

DAΦNE: il collisore Italiano

Catia Milardi

Scientific Head of the DAΦNE Accelerator Complex

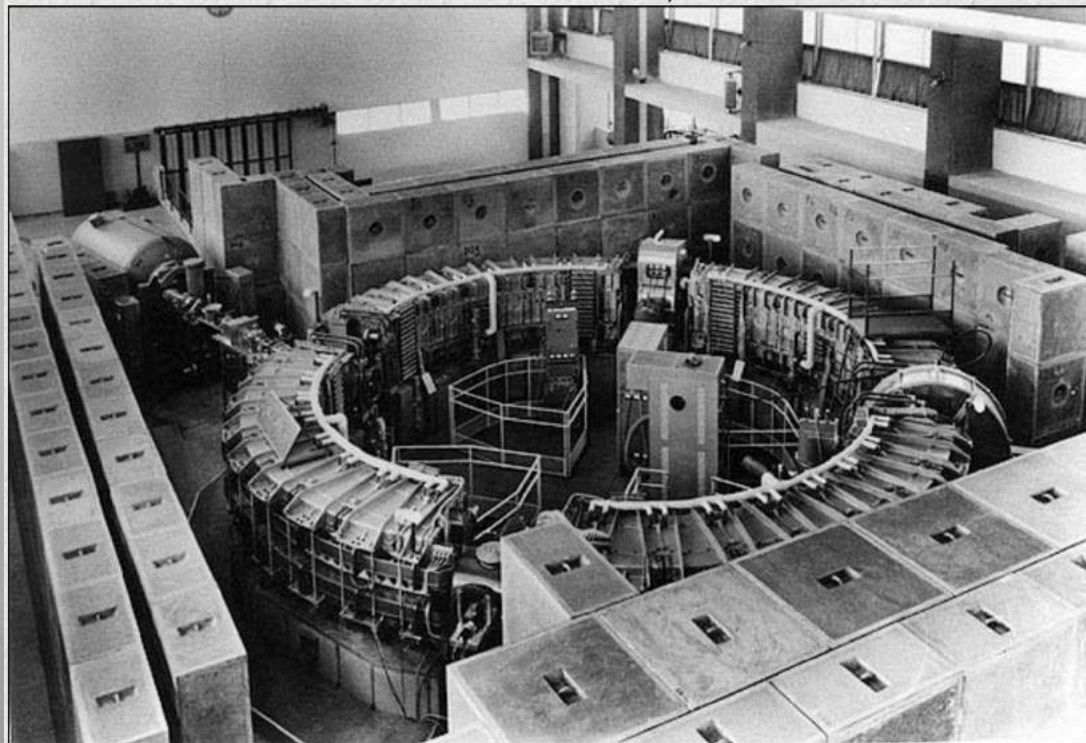
Seminari Divulgativi, aprile 2020, LNF Frascati, Roma

Una Lunga tradizione

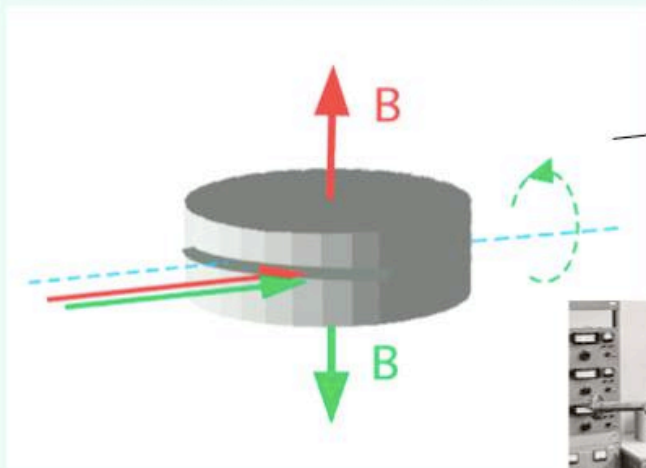
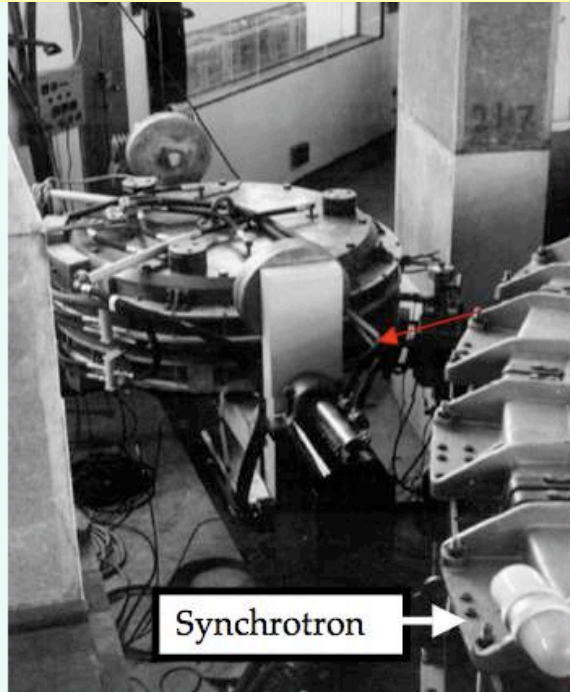
Negli anni **1956-1958** viene realizzato l'*elettrosincrotrone* grazie all'impegno di **Amaldi e Bernardini**

Giorgio Salvini dirige il gruppo che realizza l'acceleratore

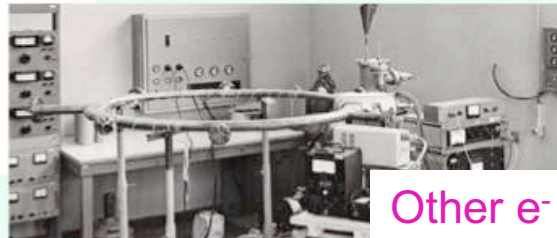
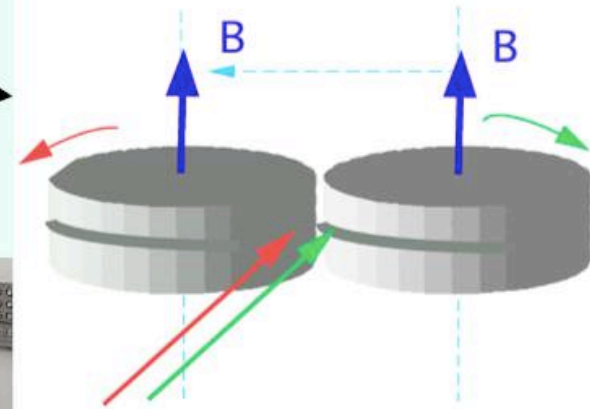
Nel febbraio **1959** nella macchina circolano elettroni accelerati a 1000 MeV.



ADA (1962) the first $e^+ e^-$ Collider



Beam loss due to falling dust



Tazzari CAS-IC-2006

Other $e^- e^-$ colliders

- 1957 G.K.O'Neil, et al. a Princeton-Stanford
- 1964 VEP1 a Novosibirsk (URSS)

ADONE

Lepton Collider

Circumference 105 m

Energy per beam 1.5 GeV

Le tappe principali nella storia di Adone :

1961 inizio degli studi per il progetto Adone

1963 inizio della costruzione

1967 primo fascio circolante di elettroni

1969 prime interazioni elettrone-positrone ed inizio della sperimentazione

1970 scoperta della produzione multipla adronica

1973 seconda generazione di esperimenti

1974 innalzamento dell'energia per studiare la particella J/ ψ

1978 modifica per operare con un solo fascio di elettroni per ricerche di fisica nucleare e con luce di sincrotrone; installazione del LADON

1979 inserimento di un magnete onduttore wiggler per luce di sincrotrone

1990 ripristino di fasci elettroni e positroni per l'esperimento Fenice; inizio della sperimentazione con la Jet Target



26 Aprile 1993

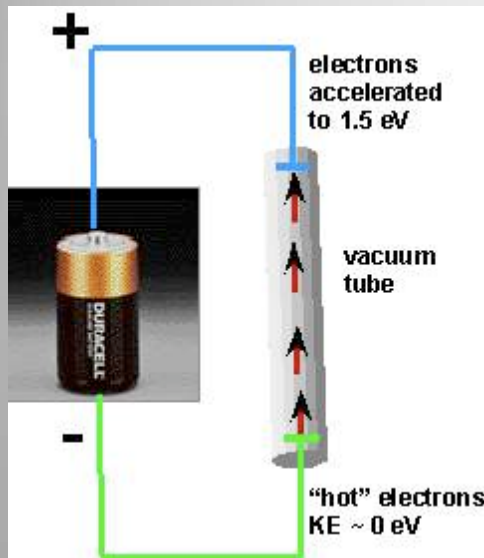
ADONE leaves the stage to DAΦNE



Gli elementi costituenti di un acceleratore di particelle

- Sorgente di particelle da accelerare (LINAC)
- Elementi che consentano di definire la traiettoria aperta o chiusa delle particelle da accelerare e trasportare (DIPOLI)
- Elementi che consentano di tenere sotto controllo la divergenza angolare delle particelle accelerate trasportate (QUADRUPOLI)
- Elementi che reintegrino l'eventuale energia persa dal fascio di particelle ad esempio per emissione di Luce di Sincrotrone (Cavita' a Radio Frequenza)

L'energia delle particelle accelerate si misura in electron Volt (**eV**)



1eV é l'energia cinetica acquistata da un elettrone sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 Volt

10^{15} eV = PeV
 10^{12} eV = TeV
 10^9 eV = GeV
 10^6 eV = MeV
 10^3 eV = KeV

1 eV rappresenta un'energia molto piccola

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

Lampadina da 100 W
accesa per 1 ora



360.000 joules
 $2.24 \cdot 10^{24}$ eV

Caldaia 12.600 Kcal in
funzione per un' ora



52.000.000 joules
 $324 \cdot 10^{24}$ eV

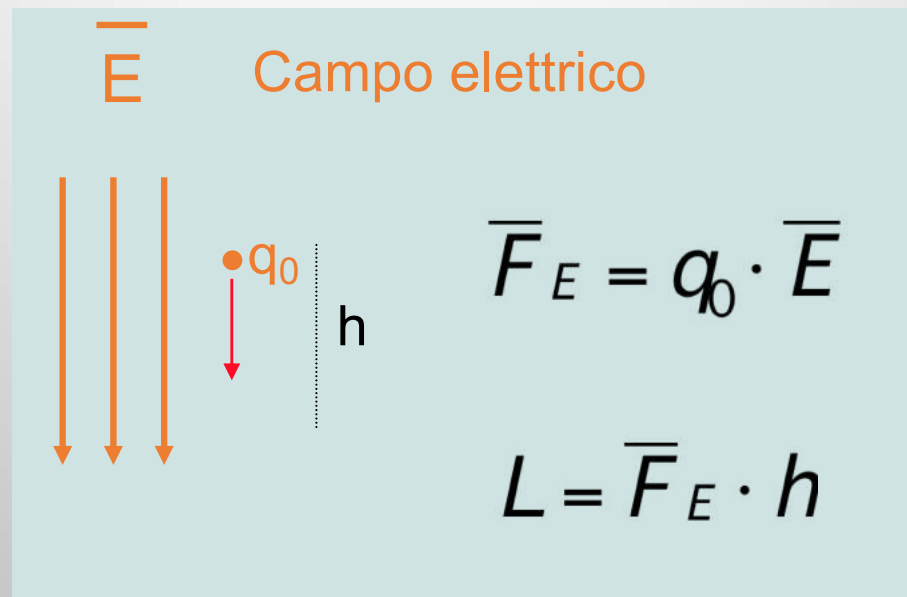
Le entità fisiche fondamentali per la realizzazione degli acceleratori di particelle

campi elettrici \vec{E}

campi magnetici \vec{B}

Forza di Lorentz

Campi elettrici \vec{E} per accelerare



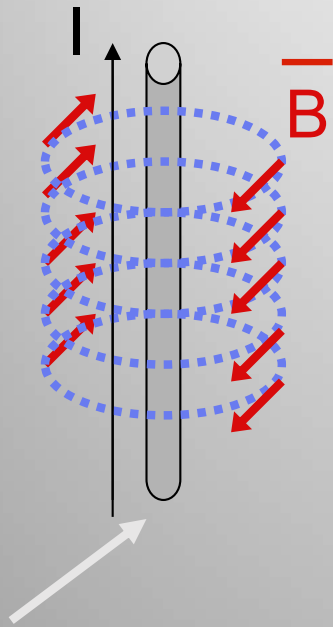
Una carica elettrica Q genera nello spazio che la circonda una entità fisica, il campo elettrico \vec{E} , capace di esercitare una forza su un'altra carica q_0 posta nelle vicinanze.

Il potenziale elettrico V è l'energia che compete ad una carica per il fatto di trovarsi in un dato punto di un campo elettrico

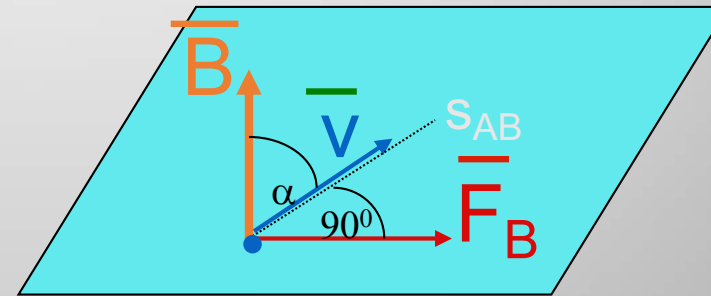
Il campo elettrico può compiere un lavoro L su una particella carica e quindi può aumentare la sua energia

Campi magnetici costanti ed uniformi \vec{B} per trasportare e confinare

- q particella carica



filo di corrente infinita



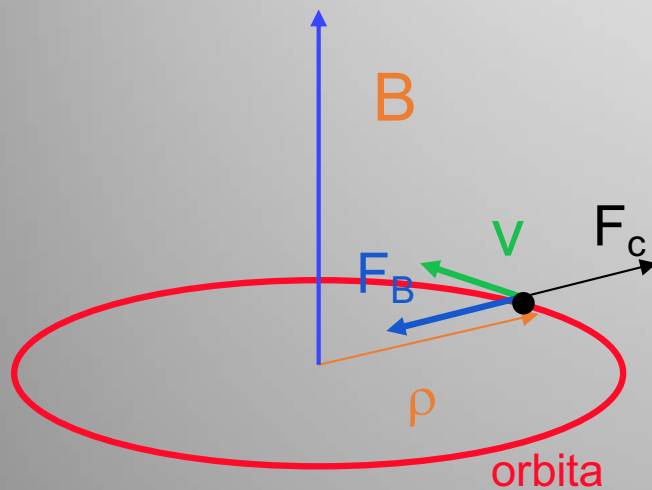
$$F_B = q \cdot v \cdot B \sin \alpha$$

$$L = F_B \cdot S_{AB} \cdot \cos \frac{\pi}{2} = 0$$

Un campo magnetico **costante** non puo' compiere un lavoro su una particella carica e quindi non puo' variare la sua energia

Moto in un campo magnetico

Un campo magnetico **uniforme e costante** può essere usato per mantenere una particella carica q in moto su un'orbita circolare



$$F_c = \frac{mv^2}{\rho}$$

forza centrifuga

$$F_B = qvB$$

forza magnetica

$$qvB = \frac{mv^2}{\rho}$$

equilibrio tra le forze

- carica q

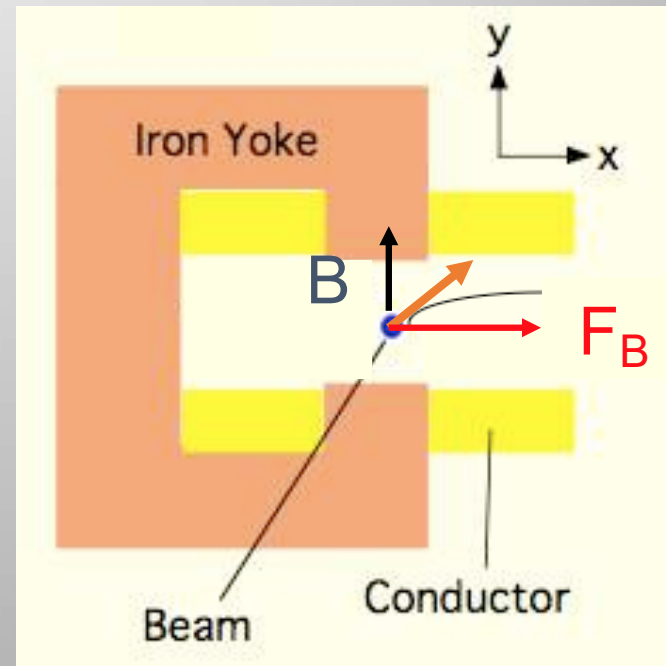
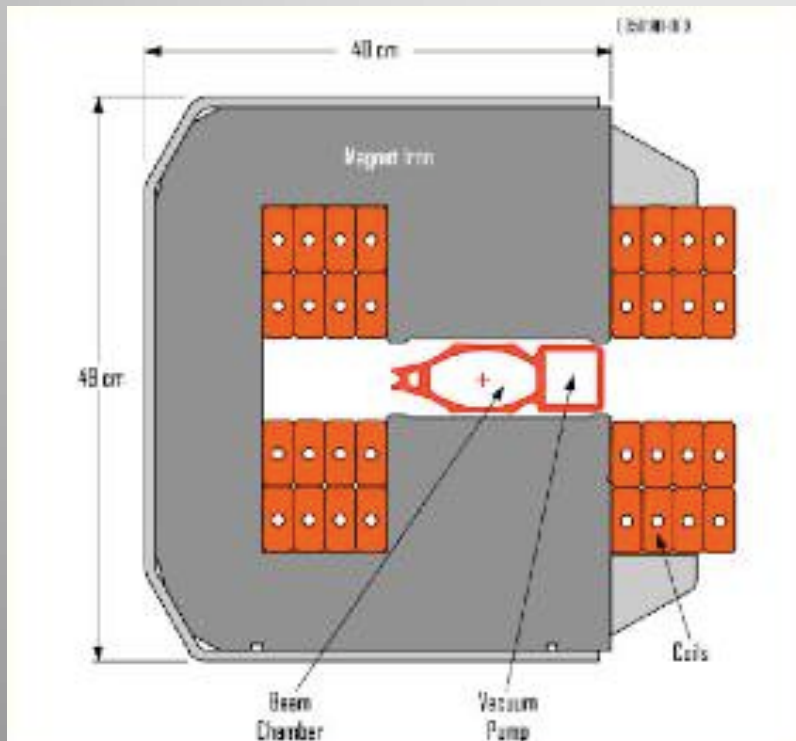
Magnete curvante dipolo

Dipolo elettromagnetico

Consente di curvare la traiettoria delle particelle

Rigidità magnetica

$$B\rho [Tm] = \frac{p}{q} = \frac{E}{cq}$$



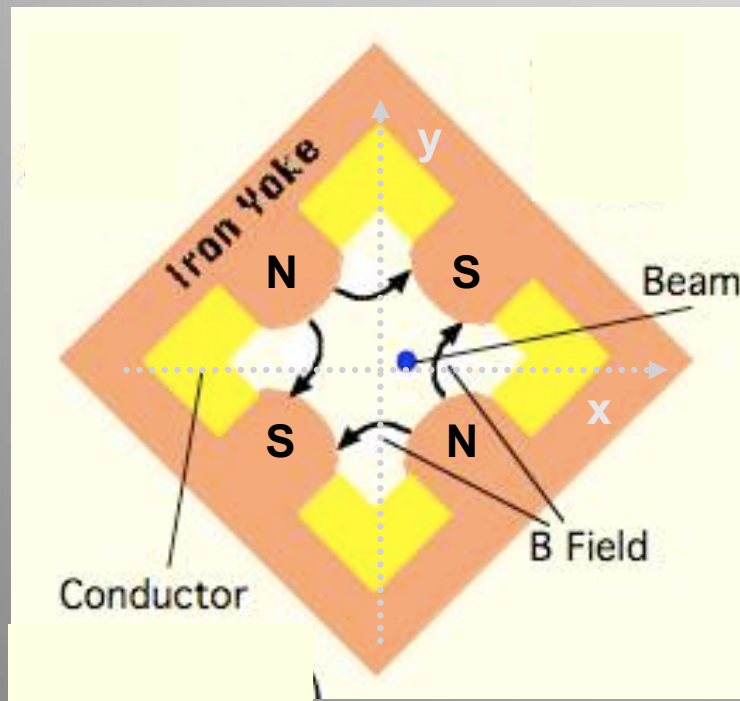
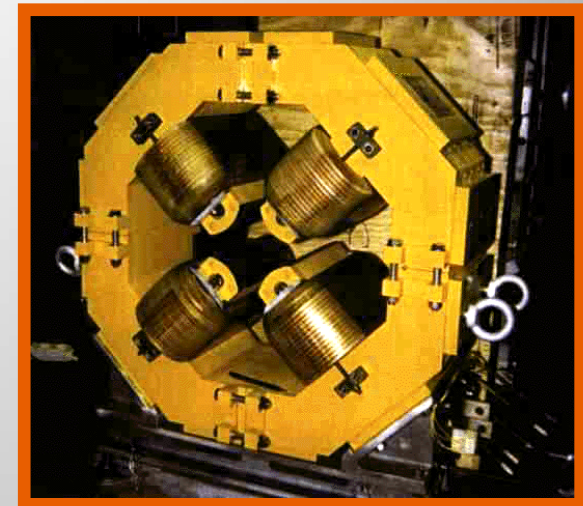
i dipoli elettromagnetici vengono usati per produrre B non oltre

$$B_{MAX} \leq 2 \text{ T}$$

Cosa fare per ottenere campi magnetici più intensi?

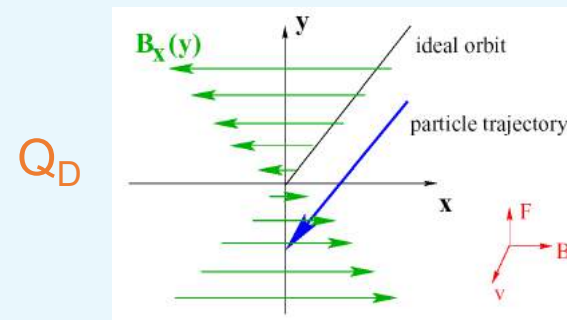
Magnete foccheggiante Quadrupolo

Focchetta le traiettorie delle singole particelle così come fa una lente con la luce



Caratteristiche di B

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



$$F_x = g \cdot x$$

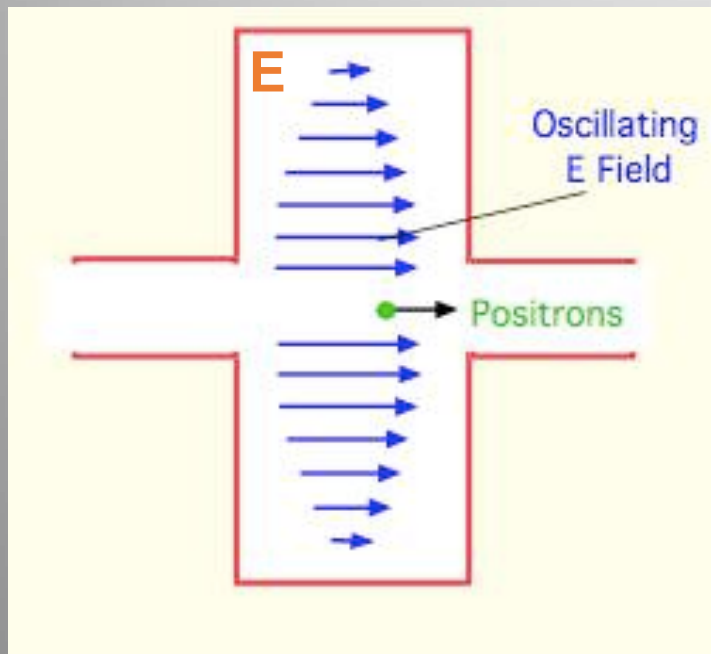
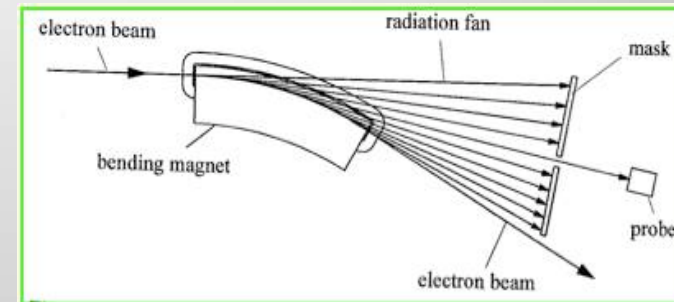
$$F_y = -g \cdot y$$

$$g = \left[\frac{T}{m} \right]$$

Cavità a Radio Frequenza (RF)

Particelle *relativistiche* in moto su un'orbita circolare quando passano all'interno di un magnete curvante emettono radiazione in direzione tangente alla loro traiettoria: la **RADIAZIONE DI SINCROTRONE (SR)**

DAΦNE $U \sim 9.7$ KeV



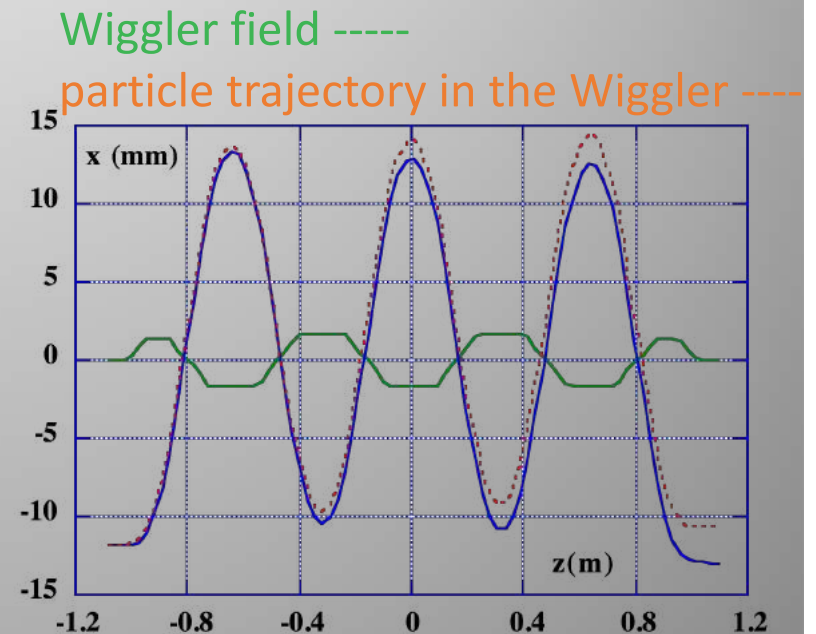
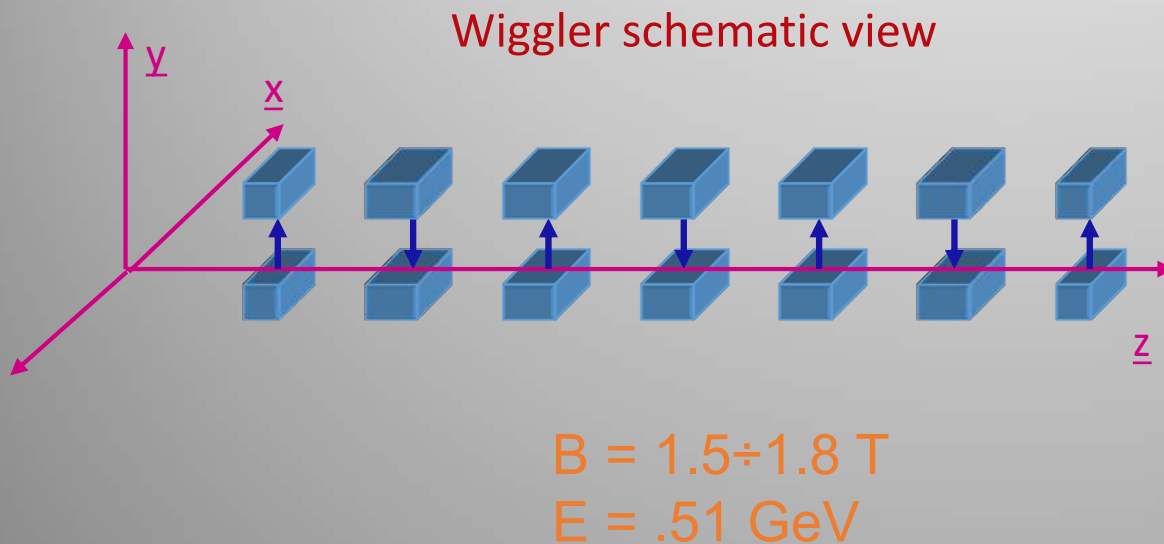
Fornisce un campo elettrico E variabile nel tempo ad alta frequenza
 E è generato da una tensione anch'essa variabile nel tempo

$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

Le particelle passando nella cavità RF ricevono, giro per giro, l'energia persa per emission di SR, inoltre per effetto del foccheggiamento in energia operato dalla RF vengono raggruppate in pacchetti (bunches)

Wigglers

I magneti WIGGLER raddoppiano l'emissione di radiazione di sincrotrone da parte del fascio circolante, consentendogli di essere più resistente alle perturbazioni a cui viene sottoposto prima fra tutte il processo di iniezione e le collisioni.





The DAFNE wigglers after delivery.

Collisori vecchi e nuovi

Large **high energy collider** to investigate:

frontiers of subnuclear physics knowledge

ultimate matter constituents

PEP-II (B quark $E^{e^-} = 7\div 12$ GeV $E^{e^+} = 2.5\div 4$. GeV)

KEKB (B quark $E^{e^-} = 8$ GeV $E^{e^+} = 3.5$ GeV)

CESAR (B quark then τ meson)

LEP (w, z_0 statistics $E^b = 45, 46, 104.6$ GeV)

TEVATRON ($E^p = 0.92$ TeV)

LHC (Higgs physics, Standard Model and beyond $E = 7$ TeV)

SuperKEKB (B quark $E^{e^-} = 7$. GeV $E^{e^+} = 4$. GeV)

Intermediate energy collider to investigate:

rare phenomena with very high precision

verify controversial theoretical aspects

DAΦNE (K meson $E^b = 0.510$ GeV)

The Φ resonance

The interest on Φ resonance relies on the fact that this resonance is a source of monochromatic colinear $K\bar{K}$ pairs

$$\begin{array}{ll} \Phi \rightarrow K^+K^- & 49\% \\ & K_S^0 K_L^0 & 33\% \\ & \rho\pi & 13\% \end{array}$$

usually:

$$\begin{array}{l} K_L^0 \rightarrow 3\pi \\ K_S^0 \rightarrow 2\pi \end{array}$$

in the case of CP violating decay:

$$K_L^0 \rightarrow 2\pi \quad (0.3\% \text{ of decays})$$

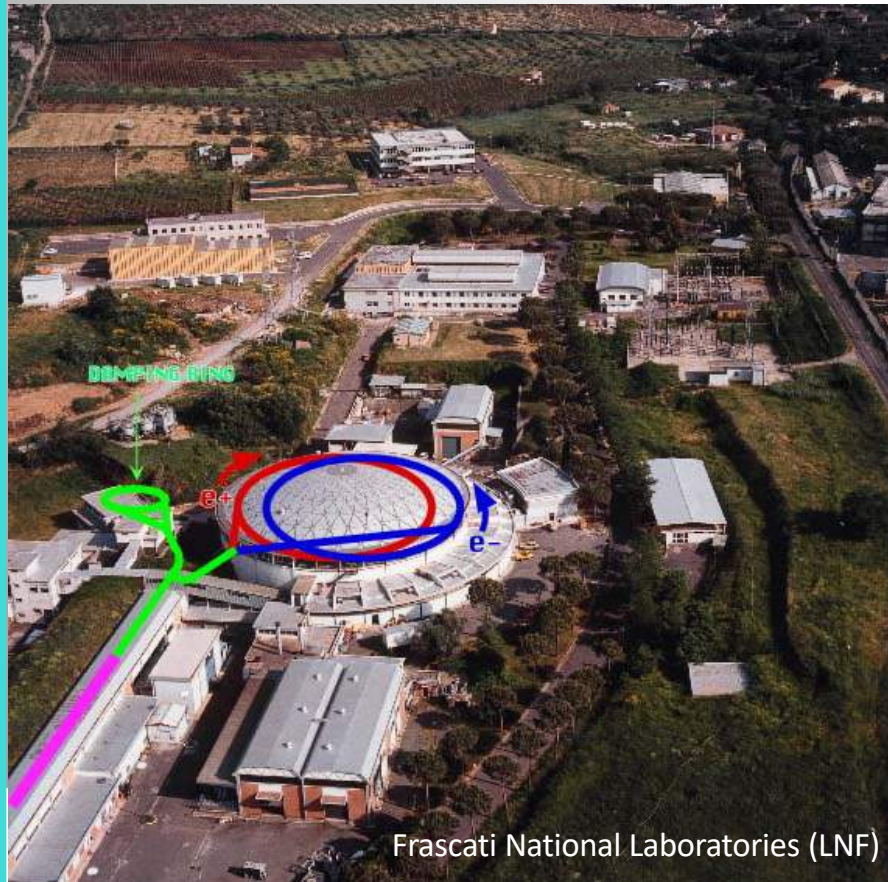
Neutral kaon are used by the **KLOE** experiment to study CP, CPT, rare decays

Charged kaons are used by:

FINUDA to produce Hypernuclei

DEAR-SIDDHARTA to study K-N scattering lengths

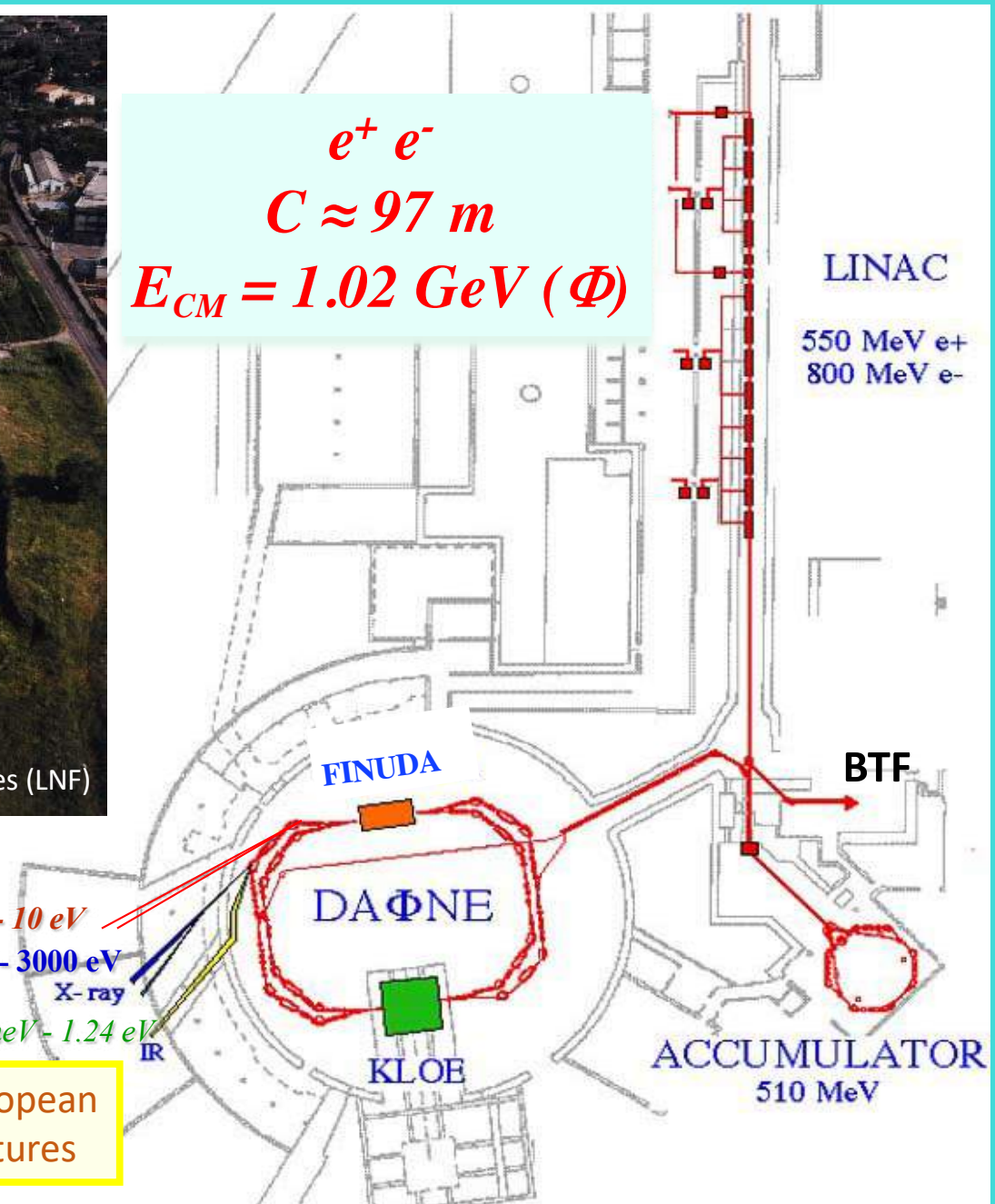
Il complesso di acceleratori DAΦNE



$e^+ e^-$
 $C \approx 97 \text{ m}$
 $E_{CM} = 1.02 \text{ GeV } (\Phi)$

UV 2 - 10 eV
X-ray 900 - 3000 eV
X-ray
IR 1.24 meV - 1.24 eV
IR

LNF are also part of the European synchrotron light Infrastructures

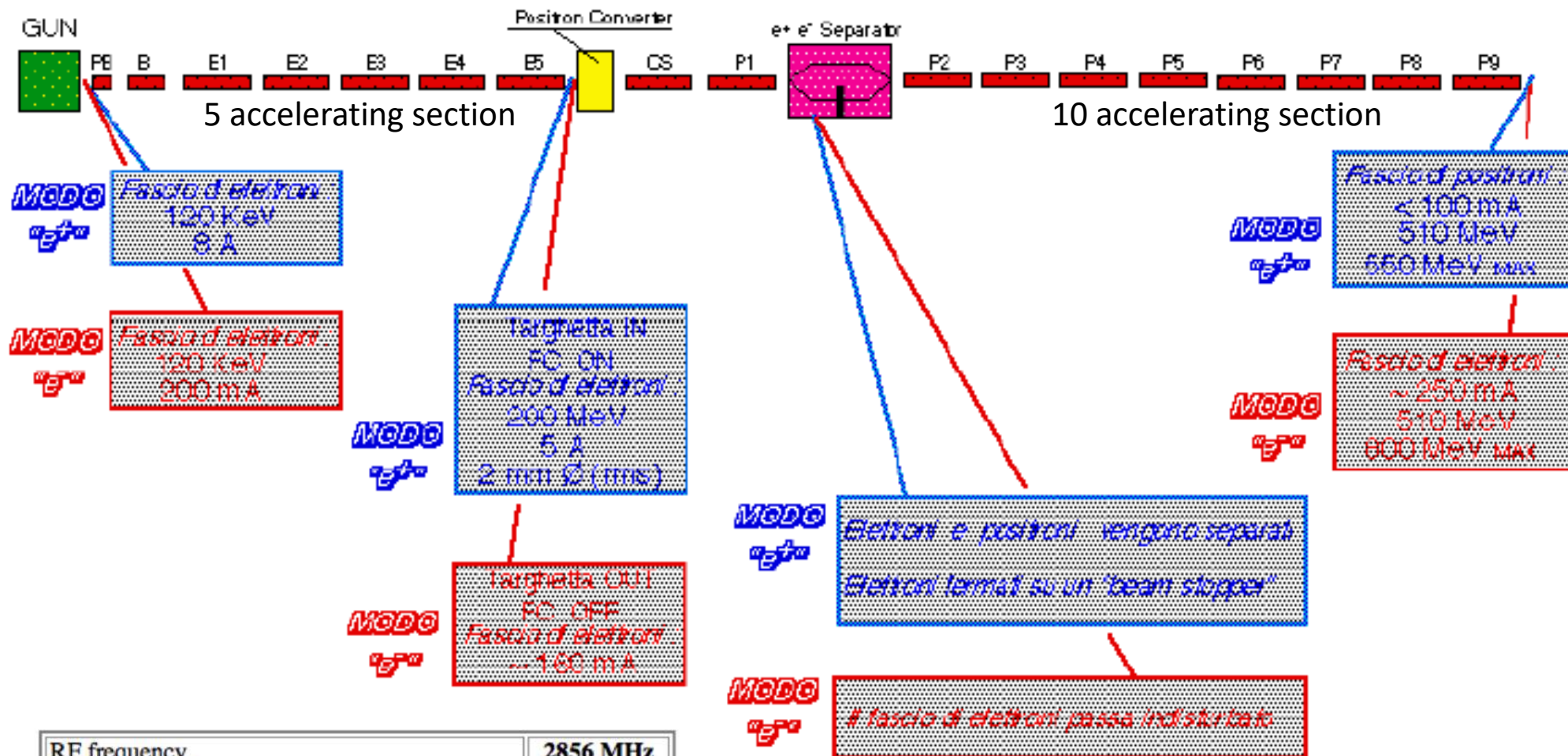


Il Sistema di Iniezione di DAΦNE

- Deve essere in grado di fornire nel più breve tempo possibile le alte correnti necessarie per fornire eventi di fisica agli esperimenti:
 - 1.5 A e⁻
 - 1.2 A e⁺
- Il Sistema di iniezione lavora all'energia del collisore in modo da reintegrare la progressiva diminuzione delle correnti accumulate dovuta principalmente all'effetto Touschek.
- Il reintegro delle correnti avviene mentre gli esperimenti prendono dati
- Il Sistema di Iniezione include:
 - LINAC
 - TRANSFER LINES
 - ACCUMULATOR ring
 - injection/extraction kickers and injection/extraction septa

LINAC

SCHEMA GENERALE E MODI DI OPERAZIONE



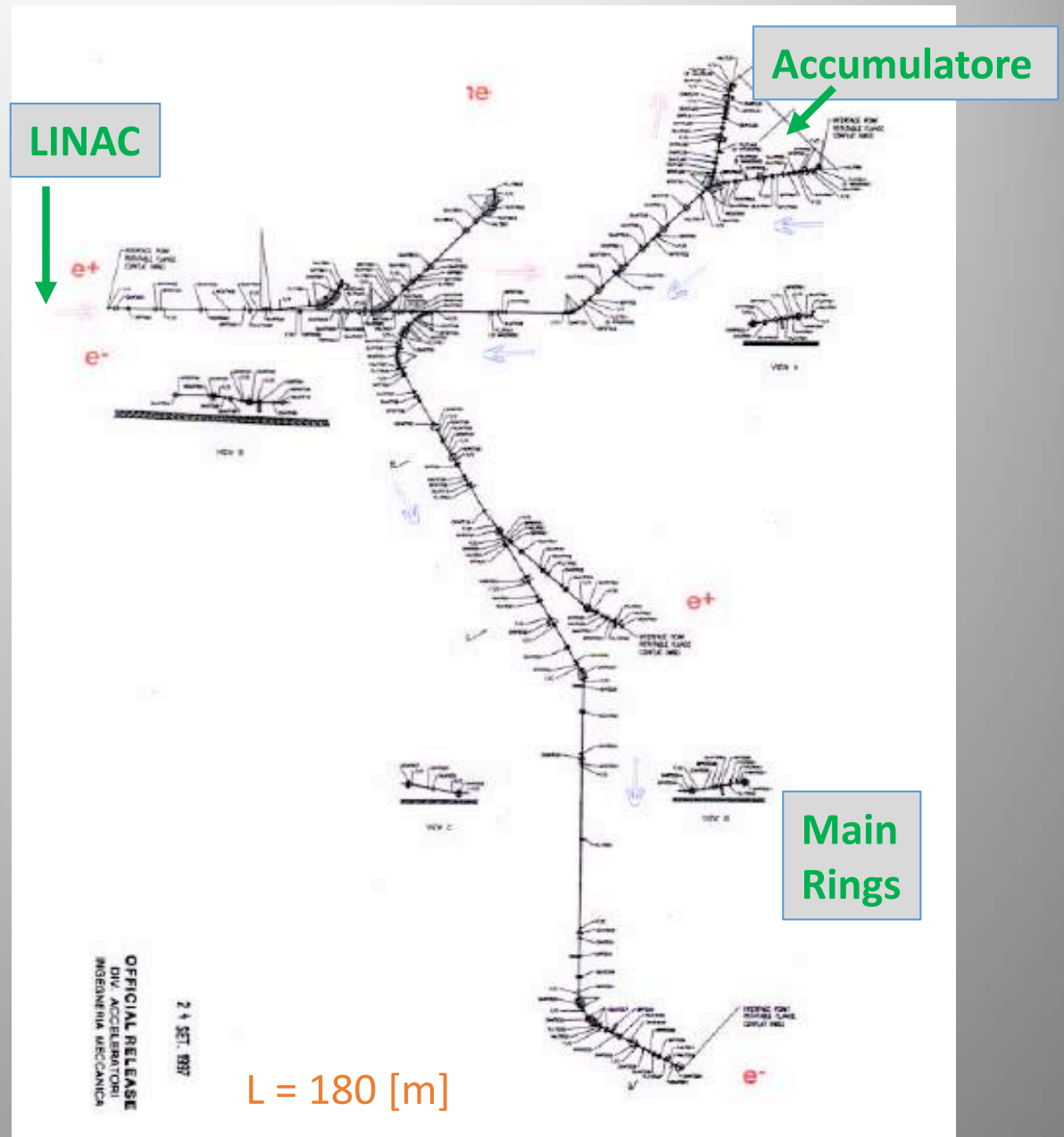
RF frequency	2856 MHz
Klystron power	45 MW
Number of klystrons	4
Number of SLED peak power doublers	4
Number of accelerating sections	15
Repetition rate	50 Hz
Beam pulse width	10 ns

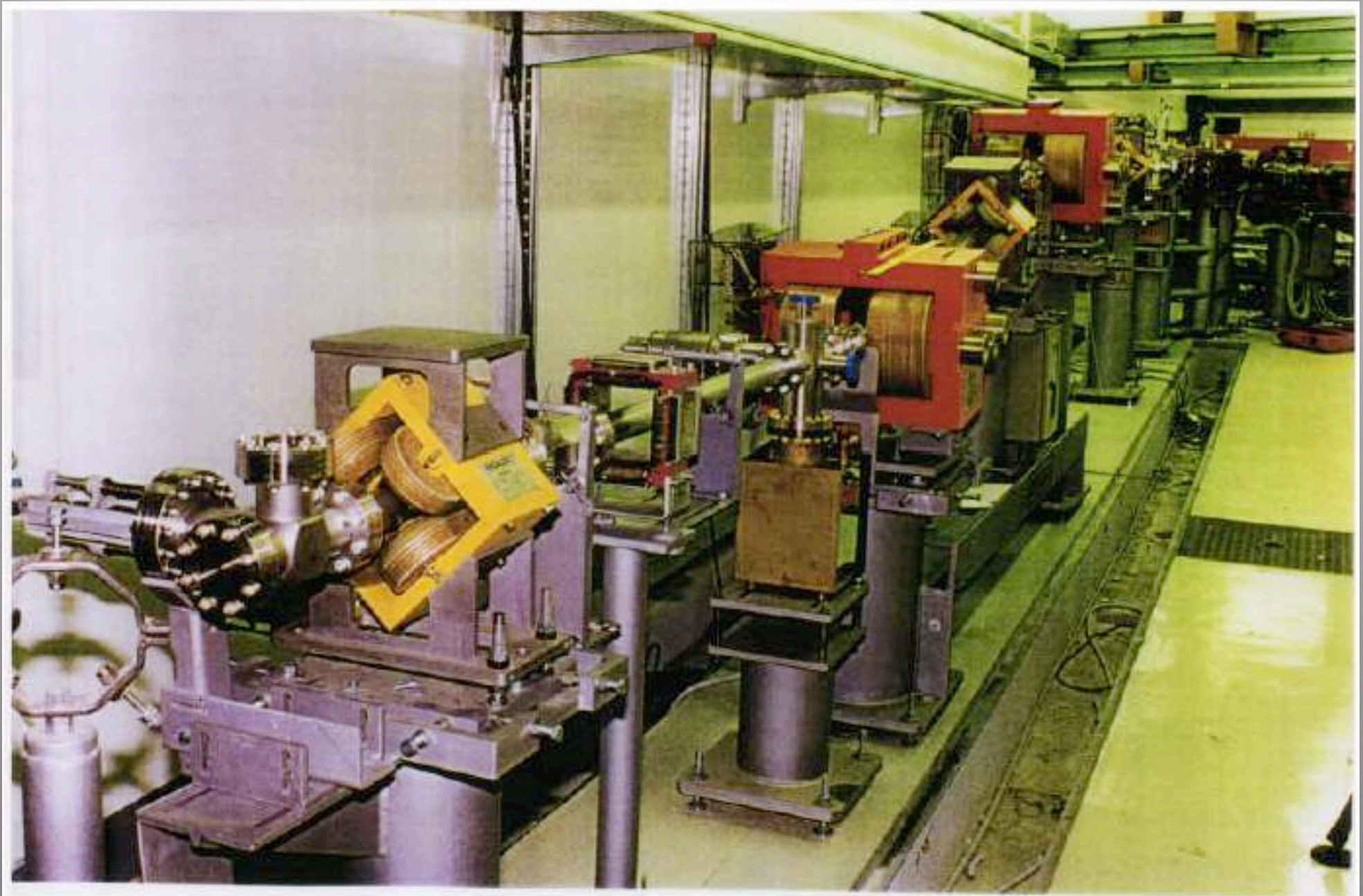
S-band Accelerator 60 m long

LINAC – Transfer Lines - Accumulatore

e^+ $E = 550 \text{ MeV}$
 $I_{\text{pulse}} = 100 \text{ mA}$
 $\Delta P/P \sim 1\%$
 $\varepsilon = 5 \text{ mm mrd}$

e^- $E = 800 \text{ MeV}$
 $I_{\text{pulse}} = 250 \text{ mA}$
 $\Delta P/P \sim 0.5\%$
 $\varepsilon = 1 \text{ mm mrd}$





Perché abbiamo bisogno dell'Acceleratore?

- $I \sim 1.5 \text{ A}$ significa avere $3.6 \cdot 10^{12}$ particelle
- Nel caso dei positroni il Linac fornisce $8.6 \cdot 10^9$ particelle/impulso
- Se si iniettassero i positroni direttamente dal LINAC nei Main Rings solo $1.7 \cdot 10^9$ particelle sarebbero accettate, questo perché le distribuzioni volumetriche ed in energia delle particelle dal LINAC sono molto più grandi di quelle richieste nei MRs.
Sarebbero quindi necessari 2000 impulsi per riempire ciascun anello.
- Inoltre il gran numero di particelle perse durante l'iniezione costituirebbe un'insostenibile sorgente di **rumore** per gli esperimenti.

Strategia d'Iniezione

Il Linac lavora a 50 Hz

19 impulsi di carica sono iniettati nell'Accumulatore e fatti circolare per un dato tempo in modo da ottenere valori ottimali di:

emittanza

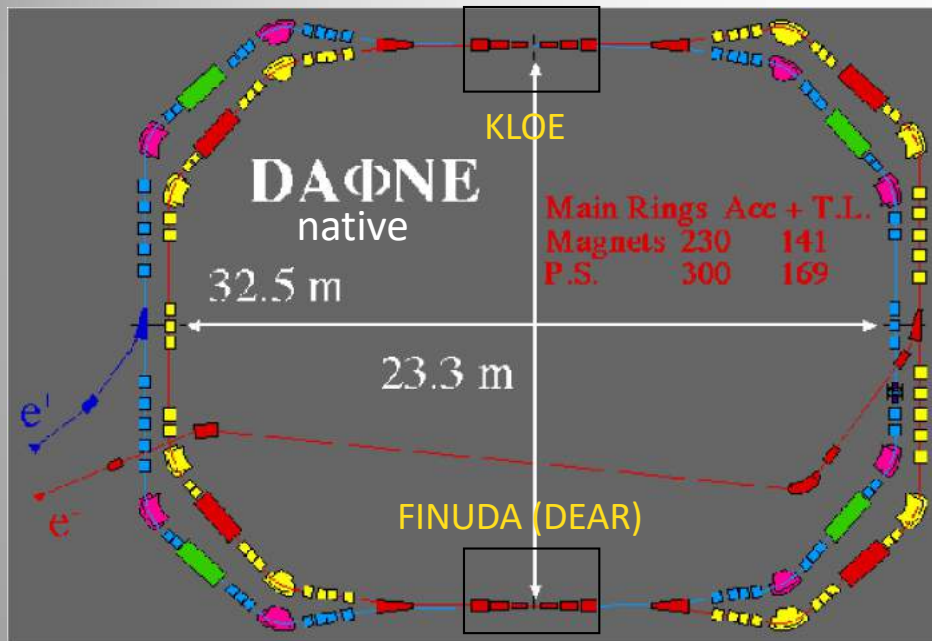
distribuzione in energia delle particelle all'interno del pacchetto

Infine un fascio di alta qualità viene estratto dall'Accumulatore e trasportato lungo le Transfer Lines verso i Main Rings

Nei Main Rings il fascio è iniettato a 2 Hz

$$0.02 * 19 + 5 * 0.02 \approx 0.5s$$

DAΦNE Main Rings Parameters



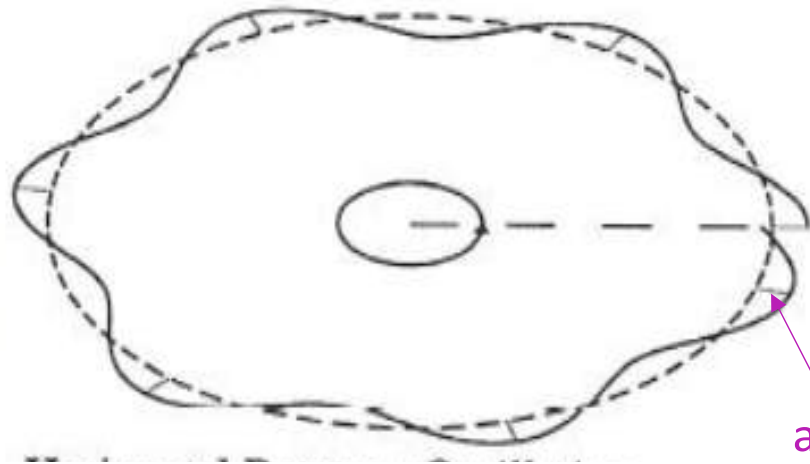
“Proposal for a Φ-factory”, LNF-90/031 (IR),1990.



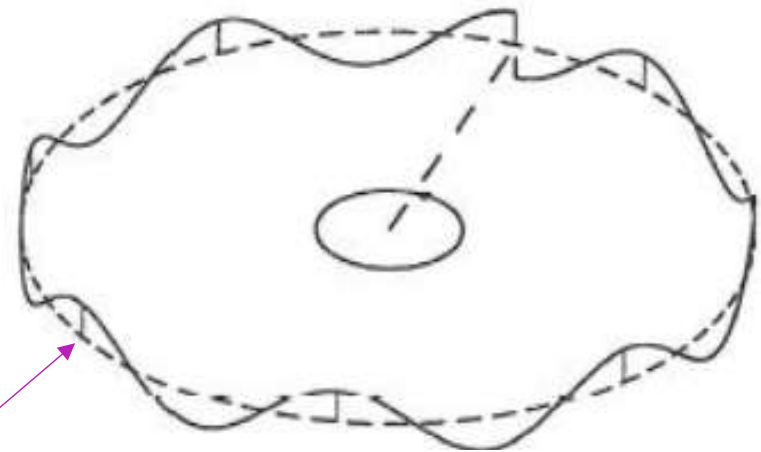
Colliding beams have:
low E
high currents
short bunch spacing
long damping time

	DAΦNE native	DAΦNE Crab-Waist
Energy (MeV)	510	510
$\theta_{\text{cross}}/2$ (mrad)	12.5	25
ϵ_x (mmxrad)	0.34	0.26
β_x^* (cm)	160	26
σ_x^* (mm)	0.70	0.26
Φ_{Piwinski}	0.6	1.9
β_y^* (cm)	1.80	0.85
σ_y^* (μm) low current	5.4	3.1
Coupling, %	0.5	0.5
Bunch spacing (ns)	2.7	2.7
I_{bunch} (mA)	13	13
σ_z (mm)	25	20
N_{bunch}	110	110
L ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) $\times 10^{32}$	1.6	5

Oscillazioni di betatrone e numero di oscillazione di betatrone (tuno)



Oscillazione di betatrone orizzontale
 $\nu_x = 6.3$



Oscillazione di betatrone verticale
 $\nu_y = 7.5$

In DAΦNE

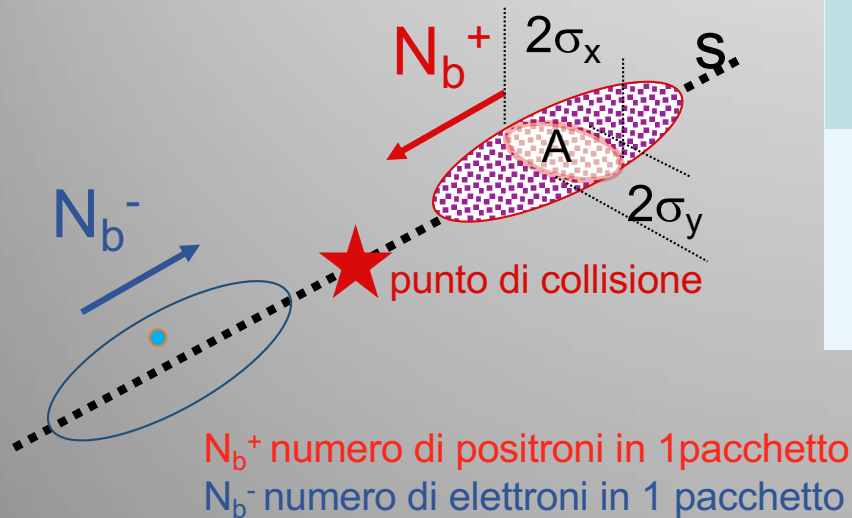
$$\begin{array}{ll} \nu_x^+ \sim 5.10 & \nu_x^+ \sim 5.14 \\ \nu_x^- \sim 5.09 & \nu_x^- \sim 5.15 \end{array}$$

Luminosità L

σ_p è la probabilità di ottenere un dato evento dall'urto tra particelle collidenti (sezione d'urto del processo da studiare)

L è il numero di collisioni realizzate per unità di superficie A per unità di tempo

N_e è il numero di eventi prodotti dalle collisioni



$$\frac{\Delta N_e}{\Delta t} = \sigma_p L$$

$$L = \frac{I^+ I^-}{4\pi f_r b \sigma_x \sigma_y}$$

$$L_{integrata} = L \Delta t$$

Unità di misura

$$L[\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}] = L[10^{33} \text{ nb}^{-1}\text{s}^{-1}]$$

$$\text{nb} = 10^{-9} \text{ b}$$

$$1\text{b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

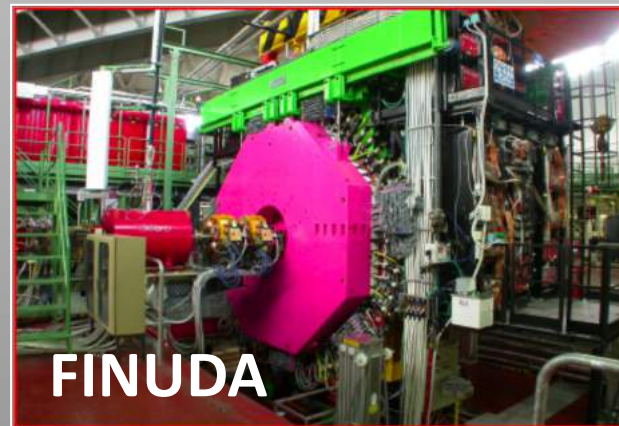
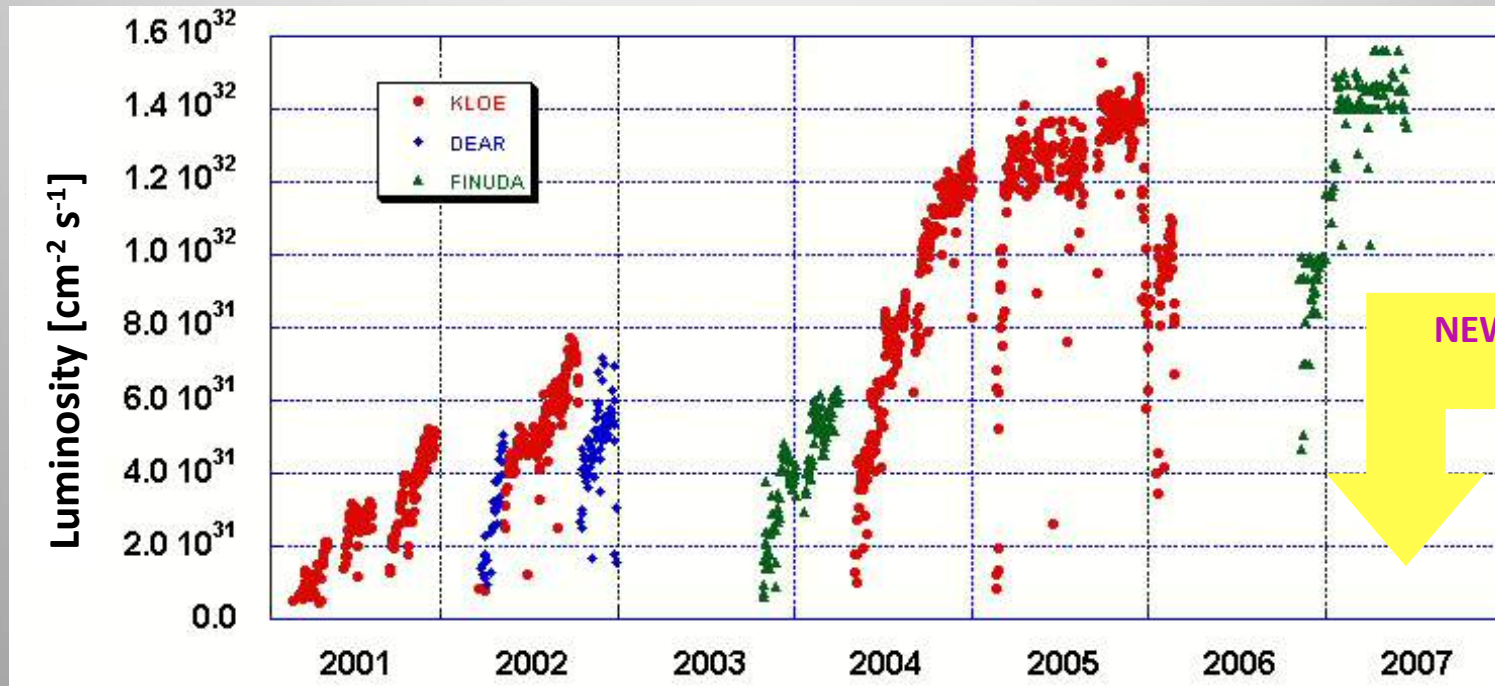
$f_r = c/L$ frequenza di rivoluzione

b numero dei pacchetti

$f_r b$ frequenza di collisione

L_{peak} at DAΦNE 2001 ÷ 2007

L_{peak} had a remarkable evolution mainly due to several machine upgrades
Experiments took data one at the time, although DAΦNE had been originally conceived as collider with two IRs



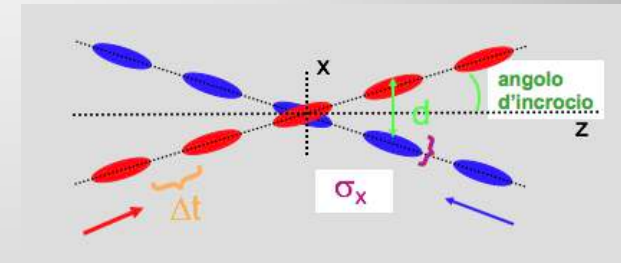
L_{logged} (fb^{-1}) 2001 ÷ 2007

KLOE	3.0
FINUDA	1.2
DEAR	0.2

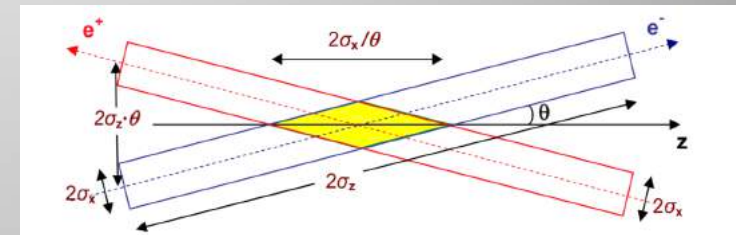
*Un nuovo metodo per gestire
l'interazione fascio-fascio: lo schema di
collisione Crab-Waist*

Il nuovo approccio di DAΦNE alle Collisioni

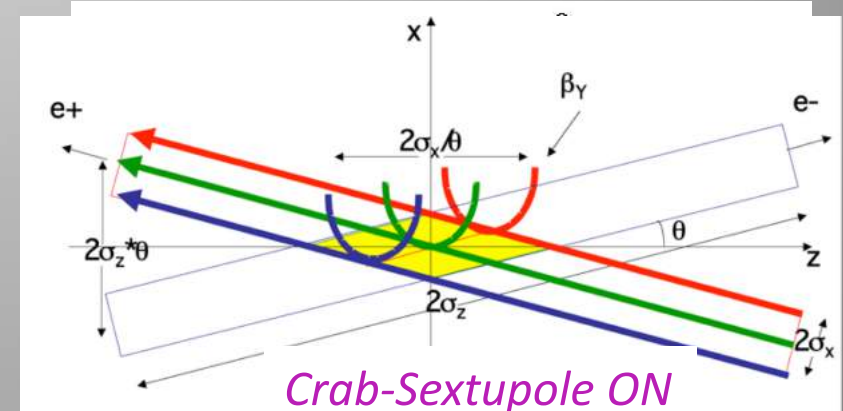
Aumentare l'angolo d'incrocio orizzontale con cui i fasci di elettroni e positroni collidono



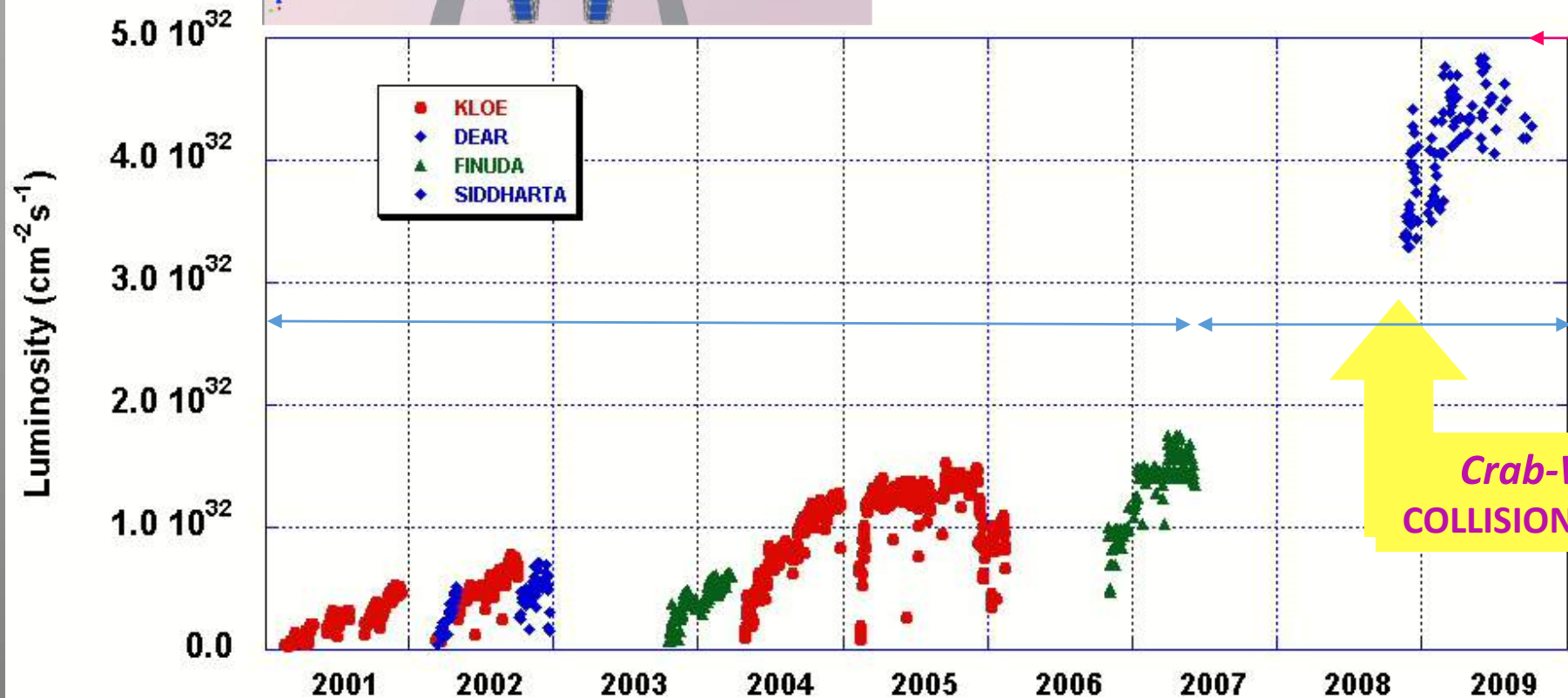
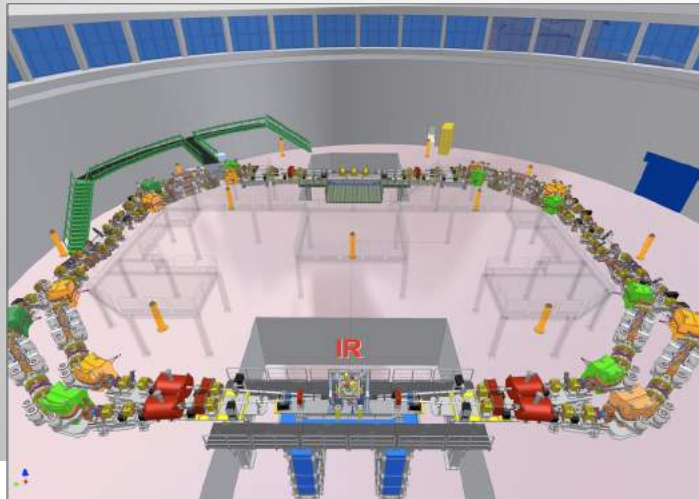
Così facendo si può aumentare il focheggiamento dei pacchetti interagenti nel punto di collisione, soprattutto nel piano verticale



Compensare le risonanze che insorgono nel caso di collisione con grande angolo di incrocio per mezzo di due sestupoli, *Crab-Sextupole*, installati simmetricamente e con opportuni avanzamenti di fase rispetto al punto di collisione IP



Luminosity during SIDDHARTA run



Design Goal

Crab-Waist
COLLISION SCHEME

Collisori basati sul concetto *Crab-Waist*

Colliders	Location	Status
DAΦNE	Φ-Factory Frascati, Italy	In operation (SIDDHARTA-2)
SuperKEKB	B-Factory Tsukuba, Japan	Phase III commissioning in 2019
SuperC-Tau	C-Tau-Factory Novosibirsk, Russia	Russian mega-science project
FCC-ee	Z,W,H,tt-Factory CERN, Switzerland	100 km, CDR at the end of 2018
CEPC	Higgs-Factory China	100 km, CDR released in September 2018
HIERA	2-7 GeV China	Considered option

KLOE-2 run

Integrating the high luminosity collision scheme with a large experimental detector introduces new challenges in terms of:

- IR layout
- optics
- beam acceptance
- coupling correction

Crucial Points:

IR optics complying with:

- Low- β

- Crab-Waist*** collision scheme

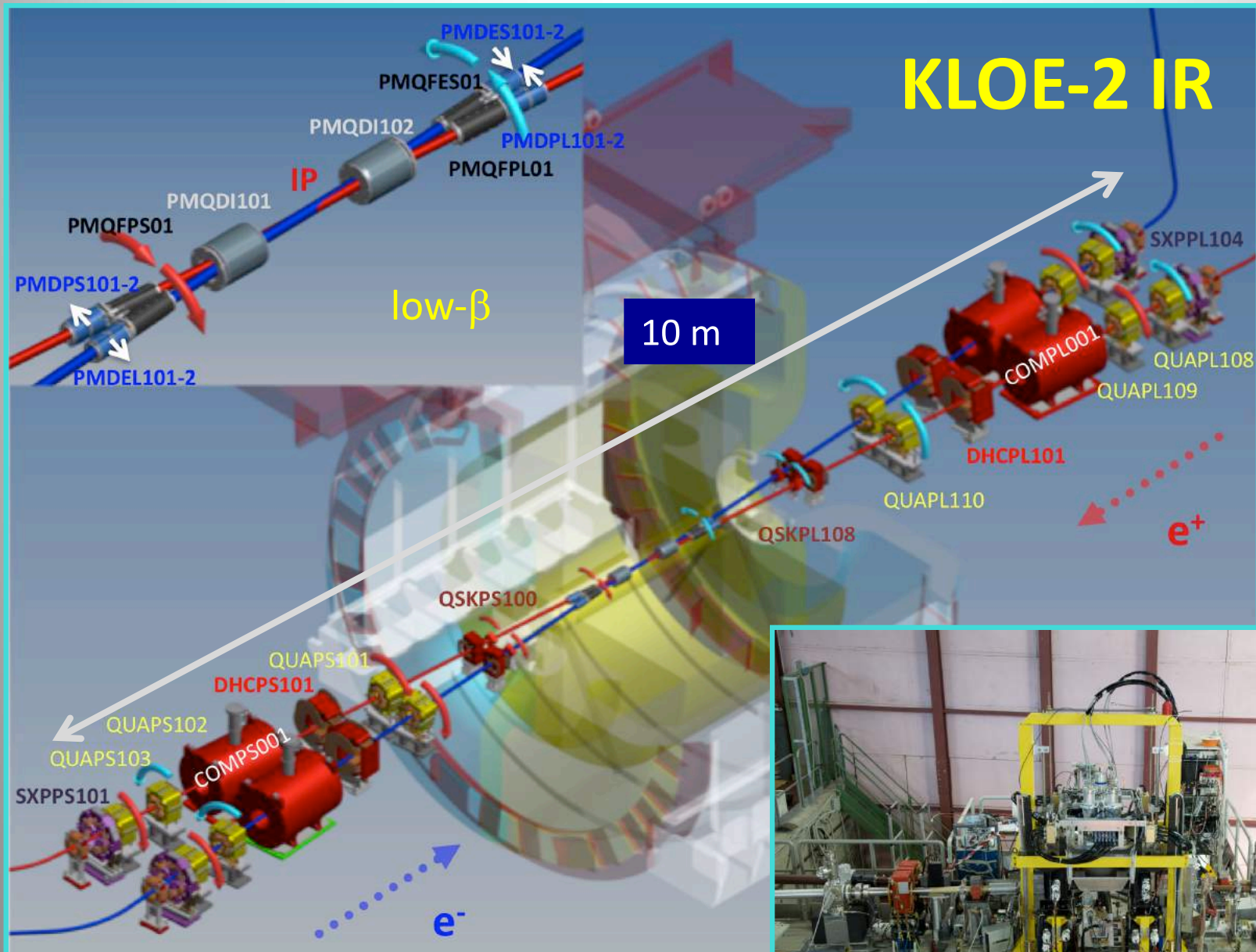
- Coupling compensation

- Beam trajectory control

IR mechanical design allowing:

- Large crossing angle

- Early vacuum pipe separation after IP inside the detector



C. Milardi *et al* 2012 JINST 7 T03002.



DAΦNE and KLOE-2

$$E_{CM} = 1020 \text{ MeV}$$

Crab-Waist collision scheme implemented for the first time with a large detector including a strong solenoidal field



DAΦNE Activity Program for KLOE-2

Preliminary Test Phase

fall 2010 ÷ Dec 2012

Collider Consolidation

KLOE-2 detector layers installed

Dec 2012 ÷ Jun 2013

KLOE-2 data taking

I Run

Nov 16th 2014 ÷ Jul 3rd 2015

goal 1 fb⁻¹

II Run

Spt 28th 2015 ÷ Jun 29th 2016

goal 1.5 fb⁻¹

III Run

Spt 12nd 2016 ÷ Aug 1st 2017

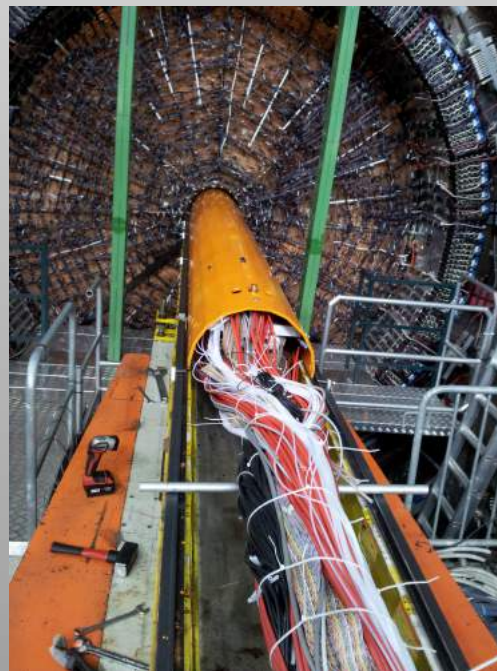
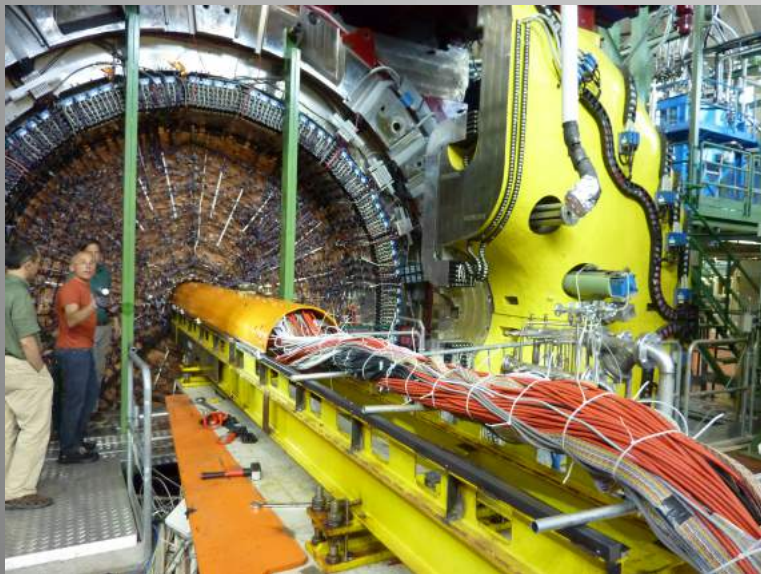
goal 2 fb⁻¹

IV Run

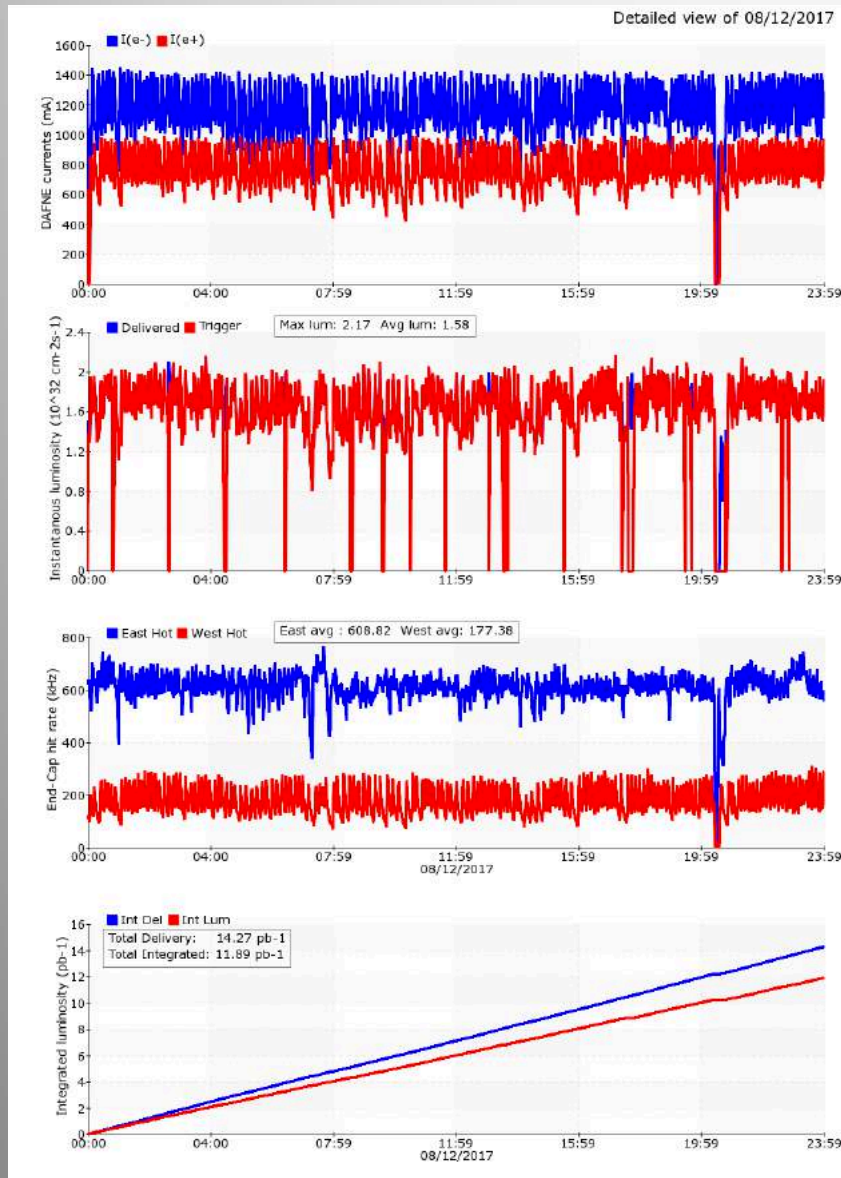
Spt 6th 2017 ÷ Mar 31st 2018

goal 1.5 fb⁻¹

DAΦNE e KLOE-2 upgrade pronti a fine Luglio 2013



Highest Daily Integrated Luminosity

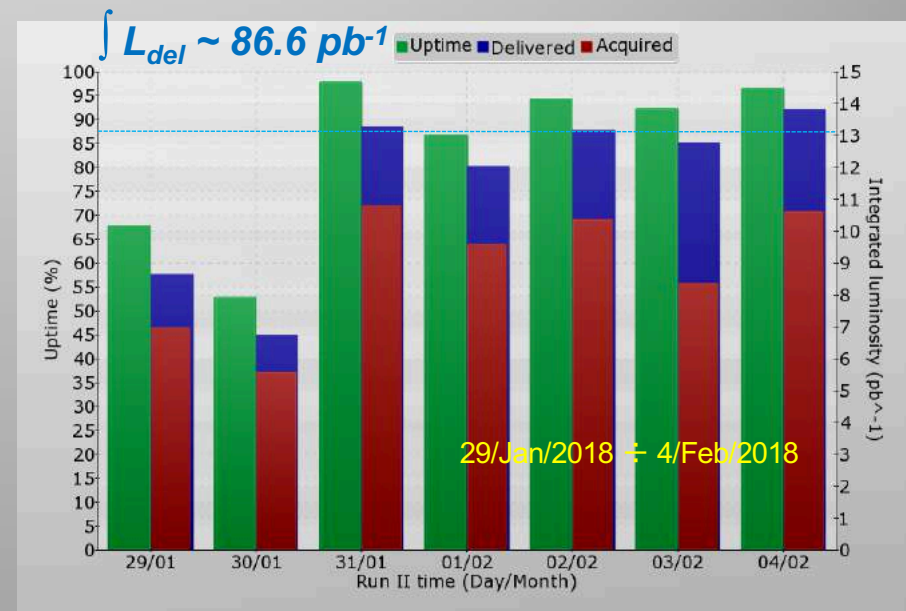


$$\int L_{del} \sim 14.3 \text{ pb}^{-1}$$

$$\int L_{acq} \sim 11.9 \text{ pb}^{-1}$$

$$\text{Uptime} \sim 98\%$$

- 106 bunches
- Sustainable background
- $I_{\text{MAX}}^- = 1.5 \div 1.6 \text{ A}$
- $I_{\text{MAX}}^+ = 1.0 \div 1.16 \text{ A}$
- Sustainable background

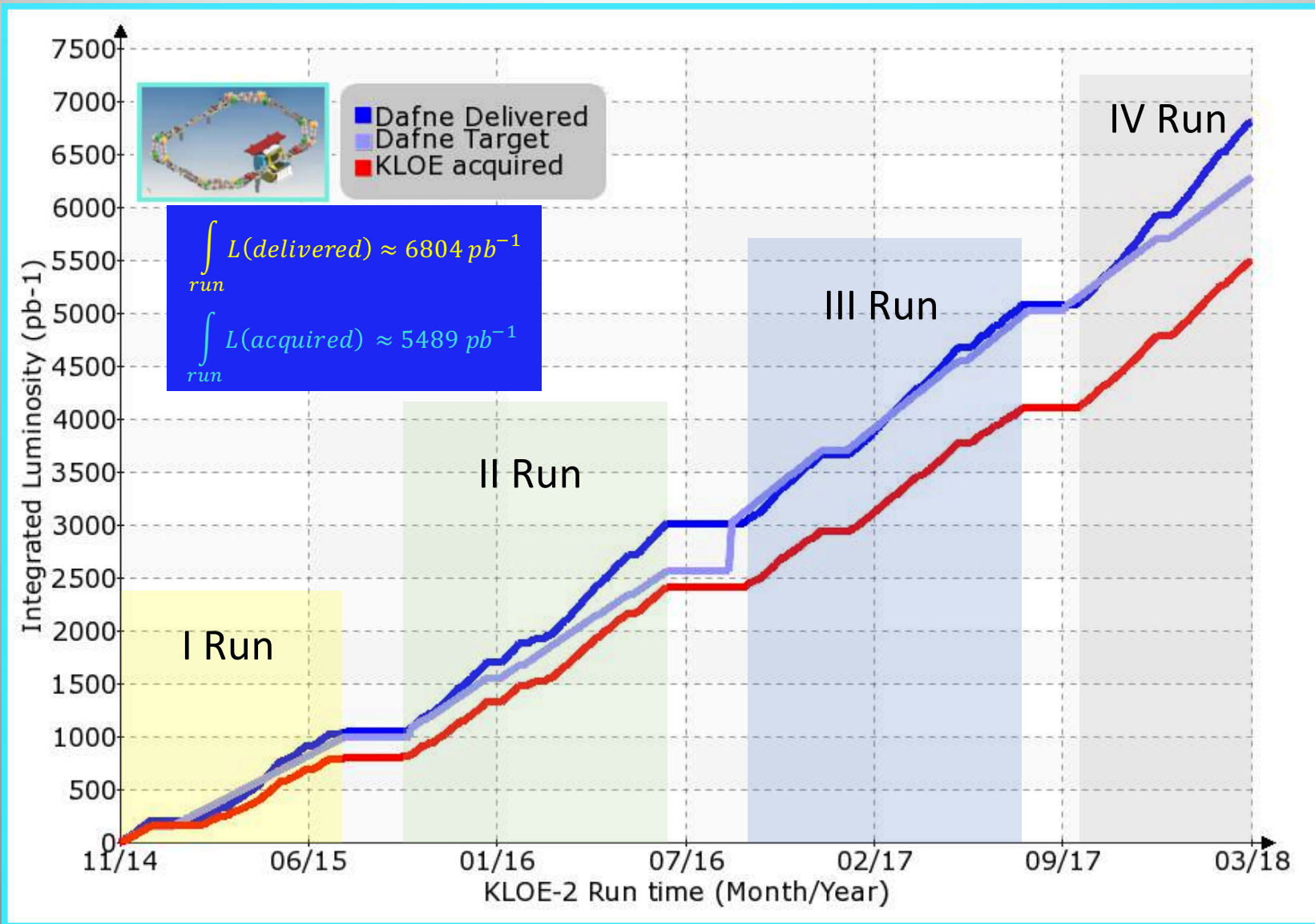


Peak Luminosity

	DAΦNE CW upgrade tested with SIDDHARTA (2009)	DAΦNE KLOE (2005)	DAΦNE (CW) KLOE-2 (2014)
L_{peak} [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	$4.53 \cdot 10^{32}$	$1.50 \cdot 10^{32}$	$2.38 \cdot 10^{32}$
I^- [A]	1.52	1.4	1.18
I^+ [A]	1.0	1.2	0.87
N_{bunches}	105	111	106
$\int_{\text{day}} L$ [pb^{-1}]	14.98	9.8 (seldom)	14.3

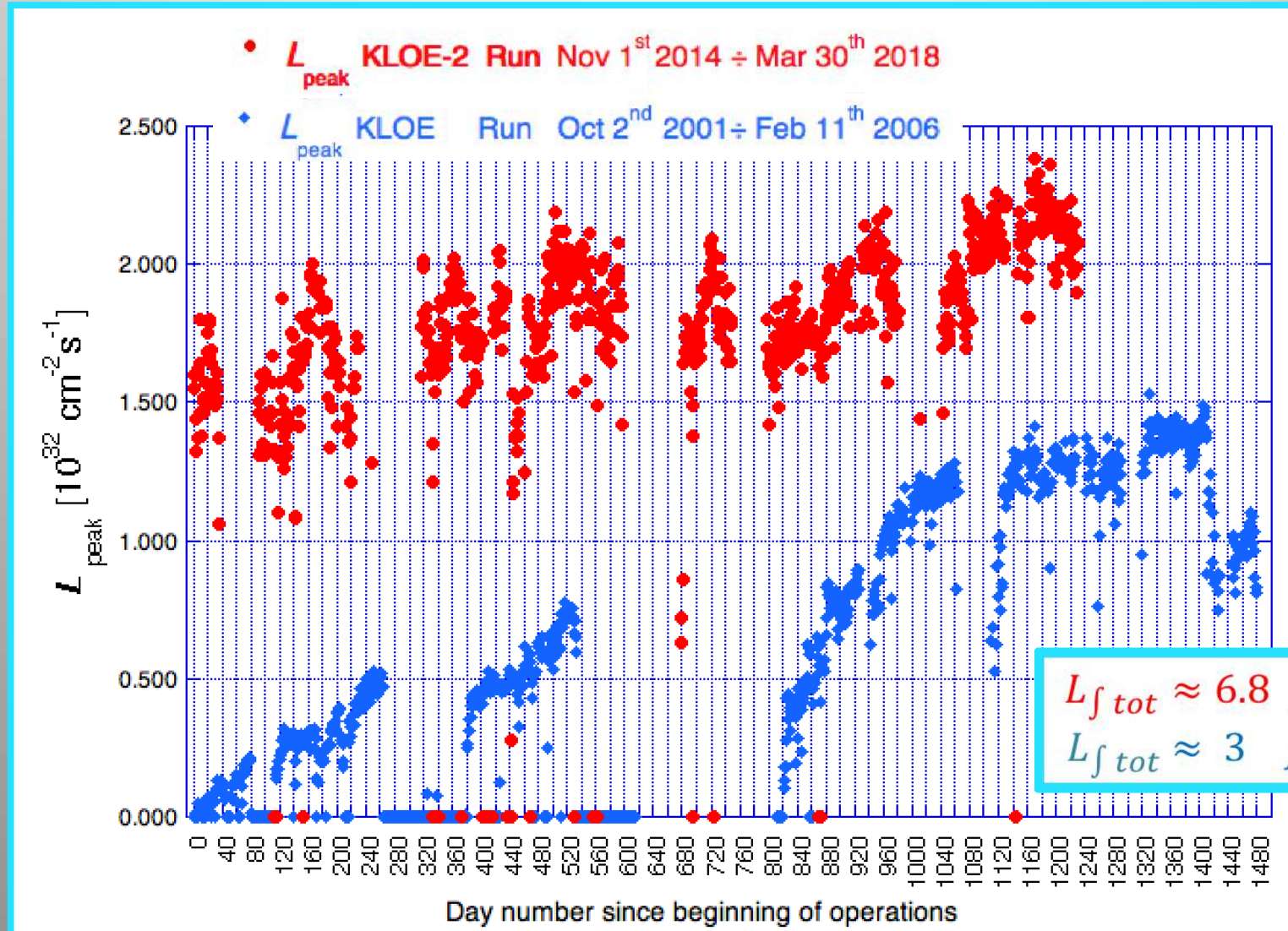
L_{peak} exceeds by a 59% the best luminosity ever achieved, at DAΦNE, during operations for an experimental apparatus including high field detector solenoid.

KLOE-2 Run Overview

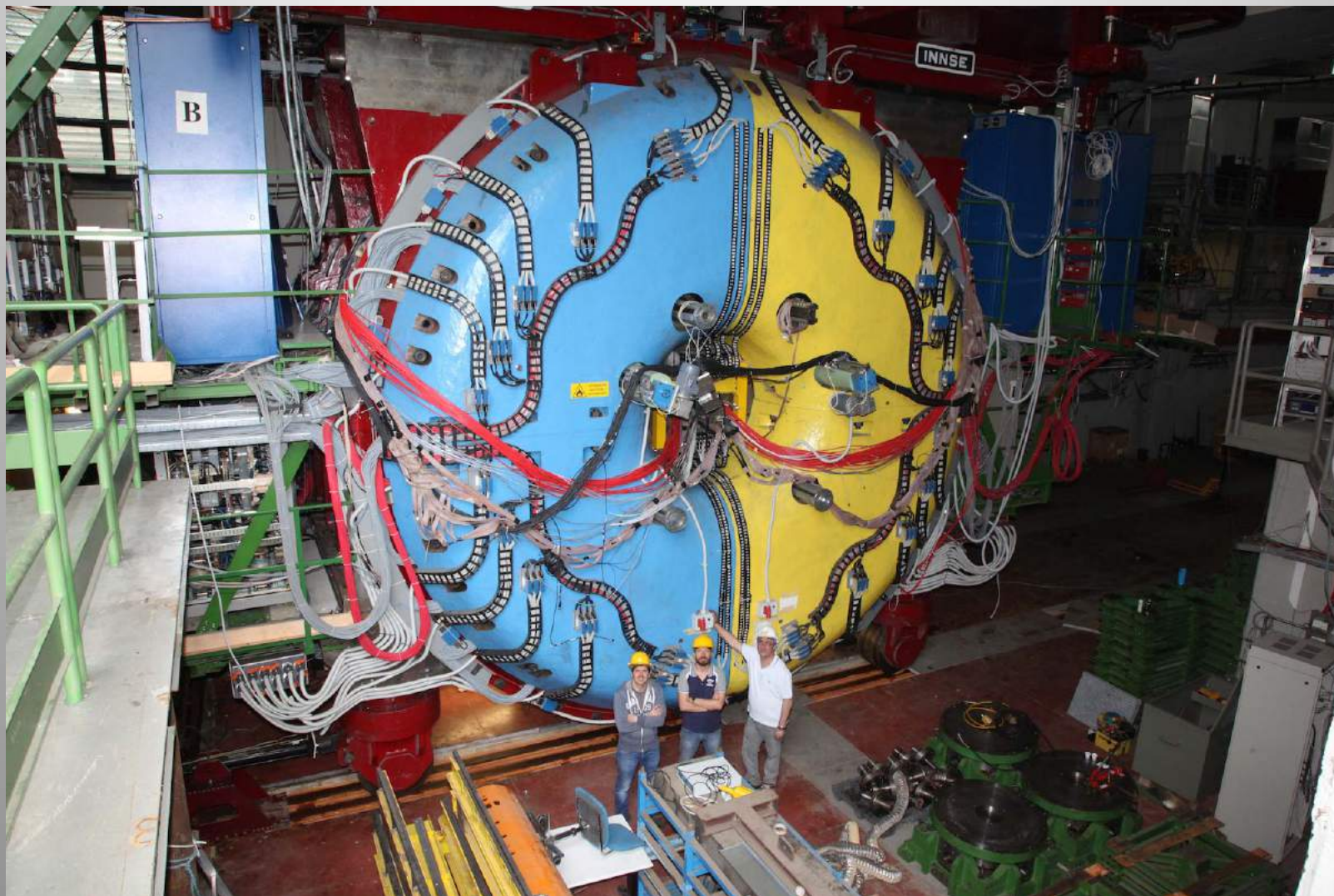


Crab-Waist Luminosity Gain

Crab-Waist provides a 59% increase in terms of peak luminosity as evidenced by data taken by the same detector with the same accuracy



KLOE-2 esce di scena



<https://www.youtube.com/watch?v=ThDEwuhE1hA>

SIDDHARTA-2

una nuova sfida

La sezione d'interazione, **IR**, di SIDDHARTA-2 è anch'essa basata sullo schema di collisione *Crab-Waist*

I **quadrupoli a magneti permanenti** della IR sono stati sostituiti con dispositivi che forniscono:

- maggiore apertura nel piano orizzontale i (PMQDs)

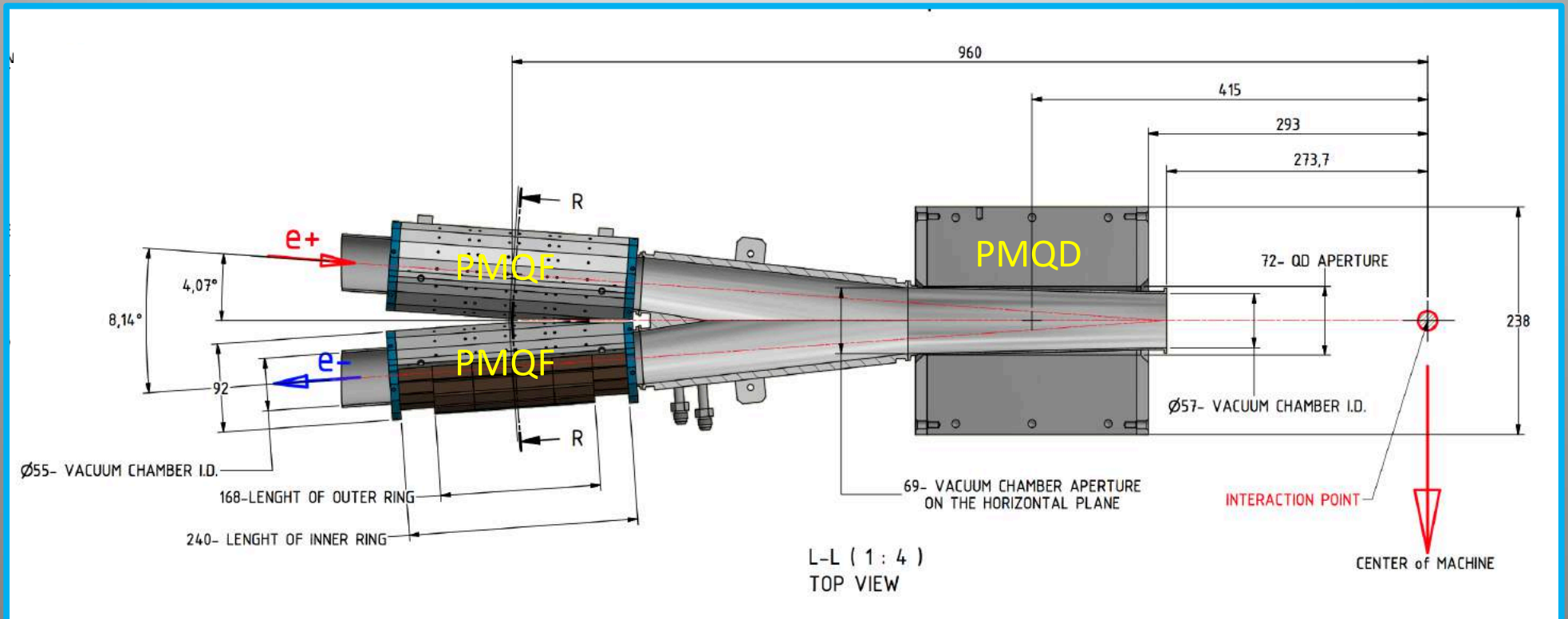
- migliore qualità di campo

- migliore compatibilità meccanica (PMQFs)

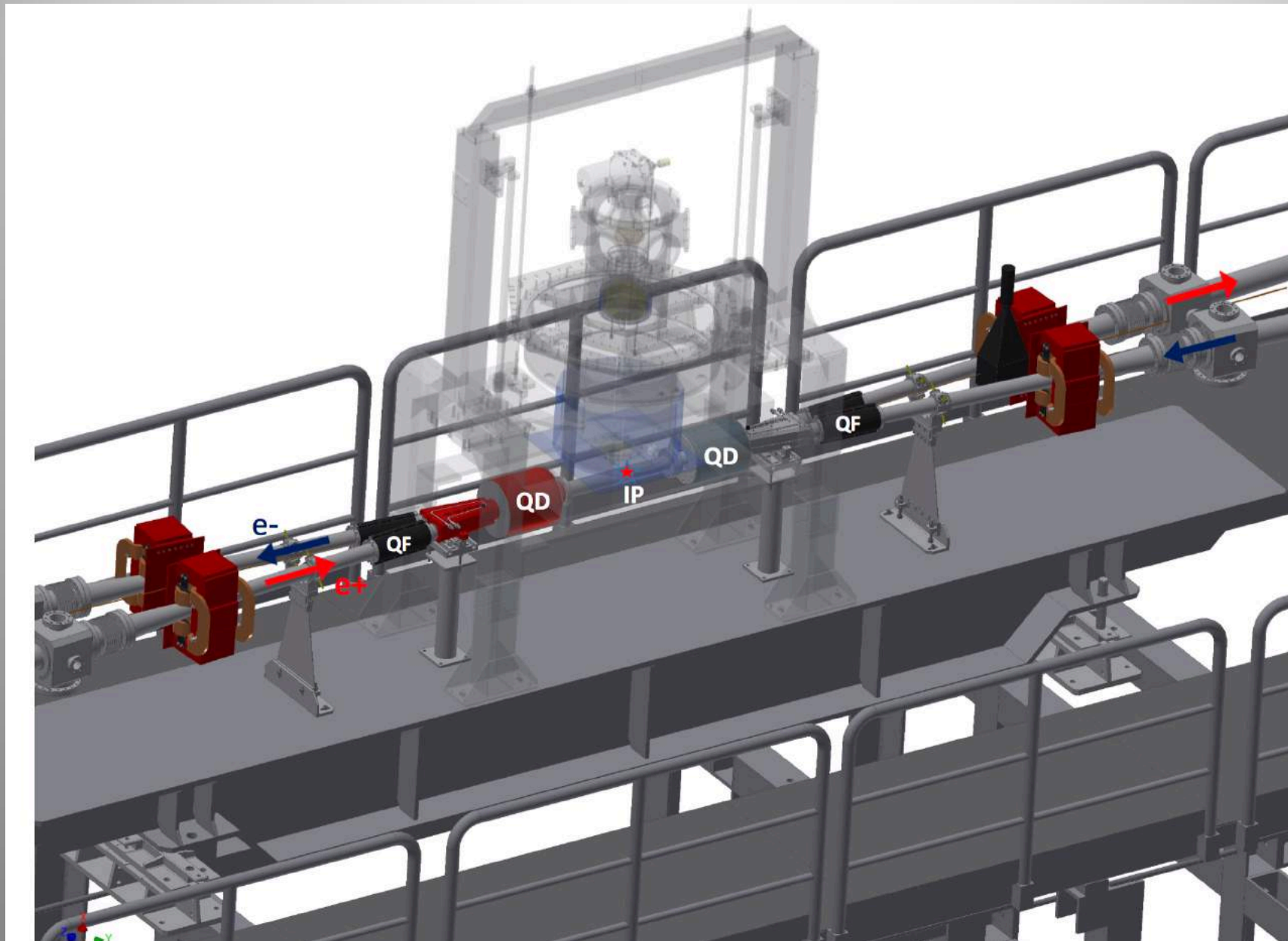
L'anello del fascio positroni sarà equipaggiato con un **secondo sistema di Feedback orizzontale** per contrastare più efficacemente gli effetti negativi dovuti al fenomeno de **e-cloud**

SIDDHARTA-2 IR Assembly

A vacuum chamber compatible with the new PMQUADs has been designed. It provides a wider stay clear aperture for the beam inside the PMQF (+1mm) at the entrance of the PMQDs (+ 4mm)



DAΦNE & SIDDHARTA-2



Il programma di DAΦNE

2020 - 2021

Collisioni per SIDDHARTA-2

Da fine 2021

DAΦNE potrebbe essere trasformata in una test facility

DAΦNE-TF

Conclusioni

DAΦNE è il complesso di acceleratori realizzato per produrre **eventi di fisica all'energia di risonanza dei mesoni Φ** .

Costituisce una delle più grandi infrastrutture dell'INFN, come tale rappresenta un'opportunità unica in Italia per esperimenti di fisica delle particelle e nucleare.

DAΦNE ha fornito dati a tre diversi esperimenti **KLOE, FINUDA e DEAR-SIDDHARTA** *migliorando, al tempo stesso, le proprie prestazioni in termini di luminosità* mediante un'intensa attività di studi e prove sperimentali.

Questo approccio ha portato a proporre e a realizzare, nel 2007, un nuovo schema di collisione chiamato '**Crab-Waist**' che provato con l'esperimento SIDDHARTA ha consentito di triplicare la luminosità di picco, aprendo la strada ad un'ulteriore fase sperimentale per il rivelatore KLOE.

Gli studi di fisica di acceleratori intrapresi su DAΦNE hanno contribuito in maniera sostanziale alla comprensione e agli sviluppi relativamente a problematiche quali: le non linearità delle strutture magnetiche, l'interazione dei fasci collidenti, l'ottimizzazione dell'ottica e gli effetti collettivi caratteristici di fasci di particelle ad alta intensità'.

Conclusioni

*DAΦNE è una infrastruttura di primo piano nel campo della fisica degli acceleratori che è stata realizzata e vive grazie all'impegno e alle competenze di tutto il **personale Tecnico-Amministrativo***

Fasi come:

Realizzazione

Modifiche

Installazione dei diversi esperimenti

operazione

dell'acceleratore richiedono il disbrigo di una ponderosa mole atti burocratici ed amministrativi

(acquisti, gare, contratti, progetti Europei, rendicontazioni ...)

*DAΦNE vive anche di collaborazioni internazionali che a loro volta richiedono un **particolare** impegno nell'organizzare efficientemente la presenza nei laboratori dei colleghi stranieri.*

Grazie