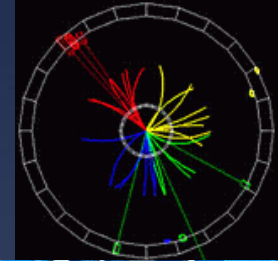


Hands on Particle Physics

European Particle Physics Masterclasses for High School Students

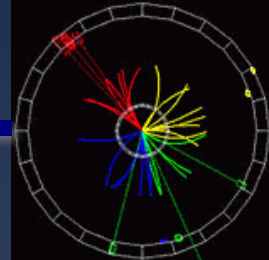


Esperimenti in Fisica delle Particelle

3 Marzo 2021, Enrico Graziani (INFN – Roma Tre)

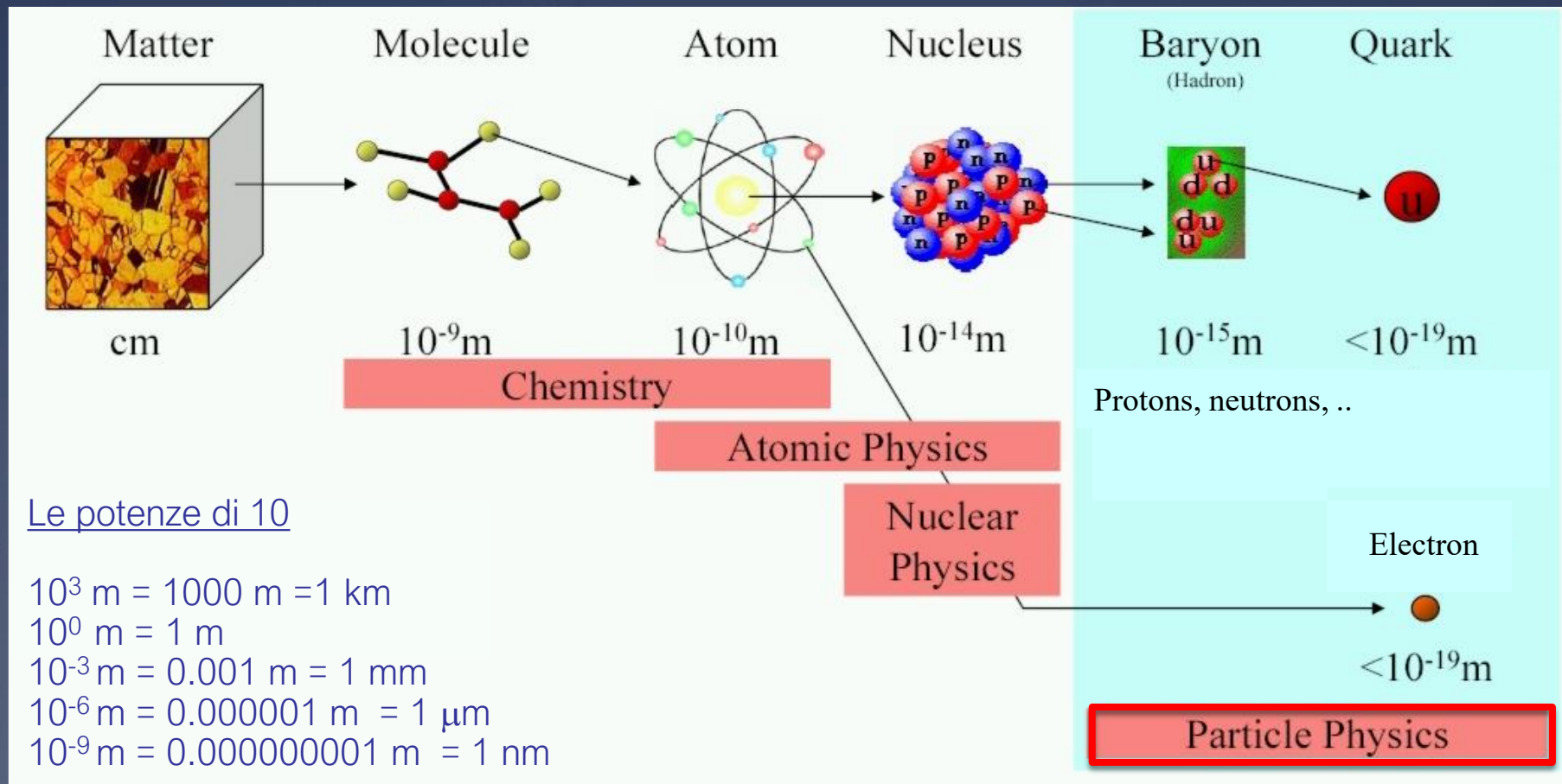


La “scala” del sistema da studiare



Hands on Particle Physics

Qual e' la dimensione degli oggetti che vogliamo osservare ?



Le potenze di 10

$$10^3 \text{ m} = 1000 \text{ m} = 1 \text{ km}$$

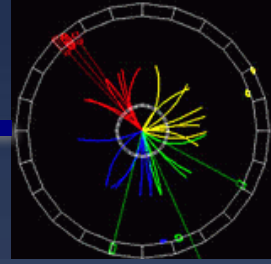
$$10^0 \text{ m} = 1 \text{ m}$$

$$10^{-3} \text{ m} = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

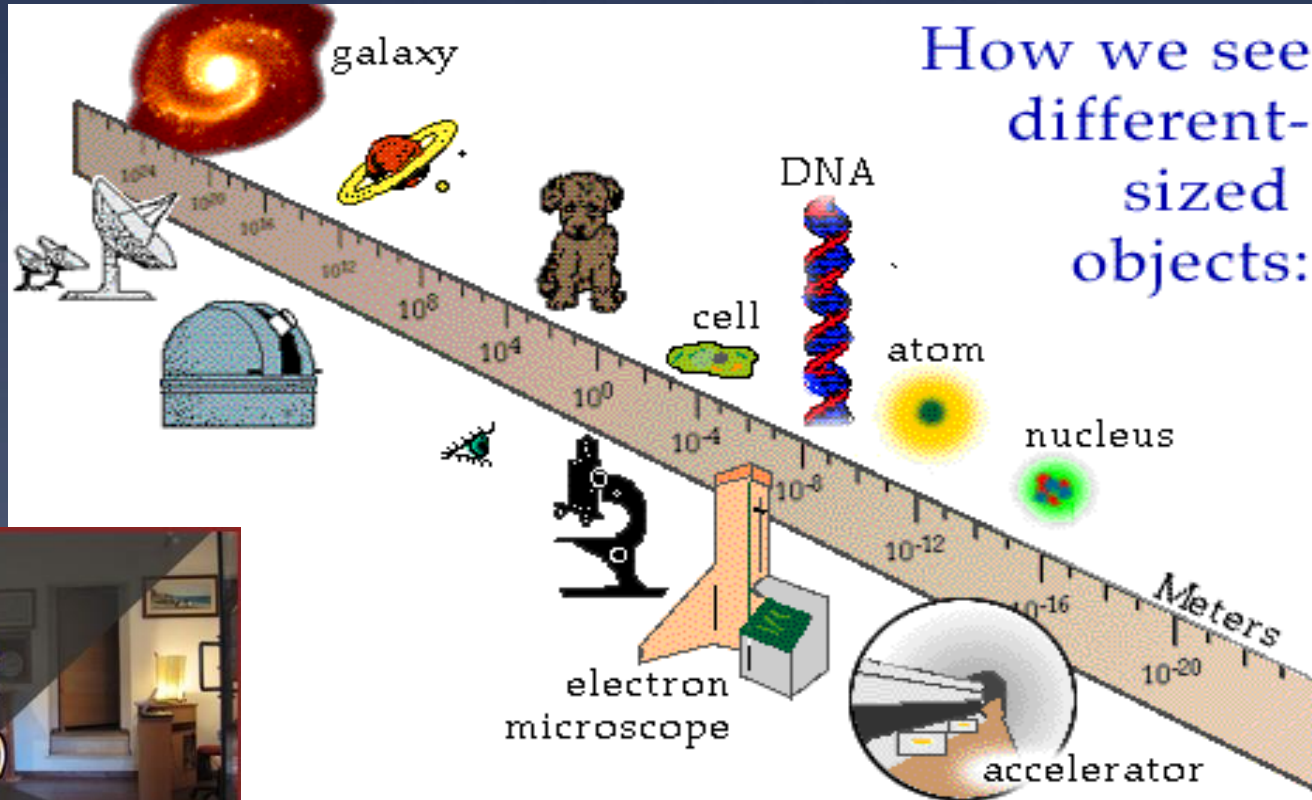
$$10^{-6} \text{ m} = 0.000001 \text{ m} = 1 \text{ }\mu\text{m}$$

$$10^{-9} \text{ m} = 0.000000001 \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Come osserviamo gli oggetti ?



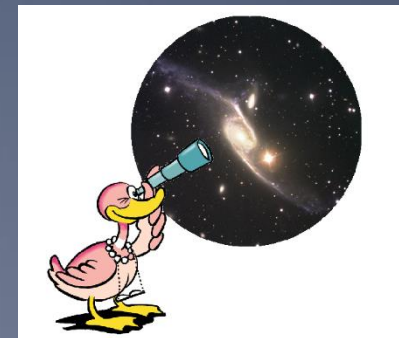
- Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare



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.

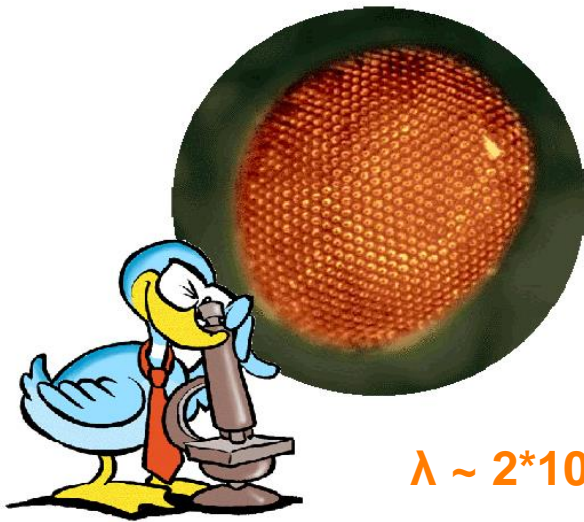
Ma come guardiamo gli oggetti microscopici?



Osservazione degli oggetti microscopici



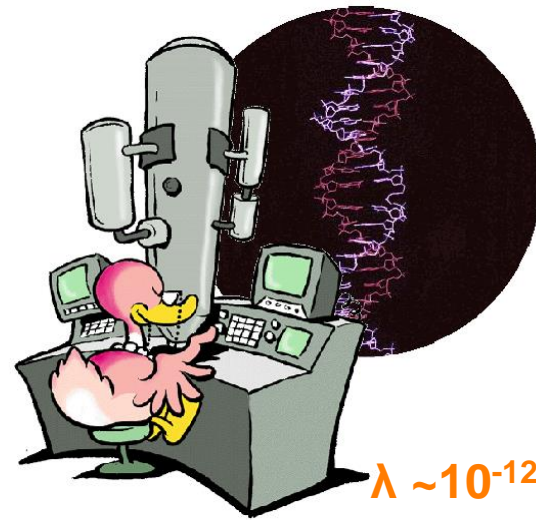
I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



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

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



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

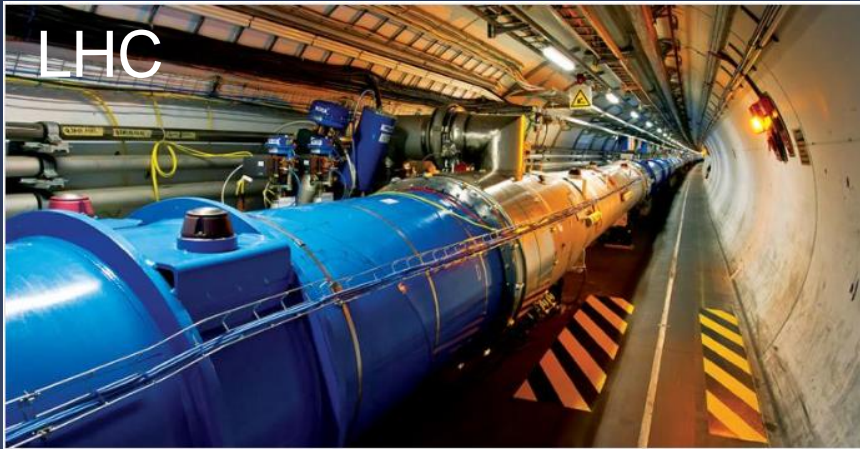
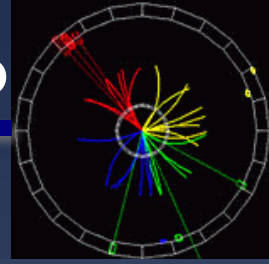
Gli elettroni di alta energia si comportano come onde, ma con una **LUNGHEZZA D'ONDA MOLTO PIU' PICCOLA DI QUELLA DELLA LUCE**

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

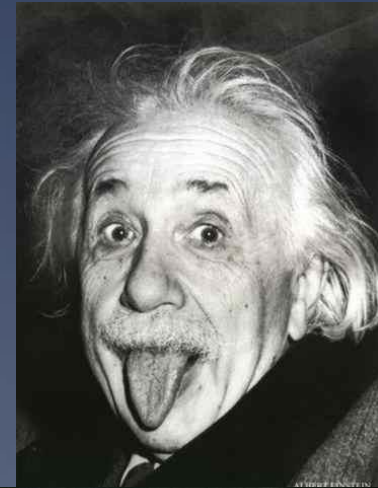


LHC

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**

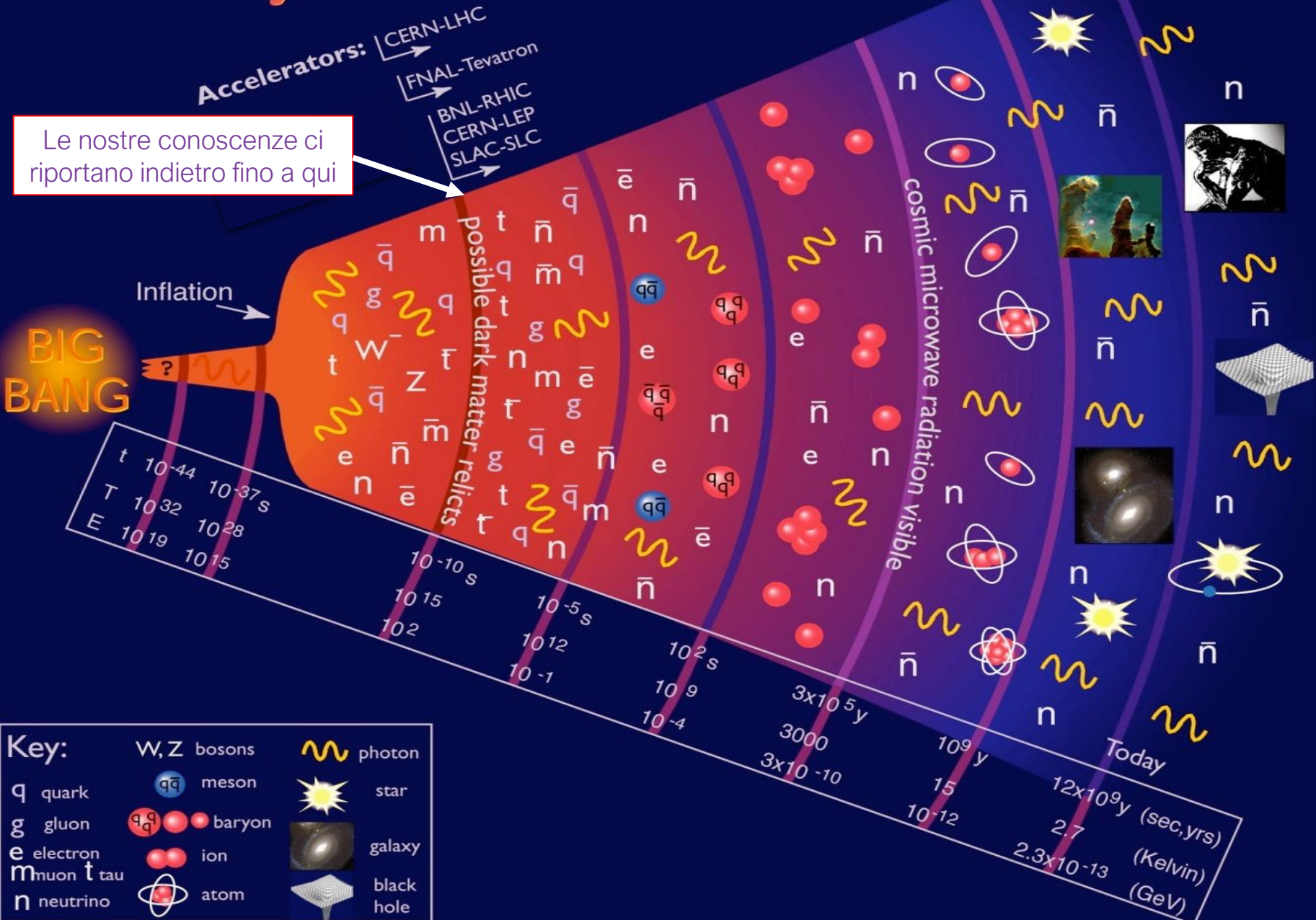


Perche' gli acceleratori di particelle ???

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



Le nostre conoscenze ci riportano indietro fino a qui

Accelerators: CERN-LHC
FNAL-Tevatron
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC-SLC

BIG BANG

Inflation

possible dark matter relicts

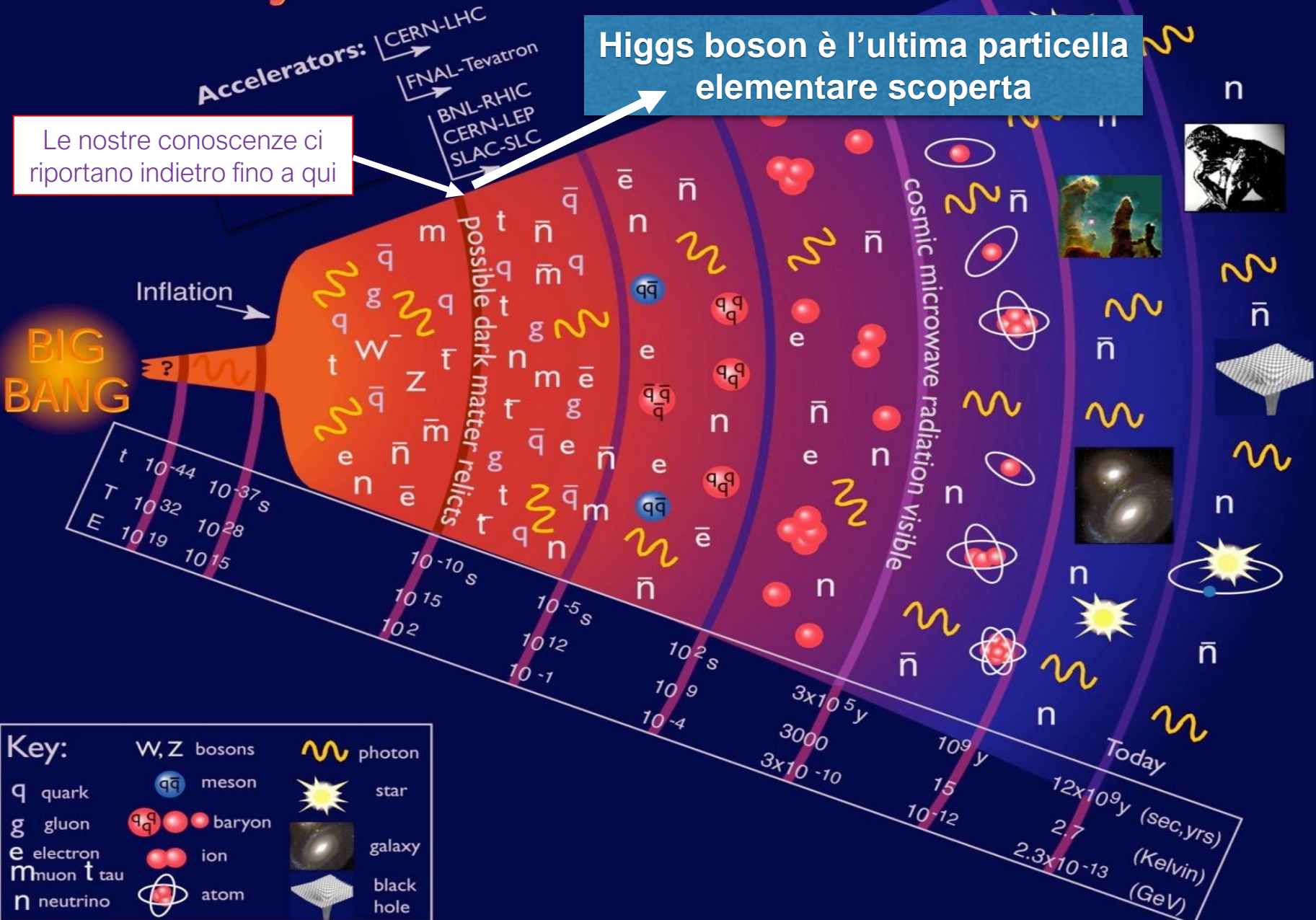
cosmic microwave radiation visible

Today

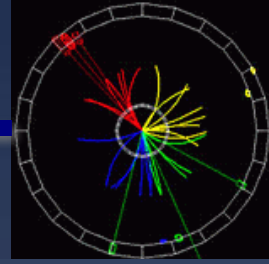
Key:

q quark	W, Z bosons	photon
g gluon	meson	star
e electron	baryon	galaxy
m muon	ion	black hole
t tau	atom	
n neutrino		

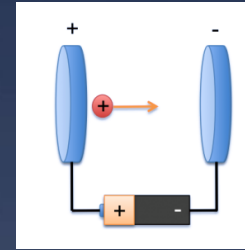
History of the Universe



Accelerare e "guidare" le particelle

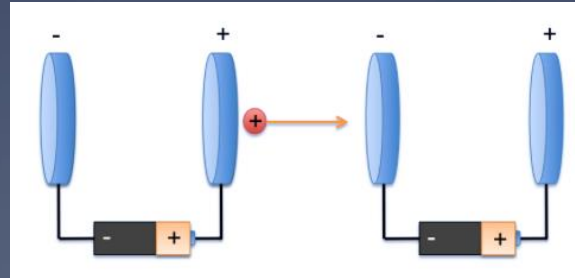
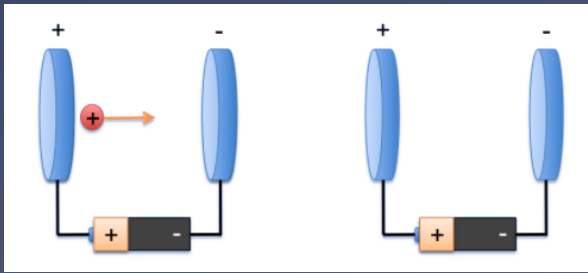


- Le particelle cariche vengono accelerate in un campo elettrico (un solo elettrodo necessiterebbe di una ddp elevatissima)



Solo campi elettrici per accelerare!

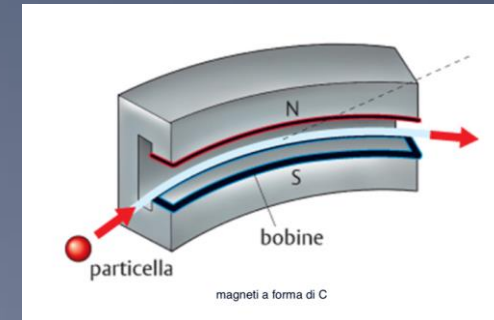
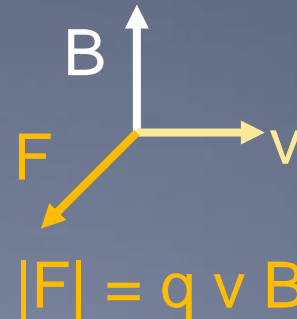
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto, e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico.



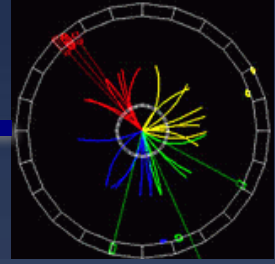
- Nella realtà qualcosa di simile all'inversione della polarità viene per esempio assicurata da un **generatore di radiofrequenza**, e la successione di elettrodi in molti casi è rimpiazzata da **cavità risonanti** come questa:



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



UNITA' DI MISURA



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

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

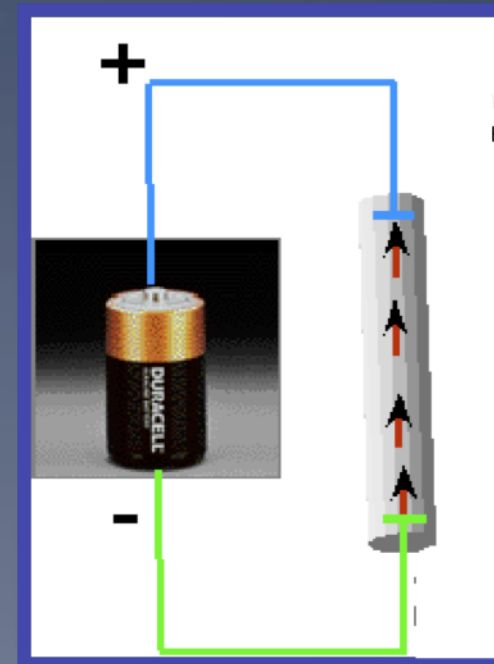
1 **keV** è mille elettronvolt (10^3 eV)

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**)

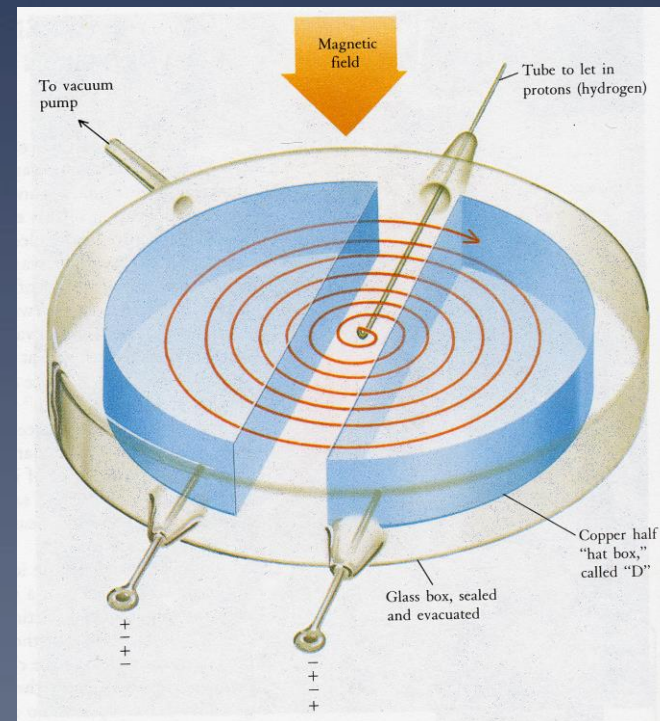
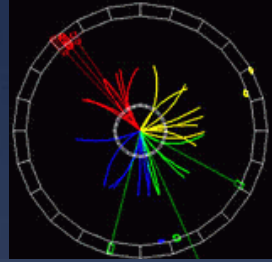


Cockroft Walton



CERN, protoni da 800 keV

CICLOTRONE



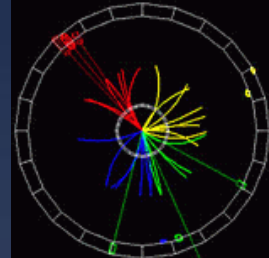
campi magnetici fanno seguire alle particelle traiettorie circolari.

1930, Lawrence, protoni da 100 MeV

Ernest
Lawrence
primo
ciclotrone
1930



La dimensione
dell'acceleratore
determina la massima
energia raggiungibile.

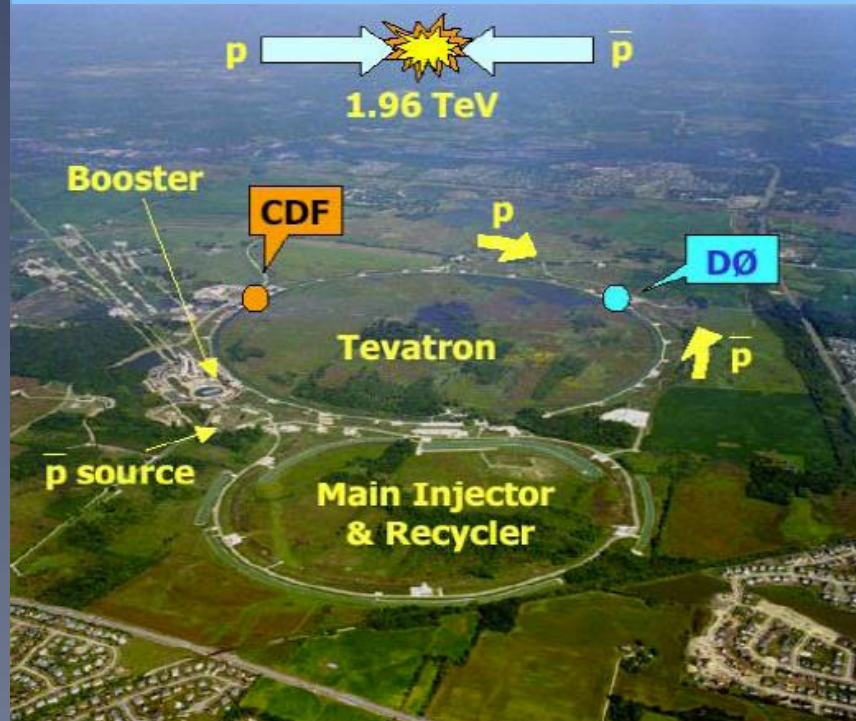


3 km, elettroni fino a ~50GeV



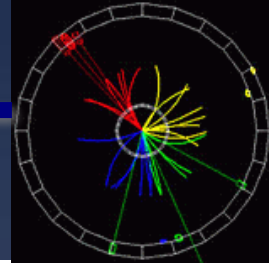
Stanford Linear Accelerator
Center (California)

raggio ~ 1 km, protoni ~1TeV



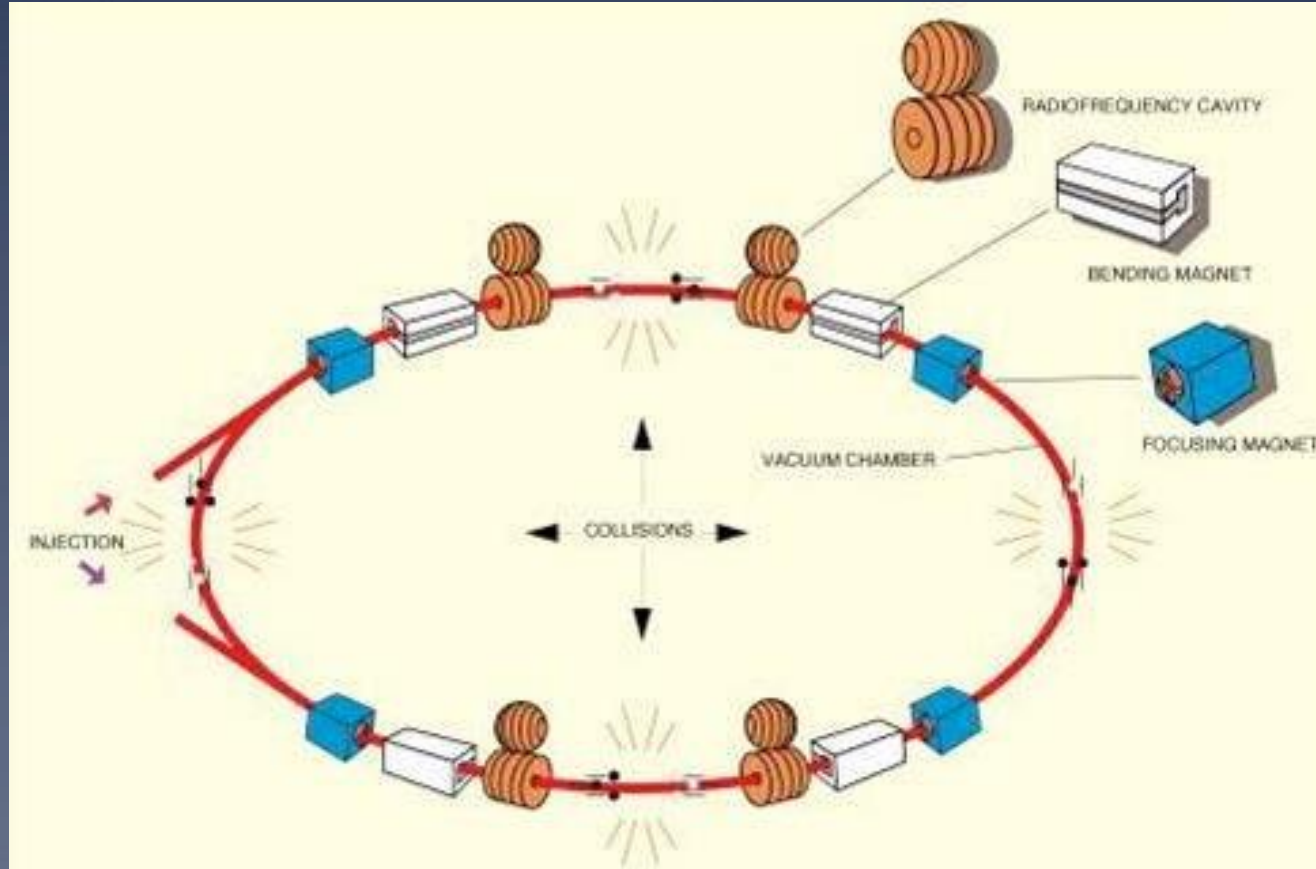
Fermilab (Chicago, IL)
Tevatron

I Collider



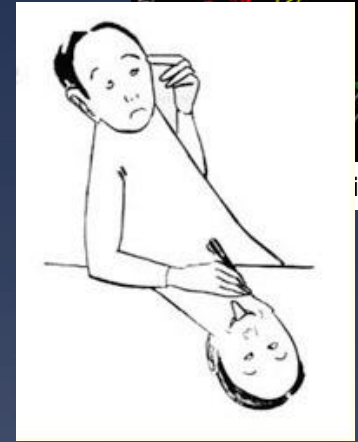
Hands on Particle Physics

- 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...**



ics

AdA (Anello di Accumulazione)

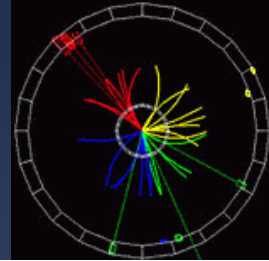


prime collisioni elettrone-positrone

Adone

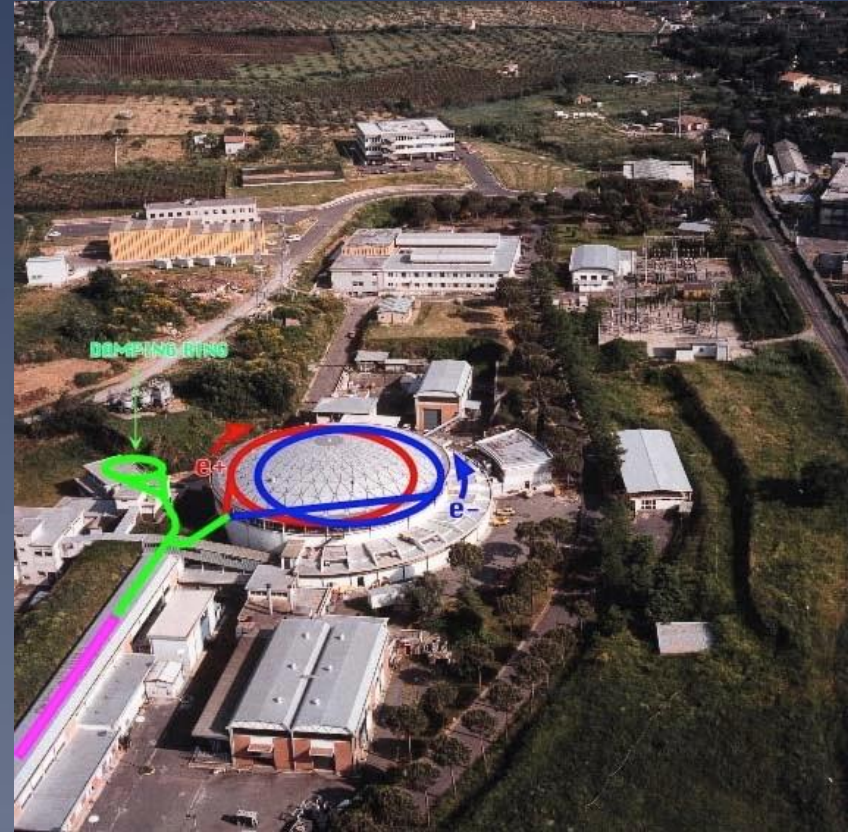
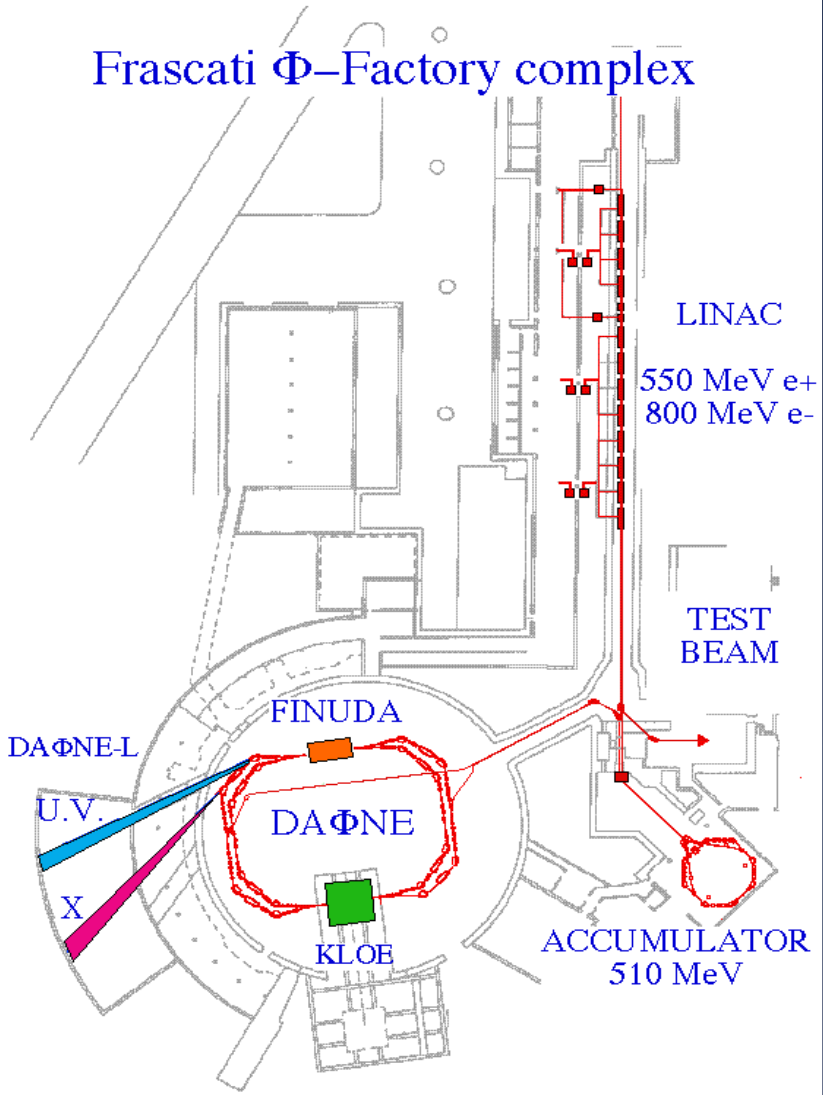


L'acceleratore DAΦNE a Frascati



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)

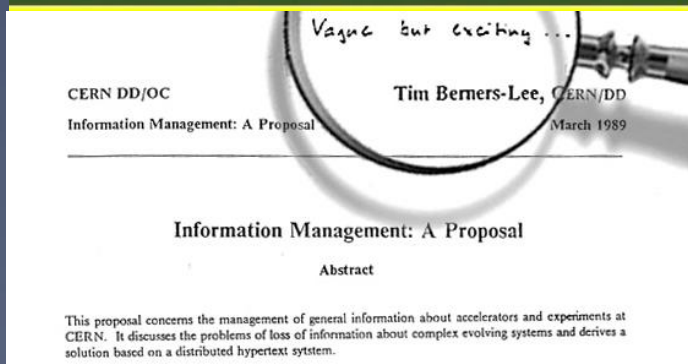
La fisica delle particelle elementari

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



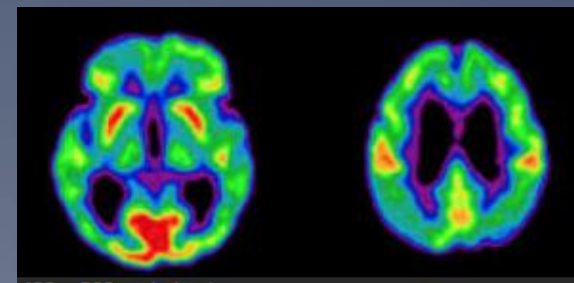
il Touch Screen



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



e la PET



II KEK

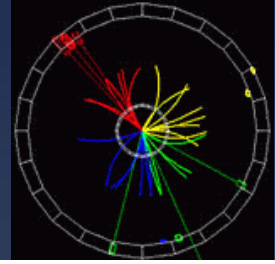
Laboratorio giapponese per la fisica delle alte energie.
Si trova a Tsukuba, non lontano da Tokyo.

Monte Tsukuba

SuperKEKB

An aerial photograph of the KEK (High Energy Accelerator Research Organization) facility in Tsukuba, Japan. The image shows a large complex of buildings and structures, including the SuperKEKB accelerator, which is highlighted by a red oval. A white arrow points from the text 'SuperKEKB' to the oval. The facility is situated in a valley, surrounded by fields and a small town. In the background, the Tsukuba Mountains are visible under a clear sky.

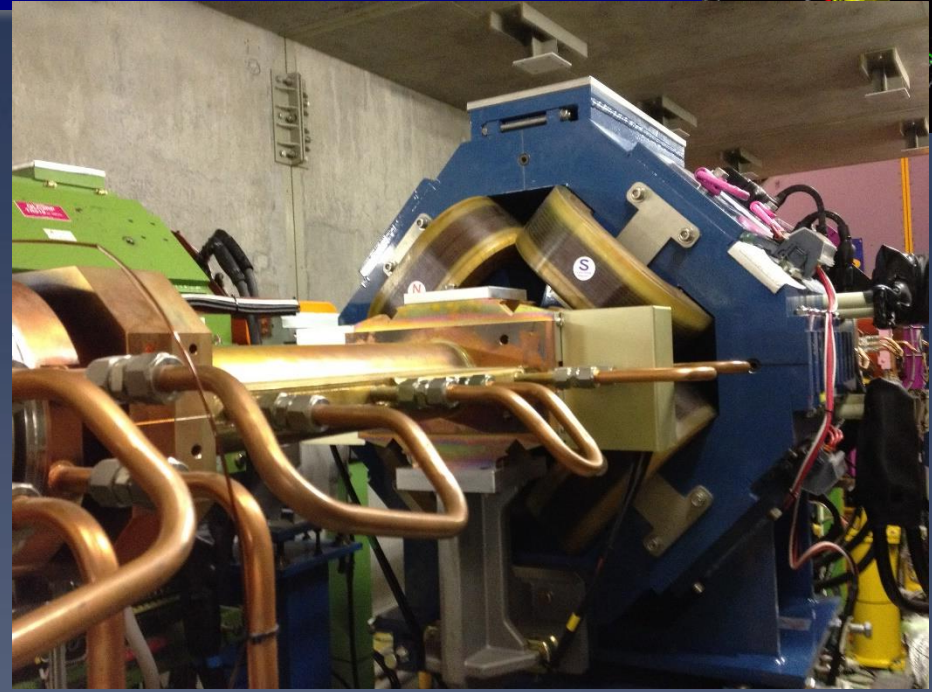
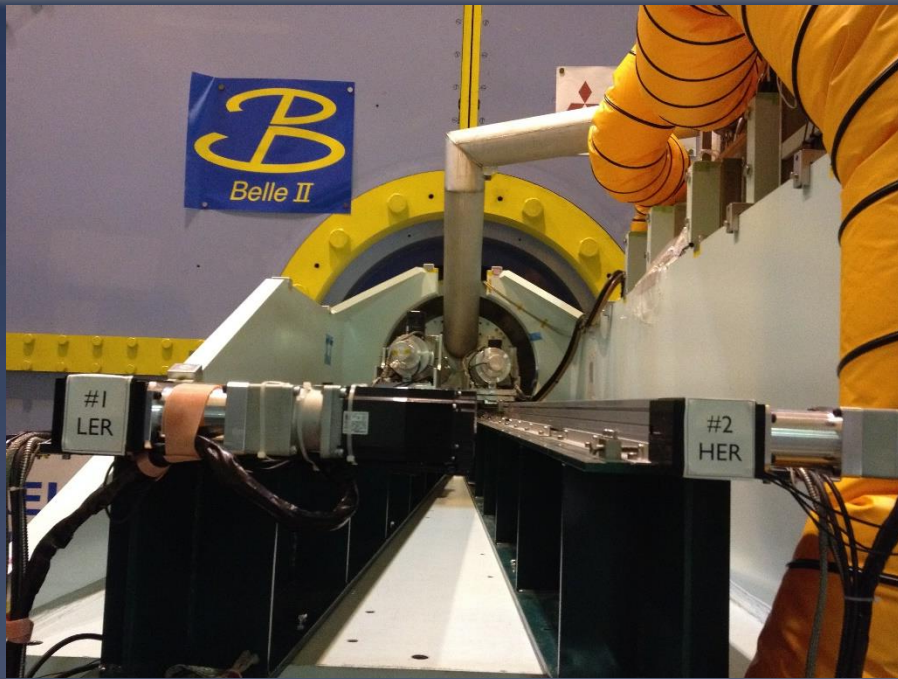
Intermezzo di cultura giapponese



Hands on Particle Physics

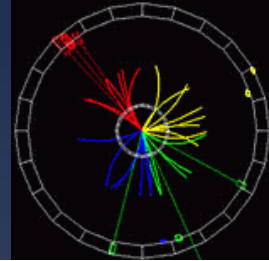
- Giappone in lingua originale è 日本 (pron. Nihon o Nippon)
- E' un'isola *composta* da circa 7000 isole!
- Il capo di stato è l'imperatore (天皇 tennō)
- Gli anni sono indicati a partire dall'ascesa al trono dell'imperatore in carica. Il periodo di regno, detto «era» ha un nome, anche nei documenti ufficiali. Quello attuale (imperatore Naruhito) si chiama «**reiwā**» e significa «armonia meravigliosa»

SUPERKEKB (elettrone-positrone)

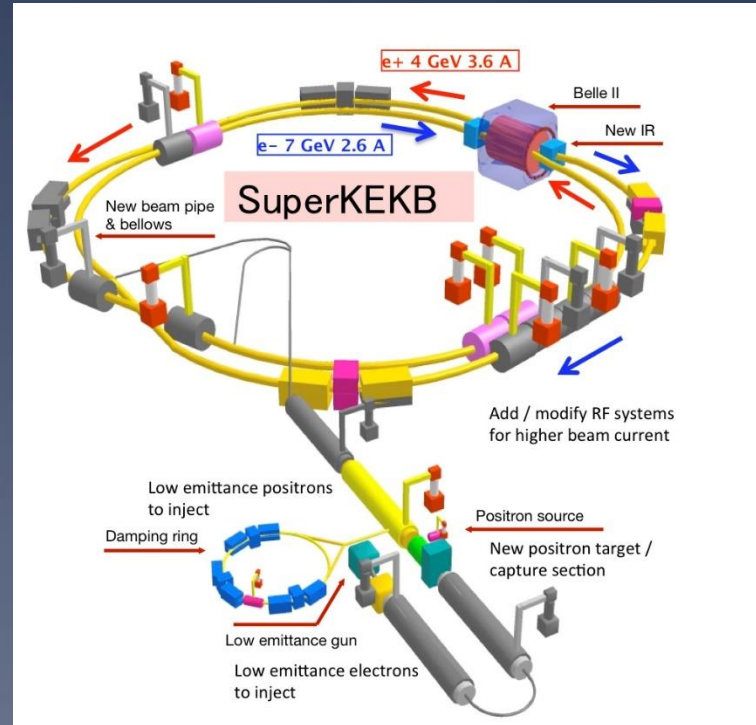
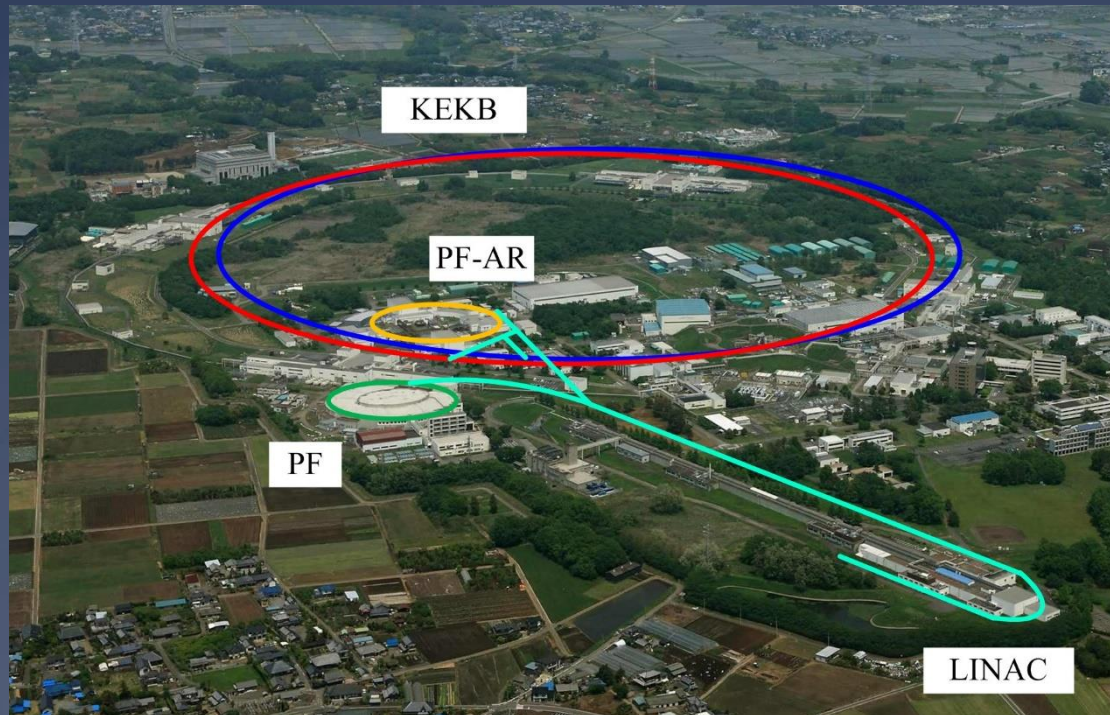


- 3 km di circonferenza
- Energia di collisione dei fasci 7+4 GeV
- pacchetti" di elettroni e positroni con 100 miliardi di particelle
- Dimensioni trasversali dei pacchetti: 50 nm x 6 μm
- Gli elettroni viaggiano quasi alla velocità della luce ($v=0.9999999999999999992 c$)
→ fanno 100000 giri al secondo!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

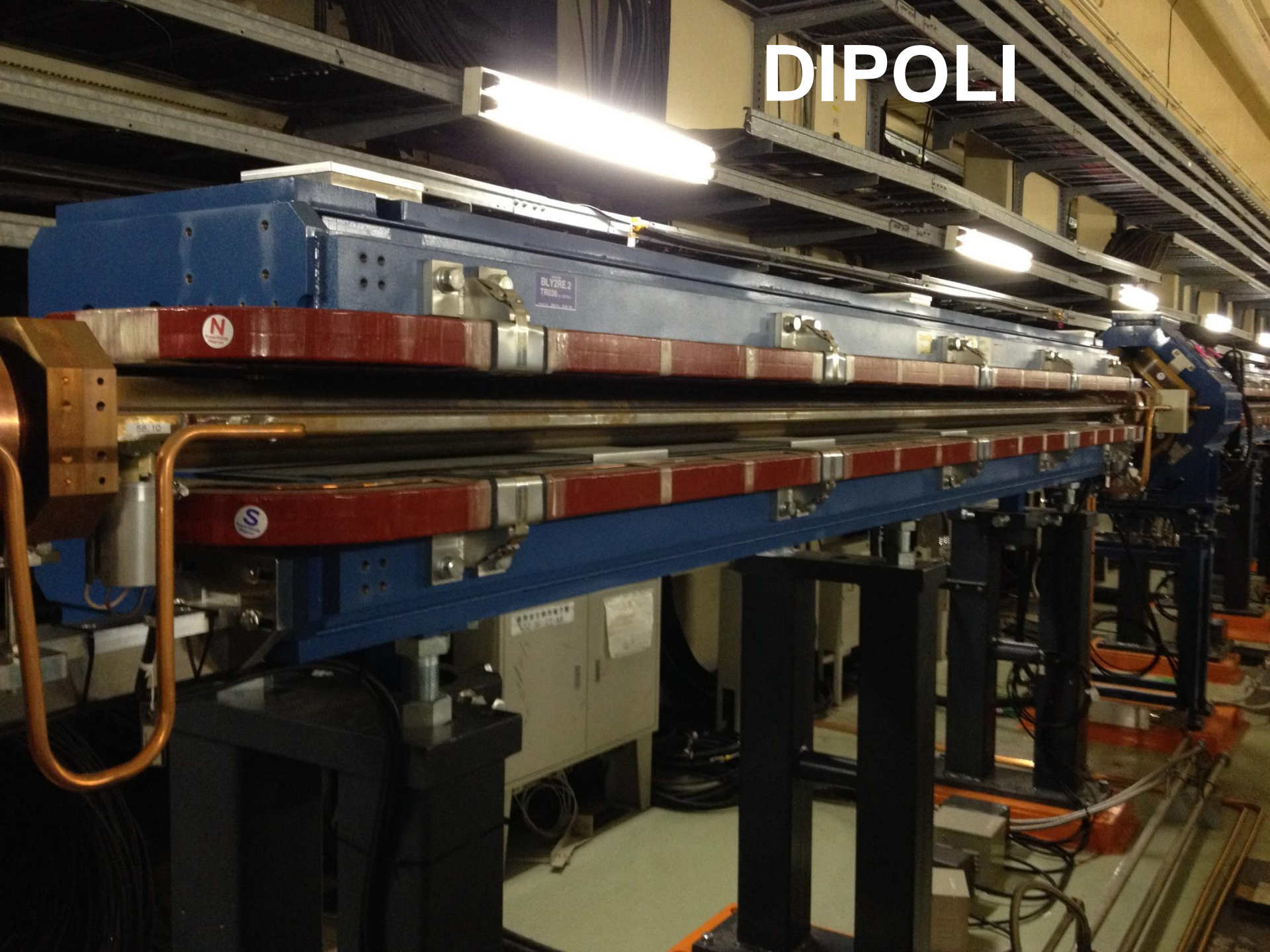


Hands on Particle Physics

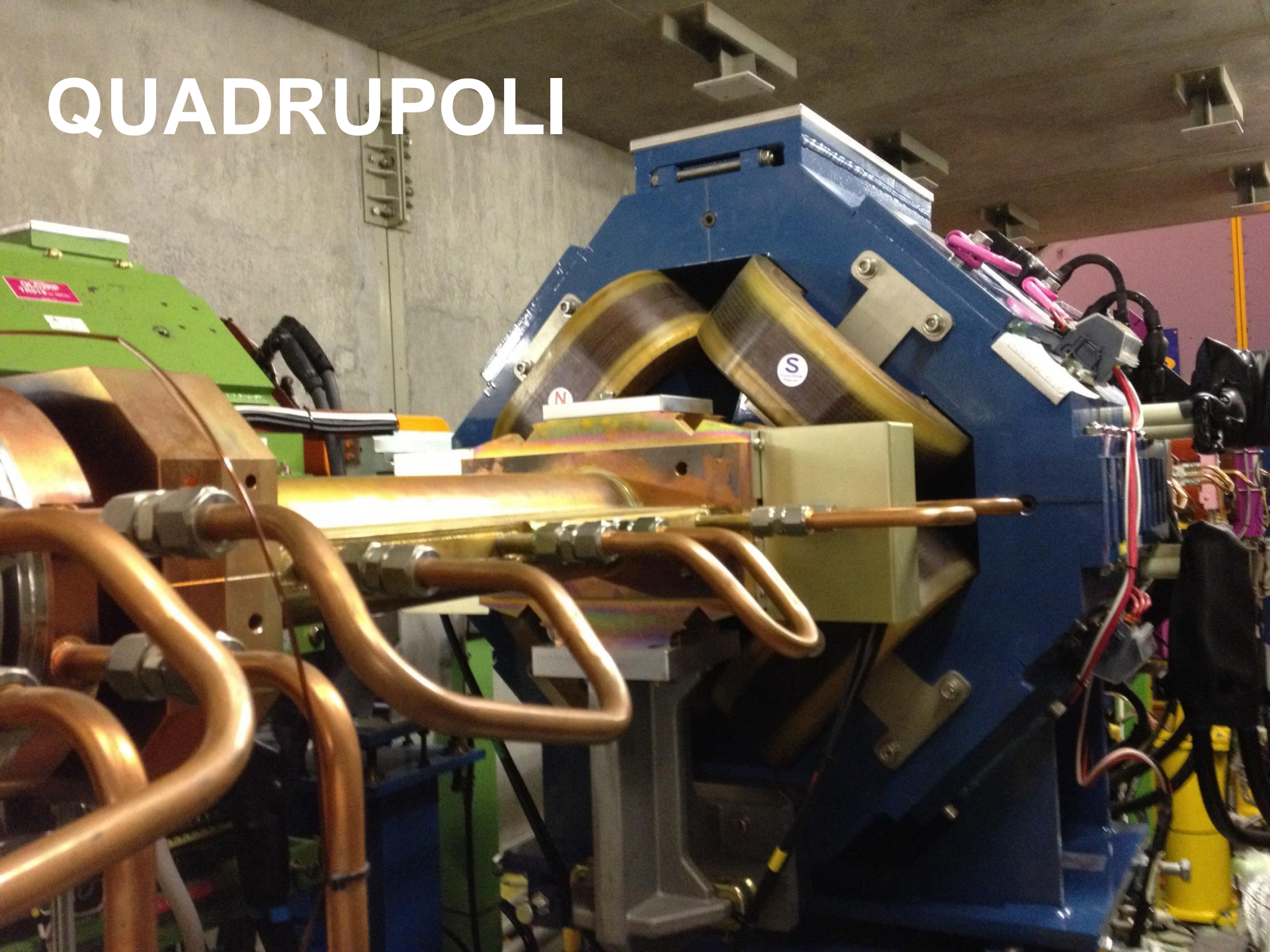


Alla fine della presa dati (≈ 2031) si prevede che SuperKEKB avrà prodotto 100 miliardi di particelle (mesoni) contenenti un quark beauty!

DIPOLI



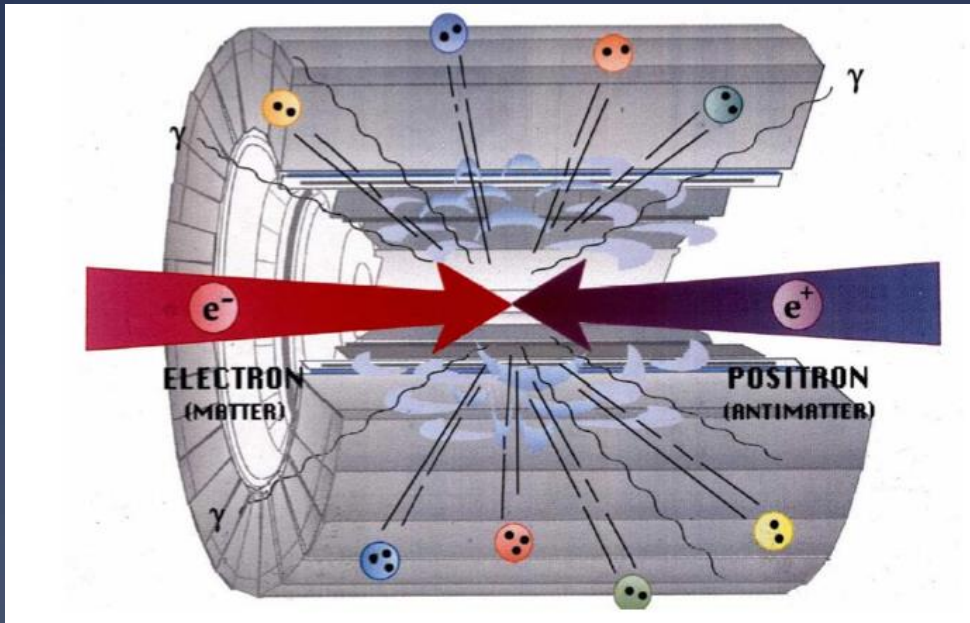
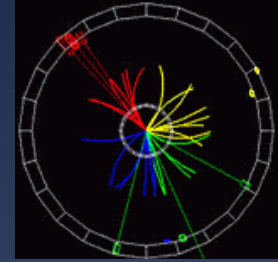
QUADRUPLI



Le due linee di fascio



I rivelatori di particelle

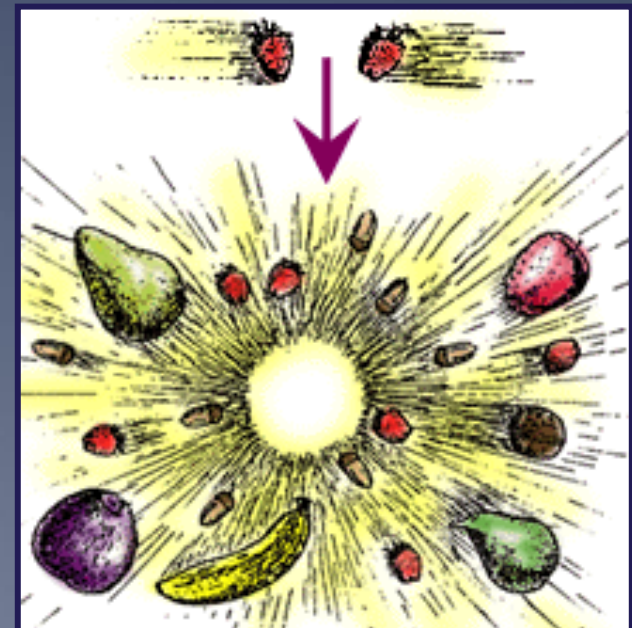


Scopi

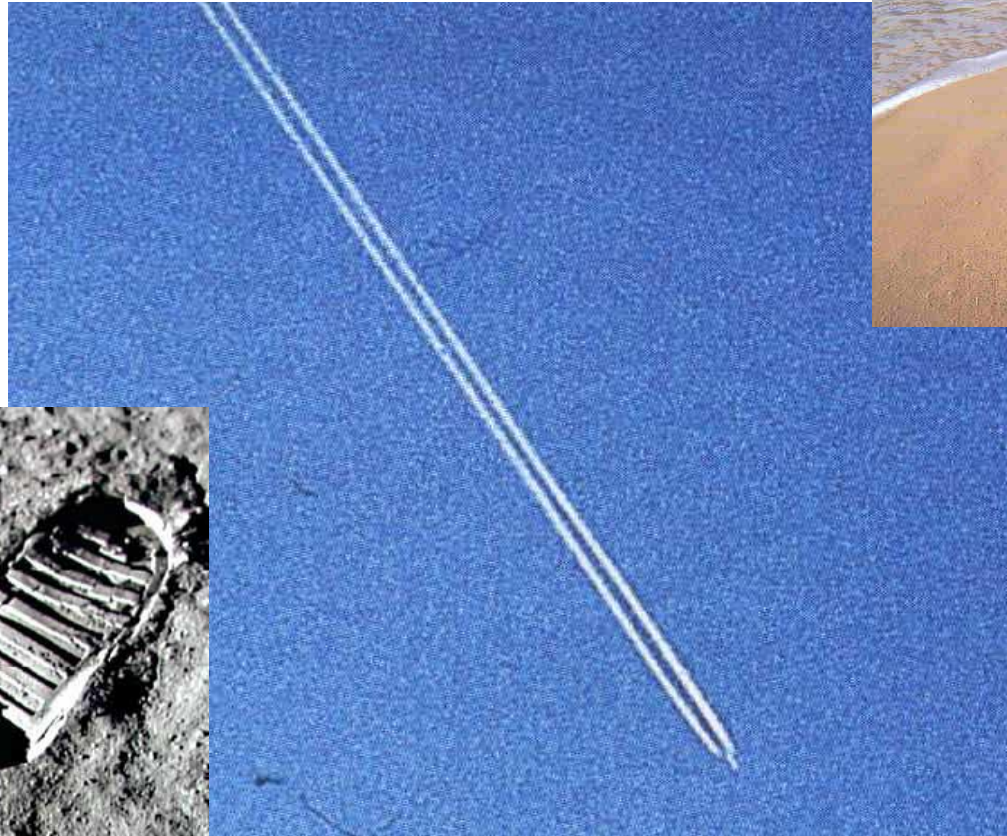
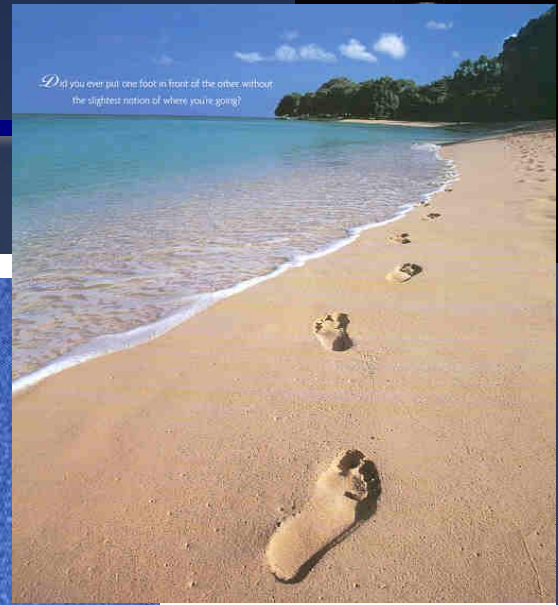
- Identificare le particelle
- misurare le caratteristiche (energia, carica..) delle particelle

Come?

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

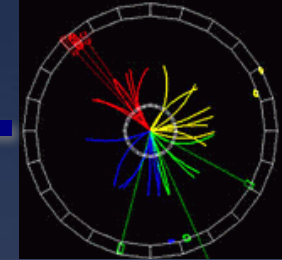


Alla ricerca di tracce

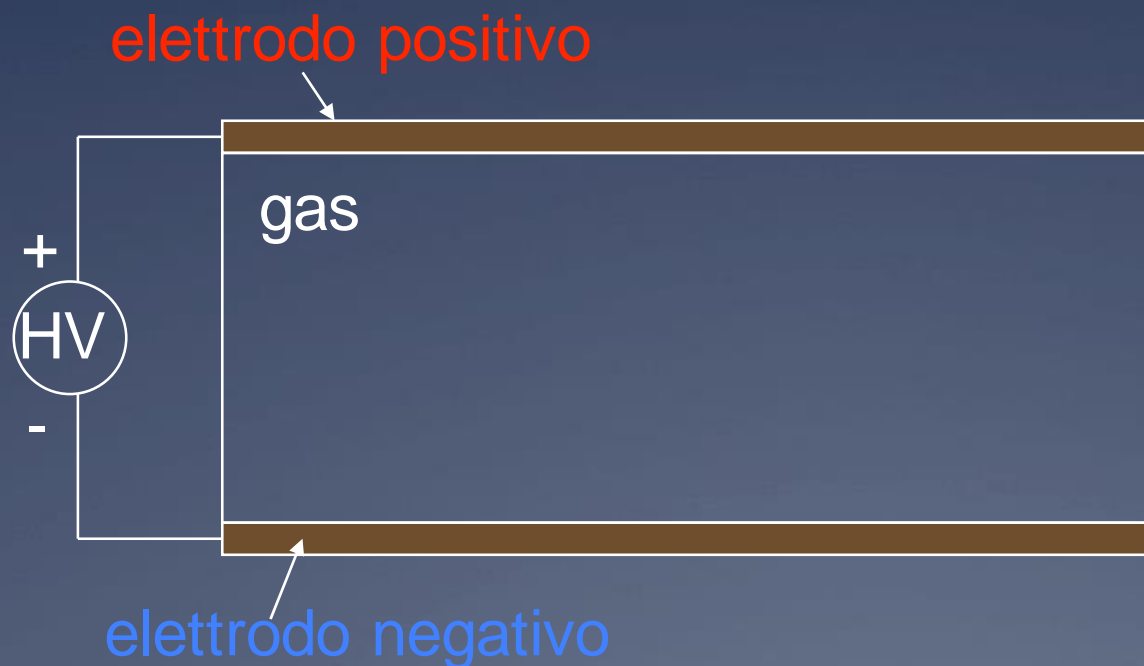


La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce.

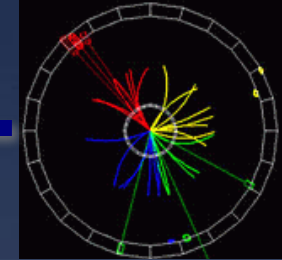


Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas

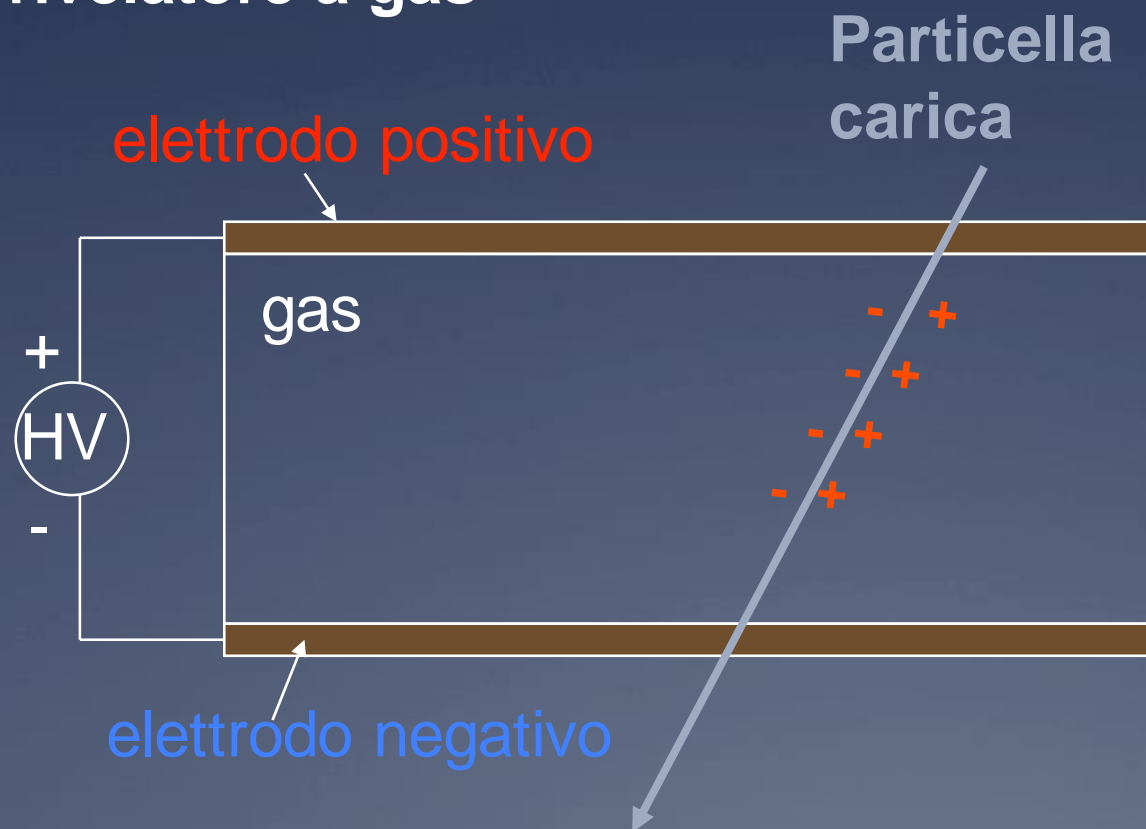


La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce.

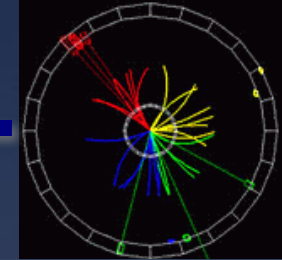


Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas

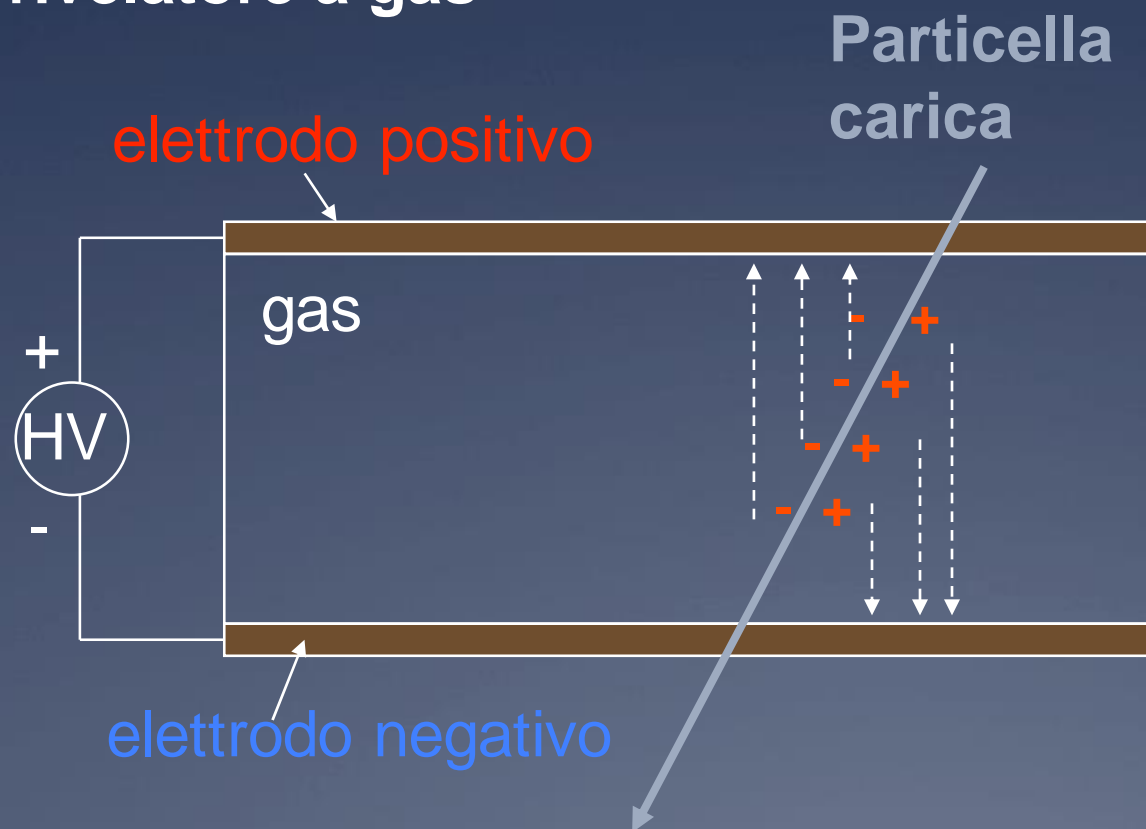


In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce.

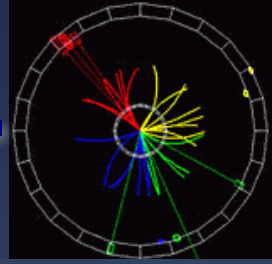


Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas

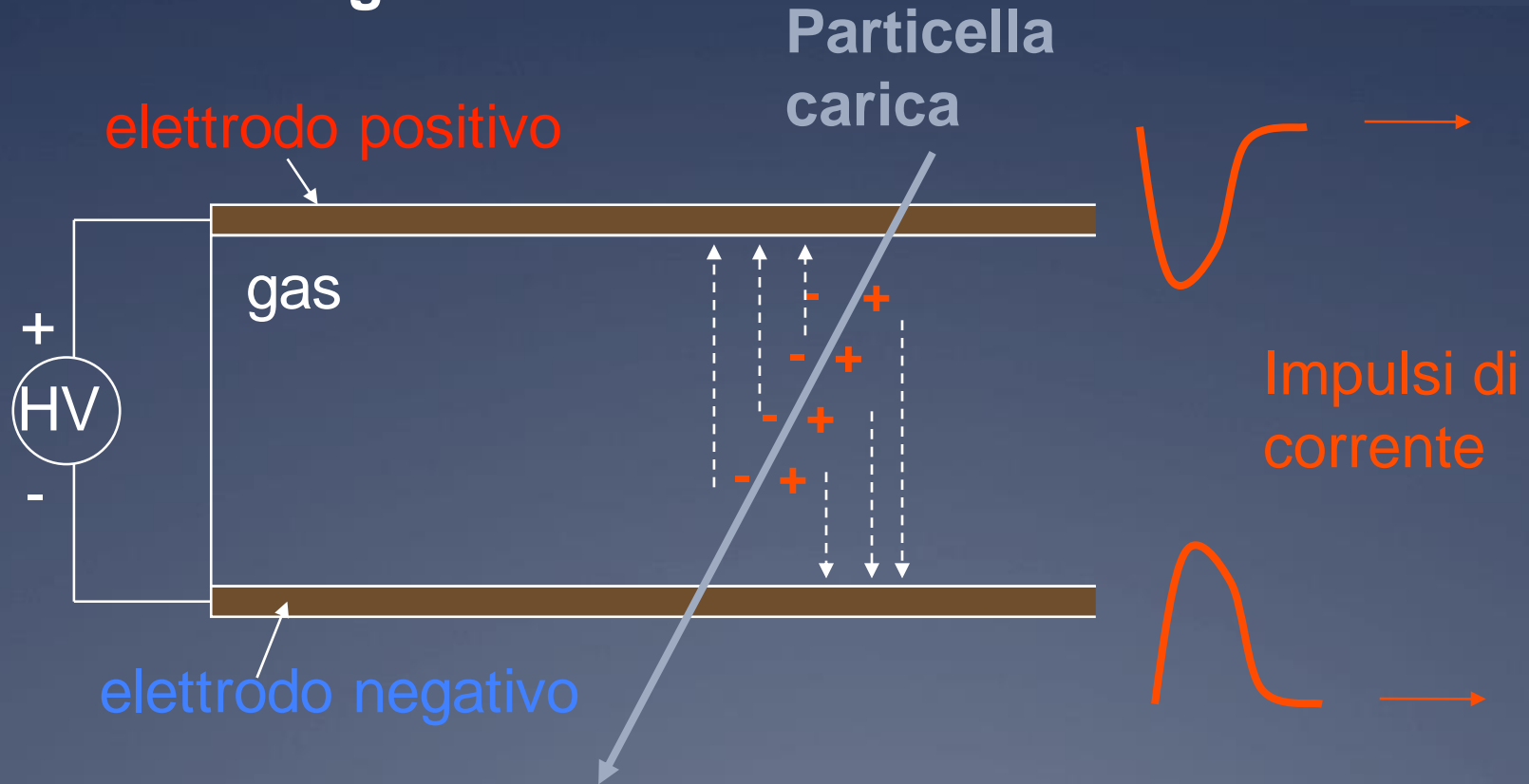


In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è'
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce.

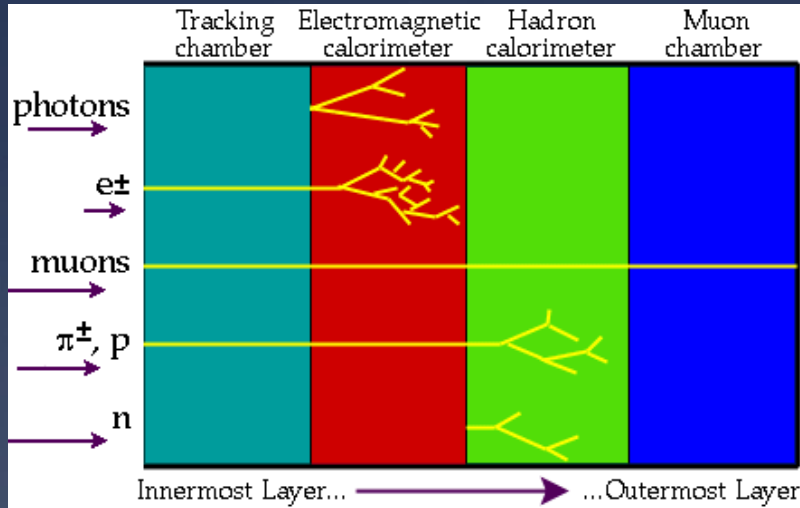


Un esempio: il passaggio di una particella carica in un rivelatore a gas



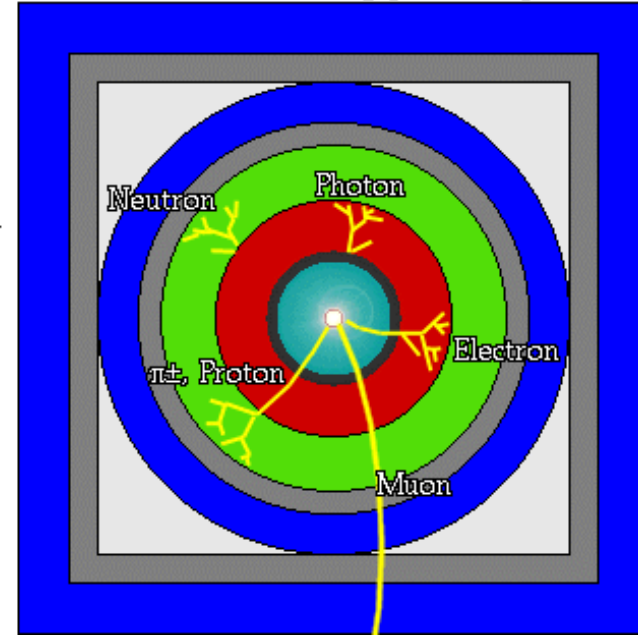
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento e'
LA IONIZZAZIONE

Apparati di rivelatori

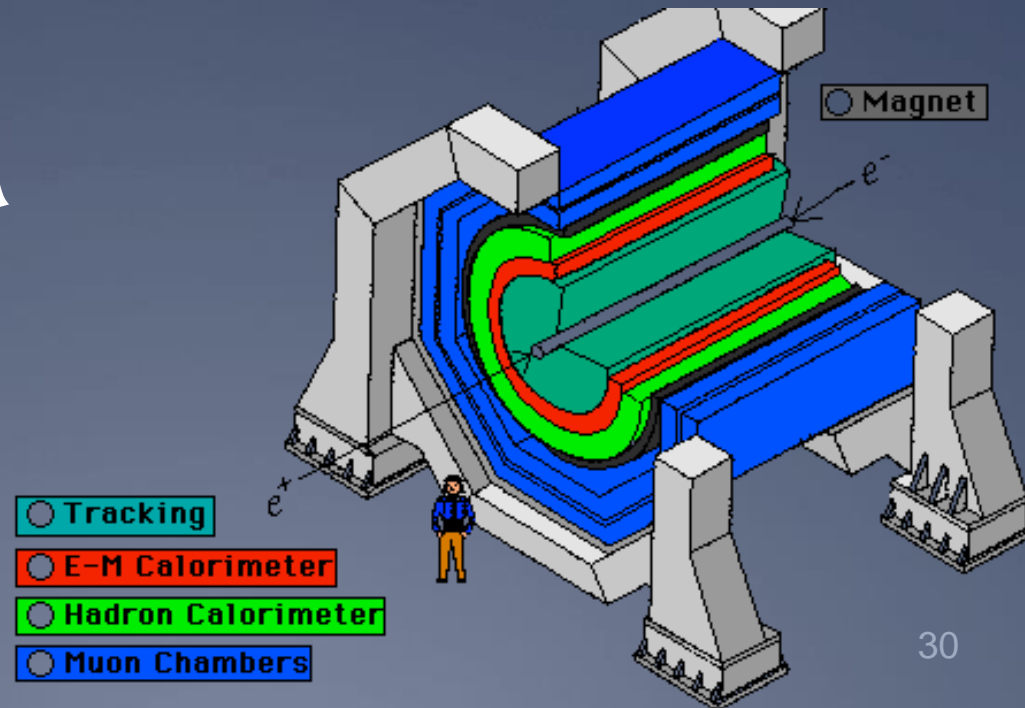


A detector cross-section, showing particle paths

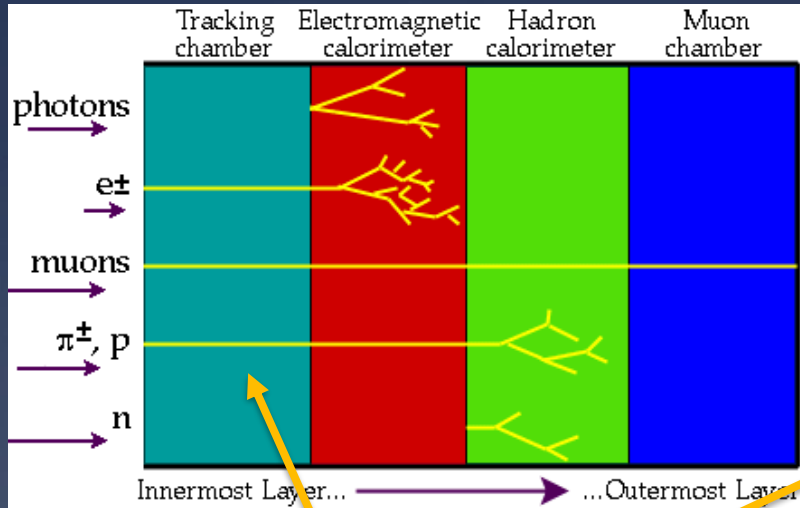
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



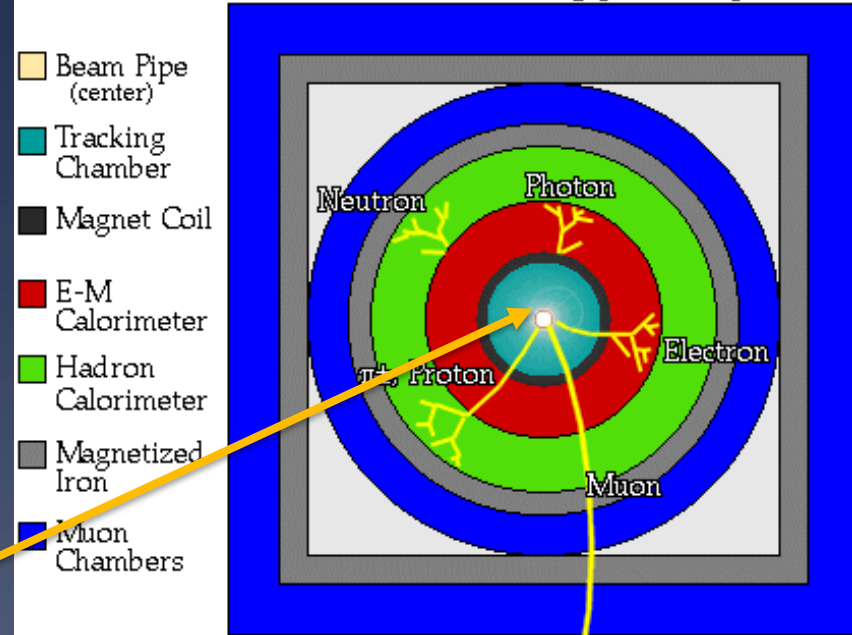
Struttura a
 “cipolla”



Apparati di rivelatori

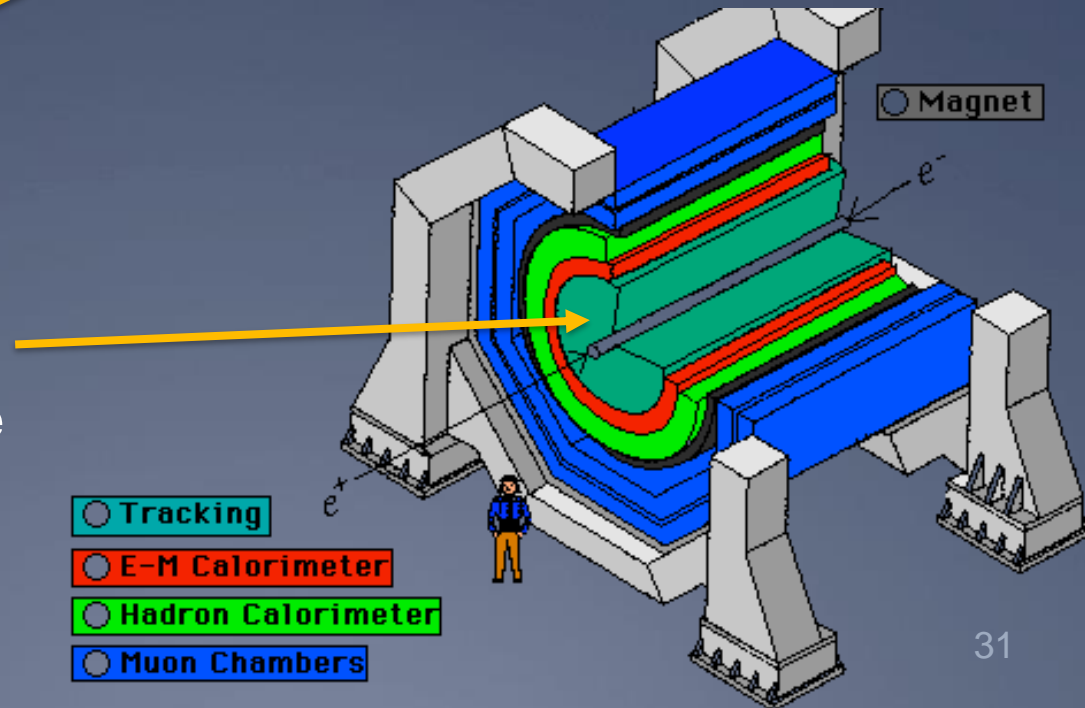


A detector cross-section, showing particle paths

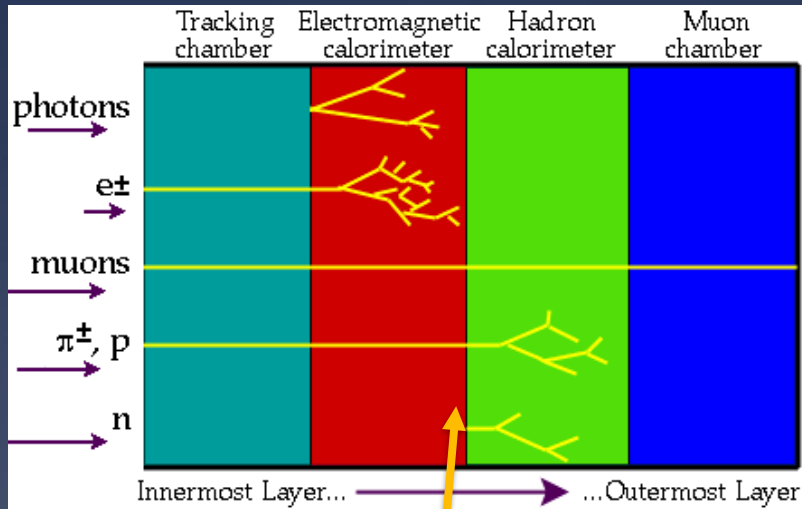


Rivelatori Traccianti

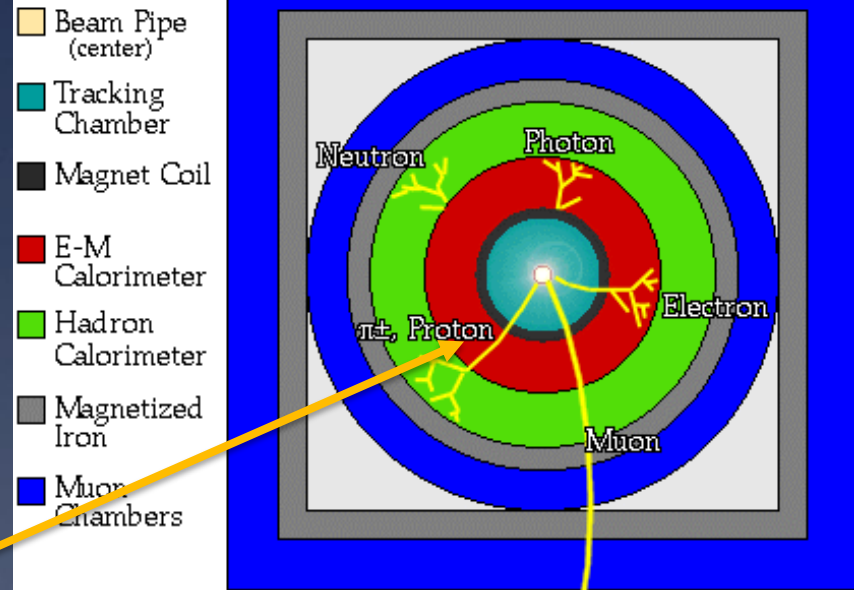
Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche



Apparati di rivelatori



A detector cross-section, showing particle paths



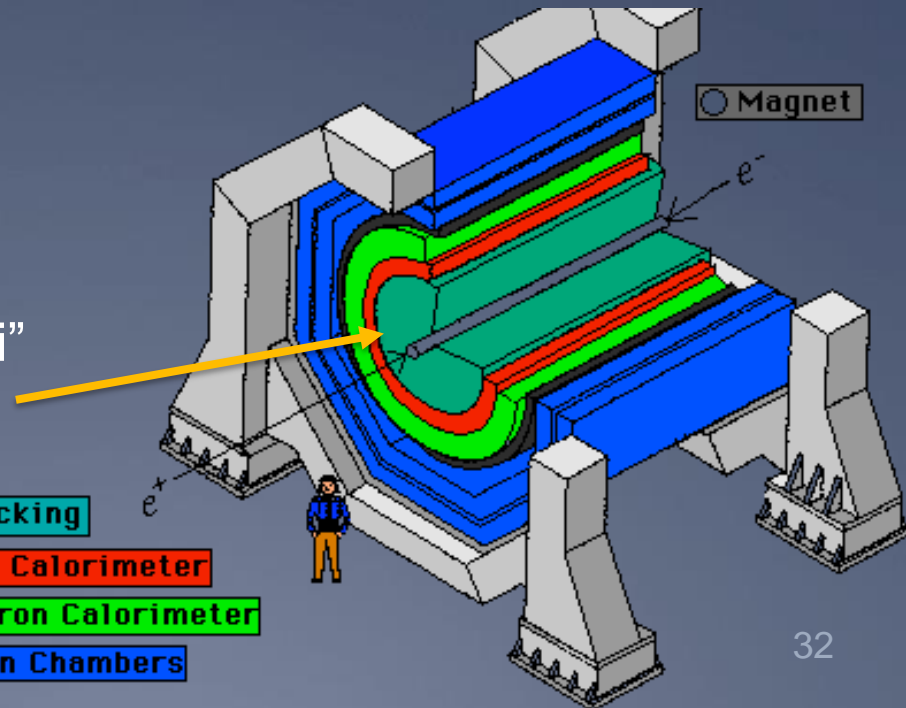
Calorimetri

Misurano l'energia rilasciata dalle particelle. Le particelle diventano "sciame"

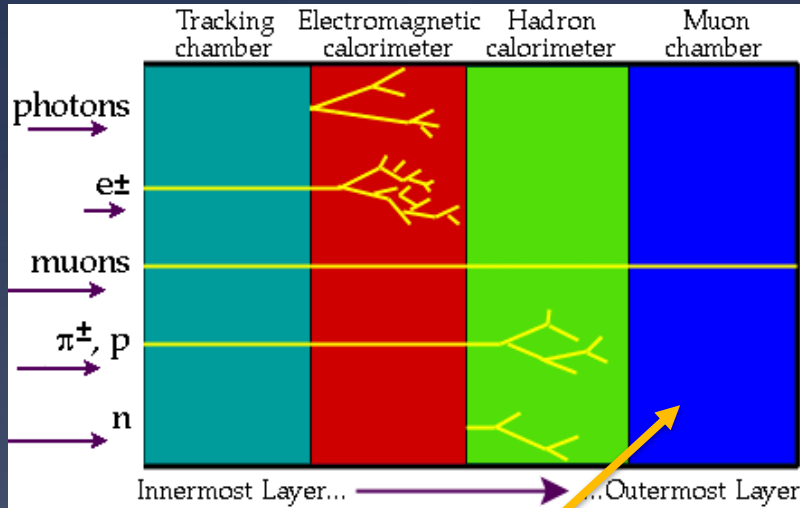
Calorimetri elettromagnetici → rivelano fotoni, elettroni

Calorimetri adronici → rivelano gli adroni

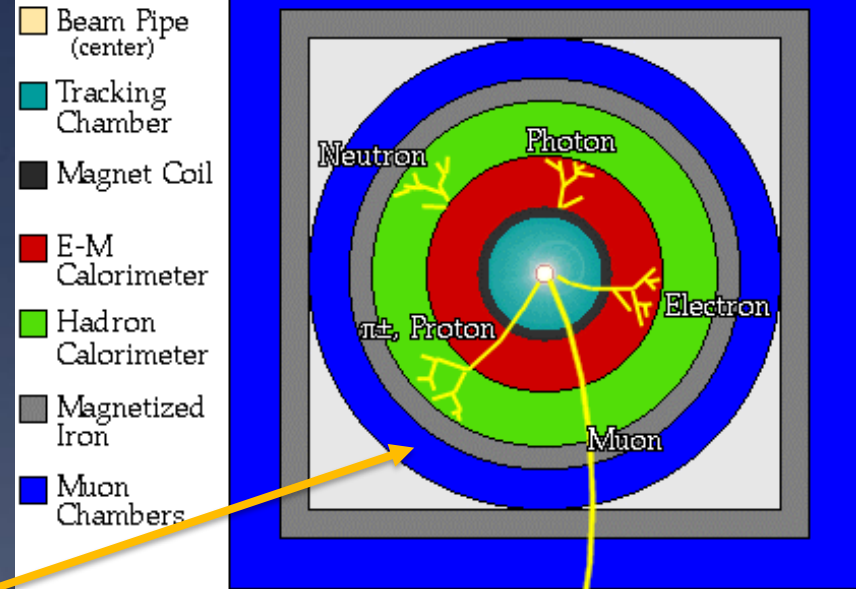
- Tracking
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Muon Chambers



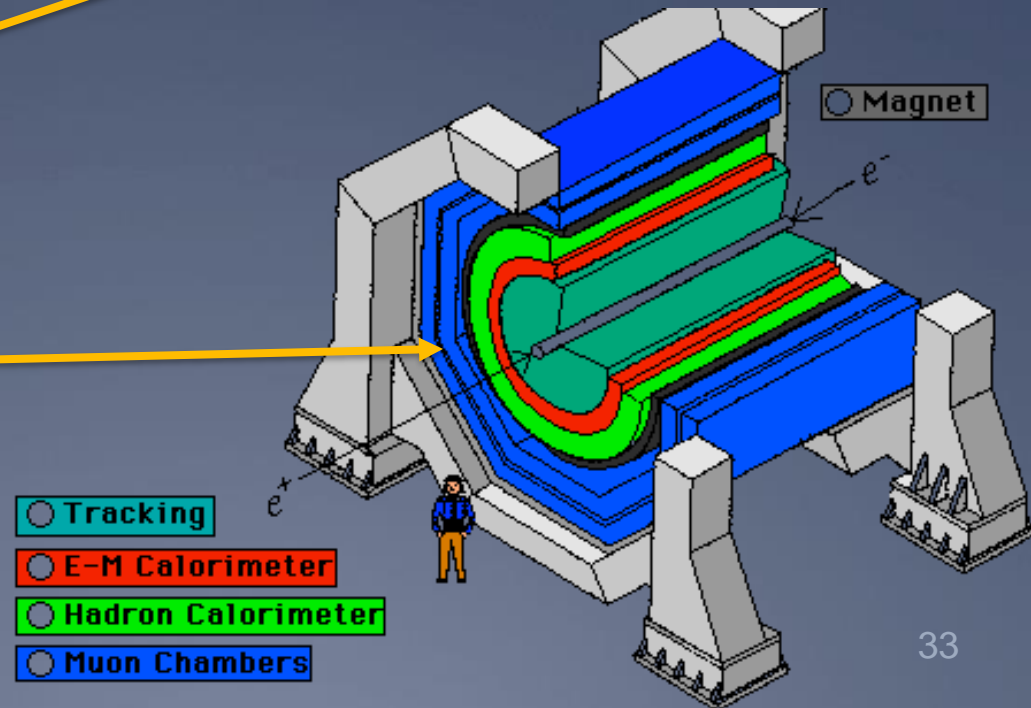
Apparati di rivelatori



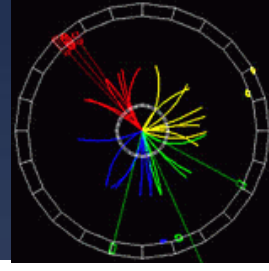
A detector cross-section, showing particle paths



Rivelatori per muoni:
Rivelano i muoni,
particelle molto
penetranti

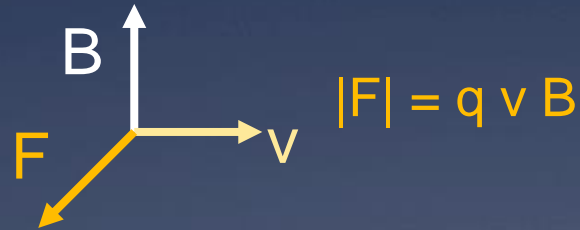


Misura della quantità di moto

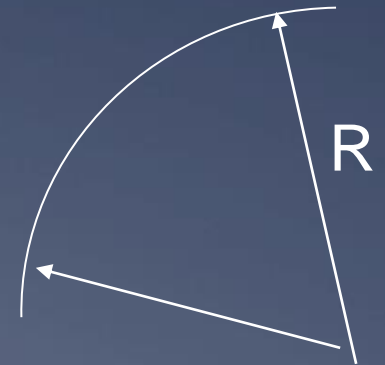


Hands on Particle Physics

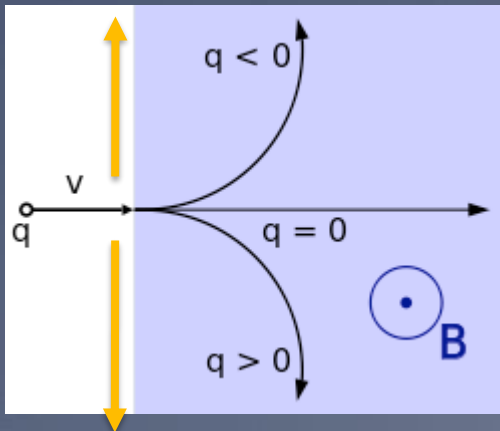
Dalla curvatura di una particella carica in un campo magnetico:
Forza di Lorentz



=> la traiettoria segue un arco di circonferenza
dal raggio di curvatura
posso ricavare $P = mv = qBR$



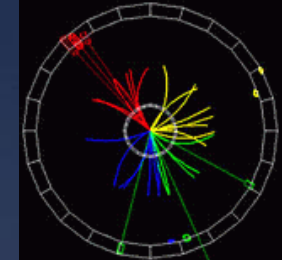
→ dal tipo di curvatura è anche possibile capire la carica



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

➔ Possiamo conoscere il segno della carica

Misura dell'Energia



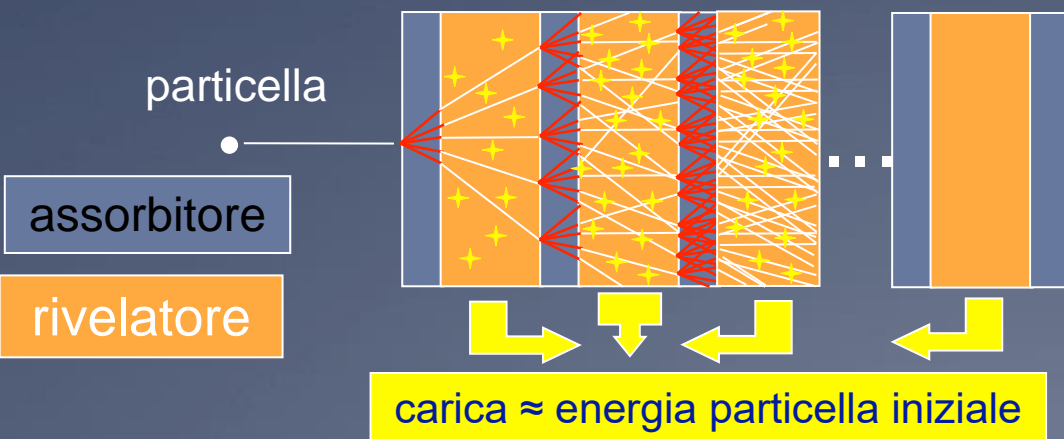
Hands on Particle Physics

Assorbimento totale in un **calorimetro**:

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

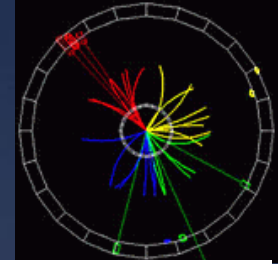
l'assorbitore fa degradare l'energia delle particelle cariche per ionizzazione e irraggiamento

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

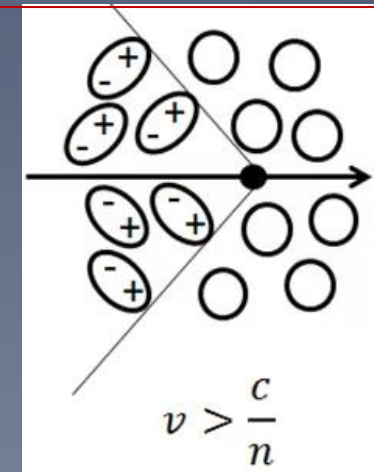
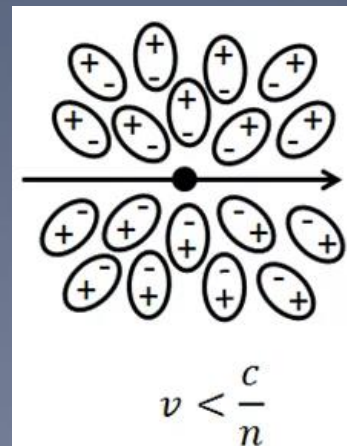
La luce rallenta quando attraversa un mezzo perché interagisce con le cariche elettriche degli atomi.

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

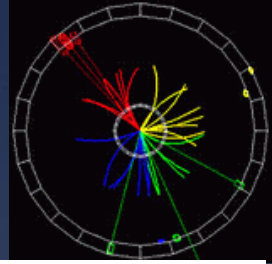
Una particella carica può benissimo essere «sparata» dentro un mezzo a velocità maggiore di c/n ! (ma sempre minore di c)

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

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.



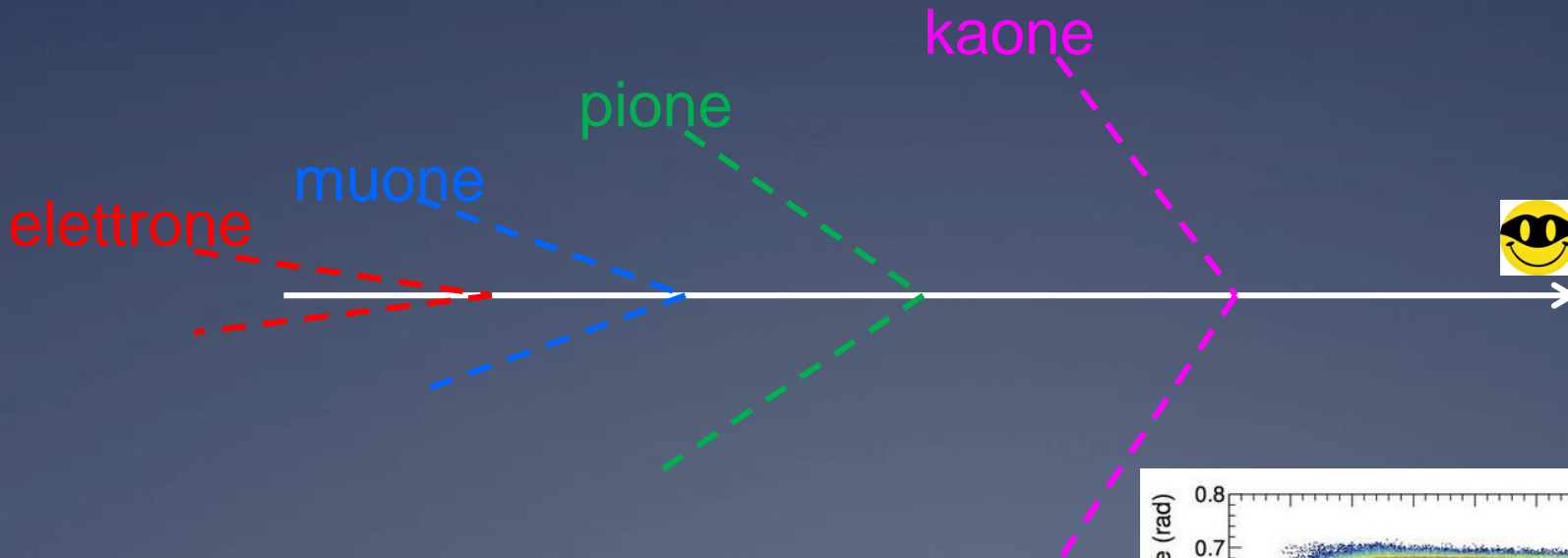
La radiazione Cerenkov «smaschera» le particelle



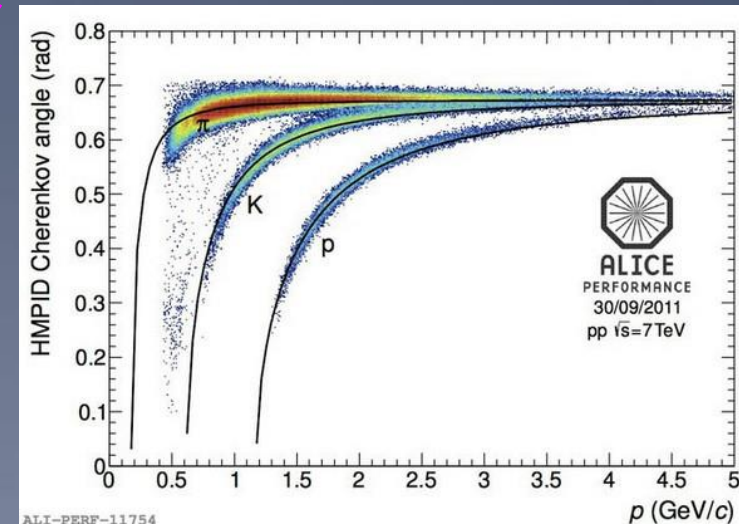
Hands on Particle Physics

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

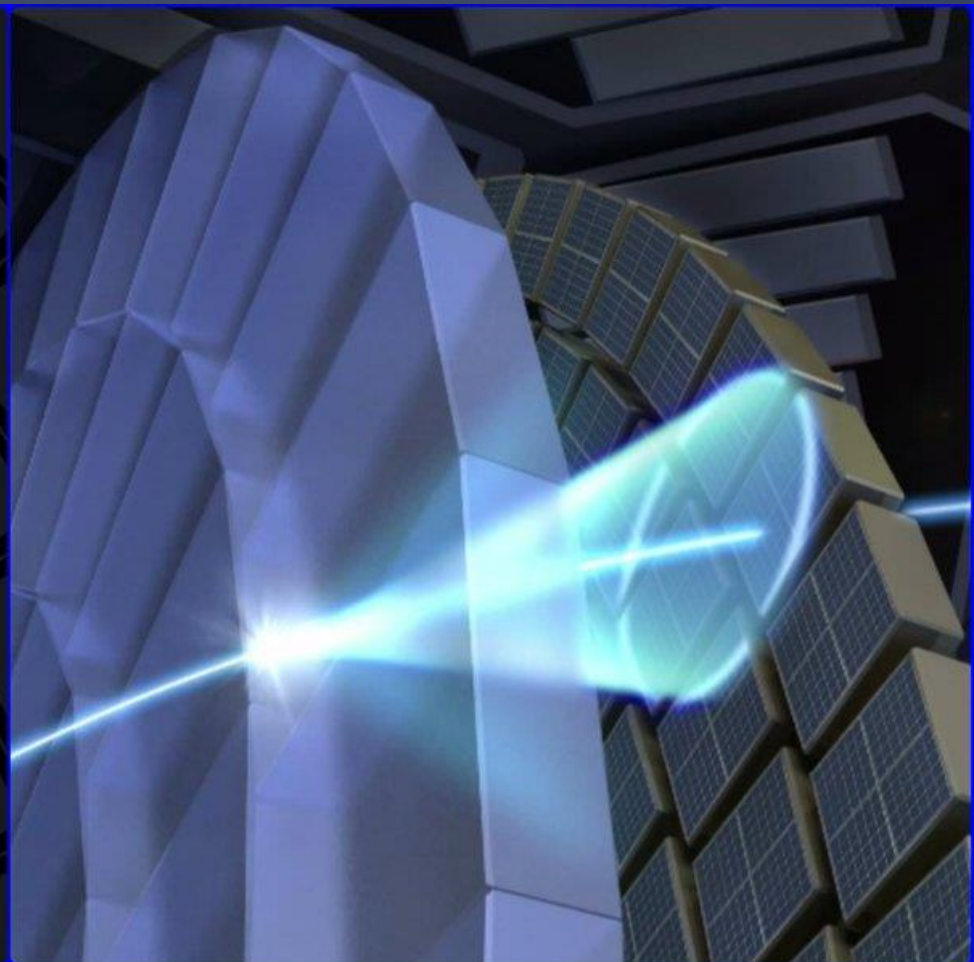
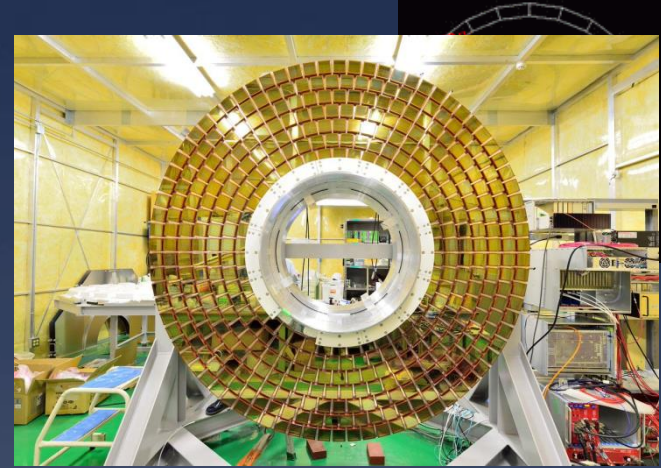
Ma le particelle più pesanti sono meno veloci !



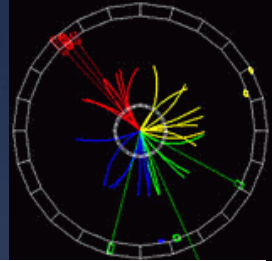
L'angolo della radiazione Cerenkov ci permette di identificare la tipologia di particella che ha attraversato il rivelatore



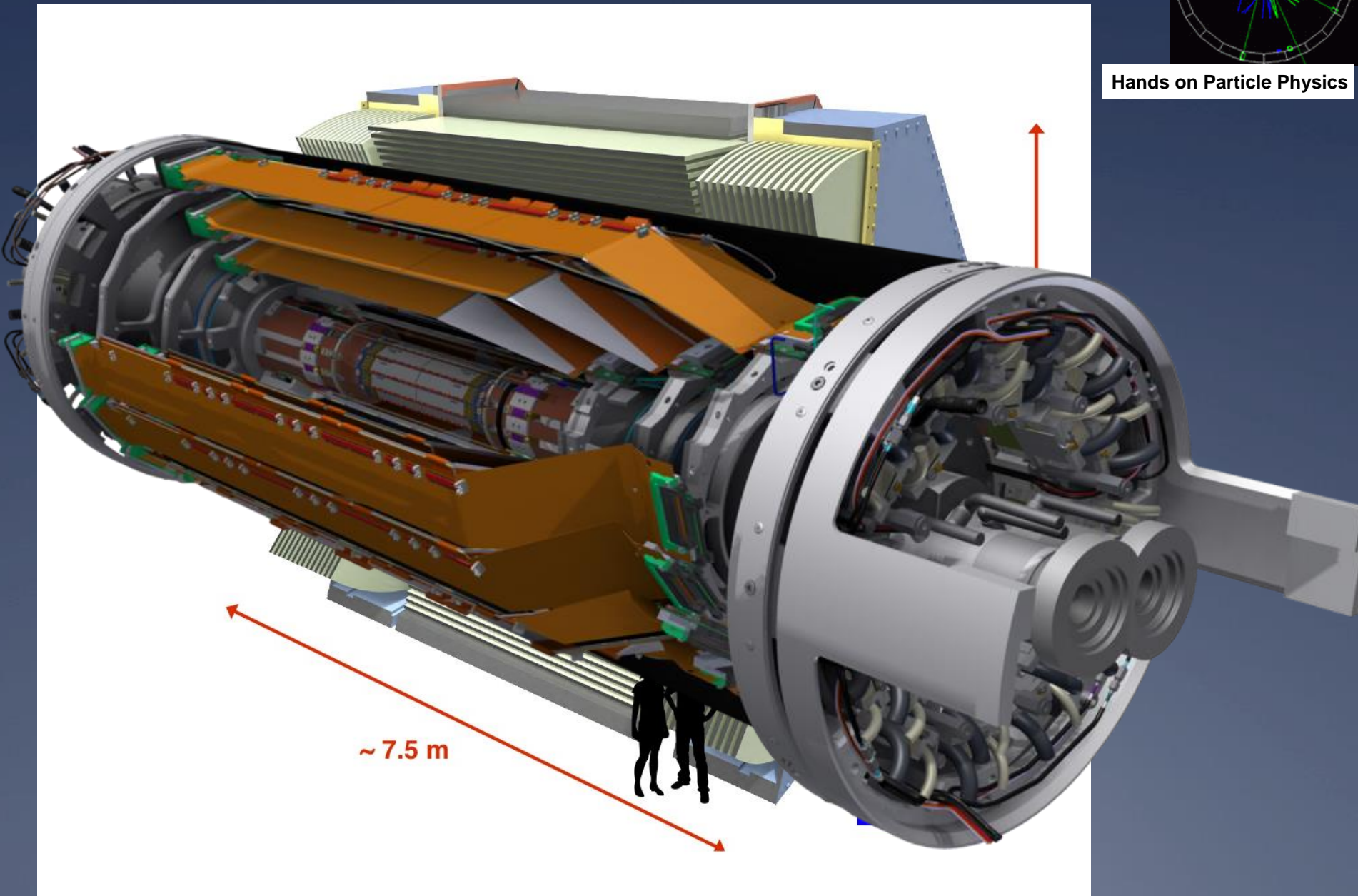
il rivelatore ARICH nell'esperimento Belle II



Il rivelatore BELLE II



Hands on Particle Physics

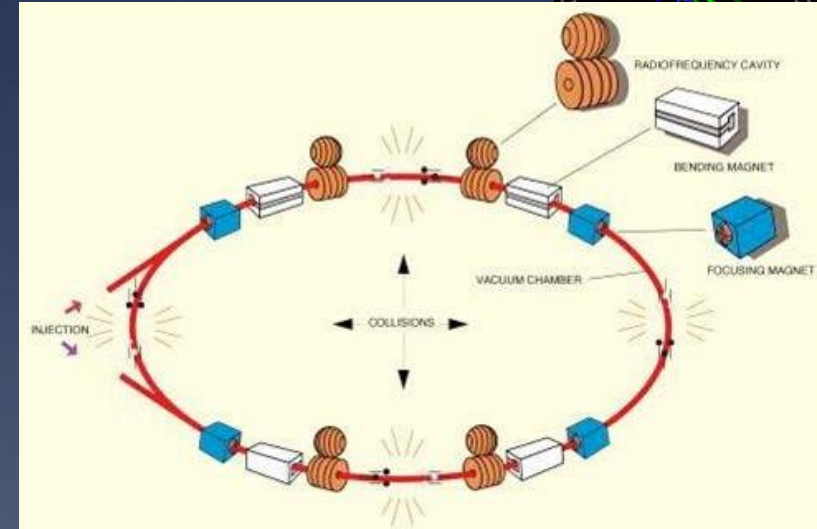


~ 7.5 m

Riepilogando...



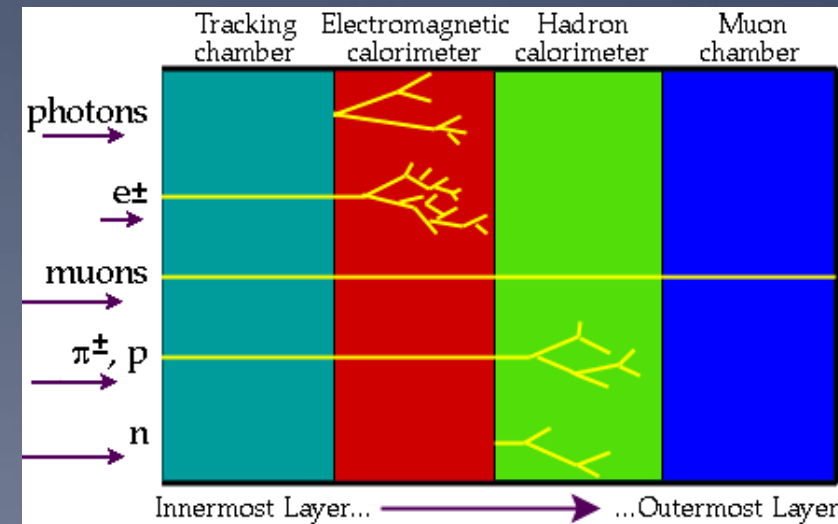
- * Gli acceleratori sono lo strumento per studiare la fisica delle particelle elementari



- * I rivelatori sfruttano gli effetti del passaggio delle particelle attraverso la materia per

- * misurare l'energia delle particelle

- * Identificare le particelle



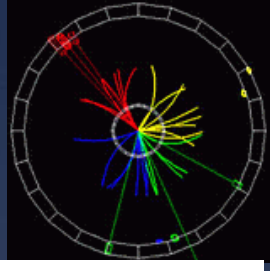
Prime collisioni osservate in Belle II



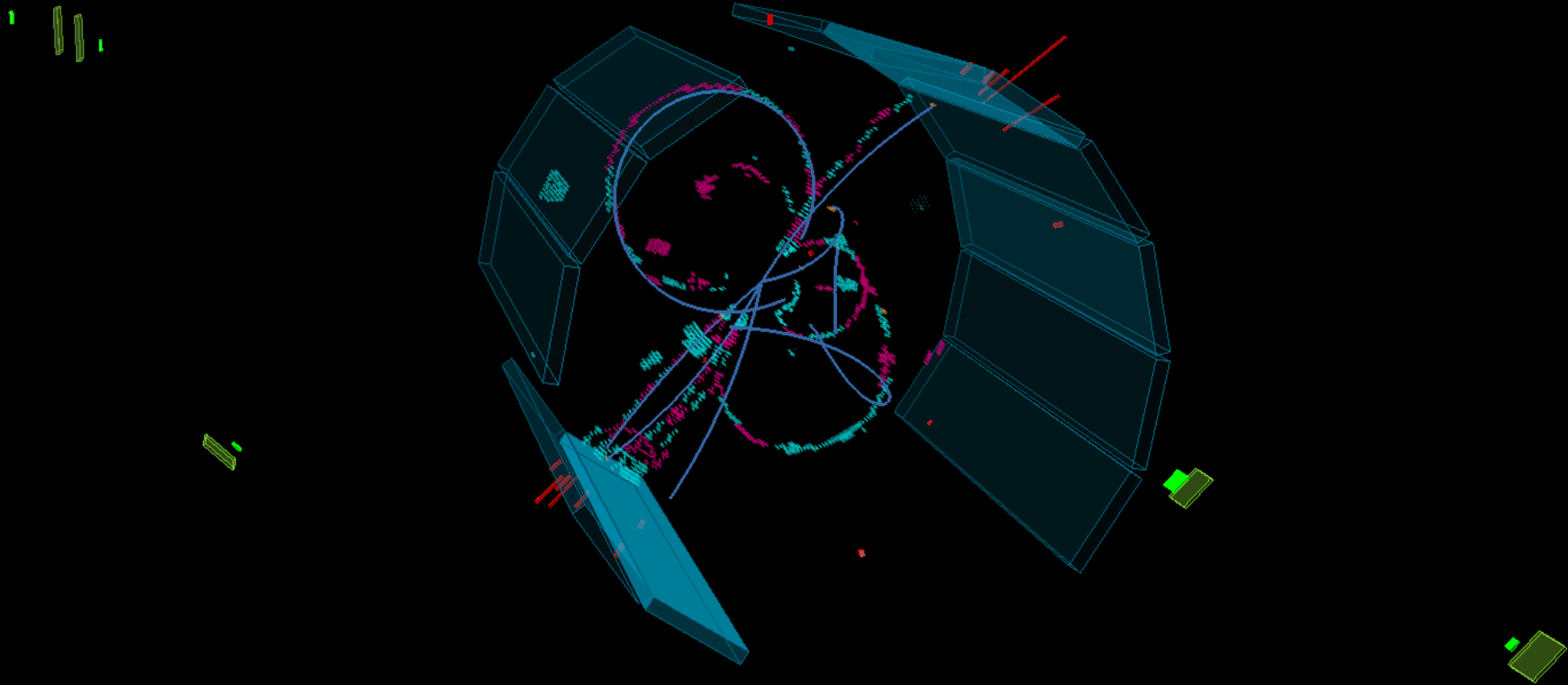
physics



Alcuni esempi di eventi acquisiti

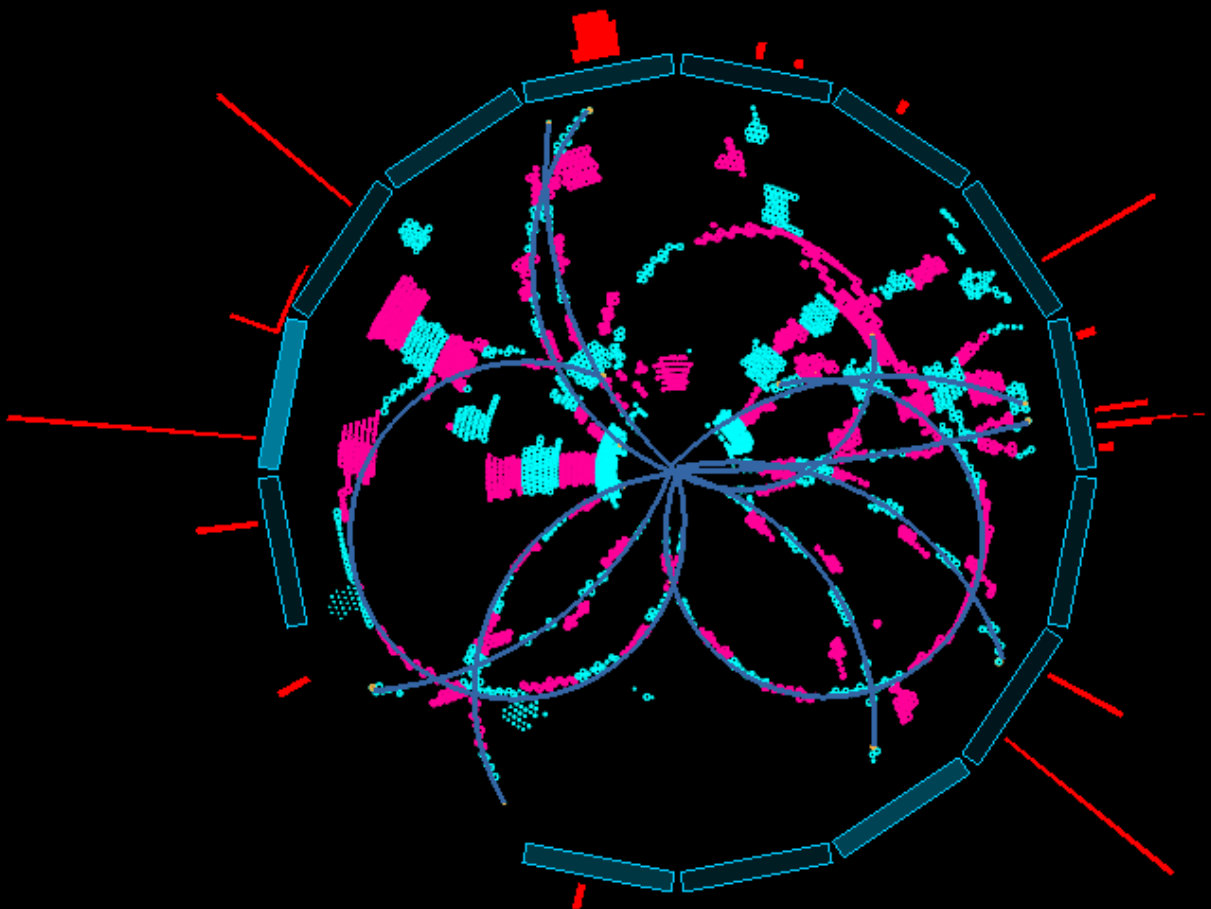


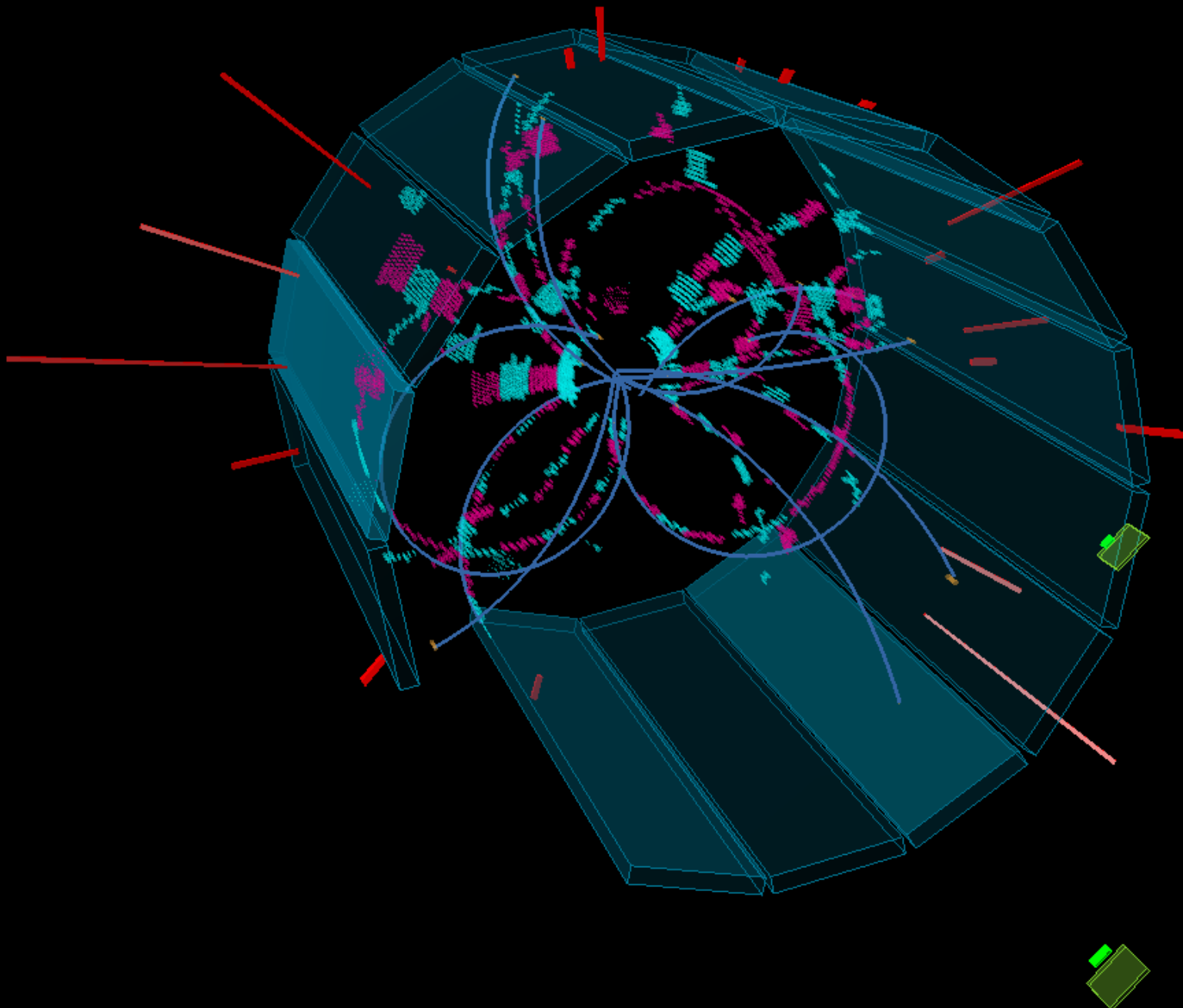
Hands on Particle Physics





cle Physics





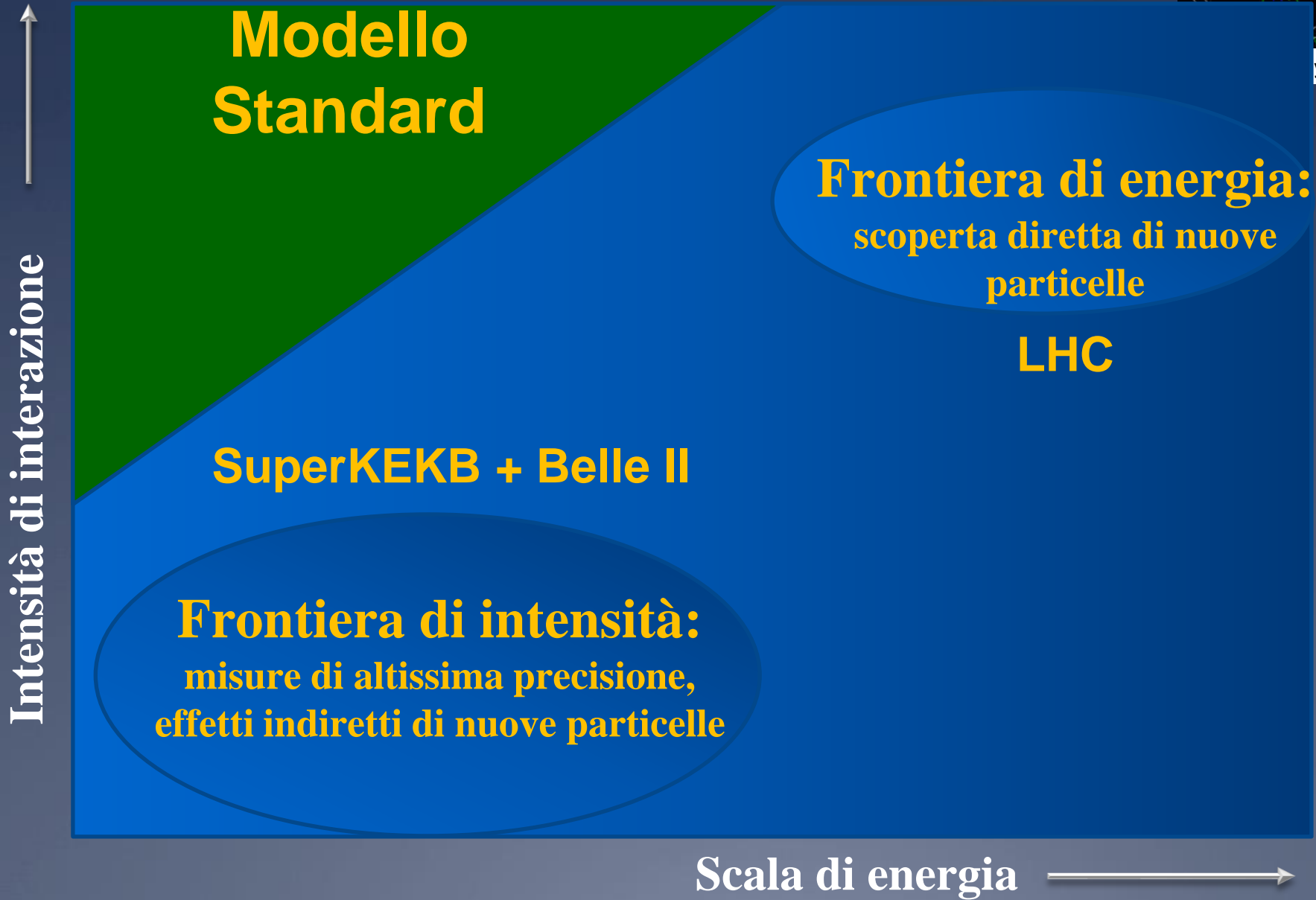
le Physics



Due diverse frontiere



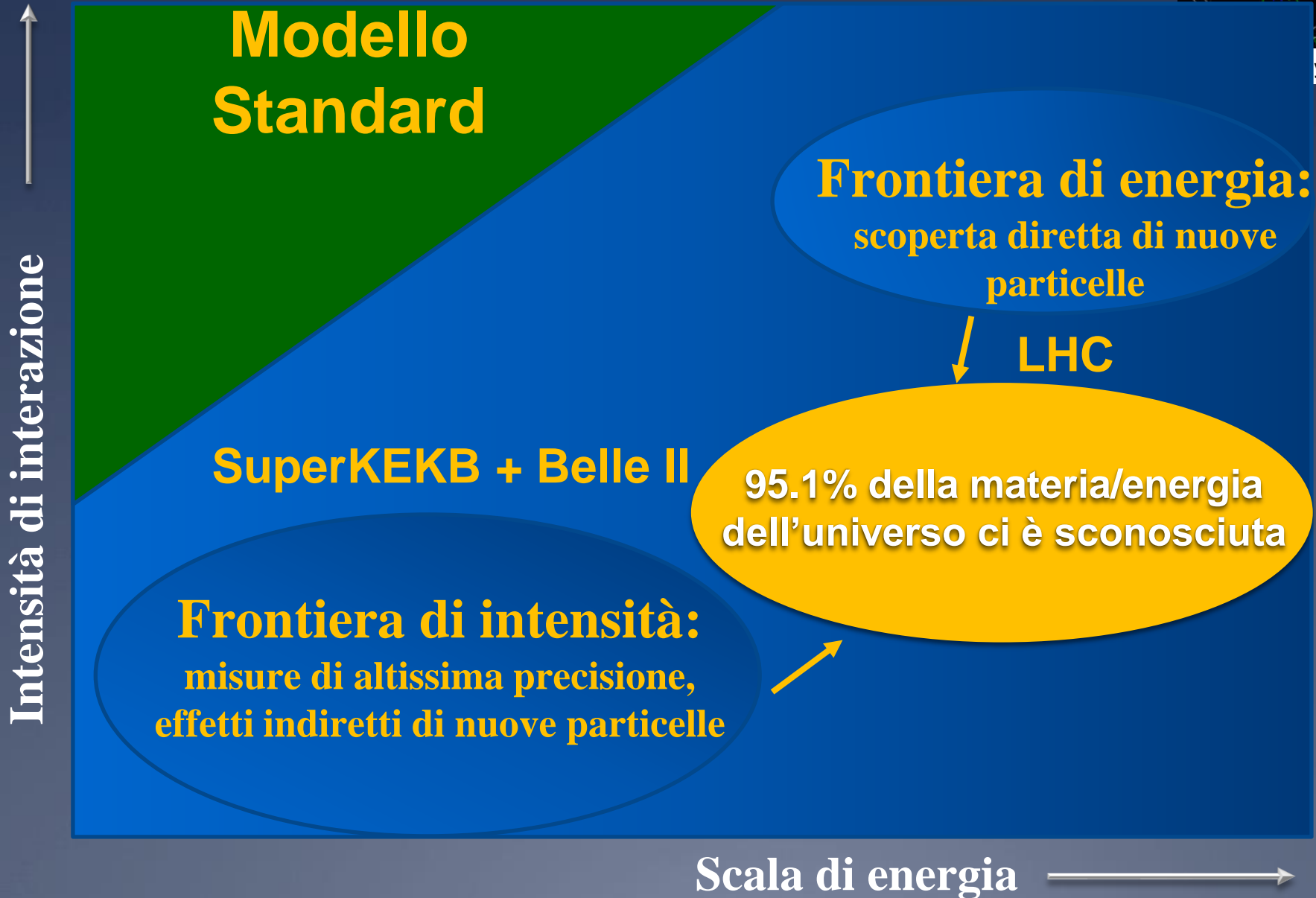
ysics

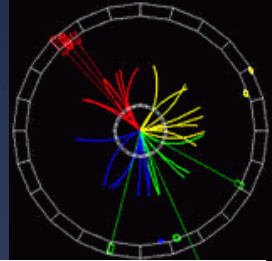


Due diverse frontiere



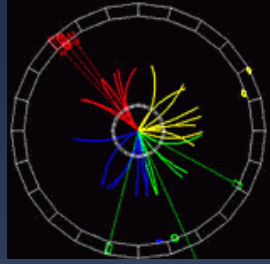
ysics





BACKUP

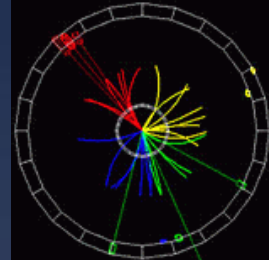
Come si identifica un neutrino?



- * 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



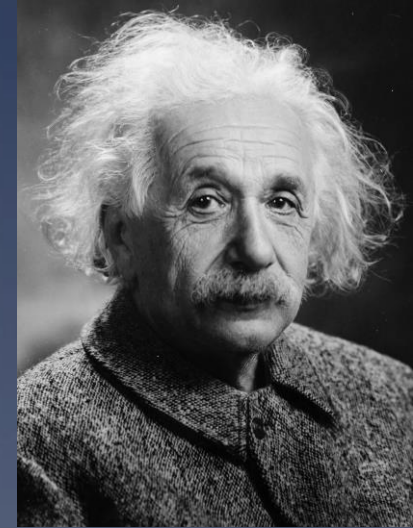
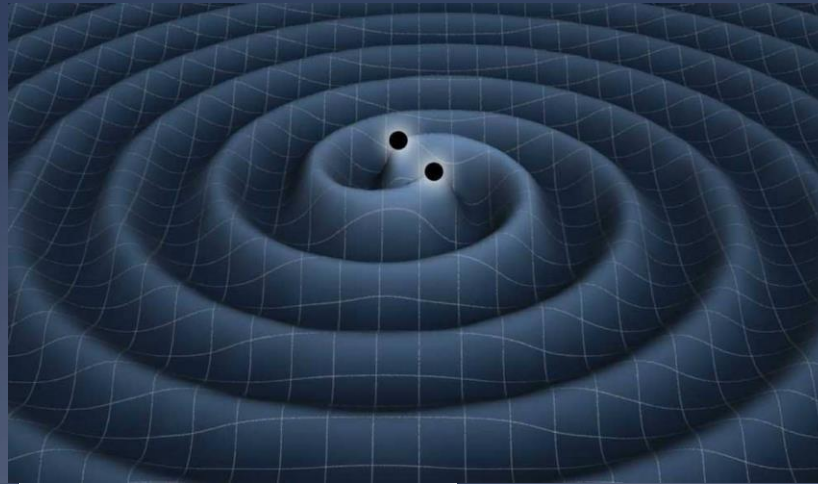
E ora?



Hands on Particle Physics

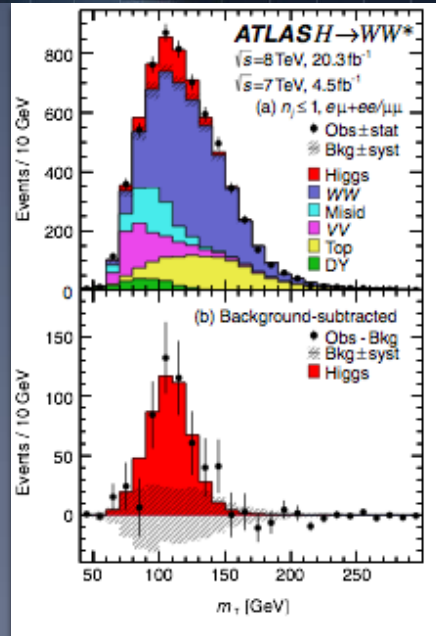
I due modelli standard delle interazioni fondamentali sono completi:

Onde gravitazionali:
Relatività Generale
Gravità

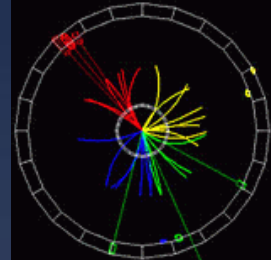


Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni
Fondamentale
Interazione Forte,
Elettromagnetica e
Debole



E ora?



I due modelli standards delle interazioni fondamentali sono completi:

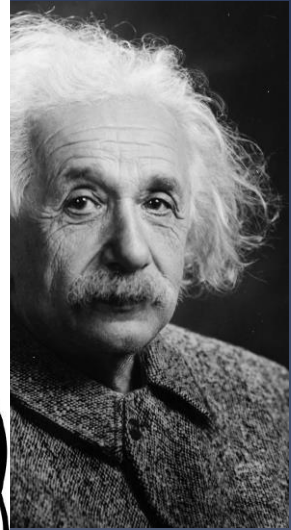
Onde gravitazionali
Relatività Generale
Gravità

Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni

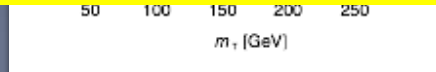


ands on Particle Physics



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

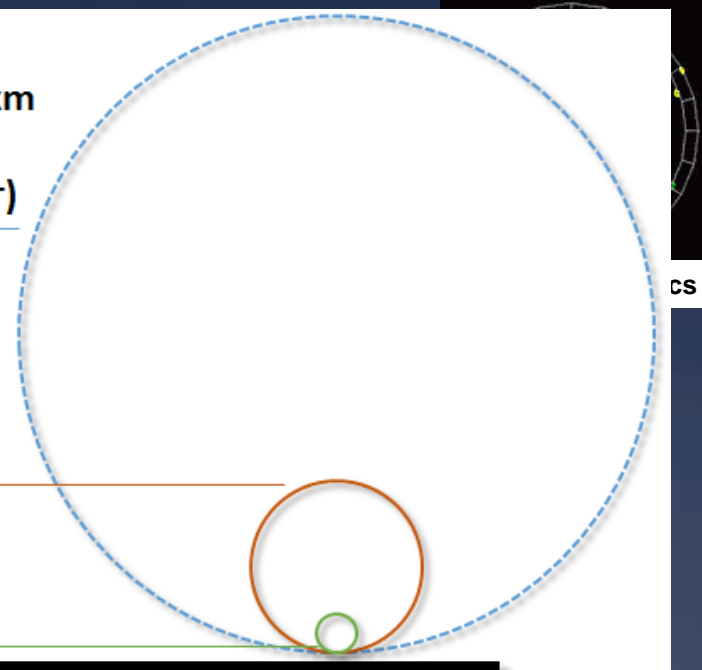
Circumference: 27 km

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

Tevatron (closed)

Circumference: 6.2 km

Energy: 2 TeV

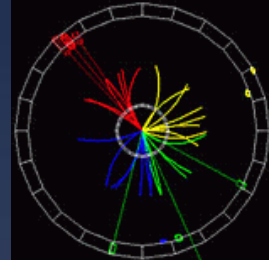


Future Circular Collider

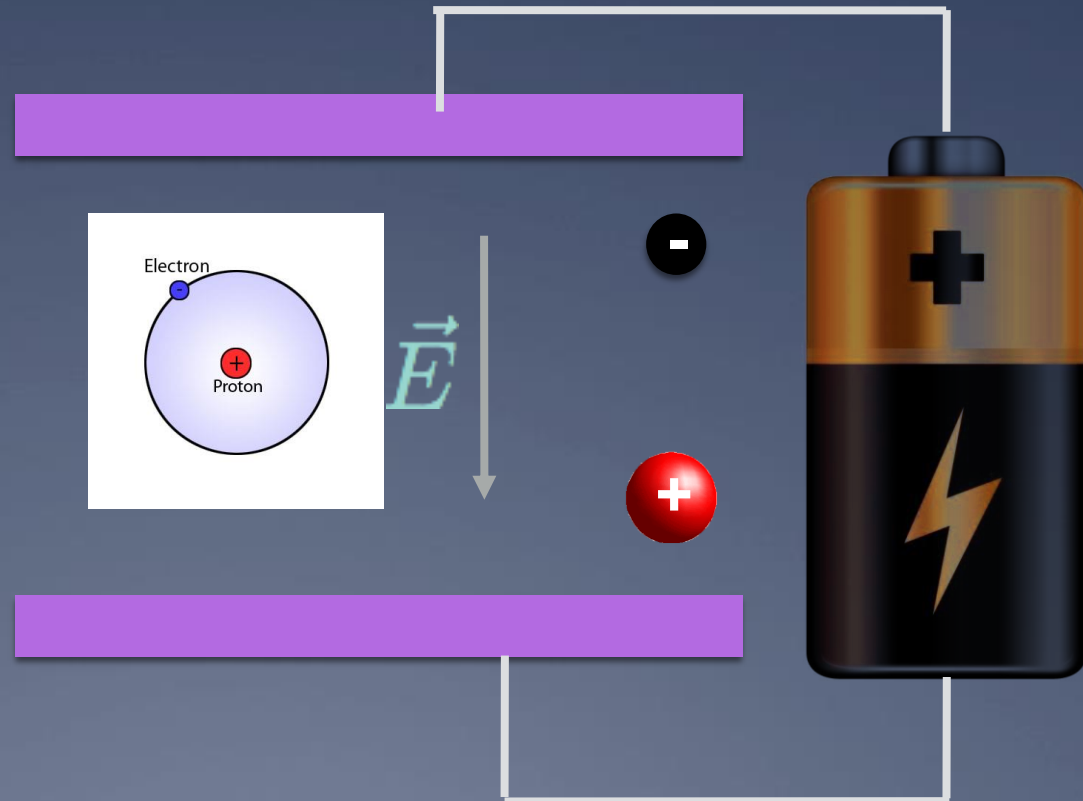
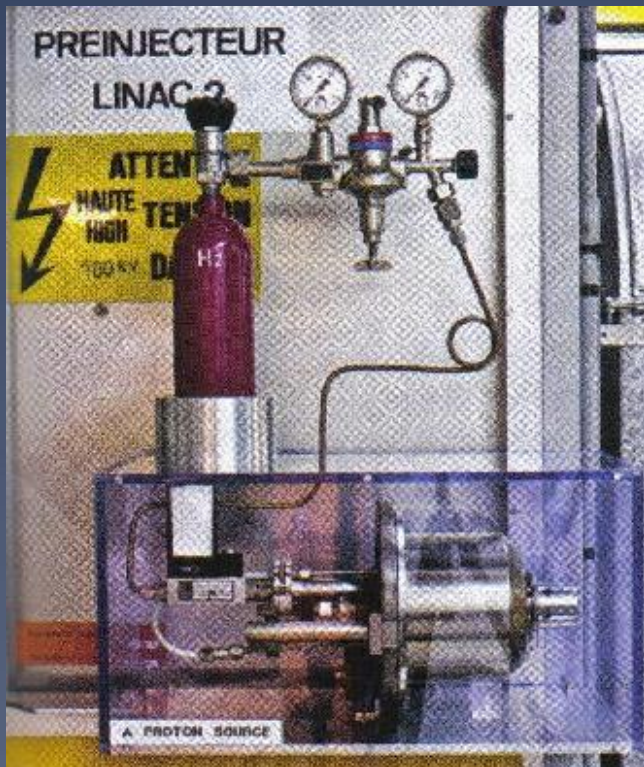




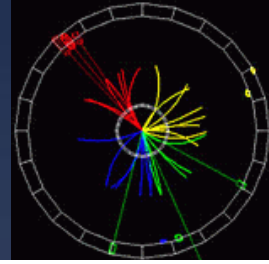
L'idrogeno proviene da una bombola e viene ionizzato in un contenitore con campo elettrico elevatissimo generato da un'elevata differenza di potenziale.



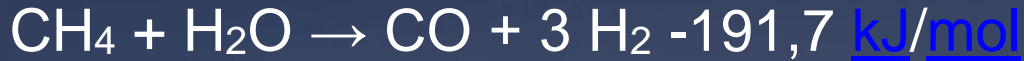
Hands on Particle Physics



Produzione di idrogeno



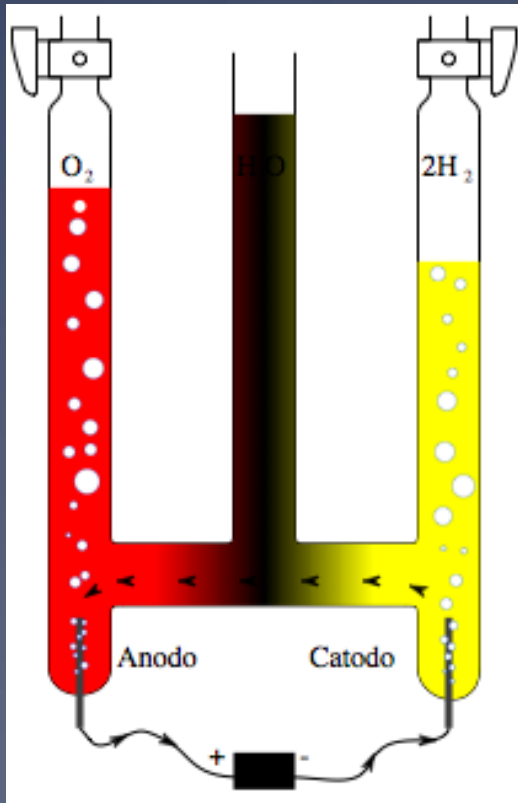
Hands on Particle Physics



dal metano



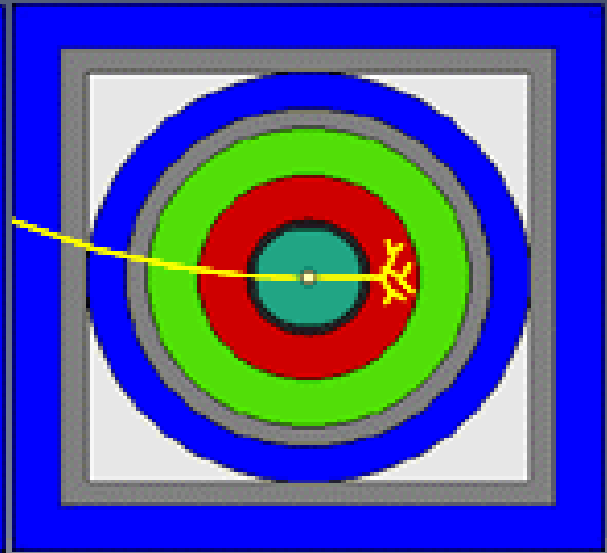
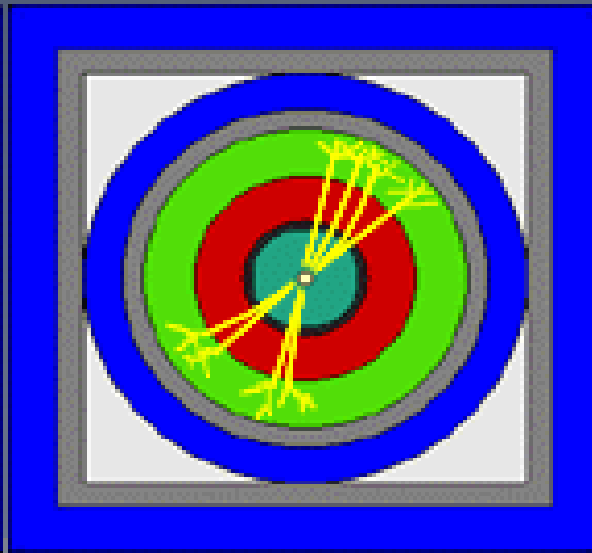
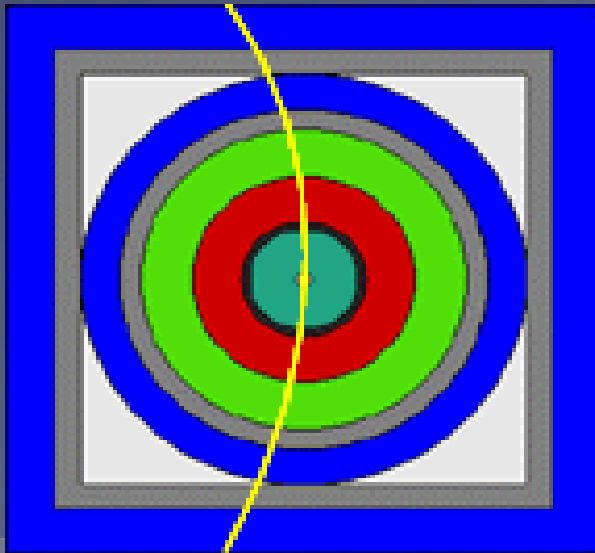
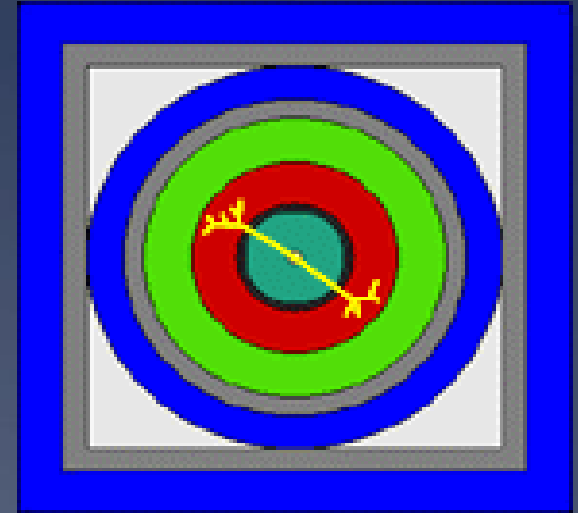
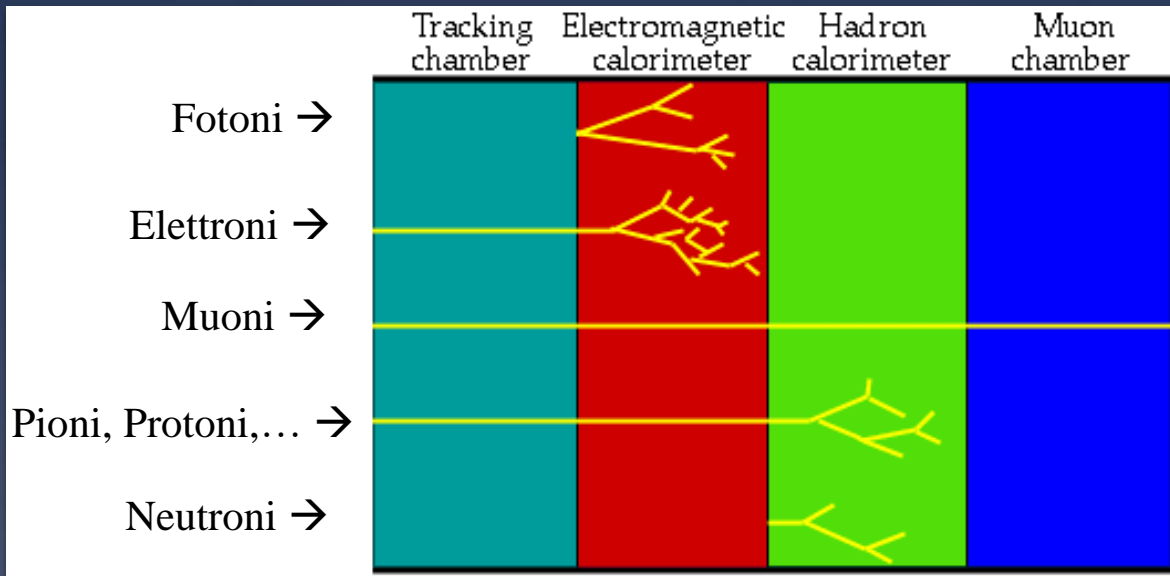
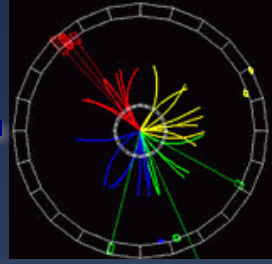
dal carbone

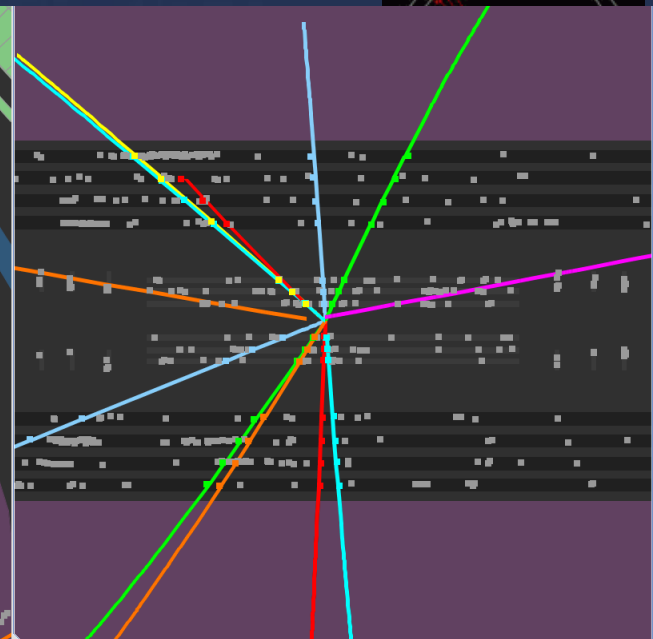
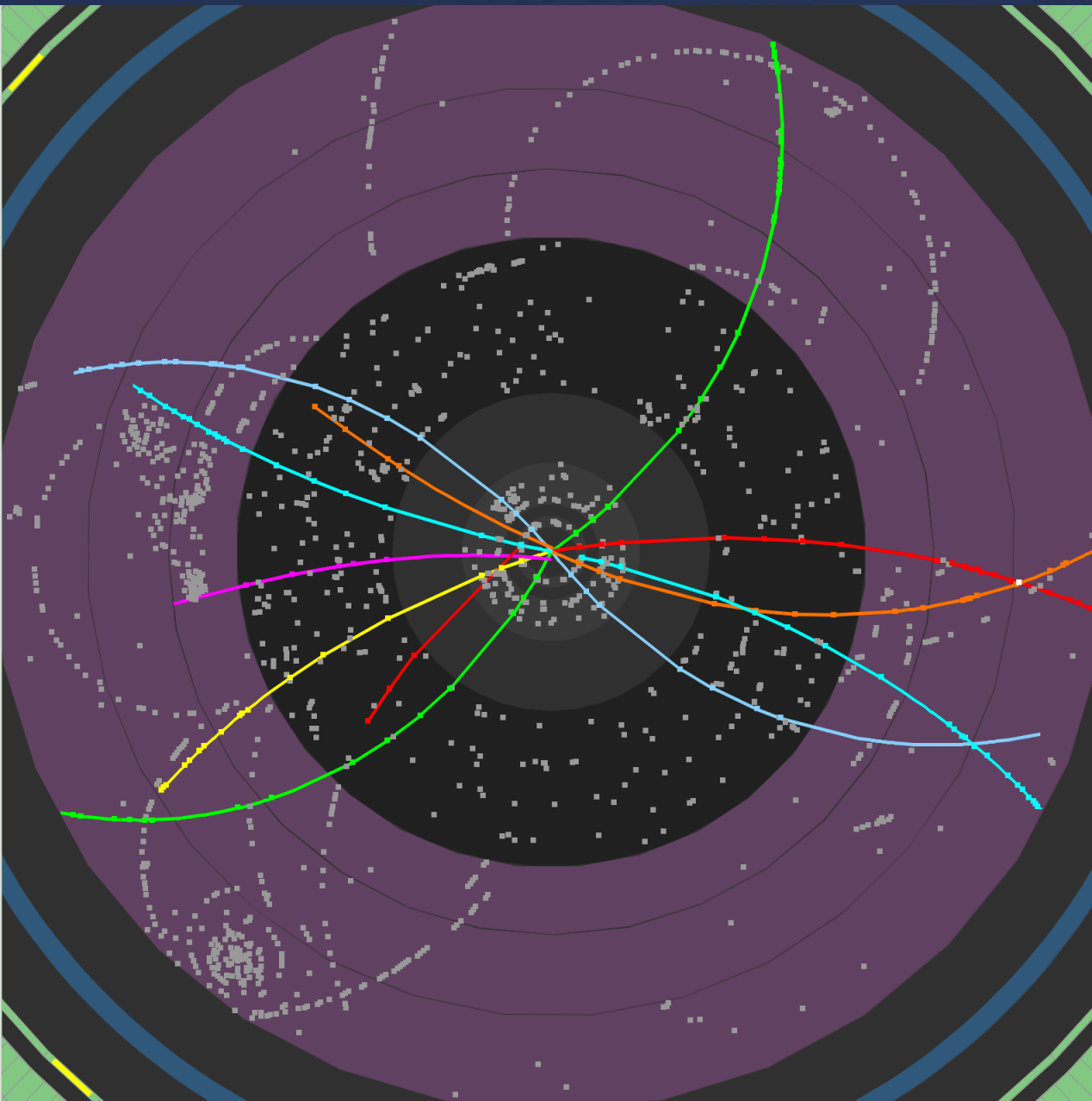


Elettrolisi dell'acqua



Riconoscere le particelle prodotte nelle collisioni





ATLAS
EXPERIMENT

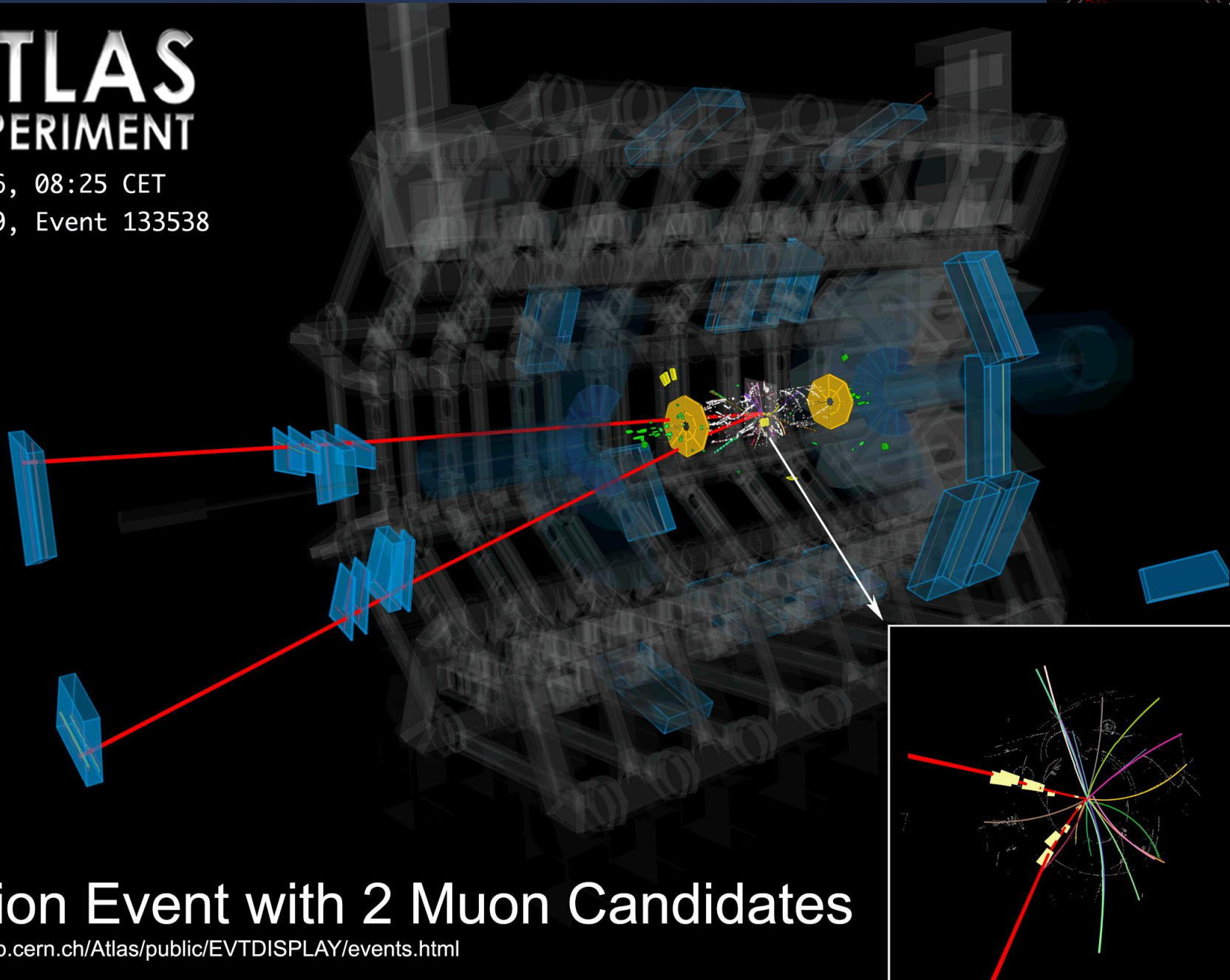
2009-12-06, 10:04 CET
Run 141749, Event 406601

Collision Event



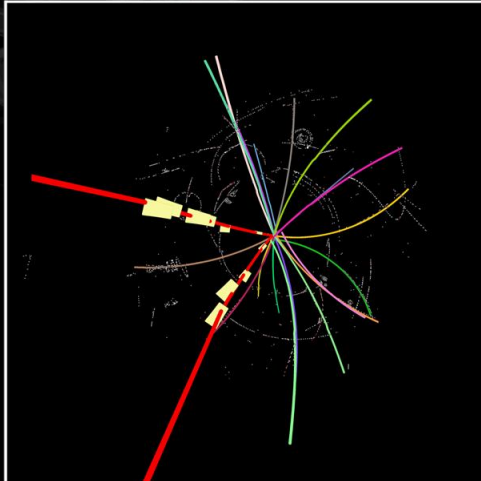
ATLAS EXPERIMENT

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

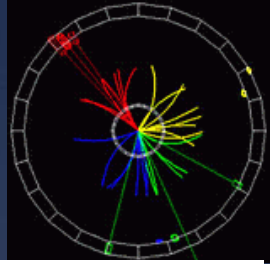


Collision Event with 2 Muon Candidates

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



A cosa serve tutto questo ???



Hands on Particle Physics

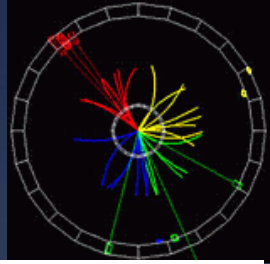
A nulla, ma è bello come l'arte, la musica e la poesia

A capire la natura, le stelle, il cosmo

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

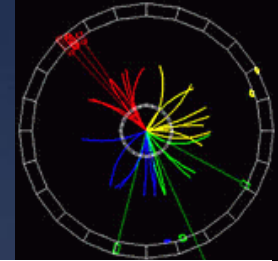
A produrre inaspettate ricadute tecnologiche i moltissimi campi :
Internet, GRID, terapie mediche, metodi diagnostici,
nuove tecnologie...

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

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

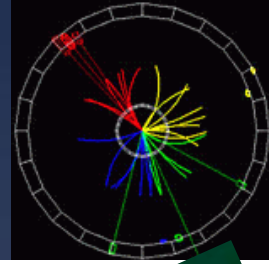
elettrone

Energia: E_1

Energia: E_2

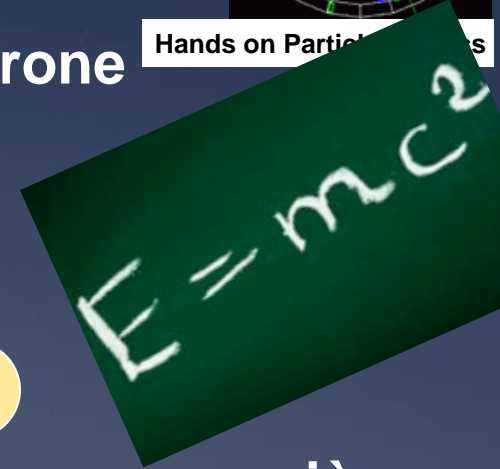
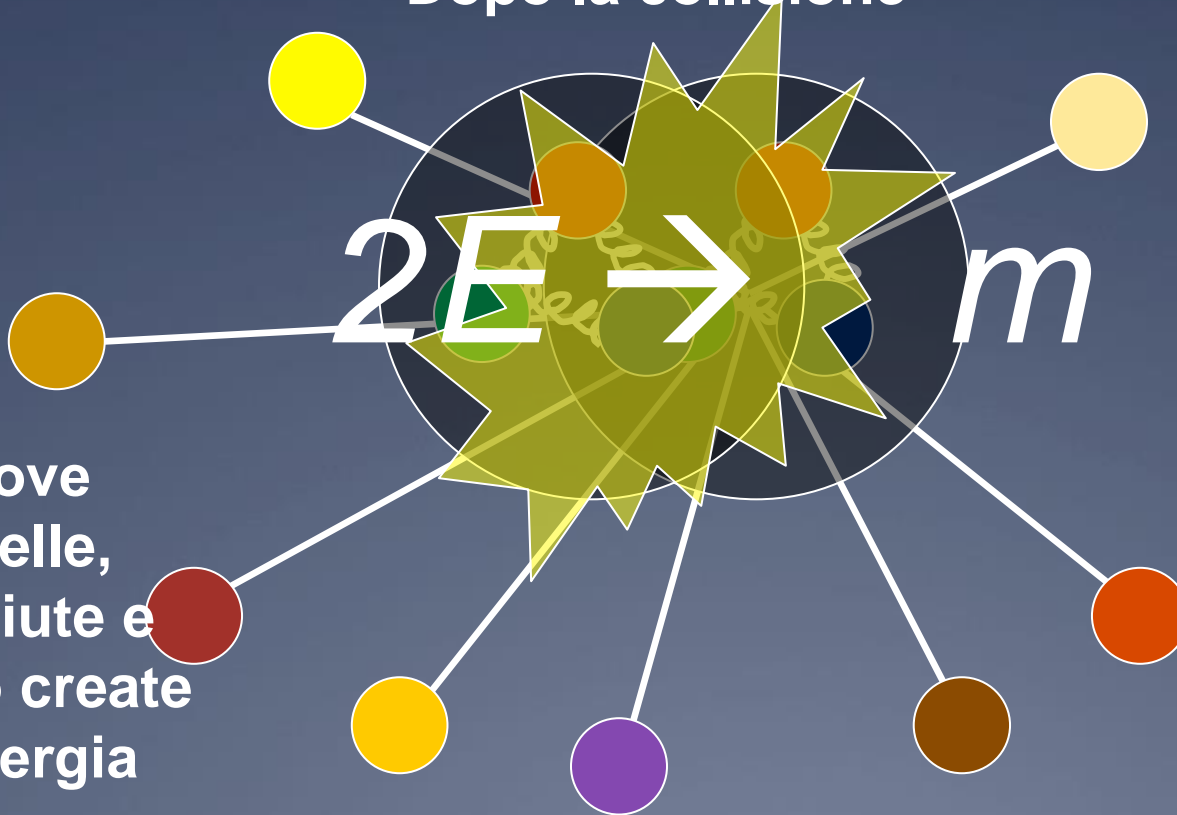
positrone

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