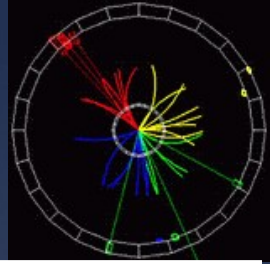


Hands on Particle Physics

European Particle Physics Masterclasses for High School Students



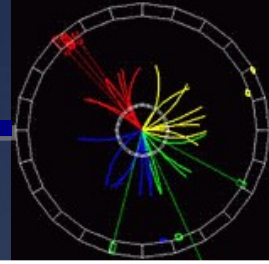
Hands on Particle Physics

Esperimenti in Fisica delle Particelle

26 Marzo 2024

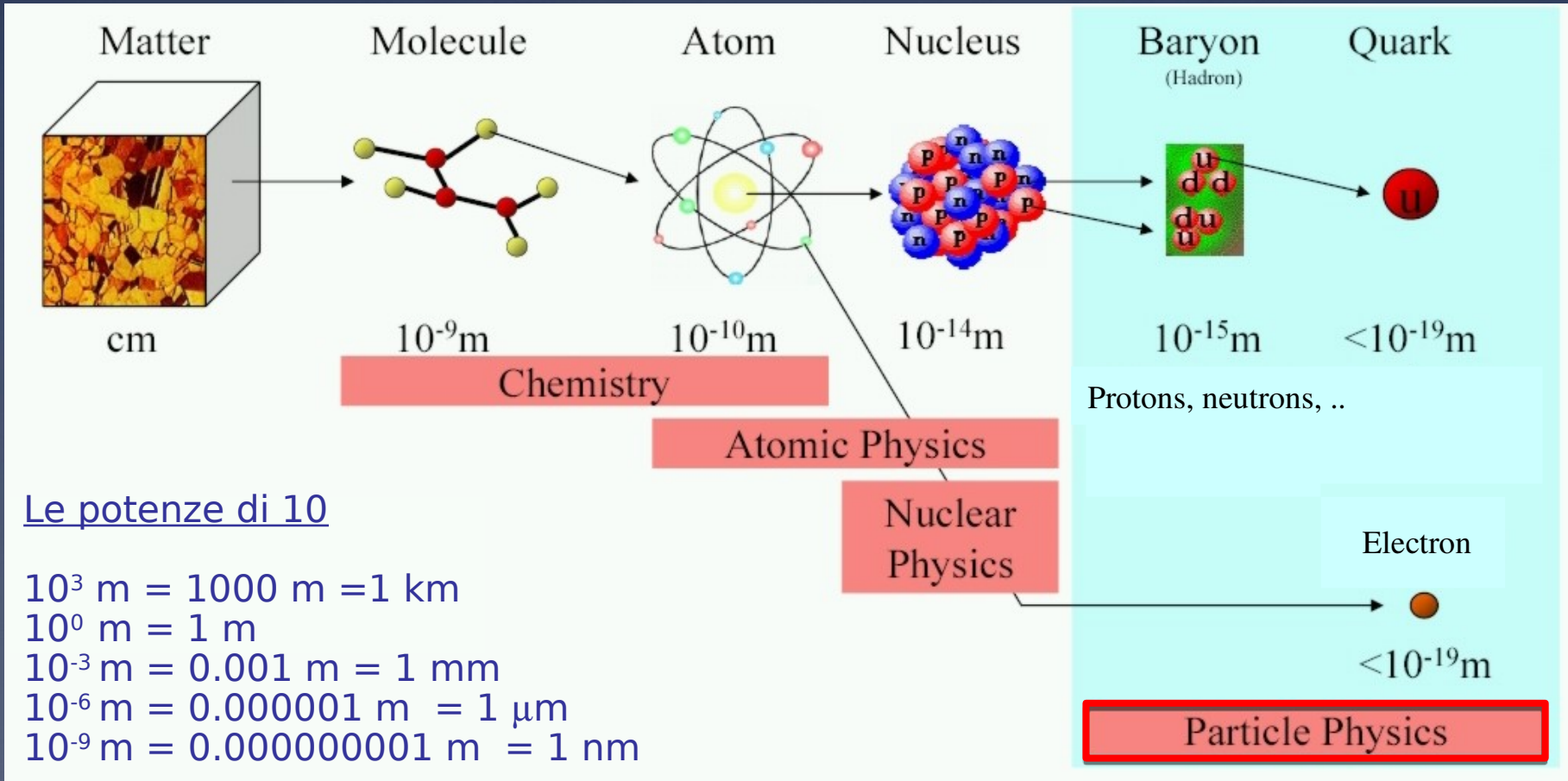
Laura Zani
(INFN – Roma Tre)

La “scala” del sistema da studiare



Hands on Particle Physics

Qual è la dimensione degli oggetti che vogliamo osservare ?



Le potenze di 10

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

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

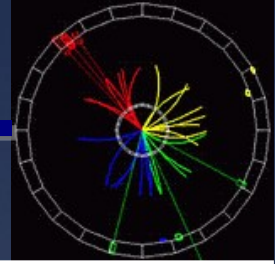
$$10^{-3} \text{ m} = 0.001 \text{ m} = 1 \text{ mm}$$

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

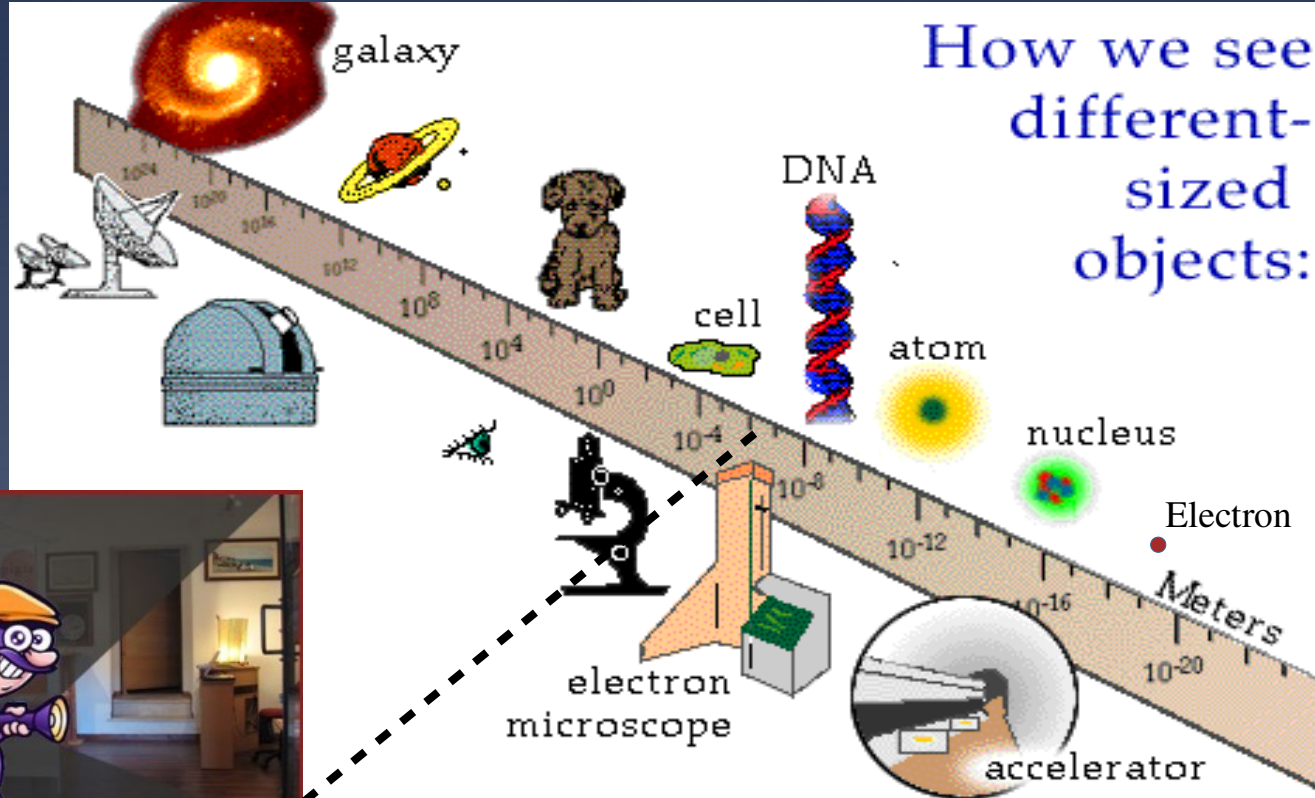
$$10^{-9} \text{ m} = 0.000000001 \text{ m} = 1 \text{ nm}$$

Come osserviamo gli oggetti ?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare



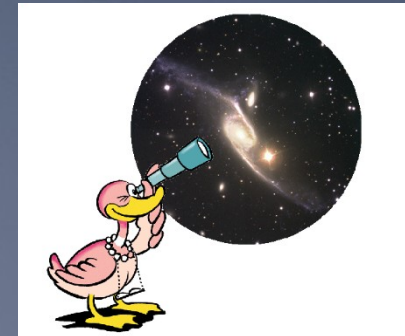
Hands on Particle Physics



La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra 400-800 nm

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

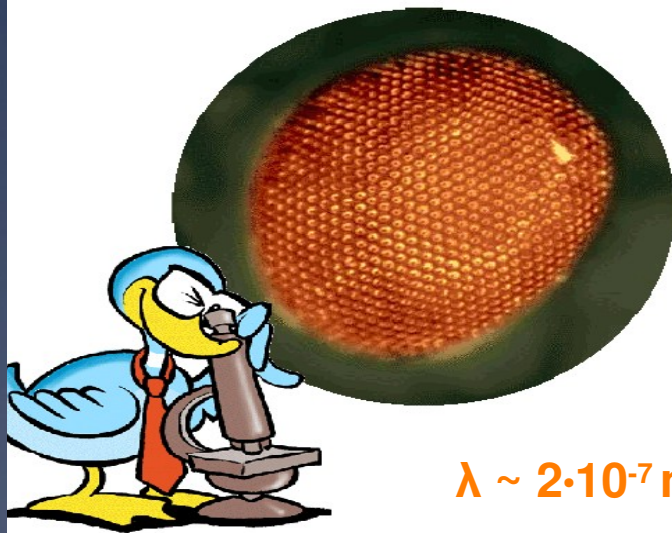
Ma come guardiamo gli oggetti microscopici?



Osservazione degli oggetti microscopici



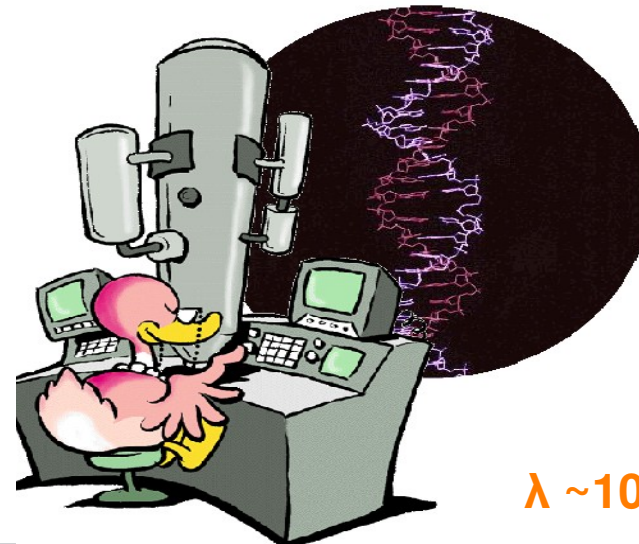
I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



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

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*



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

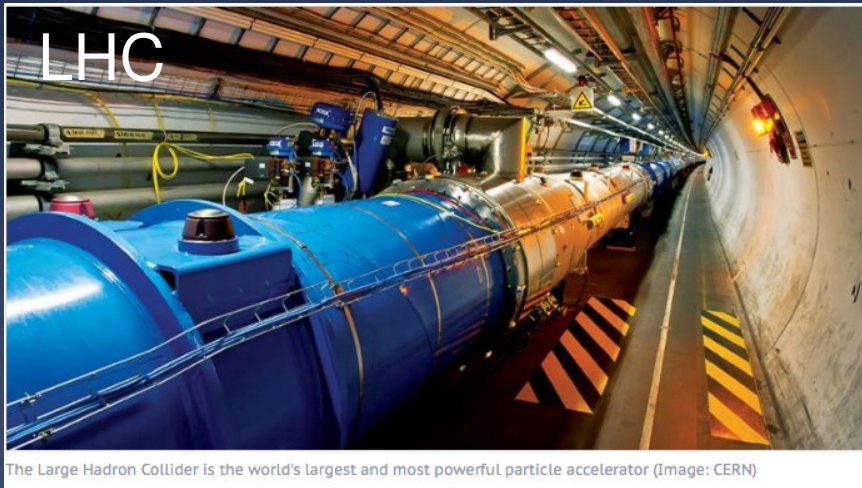
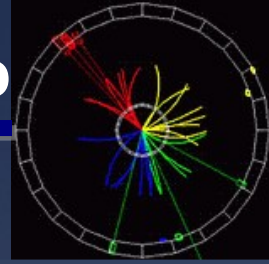
Gli elettroni di alta energia si comportano come onde, ma con una **LUNGHEZZA D'ONDA MOLTO PIU' PICCOLA DI QUELLA DELLA LUCE**

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



PICCOLE DIMENSIONI \leftrightarrow GRANDI ENERGIE

Particelle di alta energia per esplorare il microcosmo



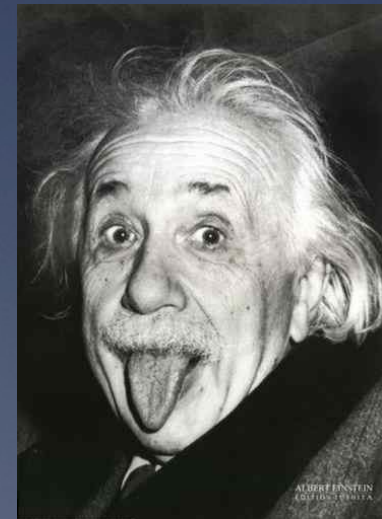
The Large Hadron Collider is the world's largest and most powerful particle accelerator (Image: CERN)

Per esplorare il microcosmo utilizziamo gli

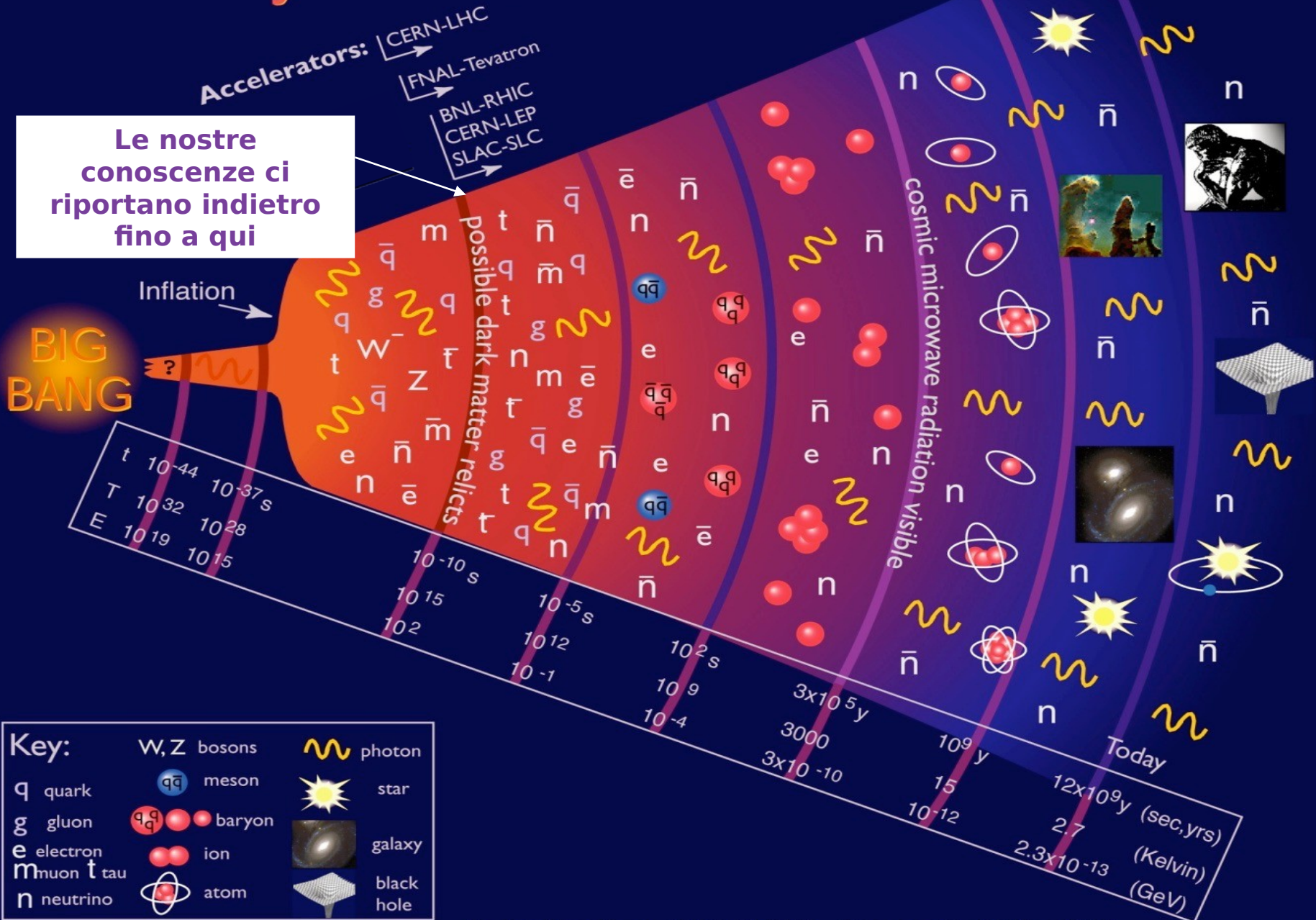
ACCELERATORI DI PARTICELLE

Perche' gli acceleratori di particelle ???

1. Per investigare dimensioni sempre minori dell'ordine $\lambda = hc/E$. 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



History of the Universe

Il Bosone di Higgs è l'ultima particella elementare scoperta

Le nostre conoscenze ci riportano indietro fino a qui

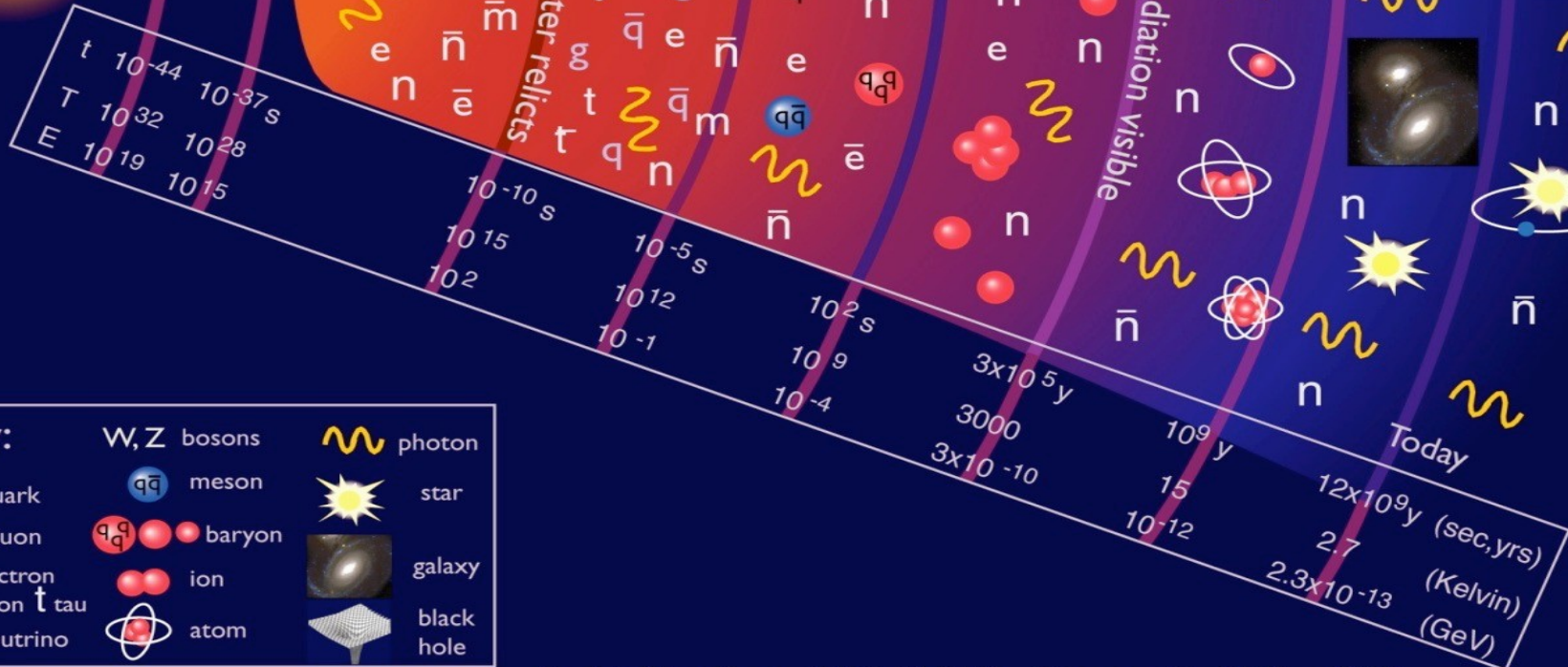
Accelerators: CERN-LHC
 FNAL-Tevatron
 BNL-RHIC
 CERN-LEP
 SLAC SLC

BIG BANG

Inflation

possible dark matter relicts

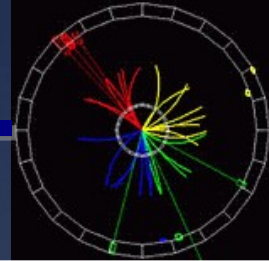
cosmic microwave radiation visible



Key:

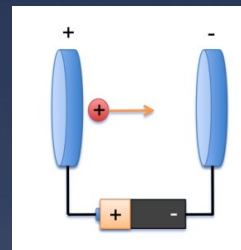
- W, Z bosons
- q quark
- g gluon
- e electron
- m muon
- t tau
- n neutrino
- meson
- baryon
- ion
- atom
- photon
- star
- galaxy
- black hole

Accelerare e "guidare" le particelle



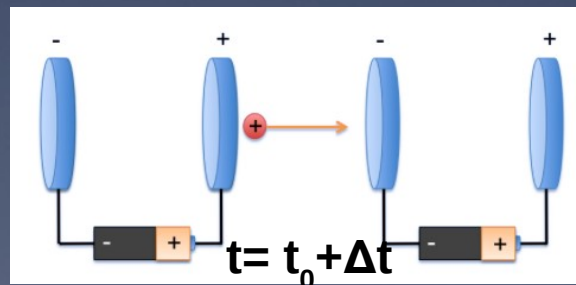
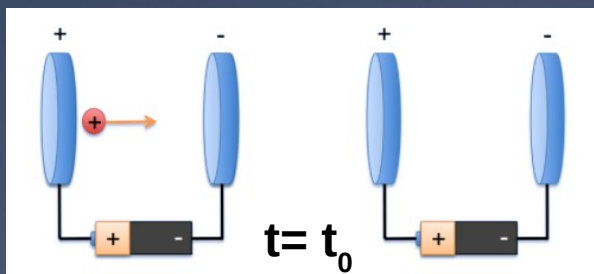
Hands on Particle Physics

- Le particelle cariche vengono accelerate in un campo elettrico



Solo campi elettrici per accelerare!

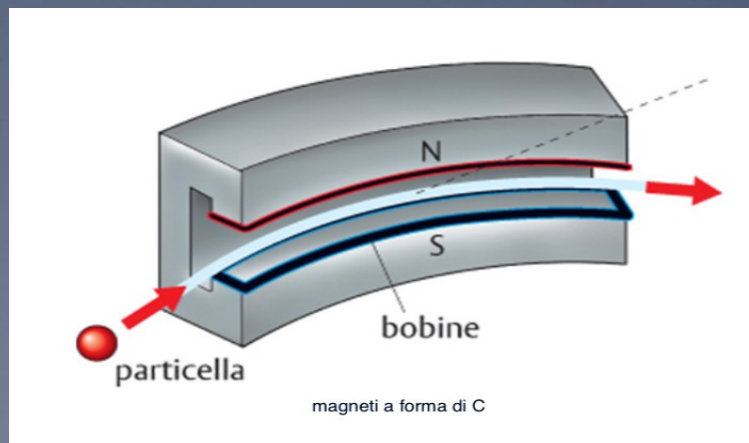
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto che le particelle possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico.

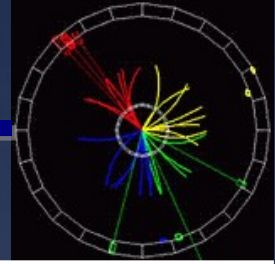


$$V(t) = V_0 \sin \omega t$$

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

$$|F| = q v B = mv^2/r$$





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

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

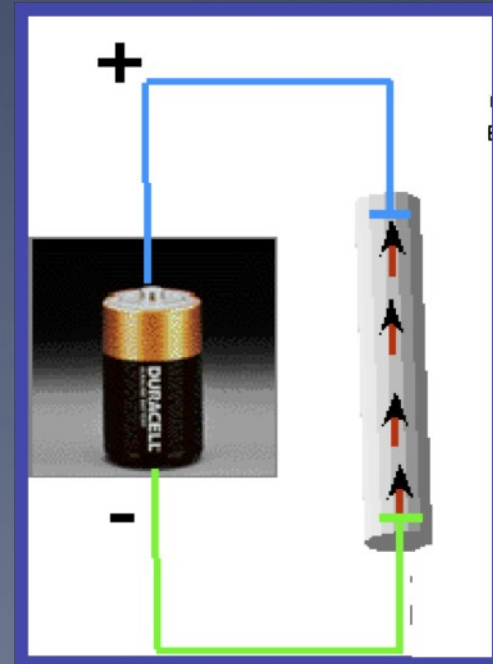
1 keV è mille elettronvolt (10^3 eV)

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

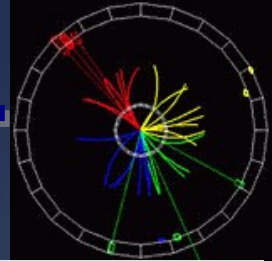
1 GeV un miliardo di elettronvolt (10^9 eV)

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



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

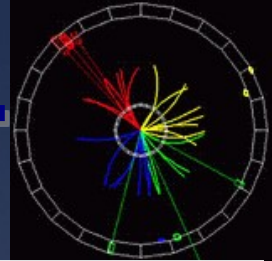
Hands on Particle Physics

Acceleratori elettrostatici
Sfruttano campi elettrici costanti



CERN, protoni da 800 keV

Acceleratori

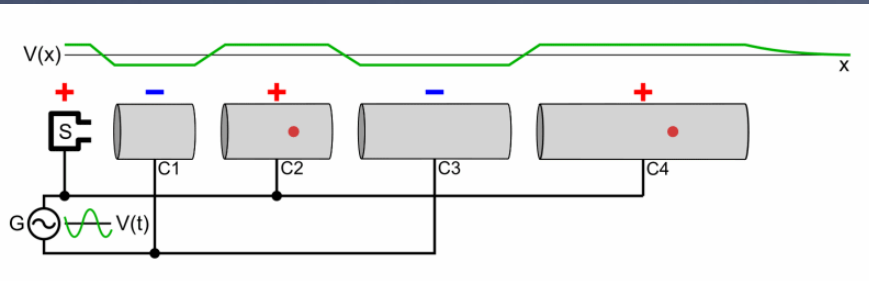


Hands on Particle Physics

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

Acceleratori elettrostatici
Sfruttano campi elettrici costanti

Acceleratori a radiofrequenza
Sfruttano campi elettrici oscillanti

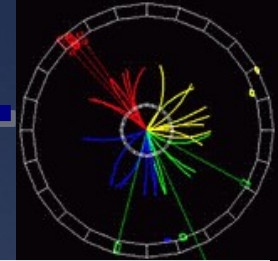


Primi LINear ACcelerator, LINAC



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

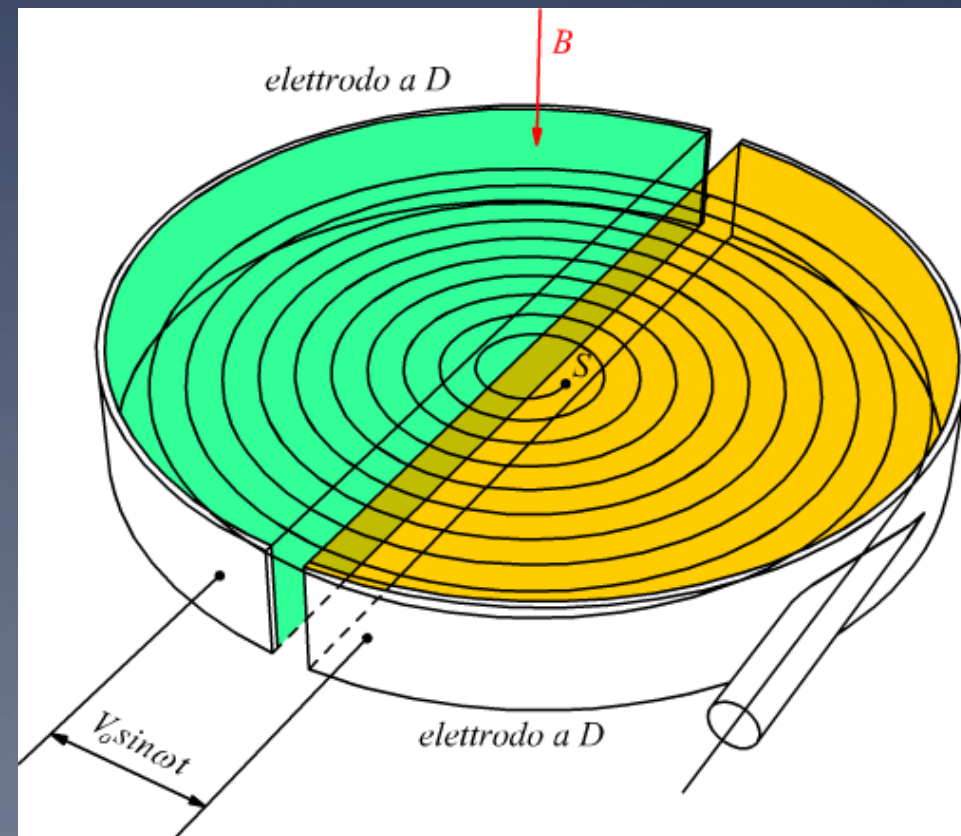
Acceleratori elettrostatici
Sfruttano campi elettrici costanti

Acceleratori a radiofrequenza
Sfruttano campi elettrici oscillanti

Ciclotrone
Struttura circolare + campo magnetico per curvare le particelle cariche

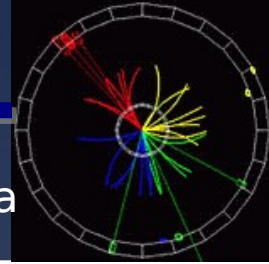
→ **Raggio dell'elettrodo determina energia massima**

CICLOTRONE



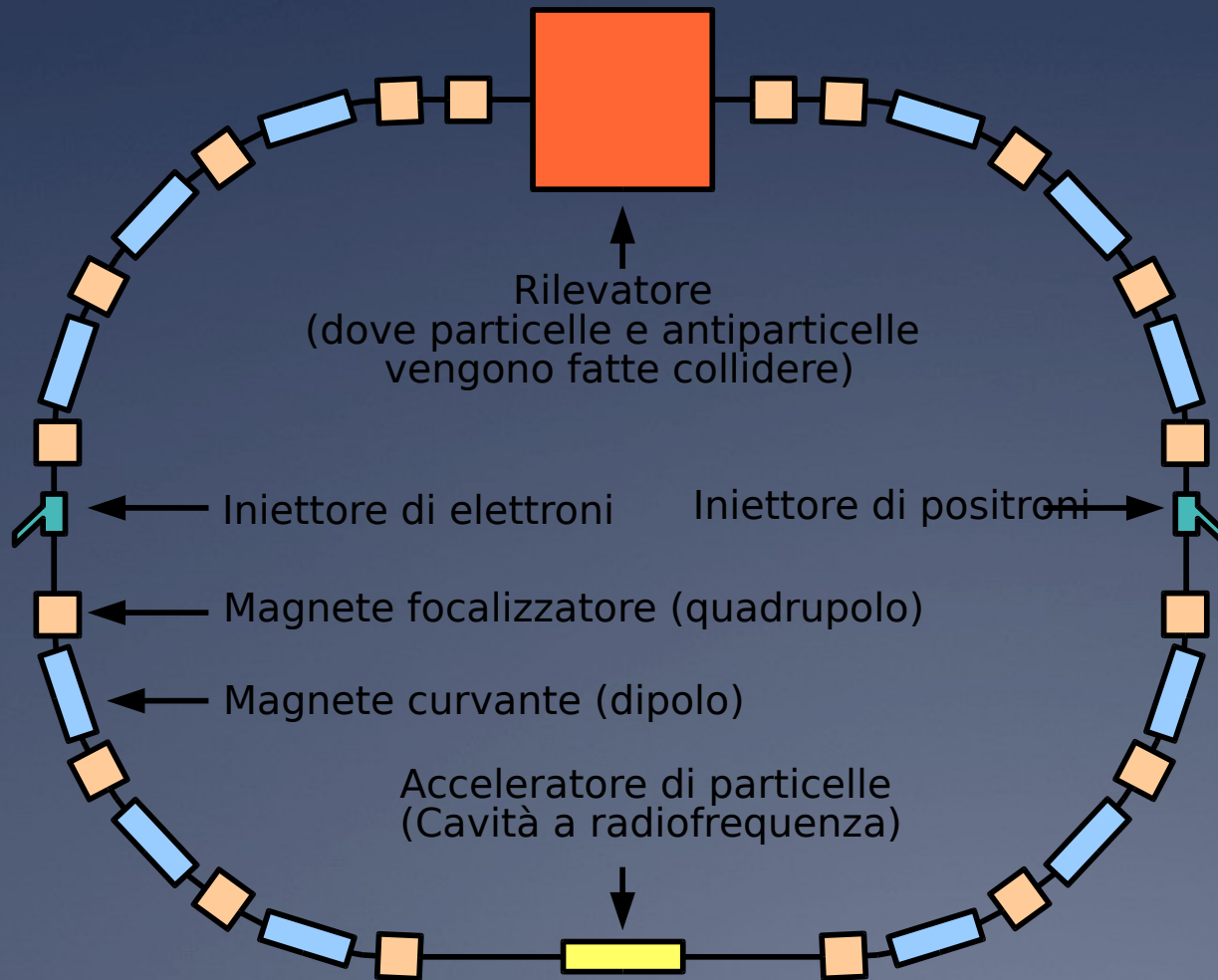
1930, Lawrence, protoni da 100 MeV

Collider



Hands on Particle Physics

Due fasci di particelle e antiparticelle viaggiano in direzioni opposte in tubi a vuoto attraverso lo stesso sistema accelerante.

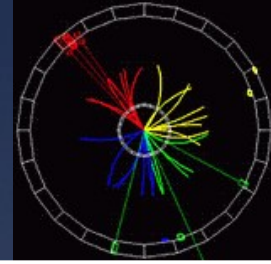
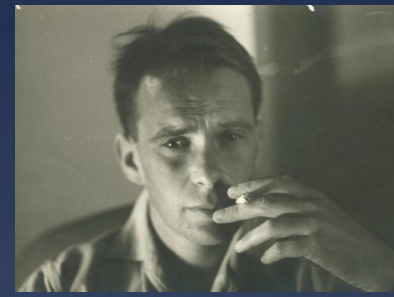


accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di diversi elementi lungo l'anello

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

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 DA BRUNO TOUSCHEK NEGLI ANNI 60

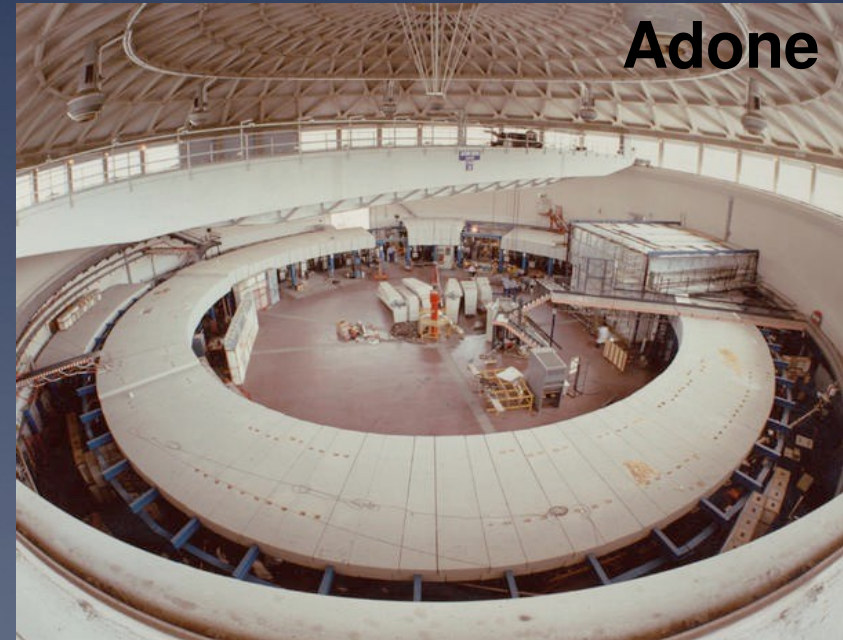


Hands on Particle Physics

Prime collisioni **elettrone-positrone**:



AdA (Anello di Accumulazione)



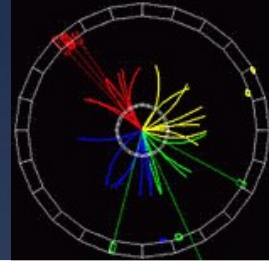
Adone

Perche grandi circonferenze?

Le **particelle cariche accelerate** perdono energia emettendo luce (irraggiano): R grande \rightarrow minore accelerazione (v^2/R) \rightarrow minore perdita di energia per irraggiamento.

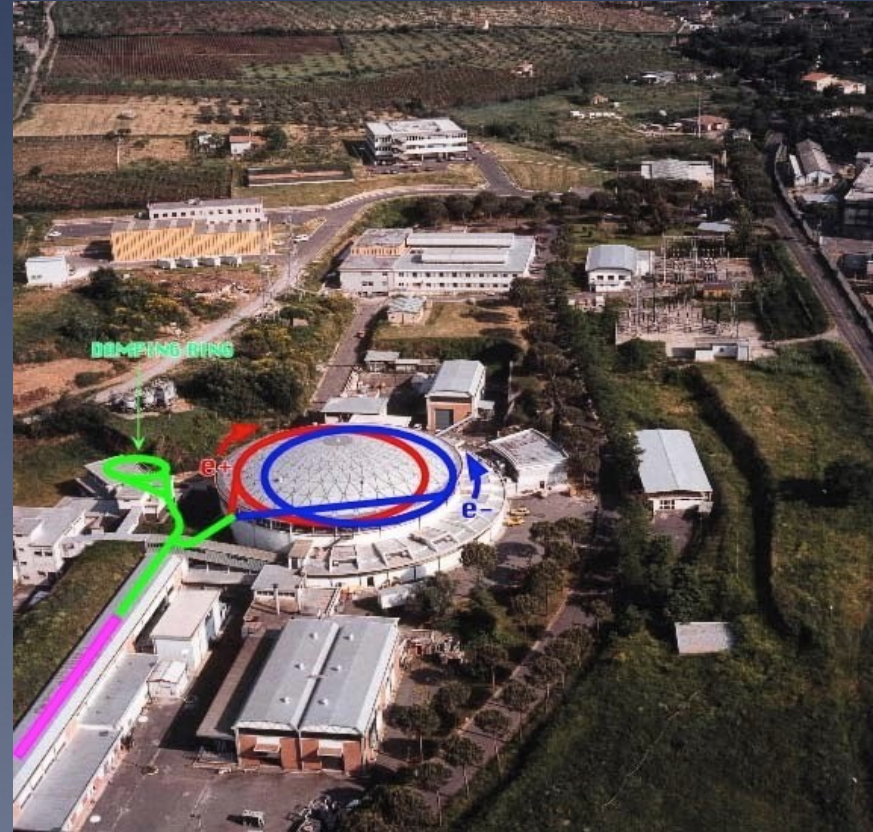
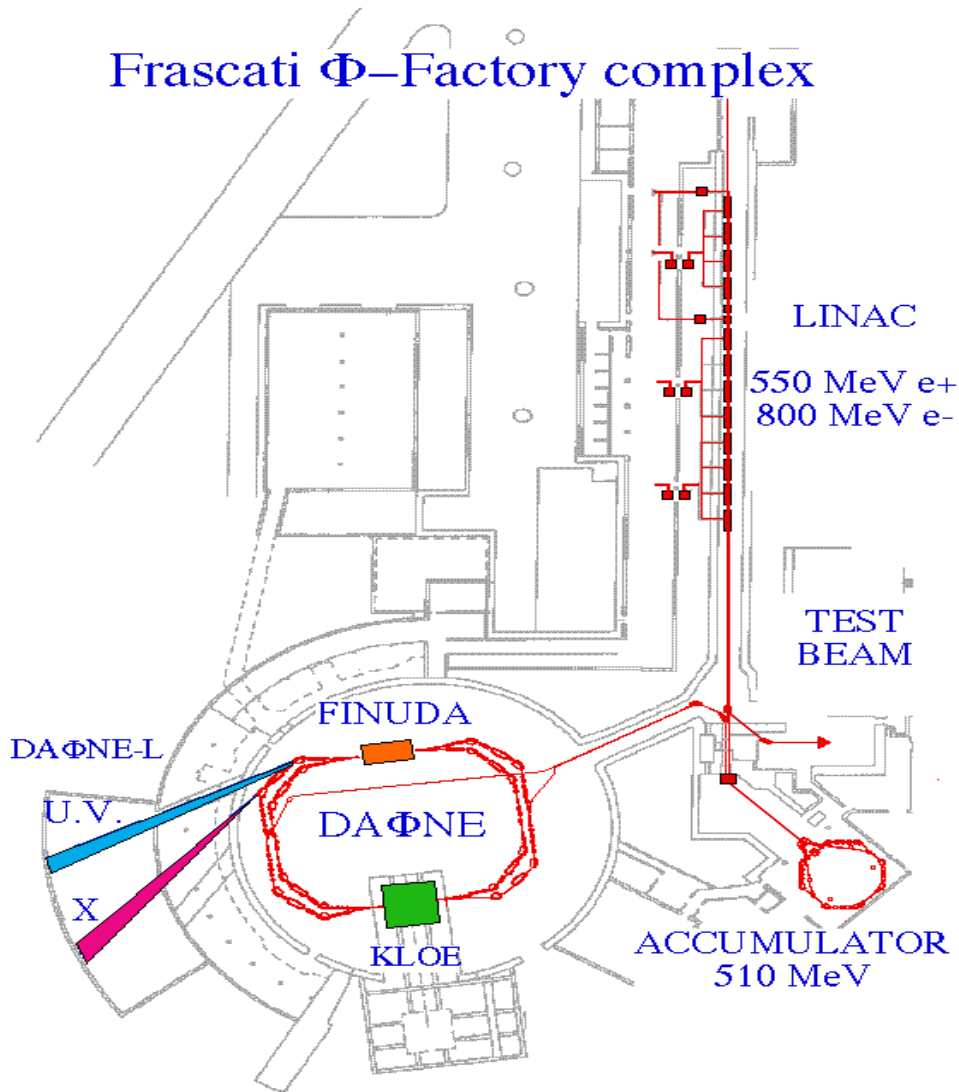
Questo effetto diminuisce al crescere della massa della particella \rightarrow per gli *elettroni* è molto importante, per i protoni è trascurabile.

L'acceleratore DAΦNE a Frascati



Hands on Particle Physics

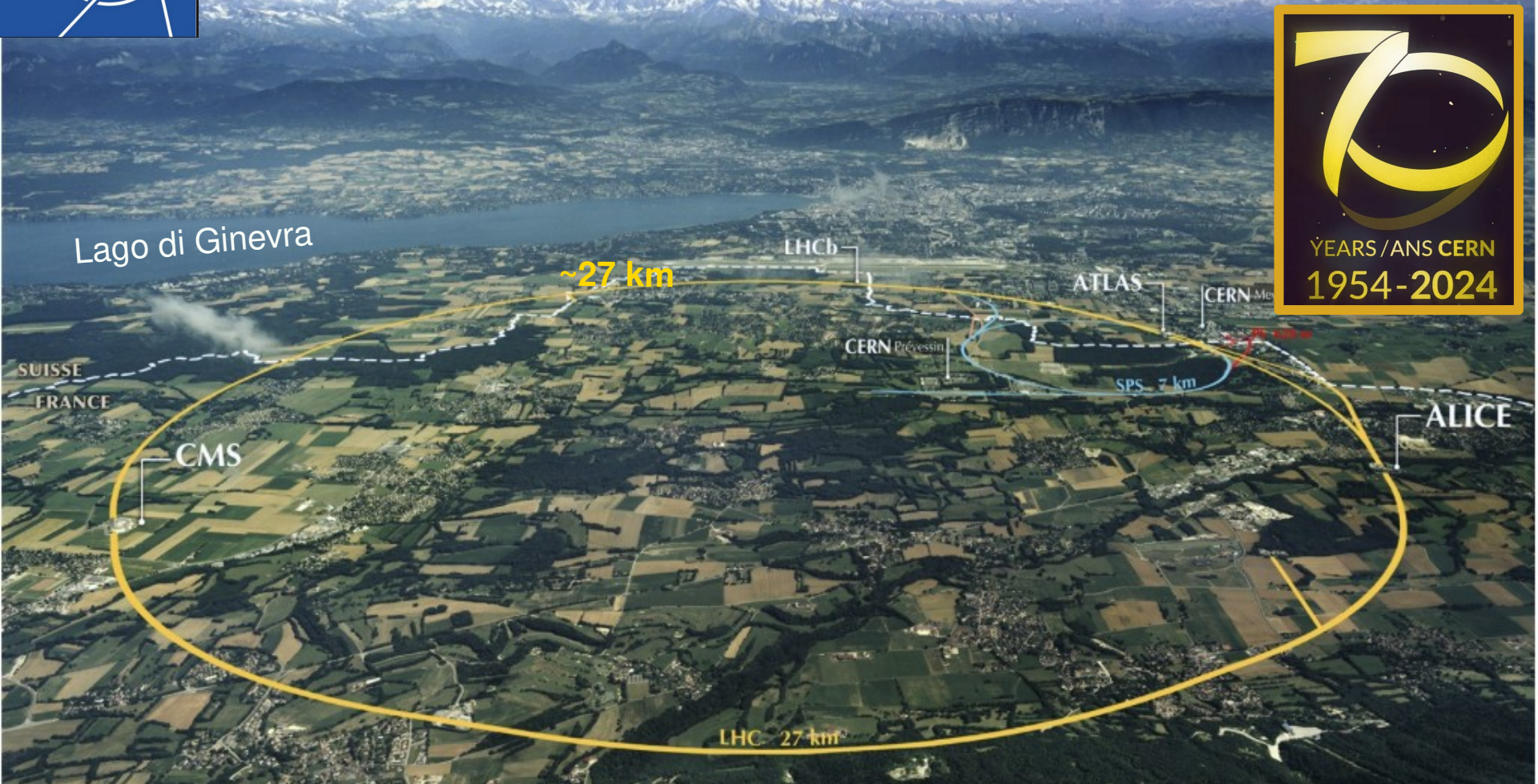
Frascati Φ -Factory complex





II CERN

Il grande laboratorio europeo per la fisica delle particelle si trova a Ginevra, al confine franco-svizzero. Fu fondato nel 1954.



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

Cosa produce la fisica delle particelle elementari?

NON solo Nobel,
ma 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*



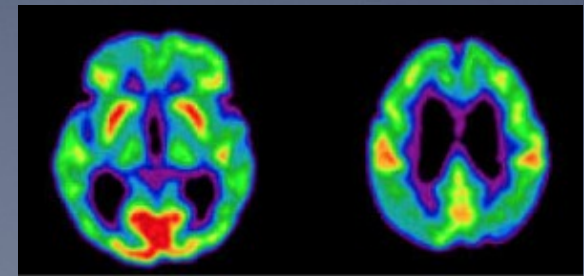
il Touch Screen



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



PET



II KEK

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

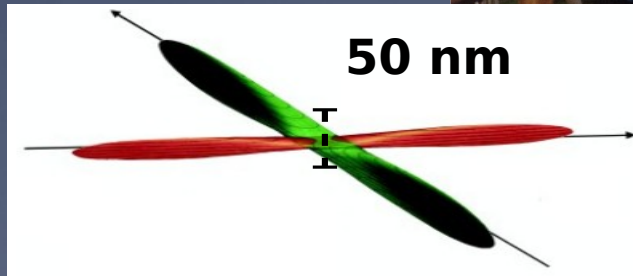
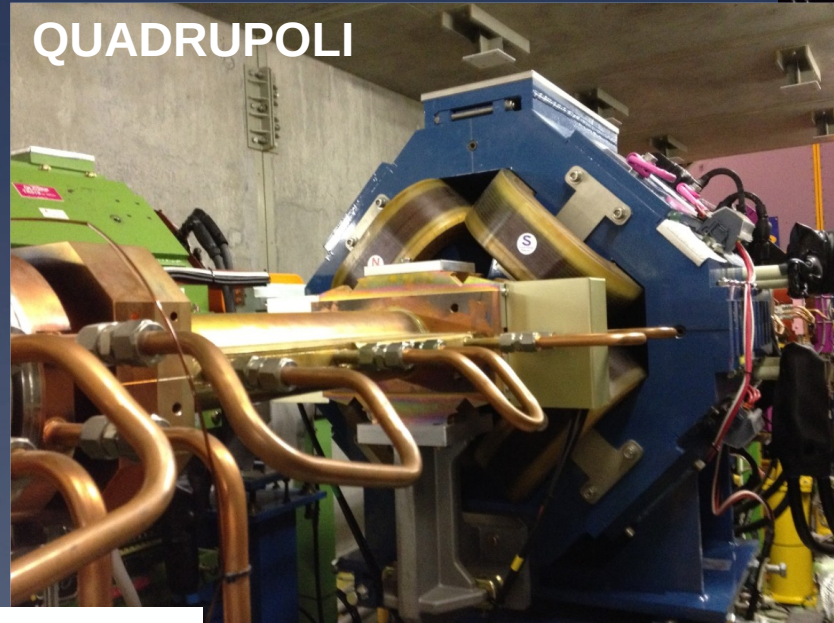
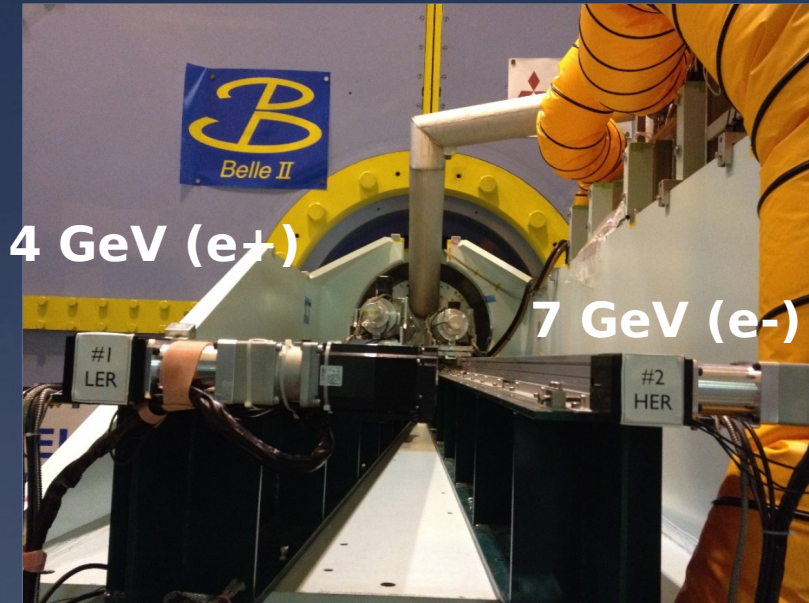
Monte Tsukuba

~3 Km

SuperKEKB

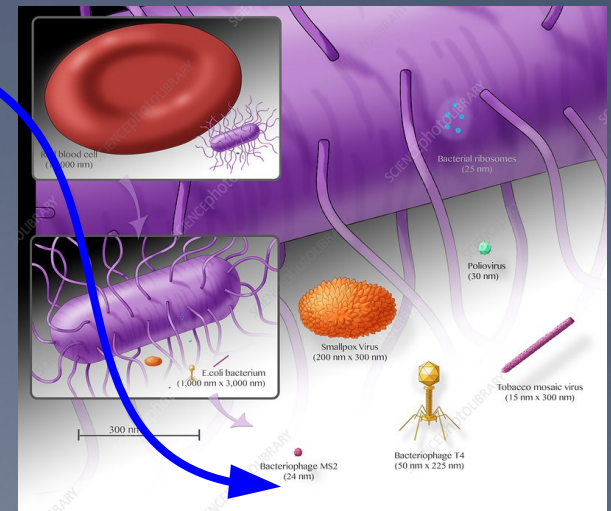


SUPERKEKB : elettrone (e^-) contro positrone (e^+)

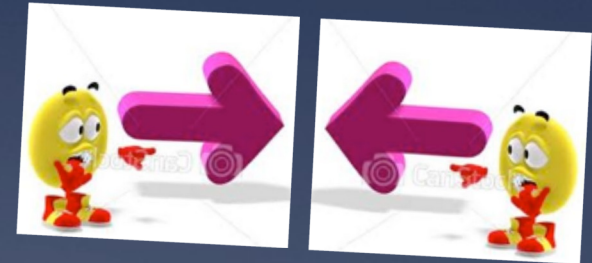
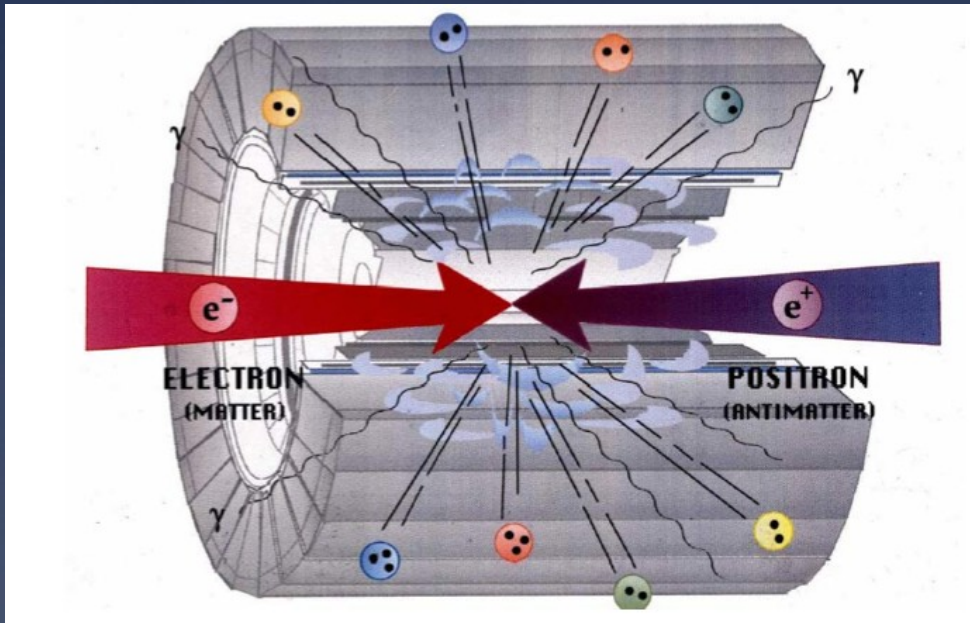
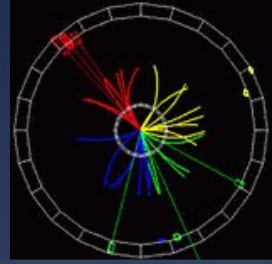


Gli elettroni viaggiano quasi alla velocità della luce

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



I rivelatori di particelle

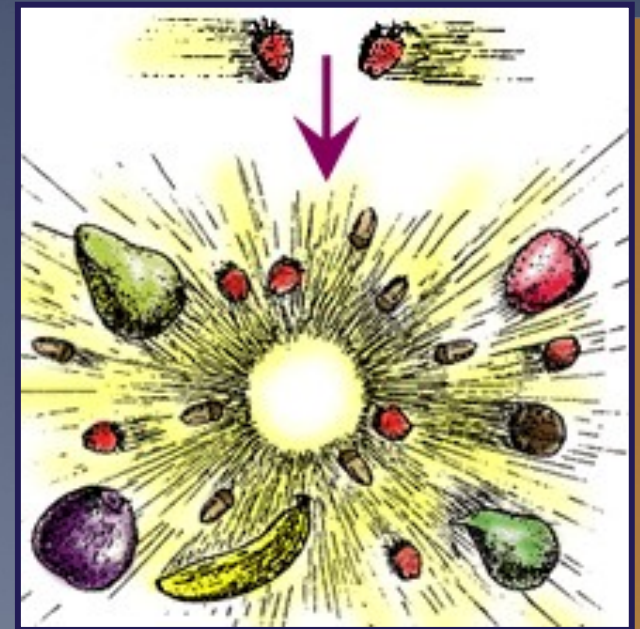


Scopi

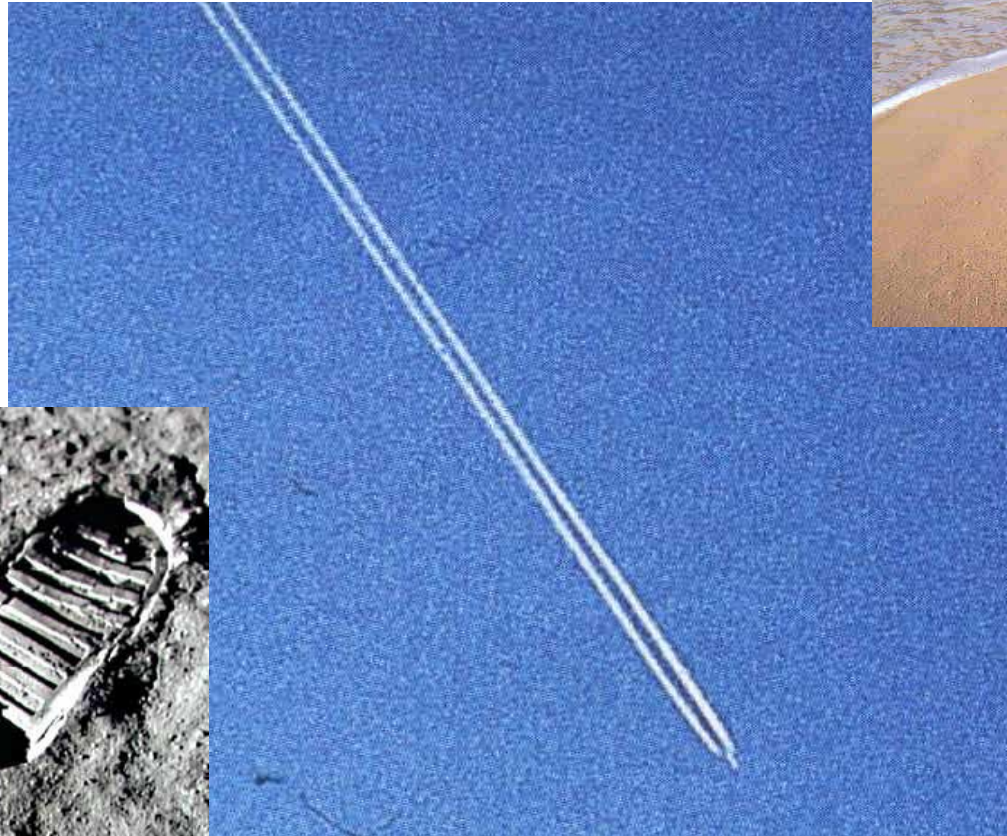
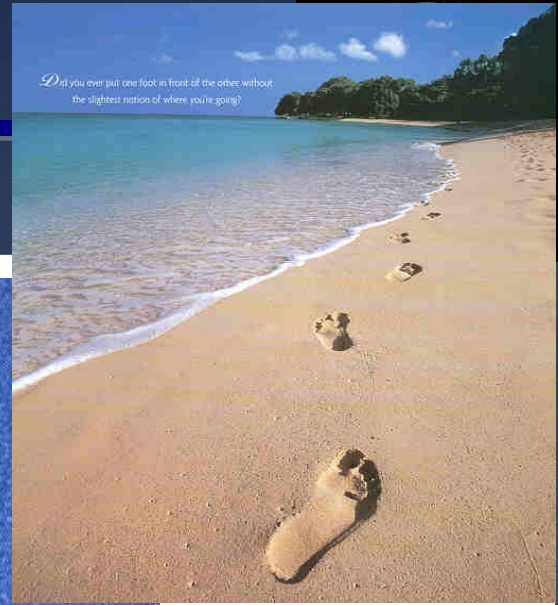
- 🕒 Identificare le particelle
- 🕒 misurare le caratteristiche (energia, carica..) delle particelle

Come?

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

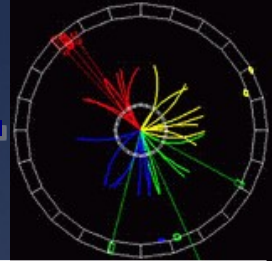


Alla ricerca di tracce



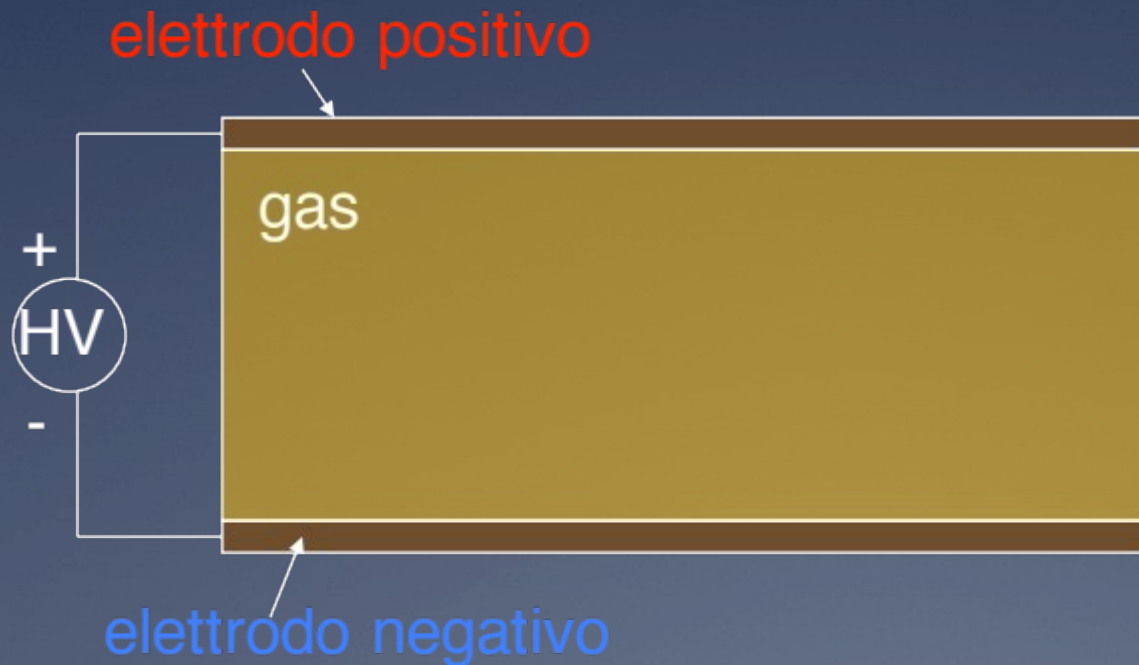
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce



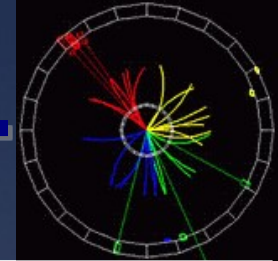
Hands on Particle Physics

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



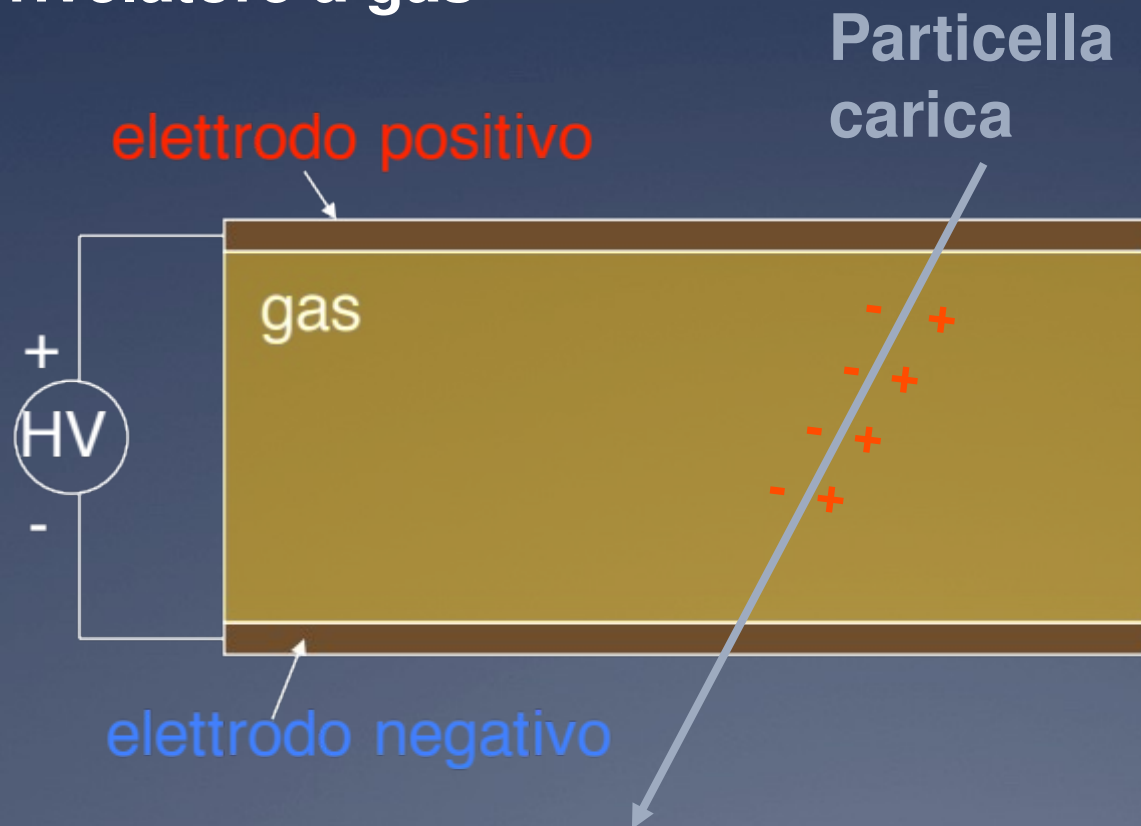
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Alla ricerca di tracce



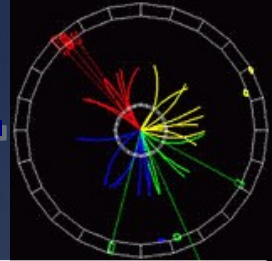
Hands on Particle Physics

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



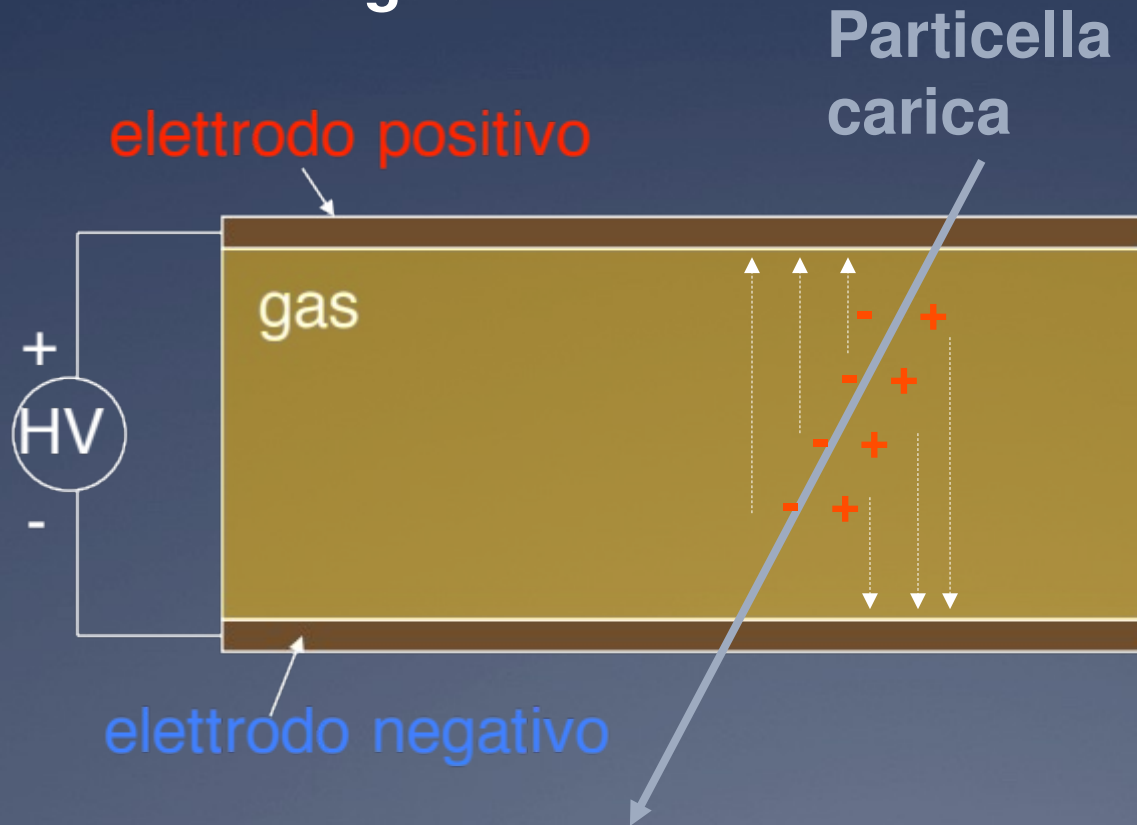
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento è
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce



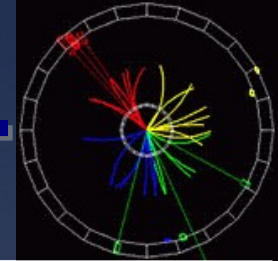
Hands on Particle Physics

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



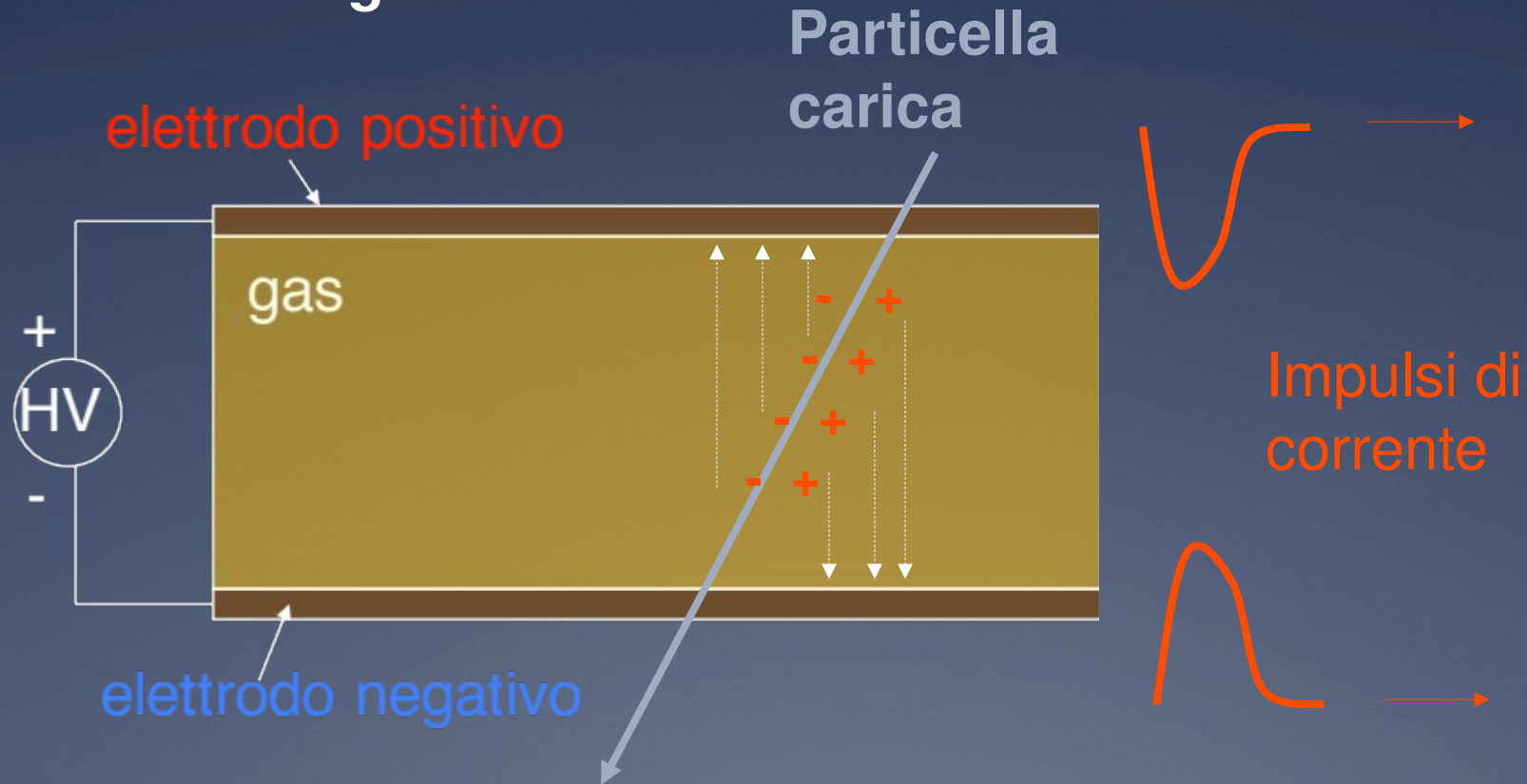
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento e'
LA IONIZZAZIONE

Alla ricerca di tracce



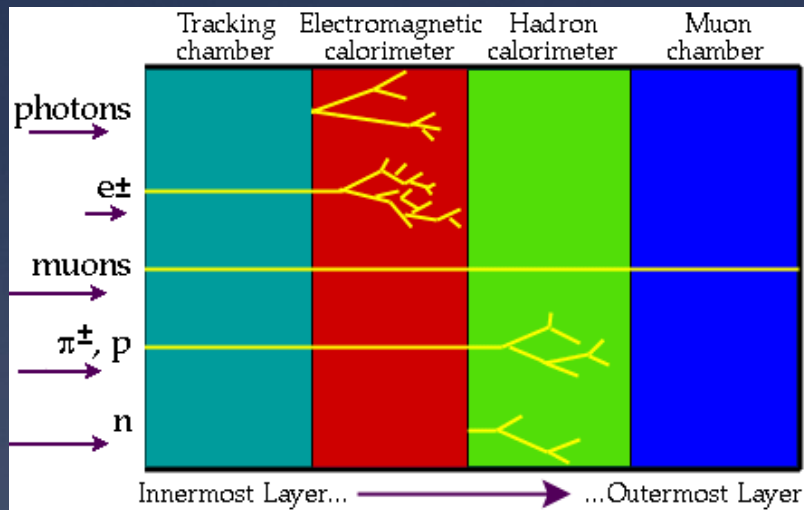
Hands on Particle Physics

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



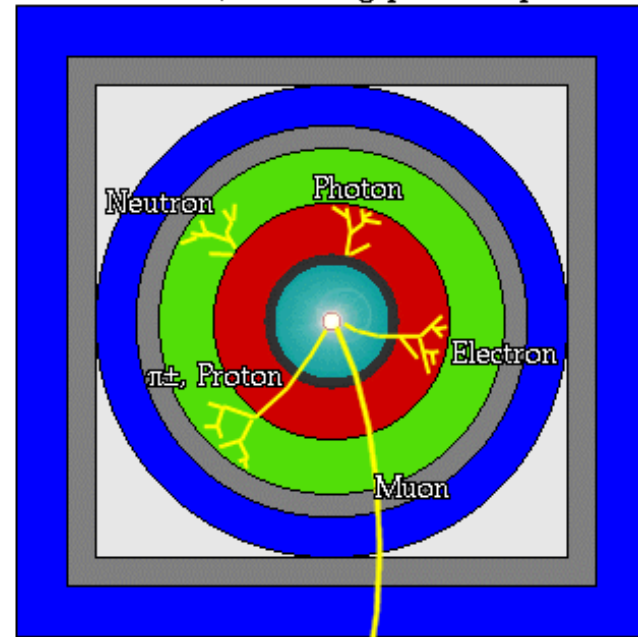
In questo tipo di rivelatori il principio di funzionamento e'
LA IONIZZAZIONE

Apparati di rivelatori

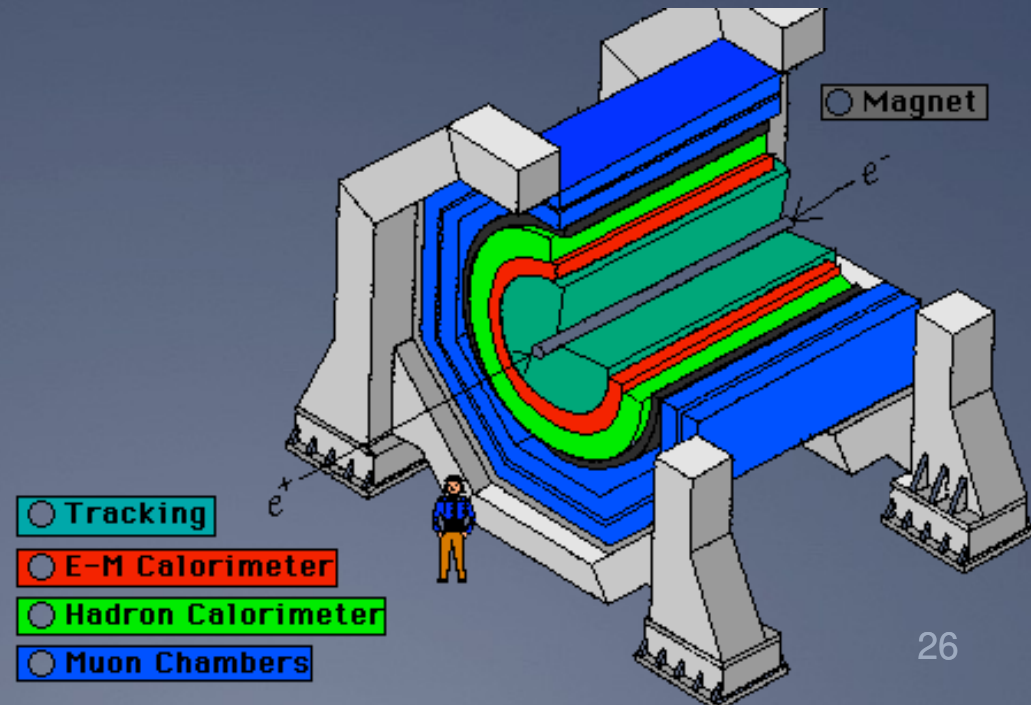


A detector cross-section, showing particle paths

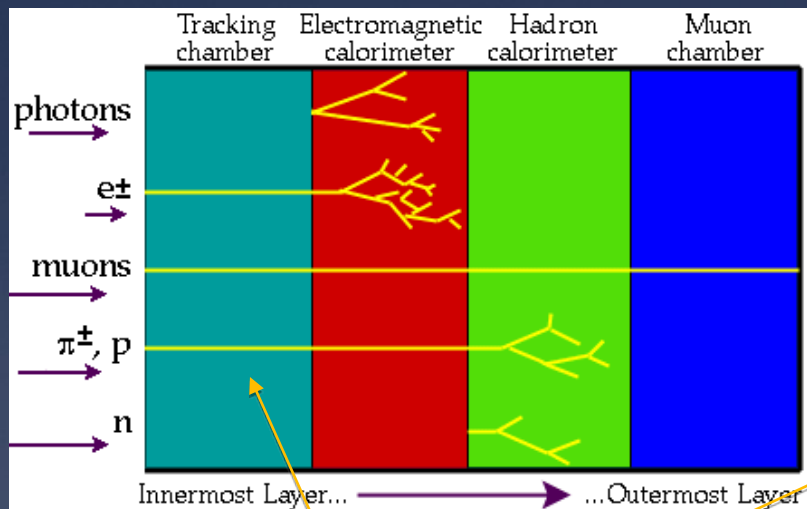
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Struttura a "cipolla"

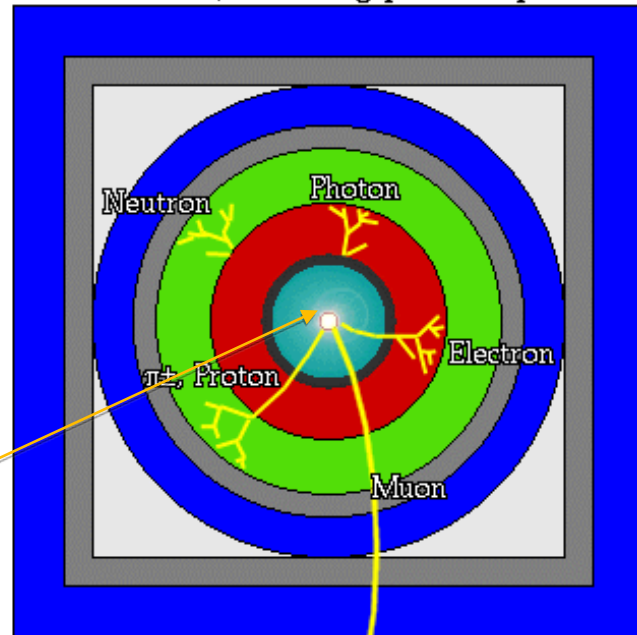


Apparati di rivelatori

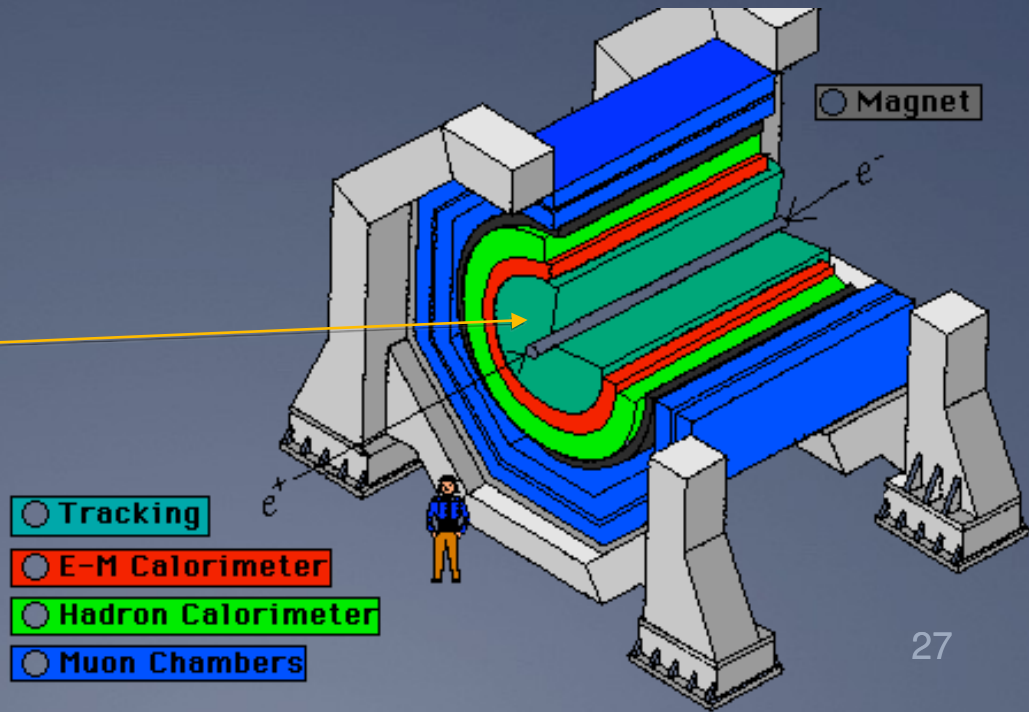


A detector cross-section, showing particle paths

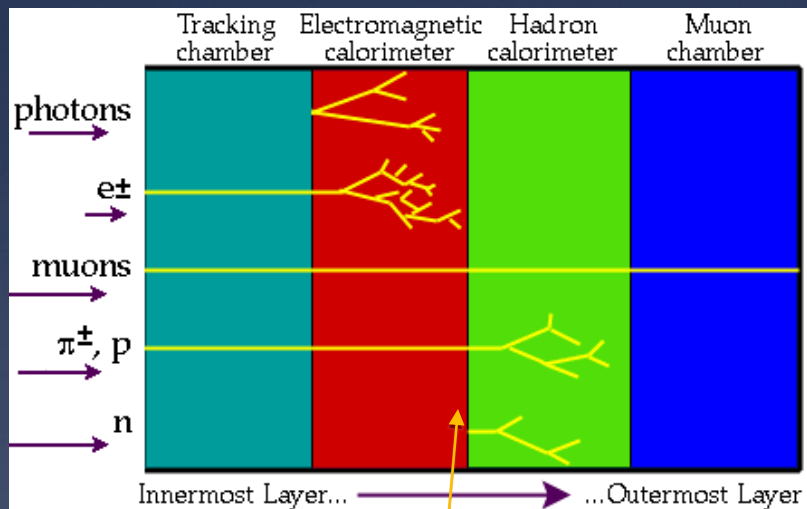
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Rivelatori Traccianti
 Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche

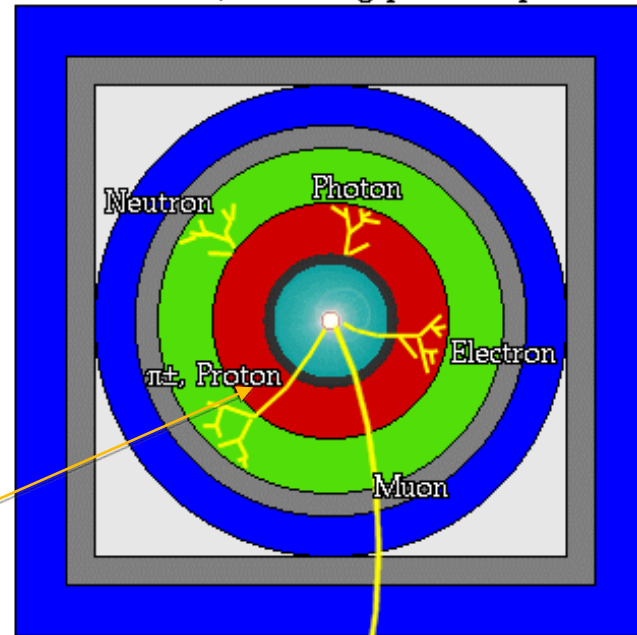


Apparati di rivelatori



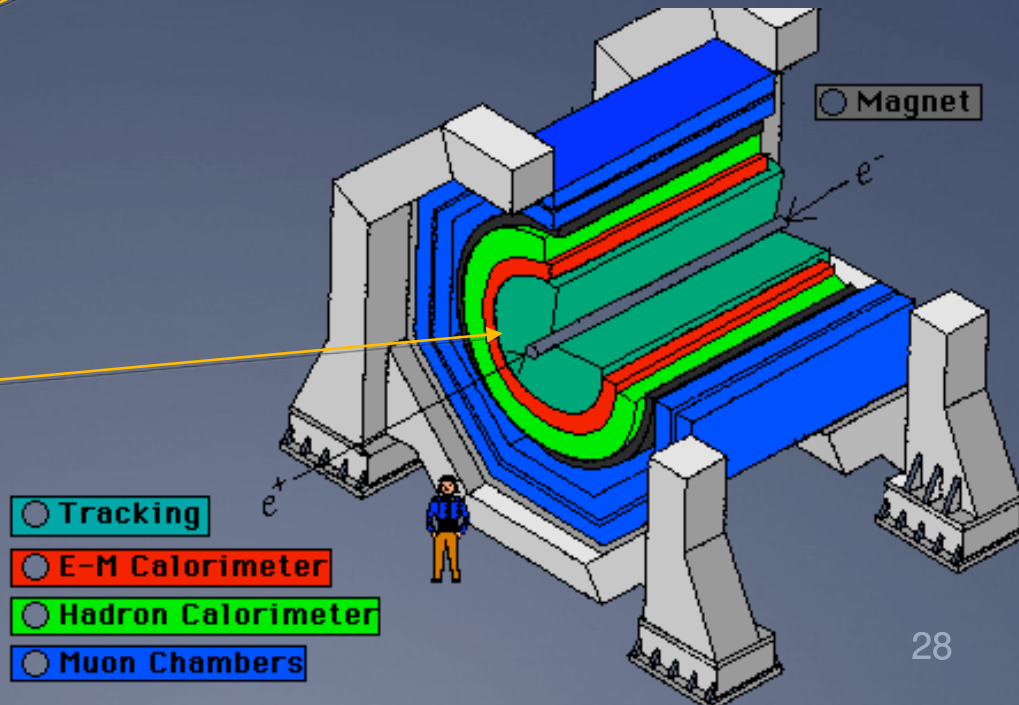
A detector cross-section, showing particle paths

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

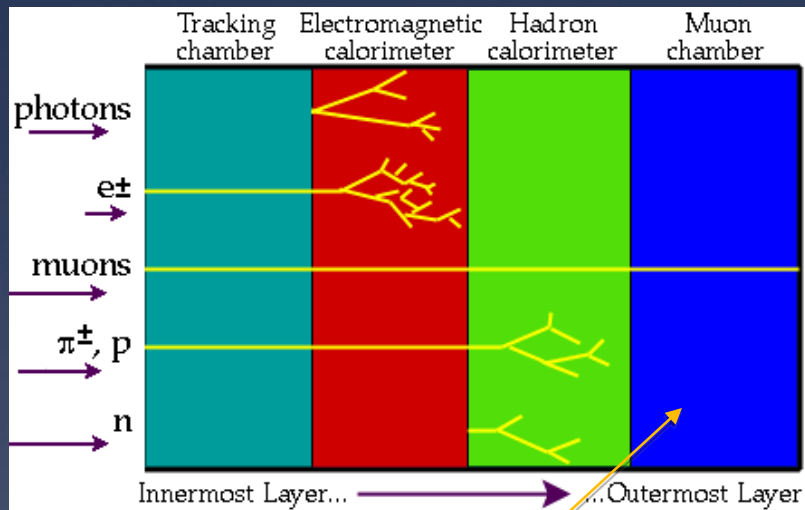


Calorimetri

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

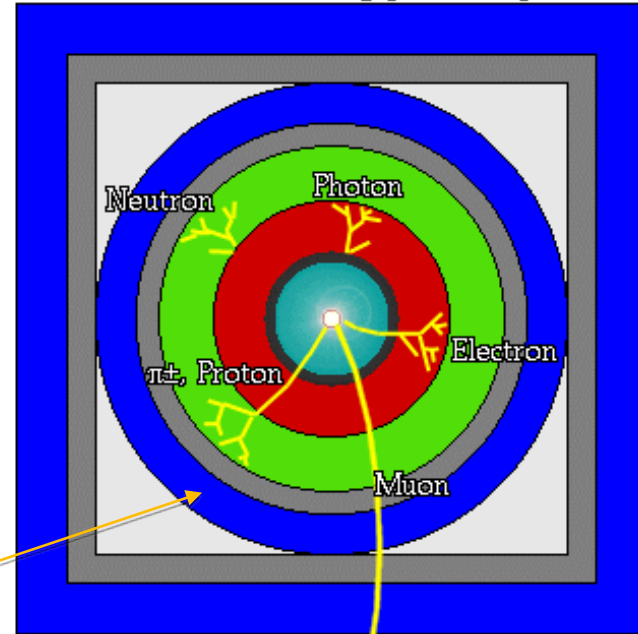


Apparati di rivelatori

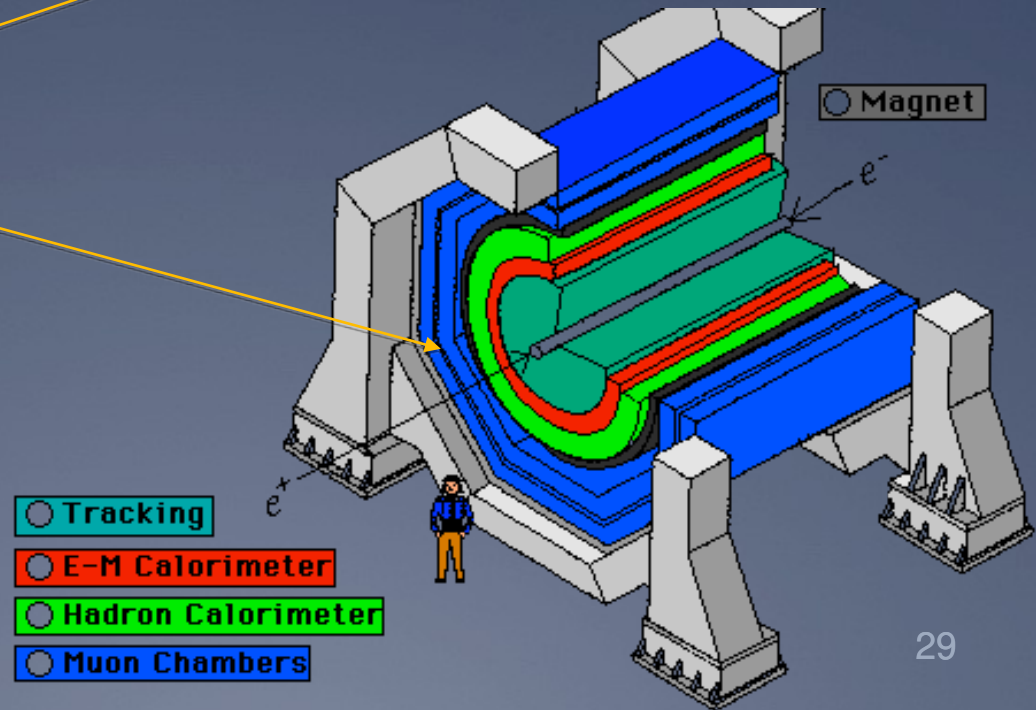


A detector cross-section, showing particle paths

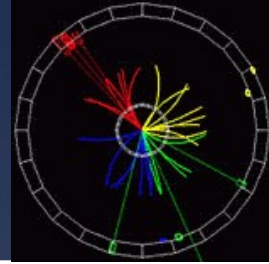
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Rivelatori per muoni



Misura della quantità di moto



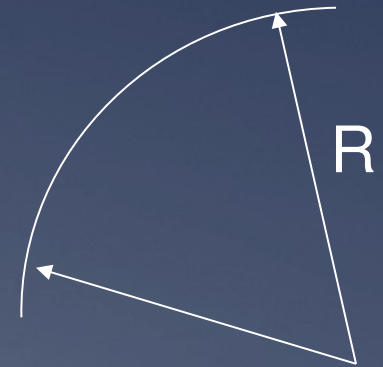
Hands on Particle Physics

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 delle forza di Lorentz su una particella carica è di curvarne la traiettoria:

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

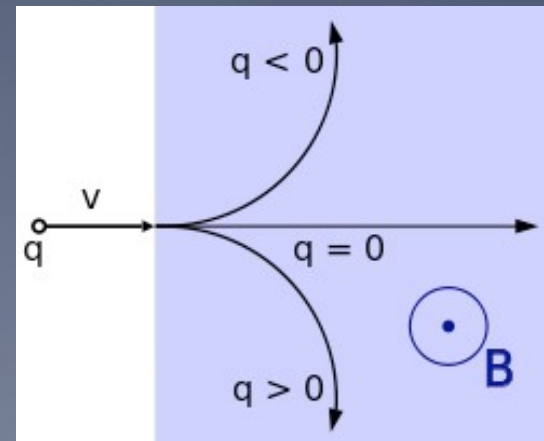


Dalla curvatura della traiettoria si può misurare:

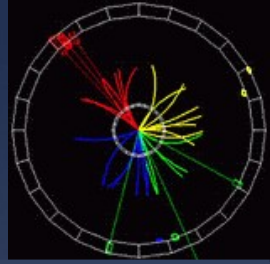
1. La quantità di moto:

$$P = mv = qBR$$

2. La carica



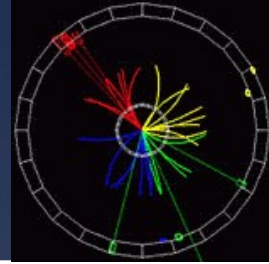
Come si identifica un neutrino?



- ▮ 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



Misura dell' Energia



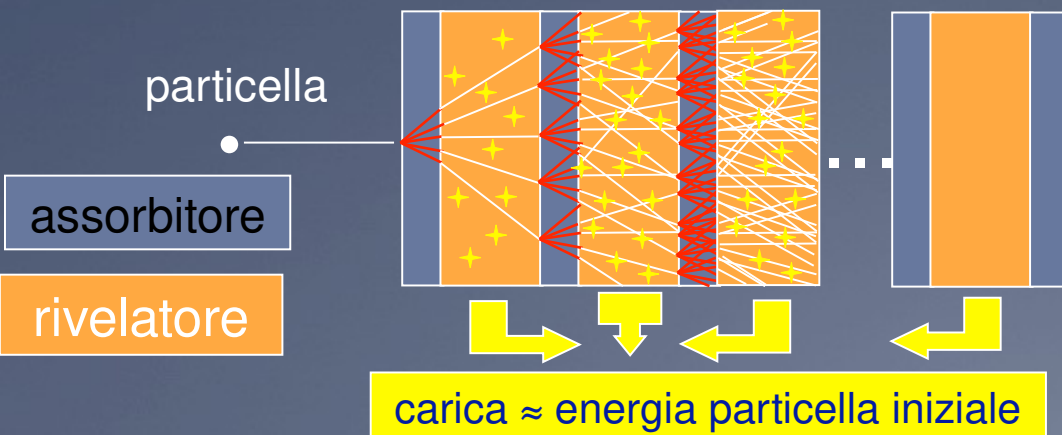
Hands on Particle Physics

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

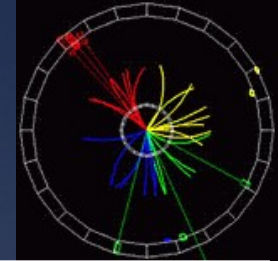
Misuro l' energia depositata anche per particelle neutre!



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* del mezzo)

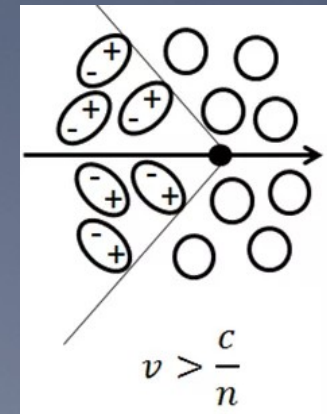
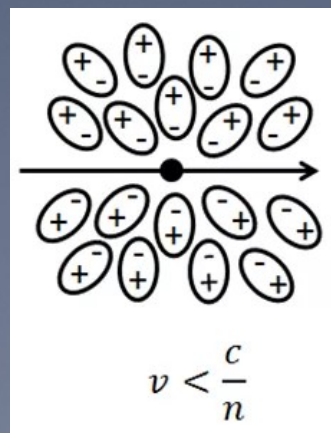
Una particella carica può avere una velocità' dentro un mezzo maggiore di c/n ! (ma sempre minore di $c = 299\,792\,458$ m/s)

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

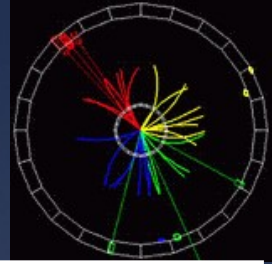


Le particelle cariche con $v > c/n$ provocano un cono di radiazione elettromagnetica: sono gli atomi del mezzo che si *polarizzano* solo DOPO il passaggio della particella.

scoperta dal fisico russo **Pavel Cerenkov**



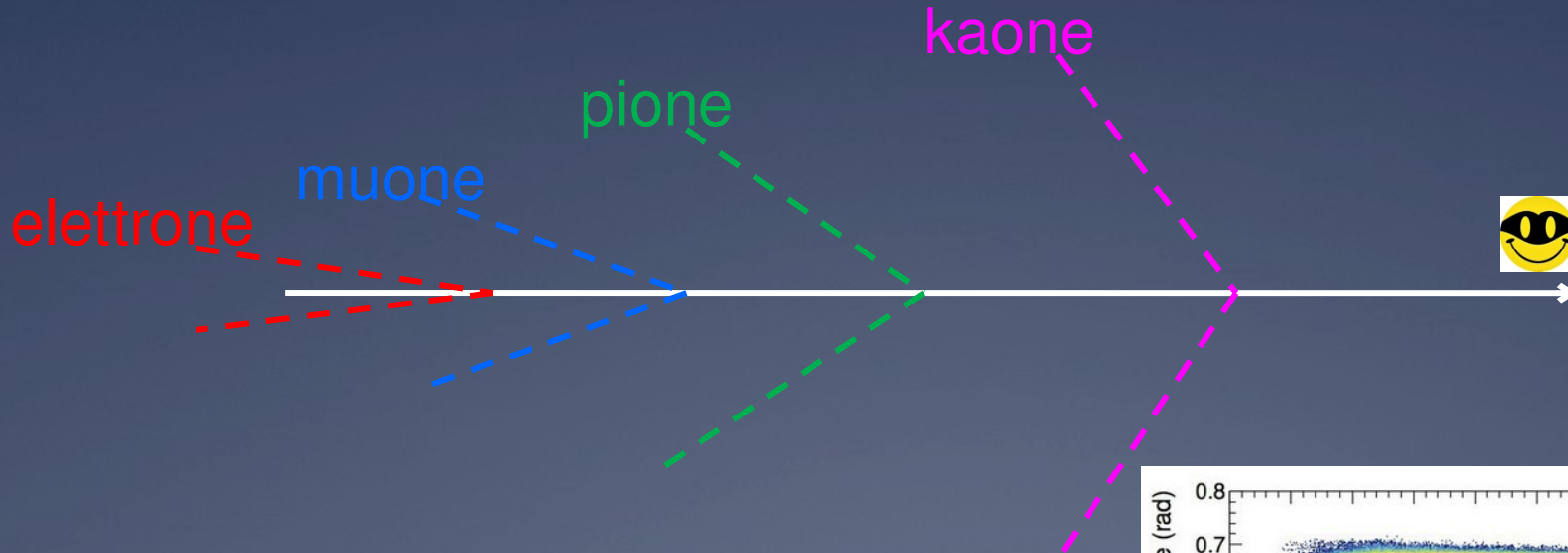
La radiazione Cerenkov «smaschera» le particelle



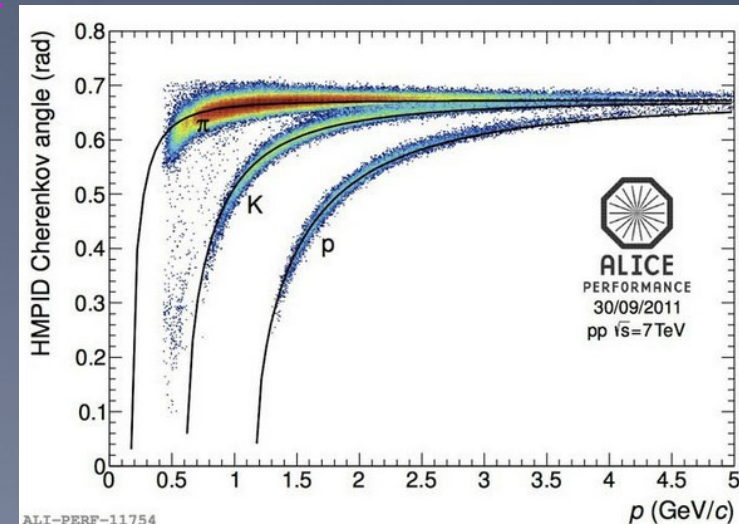
Hands on Particle Physics

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

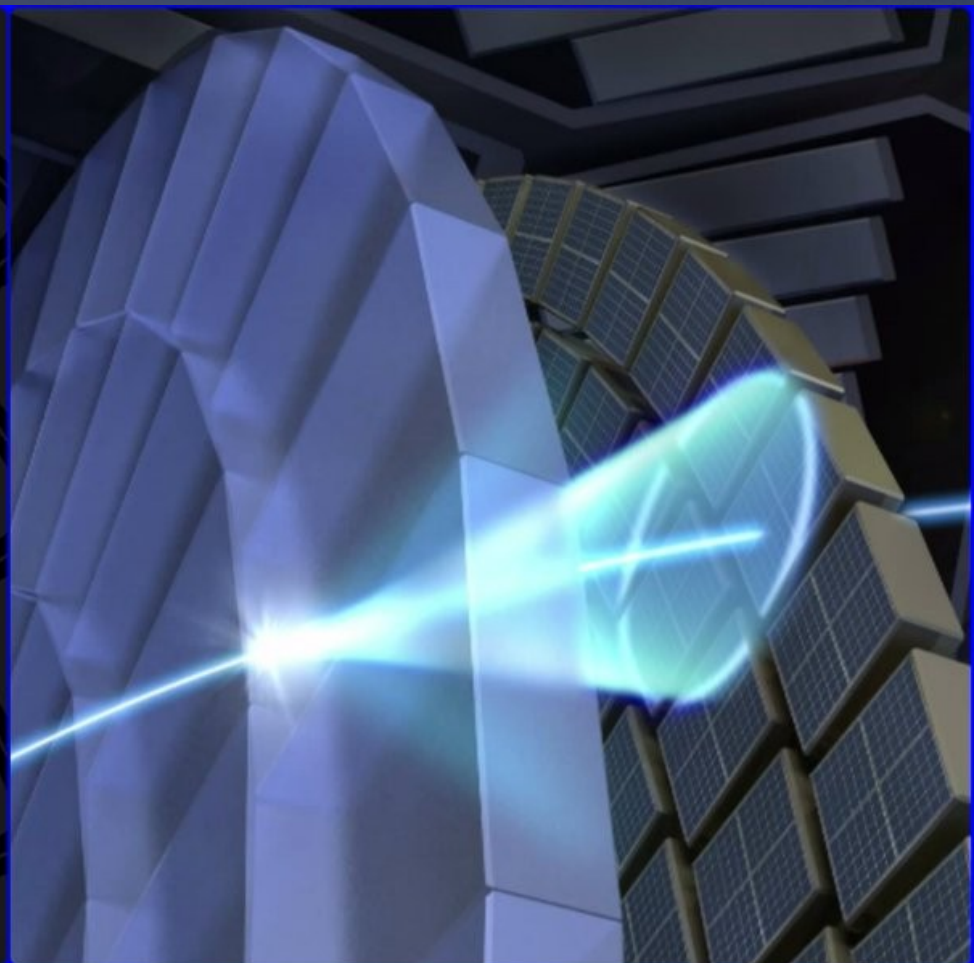
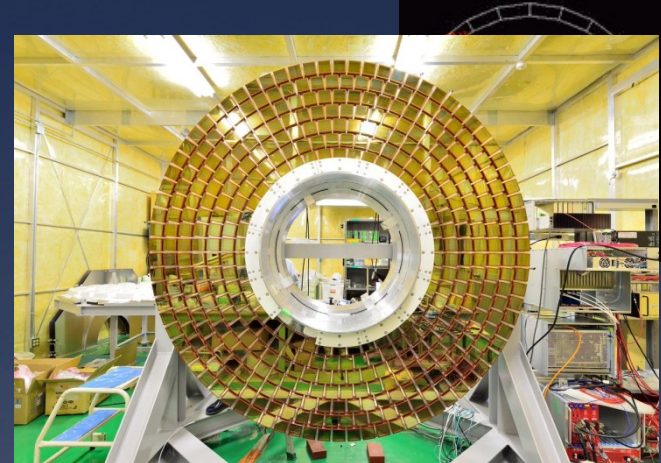
Ma le particelle più pesanti sono meno veloci !



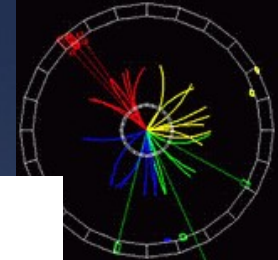
L'angolo della radiazione Cerenkov ci permette di identificare la tipologia di particella che ha attraversato il rivelatore



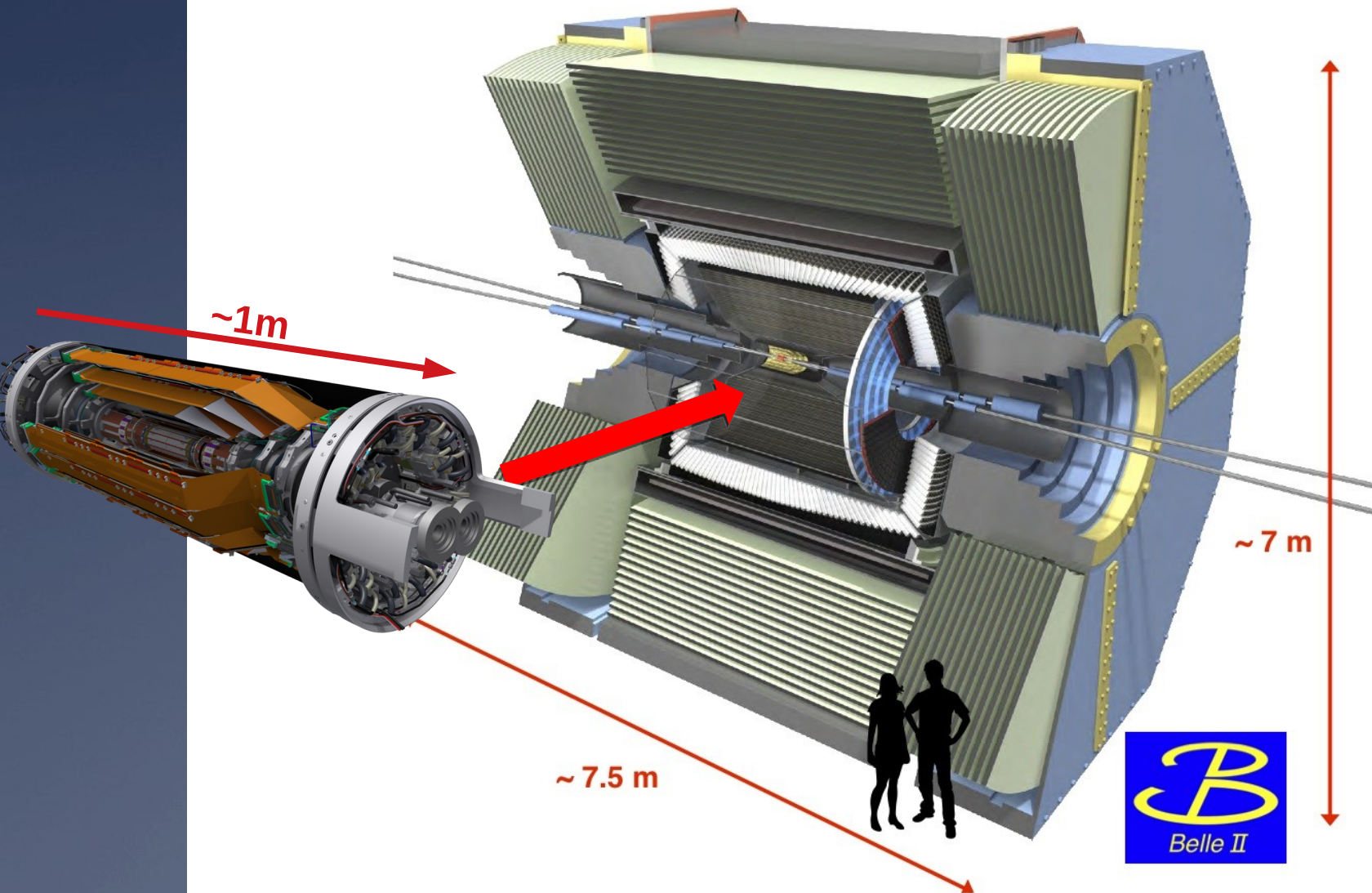
il rivelatore ARICH nell'esperimento Belle II



Il rivelatore BELLE II

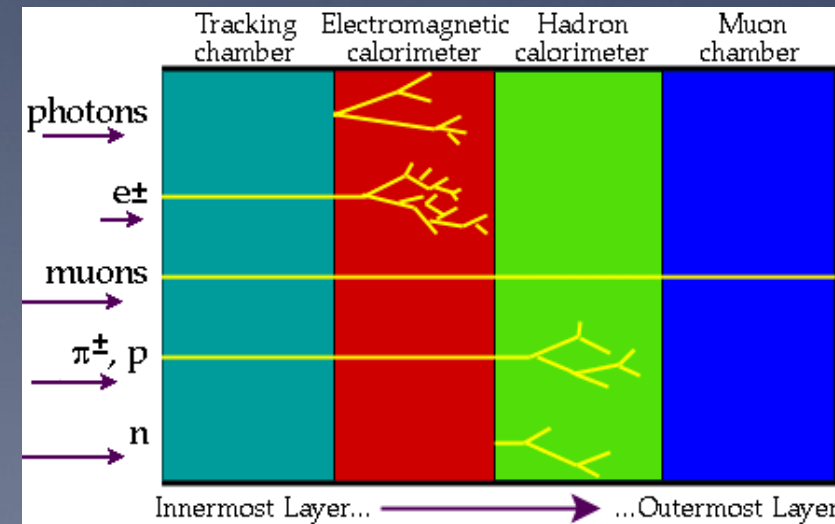
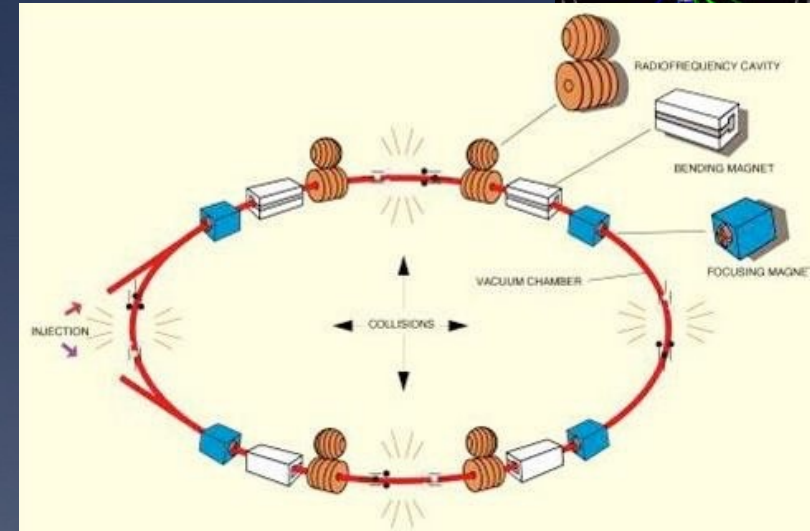


Particle Physics

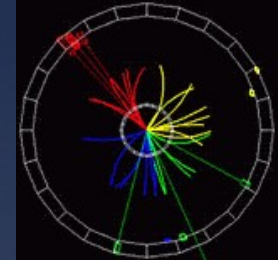


Riepilogando...

- 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

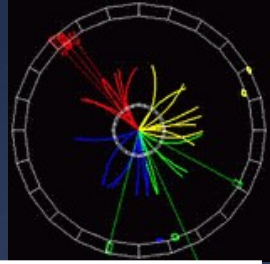
Before run 1, April 2018



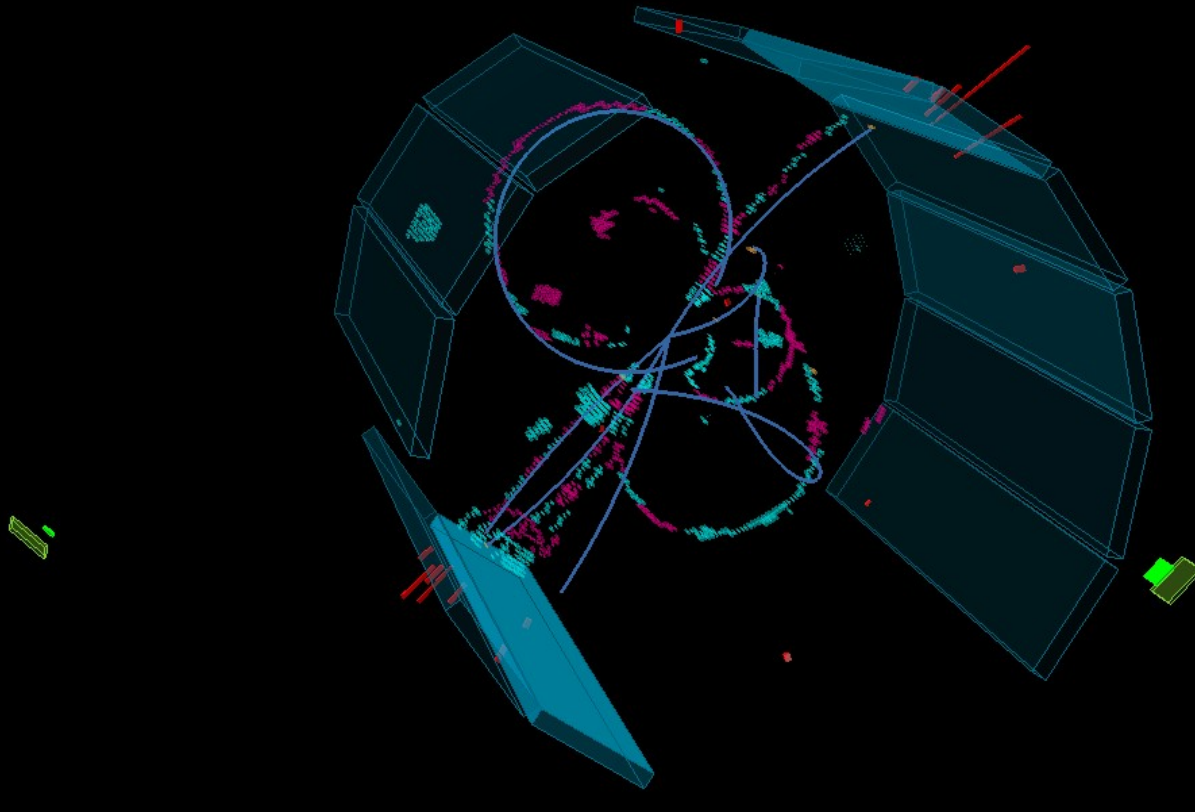
Start of run 2, 20th Feb 2024



Alcuni esempi di eventi acquisiti



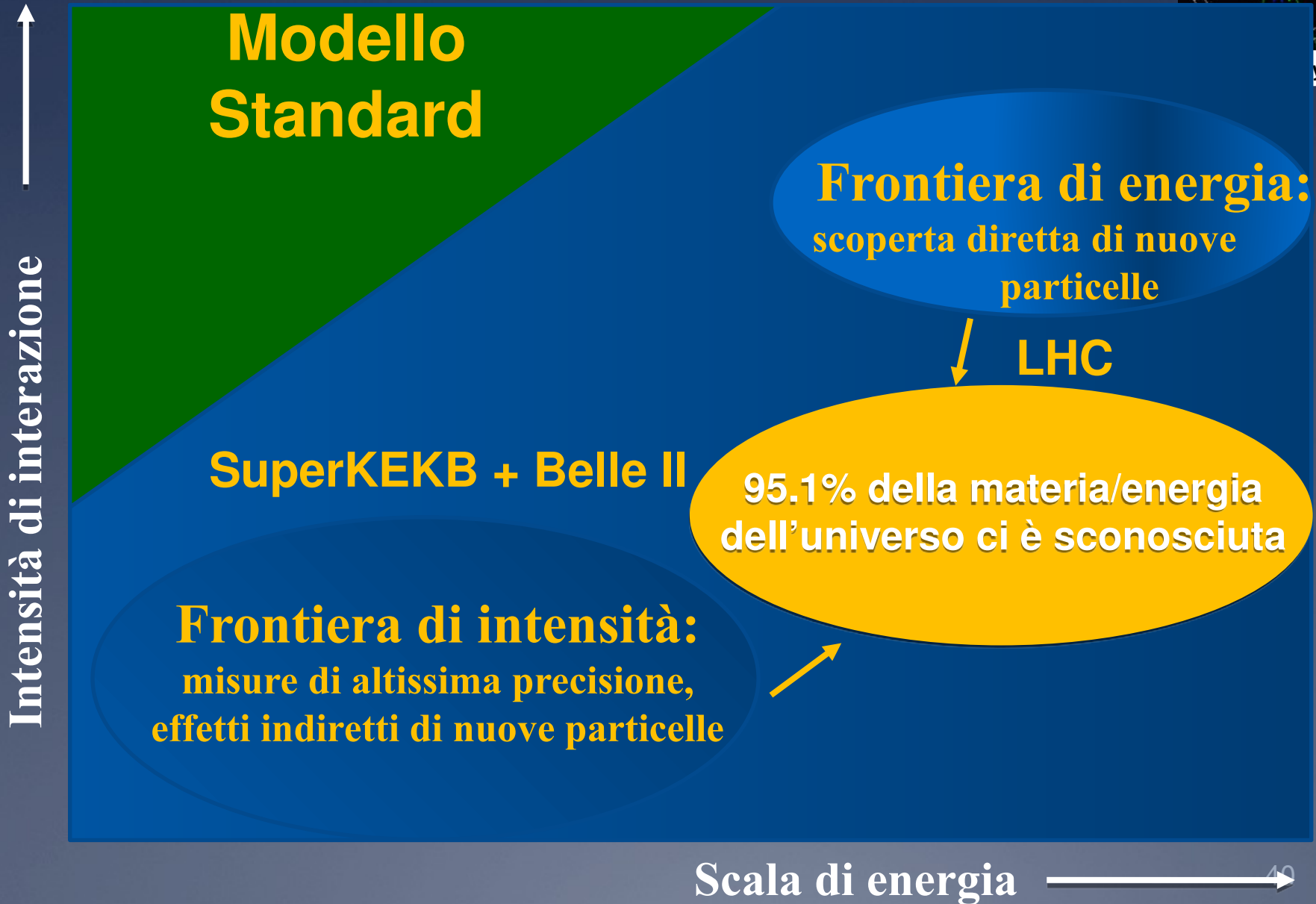
Hands on Particle Physics

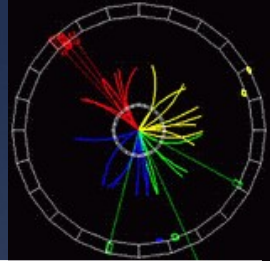


Due diverse frontiere



ysics





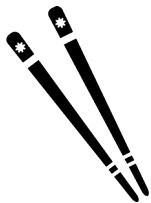
BACKUP



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»

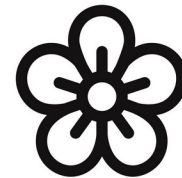
箸
hashi



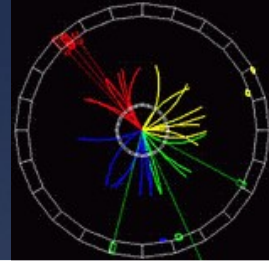
猫
Neko



花
Hana



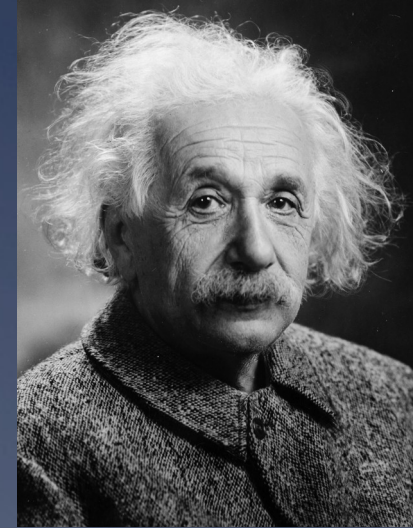
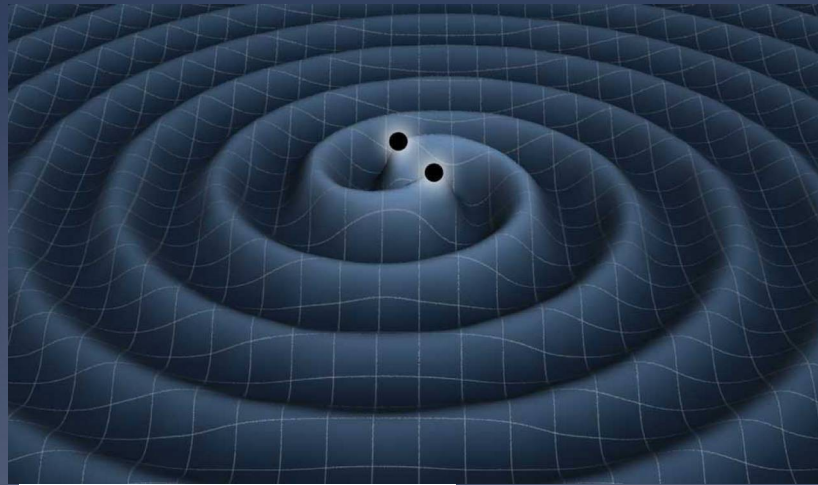
E ora?



Hands on Particle Physics

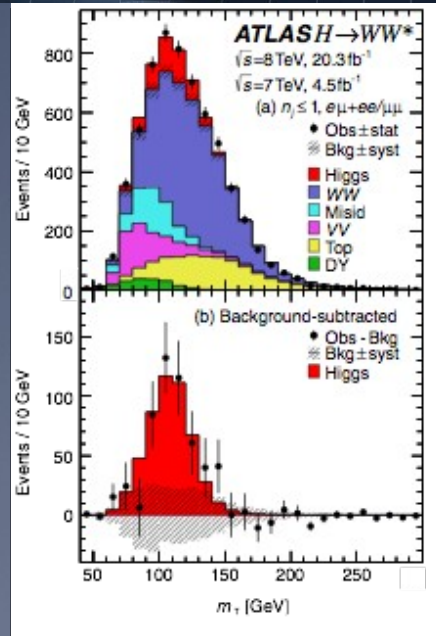
I due modelli standard delle interazioni fondamentali sono completi:

Onde gravitazionali:
Relatività Generale
Gravità

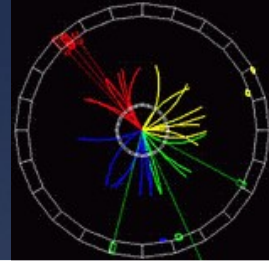


Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni
Fondamentale
Interazione Forte,
Elettromagnetica e
Debole



E ora?



I due modelli standards delle interazioni fondamentali sono completi:

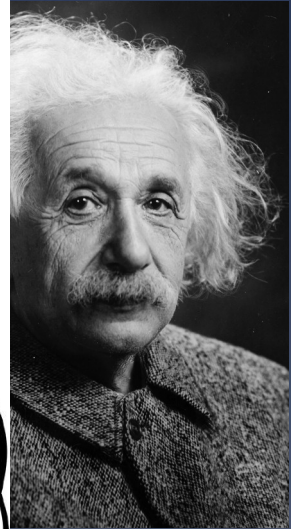
Onde gravitazionali
Relatività Generale
Gravità

Bosone di Higgs:

Modello Standard
delle Interazioni

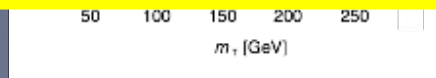


... on Particle Physics



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

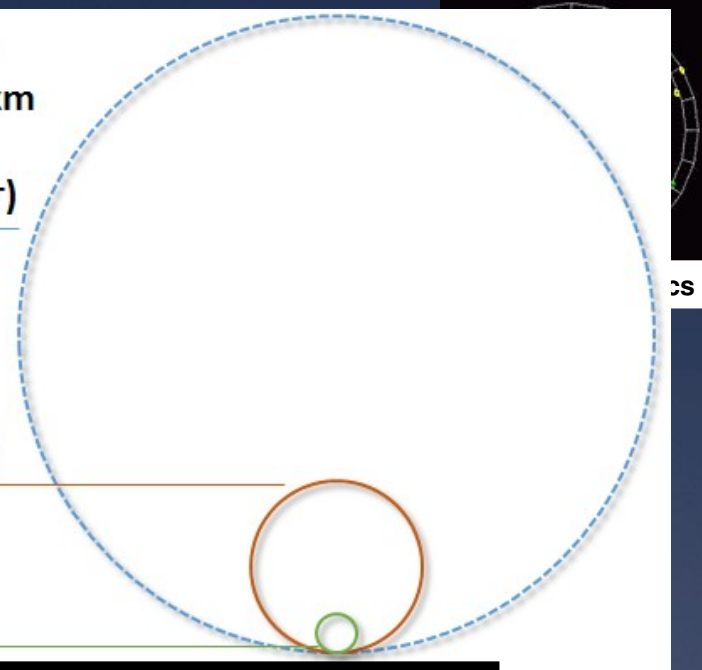
Circumference: 27 km

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

Tevatron (closed)

Circumference: 6.2 km

Energy: 2 TeV

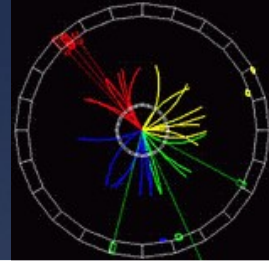


Future Circular Collider

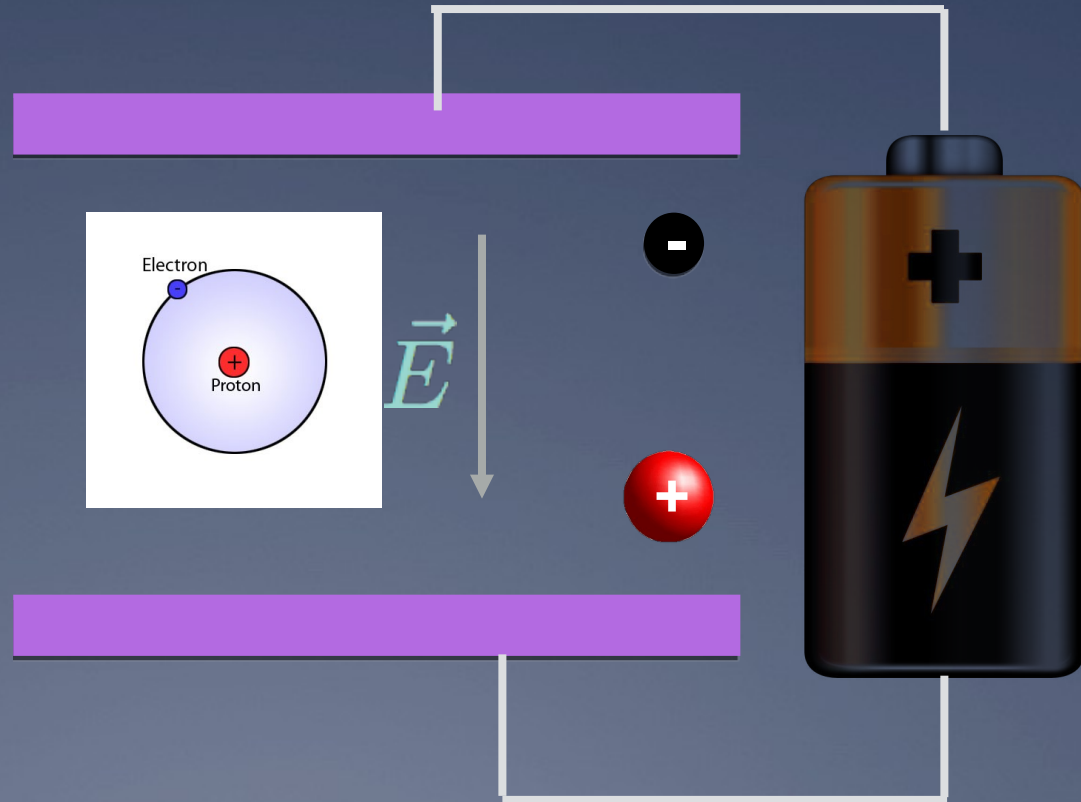
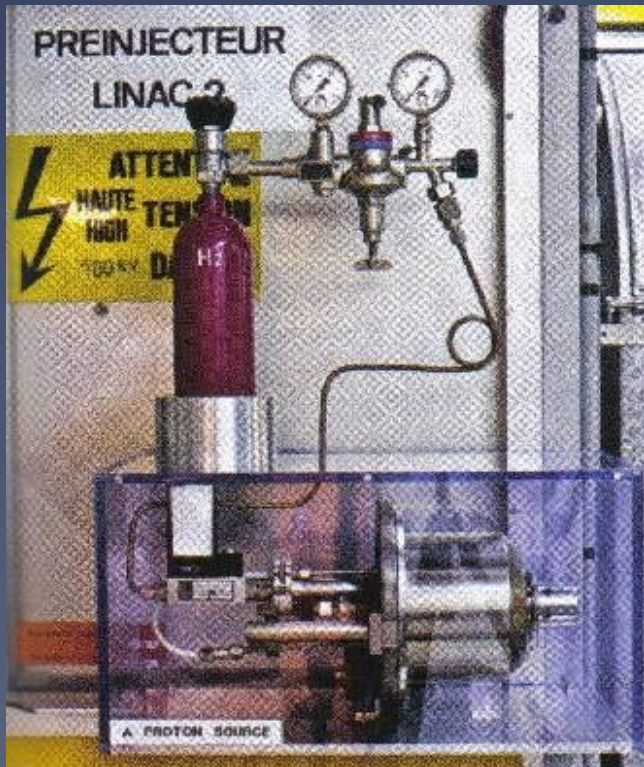




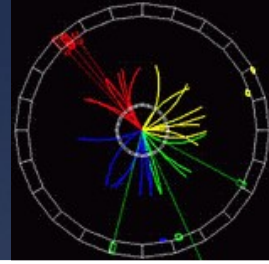
L'idrogeno proviene da una bombola e viene ionizzato in un contenitore con campo elettrico elevatissimo generato da un'elevata differenza di potenziale.



Hands on Particle Physics



Produzione di idrogeno



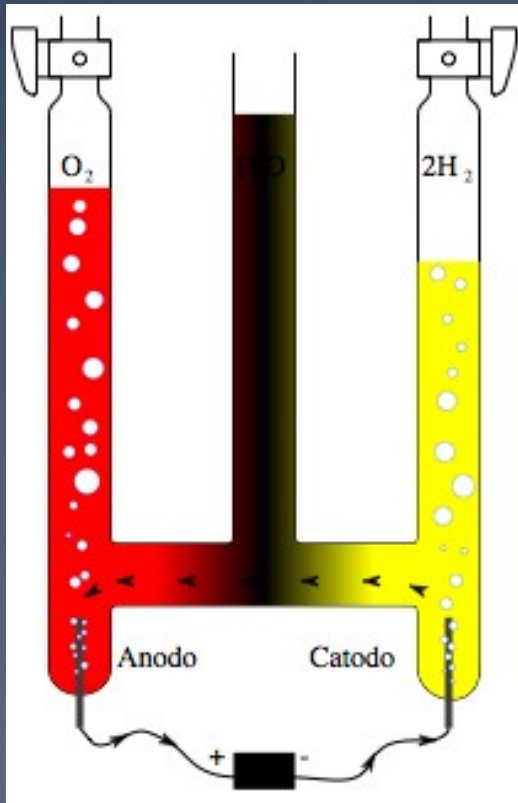
Hands on Particle Physics



dal metano



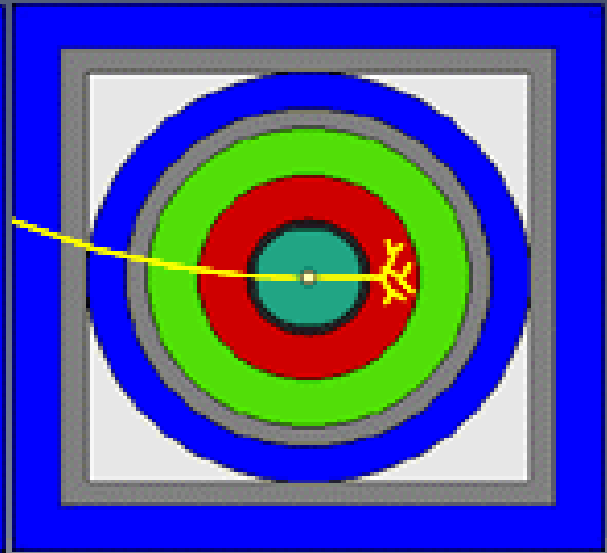
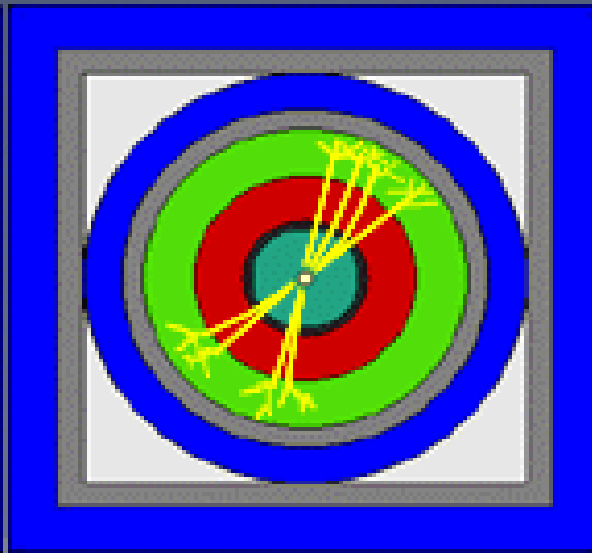
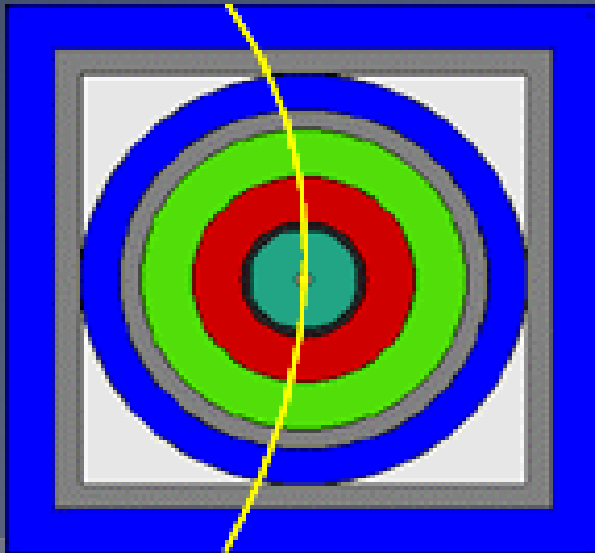
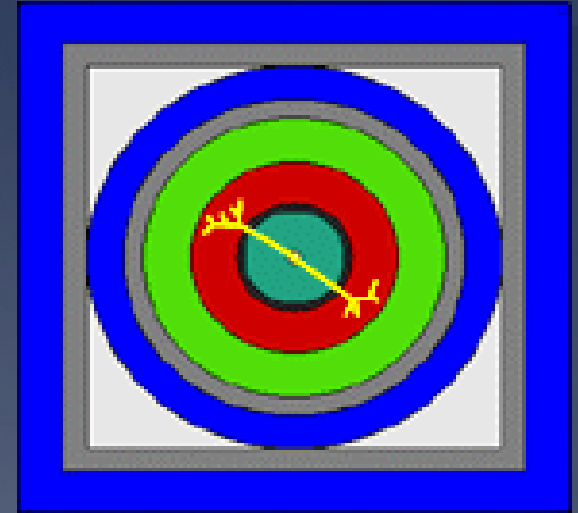
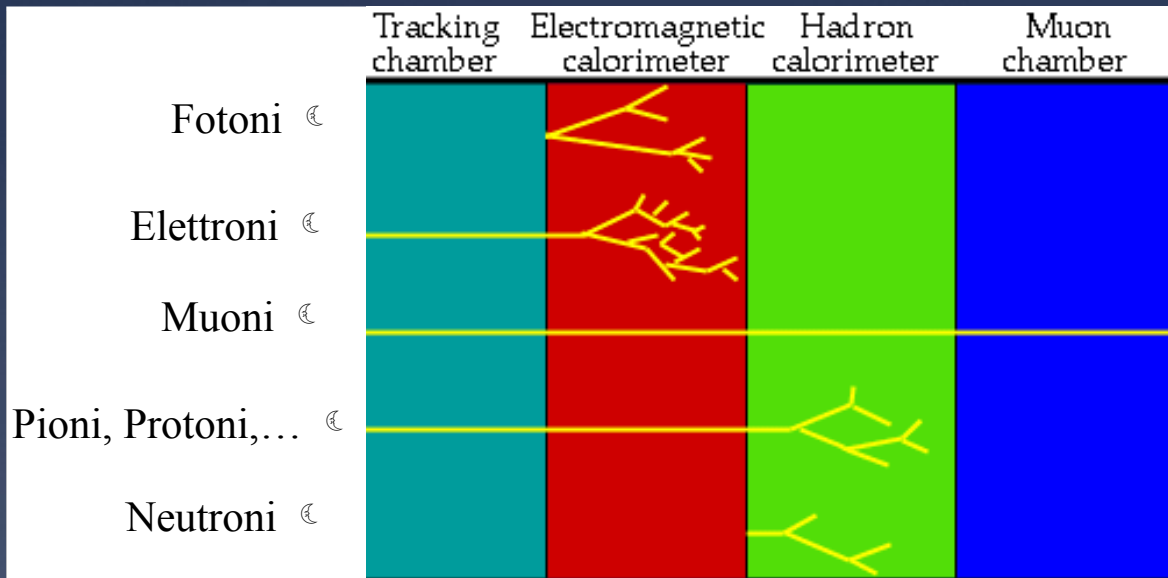
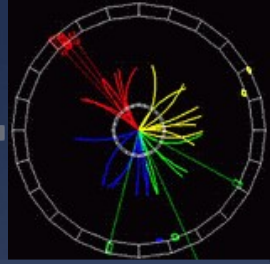
dal carbone

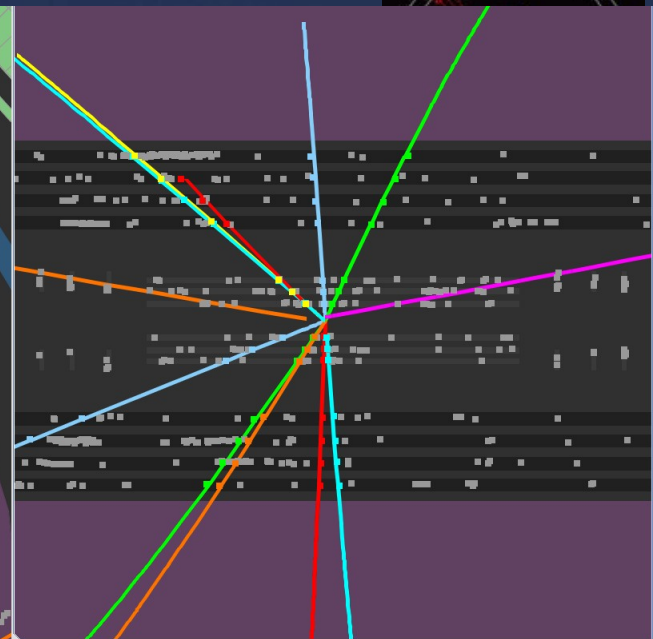
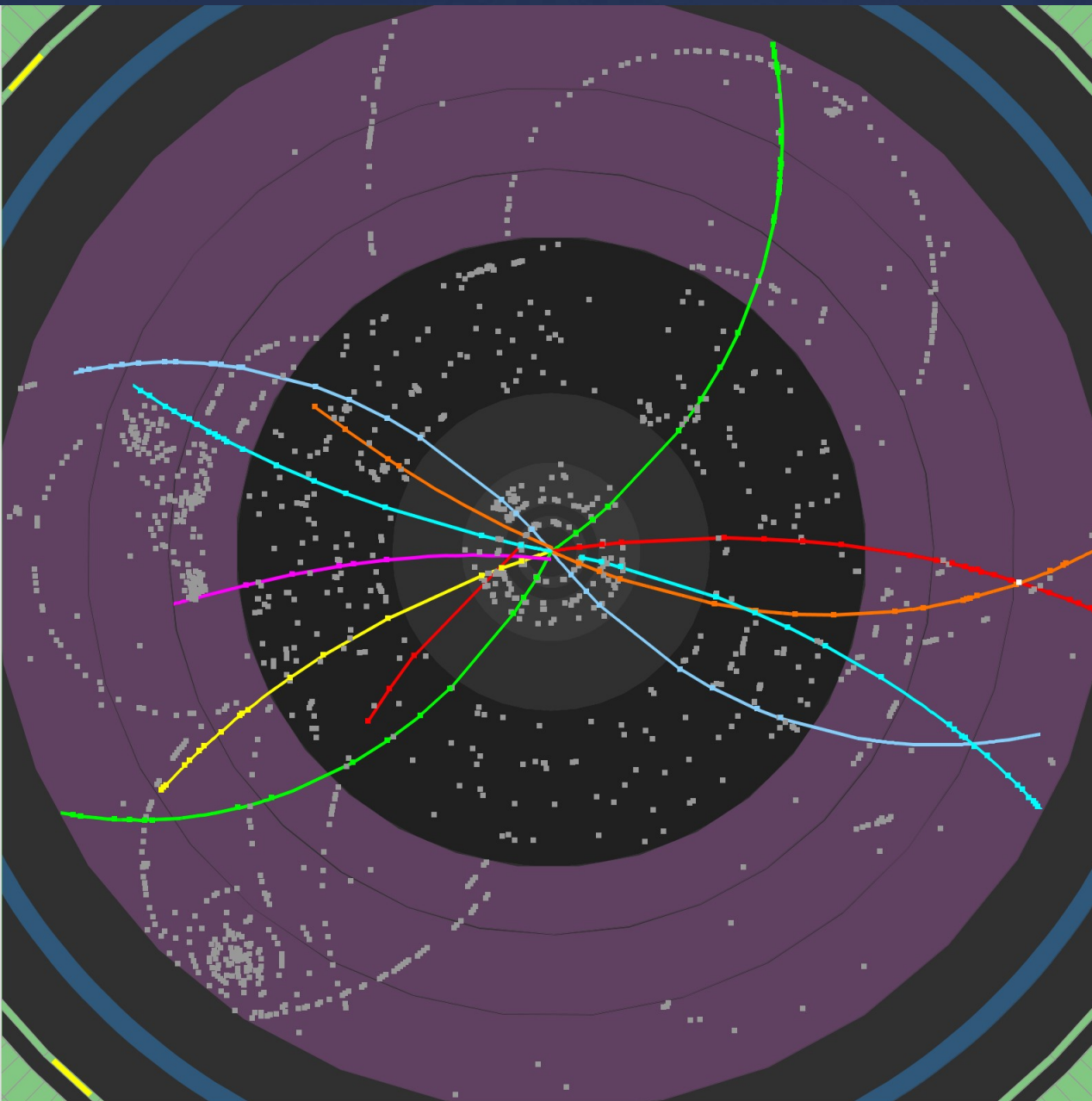


Elettrolisi dell'acqua



Riconoscere le particelle prodotte nelle collisioni





ATLAS
EXPERIMENT

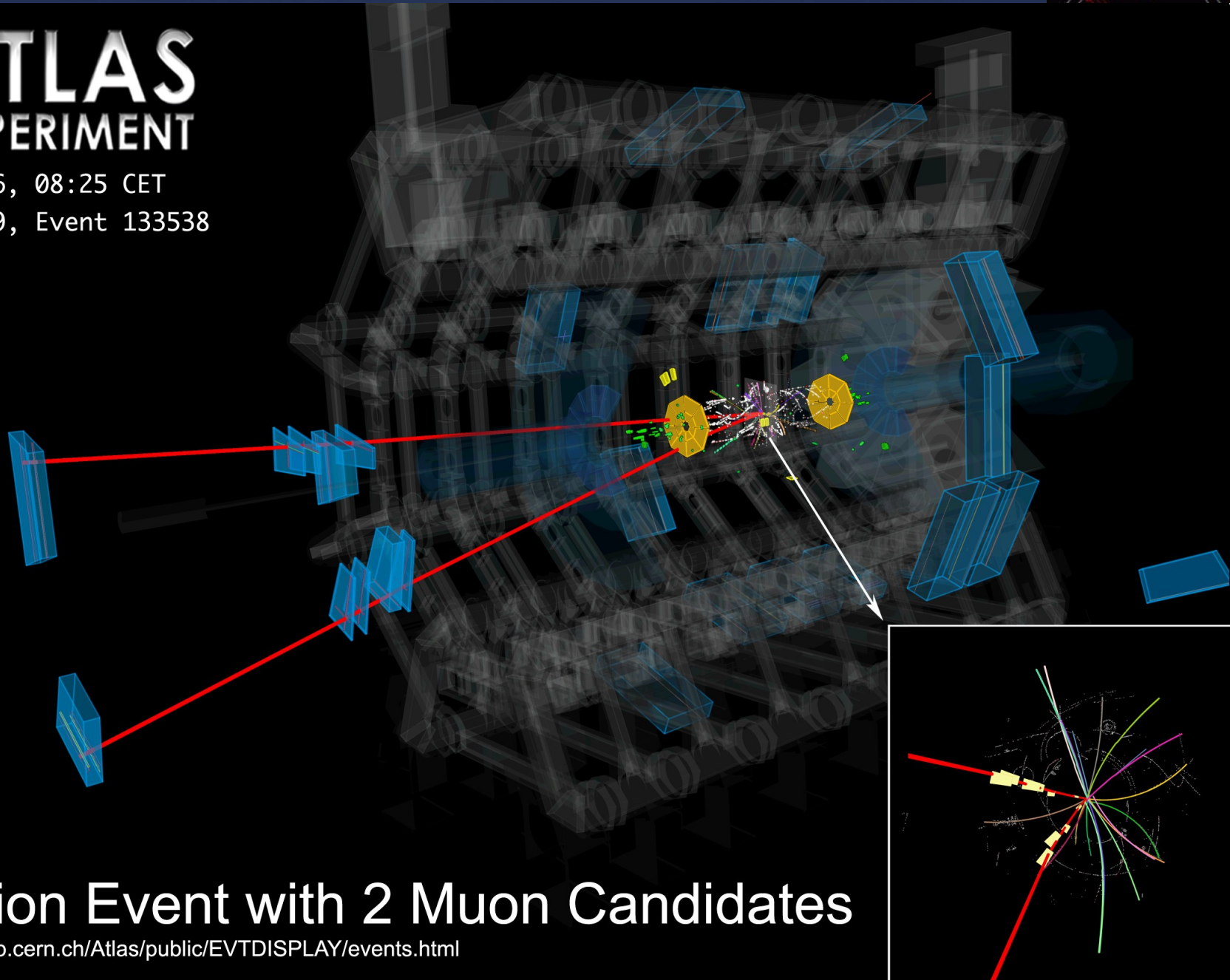
2009-12-06, 10:04 CET
Run 141749, Event 406601

Collision Event



ATLAS EXPERIMENT

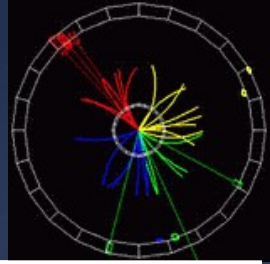
2009-12-06, 08:25 CET
Run 141749, Event 133538



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

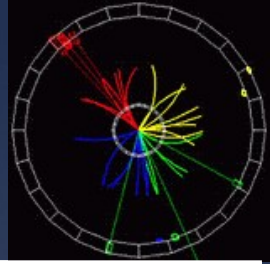
A nulla, ma è bello come l'arte, la musica e la poesia

A capire la natura, le stelle, il cosmo

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

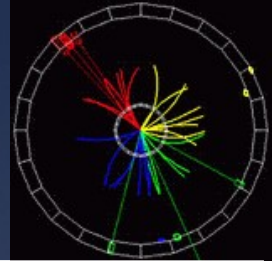
A produrre inaspettate ricadute tecnologiche i moltissimi campi :
Internet, GRID, terapie mediche, metodi diagnostici,
nuove tecnologie...

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

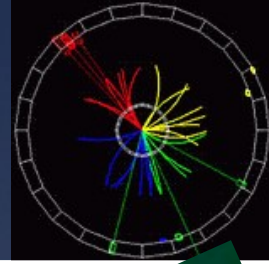
$$E_{total} = E_{proton1} + E_{proton2} = 2E$$

elettrone

Energia: E_1

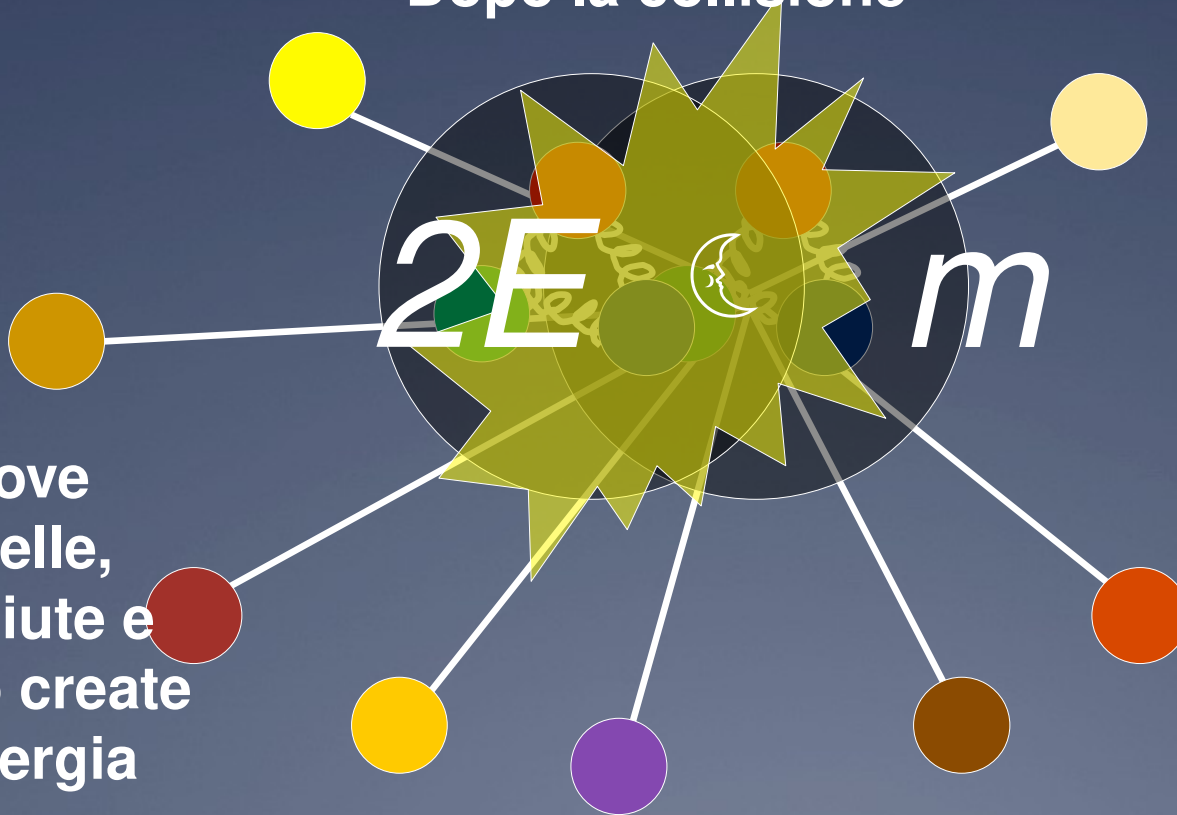
Energia: E_2

positrone

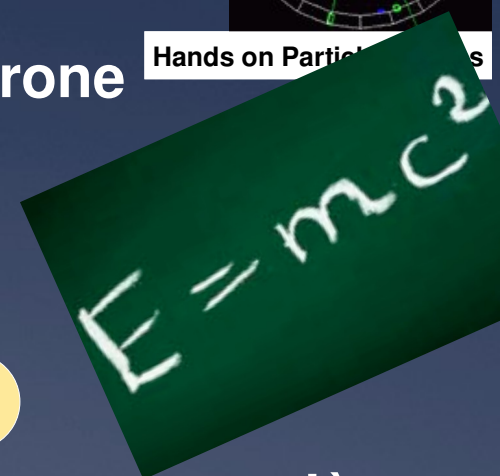


Hands on Particle Physics

Dopo la collisione



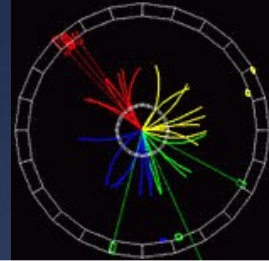
...nuove
particelle,
conosciute e
no, sono create
dall'energia



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

I raggi cosmici

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).



Hands on Particle Physics

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.

