

ACCELERATORI DI PARTICELLE

Andrea Ghigo



INCONTRI DI FISICA
CORSO DI AGGIORNAMENTO DI FISICA
DELLE ALTE ENERGIE
PER DOCENTI DI SCUOLE MEDIE
SUPERIORI
INFN - LNF

Frascati, 5-7 Settembre 2001

Incont
ri ■ di
fisica

Info: Laboratori Nazionali di Frascati

Argomenti della presentazione

- A cosa servono gli acceleratori di particelle.
- Definizioni.
- I costituenti fondamentali.
- Evoluzione degli acceleratori.
- Acceleratori elettrostatici e lineari.
- Acceleratori circolari: ciclotrone e sincrotrone.
- Anelli di accumulazione.
- Alta energia – alta luminosità.
- I nuovi acceleratori.
- Applicazione degli acceleratori in altre discipline.
- Il fascio di DAΦNE.

Bibliografia

- R.Feynman, R.Leighton, M.Sands: “La Fisica di Feynman” (Vol. 2), Addison Wesley
- R.Wilson, R.Littauer:”Acceleratori di particelle”, Zanichelli
- B.Toushek:”Gli anelli di accumulazione”, Letture da *Le Scienze* Le particelle fondamentali a cura di L.Maiani
- E. Wilson:”An introduction to particle accelerators”, Oxford

Acceleratori di Particelle

Gli acceleratori di particelle sono stati realizzati per studiare i costituenti più piccoli del mondo conosciuto. Infatti per il principio di indeterminazione di Heisenberg la quantità di moto e la posizione non possono essere contemporaneamente misurati con precisione; o meglio gli errori nella misura della posizione Δx , e della quantità di moto Δp , devono soddisfare la relazione: $\Delta x \Delta p > h/4\pi$ con h costante di Planck.

Per “risolvere” particolari aventi le dimensioni del raggio nucleare

($\Delta x = 10^{-12}$ cm) la quantità di moto dovrebbe essere $\Delta p > 10$ MeV/c. Per poter indagare sulla struttura fine di particelle è necessario fornire quantità di moto alle particelle del fascio che esplora le particelle del bersaglio.

I primi acceleratori, negli anni '30, furono motivati dagli studi di fisica nucleare, i successivi dallo studio delle particelle elementari in quanto, dall'equazione di Einstein $E=mc^2$, vi è la possibilità di produrre nuove particelle con masse sempre maggiori generando negli acceleratori fasci di energie sempre più alte.

Gli acceleratori sono stati poi impiegati in vari settori della ricerca ed hanno trovato un vasto campo di applicazione in altre discipline.

Esempi di applicazioni degli acceleratori di particelle

- Acceleratori di elettroni come sorgenti per la produzione di radiazione di sincrotrone, dall' infrarosso ai raggi x, che viene utilizzata in un' innumerevole campo di applicazioni come ad esempio: **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.**

Caratteristiche principali del fascio di particelle in un acceleratore

- Energia e distribuzione di energia.
- Emittanza: prodotto della dimensione trasversale per la divergenza angolare o meglio area nello spazio delle fasi che racchiude la distribuzione di particelle.
- Corrente media e di picco.
- Struttura temporale dei pacchetti di particelle

Gli acceleratori di particelle dedicati alla fisica delle alte energie si distinguono a loro volta per:

- **Tipo di particelle accelerate:** protoni, elettroni, ioni. Con gli adroni si possono raggiungere energie nel centro di massa più elevate ma con i leptoni gli esperimenti risultano più facili da interpretare
- **Energia massima raggiungibile:** questi acceleratori si usano per investigare le zone di energie sempre più elevate e scoprire nuove particelle.
- **Luminosità massima** per effettuare esperimenti ad alta statistica in cui è necessaria un'elevata produzione di particelle di determinata energia

Equazione del moto di una particella carica in campo elettrico **[E]** e magnetico **[B]**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = e \left[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right]$$

Dove $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$ è il momento, m la massa invariante, $\vec{v}$ la velocità, γ il fattore di Lorentz ed e la carica.

L'unità di misura dell'energia delle particelle è l'elettronvolt **[eV]** pari all'energia di una particella di carica unitaria accelerata da una differenza di potenziale elettrostatico di un volt:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

Più usati negli acceleratori i multipli **[keV, MeV, GeV]**

Definitions I

Energy of a particle at rest

$$E_0 = m_0 c^2$$

Total energy of a moving particle (definition of γ)

$$E = \gamma E_0 = m_0 c^2 \gamma$$

$$\gamma = \frac{E}{E_0}$$

Another relativistic variable is defined:

$$\beta = \frac{\text{momentum} \times c}{\text{energy}} = \frac{pc}{E} = \frac{v}{c}$$

Alternative axioms you may have learned

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

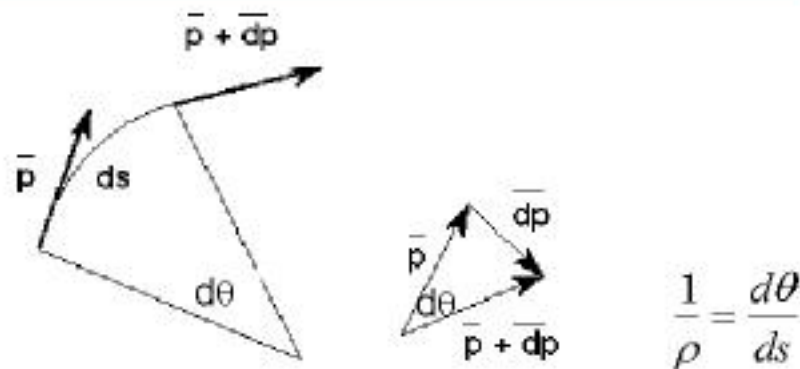
$$p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{m_0 c \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

You can prove:

$$pc = \beta E = m_0 c^2 (\beta \gamma)$$

Magnetic rigidity

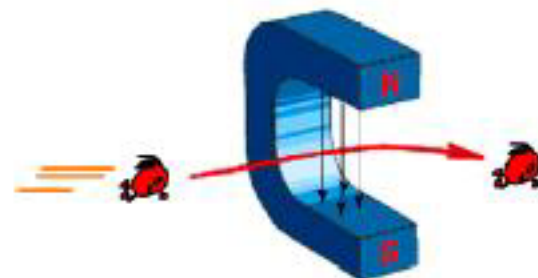


$$\begin{aligned}\frac{d\mathbf{p}}{dt} &= |\mathbf{p}| \frac{d\theta}{dt} = |\mathbf{p}| \frac{d\theta}{ds} \frac{ds}{dt} = \frac{|\mathbf{p}|}{\rho} \frac{ds}{dt} \\ &= e\mathbf{v} \times \mathbf{B} = e \frac{ds}{dt} B\end{aligned}$$

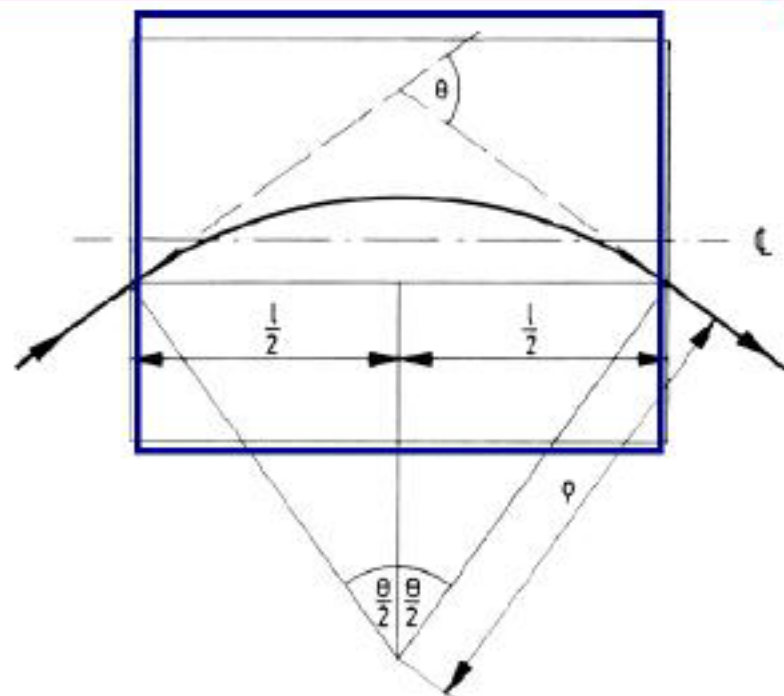
$$(B\rho) = \frac{p}{e} = \frac{pc}{ec} = \frac{\beta E}{ec} = \frac{\beta \gamma E_0}{ec} = \frac{m_0 c}{e} (\beta \gamma)$$

$$(B\rho)[T \cdot m] = \frac{pc[eV]}{c[m \cdot s^{-1}]} = 3.3356(pc)[GeV]$$

Deflessione (campi magnetici)



Bending Magnet

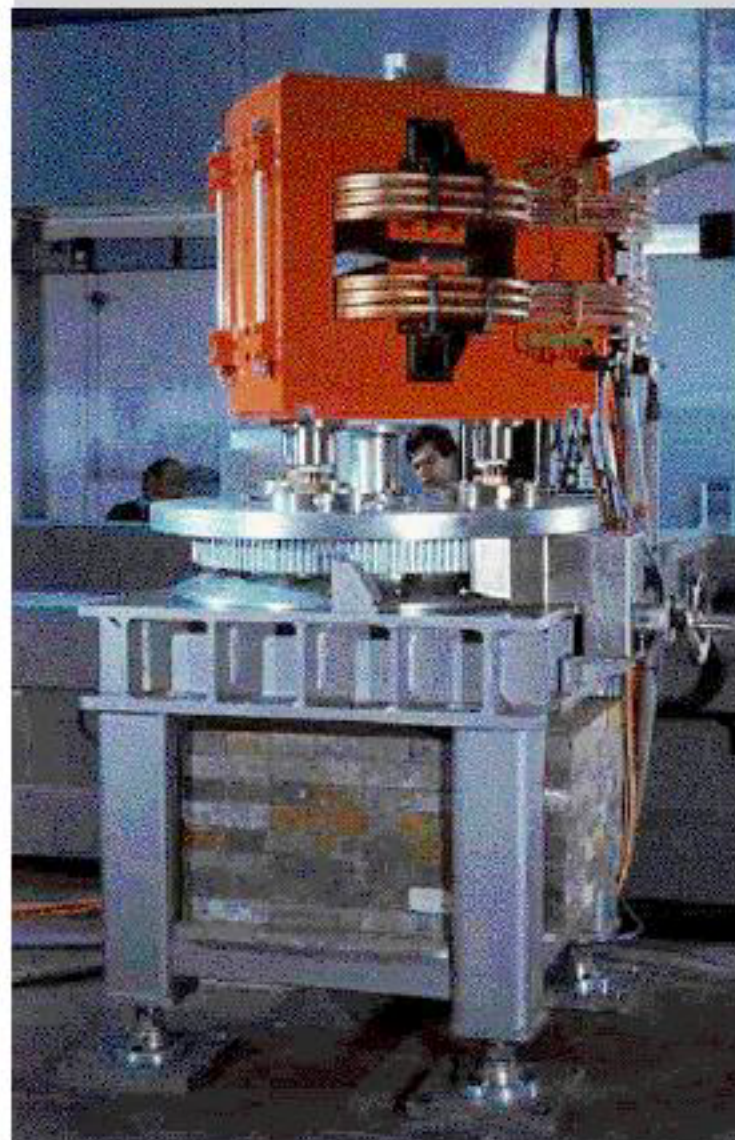


- ◆ Effect of a uniform bending (dipole) field

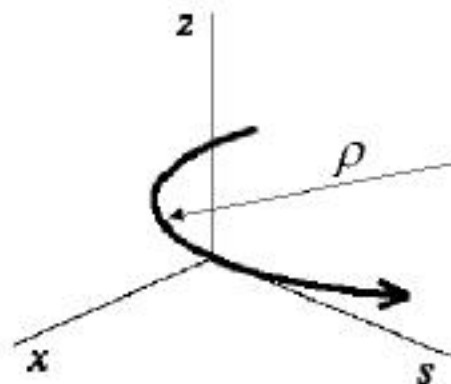
$$\sin (\theta / 2) = \frac{1}{2\rho} = \frac{1B}{2(B\rho)}$$

- ◆ If $\theta \ll \pi / 2$ then $\theta \approx \frac{1B}{(B\rho)}$

- ◆ Sagitta $\pm \frac{\rho}{2}(1 - \cos (\theta / 2)) \approx \pm \frac{\rho\theta^2}{16} \approx \pm \frac{1}{16} \theta$



Transverse Coordinates



$$\mathbf{F} = e \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

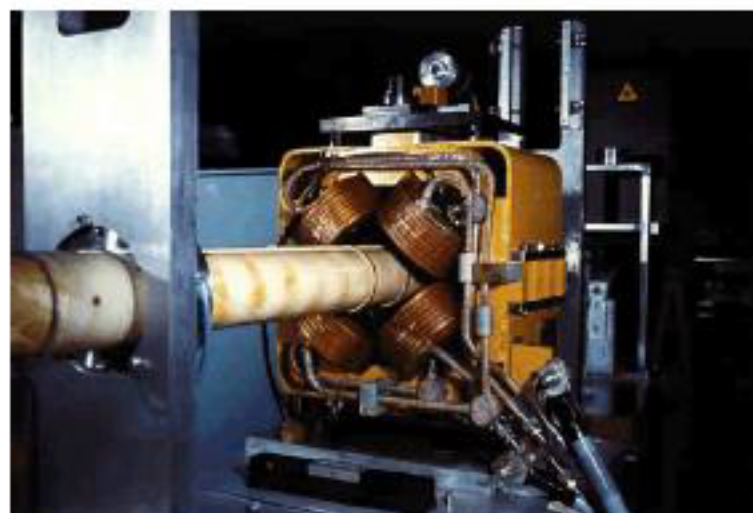
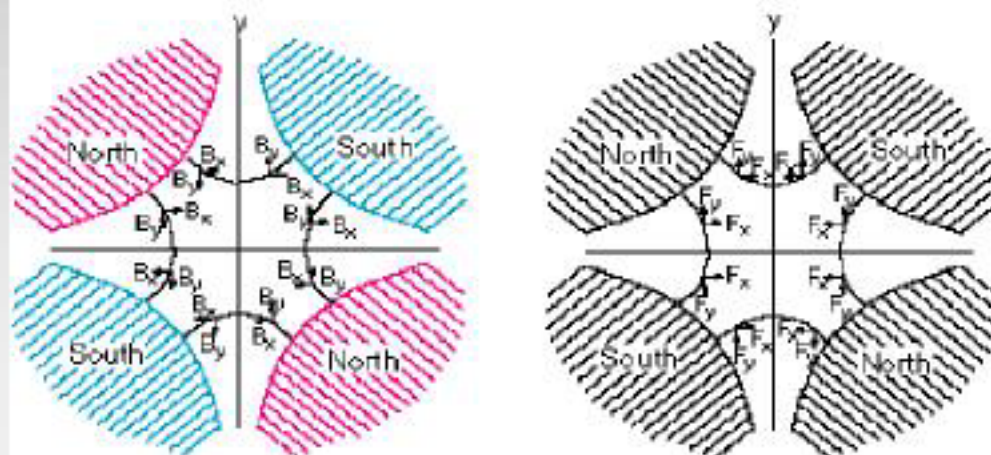
- ◆ **Coordinates**

- » z - vertical
- » x - horizontal
- » y means either vertical or horizontal
- » s - direction of the beam

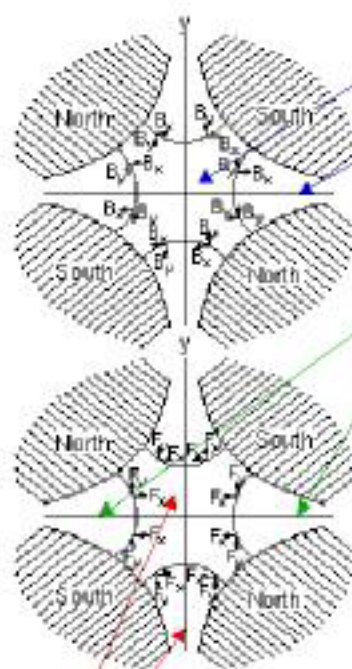
- ◆ **Quadrupoles act on x and z like lenses**

- ◆ **RF Cavities accelerate in the s direction**

Quadrupole focusing



Fields and force in a quadrupole



No field on the axis

Field strongest here

$$B \propto x$$

(hence is linear)

Force restores

Gradient

$$\frac{dB_z}{dx}$$

Normalised:

$$k = -\frac{1}{(B\rho)} \frac{dB_z}{dx}$$

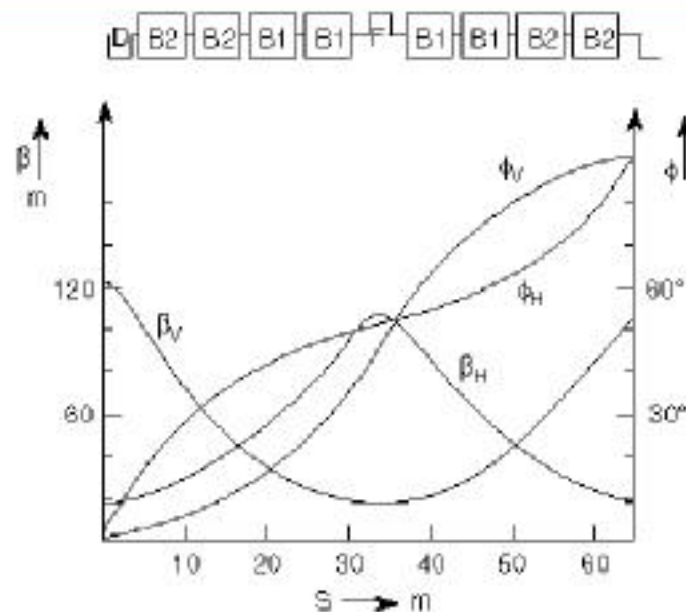
Defocuses in
vertical plane

POWER OF LENS

$$1/k = -\frac{1}{(B\rho)} \cdot \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{1}{f}$$

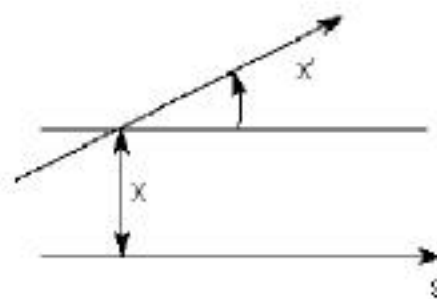
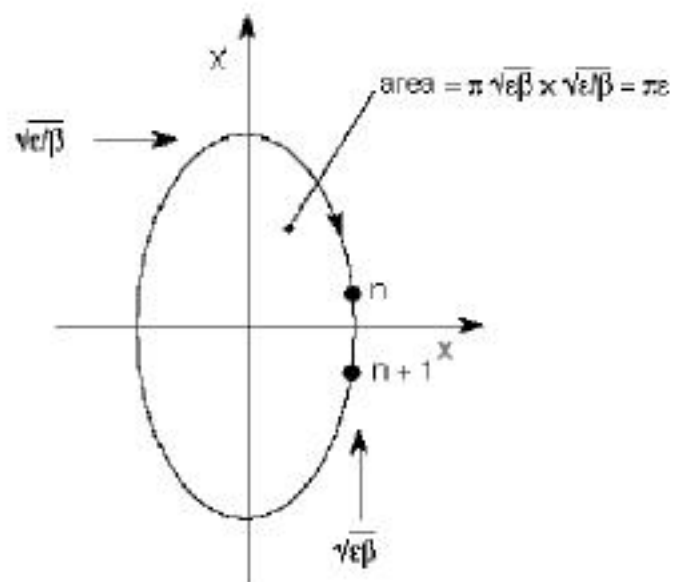
**SOLUTION IS TO ALTERNATE THE
GRADIENTS OF A SERIES OF QUADS**

FODO Period of the SPS

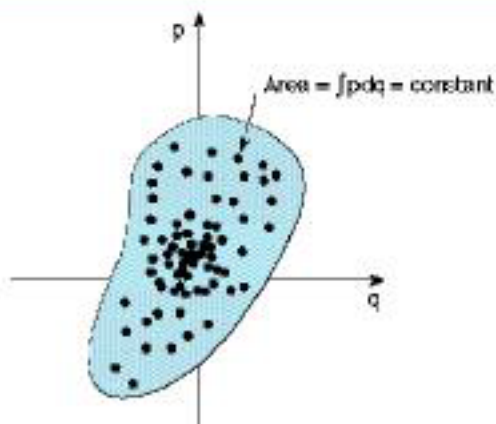


- ◆ D and F are quadrupoles
- ◆ B1 and B2 two types of dipoles
- ◆ Beta (vert. and horiz.) show focussing properties of the machine and define beam size — β^2
- ◆ Trajectories follow distorted simple harmonic motion within the envelopes which are shaded
- ◆ Phase advance ϕ is not quite linear

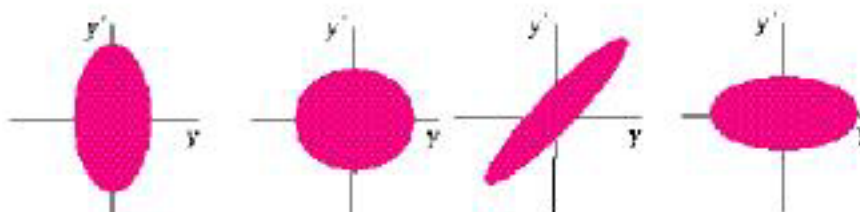
Transverse ellipse



Liouville's Theorem

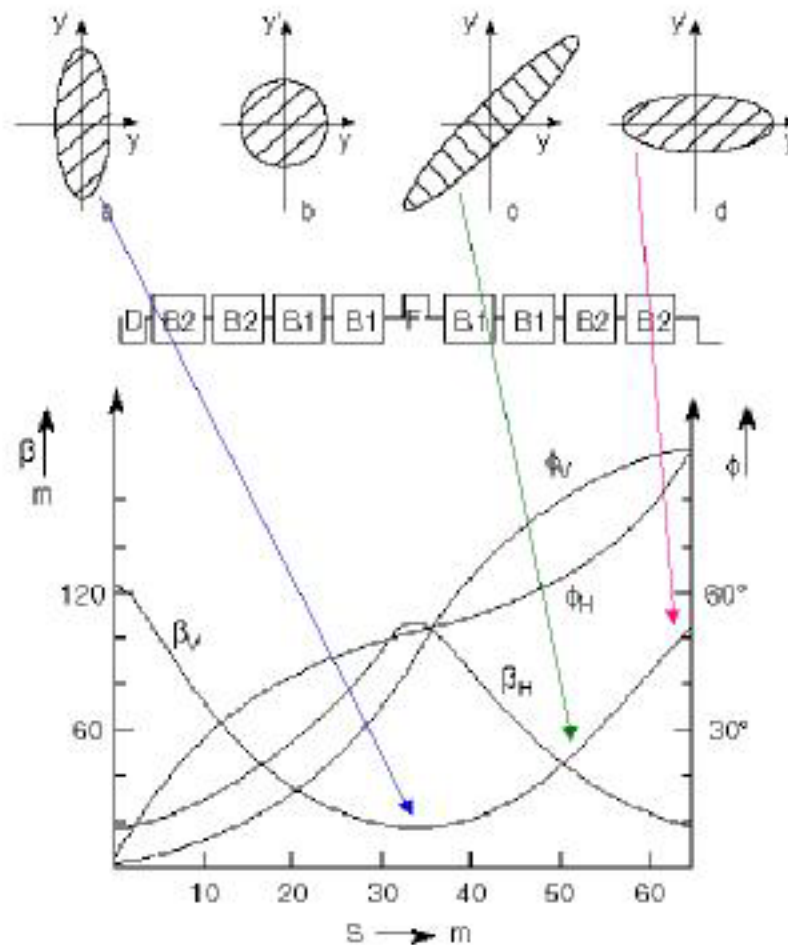


- ◆ “The area of a contour which encloses all the beam in phase space is conserved”
- ◆ This area = $\pi\epsilon$ is the “emittance”
- ◆ It is the same all round the ring



- ◆ **NOT TRUE:**
during acceleration
in an electron machine where synchrotron emission
damps

Betatron phase space at various points in a lattice



Costituenti fondamentali di un acceleratore di particelle

- Il generatore di particelle o cannone.
- Il campo accelerante.
- Il campo magnetico guida curvante e foccheggiante.
- La camera da vuoto nella quale le particelle viaggiano senza interagire con l'aria.
- La diagnostica che misura le caratteristiche del fascio di particelle

Acceleratori elettrostatici

- Nei primi acceleratori l'accelerazione di particelle cariche avveniva generando un alto voltaggio elettrostatico. Il primo acceleratore fu un apparecchio, realizzato da Roentgen, costituito da un'ampolla a vuoto con dentro un catodo connesso al polo negativo di un generatore di tensione. Riscaldato emetteva elettroni che fluivano accelerati dal campo elettrico verso l'anodo (a tensione positiva) sul quale urtavano producendo raggi x.
- Per aumentare l'energia massima delle particelle accelerate Van de Graaff pensò realizzare un generatore nel quale cariche per mezzo di una cinghia non conduttrice venivano trasportate ad un terminale isolato nel quale veniva posta la sorgente di particelle. Pressurizzando il contenitore dell'acceleratore si potevano ottenere differenze di potenziale fino a 15 MV.

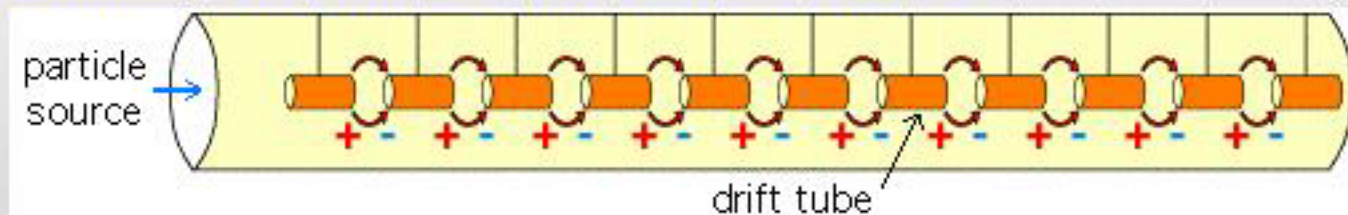
Generatore di Van de Graaff



Acceleratori lineari

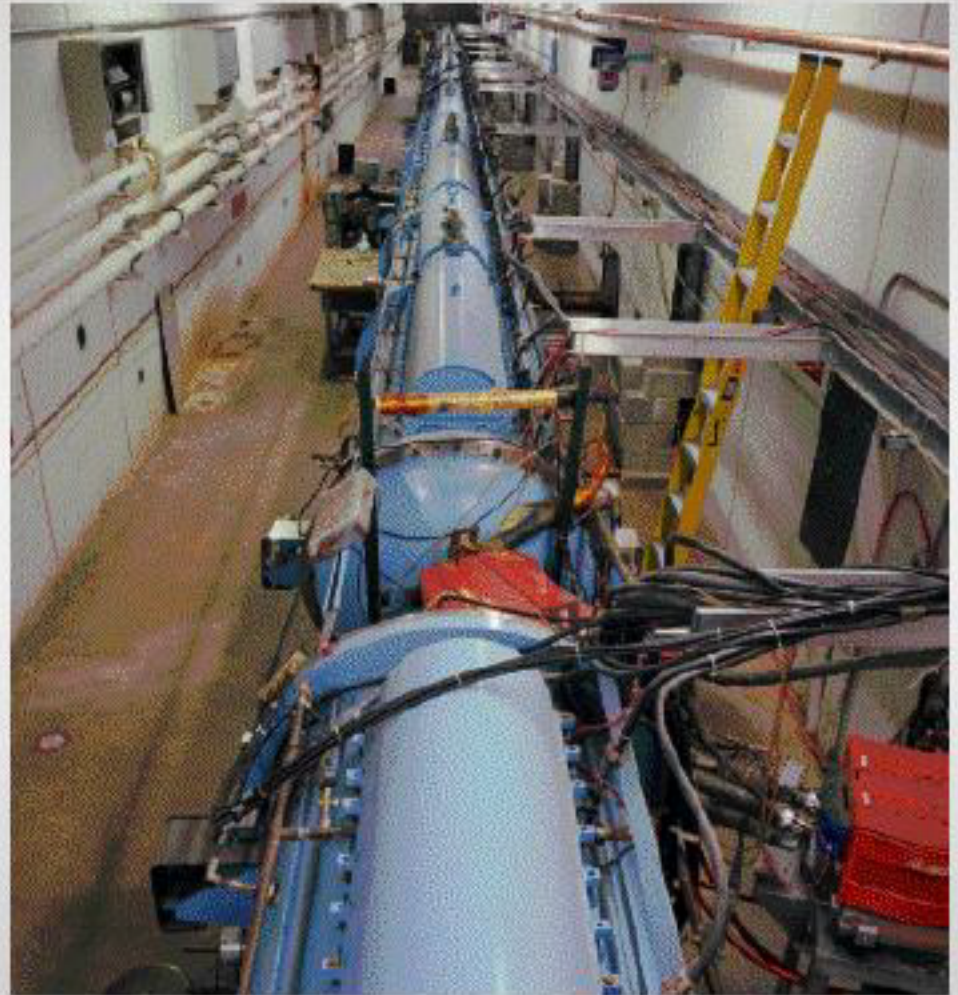


Le particelle emesse dal filamento vengono accelerate dal campo elettrico longitudinale generato da elettrodi susseguenti. Questa idea di Ising (1924) fu applicata da Videroe e nel 1927 venne realizzato il primo “drift tube Linac”.



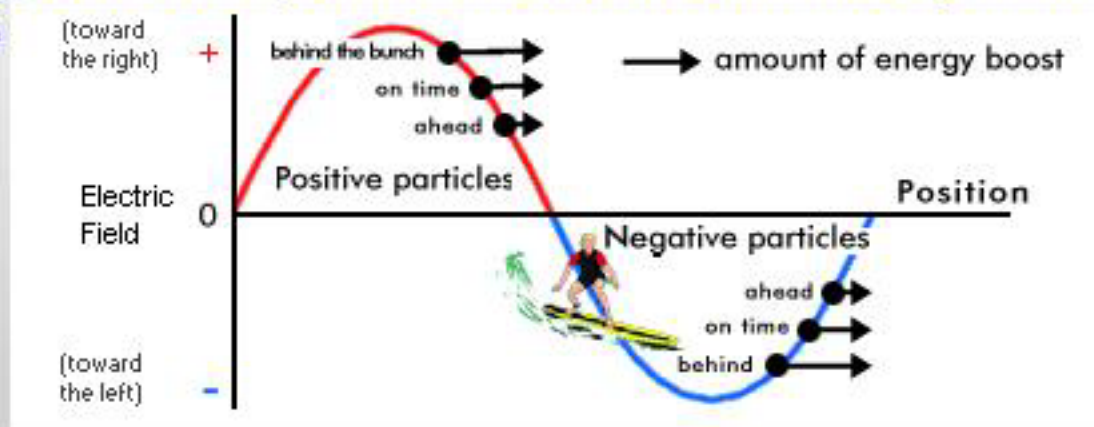
FERMILAB

“drift tube” linac



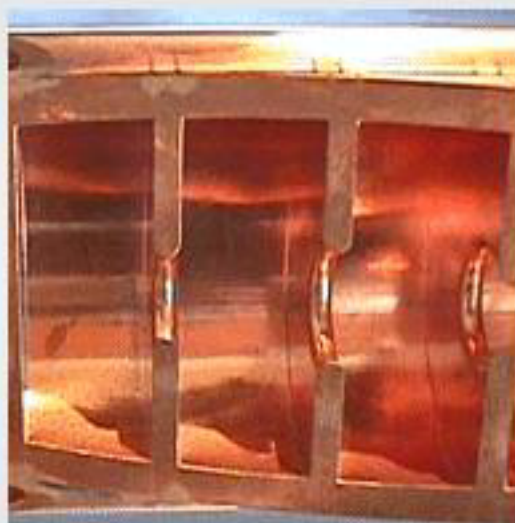
Stabilità di fase

- L'idea di Videroe fu quella di applicare, al posto di un campo elettrico statico, un campo oscillante con frequenza opportuna tale che la fase cambi di π durante il tempo di volo fra due gap successive. Il gran vantaggio fu quello di introdurre il principio di stabilità di fase: se il campo accelerante è una sinusoide e le particelle passano sulla parte crescente dell'onda, la particella che arriva in anticipo di fase rispetto alla fase sincrona verrà accelerata di meno, quella in ritardo vedrà un campo maggiore. Le particelle oscilleranno quindi attorno alla fase



nte

Linac a Radiofrequenza



Il Linac di DAFNE



Gli acceleratori circolari

Il linac di Videroe superò il limite dell'alta tensione dei linac elettrostatici, ma rimaneva la difficoltà (allora non trascurabile) di avere una serie di elettrodi di lunghezza accuratamente calcolata alimentati con energia a radiofrequenza di alta intensità.

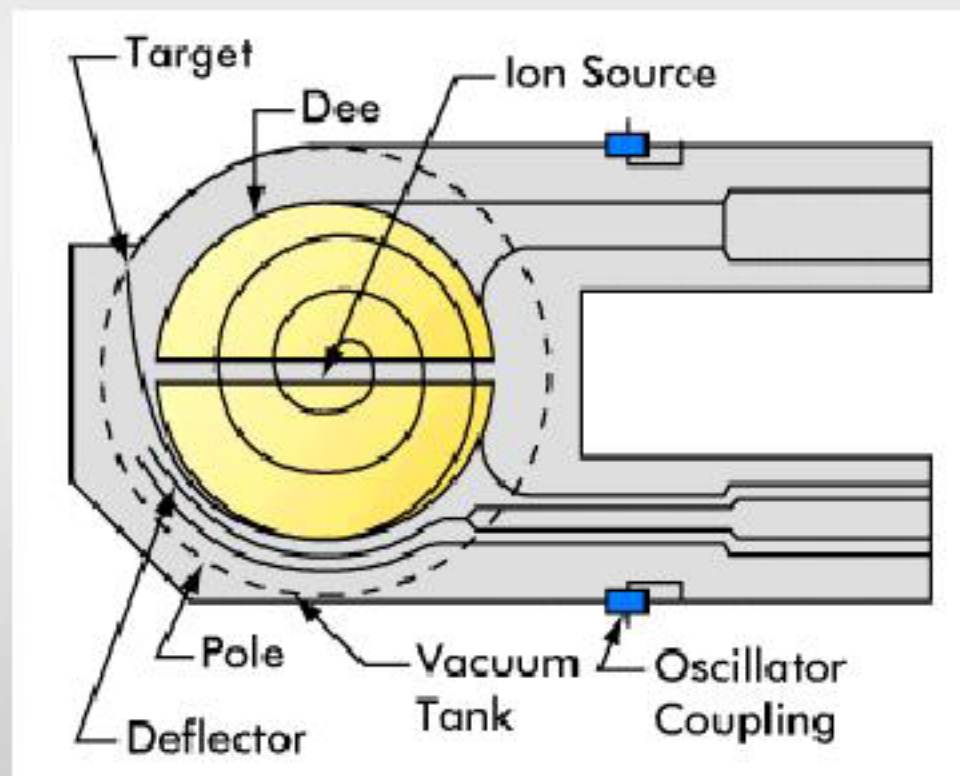
E.O. Lawrence ebbe la brillante idea di curvare le particelle su una traiettoria circolare, facendole ripassare molte volte nello stesso sistema di elettrodi. Negli acceleratori circolari il campo magnetico $\mathbf{B}$ è usualmente diretto verticalmente; se una particella relativistica di momento $\mathbf{p}$ viaggia nel campo magnetico perpendicolare la variazione di momento è: $d\mathbf{p}/dt = e\mathbf{v} \times \mathbf{B}$, il raggio di curvatura della traiettoria è legato alla carica della particella, al suo momento ed al campo magnetico attraverso l'espressione $B\rho = p/e$ (rigidità magnetica).



Il Ciclotrone

Il ciclotrone è costituito da un elettromagnete che genera un campo magnetico uniforme e due elettrodi cavi a forma di D ai quali viene applicata un tensione alternata con la frequenza tale che sia al passo con il moto delle particelle. Le particelle prodotte da una sorgente al centro del magnete spiralizzano verso l'esterno fino ad essere estratte ed inviate sul bersaglio.

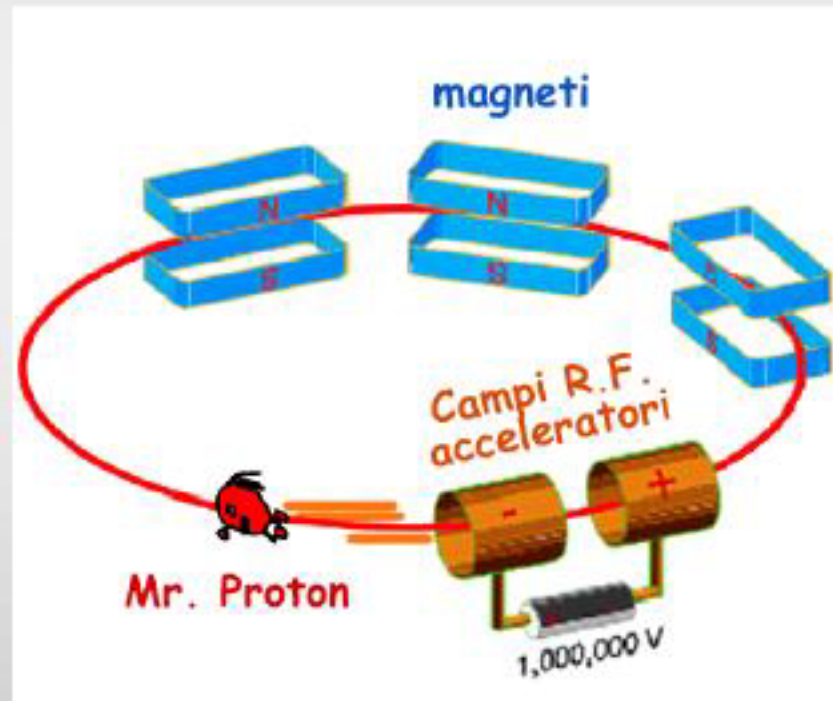
Schema di
funzionamen
to di un
ciclotrone



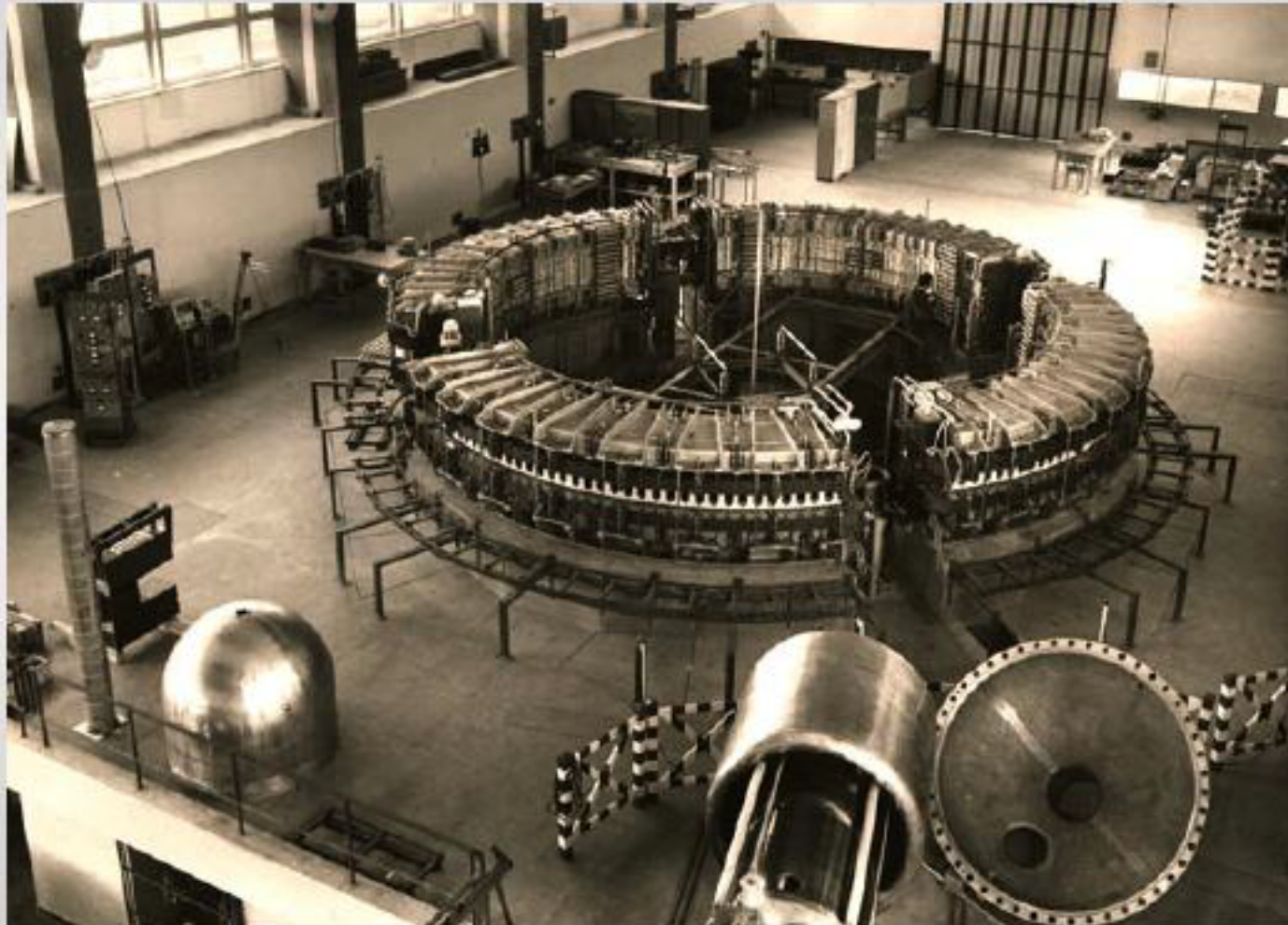
Il Sincrotrone

Dopo la guerra M.Oliphant sintetizzò tre vecchie idee in un nuovo concetto: il sincrotrone. Le idee sono: accelerare con risonatori, variare la frequenza, pulsare il magnete. Nonostante la maggior complessità del sistema si ebbe la possibilità di raggiungere energie più elevate con orbite costanti, tornando a sfruttare il principio di stabilità di fase.

Lo sviluppo, legato all'utilizzo nei trasmettitori, di generatori di campi elettro-magnetici a radiofrequenza e la realizzazione di campi guida realizzati con lenti magnetiche portarono rapidamente ad acceleratori di energie di diversi GeV.



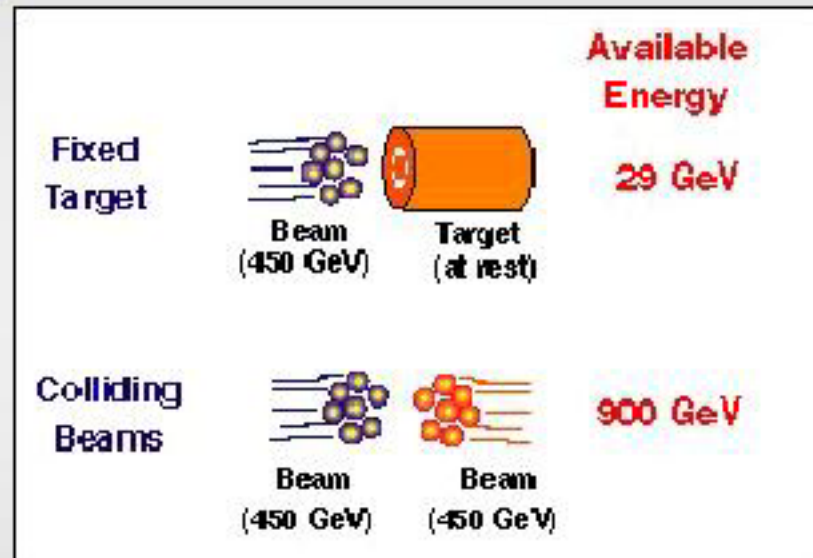
L'elettro-sincrotrone di Frascati 1959–1975



L'idea di Touschek

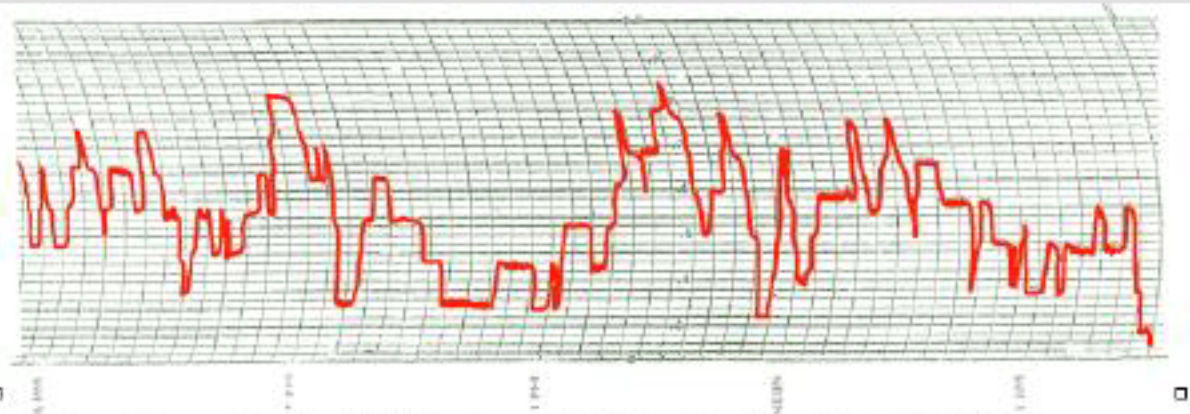
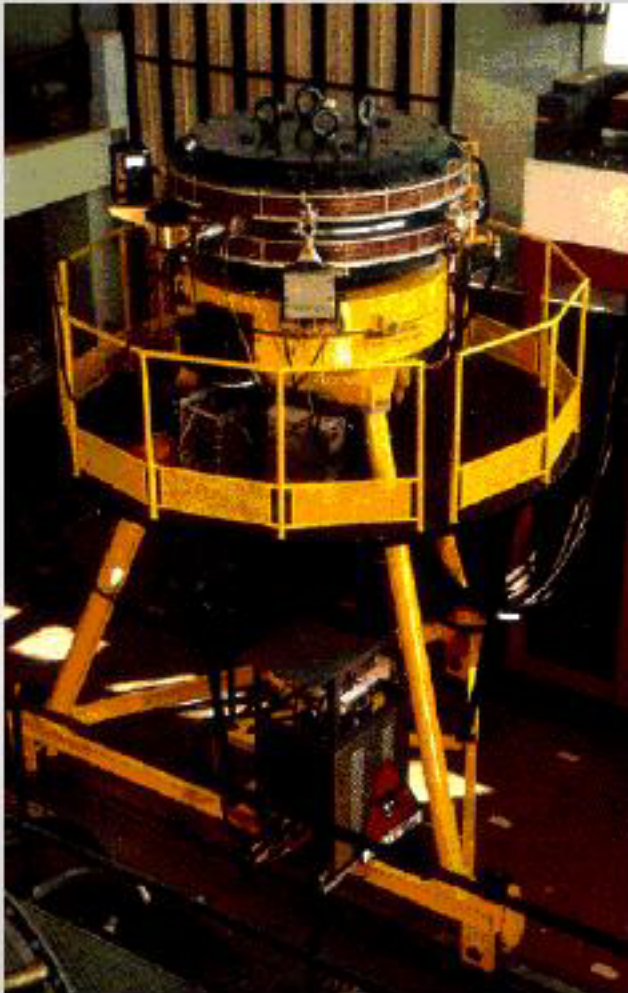


Gli acceleratori a fasci collidenti hanno permesso di aumentare enormemente l'energia a disposizione nel centro di massa.



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

AdA (Anello di Accumulazione) 1961–1965



Il Nuovo Cimento
Vol. XVIII, n. 6
16 Dicembre 1960

Registrazione dei primi elettroni accumulati in AdA. La vita media era di 21 sec, il numero medio di 2,3.

Record of the first electrons stored in AdA. Their half life was 21 sec, the average number was 2.3.

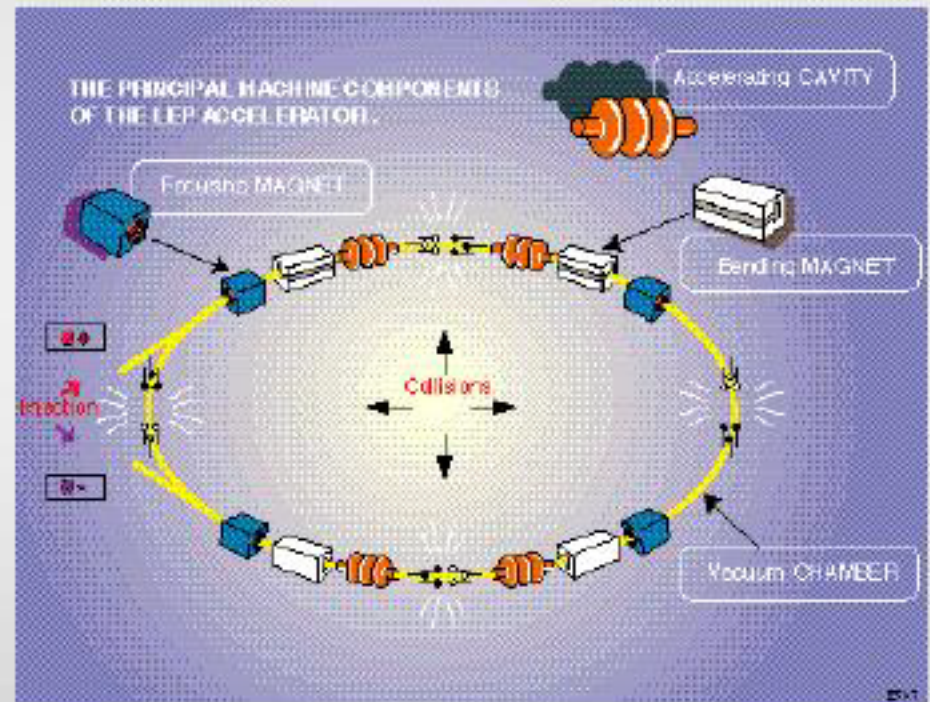
**Registrazione dei primi elettroni
accumulati in AdA. La vita media era di
21 sec, il numero medio di 2.3.**

Adone (1968–1993)





LEP: CERN–Ginevra



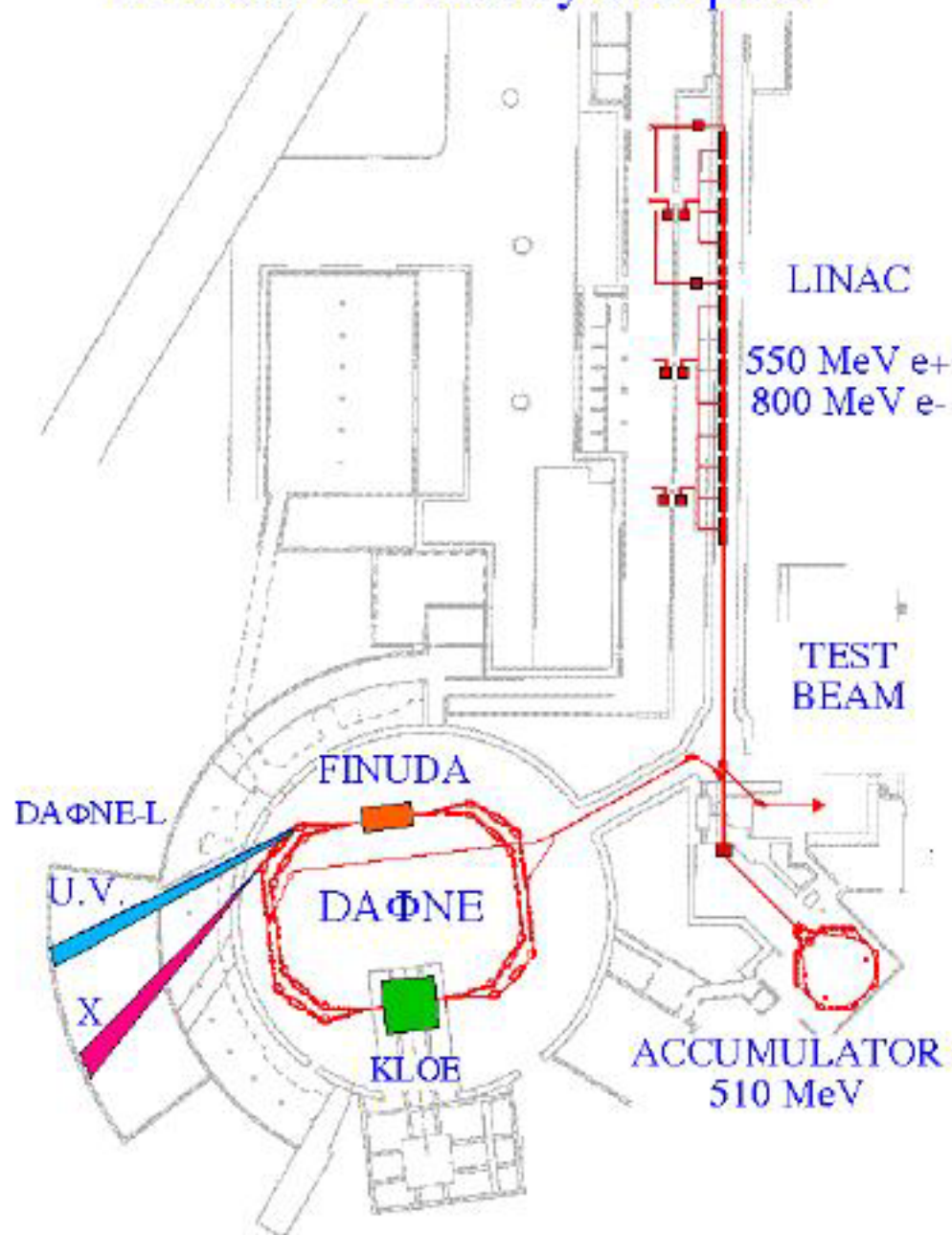
Luminosità

- La luminosità [L] di un collider è definita come la quantità di eventi di sezione d'urto unitaria prodotti in unità di tempo

$$L = f_R \frac{N_+ N_-}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

Dove N è il numero di particelle ed antiparticelle del pacchetto interagente, σ_x - σ_y le dimensioni trasverse e f_R la frequenza di interazione

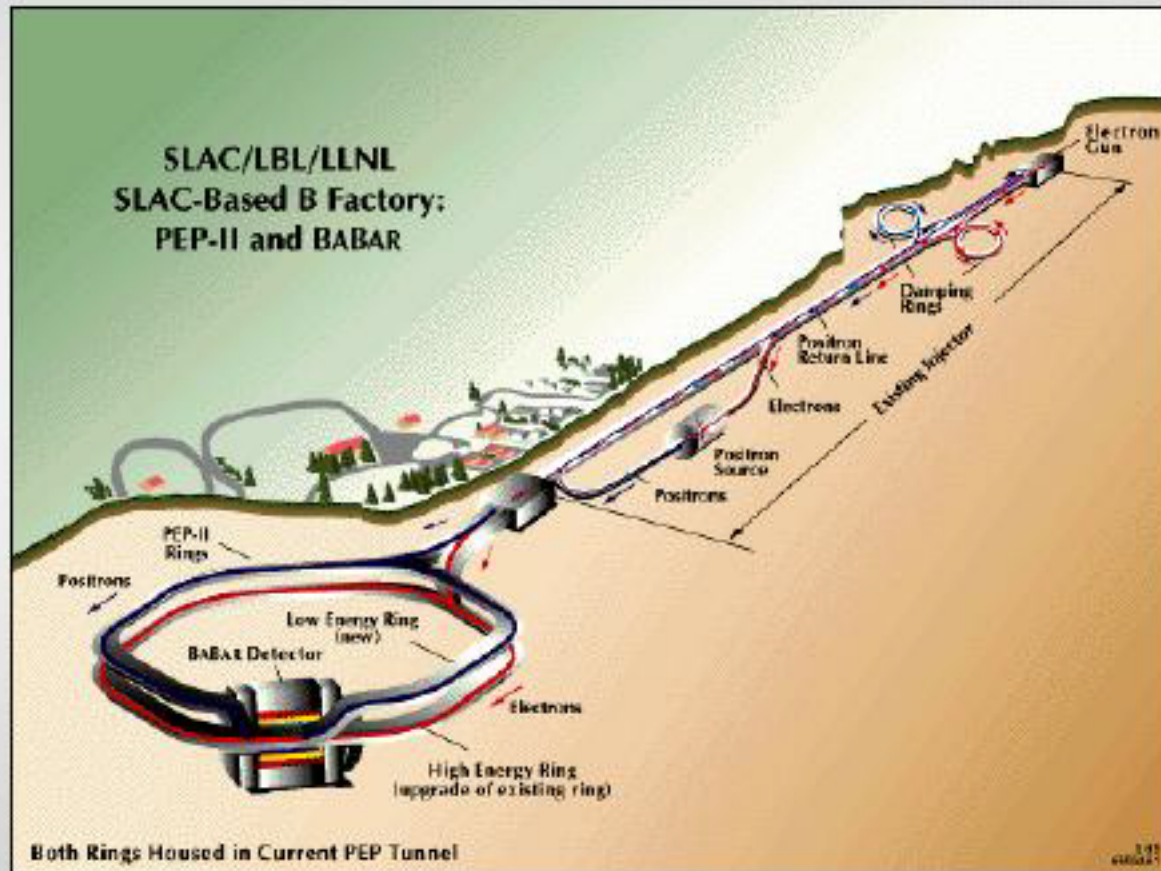
Frascati Φ -Factory complex



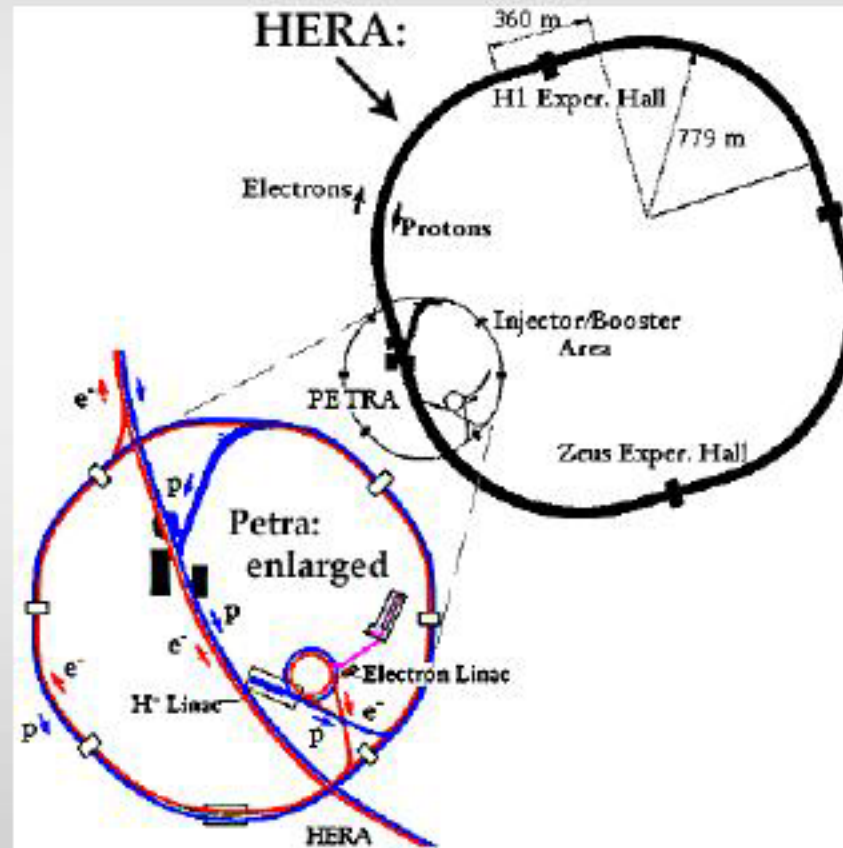
DAΦNE: Φ -Factory Laboratori Nazionali di Frascati (anelli principali)



Beauty-Factory: Stanford Linear Accelerator Center



Schema del collider a protoni ed elettroni HERA ad Amburgo



Elettra: Luce di Sincrotrone a Trieste

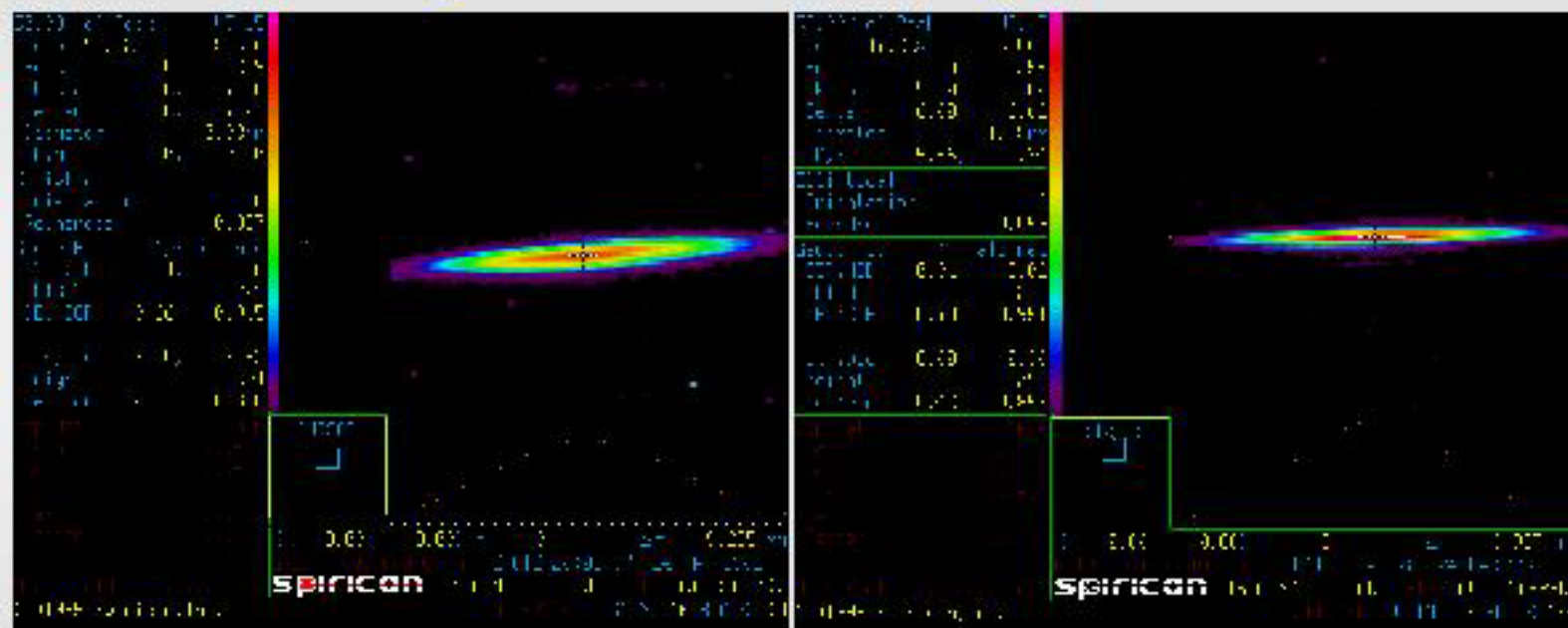


Generazione ed utilizzo della luce di sincrotrone

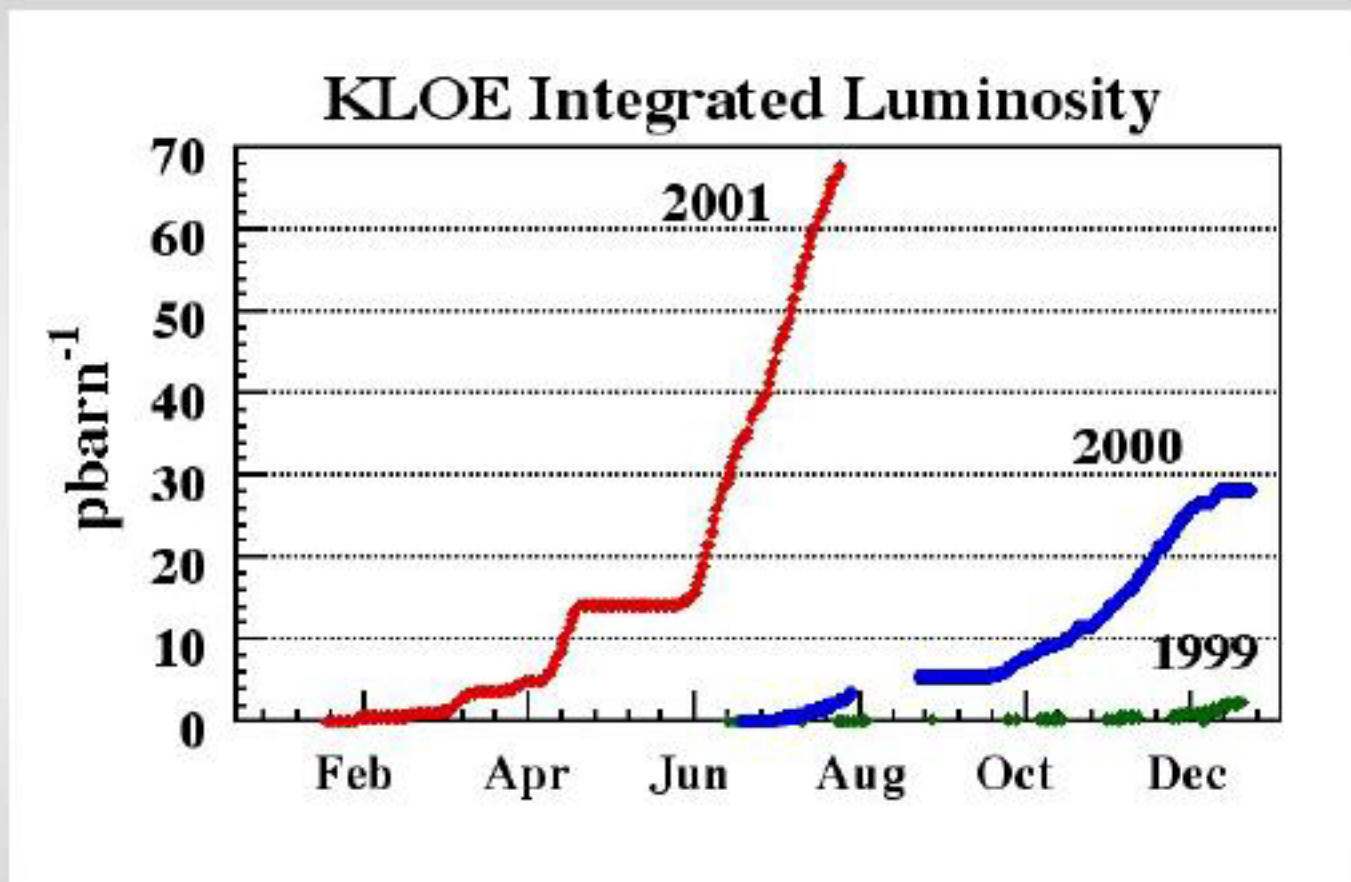
Il fascio di DAΦNE

Diagnostica con il monitor a luce di sincrotrone

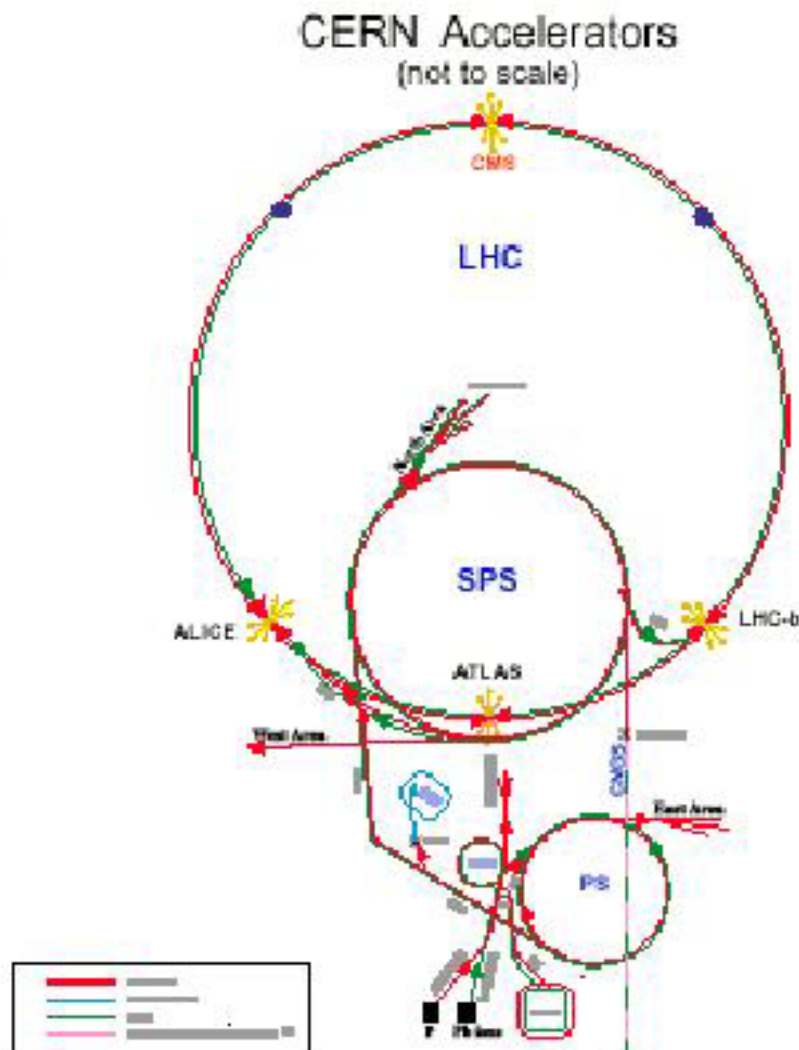
Elettroni e positroni in DAFNE



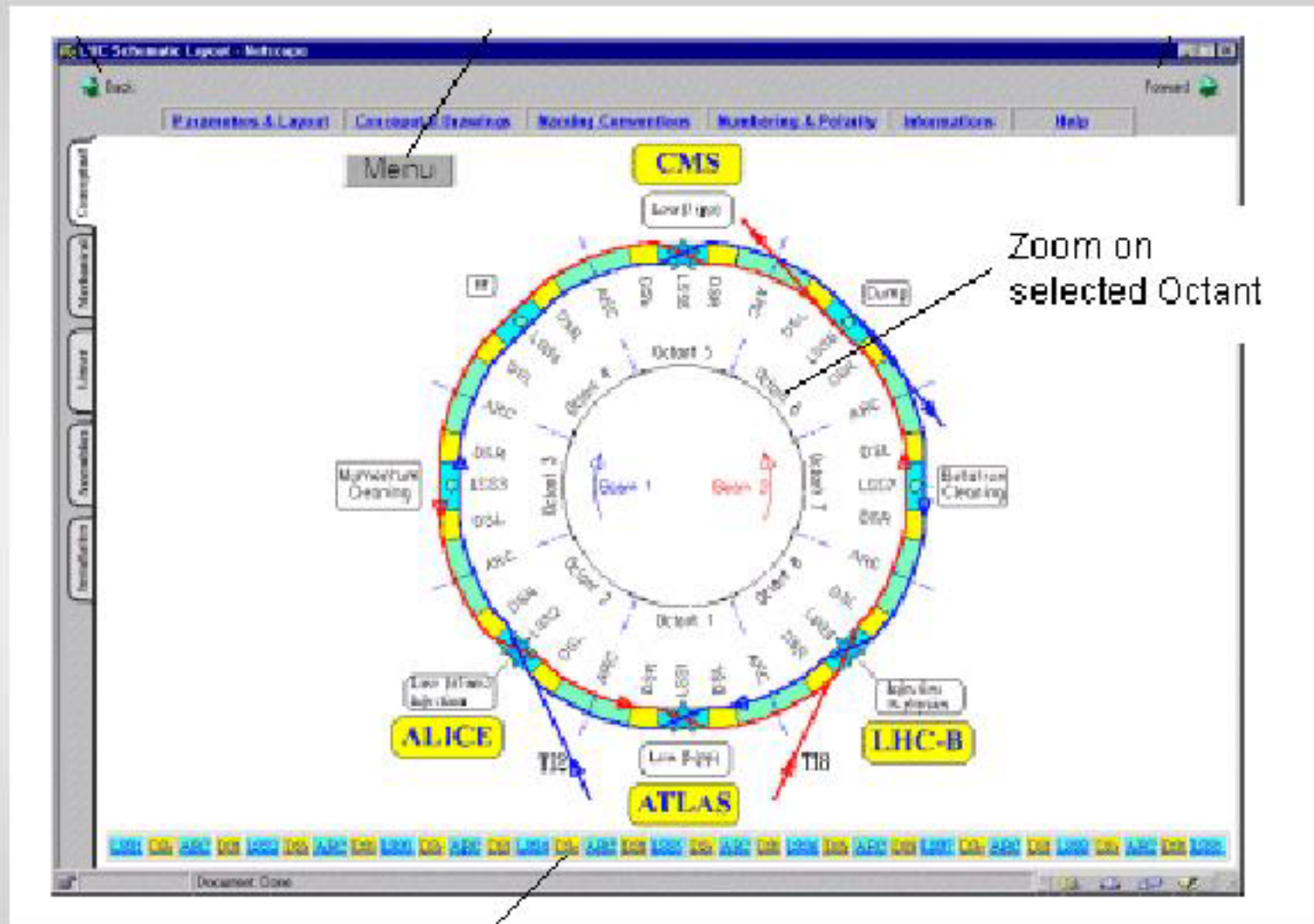
Luminosità integrata da KLOE



Schema di LHC

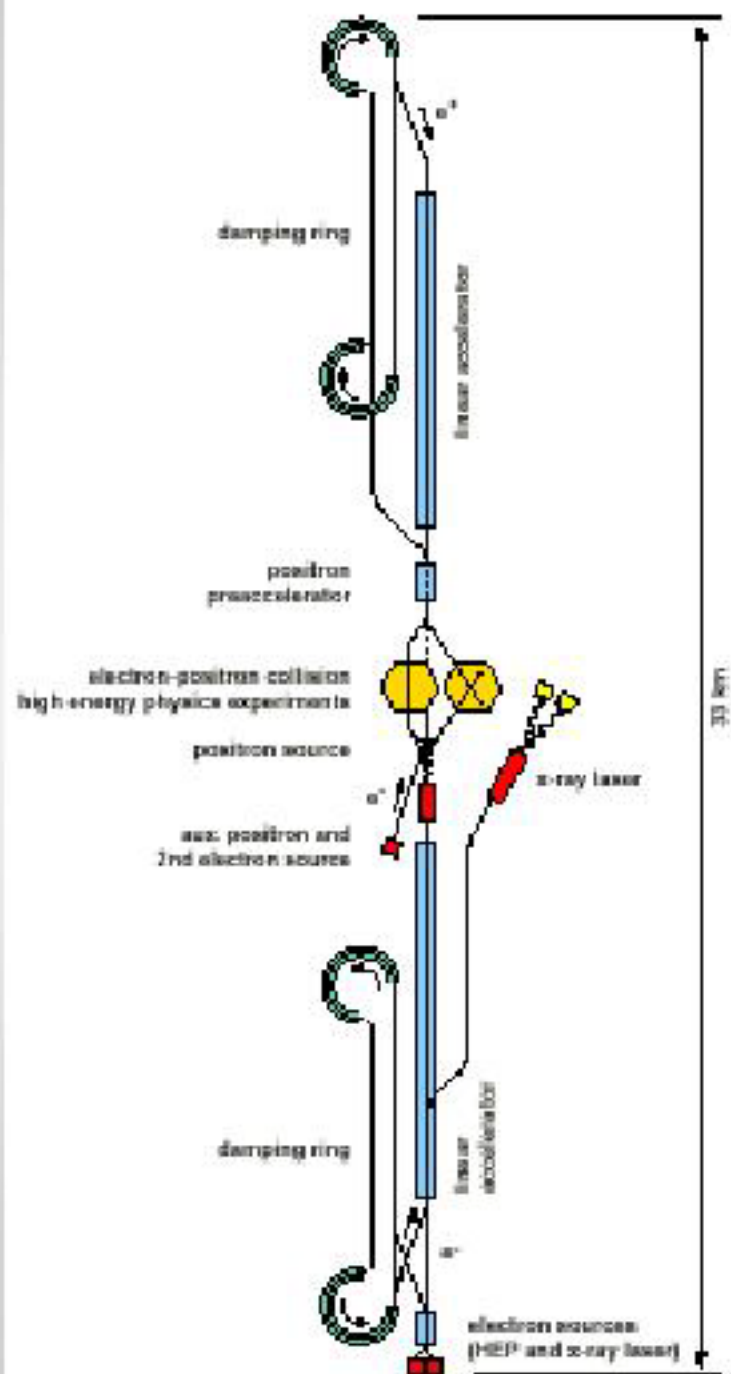


LHC: Large Hadron Collider
 SPS: Super Proton Synchrotron
 AD: Antiproton Decelerator
 ISOLDE: Isotope Separator On-Line Device
 PSB: Proton Synchrotron Booster
 PS: Proton Synchrotron
 LINAC: Linear Accelerator
 LEIR: Low-Energy Ion Ring
 CNOS: CERN Neutrino to Gran Sasso





Schema di TESLA



Schema di CLIC

Overall Layout of CLIC (3 TeV)

