

Giù la maschera: come funzionano gli acceleratori di particelle?

David Alesini

Divisione Acceleratori

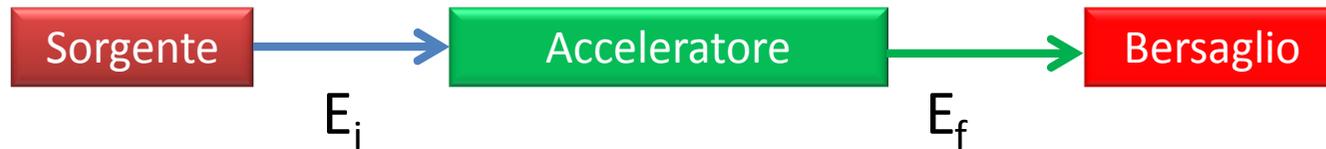
LNf-INFN

Matinées della Scienza

INFN-LNF ALiS Accelerators for LiFe and Science

Giovedì 16 Aprile 2015 - Auditorium Bruno Touschek

Cosa è un acceleratore di particelle



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

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

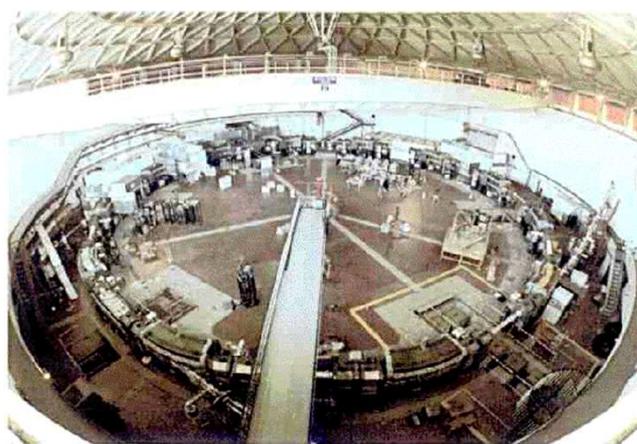
-In realtà con il termine acceleratore di particelle si identificano anche i cosiddetti **anelli di accumulazione** (storage rings) che mantengono le particelle in circolazione ad una energia costante.

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

Lineari



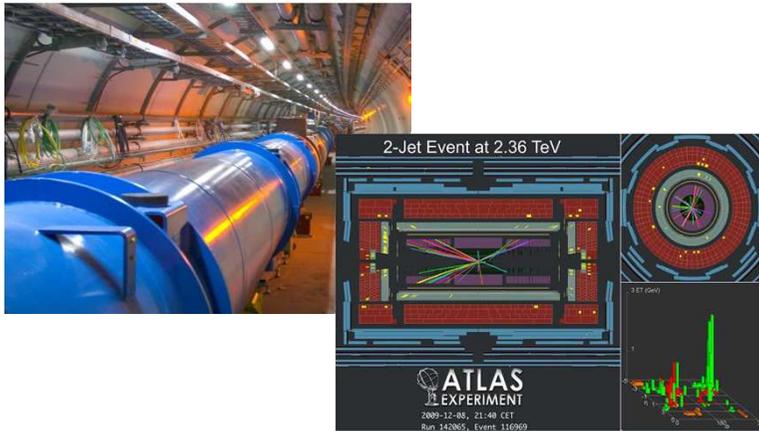
Circolari



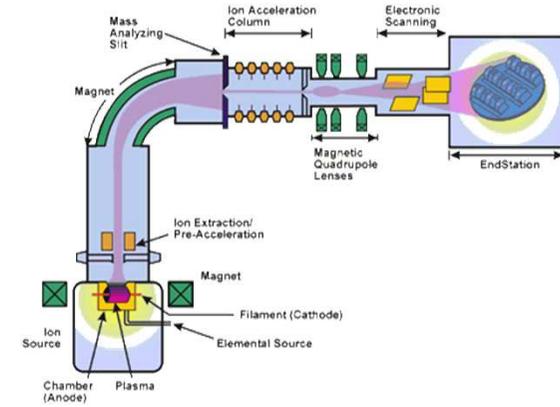
Lo sviluppo degli acceleratori è avvenuto lungo due binari paralleli

A cosa serve un acceleratore di particelle

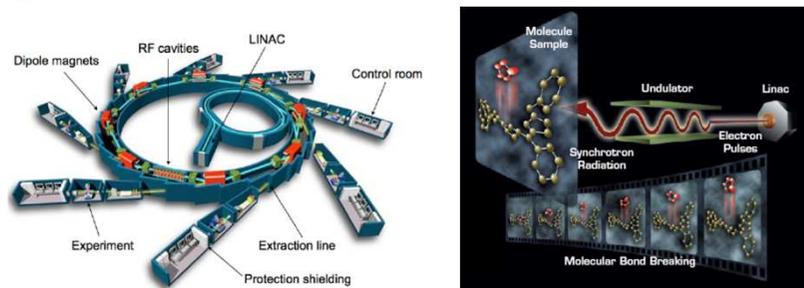
Fisica nucleare e subnucleare: LHC, Dafne,...



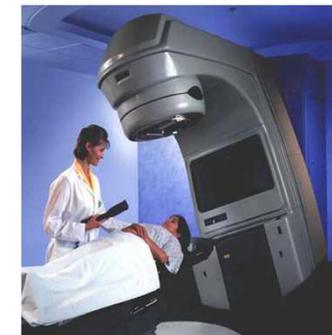
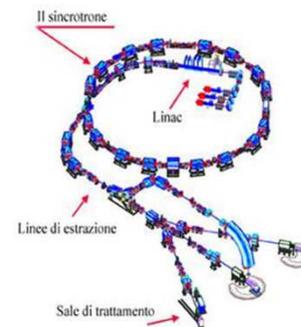
Applicazioni industriali: impiantazione ionica, sterilizzazione materiali,...



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



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



Origine degli acceleratori di particelle per la fisica

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

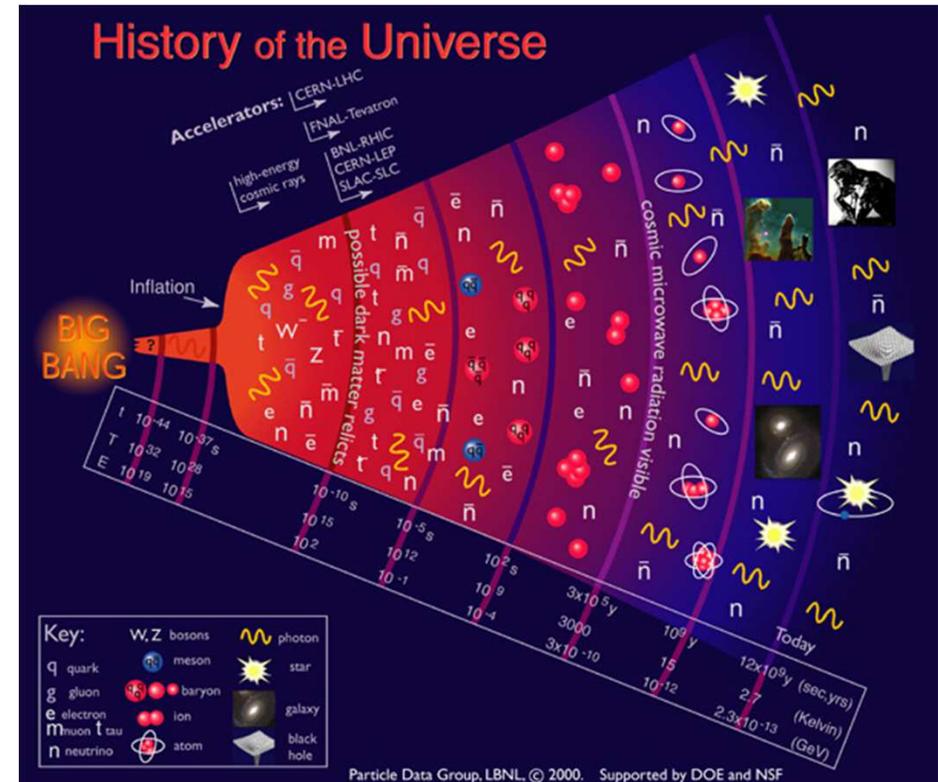
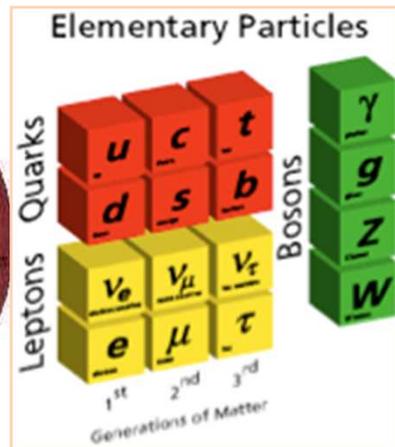
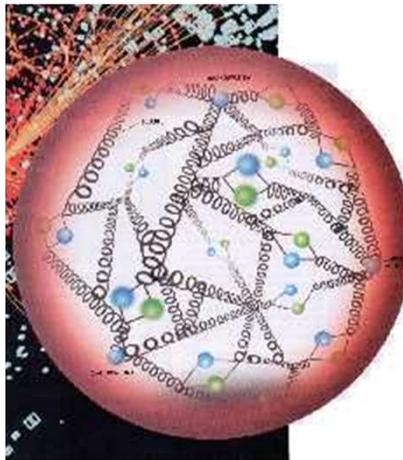
Un fascio di particelle (elettroni, positroni, protoni, ioni,...) che colpisce una targhetta o collide con un altro fascio produce *reazioni nucleari/subnucleari*, annichilazioni, nuove particelle.

Lo studio di questi fenomeni con i rivelatori:



Fornisce *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*)



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*.

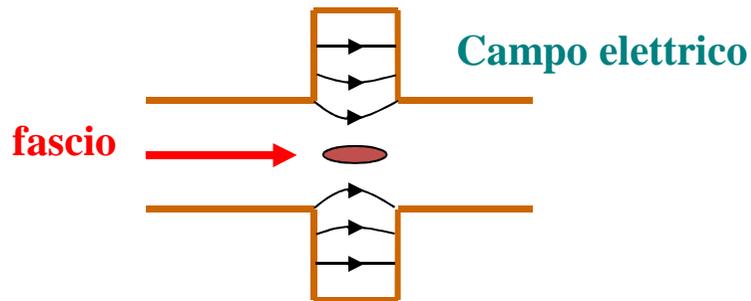
L'equazione base per la descrizione del processo di accelerazione e foccheggiamento, deflessione è rappresentata dalla **Forza di Lorentz**.

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

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

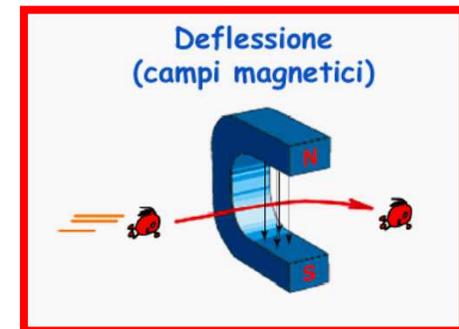
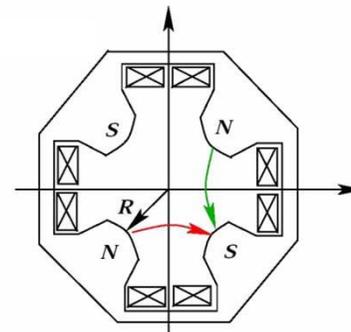
ACCELERAZIONE

\vec{E} = campo elettrico



CURVATURA E FOCHEGGIAMENTO

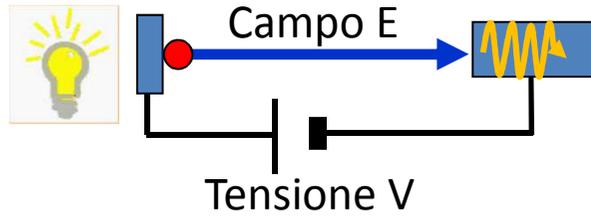
\vec{B} = campo magnetico



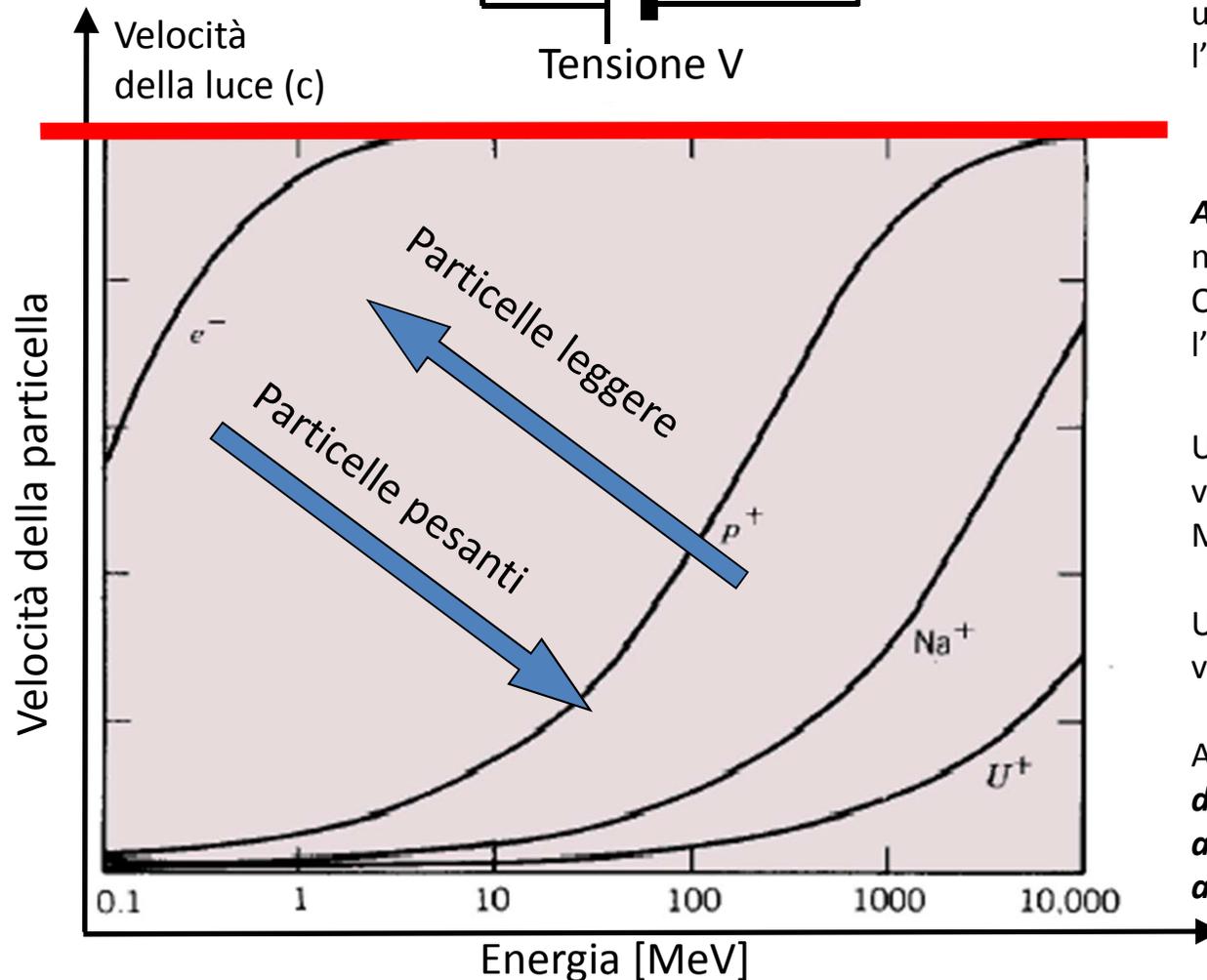
Accelerazione

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

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



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



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

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

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

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

Energia: ordini di grandezza

L' eV rappresenta un'energia molto piccola

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



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



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



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

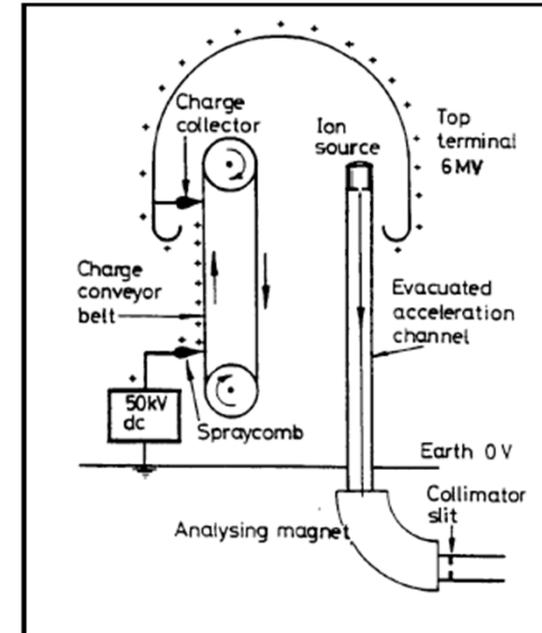
La densità di energia disponibile per le reazioni nucleari o sub-nucleari è enorme!



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

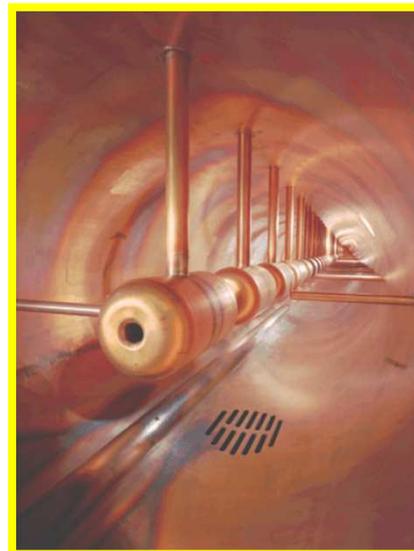
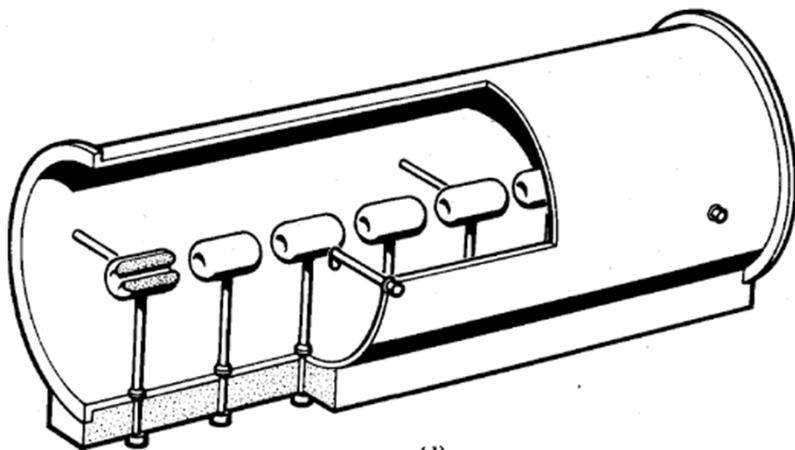
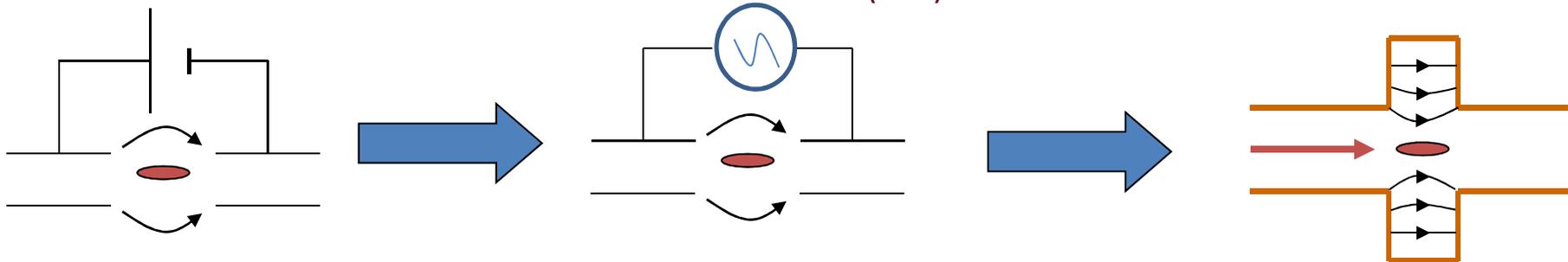


Moderni Acceleratori Lineari

PRINCIPIO:

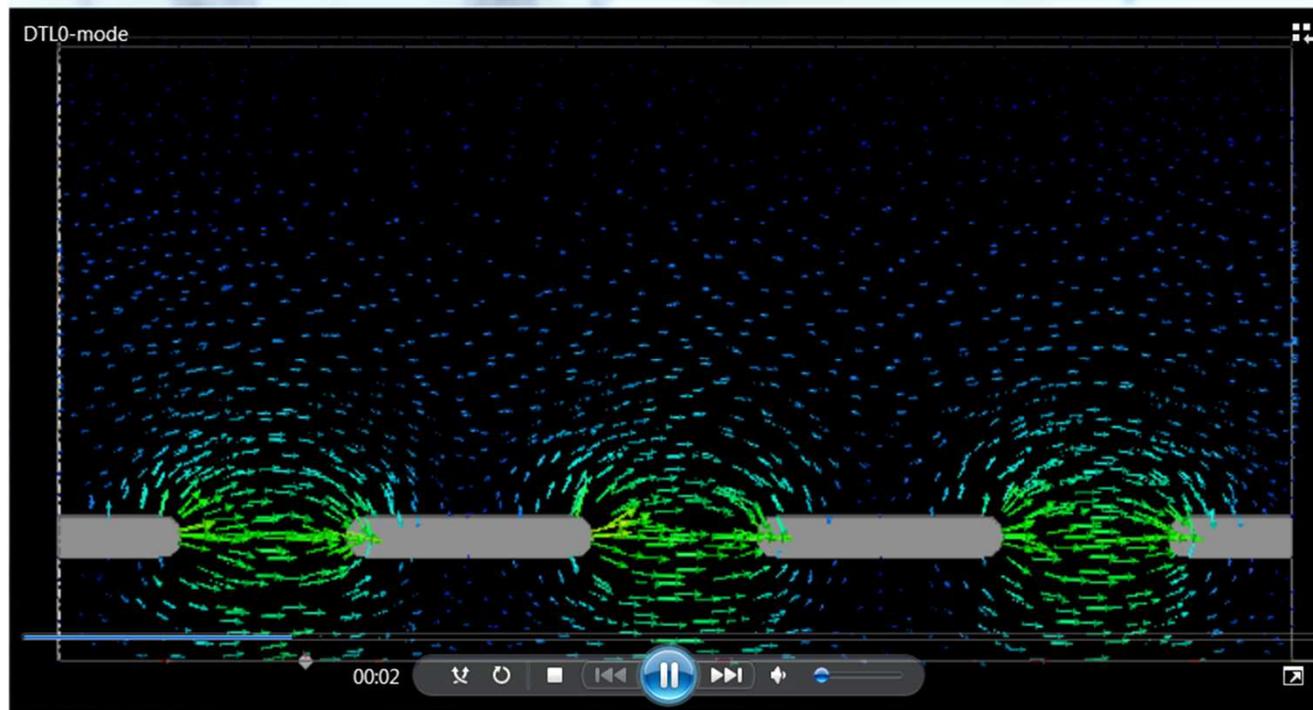
Le particelle vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da *elettrodi susseguenti*

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).



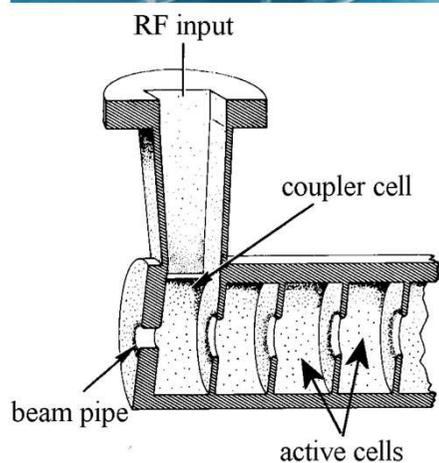
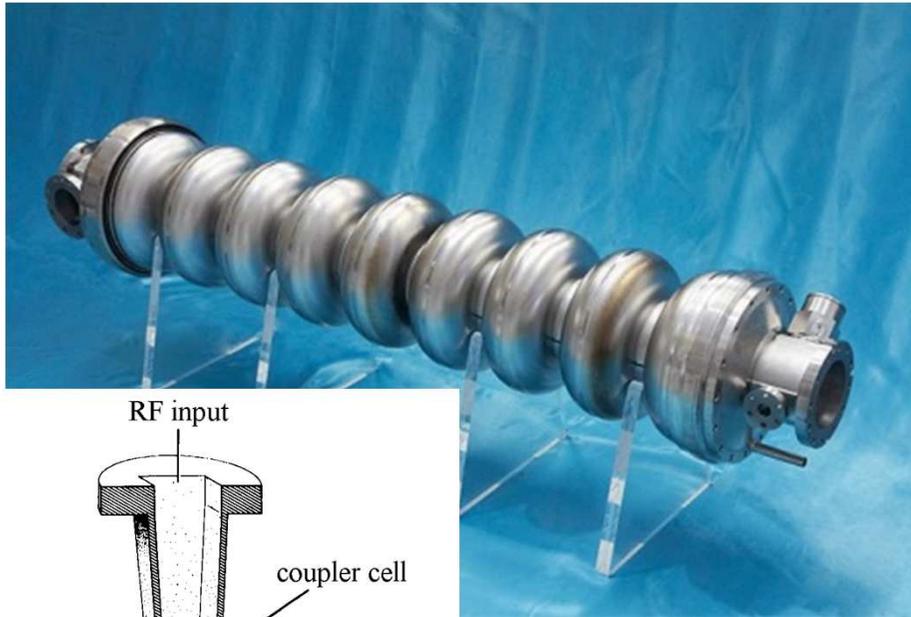
La **struttura di Alvarez** è basata su questo concetto ed è molto utilizzata nell'accelerazione di **protoni e ioni di bassa-media energia**. Essa può essere descritta come uno speciale DTL in cui gli elettrodi sono parte di una macrostruttura risonante.

DTL: video



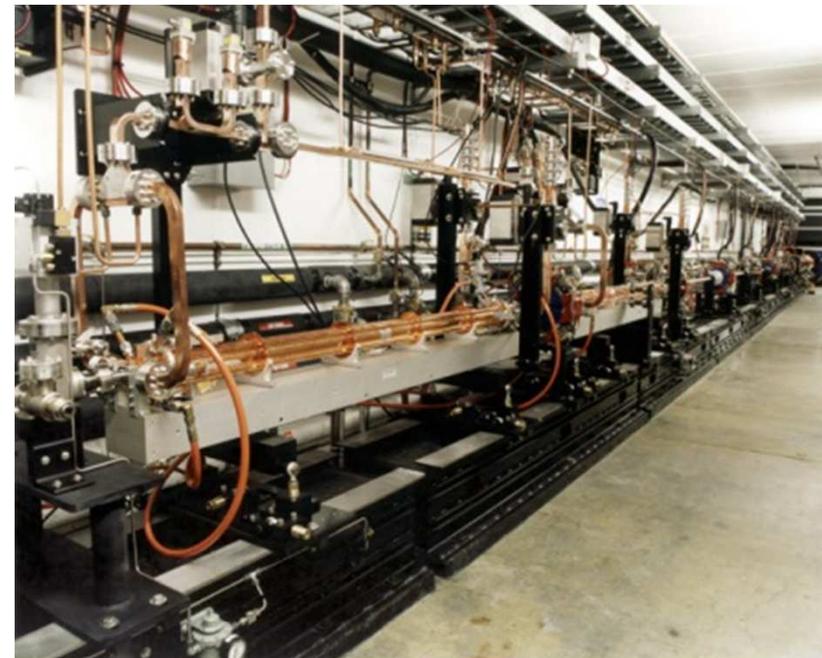
Cavità a Radiofrequenza

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).



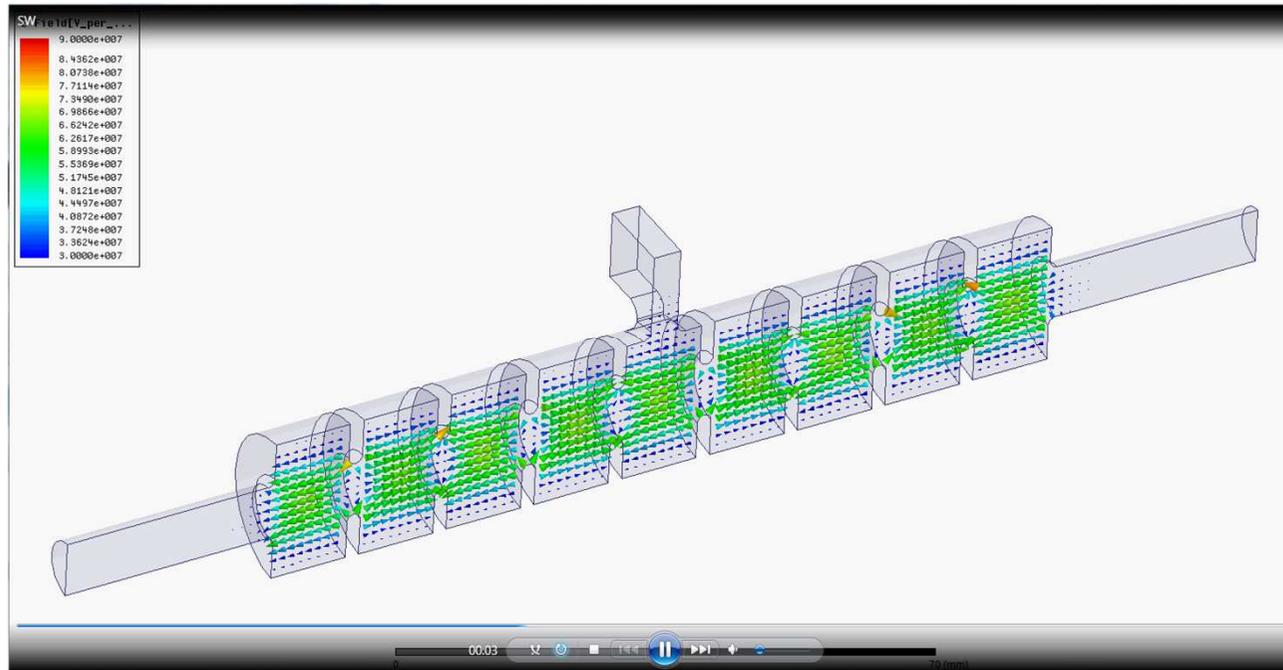
Esistono sia cavità che operano a **temperatura ambiente** (tipicamente in rame) che **cavità superconduttive** che operano a qualche K.

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

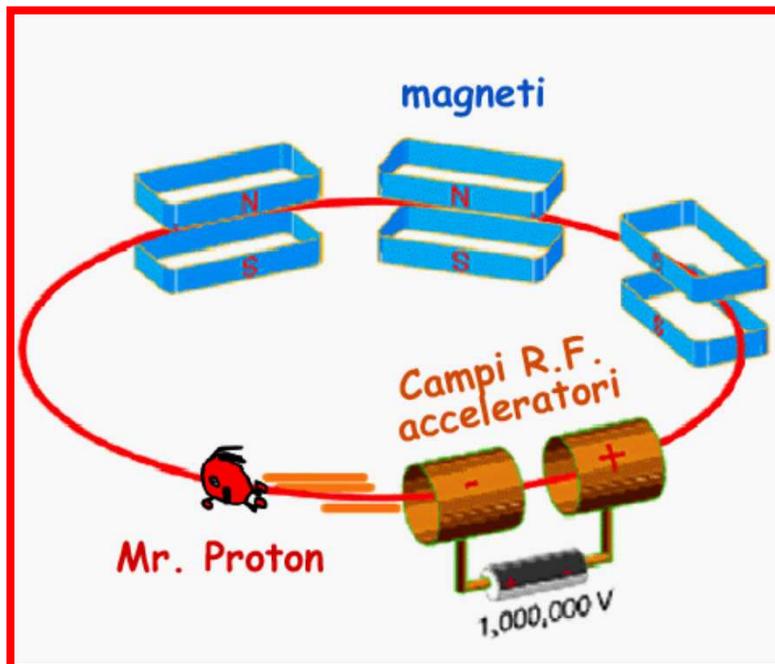
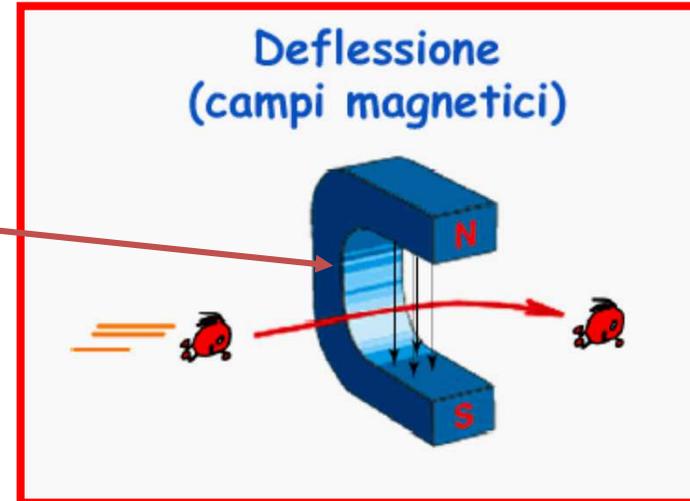


Campi Magnetici: deflessione e focalizzazione

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

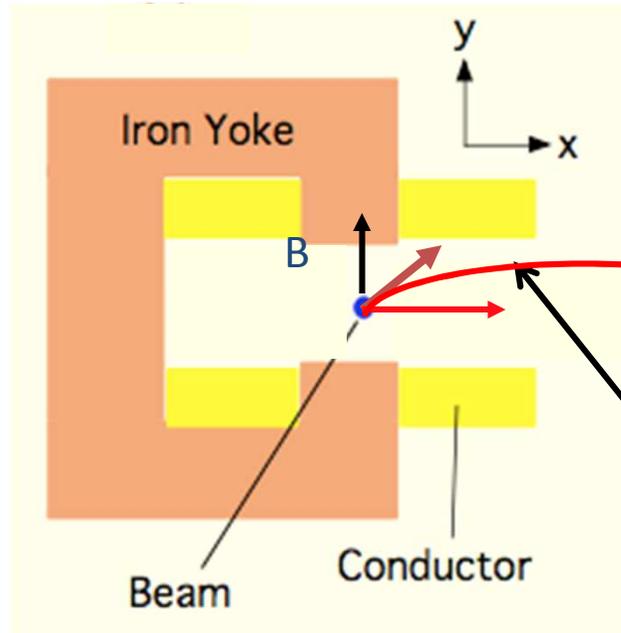
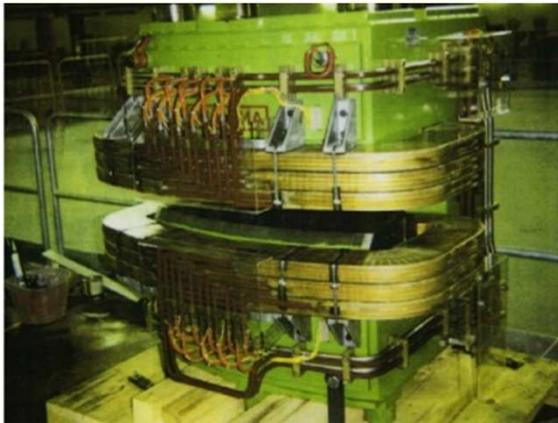
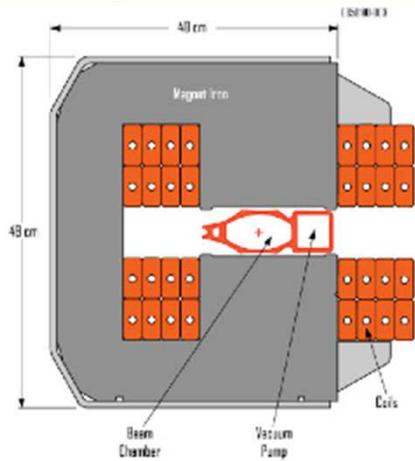


Particelle che viaggiano in un **acceleratore lineare** attraversano **una sola volta** la struttura accelerante mentre in un acceleratore **circolare** attraversano **più volte** la stessa cavità.

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

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

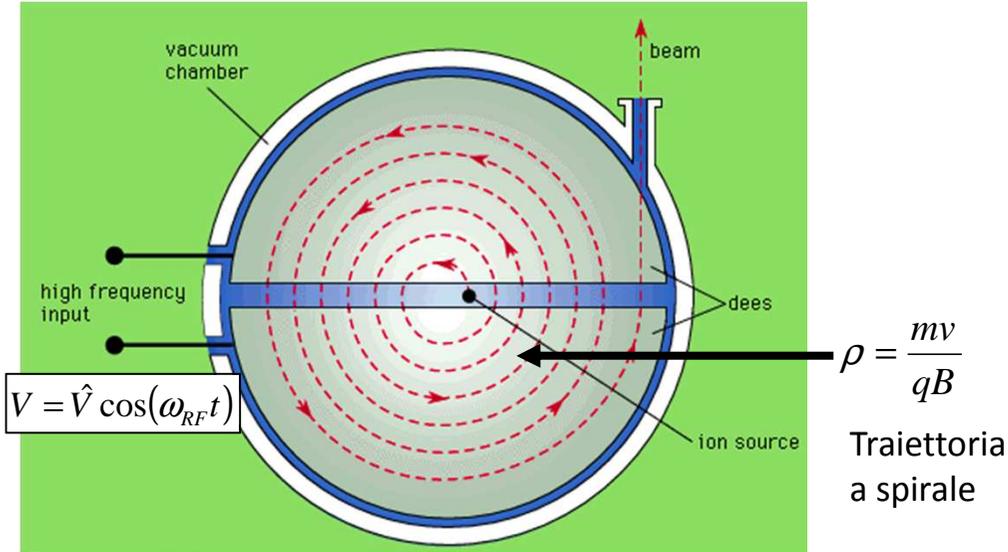
Rigidità magnetica del fascio di particelle è definita come $B\rho$ $B\rho[Tm] = \frac{p}{q} \cong \frac{W}{cq}$

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

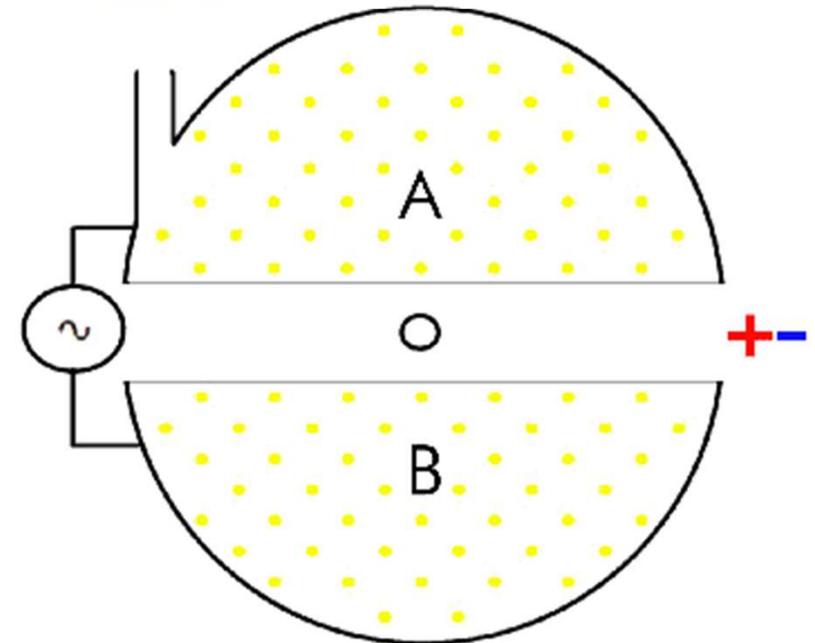
Per particelle ultra-relativistiche

Ciclotroni

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



Il **ciclotrone** è stato progettato con l'intenzione di superare le limitazioni dell'acceleratore lineare. 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**. Il problema principale è che per ottenere energie elevate è necessario **incrementare il diametro della camera a vuoto e del magnete** e dell'intensità del campo prodotto da questo. Trova comunque moltissime applicazioni nella prima **accelerazione di ioni**.

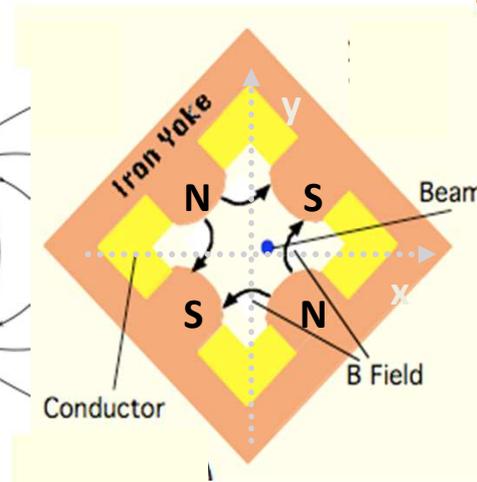
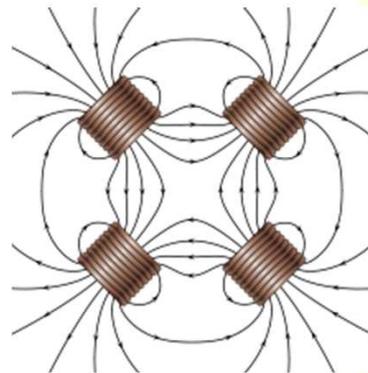
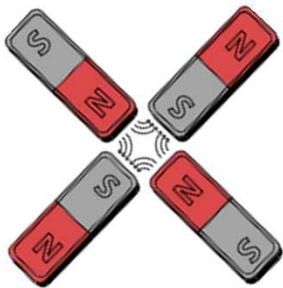


Quadrupolo: foccheggio

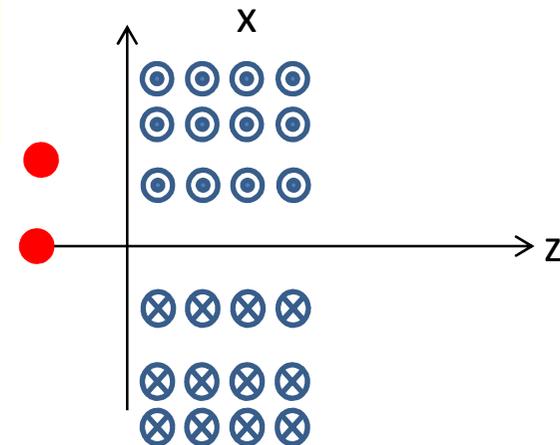
E' un magnete con **4 poli** che focchetta le traiettorie delle singole **particelle** così come fa una lente con la luce.

Caratteristiche di B

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



$$\begin{aligned} B_x &= g \cdot y \\ B_y &= g \cdot x \end{aligned} \quad g = \left[\frac{T}{m} \right]$$



Struttura finale di un LINAC

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

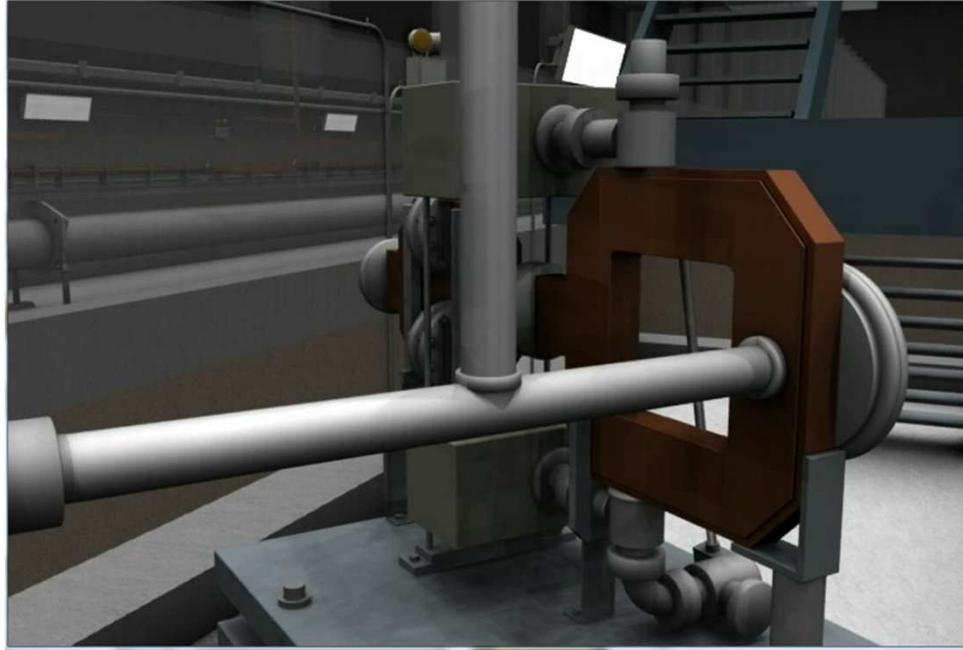


IL VUOTO in un acceleratore di particelle è tipicamente dell'ordine di 10^{-8} - 10^{-10} mbar.

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



Accelerazione in un LINAC: video

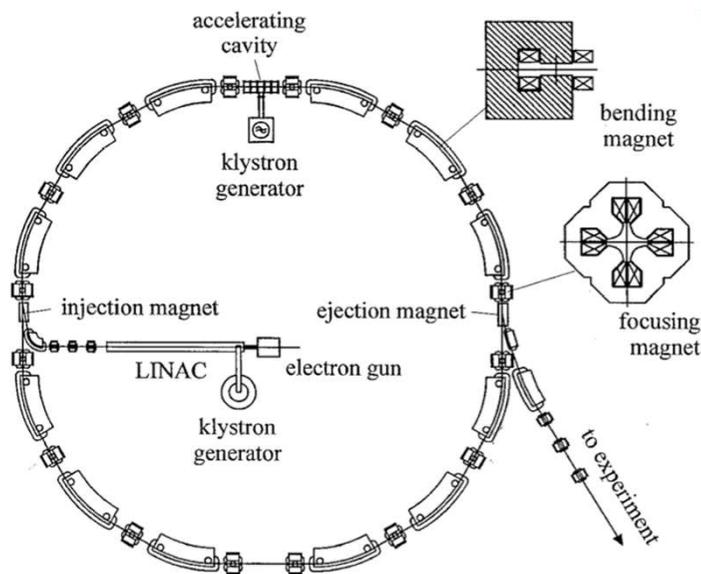


Acceleratori circolari: il Sincrotrone

Il *sincrotrone* è un acceleratore di particelle circolare.

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

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

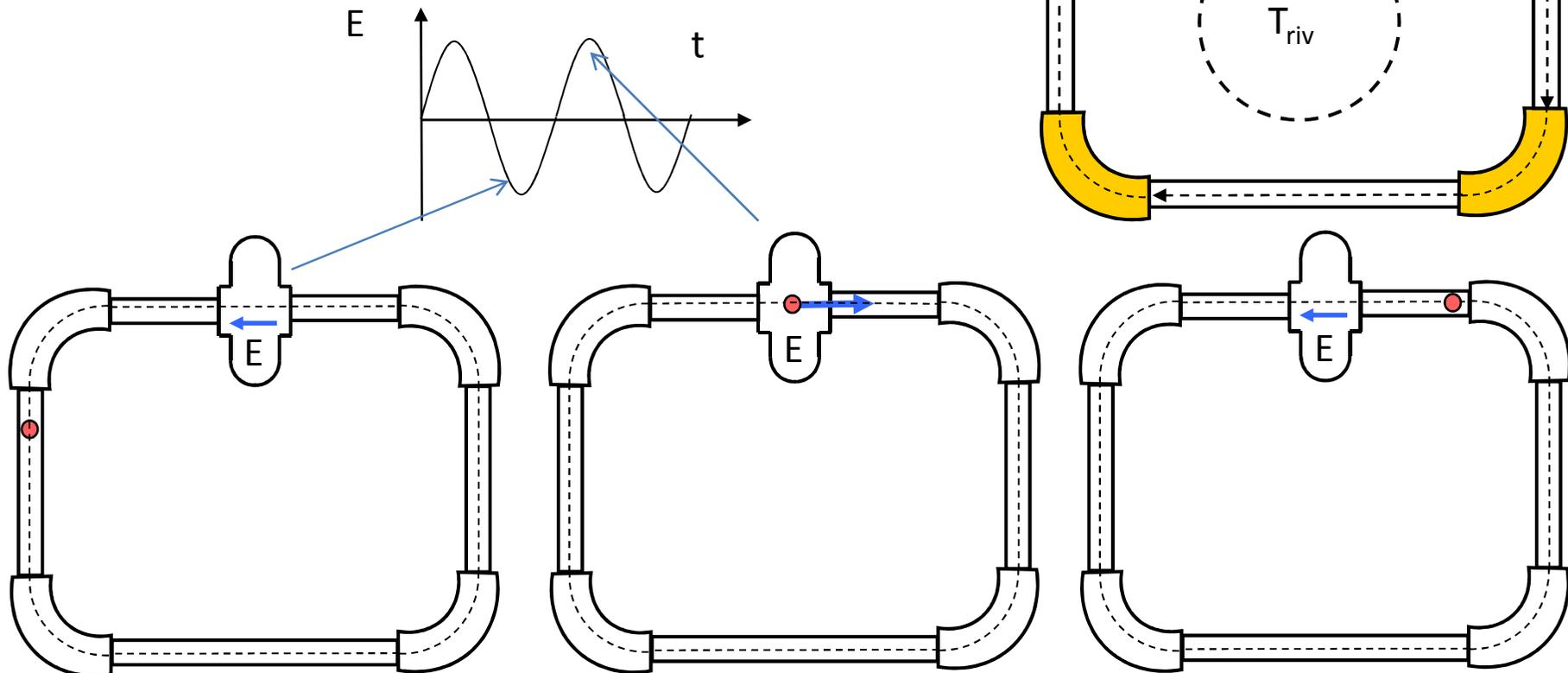
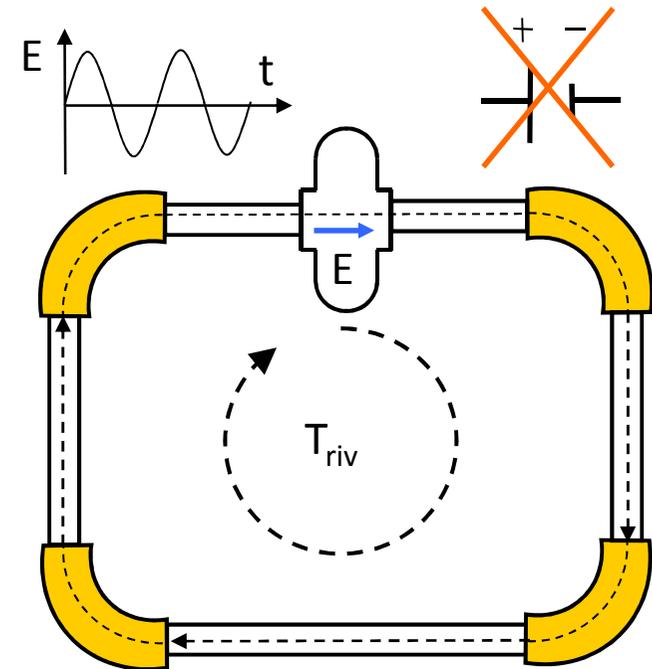


DIPOLI – determinano la traiettoria di riferimento
QUADRUPOLI – mantengono le oscillazioni di tutte le particelle intorno alla traiettoria di riferimento
SESTUPOLI – correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli
CAVITA' RF- accelera il fascio
CAMERA DA VUOTO
DIAGNOSTICA

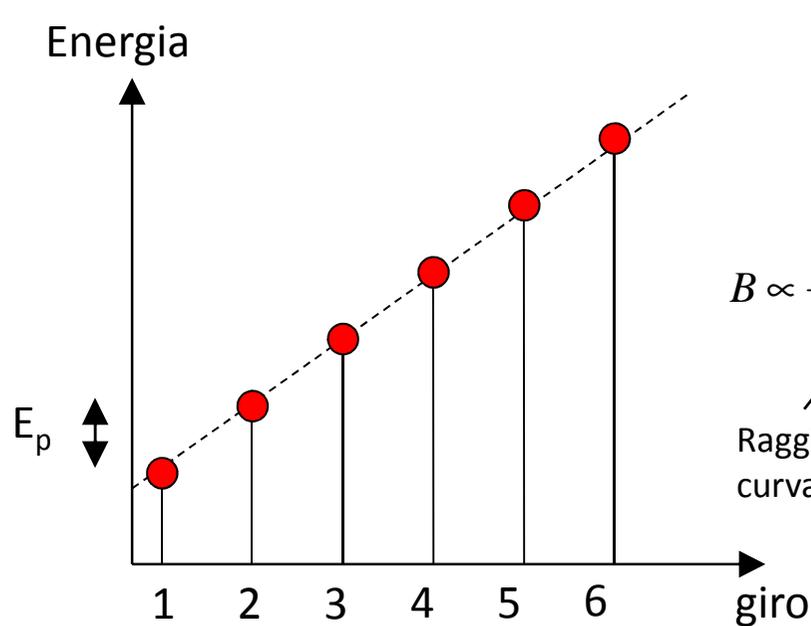


Accelerazione in un sincrotrone

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).

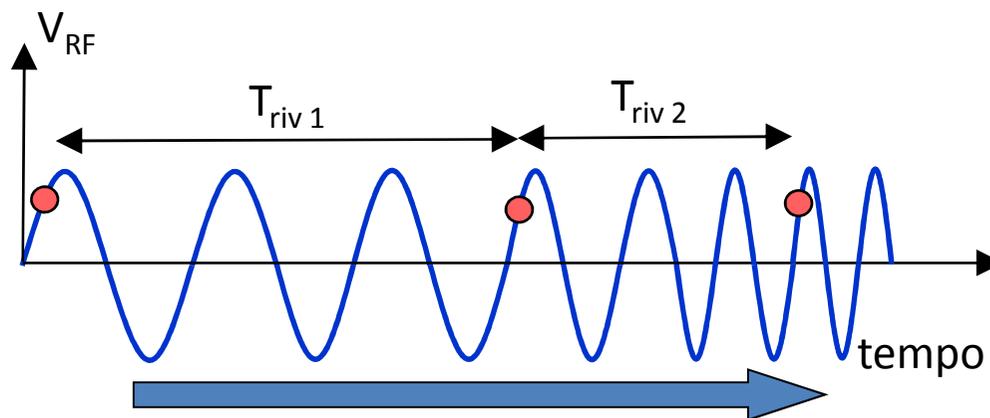
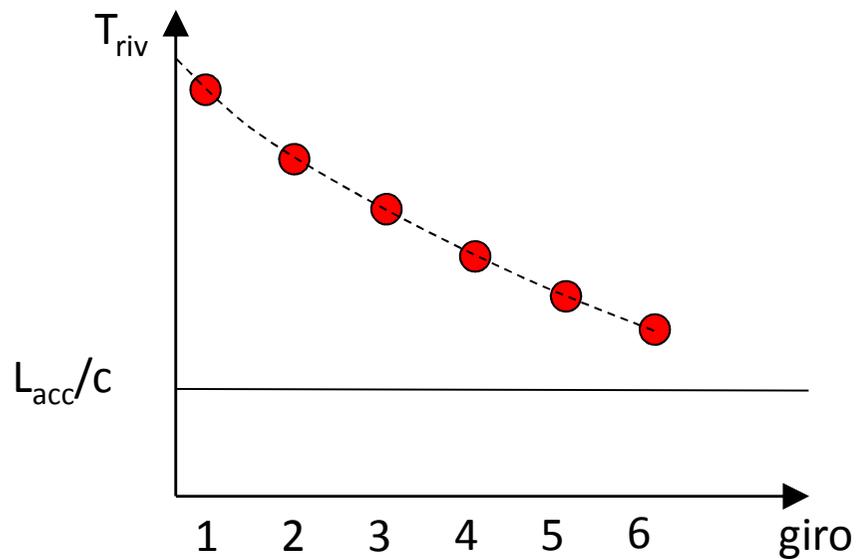
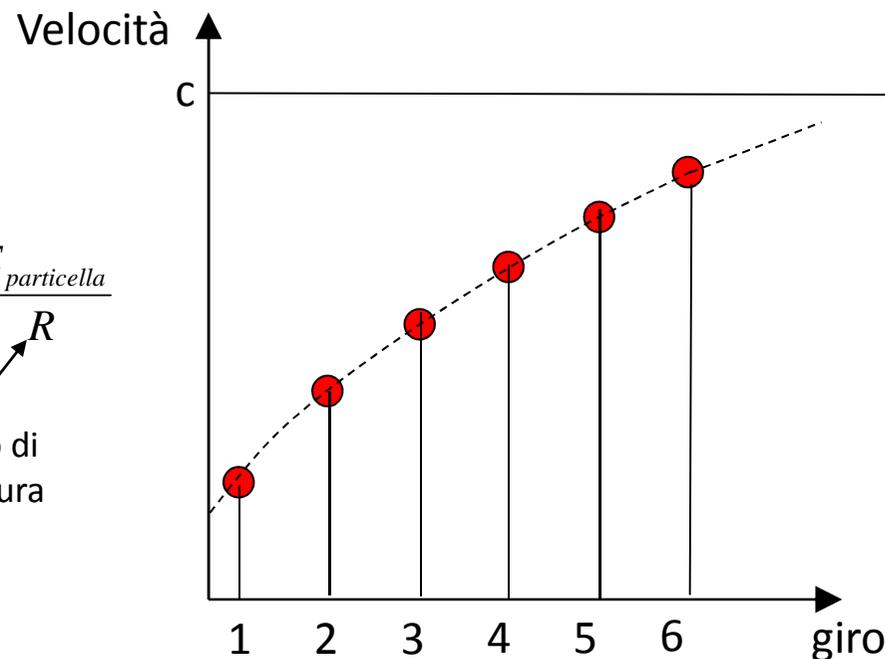


Accelerazione-energia-velocità-campo magnetico



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

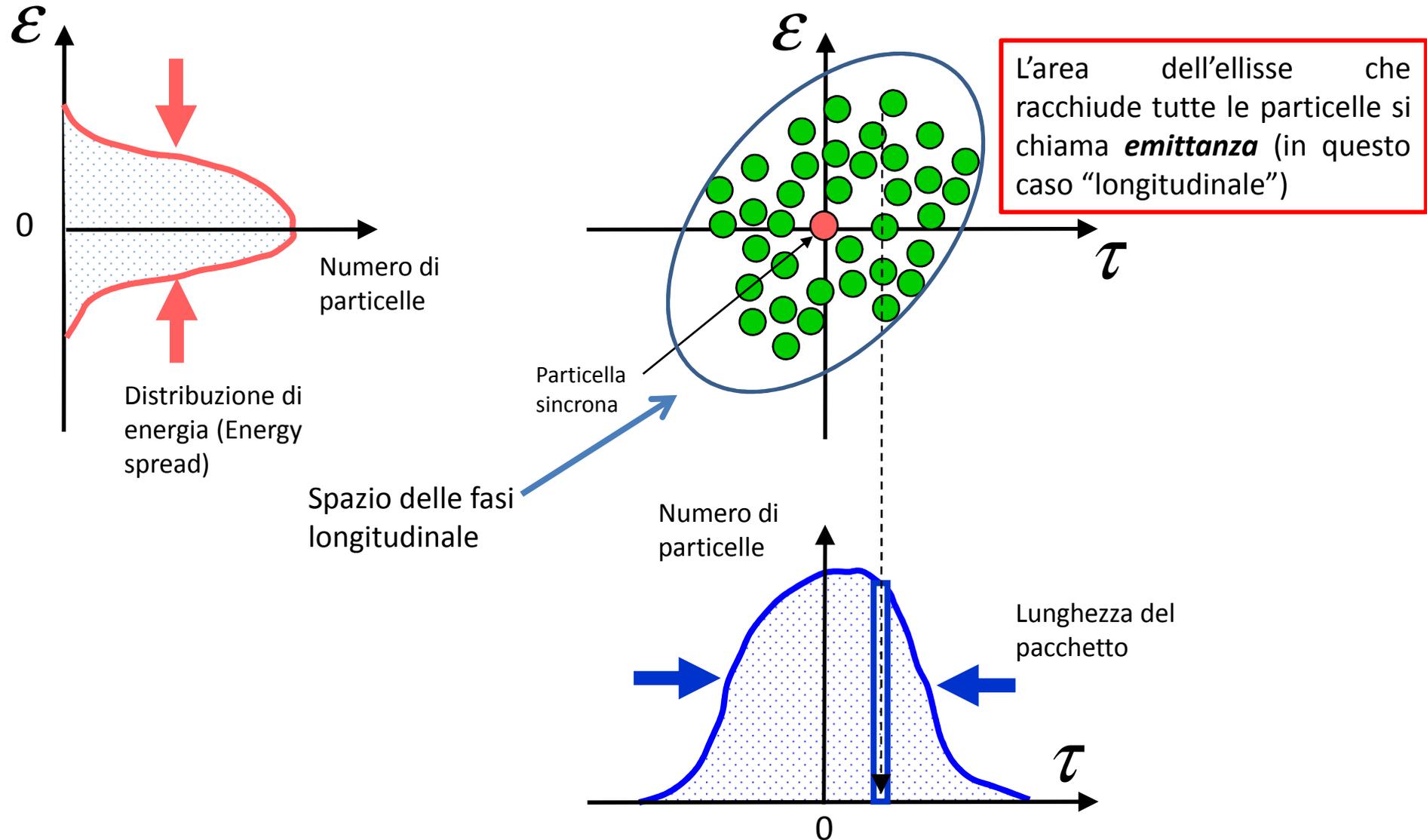
Raggio di curvatura



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

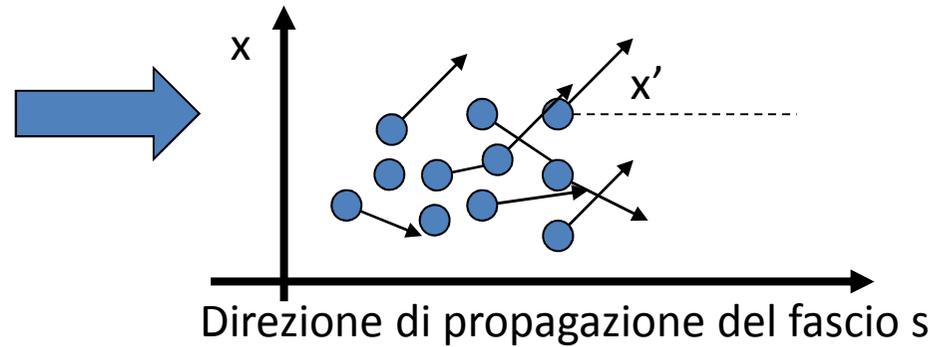
Lunghezza del pacchetto di particelle e distribuzione di energia

Si può dimostrare che **le particelle NON sincrone oscillano** stabilmente intorno alla particella sincrona, ovvero quella che ha l'energia nominale, descrive sempre la stessa orbita di riferimento, guadagnasempre la stessa quantità di energia E_p , entra in cavità sempre con la stessa fase rispetto alla tensione accelerante (**fase sincrona**) e vede sempre la stessa tensione accelerante. 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.



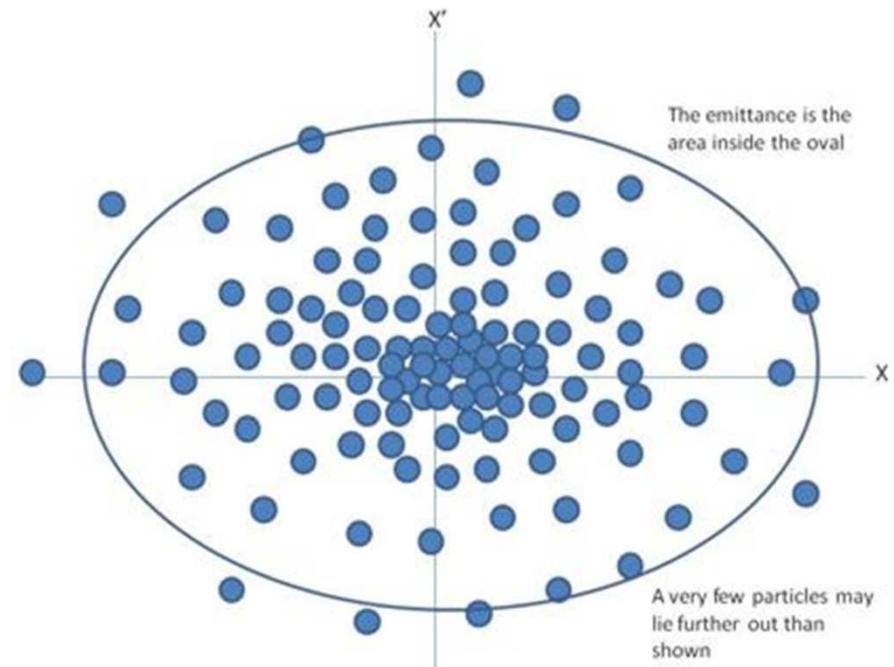
Spazio delle fasi ed emittanza

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**



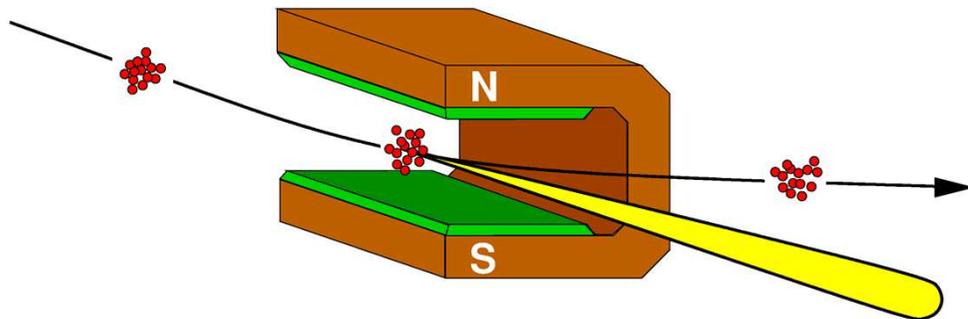
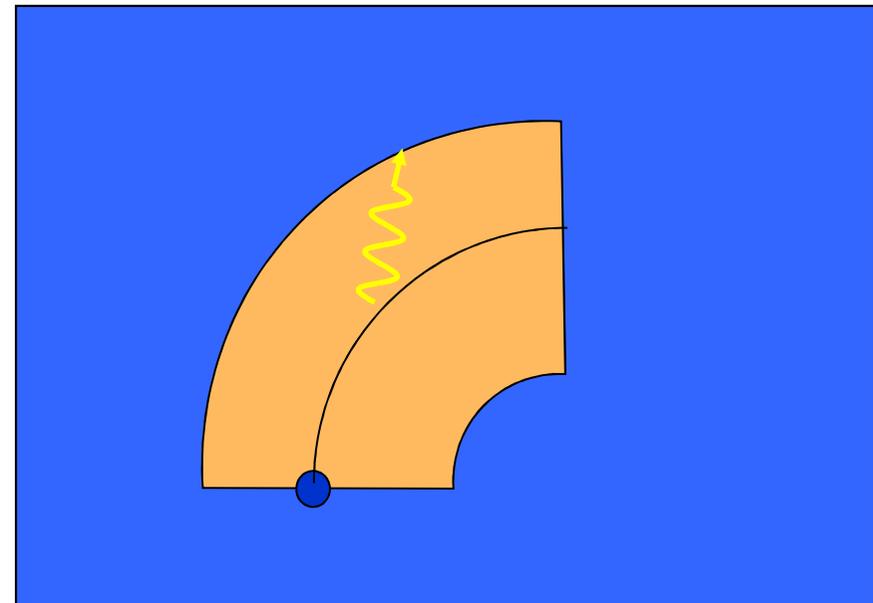
Anelli di elettroni: luce di sincrotrone

Ad energie di qualche MeV gli elettroni (o i positroni) si muovono a **velocità prossime a quella della luce**.



Si ha una notevole **semplificazione del sistema RF** del sincrotrone in quanto la frequenza non deve cambiare durante l'accelerazione.

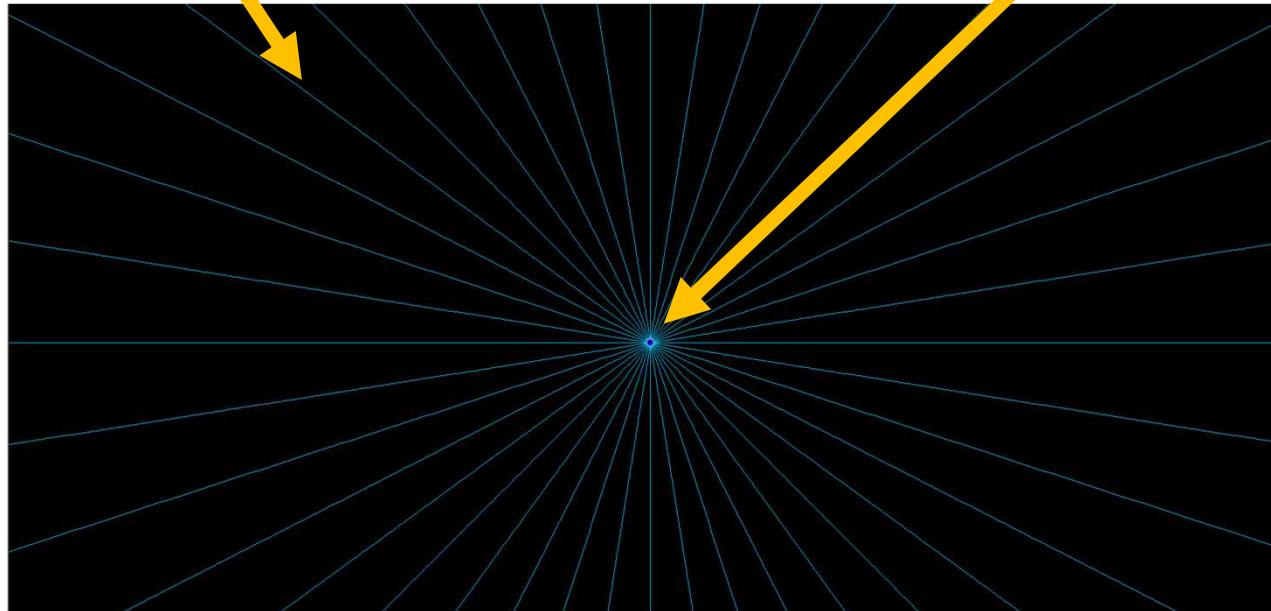
D'altra parte invece tali particelle «leggere» emettono una grande quantità di energia sottoforma di radiazione elettromagnetica ("**LUCE DI SINCROTRONE**") quando vengono fatte curvare tramite un dipolo.



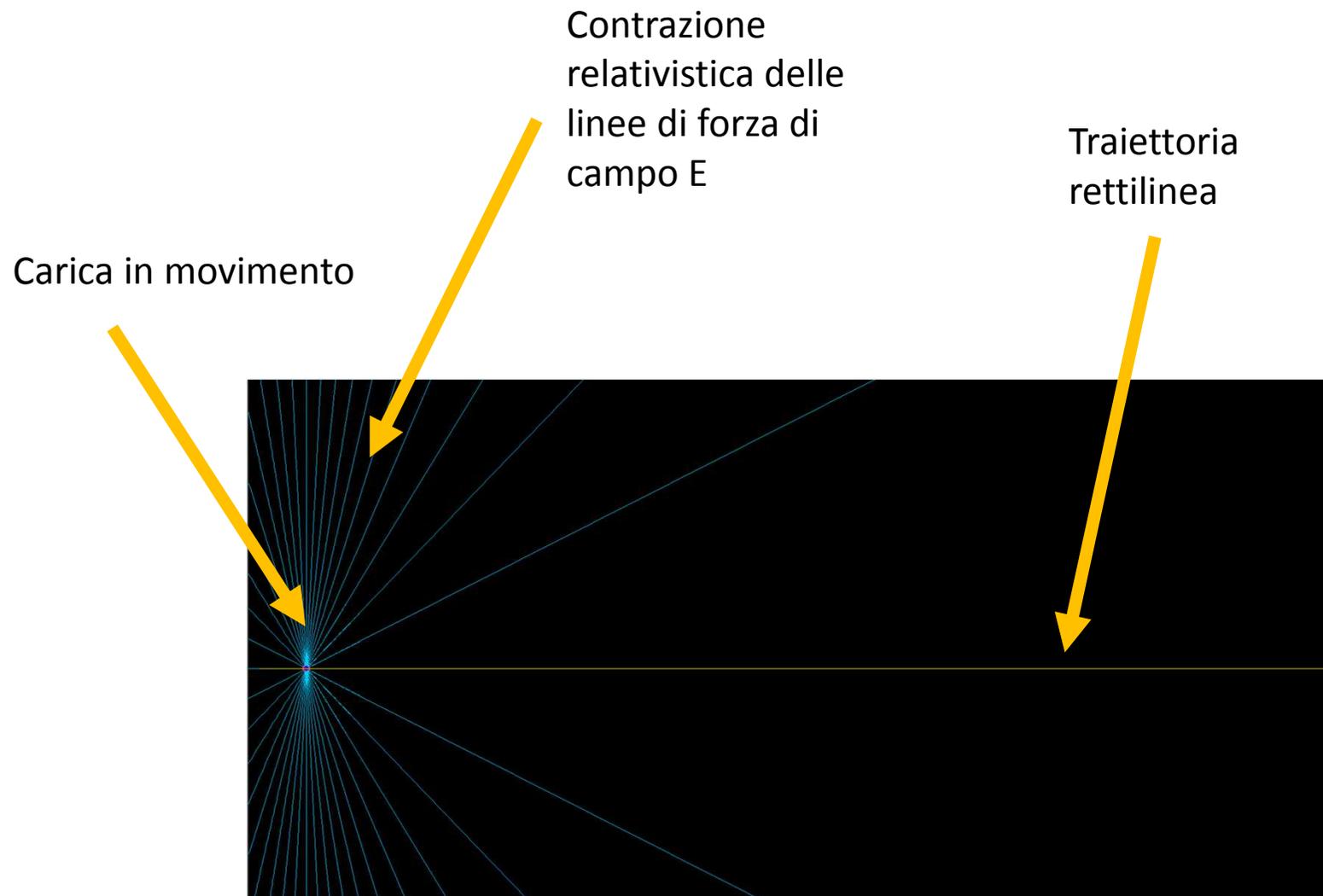
Radiazione di sincrotrone

Campo elettrico

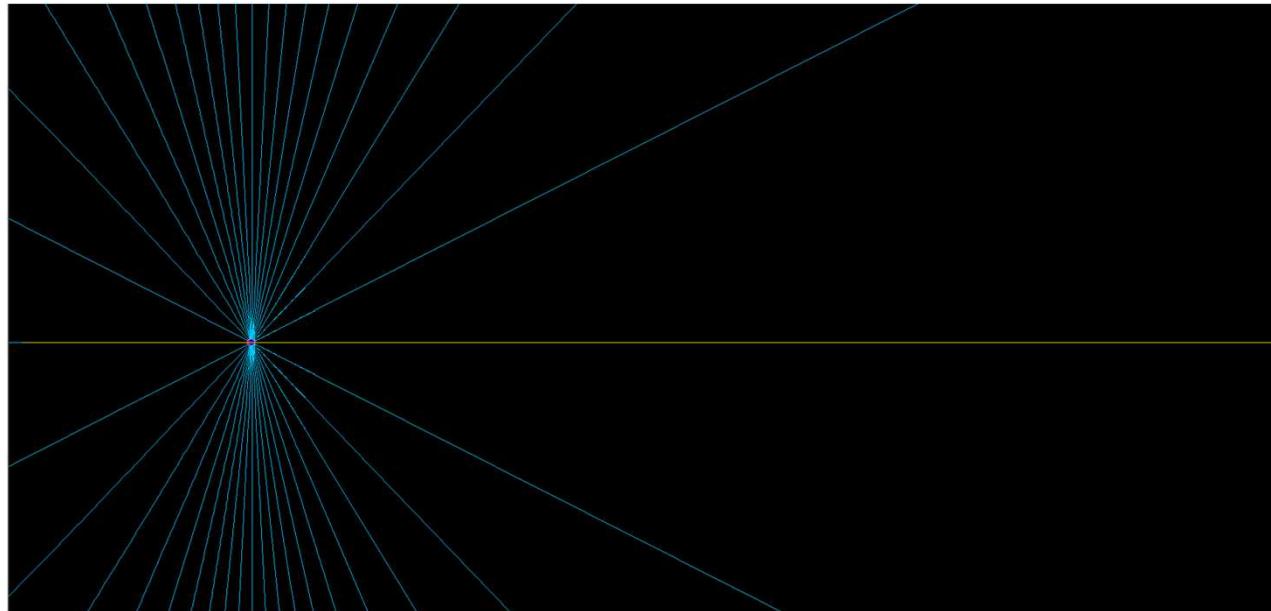
Carica ferma



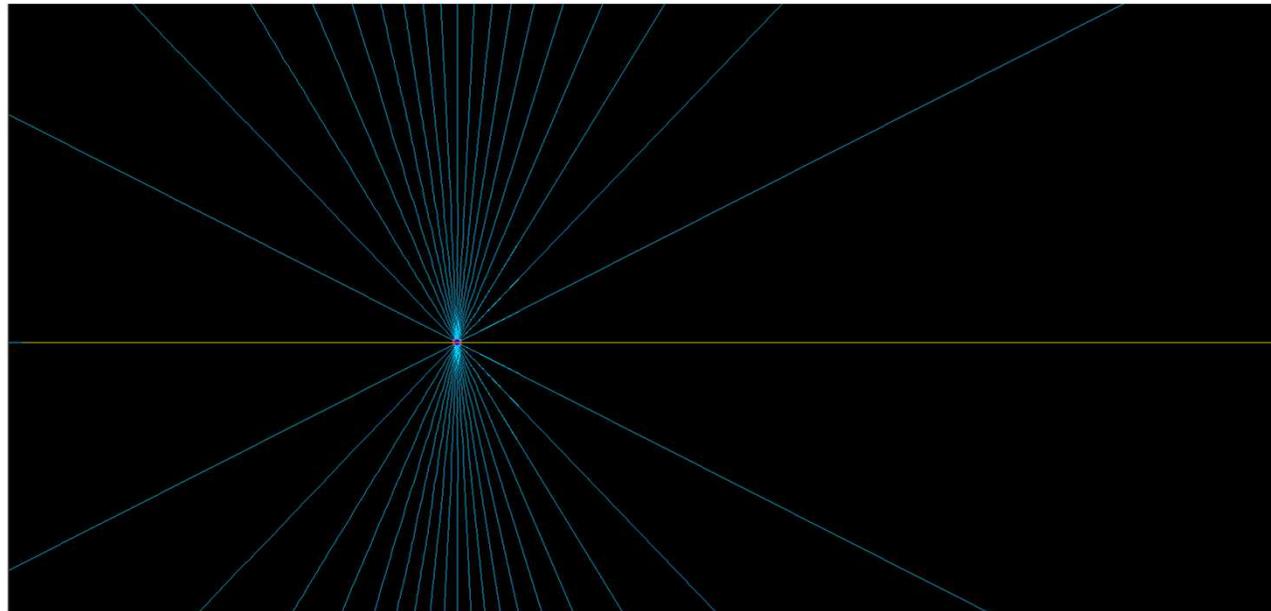
Radiazione di sincrotrone



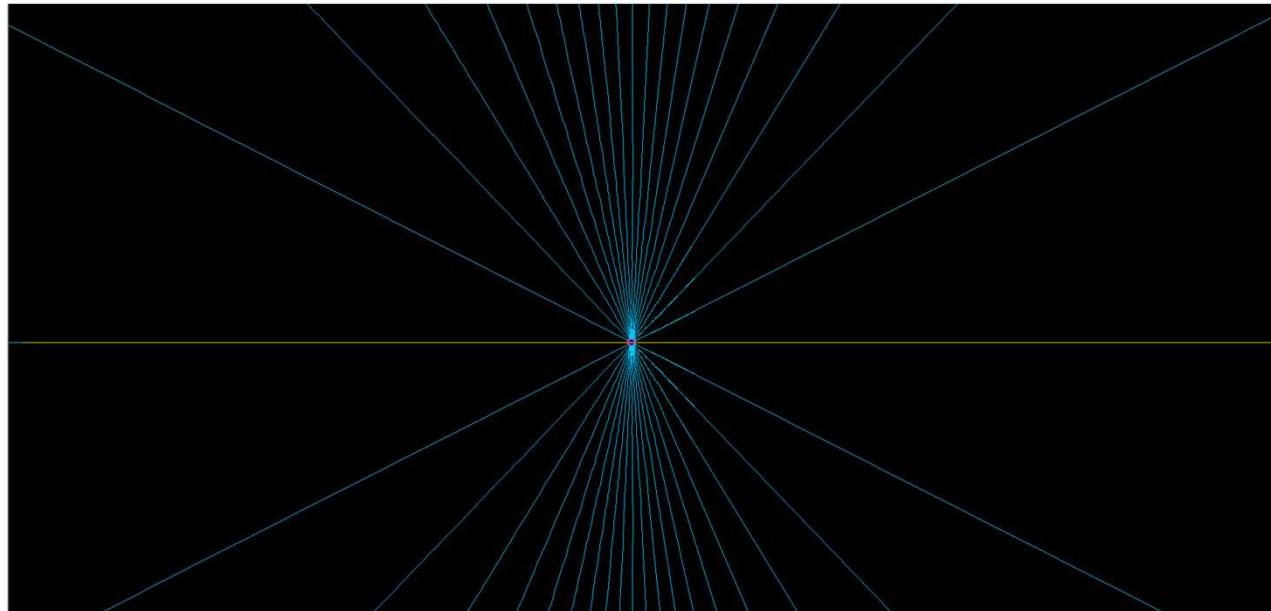
Radiazione di sincrotrone



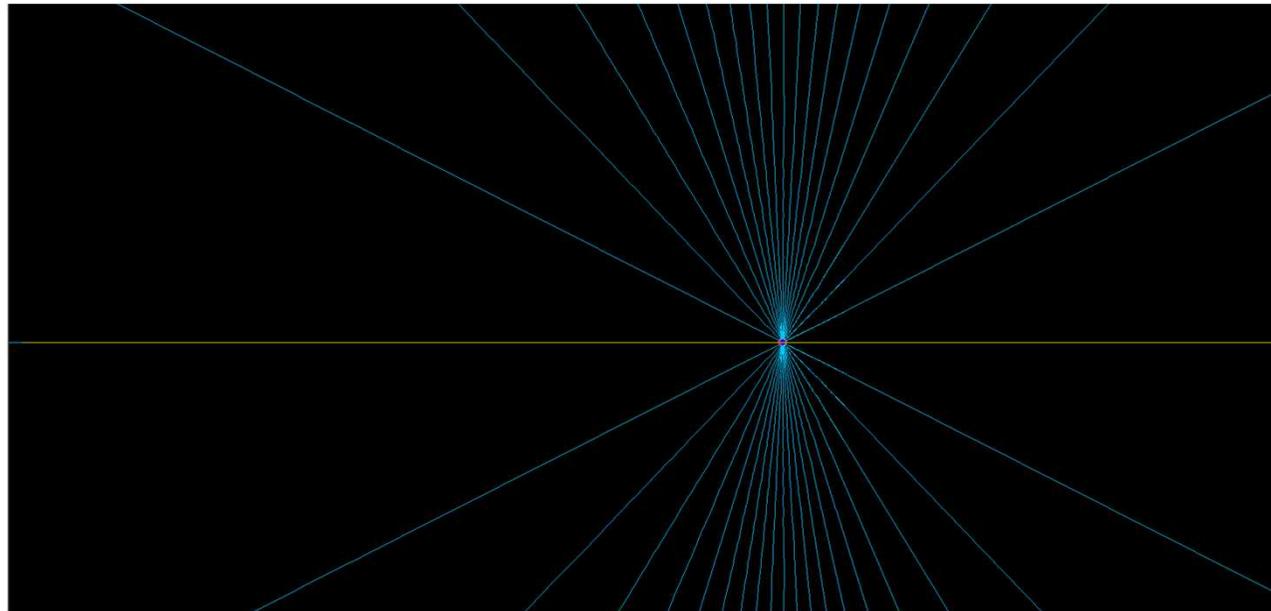
Radiazione di sincrotrone



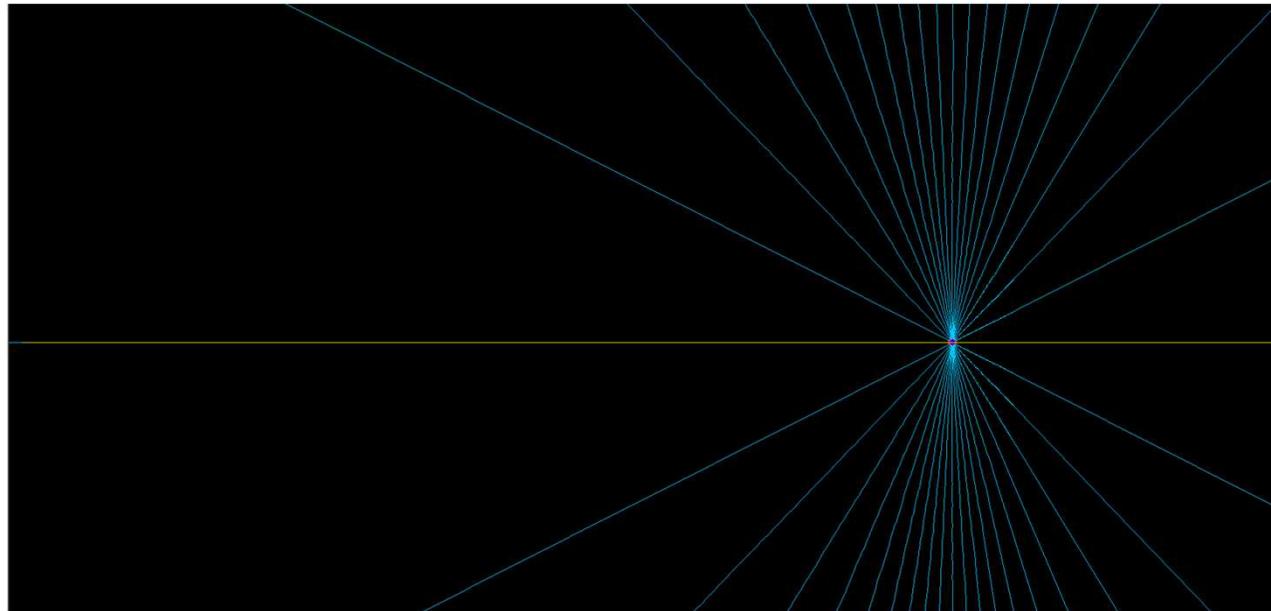
Radiazione di sincrotrone



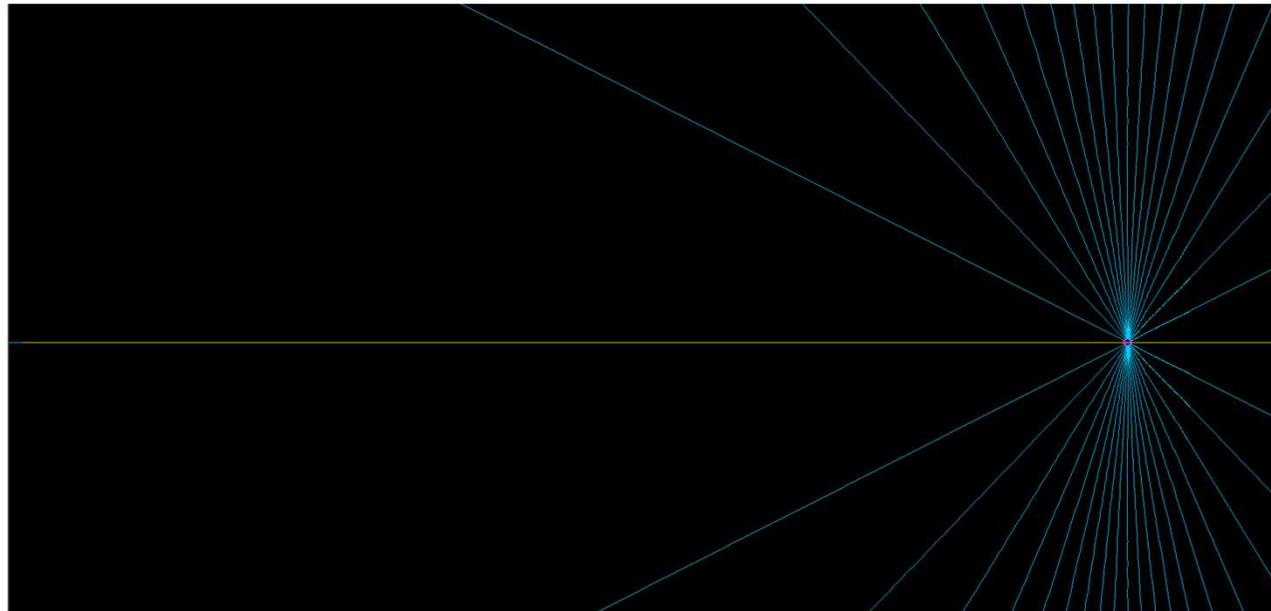
Radiazione di sincrotrone



Radiazione di sincrotrone



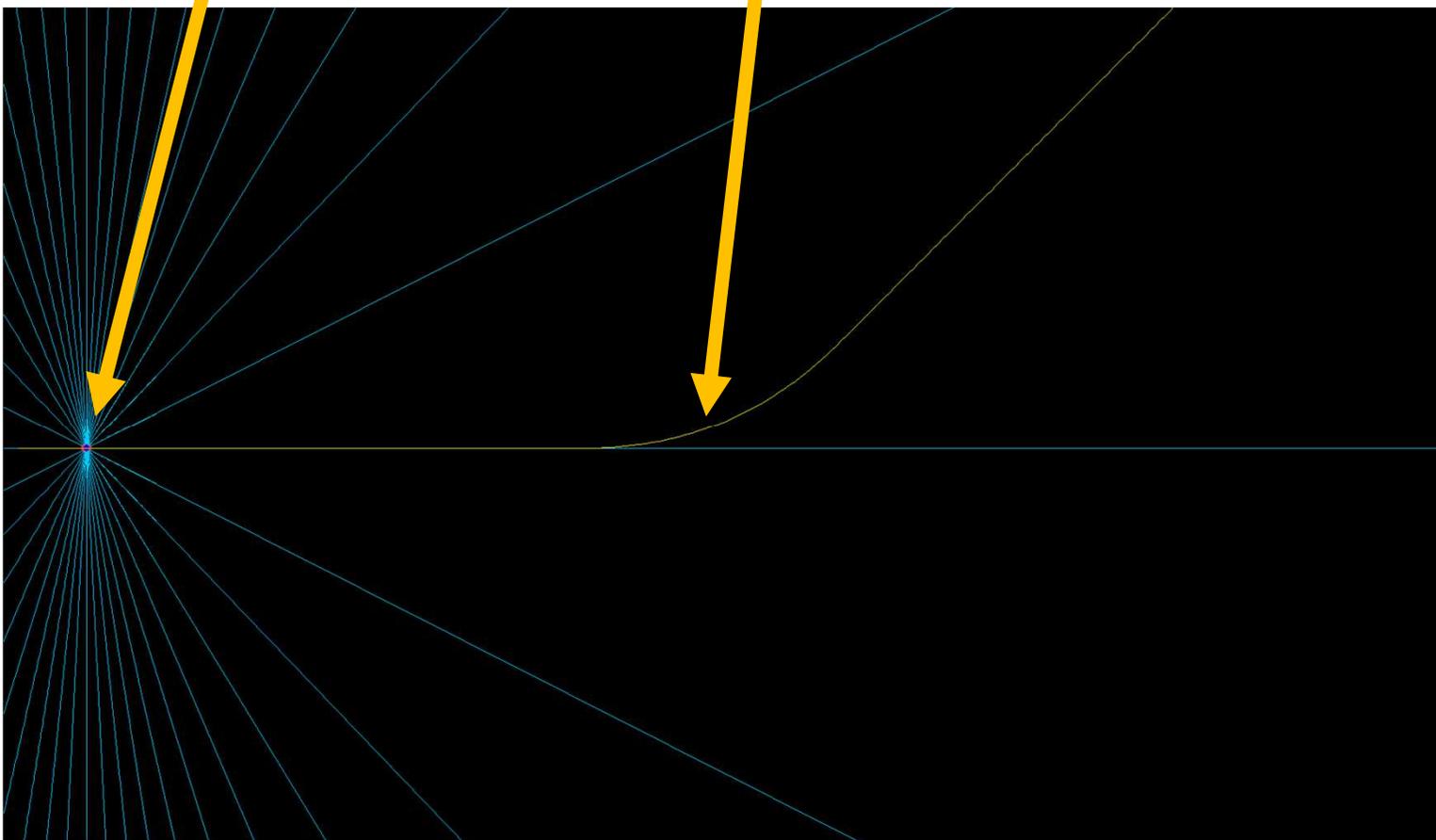
Radiazione di sincrotrone



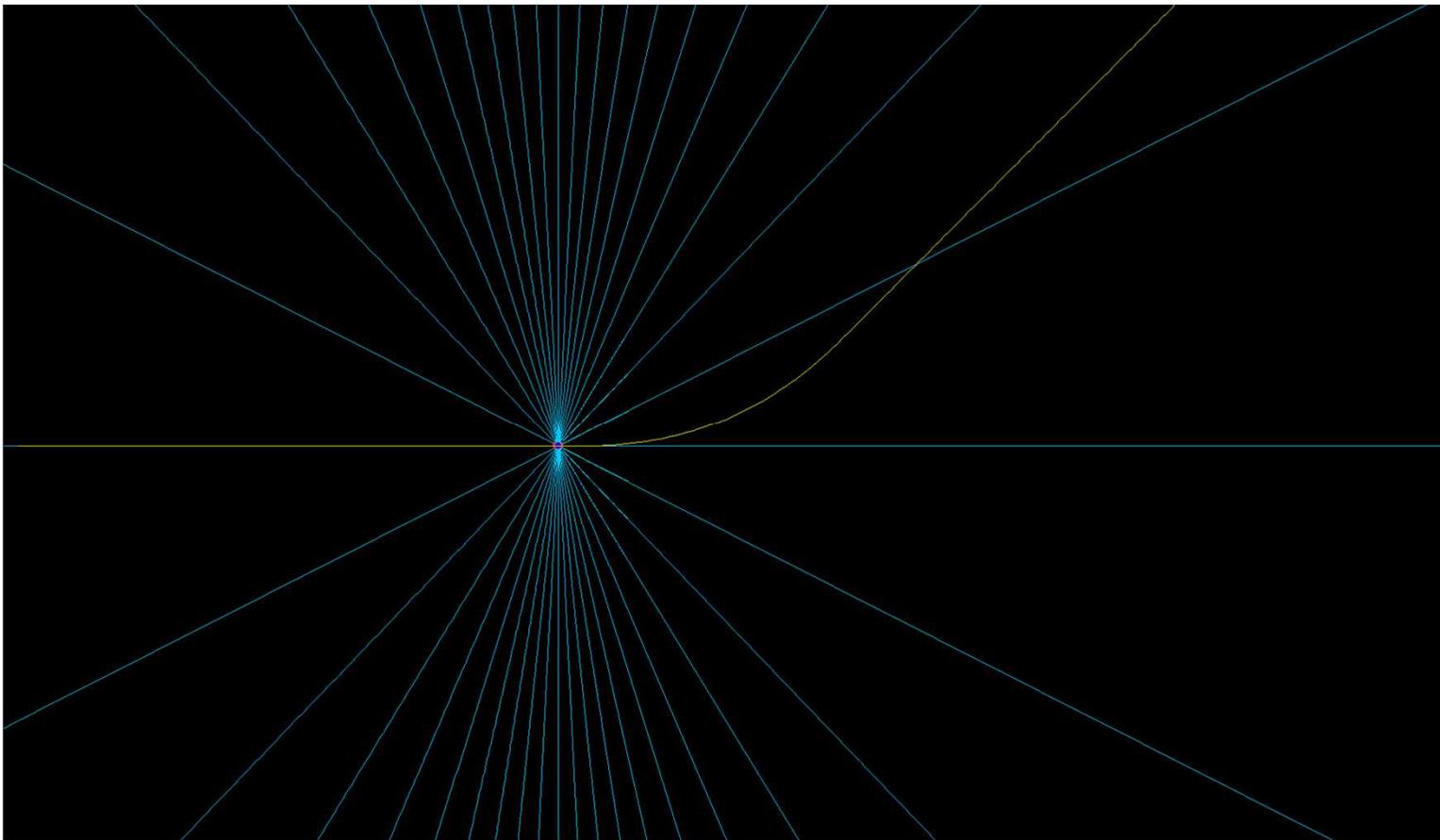
Radiazione di sincrotrone: dipolo

Carica in movimento

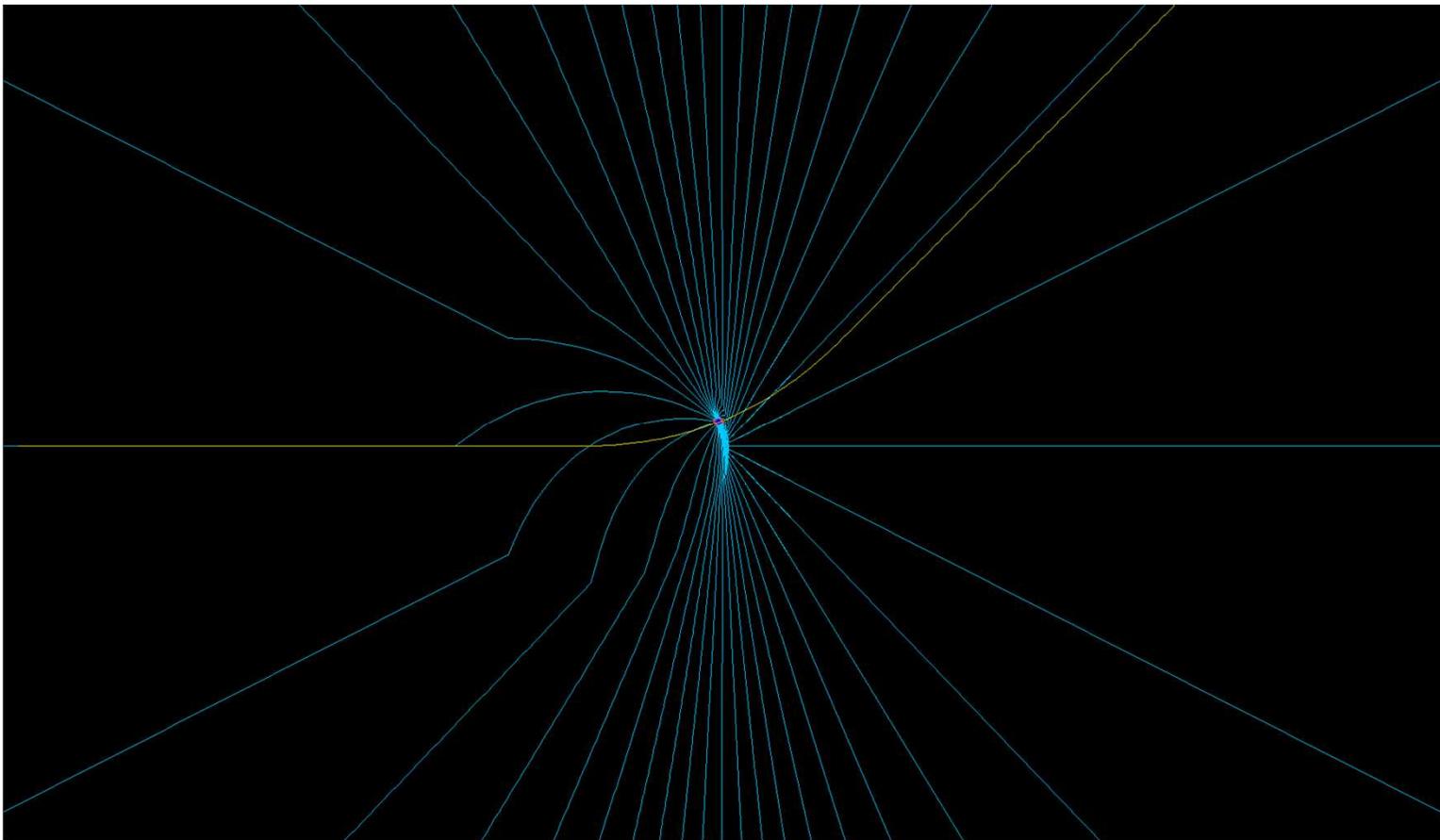
Traiettoria
generata da un
dipolo



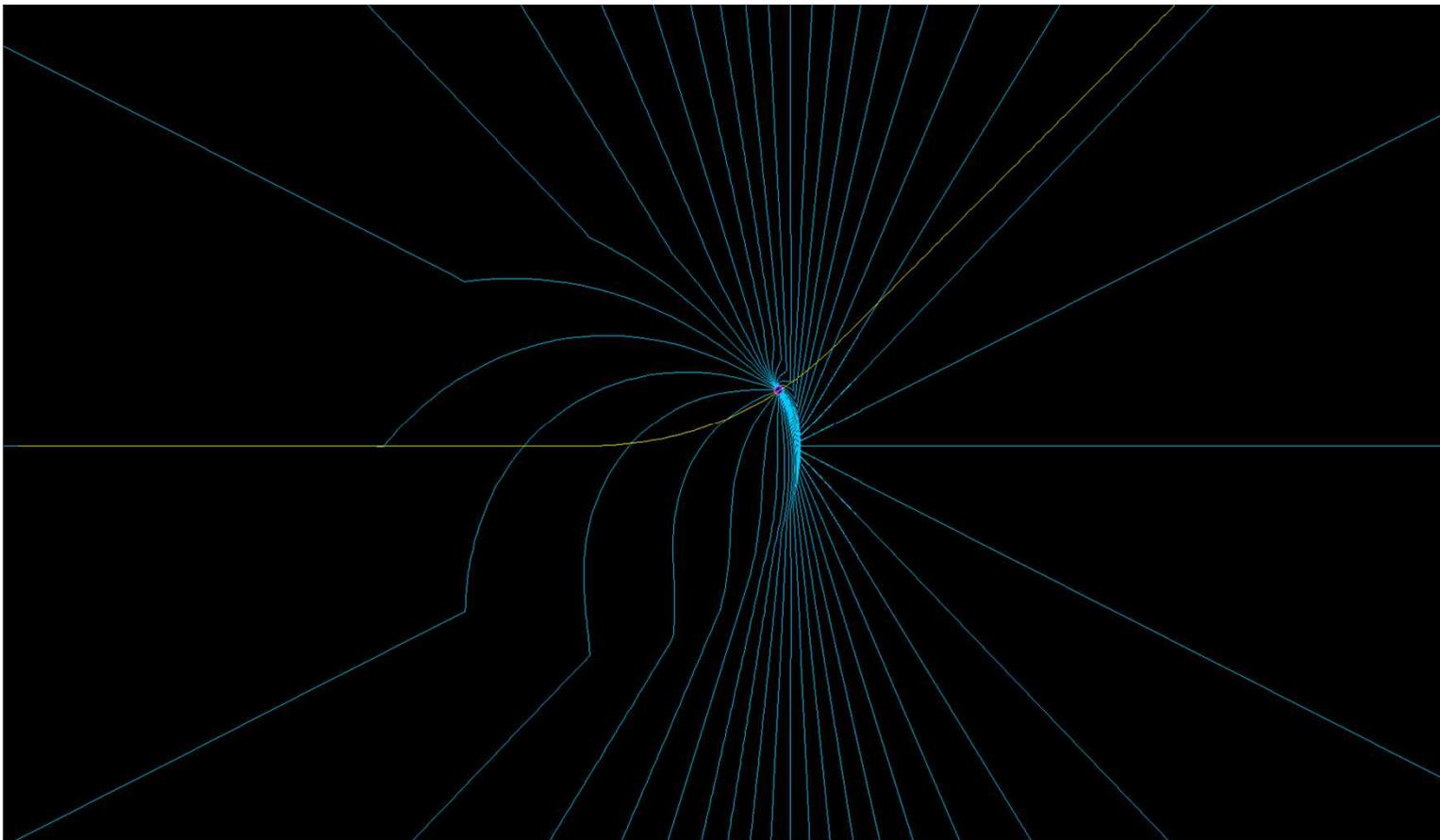
Radiazione di sincrotrone: dipolo



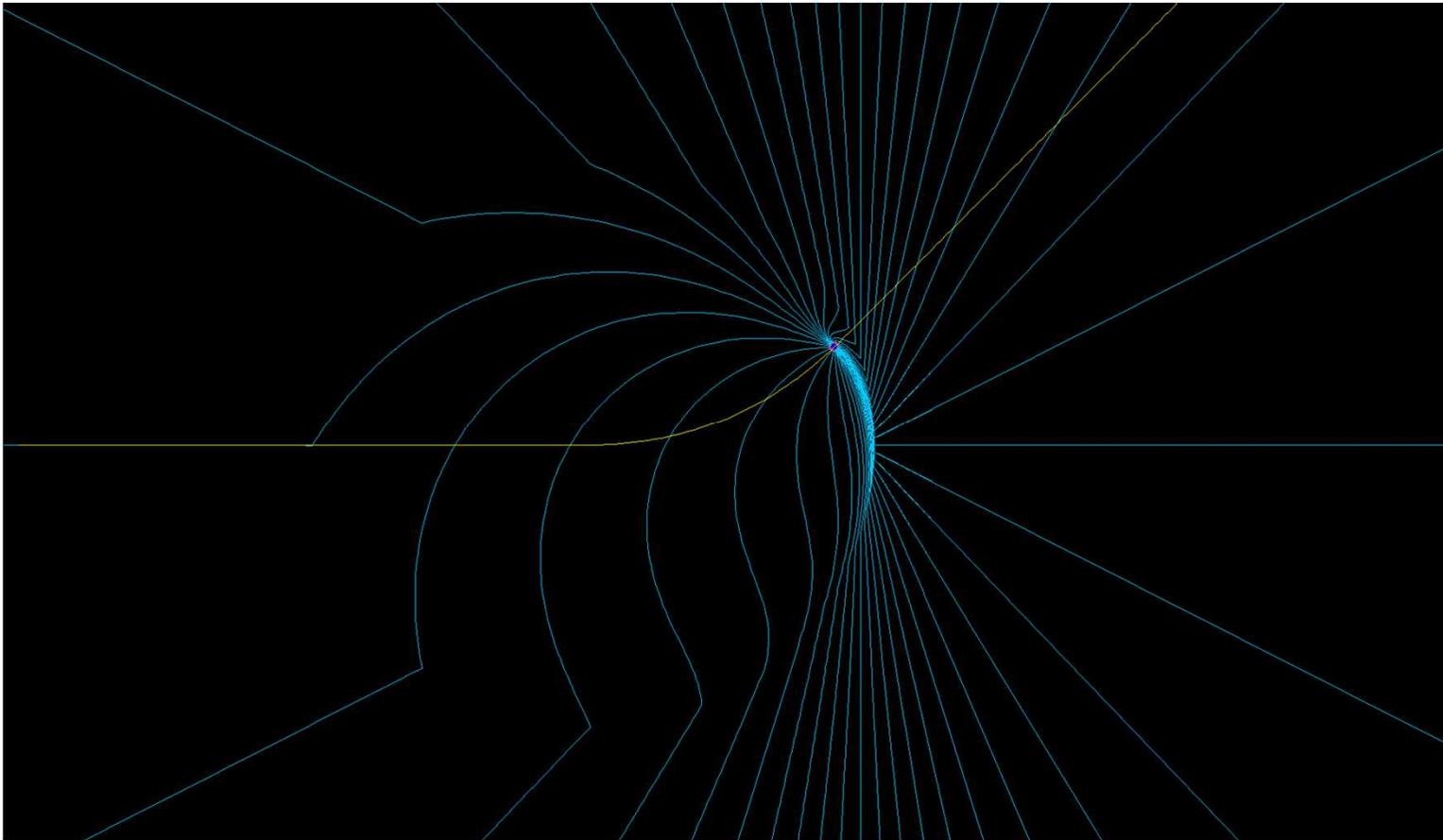
Radiazione di sincrotrone: dipolo



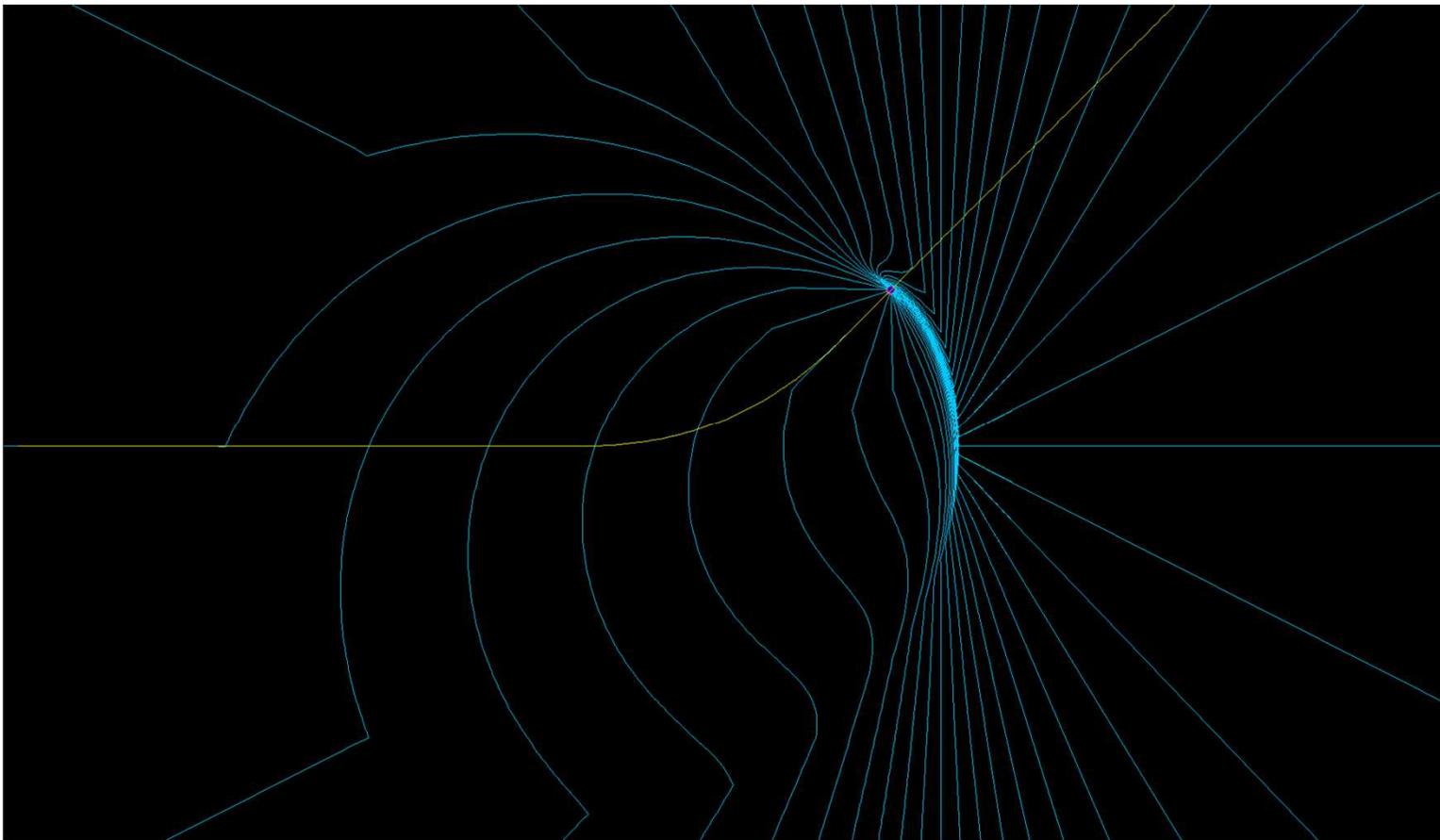
Radiazione di sincrotrone: dipolo



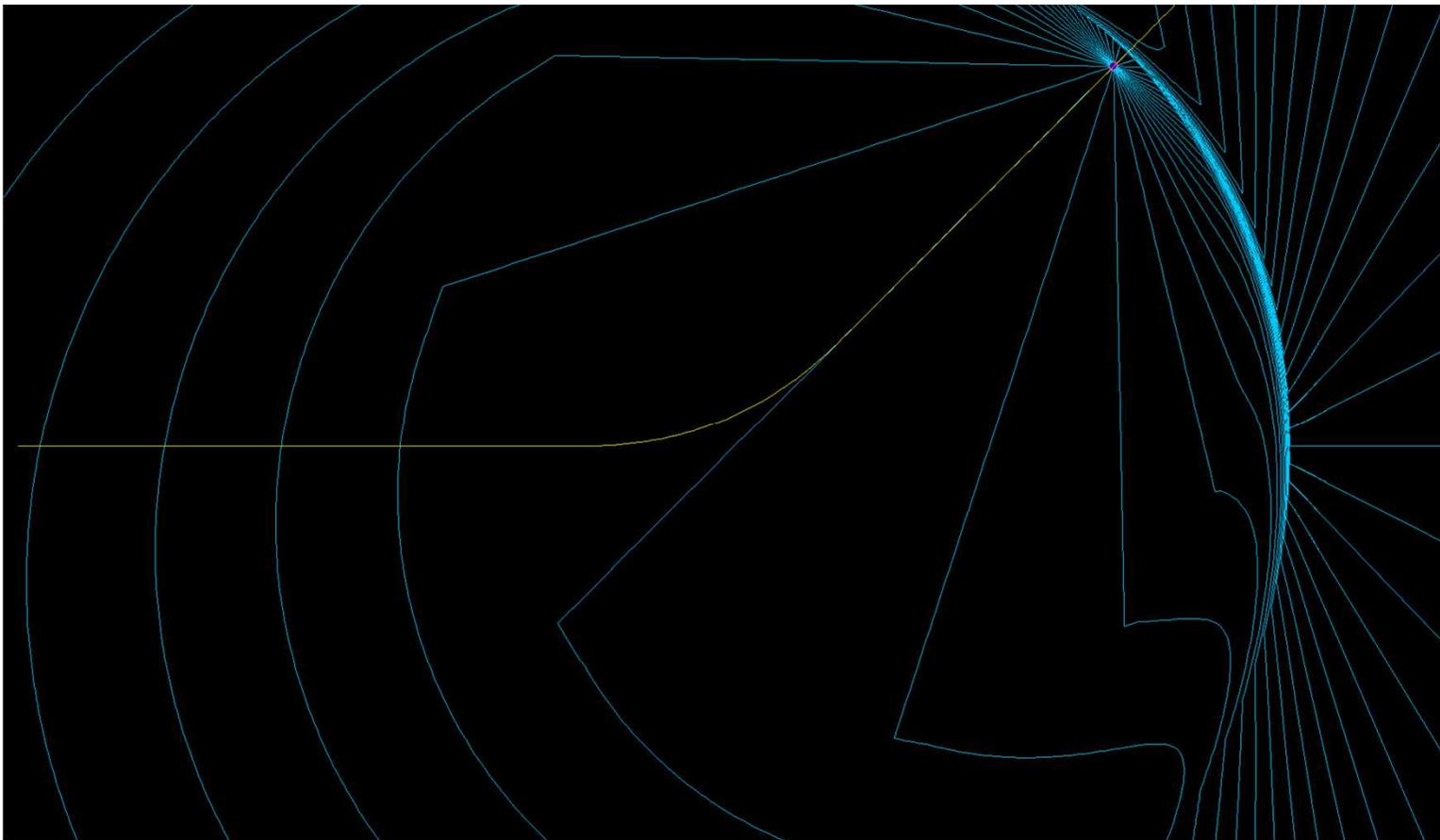
Radiazione di sincrotrone: dipolo



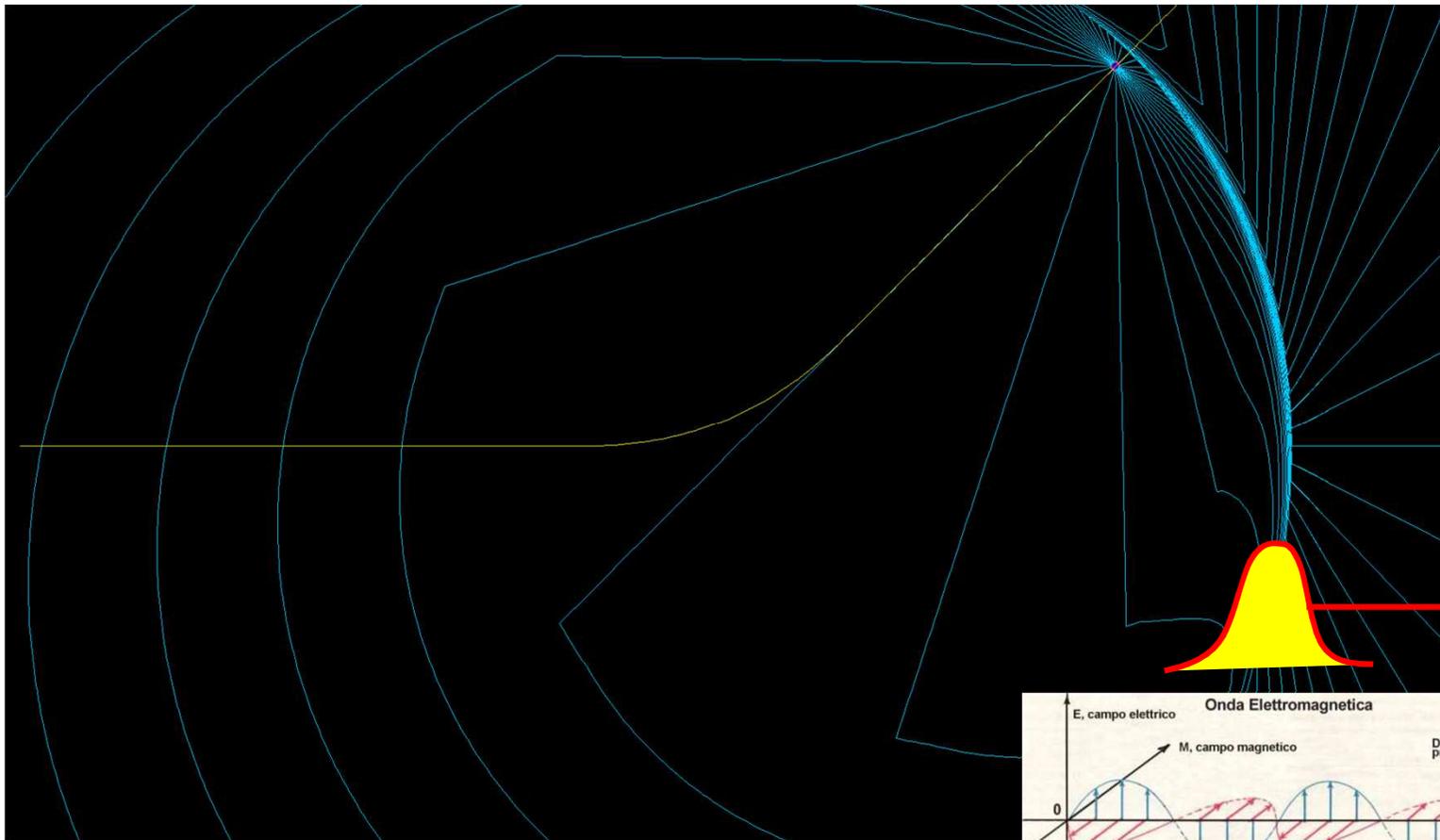
Radiazione di sincrotrone: dipolo



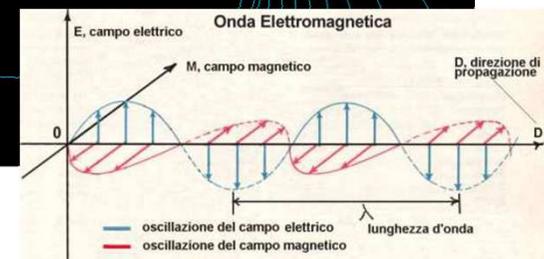
Radiazione di sincrotrone: dipolo



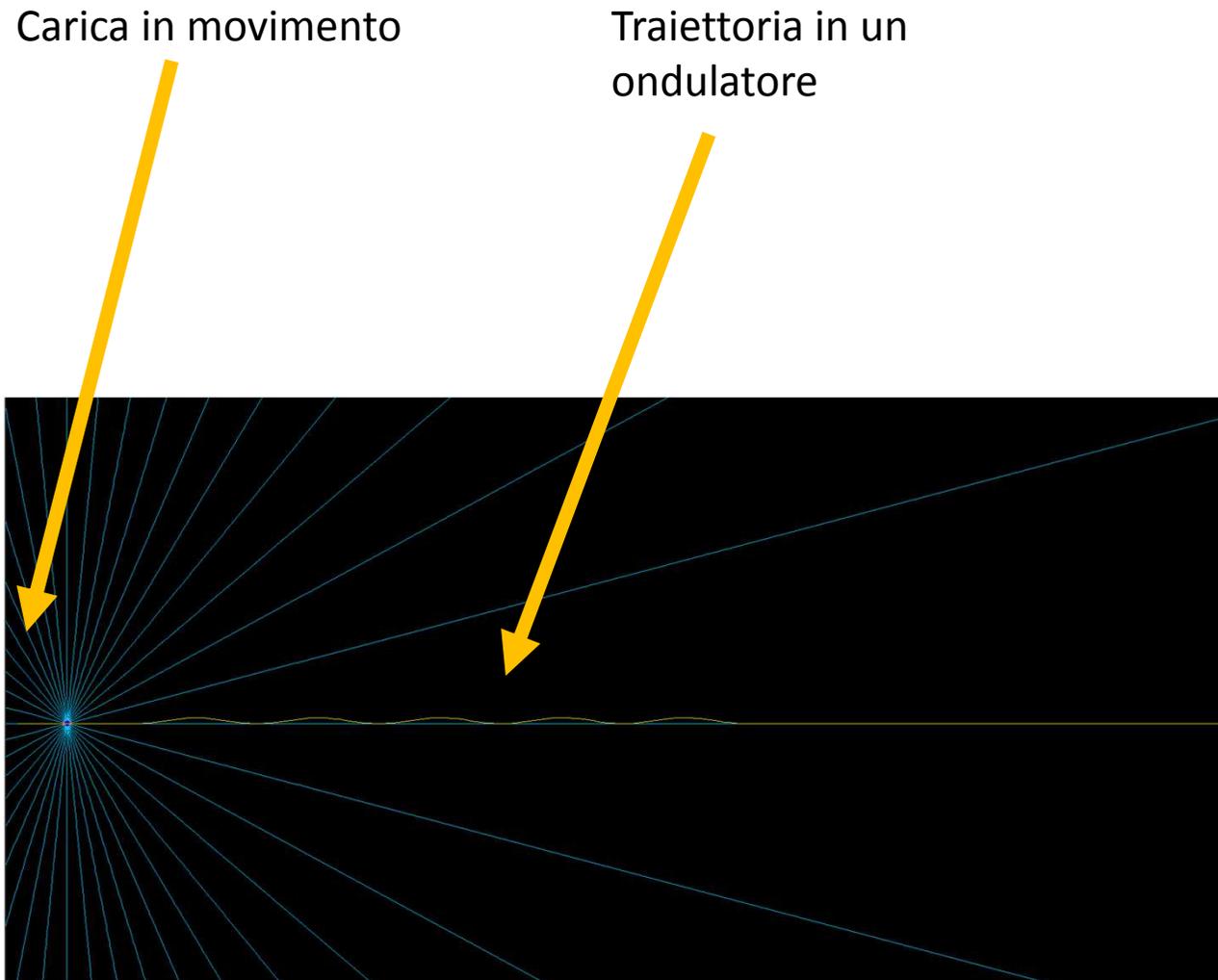
Radiazione di sincrotrone: dipolo



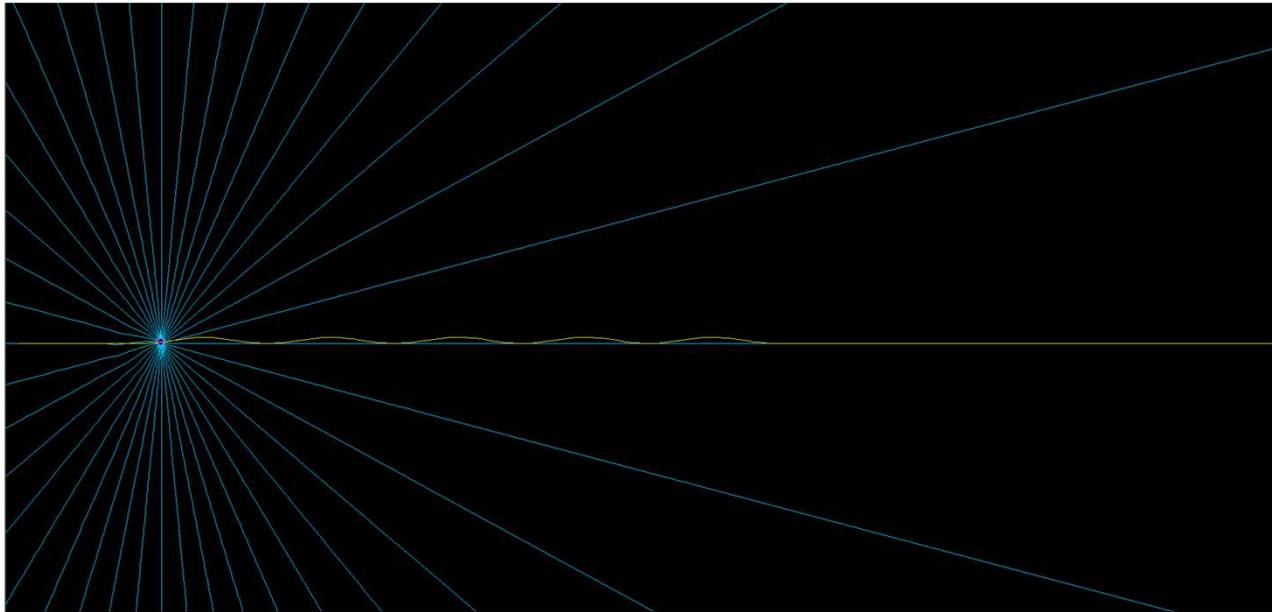
Onda piana



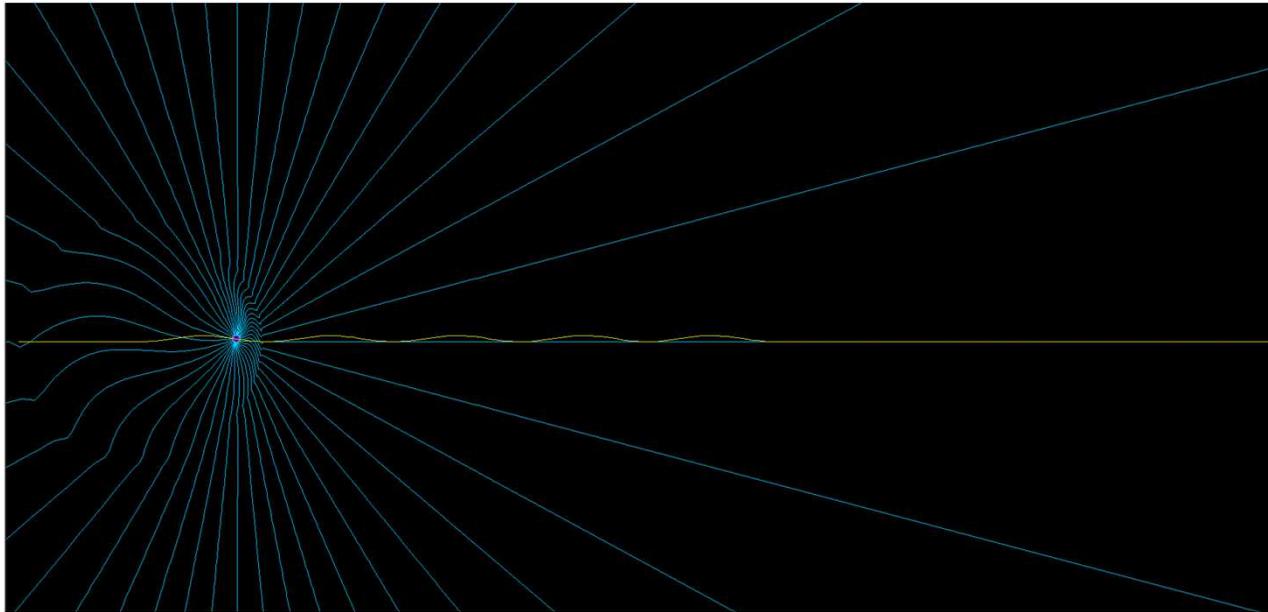
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



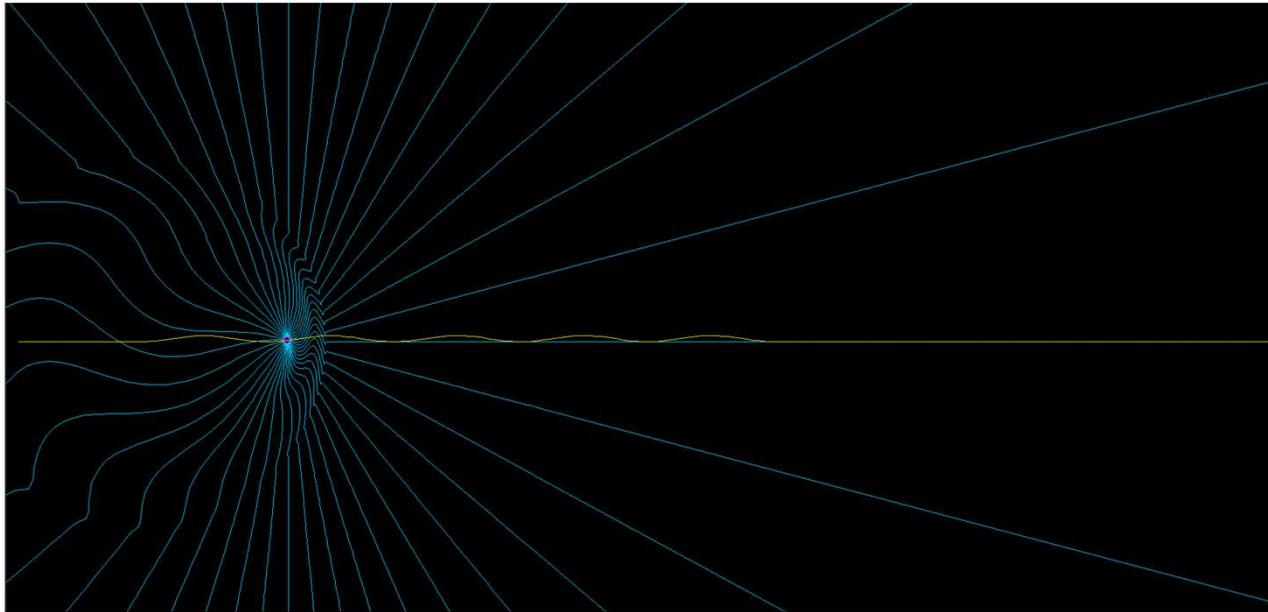
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



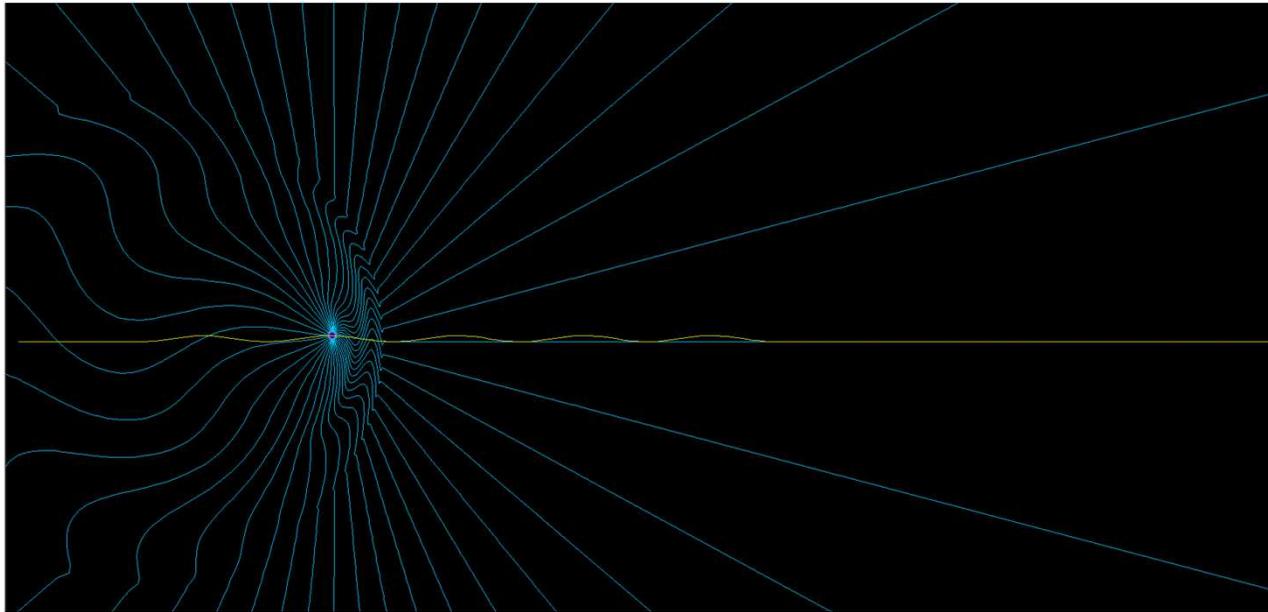
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



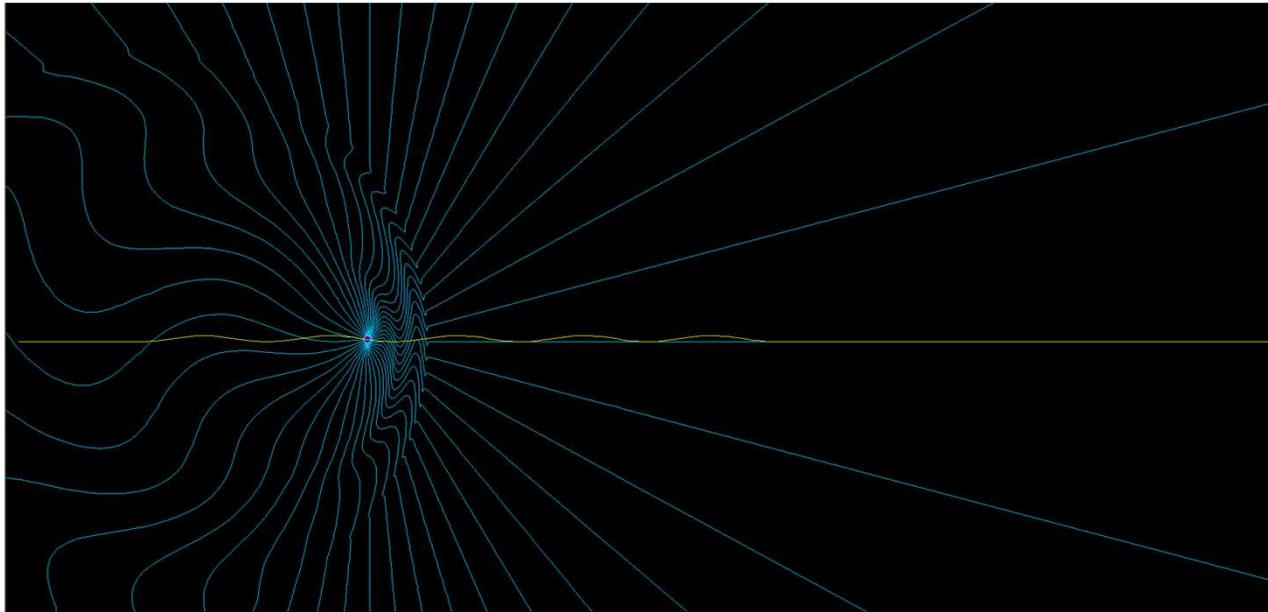
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



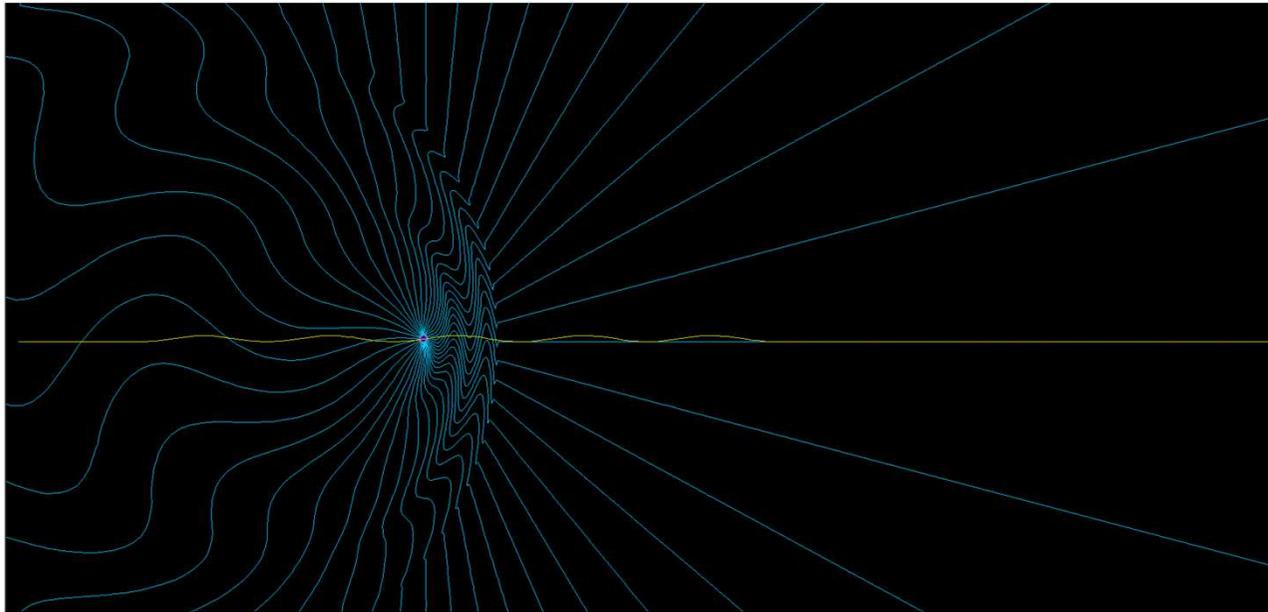
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



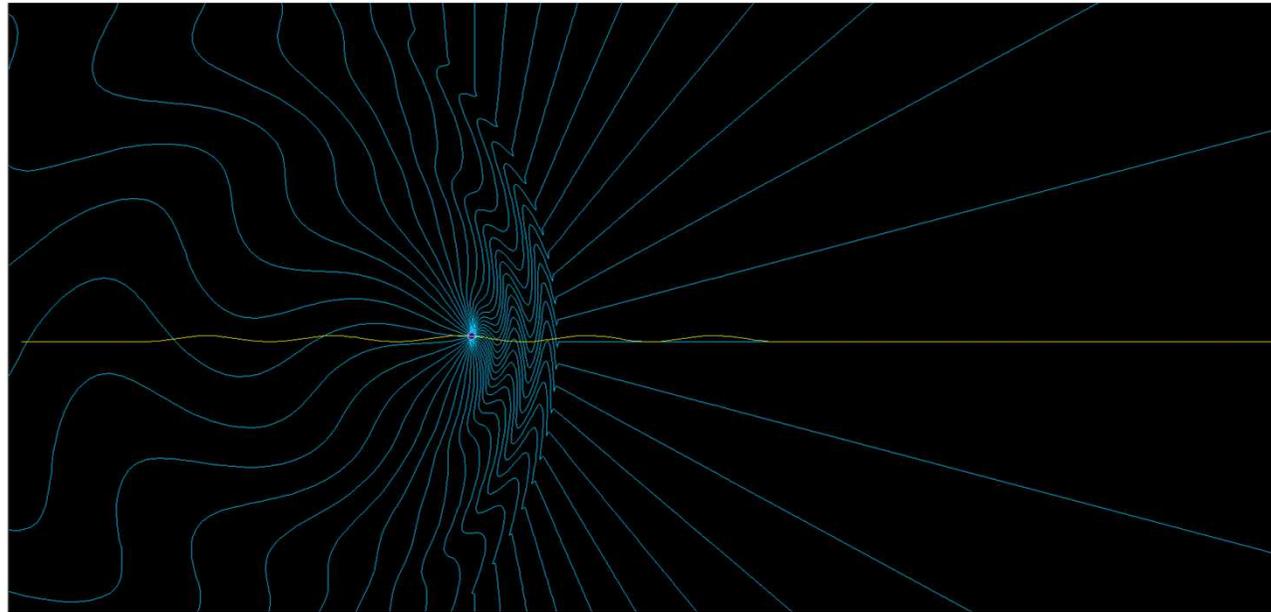
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



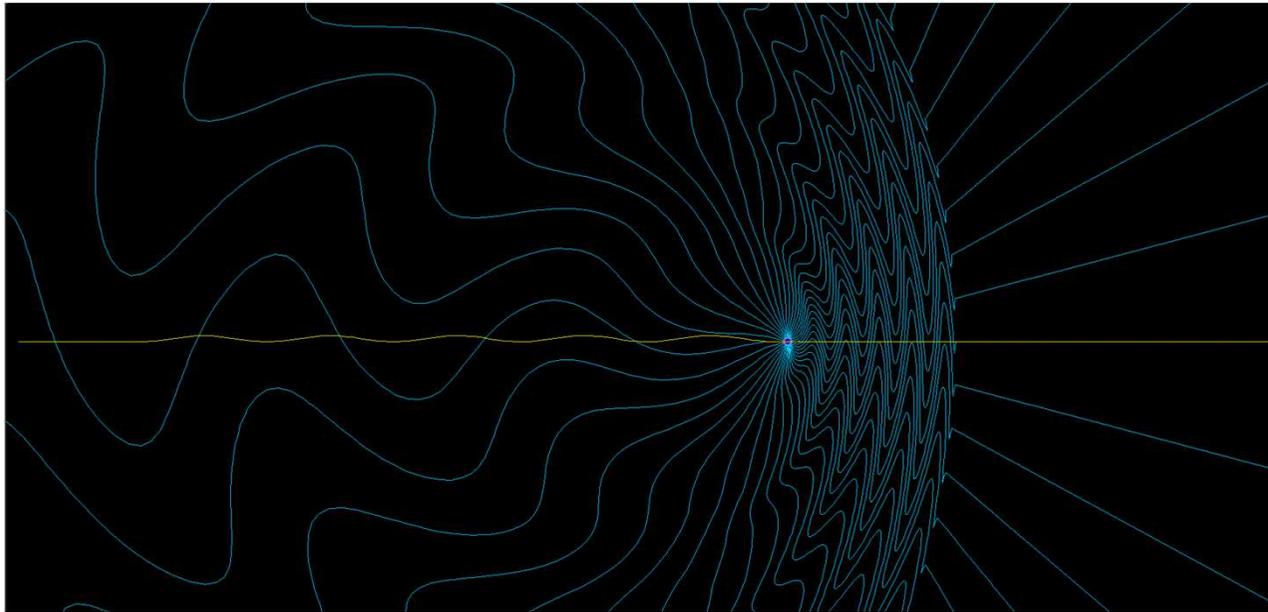
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



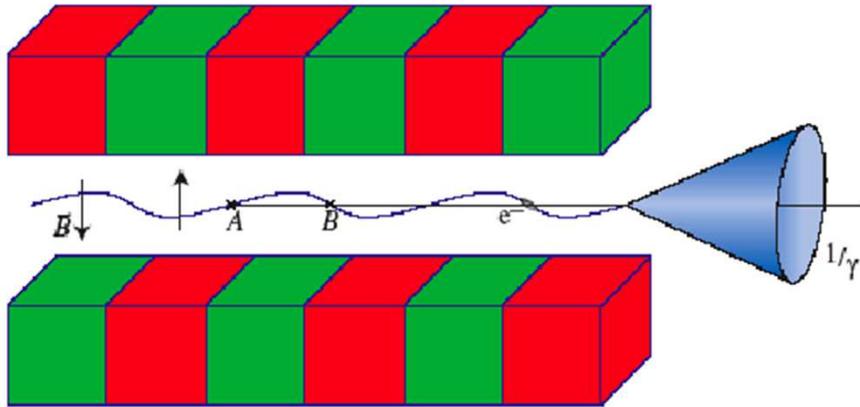
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



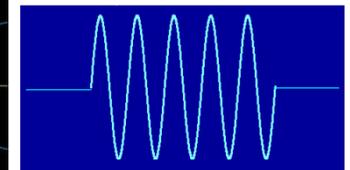
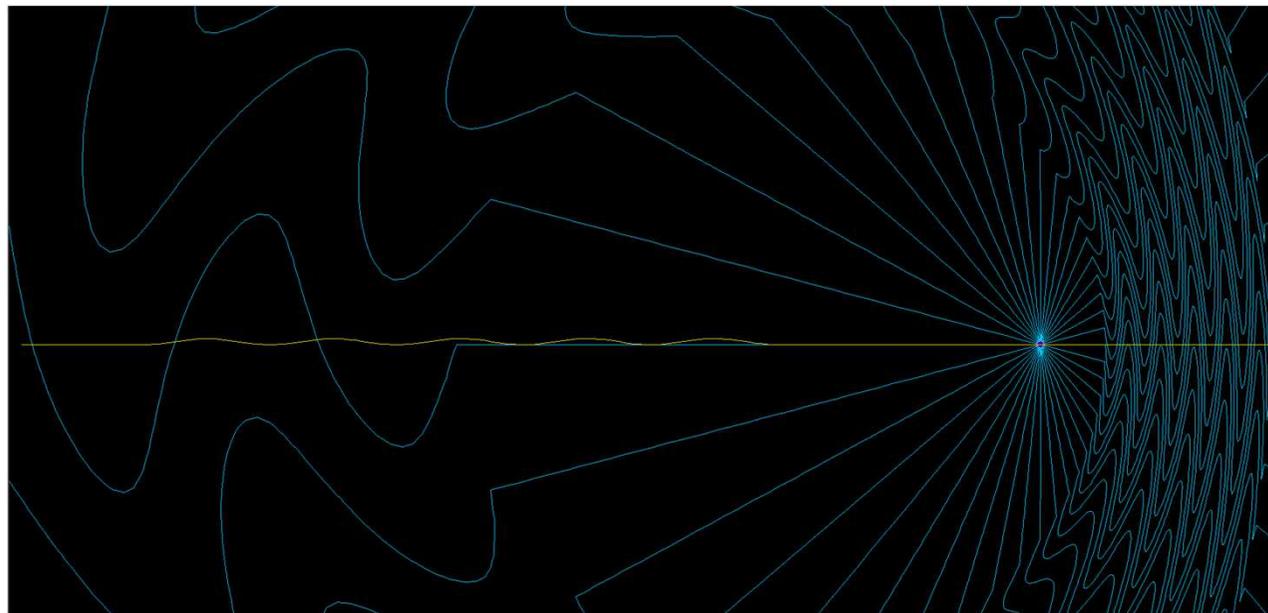
Radiazione di sincrotrone: ondulatore



Radiazione di sincrotrone: ondulatore



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

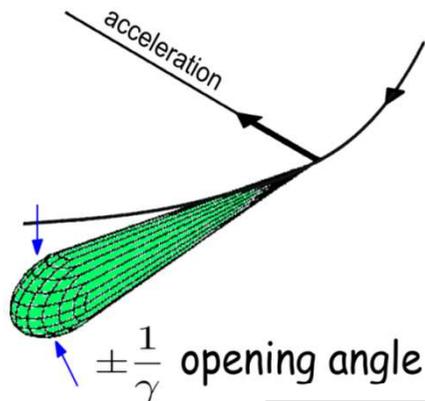


Radiazione di sincrotrone: distribuzione spaziale e potenza

La radiazione di sincrotrone (o *luce di sincrotrone*) è una radiazione elettromagnetica generata da particelle cariche (elettroni o positroni) ultrarelativistiche costrette da un campo magnetico a muoversi lungo una traiettoria curva.

Tanto più elevata è l'*energia* della particella, tanto minore è la *lunghezza d'onda della radiazione emessa* e generalmente il picco dell'emissione avviene alle lunghezze dei raggi X.

È una *radiazione «unica»* in termini di *spettro e brillantezza*, utilizzata in moltissime applicazioni ed è così chiamata perché viene prodotta per mezzo di un sincrotrone.



Energia irradiata in un giro da una particella

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

Energia della particella

Raggio di curvatura della traiettoria

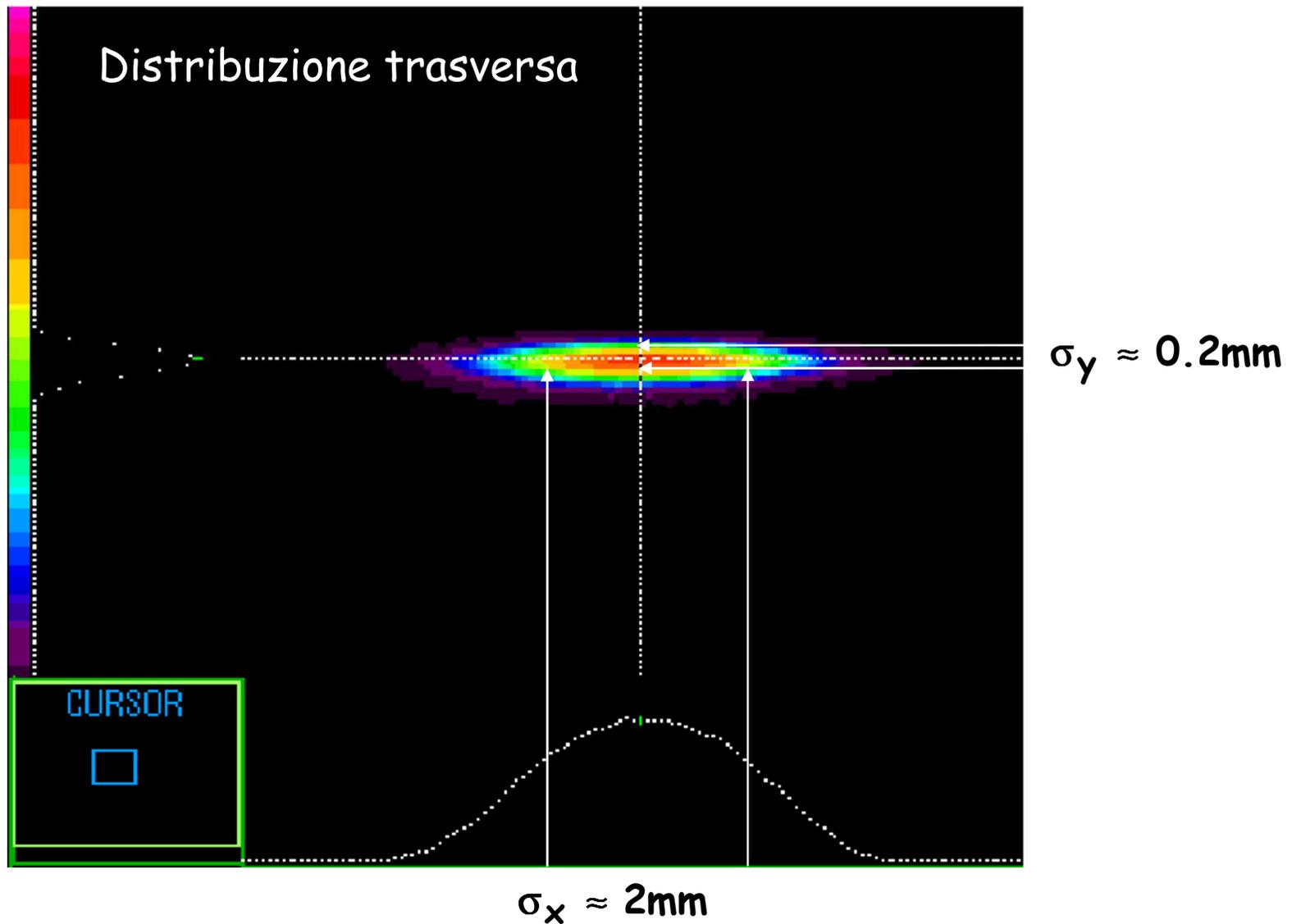
		ρ (m)	E (GeV)	$\Delta E/\text{giro}$ (GeV)
DAΦNE	e+	1	0.51	.000006
	e-	1	0.51	.000006
PEP	e+	14	3.1	.0006
	e-	165	9.0	.0035
LEP	e+	6086	100	1.5
	e-	6086	100	1.5
LHC	p	2800	7000	.000007
	p	2800	7000	.000007

$$P_{\text{electron}} \text{ (kW)} = \frac{e\gamma^4}{3\epsilon_0\rho} I_b = 88.46 \frac{E(\text{GeV})^4 I(A)}{\rho(m)}$$

$$P_{\text{proton}} \text{ (kW)} = \frac{e\gamma^4}{3\epsilon_0\rho} I_b = 6.03 \frac{E(\text{TeV})^4 I(A)}{\rho(m)}$$

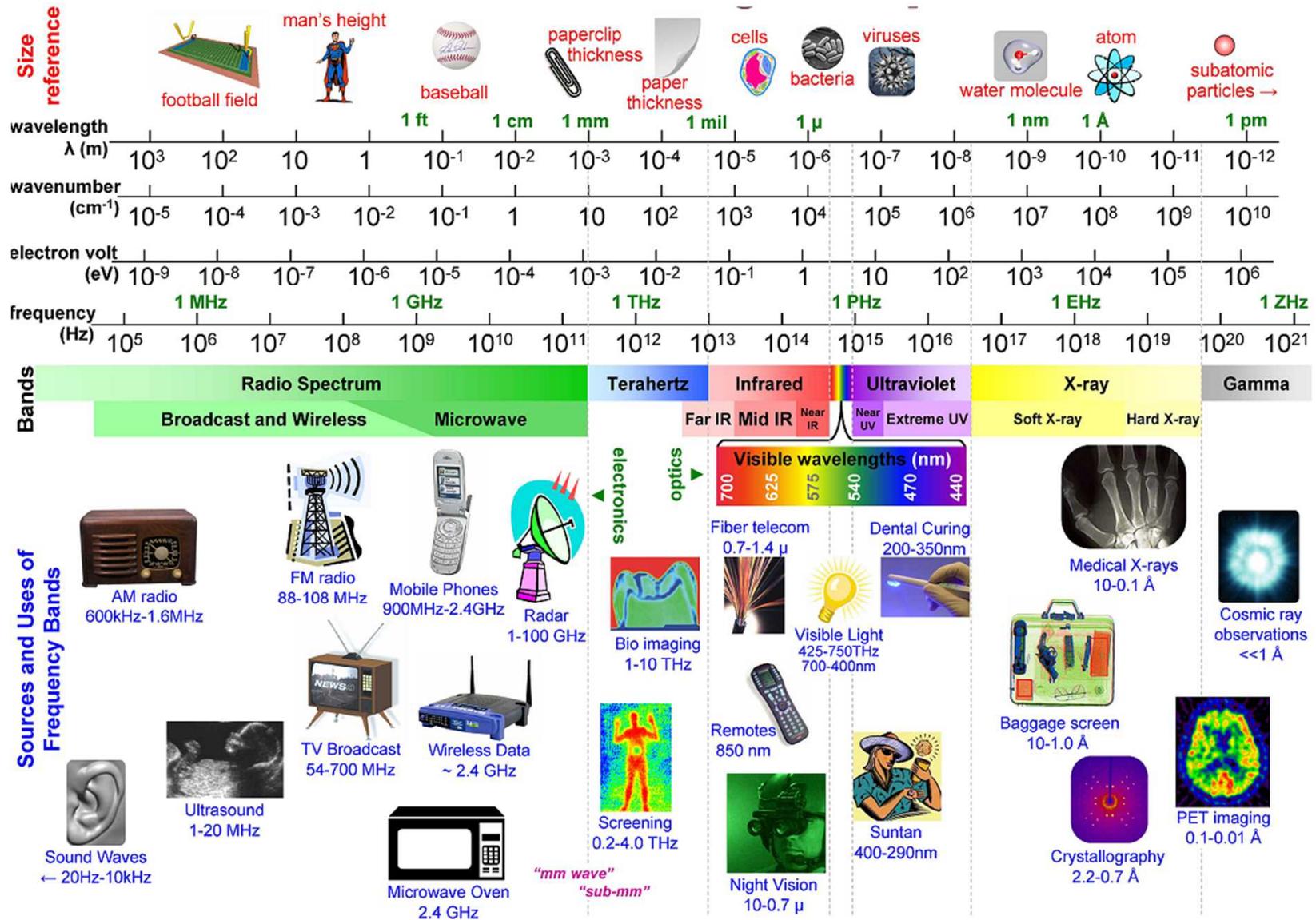
“Vedere” la luce di sincrotrone

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



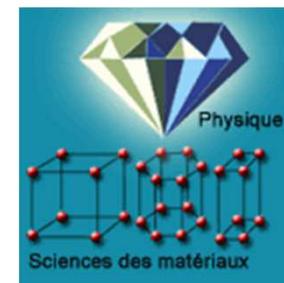
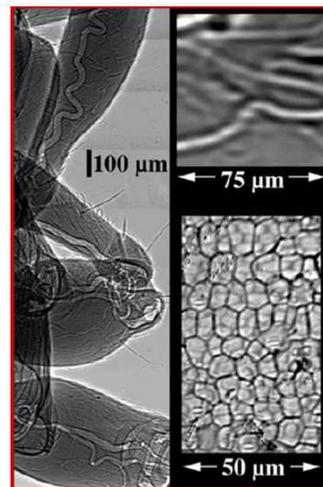
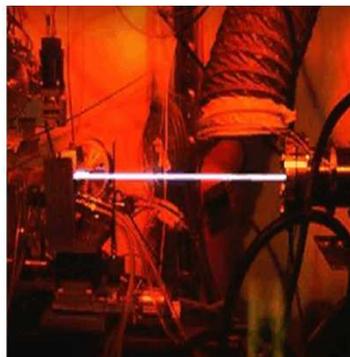
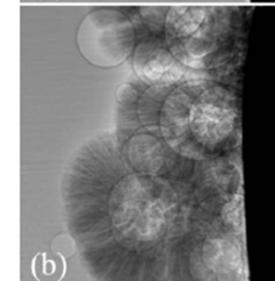
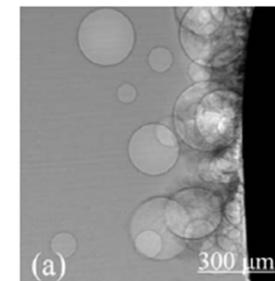
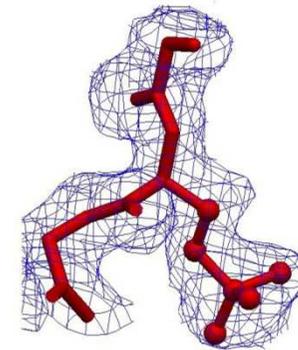
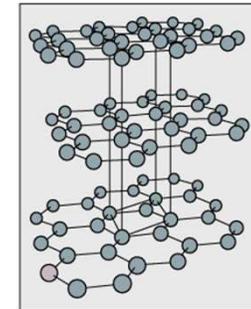
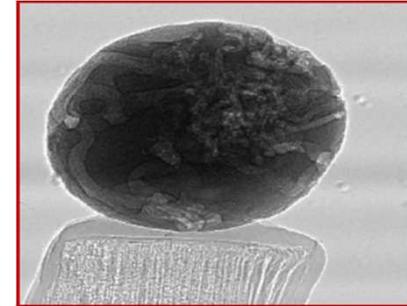
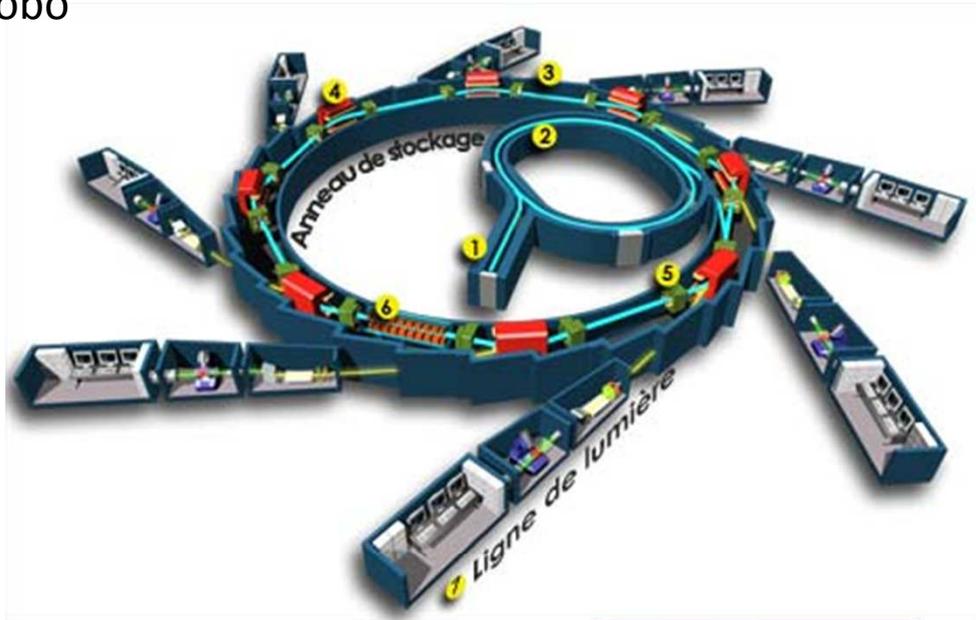
Applicazioni della luce di sincrotrone

La luce di sincrotrone (tipicamente emessa nello spettro dei raggi X) può essere utilizzata per *analisi molecolari e cristallografiche*



Anelli di luce di sincrotrone

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



Anelli di luce di sincrotrone: esempi

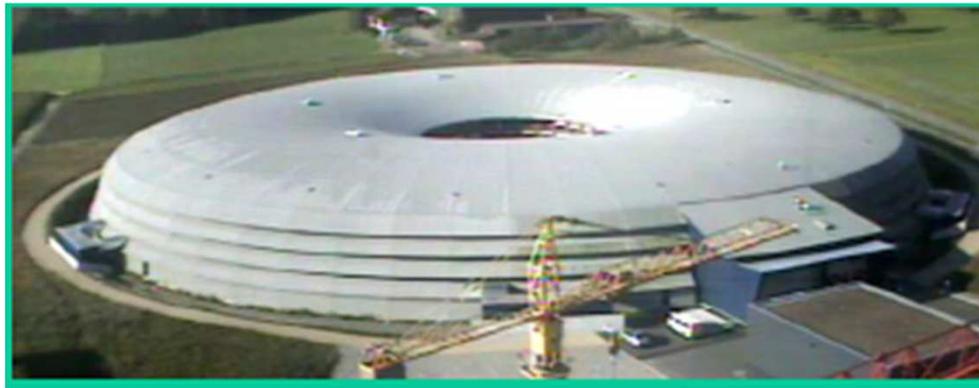
Elettra (Trieste)



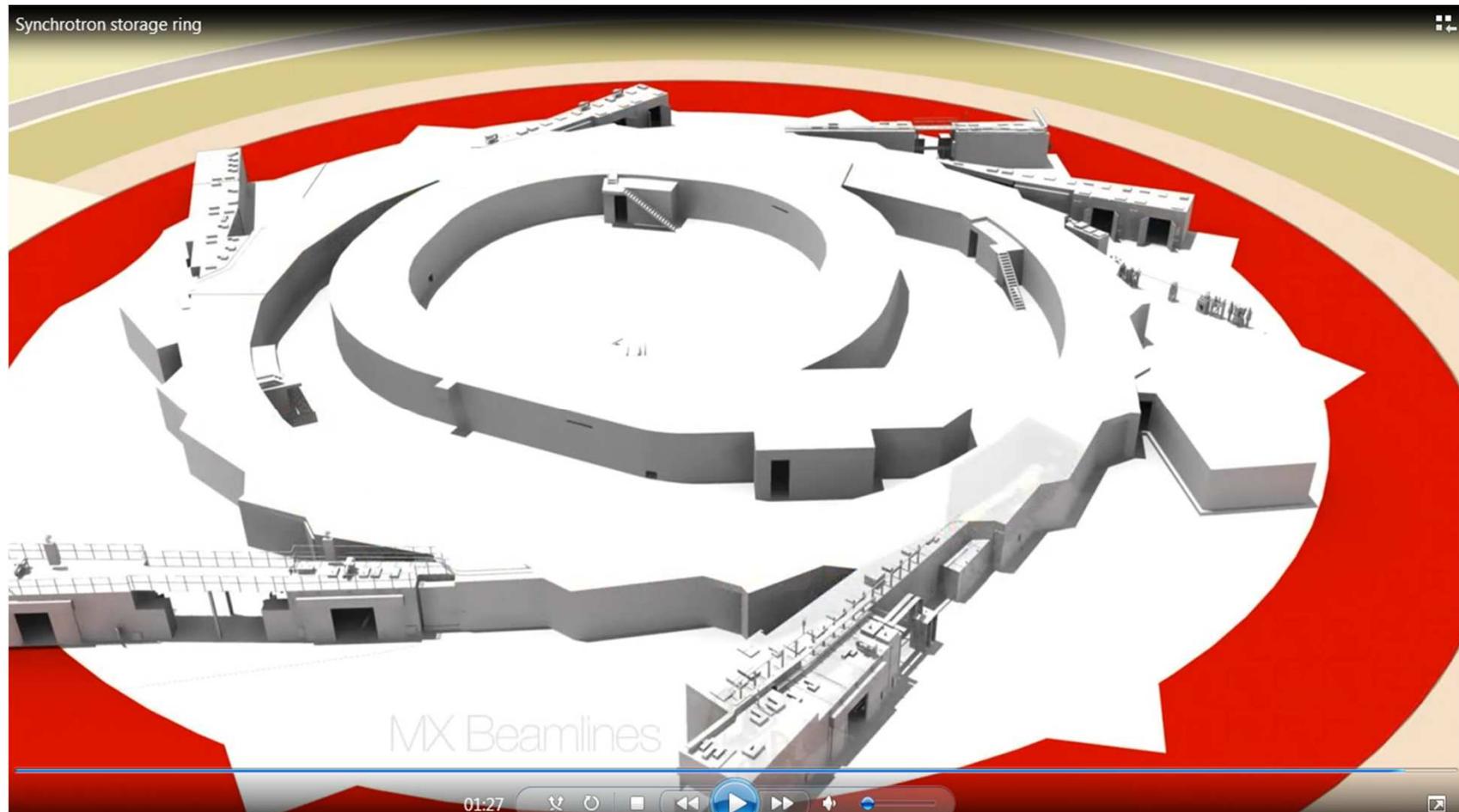
ESRF (Francia)



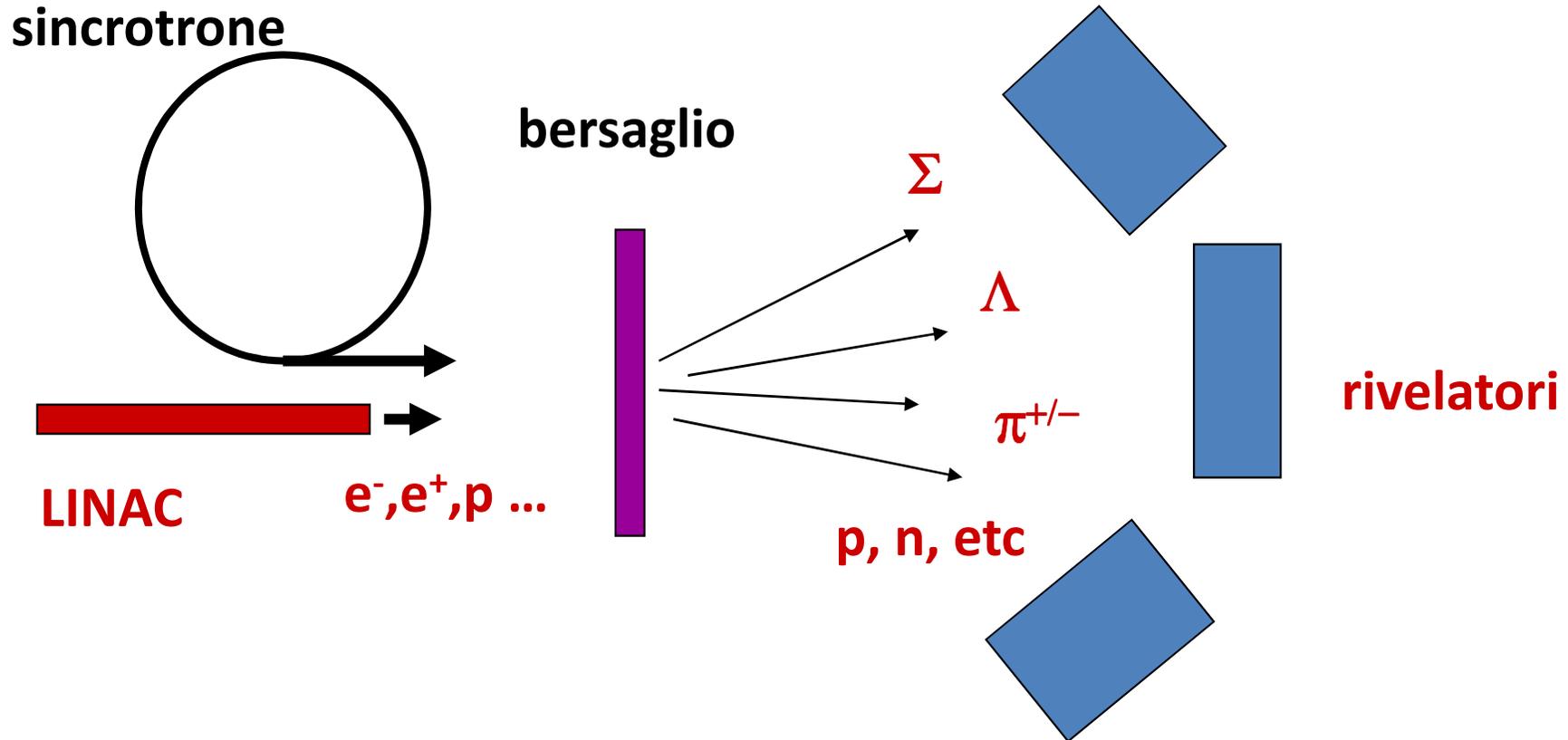
SLS (Svizzera)



Video: anelli di luce di sincrotrone



Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa

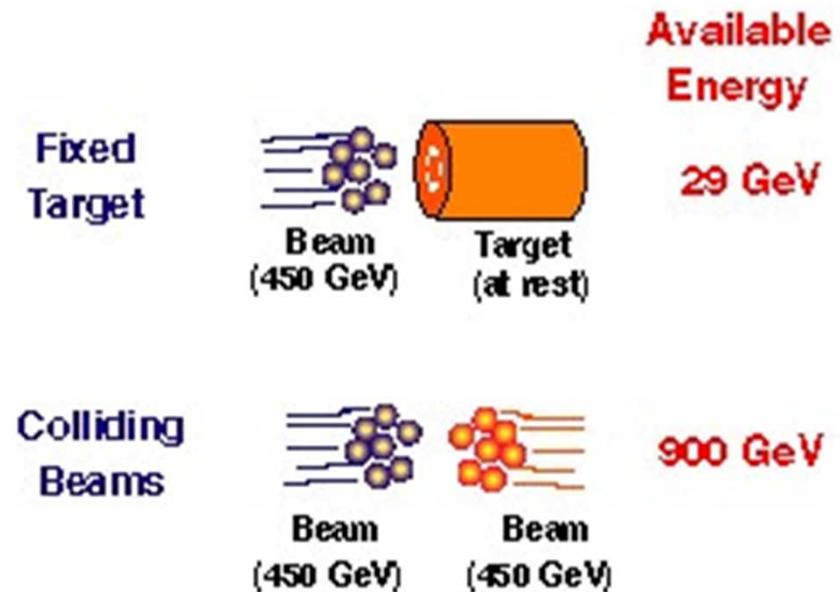
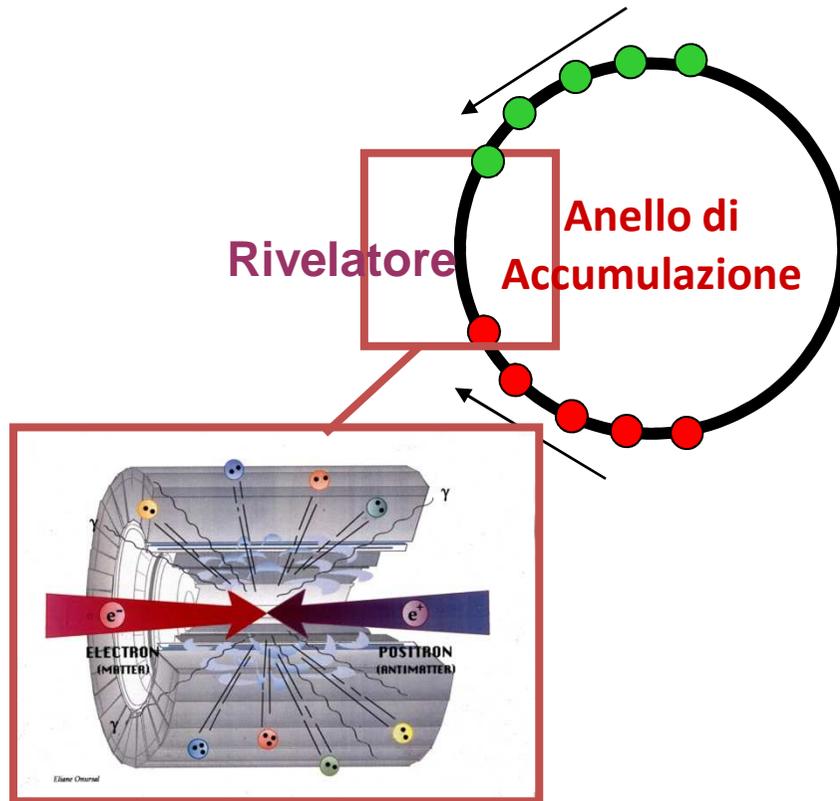


- 1) La materia è **vuota** : ciò che non ha interagito viene perduto;
- 2) Il bersaglio è **complesso**: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento;
- 3) Rivelatore "**anisotropo**";
- 4) Parte dell'energia del fascio di particelle **non viene "sfruttata"** nell'interazione in quanto posseduta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

Nascita dei Moderni Collider (Collisori)

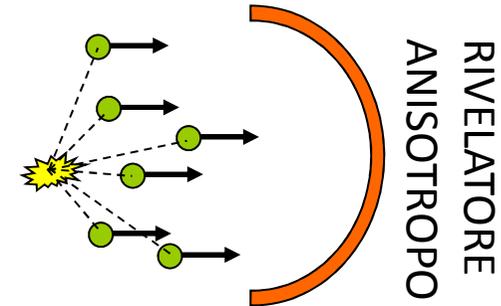
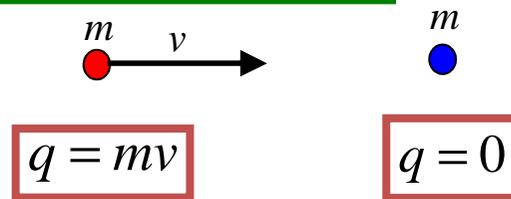


La geniale idea di **Bruno Touschek** (1960) fu quella di utilizzare come particelle collidenti, **particelle ed antiparticelle** che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato **tutta la loro energia** per creare nuove particelle. Inoltre i **prodotti delle collisioni sarebbero stati relativamente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



Energia Disponibile nell'interazione

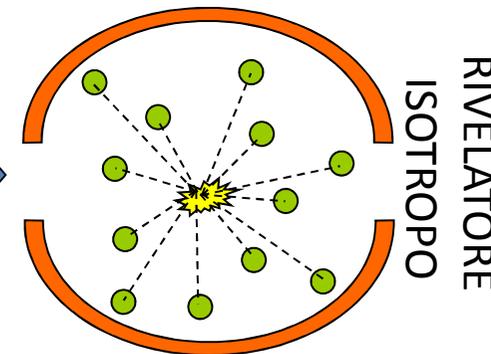
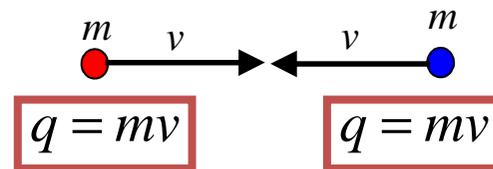
COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



ENERGIA DISPONIBILE
NELL'INTERAZIONE

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

COLLISIONE FASCIO-FASCIO



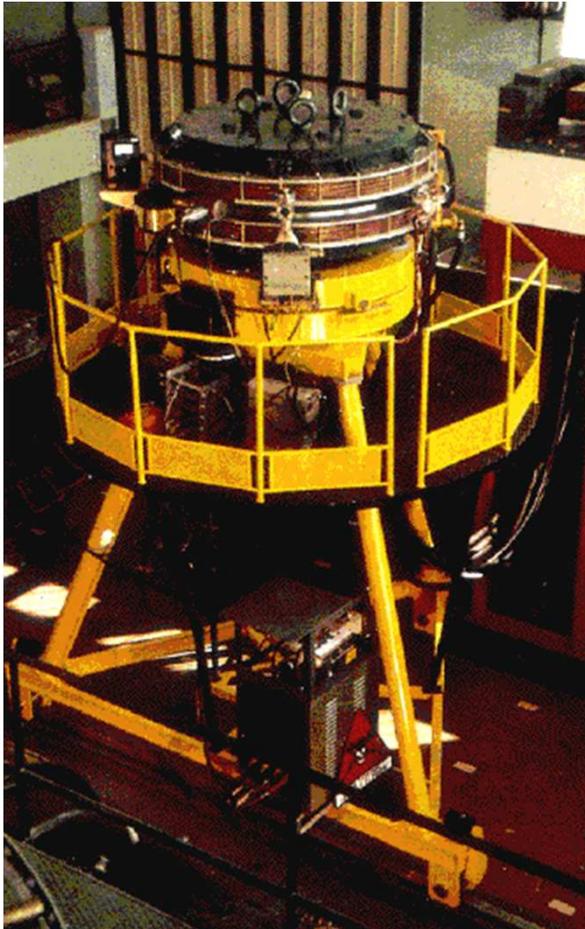
ENERGIA DISPONIBILE
NELL'INTERAZIONE

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

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

AdA (Anello di Accumulazione) 1960-1965

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



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

IL NUOVO CIMENTO

The Frascati Storage Ring.

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

R. TUSCHKEK

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

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

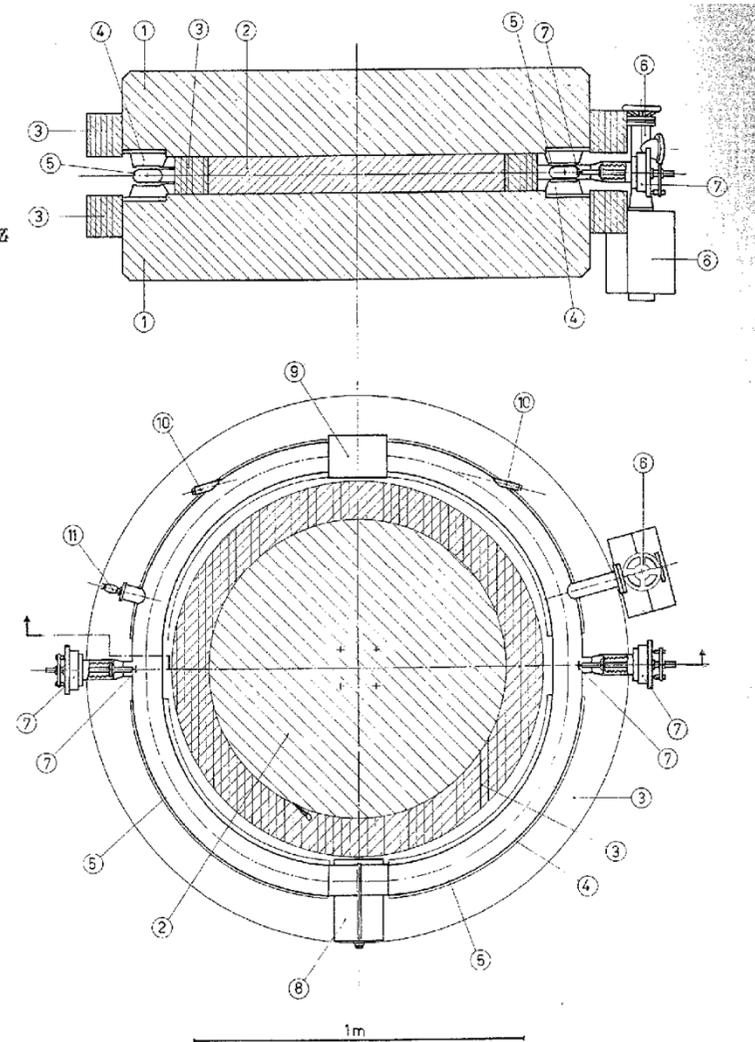
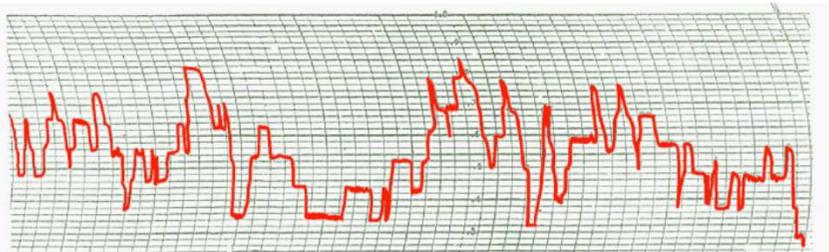


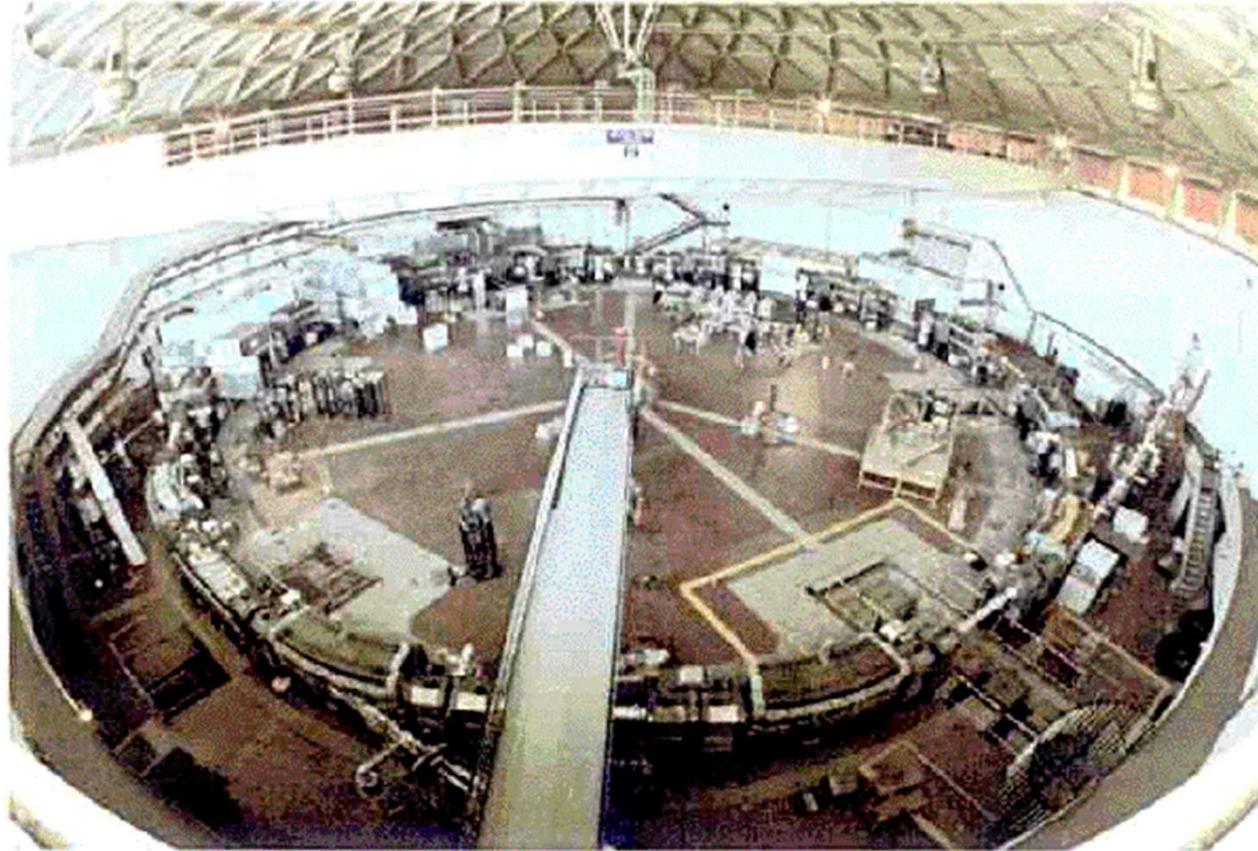
Fig. 1. - Elevation and plan section of the Frascati Storage Ring (anello di accumulazione = AdA): 1) magnet yoke; 2) magnet core; 3) coils; 4) polepieces; 5) doughnut; 6) titanium pump; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation;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



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

ADONE (1967-1993)

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

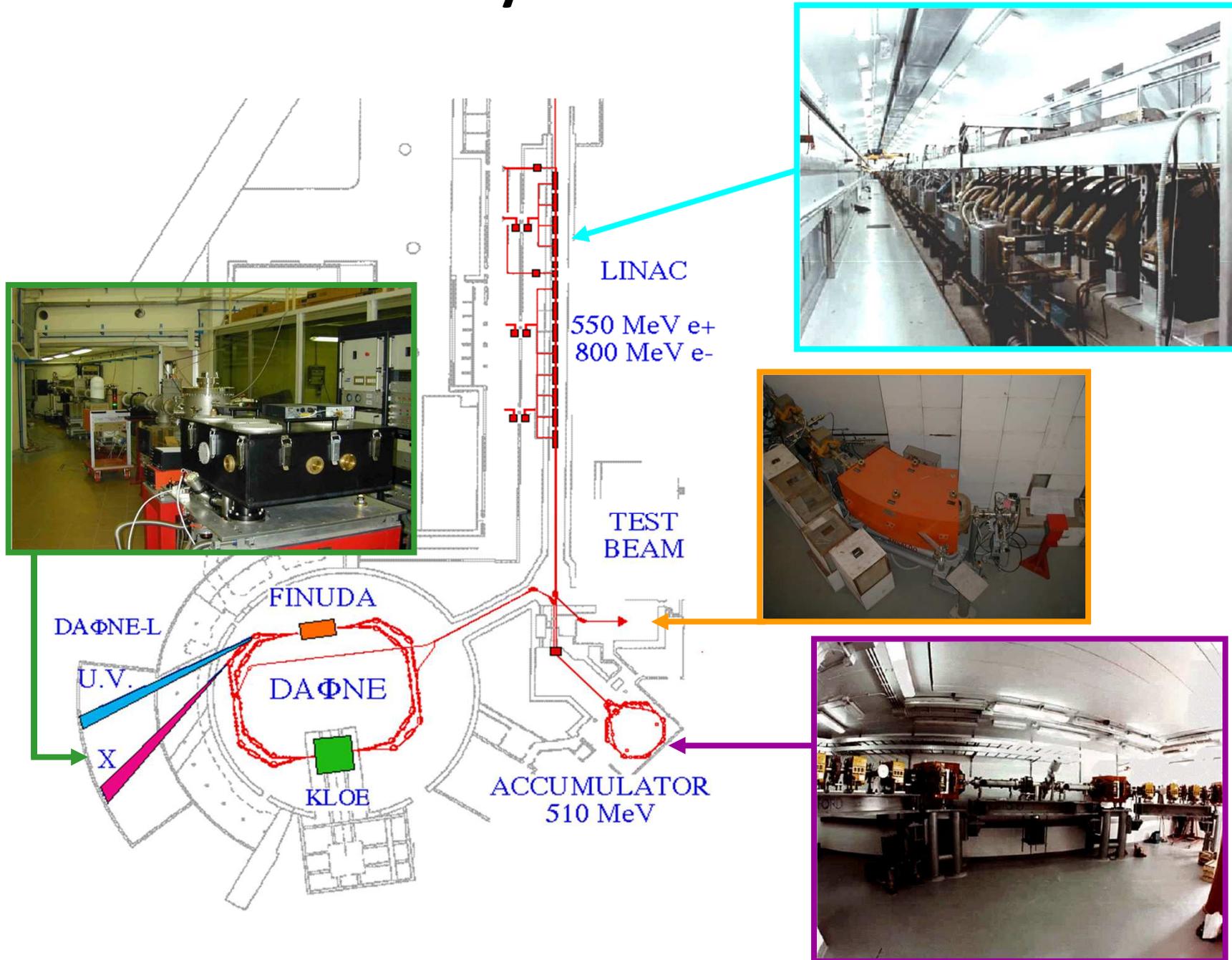


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

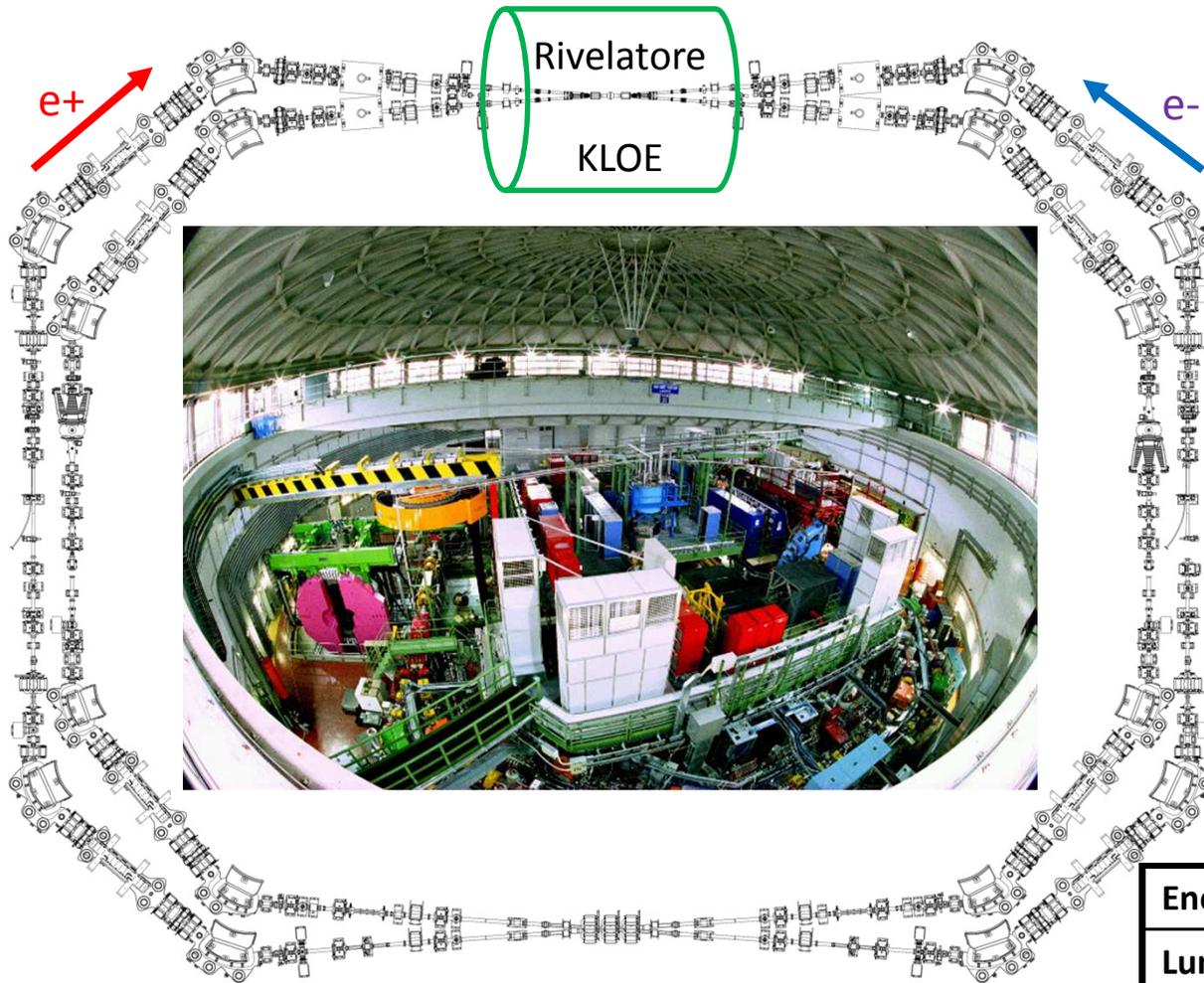
Si raggiunse la luminosità di progetto: $3 \times 10^{29} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

La Φ -Factory a Frascati: DAΦNE



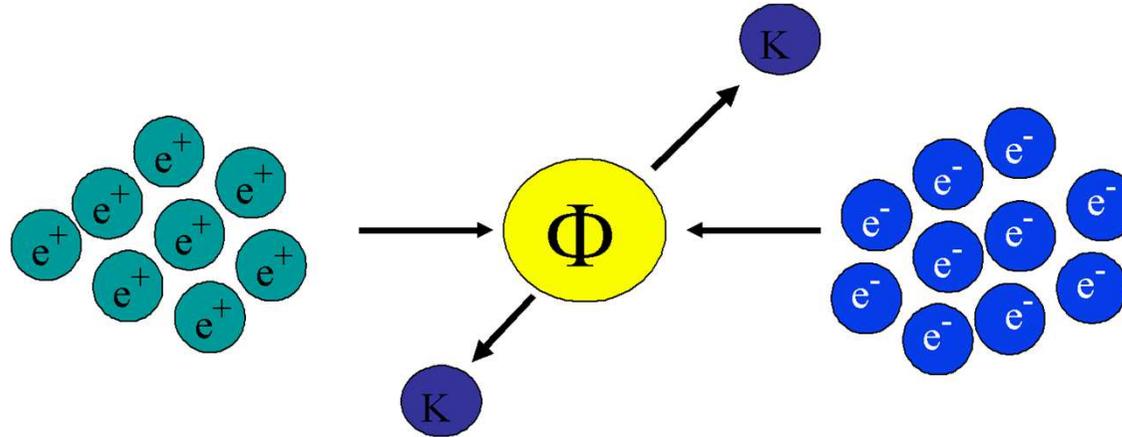
Alcuni parametri di DAΦNE



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

Fisica delle Particelle @DAΦNE

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



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

KLOE
(K LOng Experiment)

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

FINUDA
(Fisica Nucleare a DAΦNE)

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

Ipernucleo

Ecco come appare un evento ipernucleare all'interno del rivelatore

di macchine acceleratrici - Acitrezza 11-15 Giugno 2007

DEAR
(DAΦNE Exotic Atom Research)

Idrogeno Kaonico

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

$2p \rightarrow 1s (K_a)$
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

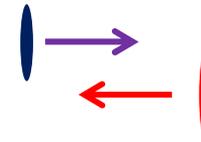
Due particelle (e^+/e^- a DAΦNE ,ad esempio) che collidono possono produrre *tipi diversi di eventi*, alcuni più probabili di altri. La **sezione d'urto** σ di un determinato evento è **proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga** e si misura in cm^2 .

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



Evento poco probabile.

A bassa sezione d'urto



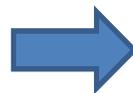
Evento più probabile.

Ad elevata sezione d'urto

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

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

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



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

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

Luminosità di un *collider*

Per fasci gaussiani la luminosità si calcola come:

Numero di particelle per fascio

La luminosità si aumenta aumentando:

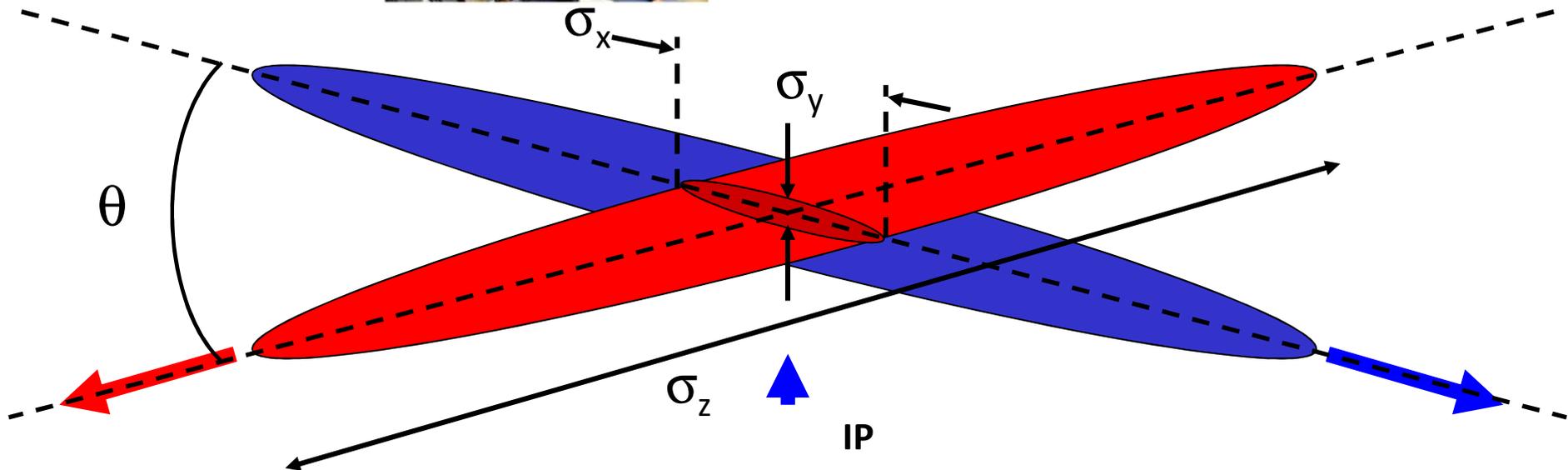
- la densità dei fasci
- frequenza di collisione
- la quantità di particelle collidenti

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

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



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

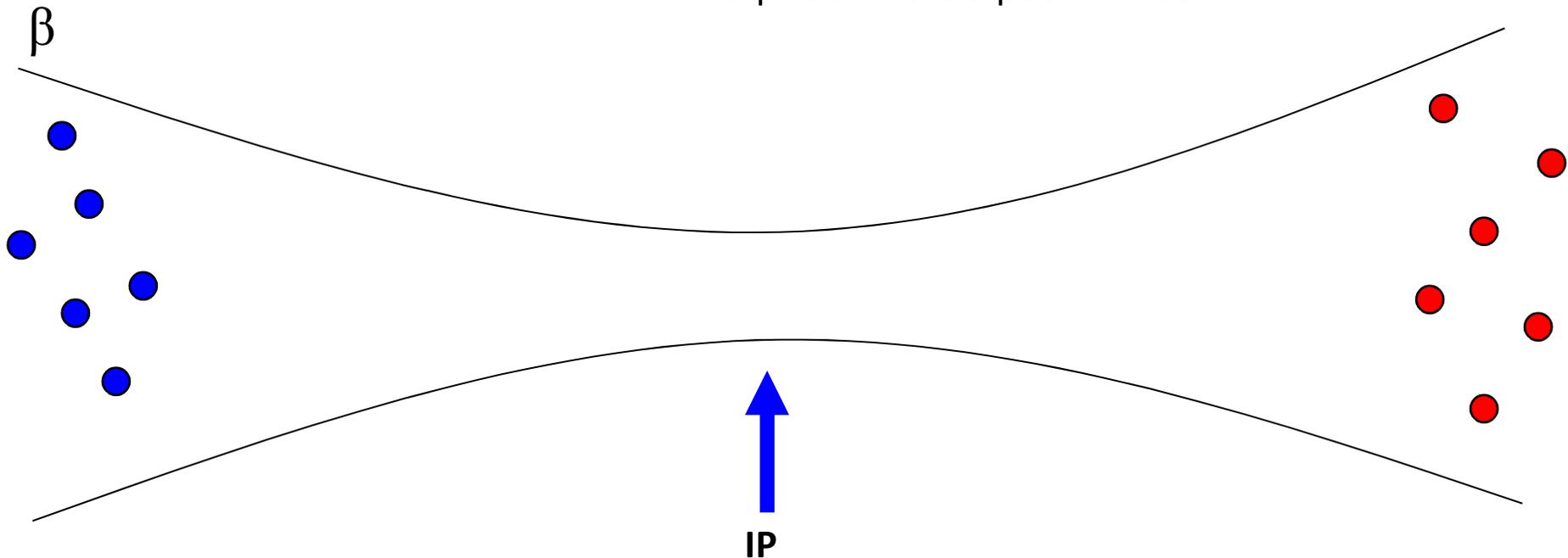


Luminosità di un *collider*

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

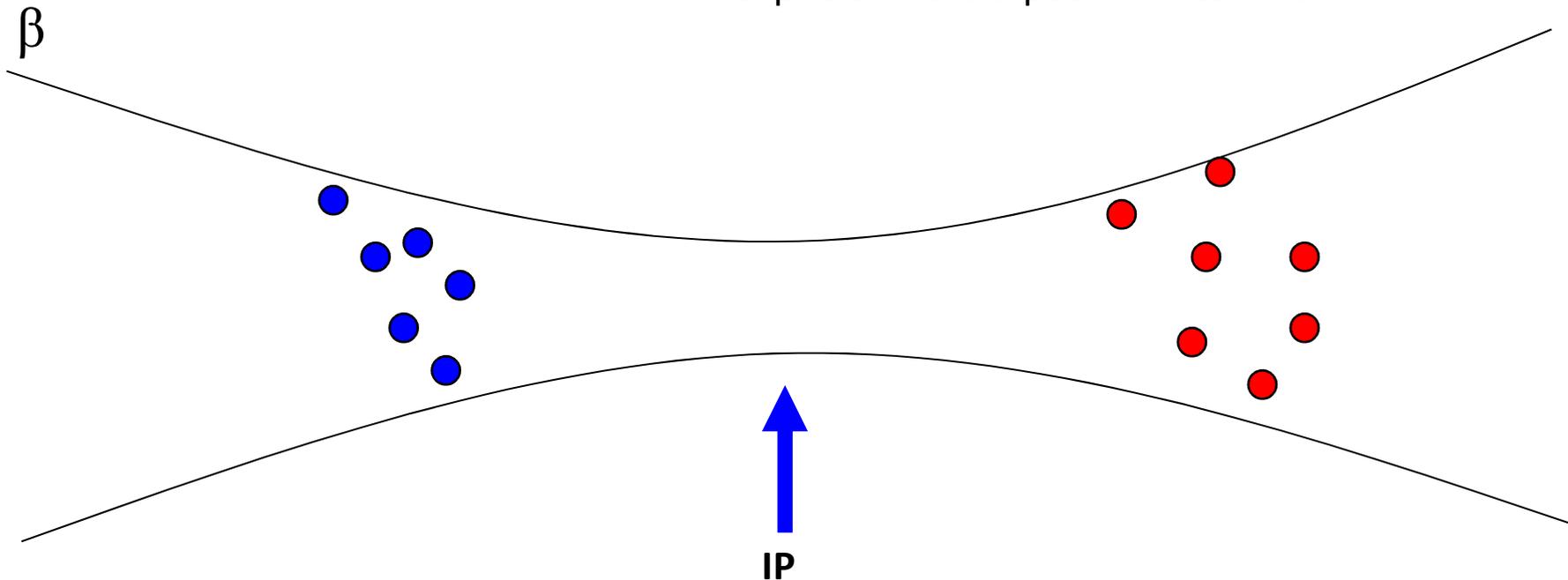


Luminosità di un *collider*

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



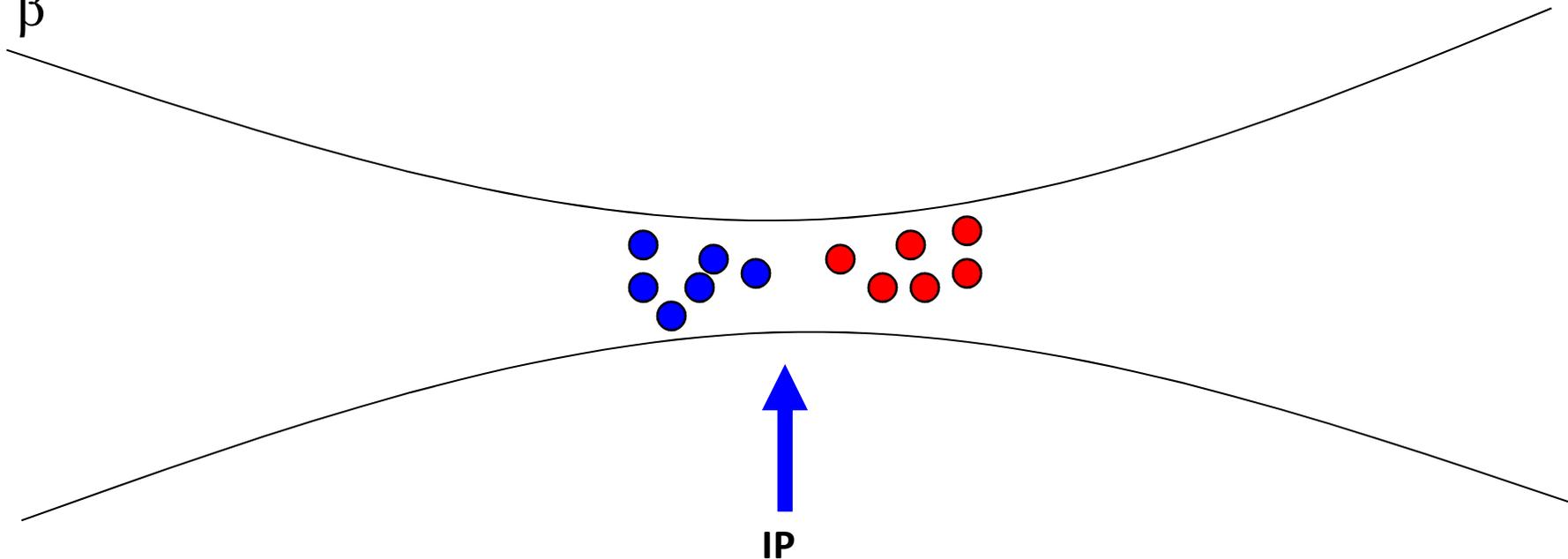
Luminosità di un *collider*

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

β



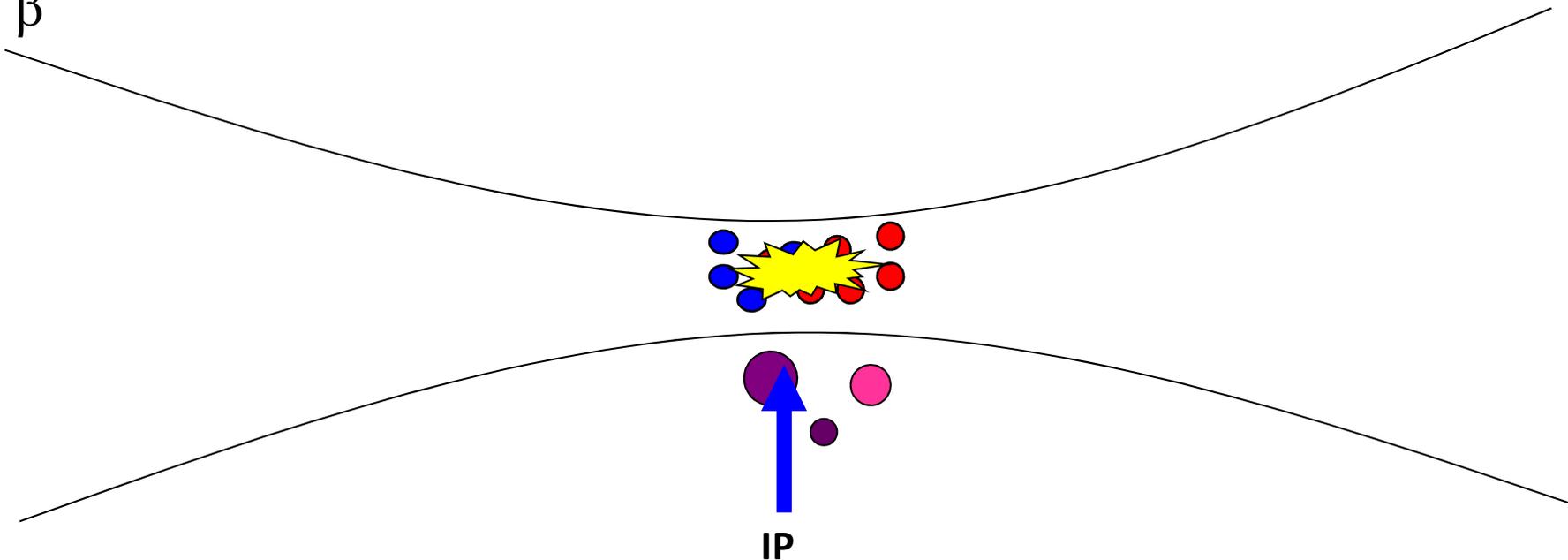
Luminosità di un *collider*

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

β



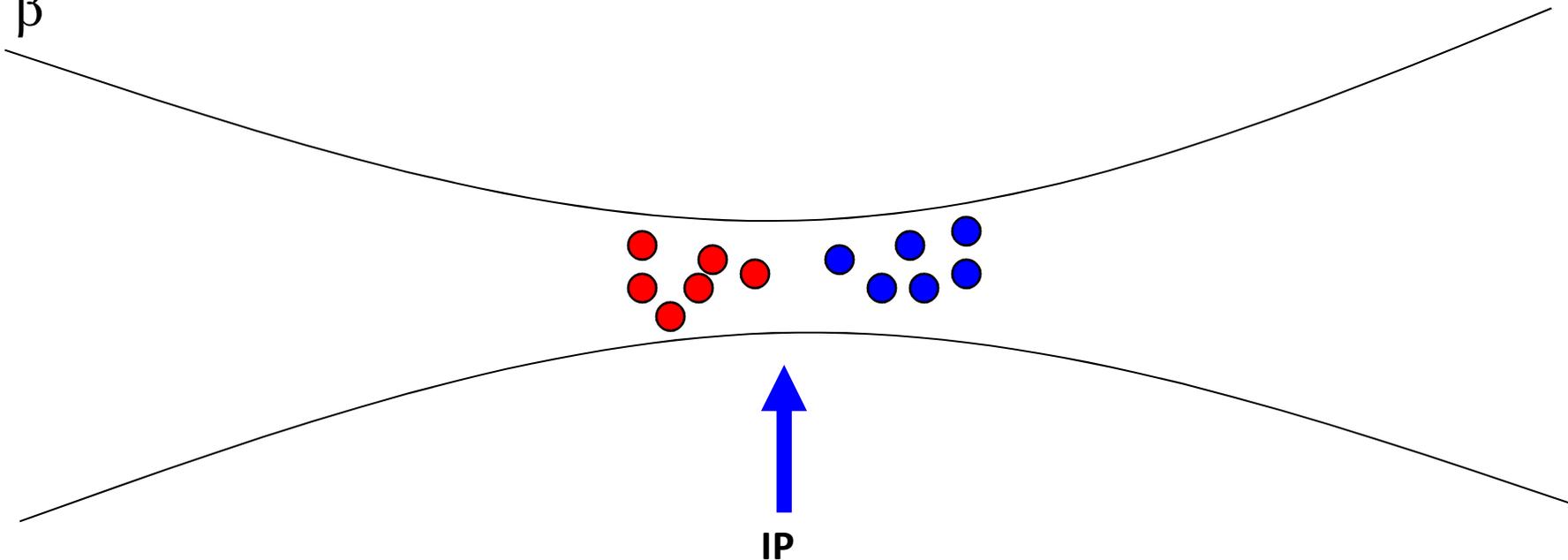
Luminosità di un *collider*

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

β

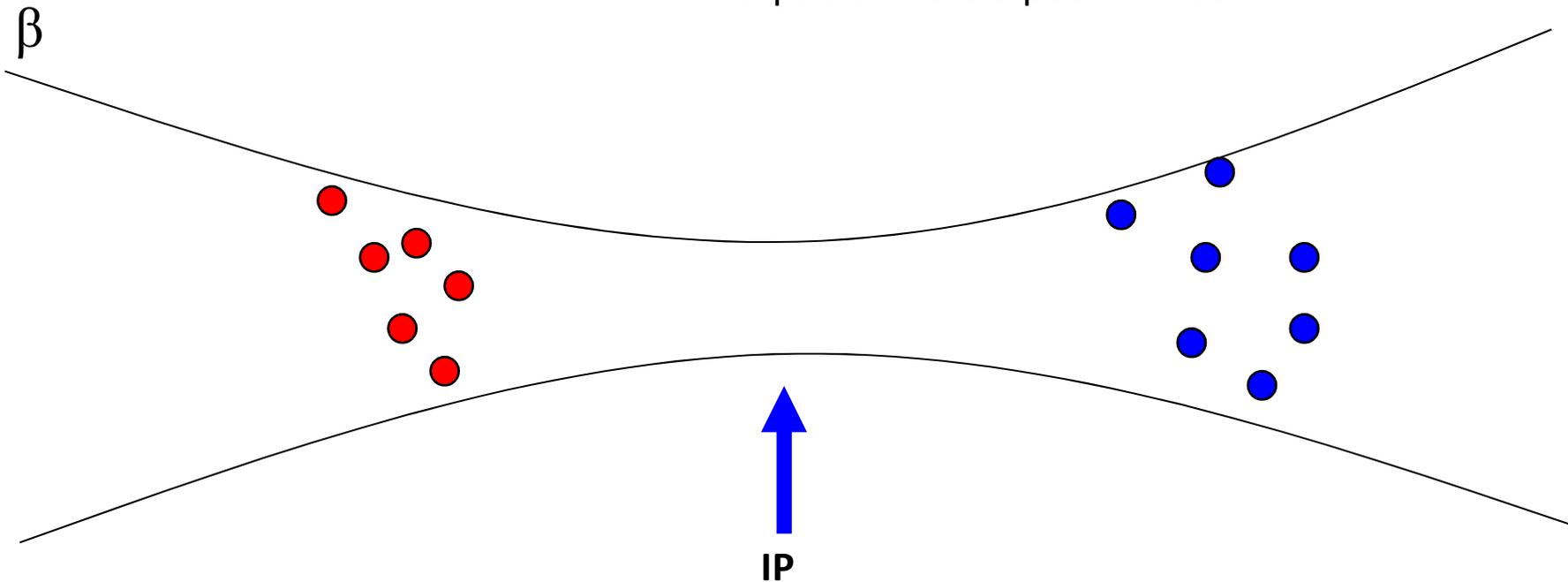


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

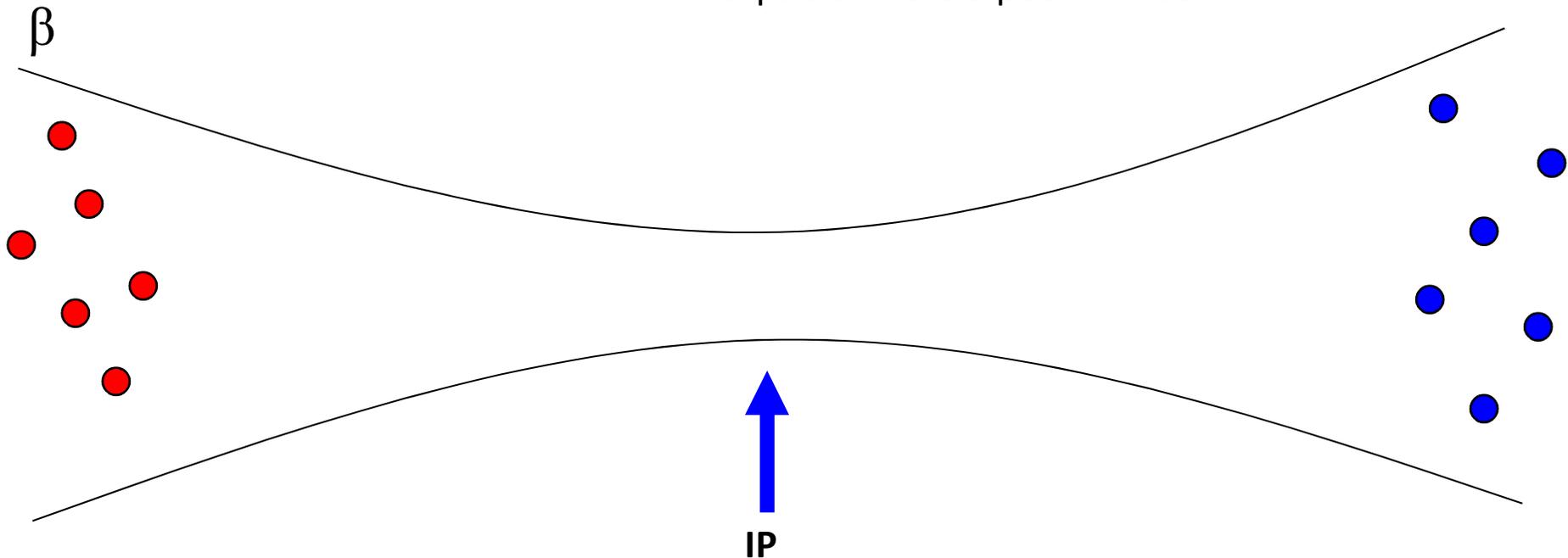


Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



Luminosità di un *collider*: esempio calcolo per DAΦNE

Produzione di Φ a DAΦNE

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

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

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

1 mm (pointing to σ_x)

10 μm (pointing to σ_y)

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



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

LEP (Large Electron Positron) CERN 1988-2001

LEP1

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

LEP2

1995 Installazione cavità superconduttrici E = 104 GeV

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



LHC (Large Hadron Collider) CERN

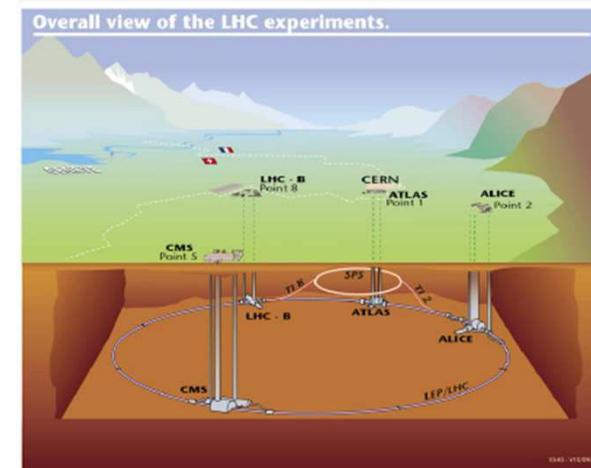
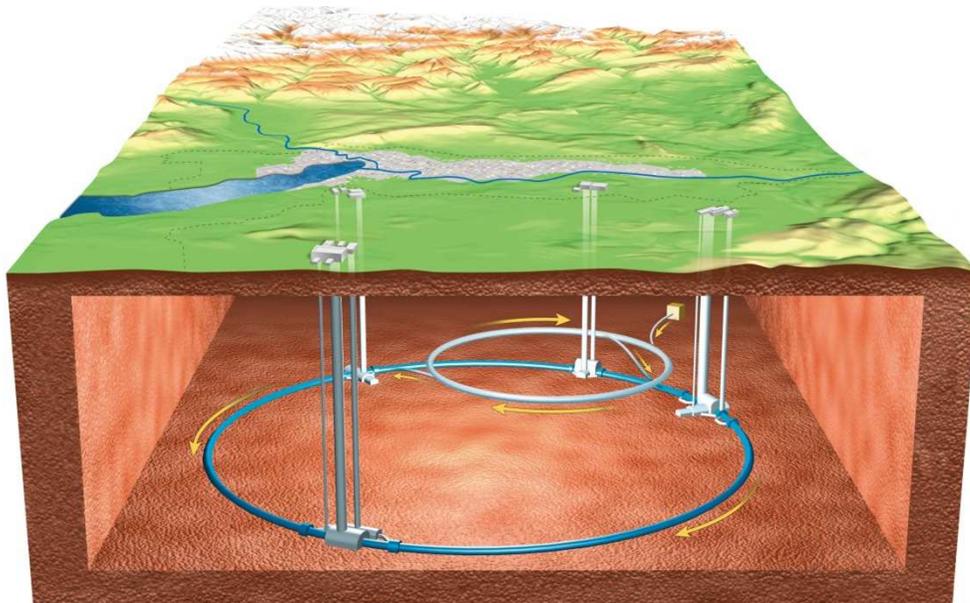
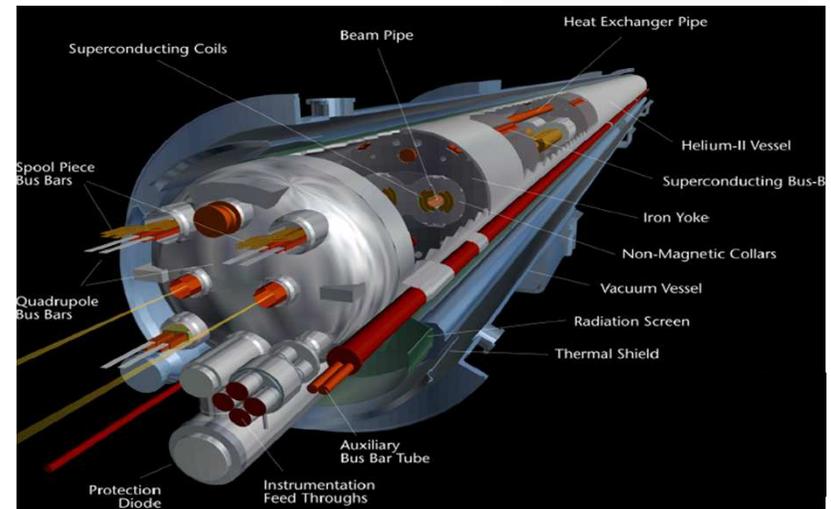
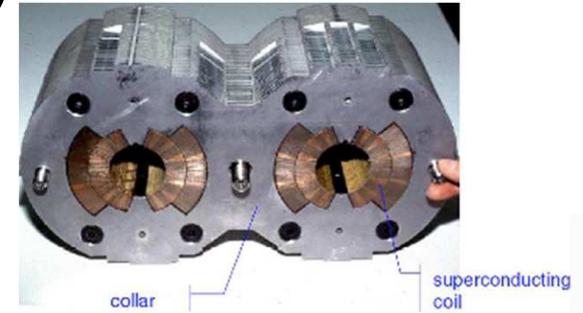
LHC parametri

particelle collidenti protoni-protoni e anche ioni (Pb - Pb)
 energia 7 TeV (massima per fascio)
 numero di pacchetti 2808
 angolo d'incrocio $300 \cdot 10^{-6}$ rad
 emittanza $5 \cdot 10^{-10}$ m
 $\sigma_x = \sigma_y$ $16 \cdot 10^{-6}$ m
 circonferenza 27.8 Km

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

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

$T = 1.9 \text{ °K}$



LHC (Large Hadron Collider) CERN

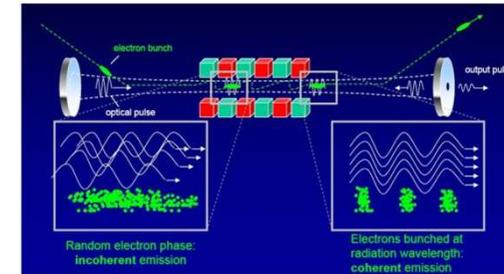
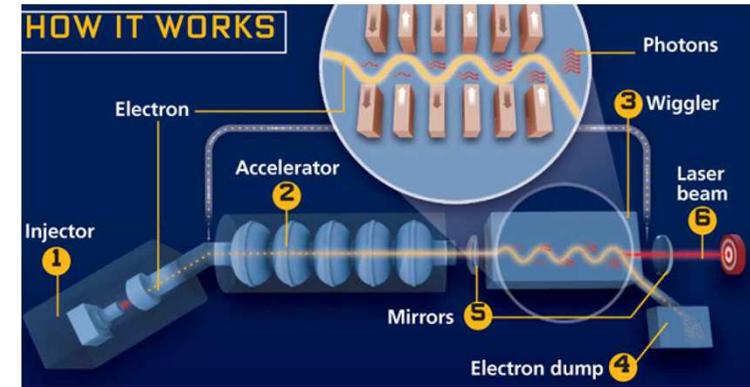
Ingresso dei dipoli criogenici nel tunnel di LHC





Altre applicazioni di acceleratori di particelle

Laser ad elettroni liberi: FEL



Medicina { *Radioterapia*
Adroterapia



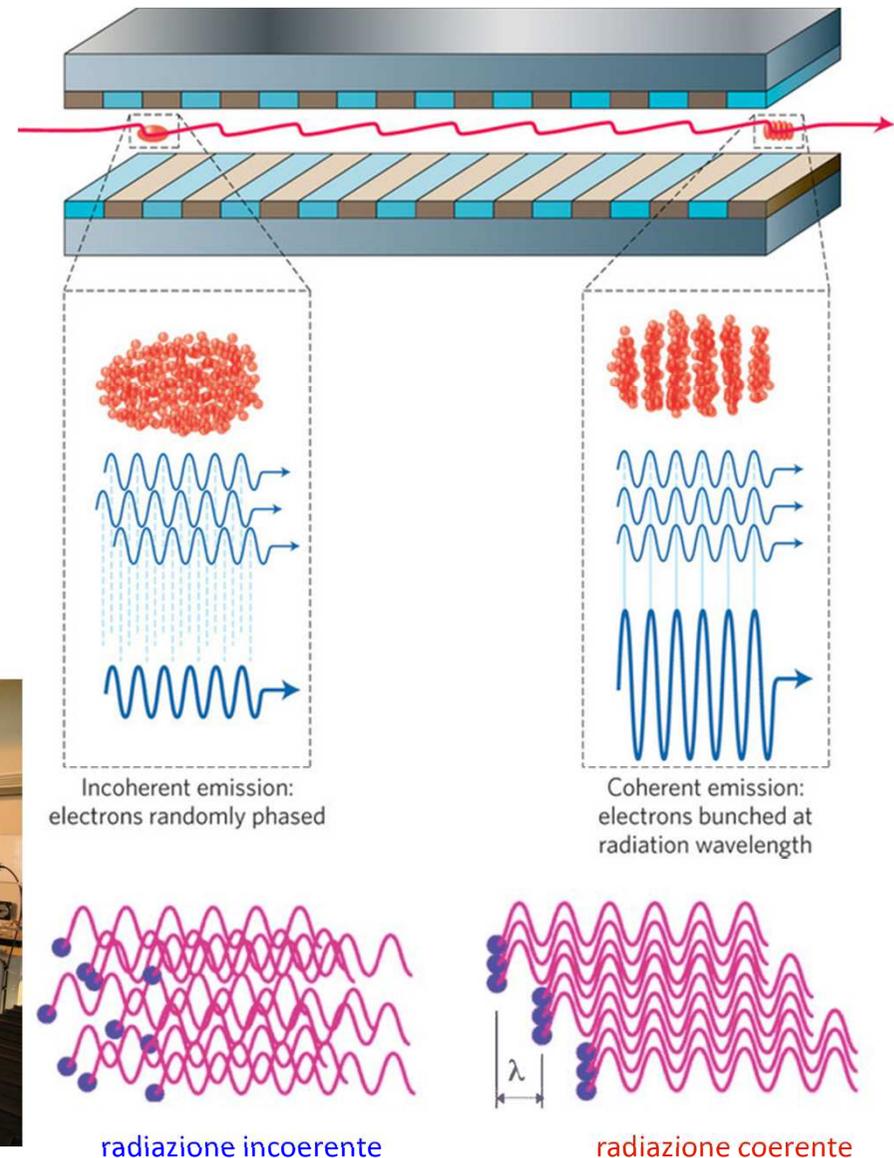
Laser ad elettroni liberi: *Free Electron Lasers (FEL)*

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

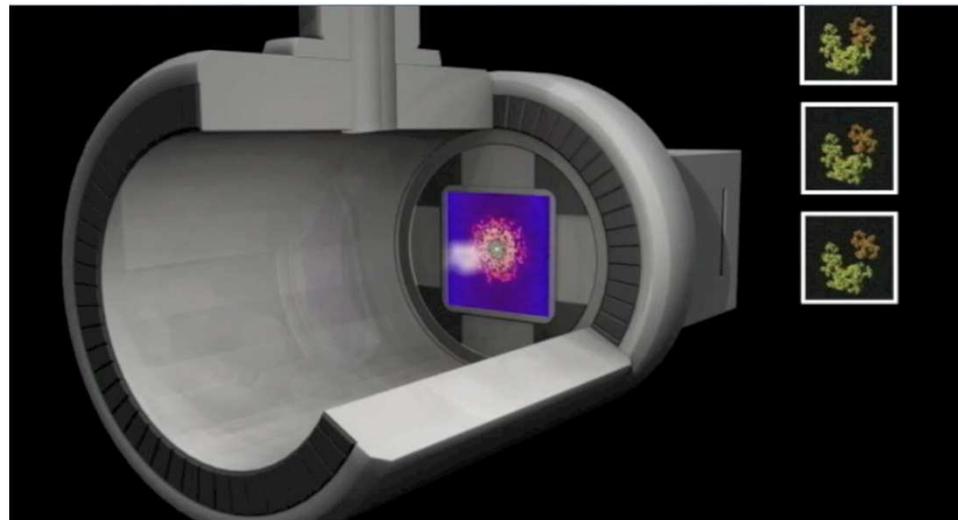
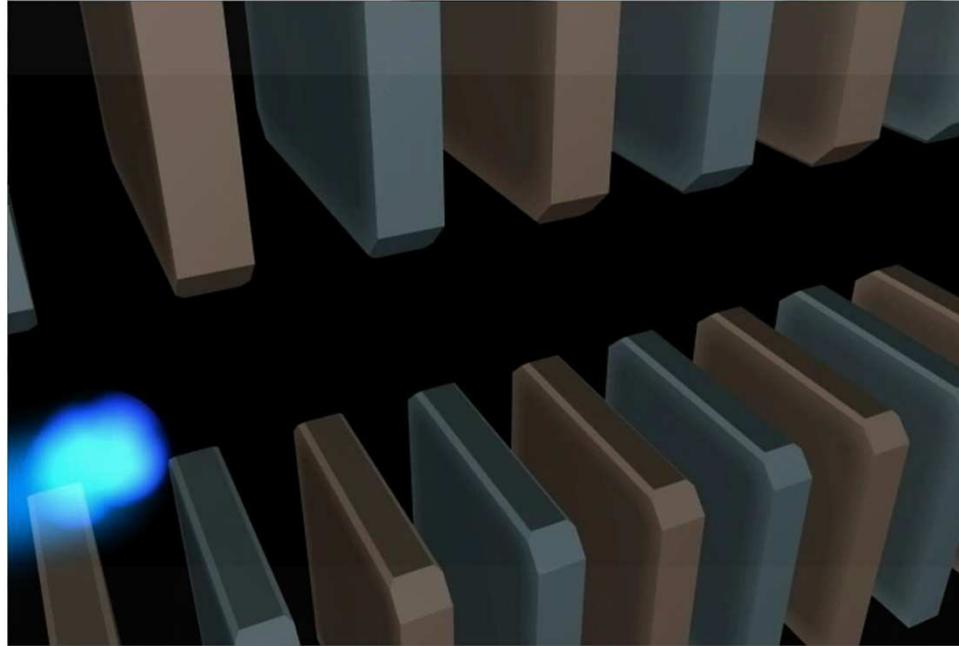
Un **LINAC ad e-** accelera **pacchetti** di elettroni di alta qualità (brillantezza) che, entrando nell'ondulatore, generano radiazione EM coerente, con un'amplificazione esponenziale.

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

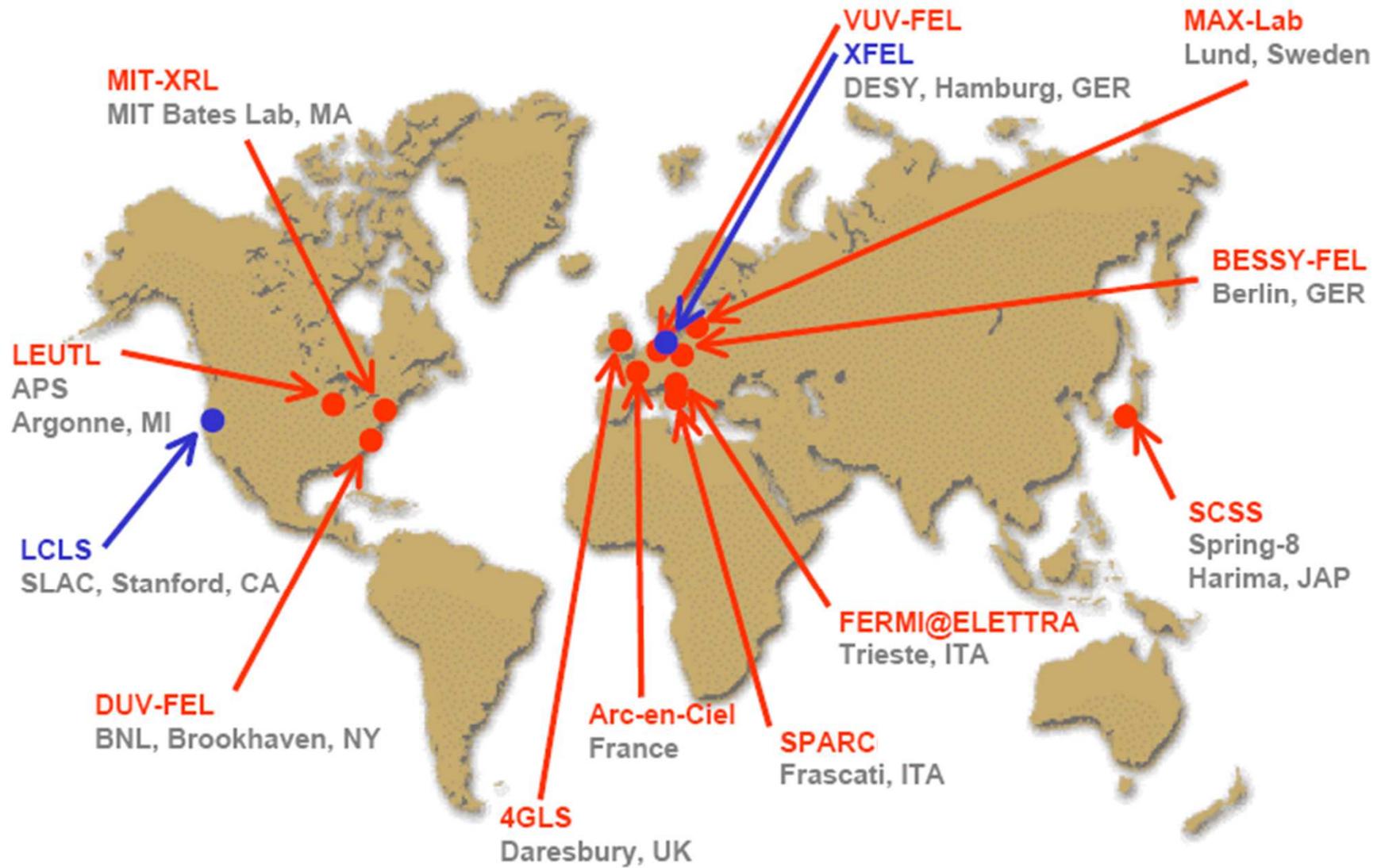
Tale tipo di radiazione ha enormi applicazioni poiché consente analisi di strutture anche non cristallizzate.



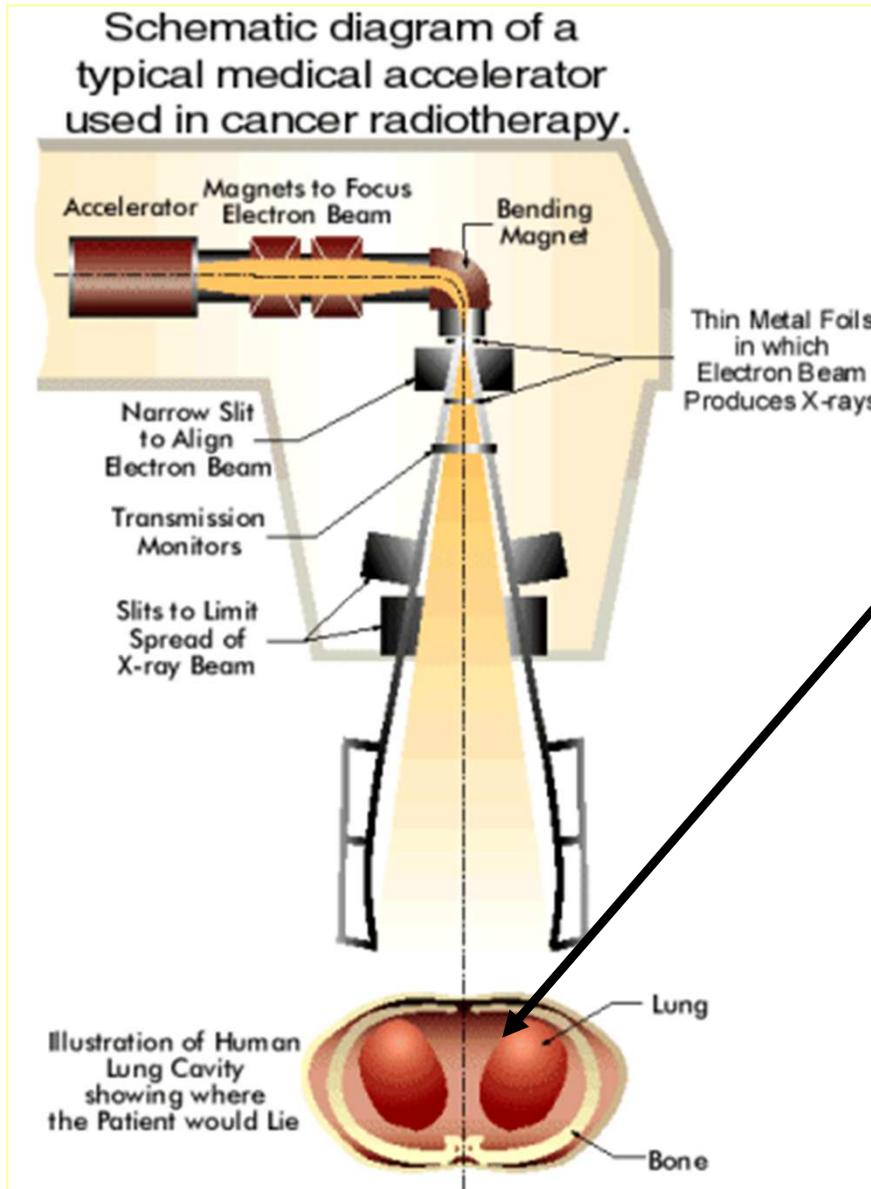
FEL: video



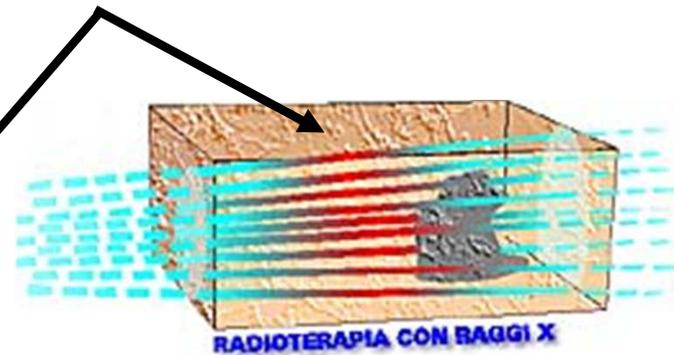
FEL nel mondo



Medicina: Radioterapia



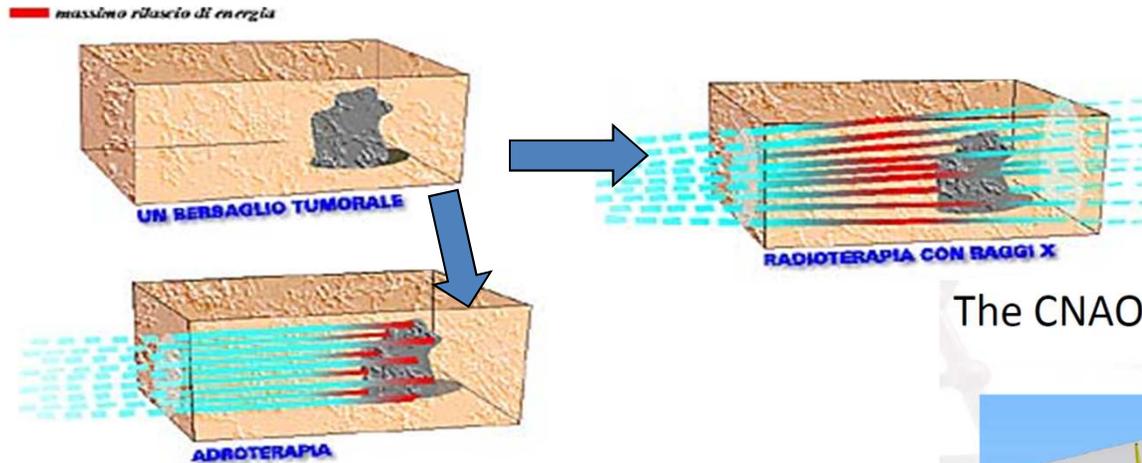
Radiazione su cellule tumorali:
molto localizzata, dose controllata.
I raggi X sono il trattamento per ora più usato.



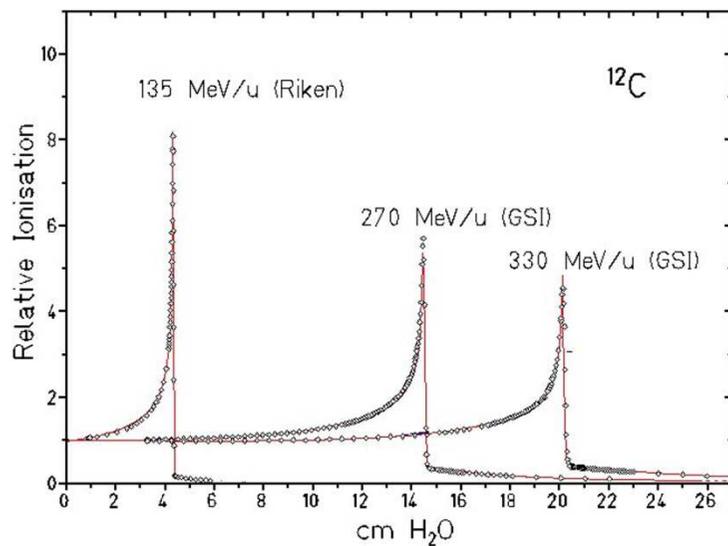
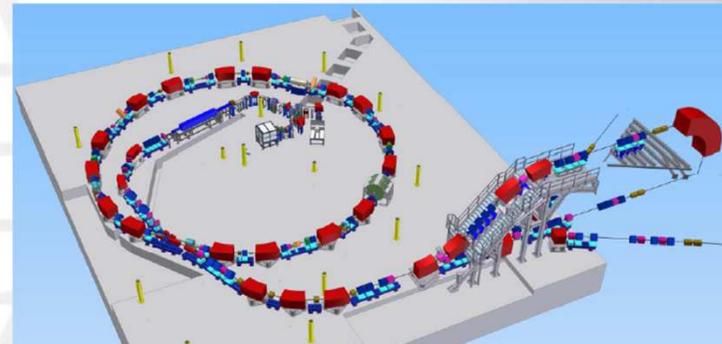
Medicina: Adroterapia

Terapia con protoni e ioni pesanti più efficace e più localizzata (risonanza di Bragg)
Centri in funzione: CNAO a Pavia, PSI a Zurigo, Loma Linda in California, Giappone,...

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



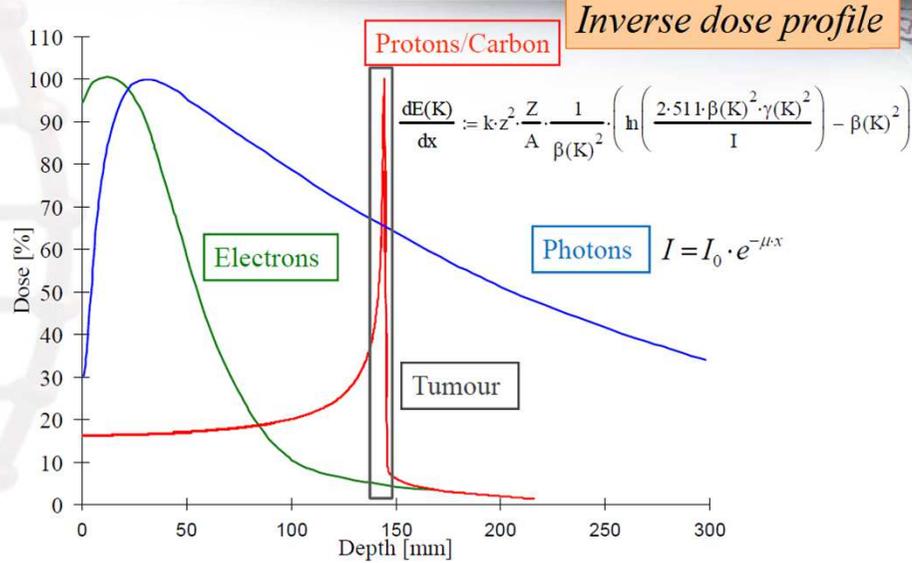
The CNAO accelerator and lines



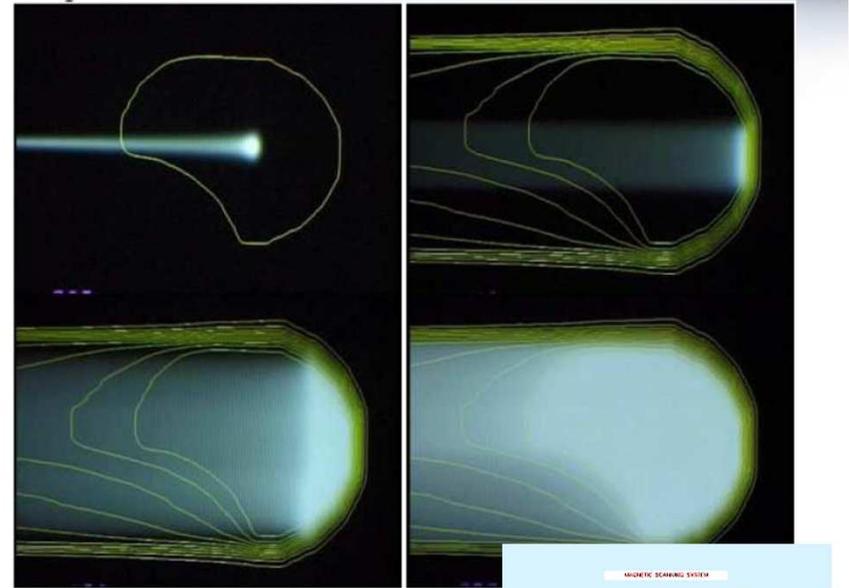
Courtesy M. Pullia

Adroterapia: controllo attivo della dose

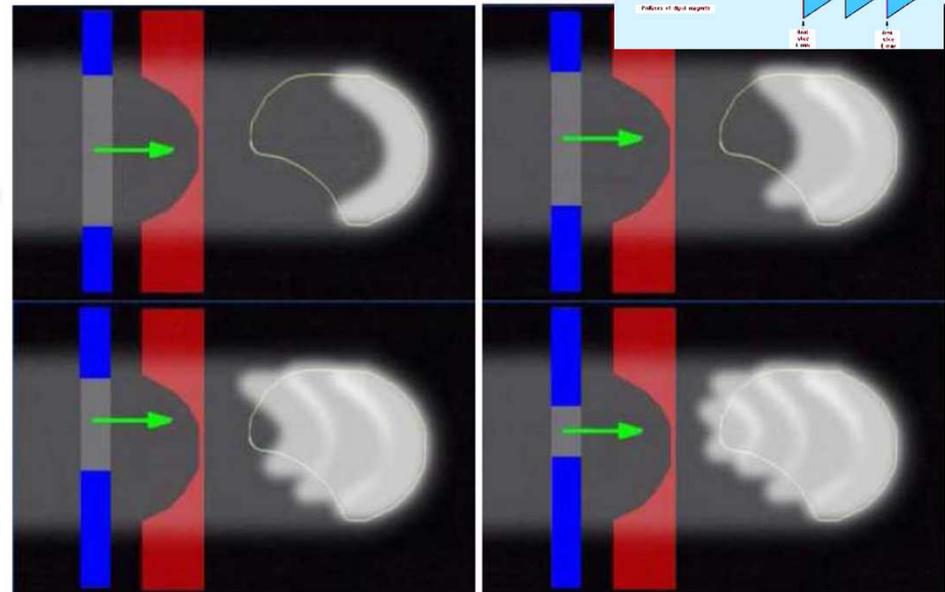
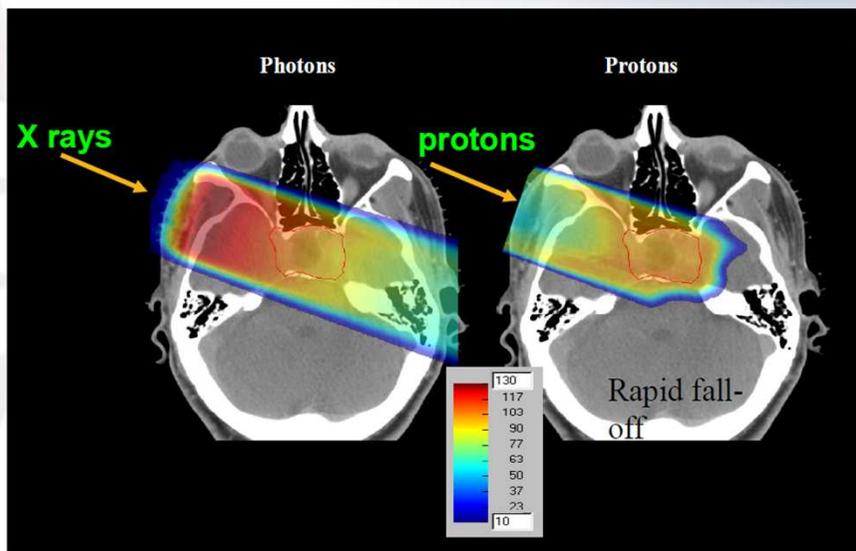
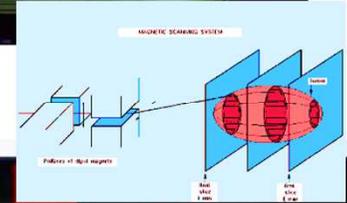
Comparison of the depth dose profiles



Courtesy M. Pullia



(Courtesy of E. Pedroni)



Frontiere nell'accelerazione: acceleratori a plasma

RF Cavity



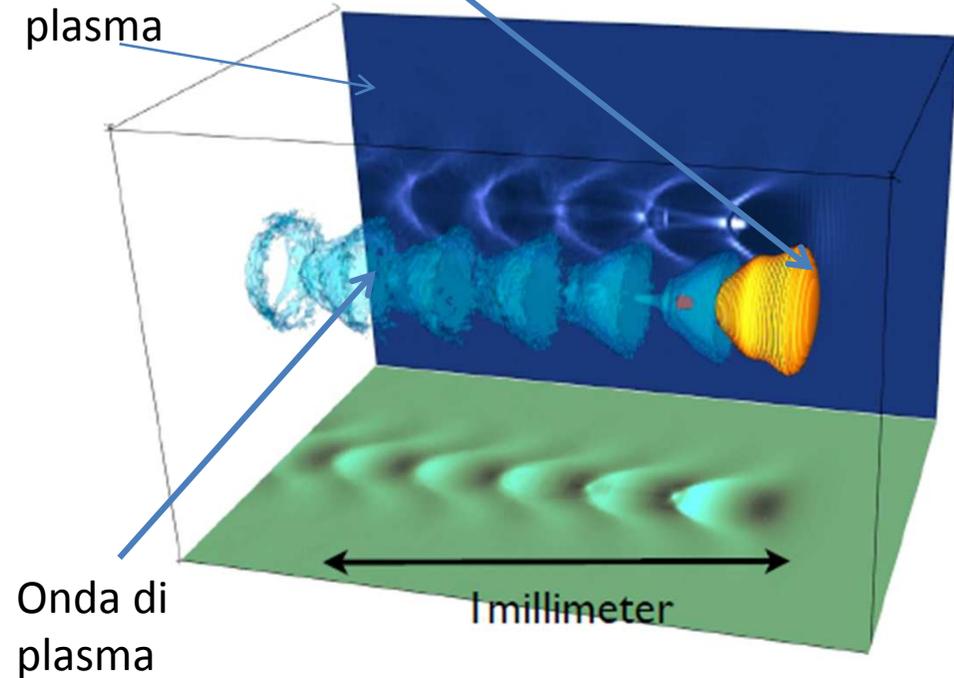
1 meter

Campo elettrico < 100 MV/m

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

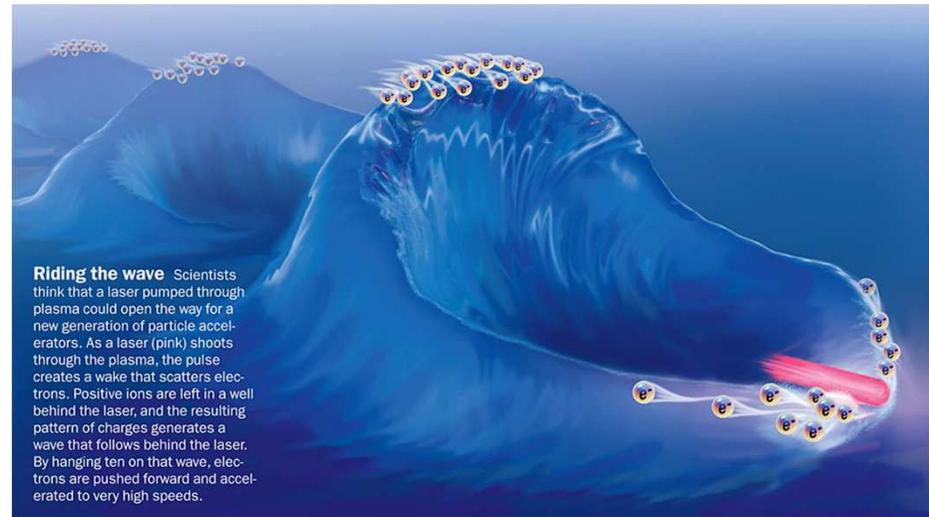
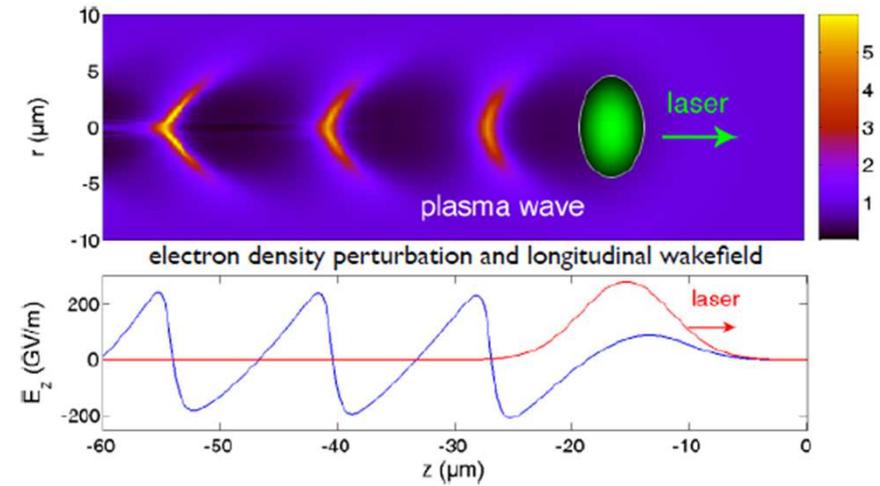
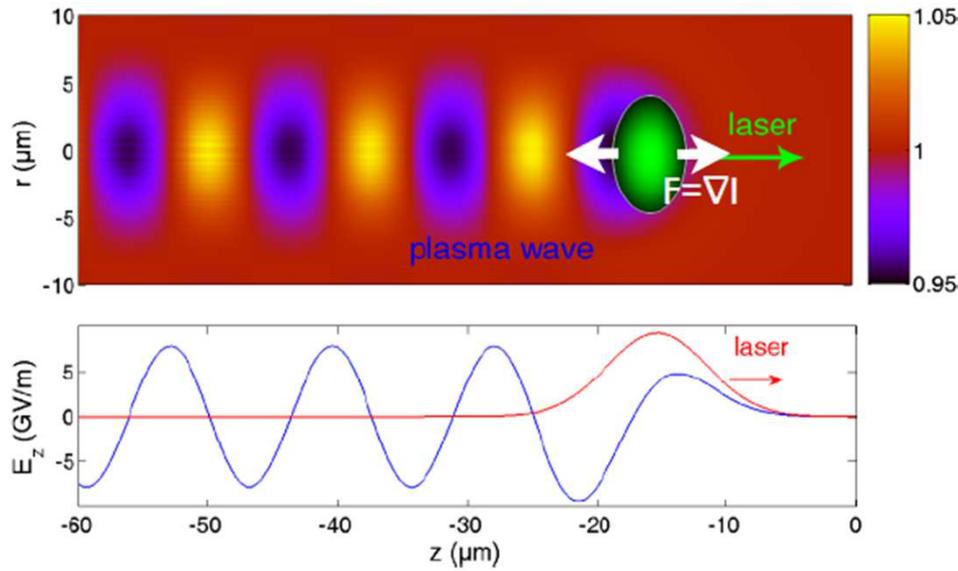
Impulso laser o pacchetto di elettroni che genera l'onda di plasma

Plasma Cavity

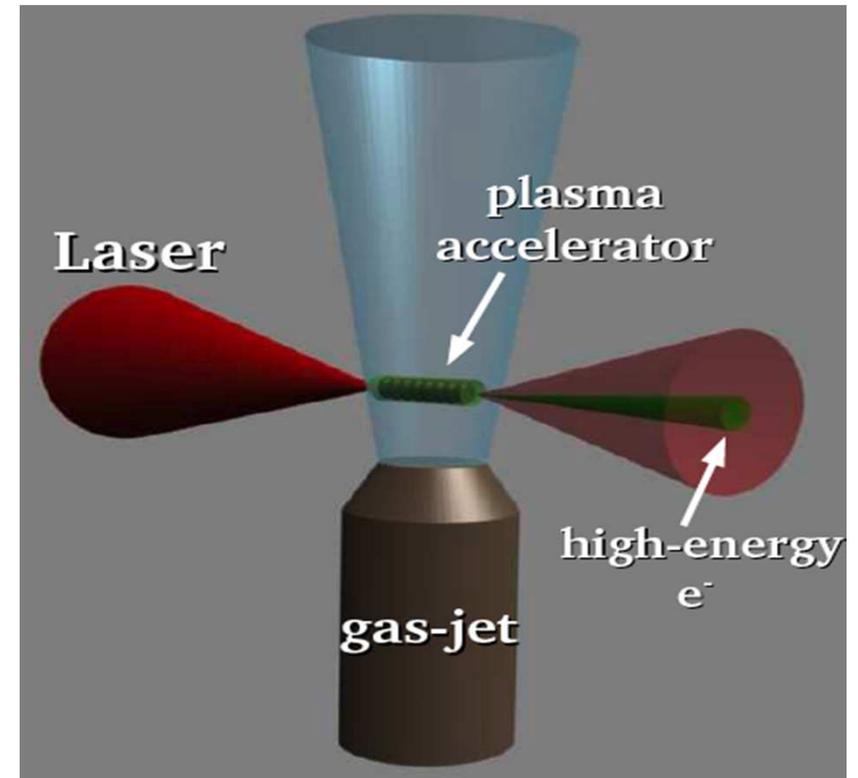
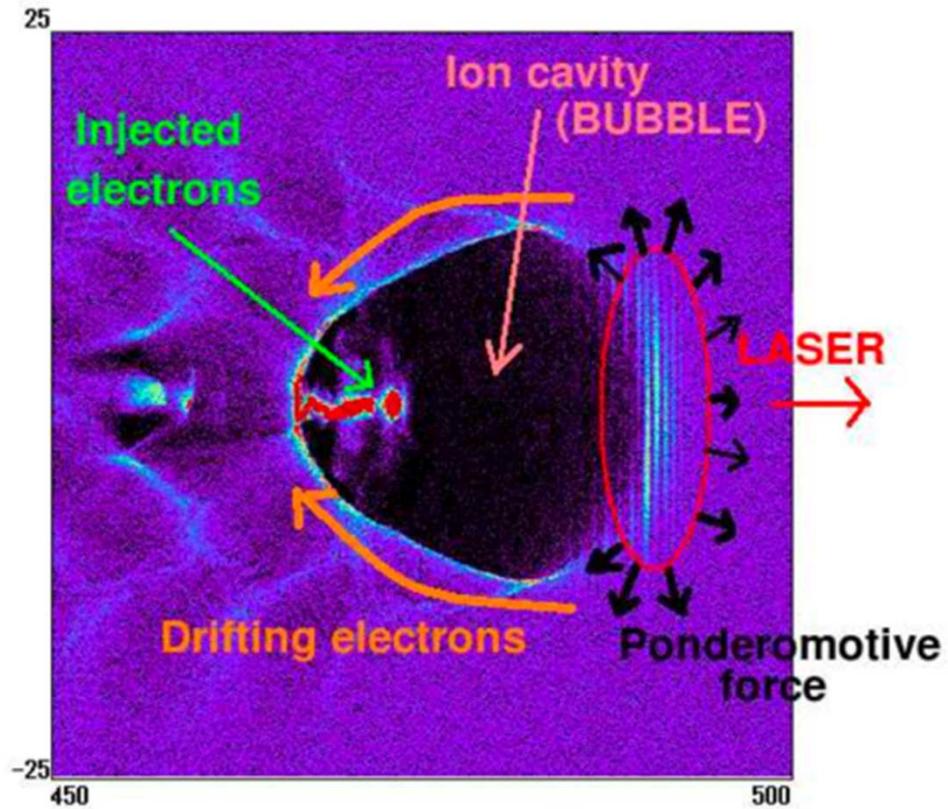


Negli acceleratori al plasma, un'onda di plasma viene generata da un *impulso laser* (o da un *pacchetto di elettroni*) che attraversa il plasma stesso. Nell'onda di plasma si possono raggiungere campi superiori ai 100 GV/m

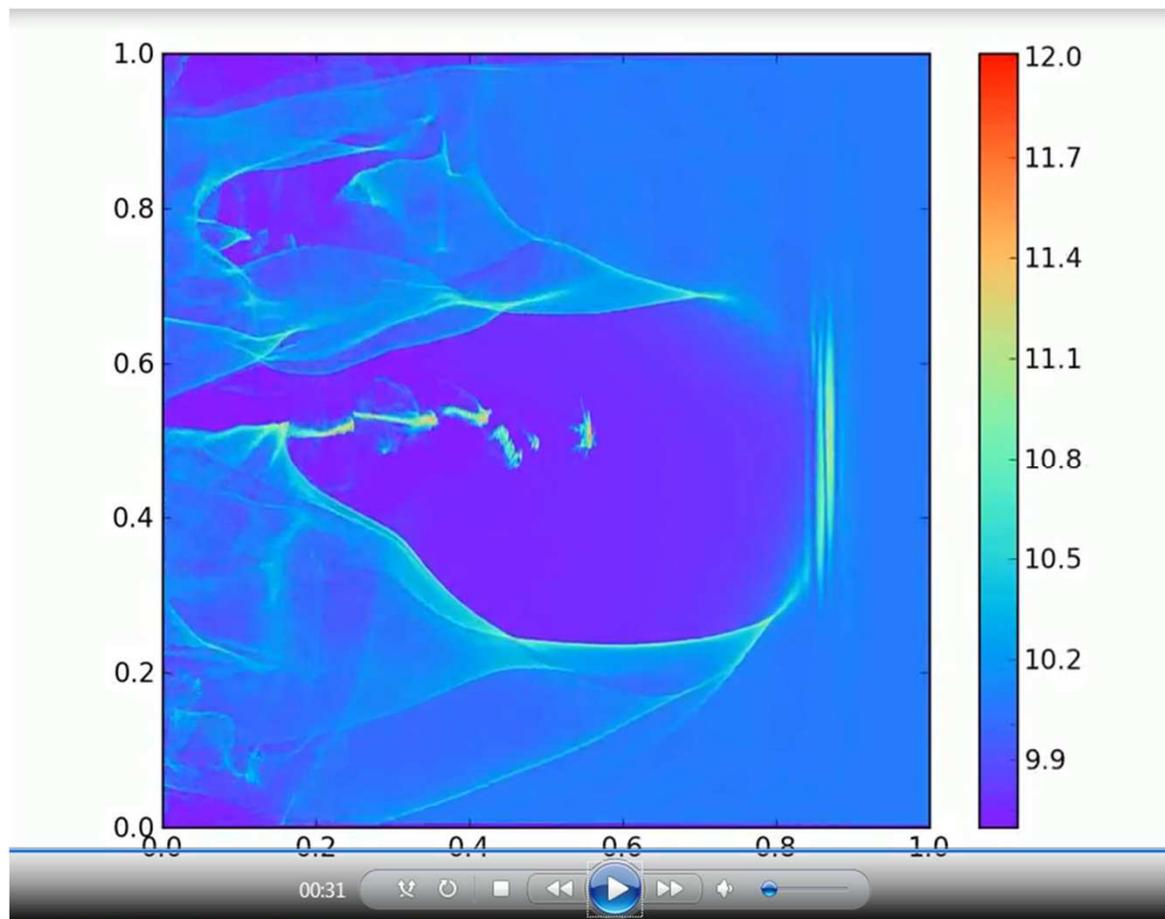
Accelerazione al plasma: possibili regimi



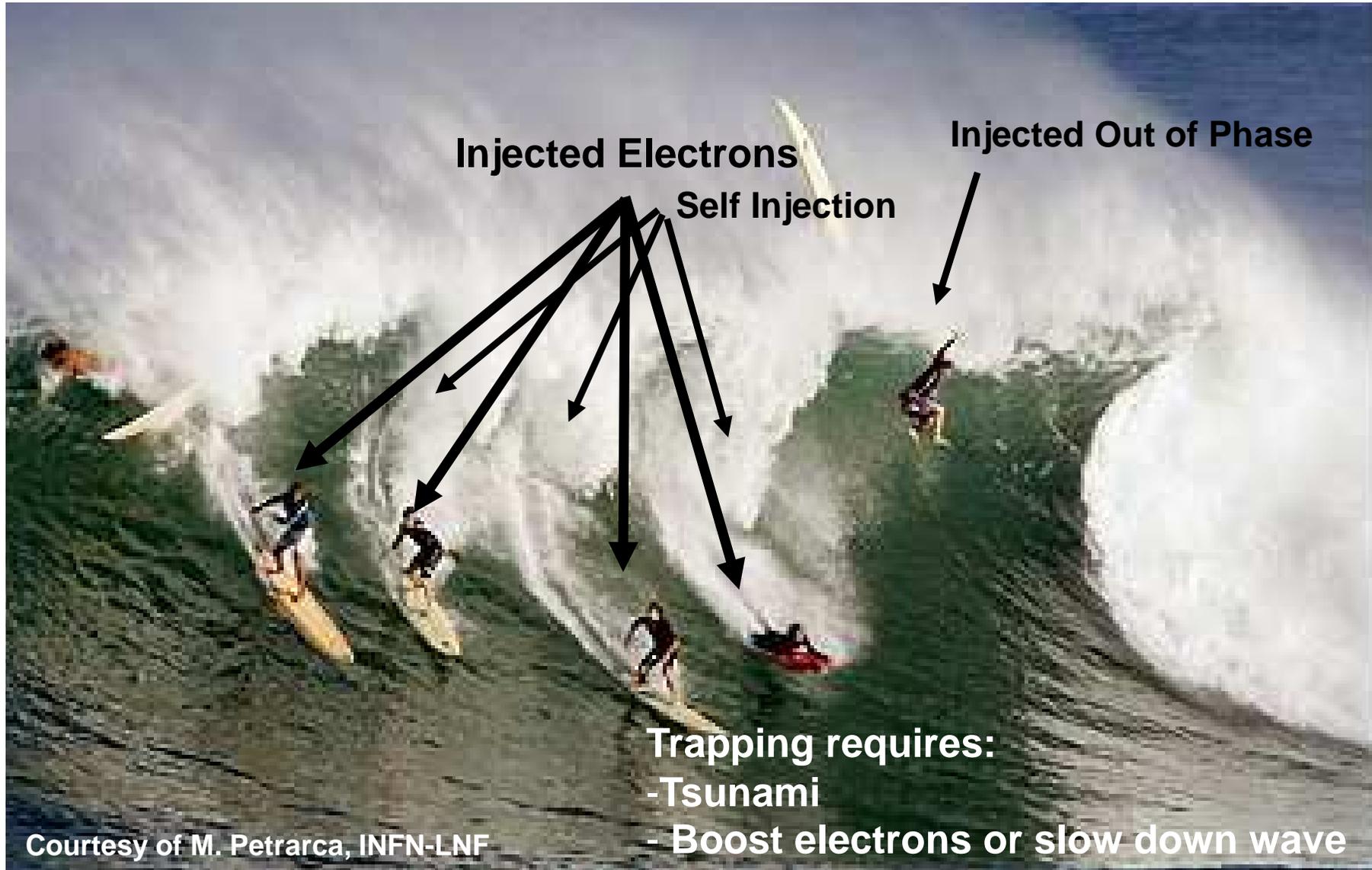
Accelerazione al plasma: possibili regimi



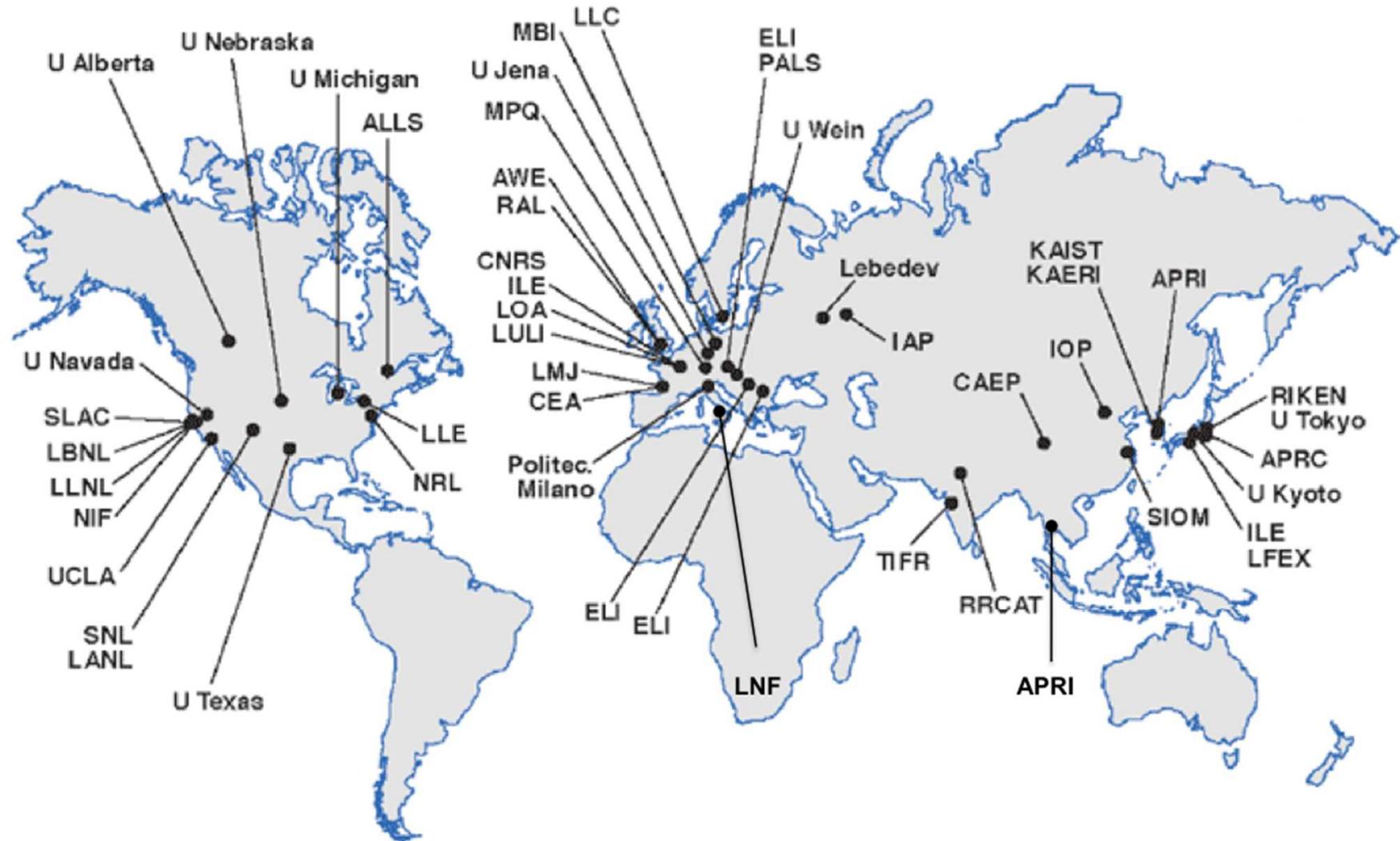
Video: Accelerazione al plasma



Accelerazione al plasma

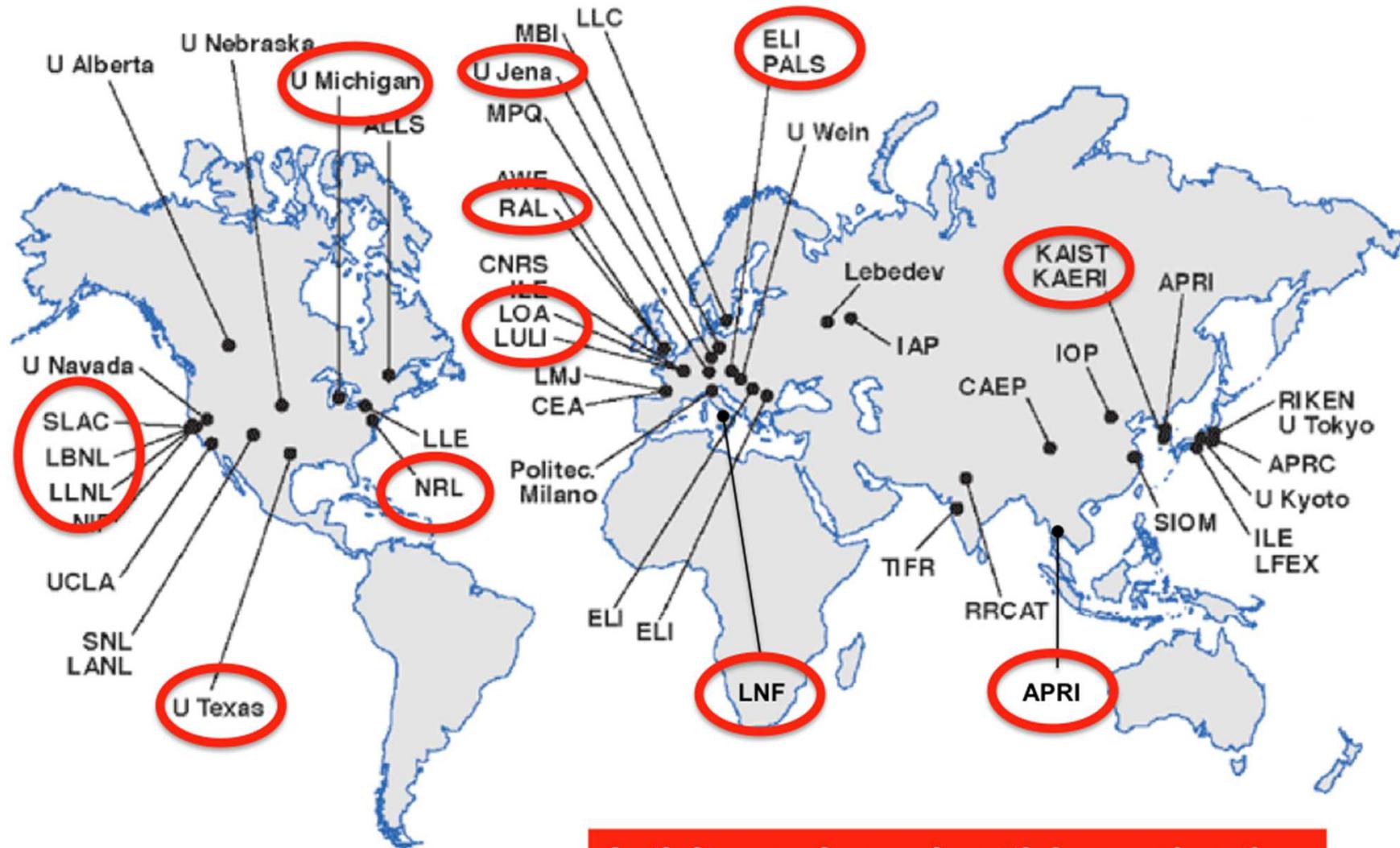


ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



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

ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



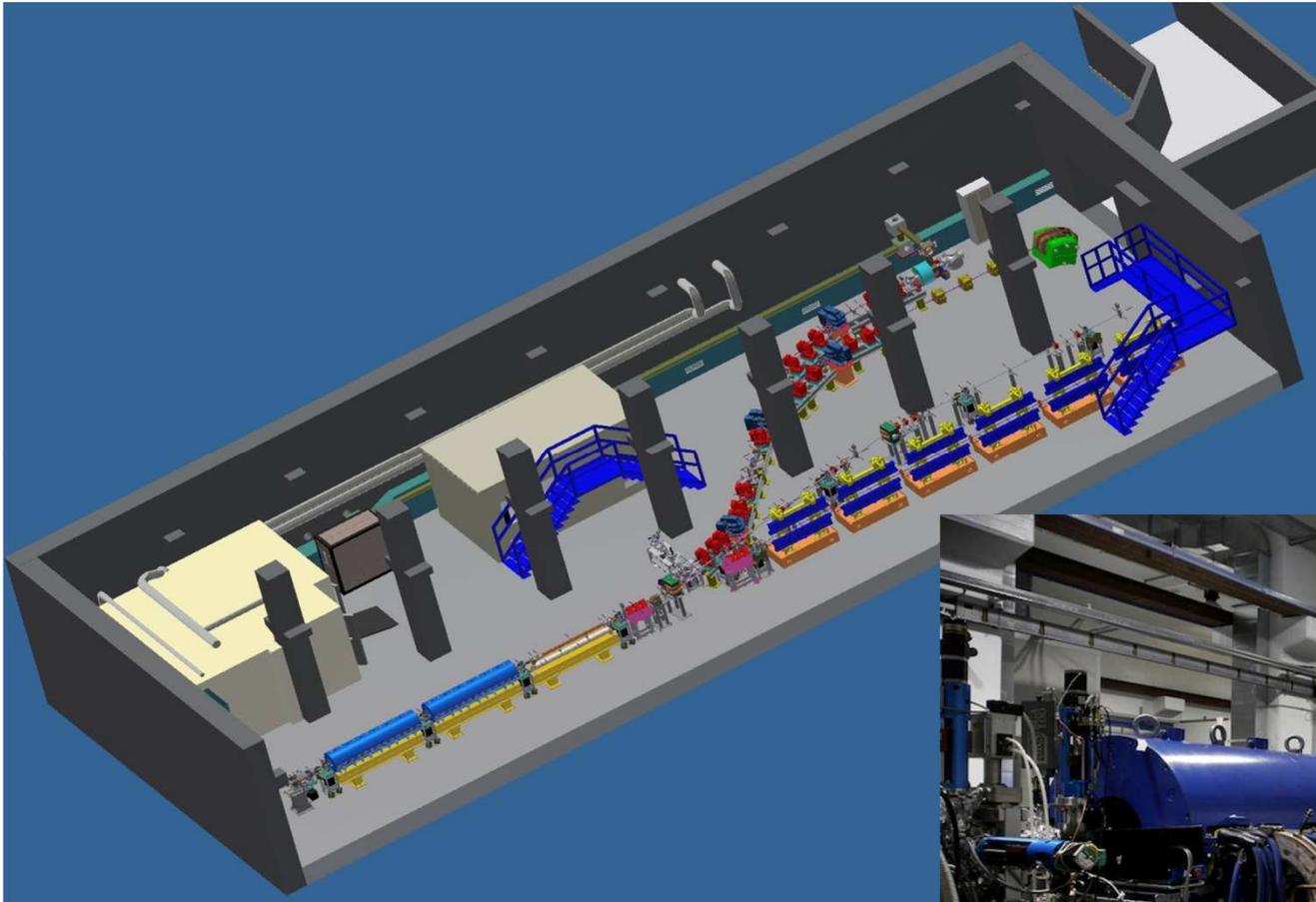
<http://www.icuil.org/>

Activity on charged particle acceleration

SPARC_LAB @LNF

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

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



Alcuni link Bibliografici

Scuole acceleratori

CERN Accelerator School:

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

JUAS

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

USPAS

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

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

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

Animazione LINAC SLAC

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

Ringrazio...

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

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

... e voi per la vostra attenzione!!