



Acceleratori di particelle seconda parte

M. Boscolo

Frascati, 31 gennaio 2012

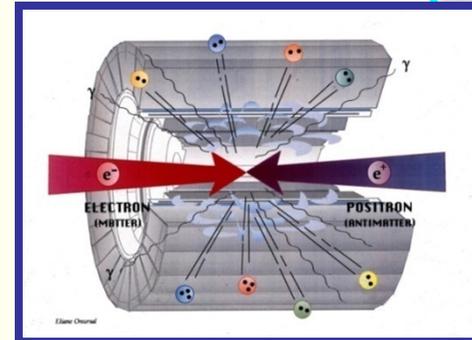
Argomenti della presentazione

- Stato Acceleratori e futuro
- Collisori circolari per fisica fondamentale:
 - Alta energia – adroni (protoni)
 - Alta luminosità – leptoni (elettroni)
- Applicazione degli acceleratori in altre discipline
 - FEL (laser ad elettroni liberi)
 - Luce di sincrotrone – anelli ad elettroni
 - Fisica medica

L'idea di Bruno Touschek: i *colliders*

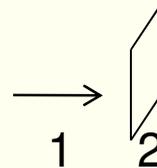


La geniale idea fu quella di utilizzare come particelle collidenti particelle ed antiparticelle che, nella loro annichilazione, avrebbero rilasciato tutta la loro energia per creare nuove particelle.



Collisione su targhetta fissa

$$E_{CM} \approx \sqrt{2E_1 m_2}$$



$$E_1 = E_{cin1}$$

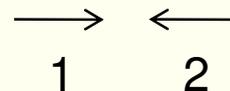
$$E_2 = E_{02} = m_{02} c^2$$

Esempio: $E_1 = 450 \text{ GeV}$

$E_{cm} = 29 \text{ GeV}$

Due fasci uguali collidenti

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



$E_{cm} = 900 \text{ GeV}$

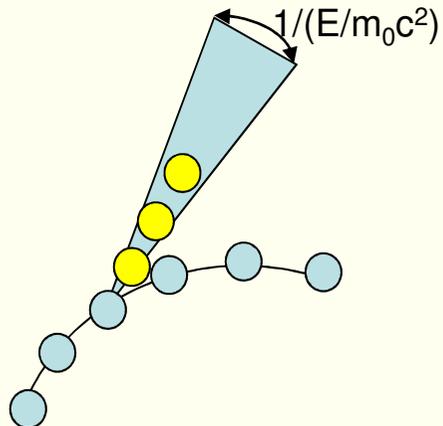
Infatti: $\vec{p}_1 = -\vec{p}_2$

$$E_{CM}^2 = (E_1 + E_2)^2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 c^2 \cong (2E_1)^2$$

Radiazione di sincrotrone

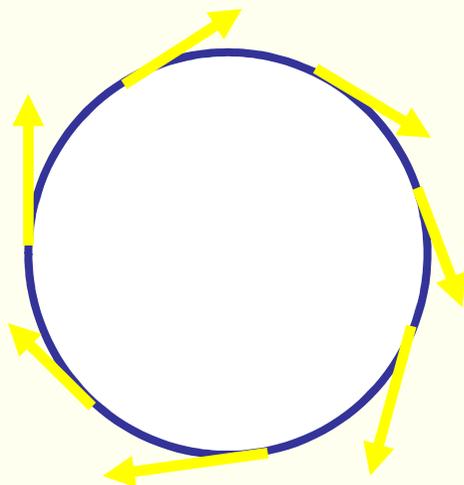
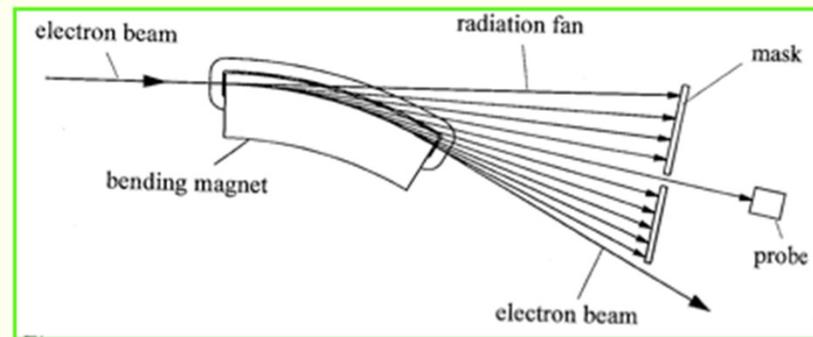
Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva emette fotoni, la cui energia dipende dalla massa, dall'energia della particella e dal raggio di curvatura della traiettoria

Radiazione ben collimata



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

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



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

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

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

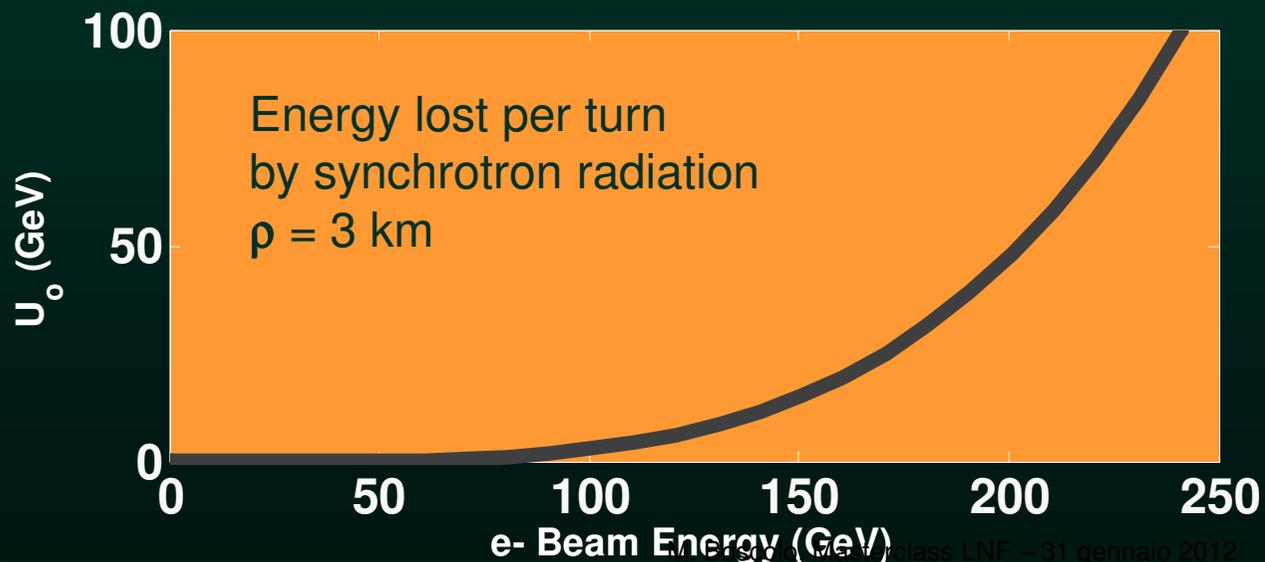
- A parità di **E** e **ρ** un elettrone emette molta più radiazione di sincrotrone di un protone
- La radiazione di sincrotrone emessa da protoni è stata osservata per la prima volta al Tevatron

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

e⁺ e⁻	DAΦNE	U ~ 0.01 MeV	E = 0.51 GeV	L = 97.58 m
e⁺ e⁻	LEP	U ~ 700 MeV	E = 70 GeV	L = 27 Km
p p	LHC	U ~ 0.007 MeV	E = 7000 GeV	L = 27 Km

ENERGY frontiers – e+ e-

LEP : last circular collider
456 GeV / beam



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 ($E > 100$ GeV)

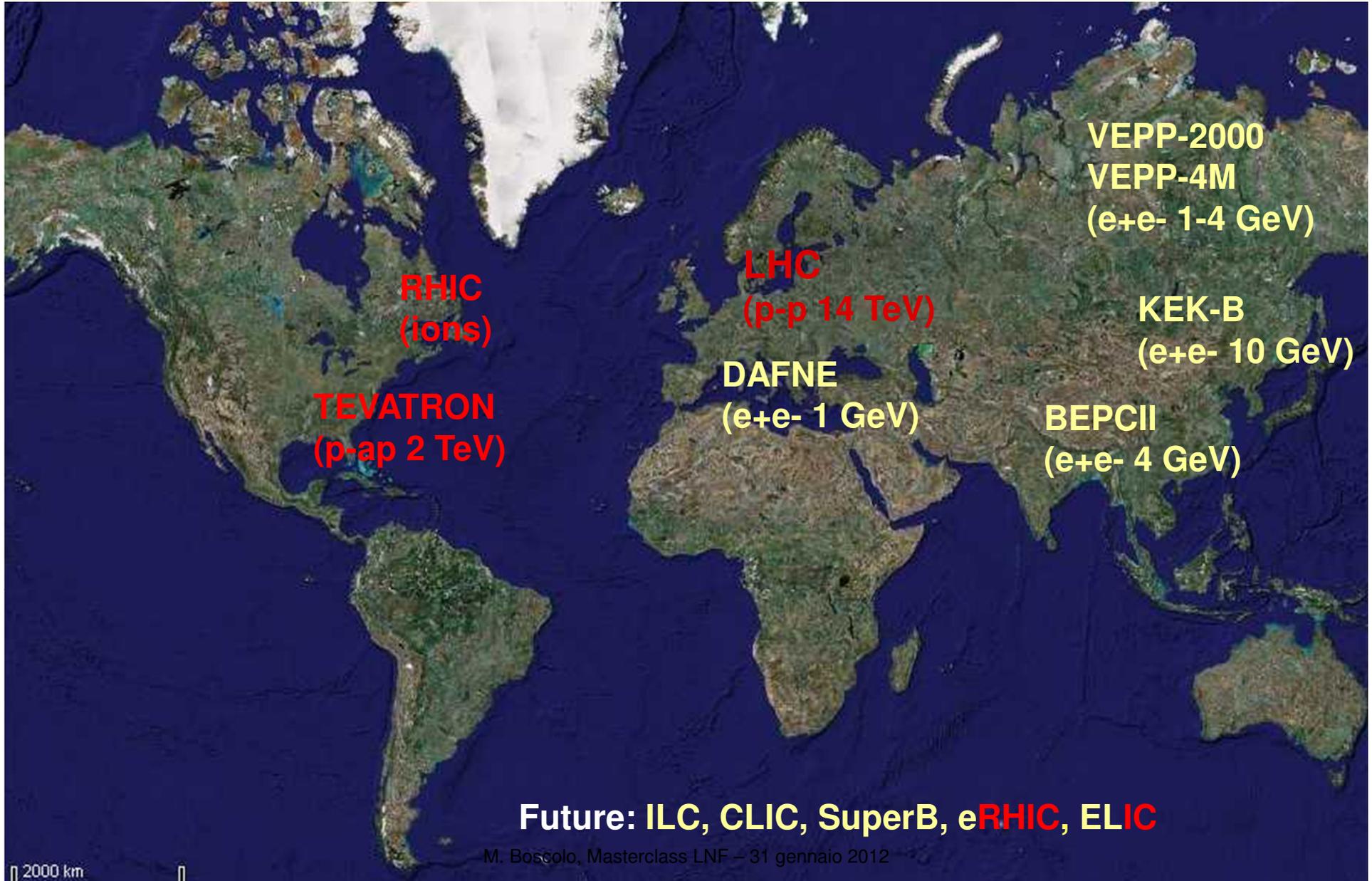
- Anelli circolari: adroni (protoni, antiprotoni o ioni) o muoni, oppure
- acceleratori lineari

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) -> limite per dimensioni
 - e^+e^- : pochi in funzione (tra cui DAFNE), progetti futuri SUPERKEKB (Giappone) in costruzione da KEKB, SUPERB grazie alla nuova idea del crab-waist
- Muon colliders – Neutrino Factories
- Acceleratori a Plasma: il campo elettrico accelerante viene generato da onde di plasma, idea molto innovativa, ancora *under test*

COLLIDERS - 2009

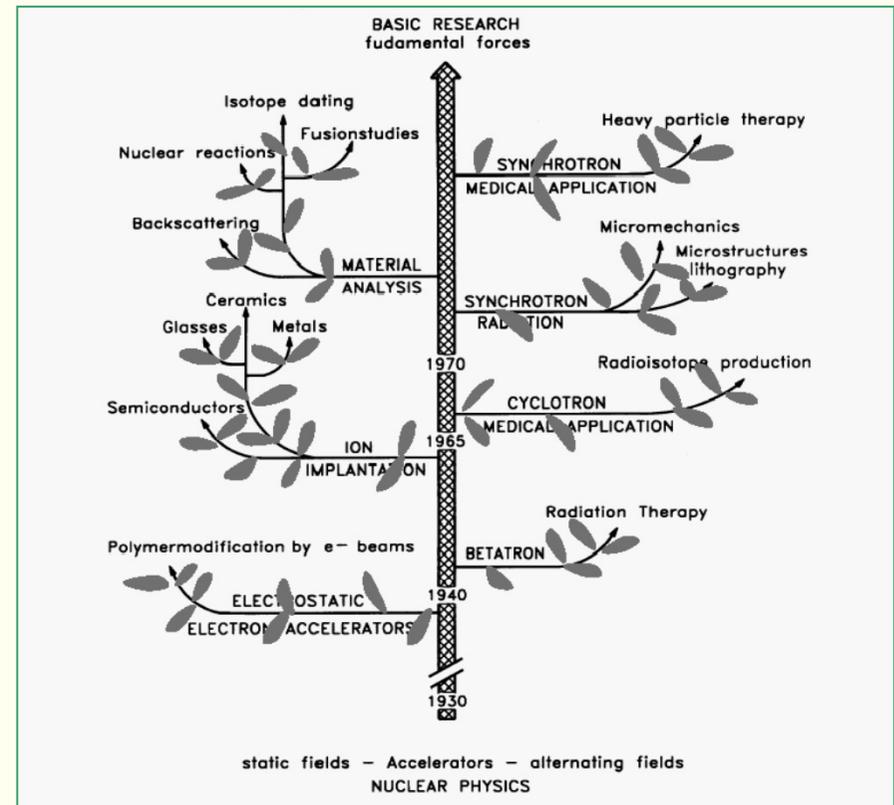
Leptons
Hadrons



Acceleratori nel mondo

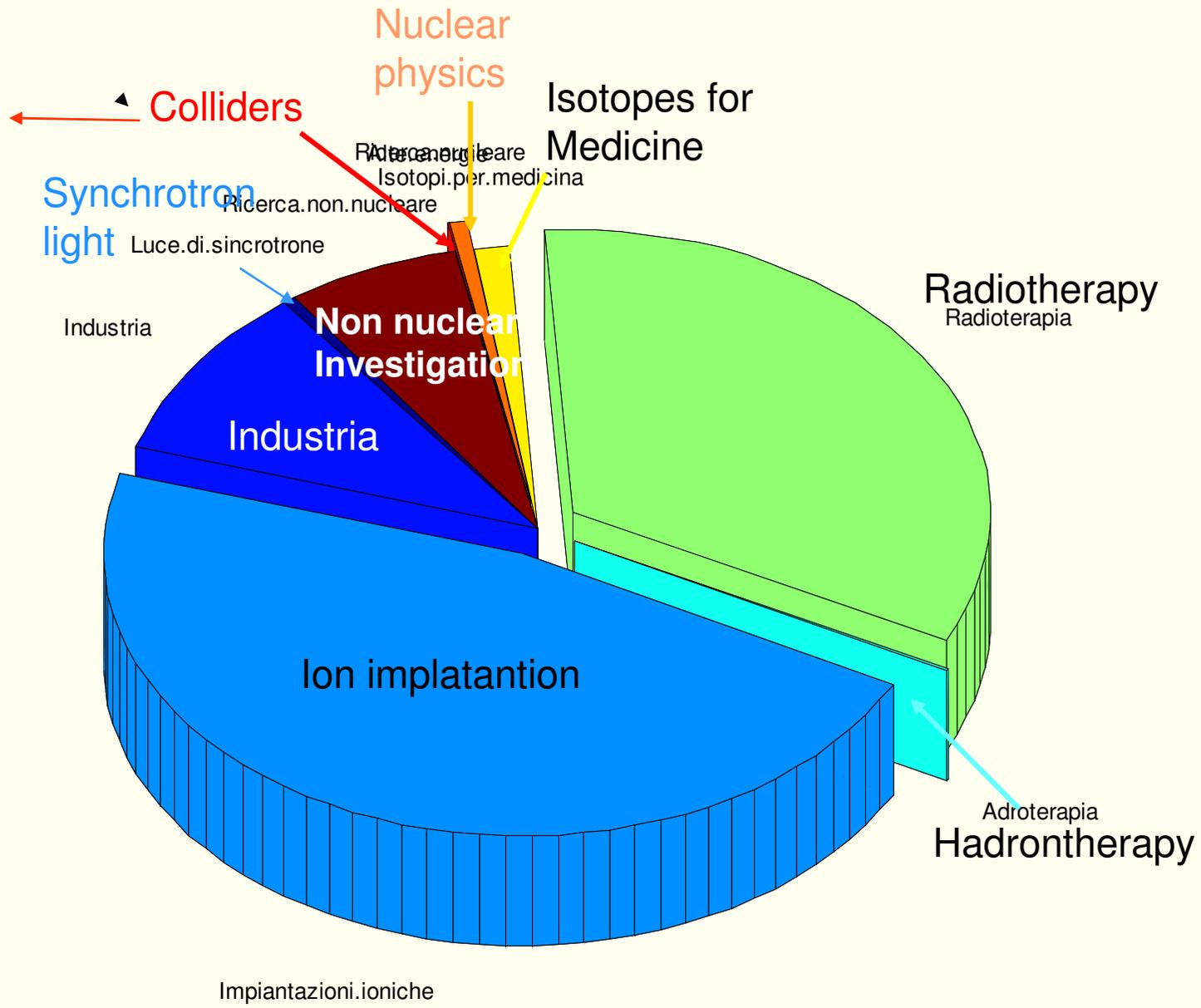
CATEGORIA	NUMERO
Impiantazioni ioniche	7000
Altri acceleratori nell'industria	1500
Acceleratori in ricerca non-nucleare	1000
Radioterapia	5000
Produzione di isotopi per medicina	200
Adroterapia	20
Sorgenti di luce di sincrotrone	70
Ricerca nucleare e subnucleare	110
TOTALE	15000

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

- 1 CERN
- 1 ITALY
- 2 SIBERIA
- 1 CINA
- 1 JAPAN
- 2 USA



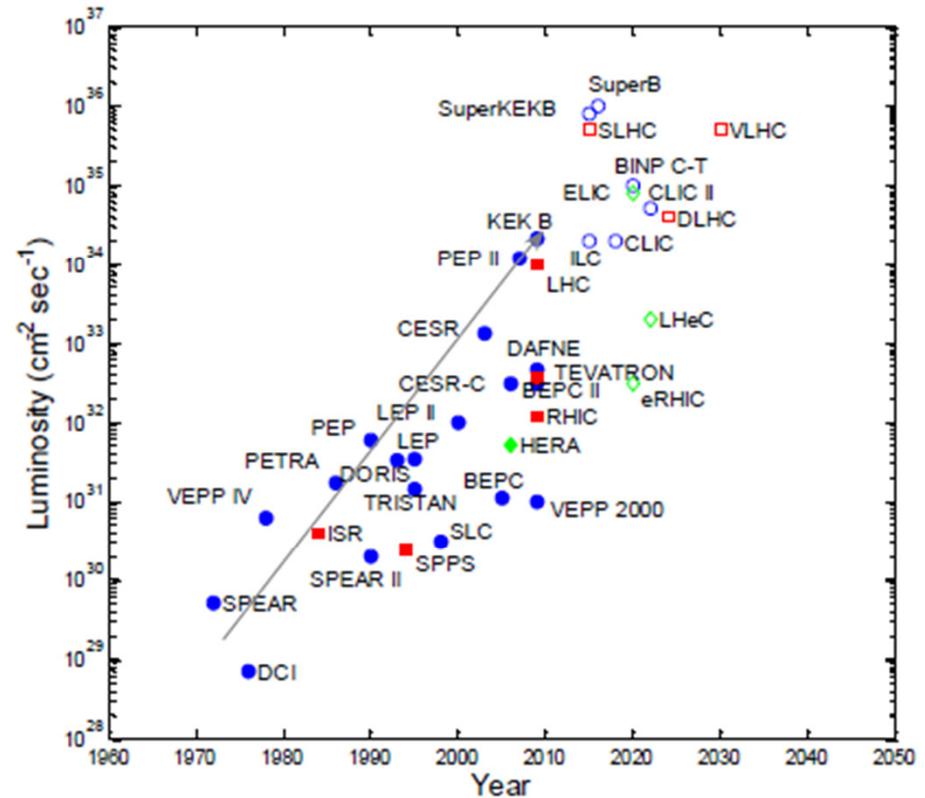
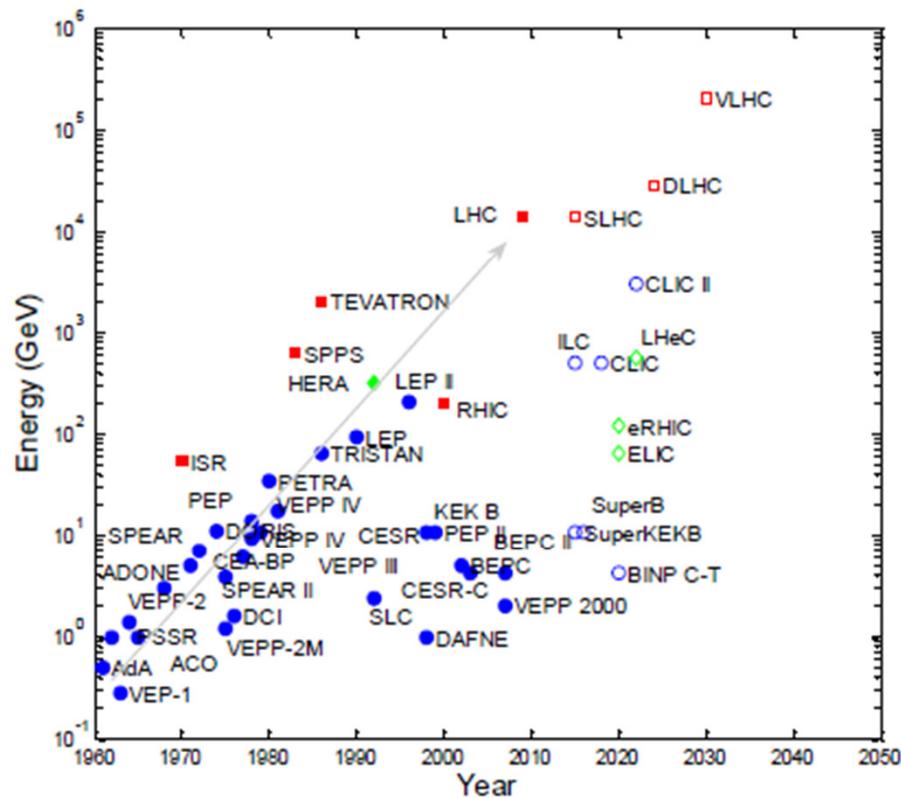
Sviluppo degli Acceleratori

- 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



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

Colliders

Location	Name (type ^[a])	Max. E_{cm} (GeV)	Start
Stanford/SLAC, USA	CBX ^[b] (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 ^[d]
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 ^[d]
	VEP-1 (e^-e^- -DR)	0.26	1963
	VEPP-2/2M (e^+e^- -SR)	1.4	1974
Cambridge, USA	CEA Bypass (e^+e^- -SR)	14	1979
	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
	Sp̄pS (p̄p SR) [9]	630	1981
	LEP (e^+e^- -SR) [10]	190	1989
	LHC (pp DR) [11]	14,000	2004 ^[d]
Brookhaven, USA	RHIC (heavy ions DR) [12]	200/u ^[c]	1999 ^[d]
	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 ^[d]
Beijing, China	BEPC (e^+e^- -SR) [15]	3.1	1989
Fermilab, USA	Tevatron (p̄p SR) [16]	1800	1987

DR: Double storage ring

SR: Single storage ring

LC: Linear collider

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

Colliders: Alta Energia

LHC

LEP al CERN di Ginevra 1988-2001

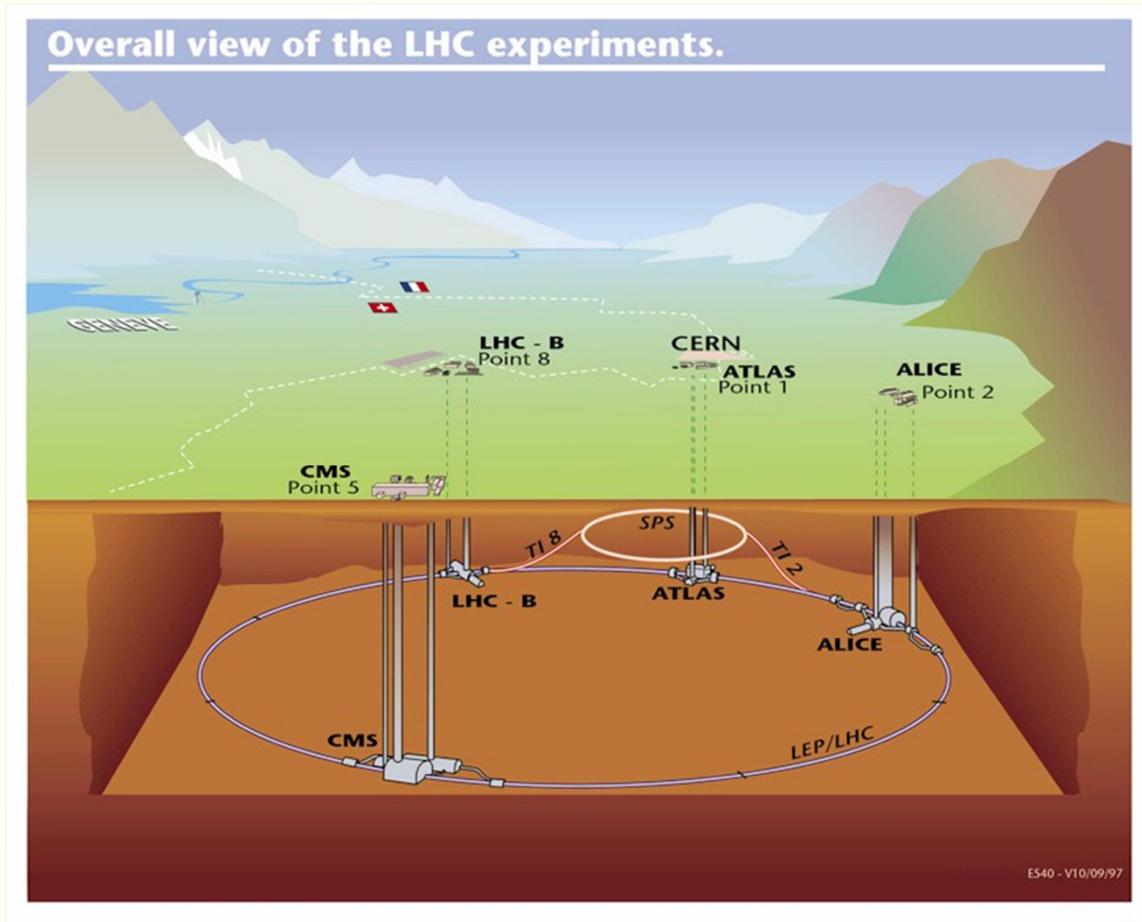
Il collisore e^+e^- a più alta energia: $E_{CM}=209$ GeV,
Circonferenza ~ 27 Km



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

LHC dipoles

Helium @ 1.9 K

Horizontal force at 8,33 T (inner and outer layer) 1,7 MN/m

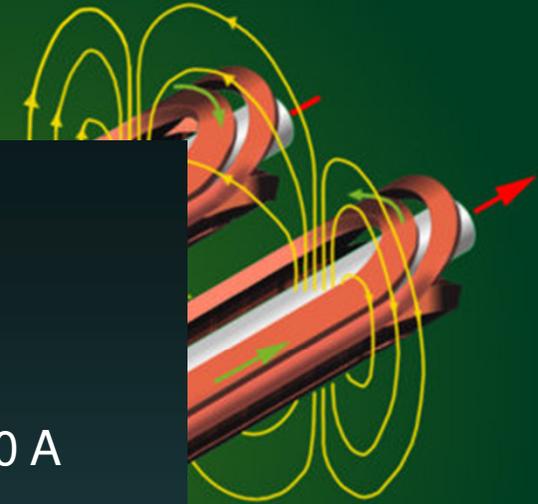
Composition of the superconducting alloy Ni-Ti (47Wt% Ti)

Maximum current with NO resistance (1,9 K e 8,33 T) 17000 A

Number de strands per cable 36

Number de Ni-Ti filaments in each strand 6500

Bending radius 2803.95 m



Force on the cable: $F = B * I_0 * L$

with

$B = 8.33 \text{ T}$

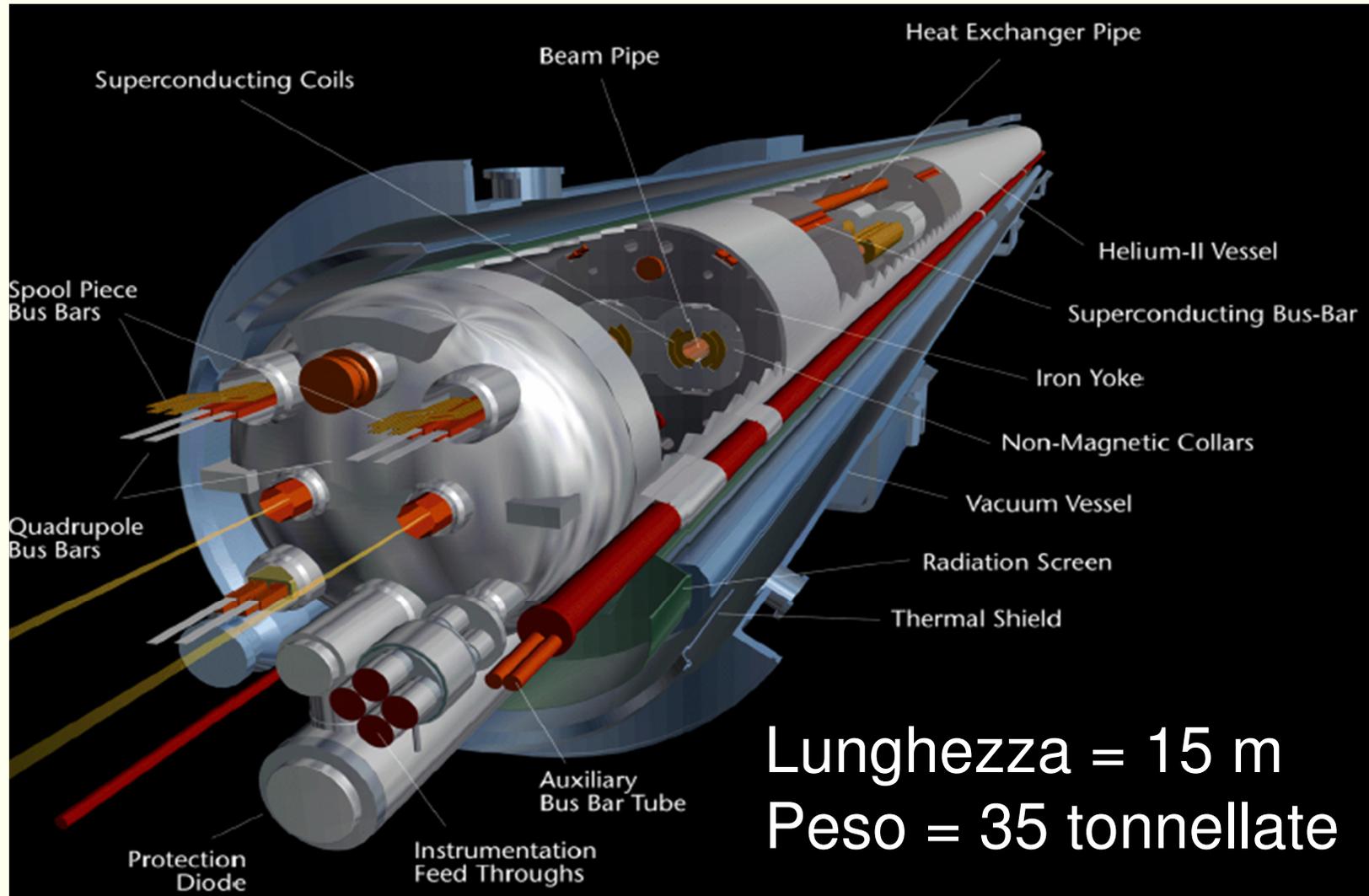
$I_0 = 12000 \text{ Ampere}$

$L = 15 \text{ m}$

$F = 165 \text{ tons}$

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, Masterclass LNF – 31 gennaio 2012

Machine protection – the challenge

Situation at 3.5 TeV (in August 2011)

Beam

100 MJ

56 mm

SC Coil:

quench limit

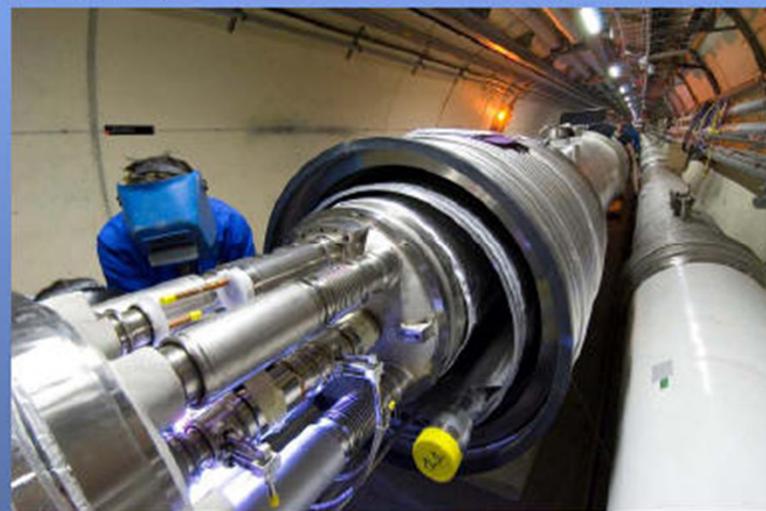
15-100 mJ/cm³

Not a single beam-induced quench
at 3.5 TeV

... YET

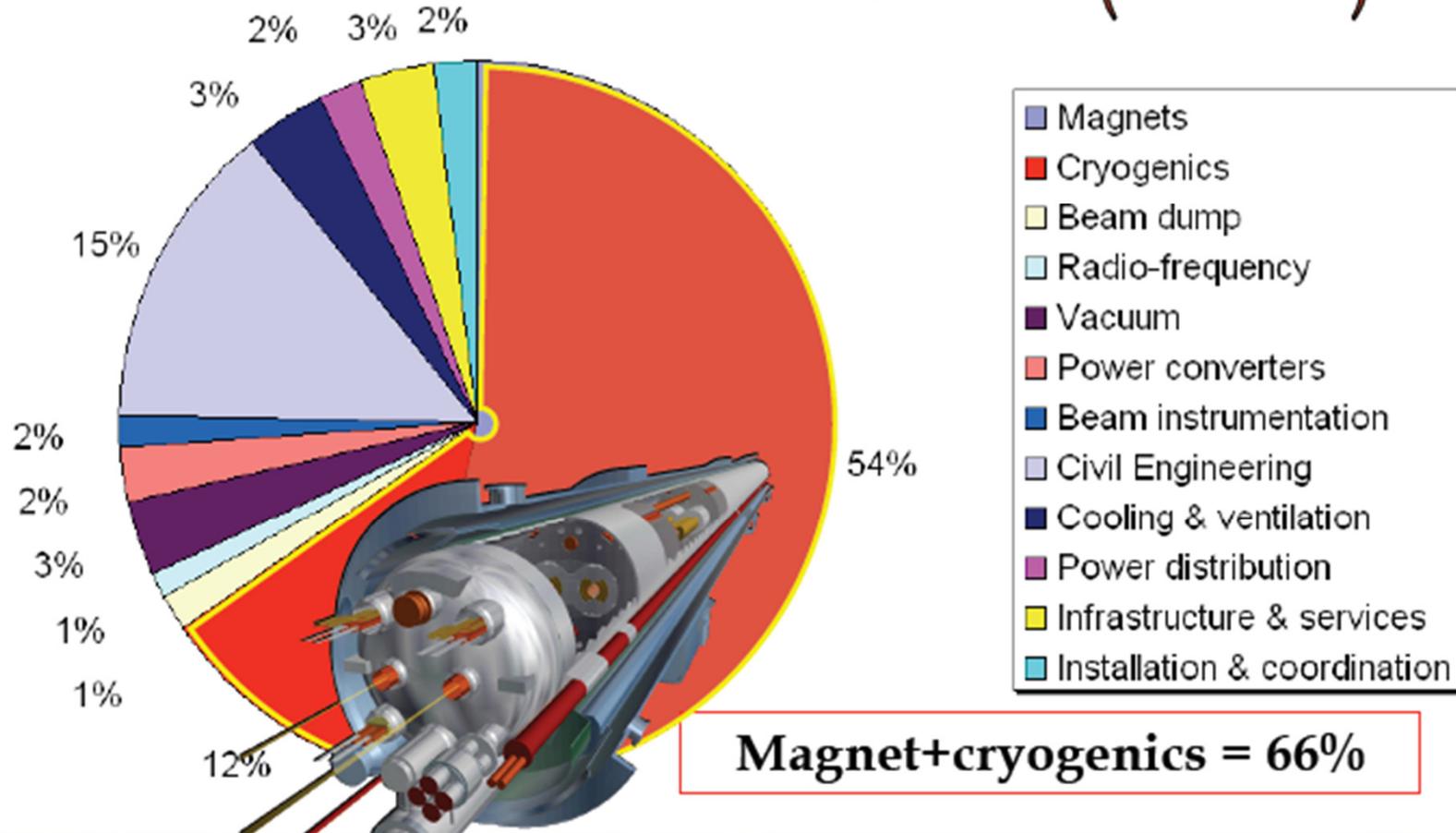
11 magnet quench at 450 GeV –
injection kicker flash-over

Underground



Costo di LHC

Total cost: 3.5 BCHF (Material)



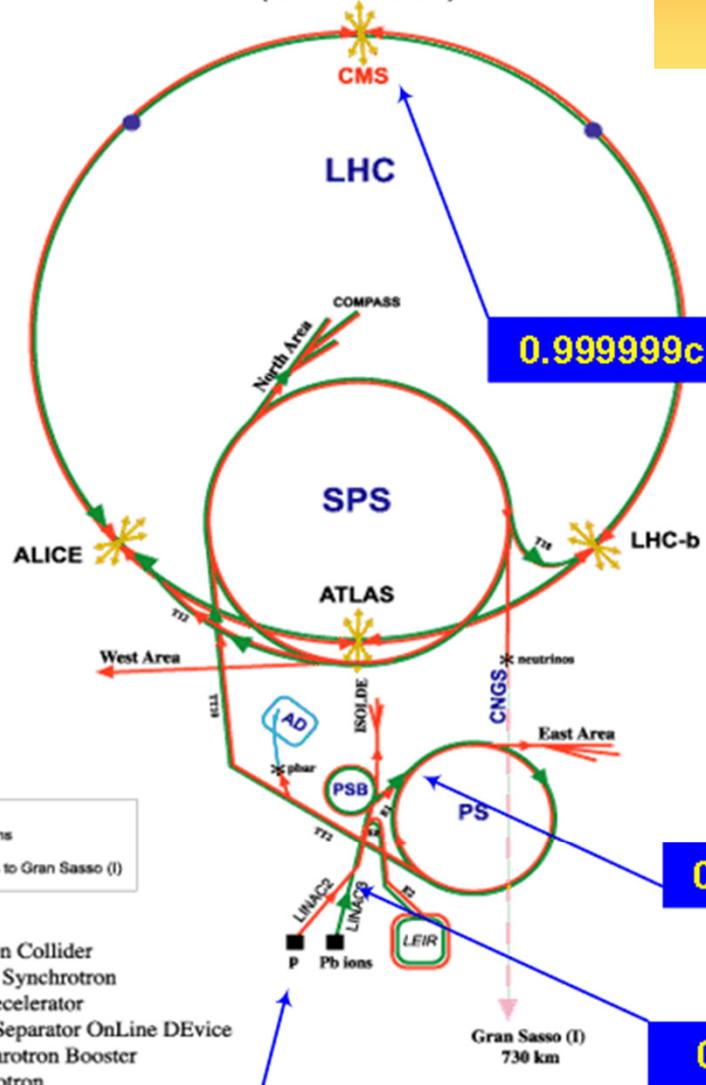
Circa $6 \cdot 10^9$ € costo dell'acceleratore

LHC



Schema del complesso degli acceleratori del CERN

CERN Accelerators
(not to scale)



0.999999c by here

0.87c by here

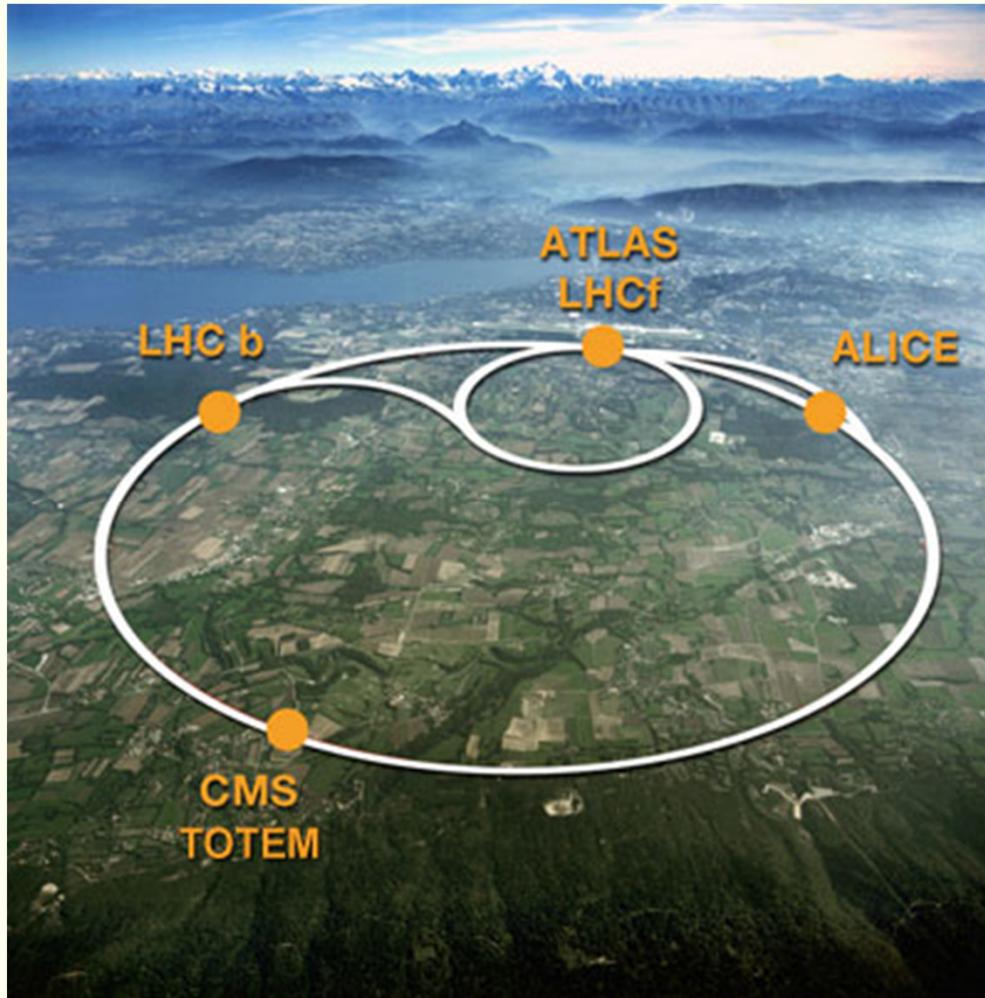
0.3c by here

Start the protons out 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

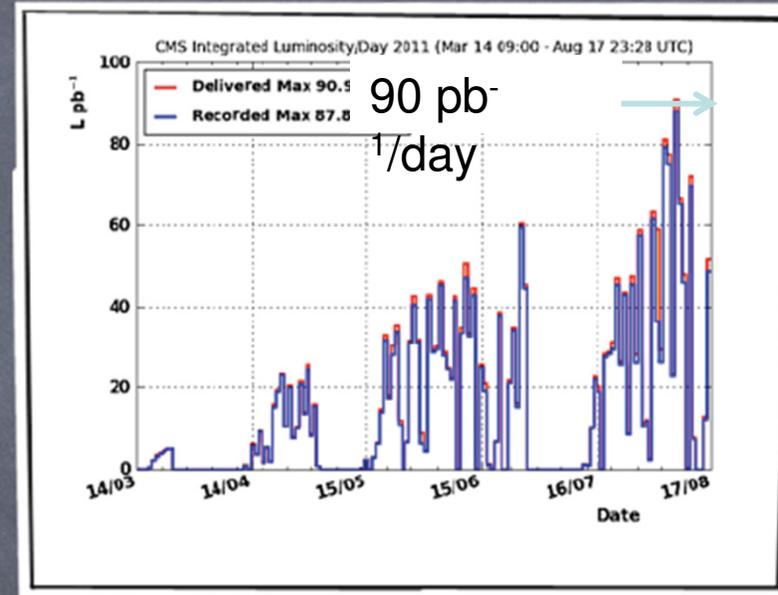
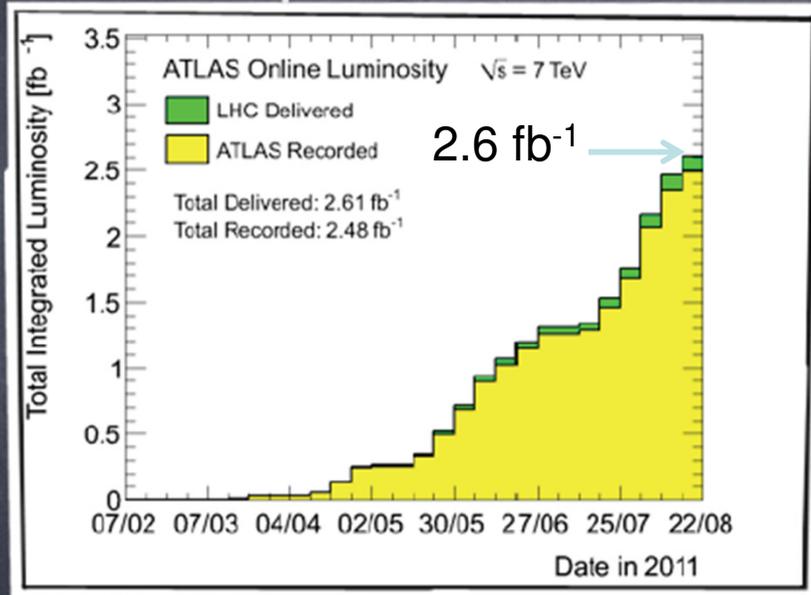
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglunki, PS Div. CERN, 23.05.01



4 esperimenti di LHC sono guidati da 4 fisici italiani (uno di questi è P. Campana) a dimostrazione del livello dei nostri scienziati in fisica nella comunità internazionale

2011 - Oh What a Year

- The new thumb rule:
 $\sim 500 \text{ pb}^{-1}/\text{week}$ and more to come



- 50 ns bunch trains with 6-8 interactions/crossing
- The analyses presented here are based on $1-2.3 \text{ fb}^{-1}/\text{experiment}$

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>

Frontiere della Luminosità nelle *Factories* a leptoni (e^+e^-)

Fabbriche a e^+e^- , 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

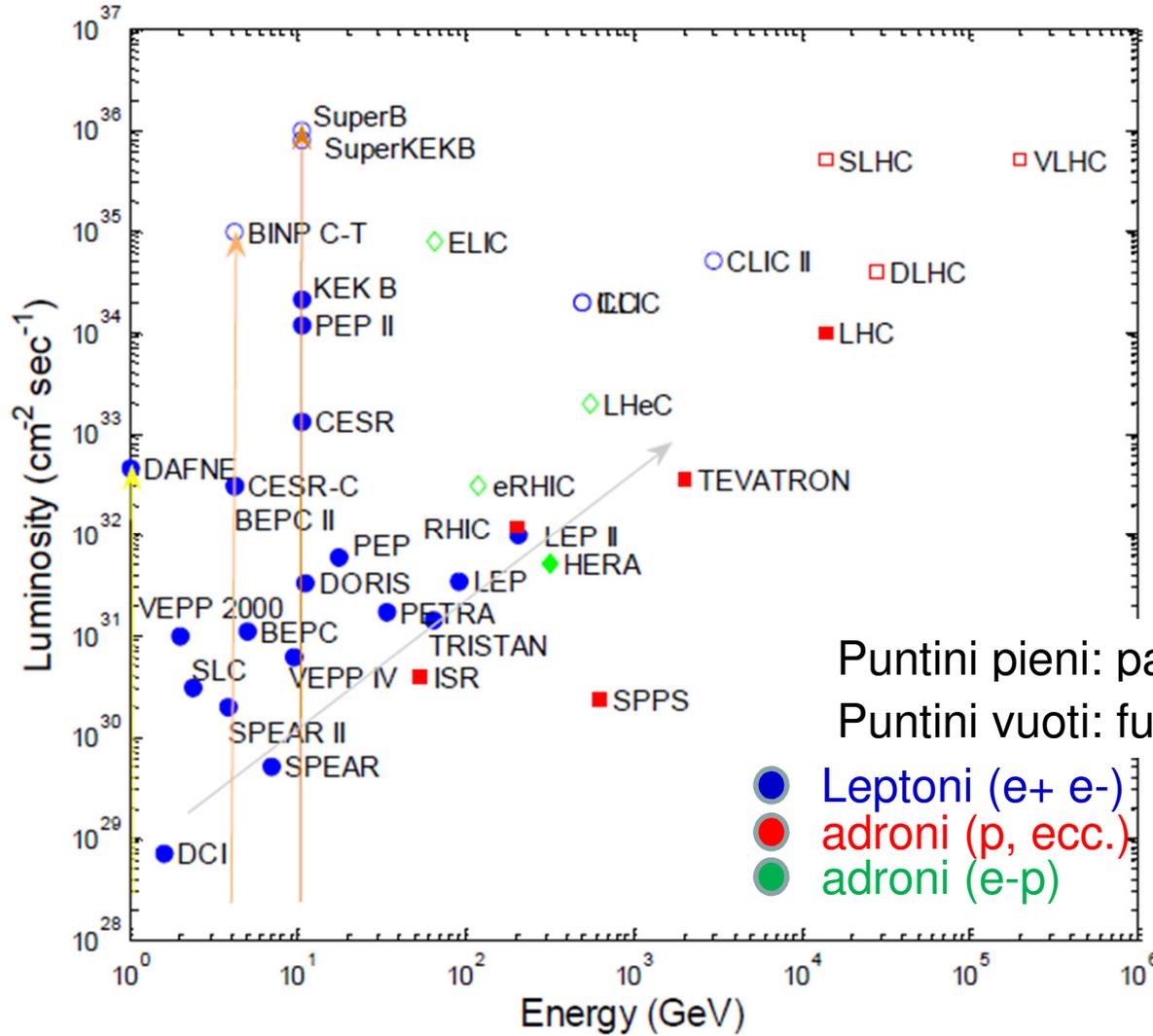
Fascio tondo

Crab-waist (Superb)

Crab-cavity

Crab-waist

Luminosità in funzione dell'energia



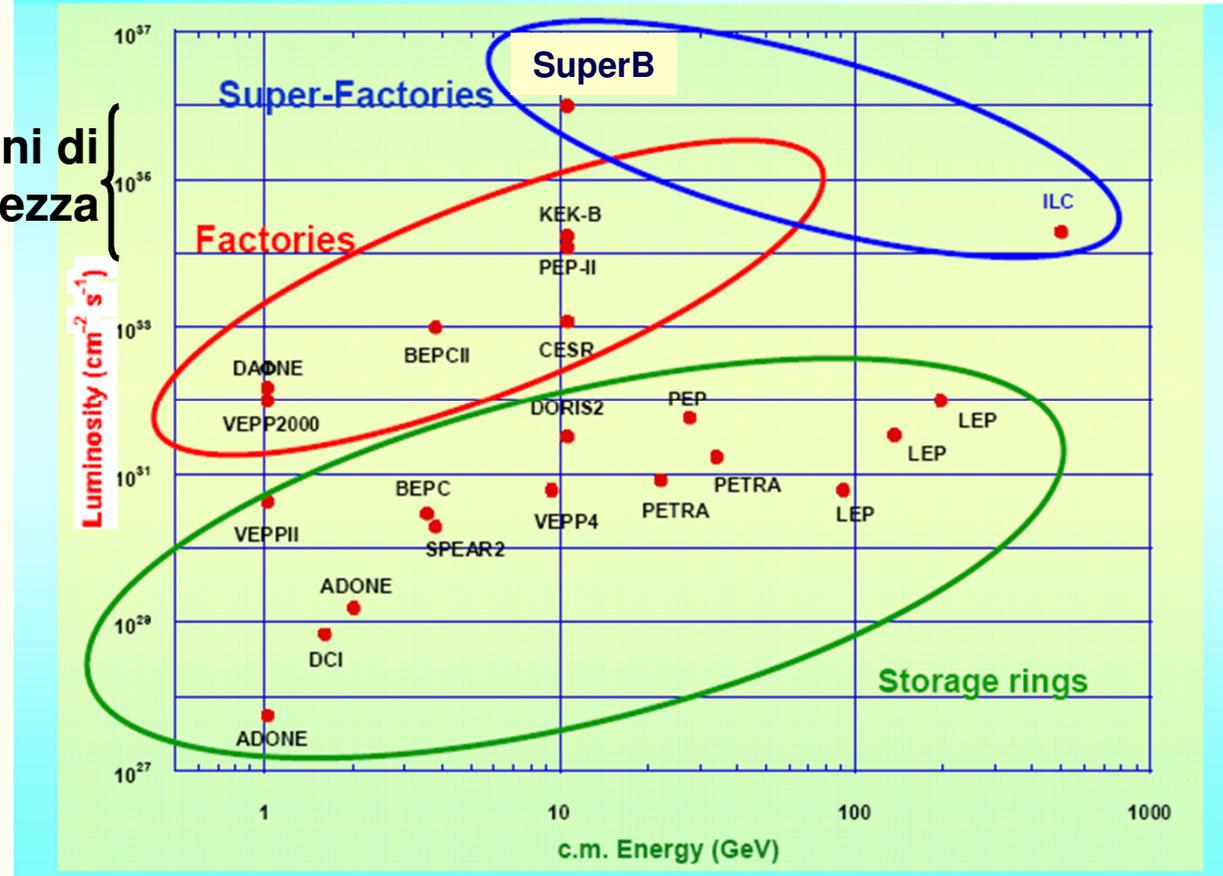
Puntini pieni: passati e presenti
Puntini vuoti: futuri

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

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

$e^+ e^-$ colliders

due ordini di grandezza

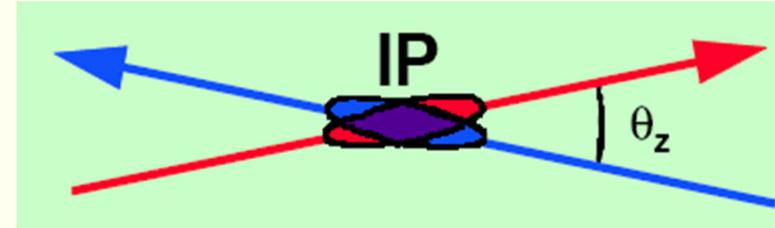


Per un aumento simile di luminosità ci vuole un'idea nuova, che cambi il modo di progettare un collider

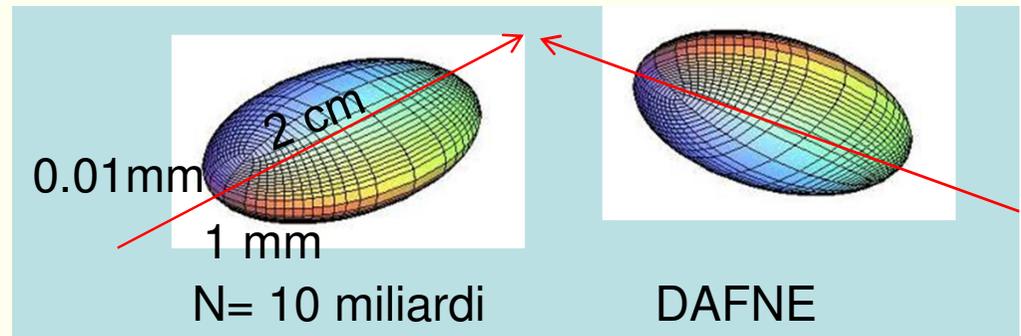
Luminosità

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

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



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



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

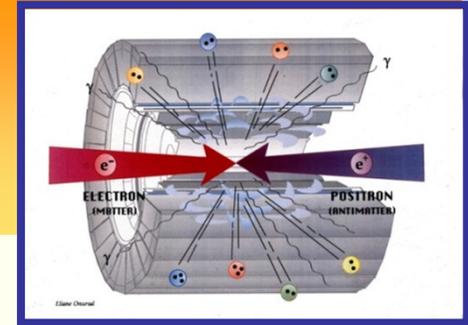
f frequenza

A area trasversa occupata dai due pacchetti all'IP

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

$$f_{\text{revolution}} = c / L$$

Luminosità



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

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

gli eventi sono ad esempio l'annichilazione di materia-antimateria nel punto di collisione per un dato processo

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

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

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

Esempio: produzione di Φ a DAΦNE

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

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

$\sim 3 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1} \times 100 \text{ pacchetti}$ (pointing to $f_{\text{collisione}}$)

1 mm (pointing to σ_x)

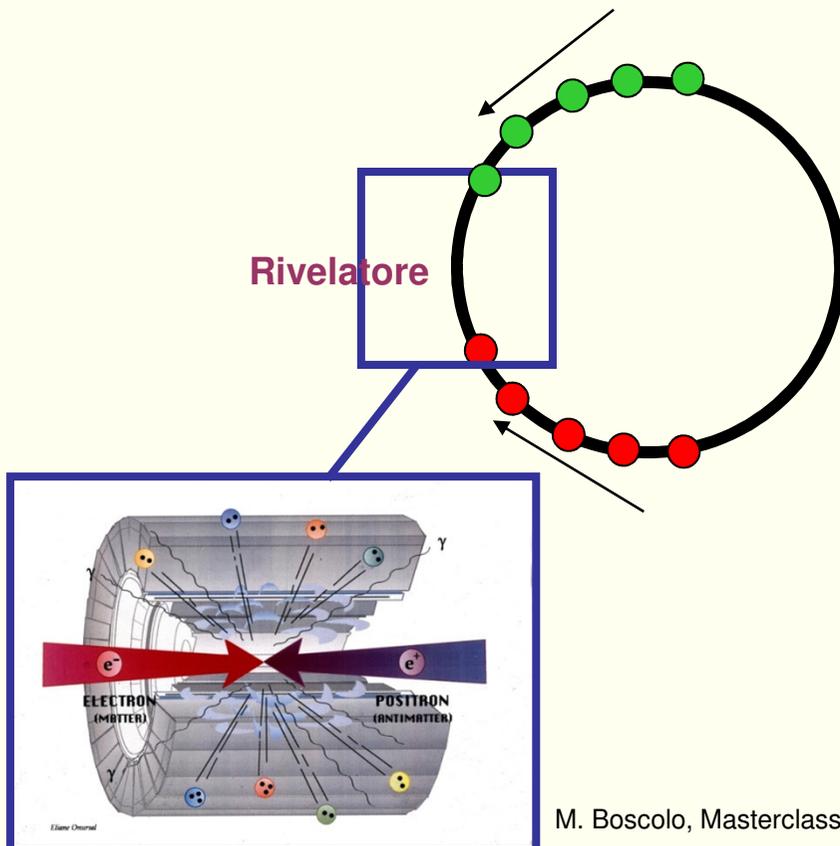
0.01 mm (pointing to σ_y)

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

frequenza degli eventi $L \sigma = 300$ eventi/s

Quando due fasci si intersecano nel punto di interazione (IP) in un collisore succedono due cose:

1. una particella interagisce con una singola particella del fascio opposto producendo **eventi di fisica**.
2. una particella vede il fascio opposto come un insieme di cariche puntiformi (**interazione fascio-fascio**)



Le interazioni del caso 1. sono quelle che studiano i fisici sperimentali.

Le interazioni del caso 2. sono quelle che vanno ottimizzate per avere un buon *collider*.

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

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)

Raggiunto il limite massimo di densità delle particelle in un pacchetto, come si aumenta la luminosità?

Schema di collisione del **crab waist** è una soluzione!

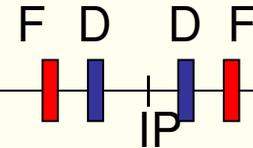
Idea innovativa di P. Raimondi, fisico italiano, a Frascati

Regione d'interazione: schema tradizionale

FOCALIZZAZIONE CON DOPPIETTO di quadrupoli FODO

LOW-BETA SCHEME

β_y e β_x minimi all'IP

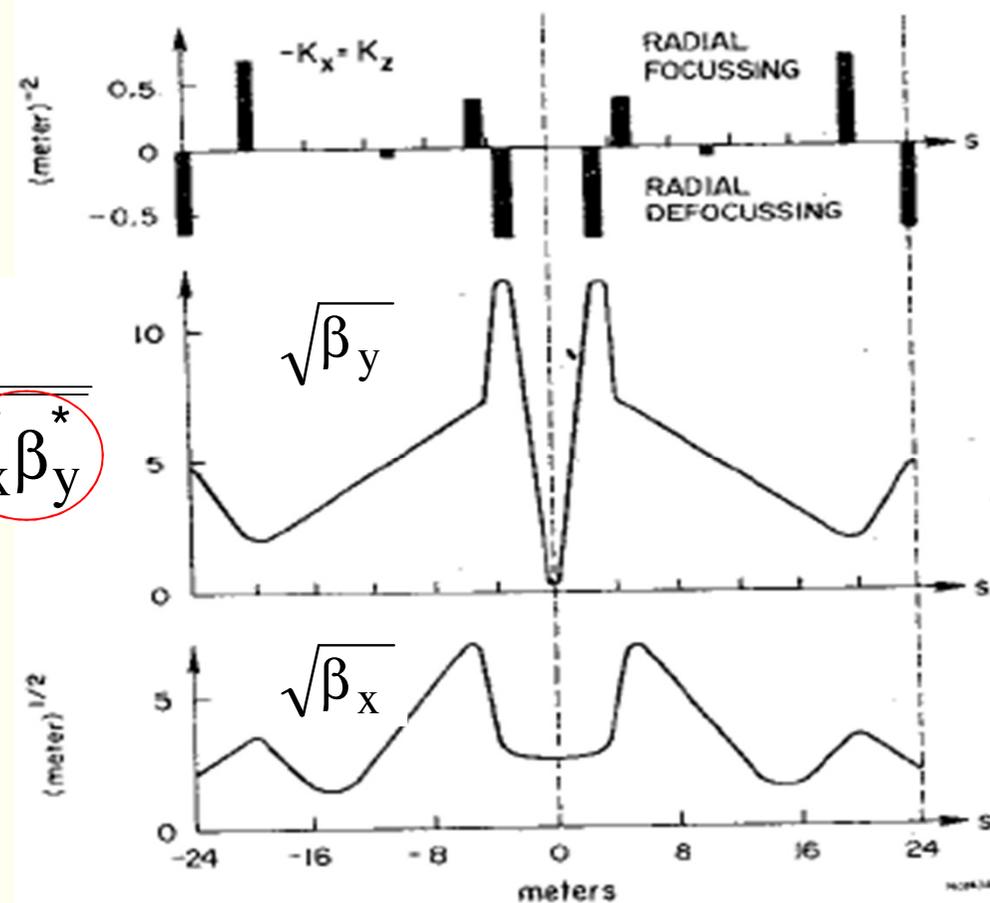


FATTORI GEOMETRICI

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

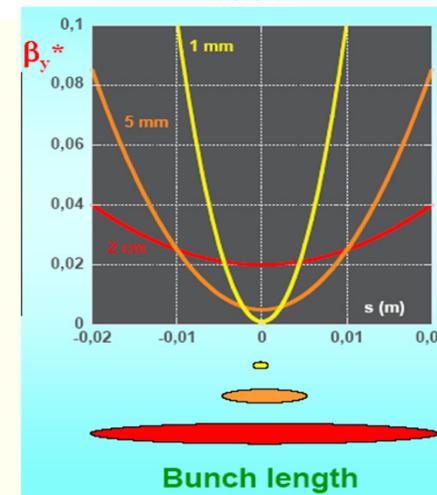
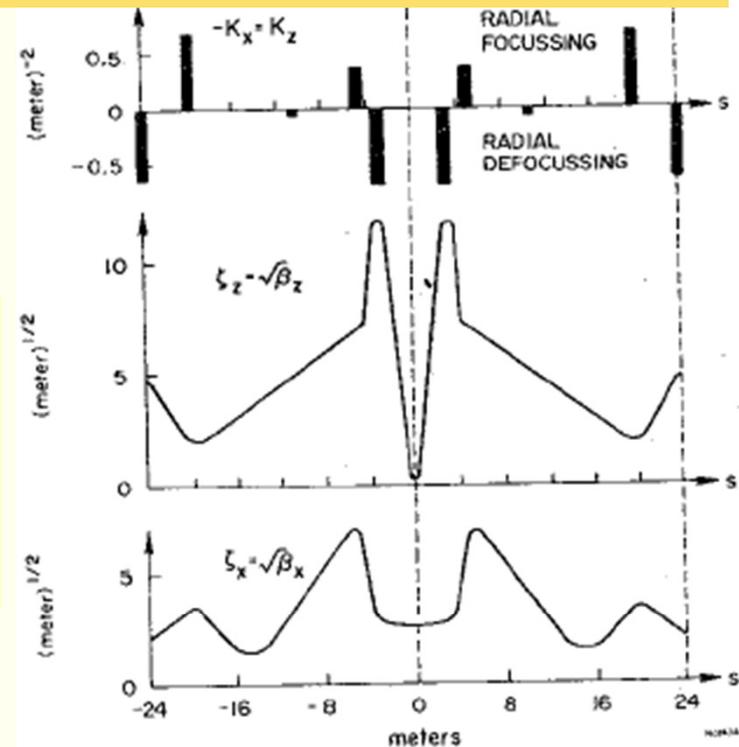
Limite inferiore per β_y all'IP è imposto dall'EFFETTO CLESSIDRA (*hourglass effect*)

the hourglass effect consists in a luminosity decrease that occurs when the bunch lengths are comparable to or larger than β_x^* or β_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 β_y quindi σ_z più piccolo possibile

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

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

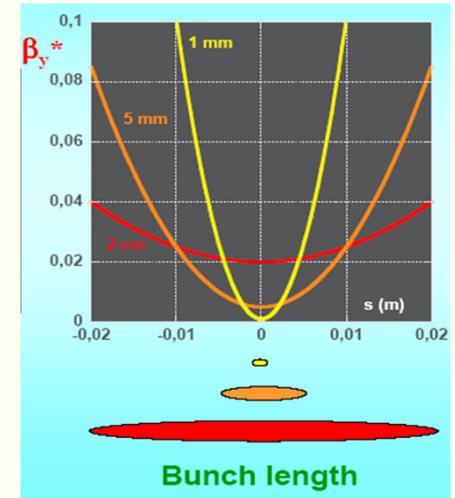


MA: **piccolo β_y all'IP** implica β_y grande nei *low- β* quads

$$\beta_{x,y}(s) = \beta_{x,y}^* \left[1 + \left(\frac{s}{\beta_{x,y}^*} \right)^2 \right]$$

tra l'IP e il primo
quadrupolo del *low- β*

più piccolo $\beta_{x,y}^*$ più velocemente cresce la funzione di β
allontanandosi dall'IP



Le inserzioni *low- β* producono solo una regione localizzata di piccola β verticale, necessaria per raggiungere alta luminosità.

Il punto di minima *dimensione trasversa* del fascio è all'IP

Le funzioni di β grandi nei quadrupoli defoccheggianti vicino all'IP inducono:

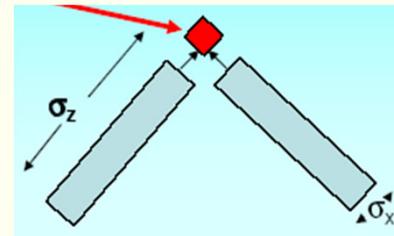
- cromatismo verticale grande e molto negativo
- più forti sestupoli di correzione
- apertura dinamica più piccola
- vita media più corta

Crab-Waist Scheme

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

1. grande angolo di Piwinski (LPA)

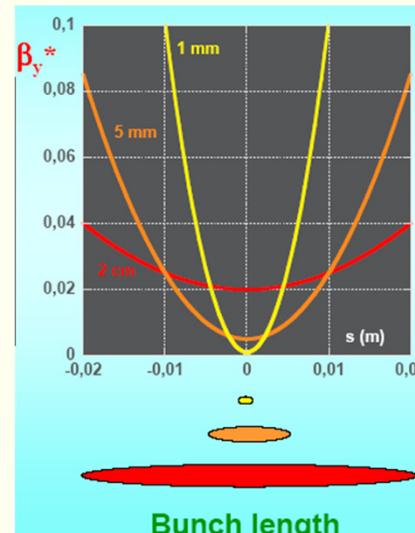
Con un grande angolo di Piwinski l'area di sovrapposizione dei due fasci in collisione diventa più piccola (inoltre, gli incroci parassiti diventano trascurabili)



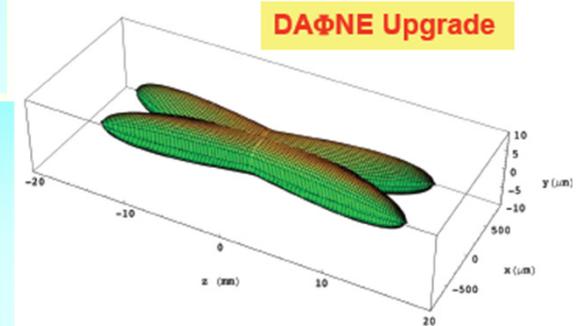
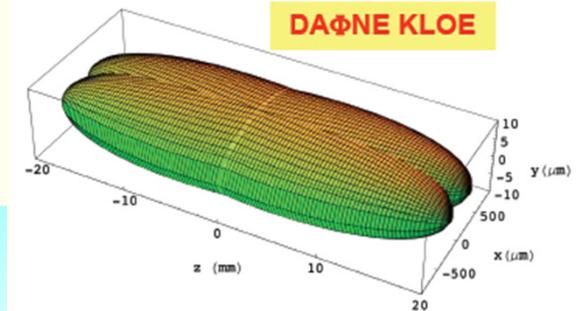
2. β_y all'IP \approx regione di sovrapposizione dei due fasci

questo permette di avere β_y all'IP più piccoli e quindi luminosità maggiore

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



beam distribution at IP



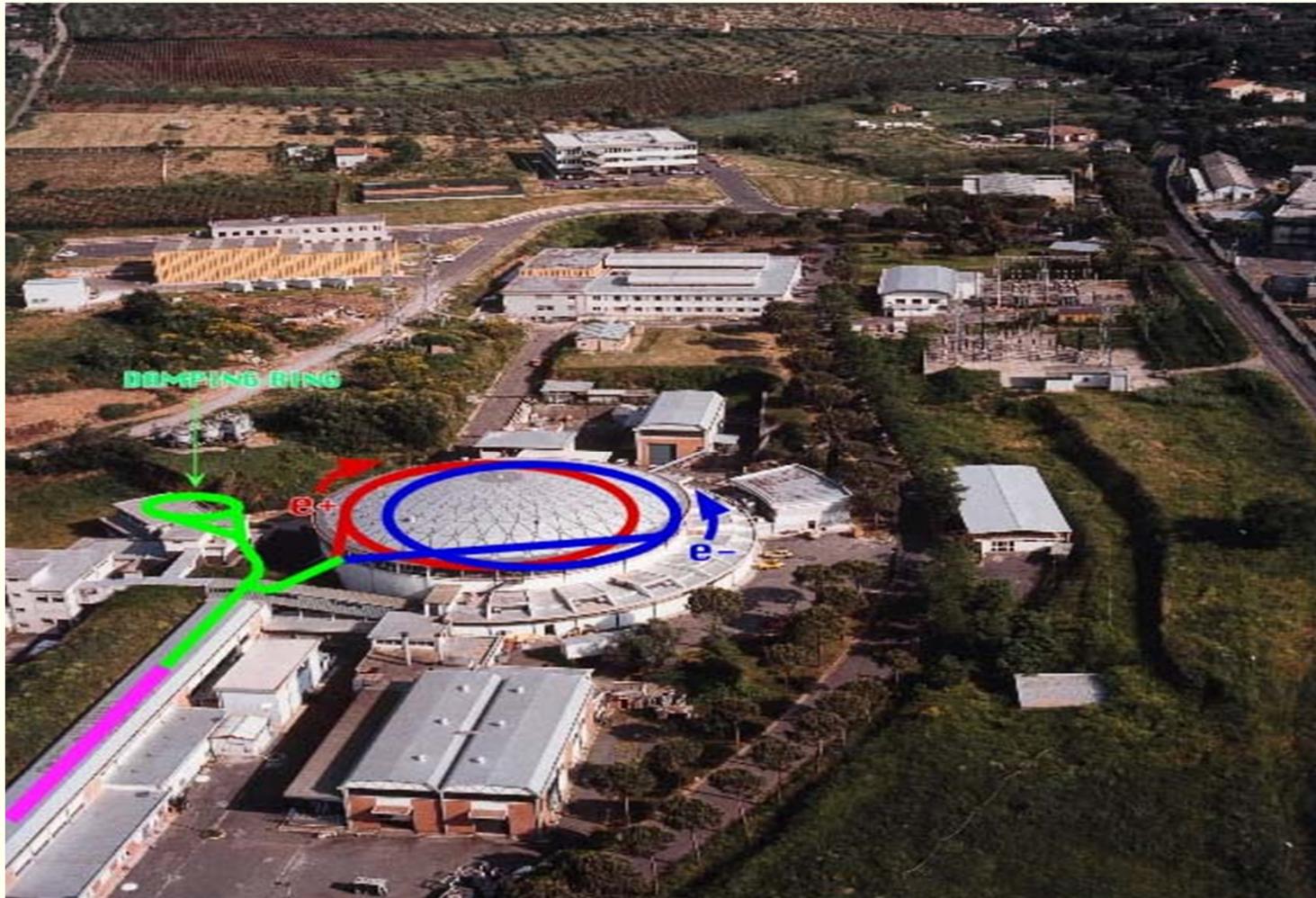
3. due sestupoli detti di crab con fase giusta rispetto all'IP (CW)

P. Raimondi, Nov. 2005/March 2006

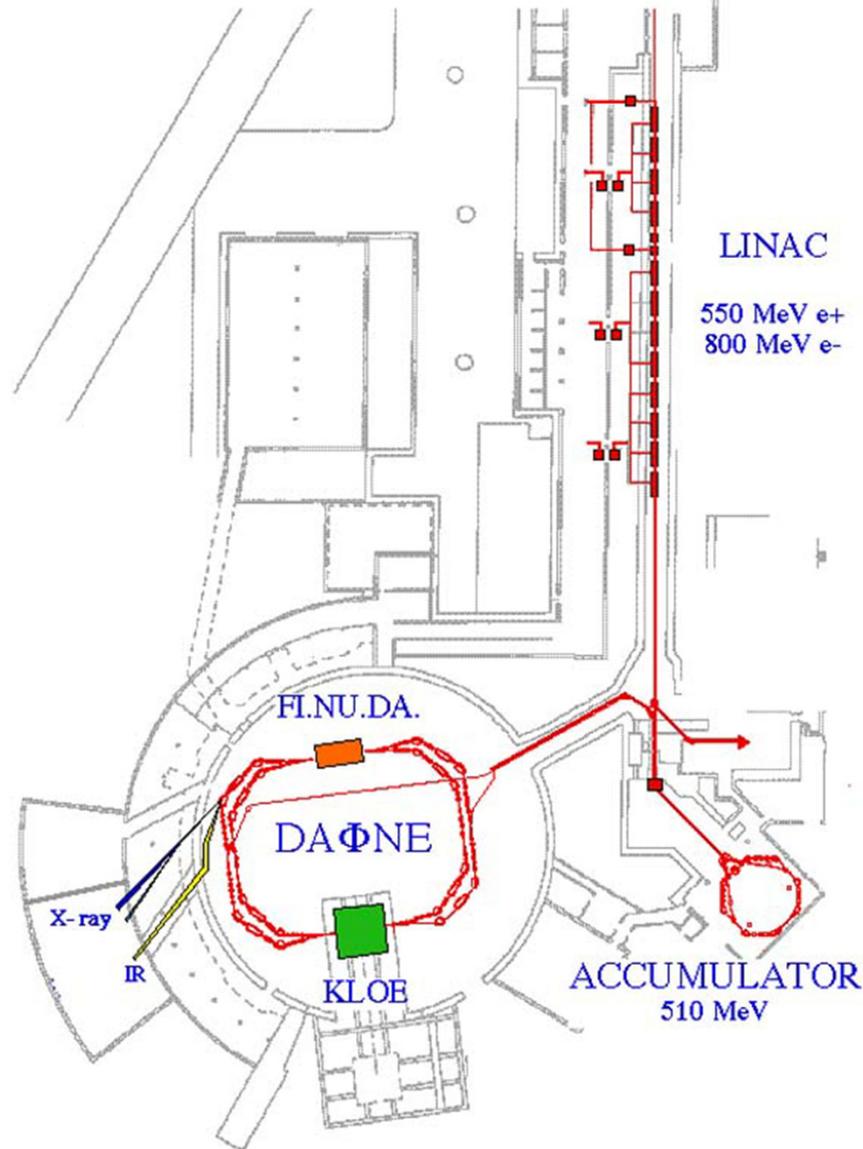
PRL **104**, 174801 (2010)

Φ factory: DAΦNE ai LNF

Double Annular Φ or Nice Experiments



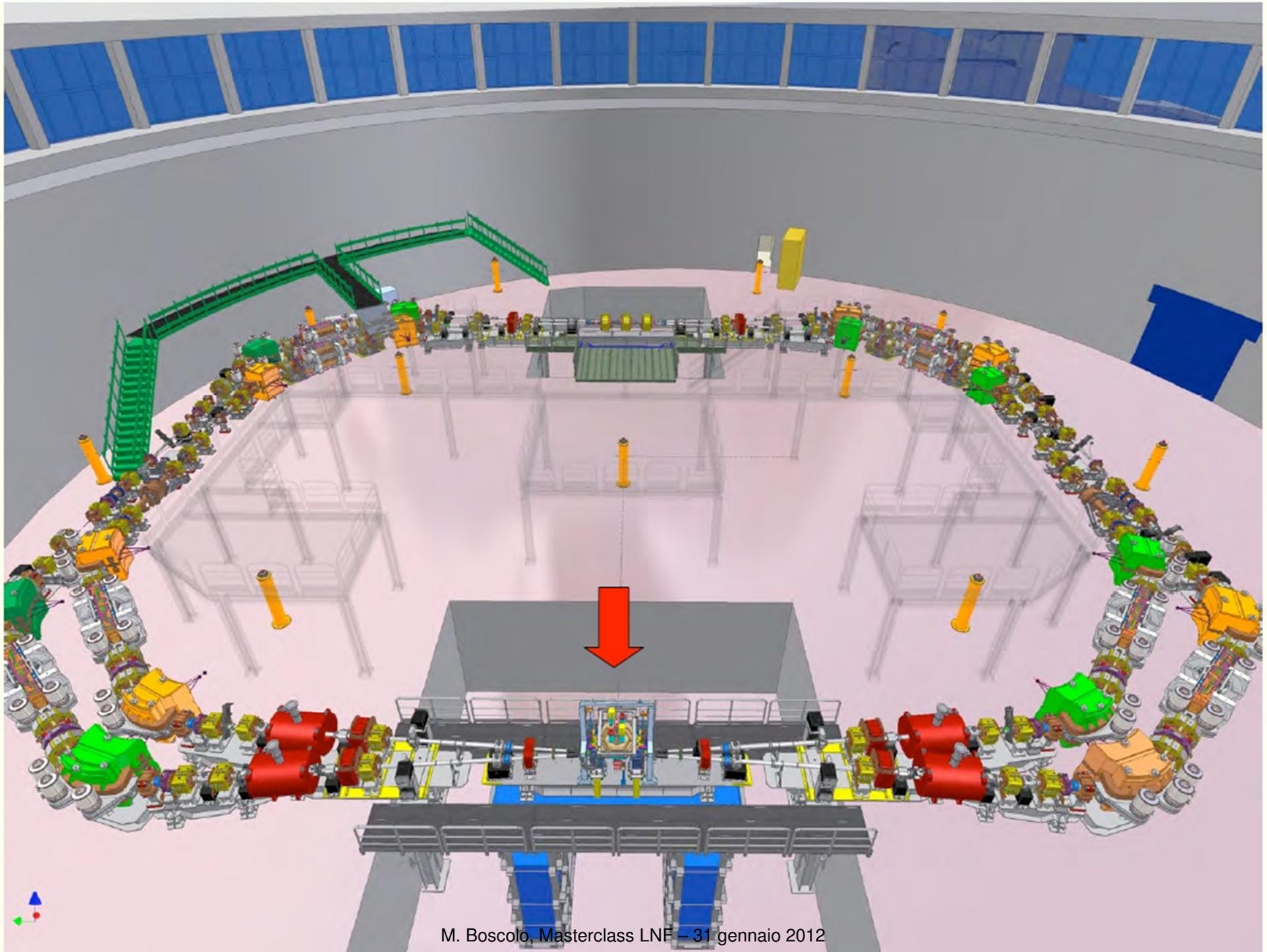
The Frascati Φ -Factory



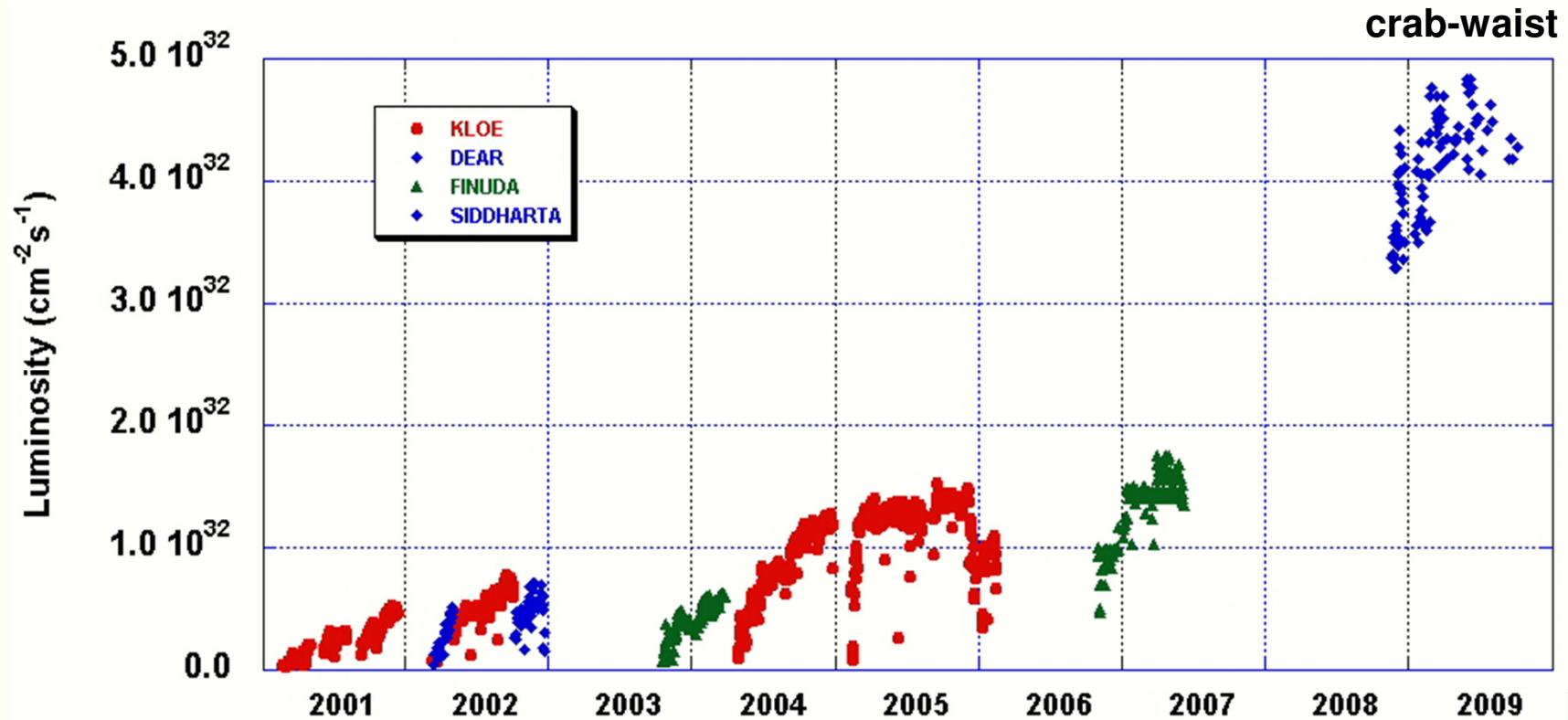
IL complesso di DAΦNE è formato da tre elementi:

- (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

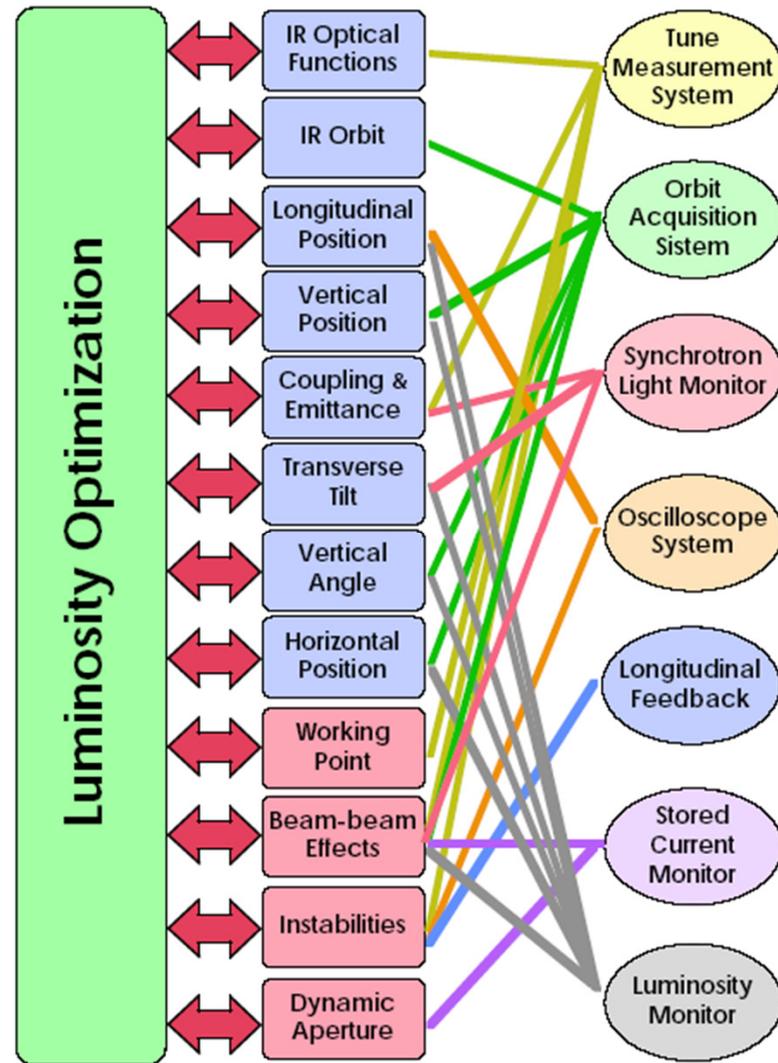
e+ mA

1002

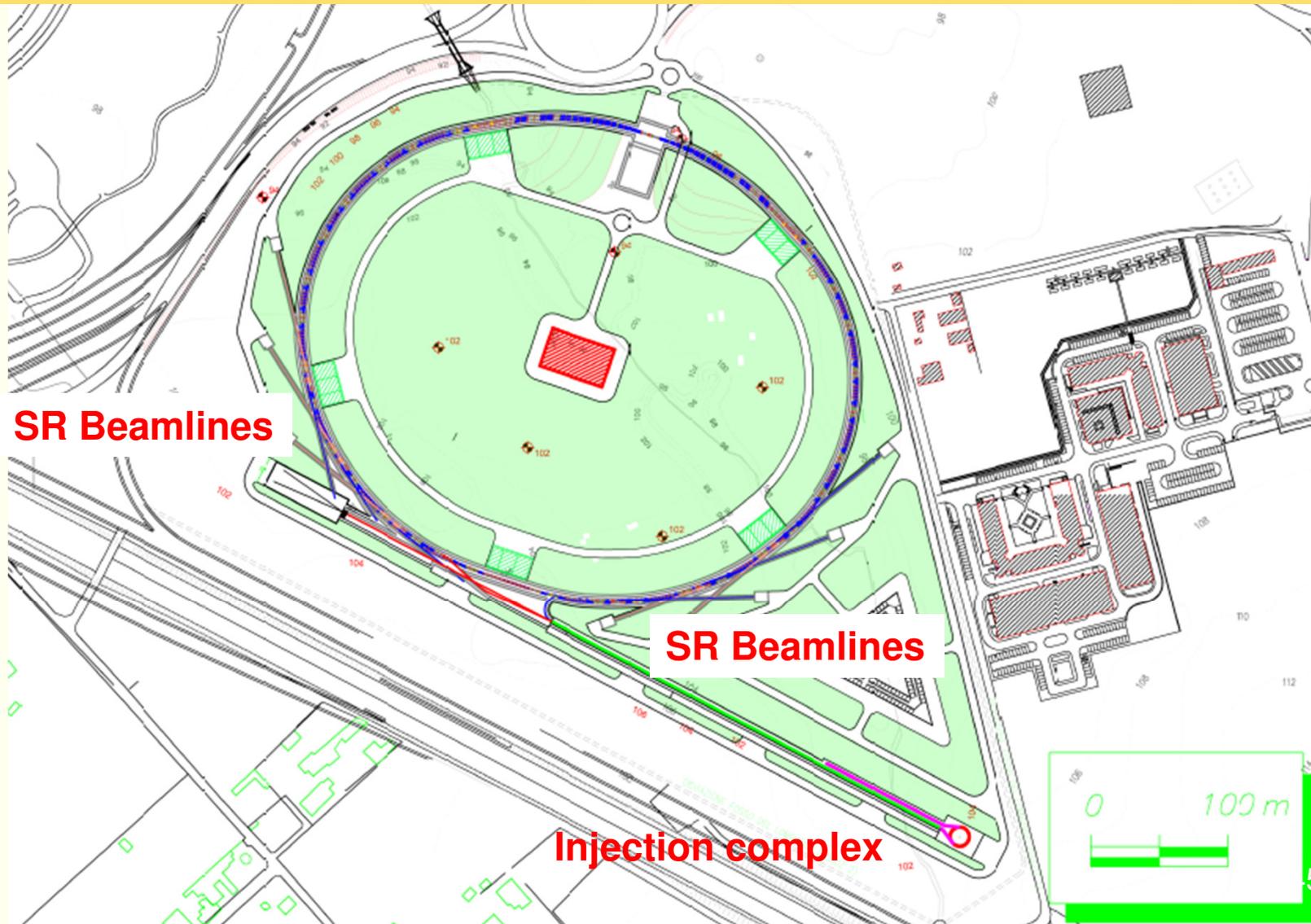
4.53E+32

t2farm

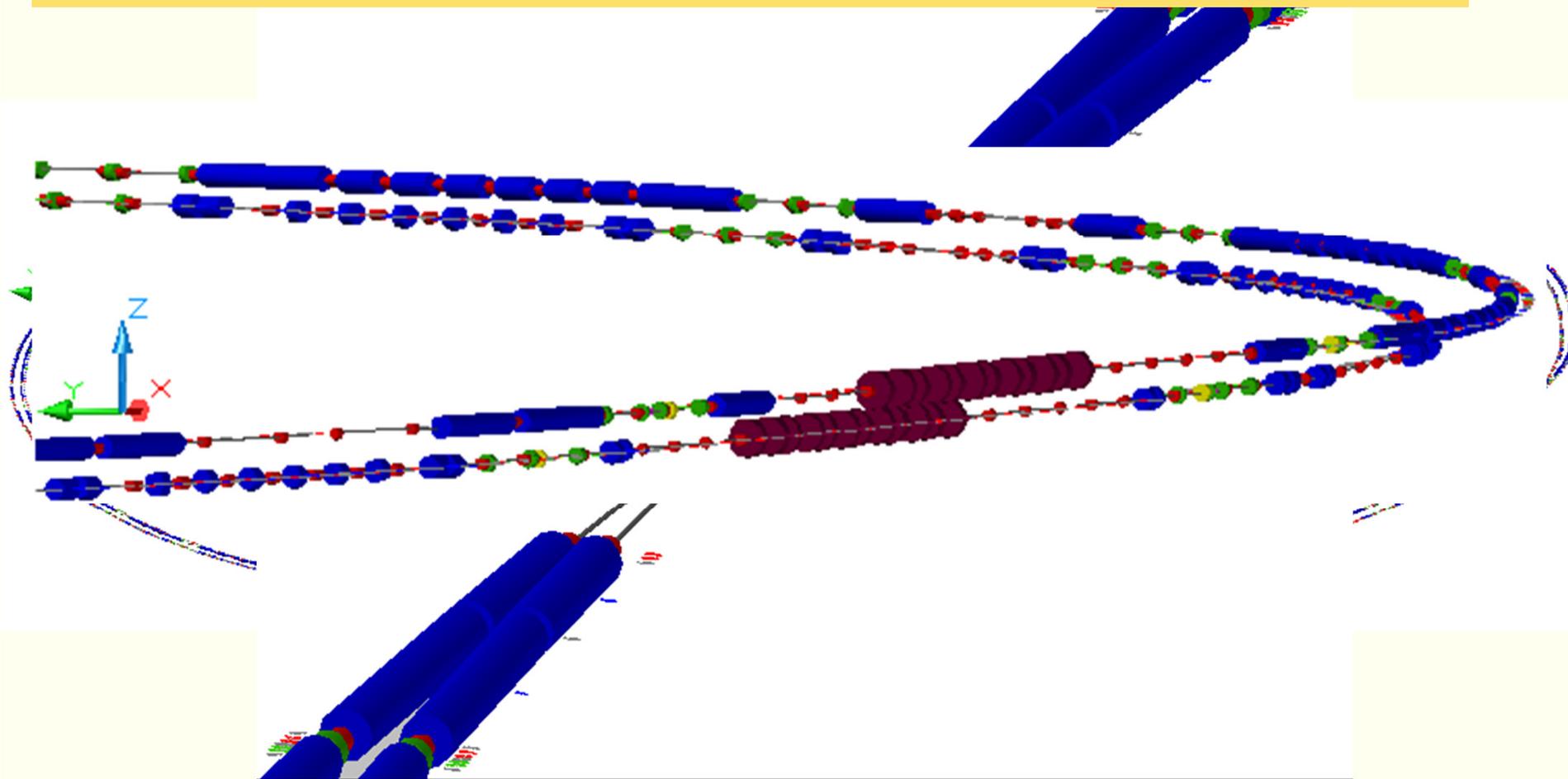
luminosity optimization needs long machine tuning!



SuperB @ Tor Vergata



Visione più da vicino dei due anelli



Parameter list

Parameter	Units	Base Line		Low Emittance		High Current		τ /charm	
		HER (e+)	LER (e-)	HER (e+)	LER (e-)	HER (e+)	LER (e-)	HER (e+)	LER (e-)
LUMINOSITY (10^{36})	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1		1		1		1	
Energy	GeV	6,7	4,18	6,7	4,18	6,7	4,18	2,58	1,61
Circumference	m	1195		1195		1195		1195	
X-Angle (full)	mrad	60		60		60		60	
Piwinski angle	rad	20,11	17,25	29,42	23,91	13,12	10,67	8,00	6,50
β_x @ IP	cm	2,6	3,2	2,6	3,2	5,06	6,22	6,76	8,32
β_y @ IP	cm	0,0253	0,0205	0,0179	0,0145	0,0292	0,0237	0,0658	0,0533
Coupling (full current)	%	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,5	0,25	0,25
ϵ_x (without IBS)	nm	2,00	1,7	1,00	0,91	1,97	1,82	1,97	1,82
ϵ_x (with IBS)	nm	2,14	2,363	1,00	1,23	2,00	2,46	5,20	6,4
ϵ_y	pm	5,35	5,9075	2,5	3,075	10	12,3	13	16
σ_x @ IP	μm	7,459	8,696	5,099	6,274	10,060	12,370	18,749	23,076
σ_y @ IP	μm	0,037	0,035	0,021	0,021	0,054	0,054	0,092	0,092
Σ_x	μm	11,457		8,085		15,944		29,732	
Σ_y	μm	0,051		0,030		0,076		0,131	
σ_L (0 current)	mm	4,69	4,29	4,73	4,34	4,03	3,65	4,75	4,36
σ_L (full current)	mm	5	5	5	5	4,4	4,4	5	5
Beam current	mA	1892	2447	1460	1888	3094	4000	1365	1766
Buckets distance	#	2		2		1		1	
Buckets distance	ns	4,20		4,20		2,10		2,10	
Ion gap	%	2		2		2		2	
RF frequency	MHz	476		476		476		476	
Harmonic number		1998		1998		1998		1998	
Number of bunches		442		442		884		884	
N. Particle/bunch (10^{10})		5,08	6,56	3,92	5,06	4,15	5,36	1,83	2,37
Tune shift x		0,0026	0,0040	0,0020	0,0031	0,0053	0,0081	0,0063	0,0096
Tune shift y		0,1089	0,1033	0,0980	0,0981	0,0752	0,0755	0,1000	0,1001
Long. damping time	msec	13	18,0	13,4	20,3	13,4	20,3	26,8	40,6
Energy Loss/turn	MeV	2,11	0,865	2,11	0,865	2,11	0,865	0,4	0,166
σ_E (zero current)	$\delta E/E$	6,10E-04	7,00E-04	6,43E-04	7,34E-04	6,43E-04	7,34E-04	6,94E-04	7,34E-04
σ_E (with IBS)	$\delta E/E$	6,28E-04	7,91E-04						
CM σ_E	$\delta E/E$	4,75E-04		5,00E-04		5,00E-04		5,26E-04	
Total lifetime	min	4,23	4,48	3,05	3,00	7,08	7,73	11,41	6,79
Total RF Power	MW	16,38		12,37		28,83		2,81	

Baseline + other 2 options:

- Lower y -emittance
- Higher currents (twice bunches)

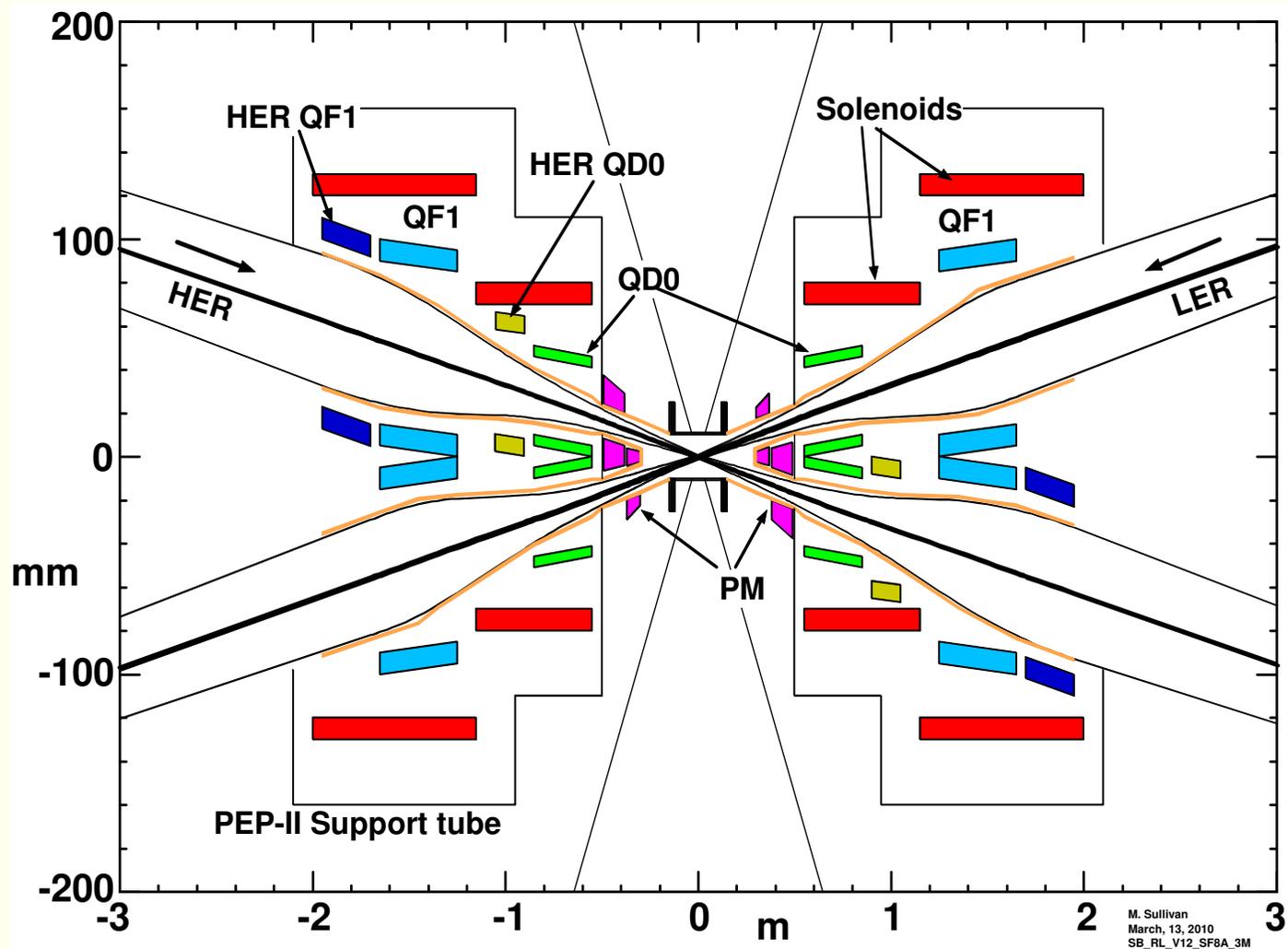
Baseline:

- Higher emittance due to IBS
- Asymmetric beam currents

RF power includes SR and HOM

Tau/charm threshold

Regione di interazione



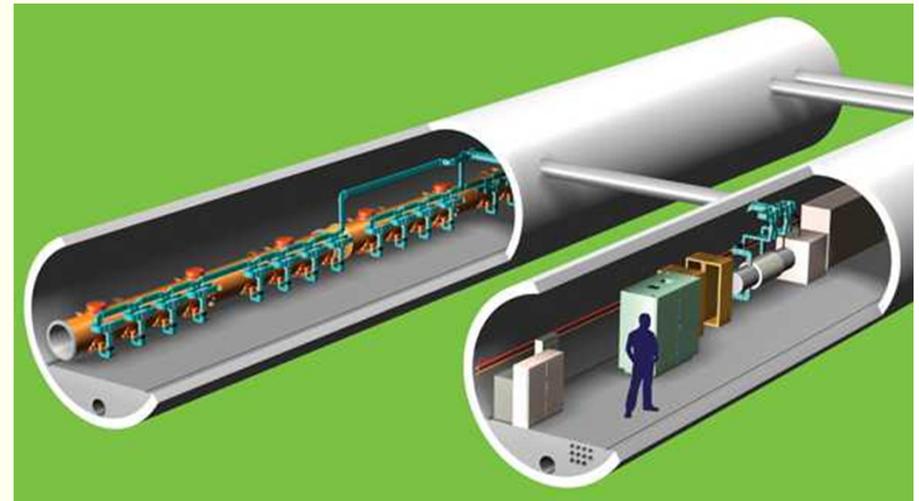
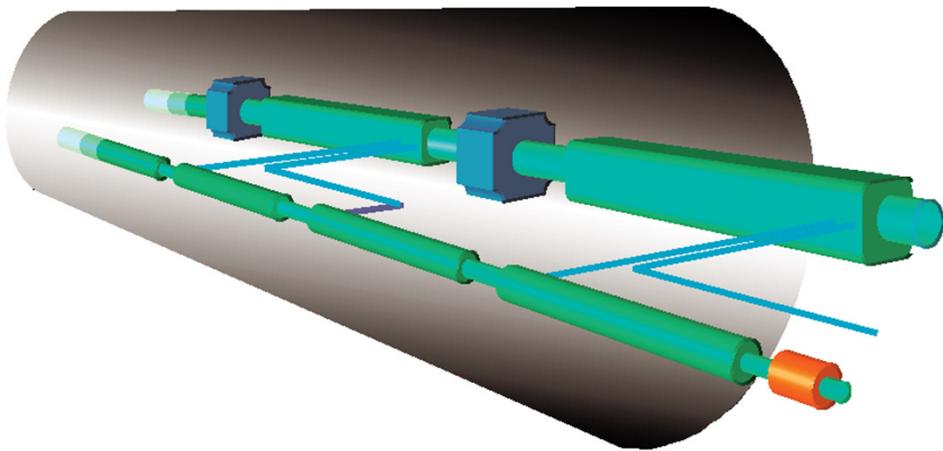
Futuro : e+ e- Linear colliders

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

e^+/e^- 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 ~ 20 y
- 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

Luminosity Frontiers in future Linear Colliders

SFIDE tecnologiche

Low emittance-high current damping rings :
e-cloud in e+ ring,
intrabeam scattering

Low emittance beams
production and transport

Beam stability and
alignment precision

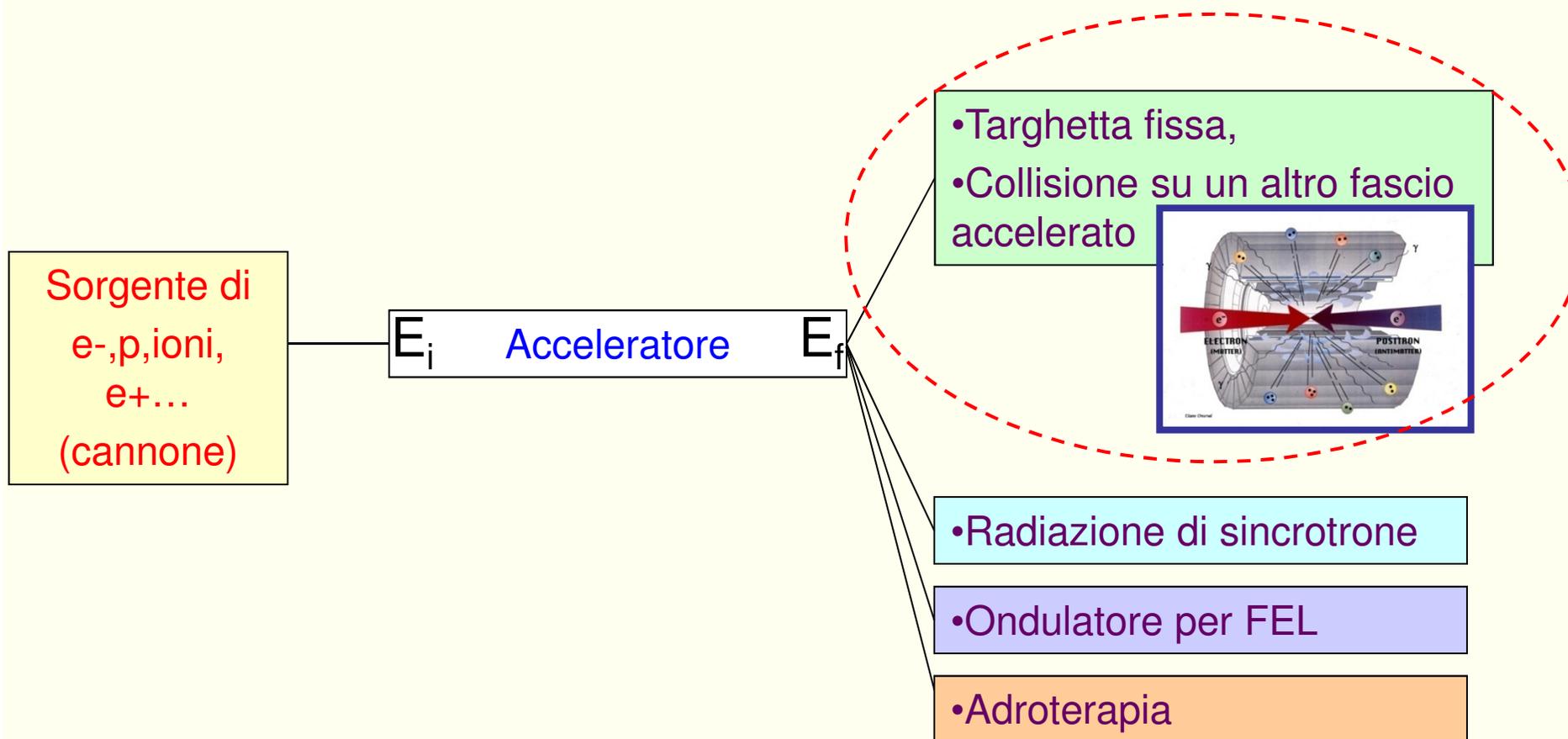
Esperienze e test di fattibilità

- Low emittance synchrotron light sources
- High currents factories
- CESRc tests, LHC injectors

- XFELs

- XFELs , ATF2, CTF2

Qualche esempio di applicazione di un acceleratore



Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

- 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.**
- Acceleratori per **applicazioni mediche**: fasci di ioni o protoni per **adroterapia**, acceleratori di elettroni come sorgenti di **raggi X.**
- Fasci di ioni per riscaldamento dei plasmi nei reattori a fusione.
- Acceleratori per sterilizzazione dei cibi e dei contenitori.
- Impiantazione di ioni in semiconduttori.

Acceleratori **Lineari** e^-

usati per molti scopi:

qualche esempio...

Medicina

Radioterapia,
Radiografia

$E \sim 4\text{-}30 \text{ MeV}$

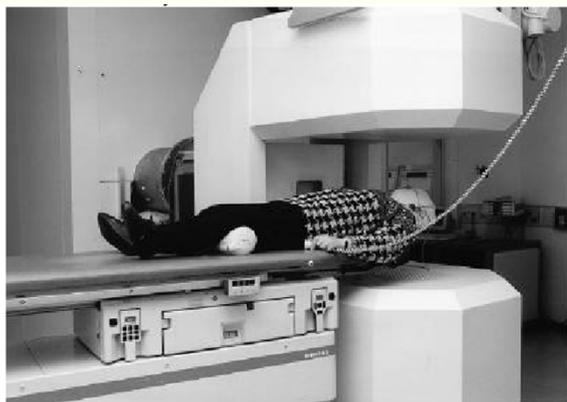
Industria

Sterilizzazione di
materiali e prodotti
(basse energie)

Ricerca fondamentale

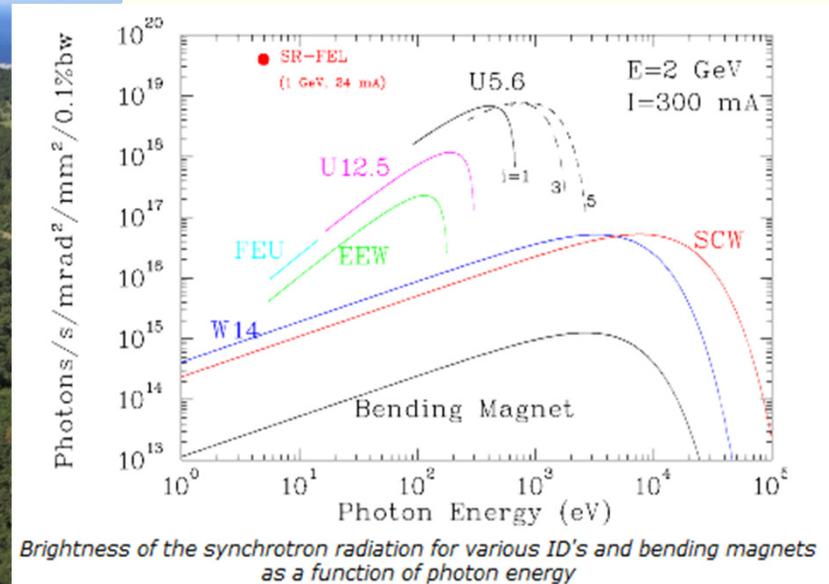
- Iniettori in anelli di accumulazione e^+/e^-
- Fisica nucleare e subnucleare
- FEL

$E \sim 50 \text{ MeV} - 50 \text{ GeV} \rightarrow 1 \text{ TeV}$



ELETTRA a Trieste: anello di accumulazione per luce di sincrotrone

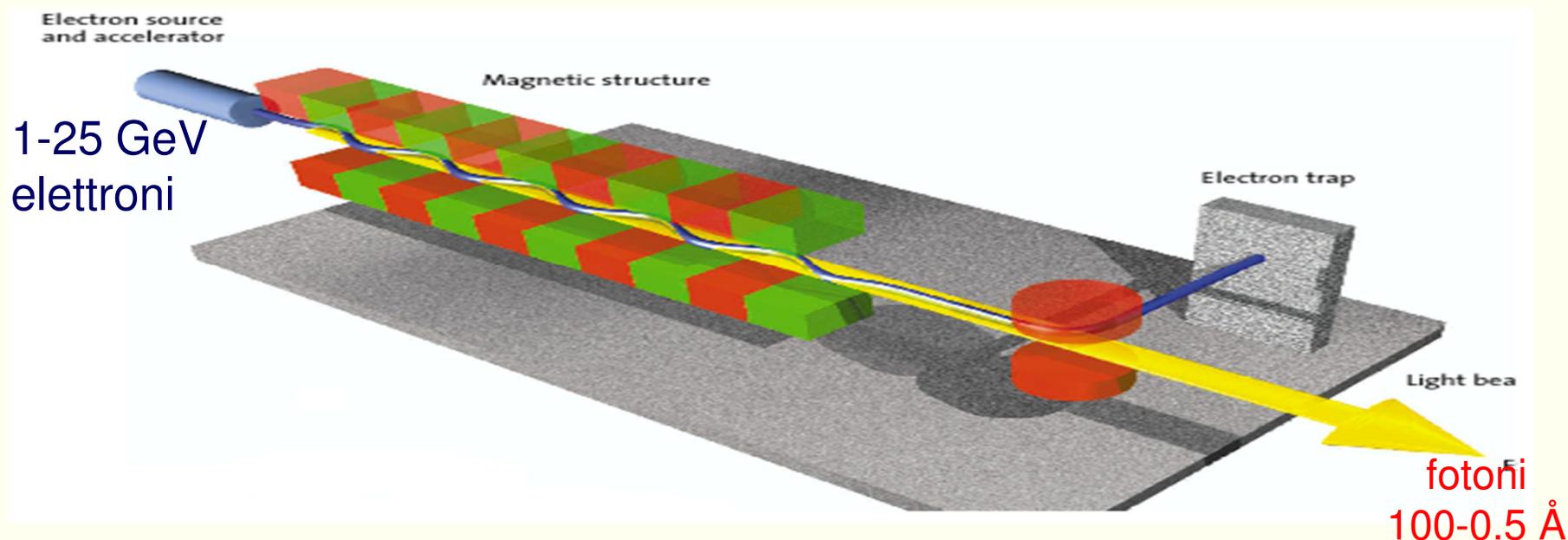
Il parametro che determina la qualità di un fascio di elettroni per questo tipo di macchine è la **BRILLANZA**, concetto molto simile alla luminosità: Quanto più denso il denso di fascio di elettroni circolanti, tanto più *pulito* il fascio di luce di sincrotrone emesso nei magneti curvanti



photons in the energy range from a few to several tens of KeV with spectral brightness of up to 10^{19} photons/s/mm²/mrad²/0.1%bw

<http://www.elettra.trieste.it/science/highlights/index.html>

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)

Acceleratori Lineari e^- per i *Free Electron Lasers* (FEL)

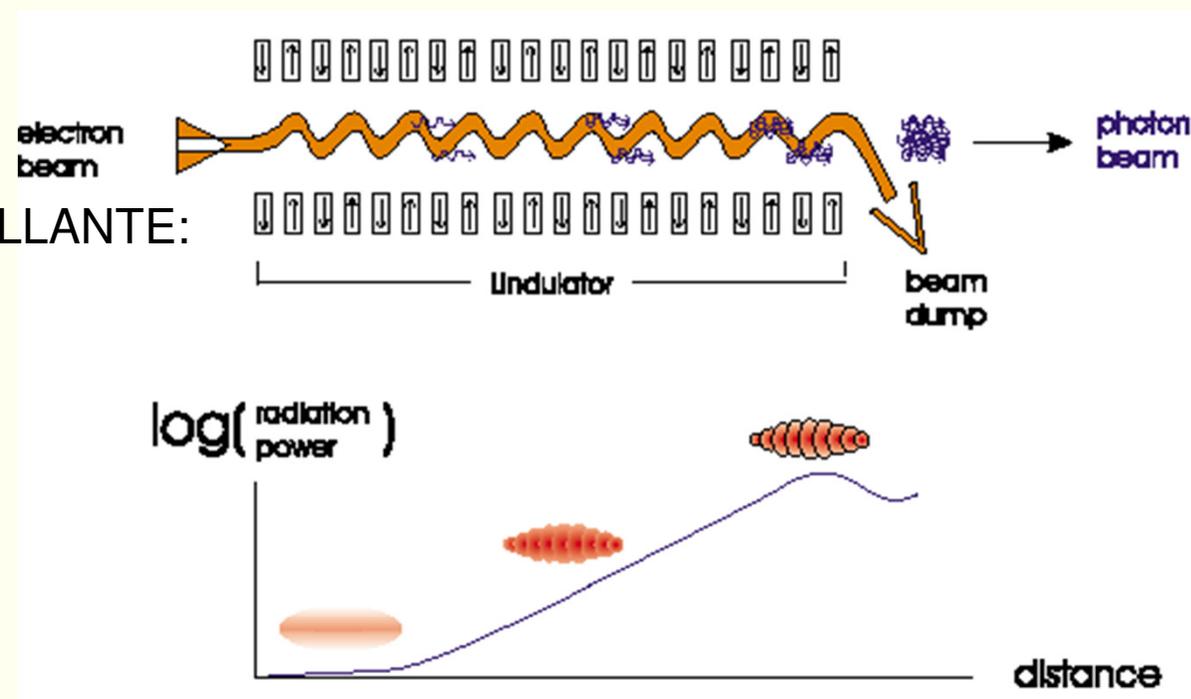
- PRINCIPIO del FEL-SASE (=Self Amplified Spontaneous Emission) : Un linac ad e^- accelera pacchetti di elettroni di alta qualità (brillanza) che entrando nell'ondulatore generano radiazione coerente, con un'amplificazione esponenziale

Fascio e^- deve essere BRILLANTE:

bassa emittanza

piccolo energy spread

altissima densità di carica

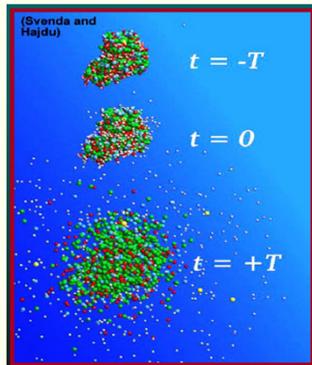


Free Electron Lasers: applicazioni

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 λ nell' IR-UV)

Applicazioni mediche
e industriali





The SPARC Linac



GUN PARAMETERS

Frequency 2856 MHz

Peak Field 120 MV/m

Beam Energy 5.6 MeV

Charge 1 nC

Emittance < 2 mm-mrad

Laser 10 ps (Flat Top with <2 ps r. t.)

LINAC PARAMETERS

Frequency 2856 MHz

Accelerating Field 25 MV/m

Beam Energy 155 MeV

Energy Spread 10^{-3}

Peak Current 100 A



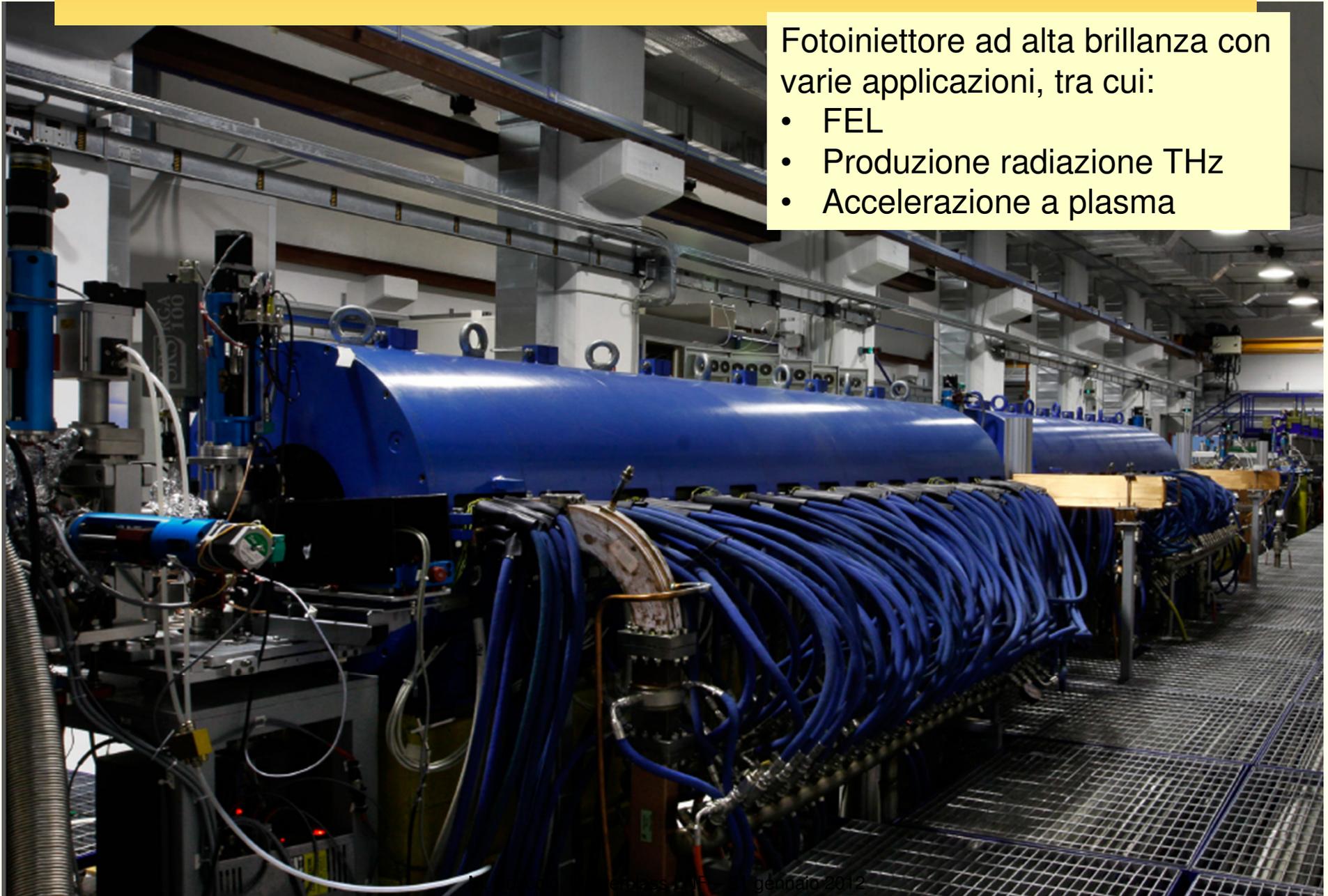
La Sapienza
Università degli Studi di Roma



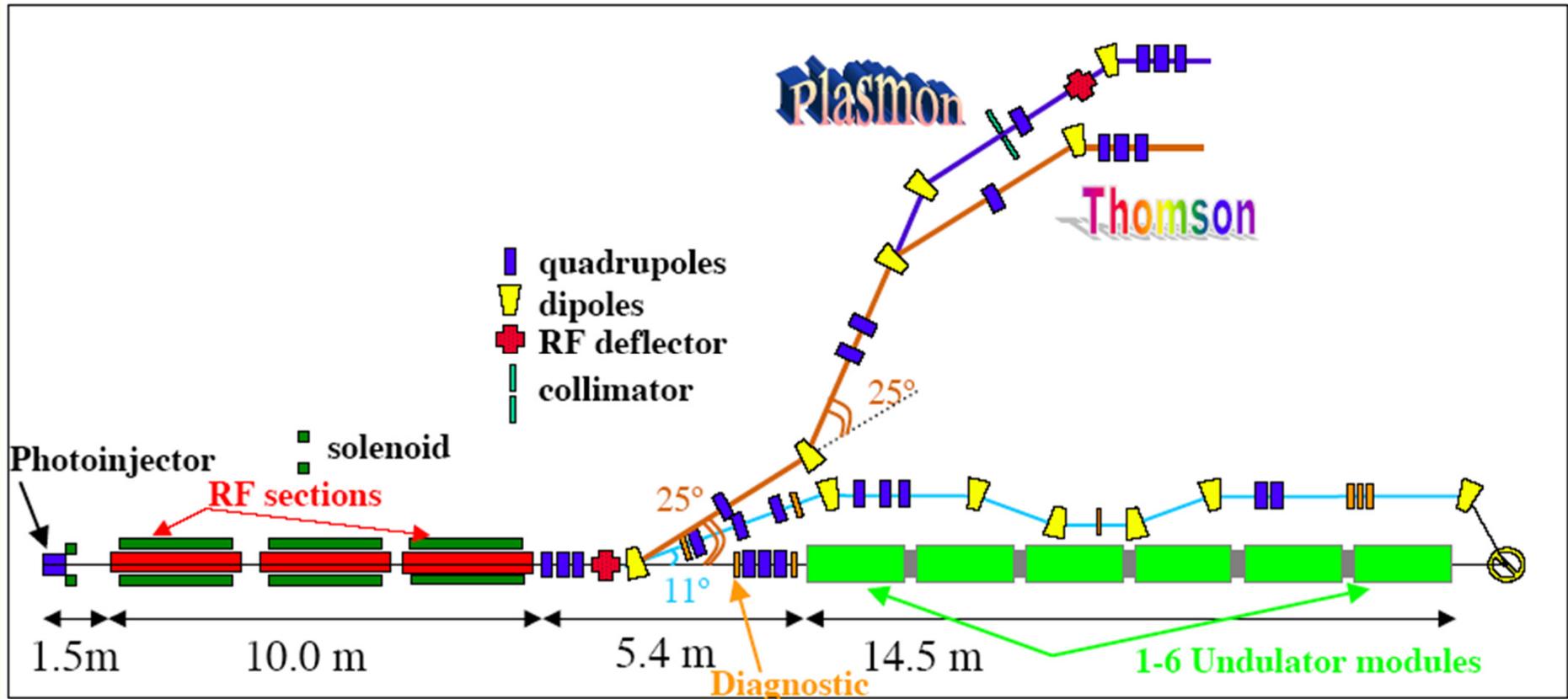
SPARC a Frascati ai LNF

Fotoiniettore ad alta brillantezza con varie applicazioni, tra cui:

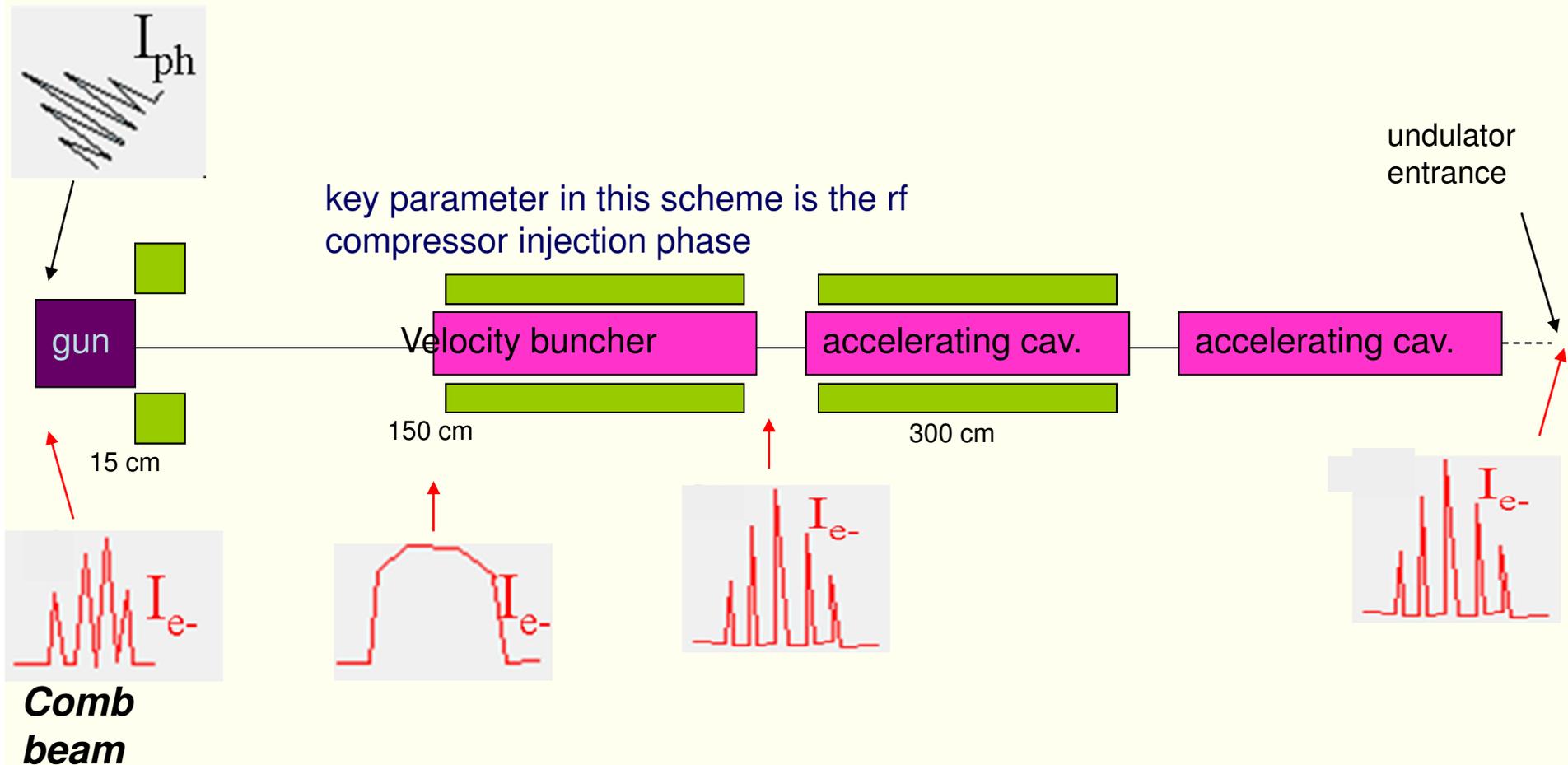
- FEL
- Produzione radiazione THz
- Accelerazione a plasma



SPARC



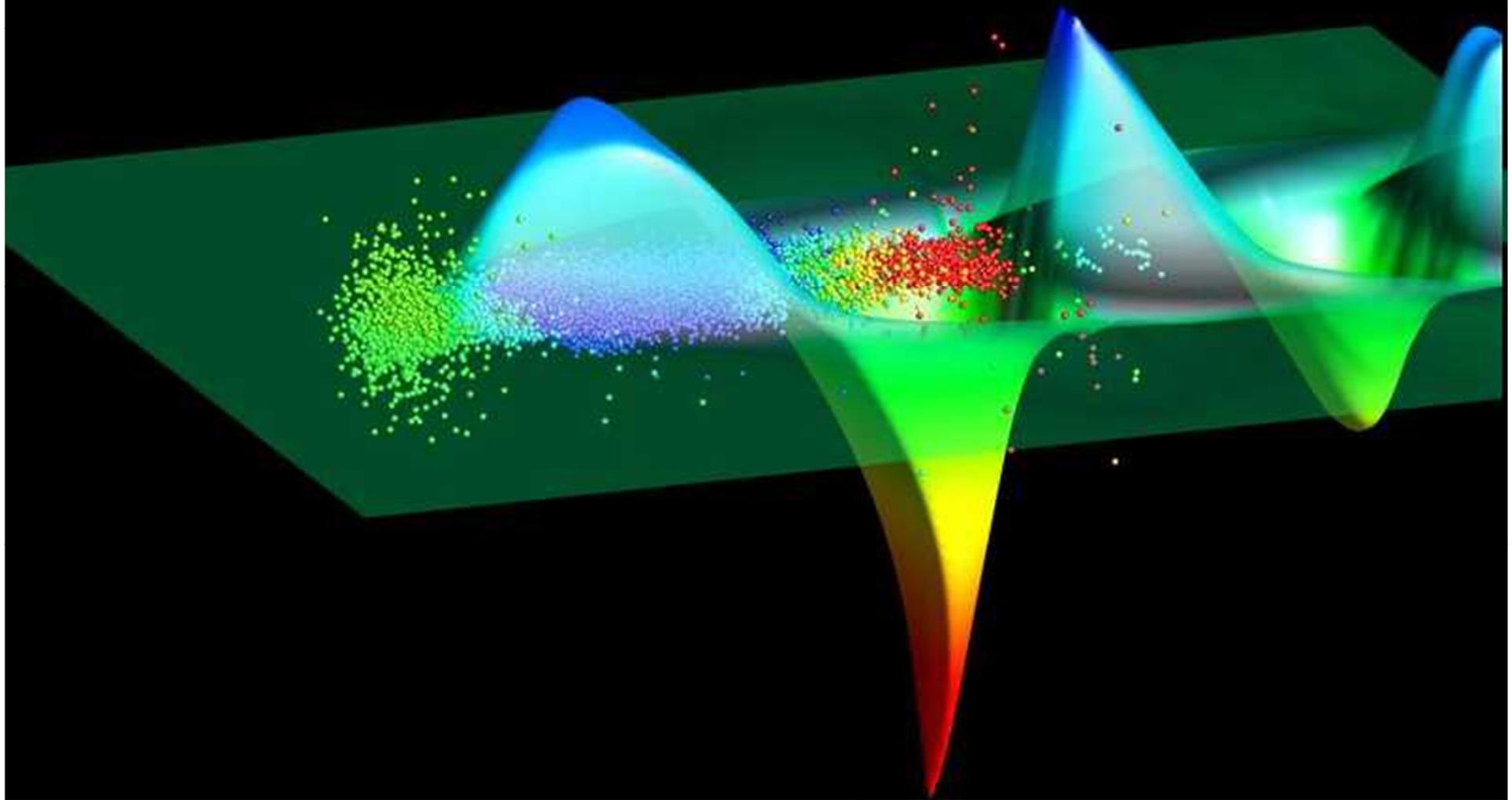
Esempio di schema sperimentale a SPARC



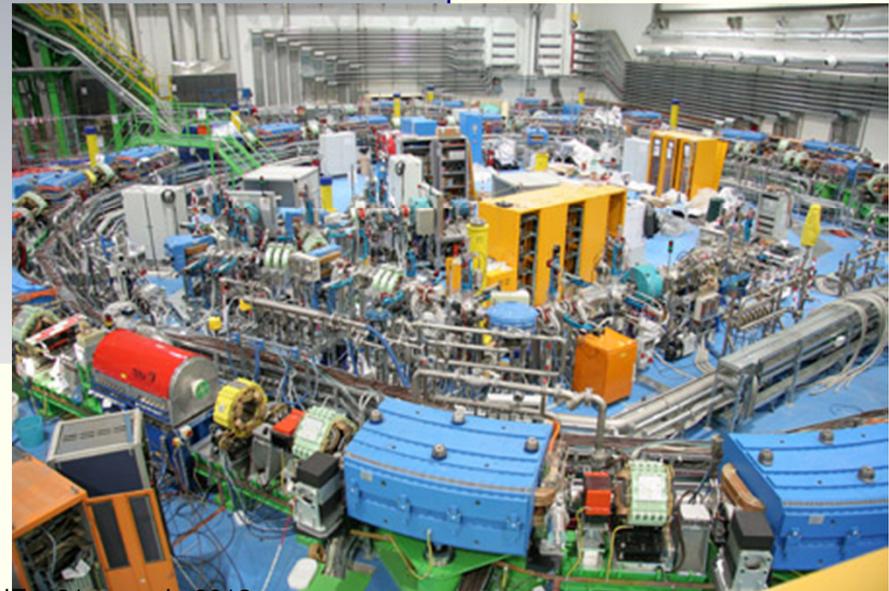
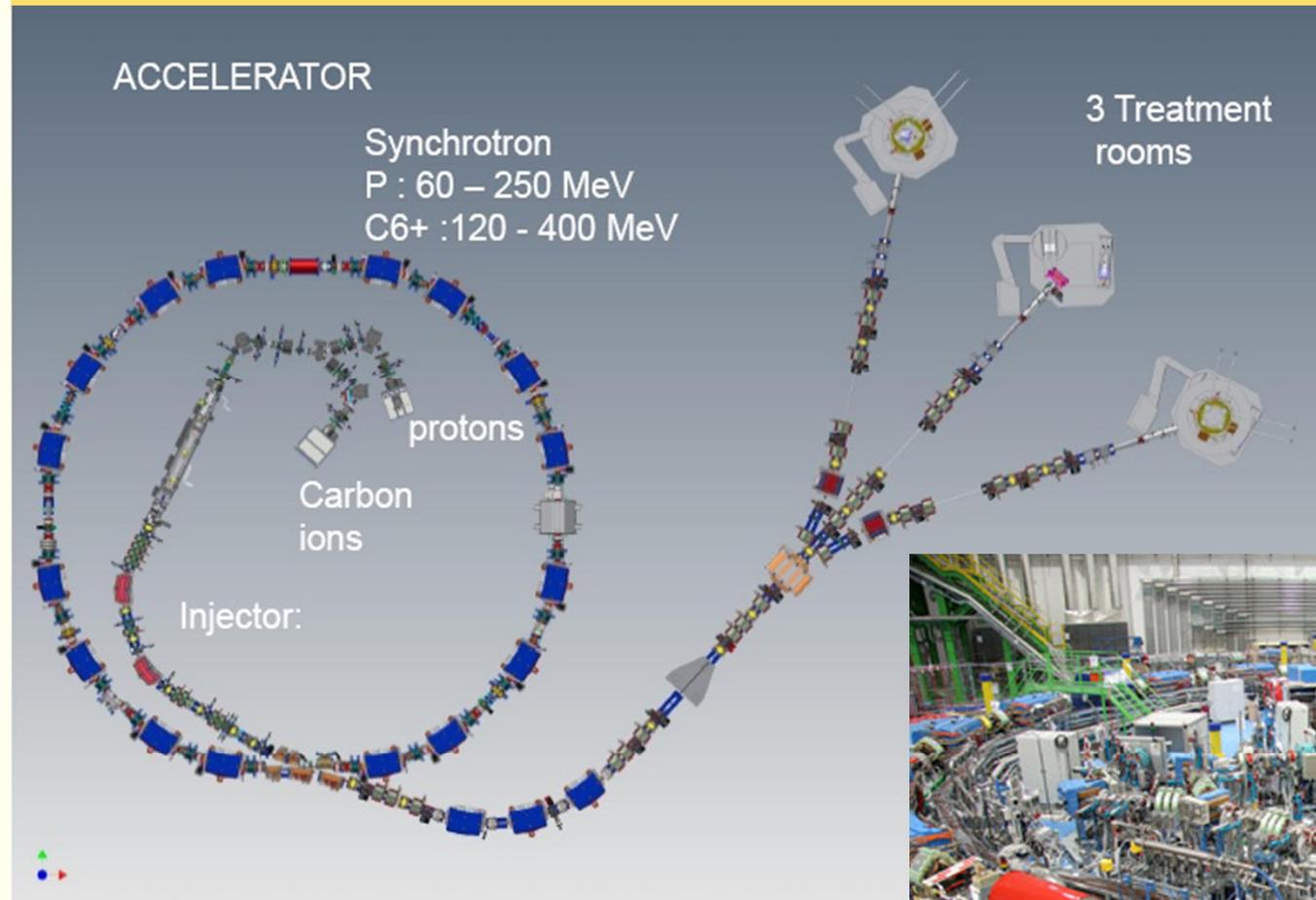
Strada verso un acceleratore lineare basato sull'accelerazione a Plasma (PWFA)

Fase di studio di fattibilità

Huge advances in beam dynamics simulations
Example : PIC code for PWFA



CNAO: Centro Nazionale Adroterapia Oncologica a Pavia



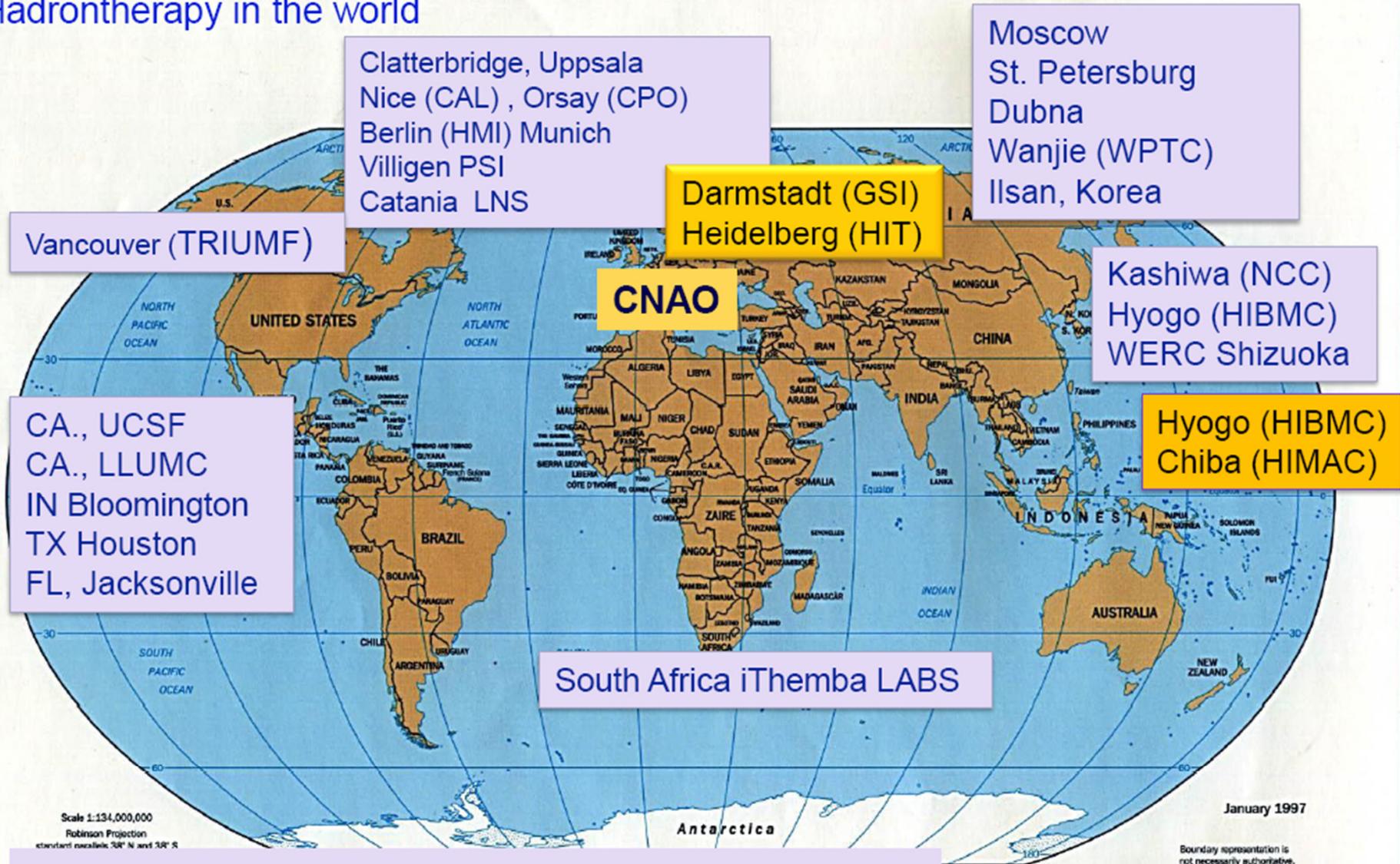
forte collaborazione con INFN

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



61122 patients treated with protons

5342 with carbon ions

M. Boscolo, Masterclass LNF – 31 gennaio 2012

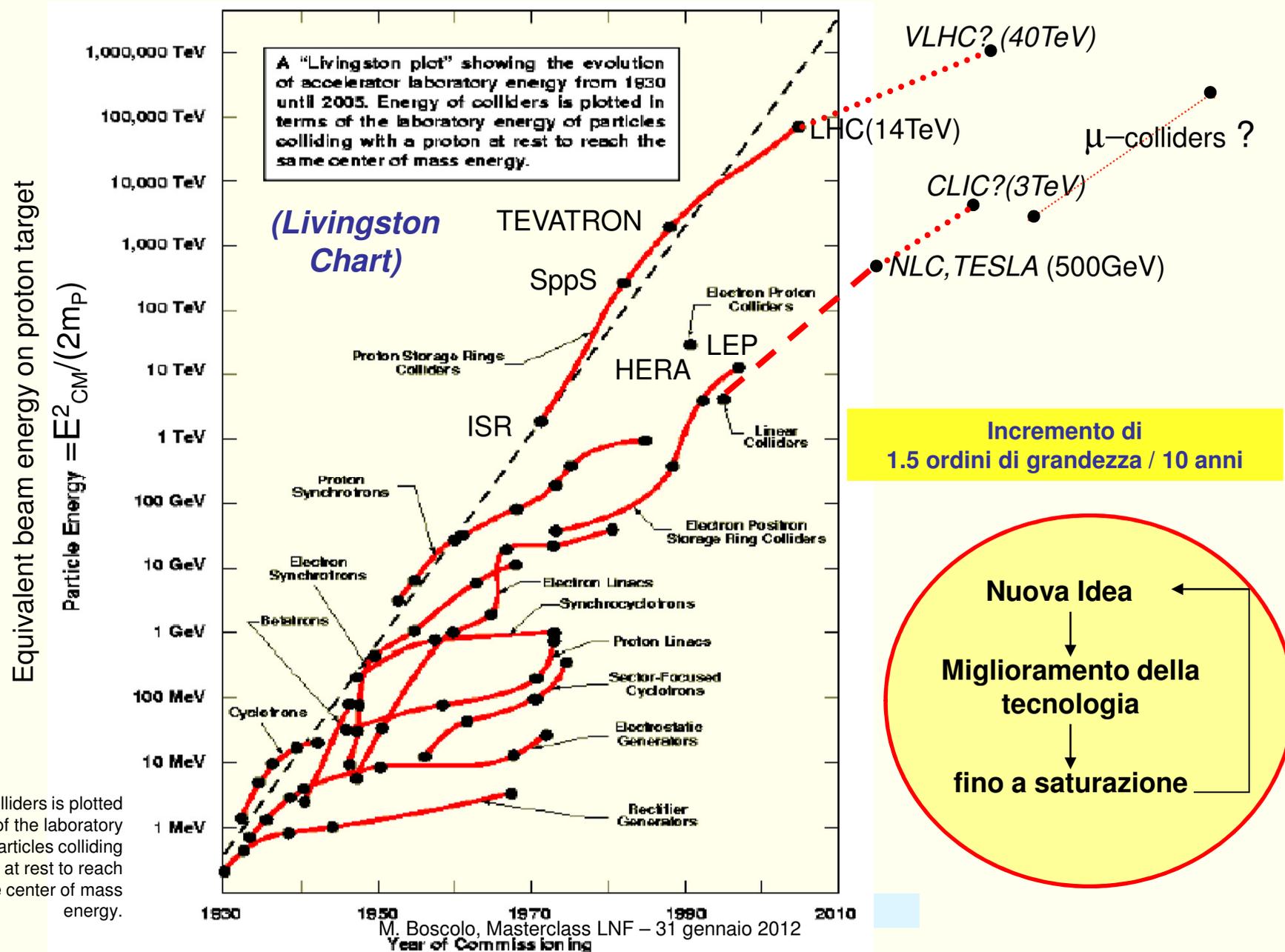
02 March 2009, PTCOG

Conclusioni

- Colliders e concetto di luminosità per fisica fondamentale
 - Alta energia : LHC
 - Alta luminosità : DAFNE
- Anelli per luce di sincrotrone: ELETTRA
- Linac per Free Electron Laser e accelerazione a plasma:
SPARC
- Anelli per adroterapia: CNAO

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...

Diagramma dell'energia degli acceleratori dal 1930 al 2010



Acceleratori macchine molto sofisticate: Tecnologia coinvolta

Sistema da vuoto

tecnologia dell' alto vuoto

Layout & Allineamenti

Ingegneria Meccanica
(progettazione, installazione)

radiofrequenza

Microonde

controlli

Software

Diagnostica del fascio

Elettronica di segnale

magneti

Elettromeccanica,
superconduttività

Alimentatori per magneti

Elettronica di potenza

Cooling e criogenia
magneti,
alimentatori,...

Impianti a fluido

E inoltre: Radioprotezione, Fisica Sanitaria

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 , SLAC-121 (1970)

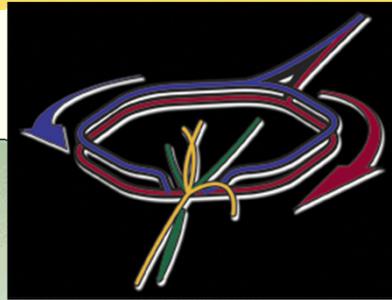
- C. Biscari, Accelerators R&D, PoS EPS-HEP2009:019 (2009)

GRAZIE PER L'ATTENZIONE !

Back-up slides

PEP-II

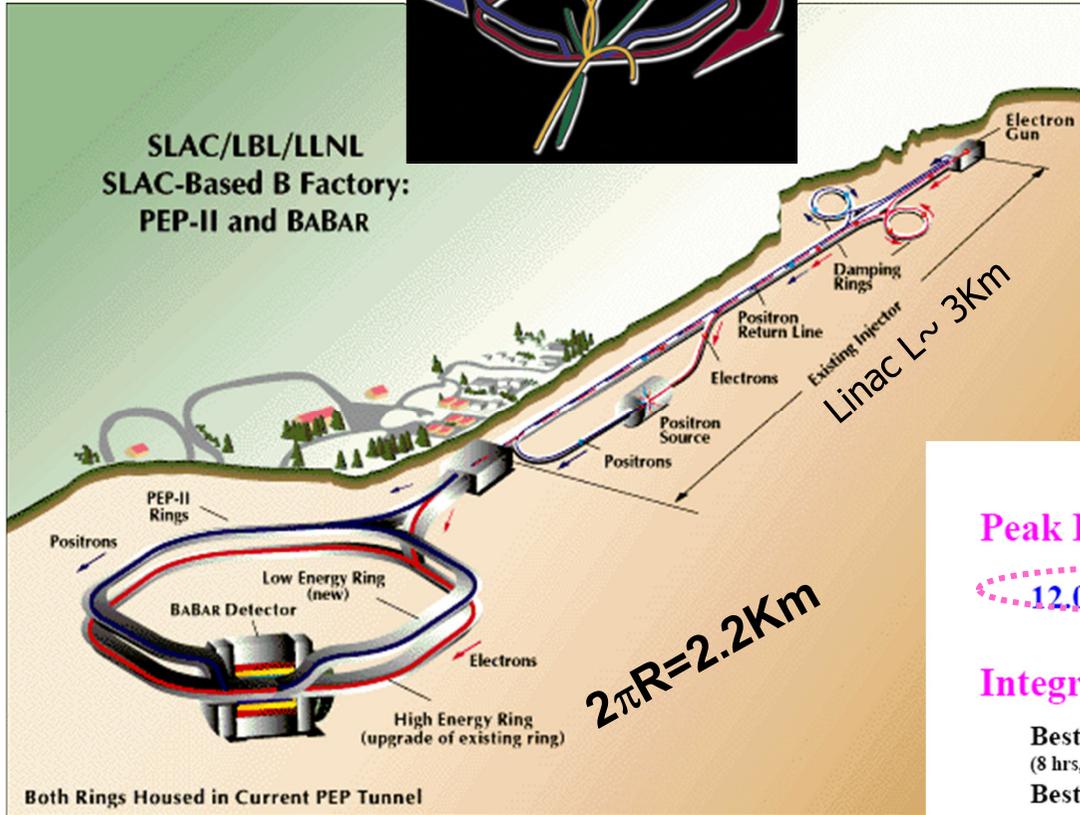
Beauty-Factory: Stanford Linear Accelerator Center



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 pb^{-1}	Aug 16, 2006
Best 3 shifts in a row	910.7 pb^{-1}	Jul 2-3, 2006
Best day	858.4 pb^{-1}	Aug 19, 2007
Best 7 days (0:00 to 24:00)	5.411 fb^{-1}	Aug 14-Aug 20, 2007
Best week (Sun 0:00 to Sat 24:00)	5.137 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 fb^{-1}	Aug 5 - Sep 3, 2007
Best month	19.732 fb^{-1}	August 2007

536 fb^{-1}

1994 comincia la costruzione

1997 primo fascio

1998 prime collisioni

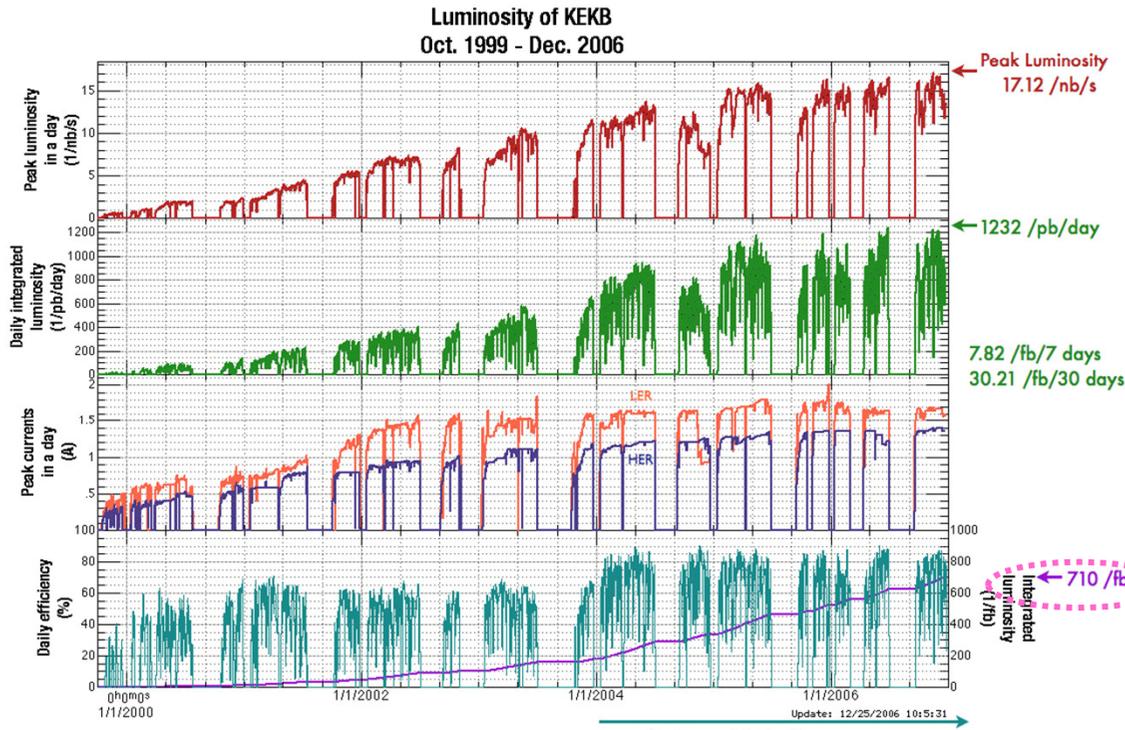
1999-2007 dati a BaBar

2008 Aprile spenta per sempre

KEKB → SUPERKEKB



Machine Parameters of the KEKB (Nov. 28 2007)



	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 ν_s	-0.0246	-0.0204	
Betatron tune ν_x / ν_y	45.506/43.570	44.511/41.590	
beta's at IP β_x^* / β_y^*	90/0.59	90/0.59	cm
momentum compaction α	3.31×10^{-4}	3.38×10^{-4}	
Estimated vertical beam size at IP σ_y^*	1.1	1.1	μm
beam-beam parameters ξ_x / ξ_y	0.089/0.093	0.098/0.088	
Beam lifetime	150@1600	132@839	min.@mA
Luminosity (Belle Csl)	14.60		1033/cm ² /sec
Luminosity records per day / 7days / 30days	1.232/7.809/30.21		/fb

IL TEVATRON AL FERMILAB- Chicago



Il collisore $p\bar{p}$ a più alta energia: $2 \text{ TeV} = 2 \cdot 10^{12} \text{ eV}$

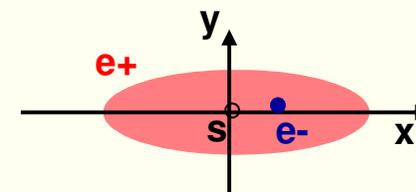
Interazione di *Beam-Beam*

Quando due fasci si intersecano nel punto di interazione (IP) in un collisore succedono due cose:

1. una particella interagisce con una singola particella del fascio opposto producendo **eventi di fisica**.
2. **una particella vede il fascio opposto come un insieme di cariche puntiformi (interazione fascio-fascio)**

Ogni particella di un fascio risente dei campi e.m. del fascio opposto ad ogni incrocio, risente della forza di beam-beam, forza altamente **NON lineare**, che si puo' linearizzare per piccole deviazioni dall'IP

Ottimizzare la luminosità di un collider significa
minimizzare la perturbazione di beam-beam



quindi la frequenza di betatrone di ogni particella che attraversa il fascio opposto nel punto di interazione (IP) viene perturbata

I *tunes nominali (working point)* vengono scelti in modo che in collisione il tune totale delle diverse particelle del fascio ($Q_y + \Delta Q_y$) non finisca su una risonanza