



## **Introduzione: due passi indietro**

### ■ **Acceleratori**

**Perché “alte energie” ?**

**Generazione di particelle**

**Cavità a radiofrequenza**

**Tipologie di acceleratori**

**Modo di utilizzo**

### ■ **Rivelatori**

**Tipologie di rivelatori**

**Rivelatori di vertice**

**Tracciatori**

**Calorimetri**

**Un rivelatore in costruzione**

Ringraziamenti a quanti hanno contribuito alle informazioni qui raccolte e in particolare a: D. Alesini, M. Boscolo, M. Diemoz, P. Lipari.

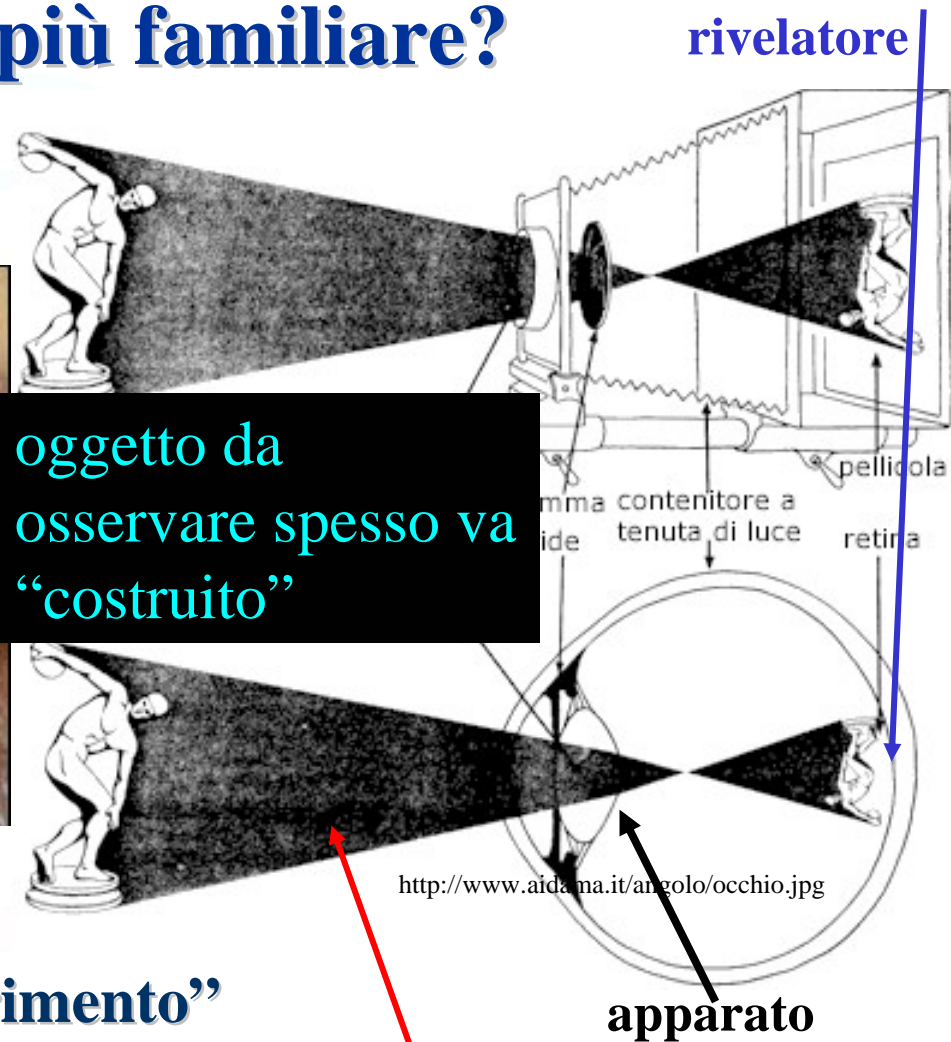
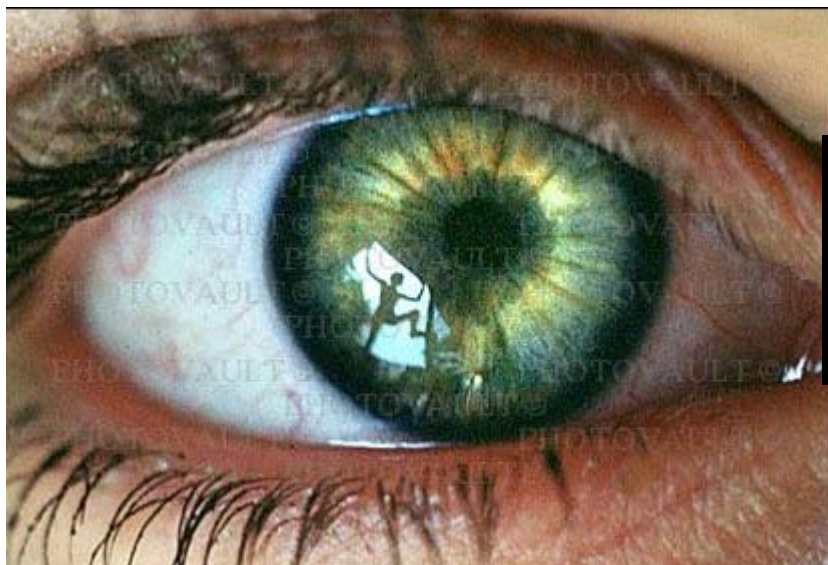
**Padova 14 Dicembre 2004**

***Ezio Torassa, Paolo Checchia***



## ■ Qual è il “rivelatore” più familiare?

Cosa vuol dire vedere?



Non molto diverso da un “esperimento”



- **Altri modi per “vedere”?**  
**es.: per sottrazione**



**luce visibile**



**luce “energetica” (raggi x)**

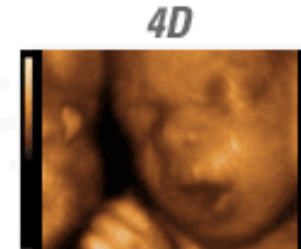
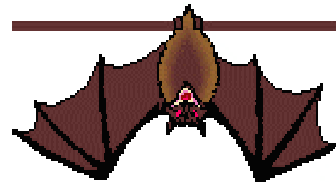




## ■ Altri modi per “vedere”?

**non solo con la luce...**

ecografia fetale



4D FETAL PROFILE



in questo caso gli oggetti da “vedere” non emettono un “fascio di suoni” ma ne vengono “illuminati” tramite un **emettitore** e si “vedono” le riflessioni (eco)

**...ma anche col suono**

**domanda: perché si usano ultrasuoni e non suoni di bassa frequenza?**

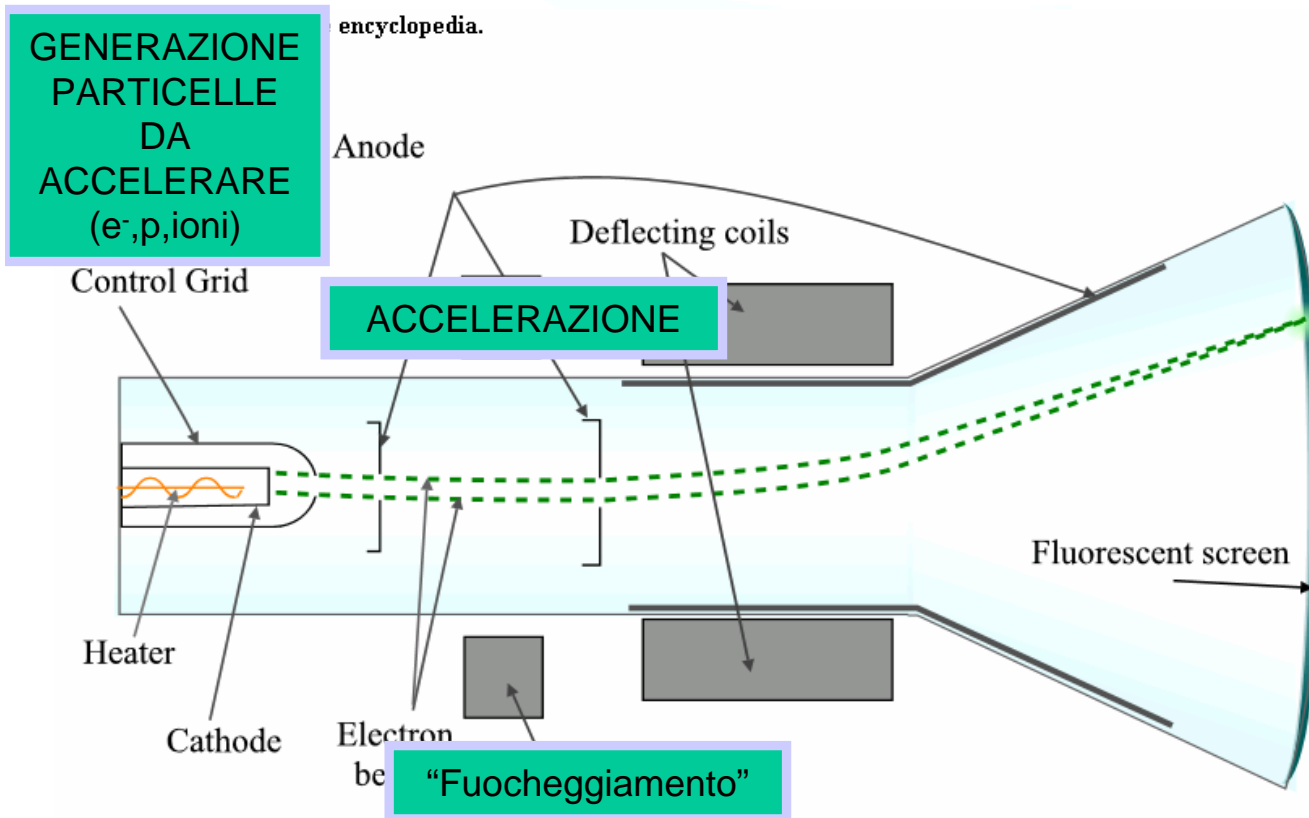


# Due passi indietro

- Qual è l'acceleratore più comune?  
**il tubo catodico**



rivelatore





I primi acceleratori di particelle furono realizzati per studiare **i costituenti più piccoli della materia.**

Un fascio di particelle (elettroni, positroni, protoni, ioni,...) che colpisce un bersaglio o collide con un altro fascio produce reazioni nucleari, annichilazioni e **crea nuove particelle.**

Lo studio di questi fenomeni ci dà informazioni sui costituenti ultimi del nostro mondo.

Inoltre per ottenere altre “luci” (sonde) che ci permettano di “vedere” dove le altre non possono





# Einstein in the 21st Century

## Perchè “alte energie” ?



La luce si comporta anche come un insieme di corpuscoli di energia

$$E = h\nu$$

### FATTI SPERIMENTALI

Le particelle si comportano anche come onde di frequenza

$$\nu = E/h$$

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$\lambda = c/\nu = hc/E$$

se  $E$  cresce  $\lambda$  diminuisce

cosa vi ricorda?

Per esplorare l'infinitamente piccolo  $E$  deve diventare molto grande

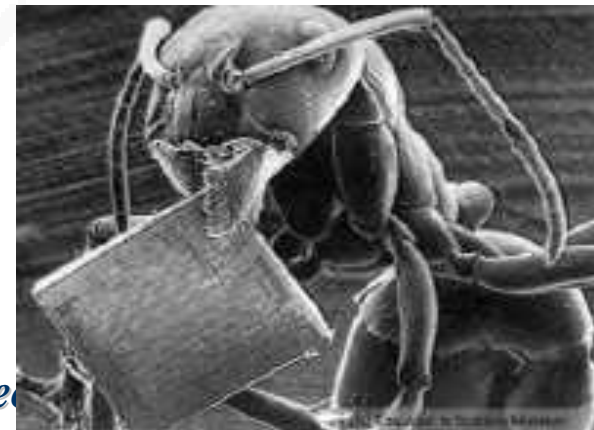
sonde

Microscopio elettronico: si vedono i singoli atomi !!!



Cu

Cl





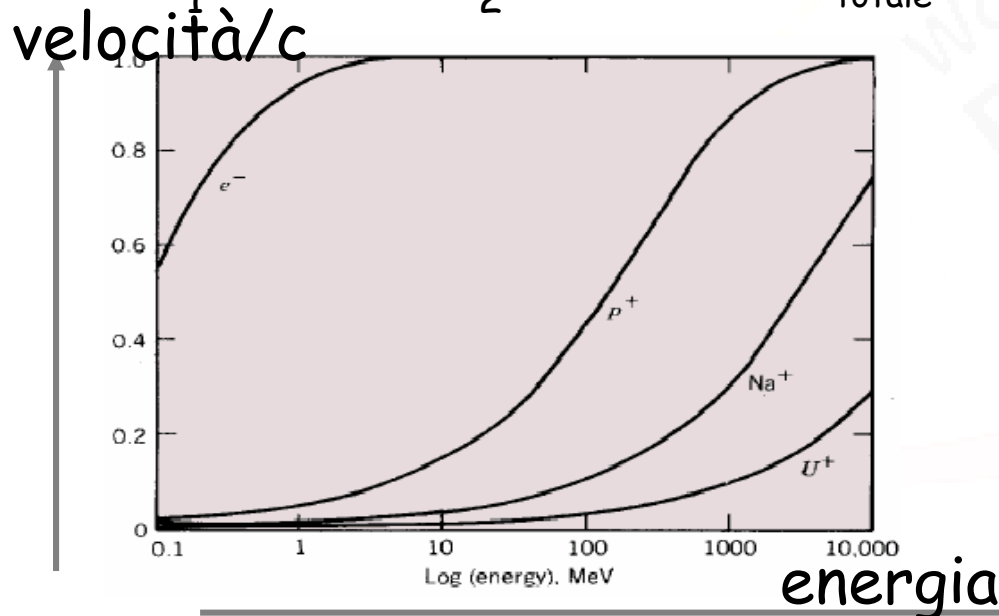
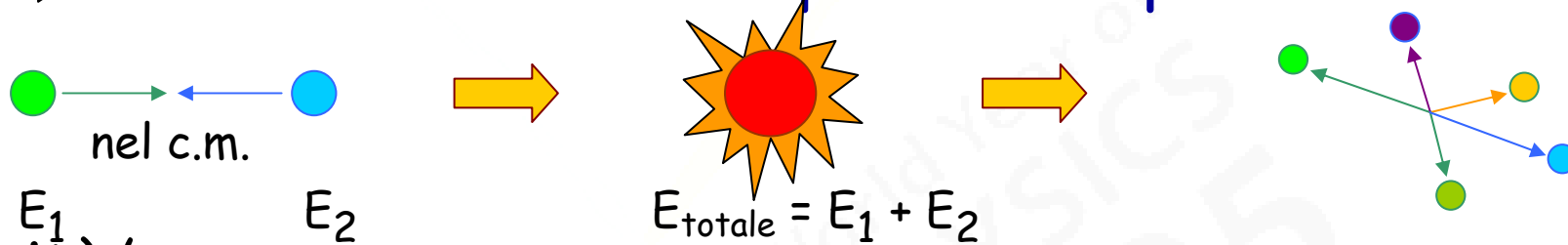
# Einstein in the 21st Century

## Perchè “alte energie” ?



$$E = mc^2$$

Grande energia delle particelle incidenti ( $E_1 + E_2$ )  
 Grande massa delle particelle prodotte



Alla crescita di energia è  
 Anche associata una crescita  
 di velocità entro i limiti imposti  
 dalla relatività ristretta  
 (importante per fare “correre”  
 particelle che vivono poco).





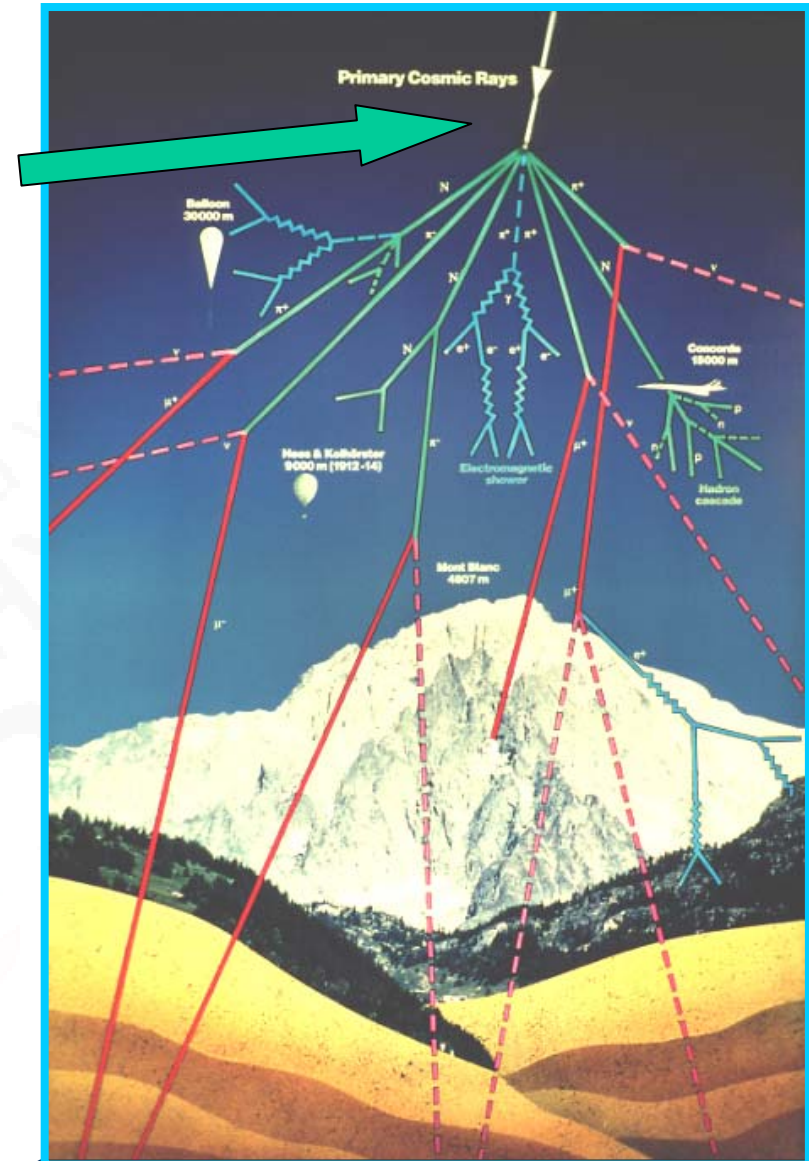
I primi fasci di particelle per gli studi di fisica nucleare e subnucleare erano sorgenti naturali:  
particelle alfa, **raggi cosmici**

La capacità di rompere le barriere elettrostatiche intorno ai nuclei aumenta con l'energia: l'energia massima delle particelle alfa è solo 10 MeV.

I raggi cosmici, anche quando molto energetici, non sono prevedibili: servono fasci di particelle ad alta energia e ripetibilità per studi sistematici.

I primi studi sugli acceleratori sono degli anni '20

I primi acceleratori sono degli anni '30

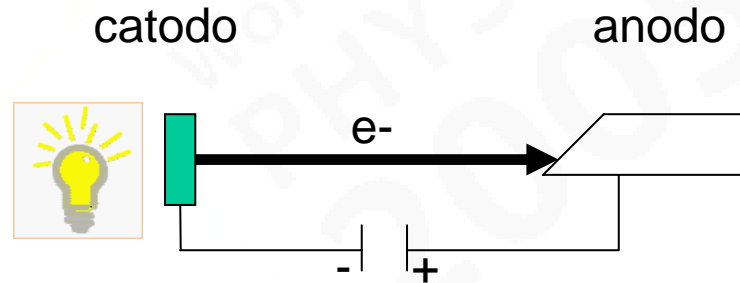




L'esempio più semplice di generatore di elettroni è un filamento caldo, come quello di una lampadina

Gli elettroni sono estratti dal catodo e, viaggiando verso l'anodo positivo, acquistano un'energia uguale alla loro carica moltiplicata per la differenza di potenziale applicata tra catodo e anodo

I **protoni** sono il nucleo dell'atomo di idrogeno. Applicando la differenza di potenziale al gas di idrogeno si accelerano i protoni



La differenza di potenziale tra due elettrodi viene usata per accelerare le particelle.

$$\Delta E = q\Delta V$$

L'energia massima raggiungibile è data dal limite di tensione oltre il quale si possono avere scariche elettriche



# La forza di Lorentz

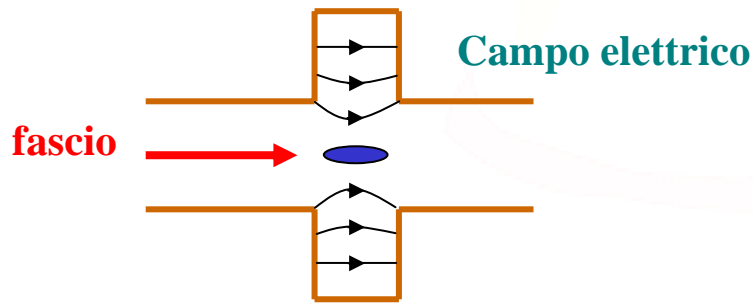
## La forza di Lorentz descrive il moto di una particella in un acceleratore

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$\vec{p}$  = impulso  
 $m$  = massa  
 $\vec{v}$  = velocità  
 $q$  = carica

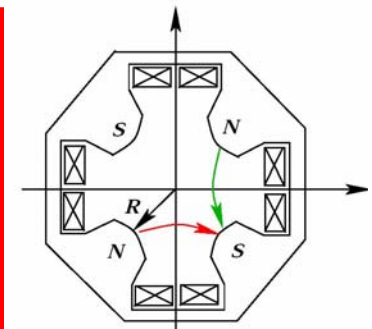
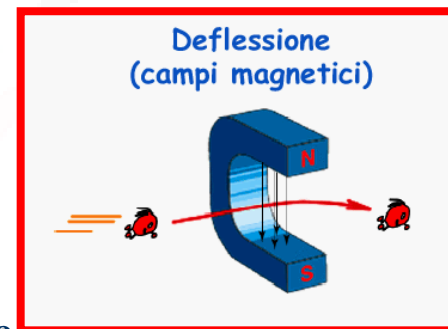
ACCELERAZIONE

$\vec{E}$  = campo elettrico

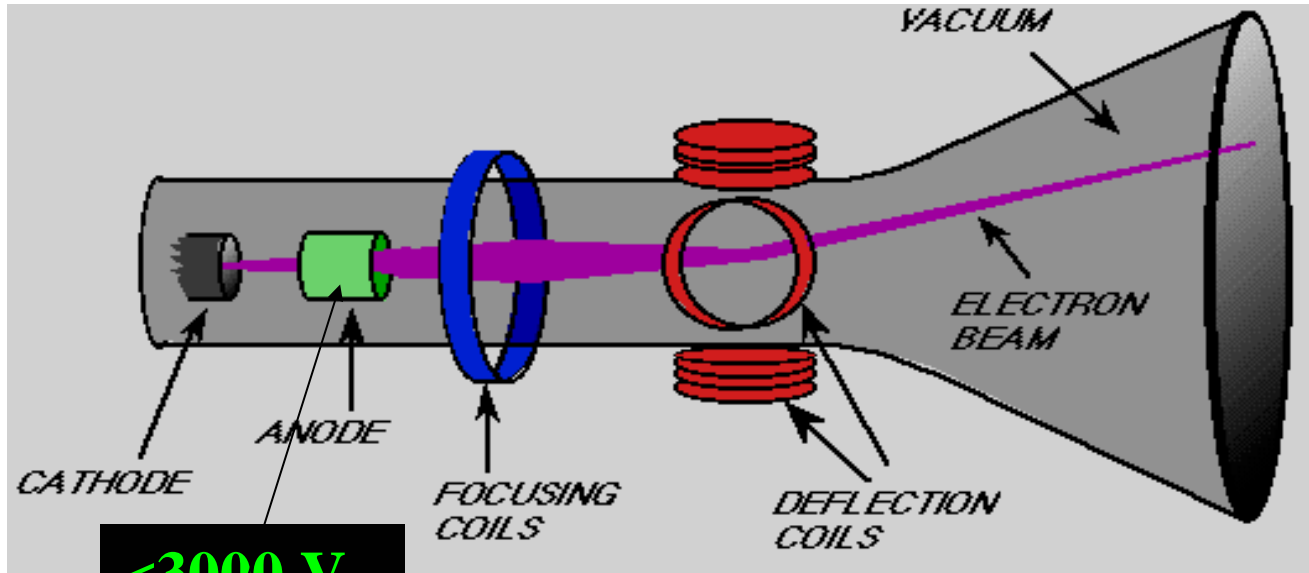


CURVATURA E FOCHEGGIAMENTO

$\vec{B}$  = campo magnetico







<3000 V



Una particella di carica  $e$  passando attraverso una differenza di potenziale  $\Delta V$  acquista una energia cinetica  $E = e \Delta V$ .

Per comodita' l'energia si puo' misurare in **electron Volt** :

**1 eV** = energia acquistata da un elettrone (carica  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb) nel passaggio attraverso una d.d.p.  $\Delta V = 1$  Volt.

1 eV =  $1.6 \times 10^{-19}$  Joule, 1 KeV =  $10^3$  eV, 1 MeV =  $10^6$  eV, 1 GeV =  $10^9$  eV,

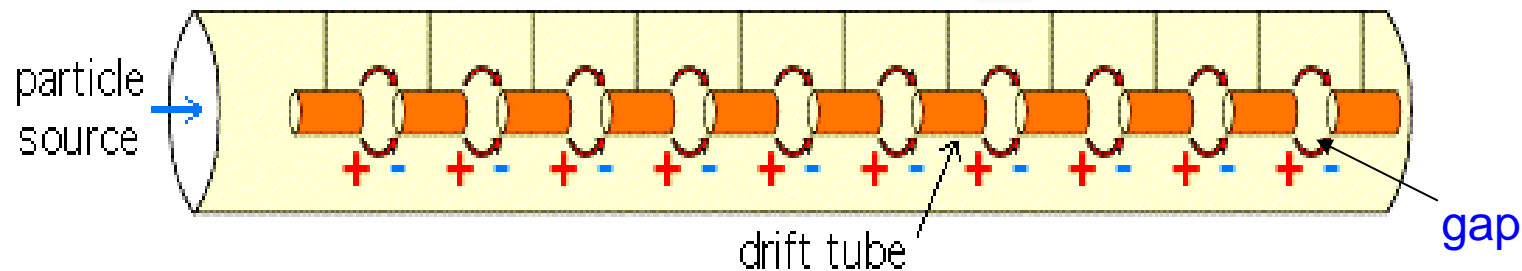
1 TeV =  $10^{12}$  eV...



## Wideroe (1928)

Anziché applicare un elevato campo elettrico statico si applica una tensione variabile nel tempo (sinusoidale) ad una sequenza di *tubi di drift*. In questo caso le particelle non sentono campo accelerante quando si muovono all'interno di ciascun tubo di drift (regione di spazio equipotenziale) e vengono accelerate in corrispondenza dei *gaps*.

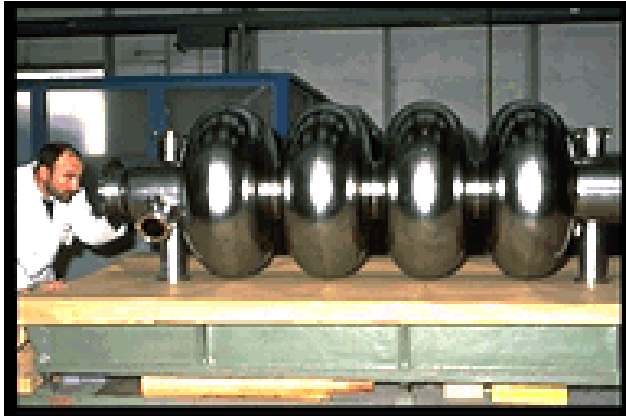
La fase si inverte durante il tempo di volo nei tubi e la particella subisce progressive accelerazioni



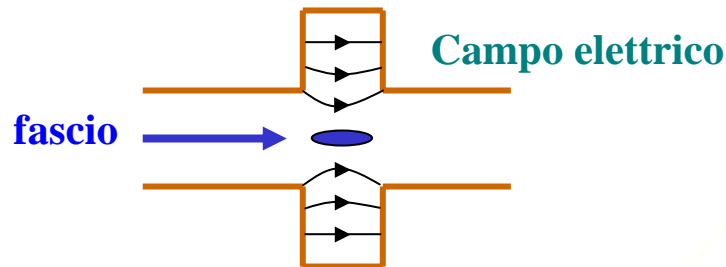


# Einstein in the 21st Century

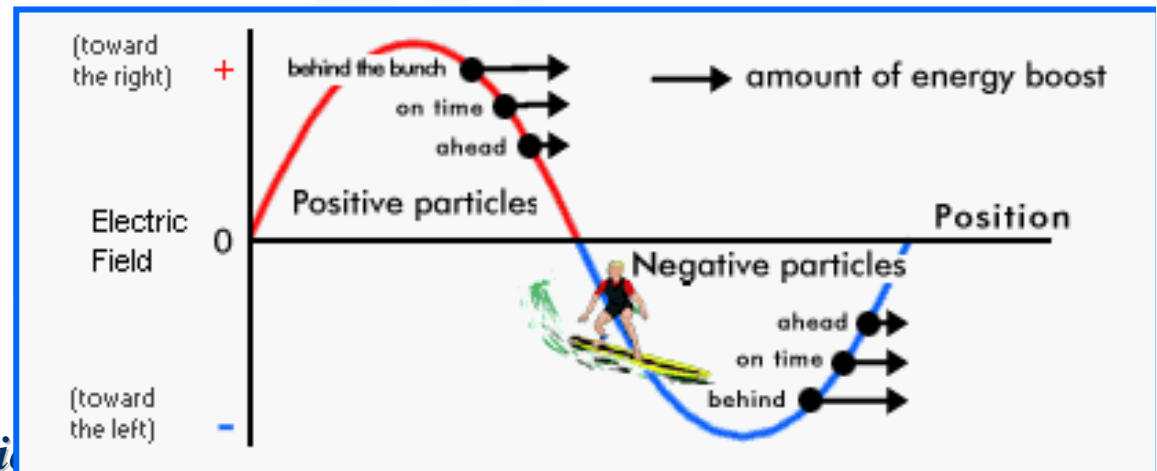
## Cavità a radiofrequenza



Si è poi passati al concetto di accelerazione con campi a radiofrequenza: La struttura accelerante consiste in una cavità risonante in cui viene accumulata l'energia di campi elettromagnetici RF.



Il campo accelerante è una sinusoide. Le particelle che arrivano in anticipo rispetto alla “posizione ideale” (detta fase sincrona) verranno accelerate di meno mentre quelle in ritardo vedranno un campo più intenso. **Le particelle oscilleranno quindi attorno alla fase corretta** raggruppandosi longitudinalmente in **pacchetti (bunches)**







# Einstein in the 21st Century

# Tipologie di acceleratori



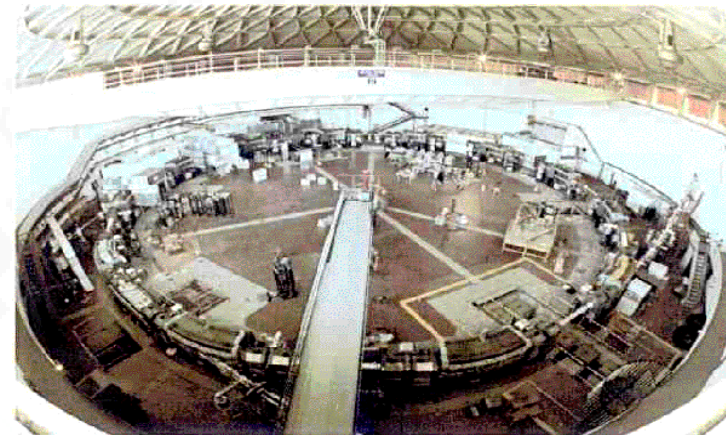
I diversi tipi di acceleratori si suddividono in base al processo di accelerazione in:

Lineari



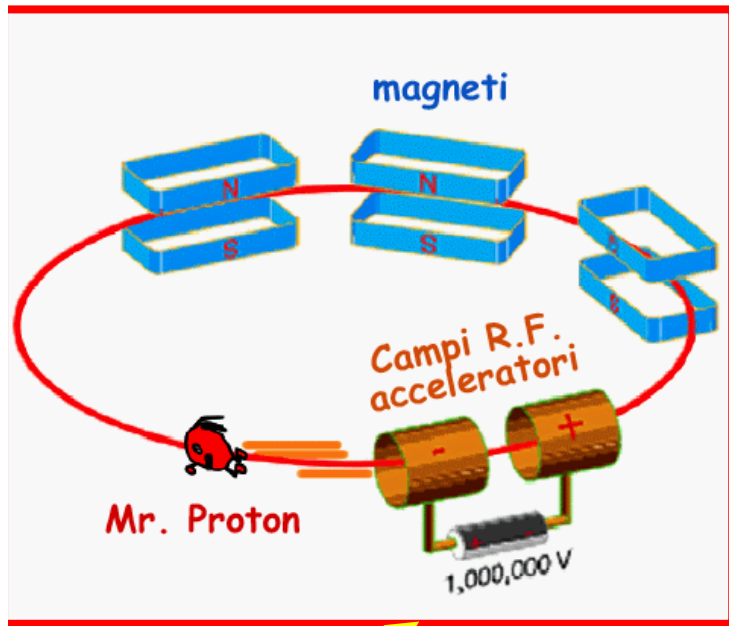
Circolari

*Ciclotrone 1930*  
*Betatrone 1940*  
*Sincrotrone 1945*  
*Microtrone 1946*





## Circolari



**Vantaggi:** Le particelle attraversano più volte la stessa cavità. Ad ogni giro tali pacchetti acquistano energia grazie al campo elettrico accelerante (a radiofrequenza)

**Svantaggio:** ne perdono a causa della **RADIAZIONE DI SINCROTRONE EMESSA** (a sua volta costituisce una sonda utilizzata in vari campi) nei magneti curvanti.

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

Energia persa per giro

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

Energia

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria

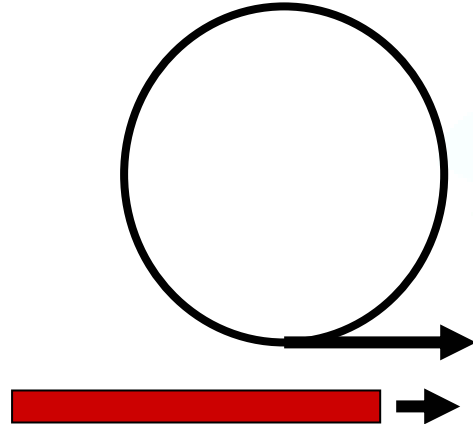
*Ezio Torassa, Paolo Checchia*



# Modo di utilizzo



sincrotrone



LINAC

$e^-, e^+, p \dots$

Bersaglio fisso



$\Sigma$   
 $\Lambda$   
 $\pi^{+/-}$   
 $p, n, \text{etc}$

rivelatori

in gergo:  
“targhetta” fissa



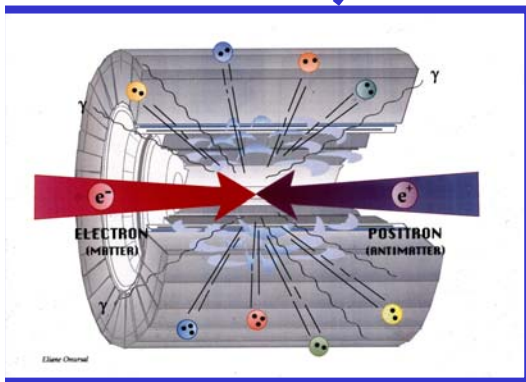
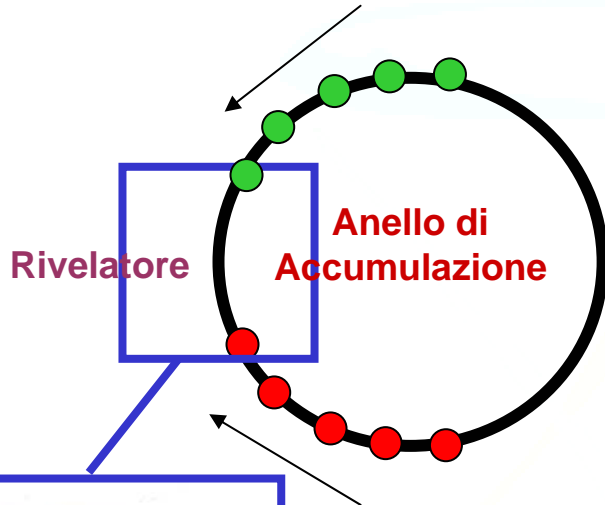


# Einstein in the 21st Century

## Modo di utilizzo : Collisori



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



Fixed Target



Available Energy

29 GeV

$$E_{CM} \approx \sqrt{2E_1m_2}$$

Colliding Beams



900 GeV

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

diverso da ciò che avviene nel (nostro) mondo non relativistico (es.: auto contro auto)



### Collider elettrone-positrone (es. LEP)



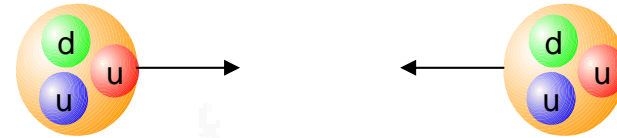
$e^{+/-}$  sono particelle elementari

$$E_{\text{collisione}} = E_{e^-} + E_{e^+} = 2 E_{\text{fascio}}$$

es. in LEP,  $E_{\text{collisione}} \sim 90 \text{ GeV} = m_Z$

Macchine "pulite", si può aggiustare l'energia dei fasci così da produrre la particella desiderata, ma l'energia massima raggiungibile è limitata dall'irraggiamento degli  $e^{+/-}$ .

### Collider protone-protone (es. LHC)



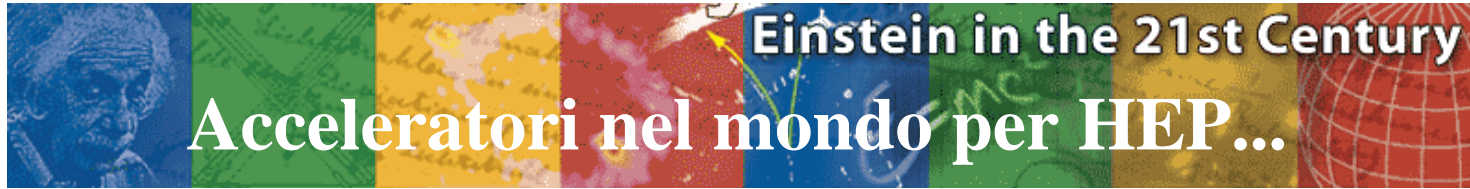
p sono costituiti da quark e gluoni

le collisioni avvengono tra quark e gluoni

$$E_{\text{collisione}} < (E_{\text{protone1}} + E_{\text{protone2}})$$

Macchine complesse, si possono raggiungere energie per fascio molto alte ma la situazione finale è sperimentalmente "caotica".





# LEP al CERN di Ginevra 1988-2001

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



Padova 14 Dicembre 2004

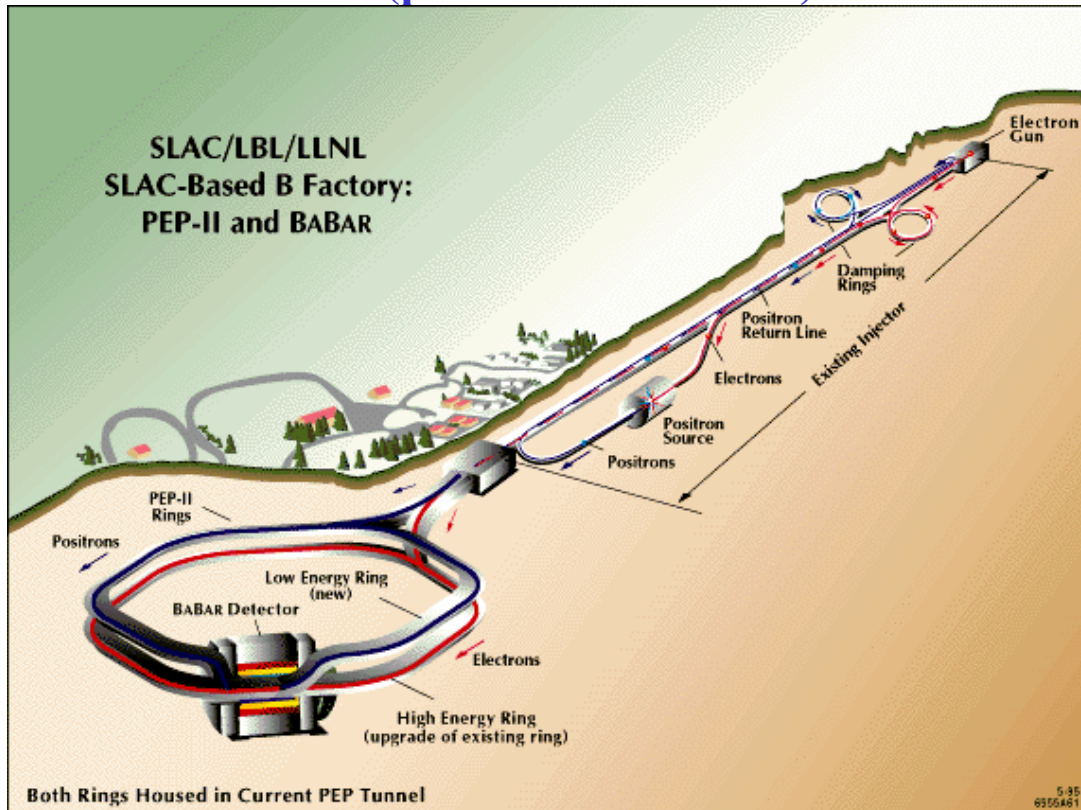
*Ezio Torassa, Paolo Checchia*





circonferenza=2.2Km

Linac L~ 3Km (per avere E serve L)



Due anelli di accumulazione di  $e^+/e^-$  uno sopra l'altro.

$E_{CM} \sim 10 \text{ GeV}$

L'annichilazione di  $e^+/e^-$  produce quarks-b, il cui decadimento è di interesse per i fisici sperimentali.

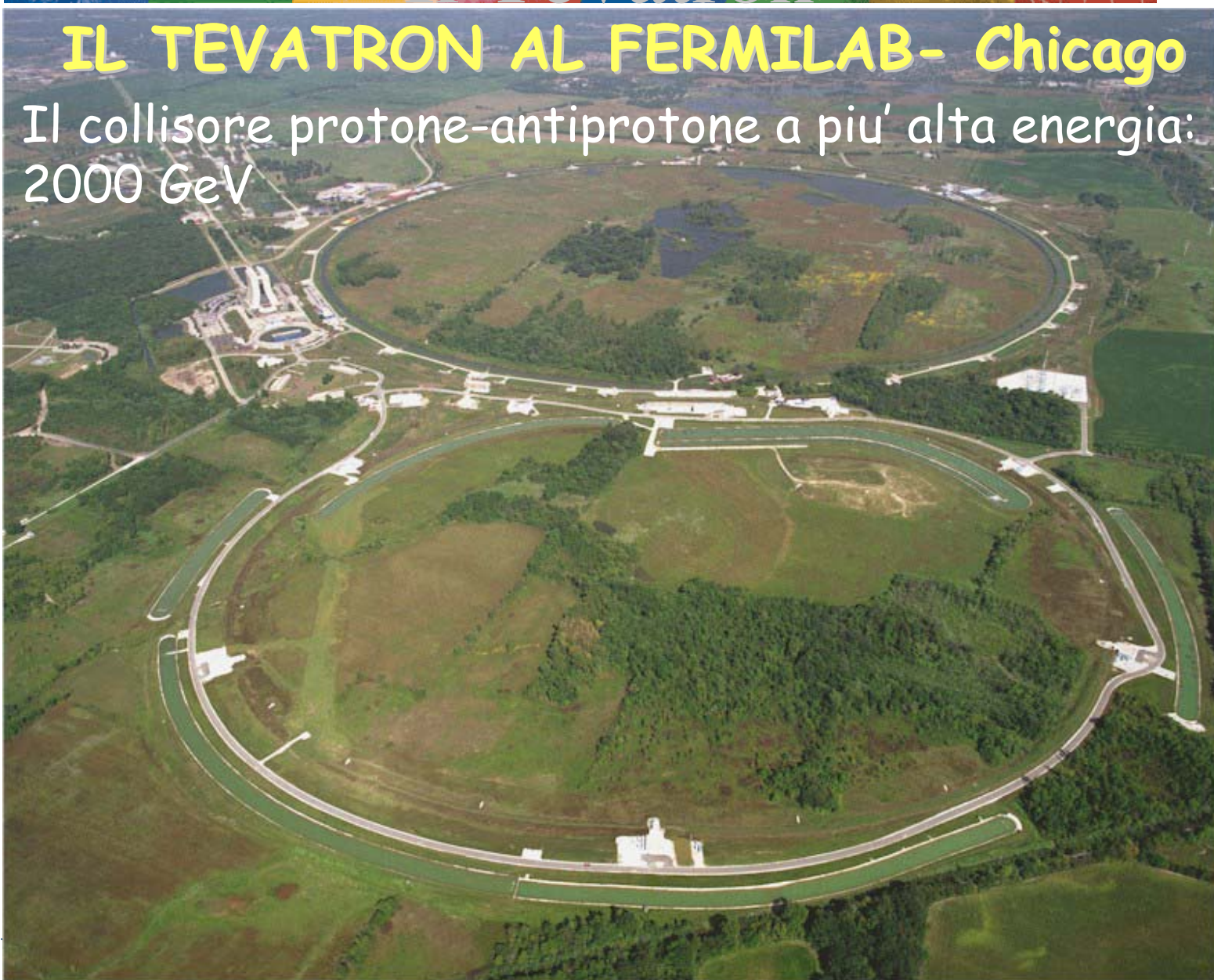




# Il Tevatron

## IL TEVATRON AL FERMILAB- Chicago

Il collisore protone-antiprotone a piu' alta energia:  
2000 GeV



Pado





Einstein in the 21st Century

# Large Hadron Collider



Padova 14 Dicembre 2004

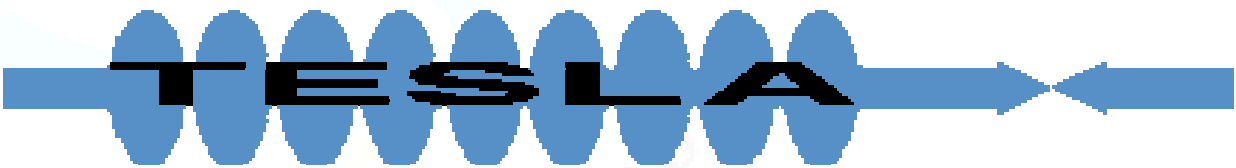
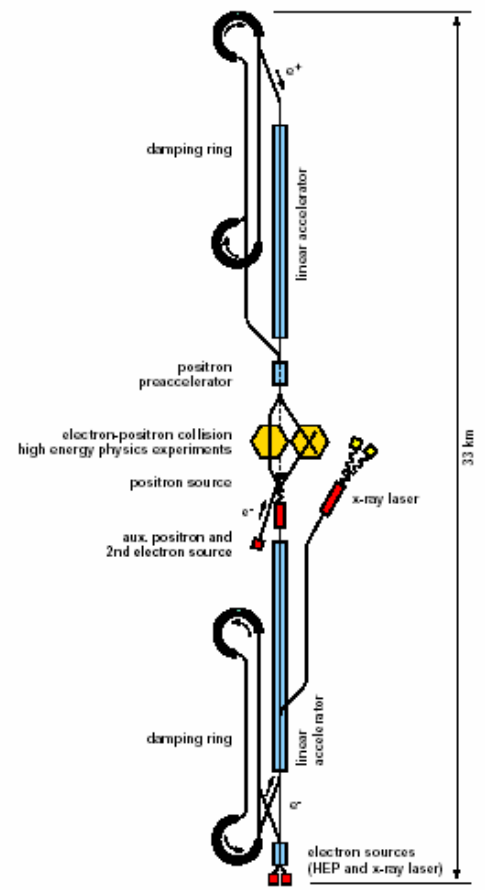
*Ezio Torassa, Paolo Checchia*



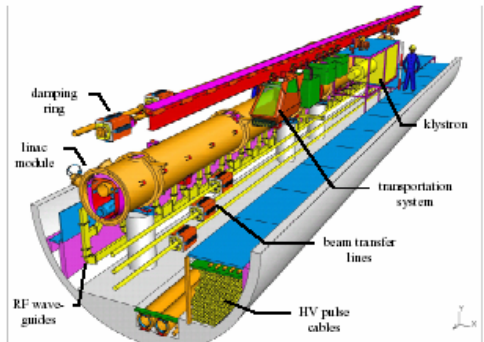


Arrivare a energie dell'ordine del TeV per e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>  
10 volte di più del LEP

→ Linear colliders



$E_{CM} = 1 \text{ TeV}$   
 $L = 33 \text{ Km}$



perchè "DRITTO"?

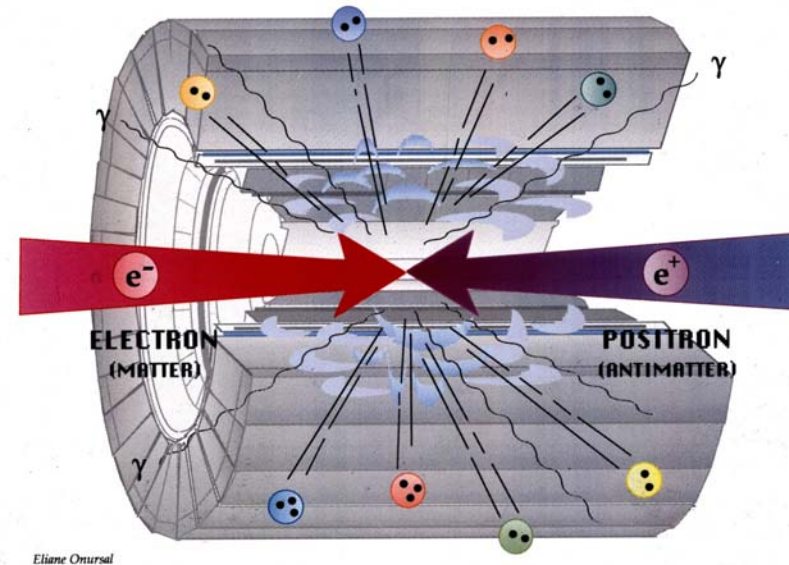
Padova 14 Dicembre 2004

Ezio Torassa, Paolo Checchia



## ■ Una volta prodotte le particelle cosa dobbiamo misurare?

- Carica
- Direzione
- Energia
- Impulso
- Massa (tipo di particella)
- Tempo di vita



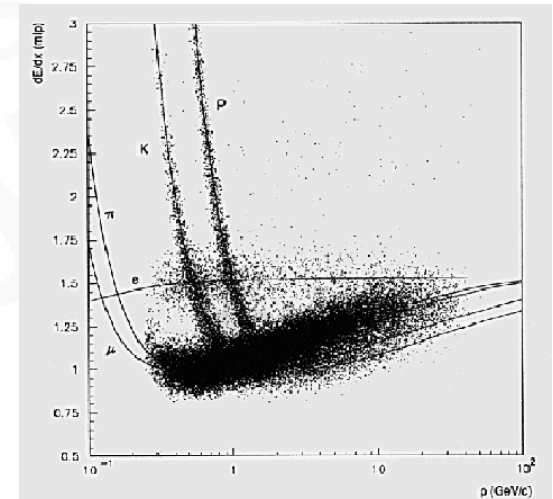


■ **Una volta prodotte, come possiamo “vedere” le particelle?**

Nonostante siano “piccole” (es  $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$  kg) le particelle cariche lasciano una parte della loro energia per ionizzazione (collisioni anelastiche con gli elettroni degli atomi del materiale che attraversano)

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} T_{\max} - \beta^2 - \delta/2 \right]$$

dipende dalla velocità  $\beta=v/c$  della particella in questione



che siamo in grado di amplificare e rivelare (es. castello di carte - mano)

gli elettroni in più producono fotoni per “frenata” ogni volta che interagiscono con i nuclei (analogia con rad. di sincrotrone) e i fotoni producono elettroni (e positroni) .....

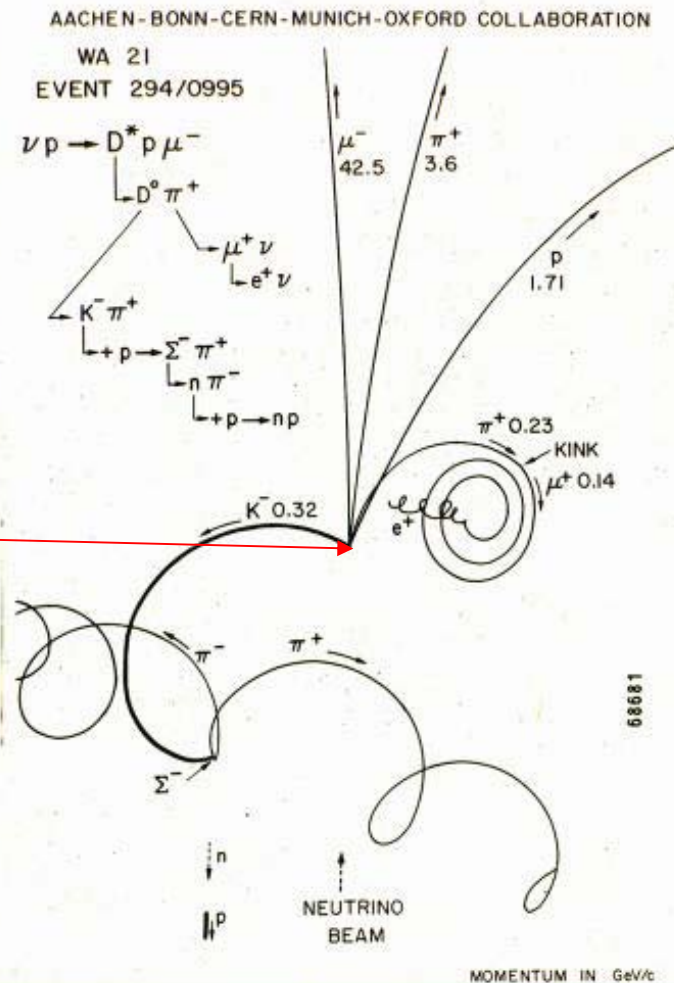
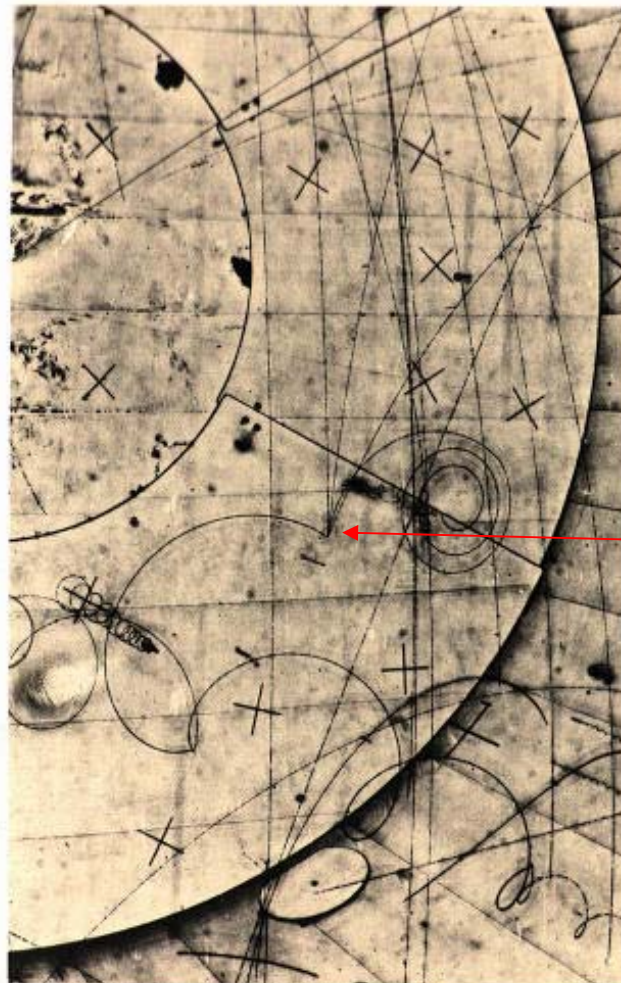




# Rivelatori storici

## Camera a Bolle

strumento “glorioso” che permetteva di vedere e fotografare le particelle. Sfruttando la **ionizzazione** delle particelle cariche in un liquido (H in questo caso) prossimo all'ebollizione



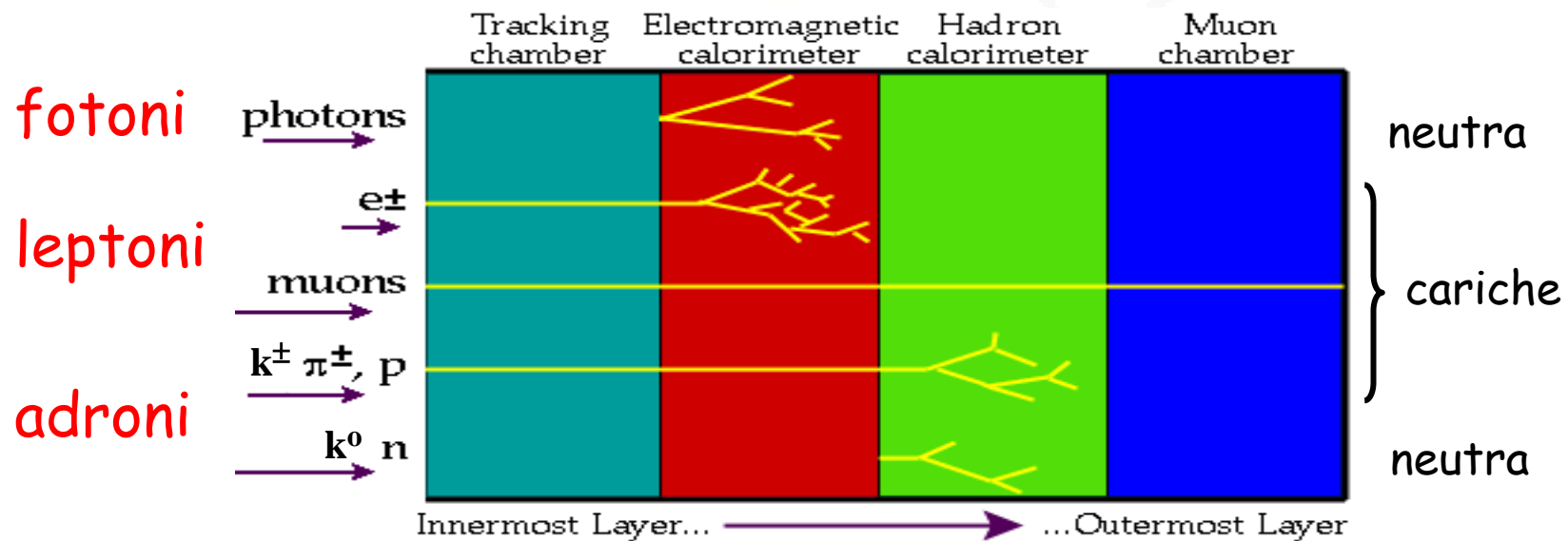


# Einstein in the 21st Century

## Tipologie di rivelatori

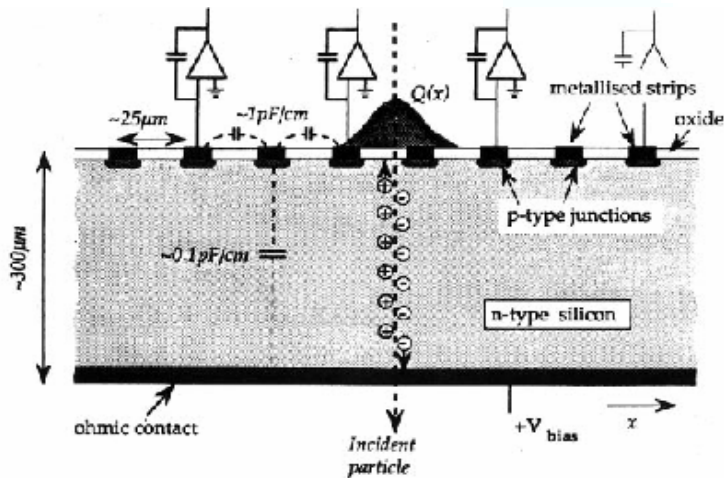


Le particelle visibili vengono misurate tramite rivelatori diversi ed identificate dai loro comportamenti caratteristici dovuti al tipo di interazione con la materia.

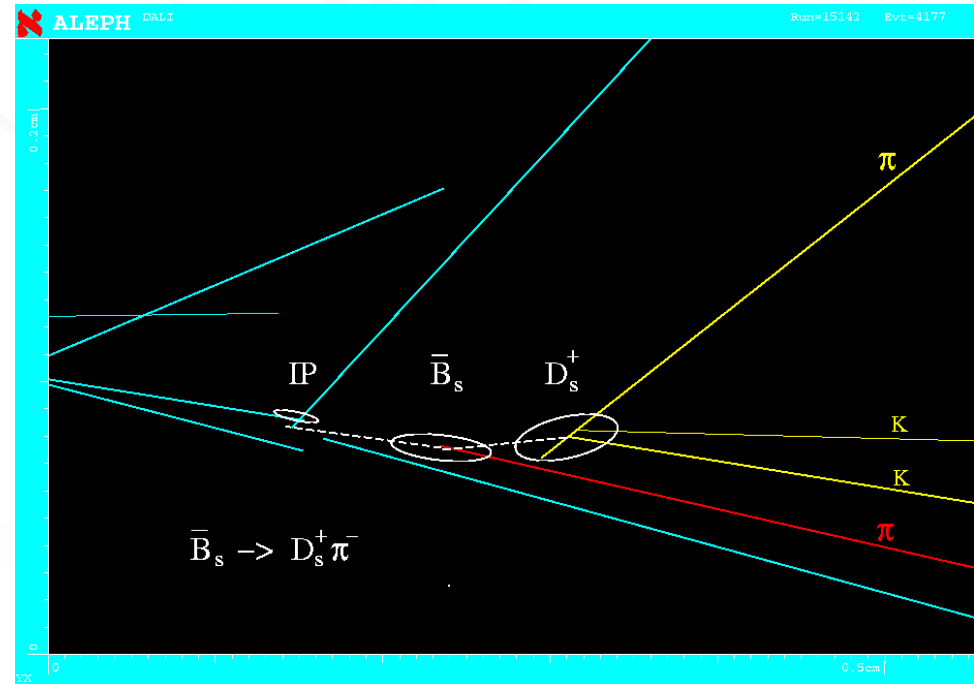




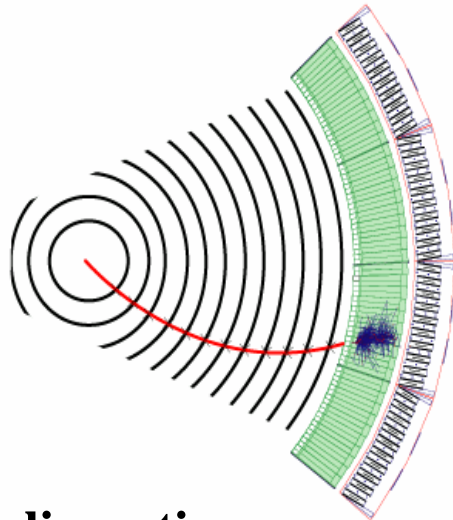
Particelle di particolare importanza prodotte nelle interazioni tra fasci (es quark pesanti, leptone  $\tau$ ) decadono dopo tempi cortissimi ( $10^{-12}$ - $10^{-13}$  sec). E' possibile ricostruirne il percorso ( $100\mu\text{m}$  - pochi mm) grazie a rivelatori al silicio ad altissima risoluzione ( $5\text{-}20\mu\text{m}$ )



il principio base è sempre la ionizzazione

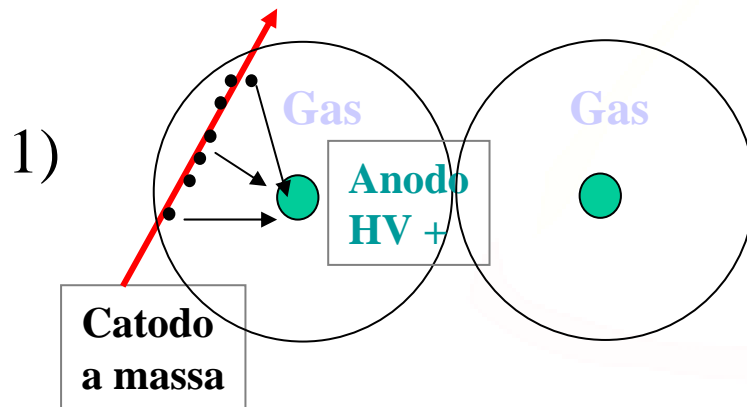






**Produce un segnale in corrispondenza dei punti di passaggio della particella carica, permette la precisa determinazione spaziale del punto. Tramite la connessione dei punti si ottiene la misura della traiettoria.**

**I singoli punti possono essere prodotti mediante diverse tipologie di rivelatori di tracciamento. Es.: 1) rivelatori a gas 2) rivelatori al silicio**



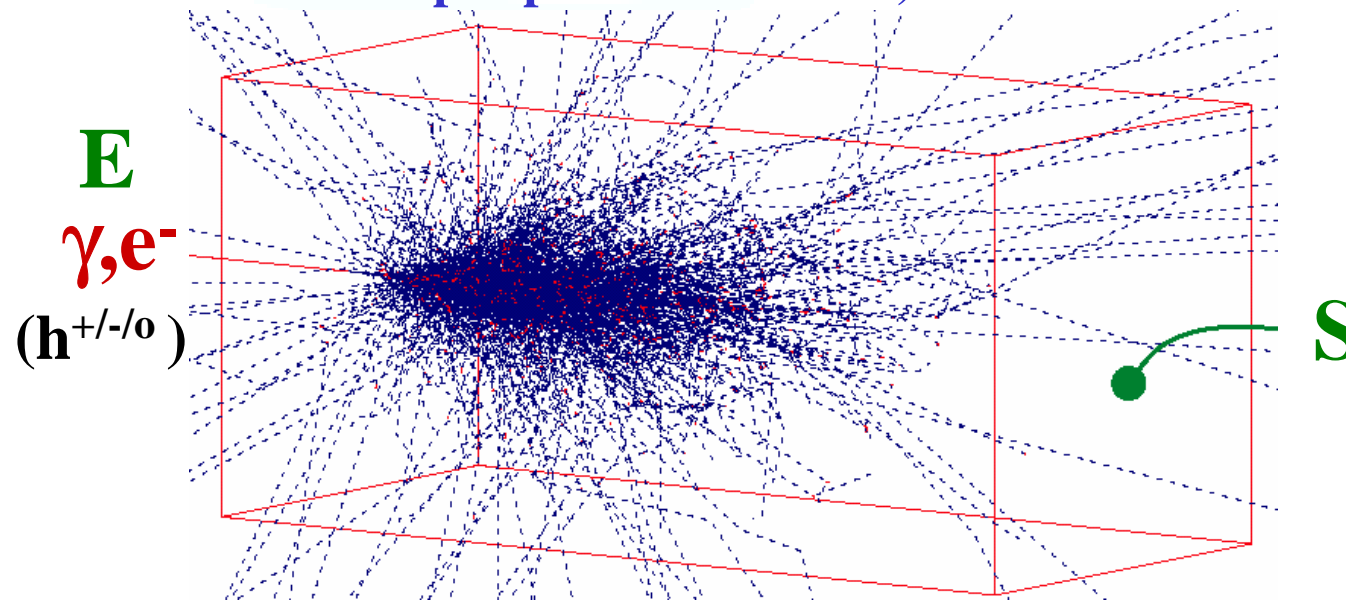
**Se immerso in un campo magnetico le particelle cariche curvano ed il loro raggio di curvatura è legato al loro impulso  $R(m) = p(\text{GeV})/0.3B(T)$  Si determina anche la carica della particella**

**domanda: anche se sappiamo impulso e carica come facciamo a sapere che particella è?**



# Calorimetri

A differenza dei Tracciatori che devono essere “trasparenti” per misurare le particelle senza modificarne lo stato, i **Calorimetri** sono blocchi di materiale **denso** che devono degradare tutta l’energia in entrata fino a poterla rivelare (metodo distruttivo: vale anche per particelle neutre)



L’energia **E** della particella incidente viene convertita in segnale **S** del rivelatore

Il segnale misurabile  $S \propto E$



# Einstein in the 21st Century

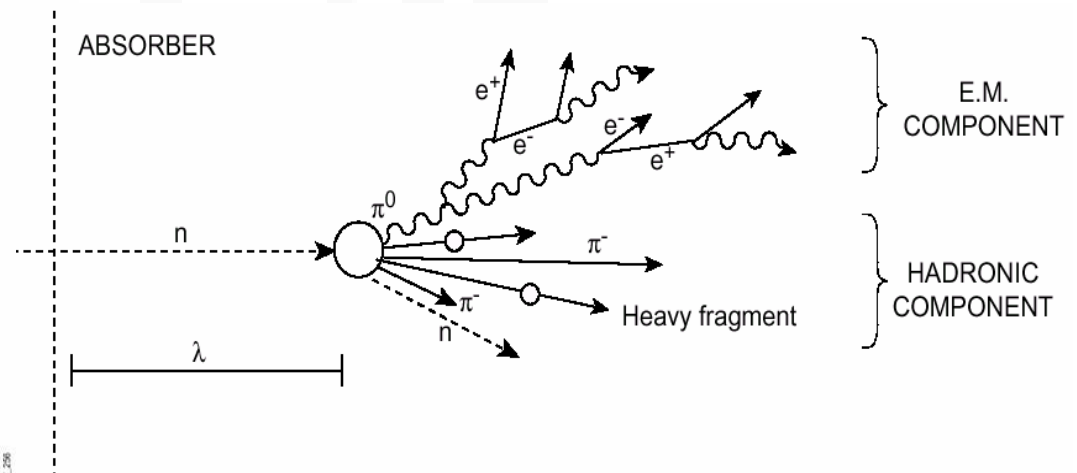
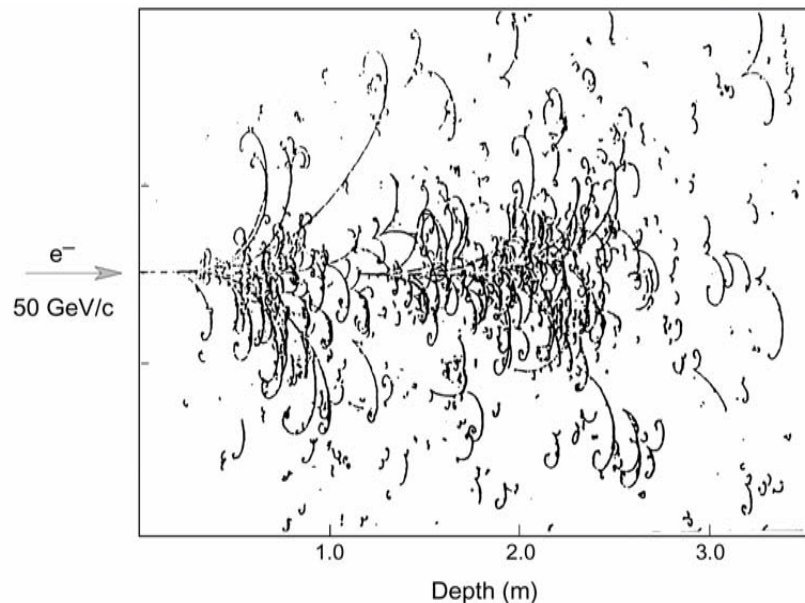
## Calorimetri



Due tipi di calorimetri: **elettromagnetici** (per elettroni e fotoni) e **adronici** (per tutte le particelle con interazione forte-in particolare per quelle neutre che altrimenti non si potrebbero misurare-)

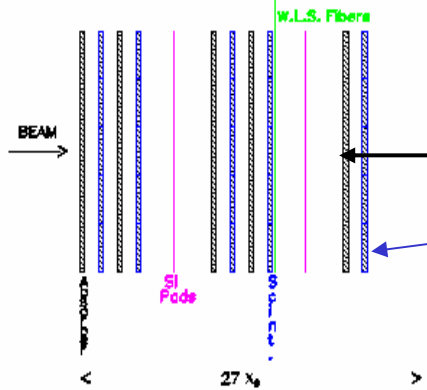
**elettromagnetici**: sfruttano tra l'altro la radiazione di fotoni per frenata da parte degli elettroni e la caratteristica dei fotoni in un mezzo di creare coppie di elettroni e positroni (sciame elettromagnetico). Sono i più compatti

**adronici**: assorbono l'energia tramite le interazioni nucleari e necessitano di molto materiale per contenere una ragionevole frazione di energia

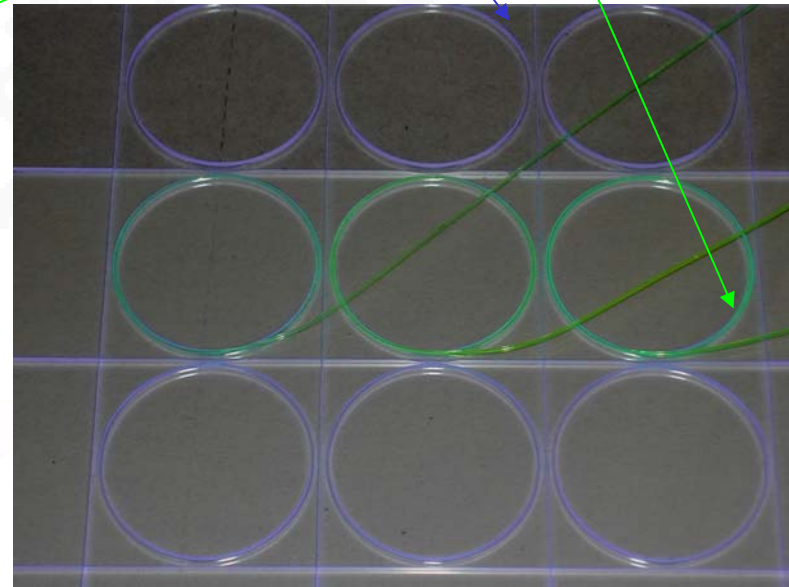


sa, Paolo Checchia





**tipica configurazione di un cal. el.m.:** assorbitore (materiale denso) al Pb e scintillatore (materiale che al passaggio di particelle cariche emette luce visibile che può essere trasportata a strumenti in grado di misurarla (fotorivelatori) tramite **fibre ottiche**

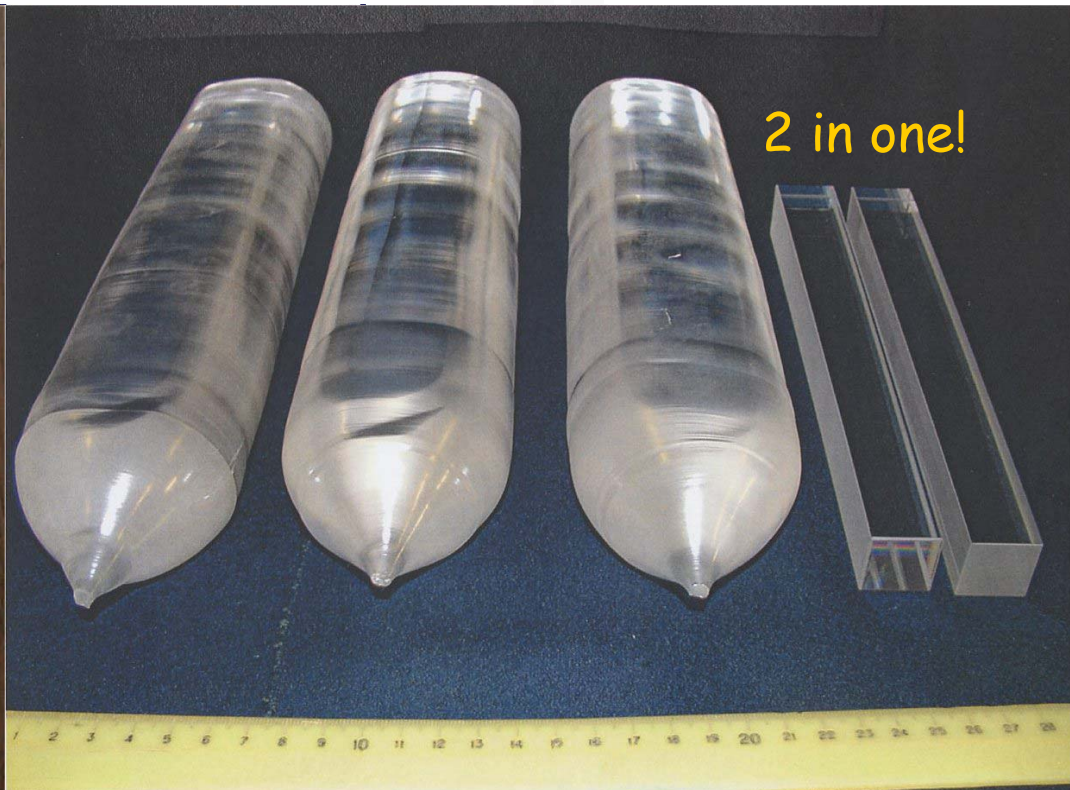
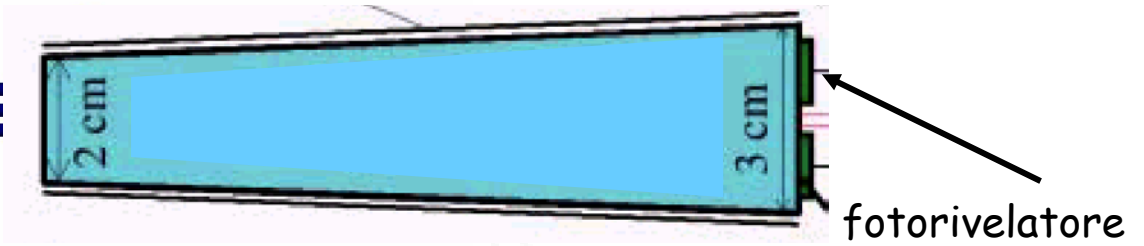
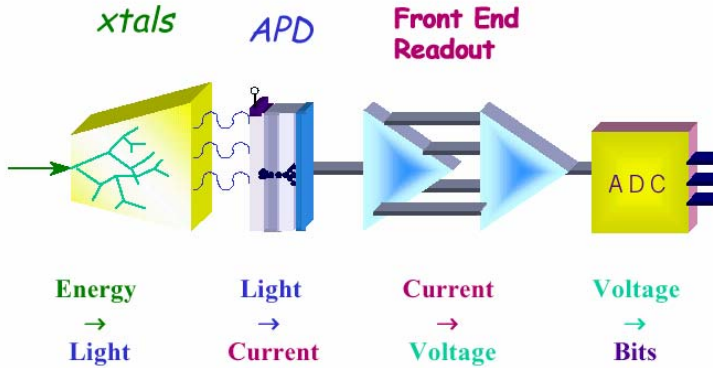






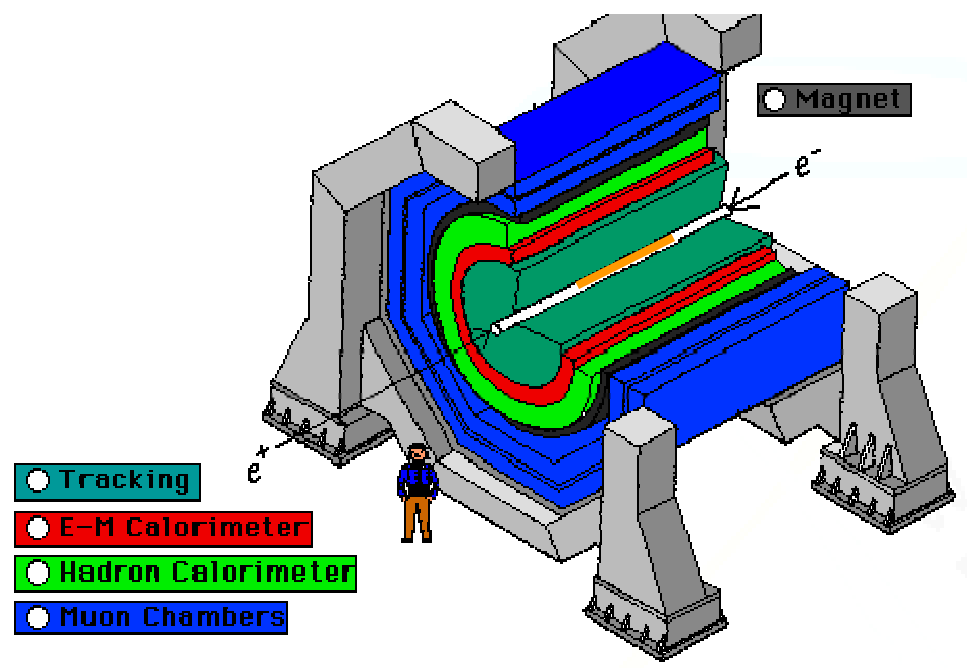
# Calorimetri

## Cristallo di Tungstato di Piombo (PWO)

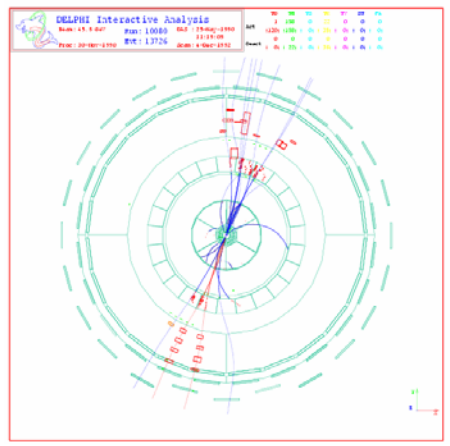




# Un rivelatore tipico per collisori



struttura “a cipolla”: all’interno i rivelatori di vertice, poi i tracciatori, i calorimetri e.m. e adronico il magnete e... il ferro (per costringere il campo magnetico) con i rivelatori di muoni (tipi di rivelatori di tracce che individuano i muoni sulla base del fatto che le altre particelle dovrebbero essere state assorbite)



2004

Ezio Torassa, Paolo Checchia

## che cosa manca?



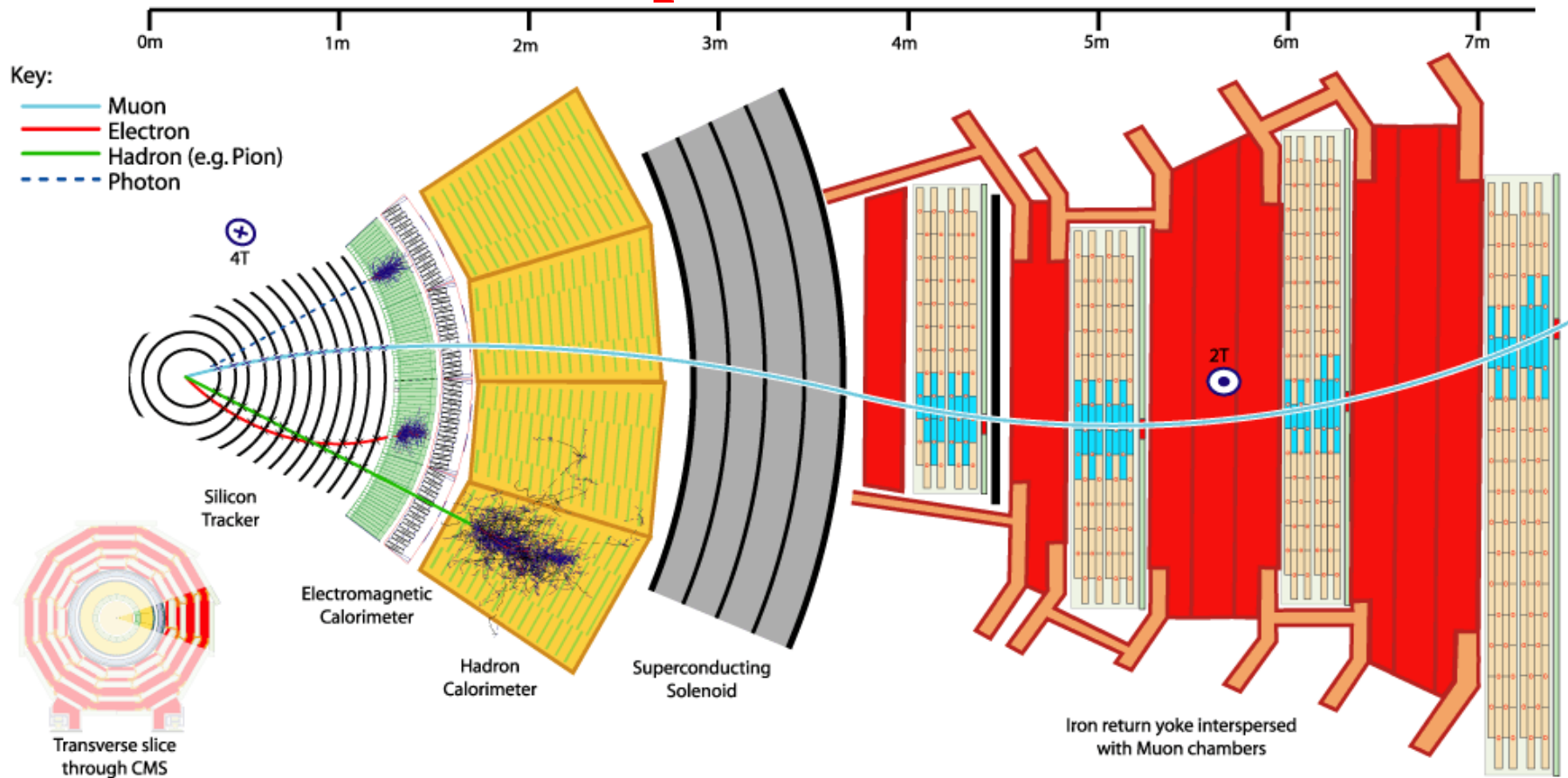


# Einstein in the 21st Century

# Un rivelatore in costruzione

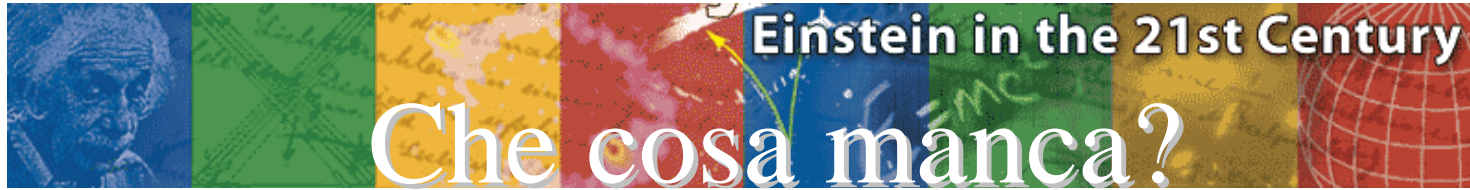


## per LHC



Padova 14 Dicembre 2004

*Ezio Torassa, Paolo Checchia*

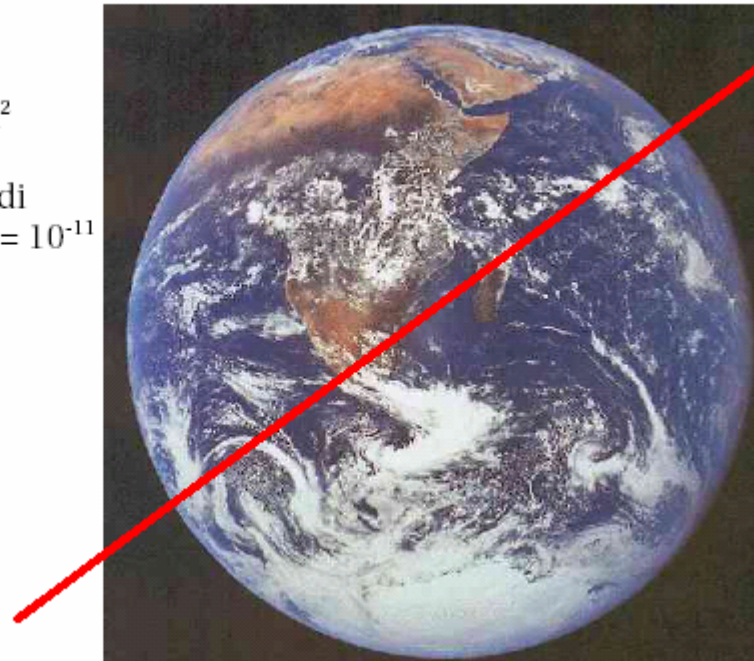


# L'inafferrabile neutrino (o suoi simili nei rapporti col mondo)

Neutrino  
1 MeV

$$\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$$

Probabilità di  
interazione =  $10^{-11}$



si può ottenere informazione per differenza dalla  
conservazione di E e p se si è misurato **TUTTO** il resto

**domanda: come si  
possono fare esperimenti  
che vedono i neutrini?**

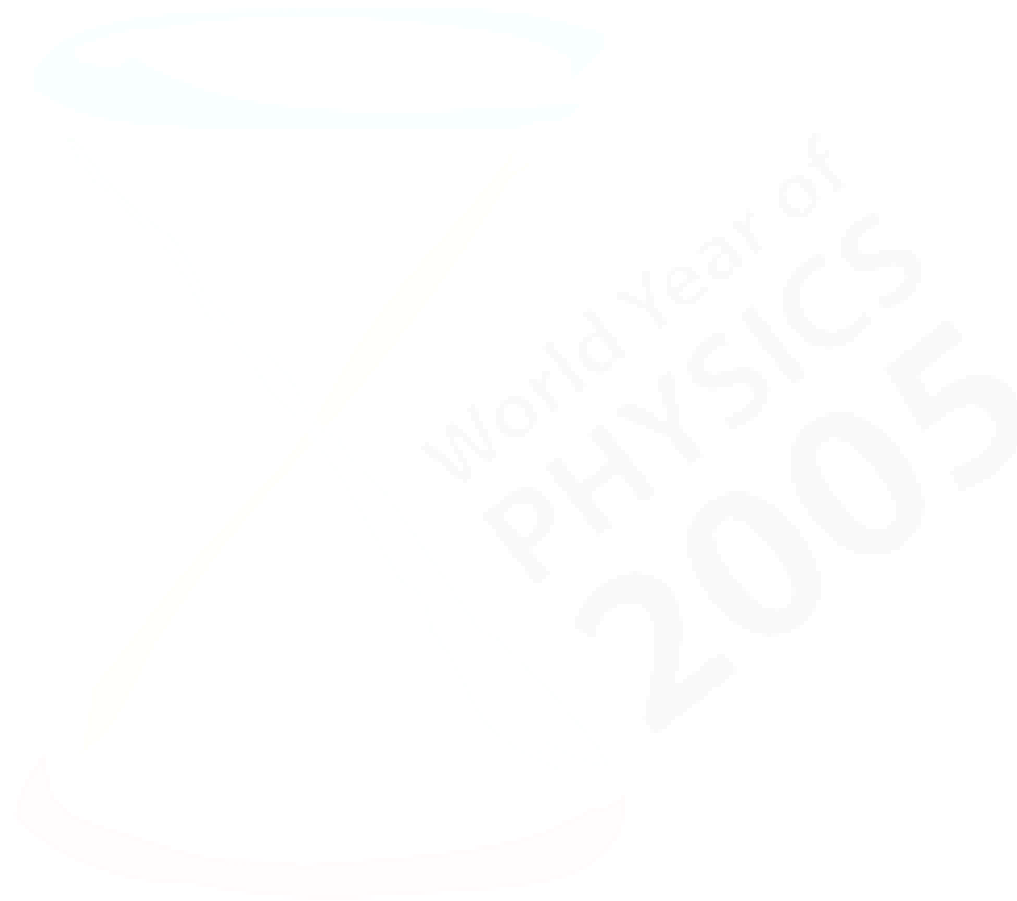


- **Gli acceleratori sono gli strumenti fondamentali per produrre e studiare le particelle elementari**
- **L'energia è indispensabile sia per produrre oggetti più pesanti che per ottenere strumenti di indagine più efficaci**
- **Le particelle ancorchè piccole si “vedono”**
- **Da tutto questo viene anche dell'altro.....**  
(applicazioni in altri campi dalla Fisica dei materiali, Biologia, Medicina ecc. , oltre al caro e –ormai – vecchio web)





coda



Padova 14 Dicembre 2004

*Ezio Torassa, Paolo Checchia*



## ■ Perché accelerare?

**(una risposta) per ottenere altre “luci” (sonde) che ci permettano di “vedere” dove le altre non possono**

## ■ Solo per produrre sonde?

**no anche per produrre altri/nuovi oggetti**

## ■ Cosa possiamo accelerare?

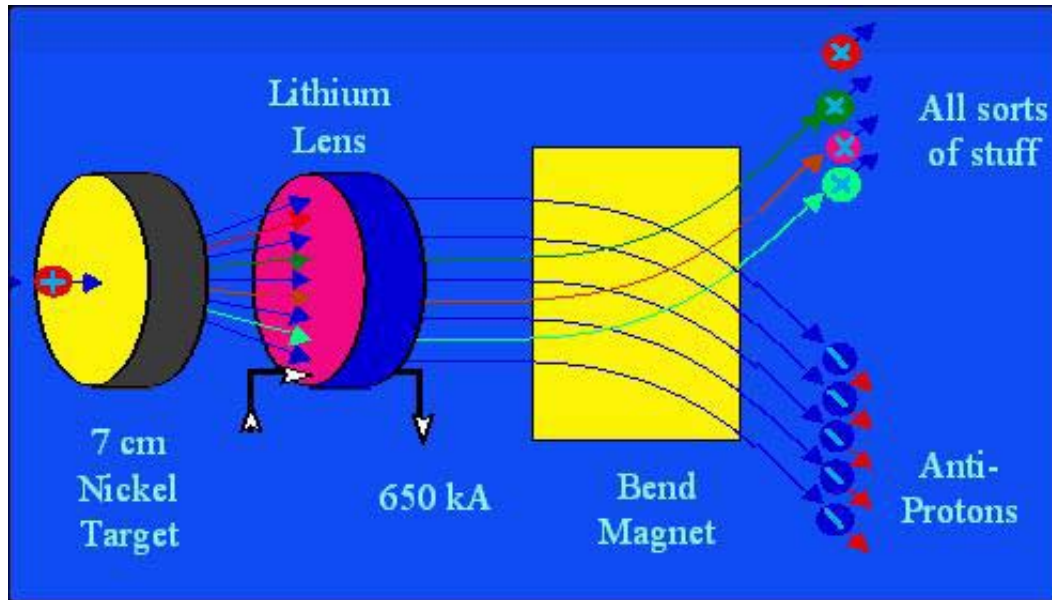


Clip video

**tutte le particelle cariche**

## ■ Sono le sole sonde che sappiamo fare?

**no, si possono utilizzare i prodotti secondari  
(anche neutri)**



## SORGENTE DI ANTI-PROTONI

Un fascio di protoni collide su una targhetta di Nichel: si creano molte particelle, tra cui i p, a diversi angoli. Seleziono solo gli antiprotoni mediante un magnete

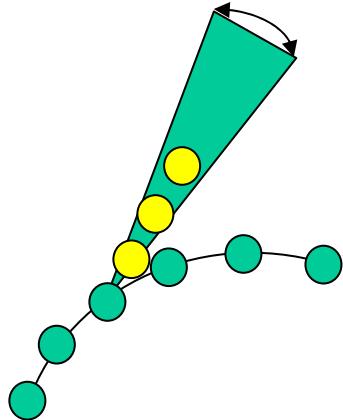
Sorgente di antiprotoni di Tevatron

L'efficienza e' 20 antiprotoni su 1 milione di protoni incidenti





## Radiazione collimata

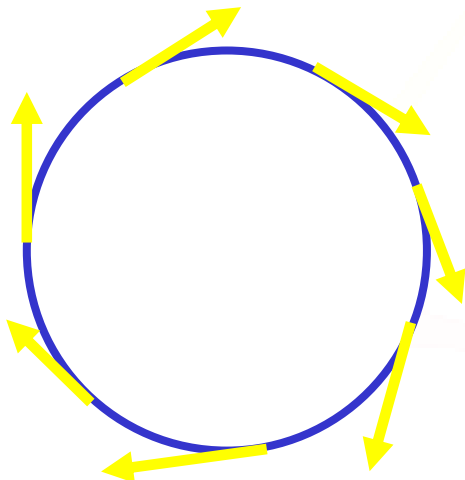


Una particella carica che viaggia lungo una traiettoria curva emette fotoni, la cui energia dipende dalla massa, dall'energia della particella e dal raggio di curvatura della traiettoria



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

In un anello di accumulazione l'energia persa viene compensata dalle Cavit  a RF



## Energia persa per giro

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

Energia

Massa

Raggio di curvatura della traiettoria



## Caratteristiche

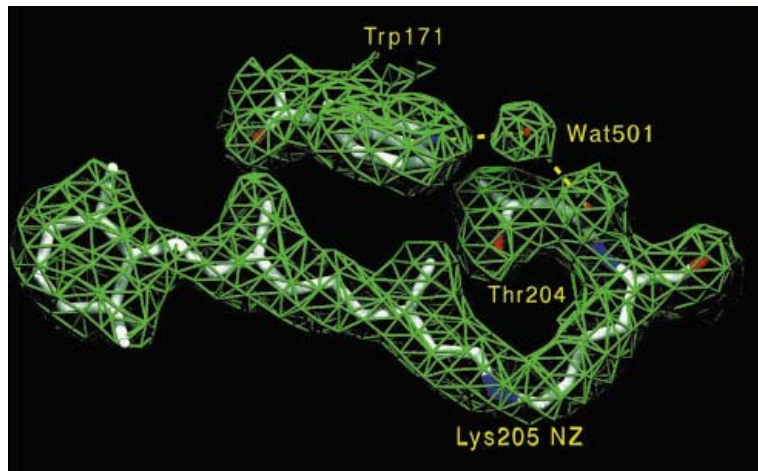
- Alta brillantezza (densità di fotoni per unità di tempo)
- Spettro continuo dall'infrarosso ai raggi X duri
- Emissione pulsata – impulsi di circa 100 ps

## Esempio di utilizzo



Viene misurata l'intensità diffratta in funzione dell'angolo  $\Theta$

Da questi dati si possono ricostruire delle mappe di densità di carica e posizione degli atomi.



Struttura della rodopsina: è una proteina specializzata nella trasformazione della luce solare in segnale riconoscibile e trasportabile al cervello.

Limiti: necessità di avere un cristallo, molte proteine non si cristallizzano