



Gli Acceleratori di Particelle

Lucio Rossi

CERN

High Luminosity LHC Project Leader

Symposio: Fisica e Biologia nel XX secolo - Milano



Indice

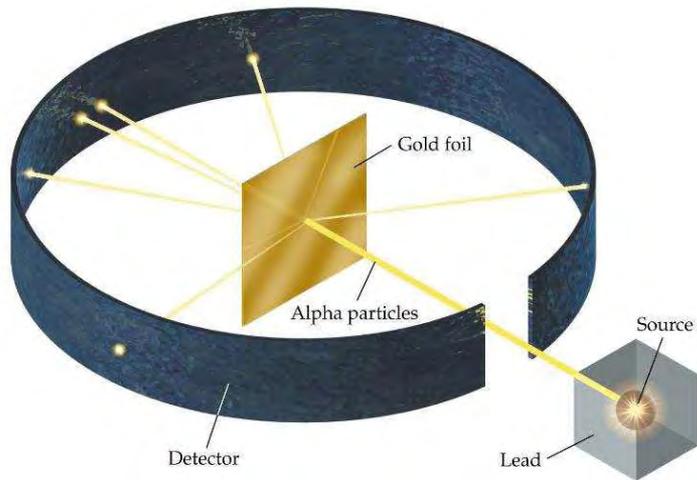
- Perchè gli acceleratori
- Breve storia degli acceleratori
 - Cockroft-Walton e gli acceleratori elettrostatici
 - Ciclotrone e sincrotroni
 - Linacs
 - Colliders
- Superconduttività e il salto di energia: dal Tevatron a LHC
- Il futuro degli acceleratori per le Alte Energie
- Le applicazioni mediche

Manchester 1909-11: la nuova frontiera – l'ATOMO

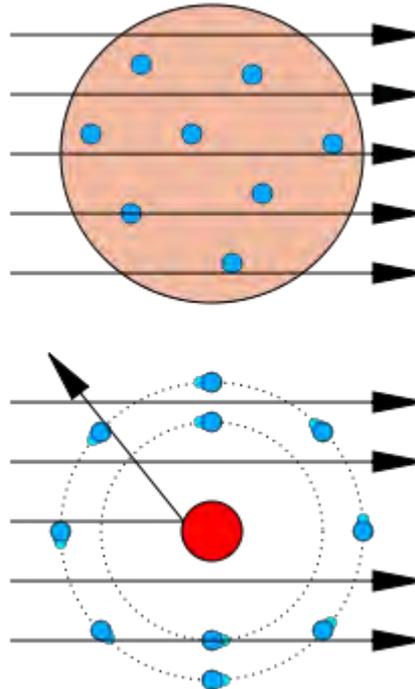


Rutherford (a destra) e Geiger nel laboratorio dell'Università di Manchester

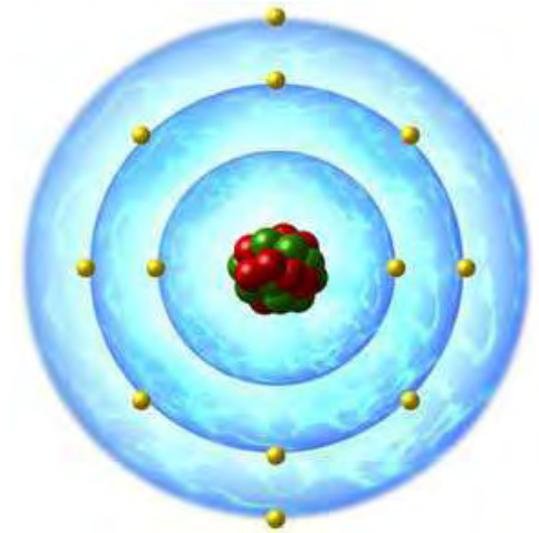
L' atomo ha un nucleo: come romperlo?



Schema esperimento di Rutherford
condotto da Geiger e Mardsen



Schema dei modelli di atomo a
«panettone» (plum pudding) di J.J.
Thomson 1904 (sopra) e quello di
E. Rutherford 1911 (sotto)



Atomo di Magnesio secondo
Rutherford (www.e-enciclopedia.it)

Dopo Rutherford, Geiger e Mansfield il programma
era dettato: usare particelle per rompere il nucleo...

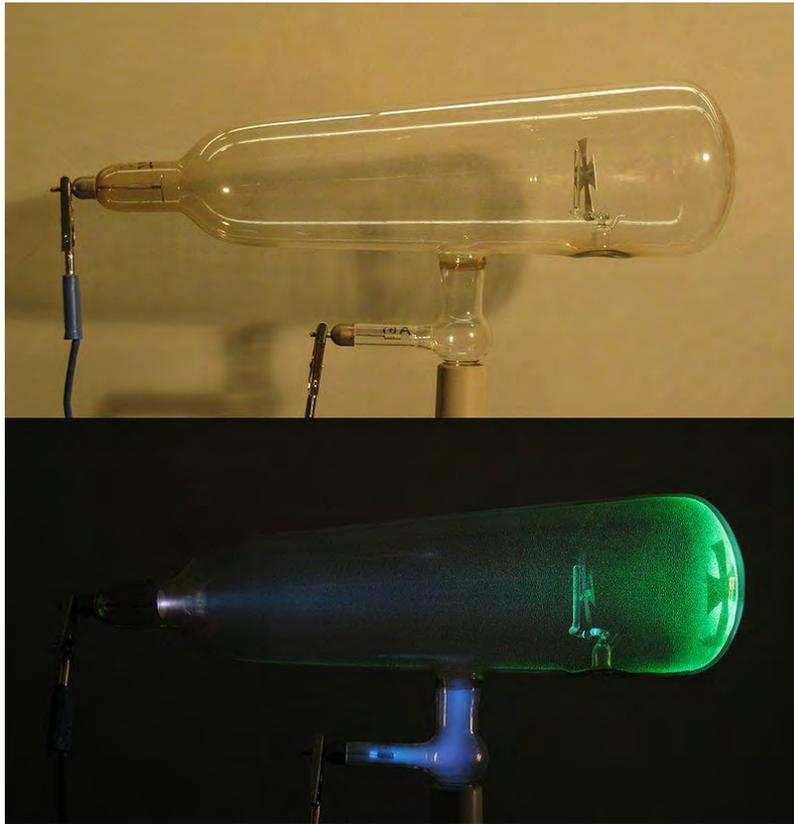
Due problemi:

L'elettrone non è stabile
Il nucleo nemmeno
(cariche+)

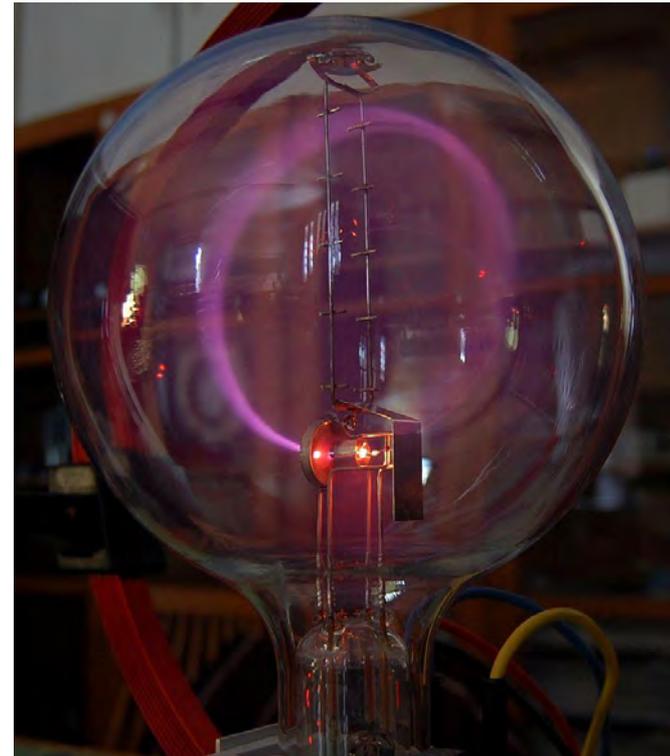
... Atomo di Bohr e poi la
meccanica ondulatoria

Dalla fine dell' '800 i tubi a vuoto si prestavano ad accelerare elettroni con elevate tensioni

I tubi a vuoto di Crookes



JJ Thomson & E. Rutherford perseguirono la strada dei tubi a vuoto...



L'elettrone fu scoperto grazie a un «prototipo» di acceleratore: particelle mosse da un campo elettrico in un campo magnetico perpendicolare

Ma come arrivarci?

Ma ci vollero diversi anni prima che la strada diventasse chiara...

- Fino alle fine degli anni '30 la fisica nucleare era il regno della fisica sperimentale, mentre i teorici si concentravano sull'atomo

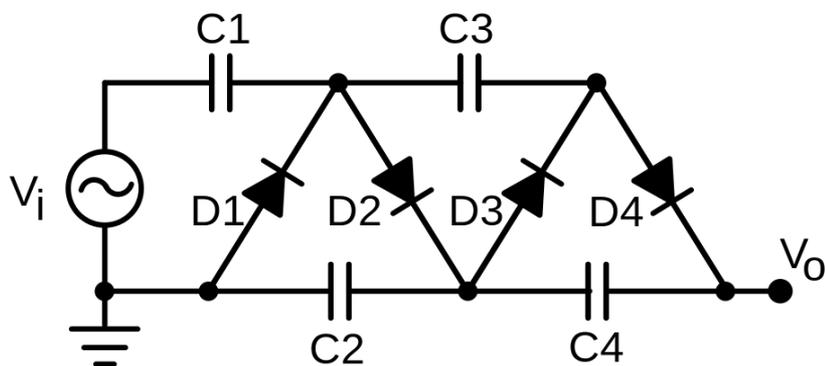
Il discorso di apertura di Rutherford, come Presidente Royal Society, 1927, indica la strada

- The advance of science depends to a large extent on the development of new technical methods and their application... From the purely scientific point of view interest is mainly centred on the application of **these high potentials to vacuum tubes in order to obtain a copious supply of high-speed electrons and high-speed atoms...** This would open up an extraordinarily interesting field of investigation which could not fail to give us information of great value, not only in the constitution of atomic nuclei but in many other directions”

Un suo studente, John Cockroft, prese sul serio il discorso di Rutherford e nel 1928...

Con il collega Ernst Walton in 3 anni costruisce un tubo moltiplicatore da 200'000 volts... nel 1931 bombardano atomi di Litio con protoni...

Generatore C-W custodito al British Museum



$V_o = N_{\text{stadi}} \times 2V_{\text{picco}}$
1919 Heinrich Greinacher, fisico svizzero

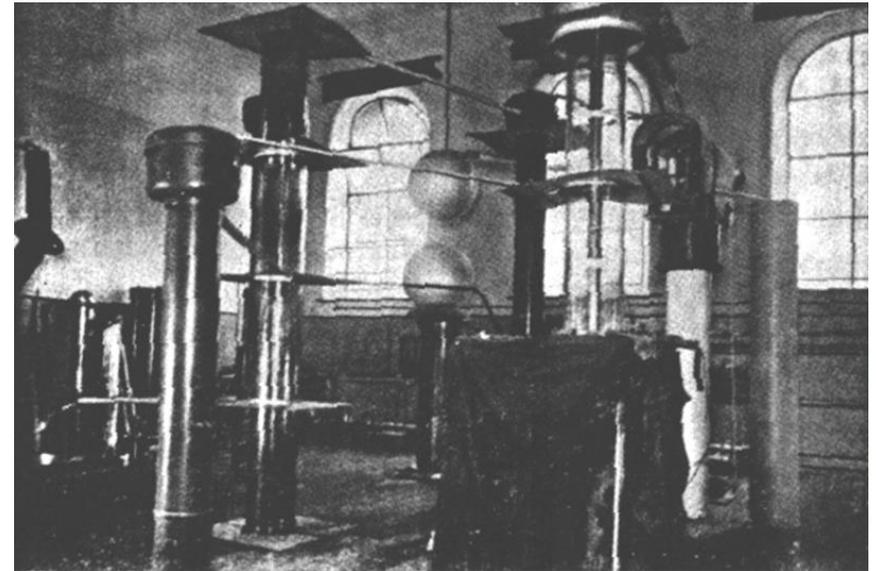


La fisica nucleare moderna ha inizio, intimamente legata alla meccanica quantistica

Tutti sapevano che ci volevano diversi MV per superare la barriera Coulombiana del nucleo

- Gli Americani, «technology driven» avevano tensioni superiori ma non le usavano perchè volevano raggiungere diversi MV...
- Manchester era impregnata di Meccanica Quantistica. Gamov nel 1928 aveva dato un'idea: forse 200 kV bastavano, contando sull'effetto tunnel...

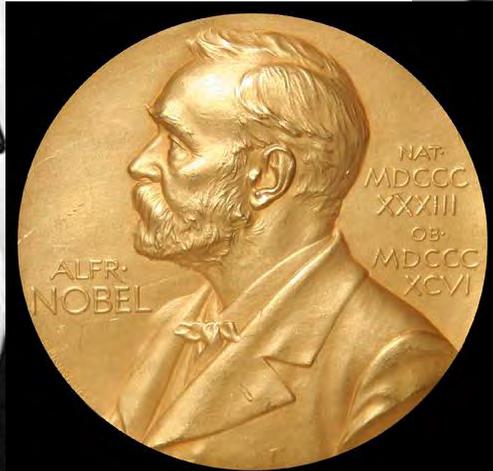
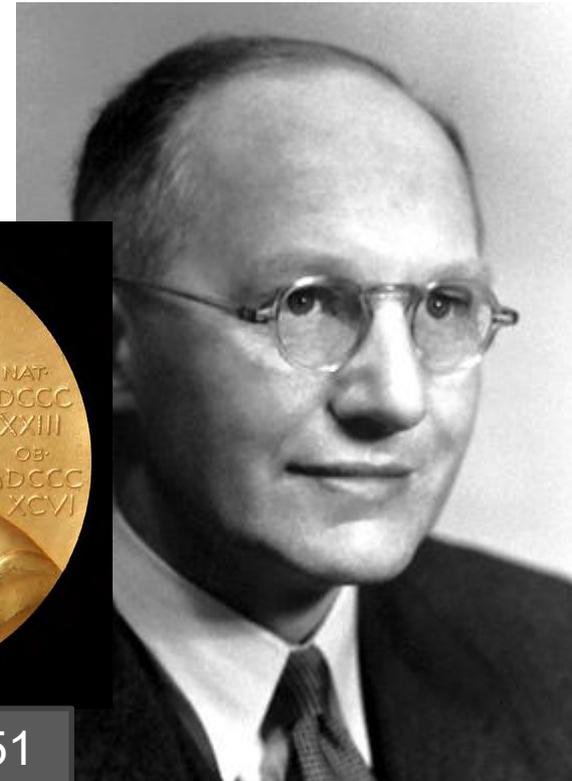
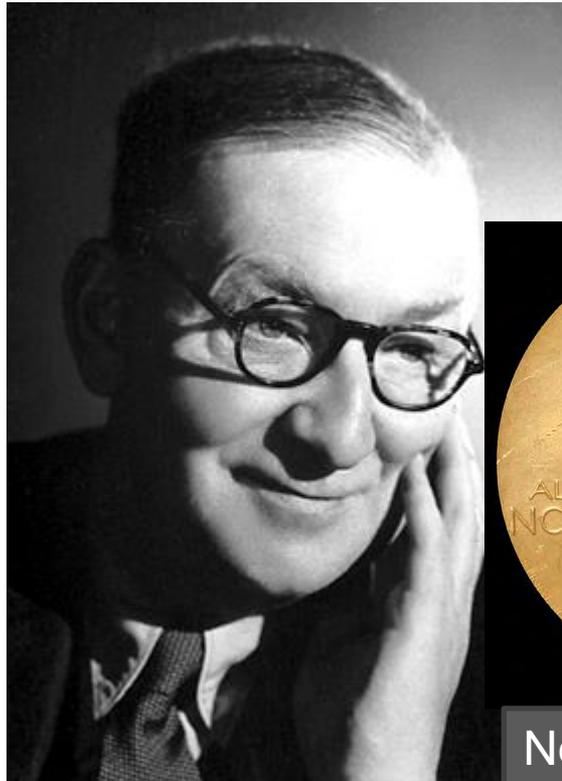
Una delle prime macchine C-W in Manchester, da 400 kV



**Insistettero e nel 1932 ottennero la prima
reazione indotta da particelle accelerate:
 $7 \text{ Li} + \text{H} \rightarrow 2 \alpha$ (2-400 kV!, poi a 700-800 kV)**

Jon Cockroft

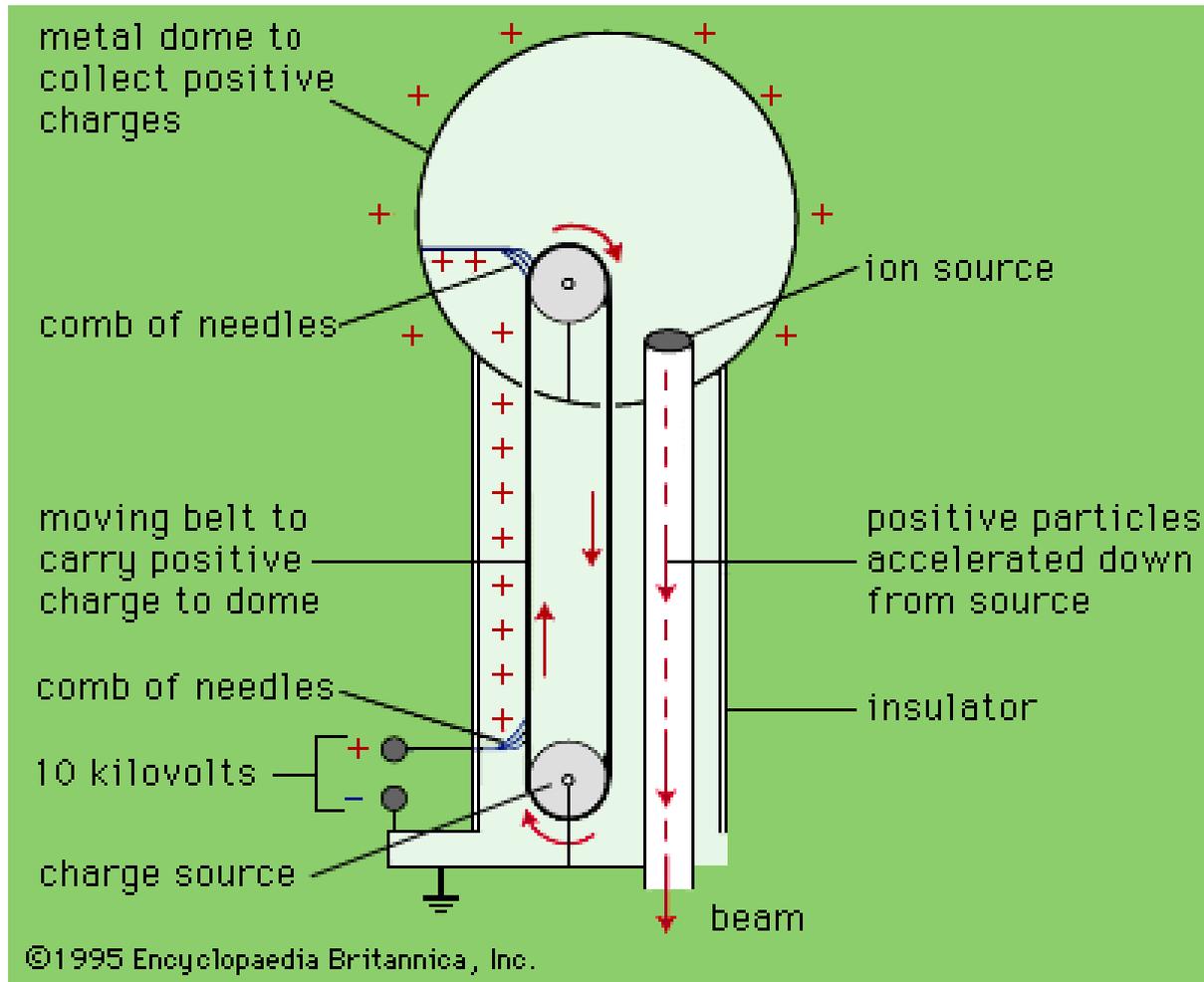
Ernst Walton



Nobel Fisica 1951

Il C-W è sovente il primo acceleratore nella catena, ed ancora in uso

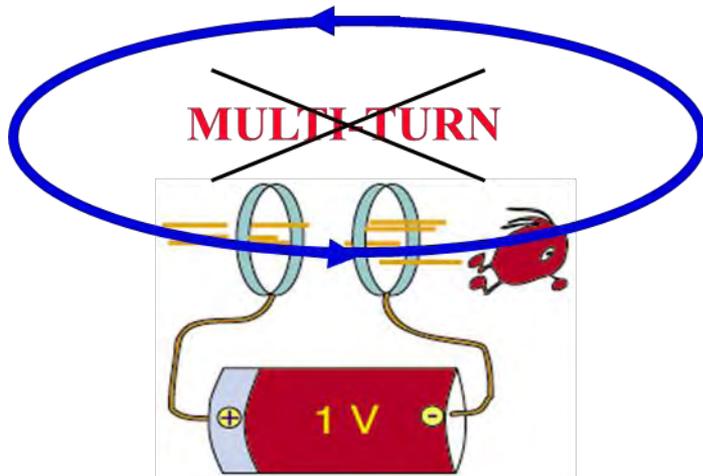
Il competitore elettrostatico: van de Graaff



Dai primi anni '30 R. van de Graaff (nel 1928 in UK) capì la necessità di alte tensioni e ottenne MV con questo acceleratore (basse correnti, fasci di alta qualità con poca dispersione in energia).
~1-10 MV
Molto usato negli anni '50-80 per fisica nucleare.

Limiti degli elettrostatici: il campo è conservativo...

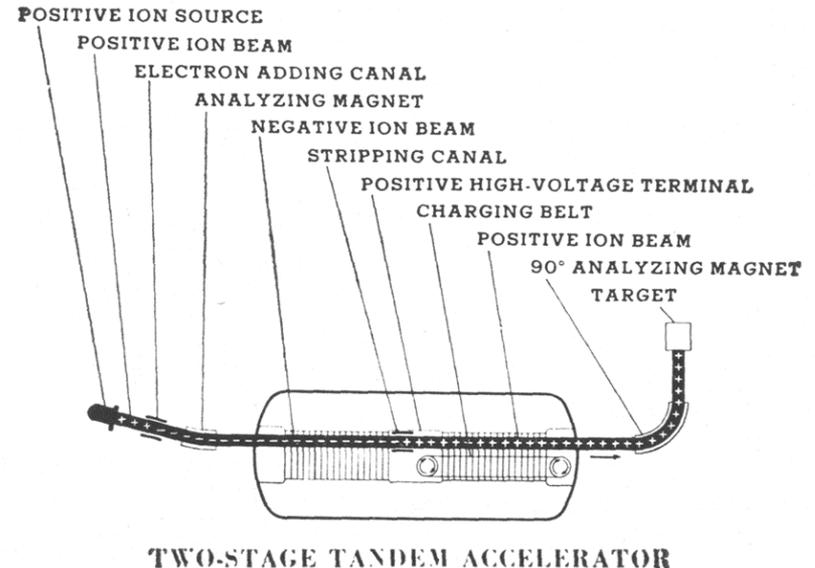
La ddp si utilizza una volta
sola...



$1 \text{ eV} = q_e \cdot 1 \text{ V}$
1 keV, 1 MeV, 1 GeV, 1 TeV...

Il Tandem è un buon trucco per usar due volte il Eel: ma con una azione non-conservativa:

- Si accelerano ioni negativi dalla «terra» verso il terminale ad HV (alta tensione, +)
- Poi nella camera a HV si ionizza ottenendo una particella positiva
- Che viene quindi accelerata verso la «terra» dalla stessa HV



Tandem a 15 MV (Italia: LNL-Pd, e LNS-Ct) Max: Strasburgo, 30 MV



Il tandem dei LNL (Legnaro) dell'INFN, in operazione dagli anni '80 a > 15 MV

Un'altra linea di sviluppo: gli acceleratori ciclici

Equivalente meccanico di un elettrostatico

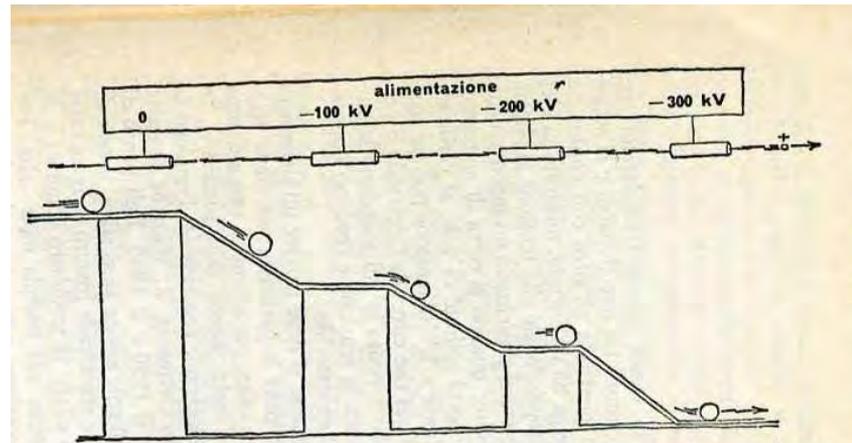


Fig. 14. In questo modello di un acceleratore di particelle, la gravità fa accelerare il moto della pallina in quelle sezioni della pista che sono in pendenza. L'altezza di ogni sezione orizzontale della pista corrisponderebbe a una sorgente di tensione in un acceleratore di particelle reale. L'accelerazione totale che la pallina può subire è strettamente limitata dal dislivello totale della pista.

1924 Ising propone di usare un campo variabile ($\text{rot } E = -dB/dt$)

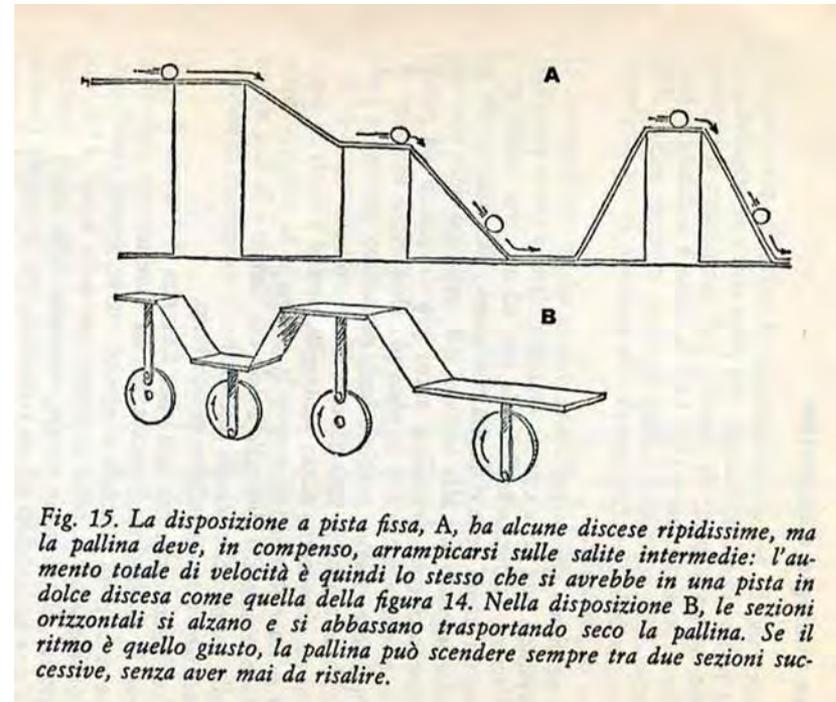


Fig. 15. La disposizione a pista fissa, A, ha alcune discese ripidissime, ma la pallina deve, in compenso, arrampicarsi sulle salite intermedie: l'aumento totale di velocità è quindi lo stesso che si avrebbe in una pista in dolce discesa come quella della figura 14. Nella disposizione B, le sezioni orizzontali si alzano e si abbassano trasportando seco la pallina. Se il ritmo è quello giusto, la pallina può scendere sempre tra due sezioni successive, senza aver mai da risalire.

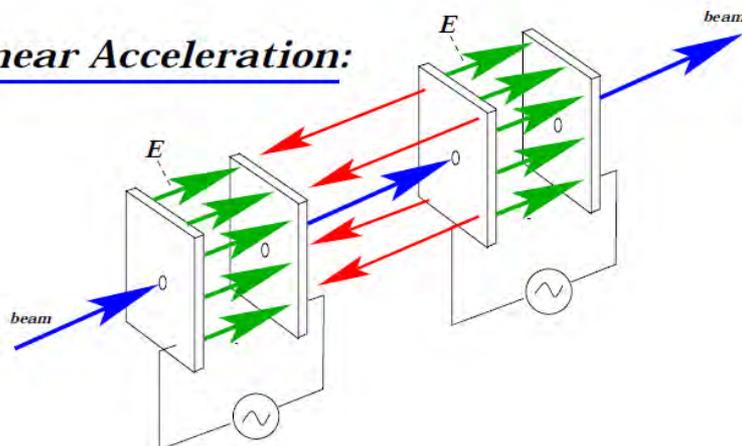
I Linacs (Linear Accelerators)

L'idea è quindi di concentrare il campo in uno spazio (cavità) in cui un campo e.m. a RF (radiofrequenza ~MHz) oscilla e si utilizza al componente elettrica per accelerare

R. Wideröe nel 1928 dimostra il principio e con un oscillatore da 1 MHz, accelera ioni potassio a 50 keV, **con 25 kV di tensione.**

Lo patentò ma non fece molto sviluppo; poi inventò il betatrone e si occupò di uso acceleratori per terapia oncologica.

● Linear Acceleration:



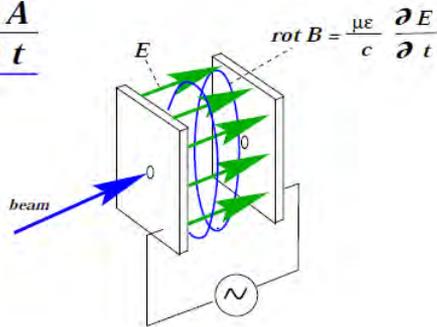
Acceleratore diventa più lungo (zona di campo nullo, frecce rosse);
I fasci di particelle ora sono in pacchetti, essendo accelerati solo quando il campo è diretto in avanti.



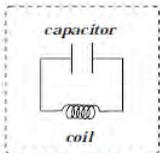
Cavità a RadioFrequenza

Time Varying Fields

$$E = - \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$$

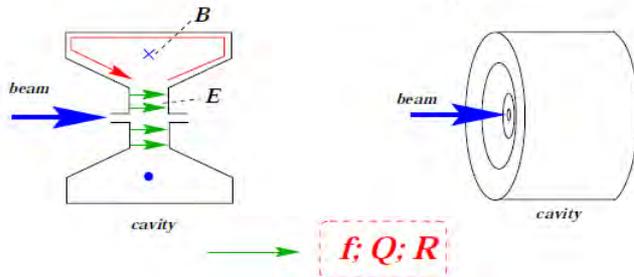


Resonator:



$$L = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{d}$$



In sostanza il circuito deve avere
alta frequenza: $\omega = 1/\sqrt{LC}$
Bassa L \rightarrow 1 spira!

La forma deve presentare il
campo elettrico nella direzione del
fascio di particelle

Il campo magnetico associato è
passivo ma spesso limita la
prestazione (correnti sorgenti)

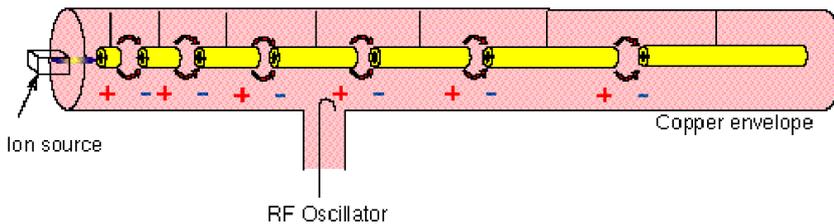
Un parametro importante è il
fattore di qualità Q: quante
oscillazioni compie il sistema
(senza eccitazione) per dimezzare
la sua energia immagazzinata
(cio' quanto «attrito», o
impedenza c'è nel il risonatore)

Il Linac di Alvarez

Primo vero Linac da fisica: Berkeley
1946: 32 MeV

I 200 MHz del linac di Alvarez sono
ancora uno standard...

Luis Alvarez ottiene il premio
Nobel nel 1968



Ad ogni «gap» c'è un E diretto giusto.
Piu cresce la velocità e piu si allunga
la parte di «drift» senza
accelerazione; ma lunghezza tubi
diventa costante per $v \rightarrow c$

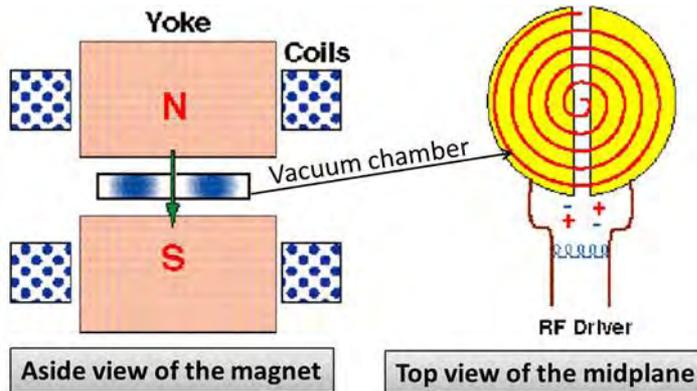


Una strada simile eppure molto diversa: il ciclotrone di Lawrence (Berkeley 1929-31)

Tramite un campo magnetico $B \perp v$, le particelle vengono fatte passare più volte nello stesso gap elettrico, moltiplicando la stessa tensione per il numero dei giri

Il punto principale è che la frequenza NON dipende dal momento (quantità di moto)

Il momento finale dipende dal campo magnetico e dal raggio del magnete.



Centripetal force

$$F = evB = \frac{mv^2}{\rho}$$

Constant revolution frequency

$$f_{rev} = \frac{v}{2\pi\rho} = \frac{v}{2\pi m v} \frac{eB}{1} = \frac{eB}{2\pi m}$$

Radius of gyration

$$\rho = \frac{mv}{eB}$$

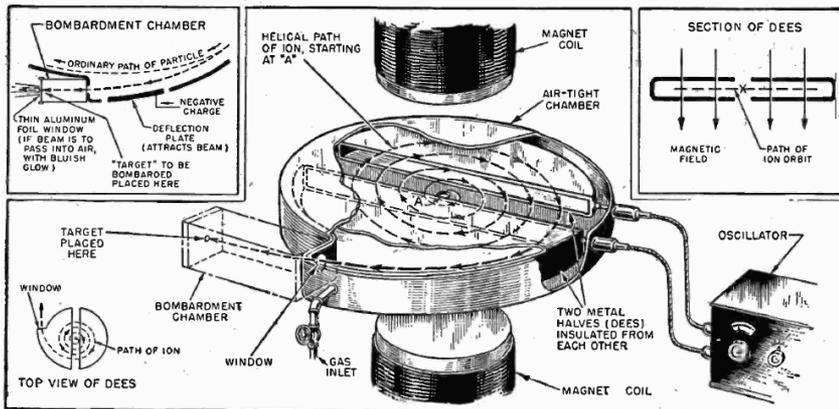
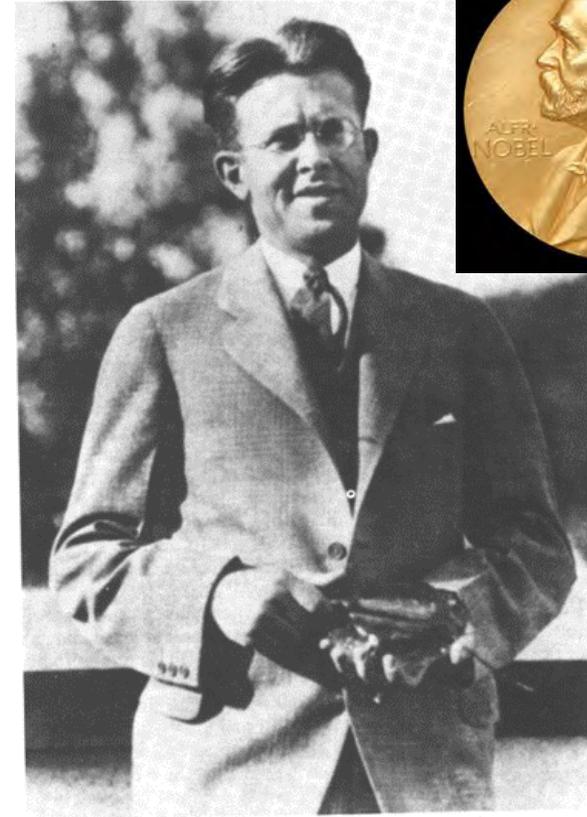
Nel 1932 ottenne 1-2 MeV – perse la corsa con C-W – ma si impose come la strada maestra...

Le tensioni erano poche decine di kV ma moltiplicate per 100-200 giri...

Il primo aveva un diametro di 10 cm e $E = 80$ keV con solo 2 kV di tensione (40 giri) che allora avrebbe richiesto più di un metro.

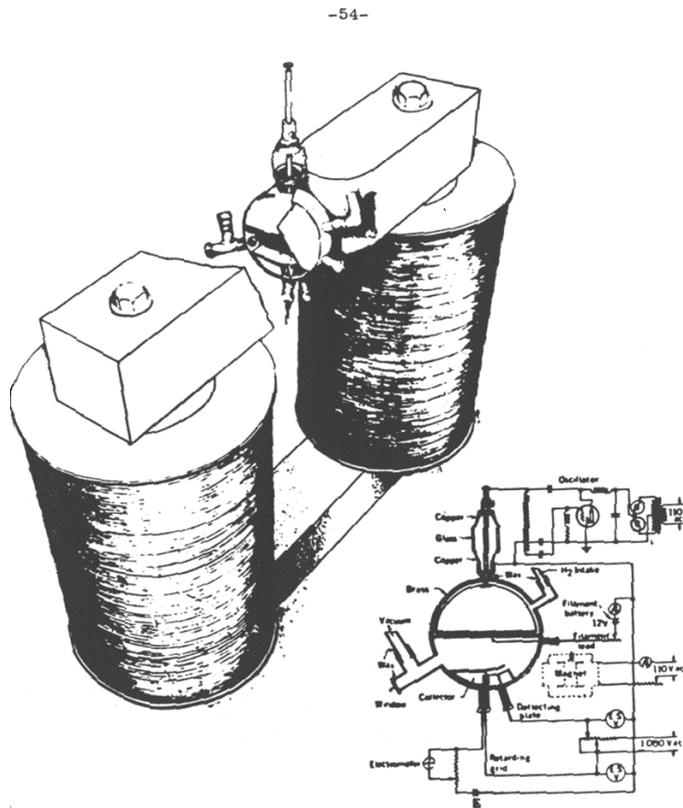
Il punto era far magneti sempre più grandi e potenti, che fu il principale lavoro di Lawrence & C. per un decennio.

Lawrence inventò e patentò la macchina; nel 1939 fu insignito del Premio Nobel

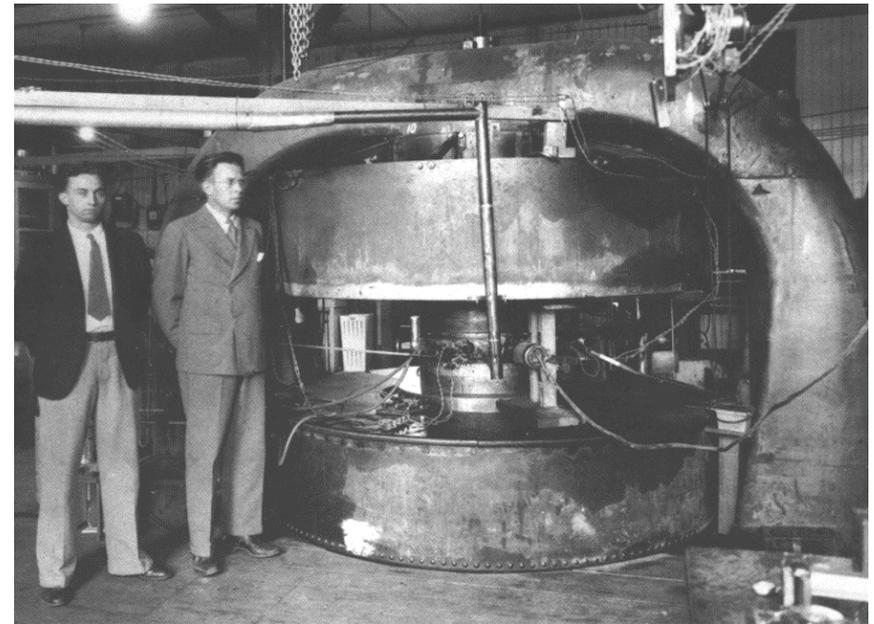


Lawrence diventò un costruttore e uno straordinario manager di ricerca

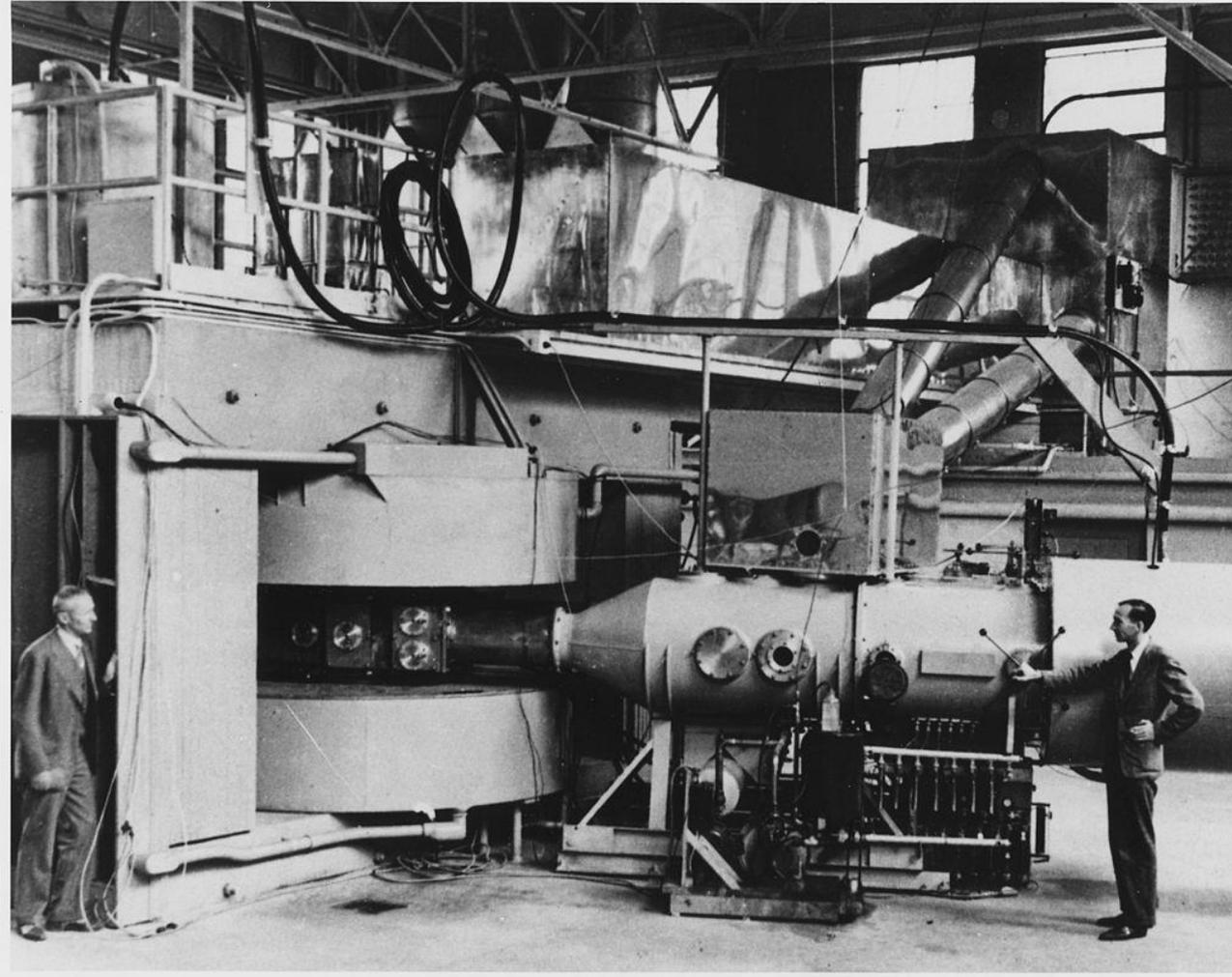
Il ciclotrone di Livingstone (studente di Lawrence)



Lawrence e Livingstone (a sinistra) davanti al ciclotrone da 27 inch a Berkeley nel 1933

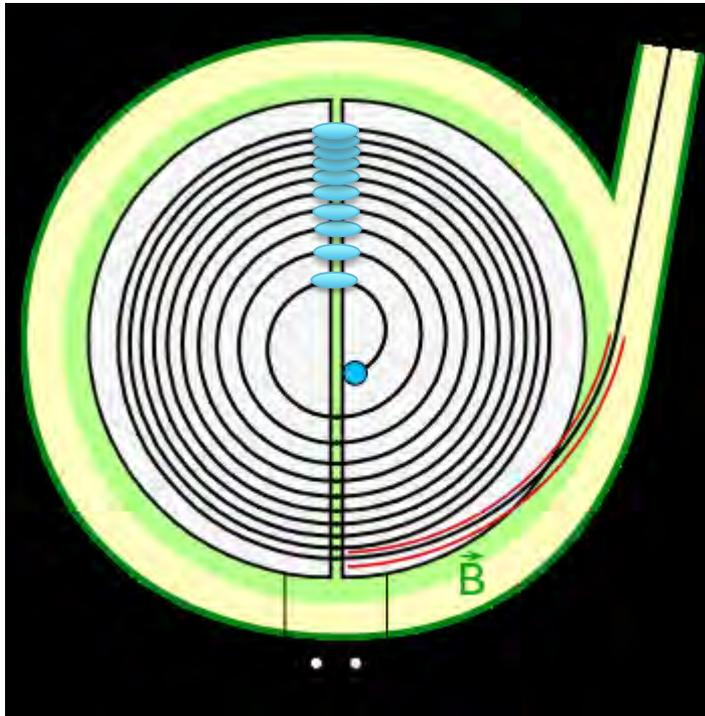


La corsa era lanciata: nel 1939 si era già a 60 inches, 1.5 m di raggio

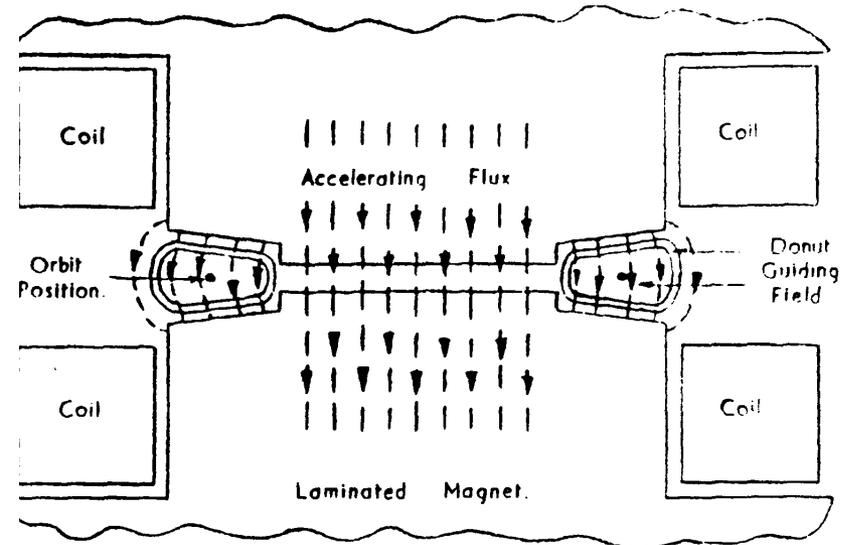


Cyclotron and betatron

Le particelle sono raggruppate in pacchetti (bunch); più il ciclotrone è grande e più è difficile estrarre i fasci



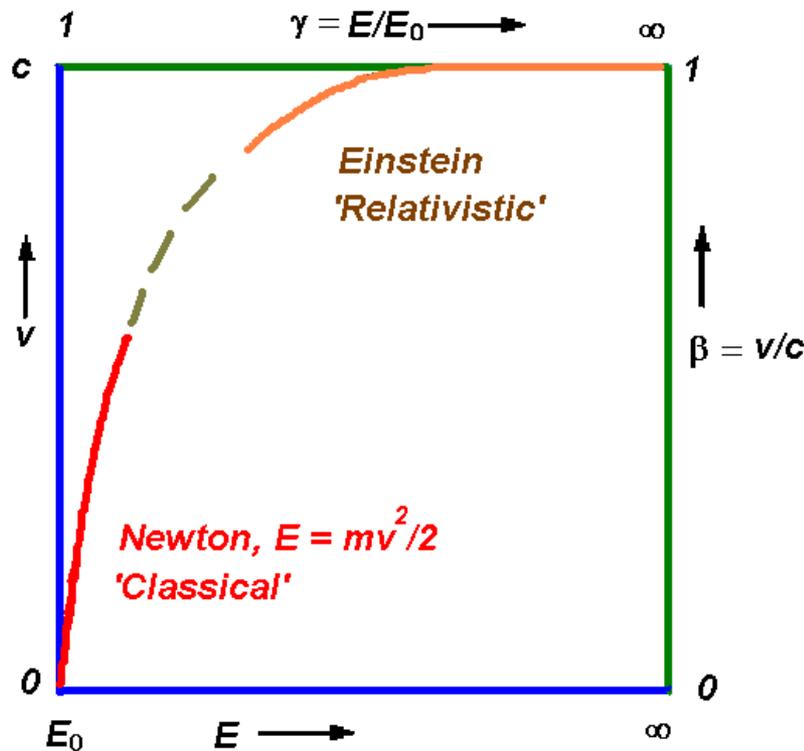
Il Betatrone (Wideroe 1924, poi realizzato negli anni '40). Usa la variazione del campo B centrale come forza e.m.; orbita costante, adatto per elettroni. Usato per produrre raggi X per lunghi anni negli ospedali.



Ritorno ai fondamenti: solo accelerazione?

Ben presto la velocità cresce molto lentamente con E.

Aumento di massa per un elettrone



Energy	1 MeV	→		1 GeV
$\beta = v/c$	0.95	0.99	0.999	0.999 999 9
$\gamma = m/m_0$	3	7	22	2000

Ci fu la proposta di chiamarli «Ponderatori» o «moltiplicatori di massa». Ma non piacque e la parola «acceleratori» si impose...

Problema del ciclotrone

(Trascurando completamente la focalizzazione...)

Perdita di isocronismo dovuto all'aumento di massa con v.

Per protoni diventa importante a 40-50 MeV

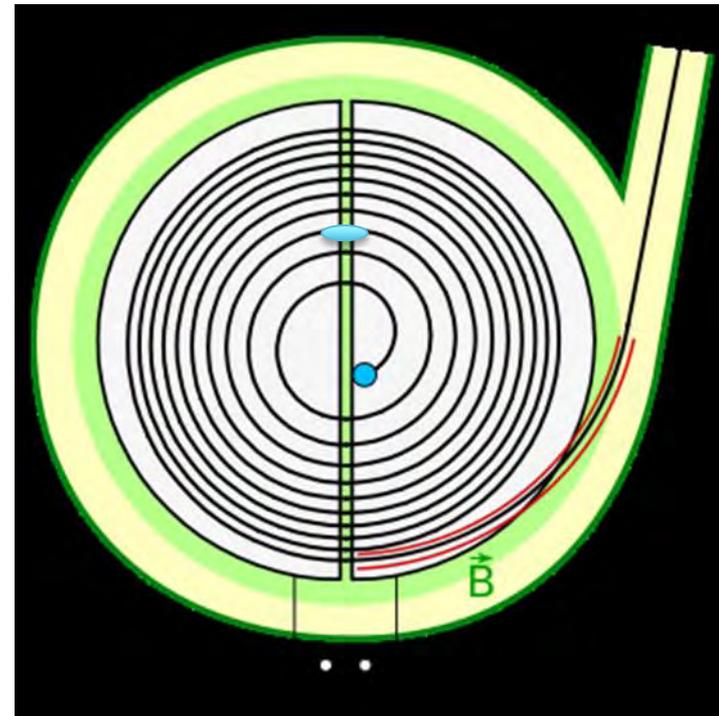
(per elettroni diventa importante già sotto il MeV)

$$\omega = \frac{Q}{m} \cdot B$$

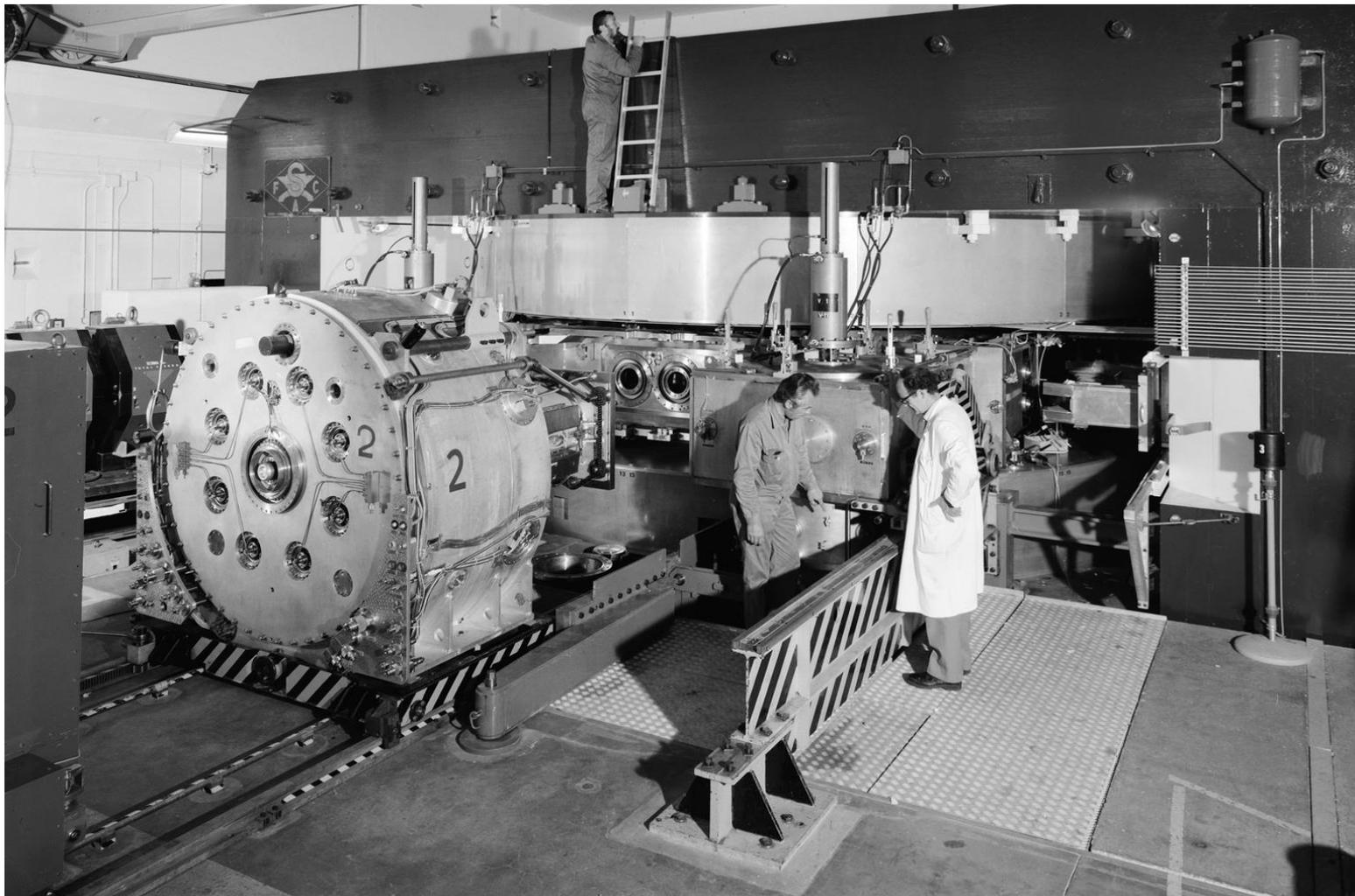
Una soluzione : cambio la frequenza della tensione oscillante (RF), diminuendola col l'energia (massa) dei protoni.

Sincrociclotrone (patente McMillan 1951)

Si accelera un pacchetto alla volta, poi si ripete il ciclo. L'intensità diminuisce ma posso raggiungere 200 MeV facilmente e anche 400-600 MeV.



Il sincrociclotrone da 600 MeV del CERN (1954)



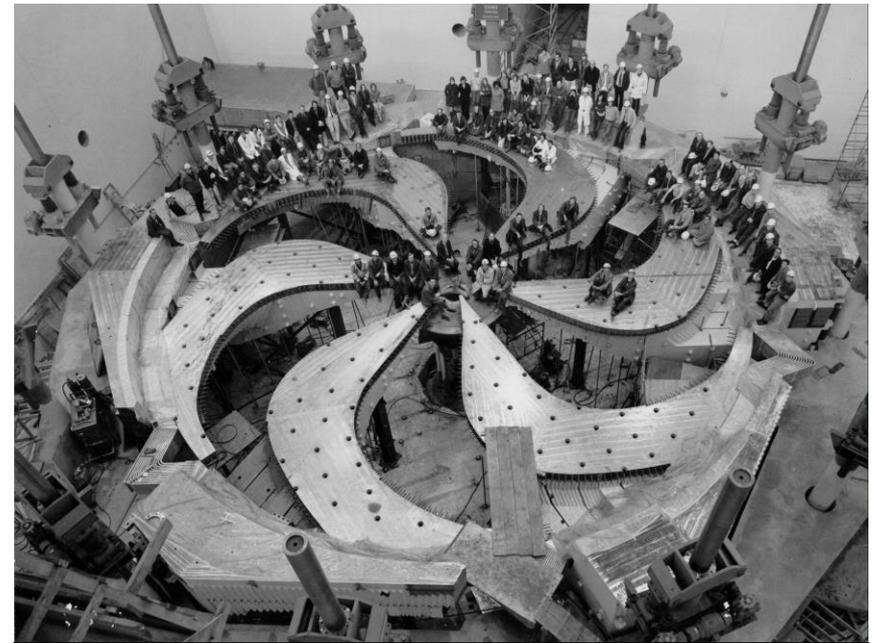
Il problema della taglia dei magneti rende pero' inefficace il sincrociclotrone (e i ciclotroni relativistici che vennero dopo)

In affetti i magneti diventavano enormi

- $p = q B R$
- Magneti classici $B \sim 1 \text{ T}$
- Volume del magnete (principalmente ferro) $\propto R^3$
- Ma per salire in energia occorre aumentare R ...
- Idea: tenere l'orbita costante a R_{max} e metter il campo magnetico solo sull'orbita delle particelle...

Il ciclotrone piu' grande è al TRIUMF (Canada), anni '70: 500 MeV

Il piu potente è al PSI (Zurigo) da 800 MeV



Ciclotrone del TRIUMF, Vancouver, B.C.

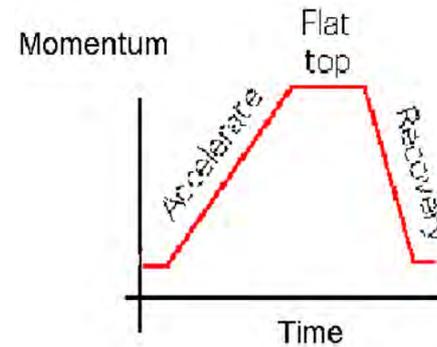
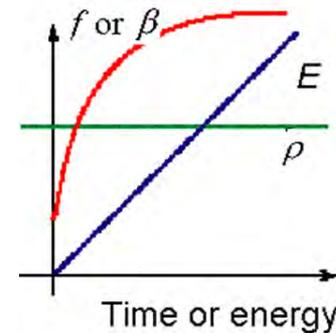
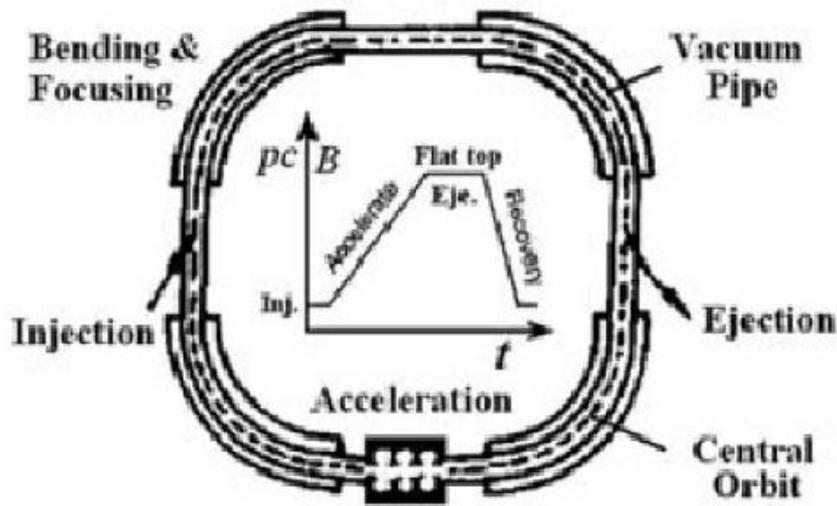
Sincrotroni, adatti sia per elettroni che protoni

Il campo magnetico è solo attorno all'orbita del fascio che è costante. Al centro non c'è più la massa di ferro. Quindi però occorre iniettare un fascio con una energia minima,

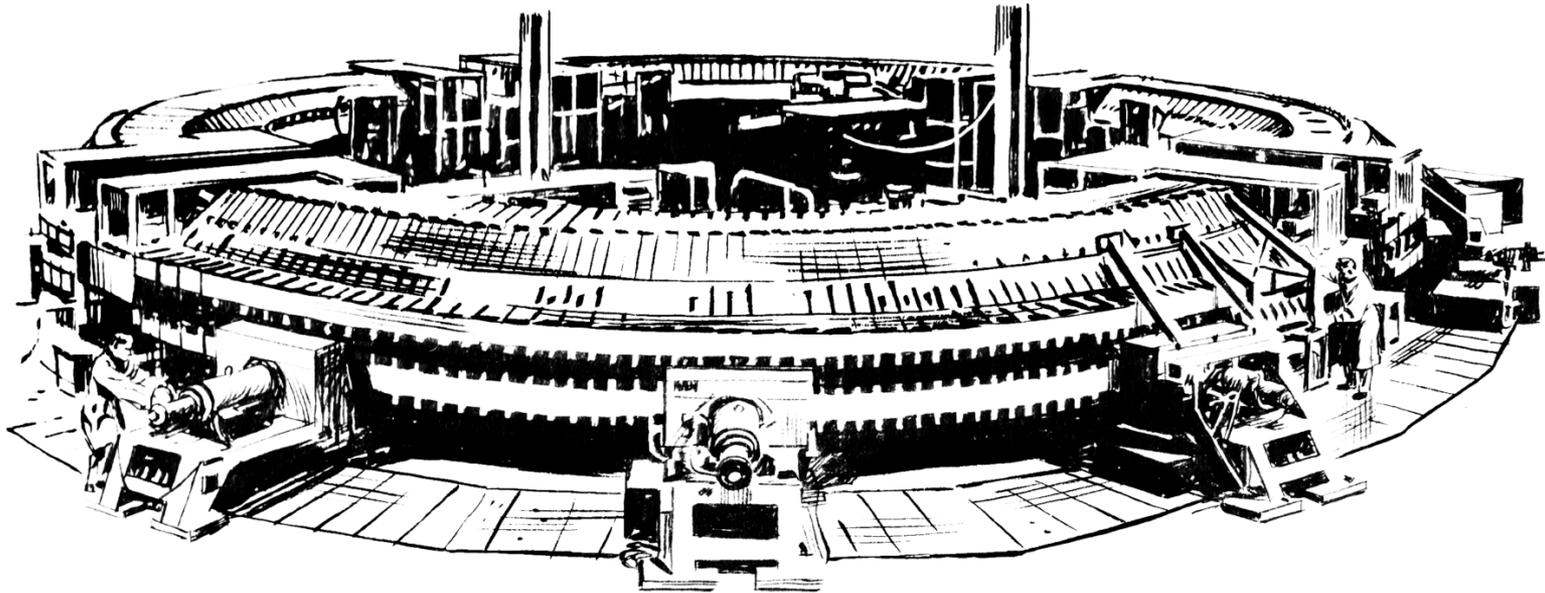
Quindi il campo magnetico aumenta con l'aumento dell'energia (del momento) delle particelle.

La frequenza della tensione alternata accelerante deve anche aumentare poichè le particelle girano sempre più velocemente.

Poichè il campo B e il campo E_{RF} devono aumentare in modo sincrono, di qui il nome!



Costruiti i primi nel 1945 (elettrosincrotrone) in Usa e nel 1952 (protosincrotrono) in UK.



Cosmotron a Brokhaven (NY). Poi il Bevatron a LBNL (Nobel a Segre et al. per antiprotone)



Foto del ProtoSincrotrone (CERN) del CERN (in primo piano un magnete dipolo)

L'anello del PS data del 1959! E' il piu' vecchio acceleratore del CERN. Raggiunge quasi 30 GeV di energia in un ciclo di pochi secondi. Lungo 600 metri. Utilizza la focalizzazione forte.

LEP: Large Electron-Positron Collider – 27 km CERN 50+50 GeV e poi LEP II 100+100 GeV Il piu grande elettrosincrotrone (1989)

I magneti del LEP (che guidano)



Le cavità RF acceleranti del LEP I
(resistive)



**Le cavità RF
superconduttive
che spinsero il LEP II**

I protosincrotroni giganti (fine anni 1970) entrambi lunghi circa 7 km

Il SuperProtosincrotrone (SPS)
del CERN (300→450 GeV)



Il Main Ring (MR) del Fermilab da
500 GeV



Il Main Ring al di sopra del Tevatron...

Intanto i Linac progrediscono soprattutto per gli elettroni...

Vista in pianta del laboratorio SLAC e del famoso 2Miles Linac



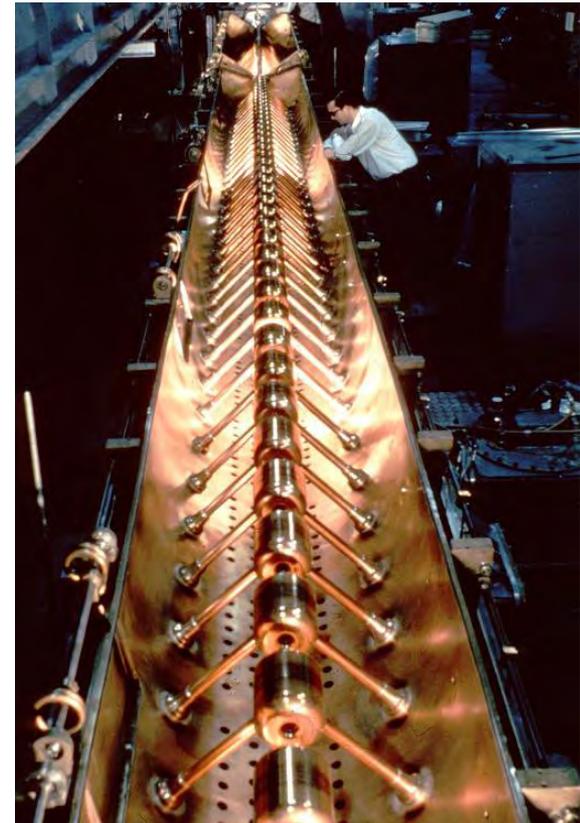
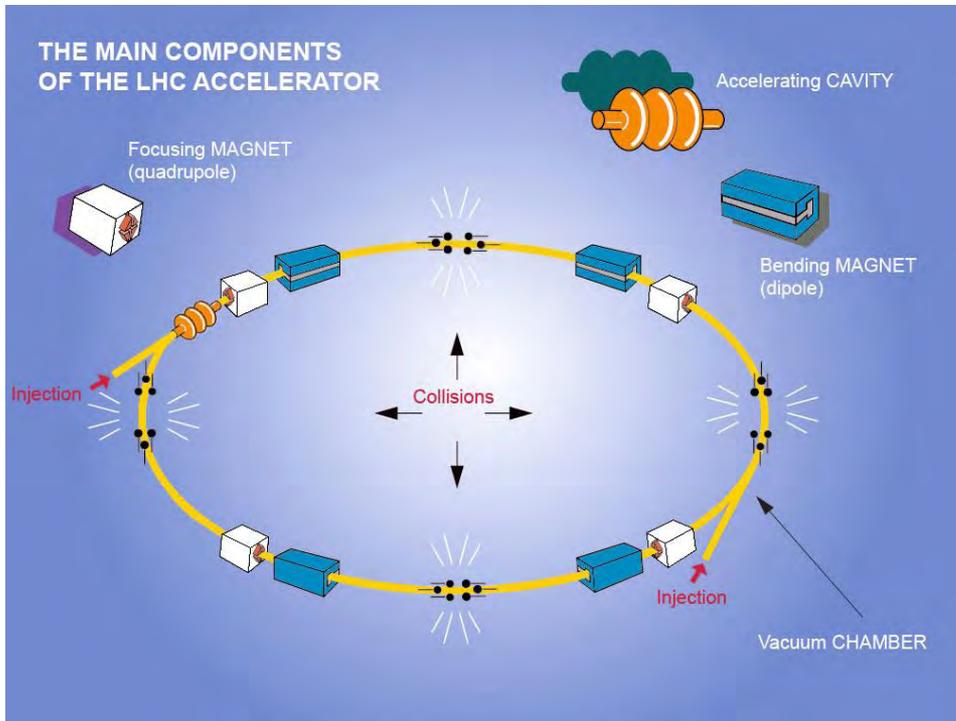
Vista nel tunnel (trincea): i tube contengono le cavità RF resitive 3 GHz



Le due grandi famiglie di acceleratori

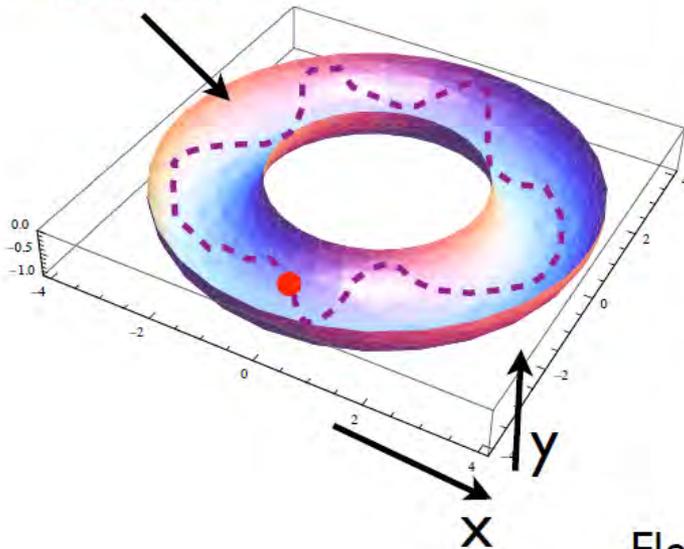
Sincrotrone (derivato dal ciclotrone) è CIRCOLARE. La sezione accelerante è corta ma viene riutilizzata ogni giro...

Lineare. Somma le accelerazioni in linea retta



How an accelerator works ?

Accelerator



Goal: keep enough **CHARGED** particles confined in a well defined volume to accelerate them for a sufficiently long time (**ms - hours**)

How ? Lorentz Force!

$$\overline{F}(t) = q \left(\overline{E}(t) + \overline{v}(t) \otimes \overline{B}(t) \right)$$

Electric field
accelerates particles

Particles of
different energy
(speed) behave differently

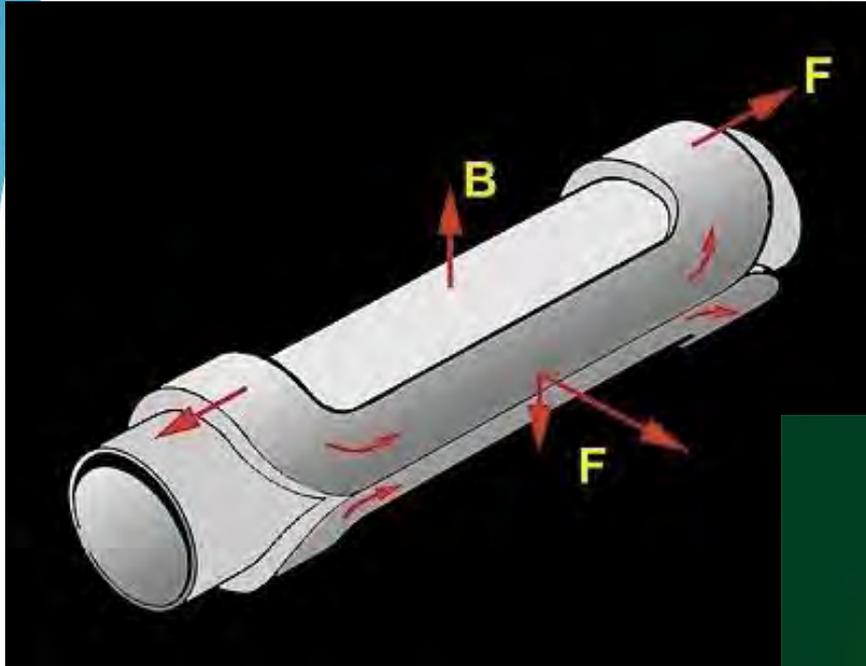
Magnetic field confines
particles
on a given trajectory

An **accelerator** is formed by a sequence (called **lattice**) of:

a) **Magnets** → **Magnetic Field**

b) **Accelerating Cavity** → **Electric Field**

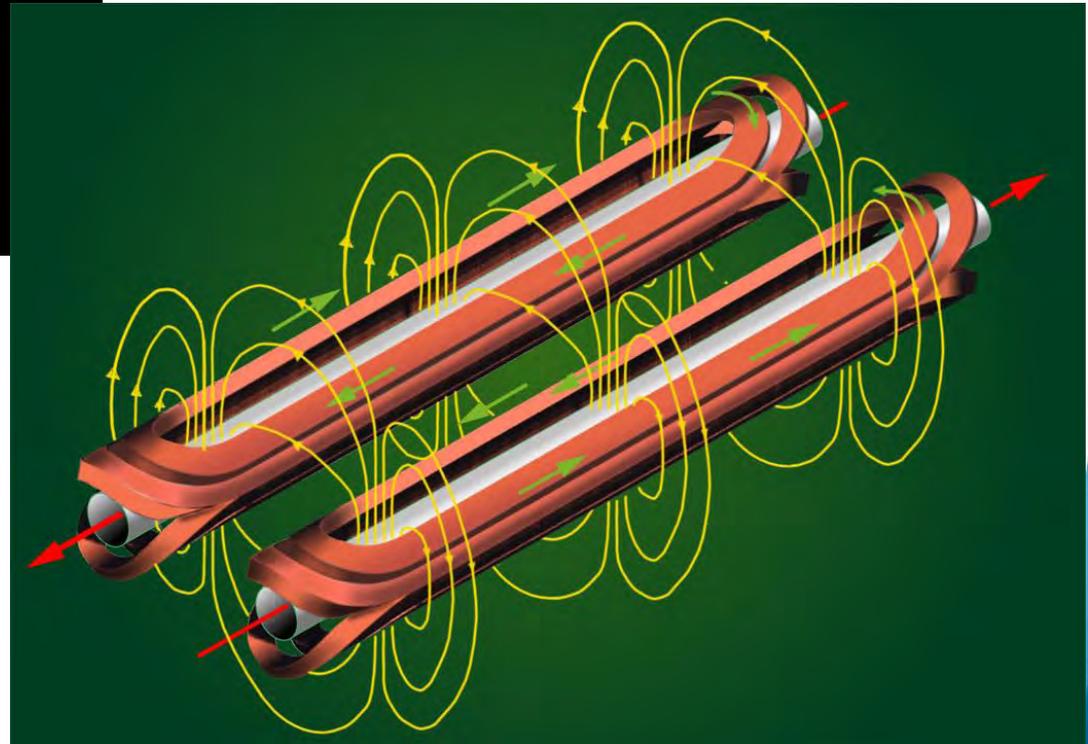
Dipolo magnetico per curvare le particelle (campo verticale uniforme)



Il dipole ideale è slanciato, generando campo solo dove è necessario

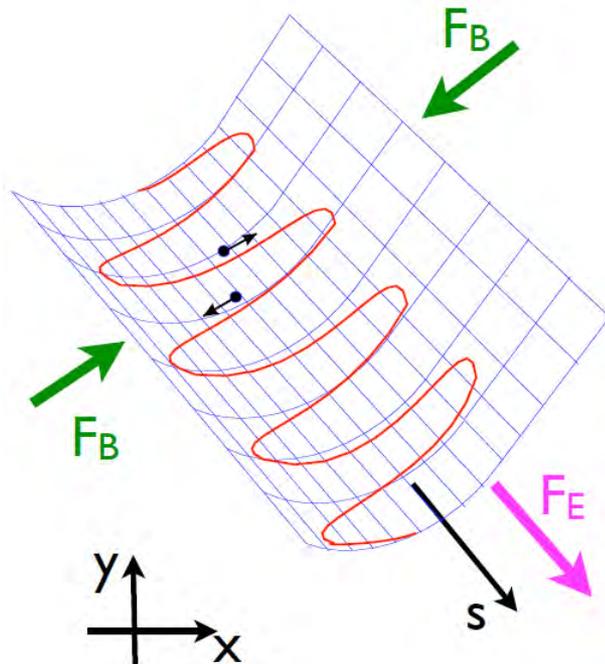
$$E = 0.3 B \cdot R$$

Dipolo doppio di LHC, dove i due magneti sono accoppiati per guidare due fasci controcircolanti

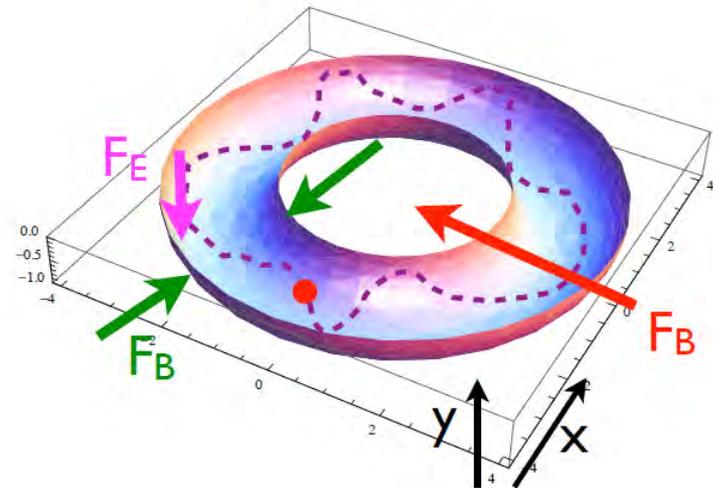


$$\overline{F}(t) = q \left(\underbrace{\overline{E}(t)}_{F_E} + \underbrace{\overline{v}(t) \otimes \overline{B}(t)}_{F_B} \right)$$

Linear Accelerator

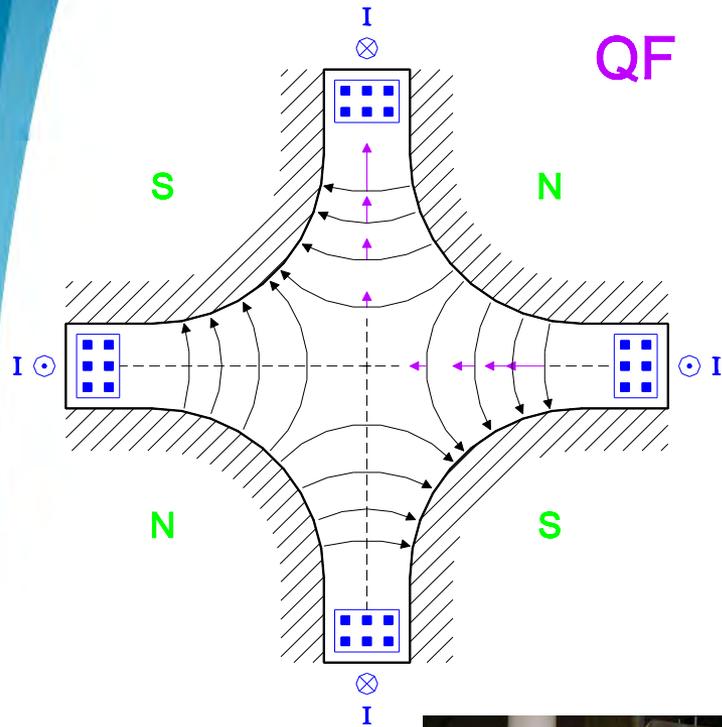


Circular Accelerator



Non basta guidarle in tondo, o spedirle diritte: i fasci di particelle devono essere focalizzati

A questo ci pensano i magneti quadrupoli...



$$F_x = -g \cdot x$$

$$F_y = g \cdot y$$

Force increases **linearly** with displacement.

Unfortunately, effect is **opposite** in the two planes (H and V).

Remember: this quadrupole is focusing in the horizontal plane but defocusing in the vertical plane!



Colliders

Differenza tra acceleratore a bersaglio fisso e collisore



- **Fixed Target:** $E_{CM} = \sqrt{2m_0c^2(m_0c^2 + E)}$
- **Collider:** $E_{CM} = 2E$



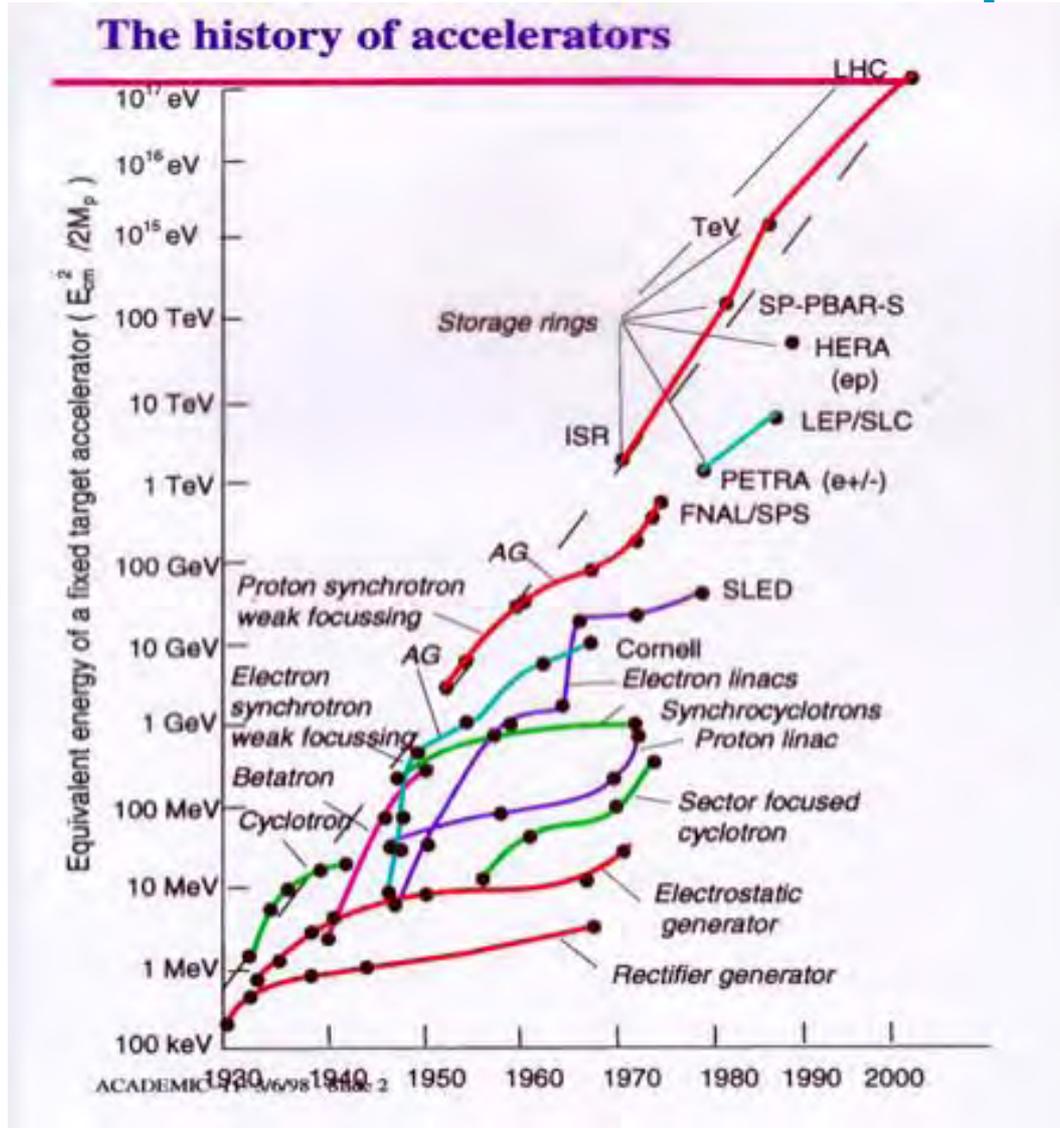
Per ottenere una energia nel Centro di Massa di 100 GeV, con un collider (due acceleratori che fanno scontrare i fasci) mi bastano 50 + 50 GeV.\$

Con una acceleratore solo che "spara" contro un bersaglio fisso mi occorre un fascio da 5328 GeV!!

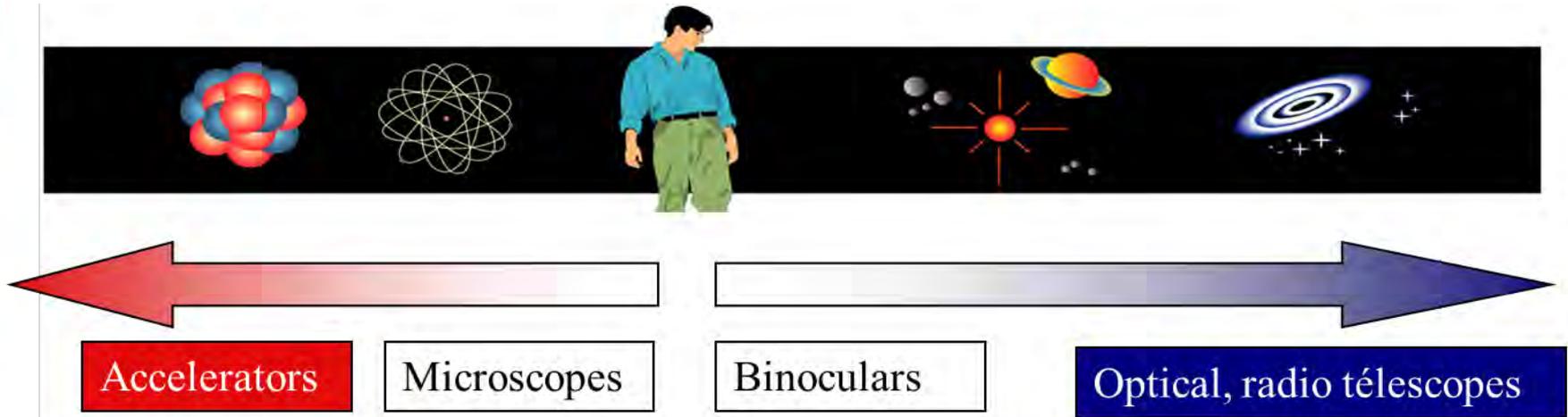
AdA (Anelli di Accumulazione),
Frascati, Bruno Touscheck, fine '60



Livingstone plot: per mantenere la crescita esponenziale occorrono dei salti quantici...



Ma perchè questa corsa?

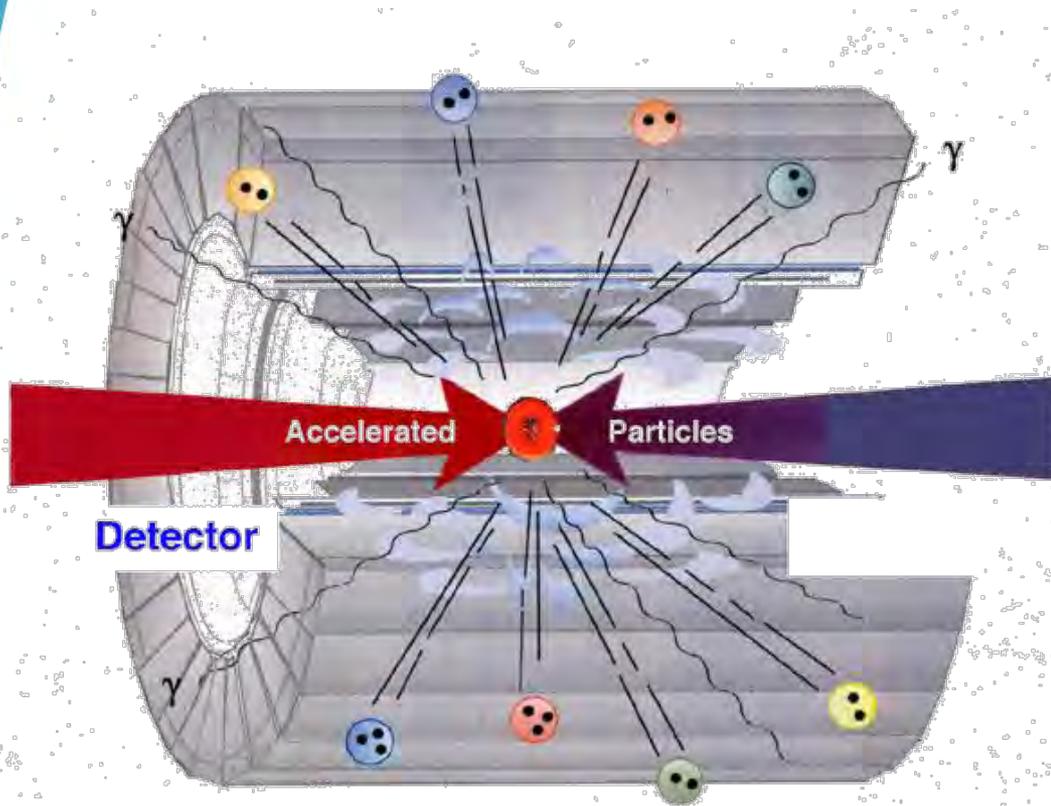


La Fisica delle Particelle osserva la materia nella sua più piccola dimensione. Gli acceleratori sono finissimi microscopi: *atto-scopi!*

$$\lambda = h/p ; @LHC: T = 1 \text{ TeV} \Rightarrow \lambda \cong 10^{-18} \text{ m}$$

Gli acceleratori sono dei nano-nanoscopi

Collider + Detector (Rivelatore, esperimento)



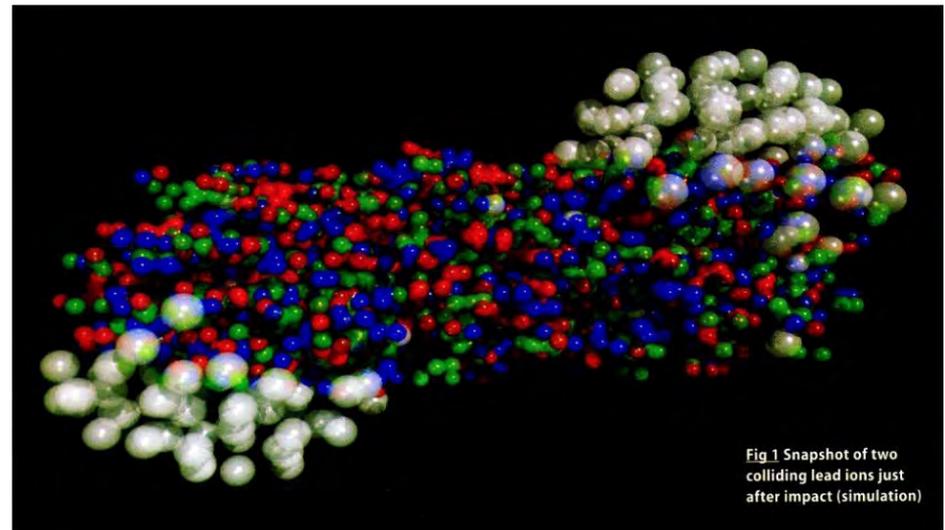
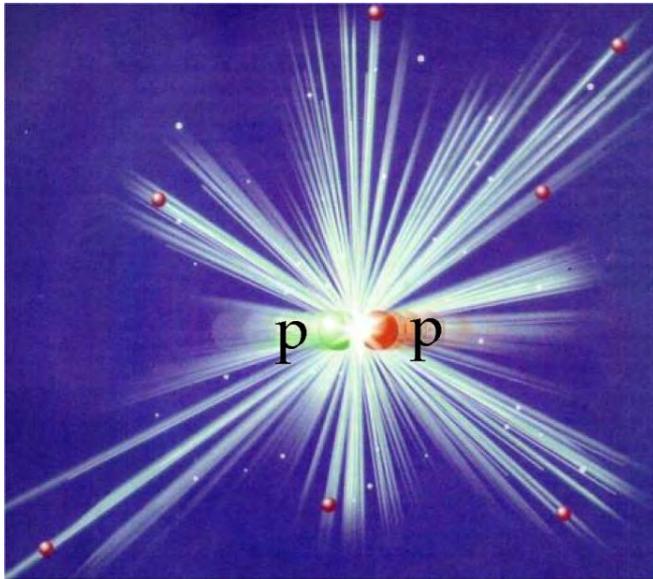
1) Concentrate energy on particles (**accelerator**)

2) **Collide** particles (recreate conditions after Big Bang)

3) Identify created particles in **Detector** (search for new clues)

Vere macchine del tempo

- Viaggio indietro nel tempo $t_{\mu s} \cong 1/E^2_{Gev}$
- $T \cong 1$ ps per creazione di particelle singole
- $T \cong 1$ μs per fenomeni collettivi QGS (Quark-Gluon Soup)



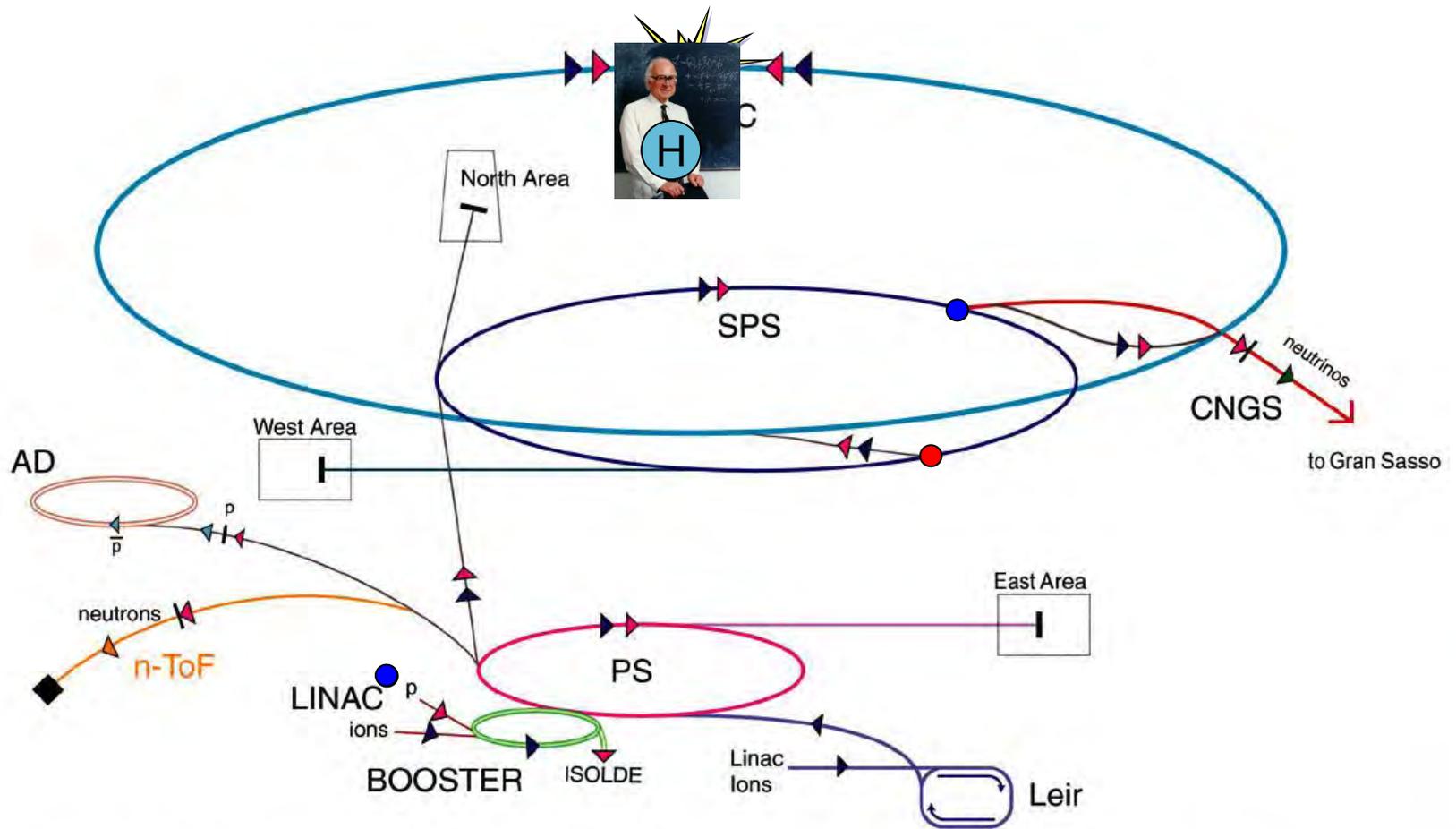
In ogni caso poi rimane il compito di spiegare come si arriva alla complessità che si sviluppa nei 13,85 miliardi di anni che seguono... Molto più difficile!

IL CERN

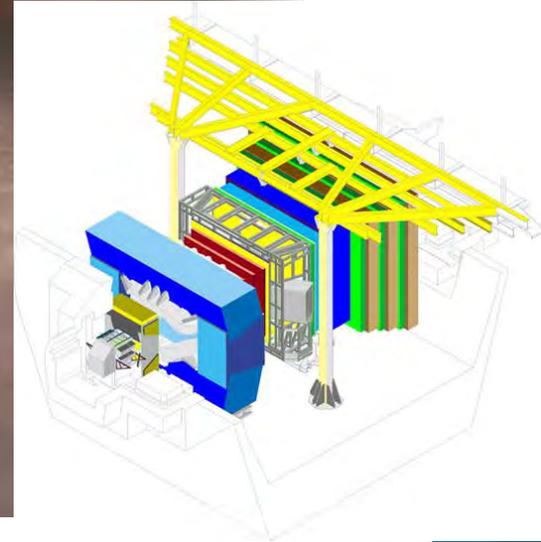
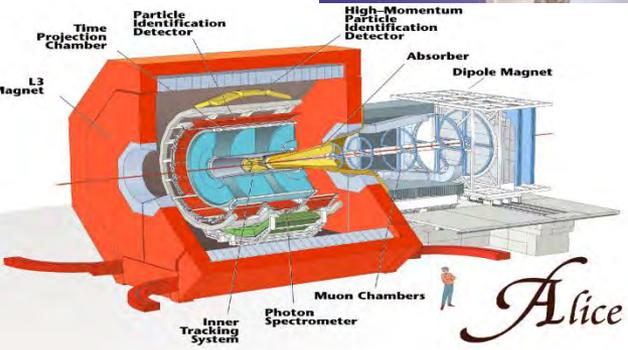
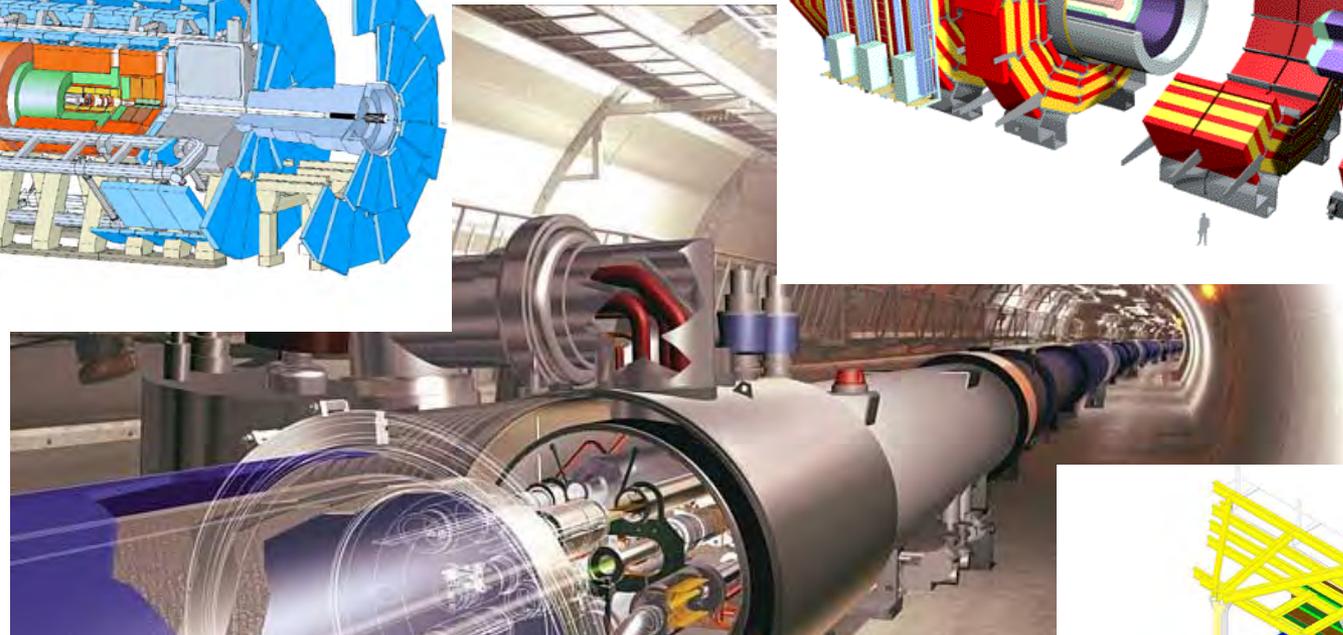
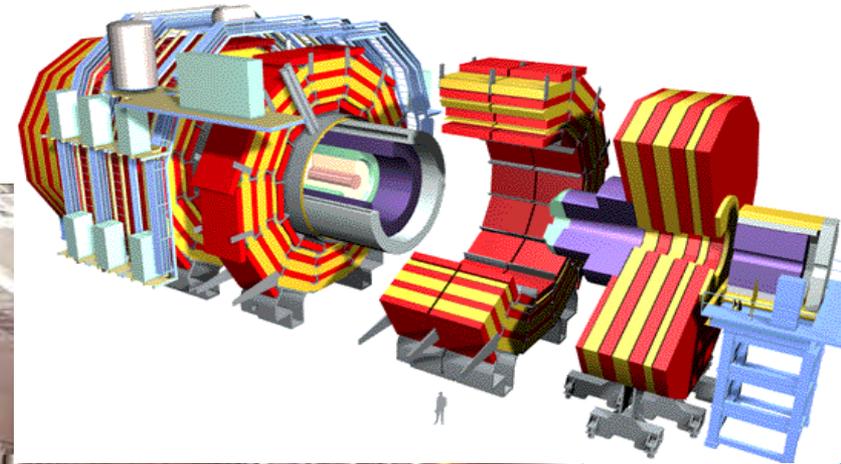
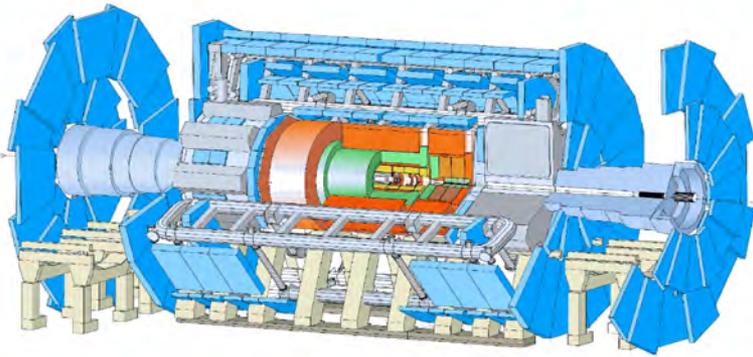
- Fondato nel 1954, oggi 21 stati membri
- Più di 11000 utilizzatori da tutto il mondo
- ~900M€ di budget annuale
- 2250 staff permanente
- 1000 persone associate o nei servizi



CERN: la catena di acceleratori



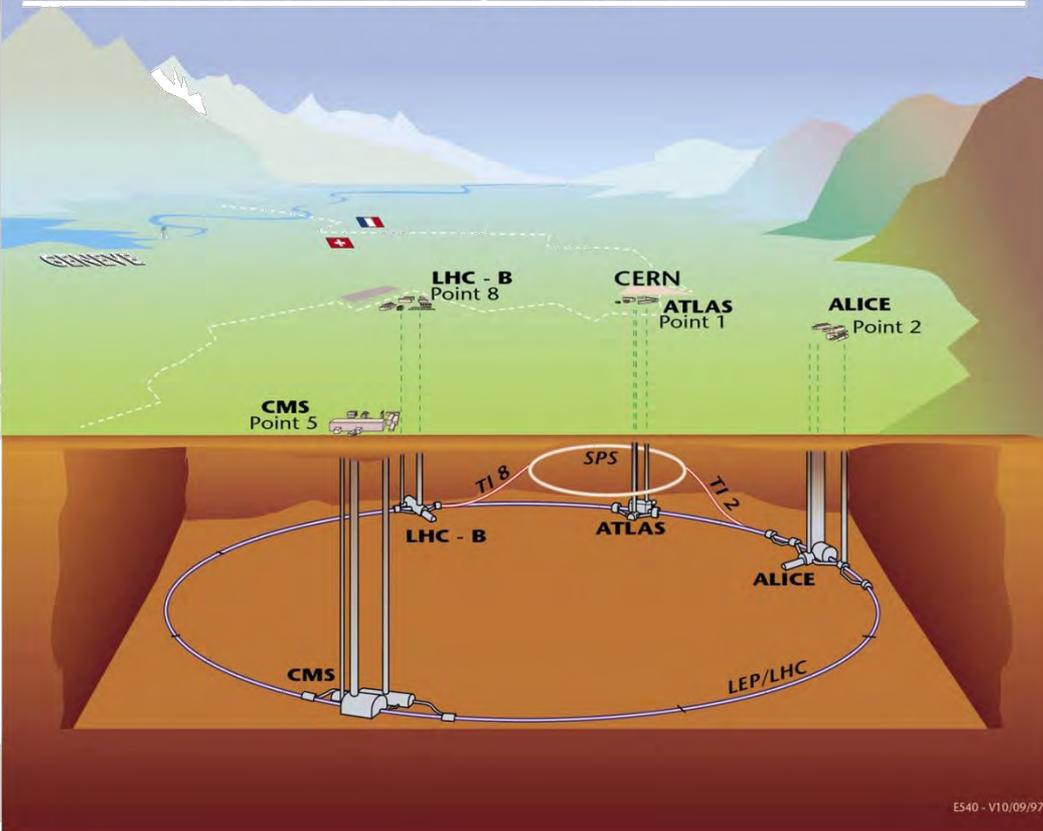
La macchina e i rivelatori



LHC: le caratteristiche

Il Large Hadron Collider (LHC) sarà il **più grande strumento scientifico del mondo** per investigare le proprietà della materia

Overall view of the LHC experiments.

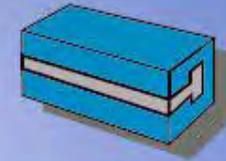


- Quattro **caverne gigantesche** ospitano i grandi rivelatori
- Il **più grande e più alta energia** di tutti gli acceleratori
- I fasci di particelle **collidenti più intensi** mai ottenuti
- Funzionerà a una temperatura **più fredda del freddo intersiderale**

THE MAIN COMPONENTS OF THE LHC ACCELERATOR



Focusing MAGNET
(quadrupole)



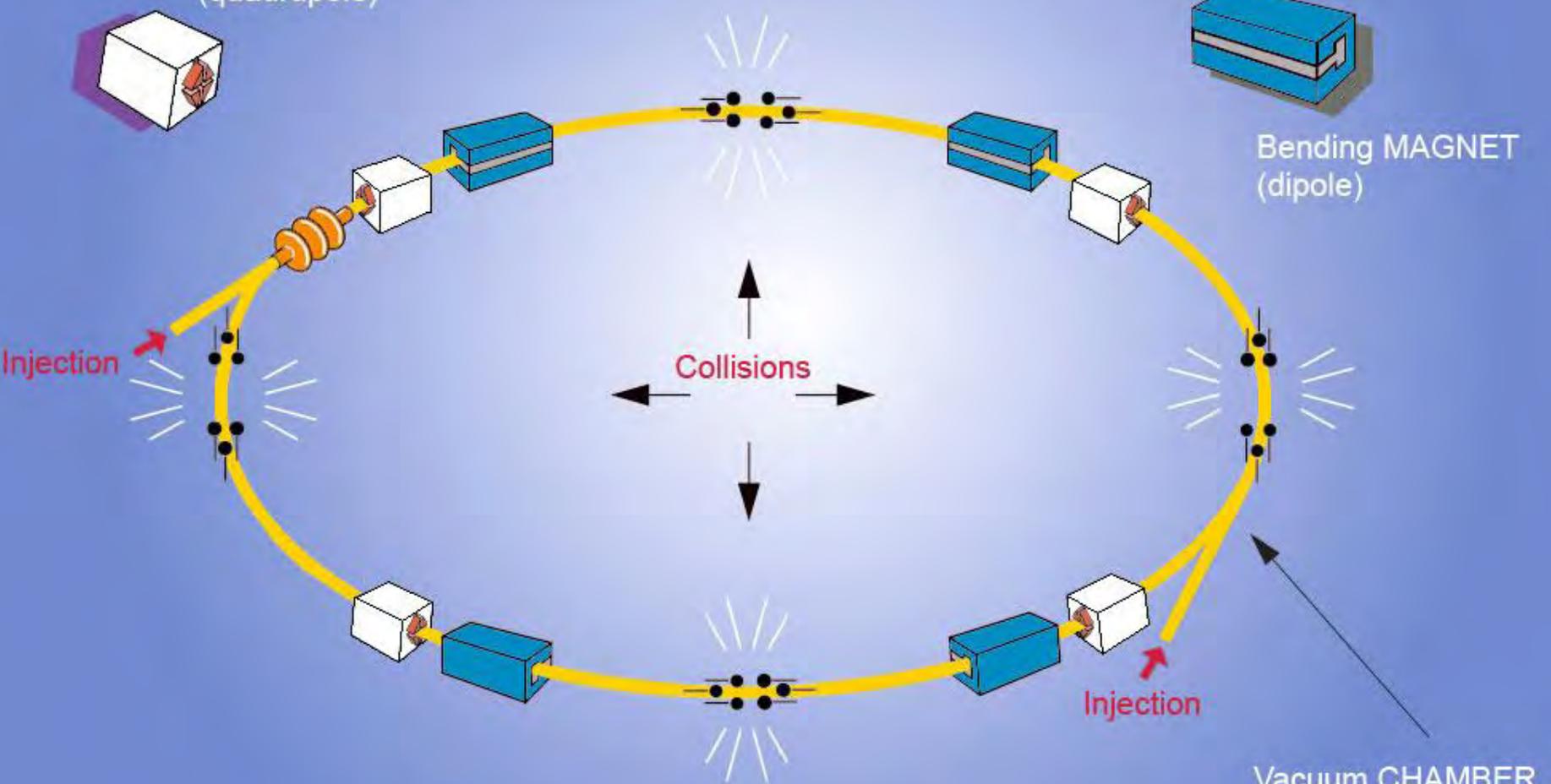
Bending MAGNET
(dipole)

Injection

Injection

Collisions

Vacuum CHAMBER



Superconduttività ed acceleratore

- LHC ha una circonferenza di **26.7 km**, di cui oltre 24 km di **magneti superconduttori** operanti a **8.3 T**. Gli impianti di criogenia consumeranno circa **40 MW** di potenza elettrica dalla rete.



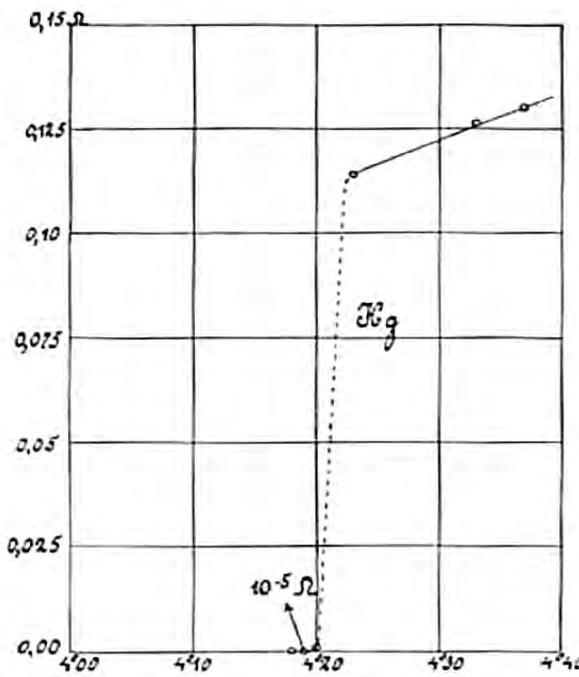
Se LHC non fosse superconduttivo:

- Utilizzando **magneti resistivi** operanti a **1.8 T** la circonferenza sarebbe di circa **100 km**, e il consumo elettrico sarebbe di almeno **900 MW** (una centrale nucleare): costi proibitivi di investimento, di operazione e ambientali.

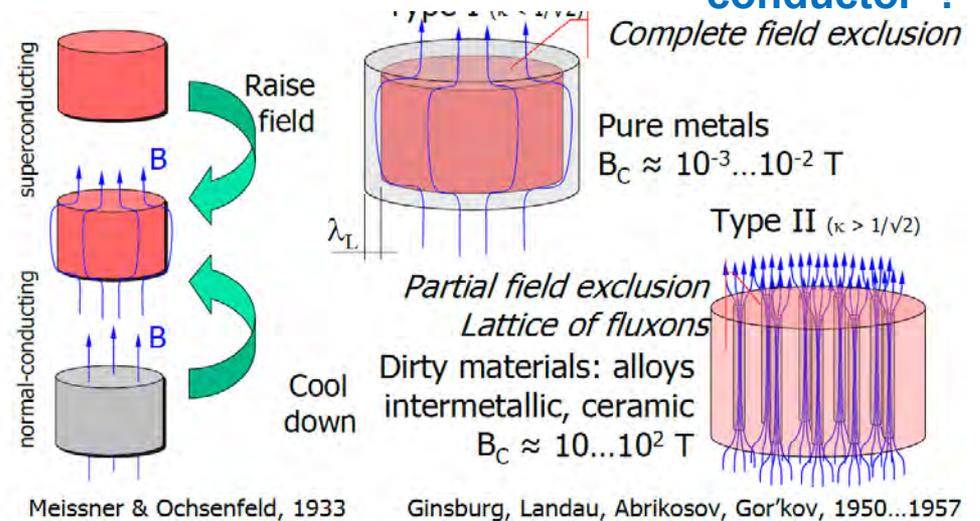


100 y SC: KH Onnes 8 April 1911

Superconductor: more than perfect conductor !

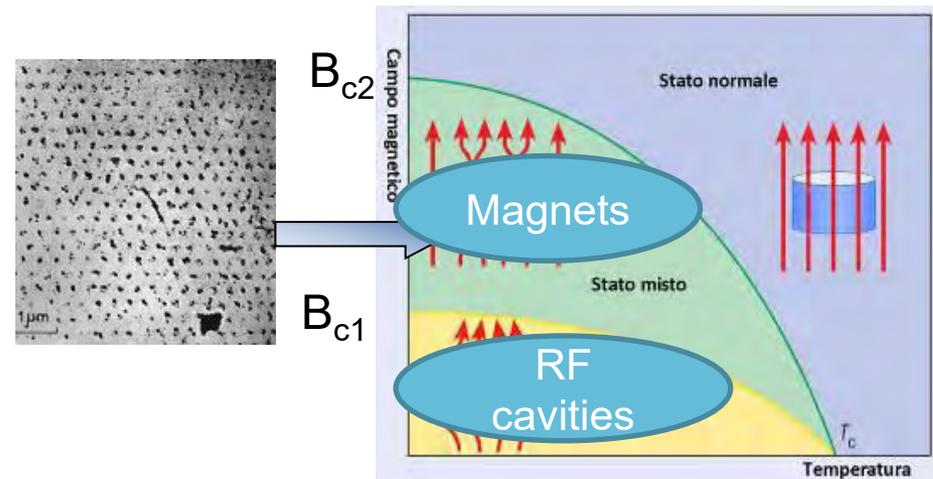


Transizione di puro (distillato) mercurio, K.H. Onnes in November 1911



Meissner & Ochsenfeld, 1933

Ginsburg, Landau, Abrikosov, Gor'kov, 1950...1957



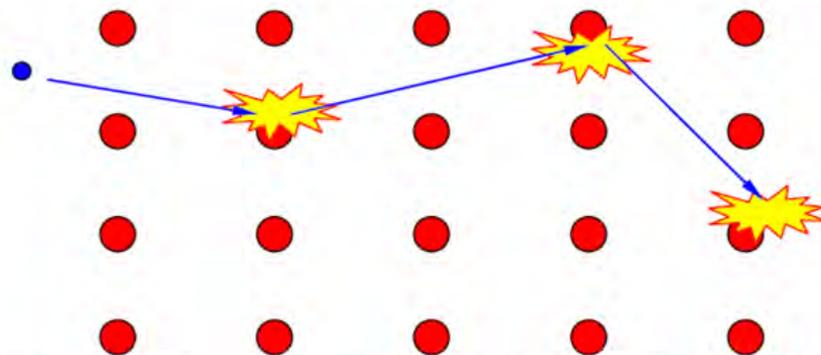
La superconduttività è un fenomeno NON raro, ma avviene a basse temperature

■ Normal conductor

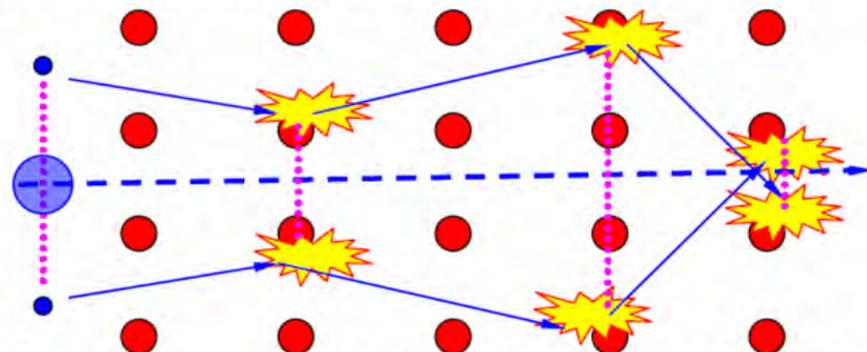
- scattering of e^-
- finite resistance due to energy dissipation

■ Superconductor

- paired electrons forming a quasi particle in *condensed* state
- zero resistance because the scattering does not excite the quasi-particle



Proper physics: a gas of Fermions. The conduction electrons at the Fermi surface have large energy (few eV) and interact with lattice defects, displacements or thermal excitations (hence $\rho(T)$)



Proper physics: paired electrons in the vicinity of the Fermi surface, with opposite momentum and spin (bosons with zero spin). The binding energy introduces a small energy gap between paired and unpaired state. An external electric field makes the pair drift.

Due elettroni di spin opposto sotto certe condizioni si accoppiano formando un bosone (quasi-particle)...

Lattice displacement



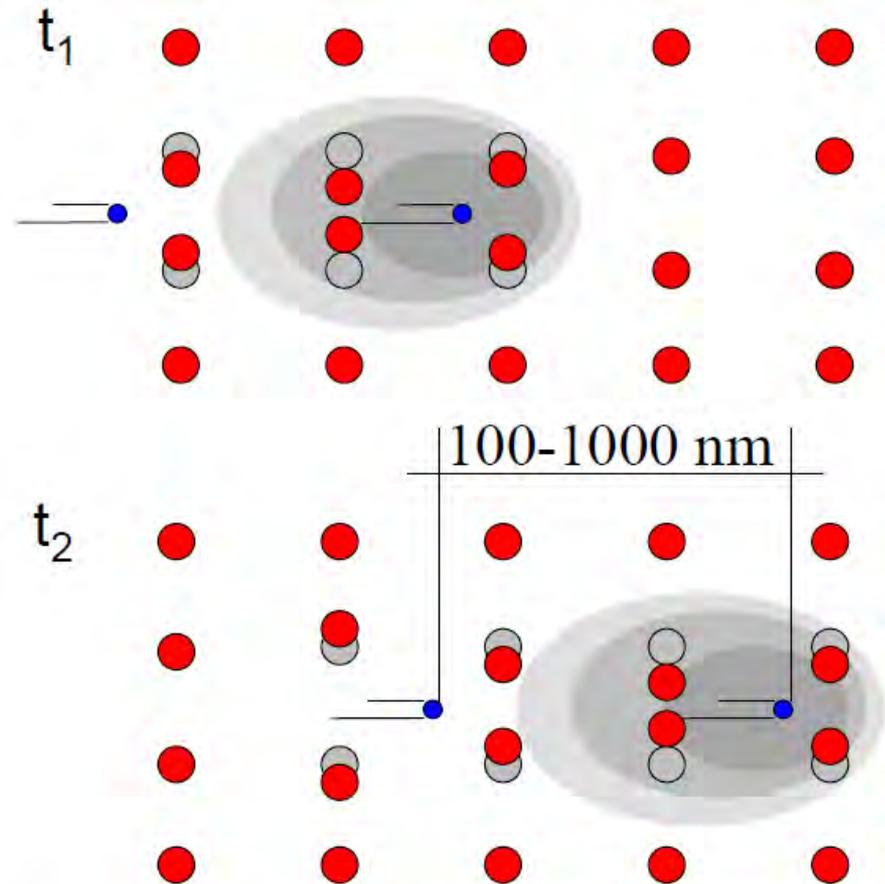
phonons (sound)



coupling of charge carriers

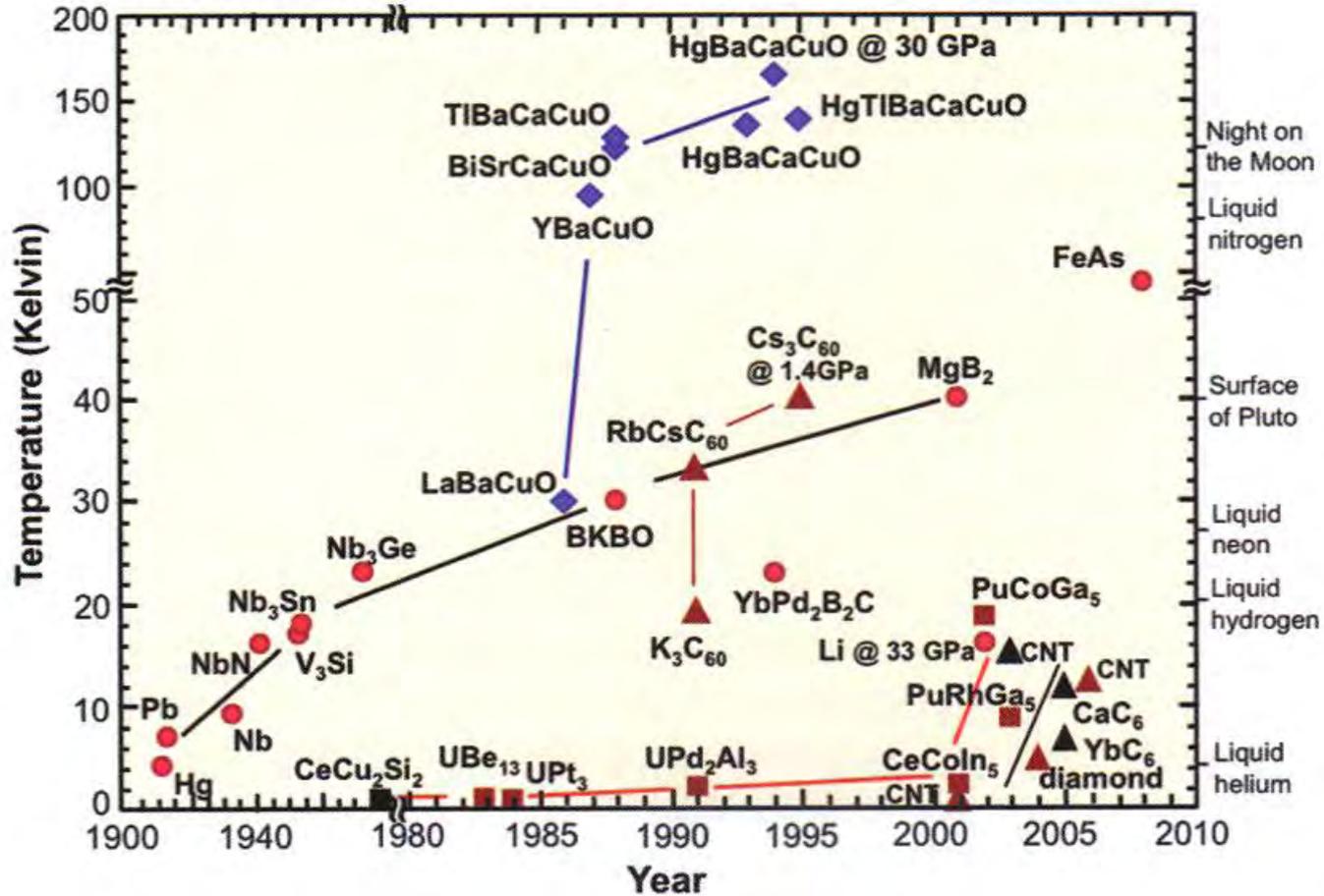
Only works at low temperature

Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS) - 1957

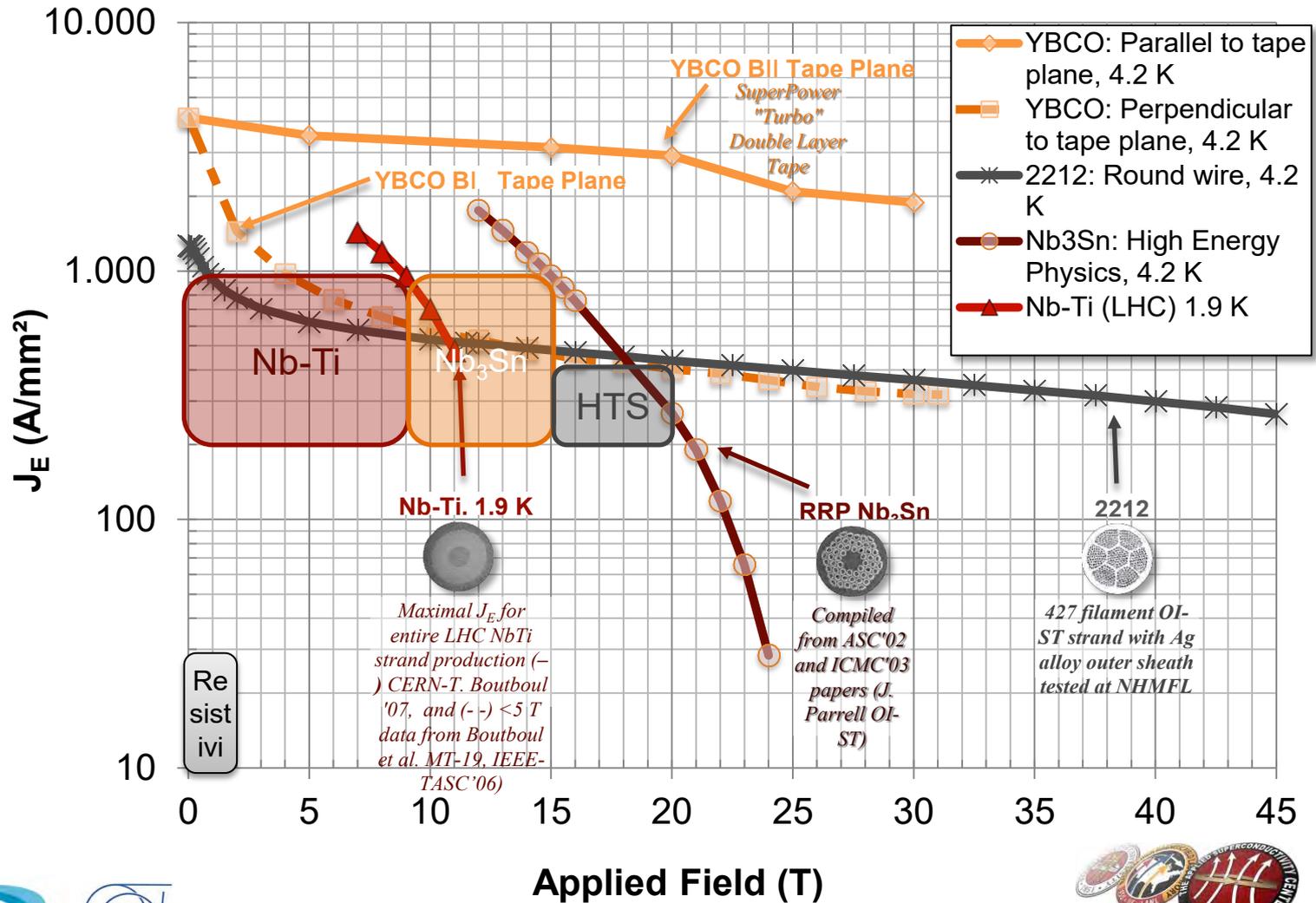


Proper physics: the binding energy is small, of the order of 10^{-3} eV. Pairs can be broken easily by thermal energy. The interaction is long range, and Cooper pairs overlap and can exchange electrons

Superconductor: Tc vs. year

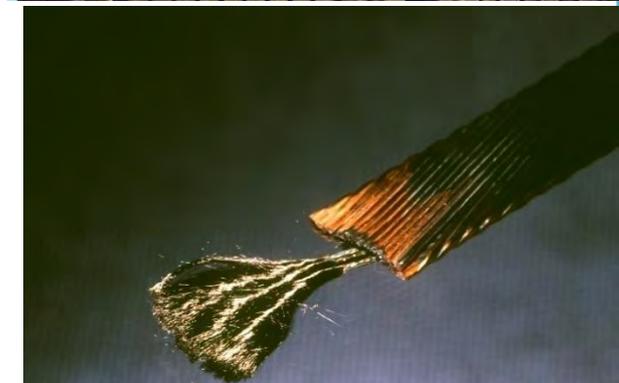


Defining the zone



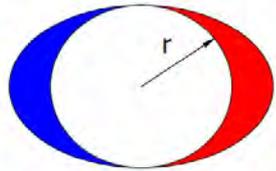
Il superconduttore 7000 km di cavi Cu/Nb-Ti

STRAND	Type 01	Type 02
Diameter (mm)	1.065	0.825
Cu/NbTi ratio	1.6-1.7 ± 0.03	1.9-2.0 ± 0.03
Filament diameter (µm)	7	6
Number of filaments	8800	6425
Jc (A/mm ²) @1.9 K	1530 @ 10 T	2100 @ 7 T
µ ₀ M (mT) @1.9 K, 0.5 T	30 ±4.5	23 ±4.5
CABLE	Type 01	Type 02
Number of strands	28	36
Width (mm)	15.1	15.1
Mid-thickness (mm)	1.900 ±0.006	1.480 ±0.006
Keystone angle (degrees)	1.25 ±0.05	0.90 ±0.05
Cable Ic (A) @ 1.9 K	13750 @ 10T	12960 @ 7T
Interstrand resistance (µΩ)	10-50	20-80

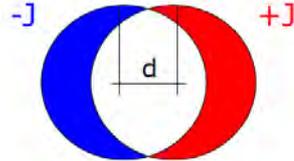


Sezioen di bobine superconduttive

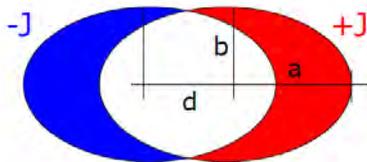
$I = I_0 \cos(\theta) \rightarrow B_1 = -\mu_0 I_0 / 2 r$



Intersecting circles $\rightarrow B_1 = -\mu_0 J d / 2$



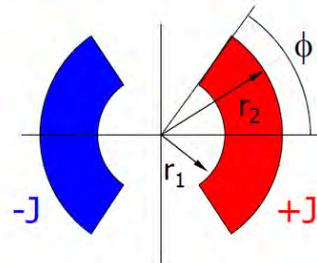
Intersecting ellipses $\rightarrow B_1 = -\mu_0 J d b / (a+b)$



Several solutions are possible and can be extended to higher order multi-pole magnets

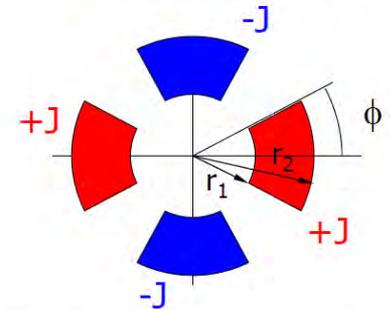
None of them is practical !

■ Dipole coil

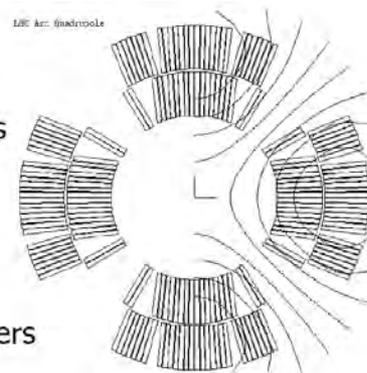
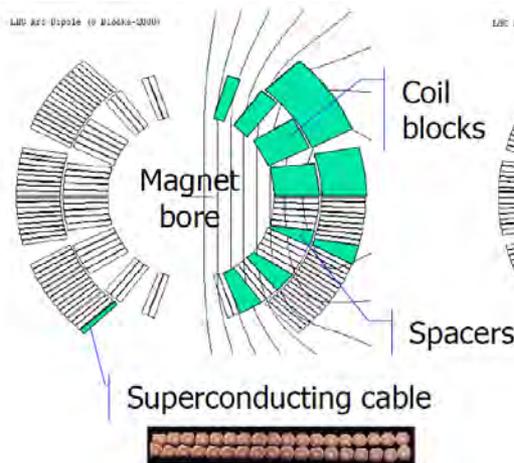


$B_1 = -2\mu_0 / \pi J (r_2 - r_1) \sin(\phi)$

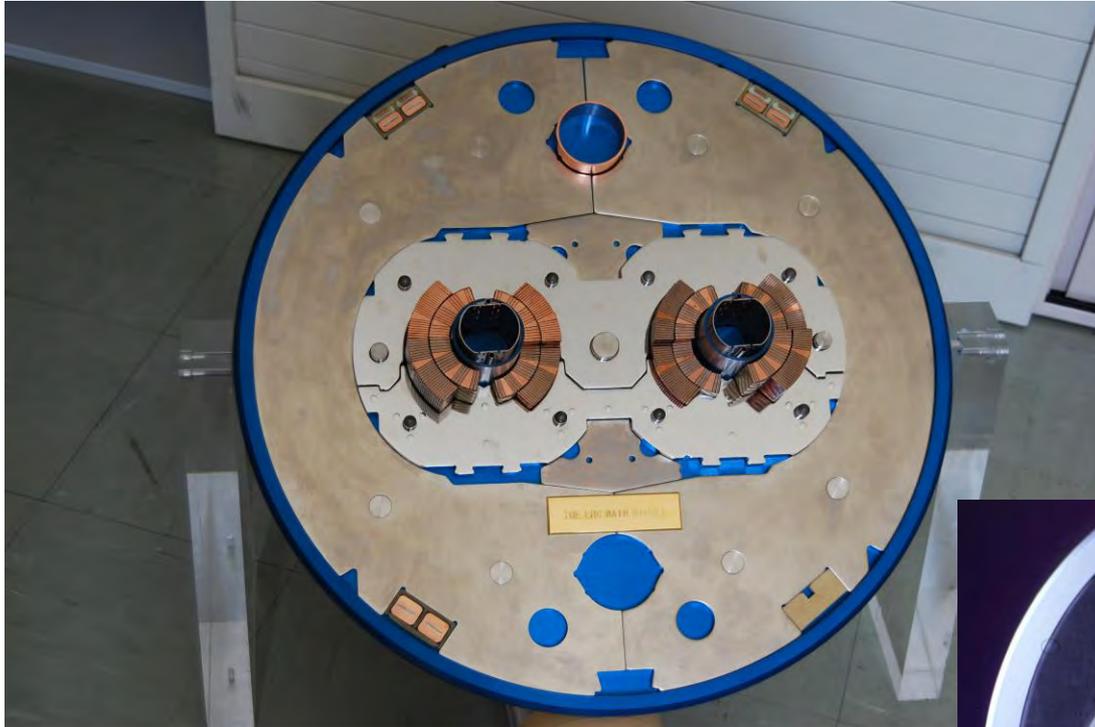
■ Quadrupole coil



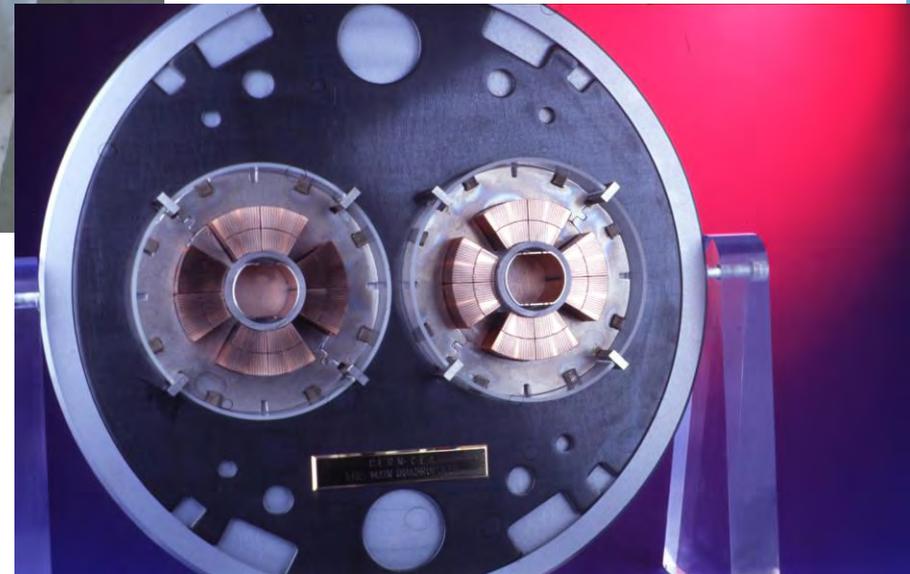
$B_2 = -2\mu_0 / \pi J \ln(r_2 / r_1) \sin(2\phi)$

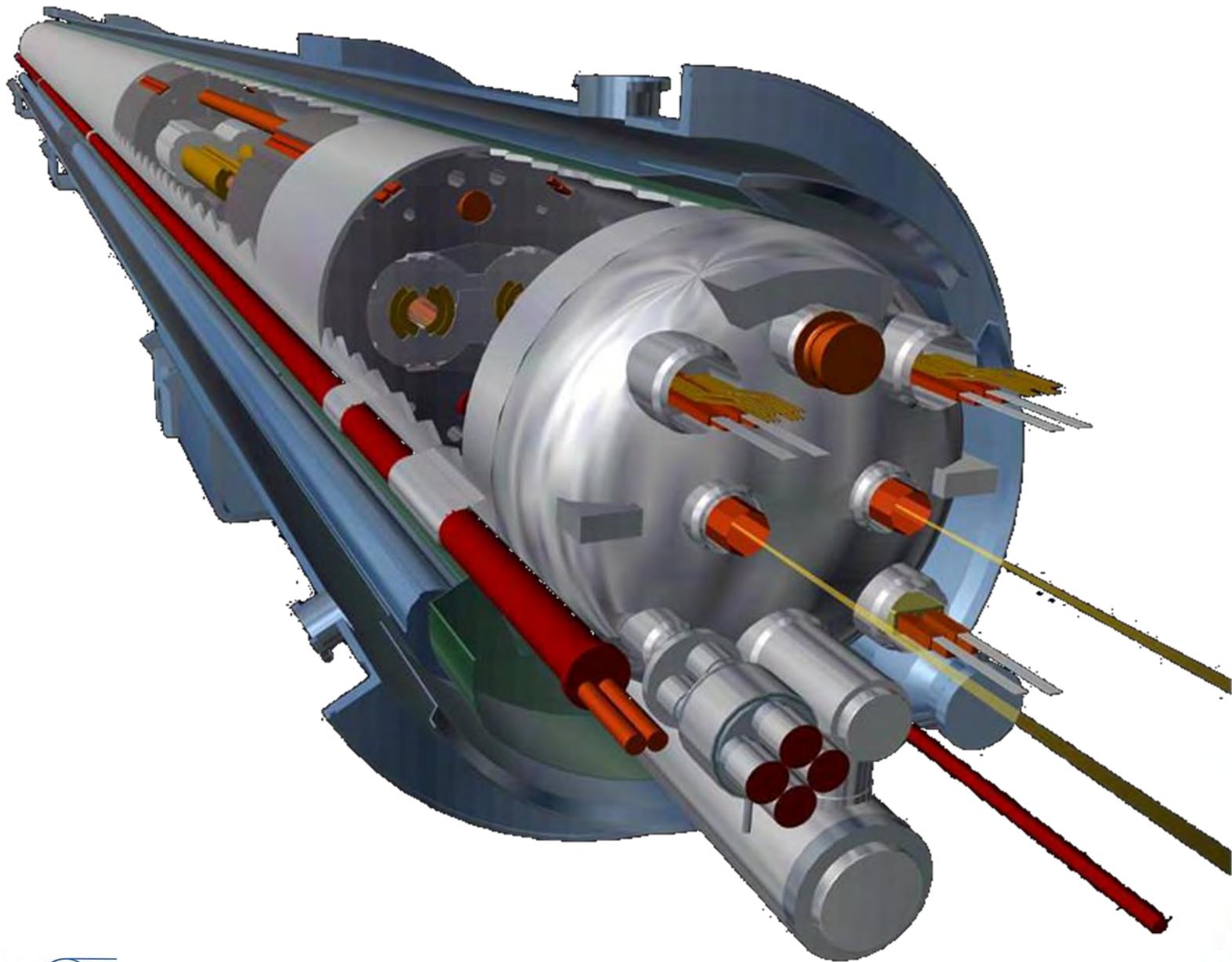


Sezione Dipolo LHC



Sezione Quadrupolo





Primo dipolo LHC 1994 (Programma Bellini!)





Il tunnel LHC

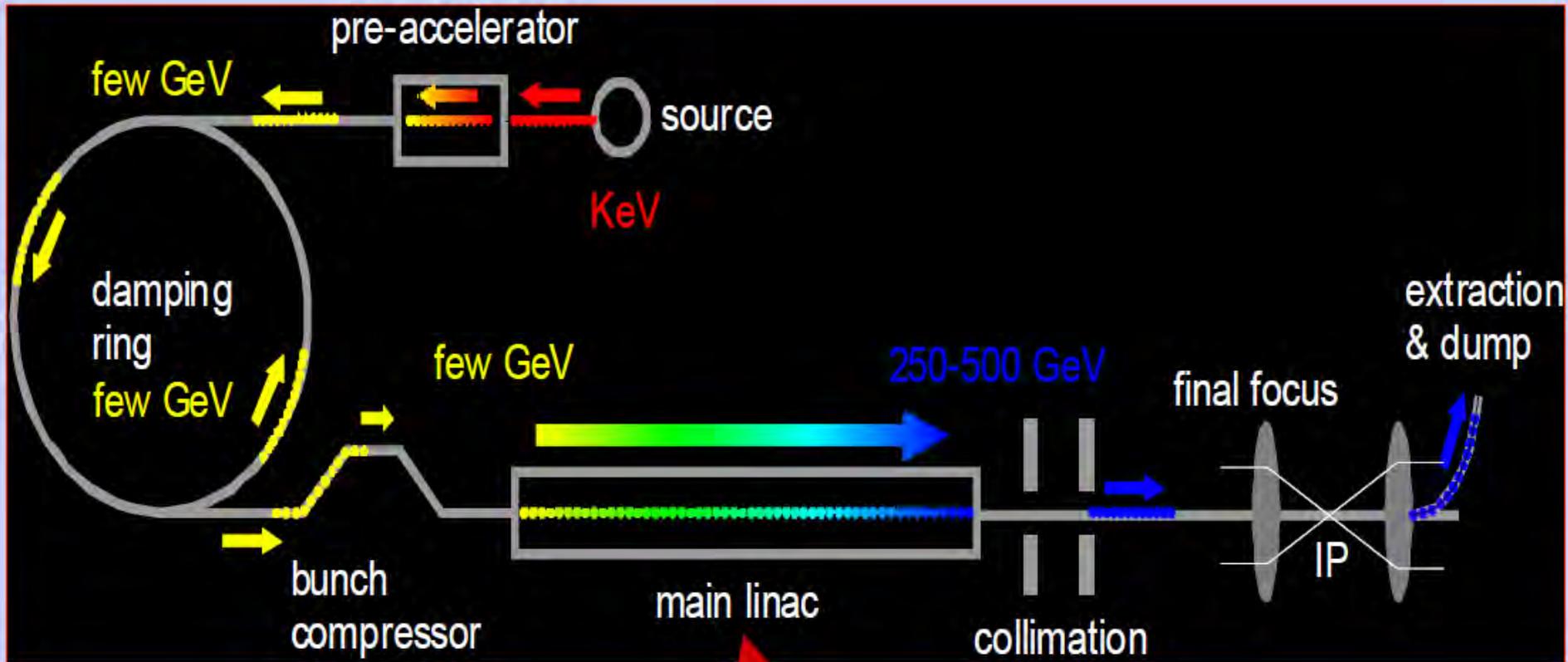
1232 dipoli da 15 metri e 8 tesla

400 quadrupoli da 7 m

Circa 7600 magneti correttori superconduttori

Circa 8 GJ di energia magnetica immagazzinata (12 GJ con i magneti dei rivelatori)

ILC



Superconducting RF Main Linac

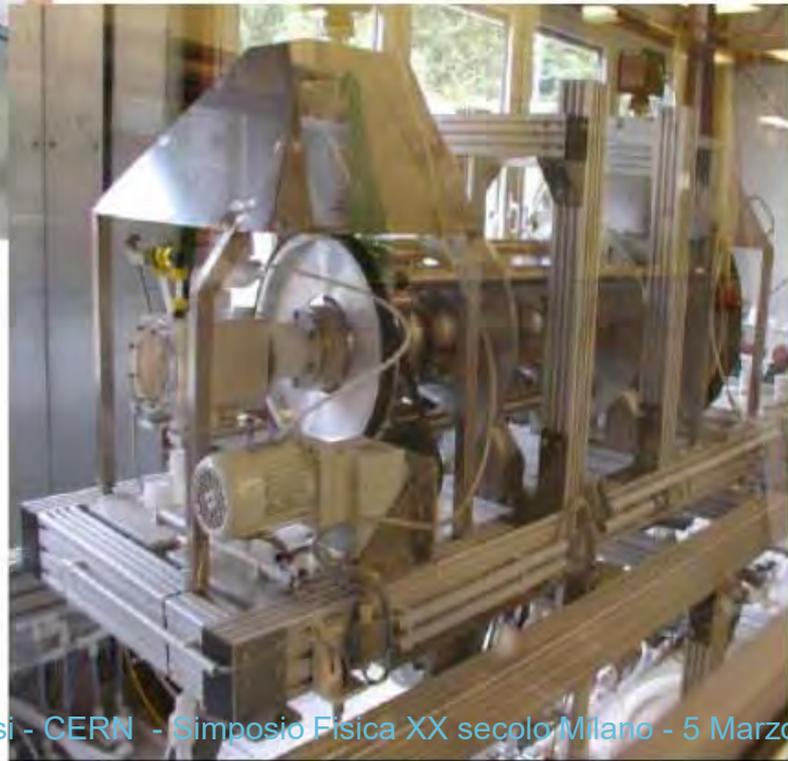
13-Sept-05

Improved Processing Electropolishing

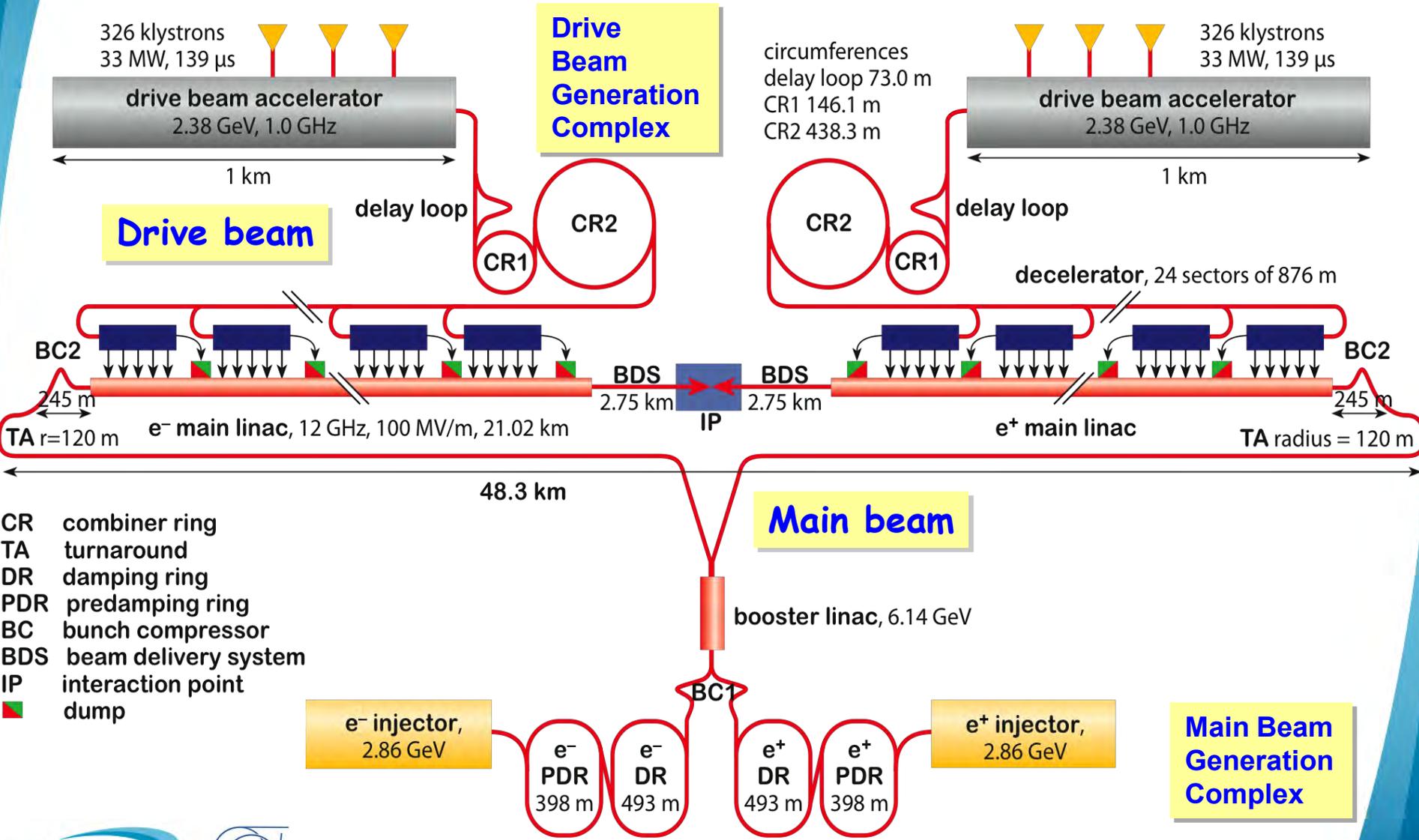


KEK / Nomura EP

DESY EP



CLIC – overall layout – 3 TeV



- CR combiner ring
- TA turnaround
- DR damping ring
- PDR predamping ring
- BC bunch compressor
- BDS beam delivery system
- IP interaction point
- █ dump

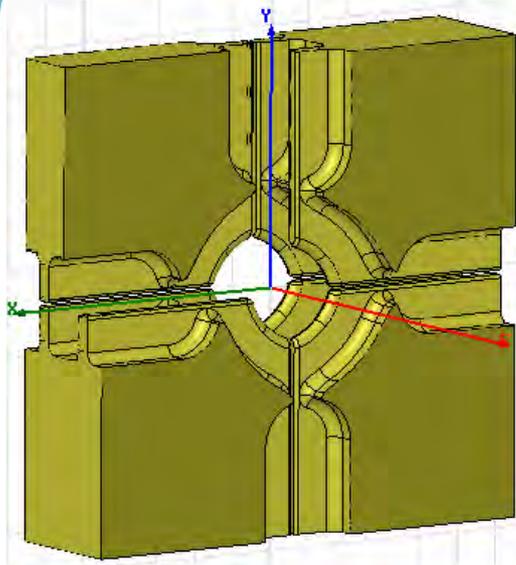


CLIC Accelerating structure:

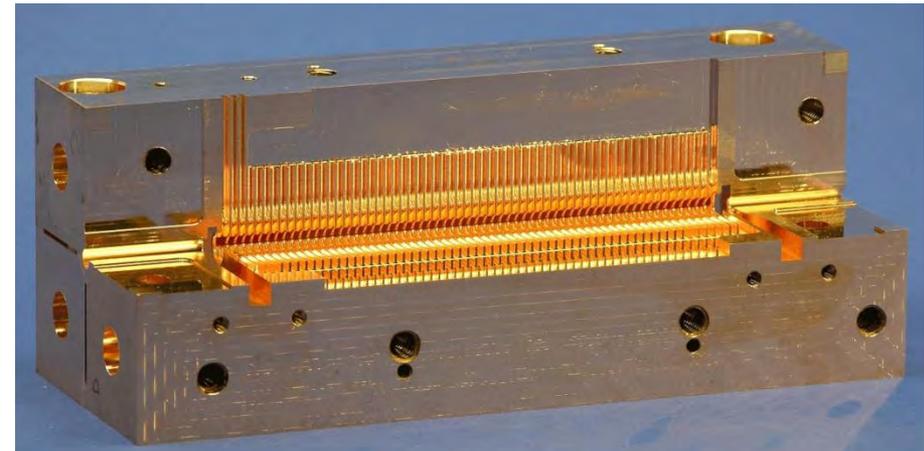
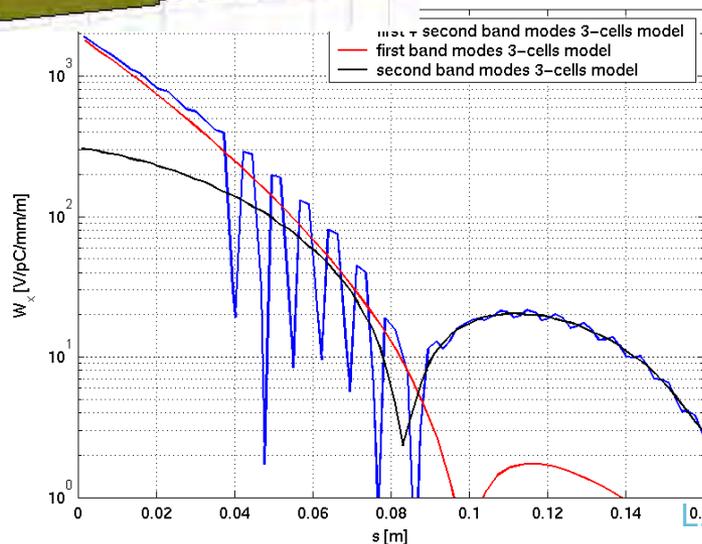
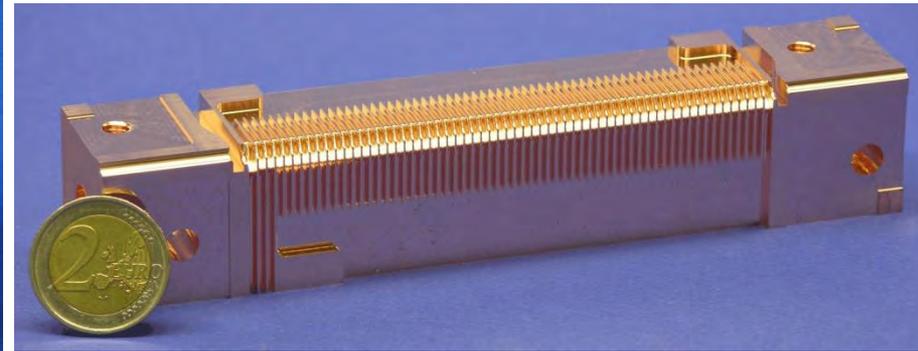
New concept HDS

- Damping waveguides + slotted iris for improved wakefield damping
- Geometry optimized to reduced surface electric and magnetic fields

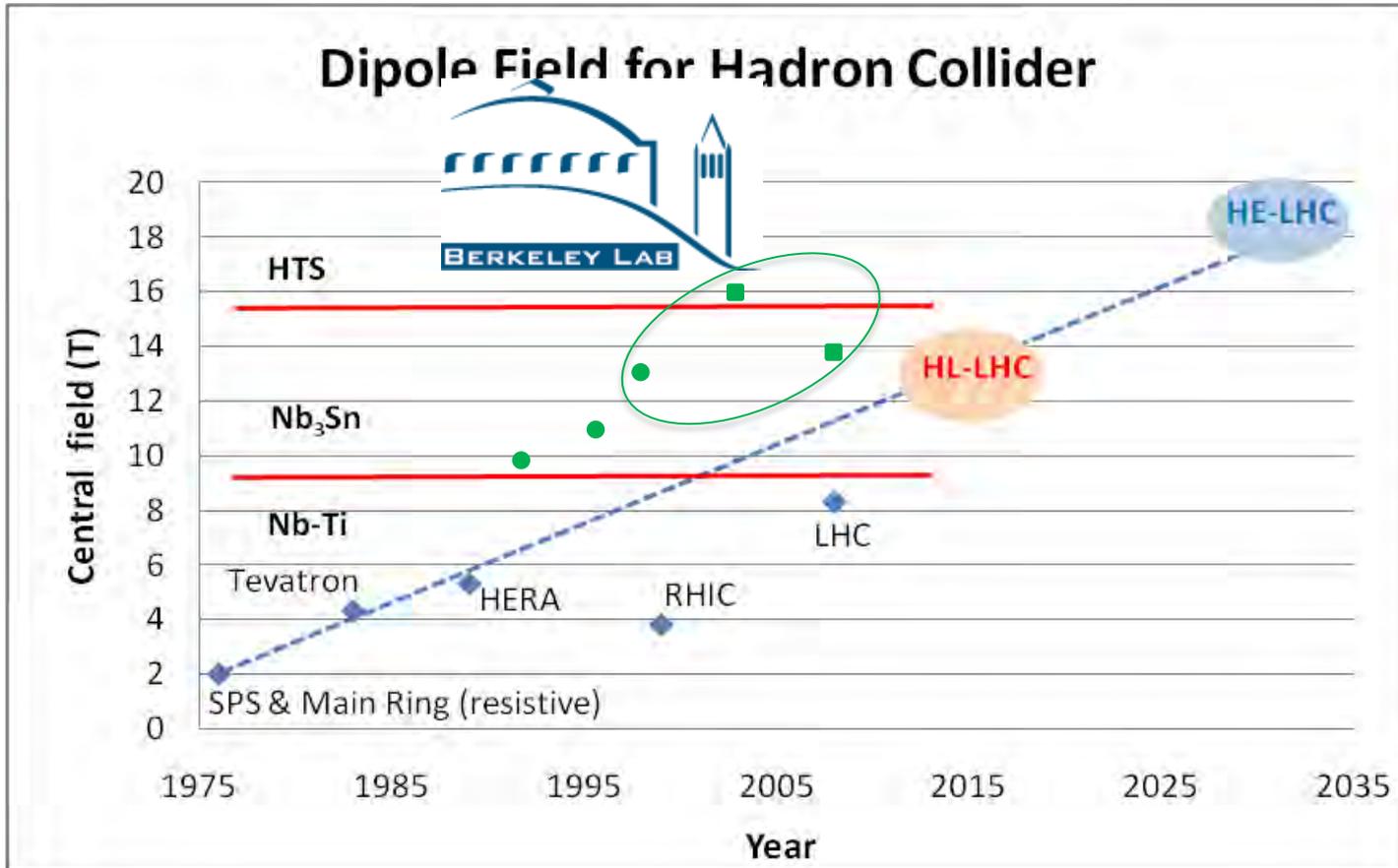
ver test early 2006



$w_i = 1.5\text{mm}$, $\sigma = 0.0\text{mm}$



Main technology is dipole magnets: is it possible ?

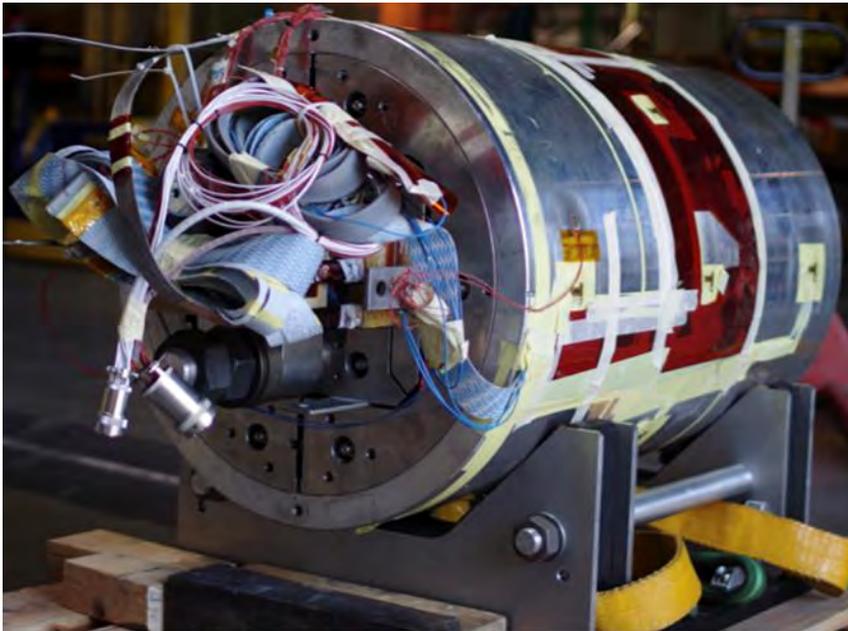


Looking at performance offered by practical SC, considering tunnel size and basic engineering (forces, stresses, energy) **the practical limits is around 20 T.**

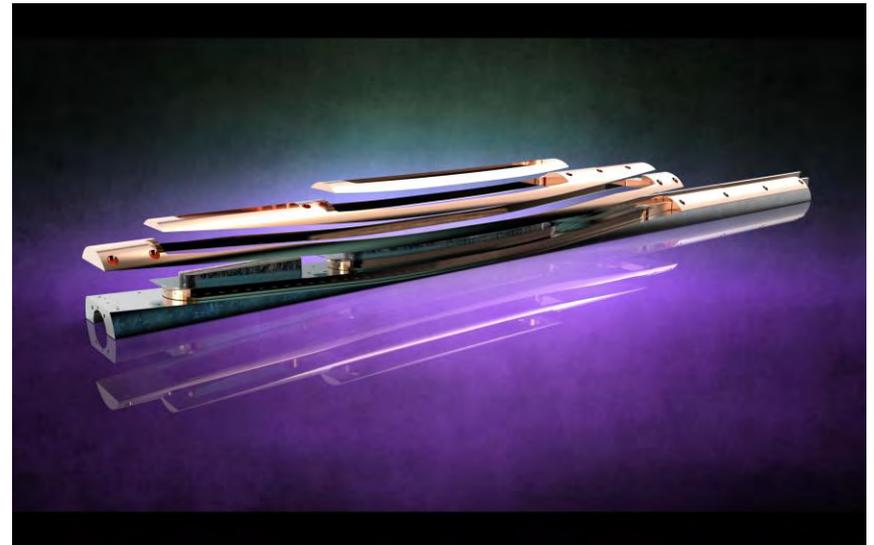
◆ Nb-Ti operating dip; ● Nb₃Sn cos θ test dip ■ Nb₃Sn block test dip

Il CERN sta scommendo sugli altri campi magnetici

Magnete (racetrack, no foro per il fascio) da 16.3 T (record)



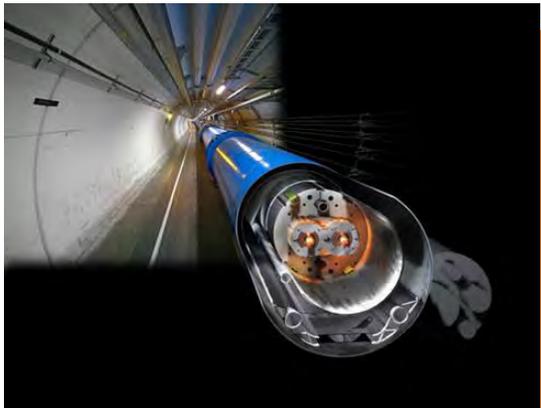
Nuovo tipo di magnet in studio per 20 T



The super-exploitation of the CERN complex: Injectors, LEP/LHC tunnel, infrastructures



today



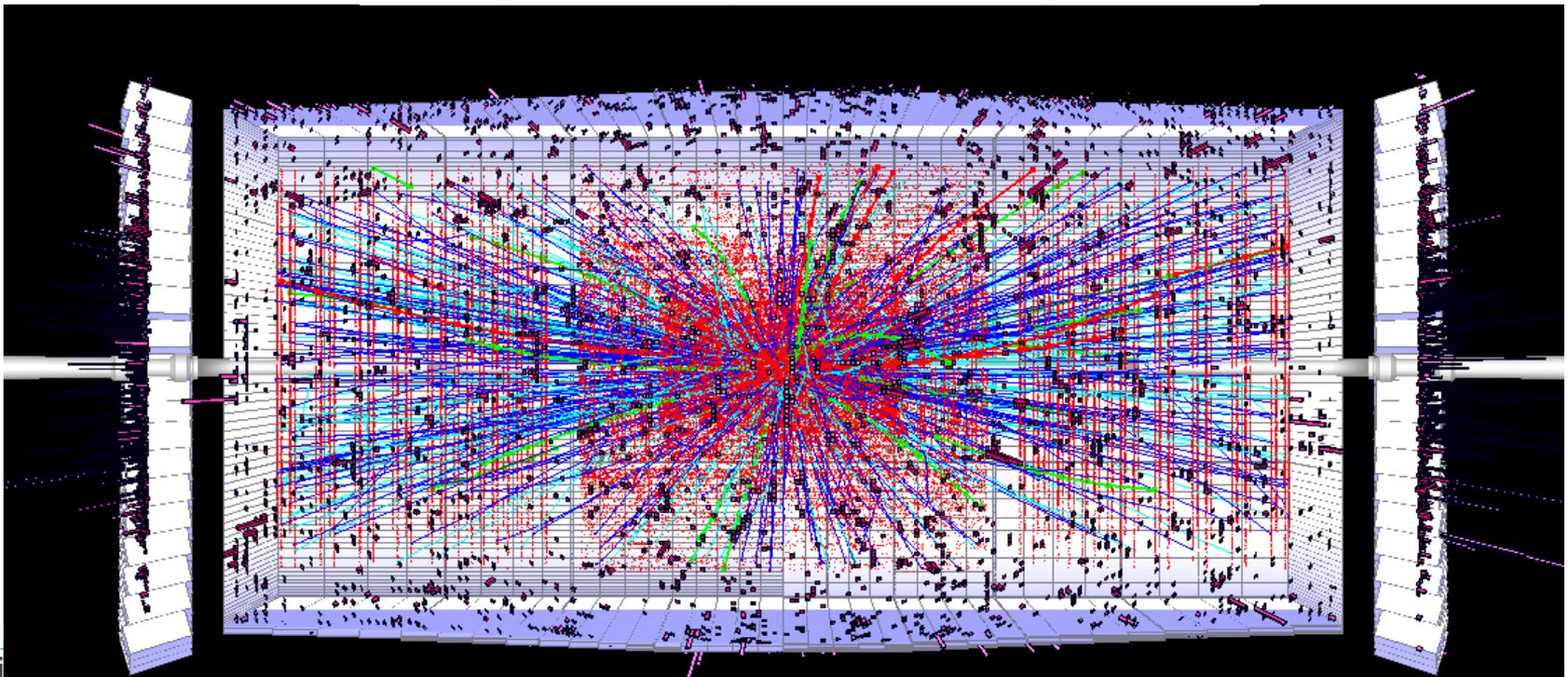
2000 large magnets of 15-20 T
1500 tons of HEP grade Nb3Sn
500 tons of HTS for magnets
100 tons of SC for Sc links



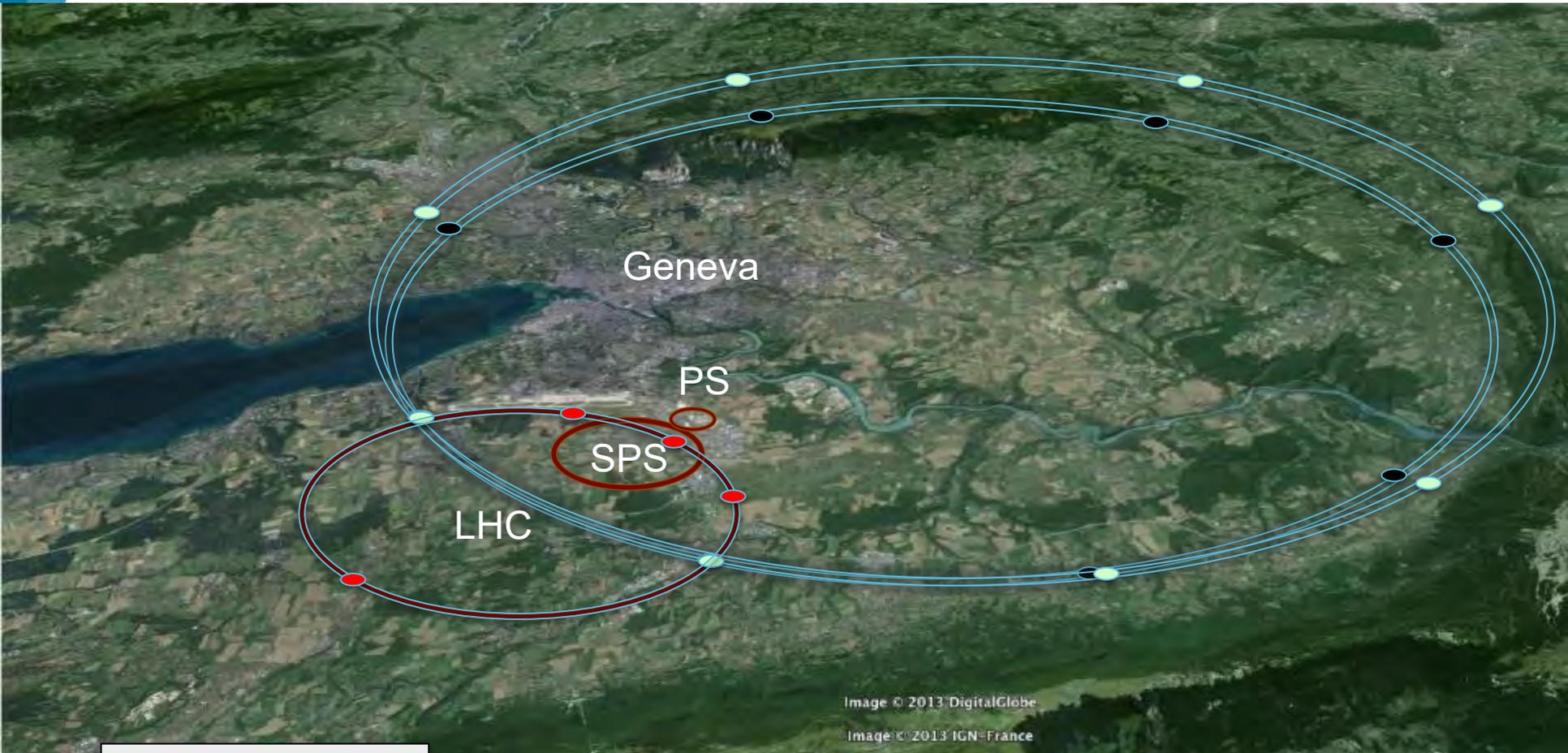
High Luminosity LHC



The HiLumi LHC Design Study (a sub-system of HL-LHC) is cofunded by the European Commission within the Framework Programme 7 Capacities Specific Programme, Grant Agreement 284404



Beyond the LHC: the FCC's



LHC

27 km, 8.33 T
14 TeV (c.o.m.)
1300 tons NbTi
0.2 tons HTS

HE-LHC

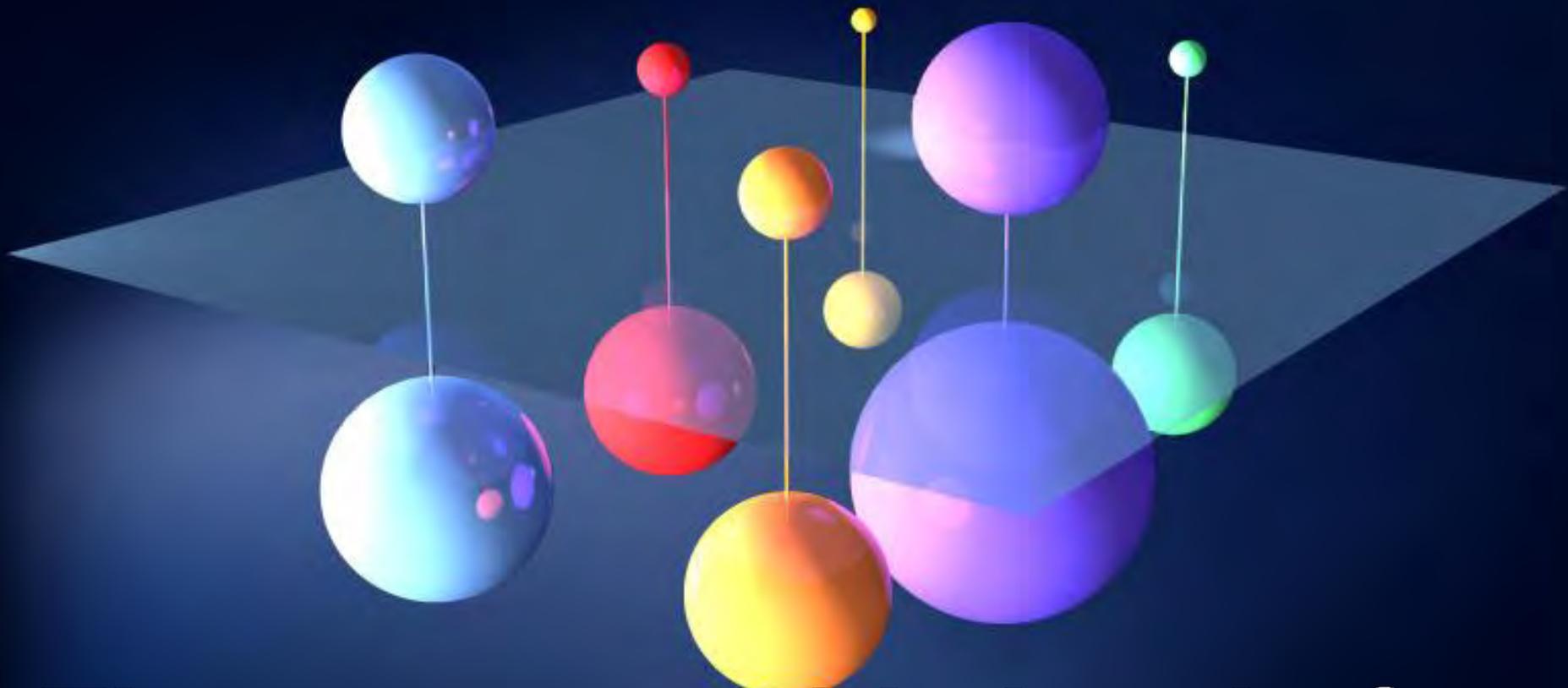
27 km, **20 T**
33 TeV (c.o.m.)
3000 tons LTS
700 tons HTS

FCC-hh

80 km, **20 T**
100 TeV (c.o.m.)
9000 tons LTS
2000 tons HTS

FCC-hh

100 km, **16 T**
100 TeV (c.o.m.)
6000 tons Nb₃Sn
3000 tons Nb-Ti



The super-world ahead of us

Summary of accelerators running in the world

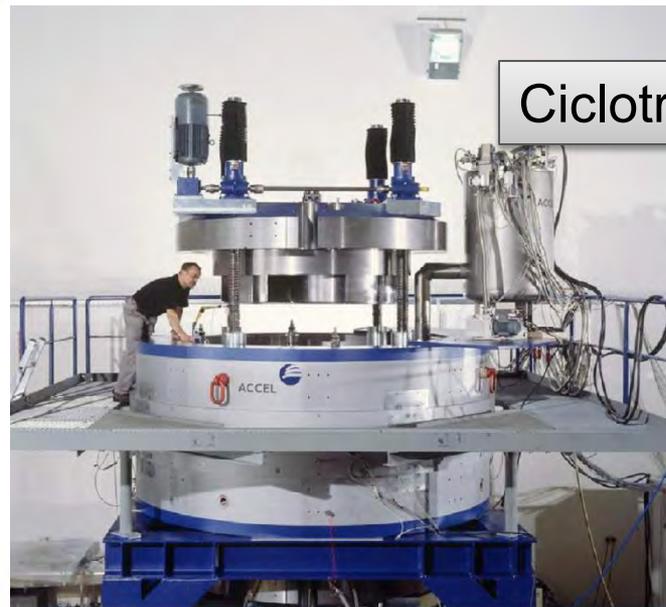
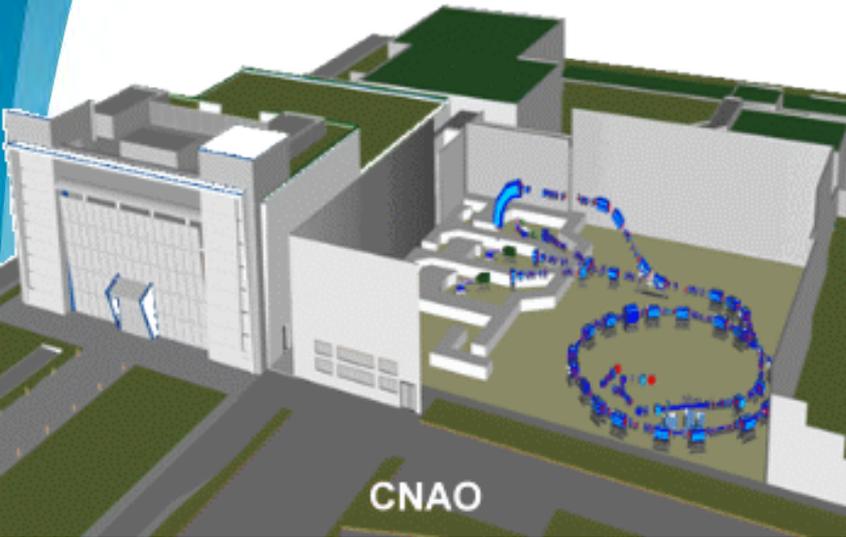
Three main applications

- 1) Scientific research
- 2) **Medical applications**
- 3) Industrial uses

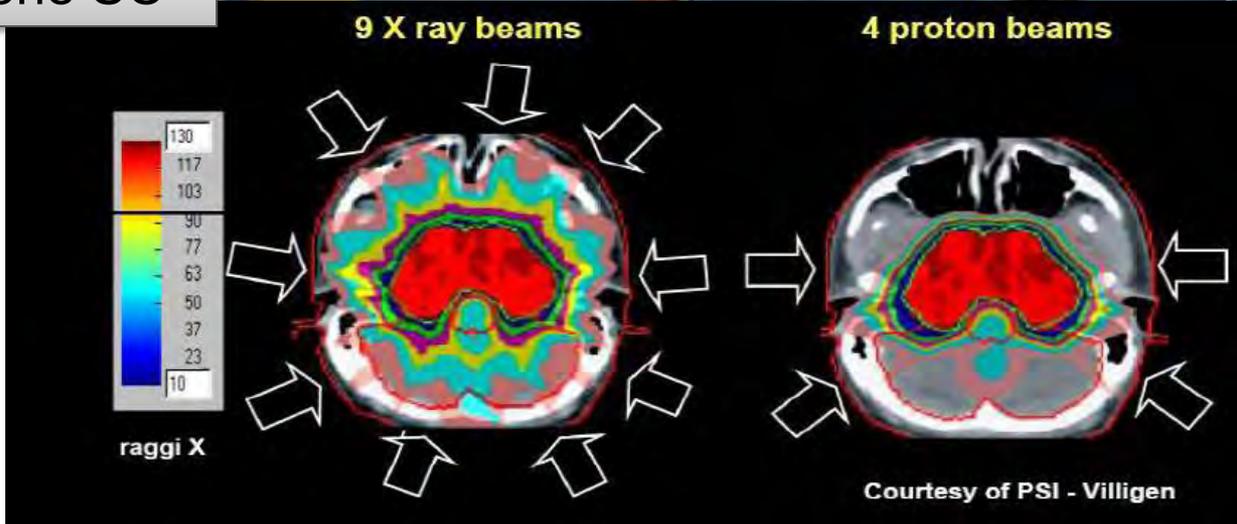
CATEGORY OF ACCELERATORS	NUMBER IN USE (*)
High-energy accelerators ($E > 1$ GeV)	~ 120
Synchrotron radiation sources	> 100
Medical radioisotope production	~ 1,000
Accelerators for radiation therapy	> 7,500
Research accelerators including biomedical research	~ 1,000
Industrial processing and research	~ 1,500
Ion implanters, surface modification	> 7,000
TOTAL	> 18,000

Adapted from “Maciszewski, W. and Scharf, W., *Particle accelerators for radiotherapy, Present status and future*, Physica Medica XX, 137-145 (2004)”

Adroterapia Oncologica CNAO PAVIA & PSI (CH)

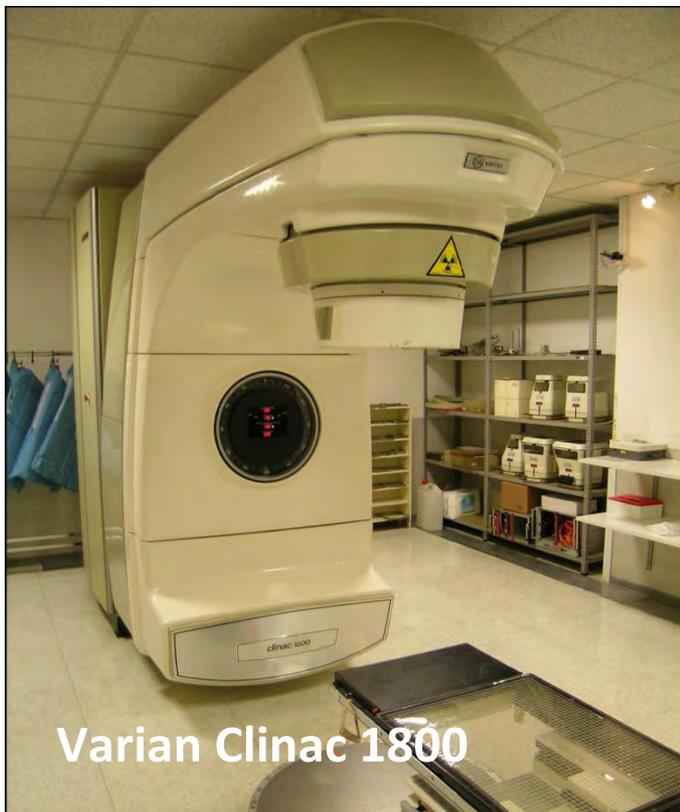


Ciclotrone SC

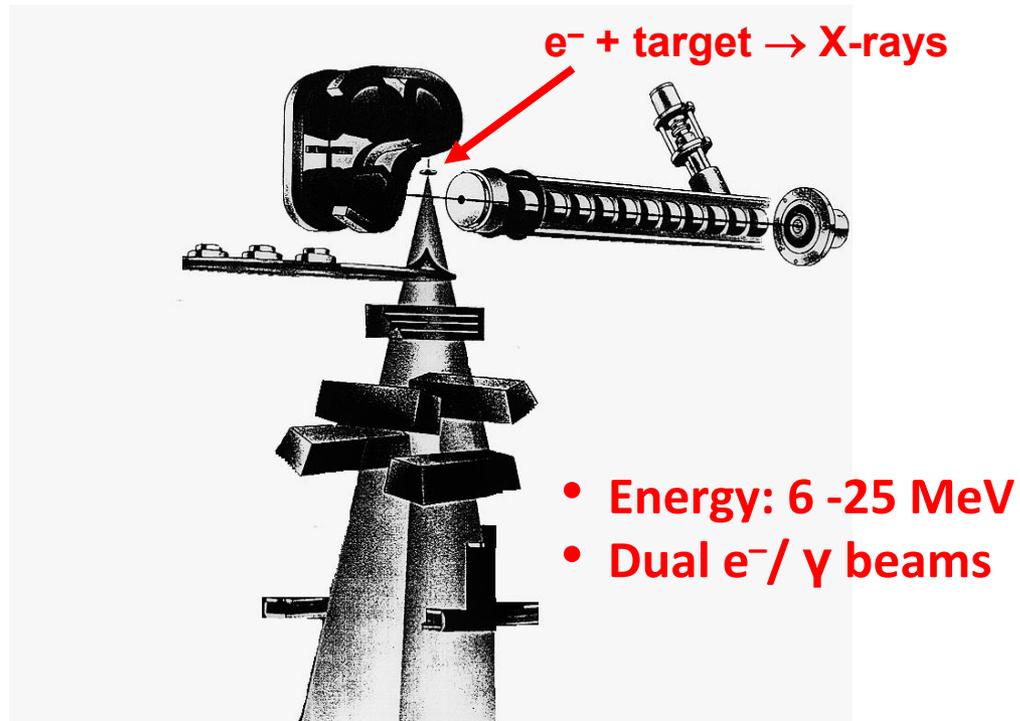




X-rays in radiation therapy: medical electron linacs



Varian Clinac 1800



Multi-leaf collimator



Intra-Operative Radiation Therapy (IORT)

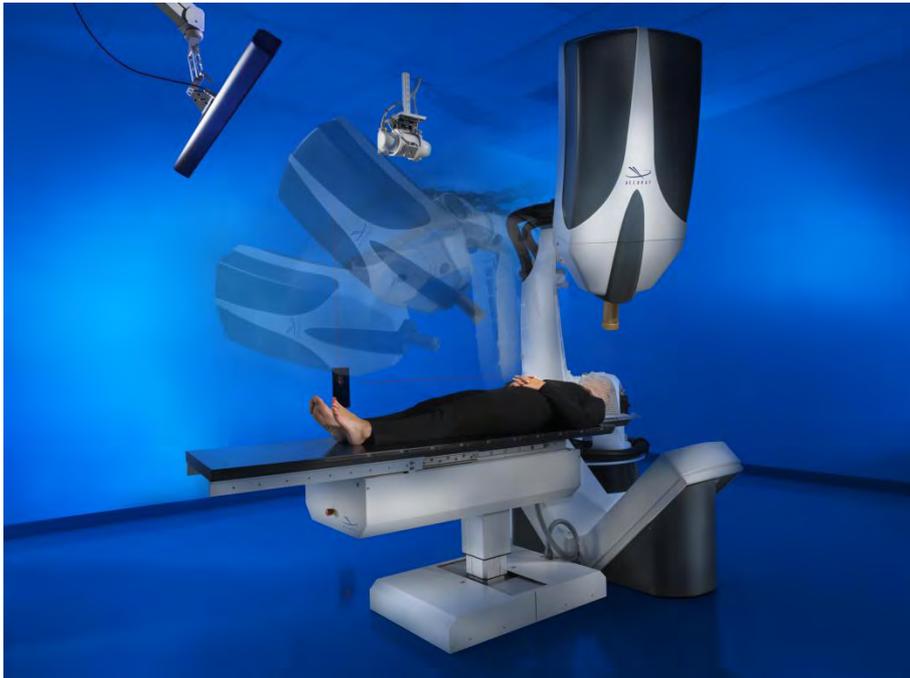


- Small electron linac
- Energy 6 – 12 MeV
- Treatment with electrons only
- Single irradiation
- Three models of linac produced by three manufacturers (two in Italy)



CyberKnife (CK) Robotic Surgery System

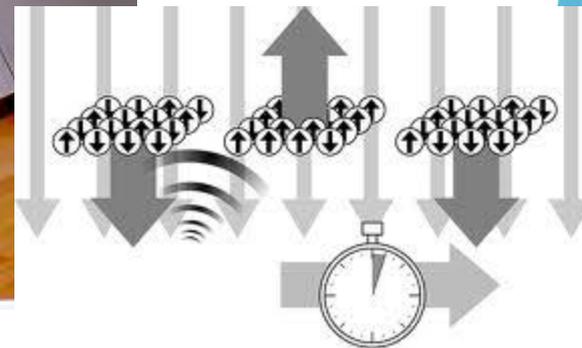
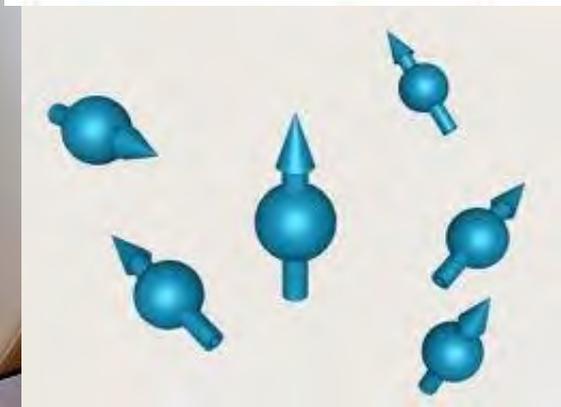
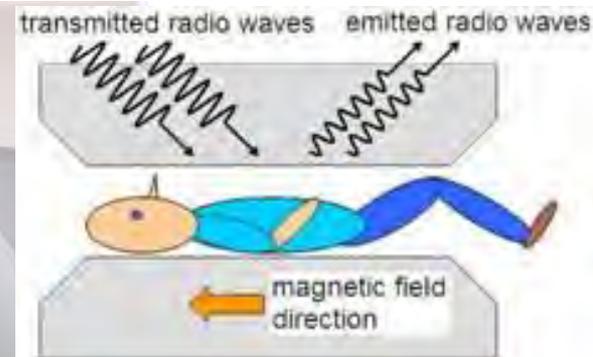
6 MV Linac mounted on a robotic arm



- No flattening filter
- Uses circular cones of diameter 0.5 to 6 cm
- Non-Isocentric
- Average dose delivered per session is 12.5 Gy
- 6 sessions/day
- Dose rate @ 80 cm = 400 cGy/min

<http://www accuray.com/Products/Cyberknife/index.asp>

La “grande” applicazioni sanitaria: Risonanza magnetica



Cyclone: 30 MeV radioisotopi – 200 MeV per proterapia

