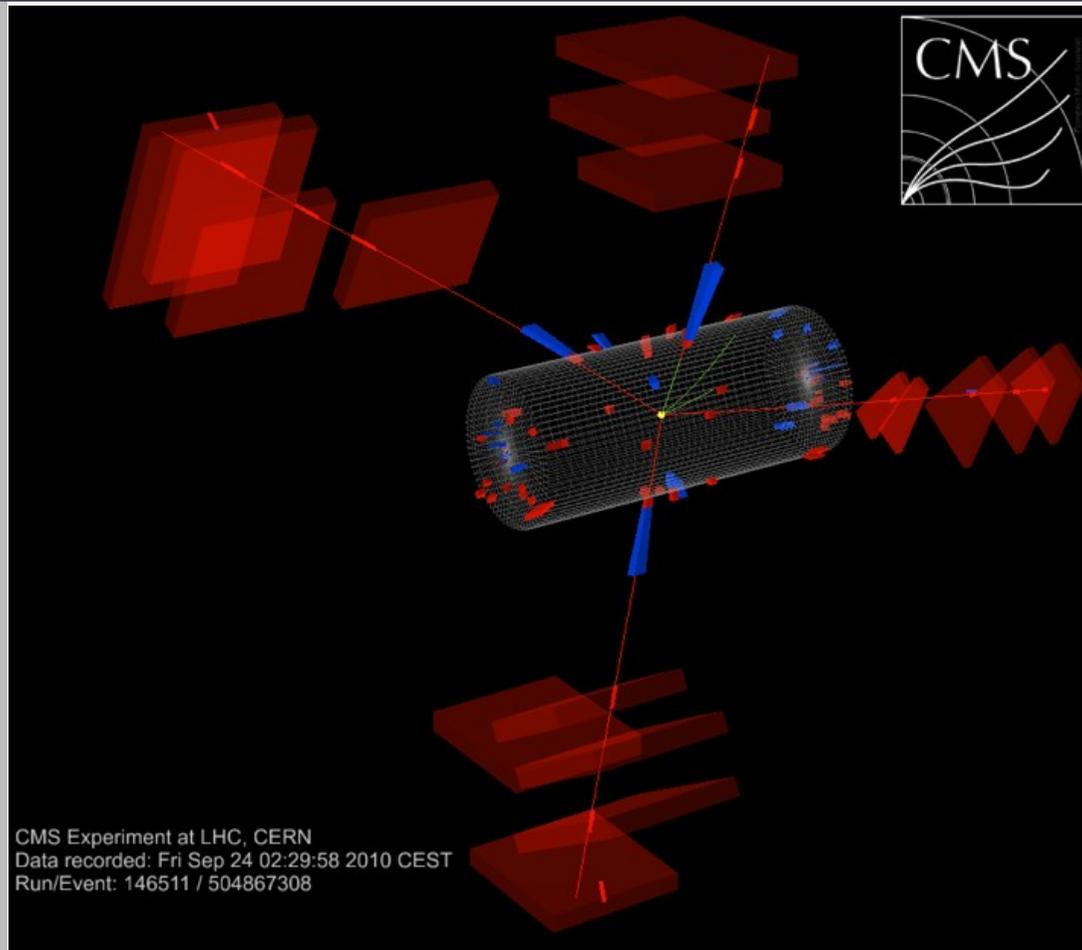
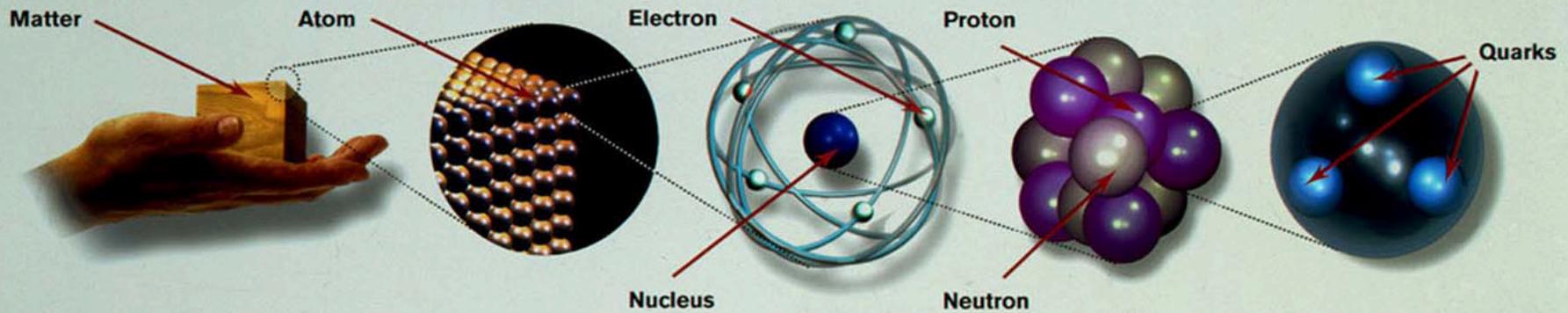


# La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

Fabio Cossutti – INFN Trieste

29 Marzo 2017





**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS					
<b>FIRST FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td> <b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1 </td> <td>  </td> <td> <b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second </td> <td>  </td> </tr> </table>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second	
<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1		<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second			
<b>SECOND FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td> <b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second </td> <td>  </td> <td> <b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay </td> <td>  </td> </tr> </table>	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay	
<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second		<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay			
<b>THIRD FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td> <b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975 </td> <td>  </td> <td> <b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist </td> <td>  </td> </tr> </table>	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist	
<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975		<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist			

QUARKS	
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	
<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two	
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974	
<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964	
<b>Top</b> Heavier still	
<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory	

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

**Gluons**  
Carriers of the strong force between quarks



Felt by: quarks

The explosive release of nuclear energy is the result of the **strong force**

**Photons**  
Particles that make up light; they carry the electromagnetic force



Felt by: quarks and charged leptons

Electricity, magnetism and chemistry are all the results of **electro-magnetic force**

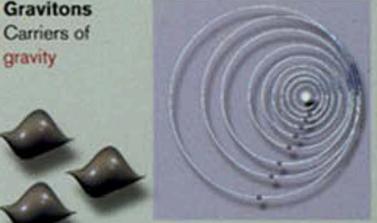
**Intermediate vector bosons**  
Carriers of the weak force



Felt by: quarks and leptons

Some forms of radio-activity are the result of the **weak force**

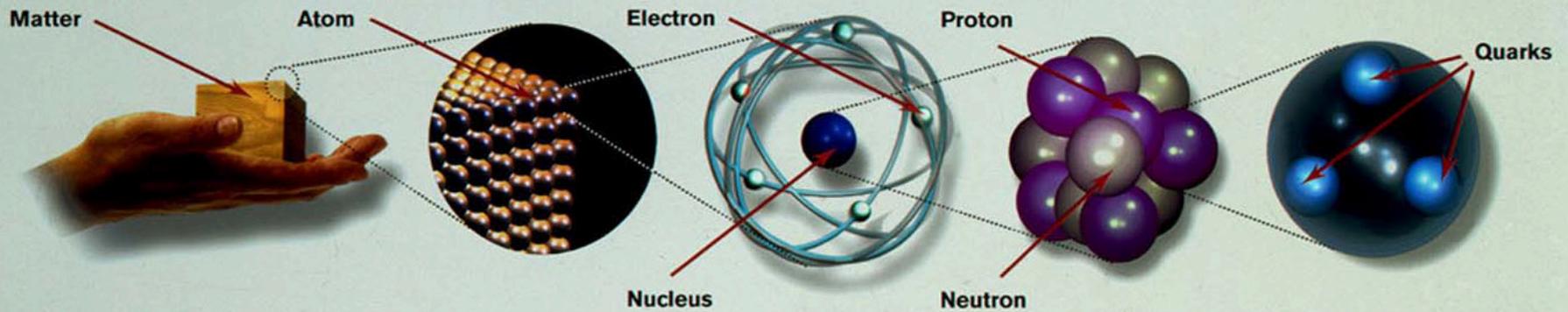
**Gravitons**  
Carriers of gravity



Felt by: all particles with mass

All the weight we experience is the result of the **gravitational force**

GRAPHICS: PETER GROWTHER

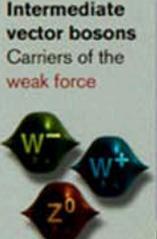
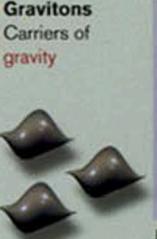


**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

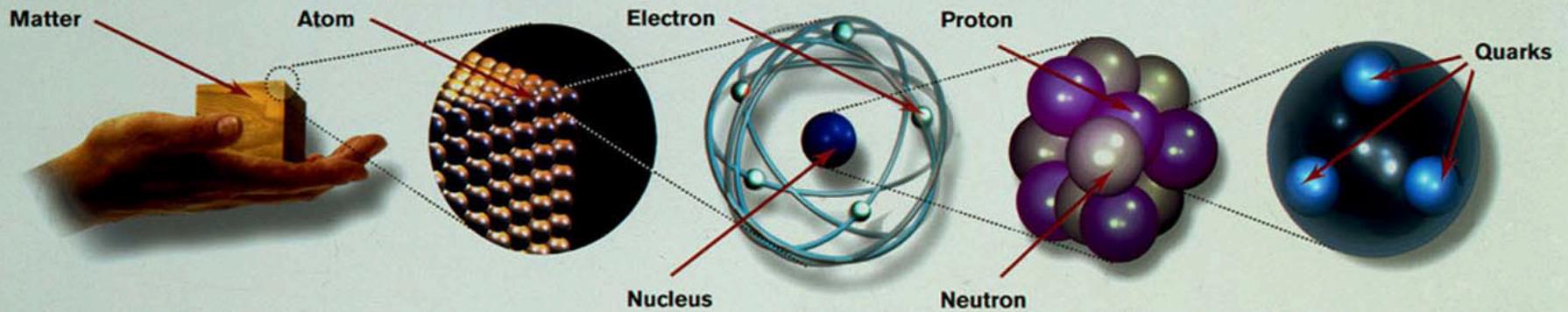
These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS		QUARKS		
<b>FIRST FAMILY</b>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one 	<b>Electron neutrino</b> Created along with electrons when some particles decay 	<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one 	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two 
<b>SECOND FAMILY</b>	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second 	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay 	<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974 	<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964 
<b>THIRD FAMILY</b>	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975 	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist 	<b>Top</b> Heavier still 	<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory 

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<b>Gluons</b> Carriers of the strong force between quarks  <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b></p>	<b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the electromagnetic force  <p>Felt by: quarks and charged leptons</p> <p>Electricity, magnetism and chemistry are all the results of <b>electro-magnetic force</b></p>	<b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the weak force  <p>Felt by: quarks and leptons</p> <p>Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b></p>	<b>Gravitons</b> Carriers of gravity  <p>Felt by: all particles with mass</p> <p>All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b></p>
--	--	--	---

GRAPHICS: PETER GROWTHER



**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS							
<b>FIRST FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td><b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one</td> <td><b>Electron neutrino</b> Created in beta decay</td> </tr> <tr> <td><b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second</td> <td><b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay</td> </tr> <tr> <td><b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975</td> <td><b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist</td> </tr> </table>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one	<b>Electron neutrino</b> Created in beta decay	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist
<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one	<b>Electron neutrino</b> Created in beta decay						
<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay						
<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist						

QUARKS	
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974	<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964
<b>Top</b> Heavier still	<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

**Costituenti della materia**

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

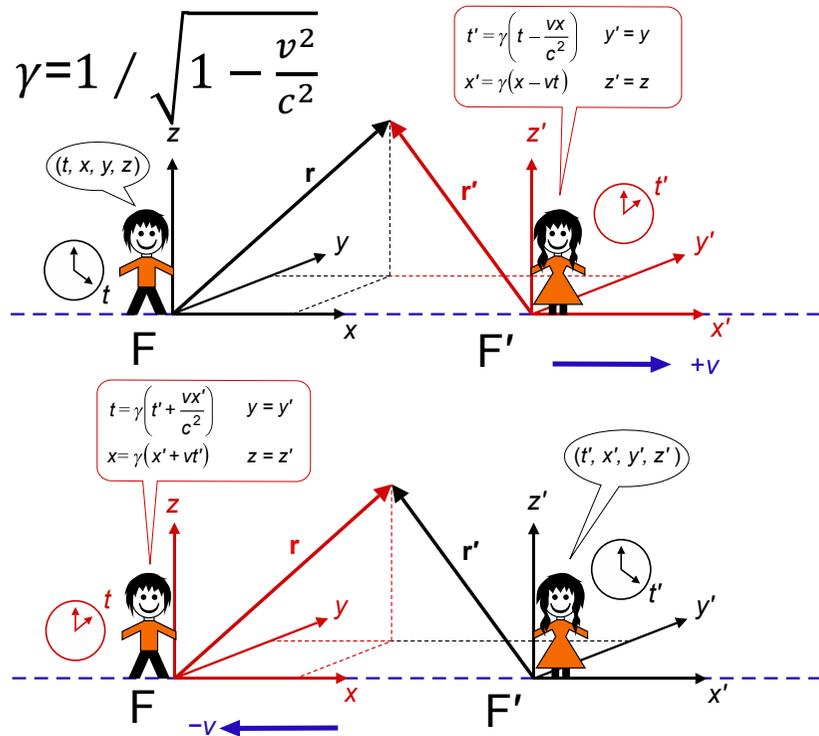
<p><b>Gluons</b> Carriers of the strong force between quarks</p> <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b></p>	<p><b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the electromagnetic force</p> <p>Felt by: quarks and charged leptons</p> <p>Electricity, magnetism and chemistry are all the results of <b>electro-magnetic force</b></p>	<p><b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the weak force</p> <p>Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b></p>	<p><b>Gravitons</b> Carriers of gravity</p> <p>All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b></p>
---	--	---	---

**Mediatori delle interazioni tra i costituenti della materia**

# Fisica delle particelle elementari

## Relatività ristretta

## Meccanica quantistica



+

Ogni particella è descritta da una funzione d'onda. È possibile calcolare la probabilità che in una interazione, descritta da  $V$ , si passi dallo stato  $i$  allo stato  $f$ :

$$\lambda_{if} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{if}|^2 \rho_f$$

*Fermi's Golden Rule*

Transition probability  $\lambda_{if}$   
 Matrix element for the interaction  $|M_{if}|^2$   
 Density of final states  $\rho_f$

$$M_{if} = \int \Psi_f^* V \Psi_i dv$$

Wavefunction for final state  $\Psi_f^*$   
 Wavefunction for initial state  $\Psi_i$   
 Operator for the physical interaction which couples the initial and final states of the system.  $V$

$$(mc)^2 = \left( \frac{E}{c} \right)^2 - p^2$$

= **teoria quantistica dei campi**, la base per descrivere le interazioni tra particelle elementari

# Struttura della materia e forze fondamentali: cosa sappiamo?

---

- ▶ La materia conosciuta è fatta di **leptoni** e **quark**, organizzati entrambi in 3 famiglie
- ▶ Le **interazioni elettrodeboli** sono molto ben descritte dal **modello di Glashow-Weinberg-Salam**
  - ▶ come verificato in 40 anni di esperimenti
- ▶ Le **interazioni forti** sono ben descritte dalla **cromodinamica quantistica**
  - ▶ Anche se spesso non sappiamo bene come usarla per calcolare quantità osservabili
- ▶ Assieme queste teorie costituiscono il **Modello Standard della fisica delle particelle**

# Dalla teoria...

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu} - \frac{1}{2}(F_W^\dagger)_{\mu\nu}(F_W)^{\mu\nu} \\
 & + \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial^\mu H + \frac{1}{2}M_Z^2 Z_\mu Z^\mu + M_W^2 (W_-)_\mu (W_+)^{\mu} - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 \\
 & + \bar{e}(i\cancel{\partial} - m_e)e + i\bar{\nu}\cancel{\partial}\nu \\
 & + ig(\partial_\mu W_{+\nu} - \partial_\nu W_{+\mu})W_-^\nu (\cos\theta_W Z^\mu + \sin\theta_W A^\mu) \\
 & + ig(\partial_\mu W_{-\nu} - \partial_\nu W_{-\mu})W_+^\nu (\cos\theta_W Z^\mu + \sin\theta_W A^\mu) \\
 & + ig(W_-^\mu W_+^\nu - W_+^\mu W_-^\nu)\partial_\mu (\cos\theta_W Z_\nu + \sin\theta_W A_\nu) \\
 & - g^2 W_{+\mu} W_-^\mu (\cos\theta_W Z_\nu + \sin\theta_W A_\nu)(\cos\theta_W Z^\nu + \sin\theta_W A^\nu) \\
 & + g^2 W_+^\nu W_-^\mu (\cos\theta_W Z_\mu + \sin\theta_W A_\mu)(\cos\theta_W Z_\nu + \sin\theta_W A_\nu) \\
 & + \frac{g^2}{2}W_{-\nu}W_{+\mu}(W_-^\nu W_+^\mu - W_-^\mu W_+^\nu) + e\bar{e}\gamma_\mu e A^\mu \\
 & - \frac{g}{2\cos\theta_W} \left[ \frac{1}{2}\bar{\nu}\gamma_\mu(1-\gamma^5)\nu + \bar{e}\gamma_\mu(g_V - g_A\gamma^5)e \right] Z^\mu \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{s}} \left[ \bar{\nu}\gamma_\mu(1-\gamma^5)e W_+^\mu + \bar{e}\gamma_\mu(1-\gamma^5)\nu W_-^\mu \right] \\
 & + \frac{g^2}{4} \left( 2vH + H^2 \right) W_{-\mu}W_+^\mu + \frac{(g^2 + g'^2)}{8} \left( 2vH + H^2 \right) Z_\mu Z^\mu \\
 & - \frac{\lambda}{4} \left( 4vH^3 + H^4 \right) - \frac{m_e}{v} \bar{e}eH
 \end{aligned}$$

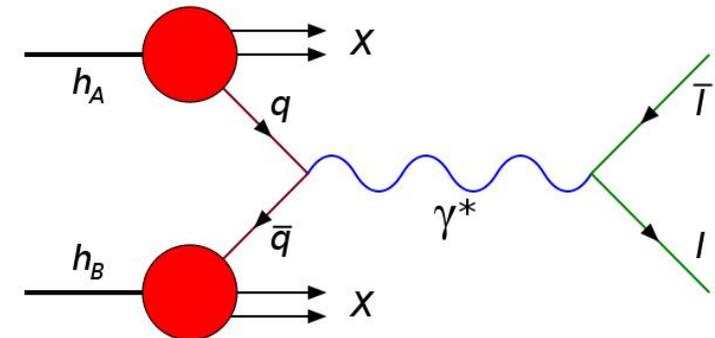
$$g_V = I_3 - 2Q \sin^2 \theta_W; \quad g_A = I_3; \quad (F_W)^{\mu\nu} = \partial^\mu W_\nu^\nu - \partial^\nu W_\mu^\mu$$

$$g \sin \theta_W = g' \cos \theta_W = e; \quad M_W = \frac{gv}{2}; \quad M_Z = \sqrt{g^2 + g'^2} \frac{v}{2}; \quad M_W = M_Z \cos \theta_W$$

- ▶ Potete condensare il Modello Standard in una espressione matematica che spiega le interazioni tra particelle

- ▶ Parametri liberi: masse e accoppiamenti

- ▶ la “forza” con cui le particelle interagiscono tra loro



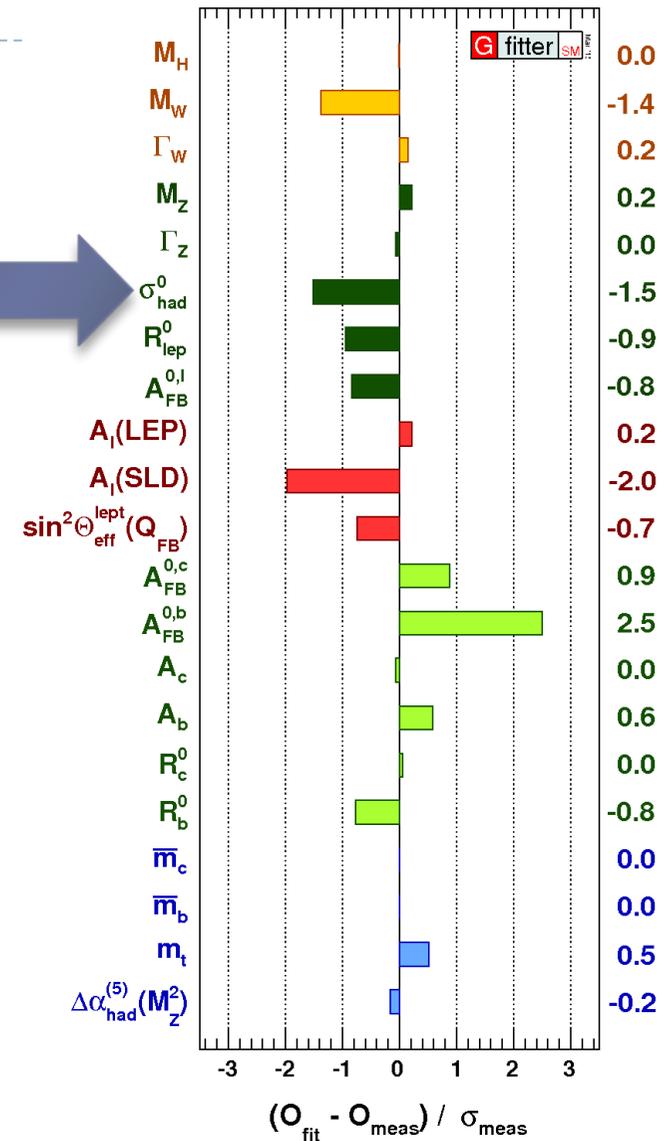
- ▶ Potete calcolare le caratteristiche di un urto tra particelle

- ▶ diagrammi di Feynman: ad ogni linea e vertice corrisponde una espressione matematica

# ... alla misura sperimentale

## ▶ Due tipi di analisi sperimentali:

- ▶ Misure di precisione delle caratteristiche predette dal modello (parametri fondamentali, grandezze misurabili in urti tra particelle ad esse collegate...)
  - ▶ deviazioni dalle predizioni possono indicare fisica oltre il Modello Standard
- ▶ Ricerca diretta di “nuova fisica”
  - ▶ evidenza diretta della produzione di particelle non osservate prima, non predette dal Modello Standard

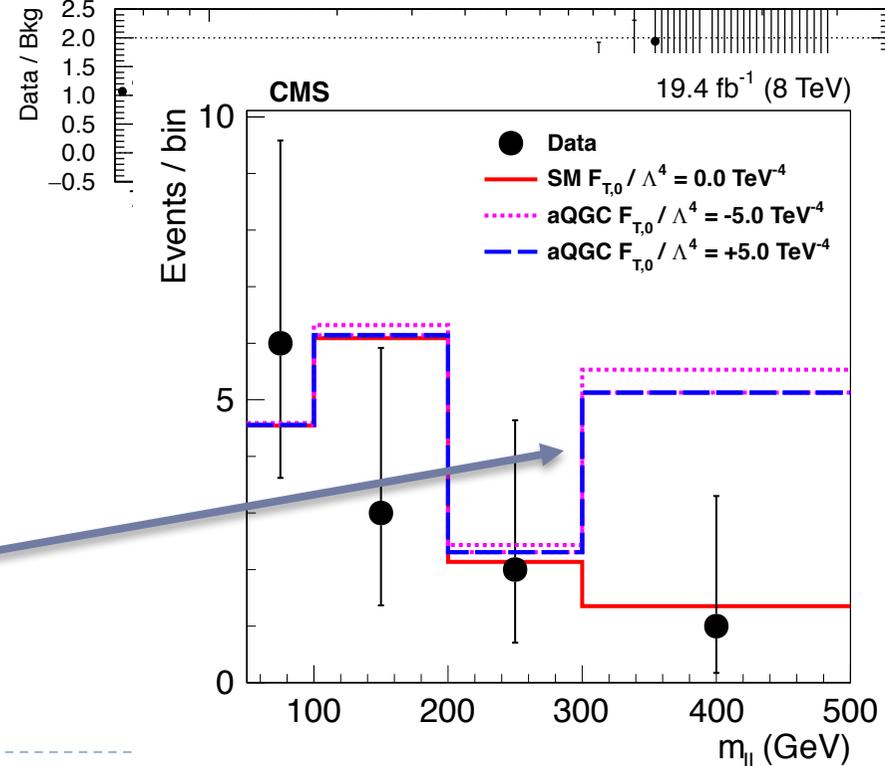
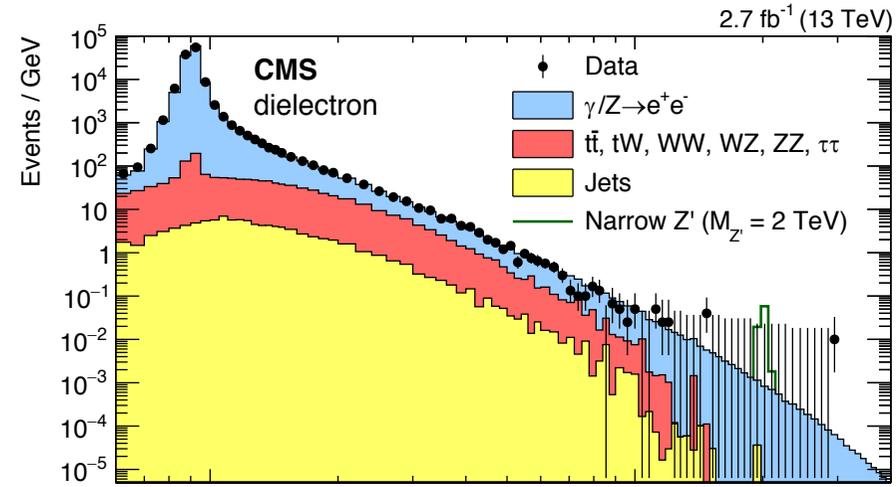
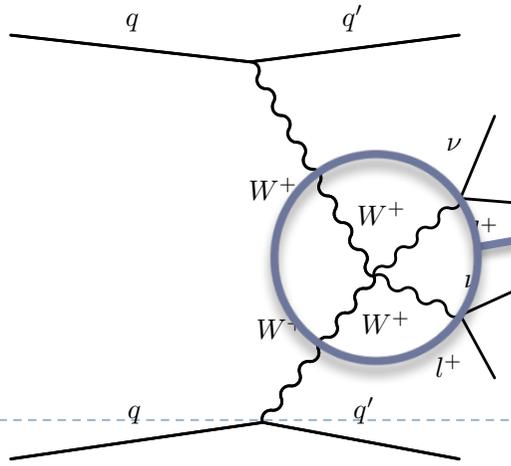


## ▶ Approcci complementari

- ▶ le misure di precisione possono evidenziare fenomeni ad energie non direttamente accessibili alla ricerca diretta
  - ▶ Produzione di “particelle virtuali” nelle “correzioni di ordine superiore”

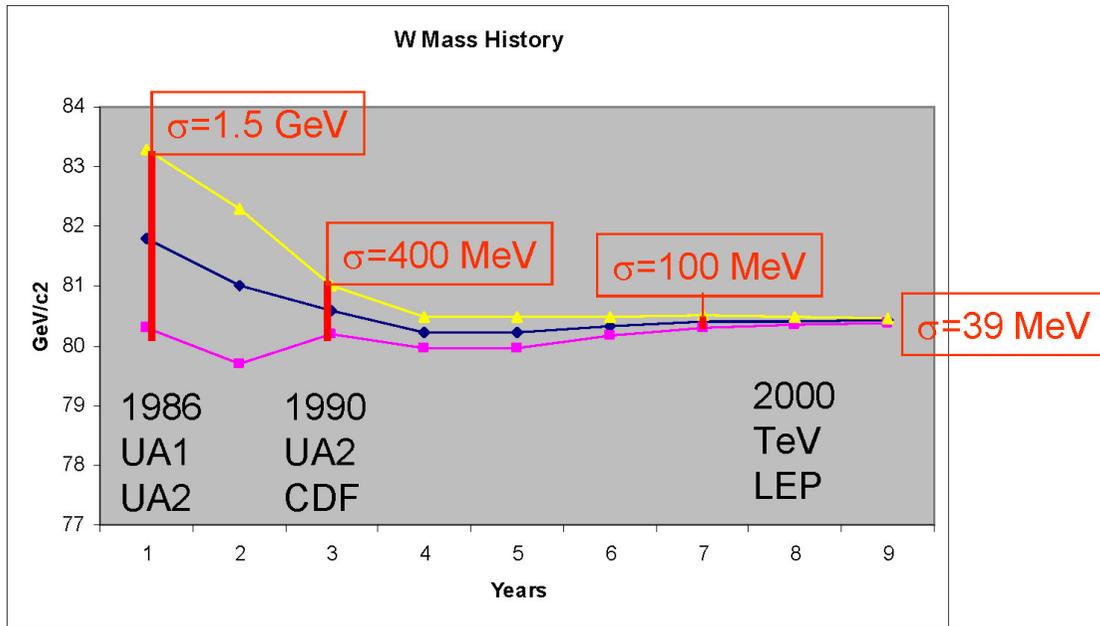
# Due facce della stessa medaglia

- ▶ Ricerca di nuova fisica: produzione di  $Z'$  ad alta massa che decade in due elettroni
- ▶ Misura di precisione: urto tra due bosoni  $W$

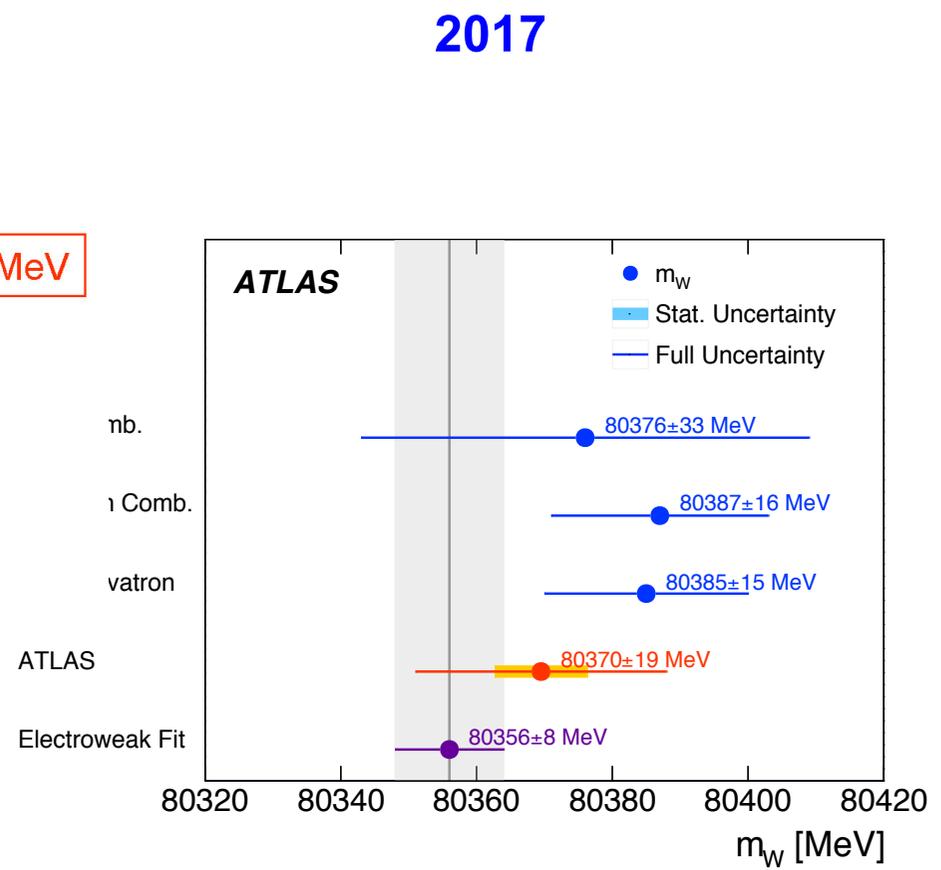
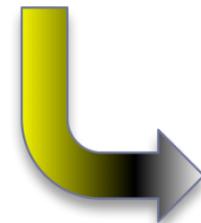


Se nuove particelle scambiate nel vertice tra 4 W

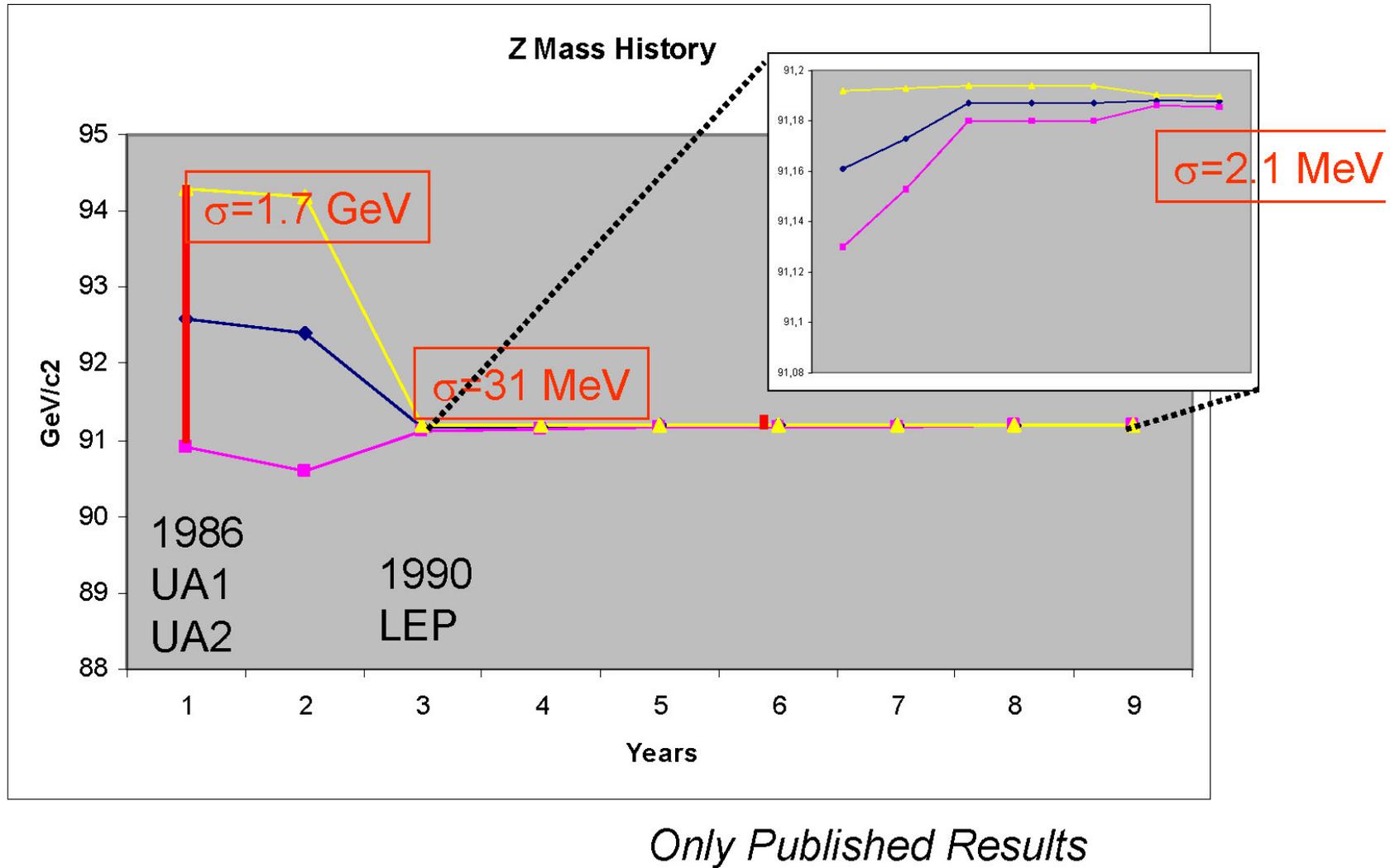
# I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



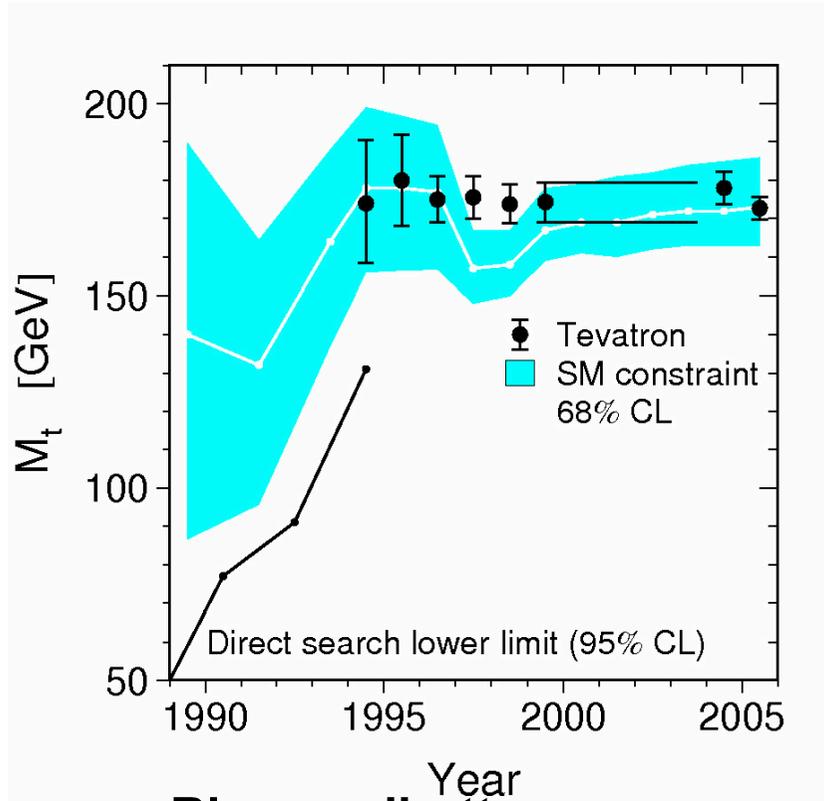
Only Published Results



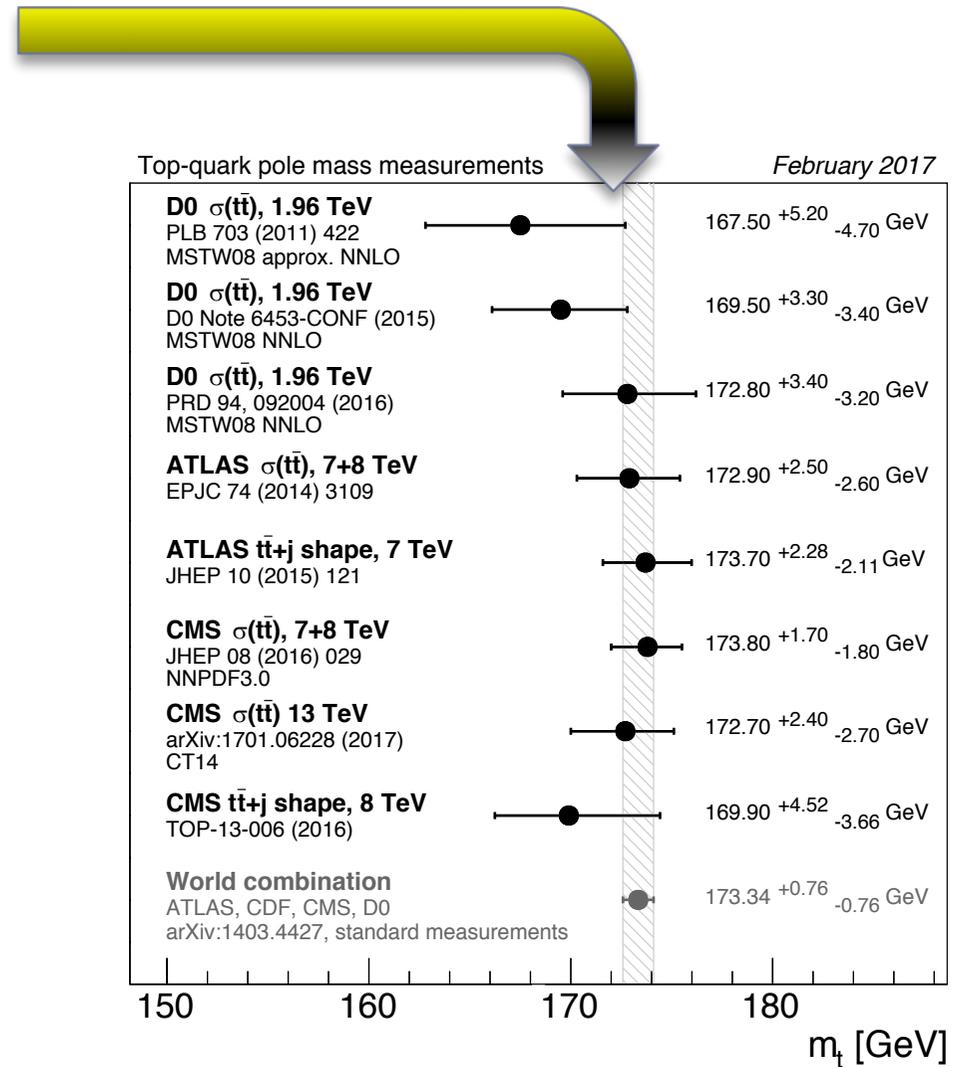
# I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



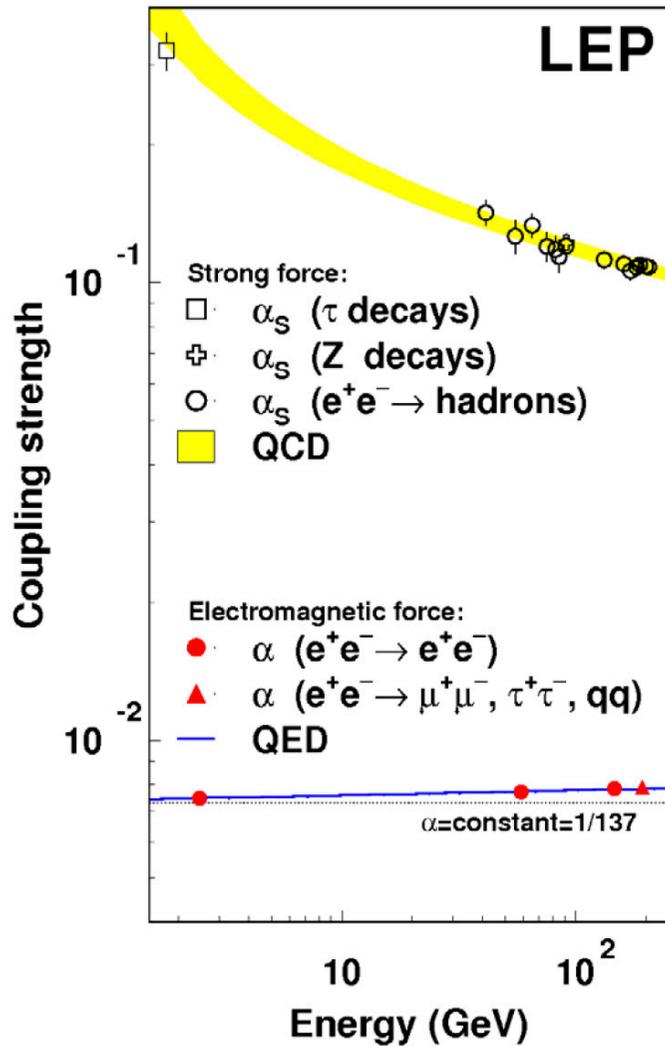
# 20 anni di quark top: trovato dove doveva essere



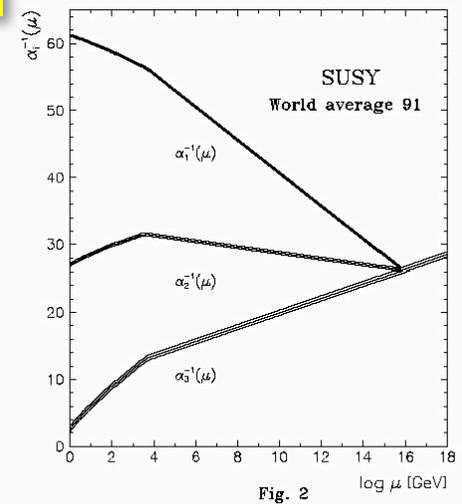
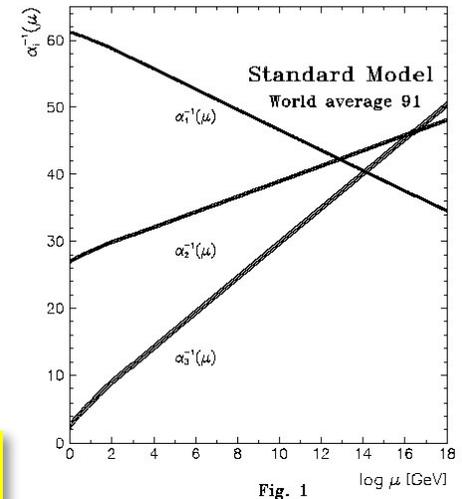
**Ricerca diretta  
 al Tevatron guidata  
 dai vincoli dati dal  
 Modello Standard  
 Mediante le misure  
 di LEP**



# Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

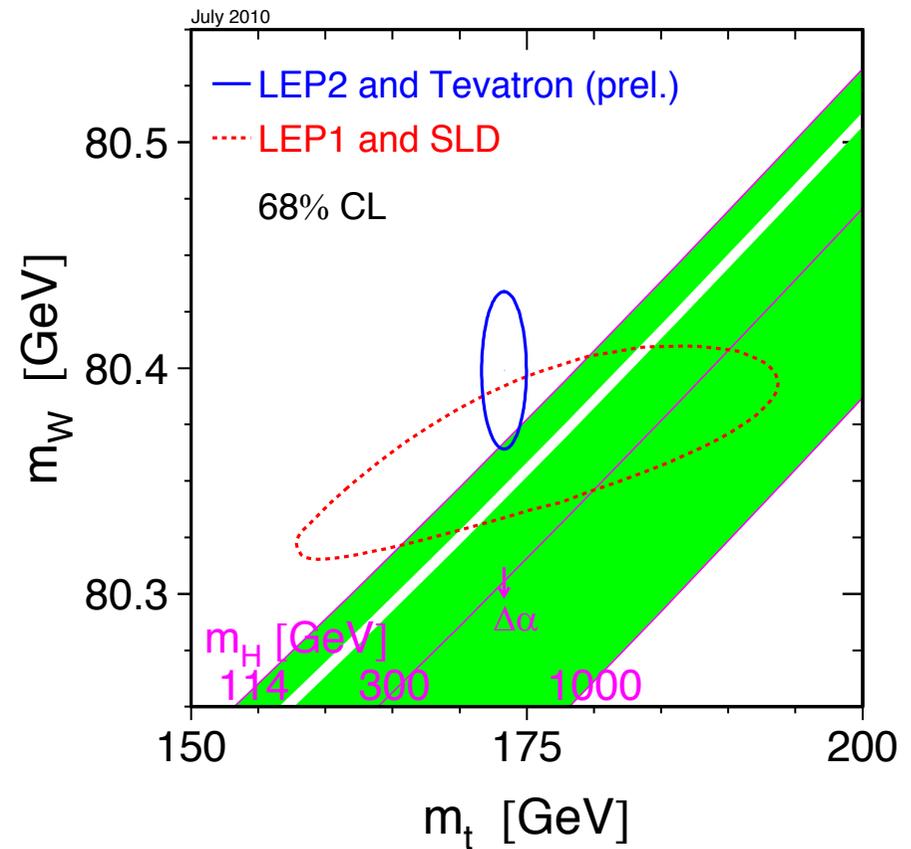
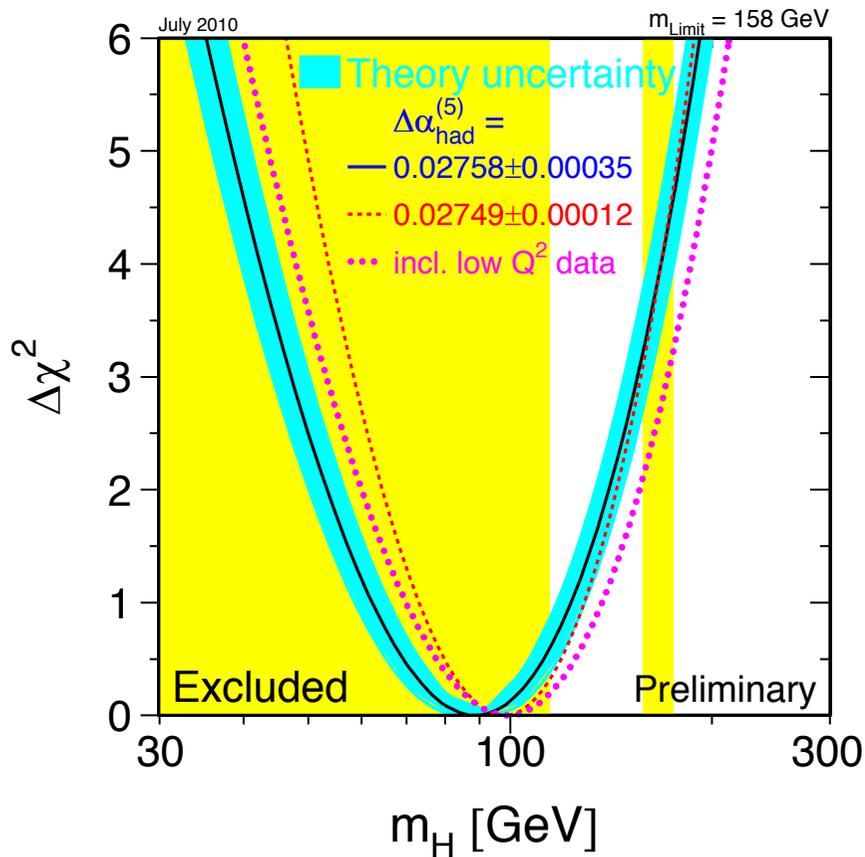


La “forza” con cui le particelle si accoppiano dipende dall’energia a cui lo fanno



# Perchè tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

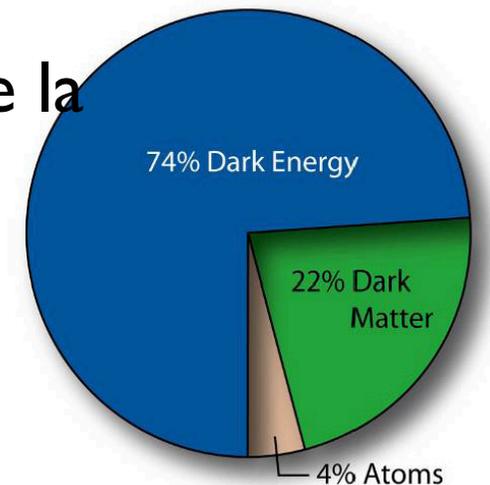
**2010:**  
 **$M_H = 89^{+35}_{-26}$  GeV @ 68% C.L.**



# Le domande per LHC

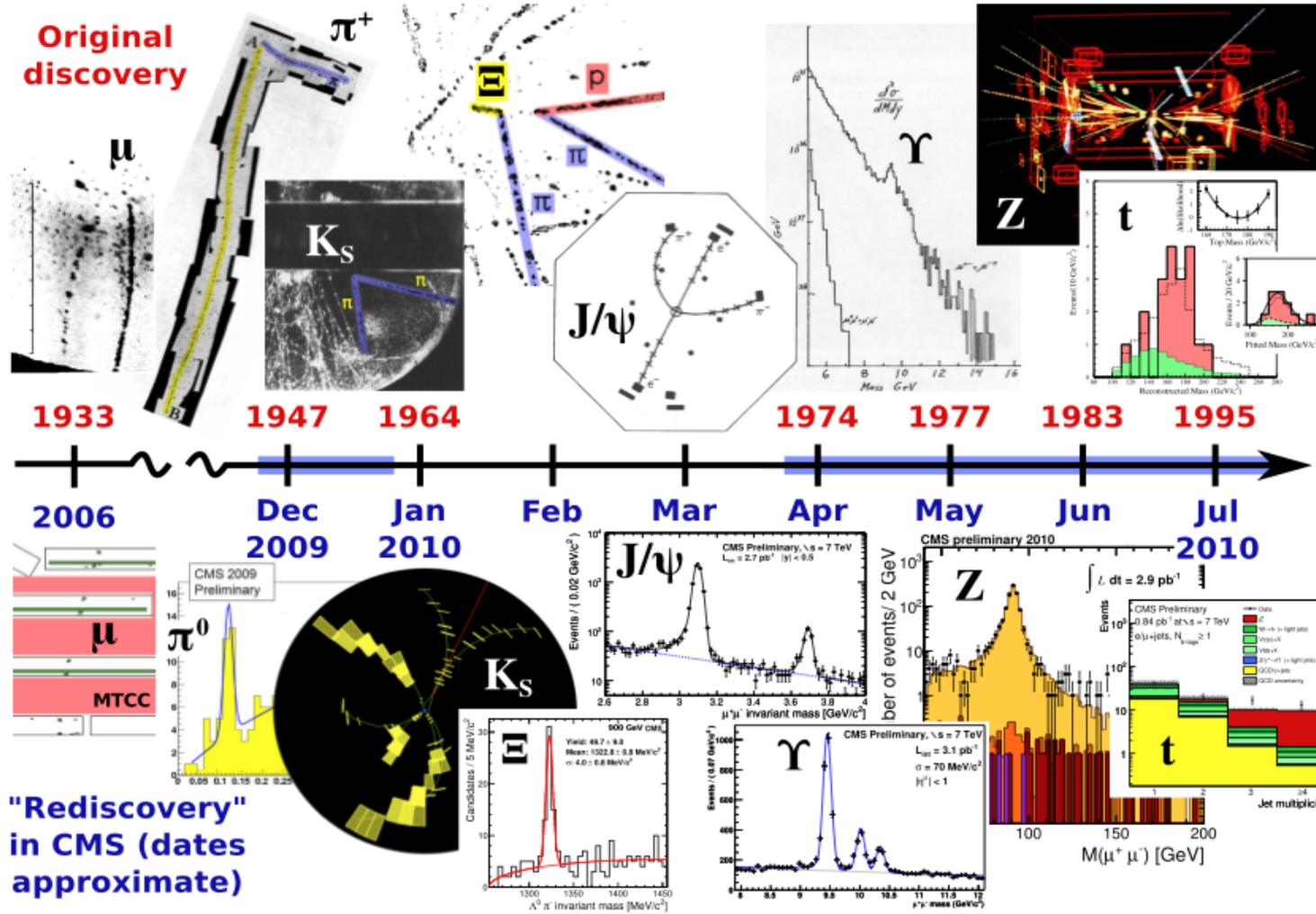
- ▶ Origine della massa: esiste il **bosone di Higgs** come previsto dallo Standard Model e dal suo meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole?
- ▶ Esiste una simmetria ulteriore tra fermioni e bosoni? È la **supersimmetria**? Quale dei tanti possibili scenari?
- ▶ Ci sono signature che indicano un legame tra la **gravitazione** e le altre tre forze fondamentali?
- ▶ Di cosa è fatta la **Materia Oscura** che compone la maggior parte della massa dell' Universo?

**Il Modello Standard non può essere la fine della storia...**



# Dopo pochi mesi di run nel 2010...

## Re-discovered the Standard Model at 7TeV



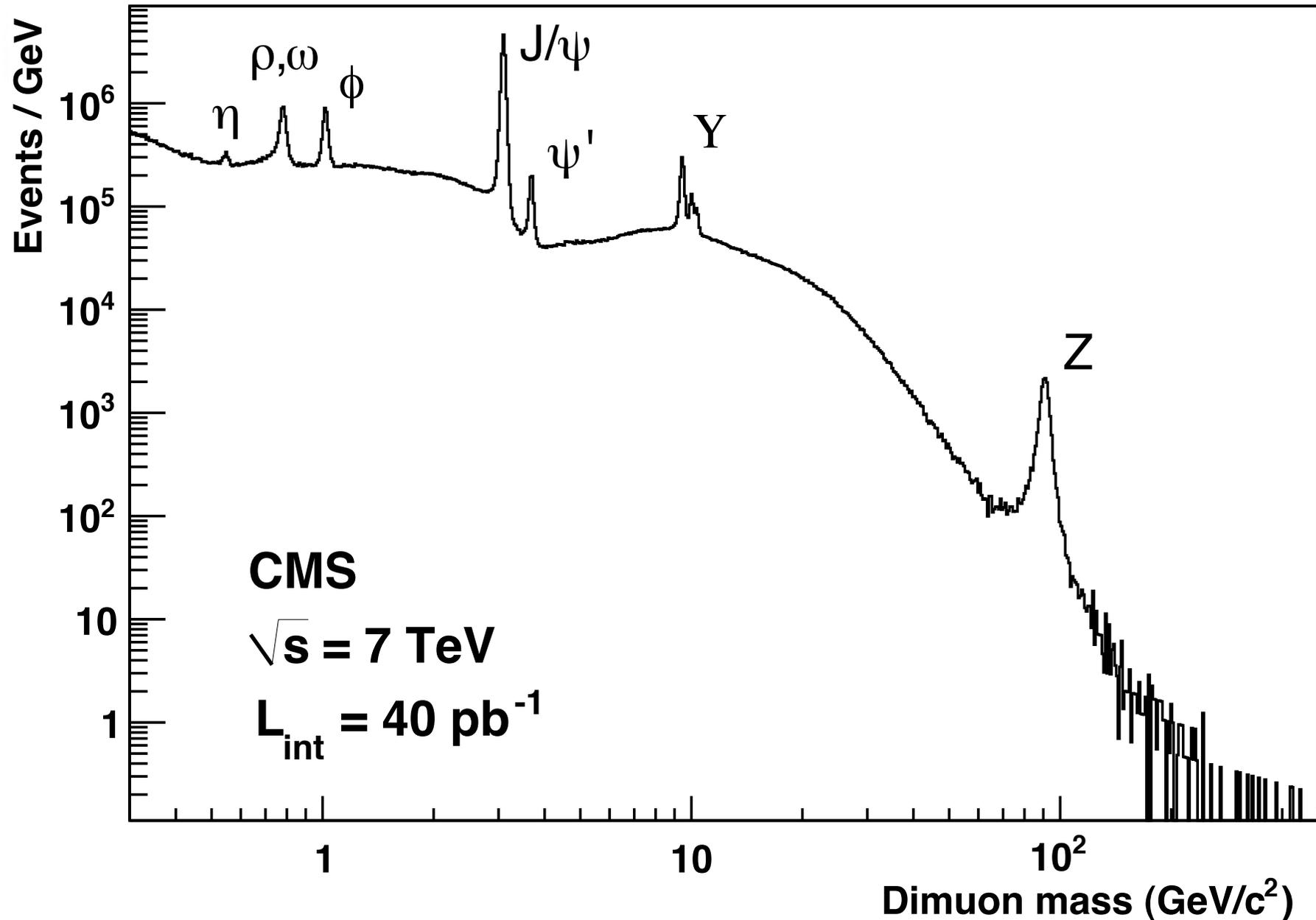
G. TONELLI, CERN/INFN/UNIPISA

LHCC

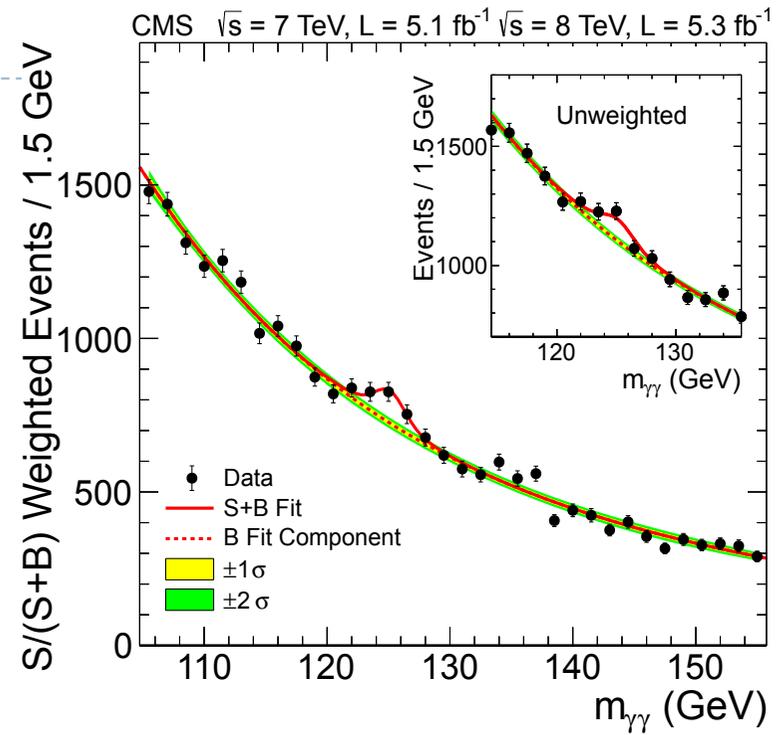
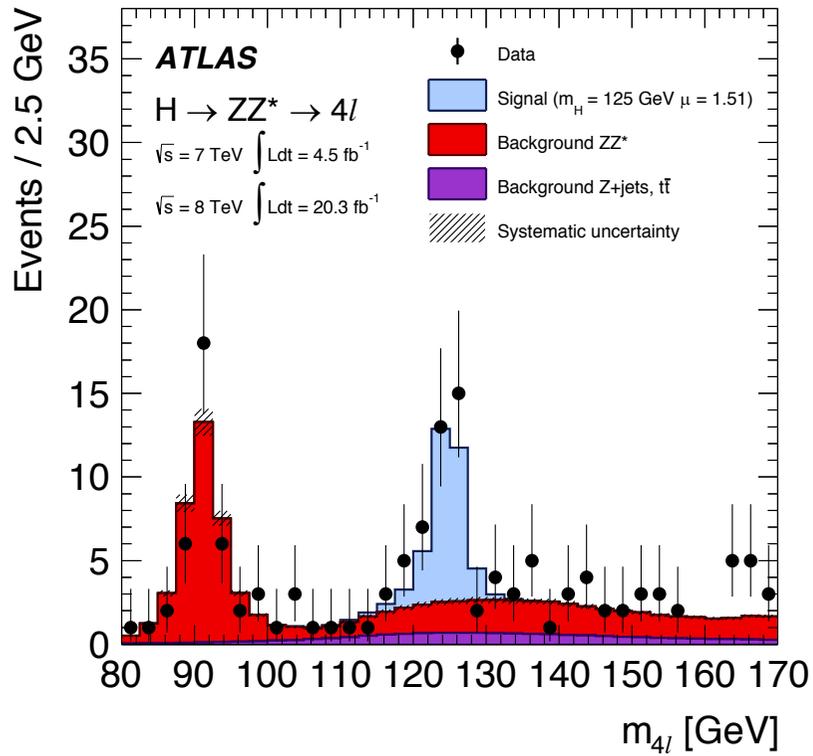
NOVEMBER 16, 2010

4

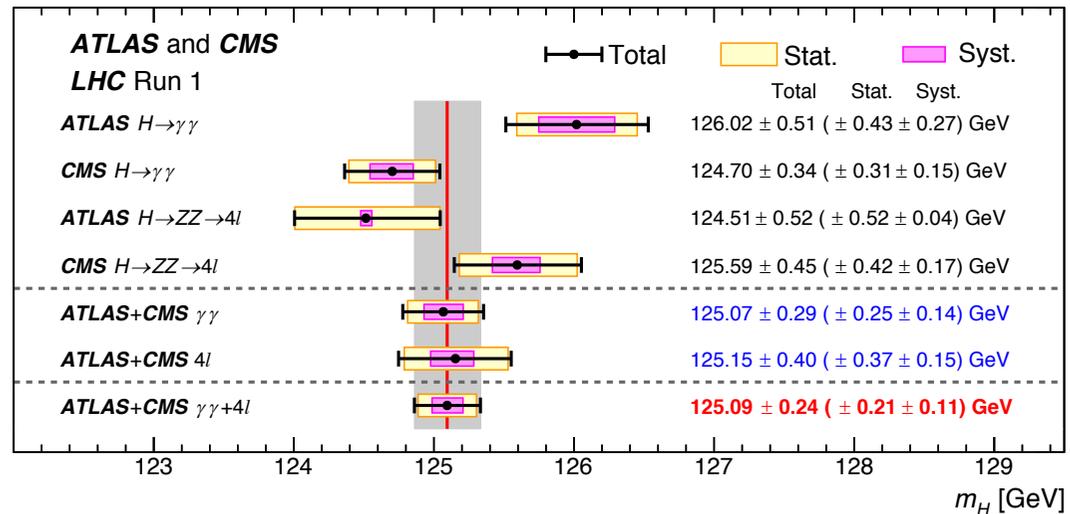
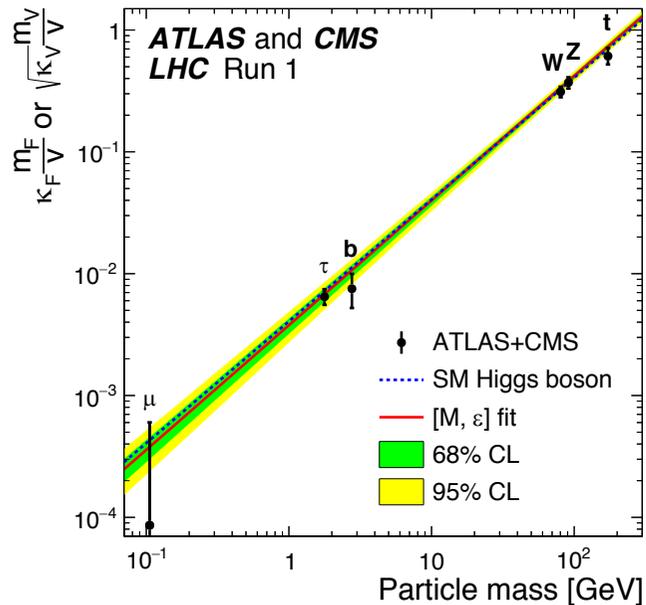
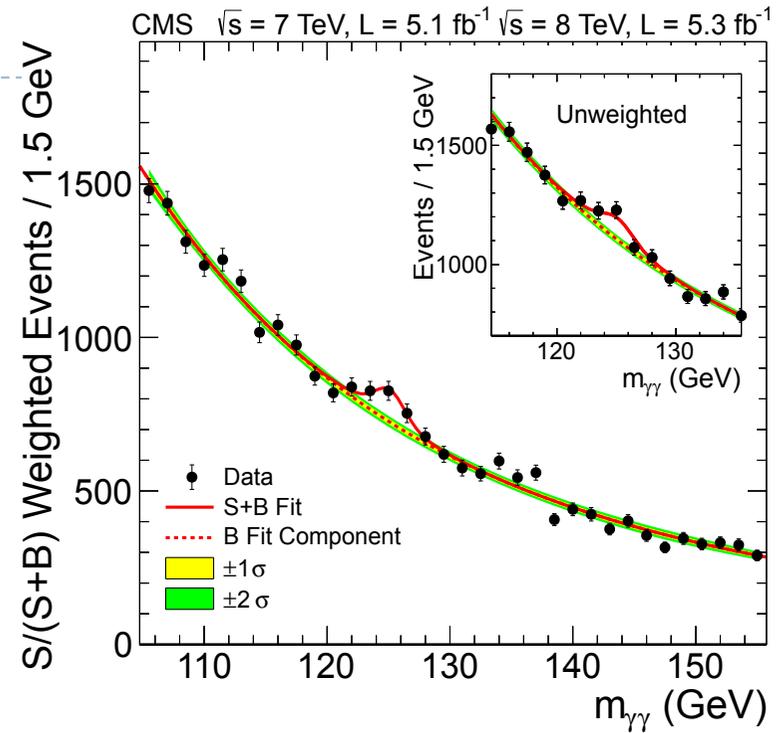
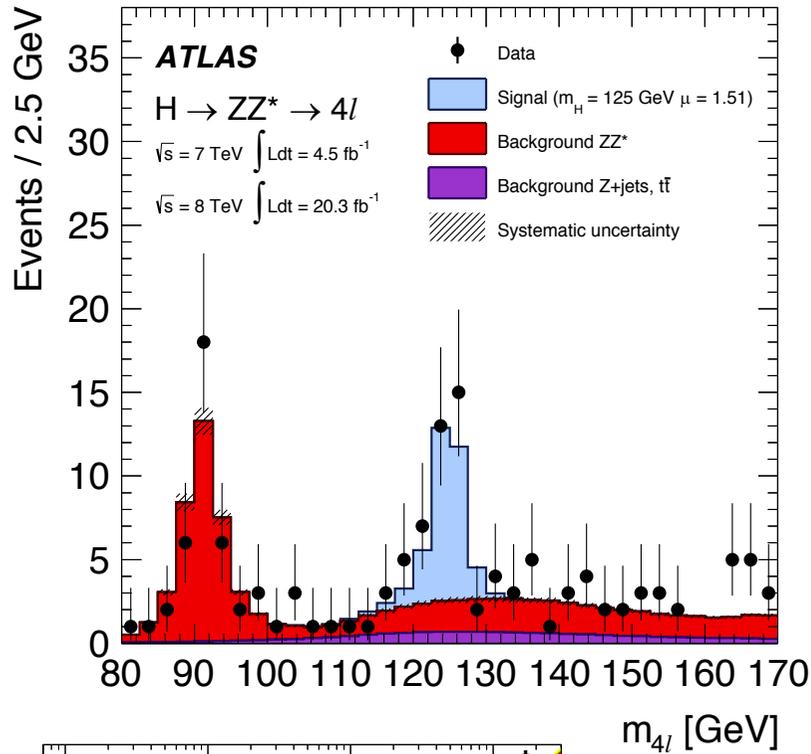
# Dopo pochi mesi di run nel 2010...



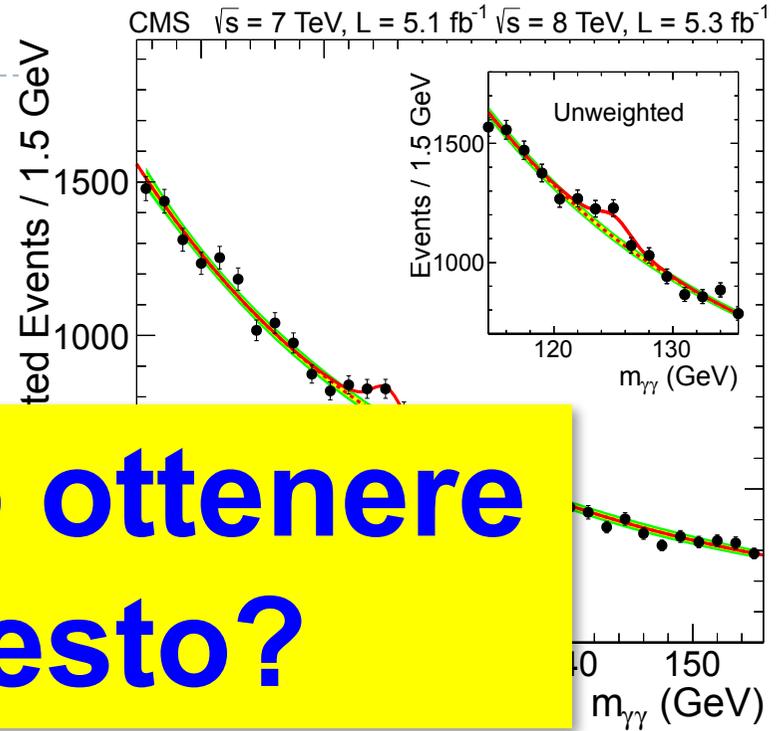
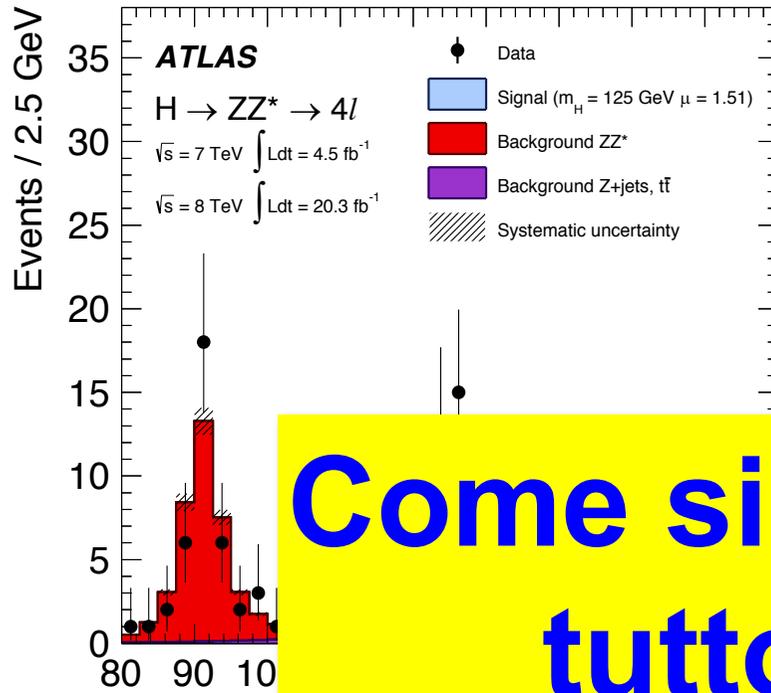
# Dopo 3 anni di run...



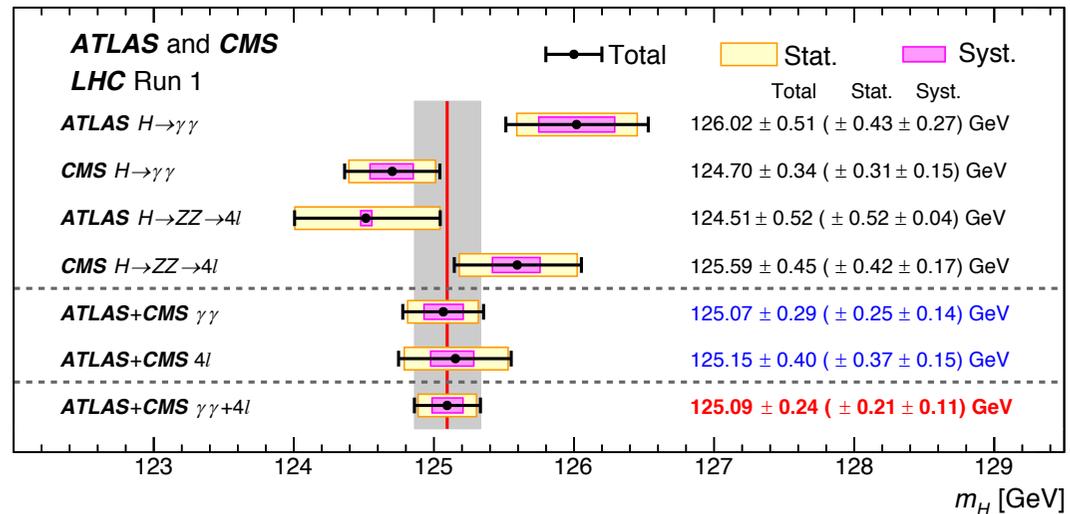
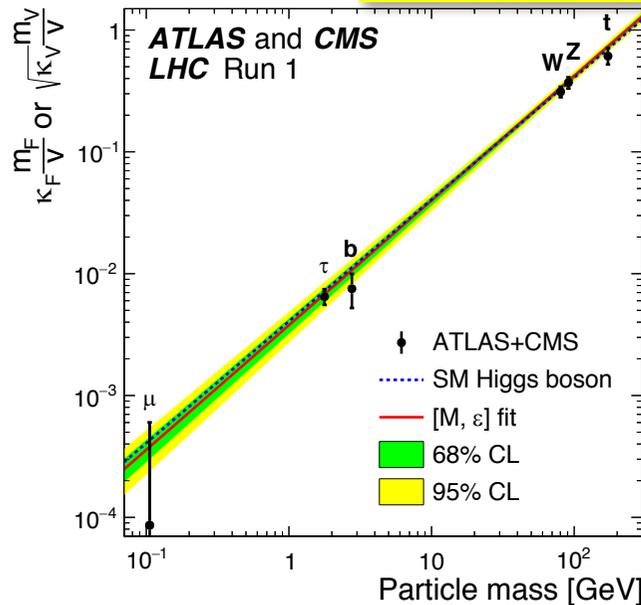
# Dopo 3 anni di run...



# Dopo 3 anni di run...



**Come si può ottenere tutto questo?**

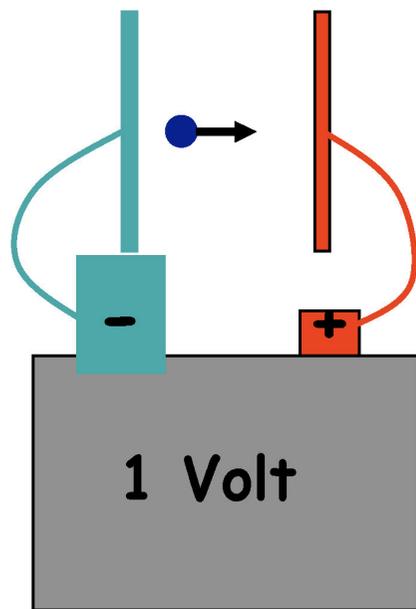


# Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) =  $10^9$  eV

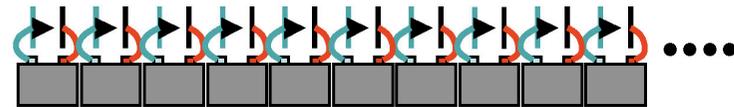
$m_{\text{protone}} = 0.938 \text{ GeV} = 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

$m_{\text{elettrone}} = 0.0005 \text{ GeV} = 9.109 \times 10^{-31} \text{ Kg}$



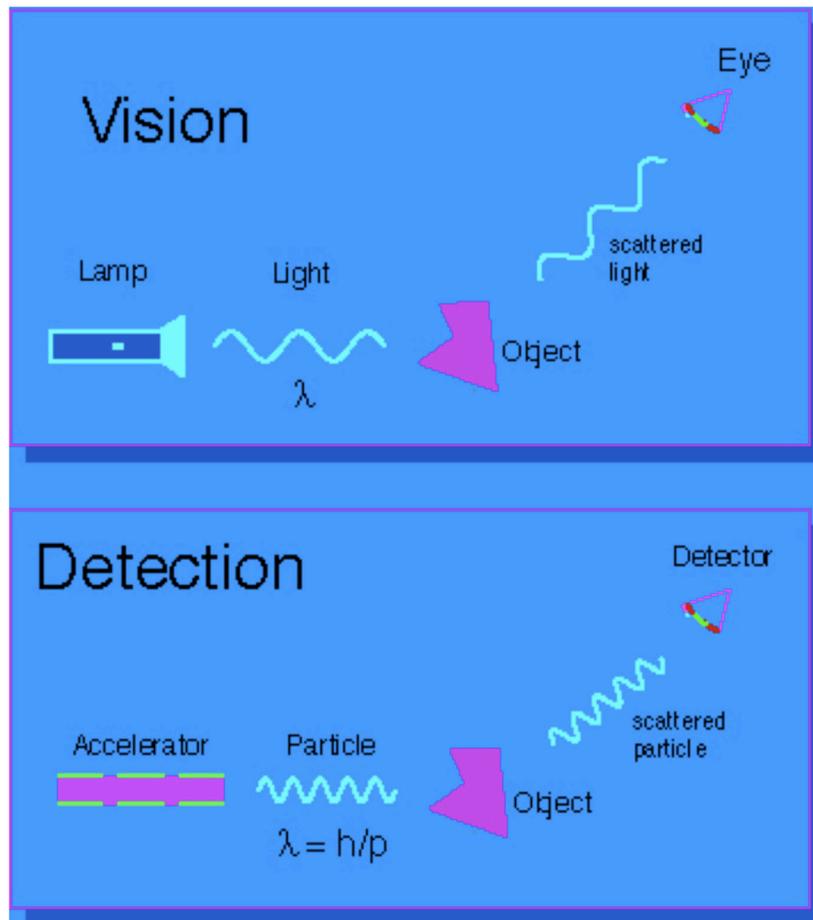
$E = 1 \text{ eV}$

Per dare ad un elettrone l'energia di 1 GeV, dovremmo mettere in serie  $10^9 = 1000000000$  pile da 1 Volt !!

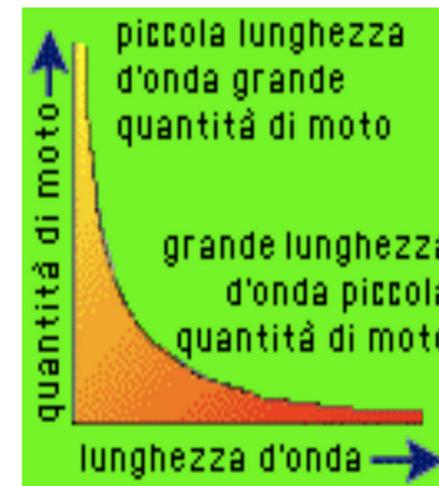


Perché vogliamo accelerare le particelle a così alte energie?

# L'osservazione del microcosmo

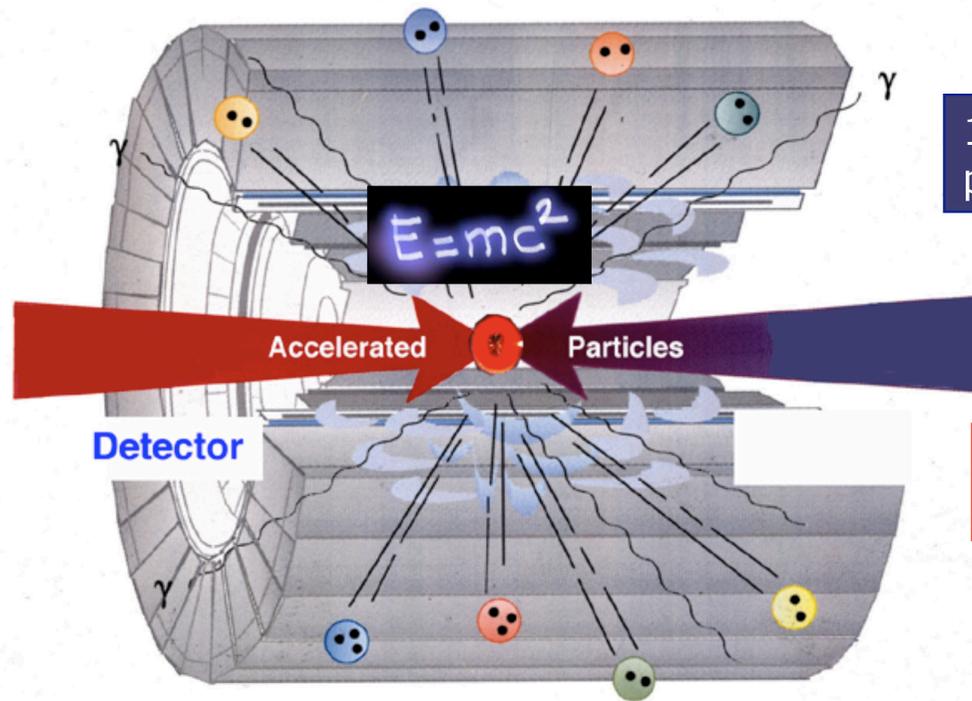


I più piccoli dettagli “risolvibili” hanno dimensioni confrontabili con  $\lambda$  della radiazione incidente.



Particelle di alta energia sono gli “esploratori del microcosmo”

# Perchè un collisionatore ?



1) Concentrare energia sulle particelle nell' **Acceleratore**

2) Fare collidere le particelle

3) Identificare i prodotti dell'interazione nel **Rivelatore**

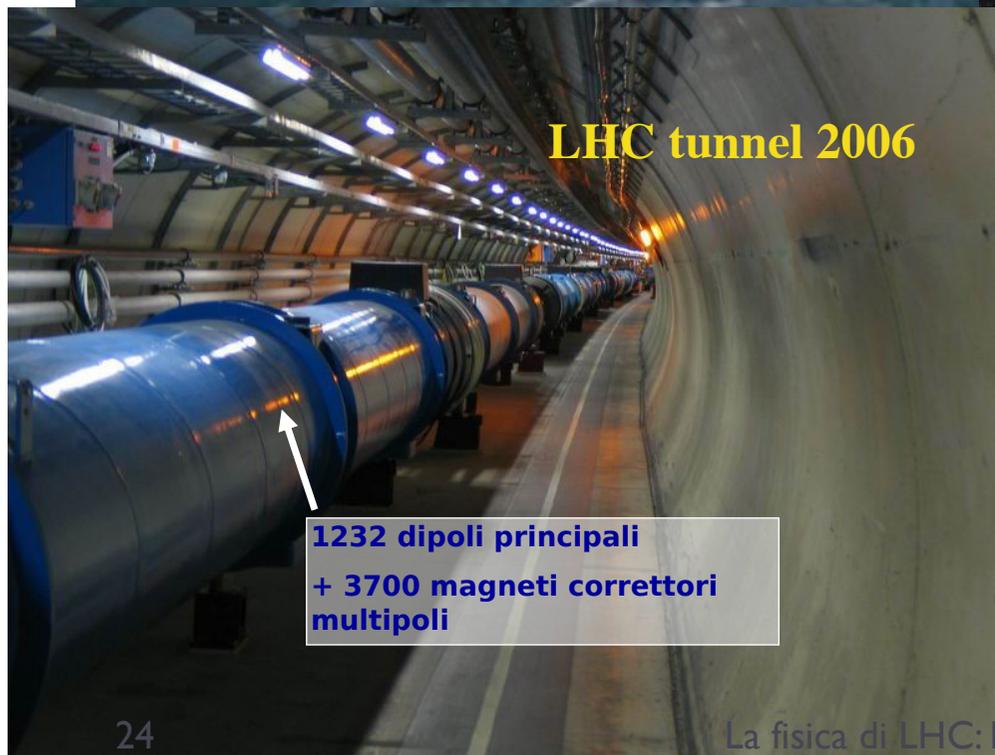
$E=mc^2$  : la massa si può trasformare in energia e viceversa

**Collider vs bersaglio fisso: più energia nel centro di massa a parità di energia del fascio**

# Large Hadron Collider



# Large Hadron Collider



# Large Hadron Collider

**CERN Accelerators (not to scale)**

**LHC tunnel 2002**

**LHC tunnel 2006**

**Gran Sasso (I) 730 km**

**0.999999c by here**

**0.87c by here**

**0.3c by here**

**1232 dipoli principali + 3700 magneti correttori multipoli**

**Start the protons out here**

LHC: Large Hadron Collider  
 SPS: Super Proton Synchrotron  
 AD: Antiproton Decelerator  
 ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 PSB: Proton Synchrotron Booster  
 PS: Proton Synchrotron  
 LINAC: LINear ACcelerator  
 LEIR: Low Energy Ion Ring  
 CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

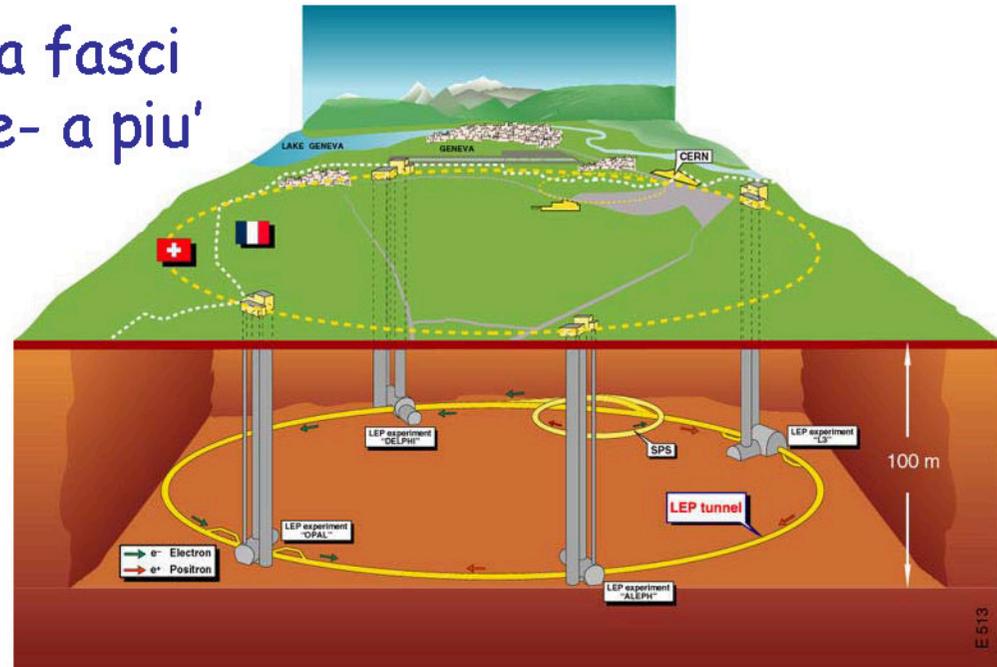
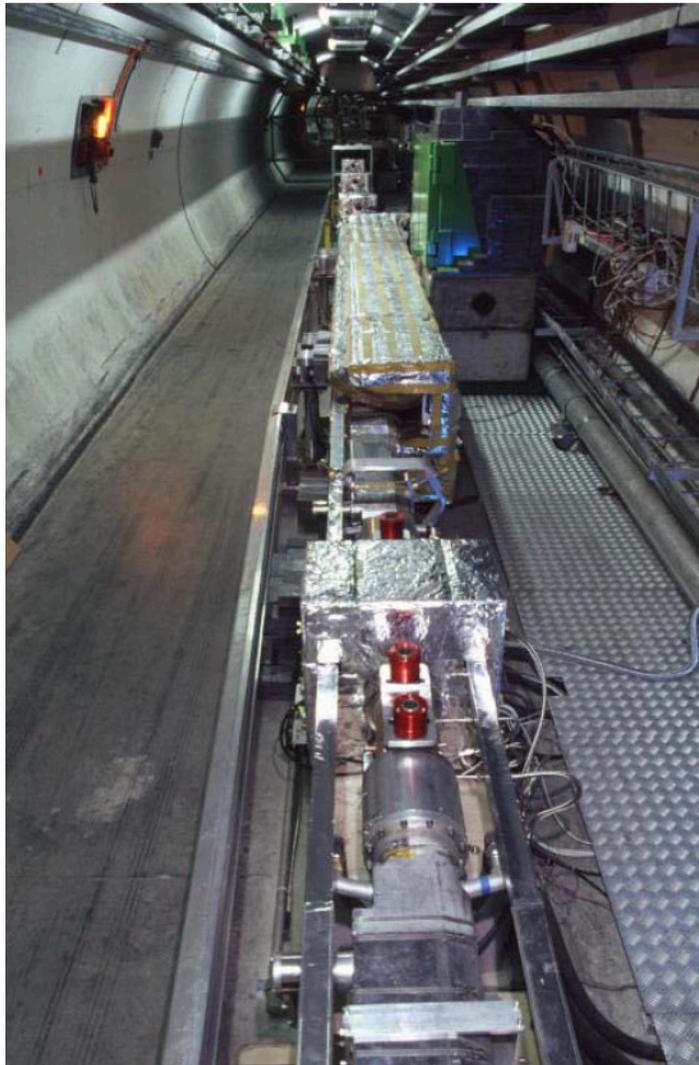
Legend:  
 - protons (red)  
 - antiprotons (blue)  
 - ions (green)  
 - neutrinos to Gran Sasso (I) (purple)

Radolf LEY, PS Division, CERN, 02/09/96  
 Revised and adapted by Antonella Del Rossio, EFT Div.,  
 in collaboration with B. Desforges, ST Div., and  
 D. Manglani, PS Div. CERN, 23/05/01

Un po' di storia:

# LEP

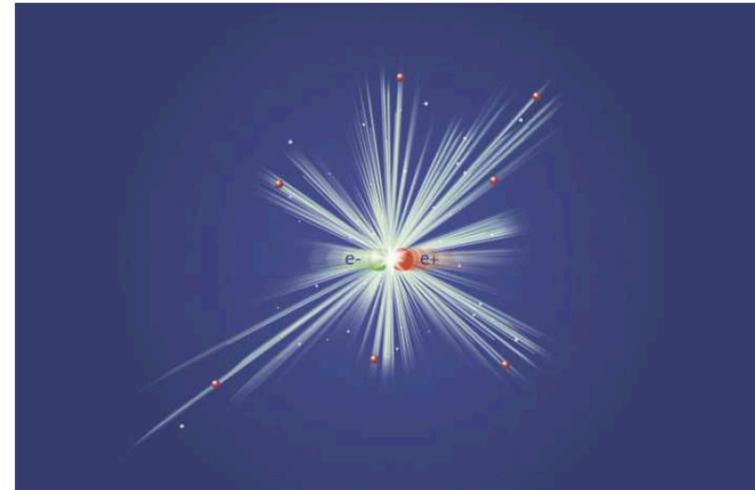
La macchina a fasci  
incrociati  $e^+e^-$  a piu'  
alta energia



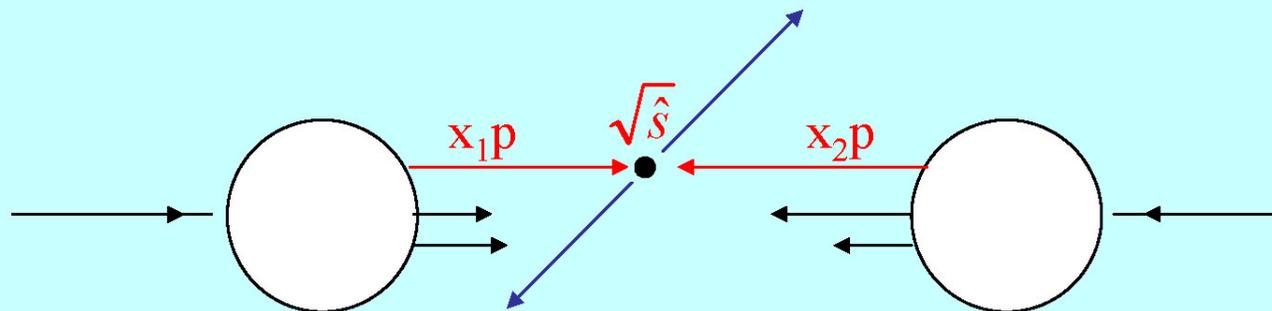
- LEP, un anello di 27 Km
- Fasci di elettroni e positroni di oltre 100 GeV
- In funzione dal 1989 al 2000
- Smontato nel 2001 per far posto a **LHC** : fasci di protoni da 7 TeV

# Macchine a fasci incrociati: *Collisori*

- Le macchine moderne per la fisica fondamentale sono Colliders (*Collisori*)
- Si producono collisioni frontali tra **elettroni** e **positroni** oppure tra **protoni** e **(anti)protoni** o anche **elettroni** e **protoni**.



I protoni sono particelle composite: si sfrutta solo parte dell'energia



Per protoni ad altissima energia la maggior parte di interazioni sono tra gluoni

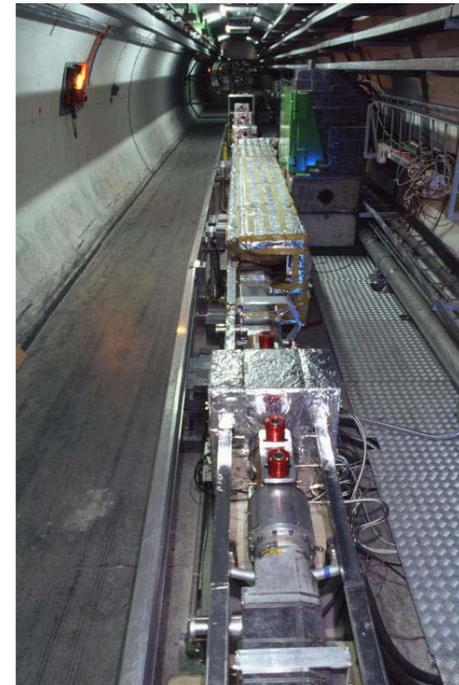
# Acceleratori Circolari e..... bolletta della luce

Una particella accelerata emette energia per radiazione  
L'energia persa deve essere compensata dall'acceleratore

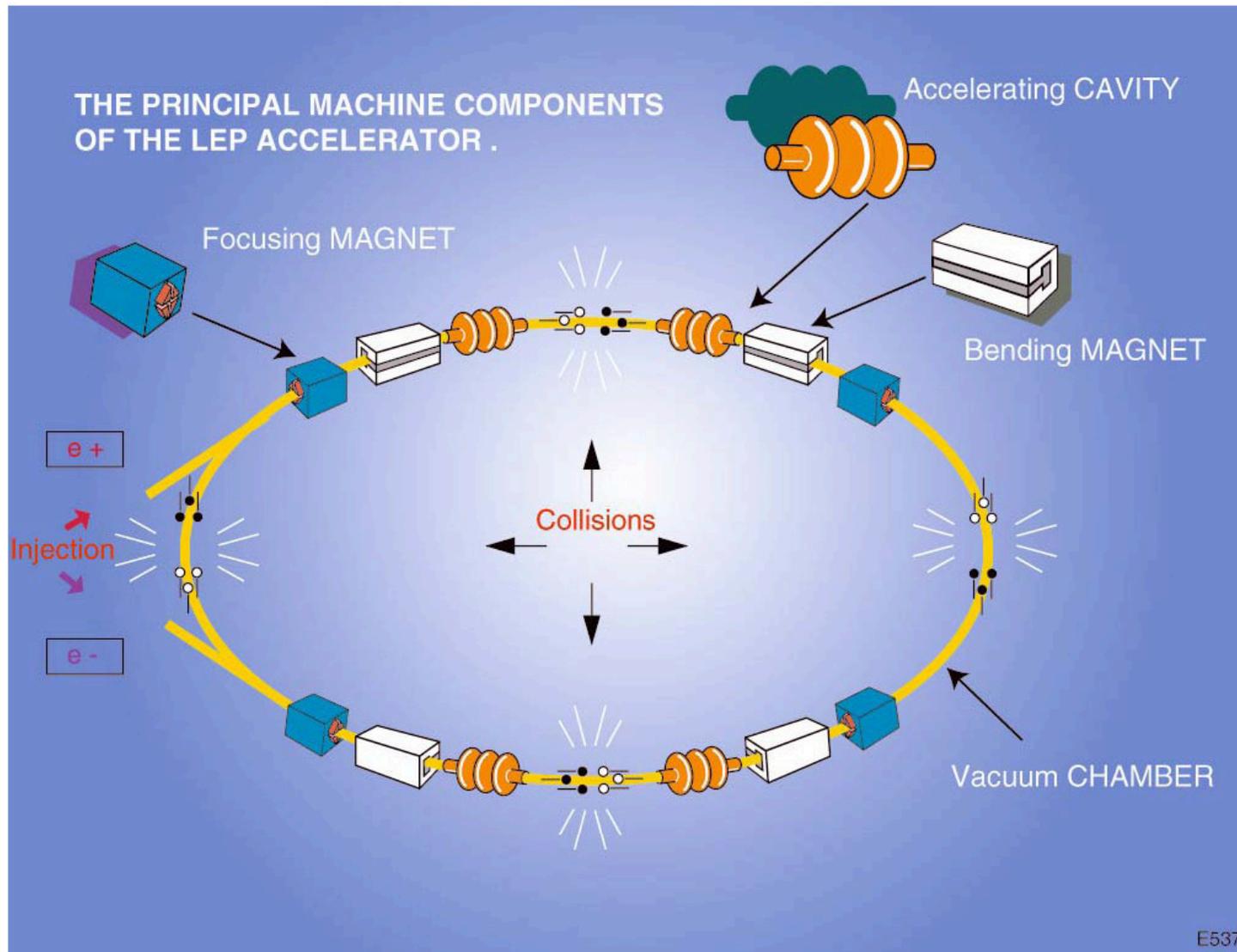
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

- Accelerare elettroni e' molto piu' costoso, hanno una massa 2000 volte inferiore ai protoni
- Raddoppiare l'energia significa aumentare di 16 volte il raggio

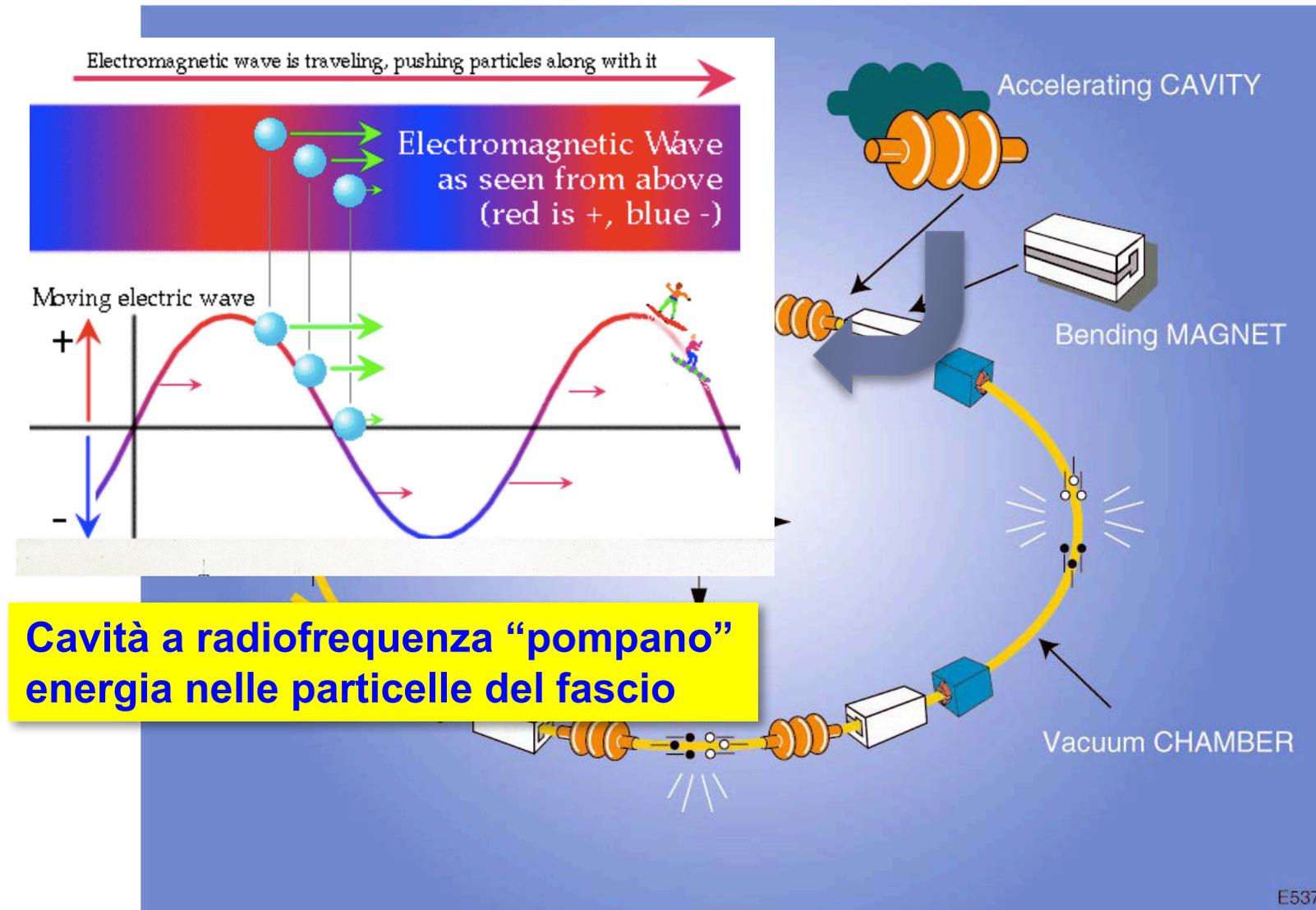
LEP : 27 Km di circonferenza ! 



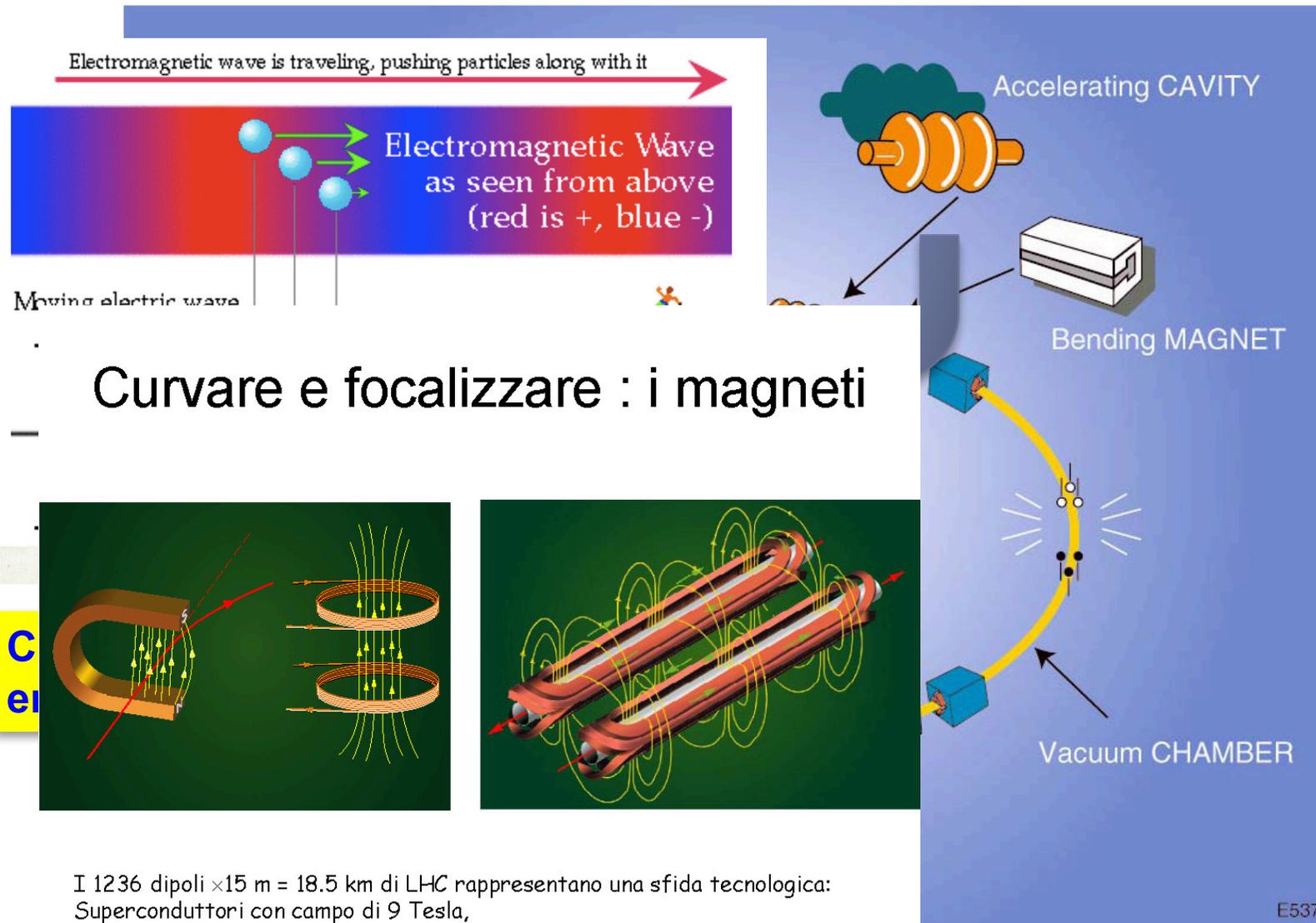
# Componenti principali di un acceleratore



# Componenti principali di un acceleratore

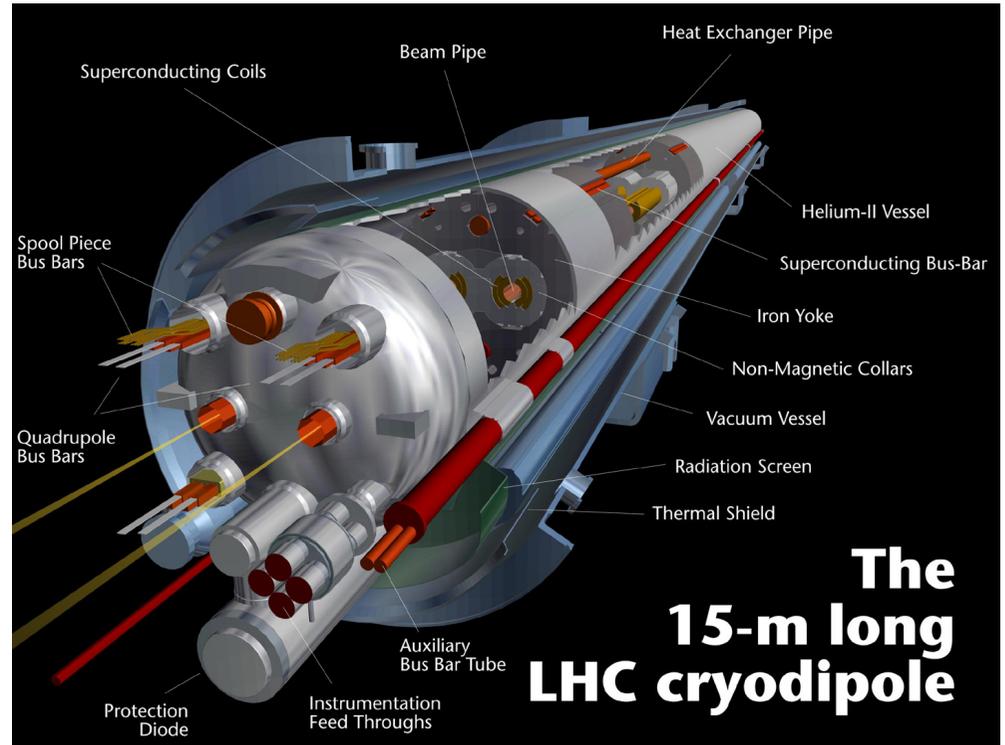


# Componenti principali di un acceleratore



# LHC: la sfida tecnologica

- ▶ Filo singolo del cavo superconduttore: 6 micron per 20 km
- ▶ Intensità di corrente del filo completo: 12000 ampere
- ▶ Massa fredda: nuova tecnica di saldatura per acciaio inossidabile
- ▶ Magneti lunghi 15 metri consegnati nel 2006, sistema pronto nel 2008
- ▶ Refrigeratori a 4.5 kelvin (già usati da LEP2)
- ▶ Energia immagazzinata: 360 Mjoule per fascio (1 Jumbo lanciato a ~ 154 km/h)
- ▶ Dimensioni del fascio: la Spagna su una moneta da un Euro
- ▶ Fascio focalizzato nelle zone di interazione (esperimenti): 20 micron



# Sezioni d'urto a LHC

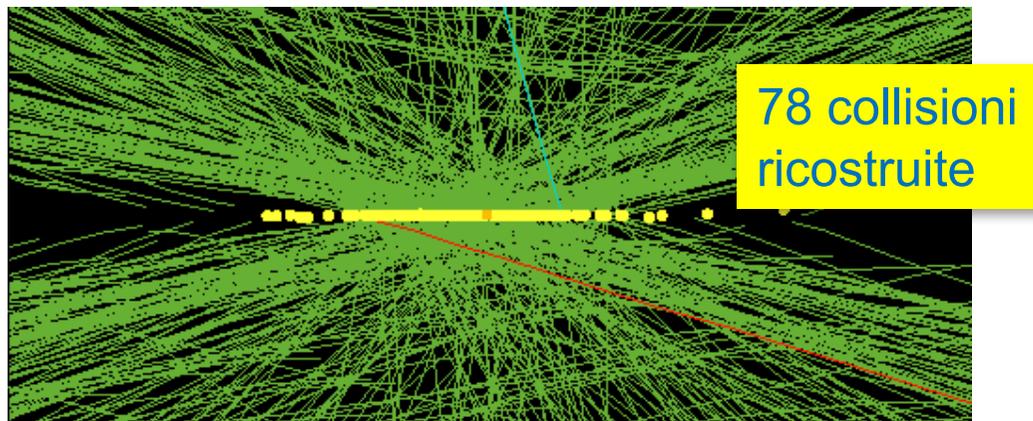
**Numero di eventi = Luminosità × sezione d'urto**

Luminosità: densità di particelle nei fasci per unità di tempo  
 Sezione d'urto: probabilità che un processo accada in un urto  
 ↳ dal quadrato dell'“elemento di matrice” per il processo d'urto

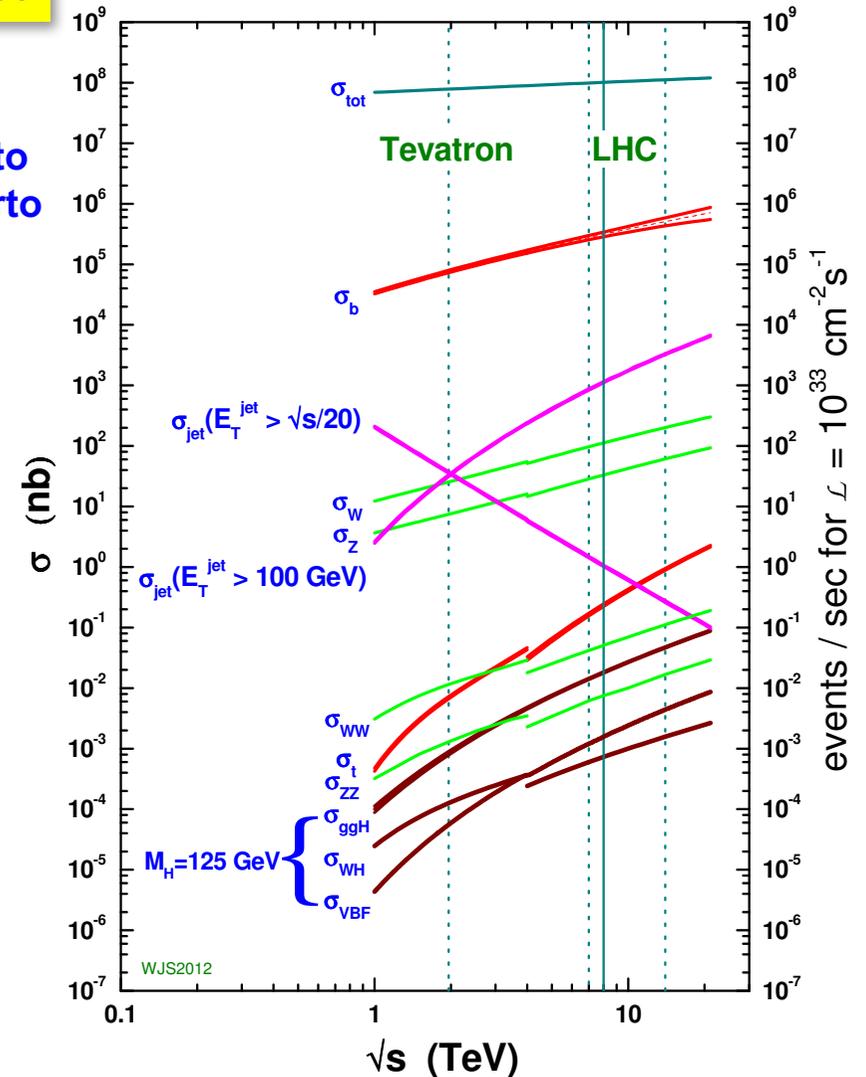
Ad alta luminosità ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ):

inelastico	$\sim 10^9 \text{ Hz}$
$W \rightarrow l\nu$	$\sim 10^3 \text{ Hz}$
$t\bar{t}$	$\sim 10 \text{ Hz}$
Higgs	$\sim 1 \text{ Hz}$

Una collisione tra fasci ogni 25 ns  
 ~ 30 collisioni multiple per incrocio

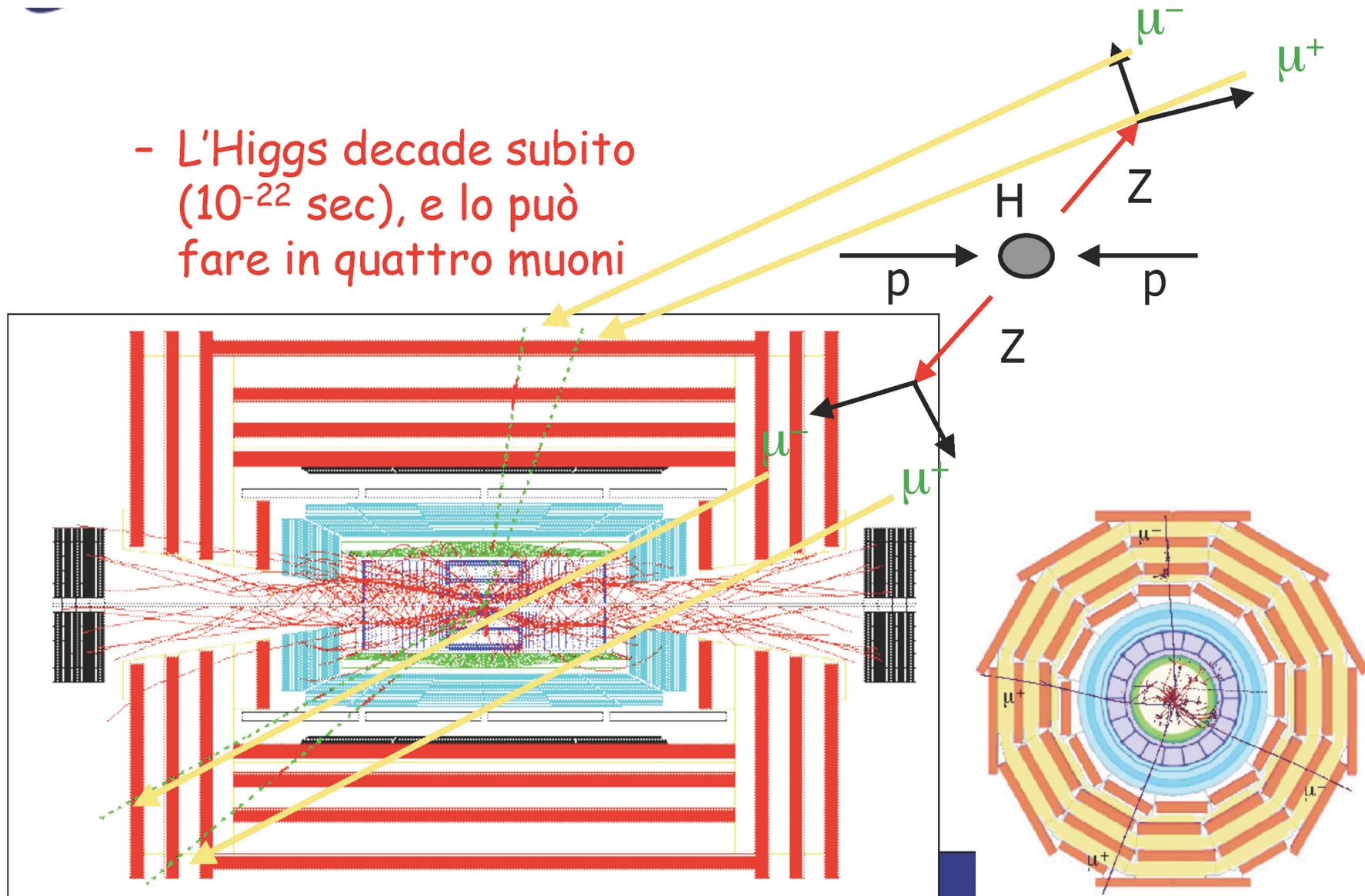


proton - (anti)proton cross sections



# Rivelazione dai prodotti di decadimento

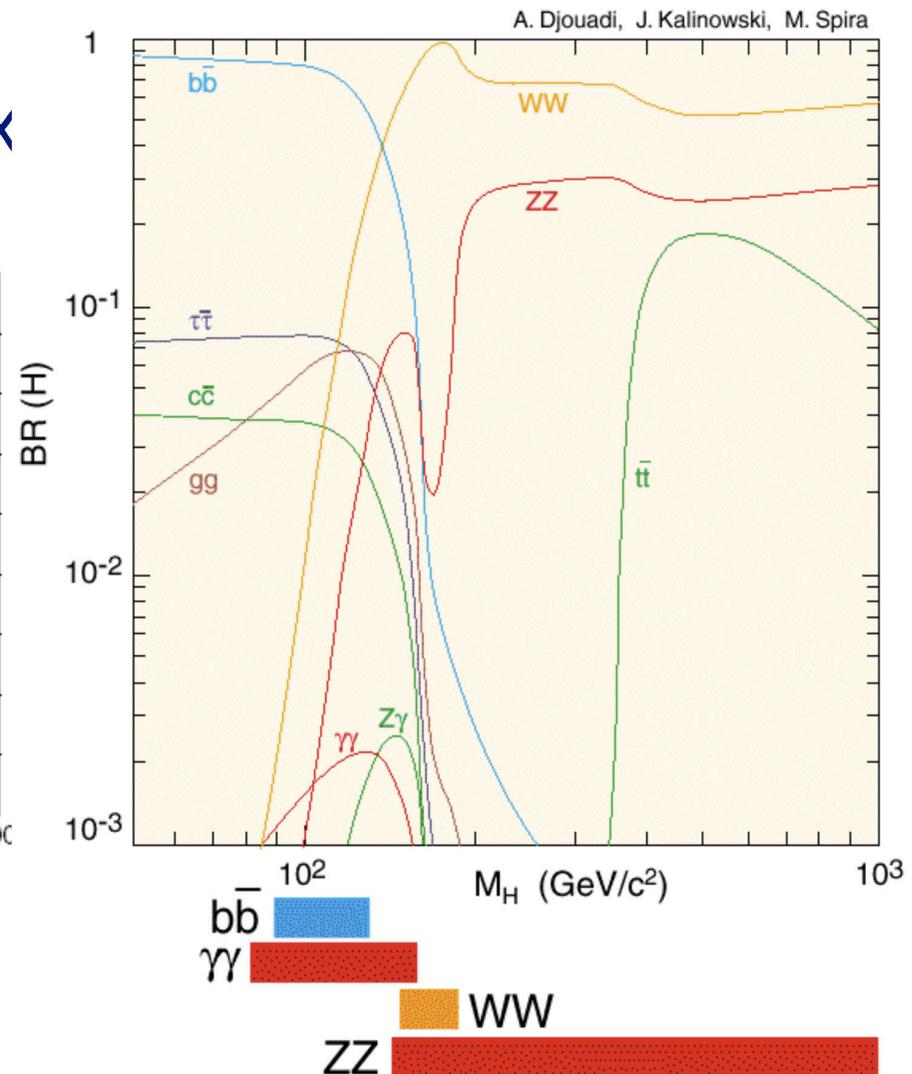
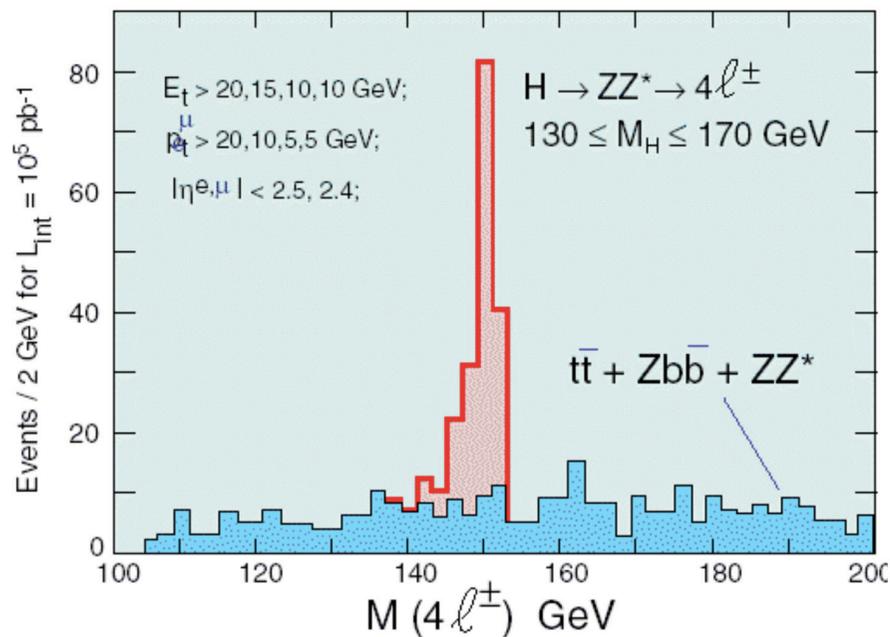
- L'Higgs decade subito ( $10^{-22}$  sec), e lo può fare in quattro muoni



# Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

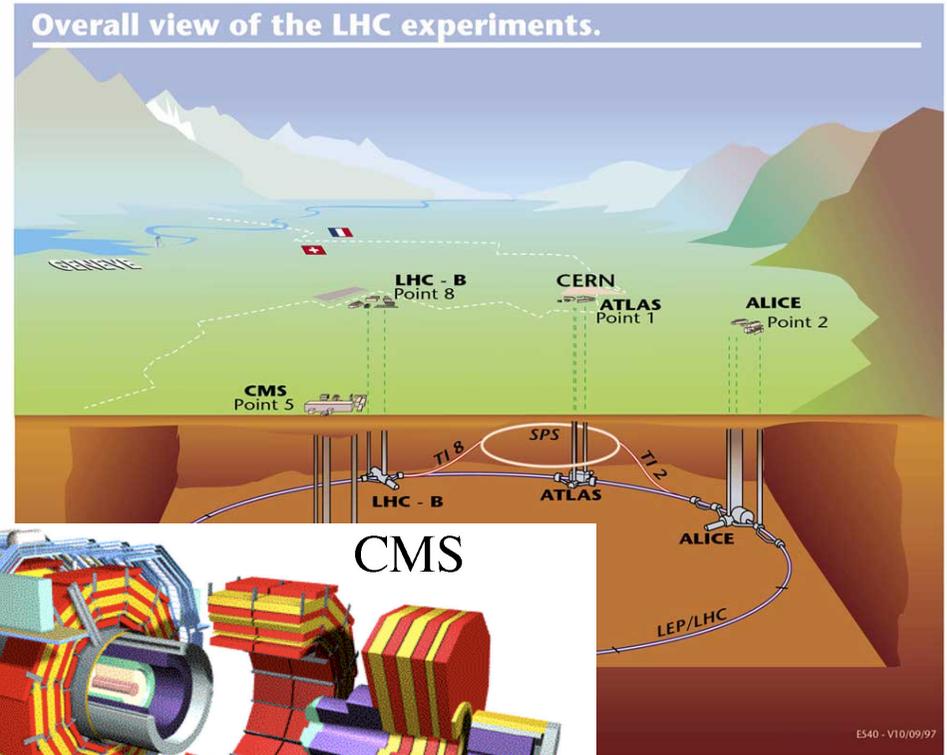
Cerco eventi :

$$pp \rightarrow H + X \rightarrow \mu + \mu - \mu + \mu - + X$$

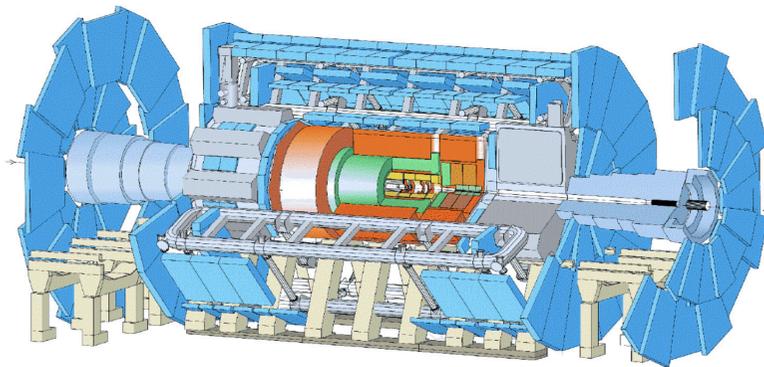


# Esperimenti a LHC

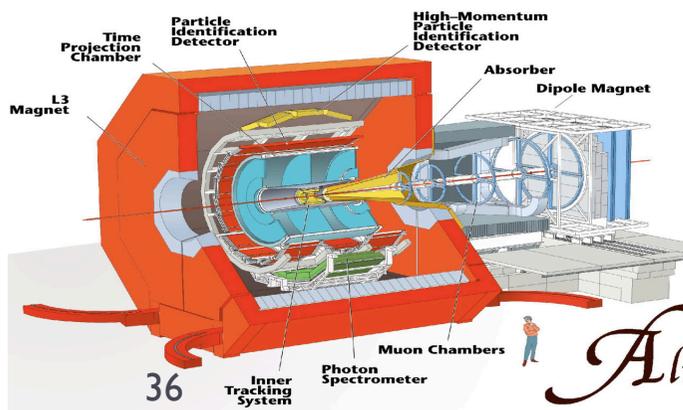
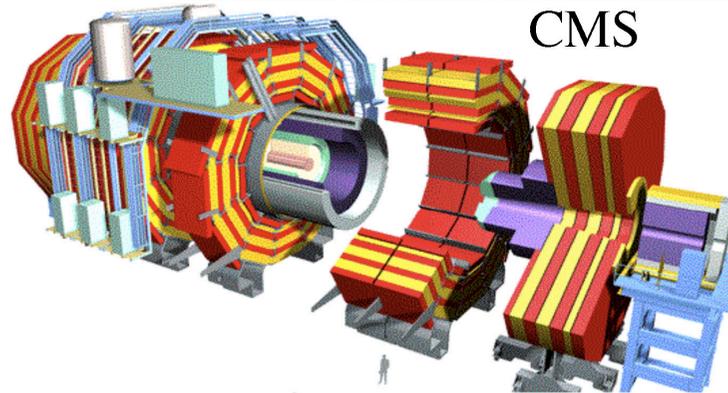
	Energia cm TeV	Luminosità $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
LEP $e^+e^-$	0.209	$10^{32}$
LHC pp	14	$10^{34}$
LHC Pb Pb	1312	$10^{27}$



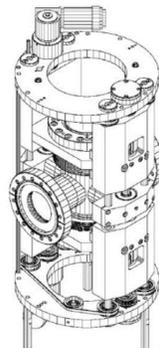
ATLAS



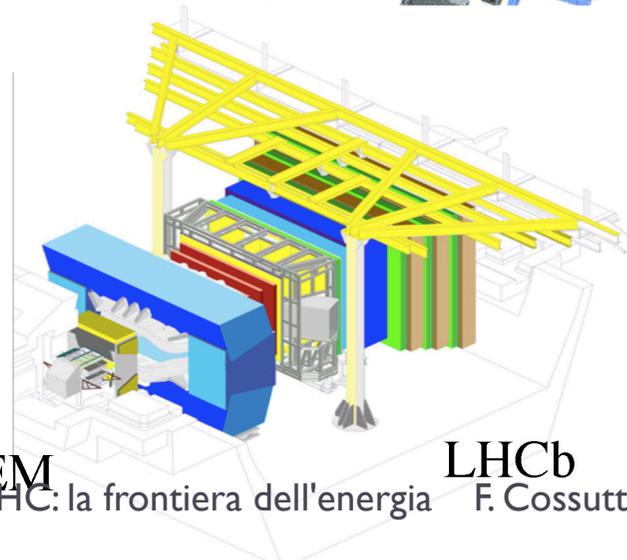
CMS



*ALICE*



TOTEM



LHCb

La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

F. Cossutti - 29/3/2017

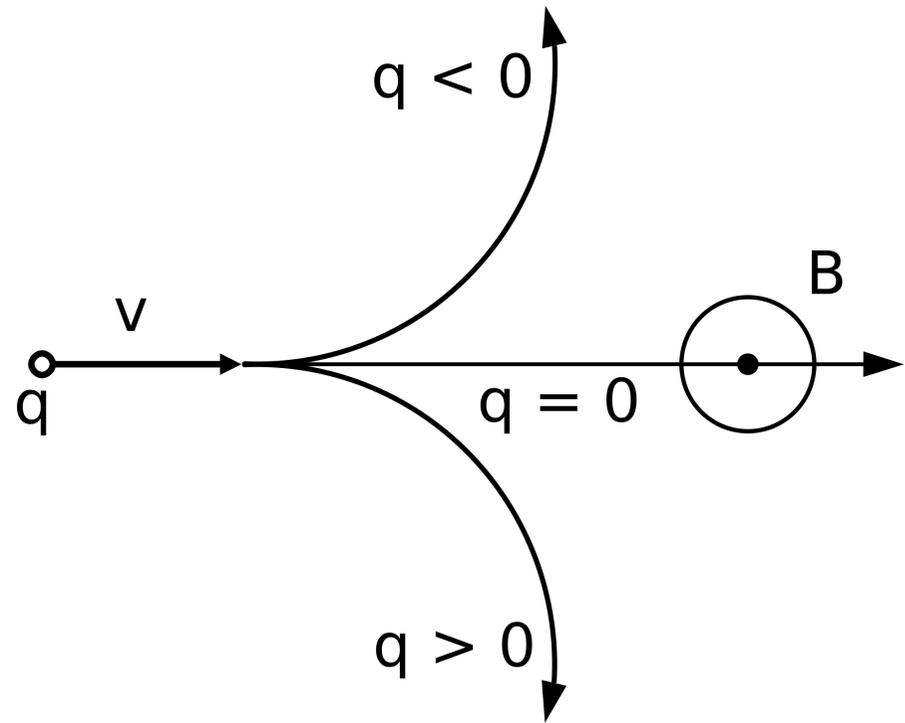
# Rivelatori di particelle per un esperimento su collisore

---

- ▶ Parte piu` interna: misura non distruttiva delle tracce cariche
  - ▶ Particelle ionizzanti, tipicamente in campo magnetico per misurarne il momento, rivelate da camere a fili, dispositivi a semiconduttore, che raccolgono la carica di ionizzazione, precisione spaziale 10/100 micron
- ▶ Esternamente: calorimetri elettromagnetici (elettroni e fotoni) e adronici, misura distruttiva dell' energia
  - ▶ Particelle “sciamano” in un materiale denso, si raccoglie l' energia prodotta, si misurano anche particelle neutre (fotoni, neutroni)
- ▶ Attorno a tutto: tracciare I muoni
  - ▶ Le particelle cariche meno interagenti

# Misura di impulso: i tracciatori

- ▶ Come si misura il momento di una particella carica?
- ▶ Usando un campo magnetico e la forza di Lorentz
- ▶ Maggiore il campo magnetico, migliore la misura
- ▶ Ma la quantità di materiale conta: minimizzare il multiplo scattering nella materia



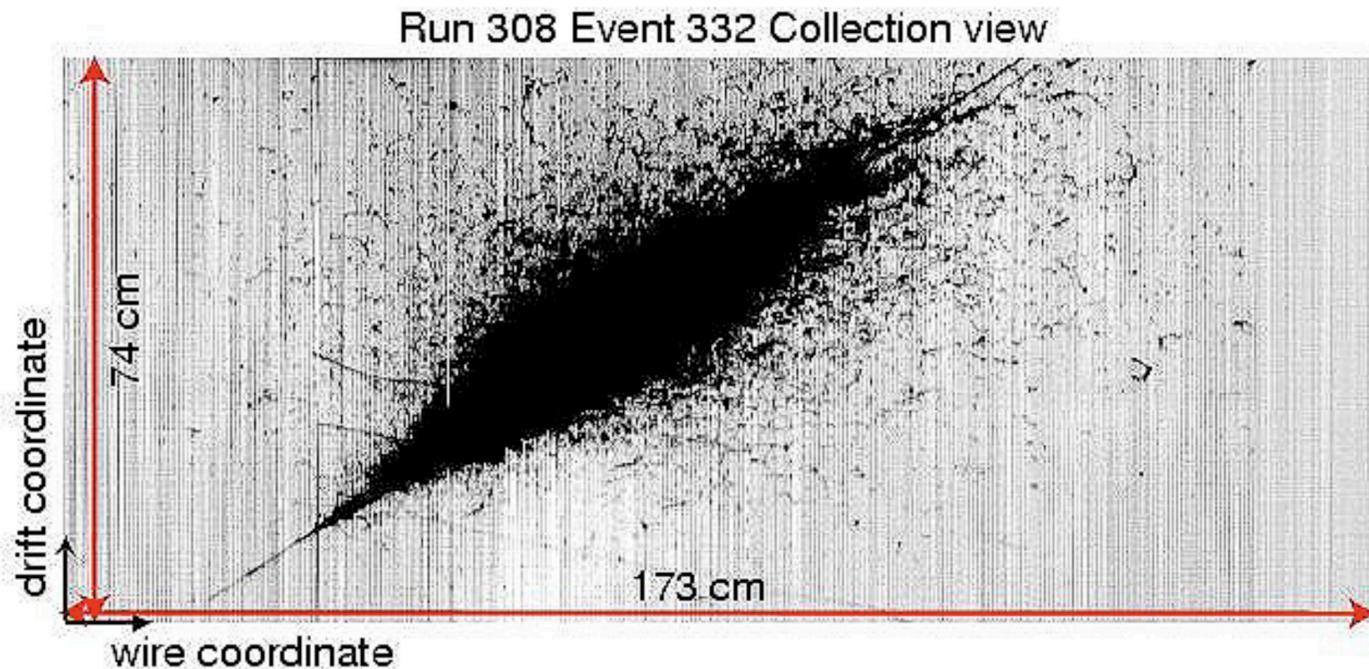
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

$\text{GeV}/c$        $q/e$        $\tau$

# Misura di energia: i calorimetri

Come si misura l'energia di una particella ?

Usiamo una grossa quantità di materiale in modo che le particelle vi rilascino tutta l'energia prima di fermarsi



# Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

**BOBINA SUPERCONDUTTIVA**

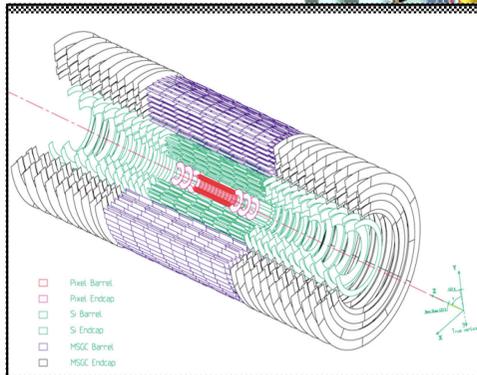
**ECAL:** cristalli PbWO<sub>4</sub>

**HCAL:** scintillatore plastico

**CALORIMETRI**

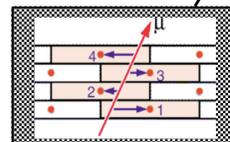
**GIOGO RITORNO**

**TRACKER**

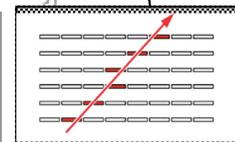


Microstrisce Silicio  
Pixels

**MUONI BARREL**

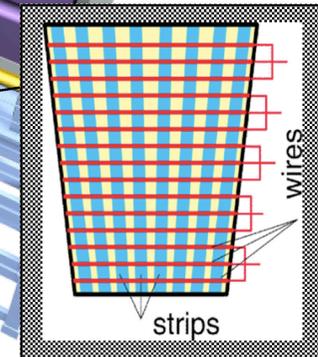


Drift Tube  
Chambers (DT)



Resistive Plate  
Chambers (RPC)

**MUONI  
ENDCAP**



Cathode Strip Chambers (CSC)  
Resistive Plate Chambers (RPC)

**Diametro: 15 m**

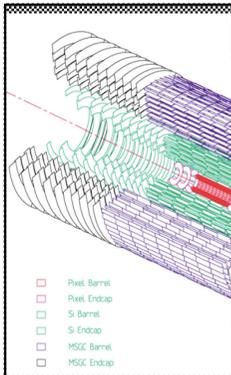
**Lunghezza: 21.5 m**

**Peso: 12500 ton.**

# Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



Microstrisce Si  
Pixels



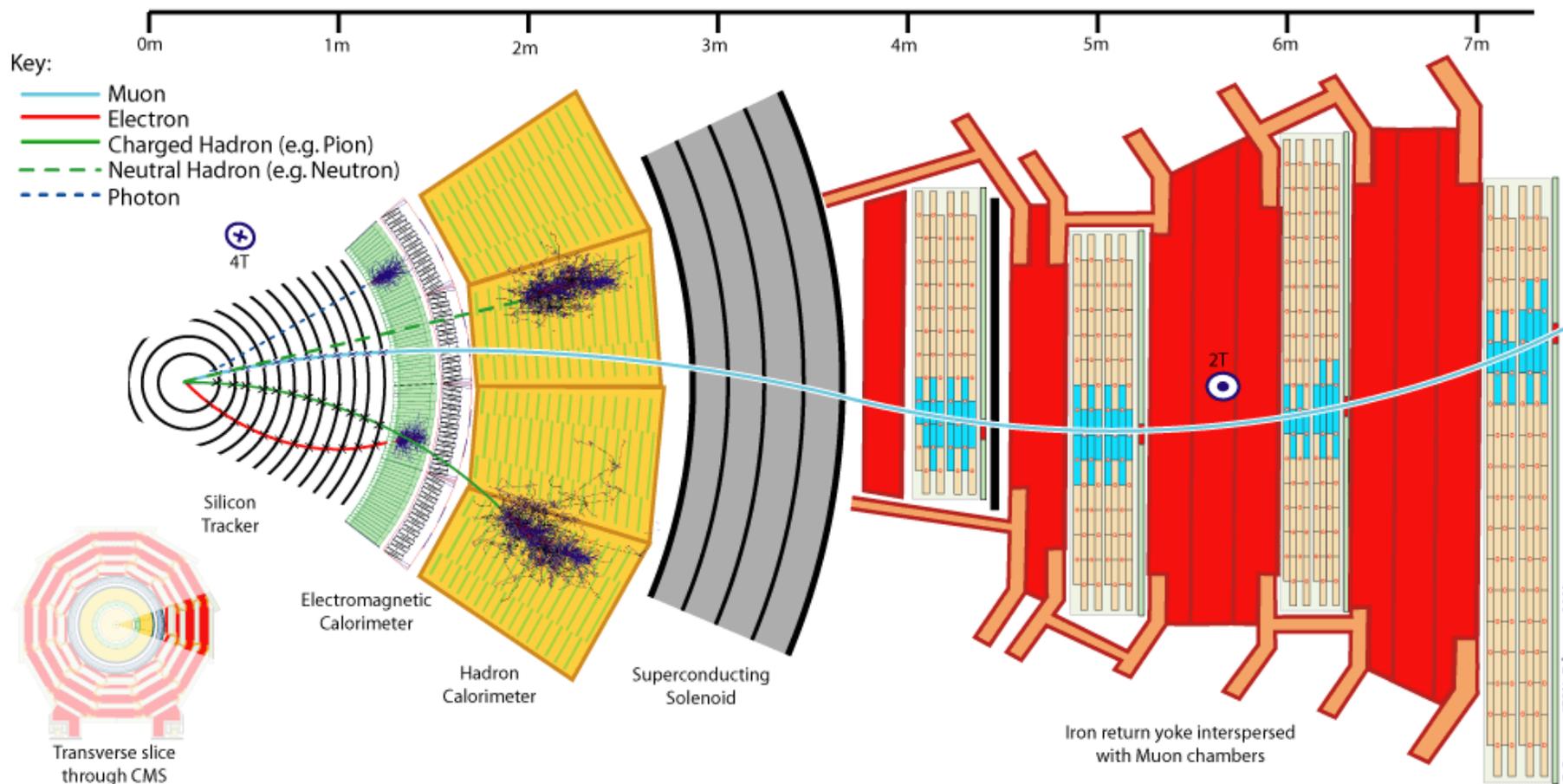
Drift Tube Chambers (DT)      Resistive Plate Chambers (RPC)      Cathode Strip Chambers (CSC)  
Resistive Plate Chambers (RPC)

**Diametro: 15 m**

**Lunghezza: 21.5 m**

**Peso: 12500 ton.**

# Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento

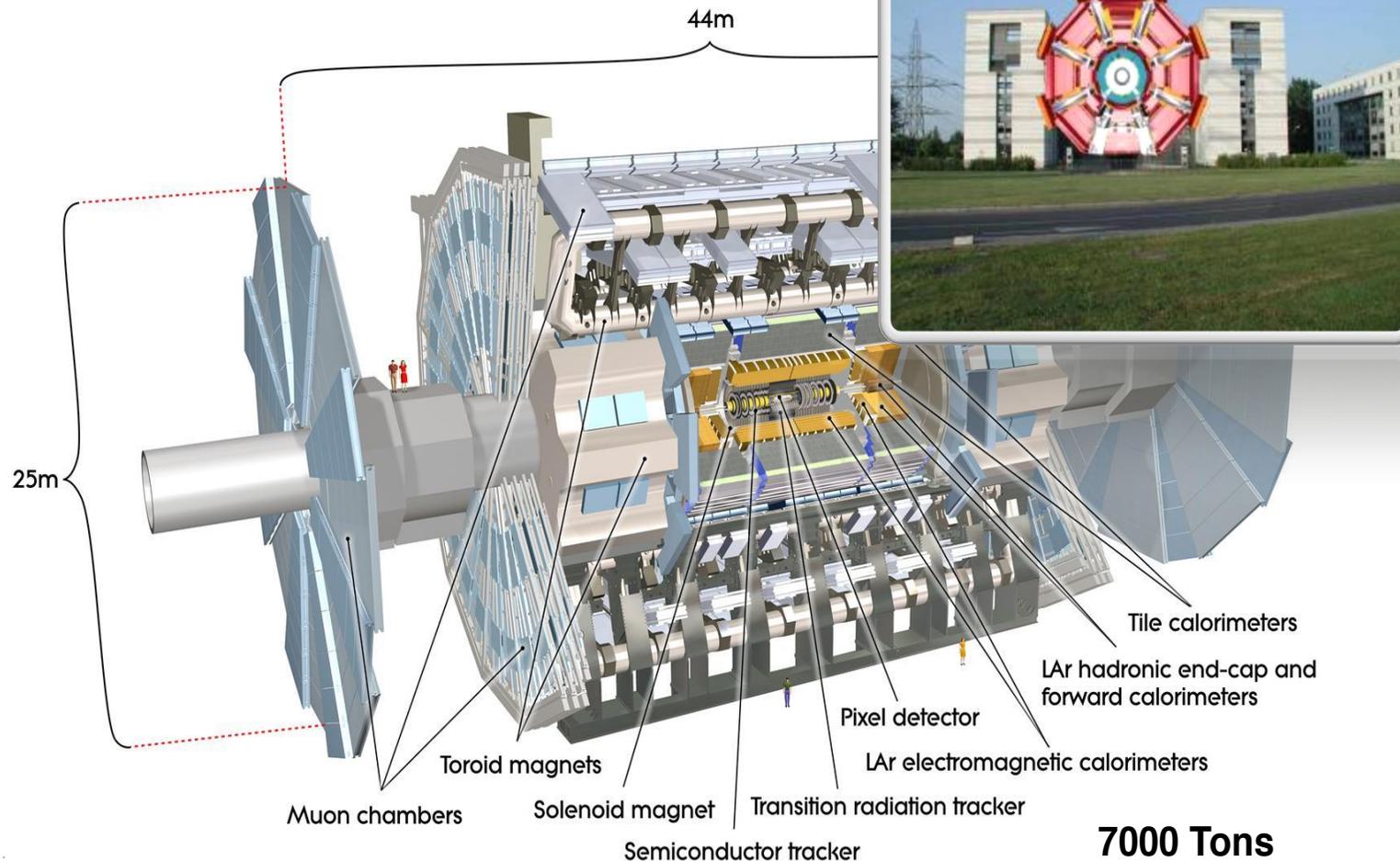


# Due sono meglio di uno solo: ATLAS

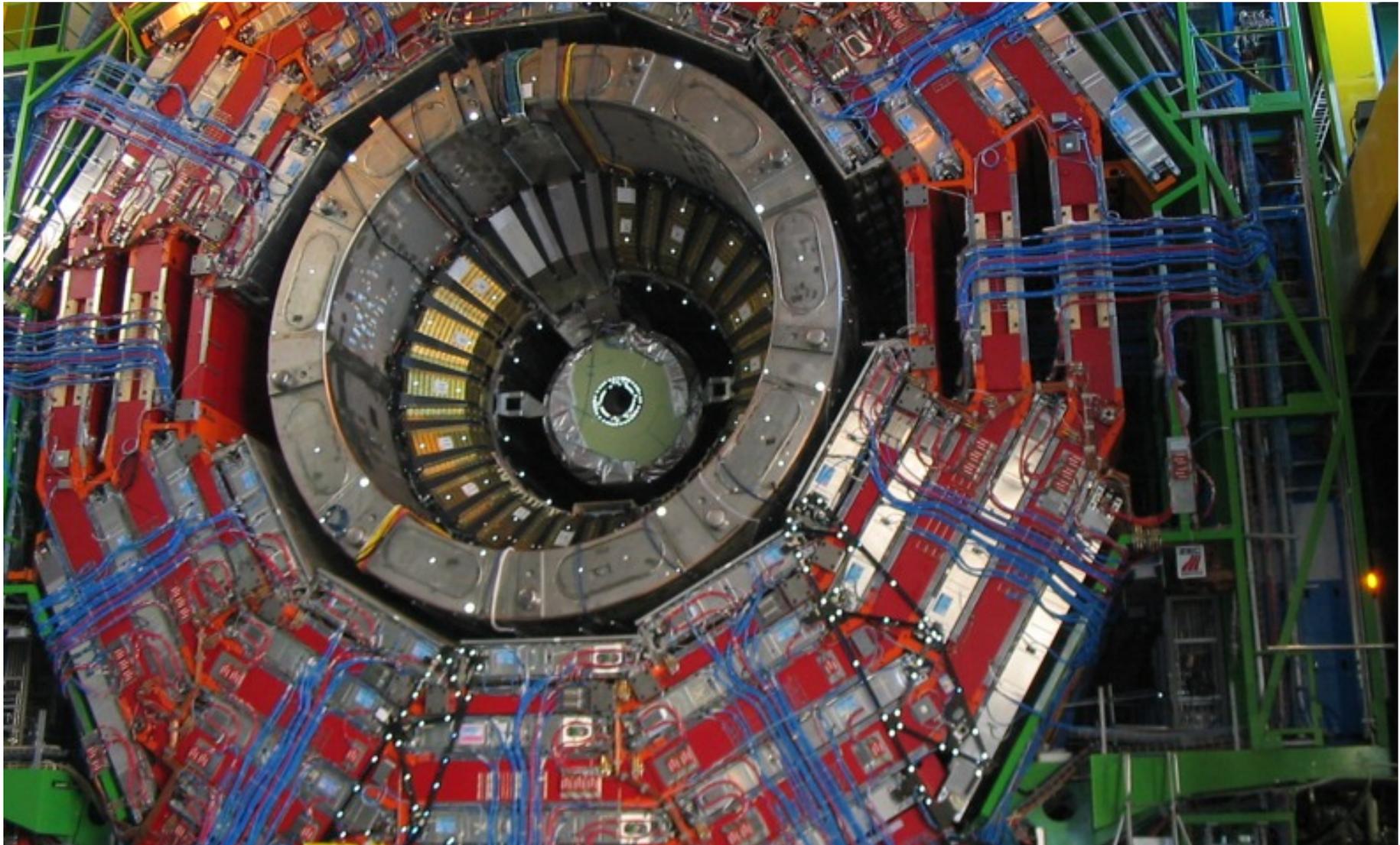
*Più grande è l'energia:*



✓ Più grande è il rivelatore:



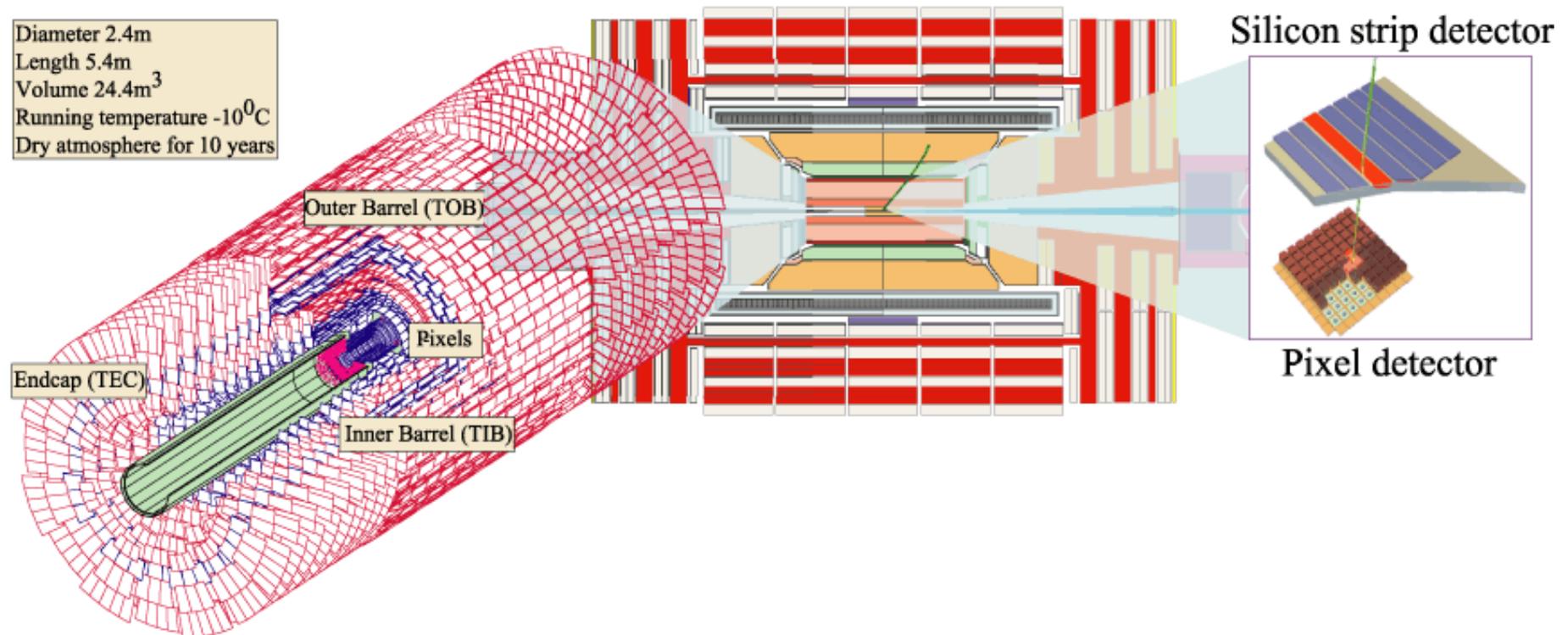
# Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



# Perchè avere un rivelatore sofisticato?

- ▶ Le potenzialità di misura e scoperta di un apparato dipendono dalla qualità degli oggetti ricostruiti ( $e, \mu, \gamma$ , adroni carichi e neutri)
  - ▶ **Risoluzione**: con quale precisione misuro una grandezza?
  - ▶ **Efficienza**: quale frazione delle particelle “vere” che attraversano il mio rivelatore riesco a ricostruire?
  - ▶ **Purezza**: quante volte l’oggetto ricostruito e/o identificato corrisponde ad un oggetto reale?
  - ▶ **Prontezza**: qual’è il tempo necessario a raccogliere un segnale ed essere pronti a raccoglierne il successivo?
    - ▶ Ogni 25 ns si potrebbe avere una collisione...
- ▶ Tutto ciò dipende dalle caratteristiche dell’apparato
  - ▶ Numero di canali e loro granularità, ermeticità, quantità di materiale, velocità di risposta al segnale degli elementi sensibili e dell’elettronica di lettura, rumore intrinseco.

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori

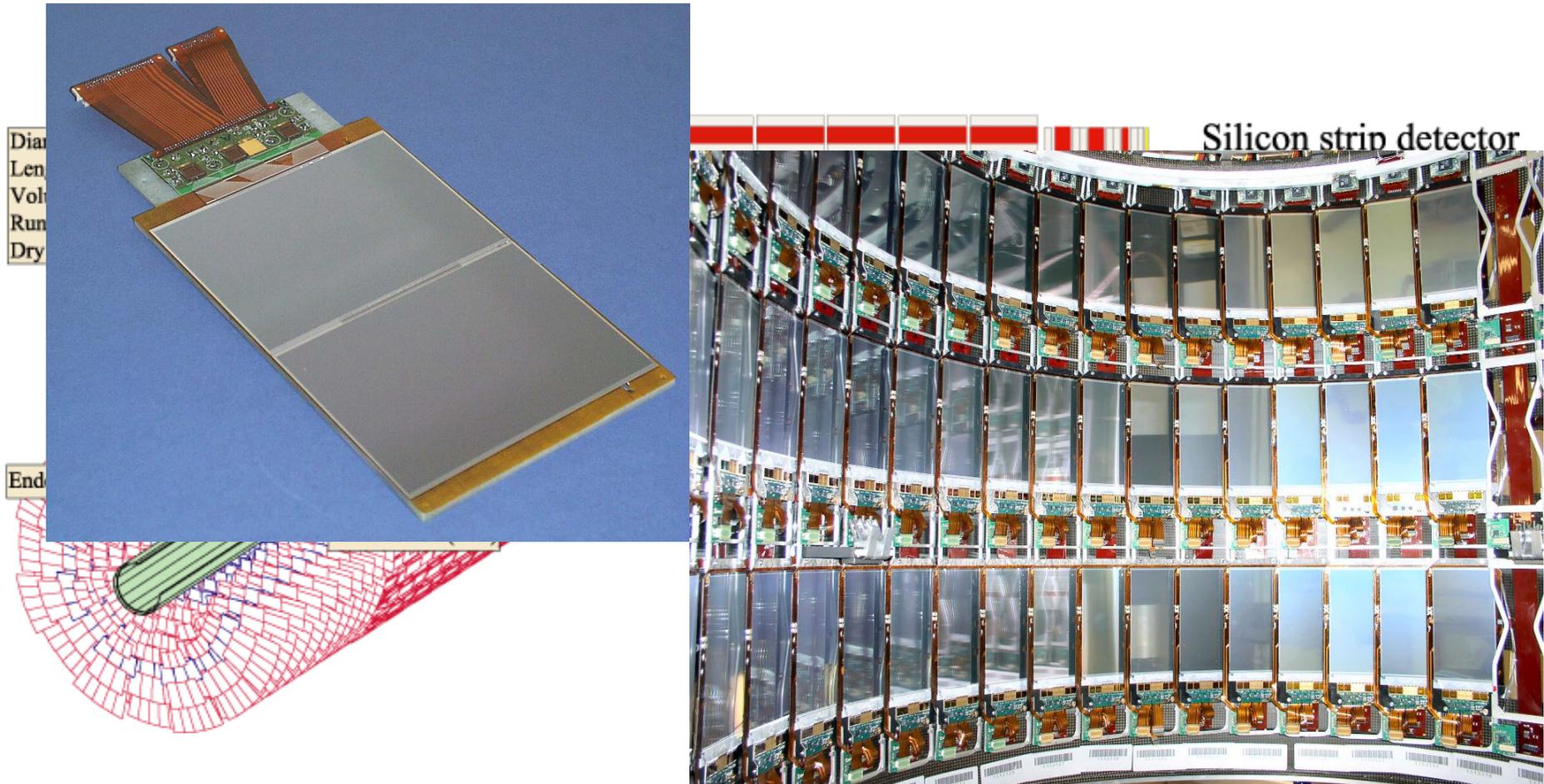


*Ad es. CMS tracker...*

*L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio*

*viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale*

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori

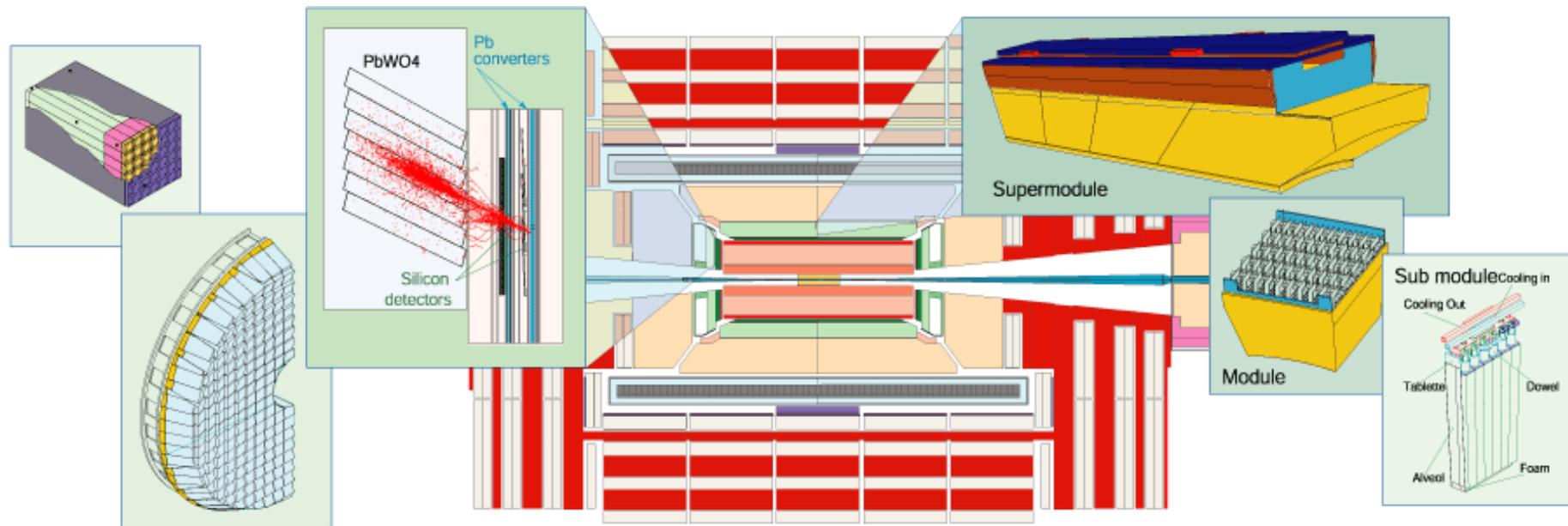


*Ad es. CMS tracker...*

*L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio*

*viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale*

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: calorimetri



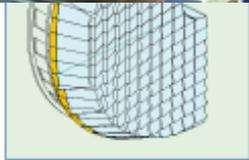
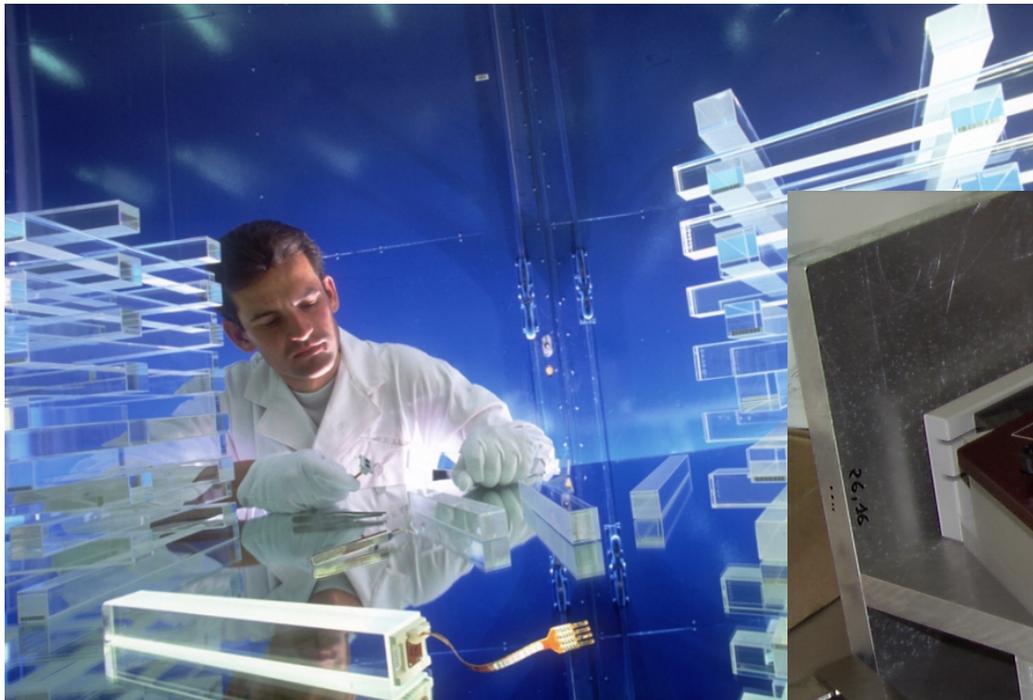
*Ad es. CMS ECAL...*

*Calorimetro omogeneo: I cristalli in cui le particelle interagiscono e sciamano producono luce (scintillazione) al passaggio delle particelle cariche.*

*La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale*

*Nei calorimetri a campionamento, parte interagente e parte sensibile sono separate*

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: calorimetri



CERN Labo 27 EP-CMA  
22 June 99-7

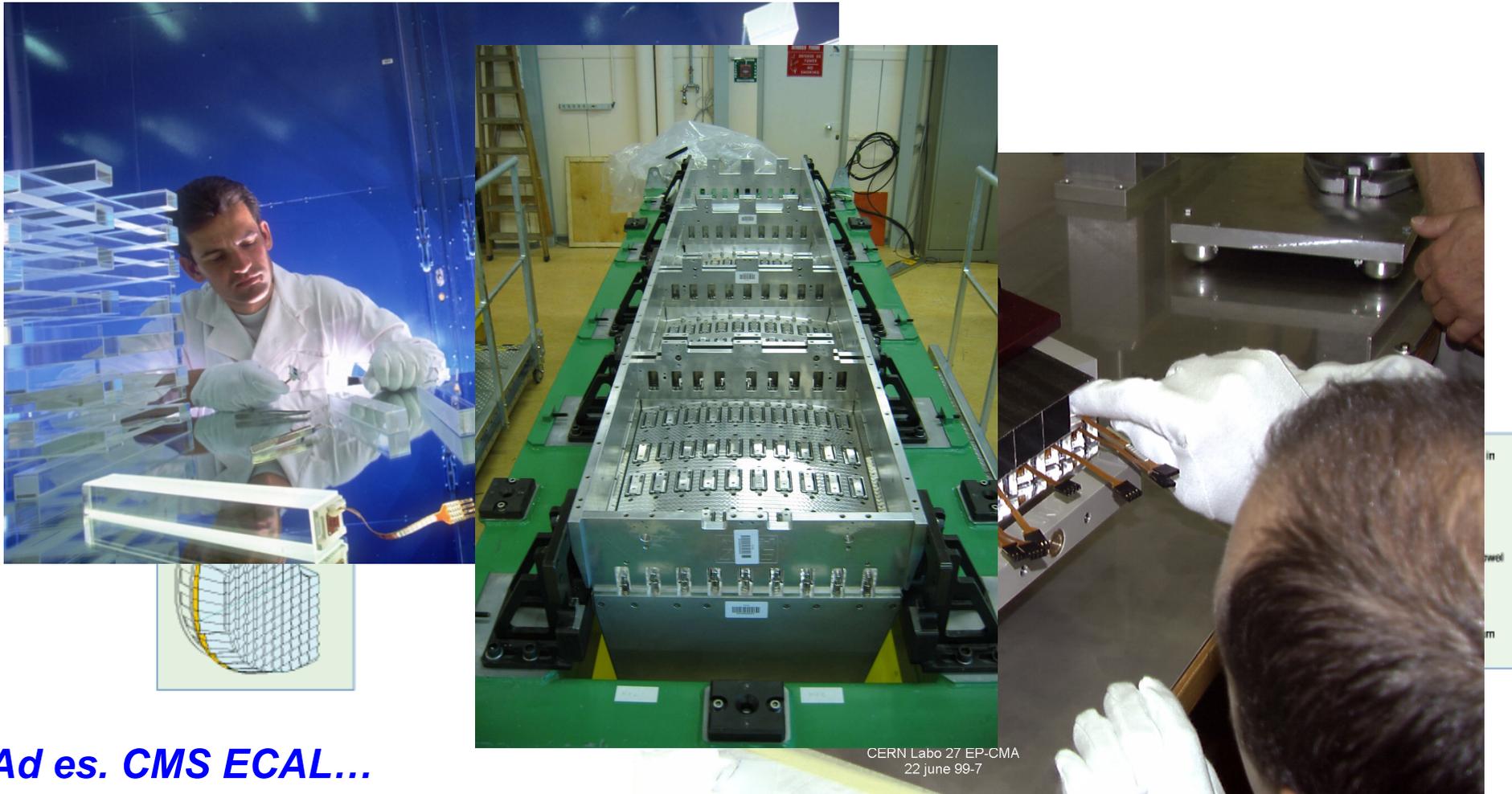
**Ad es. CMS ECAL...**

**Calorimetro omogeneo: I cristalli in cui le particelle interagiscono e sciamano producono luce (scintillazione) al passaggio delle particelle cariche.**

**La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale**

**Nei calorimetri a campionamento, parte interagente e parte sensibile sono separate**

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: calorimetri



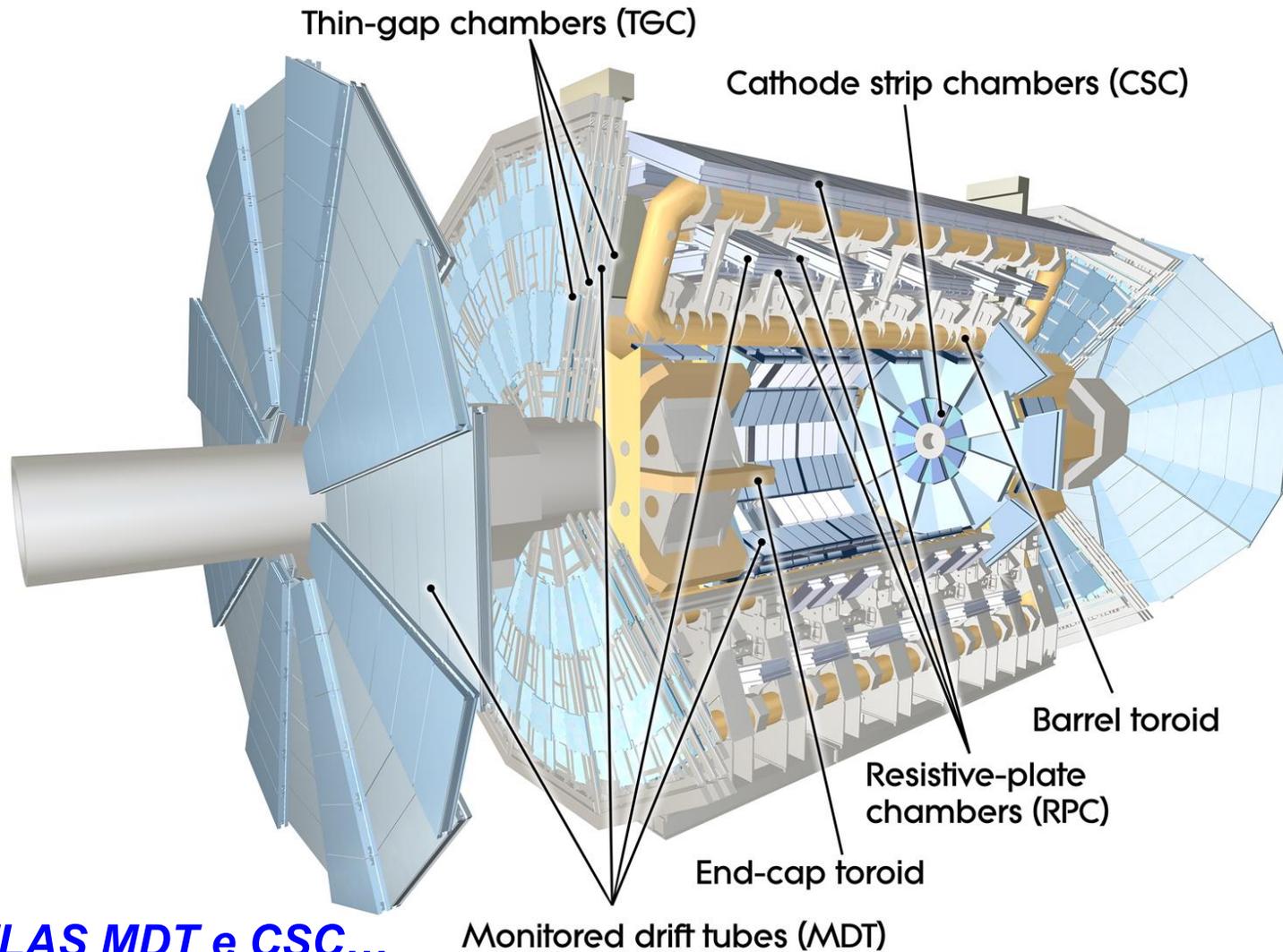
**Ad es. CMS ECAL...**

**Calorimetro omogeneo: I cristalli in cui le particelle interagiscono e sciamano producono luce (scintillazione) al passaggio delle particelle cariche.**

**La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale**

**Nei calorimetri a campionamento, parte interagente e parte sensibile sono separate**

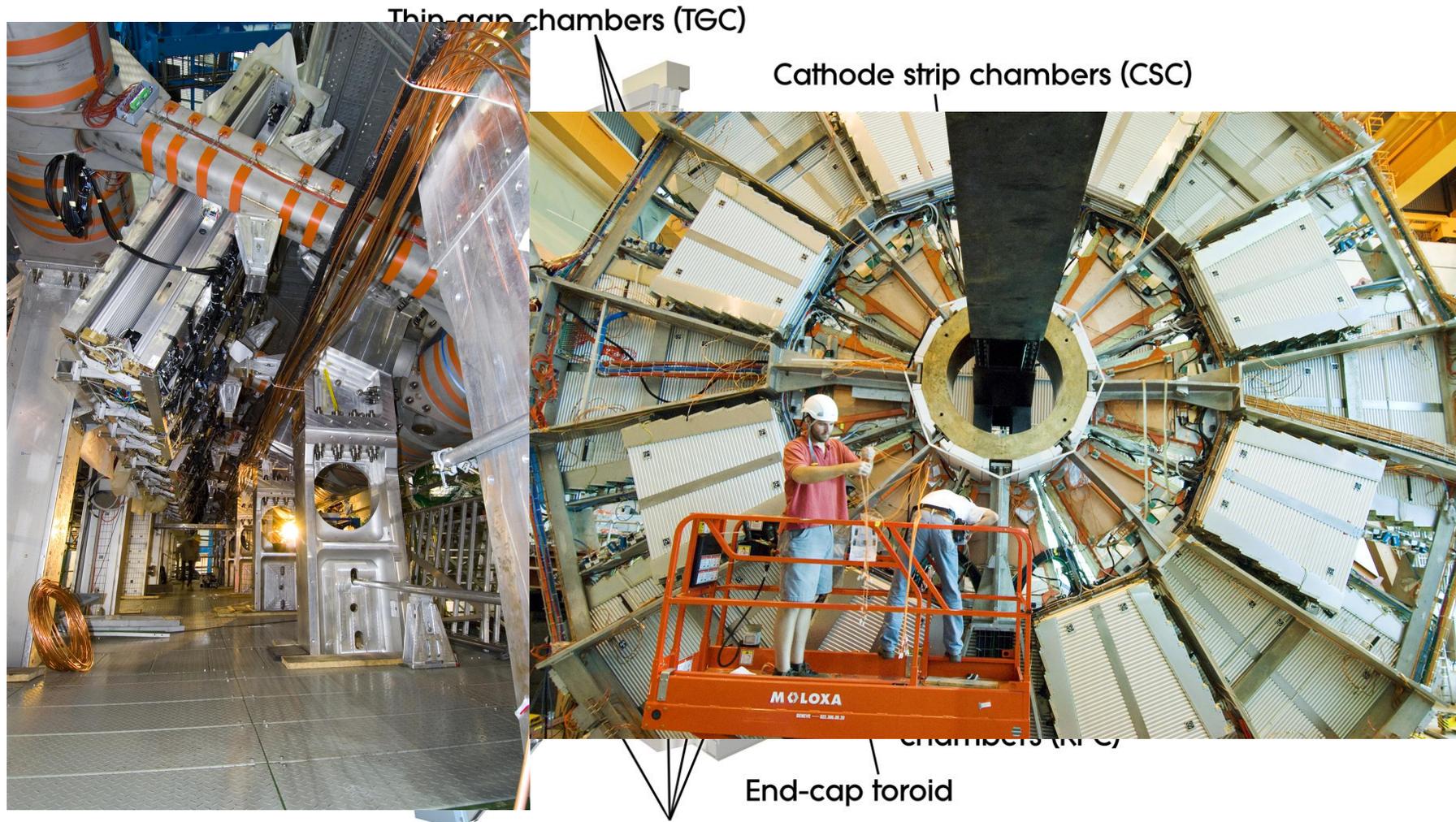
# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



**Ad es. ATLAS MDT e CSC...**

**Rivelatori a gas: le particelle cariche incidenti ionizzano il gas, la carica viene raccolta dopo il moto in un campo elettrico e trasformata dall'elettronica in segnale digitale**

# I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



**Ad es. ATLAS MDT e CSC...**

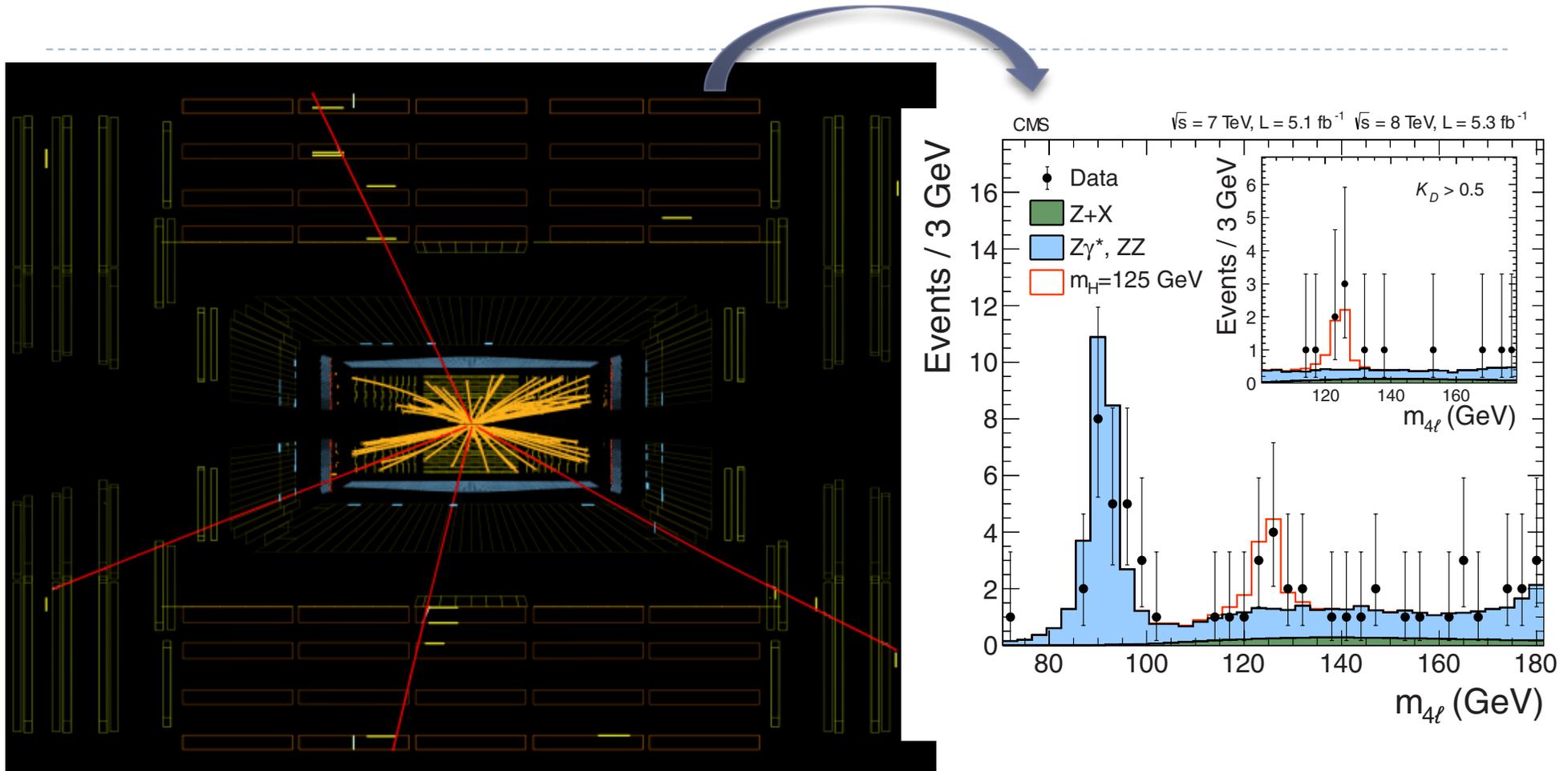
**Rivelatori a gas: le particelle cariche incidenti ionizzano il gas, la carica viene raccolta dopo il moto in un campo elettrico e trasformata dall'elettronica in segnale digitale**

# Dall'oggetto reale all'oggetto di fisica

---

- ▶ **Ricostruzione**: i segnali dei vari canali di lettura vengono combinati prima a livello di sotto-rivelatore, poi tra rivelatori diversi per ricostruire le particelle che hanno attraversato il rivelatore
- ▶ **Tracciatore**: singolo canale (hit) → cluster di hit → segmento di traccia (con procedure di fit che combinano vari cluster suscettibili di provenire dalla stessa particella)
- ▶ **Calorimetro**: singolo canale (hit) → cluster di hit
  - ▶ Combinando un segmento di traccia ed un cluster calorimetrico si può ad esempio ricostruire un elettrone o un pione e distinguerli tra loro dalle caratteristiche misurate
  - ▶ Con algoritmi opportuni si possono raggruppare le particelle in getti che sono il prodotto della trasformazione di quark e gluoni prodotti nell'interazione in adroni

# Dalla ricostruzione all'analisi



Analisi: studio statistico delle proprietà di un campione di eventi ricostruiti

Definizione dei criteri di selezione per gli eventi di interesse (es.  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ )

Calcolo delle grandezze osservabili di interesse (es. massa invariante dei 4  $\mu$ )

# Dal rivelatore al calcolatore: selezionare e acquisire i dati

---

40 milioni di volte al secondo si incontrano i pacchetti dei protoni dai 2 fasci, producendo 20 interazioni sovrapposte.

Flusso di dati "vergini": 80 TeraBytes al secondo

- 100.000 CD al secondo!
- Una torre di 100 metri di CD al secondo!

Con algoritmi di preselezione riusciamo a scrivere su disco molto meno, 200 Mbytes/s

Per trovare il bosone di Higgs necessari ~ 3 anni di dati raccolti, a 100 eventi al secondo

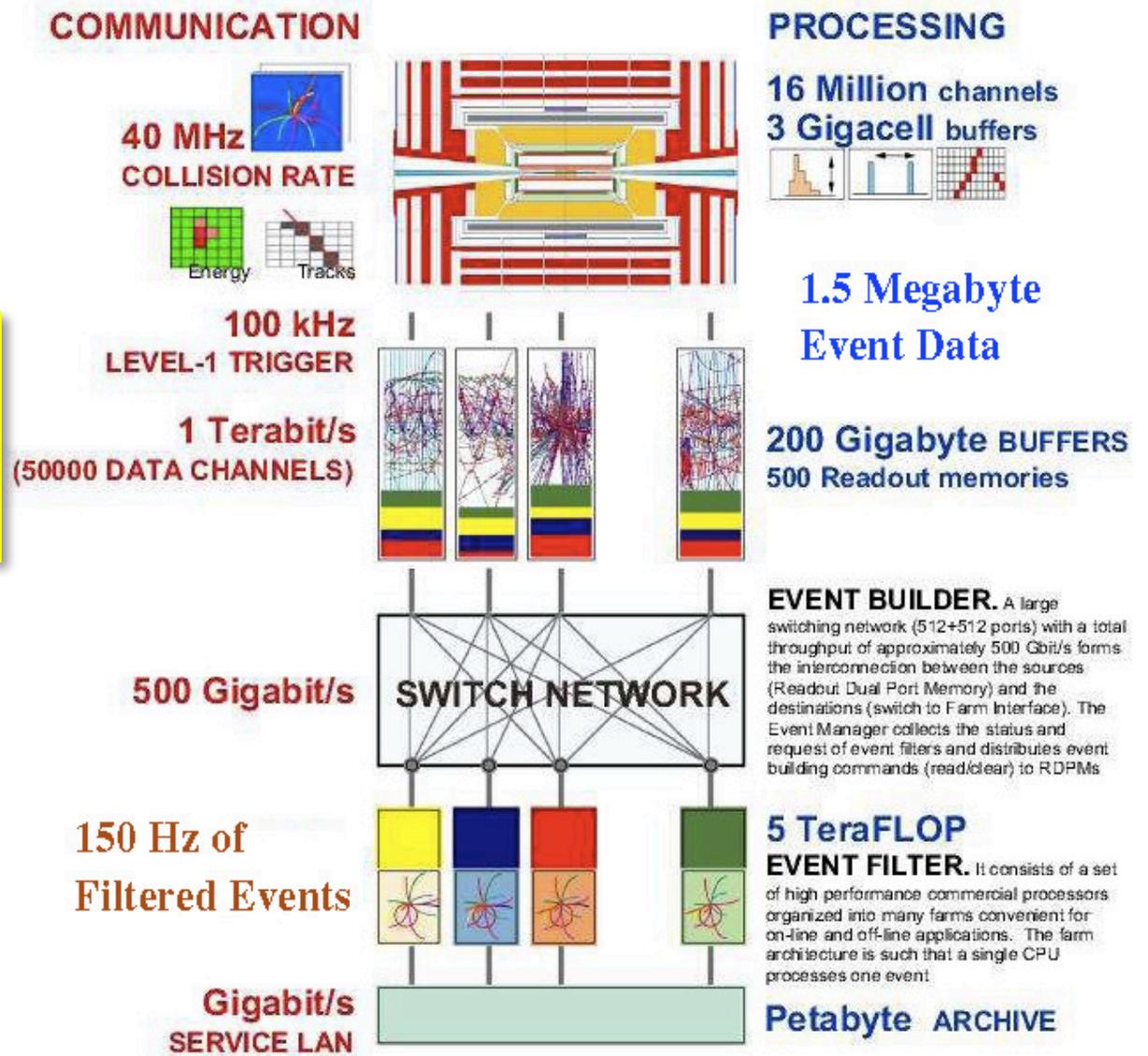
= 6 PetaBytes = 6 milioni di GigaBytes

Per il processamento dei dati sono necessari ~ 10 minuti a evento

- $10 \text{ min} * 100 * (60 * 60 * 24 * 365 * 3) / 3 = 31536000000 \text{ min} = 8760000 \text{ ore}$   
= 365000 giorni = 1000 anni

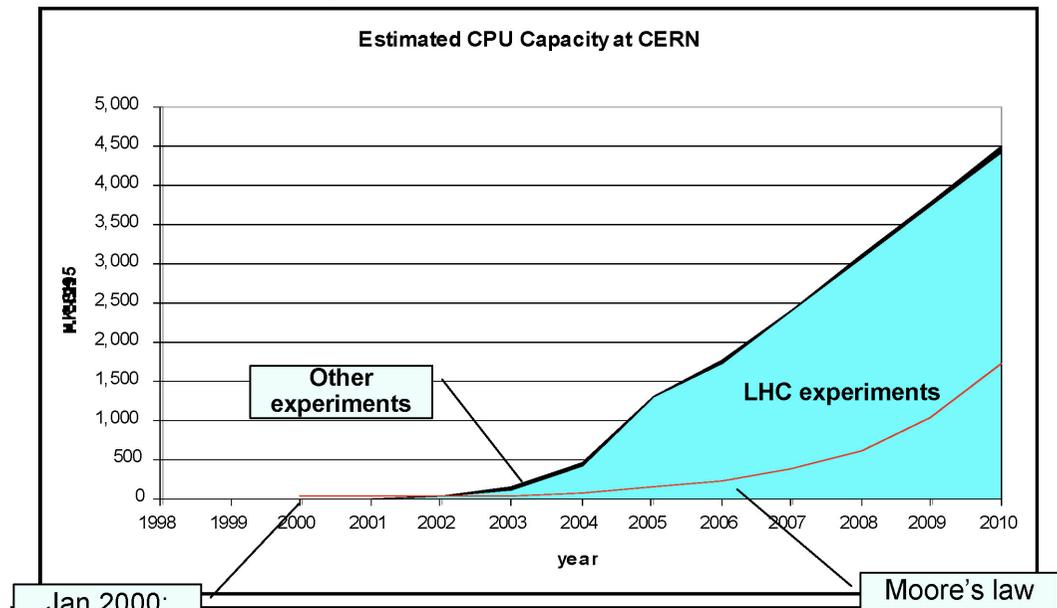
# Dal principio alla pratica, la costruzione di un evento

Segnali prodotti dai moderni rivelatori:  
impulsi elettrici tradotti in  
segnale digitale

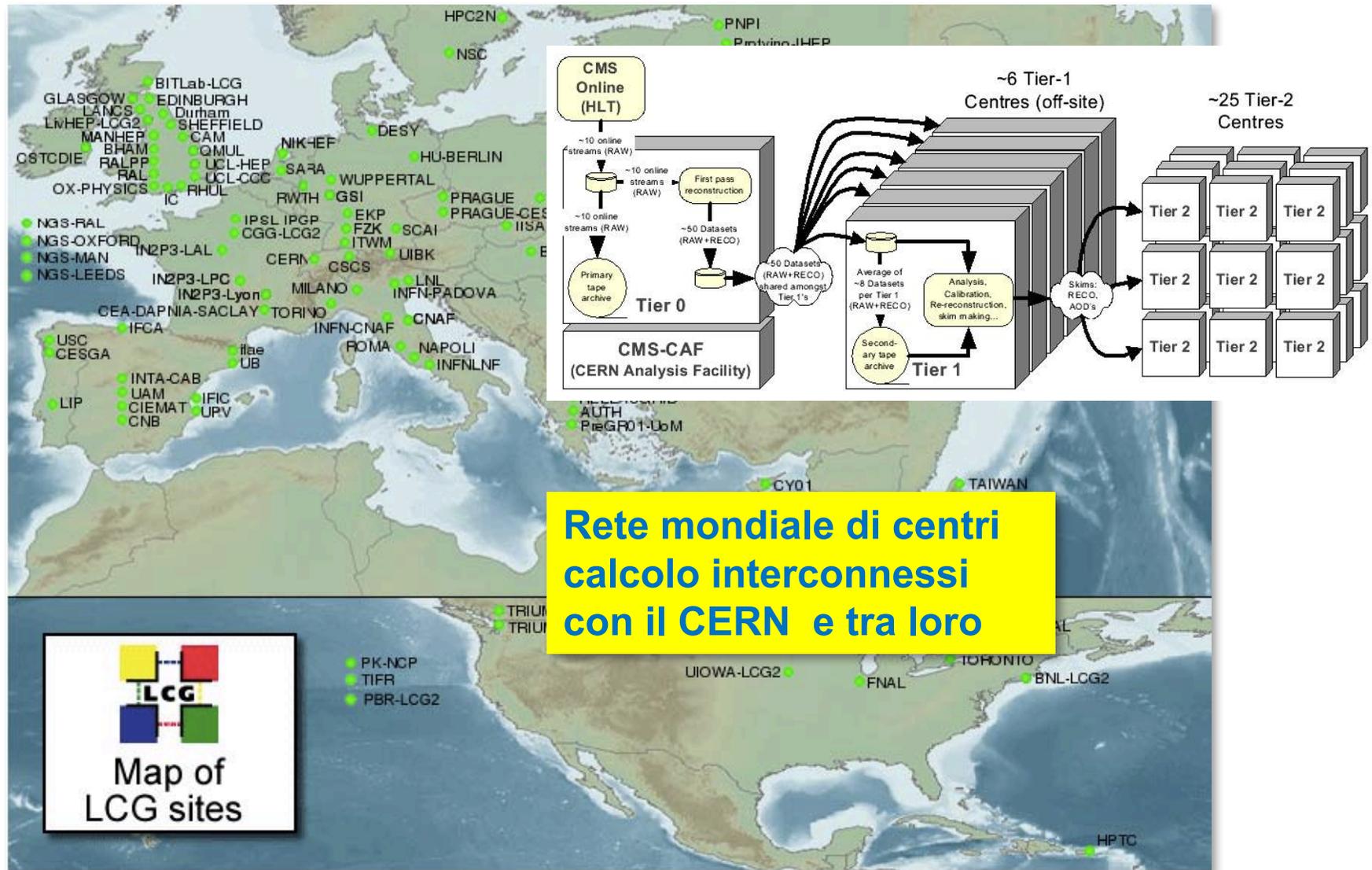


# Non basta avere un buon rivelatore...

- ▶ Simulazione, acquisizione e selezione, ricostruzione, analisi: tutto richiede calcolatori e software
- ▶ Alla fine degli anni 70 il CERN possedeva un Cray XMP, la macchina più potente d'Europa
- ▶ Oggi la vostra PlayStation o questo notebook sono 2/3 volte più potenti
  - ▶ E stanno in uno zaino



# ... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier

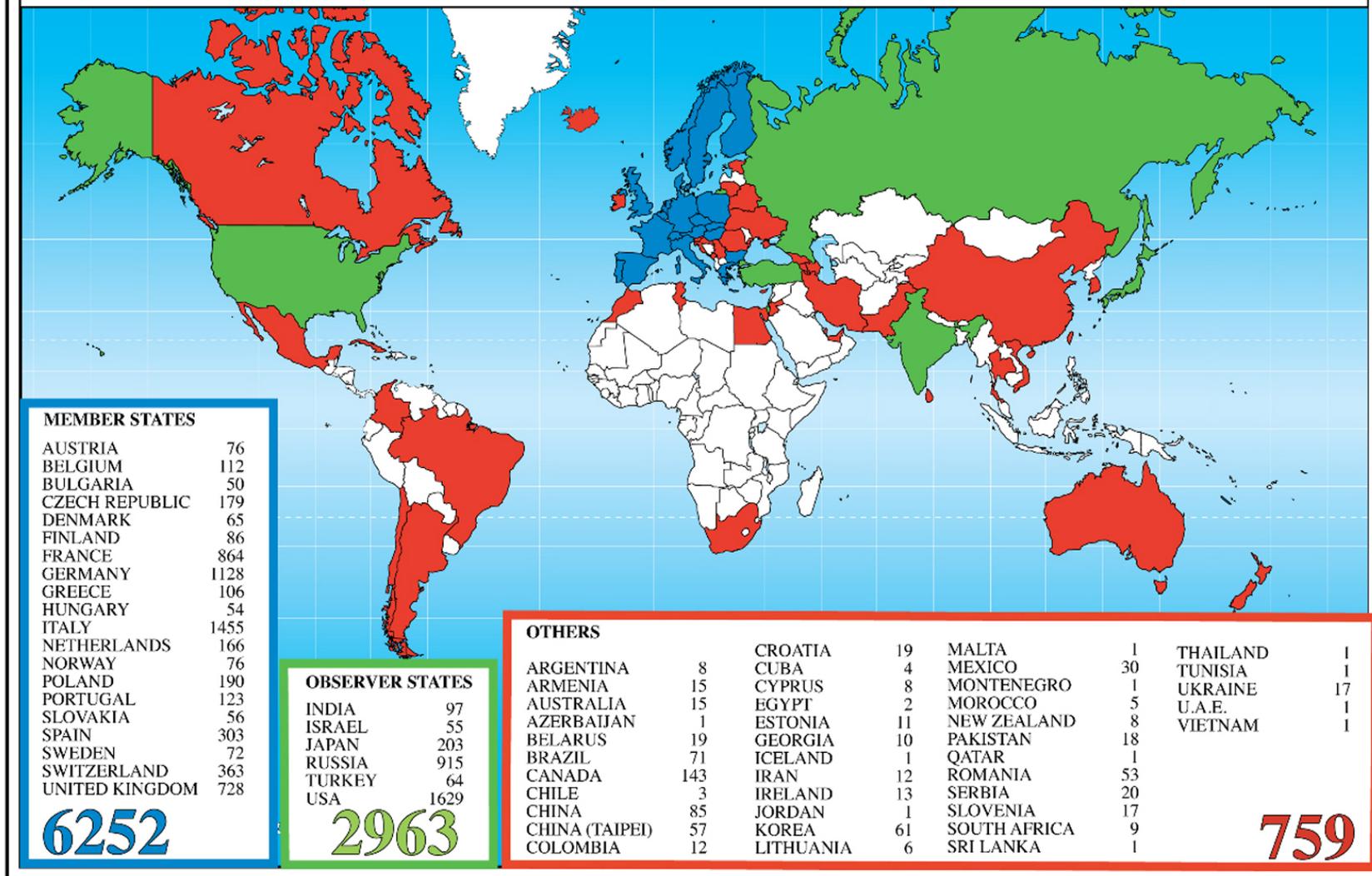


# ... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier



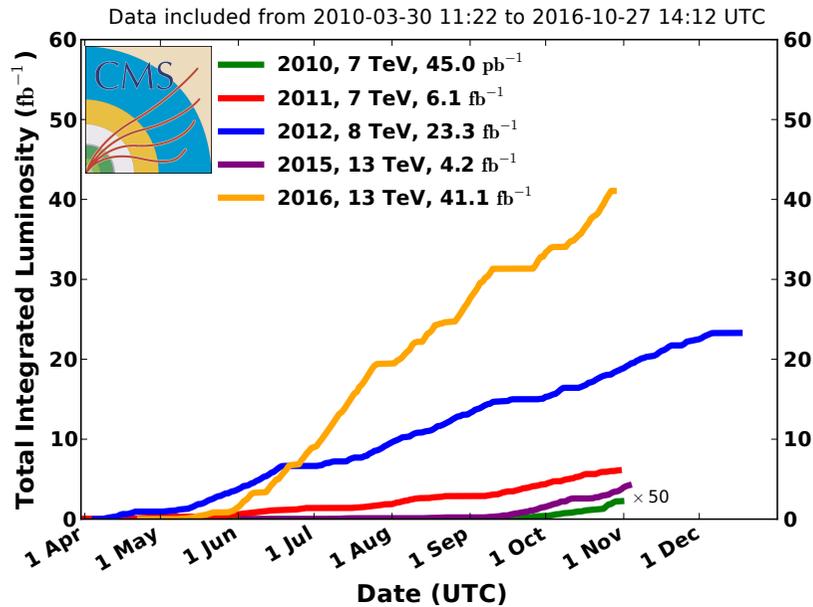
# LHC@CERN: Collaborazioni internazionali

Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 27 October 2009

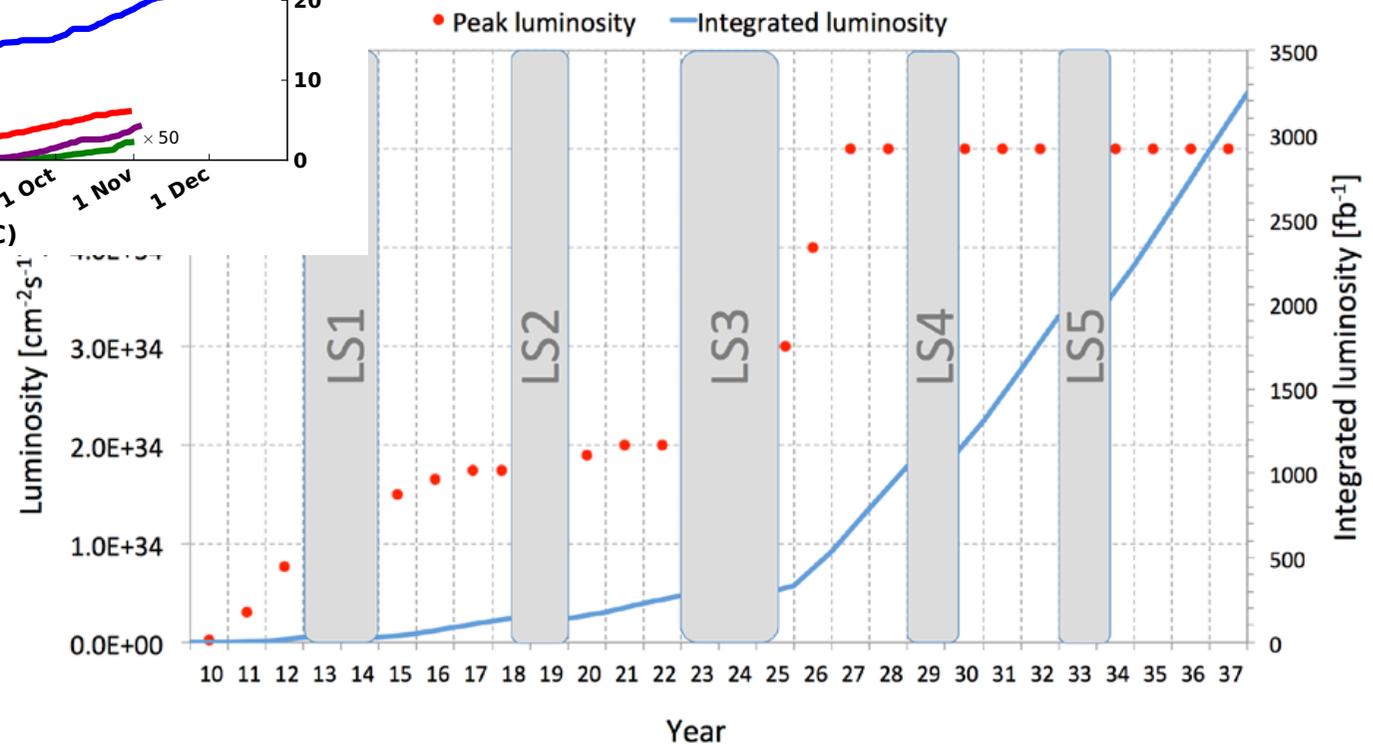


# Presente e futuro: High Luminosity LHC

CMS Integrated Luminosity, pp



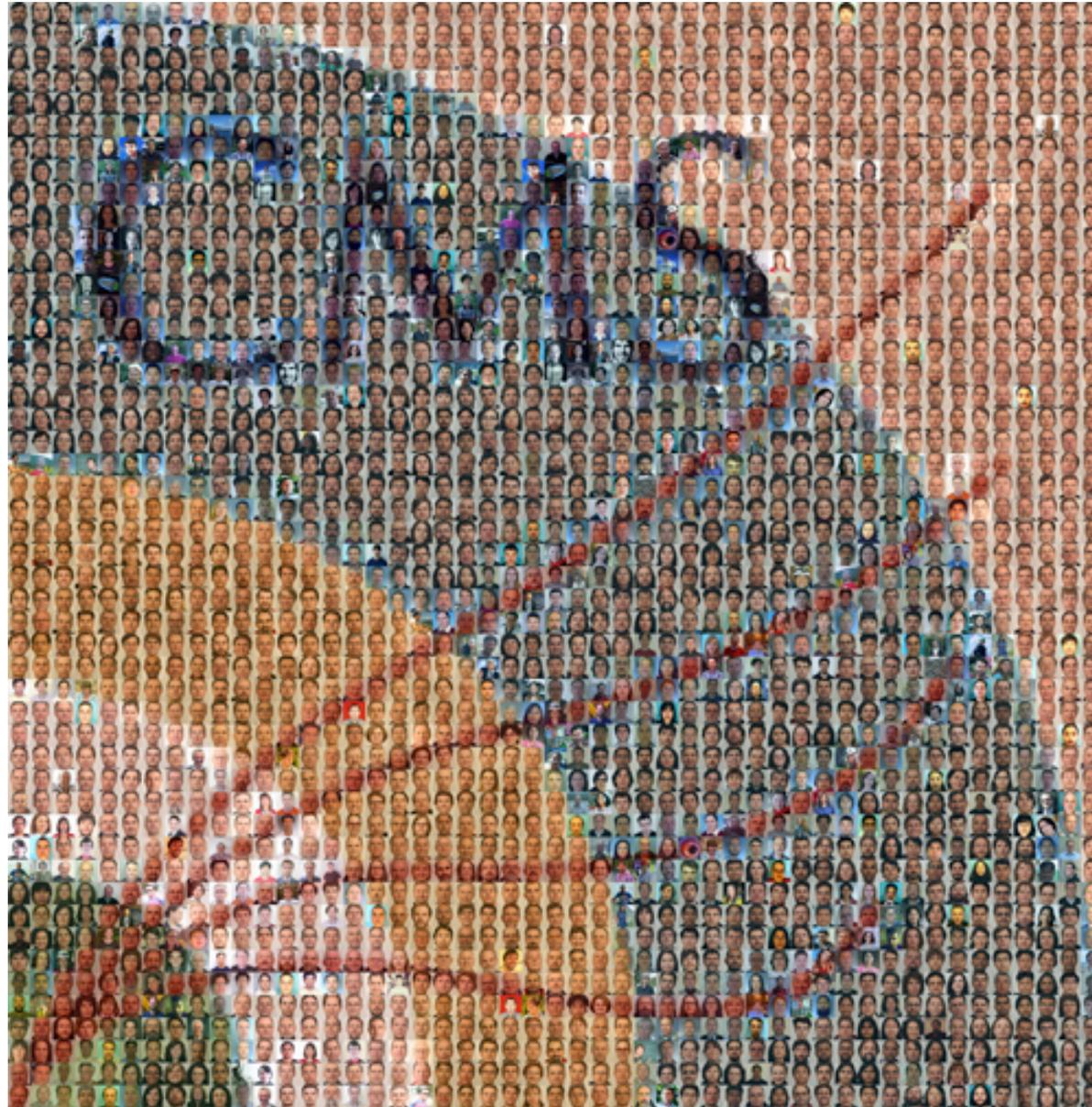
- LHC: obiettivo raccogliere 300 fb<sup>-1</sup>
- HL-LHC: decuplicare la statistica
  - misure di precisione sul bosone di Higgs



# Per concludere

- ▶ Con  $\sim 40 \text{ pb}^{-1}$  tra 2009 e 2010 si sono capiti i rivelatori, aggiustate le simulazioni, studiati i processi standard noti, prodotte decine di articoli...
- ▶ Tra il 2011 ed il 2012 LHC ha accumulato una statistica senza precedenti per questo tipo di collider  $5 \text{ fb}^{-1}$  (7 TeV) +  $20 \text{ fb}^{-1}$  (8 TeV), ha permesso oltre 600 pubblicazioni tra ATLAS e CMS, ed ha scoperto quello che sembra essere il bosone di Higgs
  - ▶ Si tratta dell'Higgs del Modello Standard? È il primo di una famiglia?
  - ▶ La supersimmetria c'è ma è meno "semplice" di quel che pensavamo? O non l'abbiamo cercata nel posto giusto?
  - ▶ Ci aspettano sorprese? Qualcosa che non ci attendevamo? Vedremo segnali di materia oscura?
- ▶ Dal 2015 l'energia nel centro di massa è quasi doppia, e la quantità di dati raccolta pure
  - ▶ Attività destinata a durare per i prossimi 15 anni almeno
- ▶ Ci sono molte persone che hanno lavorato per anni, anche 20, per poter arrivare a questo momento, una nuova fase sta per partire...
- ▶ **Voi siete dei privilegiati: l'avete a portata di mano**

# Domande?



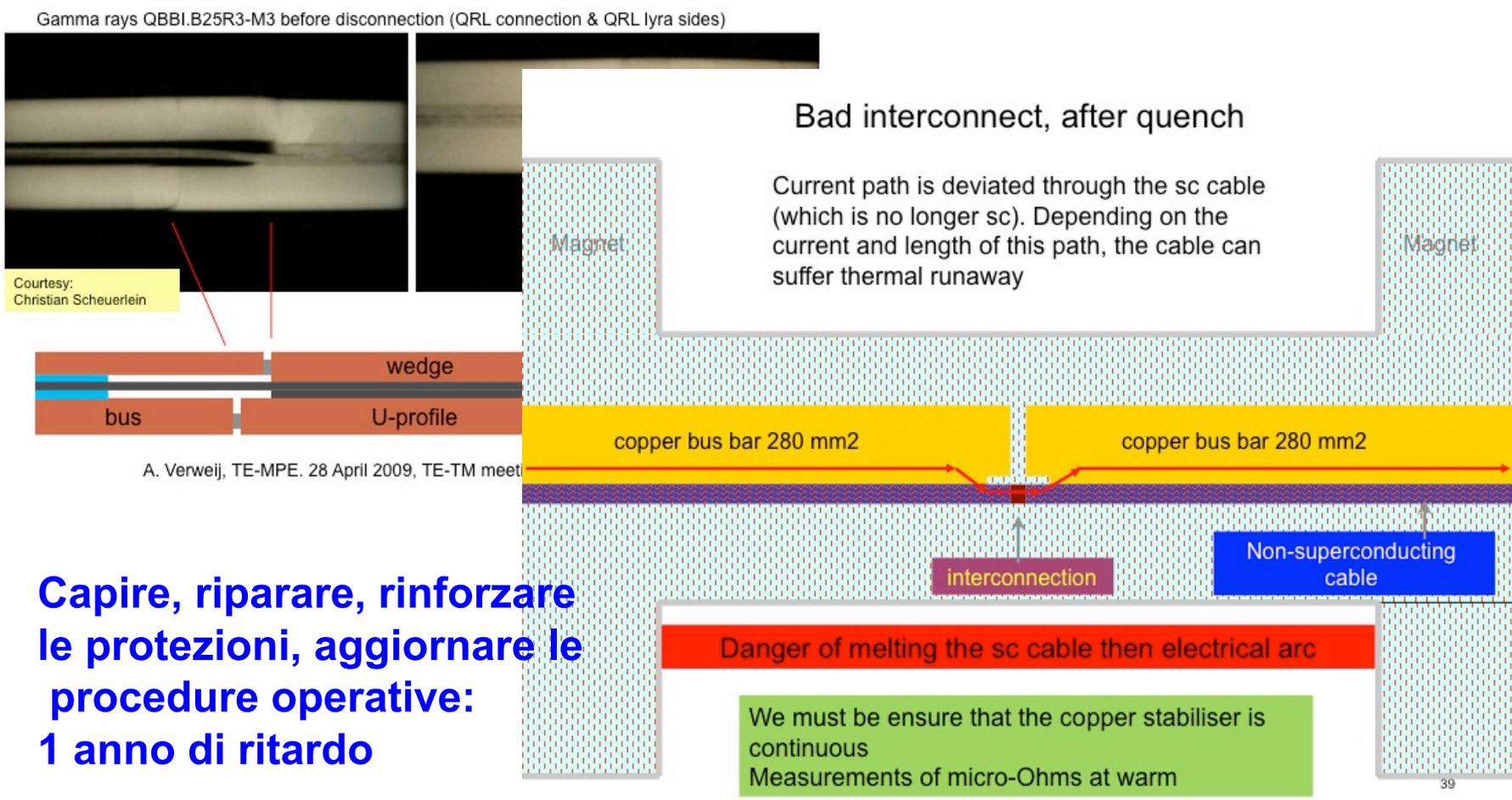
# BACKUP

---

# Cosa ti può combinare una saldatura fatta male...

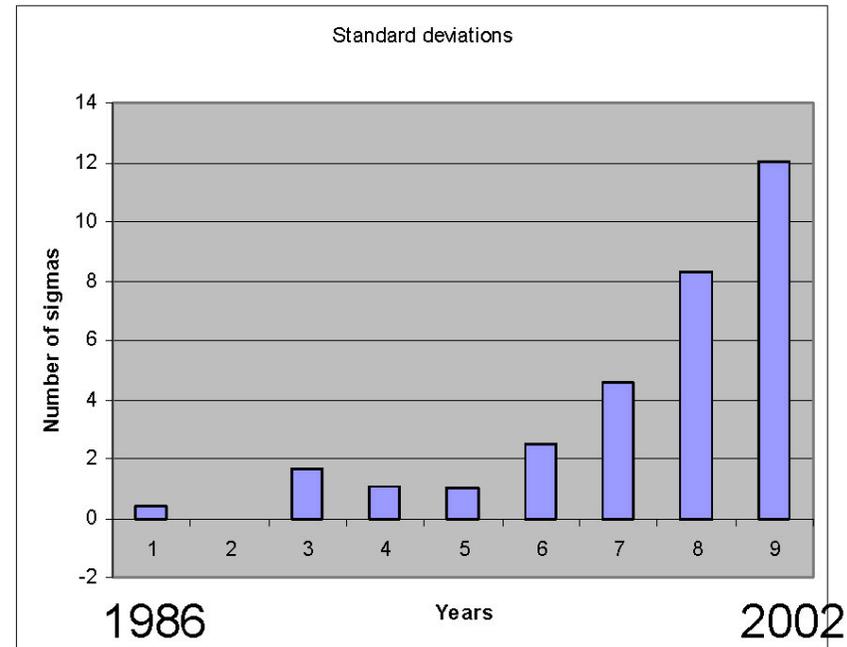
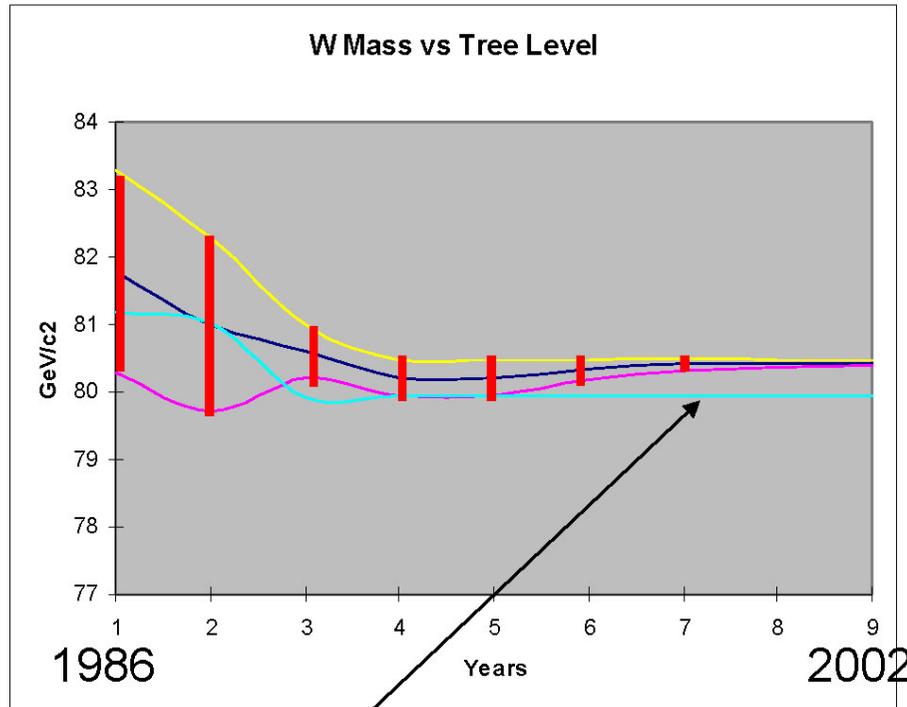
Bad surprise after gamma-ray imaging of the joints: Void is present in most of bus extremities because SnAg flows out during soldering of the joint

Cos'è accaduto a settembre 2009



Capire, riparare, rinforzare le protezioni, aggiornare le procedure operative: 1 anno di ritardo

# I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



Strong Evidence of pure E.W.  
Higher Order Corrections

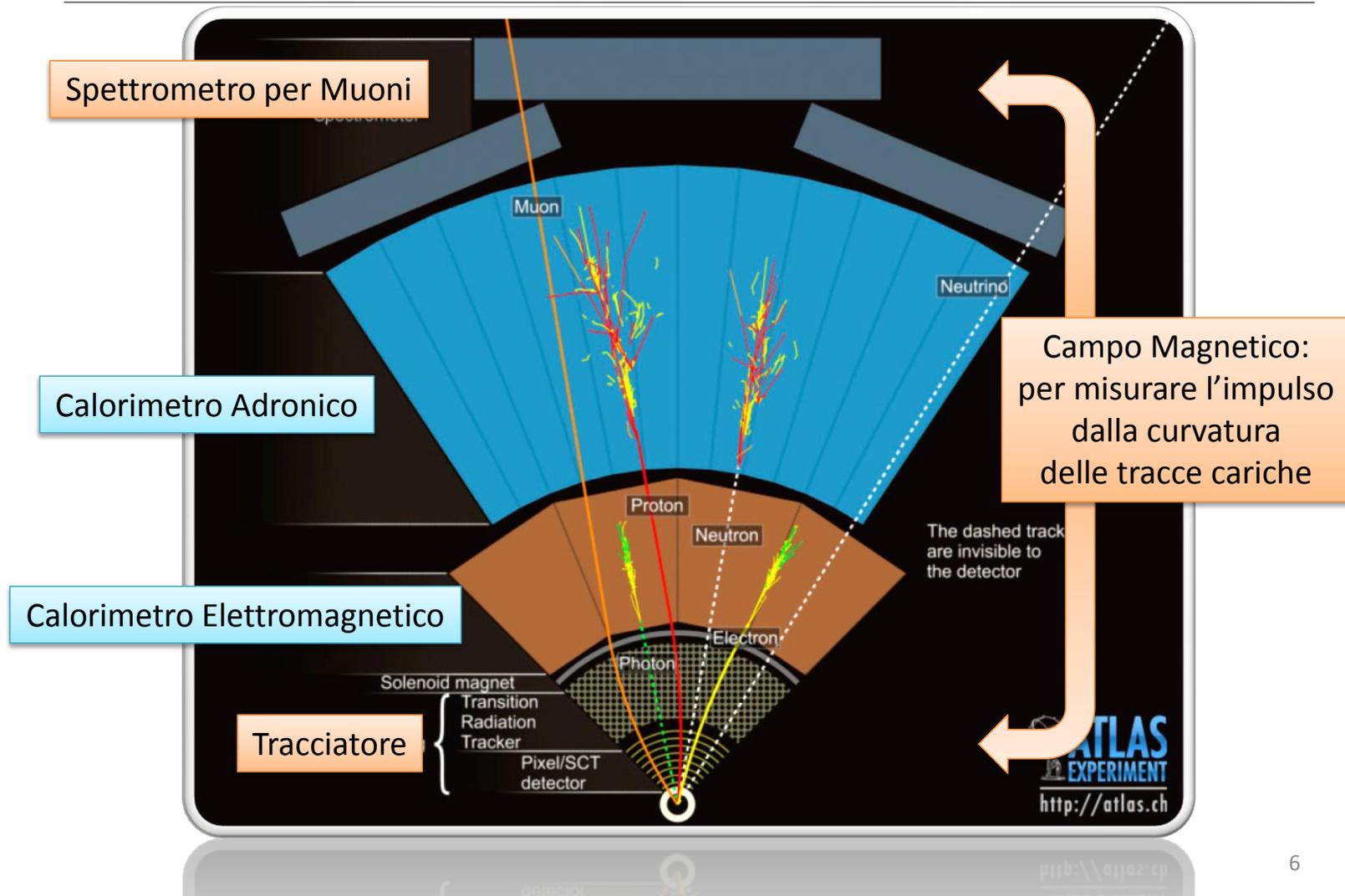
E.W. Tree level SM relation  
(with running  $\alpha$  QED)

$$M_w^2 \left( 1 - \frac{M_w^2}{M_z^2} \right) = \frac{\pi \alpha(M_z)}{\sqrt{2}} \frac{1}{G_F}$$

$$\alpha(\sqrt{s} = M_z) = \frac{1}{128.936 \pm 0.046}$$

# ATLAS: tecniche differenti, struttura analoga

*Un "microscopio" a strati specializzati*

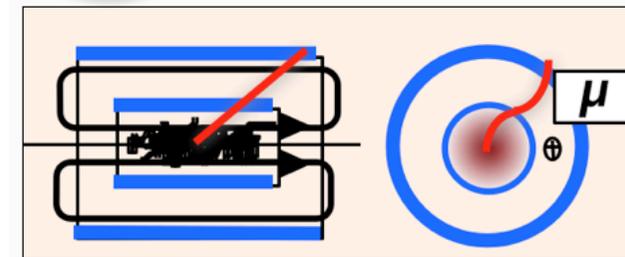
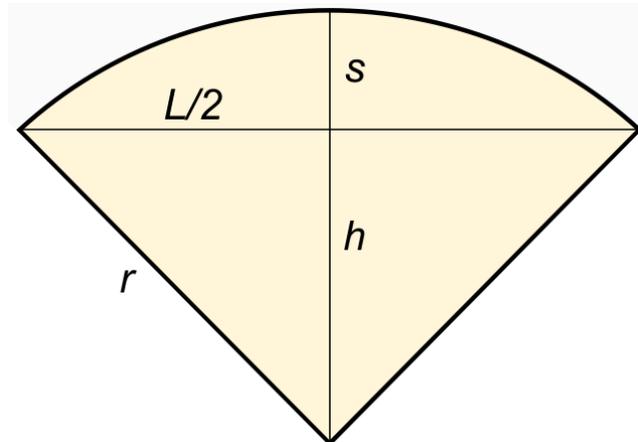


6

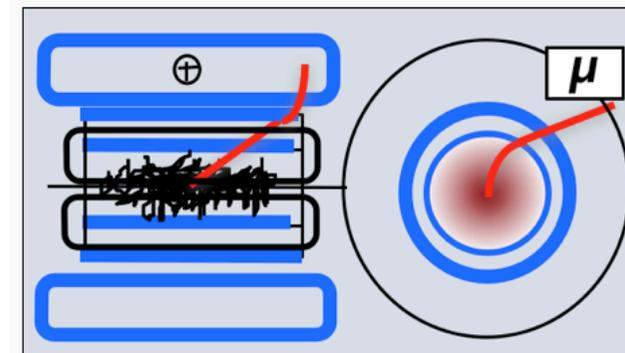
# La differenza chiave: il campo magnetico

$$p = \frac{0.3 L^2 B}{8 s} \Rightarrow \frac{\delta p}{p} = \frac{\delta s}{s} = \frac{8}{0.3} \frac{1}{L^2 B} p \delta s$$

Da massimizzare per ottimizzare la risoluzione



CMS

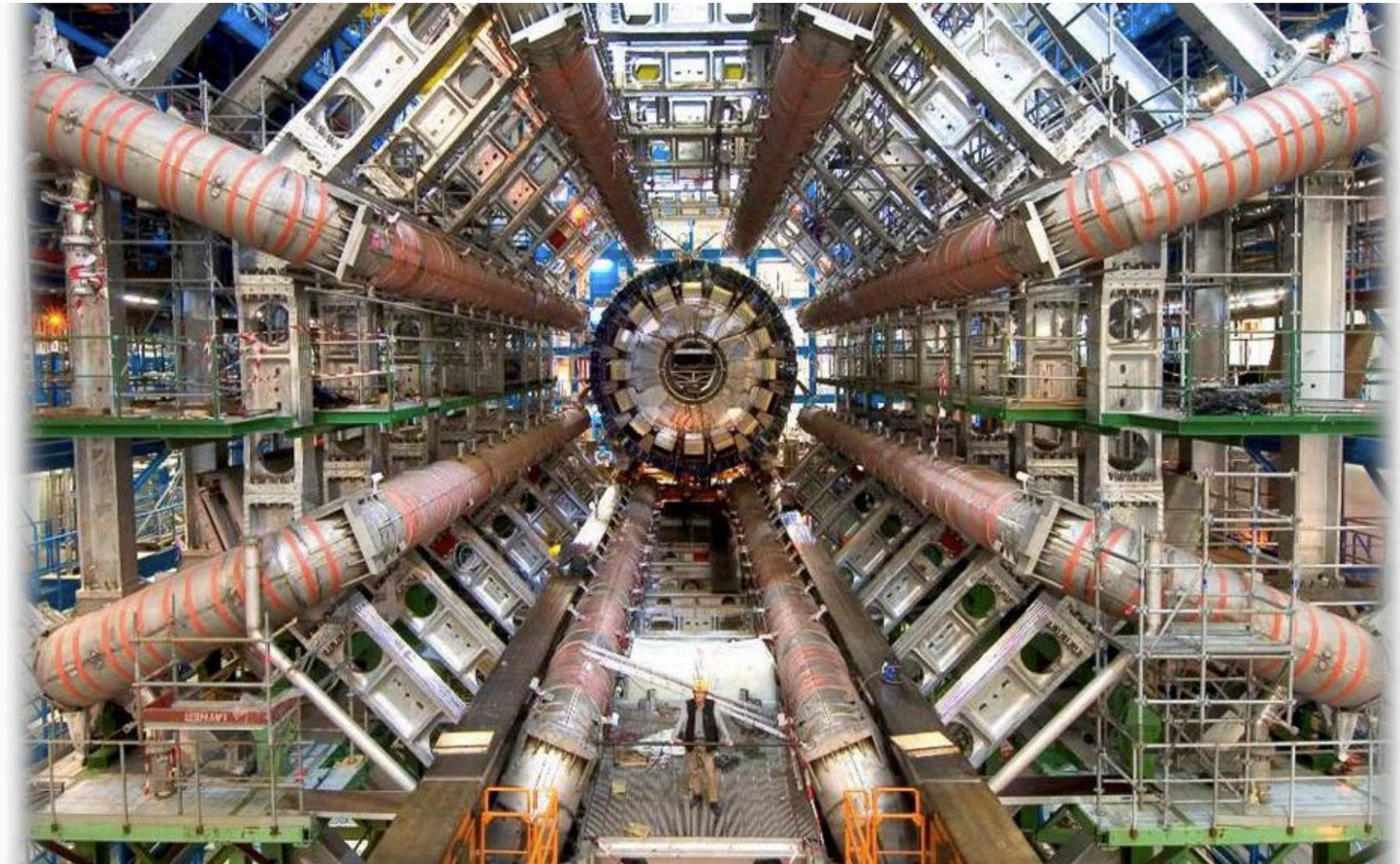


ATLAS

CMS: solenoide con giogo di ritorno instrumentato (camere a muoni)  
 $B = 4\text{T}$ ,  $L \sim 3\text{m}$ , compatto (basso costo), ottima risoluzione al centro  
 ma povera in avanti, muoni a basso angolo attraversano molto materiale

ATLAS: piccolo solenoide per il tracciatore + toroide in aria: ottimo  $L^2B$  anche  
 in avanti, ma dimensioni giganti  $\sim 44\text{ m}$ , campo magnetico molto complesso,

# Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



# Varie strategie possibili per l'acquisizione dei dati

