

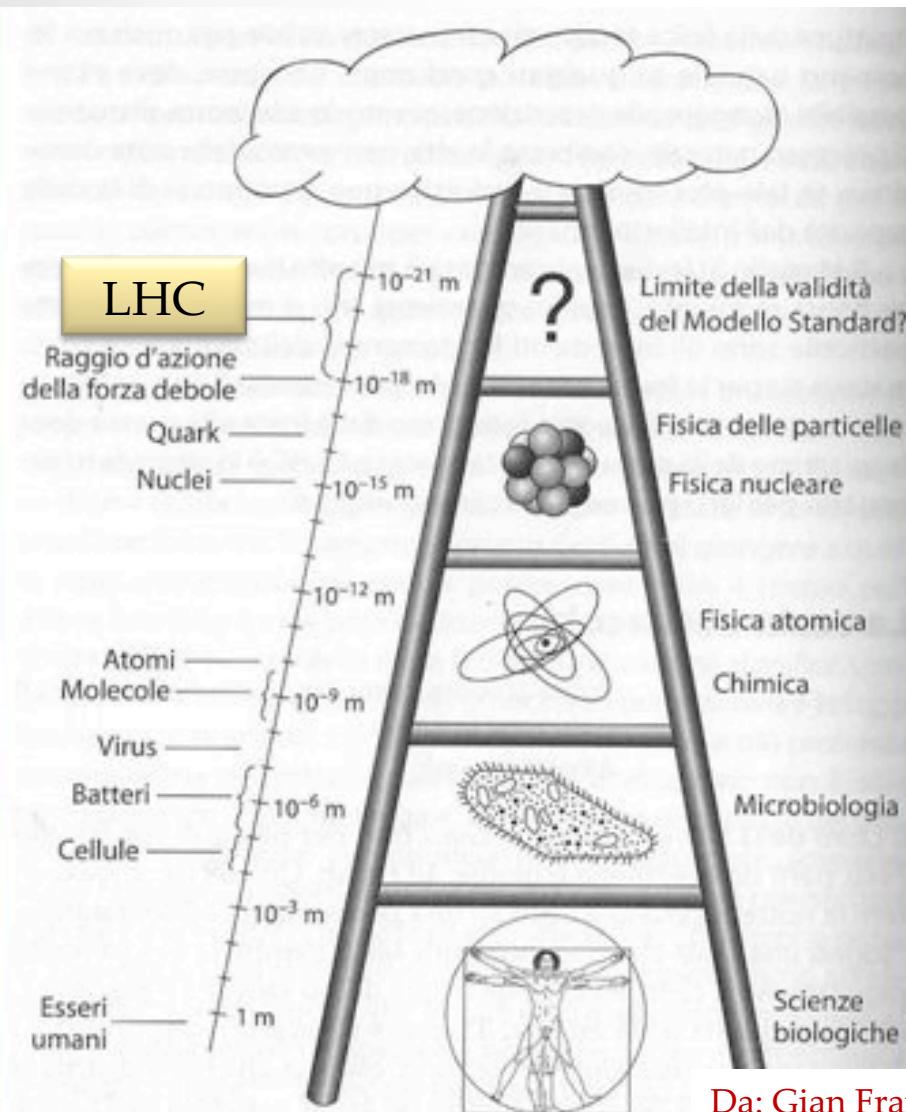
# Fare misure con l'esperimento ATLAS: la fisica delle alte energie in un esempio.

Margherita Spalla  
Università e INFN di Pisa

- Fisica delle alte energie: gli aspetti sperimentalisti
- E' un campo molto vasto, non possiamo discutere tutto in un paio d'ore
- Vediamo un esempio: l'esperimento ATLAS a LHC
  - ma ce ne sono molti altri!

**Interrompetemi se avete domande!**

# Fisica delle alte energie

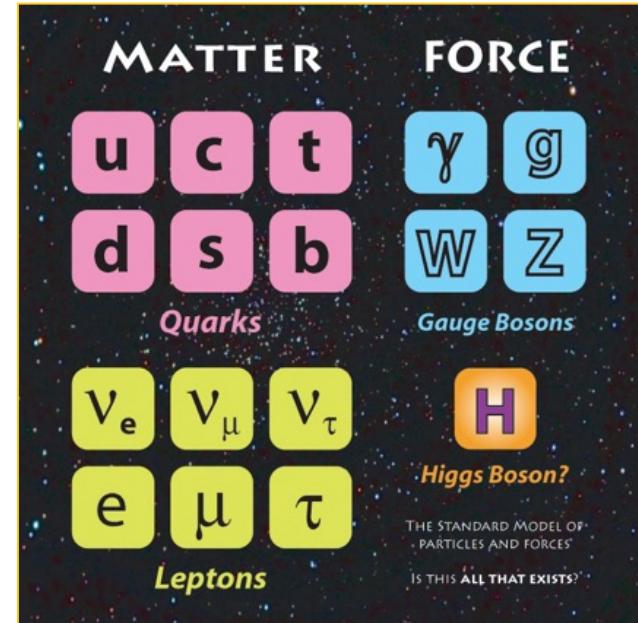
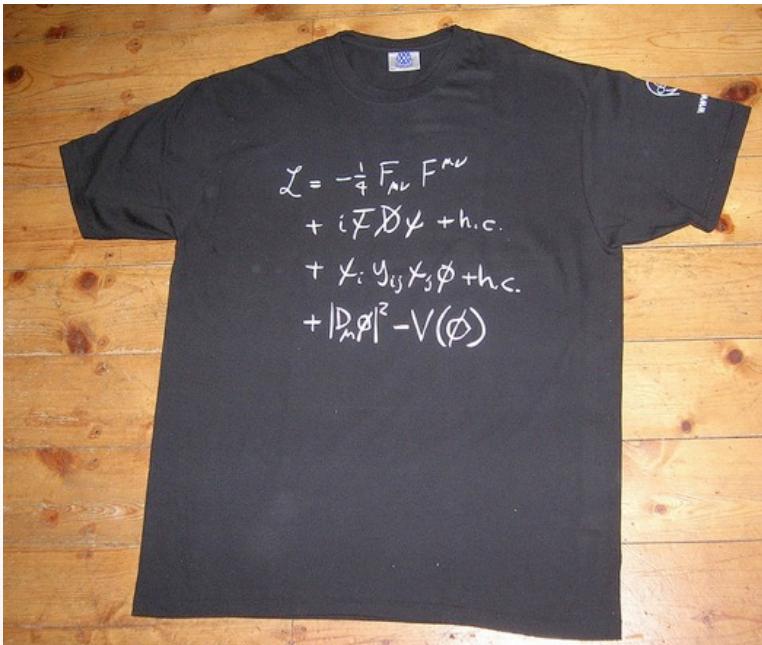


- Molti modelli in fisica: ognuno valido nel suo range di energie
- Cerchiamo una teoria sempre più fondamentale
  - Per scendere su dimensioni più piccole, devo esplorare energie più alte
- Salendo:
  - la teoria è più semplice
  - alcuni parametri liberi diventano calcolabili

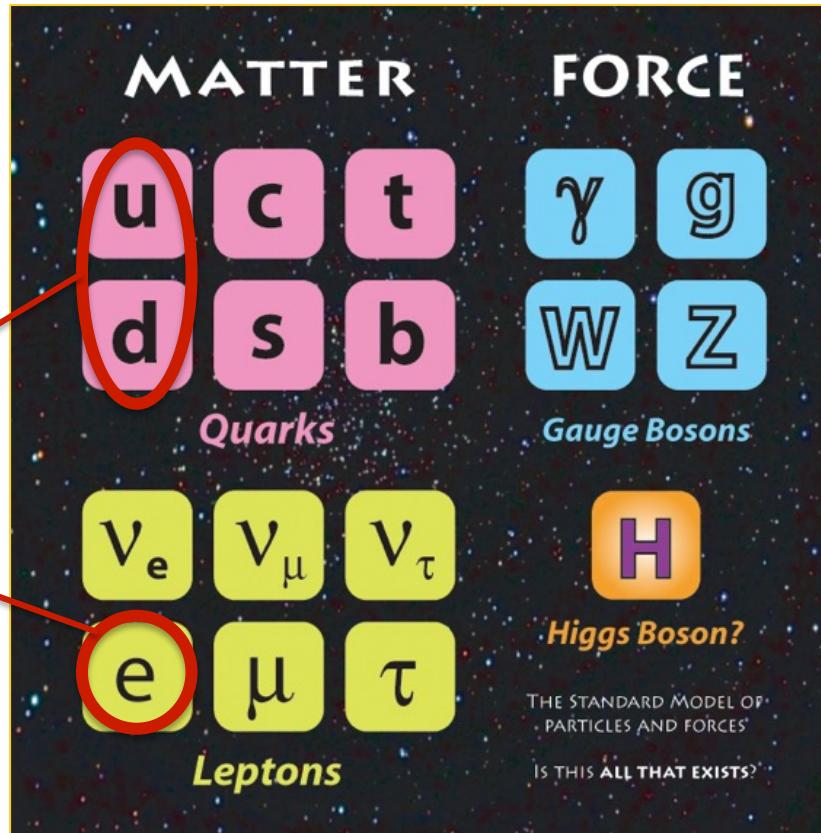
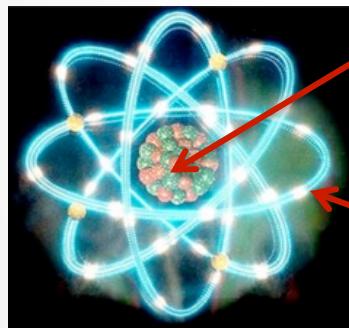
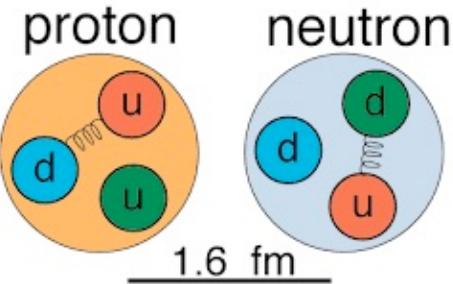
Da: Gian Francesco Giudice, "Odissea nello zeptospazio. Un viaggio nella fisica dell'LHC"

# A che punto siamo: il Modello Standard

- L'impianto teorico: teoria quantistica dei campi
- Include tre forze fondamentali su quattro in una sola equazione
  - la gravità resta fuori



# I costituenti fondamentali



# I costituenti fondamentali

Perchè tre?

- La teoria dice *almeno* tre, se no non ci sarebbero alcuni fenomeni che osserviamo.
- Misure di precisione dicono: *tre neutrini*

Ma perchè proprio tre?  
E perchè lo stesso numero per quark e leptoni?



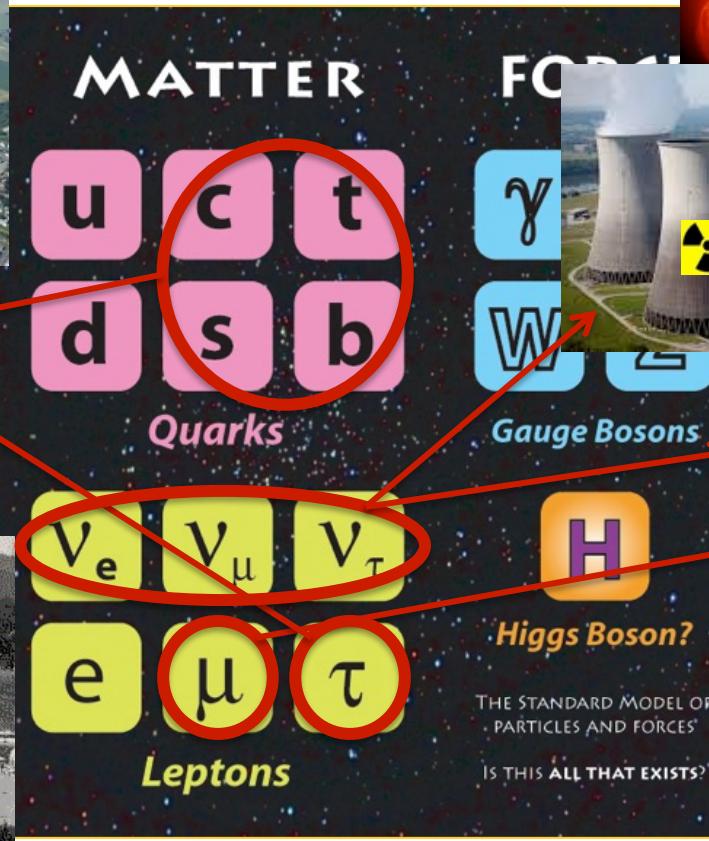
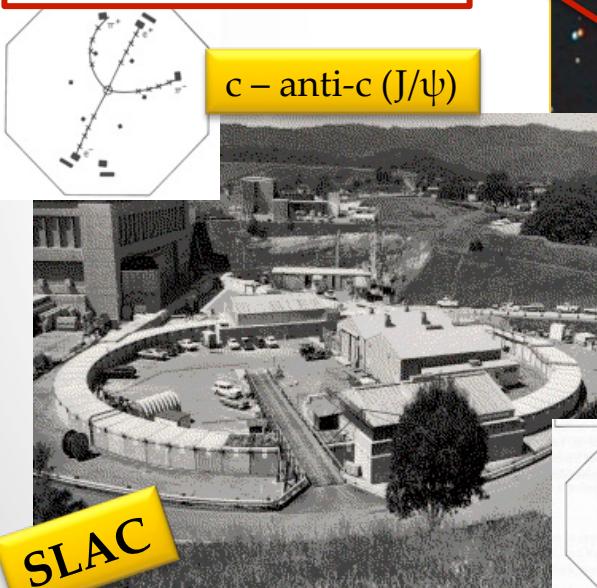
## Tre famiglie

- Stesse proprietà dei loro corrispondenti della prima colonna
- Masse più grandi
- I più pesanti sono instabili: decadono in particelle più leggere

# I costituenti fondamentali

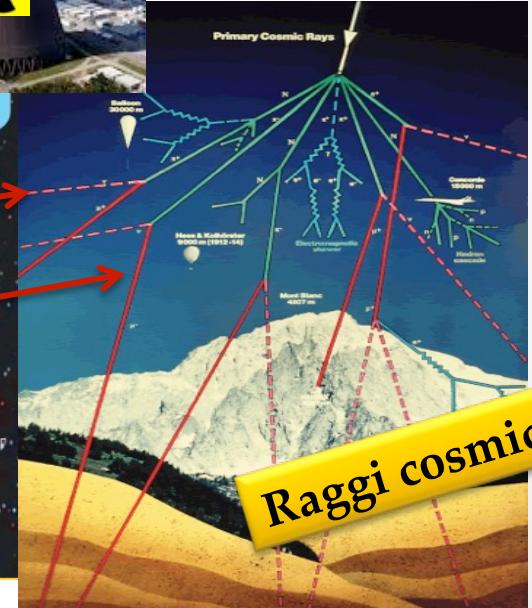
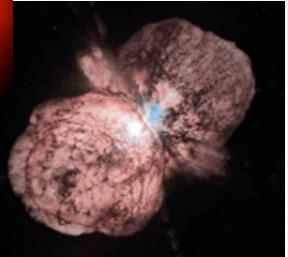


Si osservano solo in laboratorio



Feynman diagram showing the annihilation of an electron-positron pair ( $e^+e^-$ ) into a tau+ tau- pair. The incoming particles are labeled (113) and (13). The outgoing particles are labeled (113) and (13).

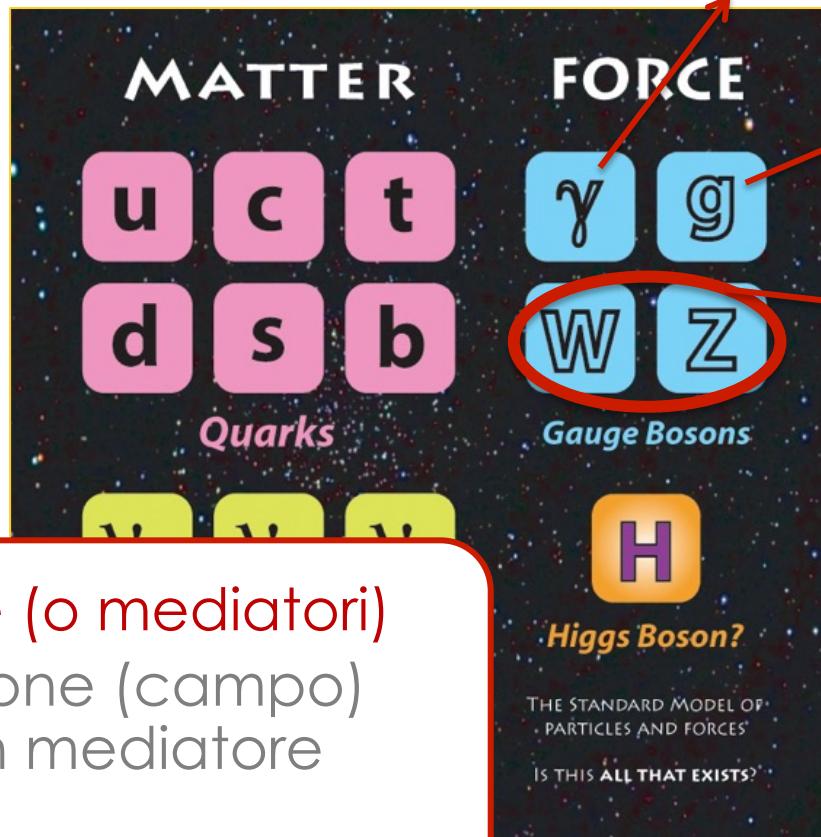
$$e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$$



# I costituenti fondamentali

Interazione elettromagnetica

- il *fotone*



Interazione forte

- 8 *gluoni*

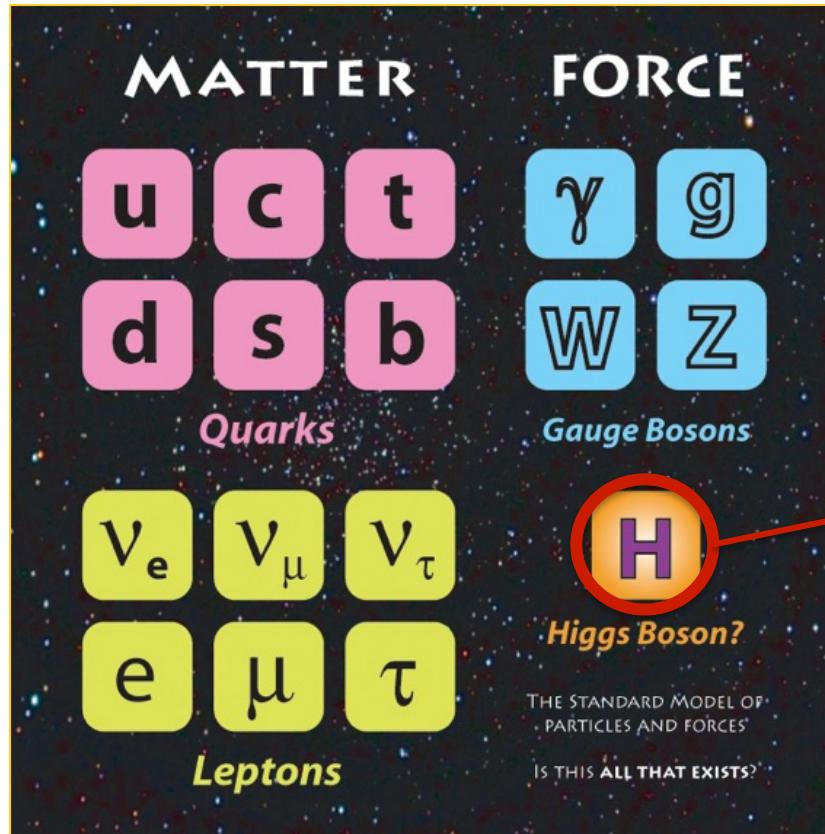
Interazione debole

- 2 *bosoni W* (carichi)
- 1 *bosone Z* (neutro)

## I bosoni di gauge (o mediatori)

- A ogni interazione (campo) corrisponde un mediatore (particella)
- Il numero di mediatori dipende dall'interazione

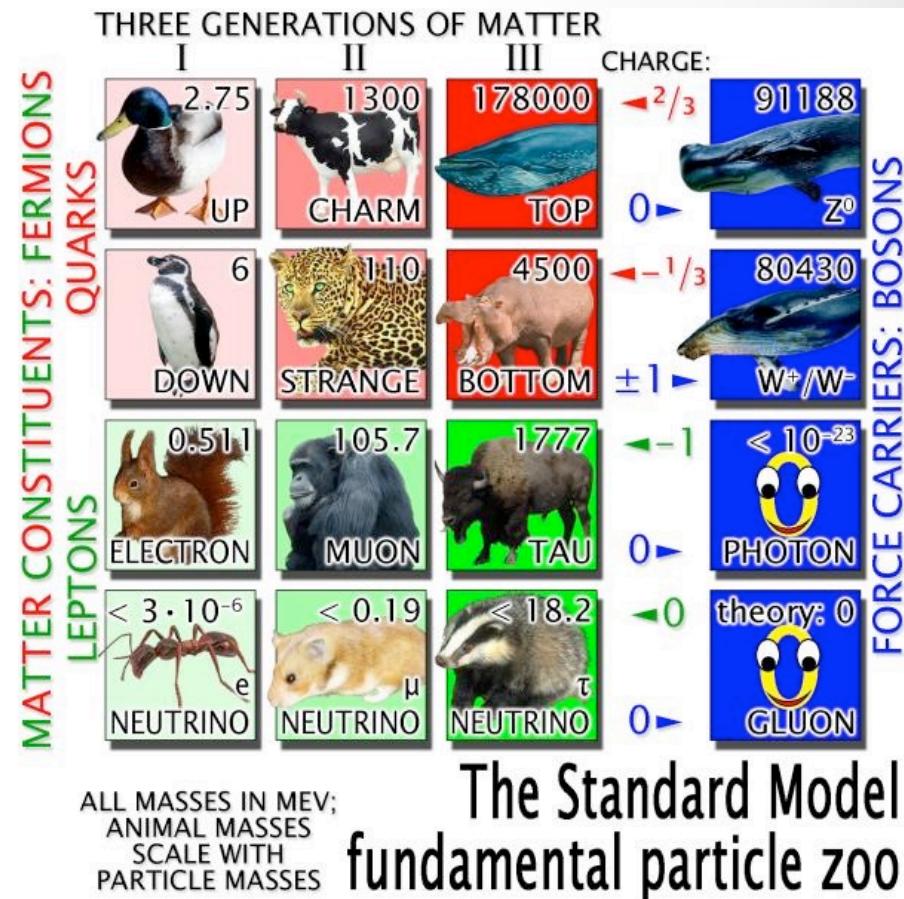
# I costituenti fondamentali



Spiega le  
masse degli  
altri  
... vediamo  
come

# A cosa serve un bosone di Higgs?

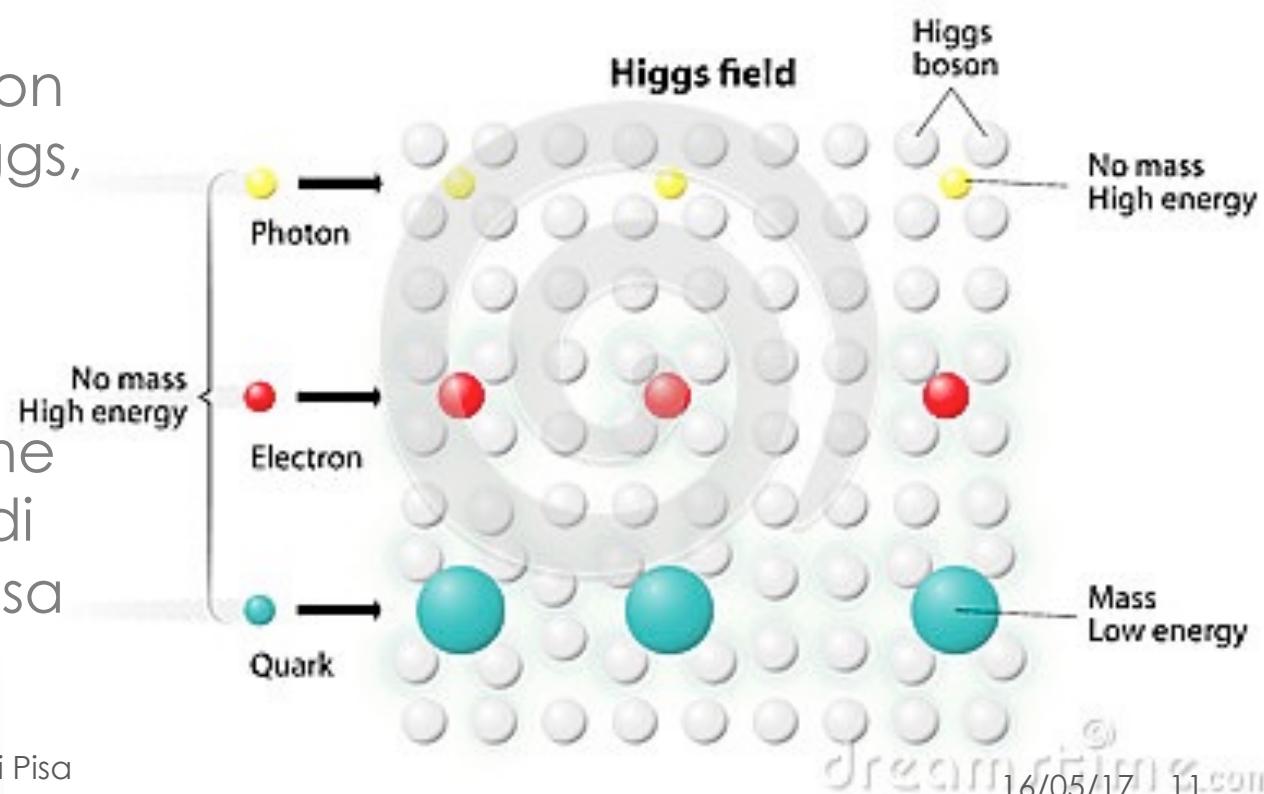
- Il Modello Standard senza Higgs prevede che tutte le particelle abbiano massa nulla
- Ma non è vero sperimentalmente
  - Masse diverse da zero
  - Diverse tra loro di ordini di grandezza
  - Tutti parametri liberi
- Un altro problema:
  - se assegno "a mano" una massa, la teoria non funziona più bene



# Il campo di Higgs

- Una soluzione al problema: la massa come risultato di un'interazione
- Il campo di Higgs è un campo uniforme che pervade tutto lo spazio.

- Interagendo con il campo di Higgs, le particelle acquisiscono massa.
- Le particelle che interagiscono di più hanno massa più grande.



# Il

## Interagiscono di più? E come mai?

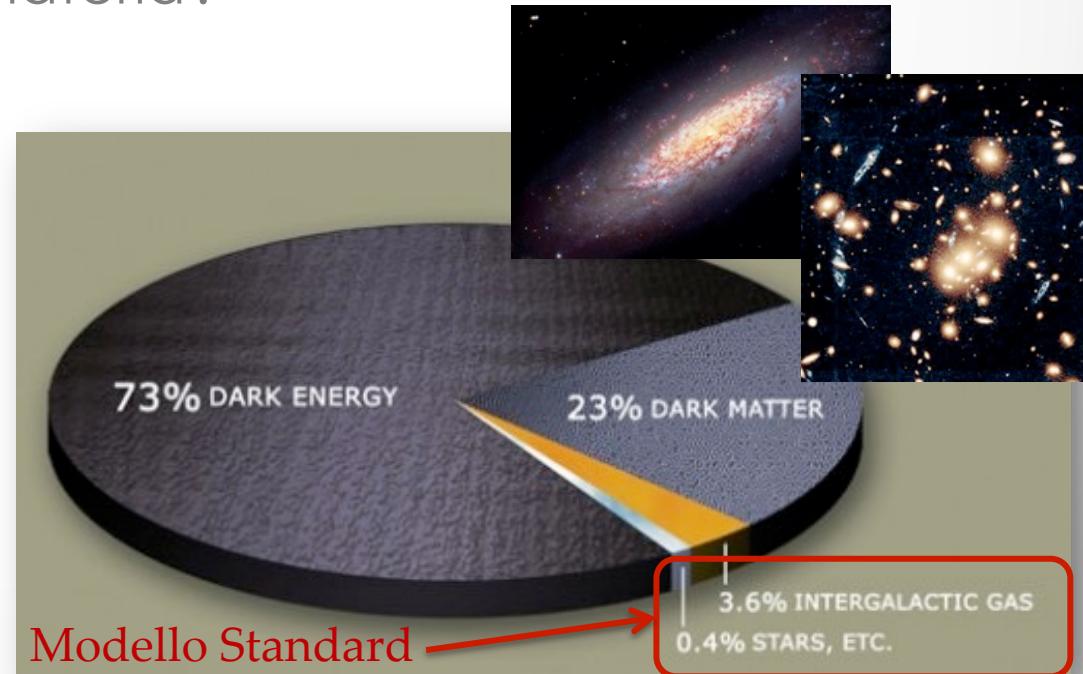
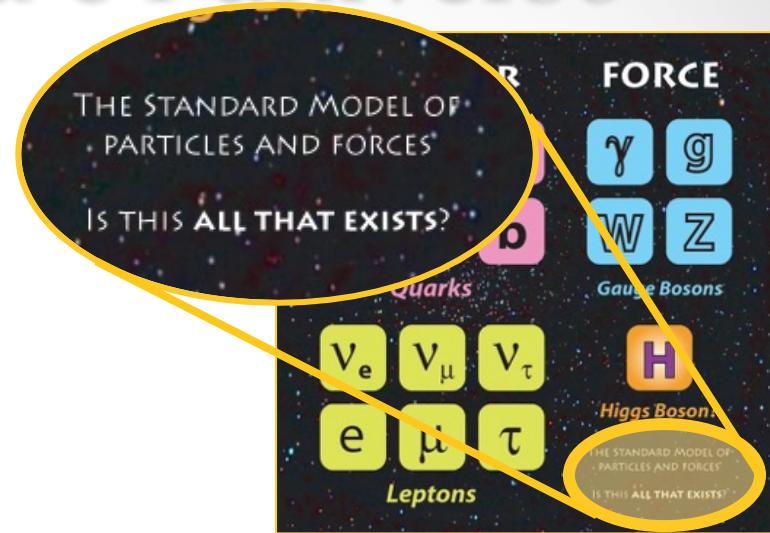
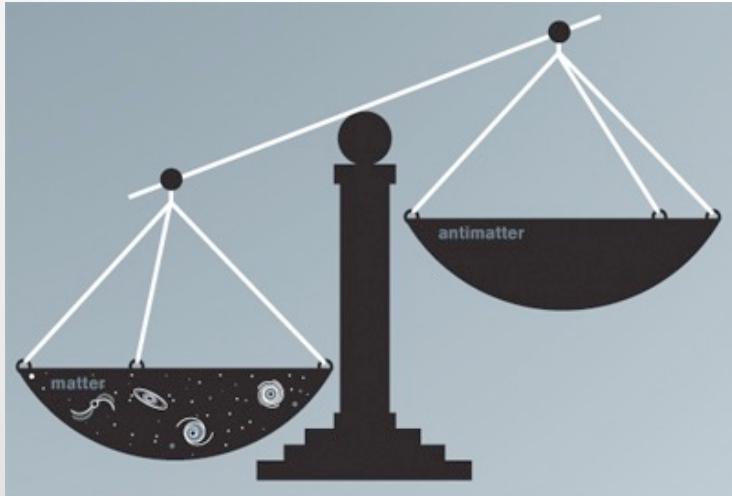
- Una soluzione per un'interazione
  - Il campo di Higgs copre tutto lo spazio
    - Interagendo con il campo di Higgs le particelle acquisiscono massa.
    - Le particelle che interagiscono di più hanno massa più grande.
- ◆ “Interagire di più” vuol dire che la *costante di accoppiamento* tra la particella e il campo di Higgs è più grande
  - ◆ Le costanti di accoppiamento **rimangono parametri liberi**
  - ◆ Trovare un bosone di Higgs è solo l'inizio

E visto che parliamo di punti aperti...

- ◆ Il Modello Standard non spiega la massa dei neutrini
- ◆ Sperimentalmente sappiamo che i neutrini hanno massa (piccolissima)

# Il Modello Standard e l'universo

- L'astrofisica ci pone un altro problema
  - Sembra che nell'universo ci sia più materia del previsto
- Oppure, perchè siamo fatti di materia e non di antimateria?



# Alla fine quanto bene funziona il Modello Standard?

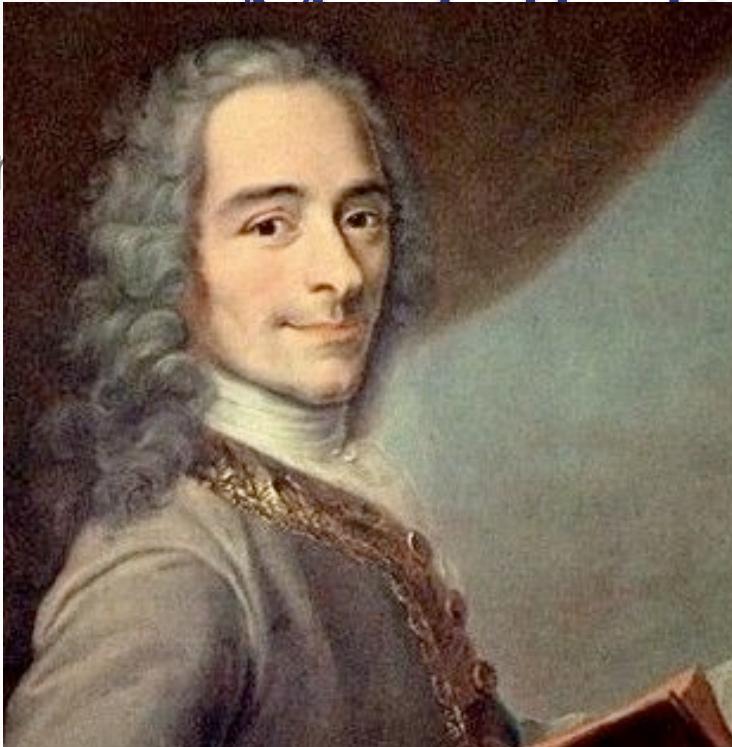
- Funziona molto bene: gli esperimenti confermano, anche con molte cifre decimali
- Eppure sospettiamo che non sia tutto.



# Alla fine quanto bene funziona il

M 1 11 Cu 1 12

- Funzione di  
analisi
- Epoca



Aforismario

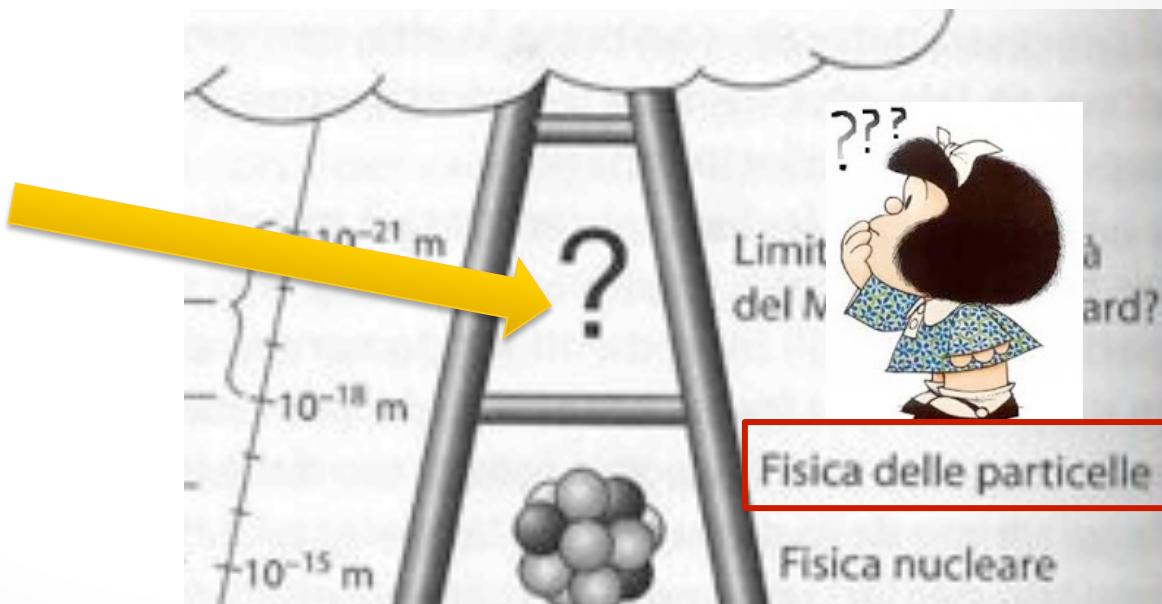
Il dubbio  
non è piacevole,  
ma la certezza  
è ridicola.

Voltaire

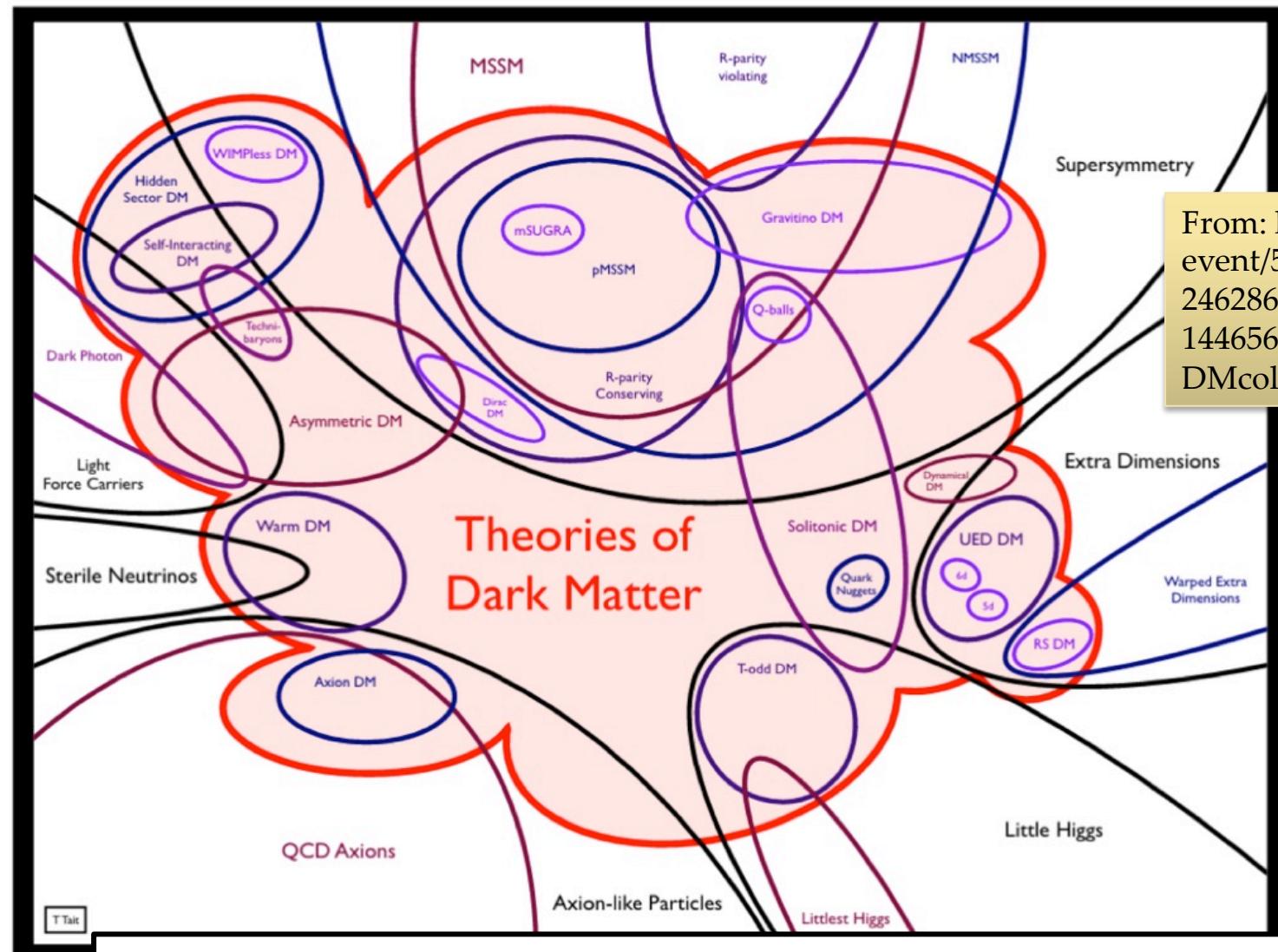


# Alla fine quanto bene funziona il Modello Standard?

- Funziona molto bene: gli esperimenti confermano, anche con molte cifre decimali
- Eppure sospettiamo che non sia tutto.
- Qualche idea su cosa ci sia qui?



# Parecchie idee...

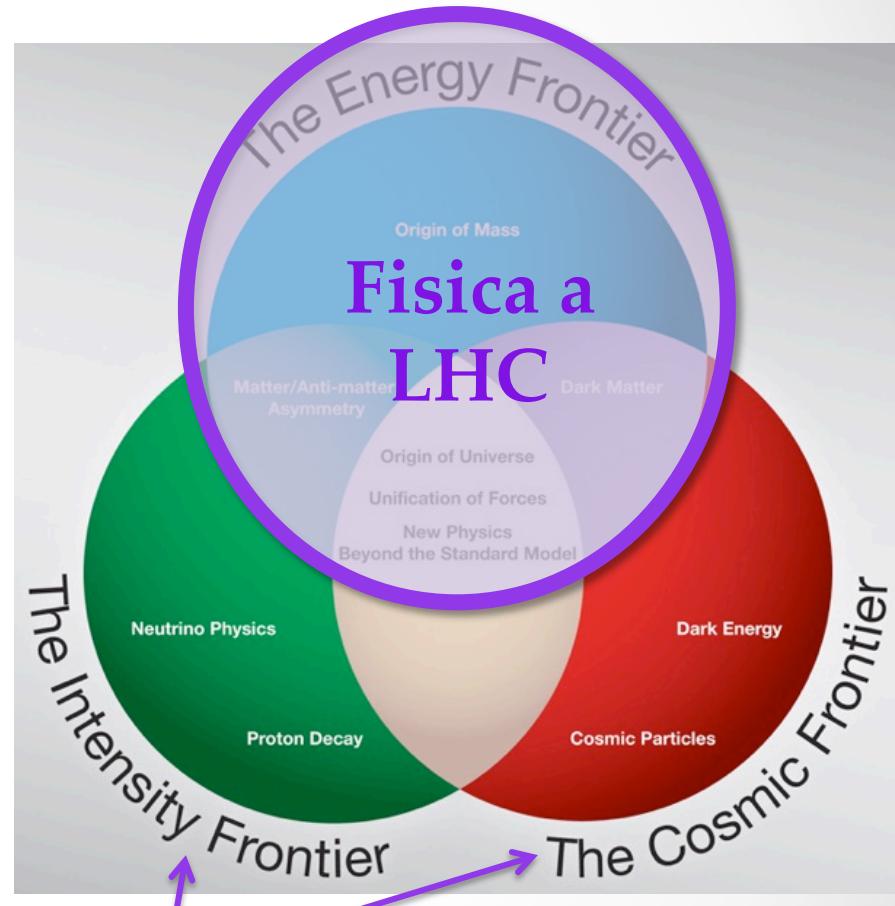


From: <https://indico.cern.ch/event/572149/contributions/2462863/attachments/1446561/2228461/DMcolliders.pdf>

Soltanto gli esperimenti ci possono dire se c'è qualcosa di vero!

# Principali metodi d'indagine

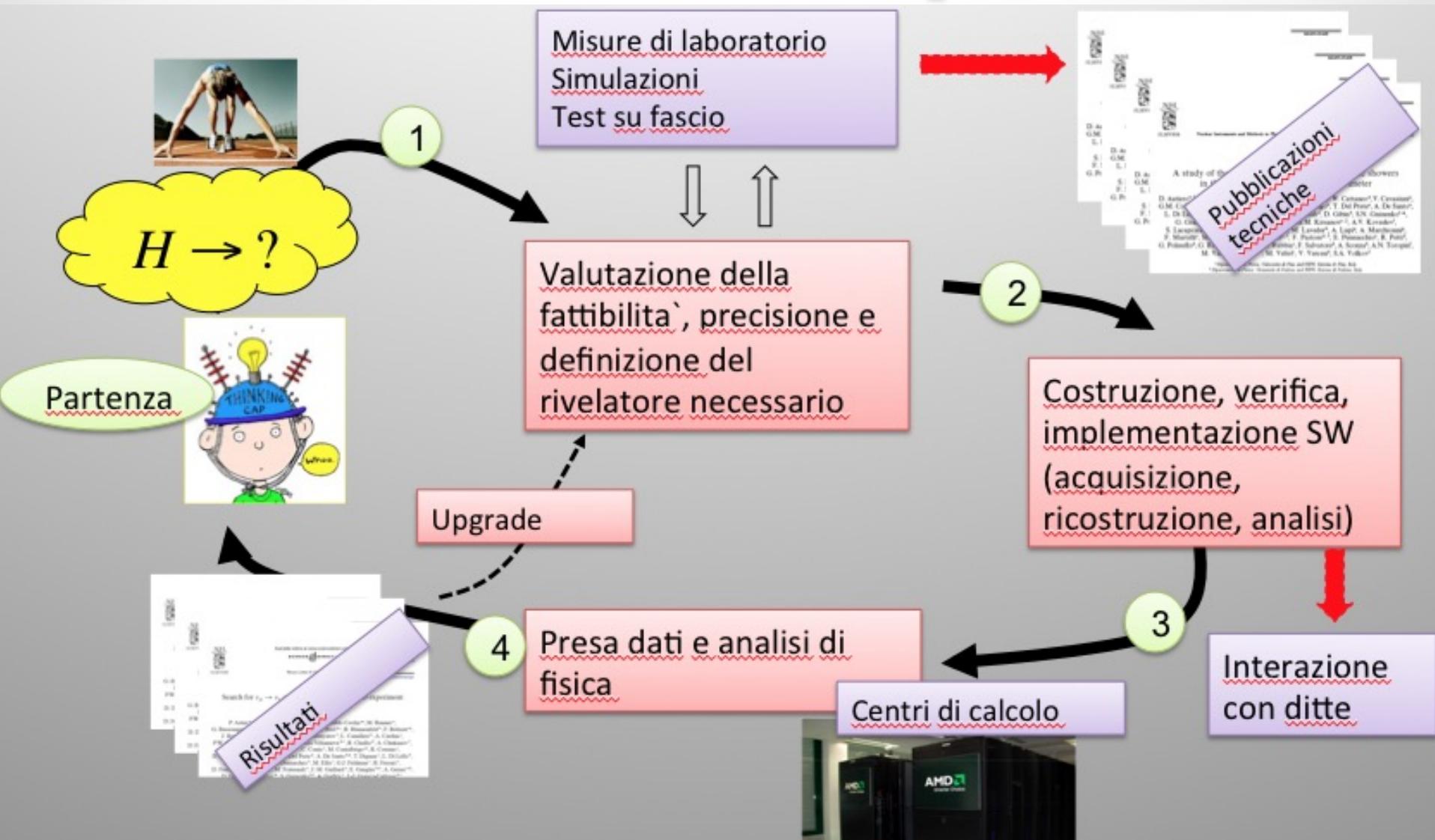
- Indagare a più alte energie
  - in cerca di particelle nuove
- Misurare con precisione i processi noti
  - in cerca di discrepanze con la previsione del Modello Standard
- Osservare l'universo
  - Misurare le particelle del Modello Standard in natura
  - Cercare fenomeni nuovi



Molti esperimenti.  
Ci sarebbe molto da dire...

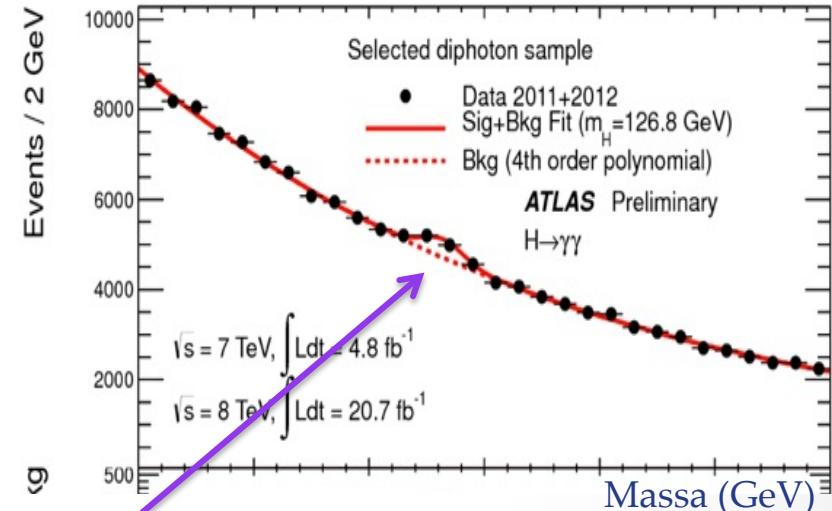


# Il ciclo di vita di un esperimento

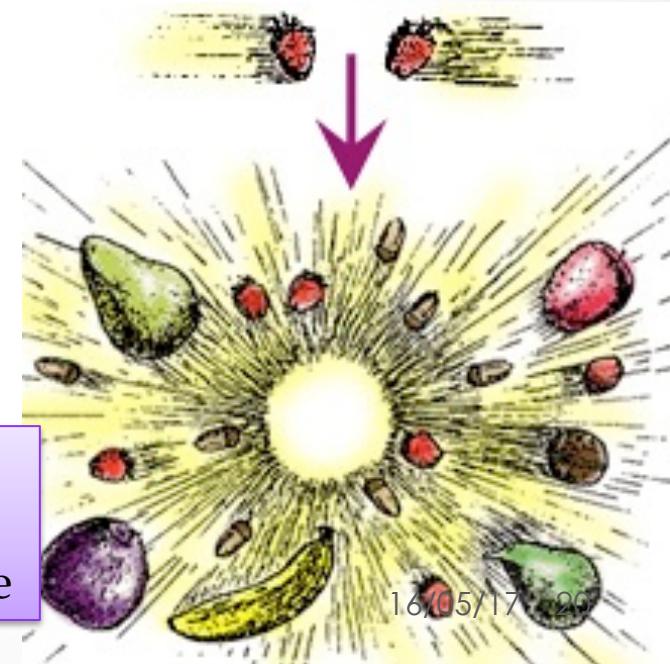


# La fisica ai collider

- Vogliamo misurare particelle come il bosone di Higgs
- La maggior parte delle particelle che c'interessano non sono osservabili in natura
- Allora:
  1. Dobbiamo produrle
  2. Dobbiamo osservarle
  3. Dobbiamo riconoscerle e misurarne le caratteristiche

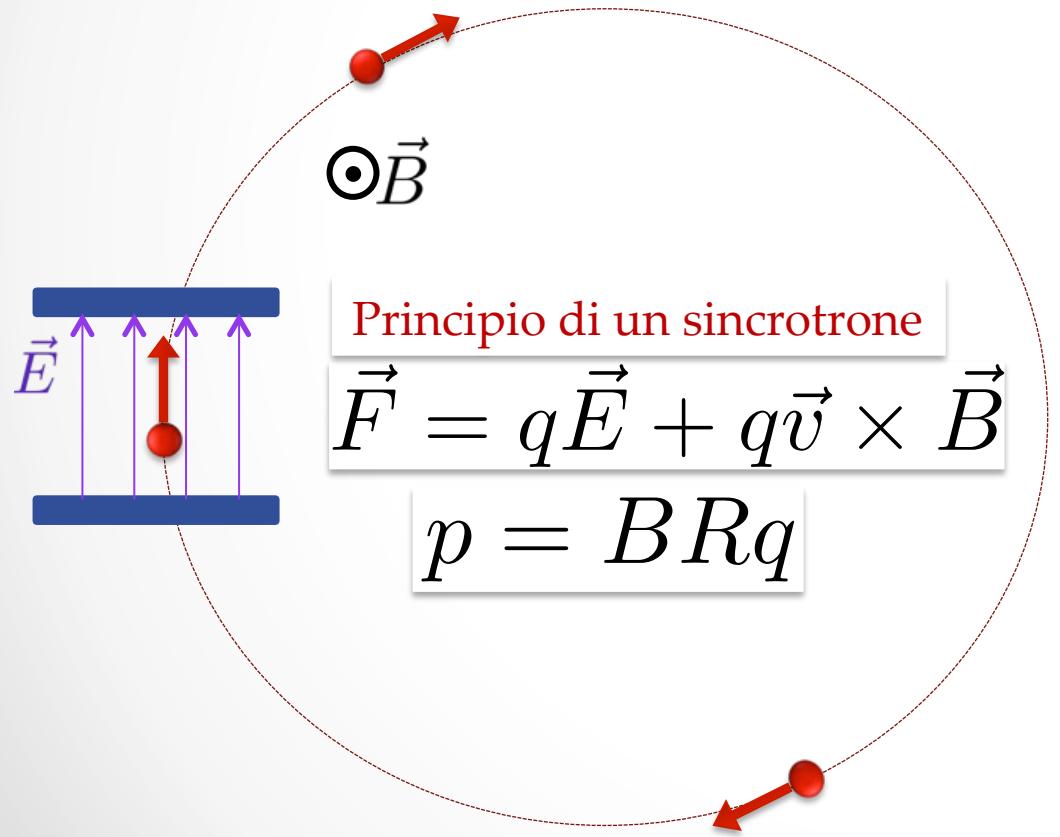


$H \rightarrow \gamma\gamma$



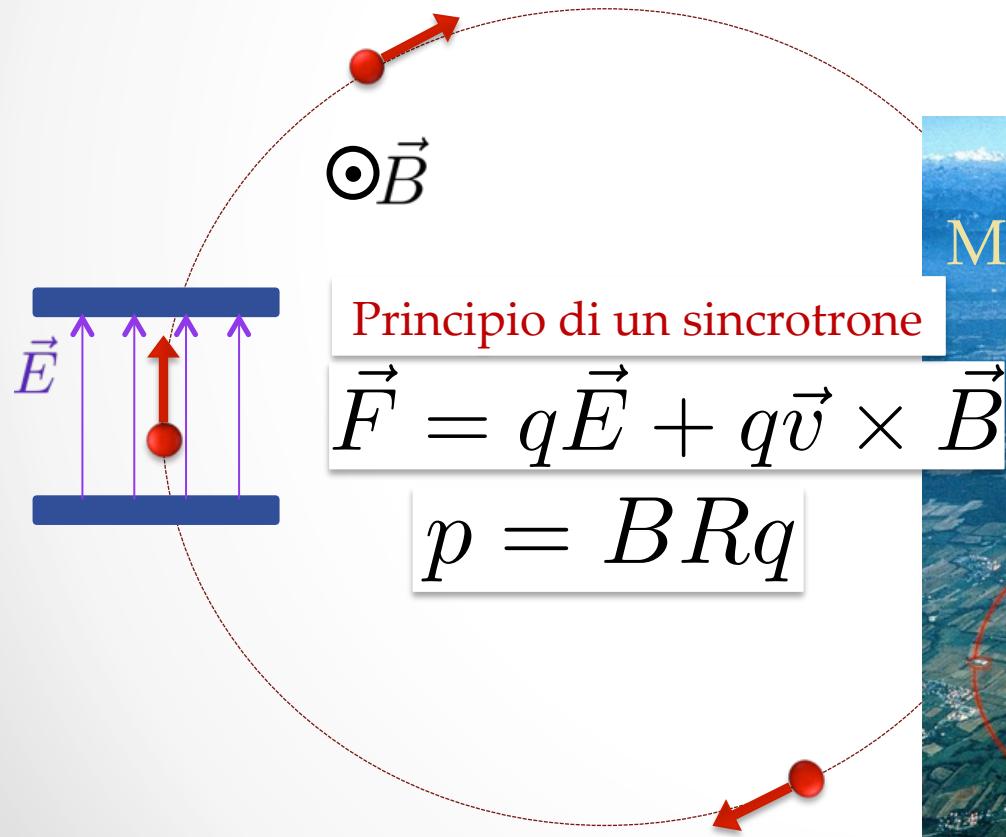
Per produrre particelle massicce uso particelle leggere molto accelerate

# Accelerare le particelle: il Large Hadron Collider (LHC)



# Large Hadron Collider (LHC)

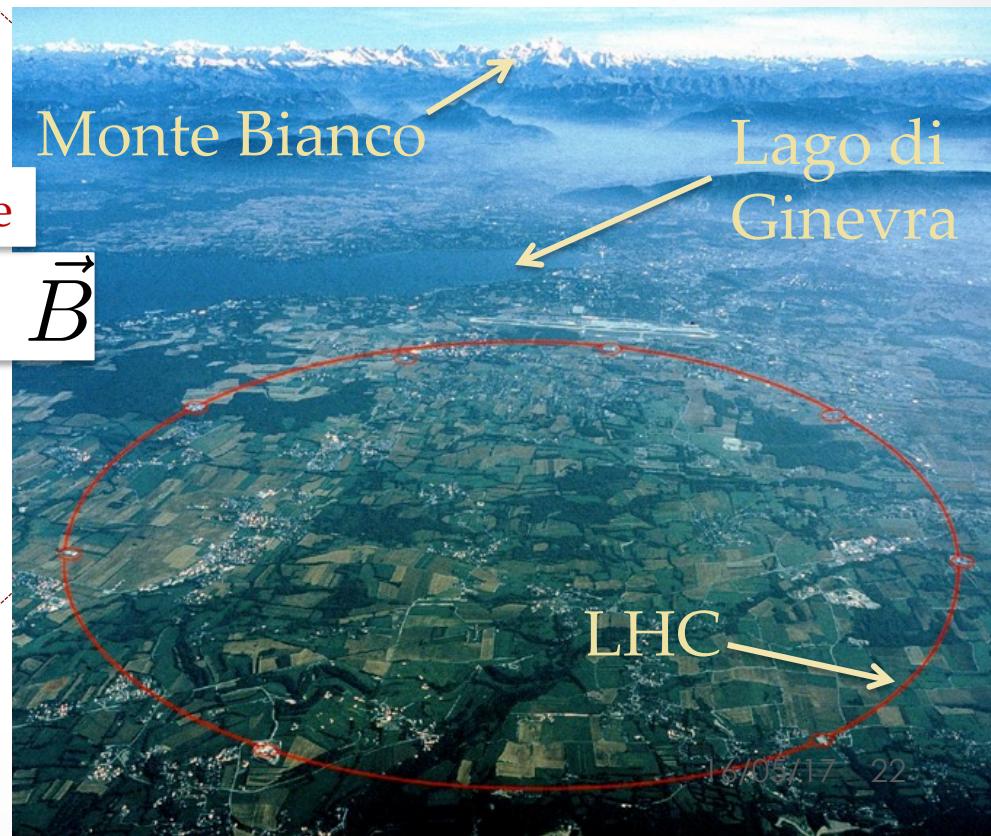
Circonferenza:  
27 Km



Principio di un sincrotrone

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

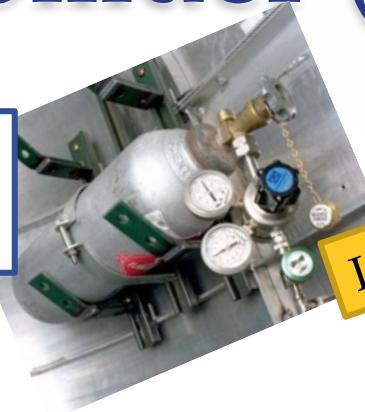
$$p = BRq$$



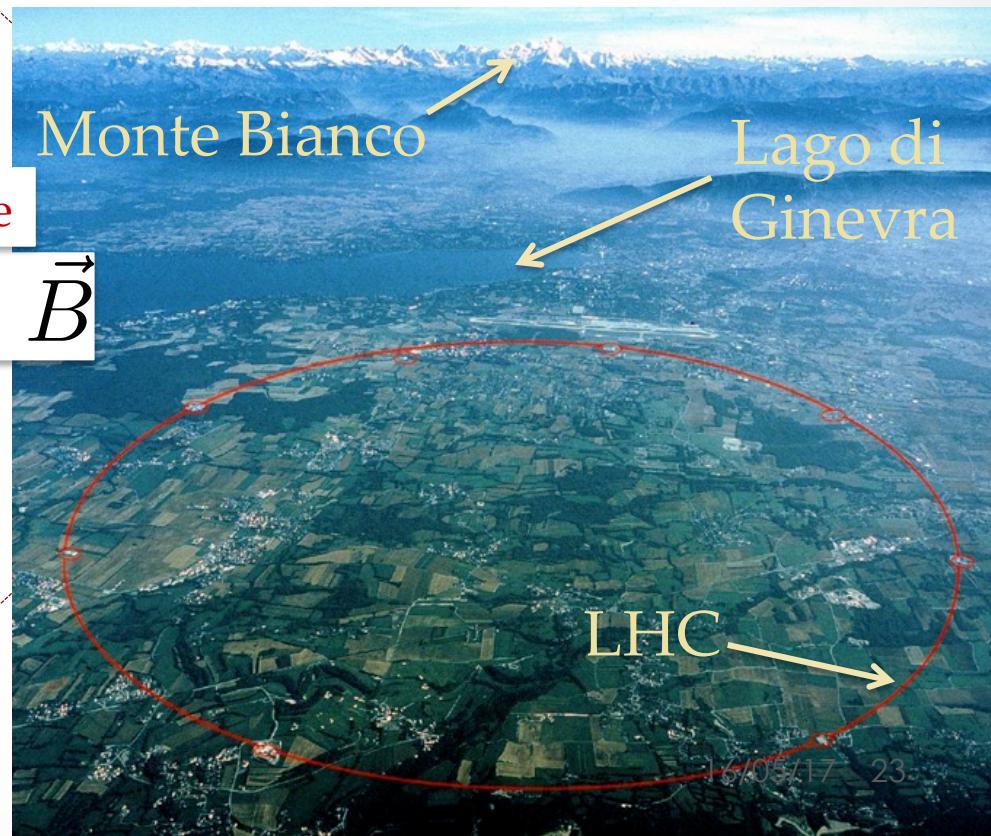
# Large Hadron Collider (LHC)

Circonferenza:  
27 Km

Accelera protoni  
fino a 7 TeV



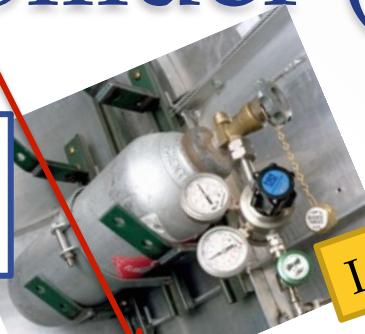
Idrogeno



# Large Hadron Collider (LHC)

Circonferenza:  
27 Km

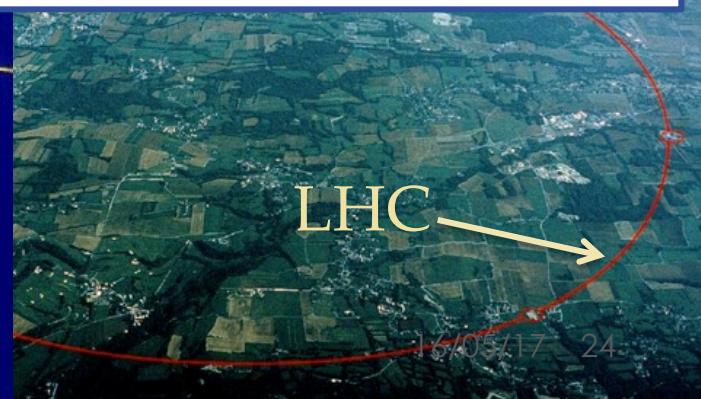
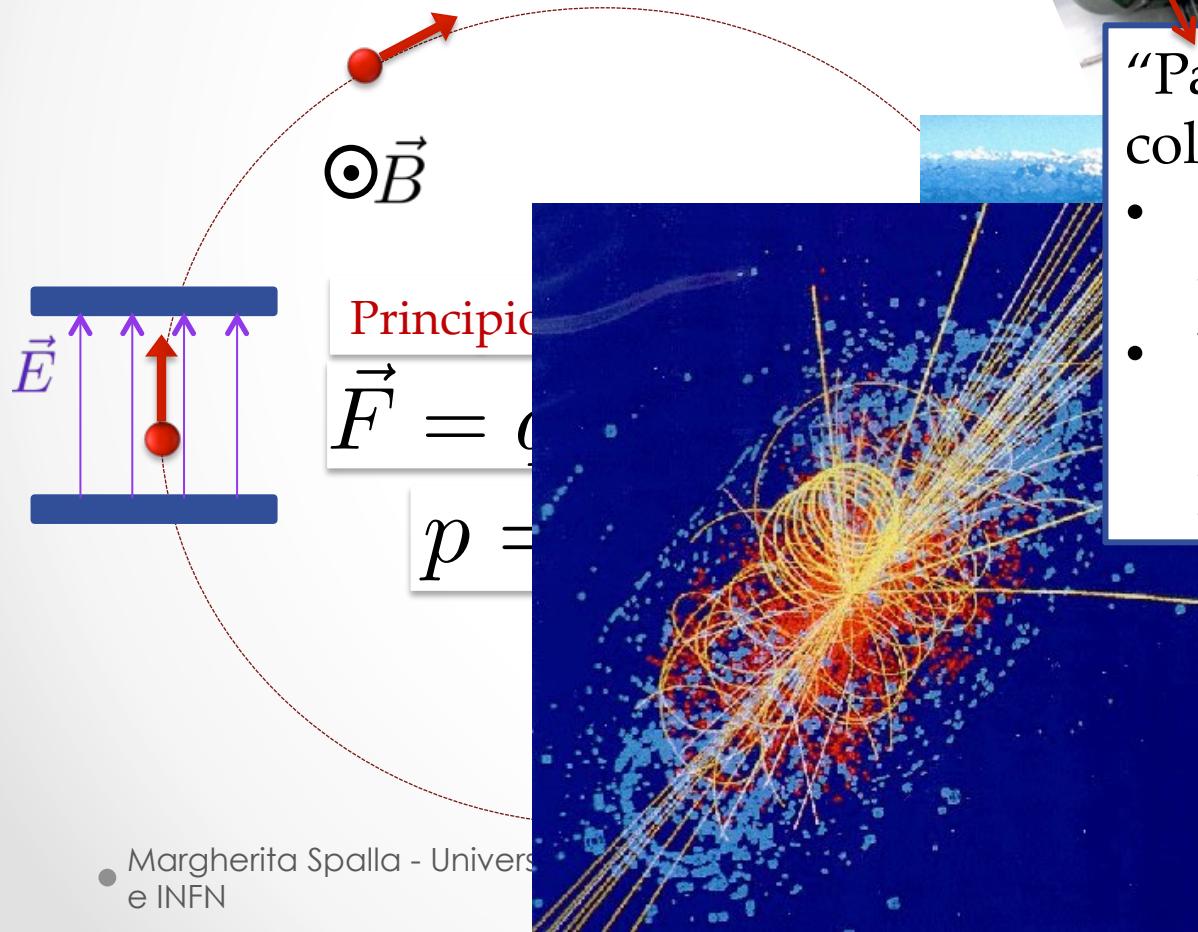
Accelera protoni  
fino a 7 TeV



Idrogeno

“Pacchetti” di protoni collidono uno contro l’altro.

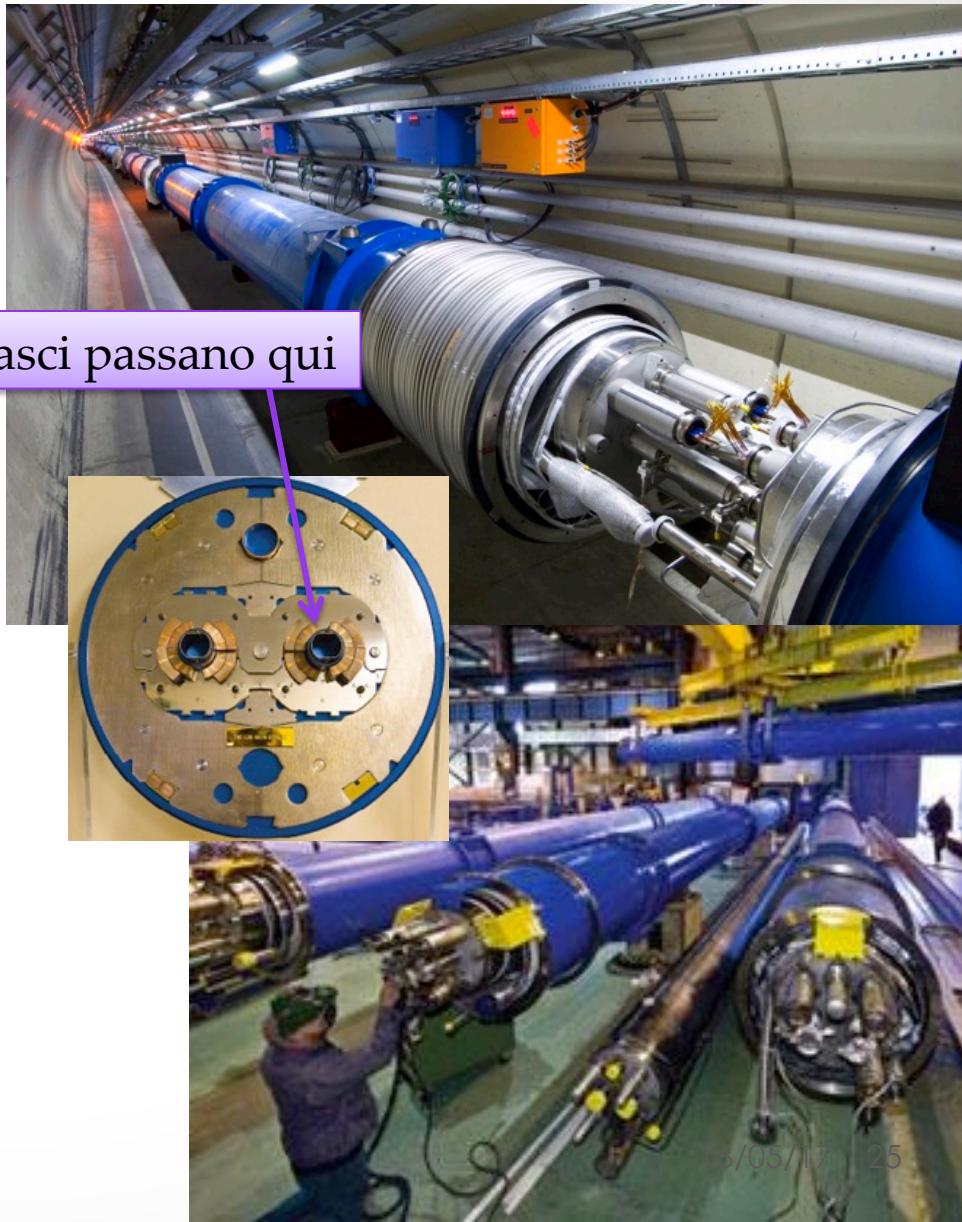
- 100 miliardi di protoni per pacchetto
- Due pacchetti collidono ogni 25 ns (50 ns nel Run1)



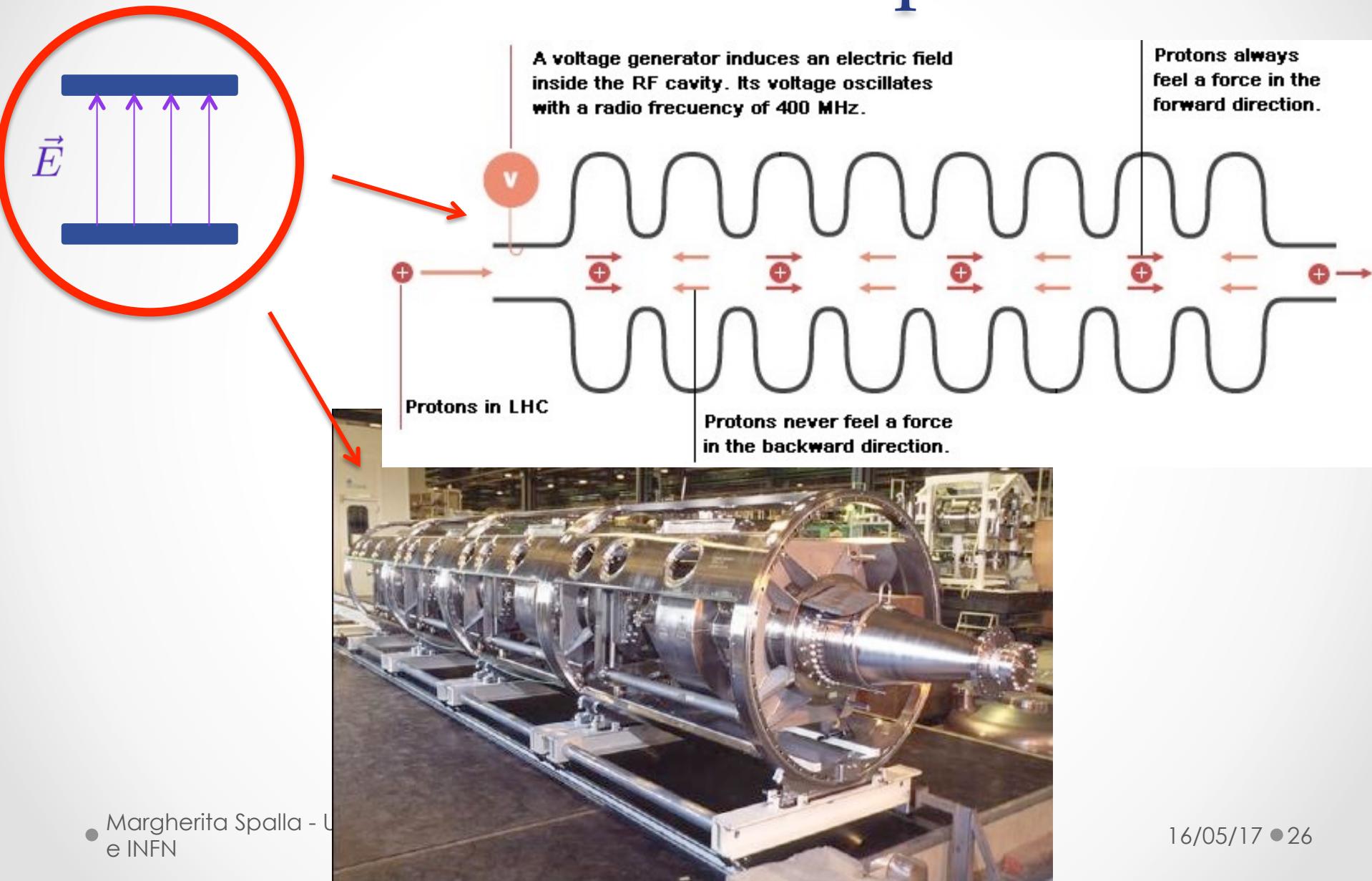


# I dipoli magnetici

- 1200 elettromagneti
- B = 8.3 Tesla
- E' necessario un magnete superconduttore.
  - Resistenza quasi nulla: corrente molto alta
- Supercondutività solo a temperatura vicina allo zero assoluto: 1,9 K
  - raffreddato a elio liquido

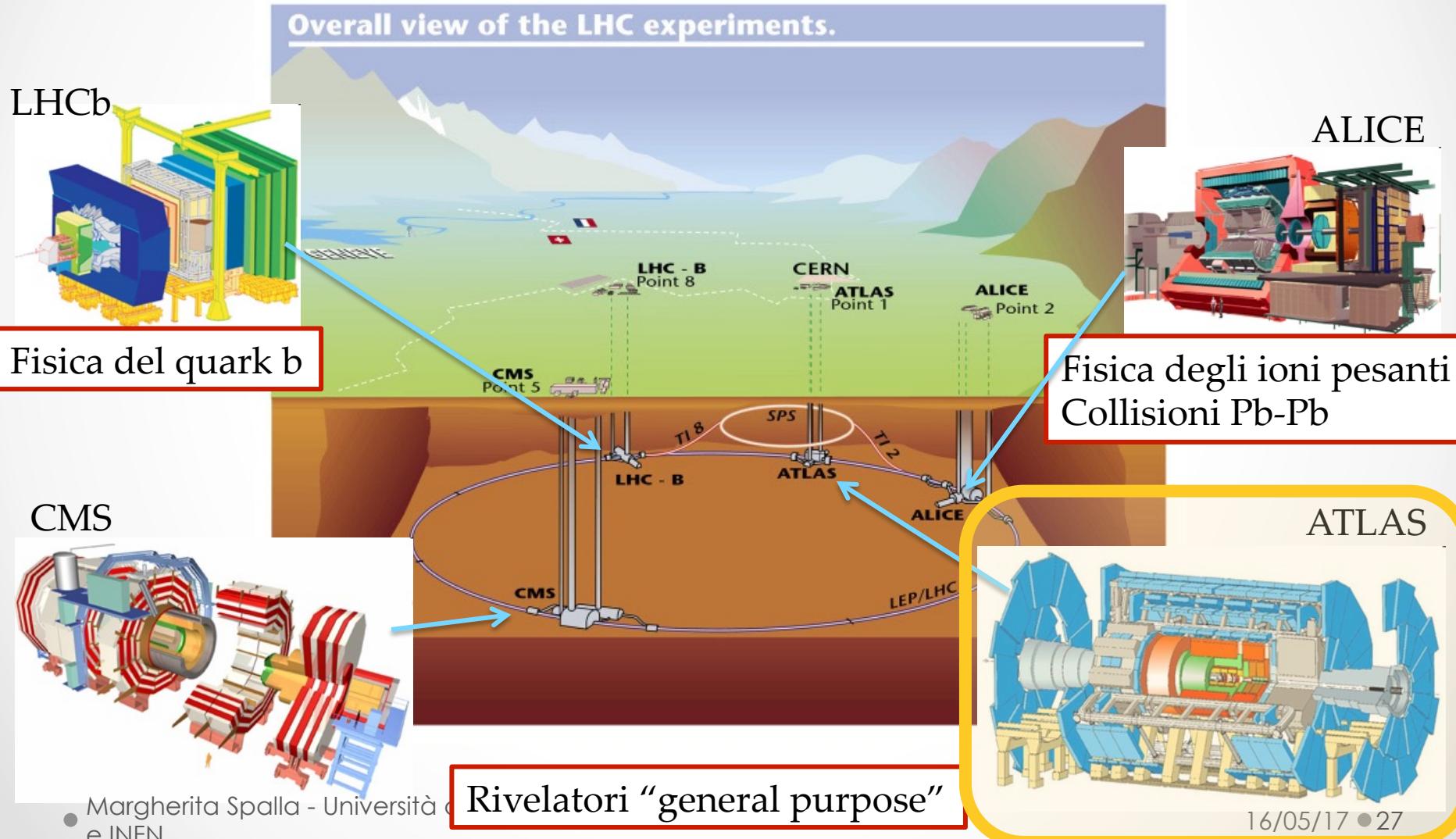


# Cavità a radiofrequenza

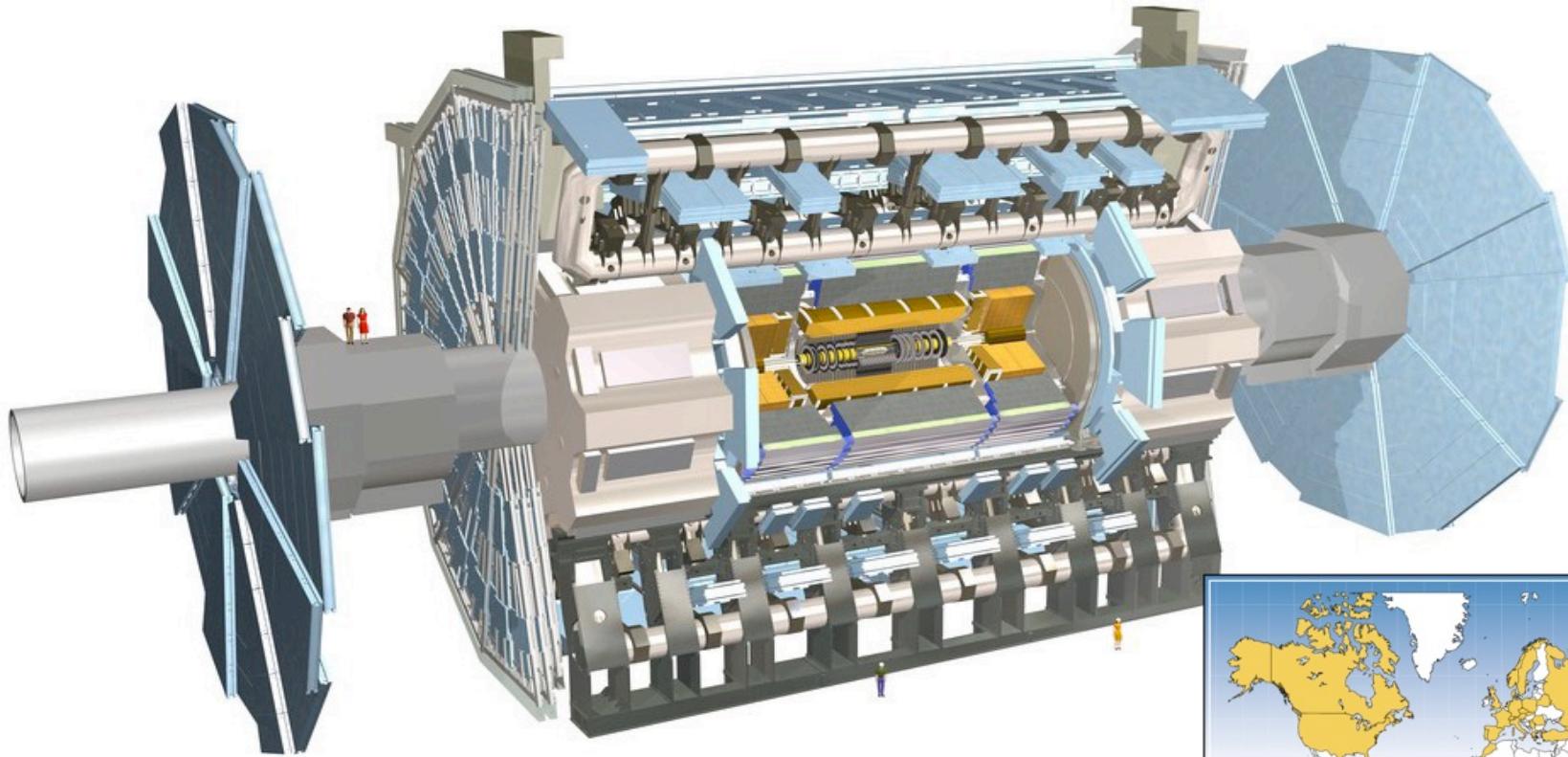


# I rivelatori

Sull'LHC sono montati quattro esperimenti, per altrettanti punti di collisione.



# ATLAS in (pochi) numeri



- 90 metri sottoterra
- Lunghezza: 46 m
- Diametro: 22 m
- Peso: 7000 ton
- Dimensioni delle componenti più piccole: decine di micron



# Un po' di storia

CERN/LHCC/92-4  
LHCC/1'2  
1 October 1992

# ATLAS

**Letter of Intent  
for a  
General-Purpose pp Experiment  
at the  
Large Hadron Collider at CERN**

## Abstract

The ATLAS collaboration proposes to build a general purpose proton-proton detector for the Large Hadron Collider, capable of exploring the new energy regime which will become accessible. The detector would be fully operational at the startup of the new accelerator. The detector concept, the research and development work under way to optimize the detector design, and its proposed implementation are described, together with examples of its discovery potential.

# 1996

Margherita Spalla - Università di Pisa  
e INFN



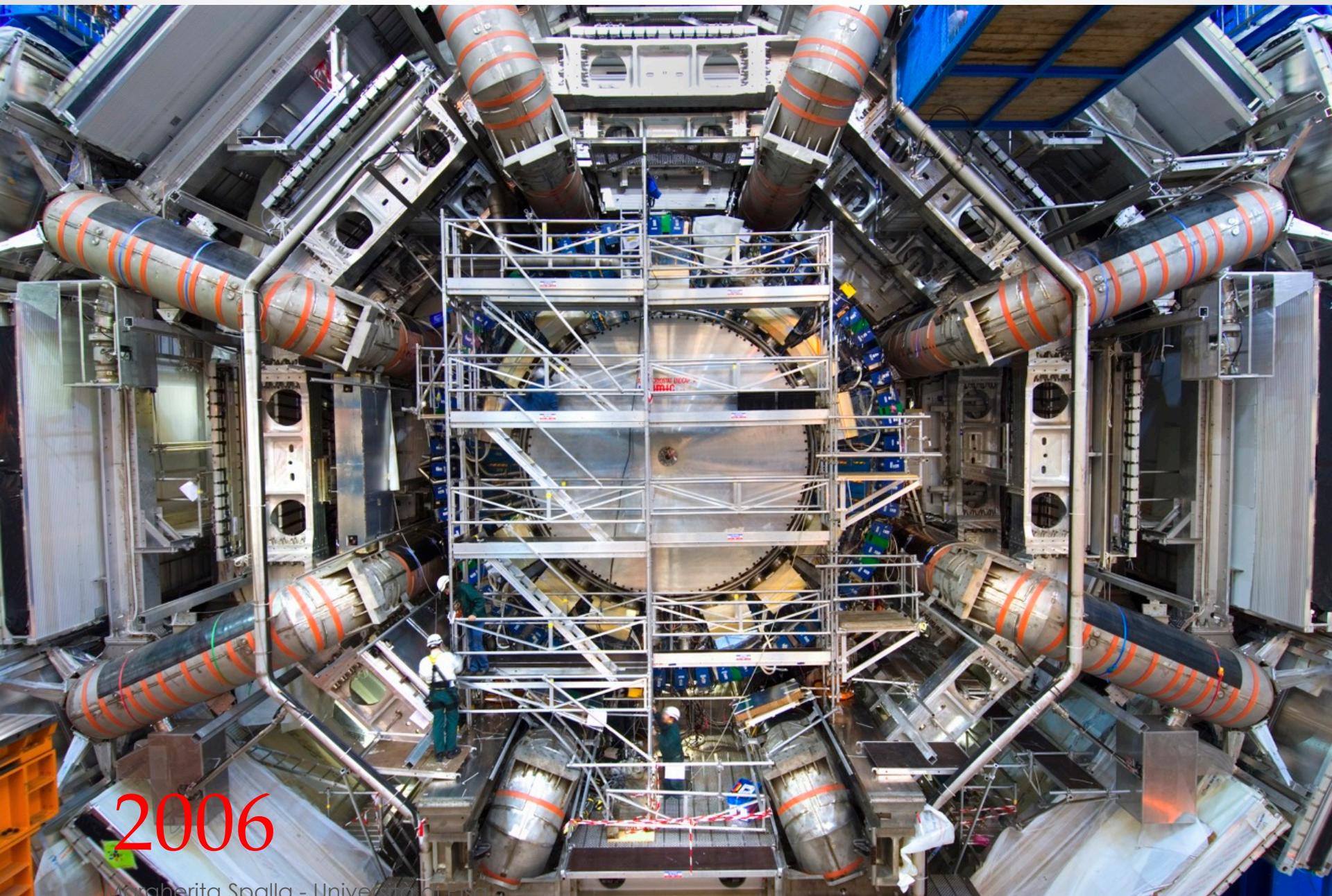


2004

Margherita Spalla - Università di Pisa  
e INFN

16/05/17

31

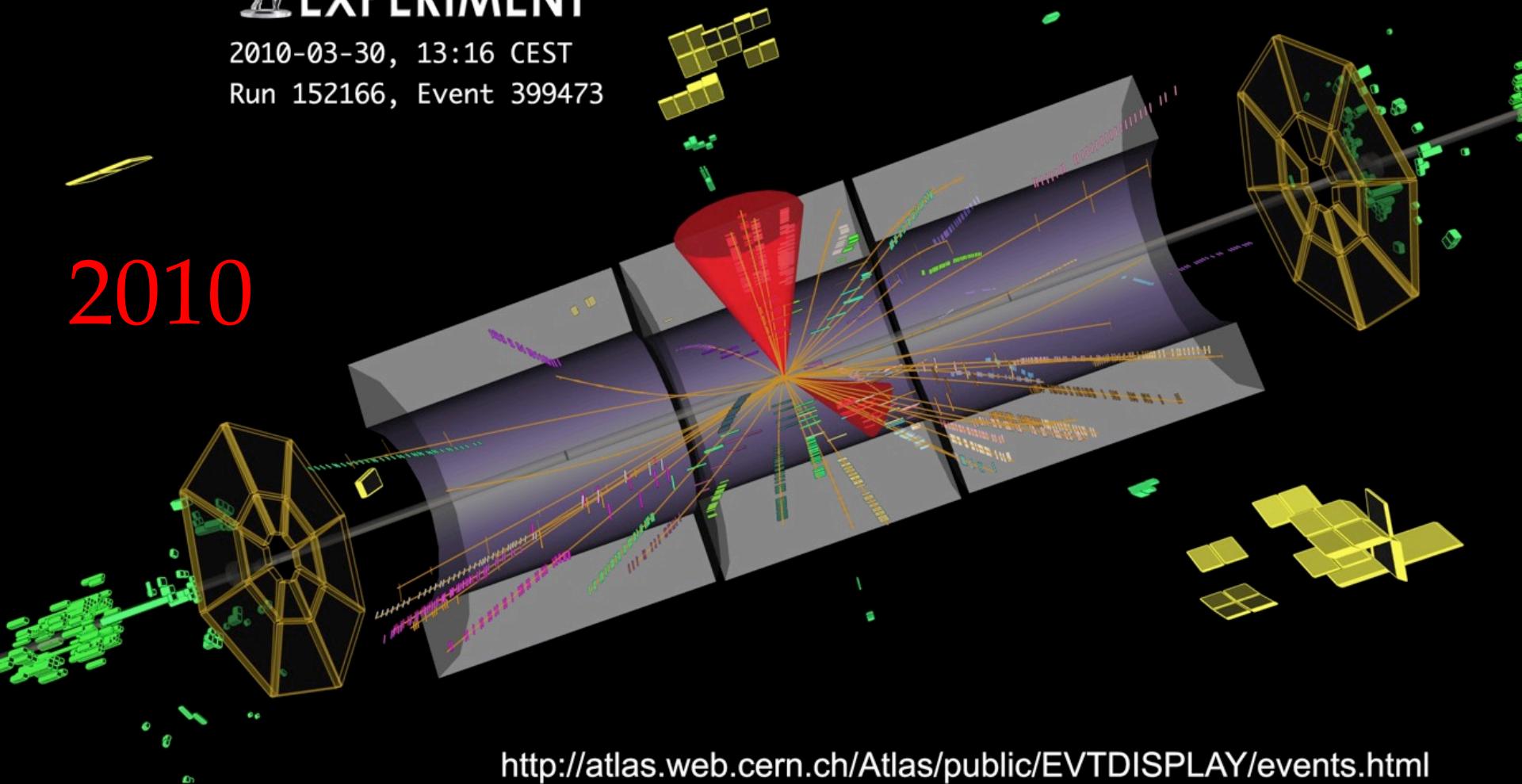


2006



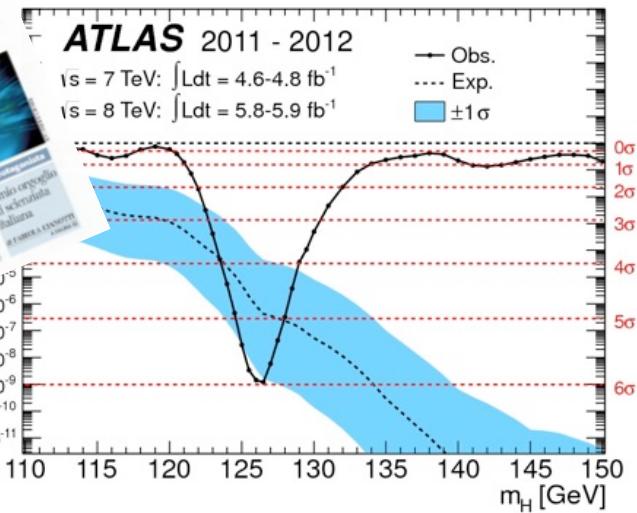
2010-03-30, 13:16 CEST  
Run 152166, Event 399473

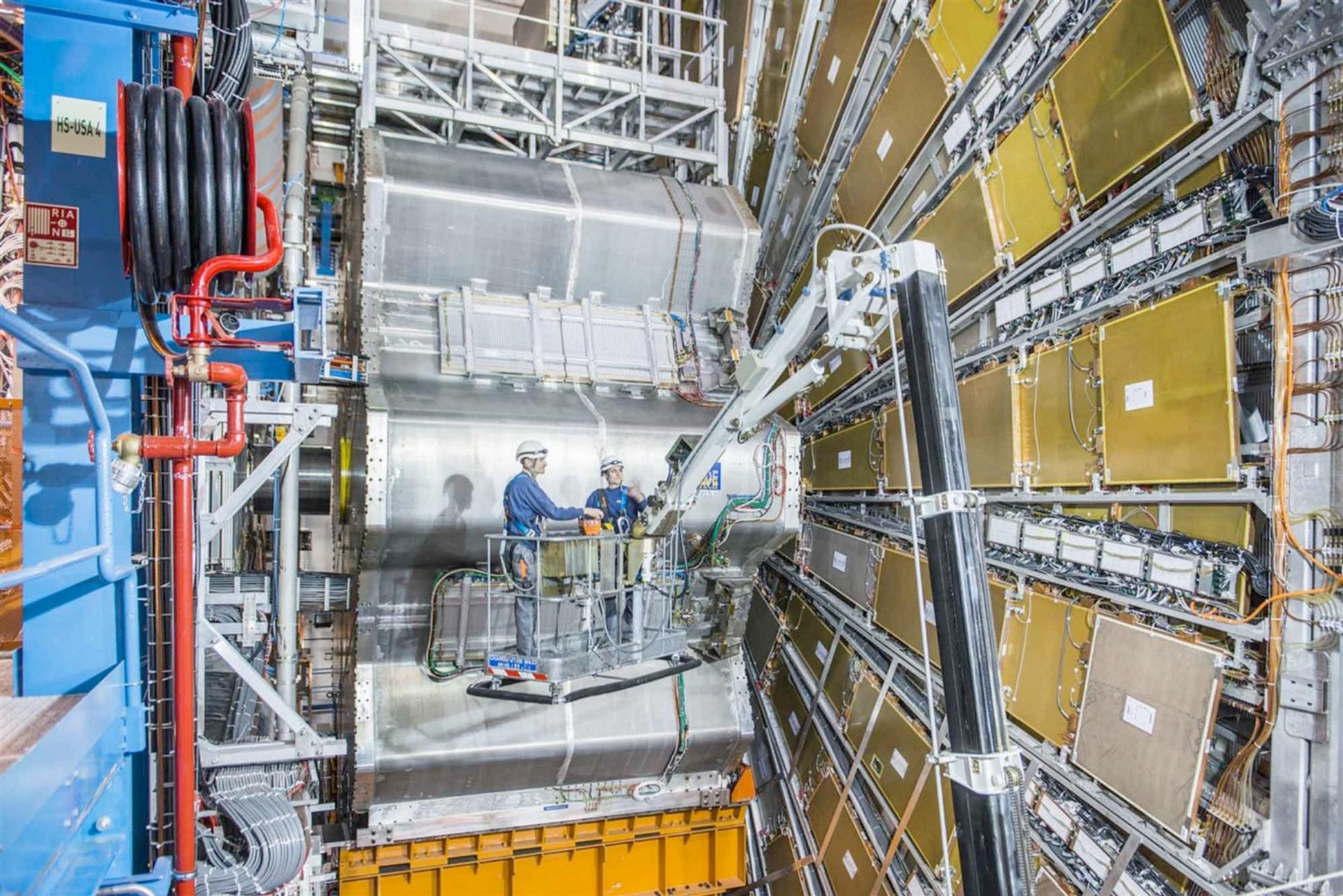
## 2-Jet Collision Event at 7 TeV



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

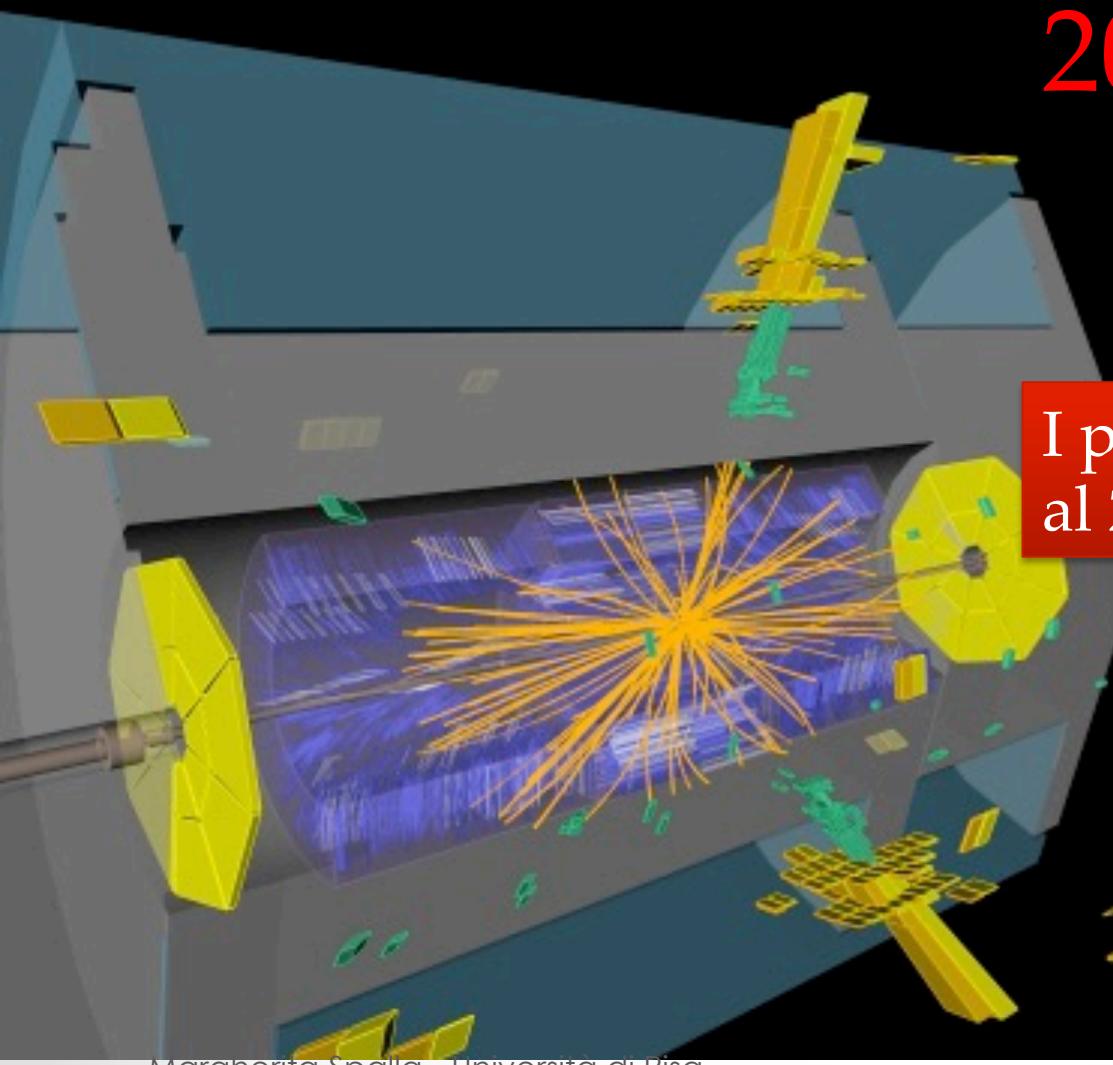
# 2012





First Stable Beams at 13 TeV

2015

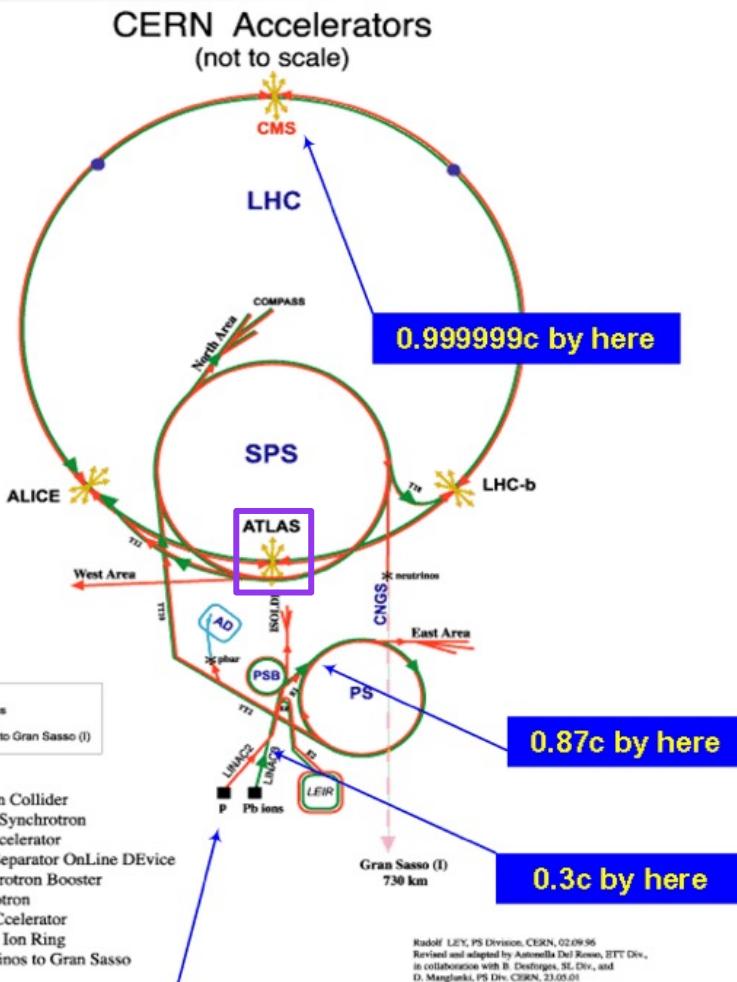


I piani per il futuro arrivano  
al 2037...



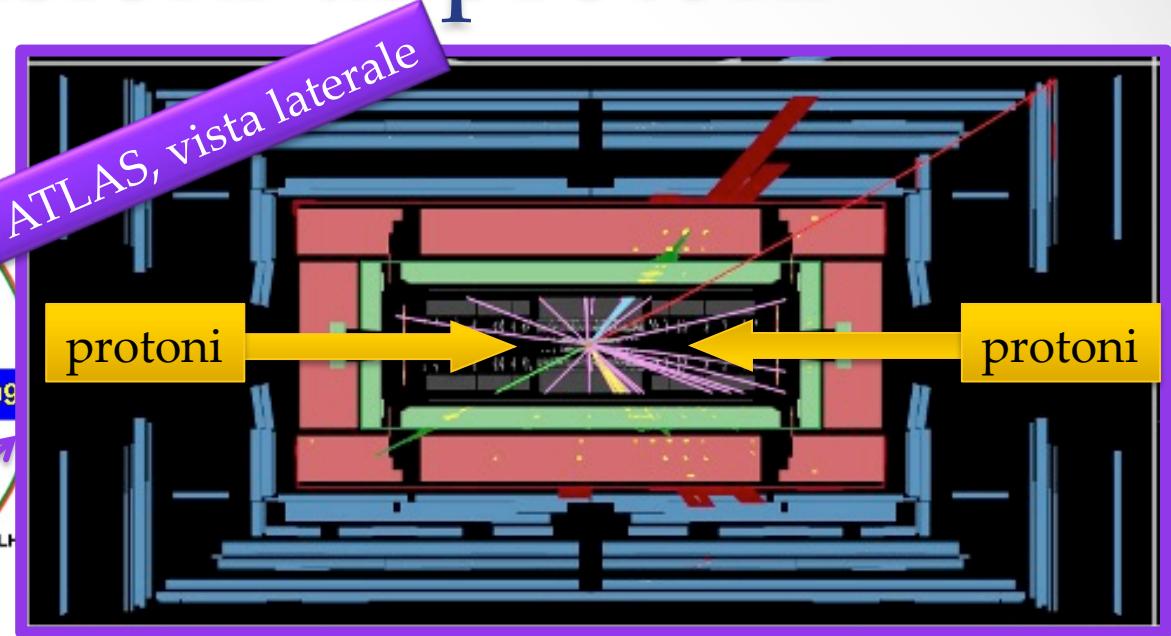
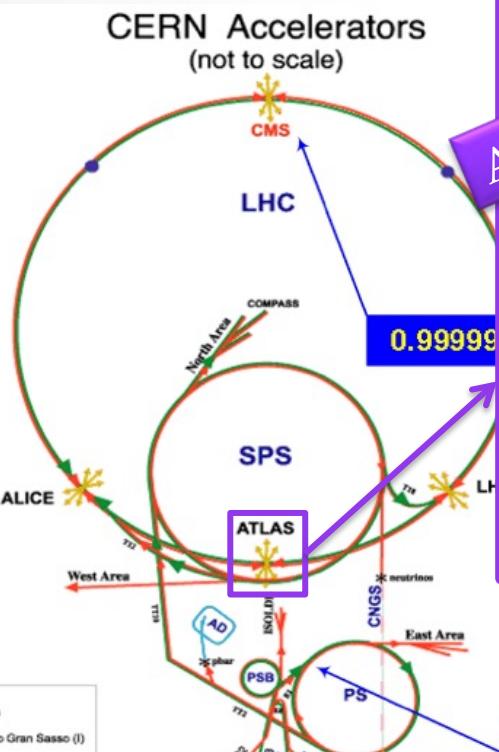
Run: 266904  
Event: 25855182  
2015-06-03 13:41:48 CEST

# Collisioni di protoni



Start the protons out here

# Collisioni di protoni



- Particelle prodotte attraversano il rivelatore
- Lasciano tracce del loro passaggio
  - che ATLAS traduce in segnali elettrici.

Start the protons out here

# Cosa vediamo dopo la collisione?

- Le particelle che ci interessano non sono stabili: decadono prima di raggiungere il rivelatore.

- Vediamo solo le particelle “figlie”:
  - elettroni ( $e^-$ ) e positroni ( $e^+$ )
  - muoni ( $\mu^-$ ) e anti-muoni ( $\mu^+$ )
  - fotoni ( $\gamma$ )
  - quark (q), o particelle composte da quark (adroni).
  - neutrini ( $\nu$ )

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+ e^- e^+ e^-$$

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- Di ogni particella, vogliamo conoscere:

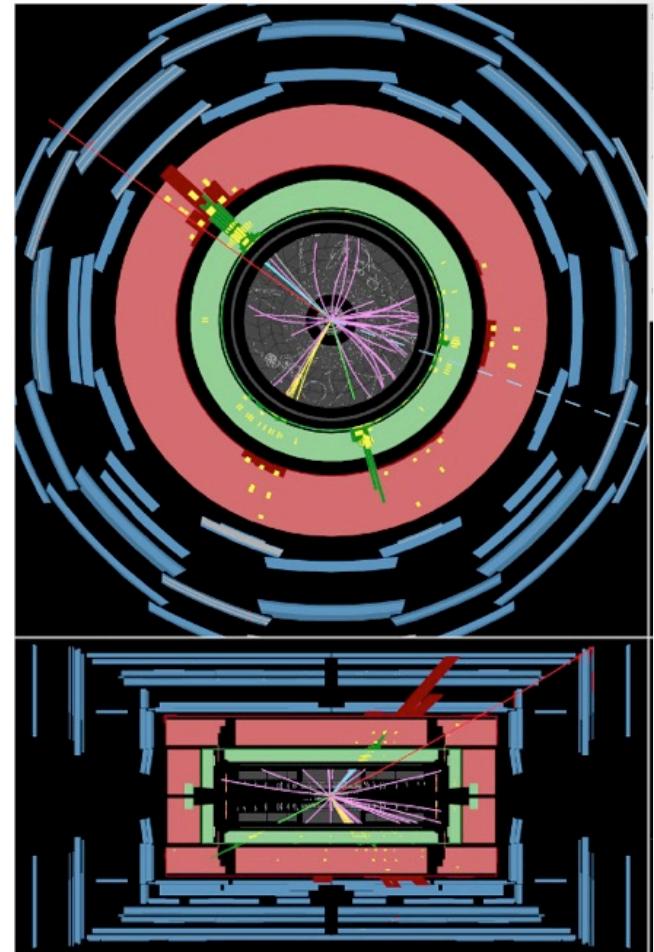
- Traiettoria
- Energia
- Impulso
- Che particella è
- Massa



Questo per tutte le particelle prodotte:  
➤ Si ottiene una “foto” della collisione.  
➤ E’ quello che chiamiamo un evento.

# Rivelatori diversi per articelle diverse

- ATLAS è composto da diversi rivelatori montati uno dentro l'altro.
  - combiniamo la misura dei diversi sotto-rivelatori.
- Due tipi di rivelatori
  - Tracciatori
  - Calorimetri



# Il tracciatore

- E' una "macchina fotografica" per particelle cariche.
  - I primi erano proprio lastre fotografiche
  - Una particella carica lascia impressa una traccia

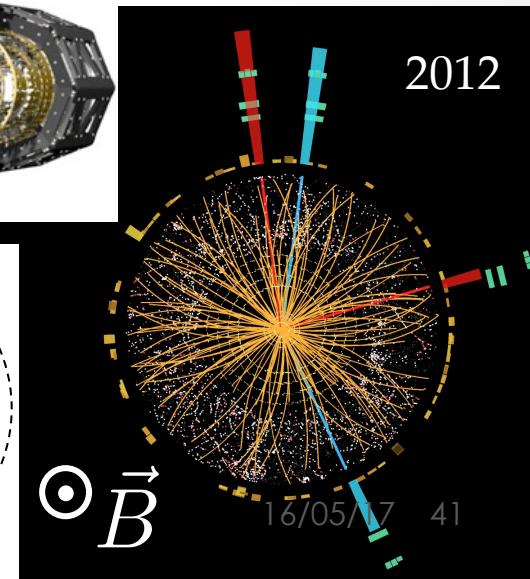
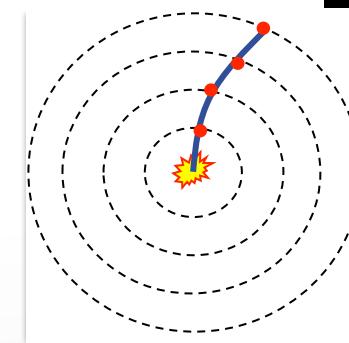


- In digitale:
  - strati di sensori intercettano la particella nel suo percorso



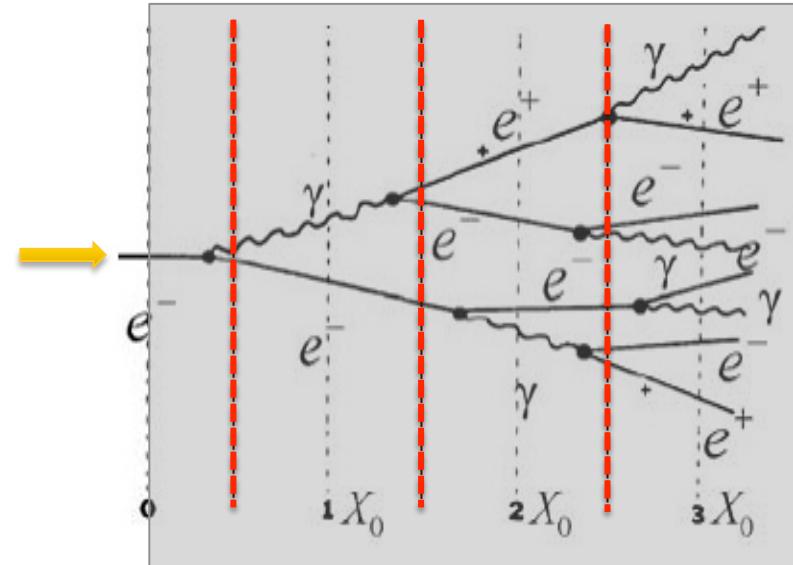
- Aggiungo un campo magnetico:
  - le particelle curvano
  - dalla curvatura ricavo carica e impulso

$$p = BRq$$



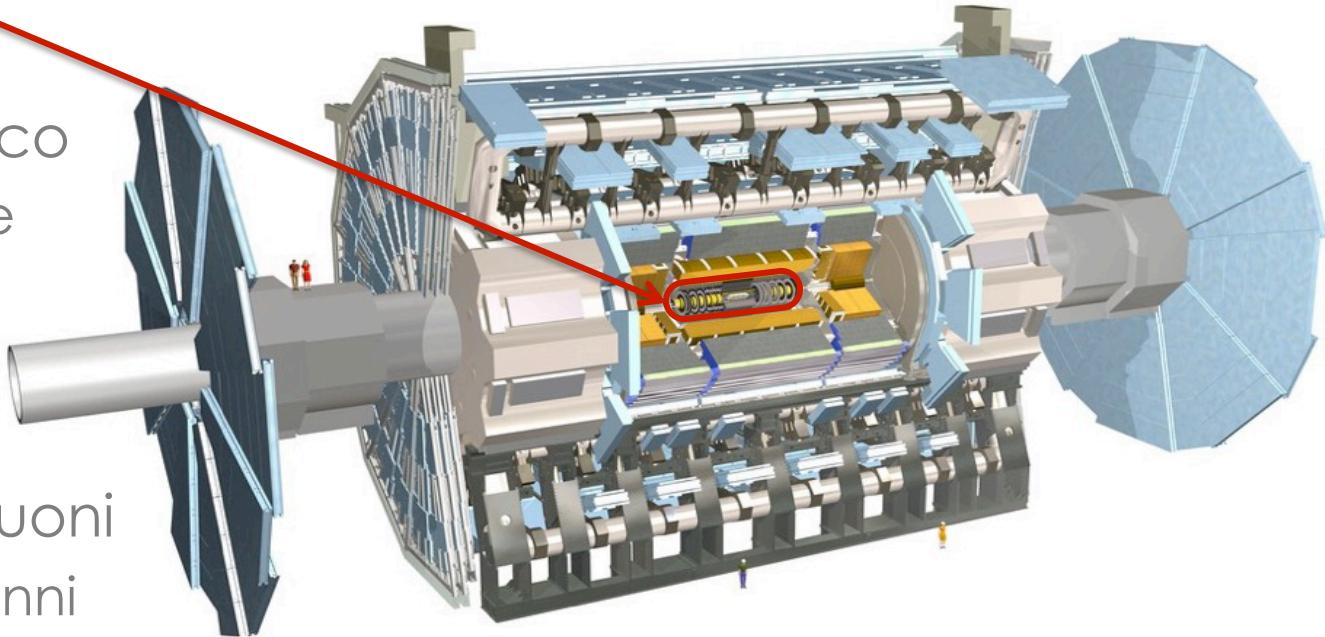
# Il calorimetro

- Misura l'energia di particelle sia cariche che neutre.
- La particella attraversa uno spesso strato di materiale denso
  - si “distrugge” in seguito all’interazione con il materiale
  - libera la propria energia sotto forma di uno sciame di altre particelle
  - sensori all’interno del calorimetro rivelano le particelle dello sciame
- Misurando le caratteristiche dello sciame determiniamo l’energia della particella incidente



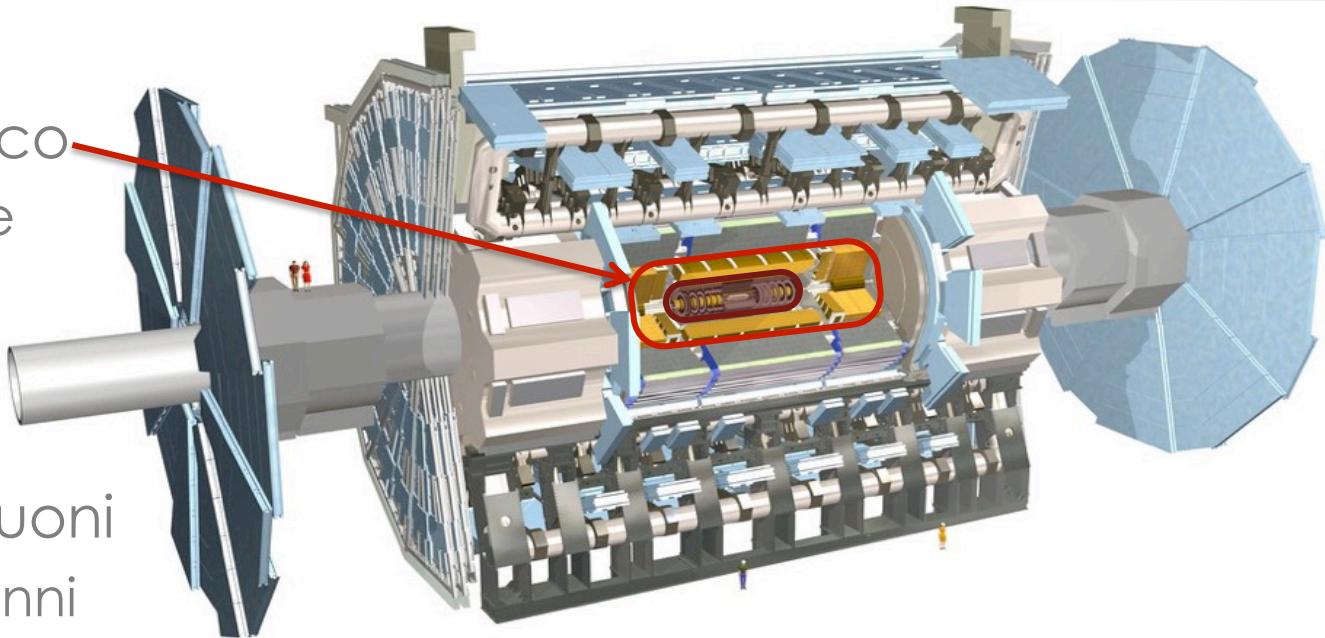
# I sotto-rivelatori di ATLAS

- Tracciatore
- Calorimetro elettromagnetico
  - per elettroni e fotoni
- Calorimetro adronico
- Rivelatore di muoni
  - passano indenni attraverso i calorimetri, serve un secondo tracciatore



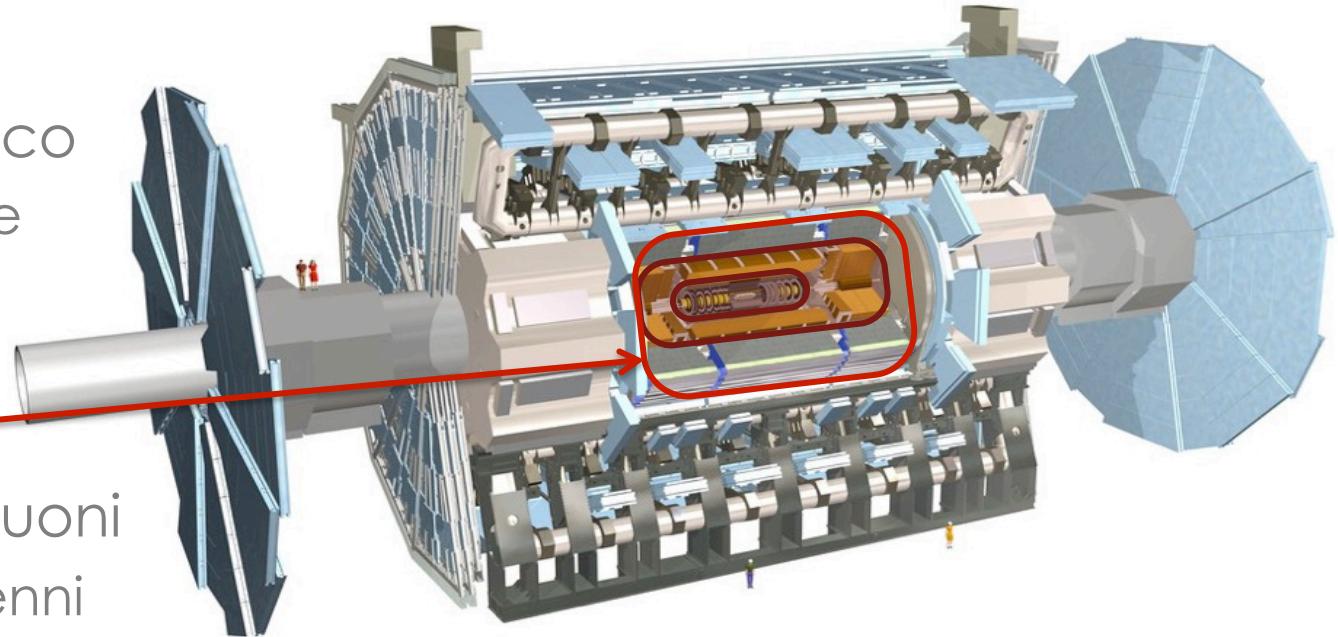
# I sotto-rivelatori di ATLAS

- Tracciatore
- Calorimetro elettromagnetico
  - per elettroni e fotoni
- Calorimetro adronico
- Rivelatore di muoni
  - passano indenni attraverso i calorimetri, serve un secondo tracciatore



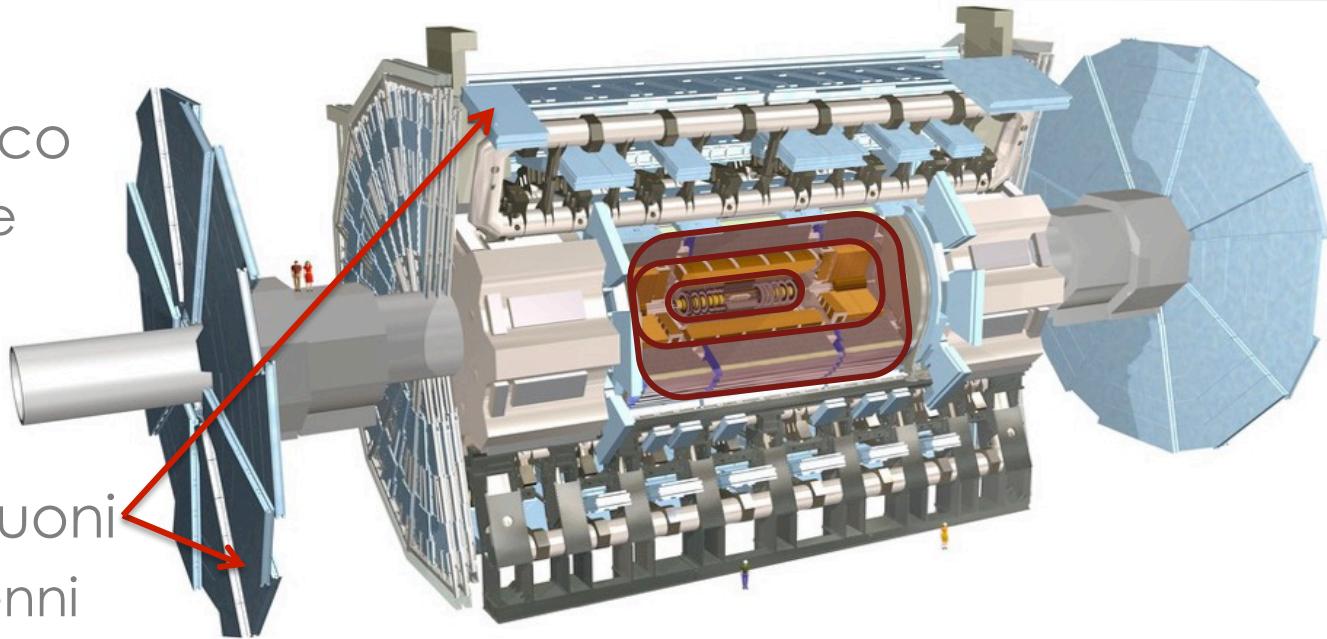
# I sotto-rivelatori di ATLAS

- Tracciatore
- Calorimetro elettromagnetico
  - per elettroni e fotoni
- Calorimetro adronico
- Rivelatore di muoni
  - passano indenni attraverso i calorimetri, serve un secondo tracciatore



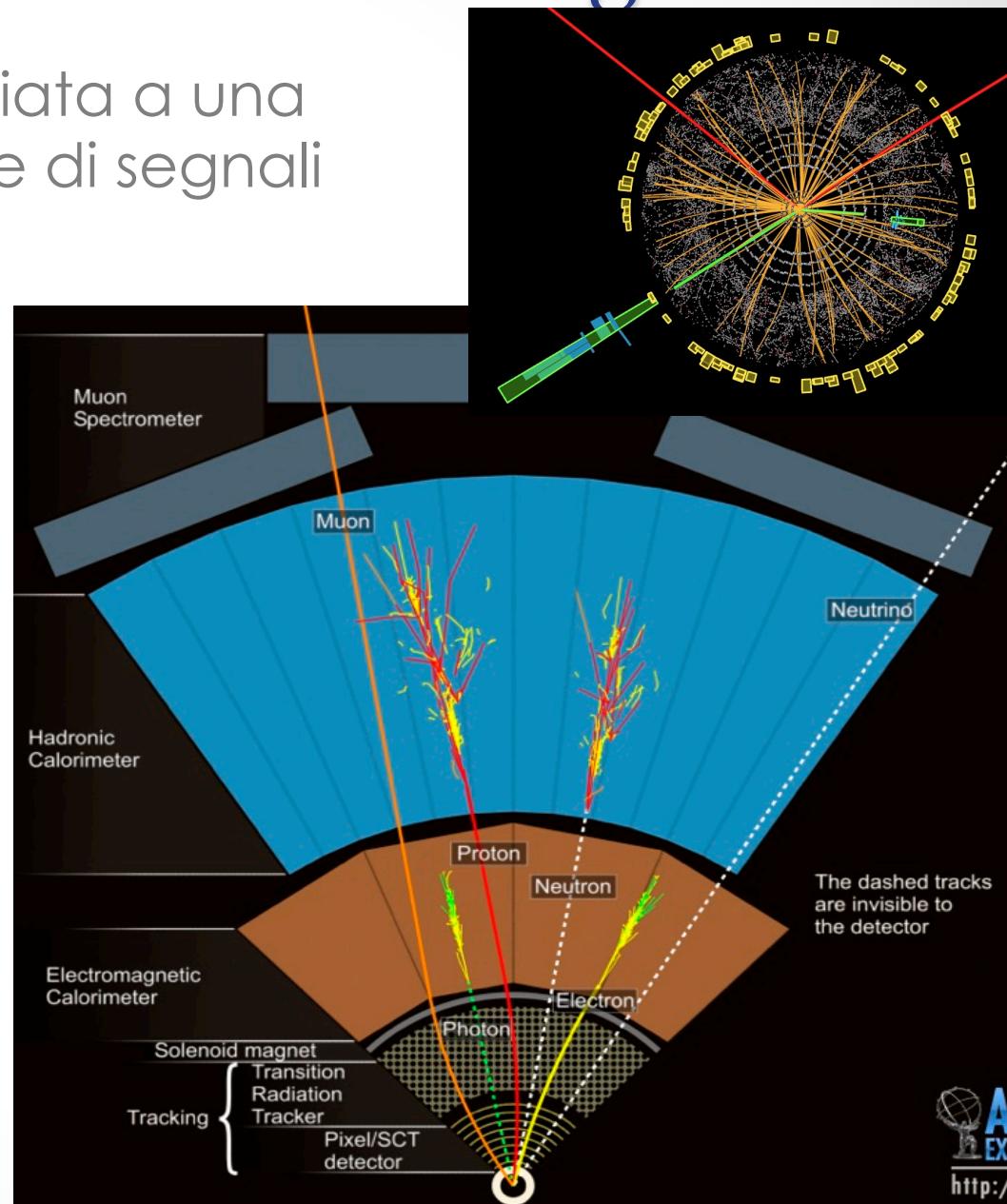
# I sotto-rivelatori di ATLAS

- Tracciatore
- Calorimetro elettromagnetico
  - per elettroni e fotoni
- Calorimetro adronico
- Rivelatore di muoni
  - passano indenni attraverso i calorimetri, serve un secondo tracciatore

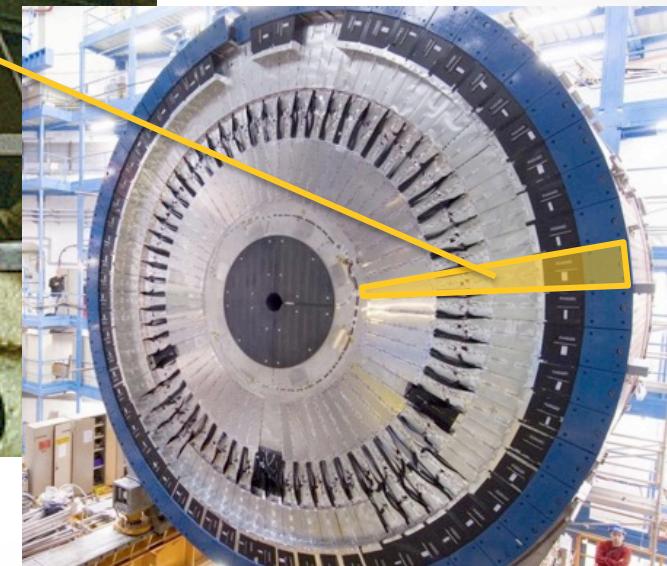


# Particelle in ATLAS: ricostruire gli eventi

- Ogni particella è associata a una specifica combinazione di segnali
- Algoritmi per passare dai segnali dei singoli rivelatori alle particelle misurate
  - Software di ricostruzione (c++, python)
- Alcuni sono consolidati, ma non abbiamo finito di svilupparne di nuovi



# Costruire il rivelatore: un esempio, il calorimetro adronico TileCal



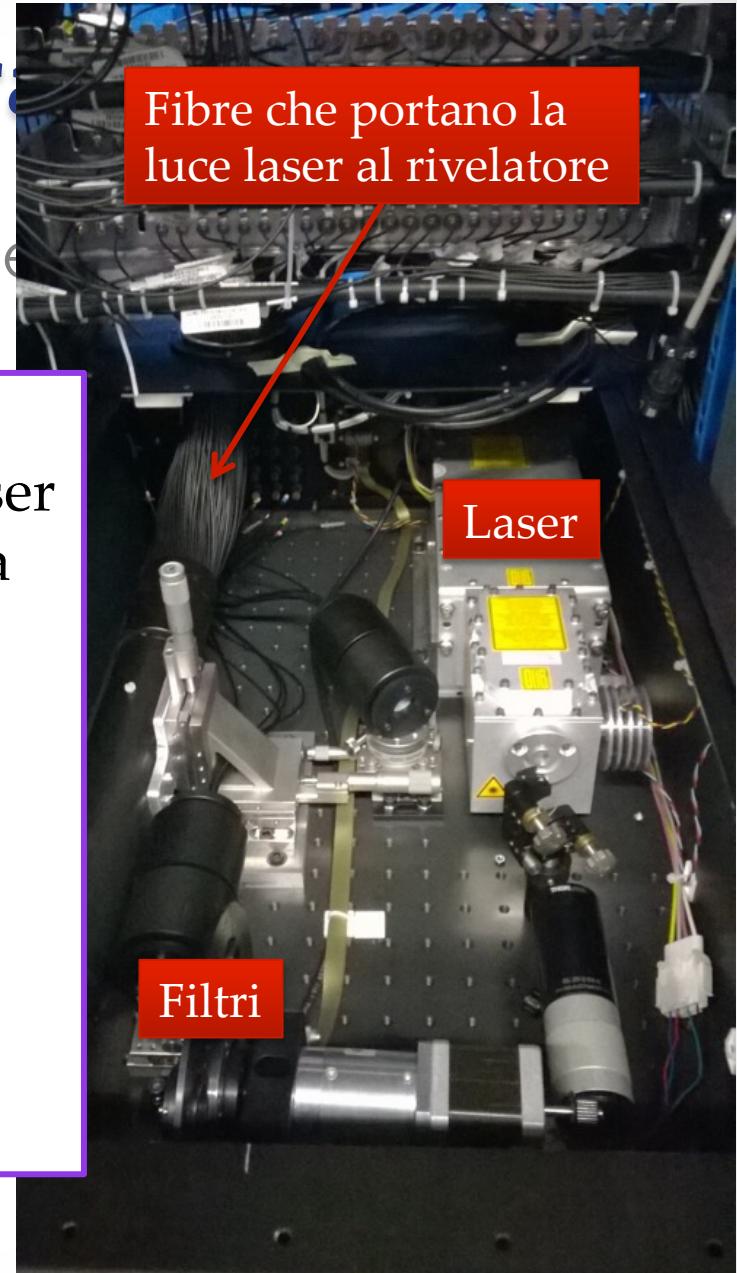
# Calibrare e monitorare il rivelatore

- E' importante conoscere bene la risposta di ogni rivelatore
  - per avere una misura precisa
- Non bastano I test iniziali:
  - il rivelatore cambia nel tempo e va costantemente monitorato

# Calibrare e monitorare

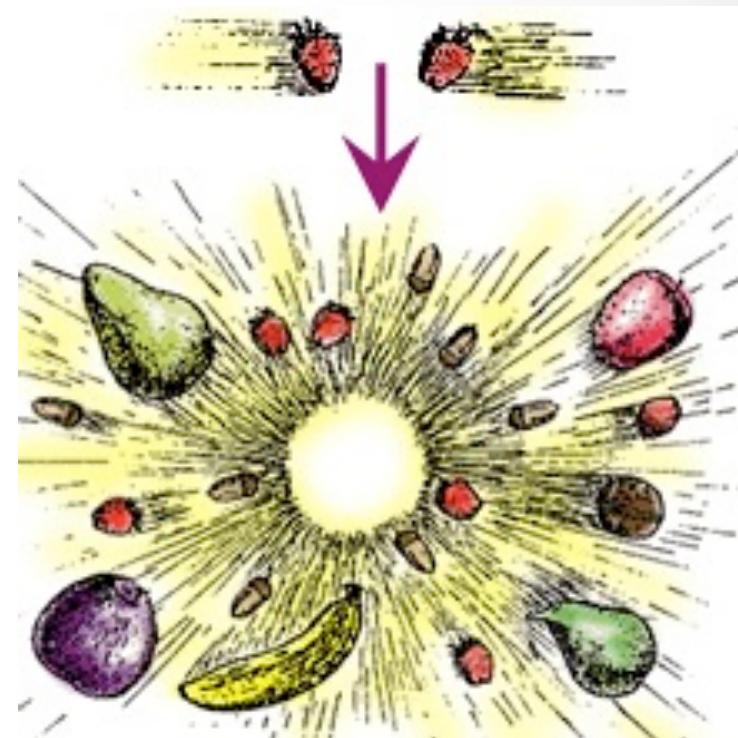
- E' importante conoscere bene il rivelatore

- Per esempio:
  - Sistema basato su luce laser per monitorare la risposta dei sensori di TileCal
  - Pisa ha sviluppato un metodo di monitoring
  - Una nuova versione del sistema recentemente costruita



# Acquisire i dati: un problema di probabilità

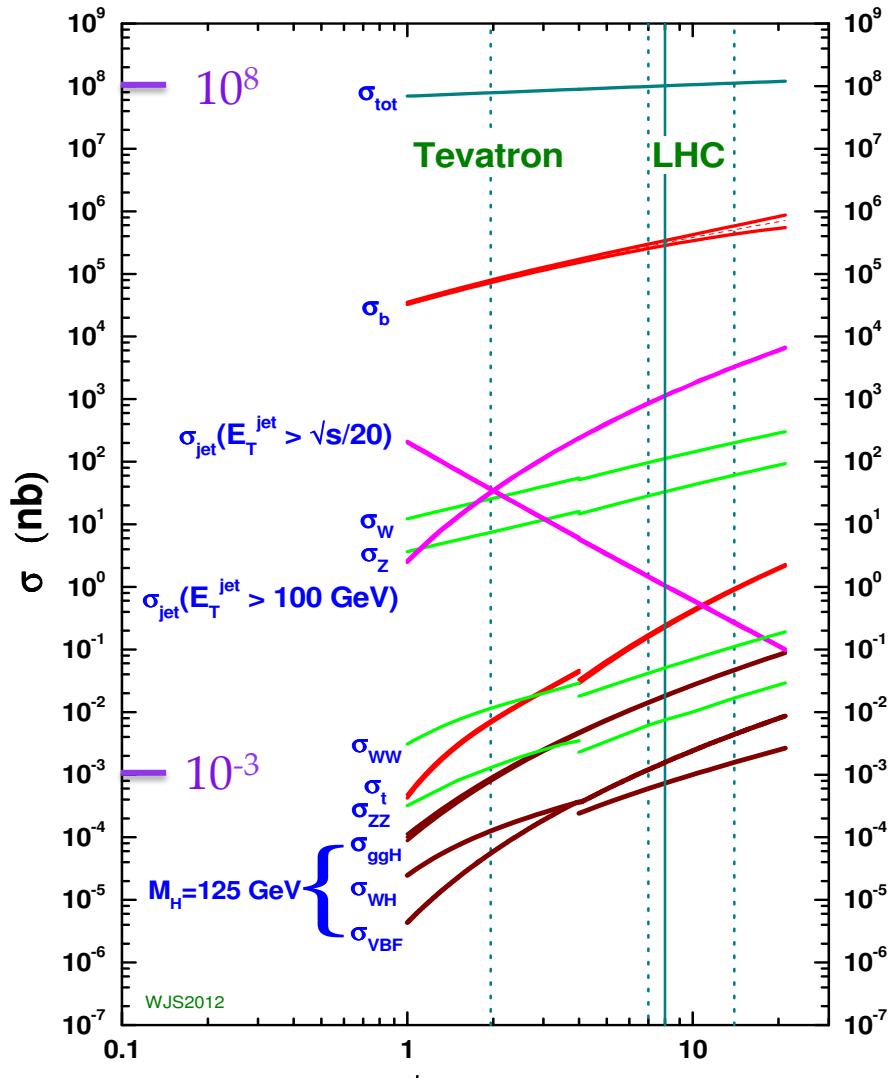
- Mi serve sapere:
  - probabilità che avvenga una collisione
  - probabilità che la collisione produca una certa particella
  
- Dipenderà:
  - dalla fisica della collisione:
    - *sezione d'urto*  $\sigma$
  - dalle caratteristiche dei flussi di particelle incidenti
    - *luminosità*  $L$



$$\text{Rate} = \sigma \cdot L$$

# Acquisire i dati: un problema di probabilità

proton - (anti)proton cross sections



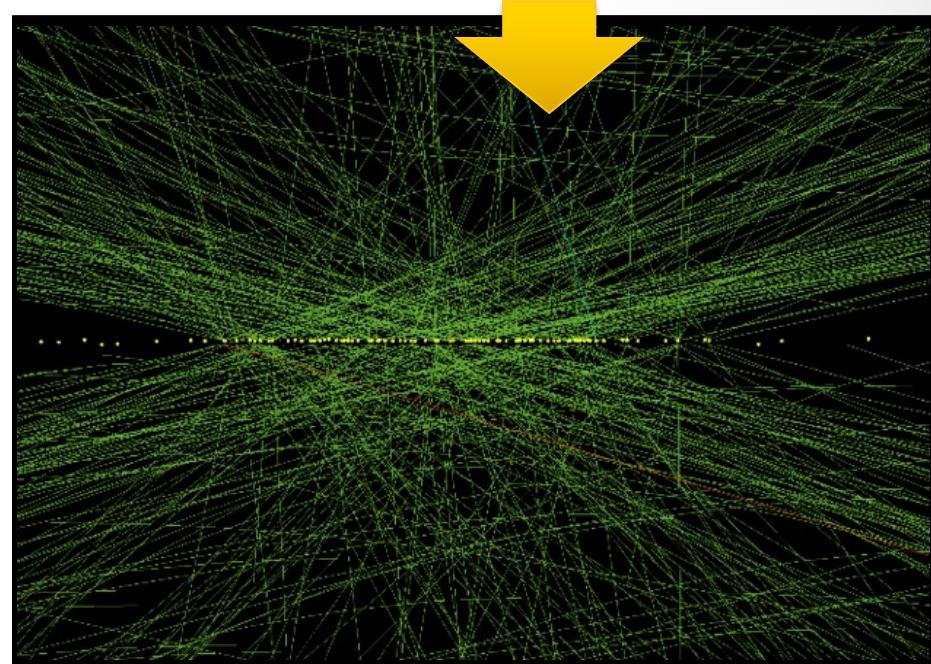
I processi che c'interessano sono rarissimi



$$\text{Rate} = \sigma \cdot L$$

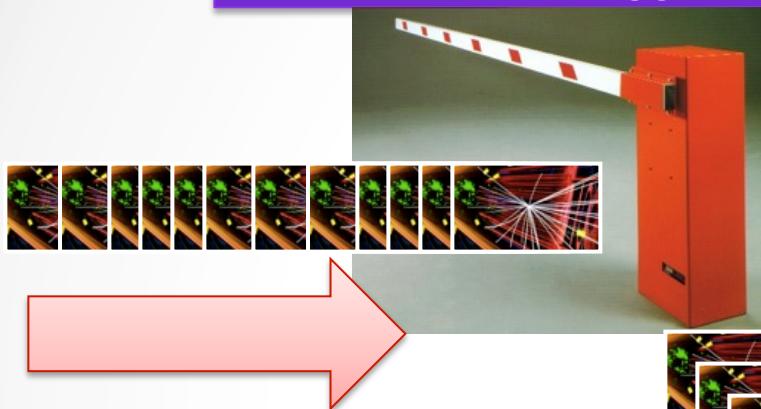
# Servono molte collisioni

- Il rivelatore deve misurare un evento molto affollato
  - Ogni 25 ns
- Servono rivelatori precisi e veloci
- 1 evento: ~ 2 Mbyte
  - Non posso salvare 1 Mbyte di dati ogni 25 ns
- La maggior parte degli eventi è fisica poco interessante: salvo solo quelli che m'interessano



# Scegliere in tempo reale: il trigger

Primo livello di trigger

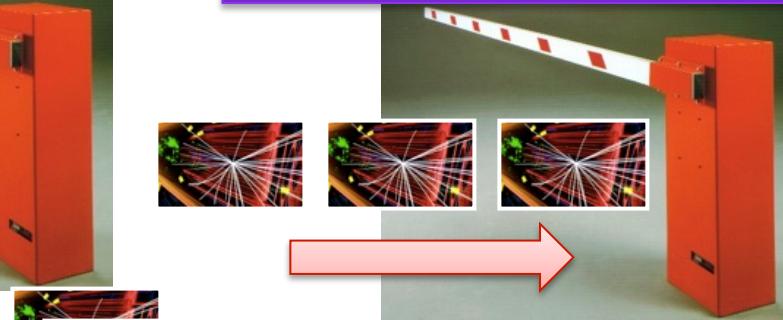


80 Tbyte al secondo

=  $10^8$  hard disk  
all'anno



Secondo livello di trigger



Scrittura



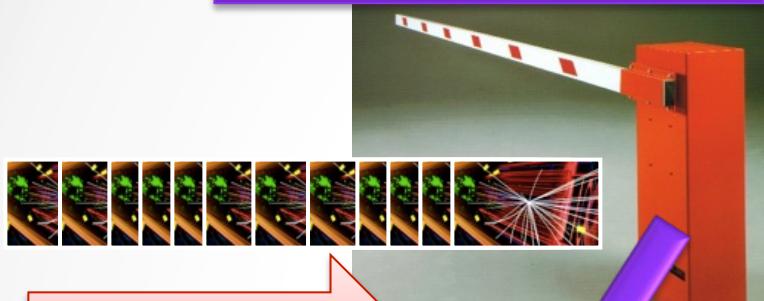
2 Gbyte al  
secondo



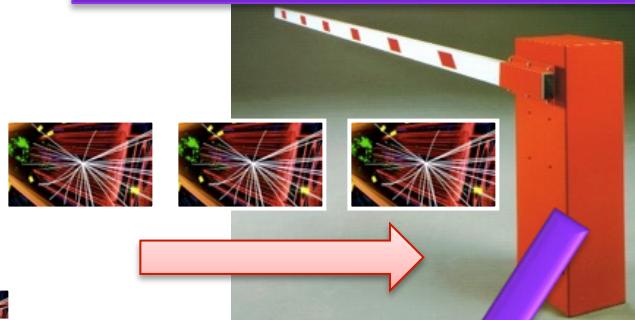
Il 99.9995% dei dati e' scartato...

# Scegliere in tempo reale: il trigger

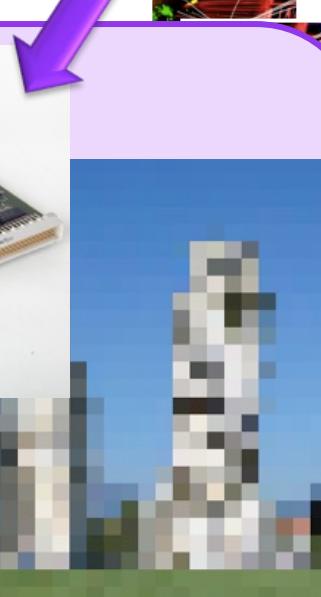
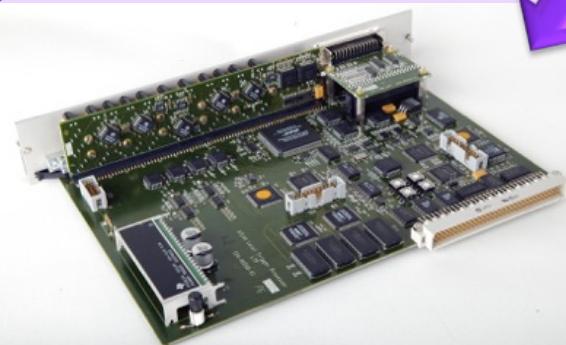
Primo livello di trigger



Secondo livello di trigger



Scrittura



Bassa risoluzione,  
scelta grossolana  
ma veloce

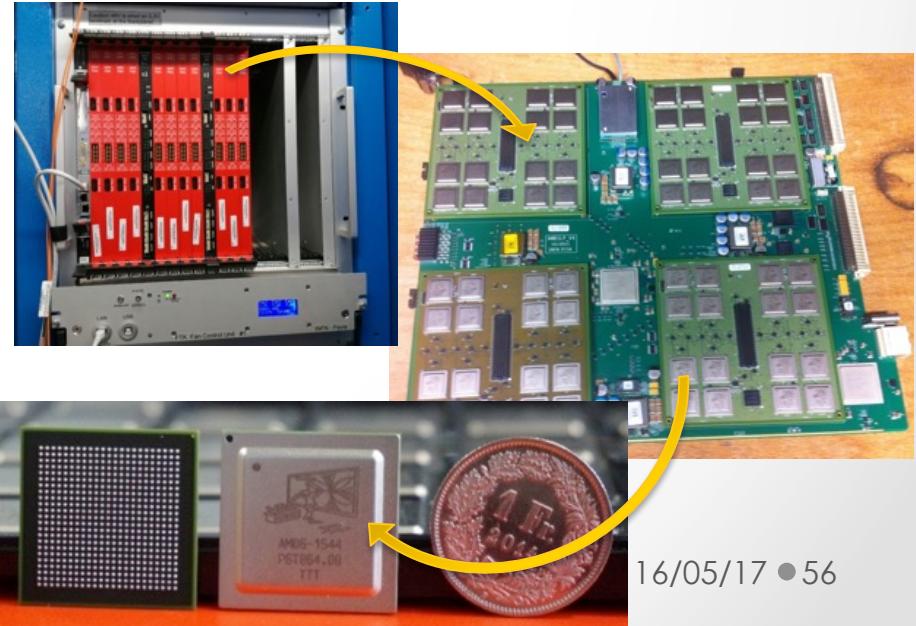
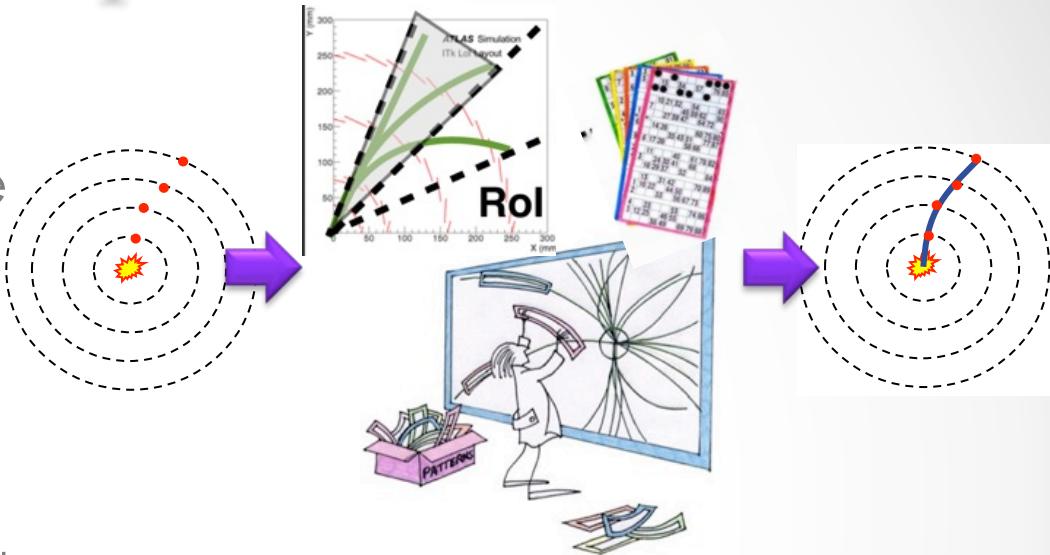


Alta risoluzione,  
scelta precisa ma  
lenta



# Un altro esempio: FastTrack

- Ricostruire le tracce abbastanza velocemente da renderle disponibili per il trigger
- Elettronica custom
  - Individua gruppi di segnali allineati
    - Pattern recognition, ha molte altre applicazioni
    - Poi ricostruisce la traccia
- In parallelo, sviluppo di algoritmi di trigger per sfruttare queste informazioni

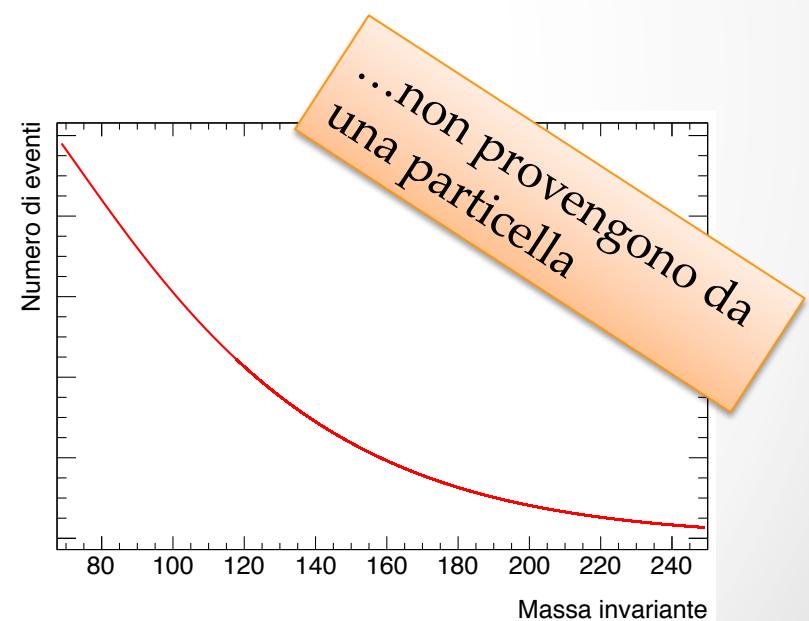
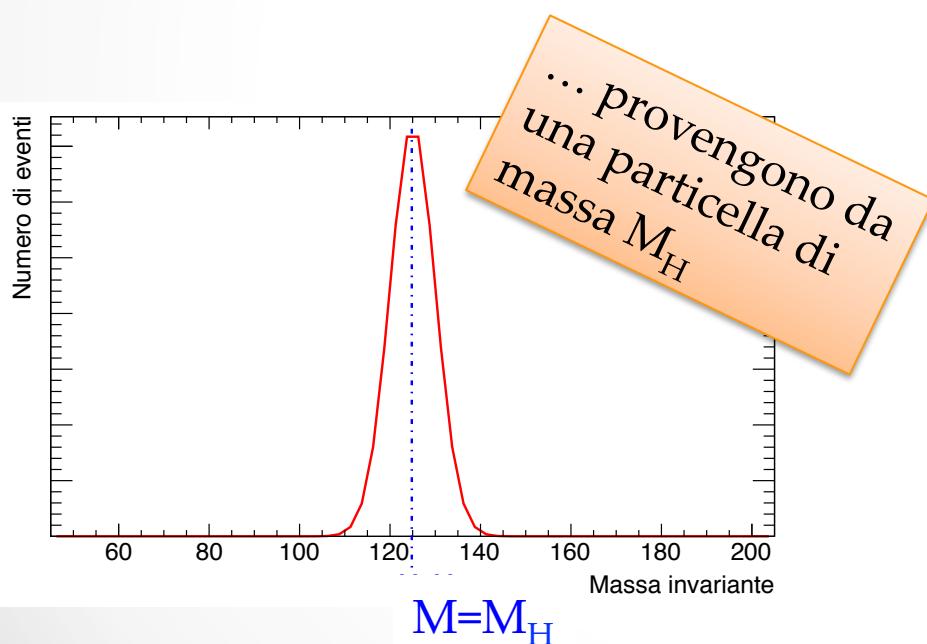
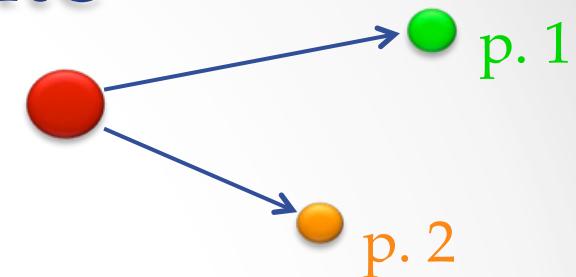


# L'analisi dati

- Triggerato e ricostruito, devo ancora analizzare i dati.
- Voglio misurare una certa particella
  - Tipo:  $H \rightarrow \gamma\gamma$
  - In genere m'interessa la sezione d'urto: quanti H ho prodotto
- Come riconosco i “figli” di H tra tutte le particelle prodotte in ATLAS?

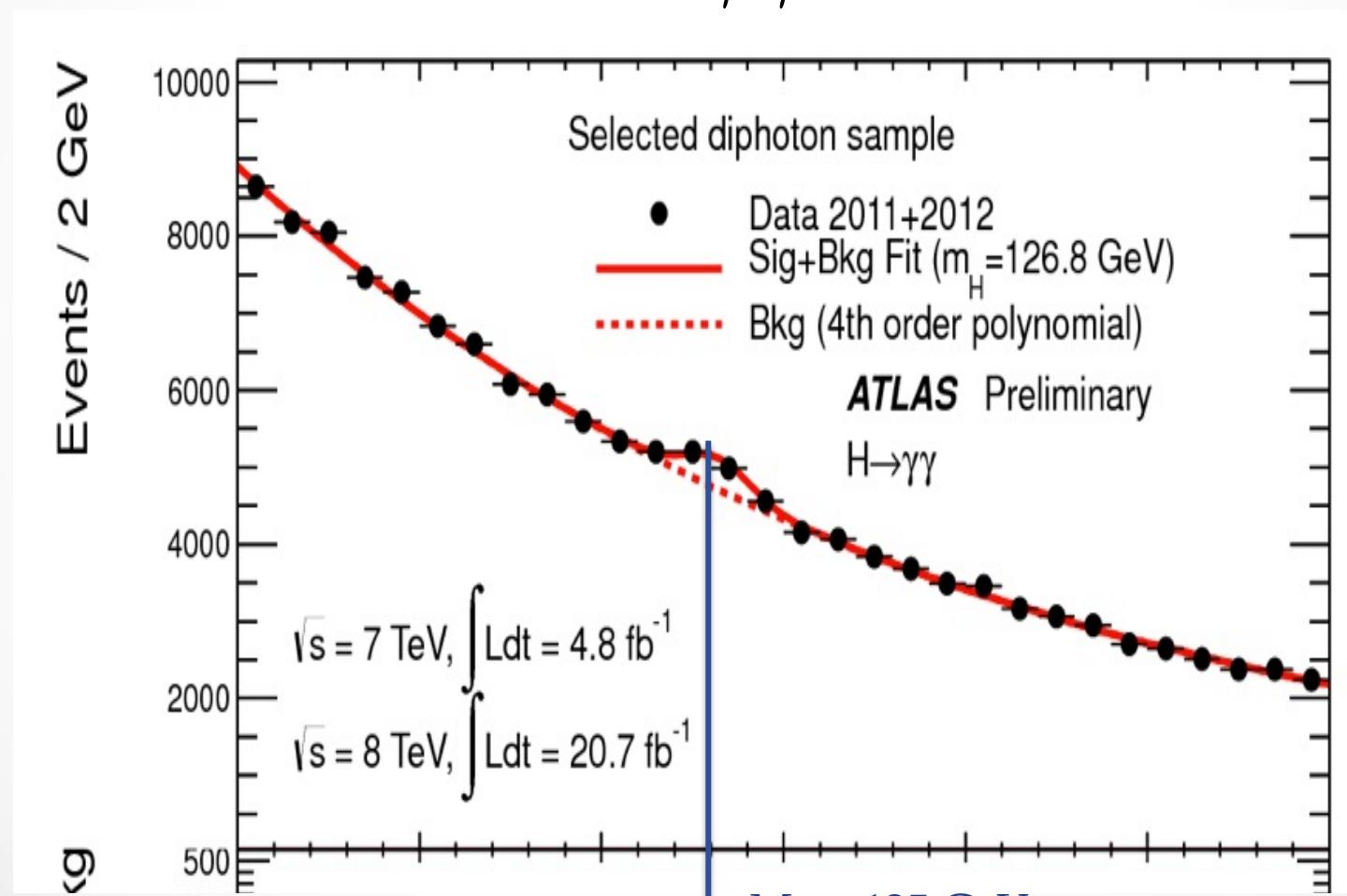
# Riconoscere un segnale: la massa invariante

$$M_{inv}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$



# Un “picco” in massa invariante è la prova della presenza di una particella

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



# L'analisi dati: che devo fare?

- Ridurre il fondo
- Stabilire se c'è un picco  
(in modo quantitativo)
- Misurare il numero di  
eventi e tradurlo in una  
sezione d'urto

# L'analisi dati: che devo fare?

- Ridurre il fondo
- Esempio: voglio  $H \rightarrow \gamma\gamma$
- Stabilire se c'è un picco (in modo quantitativo)
- Misurare il numero di eventi e tradurlo in una sezione d'urto



## Esempio (troppo) semplice

- Prendo solo gli eventi con almeno due fotoni di alta energia

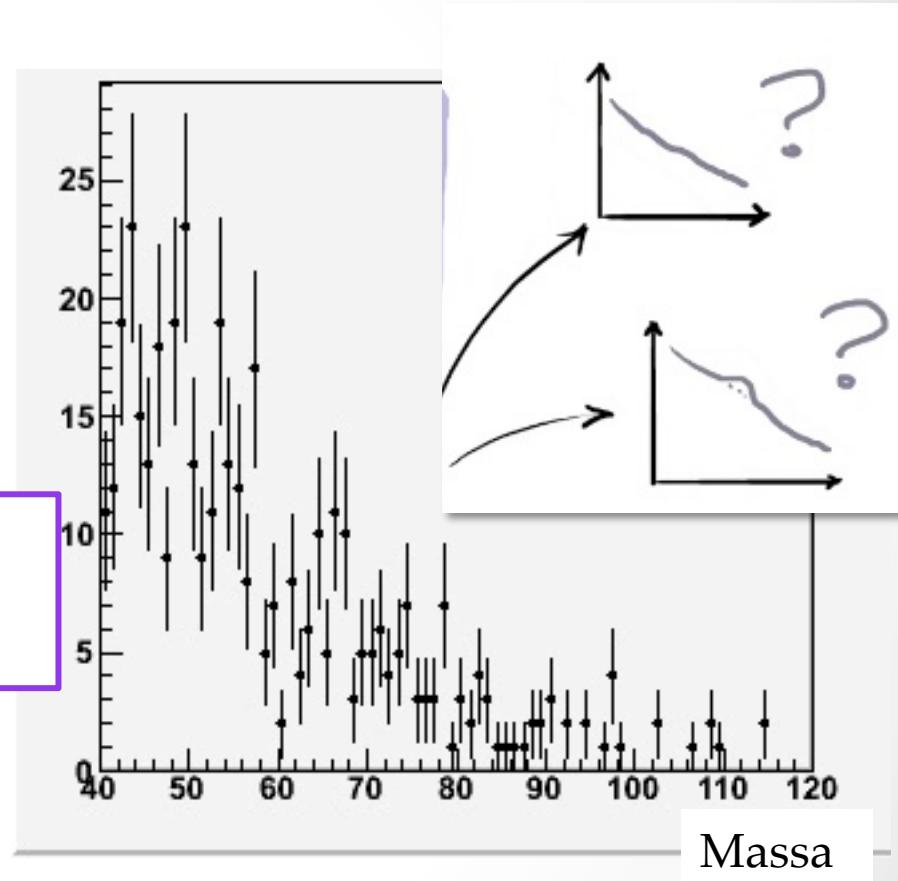
## Esempio complicato\*\*

- Uso una *rete neurale*, un software che “impara a riconoscere” gli eventi buoni

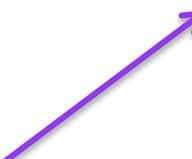
\*\*[Non so se le reti neurali siano usate davvero nel caso specifico di  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ]

# L'analisi dati: che devo fare?

- Ridurre il fondo
- Stabilire se c'è un picco (in modo quantitativo)
  - Non è facile se pochi dati.
    - ci vogliono strumenti statistici opportuni
- Misurare il numero di eventi e tradurlo in una sezione d'urto

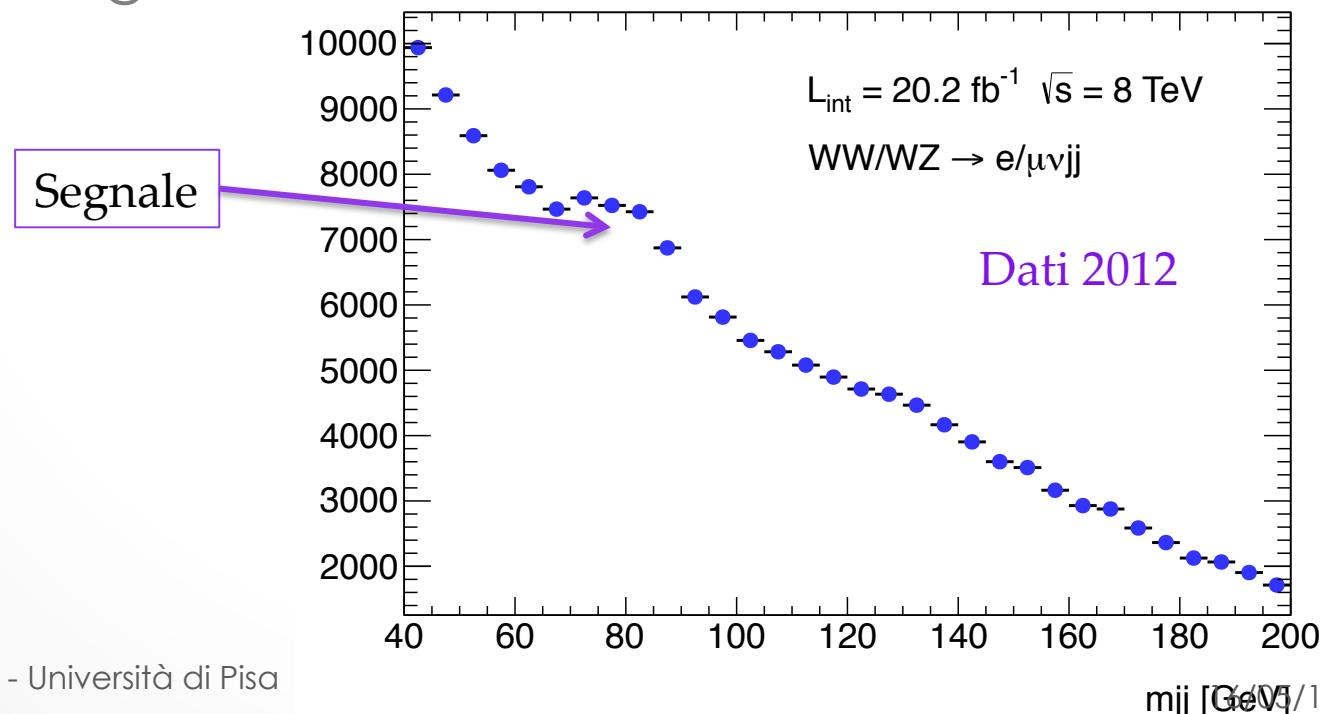


# L'analisi dati: che devo fare?

- Ridurre il fondo
  - Stabilire se c'è un picco  
(in modo quantitativo)
  - Misurare il numero di eventi e tradurlo in una sezione d'urto
- 
- Se cerco nuove particelle, l'importante è vedere il picco
  - Se misuro un processo noto, l'importante è fare una misura precisa della sezione d'urto o altre proprietà

# Quantificare un segnale

- Prendiamo la misura di un processo previsto dal Modello Standard
  - Produzione di coppie di bosoni W e Z
- Vedo bene il picco, ma come conto gli eventi che lo compongono?



# Quantificare un segnale

Un modo:

- Cerco la funzione che si adatta meglio alla forma dell'istogramma di dati
  - Il numero di eventi che m'interessa è un parametro di questa funzione

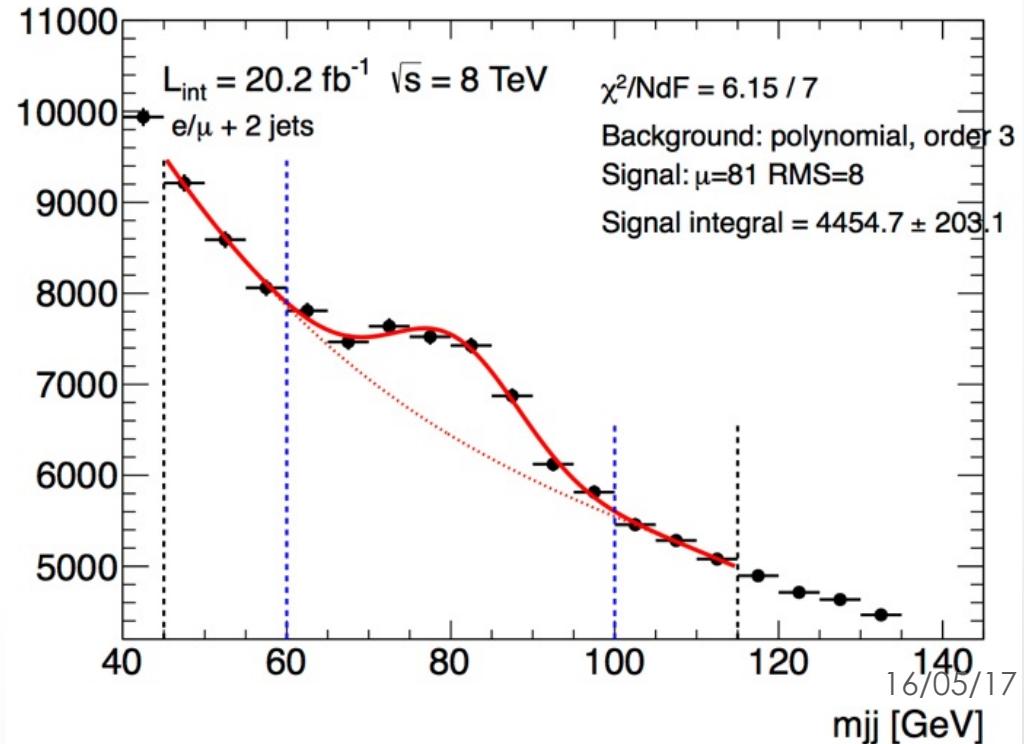
Un altro modo:

- Uso un MonteCarlo per simulare i processi di segnale e di fondo

# Quantificare un segnale

Un modo:

- Cerco la funzione che si adatta meglio alla forma dell'istogramma di dati
  - Il numero di eventi che m'interessa è un parametro di questa funzione



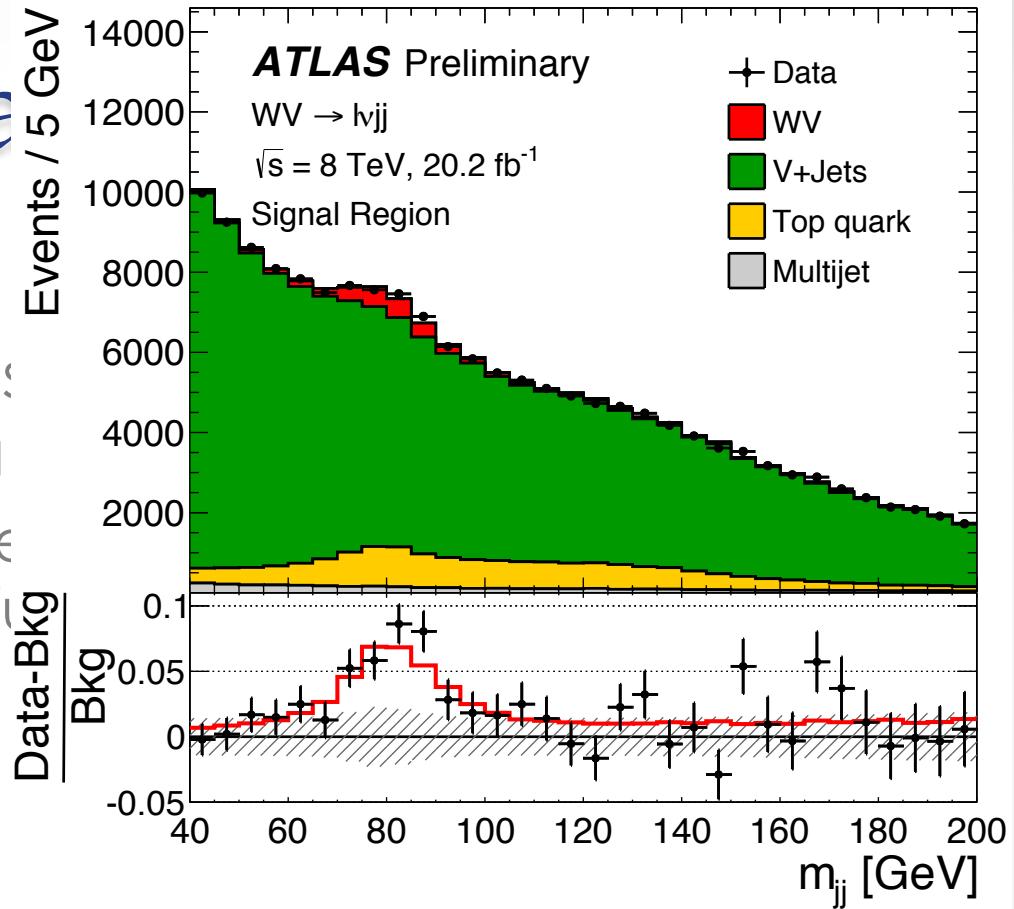
Un altro modo:

- Uso un MonteCarlo segnale e di fondo

# Quantificazione

Un modo:

- Cerco la funzione che descrive la forma dell'istogramma
  - Il numero di eventi che ha un certo valore del parametro di questa funzione



Un altro modo:

- Uso un MonteCarlo per simulare i processi di segnale e di fondo

# Lo stato dell'arte

- Il bosone di Higgs sembra corrispondere alle previsioni
  - Ma c'è ancora molto da capire
- Fin'ora non abbiamo osservato nuove particelle
  - Piccole deviazioni in alcuni canali
- Misuriamo processi sempre più rari, mai osservati prima
  - Non abbiamo ancora finito di andare a fondo con il Modello Standard
- In futuro la ricerca continuerà con una versione più potente di ATLAS
  - Il gruppo di Pisa rimarrà attivo anche sull'upgrade

# C'è molto altro

- Forse la risposta arriverà da altri tipi di esperimenti
  - collider  $e^+e^-$
  - esperimenti dedicati per misure di precisione del modello standard
  - neutrini
  - astroparticelle
  - ricerche di materia oscura



# Intervista in una slide

- Perchè hai scelto particolare?

Gli esperimenti grandi:

➤ Organizzazione più rigida:

:( che p\*\*\*\*!

:) ti aiuta anche a gestire il lavoro

➤ Si tende a specializzarsi su un ambito

:( è difficile avere sotto controllo tutto l'esperimento

:) gli ambiti tra cui scegliere sono moltissimi

:) ogni lavoro ha una sua indipendenza dal resto: come  
tanti esperimenti più piccoli incastrati insieme

:) alcuni ambiti sono anche ben spendibili nel mondo del  
lavoro

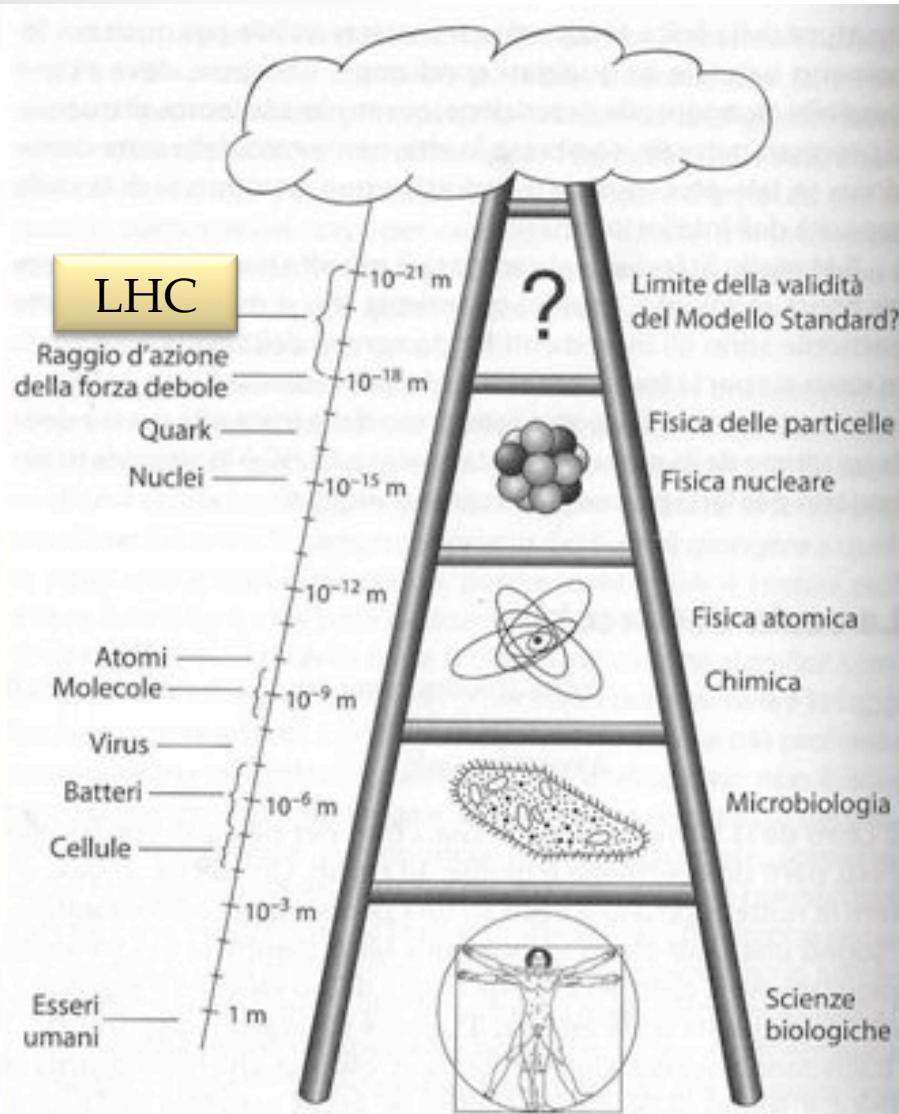
# Intervista in una slide

- Perchè hai scelto particelle?
  - Boh. Perchè mi piaceva.
- Cos'hai fatto come lavoro? In quali esperimenti?
  - Sempre in ATLAS, analisi dati, monitoring per TileCal
- Come si lavora in ATLAS? Dicono che in un esperimento così grande sarò solo l'ingranaggio di una macchina
  - Esperimento grande o piccolo: questione di gusti
  - In fisica delle alte energie esistono entrambi
- Hai mai pensato di lasciare la fisica delle alte energie?
  - Per non più di cinque minuti consecutivi
- Un consiglio per la magistrale?
  - **Scegliete una cosa che vi piaccia. La fisica è difficile, per farla bene deve piacervi e tutto il resto viene da sè.**

# Backup

• • •

# Una scala di energie

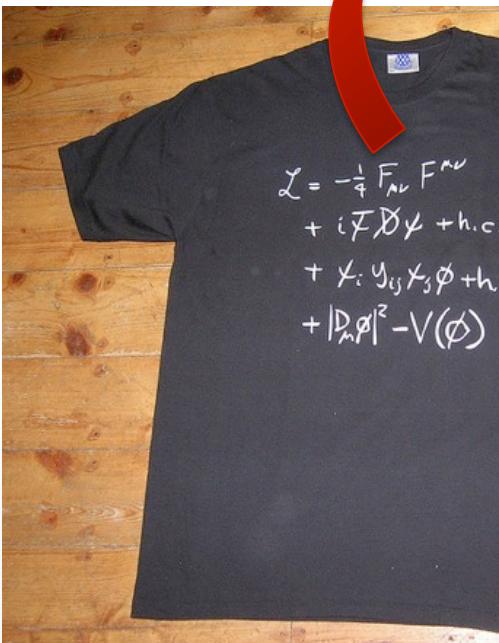


- A ogni gradino ho fenomeni nuovi
- Ogni gradino ha la sua teoria coerente:
  - per esempio, non abbiamo bisogno di conoscere l'interazione nucleare per fare una teoria atomica
- A ogni gradino le entità **fondamentali** sono diverse
- Salendo:
  - la teoria è più semplice
  - alcuni parametri liberi diventano calcolabili

# A che punto siamo:

## lo Standard Model

- L'impianto teorico: teoria di campo elettromagnetico con simmetria di gauge
- Include tre forze fondamentali (resta fuori) in una sola teoria



$$\begin{aligned}
 & -\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^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\mu 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}{2 c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2 c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2 M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2 M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2 \phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2 M^4}{g^2} \alpha_h - i g 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_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - i g s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu 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_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2 A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g \alpha [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2 H \phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4 H^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} i g [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) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & i g 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}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} i g^2 \frac{s_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} i g^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w^2}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - d_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_d^\lambda) d_j^\lambda + i g s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{i g}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \mu (1 + \\
 & \gamma^\lambda) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma \mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma \mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & (\bar{d}_j^\lambda \gamma \mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma \mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma \mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma \mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma \mu (1 + \gamma^5) u_j^\kappa)] + \\
 & \frac{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\
 & i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{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{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{i g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & \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 + \\
 & i g c_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
 & i g c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
 & i g c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \\
 & \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
 & \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

una

ità

LE

g

Z

ons

on?

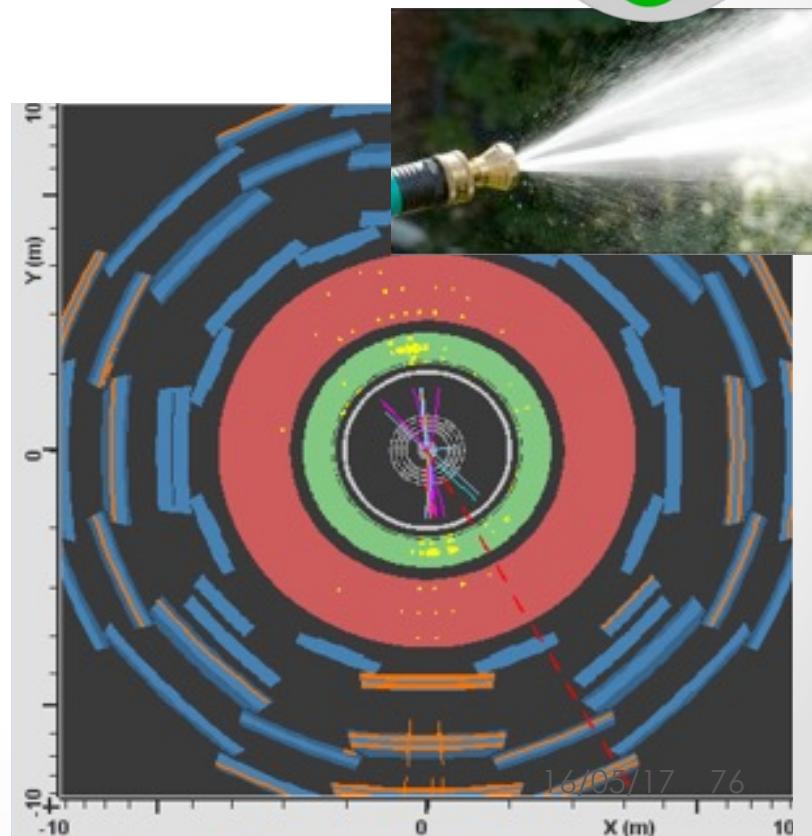
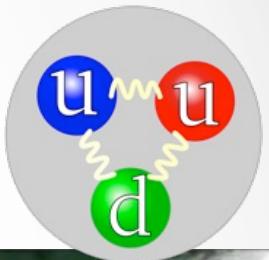
MODEL OF  
FORCES  
EXISTS?

# Il Modello Standard e l'universo (2)

- Un'altra questione: perchè siamo fatti di materia?
  - Riteniamo che all'inizio dell'universo ci fosse tanta materia quanta antimateria
  - Materia e antimateria si annichilano, perchè è rimasta solo materia?
- Dev'esserci una differenza tra come si comportano materia e antimateria
- In effetti c'è
  - Simmetria CP:
    - se sostituisci le particelle con le antiparticelle
    - e cambi verso agli assi cartesiani dello spazio,
    - la fisica resta la stessa
  - Ma CP non è rispettata esattamente dal Modello Standard
    - C'è una piccola violazione
  - Troppo piccola per spiegare che fine ha fatto l'antimateria

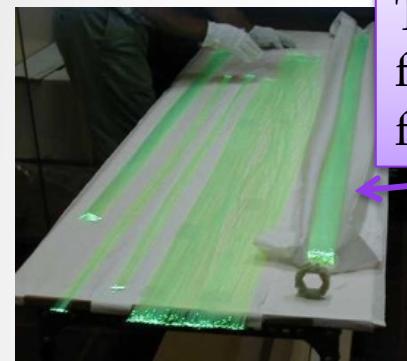
# Quark e adroni in ATLAS: i jet

- I quark “non stanno mai da soli”: esistono soltanto come costituenti di altre particelle, gli adroni.
  - Le collisioni all'LHC producono quark “singoli”
  - La forza forte trasforma un quark “solitario” in un fiotto di adroni.
- I quark in ATLAS appaiono come un getto di particelle, noto come jet
  - molte tracce e segnali nei calorimetri
  - le combiniamo per misurare l'energia del quark



# Caratterizzazione e test

- Progettazione e costruzione del sistema di test, misure ...

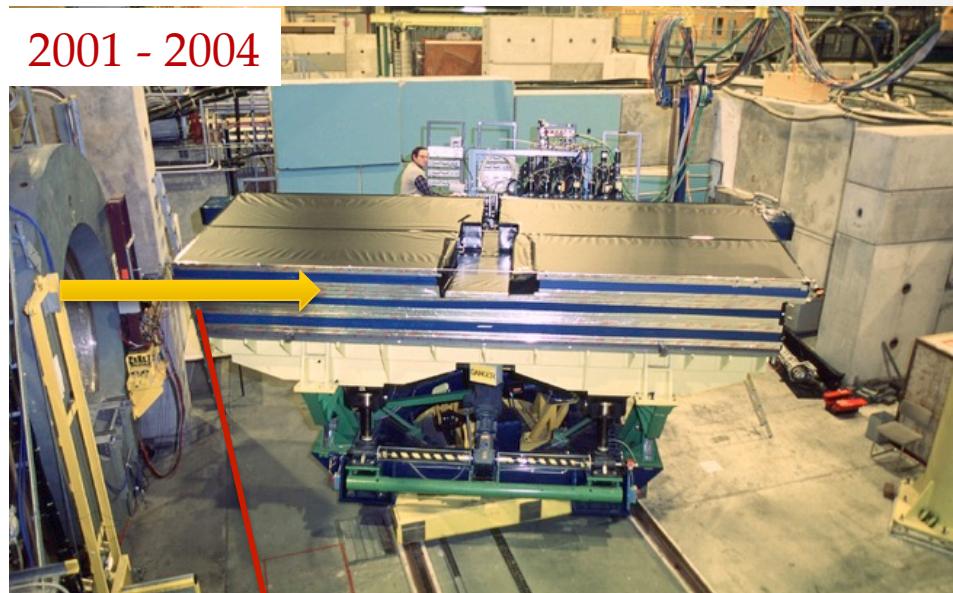


Test sui componenti:  
fotomoltiplicatori e  
fibre ottiche.



Test sul rivelatore

2001 - 2004



Fascio di particelle