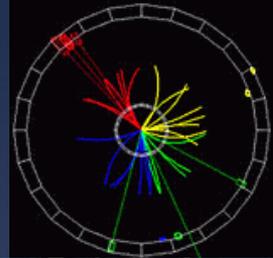


Hands on Particle Physics

European Particle Physics Masterclasses for High School Students

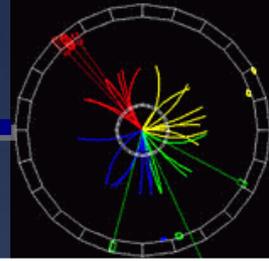


Esperimenti in Fisica delle Particelle

7 Marzo 2022, Martina Laurenza (INFN – Roma Tre)

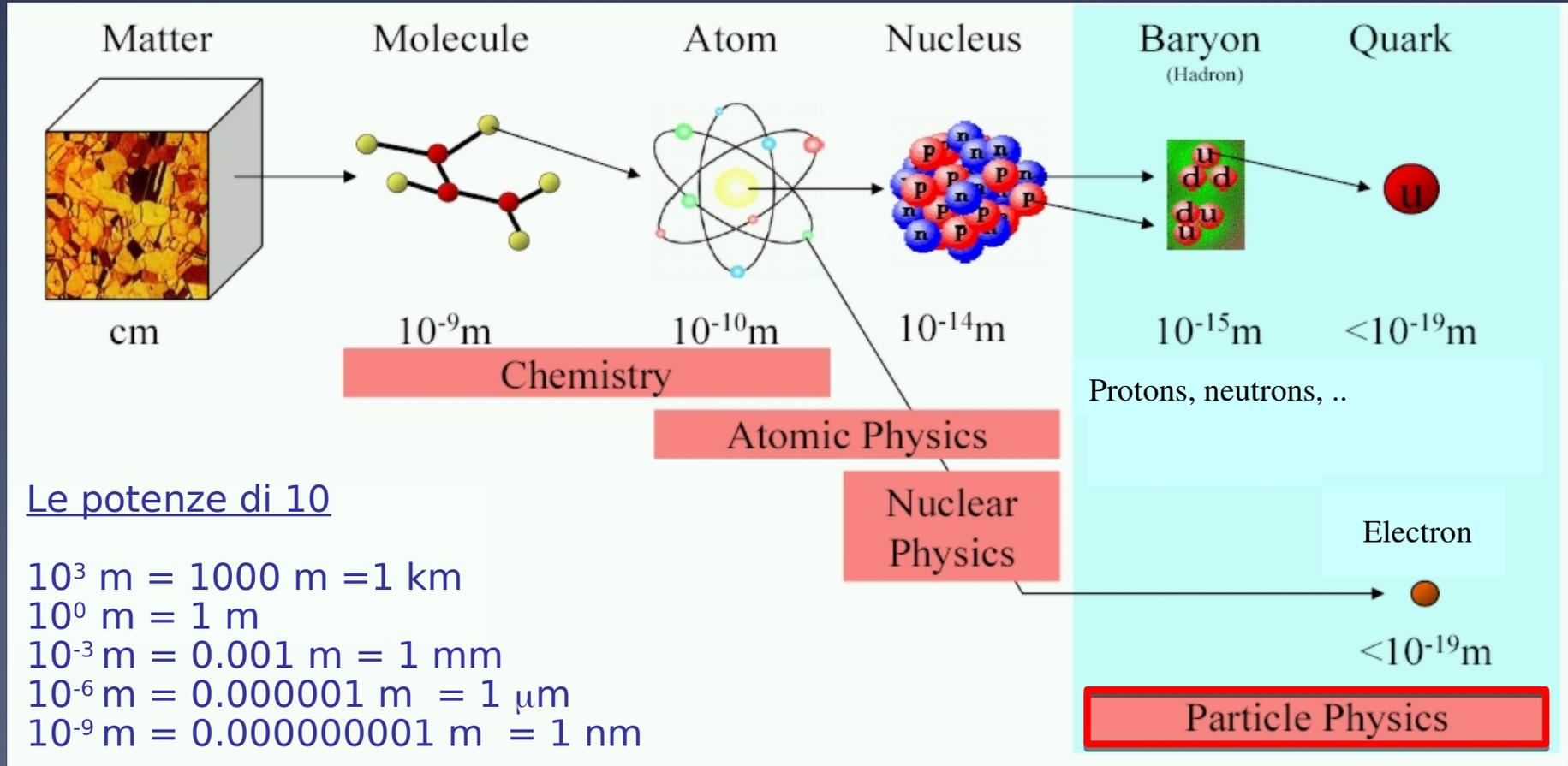


La “scala” del sistema da studiare



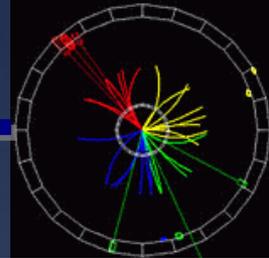
Hands on Particle Physics

Qual è la dimensione degli oggetti che vogliamo osservare ?

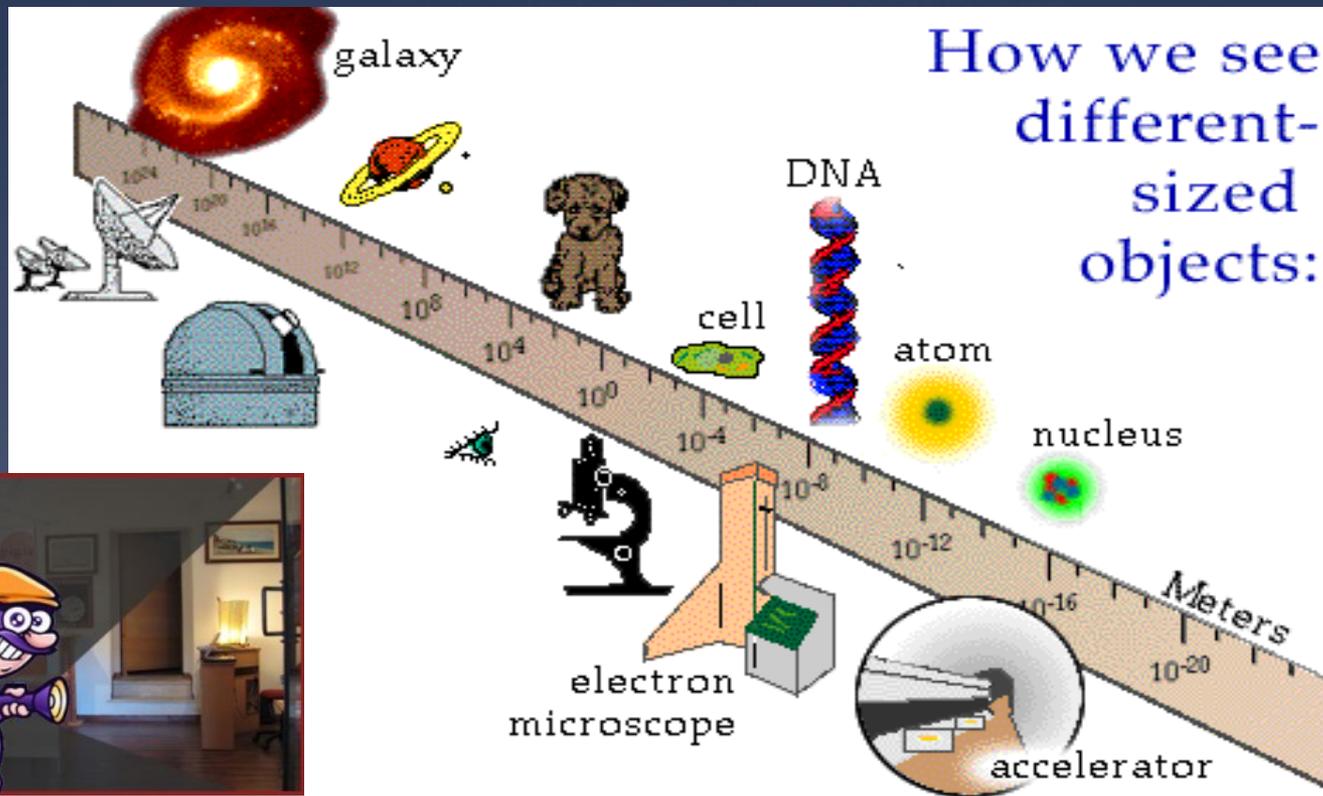


Come osserviamo gli oggetti ?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare



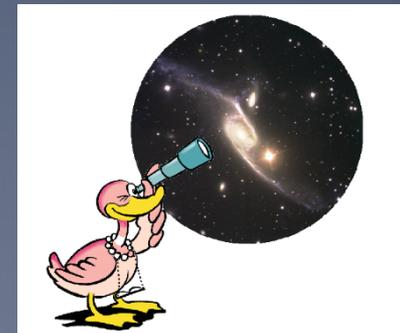
Hands on Particle Physics



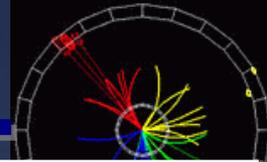
La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra 0.4–0.8 μm quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al μm .

Per osservare oggetti grandi lontani, gli astronomi usano i telescopi.

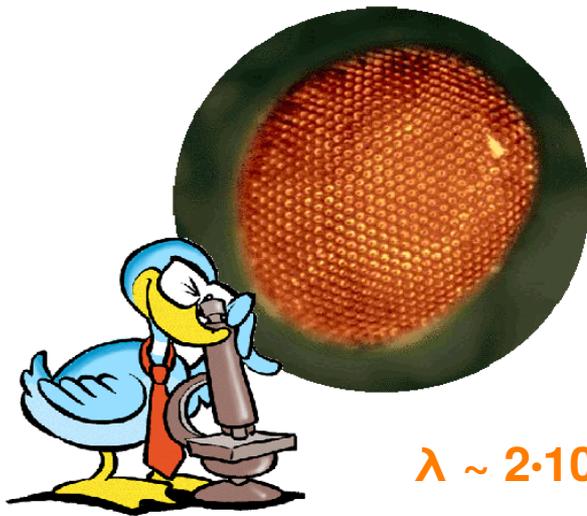
Ma come guardiamo gli oggetti microscopici?



Osservazione degli oggetti microscopici

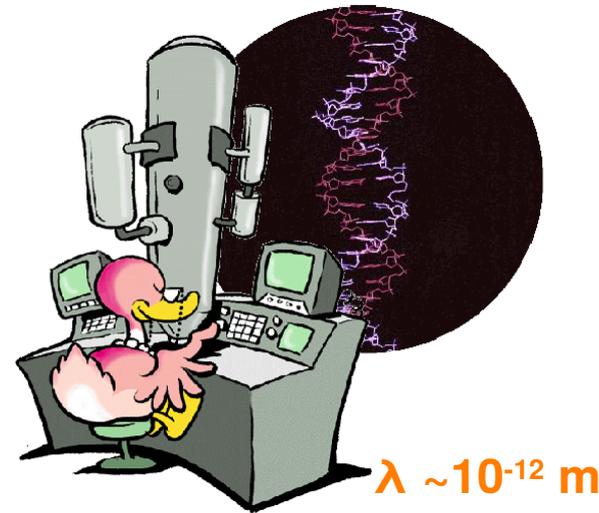


I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



$$\lambda \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

I **microscopi ad elettroni** ci consentono di osservare oggetti ancora piu' piccoli, fino al livello della struttura atomica. Usano piccoli fasci di elettroni come sonda



$$\lambda \sim 10^{-12} \text{ m}$$

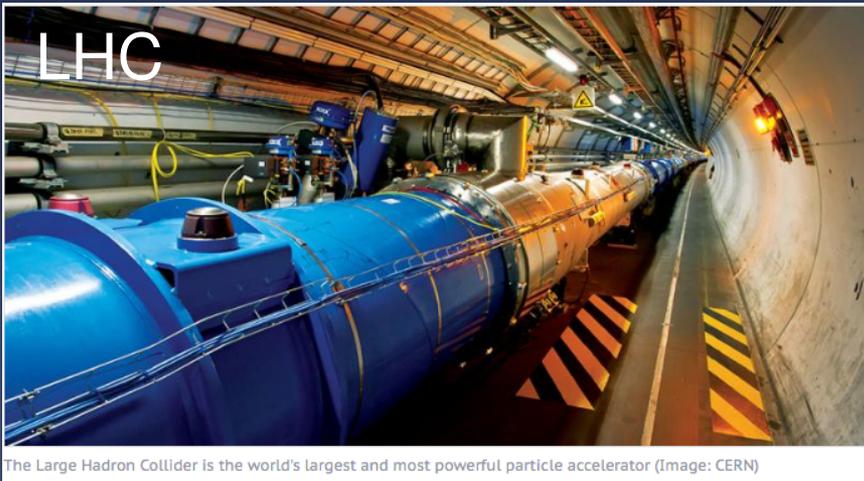
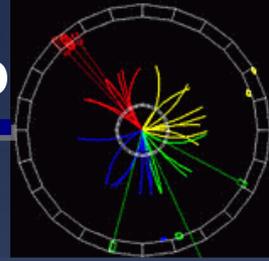
Gli elettroni di alta energia si comportano come onde, ma con una **LUNGHEZZA D'ONDA MOLTO PIU' PICCOLA DI QUELLA DELLA LUCE**

Per le leggi della meccanica quantistica, ogni particella può essere vista come un'onda con lunghezza d'onda λ inversamente proporzionale alla sua quantità di moto



PICCOLE DIMENSIONI ↔ GRANDI ENERGIE

Particelle di alta energia per esplorare il microcosmo



LHC

The Large Hadron Collider is the world's largest and most powerful particle accelerator (Image: CERN)

Per esplorare il microcosmo utilizziamo gli

ACCELERATORI DI PARTICELLE

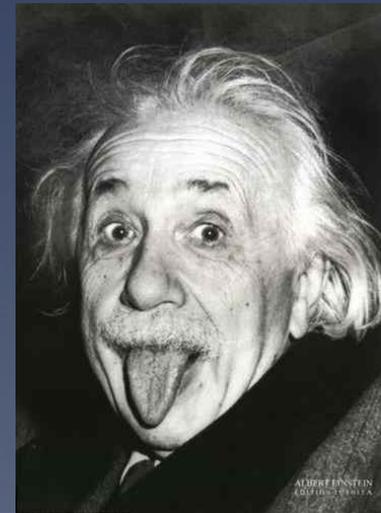
Perche' gli acceleratori di particelle ???

1. Per disporre di una radiazione di lunghezza d'onda sufficiente all'esplorazione della materia su distanze sempre minori: $\lambda = hc/E$.

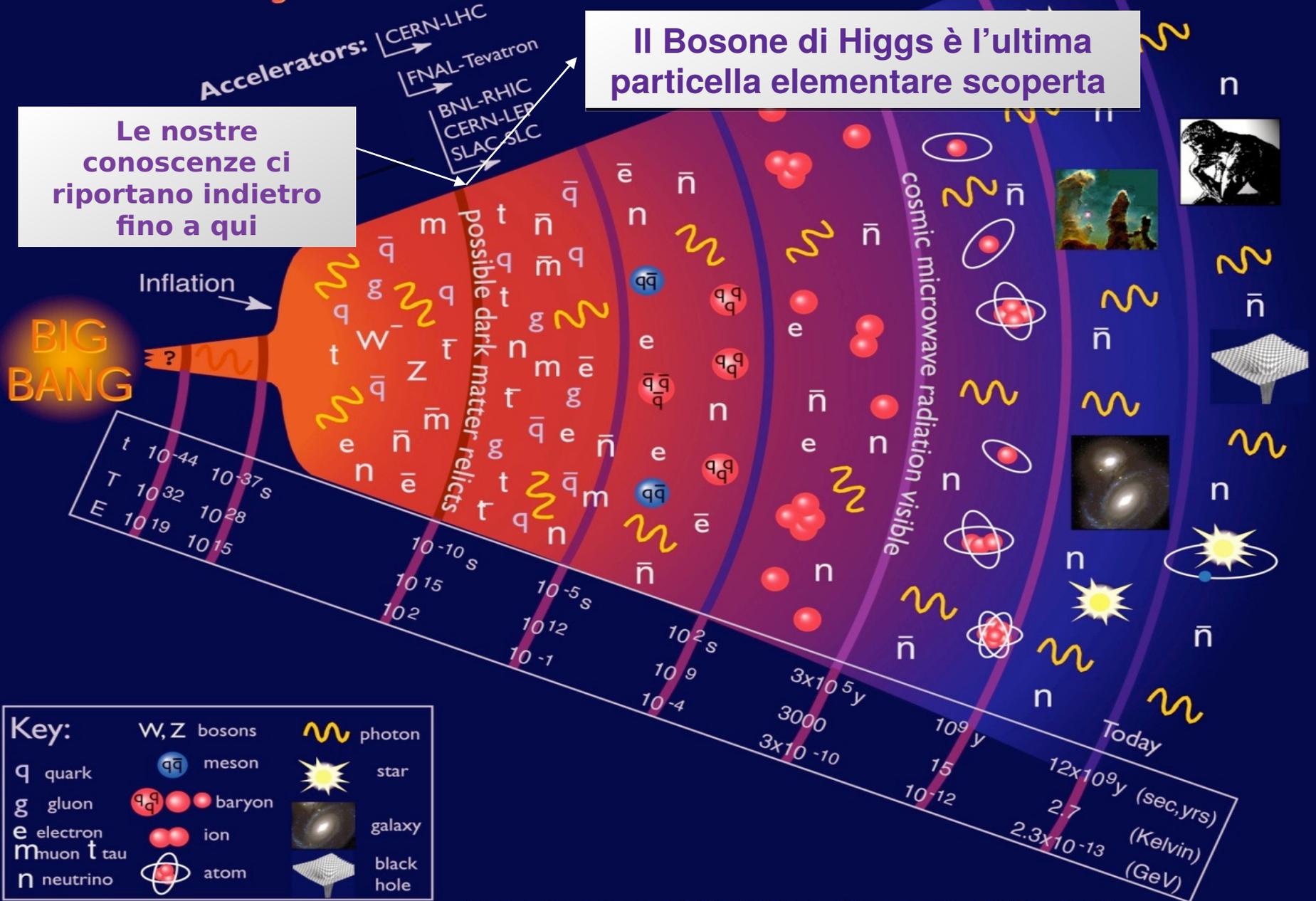
Con $E \sim 10\text{TeV}$, $\lambda \sim 10^{-19}\text{ m}$

2. Per disporre dell'energia necessaria a **produrre** particelle pesanti instabili, non presenti nella materia ordinaria. Equivalenza fra massa e energia

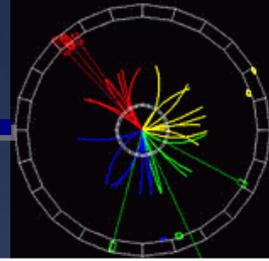
3. Per fare un viaggio indietro nel tempo...



History of the Universe

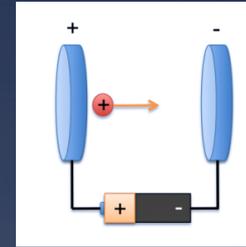


Accelerare e "guidare" le particelle



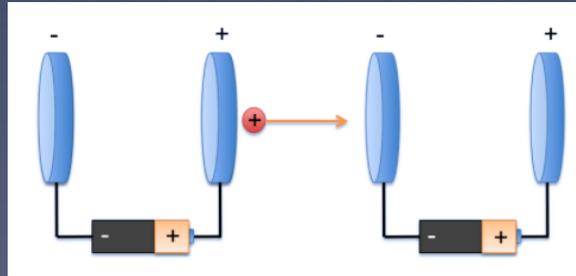
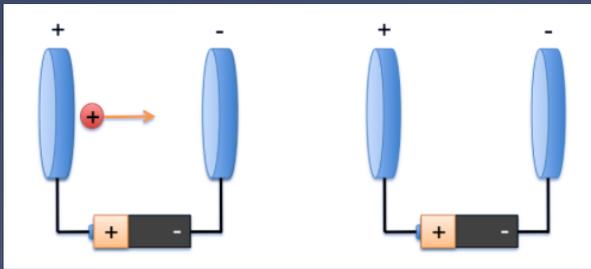
Hands on Particle Physics

- Le particelle cariche vengono accelerate in un campo elettrico (*un solo elettrodo necessiterebbe di una ddp elevatissima*)



Solo campi elettrici per accelerare!

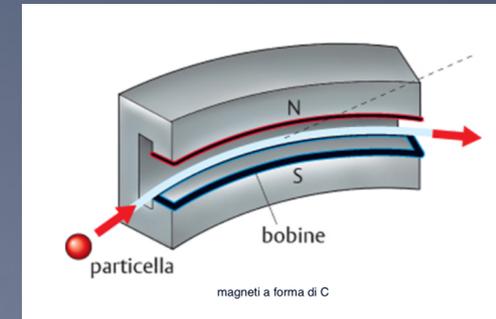
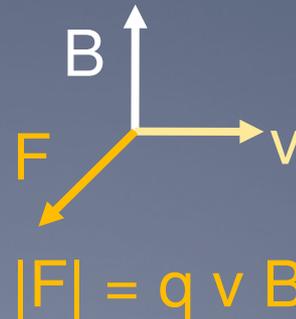
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto, e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico.



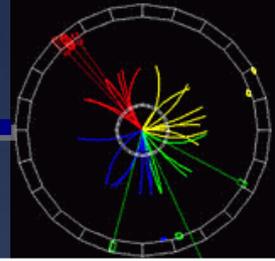
- Nella realtà qualcosa di simile all'inversione della polarità viene per esempio assicurata da un **generatore di radiofrequenza**, e la successione di elettrodi in molti casi è rimpiazzata da **cavità risonanti** come questa:



- Con CAMPI MAGNETICI, grazie alla forza di Lorentz le particelle cariche possono curvare!



UNITA' DI MISURA



Hands on Particle Physics

l'**Energia** si misura in **elettronvolt (eV)**.

È l'aumento di energia di un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt ($1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ joule)

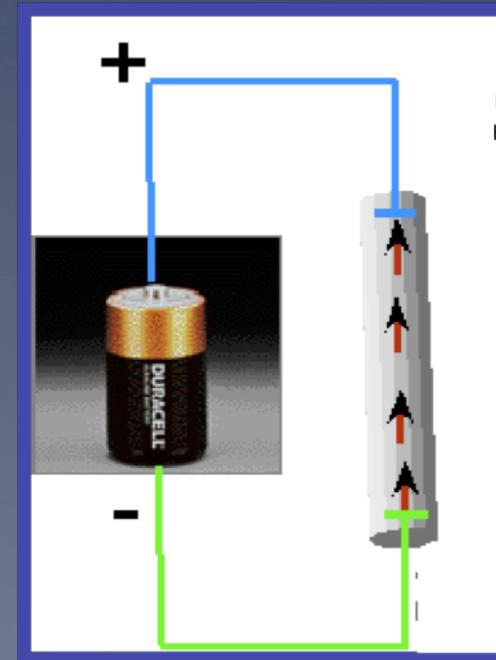
1 keV è mille elettronvolt (10^3 eV)

1 MeV è un milione di elettronvolt (10^6 eV)

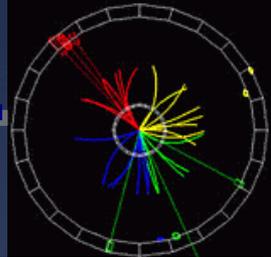
1 GeV un miliardo di elettronvolt (10^9 eV)

1 TeV mille miliardi di elettronvolt (10^{12} eV)

Vedremo che gli acceleratori nel corso della loro storia hanno fornito alle particelle energie sempre più alte (**MeV-TeV**)



Acceleratori

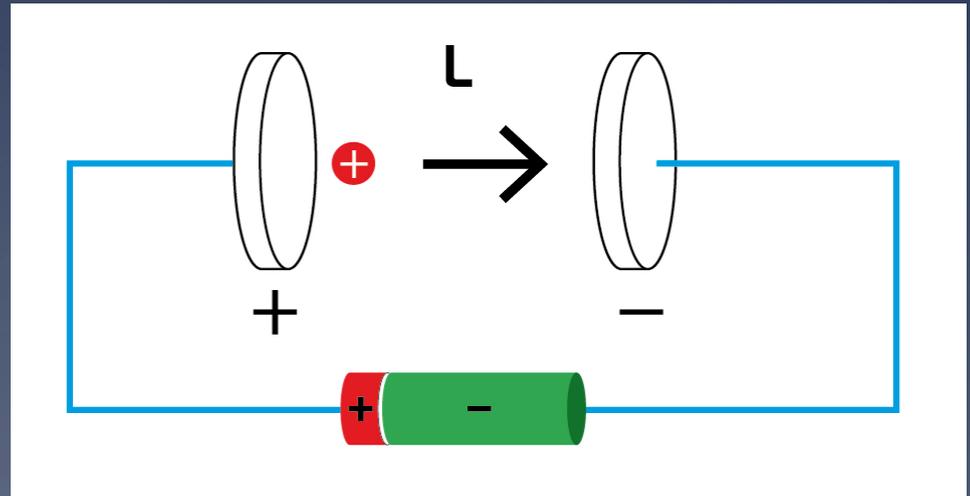


Hands on Particle Physics

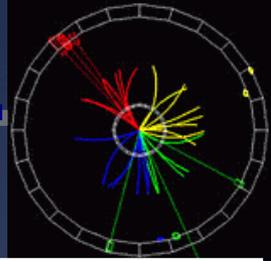
Il principio di funzionamento di un acceleratore si basa sull'utilizzo di una ddp per accelerare particelle cariche

Acceleratori elettrostatici

Sfruttano campi elettrici costanti
(10-20 MV)



Acceleratori



Hands on Particle Physics

Il principio di funzionamento di un acceleratore si basa sull'utilizzo di una ddp per accelerare particelle cariche

Acceleratori elettrostatici

Sfruttano campi elettrici costanti
(10-20 MV)

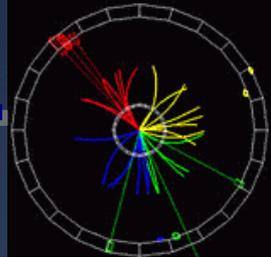
Acceleratori a radiofrequenza

Sfruttano campi elettrici oscillanti



CERN, protoni da 800 keV

Acceleratori



Hands on Particle Physics

Il principio di funzionamento di un acceleratore si basa sull'utilizzo di una ddp per accelerare particelle cariche

Acceleratori elettrostatici

Sfruttano campi elettrici costanti
(10-20 MV)

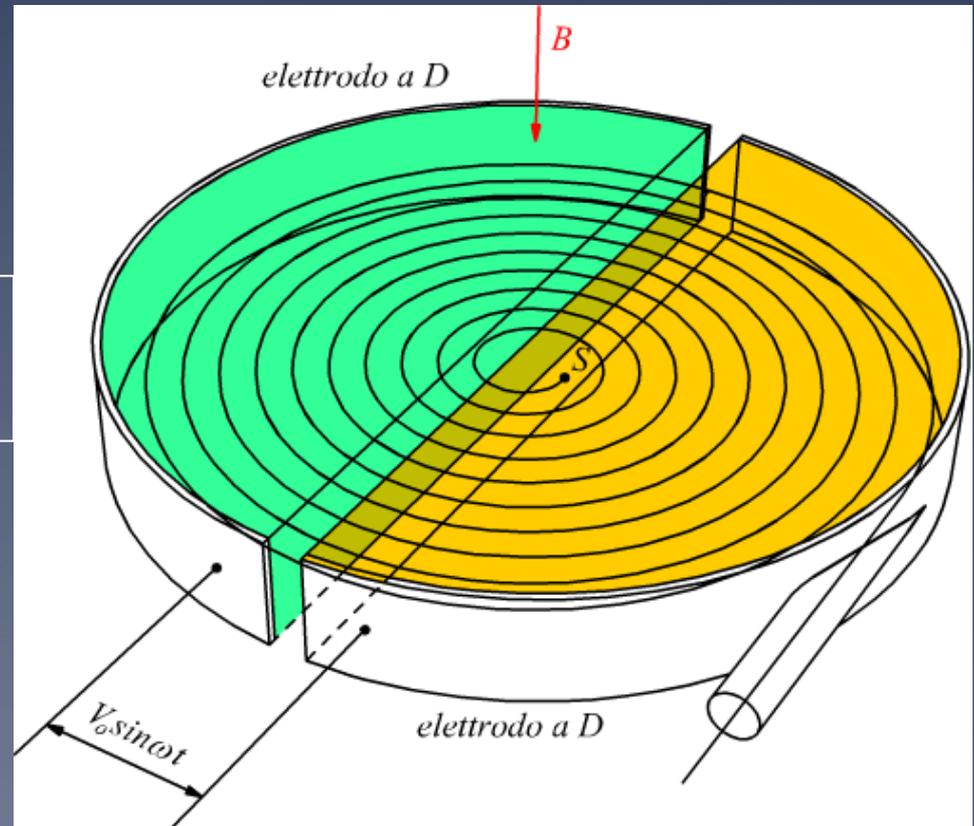
Acceleratori a radiofrequenza

Sfruttano campi elettrici oscillanti

Ciclotrone

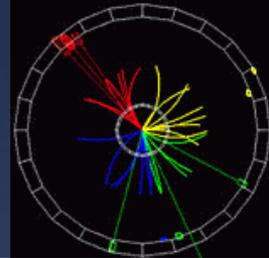
Struttura circolare + campo magnetico per curvare le particelle cariche

CICLOTRONE

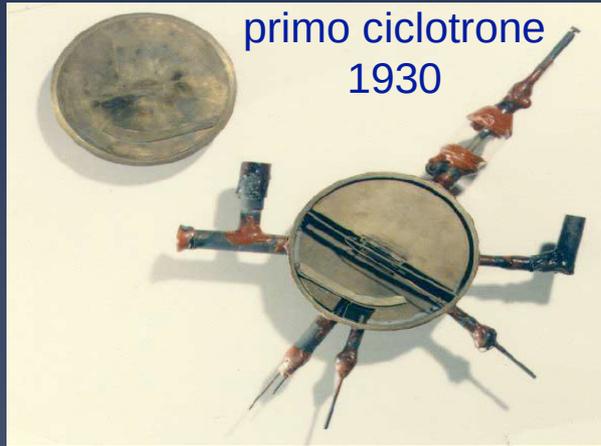


1930, Lawrence, protoni da 100 MeV

La dimensione dell'acceleratore determina la massima energia raggiungibile.



Hands on Particle Physics



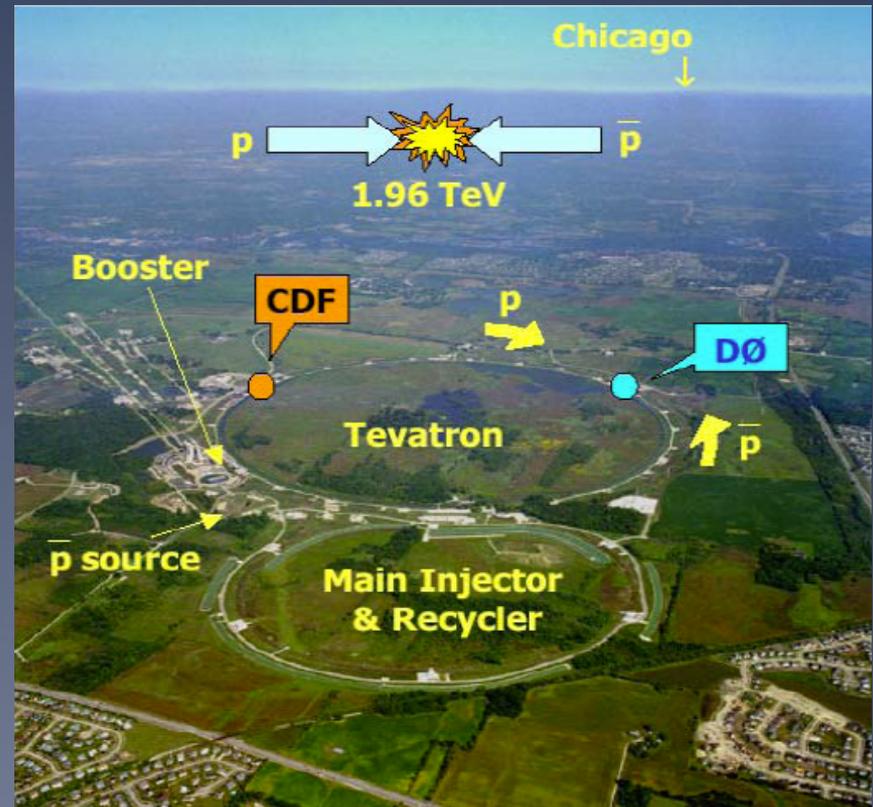
primo ciclotrone
1930

raggio ~ 1 km, protoni ~1TeV



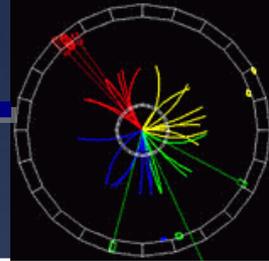
3 km, elettroni fino a ~50GeV

SLAC(California)



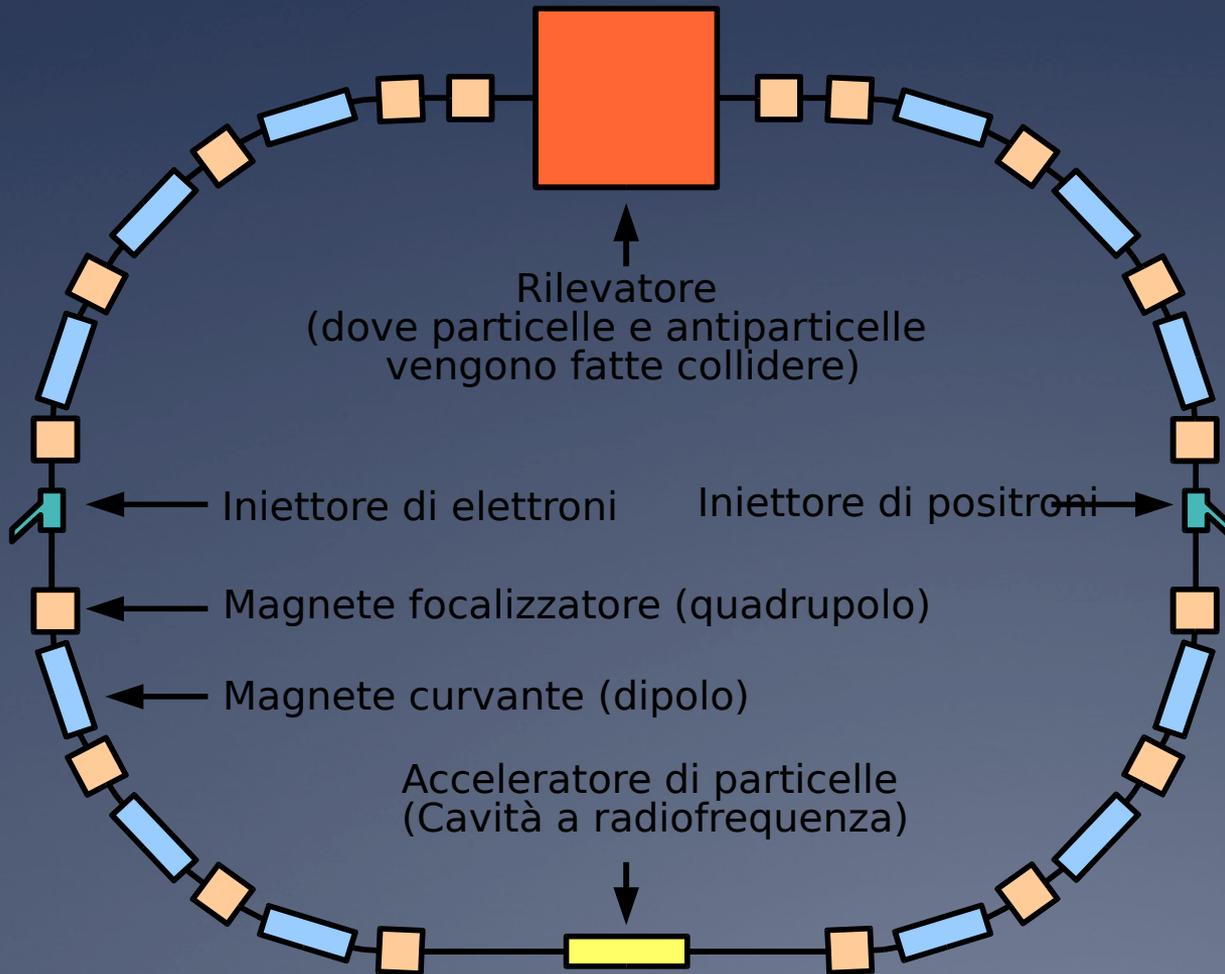
FermiLab Tevatron(Chicago, IL)

I Collider



Hands on Particle Physics

Due fasci di particelle viaggiano in direzioni opposte (in tubi a vuoto)

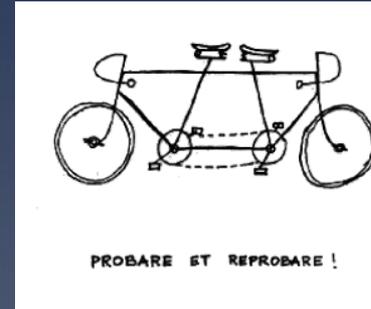
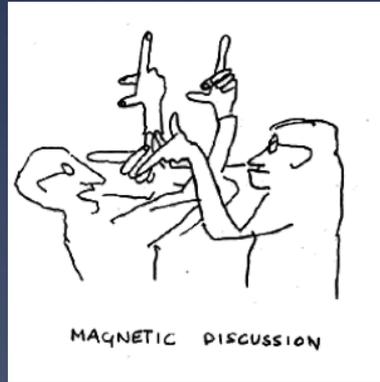


Le particelle viaggiano raggruppate in **pacchetti** (bunches) ciascuno composto da circa 10^{11} particelle.

accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi magnetici diversi lungo l'anello

i pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno o più punti e le particelle collidono

I COLLISORI CIRCOLARI SONO STATI INVENTATI A FRASCATI DAL GRANDE BRUNO TOUSCHEK NEI FAVOLOSI ANNI 60...

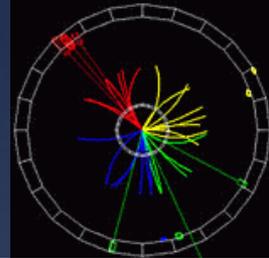


Prime collisioni **elettrone-positrone**:

AdA (Anello di Accumulazione)

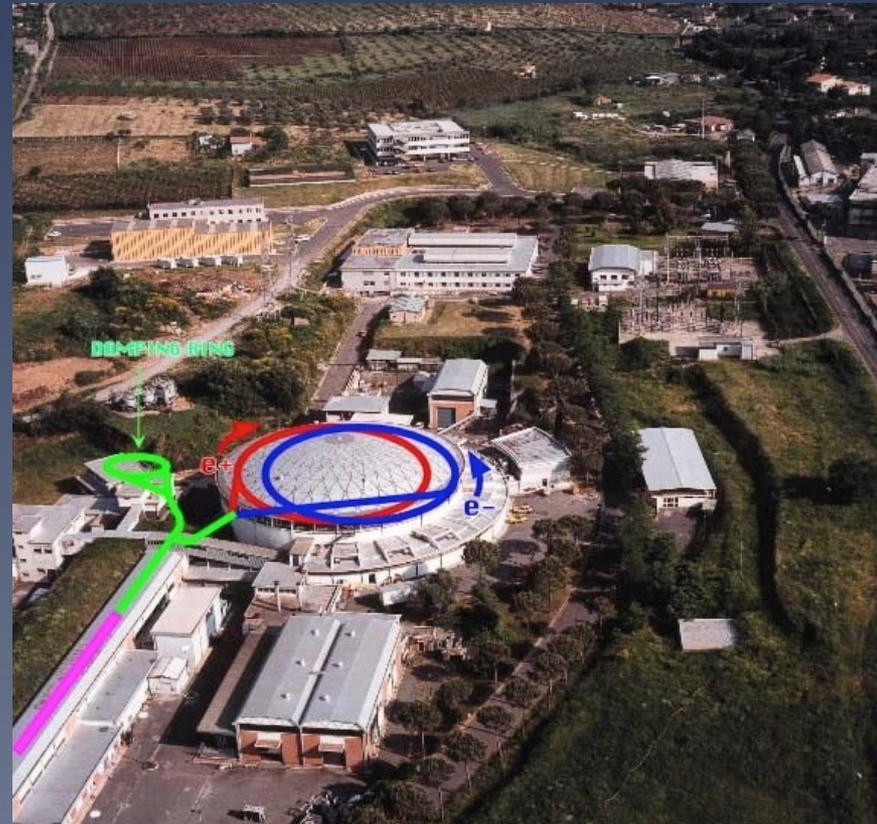
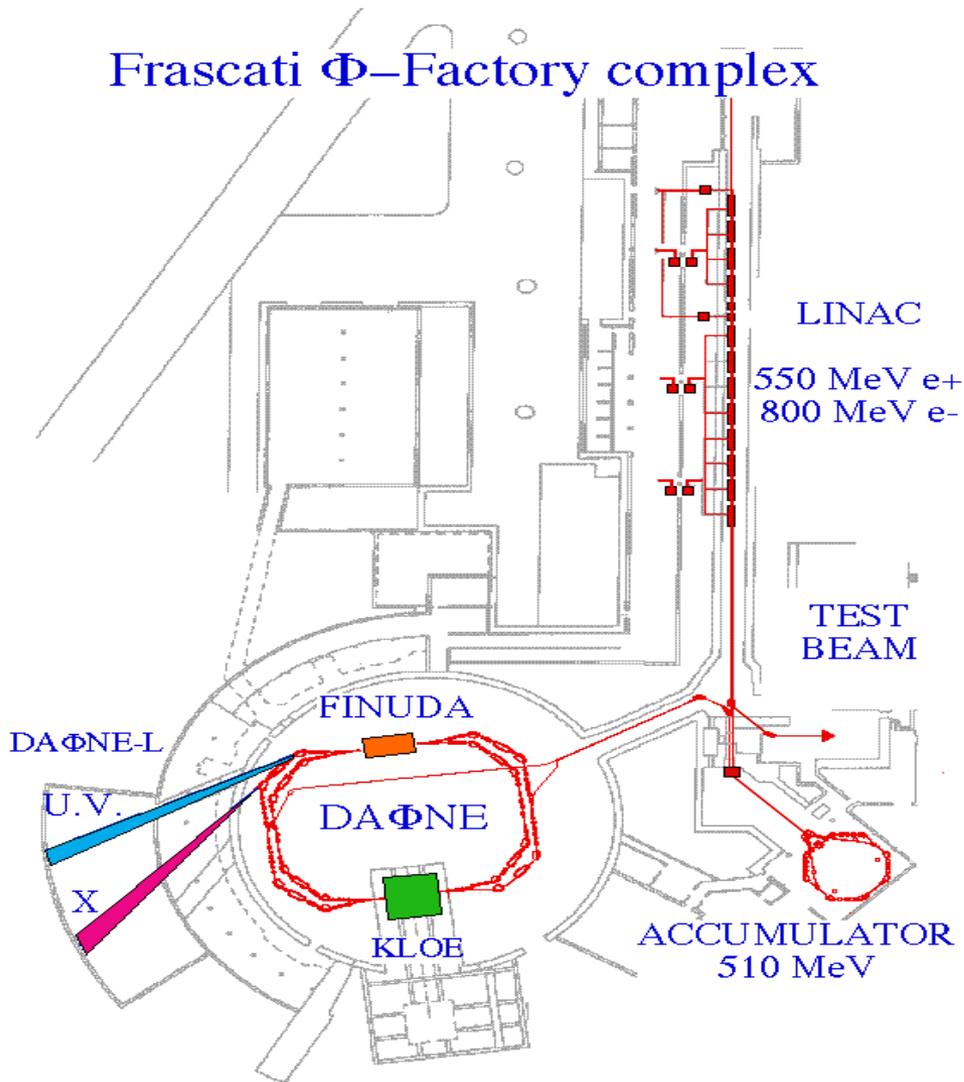


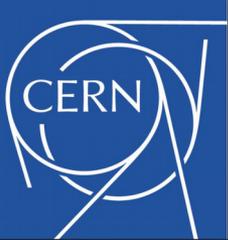
L'acceleratore DAΦNE a Frascati



Hands on Particle Physics

Frascati Φ -Factory complex





II CERN

Il grande laboratorio europeo per la fisica delle particelle si trova a Ginevra, al confine franco-svizzero. Fu fondato nel 1951.



Dispone di un eccezionale complesso di macchine acceleratrici che ha il suo culmine nel Large Hadron Collider (LHC)

La fisica delle particelle elementari

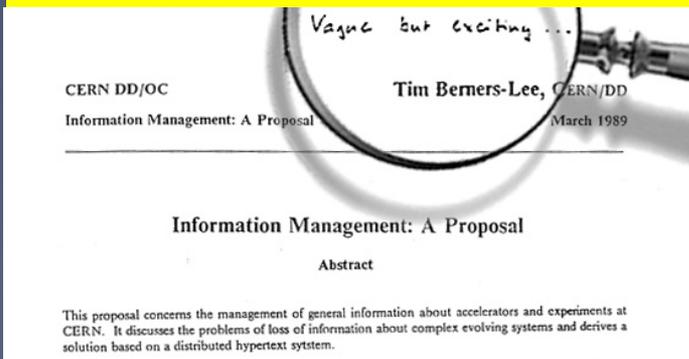
Oltre ad aver prodotto con continuità importanti risultati scientifici premiati più volte col Nobel, ha anche avuto importanti ricadute tecnologiche:

il World Wide Web



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 1989

Also called The Web or WWW



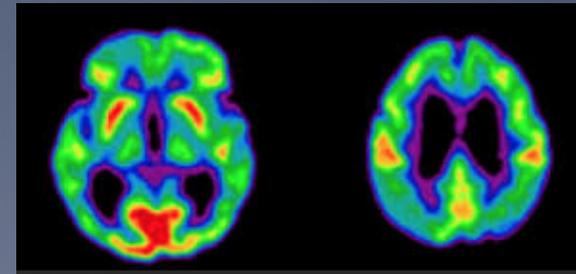
il Touch Screen



The Touch Terminal as developed for the Antiproton Accumulator (AA).



e la PET



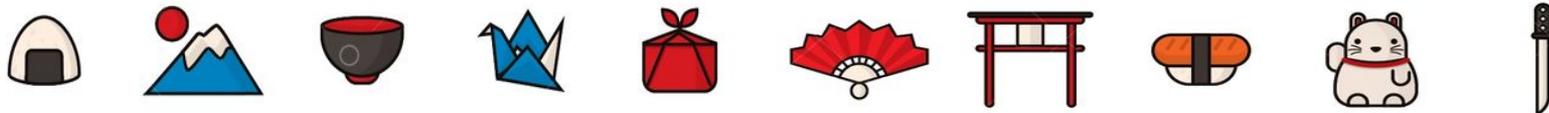
II KEK

**Laboratorio giapponese per la fisica delle alte energie.
Si trova a Tsukuba, non lontano da Tokyo.**

Monte Tsukuba

SuperKEKB

An aerial photograph of the Tsukuba region in Japan. In the background, the large, forested Mount Tsukuba rises against a clear sky. The middle ground shows a vast, flat landscape with a grid of agricultural fields and scattered residential buildings. In the lower-middle section, a large, circular complex of buildings and structures is circled in red. A white arrow points from the text 'SuperKEKB' in the bottom left towards this circled area. The foreground shows more fields and some smaller buildings.



Intermezzo di cultura giapponese

- Giappone in lingua originale è 日本 (pron. Nihon o Nippon) 
- E' un'isola *composta* da circa 7000 isole! 
- Il capo di stato è l'imperatore (天皇 tennō)
- Al contrario di quanto si potrebbe pensare Tokyo non è la capitale del Giappone: non esiste una legge che designi una città come capitale del Giappone
- Gli anni sono indicati a partire dall'ascesa al trono dell'imperatore in carica. Il periodo di regno, detto «era» ha un nome, anche nei documenti ufficiali. Quello attuale (imperatore Naruhito) si chiama «**Heisei**» e significa «raggiungimento della pace»

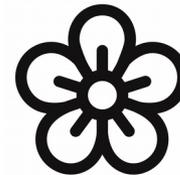
箸
Hashi



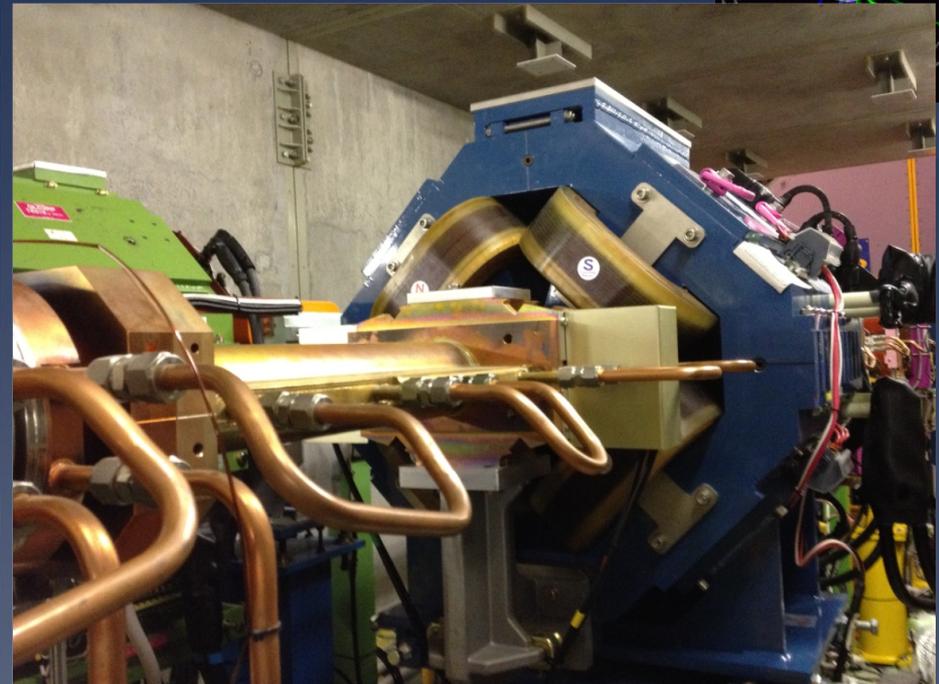
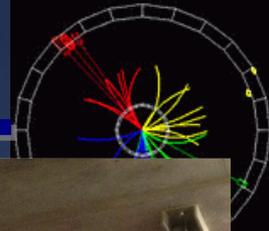
猫
Neko



花
Hana



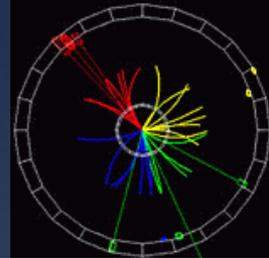
SUPERKEKB (elettrone-positrone)



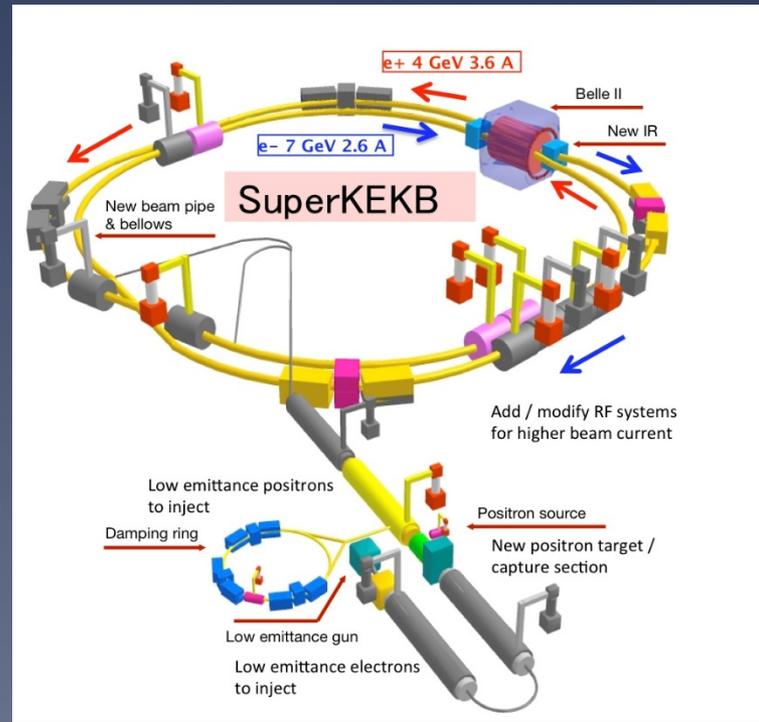
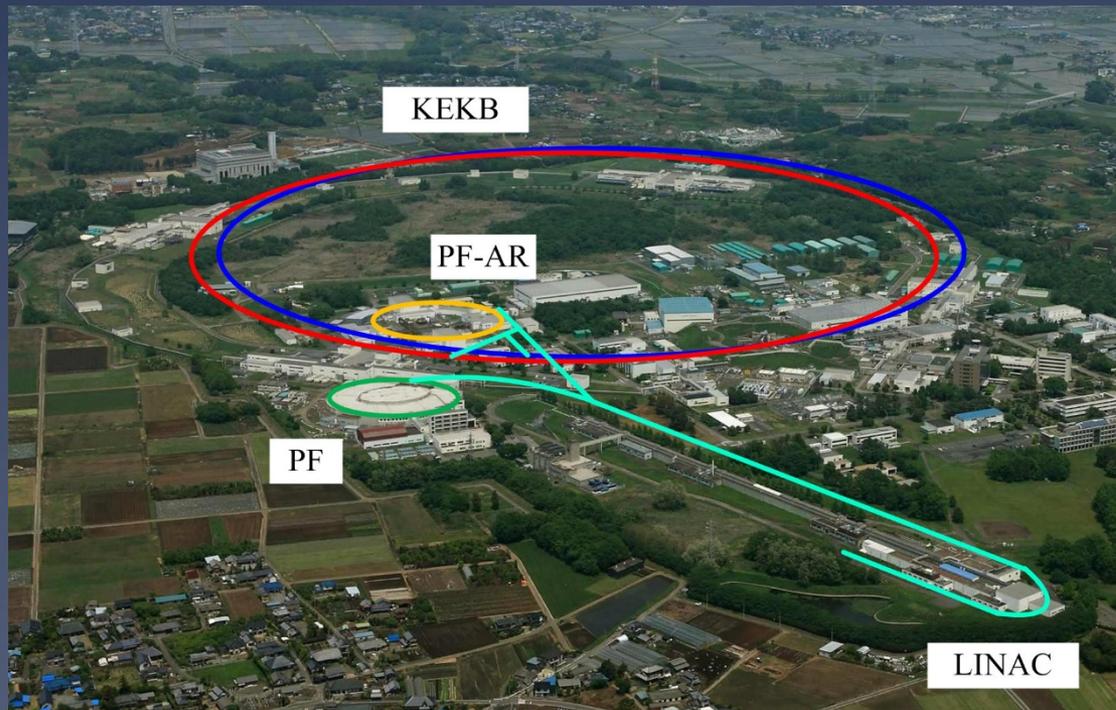
- 3 km di circonferenza
- Energia di collisione dei fasci 7+4 GeV
- pacchetti" di elettroni e positroni con 100 miliardi di particelle
- Dimensioni trasversali dei pacchetti: 50 nm x 6 μm
- **Gli elettroni viaggiano quasi alla velocità della luce ($v=0.9999999999999999992$ c) → fanno 100000 giri al secondo!**

In 10 ore percorrono 10 miliardi di Km (Terra-Nettuno-Terra) e collidono ogni 2 ns (500 milioni di volte al secondo)!

SUPERKEKB (elettrone-positrone)

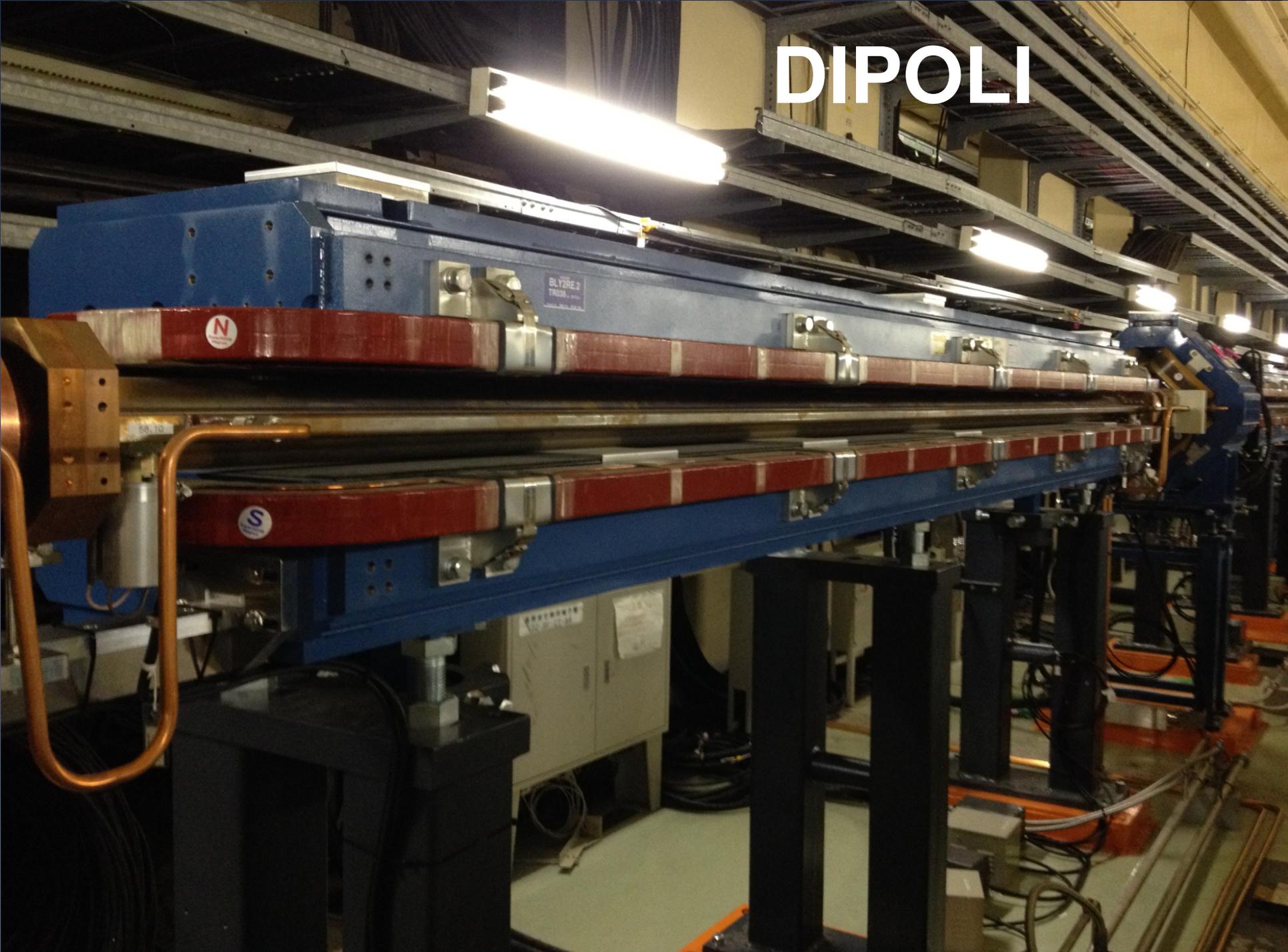


Hands on Particle Physics

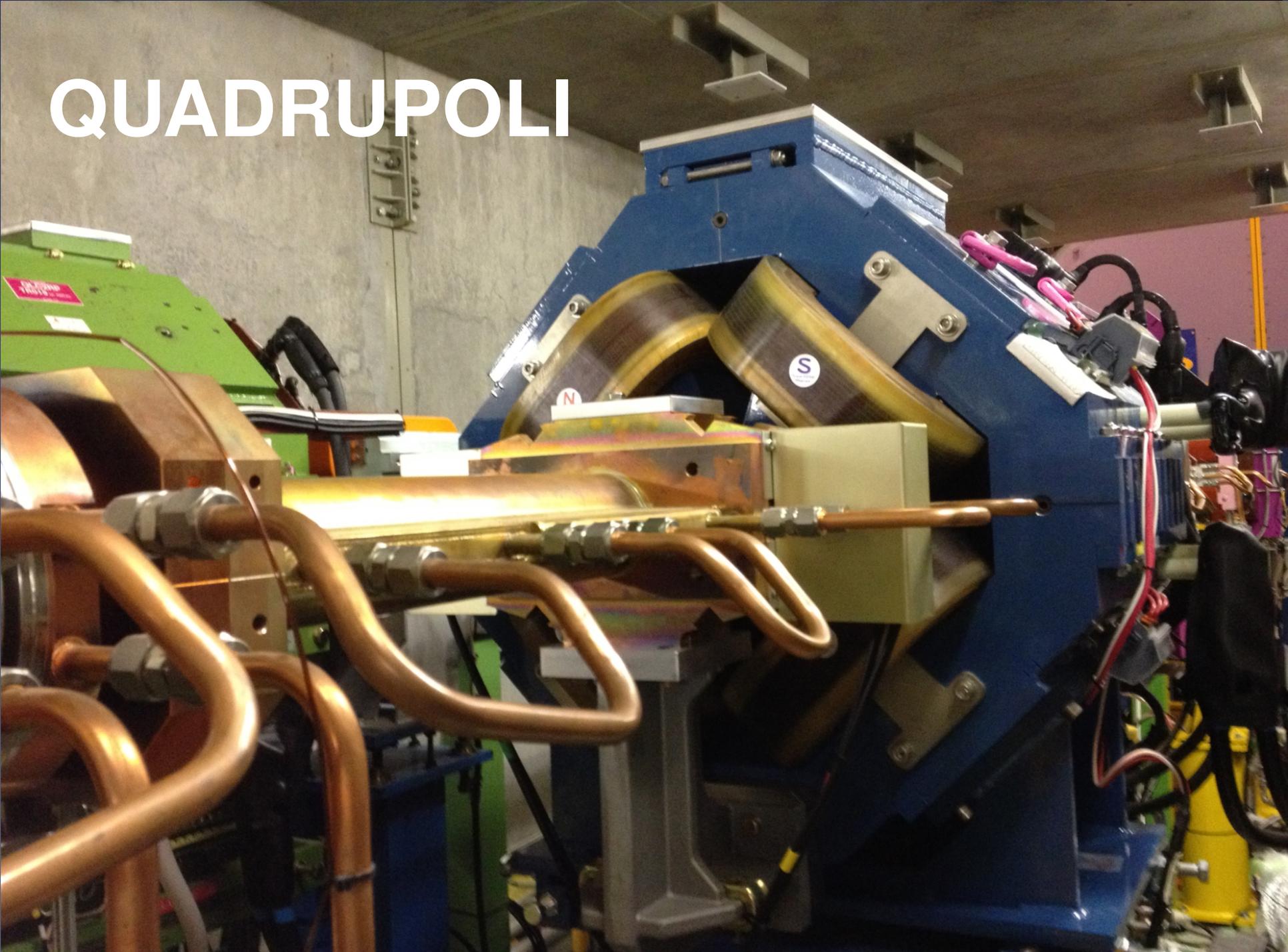


Alla fine della presa dati (≈ 2031) si prevede che SuperKEKB avrà prodotto 100 miliardi di particelle (mesoni) contenenti un quark beauty!

DIPOLI



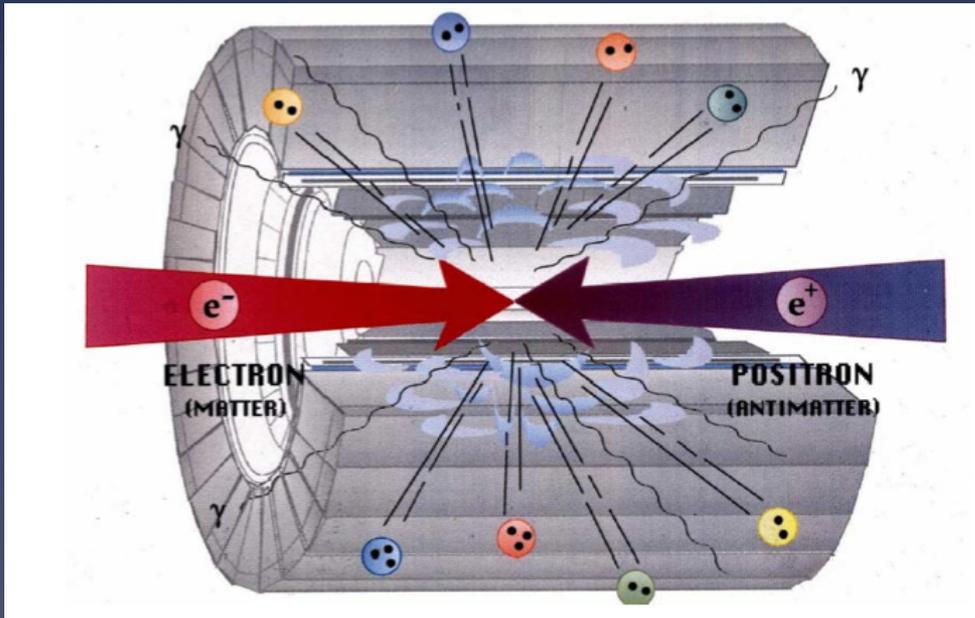
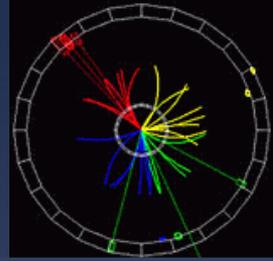
QUADRUPOLI



Le due linee di fascio



I rivelatori di particelle

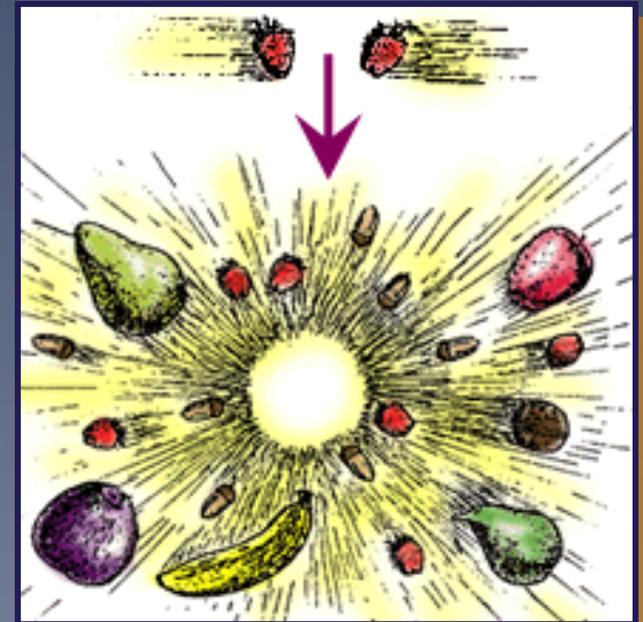


Scopi

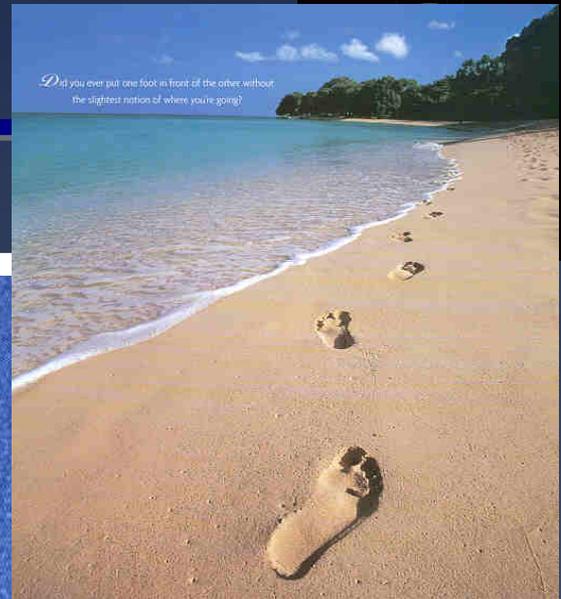
- 🕒 Identificare le particelle
- 🕒 misurare le caratteristiche (energia, carica..) delle particelle

Come?

... lavoro da detective ... seguire gli indizi per ricostruire quello che è successo

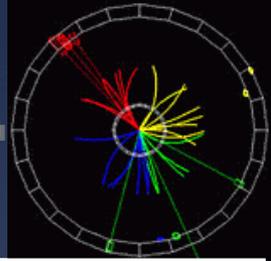


Alla ricerca di tracce



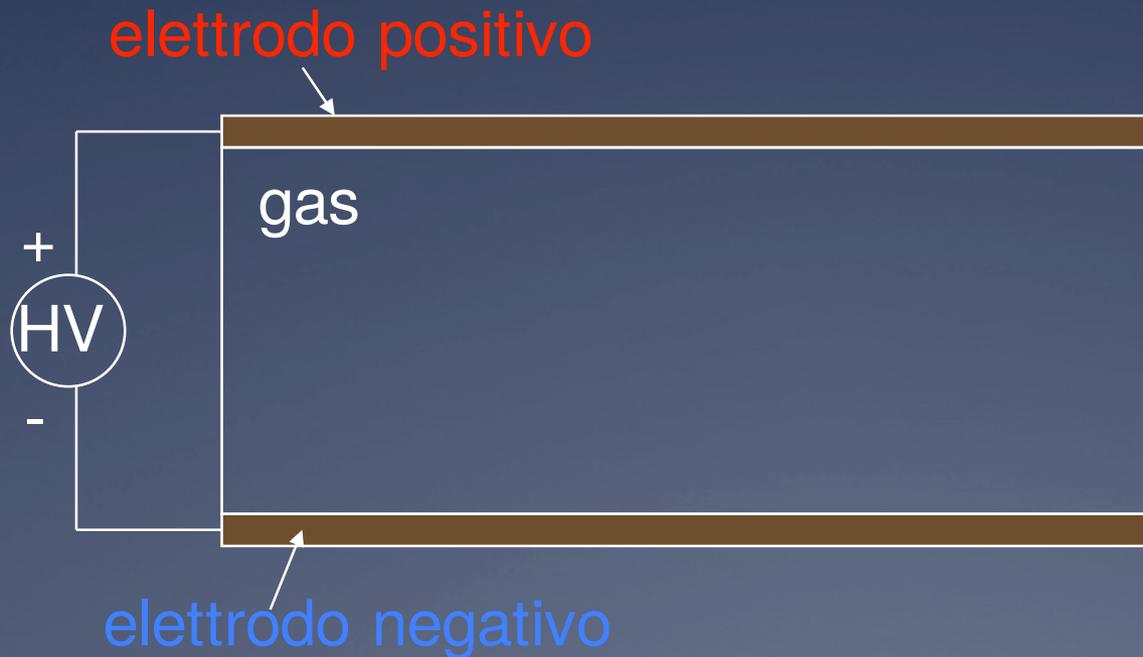
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce



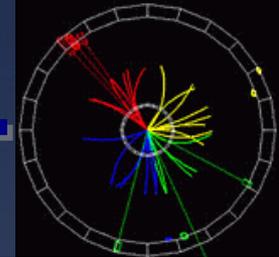
Hands on Particle Physics

Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



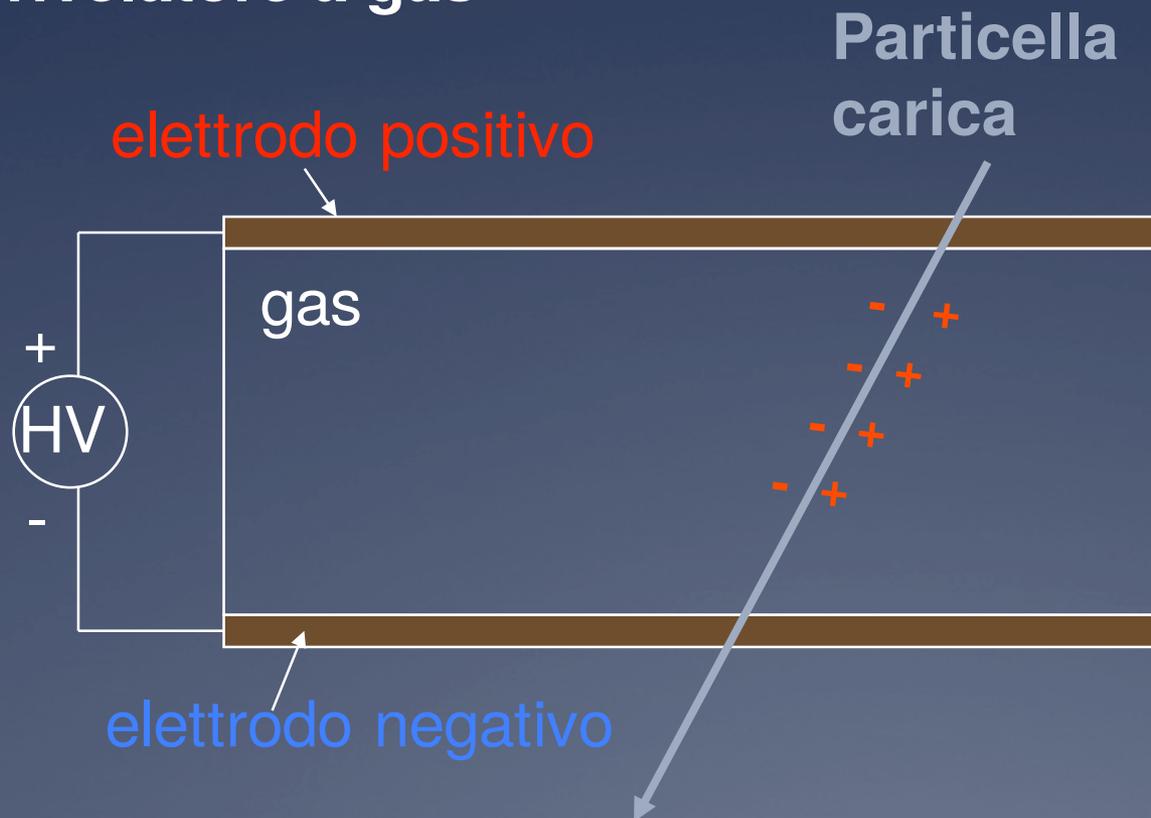
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce



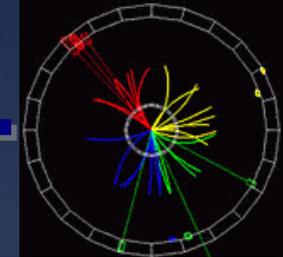
Hands on Particle Physics

Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



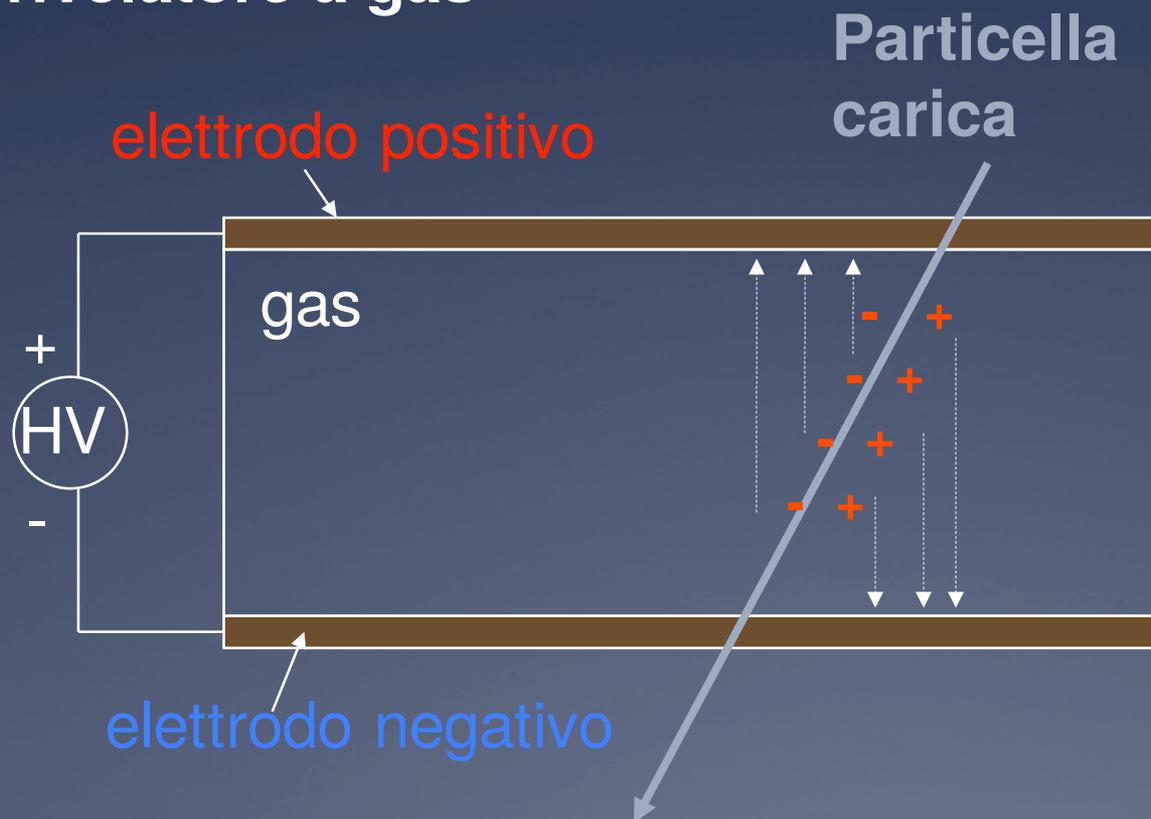
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce



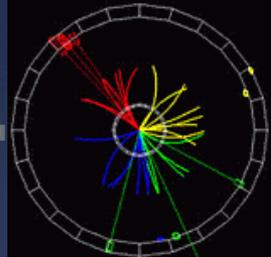
Hands on Particle Physics

Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



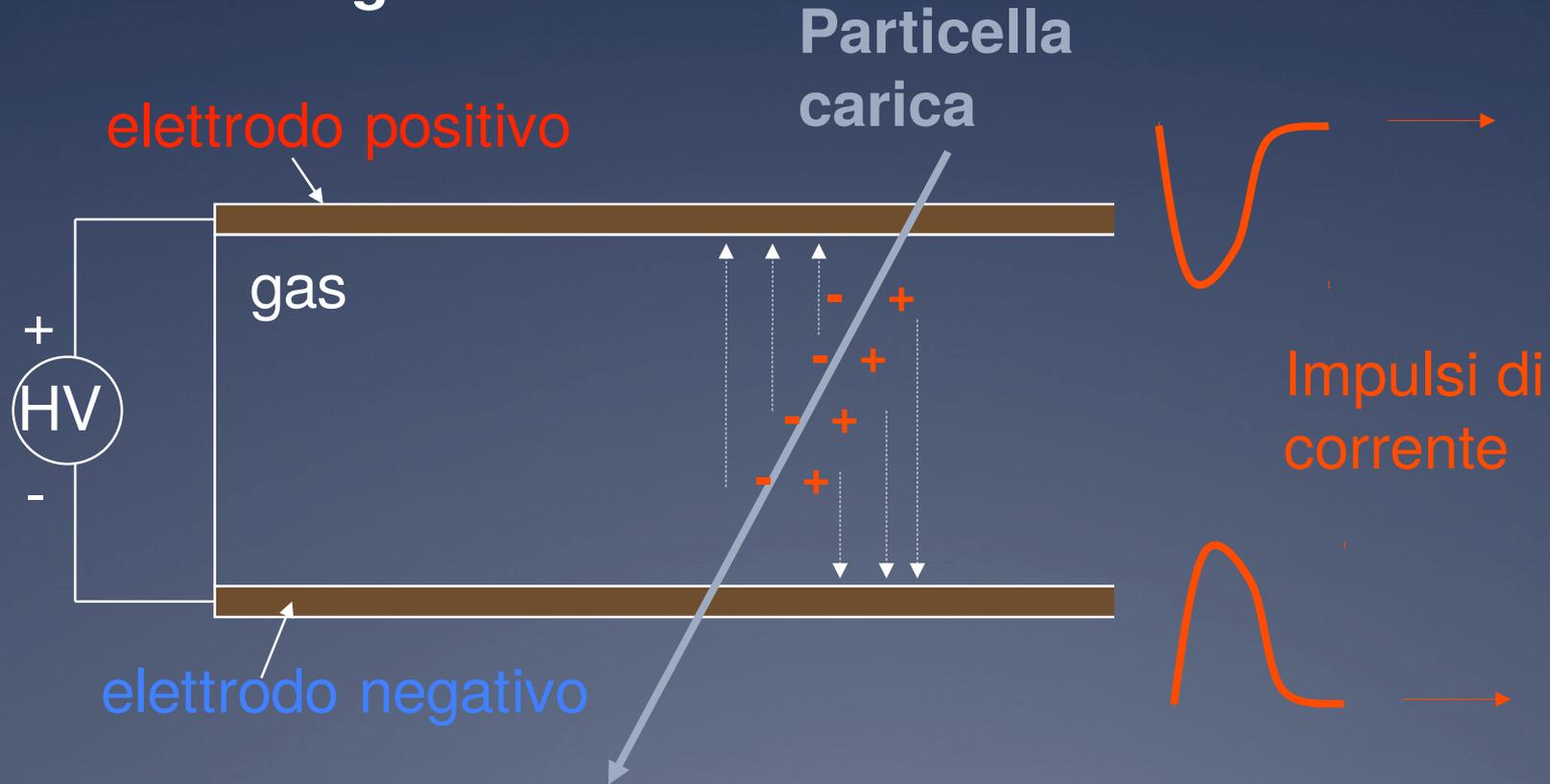
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento e'
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce



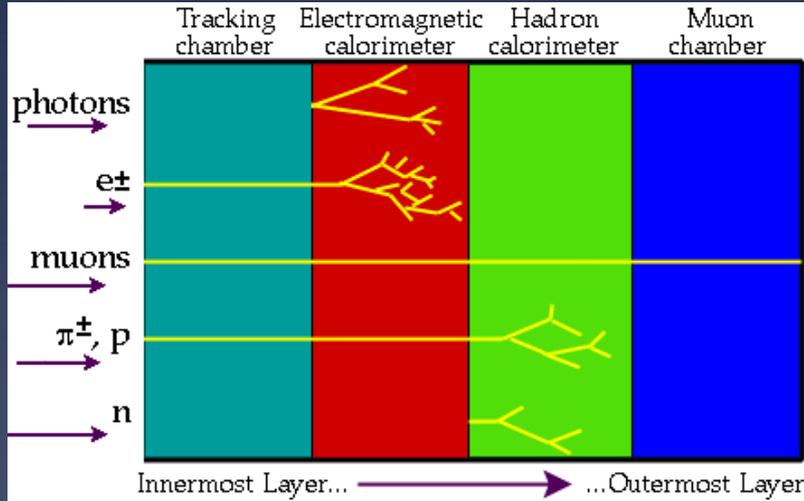
Hands on Particle Physics

Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



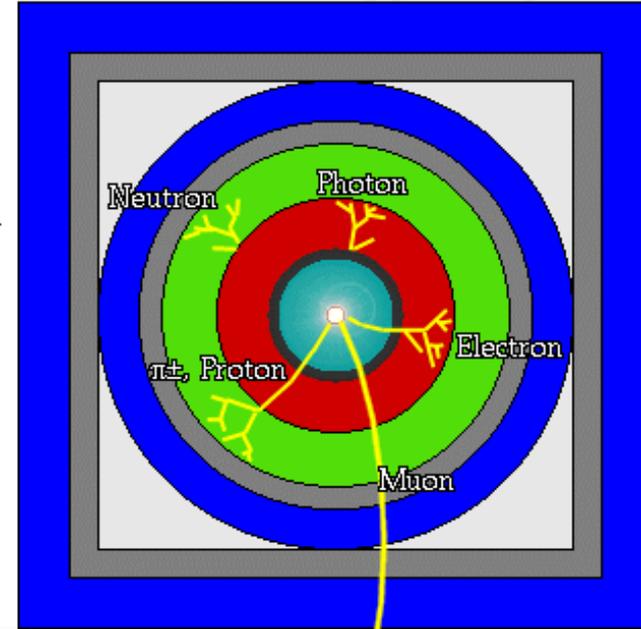
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è
LA IONIZZAZIONE

Apparati di rivelatori

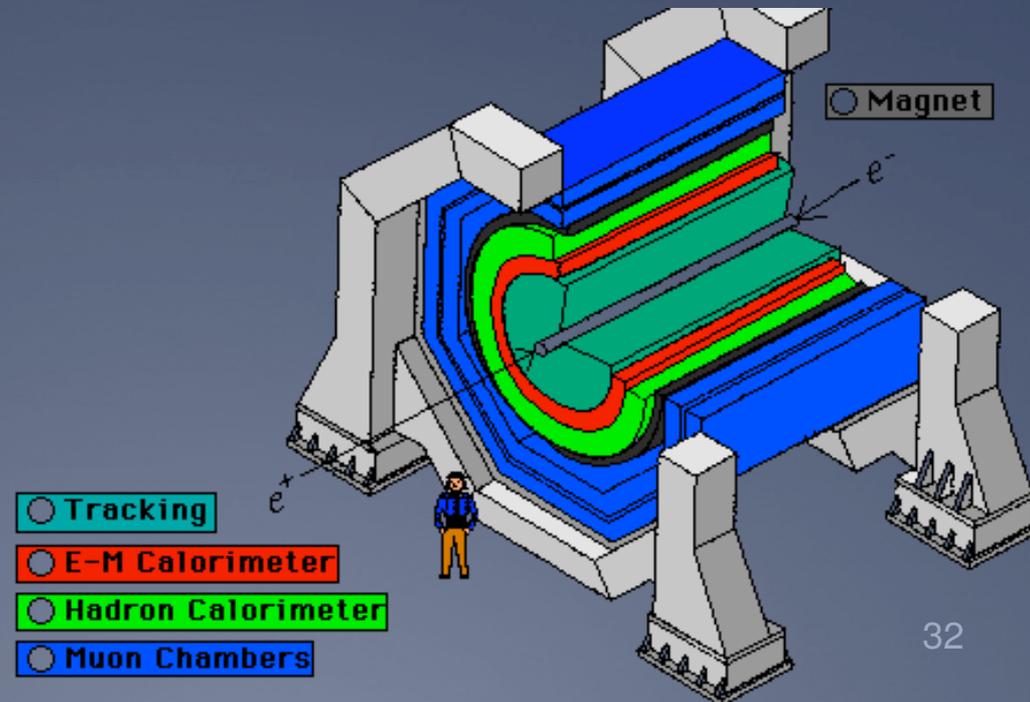


A detector cross-section, showing particle paths

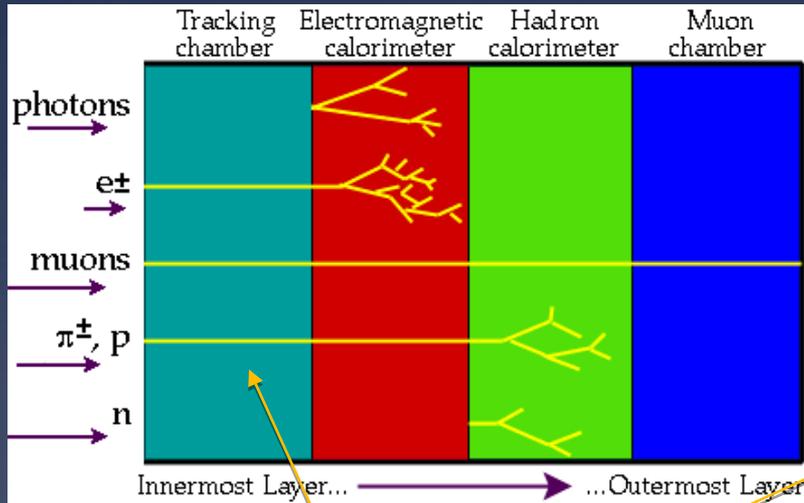
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



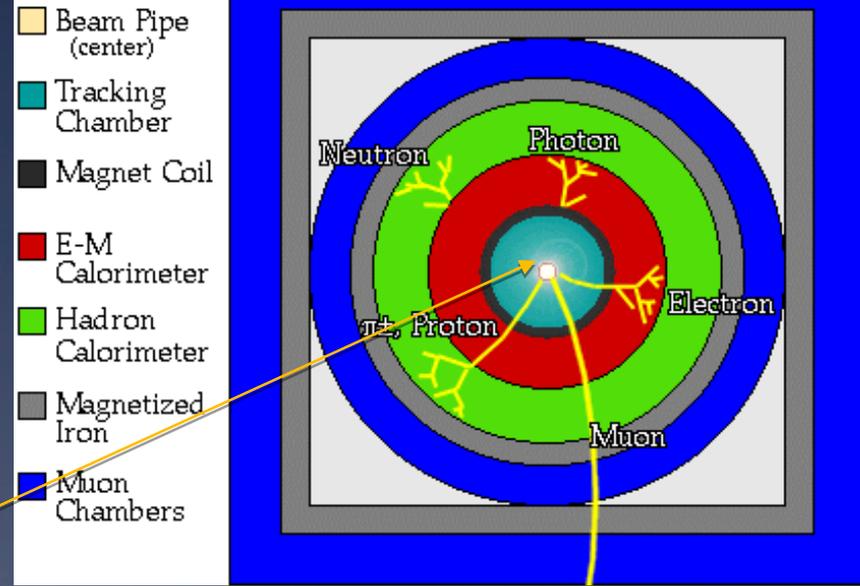
Struttura a "cipolla"



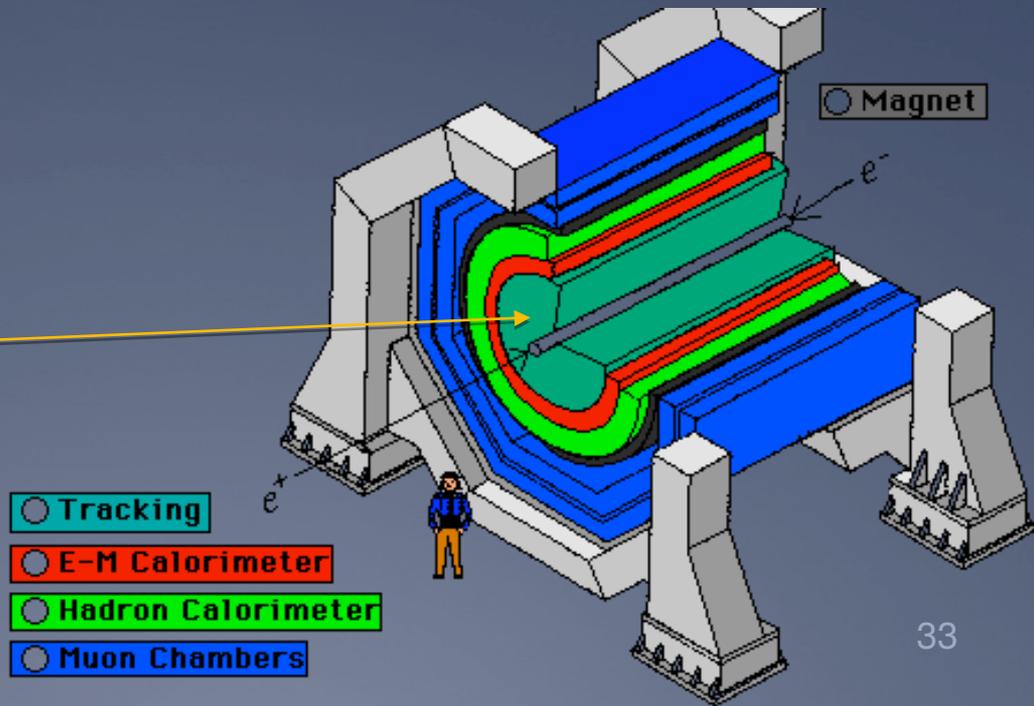
Apparati di rivelatori



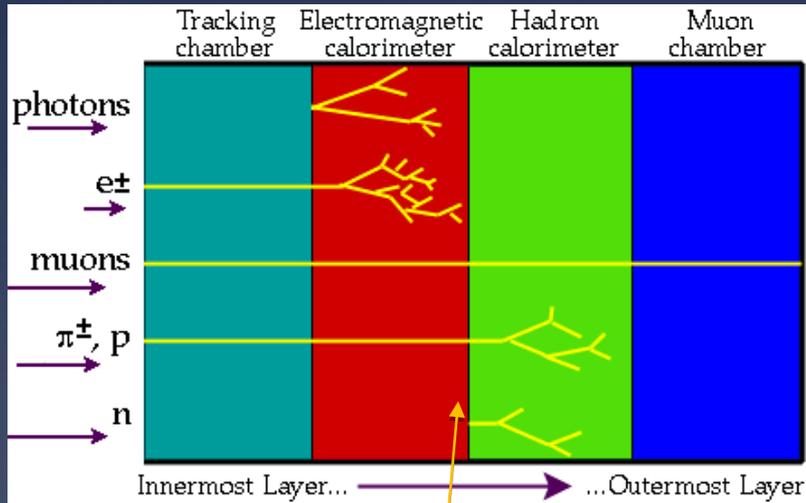
A detector cross-section, showing particle paths



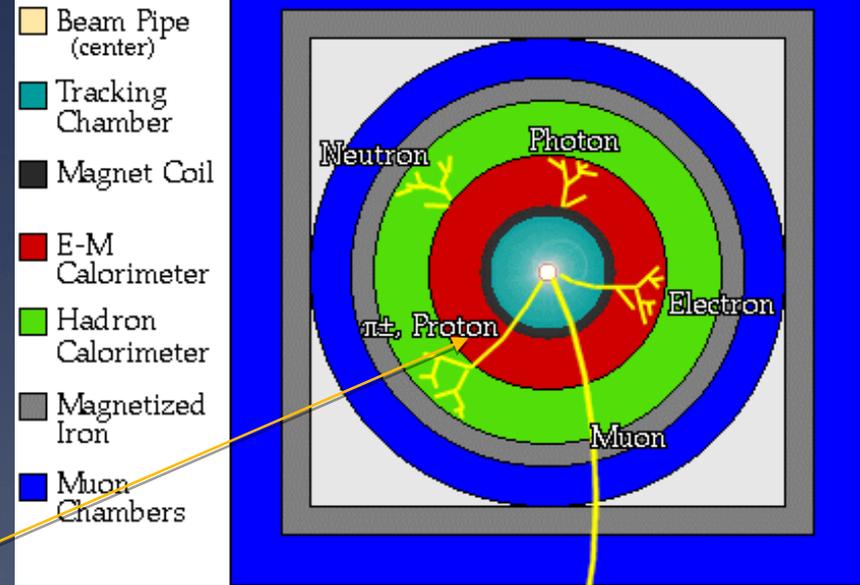
Rivelatori Traccianti
 Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche



Apparati di rivelatori

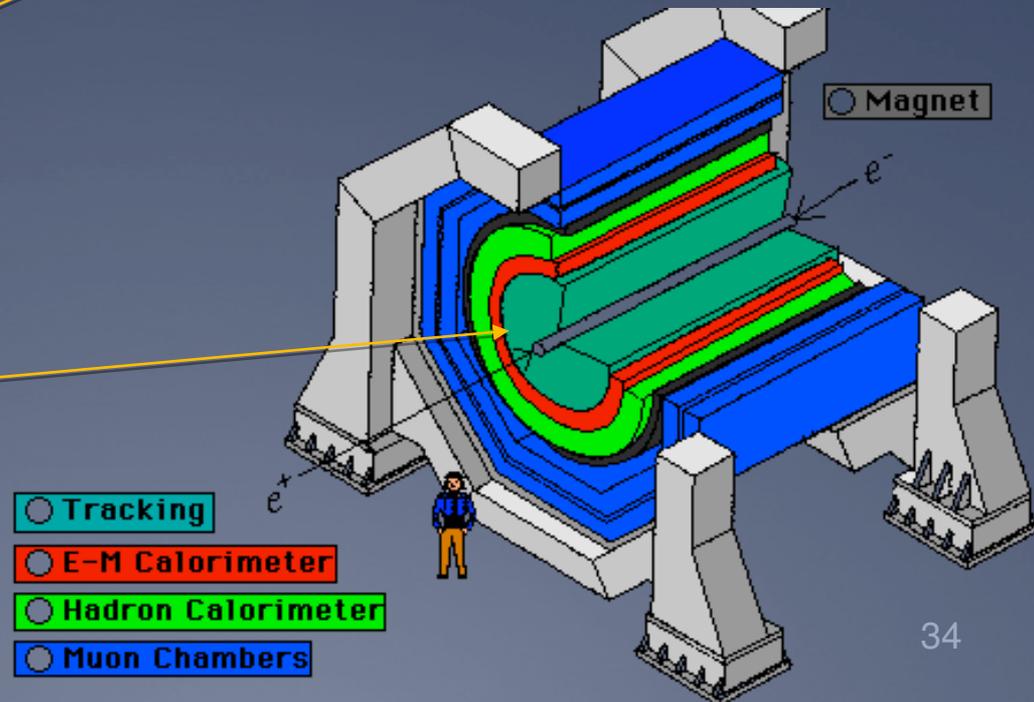


A detector cross-section, showing particle paths

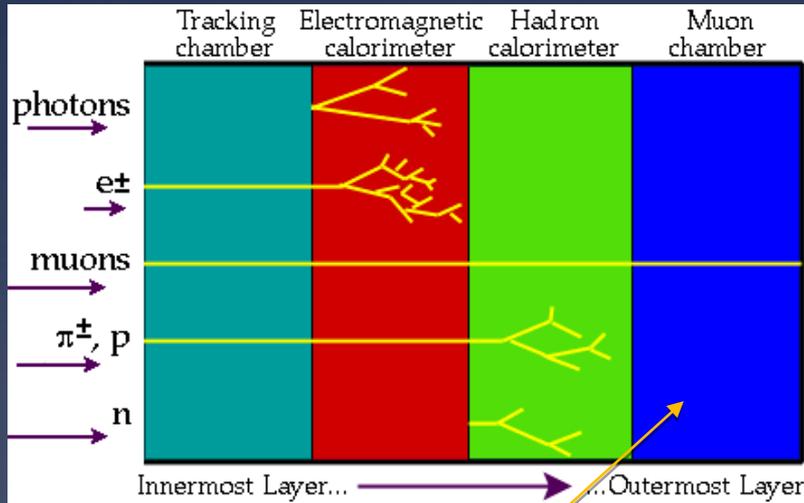


Calorimetri

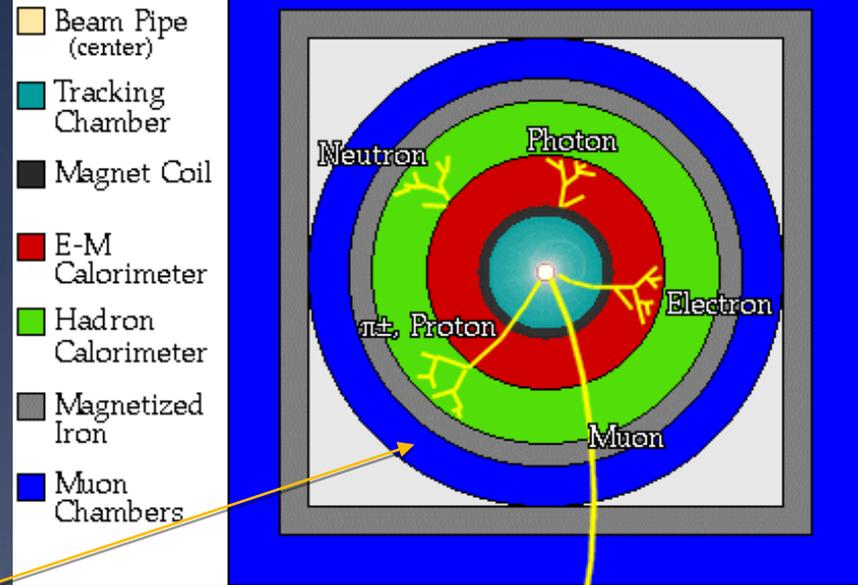
Misurano l'energia rilasciata dalle particelle. Le particelle diventano "sciame". Si dividono in **elettromagnetici** e **adronici**.



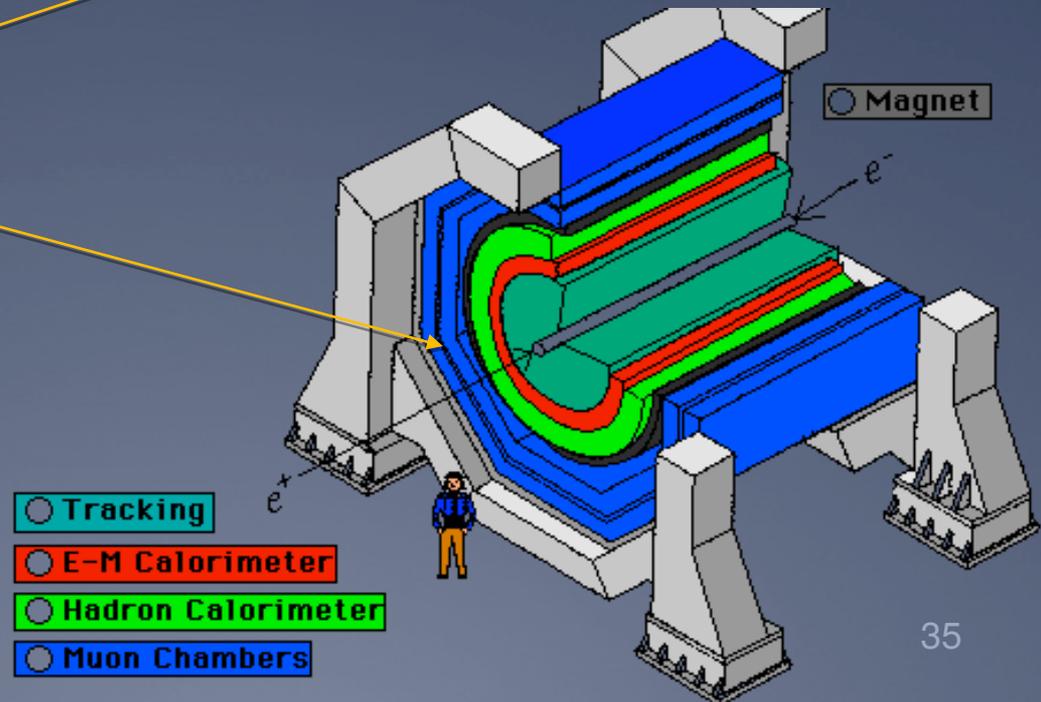
Apparati di rivelatori



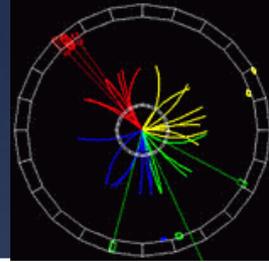
A detector cross-section, showing particle paths



Rivelatori per muoni



Misura della quantità di moto



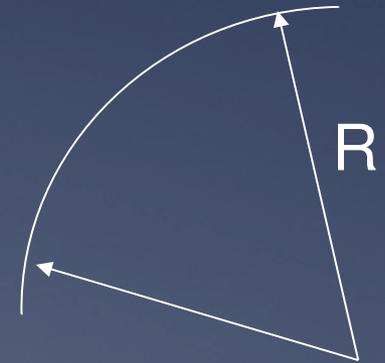
Hands on Particle Physics

Una particella carica in un campo magnetico subisce una forza, chiamata Forza di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}$$

L'azione della forza di Lorentz su una particella carica è di curvarne la traiettoria:

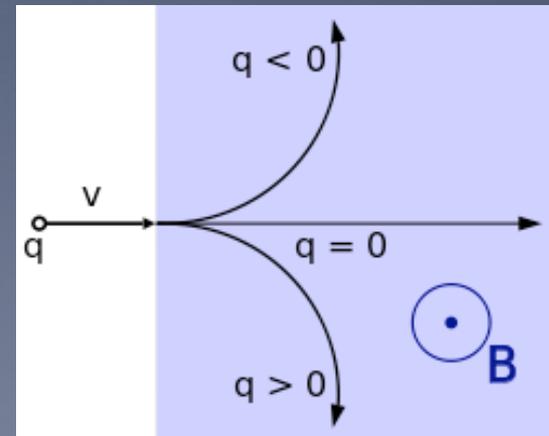
$$F_c = mv^2/R \longrightarrow qvB = mv^2/R$$



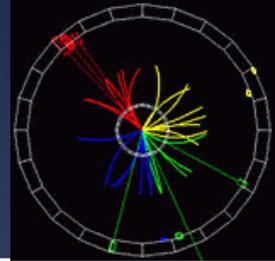
Dalla curvatura della traiettoria si può misurare:

1. La quantità di moto: $P = mv = qBR$

2. La carica



Misura dell' Energia



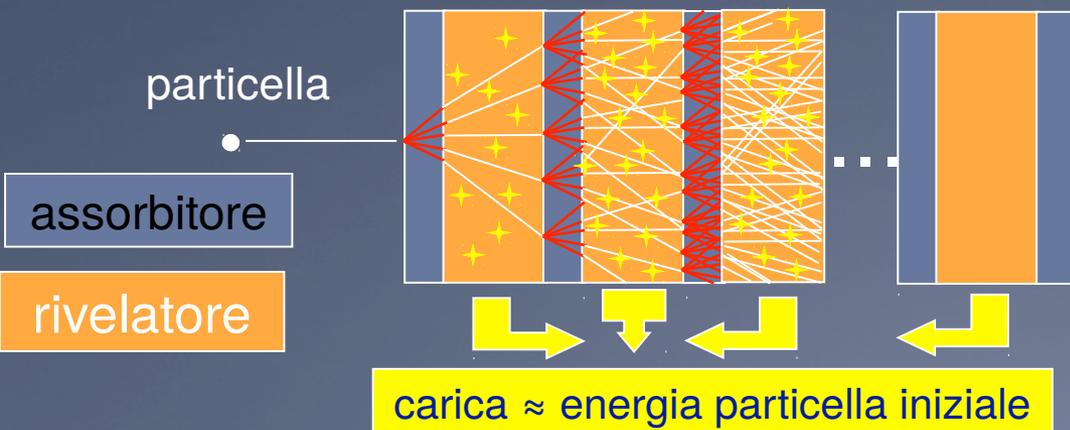
Hands on Particle Physics

La misura dell' energia di una particella avviene tramite il suo assorbimento totale in un calorimetro:

- **Omogeneo**: assorbitore \equiv rivelatore
- **A campionamento**: **lasagna** di assorbitori e rivelatori

L' assorbitore fa degradare l'energia delle particelle cariche per ionizzazione e irraggiamento

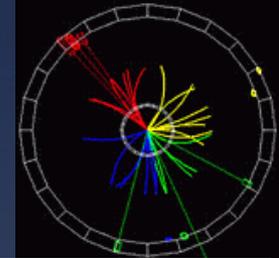
Misuro l'energia depositata anche per particelle neutre !



Calorimetri Elettromagnetici
(rivelazione di e^- , e^+ , γ)

Calorimetri Adronici
(rivelazione di adroni carichi e neutri: p, n, π, K)

Più veloci della luce !



Hands on Particle Physics

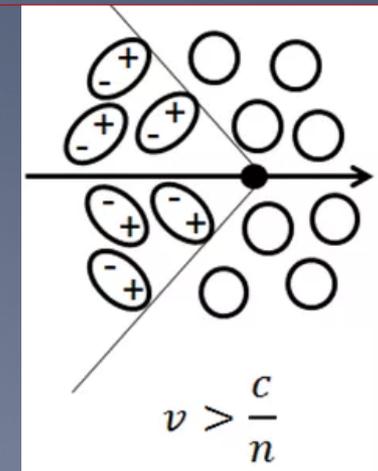
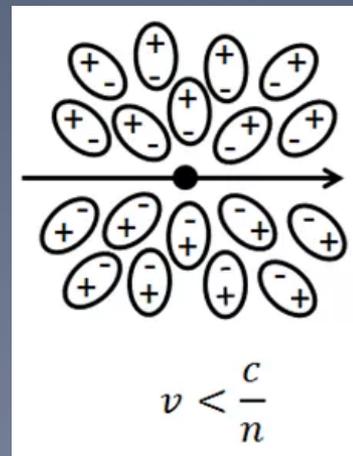
La luce rallenta quando attraversa un mezzo perché interagisce con le cariche elettriche degli atomi.

La sua velocità diventa c/n (n si chiama *indice di rifrazione*)

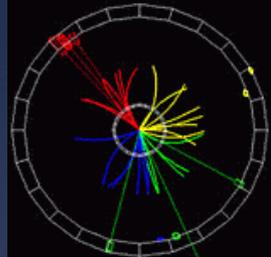
Una particella carica può benissimo essere «sparata» dentro un mezzo a velocità maggiore di c/n ! (ma sempre minore di c)

Un jet che supera la velocità del suono provoca un'onda sonora direzionata lungo un cono fissato

Analogamente le particelle cariche superluminali provocano una radiazione elettromagnetica lungo un cono, scoperta dal fisico russo **Pavel Cerenkov**, causata dal fatto che gli atomi del mezzo si polarizzano solo DOPO il passaggio della particella.



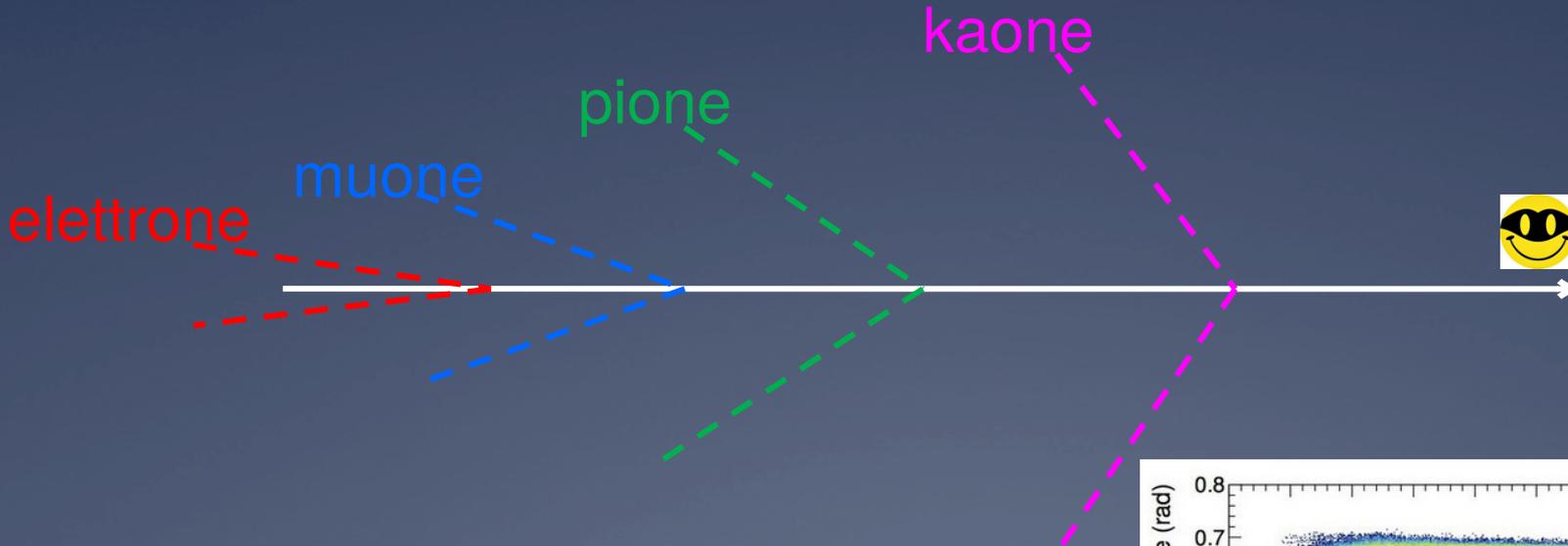
La radiazione Cerenkov «smaschera» le particelle



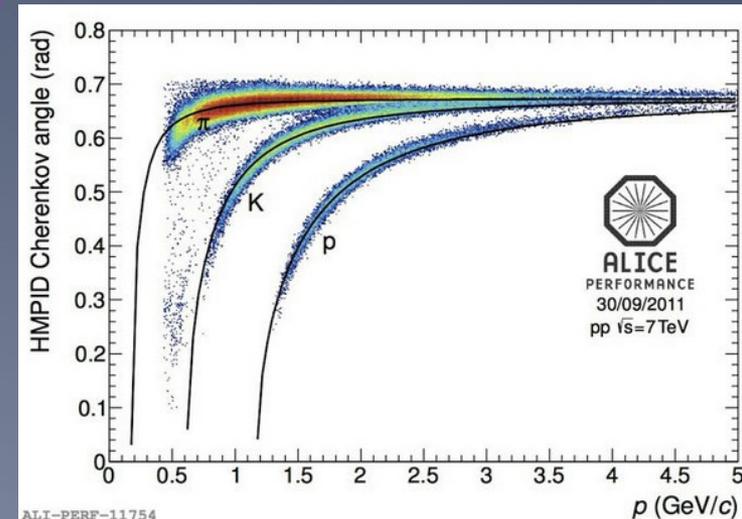
Hands on Particle Physics

L'angolo di emissione della luce Cerenkov è inversamente proporzionale alla velocità della particella carica che la provoca.

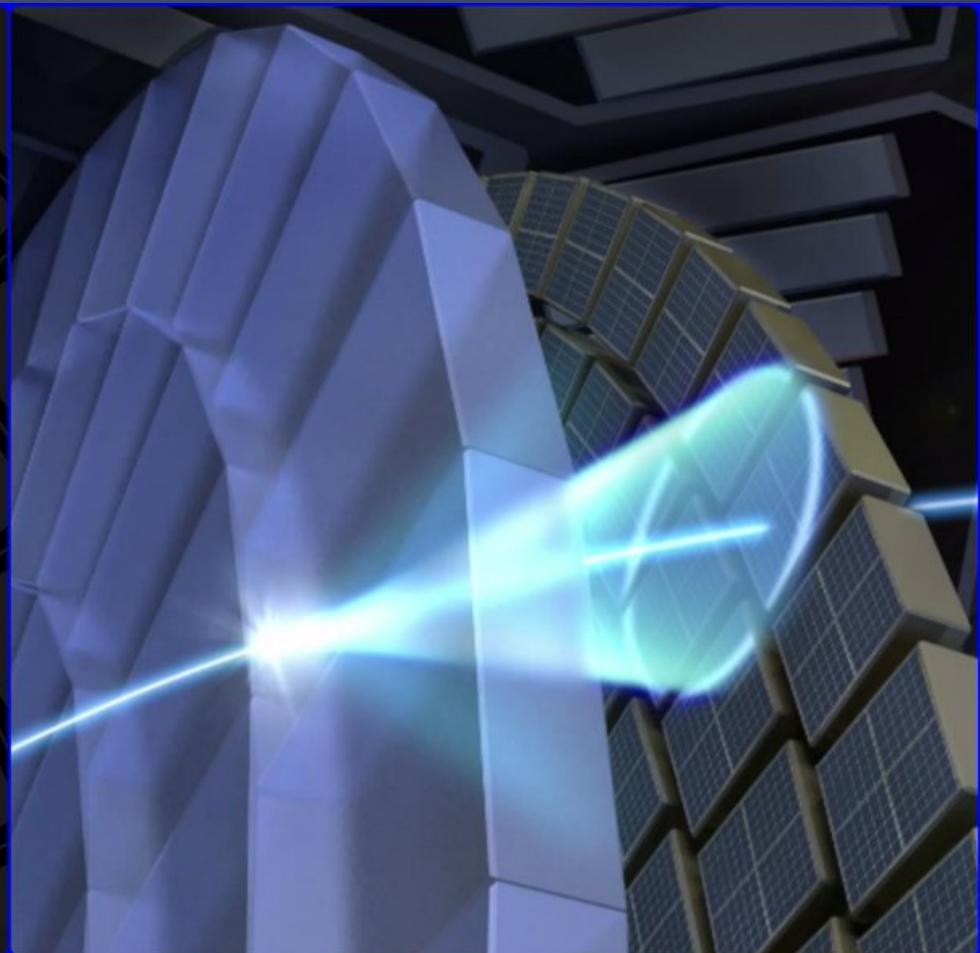
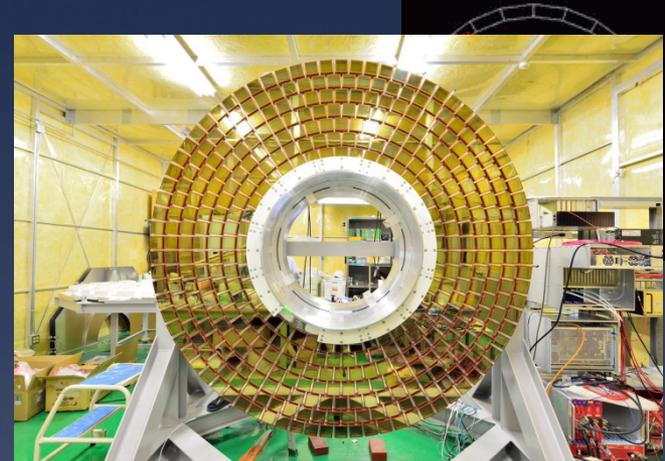
Ma le particelle più pesanti sono meno veloci !



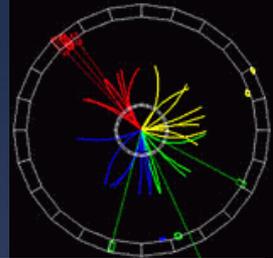
L'angolo della radiazione Cerenkov ci permette di identificare la tipologia di particella che ha attraversato il rivelatore



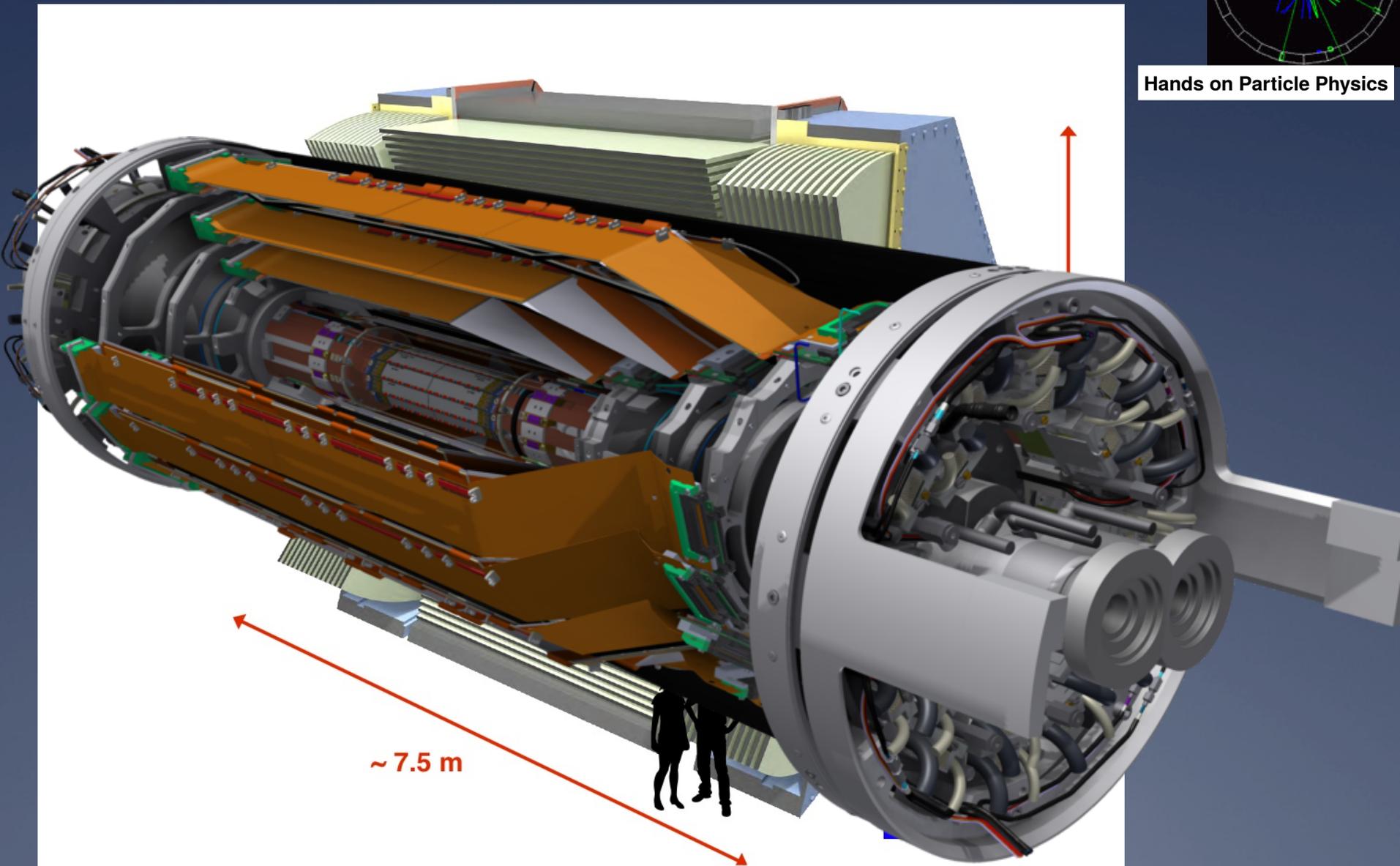
il rivelatore ARICH nell'esperimento Belle II



Il rivelatore BELLE II



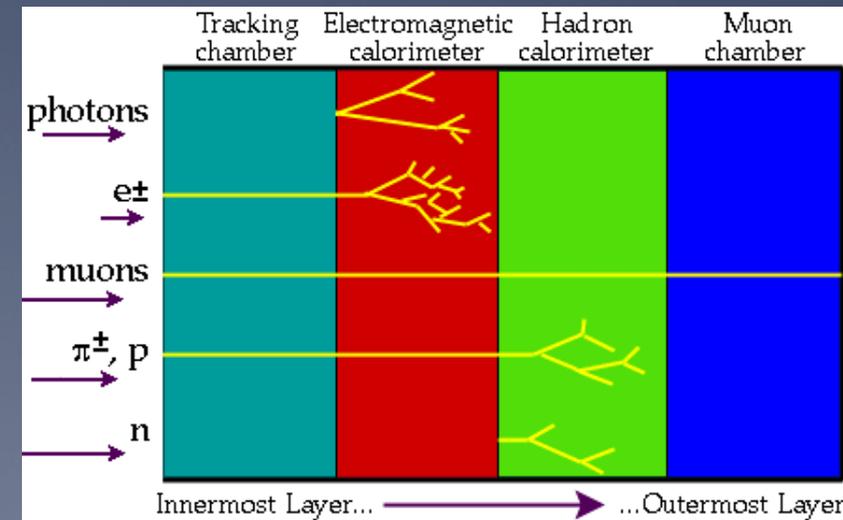
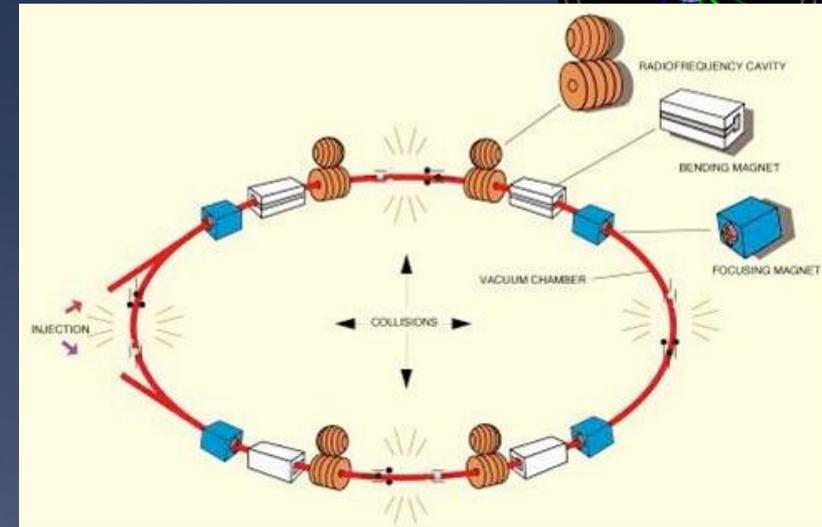
Hands on Particle Physics



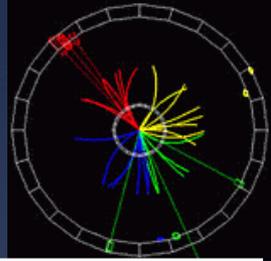
~ 7.5 m

Riepilogando...

- Gli acceleratori sono lo strumento per studiare la fisica delle particelle elementari
- I rivelatori sfruttano gli effetti del passaggio delle particelle attraverso la materia per
 - misurare l'energia delle particelle
 - Identificare le particelle



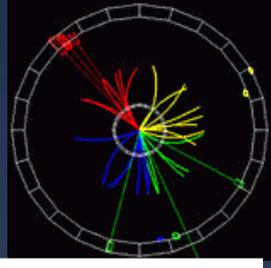
Prime collisioni osservate in Belle II



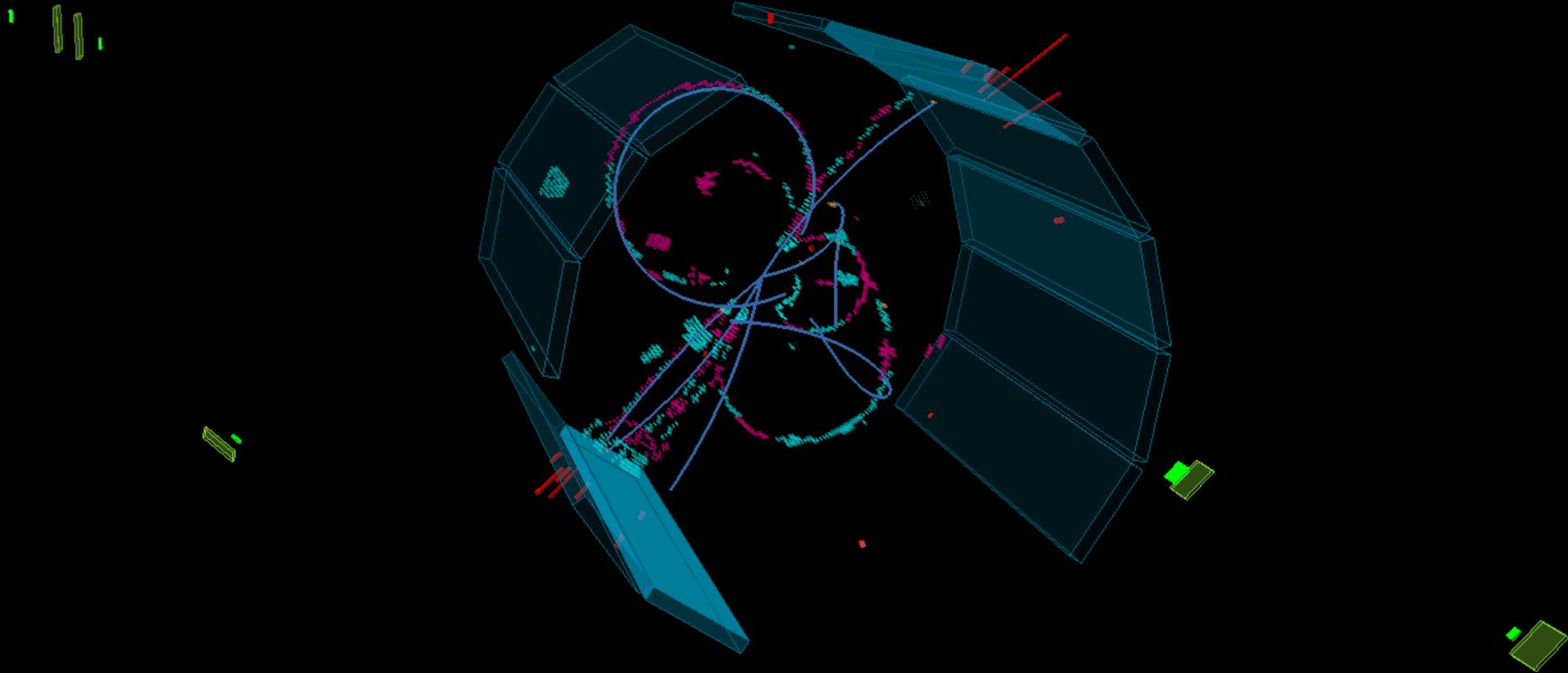
Hands on Particle Physics

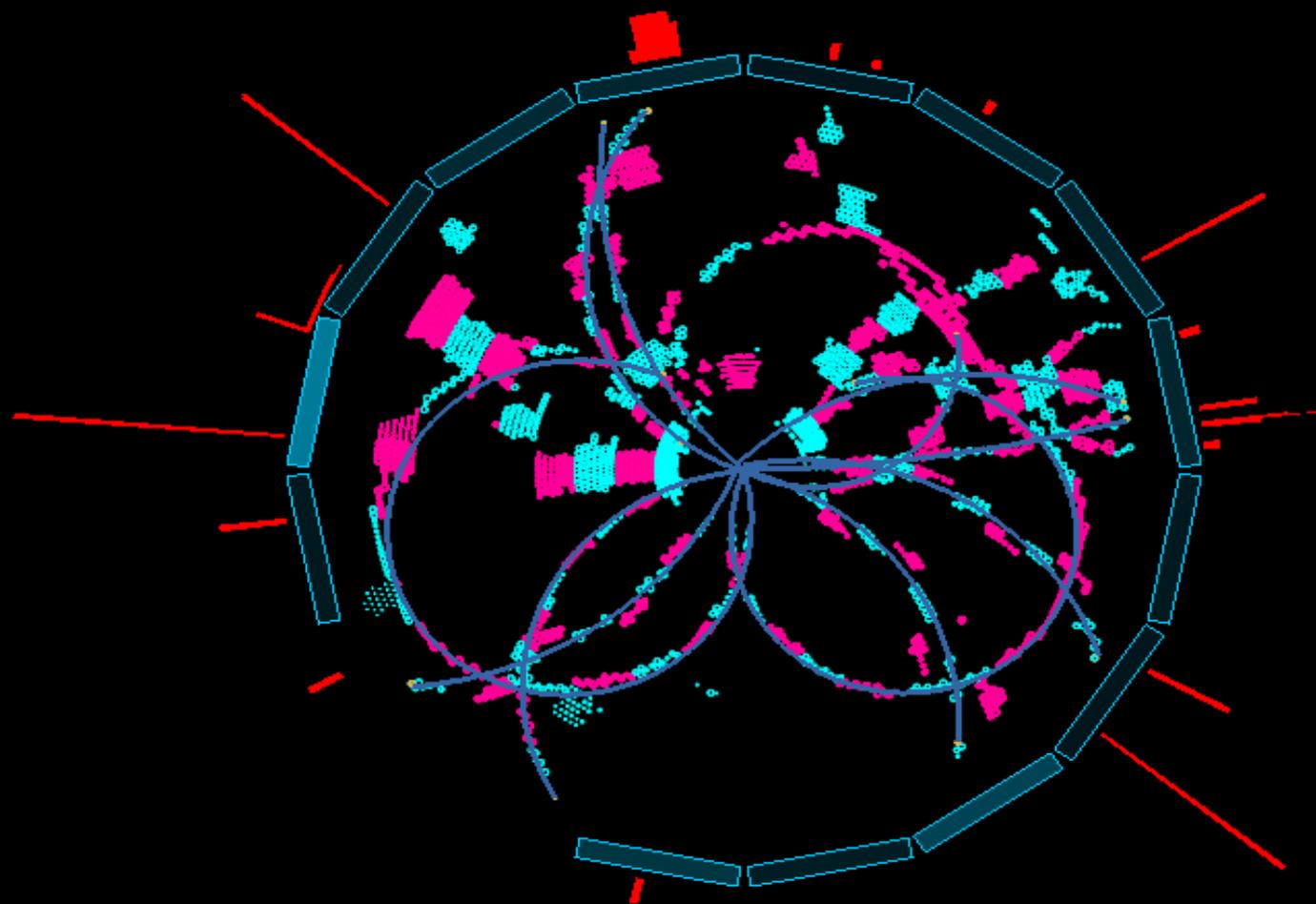


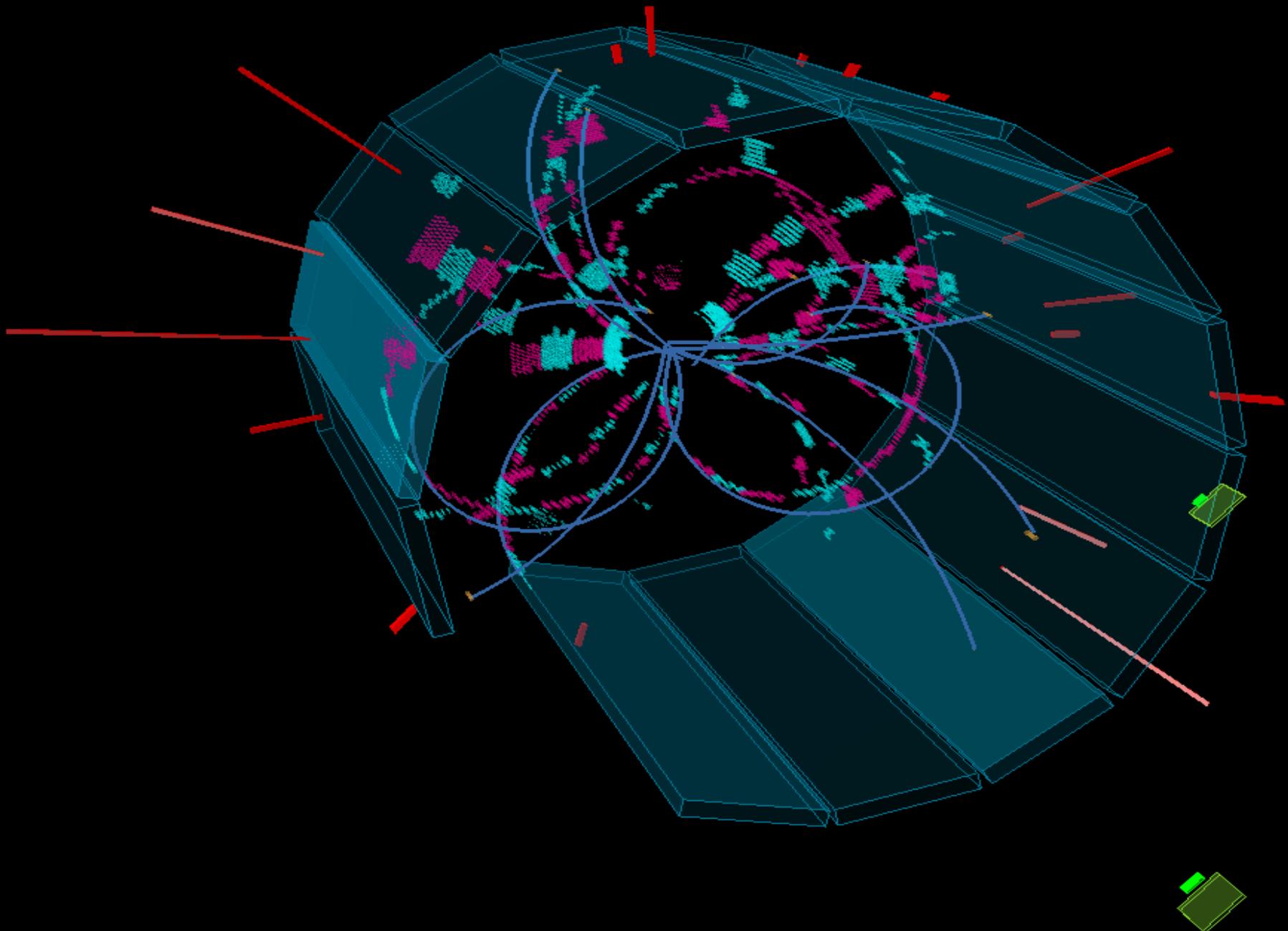
Alcuni esempi di eventi acquisiti



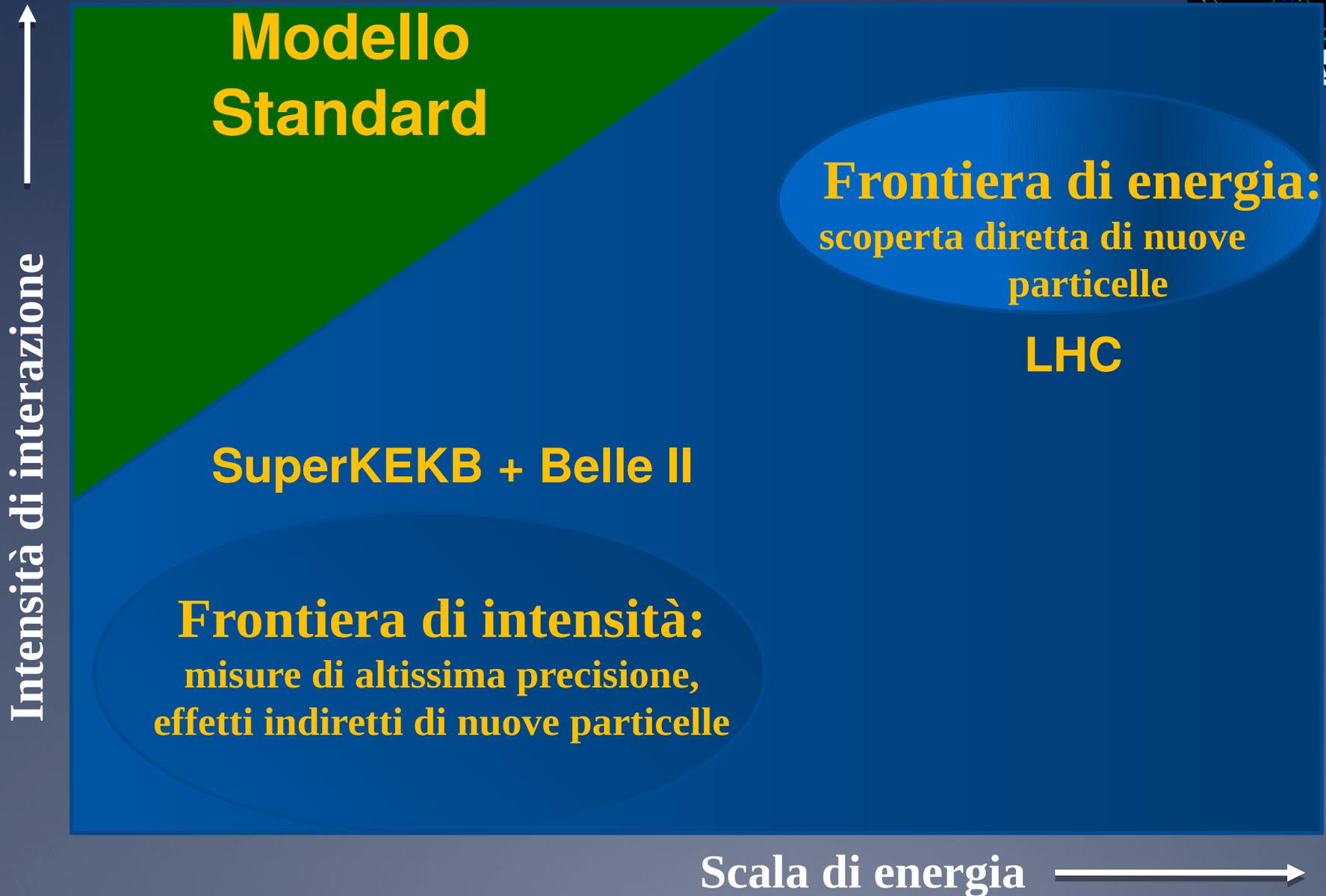
Hands on Particle Physics







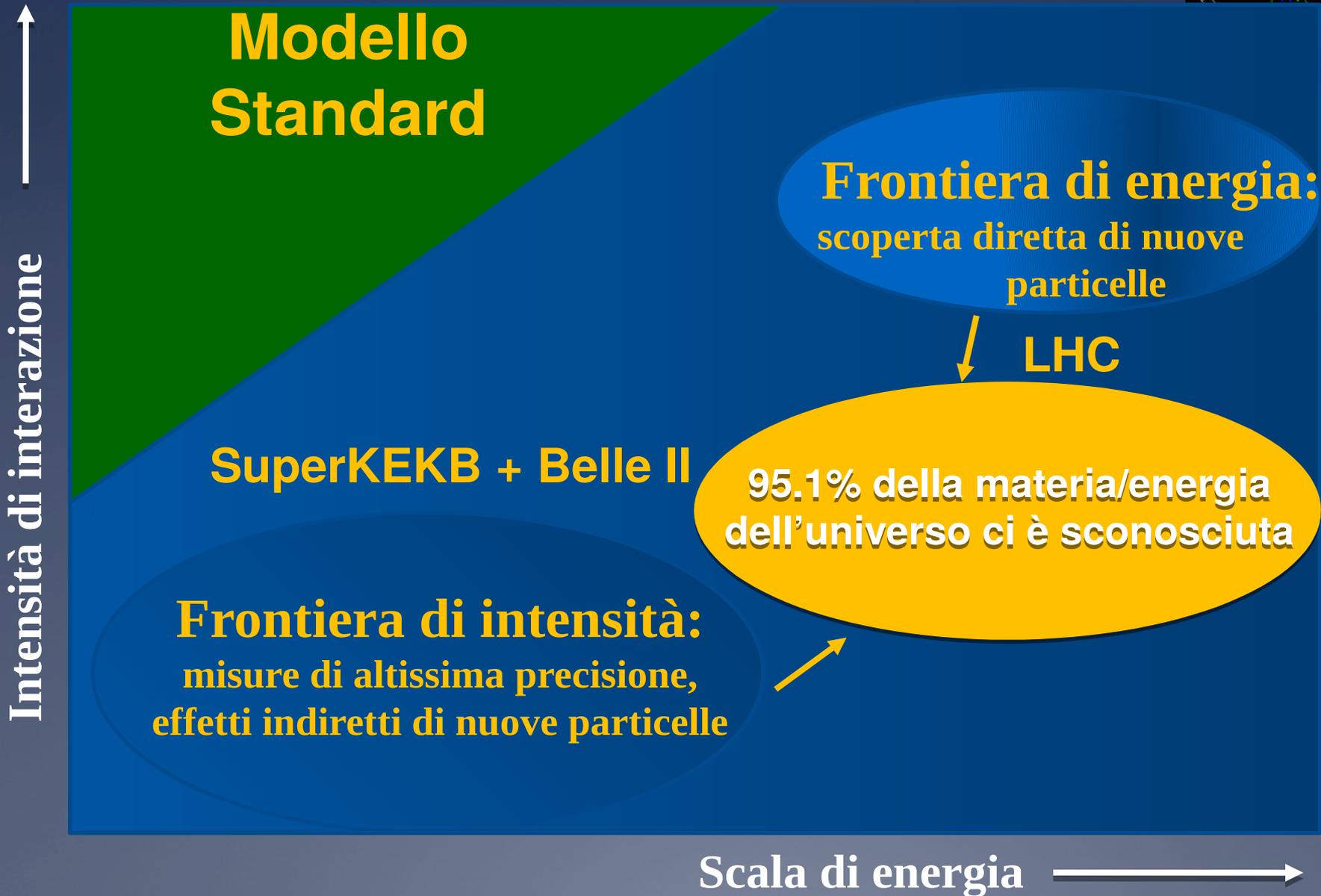
Due diverse frontiere

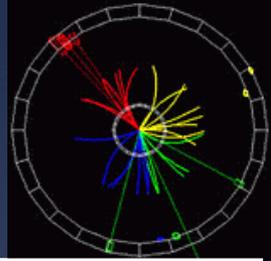


Due diverse frontiere



ysics

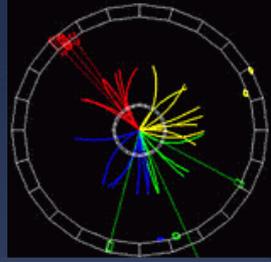




Hands on Particle Physics

BACKUP

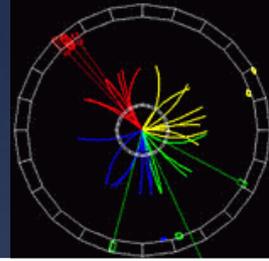
Come si identifica un neutrino?



- ▮ I neutrini, così come i muoni sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori
- ▮ Al contrario dei muoni i neutrini interagiscono molto poco con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili
- ▮ I neutrini vengono identificati come quantità di moto mancante
 - Ci si aspetta di avere nello stato finale la stessa quantità di moto che c'era nello stato iniziale (principio di conservazione)
 - se manca qualcosa probabilmente l'ha portato via un neutrino



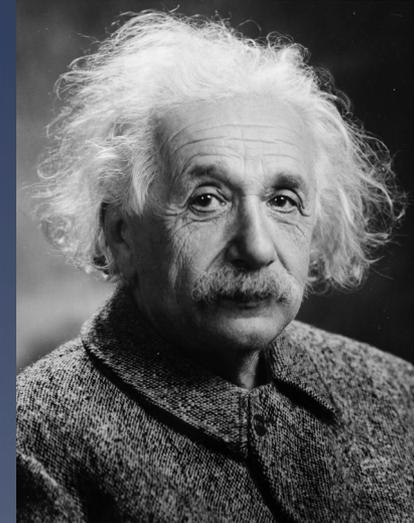
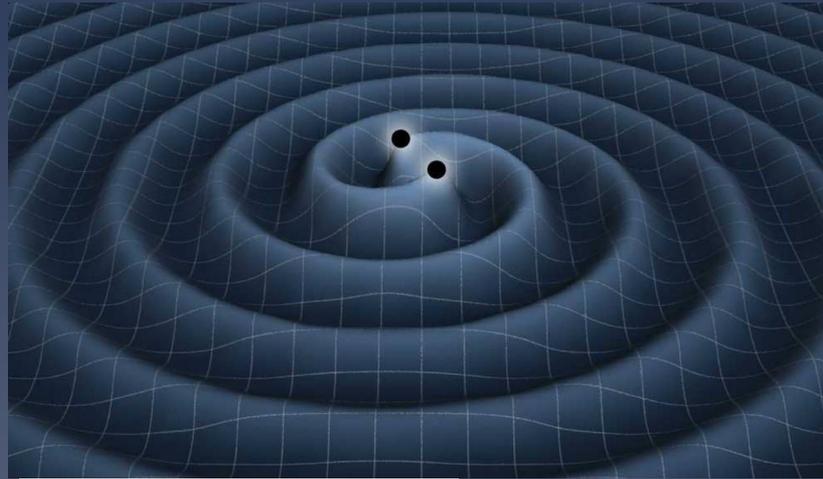
E ora?



Hands on Particle Physics

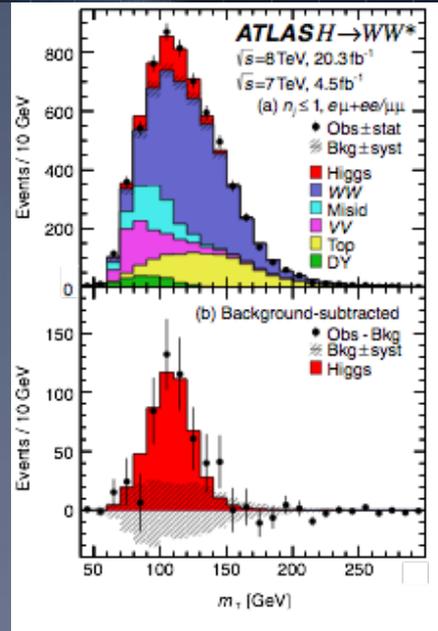
I due modelli standard delle interazioni fondamentali sono completi:

Onde gravitazionali:
Relatività Generale
Gravità

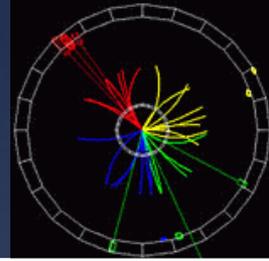


Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni
Fondamentale
Interazione Forte,
Elettromagnetica e
Debole



E ora?



I due modelli standards delle interazioni fondamentali sono completi:

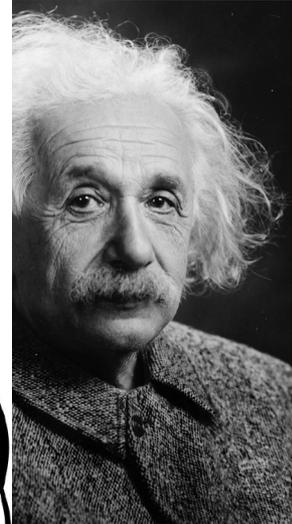
Onde gravitazionali
Relatività Generale
Gravità

Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni

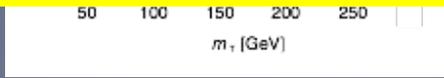


... on Particle Physics



Questi due modelli Standard sembrano inconciliabili, nuova Fisica potrebbe nascondersi dietro l'angolo per spiegarne il legame.

Debole



- 1) cercare segnali di nuova Fisica ad LHC, usando canali fino ad oggi inesplorati: hh
- 2) Iniziare a pensare alle macchine del futuro

Future Circular Collider

Circumference: 80-100 km

Energy: 100 TeV (pp)
>350 GeV (e^+e^-)

Large Hadron Collider

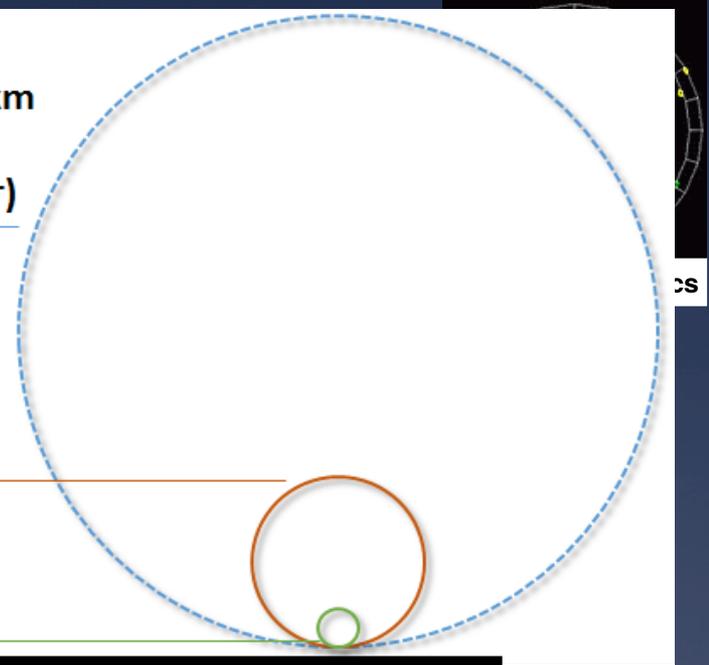
Circumference: 27 km

Energy: 14 TeV (pp)
209 GeV (e^+e^-)

Tevatron (closed)

Circumference: 6.2 km

Energy: 2 TeV

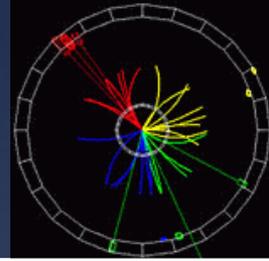


Future Circular Collider

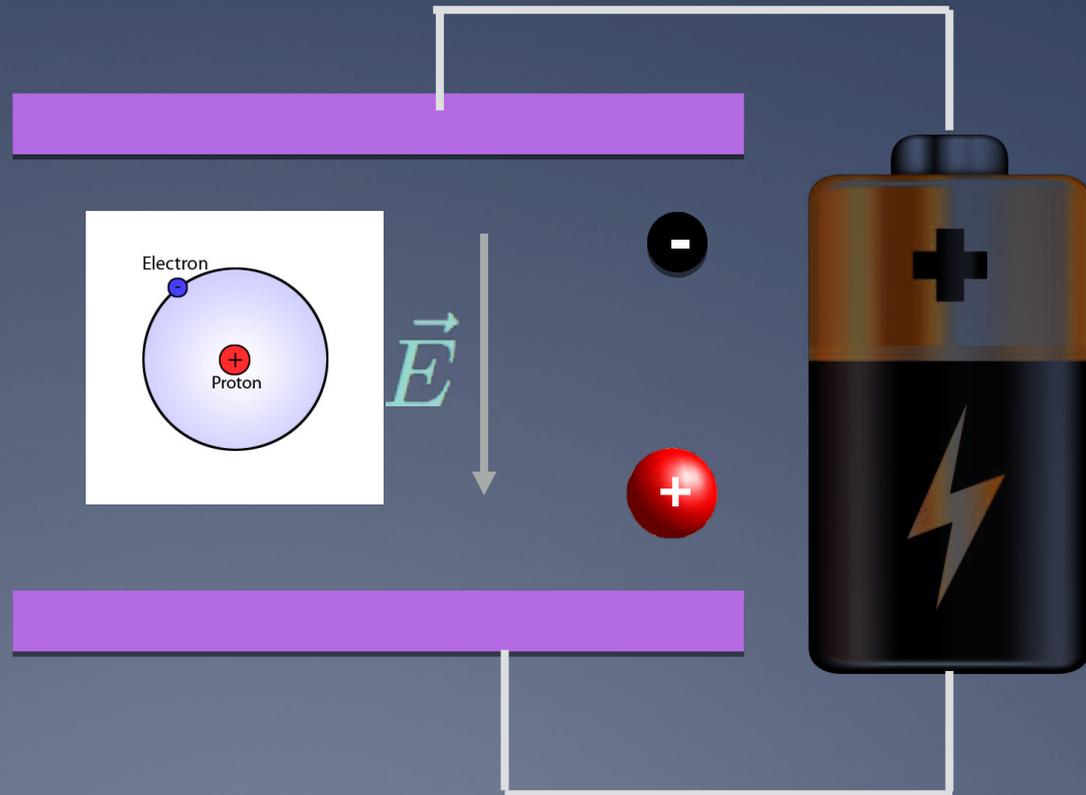
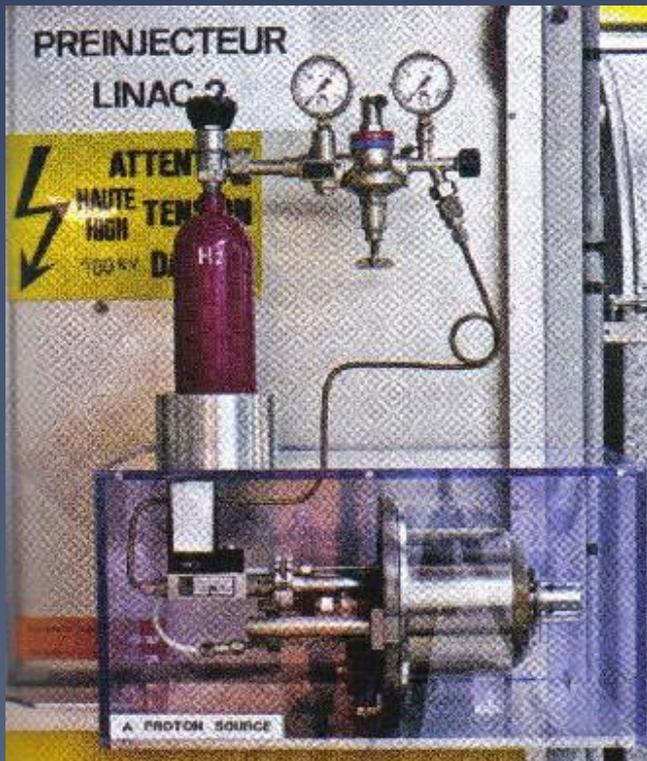




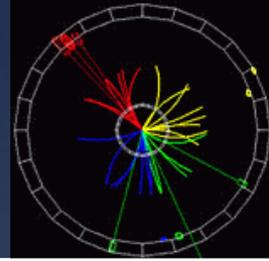
L'idrogeno proviene da una bombola e viene ionizzato in un contenitore con campo elettrico elevatissimo generato da un'elevata differenza di potenziale.



Hands on Particle Physics



Produzione di idrogeno



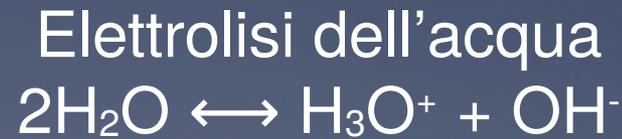
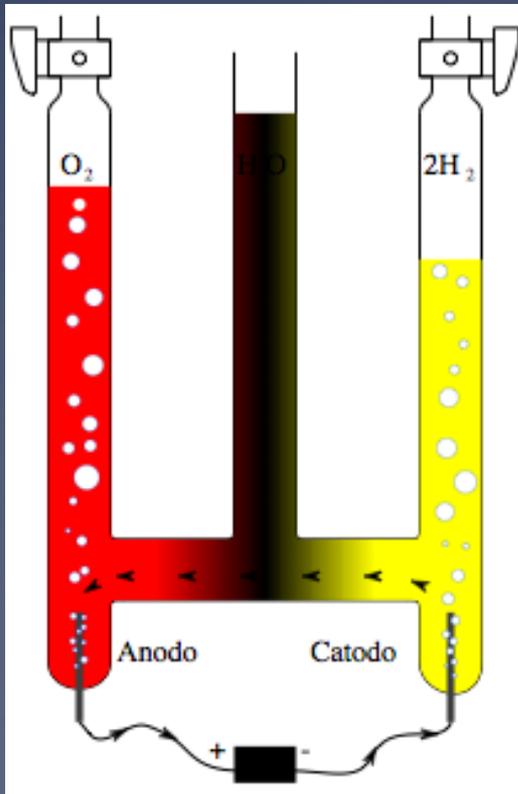
Hands on Particle Physics



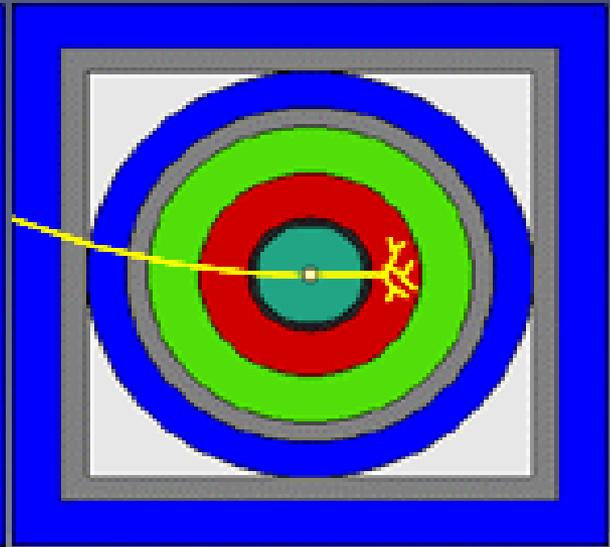
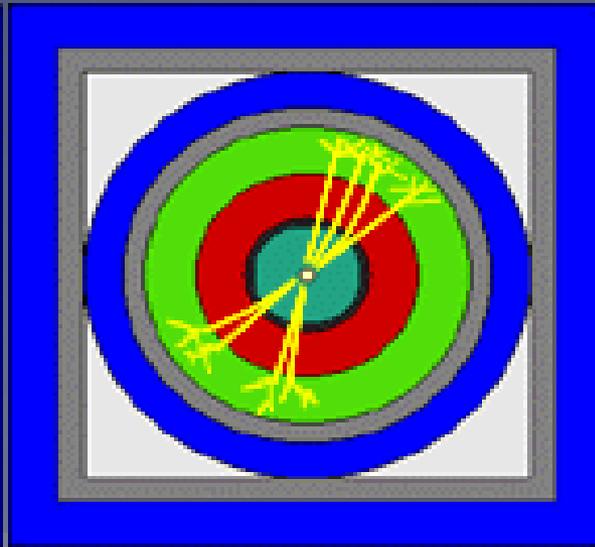
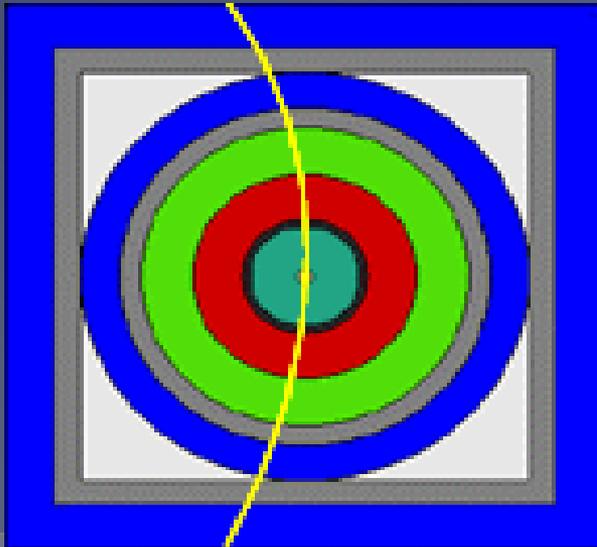
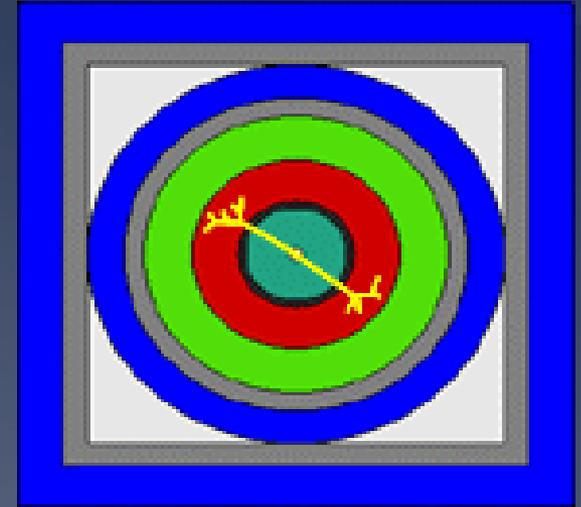
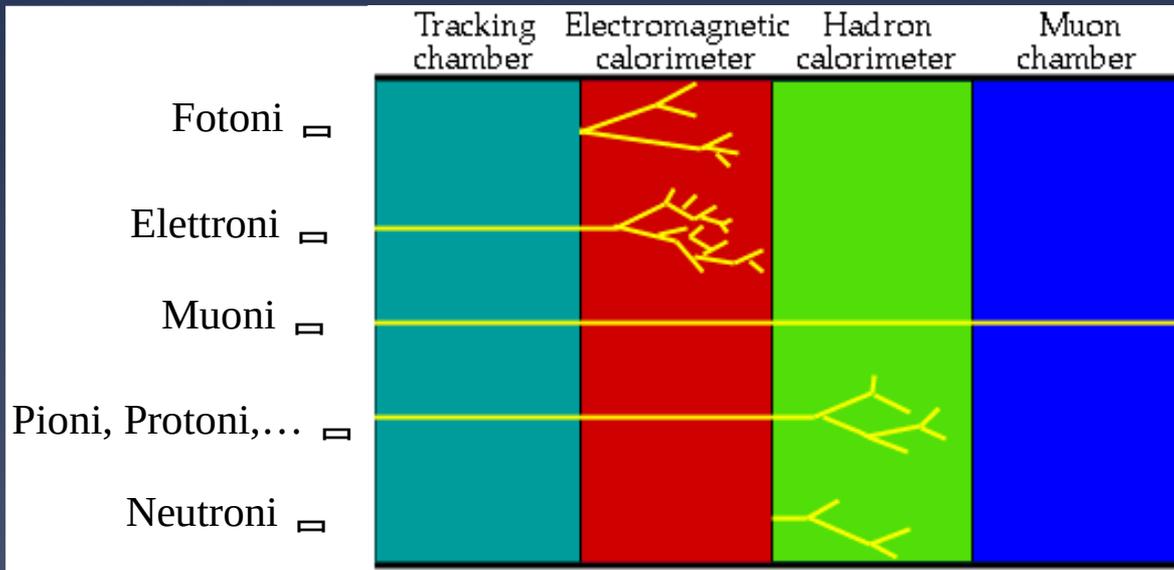
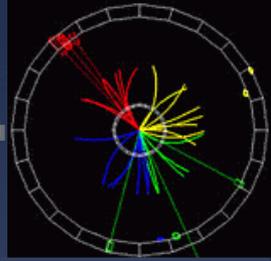
dal metano

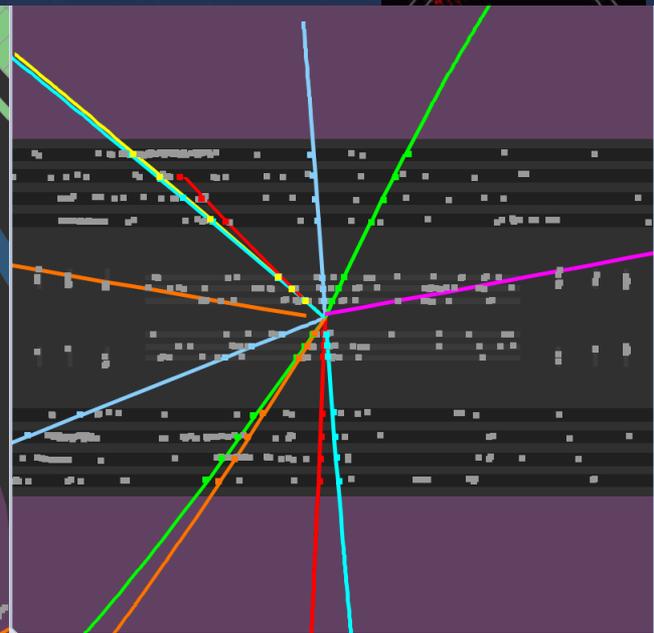
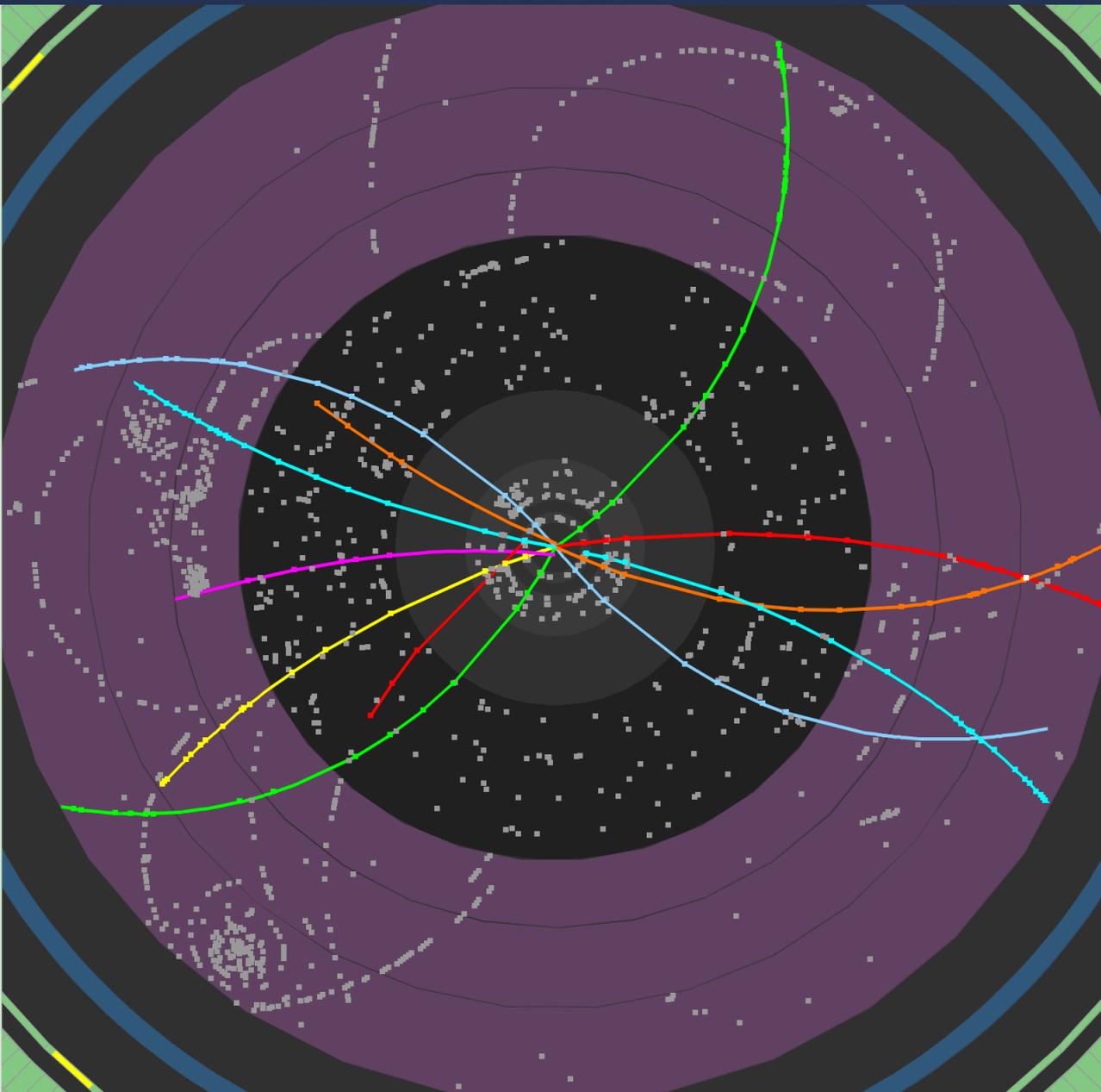


dal carbone



Riconoscere le particelle prodotte nelle collisioni





ATLAS
EXPERIMENT

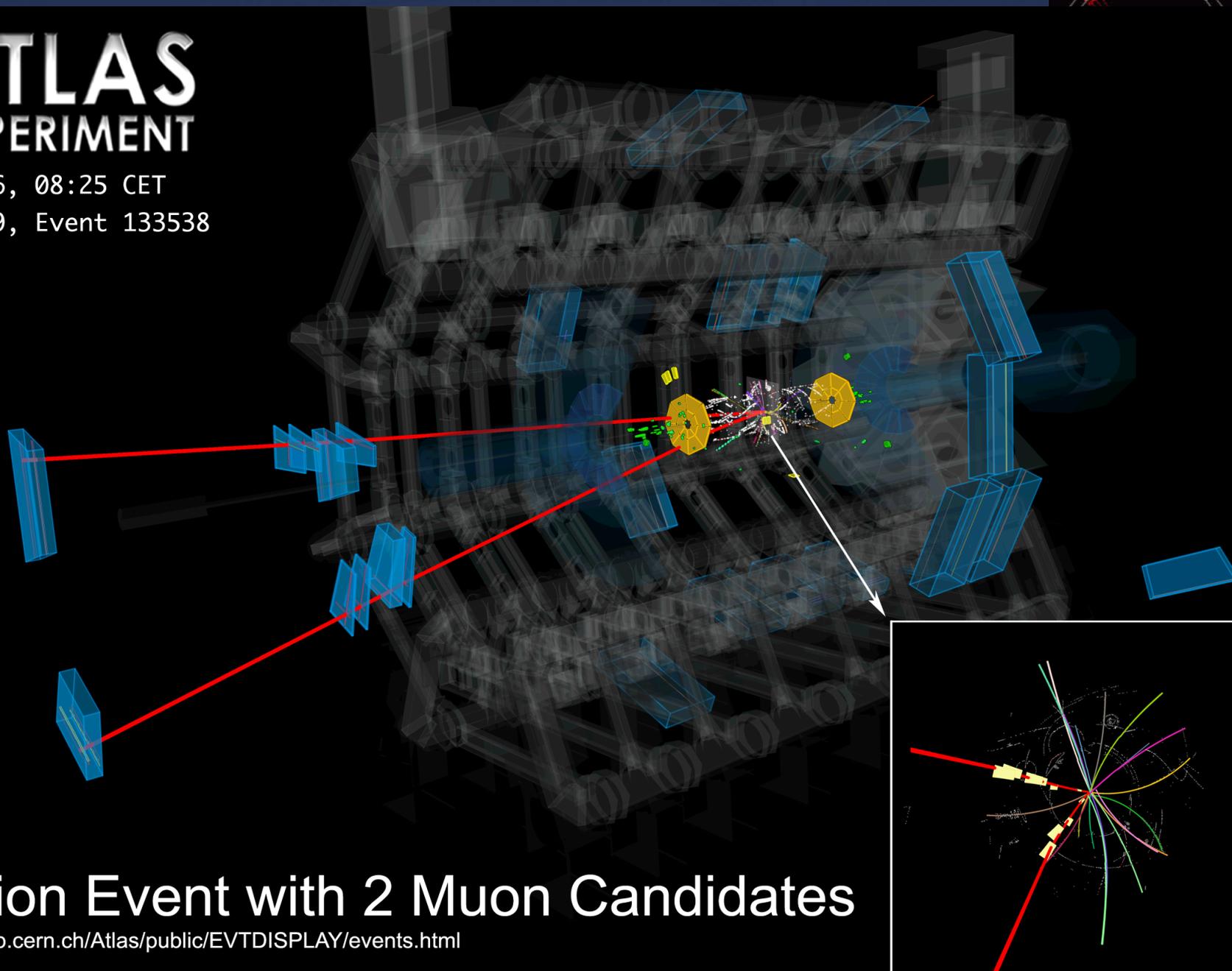
2009-12-06, 10:04 CET
Run 141749, Event 406601

Collision Event



ATLAS EXPERIMENT

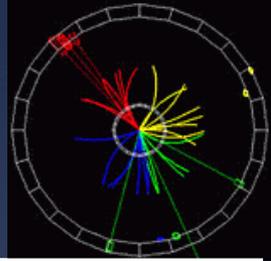
2009-12-06, 08:25 CET
Run 141749, Event 133538



Collision Event with 2 Muon Candidates

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>

A cosa serve tutto questo ???



Hands on Particle Physics

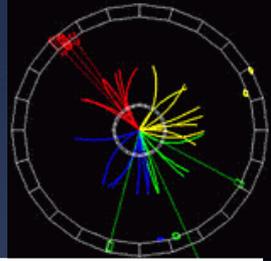
A nulla, ma è bello come l'arte, la musica e la poesia

A capire la natura, le stelle, il cosmo

A stimolare il superamento di frontiere intellettuali e tecnologiche senza l'assillo del profitto.

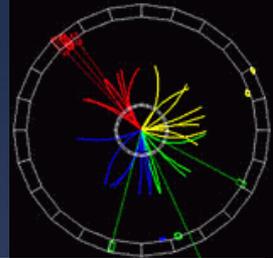
A produrre inaspettate ricadute tecnologiche i moltissimi campi :
Internet, GRID, terapie mediche, metodi diagnostici,
nuove tecnologie...

Ma quanto costa ???



Hands on Particle Physics

1 Km di autostrada	30 M€
1 caccia F16 :	25 M€
1 bombardiere B-2 stealth	1000 M€
Acceleratore DAPHNE + esp. KLOE	150 M€
Bilancio annuale INFN	270 M€
ATLAS o CMS	330 M€
1 lancio di uno shuttle	400 M€
Costruzione LHC	2 G€
Space shuttle	4 G€
Ponte sullo stretto di Messina	5 G€
Bilancio annuale difesa americana	400 G€



Hands on Particle Physics

LHC, pagato in **10 anni** dall'intera comunita' scientifica internazionale, costa come:

Una settimana di guerra in Iraq

Un centesimo di quanto stanziato dagli USA per contrastare il crack delle banche

Quanto viene speso al mondo in **una settimana**, per pubblicita'

Quattro bombardieri B-2

Meno di un centesimo della spesa militare mondiale **annua**

LHC e' costato ad **ogni cittadino italiano**:

1 euro e 20 centesimi l'anno, per 10 anni.

Per ogni euro speso dallo stato italiano per LHC, 1 euro e mezzo e' rientrato come commesse alle industrie italiane.

La ricerca scientifica e' anche un ottimo ritorno economico !

Prima della collisione

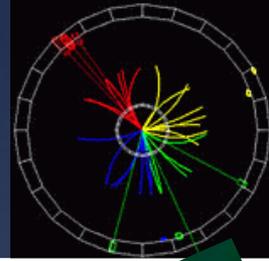
$$E_{total} = E_{proton1} + E_{proton2} = 2E$$

elettrone

Energia: E_1

Energia: E_2

positrone

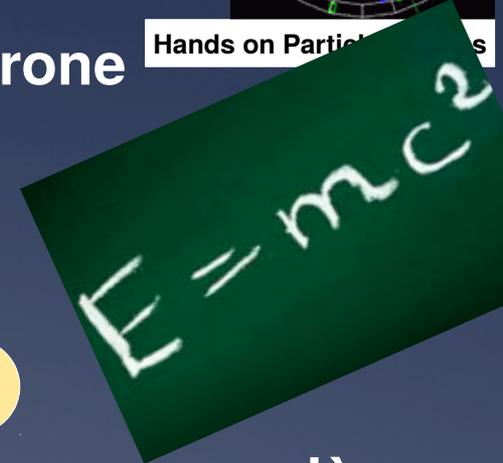


Hands on Particle Physics

Dopo la collisione

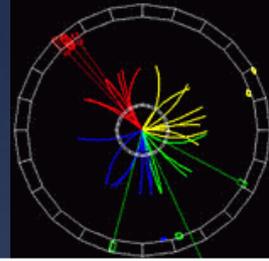


...nuove
particelle,
conosciute e
no, sono create
dall'energia



... più
l'energia è
alta e più si
ha la
probabilità
di produrre
particelle di
grande
massa

I raggi cosmici



Hands on Particle Physics

Sulla terra arriva una radiazione altamente energetica costituita in gran parte da protoni, poi da elettroni, particelle α , fotoni, con piccole componenti di antimateria (positroni ed antiprotoni).

La gran parte dei raggi cosmici viene fermata dall'atmosfera terrestre dando vita a sciame di particelle di gran lunga meno energetici.

I protoni al di fuori dell'atmosfera possono raggiungere energie 100 milioni di volte più alte che negli acceleratori che siamo in grado di concepire.

