

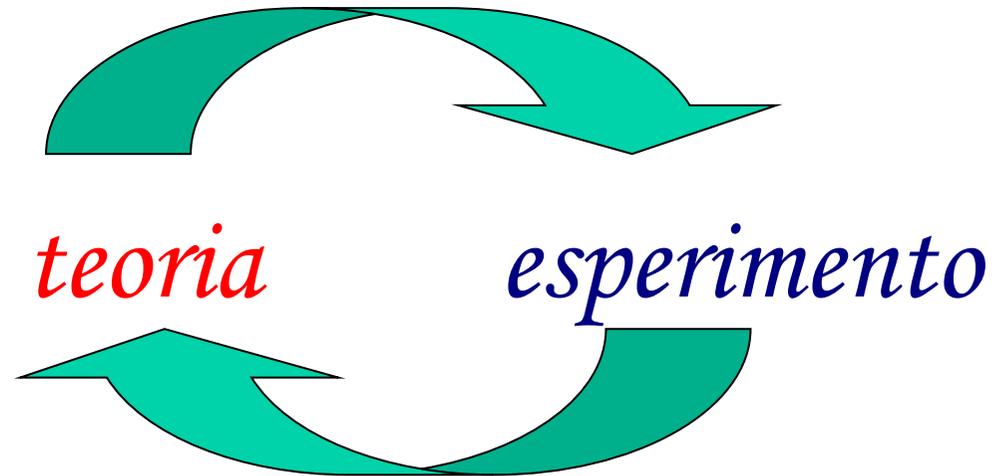
Galileo Galilei (1564-1642)

“Il gran libro della natura è scritto  
in caratteri matematici”

“Sensate esperienze”

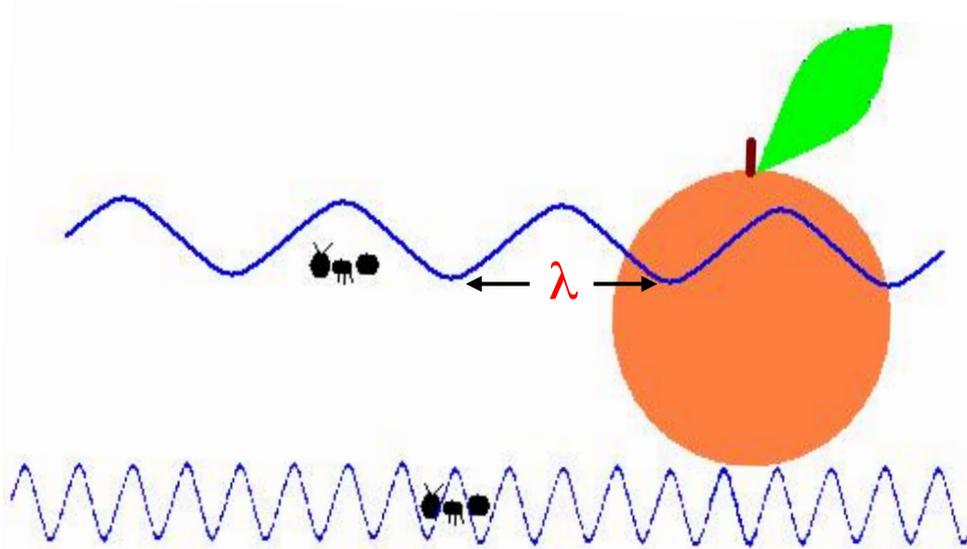


“Certe dimostrazioni”



Come facciamo a “vedere” il bosone di Higgs?

# Per guardare "dentro" la materia ci occorre una sonda adeguata

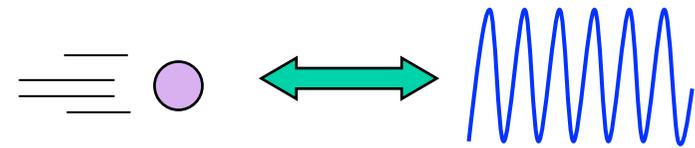
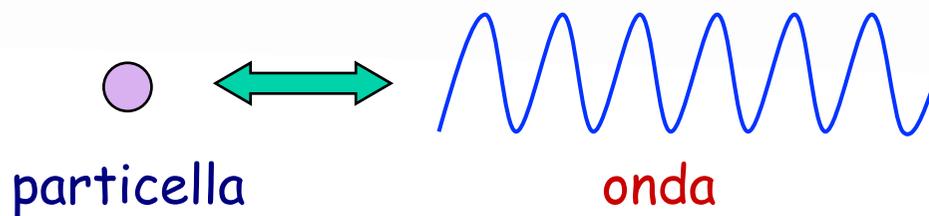


**Problema:** la lunghezza d'onda della luce visibile è troppo grande per il mondo nucleare e subnucleare

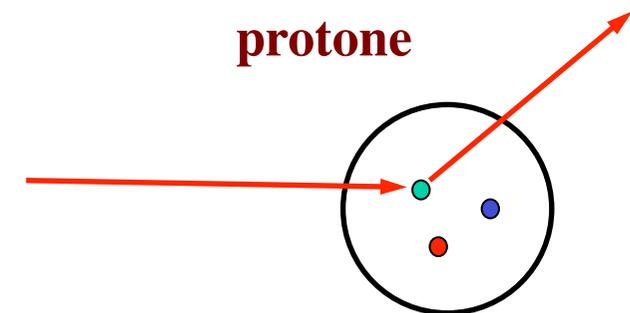
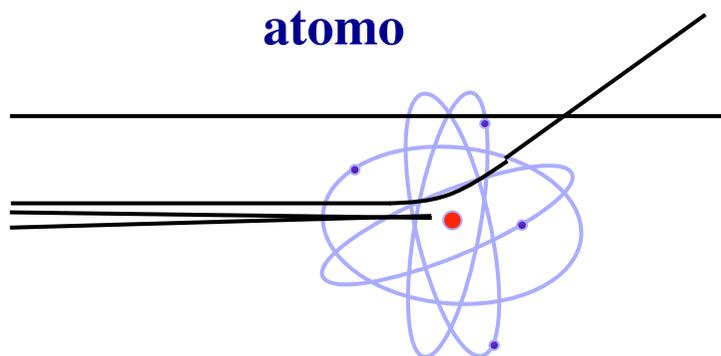
*Con la luce visibile, in una lunghezza d'onda stanno 50000 atomi*

**Soluzione:** per la fisica moderna, una particella è anche un'onda

$\lambda = h/p$  e più grande è l'energia (impulso) più piccola è  $\lambda$



**Con particelle di alta energia possiamo sondare la struttura dell'atomo o del protone**



Questo è un primo motivo per accelerare le particelle. Inoltre...

$$E=mc^2$$

massa ↔ energia



Unità di misura per l'energia e la massa

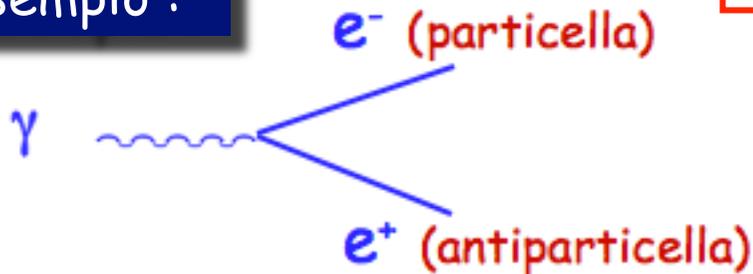
Elettronvolt (eV): energia di una carica unitaria (elettrone) sotto la d.d.p. di 1 V ↔  $1.6 \times 10^{-19}$  J

multipli:  $10^3$  eV: KeV (fenomeni atomici),  $10^6$  eV: MeV (fenomeni nucleari),  $10^9$  eV: GeV,  $10^{12}$  eV: TeV

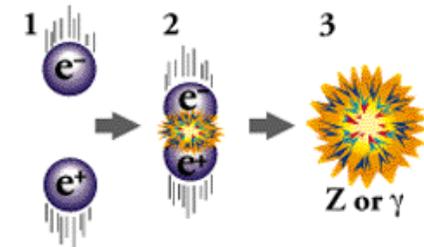
Ponendo  $c=1$ , anche la massa ha le stesse unità

$m(e) \approx 0.5$  MeV,  $m(p) \approx 1$  GeV,  $m(\text{uomo}) \approx 4 \times 10^{28}$  GeV

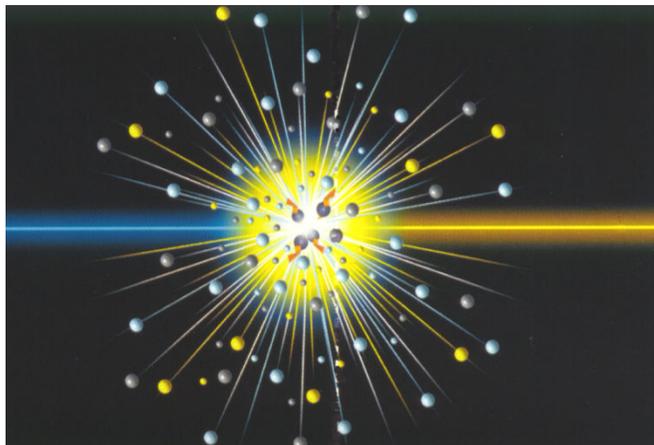
Esempio :



...e viceversa :

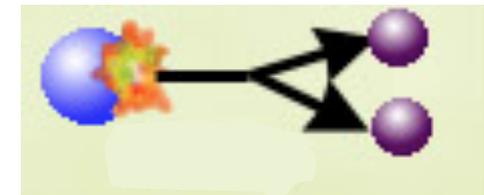


Nell' urto di particelle energetiche, si crea nuova materia



comprese particelle più massive dei proiettili iniziali, che sono esistite un tempo nell'universo, ora scomparse...

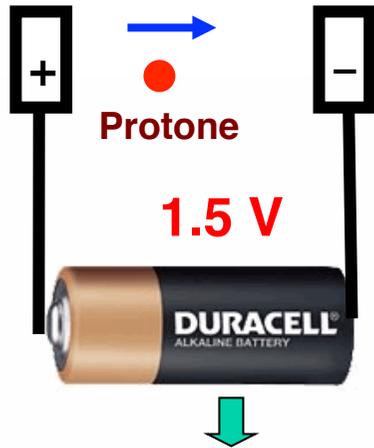
... che subito si disintegrano (*decadono*)



In tutti i processi è rispettata la conservazione della massa-energia, della quantità di moto ( $p=mv$ ), della carica...

# Come costruire un acceleratore di particelle ( un sicrotrone)

...una "batteria" molto più potente



$E=1.5 \text{ eV}$  (elettronvolt)



2000000 V

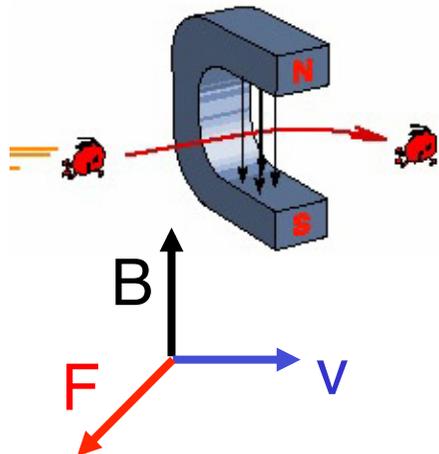
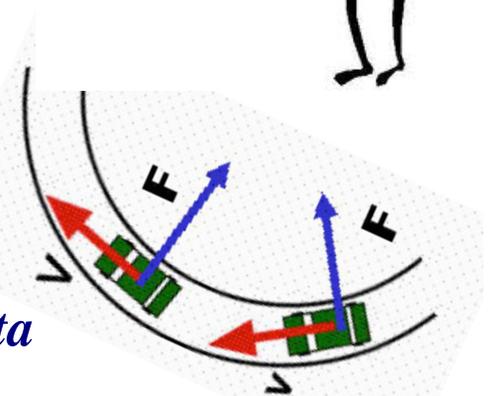
Cavità acceleratrice

Per le energie di LHC, dovremmo averne una fila di oltre 100 km



*Facciamo muovere i protoni in cerchio, come in una giostra; facendoli passare tante volte nella zona di accelerazione*

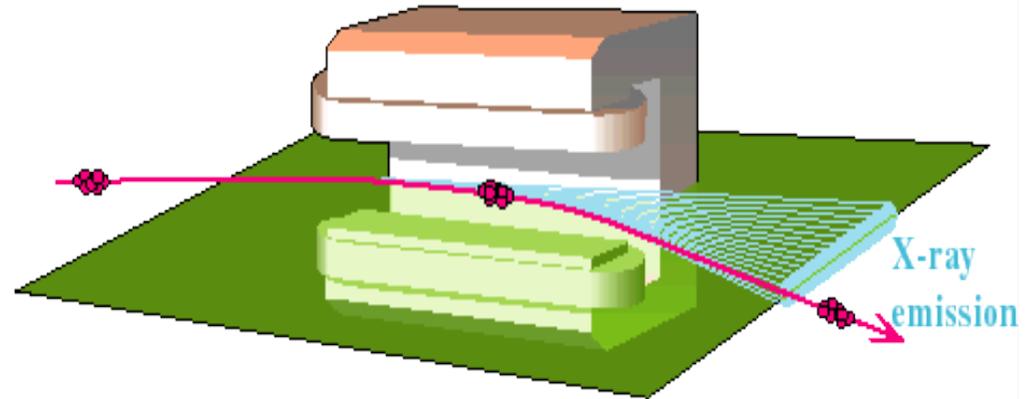
ci serve una forza centripeta



Per le particelle cariche, questo si ottiene con un campo magnetico

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

elettromagnete:  $i \rightarrow B$



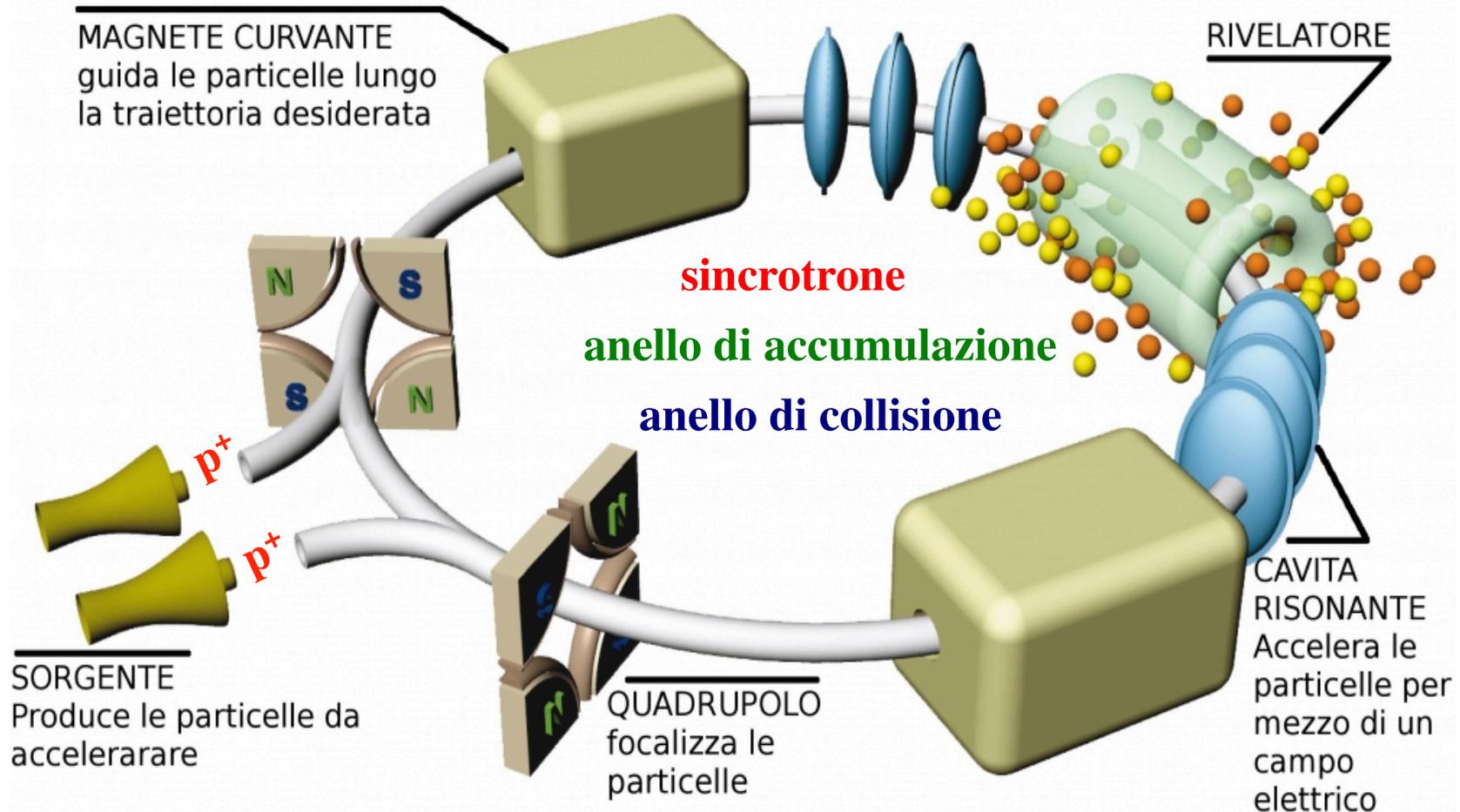


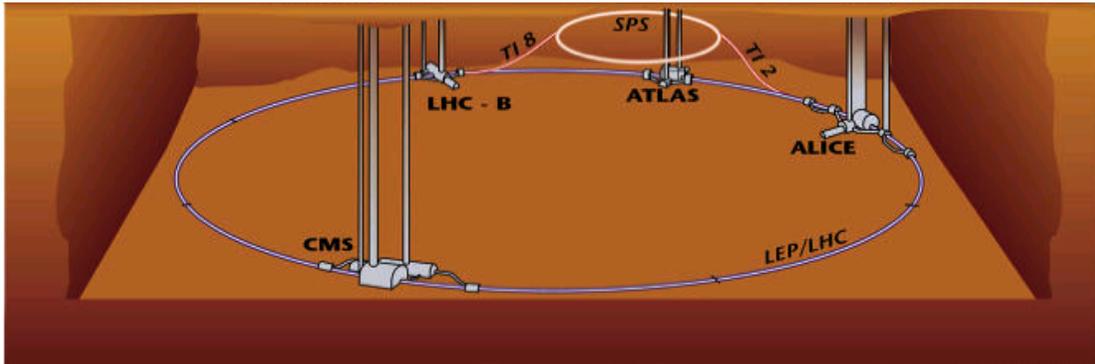
Le particelle accelerate possono essere inviate contro un bersaglio...



... oppure, per sfruttare al meglio l'energia, si possono far scontrare due fasci di particelle

Come in LHC:





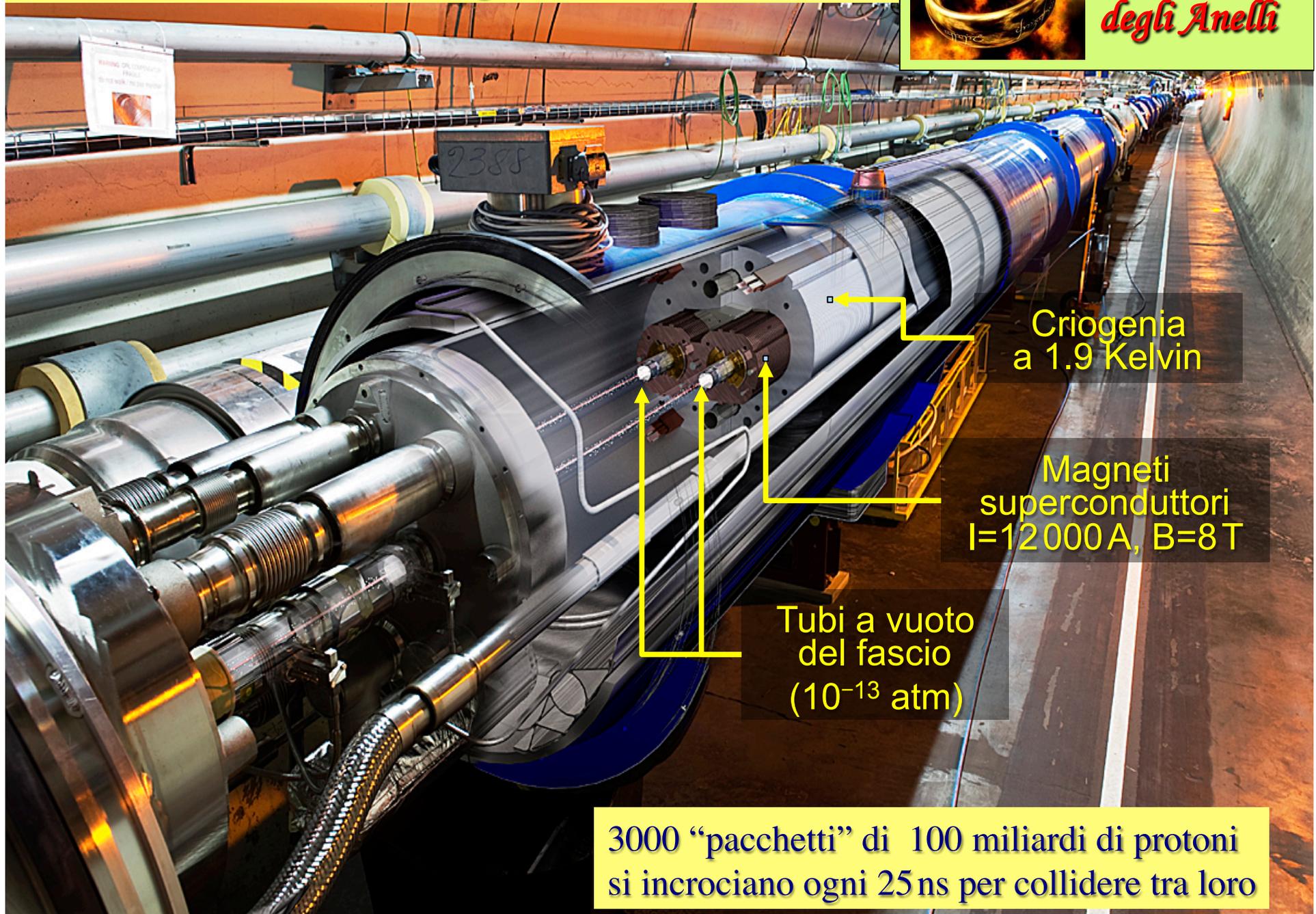
## Il penultimo stadio: l'SPS



# L'interno di LHC (Large Hadron Collider)



*Il Signore  
degli Anelli*



Criogenia  
a 1.9 Kelvin

Magneti  
superconduttori  
 $I=12000\text{ A}$ ,  $B=8\text{ T}$

Tubi a vuoto  
del fascio  
( $10^{-13}\text{ atm}$ )

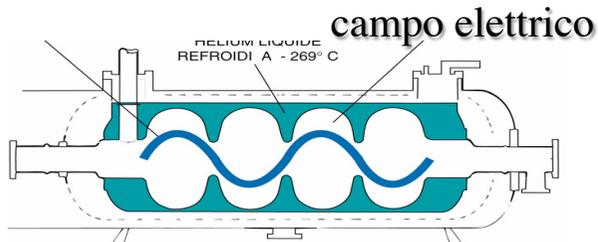
3000 “pacchetti” di 100 miliardi di protoni  
si incrociano ogni 25 ns per collidere tra loro



120 tonnellate di elio liquido raffreddano una massa totale di 37000 tonnellate (40000 m<sup>2</sup>)

Numero di dipoli: 1232  
totale di magneti: 9300

**Accelerazione: 8 cavità da 2000000 volt**



*I protoni passano per le cavità 11000 volte al secondo, per 20 minuti*

**Energia finale: 7 TeV (7000 miliardi di eV)**

**E=1.5eV**



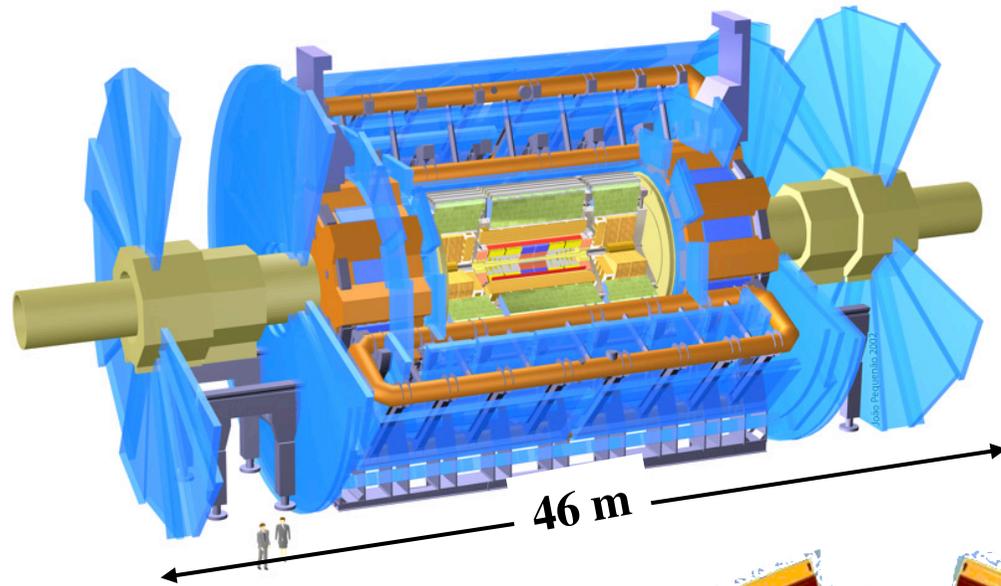
*Per un singolo protone, l'energia di una zanzara in volo...*

**ma in una zona mille miliardi di volte più piccola**



**Nel punto di collisione, la temperatura è 100000 volte più alta dell'interno del sole**

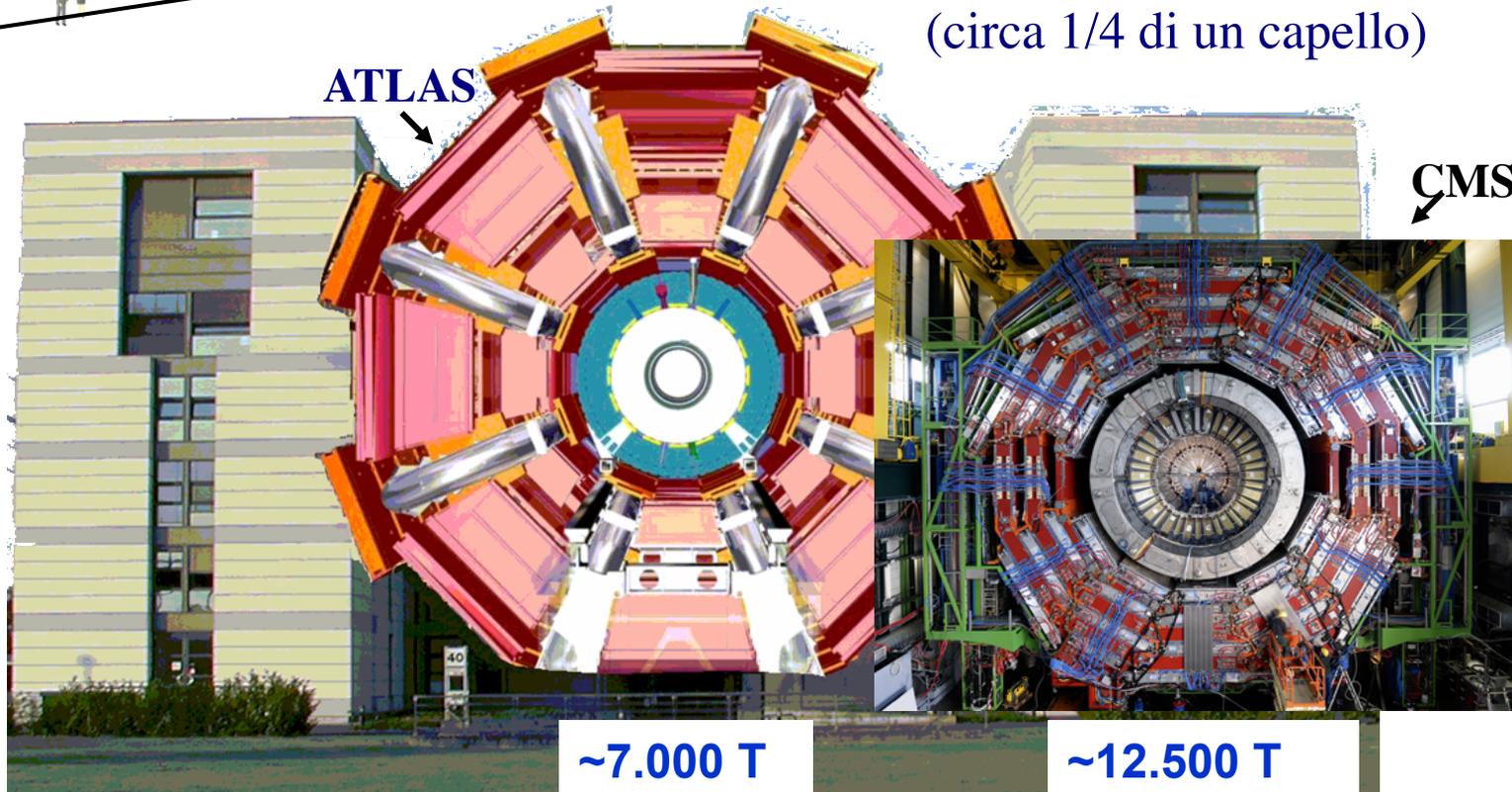
# I rivelatori di particelle



A LHC vi sono 4 rivelatori principali:  
**Alice, LHCb, CMS, ATLAS**

← **ATLAS**

Composti da moltissime parti.  
Alcune sono posizionate con  
la precisione di 20 micron  
(circa 1/4 di un capello)



~7.000 T

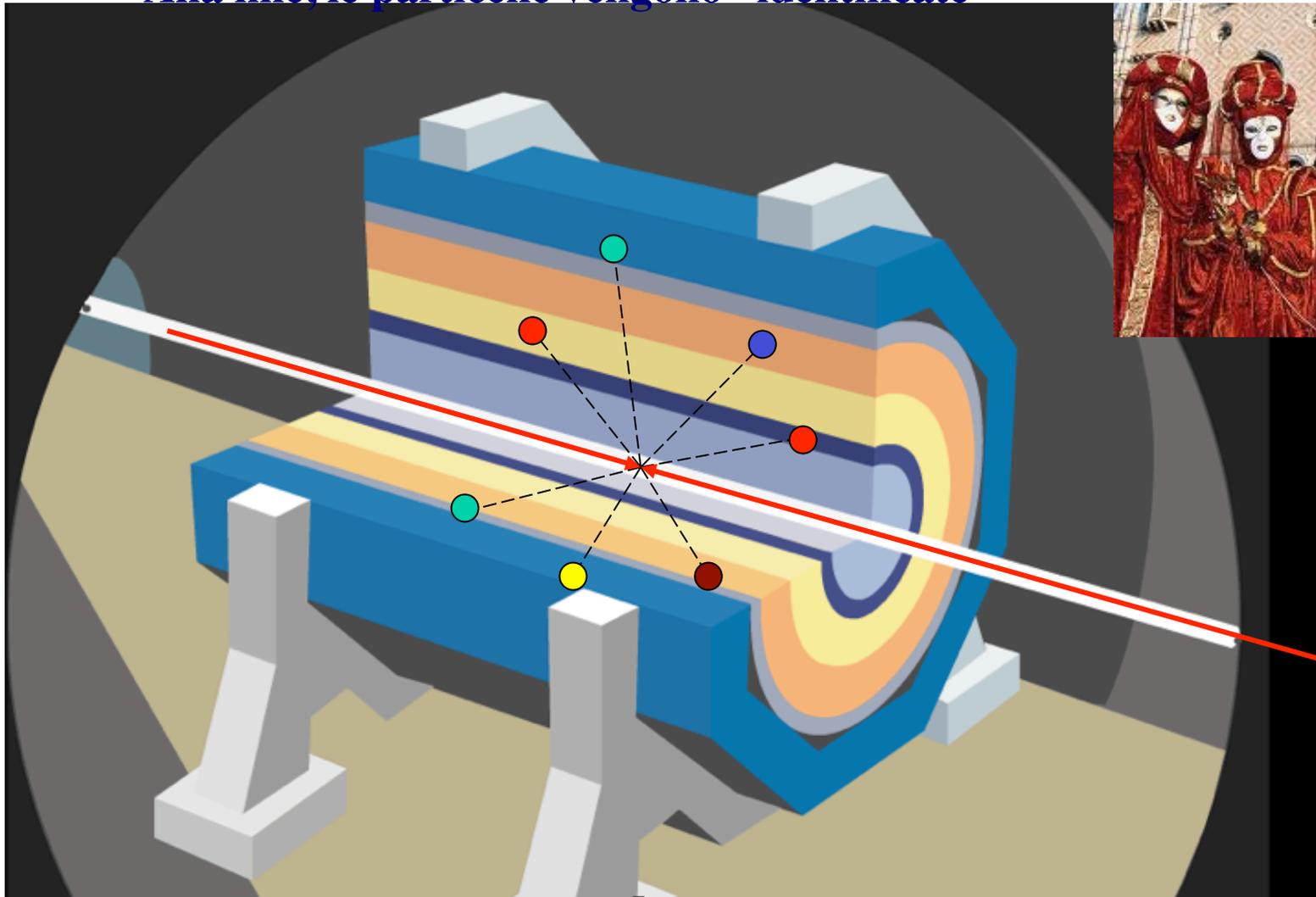
~12.500 T

*La maggior parte delle particelle generate dagli urti dei protoni si disintegrano prima di poter attraversare l'apparato, producendo altre particelle*

Quelle che vivono abbastanza a lungo vengono intercettate da strati successivi di rivelatori (come in una cipolla), che ne misurano diverse caratteristiche

**Alla fine, le particelle vengono “identificate”**

*Un po' come togliere la maschera*



## *Come funziona un rivelatore di particelle?*

Le particelle sono troppo piccole per essere “viste” direttamente



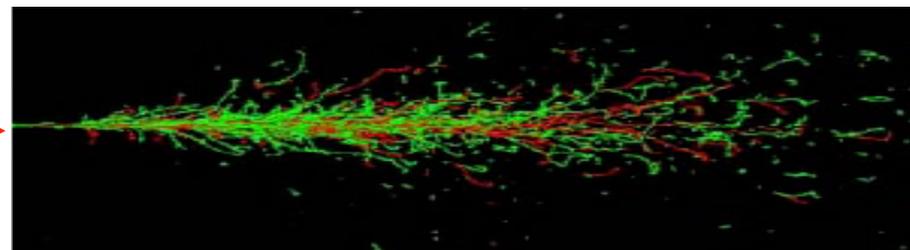
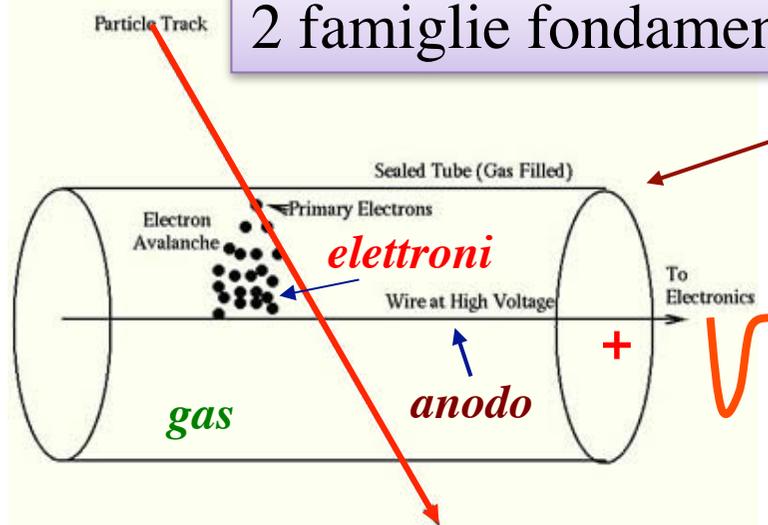
Possiamo rivelarne le tracce, o le “orme”

Una particella carica “perturba” la materia del rivelatore collidendo con i suoi atomi



Diversi tipi di rivelatore, ottimizzati per rivelare e misurare *tipi diversi di particelle ed informazioni fisiche diverse (energie, impulsi...)*

2 famiglie fondamentali: **tracciatori** e **calorimetri**

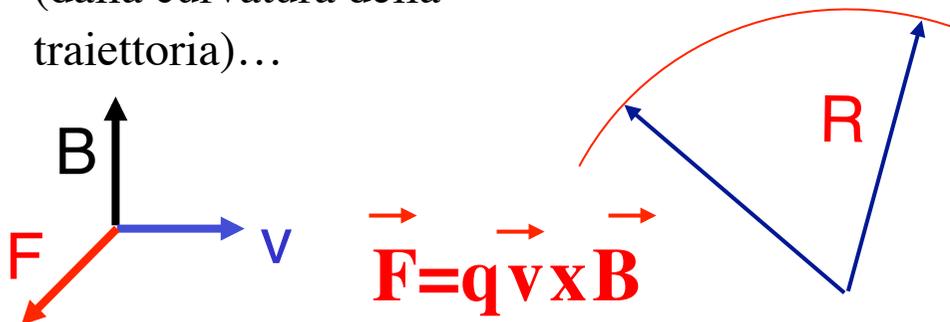


**Schema di un rivelatore a gas**  
 Si usano anche altri materiali (es. **semiconduttori**) sfruttando sempre processi di ionizzazione

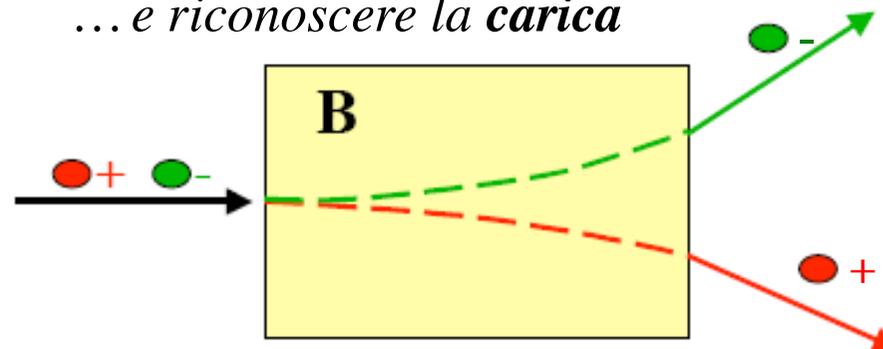
**Calorimetro** per misurare l'energia della particella  
 La particella nel materiale produce una **cascata (sciame)** di particelle e viene completamente assorbita

Due tipi: **elettromagnetico** (elettroni, fotoni...)  
**adronico** (protoni, neutroni...)

**Campo magnetico** per misurare l'impulso  
 (dalla curvatura della traiettoria)...



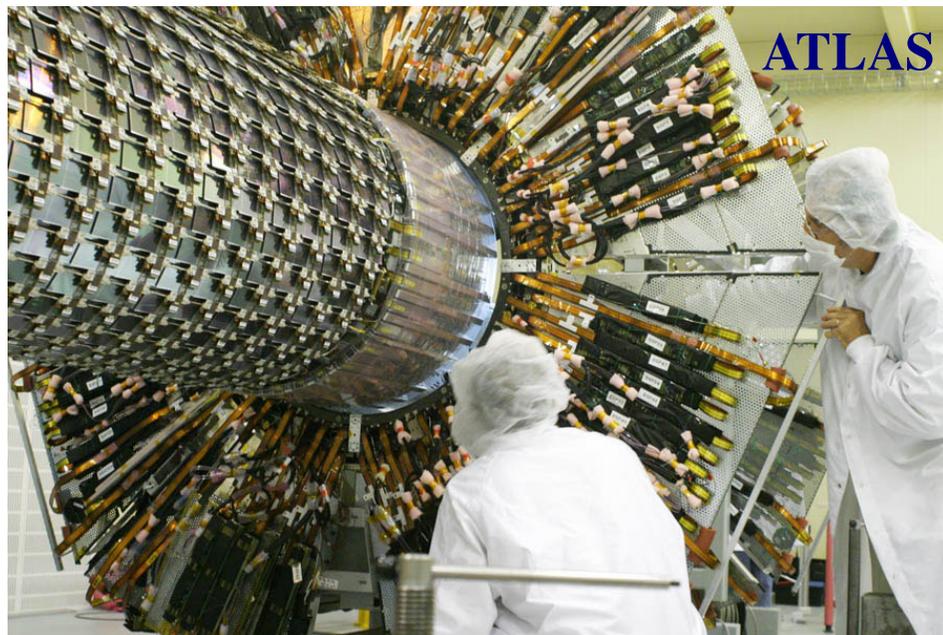
... e riconoscere la carica



## Esperimenti a LHC

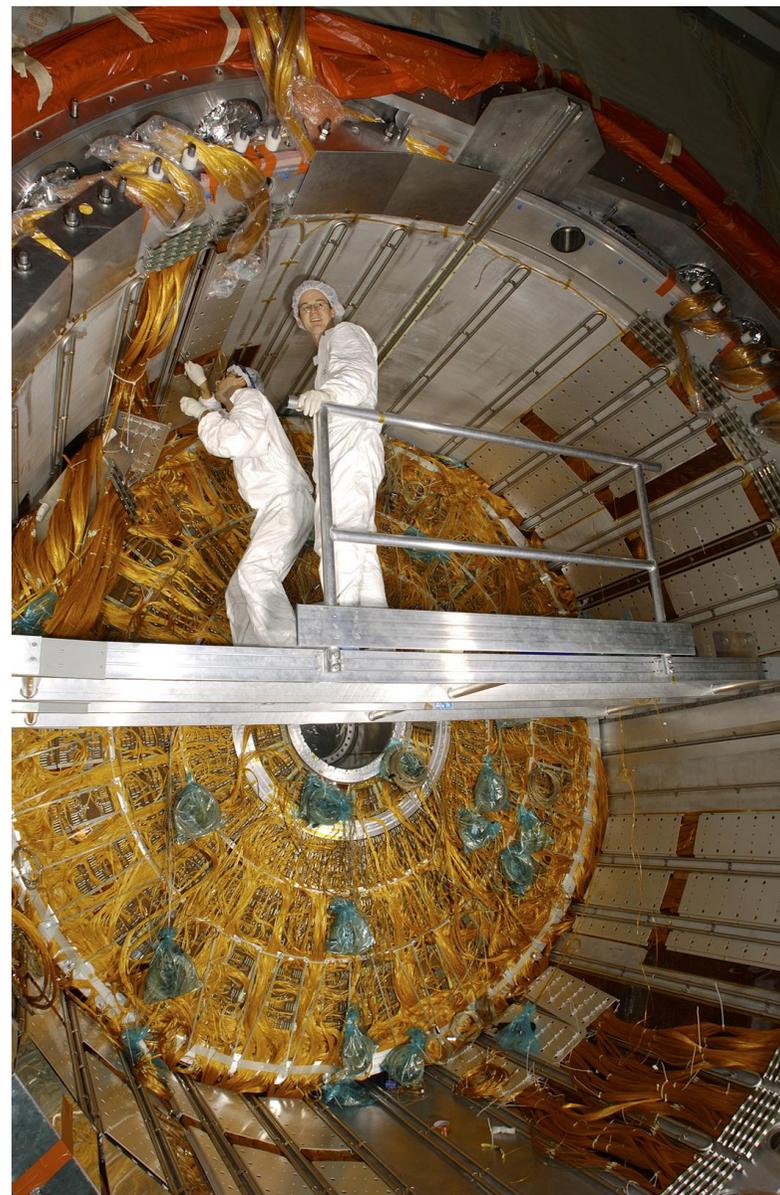
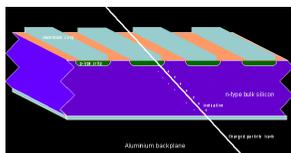
## I rivelatori interni

## I cablaggi...



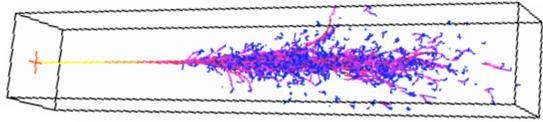
*Tre strati uno dentro l'altro, come nelle Matrioske russe*

Il guscio più interno:  
80 milioni di tasselli (pixel)  
di silicio larghi 50 micron  
e lunghi 400 micron, che  
segnalano il passaggio delle  
particelle

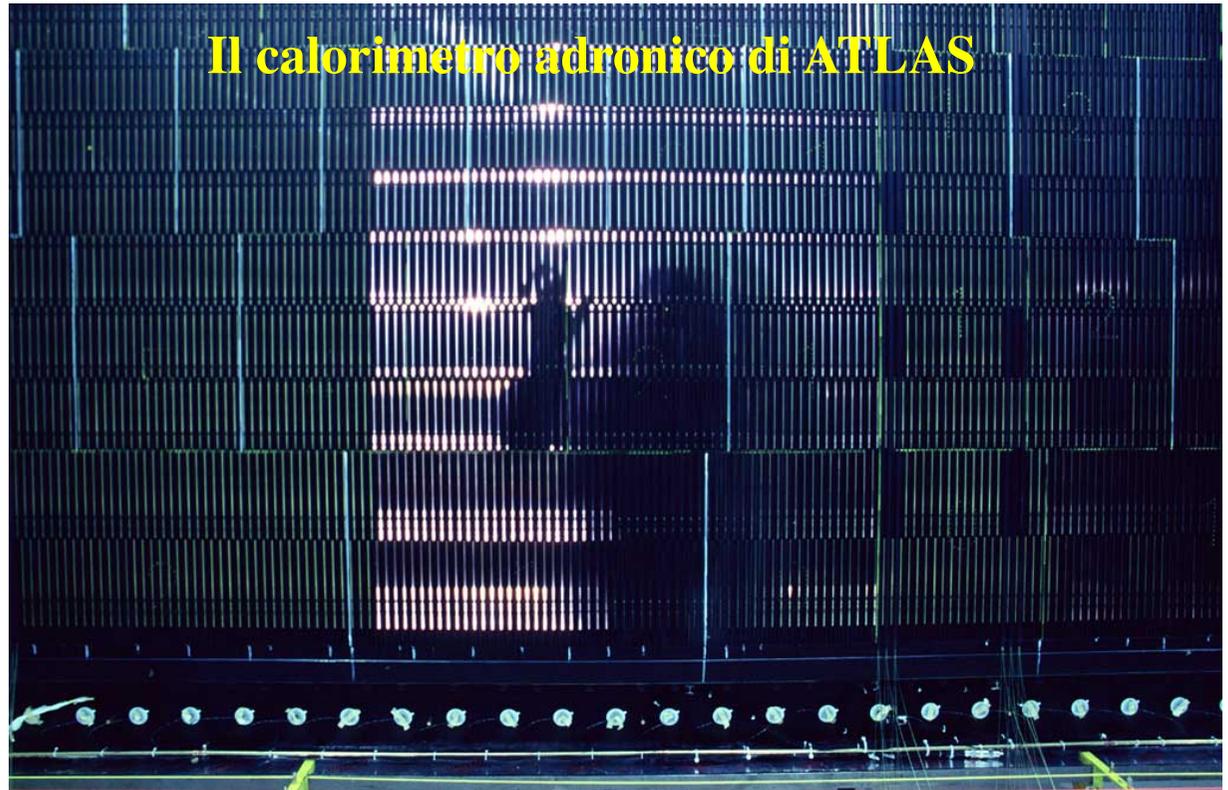
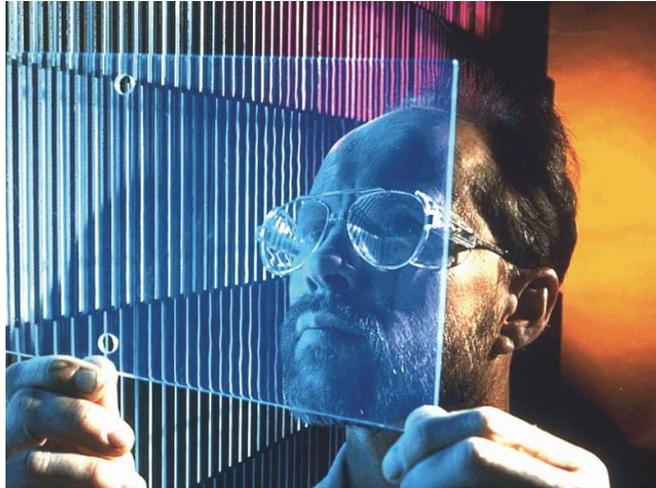


**3000 km di cavi per ciascun esperimento**

# I calorimetri



→ energia della particella

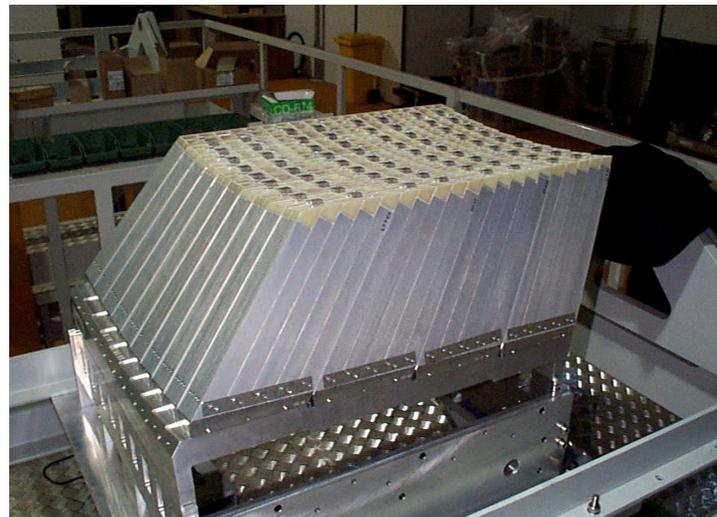


## Il calorimetro adronico di ATLAS

50000 “mattonelle” di scintillatore immerse in una struttura di acciaio

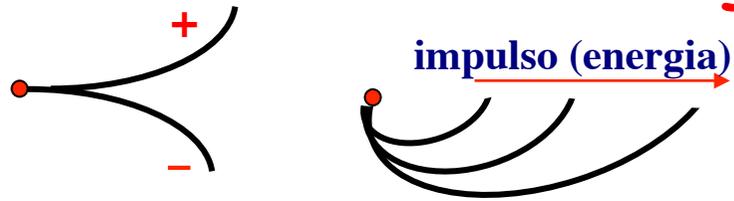


## Il calorimetro elettromagnetico di CMS



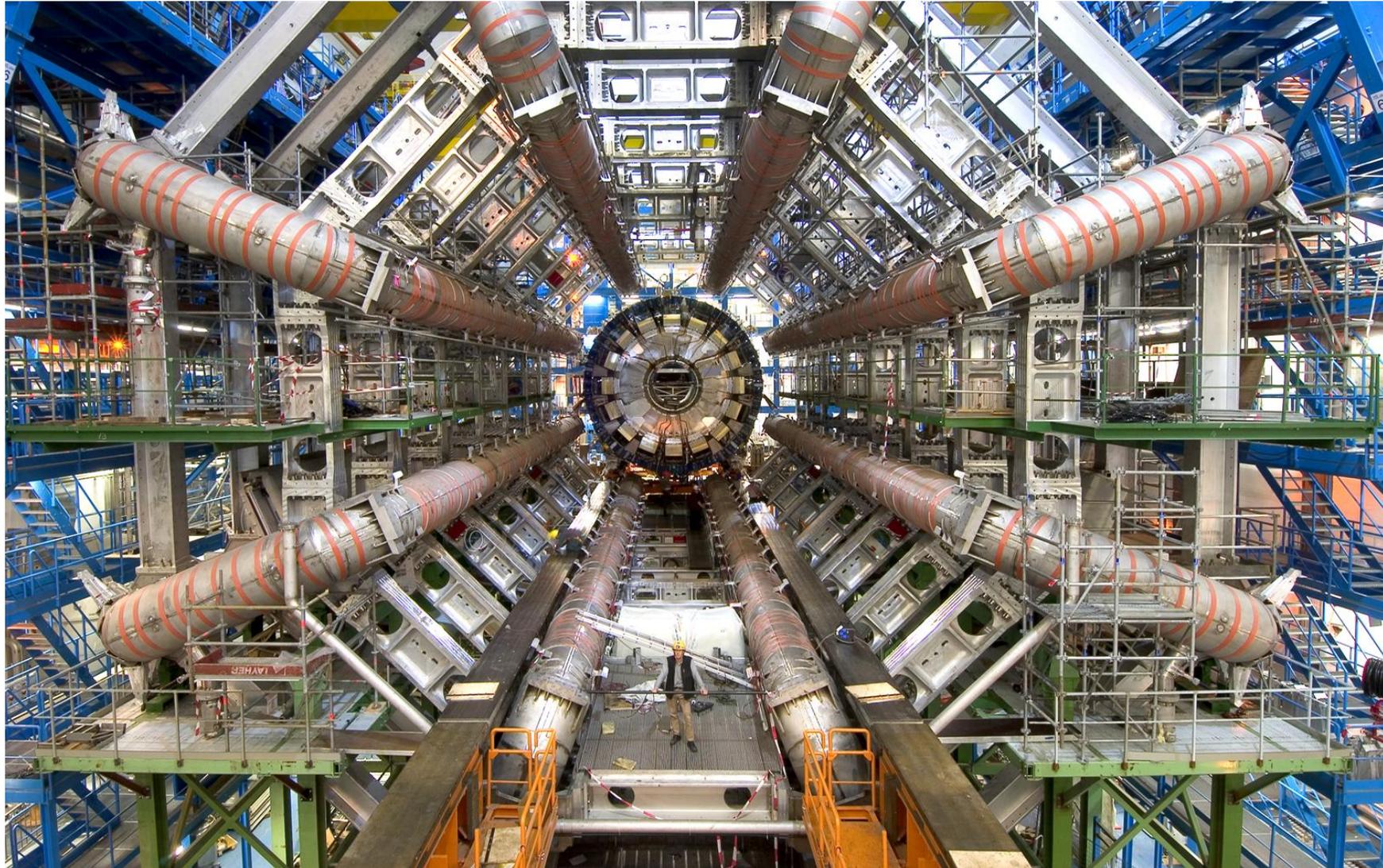
80 000  
cristalli  
di tungstato  
di piombo

## I magneti

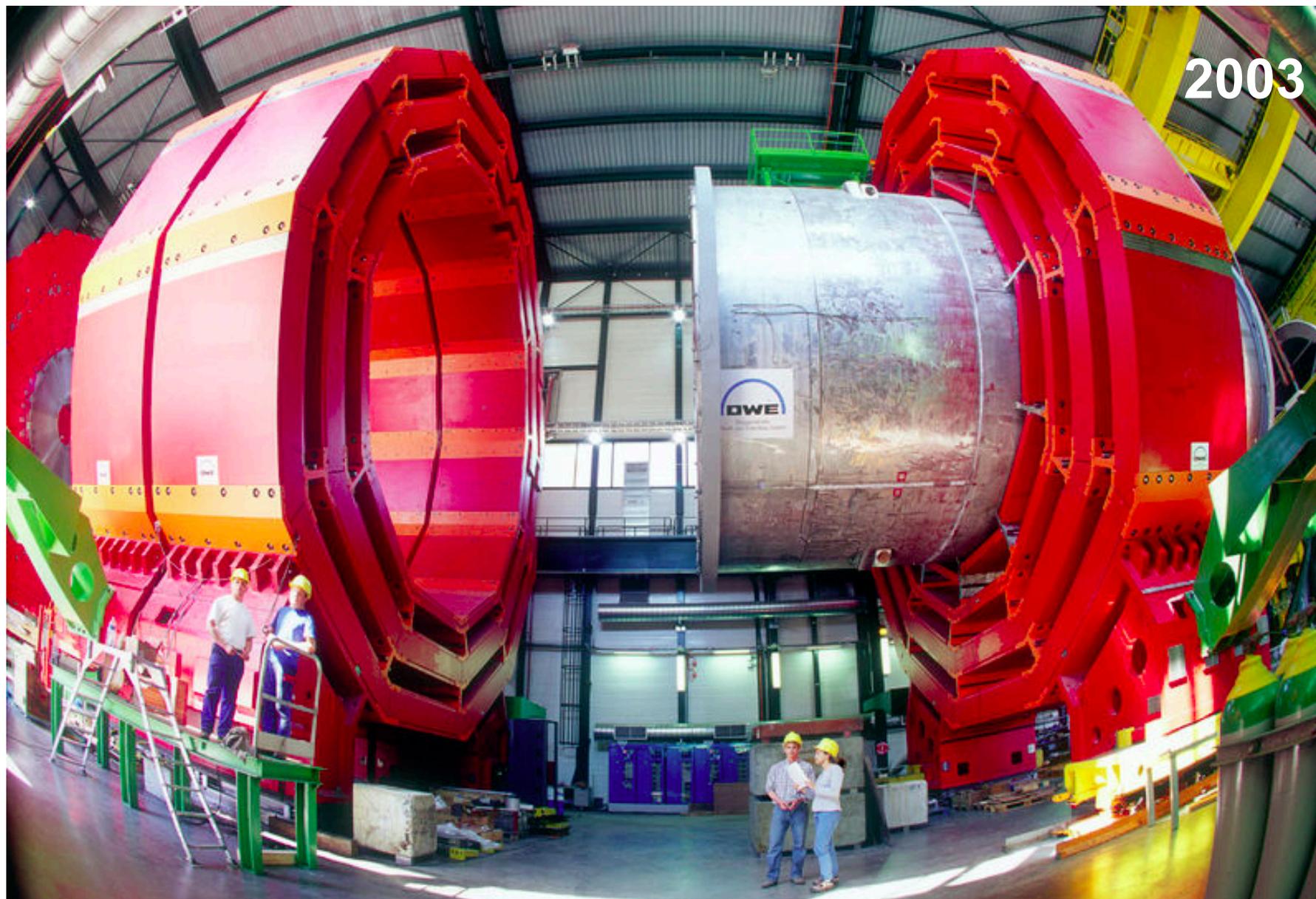


Il campo magnetico curva le tracce delle particelle cariche per misurarne l'impulso

Le 8 grandi bobine del magnete toroidale di ATLAS per il rivelatore dei muoni

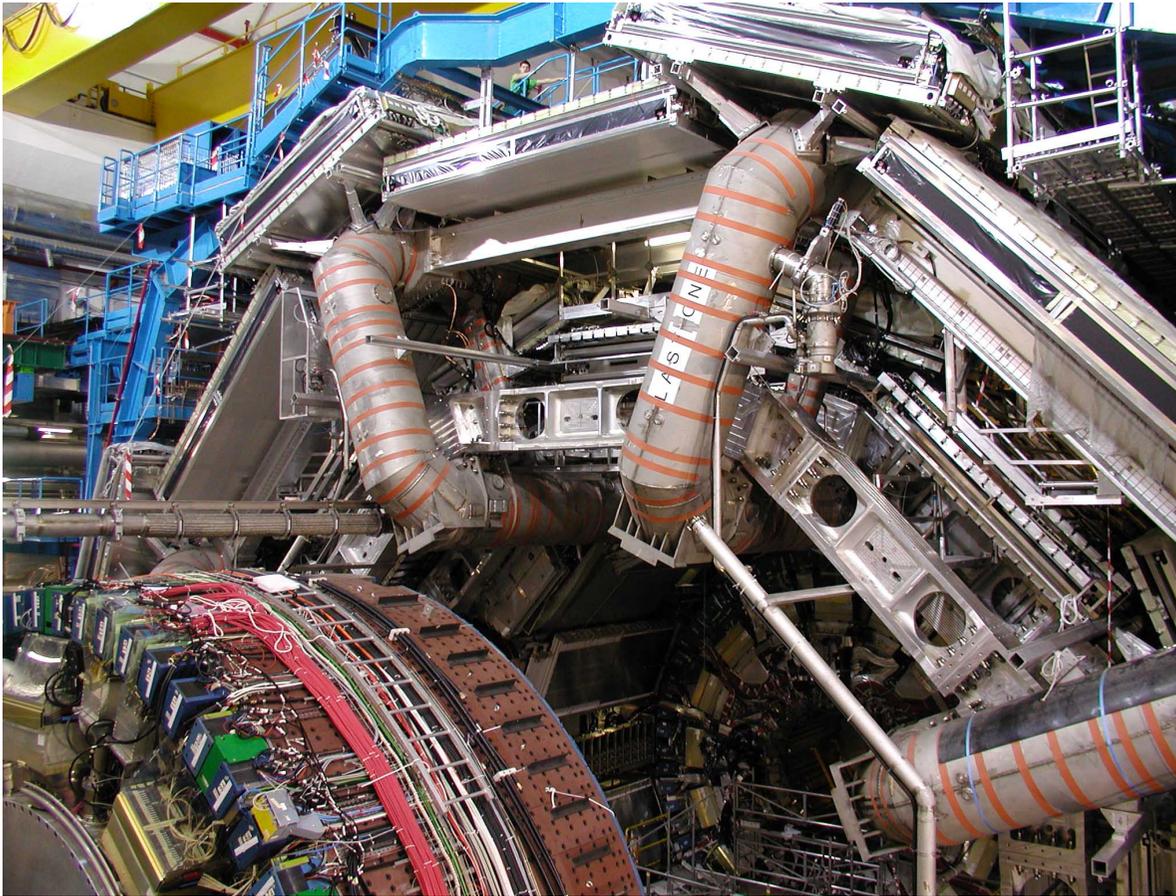


## Il magnete solenoidale di CMS durante la costruzione



## I rivelatori per misurare le tracce dei muoni

Nella parte esterna: i  $\mu$  sono molto penetranti e attraversano il materiale dei calorimetri

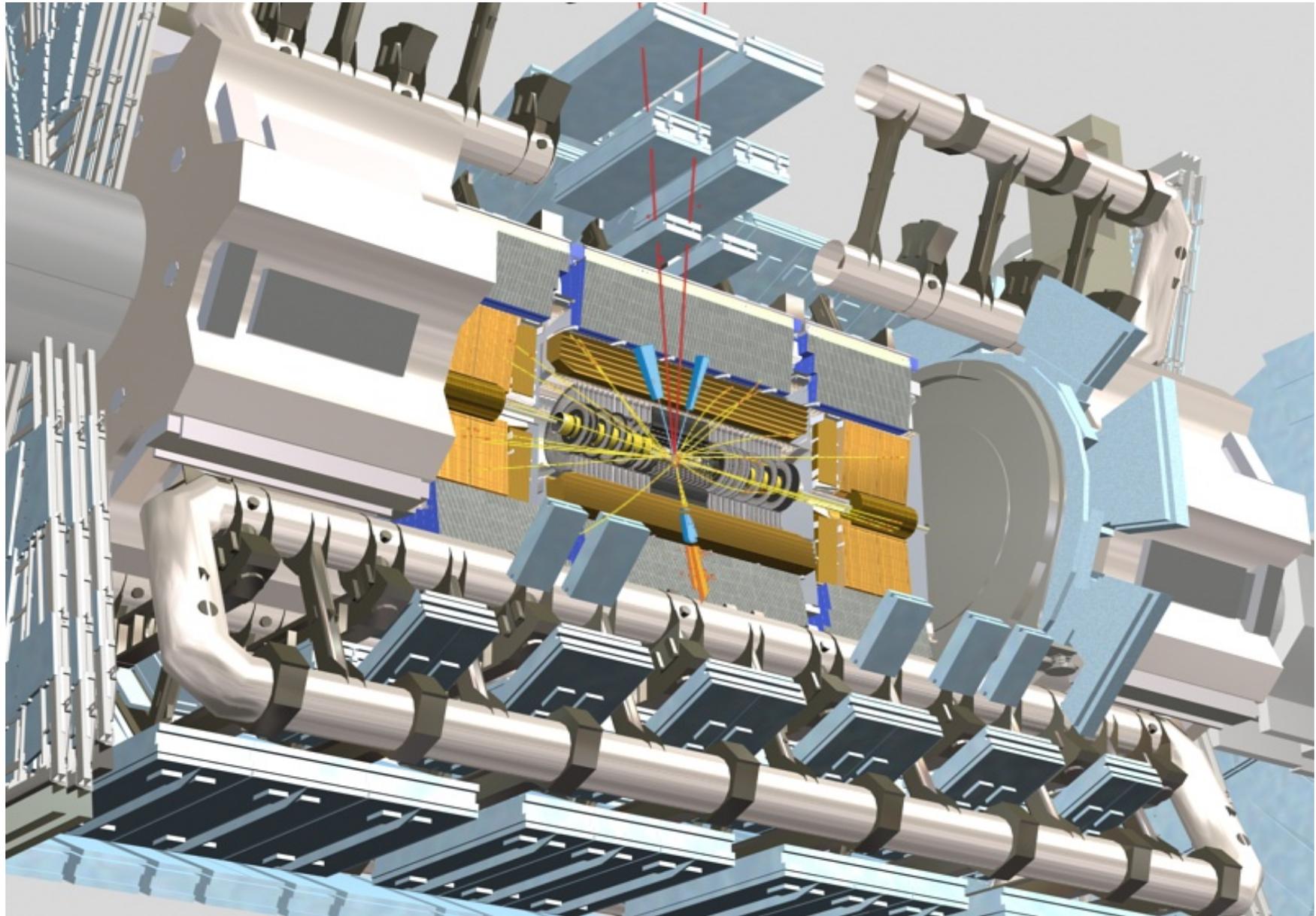


Le camere dei muoni tra le bobine del magnete nella parte centrale di ATLAS

**In ATLAS coprono una superficie di 12000 m<sup>2</sup>**



Le grandi ruote (6 in tutto) che ospitano le camere dei muoni nella parte avanti-indietro di ATLAS

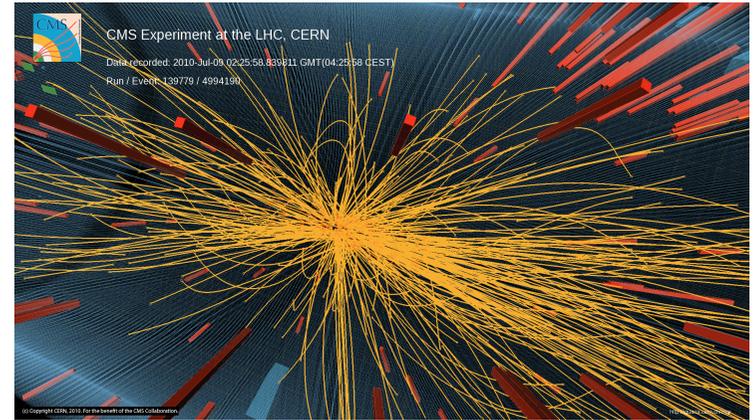




ATLAS control room

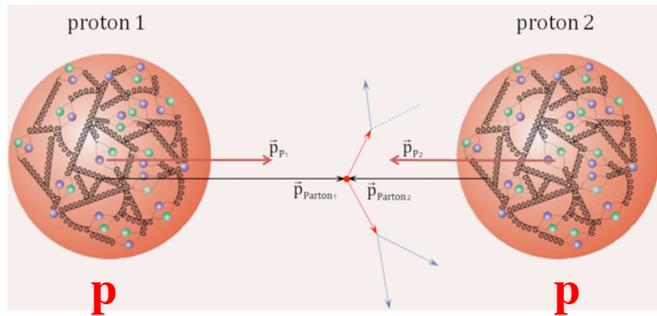


segnali elettronici →  
punti → tracce (percorsi  
delle particelle) oppure  
depositi di energia

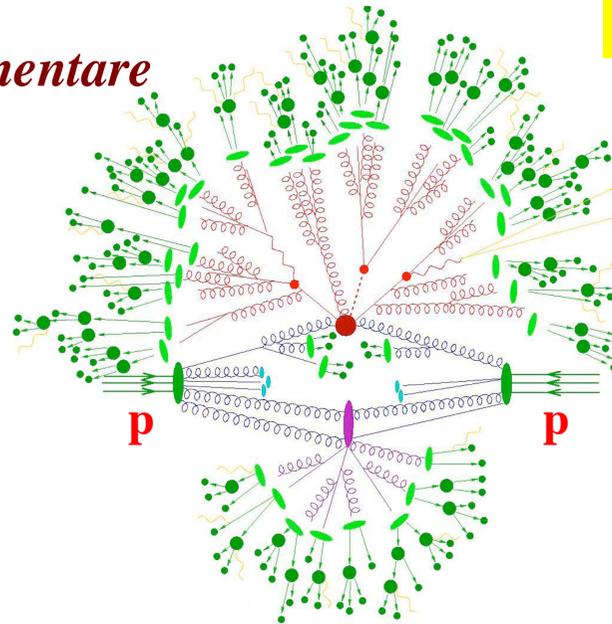


evento ricostruito

*Il protone non è una particella elementare*



Urto tra due costituenti (partoni)



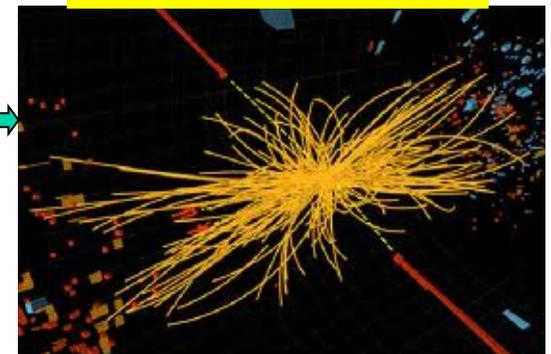
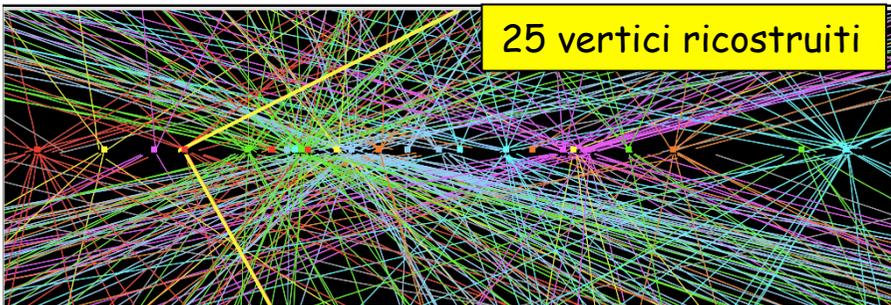
Anche gli altri partoni  
intervengono.  
Si producono eventi  
con centinaia di  
particelle

Higgs prodotto una  
volta su 10 miliardi

Candidato Higgs

*Inoltre...*

*più protoni interagiscono a ogni incrocio*



## Enorme quantità di dati da gestire

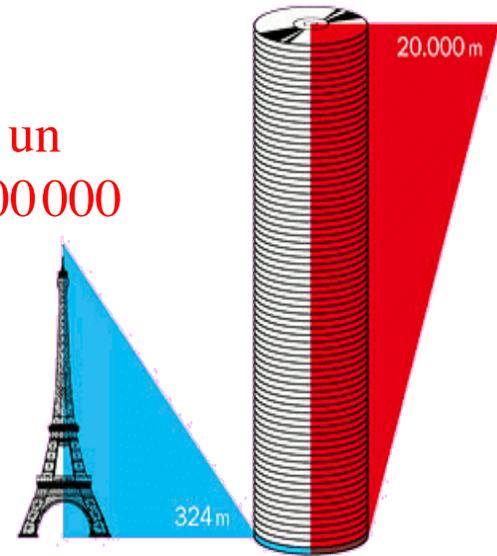
Vengono acquisiti 40 milioni di volte al secondo 100 milioni di canali di elettronica (~ 60 TB/s)

*preselezione*

Ritenuto solo un evento su 1 000 000

Anche così, vengono prodotti dagli esperimenti di LHC circa 10 milioni di GB all'anno

**Come analizzarli?**

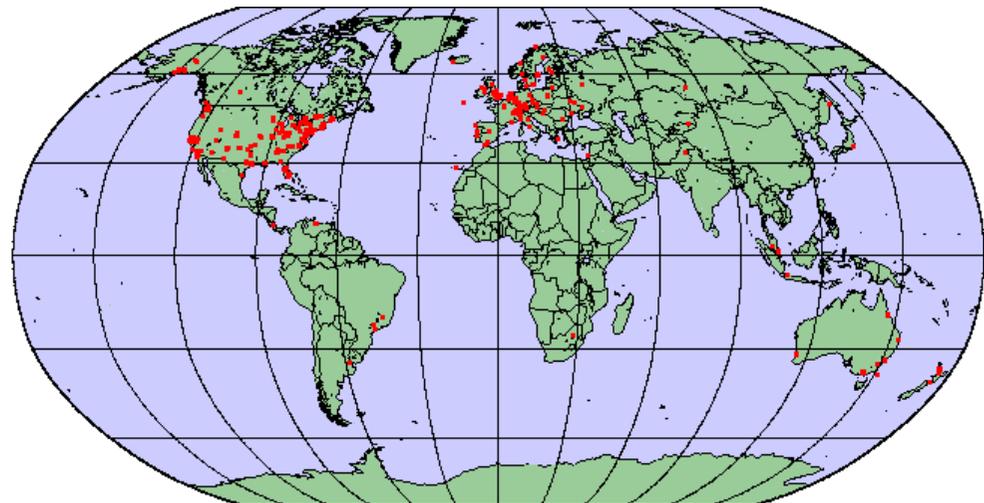


**Soluzione:** connettere tra loro centri di calcolo che prima erano isolati, unendo tutte le risorse disponibili su scala planetaria



**La GRID** decine di migliaia di computer

140 Istituti 35 nazioni



# Collaborazione ATLAS

(Aprile 2008)

**3000 Autori Scientifici in totale**

**38 Paesi 178 Istituti**

*I ricercatori vengono da quasi  
tutte le parti del mondo.*

*Ogni Istituto si prende la responsabilità  
per realizzare una parte dell'apparato  
sperimentale*



Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

**4 luglio 2012:**  
annuncio di una  
particella  
“compatibile” col  
bosone di Higgs  
da CMS e ATLAS

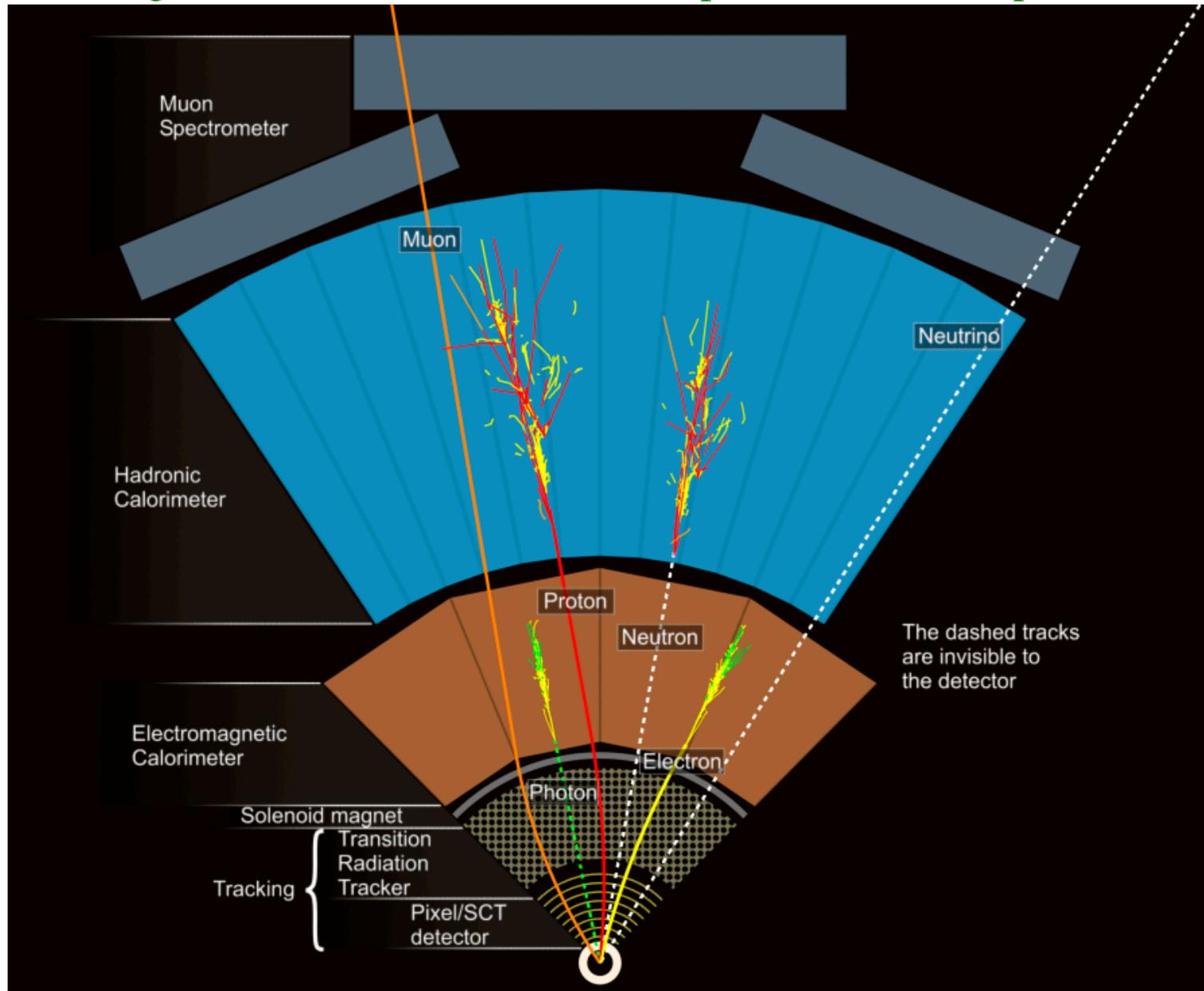
*Un seminario seguito  
anche dai non addetti  
ai lavori...*



*Cosa hanno  
mostrato i fisici  
dei due esperimenti?*



Nella parte più interna, il percorso delle particelle viene campionato in grande dettaglio  
Più in là, alcune particelle sono arrestate nei calorimetri, che ne misurano l'energia  
Dei magneti curvano la traiettoria delle particelle cariche, per misurarne l'impulso



*Bisogna riconoscere:*

*protoni*

*neutroni*

*elettroni*

*fotoni*

*muoni*

*neutrini*

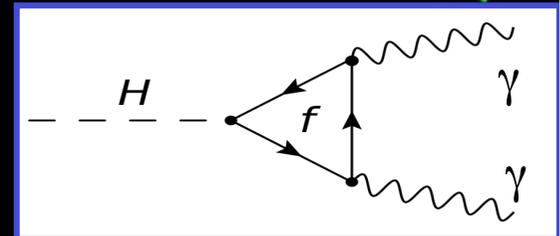
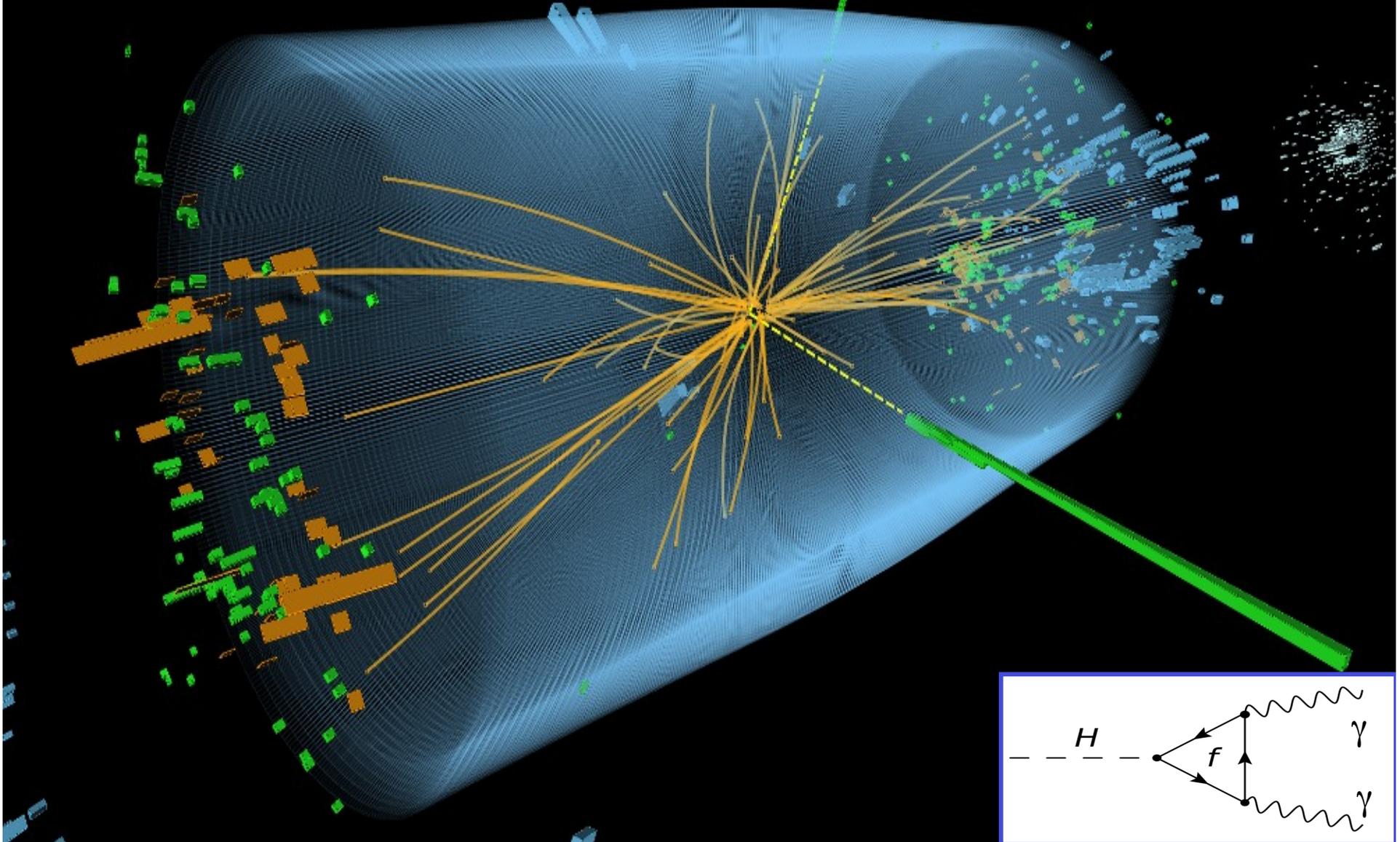
Da queste  
particelle  
si risale alle  
altre prodotte  
negli urti



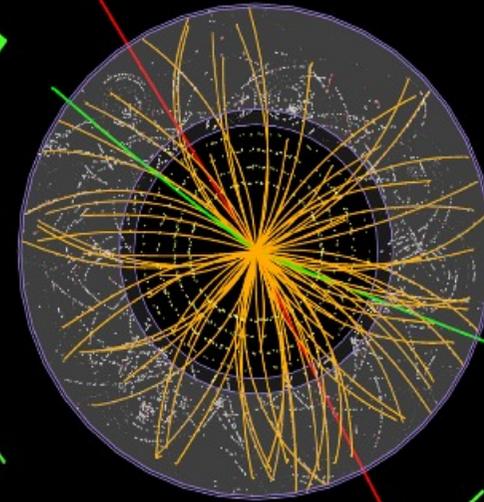
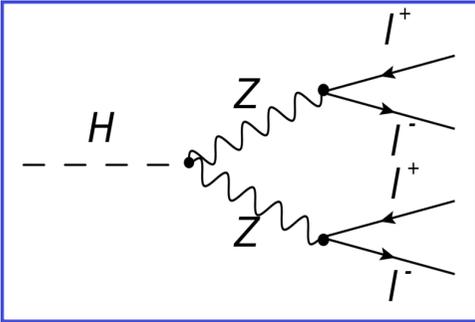
CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000

CMS

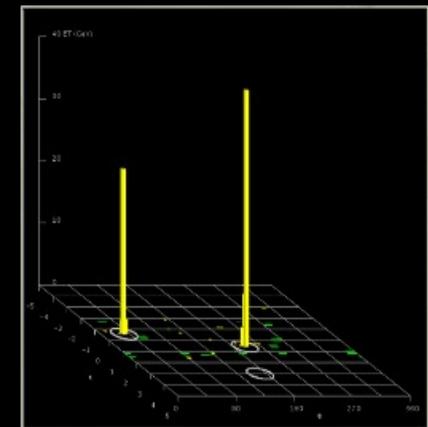
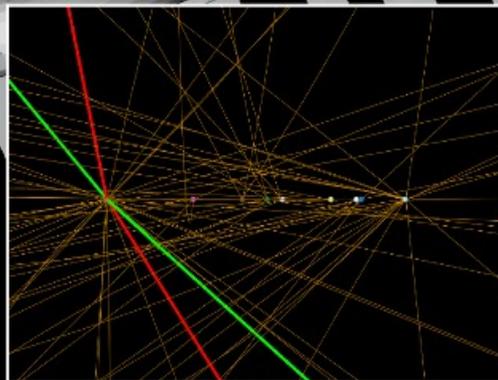
# Candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$



ATLAS



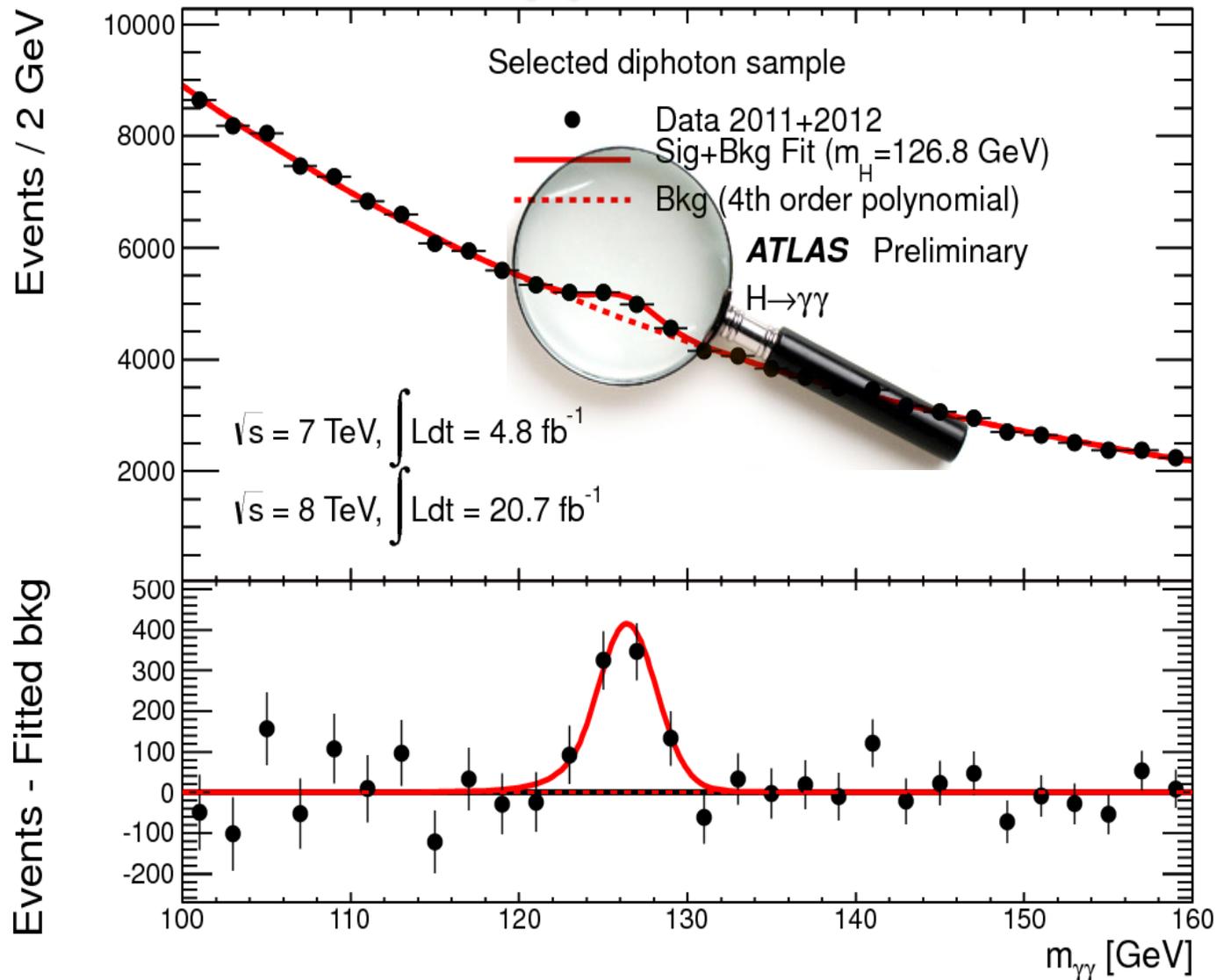
Candidato  $H \rightarrow ee\mu\mu$



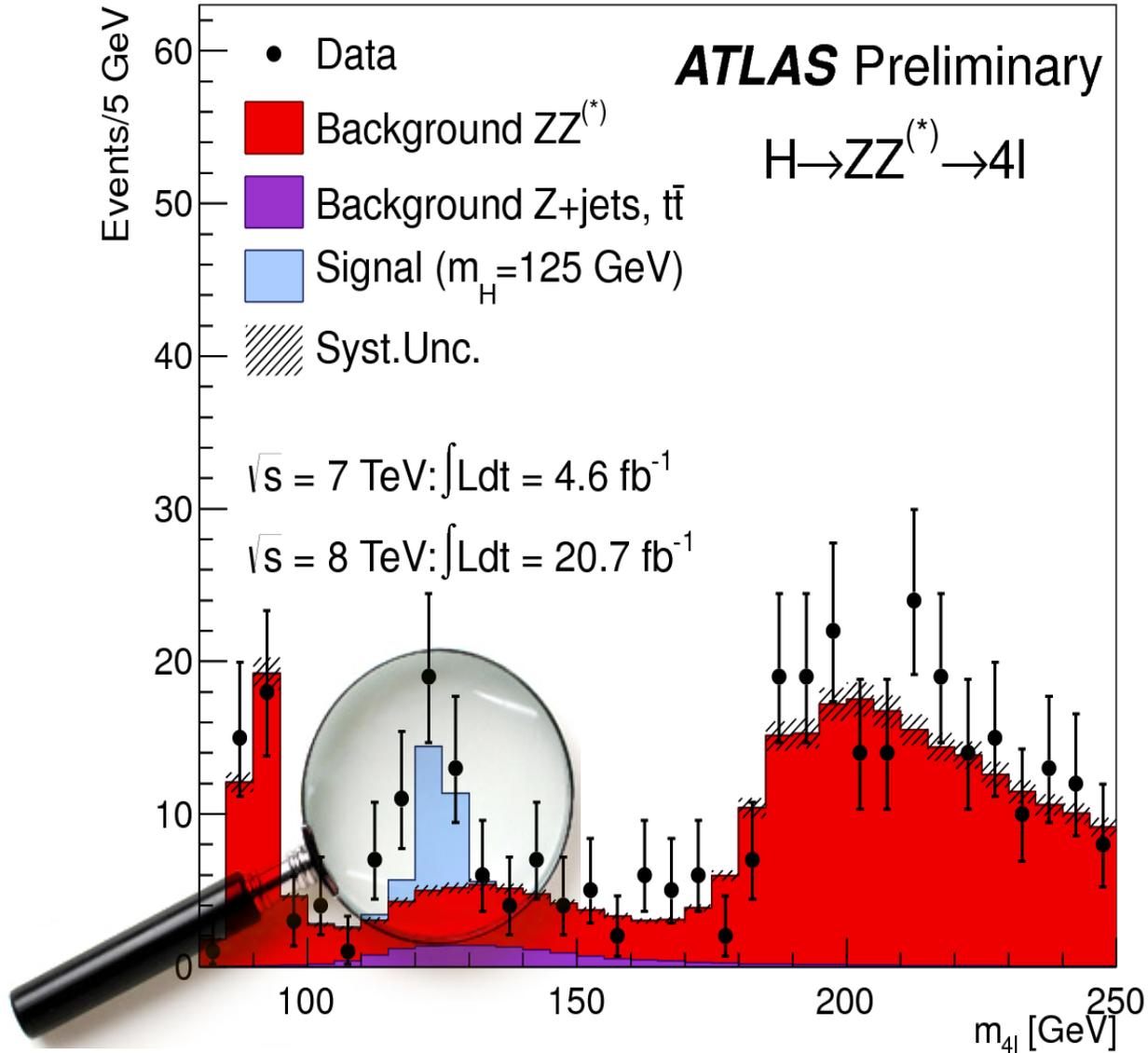
Run: 182796  
Event: 74566644  
2011-05-30 07:54:29 CEST

Non è possibile escludere che gli eventi provengano da processi noti.  
Bisogna trovarne un numero sufficiente -il *segnale*- che emerge dal *fondo*

# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$ : risultati



# H $\rightarrow$ 4 leptoni: risultati



Dopo il seminario, lo studio delle proprietà della nuova particella, di massa  $\approx 125$  GeV, ha confermato che ha proprio le proprietà attese per il bosone di Higgs



Nel 2015, dopo un fermo per revisionare la macchina e raddoppiare l'energia, LHC tornerà in operazione. *Cosa ci riserverà la nuova presa dati??*

*Non solo Higgs...*

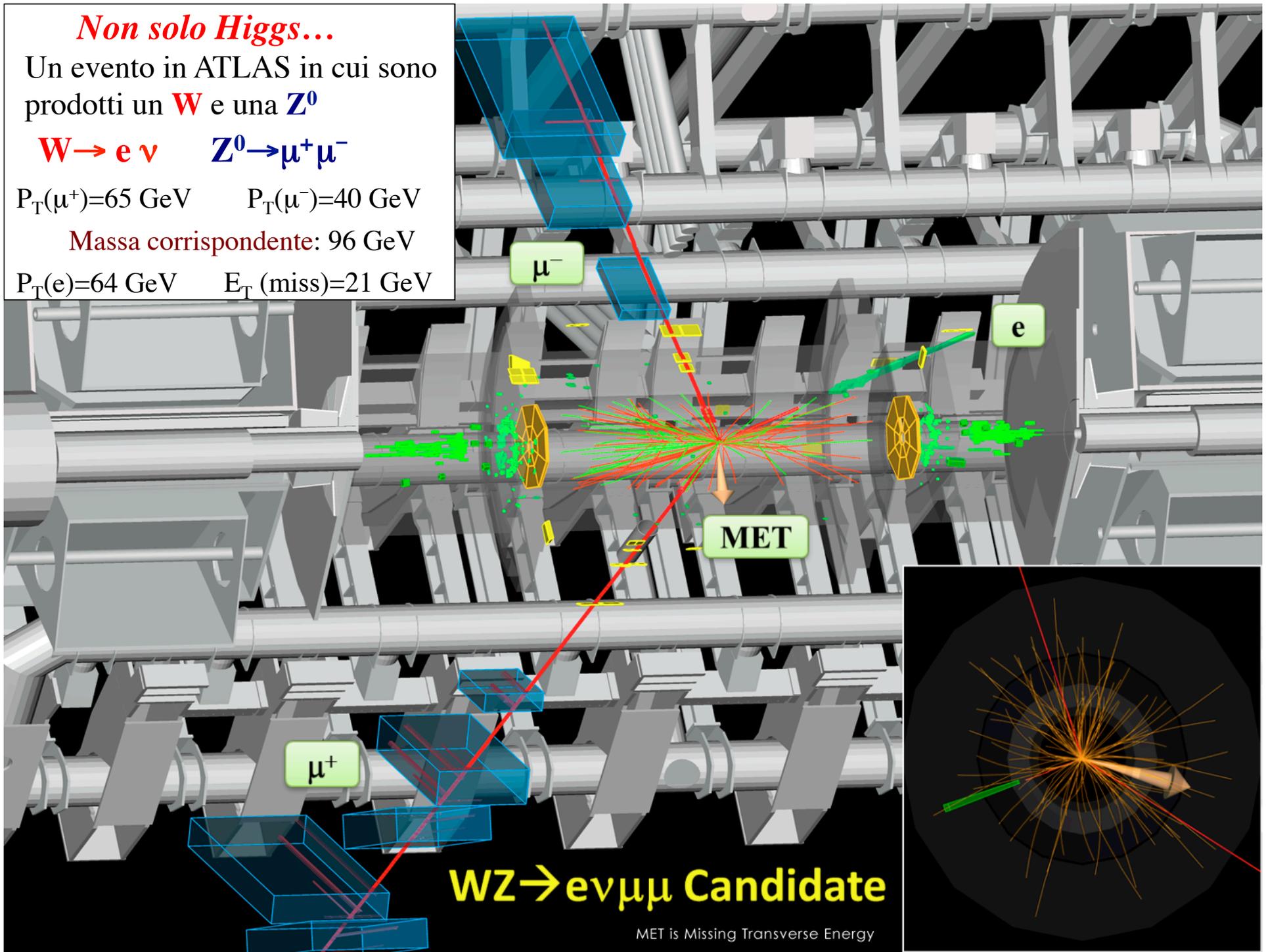
Un evento in ATLAS in cui sono prodotti un **W** e una **Z<sup>0</sup>**

**W** → **e ν**    **Z<sup>0</sup>** → **μ<sup>+</sup>μ<sup>-</sup>**

$P_T(\mu^+) = 65 \text{ GeV}$      $P_T(\mu^-) = 40 \text{ GeV}$

Massa corrispondente: 96 GeV

$P_T(e) = 64 \text{ GeV}$      $E_T(\text{miss}) = 21 \text{ GeV}$



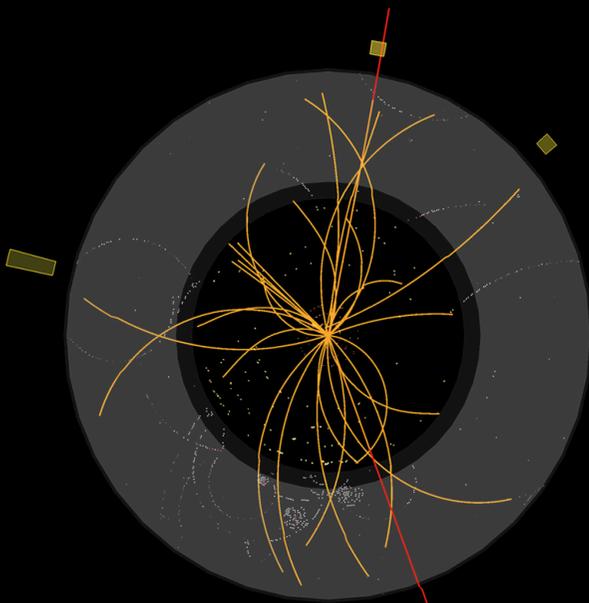
**WZ → eνμμ Candidate**

MET is Missing Transverse Energy



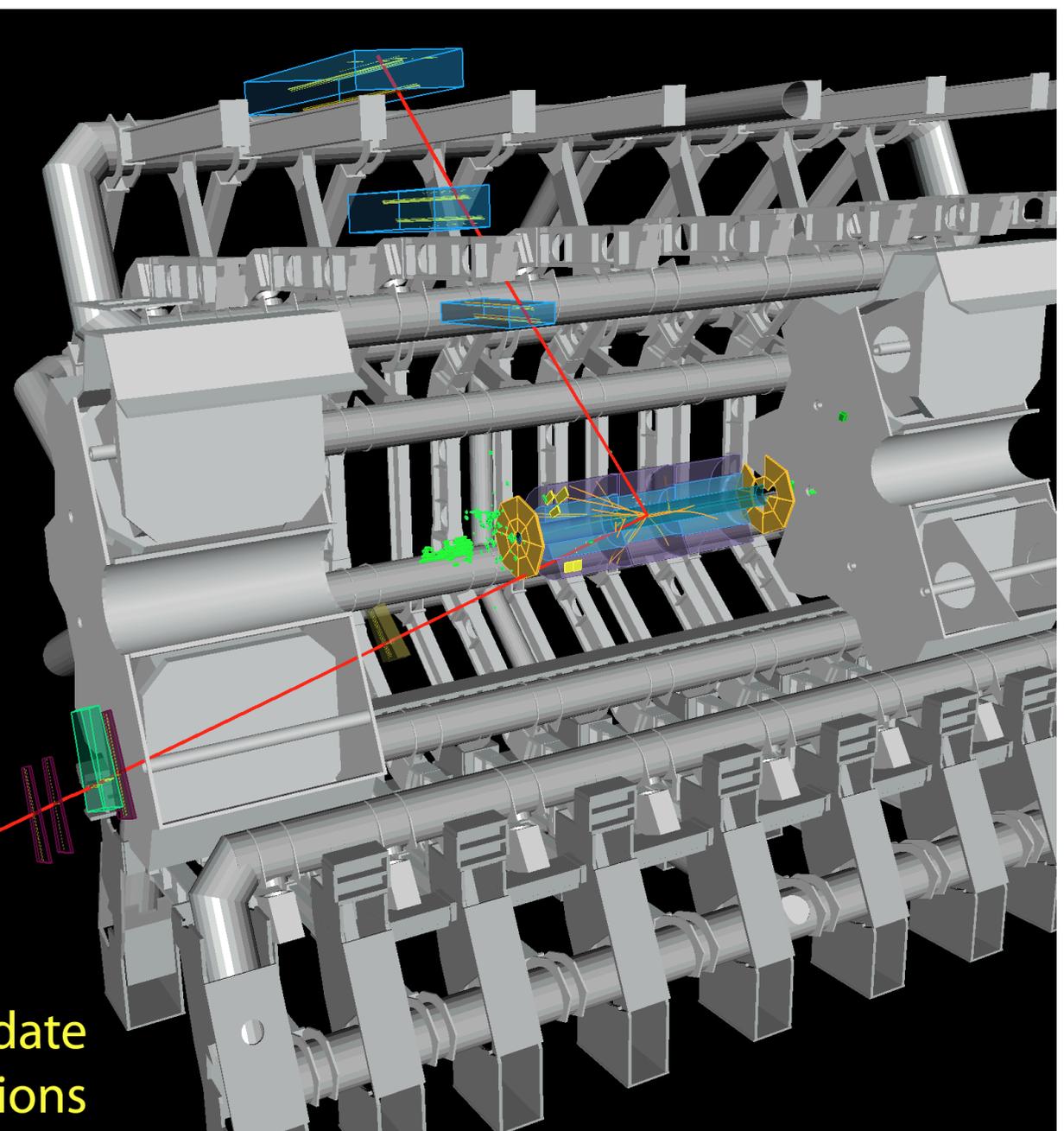
# ATLAS EXPERIMENT

Run: 154822, Event: 14321500  
Date: 2010-05-10 02:07:22 CEST



$p_T(\mu^-) = 27 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^-) = 0.7$   
 $p_T(\mu^+) = 45 \text{ GeV}$   $\eta(\mu^+) = 2.2$   
 $M_{\mu\mu} = 87 \text{ GeV}$

**Z $\rightarrow\mu\mu$  candidate  
in 7 TeV collisions**



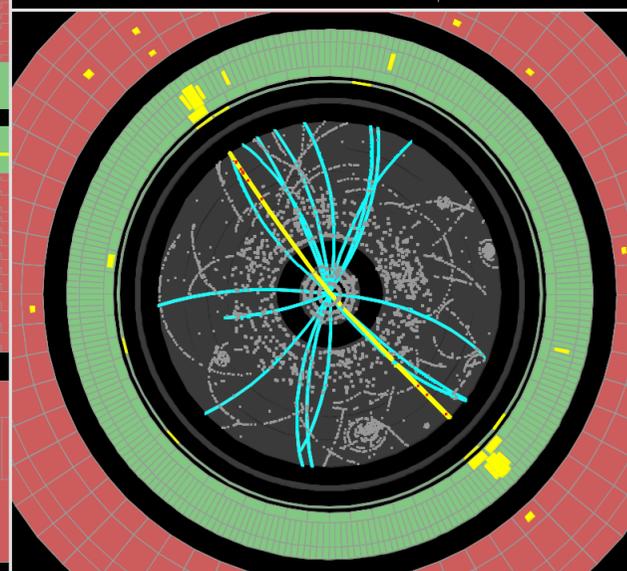
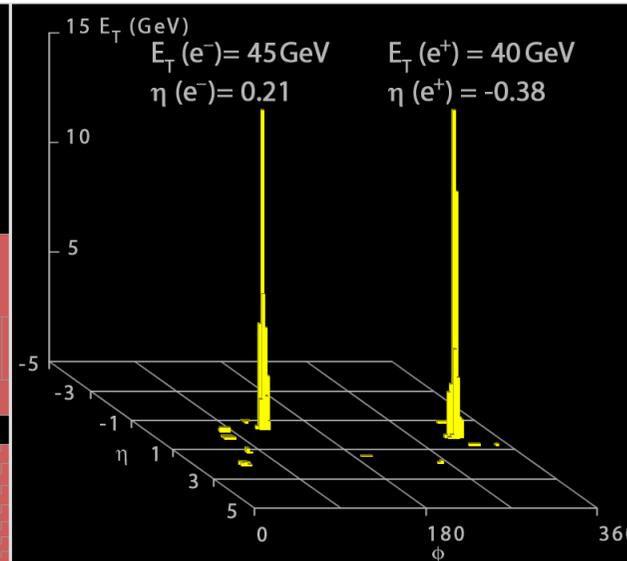
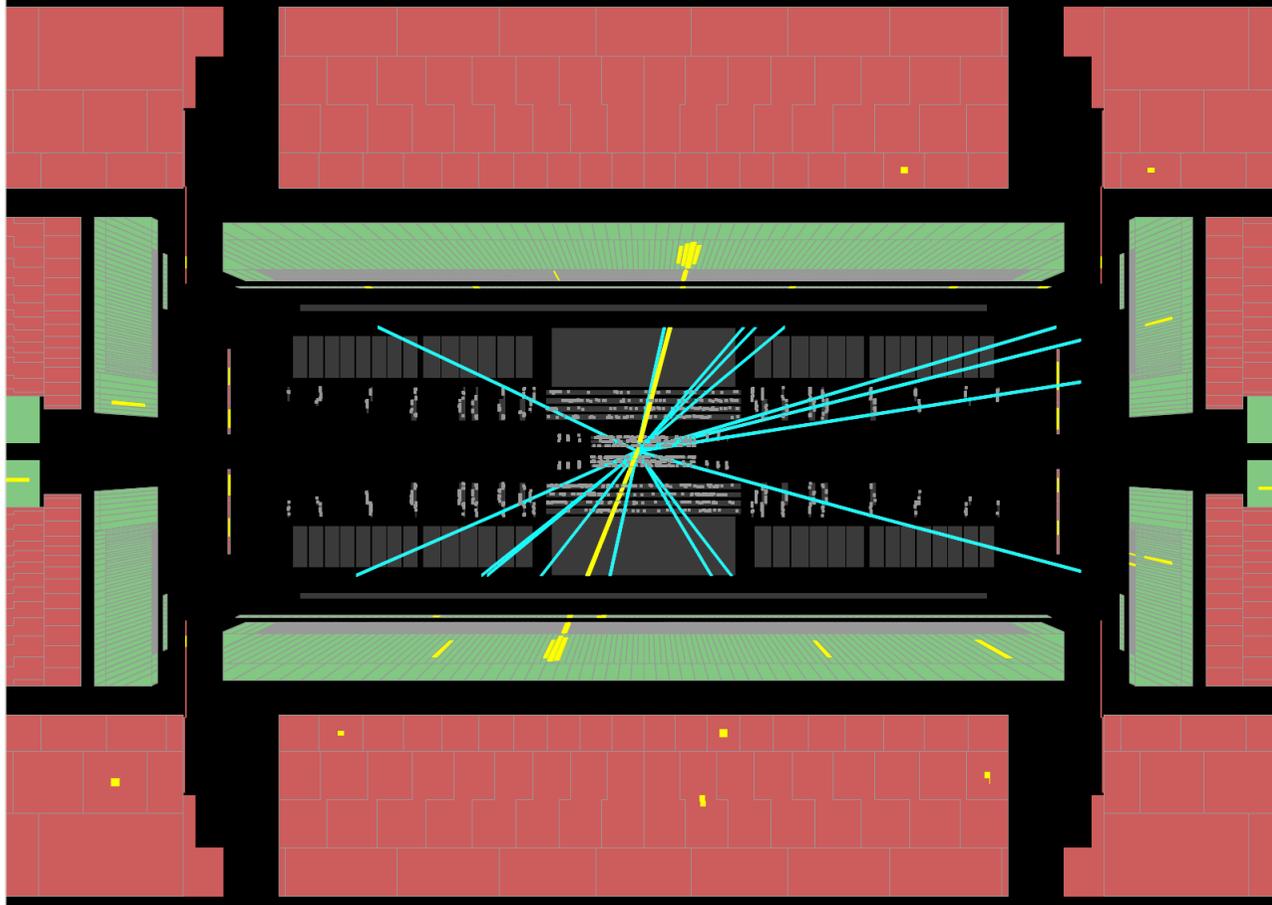
**Uno Z<sup>0</sup> decade in due muoni**



Run Number: 154817, Event Number: 968871  
Date: 2010-05-09 09:41:40 CEST

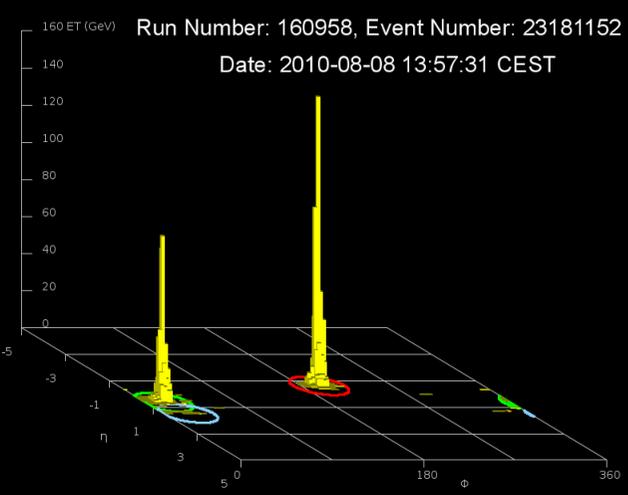
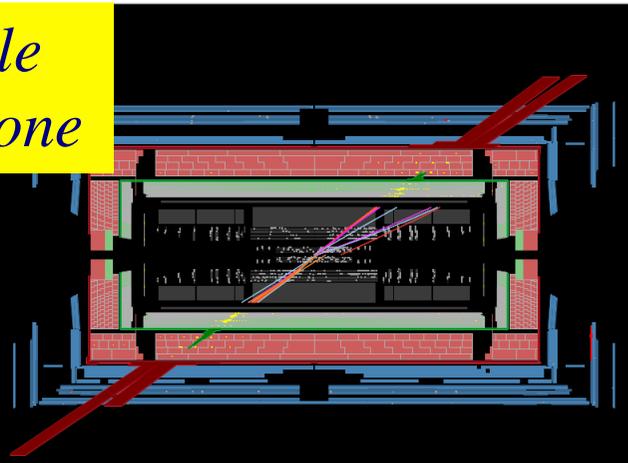
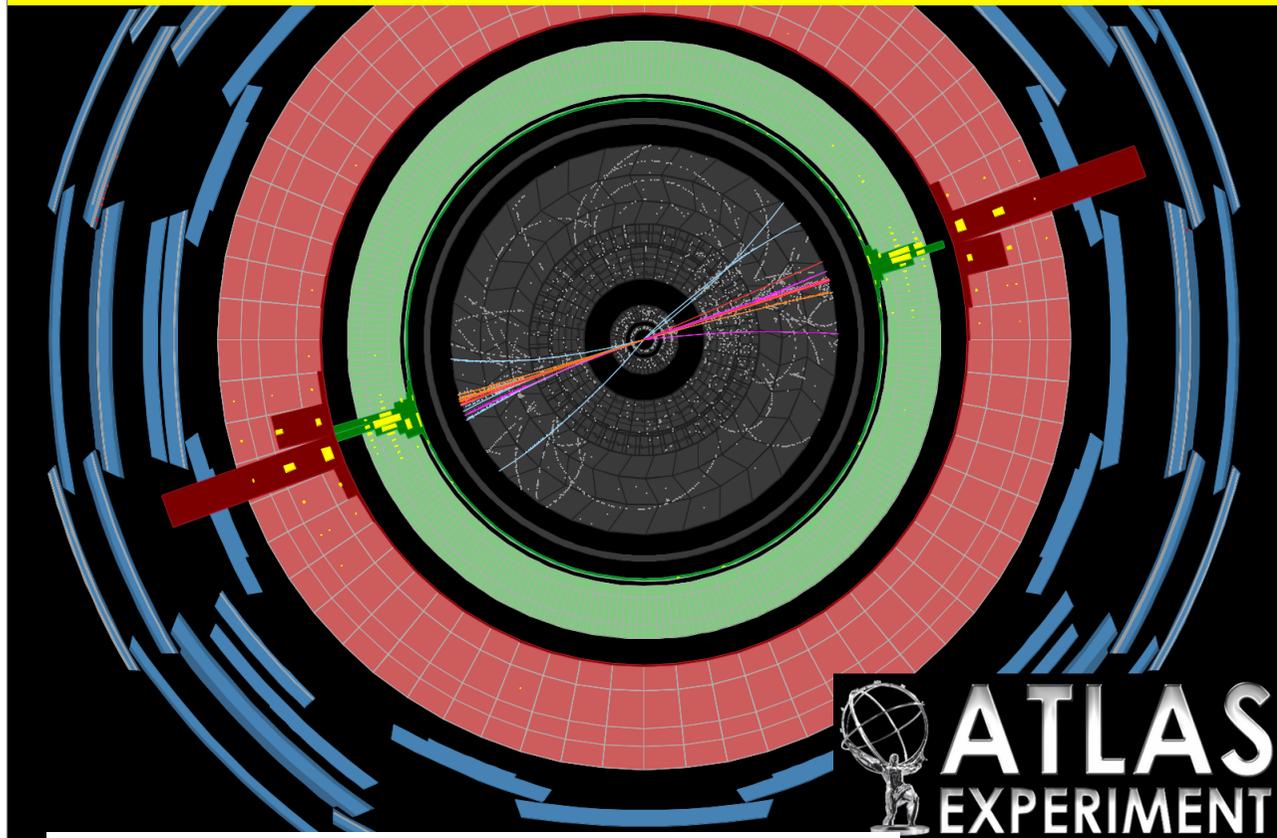
$M_{ee} = 89 \text{ GeV}$

$Z \rightarrow ee$  candidate in 7 TeV collisions



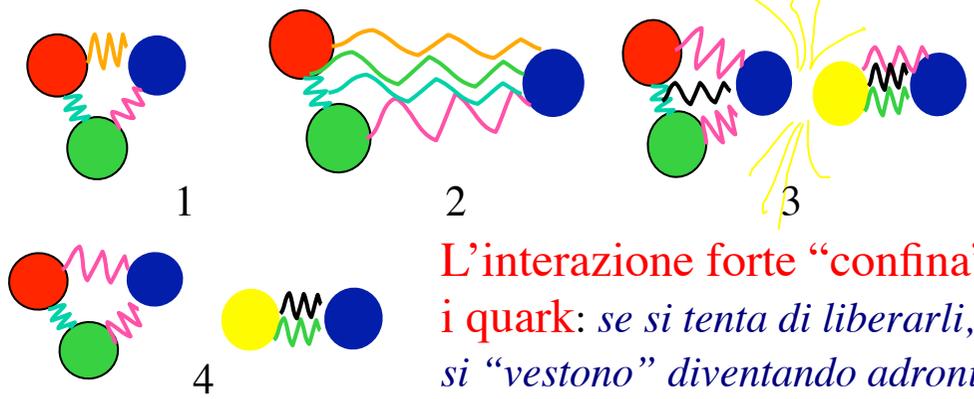
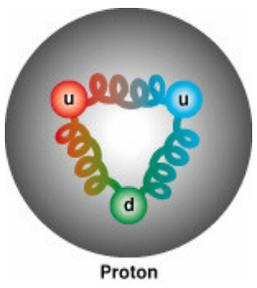
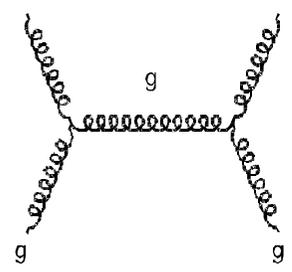
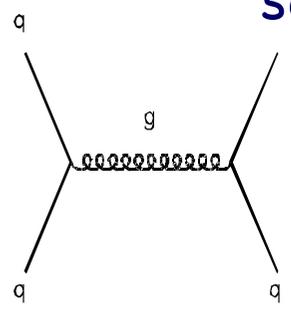
**Uno  $Z^0$  decade in due elettroni**

**Evento a due jet** *jet*: flusso collimato di particelle derivanti dalla “vestizione” di un quark o un gluone



**ATLAS EXPERIMENT**

Interazione forte:  
scambio di gluoni



L'interazione forte “confina” i quark: se si tenta di liberarli, si “vestono” diventando adroni

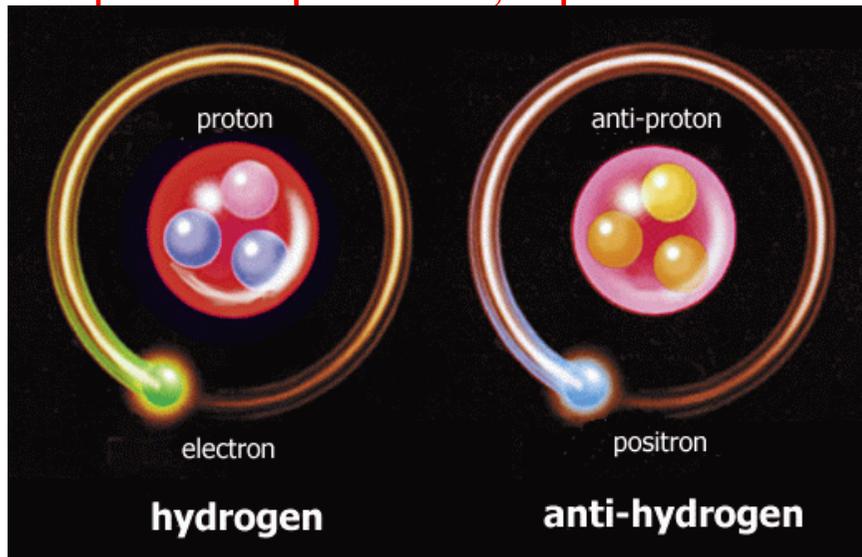
# Non solo LHC *Per esempio, a volte vogliamo rallentare le particelle*

## Produzione e studio di atomi di antimateria (anti-idrogeno)

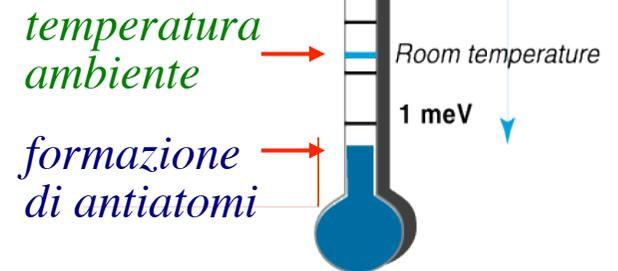


*antimateria:*  
*a ogni particella di materia*  
*corrisponde un'antiparticella*  
*Ma la materia non è solo*  
*fatta di particelle:*  
*proseguendo nella scala della*  
*complessità ci sono atomi,*  
*molecole...*

*Dopo le antiparticelle, il passo successivo è studiare gli antiatomi*

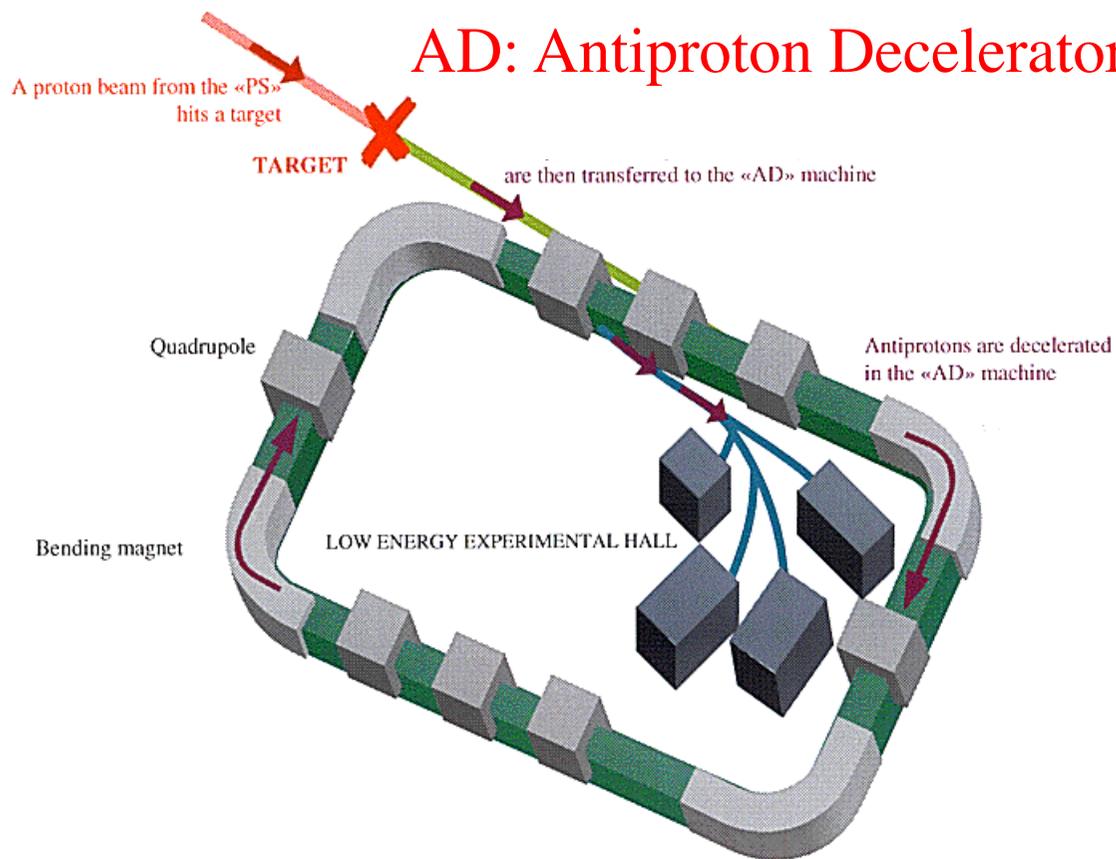


*Il più semplice:*  
*l'anti-idrogeno*  
*(antiprotone+*  
*positrone)*



*Per formare l'anti-idrogeno, dobbiamo*  
*raffreddare (decelerare) le particelle*

# AD: Antiproton Decelerator



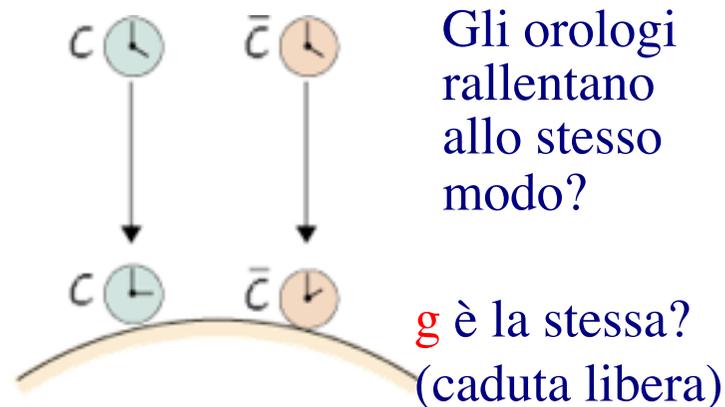
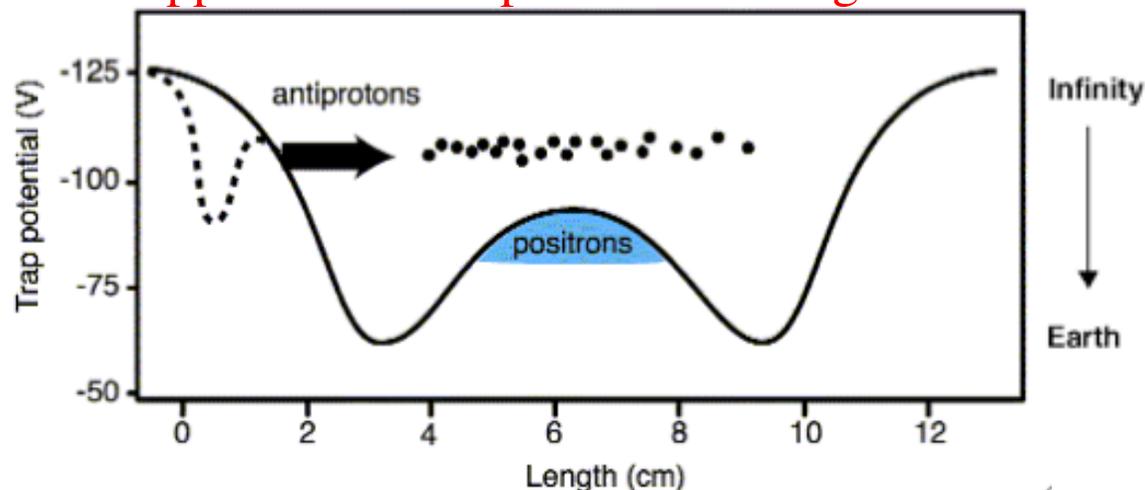
anti-idrogeno rivelato da annichilazione di  $\bar{p}$  e  $e^+$

Obiettivo: farlo vivere abbastanza per studiarlo (finora circa 1000 s)

**Spettroscopia**  
(le transizioni sono le stesse dell'idrogeno?)

**Test gravitazionali**  
(la gravità agisce allo stesso modo per materia e antimateria?)

“Trappola” con campi elettrici e magnetici



Map © Google



# *Il sito del CERN*



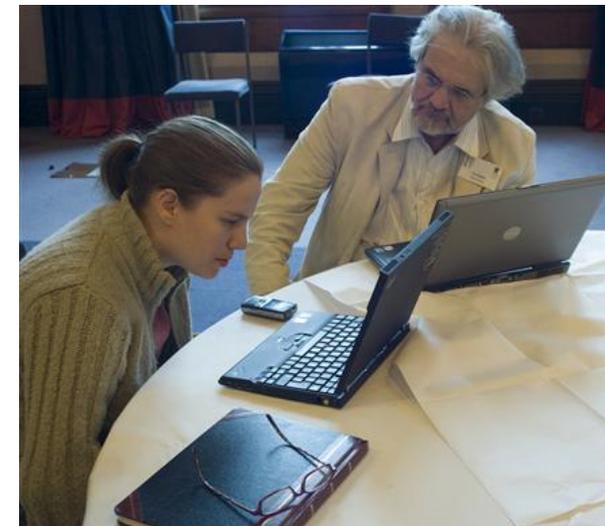


## *Cosa fanno i fisici al CERN?*

Nel lavoro, ognuno ha un campo preferito, ma si è coinvolti in molti aspetti del sistema  
Ogni giorno nuovi argomenti da studiare, nuove tecnologie da imparare e...inventare



*Non ci sono segreti  
(per statuto):  
i risultati sono messi  
a disposizione  
di tutti*



L'atteggiamento mentale che si impara serve  
anche a chi, poi, va a fare un altro lavoro

La trasmissione di conoscenze tra  
generazioni è fondamentale

Sur le terrain du futur institut nucléaire



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)  
(Photo Freddy Bertrand, Genève)

La Suisse du 30 octobre 1953

## Il CERN è una delle prime cooperazioni europee

*“Abbiamo rivolto la nostra attenzione alla creazione di questo nuovo ente internazionale, un laboratorio o un istituto dove sia possibile fare ricerca al di là del quadro nazionale dei vari stati membri...”*

L.De Broglie (1949)

**Oggi: 20 stati membri, 2500 dipendenti, 10000 scienziati coinvolti provenienti da 80 nazioni**



Vi è anche molta competizione. *Ma è la scienza che ne detta le regole.*

**Non contano età, anzianità di servizio, sesso, razza, credo politico, nazionalità: conta la competenza e il contributo di ognuno, senza barriere di lingua e di cultura**

*Il party degli studenti estivi israeliani e palestinesi (agosto 2007)*



# Quanto costa?

**LHC:** 4 miliardi  
(in 10 anni)

**Esperimenti:** 1 miliardo  
di euro (materiale)

**Bilancio CERN:** 800 milioni/anno  
pagato secondi il PIL (Italia 13%)

*Per confronto...*

**Portaerei** (classe *Gerald Ford*): 4.5 miliardi

# A che cosa serve?

*Non sappiamo (ancora) a cosa potrebbe servire -in sé- la scoperta del bosone di Higgs*

*... ma la "scienza pura" porta  
ad esiti a volte inaspettati*

Ricerca  
applicata:  
*candela →  
lume a petrolio*



Ricerca di base (Volta,  
Faraday, Ampère...)

*lampadina*



Tuttavia, gli *strumenti* usati per queste  
ricerche trovano applicazioni **già ora**

## Il sincrotrone del CNAO a Pavia

per l'adroterapia

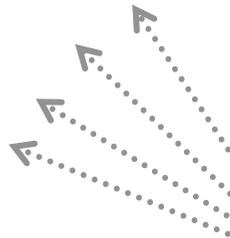


... e anche (ad esempio) nel campo dell'arte



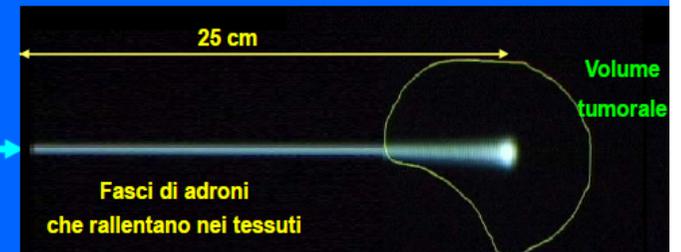
LABEC a Firenze

*Acceleratore elettrostatico  
per "radiografare" l'opera*



Per il controllo  
dei tumori  
radioresistenti  
ioni carbonio  
400 MeV\*A

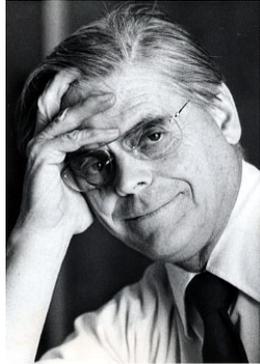
protoni  
200 MeV



La fisica di base ha moltissime ricadute positive.  
Ma, soprattutto, la **conoscenza ha valore in sè**



*Una volta Robert Wilson, direttore di un laboratorio americano, rispose a un senatore che gli chiedeva in che modo la costruzione di un nuovo acceleratore riguardasse la sicurezza nazionale:*



*“Non ha niente a che vedere direttamente con la difesa militare del nostro paese, se non fare sì che valga la pena di difenderlo”*

*curiosità e bisogno di esplorare tipici dell' Uomo*



*Richard P. Feynman*  
**The meaning of it all**  
(Il senso delle cose, Adelphi)

*Non si lavora (solo) per le applicazioni pratiche, ma per l'emozione della scoperta.*

.....  
*Non si può capire la Scienza se non la si conosce e si apprezza per quello che è: la grande avventura dei nostri tempi.*

*Non potete dirvi cittadini del nostro tempo se non sentite quanto è meravigliosa ed esaltante questa avventura.*