

Hands on Particle Physics

European Particle Physics Masterclasses for High School Students



Esperimenti in Fisica delle Particelle

27 Marzo 2015, B. Di Micco (Università degli Studi di Roma Tre)

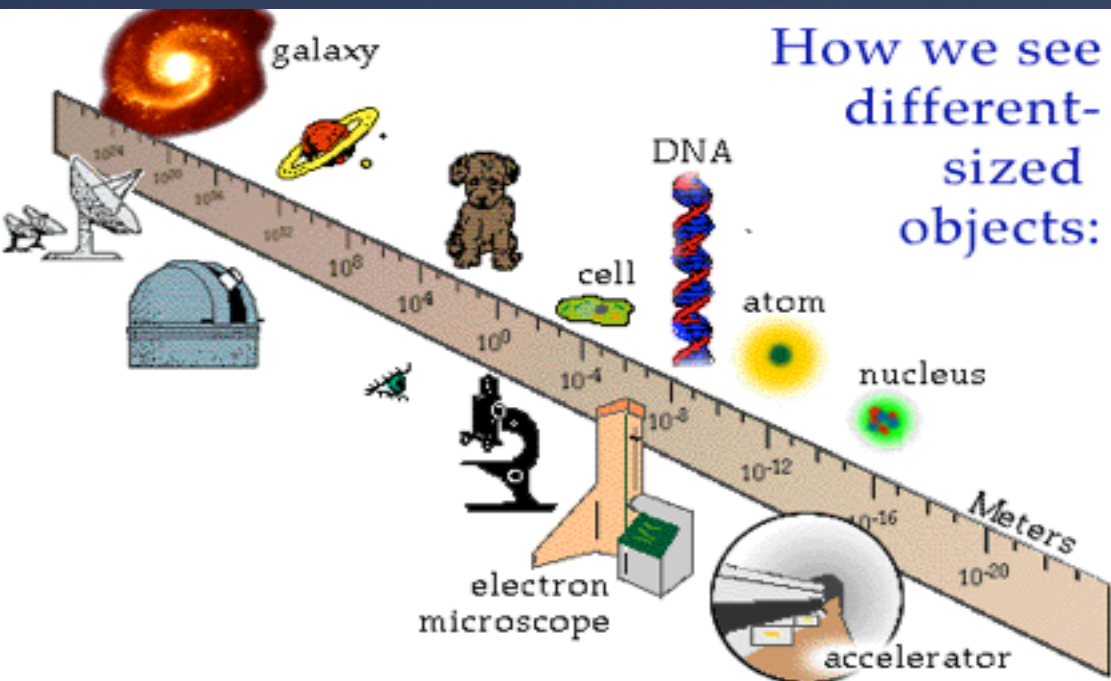
Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare

La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra $0.4\text{--}0.8\text{ }\mu\text{m}$ quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al μm



Hands on Particle Physics

How we see
different-
sized
objects:



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

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

high energy

particle accelerator: $\lambda \sim 10^{-20}\text{ m}$

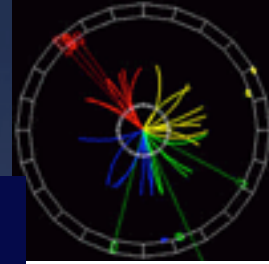
Usiamo
particelle di alta energia come
esploratori del microcosmo

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

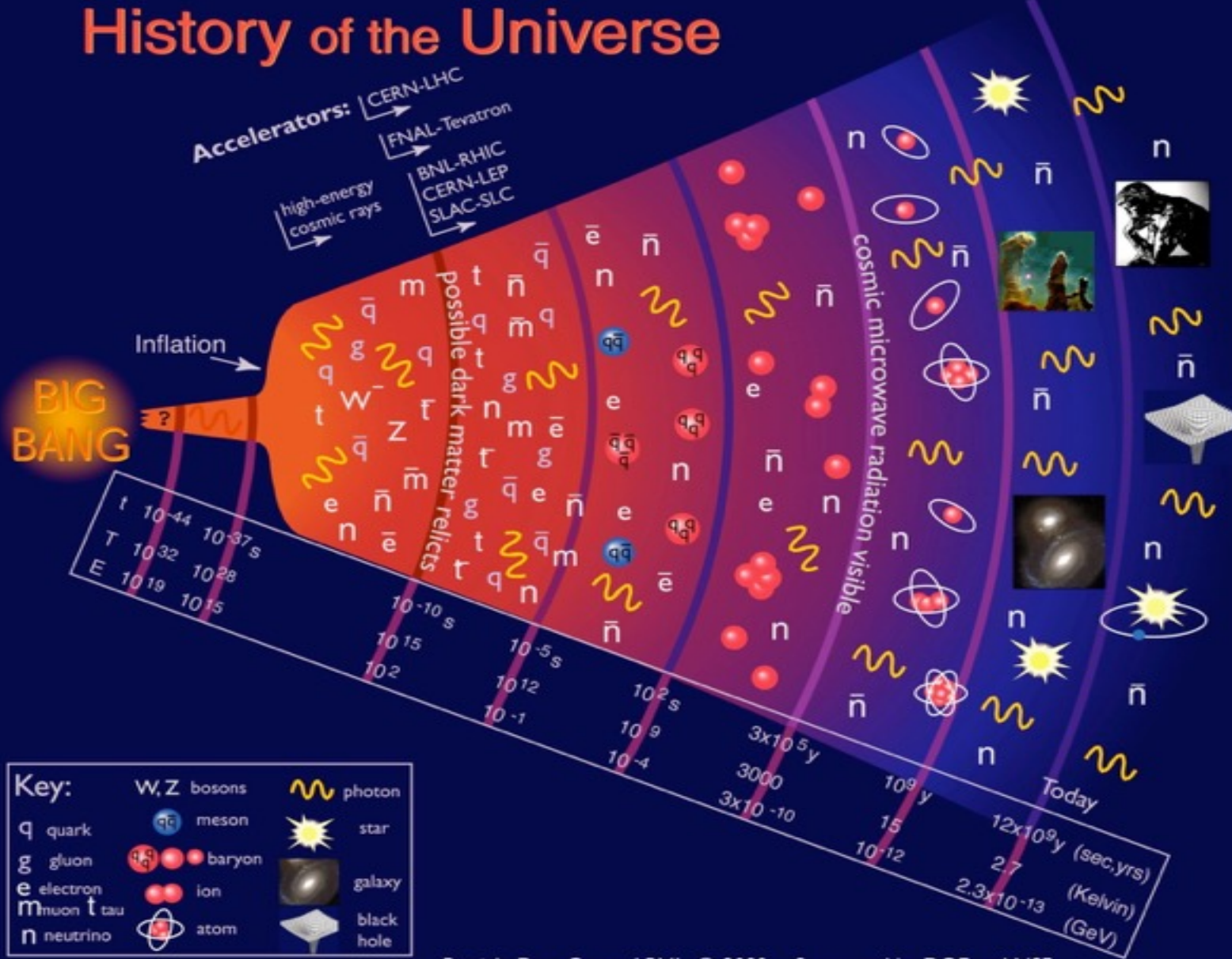


PICCOLE DIMENSIONI \leftrightarrow GRANDI ENERGIE

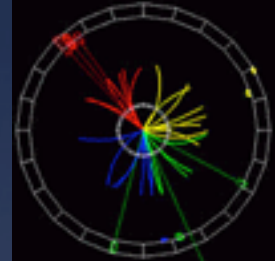
UNA GRANDE ENERGIA CI RIPORTA ANCHE INDIETRO AI PRIMI ISTANTI DELL'UNIVERSO !



on Particle Physics



Per le leggi della relatività ristretta
c'è equivalenza fra massa ed energia : **$E = Mc^2$**



Hands on Particle Physics

Servono grandi energie per studiare (o scoprire)
particelle massa “grande”

**Gli acceleratori di particelle sono gli
strumenti per studiare la fisica delle particelle elementari**

➡ Le particelle vengono accelerate ad energie elevate e le si fa urtare tra di loro o contro bersagli esterni

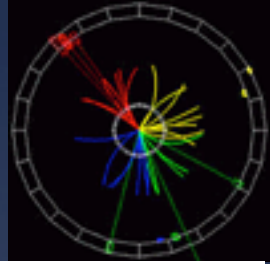
➡ l'energia liberata può produrre nuove particelle ($E=Mc^2$)

➡ Gli acceleratori possono essere di due tipi:

lineari: le particelle percorrono una sola volta l'acceleratore da un'estremità all'altra

circolari : le particelle girano più volte in un anello

Unità di Misura



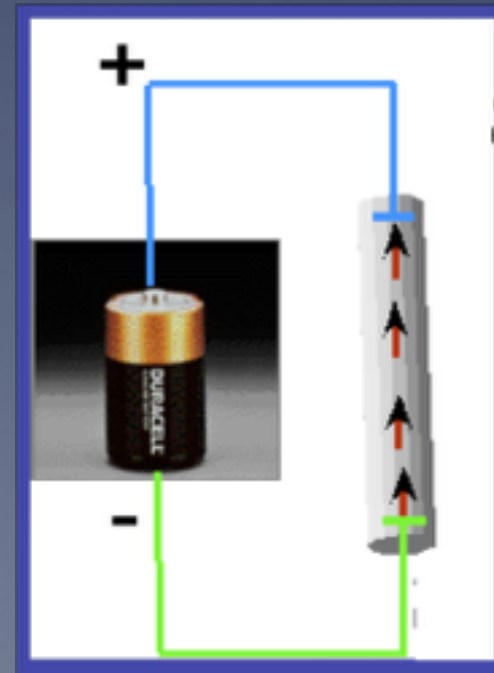
Hands on Particle Physics

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



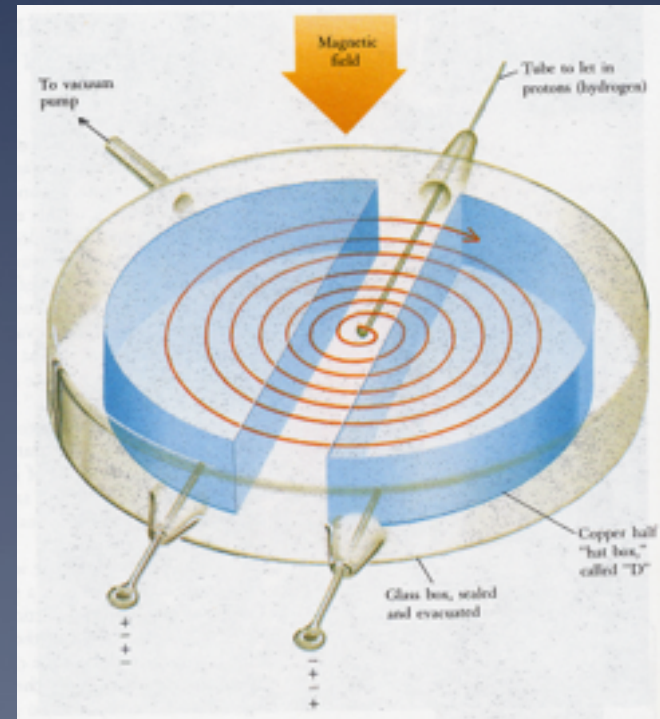
I primi acceleratori sfruttavano campi statici (10-20 MV), una ddp accelera particelle cariche

CERN, protoni da 800 keV



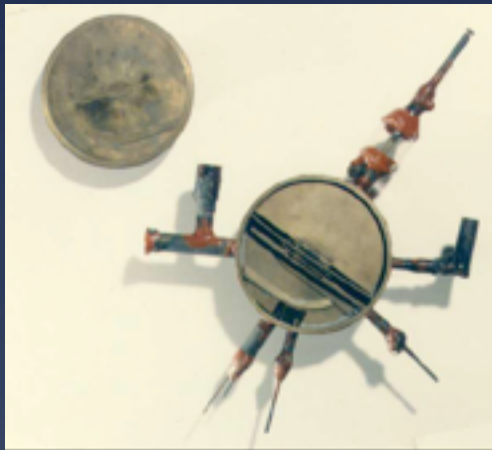
CICLOTRONE

Hands on Particle Physics



campi magnetici fanno seguire alle particelle traiettorie circolari.

1930, Lawrence, protoni da 100 MeV



La dimensione
dell'acceleratore
determina la massima
energia raggiungibile.



Hands on Particle Physics



3 km, elettroni fino a $\sim 50\text{GeV}$

**Stanford Linear Accelerator
Center (California)**



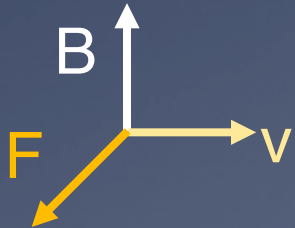
**Fermilab (Chicago, IL)
Tevatron**

i “colliders”

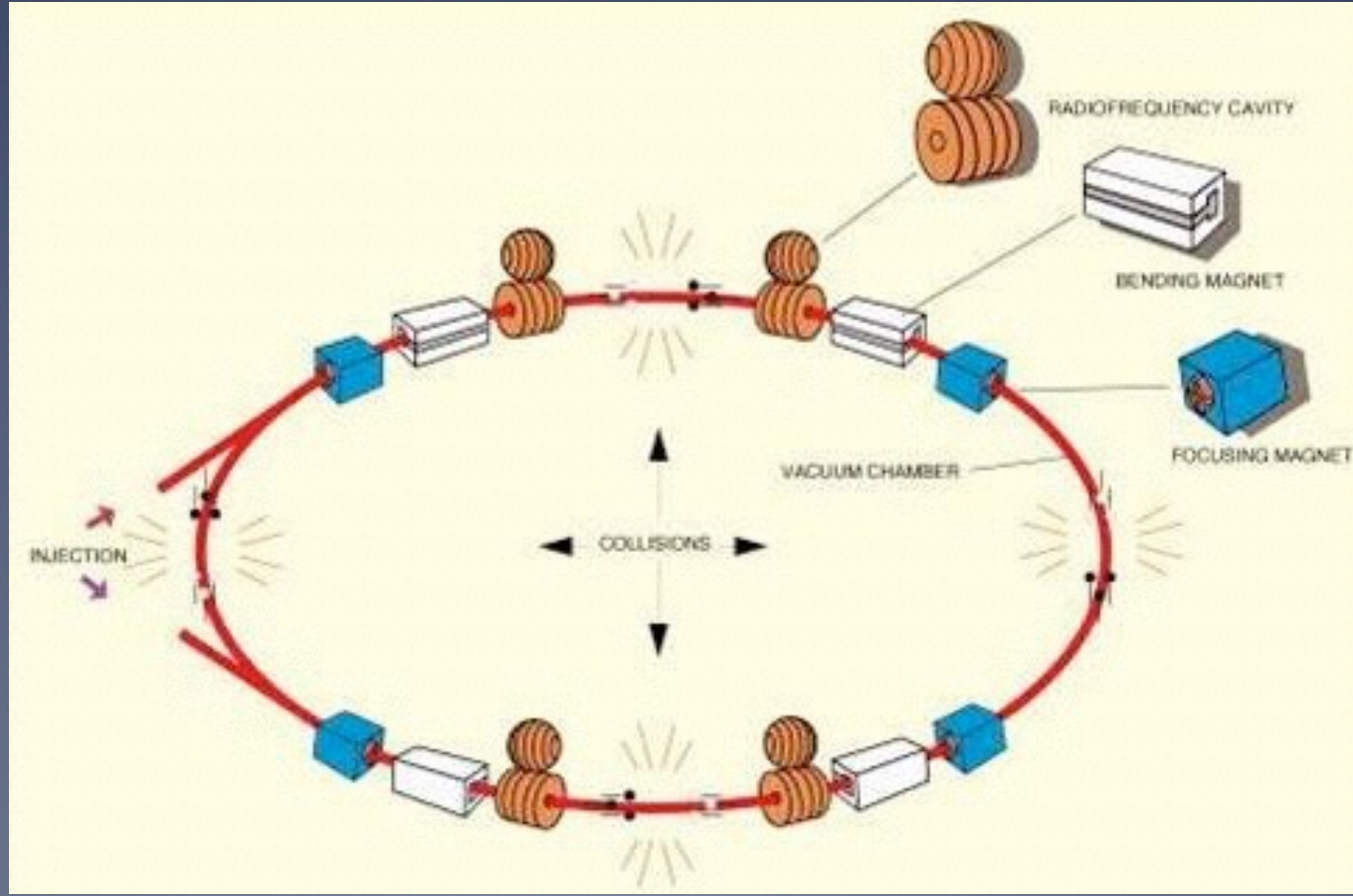
- particelle e antiparticelle viaggiano nello stesso tubo a vuoto in direzioni opposte
- le particelle viaggiano raggruppate in pacchetti (bunches) ciascuno composto da circa 10^{11} particelle
- accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi diversi lungo l'anello
- i pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno a più punti e le particelle collidono



Hands on Particle Physics

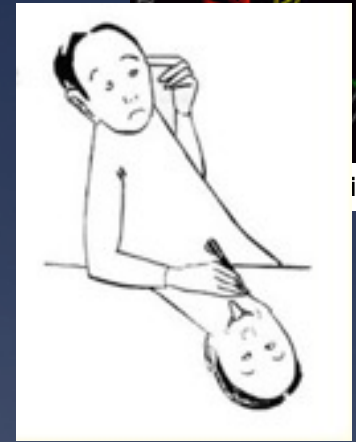
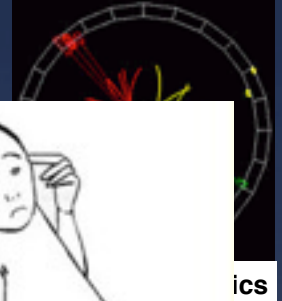


$$|F| = q v B$$





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



AdA (Anello di Accumulazione)



Adone



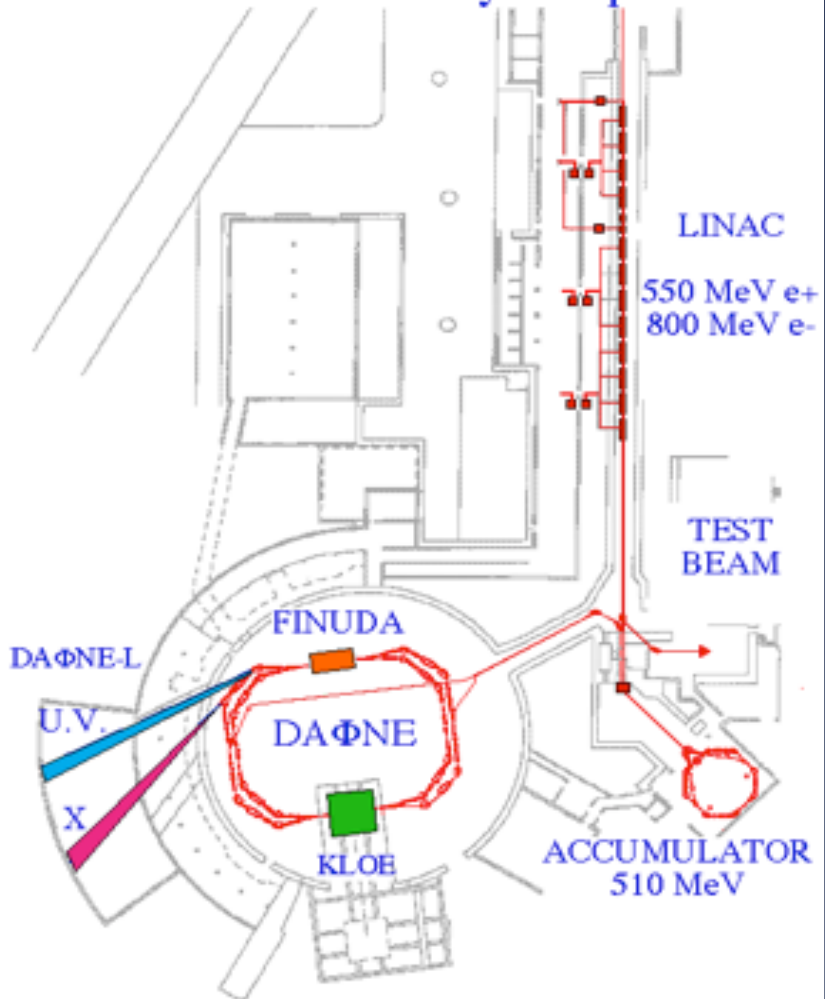
prime collisioni elettrone-positrone

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.

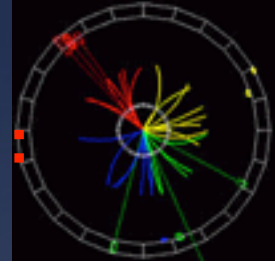
Dispone di un eccezionale complesso di macchine acceleratrici che ha il suo culmine nel Large Hadron Collider (LHC)



Oltre ad aver prodotto con continuità importanti risultati scientifici premiati più volte col Nobel, ha anche avuto importanti ricadute tecnologiche: qui è stato inventato il [World Wide Web](#)

L'acceleratore LEP del CERN (predecessore di LHC) :

ha funzionato dal 1989 al 2000 permettendo di fare test estremamente precisi del Modello Standard



Hands on Particle Physics

Energia dei fasci e^+, e^- : da 45 GeV a 105 GeV

Circonferenza : 27 km

perché?

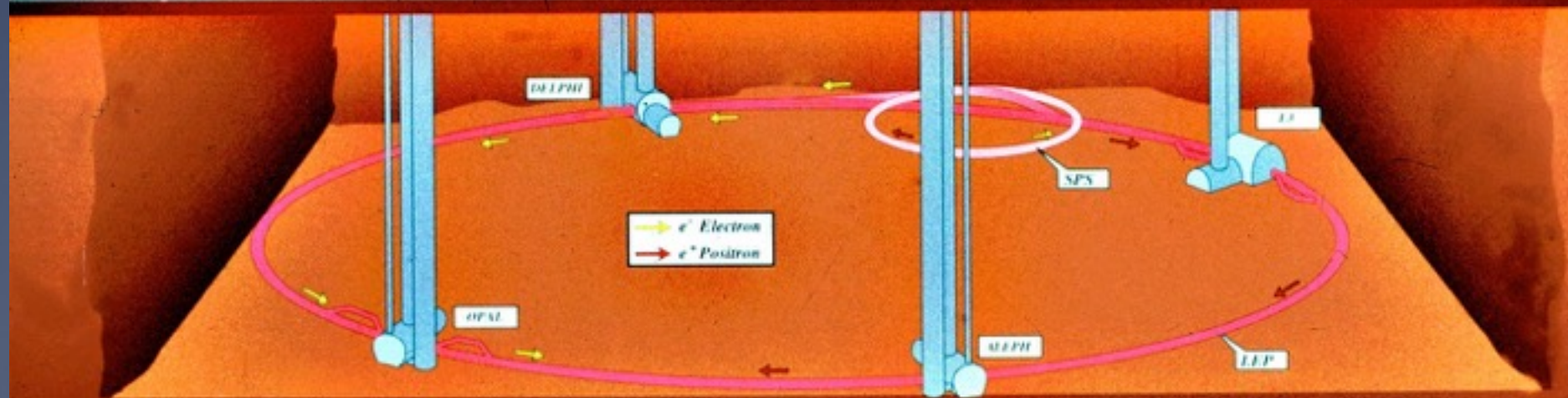
- Le particelle cariche quando sono accelerate perdono energia emettendo luce: piccola curvatura \rightarrow minore accelerazione \rightarrow minore perdita di energia per irraggiamento.
- Questo effetto diminuisce al crescere della massa della particella \rightarrow per gli elettroni è molto importante, per i protoni è trascurabile.

Nello stesso tunnel a partire dal 2001 è stato costruito il Large Hadron Collider, che riempie tutta la circonferenza con i suoi potenti magneti superconduttori

Struttura di LEP e LHC



7 Km in Svizzera
20 Km in Francia



ed ora... il **Large Hadron Collider !!!**

**NEL TUNNEL DI LEP
ACCELERA FASCI DI PROTONI A 7 TEV !!!
PRODUCE COLLISIONI P-P**



ysics



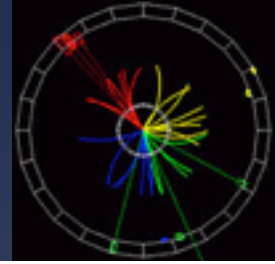
I protoni viaggiano quasi alla
velocità della luce ($v=0.999999991c$)
→ **fanno 10000 giri al secondo!**

In 10 ore percorrono 10 miliardi di
Km (Terra-Nettuno-Terra)

e collidono ogni 25 ns !

**Lo strumento scientifico
più grande del mondo!**

... tanto che ci si sposta in treno o in moto!



Hands on Particle Physics

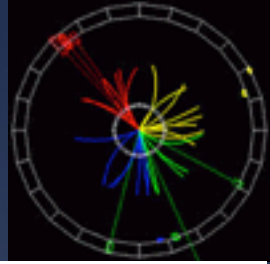


LHC è il più potente strumento mai costruito per studiare l'infinitamente piccolo

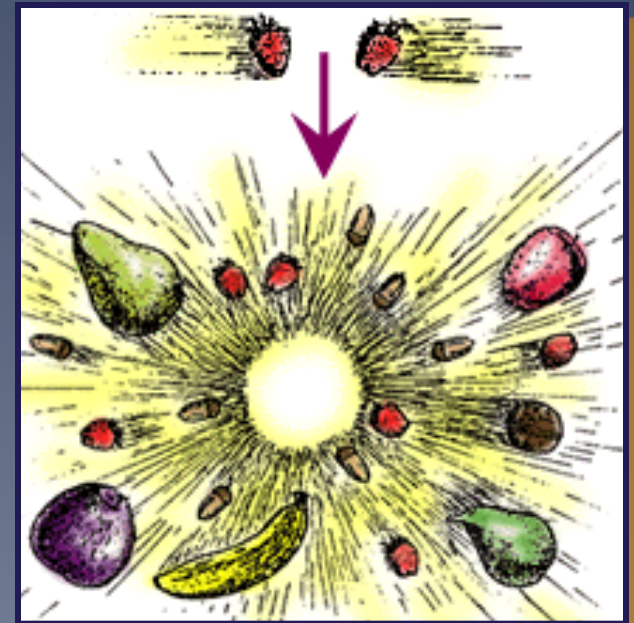
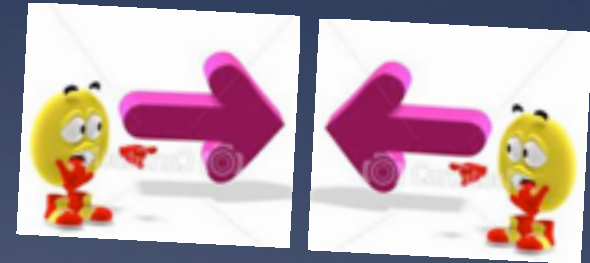
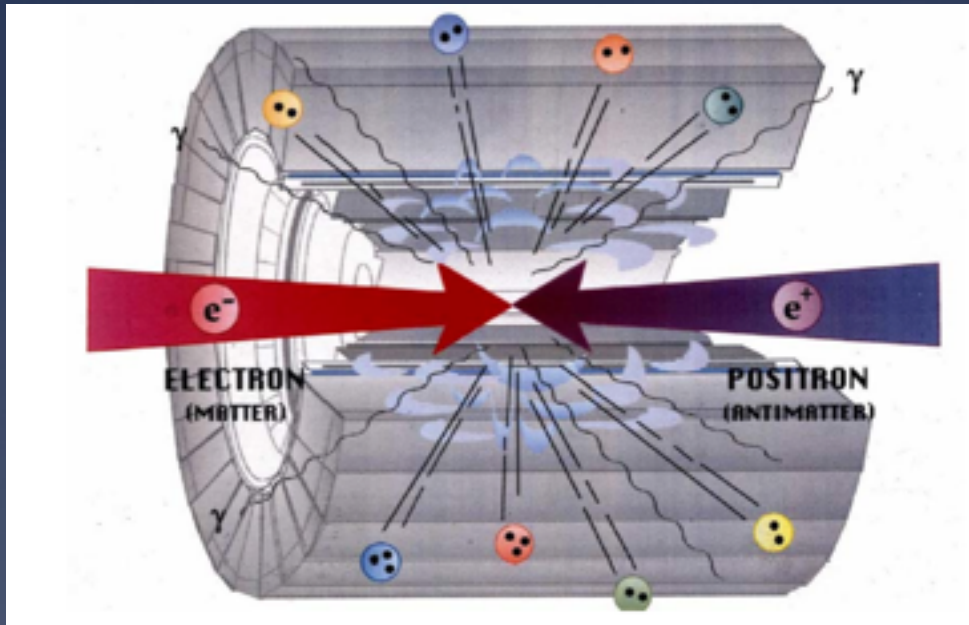
Hands on Particle Physics

- 8000 magneti superconduttori che producono un campo da 8.36 Tesla (campo magnetico terrestre ~ 0.00000040 Tesla)
- 700.000 litri di Elio liquido alla temperatura di 1.9K (-271°C)
- 30.000 tonnellate di materiale a 1.9K (-271°C)
più freddo dello spazio profondo !
- 27km di vuoto spinto (10^{-10} torr, confrontabile con il vuoto cosmico)

I rivelatori di particelle



Hands on Particle Physics



Scopi

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

Come?

... lavoro da detective ... seguire gli indizi per ricostruire quello che è successo¹⁷

Come si rivelano le particelle?



Hands on Particle Physics

➔ Le particelle si studiano con i **rivelatori**

➔ I **rivelatori** servono a:

Identificare il tipo di particelle prodotte

Misurarne traiettoria, energia e quantità di moto

➔ Per stabilire:

Che cosa è accaduto nella collisione, se si è prodotto qualche fenomeno interessante

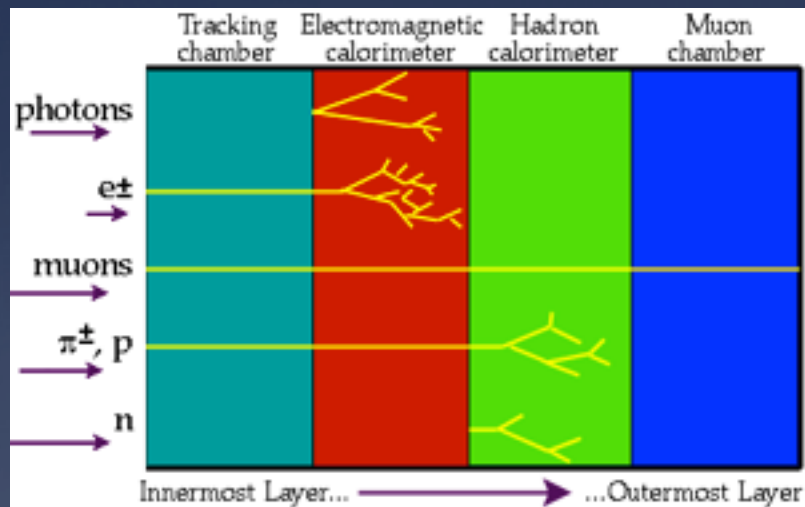
➔ Molte particelle hanno vita breve e decadono in particelle più leggere:

Si rivelano queste ultime

Dalle loro caratteristiche si risale alle proprietà delle particelle che le hanno generate

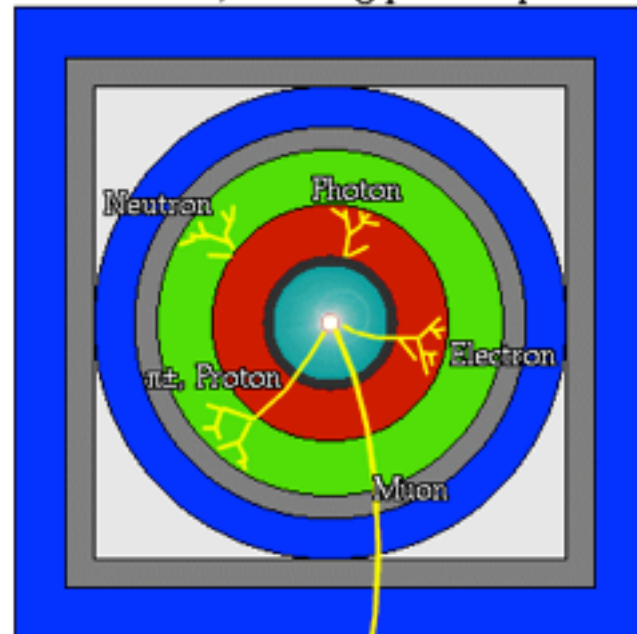
La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.

Apparati di rivelatori

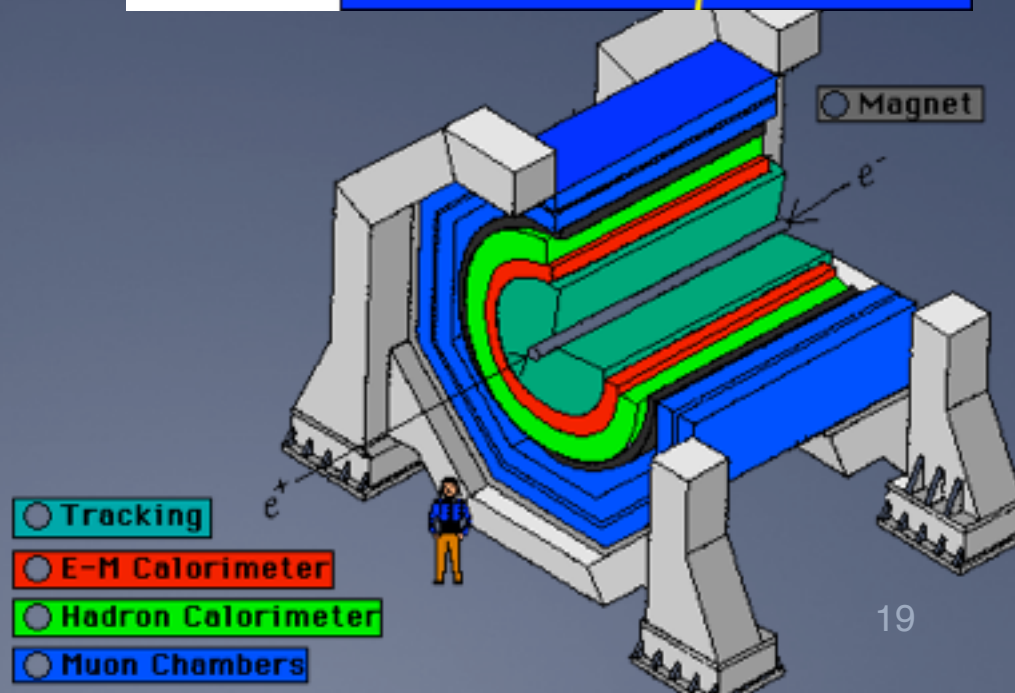


A detector cross-section, showing particle paths

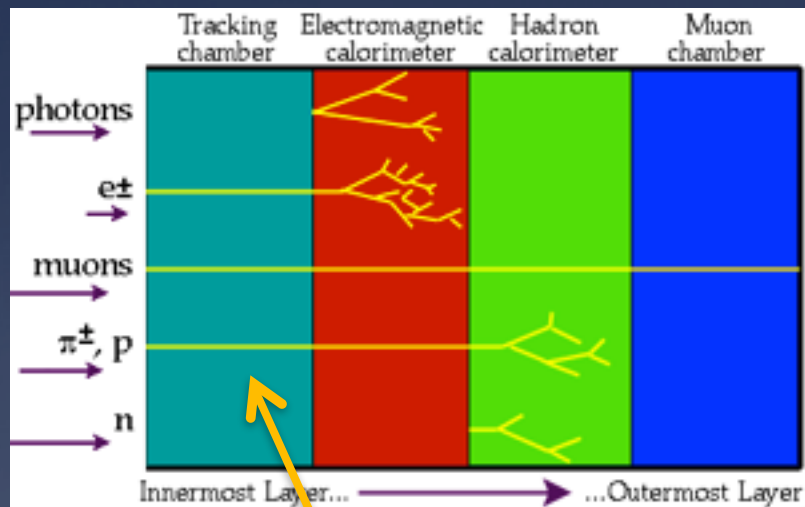
- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



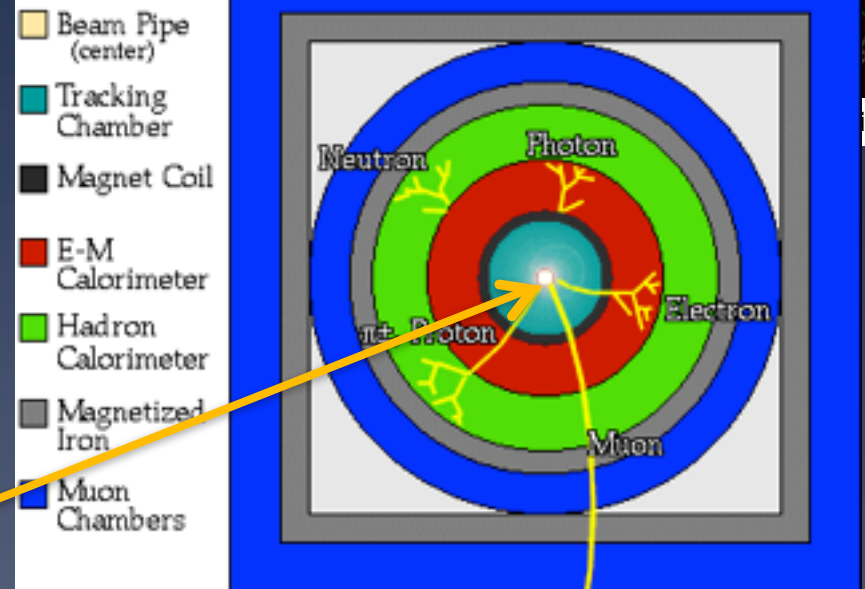
Struttura a
“cipolla”



Apparati di rivelatori

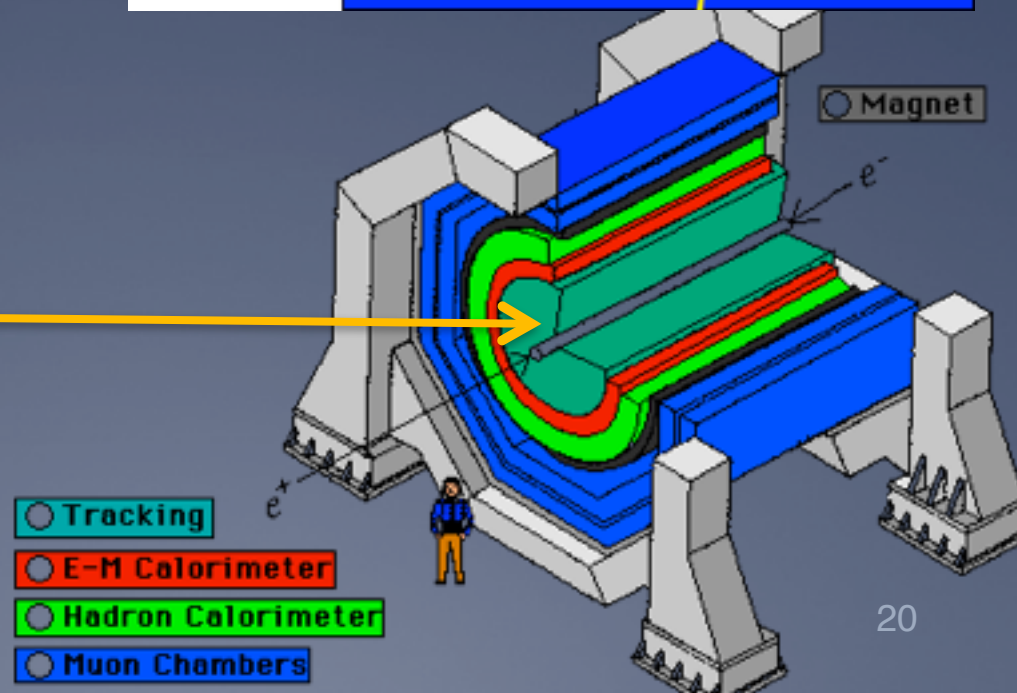


A detector cross-section, showing particle paths

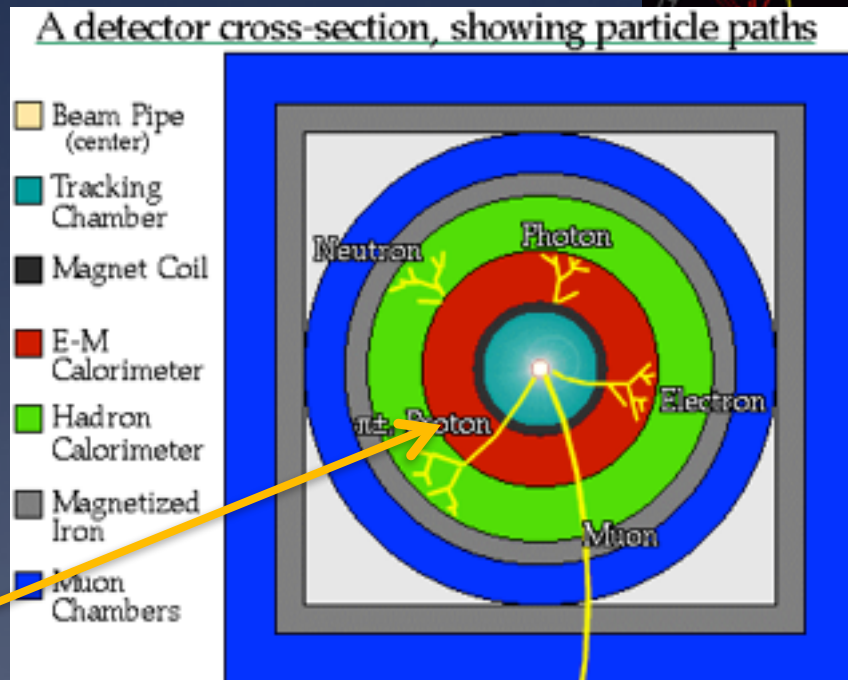
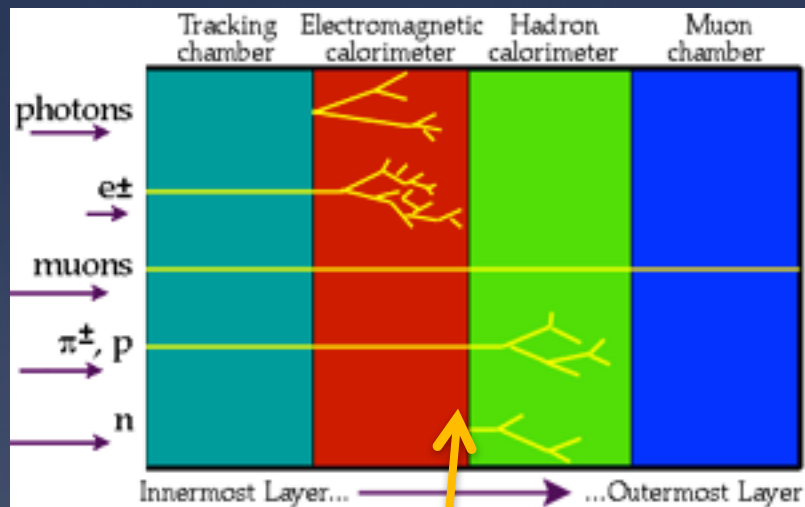


Rivelatori Traccianti

Permettono di ricostruire le tracce lasciate dalle particelle cariche



Apparati di rivelatori

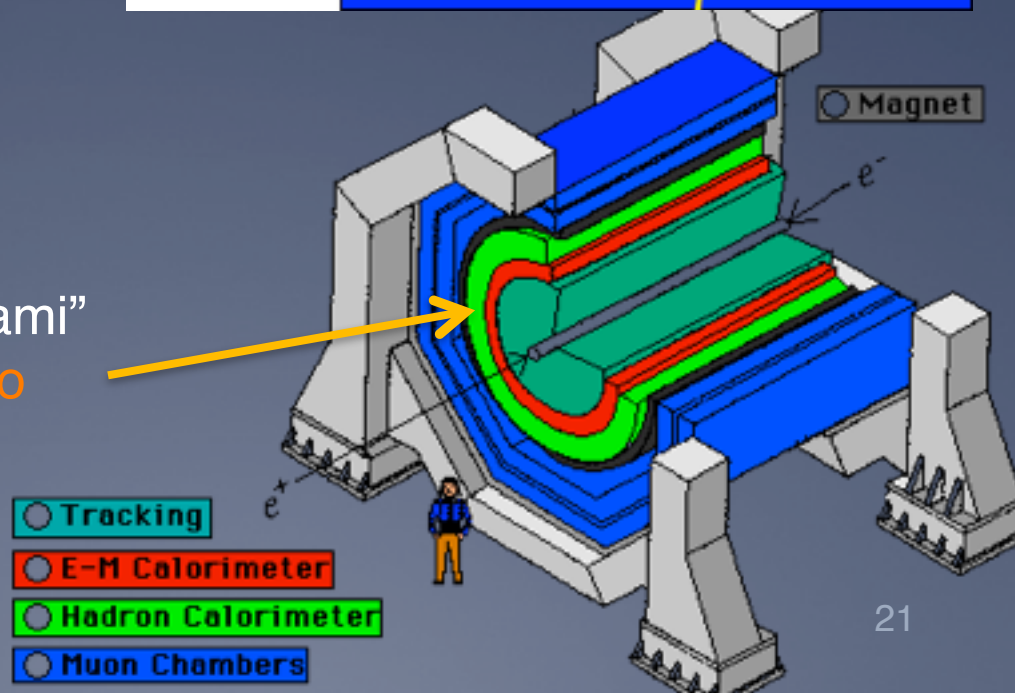


Calorimetri

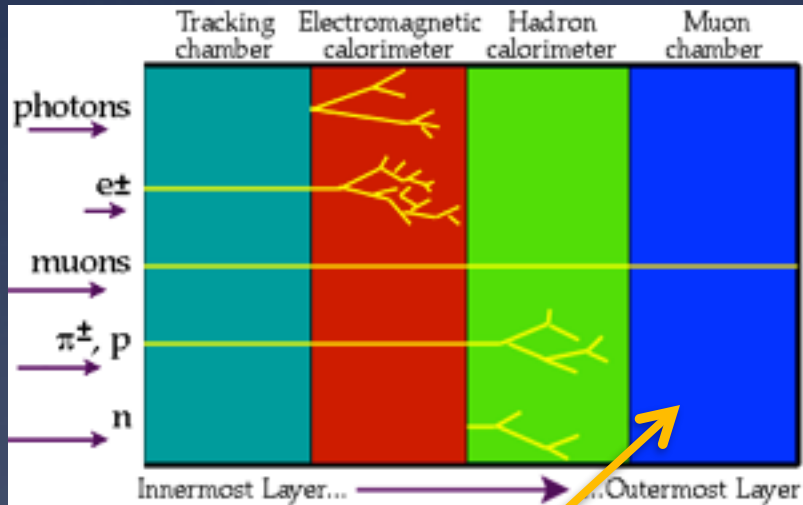
Misurano l'energia rilasciata dalle particelle. Le particelle diventano "sciame"

Calorimetri elettromagnetici → rivelano fotoni, elettroni

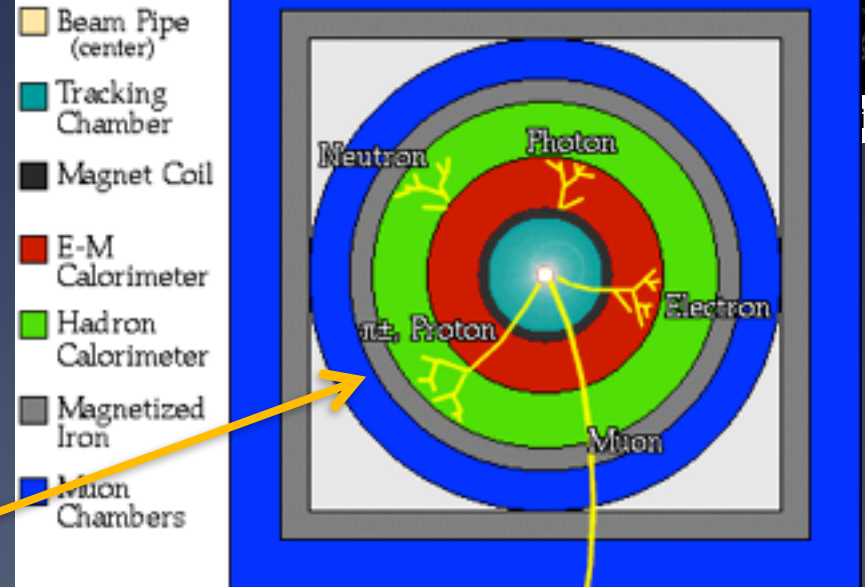
Calorimetri adronici → rivelano gli adroni



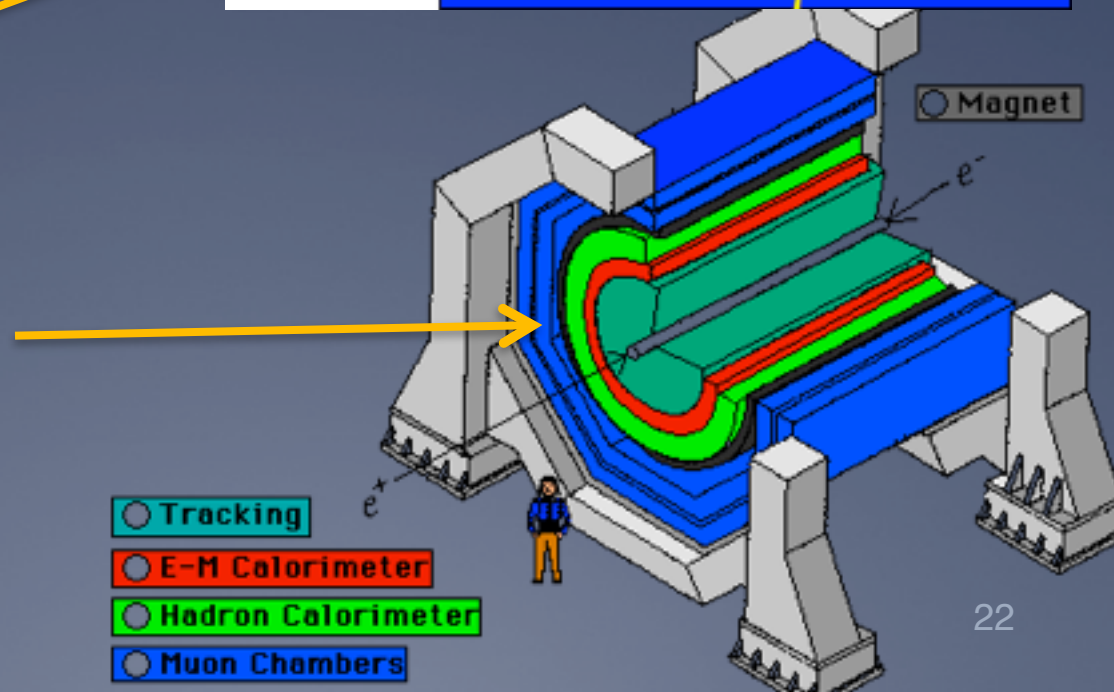
Apparati di rivelatori



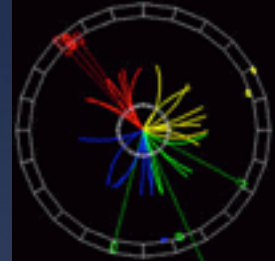
A detector cross-section, showing particle paths



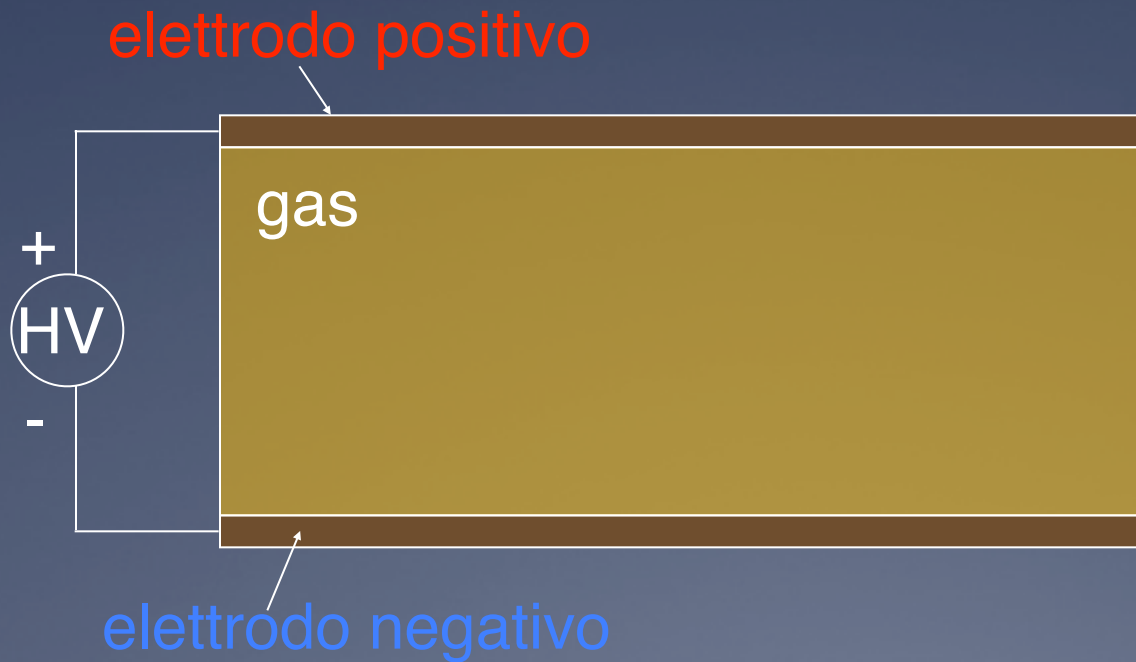
Rivelatori per muoni:
Rivelano i muoni,
particelle molto
penetranti



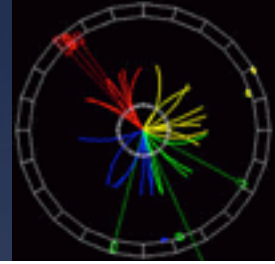
Principio di funzionamento : IONIZZAZIONE



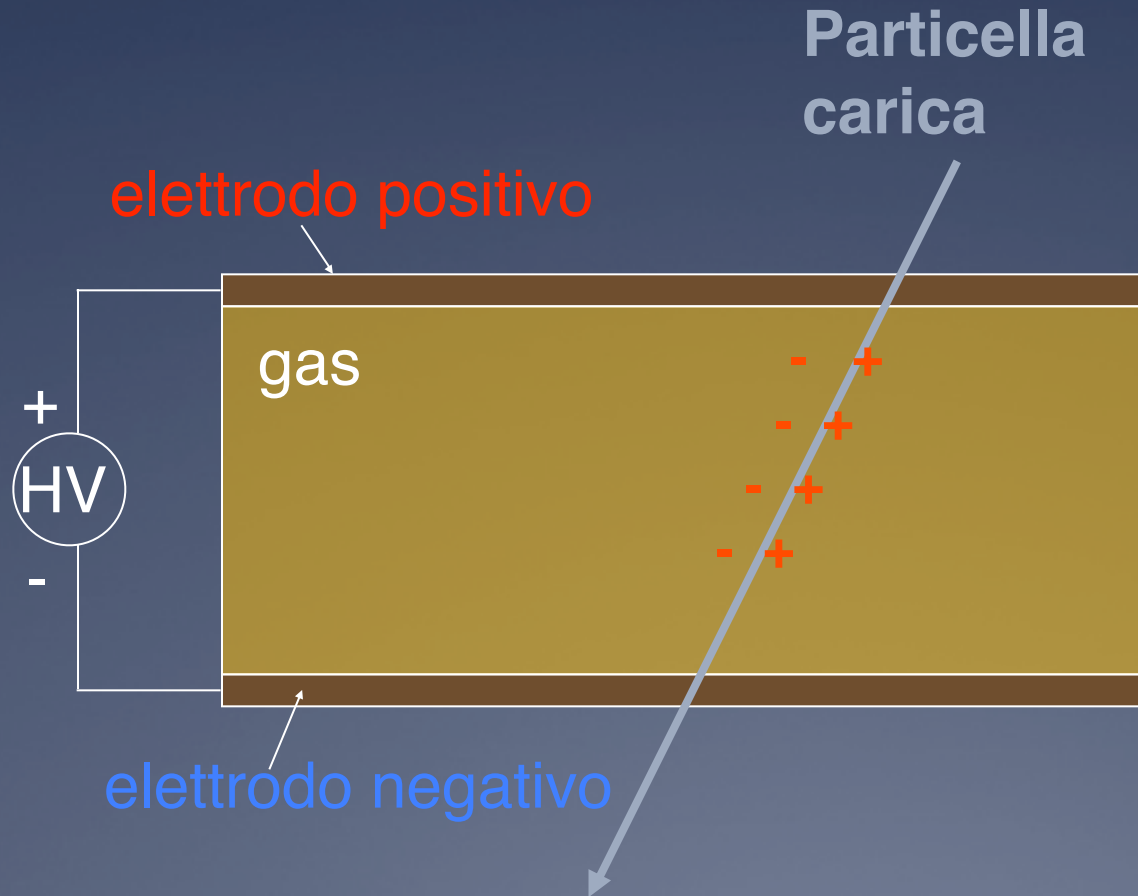
Hands on Particle Physics



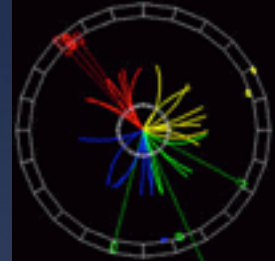
Principio di funzionamento : IONIZZAZIONE



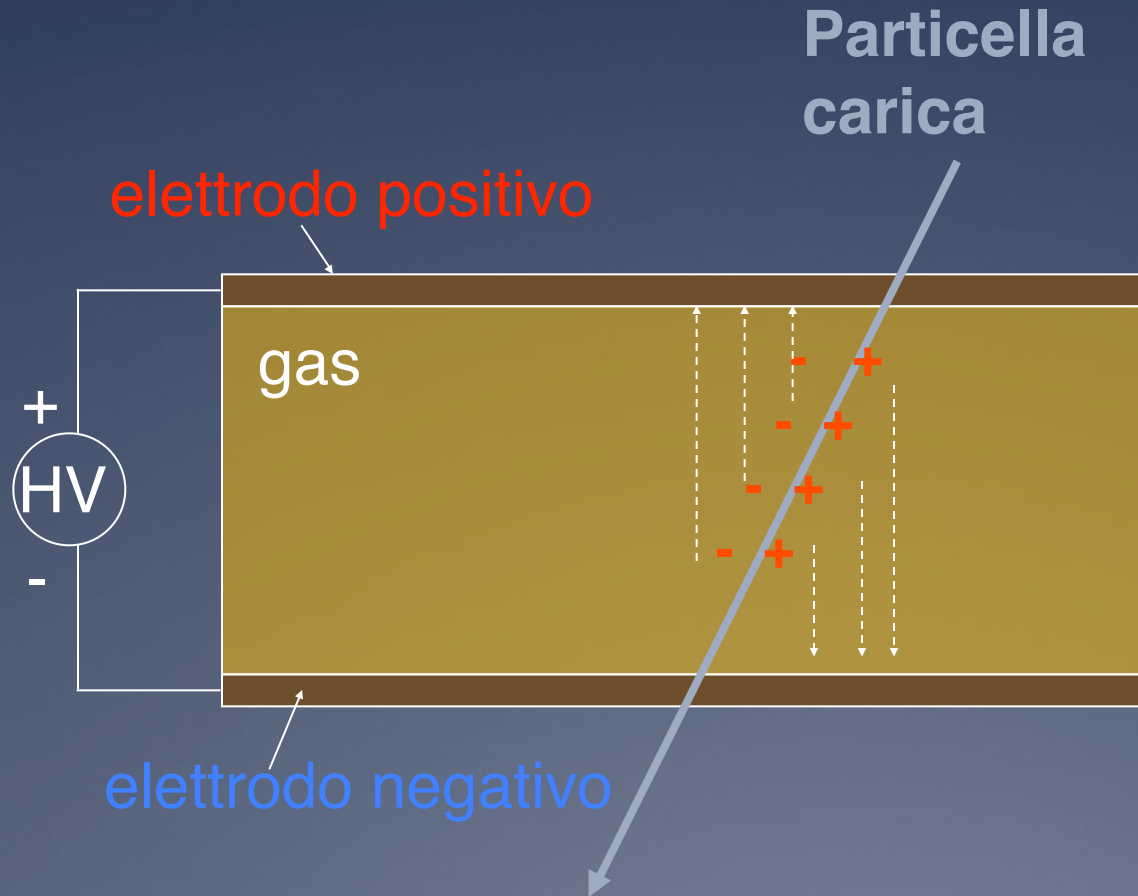
Hands on Particle Physics



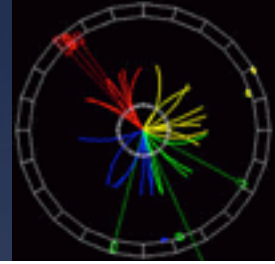
Principio di funzionamento : IONIZZAZIONE



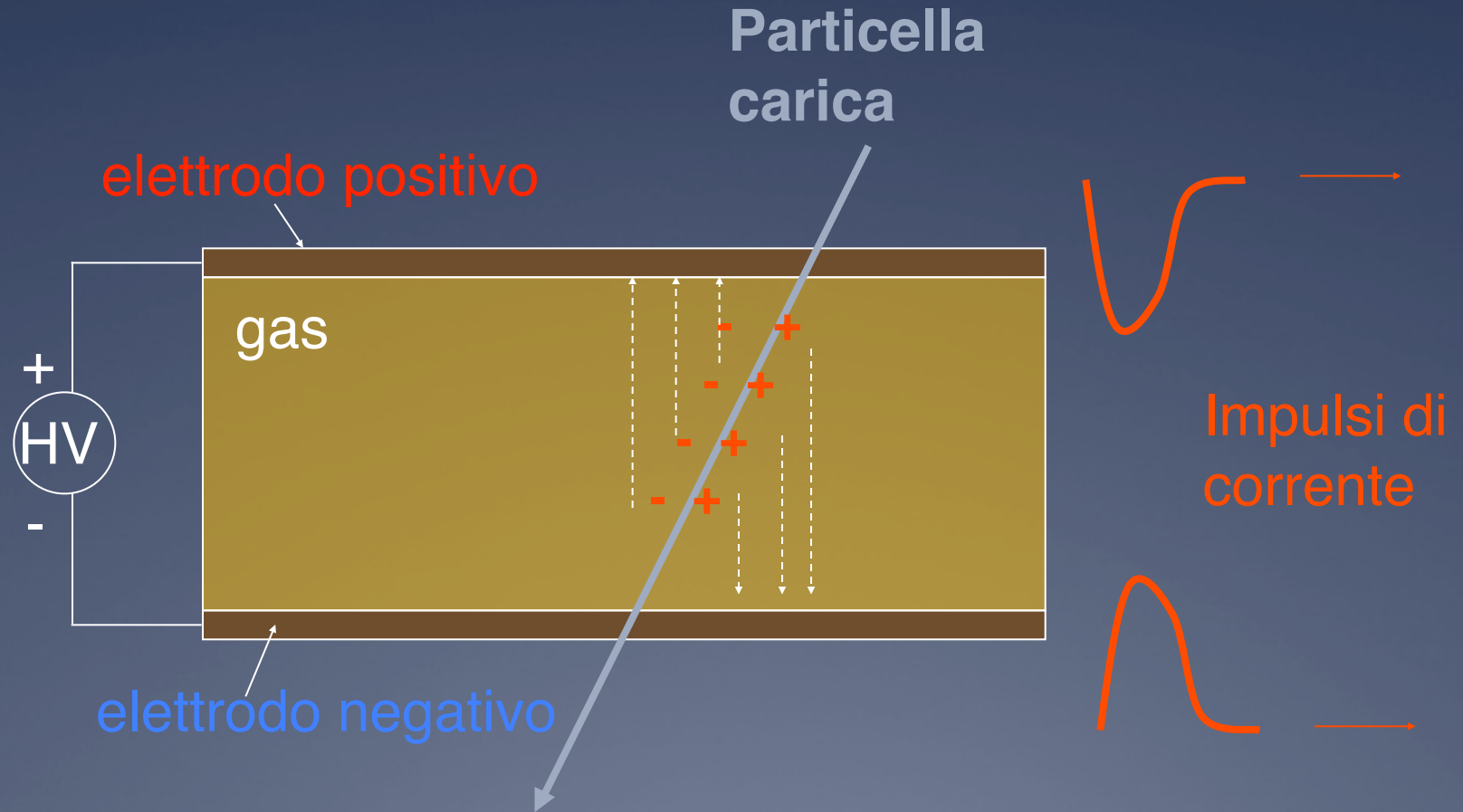
Hands on Particle Physics



Principio di funzionamento : IONIZZAZIONE



Hands on Particle Physics

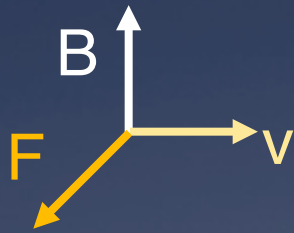




Hands on Particle Physics

Misura della quantità di moto

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

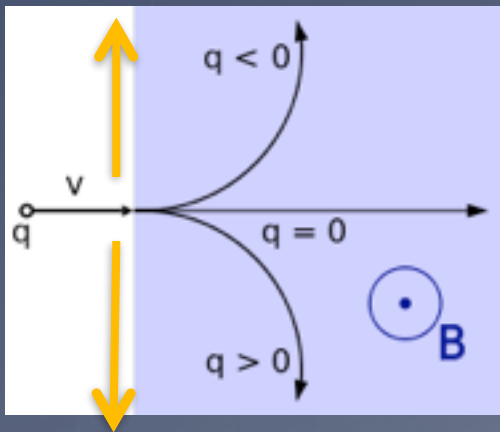


$$|F| = q v B$$

=> 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



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



Possiamo conoscere il segno della carica



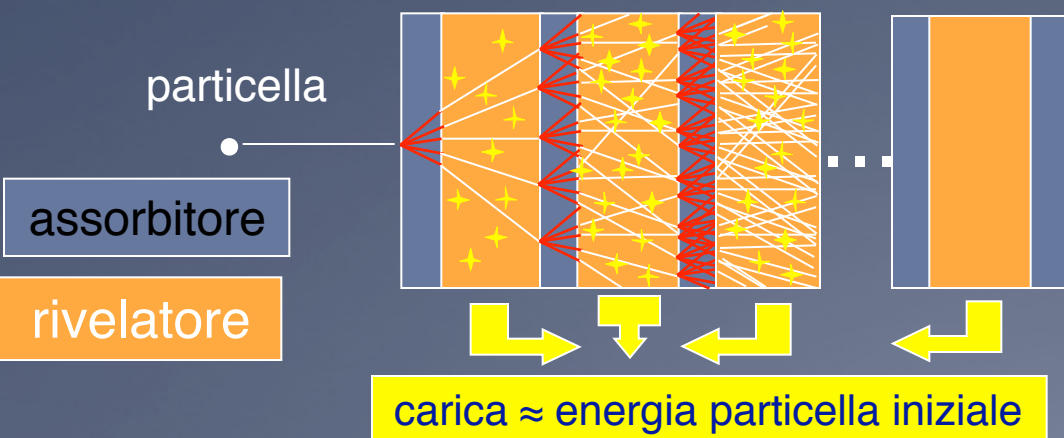
Misura dell'Energia

Assorbimento totale in un **calorimetro**:

p.es. **lasagna** di assorbitori e rivelatori

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

misuro l'energia depositata negli strati sensibili
anche per particelle neutre !!!



- **Calorimetri Elettromagnetici**
(rivelazione di e^- , e^+ , γ)
- **Calorimetri Adronici**
(rivelazione di adroni carichi e neutri: p, n, π, K)

...e come appaiono i quarks ?



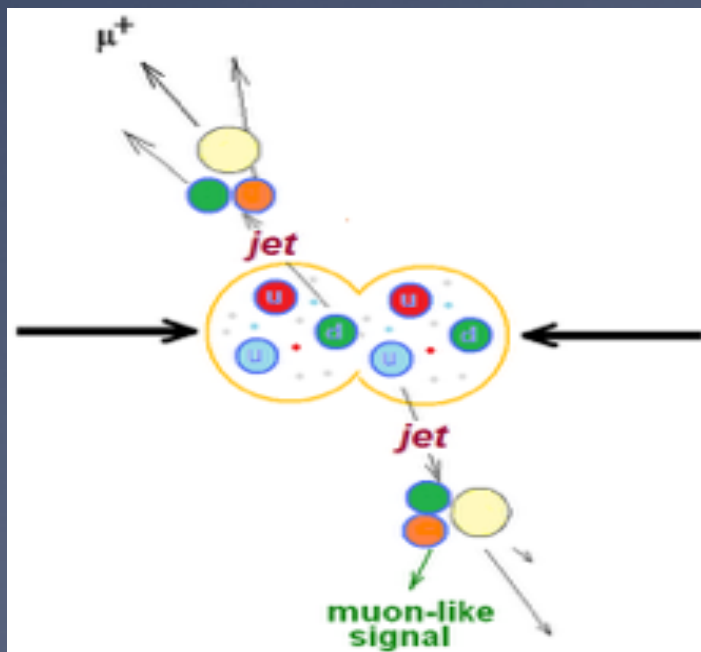
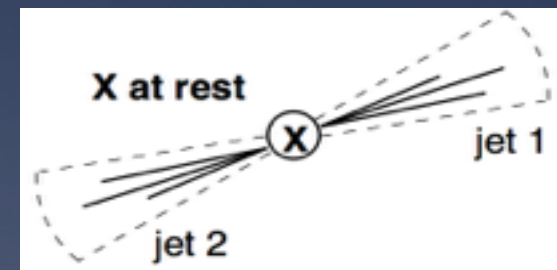
Hands on Particle Physics

non esistono allo stato libero, a causa della forza forte, eccitano particelle (coppie materia-antimateria) di ogni tipo che cercano di frenarli e gli impediscono di muoversi liberamente.

convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti **jet**

I **jet** possono contenere particelle di ogni tipo, concentrate in una stretta regione angolare

**particelle di
campo dal vuoto**



Come si identifica un neutrino?



Hands on Particle Physics

- * I neutrini, così come i muoni sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori
- * Al contrario dei muoni i neutrini non interagiscono molto (molto) poco con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili
 - * grosse quantità di materiale (molte tonnellate) posto in cave sotterranee che hanno lo scopo di schermare la radiazione cosmica → Laboratori del Gran Sasso
- * Ad LHC 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!!!!

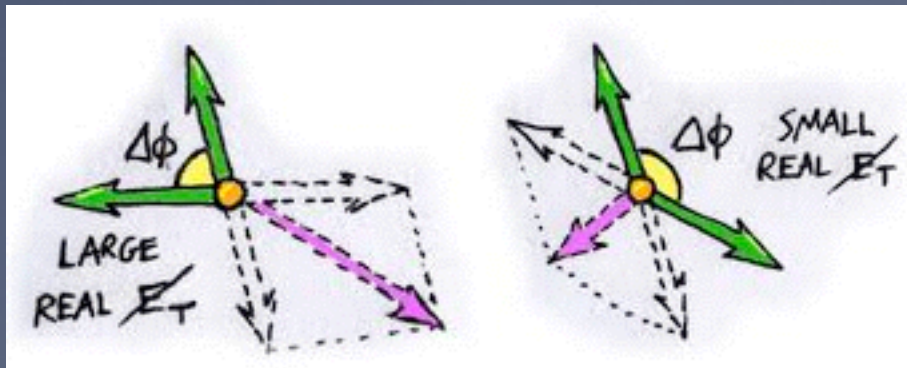
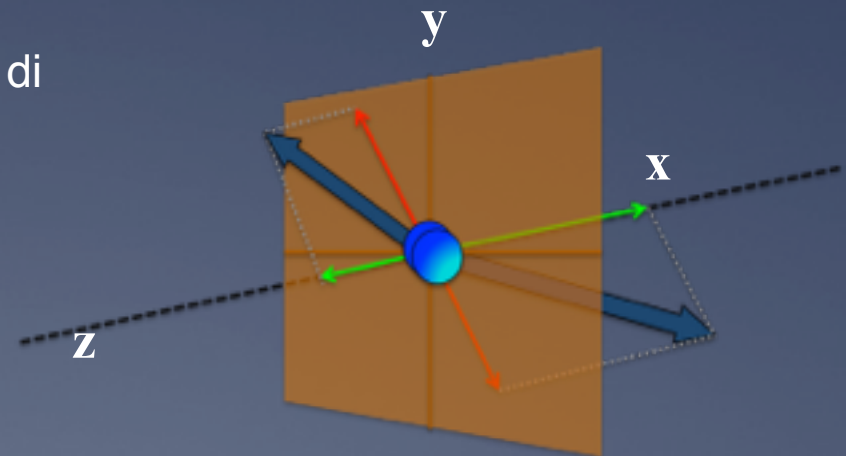
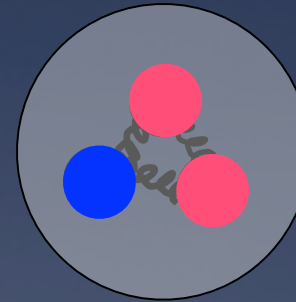


Perché ad LHC parliamo di quantità di moto ed energia “trasversa” ?



Hands on Particle Physics

- * la quantità di moto lungo l'asse di collisione del fascio non è nota
 - * non è possibile misurare le proprietà dei costituenti dei protoni che interagiscono
- * nel piano trasverso XY la quantità di moto di ogni protone e quella totale sono nulli.
- * ... e tale deve essere dopo la collisione (principio di conservazione della quantità di moto)
- * Ai colliders adronici il bilanciamento energia/quantità di moto si può usare solo nel piano trasverso

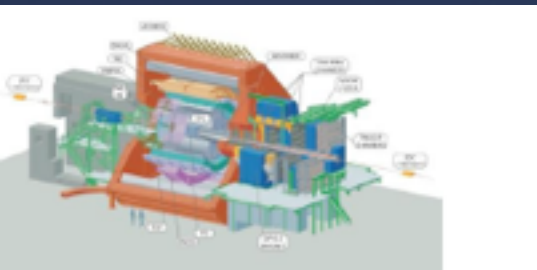


Gli Apparatzi lungo LHC

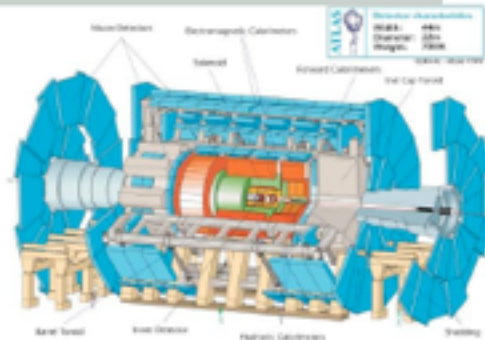


Hands on Particle Physics

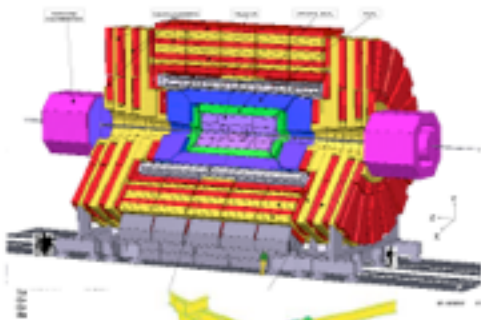
Alice



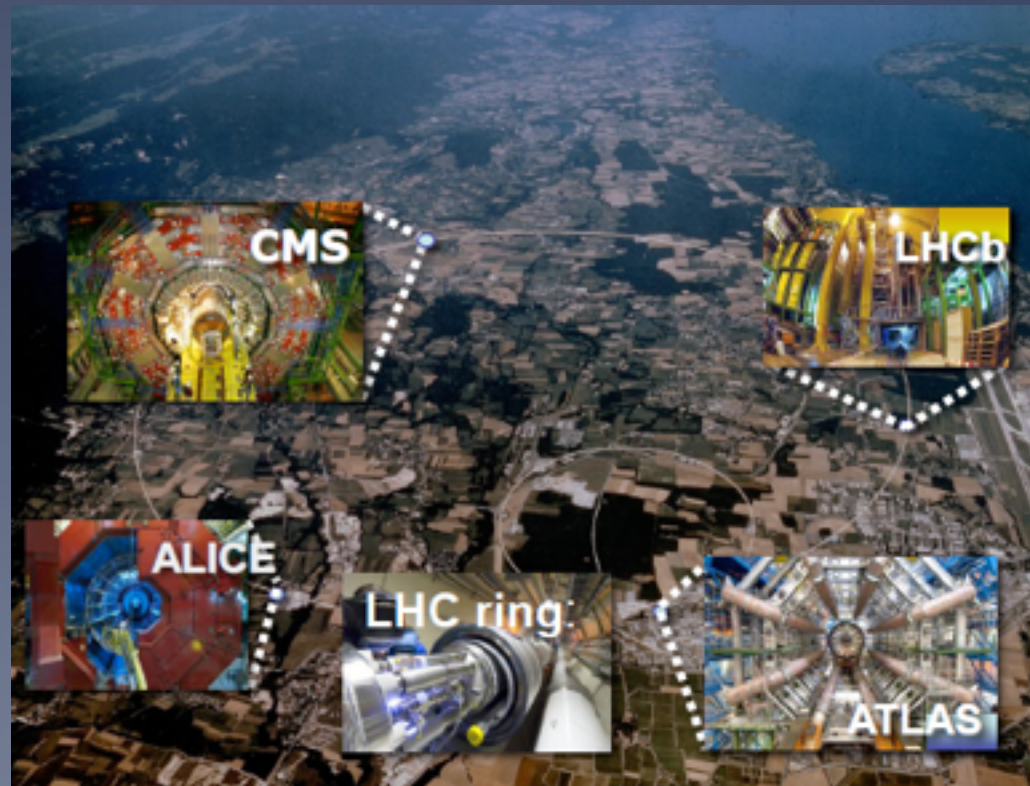
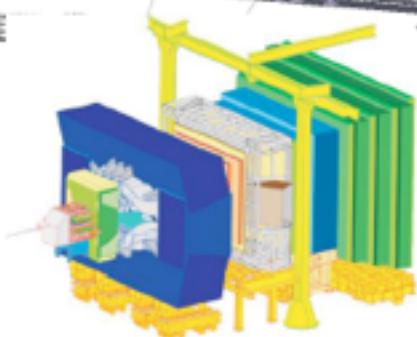
ATLAS



CMS



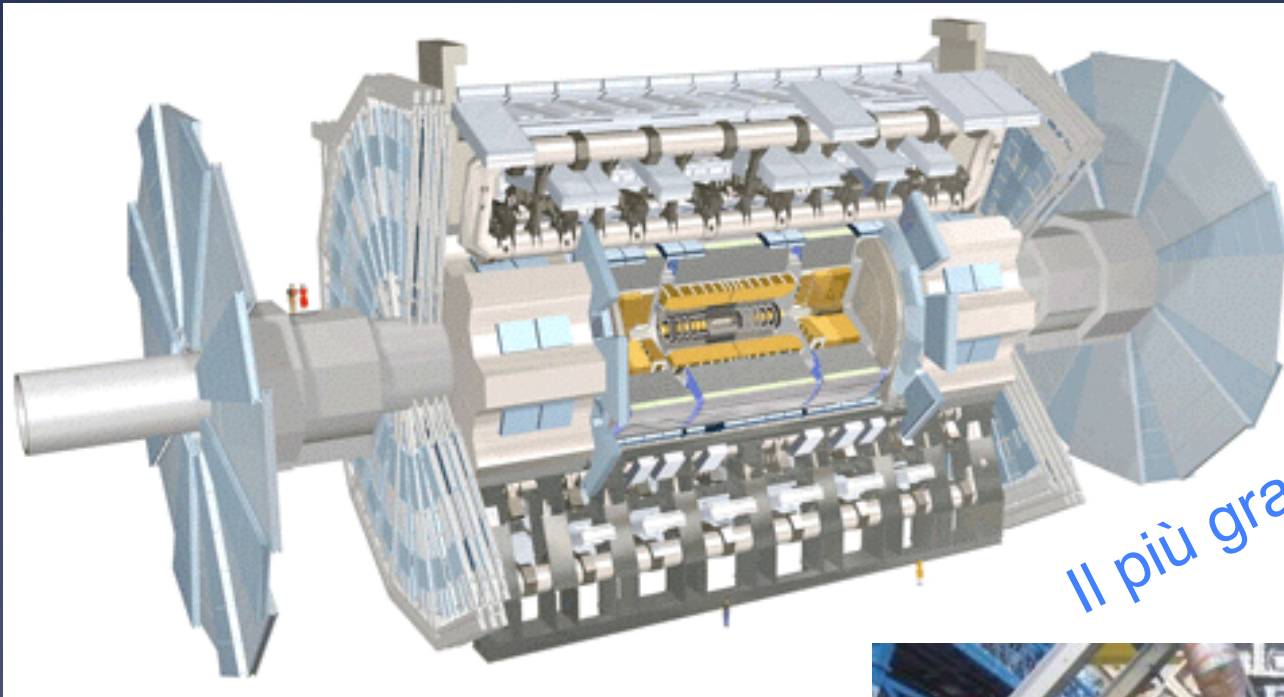
LHCb



L'esperimento ATLAS a LHC

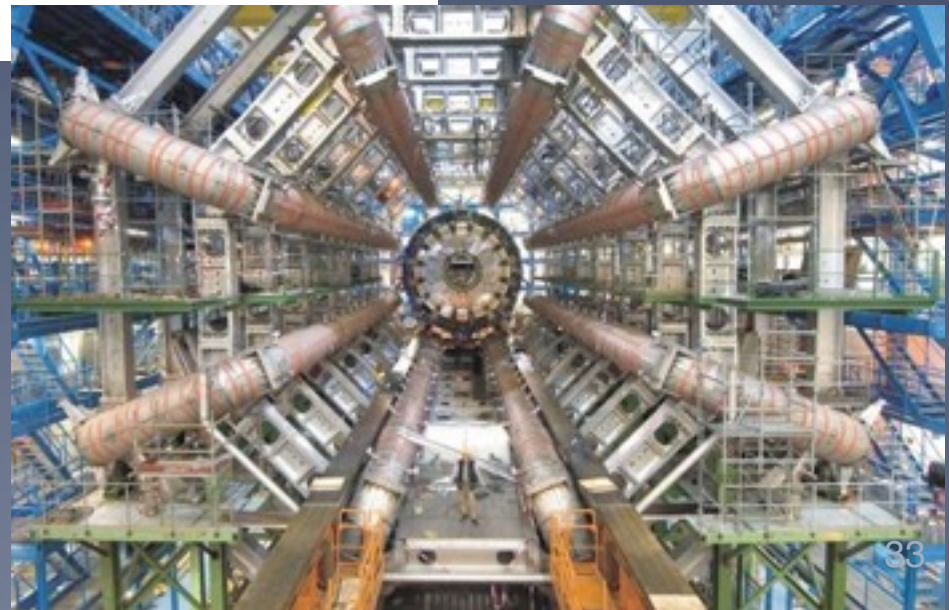


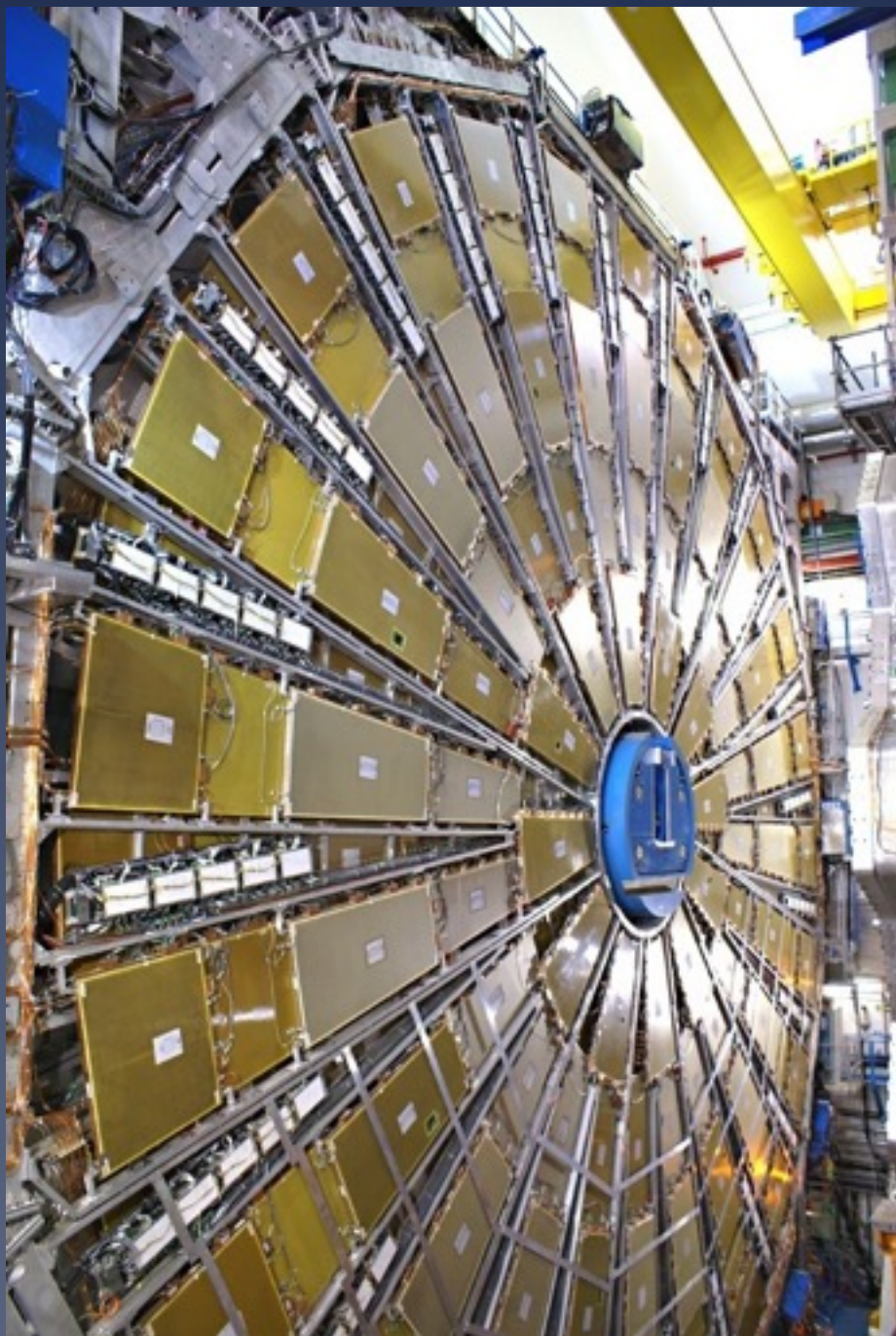
Hands on Particle Physics



Il più grande rivelatore mai
costruito

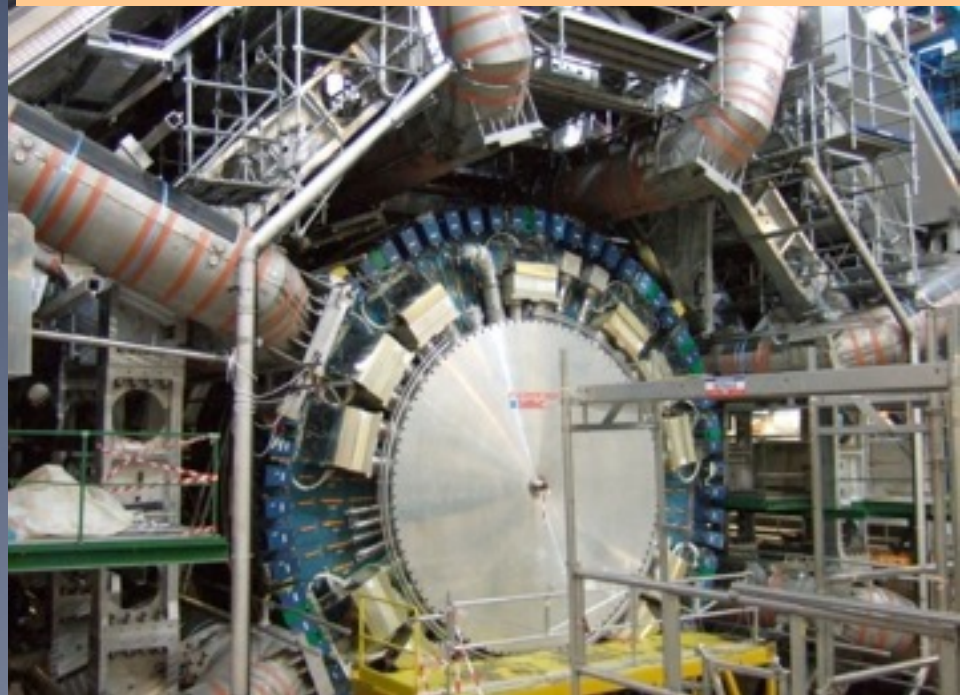
lunghezza ≈ 40 m
raggio ≈ 10 m
peso ≈ 7000 tons
canali di elettronica $\approx 10^8$
.... e ≈ 3000 km di cavo



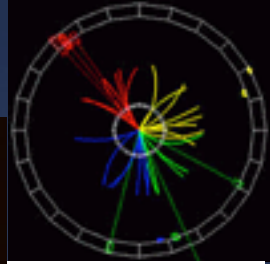


Hands on Particle Physics

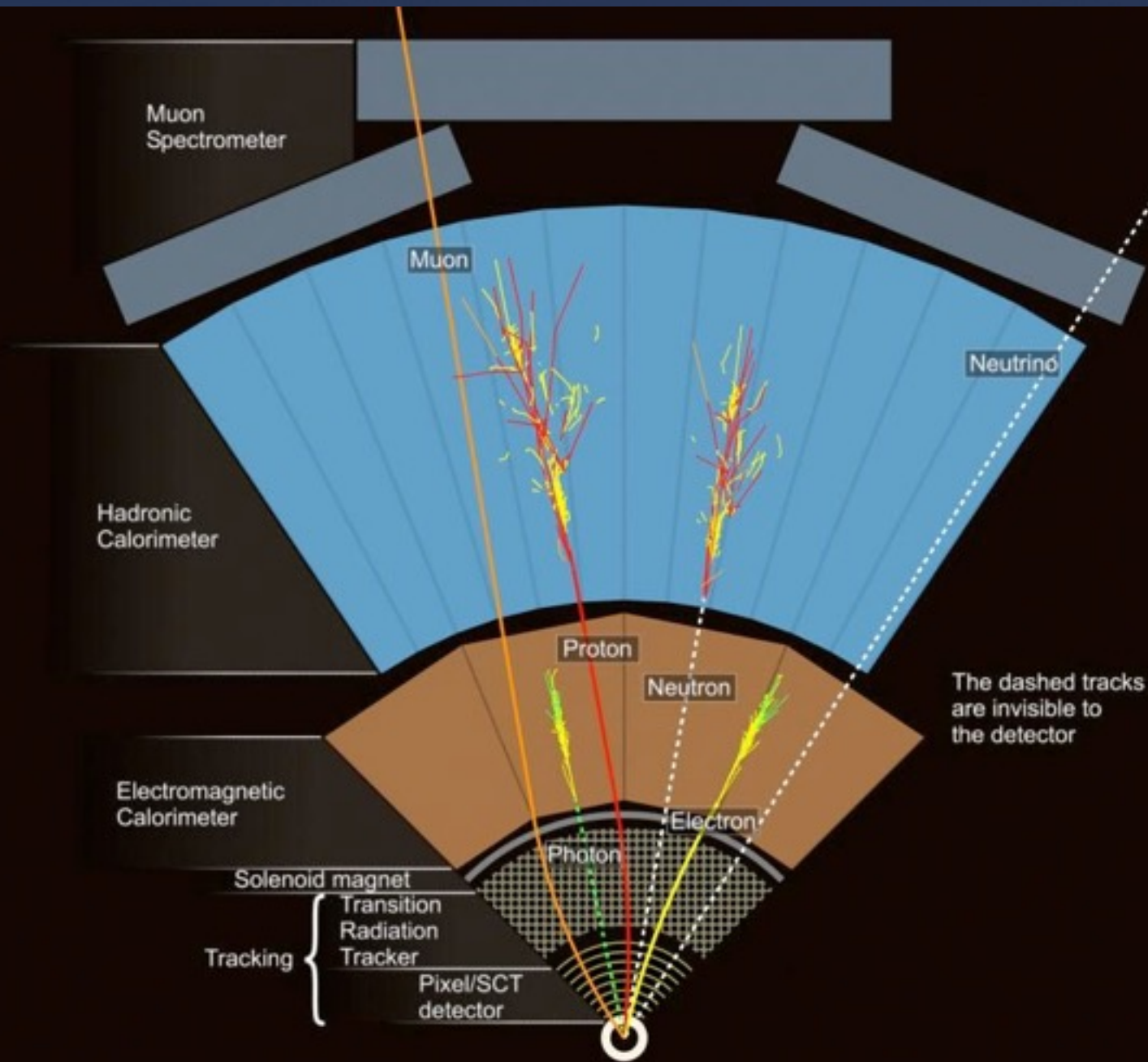
**qui a Roma Tre sono stati
costruiti e testati parte
dei rivelatori di muoni di
ATLAS**



Uno spicchio di ATLAS

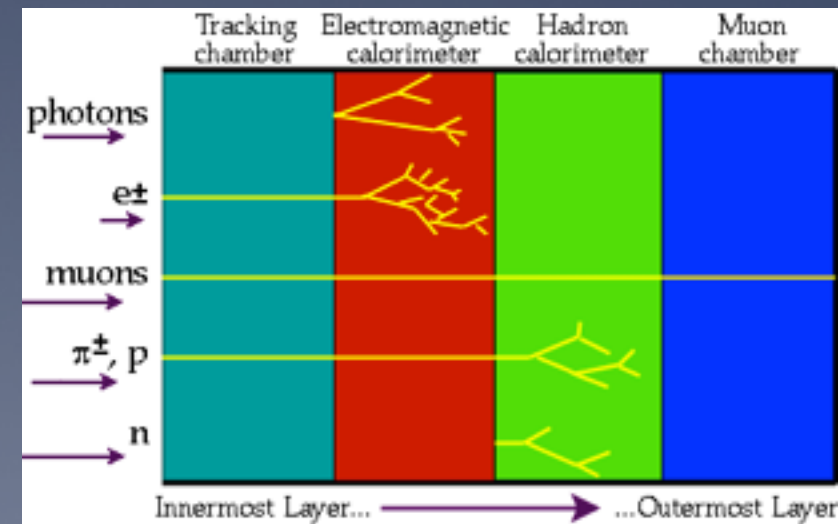
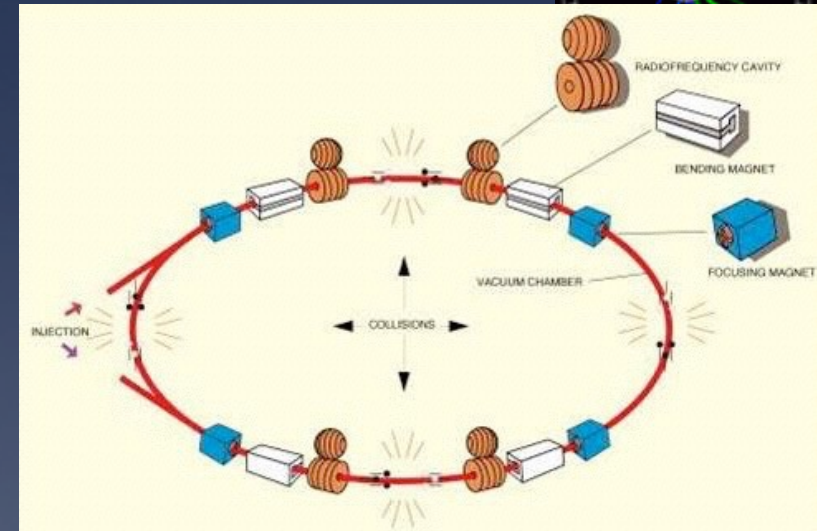


on Particle Physics

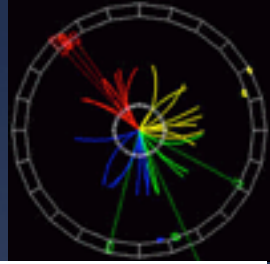


Riepilogando...

- * 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



Backup



Hands on Particle Physics

Ultimo premio nobel.

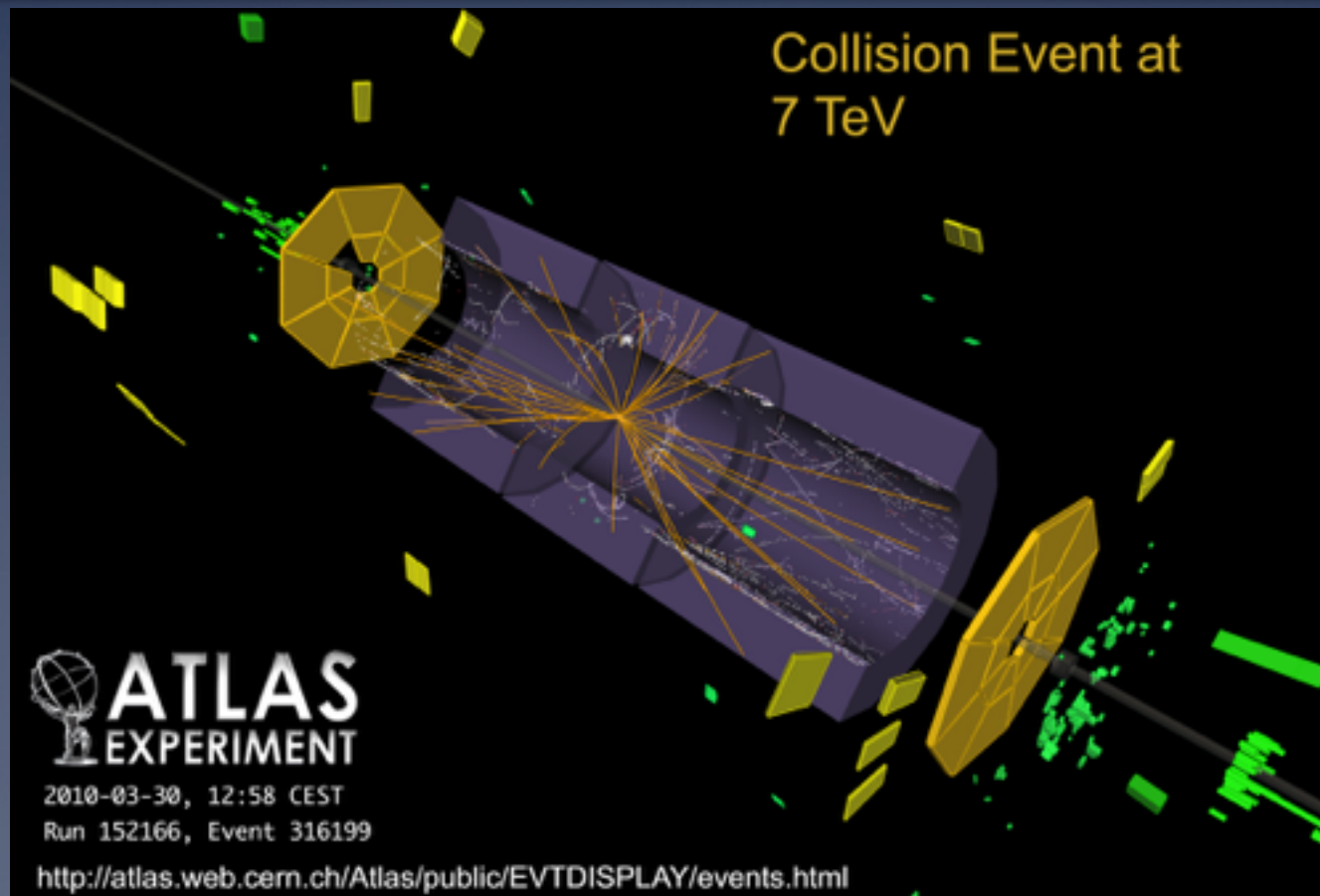


Hands on Particle Physics

Primi eventi in ATLAS...

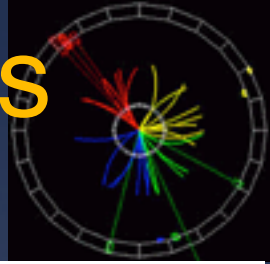


ATLAS registra le prime collisioni protone-protone a 7 TeV il 30 Marzo 2010

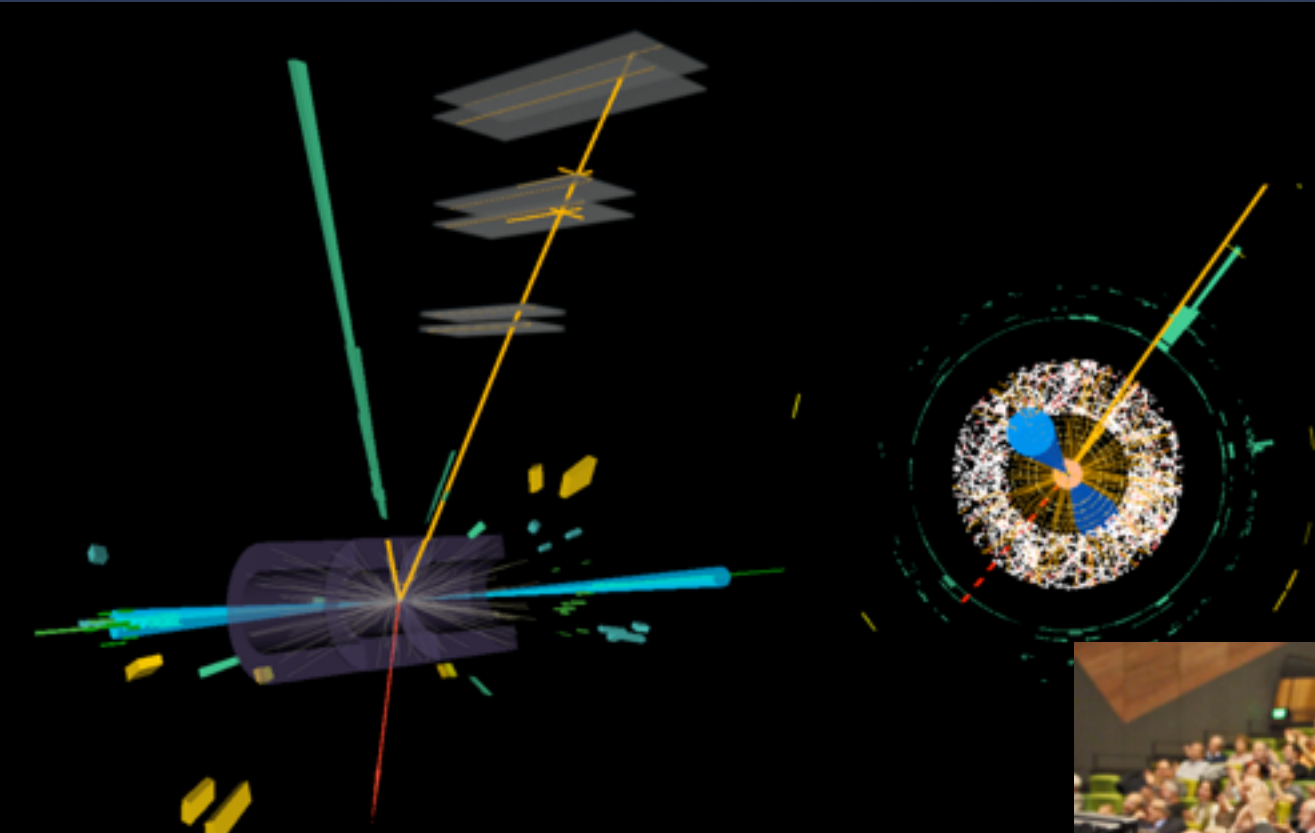


L'inizio di una nuova era per la Fisica delle Particelle!

La scoperta del Bosone di Higgs



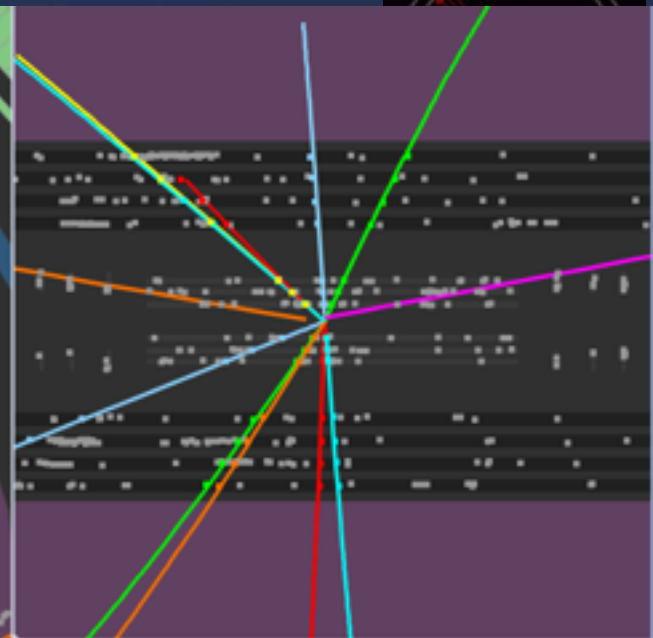
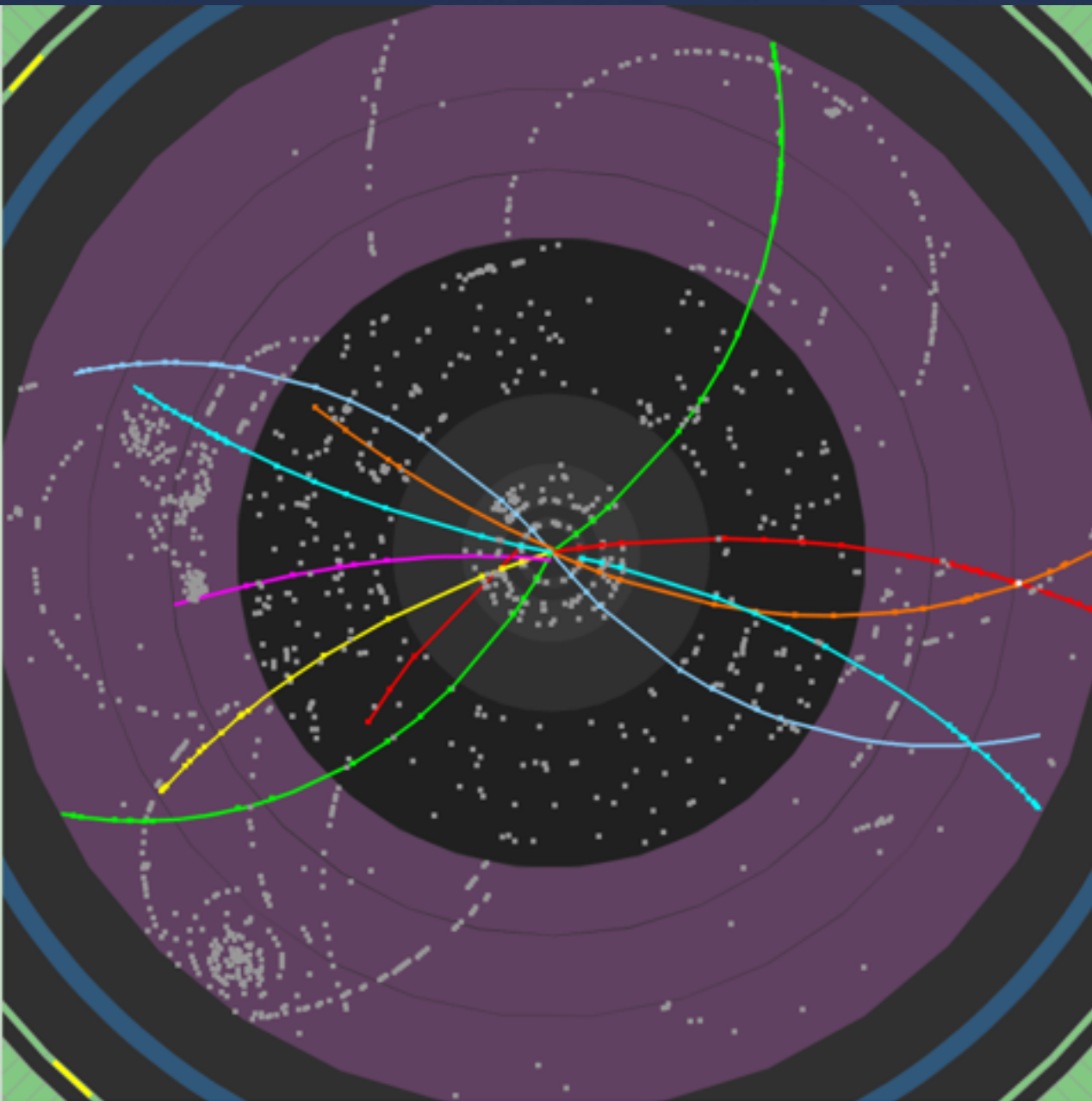
Hands on Particle Physics



$$H \rightarrow W W \rightarrow e \nu \mu \nu$$







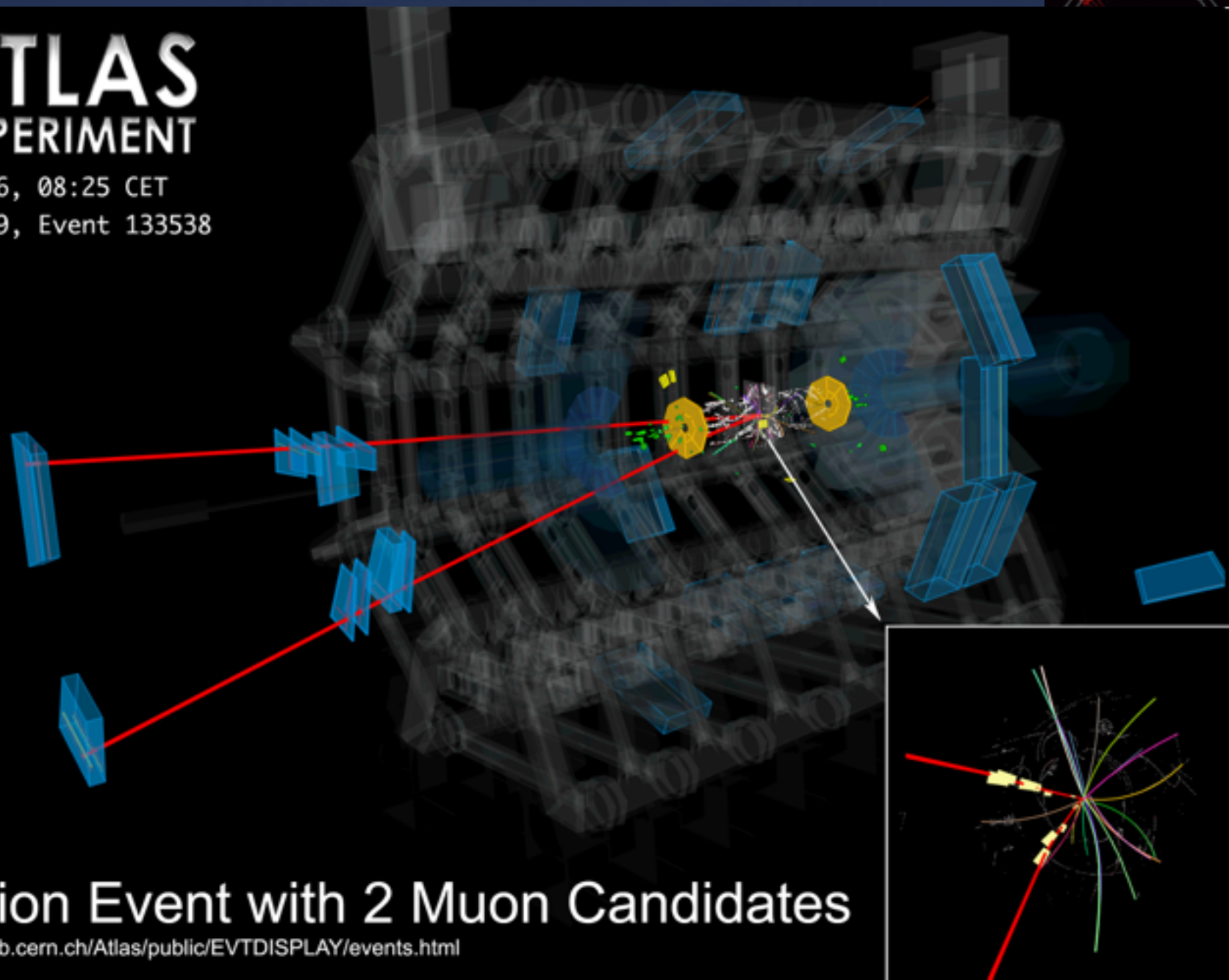
ATLAS
EXPERIMENT

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

Collision Event



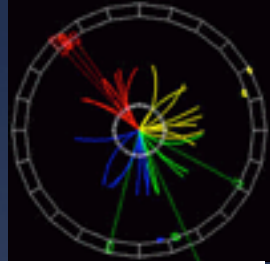
2009-12-06, 08:25 CET
Run 141749, Event 133538



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

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 !

protone



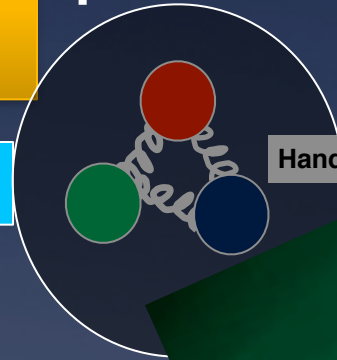
Prima della collisione

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

Energia: E_1

Energia: E_2

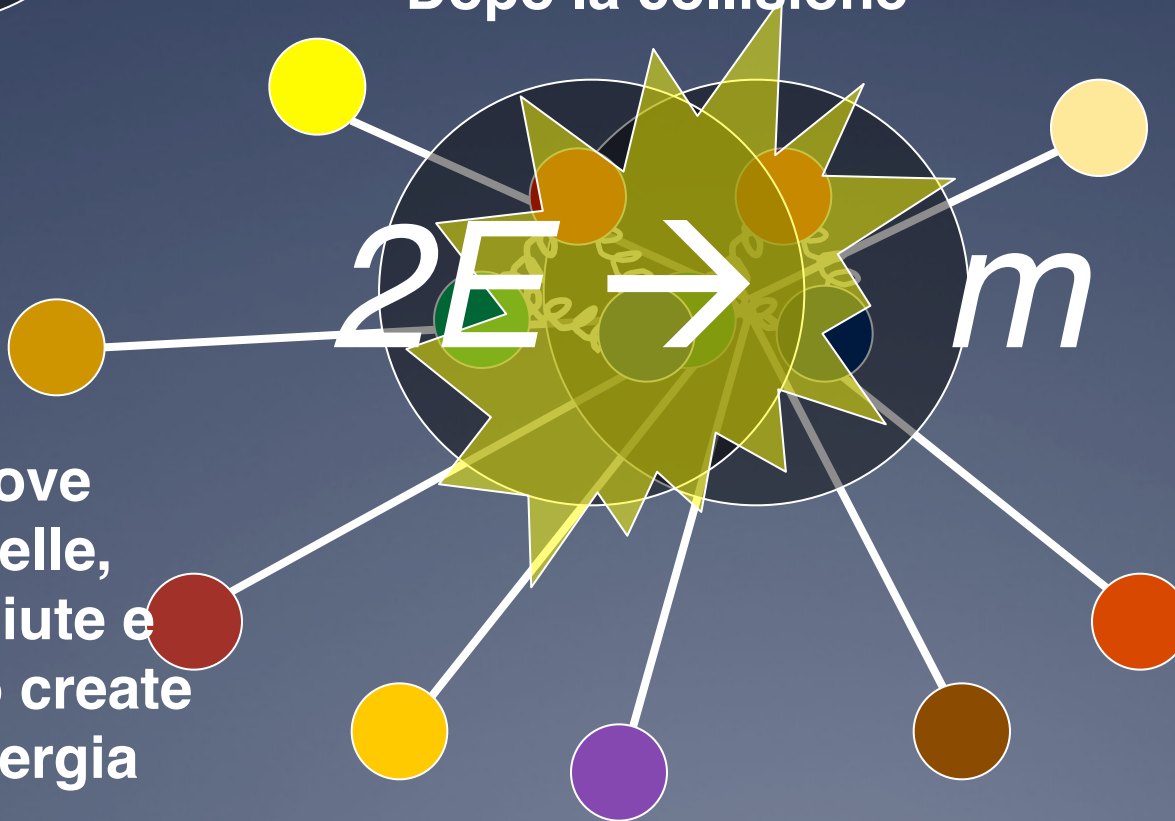
protone



Hands on Particle Physics

Dopo la collisione

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



$$E = mc^2$$

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