



# Acceleratori di particelle- II

M. Boscolo



# Piano del colloquio

- Introduzione alla fisica e tecnologia degli acceleratori
- Lezione I: I fondamenti della macchina acceleratrice di particelle
- **Lezione II: acceleratori nel mondo e prospettive**

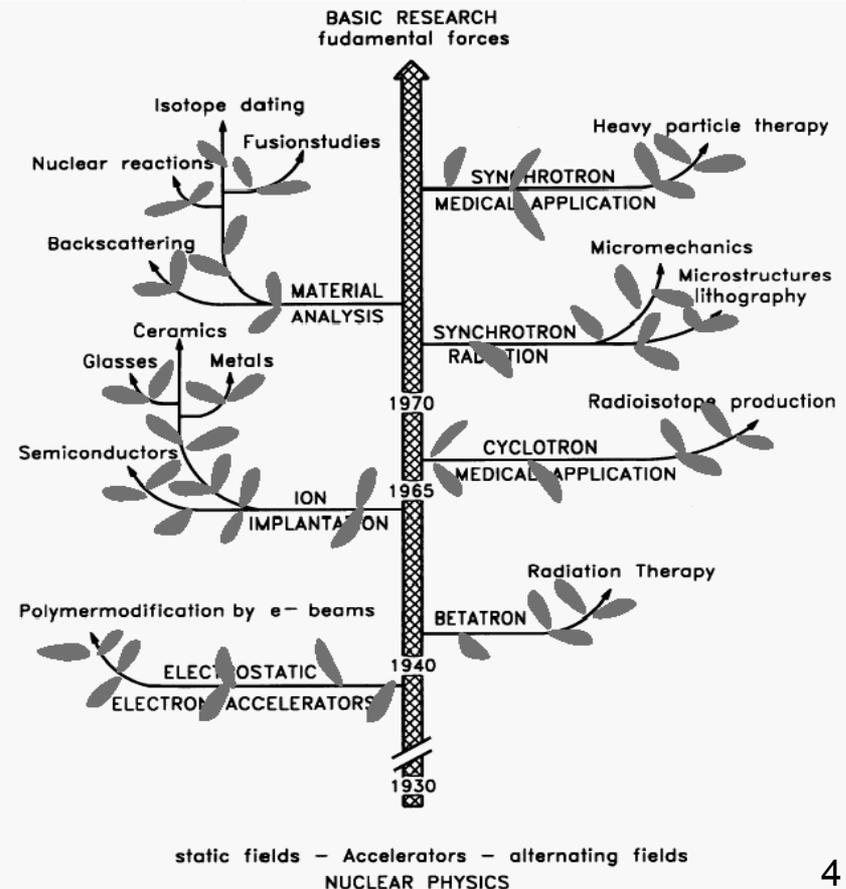
# Acceleratori nel mondo e prospettive

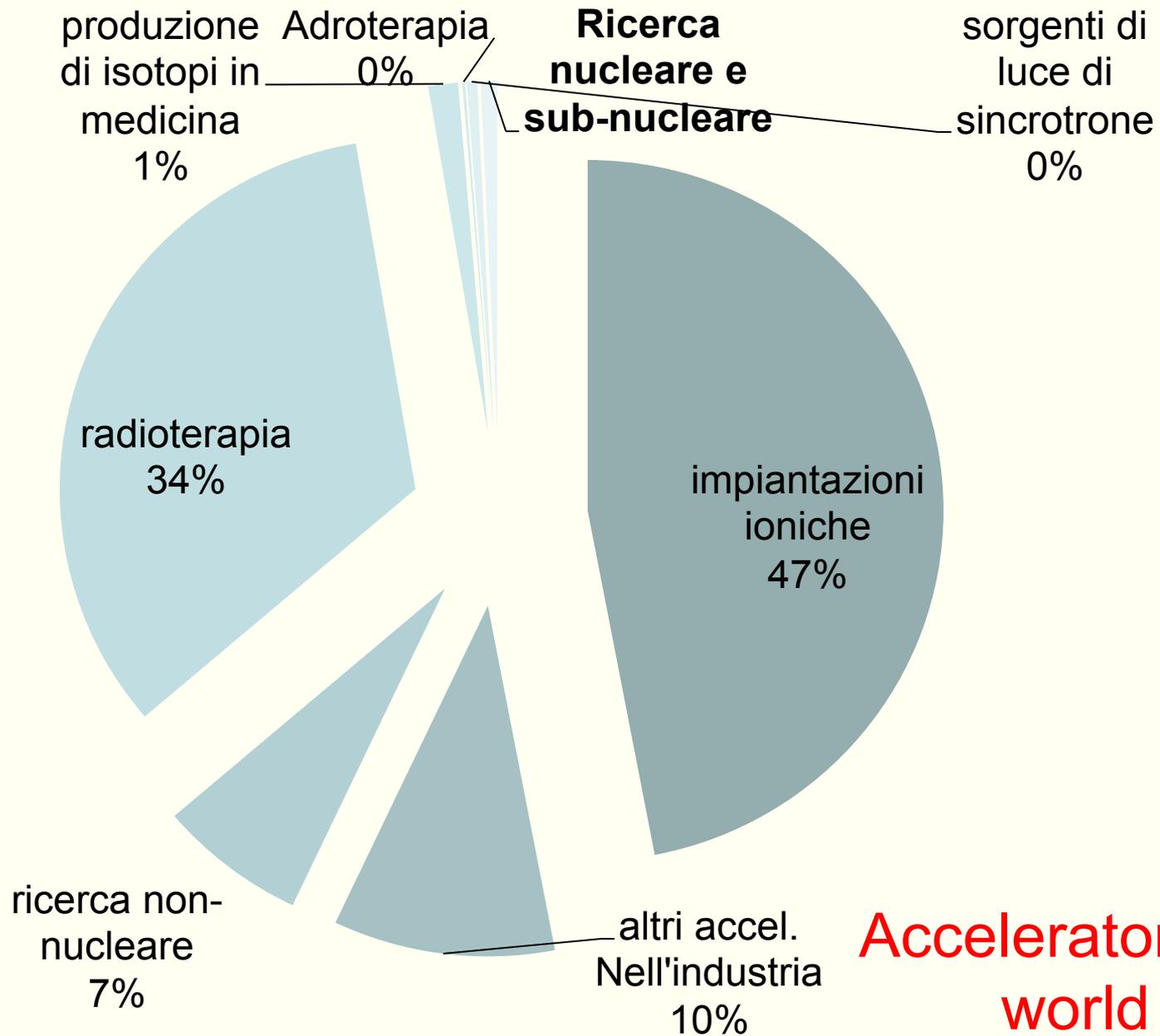
- A cosa servono gli acceleratori di particelle?
- Schema di un acceleratore a seconda del suo scopo
- Qualche esempio
- Prospettive Acceleratori per la ricerca fondamentale

# Utilizzazioni degli 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
TOTALE	15000

Gli acceleratori usati per la ricerca pura sono costruiti ai limiti della tecnologia attuale e sono anch'essi ricerca tecnologica.





**Accelerators in the world > 15000**

# Colliders

Location	Name (type <sup>[a]</sup> )	Max. $E_{cm}$ (GeV)	Start
Stanford/SLAC, USA	CBX <sup>[b]</sup> ( $e^-e^-$ -DR)	1.0	1963
	Spear ( $e^+e^-$ -SR)	5.0	1972
	PEP ( $e^+e^-$ -SR) [5]	30	1980
	SLC ( $e^+e^-$ -LC) [6]	100	1989
	PEP-II ( $e^+e^-$ -DR) [7]	10.6	1999 <sup>[d]</sup>
Frascati, Italy	AdA ( $e^+e^-$ -SR)	0.5	1962
Novosibirsk, Siberia	Adone ( $e^+e^-$ -SR)	3.0	1969
	DAΦNE ( $e^+e^-$ -SR)	1.0	1997 <sup>[d]</sup>
	VEP-1 ( $e^-e^-$ -DR)	0.26	1963
	VEPP-2/2M ( $e^+e^-$ -SR)	1.4	1974
	VEPP-4 ( $e^+e^-$ -SR)	14	1979
Cambridge, USA	CEA Bypass ( $e^+e^-$ -SR)	6	1971
Orsay, France	ACO ( $e^+e^-$ -SR)	1.0	1966
	DCI ( $e^\pm e^\pm$ -DR)	3.6	1976
DESY, Germany	Doris ( $e^+e^-$ -DR)	6.0	1974
	Petra ( $e^+e^-$ -SR)	38	1978
	Hera ( $e^\pm p$ DR) [8]	160	1992
CERN, Europe	ISR (pp DR) [2]	63	1971
	Sp̄p̄S (p̄p̄ SR) [9]	630	1981
	LEP ( $e^+e^-$ -SR) [10]	190	1989
	LHC (pp DR) [11]	14,000	2004 <sup>[d]</sup>
Brookhaven, USA	RHIC (heavy ions DR) [12]	200/u <sup>[c]</sup>	1999 <sup>[d]</sup>
	RHIC (pp DR)	500	
Cornell, USA	CESR ( $e^+e^-$ -SR)	12	1979
KEK, Japan	Tristan ( $e^+e^-$ -SR) [14]	60	1986
	KEK B ( $e^+e^-$ -DR) [13]	10.6	1999 <sup>[d]</sup>
Beijing, China	BEPC ( $e^+e^-$ -SR) [15]	3.1	1989
Fermilab, USA	Tevatron (p̄p̄ SR) [16]	1800	1987

DR: Double storage ring

SR: Single storage ring

LC: Linear collider

Dall'idea geniale di Bruno Touschek di far scontrare particelle con antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.

[Handbook of Accelerator Physics and Engineering, Ed. A. Chao and M. Tigner, World Scientific]

# Sviluppo degli Acceleratori

- Acceleratori dedicati alla fisica fondamentale sono pochi rispetto a quelli dedicati all'industria e alla medicina,
- Tuttavia le idee più innovative si hanno sugli acceleratori dedicati alla fisica fondamentale,
- è su questi che si sperimentano le tecnologie più innovative, che vengono poi applicate sugli altri

Ecco perchè sono così significativi i collisori,  
Ne parleremo in maggior dettaglio

# Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

Lineari

- Acceleratori per sterilizzazione dei cibi e dei contenitori.
- Impiantazione di ioni in semiconduttori.

Lineari  
Circolari

- Acceleratori di elettroni come sorgenti per la produzione di **radiazione di sincrotrone**, dall'infrarosso ai raggi X, utilizzata in moltissime applicazioni, tra cui: **scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia.**

Lineari  
Circolari

- **Applicazioni mediche:**
  - acceleratori di elettroni come sorgenti di **raggi X.**
  - fasci di ioni o protoni per **adroterapia.**

# Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

Lineari

- **Acceleratori per sterilizzazione dei cibi e dei contenitori.**
- **Impiantazione di ioni in semiconduttori.**

Lineari  
Circolari

- Acceleratori di elettroni come sorgenti per la produzione di **radiazione di sincrotrone**, dall'infrarosso ai raggi X, utilizzata in moltissime applicazioni, tra cui: scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia.

Lineari  
Circolari

- **Applicazioni mediche:**
  - acceleratori di elettroni come sorgenti di raggi X.
  - fasci di ioni o protoni per adroterapia.

# Acceleratori Lineari e<sup>-</sup>

usati per molti scopi:

qualche esempio...

Medicina

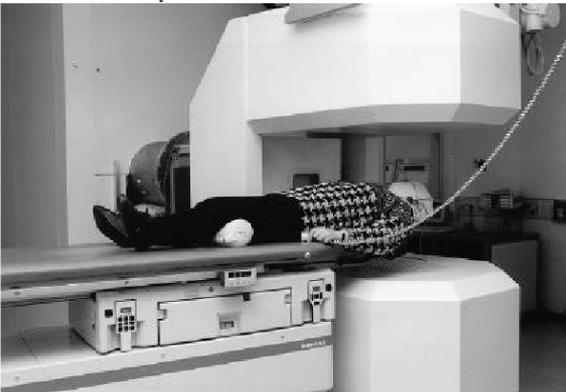
Radioterapia,  
Radiografia  
E ~ 4-30 MeV

Industria

Sterilizzazione di  
materiali e prodotti  
(basse energie)

Ricerca fondamentale

- Iniettori in anelli di accumulazione e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup>
  - Fisica nucleare e subnucleare
  - FEL
- E ~ 50 MeV - 50 GeV → 1TeV



# Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

Lineari

- Acceleratori per sterilizzazione dei cibi e dei contenitori.
- Impiantazione di ioni in semiconduttori.

Lineari  
Circolari

- **Acceleratori di elettroni come sorgenti per la produzione di radiazione di sincrotrone, dall'infrarosso ai raggi X, utilizzata in moltissime applicazioni, tra cui: scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia.**

Lineari  
Circolari

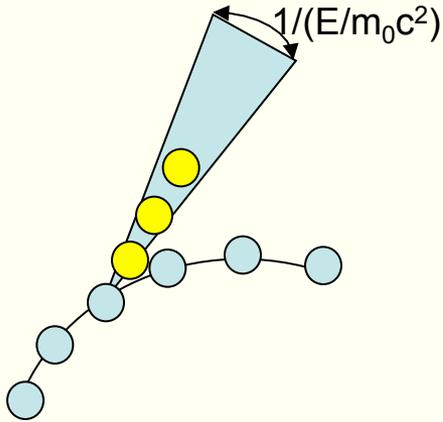
## Applicazioni mediche:

- acceleratori di elettroni come sorgenti di raggi X.
- fasci di ioni o protoni per adroterapia.

# Radiazione di sincrotrone

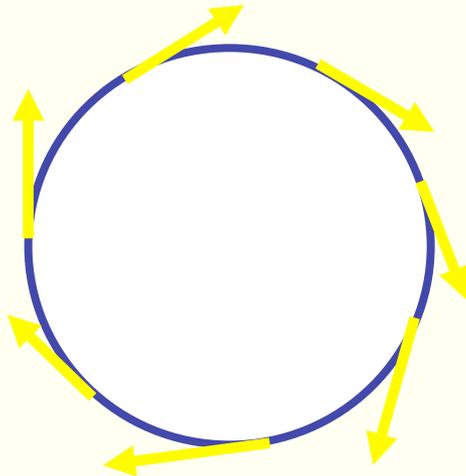
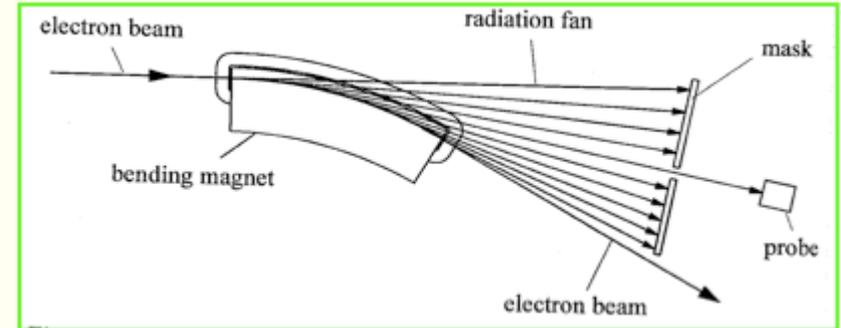
Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva emette fotoni, la cui energia dipende dalla massa, dall'energia della particella e dal raggio di curvatura della traiettoria

Radiazione ben collimata



Particelle in moto su un'orbita circolare quando passano all'interno di un magnete curvante emettono radiazione in direzione tangente alla loro traiettoria

Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva **perde energia**



Energia persa per giro

$$U = \frac{4\pi}{3} \frac{r_0}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

Energia

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria

In un anello di accumulazione l'energia persa viene compensata dalle Cavit  a RF

# Radiazione di Sincrotrone

U energia persa per giro

$$U = \frac{4\pi}{3} \frac{r_o}{(mc^2)^3} \frac{E^4}{\rho}$$

Energia

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria

$$\frac{m_p}{m_e} = 1836$$

$$\frac{U_{e^-}}{U_p} \approx 10^{13}$$

E energia della particella  
 ρ raggio di curvatura  
 m0 massa della particella

- A parità di **E** e ρ un elettrone emette molta più radiazione di sincrotrone di un protone
- La radiazione di sincrotrone emessa da protoni è stata osservata per la prima volta al Tevatron

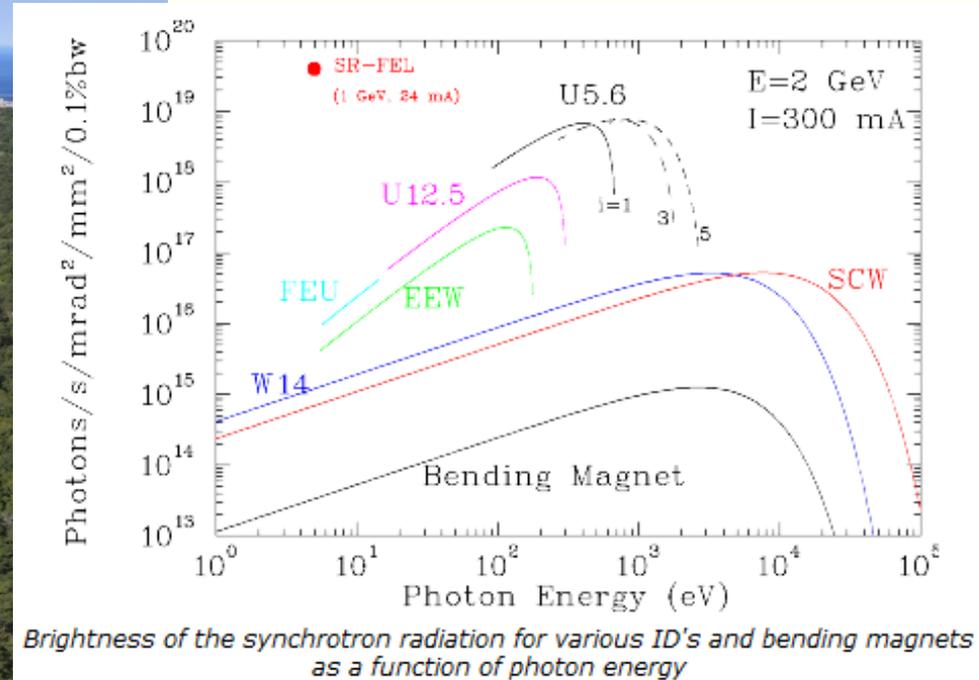
(circonferenza  $L=2\pi\rho$ )

$e^+ e^-$	DAΦNE	$U \sim 0.01$	MeV	$E = 0.51$	GeV	$L = 97.58$	m
$e^+ e^-$	LEP	$U \sim 700$	MeV	$E = 70$	GeV	$L = 27000$	m
$p p$	LHC	$U \sim 0.007$	MeV	$E = 7000$	GeV	$L = 27000$	m

# Anelli di luce di sincrotrone

- Acceleratori circolari ad elettroni sfruttano la radiazione di sincrotrone emessa negli archi per generare una radiazione che viene utilizzata in molti campi di ricerca (scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia)
- Il fascio di elettroni circolante nell'acceleratore deve soddisfare precise caratteristiche affinché la luce da esso prodotta sia di buona qualità'.
- Il parametro che determina la qualità di un fascio di elettroni per questo tipo di macchine è la **BRILLANZA**, concetto molto simile alla **luminosità**: Quanto più denso il denso di fascio di elettroni circolanti, tanto più brillante il fascio di luce di sincrotrone emesso nei magneti curvanti

# ELETTRA a Trieste: anello di accumulazione per luce di sincrotrone



photons in the energy range  
from a few to several tens of KeV  
with spectral brightness of up to  
 $10^{19}$  photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%bw

<http://www.elettra.trieste.it/>

# Limiti imposti dalla Radiazione di Sincrotrone

L'energia persa per emissione di radiazione di sincrotrone viene reintegrata mediante una **cavità a Radio Frequenza**

$$U_{MAX} = P_{MAX}^{RF}$$
$$E_{MAX} [GeV] \propto (\rho [m] U_{MAX})^{1/4}$$

- Data una certa potenza RF si può costruire un acceleratore con energia maggiore aumentandone il raggio
- Raddoppiare l'energia a parità di potenza RF richiede un acceleratore con raggio 16 volte maggiore

**QUINDI:**

Per via della radiazione di sincrotrone gli acceleratori ad alta energia (circa  $E > 100$  GeV) conviene farli:

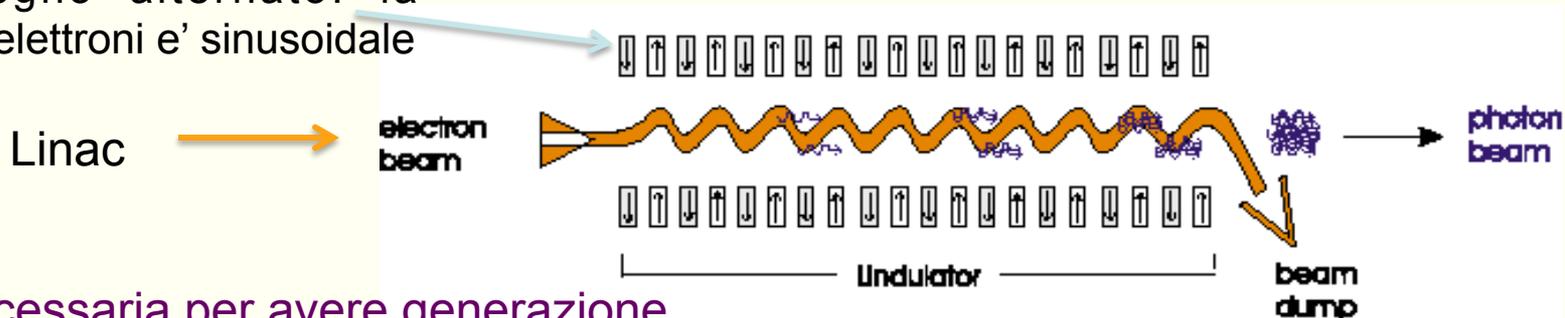
- circolari: adroni (protoni, antiprotoni o ioni) o muoni perché irradiano molto meno, essendo più pesanti oppure
- Lineari e-/e+, non essendoci irraggiamento

# Acceleratori Lineari e<sup>-</sup> per produrre radiazione coerente molto intensa

- Un linac ad e<sup>-</sup> accelera pacchetti di elettroni di alta qualità
- I pacchetti di e<sup>-</sup> accelerati attraversano poi un'ondulatore
- qui generano radiazione coerente, con un'amplificazione esponenziale [PRINCIPIO del FEL-SASE]

(*Free Electron Laser-Self Amplified Spontaneous Emission*)

**Ondulatore:** sequenza di magneti dipolari a segno alternato: la traiettoria degli elettroni e' sinusoidale



Condizione necessaria per avere generazione di radiazione coerente e intensa:

Fascio e<sup>-</sup> deve essere BRILLANTE,

Cioe' molto denso:

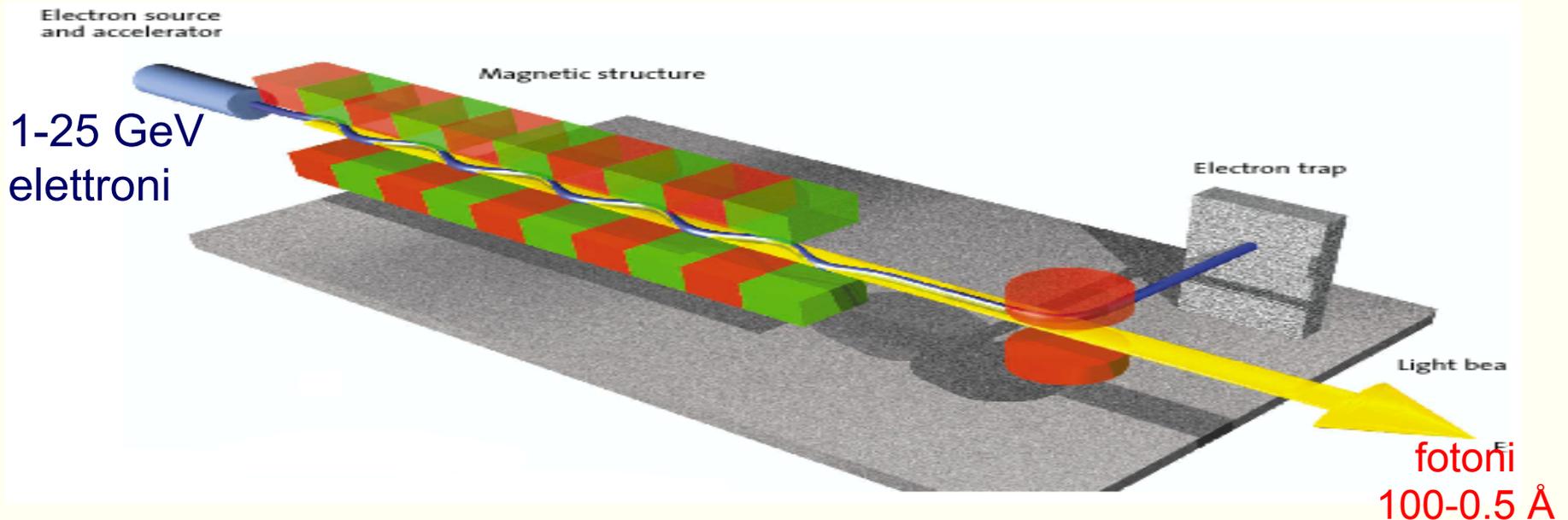
bassa emittanza

piccolo energy spread

altissima densità di carica



# Laser ad elettroni liberi (FEL-SASE)



I Laser ad Elettroni Liberi sono potenti sorgenti di radiazione elettromagnetica coerente

(microonde, UV, raggi X)

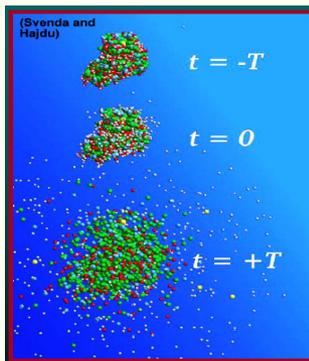
con alta potenza di picco e alta brillantezza (ordini di grandezza superiori agli anelli di luce di sincrotrone)

# Free Electron Lasers: applicazioni

Ce ne sono molti in operazione nel mondo,  
Notevole interesse per il loro sviluppo

diminuire la lunghezza d'onda  
( $\lambda \rightarrow$  raggi X)

Struttura della materia, ad es.  
Dinamica delle molecole,  
reazioni chimiche



aumentare potenza media  
(per  $\lambda$  nell' IR-UV)

Applicazioni mediche  
e industriali



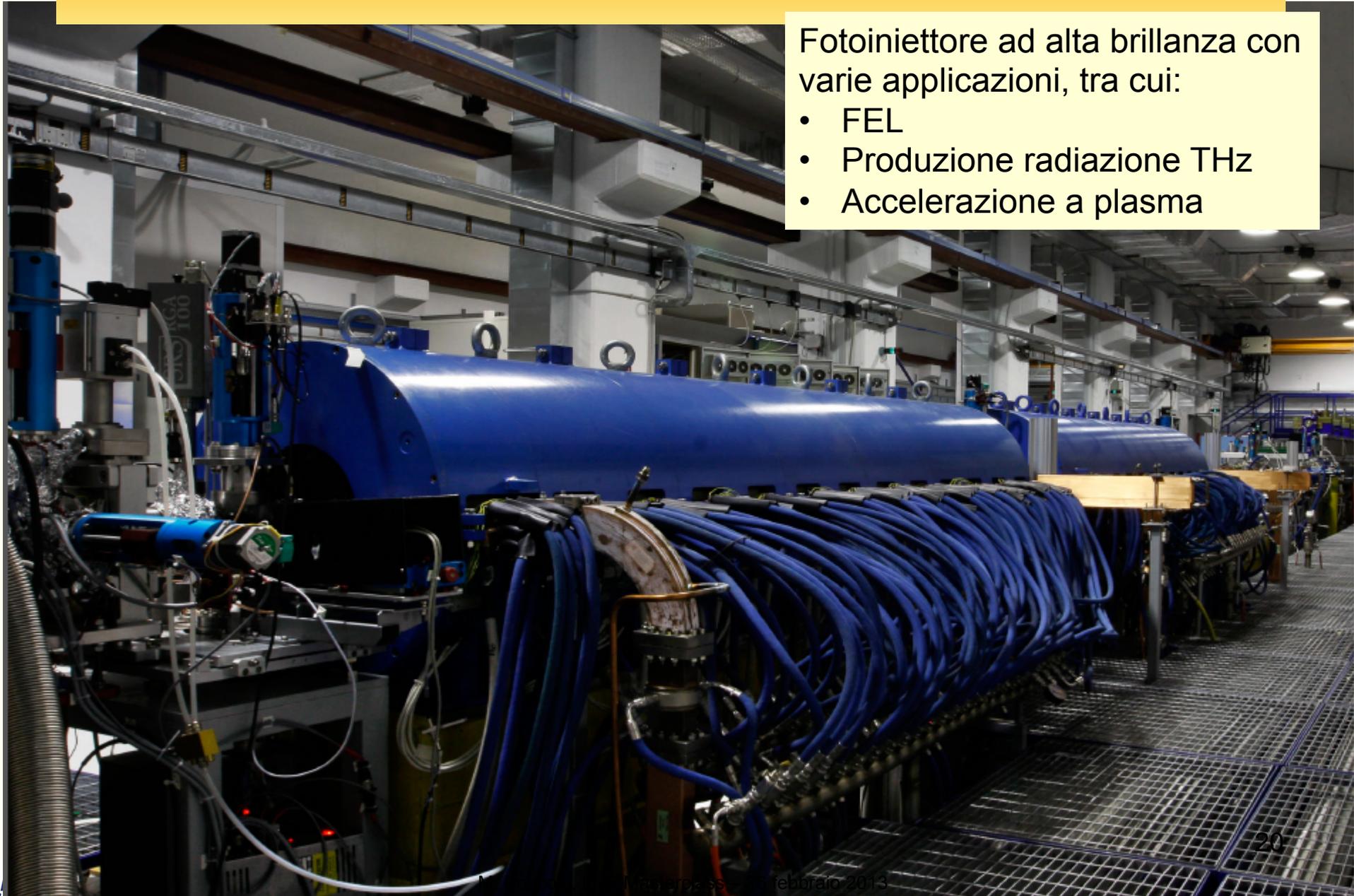
LCLS a Stanford per approfondimenti sulle applicazioni:

[https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls\\_public](https://portal.slac.stanford.edu/sites/lcls_public) 3 febbraio 2013

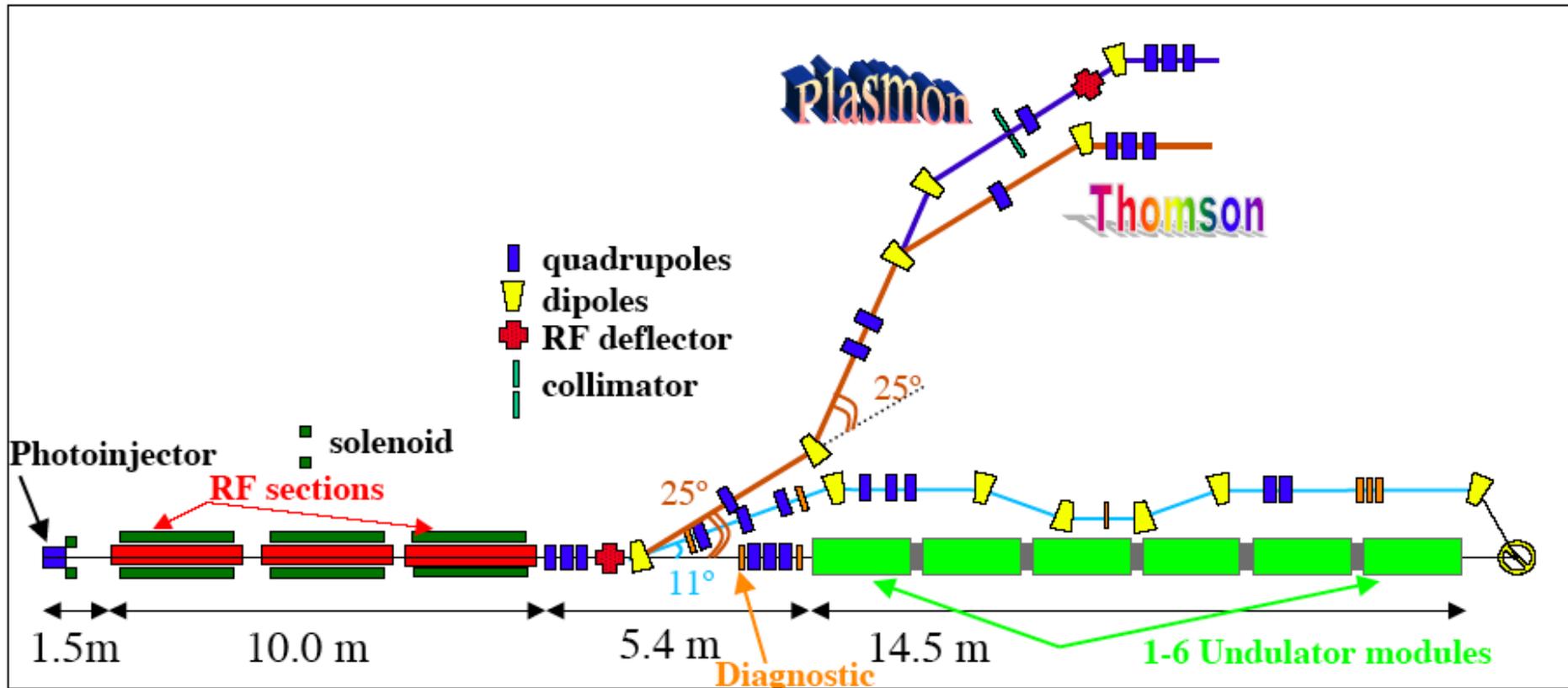
# SPARC a Frascati ai LNF

Fotoiniettore ad alta brillantezza con varie applicazioni, tra cui:

- FEL
- Produzione radiazione THz
- Accelerazione a plasma



# SPARC: schema dell'acceleratore



# Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

Lineari

- Acceleratori per sterilizzazione dei cibi e dei contenitori.
- Impiantazione di ioni in semiconduttori.

Lineari  
Circolari

- Acceleratori di elettroni come sorgenti per la produzione di **radiazione di sincrotrone**, dall'infrarosso ai raggi X, utilizzata in moltissime applicazioni, tra cui: scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia.

Lineari  
Circolari

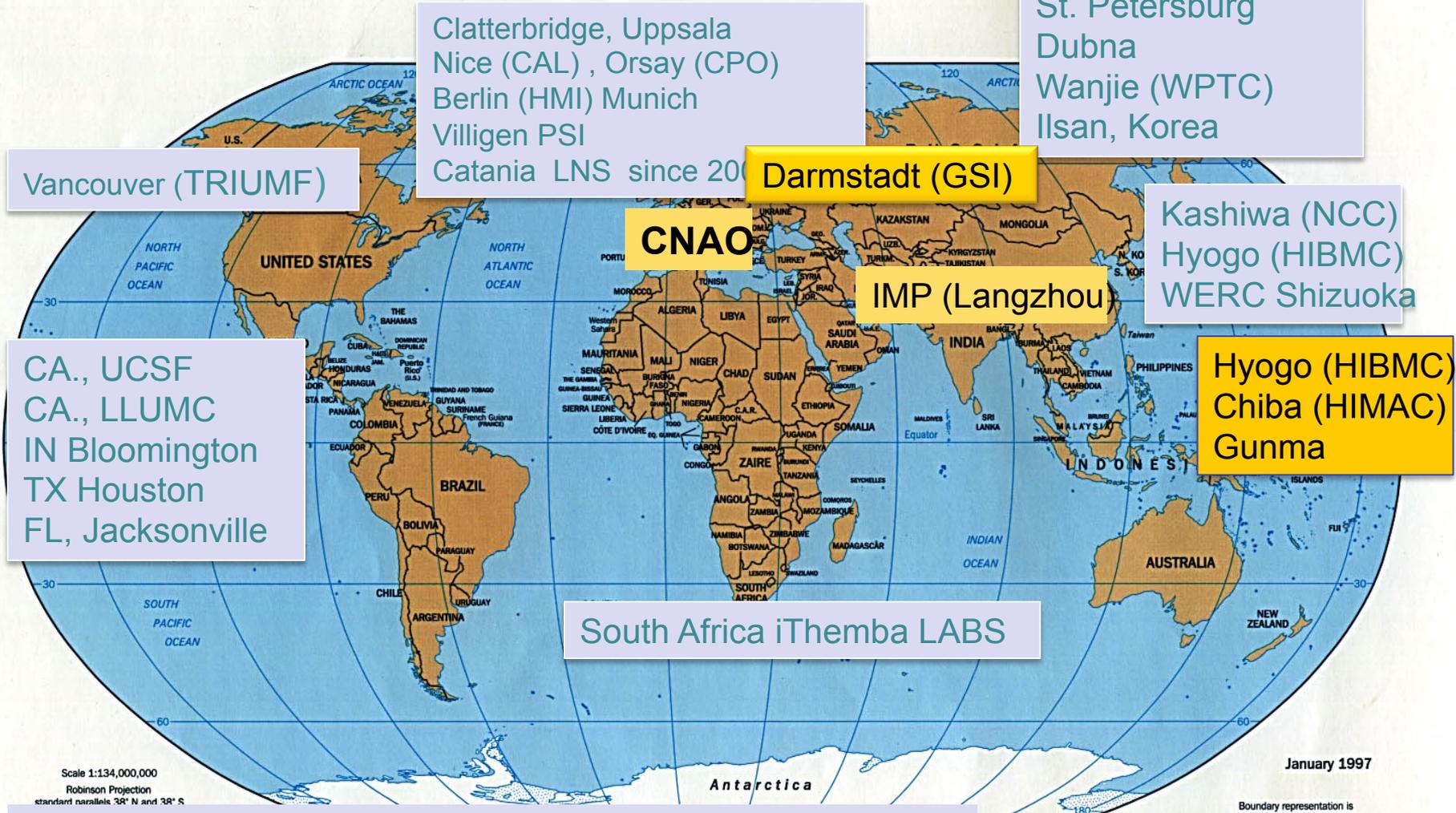
- **Applicazioni mediche:**
  - acceleratori di elettroni come sorgenti di **raggi X**.
  - fasci di ioni o protoni per **adroterapia**.

# Adroterapia

Gli Adroni sono nuclei di atomi che, portati ad alta energia da una macchina acceleratrice, sono lanciati come proiettili in grado di danneggiare tessuti malati in massima parte alla fine del loro corso nel corpo del paziente, in corrispondenza del tumore

Un fascio di adroni carico rilascia la maggior parte della sua energia (distruttiva) sul bersaglio. La dose al tumore può essere quindi molto elevata mentre i tessuti sani vengono risparmiati.

# Hadrontherapy in the world



> 70000 patients treated with protons

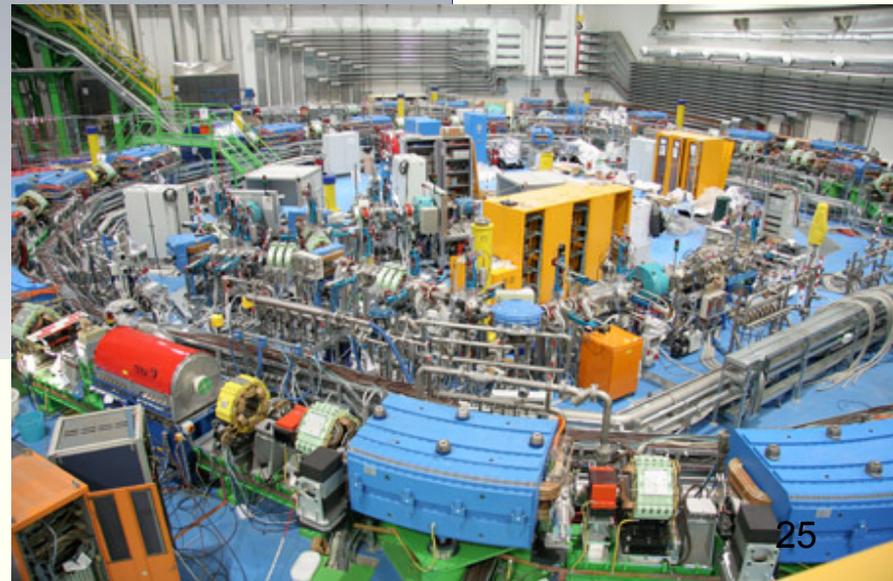
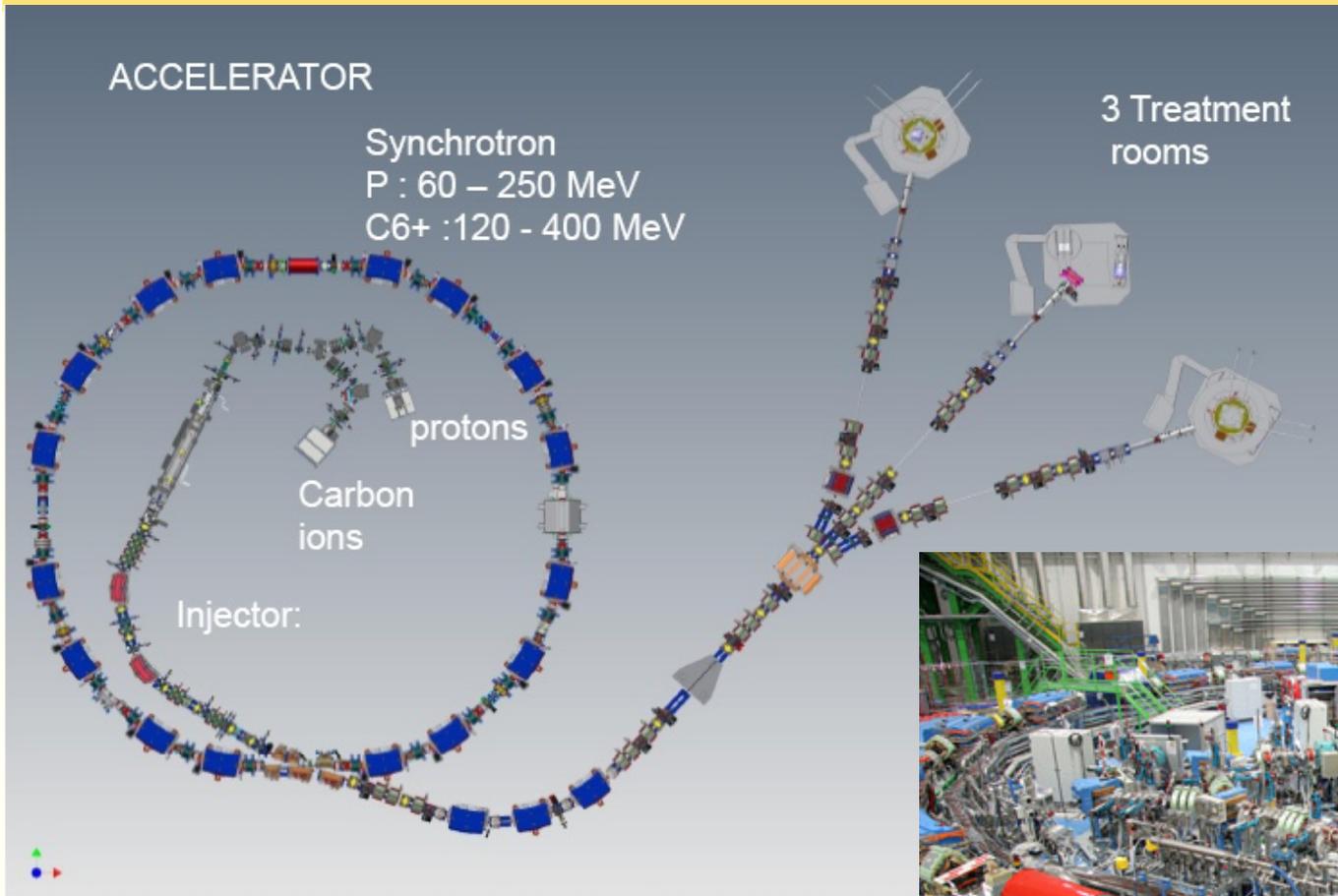
> 7000 with carbon ions

January 1997

Boundary representation is not necessarily authoritative.

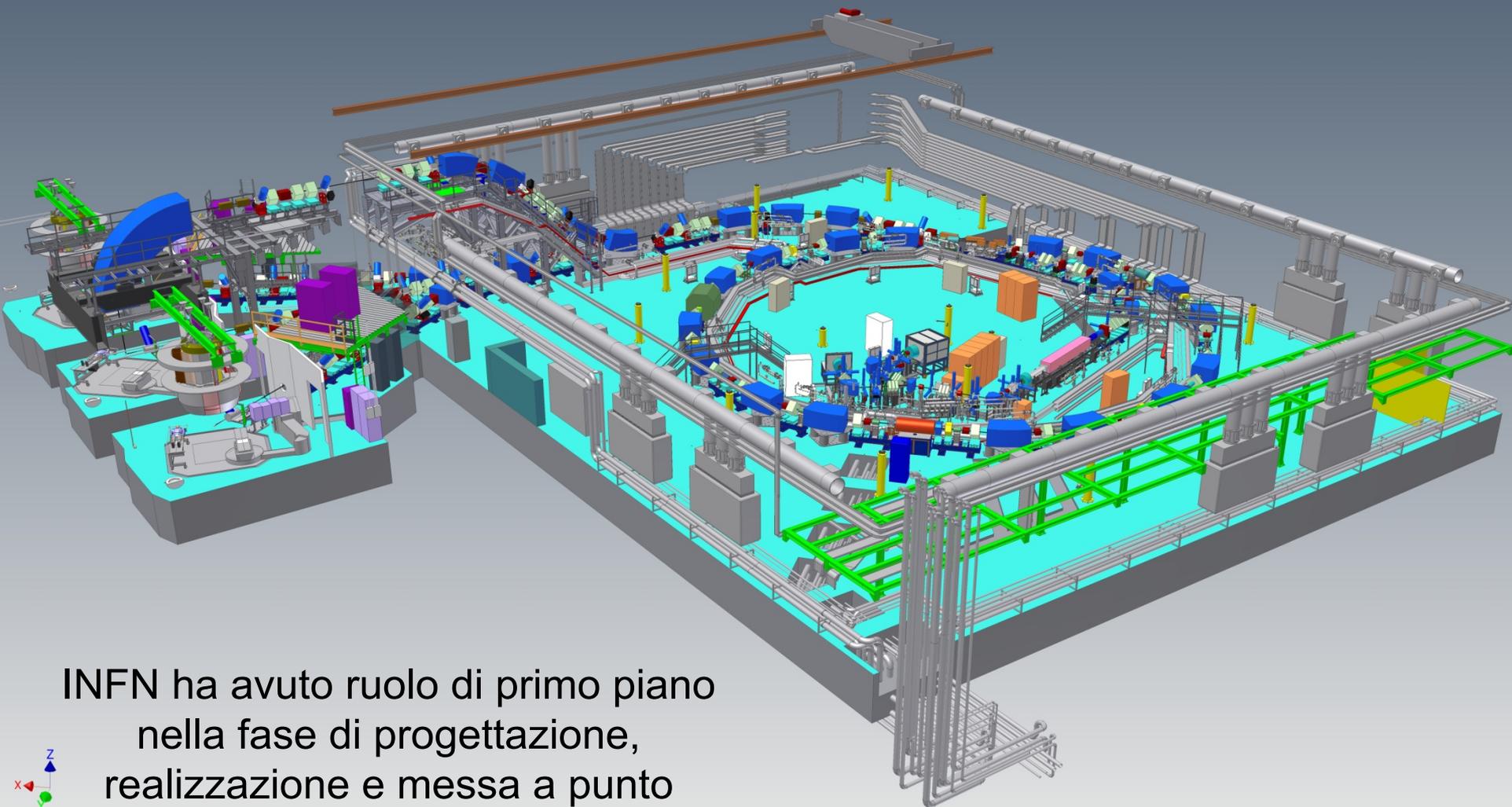
802543 (R00352) 1-97

# CNAO: Centro Nazionale Adroterapia Oncologica a Pavia



# CNAO

## Accelerator and Treatment Rooms

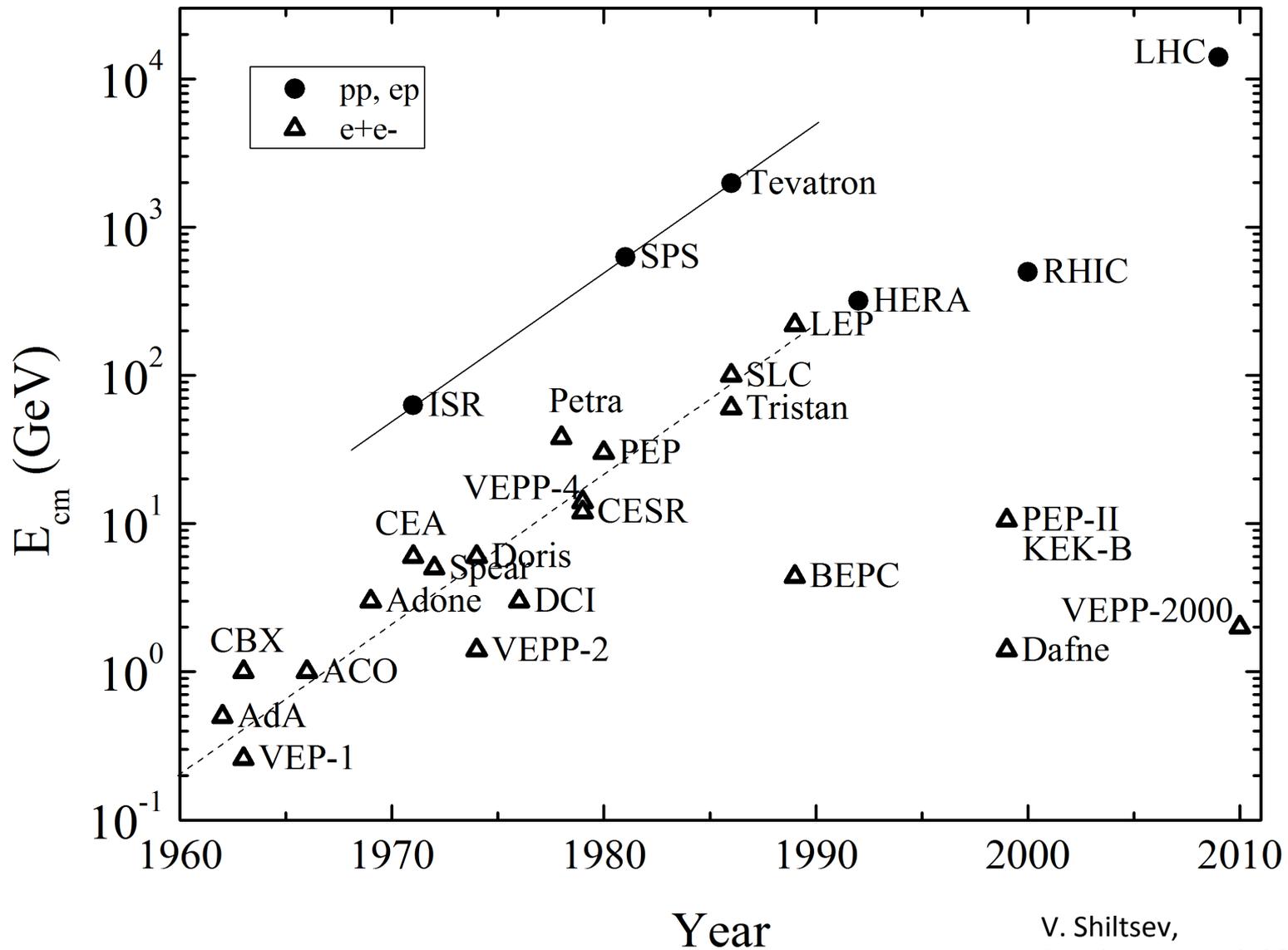


INFN ha avuto ruolo di primo piano  
nella fase di progettazione,  
realizzazione e messa a punto

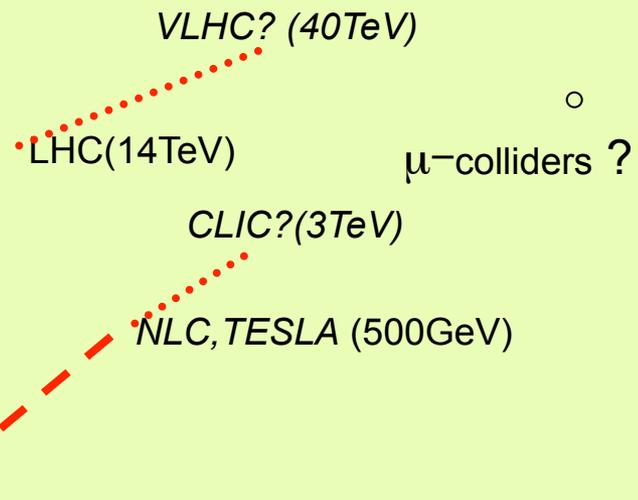
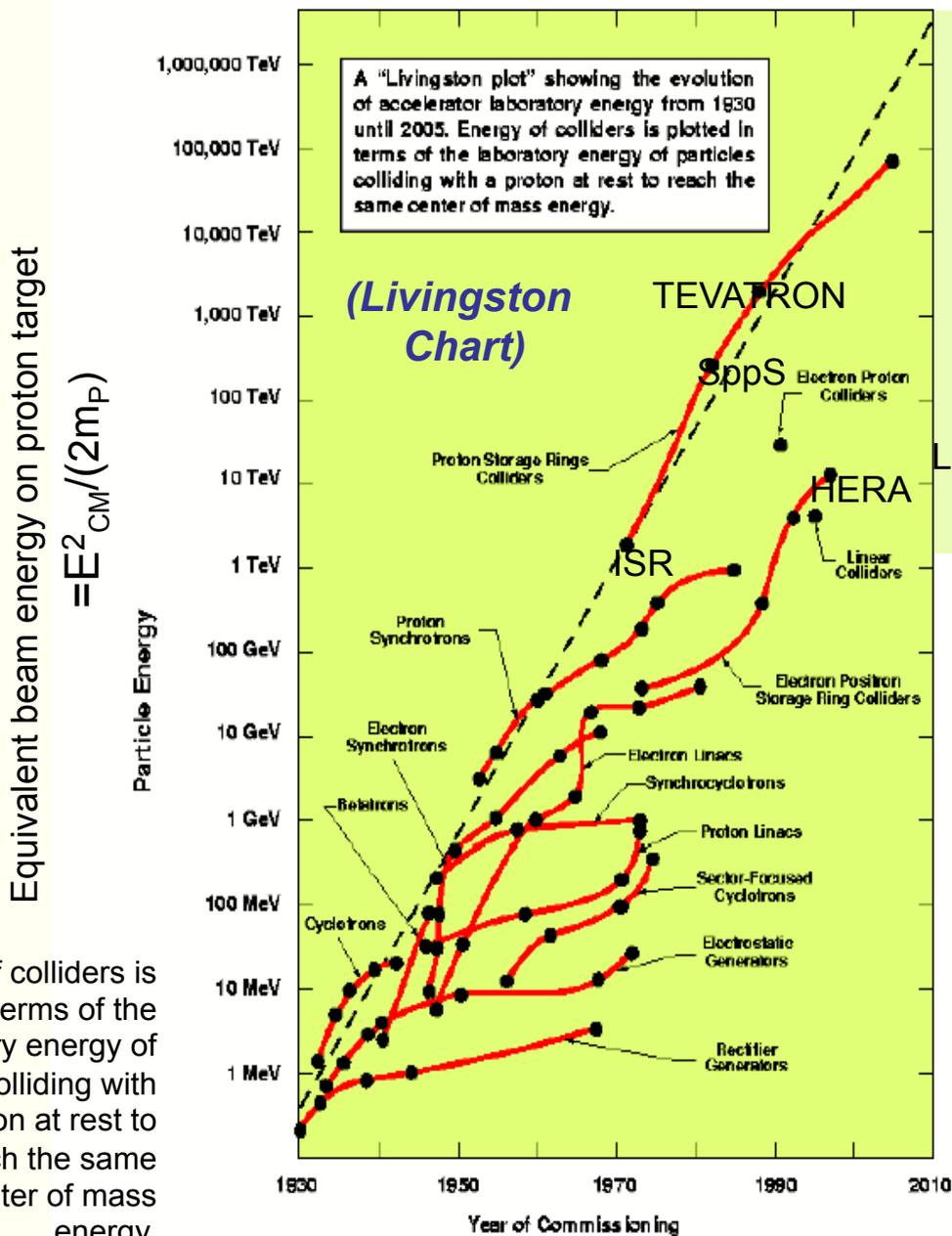
# Argomenti della presentazione di oggi

- A cosa servono gli acceleratori di particelle?
- Schema di un acceleratore di particelle a seconda delle applicazioni
- Qualche esempio
- **Prospettive Acceleratori per la ricerca fondamentale**

# Collisori di particelle nei decenni



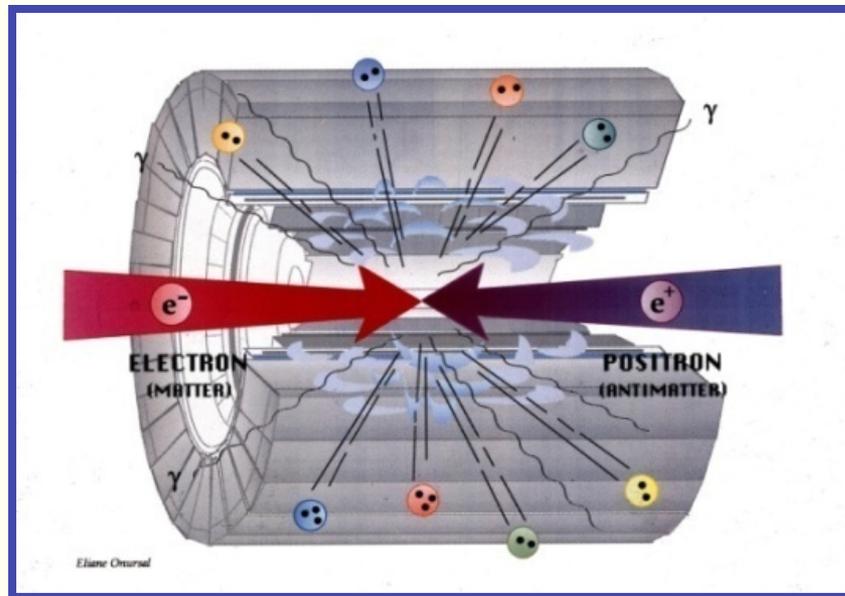
# Diagramma dell'energia dei *colliders* dal 1930 al 2010



Energy of colliders is plotted in terms of the laboratory energy of particles colliding with a proton at rest to reach the same center of mass energy.

# Luminosità di un *collider*

L'idea di base di un collisore è quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, rilasciano tutta la loro energia per creare nuove particelle.

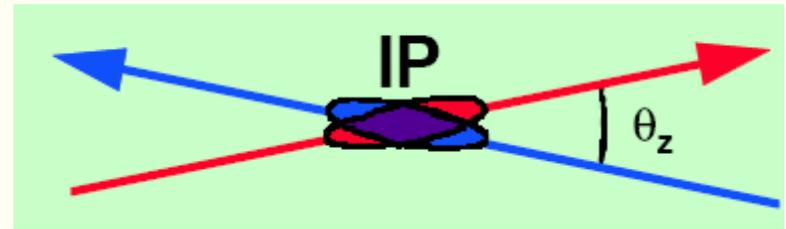


Il parametro che determina la qualità di un collisore, fissata la sua energia e il tipo di particelle che si fanno scontrare le une contro le altre, è la **LUMINOSITA'**

# Luminosità

è proporzionale alla densità dei fasci (numero particelle/area)  
e alla frequenza di collisione

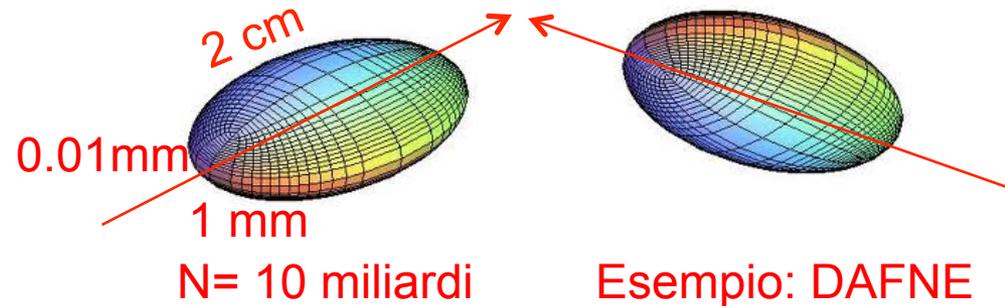
$$L = f_{collision} \cdot \frac{N_1 N_2}{A} \quad (\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1})$$



Tanti più eventi di fisica quanto più densi i pacchetti dei fasci collidenti

$$f_{collision} = n_{bunches} \cdot f_{revolution}$$

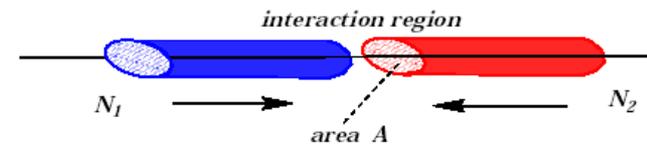
$$f_{revolution} = 1/T_{rev} = c/L$$



$N_{1,2}$  numero di particelle e di antiparticelle nei pacchetti 1 e 2

A area trasversa occupata dai due pacchetti all'IP

# Luminosità



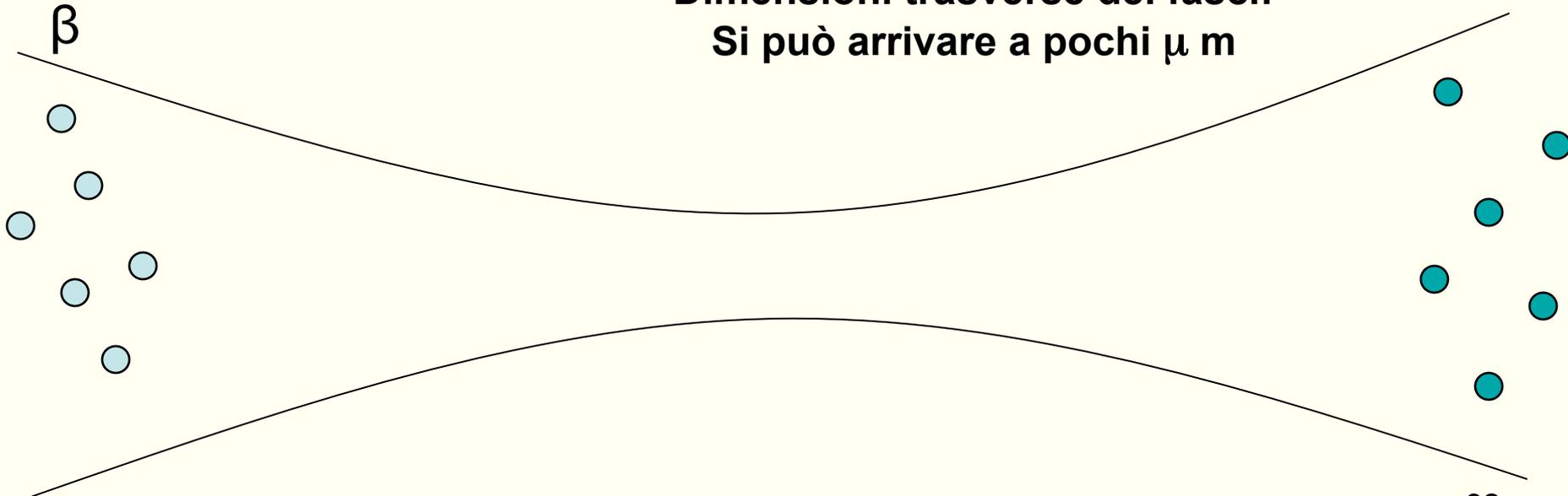
la **luminosità L** di un collider è una misura di quante interazioni fascio-fascio stiamo producendo

**Per aumentare la luminosità si aumenta la densità dei fasci**

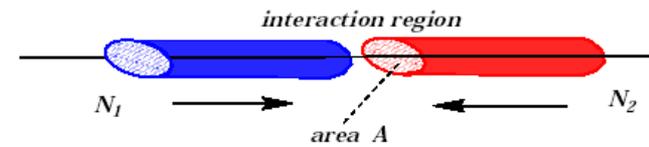
**Numero di particelle per fascio**

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

**Dimensioni trasverse dei fasci:  
Si può arrivare a pochi  $\mu\text{m}$**



# Luminosità



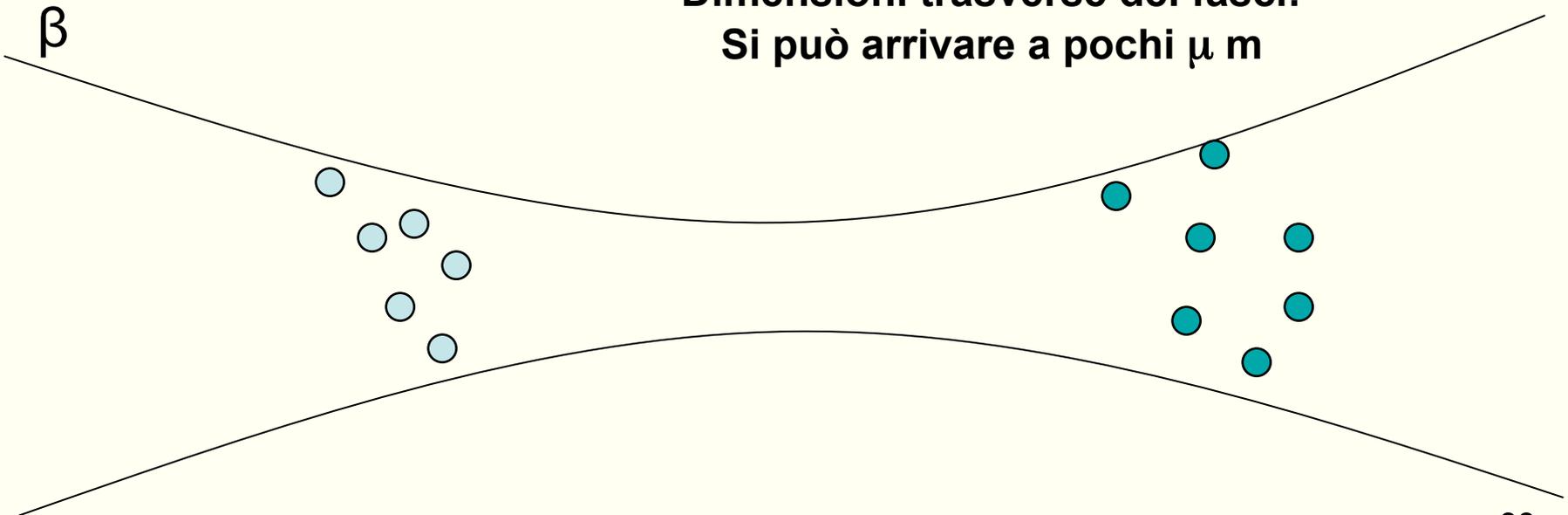
la **luminosità L** di un collider è una misura di quante interazioni fascio-fascio stiamo producendo

**Per aumentare la luminosità si aumenta la densità dei fasci**

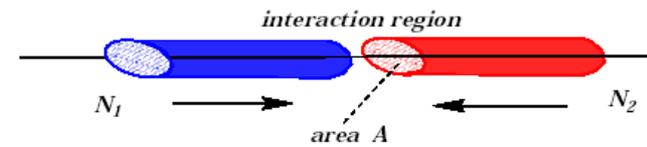
**Numero di particelle per fascio**

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

**Dimensioni trasverse dei fasci:  
Si può arrivare a pochi  $\mu\text{m}$**



# Luminosità



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

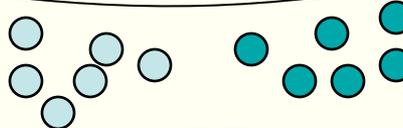
**Per aumentare la luminosità si aumenta la densità dei fasci**

**Numero di particelle per fascio**

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

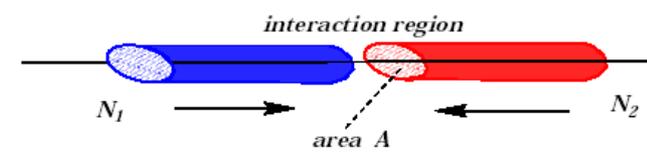
**Dimensioni trasverse dei fasci:  
Si può arrivare a pochi  $\mu\text{m}$**

$\beta$





# Luminosità



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

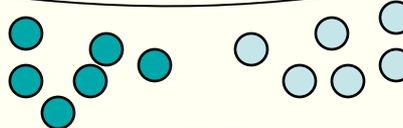
**Per aumentare la luminosità si aumenta la densità dei fasci**

**Numero di particelle per fascio**

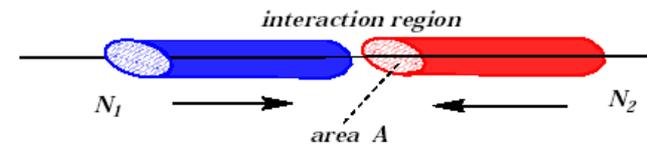
$$L = \frac{N^{e^+} N^{e^-}}{4\pi\sigma_x \sigma_y} \times f_{\text{collisione}} \quad [\text{Cm}^{-2} \text{sec}^{-1}]$$

**Dimensioni trasverse dei fasci:  
Si può arrivare a pochi  $\mu\text{m}$**

$\beta$



# Luminosità



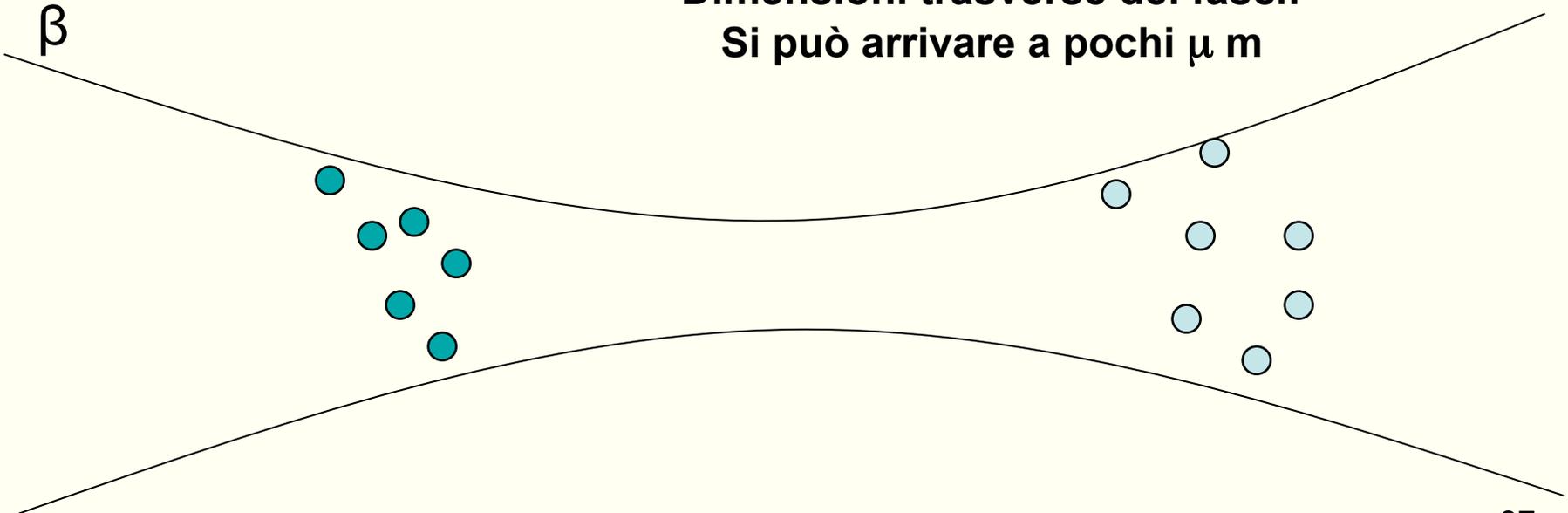
la **luminosità L** di un collider è una misura di quante interazioni fascio-fascio stiamo producendo

**Per aumentare la luminosità si aumenta la densità dei fasci**

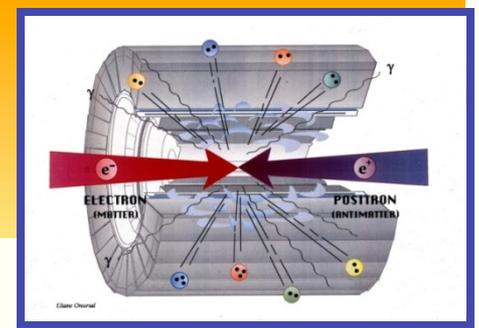
**Numero di particelle per fascio**

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

**Dimensioni trasverse dei fasci:  
Si può arrivare a pochi  $\mu\text{m}$**



# Luminosità



E' definita come la quantità di eventi al secondo per sezione d'urto unitaria

Due particelle che collidono possono produrre tipi diversi di eventi, alcuni più probabili di altri

$$L = \frac{dN_{eventi} / dt}{\sigma}$$

Un evento e' -ad esempio- l'annichilazione di materia-antimateria nel punto di collisione per un dato processo (es. produz. di  $\Phi$  a DAΦNE)

**$L\sigma$  = frequenza con cui accadono gli eventi cercati [si misura in  $s^{-1}$ ]**

**la sezione d'urto  $\sigma$  di un determinato evento è proporzionale alla probabilità che l'evento avvenga si misura in  $cm^2$**

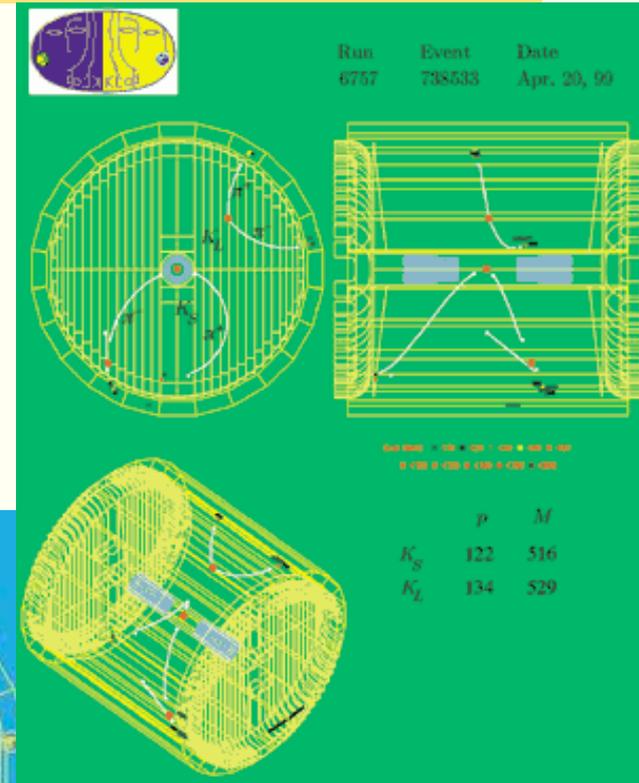
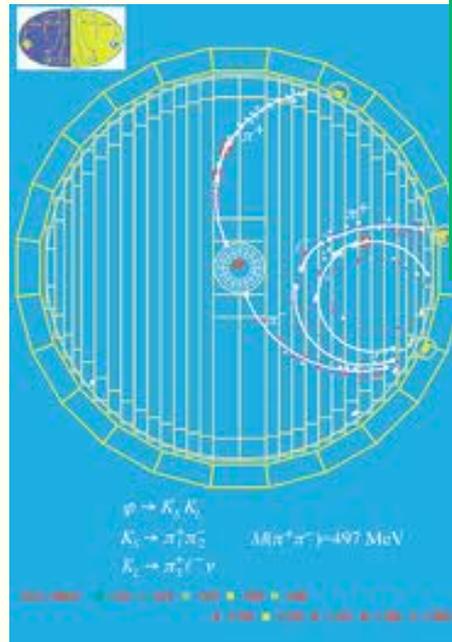
# Esempio: produzione di $\Phi$ a DAΦNE

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

$\sim 2 \cdot 10^{10}$  (pointing to  $N^{e^+}$ )  
 $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \times 100 \text{ pacchetti}$  (pointing to  $f_{\text{collisione}}$ )  
 $1 \text{ mm}$  (pointing to  $\sigma_x$ )  
 $0.01 \text{ mm}$  (pointing to  $\sigma_y$ )

$$\sigma(\Phi) \sim 3 \cdot 10^{-30} \text{ cm}^2$$

**frequenza degli eventi**  
 **$L \sigma = 300 \text{ eventi/s}$**



$$L = \frac{\dot{N}_{ev}}{\sigma} = f \cdot \frac{N_1 N_2}{A}$$

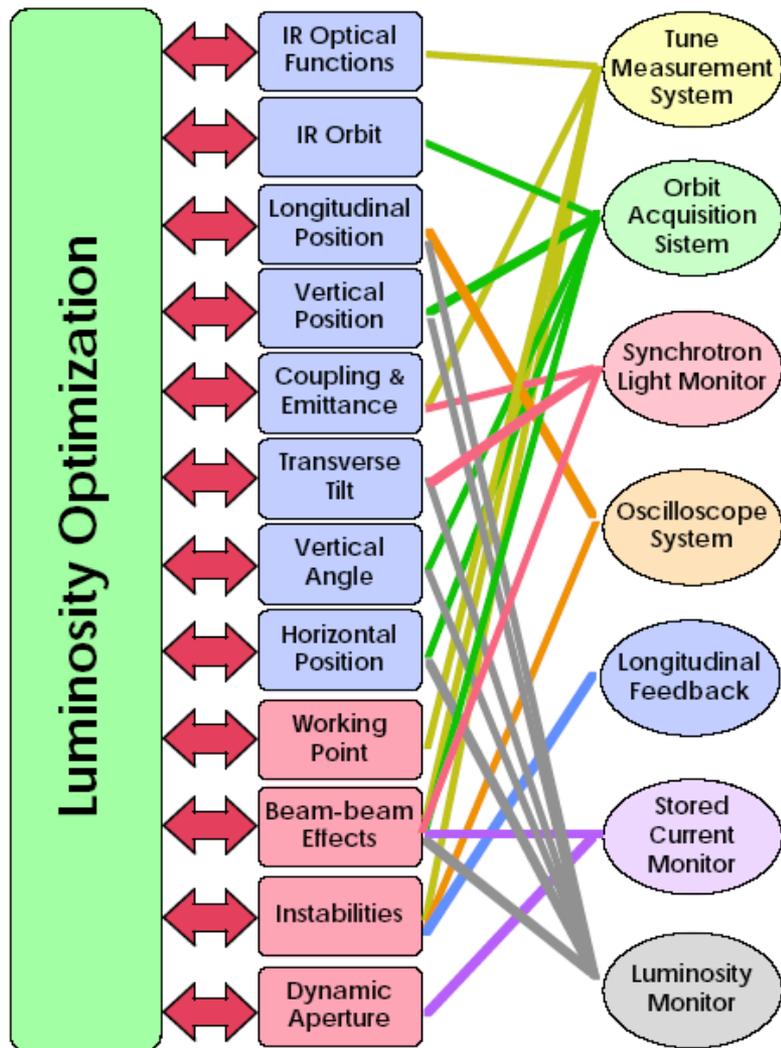
Per aumentare la luminosità si può:

1. aumentare il numero di particelle per pacchetto
2. diminuire l'area occupata dai pacchetti (cioè le loro dimensioni trasverse)

C'è un limite alla densità delle particelle in un pacchetto

La luminosità non può aumentare oltre un certo limite, l'acceleratorista in sala controllo cerca di raggiungere tale limite, mantenendolo costante

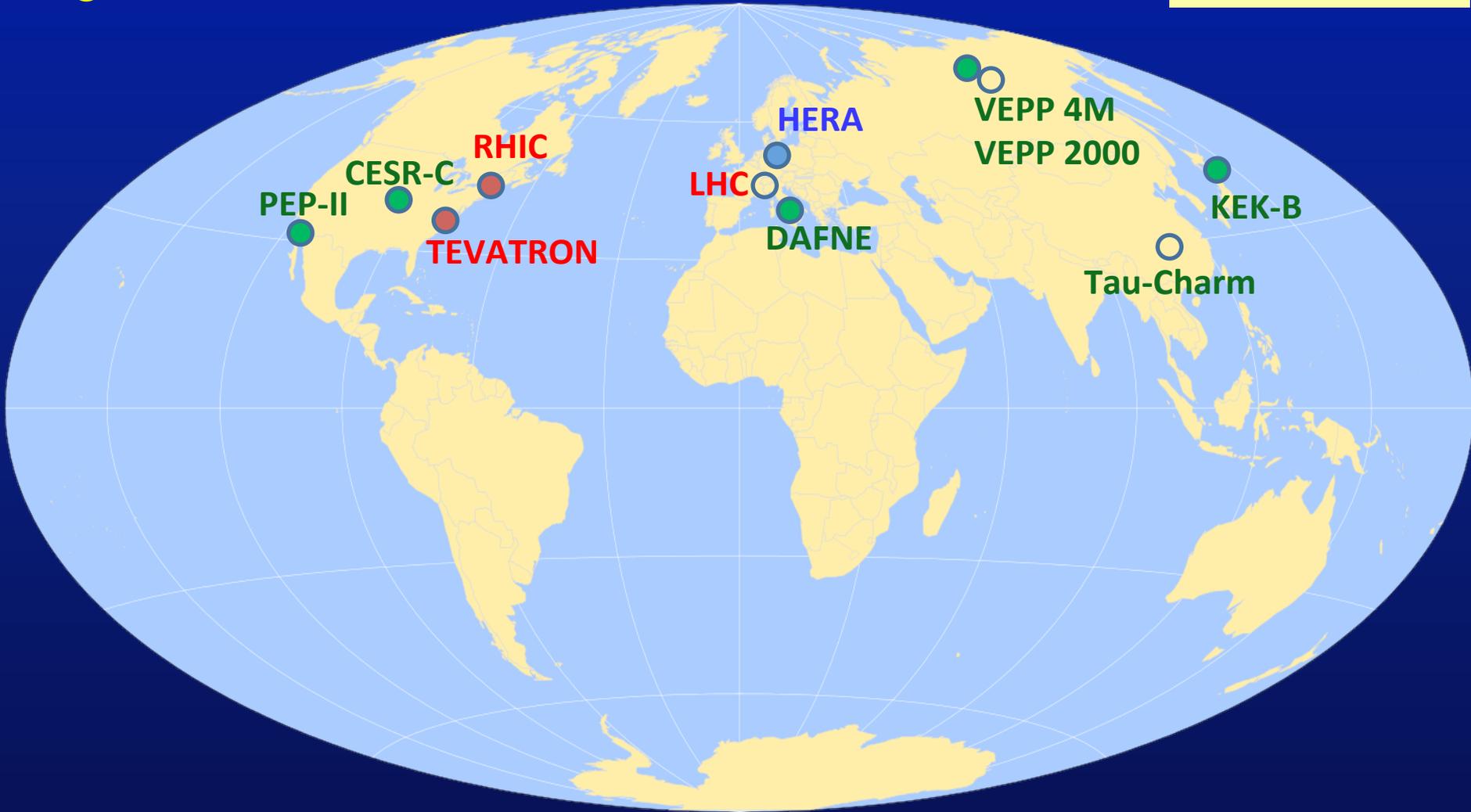
# luminosity optimization needs long machine tuning!



# Colliders - 2006

- In operation
- In construction

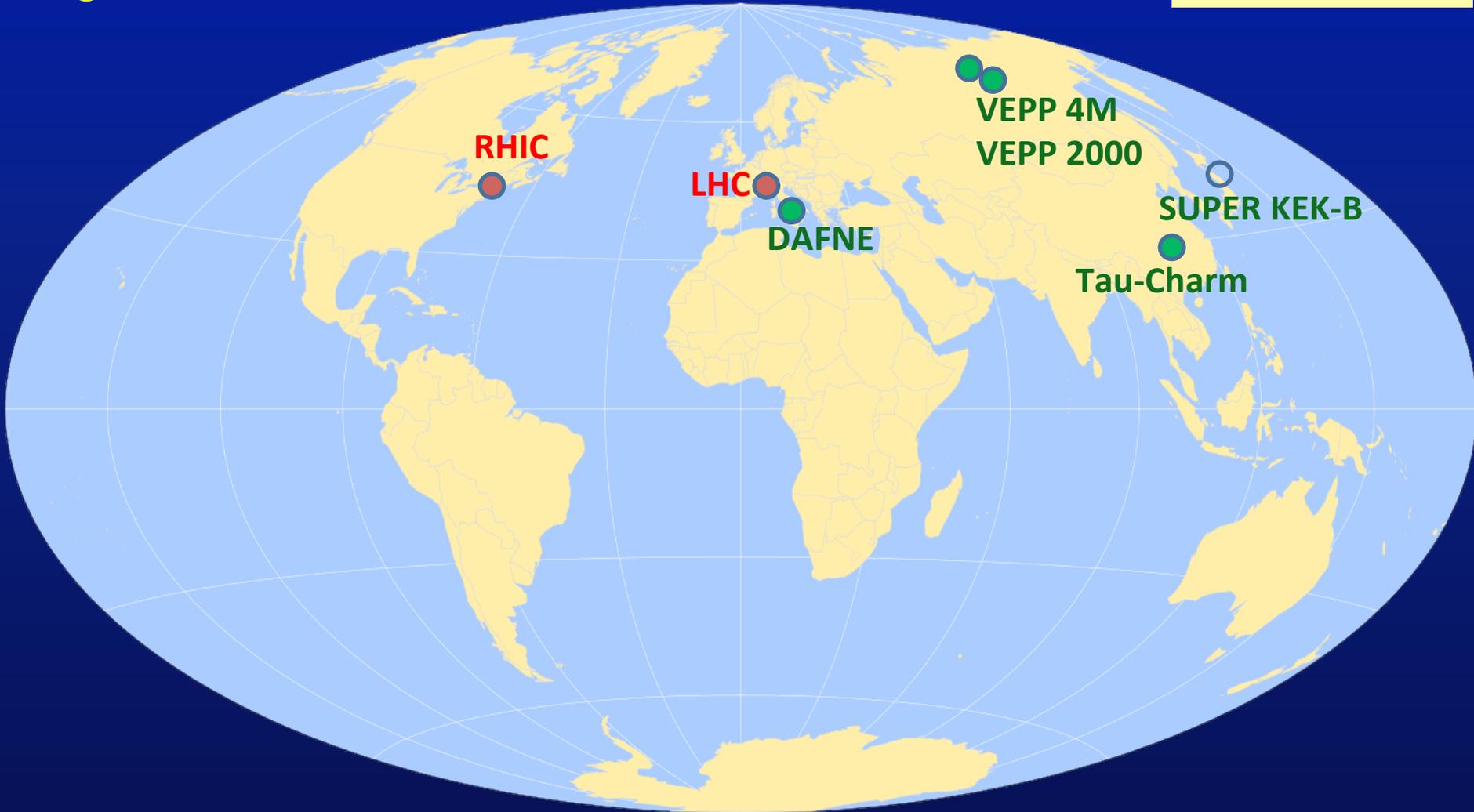
Hadrons  
Leptons  
Leptons-Hadrons

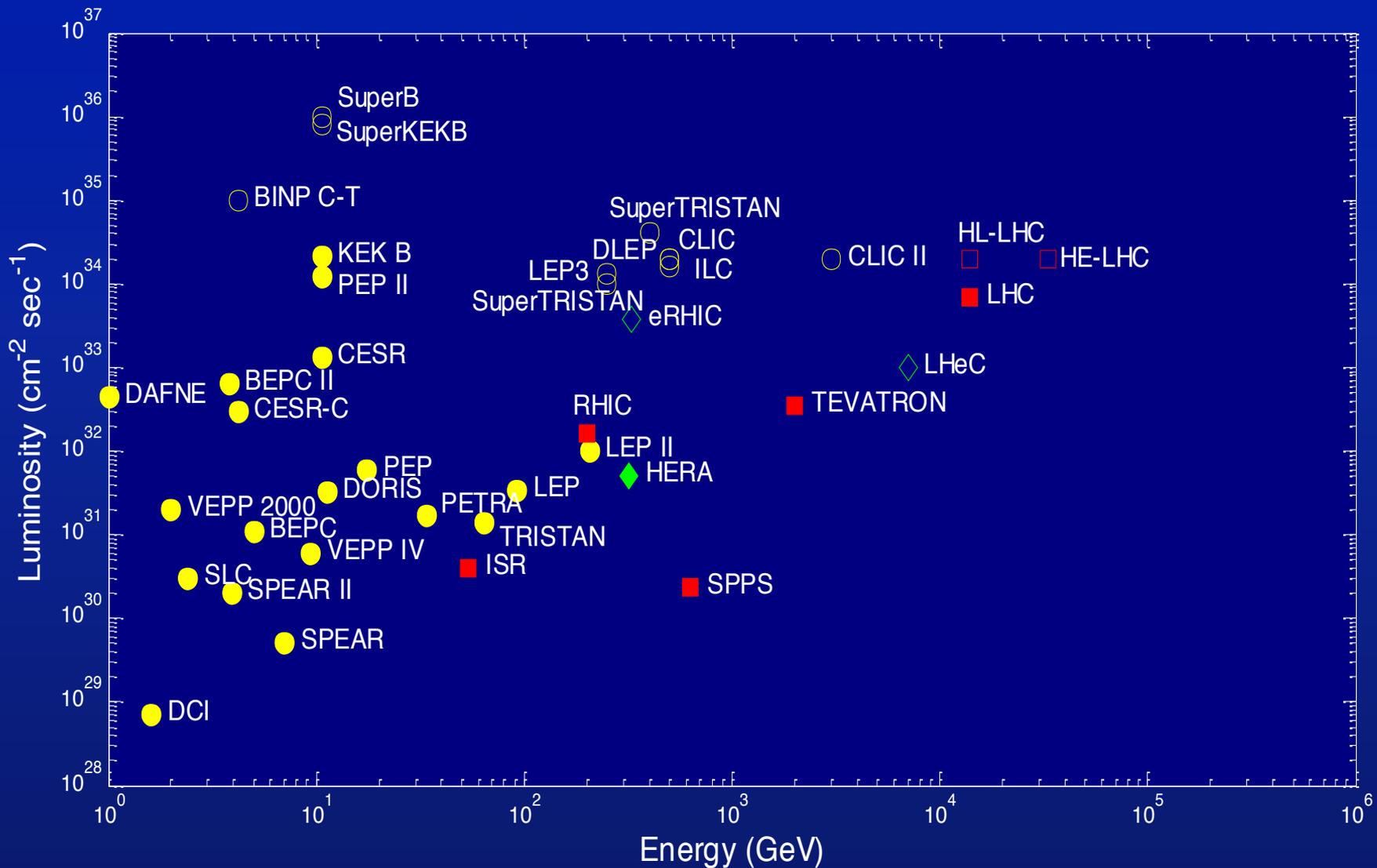


# Colliders - 2012

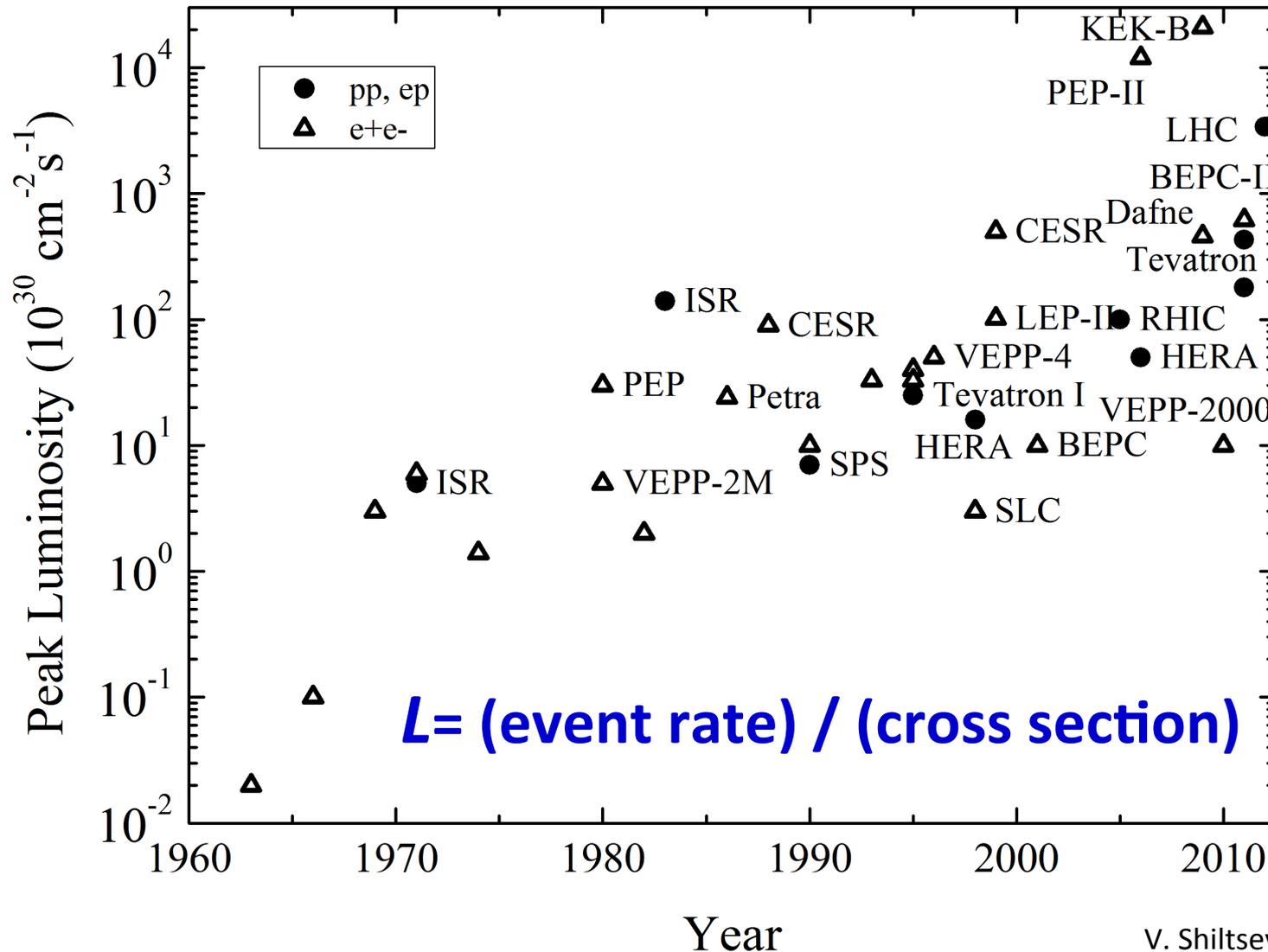
- In operation
- In construction

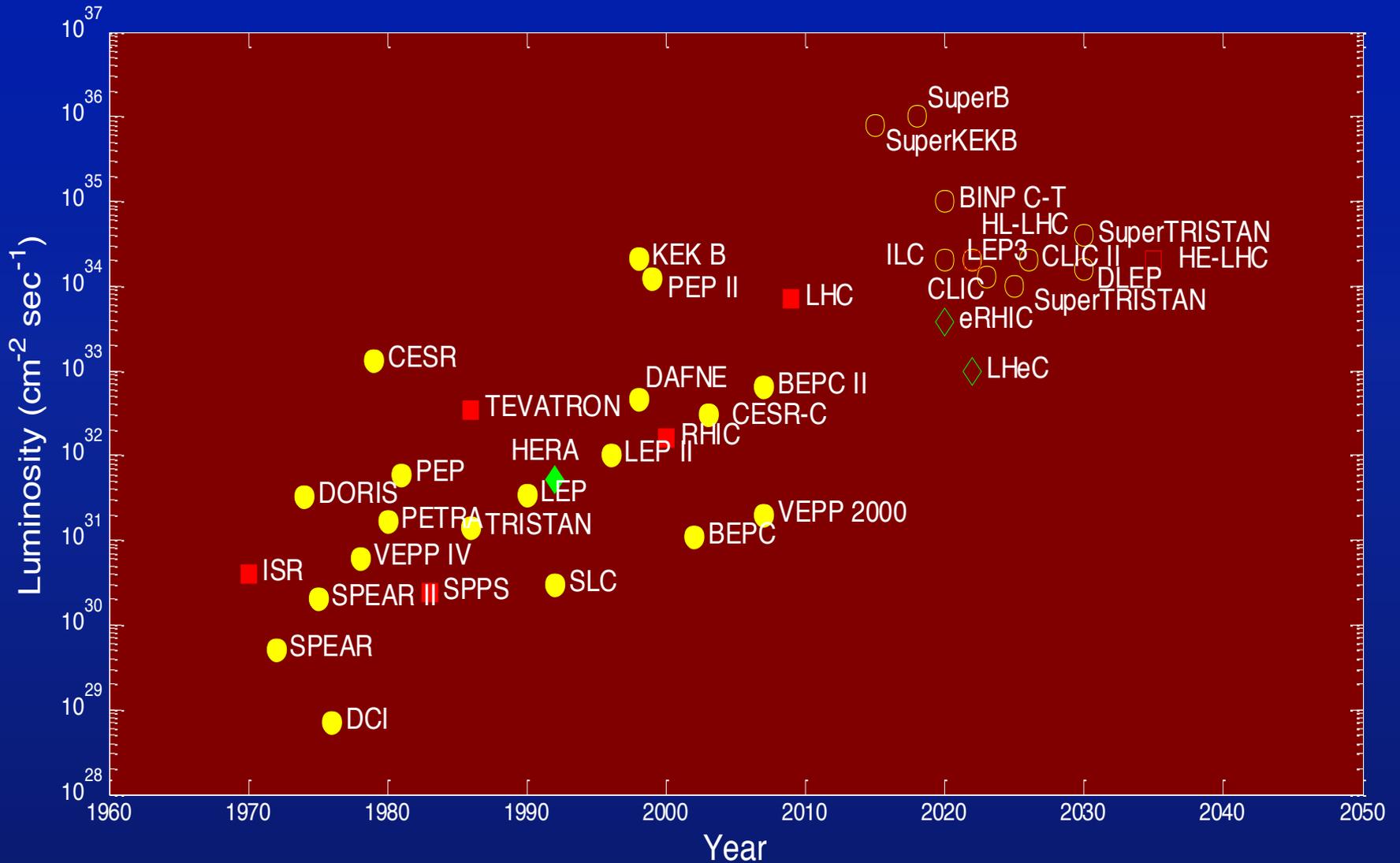
Hadrons  
Leptons  
Leptons-Hadrons





# Luminosita' di picco nei decenni



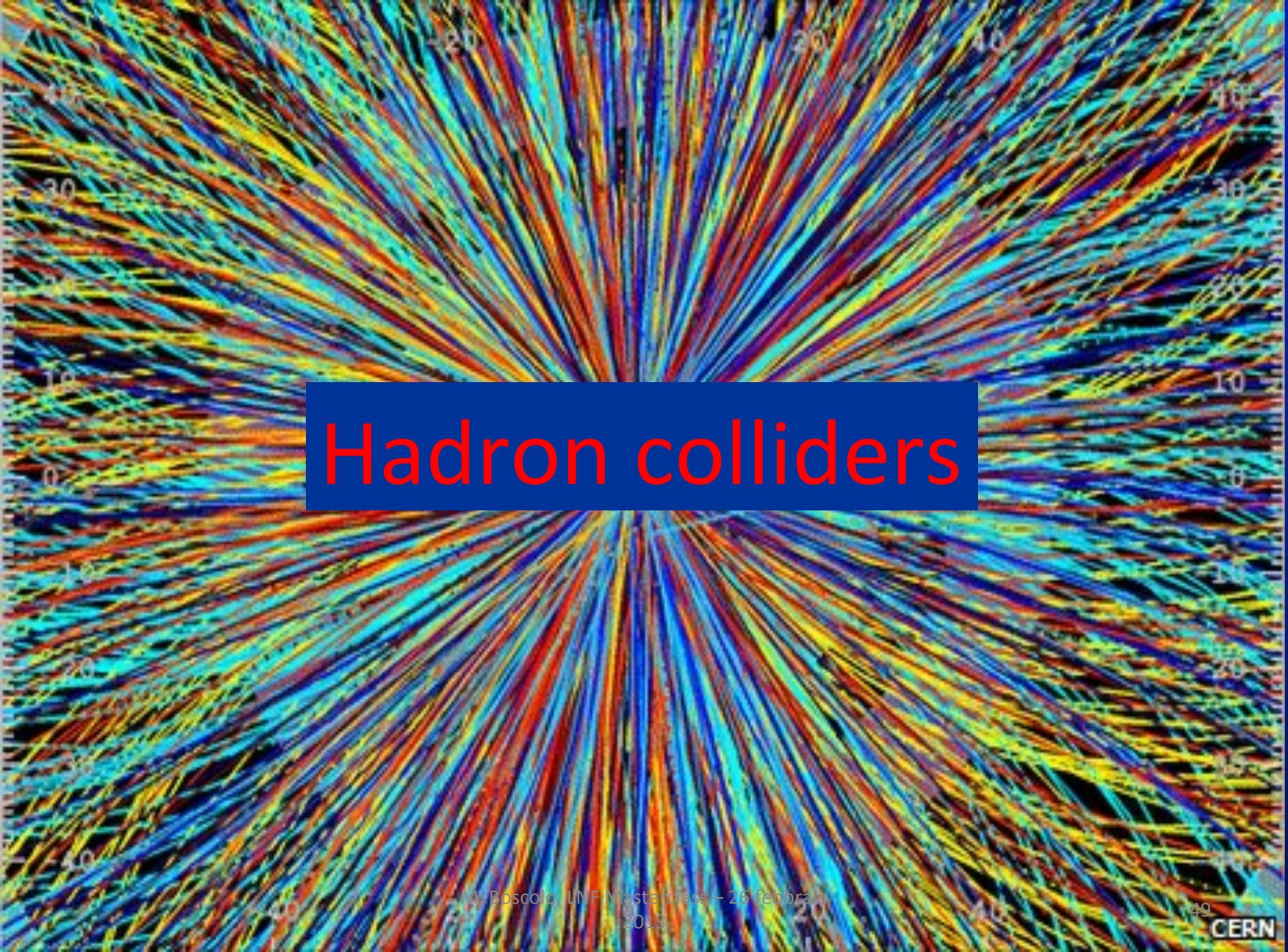


# Tre frontiere di ricerca nella fisica delle alte energie

- **“Energy Frontier”** : collisori ad alta energia per scoprire nuove particelle e sondare direttamente le proprietà della natura (vedi LHC col bosone di Higgs!)
- **“Intensity Frontier”**: fasci intensi per scoprire le proprietà elusive dei neutrini e osservare processi rari che sondano la fisica oltre il modello standard (vedi DAΦNE, SUPERKEKB)  
  
Molti esperimenti con neutrini, muoni, kaoni
- **“Cosmic Frontier”**: natura della materia oscura e della energia oscura rivelata usando particelle di alta energia dallo spazio per sondare l’architettura dell’universo. (si usano esperimenti terrestri e basati sullo spazio, non acceleratori terrestri)

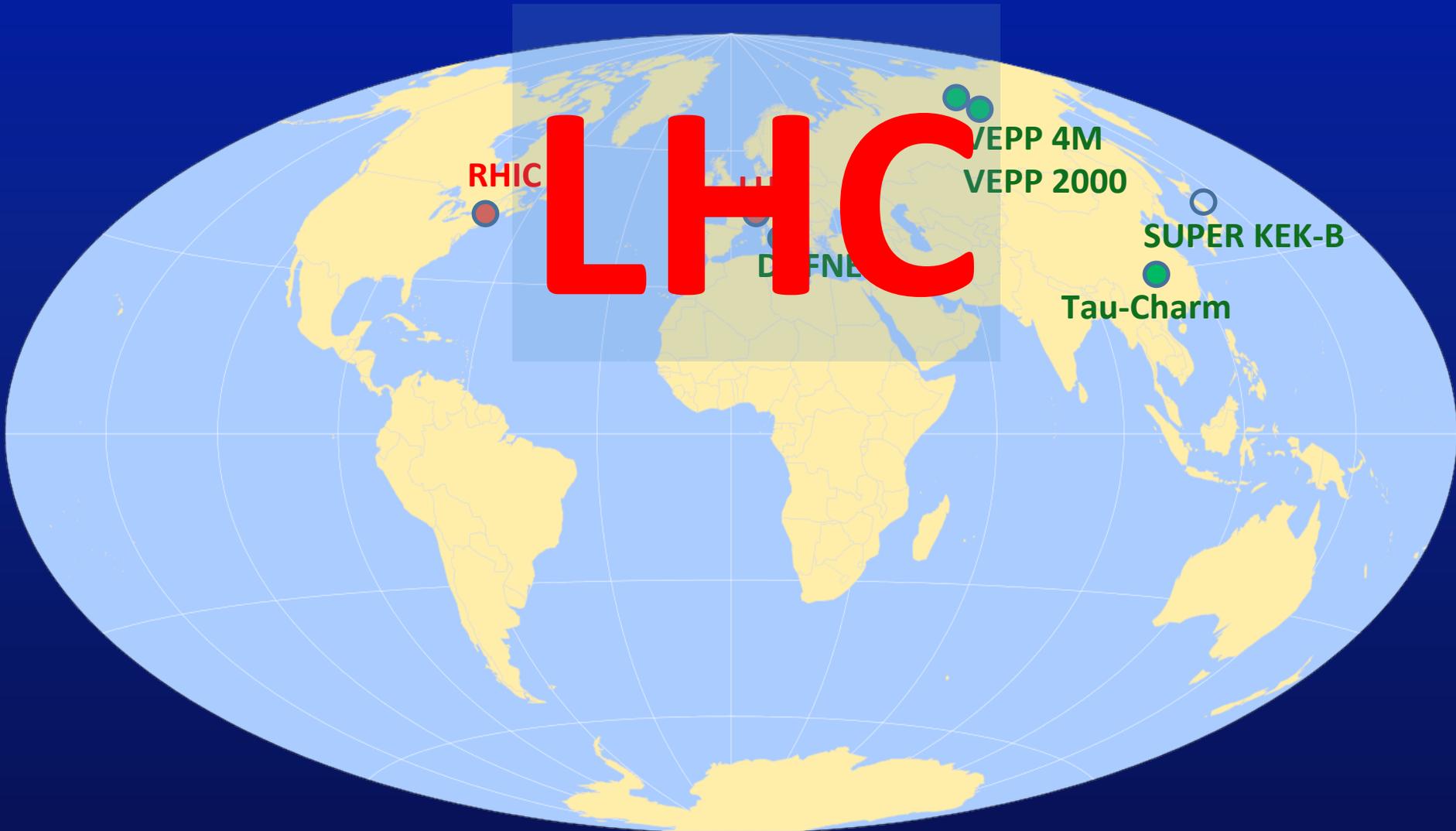
# *“Energy Frontier”*

- **Hadron Colliders (p-p)**
  - LHC
- **Lepton Colliders ( $e^+e^-$ ,  $\mu$ )**
  - Linear  $e^+e^-$  Colliders: ILC and CLIC
  - Circular  $e^+e^-$  colliders: LEP3, DLEP, TLEP, SuperTRISTAN
  - Muon Colliders
- **Hadron-Lepton Colliders (p-e)**
  - LHeC
  - eRHIC
- **HIGGS Factories** : Linear, circular ,  $\gamma\text{-}\gamma$ , muon colliders
- **Plasma accelerators**



# Hadron colliders

# pp Colliders – after 2012



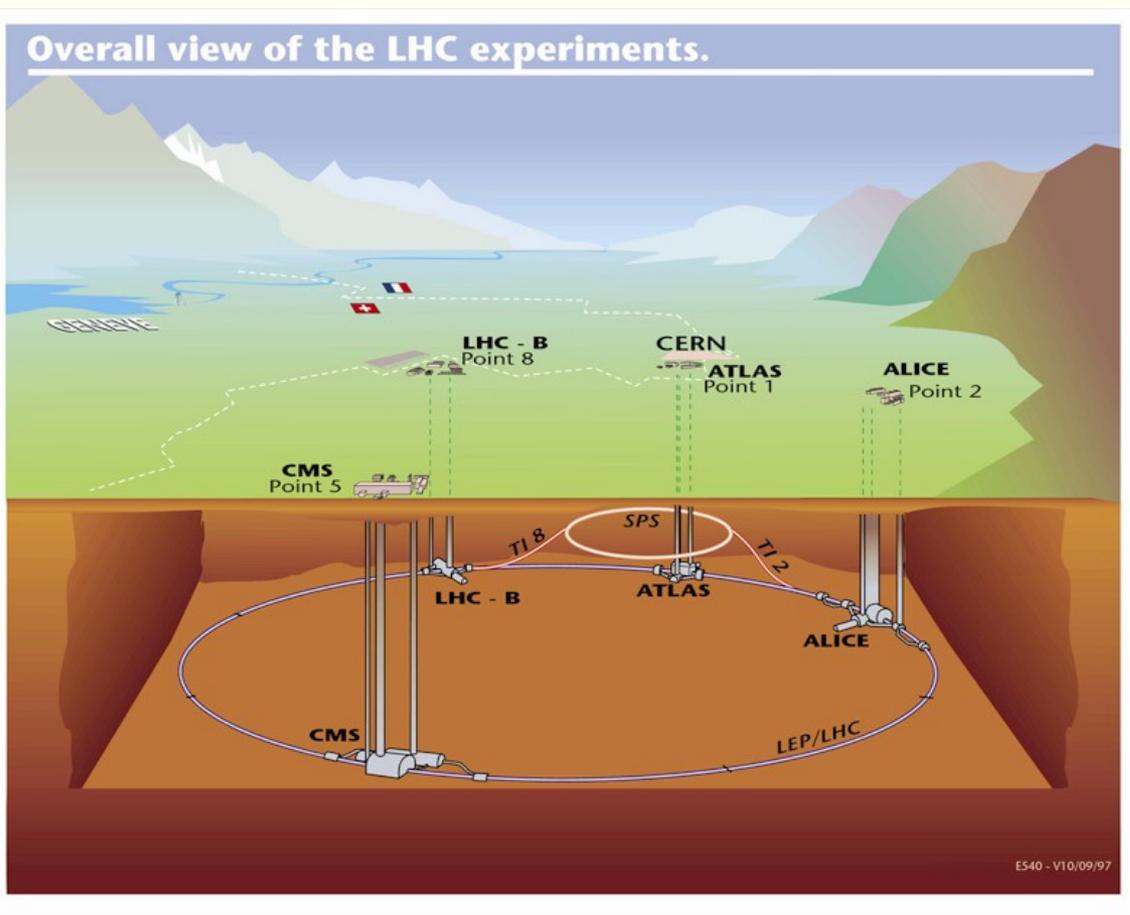
# LHC



# LHC: collisore protoni -protoni

LHC è installato 100 m di profondità!

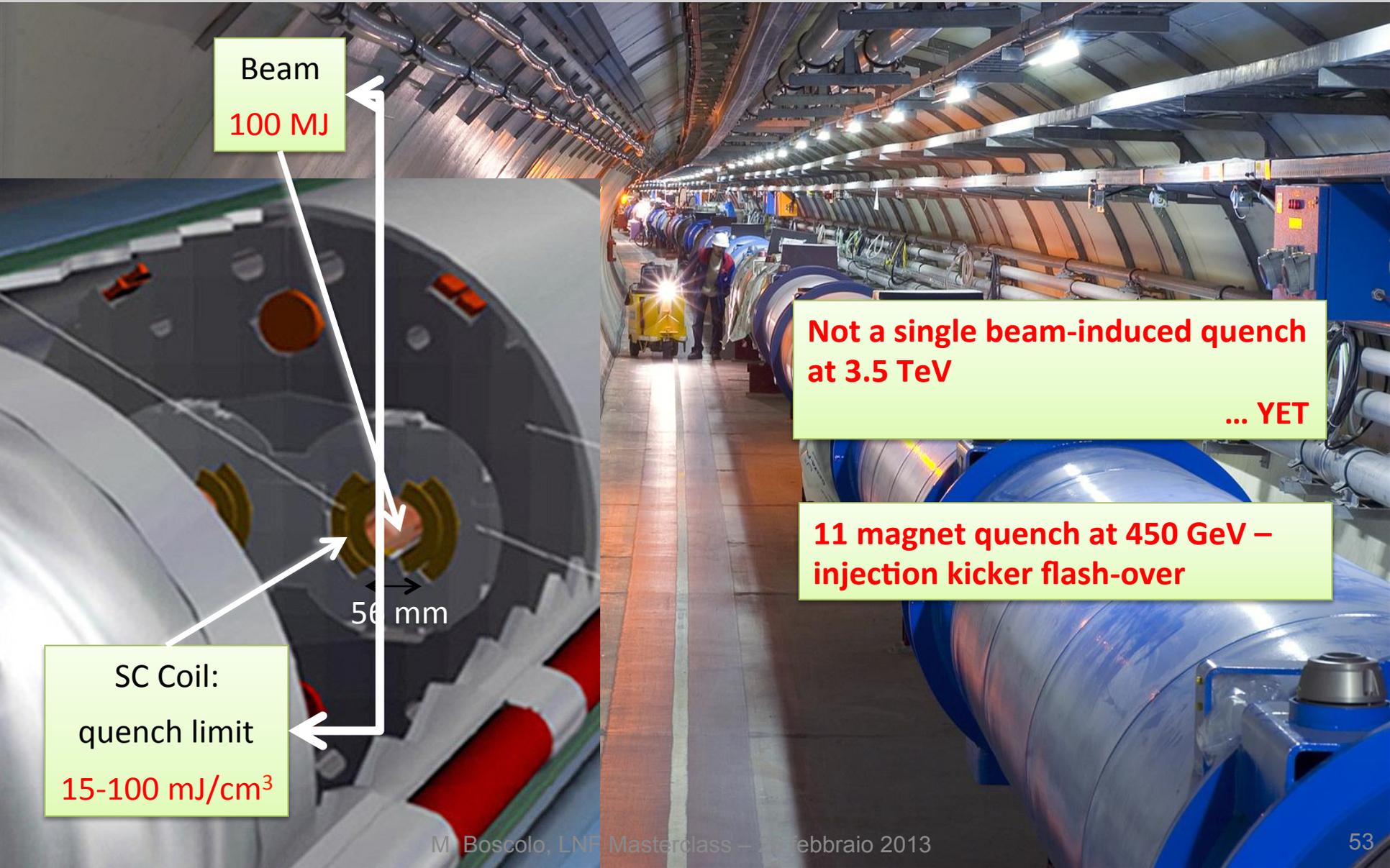
costruito nel tunnel del LEP



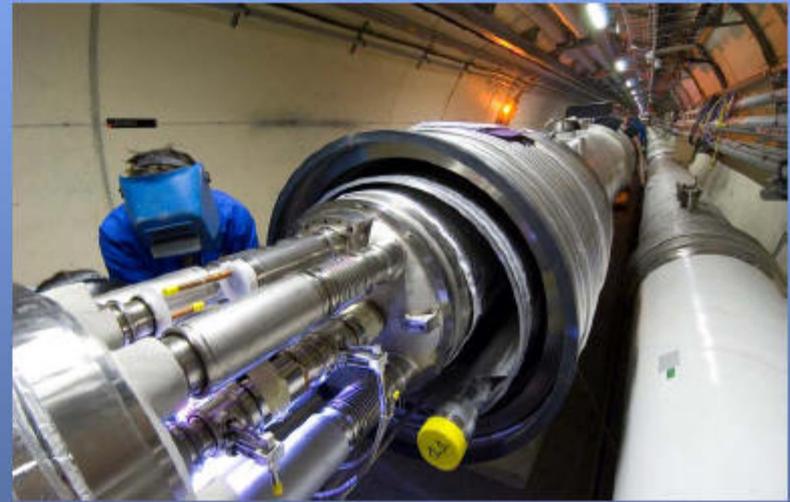
- Quattro gigantesche caverne sotterranee ospitano rivelatori enormi
- Fascio di energia mai raggiunta: **14 TeV c.m.**  
7 TeV (massima per fascio)
- Circa 40.000 ton a 1.9 K, a temperatura inferiore al freddo cosmico

# Machine protection – the challenge

Situation at 3.5 TeV (in August 2011)

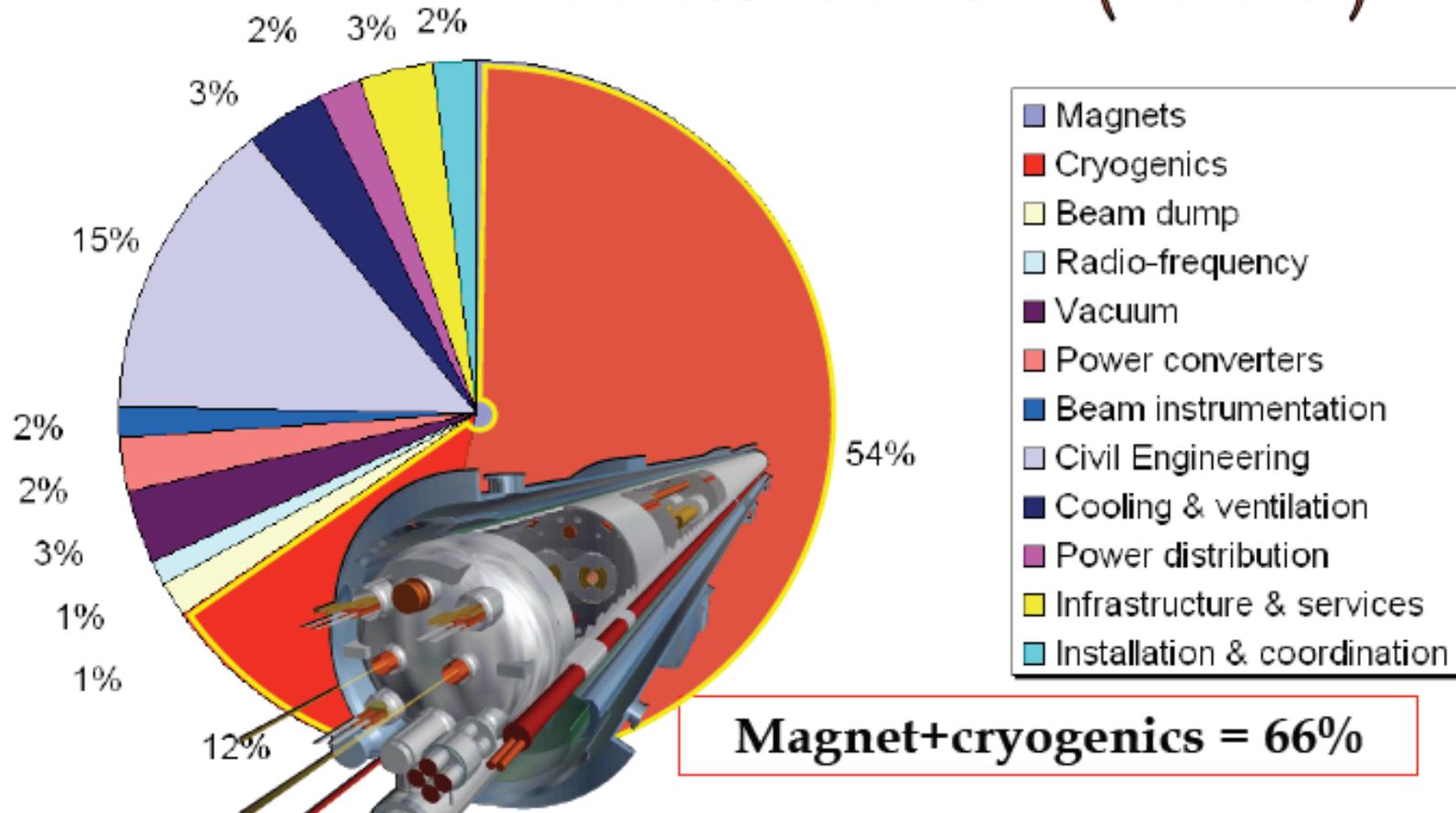


# Underground



# Costo di LHC

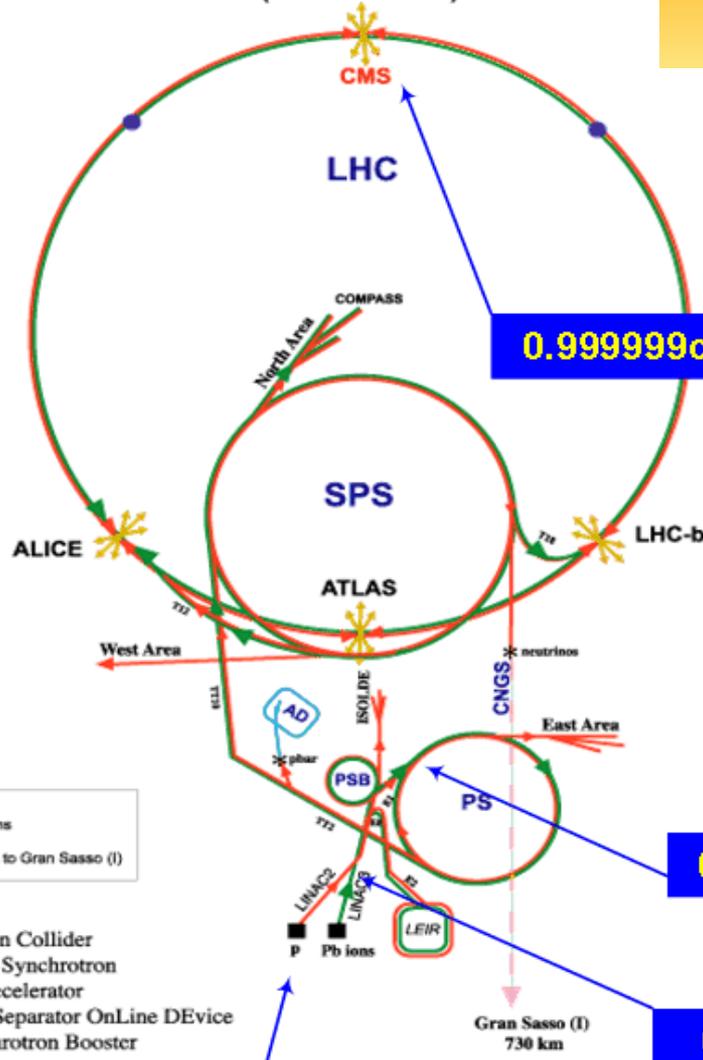
Total cost: 3.5 BCHF (Material)



Circa €  $6 \cdot 10^9$  costo dell' acceleratore

# Schema del complesso degli acceleratori del CERN

CERN Accelerators  
(not to scale)



0.999999c by here

0.87c by here

0.3c by here

- protons
- antiprotons
- ions
- neutrinos to Gran Sasso (I)

LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Radolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rosso, EIT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, SL Div., and  
 D. Manghanti, PS Div. CERN, 23.05.01

Start the protons out here

# Collision Event at 7 TeV

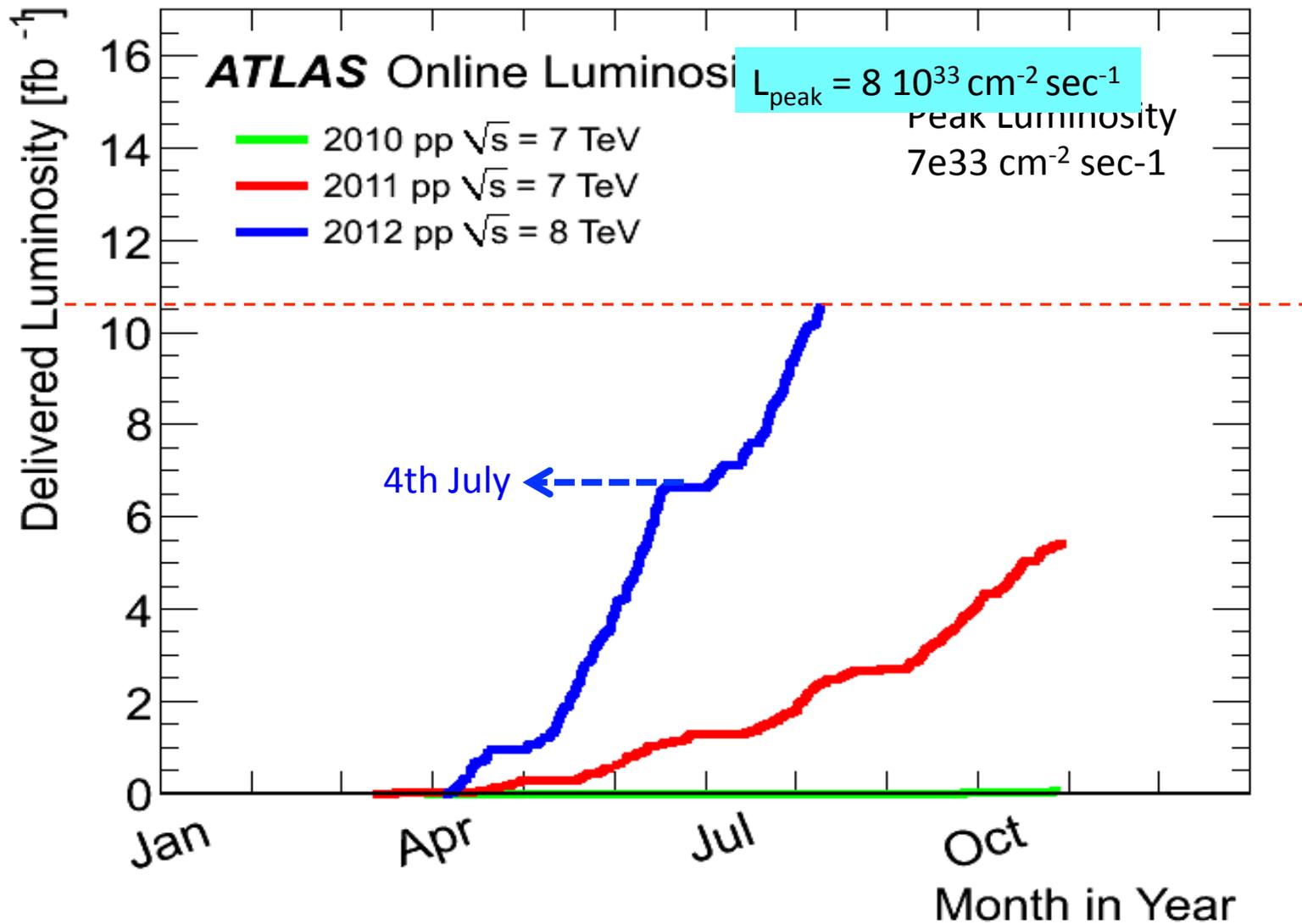


**ATLAS**  
EXPERIMENT

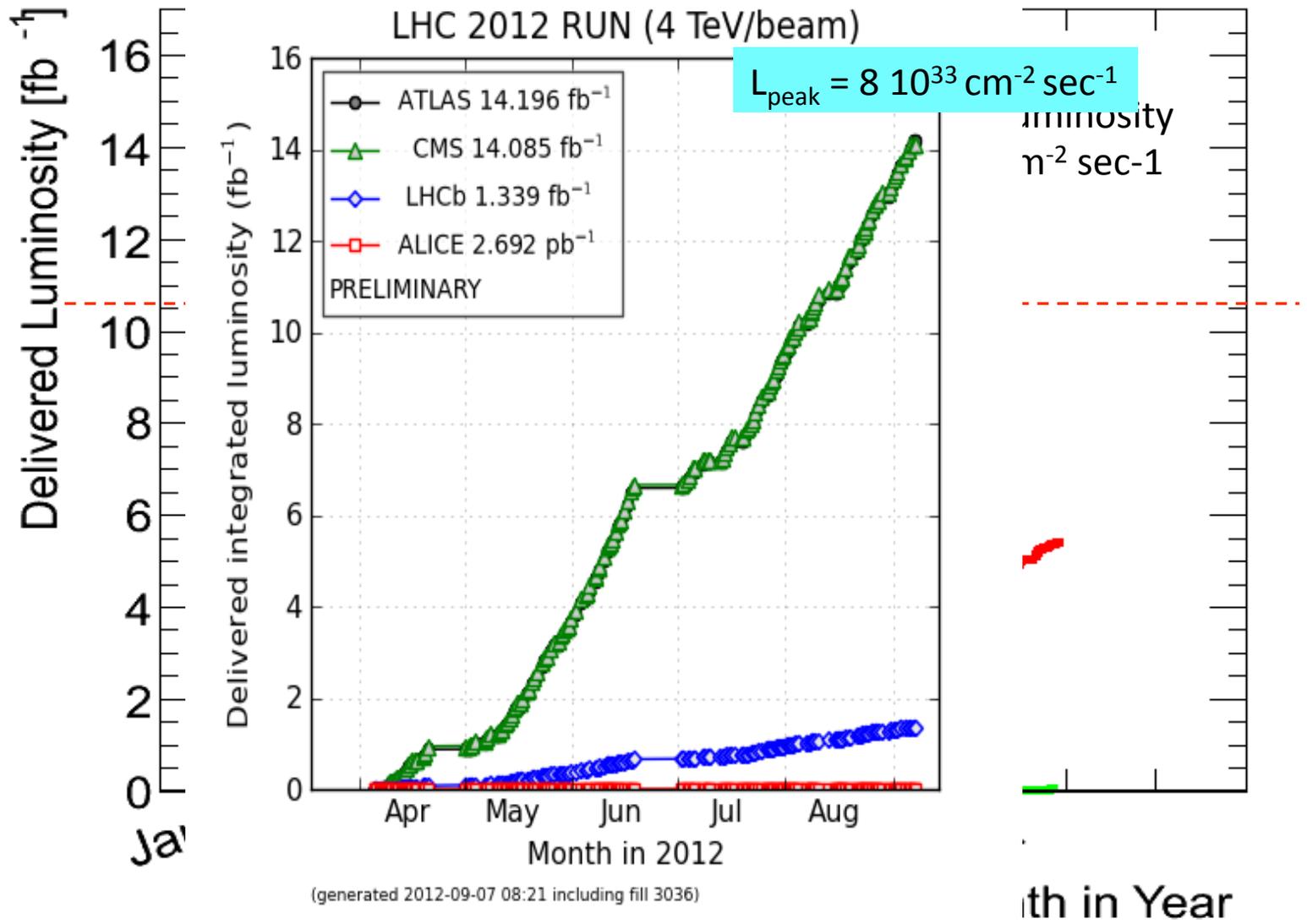
2010-03-30, 12:58 CEST  
Run 152166, Event 316199

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

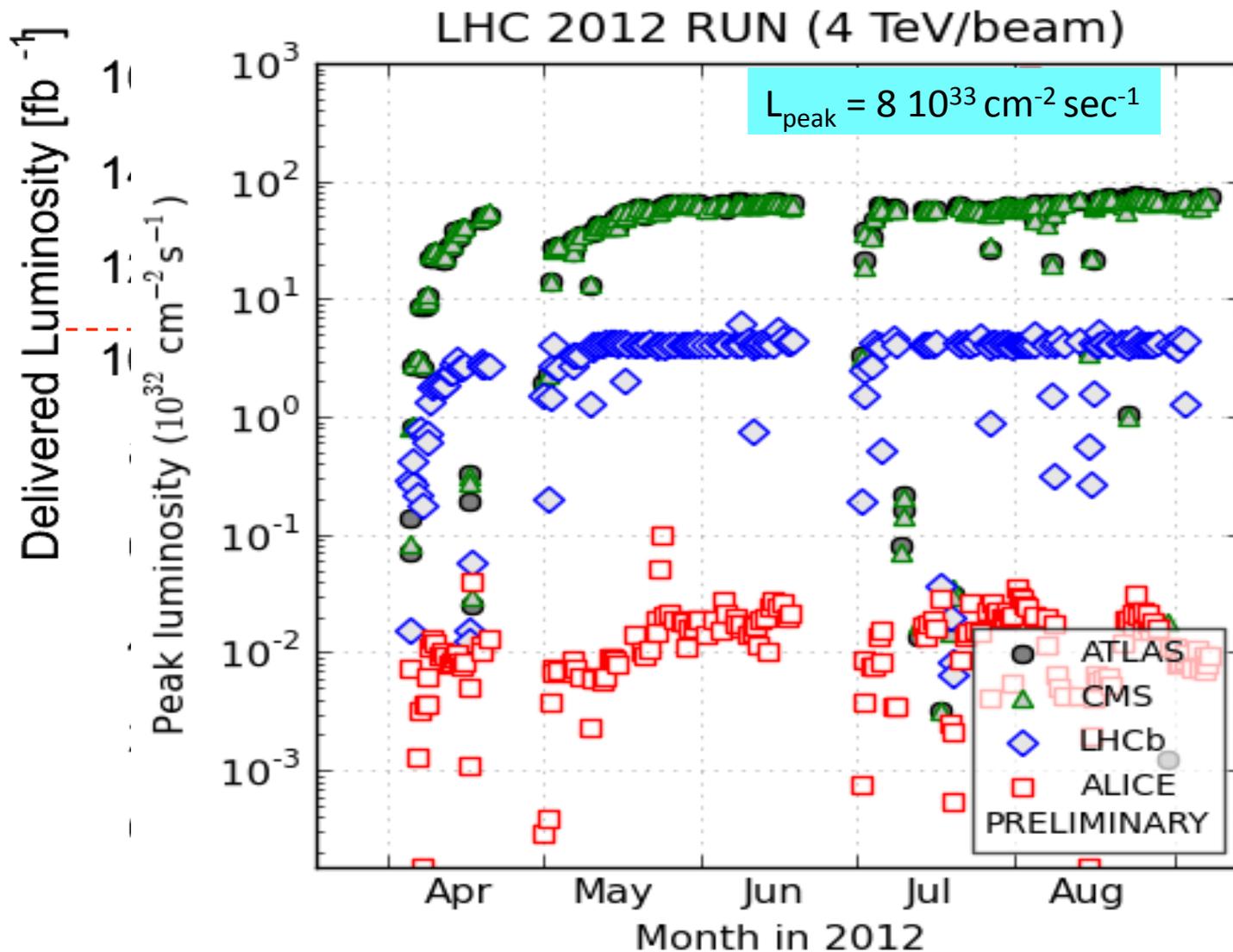
# Evolution of Integrated Luminosity (August 16)



# Evolution of Integrated Luminosity (August 16)

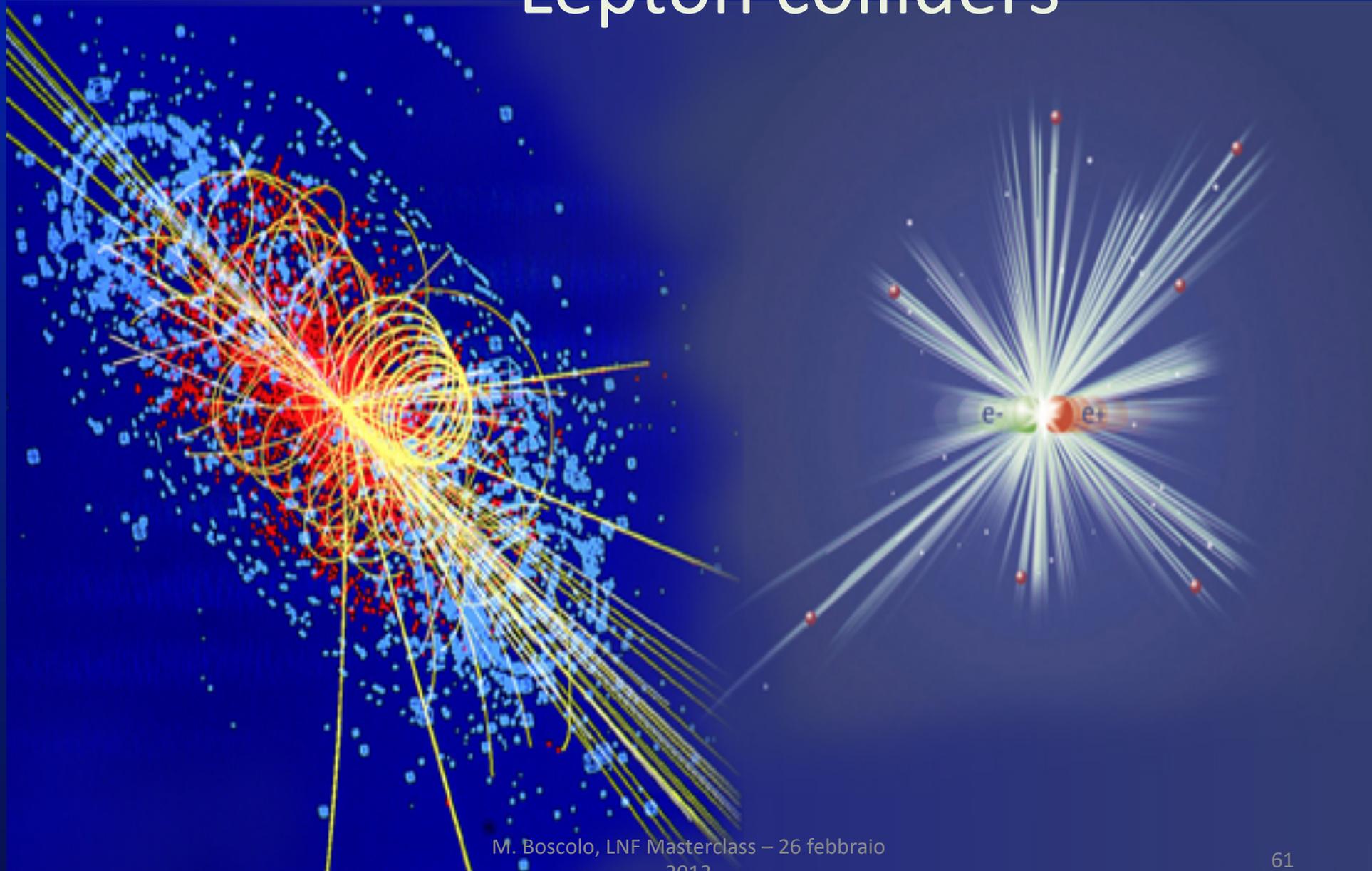


# Evolution of Integrated Luminosity (August 16)

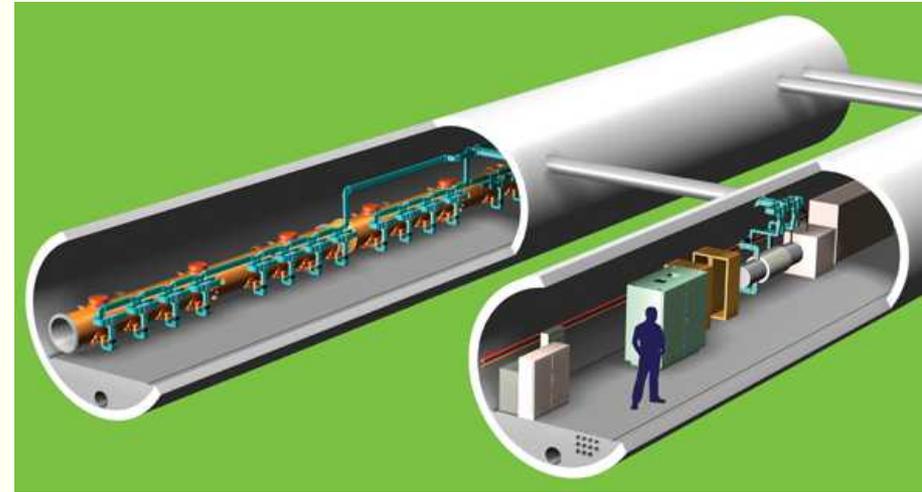
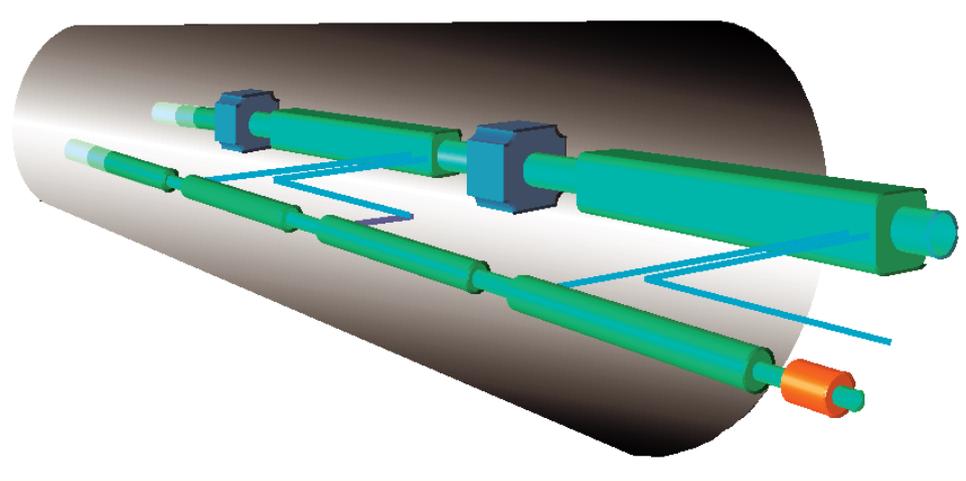


(generated 2012-09-08 01:18 including fill 3039)

# Lepton colliders



# e<sup>+</sup>/e<sup>-</sup> Linear Colliders progettati per il futuro: CLIC and ILC



<http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/>  
<http://www.linearcollider.org/cms/>

# CLIC

- Dual beam acceleration technology
- R&D at CERN ~ 25 years
- Normal conducting cavities  
12 GHz, 100 MV/m
- Maximum energy **3 TeV cm**  
– **Phase I at 0.5 TeV**
- International collaboration  
around CTF3

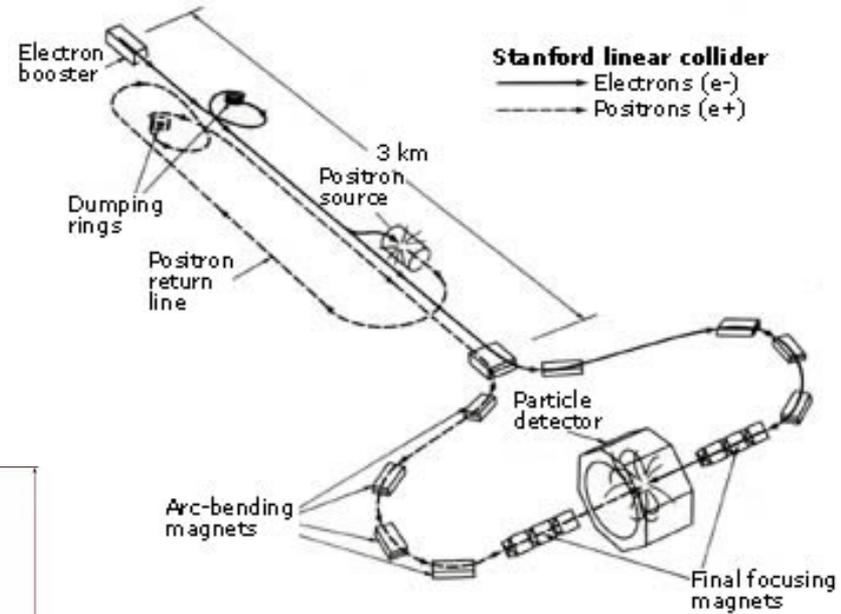
# ILC

- Well established SC rf technology (TESLA, FLASH, XFEL...)
- Decision in 2004
- Rf cavities ~ TESLA like  
1.3 GHz, 31.5 MV/m
- Maximum energy **1 TeV cm**  
- **Phase I at 0.5 TeV**
- GDE (Global Design Effort)  
- International collaboration
- Site independent

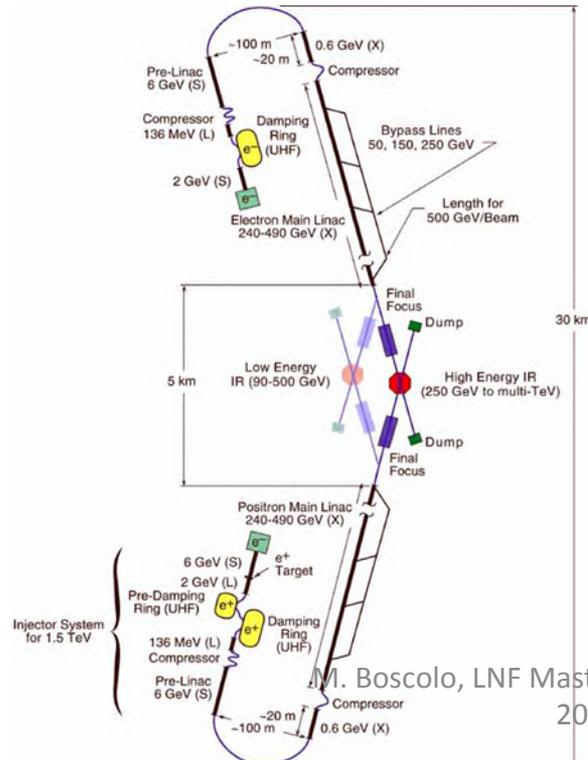
# example linear $e^+e^-$ colliders

SLAC Linear Collider  
(SLC) 1990-1998

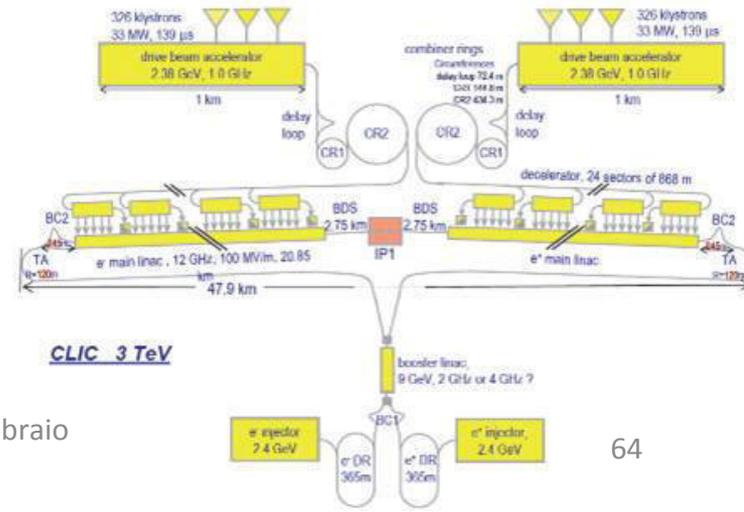
*the only linear collider  
so far*



proposed  
future  
linear  
colliders



CLIC  
(NC),  
48 km  
3 TeV  
c.m.



ILC (SC)  
31 km  
500 GeV c.m.

# Layout

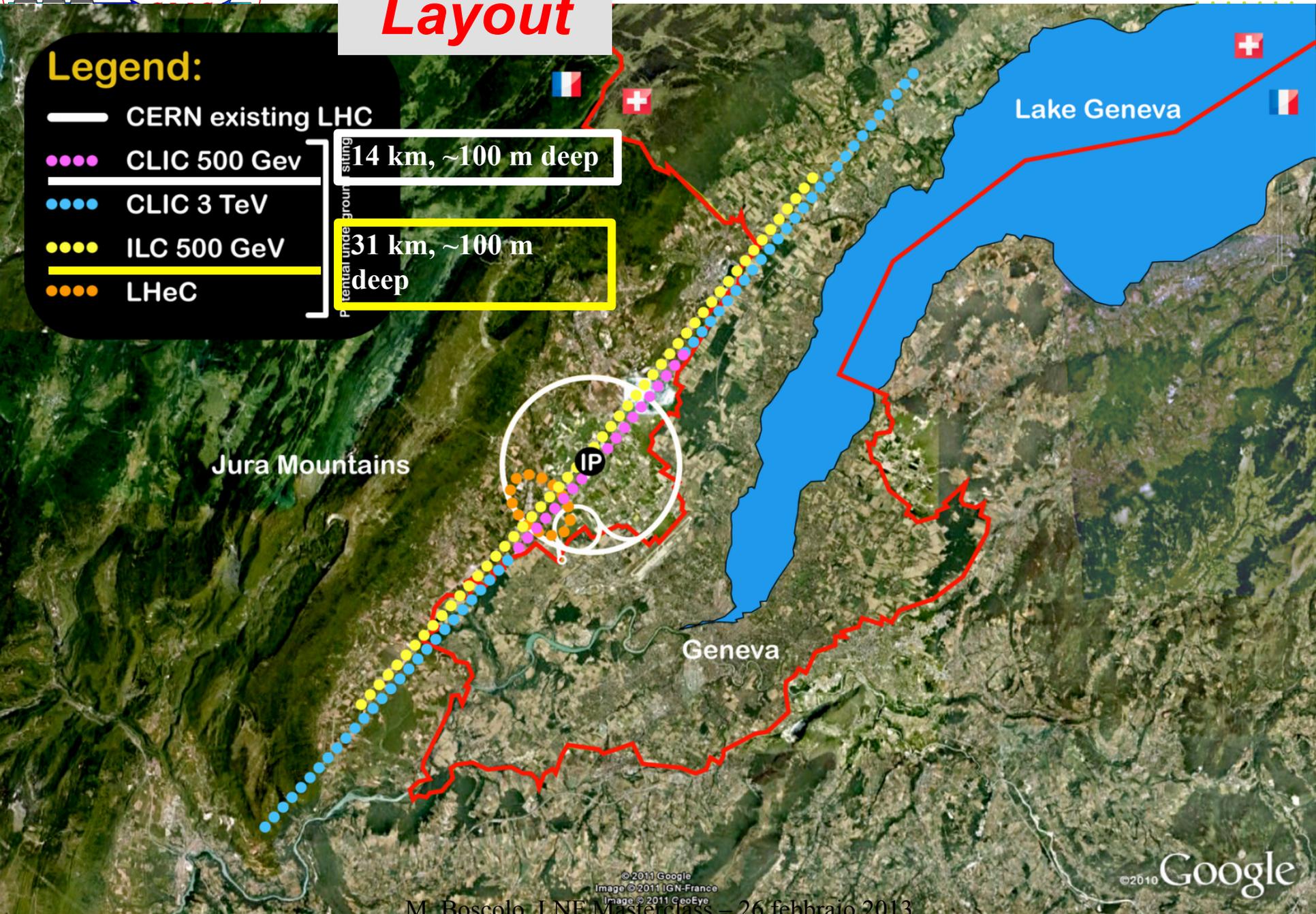
## Legend:

- CERN existing LHC
- CLIC 500 GeV
- CLIC 3 TeV
- ILC 500 GeV
- LHeC

14 km, ~100 m deep

31 km, ~100 m deep

Potential underground

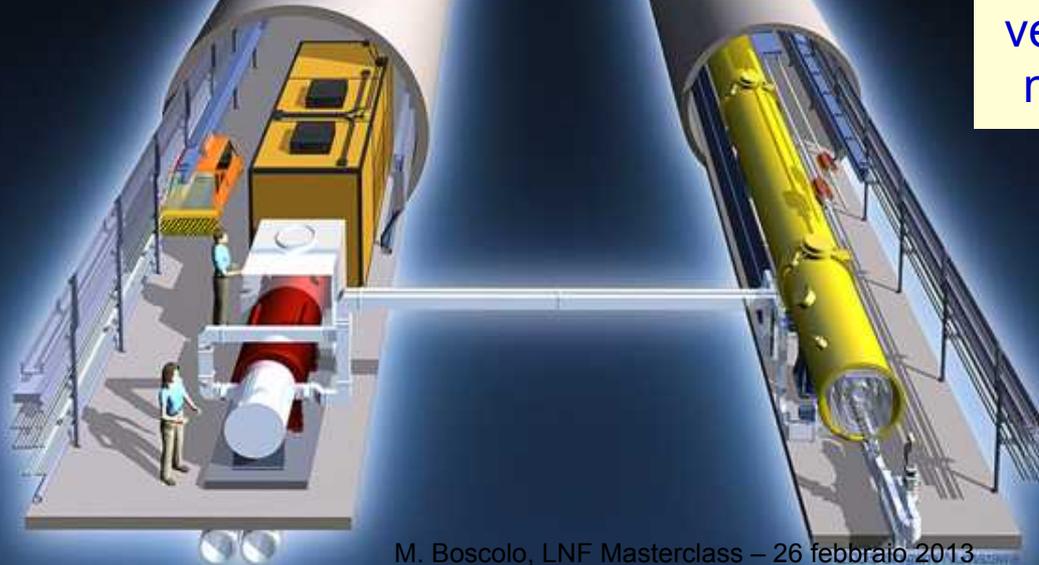


# Futuro : $e^+ e^-$ Linear colliders

Sfida tecnologica:  
Cavità ad alto gradiente

Negli acceleratori lineari non c'è radiazione di sincrotrone: per andare ad altissime energie il futuro è qui.

Ricerca tecnologica:  
capacità di accelerare più velocemente possibile, cioè nel minor spazio possibile



# LEP al CERN di Ginevra 1988-2001

Il collisore  $e^+e^-$  a più alta energia:  $E_{CM}=209$  GeV,  
Circonferenza  $\sim 27$  Km



# CIRCULAR e+e- COLLIDERS

Constant SR Power/beam  
50 MW

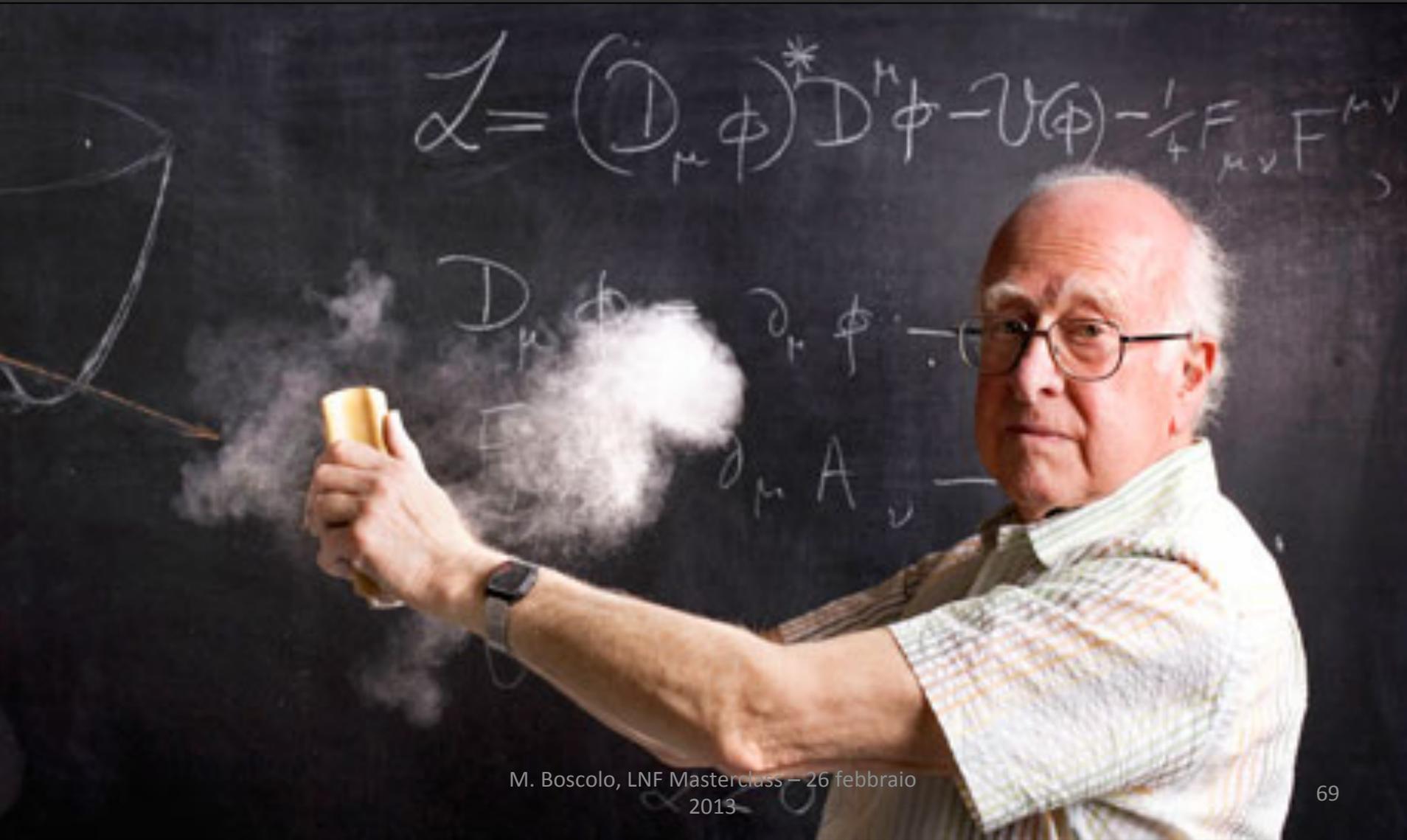
Heard in the last decades:

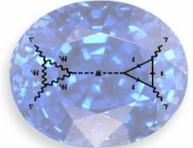
*'No other e+e- circular collider after LEP'*

BUT ... Now



# HIGGS Factories

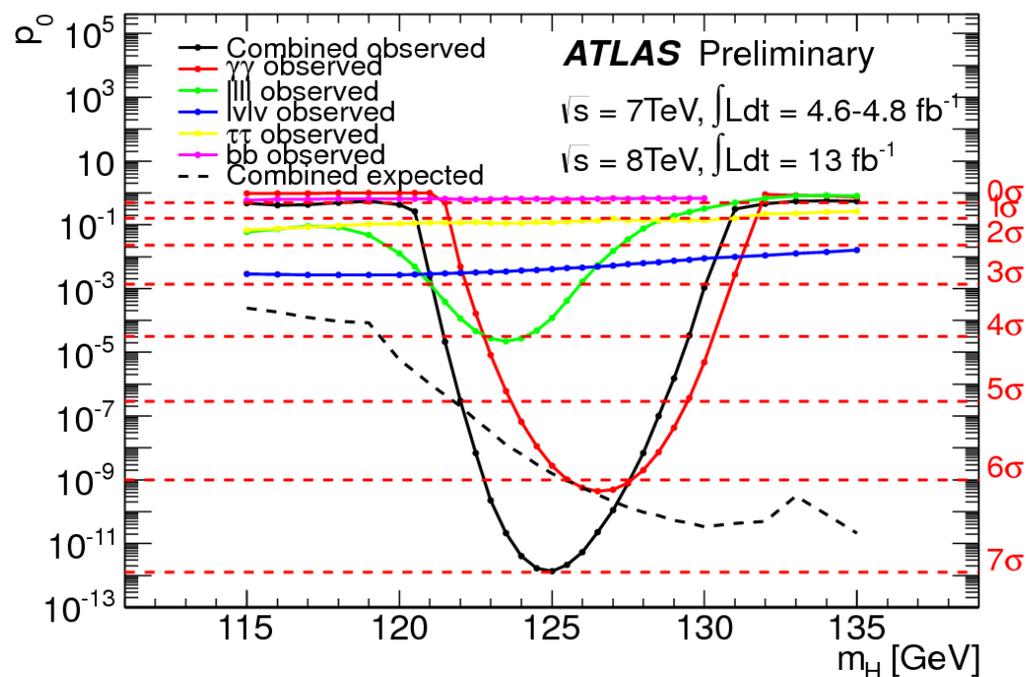
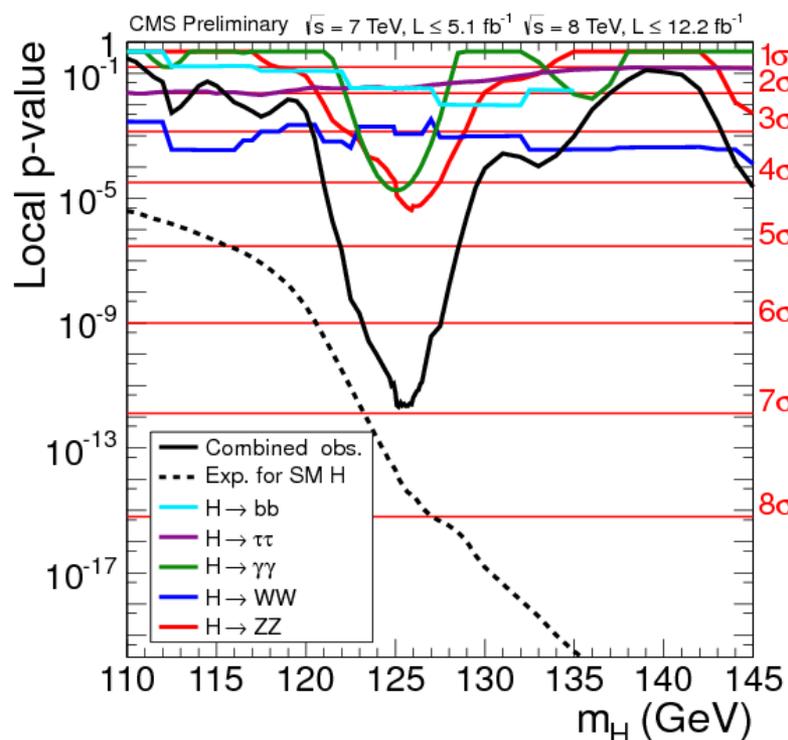




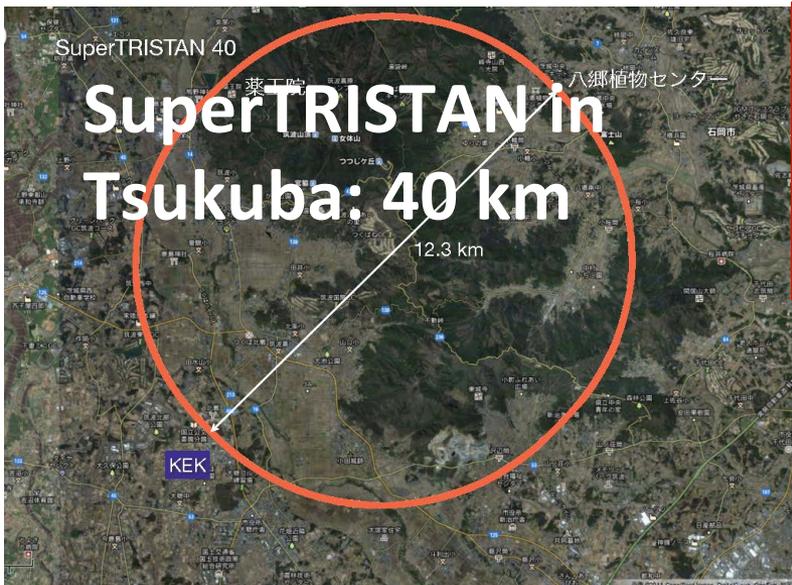
# The X125 Observation



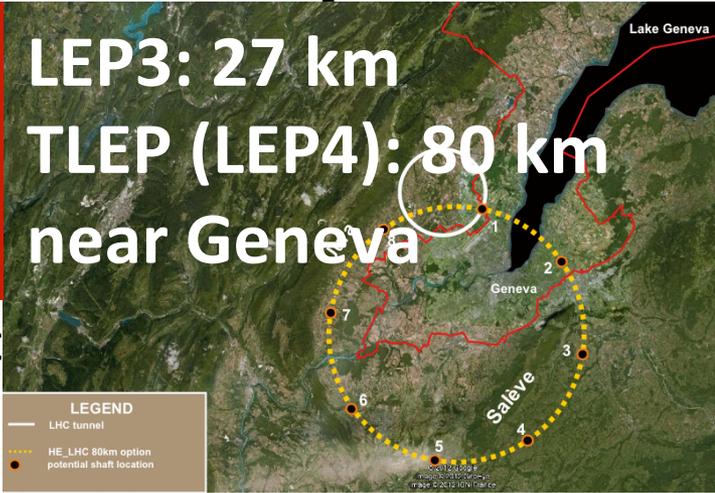
- Since the discovery on 4<sup>th</sup> July, ATLAS and CMS analyses strengthened the significance of the signal
- With the 8TeV dataset, several exclusive channels have  $>3\sigma$  sensitivity



# circular HFs – a few examples



**SLAC/LBNL  
design:  
27 km**

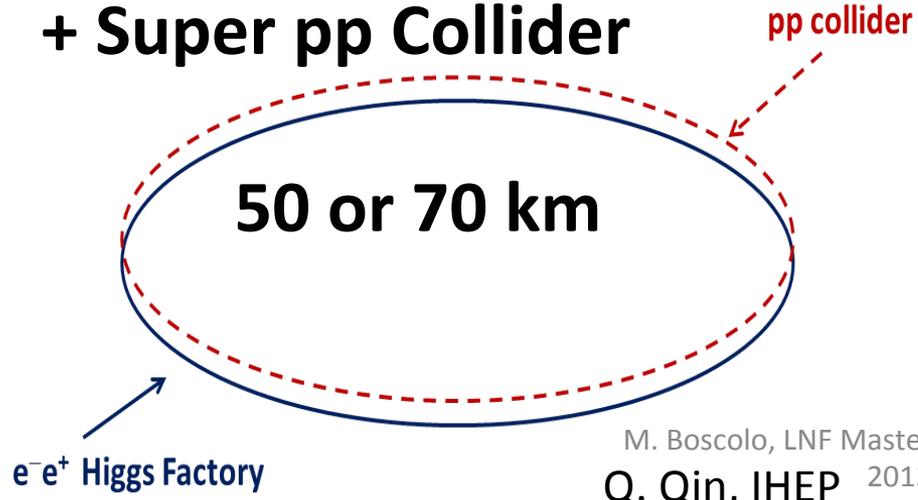


Y. Cai, SLAC

A. Blondel, J. Osborne, F. Zimmermann

K. Oide, KEK

**IHEP Chinese HF  
+ Super pp Collider**



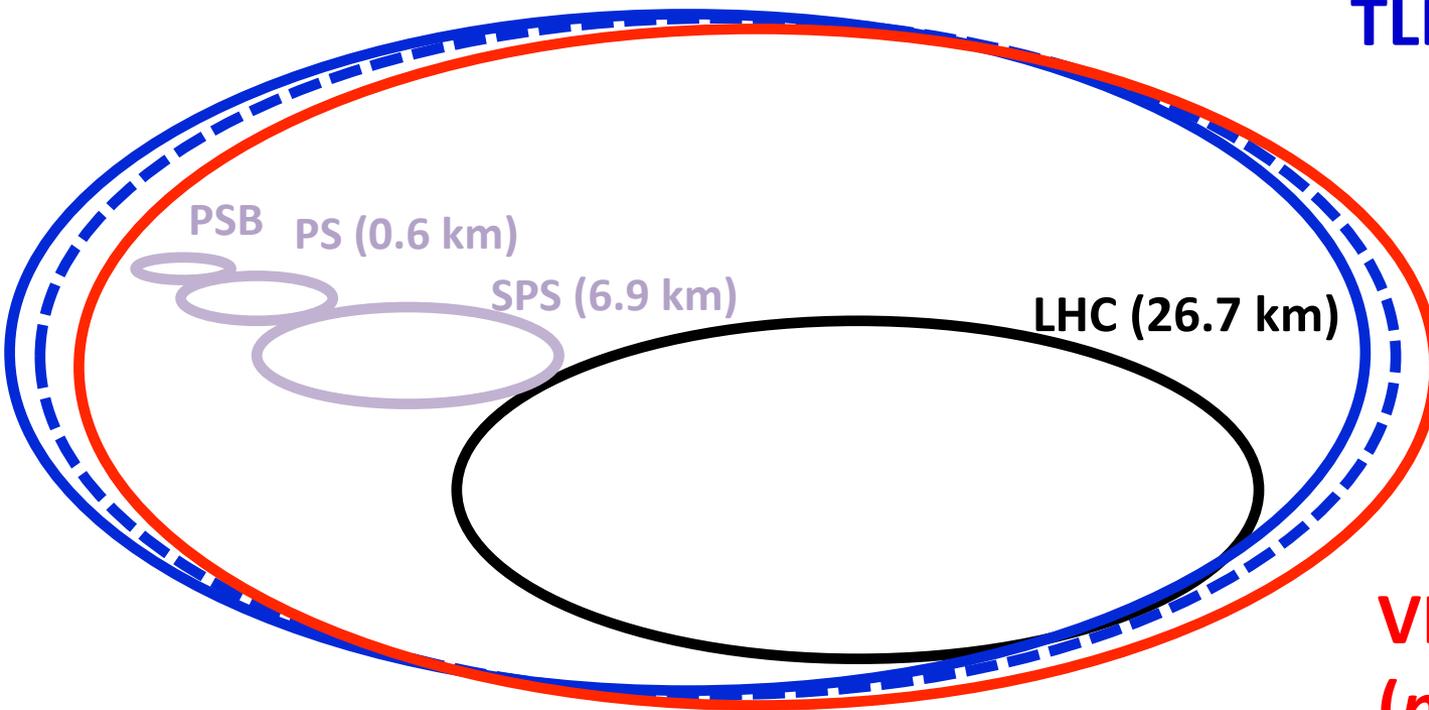
M. Boscolo, LNF Masterclass  
Q. Qin, IHEP 2013



T. Sen, E. Gianfelice-Wendt, Y. Alexahin, FNAL

# possible master plan

*not yet endorsed by CERN management!*



**TLEP (80 km,  
 $e^+e^-$ , up to  
400 GeV cm)**

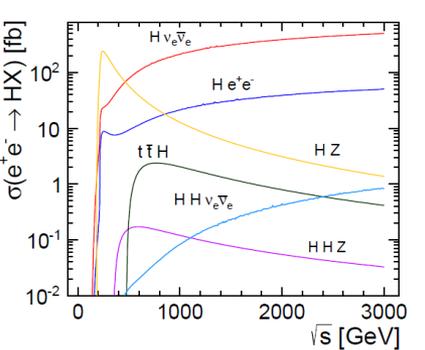
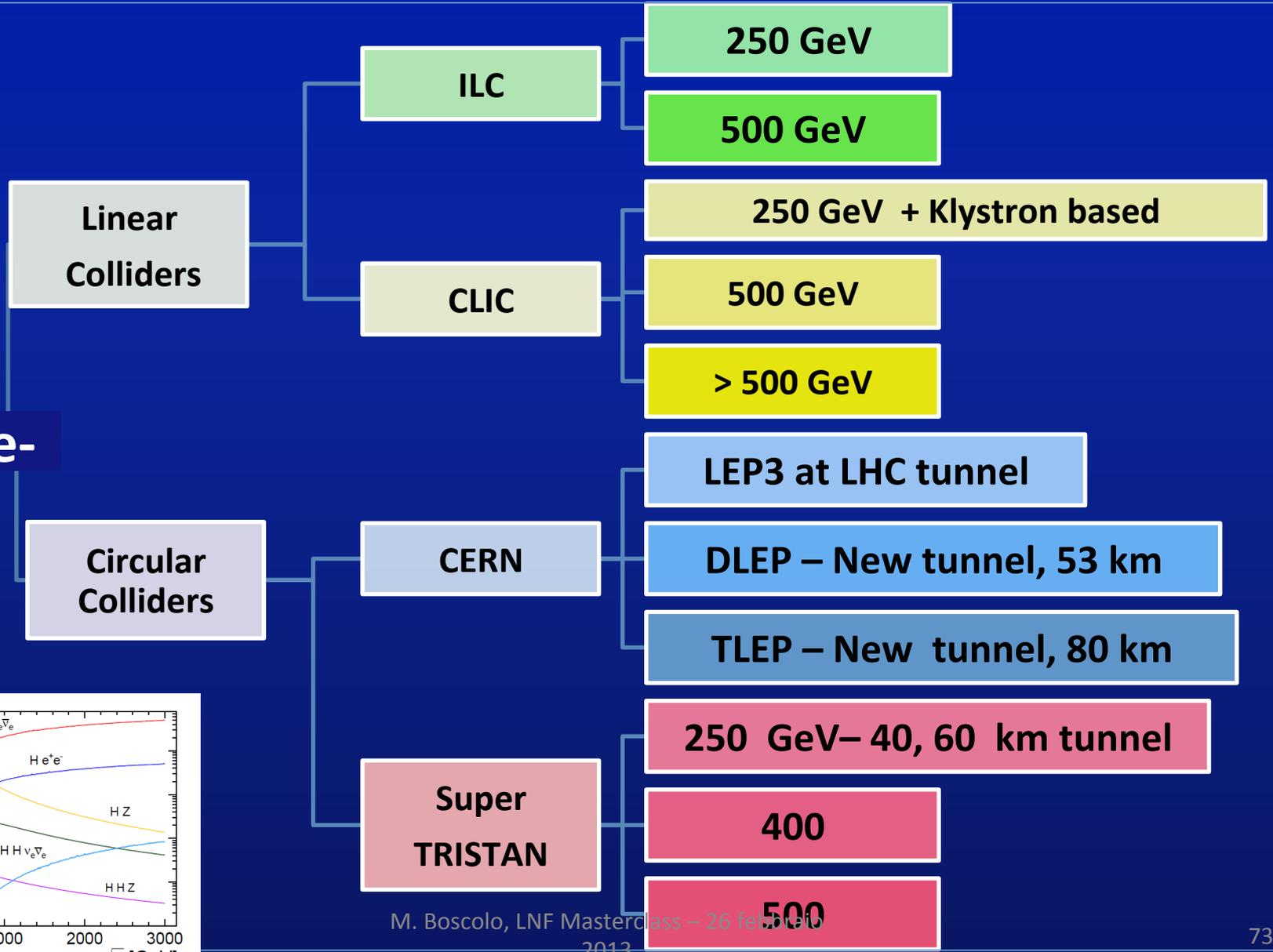
$L(350\text{GeV}) \approx 7 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
 $L(240\text{GeV}) \approx 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
 $L(160\text{GeV}) \approx 4 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$   
 $L(91\text{GeV}) \approx 3 \times 10^{36} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

**VHE-LHC  
( $pp$ , up to  
100 TeV c.m.)**

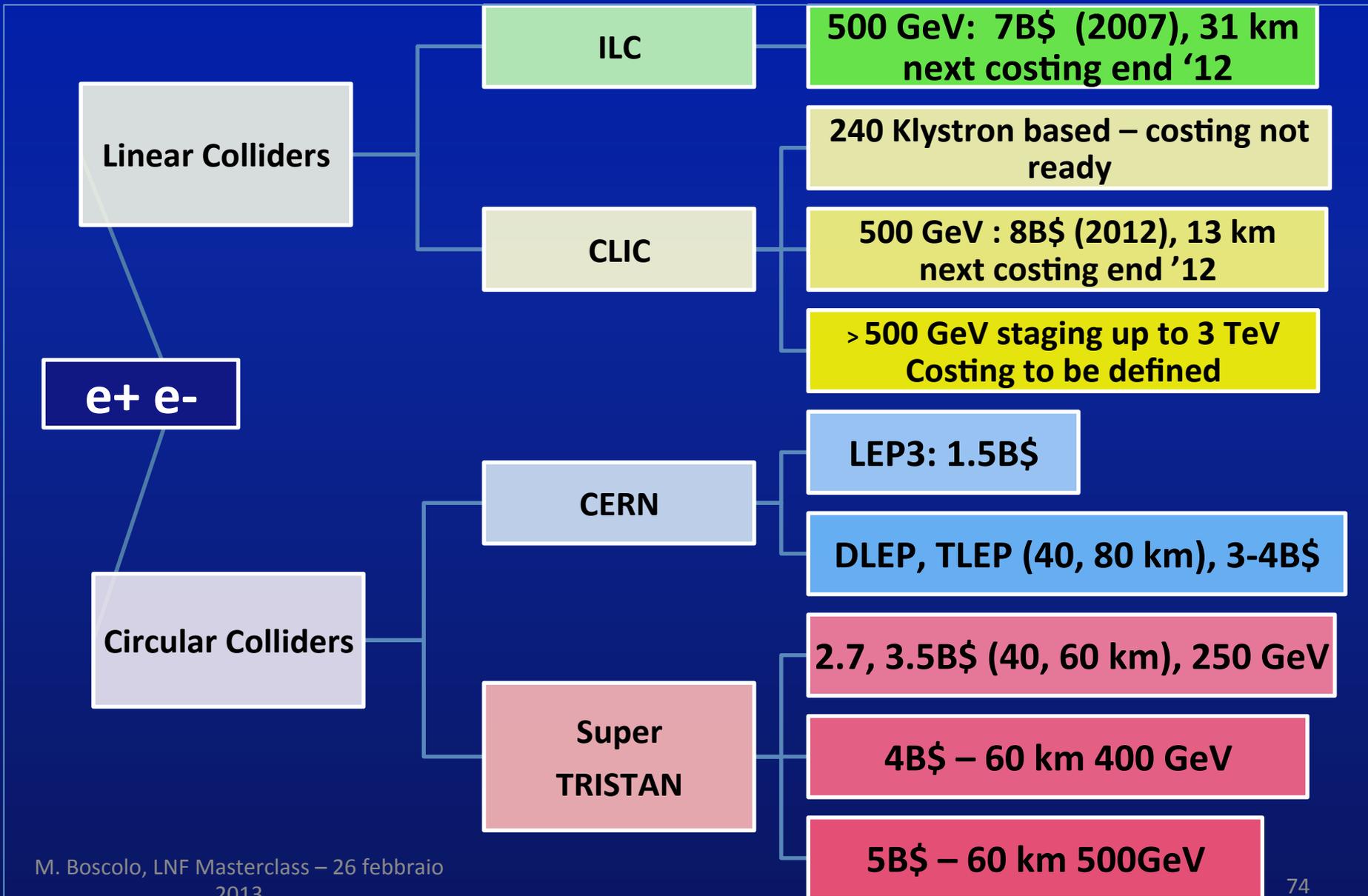
**Also:  $e^\pm$  (200 GeV) –  $p$  (7 & 50 TeV) collisions**

# HIGGS FACTORIES e+e-

e+ e-



# HIGGS FACTORIES e+e- rough costs estimations (B\$)



# Acceleratori di particelle alla frontiera dell'alta intensita'

Alta  
intensita'  
media

- **Linac** ad alta intensita' (neutrini, anti-protoni, muoni, neutroni)
- **Ciclotroni** ad alta intensita' fasci su targetta (neutroni EDM e muoni, neutrini, anti-protoni, muoni)
  - Examples in Europe are PSI

Alta  
intensita'  
istantanea

- **Anelli** ad alta intensita' (for high intensity single beams and flavor factories e.g. anti-protons, neutrinos, muons, rare-decays and CP violation)
  - Examples in Europe are **PS/SPS at CERN, ISIS** and FAIR
- **Anelli e+e-** ad alta intensita'  
(for high luminosity flavor factories)
  - Examples are SuperKEKB (there was also SuperB)

# “Intensity Frontier” Factories a leptoni (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>)

Fabbriche a e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>, perchè producono tante particelle

## Superfactories

New colliding schemes for reducing beam-beam effects  
(limiting beam currents and increasing beam dimensions)

### Factories attuali

- BEPC II - tau
- VEPP200 -2 GeV
- DAFNE - PHI
- KEKB – B      Chiusa 30 giugno 2010
- SUPER-KEKB      Finanziata, in costruzione



### Schema di incrocio

Schema classico

Fascio tondo

Crab-waist (Superb)

Crab-cavity

Crab-waist

# Crab-Waist Scheme: nuovo schema di collisione

L'idea del *crab waist* è semplice di per sé:

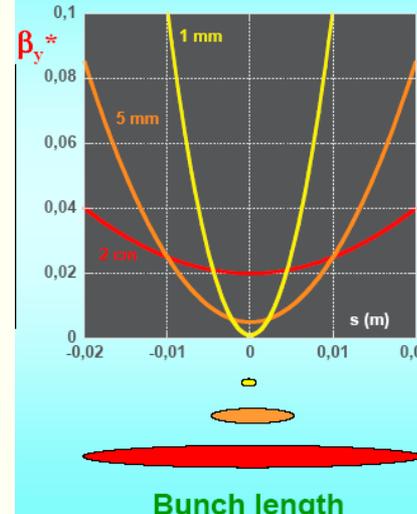
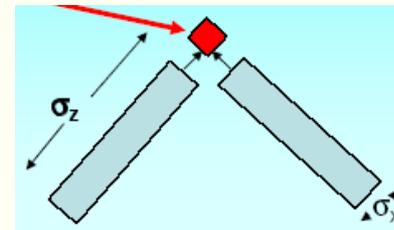
1. grande angolo di Piwinski (LPA)

Con un grande angolo di Piwinski l'area di sovrapposizione dei due fasci in collisione diventa più piccola (inoltre, gli incroci parassiti diventano trascurabili)

2.  $\beta_y$  all' IP  $\approx$  regione di sovrapposizione dei due fasci

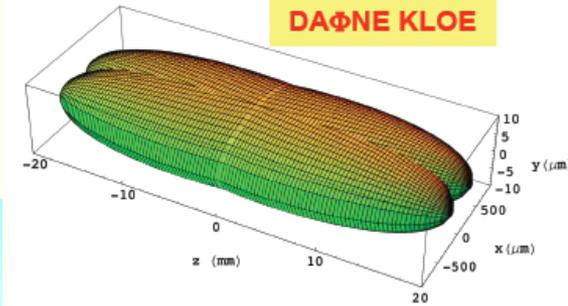
questo permette di avere  $\beta_y$  all' IP più piccoli e quindi luminosità maggiore

$$\beta_y^* \ll \sigma_z$$

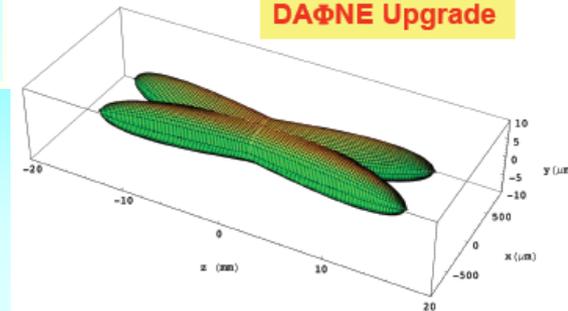


beam distribution at IP

DAΦNE KLOE



DAΦNE Upgrade

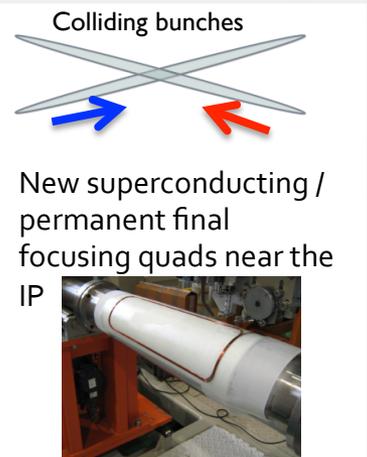
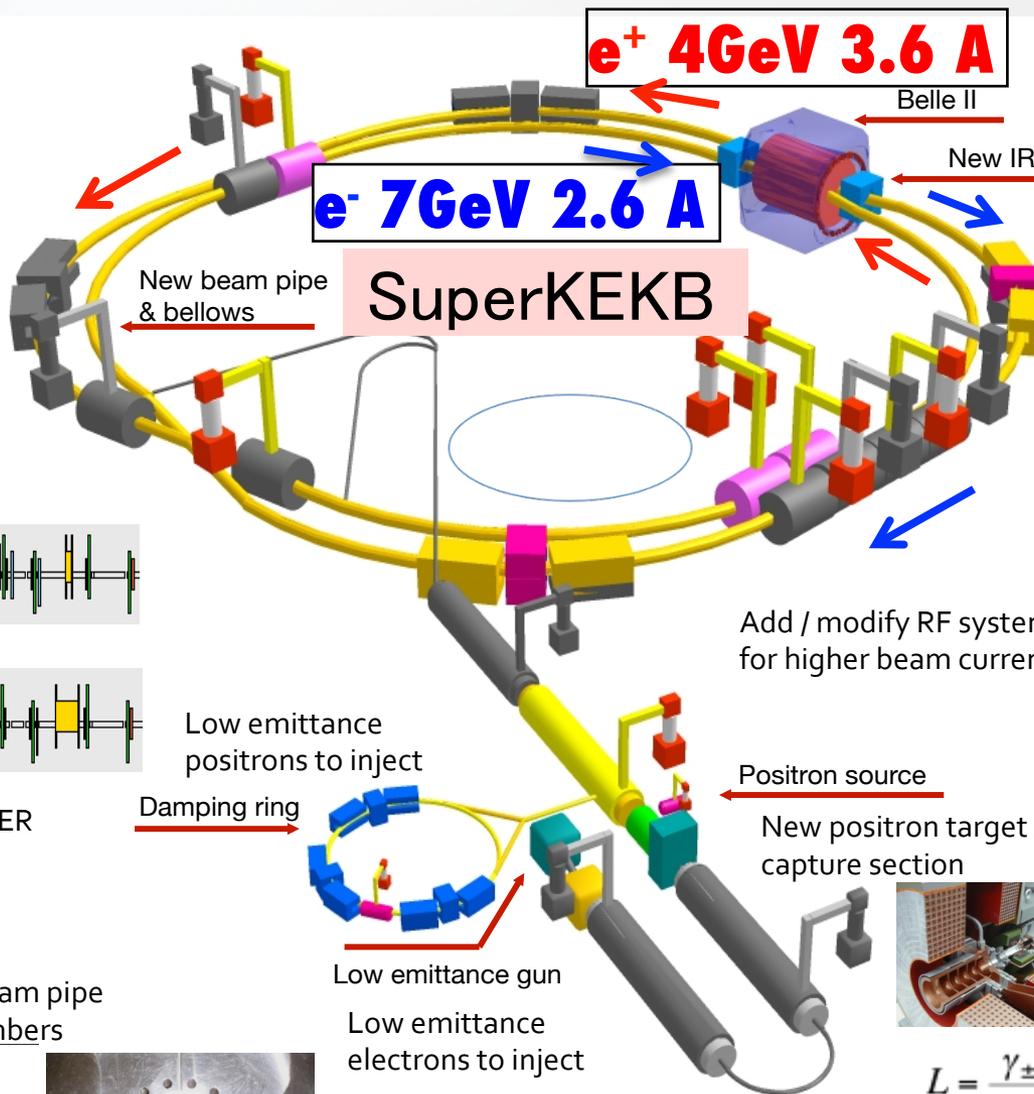


3. due sestupoli detti di crab con fase giusta rispetto all' IP (CW)

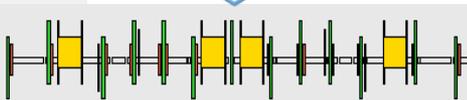
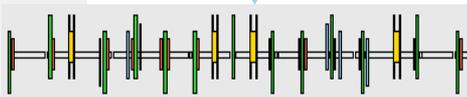
P. Raimondi, Nov. 2005/March 2006

PRL 104, 174801 (2010)

# SuperKEKB collider

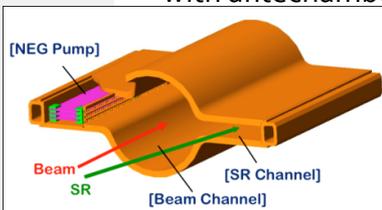


Replace short dipoles with longer ones (LER)



Redesign the lattices of HER & LER to squeeze the emittance

TiN-coated beam pipe with antechambers



Low emittance positrons to inject

Damping ring



Low emittance gun  
Low emittance electrons to inject

Add / modify RF systems for higher beam current

Positron source  
New positron target / capture section

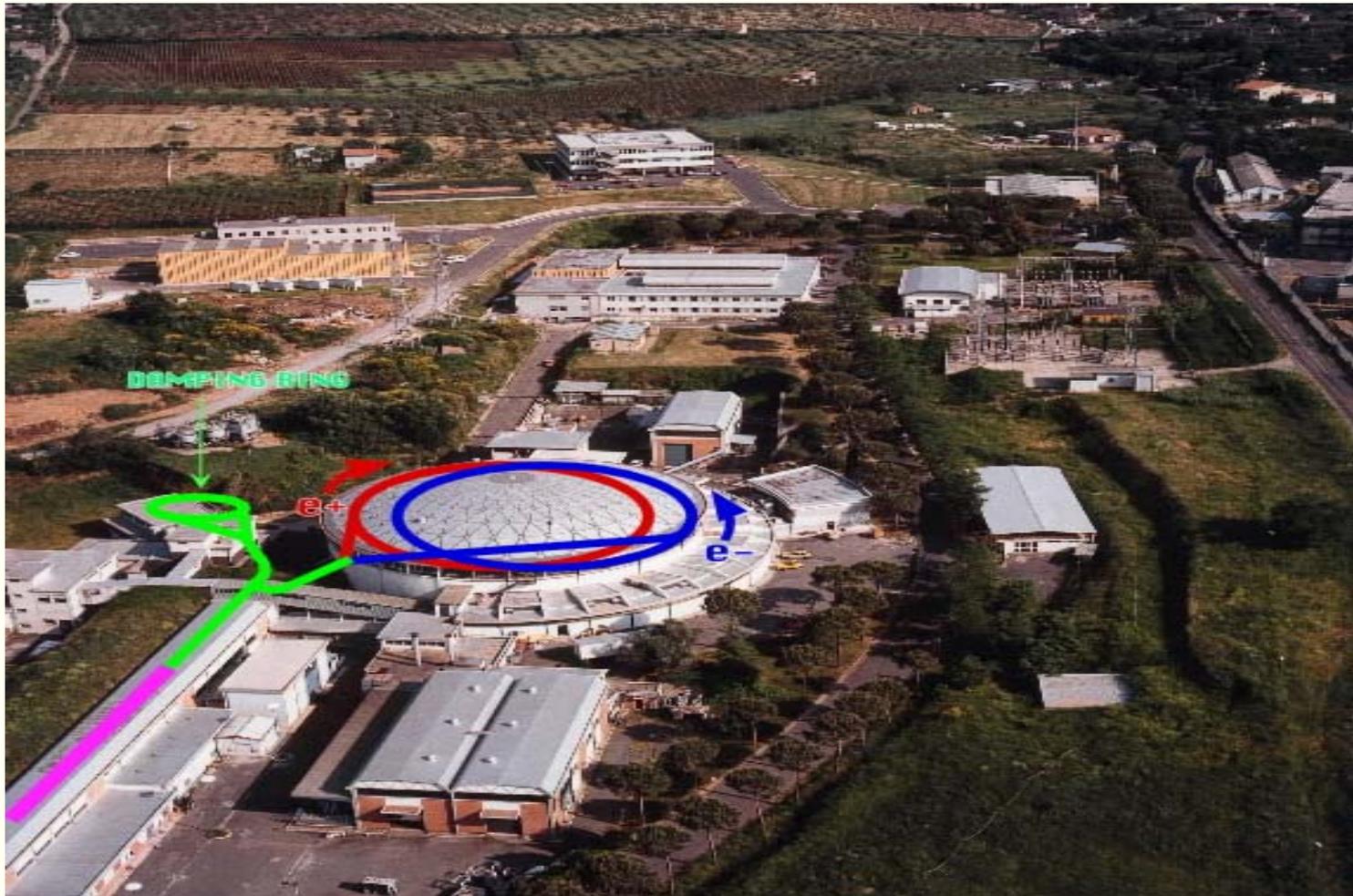


$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left( 1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \left( \frac{R_L}{R_y} \right) \right)$$

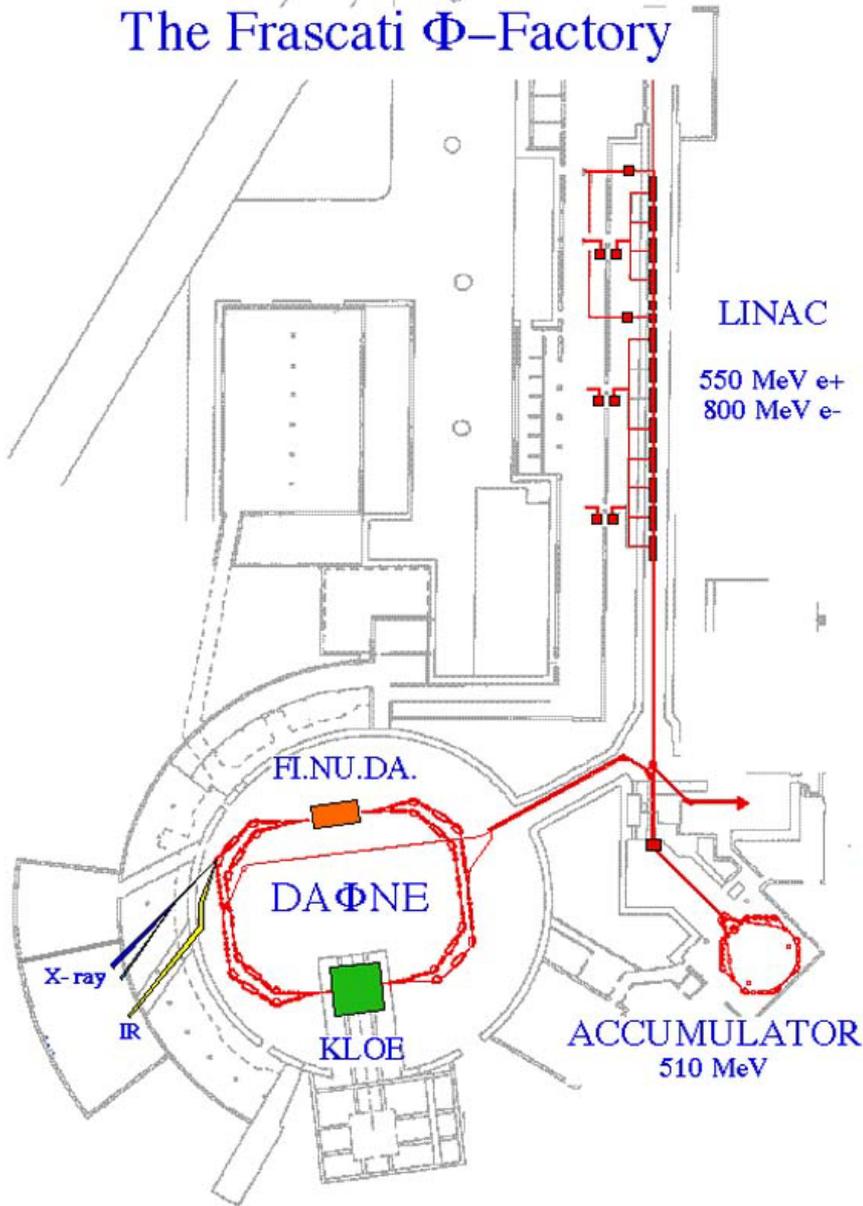
Target:  $L = 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}$

# $\Phi$ factory: DAΦNE ai LNF

Double Annular  $\Phi$ or Nice Experiments



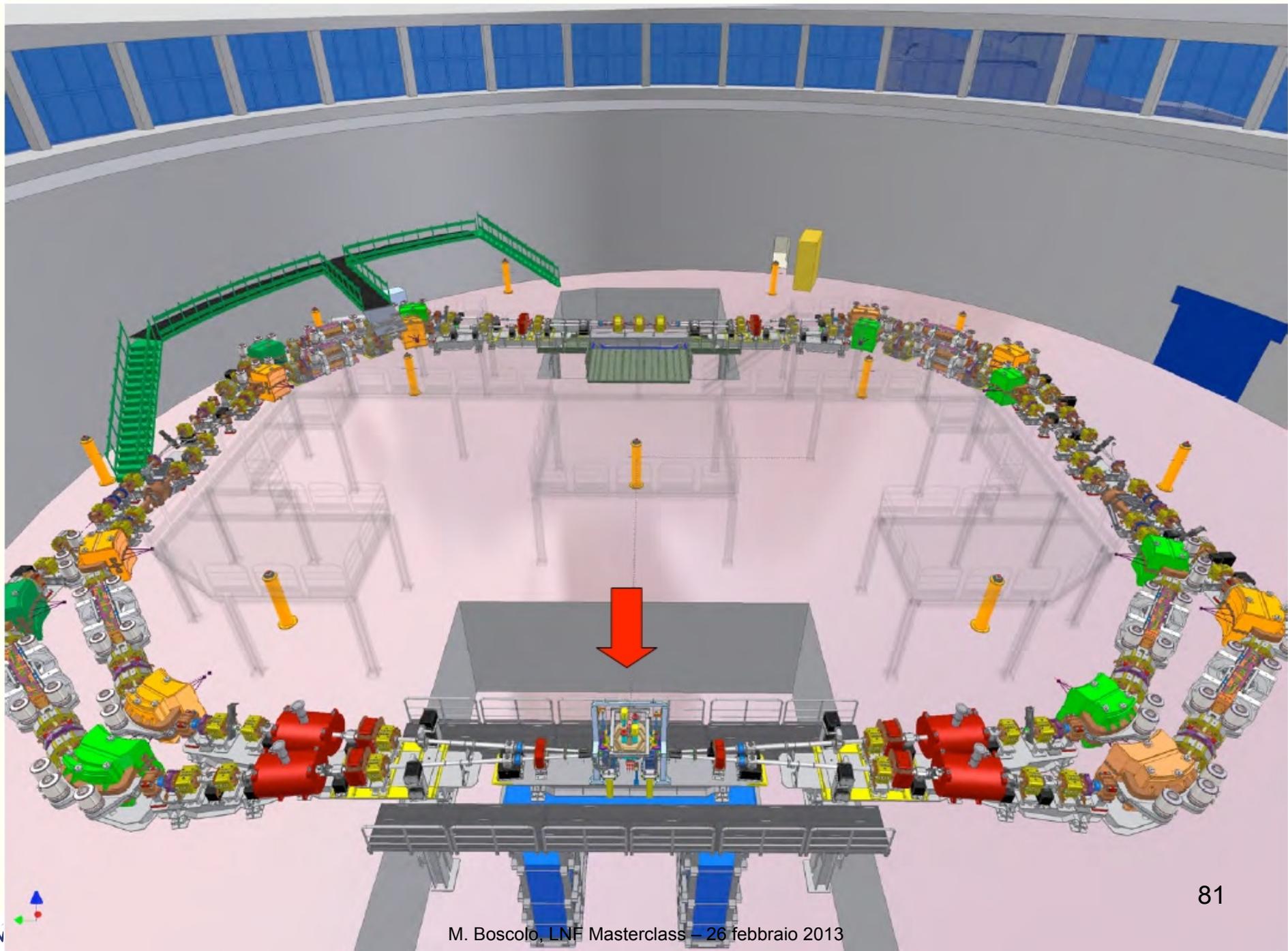
# The Frascati $\Phi$ -Factory



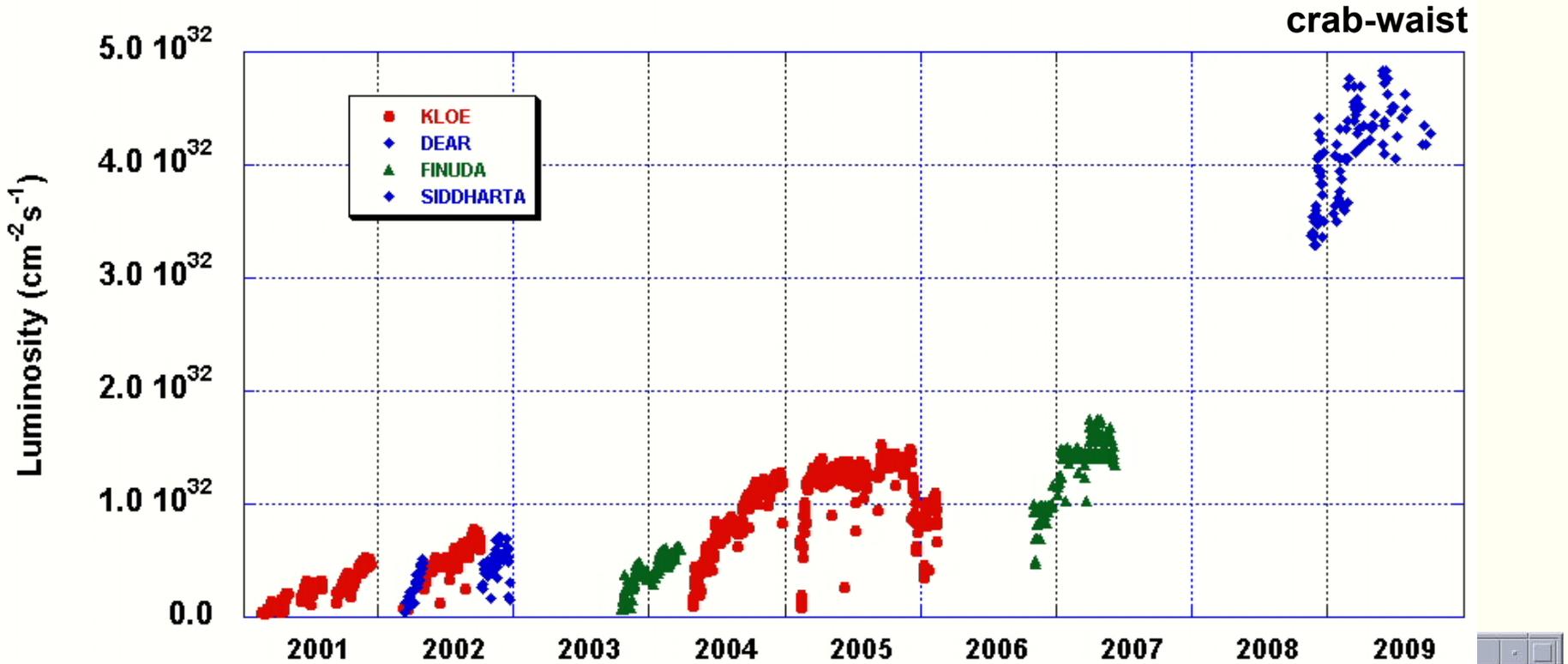
IL complesso di DAΦNE è formato da tre elementi:

- (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.



# DAFNE Peak Luminosity



## SIDDHARTA Luminosity

e- mA

1523

e+ mA

1002

**4.53E+32**

t2fam

82

LOCKED

file /u2/data/lumi/20090528.dat

# Conclusioni

- Qualche applicazione degli acceleratori
  - Medicaie
  - Industriale
  - Sorgente di luce per esperimenti di scienza dei materiali, fisica dello stato solido, microlitografia, biochimica, microscopia.
- Panoramica degli acceleratori per la ricerca fondamentale nel mondo:
  - Frontiera Alta energia
  - Frontiera Alta Intensita'

Spero di avervi trasmesso l'idea che la fisica degli acceleratori è un campo fertile con applicazioni molto varie ed interessanti, oltre che un campo complesso che richiede sempre nuove idee e soluzioni tecnologiche per nuove scoperte...

# Slides di riserva, approfondimenti

# Bibliografia

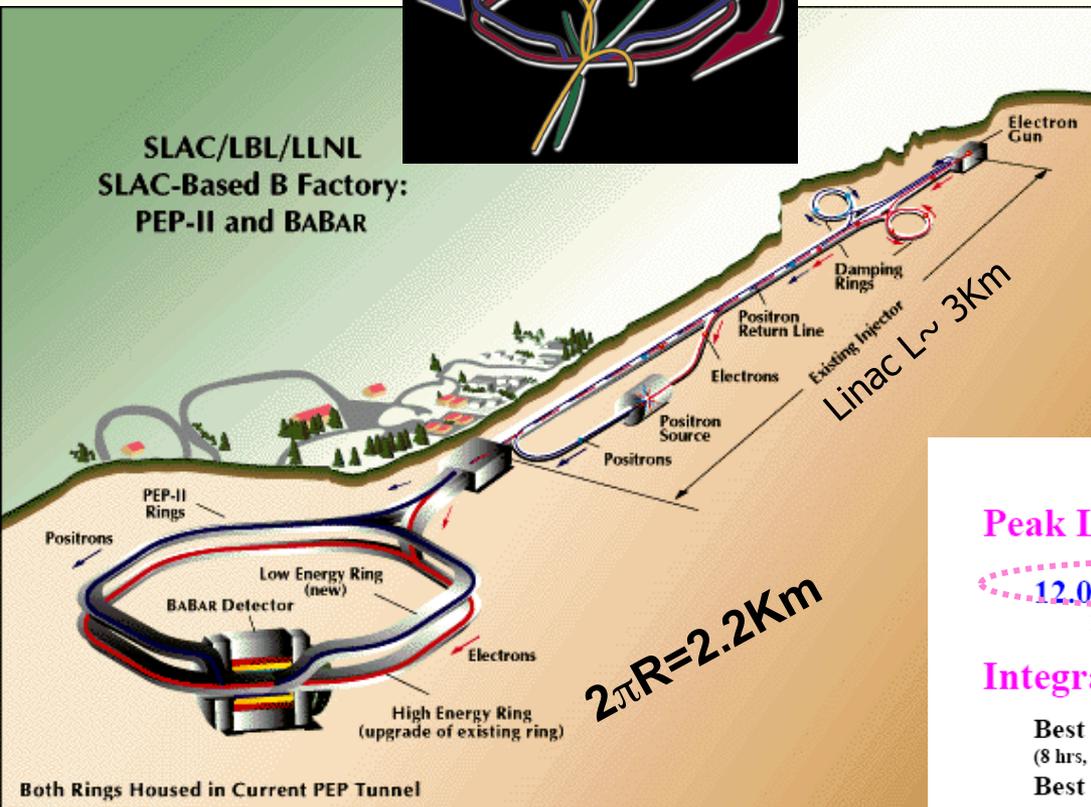
- CERN Accelerator School: Basic course on accelerator optics  
Yellow Report CERN 94-01 Vol.I  
<http://cdsweb.cern.ch/record/235242?ln=it>
  - P.J.Bryant, *“A Brief History and review of accelerators”*
  - J. Rossbach, P. Schmuser, *“Basic Course on accelerator optics”*
  - J. Le Duff, *“Dynamics and Acceleration in Linear Structures”*
  - J. Le Duff, *“Longitudinal Beam Dynamics and in Circular Accelerators”*
  
- H. Wiedemann, Particle Accelerator Physics, Springer-Verlag
  
- M. Sands, The Physics of Electron Storage Rings: An Introduction,  
[http://ccdb4fs.kek.jp/cgi-bin/img\\_index?197708303](http://ccdb4fs.kek.jp/cgi-bin/img_index?197708303) , SLAC-121 (1970)
  
- C. Biscari, Accelerators R&D, PoS EPS-HEP2009:019 (2009)

# PEP-II

Beauty-Factory: Stanford Linear Accelerator Center



SLAC/LBL/LLNL  
SLAC-Based B Factory:  
PEP-II and BABAR



Due anelli di accumulazione di  $e^+/e^-$  uno sopra l'altro.

$E_{CM} \sim 10 \text{ GeV}$

L'annichilazione di  $e^+/e^-$  produce quarks-b, il cui decadimento è di interesse per i fisici sperimentali.

## PEP-II Records

Last update:  
March 1, 2008

### Peak Luminosity

$12.069 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

1722 bunches 2900 mA LER 1875 mA HER

August 16, 2006

### Integration records of delivered luminosity

Best shift (8 hrs, 0:00, 08:00, 16:00)	339.0 $\text{pb}^{-1}$	Aug 16, 2006
Best 3 shifts in a row	910.7 $\text{pb}^{-1}$	Jul 2-3, 2006
Best day	858.4 $\text{pb}^{-1}$	Aug 19, 2007
Best 7 days (0:00 to 24:00)	5.411 $\text{fb}^{-1}$	Aug 14-Aug 20, 2007
Best week (Sun 0:00 to Sat 24:00)	5.137 $\text{fb}^{-1}$	Aug 12-Aug 18, 2007
Peak HER current	2069 mA	Feb 29, 2008
Peak LER current	3026 mA	Sep 1, 2007
Best 30 days	19.776 $\text{fb}^{-1}$	Aug 5 - Sep 3, 2007
Best month	19.732 $\text{fb}^{-1}$	August 2007 86
Total delivered	536 $\text{fb}^{-1}$	

1994 comincia la costruzione

1997 primo fascio

1998 prime collisioni

1999-2007 dati a BaBar

2008 Aprile spenta per sempre

# KEKB

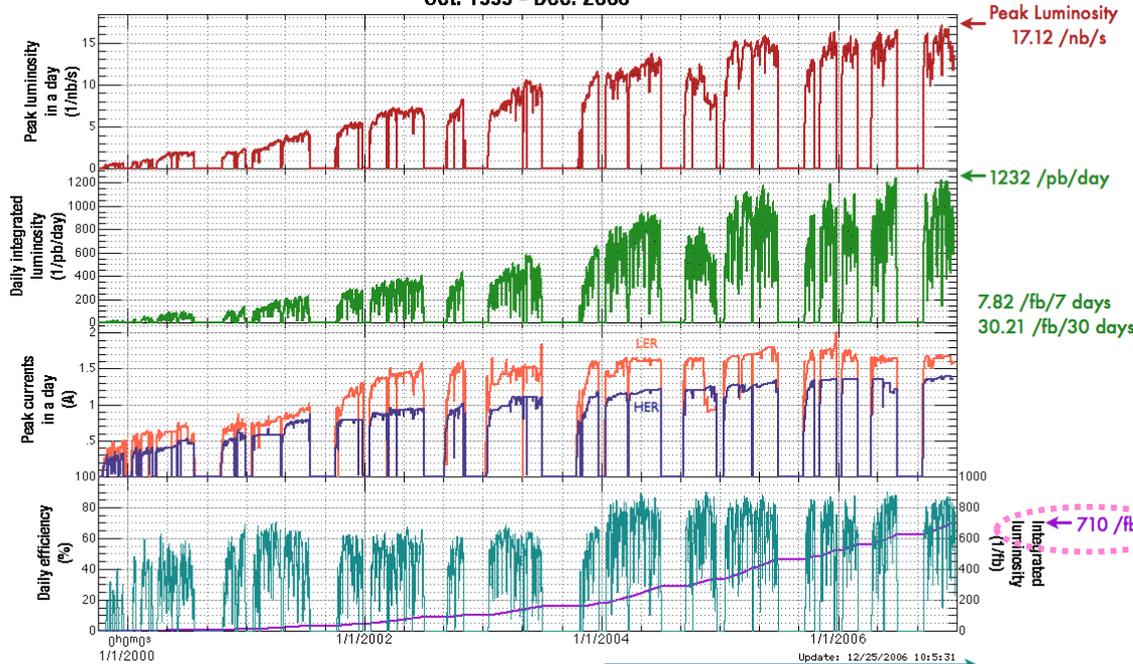
→ SUPERKEKB



Machine Parameters of the KEKB (Nov. 28 2007)



Luminosity of KEKB  
Oct. 1999 - Dec. 2006

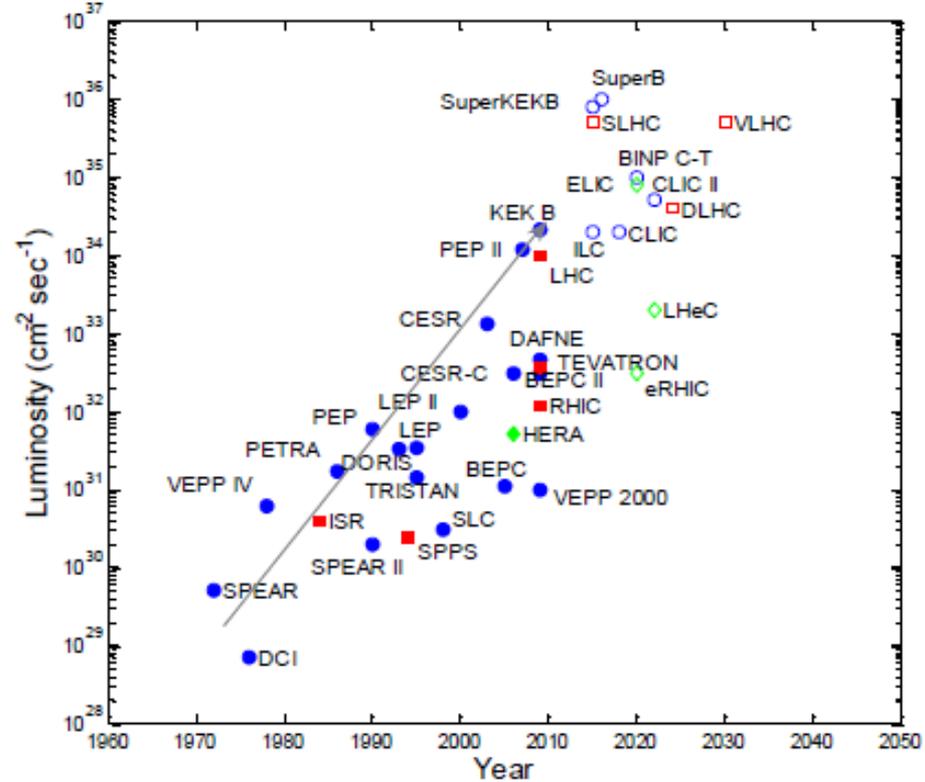
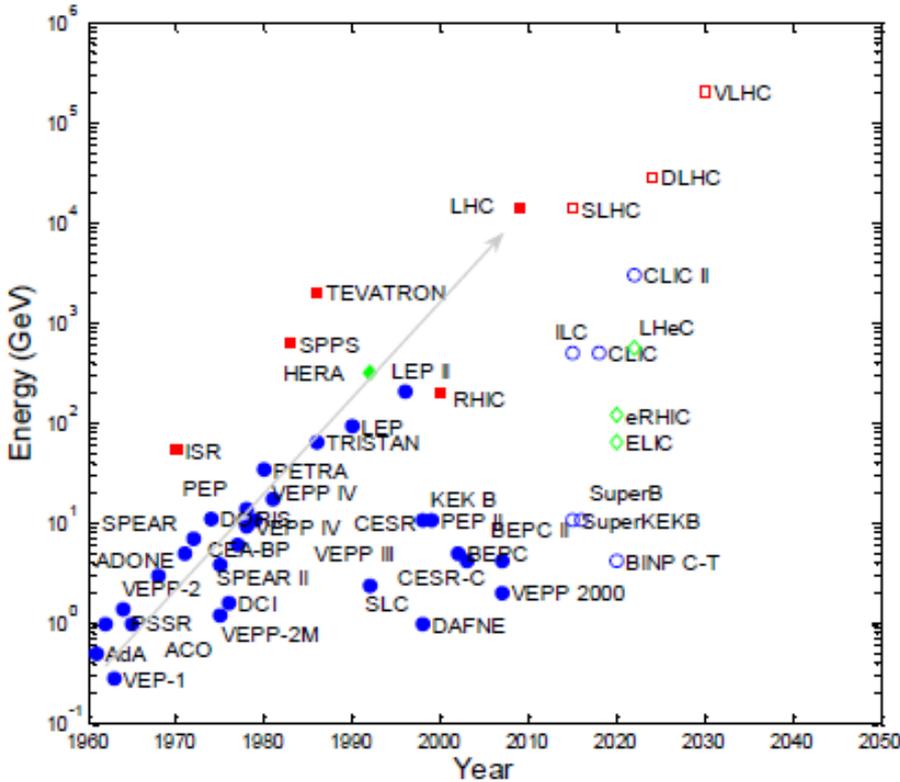


	LER	HER	
Circumference	3016		m
RF Frequency	508.88		MHz
Horizontal Emittance	18	24	nm
Beam current	1582	839	mA
Number of bunches	1584		
Bunch current	0.998	0.530	mA
Bunch spacing	2.1		m
Bunch trains	1		
Total RF voltage Vc	8.0	13.0	MV
Synchrotron tune $\nu_s$	-0.0246	-0.0204	
Betatron tune $\nu_x / \nu_y$	45.506/43.570	44.511/41.590	
beta's at IP $\beta_x^* / \beta_y^*$	90/0.59	90/0.59	cm
momentum compaction $\alpha$	$3.31 \times 10^{-4}$	$3.38 \times 10^{-4}$	
Estimated vertical beam size at IP $\sigma_y^*$	1.1	1.1	$\mu\text{m}$
beam-beam parameters $\xi_x / \xi_y$	0.089/0.093	0.098/0.088	
Beam lifetime	150@1600	132@839	min.@mA
Luminosity (Belle Csl)	14.60		$10^{33}/\text{cm}^2/\text{sec}$
Luminosity records per day / 7days / 30days	1.232/7.809/30.21		87 /fb

# Dov'è R&D degli acceleratori per applicazioni della fisica delle alte energie?

- Acceleratori **Lineari**  $e^+e^-$  : ricerca nel campo delle cavità acceleranti, a maggior gradiente di accelerazione possibile (CLIC (Cern), ILC)
- Acceleratori **circolari**:
  - $p p$  : LHC presente (Cern) -> il piu' grande al mondo
  - $e^+e^-$  : collisori sono pochi in funzione (tra cui DAFNE), in costruzione SUPERKEKB (Giappone)
- Muon colliders – Neutrino Factories
- Acceleratori a Plasma: il campo elettrico accelerante viene generato da onde di plasma, idea molto innovativa

# Evoluzione dei Collisori nel tempo



Puntini pieni: passati e presenti

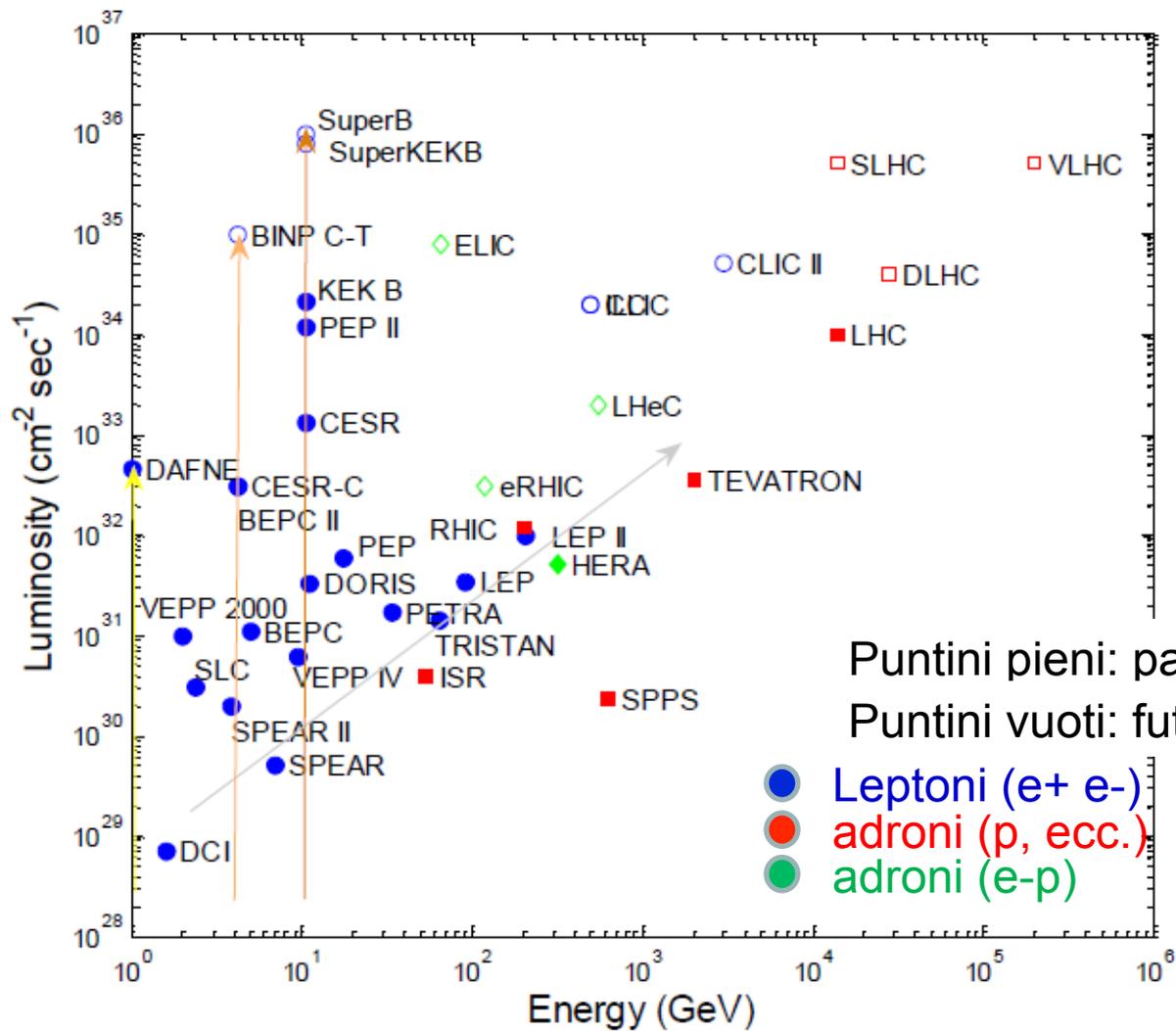
Puntini vuoti: futuri

- Leptoni ( $e^+ e^-$ )
- adroni ( $p$ , ecc.)
- adroni ( $e-p$ )

[C. Biscari, PoS EPS-HEP2009:019,2009]

In 50 anni energia e luminosità è aumentata di 5 ordini di grandezza

# Luminosità in funzione dell'energia



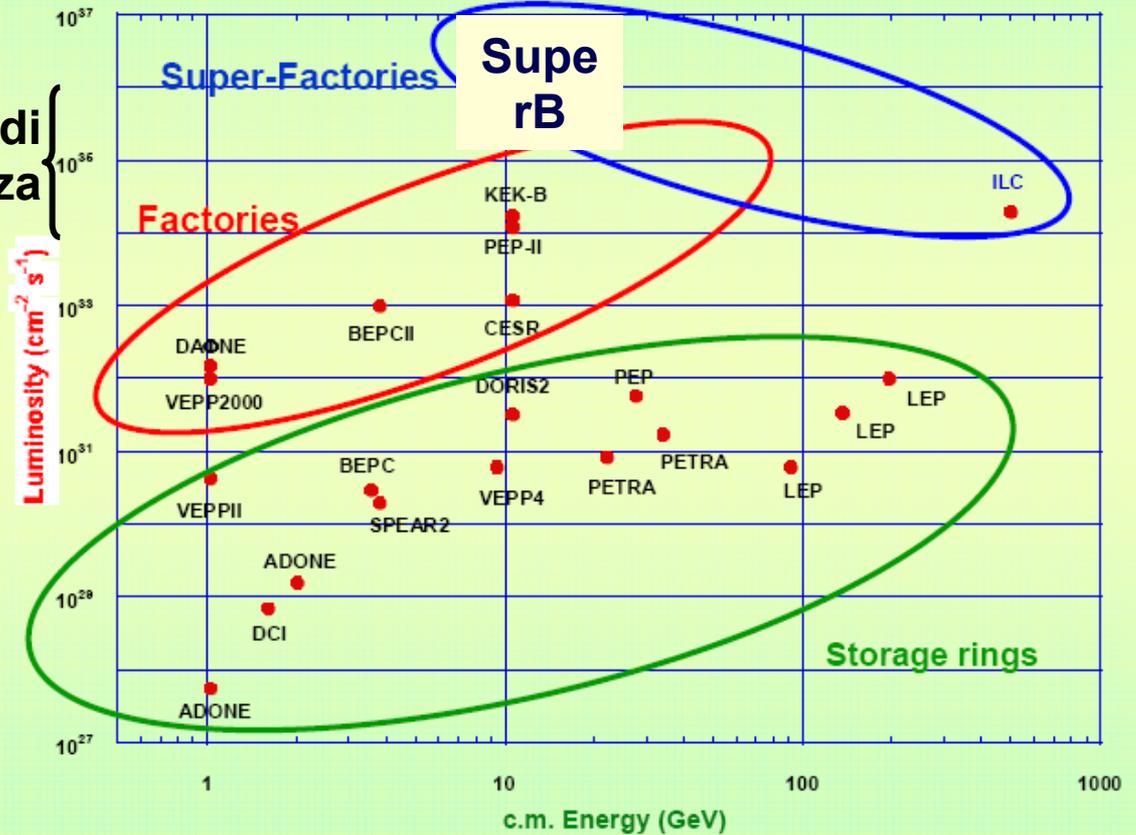
Puntini pieni: passati e presenti  
Puntini vuoti: futuri

- Leptoni ( $e^+ e^-$ )
- adroni ( $p$ , ecc.)
- adroni ( $e-p$ )

[C. Biscari, PoS EPS-HEP2009:019,2009]

# $e^+ e^-$ colliders

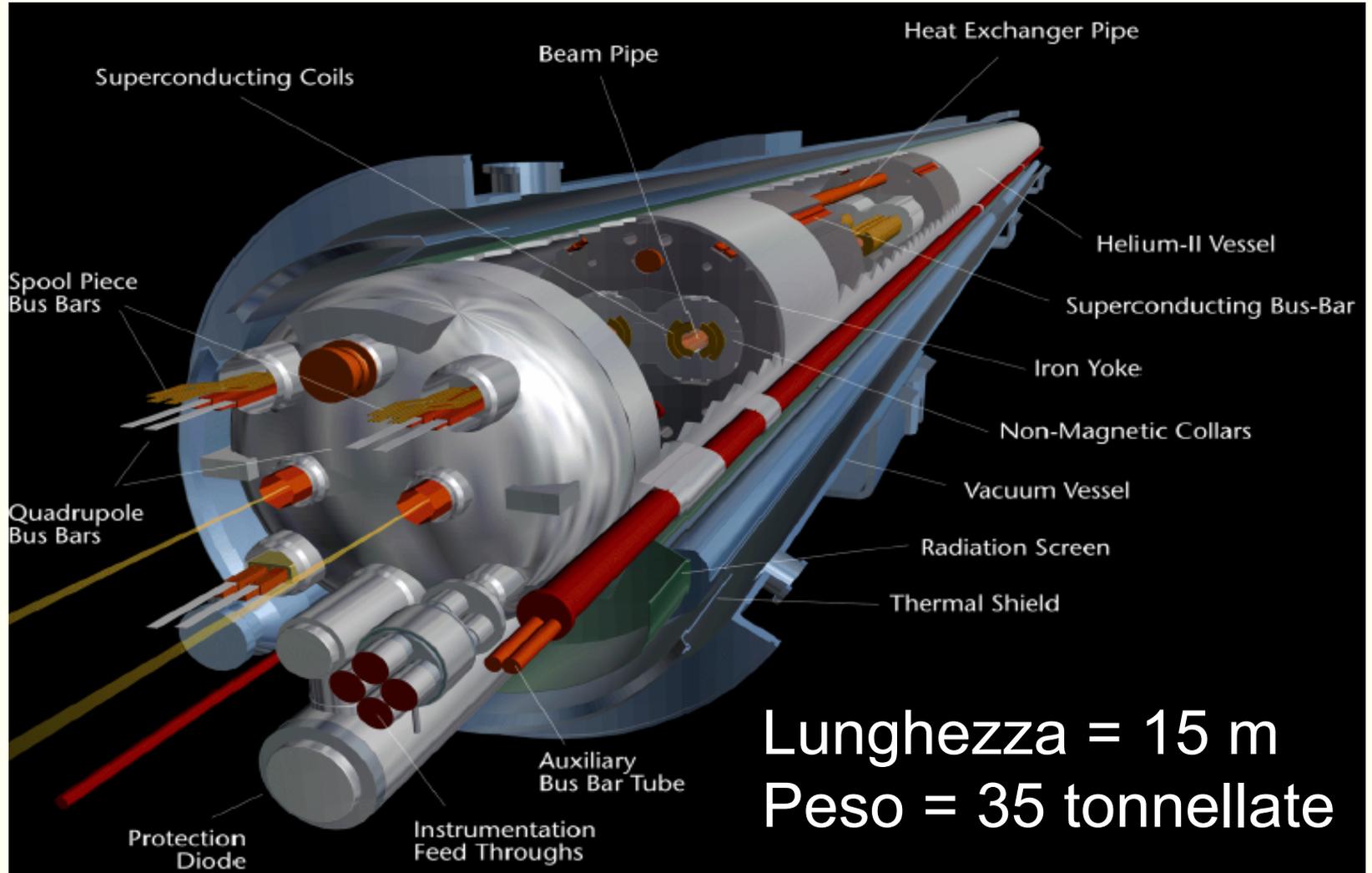
due ordini di grandezza



Per un aumento simile di luminosità ci vuole un'idea nuova, che cambi il modo di progettare un collider

# Il dipolo criogenico di LHC

The key element - the 1232 dipoles bend the beam around the 27 km circumference



Resp. italiano del "Magnets, Cryostats and Superconductors Group L. Rossi

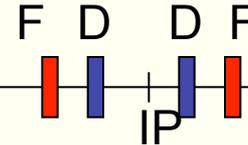
M. Boscolo, LNF Masterclass – 26 febbraio 2013

# Regione d'interazione: schema tradizionale

## FOCALIZZAZIONE CON DOPPIETTO di quadrupoli FODO

### LOW-BETA SCHEME

$\beta_y$  e  $\beta_x$  minimi all'IP

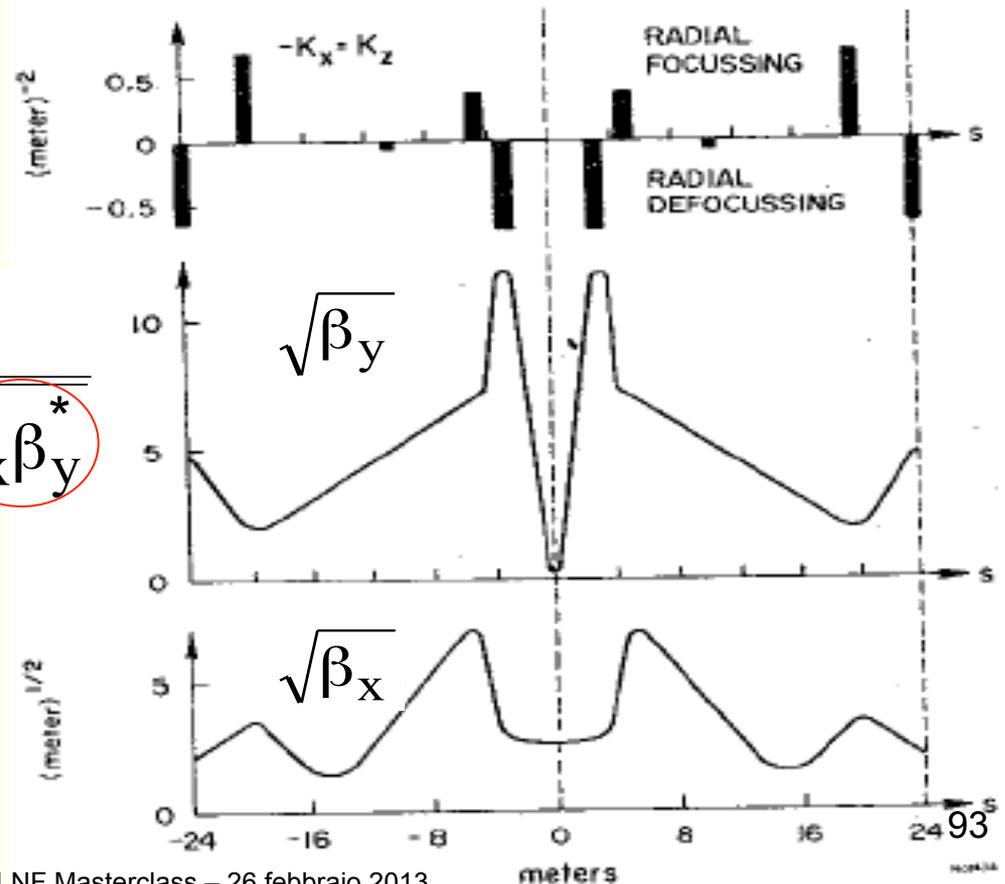


### FATTORI GEOMETRICI

L'aumento della luminosità implica la focalizzazione dei fasci all'IP (soprattutto in y)

$$L = f_r \frac{N^+ N^-}{4\pi\sigma_x\sigma_y} = f_r \frac{N^+ N^-}{4\pi\epsilon_x \sqrt{\kappa\beta_x^* \beta_y^*}}$$

$$\kappa = \epsilon_y / \epsilon_x \approx 0.001 - 0.01$$



# Regione d'interazione: schema tradizionale

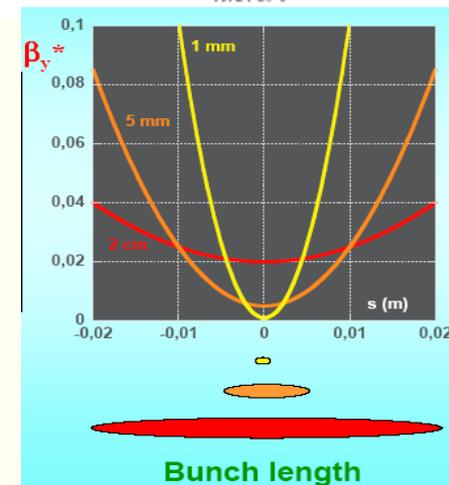
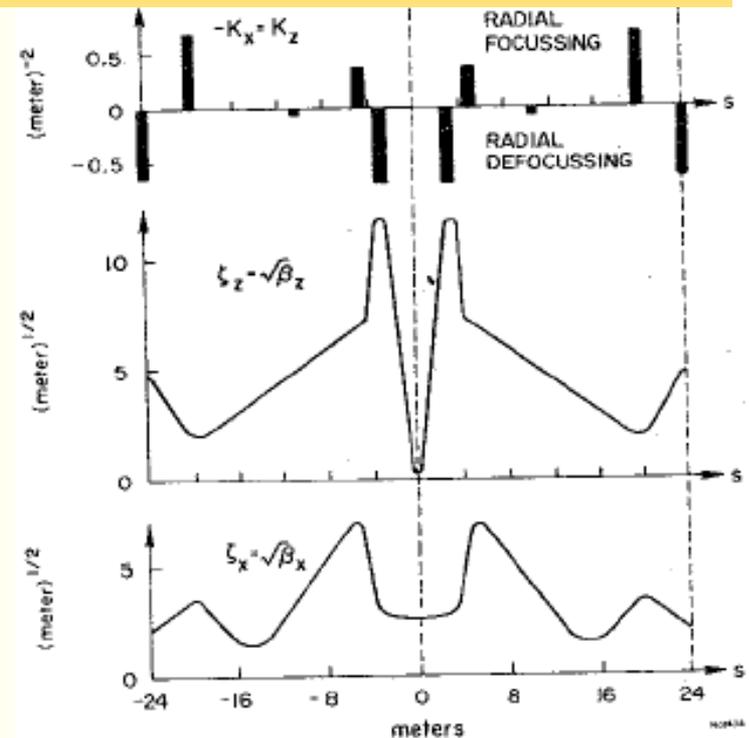
Limite inferiore per  $\beta_y$  all'IP è imposto dall'EFFETTO CLESSIDRA (*hourglass effect*)

the hourglass effect consists in a luminosity decrease that occurs when the bunch lengths are comparable to or larger than  $\beta_x^*$  or  $\beta_y^*$ . The decrease is due to the rapid increase of the transverse beam size along the bunch

Tutto il fascio lungo z deve vedere la stessa  $\beta_y$  quindi  $\sigma_z$  più piccolo possibile

$$\beta_y^* \approx \sigma_z$$

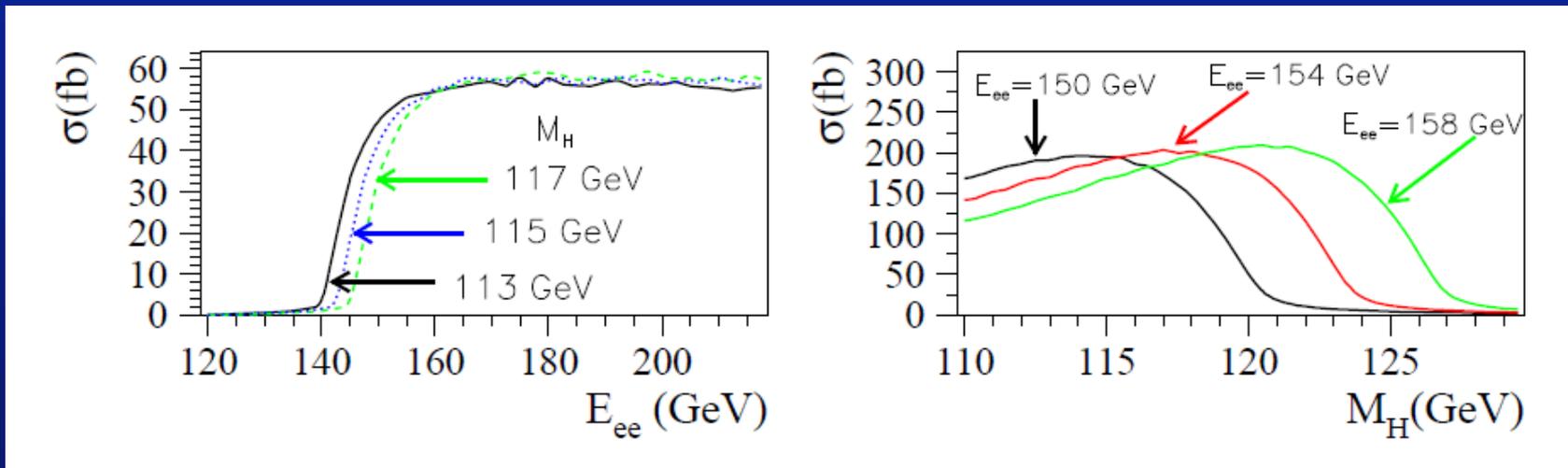
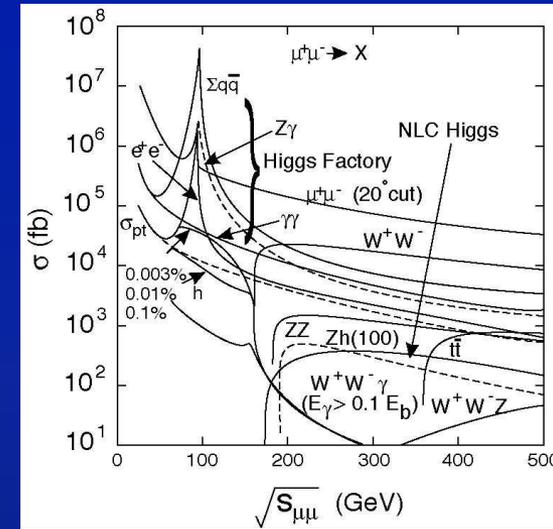
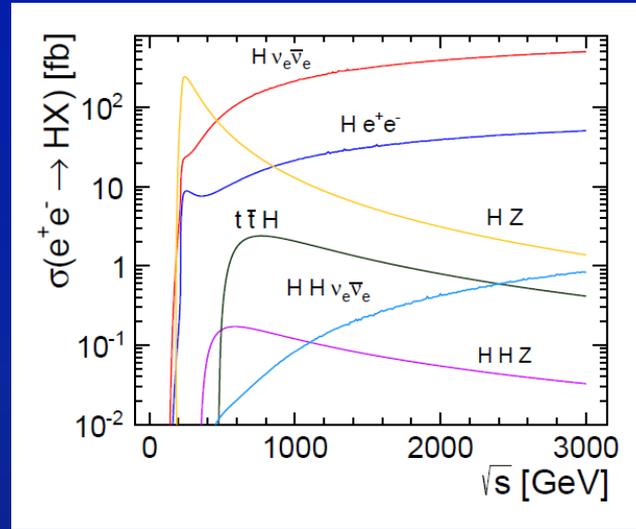
$\sigma_z \approx \text{cm} \rightarrow \beta_y$  dell'ordine di qualche cm



# HIGGS FACTORIES beyond LHC

## Colliders

- $e^+e^-$
- Muons
- $\gamma\gamma$



Cross-sections for different production mechanisms for a 125 GeV Higgs boson as a function of the  $e^+e^-$  centre-of-mass energy.