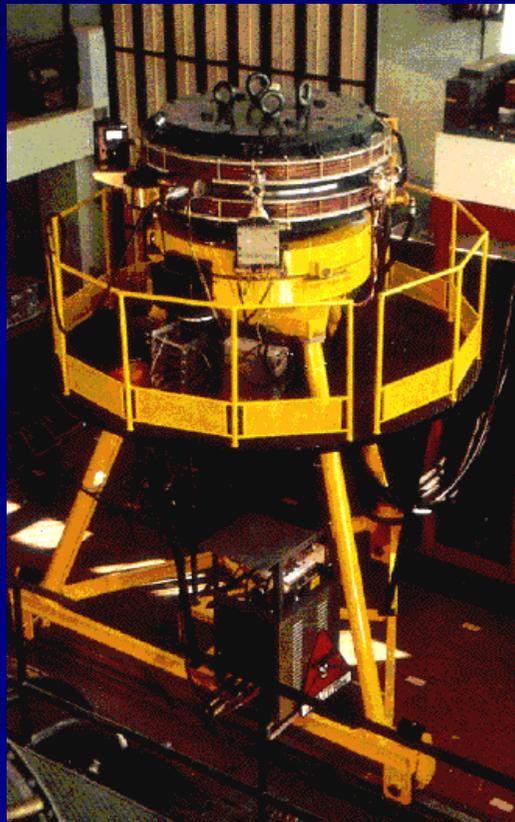


# Introduzione agli Acceleratori di Particelle

Cristina Vaccarezza

INFN-LNF



# Un acceleratore di particelle...

- Serve a produrre fasci di particelle cariche (ioni, elettroni, positroni, protoni, antiprotoni) per:
  - scopi di ricerca : Fisica nucleare e delle particelle, Struttura dei materiali
  - ricerca medica e biologica, terapia adronica dei tumori
  - scopi industriali: impiantazione di ioni, litografia, sterilizzazione dei cibi
  - .
  - .
  - .

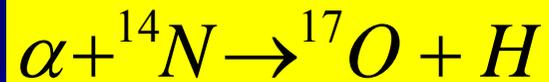
# “Classificazione”

- **Naturali:**
  - Radioattivi (1910-1919), raggi cosmici (1936-47)
- **Elettrostatici:**
  - X-ray tubes (Coolidge 1926) , Cockcroft-Walton, Van de Graaff e tandem (1931)
- **Lineari : Radio-frequenza (1925 → )**
- **Circolari:**
  - Ciclotroni, betatroni , sincrotroni, microtroni
  - Anelli di accumulazione e Collisori :
    - ADA Touschek (1960-Roma → )
- **Anelli per radiazione di Sincrotrone: (1947 → )**

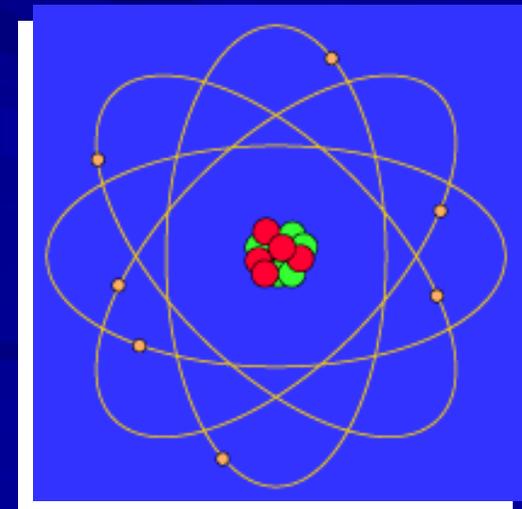
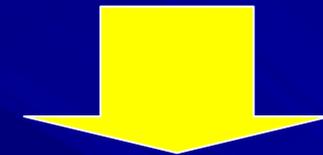
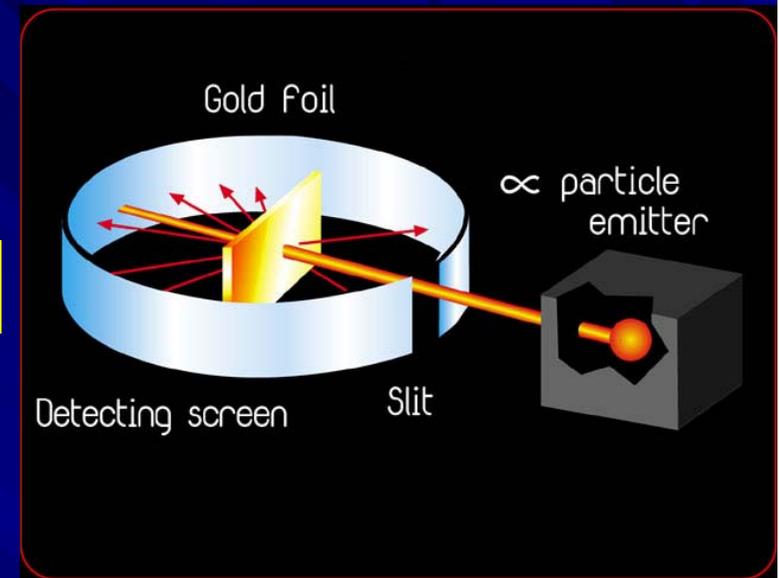
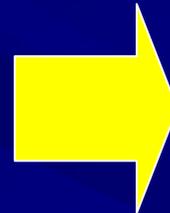
# Naturali 1

Nel 1911 Rutherford impiegando particelle  $\alpha$  prodotte naturalmente (Ra e Th) dimostrò l'esistenza di un nucleo carico ( $r < 10^{-11}$  cm) internamente all'atomo, aprendo di fatto la strada al modello atomico di Bohr.

Nel 1919 inoltre realizzò la prima reazione nucleare artificiale:



Limiti: flusso ed energia cinetica limitati

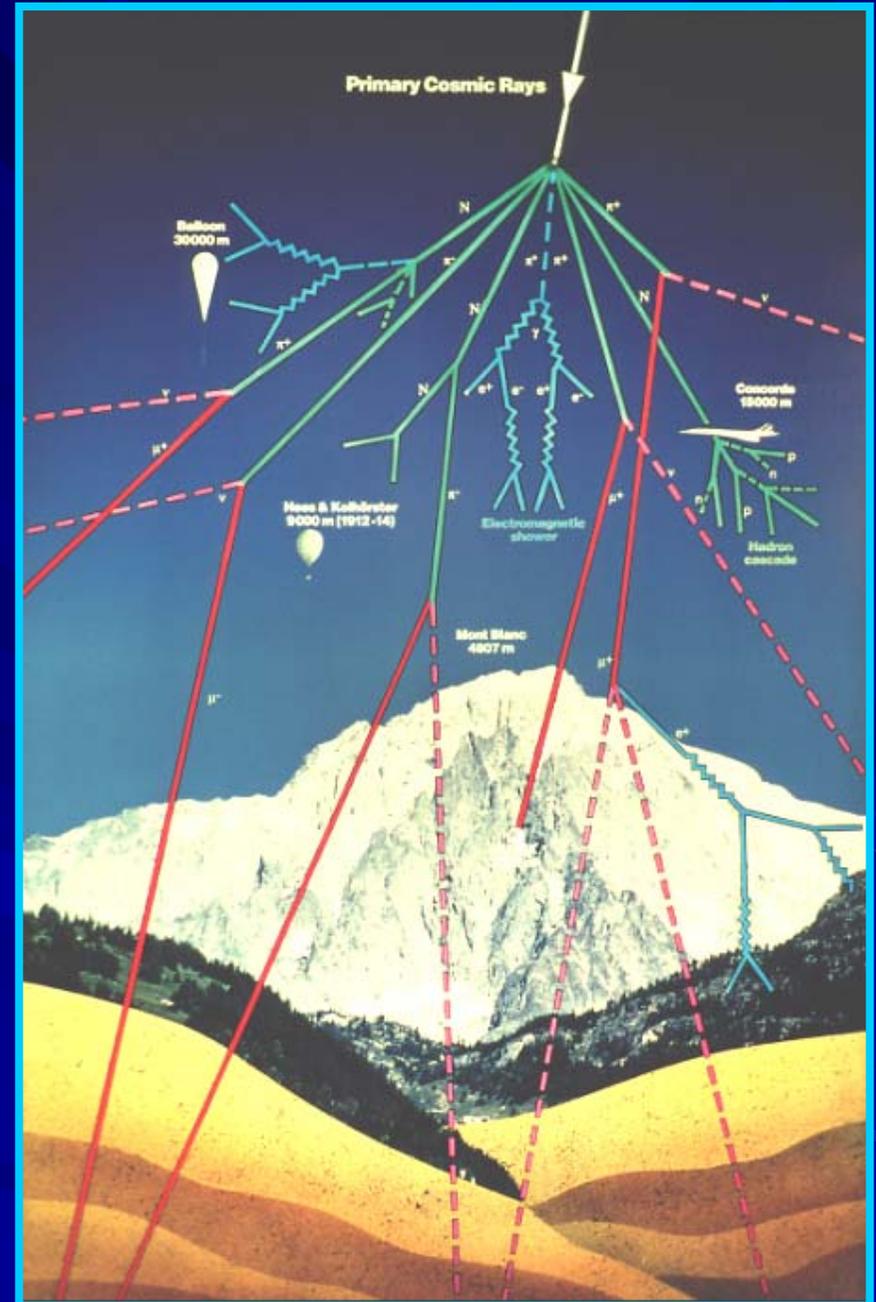


# Naturali 2

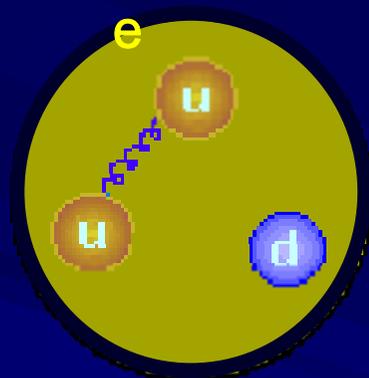
Raggi Cosmici:

- Scoperta del positrone (1932) da Anderson
- Scoperta del muone (1938) Anderson

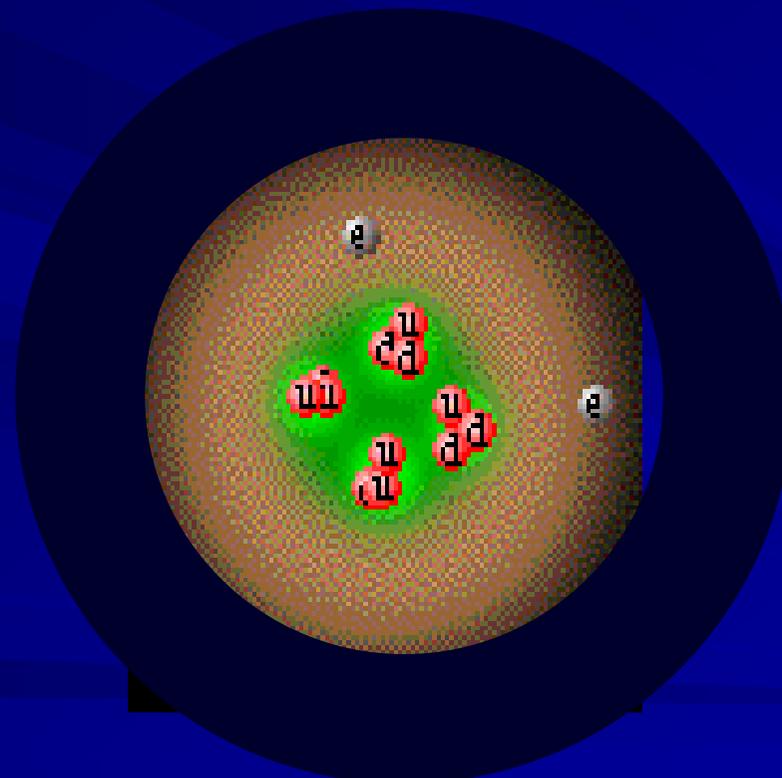
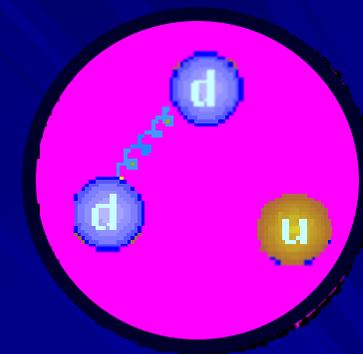
Limiti: fenomeni sovrapposti



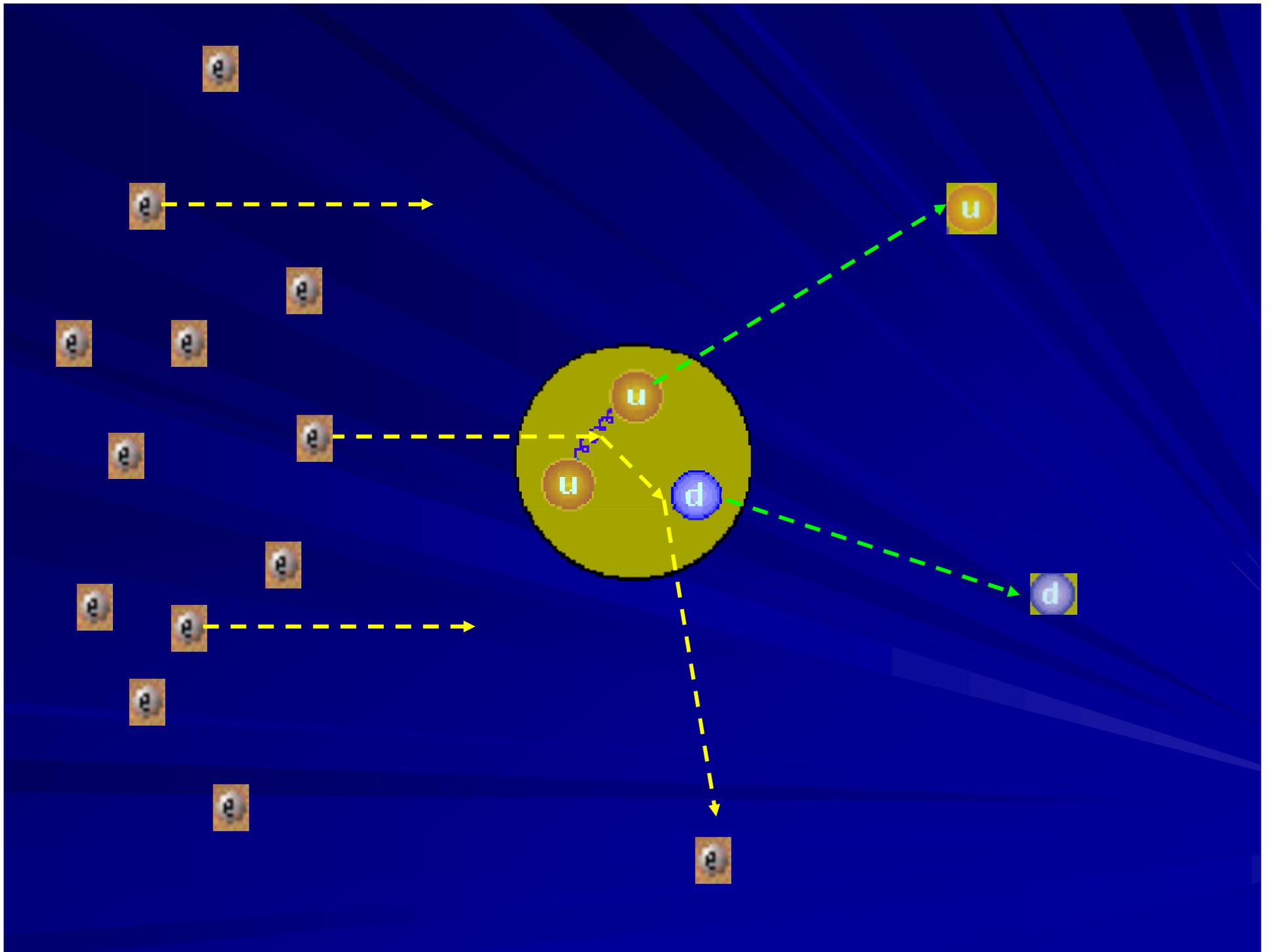
proton



neutrone

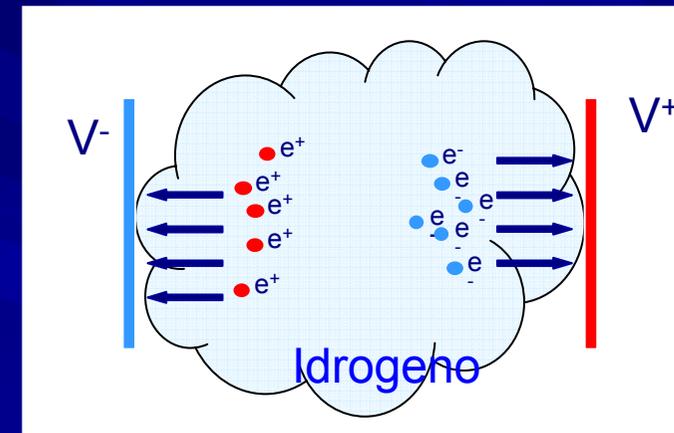
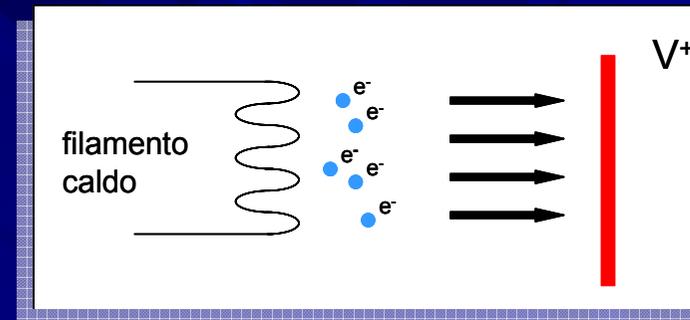


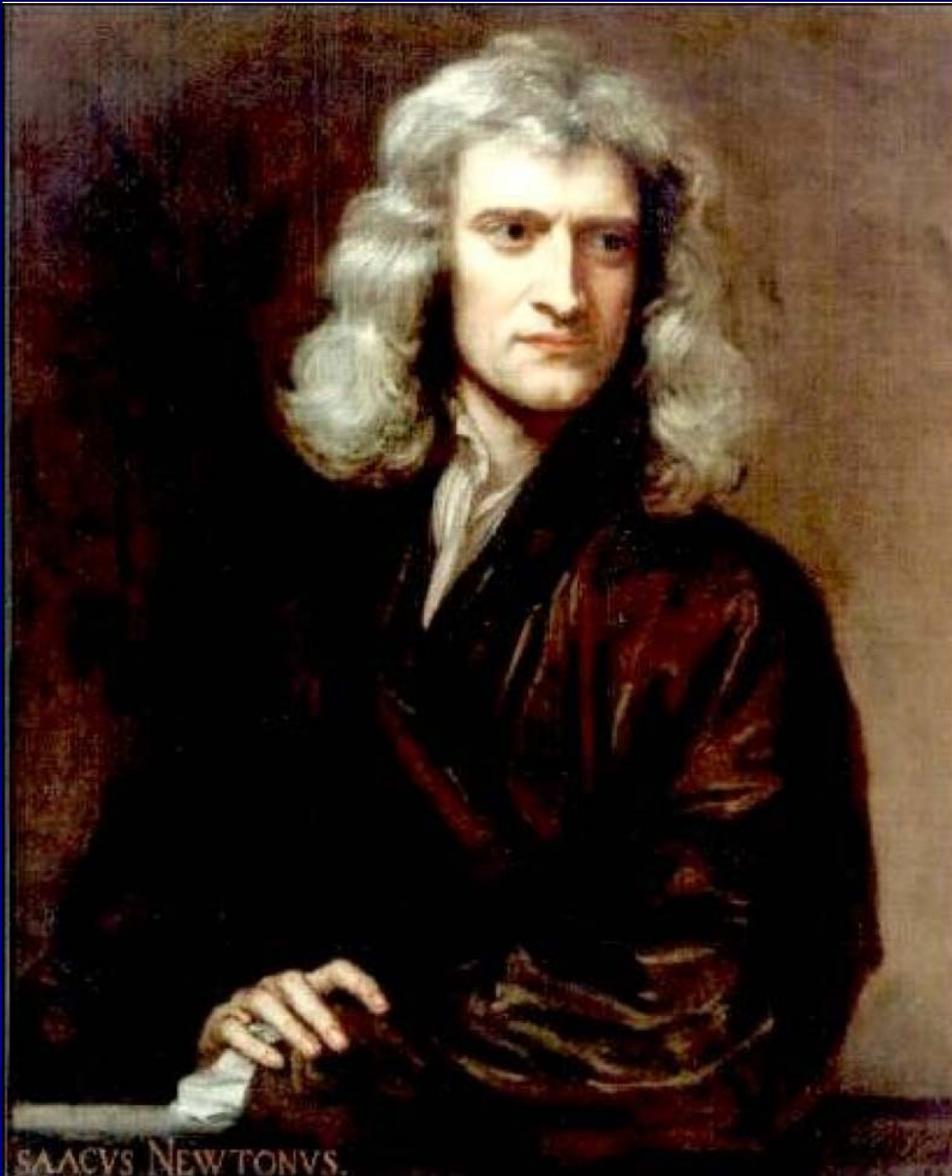
Atomo di Elio :  $2 p + 2n + 2 e$



# Sorgenti:

- Elettroni
- Protoni-Ioni
- Antiparticelle: positroni, antiprotoni, prodotte per collisione su un bersaglio ed estratte con campi magnetici
- Secondari:  $\gamma$ , muoni, neutrini, ottenuti dalla collisione un bersaglio con un fascio primario



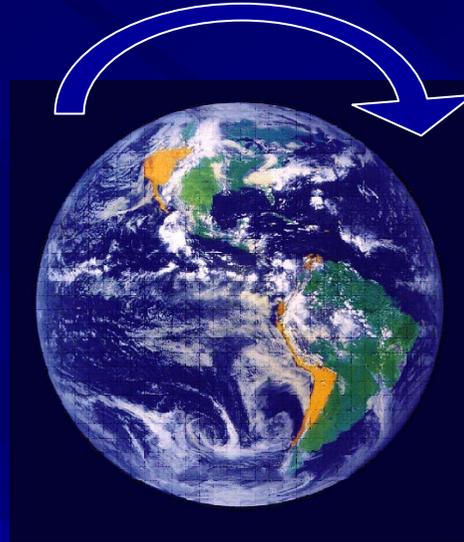


$$F = m_0 a$$

$$F \cdot \Delta t = \Delta(m \cdot v)$$

$$v = v_0 + at$$

Velocita' della luce  $c = 300\,000\text{ km/s}$



=> 7 giri della terra in 1 secondo

Quando le particelle si avvicinano alla velocità della luce diventano più massicce, non più veloci



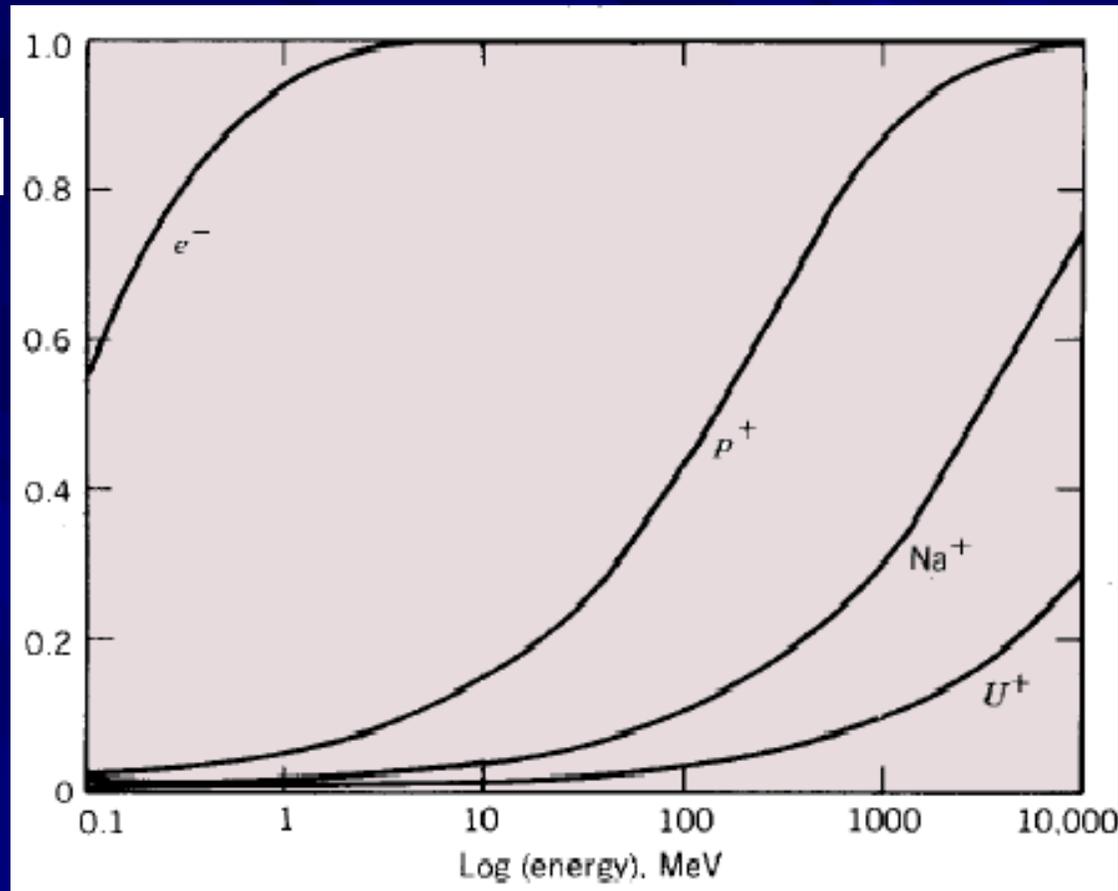
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

$$a = \frac{F}{\gamma^3 m_0} \xrightarrow{v=c} 0$$

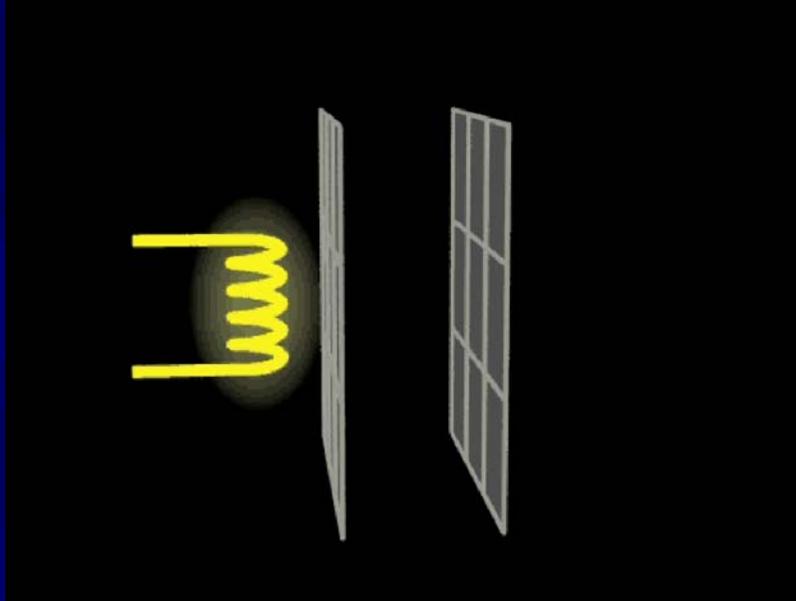
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \xrightarrow{v=c} \frac{1}{0} = \infty$$

# Accelerazione = aumento di energia

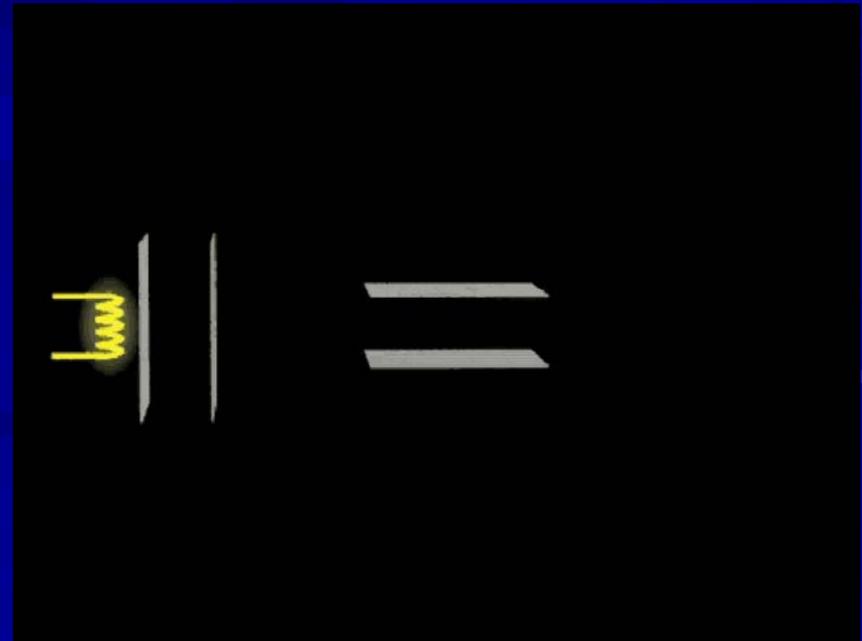
$$\beta = v/c$$

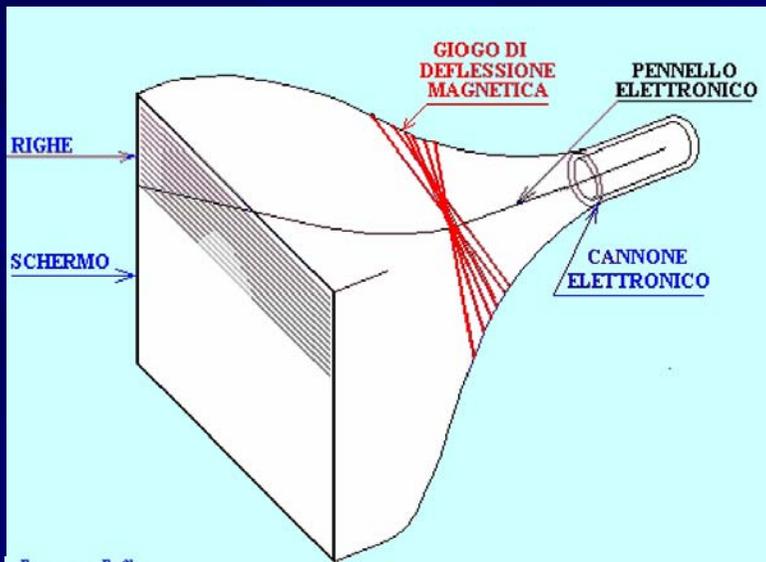
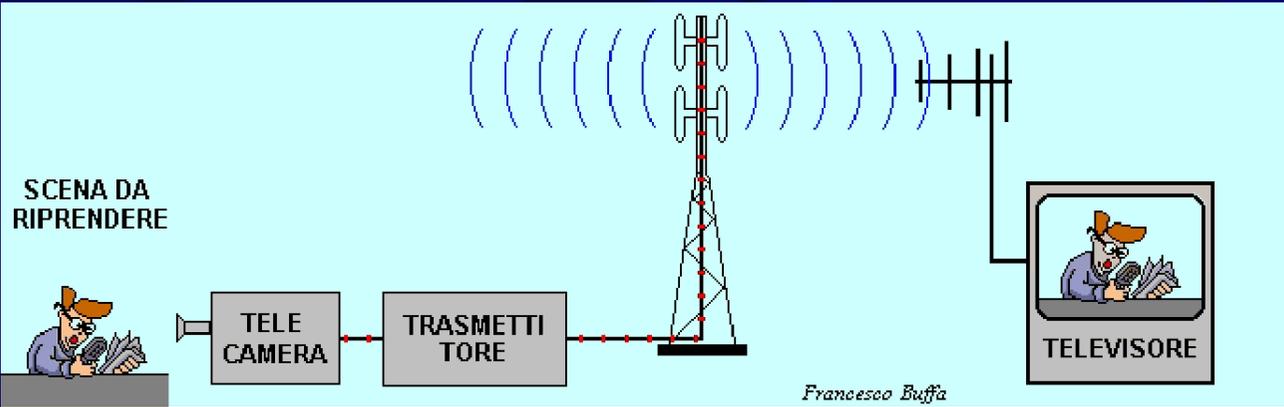


$$E = mc^2 = \gamma m_0 c^2$$

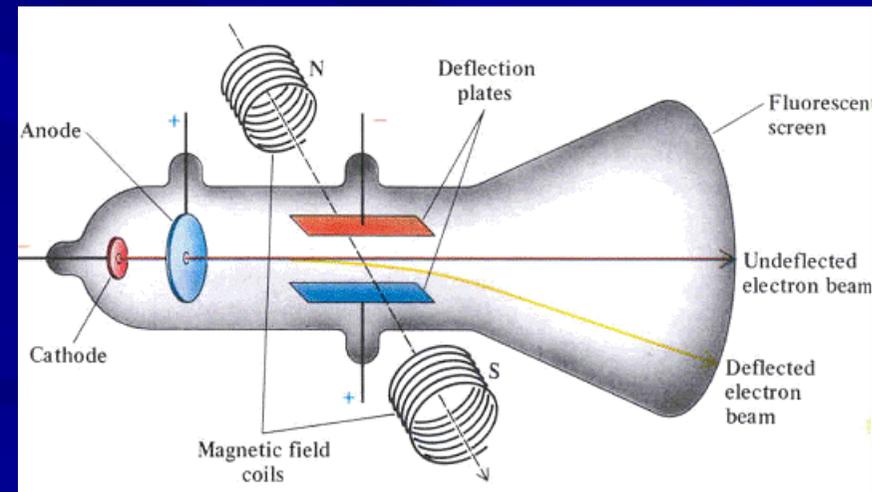
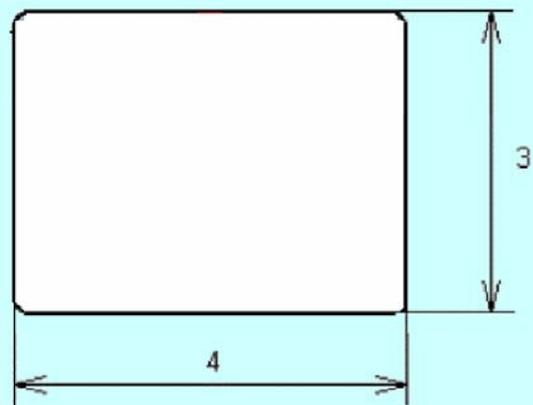


L'unità di misura dell'energia delle particelle è l' **ELETRONVOLT** pari all'energia di un elettrone accelerato da una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt: 1 eV





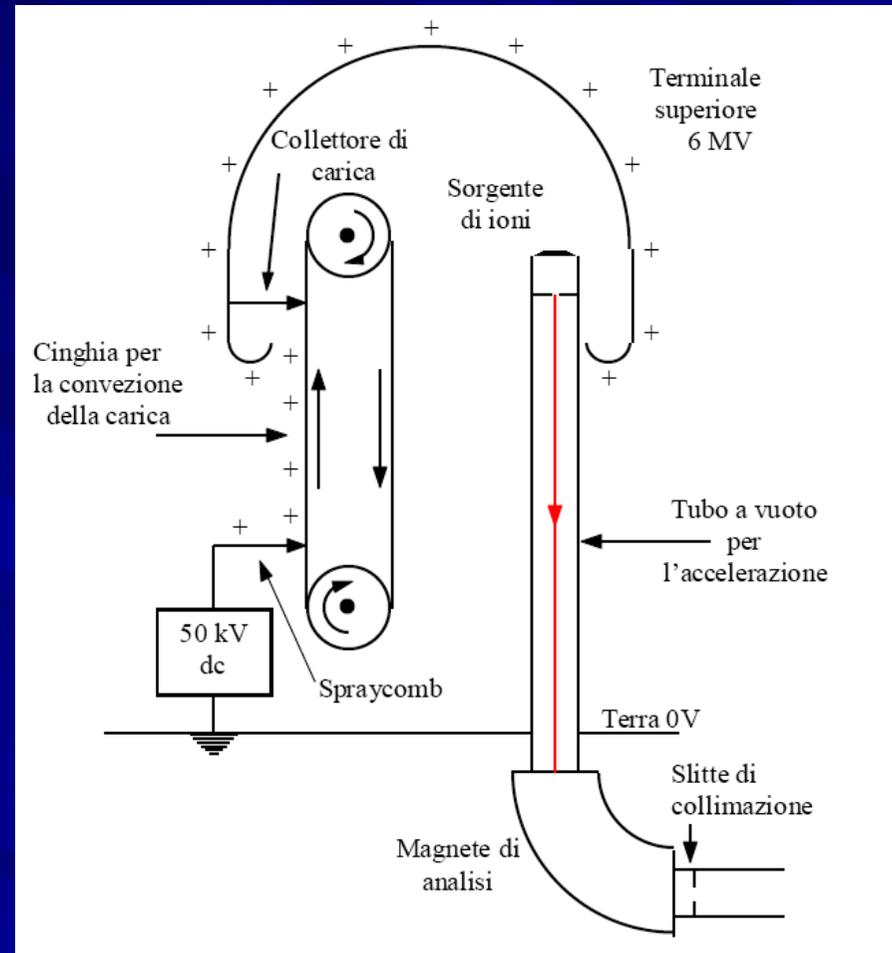
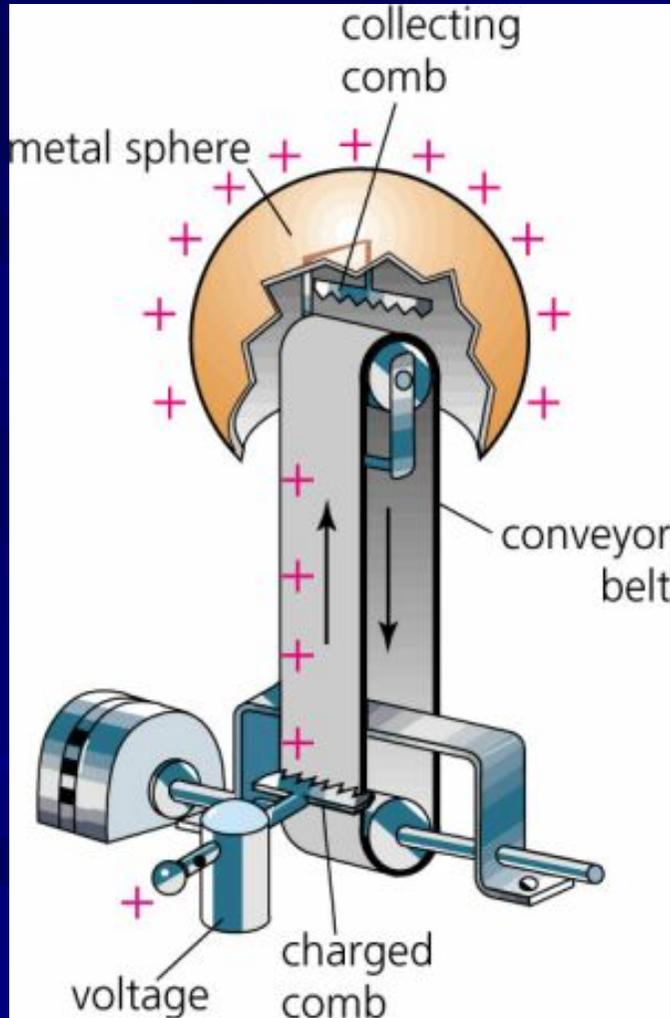
**$E = 10 \text{ keV}$**



**Acceleratore elettrostatico costruito a Roma nel 1939:  
fu il primo acceleratore italiano**



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.

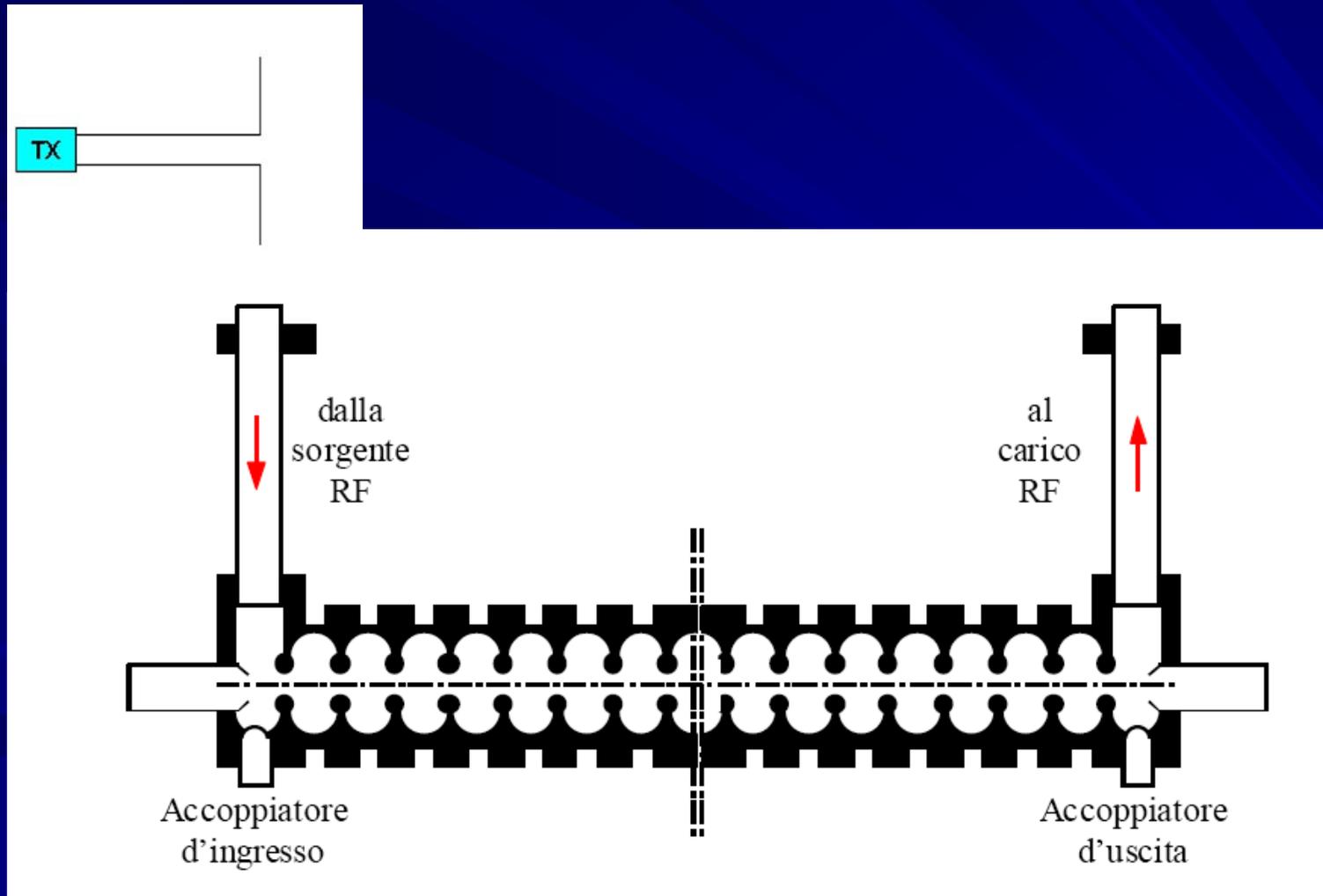






**$E = 6 \text{ MeV}$**

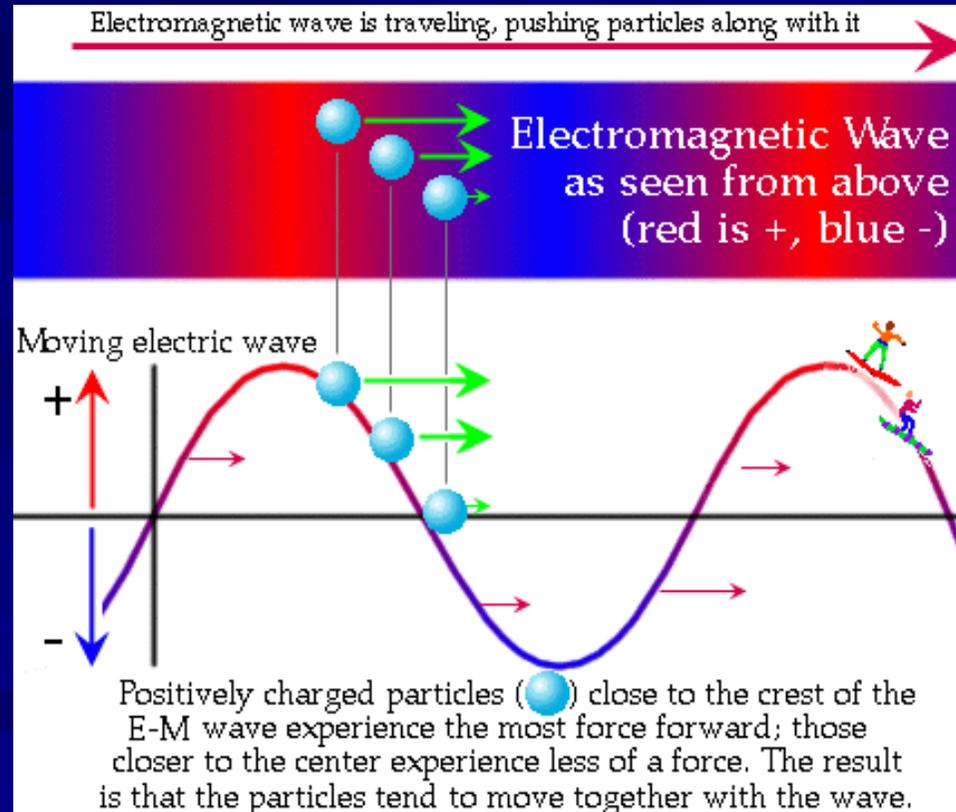
# Guide d' Onda Elettromagnetiche



1 | Positive particles just sitting there

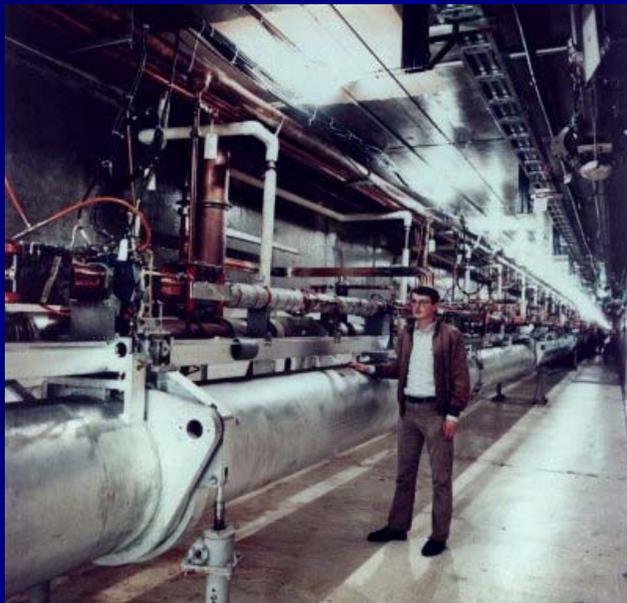
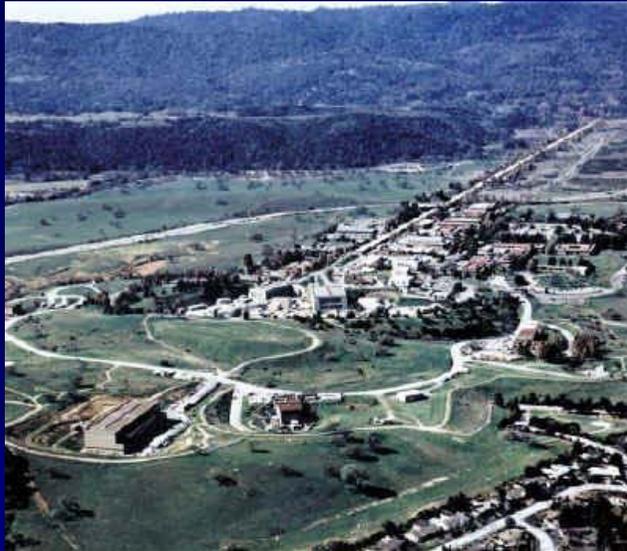


Electromagnetic wave is traveling, pushing particles along with it





# IL LINAC DI STANFORD (SLAC)



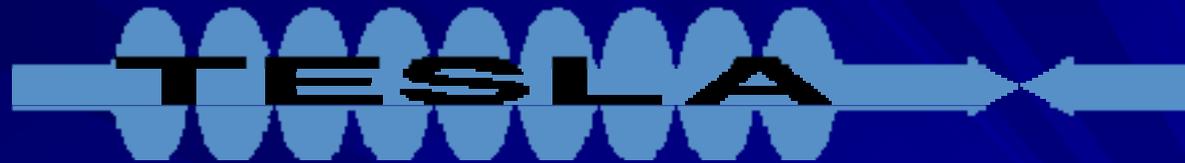
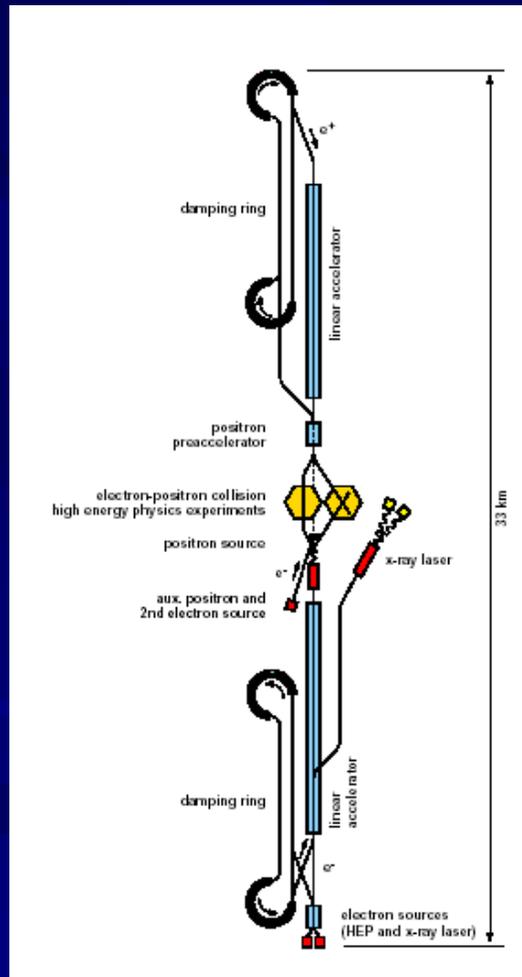
Accelerator length	3100 m
Length between power feeds	3.1 m
Number of accelerator sections	960
Number of klystrons	245
Peak power per klystron	6–24 MW
Beam pulse repetition rate	1–360 pulses/s
Radio-frequency pulse length	2.5 $\mu$ s
Filling time	0.83 $\mu$ s
Shunt impedance	53 M $\Omega$ /m
Electron energy (unloaded)	11.1–22.2 GeV
Electron energy (loaded)	10–20 GeV
Electron beam peak current	25–50 mA
Electron beam average current	15–30 $\mu$ A
Average electron beam power	0.15–0.6 MW
Efficiency	4.3%
Positron energy	7.4–14.8 GeV
Positron average beam current	0.45 $\mu$ A
Operating frequency	2.856 GHz
Accelerating structure	Iris-loaded waveguide
Waveguide outer diameter	10.5 cm
Aperture diameter	1.9 cm



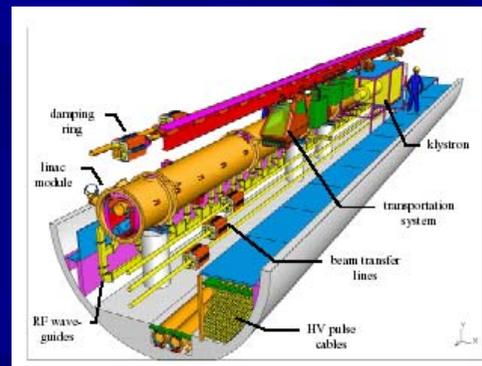
# ...e progetti futuri (per la ricerca fondamentale)

Arrivare a energie dell'ordine del TeV per  $e^+e^-$   
10 volte di più del LEP

Linear colliders

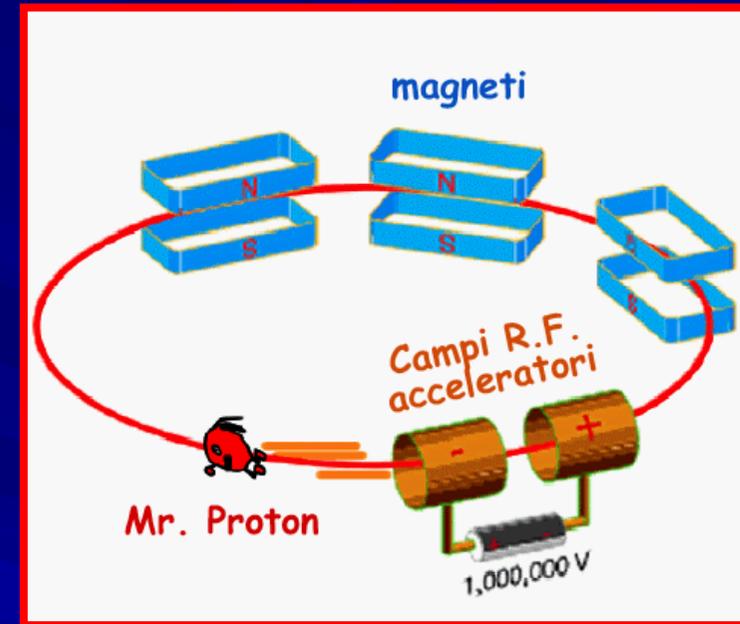
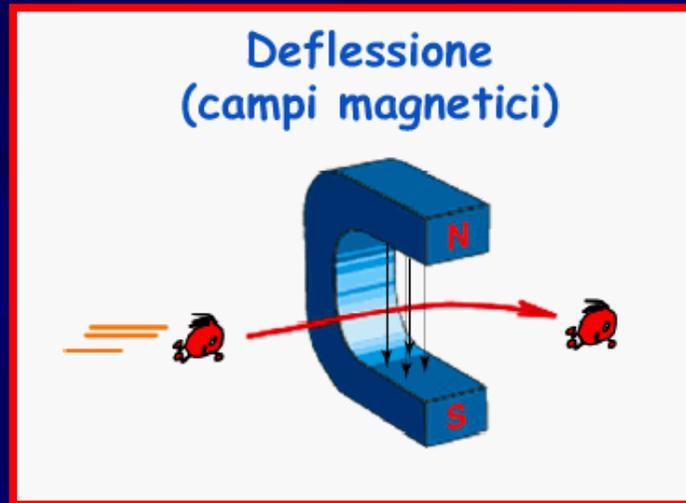


$E_{CM} = 1 \text{ TeV}$   
 $L = 33 \text{ Km}$



# Sincrotroni e anelli di Accumulazione

**PRINCIPIO:** Campi magnetici usati per guidare la particelle cariche lungo un'orbita chiusa.



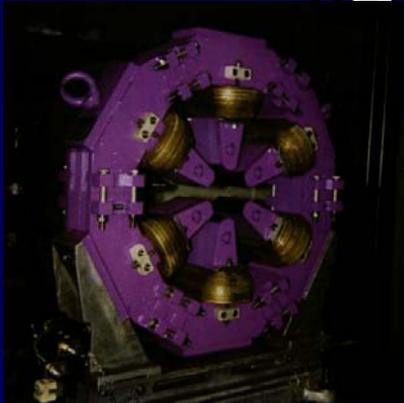
Particelle che viaggiano in un acceleratore lineare attraversano una sola volta la struttura accelerante mentre in un acceleratore circolare attraversano più volte la stessa cavità. Ad ogni giro tali pacchetti acquistano energia grazie al campo elettrico accelerante (a radiofrequenza).

$$v = c = 300.000.000 \text{ m/s}$$

DA Φ NE:  $L=96 \text{ m}$ :  $T_0 \approx 3.2 \times 10^{-7} \text{ s}$  -> in 1 secondo 3 milioni di giri

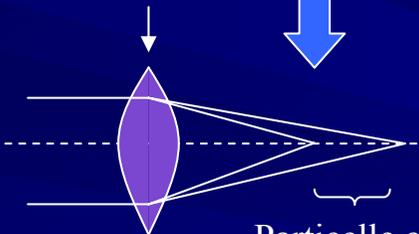
LEP:  $L=27 \text{ Km}$ :  $T_0 \approx 1 \times 10^{-4} \text{ s}$  -> in 1 secondo 10000 giri

# Magneti in un acceleratore circolare

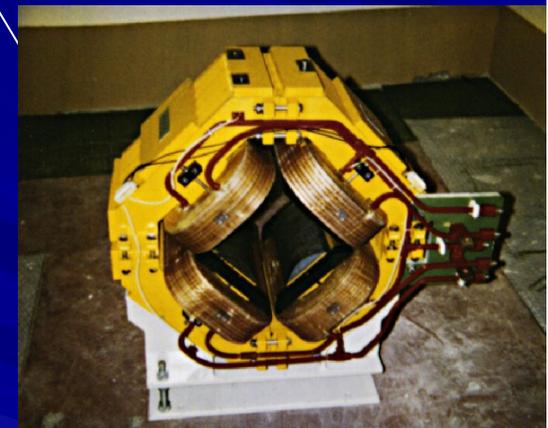
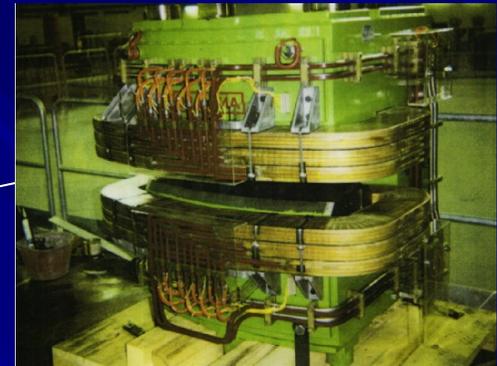
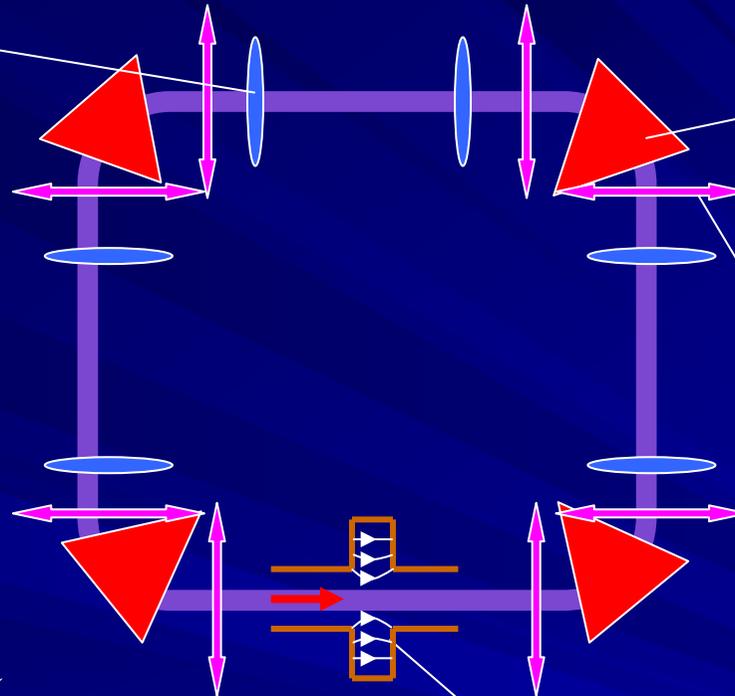


I sestupoli correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli

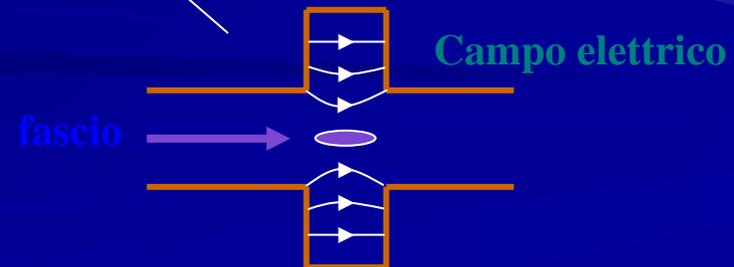
**QUADRUPOLO**



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



**DIPOLI** – determinano la traiettoria di riferimento  
**QUADRUPOLI** – mantengono le oscillazioni di tutte le particelle intorno alla traiettoria di riferimento  
**SESTUPOLI** – correggono l'effetto cromatico dei quadrupoli



# Tipologia degli acceleratori di particelle

I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base al processo di accelerazione  
in:

Lineari



Circolari

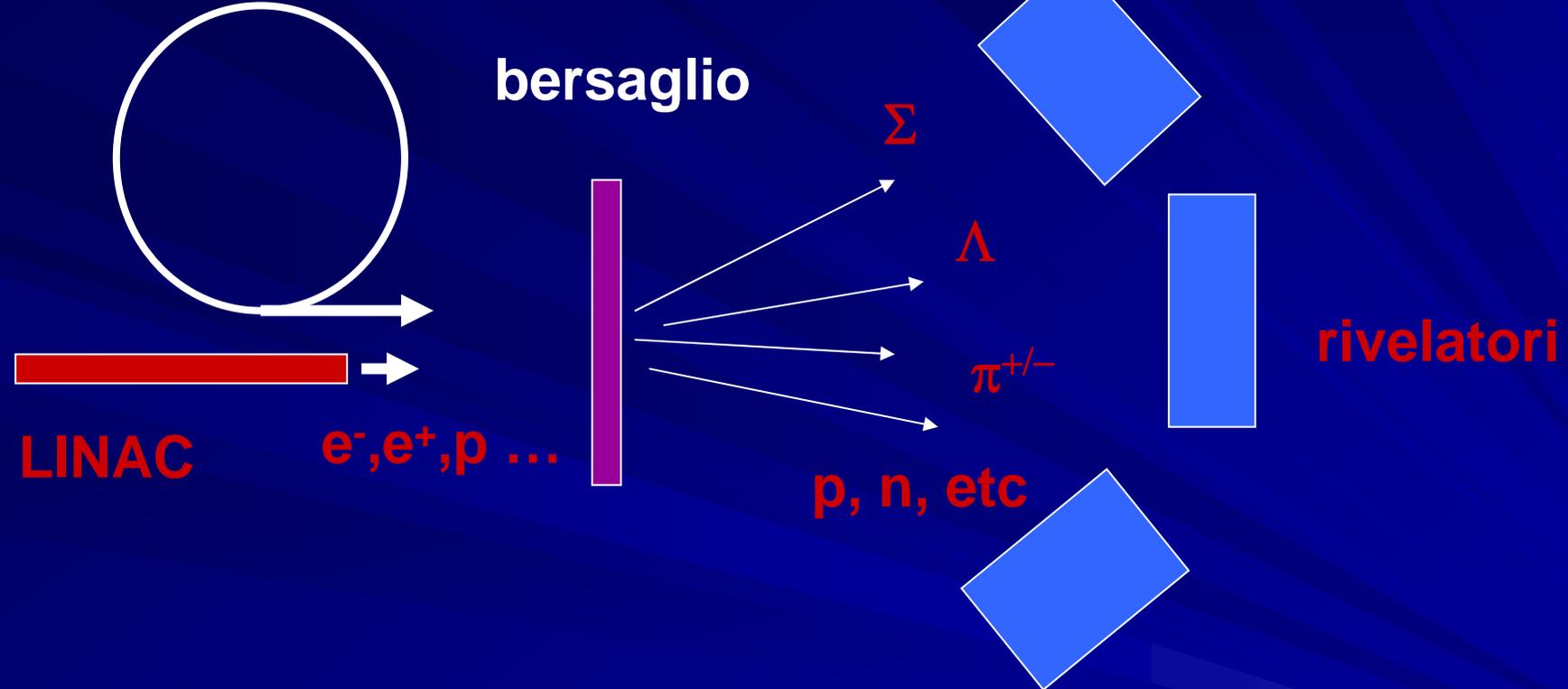


*Ciclotrone 1930*  
*Betatrone 1940*  
*Sincrotrone 1945*  
*Microtrone 1946*

Lo sviluppo degli acceleratori è avvenuto lungo  
due binari paralleli

## L'osservazione su "bersaglio" fisso

sincrotrone

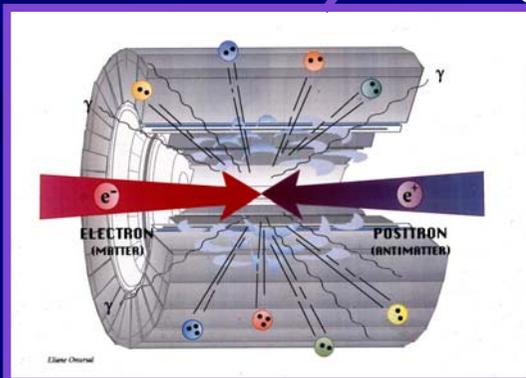
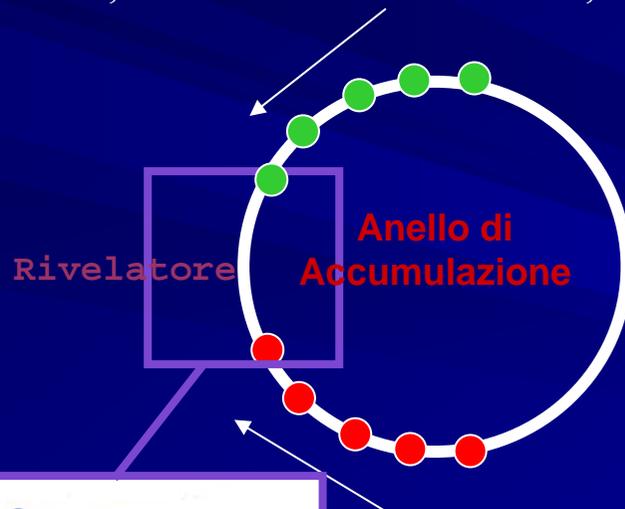


La materia è vuota : ciò che non ha interagito viene perduto  
Energia a disposizione dell'interazione dovuta solo al fascio  
Il bersaglio è complesso: molte delle particelle prodotte disturbano l'esperimento

L'idea di Touschek:  
 collisioni **materia-antimateria**  
*Frascati*



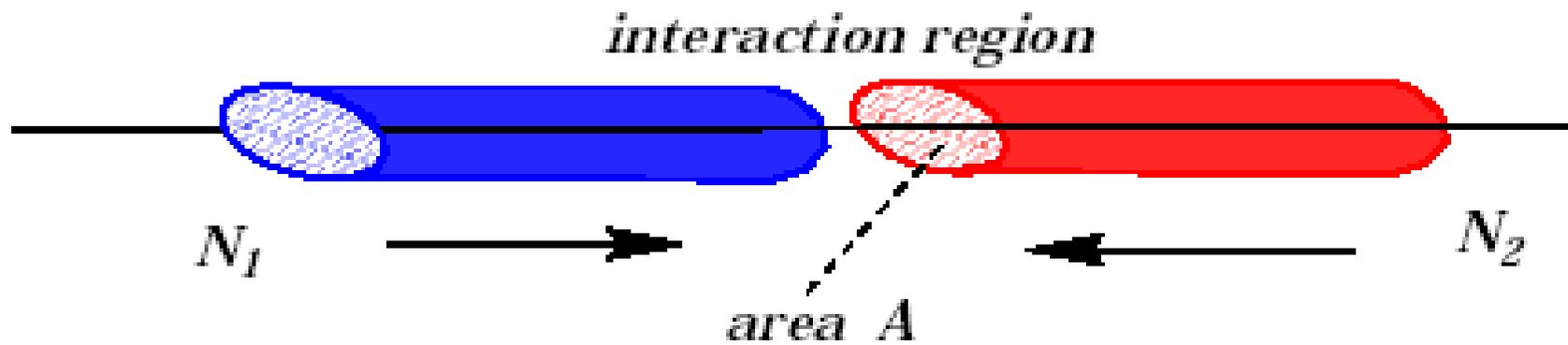
La geniale idea di **Bruno Touschek** fu quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.



		Available Energy
Fixed Target	 Beam (450 GeV)      Target (at rest)	29 GeV $E_{CM} \approx \sqrt{2E_1 m_2}$
Colliding Beams	 Beam (450 GeV)      Beam (450 GeV)	900 GeV $E_{CM} \approx 2E$

# Luminosità

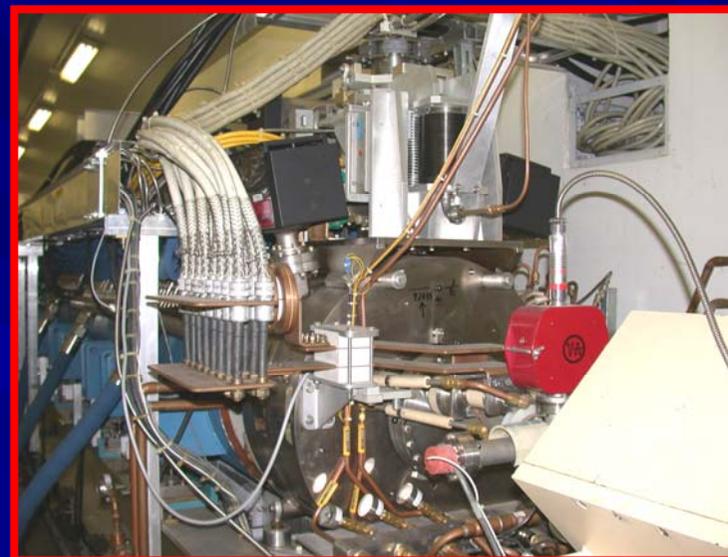
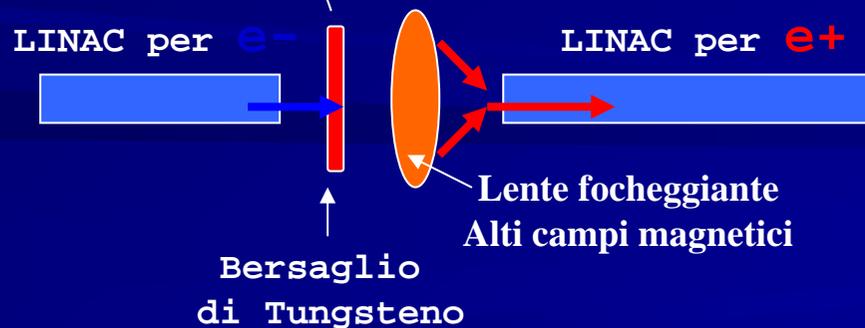
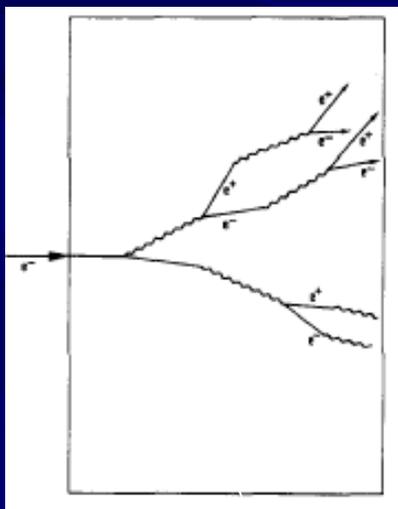
- la *luminosità*  $L$  di un collider è una misura di quante interazioni fascio-fascio stiamo producendo



# Dove si prende l'antimateria?

L'universo, il nostro mondo sono formati da materia: elettroni, protoni, neutroni,...

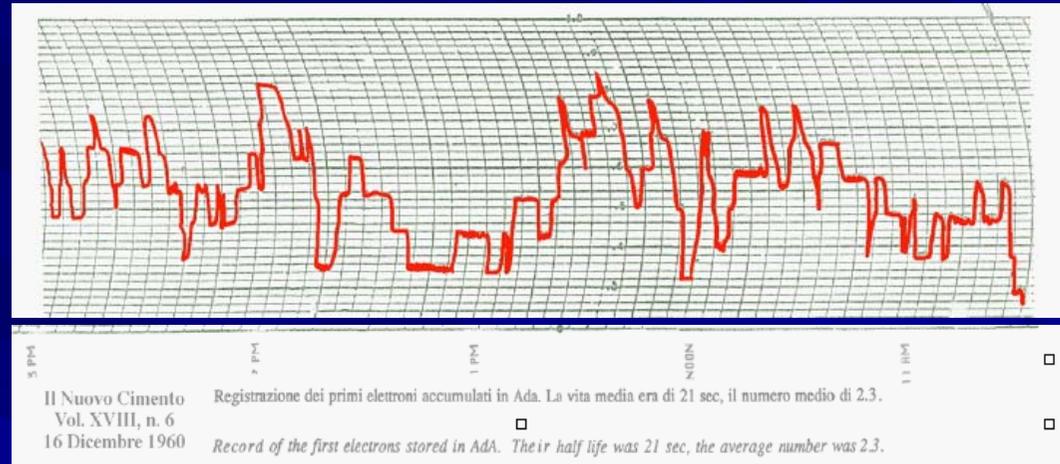
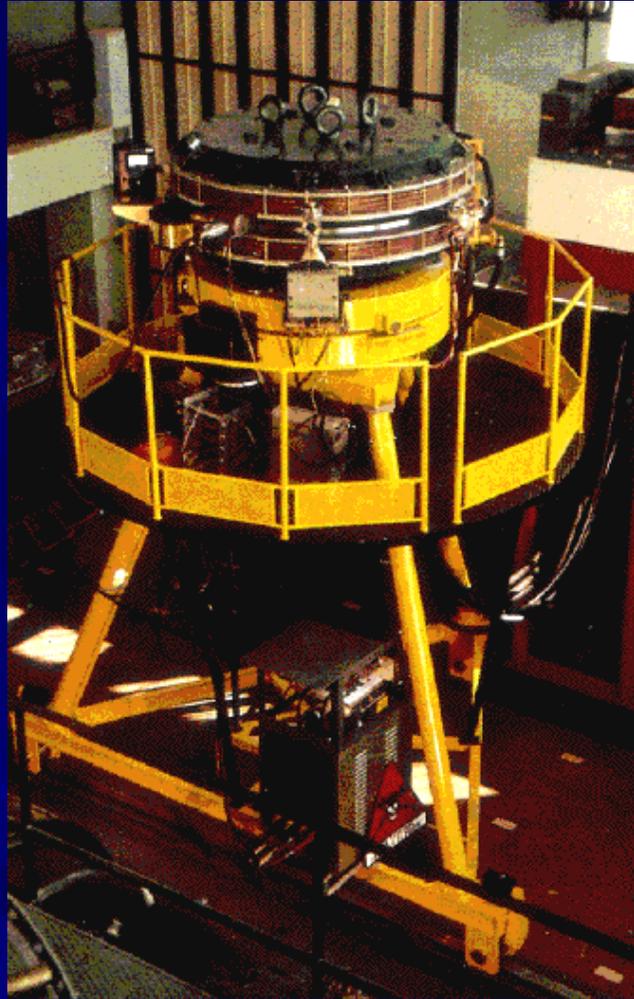
**positroni** predetti nel 1927 da un matematico (**Dirac**), misurati qualche anno dopo in un esperimento con raggi cosmici (**Andersen**), adesso si producono in laboratorio. (Così anche gli **antiprotoni**, l'antimateria dei protoni, anche se la loro produzione e manipolazione è più complessa)



Sorgente di positroni di DAΦNE

# AdA (Anello di Accumulazione)

## FRASCATI - 1961-1965



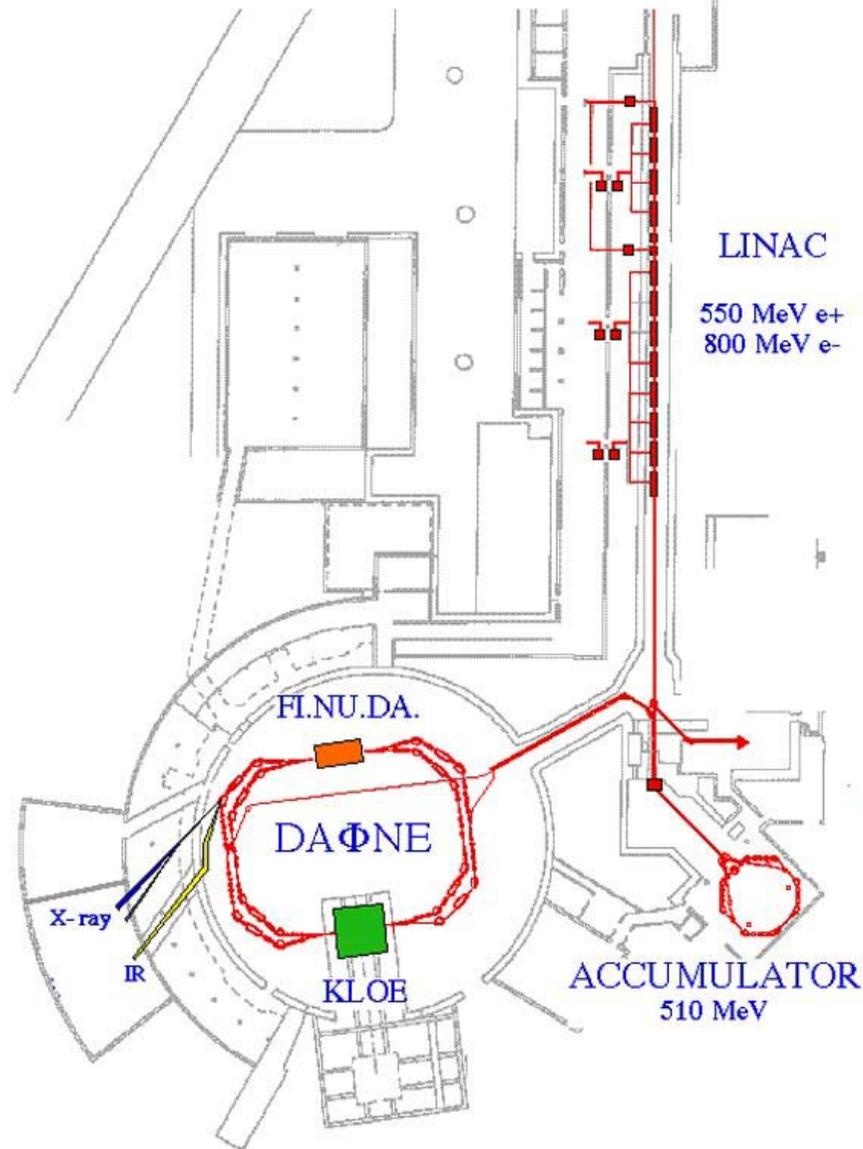
Registrazione dei primi elettroni  
accumulati in AdA.  
La vita media era 21 sec,  
il numero medio 2.3

# I COLLIDERS materia-antimateria: una storia che parte e si sviluppa a Frascati

**DAFNE**



## The Frascati $\Phi$ -Factory



IL complesso di DAΦNE è formato da tre elementi:

- (1) il **LINAC**;
- (2) l'**accumulatore**;
- (3) i due **anelli principali**.
- (4) tre **linee di luce di sincrotrone**

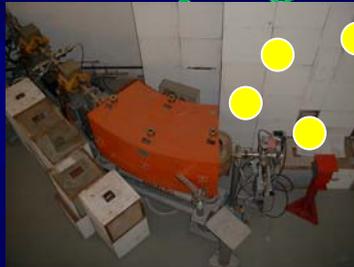
Le strutture sono state completate nel 1997 e le prime collisioni sono avvenute nel marzo 1998.

# DAΦNE



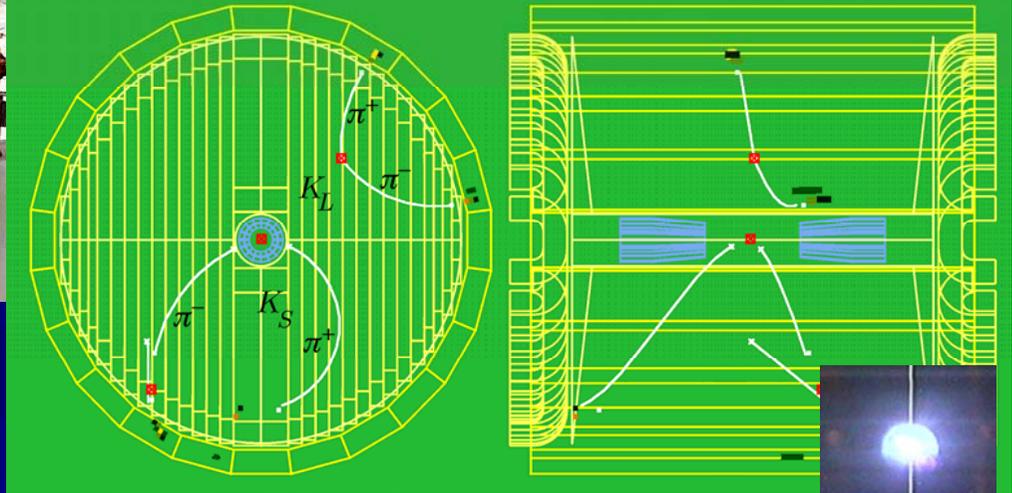
Run	Event	Date
6757	738533	Apr. 20, 99

Damping ring



Test beam

Main rings

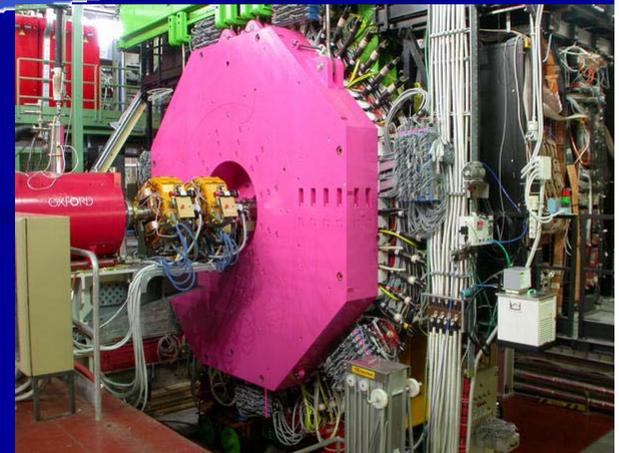


DAΦNE-Light

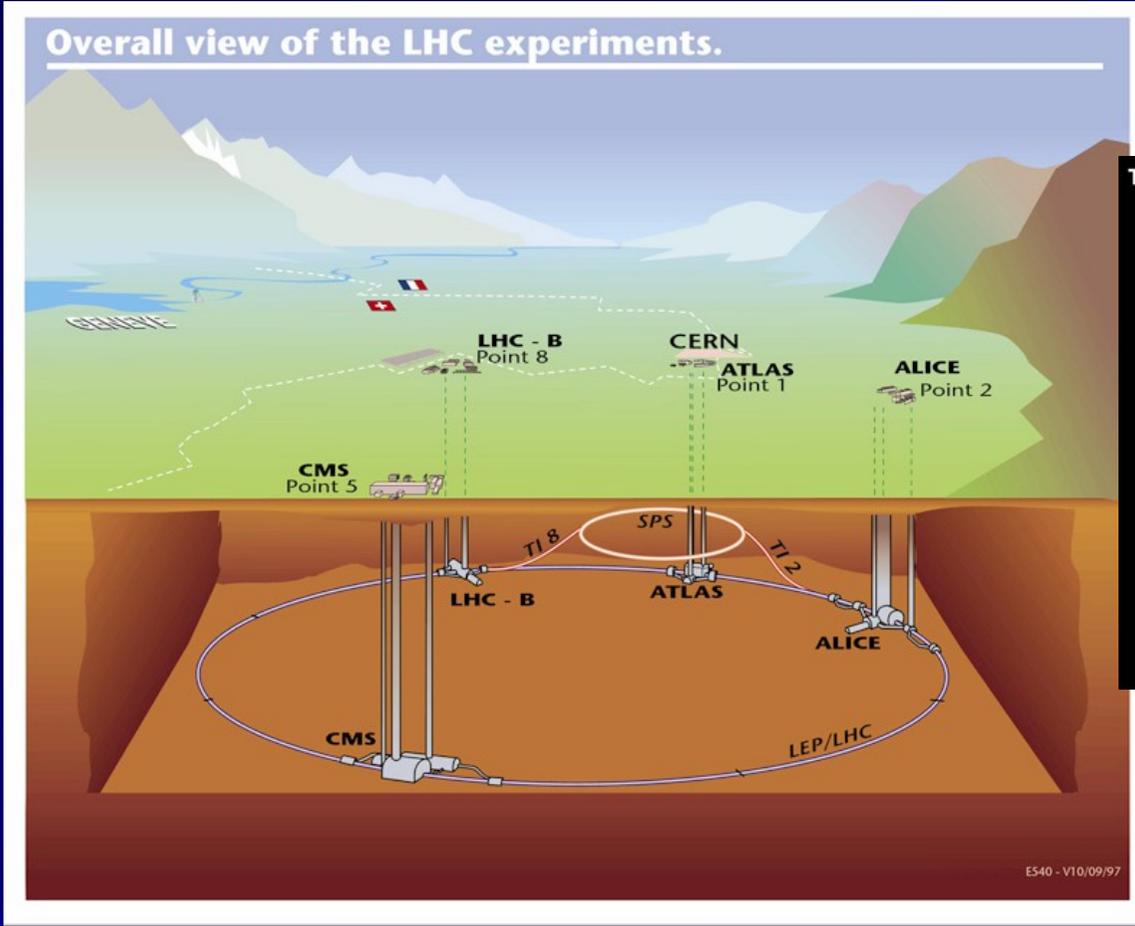
Linac



DEAR  
FINUDA



# In fase di costruzione LHC: collisore pp al posto del LEP: $E_{CM}=14\text{ TeV}$

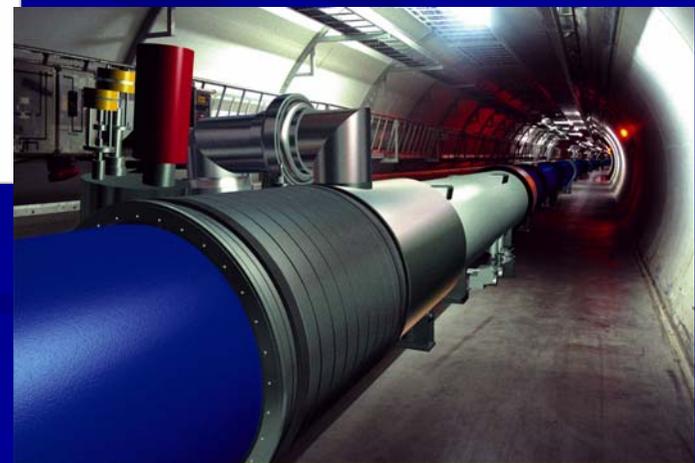


### The Twenty Member States of CERN

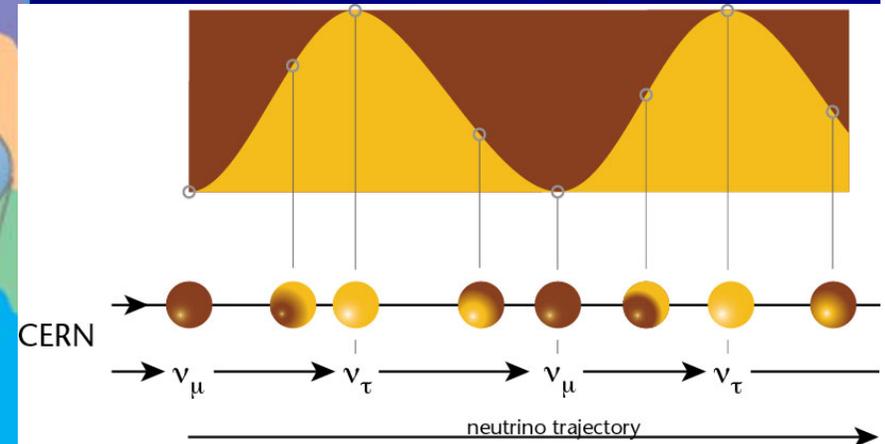
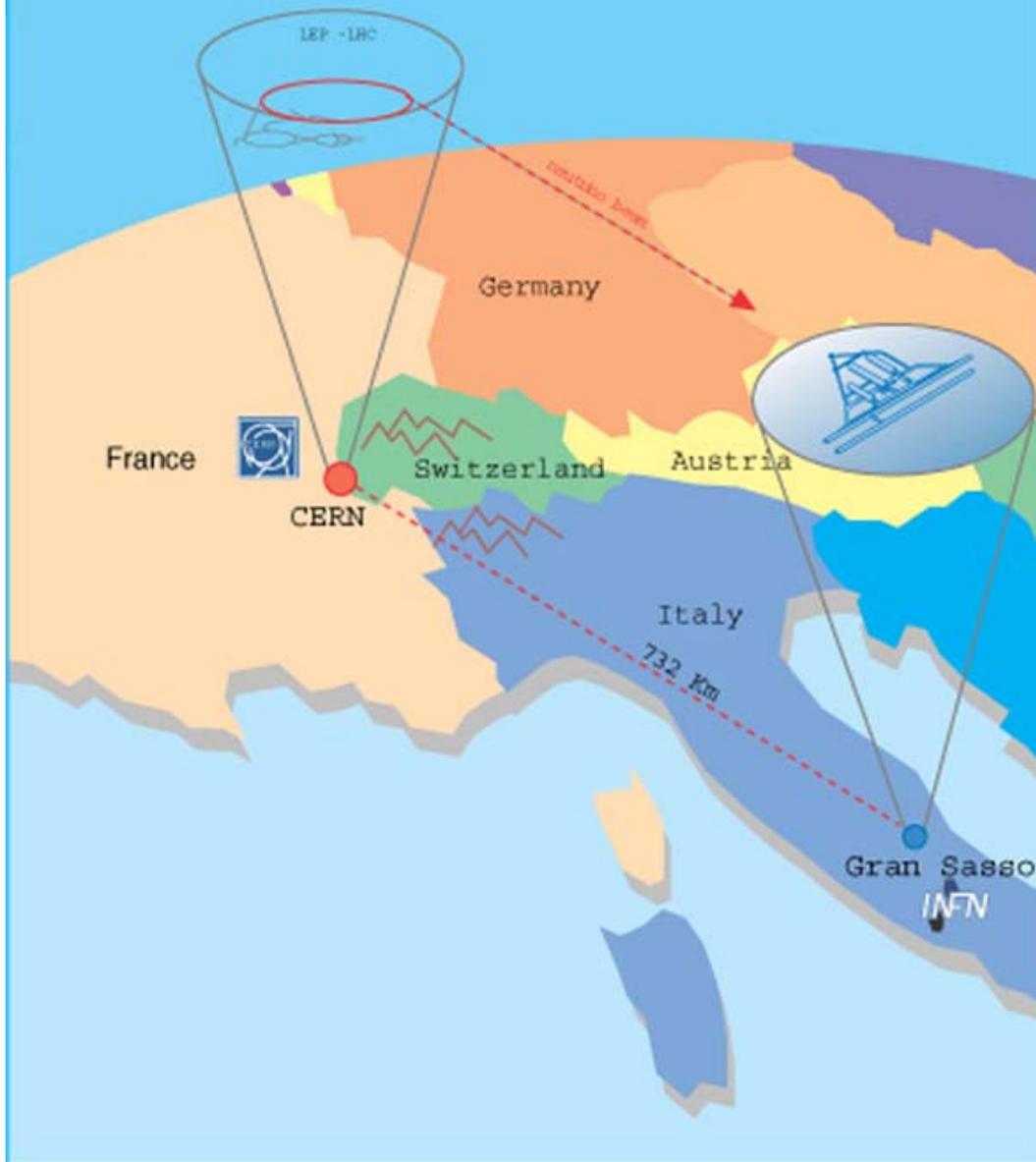
Member States (Dates of Accession)

AUSTRIA (1959)	DENMARK (1953)	GREECE (1953)	NORWAY (1953)	SPAIN (1/1961-12/1968-1/1983)
BELGIUM (1953)	FINLAND (1993)	HUNGARY (1992)	POLAND (1991)	SWEDEN (1953)
BULGARIA (1999)	FRANCE (1953)	ITALY (1953)	PORTUGAL (1986)	SWITZERLAND (1953)
CZECH REP (1993)	GERMANY (1953)	NETHERLANDS (1953)	SLOVAK REP (1993)	UNITED KINGDOM (1953)

CERN-AC, CC-BY-NC, ESHN 1999, 15.12.99

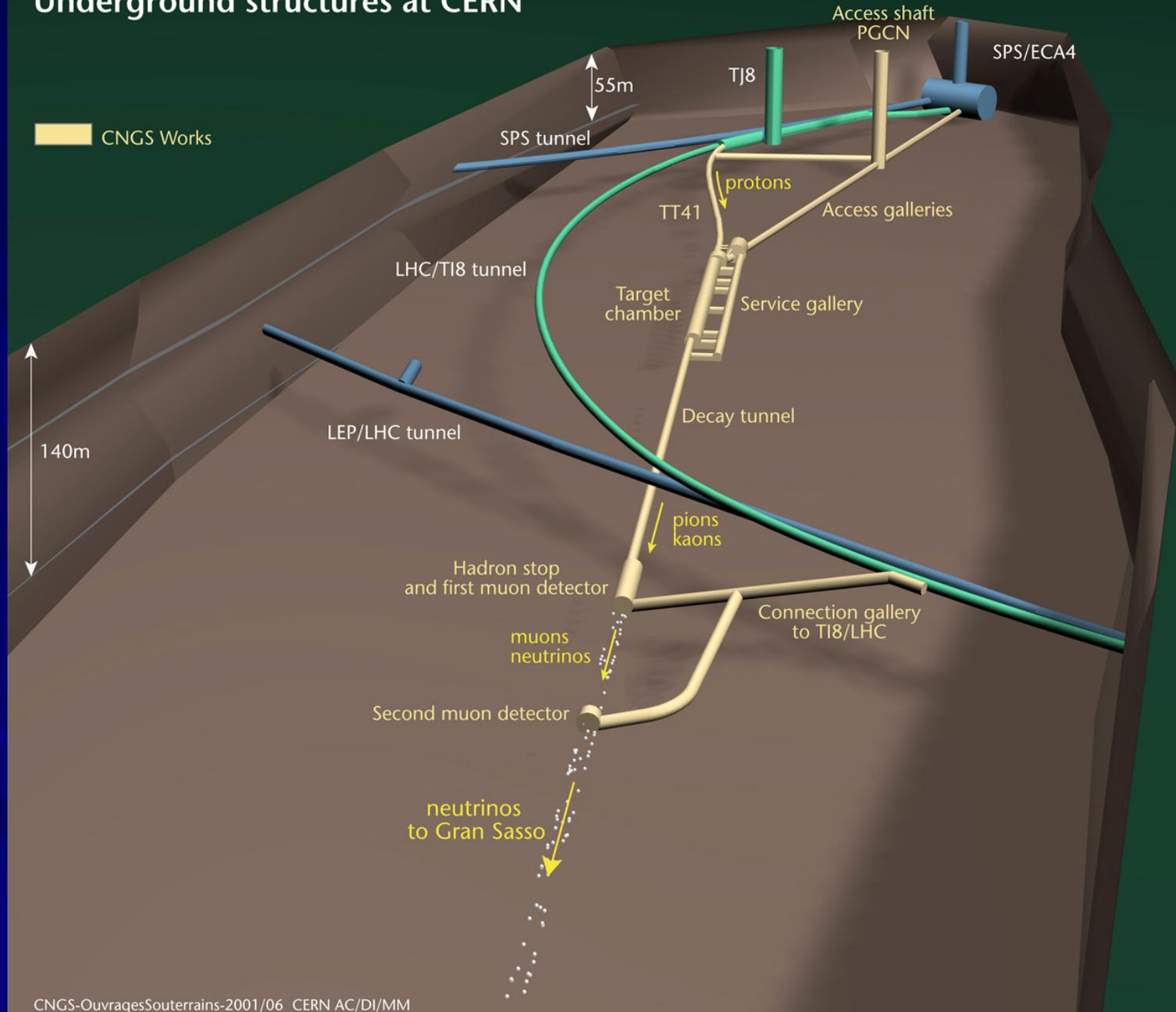


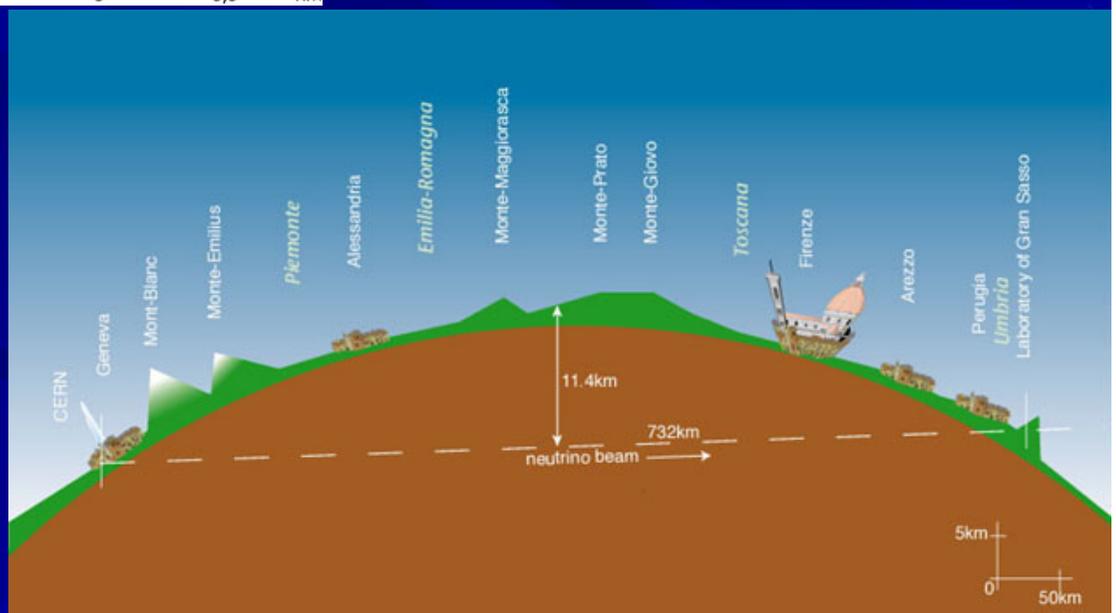
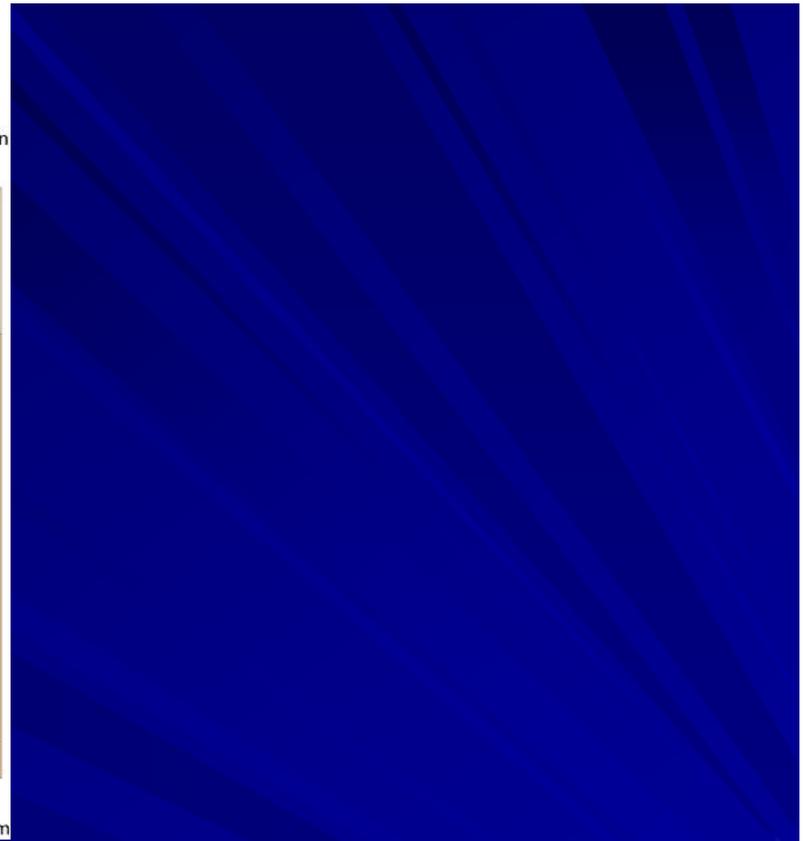
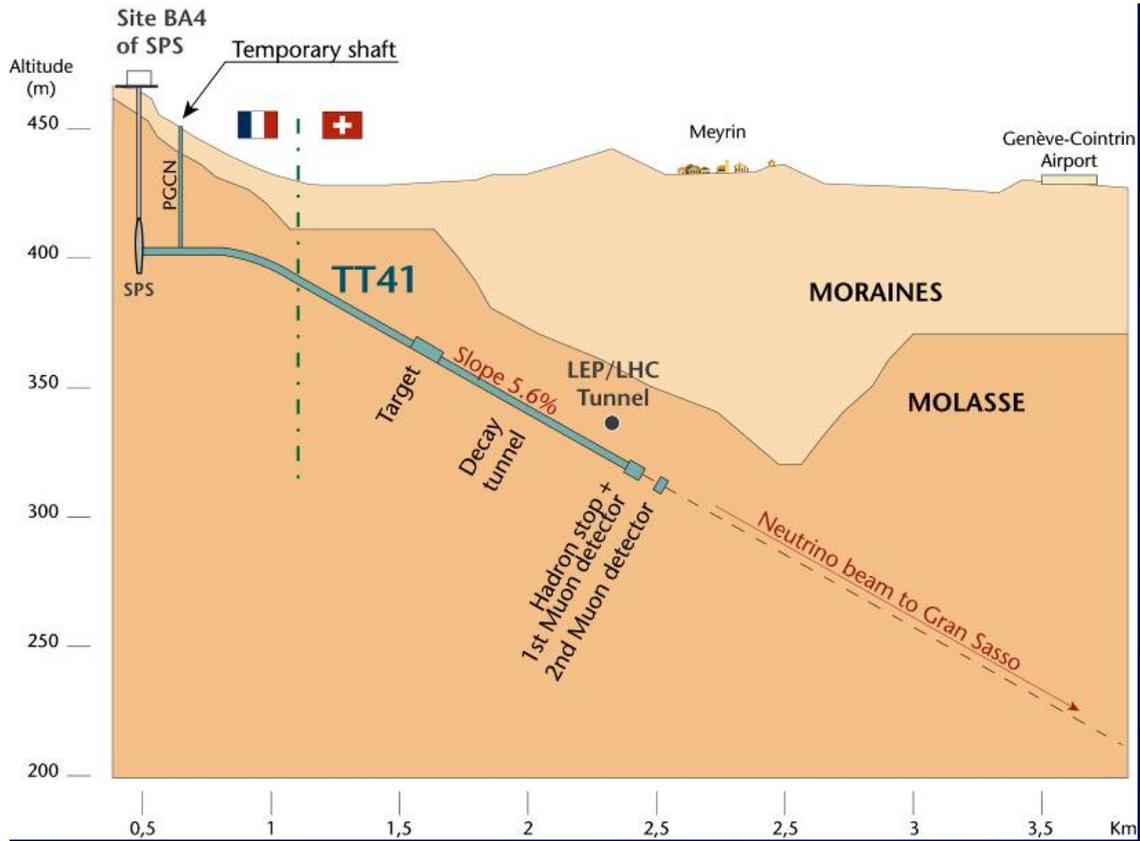
# CNGS - CERN Neutrinos to Gran Sasso



# CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO

## Underground structures at CERN

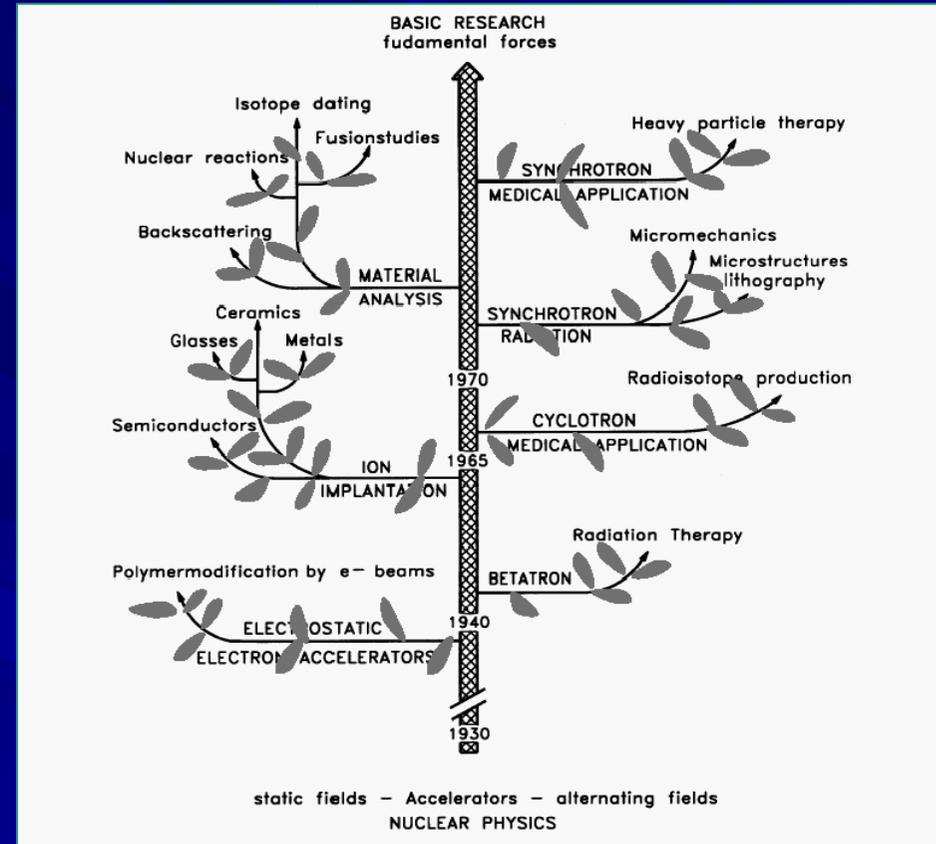






# Acceleratori nel mondo

CATEGORIA	NUMERO
Impiantazioni ioniche	7000
Altri acceleratori nell'industria	1500
Acceleratori in ricerca non-nucleare	1000
Radioterapia	5000
Produzione di isotopi per medicina	200
Adroterapia	20
Sorgenti di luce di sincrotrone	70
Ricerca nucleare e subnucleare	110
<b>TOTALE</b>	<b>15000</b>

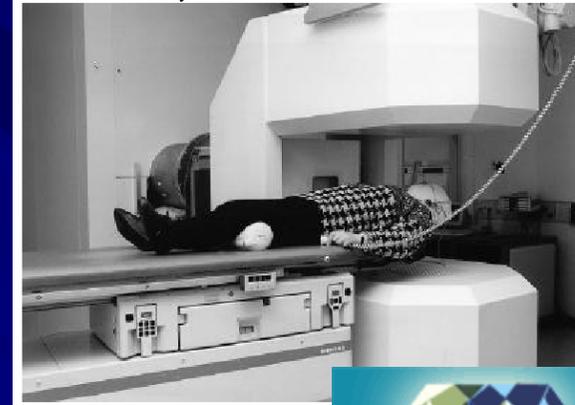


## Altre applicazioni

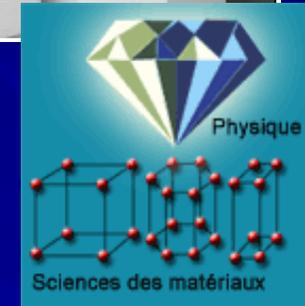
### Medicina

*Radioterapia*

*Adroterapia*



*Analisi molecolare, cellulare,  
cristallografica* (anelli per luce di sincrotrone, FEL)

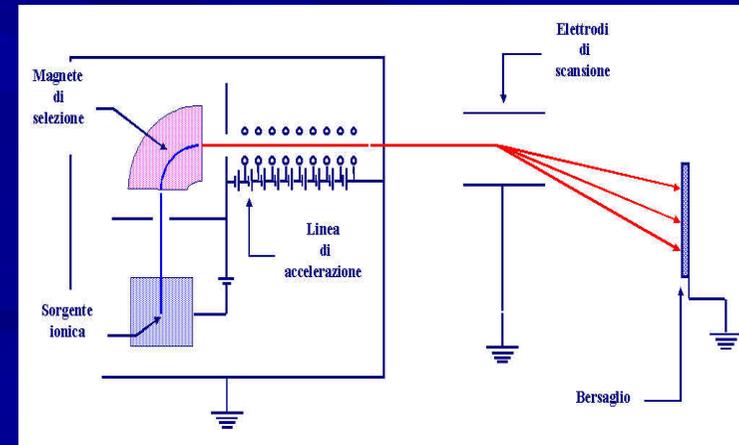


### Industria

*Impiantazione ionica*

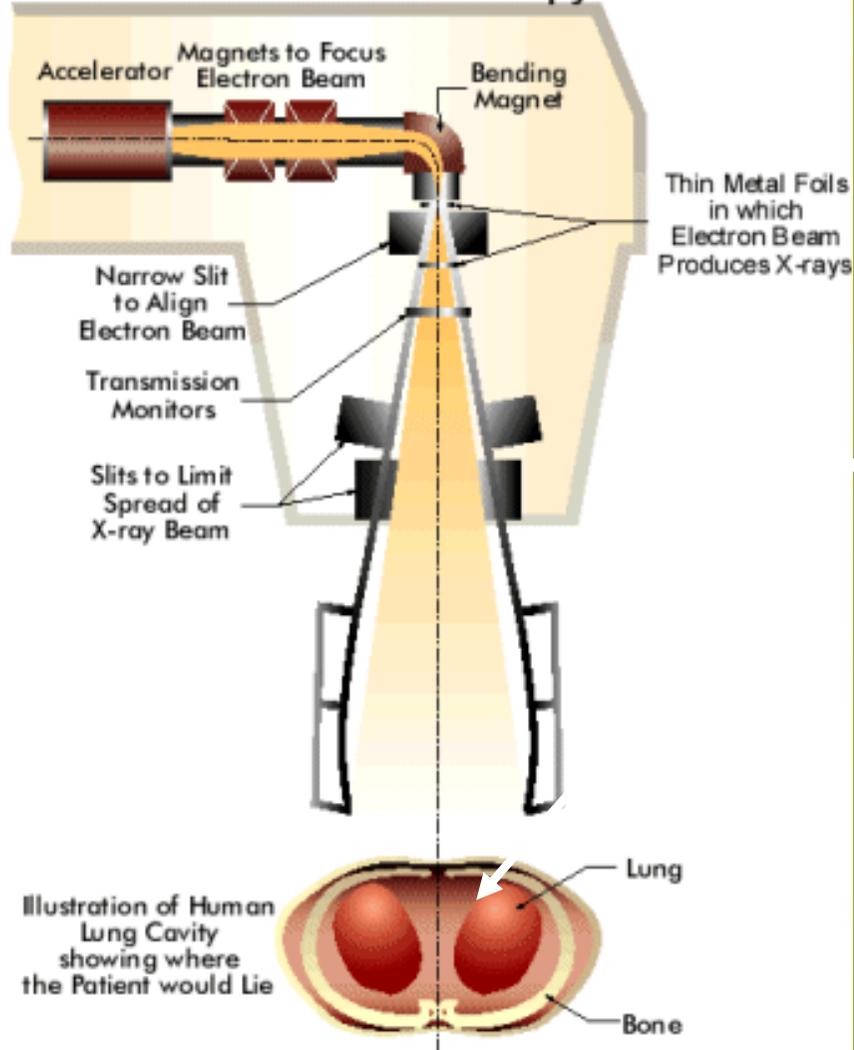
*Sterilizzazione di materiali*

*Smaltimento scorie radioattive*



# Medicina: Radioterapia

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



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

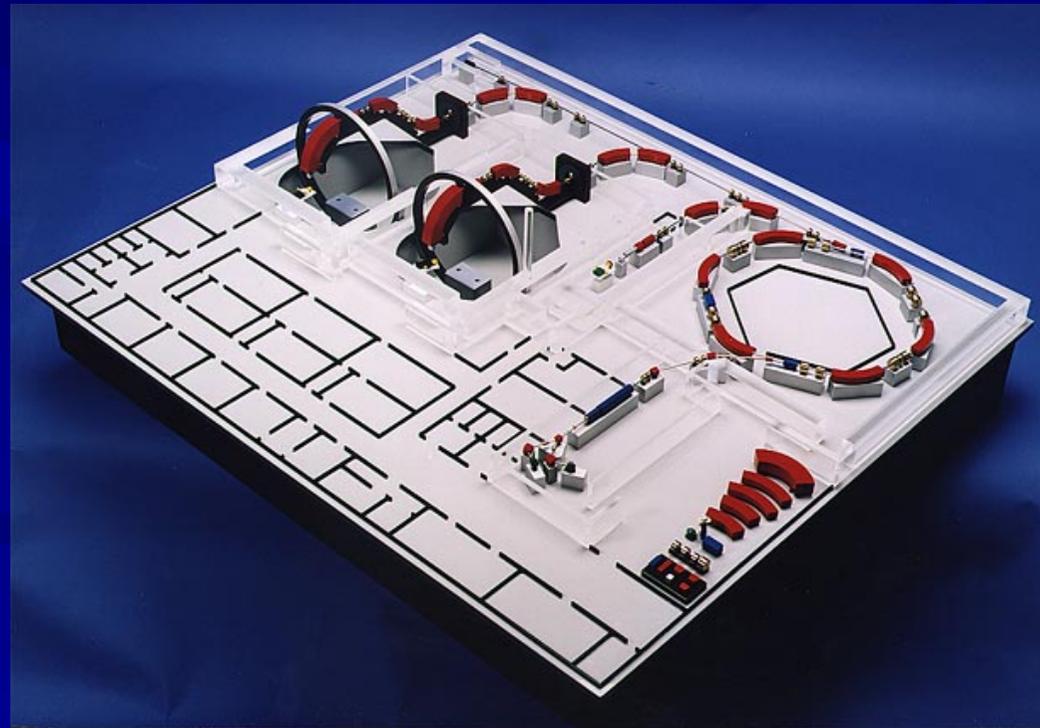
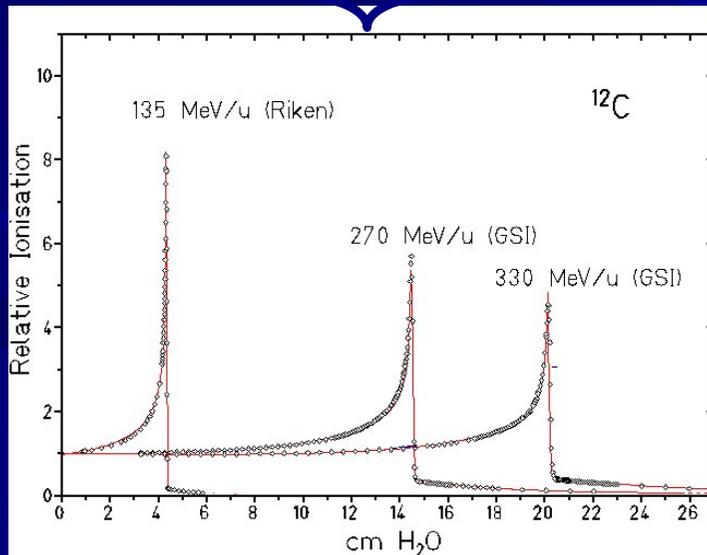
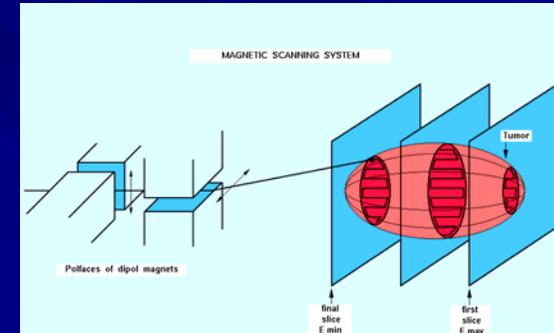
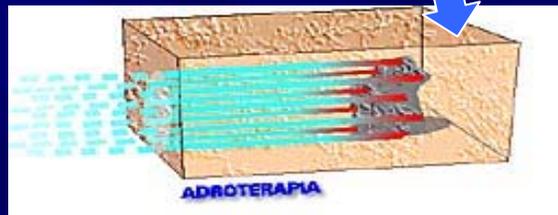


# Medicina: Adroterapia

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

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

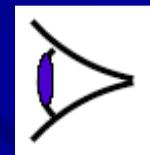
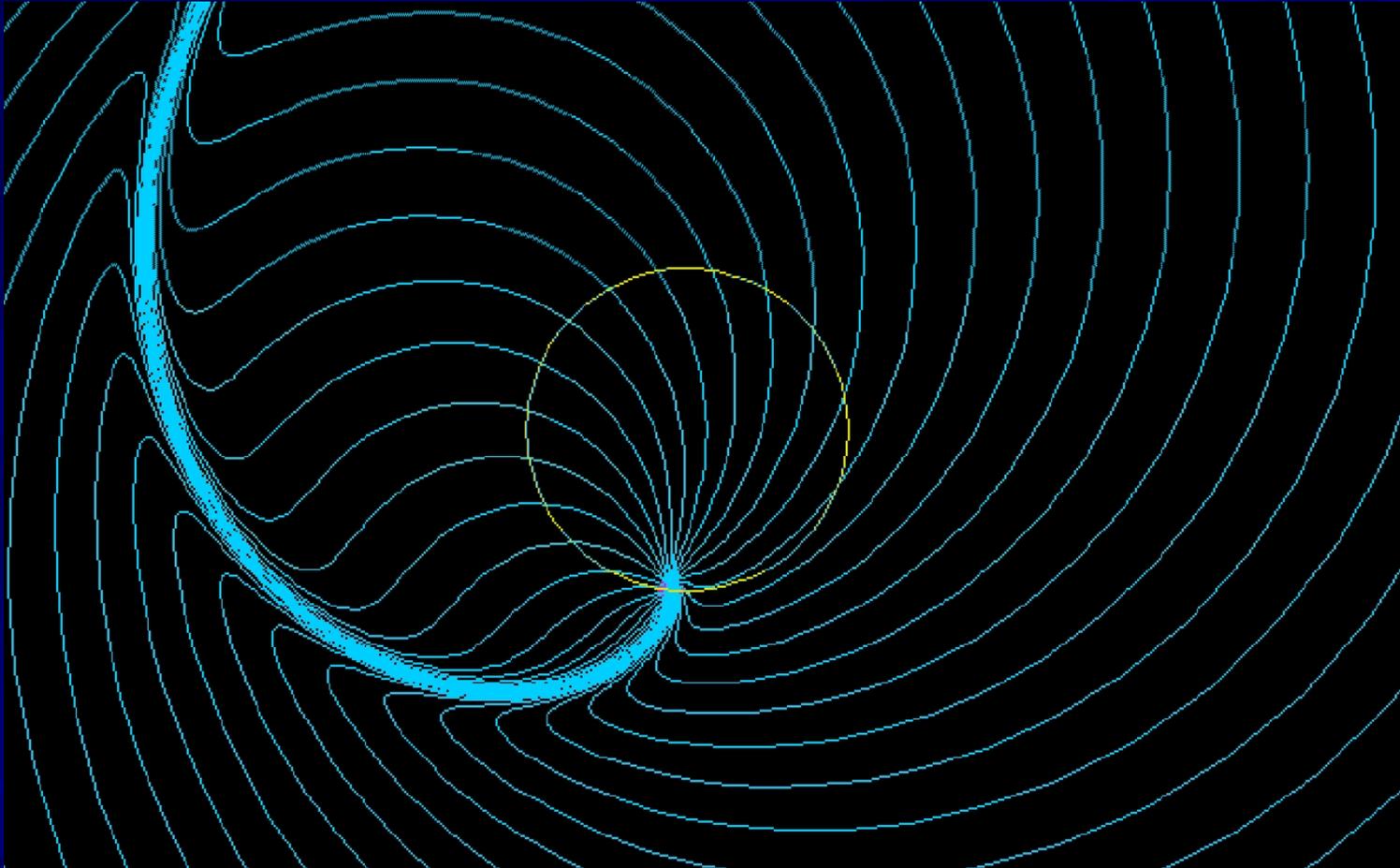
In costruzione con la collaborazione dell'INFN e LNF: CNAO a Pavia



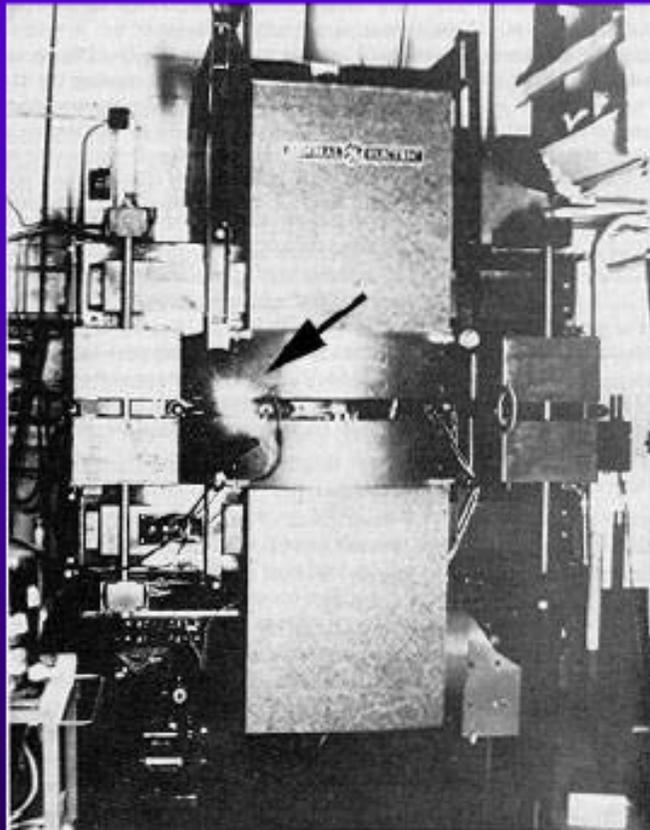
# National Security



# Charged particle moving on a circle

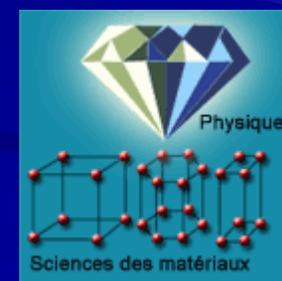
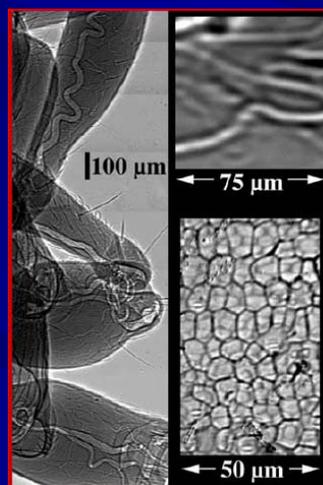
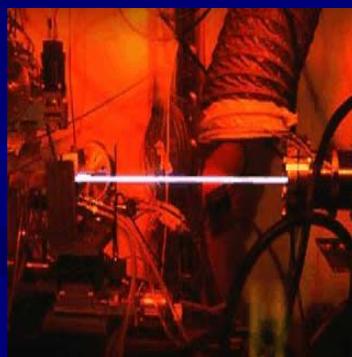
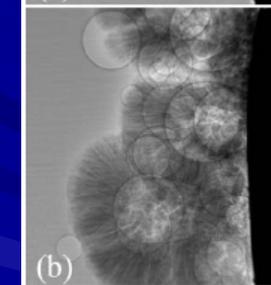
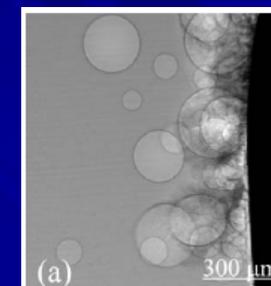
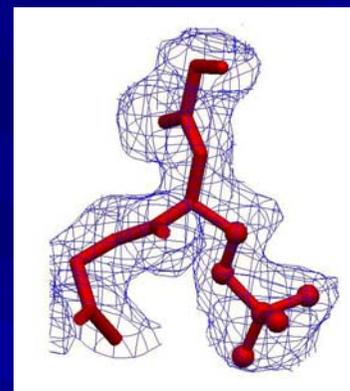
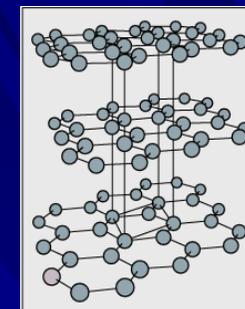
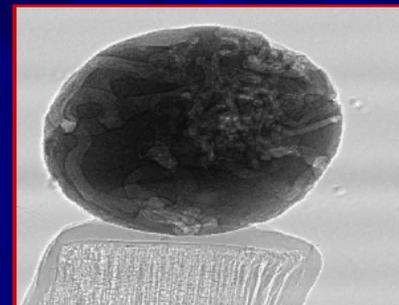


# **GE Synchrotron New York State**



**First light observed  
1947**

# Analisi molecolare, cellulare, cristallografica (Anelli per luce di sincrotrone)



Elettra (Trieste)



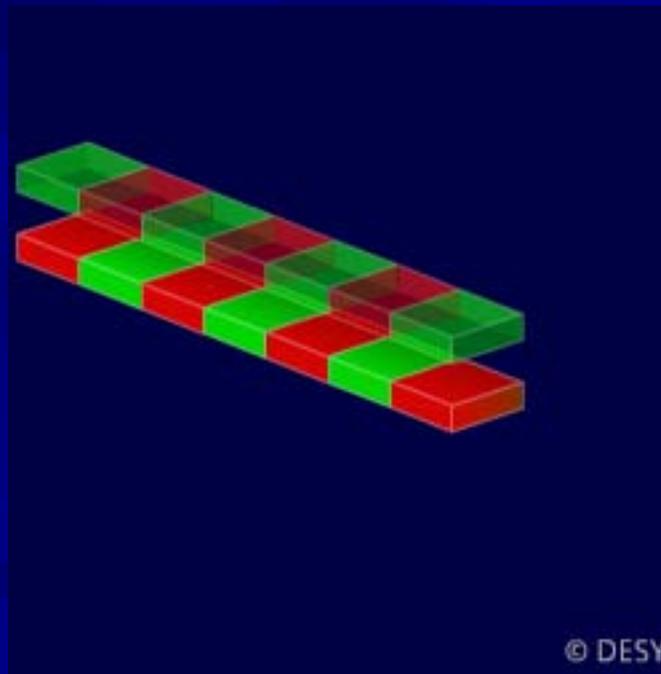
ESRF (Francia)



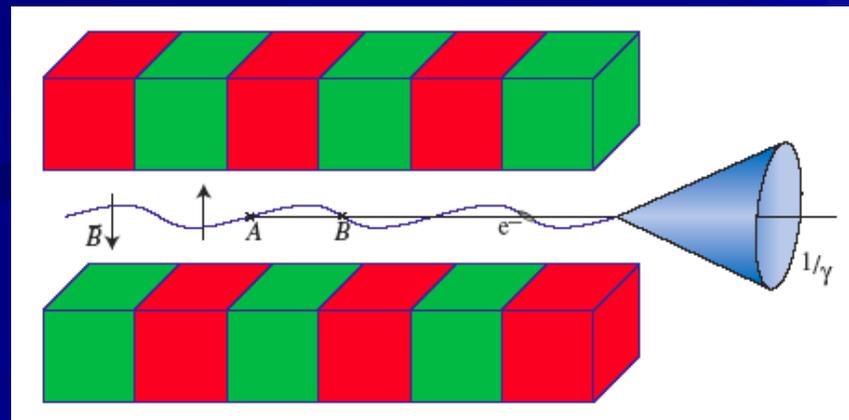
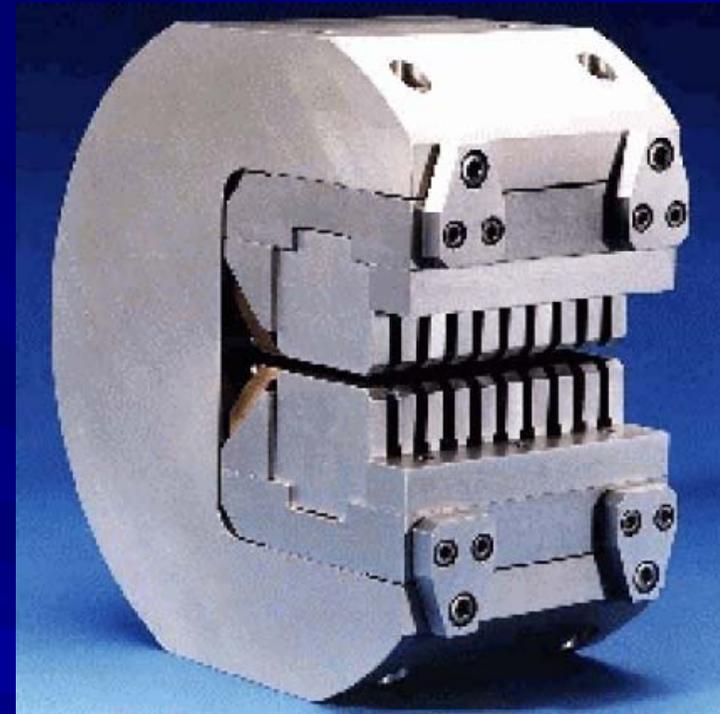
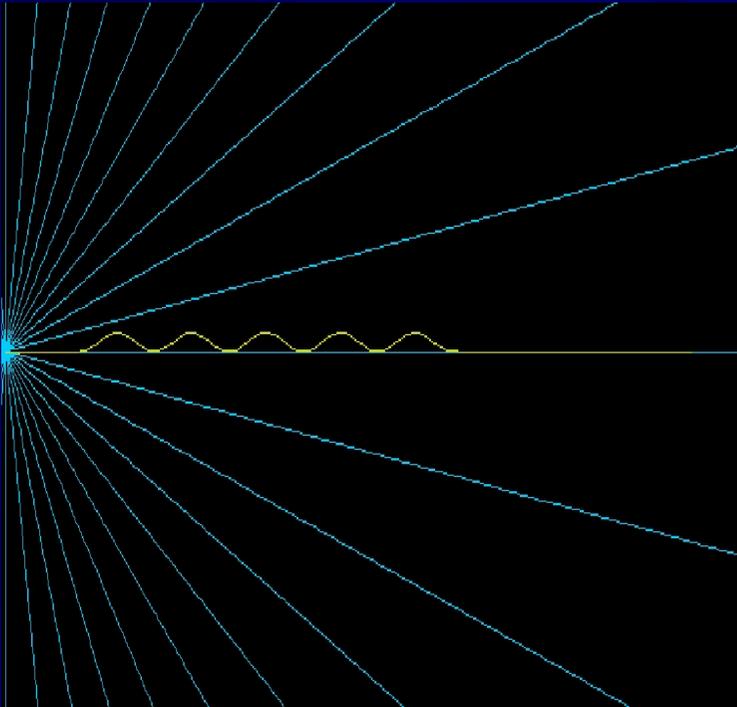
SLS (Svizzera)

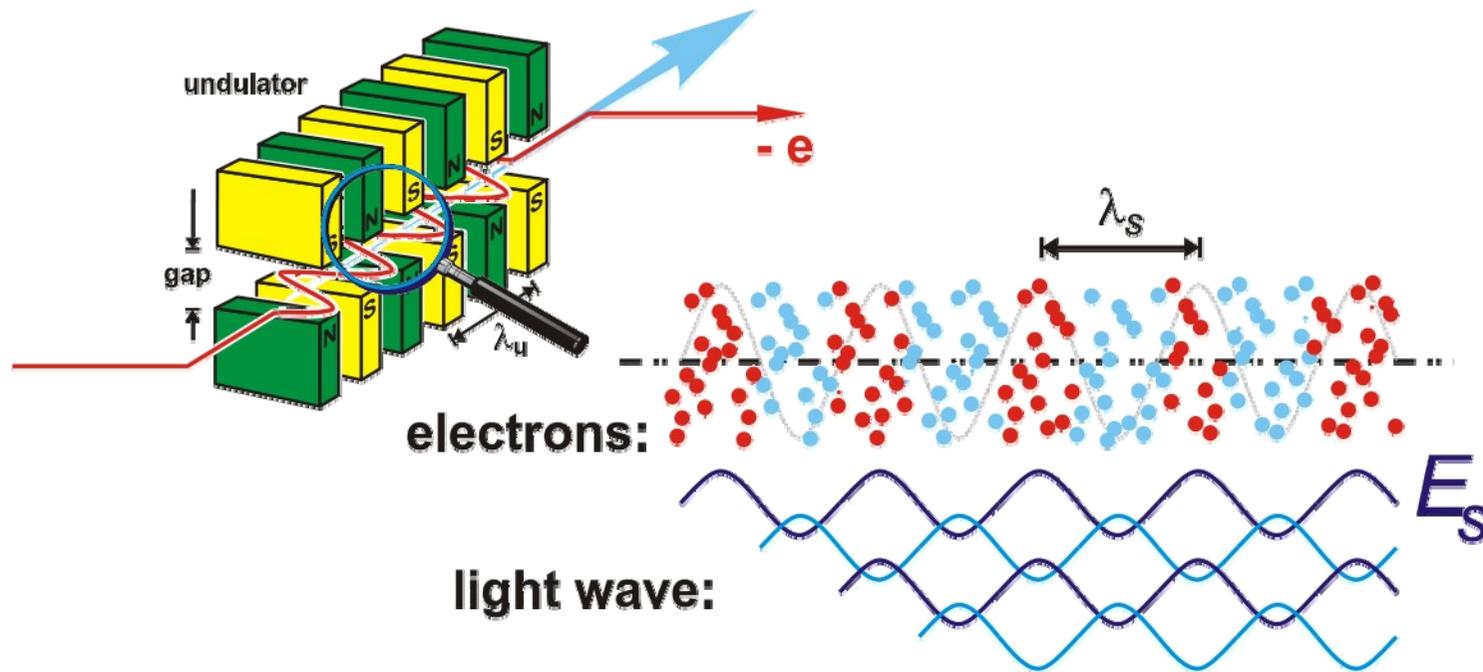


# Un Laser ad Elettroni Liberi (FEL) a Frascati



# Undulator Radiation





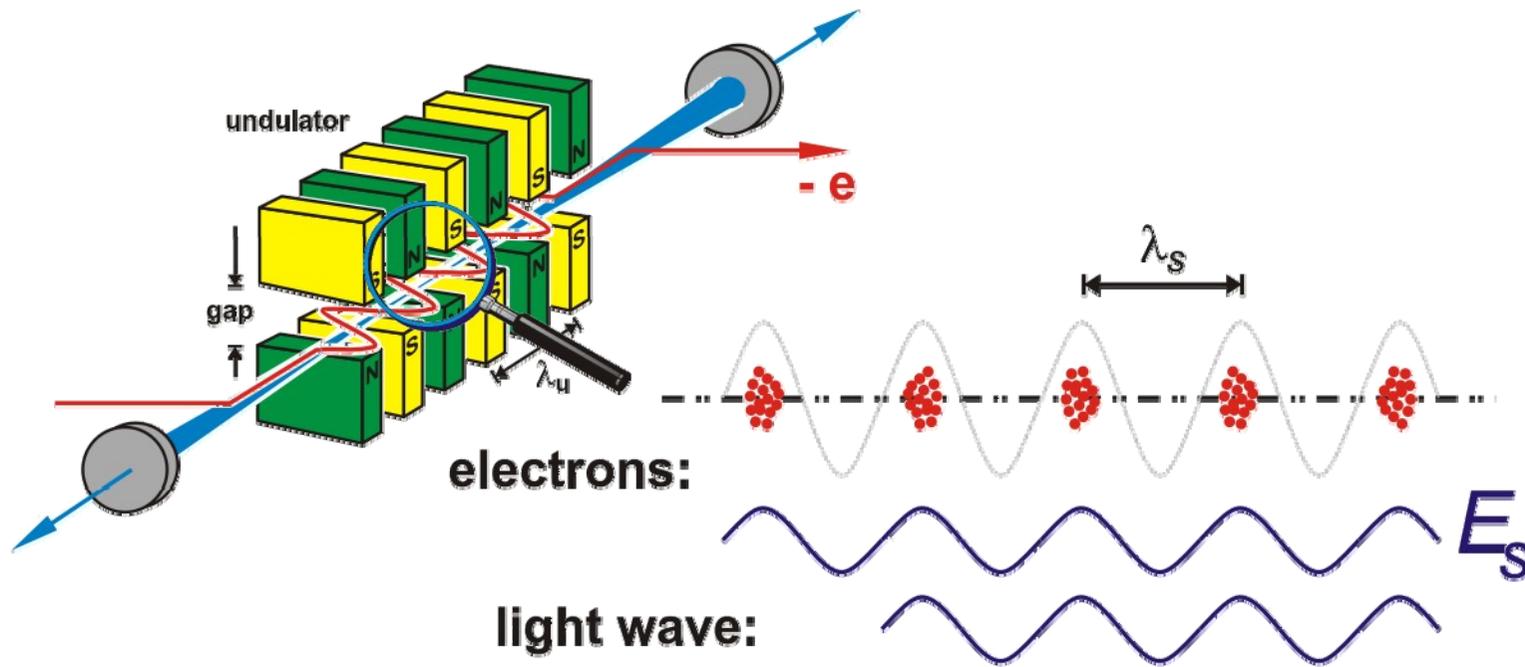
Radiated Power :

$$P \propto n_e \text{ (number of electrons)}$$

destructive interference

→ shotnoise radiation

# FEL interaction



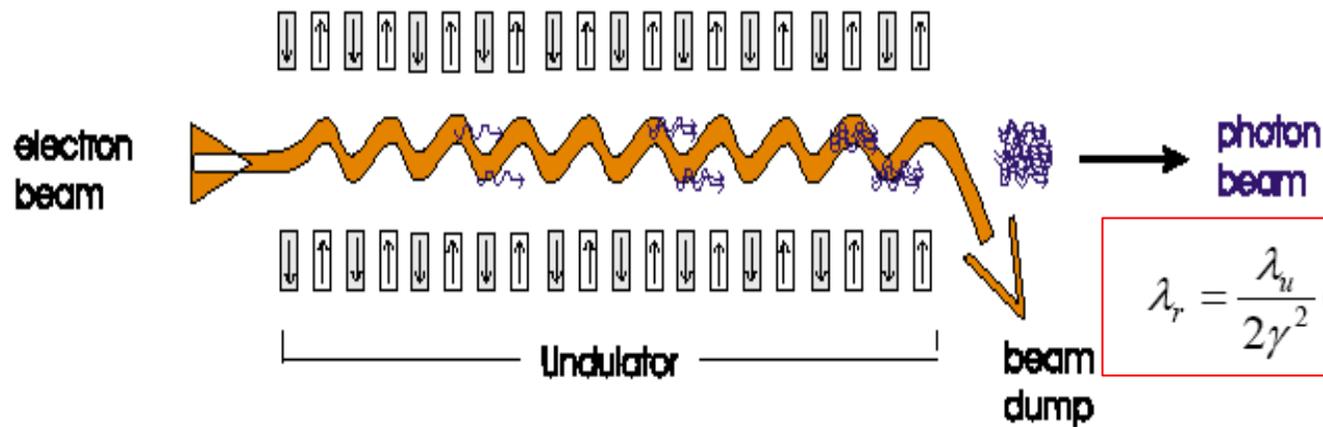
Radiated Power :

$$P \propto n_e^2 \left( \begin{array}{l} \text{number of electrons} \\ n_e \sim 10^6 - 10^9 \end{array} \right)$$

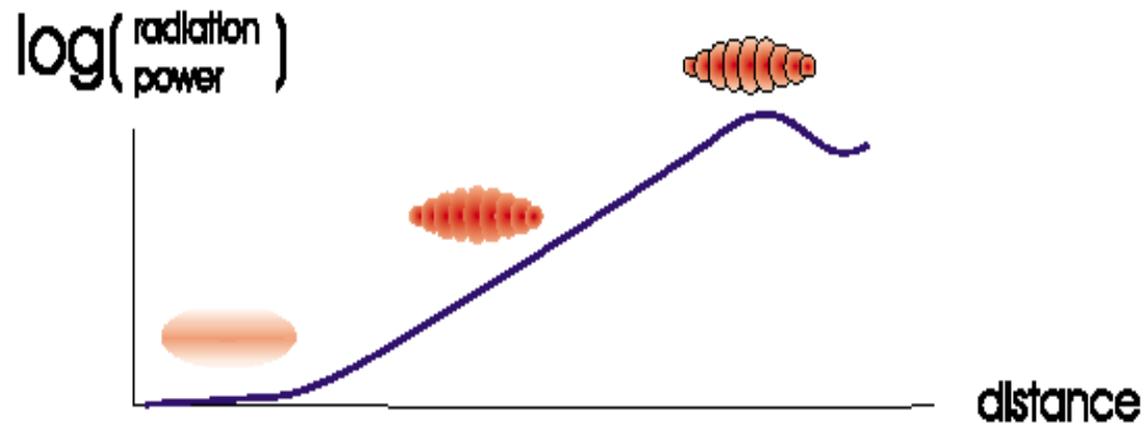
constructive interference  
→ enhanced emission

# Free Electron Laser

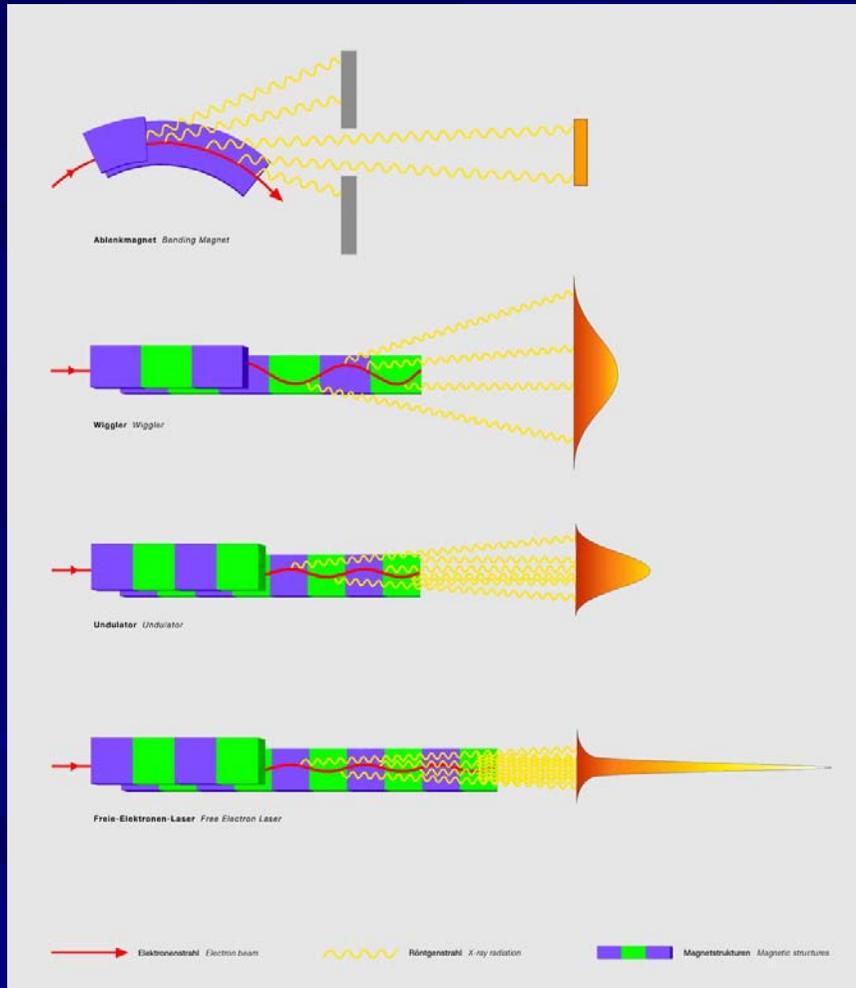
## Self-Amplified-Spontaneous-Emission (No Mirrors - Tunability - Harmonics)



$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + a_u^2 + \gamma^2 \theta^2)$$



# Radiation from charged particles



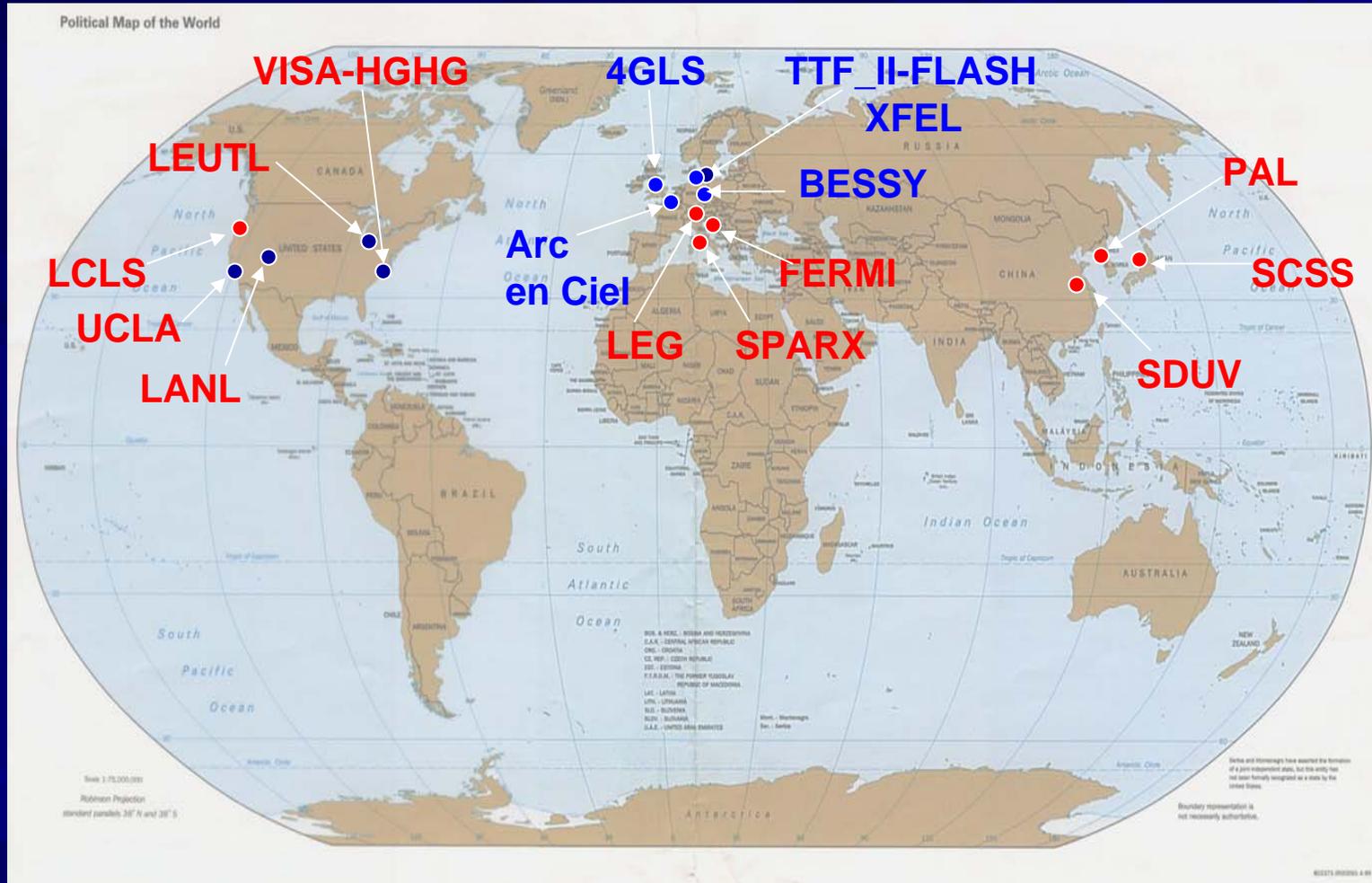
Bending magnet

Wiggler

Undulator

FEL

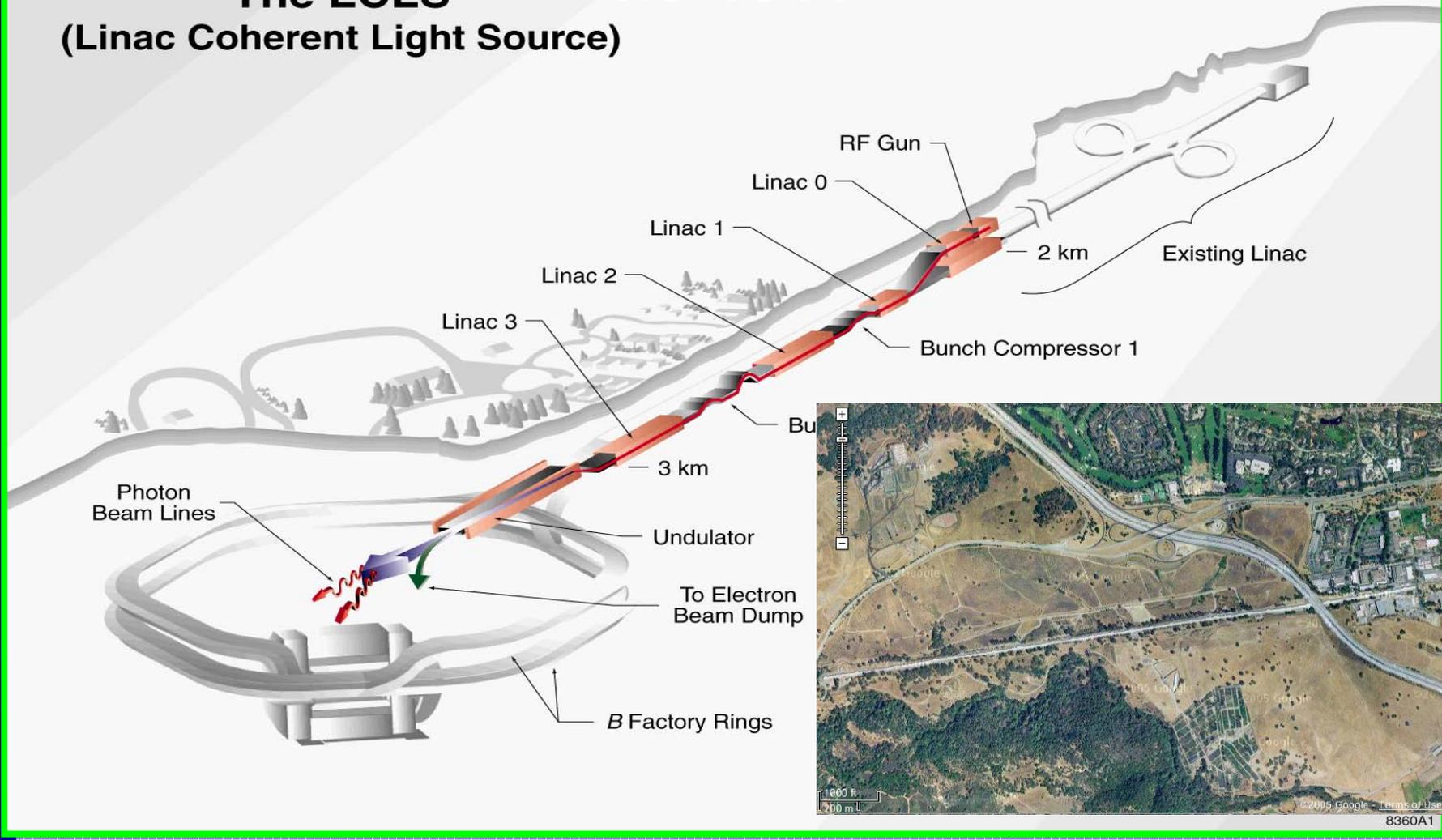
# Short Wavelength SASE FEL



# LCLS at SLAC

The LCLS  
(Linac Coherent Light Source)

1.5-15 Å



X-FEL based on last 1-km of existing SLAC linac

# TESLA XFEL at DESY

user facility

0.85-60 Å

superconducting  
POSITRON linac

XFEL laboratory

FEL undulator magnets

experimental hall  
& detector

"dog bone" damping ring

cryogenic supply shaft

tunnel

25-50 GeV  
transport  
line

13-27 GeV  
transport  
line

begin of  
main linac

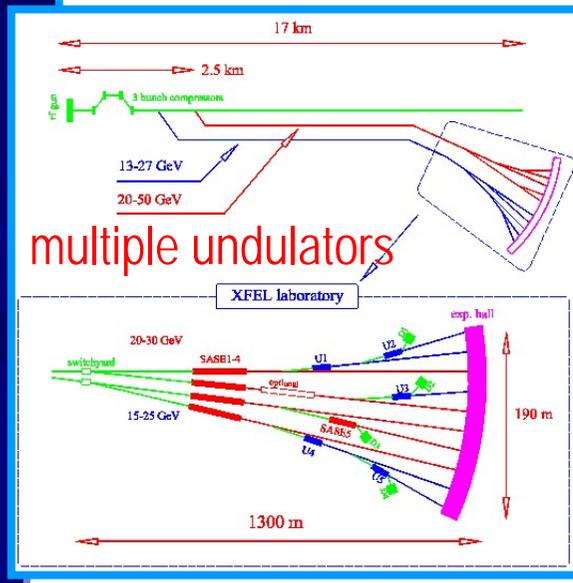
superconducting  
ELECTRON linac

500 MeV X-FEL Injector Linac  
with longitudinal bunch compression  
magnet chicanes (BC)

500 MeV Collider Injector Linac

HERA

TESLA-HERA  
tunnel for e-p  
collisions

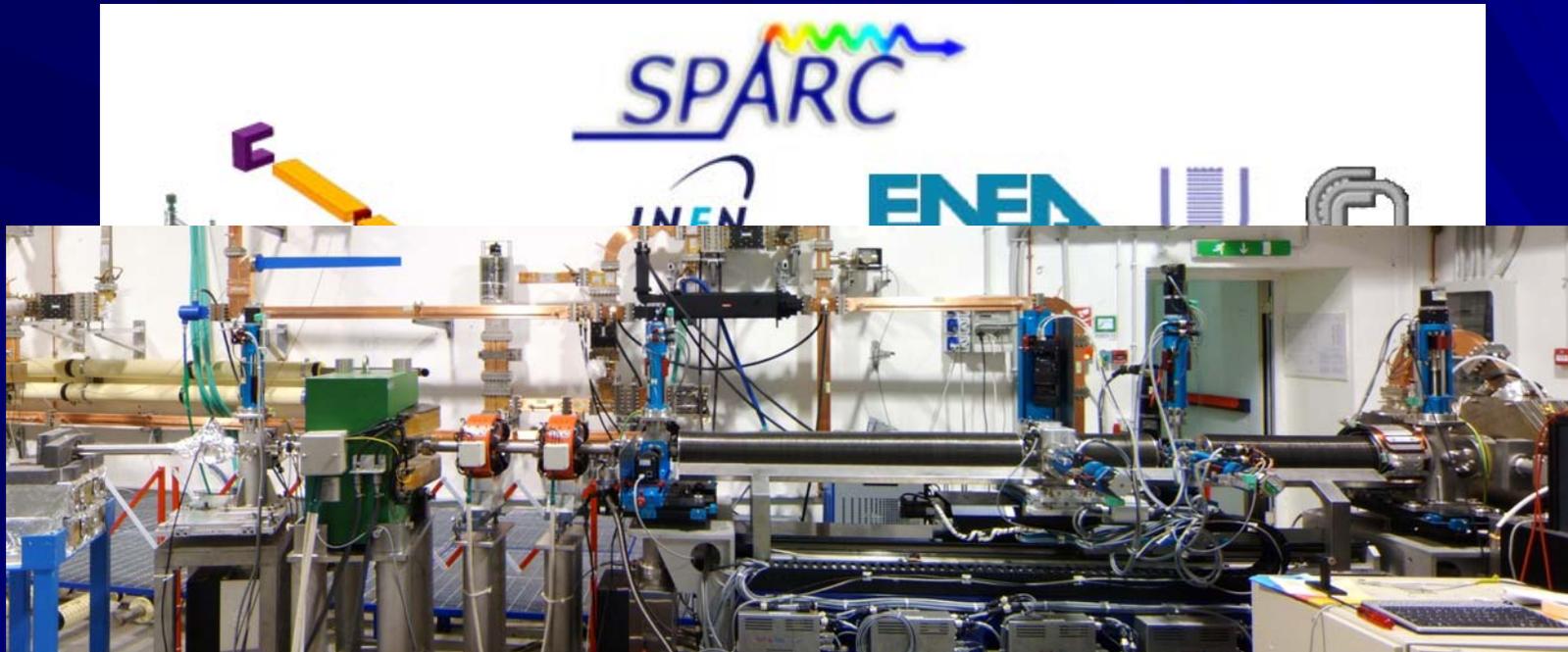


X-FEL Integrated into linear collider

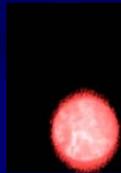
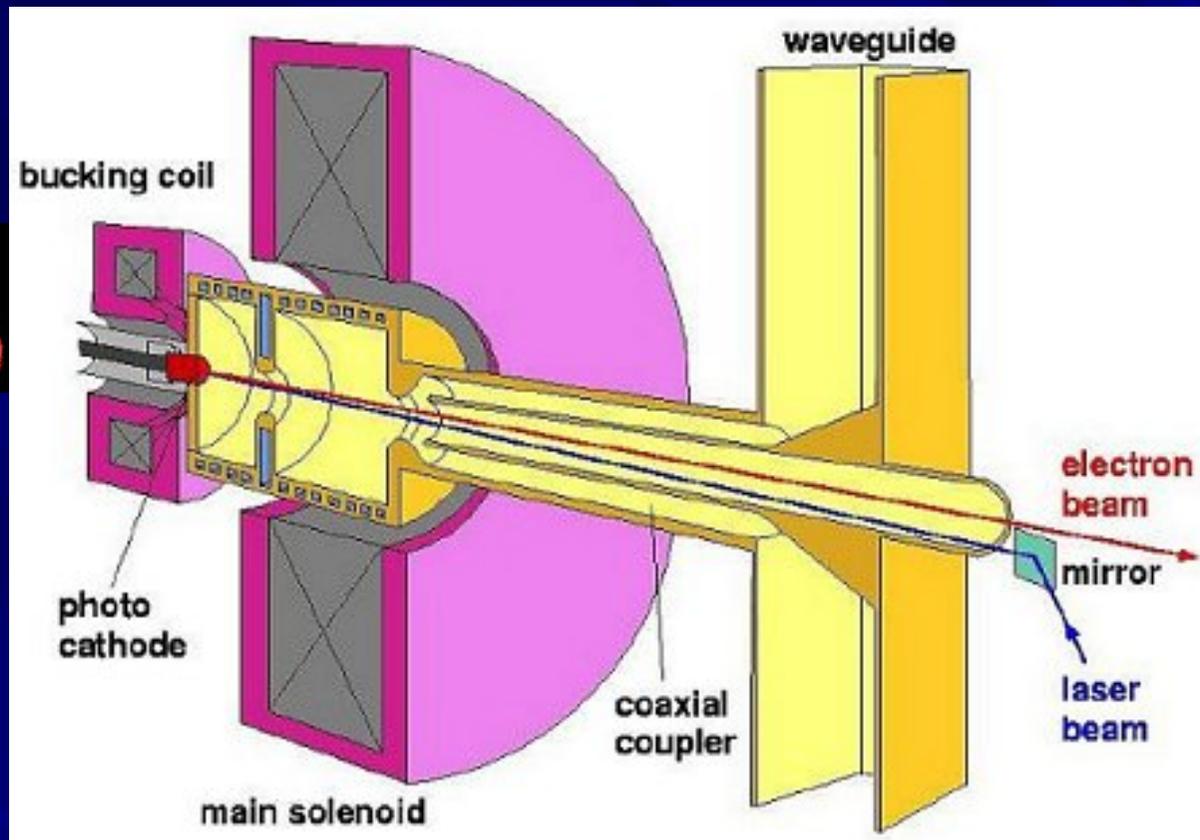


**SPARC - SPARX**

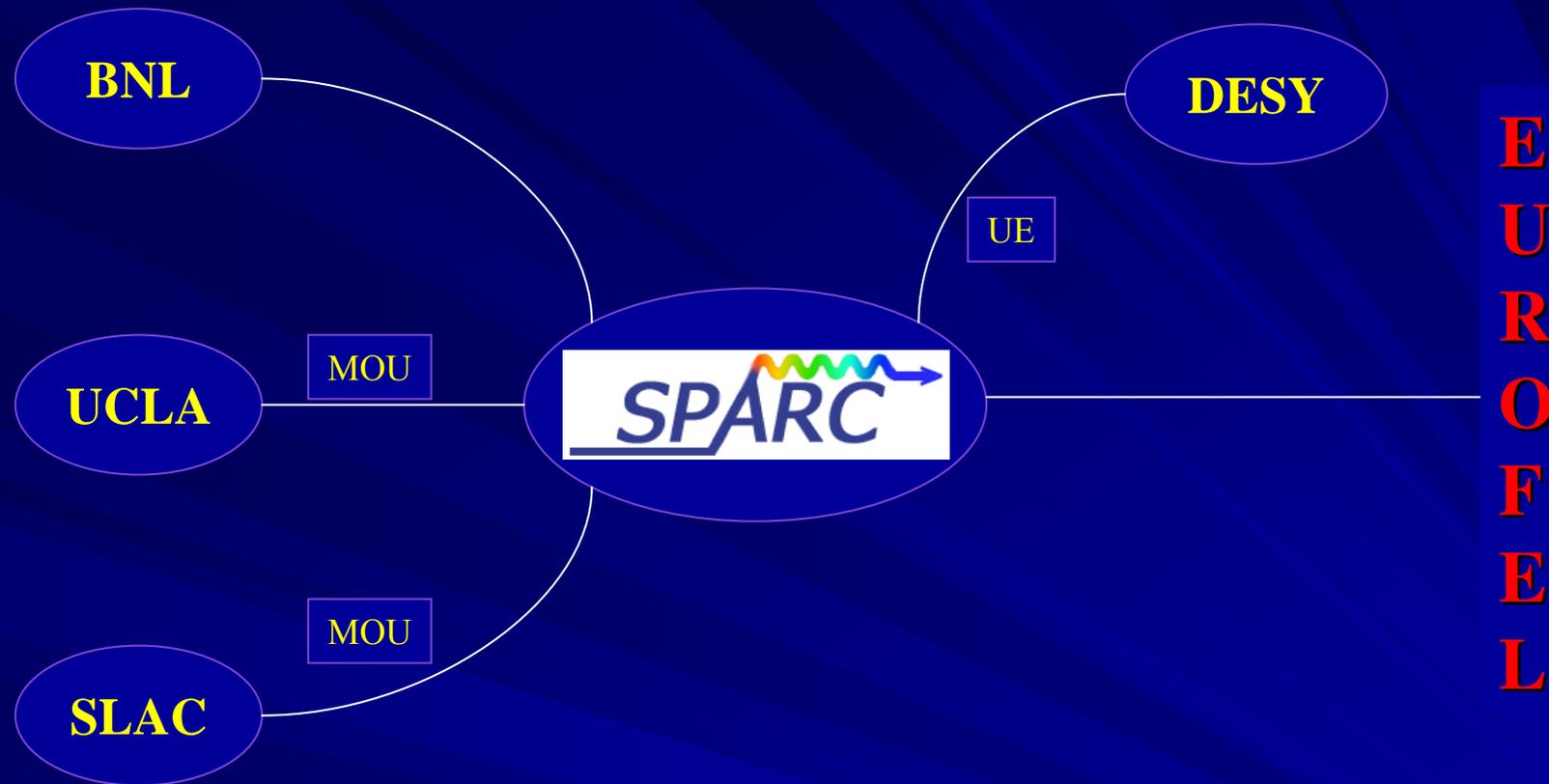
# The SPARC photo-injector and FEL experiment: an R&D for SPARX



# Electron Photo-Injector



Copyright 2000  
University of Wisconsin  
All rights reserved.



The Quick-start programme of the European Initiative for Growth has recently identified *next generation lasers* as a "key technology sector for the Union's long-term competitiveness and strength of the European economy". Support for the development of a network of national facilities working on next generation laser technologies is explicitly mentioned in the final report "A European Initiative for Growth" of the European Commission to the European Council dated 11.11.2003.

La Regione istituisce un fondo triennale. L'obiettivo: rilanciare l'economia attraverso l'innovazione tecnologica e attirare scienziati da tutta Europa

# Un super laser per la ricerca anche nel Lazio

In arrivo 60 milioni. L'assessore Ranucci: «Creeremo un polo di grande valore scientifico»

di MARCO GIOVANNELLI

Investimenti e non finanziamenti a pioggia. La Regione Lazio ha previsto nel bilancio un fondo per la ricerca, lo sviluppo economico e l'innovazione tecnologica di 60 milioni di euro da spendere in tre anni. Fiore all'occhiello del fondo è la partecipazione, con cinque milioni di euro, alla realizzazione del "Free Electrical Laser" progettato dall'Istituto nazionale di fisica nucleare che permetterà studi avanzati sulle cellule. La quota della Regione di fatto ha anche obbligato l'Infra a scegliere una zona tra farsecati e Tor Vergata per costruire l'impianto e i laborato-

**Saranno finanziati infrastrutture e progetti specifici in collaborazione con le università**

ri. «Saranno finanziati solo progetti specifici in collaborazione con le università, i centri di ricerca e il ministero dell'Università e la ricerca scientifica», spiega Raffaele Ranucci, assessore regionale allo sviluppo che ha proposto il finanziamento. «Vogliamo così rilanciare la nostra economia e fare di Roma e Lazio quella città virtuale delle scienze. Lo possiamo fare con azione mirate e di grande valore scientifico che permetteranno la valorizzazione delle competenze sui settori dell'innovazione e della ricerca. Così il Lazio potrà pienamente aderire all'Agenda di Lisbona che si propone in dieci anni di trasformare l'Europa con una serie di riforme strutturali nell'occupazione e l'innovazione, con riforme economiche e della coesione sociale».

L'idea del fondo è quella di finanziare infrastrutture, cioè investire nell'acquisto di apparecchiature al servizio dei ricercatori del Lazio ma anche che diventino volano per attrarre

scienziati dal resto del Paese e dall'Europa. «Il Lazio è sulla buona strada per diventare un polo di attrazione scientifica», aggiunge Ranucci. «Penso al polo aerospaziale ma anche al distretto delle bioscienze che ci ha assegnato il Miur. Per dare corpo a quest'ultima iniziativa servono risorse da spendere in apparecchiature. Sullo sfondo resta il progetto di trasformare tutto il territorio regionale in una immensa "città della ricerca" senza un luogo fisico ben delineato ma con tanti centri di attrazione e innovazione».

Il Lazio è la Regione dove c'è, in percentuale, il più alto

numero di persone impegnate nella tecnologia avanzata attraverso università, centri di ricerca e imprese avanzate, il 18,8 per cento del personale addetto contro il 18,2 della Lombardia e

il 11,4 del Piemonte. «Una volta individuati gli obiettivi e ritenuti prioritari o comunque meritevoli di realizzazione procederemo al finanziamento», dice l'assessore. «Attraverso la costituzione del fondo si gettano le basi per rendere competitivo il nostro territorio dotandolo di strumenti che consentono di radicare e attrarre i ricercatori realizzando quella regione della ricerca in tutto il Lazio».

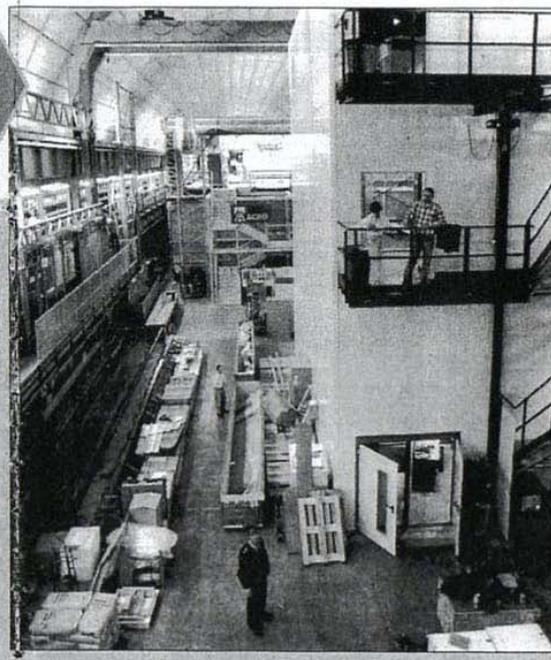
Con l'approvazione del fondo per la ricerca, si conclude anche l'esame nella commissione bilancio del Documento di programmazione economica e finanziaria regionale, una manovra finanziaria di circa 387,2 milioni di euro. Il dibattito sul bilancio inizierà alla Regione la prossima settimana.

Rispetto al laboratorio sotterraneo del Gran Sasso (nella foto), il laser che verrà realizzato nel Lazio non è circolare ma sviluppa la sua azione con onde sinusoidali "sparate" in un tubo particolare lungo circa duecento metri

**LE ALTRE APPLICAZIONI**  
**Il Medical Imaging per la ricostruzione tridimensionale di cellule**

Si chiama "Free Electrical Laser" e la Regione parteciperà al progetto dell'Istituto nazionale di fisica nucleare con tre milioni per ognuno dei prossimi tre anni. Il laser ad alta frequenza è capace di "ricordarsi" degli atomi che ha incontrato, quindi permette di scattare una "foto" del sistema che attraversa. Le applicazioni sono molteplici e vanno dal Medical imaging (cioè delle vere e proprie ricostruzioni tridimensionali delle cellule), alle Nanotecnologie (per costruire oggetti piccolissimi), allo Studio dei materiali. Il laser dovrebbe essere costruito tra Frascati e Tor Vergata.

Gli altri interventi per lo sviluppo di nuove tecnologie nei Parchi Scientifici e tecnologici ma anche per la riqualificazione di laboratori di ricerca attraverso l'acquisto e l'ammodernamento di impianti e macchinari.



**LE REAZIONI**

**Valori: «E' un atto concreto per lo sviluppo della regione»**

Tutti felici e contenti per i finanziamenti che la Regione destinerà alla scienza. «Questa iniziativa», spiega Fabio Pistella, presidente del Cnr, «permetterà di promuovere progetti di ricerca per accrescere lo sviluppo, la competitività e l'innovazione del tessuto produttivo rendendo ancora più concreta la collaborazione fra mondo della ricerca, imprese e territorio». Soddisfatto anche Giancarlo Elia Valori, presidente di Confindustria Lazio e neo presidente della holding regionale Sviluppo Lazio: «E' un atto concreto per le prospettive di sviluppo

del sistema economico e sociale del Lazio». Così come il presidente della Regione Piero Marrazzo: «Il Lazio punta alla ricerca e il fondo sarà uno strumento per sviluppare progetti e idee».

«I sessanta milioni di euro saranno linfa vitale soprattutto per le università: «Il mio plauso convinto e caloroso», afferma Guido Fabiani, rettore di Roma Tre - per una iniziativa che conferma la volontà della Regione di concentrare risorse significative sull'obiettivo dello sviluppo della ricerca e innovazione. Tutta l'università si sente par-

tecipe di questo progetto». «Per la prima volta la Regione si impegna a sostenere in modo organico la ricerca quale strumento indispensabile per la crescita economica del territorio», ha aggiunto Alessandro Finazzi Agrò, rettore di Tor Vergata. «E' anche molto significativa la decisione di cofinanziare insieme a Miur, Cnr, Infra, Enea e università la costituzione di un laser a elettroni liberi, strumento di assoluta avanguardia in Europa con ricadute importanti per la fisica, la chimica, la scienza dei materiali, la biologia e la medicina».

**ACCORDO UE**

**Dal 2007 via alla semina di girasoli per il biodiesel**

Carburanti ecologici per mezzi pubblici e caldaie. Grazie a un progetto pilota presentato ieri a Bruxelles dal presidente della Regione Piero Marrazzo e dal presidente regionale di Coldiretti Massimo Gargano - il Lazio potrà contare, già dal 2008, sull'utilizzo di biodiesel prodotto dalla coltivazione di girasole in diverse aree agricole della regione. Nella campagna di semina del 2007, spiega Gargano, saranno coltivati circa centomila ettari di terreno a girasole. La nuova coltura prenderà il posto dei cereali o sarà avviata in zone già inquinata, come quelle della Valle del Sacco, dove la produzione alimentare ha dovuto lasciare il posto al no-food. «La sfida», aggiunge Gargano, «è di arrivare nel 2008 a produrre così almeno il 5 per cento del fabbisogno di carburante per il trasporto pubblico».

«L'accordo firmato a Bruxelles rappresenta una risposta innovativa e una sfida per la riqualificazione della nostra agricoltura, che pone il Lazio in una posizione di avanguardia», spiega l'assessore regionale all'Agricoltura Daniela Valentini. «Con un finanziamento di 25 milioni di euro - sottolinea l'assessore regionale all'Ambiente Angelo Bonelli - il 30 per cento delle vetture del trasporto pubblico utilizzeranno i biocarburanti (olio di colza, biodiesel, idrogeno)».



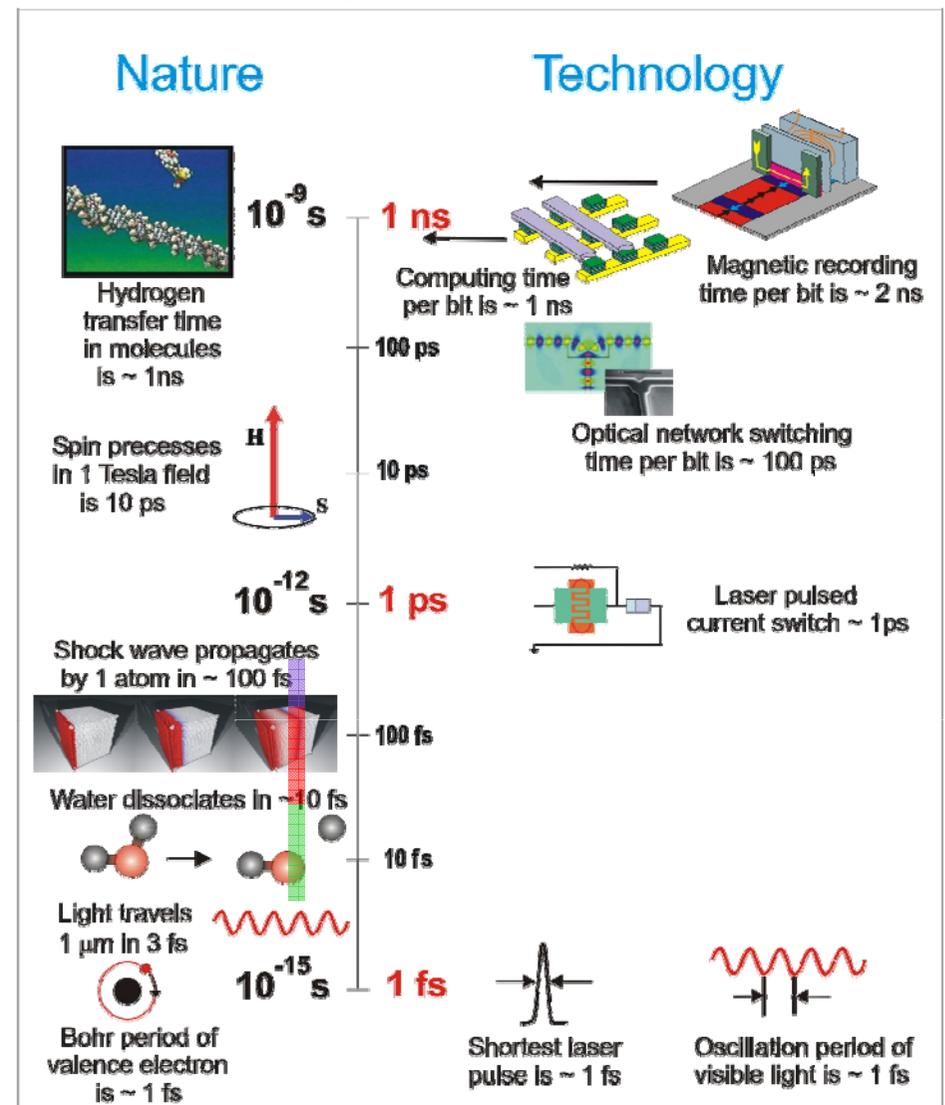
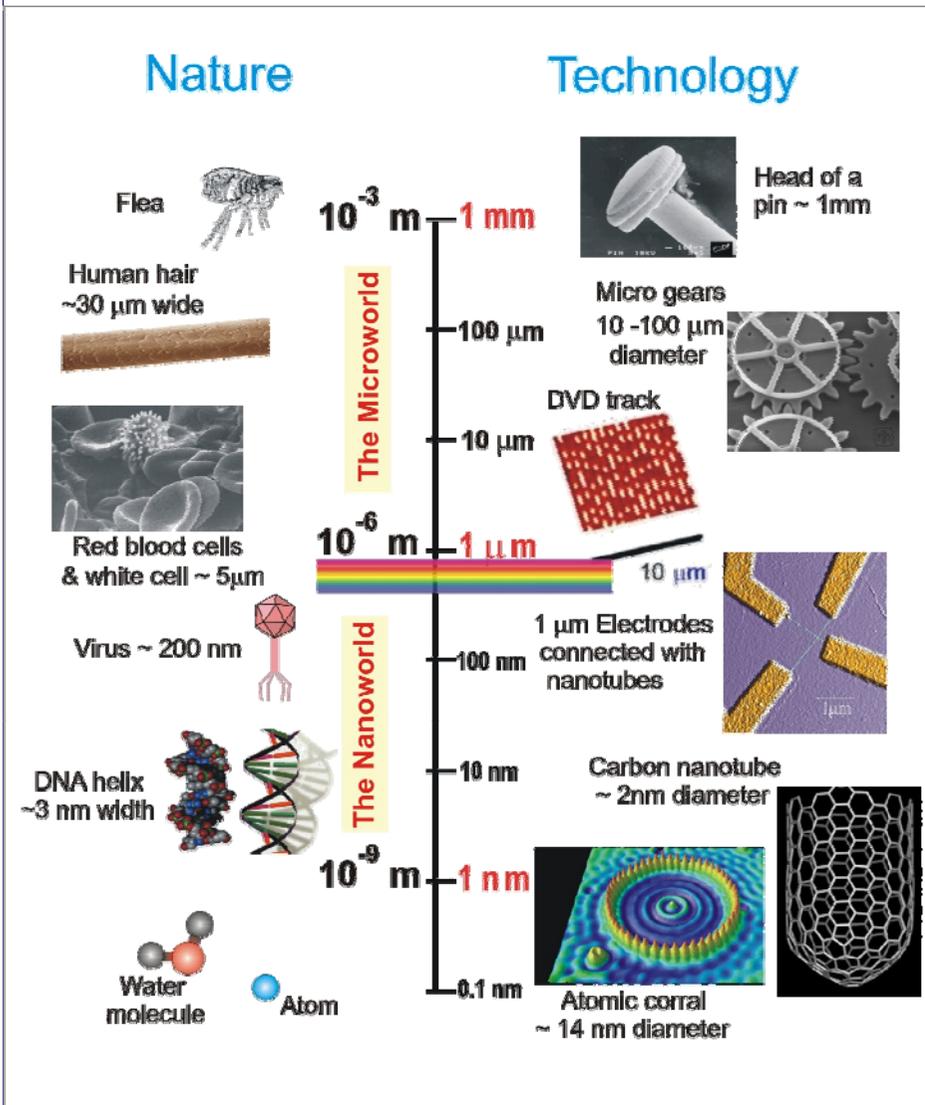
C. Vaccarezza – 37<sup>th</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on Future Light Sources

# The FEL Applications

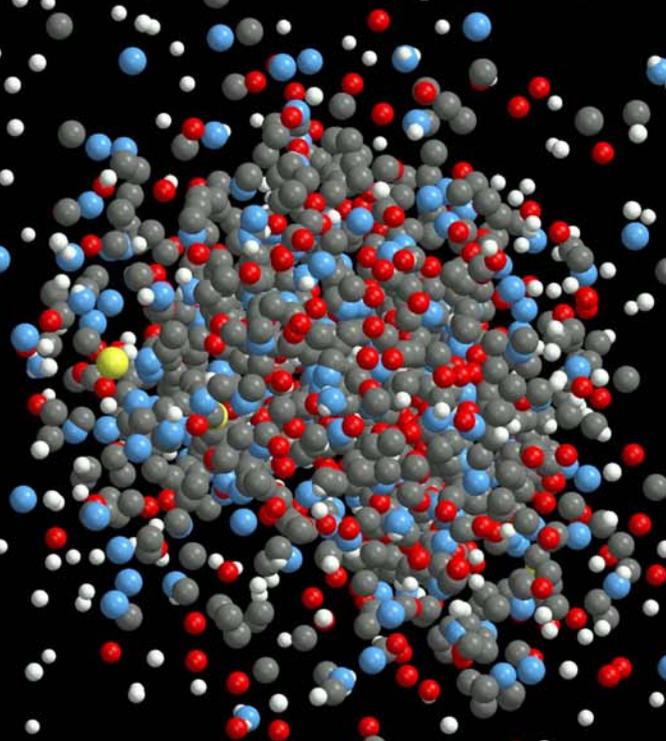
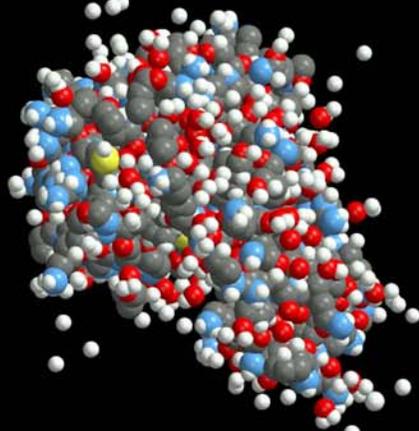
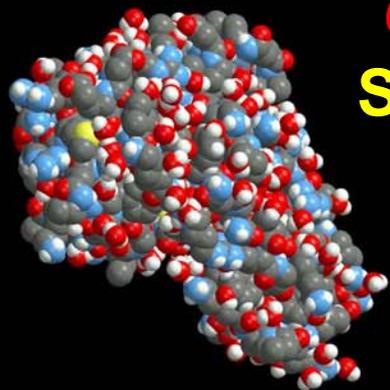
# X-Rays have opened the Ultra-Small World X-FELs open the Ultra-Small and Ultra-Fast Worlds

## Ultra-Small

## Ultra-Fast



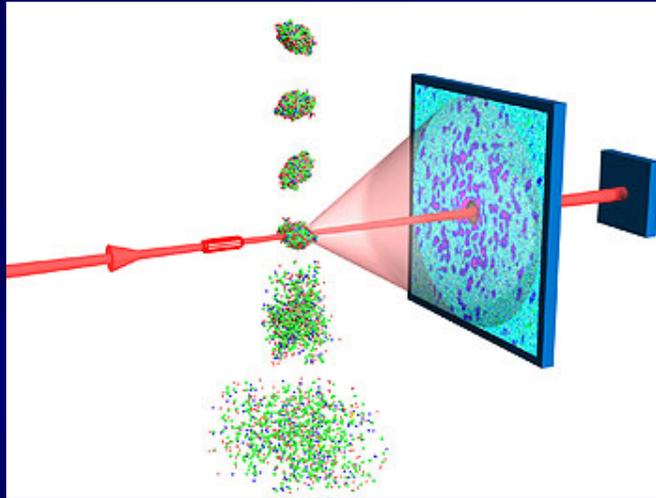
*Coulomb Explosion of Lysozyme (50 fs)*  
**Single Molecule Imaging with Intense X-rays**



Atomic and  
molecular  
dynamics occur  
at the *fsec*-scale

*J. Hajdu, Uppsala U.*

# Protein imaging



Using extremely short and intense X-ray pulses to capture images of objects such as proteins before the X-rays destroy the sample.

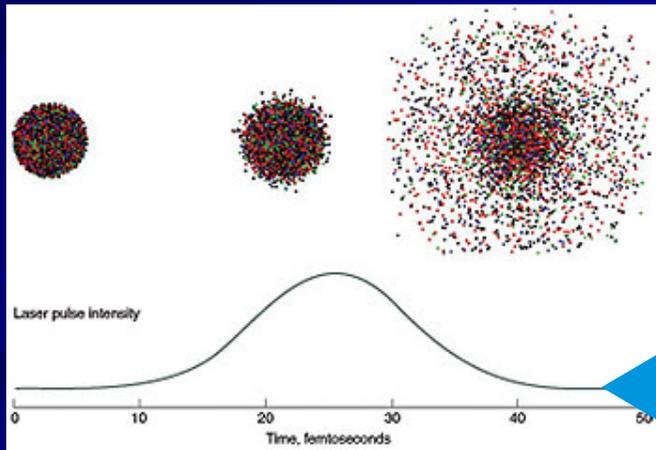
Single-molecule diffractive imaging with an X-ray free-electron laser.

Individual biological molecules will be made to fall through the X-ray beam, one at a time, and their structural information recorded in the form of a diffraction pattern.

The pulse will ultimately destroy each molecule, but not before the pulse has diffracted from the undamaged structure.

The patterns are combined to form an atomic-resolution image of the molecule.

The speed record of 25 femtoseconds for flash imaging was achieved.



Models indicate that atomic-resolution imaging can be achieved with pulses shorter than 20 femtoseconds.

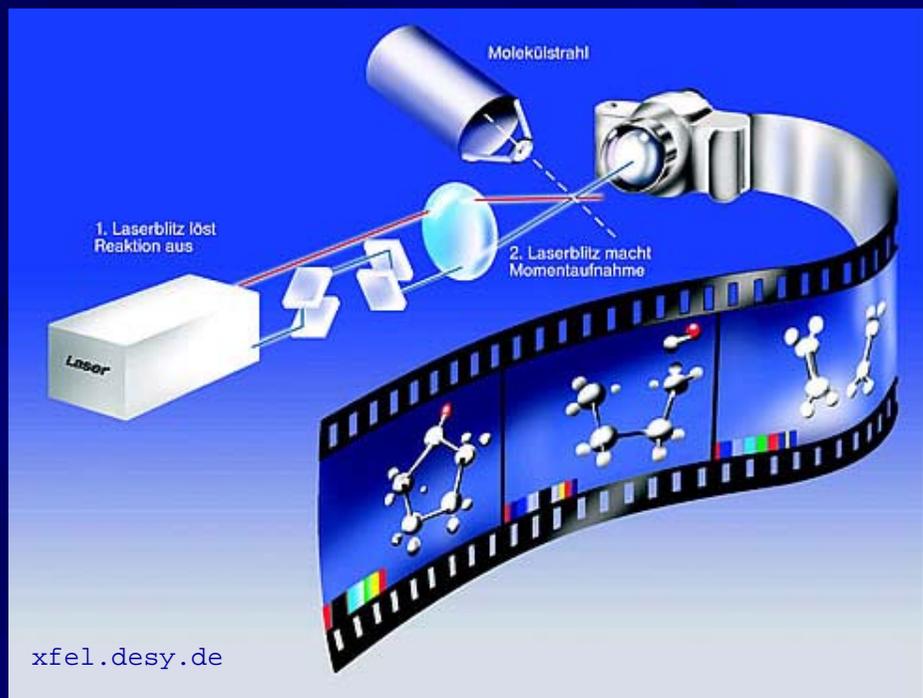
# make a movie of chemical reactions

Chemical reactions often take place incredibly quickly: orders of magnitude of femtosecond are not rare. The atomic changes that occur when molecules react with one another take place in moments that brief.

The XFEL X-ray laser flashes make it possible to film these rapid processes with an unprecedented level of quality.

Since the flash duration is less than 100 femtoseconds, images can be made in which the movements of detail are not blurred.

And thanks to the short wavelength, atomic details become visible in the films.



To film a chemical reaction, one needs a series of pairs of X-ray laser flashes. The first flash in each pair triggers the chemical reaction. With the second flash, a snapshot is then made.

The delay between the two flashes can be precisely modified to within femtosecond and a series of snapshots can be made at various times following the start of the reaction.

In each case, the images are of different molecules, but these images can be combined into a film.

THE END