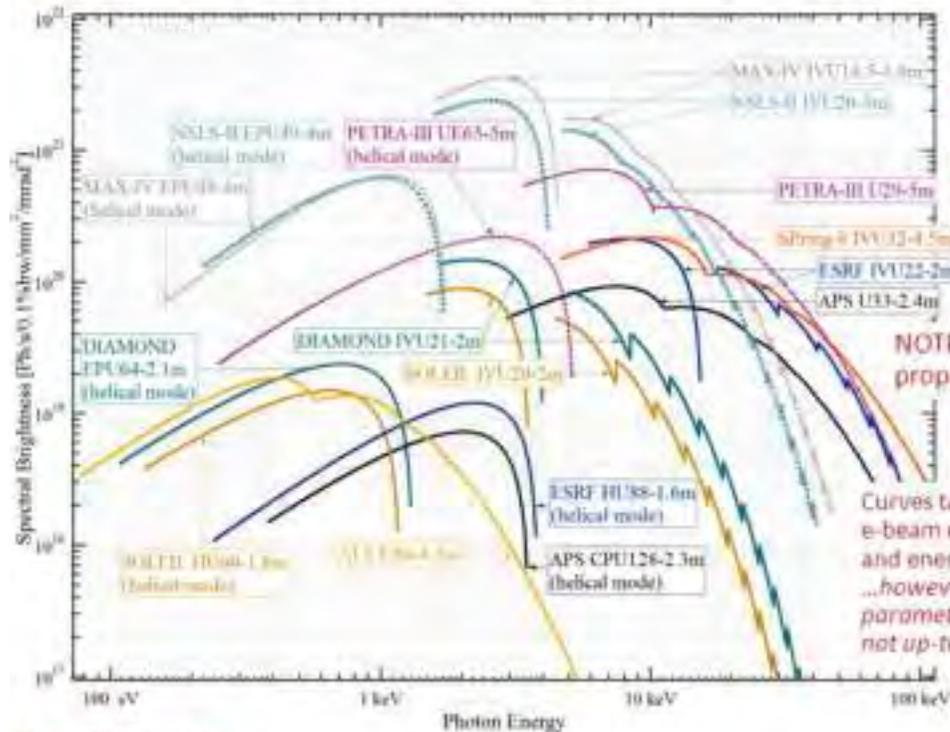
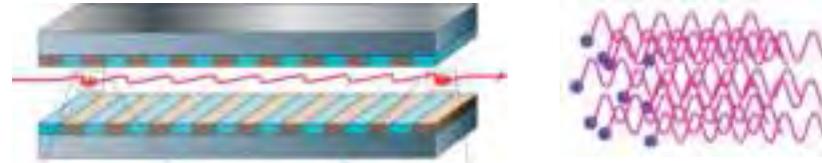
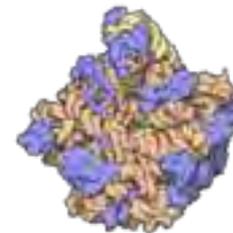
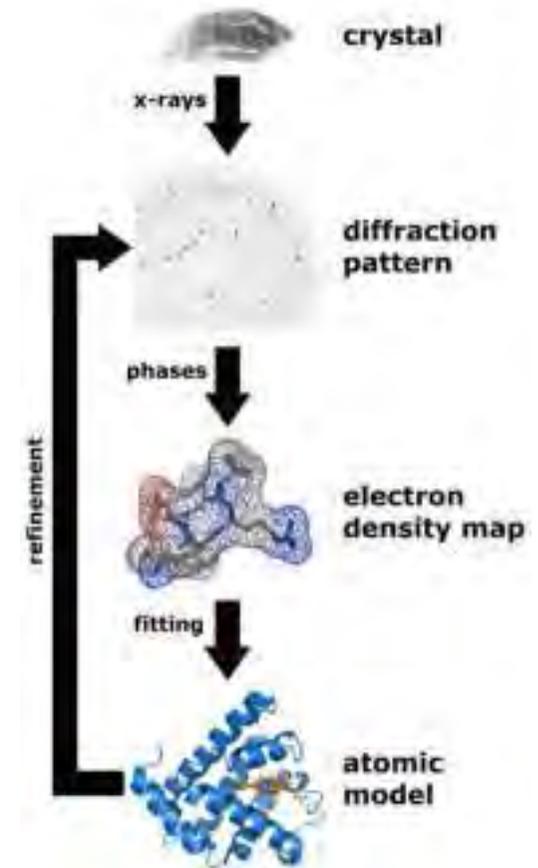


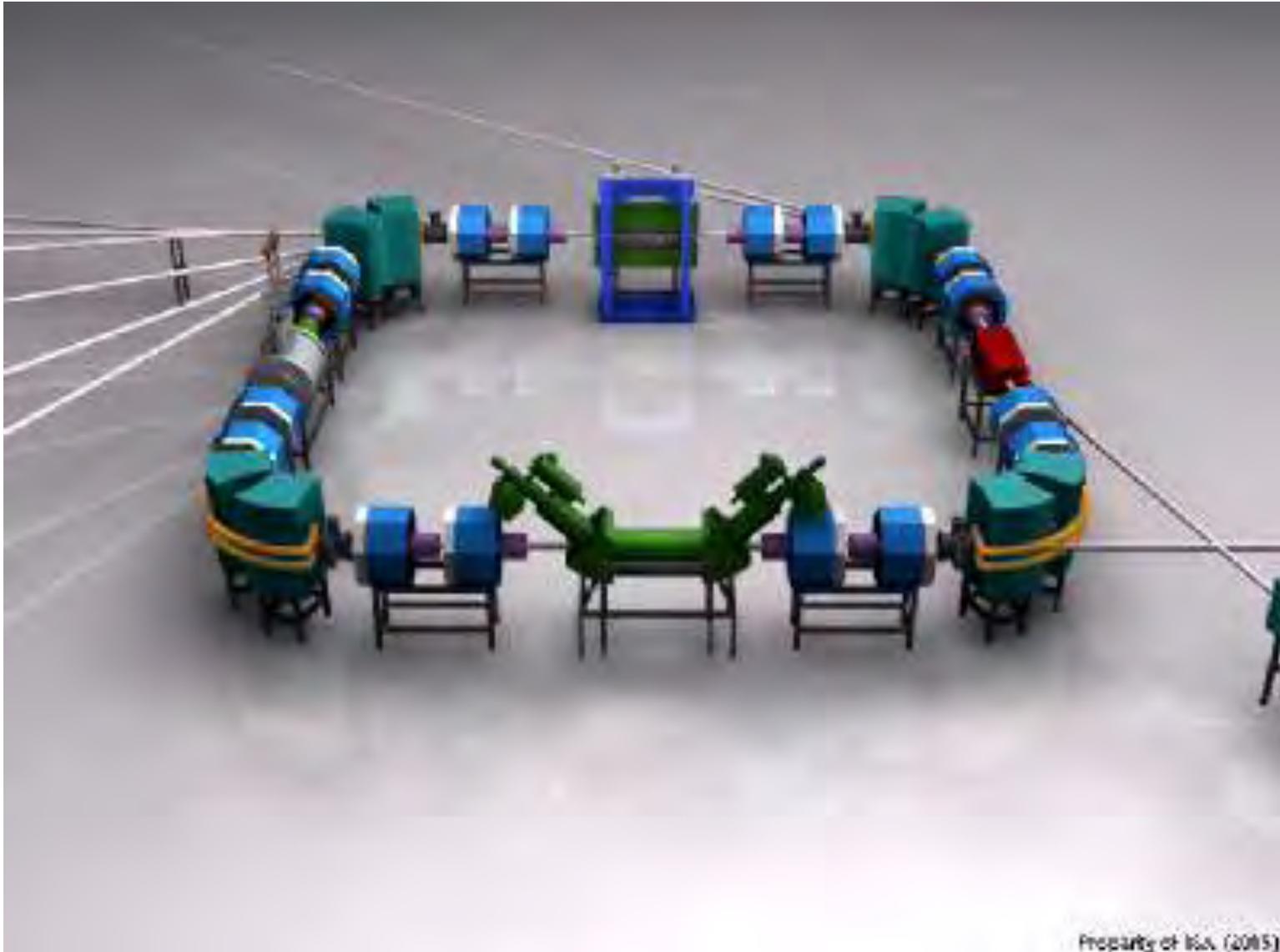
# PROPRIETA' DELLA RADIAZIONE DI SINCROTRONE

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



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





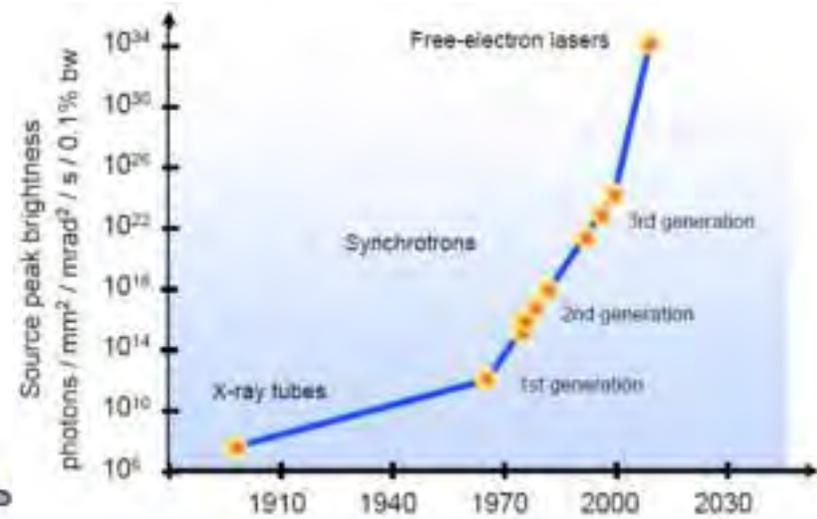
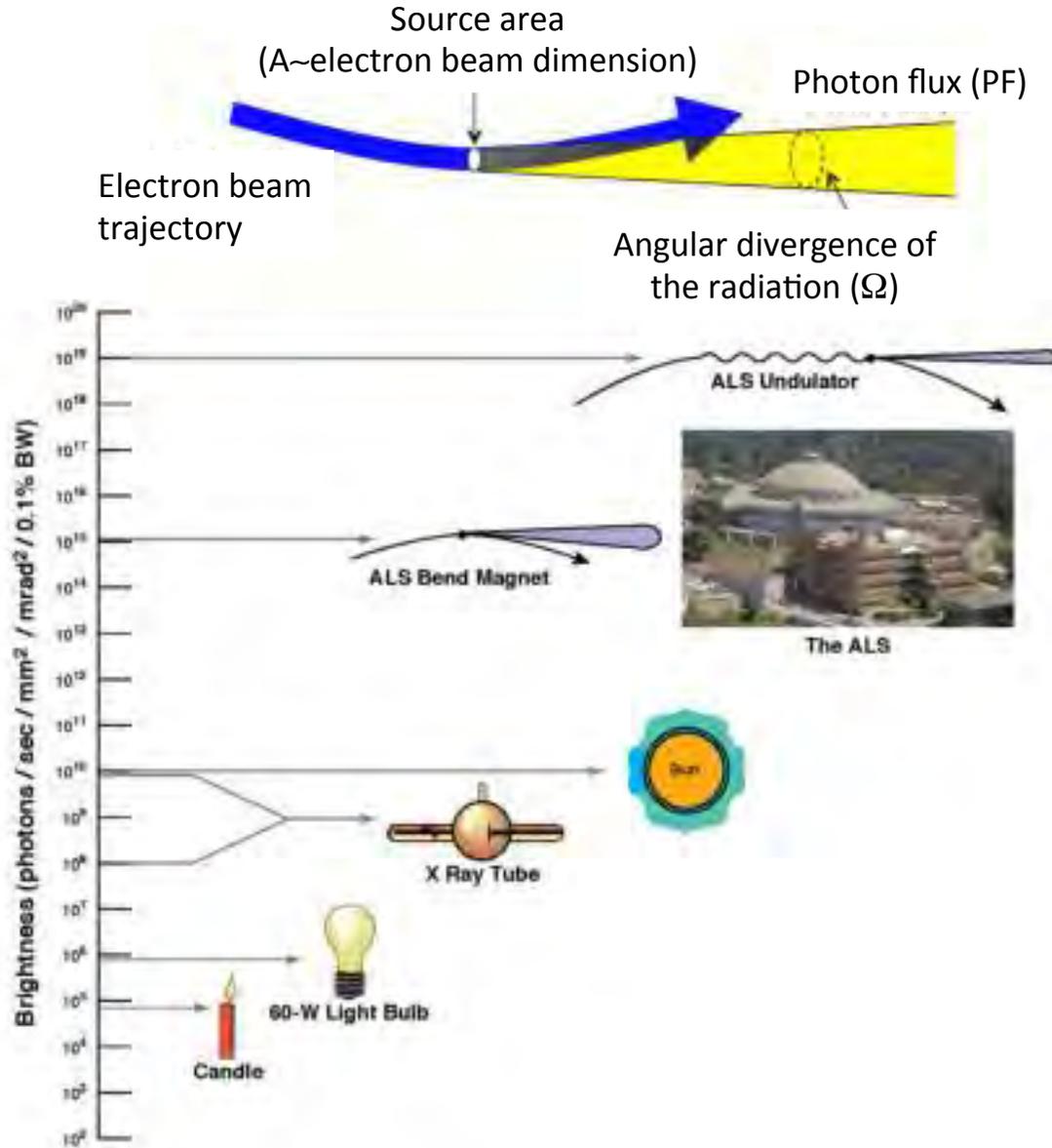
<http://www.isa.au.dk/animations/animations.asp>

# SINCROTRONI DEDICATI ALLA “PRODUZIONE” DI LUCE



# BRIGHTNESS OF A PHOTON SOURCE

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



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

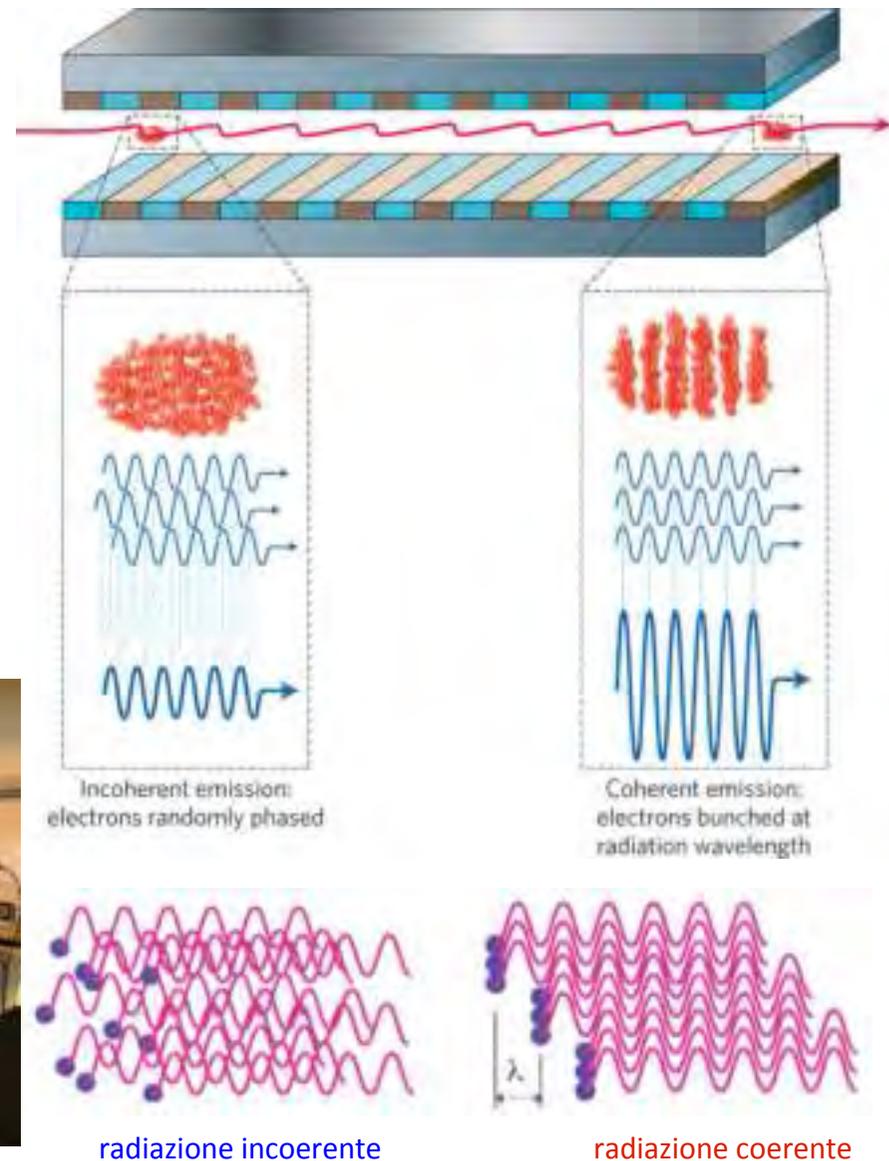
# Laser ad elettroni liberi: *Free Electron Lasers (FEL)*

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

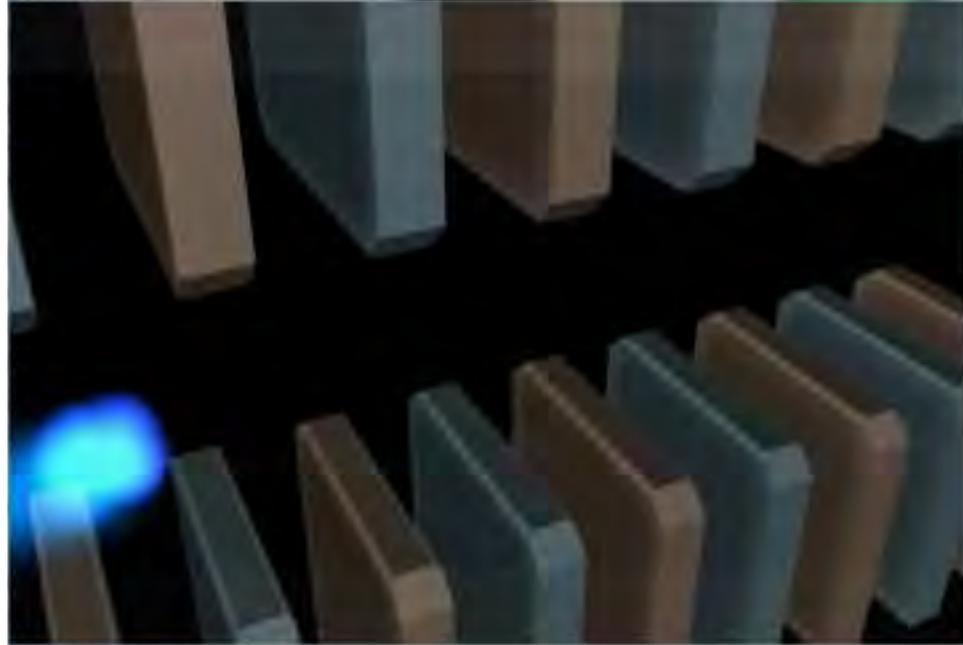
Un **LINAC ad e-** accelera **pacchetti** di elettroni di alta qualità (brillantezza) che, entrando nell'ondulatore, generano radiazione EM coerente, con un'amplificazione esponenziale.

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

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



# FEL: video



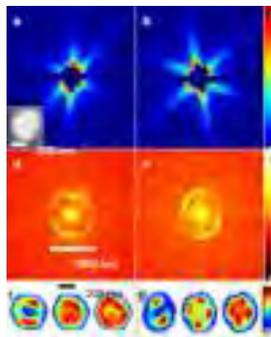
# FEL: RADIAZIONE COERENTE ED IMPULSI ULTRA-CORTI

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

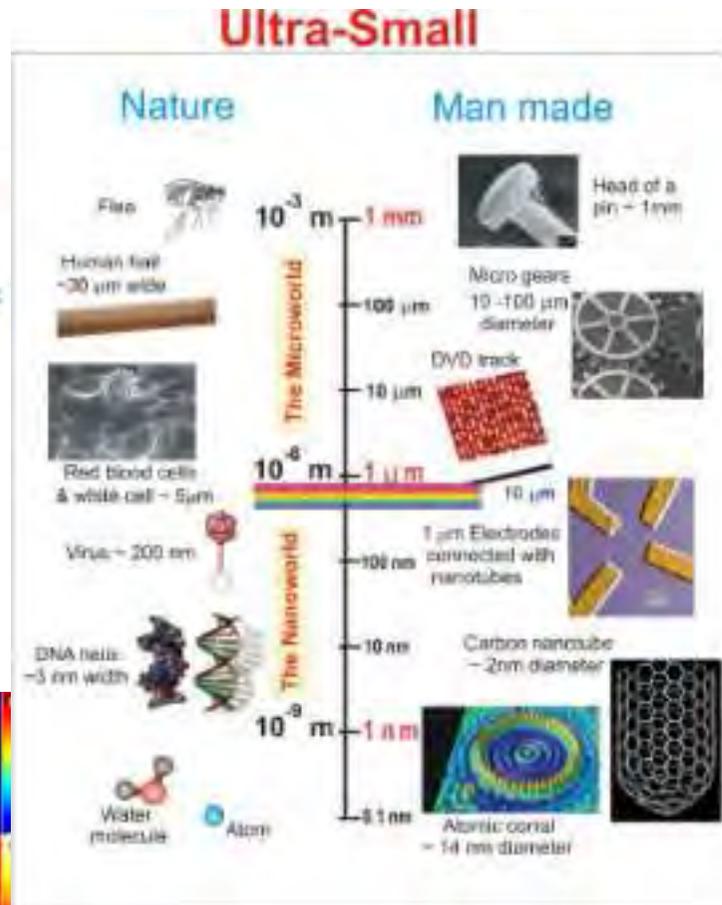
⇒con i FEL è possibile generare **impulsi ultra-corti** (fs) con cui è possibile «filmare» movimenti di molecole, passaggi di carica etc...



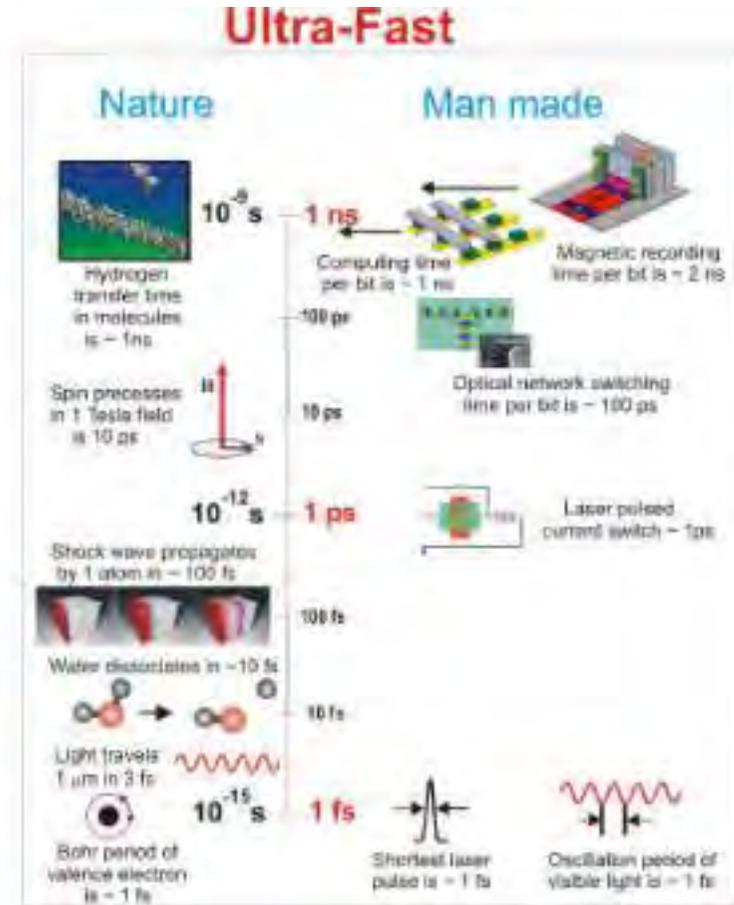
Inhibited Trypanosoma brucei Cathepsin B Structure Determined by Using an Xray Laser, L. Redecke et al. Science 339, 227 (2013)



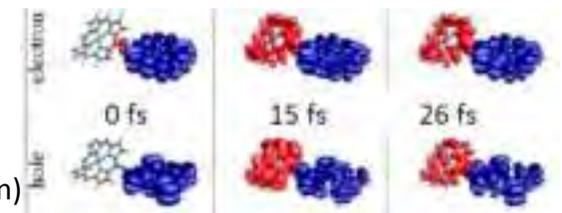
Imaging single mimivirus Seibert et al, Nature, 470, 78 (2011)



Courtesy C. Pellegrini and J. Stohr



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



# FEL nel mondo



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



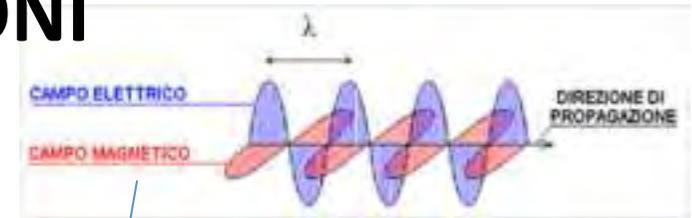
# SORGENTI DI RAGGI X E $\gamma$ BASATE SU COLLISIONI ELETTRONI-FOTONI



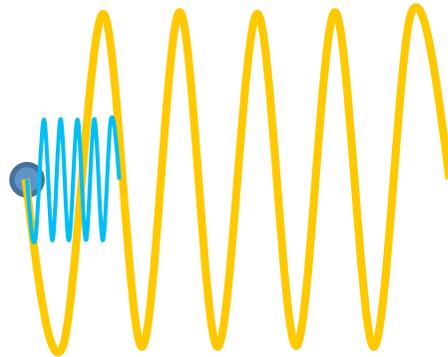
Sorgente di elettroni



LINAC (100-800 MeV)



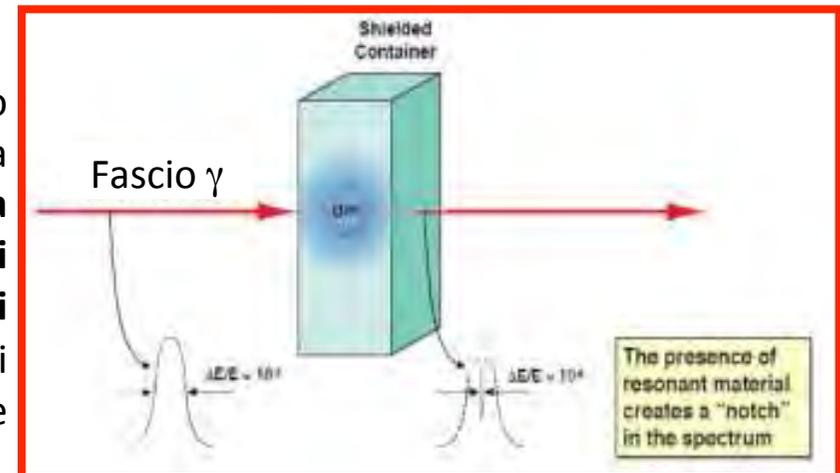
LASER



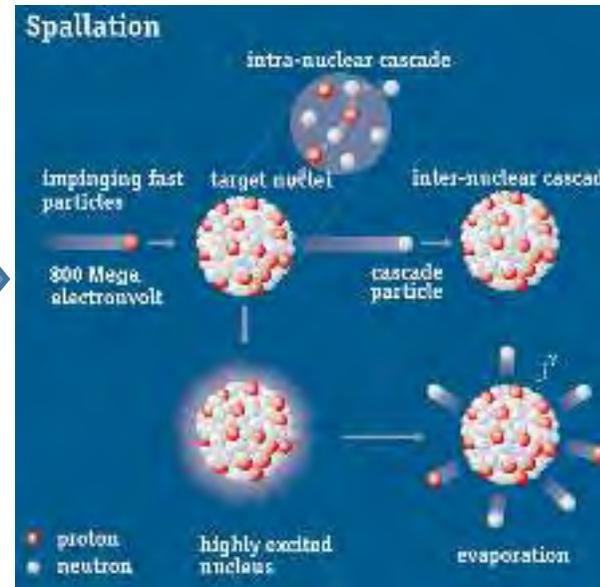
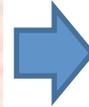
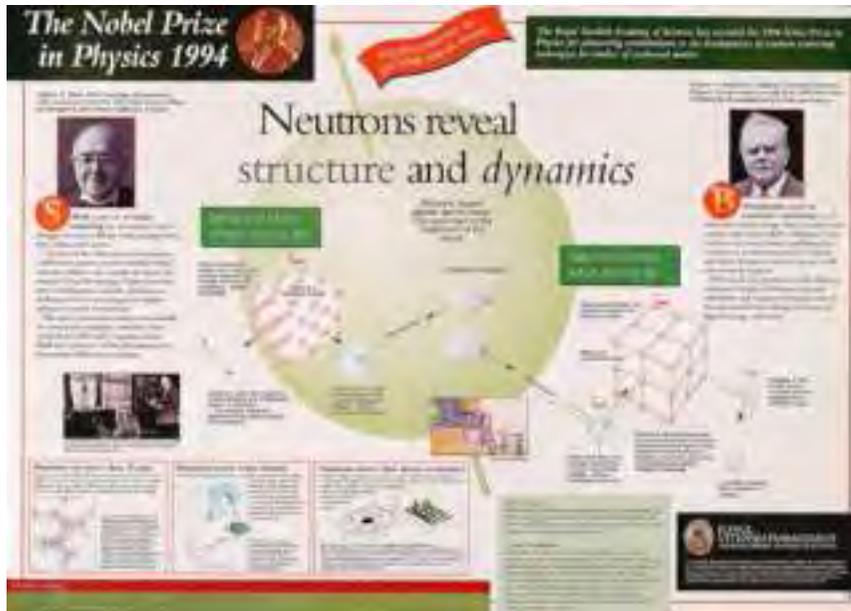
Il fascio di fotoni emesso può coprire uno spettro di radiazione dai raggi X ai raggi  $\gamma$



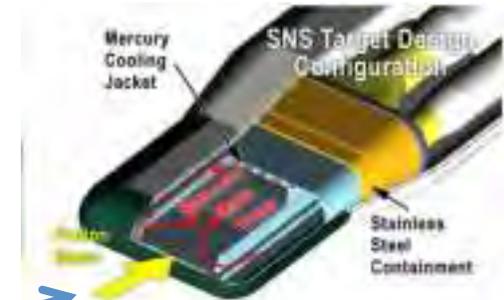
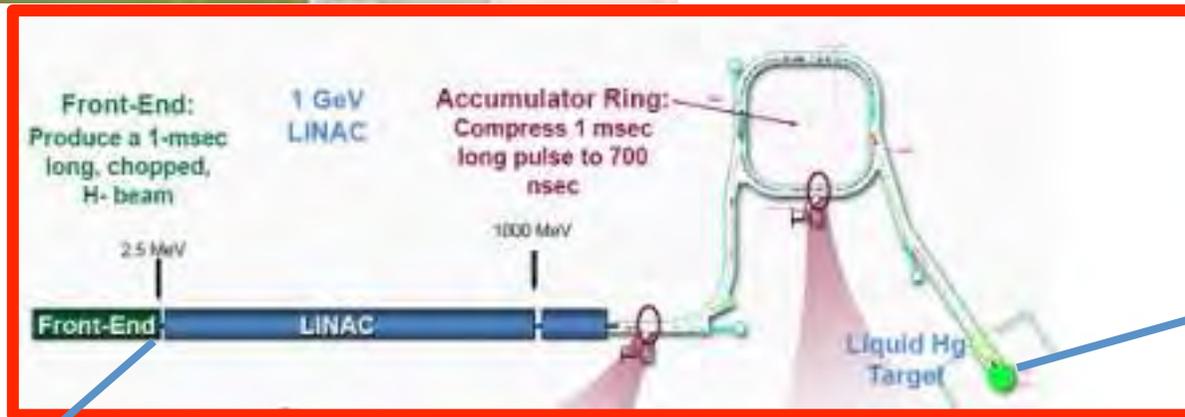
I fasci di raggi  $\gamma$  hanno una lunghezza d'onda così piccola che **da poter interagire con i nuclei degli atomi** fornendo informazioni sulla struttura nucleare dell'atomo stesso



# ACCELERATORI PER SORGENTI DI NEUTRONI



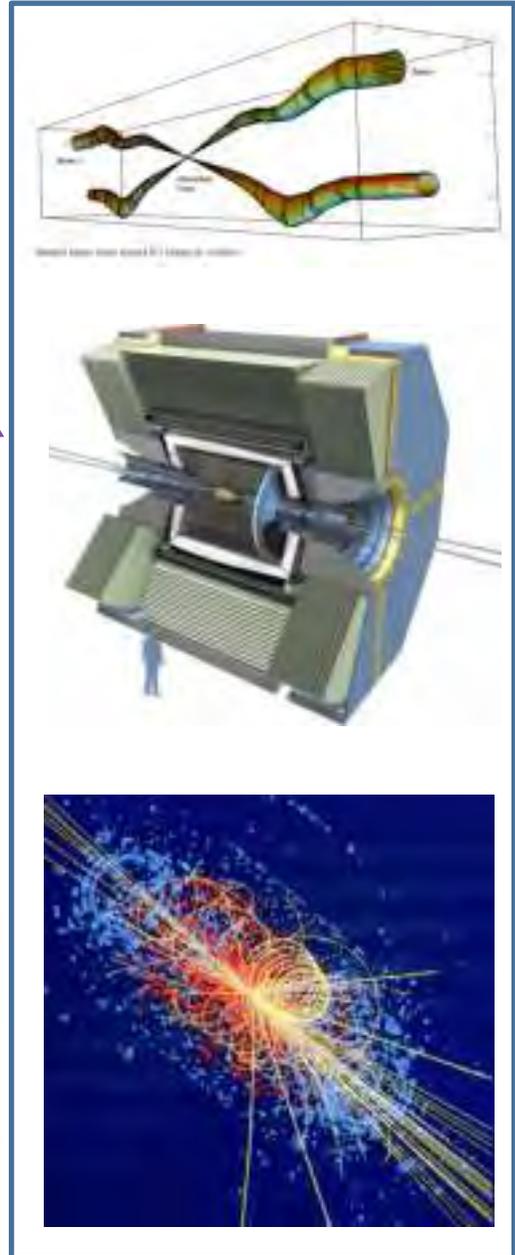
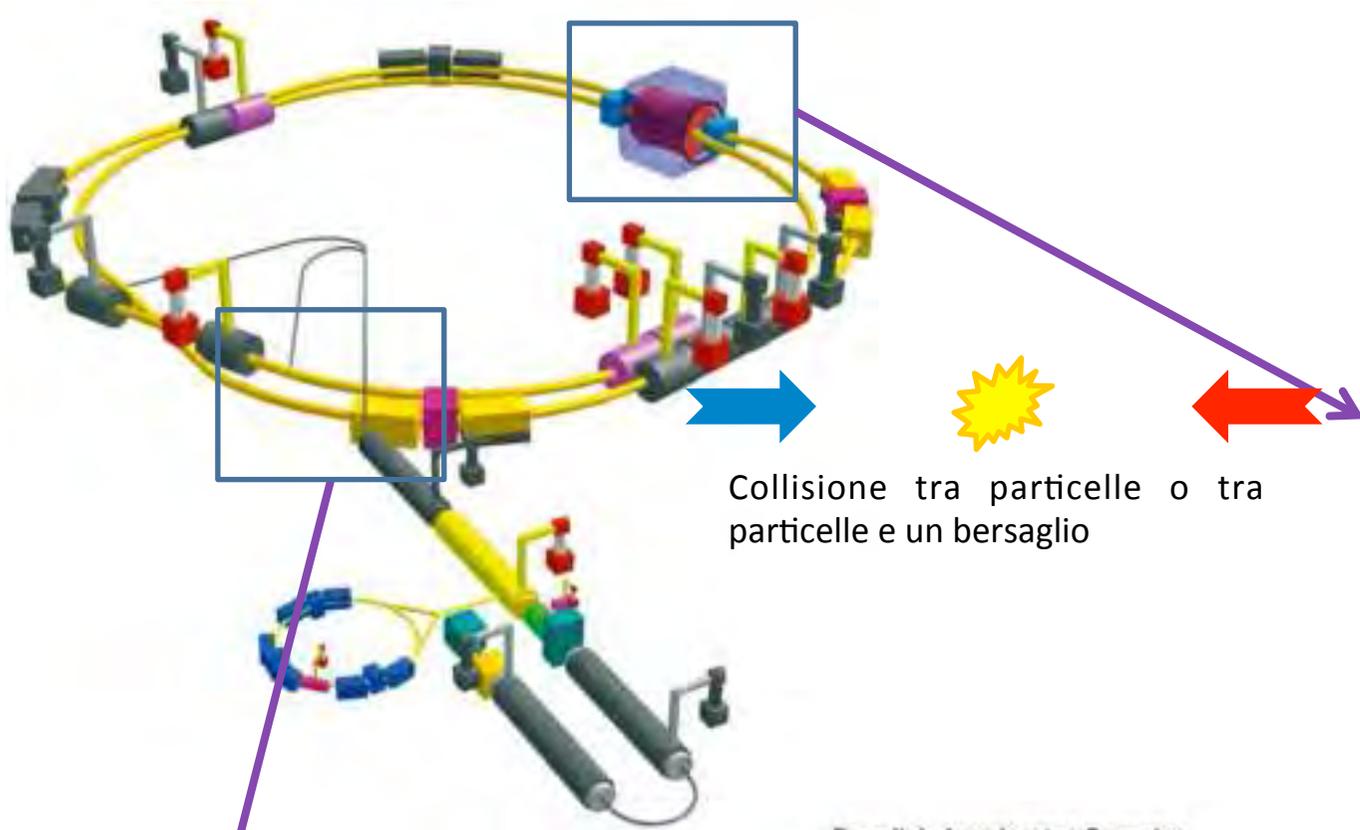
spallazione



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



# FISICA FONDAMENTALE: COLLISORI (COLLIDERS)

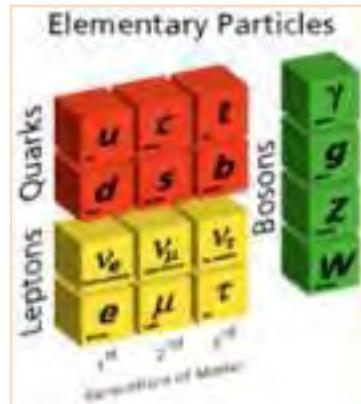
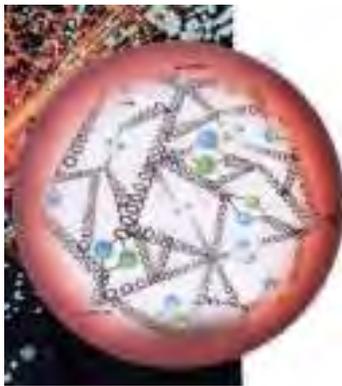


# ACCELERATORI DI PARTICELLE: MICROSCOPI SUB-ATOMICI E MACCHINE DEL TEMPO

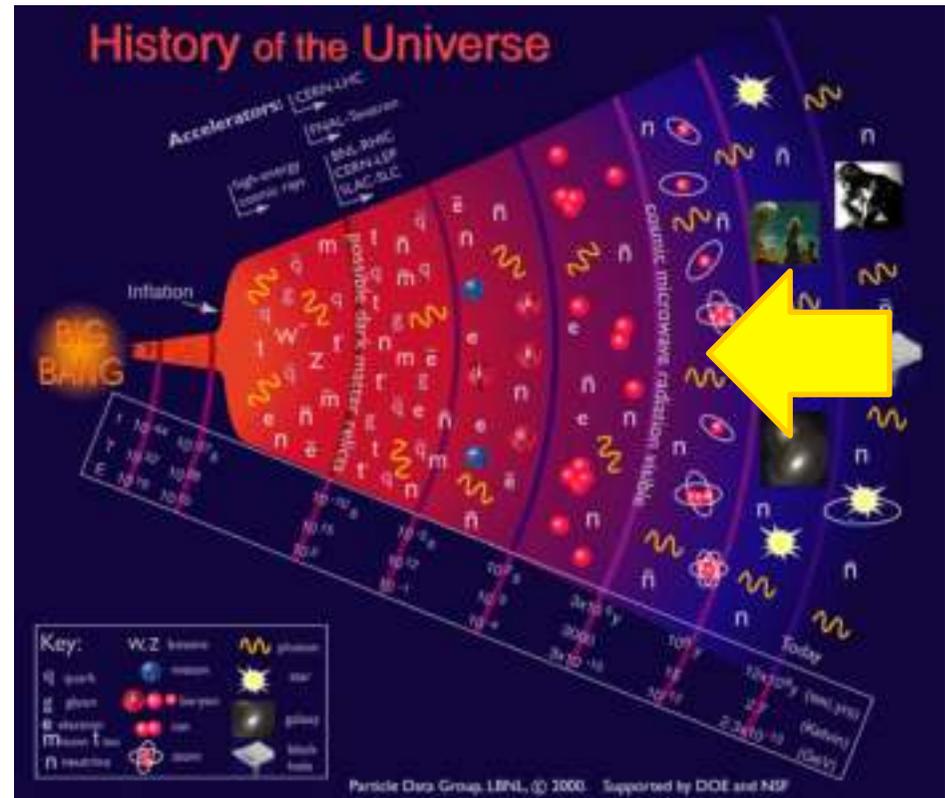
Le collisione tra due fasci di particelle o tra un fascio di particelle e un bersaglio ...



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



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



# COLLISIONI: ENERGIA O DENSITA' DI ENERGIA?

L' eV rappresenta un'energia molto piccola

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

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

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

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



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



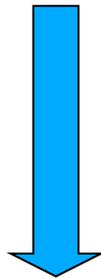
In un *acceleratore come LHC* si raggiungono energie per ogni protone di 7 TeV ( $7 \times 10^{12} \text{ eV}$ )!

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

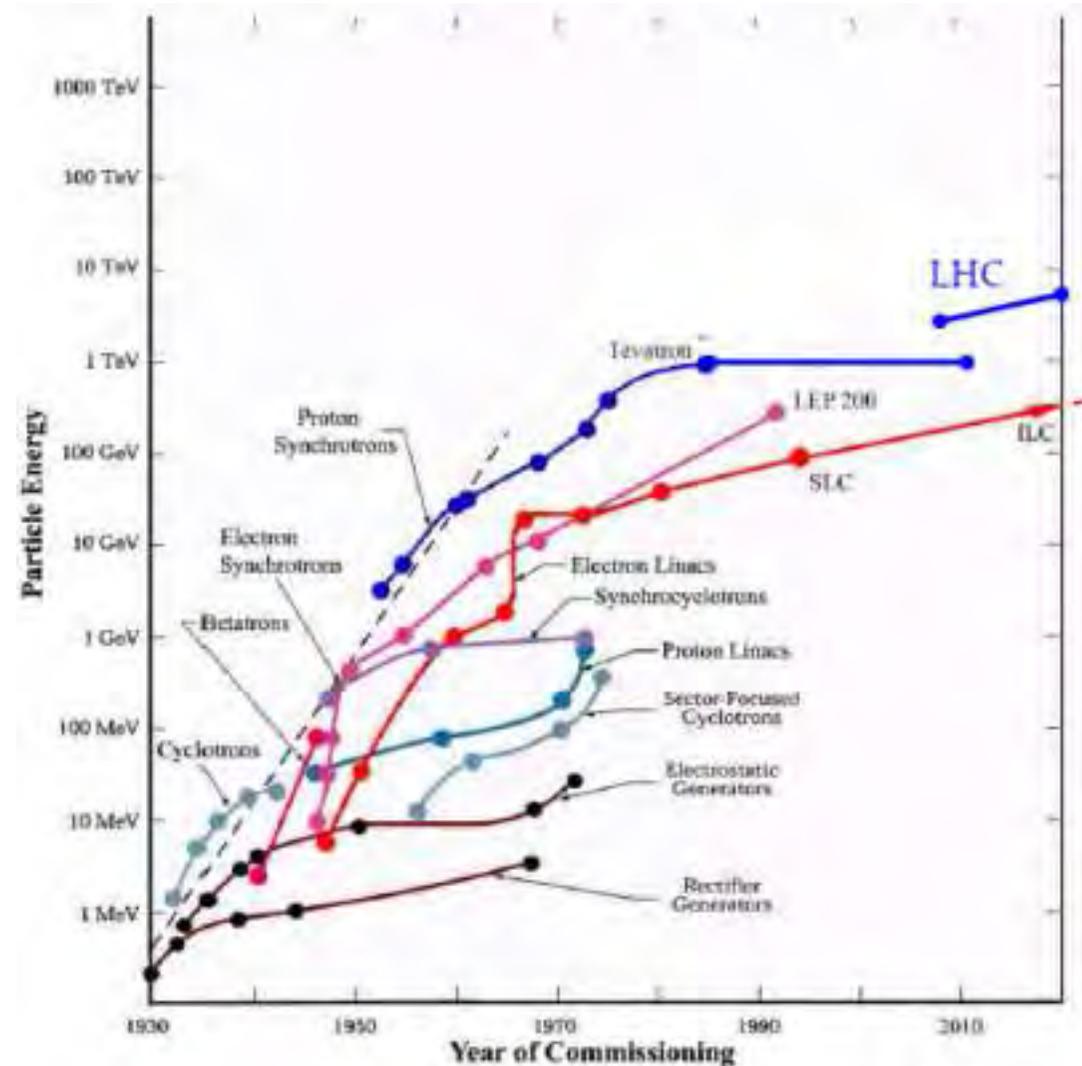


# Sviluppo degli acceleratori di particelle

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



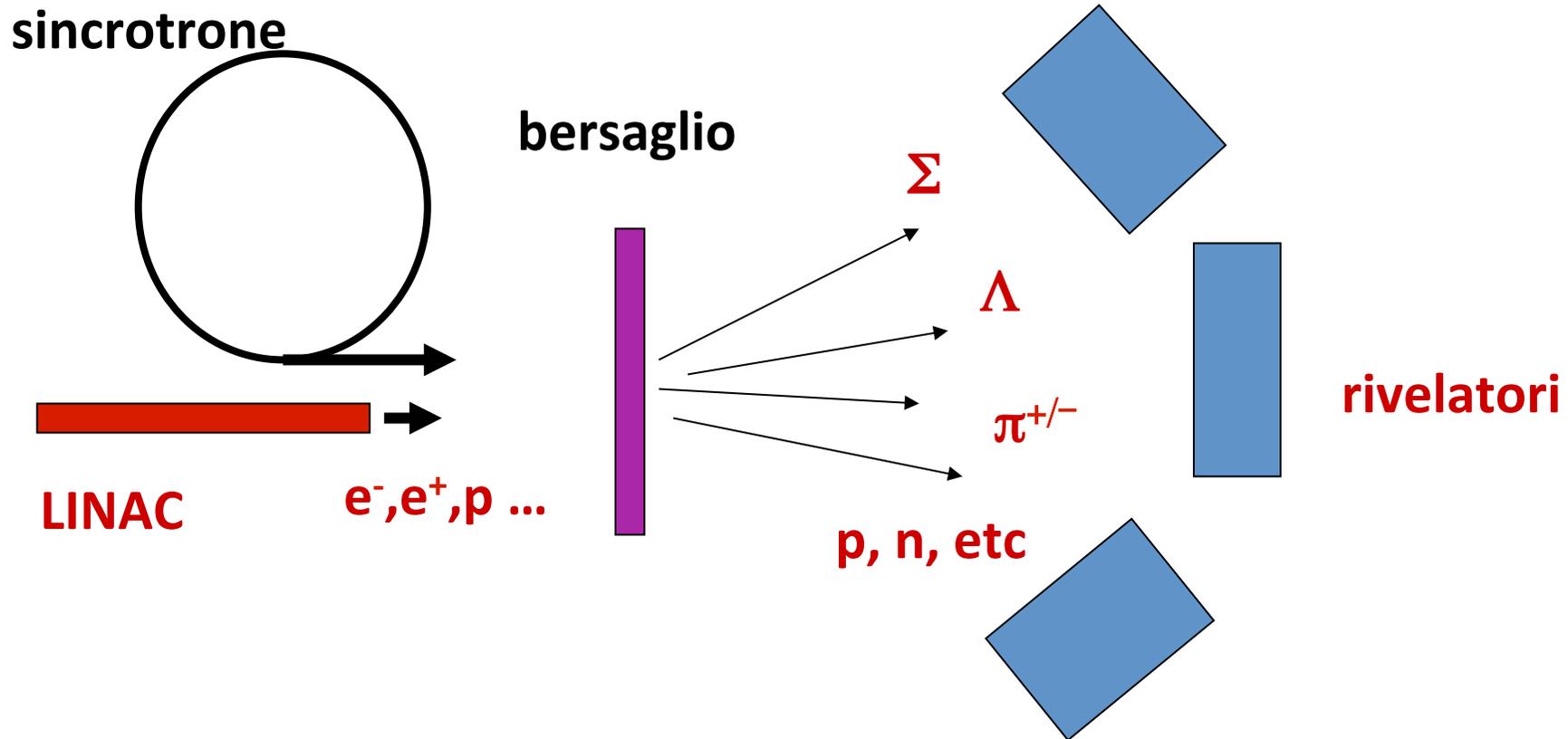
Lo sviluppo degli acceleratori per la fisica delle alte energie è stato determinato dalla necessità di ottenere energie e intensità di fasci sempre maggiori.



Courtesy M. Biagini

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

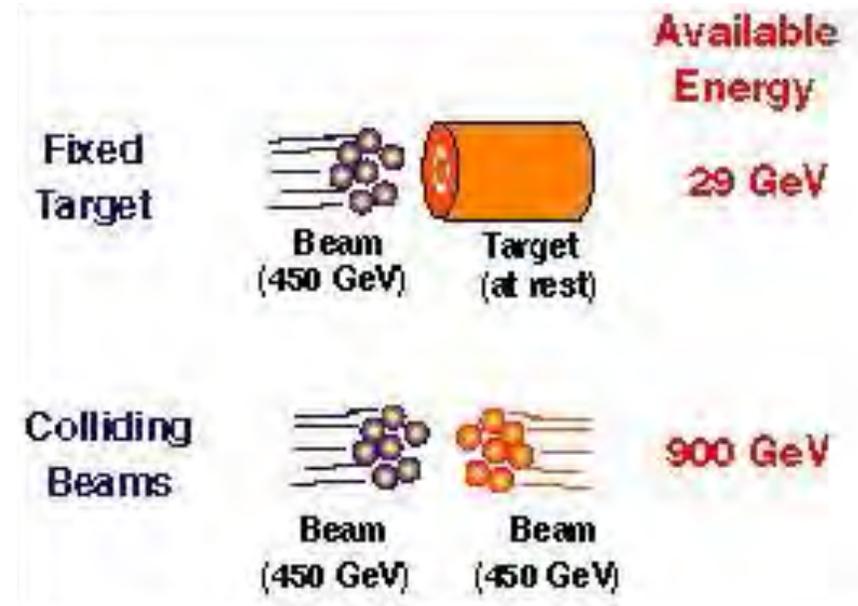
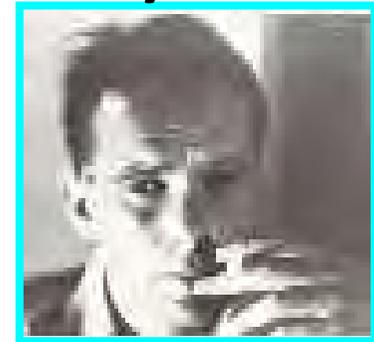
# Fisica delle Particelle con Acceleratori: collisioni su targhetta fissa



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

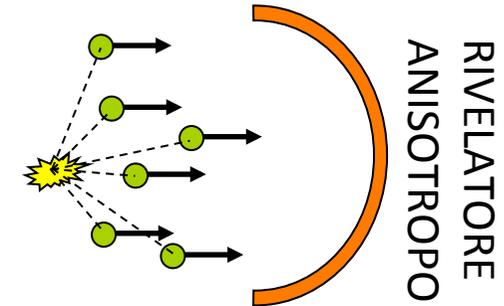
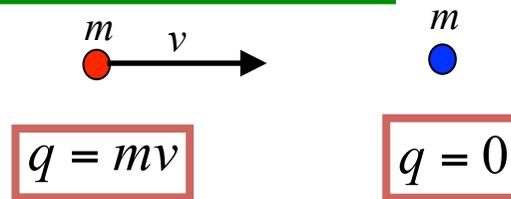
# Nascita dei Moderni Collider (Collisori)

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



# Energia Disponibile nell'interazione

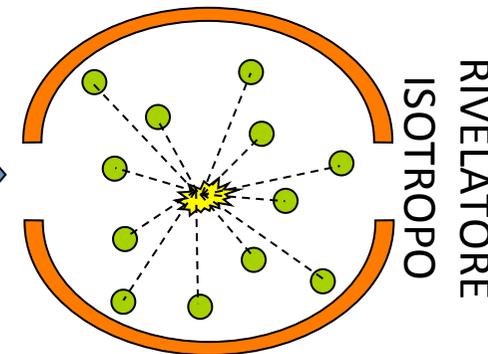
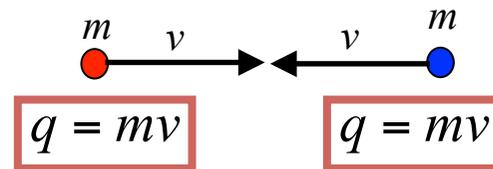
## COLLISIONE CONTRO BERSAGLIO FISSO



ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

## COLLISIONE FASCIO-FASCIO



ENERGIA DISPONIBILE  
NELL'INTERAZIONE

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

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

# AdA (Anello di Accumulazione) 1960-1965

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



Length of orbit . . . . .	408	cm
Radio frequency ( $k=2$ )	147	MHz
Radio voltage . . . . .	10	kV
Length of bunches . . . . .	16.7	cm
Radial width of bunches	.22	cm
Height of bunches (at $10^{-10}$ mm) . . . . .	$5.6 \cdot 10^{-4}$	cm
Radiation loss/revolution	380	eV
Lifetime of beam at $10^{-10}$ mm . . . . .	250	h

IL NUOVO OBIETTIVO

## The Frascati Storage Ring.

C. BERNARDINI, G. P. COZZARA, G. GRIGIO  
Laboratori Nazionali del CERN - Frascati

R. TOUNCHIK

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

(ricevuto il 7 Novembre 1960)

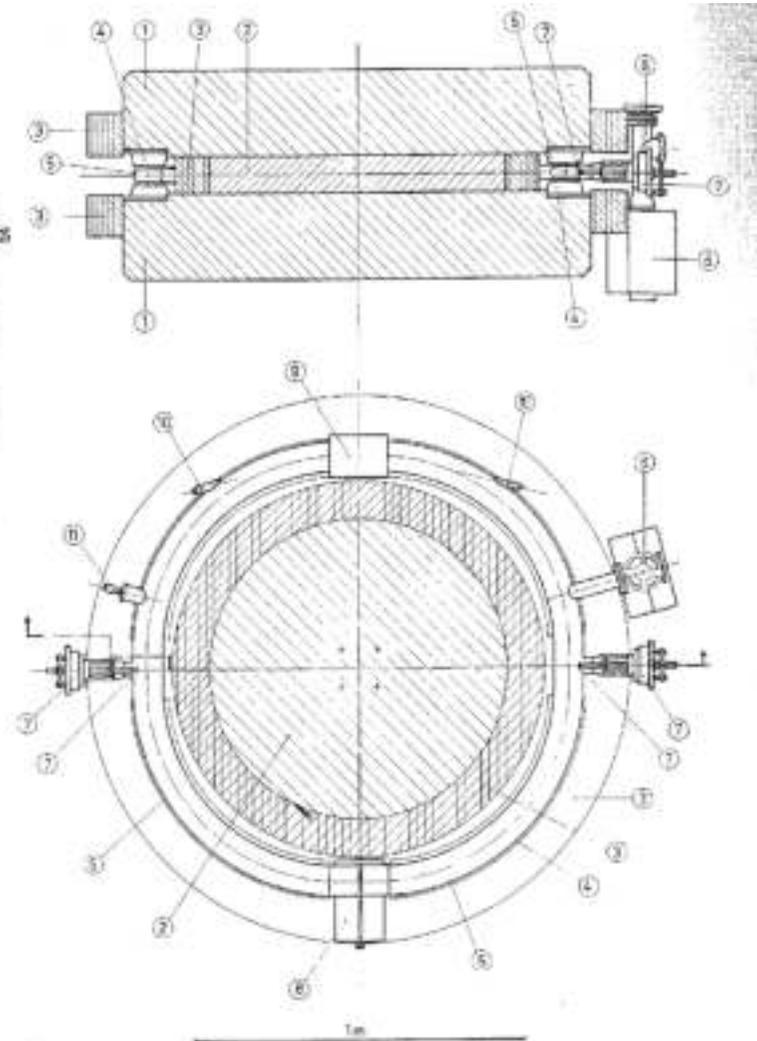
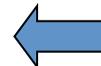
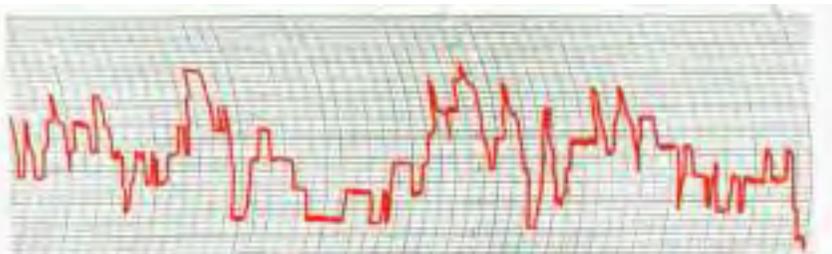


Fig. 1. - Elevations and plan sections of the Frascati storage ring (scale of construction - AdA): 1) magnet poles; 2) magnet core; 3) rails; 4) polepieces; 5) doublers; 6) Wien filter; 7) injection ports; 8) RF cavity; 9) experimental section; 10) windows for the observation of the synchrotron radiation; 11) vacuum pumps.



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

## ADONE ( 1967-1993 )

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

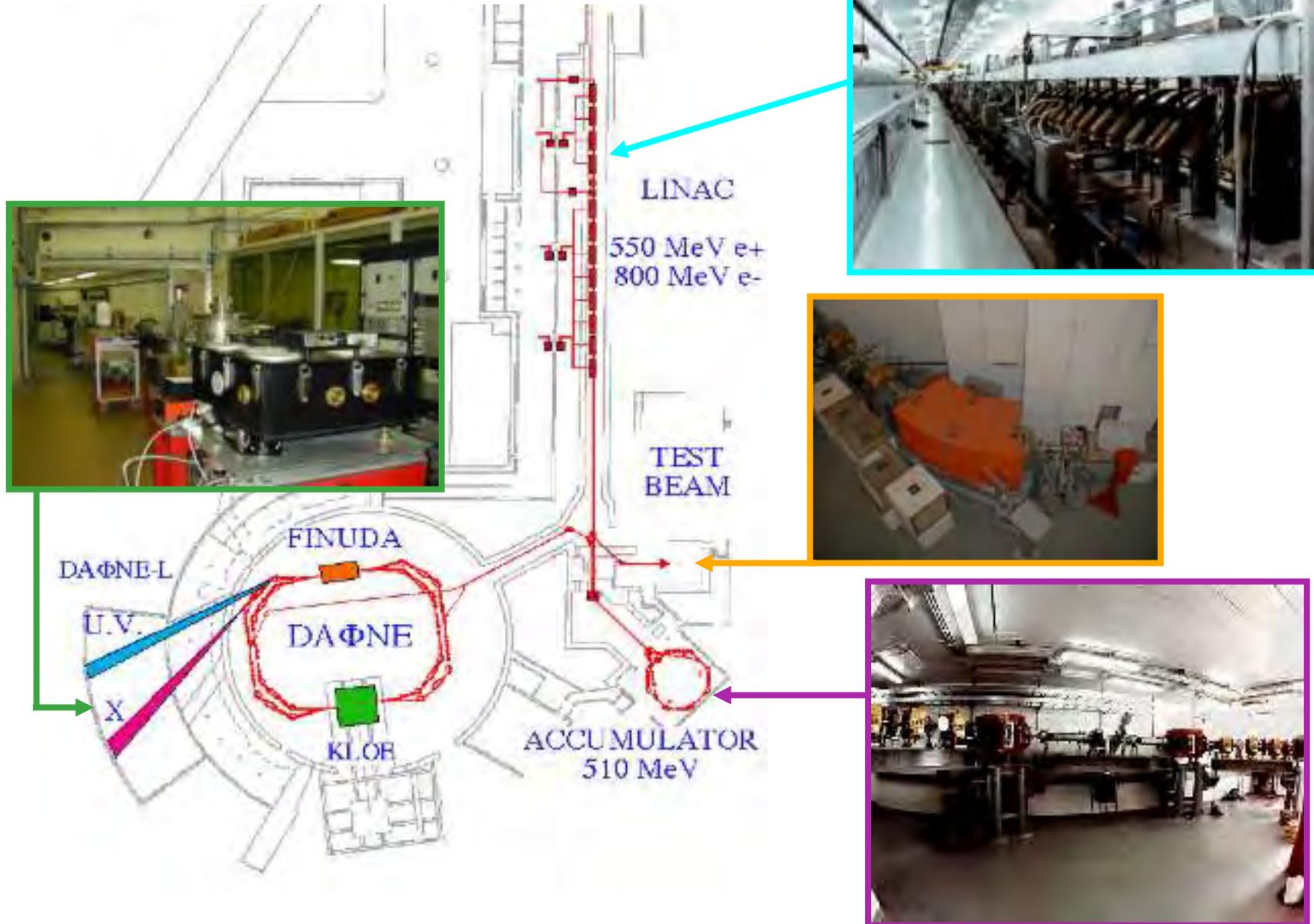


La **costruzione della nuova macchina iniziò nel 1963** e il primo elettrone fu immagazzinato nel 1967. Un LINAC di 350 MeV fu utilizzato come iniettore. La corrente massima circolante in ADONE era di **100 mA in 3 pacchetti**.

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

ADONE fu spento il 26 Aprile 1993.

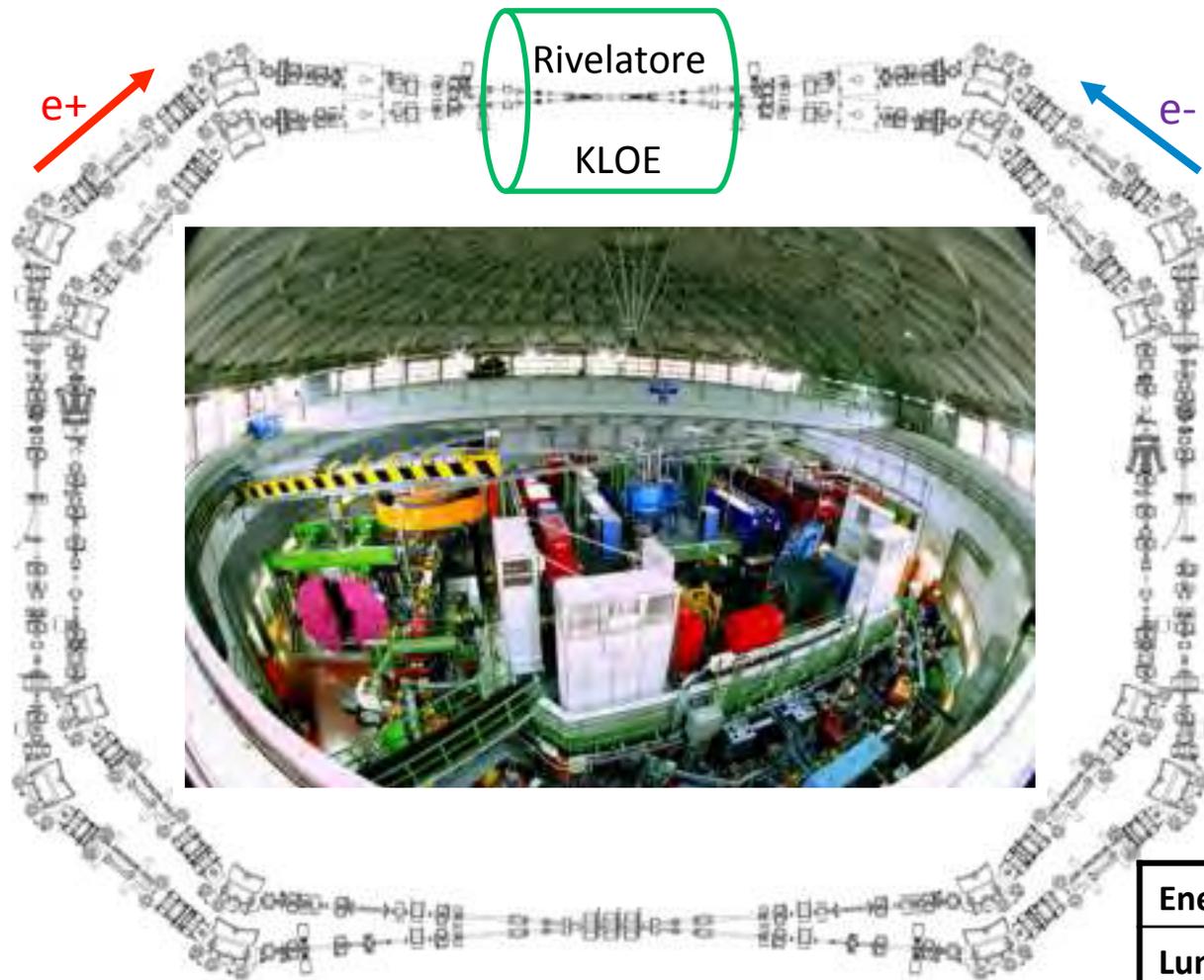
# La $\Phi$ -Factory a Frascati: DAΦNE



# La $\Phi$ -Factory a Frascati



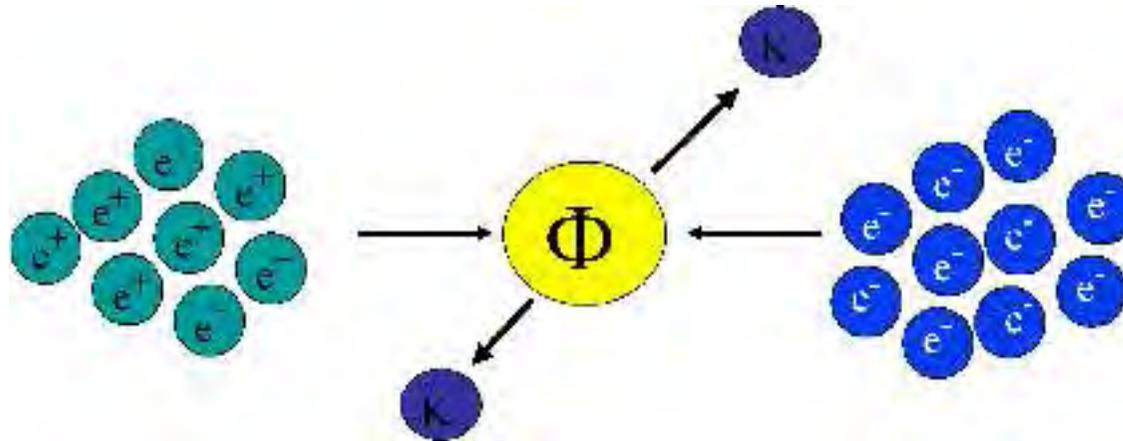
# Alcuni parametri di DAΦNE



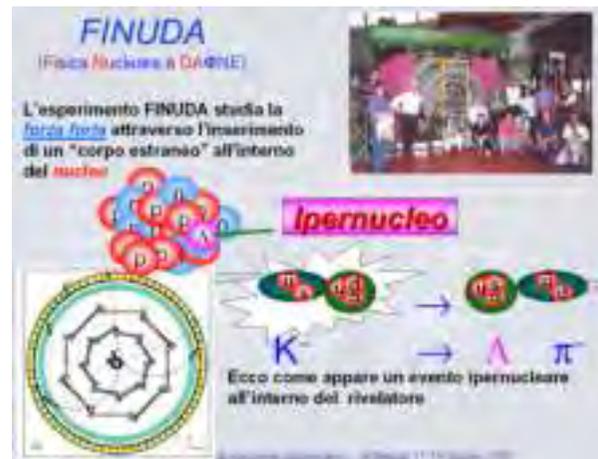
<b>Energia</b>	510 MeV/beam
<b>Lunghezza</b>	96 m
<b><math>f_{RF}</math></b>	368 MHz
<b>Numero di pacchetti</b>	120/anello
<b>Lunghezza dei pacchetti</b>	1.5-2.5 cm
<b><math>I_{MAX}</math></b>	2.5 A (anello $e^-$ )

# Fisica delle Particelle @DAΦNE

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



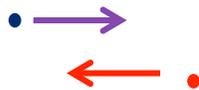
I K sono utilizzati dagli esperimenti KLOE, FINUDA, DEAR e SIDDHARTA



# Sezione d'urto e luminosità di un collider

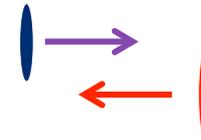
Due particelle ( $e^+/e^-$  a DAΦNE ,ad esempio) che collidono possono produrre **tipi diversi di eventi**, alcuni più probabili di altri. La **sezione d'urto**  $\sigma$  di un determinato evento è **proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga** e si misura in  $\text{cm}^2$ .

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



**Evento poco probabile.**

A bassa sezione d'urto



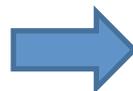
**Evento più probabile.**

Ad elevata sezione d'urto

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

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

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



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

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

# LUMINOSITY

The luminosity is related to:

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

For gaussian beams

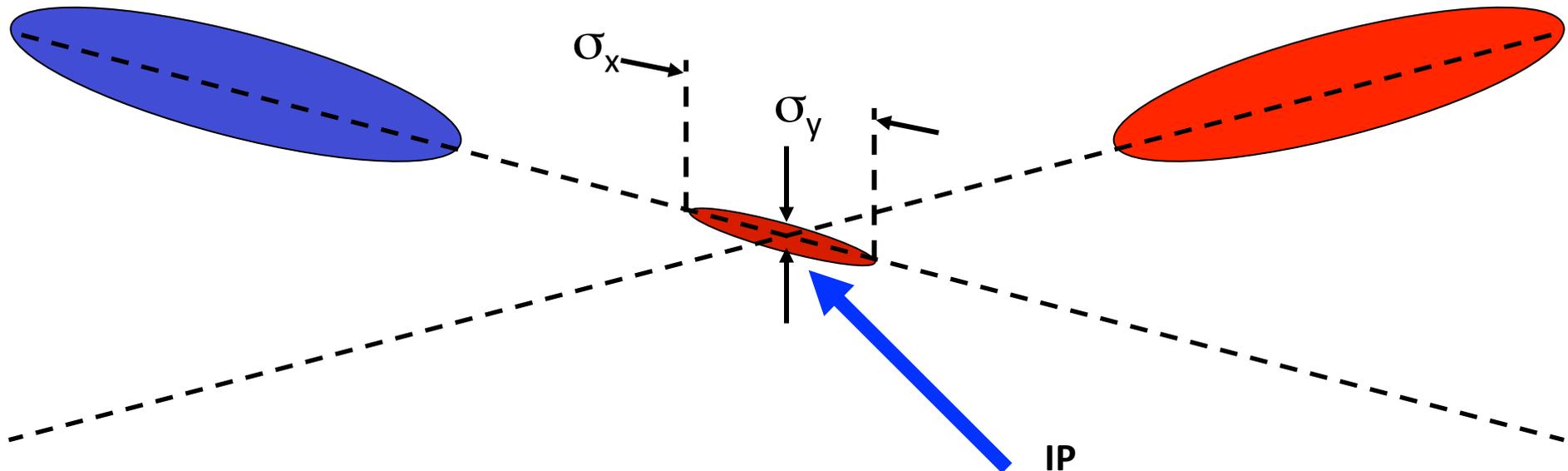


$$L = \frac{N^{e+} N^{e-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{collision} \quad [cm^{-2} sec^{-1}]$$

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

Collision frequency (up to hundreds of MHz)

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

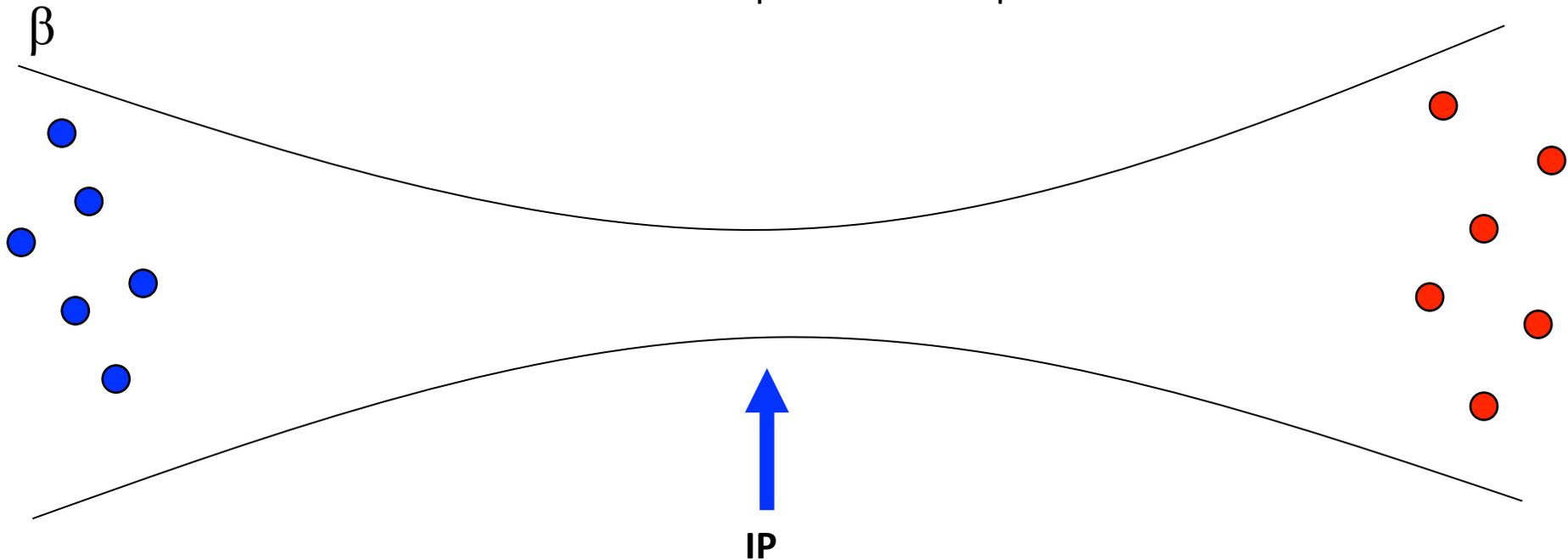


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

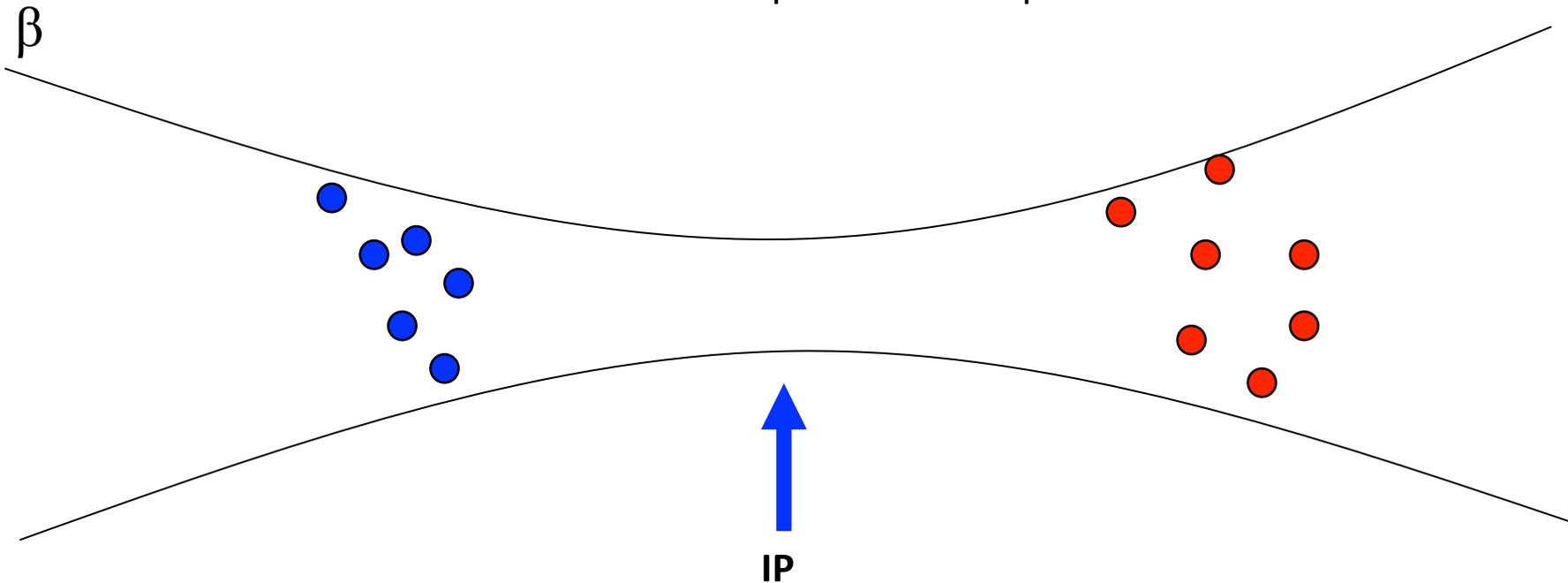


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

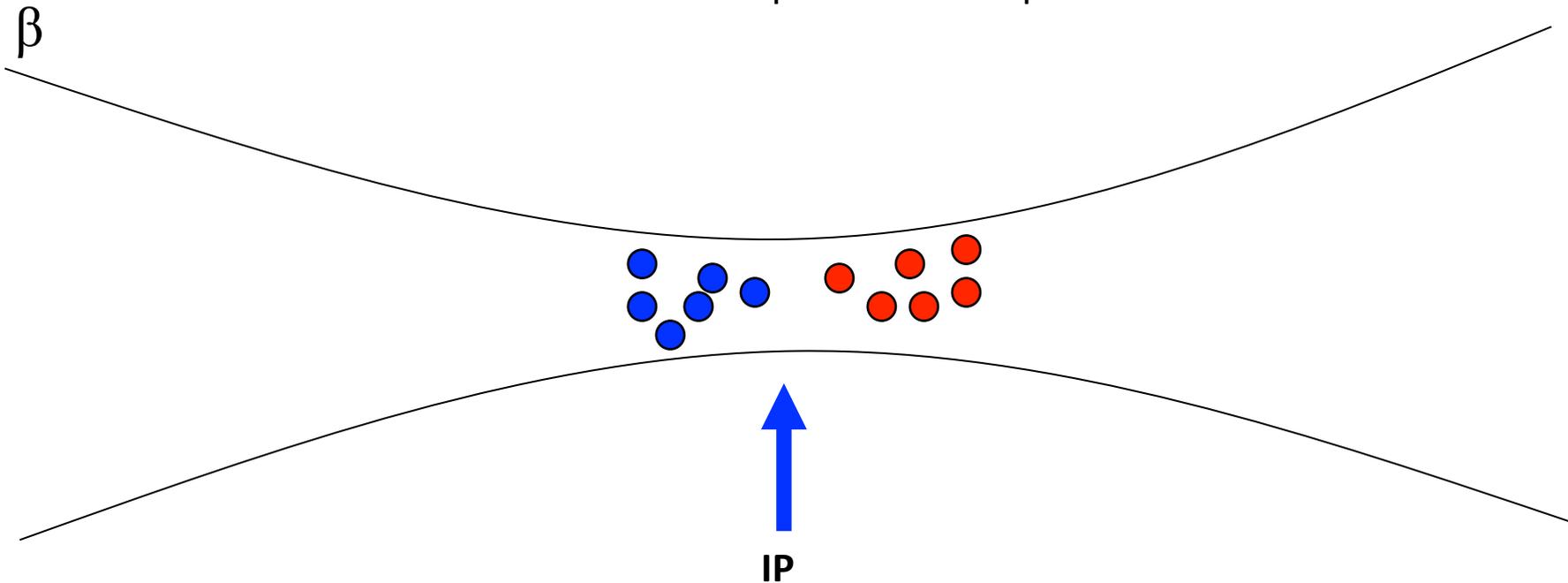


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



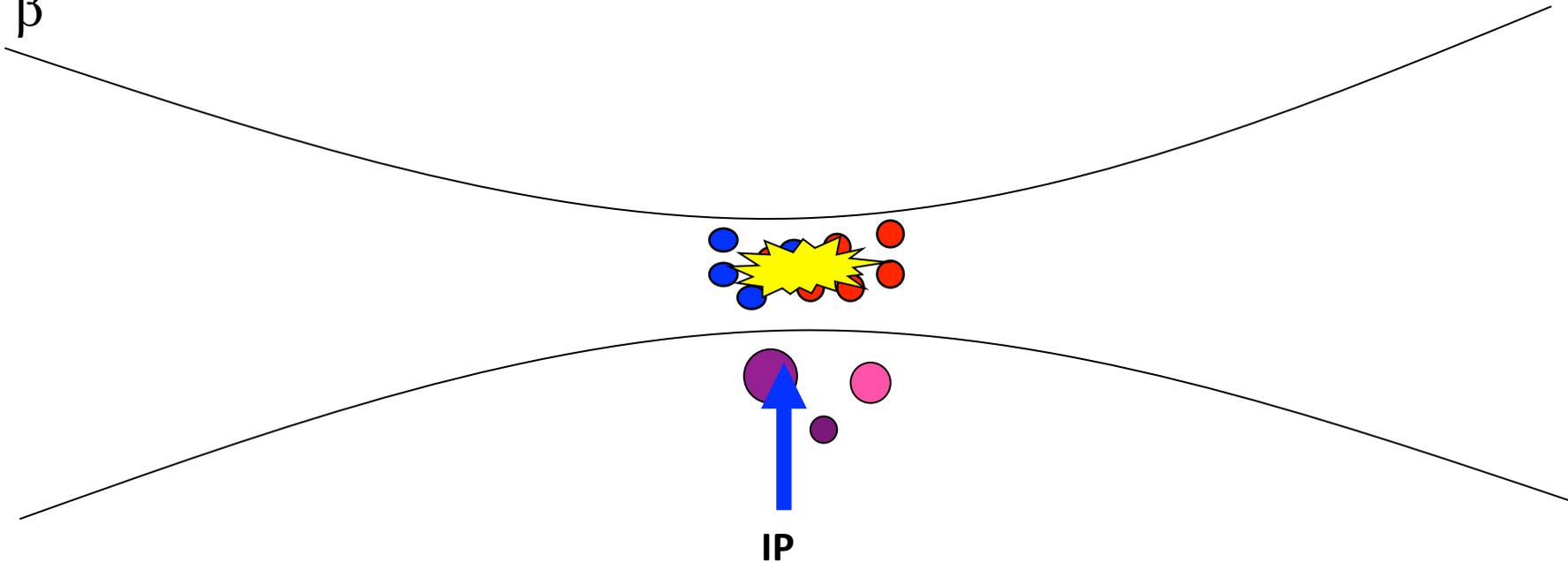
# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

$\beta$

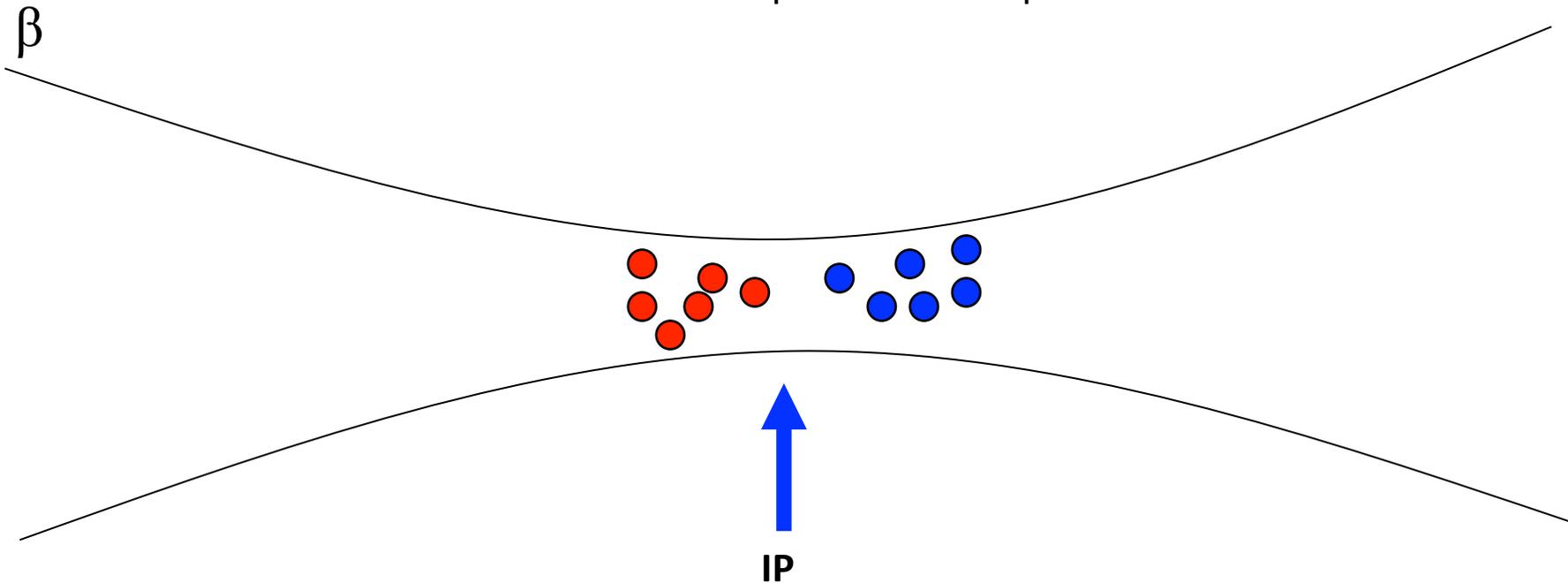


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

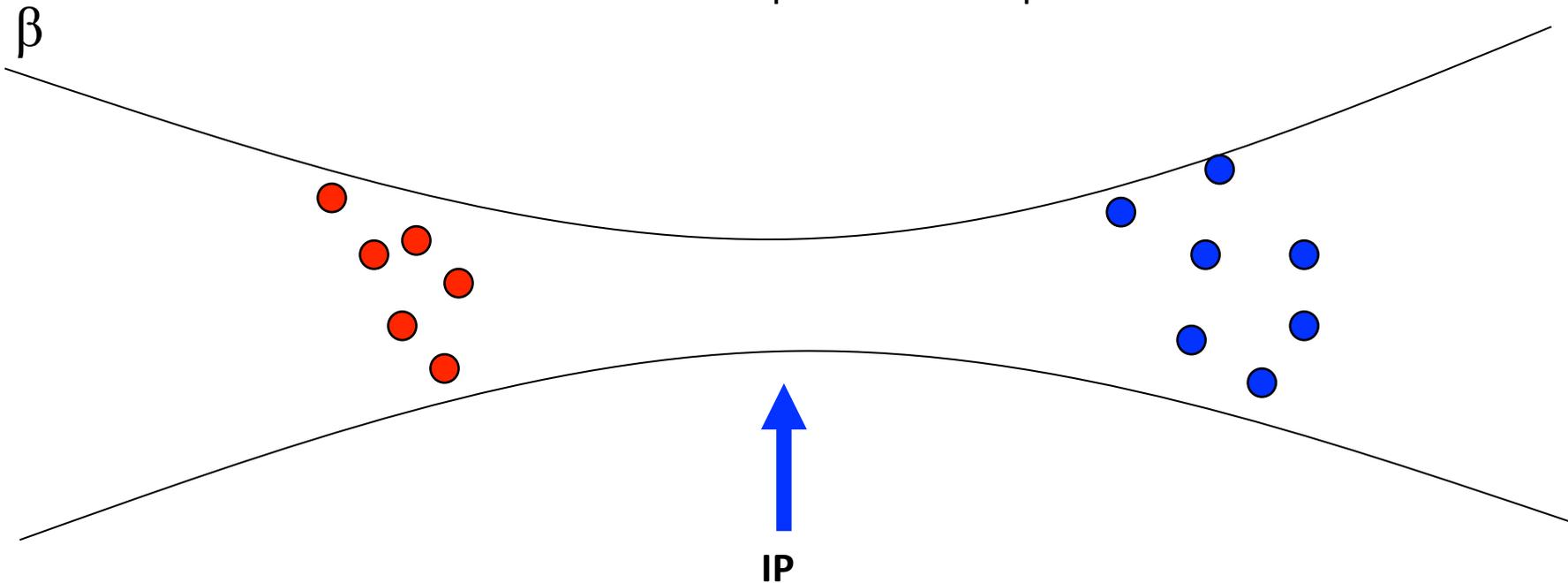


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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

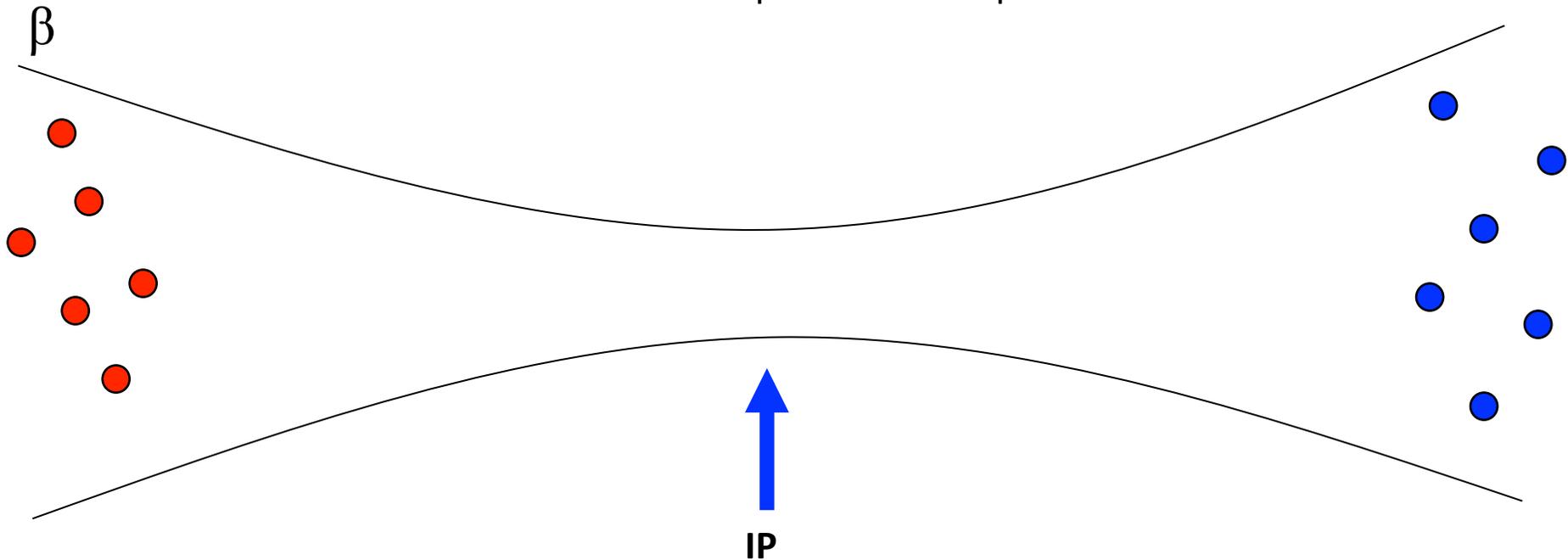


# Luminosità di un *collider*

Numero di particelle per fascio

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

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



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

Produzione di  $\Phi$  a DAΦNE

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

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

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

1 mm (pointing to  $\sigma_x$ )

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

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



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

# LEP (Large Electron Positron) CERN 1988-2001

## LEP1

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

## LEP2

1995 Installazione cavità superconduttrici E = 104 GeV

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

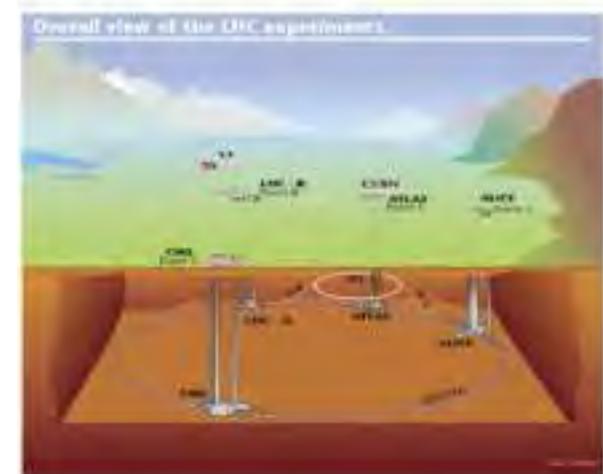
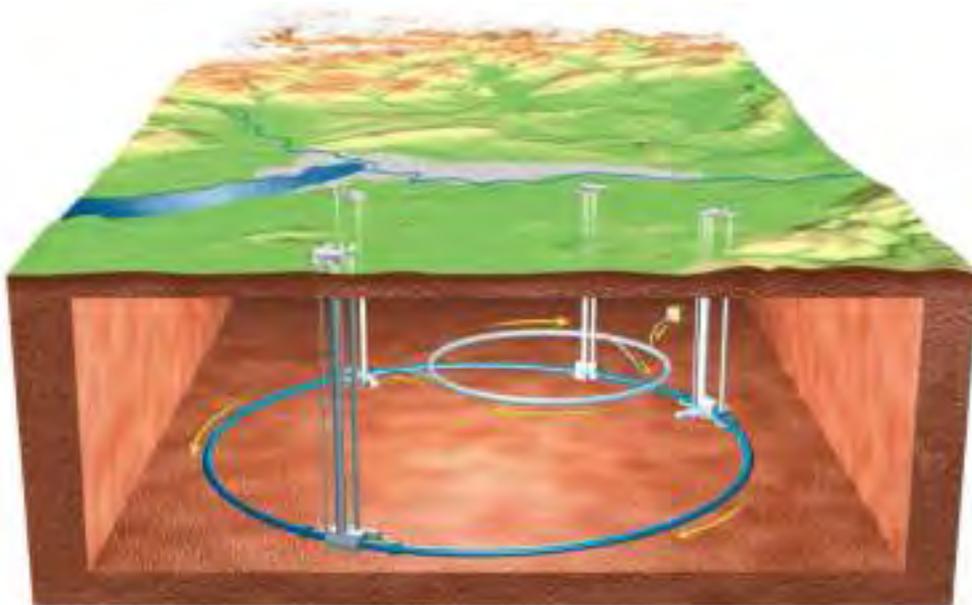
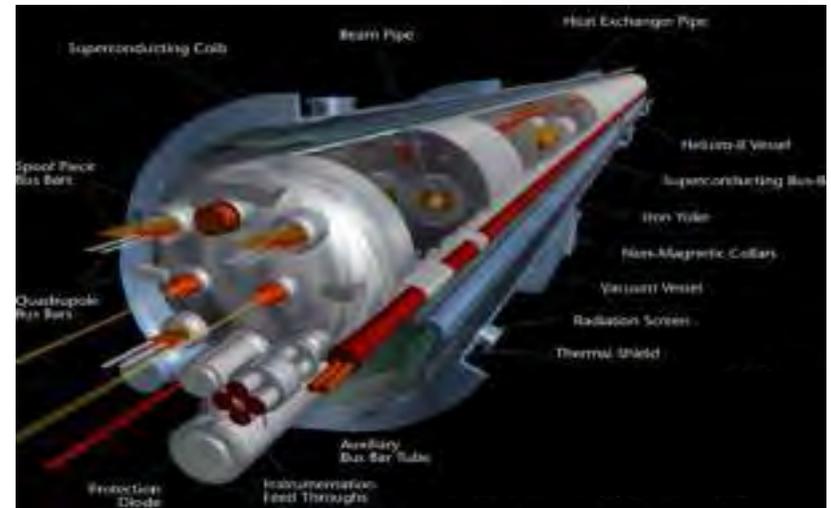


# LHC (Large Hadron Collider) CERN

## LHC parametri

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

$B_{\text{MAX dipoli}} = 83800$  Gauss con  $I = 11700$  A  
 $T = 1.9$  K

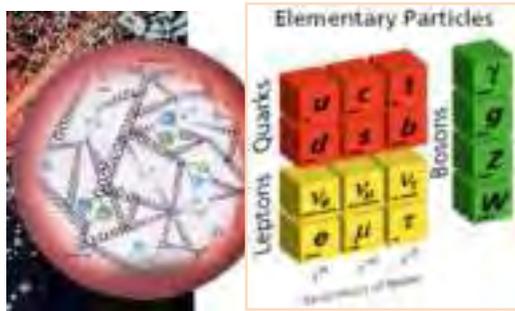




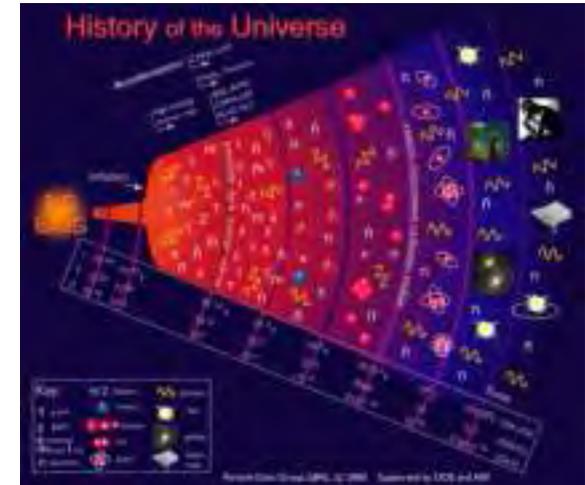
# LUMINOSITA' ED ENERGIA

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

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



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



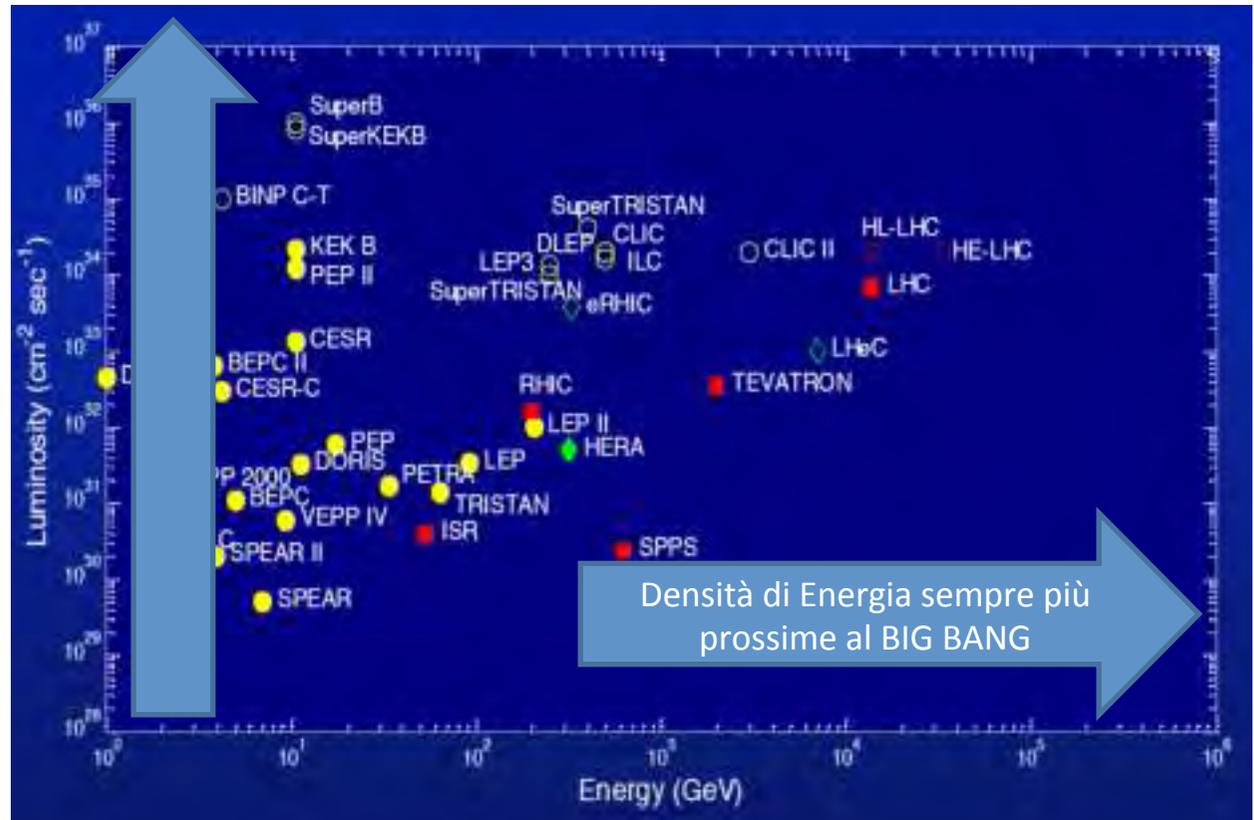
Quantità di eventi di fisica generati/statistica della misura

Numero di particelle per fascio

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

Dimensioni trasverse dei fasci nell'IP

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



# LINEE DI RICERCA PRINCIPALI SUGLI ACCELERATORI DI

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

**ALTI GRADIENTI  
ACCELERANTI**

**ALTA ENERGIA**

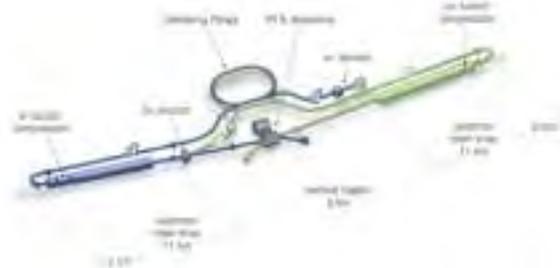
**ELEVATA QUALITA' DI  
FASCIO**

**INTENSITA' DEI FASCI  
DI PARTICELLE**

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



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



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



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



# IL LIMITE DELLE MACCHINE CIRCOLARI AD ALTA

## ENERGIA

Macchine adroniche (p,...)

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

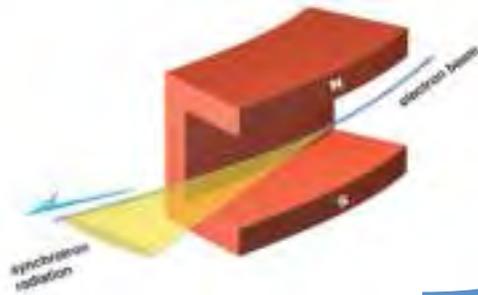


I massimi campi magnetici ottenibili con dipoli superconduttori sono dell'ordine di 15-20 T (8 T LHC)

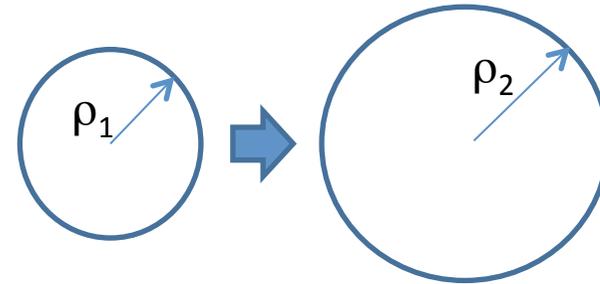
Macchine leptoniche (elettroni)

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

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



Macchine sempre più grandi



Acceleratore lineare con elevatissimi campi acceleranti



# ALTI CAMPI ACCELERANTI $\Rightarrow$ ALTA FREQUENZA

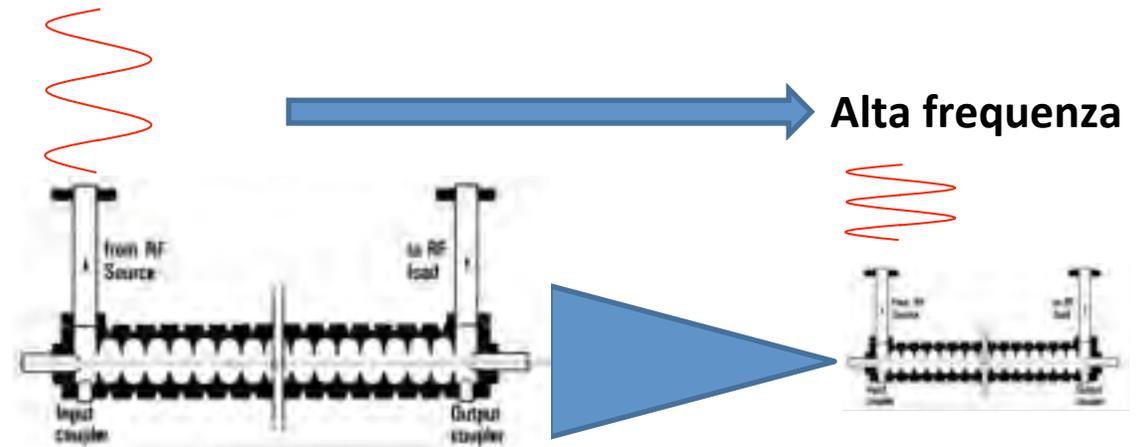
L'idea di base è quella di **concentrare energia elettromagnetica** in spazi sempre più piccoli per aumentarne la densità e, quindi, il valore del campo accelerante.



## Alte frequenze di alimentazione

...Compatibilmente con:

- Disponibilità sorgenti elettromagnetiche
- Dissipazioni sulle strutture (potenze richieste)
- Limiti di scarica (breakdown)



## STRUTTURE METALLICHE



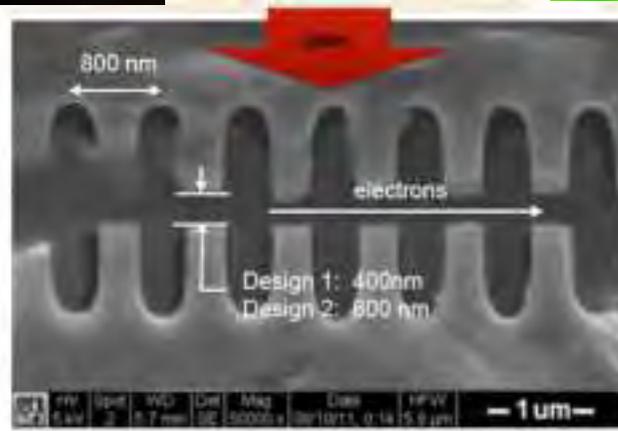
Strutture ad alto gradiente possono raggiungere  **$\sim 100-150$  MV/m** di campo accelerante con numero di scariche limitato.

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

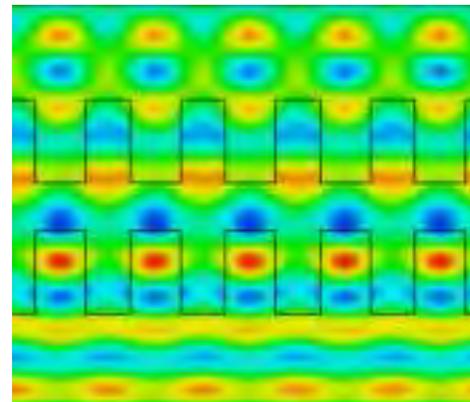
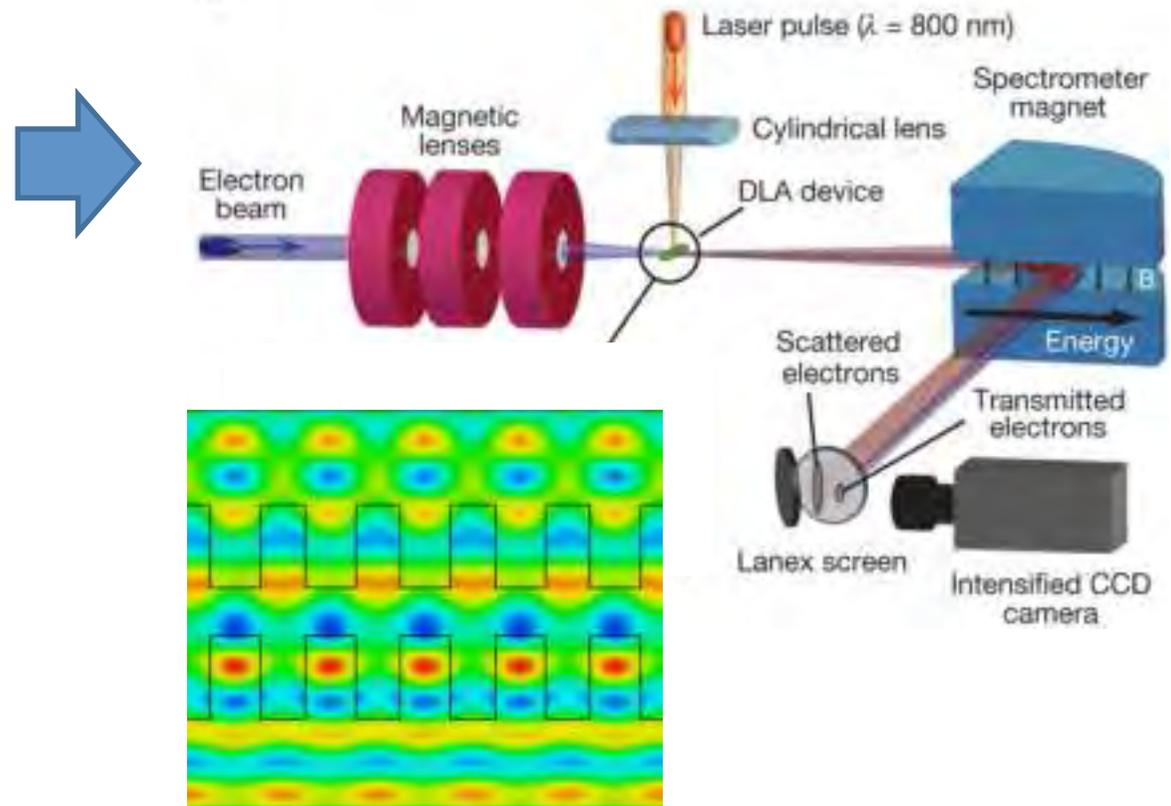
# STRUTTURE DIELETTICHE ALIMENTATE DA LASER (DLA)

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

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

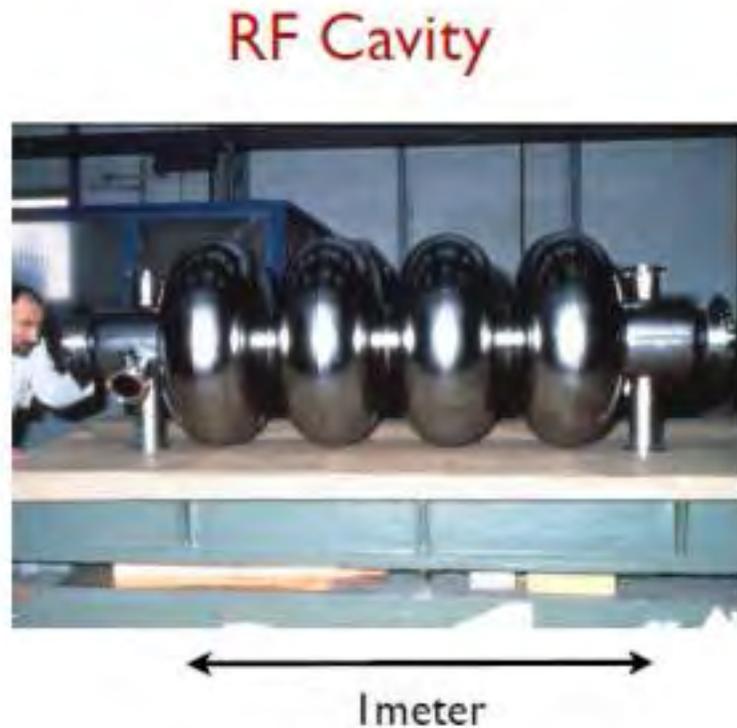


Si utilizzano **strutture dielettriche** di vario tipo



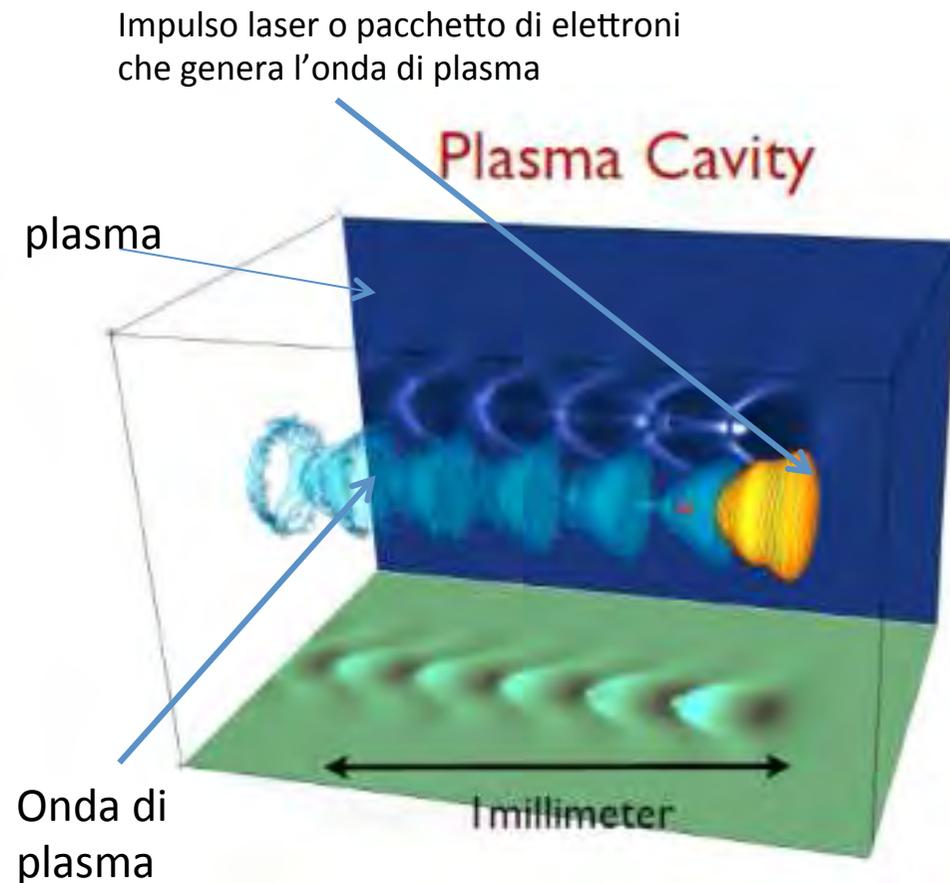
Gradienti fino a **>1 GV/m**  
sono stati misurati

# Frontiere nell'accelerazione: acceleratori a plasma



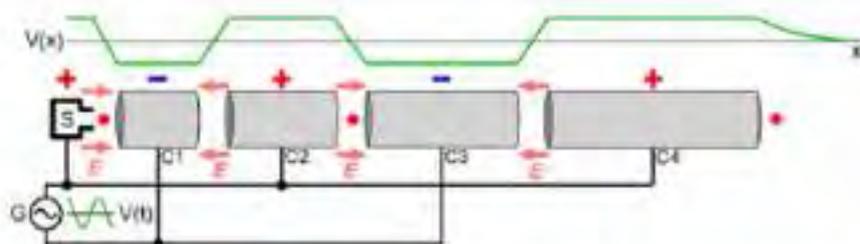
Campo elettrico  $< 100$  MV/m

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



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

km  m



La potenza immagazzinata nelle cavità non può crescere all'infinito

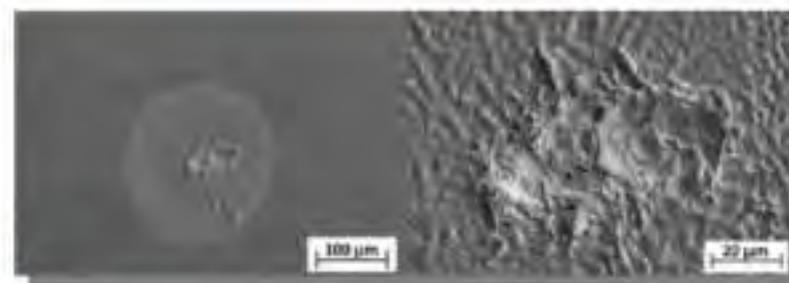
*RF breakdown: imperfezioni delle cavità possono innescare scariche elettriche e danneggiare la struttura*

*Esiste un massimo gradiente raggiungibile*

La tecnologia RF usa microonde ad alta potenza in cavità metalliche risonanti

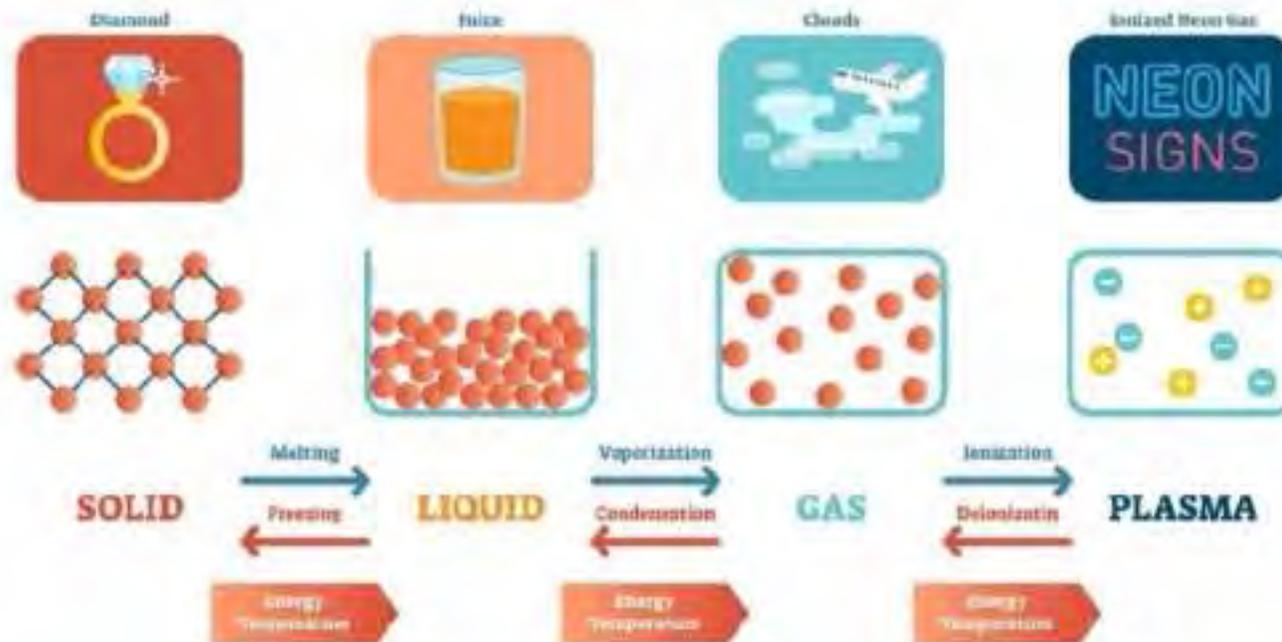
*Frequenze tipiche RF sono nel GHz*

*La dimensione delle cavità è dell'ordine della lunghezza d'onda RF (1-60 cm)*



$$E_{max} \approx 100 \frac{MV}{m}$$

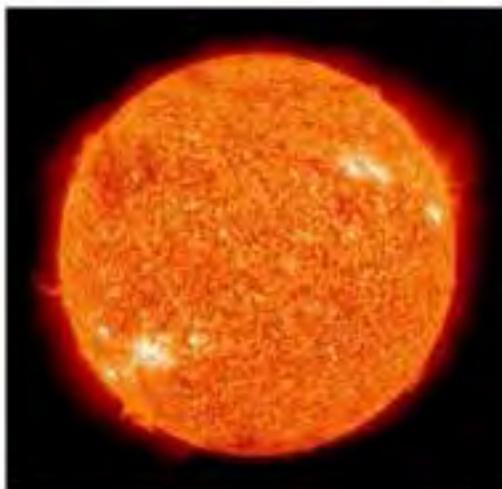
## States of Matter



Il **Plasma** rappresenta il 4° stato della materia e consiste in elettroni slegati dai rispettivi ioni positivi

*È prodotto scaldando un gas fino a quando gli elettroni hanno energia sufficiente per sfuggire dai nuclei*

*Essendo già ionizzato, il plasma non può essere "danneggiato" da scariche e può quindi sostenere enormi campi*



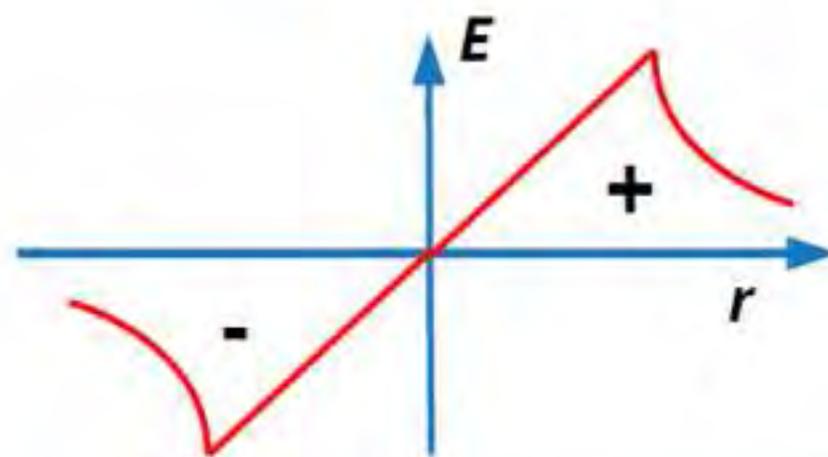
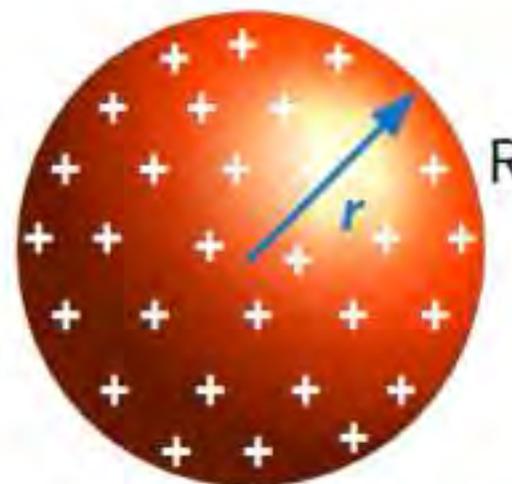
Dalle equazioni di Maxwell, il flusso del campo elettrico in una sfera carica (positiva) a densità uniforme  $n_i$  alla posizione  $r$  è

$$\Phi(\vec{E}(r)) = \frac{Q(r)}{\epsilon_0} = \frac{4\pi r^3}{3\epsilon_0} q_i n_i$$

Il campo **diminuisce** fuori dalla sfera

Il campo **aumenta** all'interno della sfera

$$\vec{E}(r) = \frac{q_i n_i}{3\epsilon_0} r$$

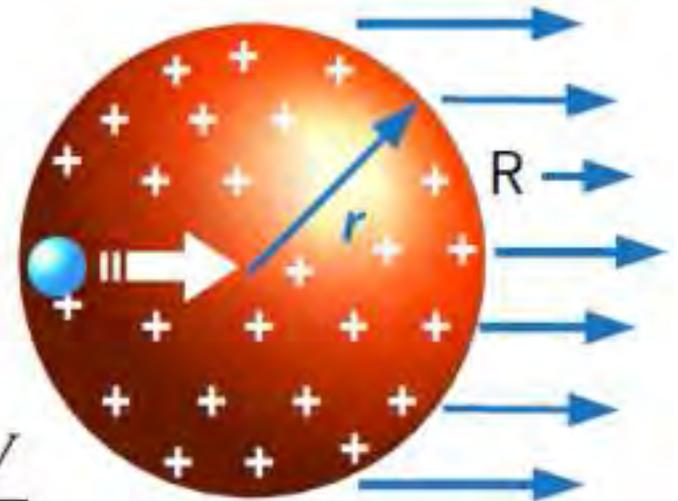


Il campo **umenta** all'interno della sfera

$$\vec{E}(r) = \frac{q_i n_i}{3\epsilon_0} r$$

Inserendo numeri tipici...

$$n_i = 10^{16} \text{ cm}^{-3}, r = \lambda_p/2 = 150 \mu\text{m} \implies E \approx 10 \frac{\text{GV}}{\text{m}}$$

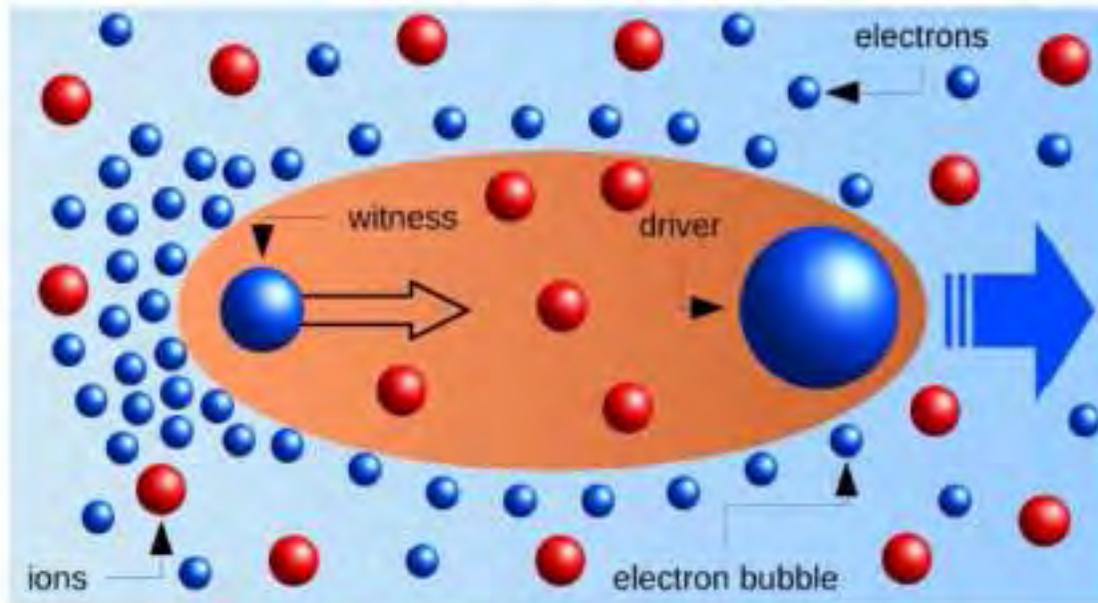


Cosa succede all'elettrone nella sfera?

*È accelerato dal campo elettrico e si muove verso il centro della sfera*

Cosa succede se la sfera si muove a velocità relativistica?

*L'elettrone è continuamente accelerato e guadagna energia (finché la sfera si muove)*



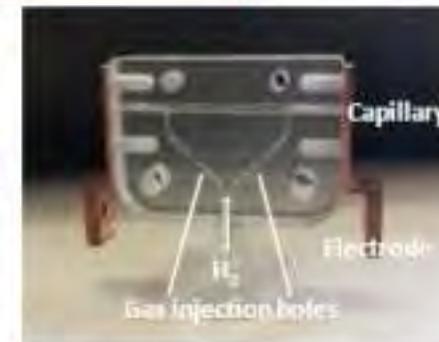
Il **driver** crea la sfera carica positiva (o **bolla**).  
Può essere

- Fascio di particelle (PWFA)
- Impulso laser (LWFA)

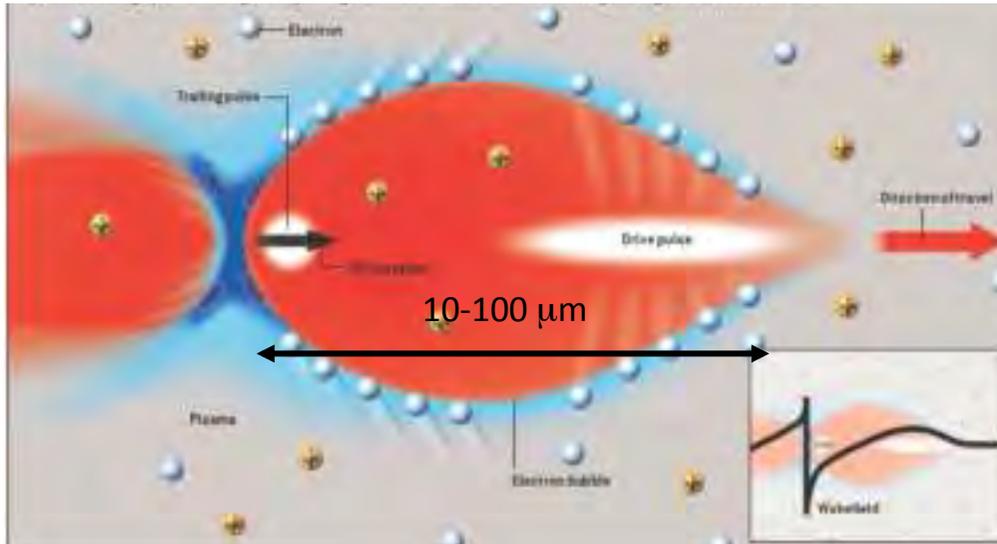
Il **witness** può essere

- Auto-iniettato dal plasma
- Iniettato esternamente

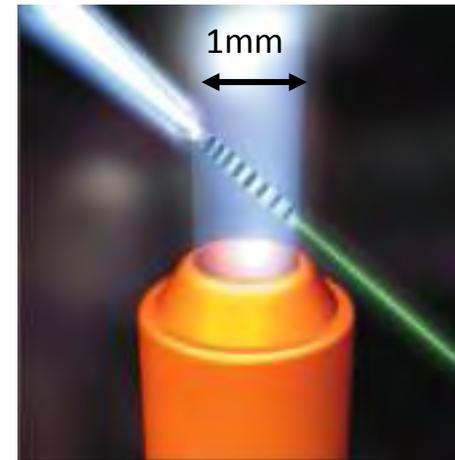
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \simeq 96 \sqrt{n_0 (\text{cm}^{-3})} \rightarrow E_0 \approx 10 \frac{\text{GV}}{\text{m}} @ n_0 = 10^{16} \text{cm}^{-3}$$



# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA (LWFA)



laser Gas jet



VIDEO

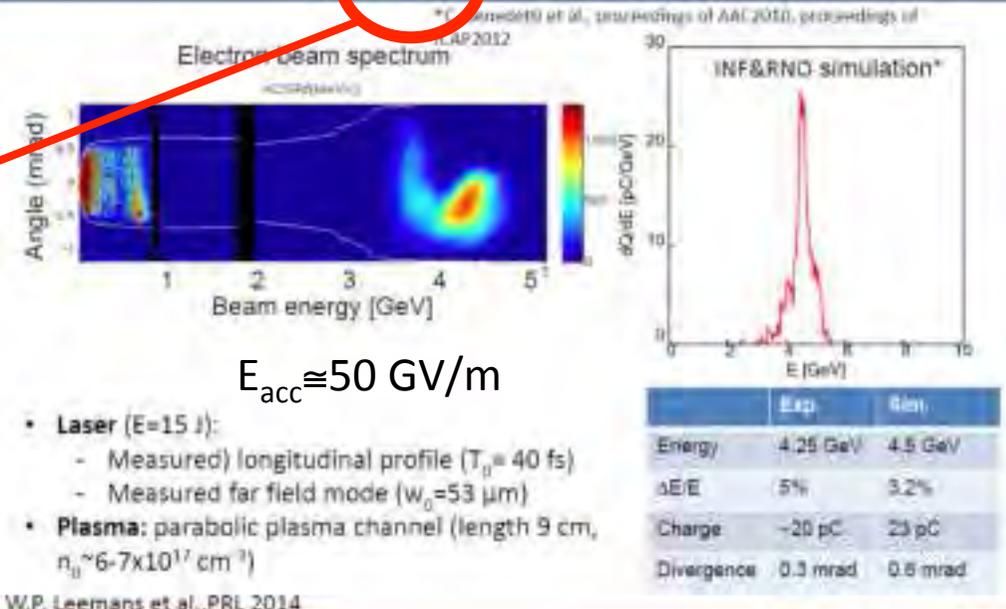
Elettroni accelerati

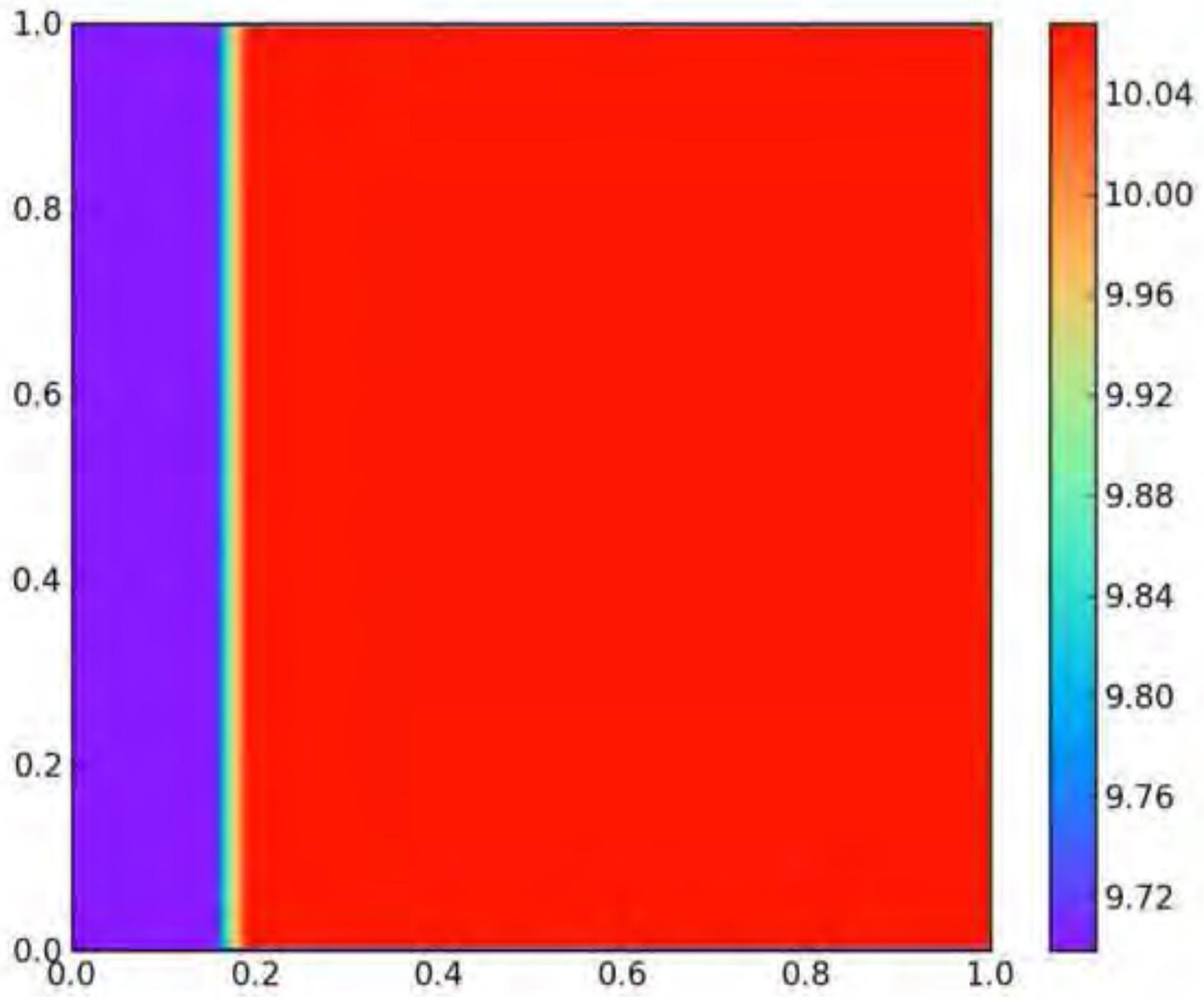
$$E_0 = \frac{m_e c \omega_p}{e} \approx 100 \left[ \frac{\text{GeV}}{m} \right] \cdot \sqrt{n_0 [10^{18} \text{ cm}^{-3}]}$$

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

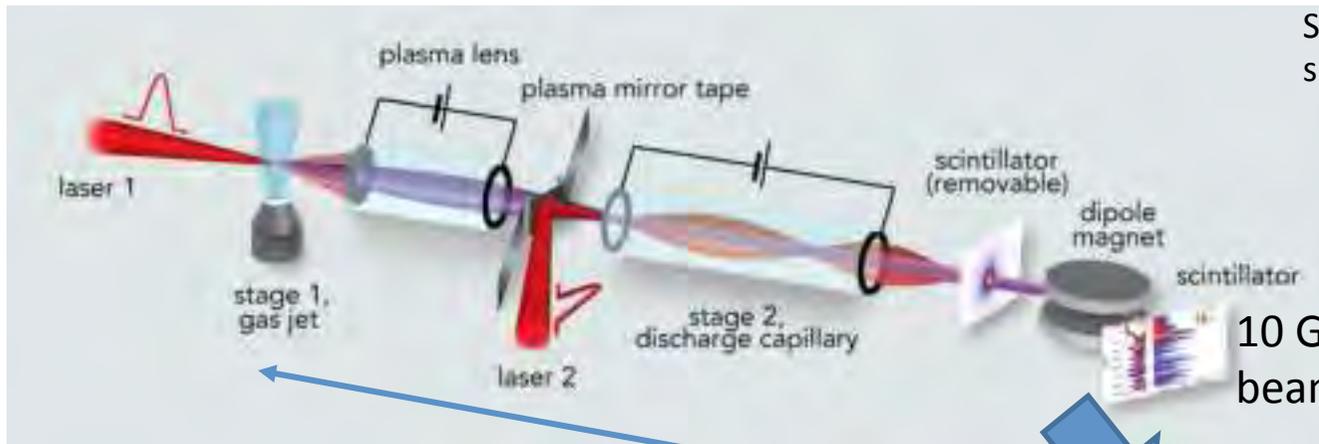


Leader mondiale: BELLA Center, Accelerator Technology and Applied Physics Division  
Lawrence Berkeley National Laboratory

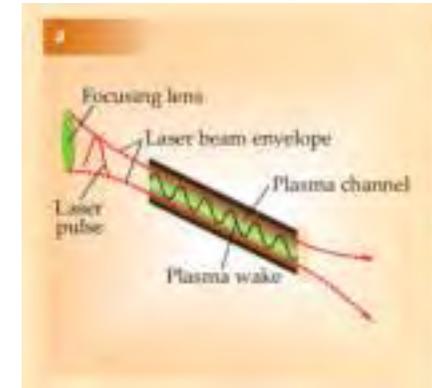




# ACCELERAZIONE LASER-PLASMA: MULTI-GeV LINAC



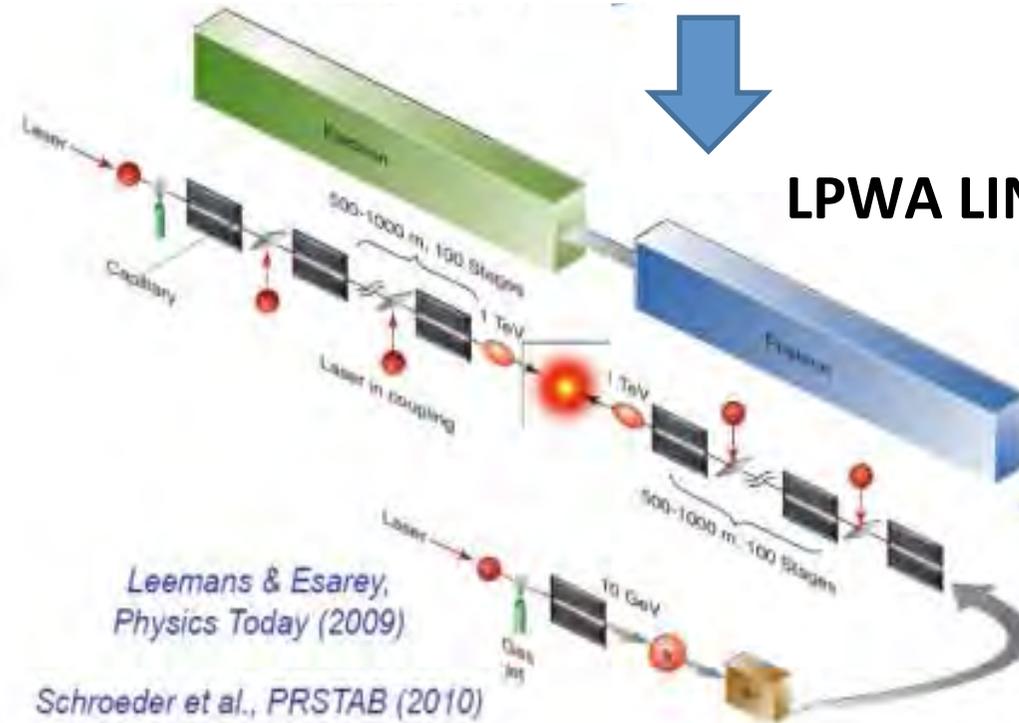
Su scala ridotta ci sono già dei risultati sperimentali



~90 cm

**SORGENTI DI RADIAZIONE  
COMPATTE BASATE SU LPWA**

**LPWA LINEAR COLLIDER?**



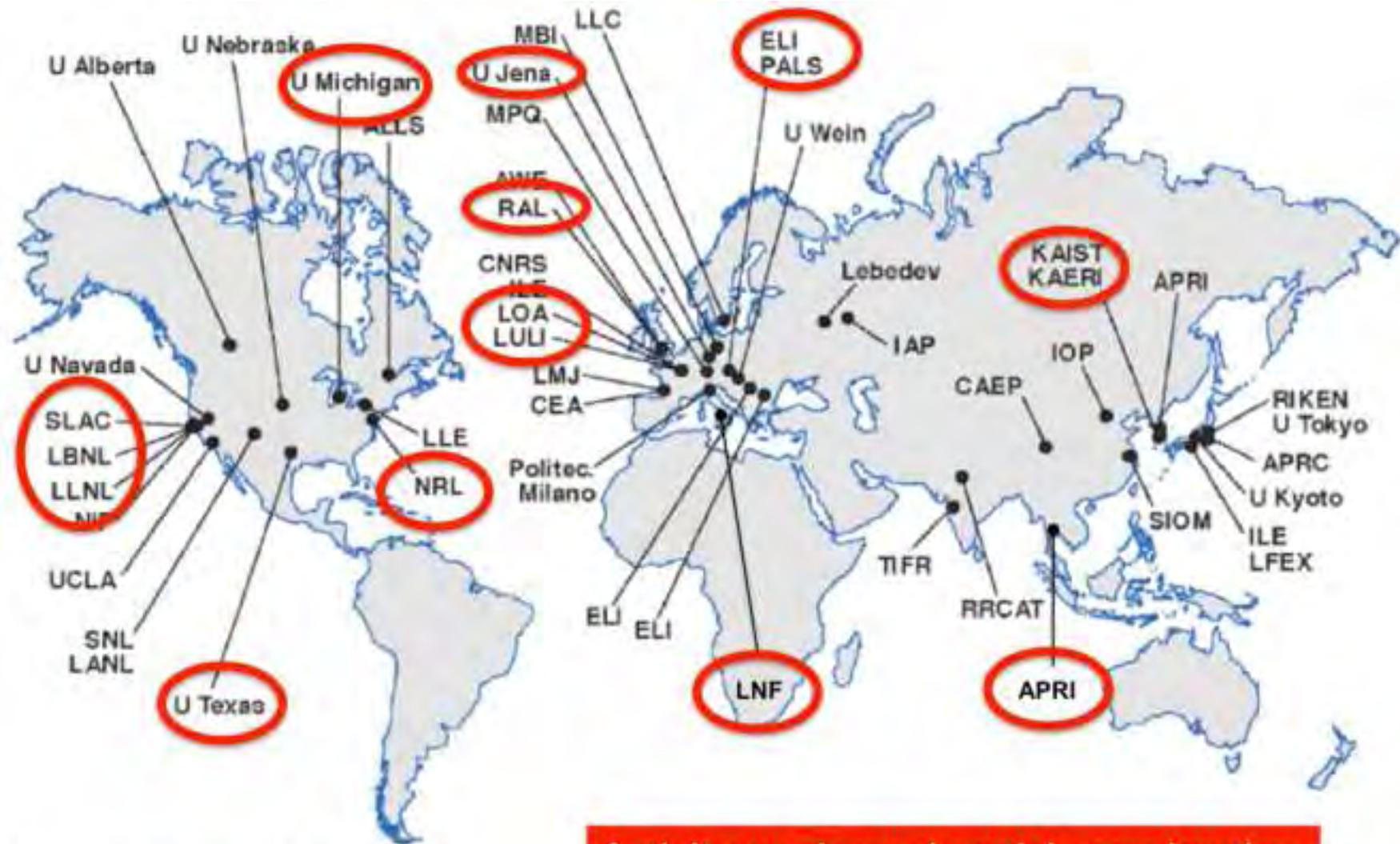
- LPA-linear collider:
- 50 stages (1 TeV collider)
- 10 GeV/stage
- requires ~10 J laser (at tens of kHz, hundreds of kW)
- $n=10^{17} \text{ cm}^{-3}$  (set by laser depletion)

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



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

# ULTRA-HIGH INTENSITY LASER FACILITIES



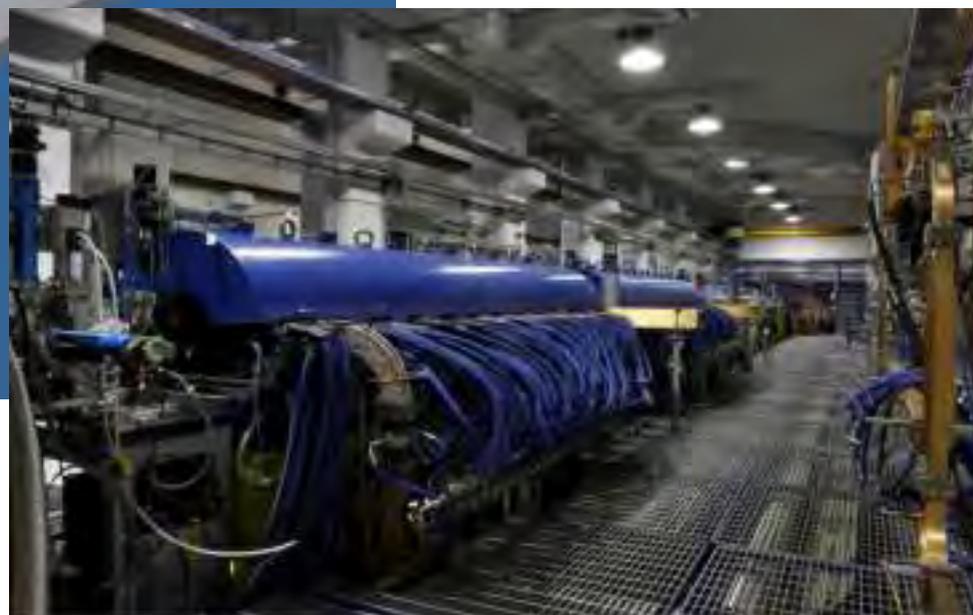
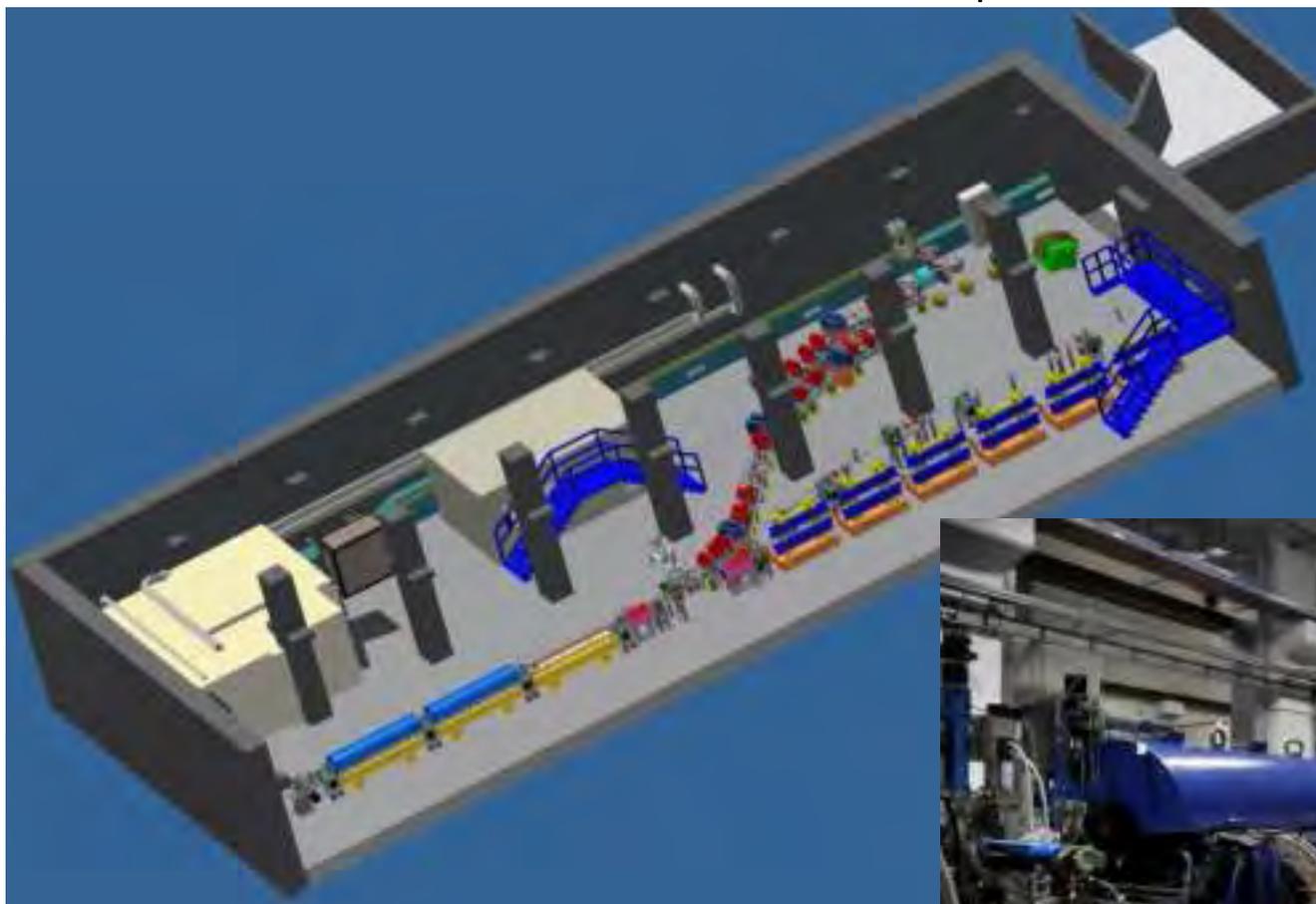
<http://www.icuil.org/>

Activity on charged particle acceleration

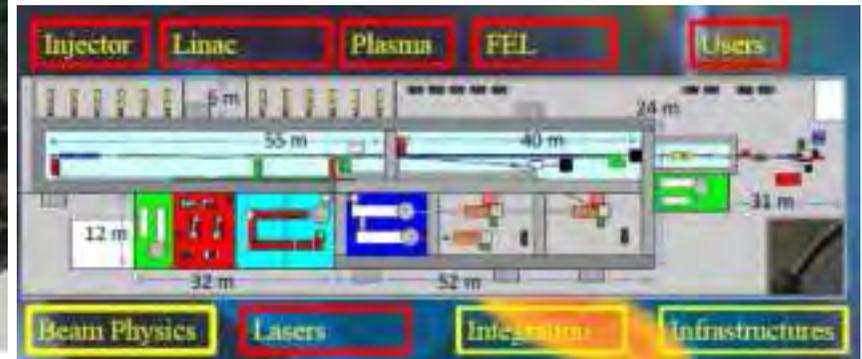
# SPARC\_LAB @LNF

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

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



# EuPRAXIA@SPARC\_LAB

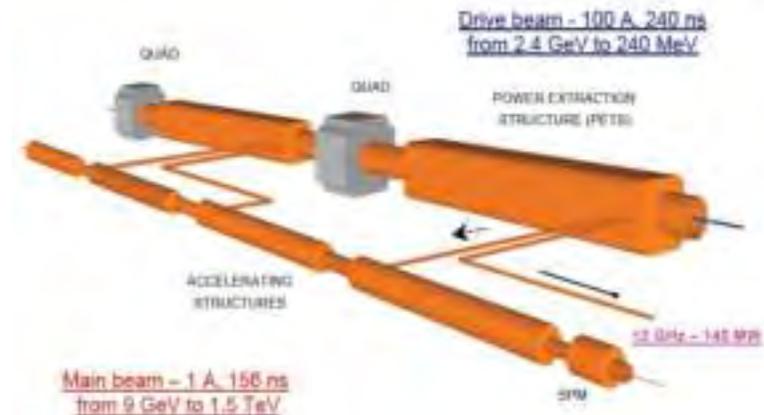


# PROPOSTE DI FUTURI COLLIDER AL CERN DOPO LHC



## FCC hadron collider parameters

Parameter	FCC-hh	SPPC	LHC	HL-LHC
collision energy cms [TeV]	100	71.2	14	
dipole field [T]	16	20	8.3	
# IP	2 main & 2	2	2 main & 2	
bunch intensity [ $10^{11}$ ]	1	1 (0.2)	1.1	2.2
bunch spacing [ns]	25	25 (5)	25	25
luminosity/lp [ $10^{34}$ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	5	-25	1	5
events/bunch crossing	170	-850 (170)	27	135
stored energy/beam [GJ]	8.4	8.6	0.36	0.7
synchrotron radiation [W/m/aperture]	30	58	0.2	0.35



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



# CONCLUSIONI

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

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

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

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

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

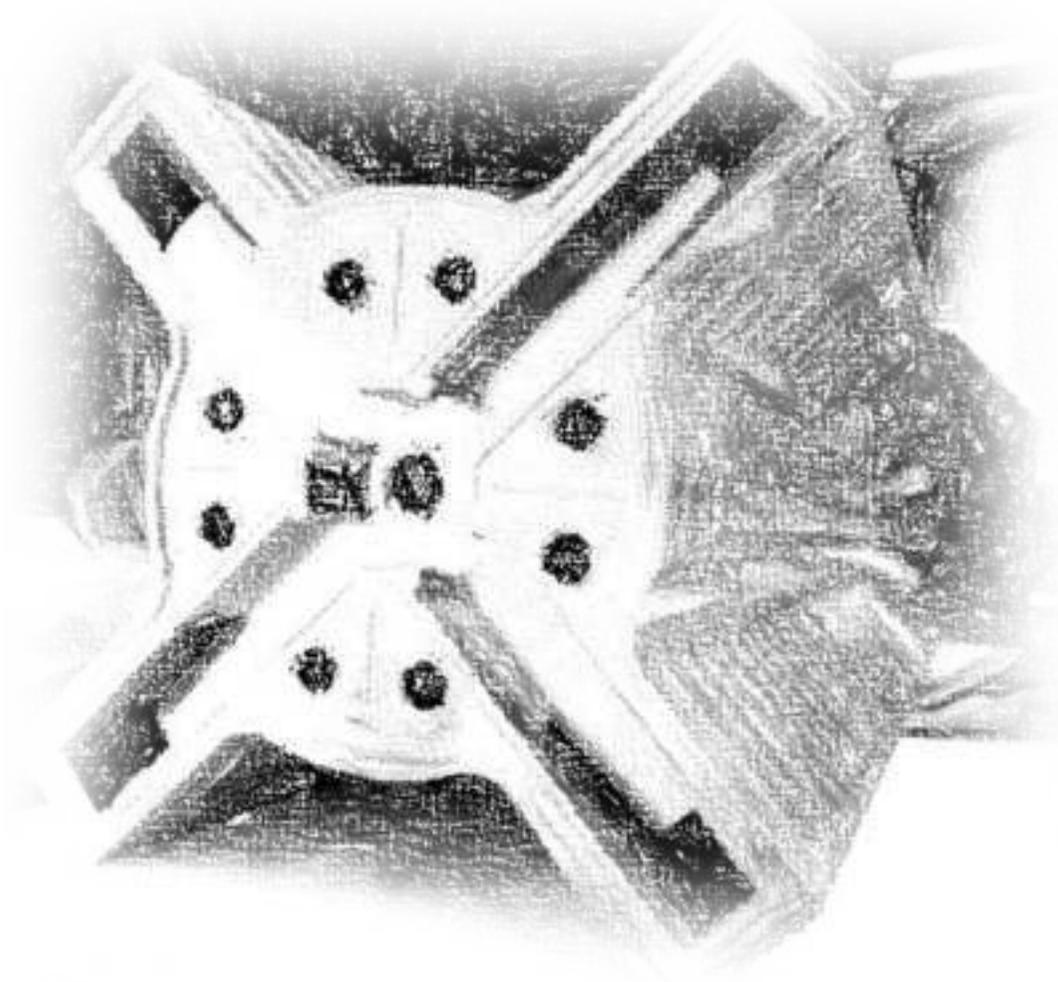
⇒L' R&D NELLA FISICA E TECNOLOGIA DEGLI ACCELERATORI DI PARTICELLE RIMANE UNO DEI SETTORI PIU' **ENTUSIASMANTI DELLA RICERCA** IN FISICA APPLICATA IN CUI **FANTASIA E CREATIVITA'** SONO GLI INGREDIENTI FONDAMENTALI

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

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

Quali i **possibili scenari** futuri?

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



**Ringrazio...**

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

# Alcuni link Bibliografici

## Scuole acceleratori

CERN Accelerator School:

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

## JUAS

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

USPAS

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

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

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

Animazione LINAC SLAC

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