

# Acceleratori, rivelatori e altro ancora



Carminati Leonardo  
Universita' di Milano e INFN

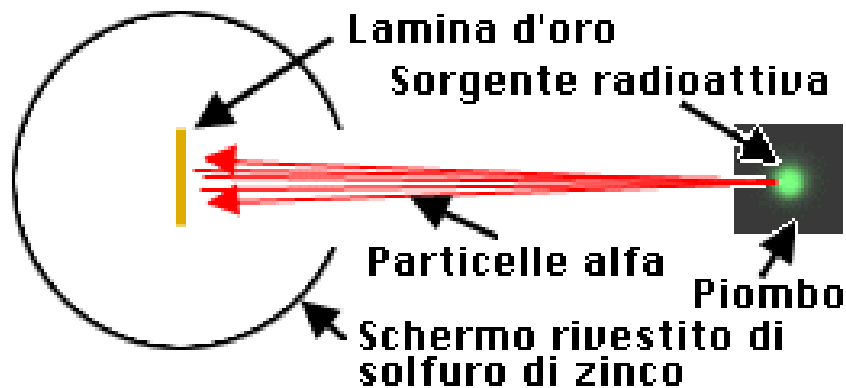


- ❑ Come sondiamo l'infinitamente piccolo: acceleratori e rivelatori di particelle
- ❑ Come si producono le particelle ? I collisionatori/acceleratori
  - ❑ Cos'è un acceleratore? A cosa serve ? Come funziona ?
  - ❑ Perché è così grande ? Perché costa così tanto?
- ❑ Come si 'vedono' le particelle ? I rivelatori di particelle :
  - ❑ Cos'è un rivelatore ? Come funziona e perché è così grande e costoso?
- ❑ L'analisi dei dati: segnali e fondi, variabili discriminanti, confronto teoria-esperimento
- ❑ Torniamo al Modello Standard : il bosone vettore Z, il bosone di Higgs e risonanze esotiche

# L'esperimento di Rutherford

- ❑ Formulare un'ipotesi (teoria)
- ❑ Costruire un esperimento per mettere alla prova l'ipotesi
- ❑ Analizzare i dati per tentare di confutare la teoria

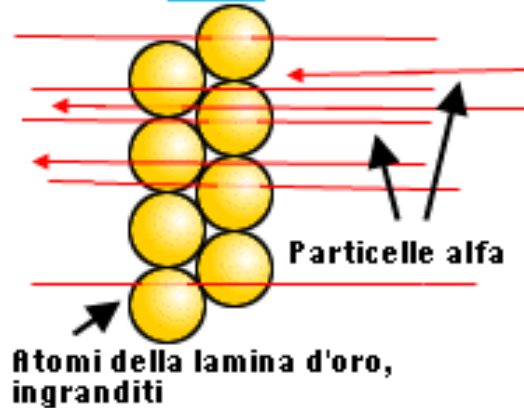
Agli inizi del 1900 il dibattito sulla struttura atomica era abbastanza acceso: si sapeva che dovevano contenere delle cariche elettriche (elettroni) ma dal momento che si presentavano elettricamente neutri l'idea era che ci fosse una 'gelatina' positiva farcita di ciliegine (elettroni) negative con carica totale nulla.



- ❑ Rutherford si inventa un esperimento divenuto celebre per verificare (o confutare) questa teoria:
  - ❑ Sorgente di particelle alfa
  - ❑ Bersaglio a lamina d'oro
  - ❑ Schermo sensibile al passaggi delle particelle alfa (rivelatore)

# L'esperimento di Rutherford

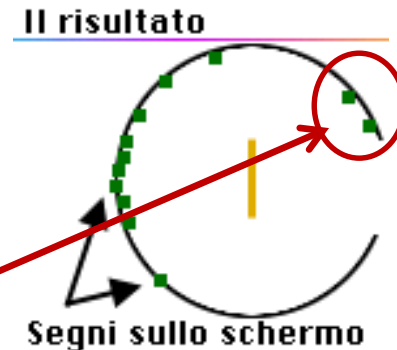
**Dettaglio della lamina d'oro**  
secondo il vecchio modello atomico



Se il modello atomico a 'gelatina' fosse stato corretto ci saremmo aspettati un esito di questo tipo :



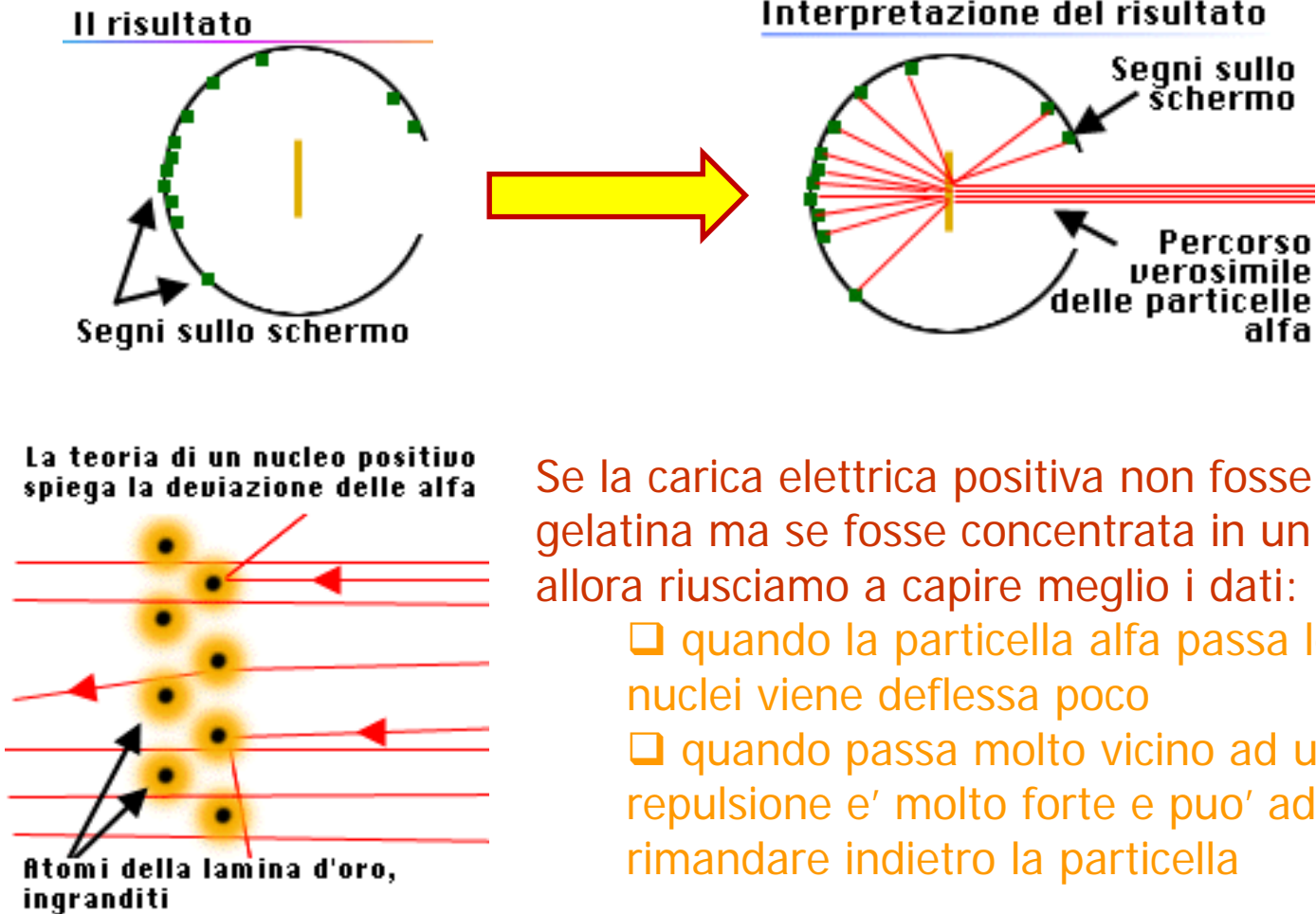
Con grande sorpresa di Rutherford stesso si vedevano particelle alfa poco deflesse (ok) ma si notavano particelle alfa emesse all'indietro!!



Non vi e' modo di spiegare i risultati sperimentali di Rutherford con il modello a 'gelatina' : il modello NON e' valido e deve essere rigettato

# L'esperimento di Rutherford

Come si interpreta quindi il risultato sperimentale? Riusciamo a costruire un modello adeguato?

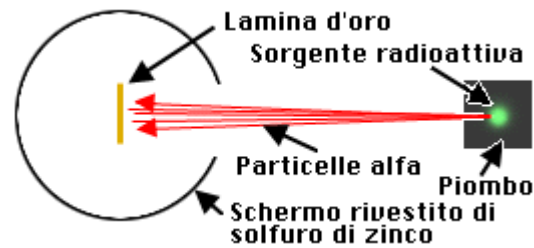


Se la carica elettrica positiva non fosse una gelatina ma se fosse concentrata in un nucleo allora riusciamo a capire meglio i dati:

- quando la particella alfa passa lontano dai nuclei viene deflessa poco
- quando passa molto vicino ad un nucleo la repulsione e' molto forte e puo' addirittura rimandare indietro la particella

## Il metodo scientifico

- ❑ Formulare un'ipotesi (teoria)
- ❑ Costruire un esperimento per mettere alla prova l'ipotesi
- ❑ Analizzare i dati per tentare di confutare la teoria



## La procedura sperimentale

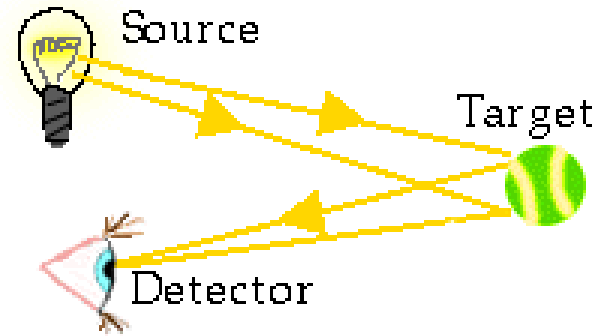
- ❑ Una sonda (la particella alfa)
- ❑ Un bersaglio (la lamina d'oro)
- ❑ Un rivelatore (lo schermo di solfuro di zinco)

Lo schema seguito da Rutherford nel suo esperimento e' (pur con numerose varianti) quello che viene usato ancora oggi nella fisica delle particelle elementari

## Osservare l'infinitamente piccolo : estendiamo il concetto di visione!

---

Lo schema che abbiamo appena illustrato (sorgente, bersaglio e rivelatore) non e' tanto diverso da un meccanismo che conosciamo bene, quello della visione di un oggetto

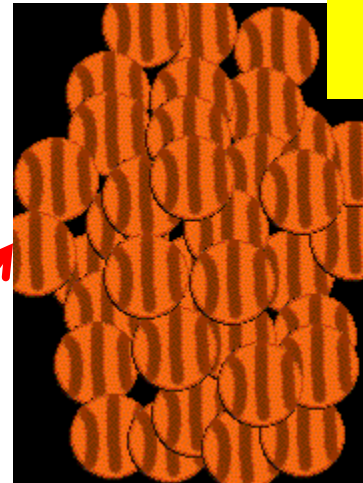
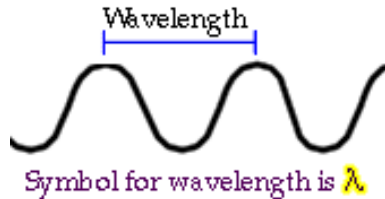


- ❑ Una sorgente emette luce : ora sappiamo che la luce e' in realta' costituita da 'quanti' detti fotoni vere e proprie particelle di luce.
- ❑ I fotoni emessi dalla sorgente di luce colpiscono il bersaglio (la palla da tennis) : alcuni vengono assorbiti, altri riflessi. Questi ultimi portano informazioni sull'oggetto
- ❑ Il nostro occhio riceve una parte dei fotoni che hanno colpito il bersaglio. Il cervello analizza i dati e costruisce l'immagine della palla da tennis.

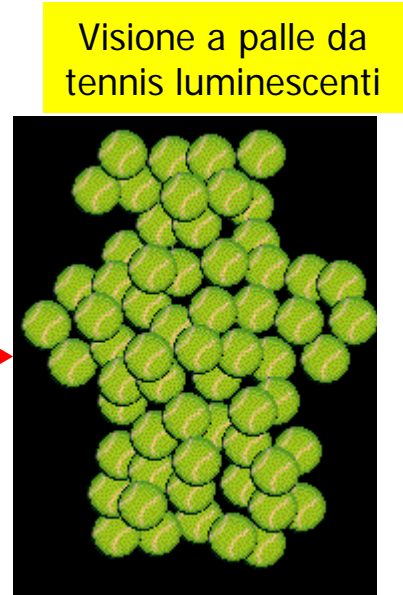
Un meccanismo di visione basato su onde sonore (pipistrelli) e' perfettamente equivalente da questo punto di vista...

# Osservare l'infinitamente piccolo

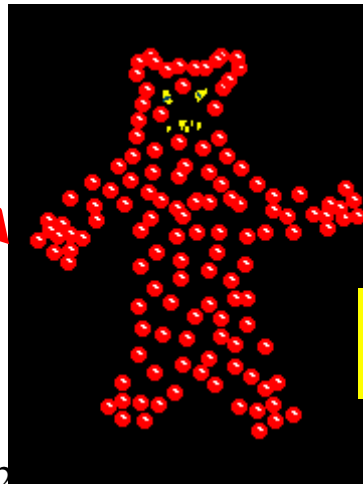
La qualità dell'immagine che si ottiene dipende dal tipo di 'luce' che si utilizza (tecnicamente la lunghezza d'onda) :



Visione a palle da basket luminescenti



Visione a palle da tennis luminescenti



Visione a sassolini luminescenti

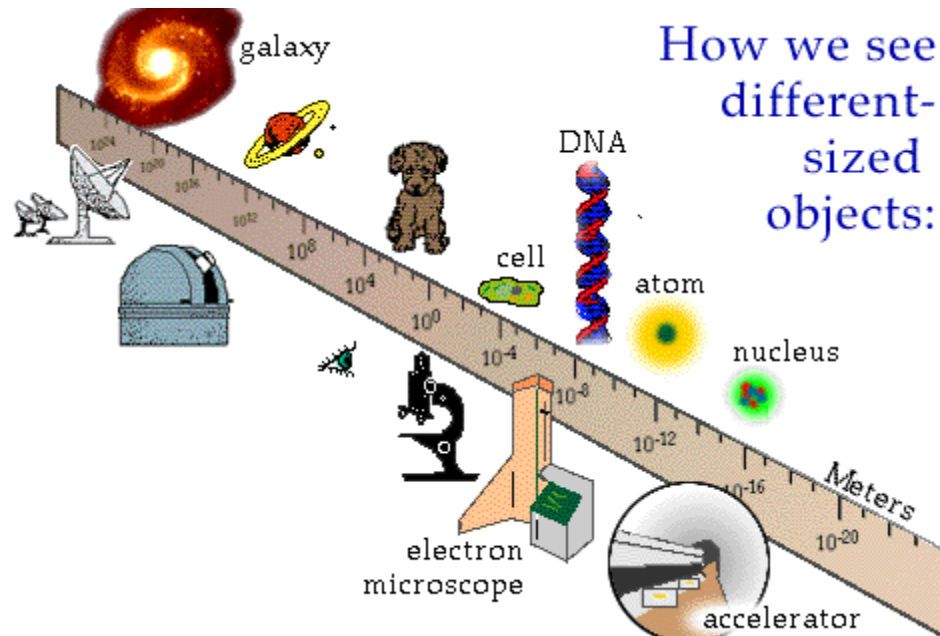
I nostri occhi (rivelatori) possono percepire la luce di lunghezza d'onda di  $\sim 500$  nm, piu' che sufficiente! Ma che fare per 'vedere' al di la' di questo limite??



# Osservare l'infinitamente piccolo

Piu' piccola e' la 'sonda' che spariamo sul bersagli, piu' precise sono le informazioni che riusciamo ad ottenere sul bersaglio stesso.

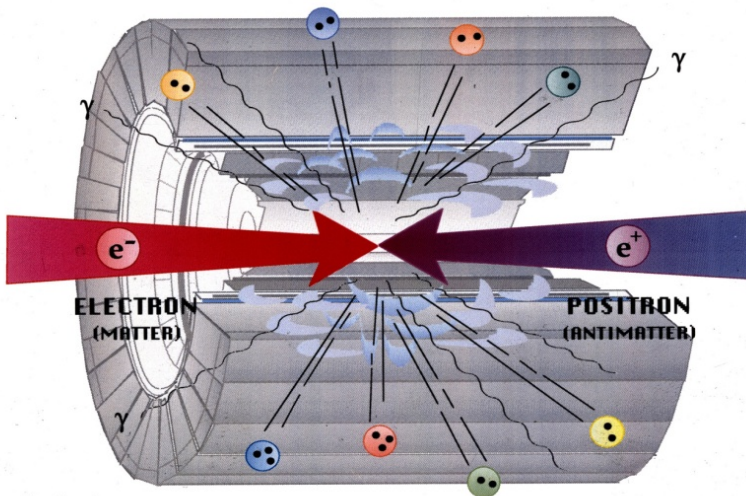
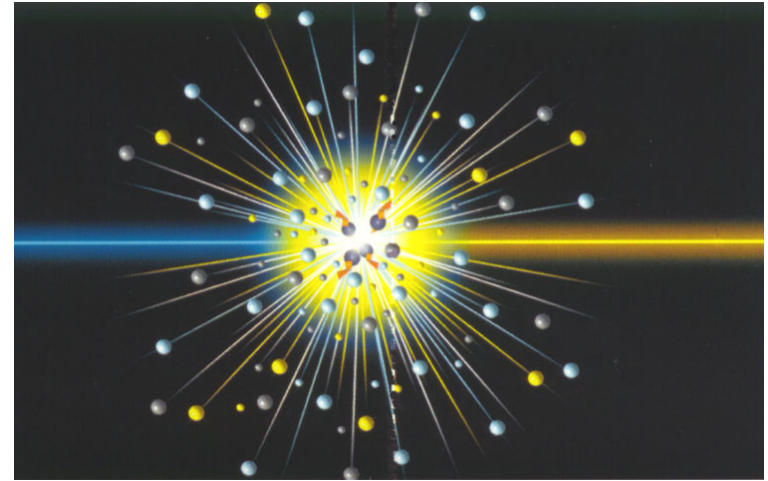
- ❑ quando le distanze che vogliamo esplorare sono molto piccole (dalle dimensioni atomiche in avanti) la luce non e' sufficiente (lunghezza d'onda troppo lunga..)
- ❑ Ogni particella ha un comportamento ondulatorio (come il fotone) : maggiore e' la sua energia e minore e' la sua lunghezza d'onda
  - ❑ Accelerare le particelle significa creare sonde sempre piu' 'piccole' in grado di fornire informazioni su scale di distanze sempre minori



# La creazione di nuove particelle

Da Einstein in poi massa ed energia sono due concetti strettamente legati: facendo scontrare tra loro due fasci di particelle possiamo produrre di nuove

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$$



Eliane Omursal

Il modo più efficiente per trasformare tutta l'energia in nuove particelle è quello di realizzare un urto frontale. Si possono creare, oltre gli elettroni e antielettroni, altre coppie di particelle

- antiparticelle
- ad esempio quark antiquark

# Come funziona un acceleratore?

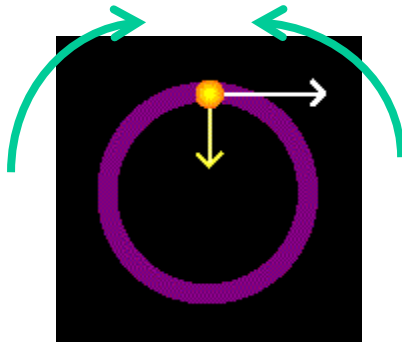
---

- ❑ Accelerazione : le particelle vengono accelerate (incrementando la loro energia cinetica) utilizzando campi elettrici oscillanti
  - ❑ Acceleratori lineari : due (piu' o meno) lunghi bracci costituiti da una sequenza di cavit  acceleranti



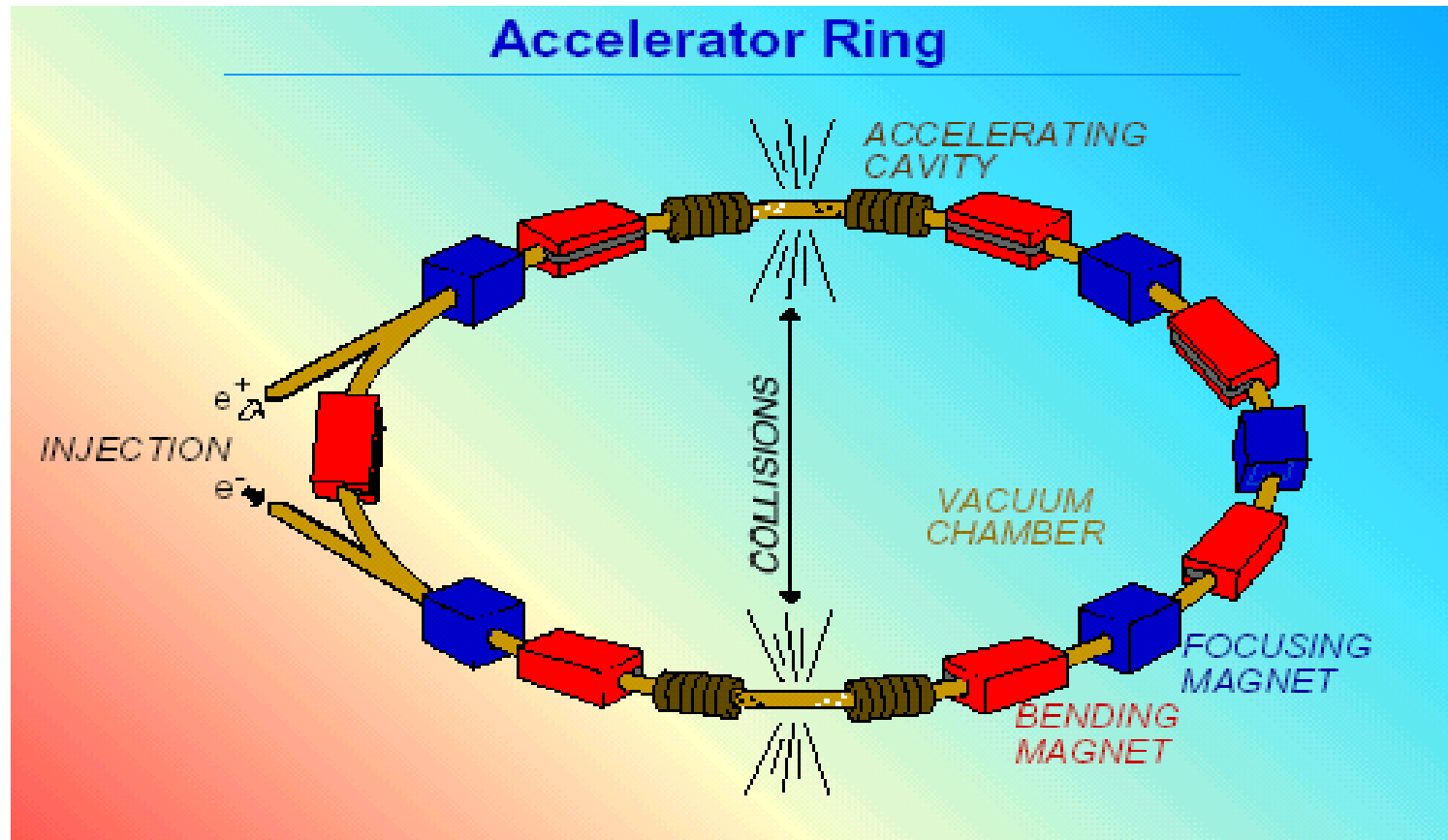
E' la struttura piu' semplice. Unico problema: le particelle una volta fatte scontrare sono inservibili

- ❑ Acceleratori circolari : sequenza di cavit  acceleratrici intervallate da magneti di curvatura per mantenere l'orbita



La struttura e' piu' complicata perche' ho bisogno di potenti magneti per mantenere in orbita le particelle. Inoltre le particelle irradiano (->perdono) energia quando sono curvate. Ma posso far scontrare le stesse particelle un numero enorme di volte!

# Come funziona un acceleratore?



Curvatura

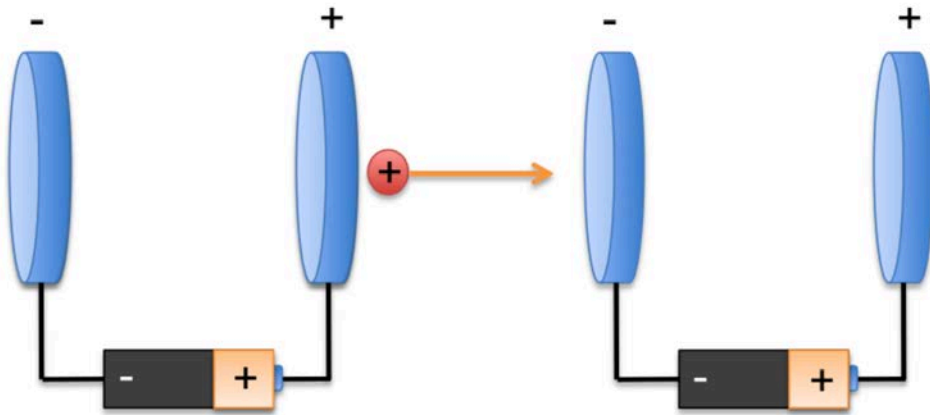
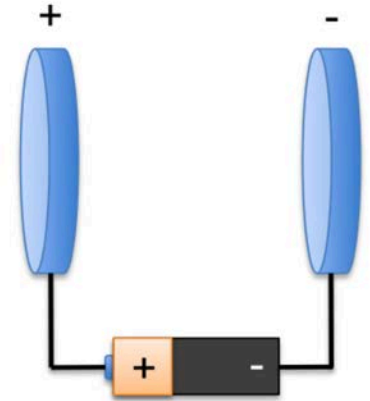
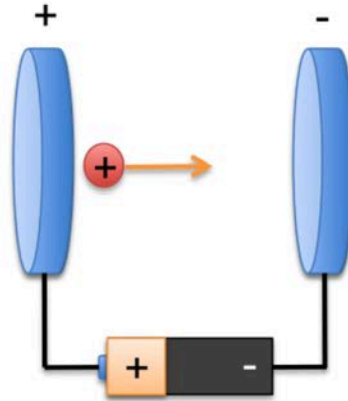
Magneti superconduttori

Accelerazione

Cavità a radiofrequenza

## Come funziona un acceleratore?

Cerchiamo di accelerare particelle cariche : ogni particella deve trovare il campo con la polarita' giusta !



## Come le curviamo le particelle ?

Per studiare la struttura della materia a scale sempre piu' piccole abbiamo bisogno di macchine che possano fornire sempre piu' energia. Parallelamente per mantenere in orbita i fasci sono necessari magneti sempre piu' potenti che non sono facili da realizzare!

❑ ad LHC piu' di 1000 magneti superconduttori che generano un campo da 8 T!!

Aumentando il raggio di curvatura il campo magnetico richiesto e' minore : con una circonferenza di 27 Km possiamo arrivare a 7+7 TeV nel centro di massa

$$p(\text{TeV}) = 0.3B(\text{Tesla})R(\text{Km})$$

## Quante collisioni?

Gli urti violenti in cui si possono formare nuove particelle sono molto rari: possono volerci milioni di scontri 'a vuoto' prima di ottenere qualcosa di interessante. Per questo motivo i fasci devono essere intensi, concentrati e le collisioni devono essere frequenti!

---

## The LHC experimental conditions

□ Just a few remarks on luminosity : for a process with a given cross section  $\sigma_{\text{int}}$  the rate and the number of events can be expressed as a function of the luminosity  $L$

$$R = L\sigma_{\text{int}} \quad N_{\text{ev}} = \sigma_{\text{int}} \int_t L$$

□ The luminosity depends on the features of the machine :

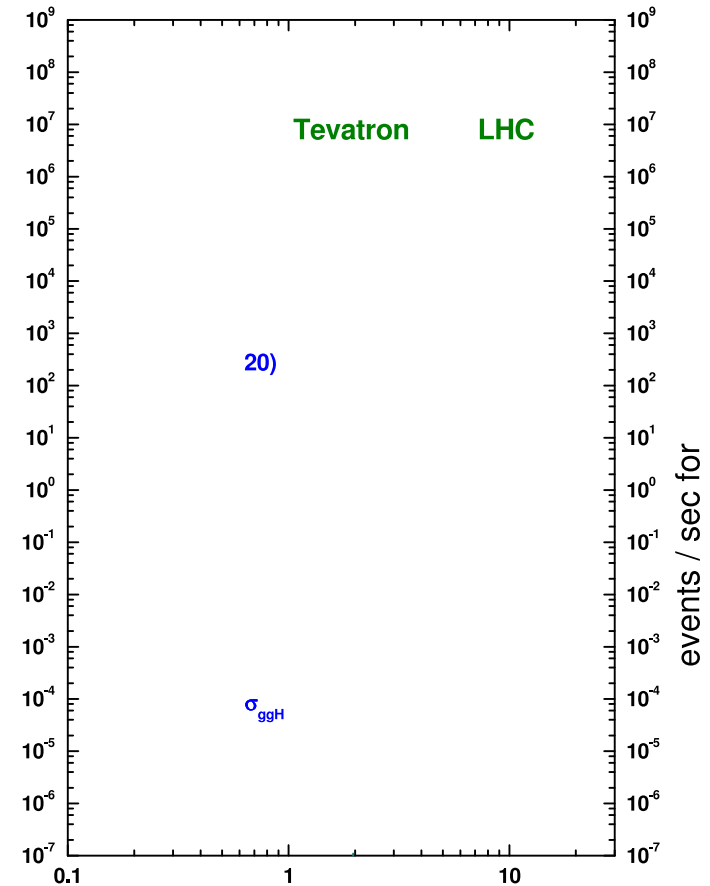
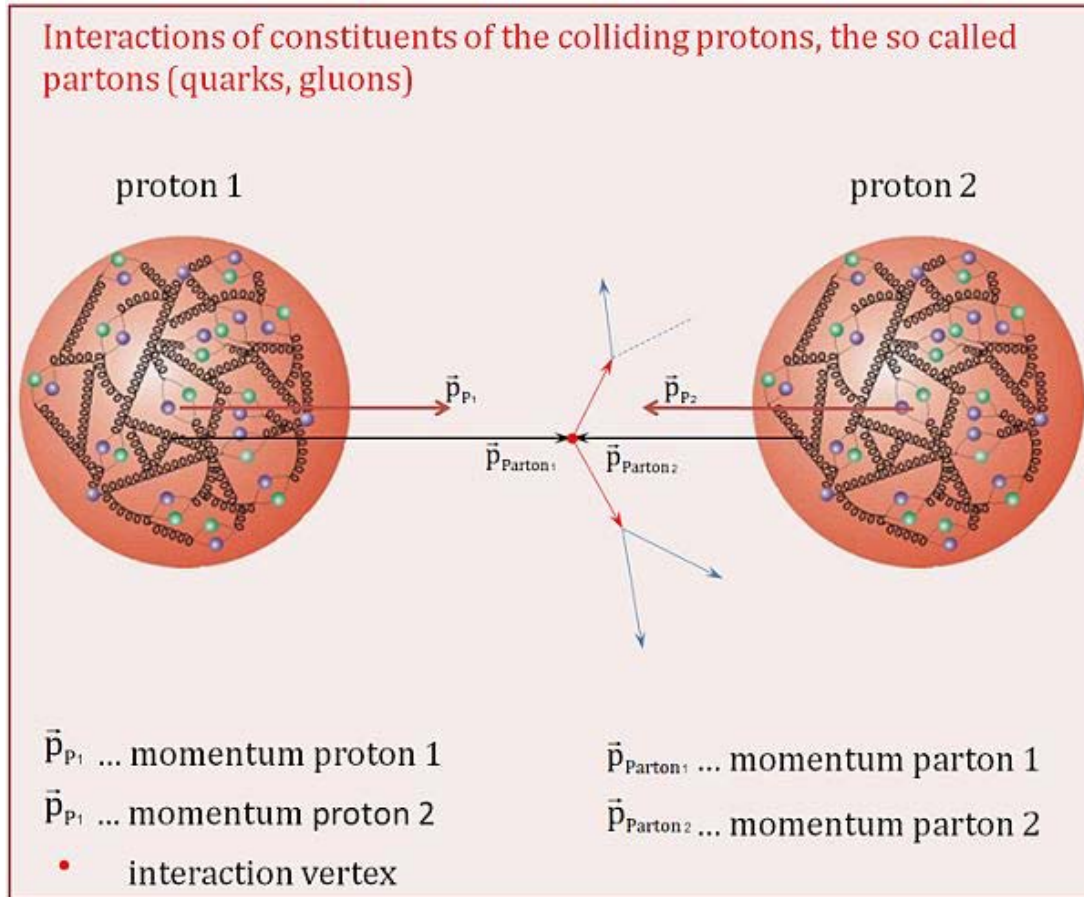
$$L = f \frac{n_1 n_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

where  $f$  is the frequency,  $n_1$  and  $n_2$  the number of particles per bunch,  $\sigma_x$  and  $\sigma_y$  the size of the beam in the transverse plane

□ The best available technology allows to squeeze the bunches to a size of  $\sim 17 \mu\text{m}$  with bunches of up to  $10^{11}$  protons every 25 ns: can observe many interesting processes

- Higgs ( $120 \text{ GeV}/c^2$ ): 0.1 Hz
- $t\bar{t}$  production: 10 Hz
- $W \rightarrow l \nu$ :  $10^2$  Hz

# E' solo una questione di scala :

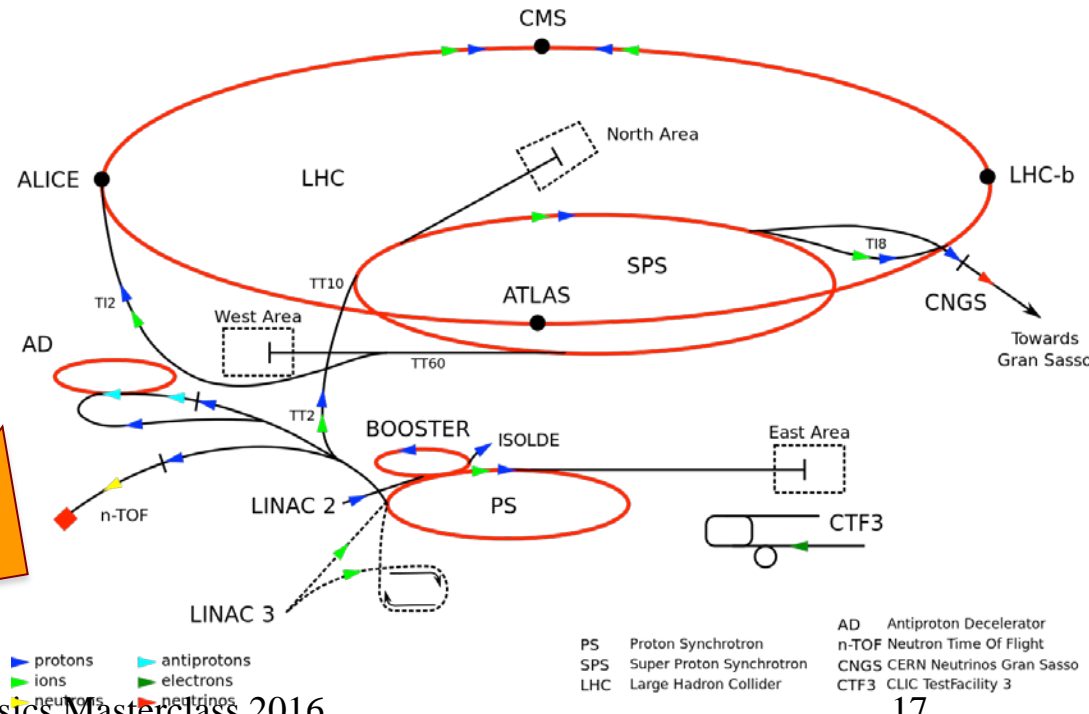




# Come funziona un acceleratore?

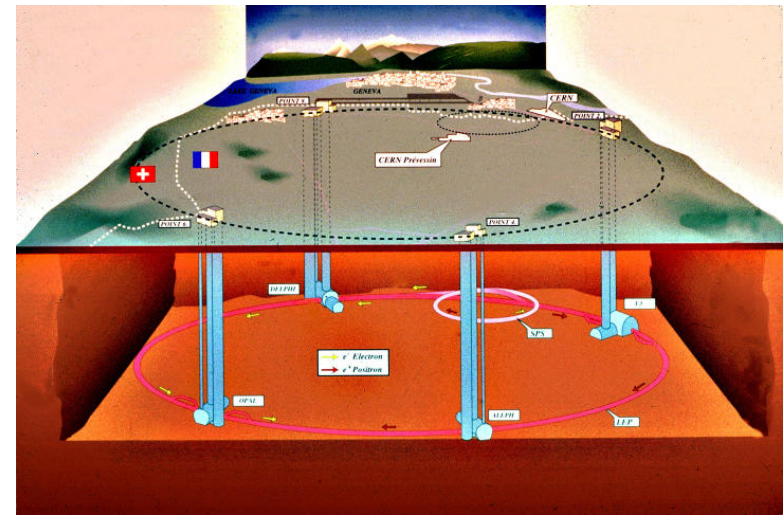


Si parte da una semplice bottiglietta di idrogeno in forma di gas



# La nuova frontiera: il Large Hadron Collider

LHC accelera due fasci di protoni che ruotano in due direzioni opposte e sono fatti collidere in quattro punti dove sono posizionati dei rivelatori. 27 km di circonferenza in un tunnel sotterraneo !



I protoni vengono raggruppati in pacchetti approssimativamente cilindrici di raggio pari a circa  $20 \mu\text{m}$  ( $1 \mu\text{m} = 1$  millesimo di millimetro). La macchina acceleratrice e' in grado di provocare collisioni tra pacchetti di protoni 40 milioni di volte al secondo!

**Perche' facciamo collidere le particelle?** Essenzialmente due motivi:

- studiare la loro struttura interna
- usare l'energia disponibile nella collisione per creare nuove particelle

Gli acceleratori sono le macchine con cui produciamo nuove particelle

I rivelatori sono le macchine che ci permettono di 'osservare' (nel senso che poi vedremo) le particelle

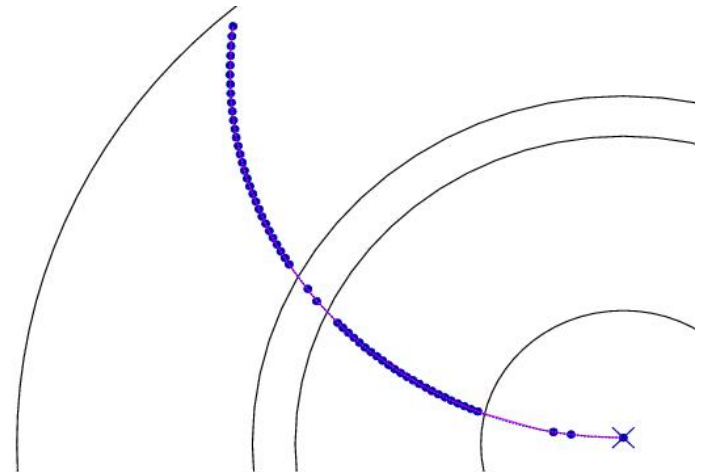


- ❑ Il concetto base e' che una particella attraversando un materiale lascia una traccia del suo passaggio provocando qualche fenomeno nel mezzo che ha attraversato
- ❑ Un rivelatore e' essenzialmente un blocco materiale corredato di un apposito sistema di lettura in grado di misurare l'effetto prodotto dal passaggio della particella
  - ❑ Esistono materiali particolari detti scintillatori nei quali il passaggio di una particella (segnale luminoso).
  - ❑ In altri materiali la particella ionizza il mezzo generando delle coppie elettroni – ione

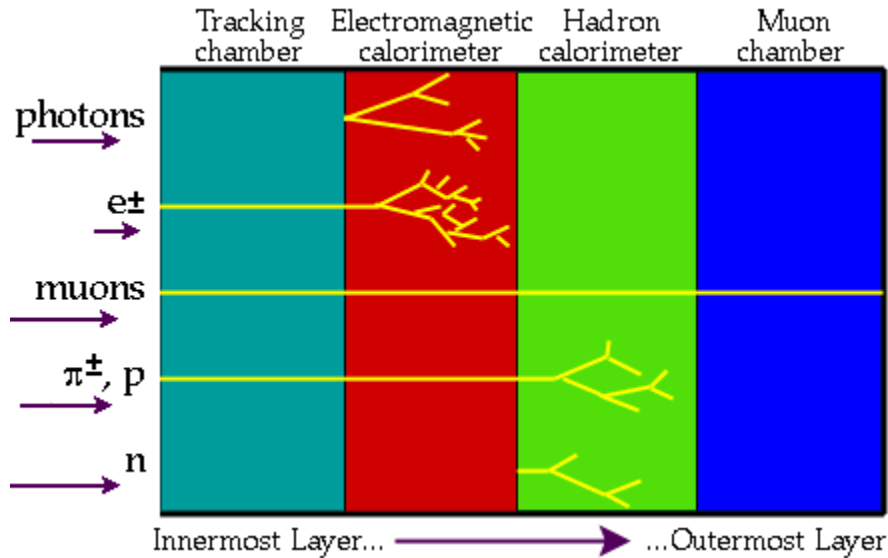
## Come osservare le particelle?

---

- ❑ Esempio 1: posso decidere di bloccare completamente una particella. Un calorimetro e' un oggetto che misura l'energia di una particella per assorbimento totale.
  - ❑ Chiaramente l'effetto misurato deve essere legato in maniera nota alla grandezza che vogliamo misurare (l'energia nel caso del calorimetro)
- ❑ Esempio 2 : oppure posso decidere di osservare il passaggio della particella perturbandola il meno possibile. Un tracciatore ricostruisce il passaggio di una particella ( traccia ) cercando di non bloccarla !
  - ❑ Se mettiamo un campo magnetico e misuriamo la curvatura possiamo determinare il momento della particella  $p = 0.3 \text{ B(T) R(m)}$
  - ❑ Ma anche la sua carica per esempio!



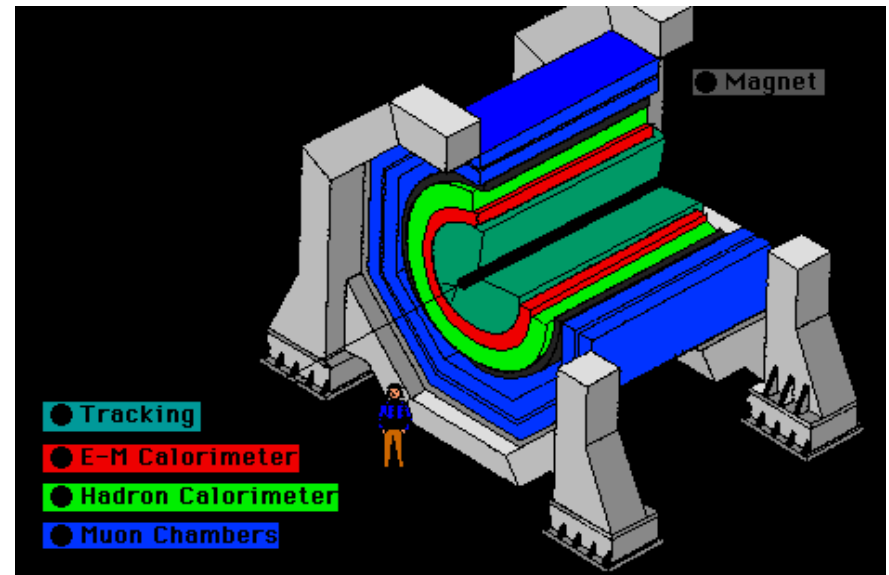
# I rivelatori di particelle agli acceleratori

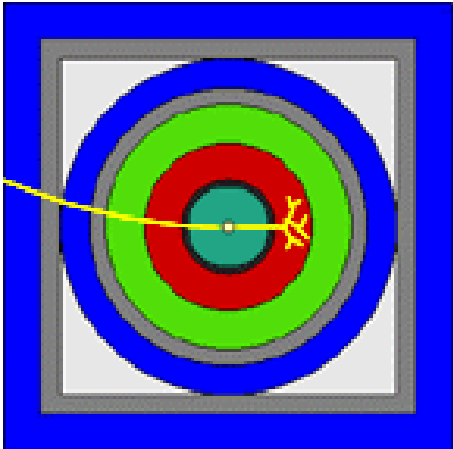
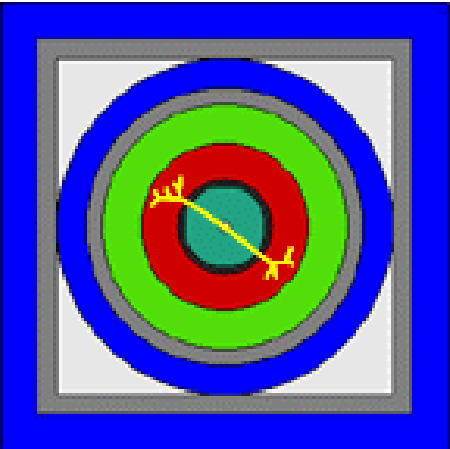


- ❑ Diverse particelle si comportano diversamente attraversando materiali diversi
- ❑ Costruire rivelatori diversi ottimizzati per ogni particella,

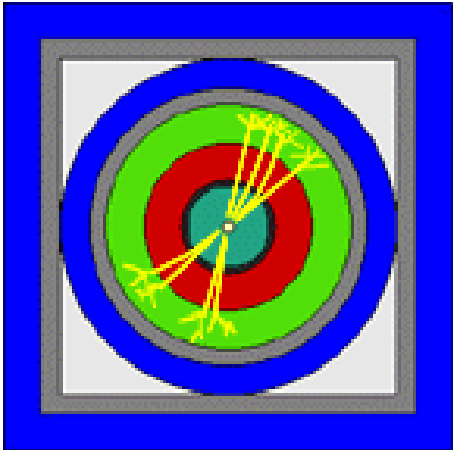
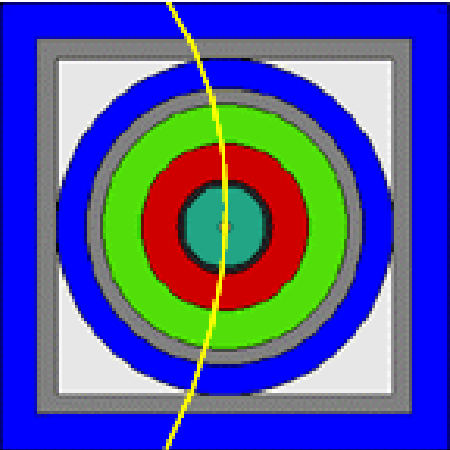
❑ Costruire rivelatori 'multi-purpose' con struttura a 'cipolla'

❑ Combinare tutte le informazioni da sotto-rivelatori diversi per capire di che particella si tratta!



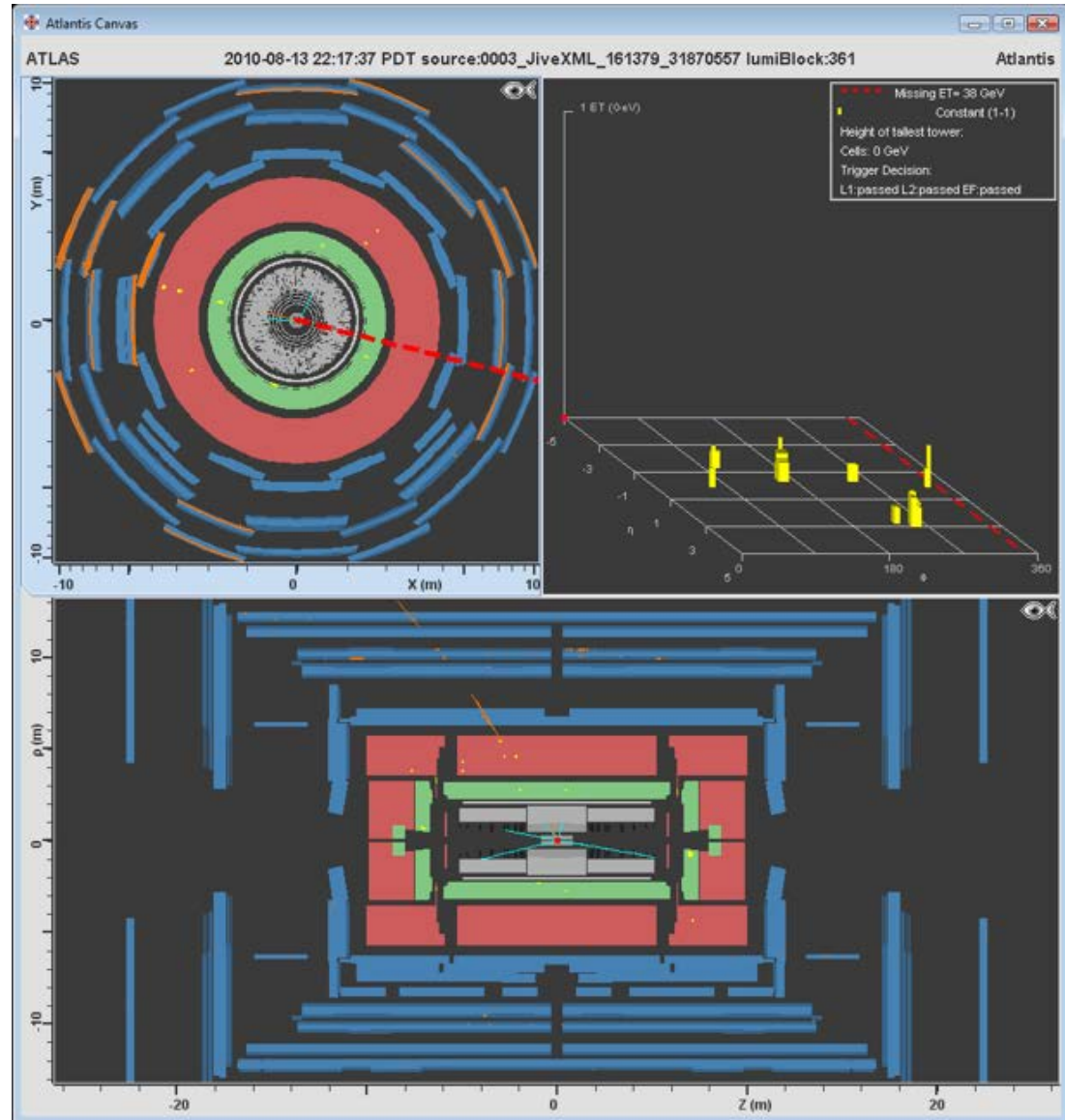


?



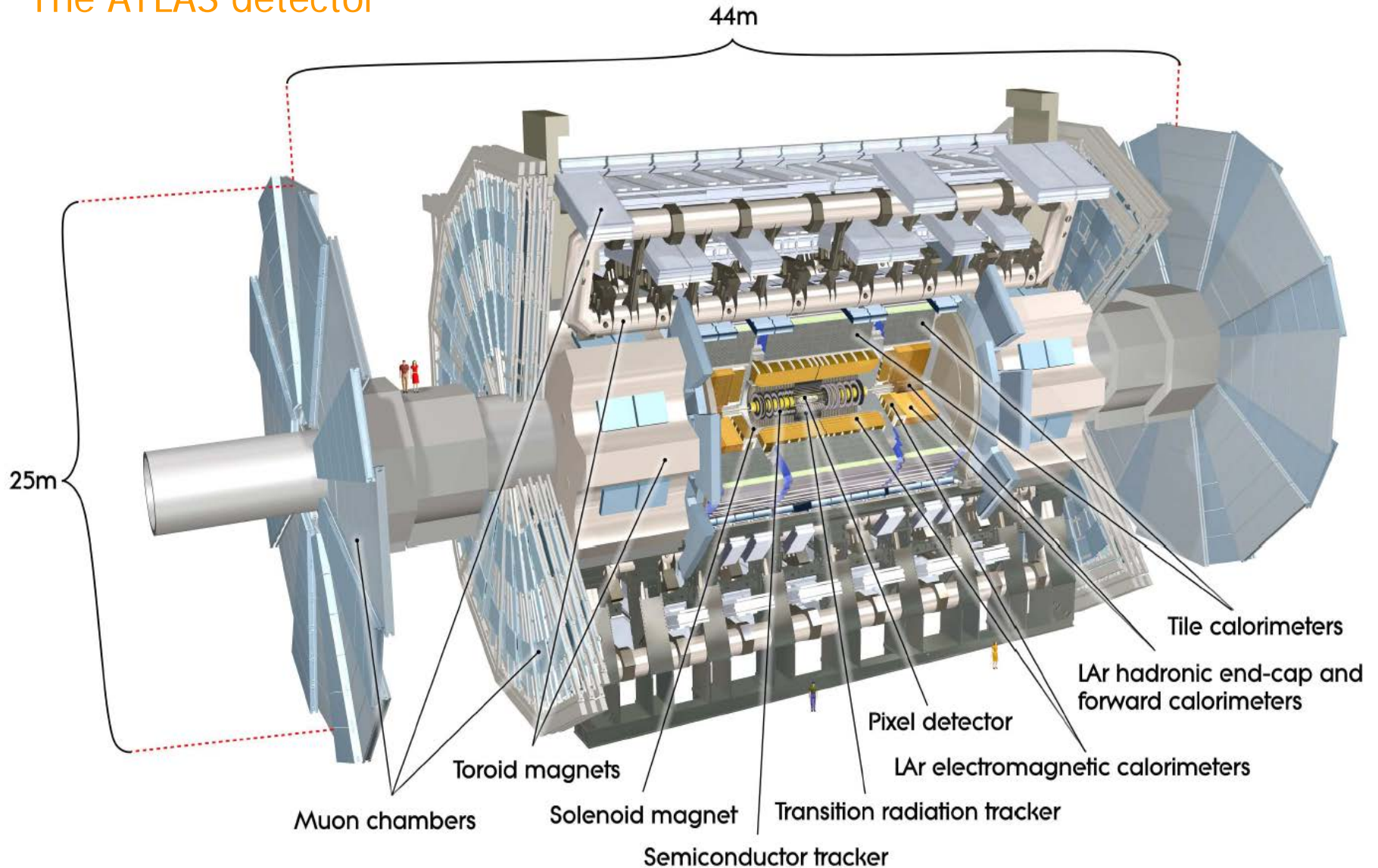
# Anche la mancanza di energia ci dice qualcosa....

- ❑ In una collisione frontale si deve conservare il momento ( la parte trasversa se collidiamo protoni )
- ❑ Ci sono particelle del modello standard ( neutrini ) che quasi non interagiscono con il materiale, solo interazione debole :
- ❑ Sommo vettorialmente tutta l'energia osservata e la parte trasversa si deve conservare
- ❑ Se manca dico che una particella si e' portata via la parte mancante
- ❑ Facciamo rivelatori ermetici!
- ❑ Materia oscura potrebbe 'vedersi' in questo modo



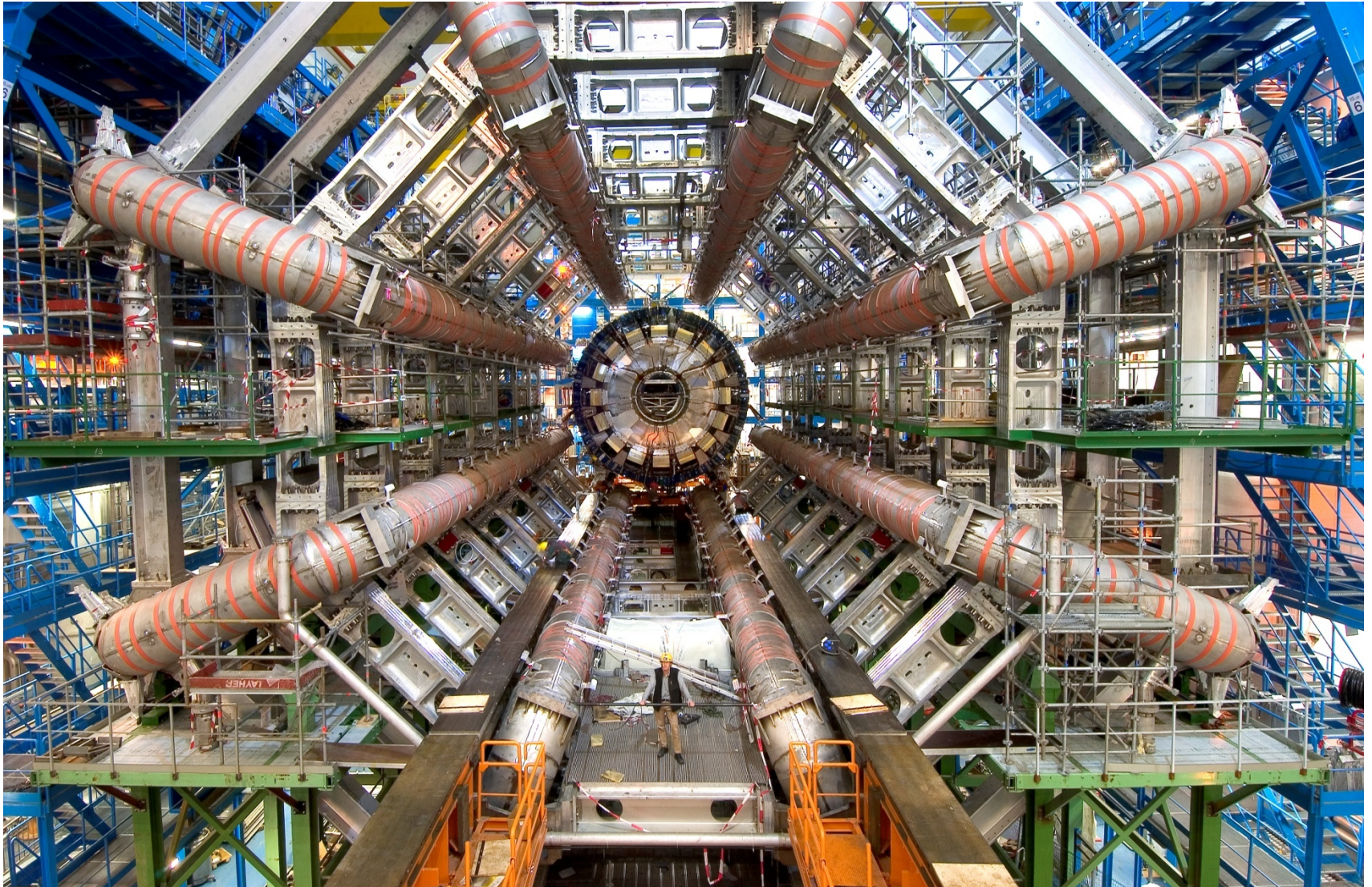


# The ATLAS detector



## Il rivelatore ATLAS

---



Febbraio 2016

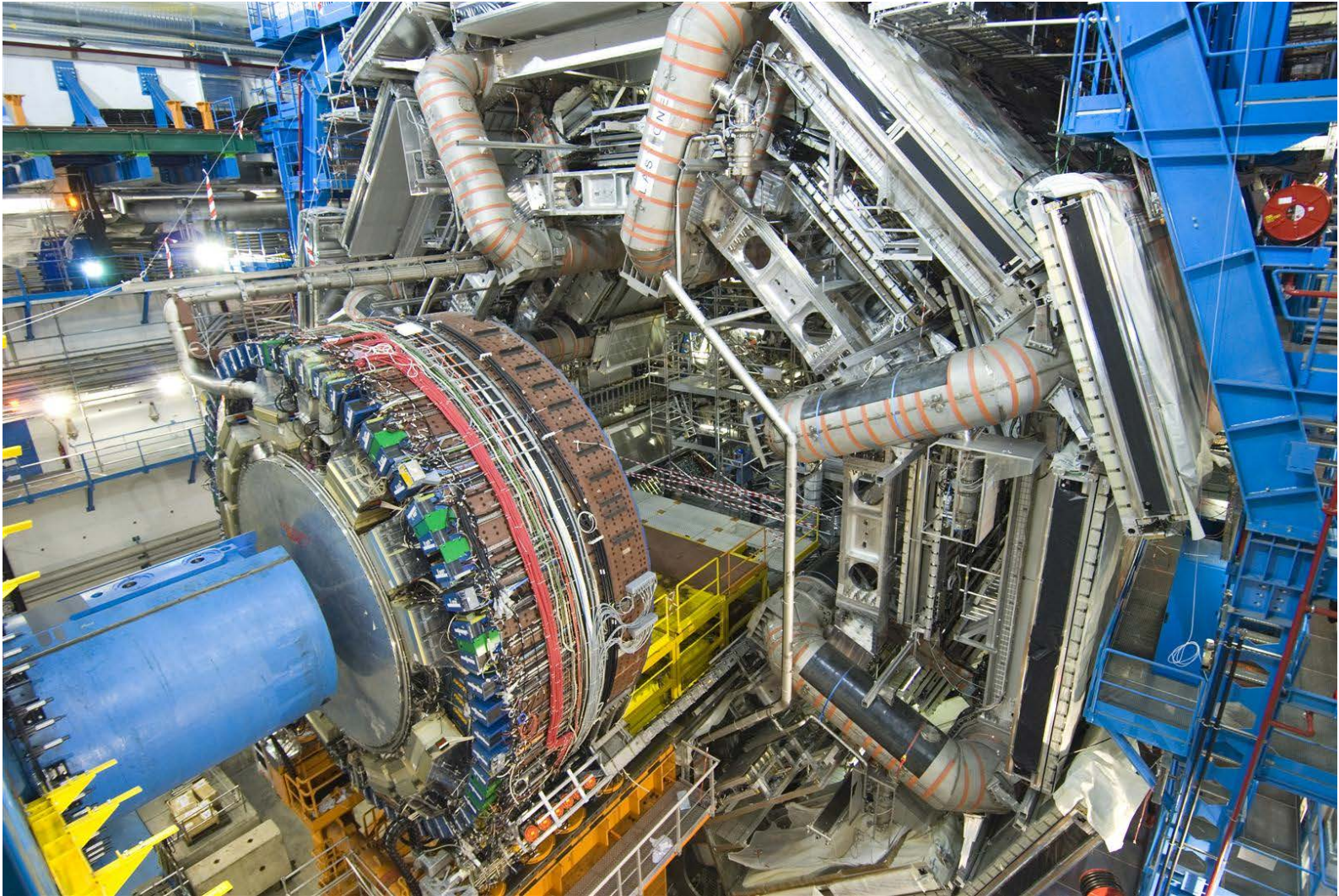
Physics Masterclass 2016

26

---

## Il rivelatore ATLAS

---



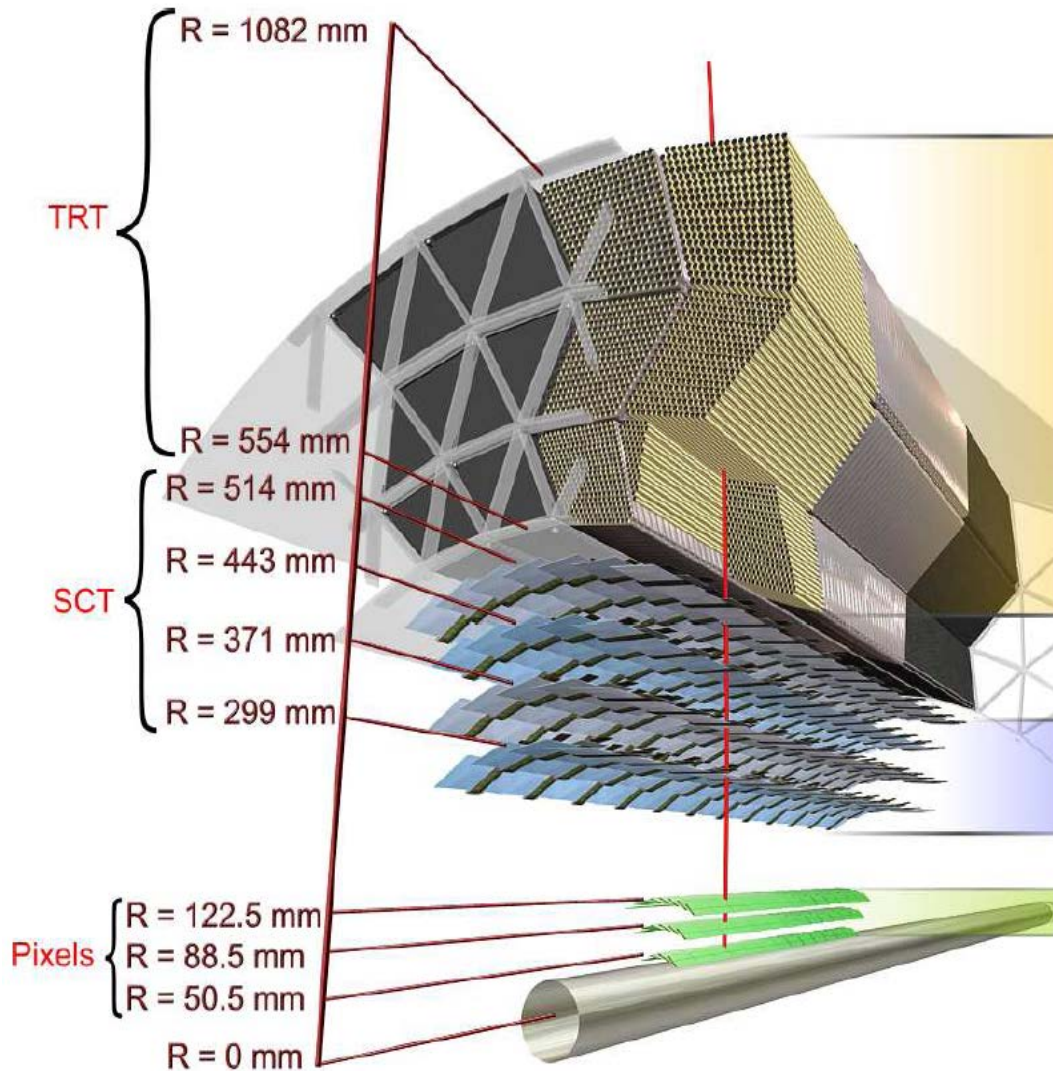
Febbraio 2016

Physics Masterclass 2016

27

---

## Inner Detector ( quello che non vuole disturbare )



❑ Inner Detector (ID) is immersed in a 2 T solenoidal B-field

❑ Transition Radiation Tracker

- ❑ 350k channel tracker
- ❑ 4mm (diameter) straws
- ❑ TR detection:  $e/\pi^\pm$  discrimination
- ❑ 36 hits on track
- ❑  $130\mu\text{m}$  resolution

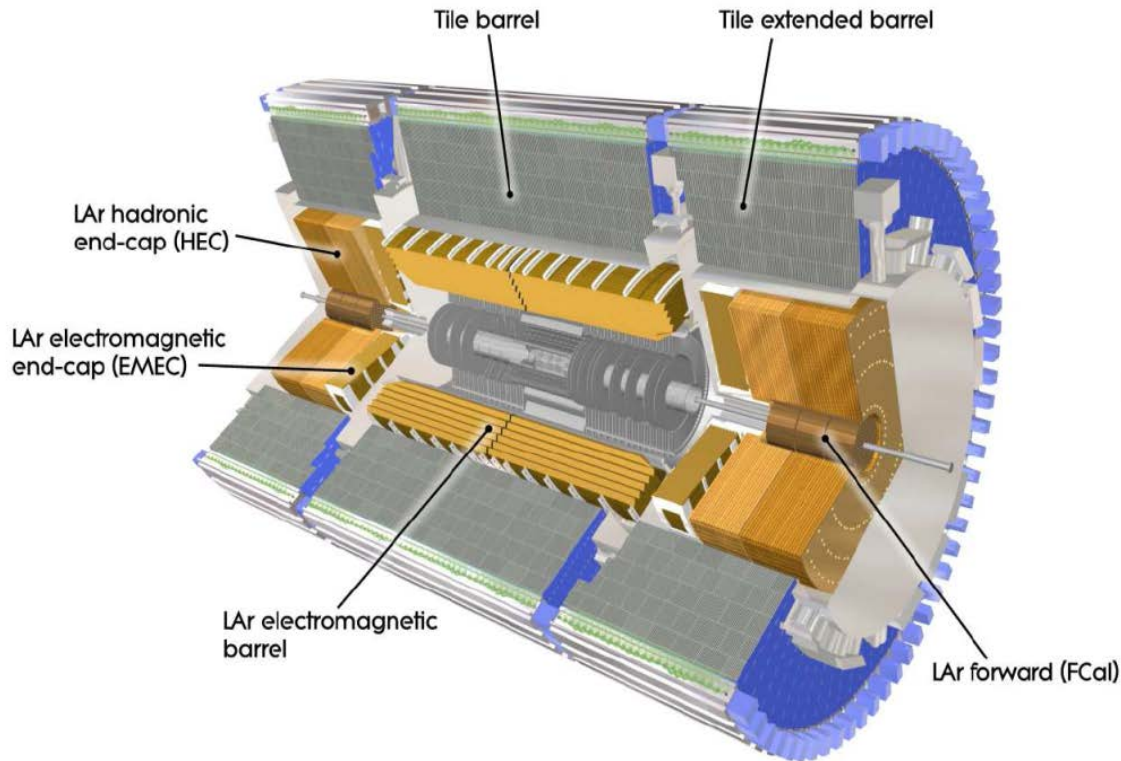
❑ Semi-Conductor Tracker

- ❑ 6.3M channels
- ❑ 4 cylinders, 8 hits/track
- ❑  $17\mu\text{m}$  resolution

❑ Pixel Tracker

- ❑ 80M channels, 3 layers
- ❑  $10\mu\text{m}$  resolution

## Calorimetry ( quelli che si pigliano tutto )



### Hadronic Calorimeter

- ❑ Fe-scintillator for  $|\eta| < 1.7$  :
  - ❑  $\sigma(E)/E = (50\%) / \sqrt{E} \oplus 3\%$
  - ❑ 0.1x0.1 typical granularity
  - ❑ Longitudinally segmented
- ❑ Cu-LAr for  $1.5 < |\eta| < 3.2$  :
  - ❑  $\sigma(E)/E = (50\%) / \sqrt{E} \oplus 6\%$
  - ❑ 0.1x0.1 typical granularity
  - ❑ Longitudinally segmented

### Liquid Argon-Lead sampling EM calorimeter with an 'accordion' geometry :

- ❑ 3 longitudinal layers with cell of  $\Delta\eta \times \Delta\phi$ : (0.003-0.006)x0.1 (1<sup>st</sup>layer) ; 0.025x0.025 (2<sup>nd</sup>layer); 0.050x0.025 (3<sup>rd</sup>layer). Allow a calo-based measurement of electron/photon direction.
- ❑ Presampler for  $|\eta| < 1.8$   $\Delta\eta \times \Delta\phi \sim 0.025 \times 0.1$
- ❑  $\sigma(E)/E = (10-17\%) (\eta) / \sqrt{E} \text{ (GeV)} \oplus 0.7\%$
- ❑ angular resolution 50 mrad/  $\sqrt{E}$  : Z vertex resolution in H- $\rightarrow\gamma\gamma$  simulated events  $\sim 16$  mm

---

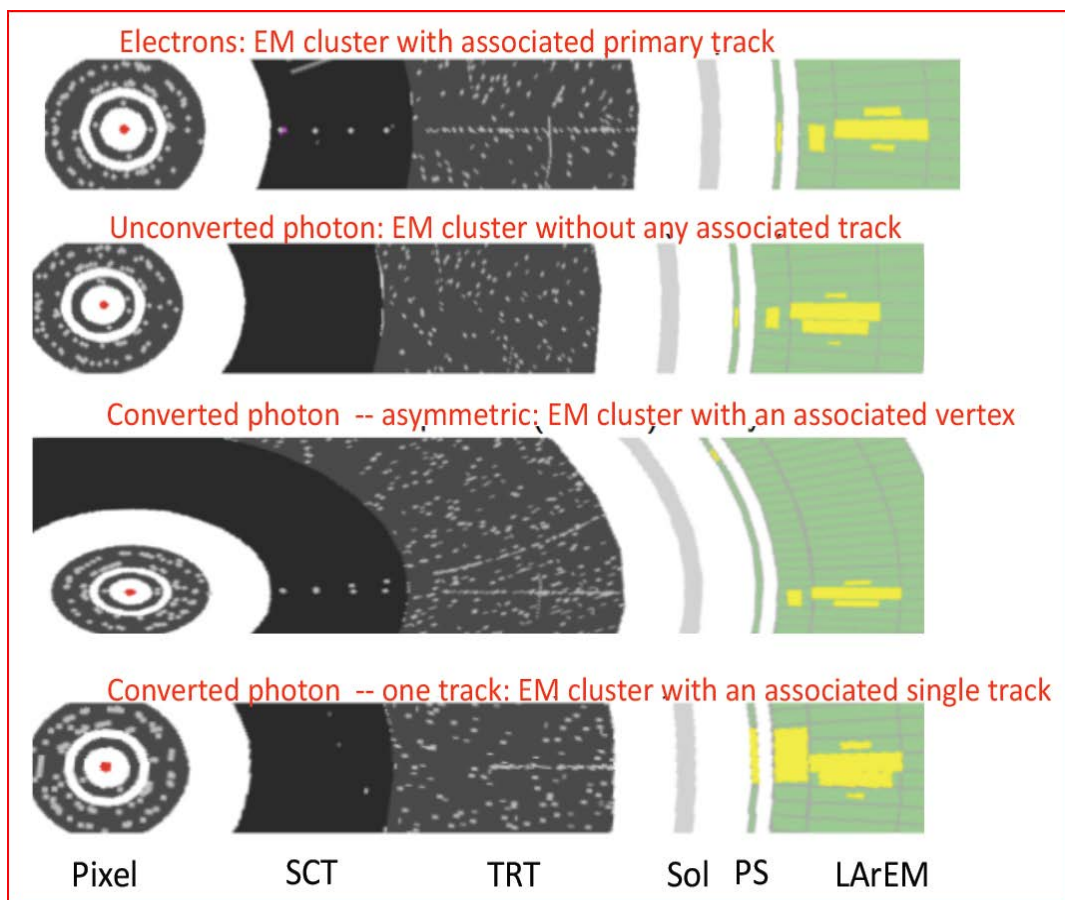
## Laurea sprint : tutto quello che serve sapere

Per ogni evento registrato leggiamo TUTTI I segnali da TUTTI I rivelatori:

- ❑ Segnali dall'inner detector : hits nel rivelatore, costruiamo le tracce. Particelle cariche, la curvatura ci dice il suo momento
- ❑ Segnali dai calorimetri : identifichiamo elettroni, fotoni e jets. Sia carichi sia neutri.
- ❑ Segnali dal muon spectrometer : hits nel rivelatore, costruiamo tracce dei muoni ( i soli che possono arrivare fino li )
- ❑ Se manca dell'energia trasversa allora c'era un neutrino o una particella sconosciuta

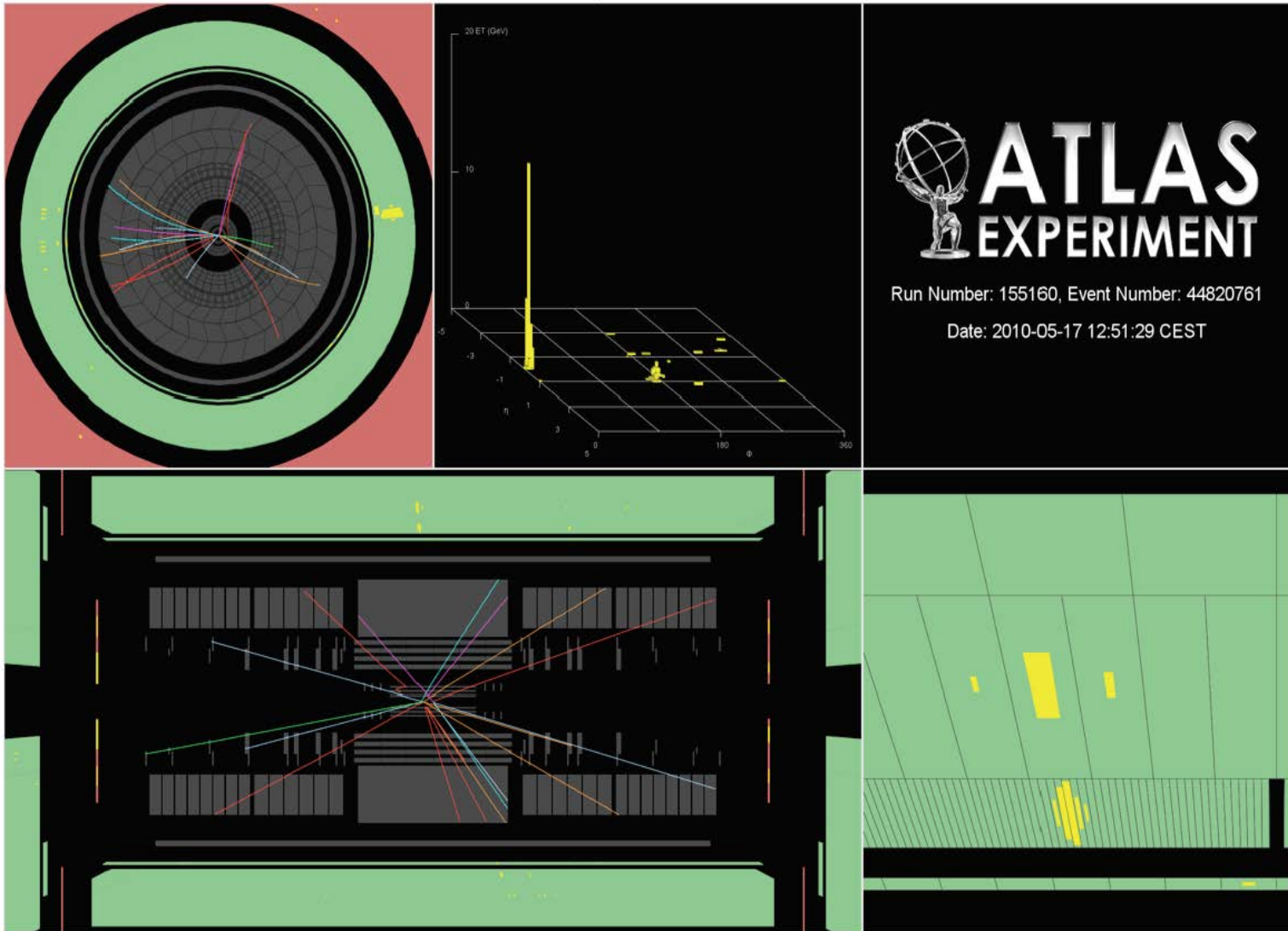
## Un esempio : ricostruzione di fotoni ed elettroni

Main ingredients are clusters in the EM calo and tracks/vertexes in the ID:



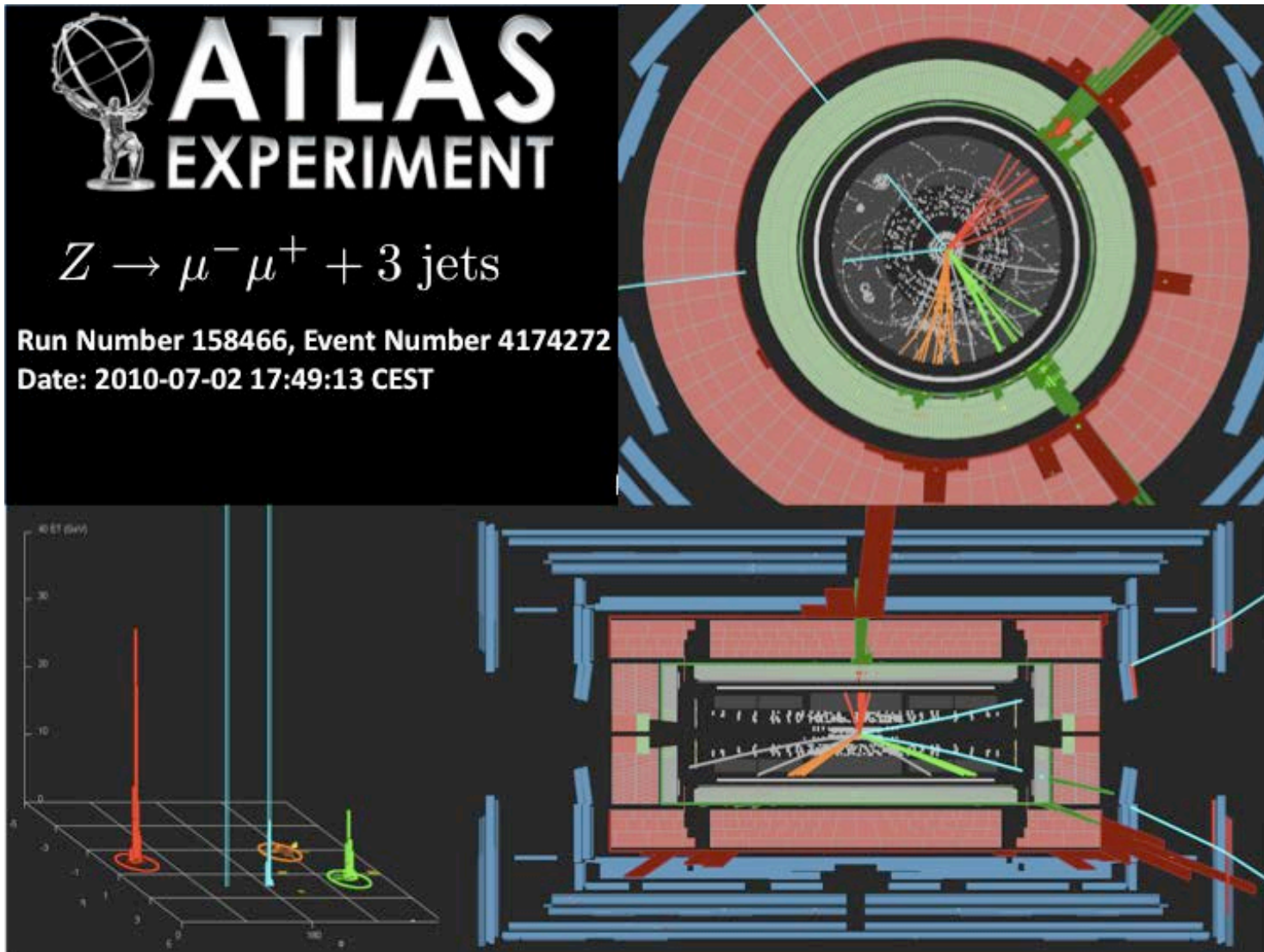
- ❑ An electron candidate is roughly a cluster in the EM calo with a track pointing to it
- ❑ A photon candidate is a cluster with no associated track
- ❑ But life is not always so easy...
- ❑ A photon can convert
  - ❑ you can see one cluster with one associated track coming from a secondary vertex
  - ❑ you can see one cluster with one single associated track (but with no hits in the pixels)
- ❑ An electrons can brems:
  - ❑ Track has to be followed precisely
- ❑ There's always a certain degree of ambiguity that can't be resolved

## A nice photon candidate

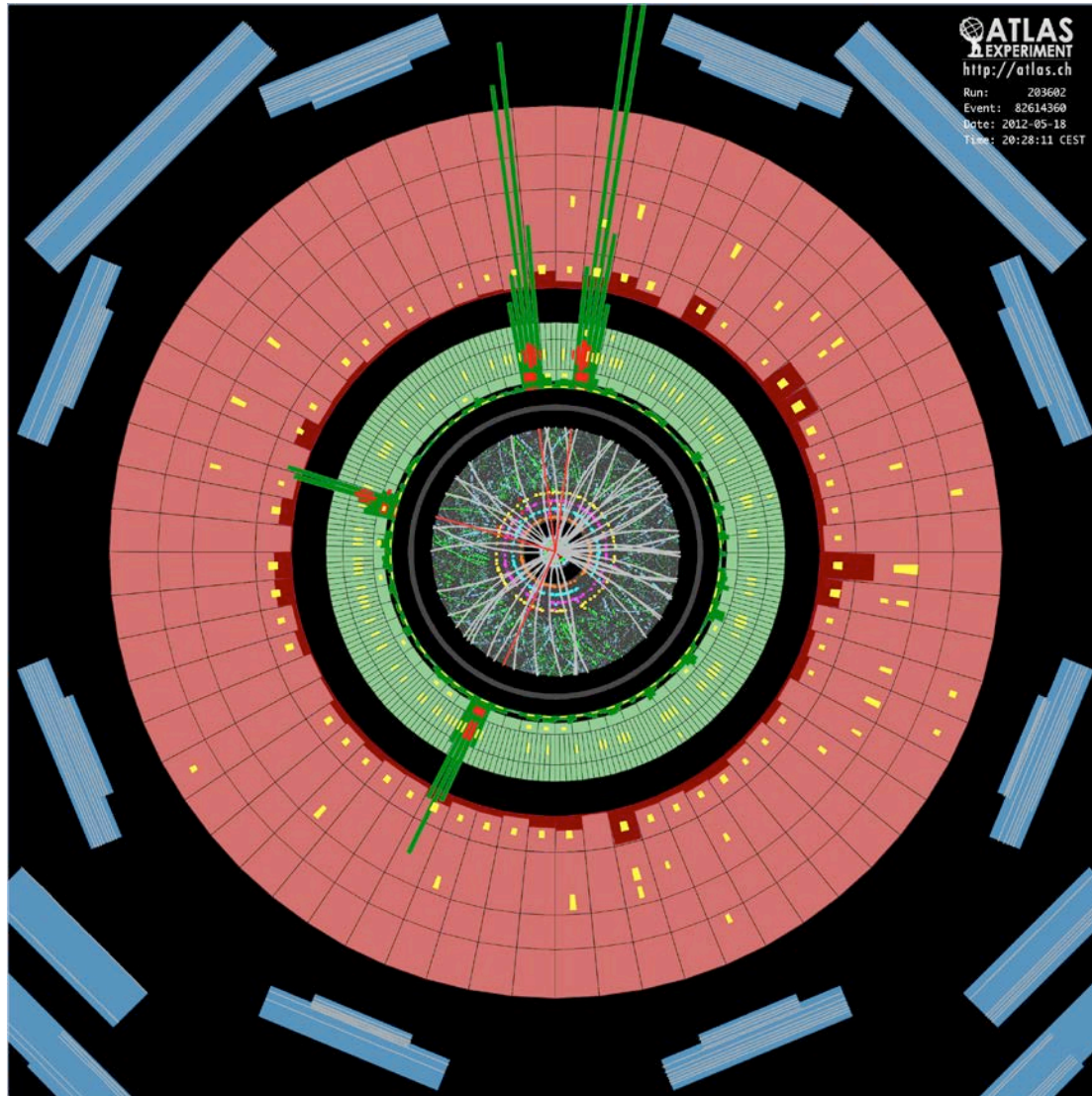




## A nice Z event



## A nice H to 4 e candidate



- Abbiamo già visto che nella relatività ristretta l'energia viene riscritta

$$E = \sqrt{(\vec{p} \cdot c)^2 + (m_0 \cdot c^2)^2}$$

- Da cui possiamo ricavare la massa a riposo  $m_0$

$$m_0 = \sqrt{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}}{c}\right)^2}$$

- La massa a riposo è un invariante relativistico, non dipende dal sistema di riferimento e può essere misurato nota energia e momento

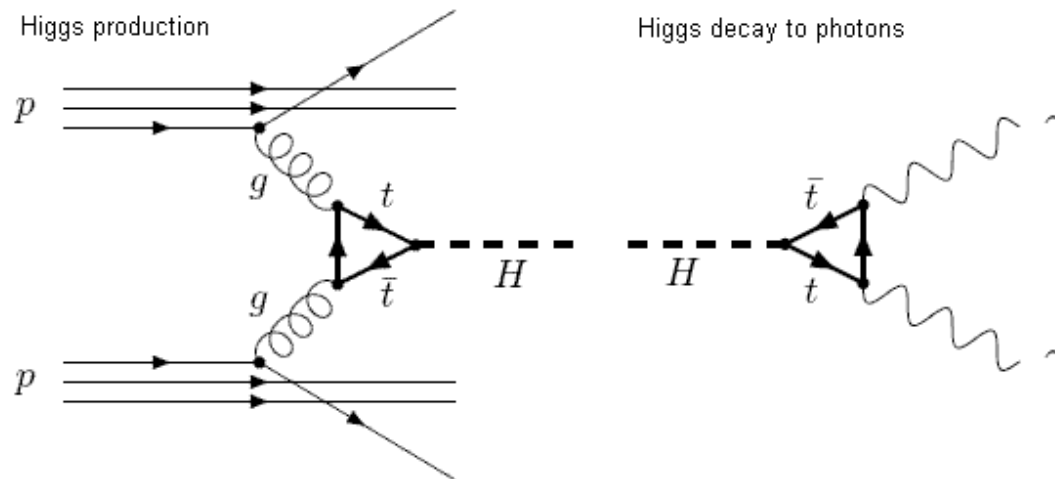
- Se ho un decadimento  $Z \rightarrow e^+ e^-$

$$m_0^{(Z)} = \sqrt{\left(\frac{(E_{e^-} + E_{e^+})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_{e^-} + \vec{p}_{e^+}}{c}\right)^2}$$

## Il problema del 'fondo' : perche' e' cosi' difficile scovare l'Higgs

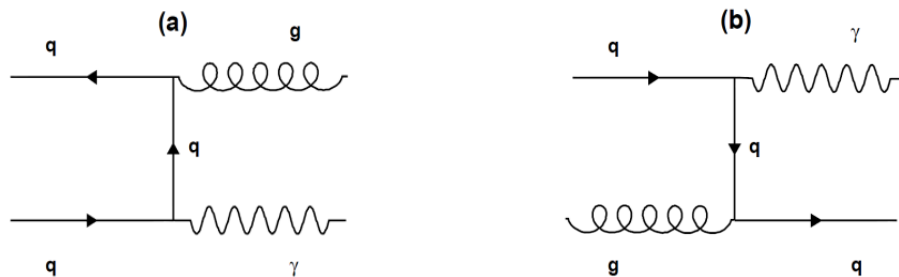
- ❑ Non solo il bosone di Higgs si manifesta con difficoltà : tende anche a mascherarsi da altro !
- ❑ Fondo : eventi che 'sembrano' il bosone ma non lo sono!

Supponiamo di cercare il decadimento di un bosone di Higgs in due fotoni:

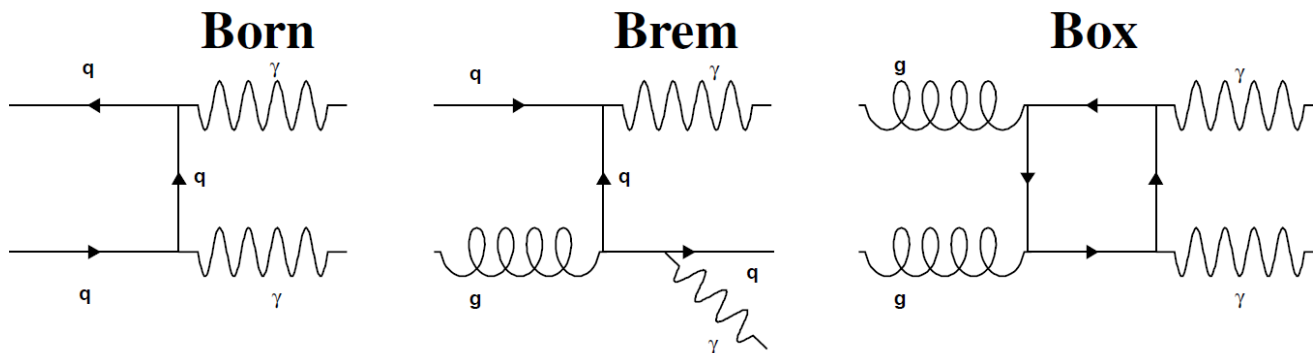


# Il problema del 'fondo' : perche' e' cosi' difficile scovare l'Higgs

- ❑ **Fondo riducibile** : eventi che NON sono due fotoni ( magari due jets ) ma che nel rivelatore 'sembrano' fotoni : dobbiamo progettare per bene i nostri rivelatori e analizzare bene i nostri dati !

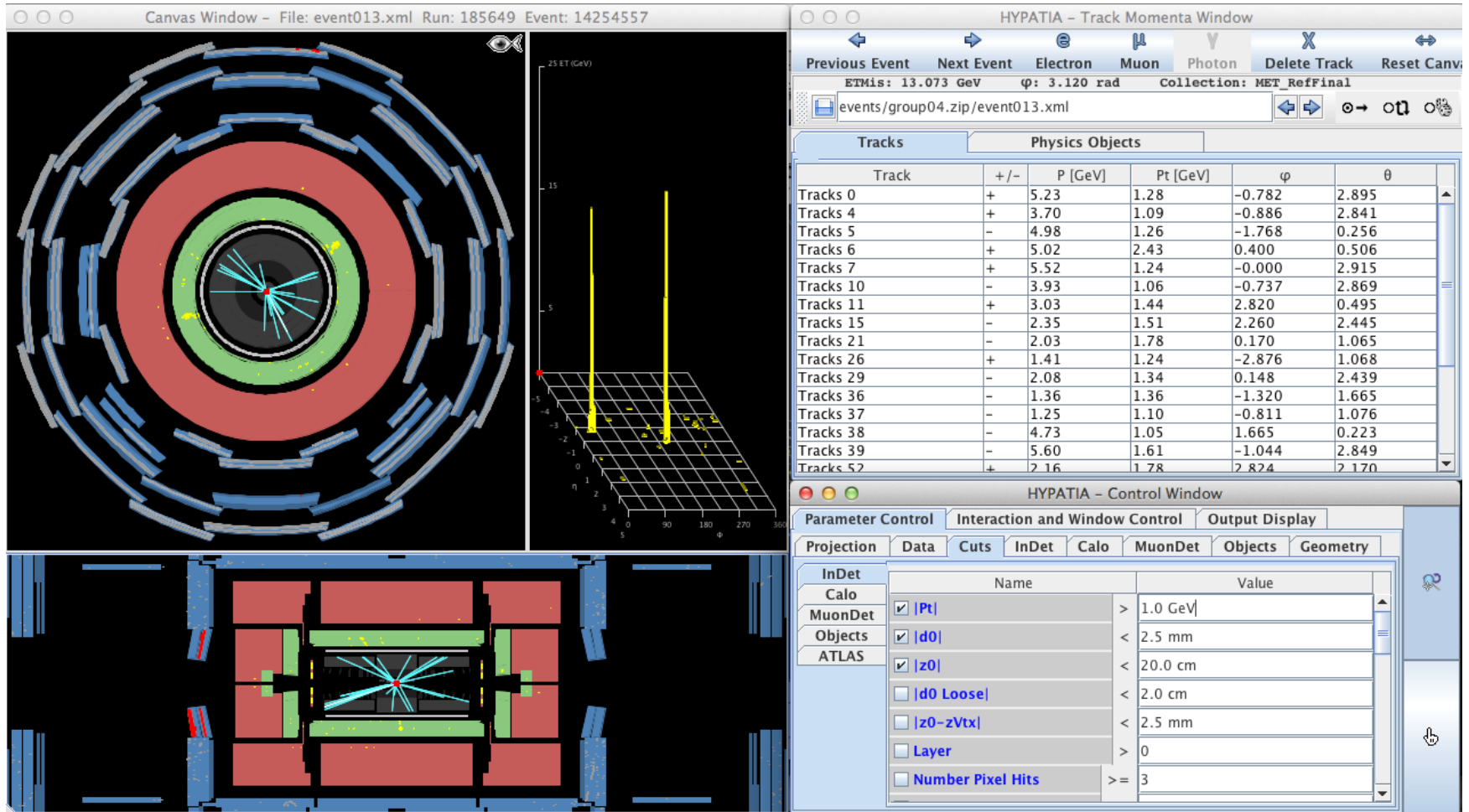


- ❑ **Fondo irriducibile** : eventi con due fotoni veri ma che NON vengono dall'Higgs. Non c'e' nulla da fare, dobbiamo convivere !

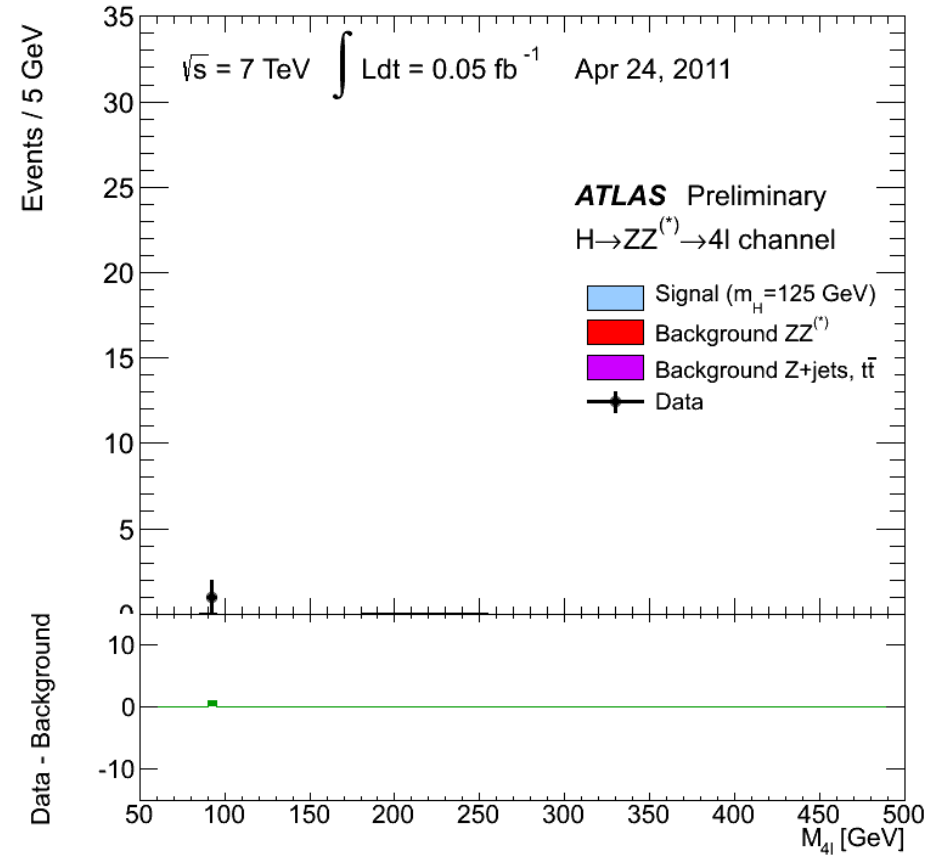
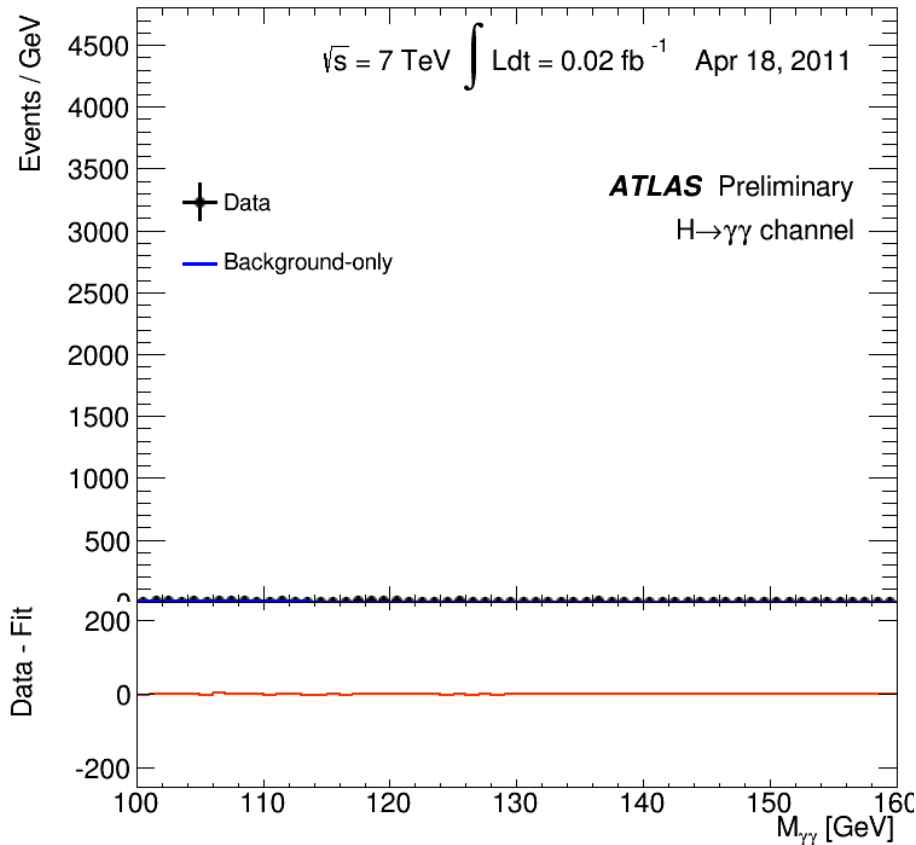


# Il problema del 'fondo' : perche' e' cosi' difficile scovare l'Higgs

❑ So what about this ? Can I say this is an Higgs boson ?



# Il bosone di Higgs finalmente scovato



- Un 'eccesso' di eventi ad una determinata massa rispetto a quelli attesi da processi noti dice che lì e' abbiamo generato particelle di un tipo inatteso che e' immediatamente decaduta!

- ❑ Ogni gruppo avrà a disposizione circa 50 eventi di dati reali raccolti da ATLAS nel 2012 alla ricerca del bosone vettore Z
- ❑ Vita media  $\sim 10^{-25}$  s : il bosone Z una volta prodotto decade quasi istantaneamente ( ie : non siamo in grado di misurarlo )

---

### Z DECAY MODES

	Mode	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level
$\Gamma_1$	$e^+ e^-$	( 3.363 $\pm$ 0.004 ) %	
$\Gamma_2$	$\mu^+ \mu^-$	( 3.366 $\pm$ 0.007 ) %	
$\Gamma_3$	$\tau^+ \tau^-$	( 3.370 $\pm$ 0.008 ) %	
$\Gamma_4$	$l^+ l^-$	[a] ( 3.3658 $\pm$ 0.0023 ) %	
$\Gamma_5$	invisible	(20.00 $\pm$ 0.06 ) %	
$\Gamma_6$	hadrons	(69.91 $\pm$ 0.06 ) %	

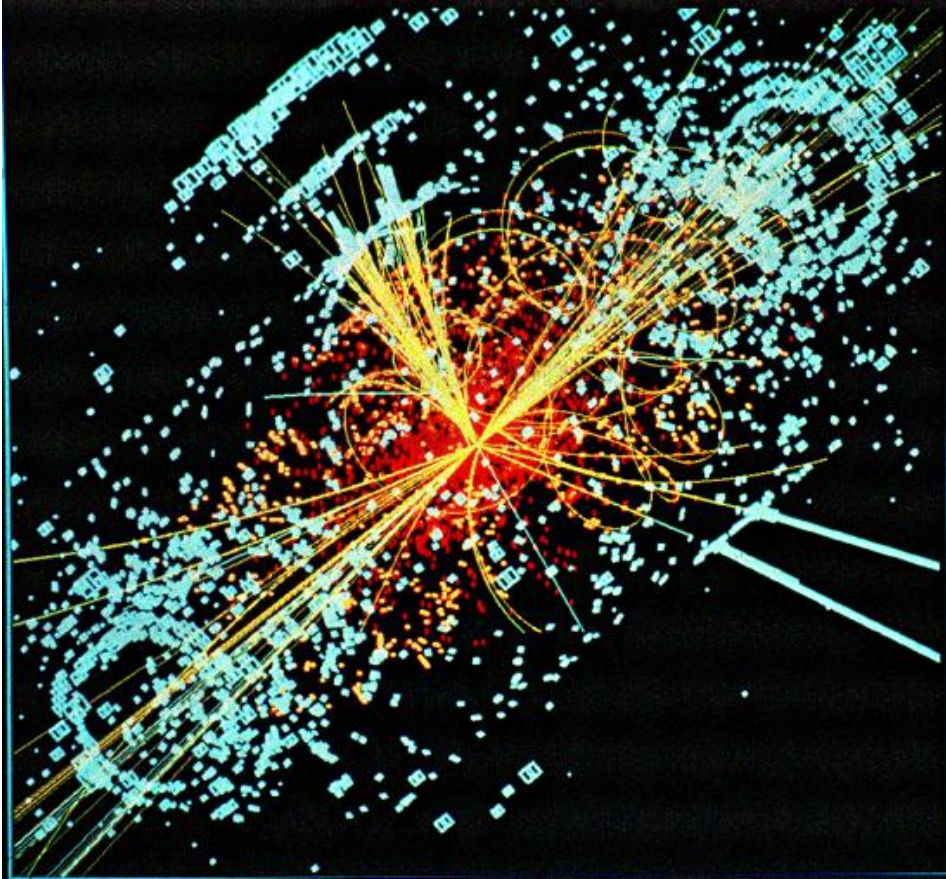


- ❑ Analizzare gli eventi : cercare di capire gli oggetti fisici ( elettroni, fotoni, muoni altro ? ) e catalogare gli eventi ( eventi di decadimento del bosone Z, Higgs, nuove particelle ? )
- ❑ Cercare un eccesso di eventi sul fondo compatibile con la creazione di nuove particelle
- ❑ Altri 4 gruppi di studenti in universita' straniere faranno la stessa cosa. Metteremo in comune i risultati dell'analisi e in una video-conferenza finale discuteremo insieme i risultati.

## L'analisi dei dati :

---

❑ Abbiamo visto che con LHC produrremo miliardi di collisioni. Ogni collisione genera segnali nei rivelatori di ATLAS



- ❑ Per ogni evento potremmo avere cose del tipo in figura
- ❑ Guardare ogni singolo evento, vedere tracce, clusters e decidere
- ❑ Scrivere programmi di 'ricostruzione' degli eventi e analisi dei dati che decifrano tutti questi inputs per dirci : e' passata una particella (c'e' una traccia?) ? C'e' un elettrone ? Era un elettrone o un jet?
- ❑ E' richiesta una capacita di calcolo e storage mai vista prima : GRID!!!

- ❑ The LHC is the largest scientific instrument on the planet. At full operation intensity, the LHC will produce roughly ~5 Petabytes (~5 million Gigabytes) of data annually, which thousands of scientists around the world will access and analyse.
- ❑ The mission of the **WLCG** is to build and maintain a data storage and analysis infrastructure for the entire high energy physics community that will use the LHC.
- ❑ Today, the **WLCG** combines the computing resources of more than 100,000 processors from over 170 sites in 34 countries, producing a massive distributed computing infrastructure that provides more than 8,000 physicists around the world with near real-time access to LHC data, and the power to process it.
- ❑ Milano is a T2 site : 1600 cores and 1.5 PB of disk

La comunità scientifica internazionale ha affrontato una sfida tecnologica incredibilmente avanzata e complessa.

❑ Ogni singolo pezzo delle macchine del CERN di Ginevra è un salto in avanti rispetto a quello che si era abituati a fare, tutto è alla frontiera della scienza e della tecnologia

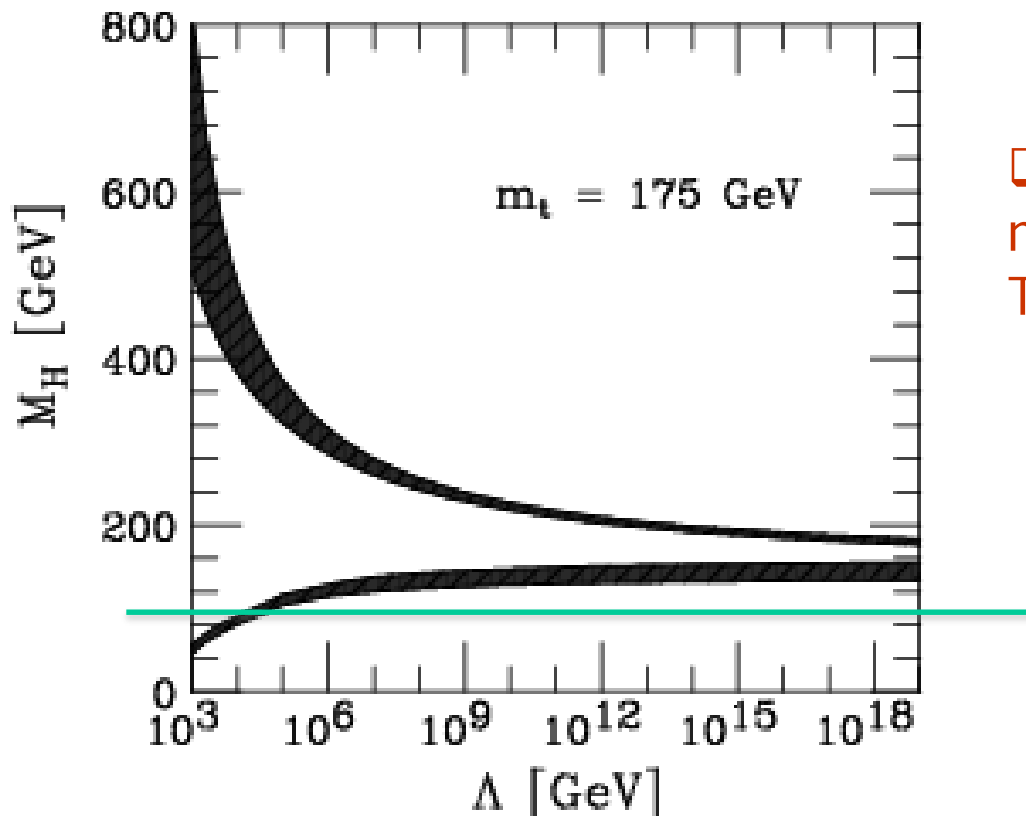
❑ Abbiamo scoperto un mattone fondamentale dalla struttura della natura:  
❑ Tuttavia la scoperta apre interrogativi ancora più profondi e complessi, non siamo alla fine della storia!

❑ L'Italia ha svolto e svolge tutt'ora un ruolo di primo piano a livello internazionale.

❑ Un gran numero di fisici ( studenti !!!! ), ingegneri ma anche imprese italiane ha lavorato e continua a lavorare per il successo di questo progetto.

## E dopo il Modello Standard ? Abbiamo gia' capito tutto?

- Abbiamo scoperto un bosone di Higgs a 126 GeV e null'altro ( per ora )
  - Molto difficile spiegare insieme questi due fatti : se non c'e' altro (SUSY per esempio) ci deve essere una cospirazione generale ("fine tuning") per stabilizzare la teoria ( principio antropico ? )

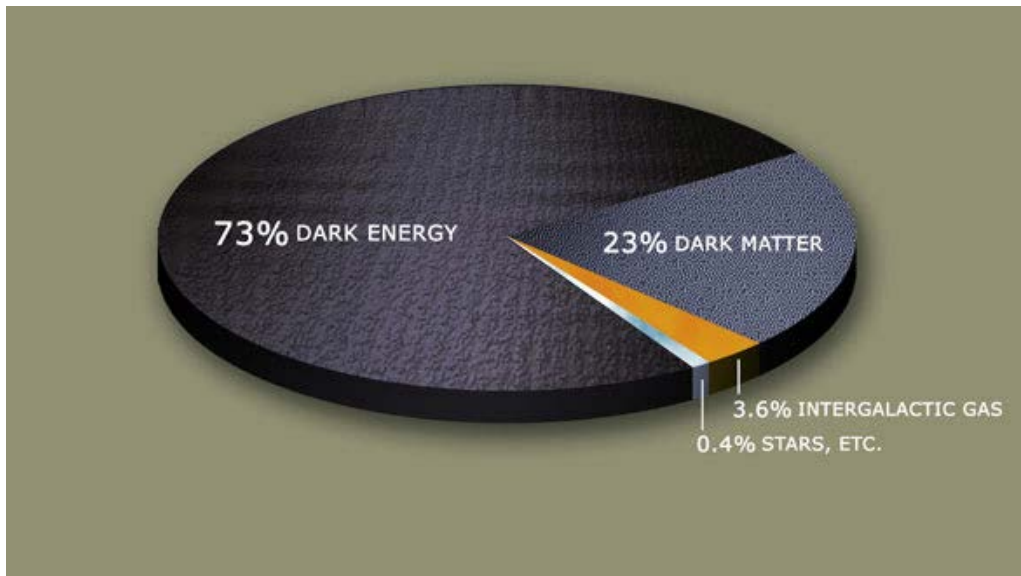


- Ma quindi c'e' tutta una nuova fisica dietro l'angolo ( 10 TeV-100 TeV ) ?

## E dopo il Modello Standard ? Abbiamo gia' capito tutto?

---

- ❑ Abbiamo scoperto un bosone di Higgs a 126 GeV e null'altro ( per ora )
  - ❑ Molto difficile spiegare insieme questi due fatti : se non c'e' altro (SUSY per esempio) ci deve essere una cospirazione generale ("fine tuning") per stabilizzare la teoria ( principio antropico ? )



- ❑ Qual'e la natura delle particelle che costituiscono la materia oscura dell'universo? La maggior parte dell'Universo (~95%) e' fatto di qualcosa di cui non sappiamo nulla e che ancora non capiamo!!!

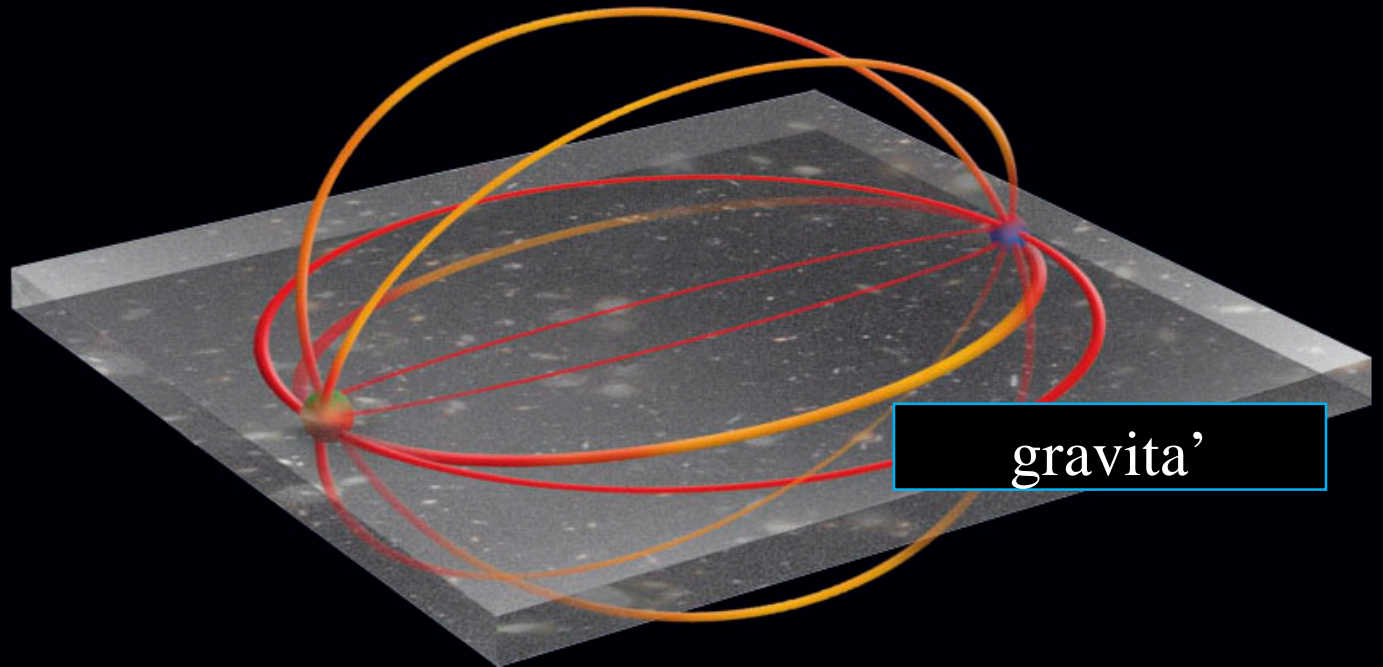
- ❑ Ma ancora oltre : sono le interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche espressione di un'unica forza che include la gravita' a qualche scala?

## Perche' la gravita' e' cosi' debole ?

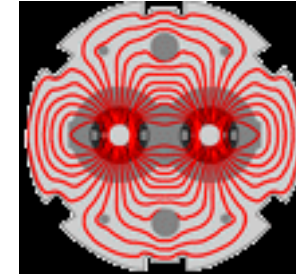
---

L'Elettromagnetismo e' confinato nelle nostre solite tre dimensioni dello spazio

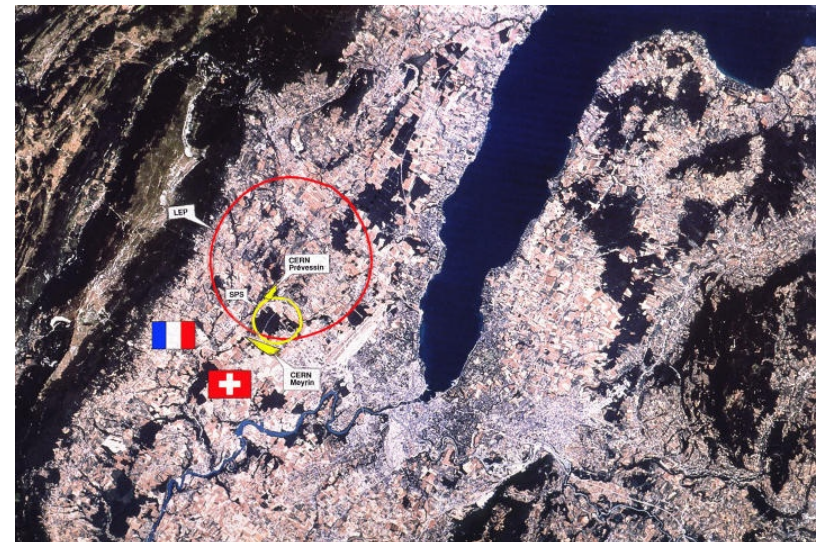
Ma la Gravita' potrebbe vedere anche le altre dimensioni dello spazio. Allora la forza si distribuisce su uno spazio piu' grande e quindi si indebolisce nella nostra membrana di spazio.



# Gli acceleratori del CERN

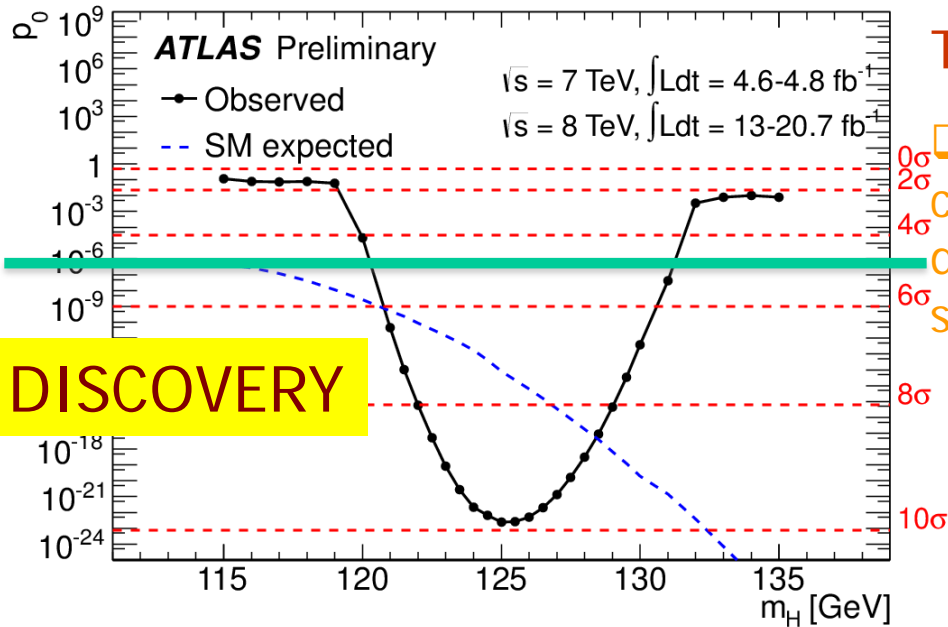


- Il CERN ha il più grande complesso di macchine acceleratrici del mondo
- Sono macchine costruite sotto terra ma sarebbero facilmente visibili da un satellite





# Facendo le cose in modo rigoroso...

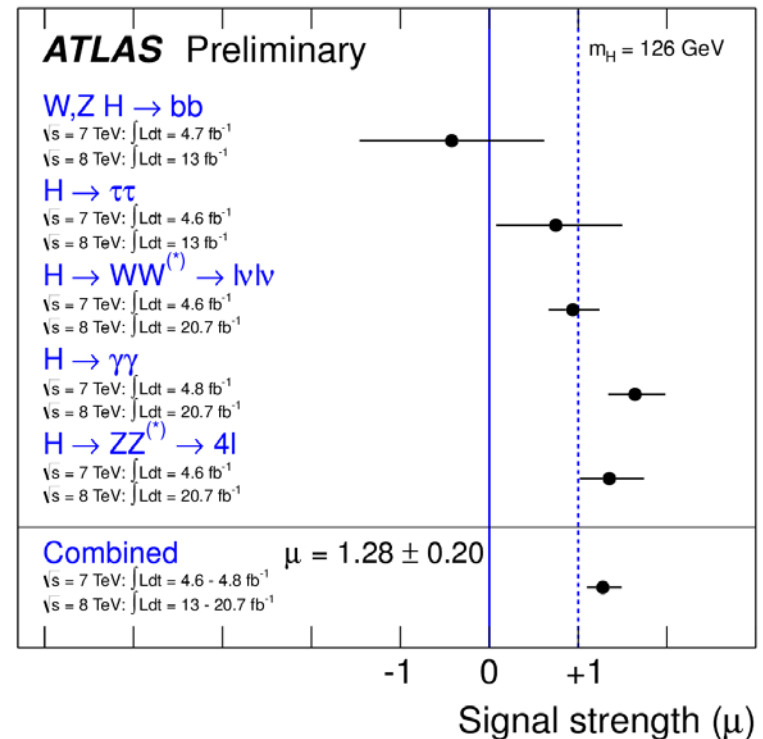


Tipico plot 'ufficiale' serio :

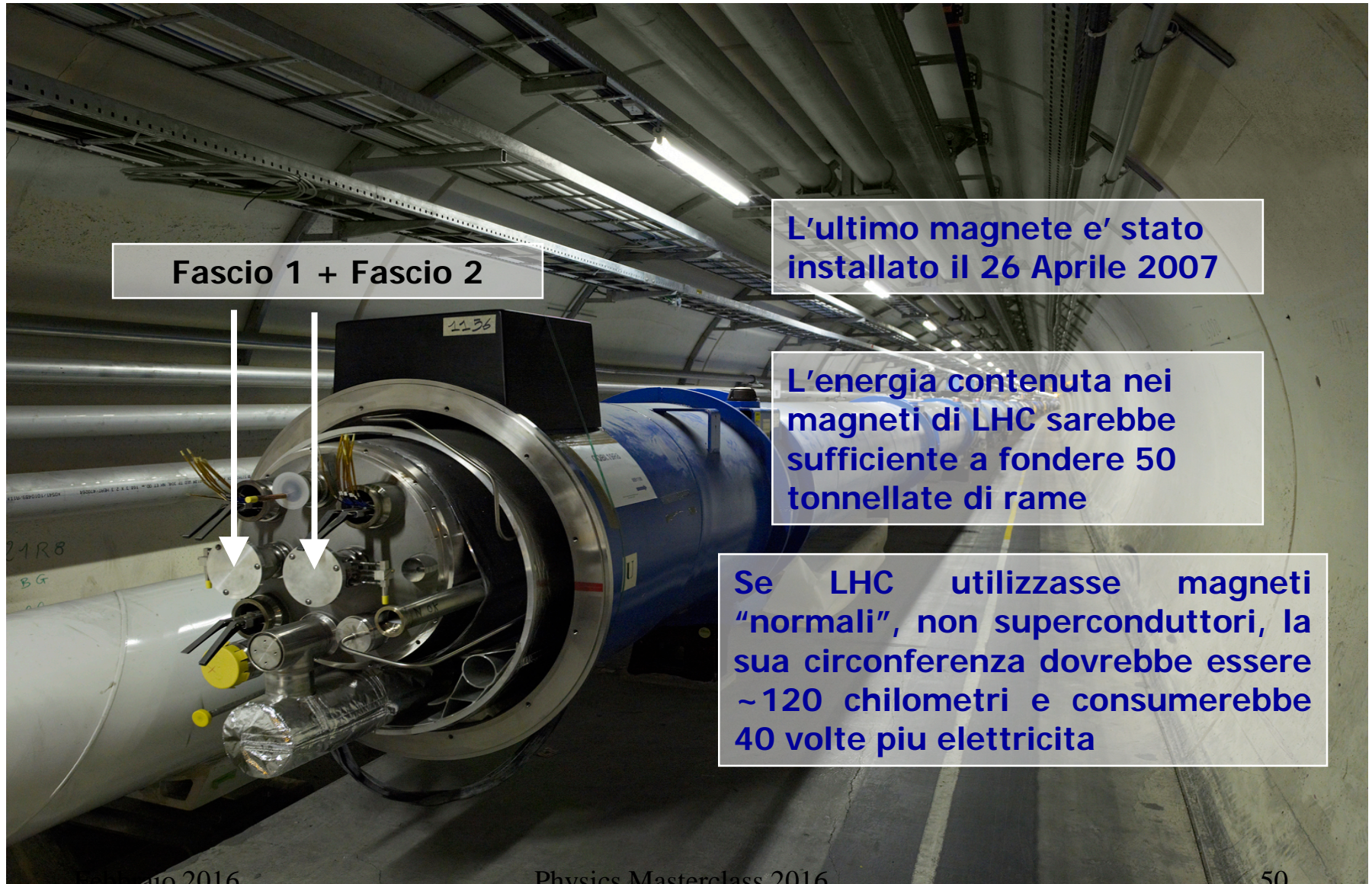
La probabilita' che una fluttuazione casuale del fondo spieghi la forma dei dati : se e' piccola significa che c'e' un segnale vero!

Ok siamo sicuri che c'e' una particella nuova, ma e' proprio il bosone di Higgs che stavamo cercando ?

Tutte le sue proprieta' che stiamo misurando puntano in quella direzione : lo vediamo proprio come era stato predetto!



# La nuova frontiera : il Large Hadron Collider



Fascio 1 + Fascio 2

L'ultimo magnete e' stato installato il 26 Aprile 2007

L'energia contenuta nei magneti di LHC sarebbe sufficiente a fondere 50 tonnellate di rame

Se LHC utilizzasse magneti "normali", non superconduttori, la sua circonferenza dovrebbe essere ~120 chilometri e consumerebbe 40 volte piu elettricita

# La nuova frontiera : il Large Hadron Collider

---

$B_{\text{dip}} \cong 8.3 \text{ T}$   
 $R_{\text{dip}} \cong 3 \text{ km}$   
 $L_{\text{dip}} \cong 15 \text{ m} \times 1232$   
 $L_{\text{tunnel}} = 27 \text{ km}$

1500 tonn. di cavi  
SuperConduttori

1800 Convertitori di  
potenza da 60 A a 24 kA

15000 MJ di energia  
magnetica

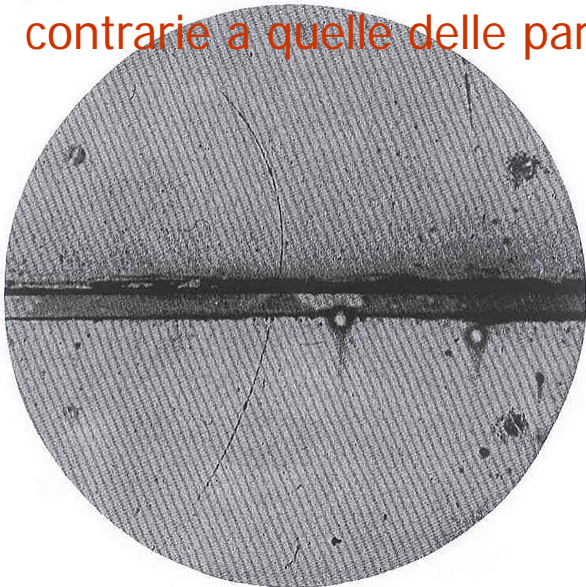
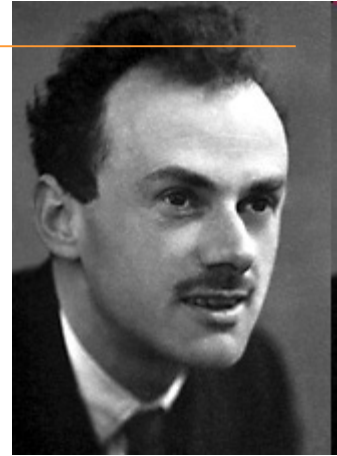
$T = 1.9 \text{ K}$

- ❑ Ogni "pacchetto" del fascio contiene 100 miliardi di protoni. Il "pacchetto" ha l'energia totale di un treno a 160 km/h ma ogni protone ha l'energia di una zanzara che vola
- ❑ Il fascio di protoni "vive" per ~10 ore percorrendo 10 miliardi di chilometri (andata e ritorno Terra-Nettuno)
- ❑ Ad ogni collisione fra pacchetti ci sono in media 20 interazioni p-p
- ❑ Molti milioni di collisioni al secondo: solo 200 al secondo sono quelle che vengono selezionate perche di un certo interesse
- ❑ Flusso di dati utile: circa 1 Petabyte( $10^{15}$  Bytes)/anno: l'equivalente di 4000 hard disk da 250 GB ciascuno.

## Molte volte il modello ha predetto davvero...

---

- ❑ Nel 1928 Dirac, predisse l'esistenza del positrone, l'antiparticella dell'elettrone, come conseguenza della soluzione della equazione che porta il suo nome
- ❑ L'equazione fu ottenuta mettendo insieme le conquiste più importanti della fisica moderna: la teoria quantistica, la relatività ristretta di Einstein, e le equazioni di Maxwell che descrivano l'evoluzione dei campi elettrici.
- ❑ Veniva così postulato dimostrato che in natura particelle simili a quelle che erano state osservate fino ad allora ma con le proprietà (cariche) uguali e contrarie a quelle delle particelle che conosciamo: elettroni, protoni e neutroni



- ❑ Nel 1932, Anderson, osservando le particelle nei "raggi cosmici", scoprì il positrone
- ❑ L'antimateria, che aveva una solida base teorica, veniva finalmente scoperta

# Zoomando sulla materia :

Los Alamos National Laboratory Chemistry Division

## Periodic Table of the Elements

1A 1 <b>H</b> hydrogen 1.008	2A 4 <b>Be</b> beryllium 9.012																	3A 5 <b>B</b> boron 10.81	4A 6 <b>C</b> carbon 12.01	5A 7 <b>N</b> nitrogen 14.01	6A 8 <b>O</b> oxygen 16.00	7A 9 <b>F</b> fluorine 19.00	8A 2 <b>He</b> helium 4.003																																																		
3 <b>Li</b> lithium 6.941	11 <b>Na</b> sodium 22.99	19 <b>K</b> potassium 39.10	37 <b>Rb</b> rubidium 85.47	55 <b>Cs</b> cesium 132.9	87 <b>Fr</b> francium (223)	20 <b>Ca</b> calcium 40.08	38 <b>Sr</b> strontium 87.62	56 <b>Ba</b> barium 137.3	88 <b>Ra</b> radium (226)	3 <b>Sc</b> scandium 44.96	21 <b>Ti</b> titanium 47.88	39 <b>Y</b> yttrium 88.91	57 <b>La*</b> lanthanum 138.9	89 <b>Ac~</b> actinium (227)	4 <b>Mg</b> magnesium 24.31	12 <b>Mg</b> magnesium 24.31	20 <b>Ca</b> calcium 40.08	38 <b>Sr</b> strontium 87.62	56 <b>Ba</b> barium 137.3	88 <b>Ra</b> radium (226)	3 <b>Sc</b> scandium 44.96	21 <b>Ti</b> titanium 47.88	39 <b>Y</b> yttrium 88.91	57 <b>La*</b> lanthanum 138.9	89 <b>Ac~</b> actinium (227)	4 <b>Be</b> beryllium 9.012	12 <b>Mg</b> magnesium 24.31	20 <b>Ca</b> calcium 40.08	38 <b>Sr</b> strontium 87.62	56 <b>Ba</b> barium 137.3	88 <b>Ra</b> radium (226)	5 <b>B</b> boron 10.81	13 <b>Al</b> aluminum 26.98	31 <b>Ga</b> gallium 69.72	49 <b>In</b> indium 114.8	81 <b>Tl</b> thallium 204.4	6 <b>C</b> carbon 12.01	14 <b>Si</b> silicon 28.09	32 <b>Ge</b> germanium 72.58	50 <b>Sn</b> tin 118.7	82 <b>Pb</b> lead 207.2	7 <b>N</b> nitrogen 14.01	15 <b>P</b> phosphorus 30.97	33 <b>As</b> arsenic 74.92	51 <b>Sb</b> antimony 121.8	83 <b>Bi</b> bismuth 208.9	8 <b>O</b> oxygen 16.00	16 <b>S</b> sulfur 32.07	34 <b>Se</b> selenium 78.96	52 <b>Te</b> tellurium 127.6	84 <b>Po</b> polonium (209)	9 <b>F</b> fluorine 19.00	17 <b>Cl</b> chlorine 35.45	35 <b>Br</b> bromine 79.90	53 <b>I</b> iodine 126.9	85 <b>At</b> astatine (210)	10 <b>Ne</b> neon 20.18	18 <b>Ar</b> argon 39.95	36 <b>Kr</b> krypton 83.80	54 <b>Xe</b> xenon 131.3	86 <b>Rn</b> radon (222)												
																		8B 26 <b>Fe</b> iron 55.85	27 <b>Co</b> cobalt 58.93	28 <b>Ni</b> nickel 58.69	29 <b>Cu</b> copper 63.55	30 <b>Zn</b> zinc 65.39	31 <b>Ga</b> gallium 69.72	32 <b>Ge</b> germanium 72.58	33 <b>As</b> arsenic 74.92	34 <b>Se</b> selenium 78.96	35 <b>Br</b> bromine 79.90	36 <b>Kr</b> krypton 83.80	44 <b>Ru</b> ruthenium 101.1	45 <b>Rh</b> rhodium 102.9	46 <b>Pd</b> palladium 106.4	47 <b>Ag</b> silver 107.9	48 <b>Cd</b> cadmium 112.4	49 <b>In</b> indium 114.8	50 <b>Sn</b> tin 118.7	51 <b>Sb</b> antimony 121.8	52 <b>Te</b> tellurium 127.6	53 <b>I</b> iodine 126.9	54 <b>Xe</b> xenon 131.3	76 <b>Os</b> osmium 190.2	77 <b>Ir</b> iridium 190.2	78 <b>Pt</b> platinum 195.1	79 <b>Au</b> gold 197.0	80 <b>Hg</b> mercury 200.5	81 <b>Tl</b> thallium 204.4	82 <b>Pb</b> lead 207.2	83 <b>Bi</b> bismuth 208.9	84 <b>Po</b> polonium (209)	85 <b>At</b> astatine (210)	86 <b>Rn</b> radon (222)																							
																		8B 108 <b>Hs</b> hassium (265)	109 <b>Mt</b> meitnerium (266)	110 <b>Ds</b> darmstadtium (271)	111 <b>Uuu</b> (272)	112 <b>Uub</b> (277)	113 <b>Uuq</b> (296)	114 <b>Uuq</b> (296)	115 <b>Uuh</b> (298)	116 <b>Uuh</b> (298)	117 <b>Uuo</b> (?)	118 <b>Uuo</b> (?)	108 <b>Hs</b> hassium (265)	109 <b>Mt</b> meitnerium (266)	110 <b>Ds</b> darmstadtium (271)	111 <b>Uuu</b> (272)	112 <b>Uub</b> (277)	113 <b>Uuq</b> (296)	114 <b>Uuq</b> (296)	115 <b>Uuh</b> (298)	116 <b>Uuh</b> (298)	117 <b>Uuo</b> (?)	118 <b>Uuo</b> (?)	108 <b>Hs</b> hassium (265)	109 <b>Mt</b> meitnerium (266)	110 <b>Ds</b> darmstadtium (271)	111 <b>Uuu</b> (272)	112 <b>Uub</b> (277)	113 <b>Uuq</b> (296)	114 <b>Uuq</b> (296)	115 <b>Uuh</b> (298)	116 <b>Uuh</b> (298)	117 <b>Uuo</b> (?)	118 <b>Uuo</b> (?)																							
																		58 <b>Ce</b> cerium 140.1	59 <b>Pr</b> praseodymium 140.9	60 <b>Nd</b> neodymium 144.2	61 <b>Pm</b> promethium (147)	62 <b>Sm</b> samarium (150.4)	63 <b>Eu</b> europium 152.0	64 <b>Gd</b> gadolinium 157.3	65 <b>Tb</b> terbium 158.9	66 <b>Dy</b> dysprosium 162.5	67 <b>Ho</b> holmium 164.9	68 <b>Er</b> erbium 167.3	69 <b>Tm</b> thulium 168.9	70 <b>Yb</b> ytterbium 173.0	71 <b>Lu</b> lutetium 175.0	58 <b>Ce</b> cerium 140.1	59 <b>Pr</b> praseodymium 140.9	60 <b>Nd</b> neodymium 144.2	61 <b>Pm</b> promethium (147)	62 <b>Sm</b> samarium (150.4)	63 <b>Eu</b> europium 152.0	64 <b>Gd</b> gadolinium 157.3	65 <b>Tb</b> terbium 158.9	66 <b>Dy</b> dysprosium 162.5	67 <b>Ho</b> holmium 164.9	68 <b>Er</b> erbium 167.3	69 <b>Tm</b> thulium 168.9	70 <b>Yb</b> ytterbium 173.0	71 <b>Lu</b> lutetium 175.0	90 <b>Th</b> thorium 232.0	91 <b>Pa</b> protactinium (231)	92 <b>U</b> uranium (238)	93 <b>Np</b> neptunium (237)	94 <b>Pu</b> plutonium (242)	95 <b>Am</b> americium (243)	96 <b>Cm</b> curium (247)	97 <b>Bk</b> berkelium (247)	98 <b>Cf</b> californium (249)	99 <b>Es</b> einsteinium (254)	100 <b>Fm</b> fermium (253)	101 <b>Md</b> mendelevium (256)	102 <b>No</b> nobelium (254)	103 <b>Lr</b> lawrencium (257)	90 <b>Th</b> thorium 232.0	91 <b>Pa</b> protactinium (231)	92 <b>U</b> uranium (238)	93 <b>Np</b> neptunium (237)	94 <b>Pu</b> plutonium (242)	95 <b>Am</b> americium (243)	96 <b>Cm</b> curium (247)	97 <b>Bk</b> berkelium (247)	98 <b>Cf</b> californium (249)	99 <b>Es</b> einsteinium (254)	100 <b>Fm</b> fermium (253)	101 <b>Md</b> mendelevium (256)	102 <b>No</b> nobelium (254)	103 <b>Lr</b> lawrencium (257)



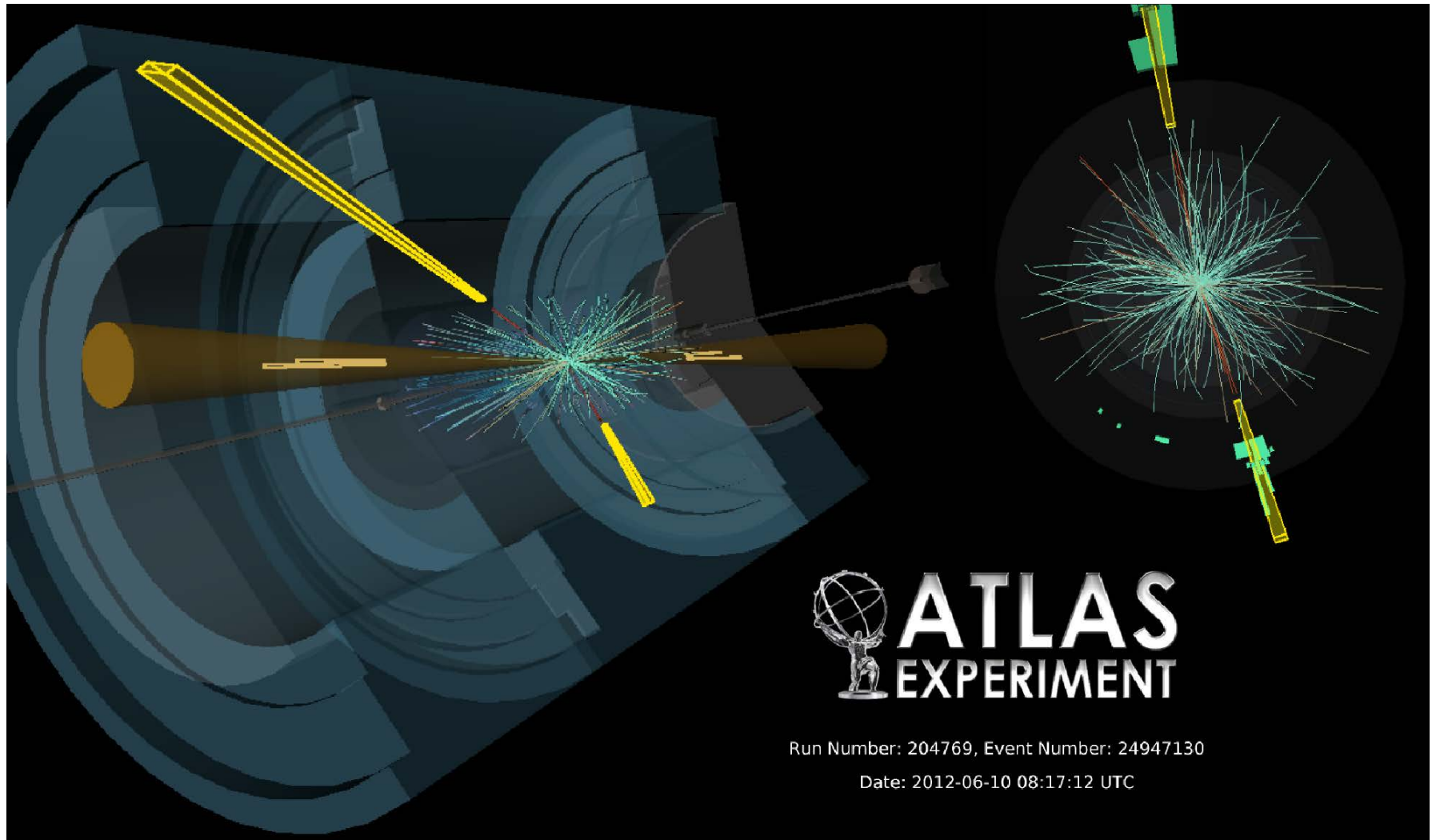
La chimica opera su scale enormi ( $10^{-10}$  m)

- ❑ Centro Europeo Ricerche Nucleari:
  - ❑ Il CERN è il laboratorio più grande del mondo per le ricerche di Fisica delle Particelle Elementari
  - ❑ 6500 scienziati di 500 università di 80 paesi diversi lavorano al CERN
- ❑ Fondato nel 1954
- ❑ L'Italia uno dei 12 paesi fondatori: scienziati e industrie italiane occupano ruoli di primissimo piano
- ❑ Scopo del CERN:
  - ❑ Il CERN fornisce ai paesi membri apparecchiature complesse e sofisticate per compiere ricerche di Fisica fondamentale nel campo della Fisica delle Particelle Elementari

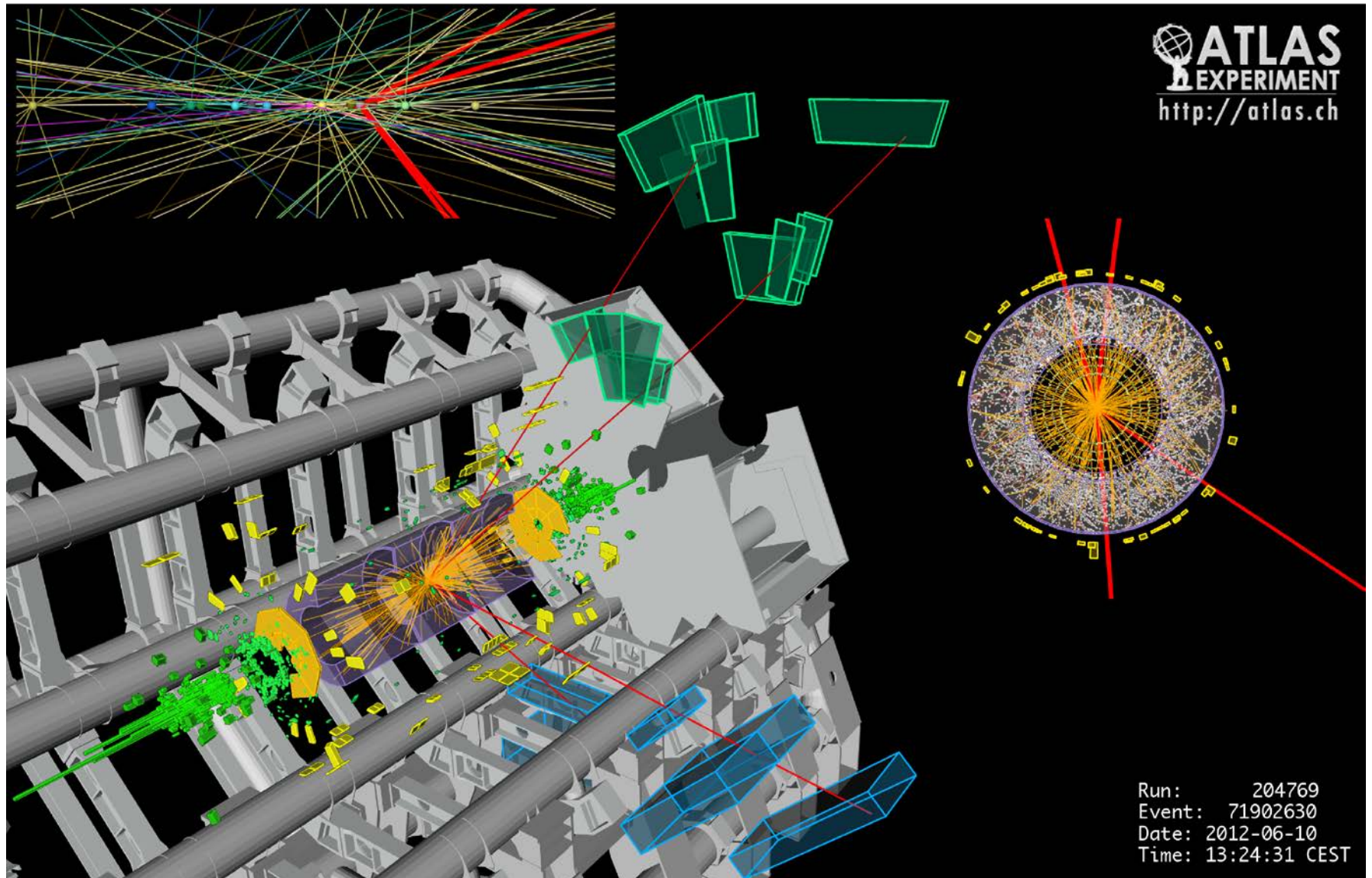


forse un bosone di Higgs che si disintegra in due fotoni

---



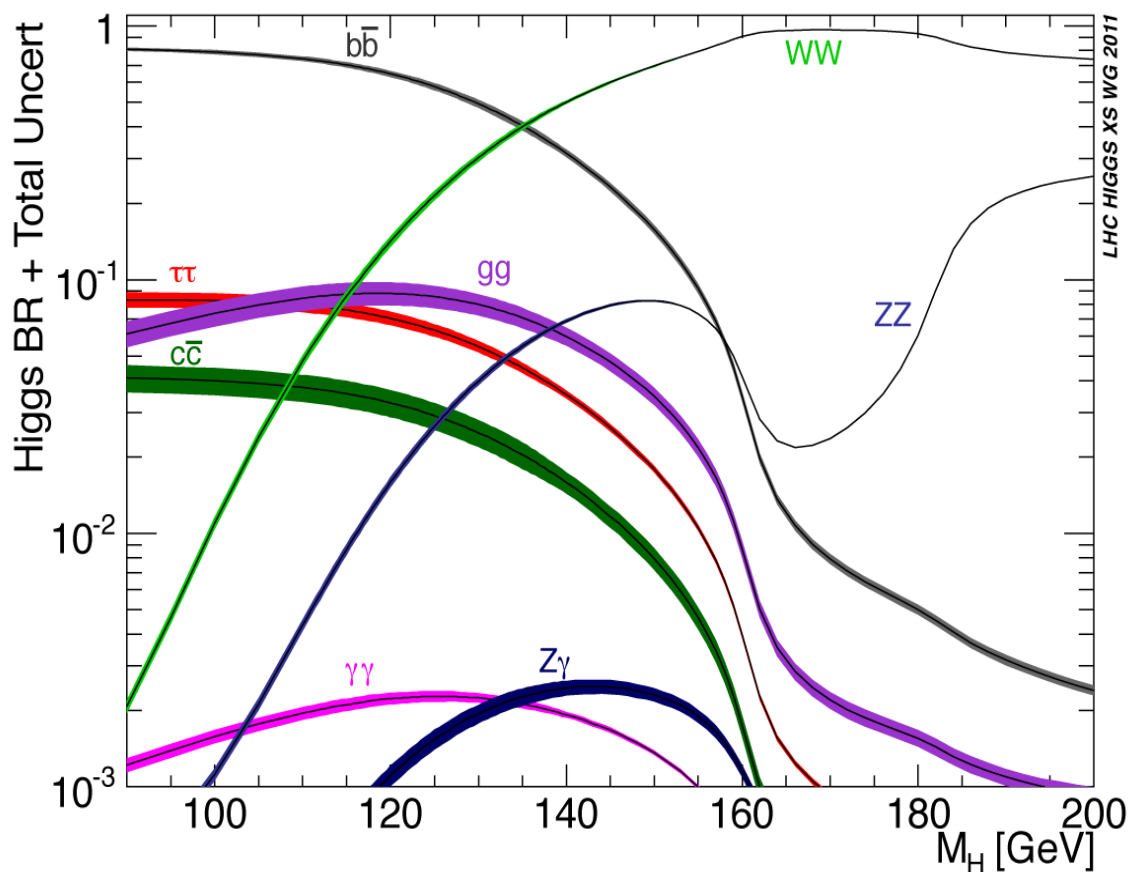
# Forse un bosone di Higgs che si disintegra in 4 muoni





## Segni particolari : bosone di Higgs

Il bosone di Higgs una volta (faticosamente !) generato si disintegra ( "decade" ) in altre particelle : vediamo solo i cocci del suo decadimento



- Il Modello Standard e' in grado di predire i modi di decadimento ( in funzione della massa che invece NON e' predetta )
- Dobbiamo mettere alla prova il modello e cercare il bosone di Higgs in tutti i canali predetti

E' solo una questione di scala :

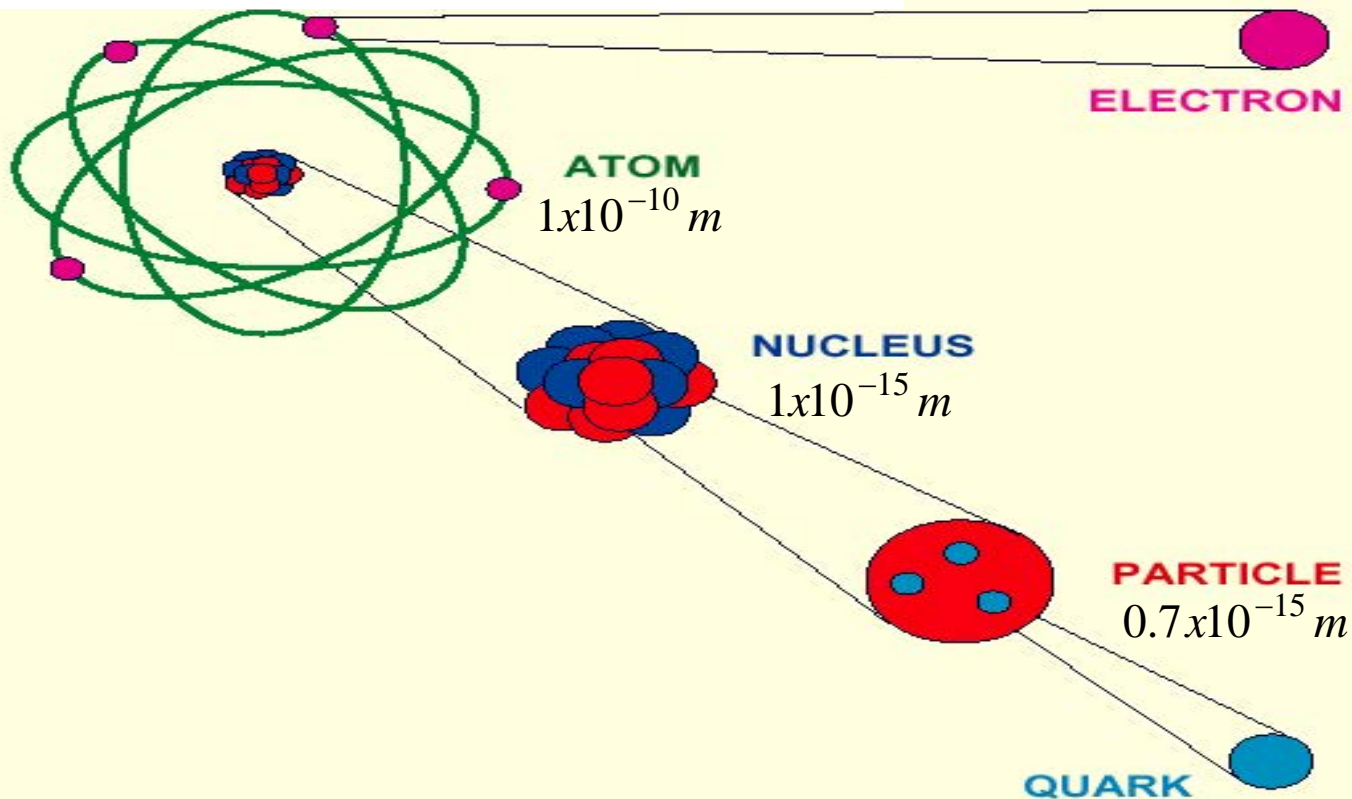
## Constituents of Matter

Thomson (1897): Discovers electron

Rutherford (1909): Nuclear atom (proton)

Chadwick (1932): Discovers neutron

SLAC (1968): Quarks in neutrons and protons



## Il Modello Standard : i mattoni fondamentali della Natura

Nel modello standard delle interazioni fondamentali tutte le particelle sino ad oggi conosciute sono considerate come composte di pochi costituenti fondamentali.

Secondo il modello standard esistono sei tipi di quarks organizzati in tre doppietti ( $u, d$ ), ( $c, s$ ), ( $t, b$ ) e altri sei tipi di particelle fondamentali ( $e, \nu_e$ ), ( $\mu, \nu_\mu$ ), ( $\tau, \nu_\tau$ ), chiamati leptoni.

Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom
Leptons	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ $\mu$ - Neutrino	$\nu_\tau$ $\tau$ - Neutrino
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau
	I	II	III

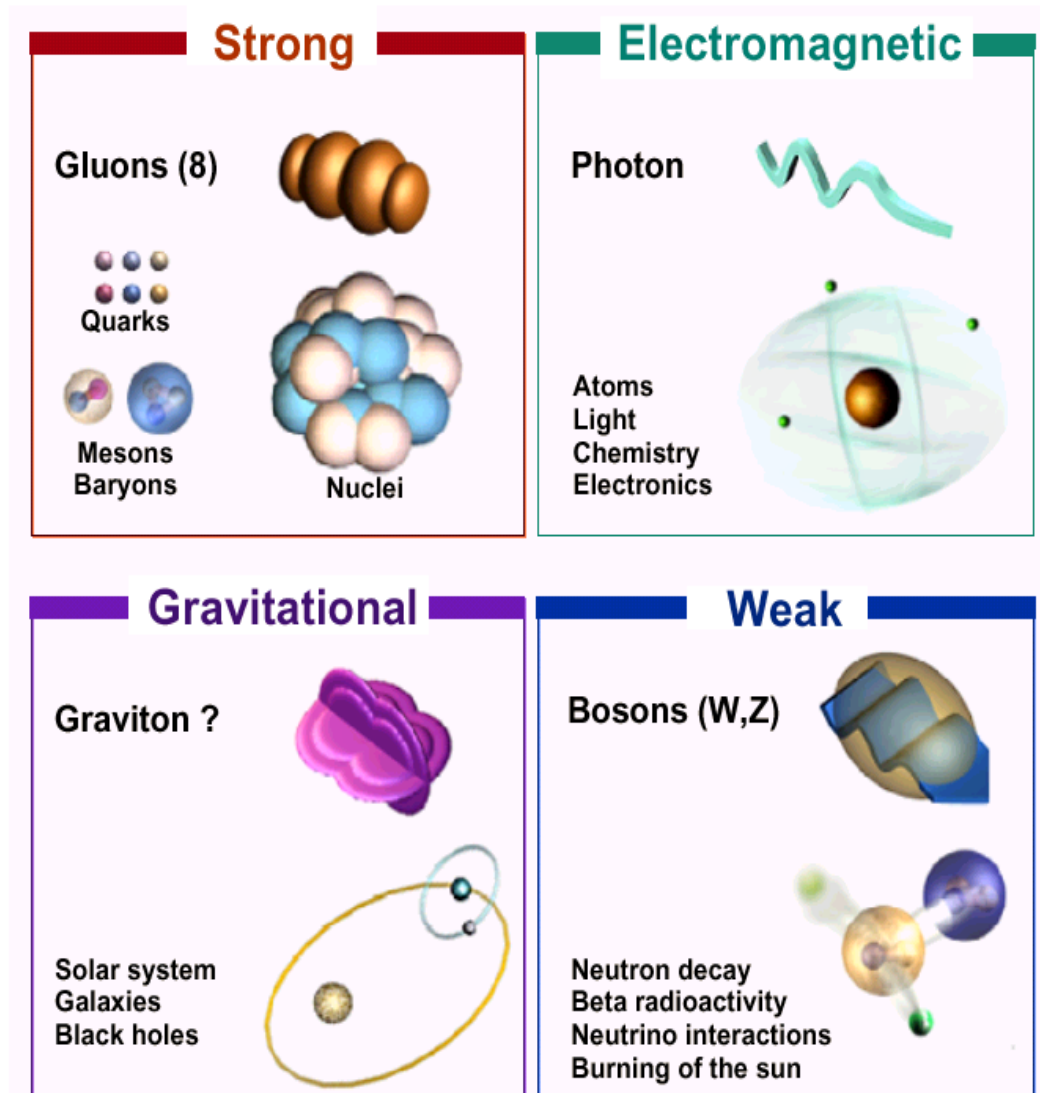
The Generations of Matter

## Il Modello Standard: le interazioni fondamentali

In natura conosciamo 4 tipi di interazioni fondamentali

Il Modello Standard spiega inoltre le interazioni *forti*, *deboli* ed *elettromagnetiche* tra quarks e leptoni come mediate dallo scambio di altre particelle dette *bosoni* (gluoni,  $W^\pm$  and  $Z$ , e fotone).

La teoria dell'interazione *gravitazionale*, non fa ancora parte del Modello Standard e il suo mediatore, che si chiama *gravitone*, non e' ancora stato scoperto.



## Il Modello Standard: perche' ci piace e perche non ci piace...

---

- ❑ Il Modello Standard spiega inoltre le interazioni tra i campi di materia a partire da principi di simmetria ( bello no ? )
- ❑ Purtroppo quando nella teoria cerchiamo di inserire una massa la simmetria la perdiamo ( insieme a tutte le belle proprieta' connesse )
- ❑ Il meccanismo di Higgs permette di introdurre una massa nella teoria in modo elegante : "rompendo spontaneamente la simmetria"
- ❑ La teoria si salva, al prezzo che ora la massa discende dall'interazione con una nuova particella, il bosone di Higgs
- ❑ Il bosone di Higgs e' sfuggente, la probabilita' di crearlo da una collisione e' estremamente piccola : dobbiamo produrre un numero enorme di collisioni per sperare di riuscire a generarne



## A nice $\pi^0$ candidate

