
Hands on particle physics : acceleratori, rivelatori e altro ancora



Carminati Leonardo
Universita' di Milano e INFN

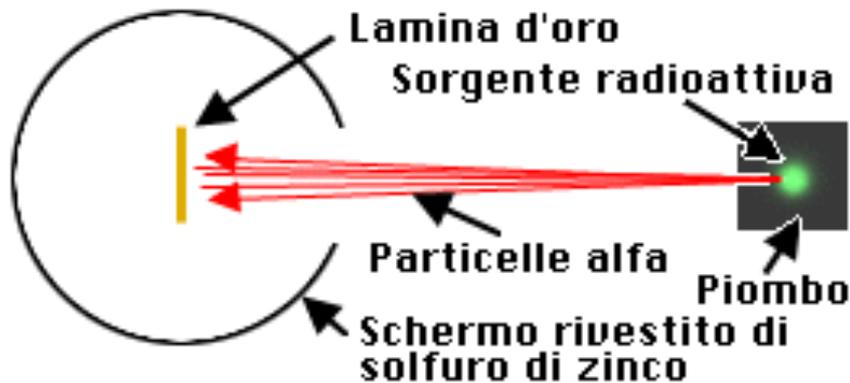


1. Come sondiamo l'infinitamente piccolo: acceleratori e rivelatori di particelle
2. Come si producono le particelle ? I collisionatori/acceleratori
 1. Cos'è un acceleratore? A cosa serve ? Come funziona ?
 2. Perché è così grande ? Perché costa così tanto?
3. Come si 'vedono' le particelle ? I rivelatori di particelle :
 1. Cos'è un rivelatore ? Come funziona e perché è così grande e costoso?
4. L'analisi dei dati: segnali e fondi, variabili discriminanti, confronto teoria-esperimento, scoperta di una particella

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

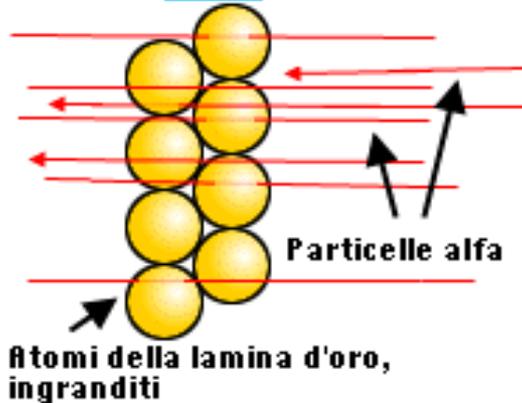
Agli inizi del 1900 il dibattito sulla struttura atomica era abbastanza acceso: si sapeva che dovevano contenere delle cariche elettriche (elettroni) ma dal momento che si presentavano elettricamente neutri l'idea era che ci fosse una 'gelatina' positiva farcita di ciliegine (elettroni) negative con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

L'esperimento di Rutherford

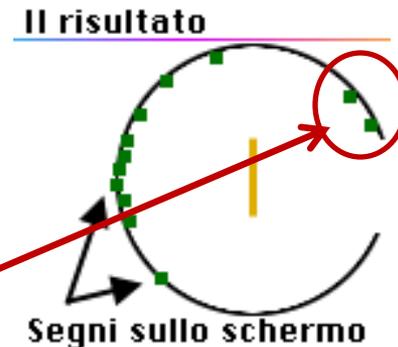
Dettaglio della lamina d'oro
secondo il vecchio modello atomico



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



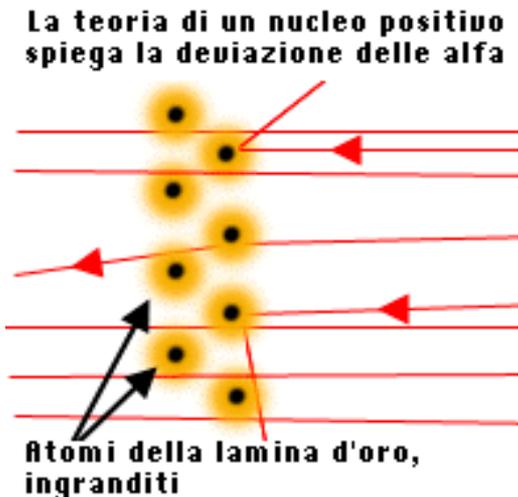
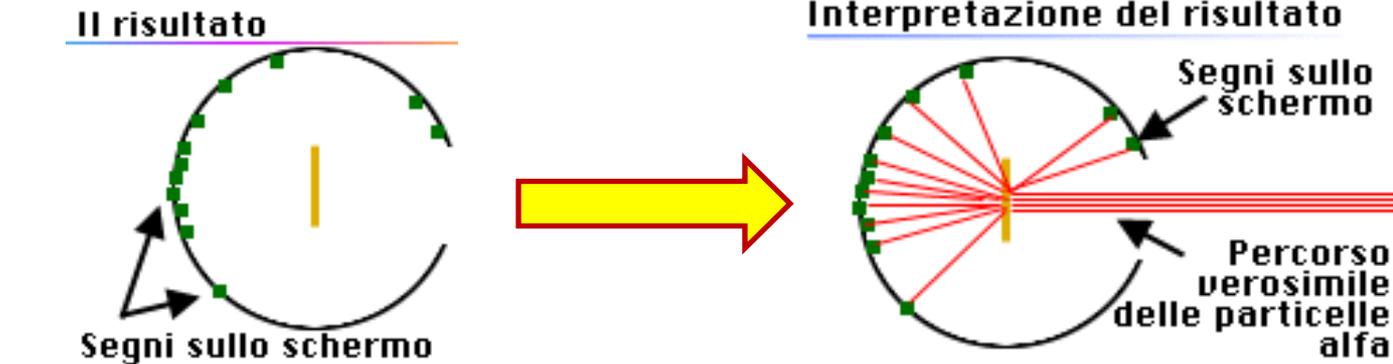
Con grande sorpresa di Rutherford stesso si vedevano particelle alfa poco deflesse (ok) ma si notavano particelle alfa emesse all'indietro!!



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?

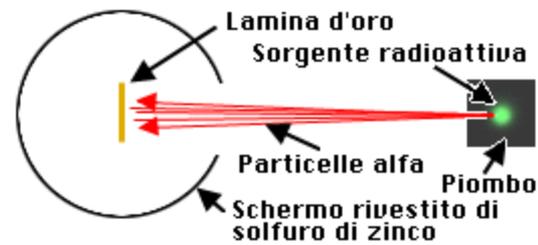


Se la carica elettrica positiva non fosse una gelatina ma se fosse concentrata in un nucleo allora riusciamo a capire meglio i dati:

- ❑ quando la particella alfa passa lontano dai nuclei viene deflessa poco
- ❑ quando passa molto vicino ad un nucleo la repulsione è molto forte e può 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



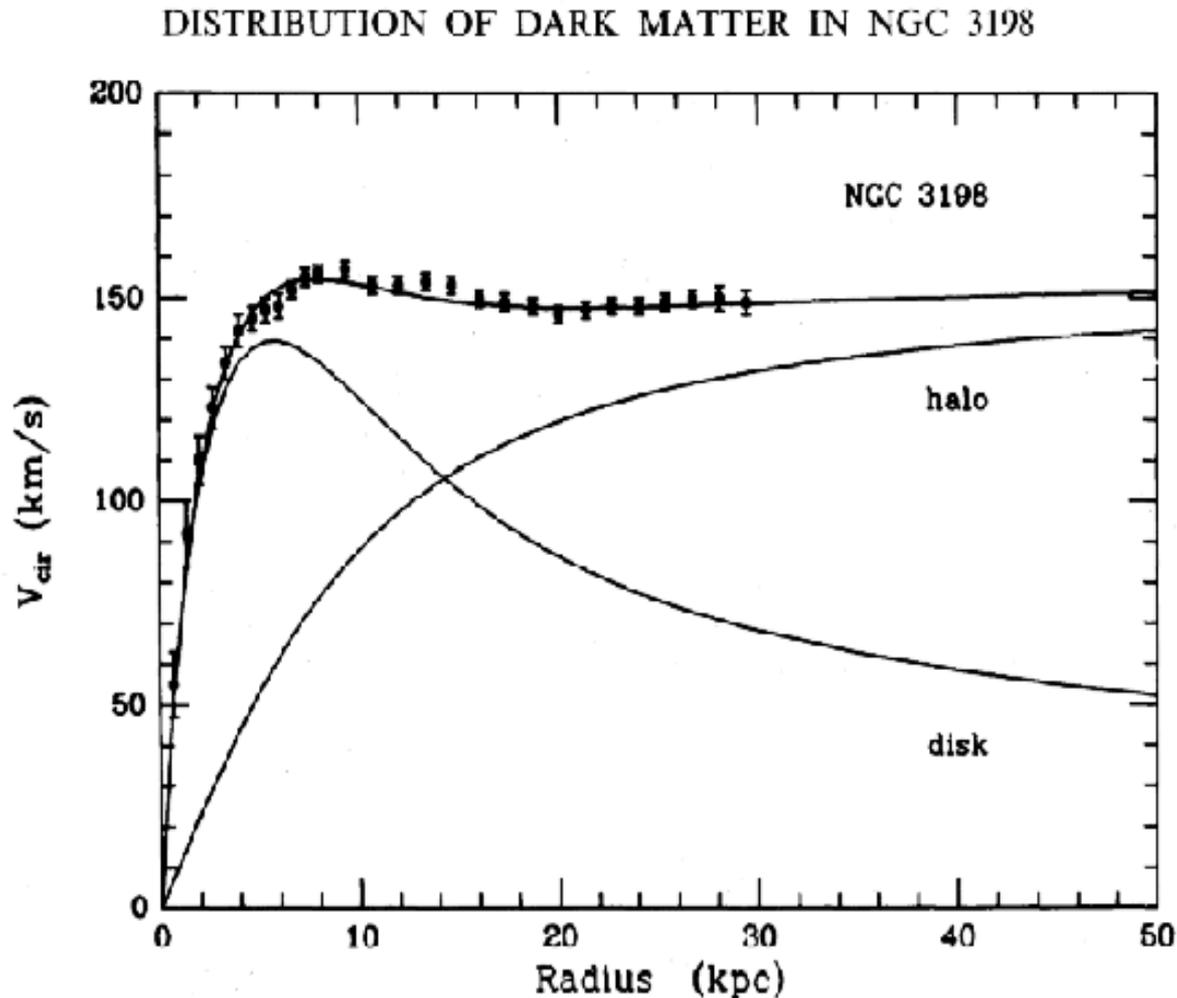
La procedura sperimentale

- ❑ 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

Un modello (modello ! modello ! modello !) per la Dark Matter

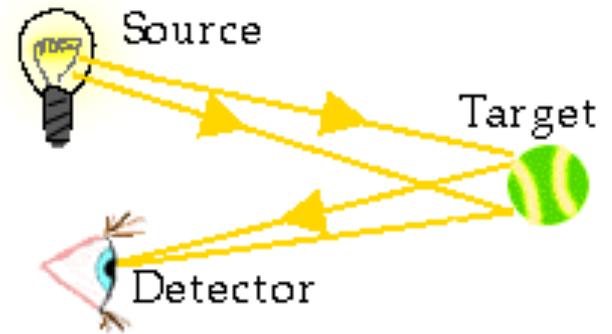
F. Zwitcki e V. Rubin



- ❑ According to Kepler laws one would expect the velocity to go as $1/r$: $Mv^2/r = GmM/r^2$ while to explain the constant value you have to assume $M(r) \sim r$
- ❑ This is again not compatible with the visible matter in the galaxies.
- ❑ Which is the nature of this strange type of matter ? It doesn't fit in the current picture of the SM

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

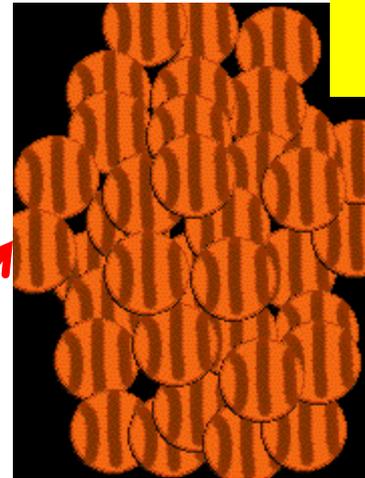
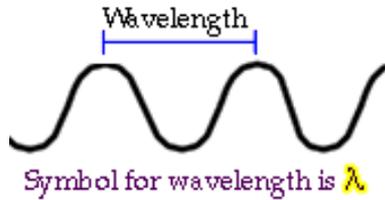


- ❑ Una sorgente emette luce : ora sappiamo che la luce e' in realta' costituita da 'quanti' detti fotoni vere e proprie particelle di luce.
- ❑ I fotoni emessi dalla sorgente di luce colpiscono il bersaglio (la palla da tennis) : alcuni vengono assorbiti, altri riflessi. Questi ultimi portano informazioni 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.

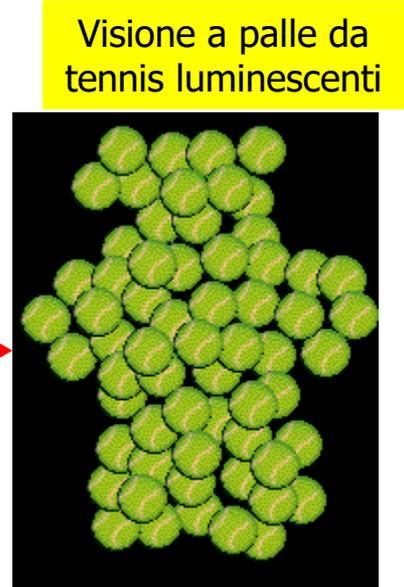
Un meccanismo di visione basato su onde sonore (pipistrelli) e' perfettamente equivalente da questo punto di vista...

Osservare l'infinitamente piccolo

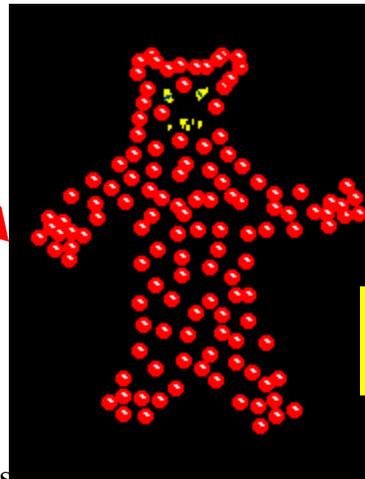
La qualità dell'immagine che si ottiene dipende dal tipo di 'luce' che si utilizza (tecnicamente la lunghezza d'onda) :



Visione a palle da basket luminescenti



Visione a palle da tennis luminescenti



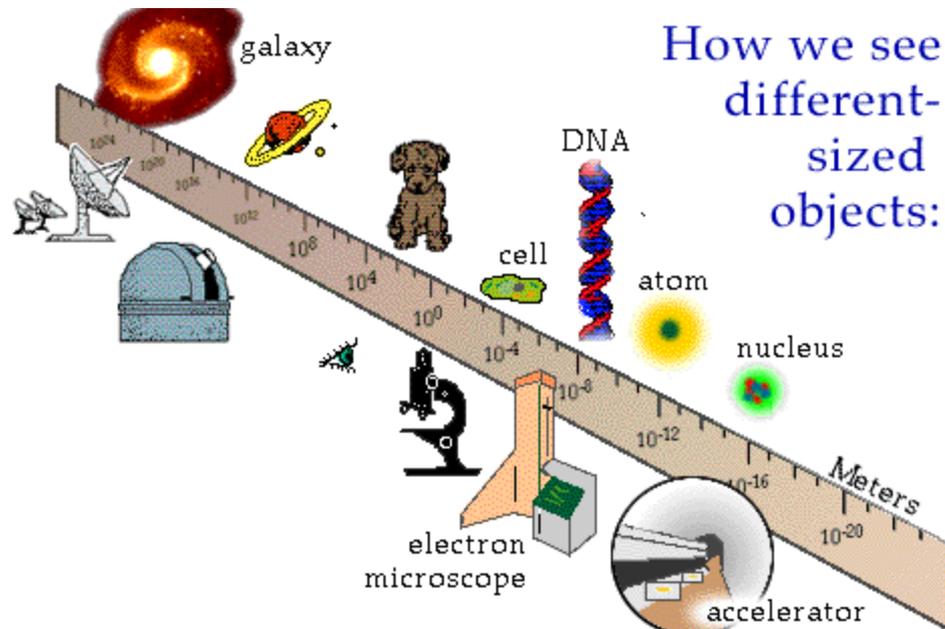
Visione a sassolini luminescenti

I nostri occhi (rivelatori) possono percepire la luce di lunghezza d'onda di ~ 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.

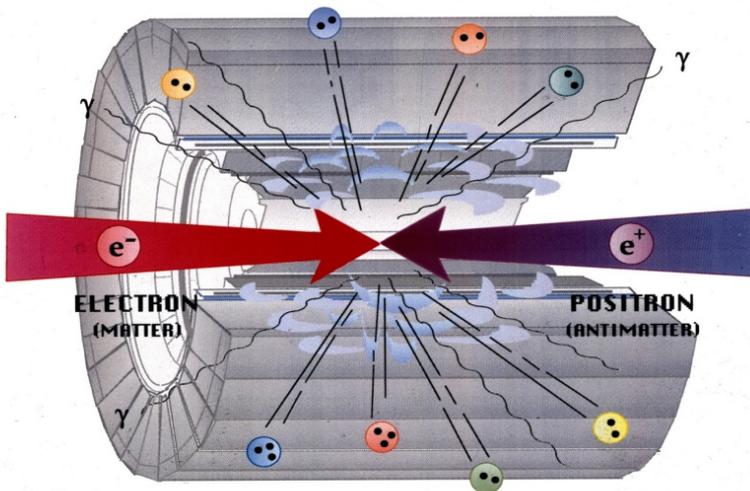
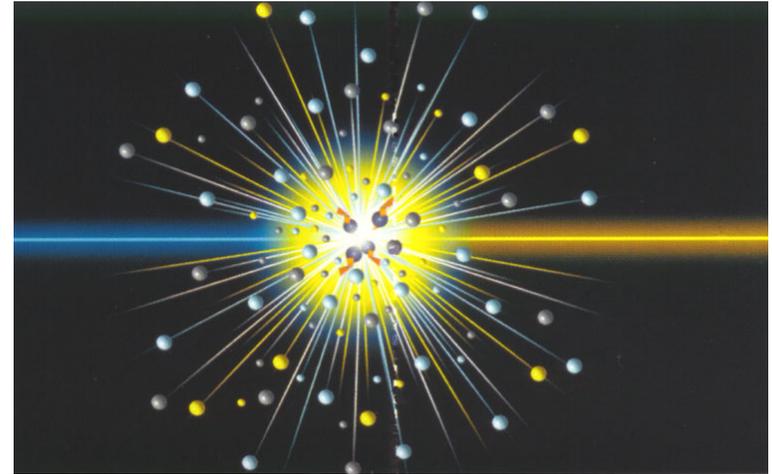
- ❑ quando le distanze che vogliamo esplorare sono molto piccole (dalle dimensioni atomiche in avanti) la luce non e' sufficiente (lunghezza d'onda troppo lunga..)
- ❑ Ogni particella ha un comportamento ondulatorio (come il fotone) : maggiore e' la sua energia e minore e' la sua lunghezza d'onda
 - ❑ Accelerare le particelle significa create 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. La teoria **prevede** quali e quante particelle nuove vengono prodotte!

Perche' facciamo collidere le particelle? Essenzialmente due motivi:

- studiare la loro struttura interna (osservare dettagli sempre 'piu' piccoli')
- usare l'energia disponibile nella collisione per creare nuove particelle

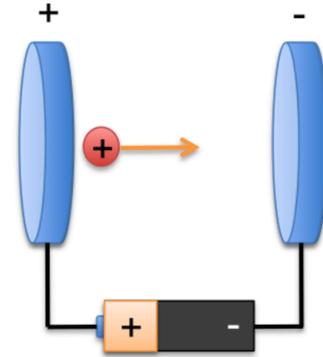
❑ Gli **acceleratori** sono le macchine con cui produciamo nuove particelle

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

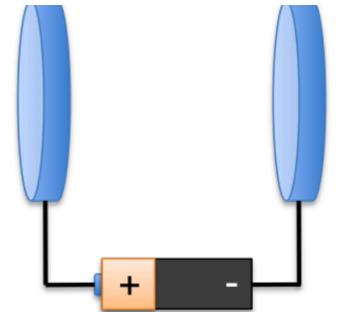
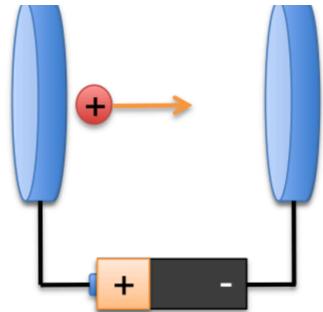


Come funziona un acceleratore?

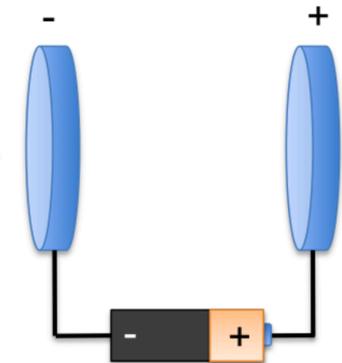
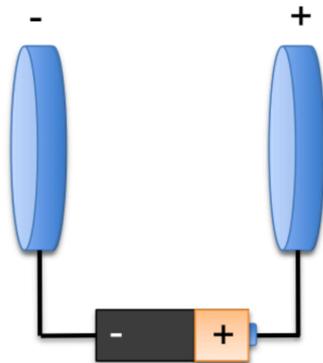
Per accelerare una particella carica possiamo usare due piani conduttori carichi



Ne possiamo mettere molti in cascata : ogni particella deve trovare il campo con la polarita' giusta !



Le particelle che circolano nella macchina si raggruppano in "pacchetti" (10^{11} protoni ad LHC)



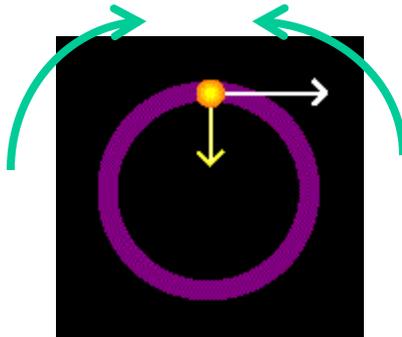
Come funziona un acceleratore?

- ❑ Accelerazione : le particelle vengono accelerate (incrementando la loro energia cinetica) utilizzando campi elettrici
 - ❑ 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 le curviamo le particelle ?

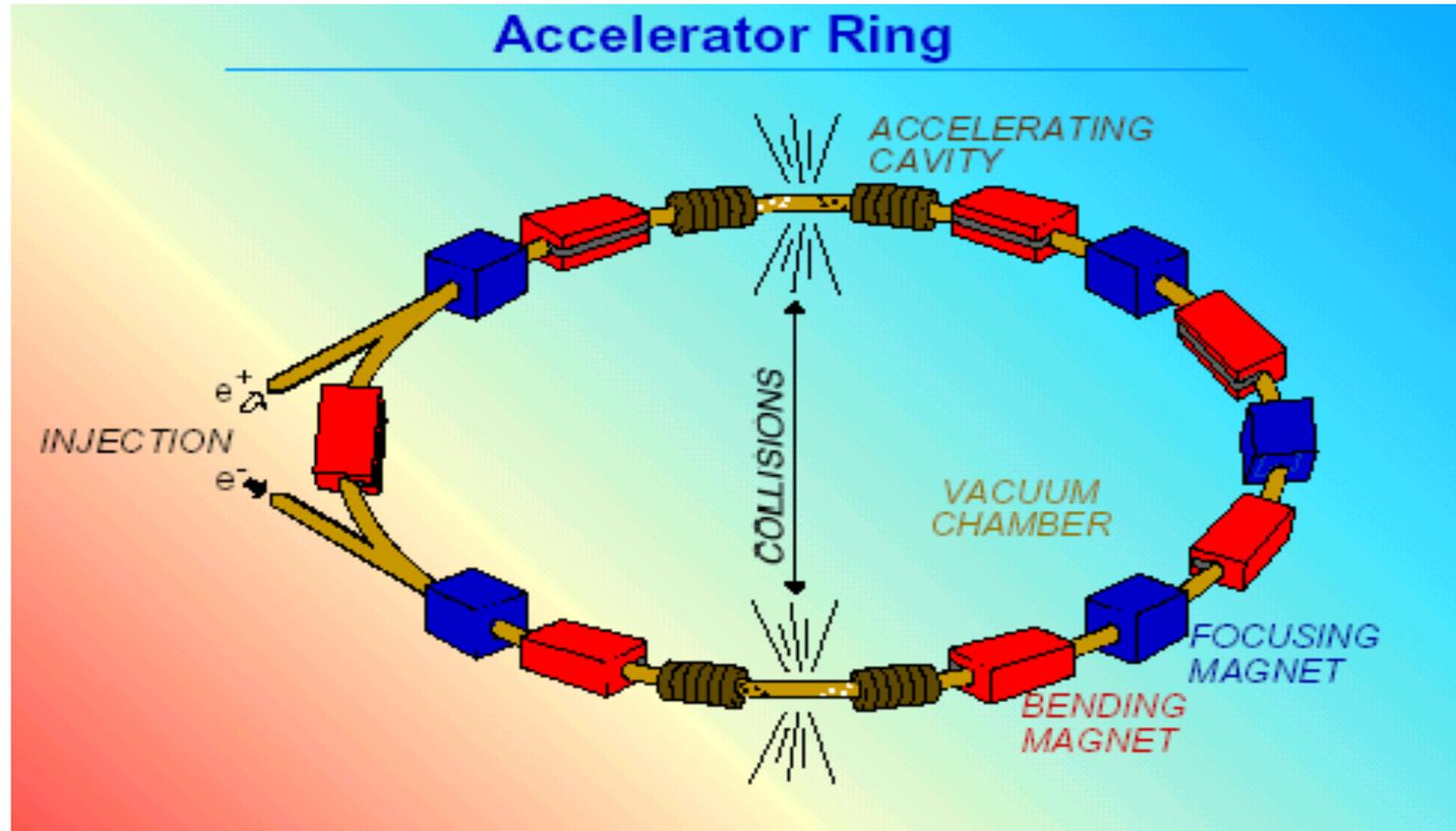
Per studiare la struttura della materia a scale sempre piu' piccole abbiamo bisogno di macchine che possano fornire sempre piu' energia. Parallelamente per mantenere in orbita i fasci sono necessari magneti sempre piu' potenti che non sono facili da realizzare!

□ ad LHC 1232 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

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

Come funziona un acceleratore?



Curvatura

Accelerazione

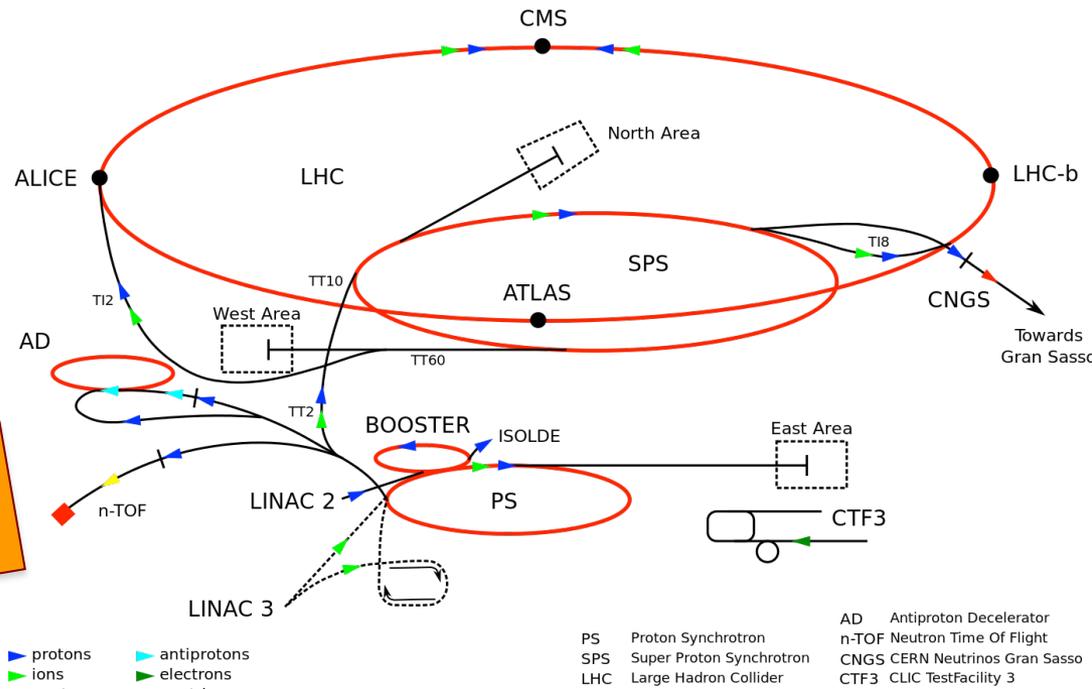
Magneti superconduttori

Cavità a radiofrequenza

Come funziona un acceleratore?



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

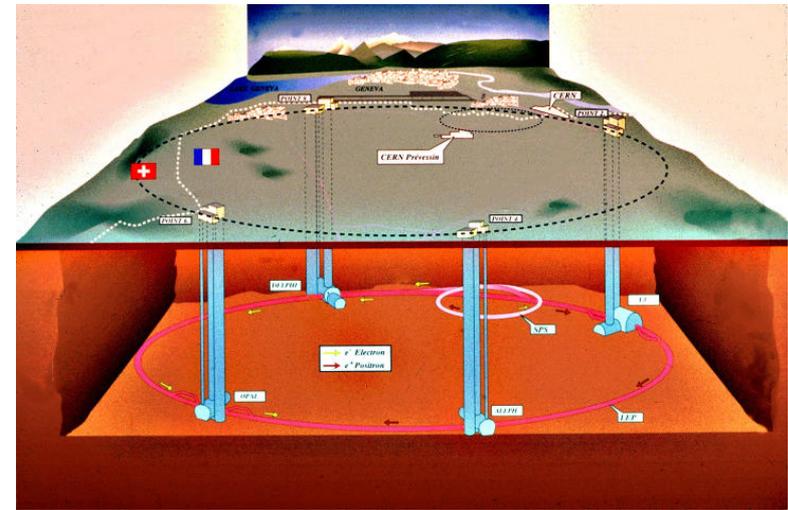


Quante collisioni?

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: LHC fa scontrare pacchetti a 40 MHz !

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!

La nuova frontiera : il Large Hadron Collider

Fascio vive ~ 10 ore,
10 miliardi di chilometri
(andata e ritorno
Terra-Nuttuno)

$T = 1.9^\circ \text{ K}$

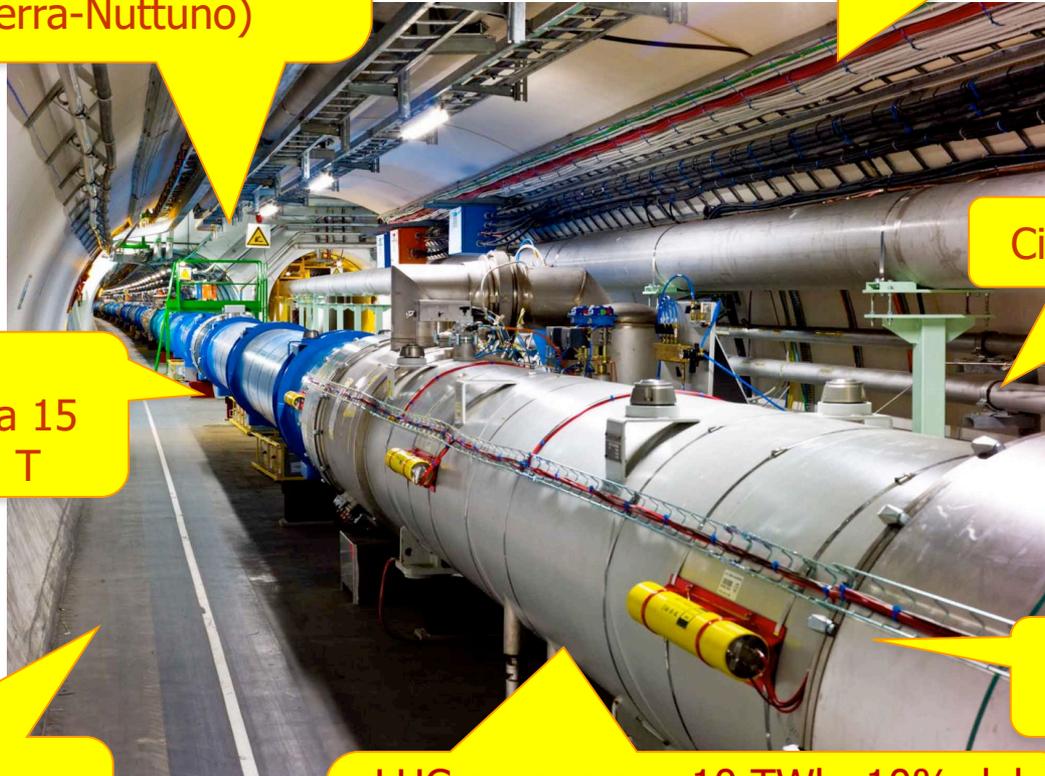
Circonferenza = 27 km

1232 dipoli
superconduttori da 15
metri per $B=8.3 \text{ T}$

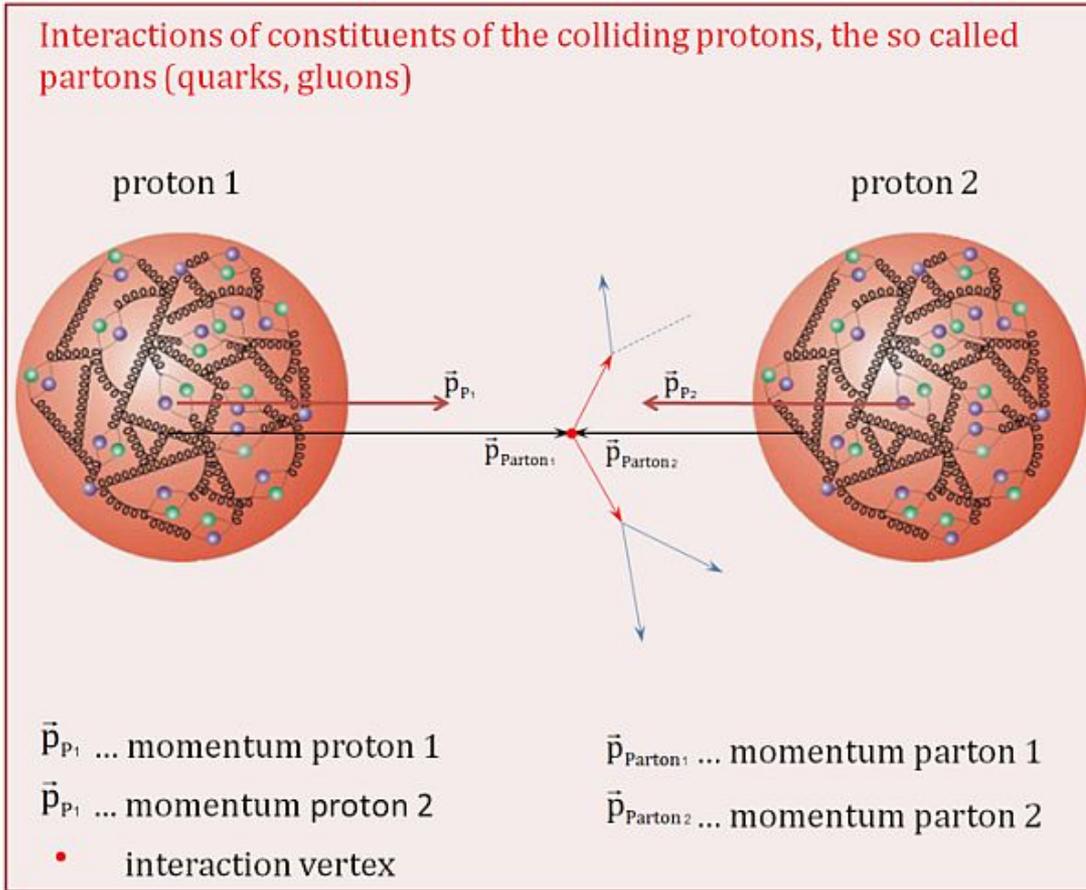
1500 tonn cavi
superconduttori

40 Milioni di collisioni al
secondo

LHC consuma ~ 10 TWh, 10% del
consumo del cantone di Ginevra,
approssimativamente il consumo
della citta' (200000 abitanti)

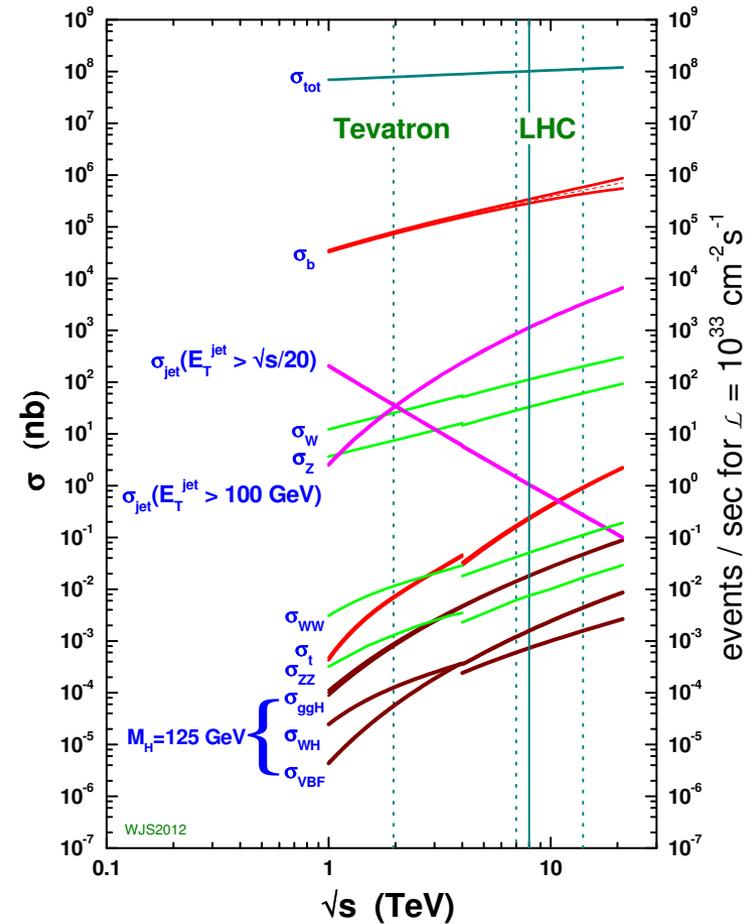


Collisioni protone-protone:



Probabilità !!

proton - (anti)proton cross sections



The LHC experimental conditions

Modello Standard !

- Just a few remarks on luminosity : for a process with a given cross section σ_{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 :

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

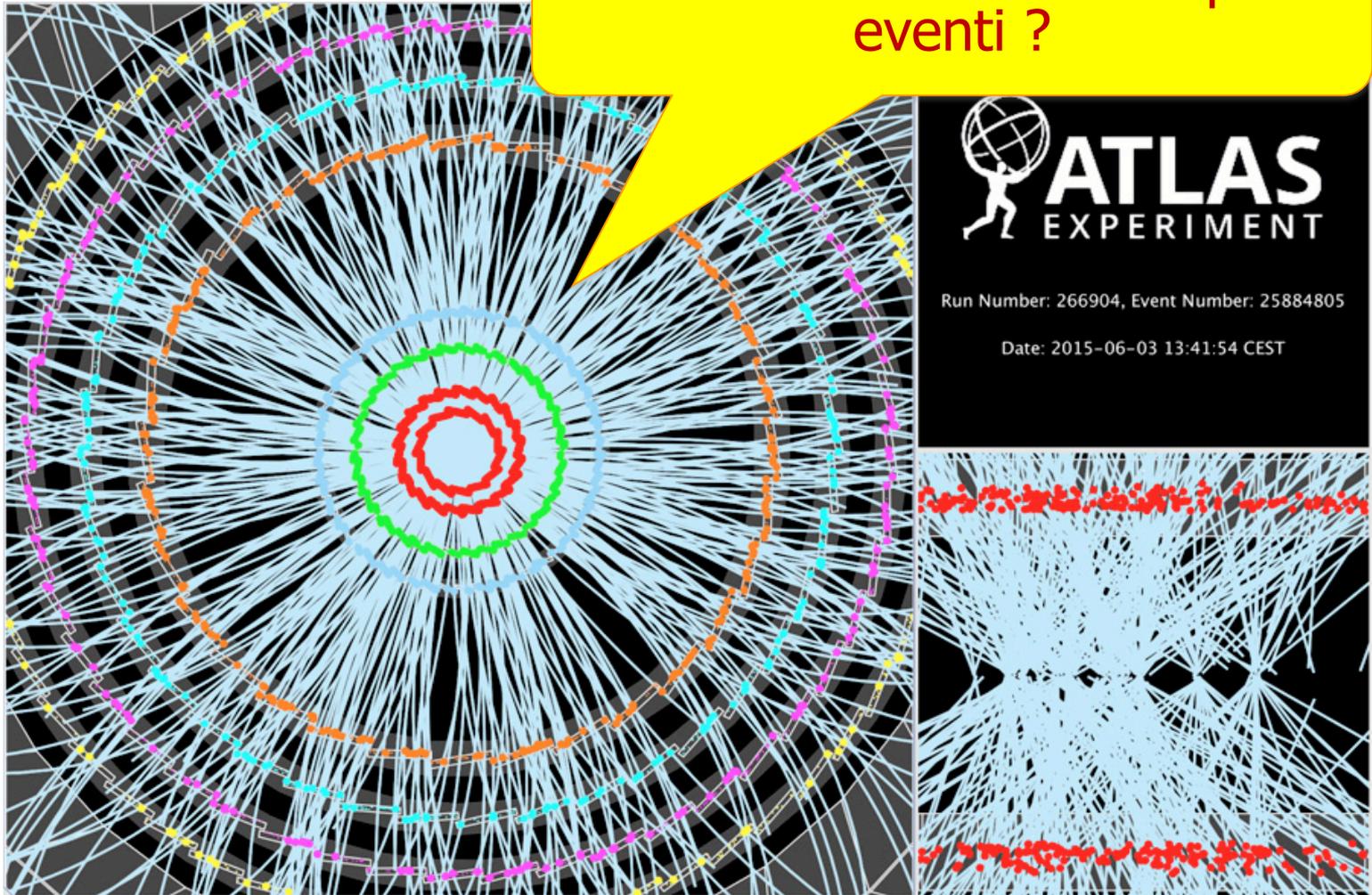
where f is the frequency, n_1 and n_2 the number of particles per bunch, σ_x and σ_y the size of the beam in the transverse plane

- 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

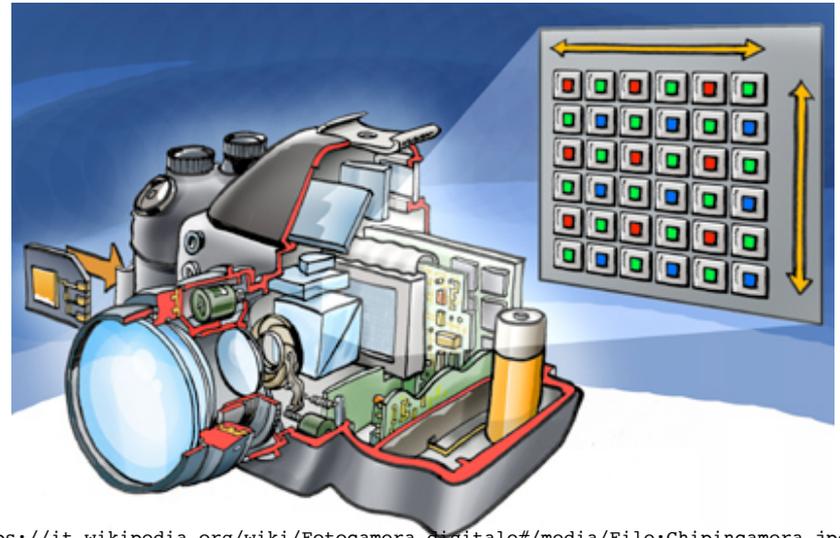
A real collision

Ma come si "osservano" questi eventi ?



Come osservare le particelle?

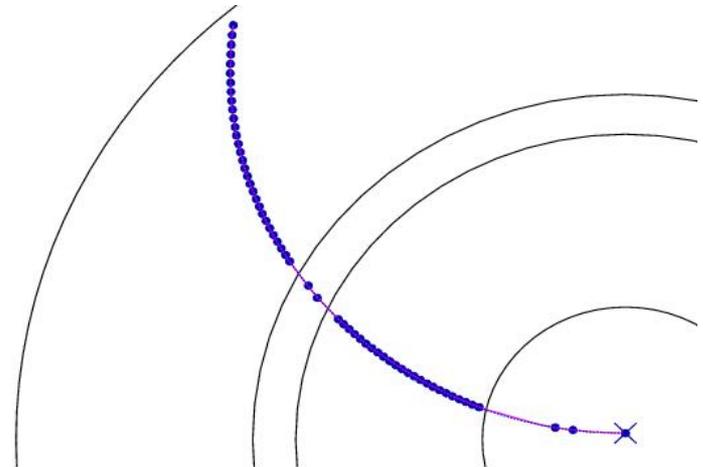
- ❑ Il concetto base e' che una particella attraversando un materiale lascia una traccia del suo passaggio provocando qualche fenomeno nel mezzo che ha attraversato
- ❑ Un rivelatore e' essenzialmente un materiale corredato di un apposito sistema di lettura in grado di misurare l'effetto prodotto dal 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
 - ❑ Fotodiodi al silicio : forniscono un segnale elettrico quando colpiti da fotoni ("particelle di luce")



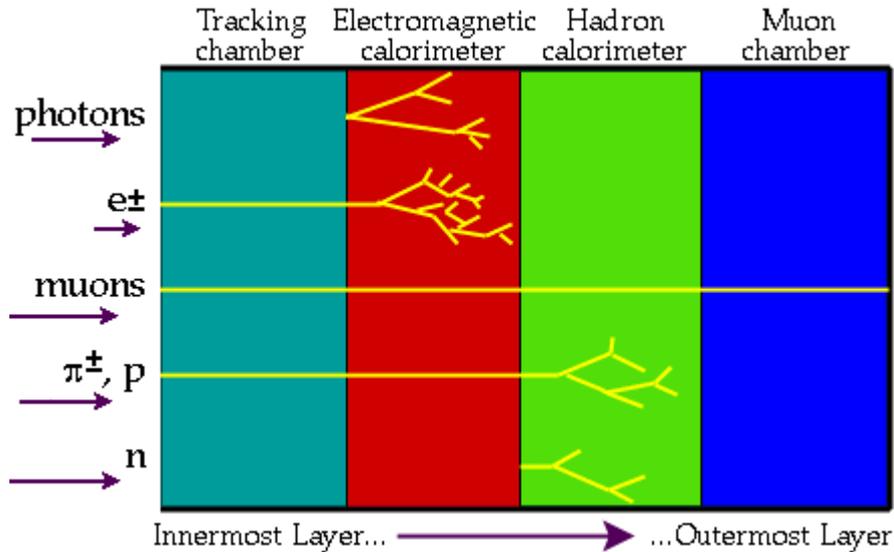
https://it.wikipedia.org/wiki/Fotocamera_digitale#/media/File:Chipincamera.jpg

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!



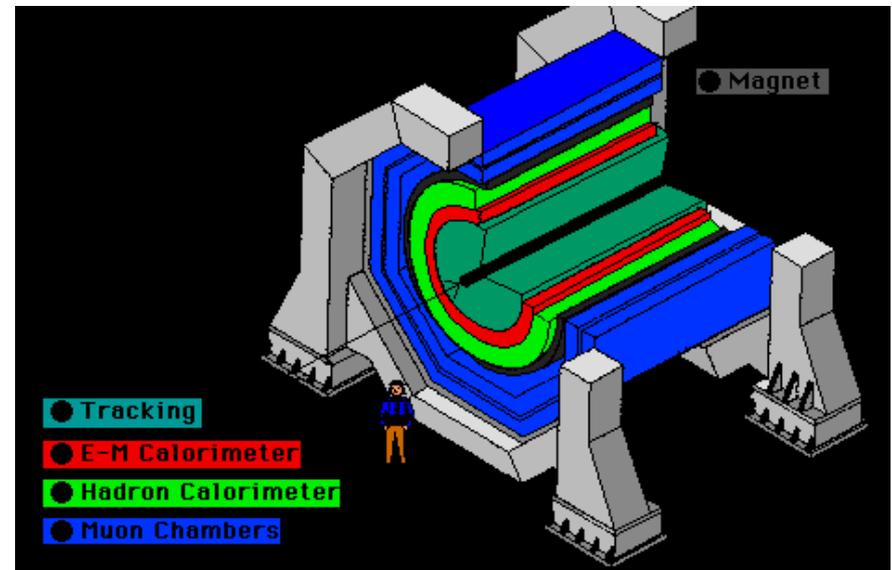
I rivelatori di particelle agli acceleratori



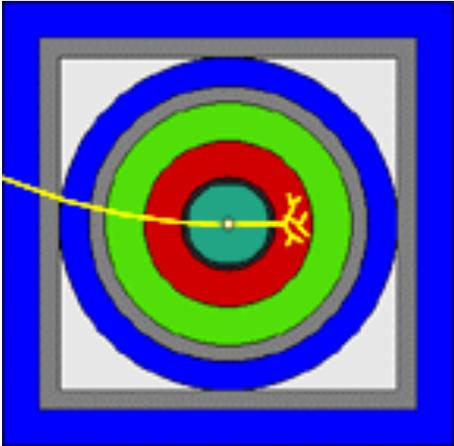
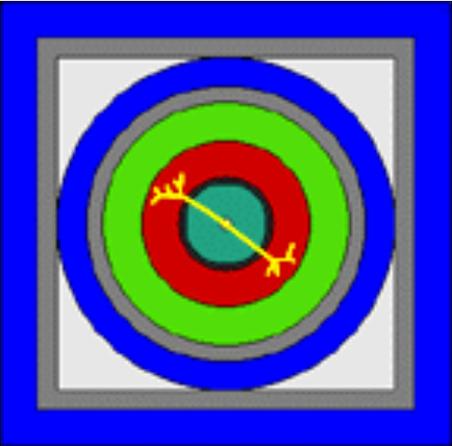
- ❑ Diverse particelle si comportano diversamente attraversando materiali diversi
- ❑ Costruire rivelatori diversi ottimizzati per ogni particella,

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

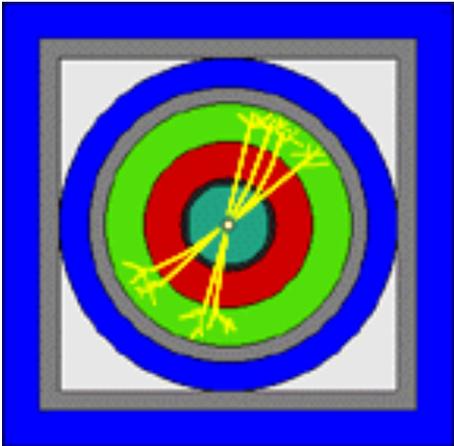
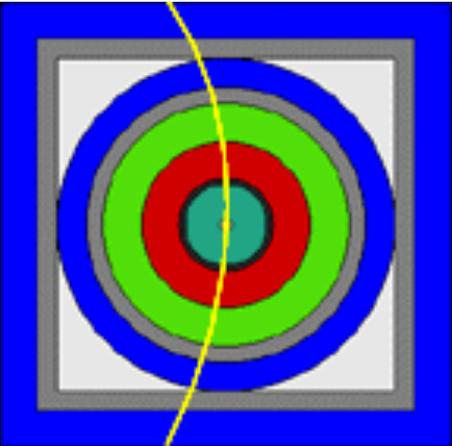
❑ Combinare tutte le informazioni da sotto-rivelatori diversi per capire di che particella si tratta!



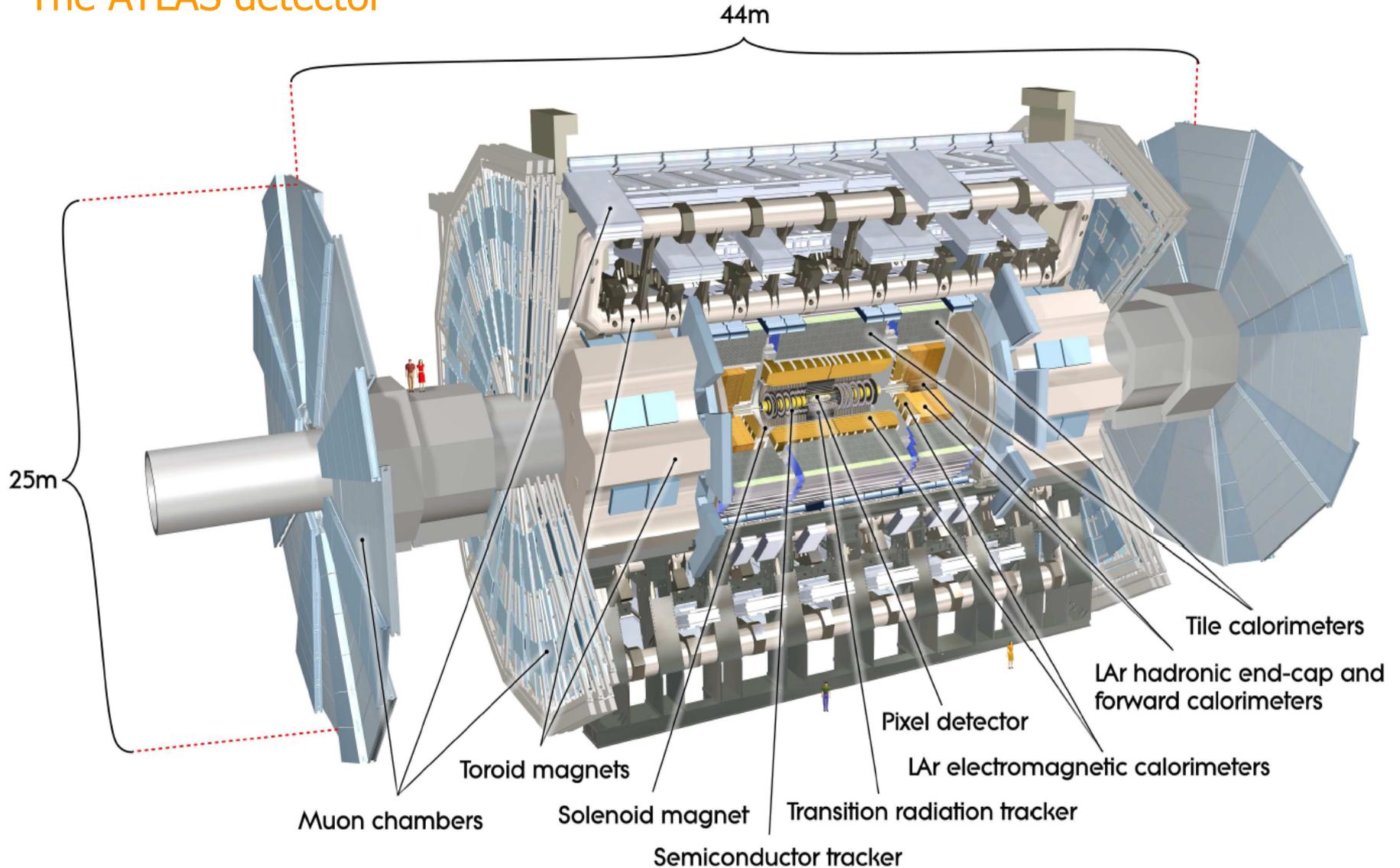
Quiz...



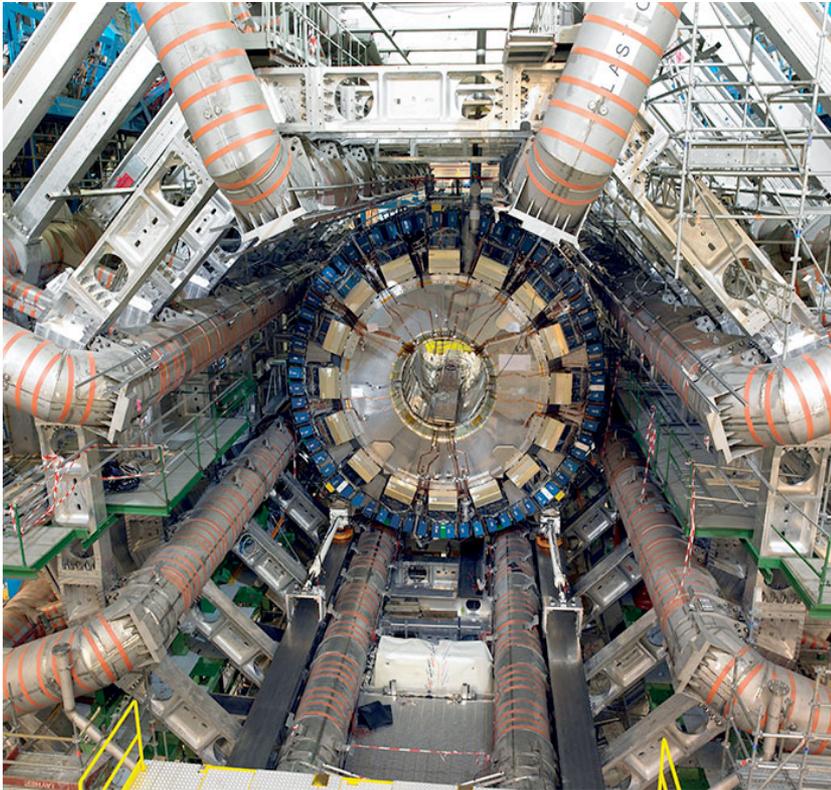
?



The ATLAS detector



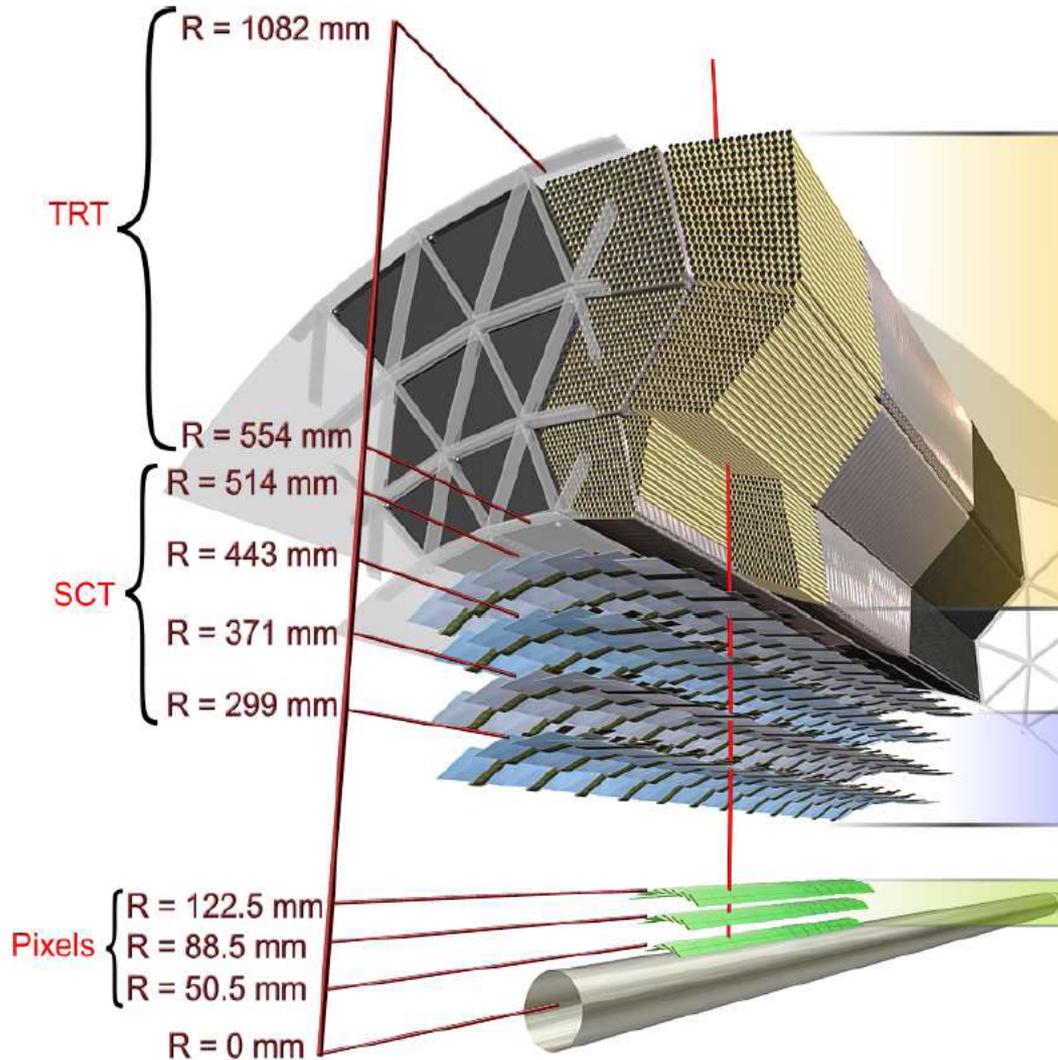
LHC detectors : magnets



- ❑ Central superconducting solenoid : generate a 2 T magnetic field used by the tracking system
- ❑ Placed outside the tracker and before the EM calo



- ❑ ATLAS external toroids : generate magnetic field for the muon spectrometer (~ 4 T).
- ❑ Superconducting magnets, current 20 kA



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

❑ Transition Radiation Tracker

❑ 350k channel tracker

❑ 4mm (diameter) straws

❑ TR detection: e/π^\pm discrimination

❑ 36 hits on track

❑ $130\mu\text{m}$ resolution

❑ Semi-Conductor Tracker

❑ 6.3M channels

❑ 4 cylinders, 8 hits/track

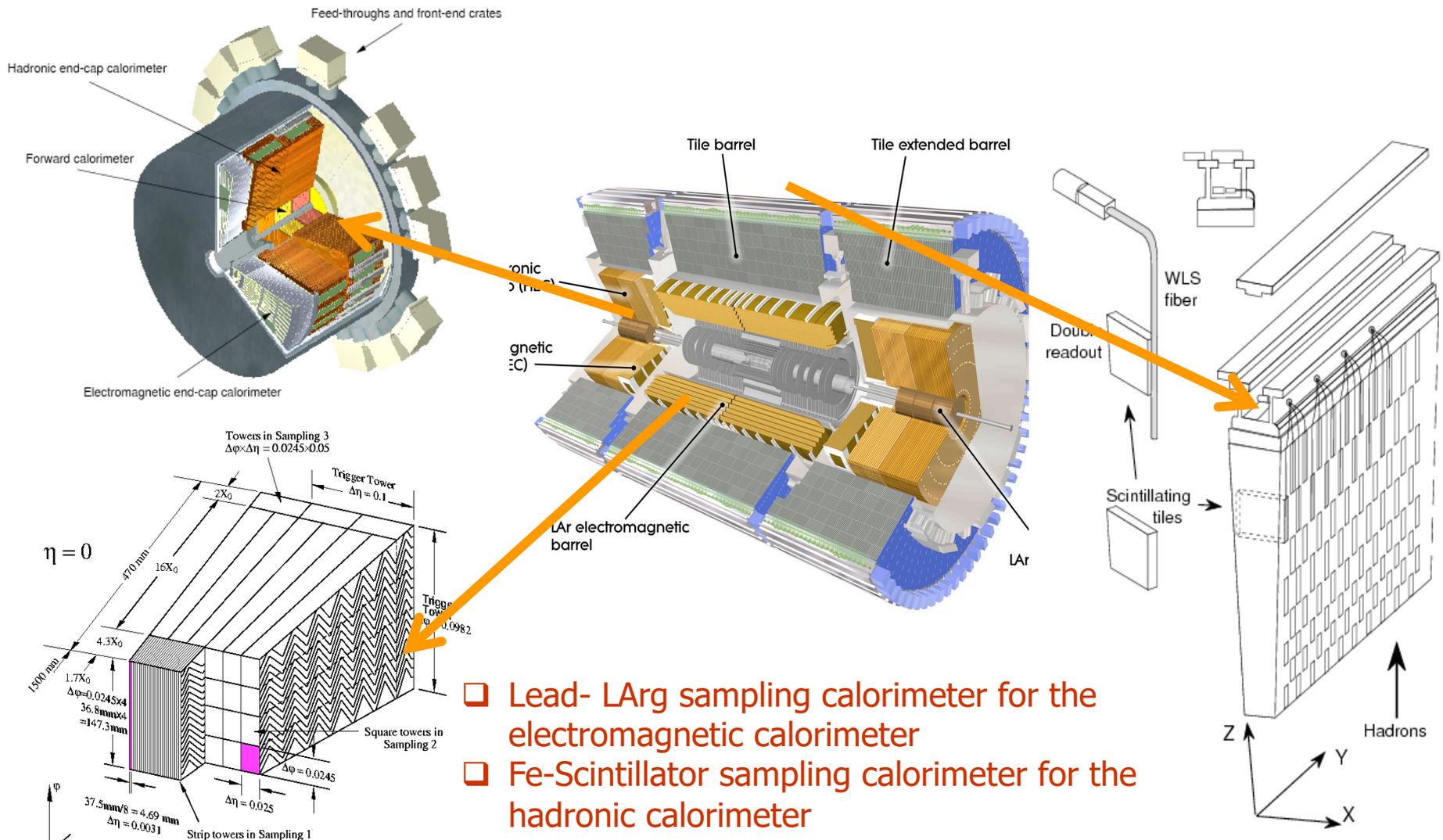
❑ $17\mu\text{m}$ resolution

❑ Pixel Tracker

❑ 80M channels, 3 layers

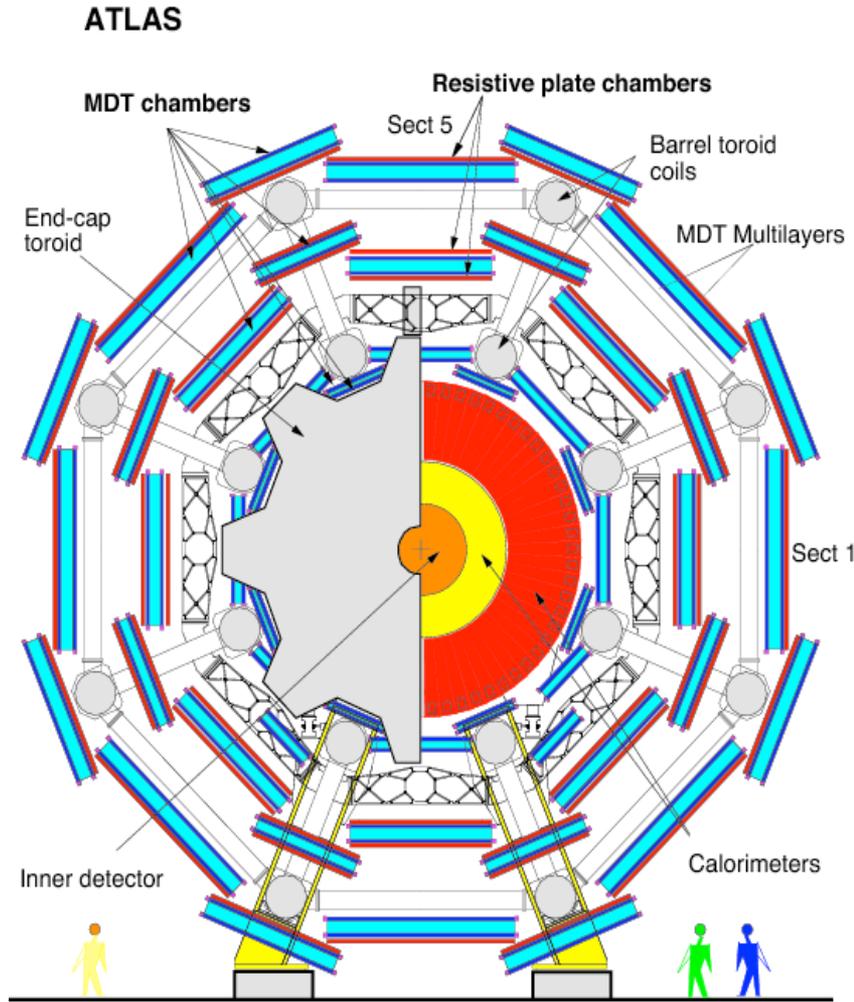
❑ $10\mu\text{m}$ resolution

LHC detectors : calorimeters

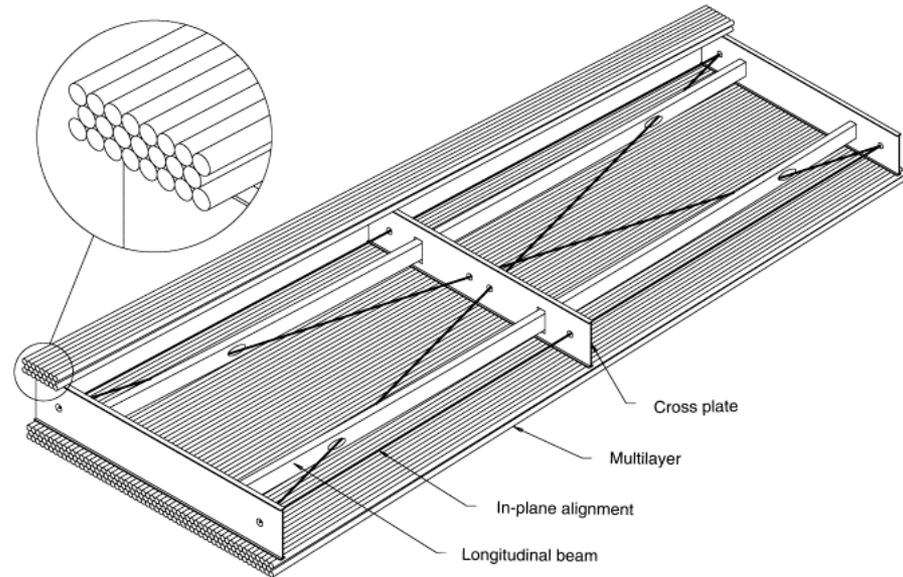


- ❑ Lead- LAr g sampling calorimeter for the electromagnetic calorimeter
- ❑ Fe-Scintillator sampling calorimeter for the hadronic calorimeter

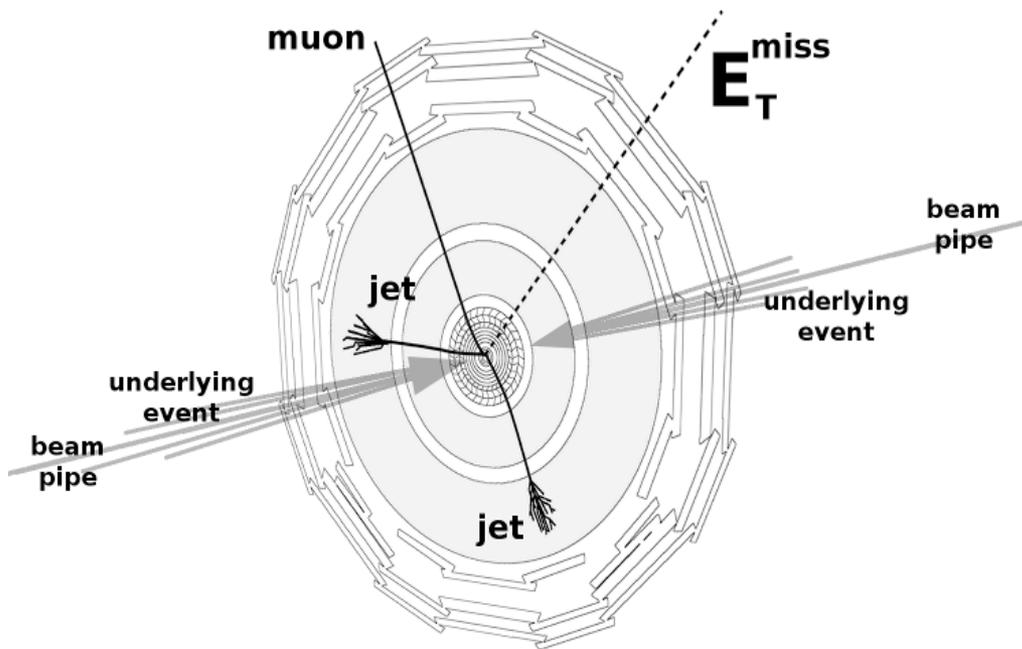
Le camere per muoni



- Tracking system based on drift chambers (MDT) and resistive plate chambers (RPC)



Can we infer the passage of weakly interacting particles ?

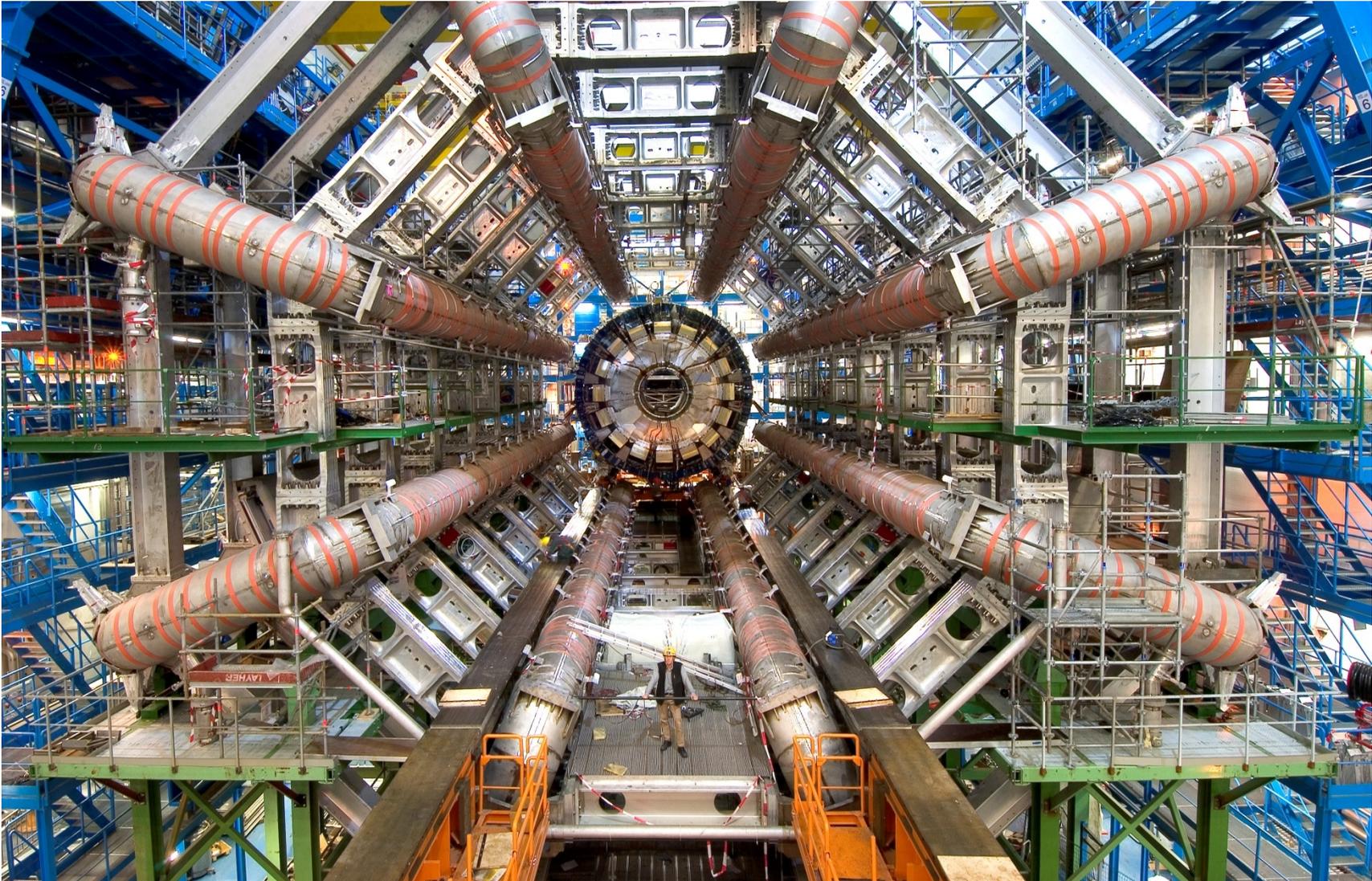


- ❑ Build an event quantity based on momentum conservation in the transverse plane
- ❑ Sum of $x(y)$ component of the momentum of all jets, electrons, photons, taus and muons
- ❑ Residual soft activity : all tracks from primary vertex not associated with any reconstructed object, pileup dependence !

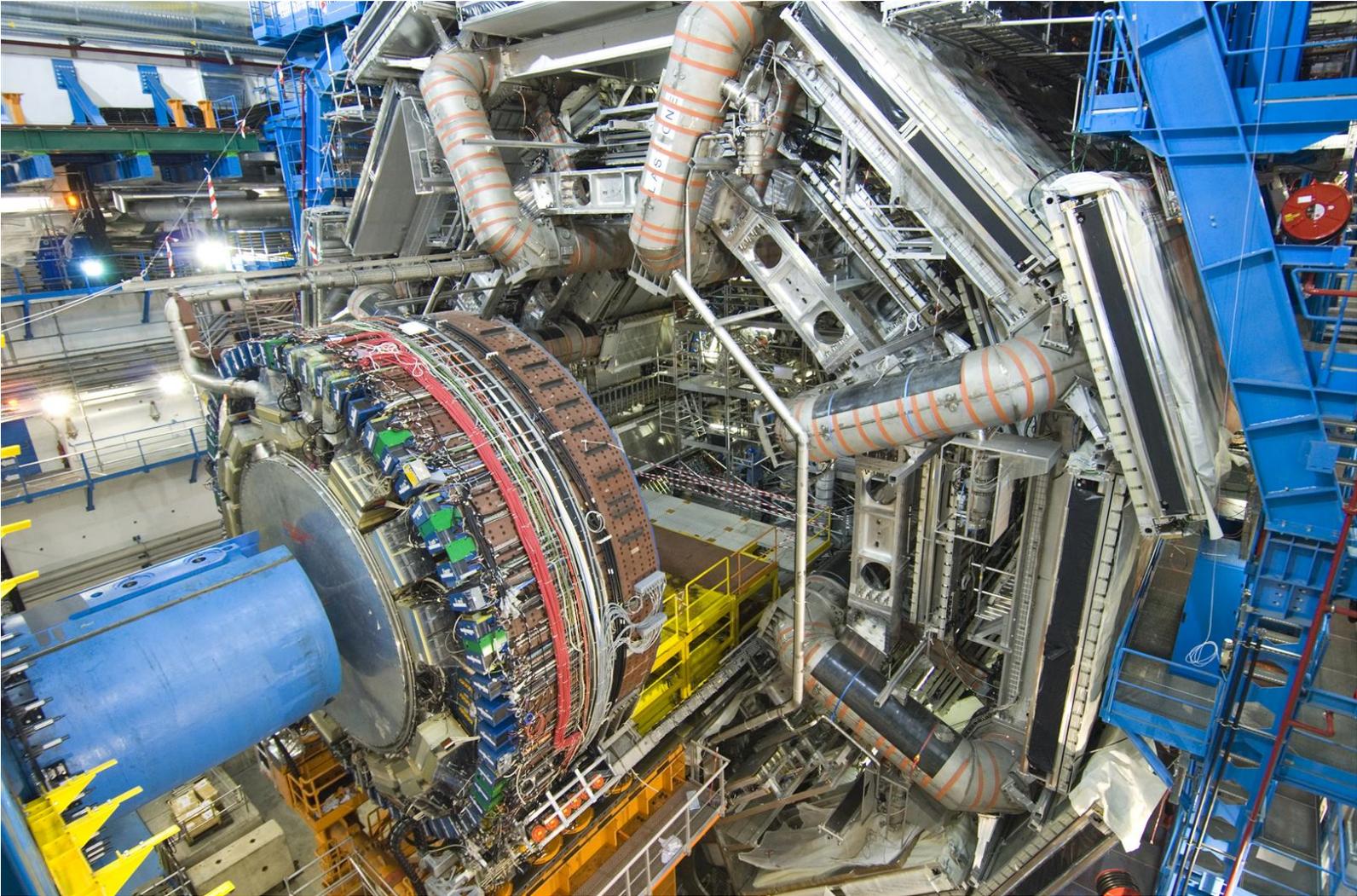
$$\mathbf{E}_T^{\text{miss}} = - \underbrace{\sum_{\text{selected electrons}} \mathbf{p}_T^e - \sum_{\text{accepted photons}} \mathbf{p}_T^\gamma - \sum_{\text{accepted } \tau\text{-leptons}} \mathbf{p}_T^{\tau\text{had}} - \sum_{\text{selected muons}} \mathbf{p}_T^\mu - \sum_{\text{accepted jets}} \mathbf{p}_T^{\text{jet}}}_{\text{hard term}} - \underbrace{\sum_{\text{unused tracks}} \mathbf{p}_T^{\text{track}}}_{\text{soft term}} .$$
$$\mathbf{E}_T^{\text{miss}} = (E_x^{\text{miss}}, E_y^{\text{miss}}),$$

$$E_T^{\text{miss}} = |\mathbf{E}_T^{\text{miss}}| = \sqrt{(E_x^{\text{miss}})^2 + (E_y^{\text{miss}})^2},$$

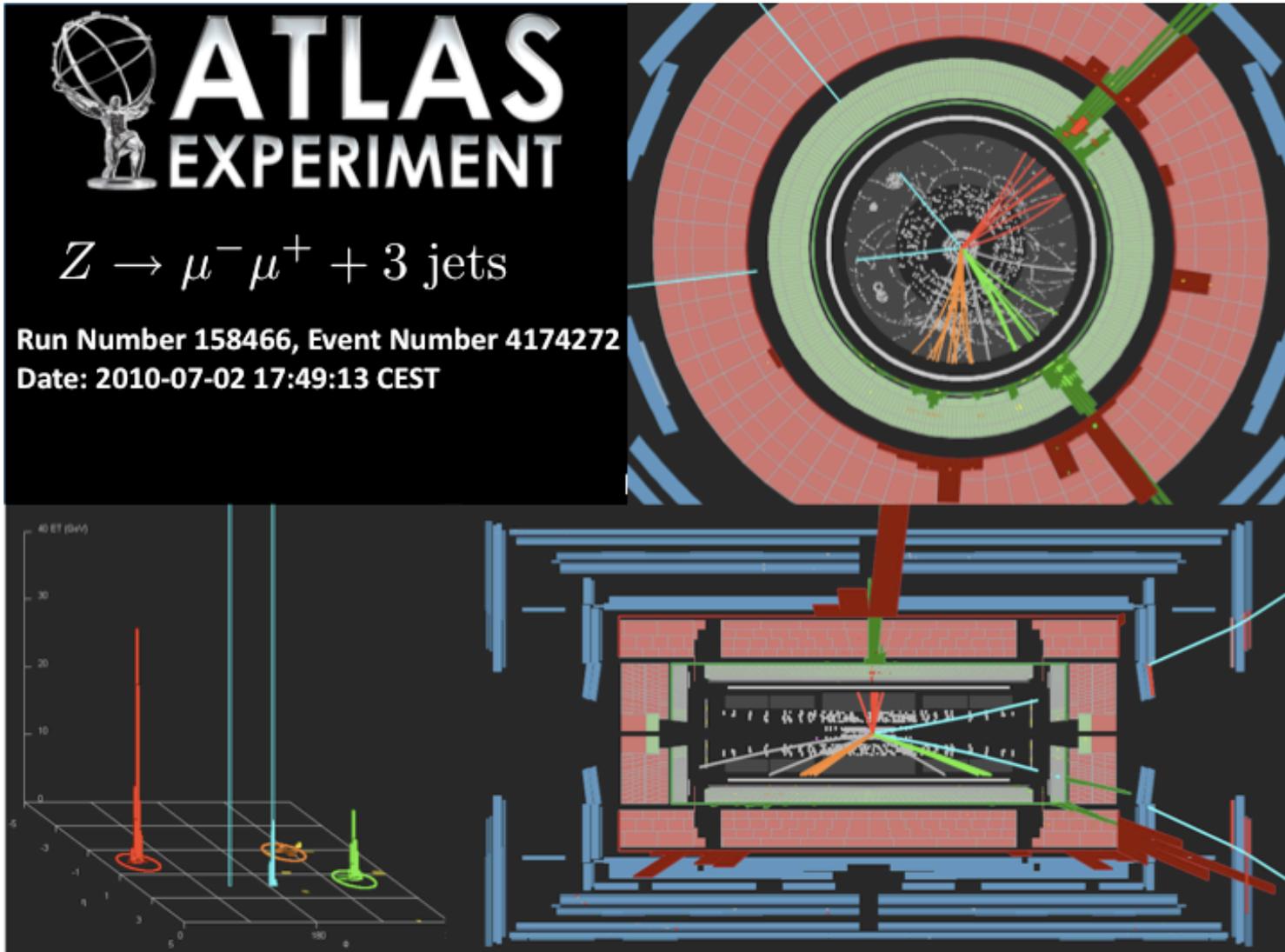
Il rivelatore ATLAS



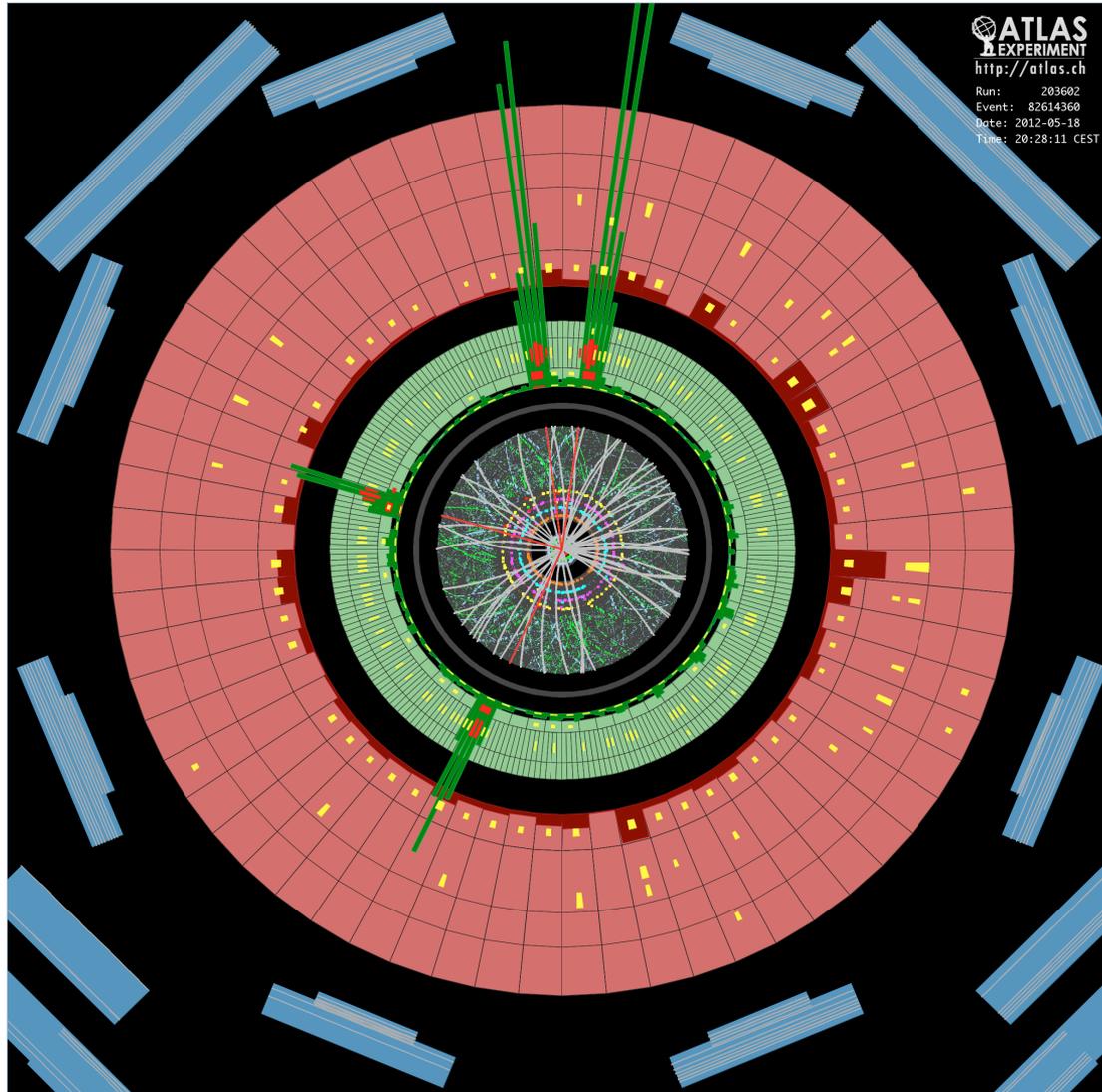
Il rivelatore ATLAS



A nice Z event



A nice H to 4 e candidate

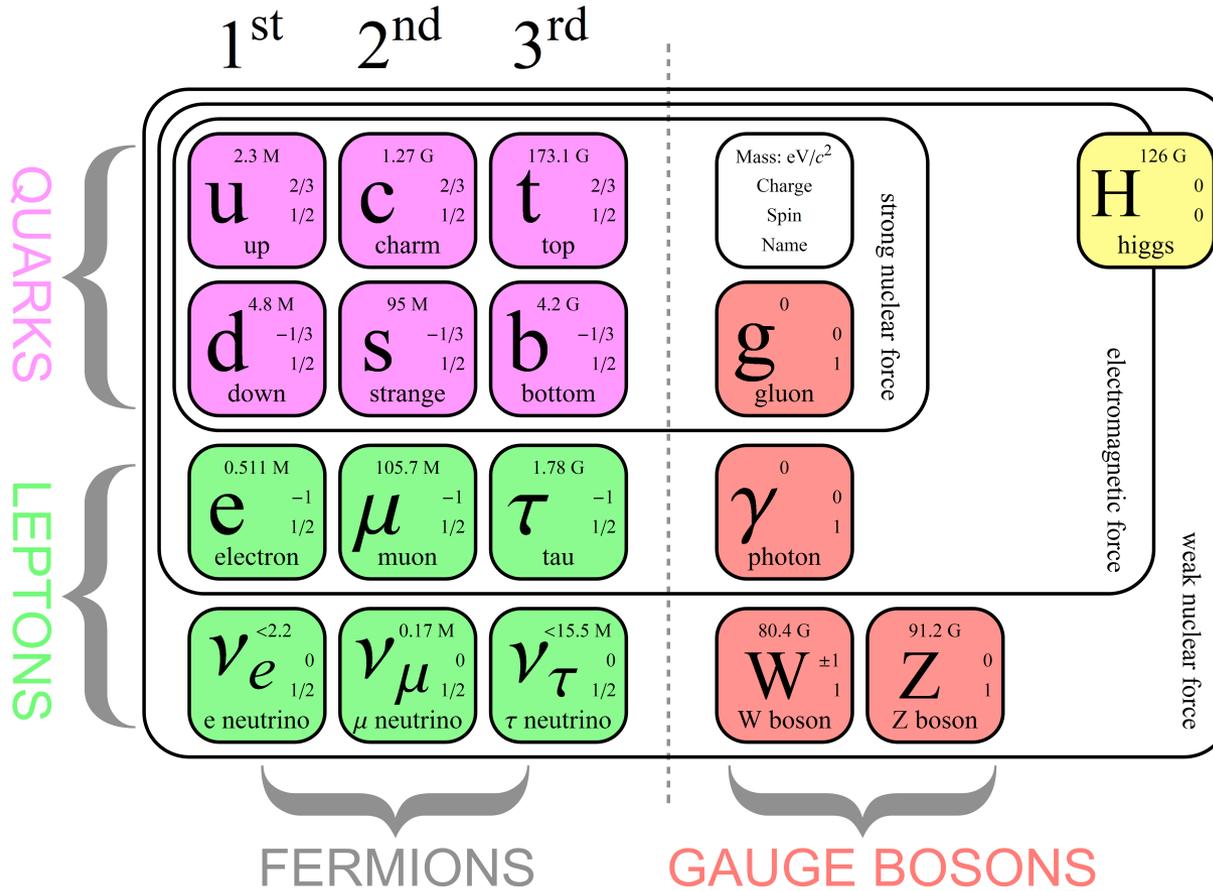


Mettiamo tutto insieme :

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

The grand picture



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 termini di 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"
-
- ❑ Inizialmente nasce come puro artificio "matematico" per salvare capra e cavoli
 - ❑ 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



The Standard Model (a bit more formal)

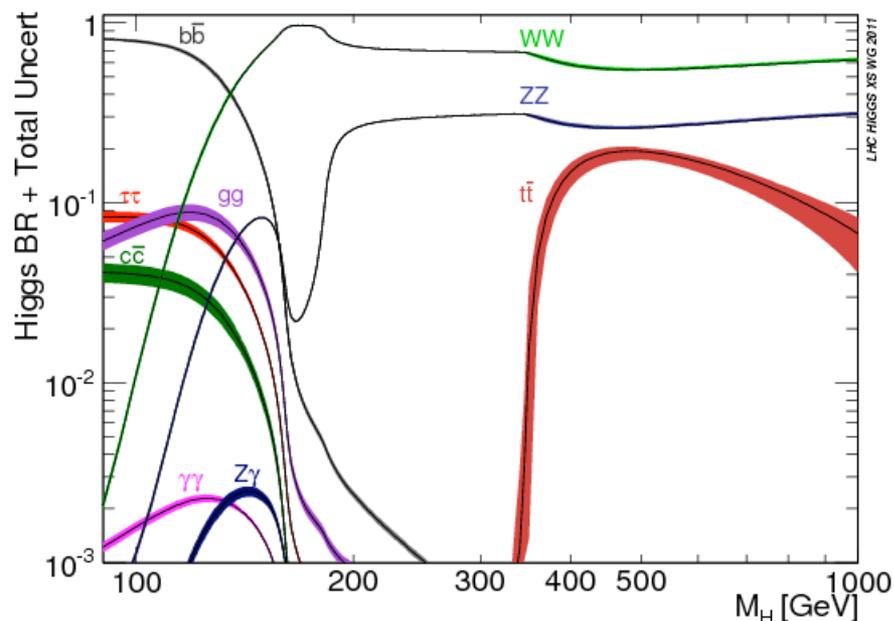
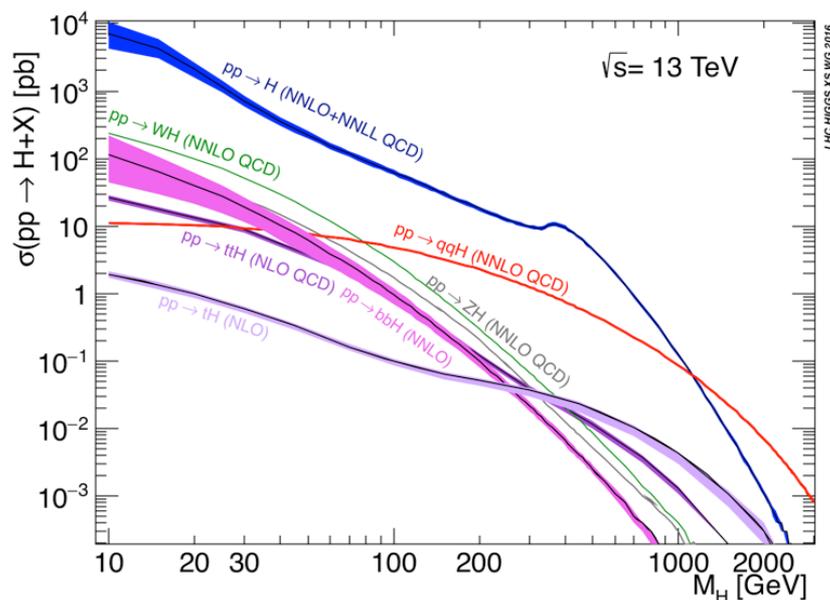
The SM is a gauge theory: interactions derived imposing local gauge invariance of the Lagrangian. Only works for 0 explicit mass fields.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}\text{tr}(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}\text{tr}(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu}) && \text{(U(1), SU(2) and SU(3) gauge terms)} \\
 & +(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R \sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R \sigma^\mu iD_\mu \nu_R + (\text{h.c.}) && \text{(lepton dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \phi M^e e_R + \bar{e}_R \bar{M}^e \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right] && \text{(electron, muon, tauon mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L) \phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R \bar{M}^\nu \phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] && \text{(neutrino mass term)} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \bar{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R \sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R \sigma^\mu iD_\mu d_R + (\text{h.c.}) && \text{(quark dynamical term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi M^d d_R + \bar{d}_R \bar{M}^d \bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] && \text{(down, strange, bottom mass term)} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L) \phi^* M^u u_R + \bar{u}_R \bar{M}^u \phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] && \text{(up, charmed, top mass term)} \\
 & +\overline{(D_\mu \phi)} D^\mu \phi - m_h^2 [\bar{\phi} \phi - v^2/2]^2 / 2v^2. && \text{(Higgs dynamical and mass term)} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{adc} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig c_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{2s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{2s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig s_w \lambda_{ij}^a (g_i^\sigma \gamma^\mu g_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda)\} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

The predictive power of the SM

- ❑ Il Modello Standard predice la sezione d'urto (probabilità che in uno scontro pp si produca un bosone di Higgs) ma non la sua massa!
 - ❑ Probabilità e' piccolissima!
- ❑ Il Modello Standard ci dice anche che il bosone di Higgs appena prodotto decade immediatamente in altro. Predice le frazioni tra i vari canali

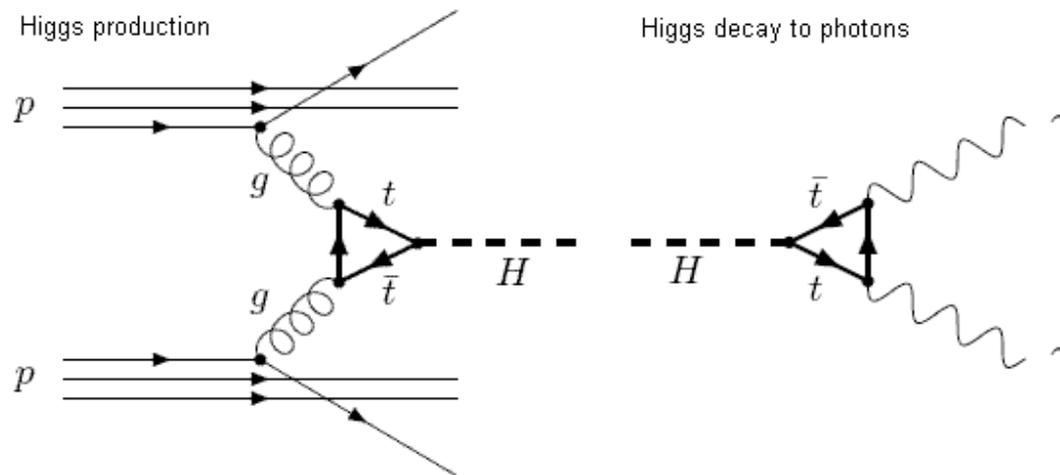


- ❑ Avevamo bisogno di una macchina che producesse tante collisioni e in grado di esplorare un range di massa elevato

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

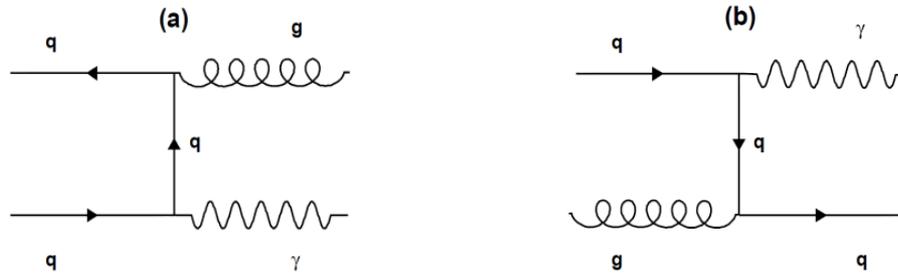
- ❑ La sezione d'urto di produzione del bosone di Higgs e' molto piccola (ie : e' raro produrlo)
- ❑ Il Boson di Higgs e' una particella capricciosa : appena viene creata si disintegra in altre particelle (due fotoni, quattro muoni etc..)
- ❑ Non solo il bosone di Higgs si manifesta con difficolta' : 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:

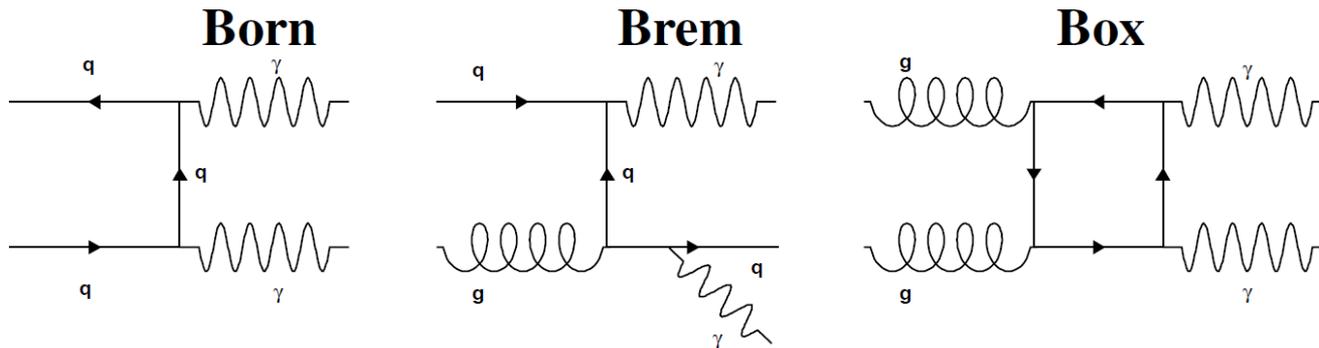


Il problema del 'fondo' : perche' e' cosi' difficile scovare l'Higgs

- ❑ **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 !

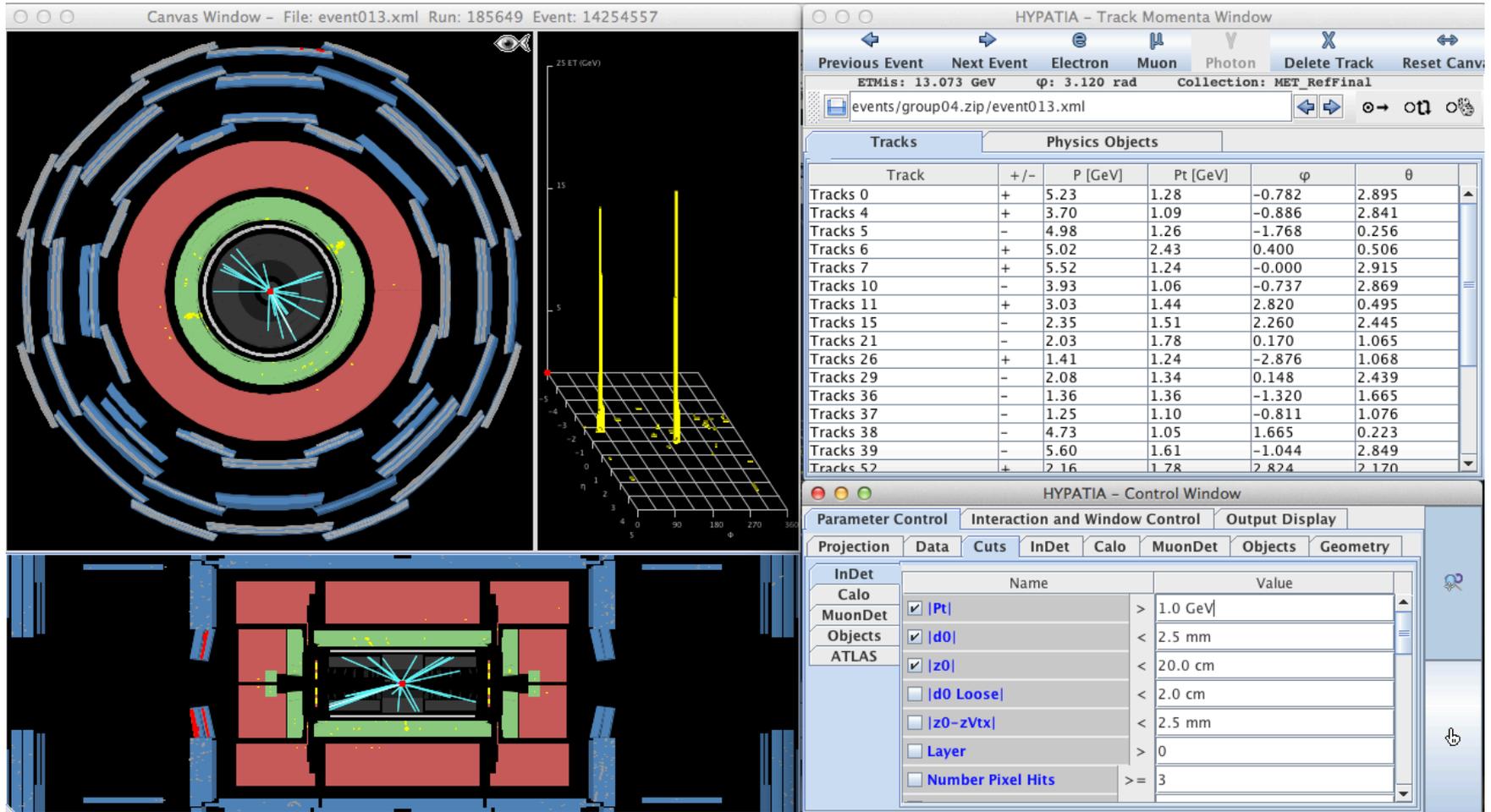


- ❑ **Fondo irriducibile** : eventi con due fotoni veri ma che NON vengono dall'Higgs. Non c'e' nulla da fare, dobbiamo conviverci !



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

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



- ❑ 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 evento con due fotoni nello stato finale posso calcolare una massa invariante

$$m_H = \sqrt{\left(\frac{(E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2})}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{(\vec{p}_{\gamma 1} + \vec{p}_{\gamma 2})}{c}\right)^2}$$

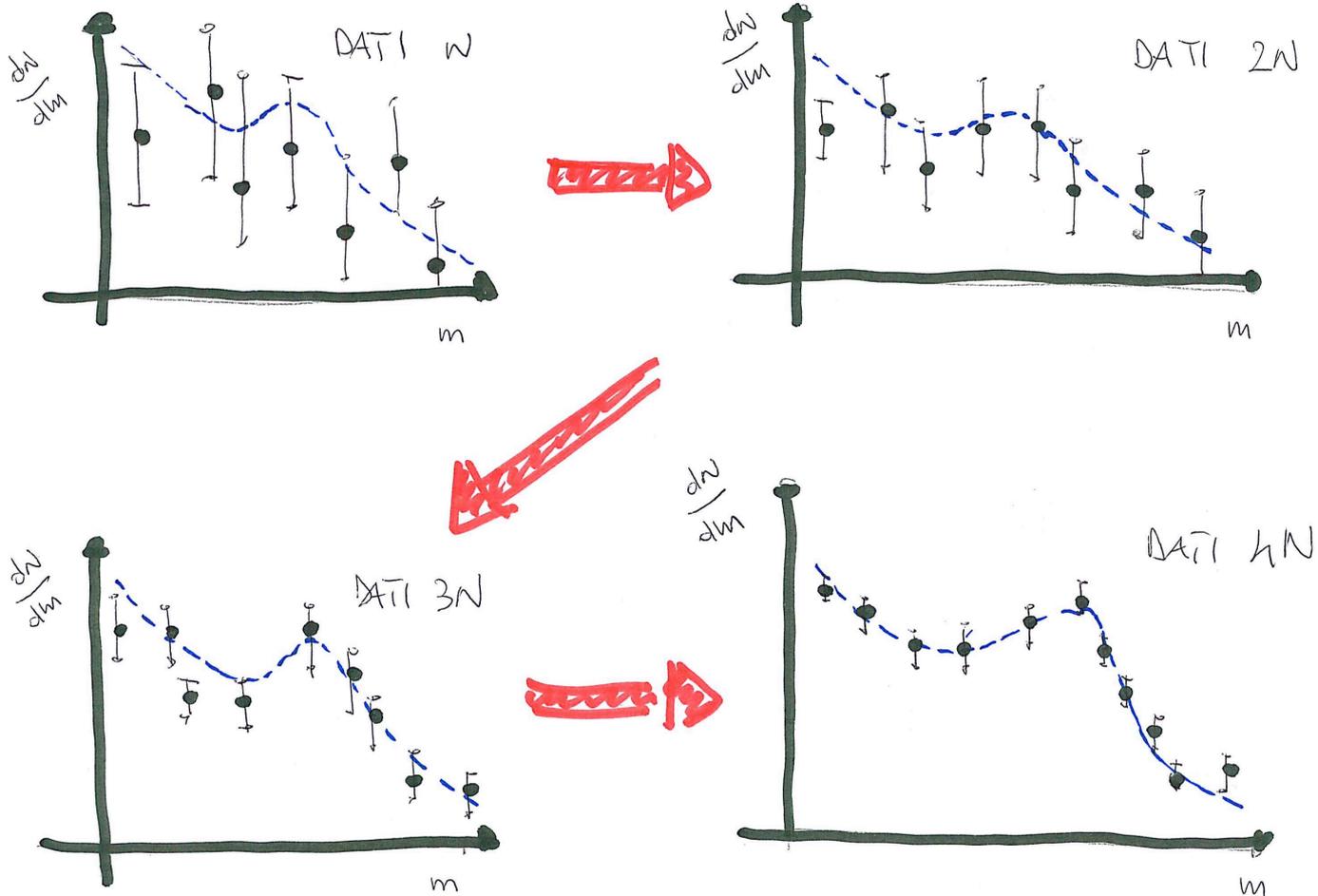
Osservare una particella :

Analizzo tutti gli eventi con due fotoni nello stato finale. Calcolo per ogni evento la massa invariante e costruisco un istogramma

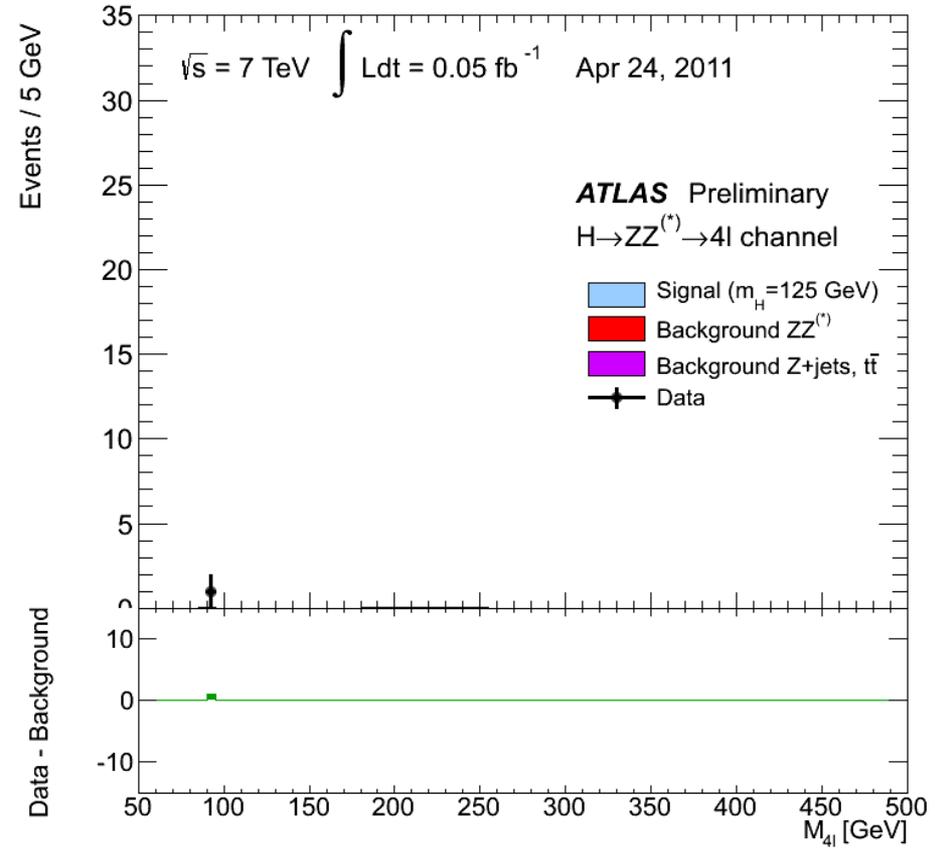
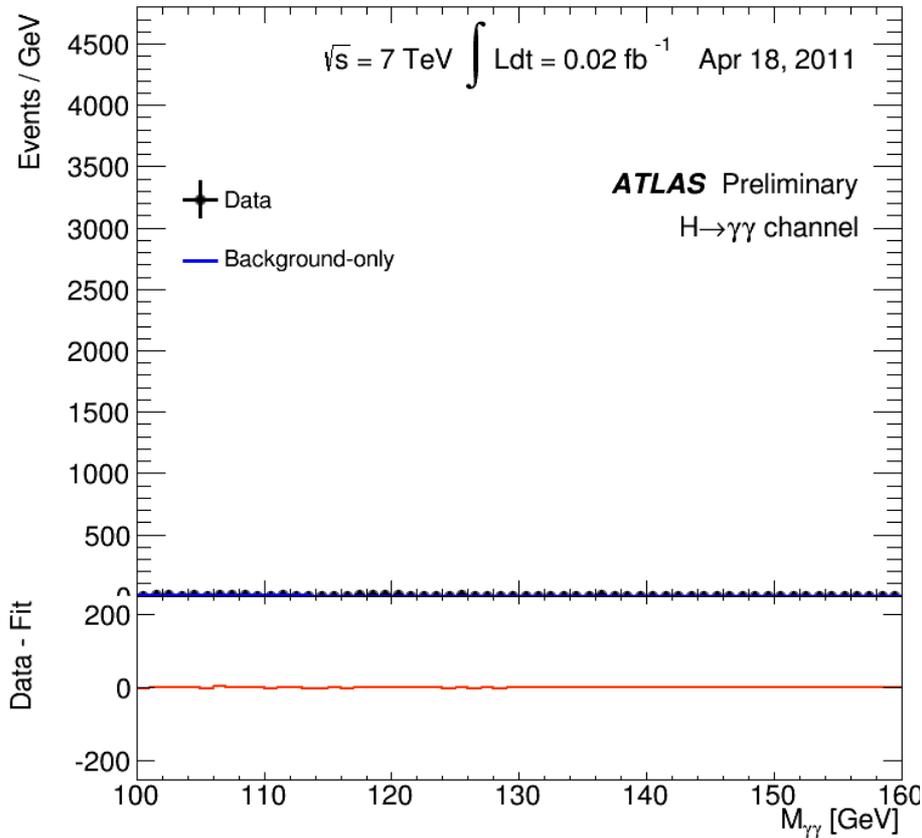


Fluttuazioni, fluttuazioni, fluttuazioni !

Perche' vogliamo raccogliere molti dati ???



Il bosone di Higgs finalmente scovato



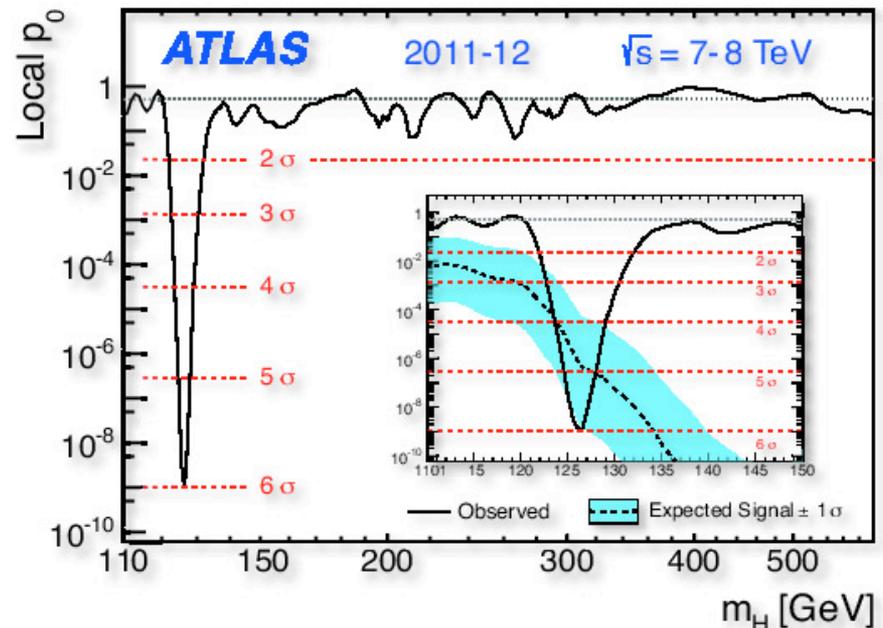
□ Un 'eccesso' di eventi ad una determinata massa rispetto a quelli attesi da processi noti dice che lì e' abbiamo generato particelle di un tipo inatteso che e' immediatamente decaduta!

Come faccio a dire che un eccesso e' significativo ?

- ❑ Test d'ipotesi : rigettare l'ipotesi nulla significa dichiarare una scoperta
 - ❑ Ipotesi nulla : c'e' solo fondo nei dati che sto guardando
 - ❑ Ipotesi segnale : c'e' fondo e segnale nei dati che sto guardando
- ❑ Qual'e' la probabilita' che una fluttuazione del fondo mi generi l'eccesso che osservo nei dati ?
 - ❑ Se e' piccola: scoperta! Se e' grande: non c'e' nulla o non ho abbastanza dati

❑ Lo stimatore approssimato della scoperta e' il p_0 e/o la significanza statistica : S / \sqrt{B}

❑ se aumento la quantita' di dati aumento la mia capacita' di osservare una particella



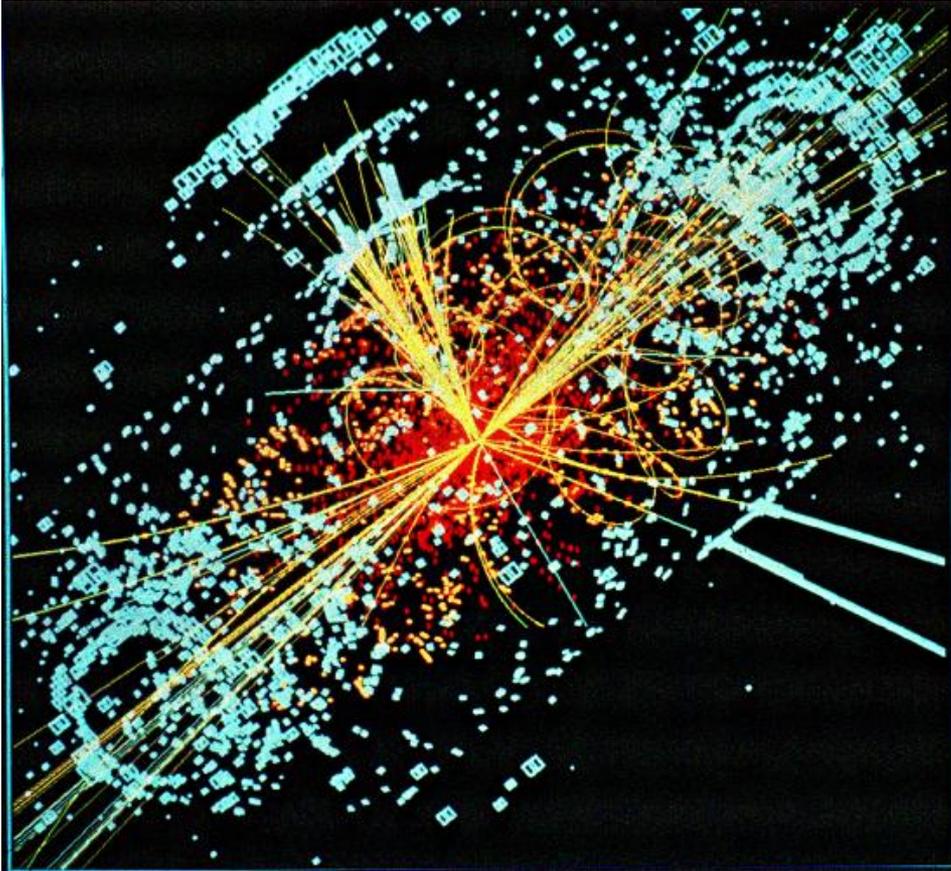
- ❑ La probabilita' di produrre un Bosone di Higgs e' molto piccola. Piu' facile lavorare con un processo piu' probabile : utilizziamo il bosone Z
- ❑ Vita media $\sim 10^{-25}$ s : il bosone Z una volta prodotto decade quasi istantaneamente (ie : non siamo in grado di misurarlo)
- ❑ Ogni gruppo avra a disposizione circa 50 eventi di dati reali raccolti da ATLAS nel 2012 alla ricerca del bosone vettore Z

Z DECAY MODES

	Mode	Fraction (Γ_i/Γ)	Scale factor/ Confidence level
Γ_1	$e^+ e^-$	(3.363 \pm 0.004) %	
Γ_2	$\mu^+ \mu^-$	(3.366 \pm 0.007) %	
Γ_3	$\tau^+ \tau^-$	(3.370 \pm 0.008) %	
Γ_4	$\ell^+ \ell^-$	[a] (3.3658 \pm 0.0023) %	
Γ_5	invisible	(20.00 \pm 0.06) %	
Γ_6	hadrons	(69.91 \pm 0.06) %	

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 decifrino 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 produces ~50 Petabytes (~50 million Gigabytes) of data annually, which thousands of scientists around the world will access and analyse.

□ Today, the **WLCG** combines the computing resources of more than 1 million processors from over 170 sites in 43 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. Approximately 1 exabyte of storage.



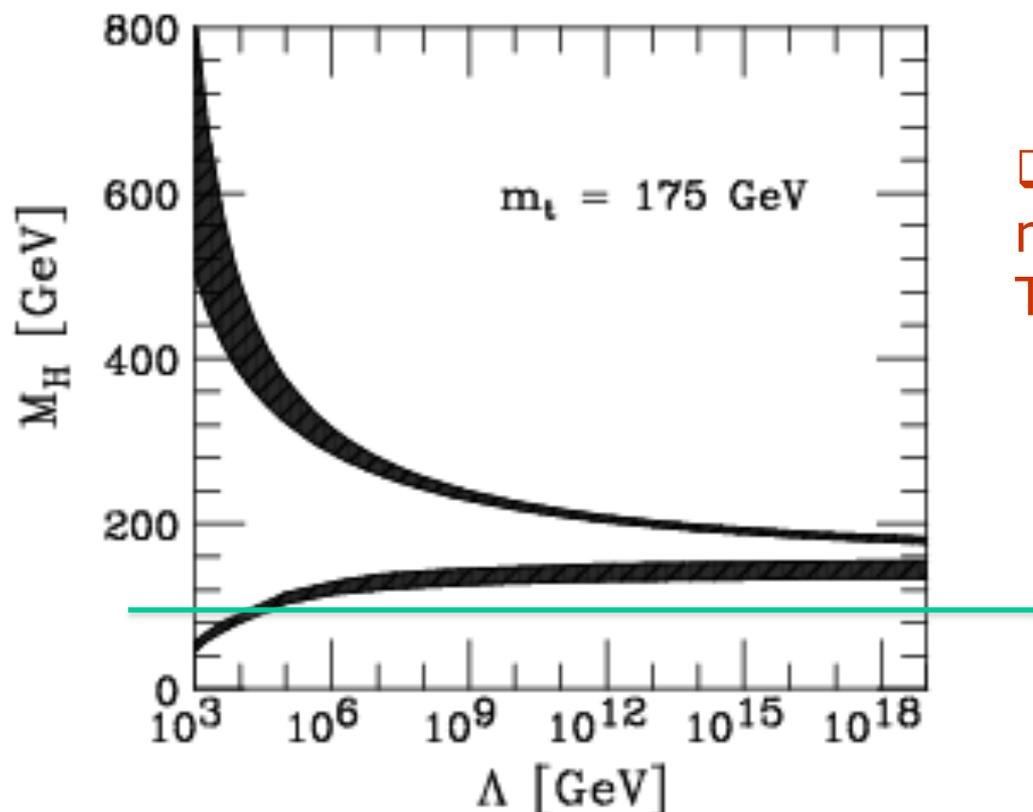
□ Milano is a T2 site : 1600 cores and 1.5 PB of disk

- ❑ 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.

- ❑ LHC e i suoi rivelatori sono macchine formidabili che ci stanno permettendo di fare un salto in avanti nella nostra comprensione della natura
- ❑ 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.
- ❑ 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
- ❑ Il bosone di Higgs è l'ultimo (??) mattone fondamentale della natura:
 - ❑ Tuttavia la scoperta apre interrogativi ancora più profondi e complessi, non siamo alla fine della storia!

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

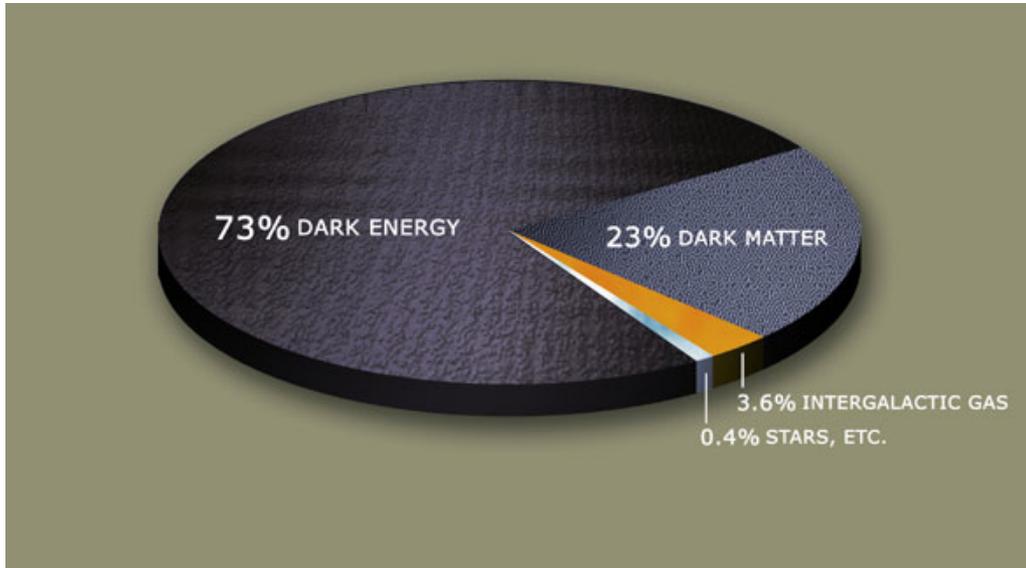
- Abbiamo scoperto un bosone di Higgs a 126 GeV e null'altro (per ora)
 - Molto difficile spiegare insieme questi due fatti : se non c'e' altro (SUSY per esempio) ci deve essere una cospirazione generale ("fine tuning") per stabilizzare la teoria (principio antropico ?)



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

E dopo il Modello Standard ? Abbiamo già capito tutto?

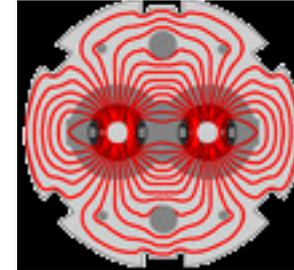
- ❑ Abbiamo scoperto un bosone di Higgs a 126 GeV e null'altro (per ora)
 - ❑ Molto difficile spiegare insieme questi due fatti : se non c'è altro (SUSY per esempio) ci deve essere una cospirazione generale ("fine tuning") per stabilizzare la teoria (principio antropico ?)



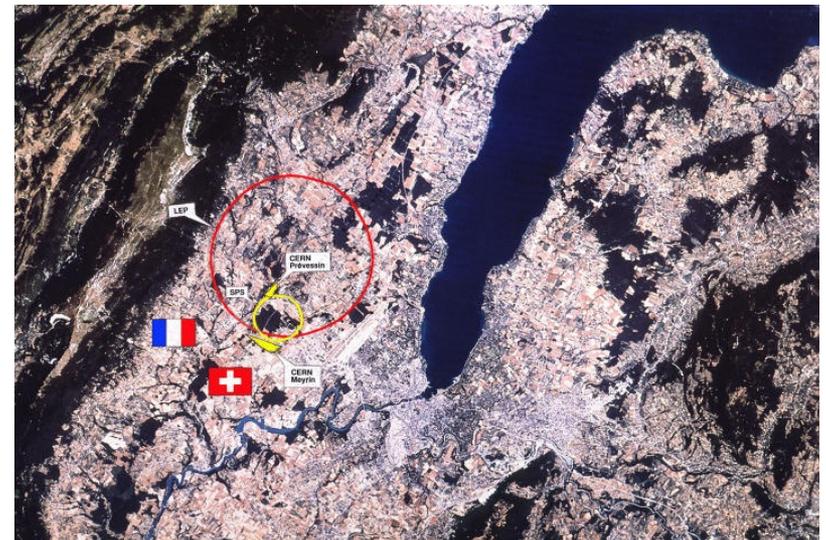
- ❑ Qual'è la natura delle particelle che costituiscono la materia oscura dell'universo? La maggior parte dell'Universo (~95%) è fatto di qualcosa di cui non sappiamo nulla e che ancora non capiamo!!!

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

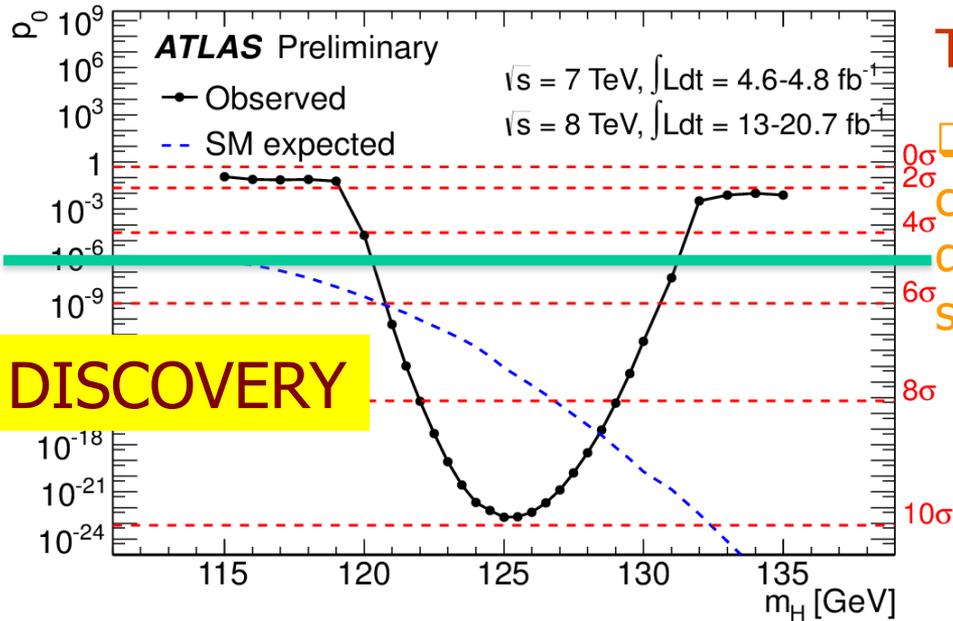
Gli acceleratori del CERN



- 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...

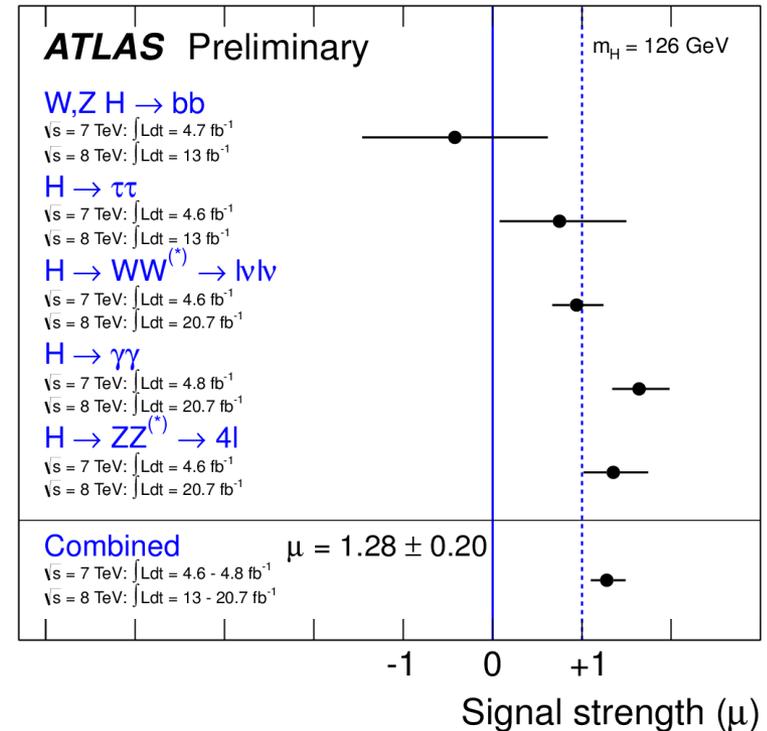


Tipico plot 'ufficiale' serio :

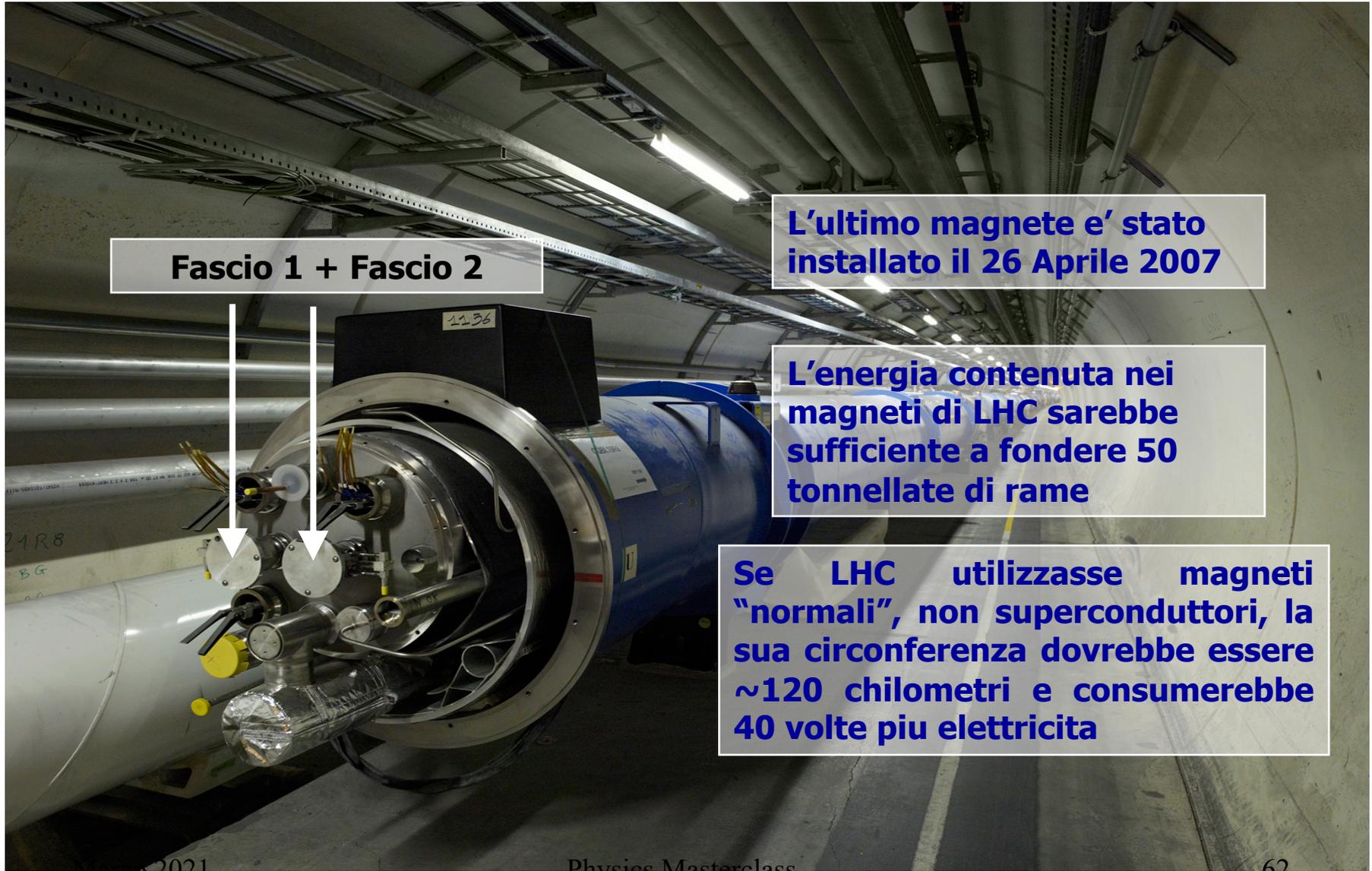
La probabilita' che una fluttuazione casuale del fondo spieghi la forma dei dati : se e' piccola significa che c'e' un segnale vero!

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

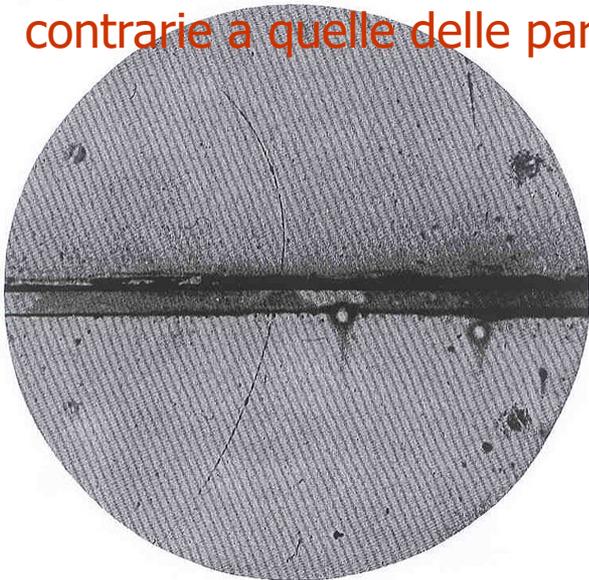
L'ultimo magnete e' stato installato il 26 Aprile 2007

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

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

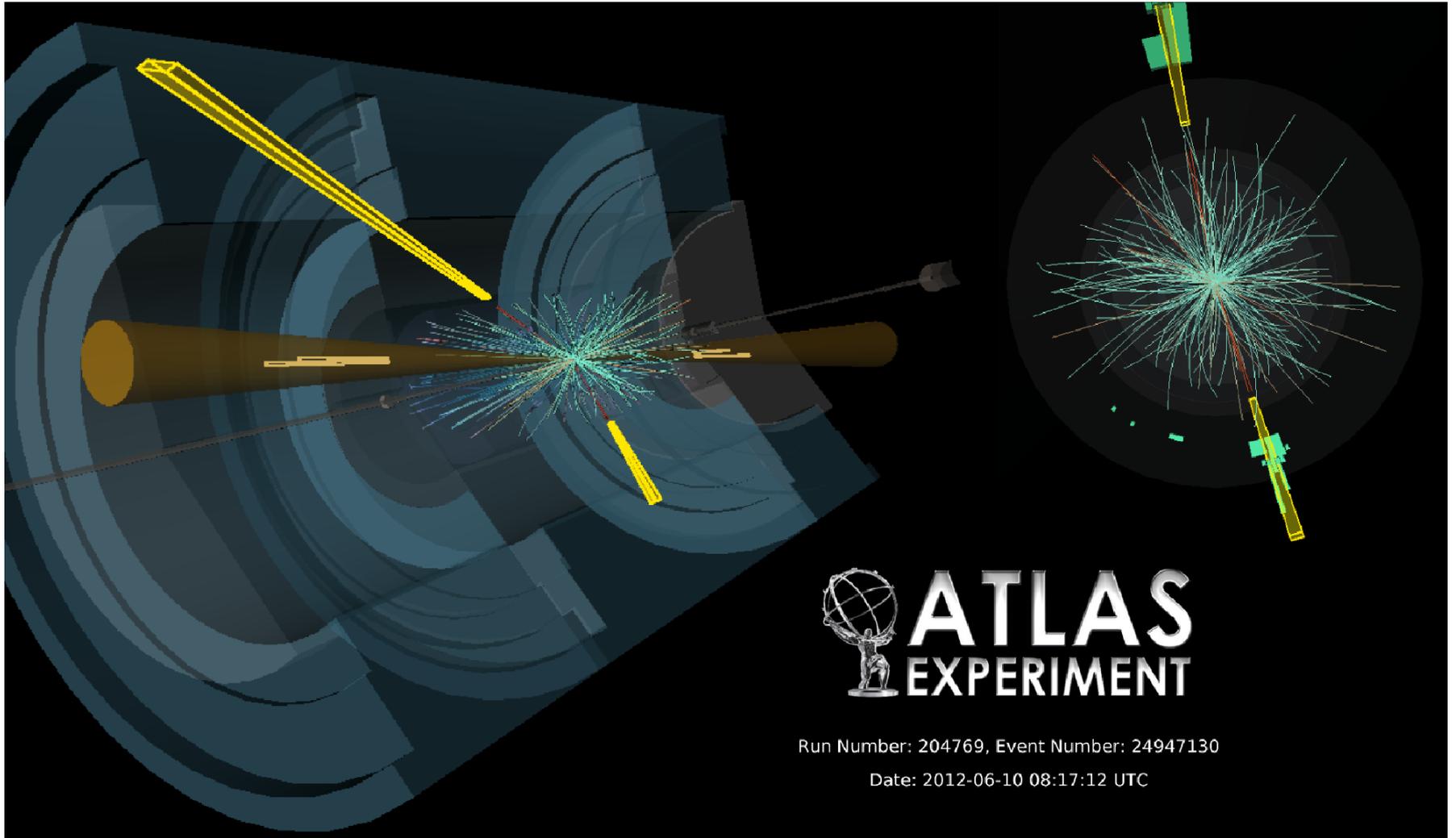
Periodic Table of the Elements

1A 1 H hydrogen 1.008																	8A 2 He helium 4.003						
3 Li lithium 6.941	2A 4 Be beryllium 9.012																	5 B boron 10.81	6 C carbon 12.01	7 N nitrogen 14.01	8 O oxygen 16.00	9 F fluorine 19.00	10 Ne neon 20.18
11 Na sodium 22.99	12 Mg magnesium 24.31	3B	4B	5B	6B	7B	8B		11B	12B	13 Al aluminum 26.98	14 Si silicon 28.09	15 P phosphorus 30.97	16 S sulfur 32.07	17 Cl chlorine 35.45	18 Ar argon 39.95							
19 K potassium 39.10	20 Ca calcium 40.08	21 Sc scandium 44.96	22 Ti titanium 47.88	23 V vanadium 50.94	24 Cr chromium 52.00	25 Mn manganese 54.94	26 Fe iron 55.85	27 Co cobalt 58.93	28 Ni nickel 58.69	29 Cu copper 63.55	30 Zn zinc 65.39	31 Ga gallium 69.72	32 Ge germanium 72.58	33 As arsenic 74.92	34 Se selenium 78.96	35 Br bromine 79.90	36 Kr krypton 83.80						
37 Rb rubidium 85.47	38 Sr strontium 87.62	39 Y yttrium 88.91	40 Zr zirconium 91.22	41 Nb niobium 92.91	42 Mo molybdenum 95.94	43 Tc technetium (98)	44 Ru ruthenium 101.1	45 Rh rhodium 102.9	46 Pd palladium 106.4	47 Ag silver 107.9	48 Cd cadmium 112.4	49 In indium 114.8	50 Sn tin 118.7	51 Sb antimony 121.8	52 Te tellurium 127.6	53 I iodine 126.9	54 Xe xenon 131.3						
55 Cs cesium 132.9	56 Ba barium 137.3	57 La* lanthanum 138.9	72 Hf hafnium 178.5	73 Ta tantalum 180.9	74 W tungsten 183.9	75 Re rhenium 186.2	76 Os osmium 190.2	77 Ir iridium 190.2	78 Pt platinum 195.1	79 Au gold 197.0	80 Hg mercury 200.5	81 Tl thallium 204.4	82 Pb lead 207.2	83 Bi bismuth 208.9	84 Po polonium (209)	85 At astatine (210)	86 Rn radon (222)						
87 Fr francium (223)	88 Ra radium (226)	89 Ac~ actinium (227)	104 Rf rutherfordium (261)	105 Db dubnium (262)	106 Sg seaborgium (263)	107 Bh bohrium (264)	108 Hs hassium (265)	109 Mt meitnerium (266)	110 Ds darmstadtium (271)	111 Uuu (272)	112 Uub (277)	114 Uuq (296)		116 Uuh (298)		118 Uuo (?)							
Lanthanide Series*		58 Ce cerium 140.1	59 Pr praseodymium 140.9	60 Nd neodymium 144.2	61 Pm promethium (147)	62 Sm samarium (150.4)	63 Eu europium 152.0	64 Gd gadolinium 157.3	65 Tb terbium 158.9	66 Dy dysprosium 162.5	67 Ho holmium 164.9	68 Er erbium 167.3	69 Tm thulium 168.9	70 Yb ytterbium 173.0	71 Lu lutetium 175.0								
Actinide Series~		90 Th thorium 232.0	91 Pa protactinium (231)	92 U uranium (238)	93 Np neptunium (237)	94 Pu plutonium (242)	95 Am americium (243)	96 Cm curium (247)	97 Bk berkelium (247)	98 Cf californium (249)	99 Es einsteinium (254)	100 Fm fermium (253)	101 Md mendelevium (256)	102 No nobelium (254)	103 Lr lawrencium (257)								

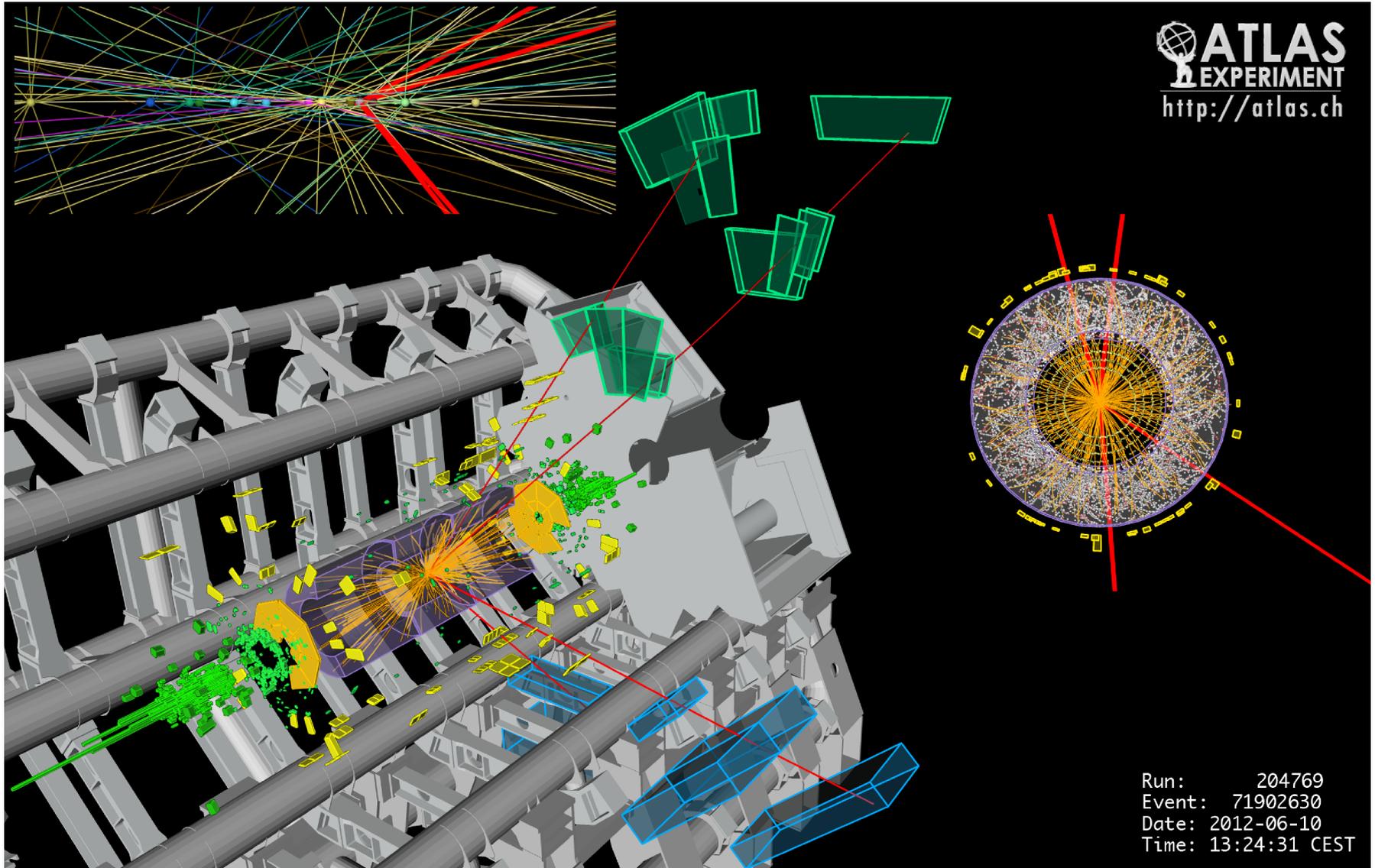


La chimica opera su scale enormi (10⁻¹⁰ m)

forse un bosone di Higgs che si disintegra in due fotoni

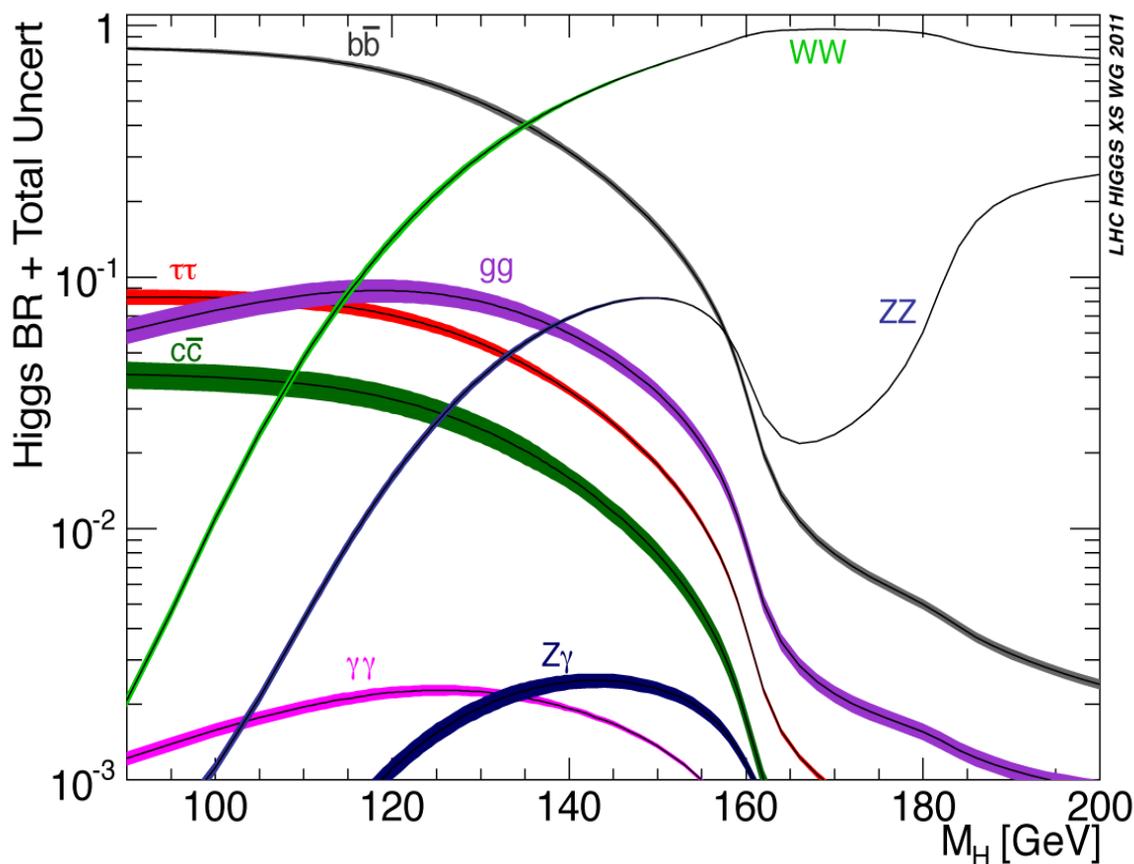


Forse un bosone di Higgs che si disintegra in 4 muoni



Segni particolari : bosone di Higgs

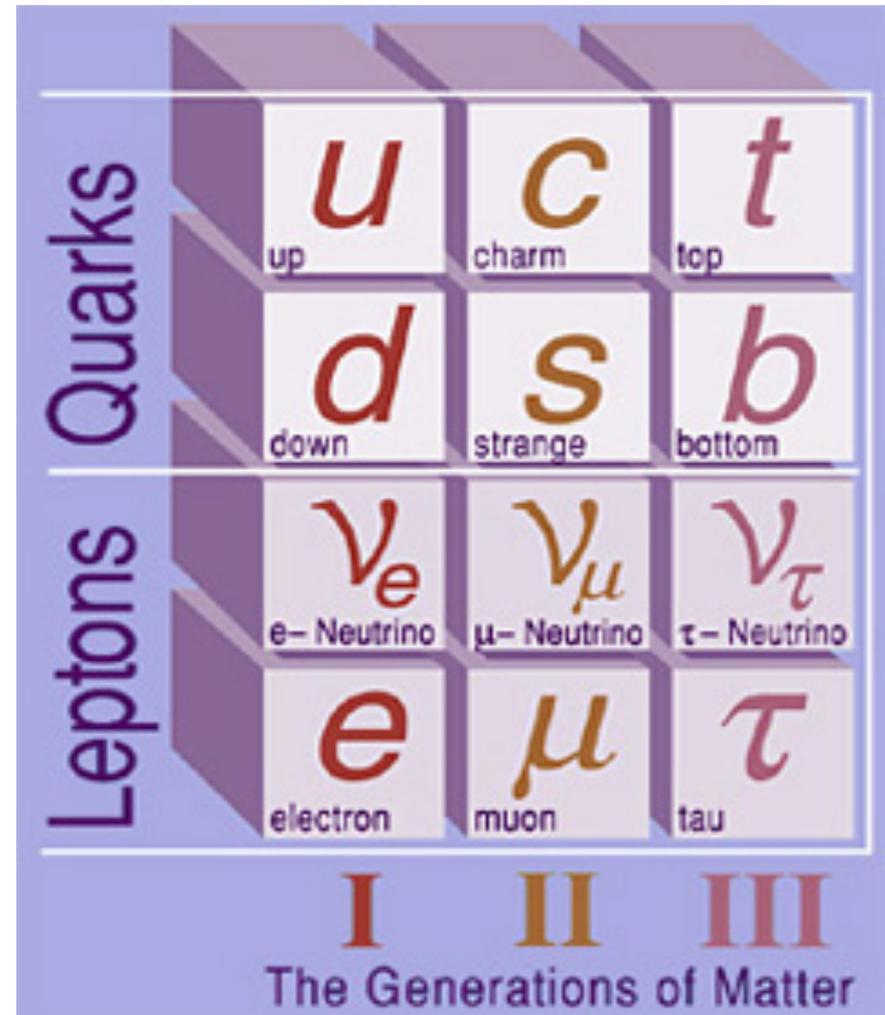
Il bosone di Higgs una volta (faticosamente !) generato si disintegra ("decade") in altre particelle : vediamo solo i cocci del suo decadimento



- 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

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, ν_e), (μ, ν_μ), (τ, ν_τ), chiamati leptoni.

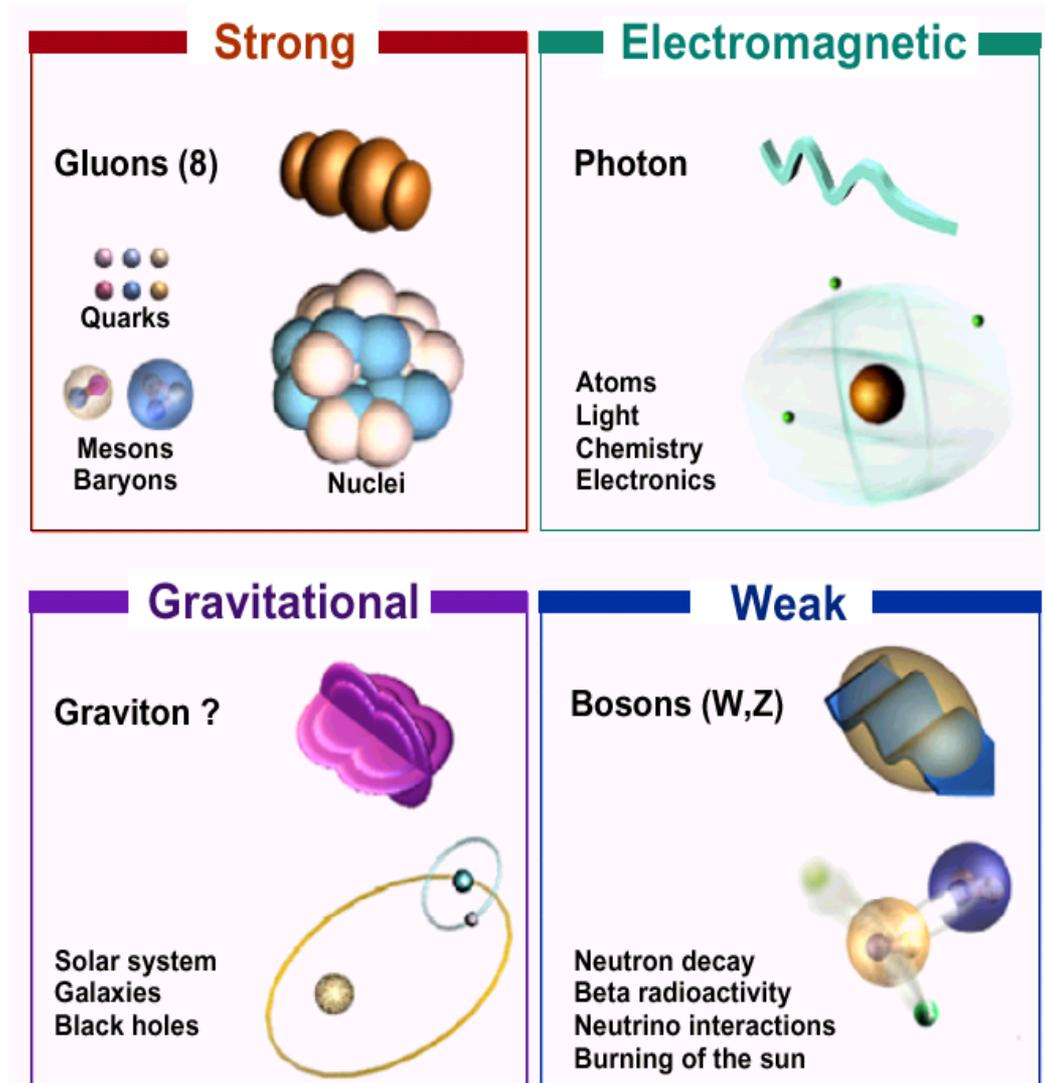


Il Modello Standard: le interazioni fondamentali

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.

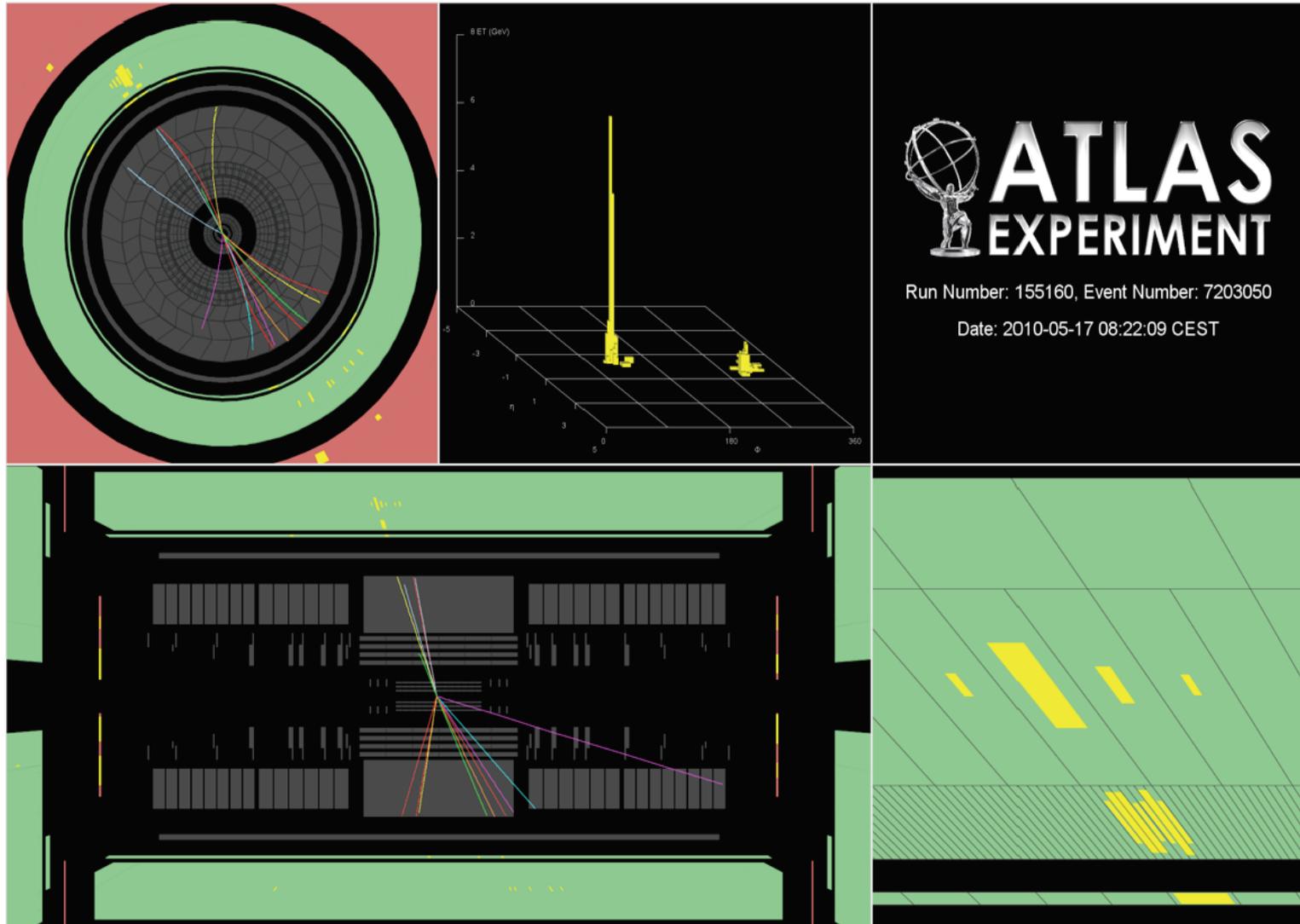


Il Modello Standard: perche' ci piace e perche non ci piace...

- ❑ 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 π^0 candidate



E' solo una questione di scala :

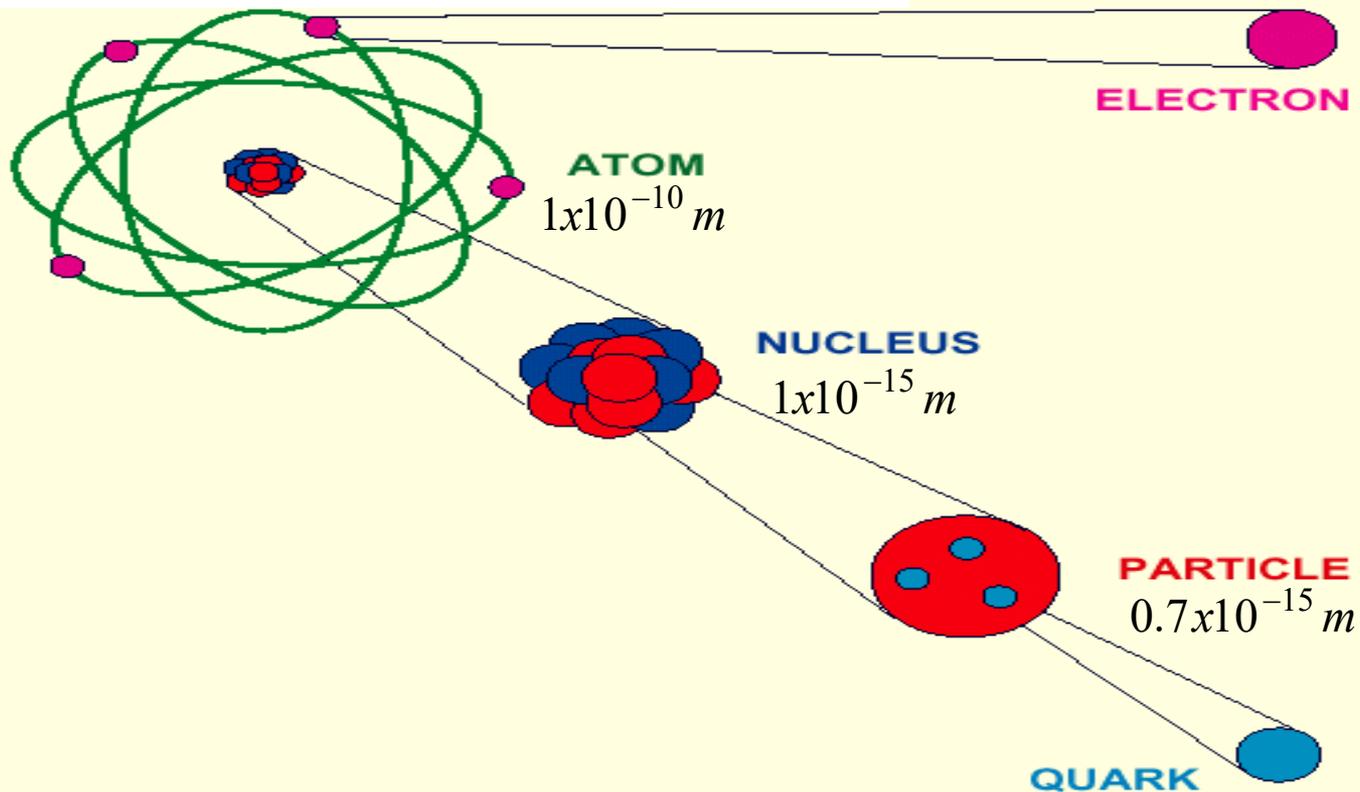
Constituents of Matter

Thomson (1897): Discovers electron

Rutherford (1909): Nuclear atom (proton)

Chadwick (1932): Discovers neutron

SLAC (1968): Quarks in neutrons and protons

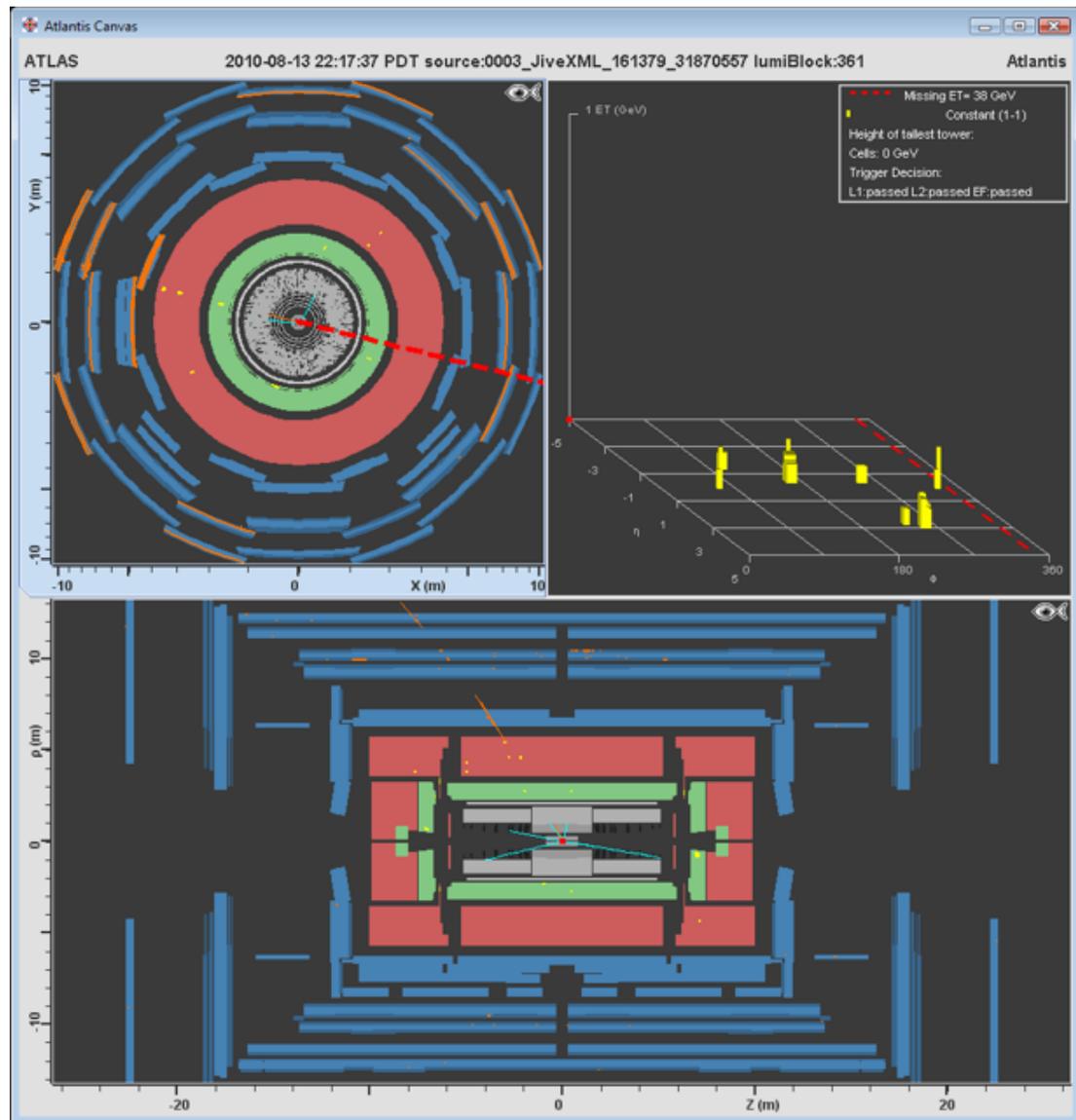


- ❑ **Centro Europeo Ricerche Nucleari:**
 - ❑ Il CERN è il laboratorio più grande del mondo per le ricerche di Fisica delle Particelle Elementari
 - ❑ 6500 scienziati di 500 università di 80 paesi diversi lavorano al CERN
- ❑ **Fondato nel 1954**
- ❑ **L'Italia uno dei 12 paesi fondatori: scienziati 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

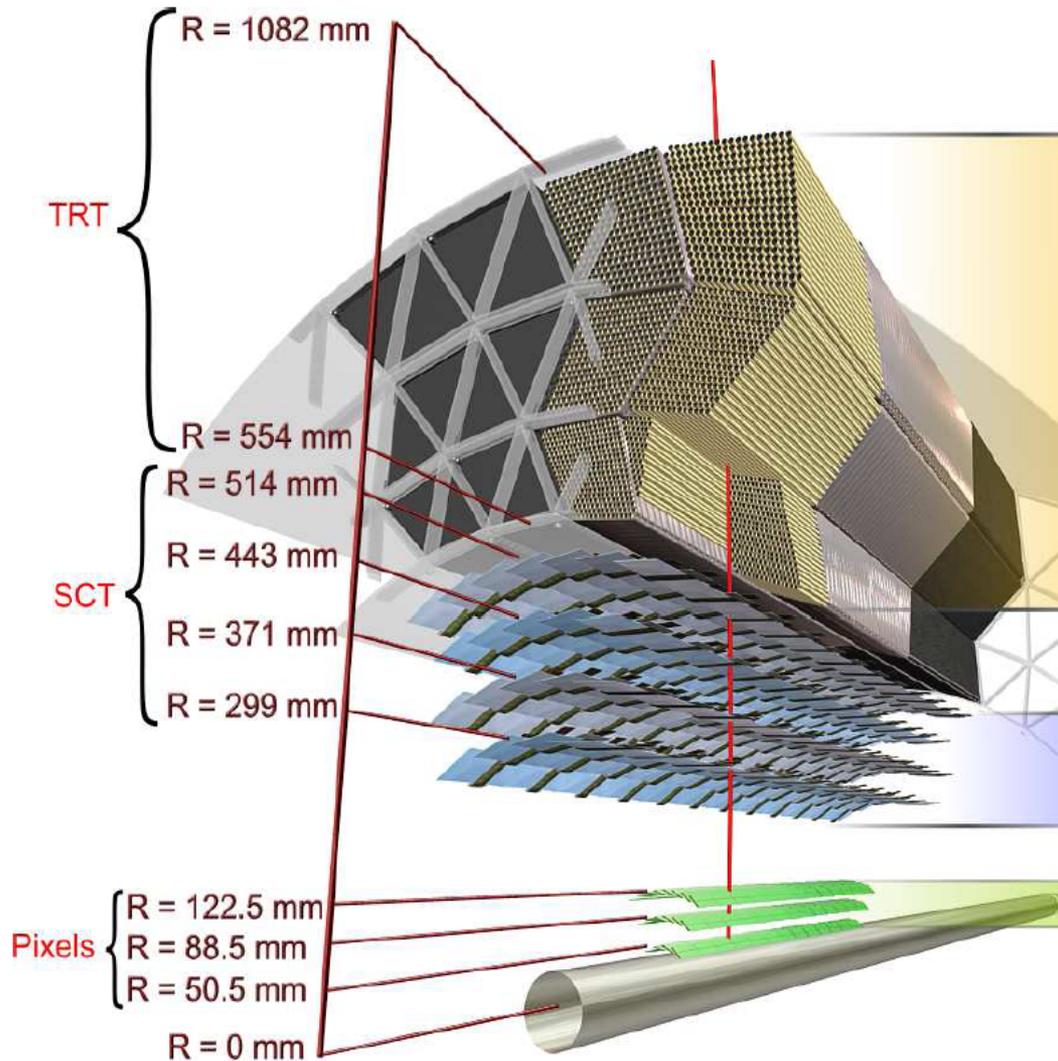


Anche la mancanza di energia ci dice qualcosa....

- ❑ 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



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/π^\pm discrimination
- ❑ 36 hits on track
- ❑ $130\mu\text{m}$ resolution

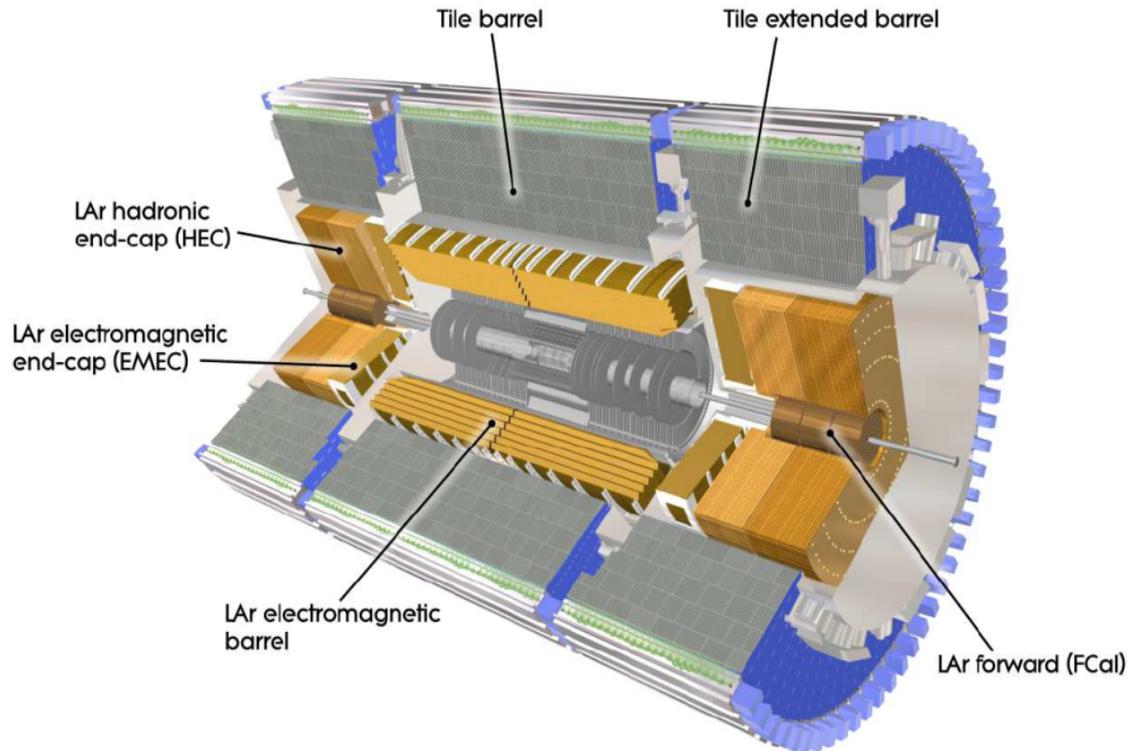
- ❑ Semi-Conductor Tracker

- ❑ 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 $|\eta| < 1.7$:
 - ❑ $\sigma(E)/E = (50\%) / \sqrt{E} \oplus 3\%$
 - ❑ 0.1×0.1 typical granularity
 - ❑ Longitudinally segmented

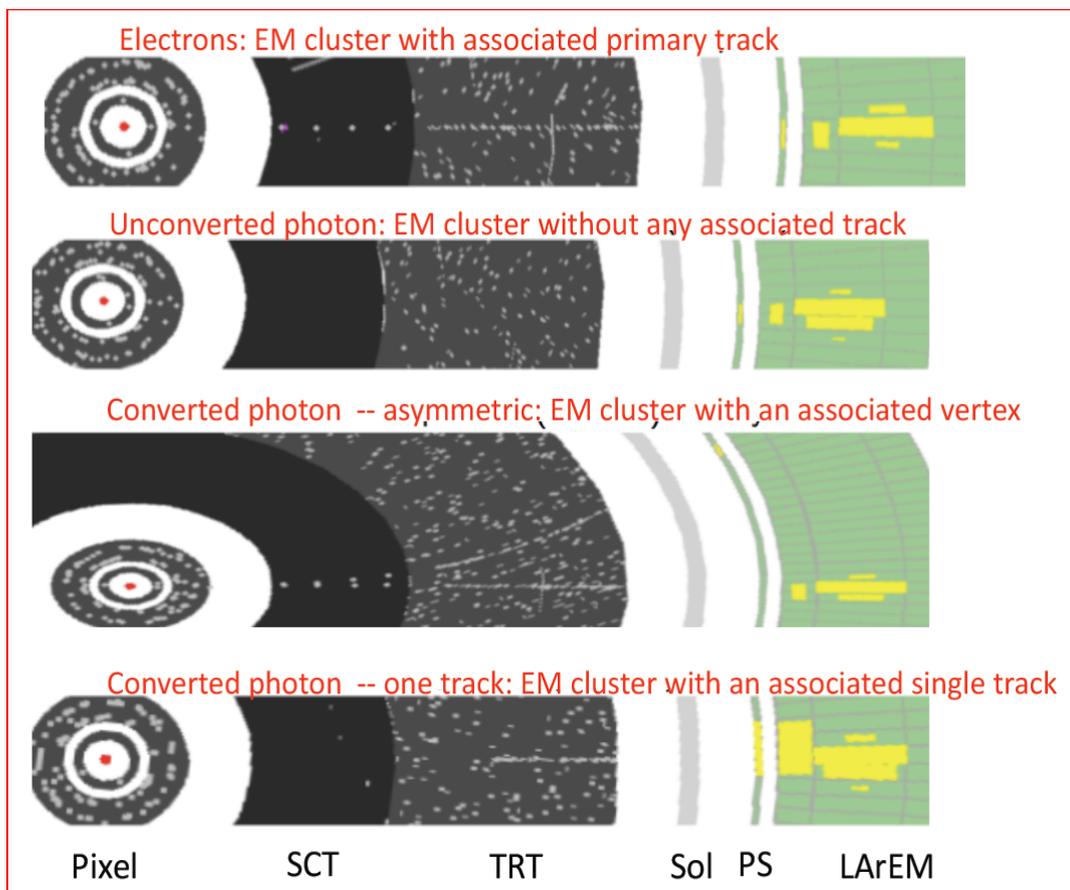
- ❑ Cu-LAr for $1.5 < |\eta| < 3.2$:
 - ❑ $\sigma(E)/E = (50\%) / \sqrt{E} \oplus 6\%$
 - ❑ 0.1×0.1 typical granularity
 - ❑ Longitudinally segmented

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

- ❑ 3 longitudinal layers with cell of $\Delta\eta \times \Delta\phi$: $(0.003-0.006) \times 0.1$ (1st layer) ; 0.025×0.025 (2nd layer); 0.050×0.025 (3rd 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 $50 \text{ mrad} / \sqrt{E}$: Z vertex resolution in $H \rightarrow \gamma\gamma$ simulated events $\sim 16 \text{ mm}$

Un esempio : ricostruzione di fotoni ed elettroni

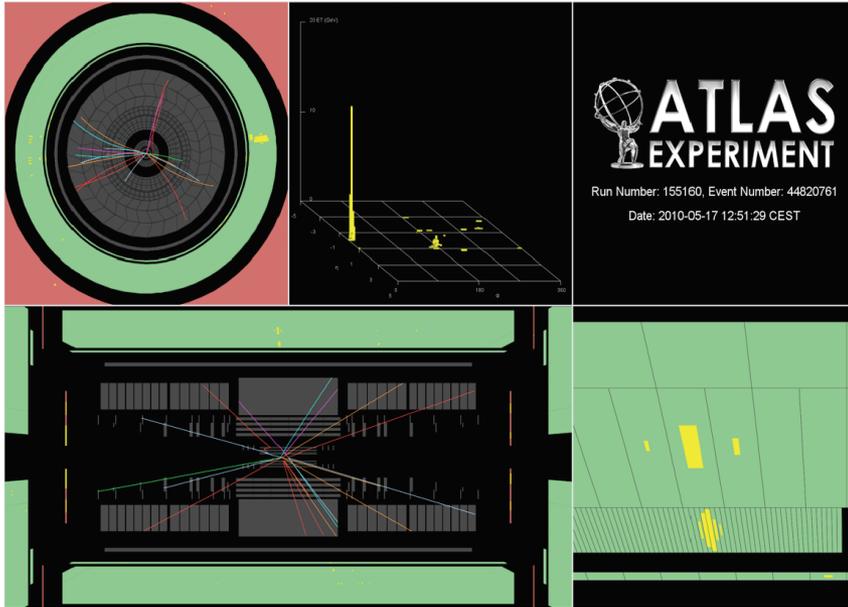
Main ingredients are clusters in the EM calo and tracks/vertexes in the ID:



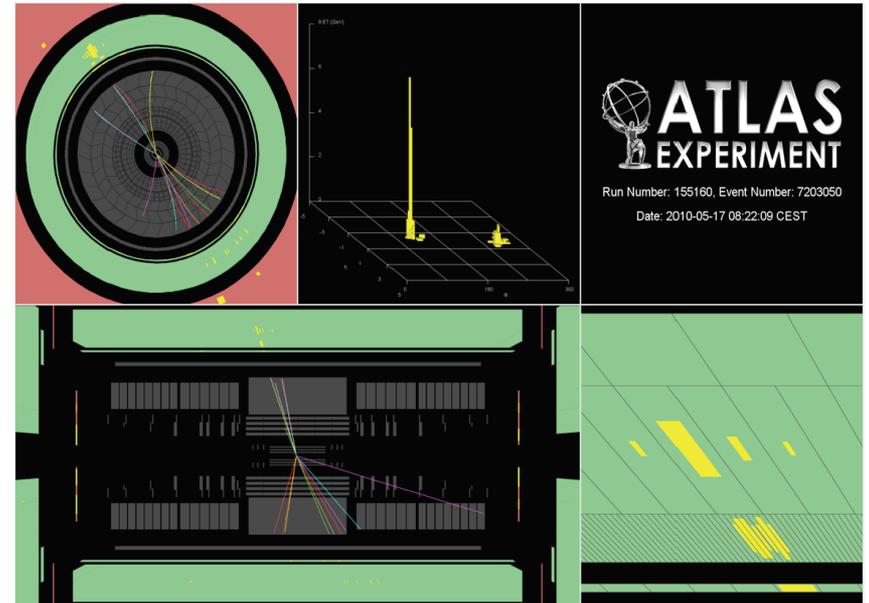
- ❑ An electron candidate is roughly a cluster in the EM calo with a track pointing to it
- ❑ A photon candidate is a cluster with no associated track
- ❑ But life is not always so easy...
- ❑ A photon can convert
 - ❑ you can see one cluster with one associated track coming from a secondary vertex
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

Photon or π^0 ?

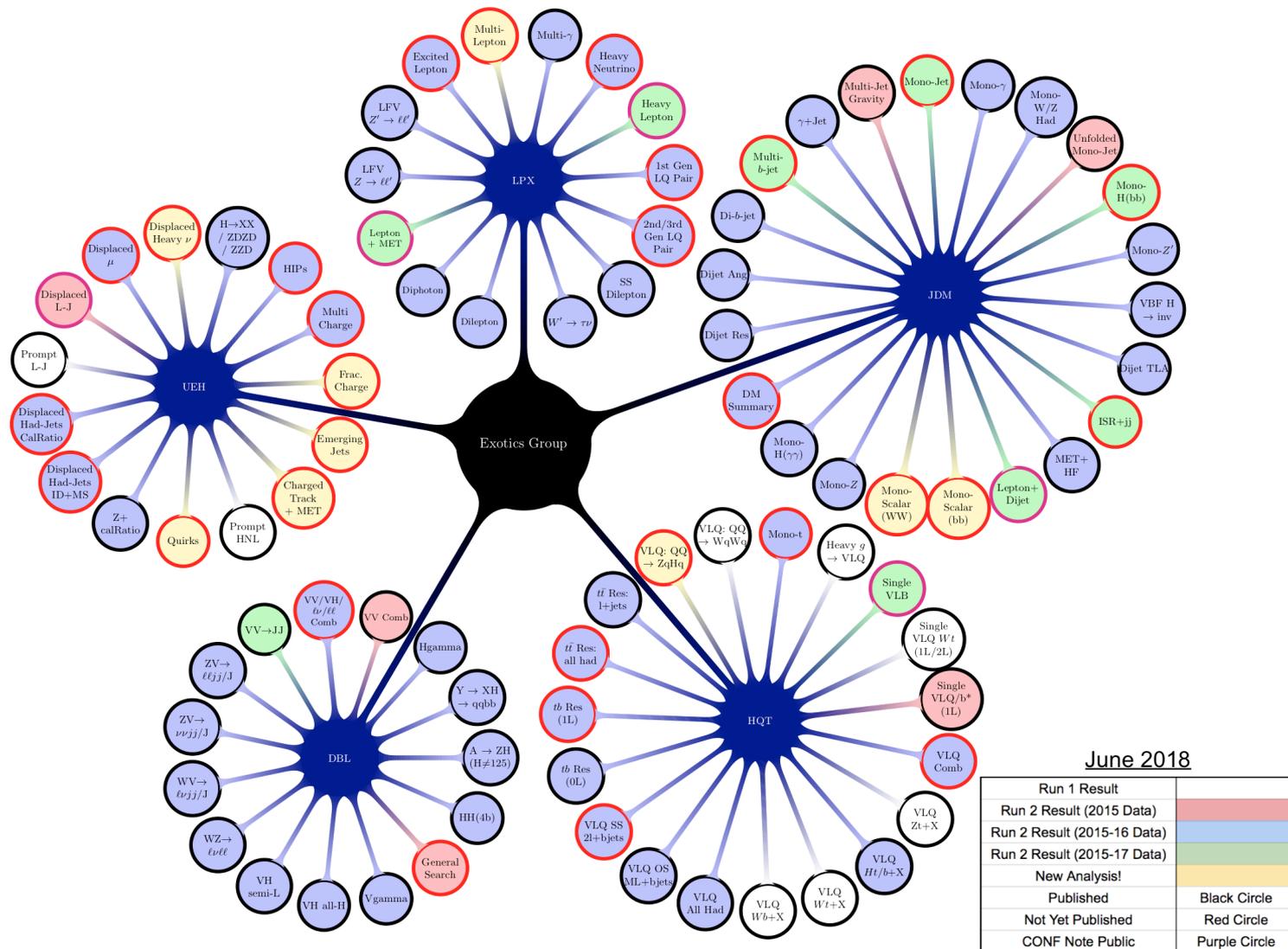
□ Un potenziale candidato fotone



□ Un potenziale candidato π^0



Searches panorama



June 2018

Run 1 Result	
Run 2 Result (2015 Data)	Red Circle
Run 2 Result (2015-16 Data)	Blue Circle
Run 2 Result (2015-17 Data)	Green Circle
New Analysis!	Black Circle
Published	Black Circle
Not Yet Published	Red Circle
CONF Note Public	Purple Circle