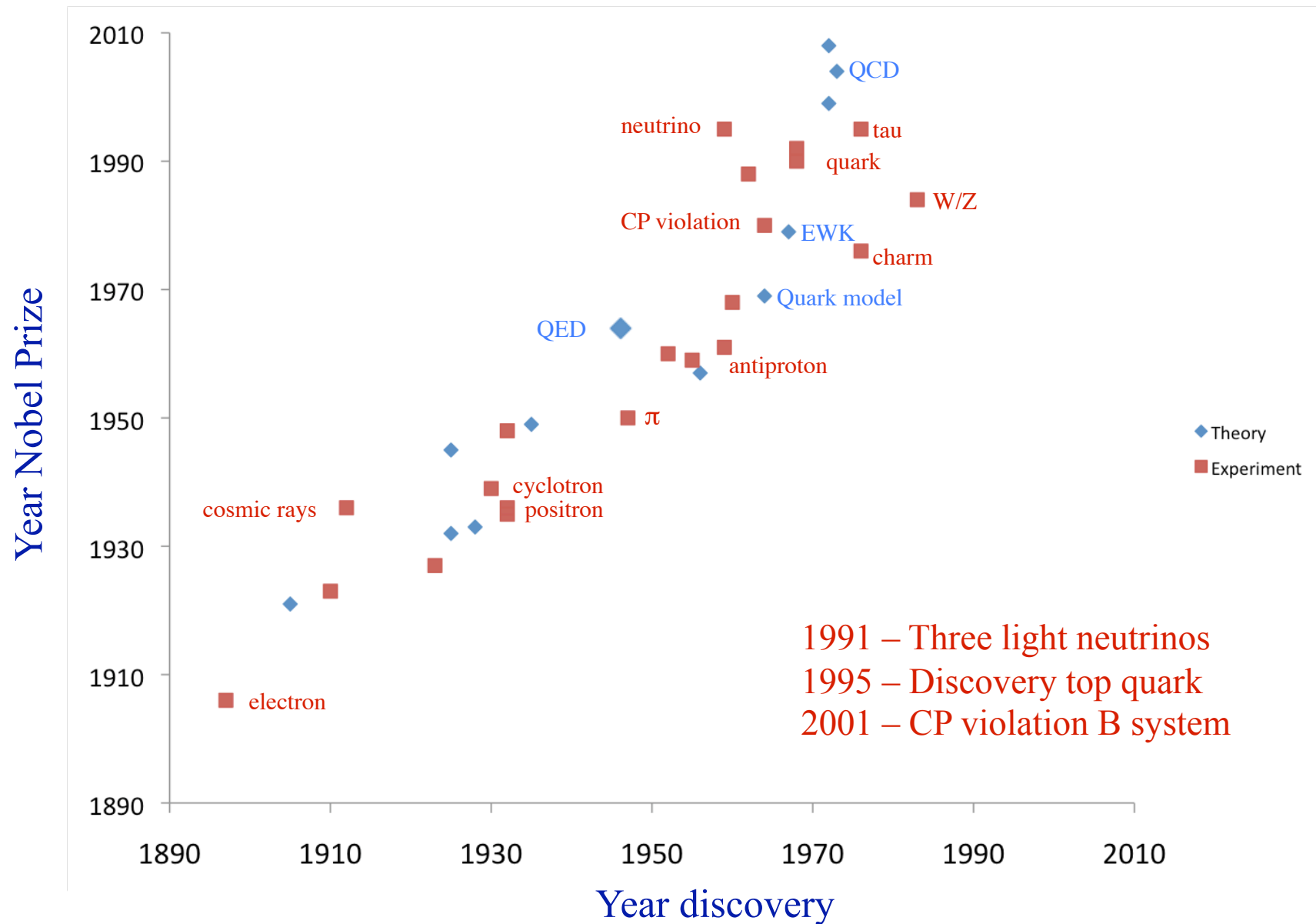


# ***II Large Hadron Collider***



***esperimenti alla nuova frontiera dell' energia***

# Discoveries in Particle Physics



# Particelle Elementari

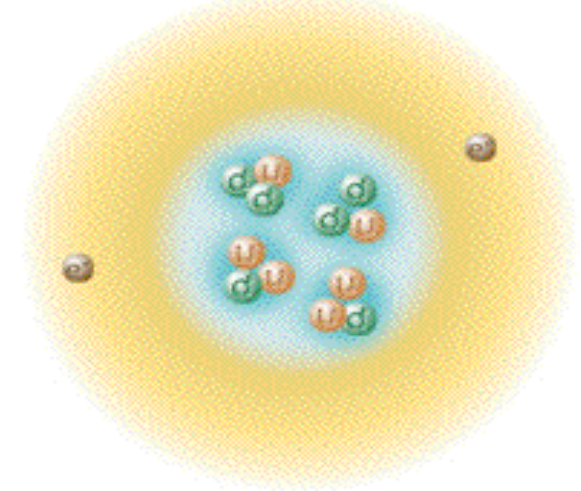
- minuscoli elementi in un immenso spazio “vuoto”
- pochi tipi differenti (elettrone, protone, ...)
- copie assolutamente identiche l'uno dell'altro
- replicati su scala cosmica

- Quali sono le particelle elementari ?
- Come esse interagiscono ?

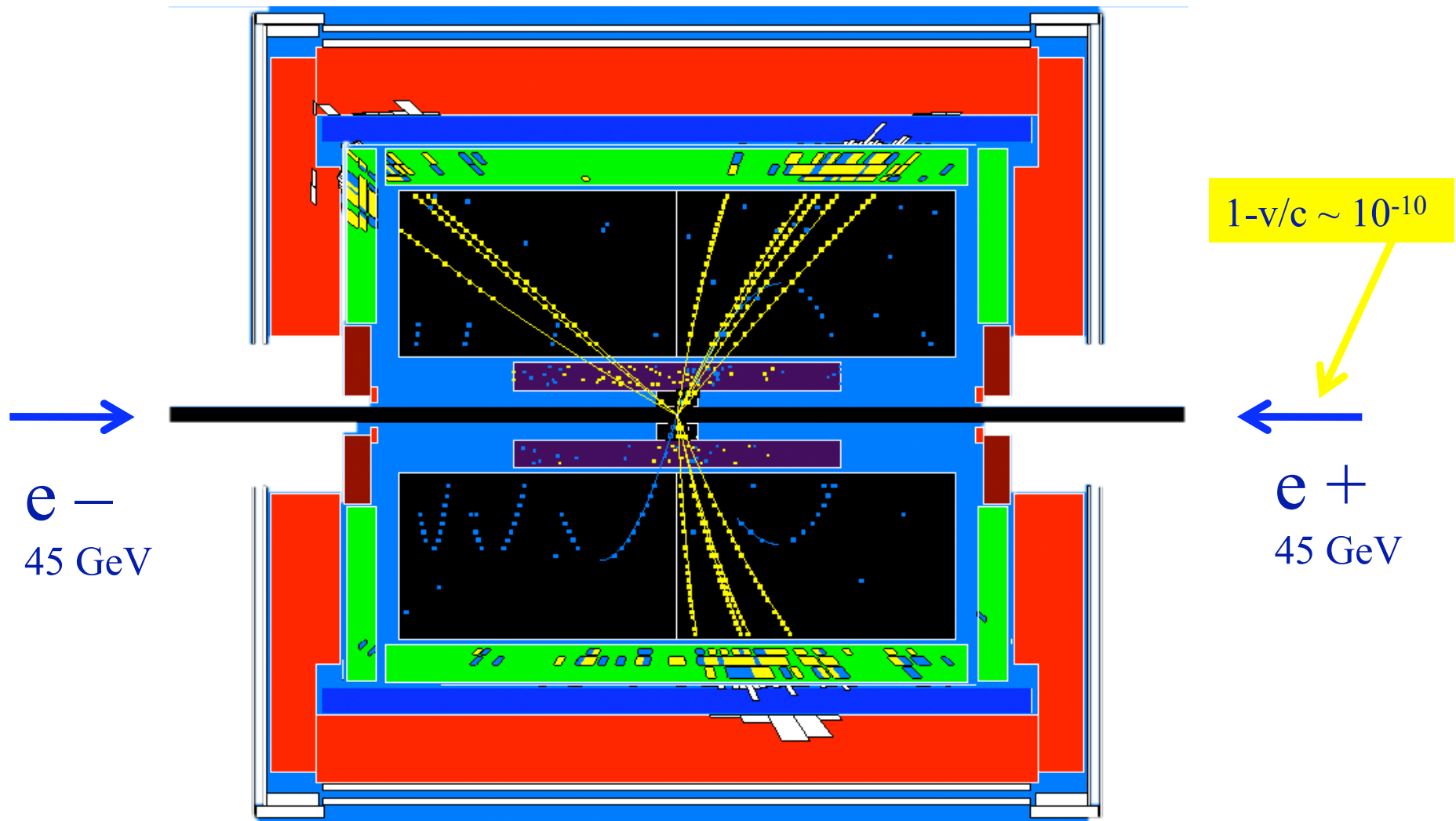
- 
- Come si studiano ?
  - scattering
  - stati legati
  - decadimenti

Derminare le leggi di interazione da un evidenza indiretta non e' facile: si formula un modello basato su quantum field theory e si confronta con i risultati degli esperimenti

Atomo di Elio



Fasce di particelle di alta energia vengono fatti collidere al centro di un rivelatore. Nella collisione si ottiene un **ALTA DENSITA' DI ENERGIA** e nuove particelle vengono “create” dal vuoto convertendo energia in massa ( $E=mc^2$ ) e studiate con il rivelatore.

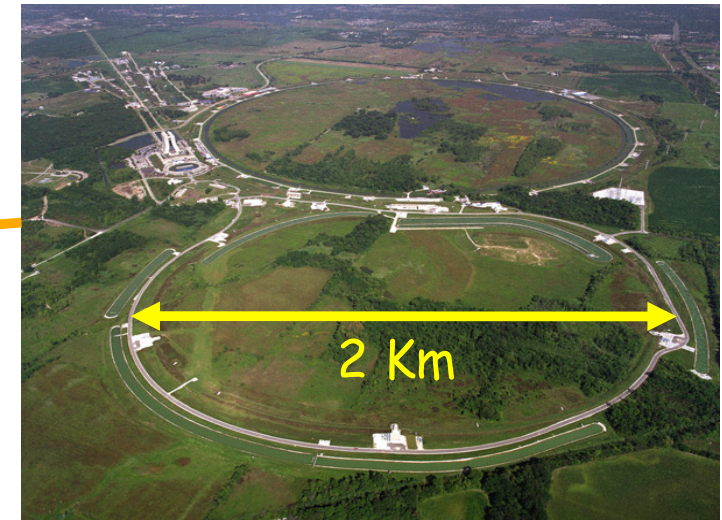
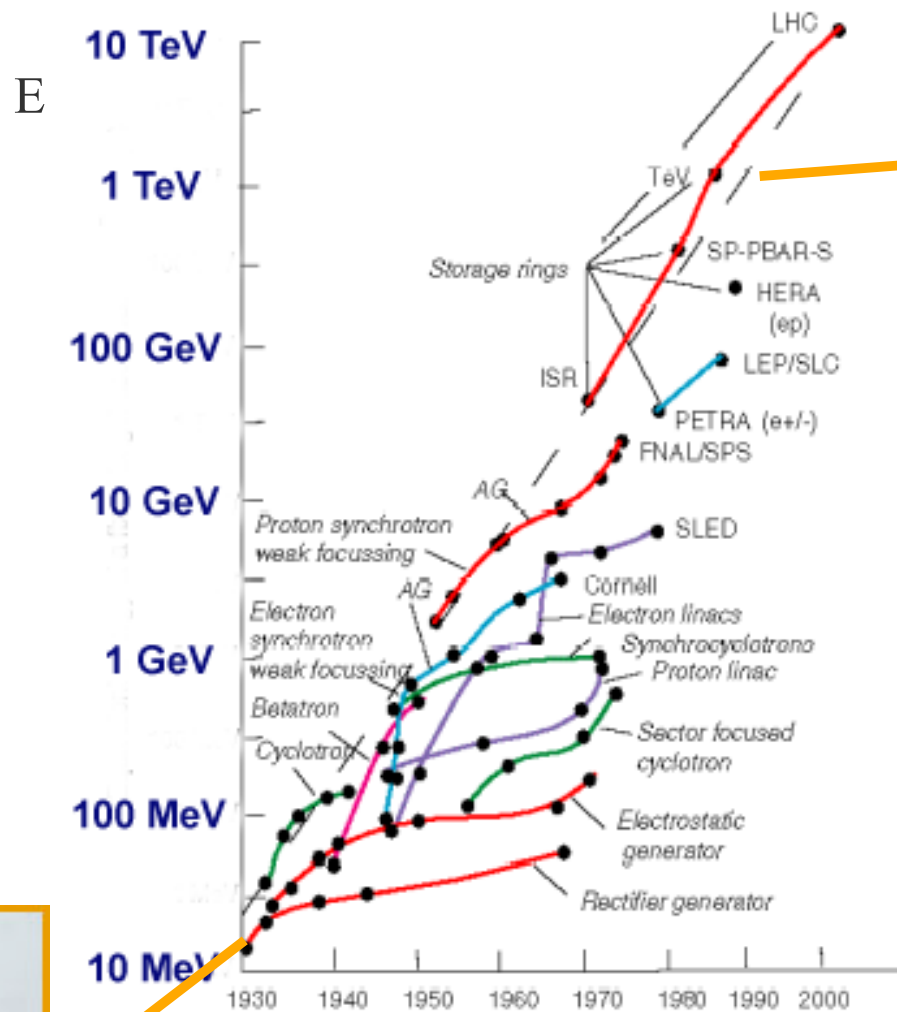


One of the many millions events collected with the ALEPH detector at LEP



# Acceleratori di Particelle

$10^{17} \text{ } ^\circ\text{K}$



$$p \sim E \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

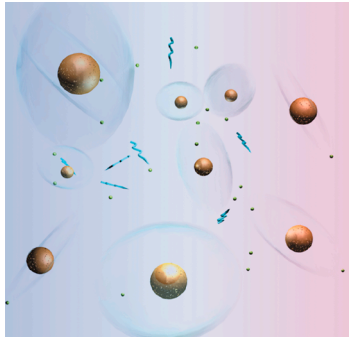
Alta energia, alto impulso,  
migliore risoluzione spaziale,  
capacita' di vedere strutture  
piu' piccole

$10^{12} \text{ } ^\circ\text{K}$



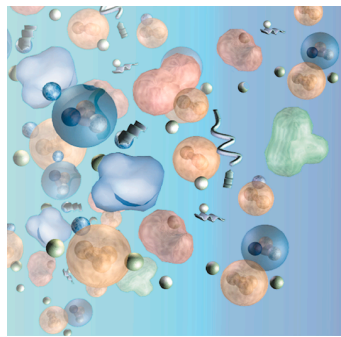
# TEMPERATURA

$6 \cdot 10^3 \text{ K}$   
 $0.5 \text{ eV}$



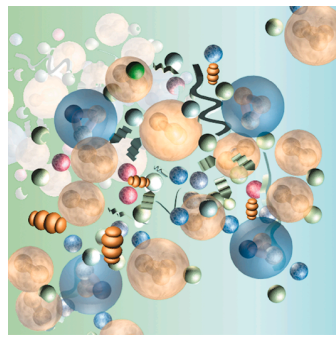
ATOMI

$10^9 \text{ K}$   
 $10^5 \text{ eV}$



NUCLEI

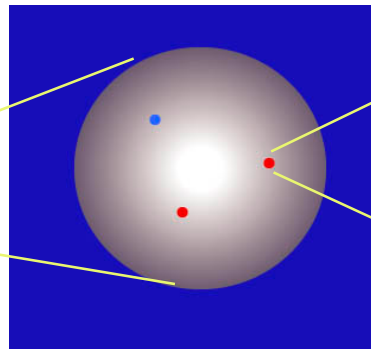
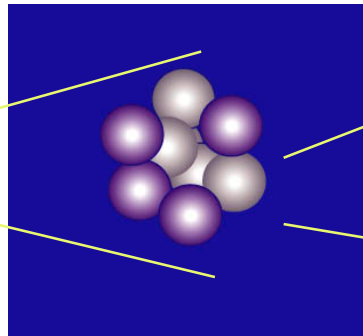
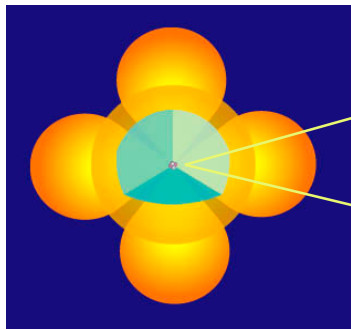
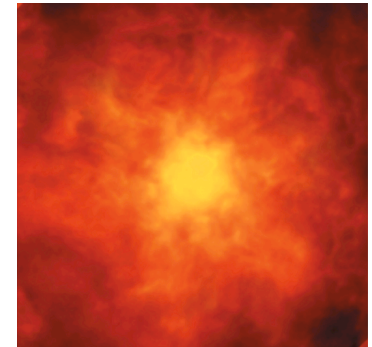
$10^{13} \text{ K}$   
 $10^9 \text{ eV}$



PROTONI

QUARKS

??????



COMPLESSITA,

# Il Modello Standard della fisica delle particelle

Ma non tutte le domande hanno risposta:

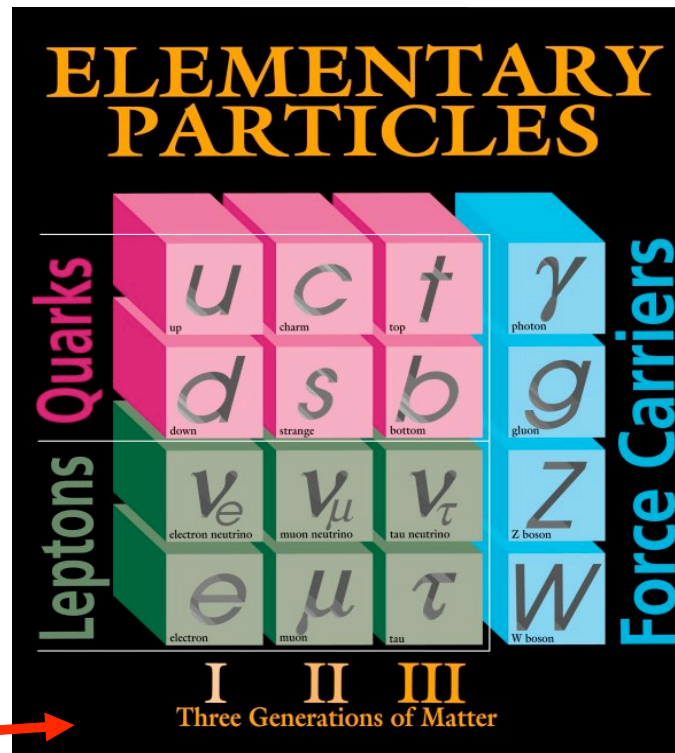
Perche' il quark top e' cosi' piu' pesante degli altri

⇒ Mass(top) = nucleo oro

Quale e' l'origine della massa?

Misure cosmologiche mostrano che la gran parte della materia dell' Universo NON e' la materia di questa tabella

Cosa e' la materia oscura ?



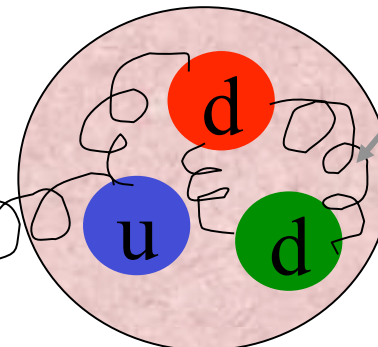
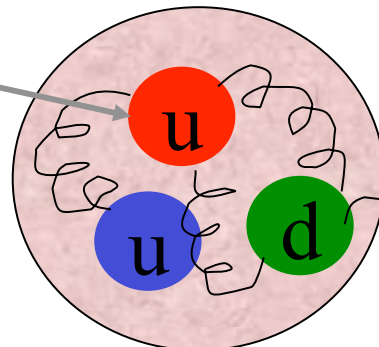
Quattro Forze

- Gravita'
- Elettromagnetismo
- Forza Nucleare
- Forza Debole



quarks

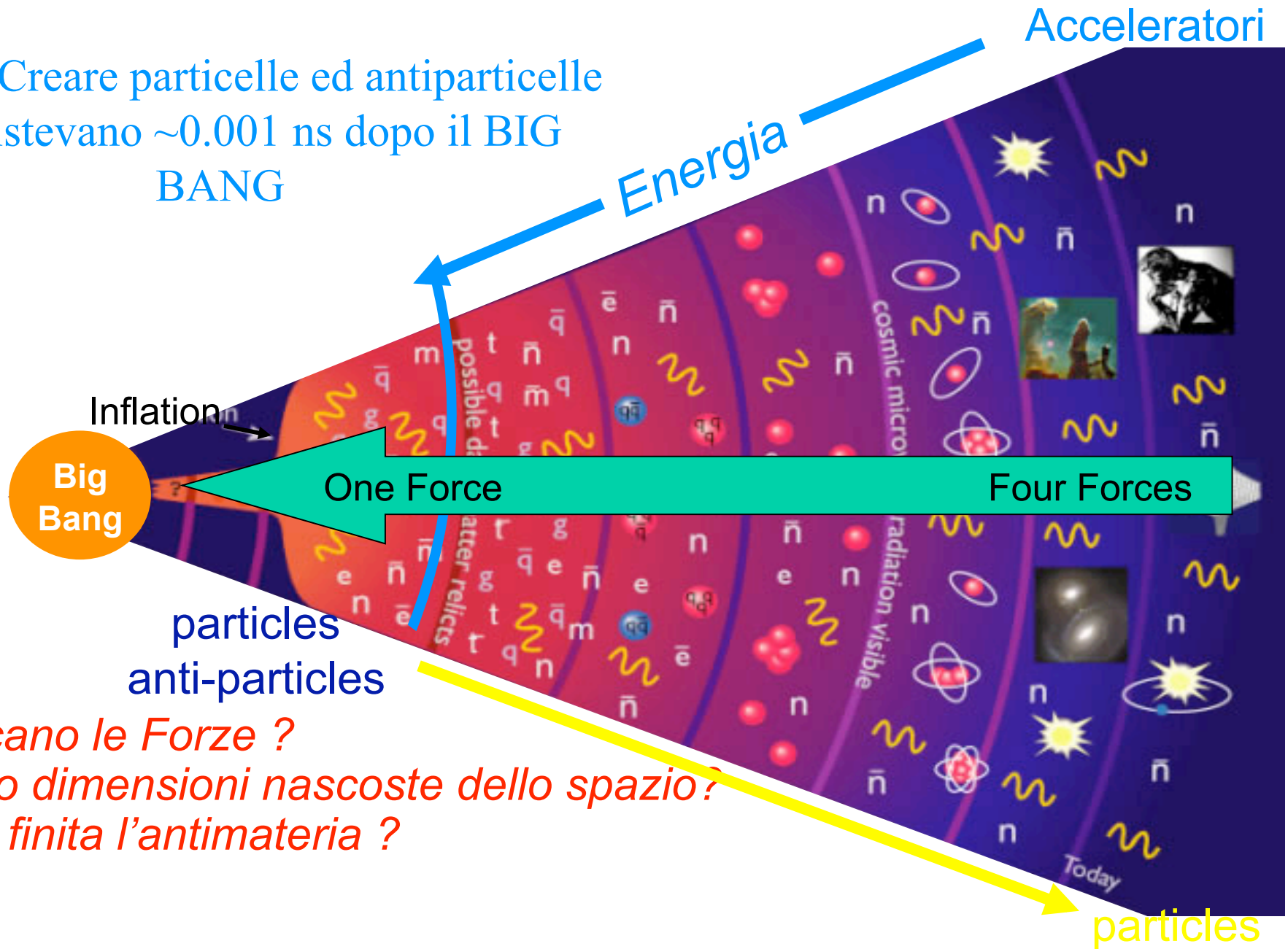
proton



neutron

gluons

$E=mc^2$  : Creare particelle ed antiparticelle  
che esistevano ~0.001 ns dopo il BIG  
BANG



*Si unificano le Forze ?*  
*Esistono dimensioni nascoste dello spazio?*  
*Dove e' finita l'antimateria ?*

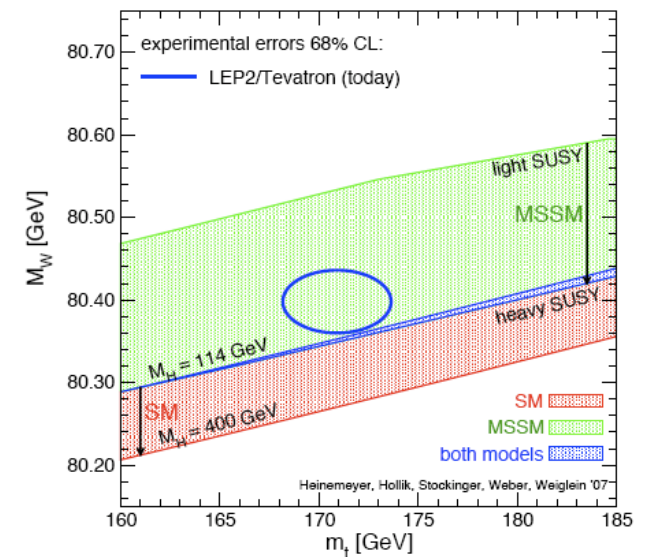


# Oltre il Modello Standard ?

- Il Modello Standard fa predizioni accurate: spiega ad esempio di cosa sono fatti i nuclei, gli atomi, le stelle, voi e me
- E' compatibile con tutte le misure effettuate sino ad ora, anche se ci sono altri modelli che hanno migliore accordo con i dati

Pero':

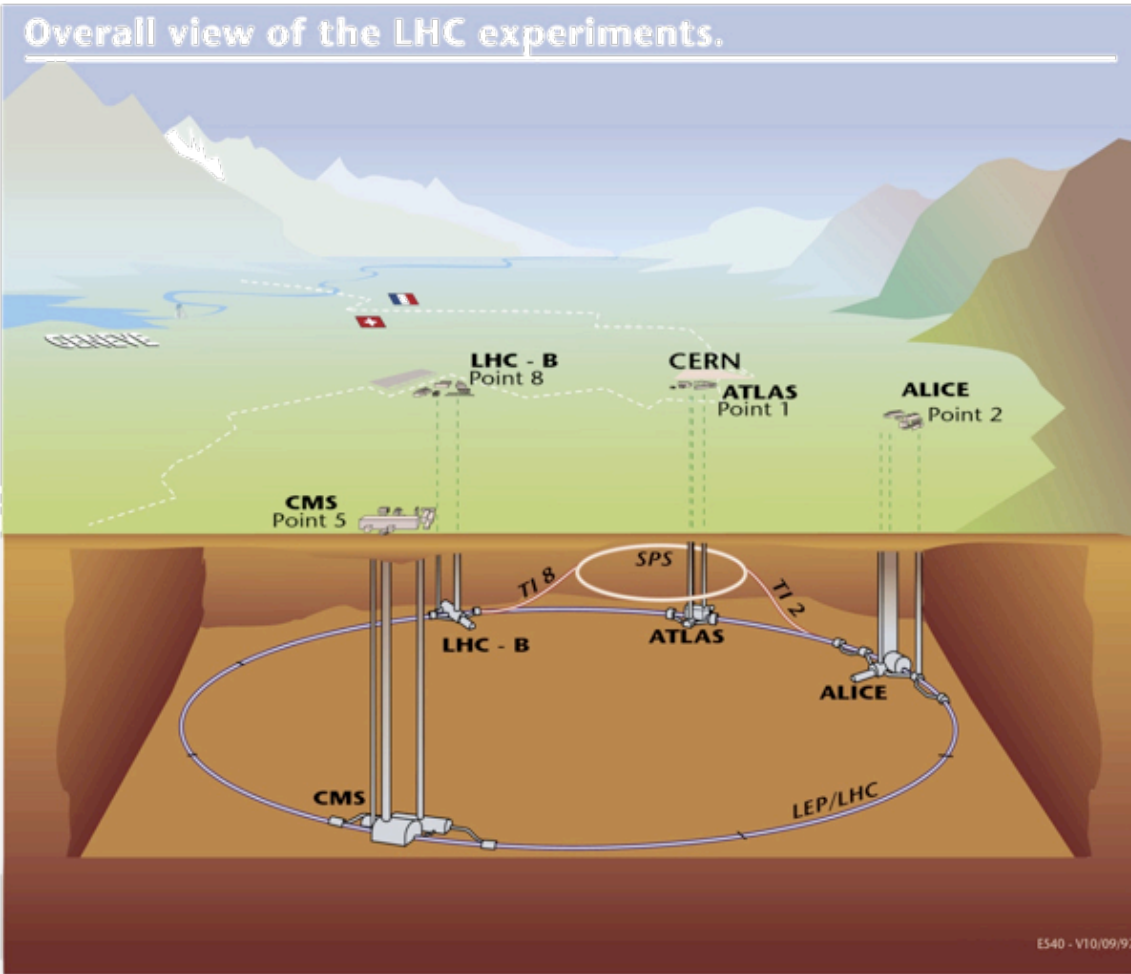
- Si basa su almeno un elemento non ancora osservato: il bosone di Higgs
- Ha una serie di difficoltà matematiche (fine-tuning)
- Non spiega l'esistenza della materia oscura



- La risposta a queste contraddizioni può essere ottenuta solo attraverso nuovi esperimenti : per questo guardiamo con grande eccitazione alla partenza dell'LHC



## II Large Hadron Collider



# Tunnel lungo 27 km - 100 m sottoterra

## Parametri principali

|                      |                                       |
|----------------------|---------------------------------------|
| Energy per beam      | 7 TeV                                 |
| Dipole field         | 8.3 T                                 |
| Luminosity           | $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ |
| Current per per beam | 0.56 A                                |
| Bunch spacing        | 25 ns                                 |
| Stored beam energy   | 334 MJ                                |

## Migliorie rispetto ad altri acceleratori

|                        |            |
|------------------------|------------|
| Dipole field           | x 1.5      |
| Length                 | x 4.7      |
| Luminosity             | x 20       |
| Collimation efficiency | 70 -> 96 % |
| Beam stored energy     | x 100      |

# Time Line dell' acceleratore

- Dec 1994: Progetto approvato
- Oct 1995: Pubblicazione del TDR
- Dec 1997: Primo prototipo del dipolo
- Jun 1998: Raggiunto il campo magnetico di 8.3 T
- Nov 2000: Primo magnete (di 1232) produzione industriale
- Feb 2002: tunnel libero dal LEP
- Dec 2003: completati i refrigeratori
- Oct 2004: test delle linee di trasferimento
- Mar 2005: primo magnete installato nel tunnel
- May 2005: prima delle 1700 interconnessioni
- Dec 2005: prima ottante dell distribuzione criogenica
- Oct 2006: completata la criogenia
- Jun 2007: primo ottante raffreddato ed alimentato
- Nov 2007: interconnessioni completate
- Sep 2008: primo fascio circola in LHC

**COSTO TOTALE 5000 MCHF**

1200 MCH personale

3800 MCH materiale

**in 12 anni**



# LHC tunnel 2002

4 m





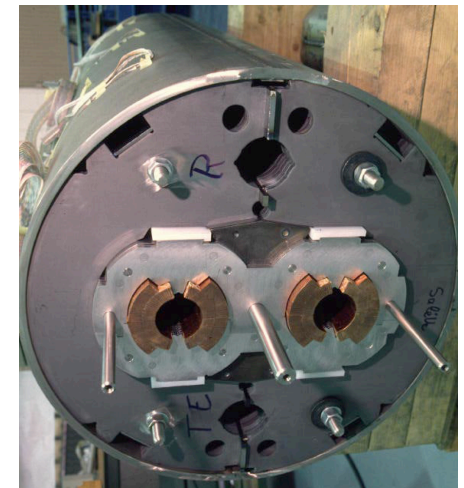
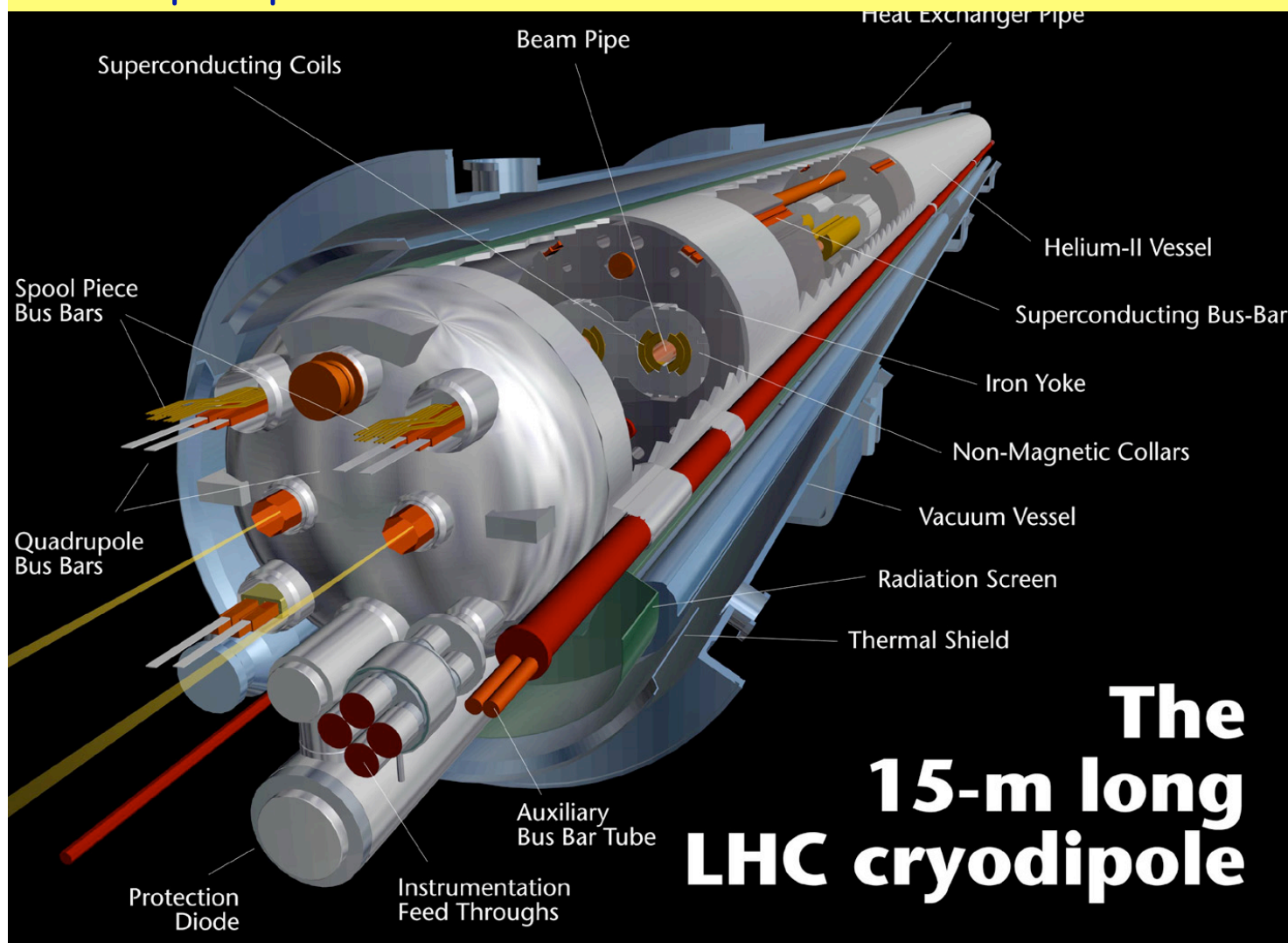
# LHC tunnel 2006



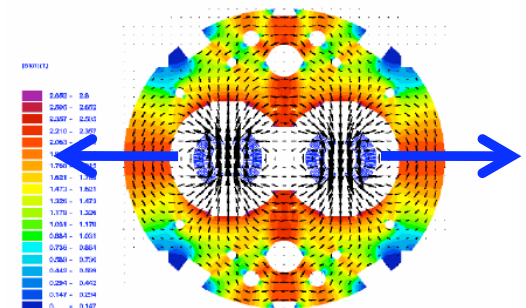
1232 dipoli principali  
+ 3700 magneti correttori multipoli

# I magneti superconduttori

- Dipoli superconduttori (1.9 K) producono un campo di 8.4 T
- L'energia racchiusa in ognuno dei 1232 magneti  $e' = 7 \text{ MJ}$
- Un dipolo pesa 34 tonnellate



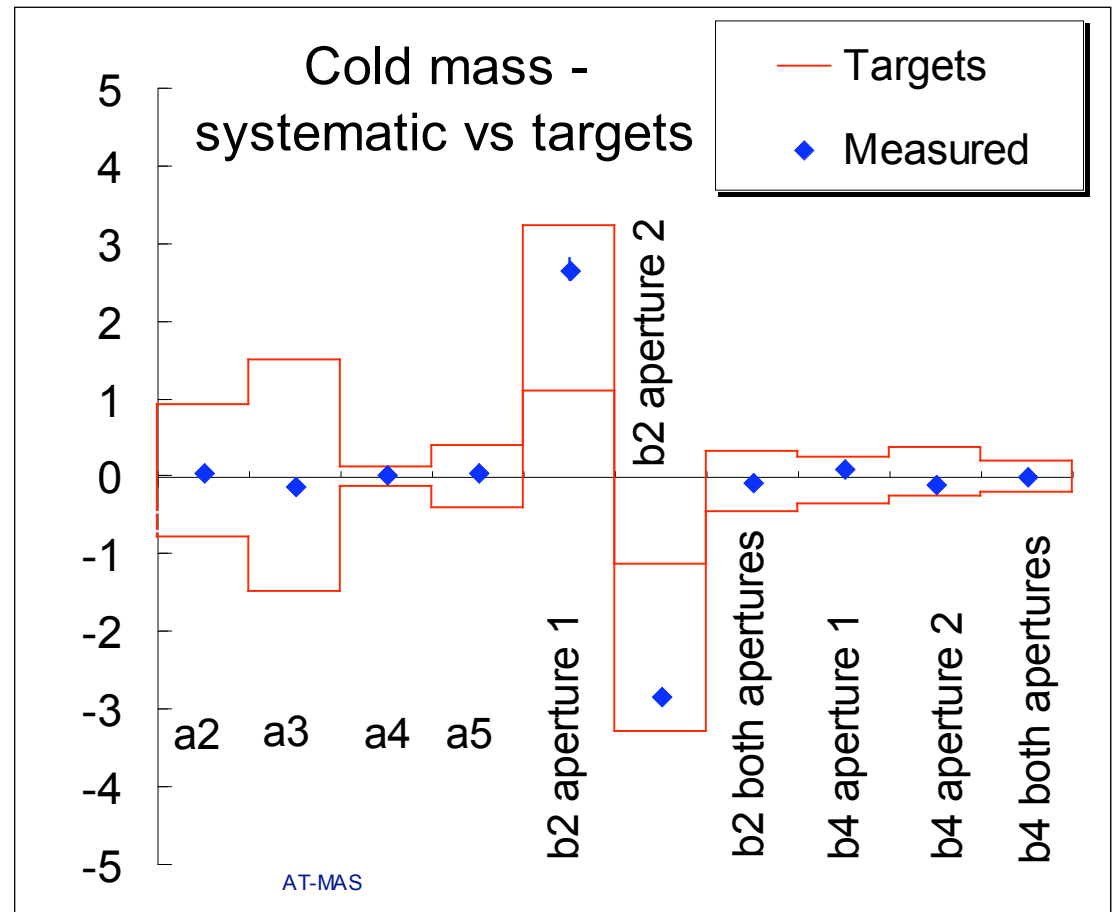
11800 Ampere  
 $F_x \sim 400 \text{ tonne/m}$





# Multipoli ed apertura dinamica

L'apertura dinamica di una macchina (lo spazio delle fasi a disposizione del fascio) dipende dalla qualità del campo magnetico e quindi in ultimo dalla precisione geometrica nell'allineamento del filo superconduttore negli elementi magnetici. Le tolleranze sono molto strette con posizionamenti all'ordine dei 10 microns.

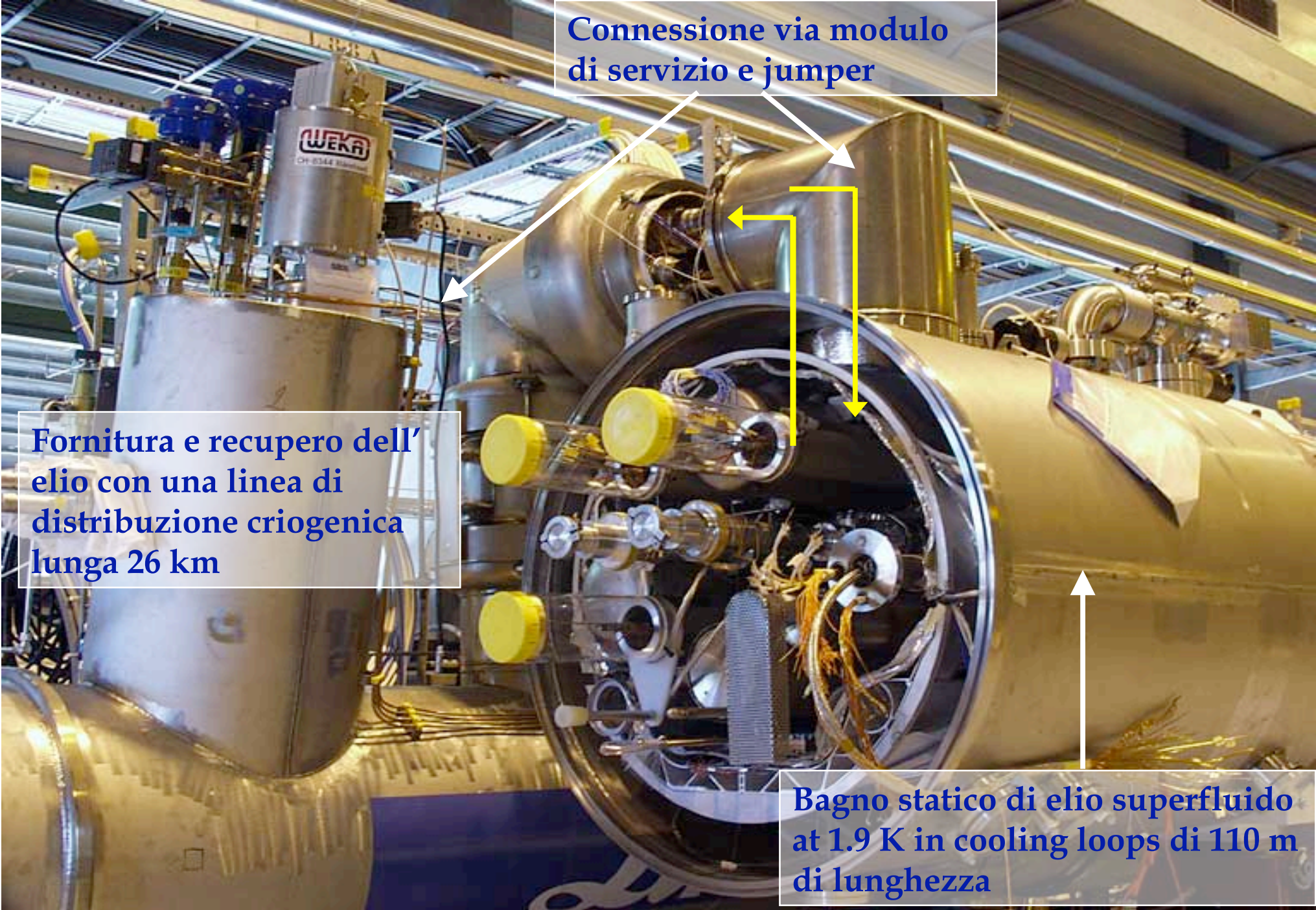




Linea Criogenica

Magnete





Connessione via modulo  
di servizio e jumper

Fornitura e recupero dell'  
elio con una linea di  
distribuzione criogenica  
lunga 26 km

Bagno statico di elio superfluido  
at 1.9 K in cooling loops di 110 m  
di lunghezza



# Di cosa ha bisogno il sistema di raffreddamento ?

## ✓ Electric power

about 32 MW; 24 GWh/month

1.2 MCHF/month



## ✓ Helium and nitrogen

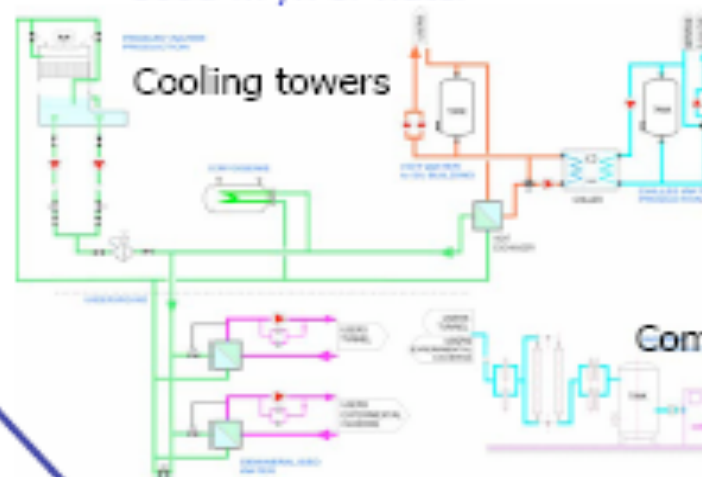
120 t of He – 4 MCHF

10'000 t of LN2 – 1.6 MCHF



## ✓ Cooling and ventilation

5000 m<sup>3</sup>/h of water



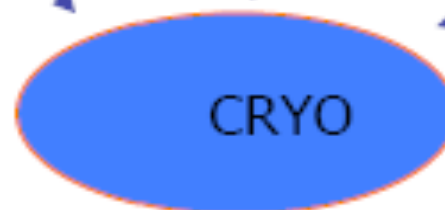
Compressed air

## ✓ Vacuum

10<sup>-2</sup> mbar

## ✓ Controls:

Networks, fieldbuses,  
PLC, SCADA



7/Mar/2007

Luigi SERIO - AT/ACR

10

# Inter-connections

$O(10^5)$





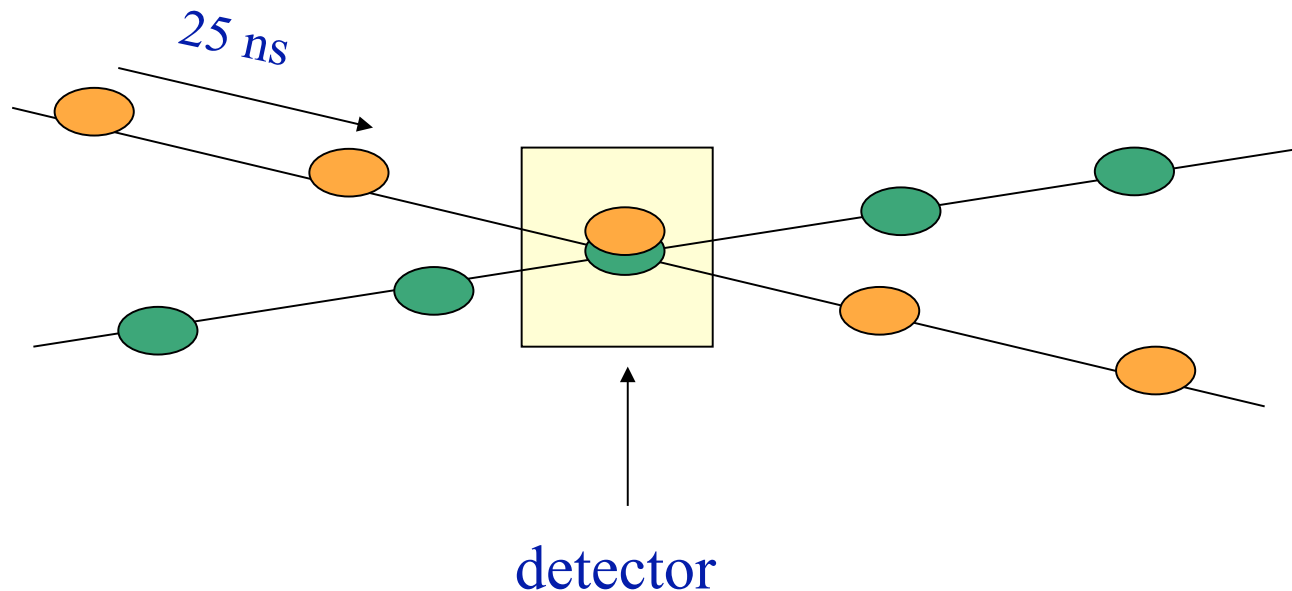
# LHC OPERATION





# LHC Beams

I protoni sono concentrati in pacchetti ( $100\text{ }\mu\text{m}$  [x]  $10\text{ }\mu\text{m}$  [y]  $15\text{ cm}$  [z]) che collidono ogni  $25\text{ ns}$ . Ci sono 2808 pacchetti ognuno contenente sino a  $10^{11}$  protoni. La macchina e' piena solo al 79% . Gli spazi vuoti nell'orbita servono per l'iniezione e per il dump dei fasci.



**L'energia di un singolo protone accelerato da LHC a 7 TeV corrisponde alla energia cinetica di una zanzara che vola**



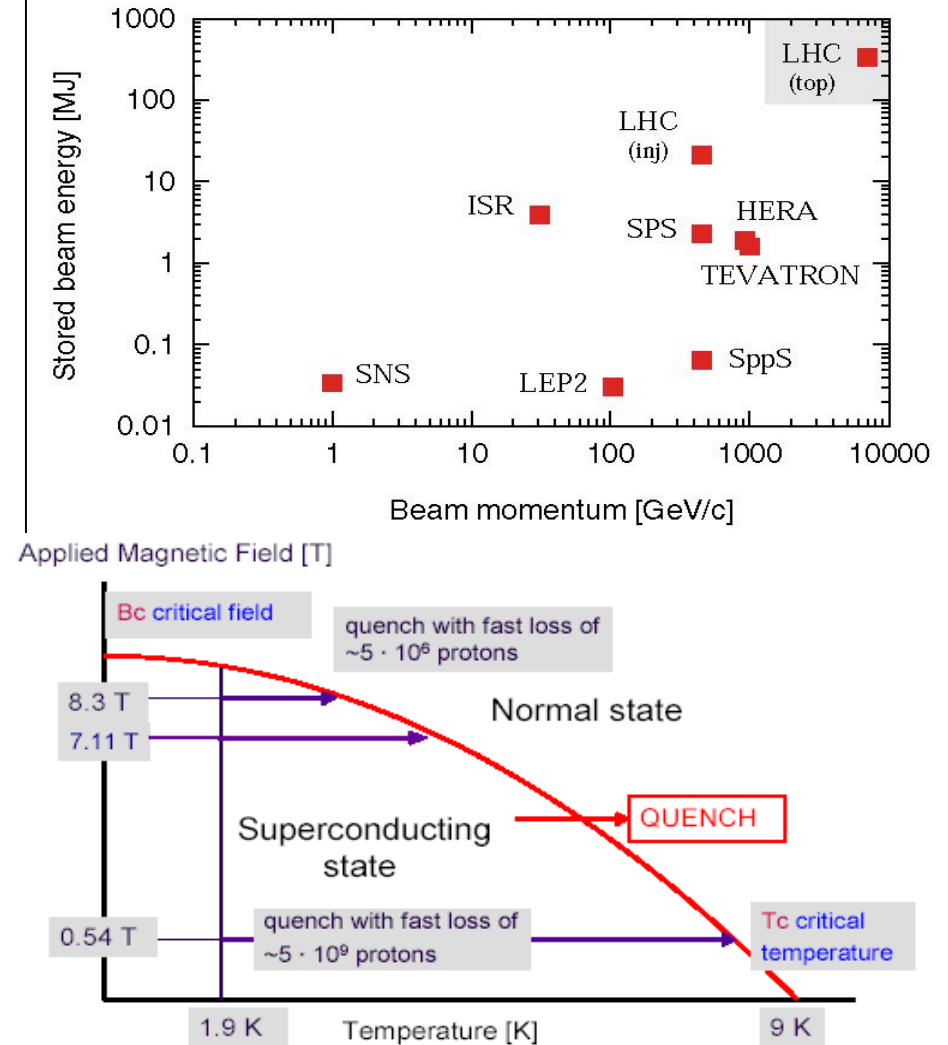
**L'energia del fascio di protoni accelerato da LHC a 7 TeV corrisponde alla energia cinetica di un Boeing 777 (50 Ton) dopo il decollo (450 km/h)**  
**Nel fascio ci sono**

**300.000.000.000 protoni !**  
**300.000.000.000.000 protoni !**



# Challenges of LHC Operation

- Gestire l'elevata energia nei fasci di 370 MJ per fascio (sufficiente a fondere 700 Kg di rame)
- Controllare le perdite dei fasci a livello mai raggiunto prima per evitare il quench dei magneti
- LHC è la prima macchina dove il sistema di controllo dei fasci deve essere collaudato contemporaneamente alle prime orbite dei fasci.



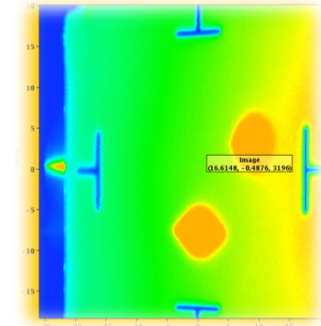
# LHC Operation 10-19 Sep 08

Entrambi i fasci hanno circolato nella macchina, a bassa intensita' dopo poche ore di operazione.

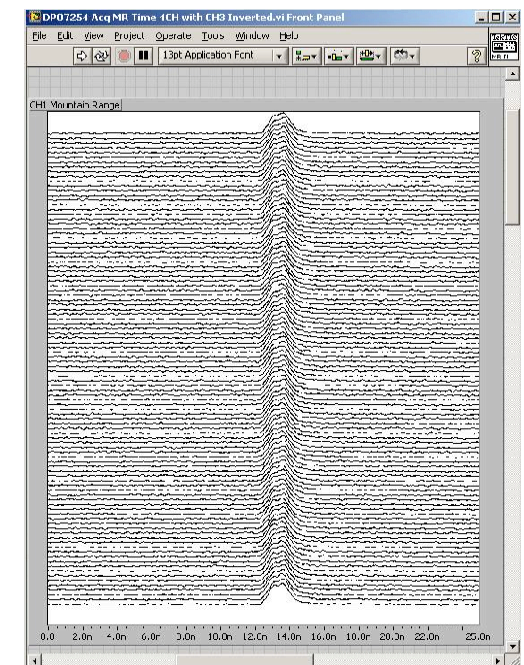
Le orbite sono state corrette

Il fascio e' stato catturato dalle radiofrequenze  
(struttura a bunch)

Sono state fatte varie prove di stabilita' e di apertura  
dinamica



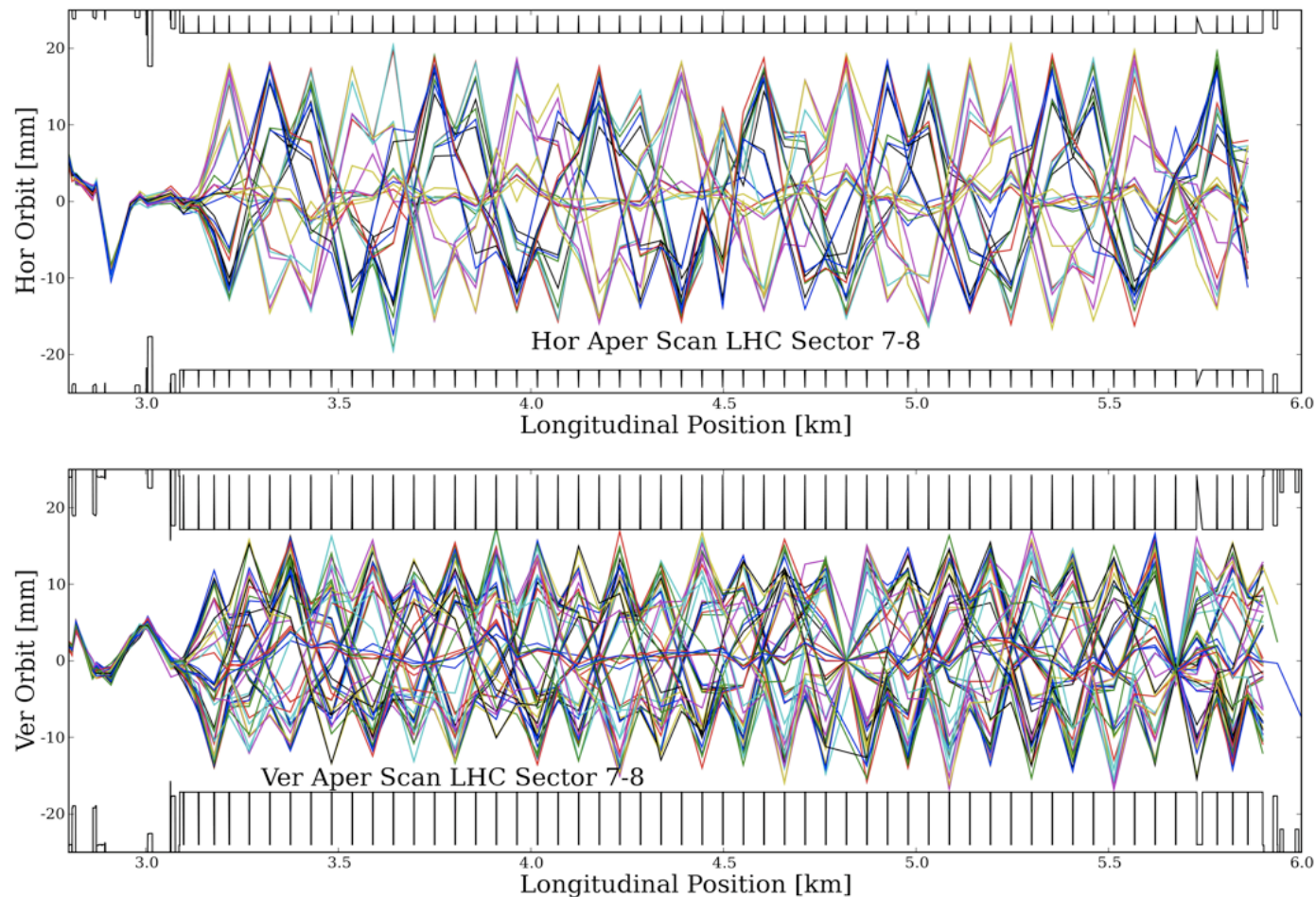
**RF ON & tuned**  
**Beam 2 'captured'**



# Dynamic Aperture

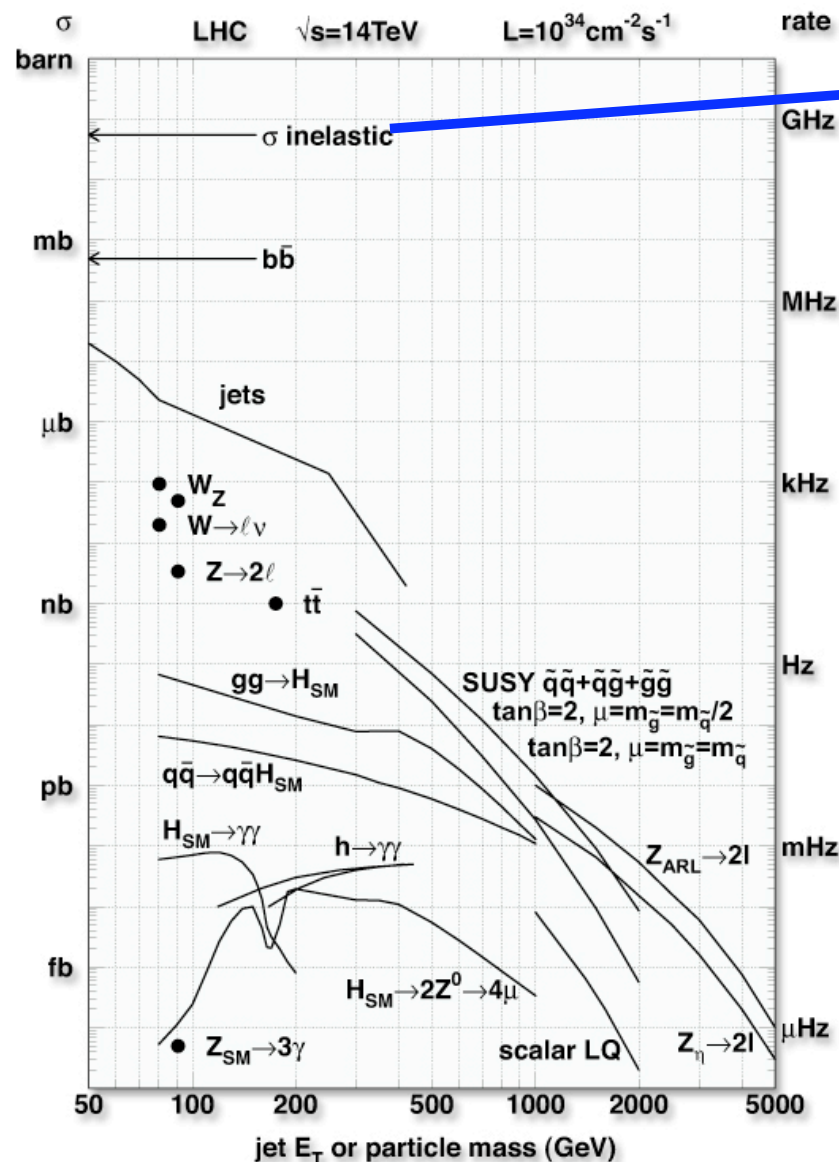
Un grande successo: l'apertura dinamica e' molto buona

Example for sector 78 : l'apertura e' misurata aumentando l'ampiezza delle oscillazioni della traiettoria sino a che si comincia a perdere intensita' di fascio. Nella figura si vede il limite della traiettoria





# Esperimentazione ad LHC



La sezione d'urto totale pp a 14 TeV e'

$$\sigma_{\text{tot}}(\text{pp})=70 \text{ mb}$$

Alla massima luminosita'

$$L=10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} = 10 \text{ nb}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

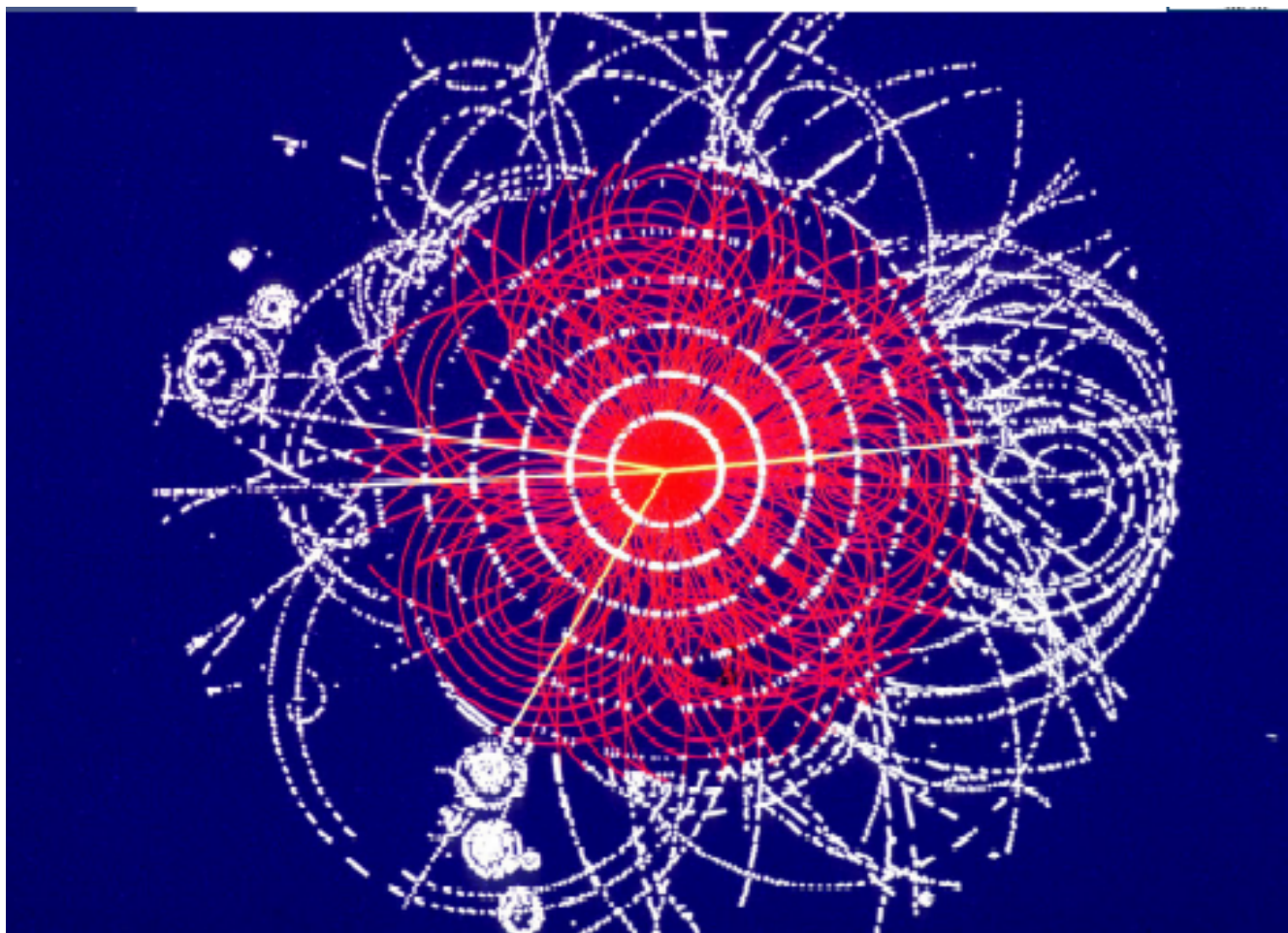
La frequenza di interazione e'

$$R=L \times \sigma_{\text{tot}}(\text{pp}) = 7 \cdot 10^8 \text{ interazioni/s}$$

La gran parte di questi eventi sono “minimum bias”, cioe' collisioni a grande distanza che producono particelle a basso impulso trasverso ai fasci. Ma poiche' la frequenza di collisione dei fasci e' di  $4 \cdot 10^7 \text{ Hz}$  circa 20 eventi di questo tipo si sovrappongono ad ogni bunch crossing.

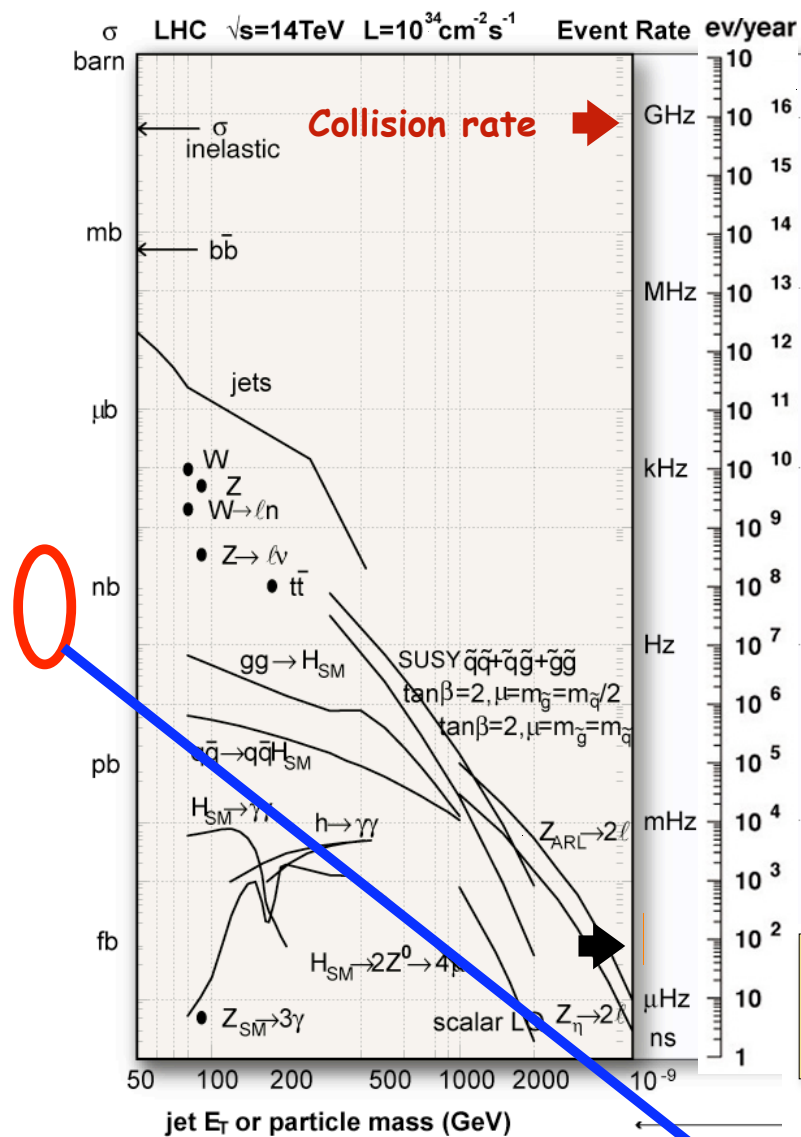
# Evento simulato di produzione del bosone di Higgs

Circa 1000 particelle a basso impulso (piccolo raggio di curvatura) sono prodotte contemporaneamente alle quattro particelle ad alto momento dal decadimento di un bosone di Higgs.



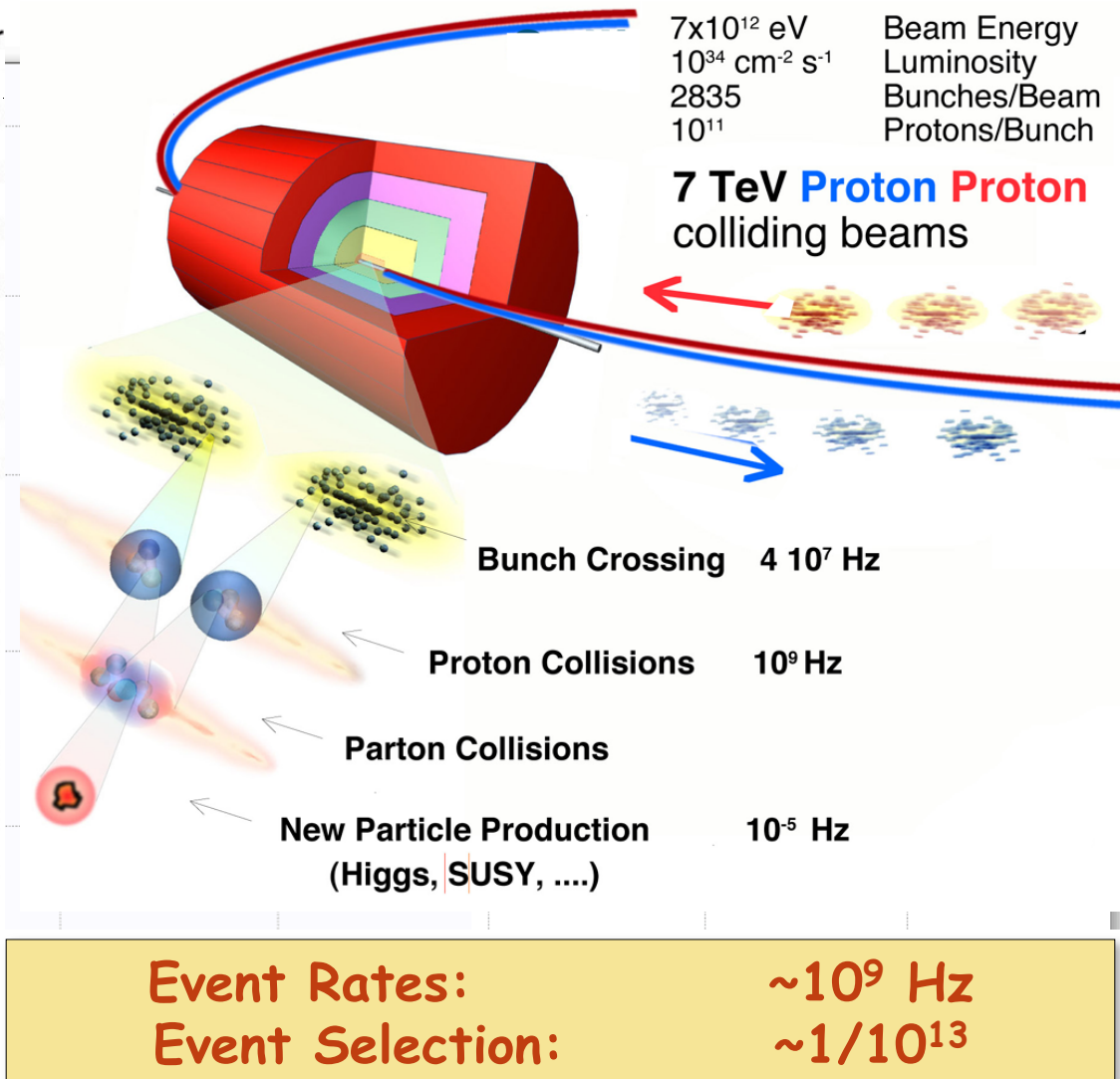
Vista perpendicolare ai fasci le particelle sono curvate dal campo magnetico solenoidale

# Frequenza di eventi e selezione ad LHC



S. Cittolin CMS/PH-CMD

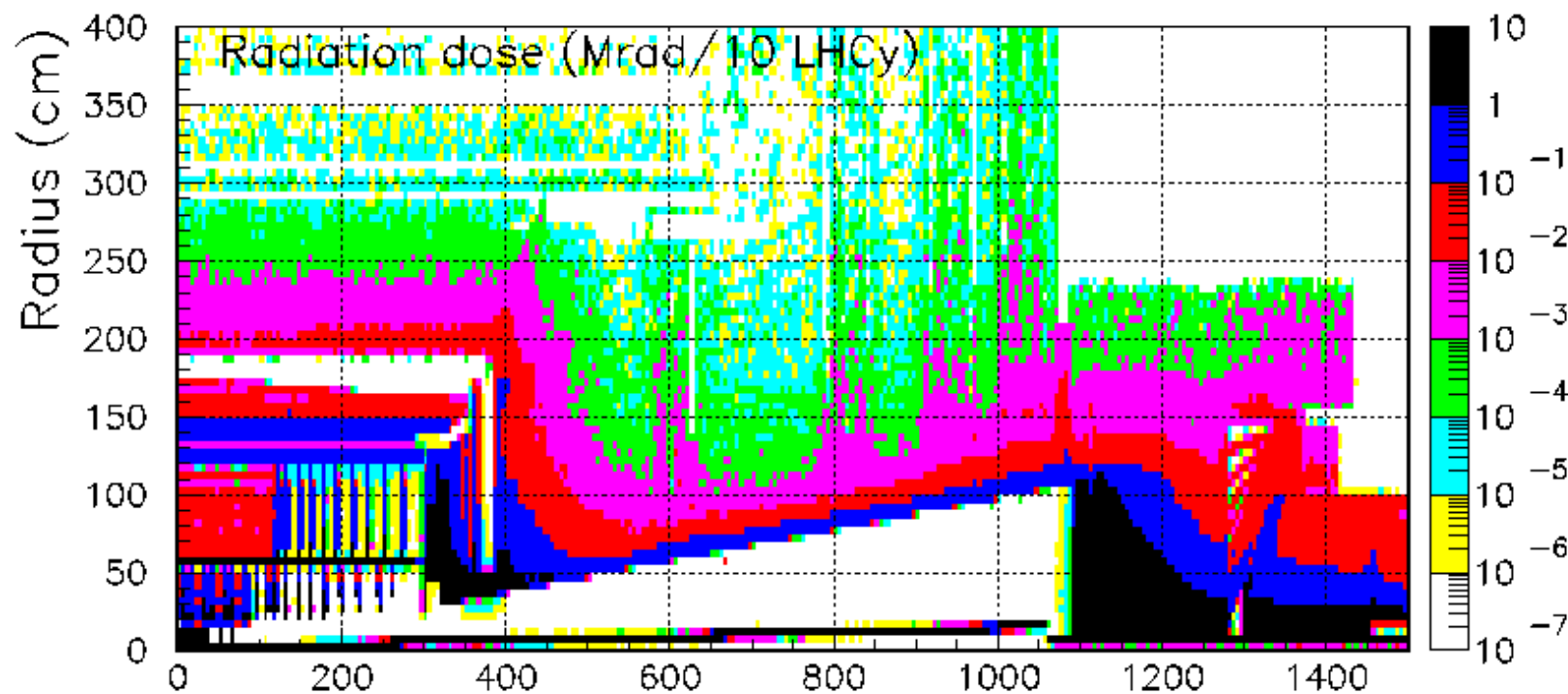
Nuova Fisica





# Danno da radiazione

A causa dell'elevato rate di produzione di particelle la regione di interazione di LHC è estremamente radioattiva e raggiunge in 10 anni di operazione livelli di qualche Megarad. I rivelatori devono essere in grado di funzionare in queste condizioni.



# Caratteristiche generali di un rivelatore ad LHC

- **Altissima granularita'** per ridurre la probabilita' che una particella di pile-up si sovrapponga nello stesso elemento di rivelazione con un oggetto interessante (come un prodotto del decadimento di un bosone di Higgs) Tipicamente occupancy  $\ll 1\%$ .
  - Grande numero di canali di elettronica
- **Risposta in tempo molto veloce** (10-20 ns) per non integrare piu' di un bunch crossing
  - Elettronica estremamente performante
- **Grandi dimensioni** per misurare con precisione la curvatura in campo magnetico (impulso) di particelle di impulso sino a qualche TeV
  - ed anche alto campo magnetico e elevata risoluzione
- **Rivelatori radiation resistant** vicino alla zona di interazione capaci di funzionamento in condizioni di radiazione estrema

# Rivelatore di LHC

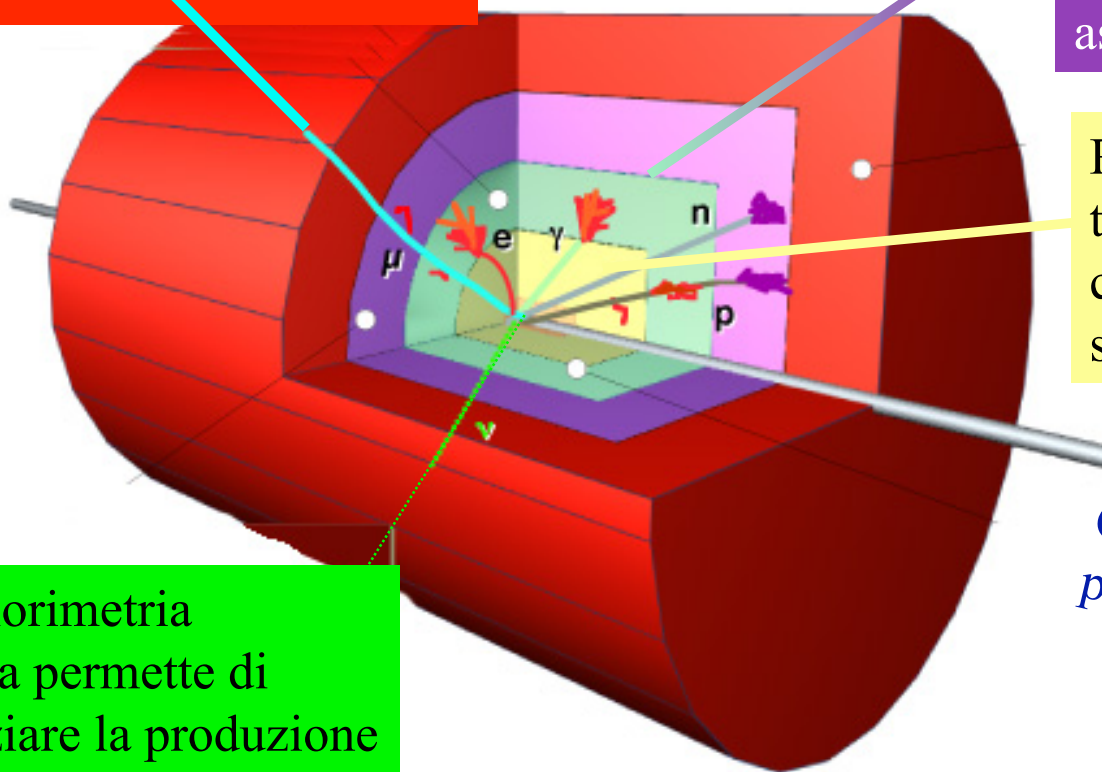
I muoni sono identificati per tracciatura dopo aver attraversato i calorimetri ed il traferro del magnete

I calorimetri, rivelatori di materiale ad alta densita' e segmentati, misurano tutte le particelle che vengono assorbite

Rivelatori a bassa densita' per tracciare le particelle cariche che idealmente interagiscono solo per ionizzazione

Una calorimetria ermetica permette di evidenziare la produzione di neutrini come energia trasversa mancante

Campo magnetico per curvare particelle cariche



Tipicamente decine di milioni di canali di elettronica



# Gli esperimenti dell' LHC

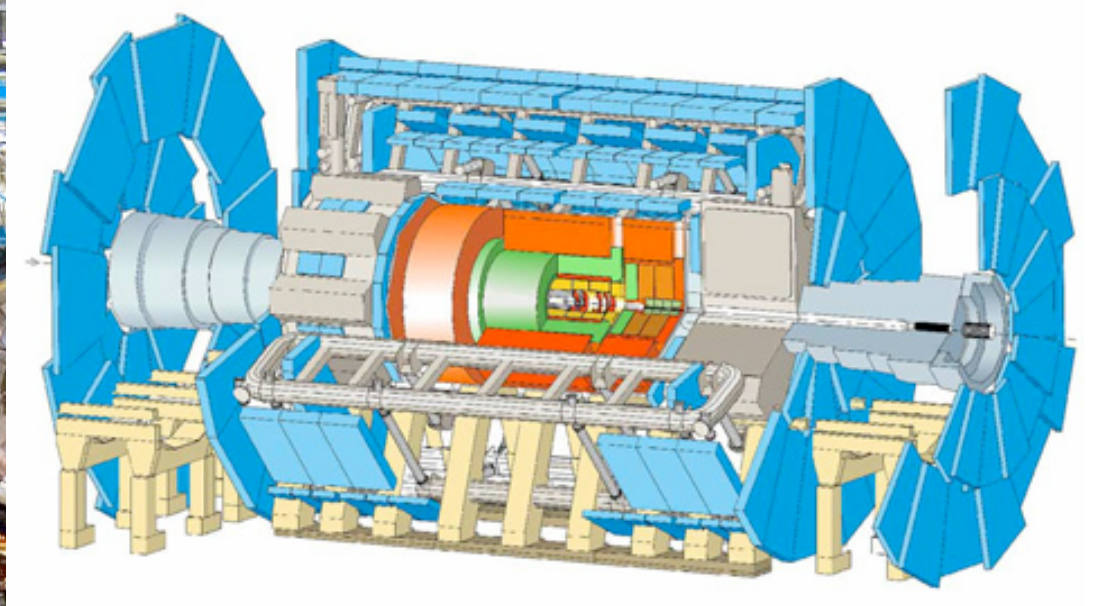
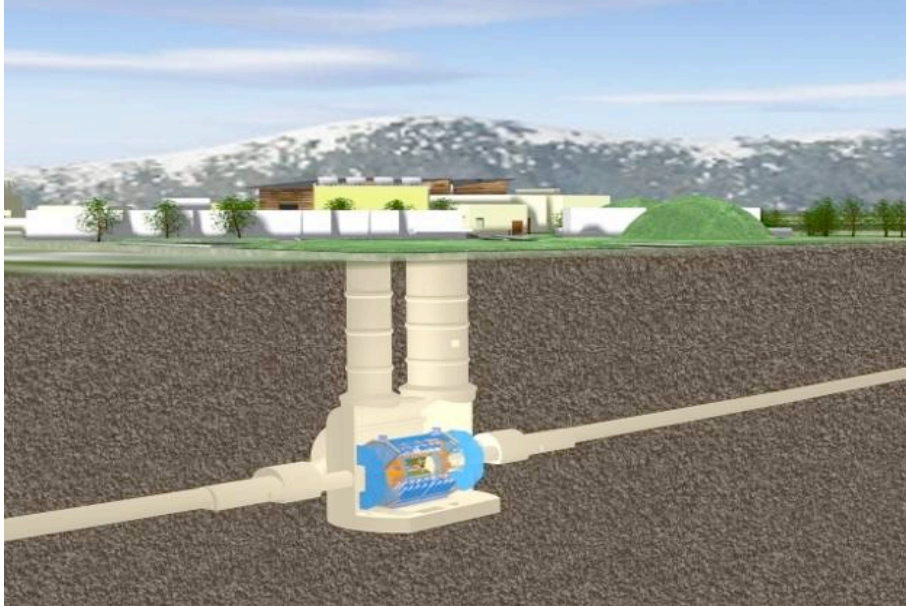
Due esperimenti giganteschi **ATLAS** (A Toroidal LHC ApparatuS) e **CMS** (Compact Muon Solenoid) basati su rivelatori “general-purpose” disegnati per investigare tutti i possibili fenomeni prodotti nelle collisioni di LHC con enfasi sulla ricerca di nuova fisica. Due esperimenti sono necessari per una verifica incrociata dei risultati.

Due esperimenti di dimensione media **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) e **LHCb** (Large Hadron Collider beauty) con dei rivelatori disegnati per analizzare le collisioni di LHC in relazione a fenomeni specifici.

Due piccoli esperimenti **TOTEM** (TOTAl Elastic and diffractive cross section Measurement) and **LHCf** (Large Hadron Collider forward) che studiano solo le particelle prodotte “in avanti” e sono installati in simbiosi con CMS ed ATLAS rispettivamente



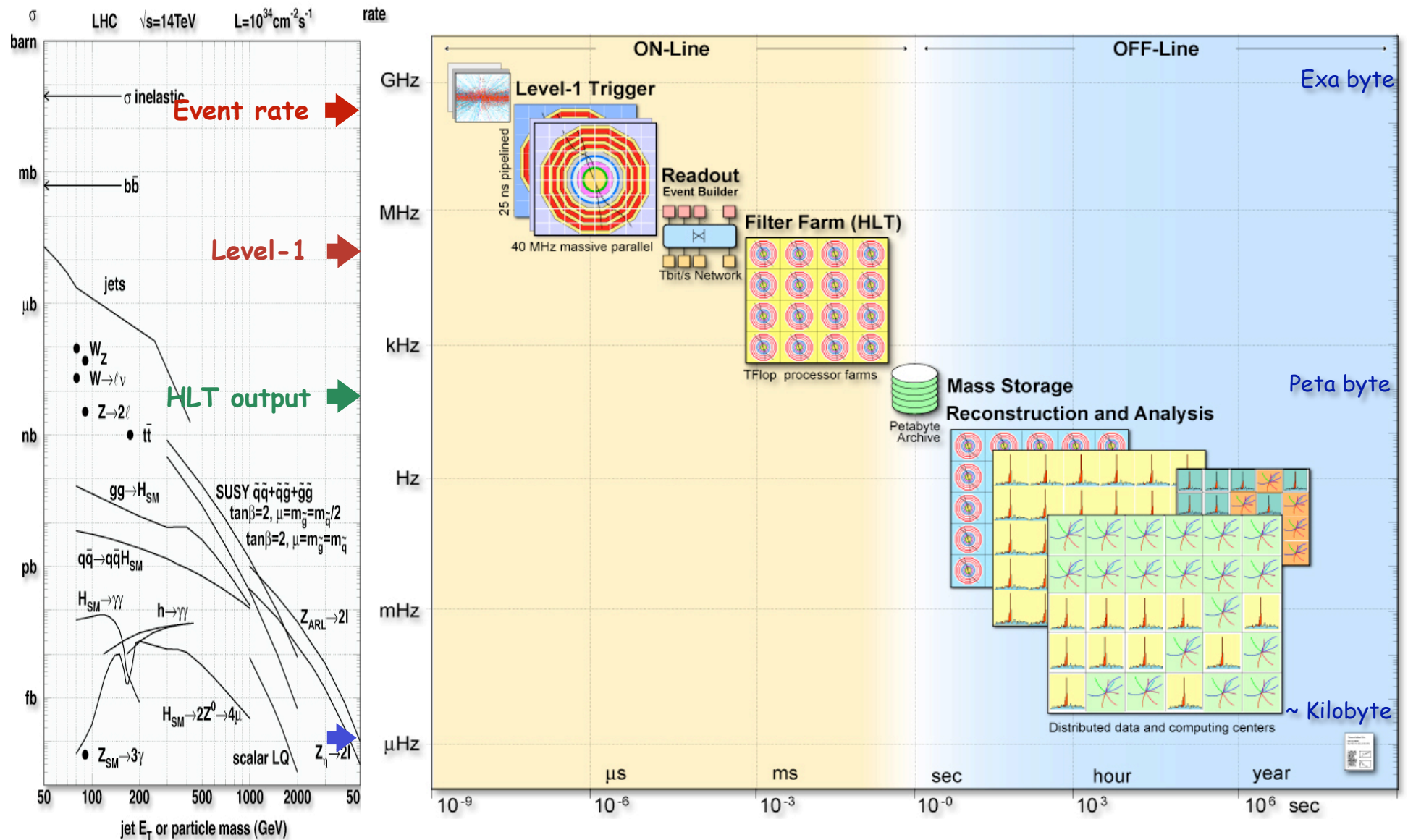
# ATLAS BARREL TOROIDAL SYSTEM



45 metri di lunghezza, 25 metri di diametro e' il piu' grande rivelatore di particelle mai costruito. Ci lavorano circa 2000 scienziati di piu' di 150 istituti.

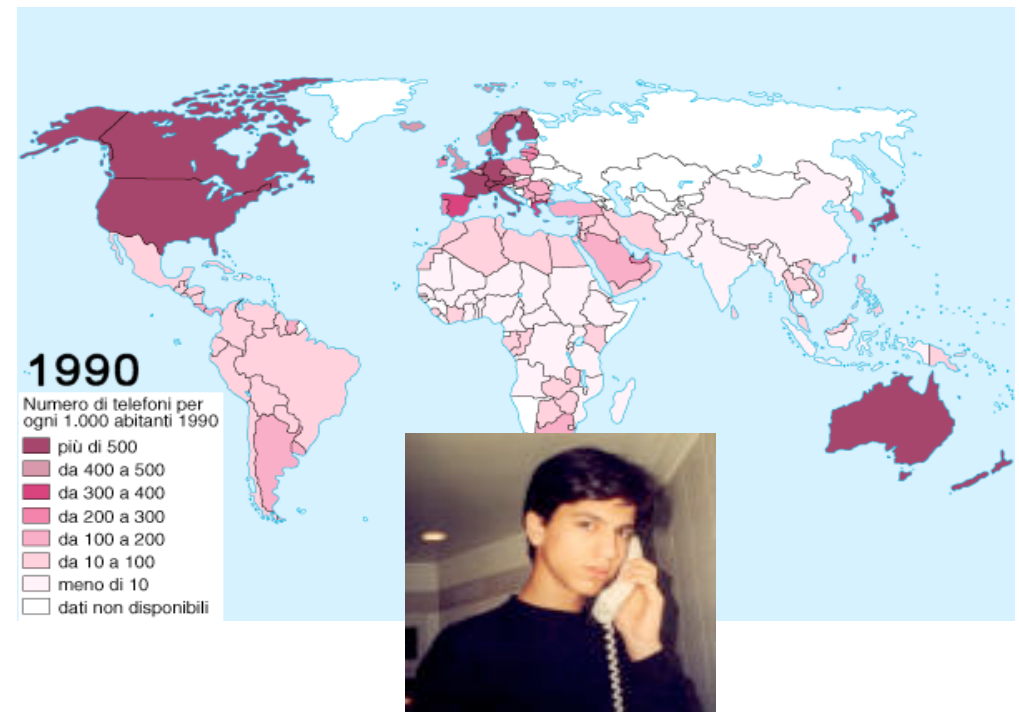
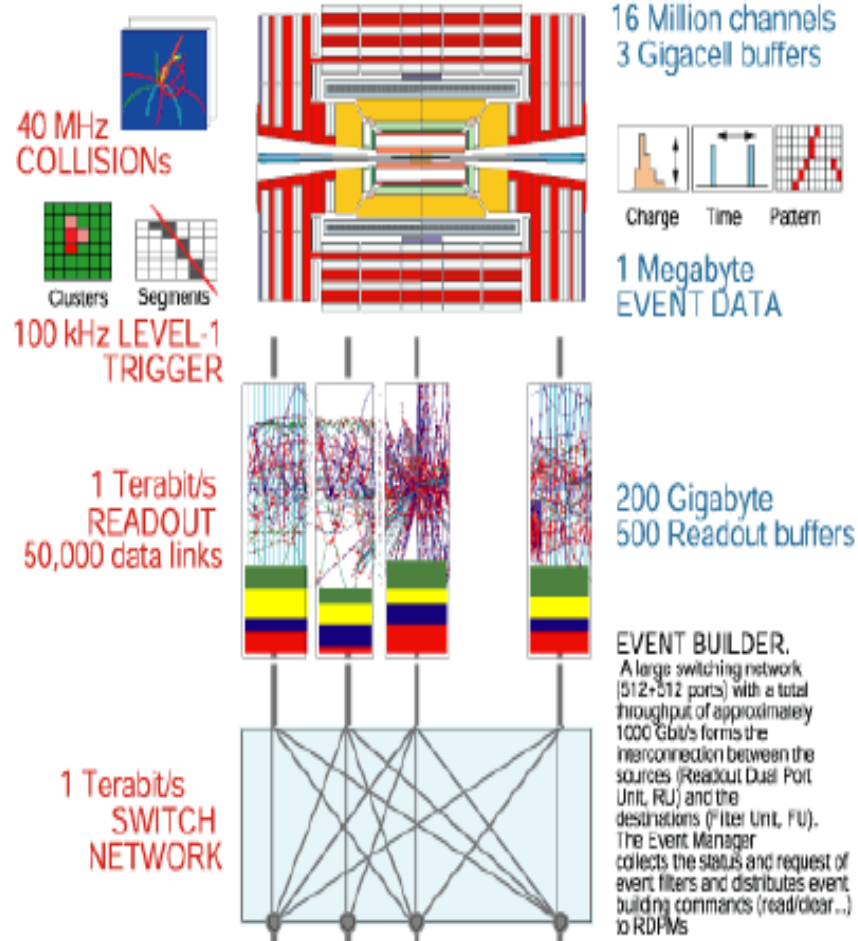


# ACQUISIZIONE DATI



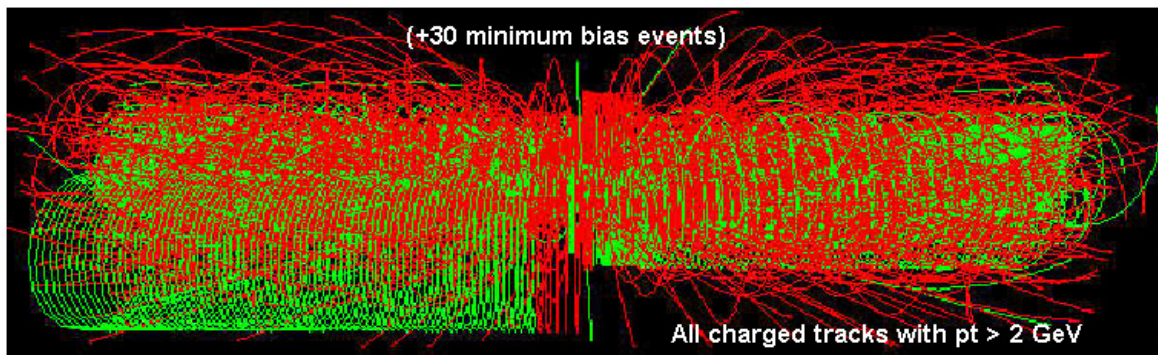


# Il flusso di dati generato da CMS ( ~ 500 Gigabit/sec) e' equivalente a tutto il traffico mondiale istantaneo di telefonia

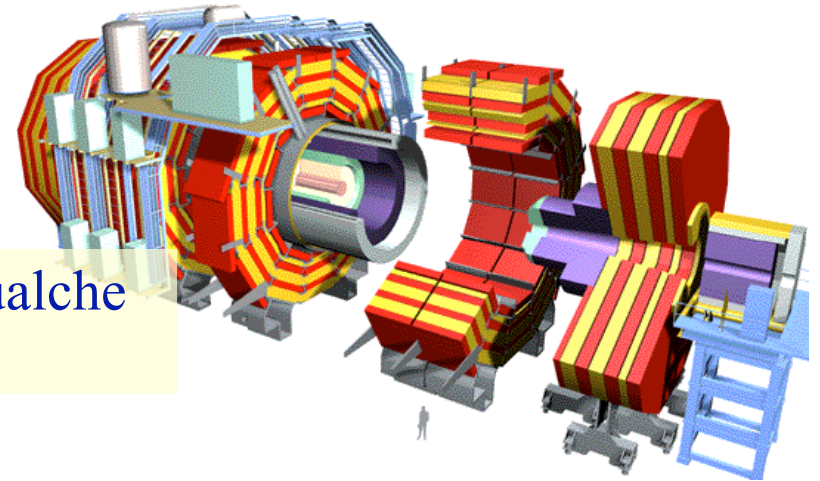


# LHC DATA

Sono selezionati da computer online che filtrano qualche centinaio di eventi per secondo



Che sono scritti su disco o nastro a 100-1,000 MegaBytes/sec  
→ ~16 PetaBytes per anno per i quattro esperimenti



# WLCG Collaboration

Una imponente infrastruttura di calcolo distribuita su tutto il pianeta e' stata messa in opera per analizzare questa immensa mole di dati

- 4 LHC experiments
- ~140 computing centres
- 12 large centres  
(Tier-0, Tier-1)
- 38 *federations* of smaller  
“Tier-2” centres
- Growing to ~40 countries





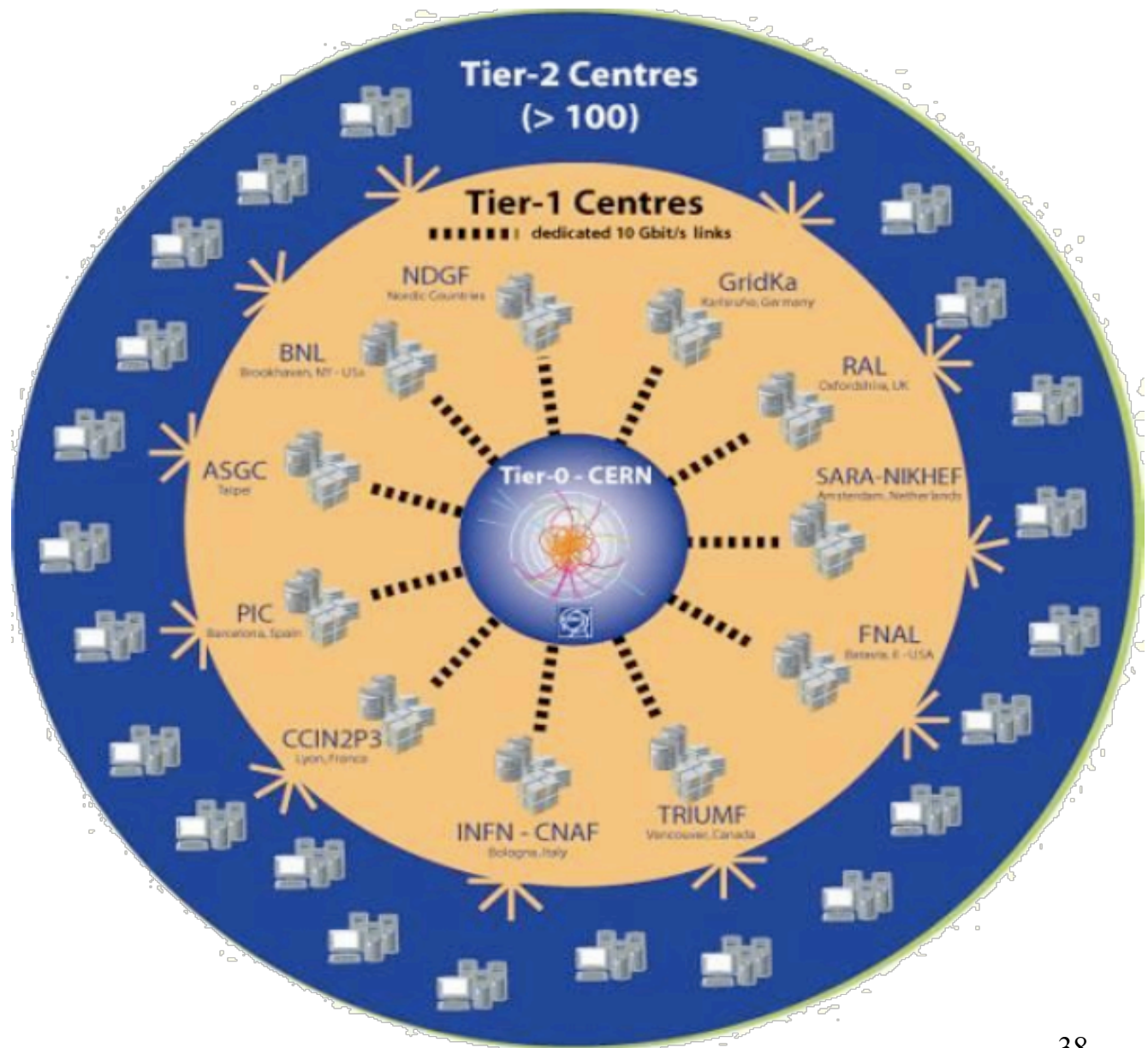
## II Network di LHC

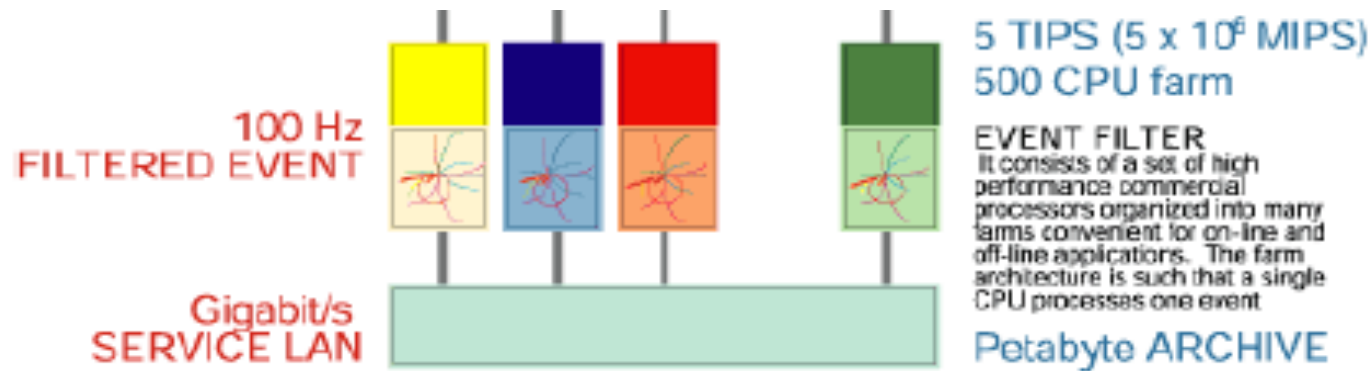
### T0 - T1:

- dedicated 10 Gbit/s optical network

### Tier-2s and Tier-1s:

- inter-connected by the general purpose research networks
- any Tier-2 center needs to access data at any Tier-1





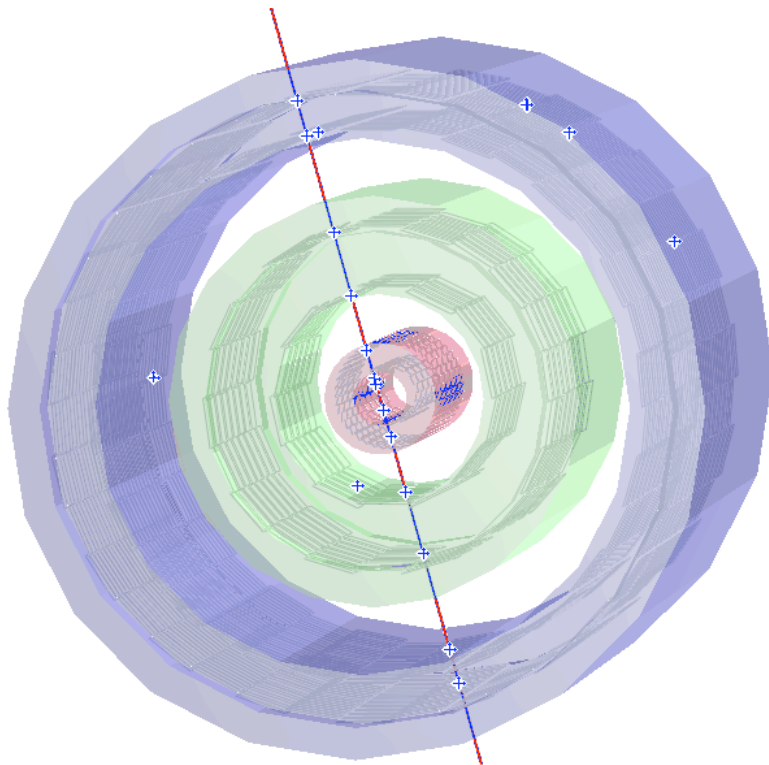
**Durante un secondo di presa dati a CMS viene registrata una quantita' di dati pari a 10.000 Enciclopedie**

*L' archivio dati di CMS corrispondera' a circa 10.000.000 di CD*

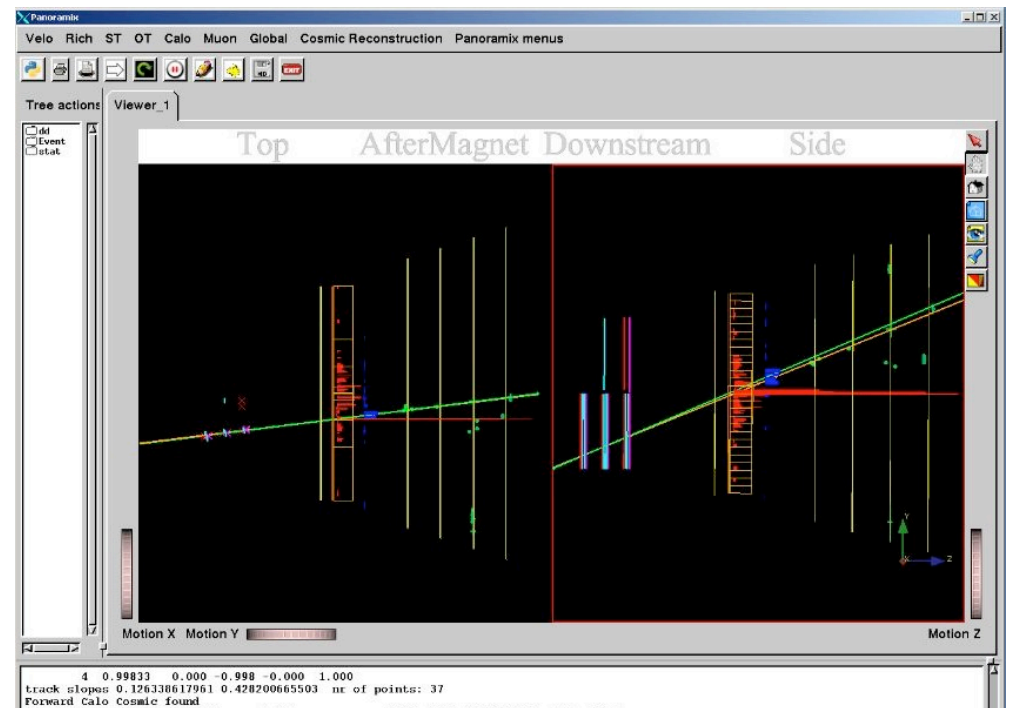


# Gli esperimenti LHC sono in fase operativa

I quattro esperimenti sono da tempo in fase operativa. Hanno raccolto dati di raggi cosmici per verificare il funzionamento dei rivelatori e per effettuare alcune prime calibrazioni. Hanno raccolto dati durante i pochi giorni di funzionamento di LHC.



Raggio cosmico in ALICE



Raggio cosmico in LHCb

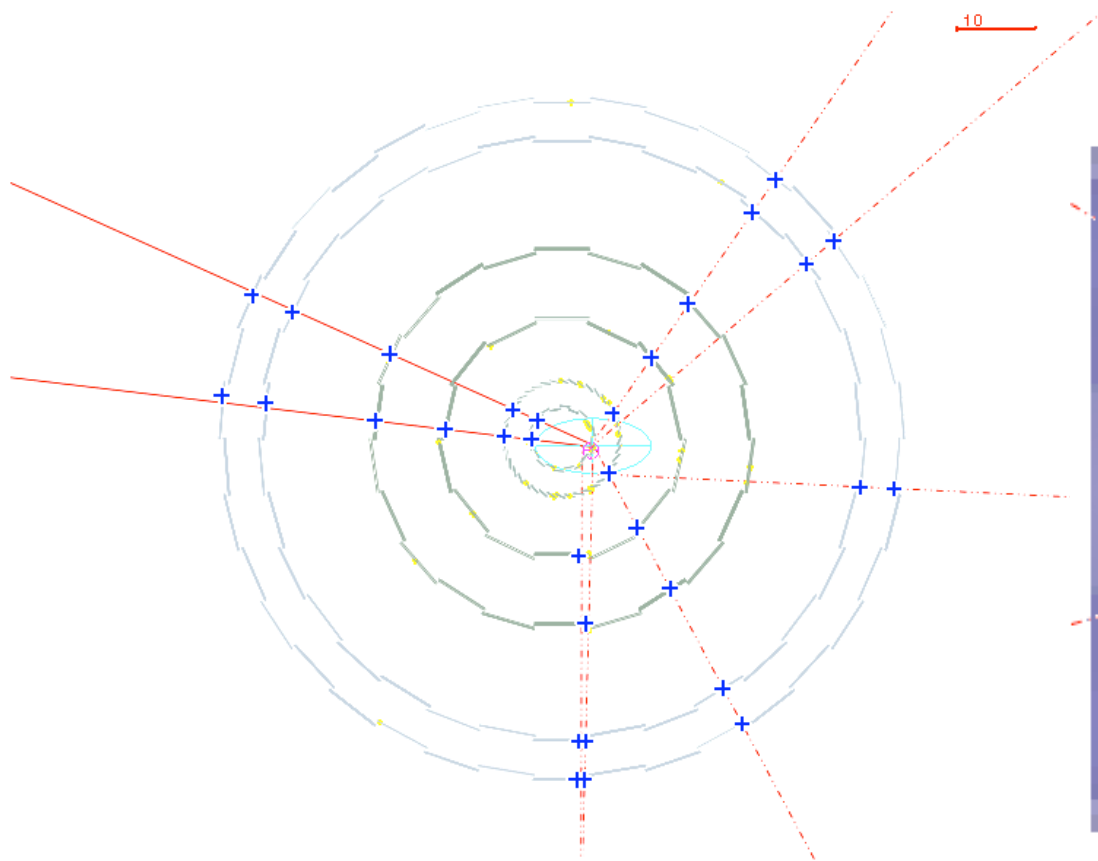


# Formal end of installation of ALICE

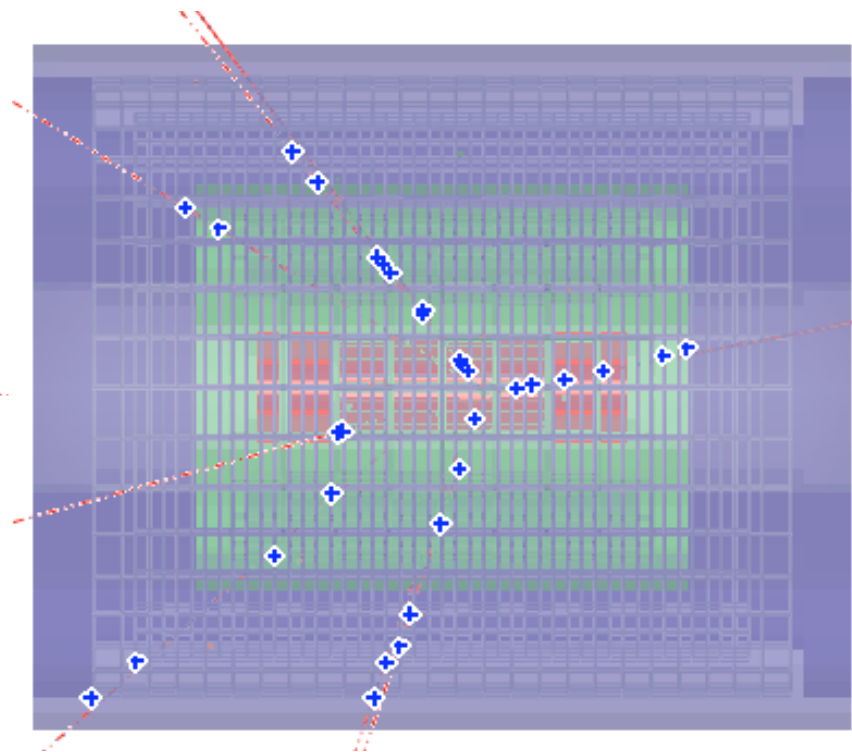




# Prima interazione in ALICE



ITS tracks on 12.9.2008  
7 reconstructed tracks, common vertex



Circulating beam 2:  
stray particle causing an  
interaction in the ITS

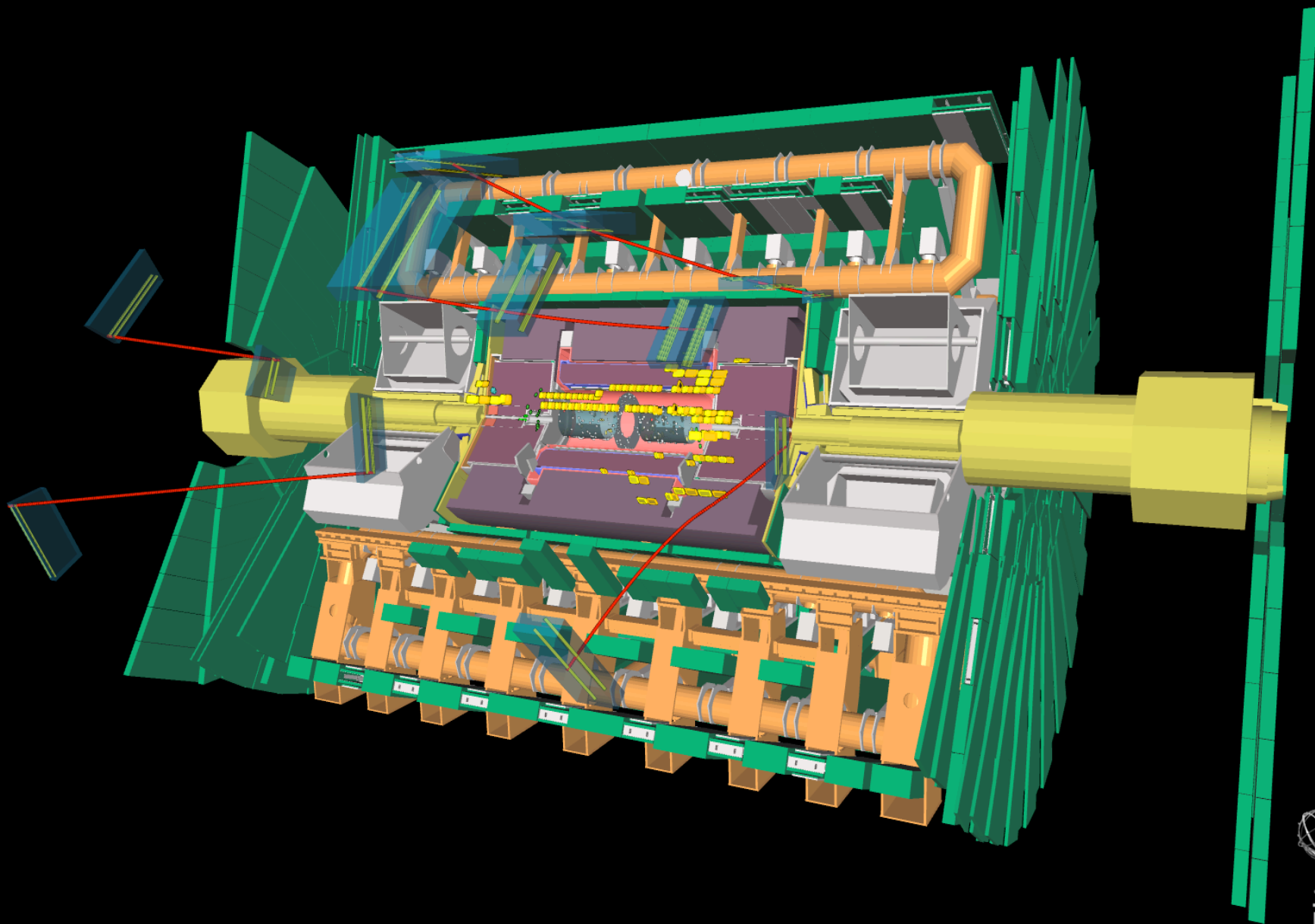


# Installazione dell' ultimo elemento di ATLAS



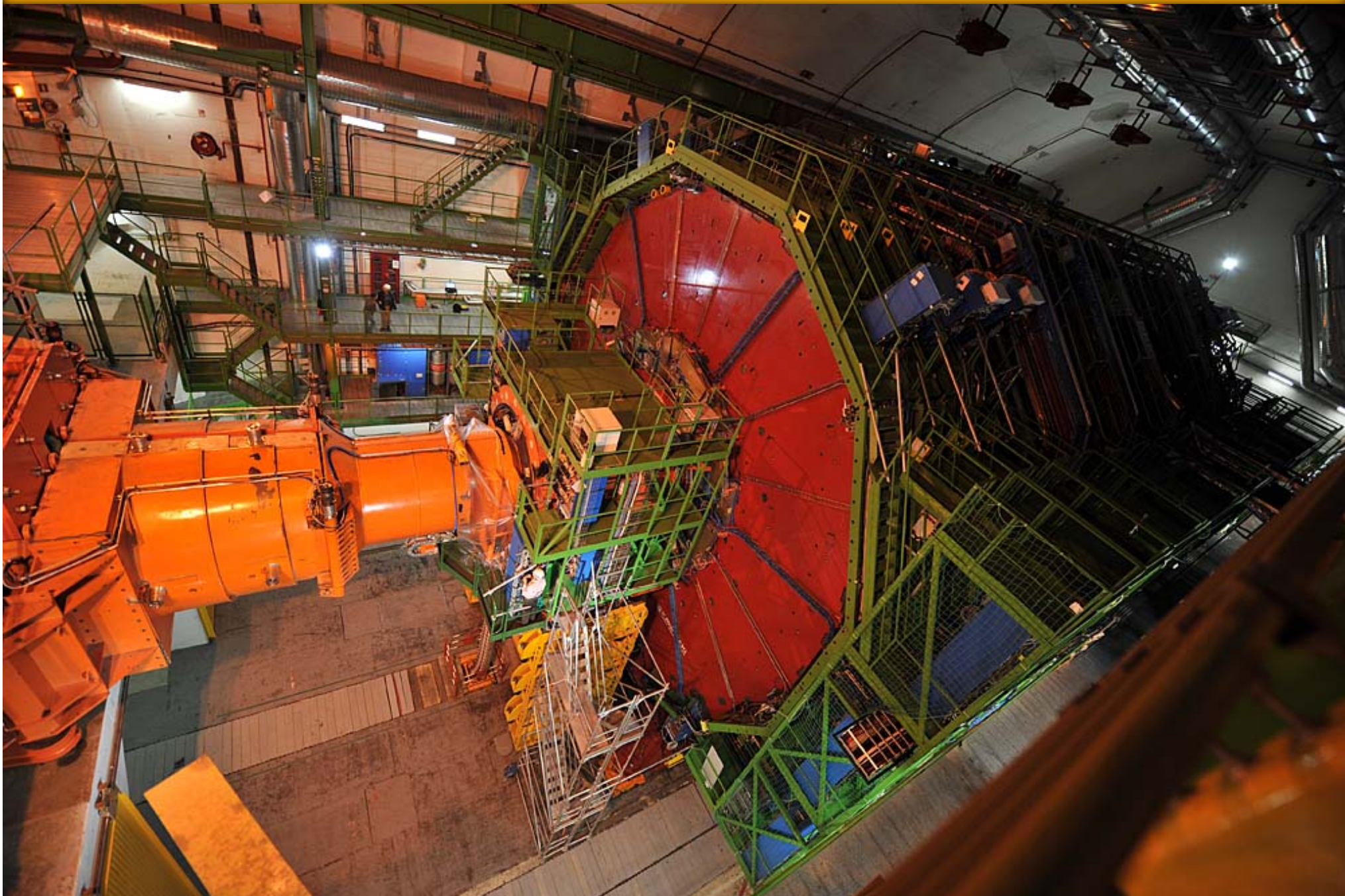


# BEAM HALO EVENT in ATLAS

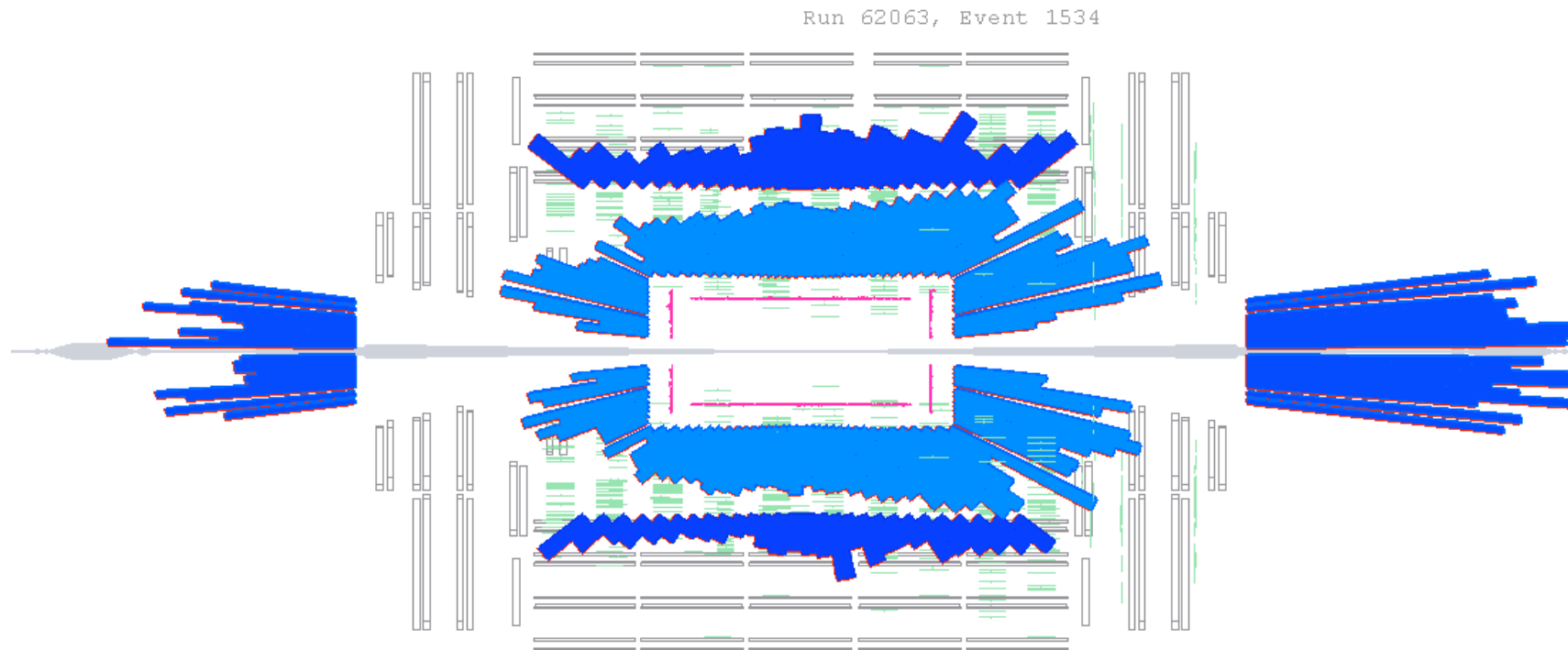




# CMS CHIUSO E PRONTO PER IL FASCIO



# BEAM SPLASH IN CMS



Circa un milione di muoni con  $\langle E \rangle 30$  GeV attraversano l'apparato contemporaneamente da destra verso sinistra. L'istogramma mostra la carica misurata dalle celle dei calorimetri. Una frazione importante dei muoni è fermata dalle 12000 T di ferro del rivelatore.



COSA SCOPRIRA' LHC

?

Evolved Thinker





# The Higgs Particle

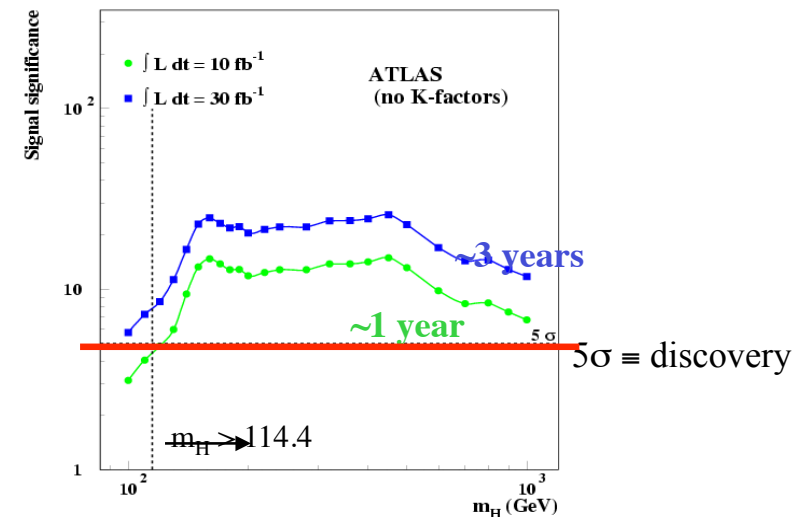
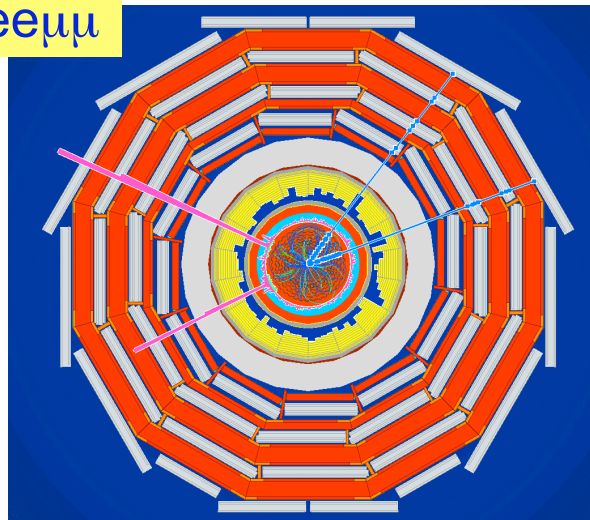
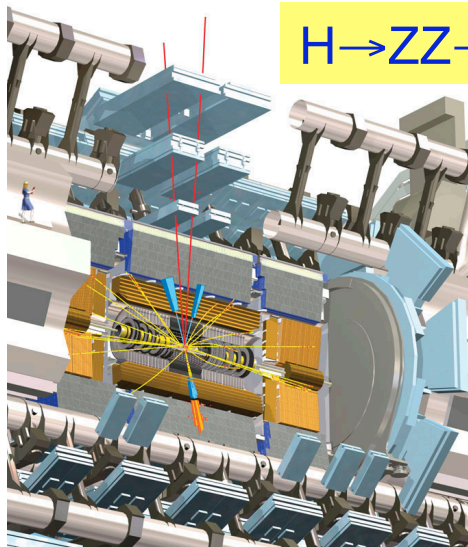
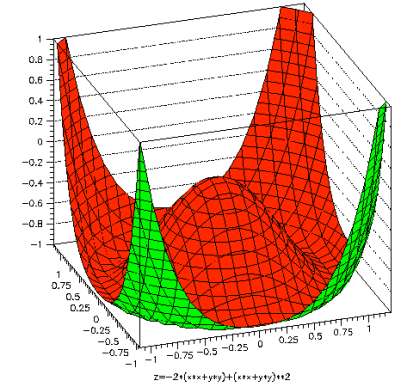
⇒ What is the origin of mass of the elementary particles?

Solution within the Standard Model: A scalar Higgs field

⇒ At least one new scalar particle should exist: The Higgs

The Higgs is the last missing particle in the Standard Model

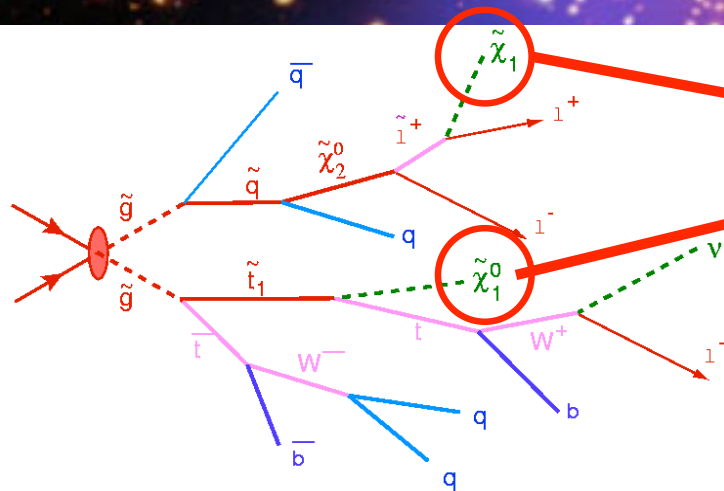
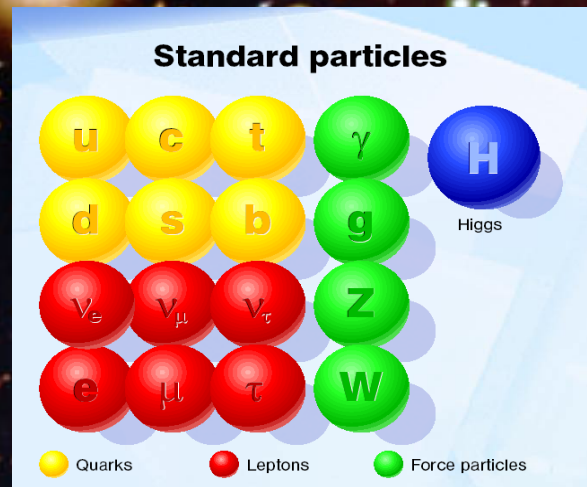
One of the main missions of LHC: discover the Higgs



- If the Higgs exist: LHC will discover it after 2-3 years of operation
- If the Higgs does not exist: LHC should see spectacular new effects

# Beyond the Higgs Particle

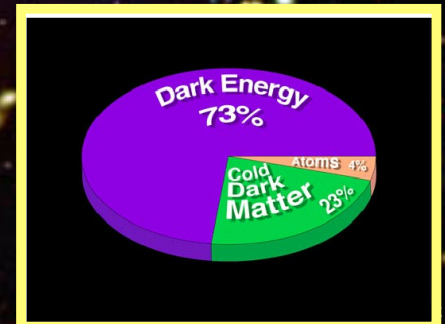
## Supersymmetry: a new symmetry in Nature



Candidate particles for Dark Matter  
 $\Rightarrow$  Produce Dark Matter in the lab

**SUSY particle production at the LHC**

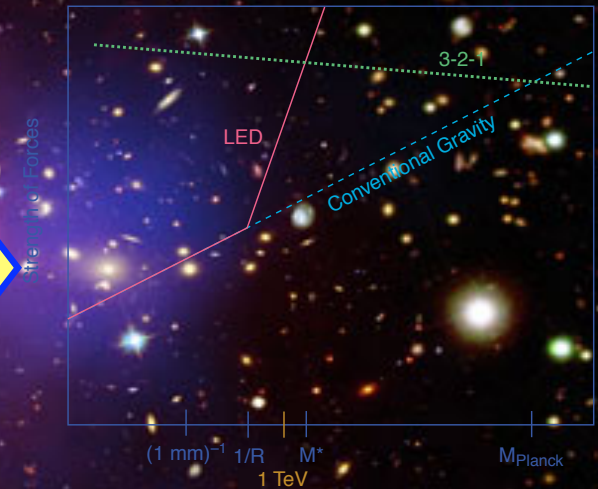
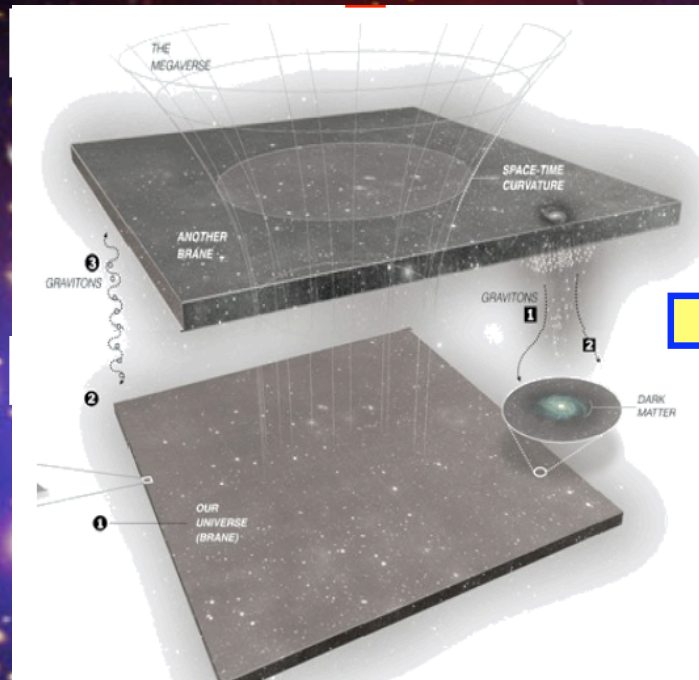
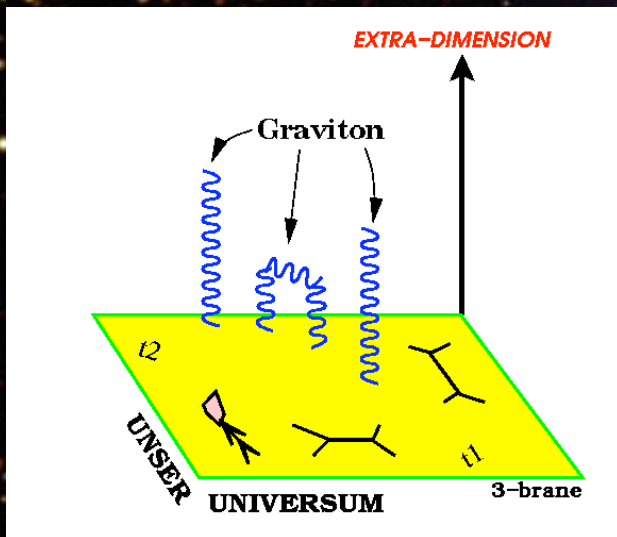
+ 2 b-jets  
 + 4 jets  
 - miss





# Beyond the Higgs Particle

## Extra Space Dimensions

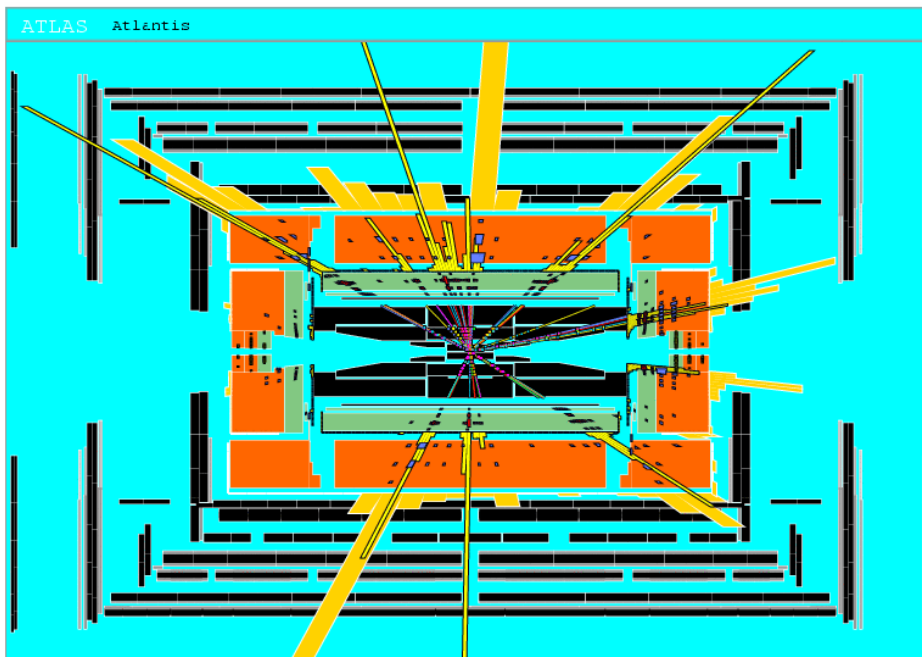
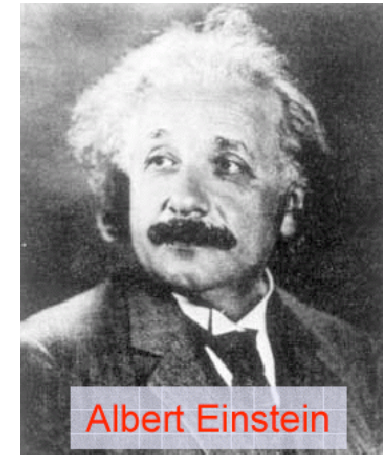


The Gravity force becomes strong!

# Buchi Neri Quantistici allo LHC ?

Black Holes are a direct prediction of Einstein's general theory on relativity

If the Planck scale is in  $\sim \text{TeV}$  region:  
can expect Quantum Black Hole production

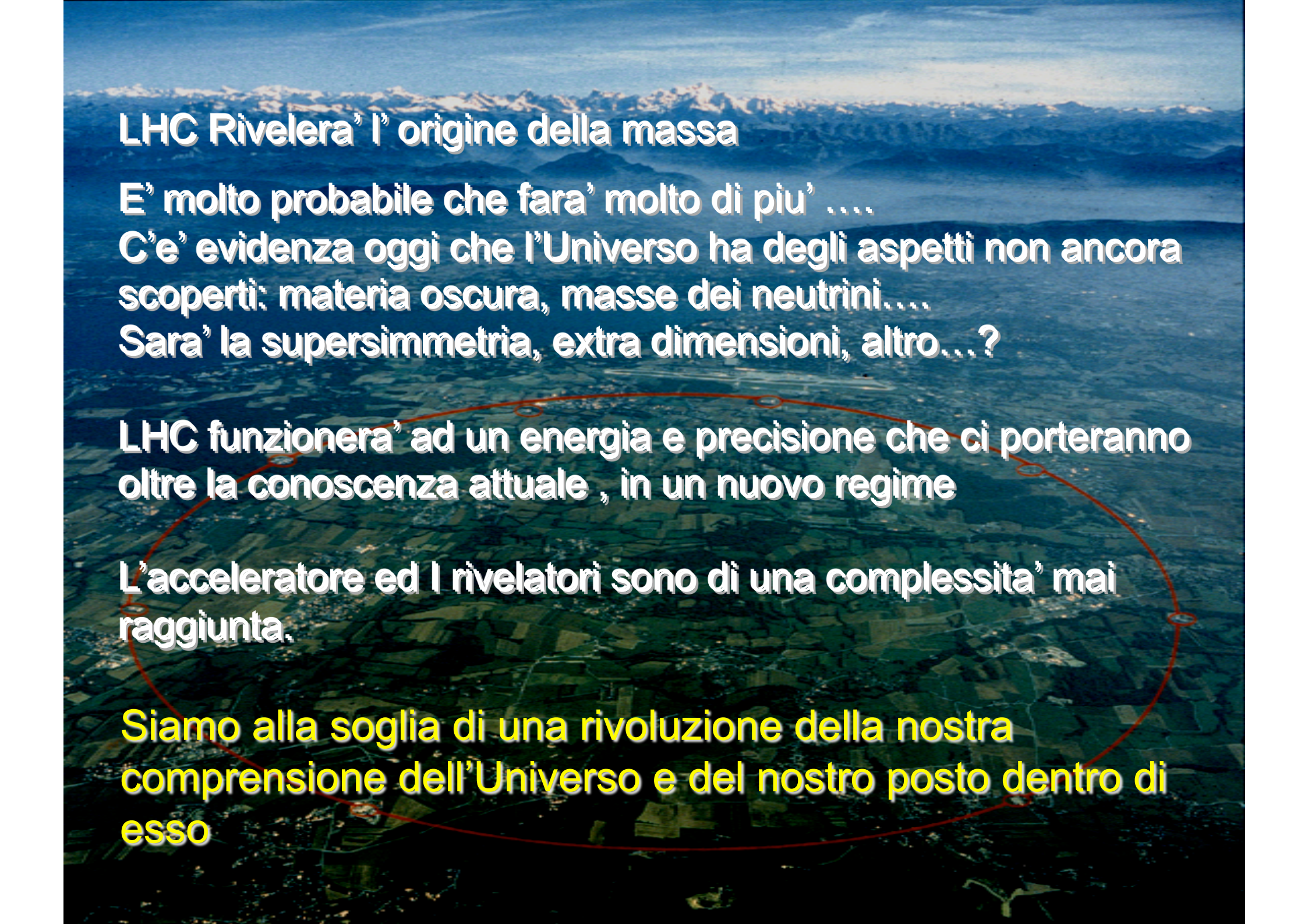


Simulation of a Quantum Black Hole event

Quantum Black Holes are harmless for the environment: they will decay within less than  $10^{-27}$  seconds

Quantum Black Holes open the exciting perspective to study Quantum Gravity in the lab!





LHC Rivelera l'origine della massa

E' molto probabile che fara' molto di piu' ....

C'e' evidenza oggi che l'Universo ha degli aspetti non ancora scoperti: materia oscura, masse dei neutrini....

Sara' la supersimmetria, extra dimensioni, altro...?

LHC funzionera' ad un'energia e precisione che ci porteranno oltre la conoscenza attuale, in un nuovo regime

L'acceleratore ed i rivelatori sono di una complessita' mai raggiunta.

Siamo alla soglia di una rivoluzione della nostra comprensione dell'Universo e del nostro posto dentro di esso



# A cosa serve tutto questo.....

A soddisfare una delle piu' nobili esigenze dell'uomo: la sete di conoscenza. La ricerca fondamentale e' la chiave per convertire la curiosita' scientifica in conoscenza e progresso.

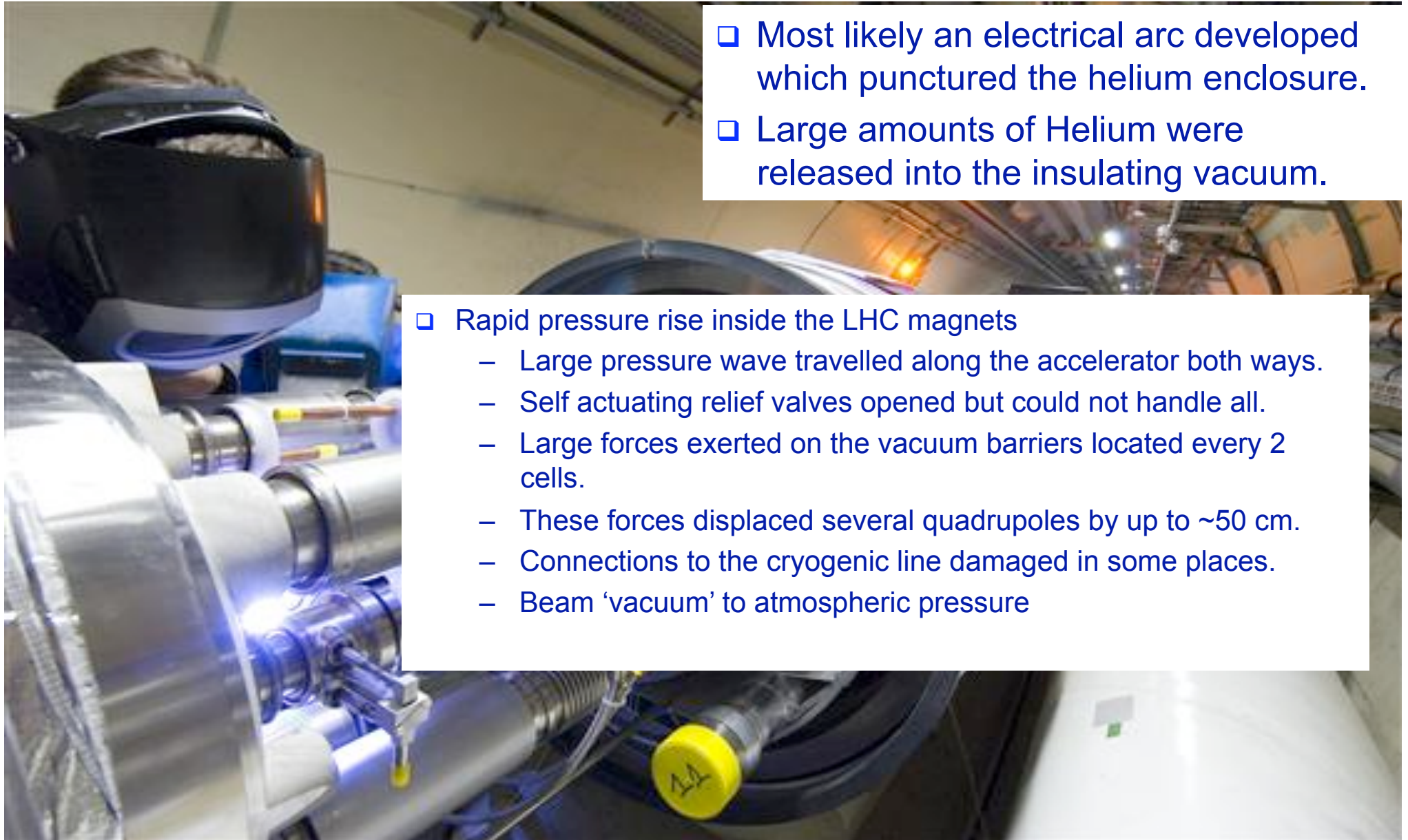




## 12 Unresolved Fundamental Questions in HEP

- How do the Z and W acquire mass and not the photon?
- What is  $M_H$  and how do we measure it?
- Why are there 3 and only 3 light “generations”?
- What explains the pattern of quark and lepton masses and mixing?
- Why are the known mass scales so different?  $\Lambda_{\text{QCD}} \sim 0.2 \text{ GeV} \ll \text{EW vev} \sim 246 \text{ GeV} \ll M_{\text{GUT}} \sim 10^{16} \text{ GeV} \ll M_{\text{PL}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$
- Why is charge quantized?
- Why do neutrinos have such small masses
- Why is matter (protons)  $\sim$  stable?
- Why is the Universe made of matter?
- What is “dark matter” made of?
- Why is the cosmological constant small?
- How does gravity fit in with the strong, electromagnetic and weak forces?

# Inter-connection

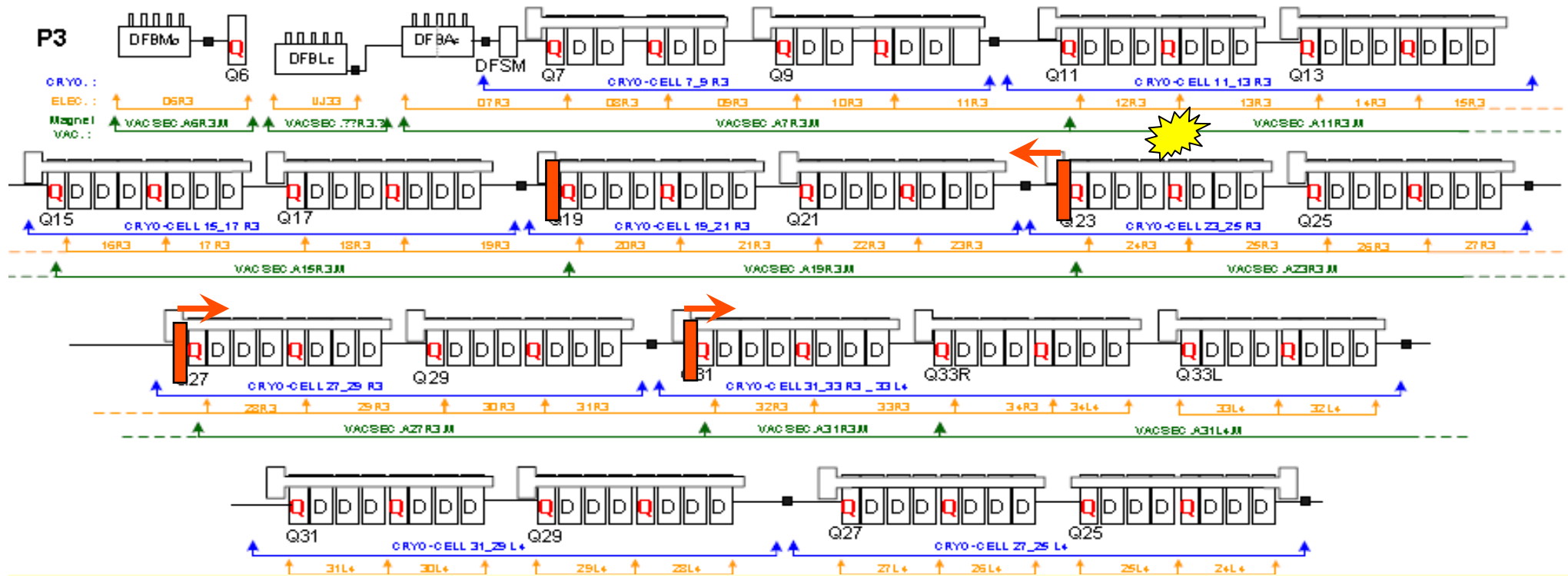


- ❑ Most likely an electrical arc developed which punctured the helium enclosure.
- ❑ Large amounts of Helium were released into the insulating vacuum.

- ❑ Rapid pressure rise inside the LHC magnets
  - Large pressure wave travelled along the accelerator both ways.
  - Self actuating relief valves opened but could not handle all.
  - Large forces exerted on the vacuum barriers located every 2 cells.
  - These forces displaced several quadrupoles by up to ~50 cm.
  - Connections to the cryogenic line damaged in some places.
  - Beam 'vacuum' to atmospheric pressure



# Damage zone

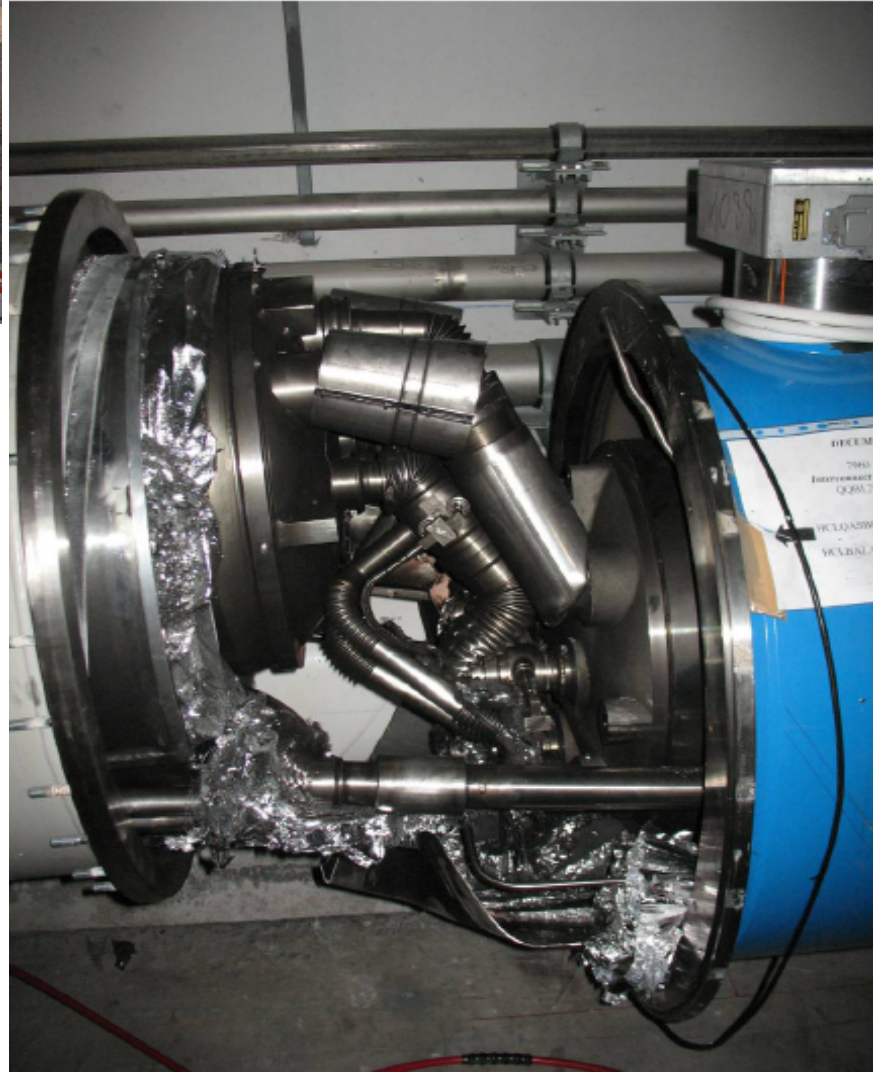


**Insulating vacuum barrier every 2 cells in the arc → Some moved**

- Considerable collateral damage over few hundred metres
- Contamination by soot and debris (magnetic !) of vacuum chambers – extends beyond mechanical damage zone.
- Damage to super-insulation blankets
- Large release of cold helium into the tunnel (6 of 15 tons)

# Collateral damage

S. Myers AB depart. meeting





# WLCG Service Hierarchy

## Tier-0 – the accelerator centre/CERN

- Data acquisition & initial processing
- Archive one copy of the data
- Distribution of data → Tier-1 centres



## Tier-1: 11 computer centers

- Archive second copy of the data
- Re-processing
- Data-intensive Batch analysis
- National, regional support

## Tier-2 : ~140 centres in ~40 countries

- End-user Analysis, batch and interactive
- Monte Carlo Simulation



# LHCb experiment ready to take data

