



ACCELERATORI DI PARTICELLE

Bardonecchia, Dicembre 2015

E.Menichetti – Dip. di Fisica e INFN, Torino

Fisica delle particelle

Fronte piu' avanzato nello studio della

Struttura della Materia

Studio dei costituenti (ultimi) del mondo materiale
e delle forze (fondamentali) cui sono soggetti

Fine '800 – Inizio '900: Molecole, Atomi

Oggi: Leptoni, Quark, Fotoni, Gluoni, ..

Fisica delle particelle = Fisica delle alte energie

Perche' ?

Un passo indietro:

Studio della struttura 'granulare' della materia

≡

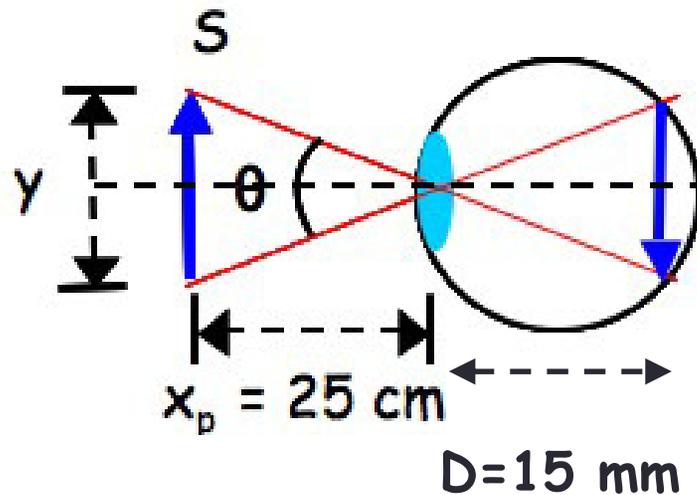
Studio delle proprietà di sistemi fisici *piccoli*

Misure *indirette* delle dimensioni molecolari:

$$d \sim 10^{-10} \div 10^{-9} \text{ m}$$

Come *osservare* sistemi così piccoli?

Limite di osservabilità dell'occhio umano:



Minima distanza apprezzabile sulla retina :

$$s \sim 6 \mu\text{m}$$

simile a dimensione di bastoncelli / coni

$$\theta = s/D = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ rad (un po' meno di } 1')$$

$$y = x_p \theta = 0.25 \text{ m} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0.1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m}$$

Microscopio:

Aumenta la risoluzione dell'occhio umano

Ingrandimento → Riduzione del dettaglio minimo

Ingrandimento massimo del microscopio ottico standard:

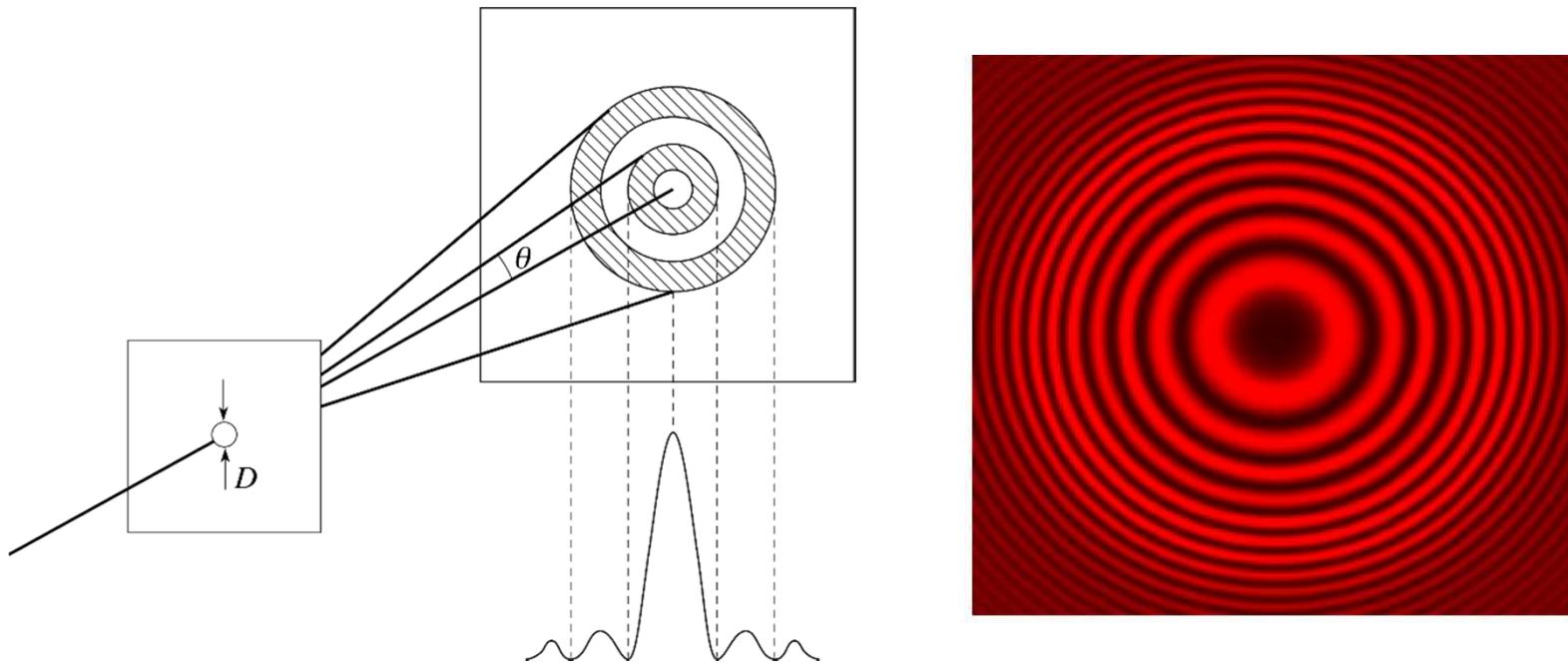
1000X ÷ 2000X

Limite: Dovuto a *diffrazione*

Effetto legato alla natura ondulatoria della luce

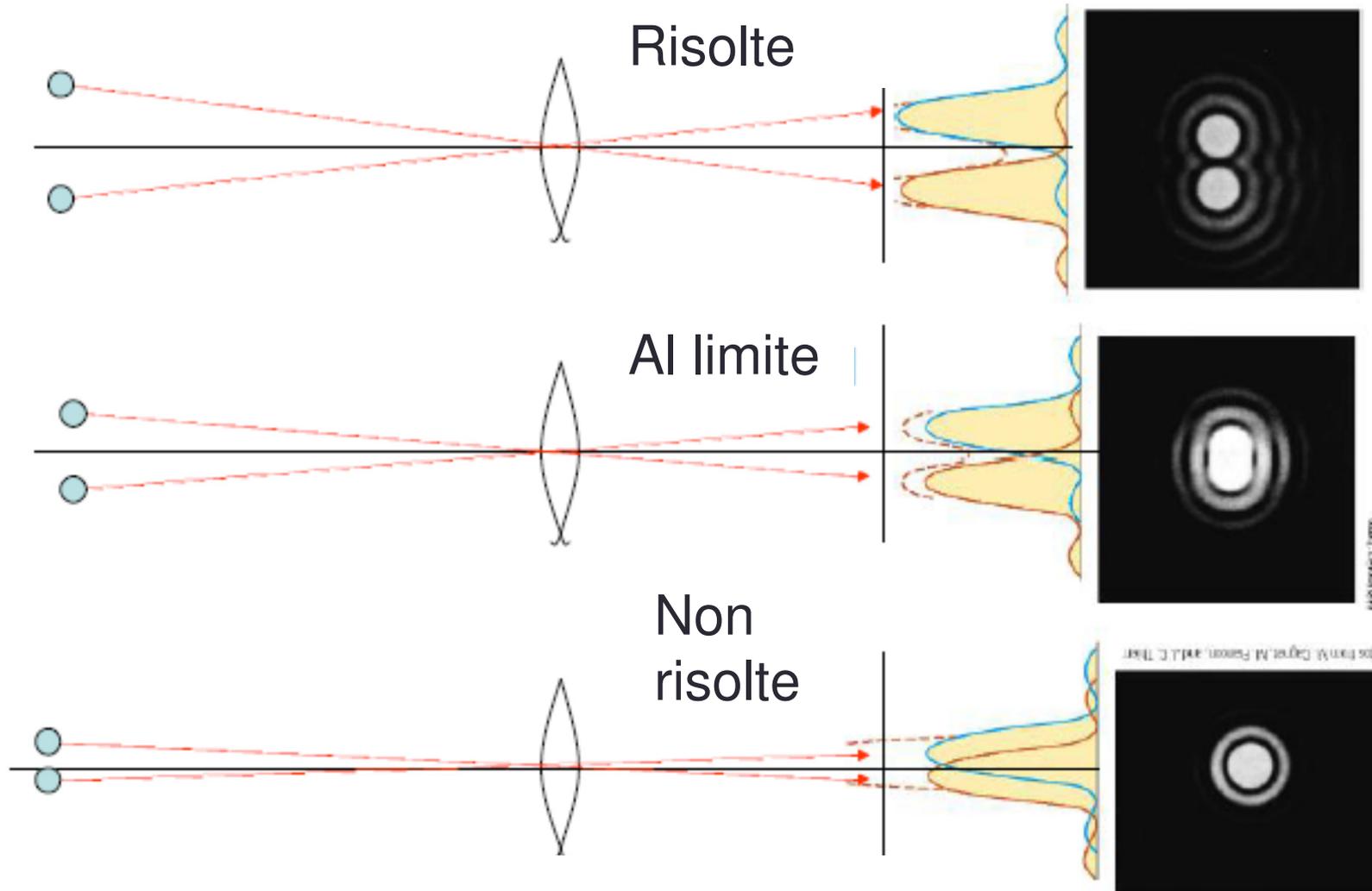
Praticamente impossibile distinguere dettagli
le cui dimensioni siano \leq lunghezza d'onda
della luce usata

Quando $D \sim \lambda$, propagazione non piu' in linea retta
Sovrapposizione di massimi e minimi delle onde luminose
Dettagli geometrici via via piu' confusi



Profilo intensita' luminosa

Due sorgenti



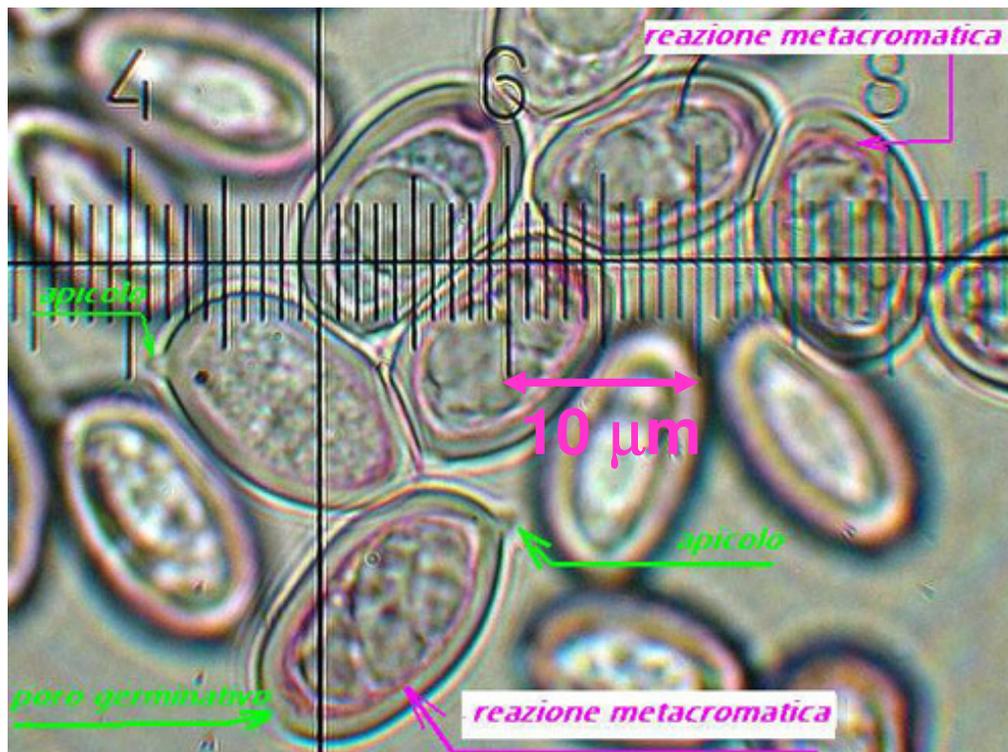
Possibilita': λ piu' piccola?

Finestra del visibile: $\lambda \sim 0.4 \div 0.7 \mu\text{m}$

Non si possono realizzare elementi ottici adatti a $\lambda < 0.2-0.3 \mu\text{m}$

Quindi:

Dettaglio minimo osservabile al microscopio ottico $\sim 0.2-0.3 \mu\text{m}$



Spore
M=1000X

La luce ha proprieta' *ondulatorie*, ma anche *corpuscolari*..
La materia ha proprieta' *corpuscolari*, ma anche *ondulatorie*..

Un bel pasticcio, apparentemente, col quale pero' si puo' imparare a convivere pacificamente

Conseguenza, fra le altre:

Particelle 'microscopiche' in movimento hanno una lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{\hbar}{p} = \frac{\hbar}{mv} \quad \text{De Broglie}$$

'Microscopiche' significa a dimensione atomica o subatomica

Quindi su scala atomica le particelle hanno proprietà ondulatorie come la luce

→ Possiamo 'illuminare' il campione con gli elettroni, e 'guardare' gli elettroni diffusi

Diffrazione: Anche qui limiterà la risoluzione

Ma: Particelle veloci hanno λ piccola..

Se potessimo usare un fascio di elettroni veloci al posto del fascio di luce nel microscopio, magari potremmo ingrandire di più prima di essere limitati dalla diffrazione

→ Dovremmo poter osservare dettagli molto più piccoli rispetto al caso della luce visibile

Ma quanto?

Consideriamo un elettrone che venga accelerato nel campo elettrico di un condensatore:
 Ai capi del condensatore c'è una diff. di potenziale costante V (p es mantenuta con una batteria da 1 Volt)

L'elettrone è rilasciato da fermo sull'armatura negativa, e si muove verso quella positiva.

Con che velocità arriva su quella positiva?

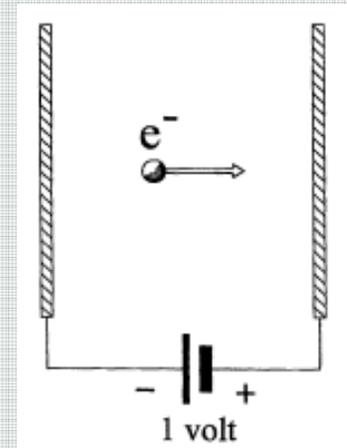
L'energia meccanica si conserva

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

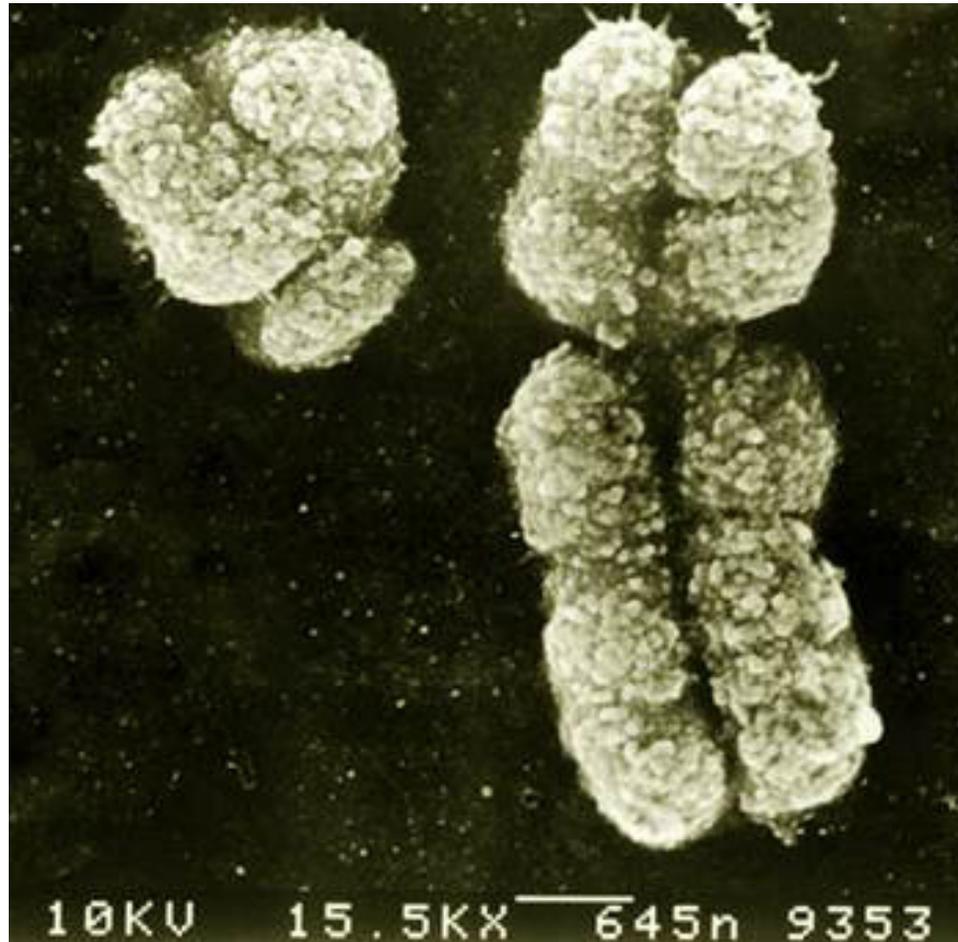
$$\left. \begin{array}{l} e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \\ V = 1 \text{ V} \end{array} \right\} \rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1}{9.1 \cdot 10^{-31}}} \approx 0.593 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

Qual è la sua λ ?

$$\hbar = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kgs}^{-1} \rightarrow \lambda = \frac{\hbar}{mv} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34}}{9.1 \cdot 10^{-31} \cdot 0.593 \cdot 10^6} \approx 1.23 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0.0012 \mu\text{m} !$$



Cromosomi umani, Y e X



Adenovirus
Parvovirus
90000X

Dimensioni:

80 nm
(~1500 atomi di
Idrogeno)

25 nm
(~350 atomi di
Idrogeno)



Ma come avviene l' «osservazione»??

Visione 'ottica':

Sorgente di luce

Gas caldo, Scarica elettrica in un gas, Filamento riscaldato, LED, ...

Ottica

Lenti, Prismi, Specchi, ...per convogliare la luce dalla sorgente al campione

Interazione Luce-Materia nel campione

Assorbimento, Emissione, Diffusione, ...

Ottica

Lenti, Prismi, Specchi, ...per raccogliere la luce diffusa dal campione sul rivelatore

Rivelatore di luce

Retina, Pellicola fotografica, CCD, ...

Processore di immagini

Cervello, Computer, ...

Visione 'elettronica':

Sorgente di elettroni

Filamento riscaldato, ...

Ottica elettronica

Lenti elettrostatiche, magnetiche, collimatori,...per convogliare gli elettroni

Interazione Elettrone-Materia nel campione

Ionizzazione, diffusione, irraggiamento, ...

Ottica elettronica

Lenti elettrostatiche, magnetiche, collimatori,...per raccogliere gli elettroni

Rivelatore di elettroni

Pellicola fotografica, rivelatore al silicio, moltiplicatore di elettroni, CCD, ...

Processore di immagini

Computer, ...

Microscopio elettronico:

Uso di elettroni veloci per ottenere ingrandimenti elevati entro il limite dato dalla diffrazione

Tensione tipica di accelerazione 20000 volt = 20 KV

Esempio di acceleratore di elettroni

Azione del campo elettrico sugli elettroni:

Forza

Incremento di velocità

Incremento di energia cinetica: $E_{el} = 20 \text{ KeV}$

$F = qE$ forza elettrica sulla carica; $F = ma$ legge della dinamica

$a = \frac{qE}{m}$ costante se E costante e velocita' 'bassa' \rightarrow moto uniformemente accelerato

$\rightarrow v = at \rightarrow s = \frac{1}{2}at^2$ alla fine dell'accelerazione

$\rightarrow t = \sqrt{\frac{2s}{a}} \rightarrow v = a\sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{2as} = \sqrt{\frac{2qEs}{m}}$

$Es =$ differenza di potenziale $\equiv V \rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$

$\rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\frac{2qV}{m} = qV$ en. cinetica dell'elettrone alla fine dell'accelerazione

Se $\begin{cases} q \text{ si misura in unita' di carica dell'elettrone } e \text{ } 1.610^{-19} \text{ C} \\ V \text{ si misura in Volt} \end{cases}$

\rightarrow En. elettrone si misura in *elettronvolt*

Multipli: $1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}, 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}, 1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}, \dots$

Come viene 'osservato' l'elettrone che esce dalla collisione con il campione ? Osservazione visuale impossibile

Vari metodi:

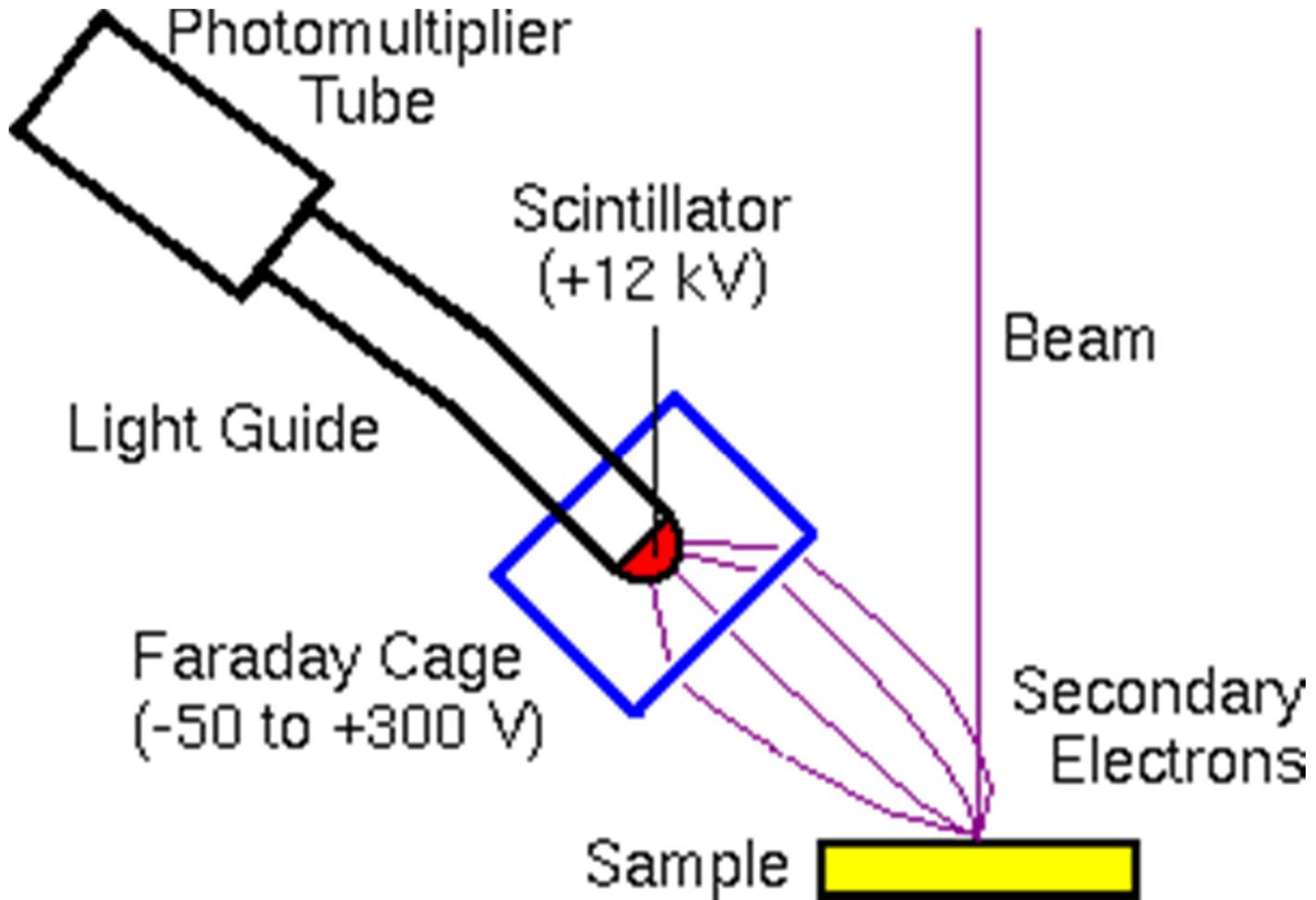
Elettrone uscente assorbito in lastra fotografica

Elettrone uscente assorbito in schermo fluorescente, con formazione di immagine come in una TV di vecchio tipo

Elettrone uscente assorbito in schermo fluorescente + Fibre ottiche + CCD, con formazione di immagine come in una fotocamera moderna

Rivelazione diretta dell'elettrone, tramite sensore a pixel di silicio ed elettronica associata

Microscopio elettronico a scansione (SEM)



Fascio elettronico 'sterzato' su un elemento di superficie alla volta: Scansione di tutta la superficie

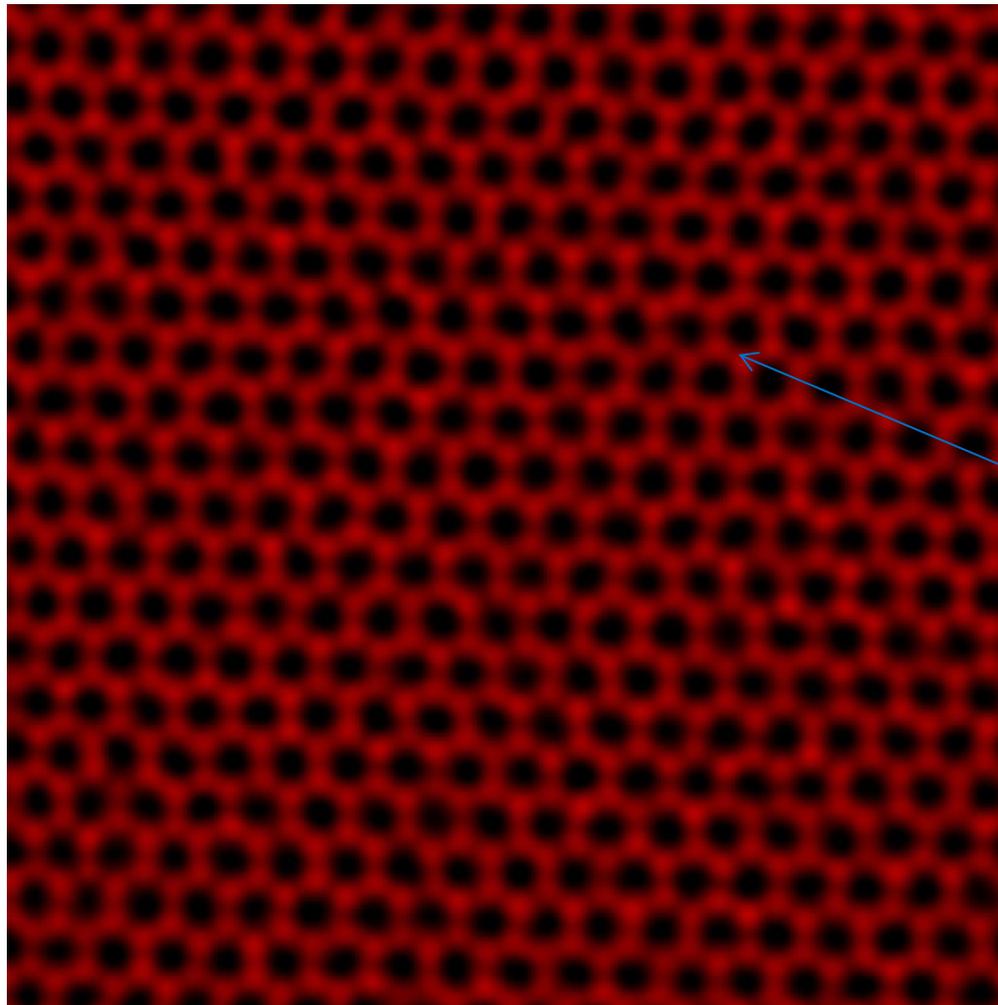
Elettroni diffusi raccolti da elettrodi appropriati (ottica elettronica)

Assorbiti da scintillatore (energia elettroni \rightarrow luce)

Luce raccolta da fotomoltiplicatore (luce \rightarrow segnale elettrico)

Segnale elettrico \propto Intensita' el. diffusi \propto Densita' atomica

Grafene: Strato monoatomico di atomi di carbonio



Atomo di C

Grafene visto al SEM

Uso di fasci di elettroni di 'alta' energia:
Consente la 'visione' elettronica di dettagli di dimensione atomica

Cosa possiamo osservare aumentando ancora l'energia del fascio esploratore?

Costituenti atomici: Elettroni e Nucleo

Scoperta del nucleo: Rutherford 1911

Come conseguenza: Formulazione del modello di Bohr 1913

Radioattività alfa:

Nuclei di Elio di 'alta' energia $\sim 5 \text{ MeV}$ prodotti da disintegrazioni nucleari spontanee

Scoperta prima dell'esperimento del 1911

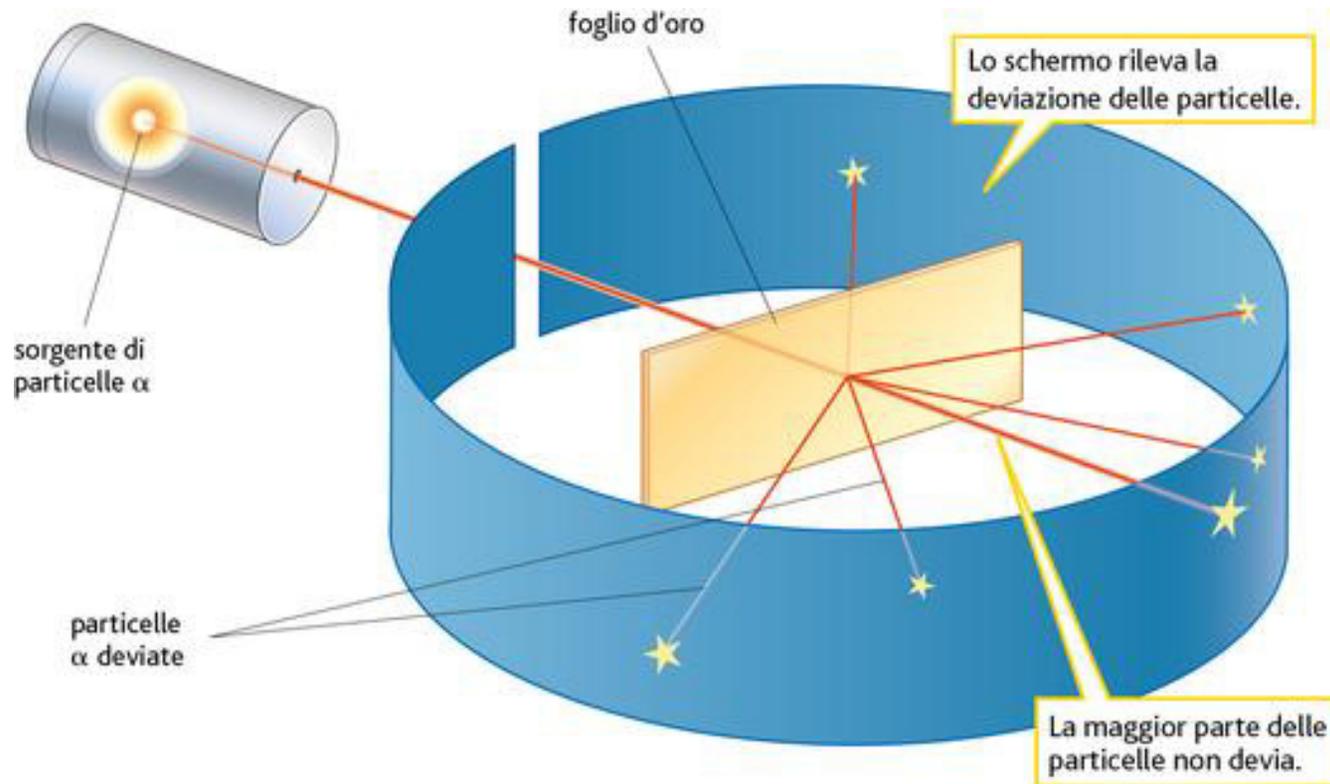
Come nel microscopio elettronico:

Proiettili carichi molto energetici, usati per sondare la struttura interna dell'atomo

Perche' le alfa?

Non erano disponibili elettroni di energia altrettanto elevata

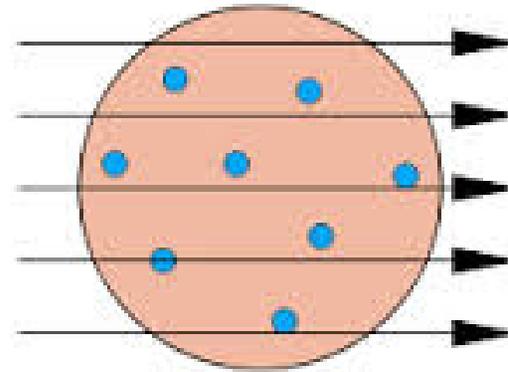
La scoperta del nucleo: Rutherford, Geiger, Marsden 1911



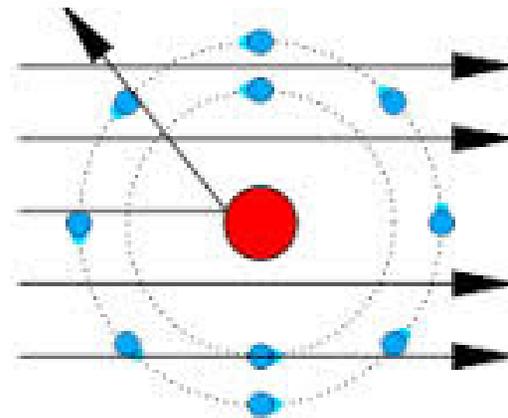
Uso innovativo della radioattività alfa,
scoperta da Rutherford pochi anni prima

Trovata consistenza con ipotesi di nucleo 'puntiforme'
(modello 'planetario'), inconsistenza con ipotesi di carica
positiva 'diffusa' (modello a 'pudding')

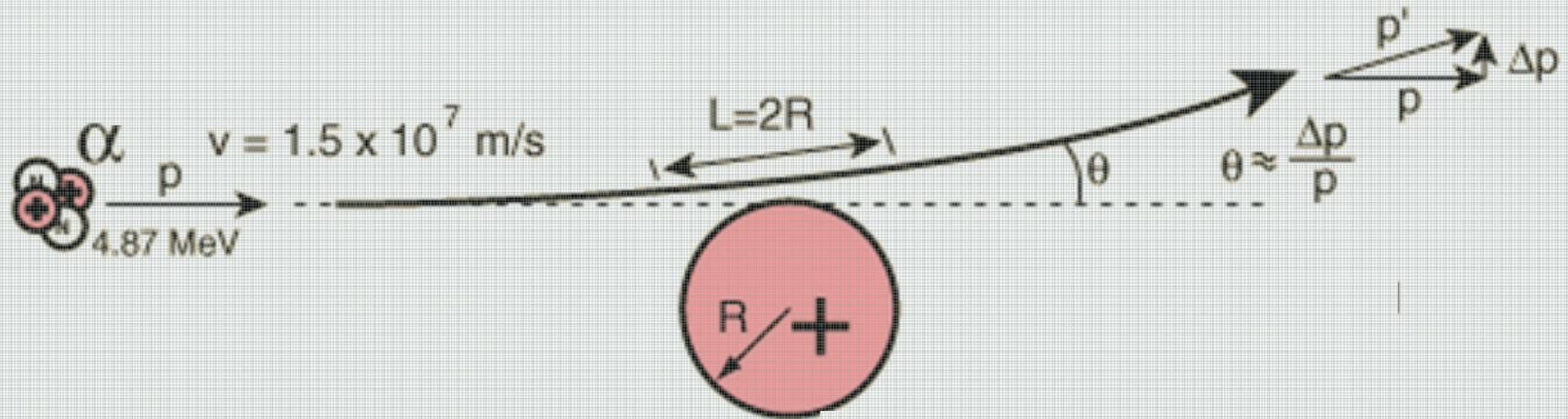
Modello a pudding:
Panettone sferico di carica +va
Elettroni puntiformi sparsi



Modello planetario:
Nucleo ~ puntiforme di carica +va
Elettroni puntiformi in orbita



Quale sarebbe l'angolo max nel modello a pudding?



Usiamo la legge dinamica:

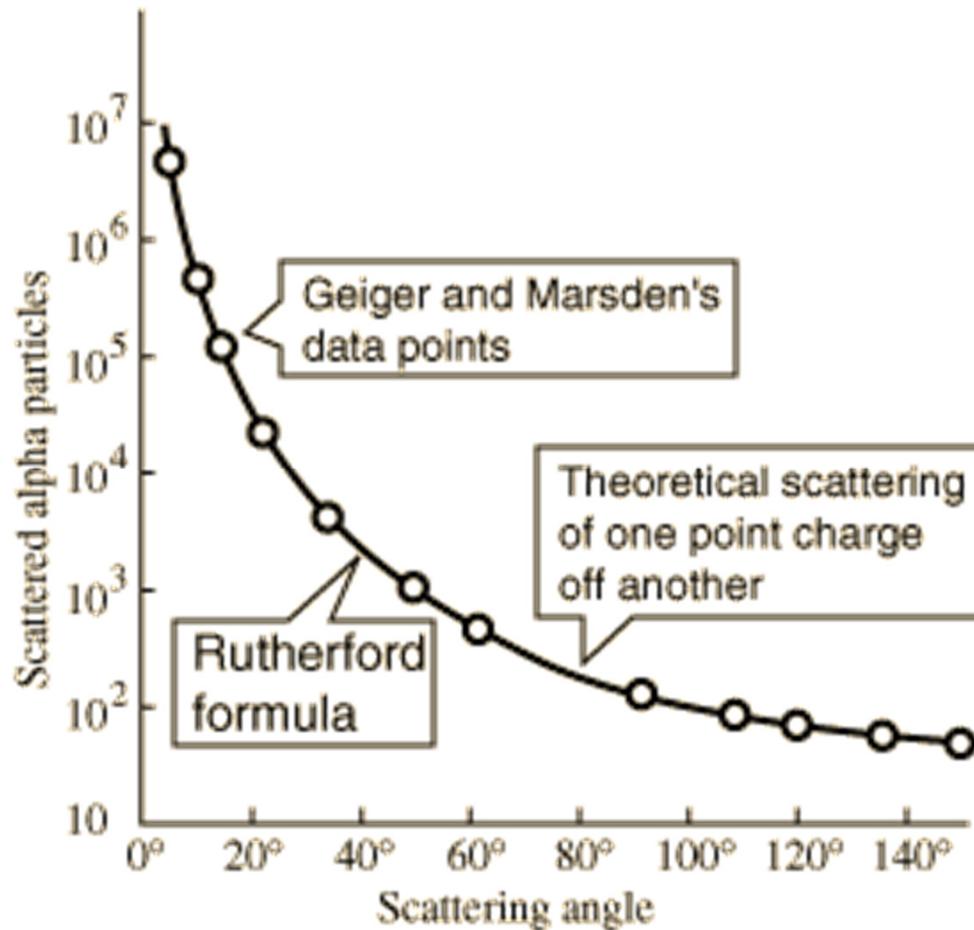
Impulso della forza = Variazione della quantita' di moto

$$\Delta t \sim \frac{2R}{v}$$

$$\Delta p = F \Delta t, F \leq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2eQ}{R^2} \rightarrow \Delta p \leq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2eQ}{R^2} \frac{2R}{v}$$

$$\rightarrow \theta \simeq \frac{\Delta p}{p} \leq \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2eQ}{R^2} \frac{2R}{v} \frac{1}{Mv} \rightarrow \theta_{\max} \simeq 0.02^\circ$$

Nessun angolo max. nel modello planetario
Confronto fra dati sperimentali e previsione:



L'energia delle particelle α e' molto elevata:

Infatti devono penetrare nella 'nuvola elettronica' (carica -va) per avvicinarsi e 'sentire' la carica +va del nucleo:
A distanze \sim raggio atomico la carica totale 'sentita' e' zero

All'epoca l'unica possibilita' era l'uso di un 'acceleratore naturale' come la radioattivita' alfa

Interesse per energie superiori per sondare le dimensioni e la struttura interna del nucleo

Metodo: Sfruttare le proprieta' dei campi elettromagnetici

Che cos'è un campo elettromagnetico?

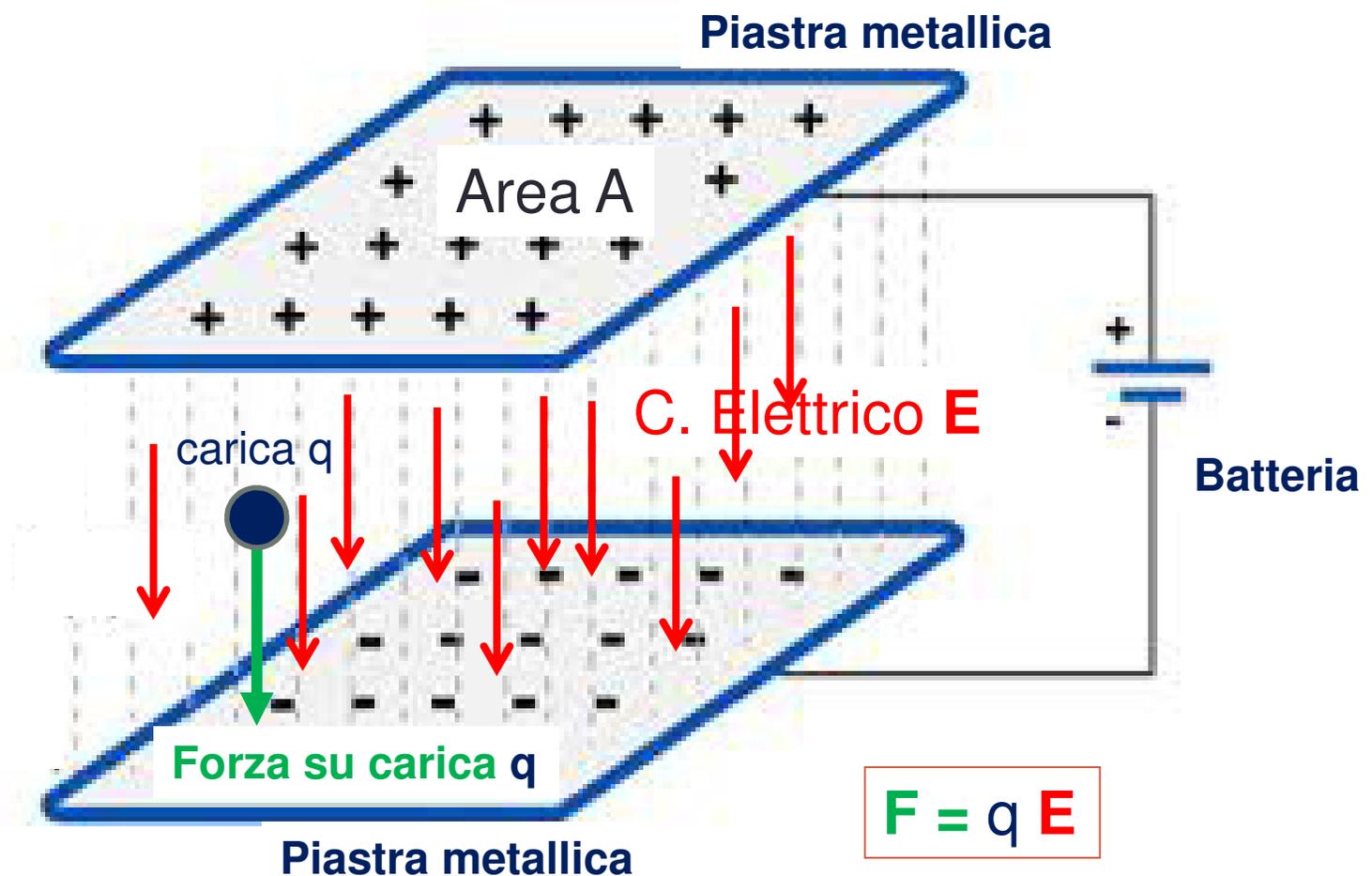
Idea apparentemente un po' astratta, in realtà piuttosto semplice

In una data regione di spazio è presente un campo e.m. se *una carica di prova* (*p* es una pallina carica, un elettrone, un nucleo, ...), quando è in quella regione, è soggetta a una forza, osservabile e con caratteristiche specificate.

Possono essere presenti il solo campo elettrico, il solo campo magnetico, o entrambi

I campi elettrici e magnetici sono quantità *vettoriali*: ce li possiamo figurare come descritti pittorescamente da una freccia in ogni punto dello spazio

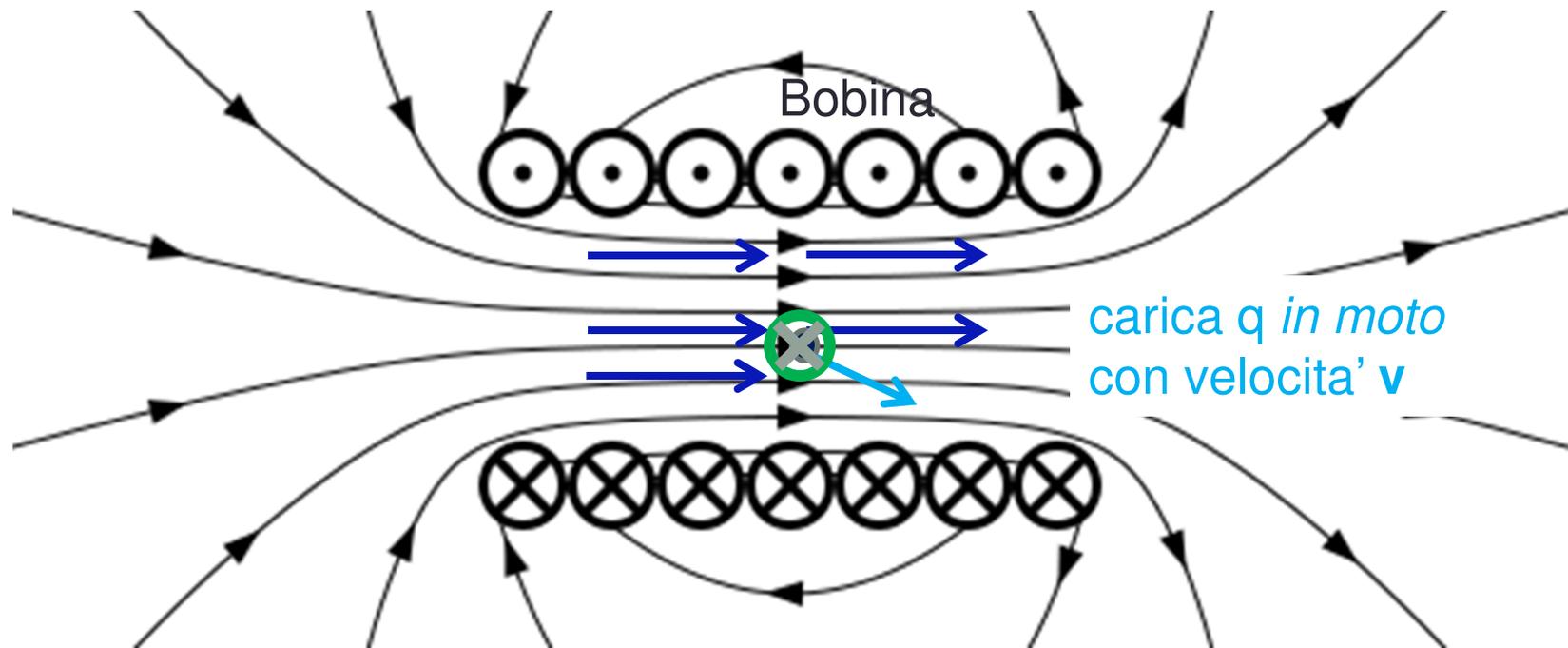
Es. di campo elettrico: Condensatore



Forza elettrica \parallel a E

Es. di campo magnetico: Bobina

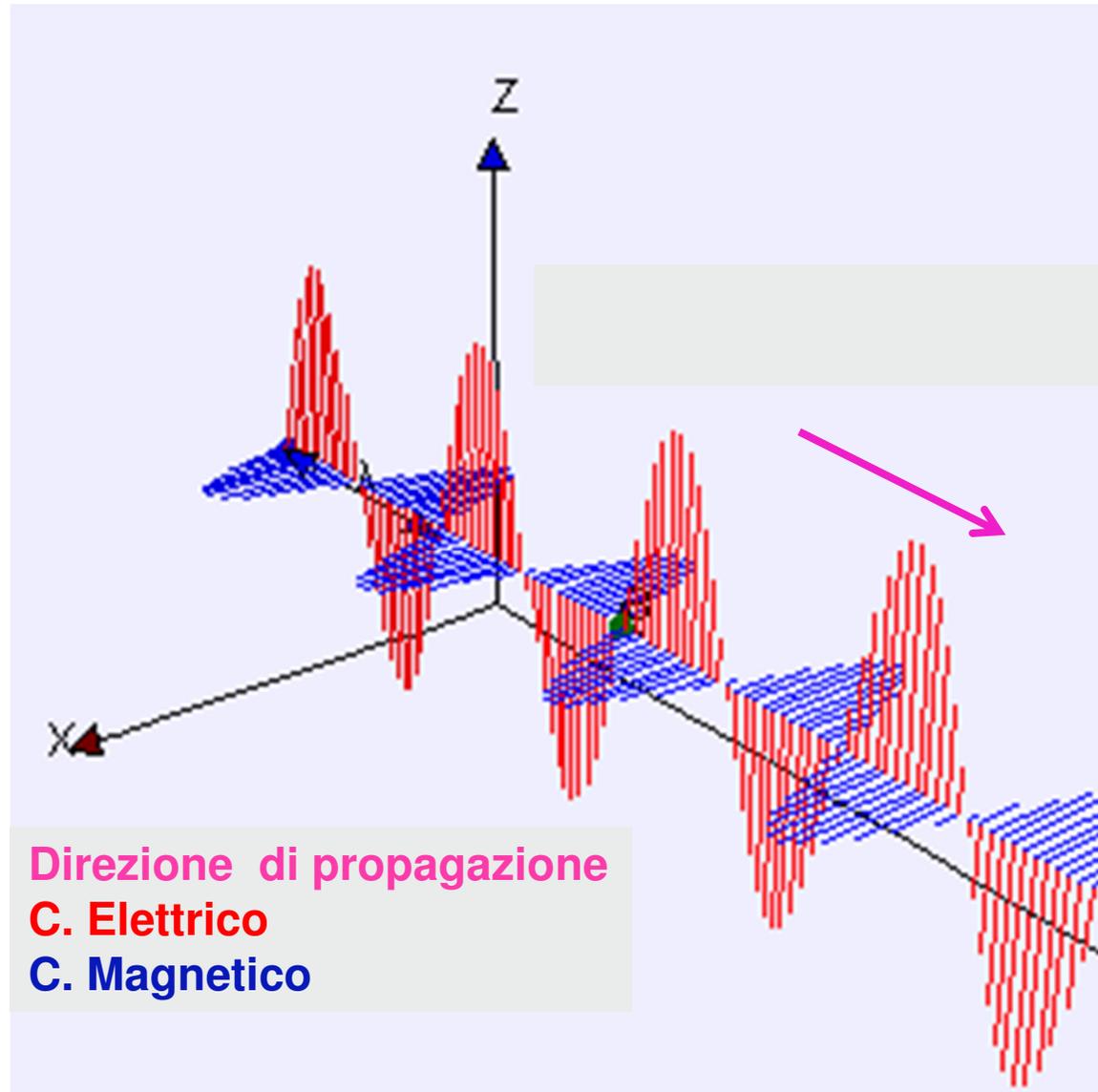
C. Magnetico **B**



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

Forza magnetica \perp alla velocita' (e a \mathbf{B})

Es. di campo elettrico & magnetico: Onda elettromagnetica



Idea piu' semplice e immediata:

Usiamo un campo elettrostatico per accelerare particelle cariche

Una specie di 'superbatteria' mantiene una tensione molto elevata fra due elettrodi

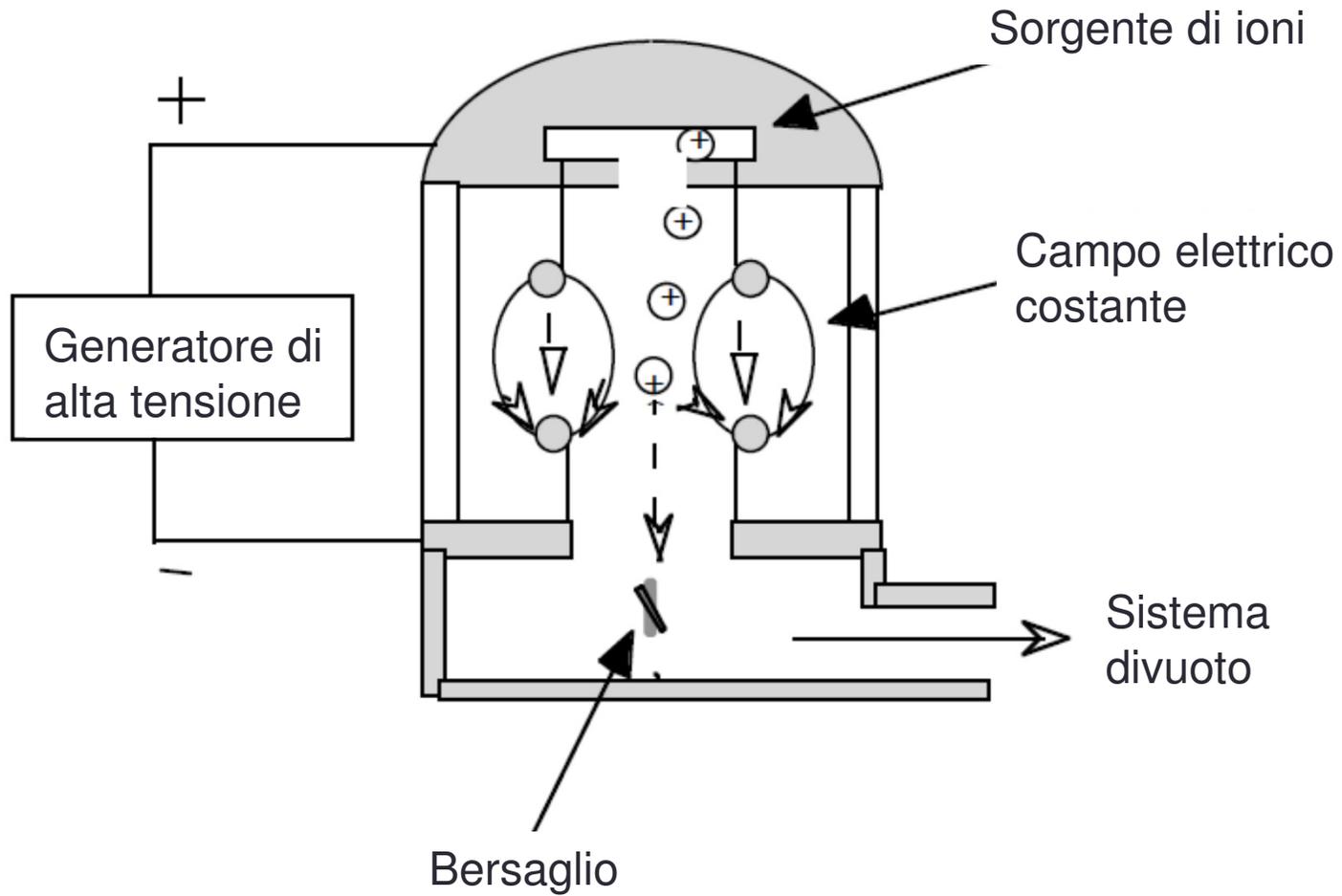
Fra di essi piazziamo un tubo isolante, nel quale si possa fare il vuoto. Nel tubo si muoveranno le particelle sotto l'azione del campo elettrostatico

[NB Perche' il vuoto? Le particelle cariche interagiscono volentieri con la materia, e in essa i nostri tentativi di accelerarle sarebbero frustrati: noi le acceleriamo, e la materia le rallenta.

V. dopo..]

Primo tipo di acceleratore mai realizzato

Schema generale di un acceleratore elettrostatico



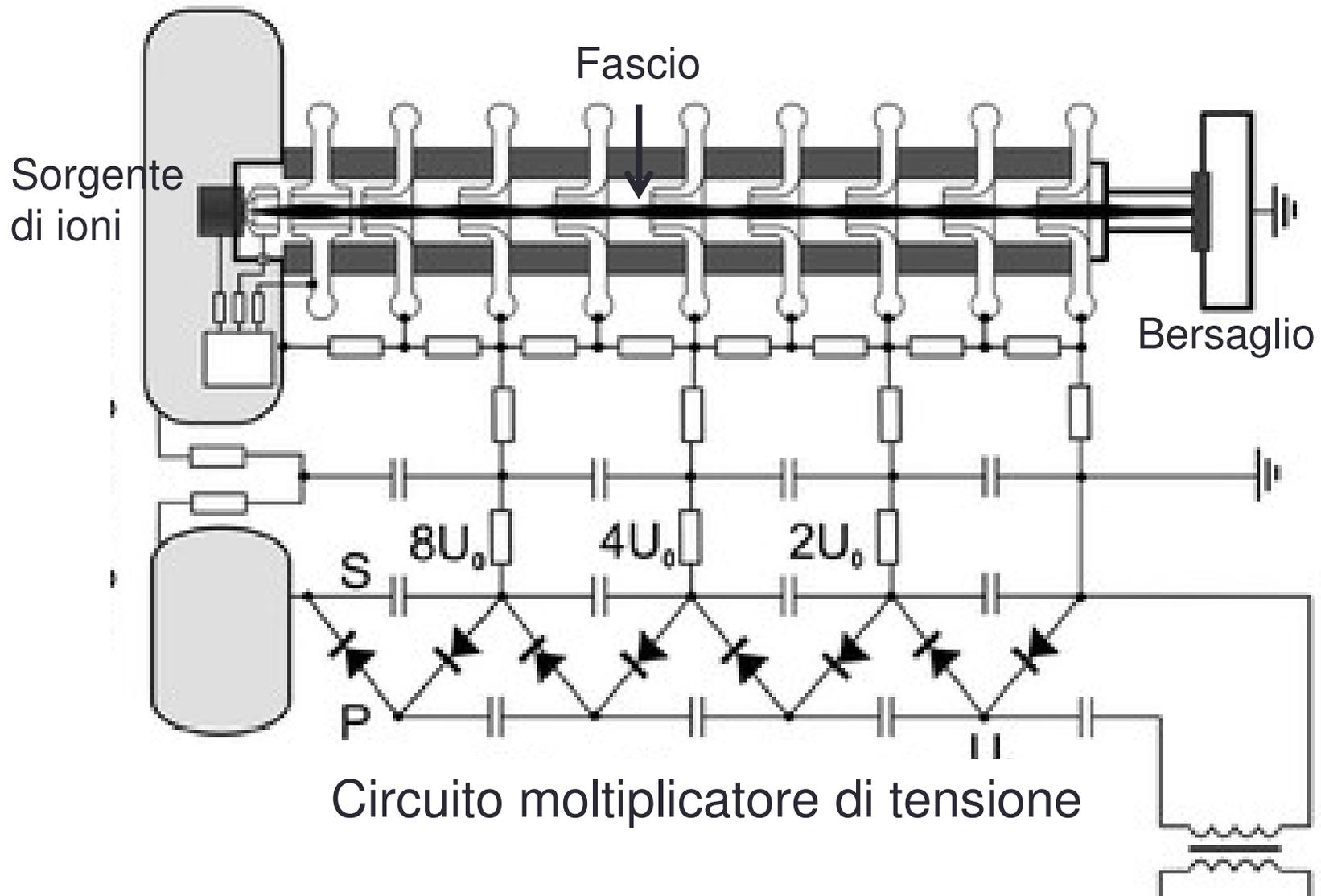
Acceleratore elettrostatico di Cockroft – Walton (1932)

Circuito moltiplicatore di tensione

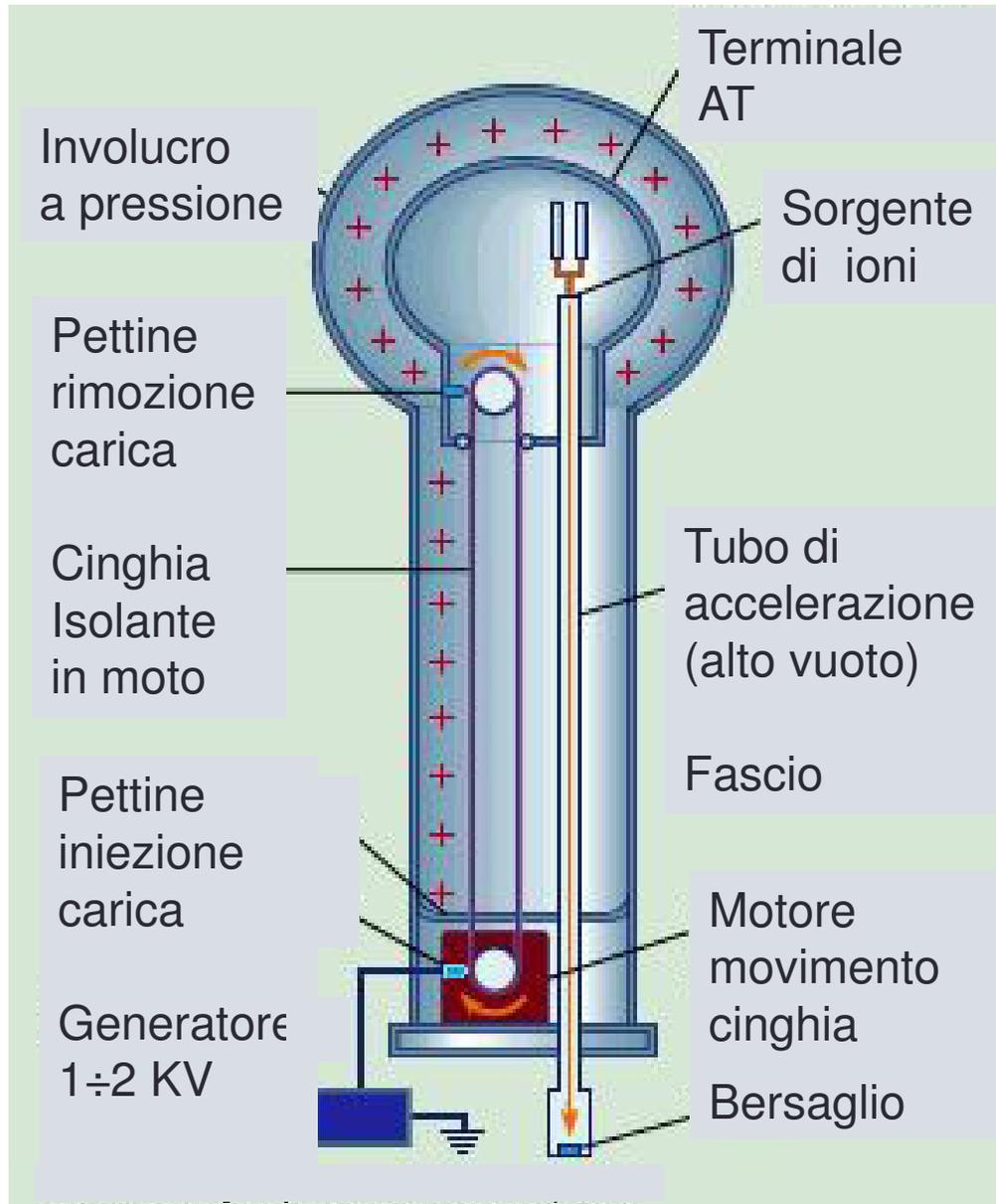
Terminale alta tensione ~ 1 MV



CERN



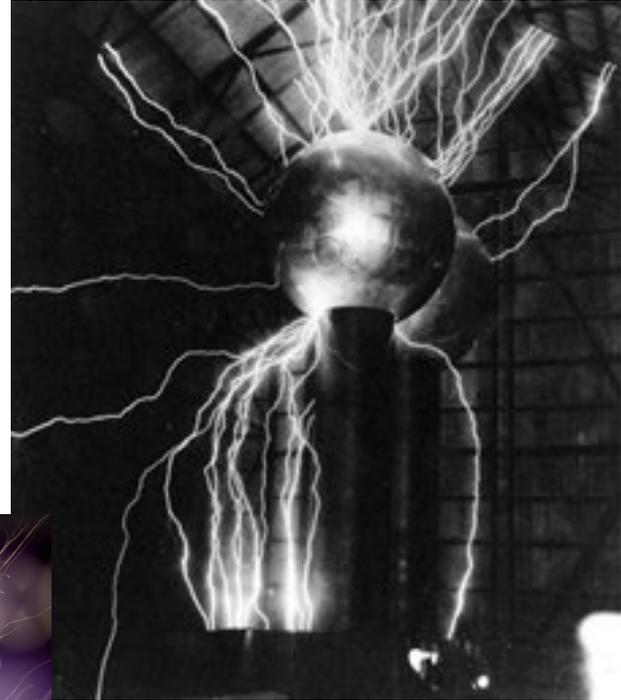
Acceleratore elettrostatico di Van der Graaf



Cinghia isolante in moto caricata/scaricata elettrostaticamente (Strofinio con pettini metallici)

→ Trasporto di carica da generatore a terminale alta tensione

→ Aumento del potenziale elettrostatico del terminale AT fino a ~ 20 MV max.



Cockroft-Walton e Van der Graaf usati tuttora:

Iniettori di acceleratori piu' grandi

Litografia circuiti integrati

Radioterapia

Fisica nucleare

...

Limite degli acceleratori elettrostatici:

Scarica ad alta tensione

Cure parziali inserendo l'acceleratore in contenitore a tenuta con gas inerte ad alta pressione (isolamento)

Tensioni max tipiche ~ 25 MV

Energie piu' alte: nuove tecniche

Calcolo semplificato del limite di tensione:

$E_{\text{lim}} \sim 10 \text{KV} / \text{cm}$ in aria; 3 ÷ 4 volte maggiore in gas inerte

Situazione tipica: terminale A.T. sferico di raggio R

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{CV}{4\pi\epsilon_0 R^2} \quad \text{campo elettrico alla superficie}$$

$Q = CV$, $C = 4\pi\epsilon_0 R$ capacita' di una sfera

$$\rightarrow E = \frac{4\pi\epsilon_0 RV}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{V}{R} \rightarrow \frac{V}{R} \leq 10^4 \text{V} / \text{cm} = 10^6 \text{V} / \text{m}$$

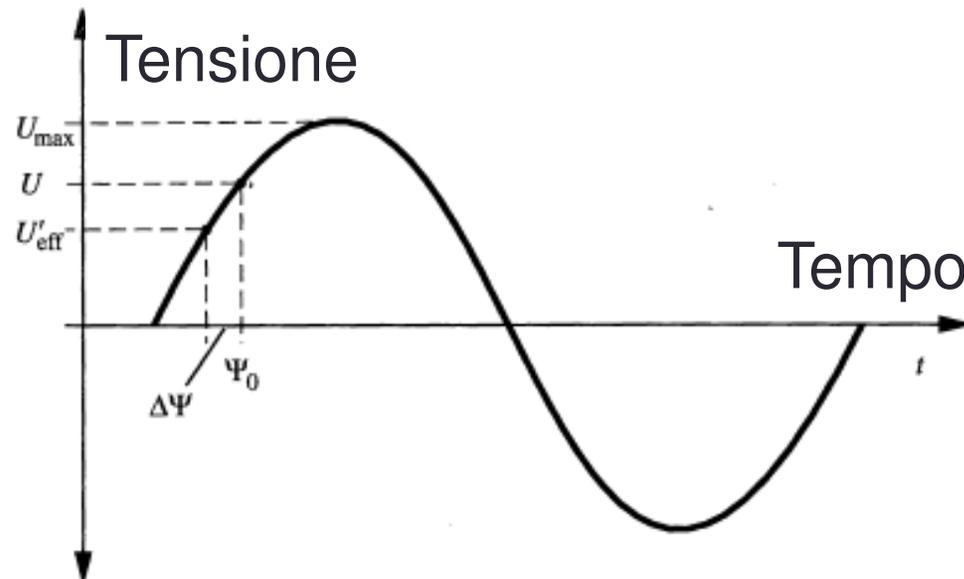
$$\rightarrow V \leq 10^6 R \quad V, R \text{ in } m$$

In pratica $R \leq 4 \div 5 \text{ m}$

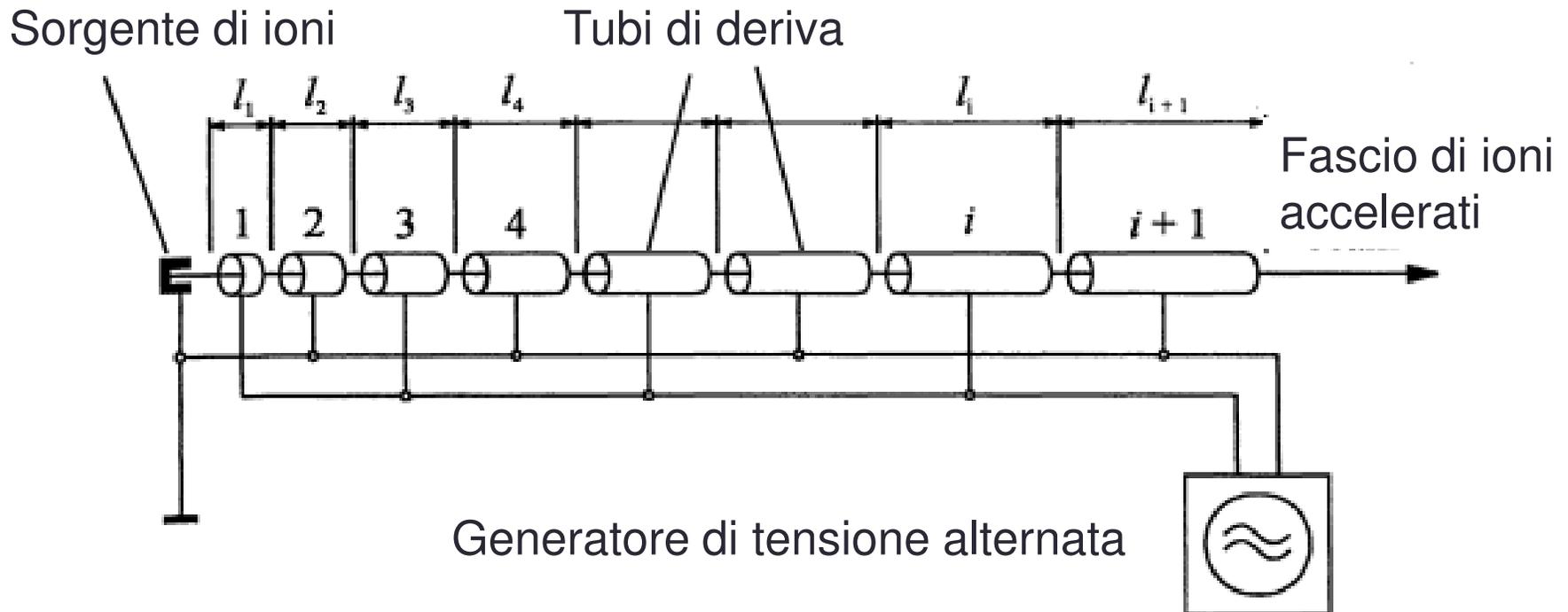
$\rightarrow V \leq 4 \div 5 \text{ MV}$ in aria, $15 \div 20 \text{ MV}$ in gas inerte

Nuovo schema: Acceleratore lineare.

Consiste in una serie di tubi metallici collegati alternativamente ai poli $+$ e $-$ di una tensione alternata. Quando una particella carica passa nello spazio fra 2 tubi viene accelerata, mentre quando passa dentro il tubo no: nel tubo non vi è alcun campo elettrico (gabbia di Faraday)



Tensione alternata fra coppie di elettrodi



Particella carica accelerata dal campo elettrico nello spazio fra due tubi consecutivi → Incremento di velocità/energia

Fissata la frequenza di oscillazione della tensione alternata:
Tubi di lunghezza crescente per compensare l'aumento di
velocita'

→La particella carica trova sempre lo stesso campo
acceleratore a ogni uscita da un tubo

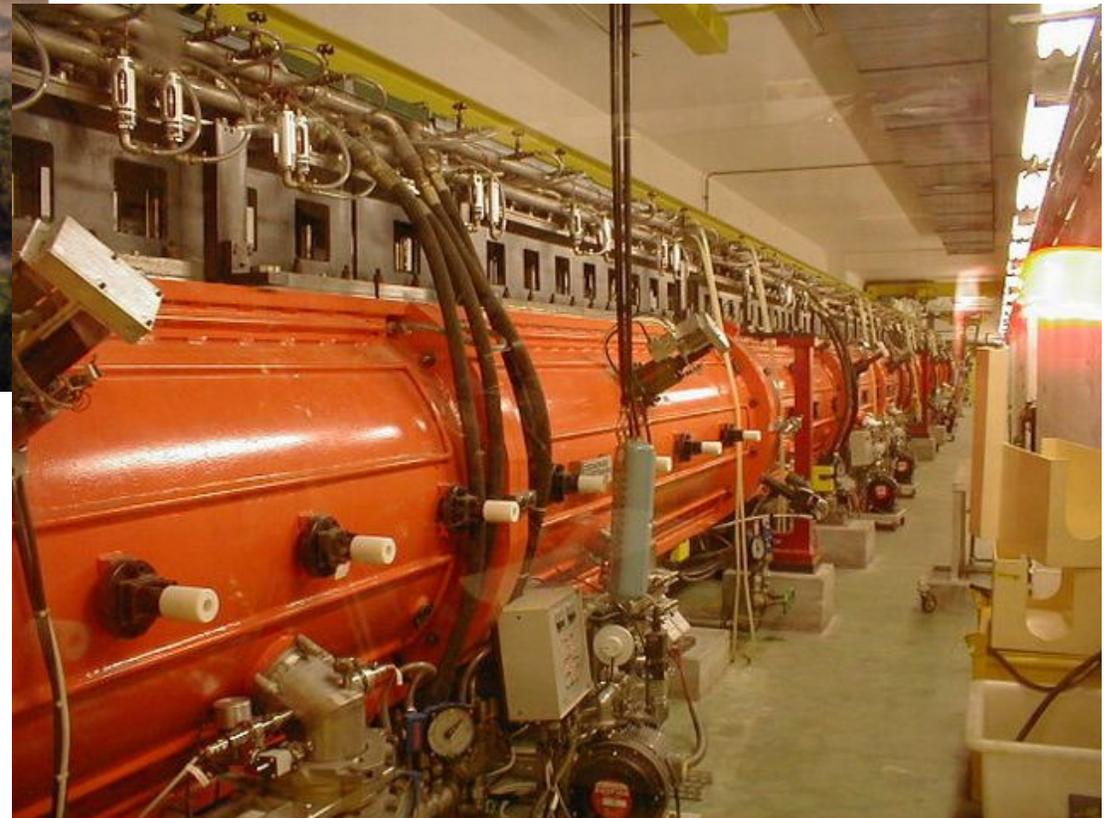
Ad energie molto elevate: velocita' particella ~ vel. della luce
→Regime *relativistico*

Le leggi dinamiche cambiano..

L'energia continua a incrementare, la velocita' quasi niente
→La lunghezza dei tubi e' costante



SLAC – LINAC per elettroni
Lunghezza ~ 3 km
 $E < 50 \text{ GeV}$
Regime ultrarelativistico $v_{el} \sim c$



CERN – LINAC 2 per protoni
Lunghezza ~ 40 m
 $E < 50 \text{ MeV}$
Regime non relativistico $v_p \ll c$
Primo stadio nella catena di acceleratori del CERN

Idea per aumentare l'energia e non fare un acceleratore lunghissimo: curvare la traiettoria delle particelle, di modo che rimangano in una zona limitata e sfruttino più volte in sequenza il campo elettrico acceleratore

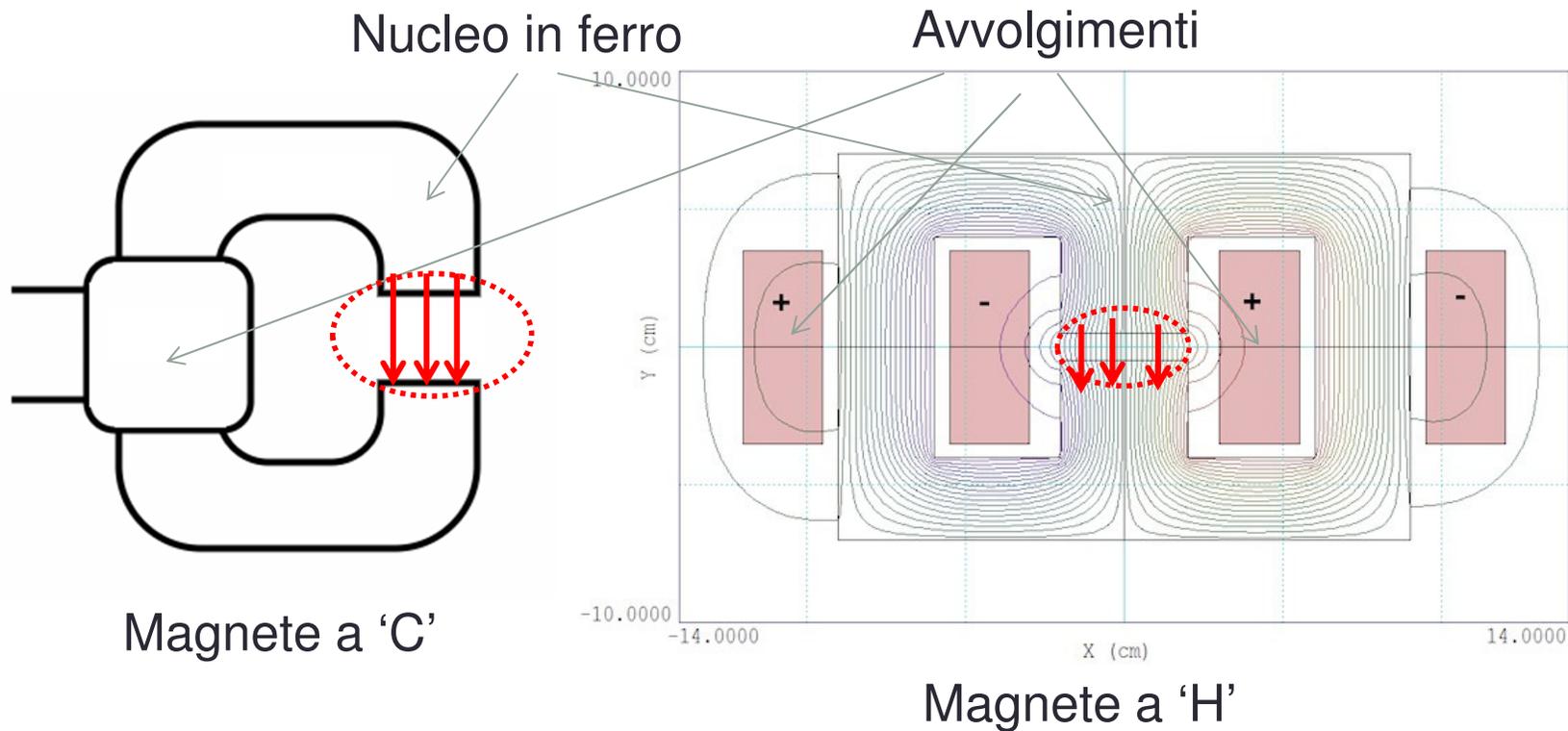
Primo acceleratore circolare: *ciclotrone*
(attualmente usato soprattutto in fisica medica).

Notare:

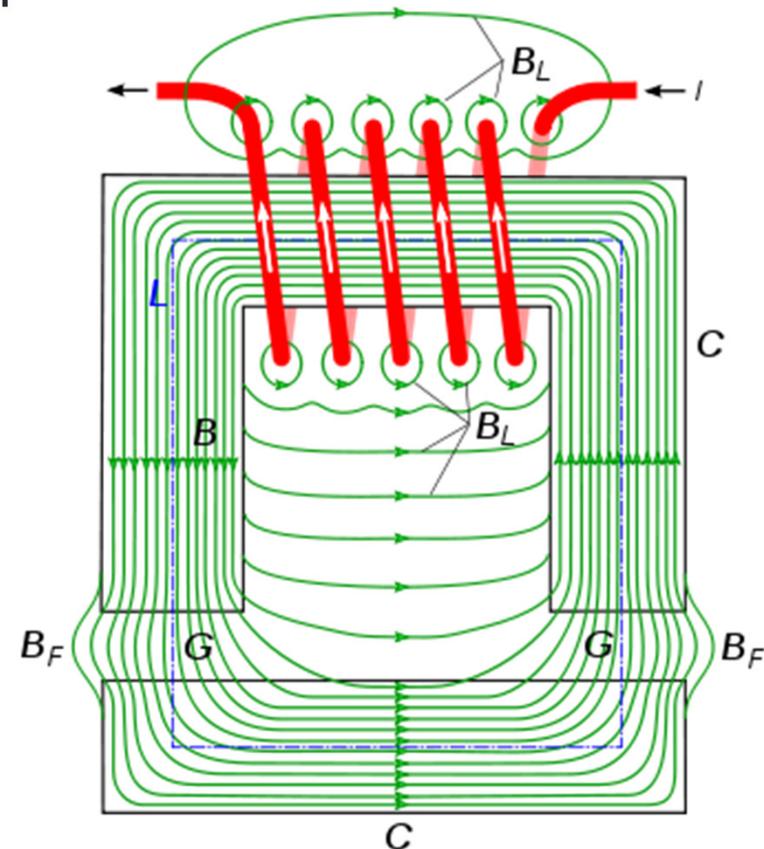
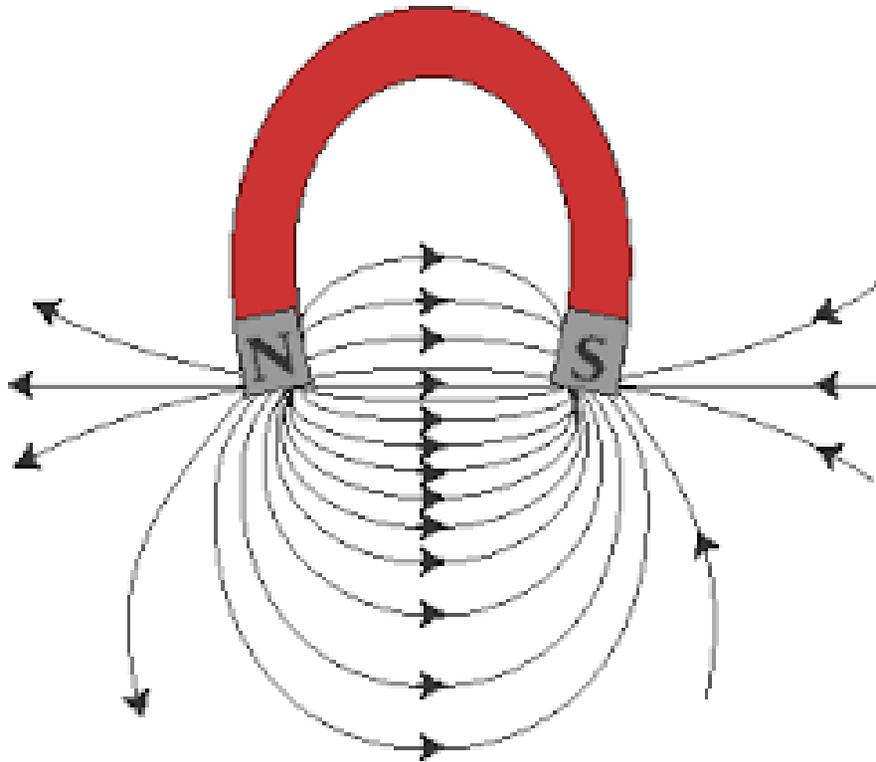
Anche con un ciclotrone ci dobbiamo limitare ad energie non relativistiche, e comunque ad energie non troppo elevate.

Elettromagnete:

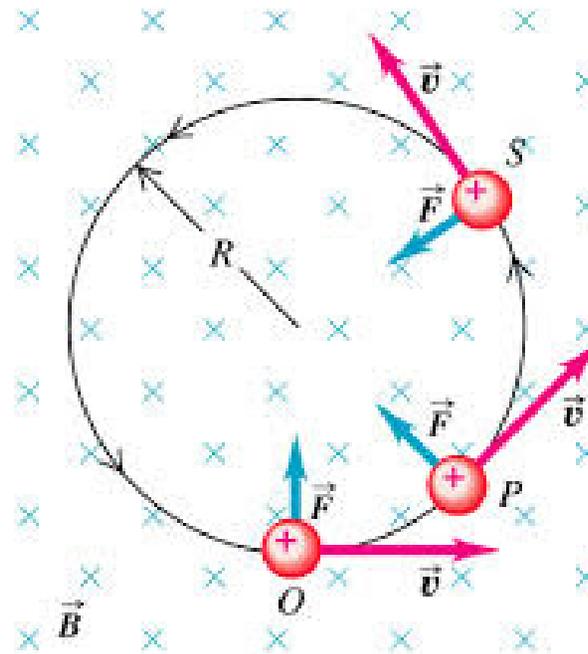
Circuito costituito da un avvolgimento ('bobina' in cui circola corrente elettrica - elevata, nel caso di quelli per acceleratori) avvolto attorno ad un elemento di ferro dolce sagomato in forma opportuna. Il ferro aumenta molto il campo magnetico



Risultato: Formazione di un *campo magnetico* in una certa regione dello spazio, come fra i poli di una calamita



Particella carica *in movimento* nella regione di spazio in cui c'è un campo magnetico:
Sente una forza che tende a variare la *direzione* della sua velocità



Risultato: Una particella che si muove in un campo magnetico costante tipicamente percorre un *arco di circonferenza*
Particelle veloci \rightarrow Raggio grande

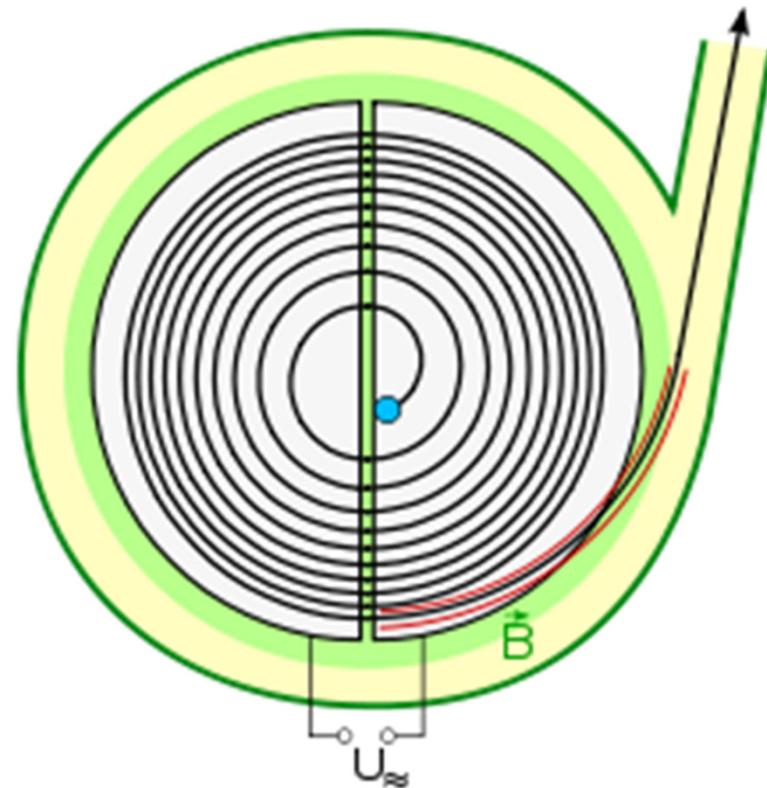
Principio di funzionamento del ciclotrone:

Incremento di velocità con campo elettrico alternato

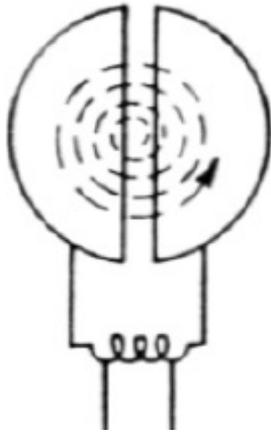
Traiettoria determinata da campo magnetico costante

→ Spirale a raggio crescente

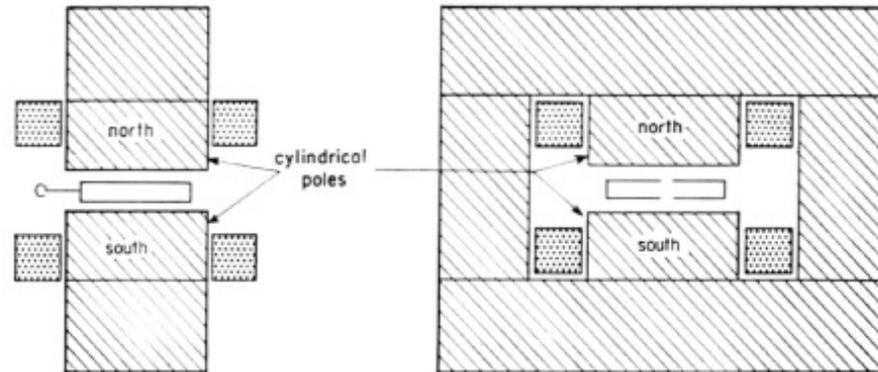
Orbita ed estrazione del fascio



Elettrodi cavi a forma di 'D'



Elettromagnete a forma di 'H': Giogo in ferro e avvolgimenti



Tensione alternata ~ alcuni ÷ decine di KV

Particella carica :

Accelerata da campo elettrico fra le 'D'

Moto circolare uniforme entro le 'D', raggio cresce a ogni semiorbita

Allungamento orbita compensa esattamente aumento di velocità'

→ *Frequenza di rivoluzione = Frequenza tensione alternata = Costante*

Ciclotrone da 20 MeV Produzione di radioisotopi a vita breve usati nella diagnostica PET



Limiti del ciclotrone:

Grandezza magnete: Deve coprire l'orbita max.
Proibitivamente grande per $E > ca. 500 MeV$

Regime relativistico quando $v \sim c$
Frequenza di rivoluzione non e' piu' costante

Generatore a frequenza variabile
Campo magnetico non omogeneo

Entrambe soluzioni complicate

Occorre un nuovo schema per energie maggiori

Per superare il limite principale del ciclotrone:
Cambiamento tipo di orbita → Sincrotrone

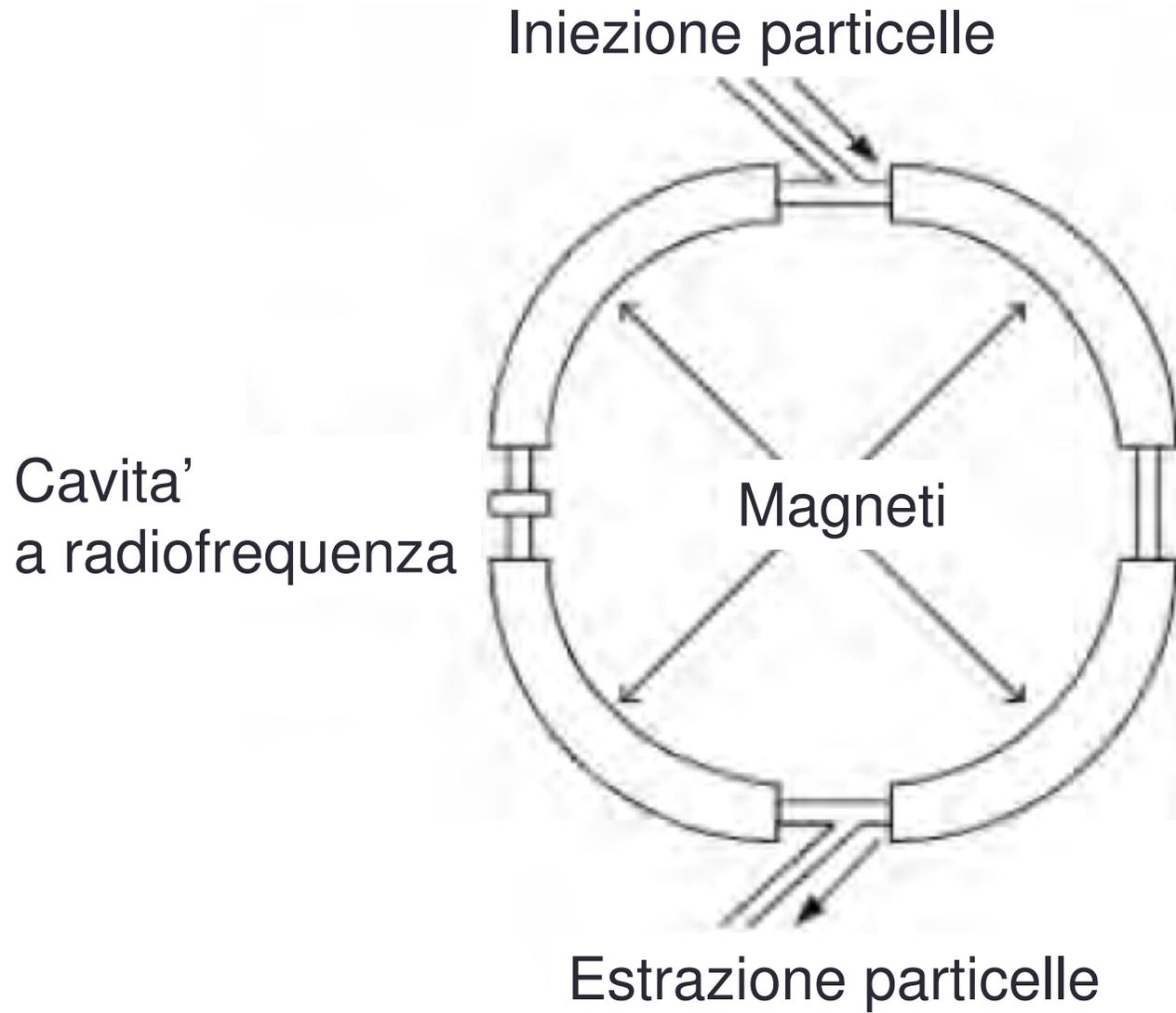
Da *raggio variabile, c. magnetico fisso*
a *raggio fisso, c. magnetico variabile*

Orbita circolare

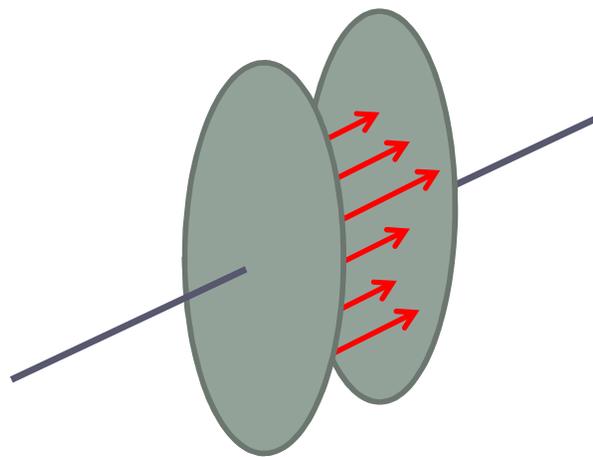
Cavita' a radiofrequenza per cessione energia alla particella
Campo magnetico guida *crescente* nel tempo per bilanciare
energia crescente delle particelle

Particolarmente adatto al regime relativistico

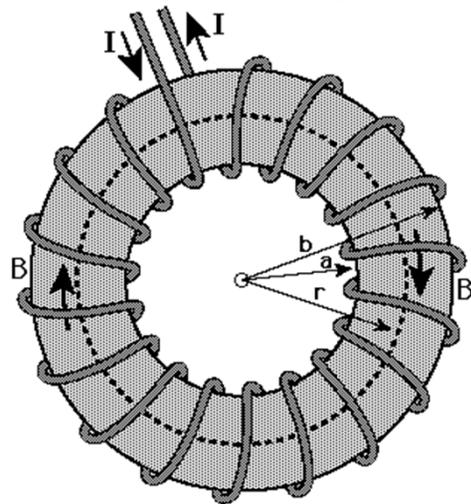
Schema usato anche oggi nelle macchine ad energia piu'
elevata (SPS, Tevatron, LHC)



Che cos'è una cavità a radiofrequenza?

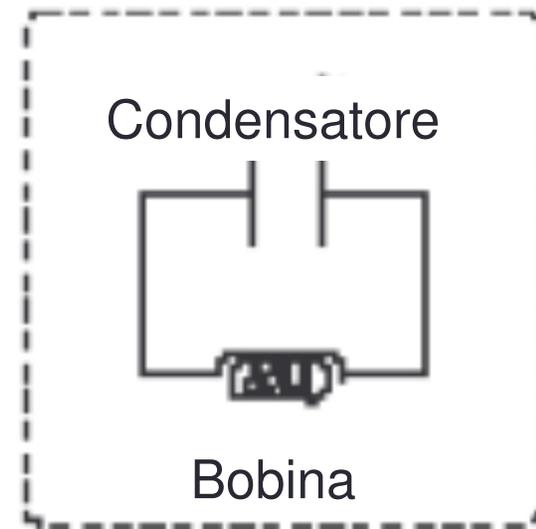


Condensatore piano



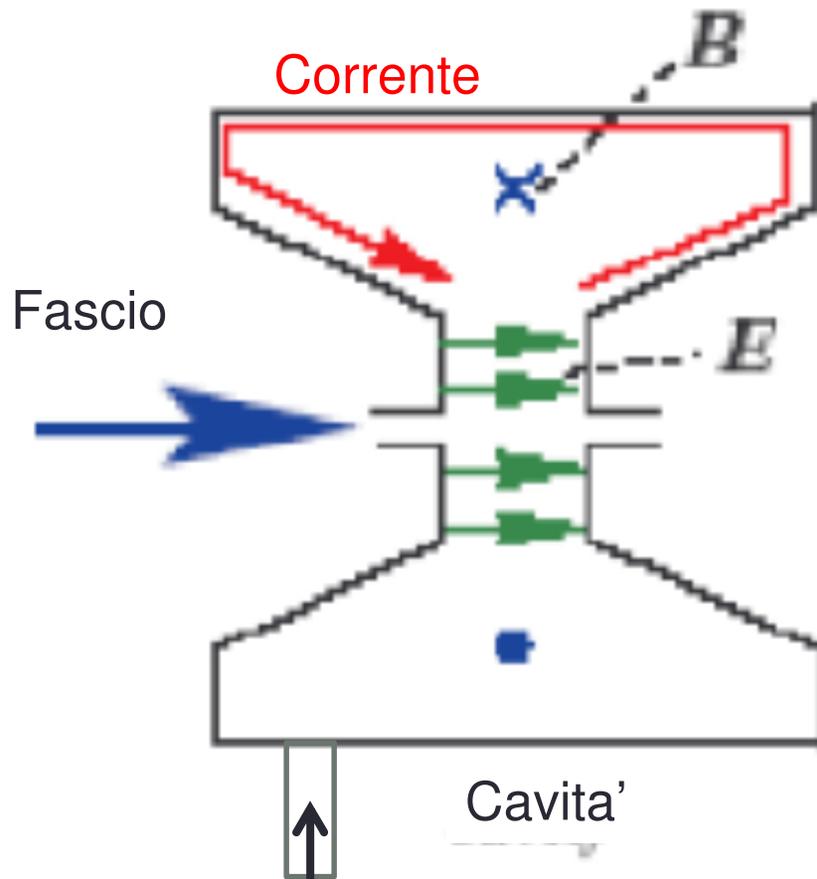
Bobina toroidale

Condensatore: contiene energia del campo elettrico
Bobina: contiene energia del campo magnetico



Circuito risonante:
 Scambio periodico di energia
 Condensatore ↔ Bobina

Cavita': Generalizzazione di un circuito oscillante



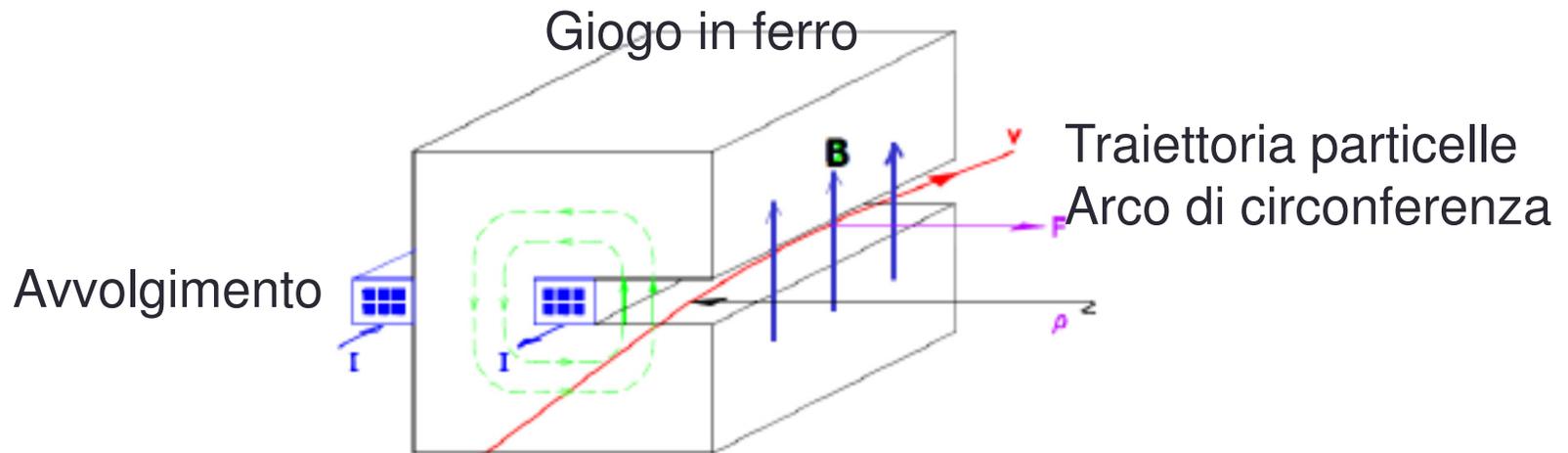
Alta tensione a frequenze radio fornita da generatori tramite condutture speciali (guide d'onda)

Campi E e B oscillanti
 Fascio accelerato da E
 Campo B serve a mantenere E in oscillazione
 Funzionamento a frequenze alte
 ~ Centinaia di MHz

Multicavita'
 per acceleratori



Tipico magnete a 'C' per sincrotroni



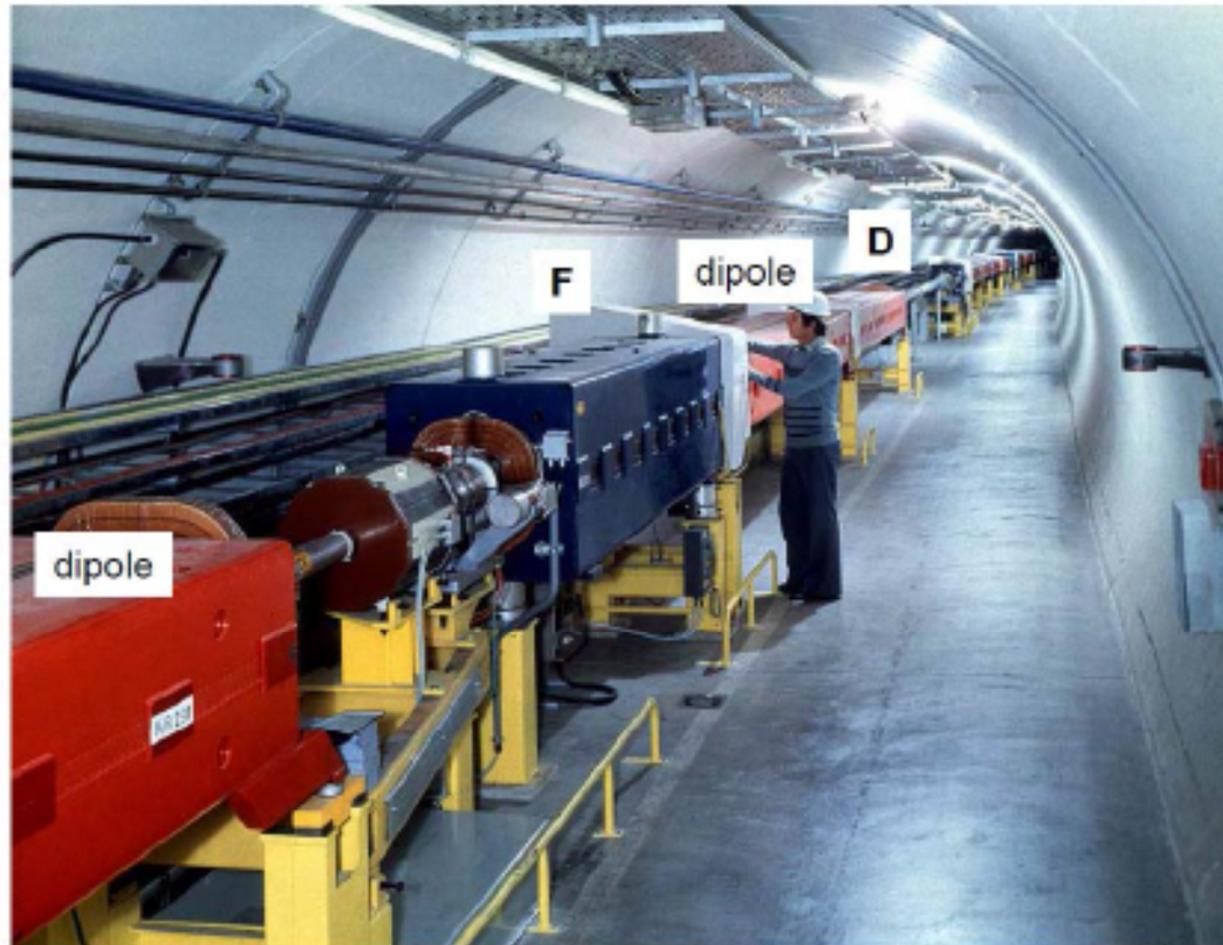
Vecchio stile: PS - P⁺ - CERN



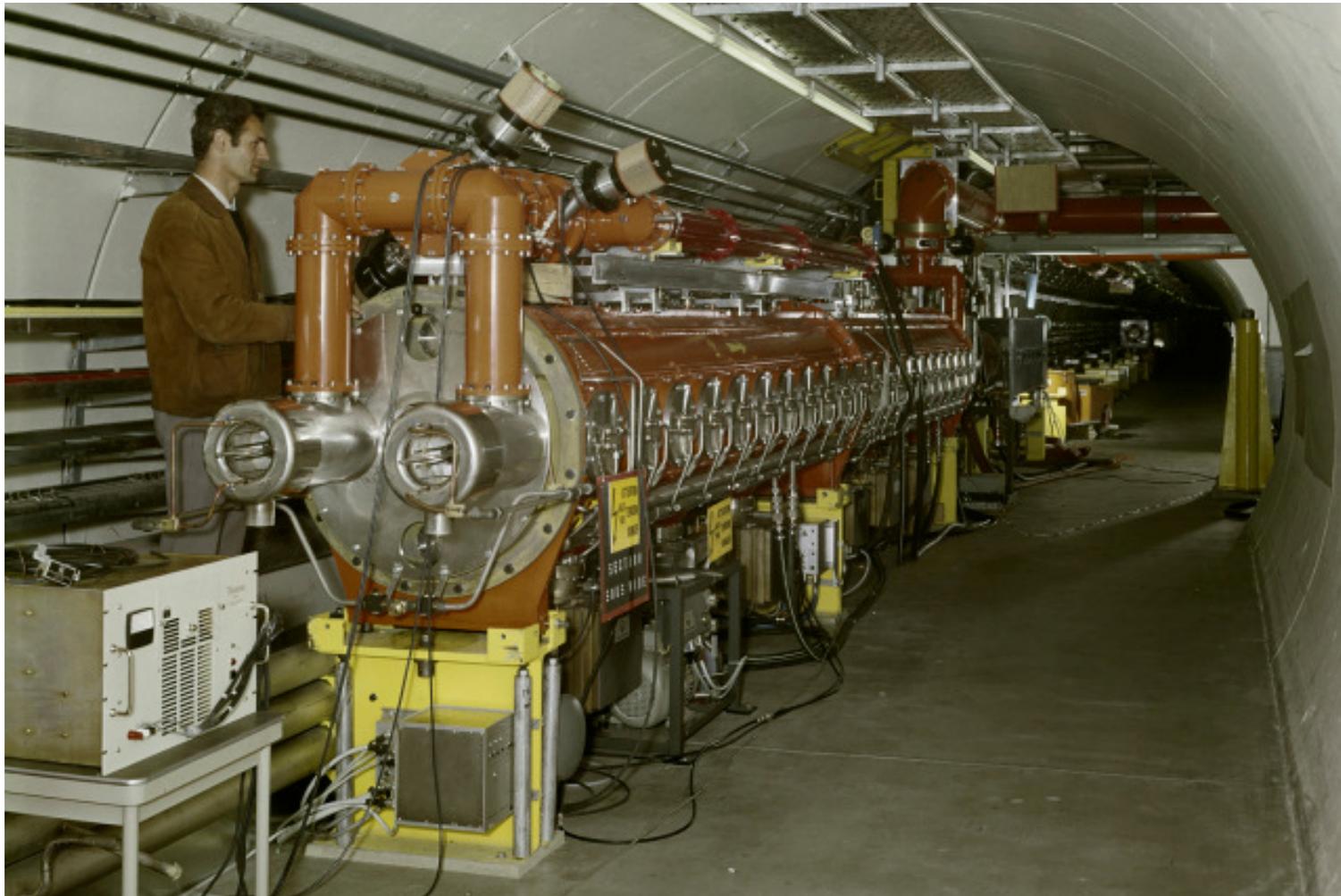
Nuovo stile: LHC - CERN

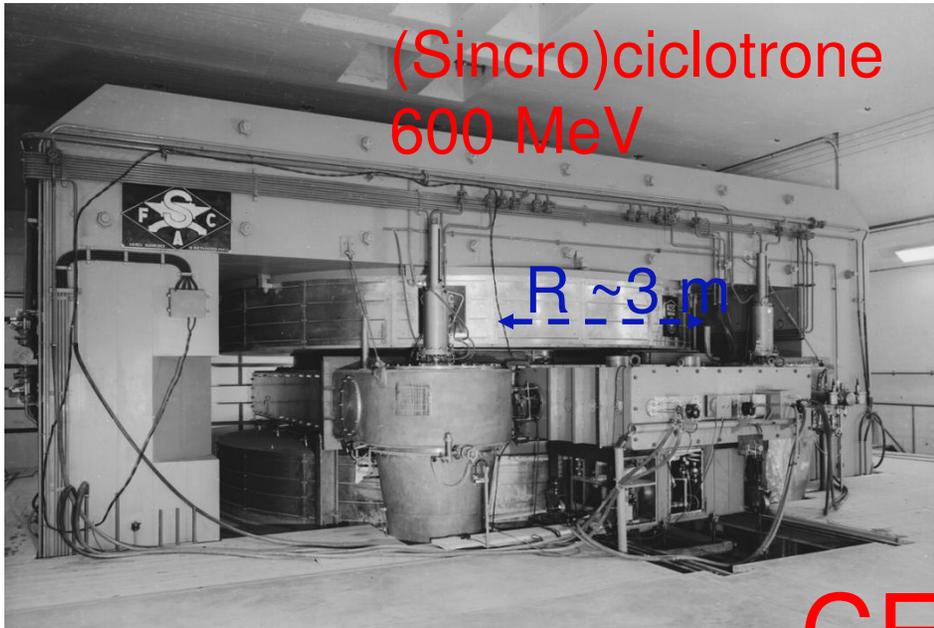


Magneti del SPS - CERN



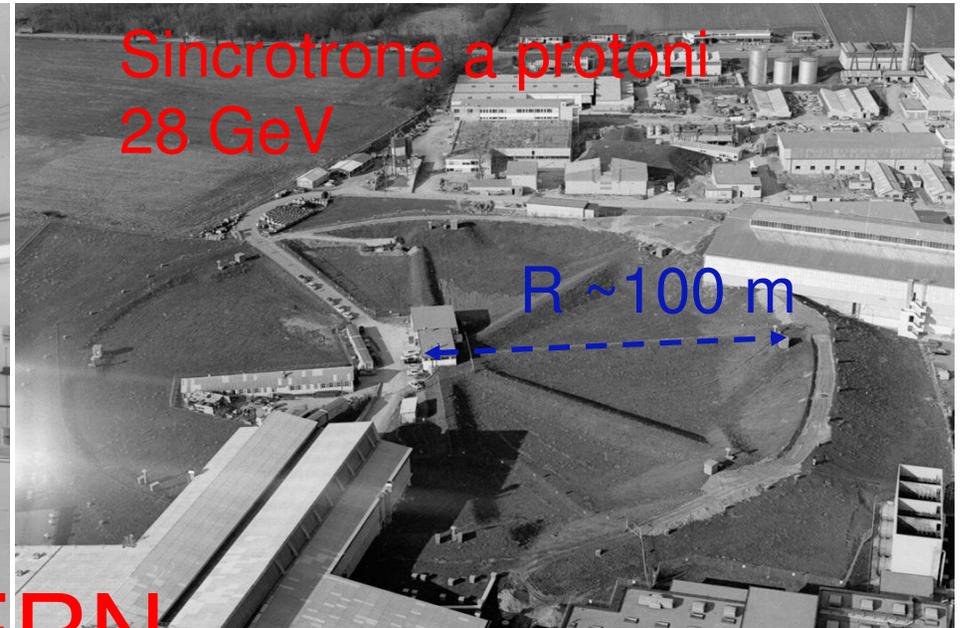
Cavita' a radiofrequenza del SPS - CERN





(Sincro)ciclotrone
600 MeV

$R \sim 3 \text{ m}$



Sincrotrone a protoni
28 GeV

$R \sim 100 \text{ m}$

CERN



Superprotonosincrotrone
450 GeV

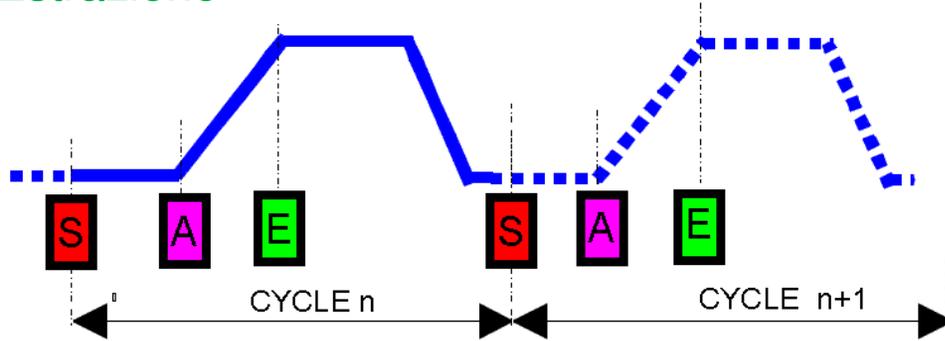
$R \sim 1 \text{ km}$



Large Hadron Collider
13 TeV

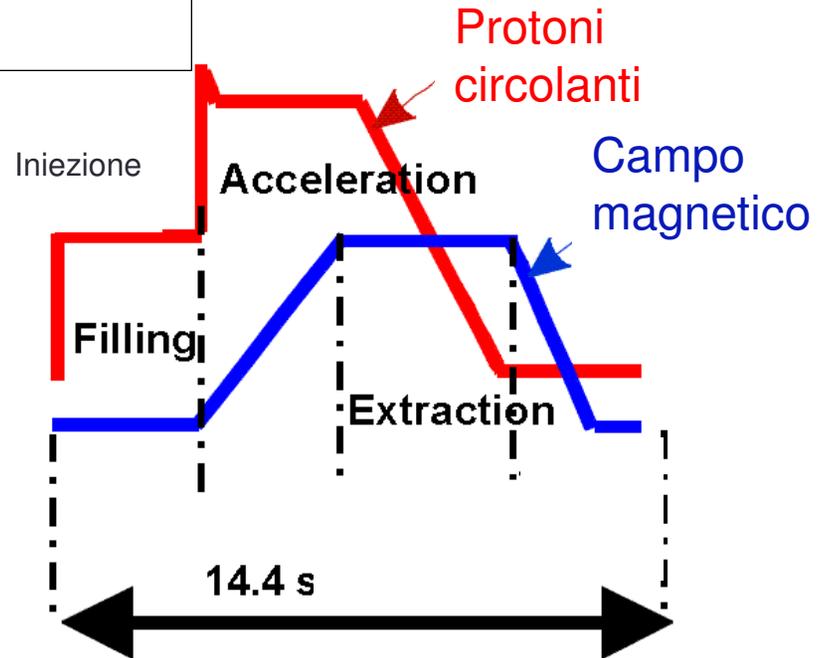
$R \sim 4 \text{ km}$

Iniezione
Accelerazione
Estrazione

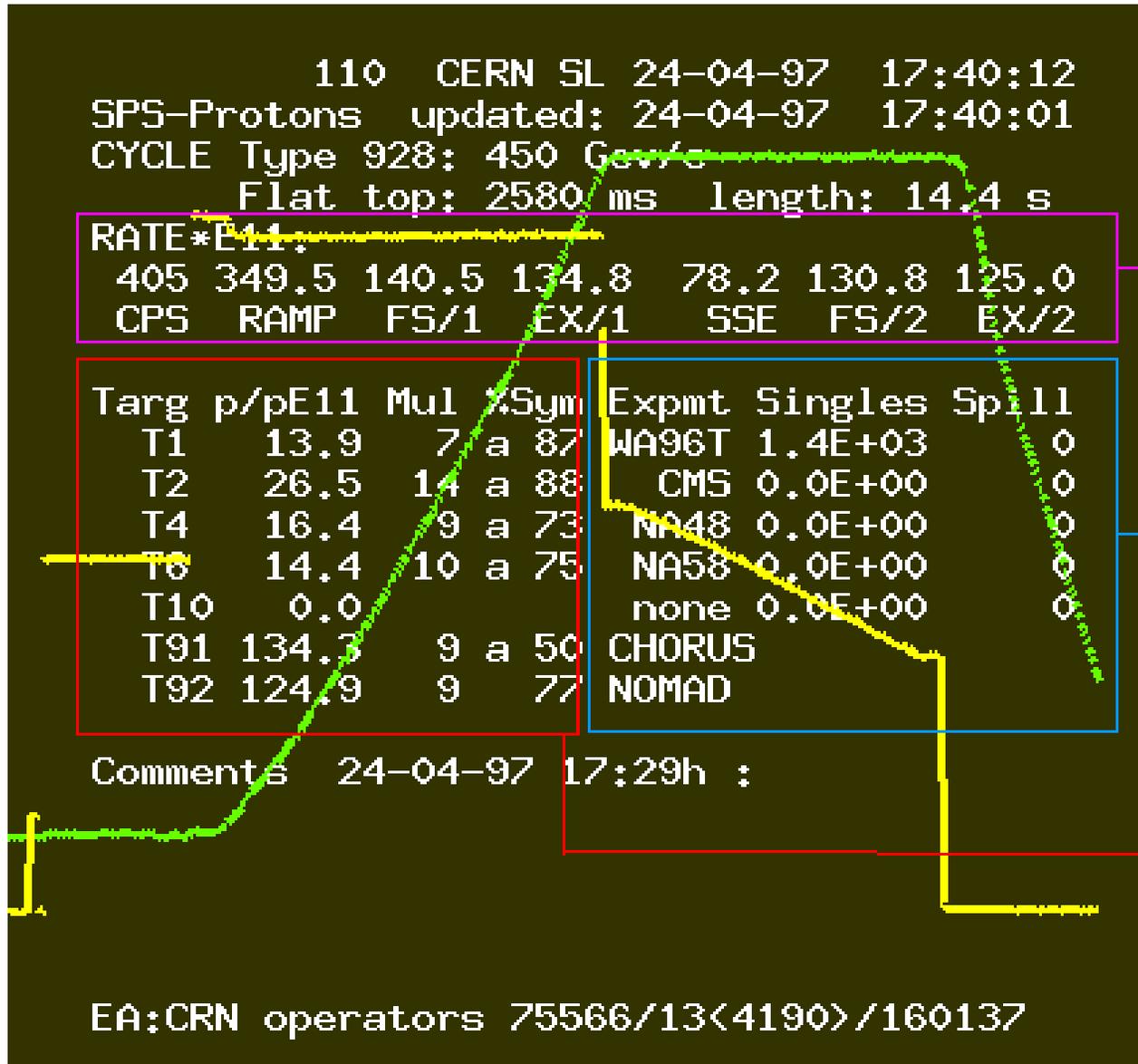


Ciclo macchina
di un sincrotrone

Tipico ciclo macchina
del SPS (CERN)



Esempio di ciclo di accelerazione: Vintage CERN SPS



Intensita'

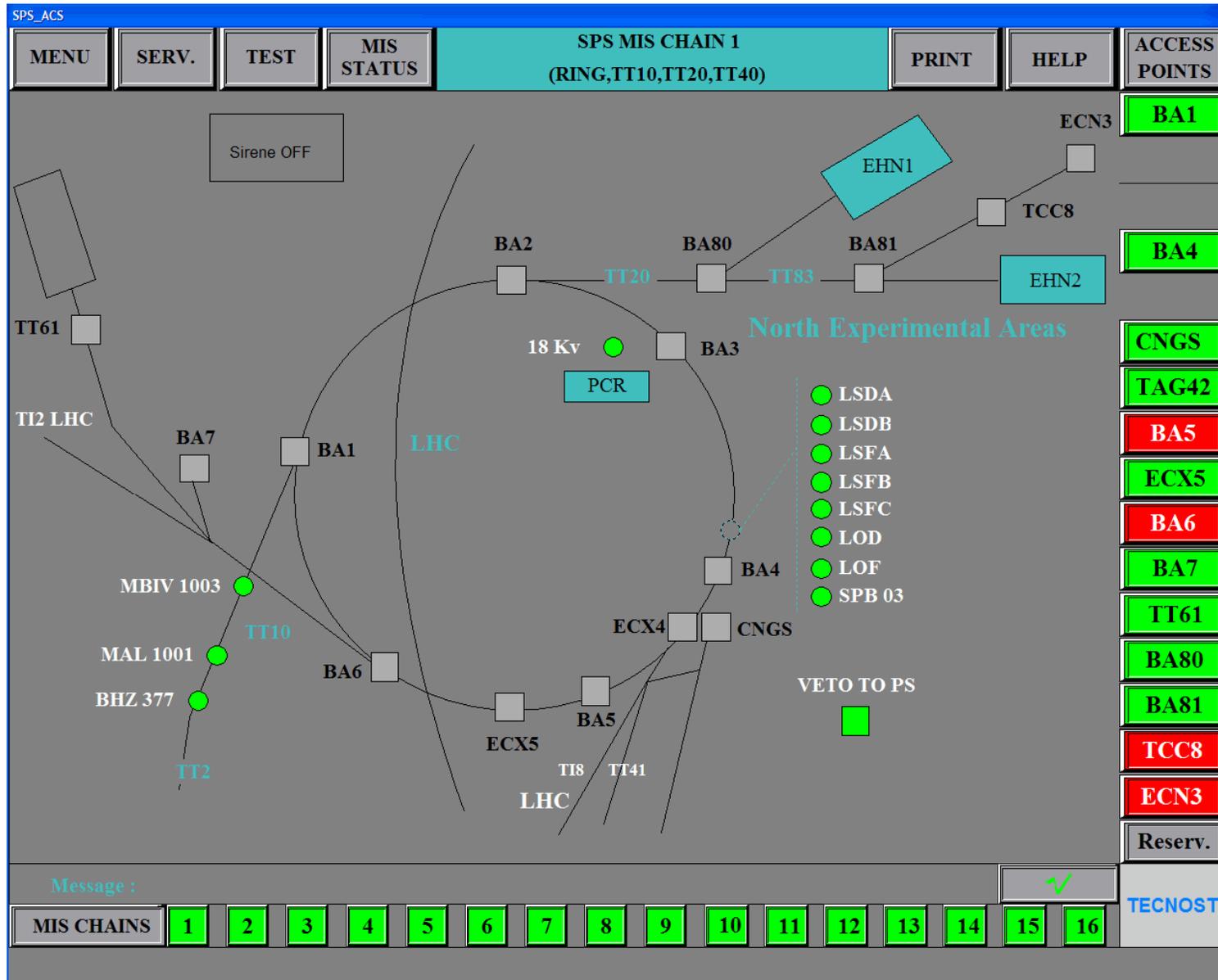
Energia

Intensities in the SPS

Data from experiments

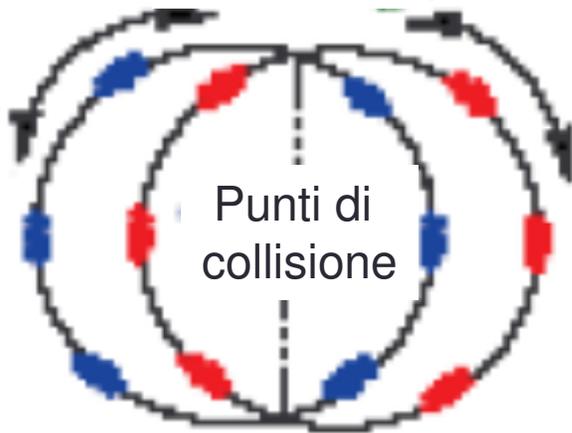
Steering on targets

Pagina base del software di controllo del SPS

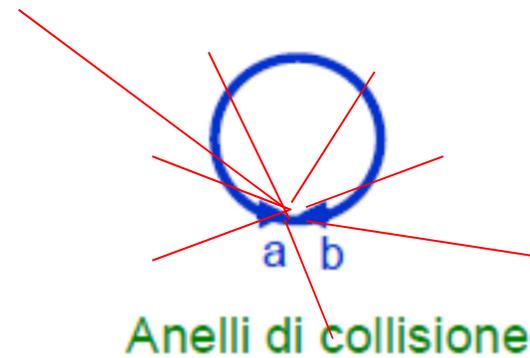
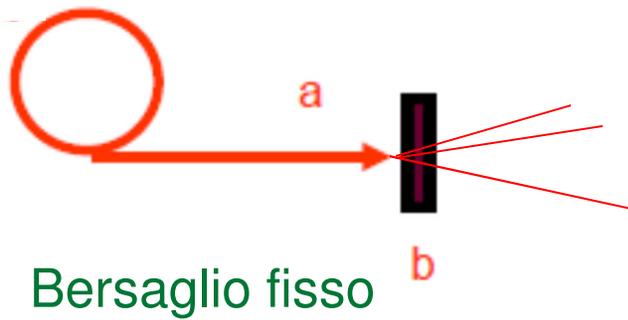
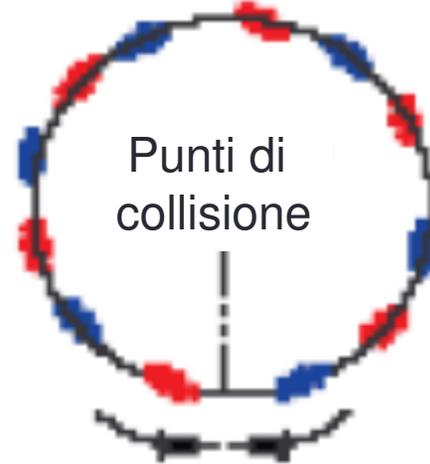


Collider: Anelli di accumulazione + Fasci incrociati

Due anelli



Anello singolo



Vantaggio fondamentale:

*Energia dei fasci molto minore
per una data energia utile della collisione*

Svantaggio fondamentale:

*Rateo di collisioni molto minore
per una data intensita' di fascio*

	E utile (GeV)	E fascio (GeV) Acceleratore	E fascio (GeV) Collider
pp	10	52	5
	100	5200	50
	1000	5.4×10^5	500
e ⁺ e ⁻	1	10^3	0.5
	10	10^5	5
	100	10^7	50

Anelli di accumulazione:

Fasci circolano continuamente nel tubo a vuoto della macchina

Collisori:

In alcuni punti dell'orbita i due fasci si incrociano

Macchine:

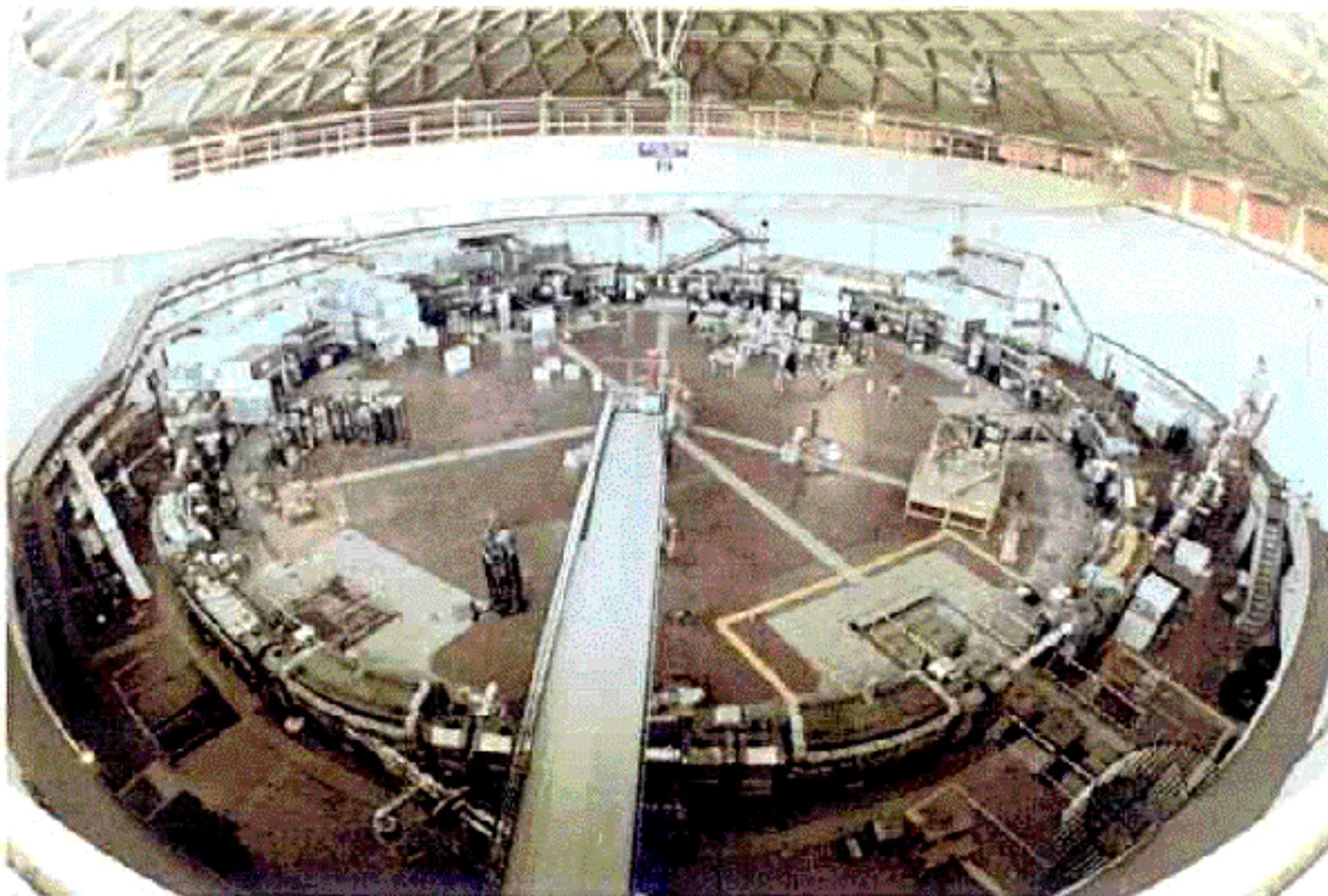
ADA/ADONE Frascati, anni '60-'70

ISR CERN, anni '70

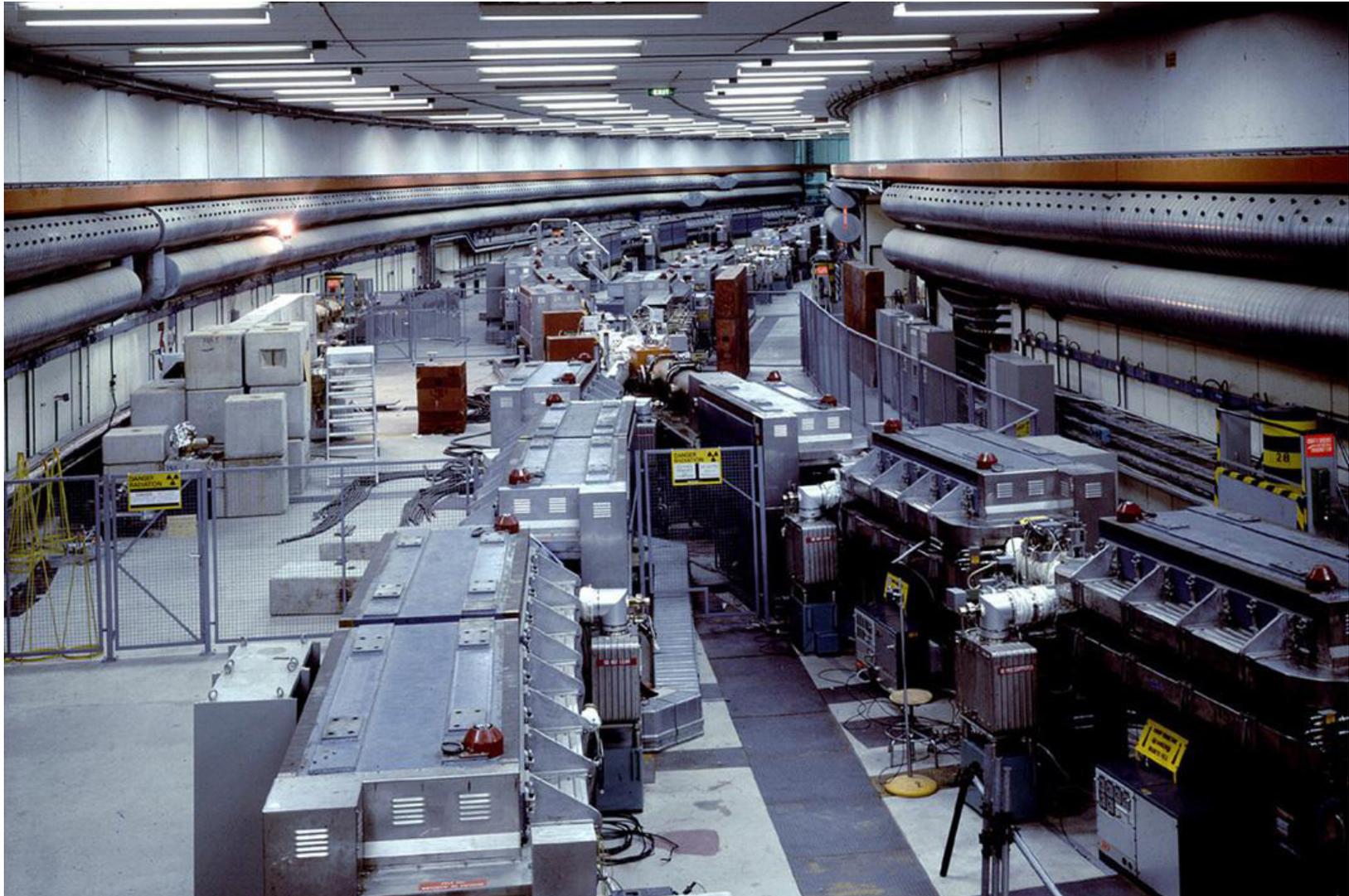
Tevatron, US anni '80-'10

LHC, CERN, dal 2010

...e molte altre



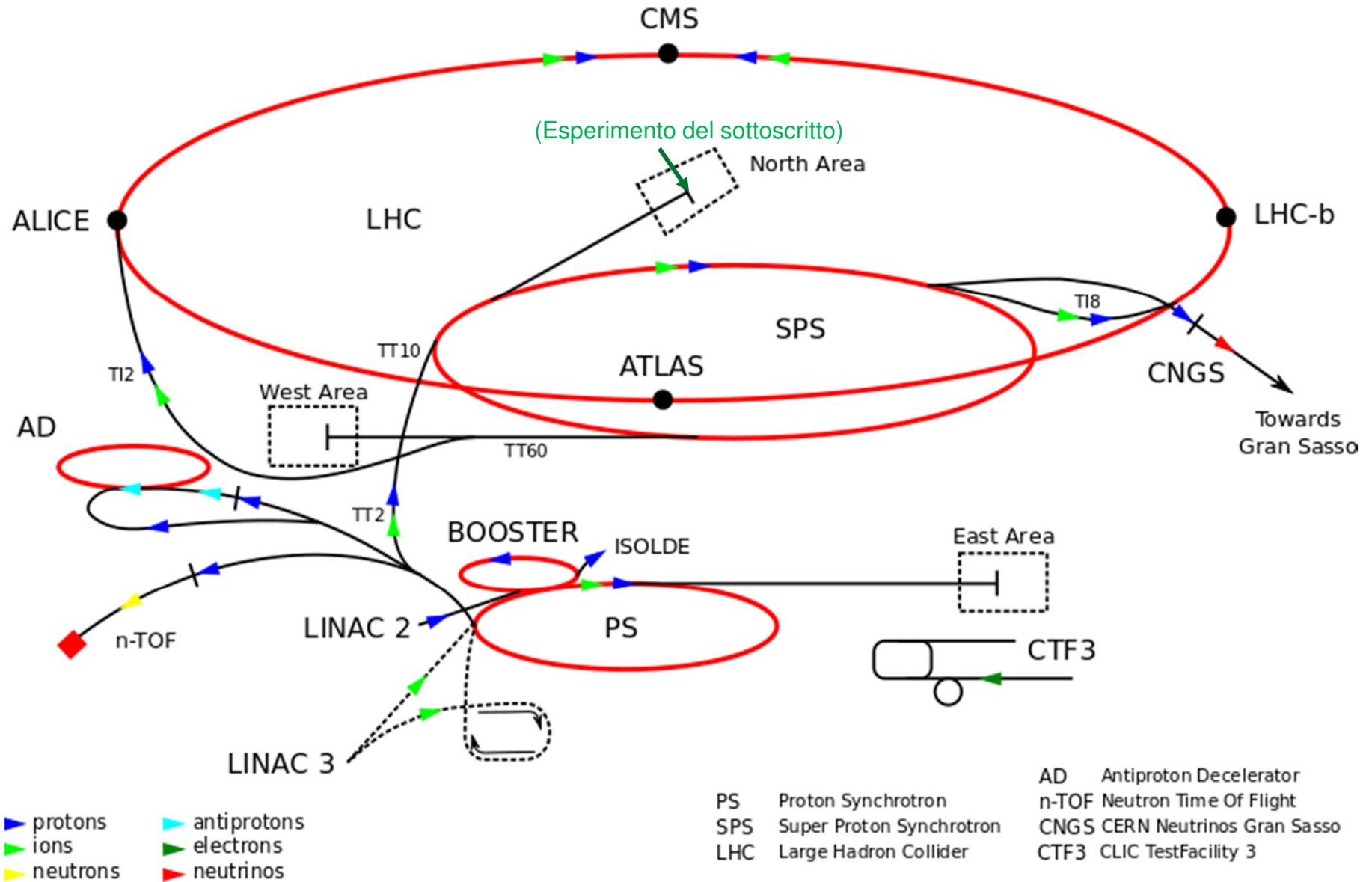
ADONE



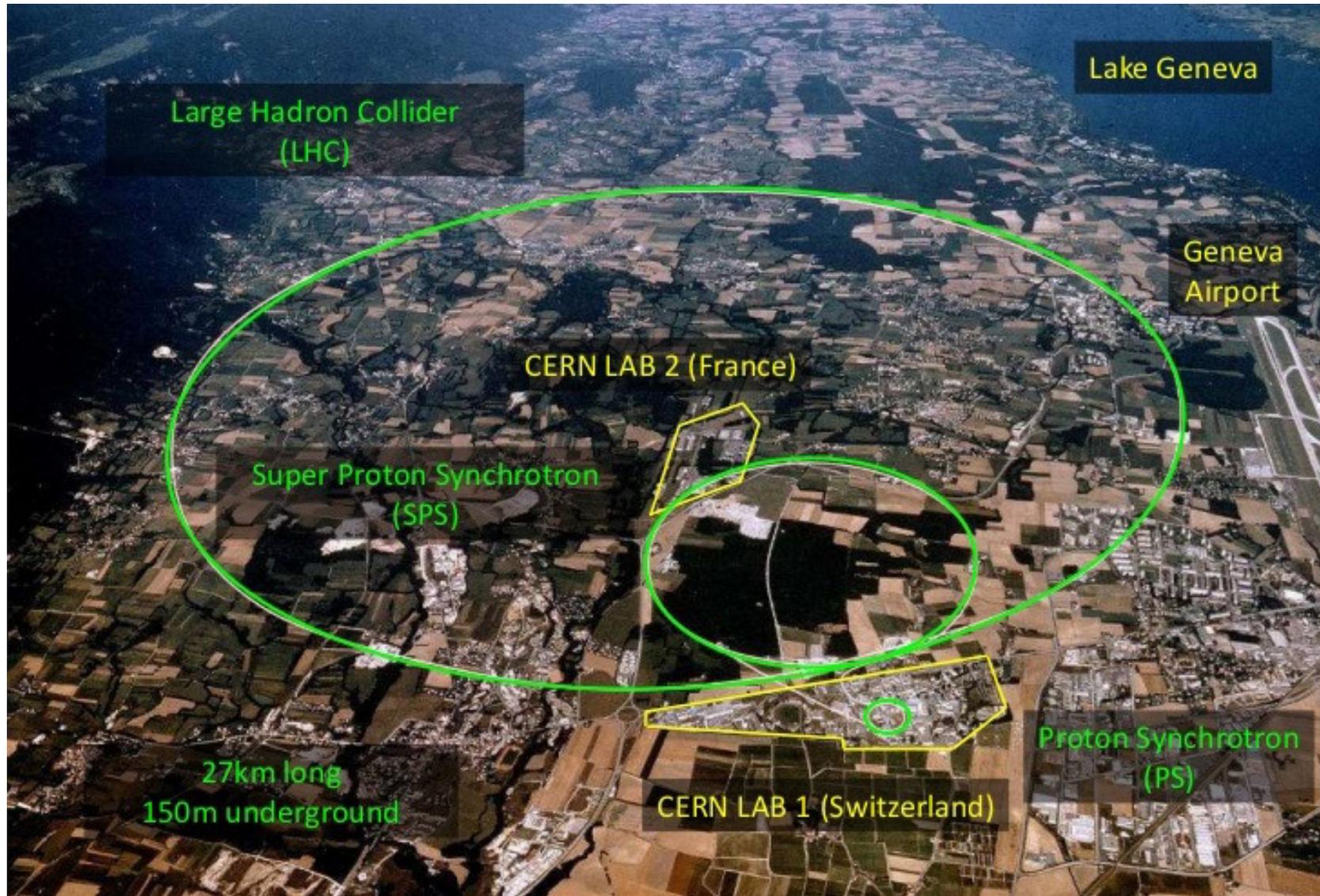
ISR



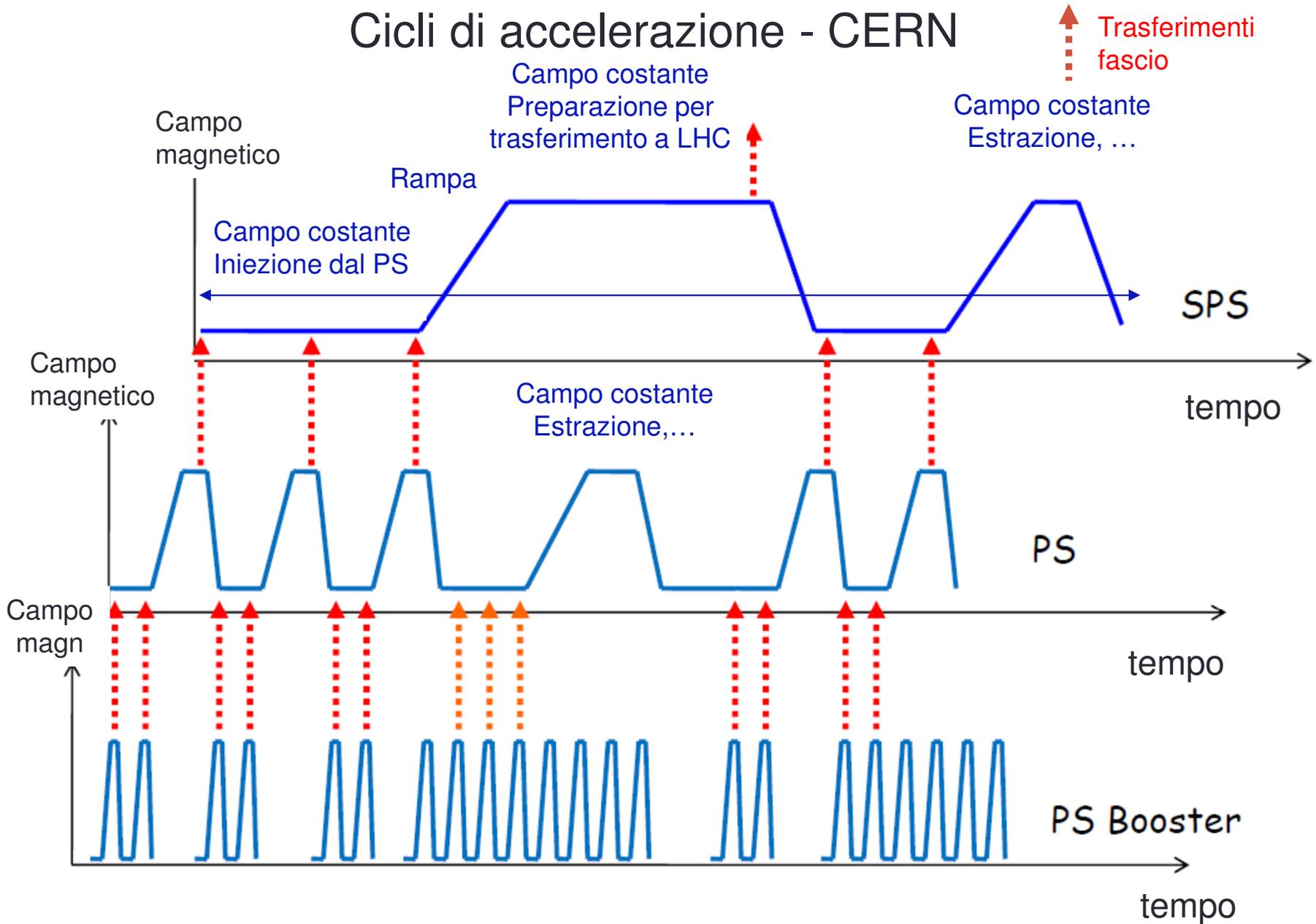
LHC



La catena di acceleratori del CERN



Cicli di accelerazione - CERN



LHC Page1
Fill: 3746
E: 6500 GeV
t(SB): 00:00:00
21-05-15 09:22:18

BEAM SETUP: ADJUST

Energy: 6500 GeV

I(B1): 1.84e+11

I(B2): 1.85e+11

FBCT Intensity and Beam Energy Updated: 09:22:19

Comments (21-May-2015 09:22:03)

test collisions at 13 TeV

BIS status and SMP flags	B1	B2
Link Status of Beam Permits	false	false
Global Beam Permit	true	true
Setup Beam	true	true
Beam Presence	true	true
Moveable Devices Allowed In	false	false
Stable Beams	false	false

AFS: Single_2b+1p_1_1_1

PM Status B1	ENABLED	PM Status B2	ENABLED
--------------	---------	--------------	---------