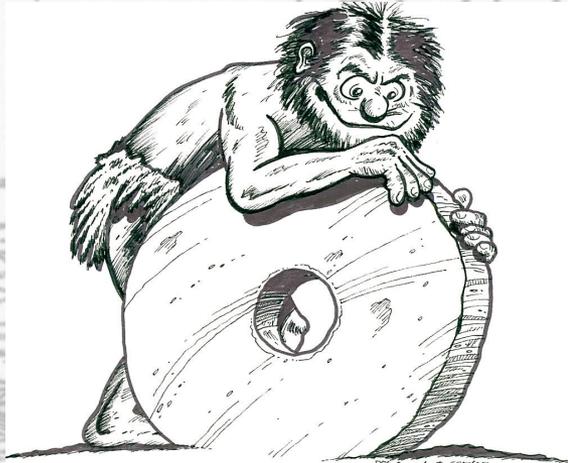


# L'avvio del Large Hadron Collider del CERN

Master Class  
19-20-22 Marzo 2009

*Paolo Bellan*

Siamo davvero prossimi ad una svolta epocale  
per la Fisica, e per la scienza in generale...



L'era del bronzo

L'era del ferro

...

**L'era di LHC !!**



**Cerchero' di farvi capire perche'**

Lasciatemi partire un po' da lontano...

# Cos'è la **SCIENZA**?

“Insieme di conoscenze rigorosamente controllate e sistematicamente ordinate che consente di giungere a **verità obiettive** intorno a un determinato insieme di **fenomeni** o di concetti”

**DATO sperimentale** ↔ **verità obiettive**

Verificabile, Ripetibile

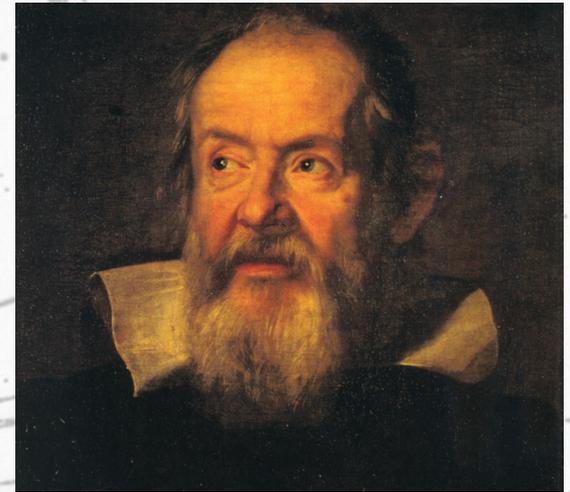


**COMPRESIONE  
di un FENOMENO**



Inquadramento in una teoria  
'universale', verificata quantitativamente  
in grado di interpretarlo e prevederne altri

# IL METODO SCIENTIFICO!



OSSERVAZIONE  
DI UN FENOMENO



Formulazione di  
una TEORIA o  
MODELLO



VERIFICA  
SPERIMENTALE

## E la FISICA?

e' una scienza SPERIMENTALE che cerca di comprendere le leggi che regolano i fenomeni che avvengono in natura

La fisica ha fatto passi avanti quando ha **compreso** dei fenomeni quando li ha **interpretati** con un modello **verificato sperimentalmente**

Progressi della fisica



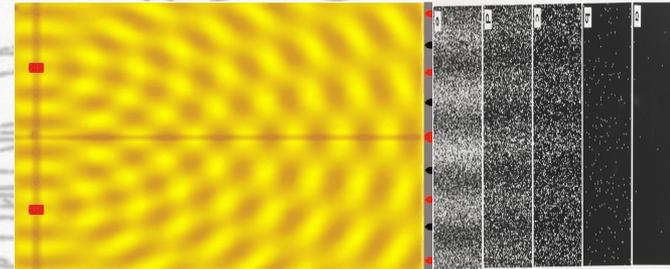
Esperimenti cruciali

(=> per vincere il Nobel per la fisica non vi basta una buona teoria! Serve la sua verifica)

Natura ondulatoria della luce



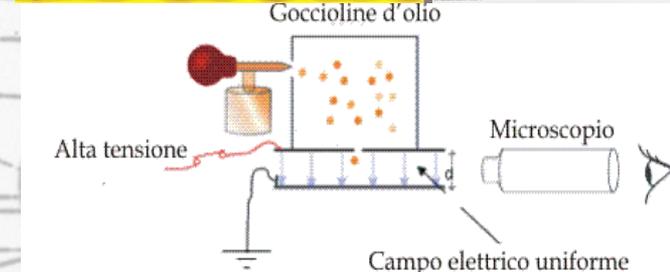
Esperimento dei 'fori di Young' (1801)



La carica elettrica sempre multipla di quella elementare  
 $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$



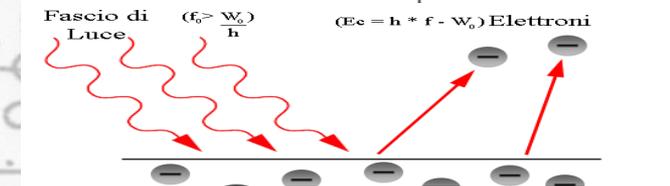
Esperimento di Millikan (1909)



Natura della radiazione elettromagnetica



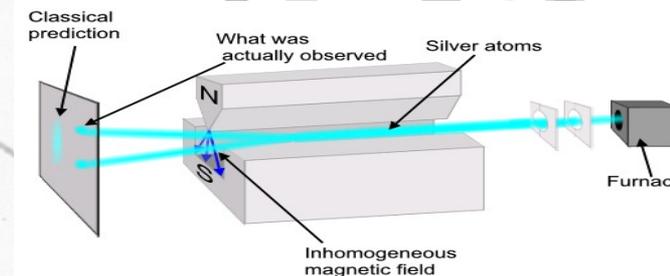
Esperimento di Lenard (1902), Effetto fotoelettrico (1905)



QUANTIZZAZIONE del MOMENTO ANGOLARE



Esperimento di Stern-Gerlach (1922)



# LHC e' "uno" di questi esperimenti cruciali!

## COSA SI FA

Testiamo la natura profonda della  
teoria quantistica di campo  
delle interazioni fondamentali

facciamo cocciare protoni  
tra loro ad una energia enorme  
e vediamo che succede!

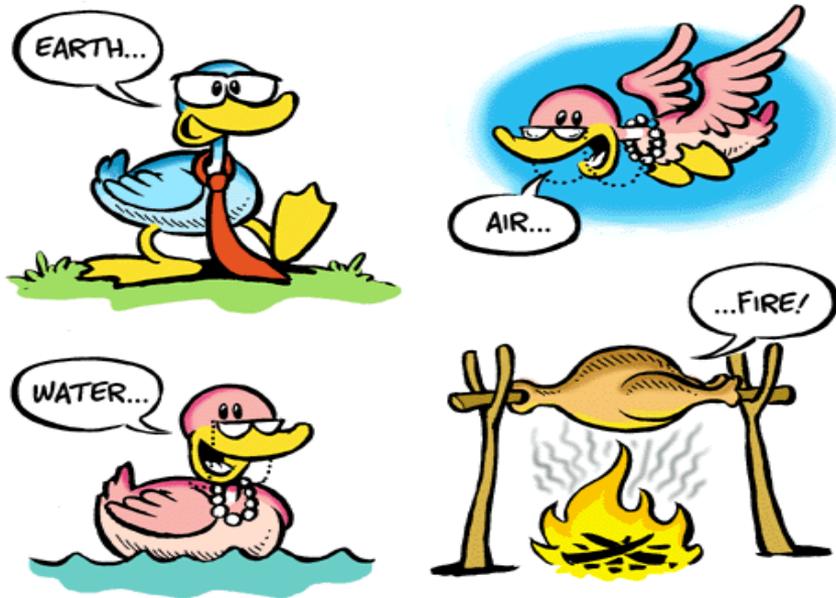
## PERCHE'

Forti indicazioni di  
Nuova Fisica  
alla scala del TeV

## ...CIOE':

Non abbiam mai fatto  
un botto cosi' !!

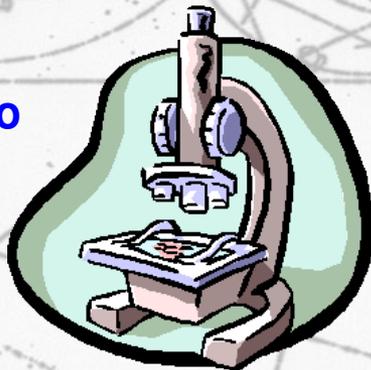
# Di cosa e' fatto l'Universo?



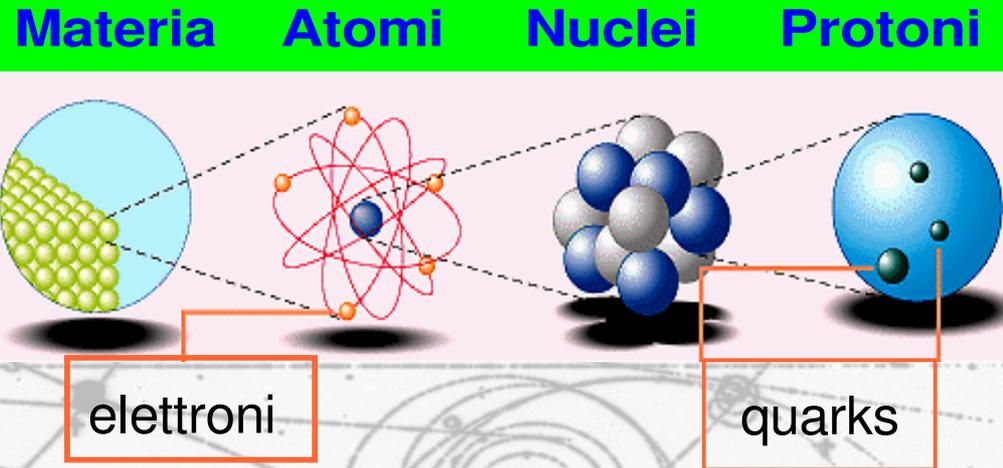
Bisogna guardare con lo strumento giusto!  
**La lunghezza d'onda  $\lambda$  della "luce" deve essere piu' piccola dell'oggetto che guardo**

$$\lambda \propto 1/E$$

23/03/09



...Dipende da QUANDO!



Cellula ( $d \sim 10 \mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m}$ ): luce visibile  $E \sim \text{eV}$

Virus: ( $d \sim 10 \text{ nm} = 10^{-8} \text{ m}$ ): microscopio elettronico  $E \sim \text{keV}$

Protone: ( $d \sim 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ): acceleratore di particelle!  $E \sim \text{GeV}$

Quark: ( $d < 10^{-18} \text{ m}$ ): LHC  $E \sim 10 \text{ TeV}$   $d \sim 0.0002 \text{ fm}$

NB: a queste dimensioni e energie • **Meccanica quantistica**  
 ⇒ due PICCOLE complicazioni: • **Relativita'**

# Al momento cosa ne sappiamo?

**4 Forze:** INTERAZIONI tra particelle a loro 'sensibili'.

- **Elettromagnetica**  
Atomi, luce, chimica, elettronica...
- **Nucleare debole**  
Decadimento del Neutrone, reazioni nucleari nel Sole, radioattivita'...
- **Nucleare forte**  
Tiene assieme i nuclei, mesoni...

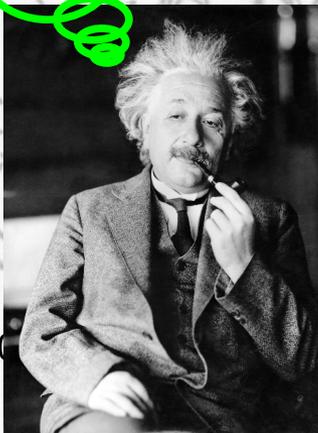
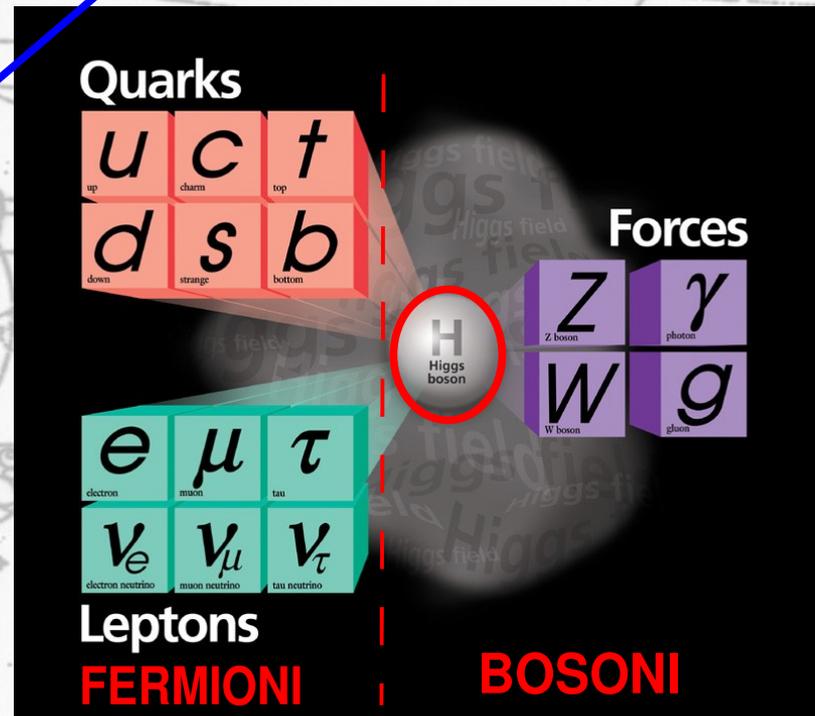
- **Gravita'**  
Pianeti, stelle, galassie, buchi neri...

TUTTA la **materia** (nota) invece e' fatta da

**FERMIONI:**  
Leptoni e Quarks

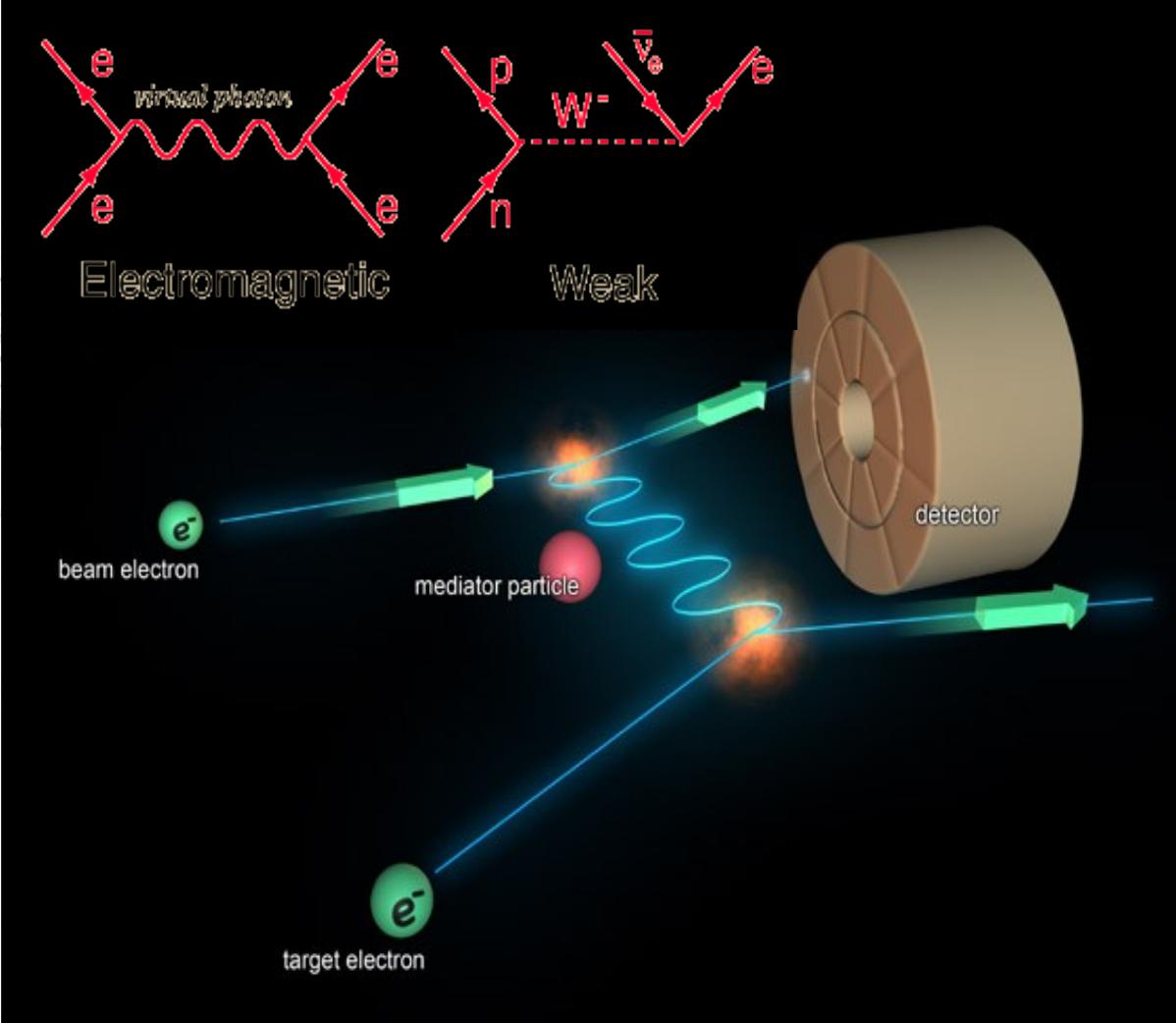
**“Modello Standard!”**

*Manca ancora qualcosa...*



I fermioni (MATERIA) interagiscono scambiandosi dei "mediatori" delle forze, i bosoni

Per sondare i costituenti piu' piccoli della materia e testare le loro interazioni



⇒ **ACCELERATORI**

per produrre l'interazione a grandissima energia (LHC!)

e **RIVELATORI**

per studiare il risultato

NB:  $E = mc^2$

⇒ posso produrre altre particelle!

# Cos'e' LA MASSA e da dove viene?

Quale?

Quella **inerziale**?

$$F = ma$$

Quella **gravitazionale**?

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

In una teoria di campo

si introduce come **PARAMETRO**

$$\mathcal{L}_d = \bar{\Psi} (i \gamma_\mu \partial^\mu - m) \Psi$$

## In realta'.. NON LO SAPPIAMO!

Nel Modello Standard la massa delle particelle proviene dall'interazione con un ipotetico campo scalare obiquo, il

## BOSONE di HIGGS



# Poi...? Cos'altro non sappiamo?

- Problemi generali (origine delle masse, del numero di famiglie etc )
- Quantizzazione della gravita', Unificazione delle forze...
- Problemi cosmologici (Dark Energy/Matter, bariogenesi...)
- Problemi teorici (gerarchia, naturalezza, flavour etc)

**Problemi ovunque!**

Molti di essi possono essere “attaccati”  
mediante lo studio dei processi di interazione  
tra particelle ad altissima energia!

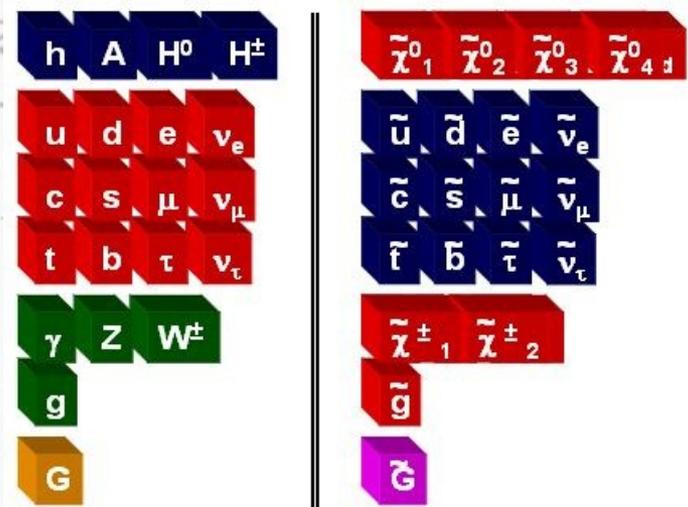
Il **bosone di Higgs** e' il ricercato numero uno ad LHC  
e' l'unico mattoncino mancante del Modello Standard

# Ma non solo!

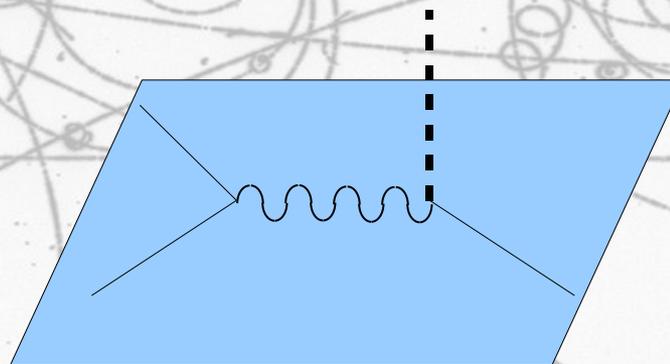
Ci sono molti altri oggetti previsti da alcuni modelli teorici  
per ovviare a problemi del Modello Standard (e crearne di nuovi!)

## Super Simmetria

TUTTO x 2!



## Nuove Dimensioni



...E MOLTO altro  
(i teorici hanno  
molta fantasia!)

# Quindi serve un super-acceleratore ad energia sin'ora ineguagliata!

- per capire l'origine della massa,
- per sondare la natura delle interazioni fondamentali
- per cercare materia oscura
- varie ed eventuali! (the “unexpected”)

Ecco perche' **LHC** sara' uno di quegli  
“esperimenti cruciali” che fanno fare  
un passettino alla nostra conoscenza

Come vedete il lavoro non manca...

**...il POSTO FISSO un po' meno!**

# CERN: Centro Europeo per la Ricerca Nucleare

- Organizzazione internazionale fondata nel 1954 (Italia e' un membro fondatore)
- Vicino a Ginevra (Svizzera) sul confine con la Francia
- 20 stati membri (+ osservatori)
- Dedicato a ricerca di base su elementi costitutivi della materia e interazioni fondamentali
- [www.cern.ch](http://www.cern.ch) (**WWW inventato al CERN!** Si celebra quest' anno il ventennale)



Ufficio di  
Padova

# L'acceleratore

## LHC:

## Large

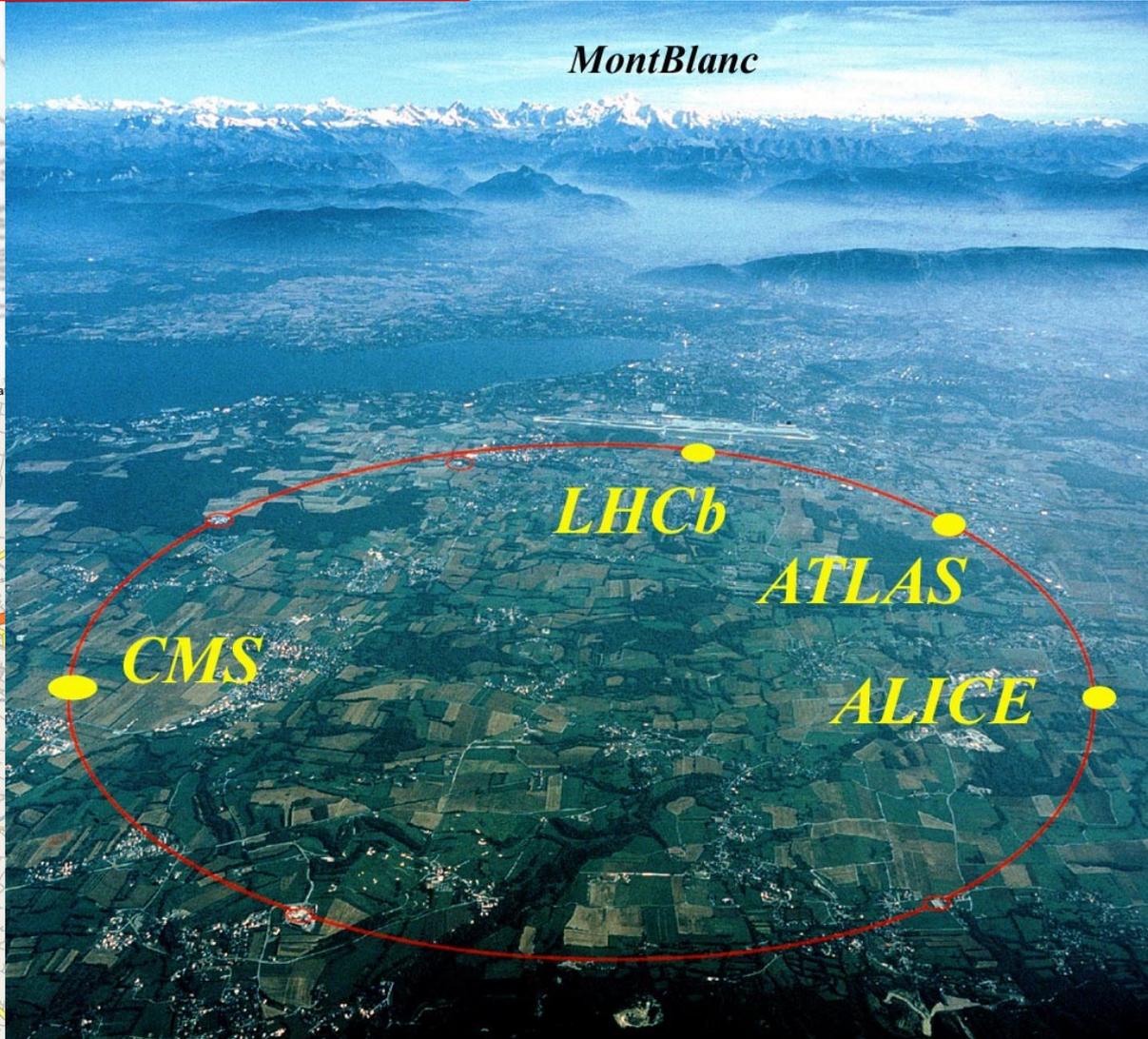
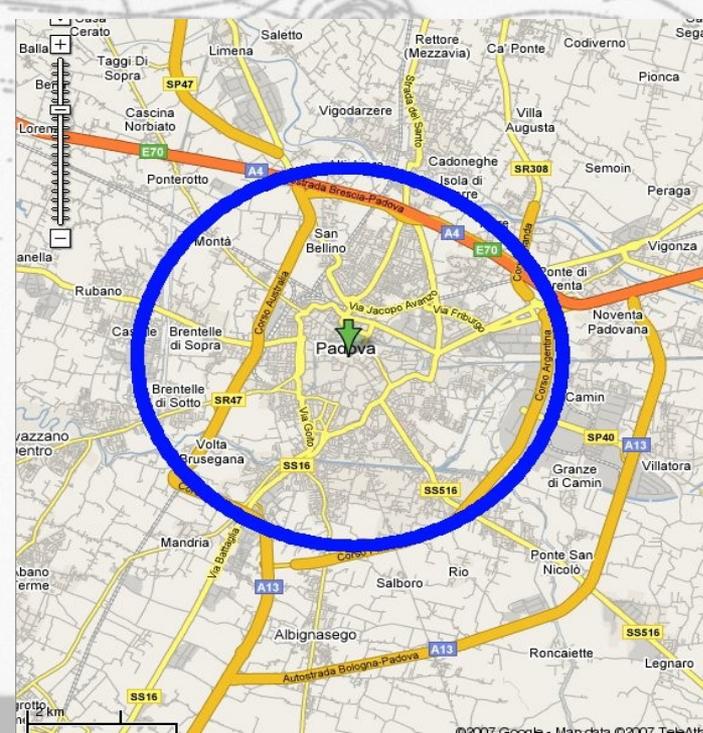
## Hadron

## Collider

~27 km di circonferenza (stesso tunnel del collisore precedente, il LEP, che accelerava elettroni e positroni)

Collisore PROTONE-PROTONE

$$T=2\pi R/c \sim 88\mu s$$



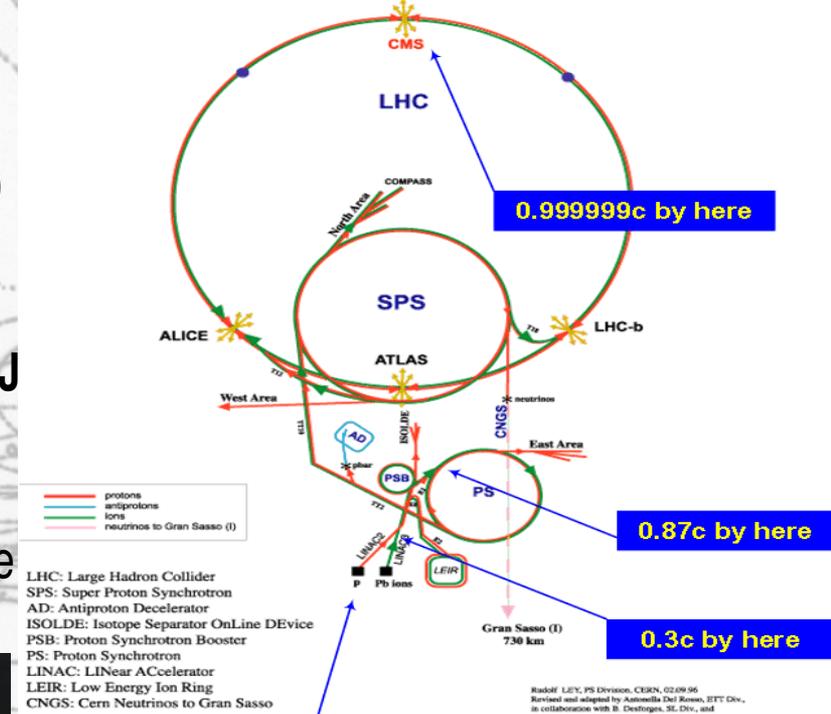
# LHC: come e' fatto

**RFC per accelerare e 1232 dipoli superconduttori (Nb-Ti)**  
**per curvare i protoni nell' anello (T= -271 °C; B=8.4 T)**  
**ognuno lungo 14.3 m; energia totale immagazzinata 11 GJ**  
**+ varie centinaia di quadrupoli/sestupoli/ottupoli per**  
**la focalizzazione dei fasci; vuoto ultra-spinto nella beam pipe**

$$E_{\text{beam}} = 7 \text{ TeV} \quad (1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV})$$

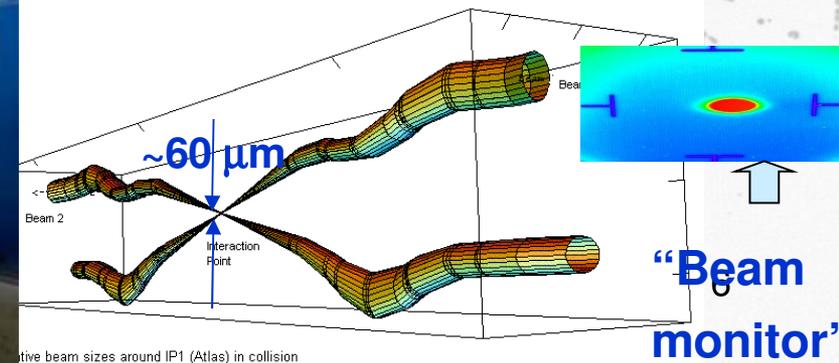


CERN Accelerators  
(not to scale)



Start the protons out here

**Il fascio ha una struttura di 2800**  
**“pacchetti” distanziati 25 ns**  
**~10<sup>11</sup> protoni/pacchetto**



Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Urti profondamente anelastici tra (costituenti delle) particelle primarie (p)

↳ Creazione di nuove particelle ordinarie e NON

↳ Loro natura e dinamica connesse con l'interazione

Dall'analisi accurata dei prodotti della collisione  
informazioni sulle grandezze fondamentali della natura

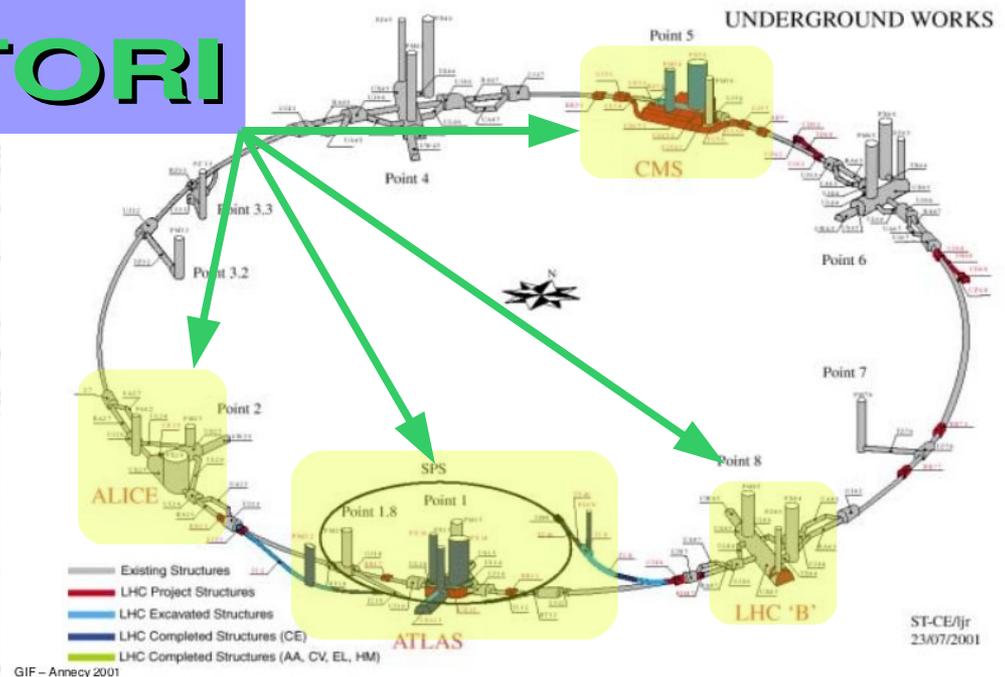
# RIVELATORI

nei quattro punti in cui i  
fasci vengono fatti collidere

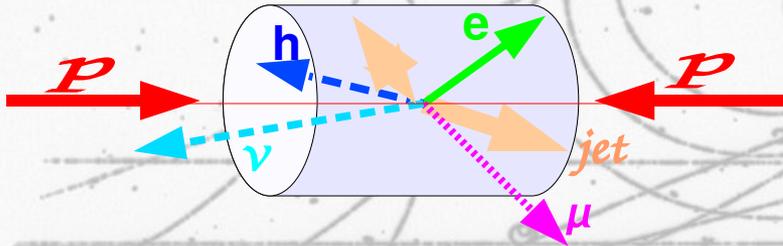
↳ quattro “**DETECTOR**”,  
quattro distinti esperimenti:

**Atlas, CMS, LHCb, ALICE**

23/03/09

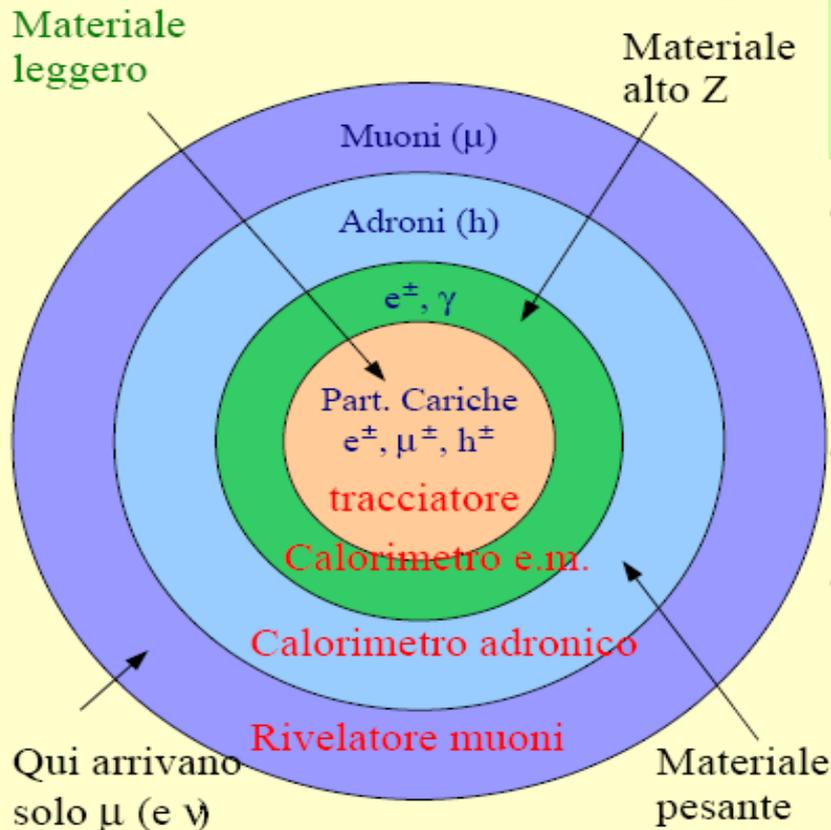


Vengono prodotte particelle **molto** diverse tra loro  
 si vuole **identificarle** e misurarne bene *velocita'* ed energia



Alcune particelle sono evanescenti e scappan via, altre sono pesanti,  
 certe son cariche certe no, alcune si "rompono" in fiotti di particelle...

I rivelatori dovranno essere:



- specializzati per diverse particelle  
 (elettroni / fotoni / muoni/ adroni )

- Ermetici (deve uscire  
 il "meno possibile"!)

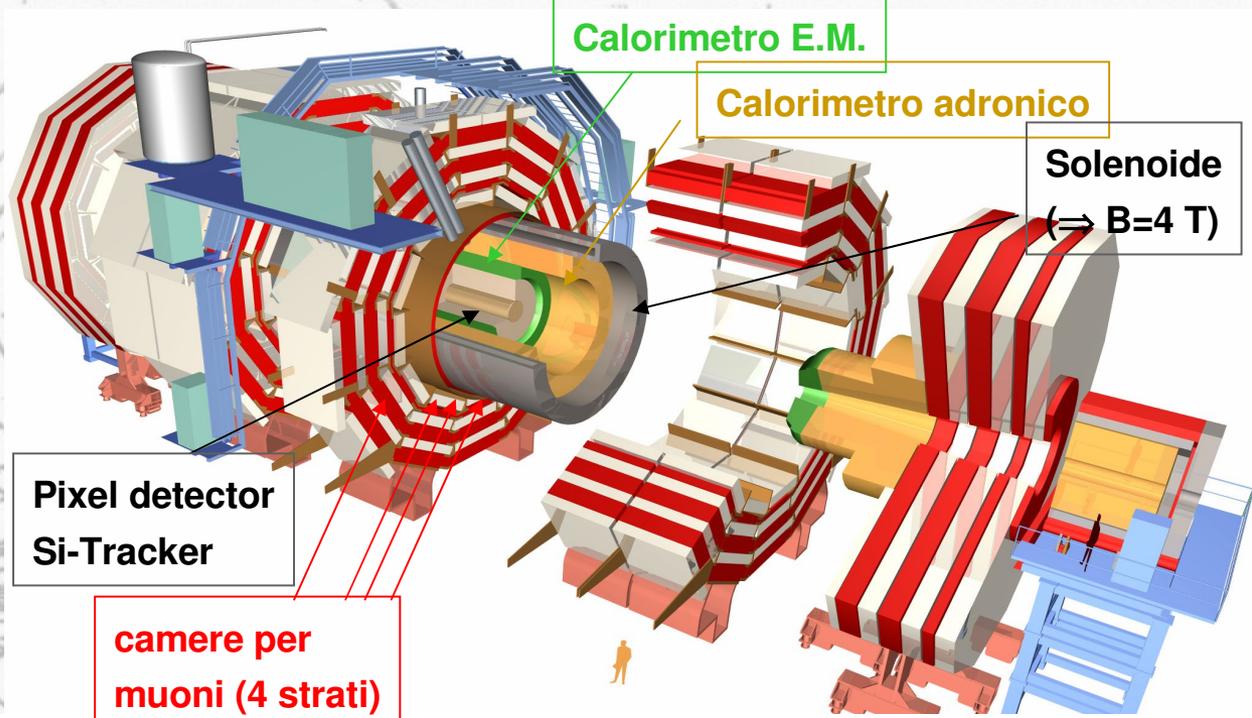
- ad alta risoluzione e granularita'  
 (⇒ milioni di canali di elettronica...)

- veloci ed efficienti nelle decisioni  
 ("trigger"): non tutti gli eventi  
 possono essere registrati

Serve un elevato campo magnetico per  
 curvare le traiettorie di quelle cariche...

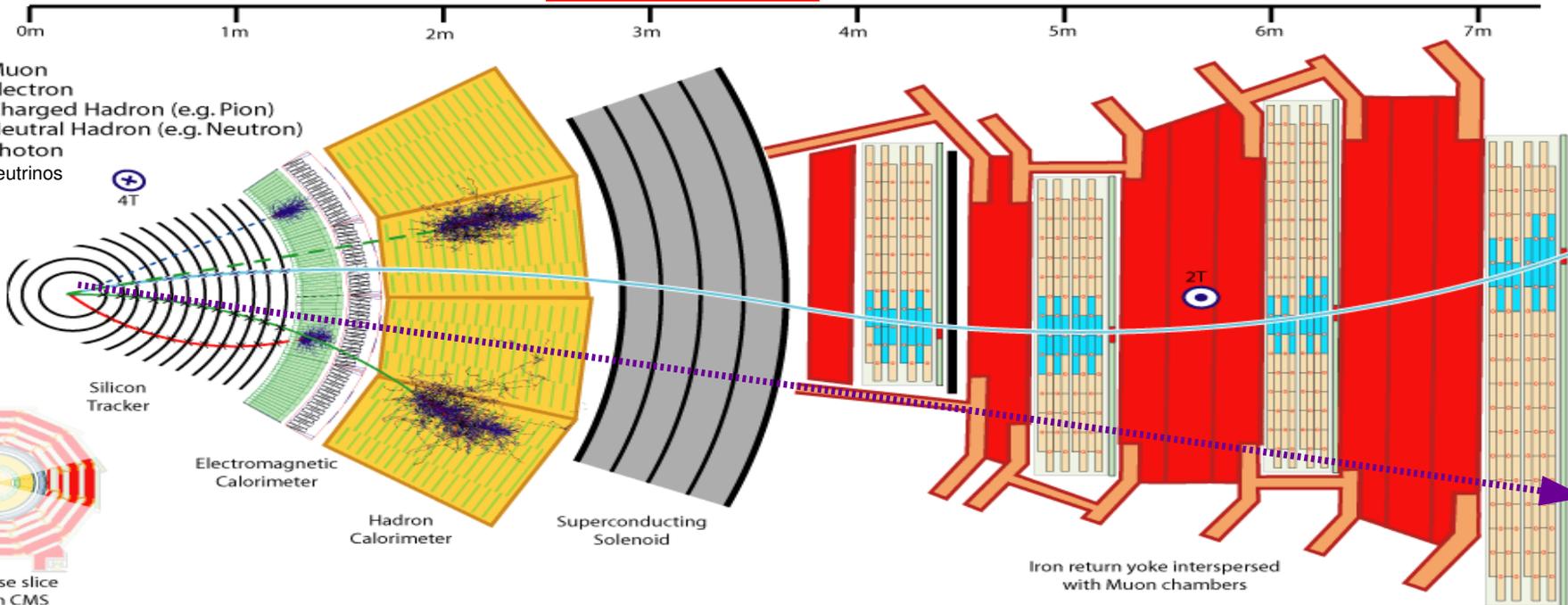
Struttura schematica di uno dei rivelatori generici

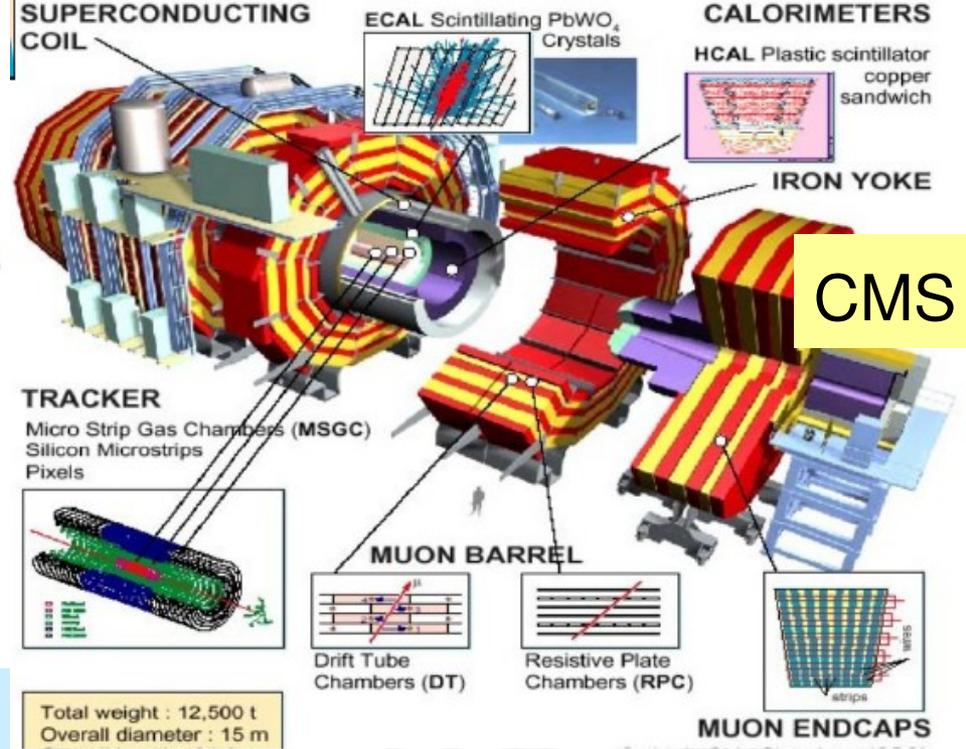
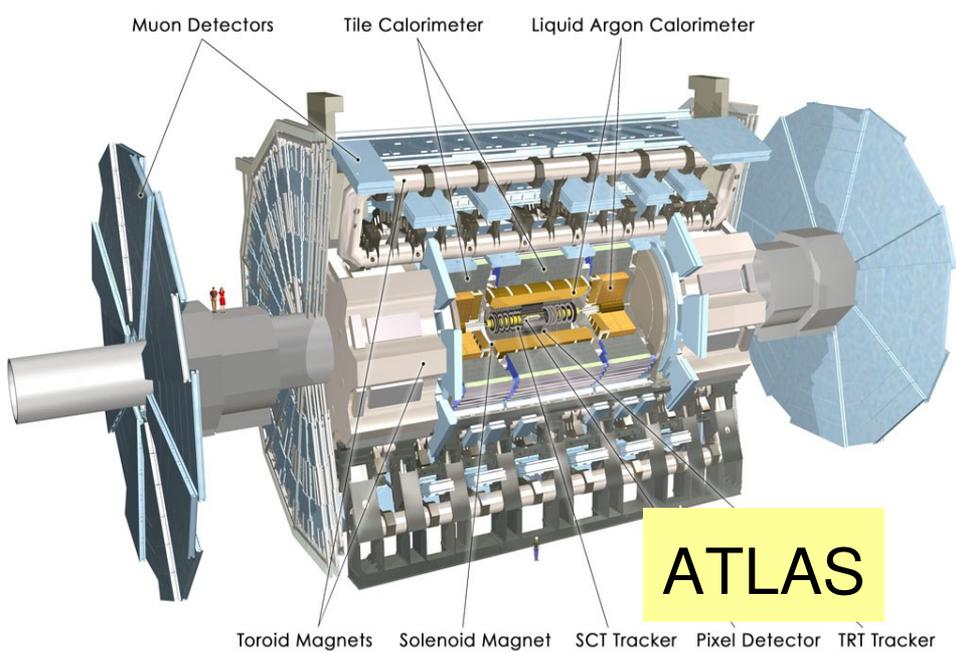
Compact  
Muon  
Solenoid



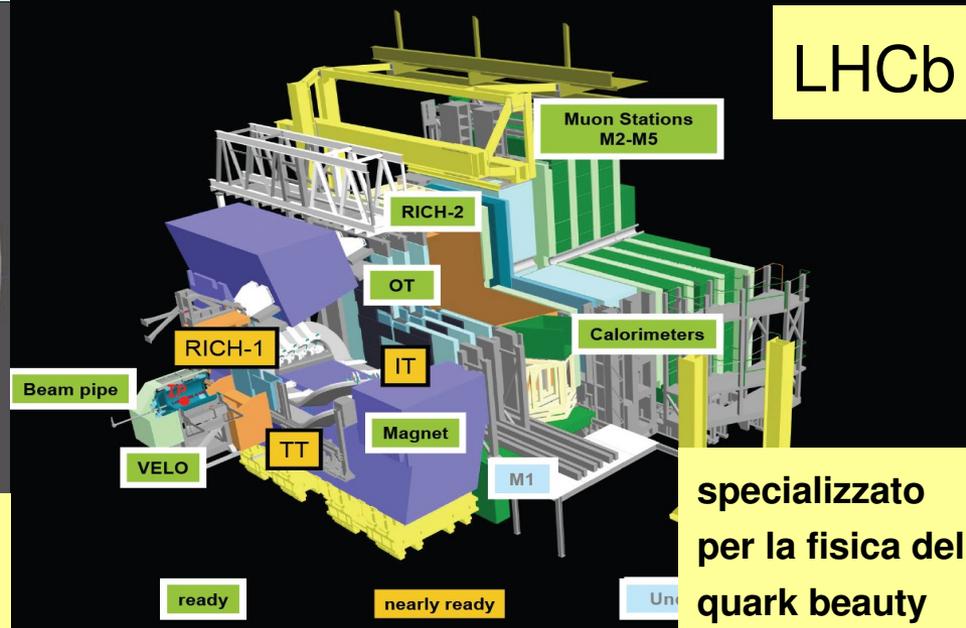
Key:

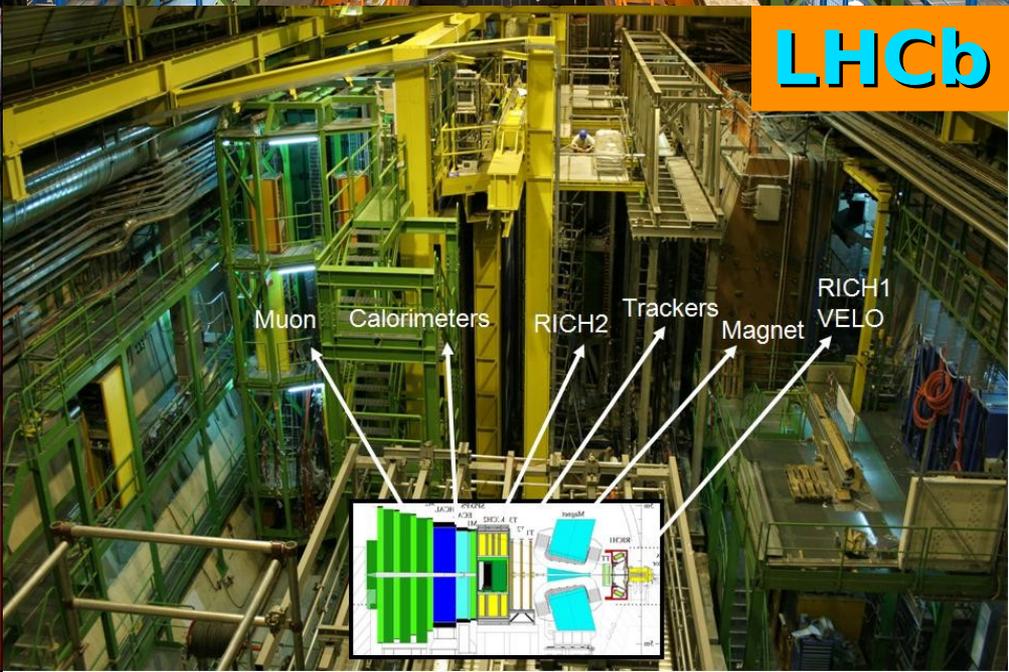
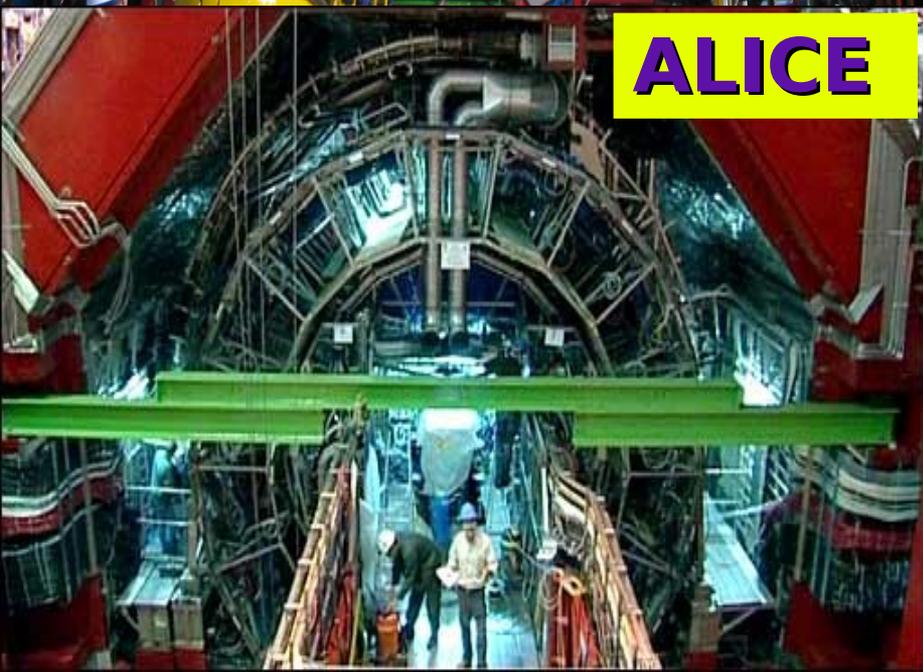
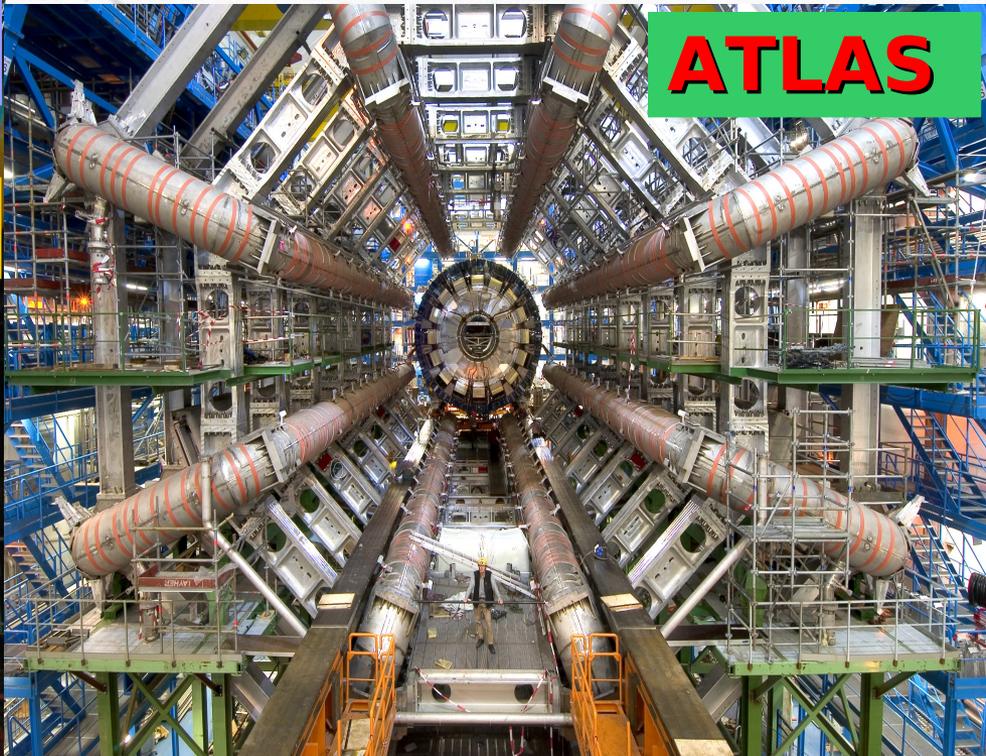
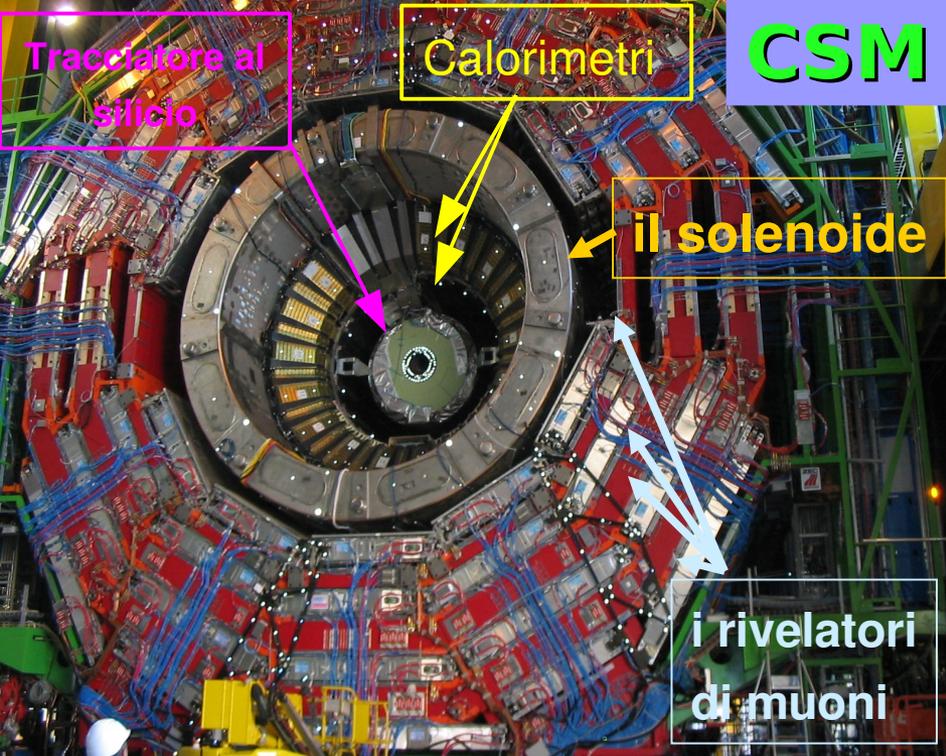
- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon
- - - Neutrinos



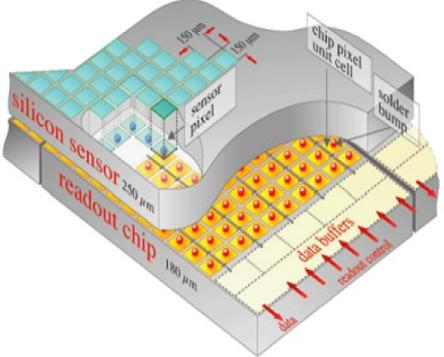


# I rivelatori a LHC

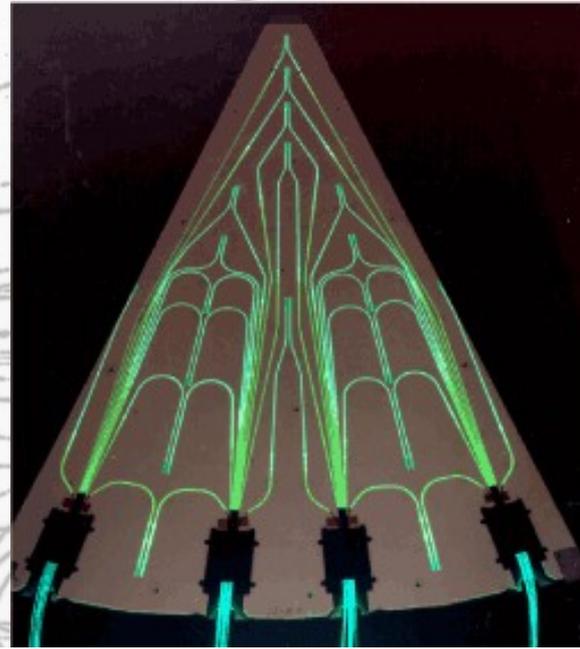




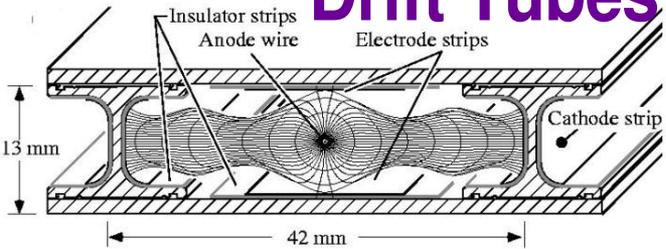
Sensori al silicio  
con elettronica di RO  
del tracker



Assorbitori di Fe-Cu +  
scintillatori plastici + HPD  
per il calorimetro adronico

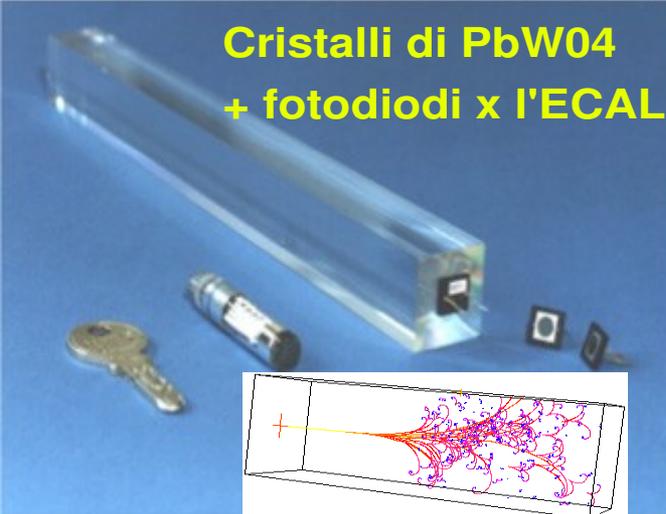


## Drift Tubes

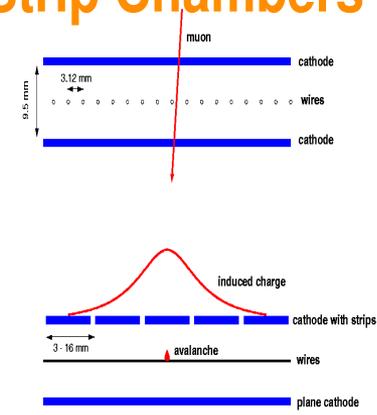
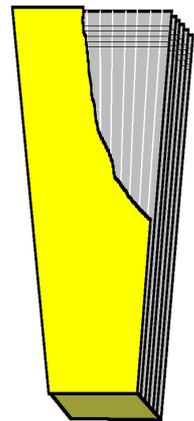


Principi DIVERSI  
per strumenti DIVERSI  
con scopi DIVERSI

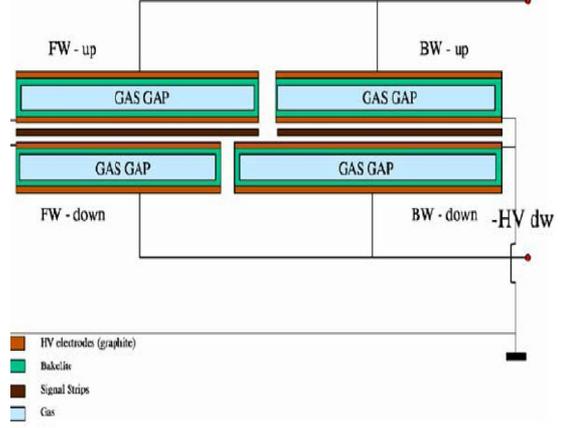
Cristalli di PbWO4  
+ fotodiodi x l'ECAL



## Cathode Strip Chambers



## Resistive Plate Chambers





Naturalmente ogni componente ha la sua elettronica di lettura, elaborazione, controllo; piu' il raffreddamento, i gas, etc...



**Risultato... un PO' di cavi!**

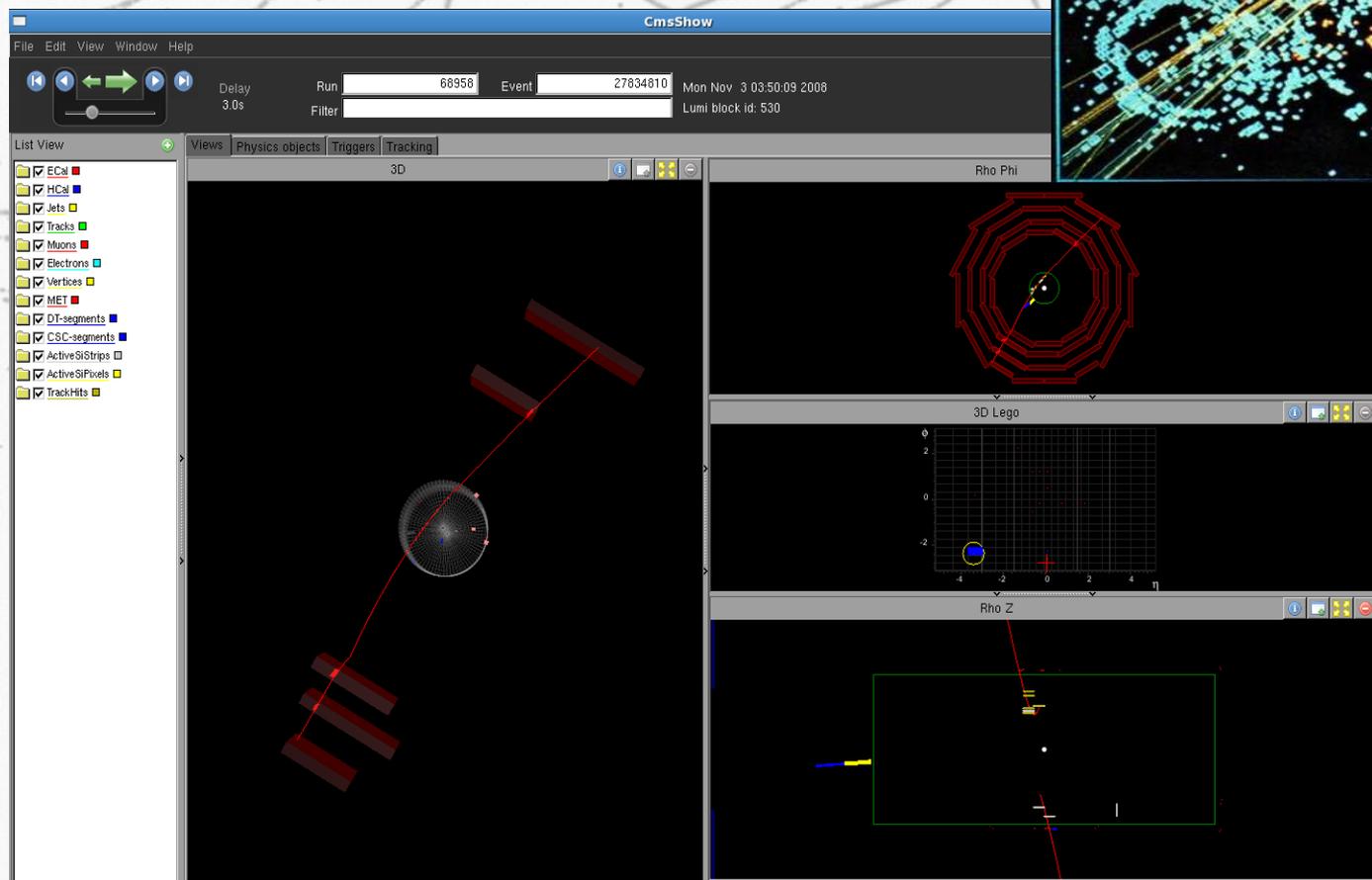
# Ma cosa e come si "vede"?

## Ricostruzione!

## Simulazioni...

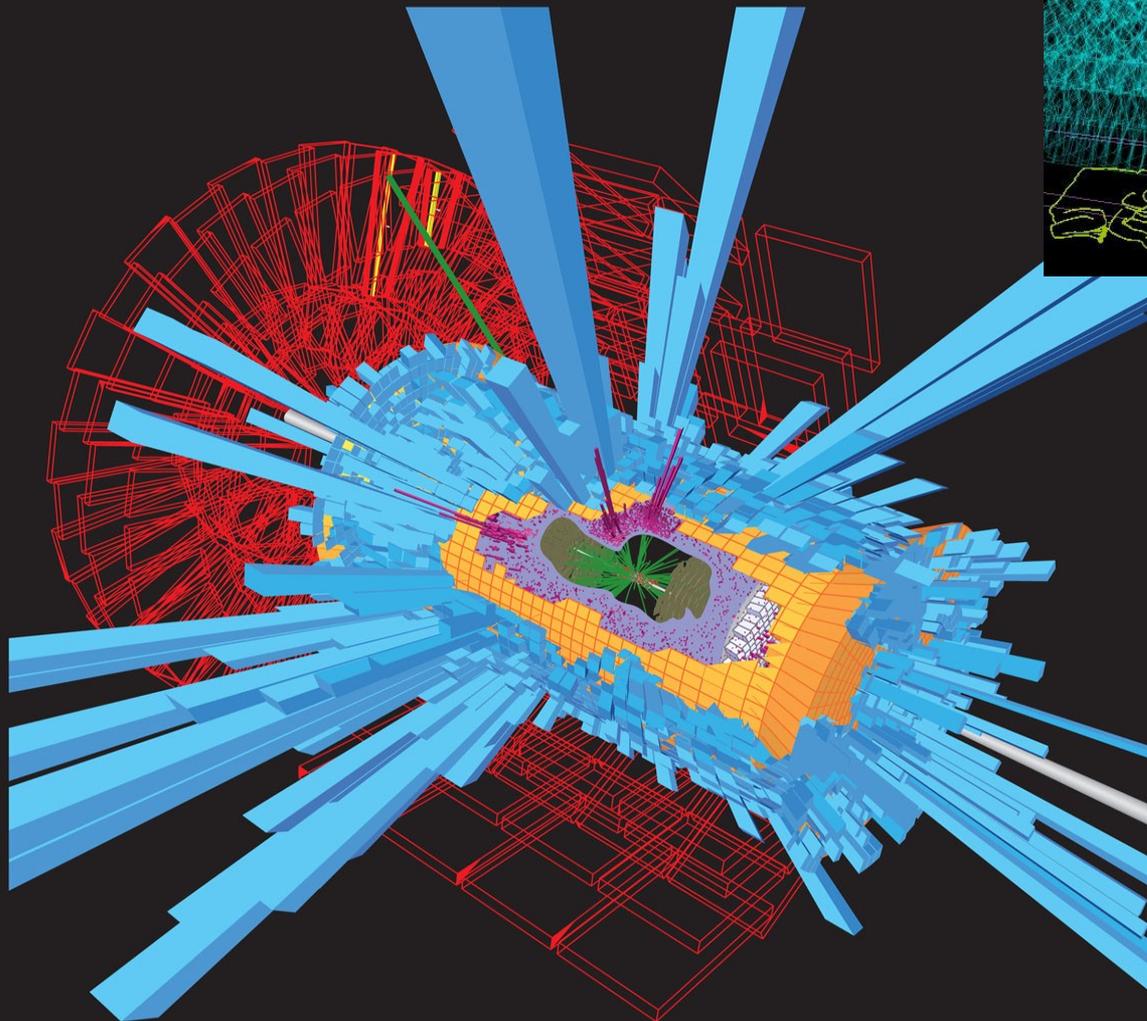
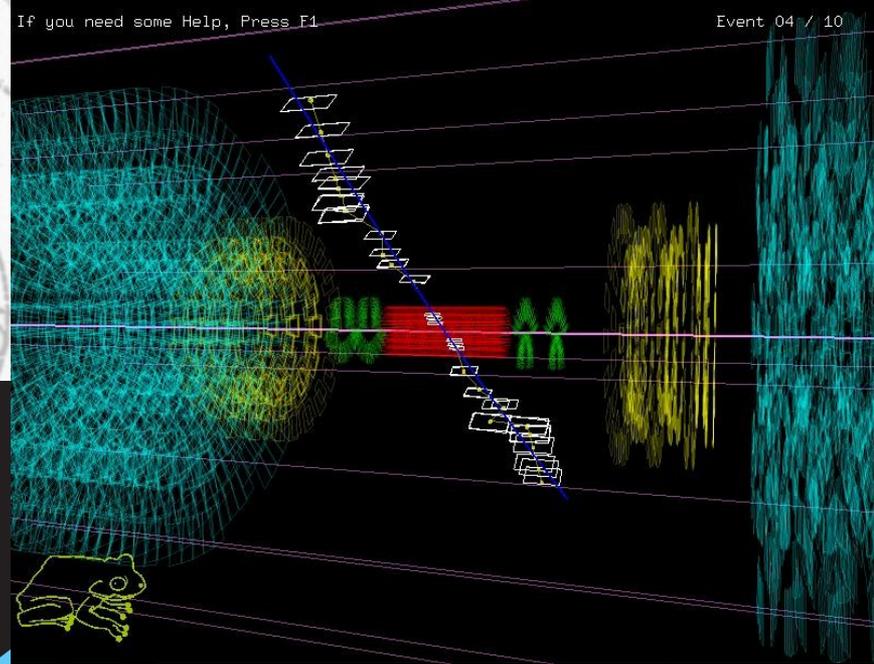


Simulazione del bosone di Higgs



...ma non solo!  
"Vediamo"  
anche i  
raggi cosmici!

# Gli acceleratori come “microscopi”



- ✓ Tracce cariche → tracker
- ✓ Elettroni → Ecal
- ✓ Jets → Hcal
- ✓ Neutri → Hcal
- ✓ Muoni → mu
- ✓ Quello che scappa?  
→ **bilancio energetico!**  
**(nel piano trasverso)**
- ✓ **Oggetti composti?**  
→ **RICOSTRUZIONE!**

# Ma c'e' anche

## I' "Energia Trasversa Mancante"!

I prodotti di una collisione devono avere un impulso totale **nullo** nel piano trasverso ai fasci

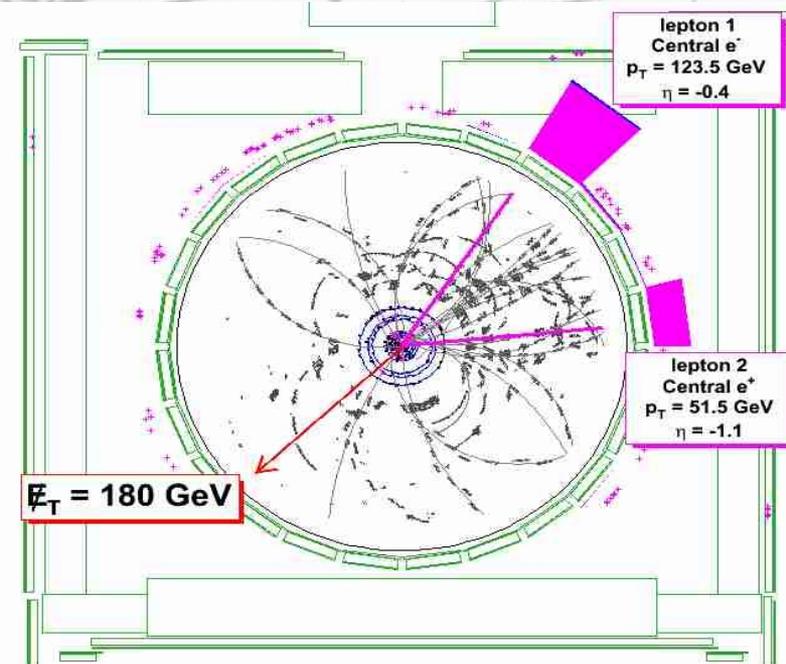
Calcolandone la somma vettoriale, si trova

$$MET = [(\sum E_x)^2 + (\sum E_y)^2]^{0.5}$$

se ne misura anche l'angolo nel piano trasverso:

$$\Phi = \text{atan2}(-\sum E_y, -\sum E_x)$$

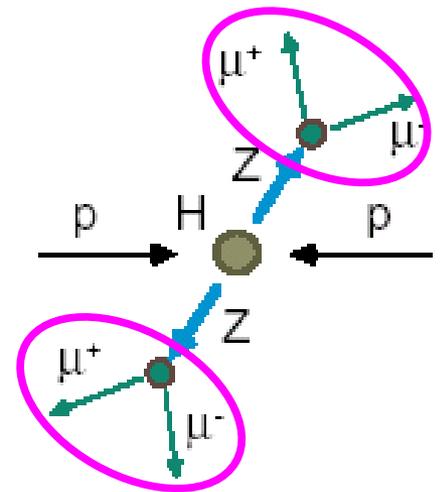
Un valore di MET diverso da zero indica la produzione di uno o più particelle non interagenti che hanno "sottratto" impulso trasverso



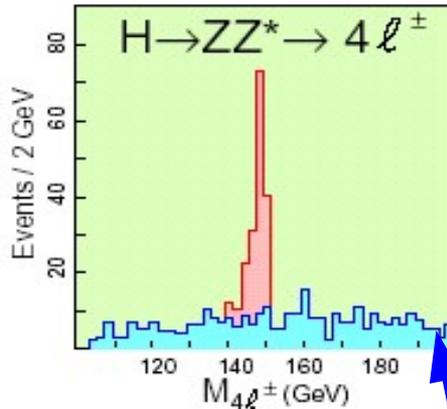
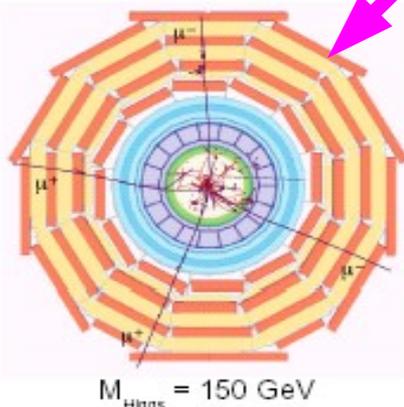
Un strumento fondamentale per cercare quel che non si "vede"

# E con gli oggetti che decadono come faccio?

Supponiamo di avere un processo tipo questo:



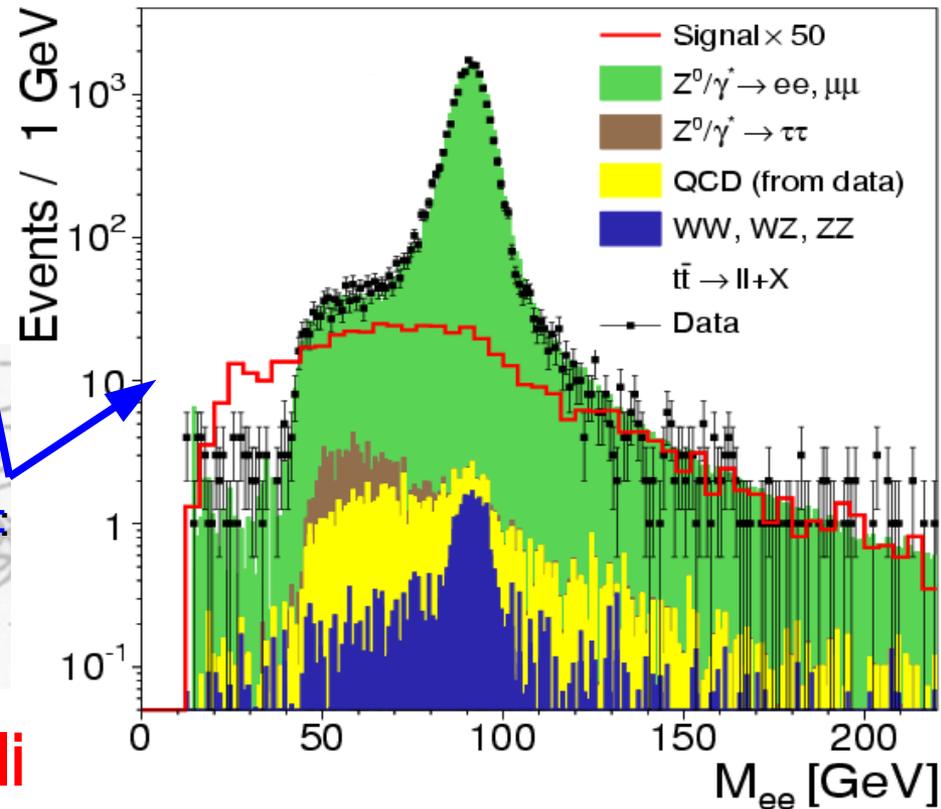
Nel rivelatore vedrei cosa tipo questa:

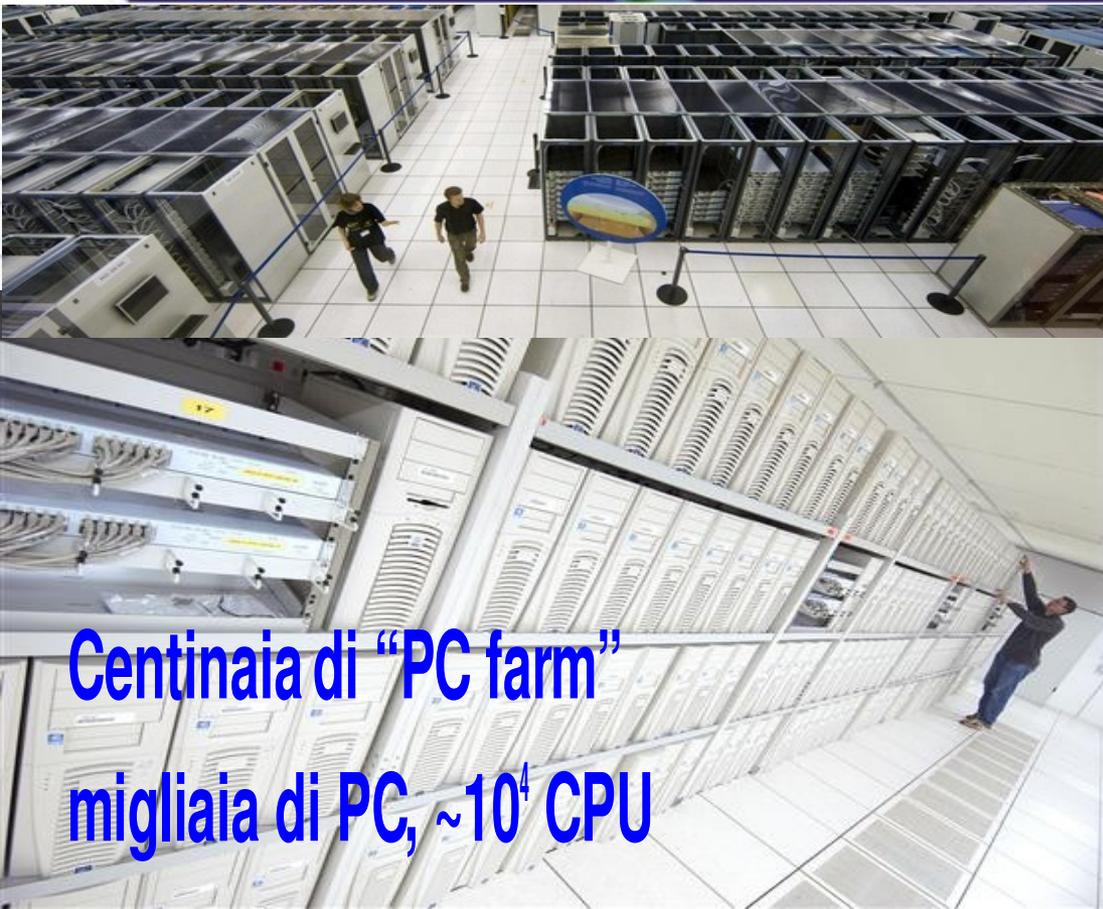


Cioe' MISURO solo gli "stati finali"!  
 Ma dal loro IMPULSO posso calcolarmi  
 una quantita' quale la MASSA INVARIANTE:

$$M_{12} = [m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 \cdot p_2)]^{1/2}$$

Cosi' "VEDO" le particelle originali



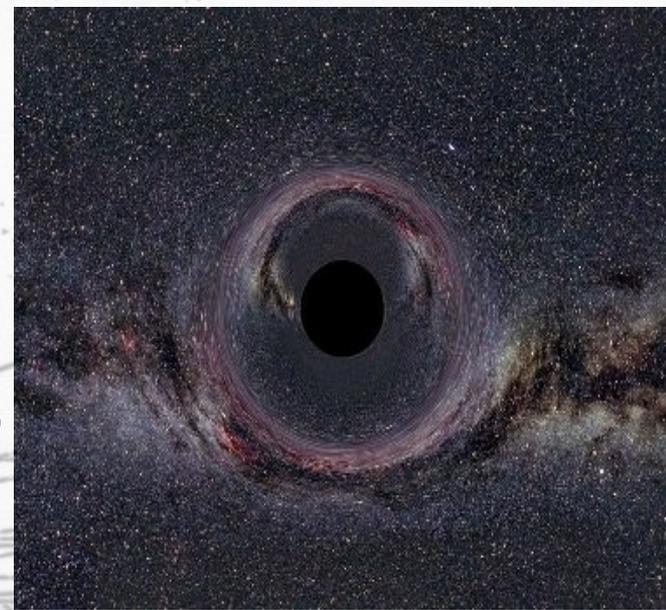


Centinaia di "PC farm"  
migliaia di PC,  $\sim 10^4$  CPU



# ma... e quella storia del **BUCO NERO?**

I buchi neri sono oggetti previsti dalla relatività  
nel cosmo abbondano (si pensa)



Alle energie di LHC POTREMMO ANCHE produrne qualcuno!  
**ma...**

- DOVREBBERO evaporare (in teoria)
- raggi cosmici li produrrebbero già' attorno a noi
- Altri argomenti astrofisici e teorici sono tranquillizzanti...

**lo comunque il giorno dell'accensione  
di LHC ho prenotato un viaggetto...!**



# ...e quell'altra storia che “ricreate il Big Bang”?

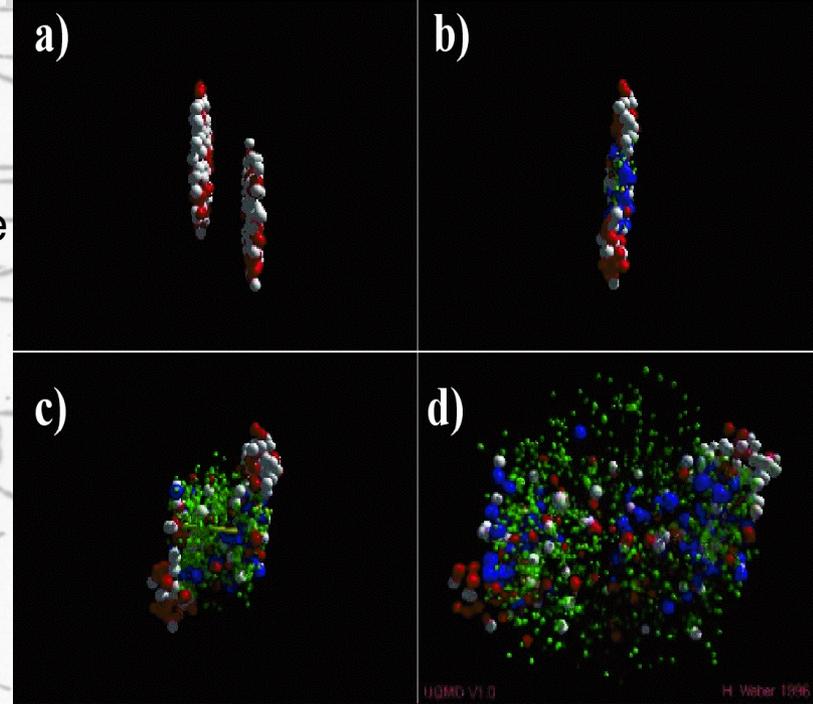
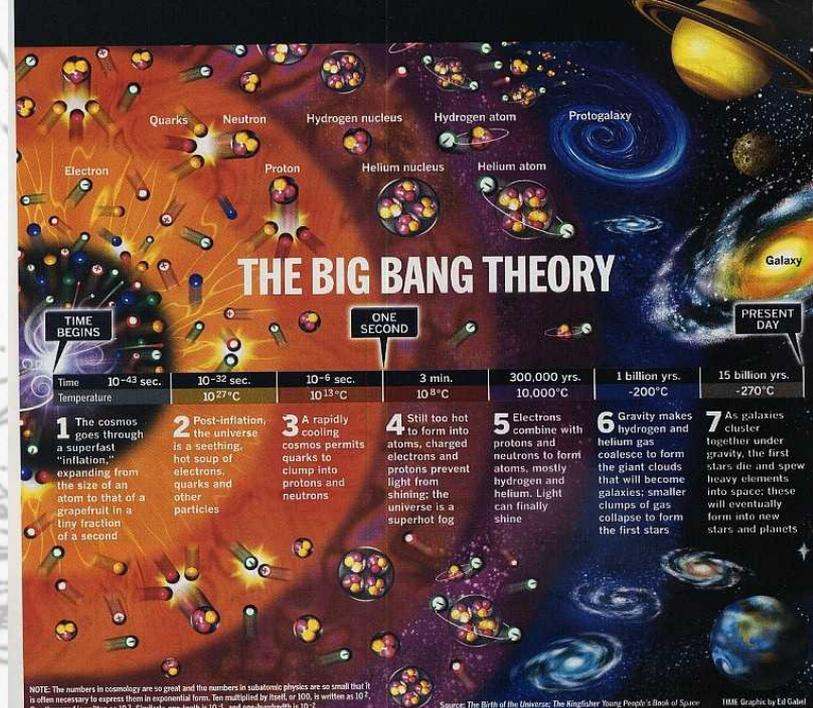
Beh ... quella e' al tempo stesso:

- una verita'
- una ~~ca~~ **CENSORED** zata pazzesca
- una sparata pubblicitaria!

La teoria cosmologica del Big Bang prevede condizioni iniziali di altissima temperatura e pressione --> “brodo” primordiale di particelle elementari nelle collisioni tra ioni pesanti LHC produrra' MOLTO LOCALMENTE condizioni “simili” (QGP)

**Quanto** simili lo lascio immaginare a voi!

23/03/09



# Concludendo...

LHC sta per partire:

- speriamo sia la volta buona!
- ci si aspetta MOLTO! Ma qualcosa di nuovo e' quasi certo...
- in ogni caso ci sara' da lavorarci su parecchio!
- la nostra conoscenza del mondo potrebbe *cambiare*
- la nostra vita forse meno... (buchi neri a parte!)
- per un po' i fisici non chiederanno un giocattolo nuovo!

# Le domande aperte sono ancora molte ma...



...ci stiamo lavorando!

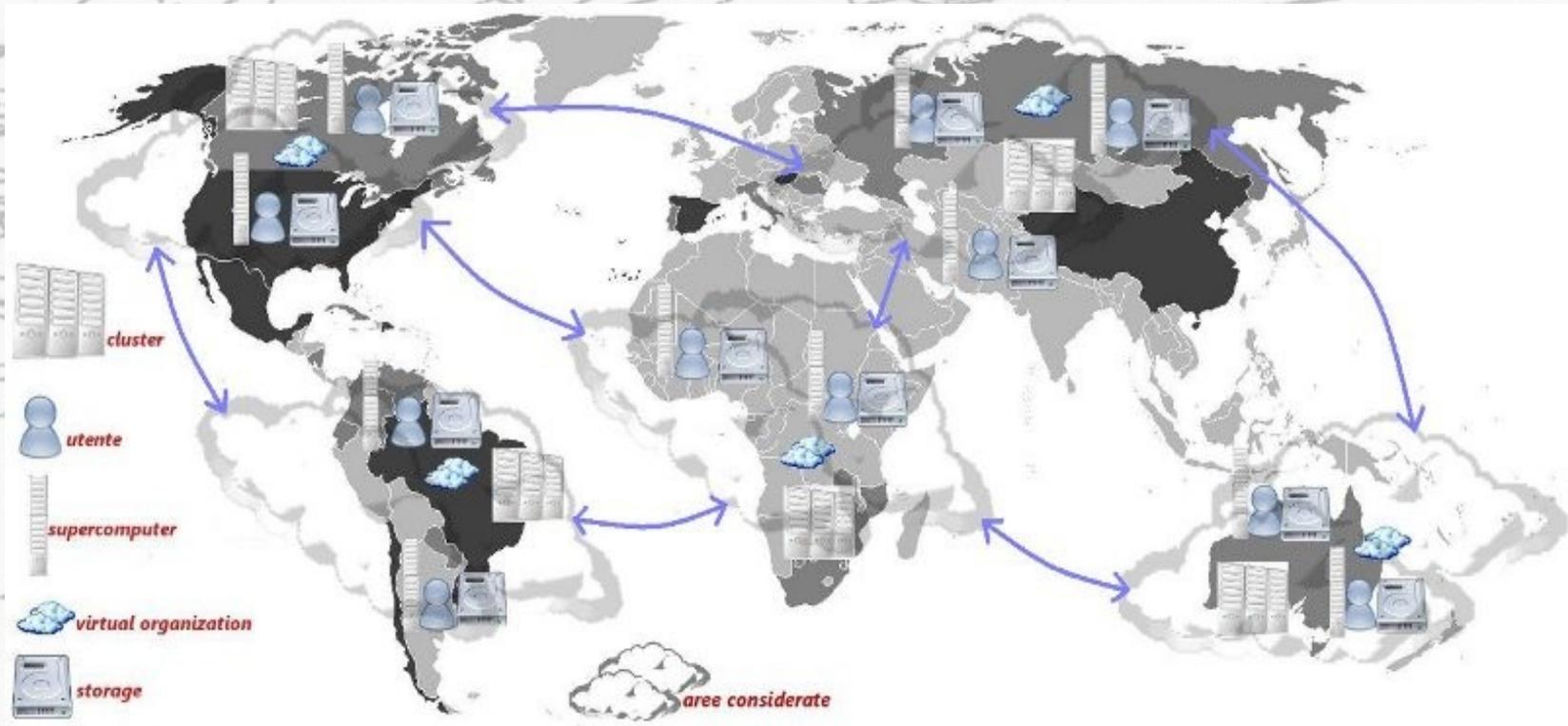
# Back Up Slides

Dal detector  $\sim 300$  GB/s  $\rightarrow$  300MB/s

Memo Trigger filtering: 100 / 40M

Attesi  $\sim 27$  TB / day di dati RAW

Link Ottici da 10Gb/s tra T0 e T1s



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