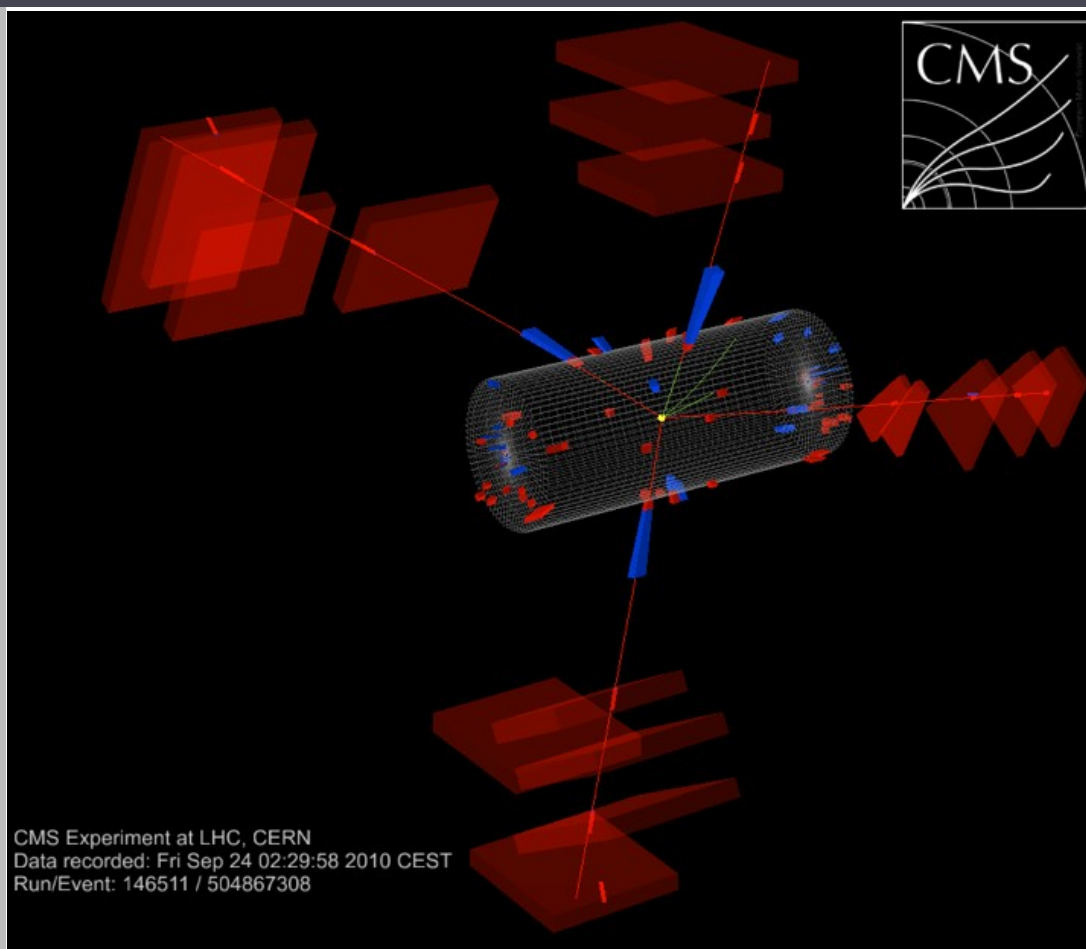
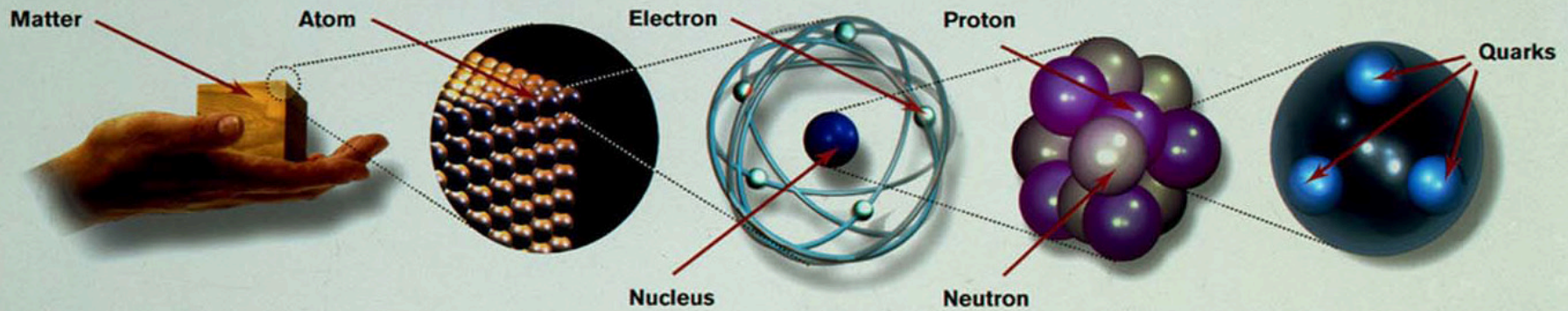


# La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

Fabio Cossutti – INFN Trieste



















Masterclass 2026











**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

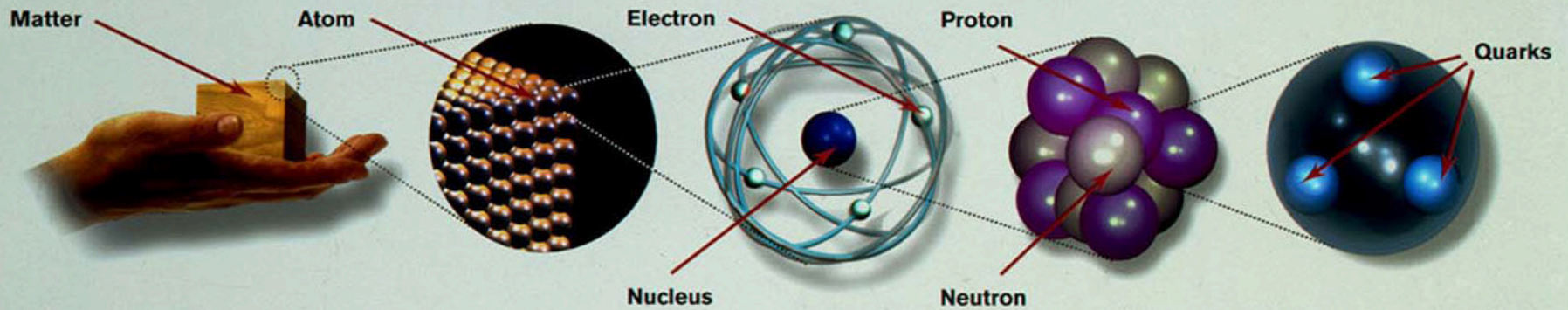
**Gravitons**  
Carriers of gravity



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

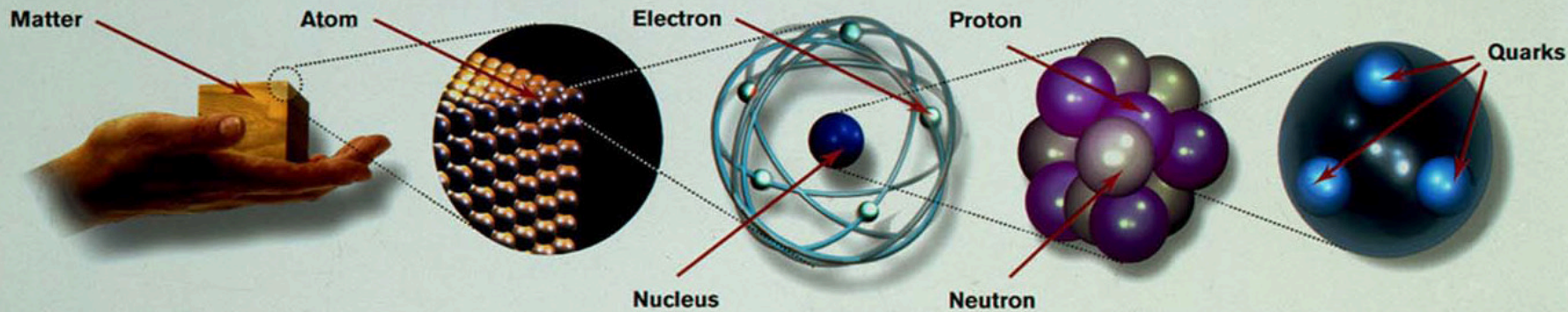
LEPTONS		QUARKS		
<b>FIRST FAMILY</b>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one	<b>Electron neutrino</b> Created along with electrons when some particles decay	<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain 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

**Costituenti della materia  
(con le relative antiparticelle)**

**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 Felt by: quarks The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b>	<b>Photons</b> 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 <b>electro-magnetic force</b>	<b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the weak force Felt by: quarks and leptons Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b>	<b>Gravitons</b> Carriers of gravity Felt by: all particles with mass All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b>
---	--	--	---

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>	<p><b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one</p> <p><b>Electron neutrino</b> Created along with electrons when some particles decay</p>
<b>SECOND FAMILY</b>	<p><b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second</p> <p><b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist</p>
<b>THIRD FAMILY</b>	<p><b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975</p>

**Costituenti della materia  
(con le relative antiparticelle)**

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

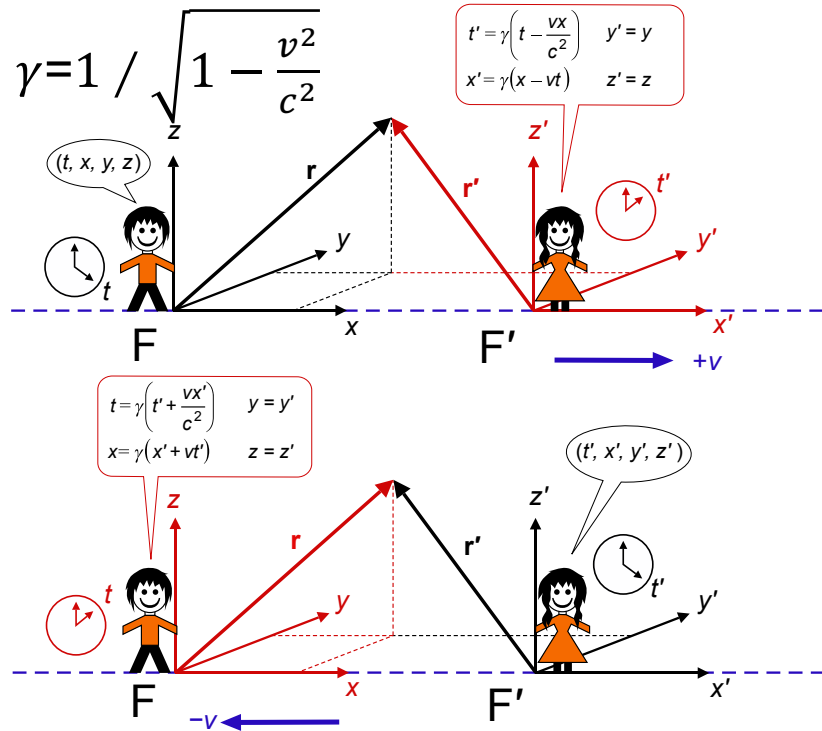
<p><b>Gluons</b> Carriers of the strong force between quarks</p> <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force</p>	<p><b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the electromagnetic force</p> <p>Felt by: quarks and charged leptons</p>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

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

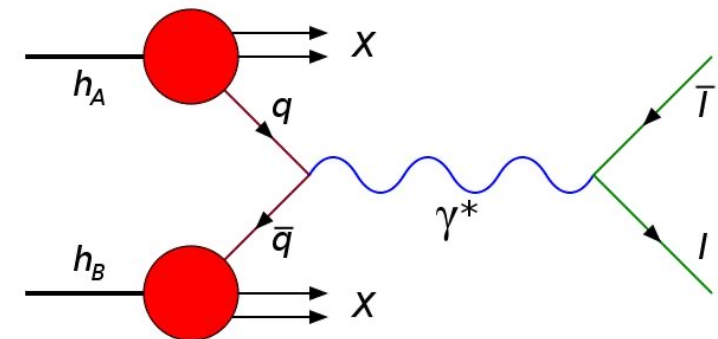
$$g_V = I_3 - 2Q \sin^2 \theta_W; \quad g_A = I_3; \quad (F_W)^{\mu\nu} = \partial^\mu W_\nu^\nu - \partial^\nu W_\mu^\mu$$

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

- ▶ 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



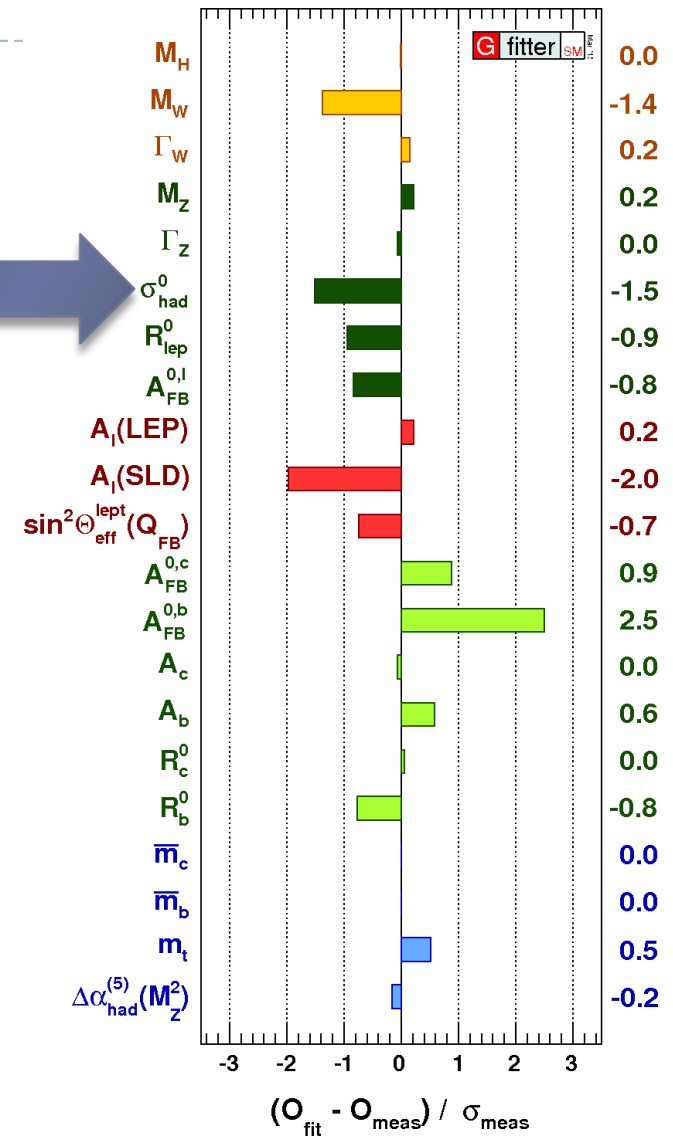
- ▶ Potete calcolare le caratteristiche di un urto tra particelle

- ▶ 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

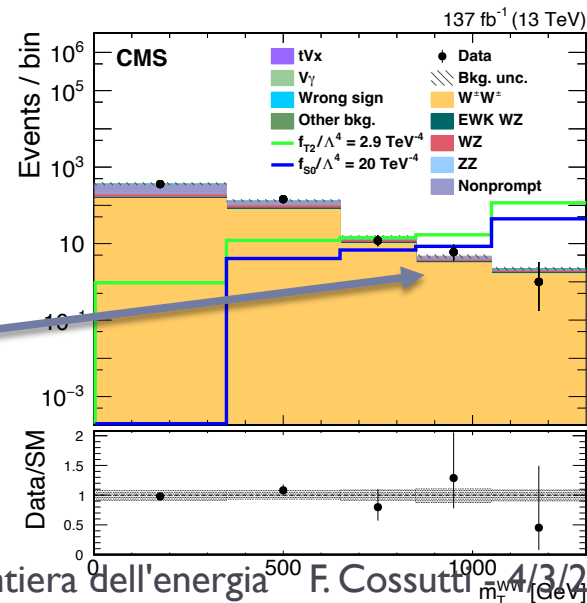
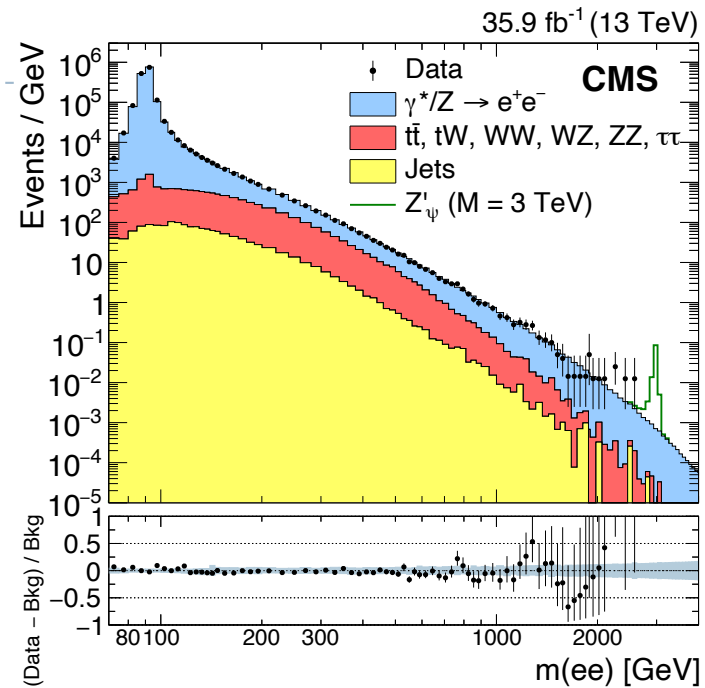
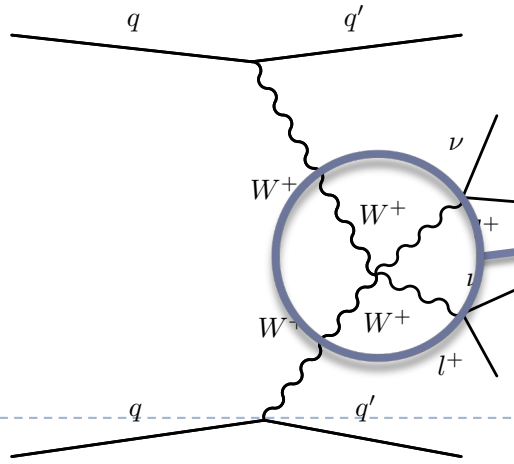


## ▶ Approcci complementari

- ▶ 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

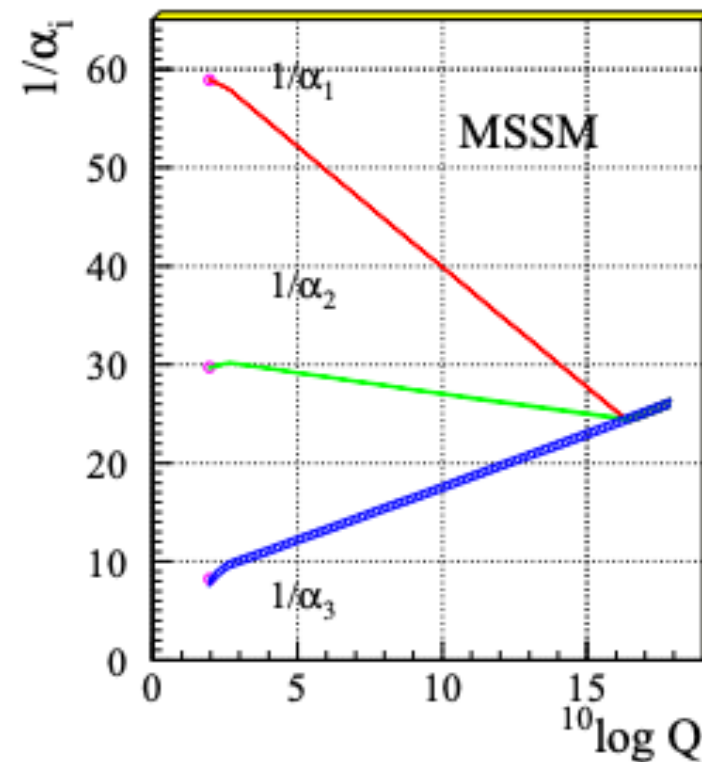
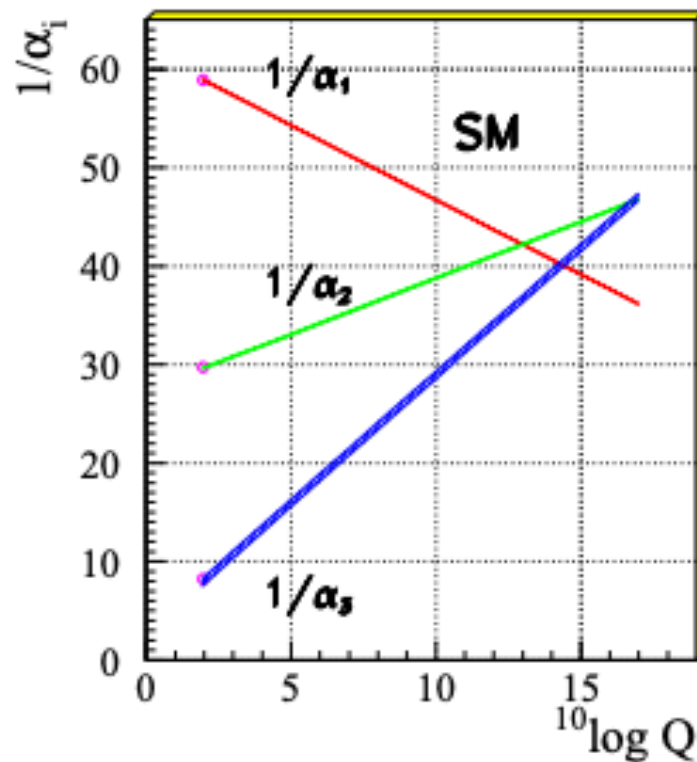
- ▶ Ricerca di nuova fisica: produzione di  $Z'$  ad alta massa che decade in due elettroni
- ▶ Misura di precisione: urto tra due bosoni  $W$



Se nuove particelle scambiate nel vertice tra 4 W

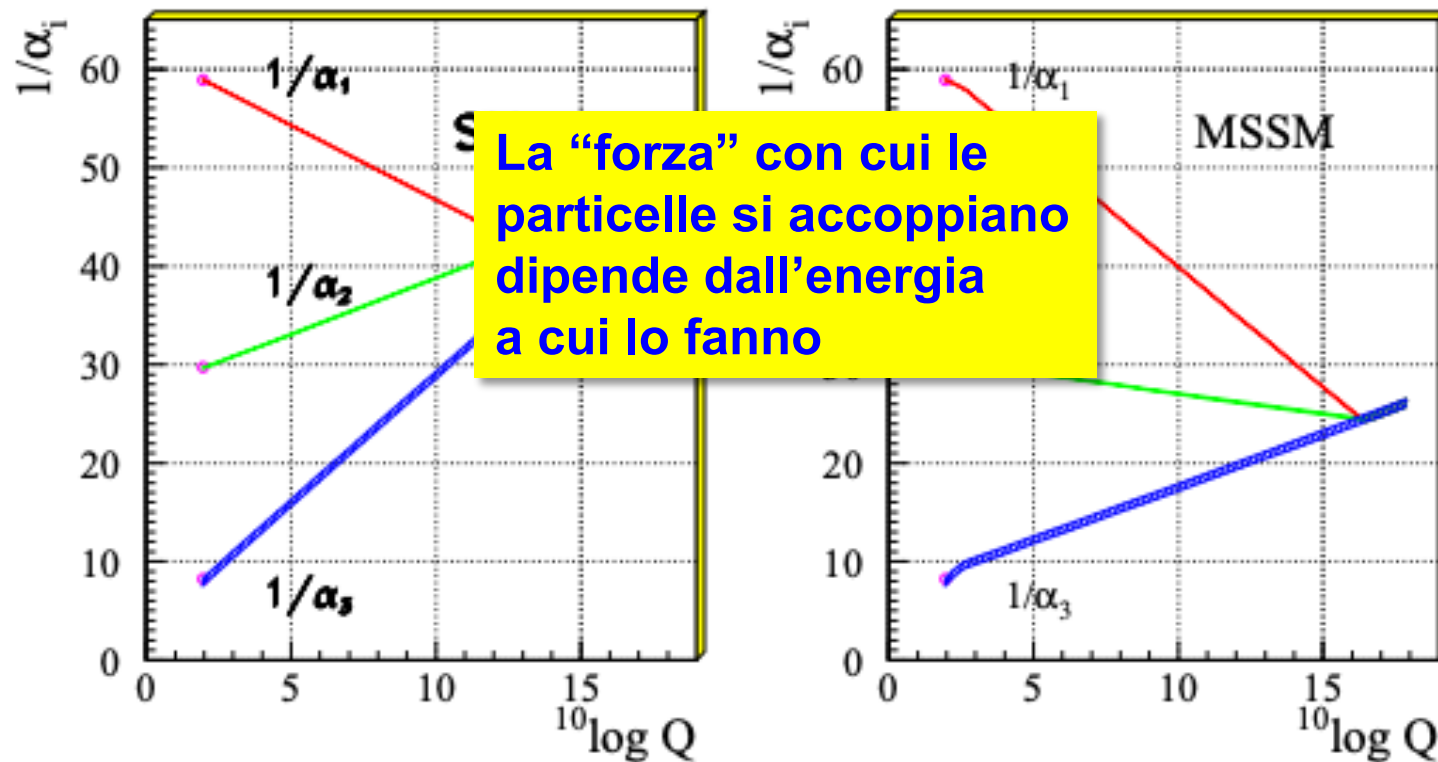
# Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

Unification of the Coupling Constants  
in the SM and the minimal MSSM



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

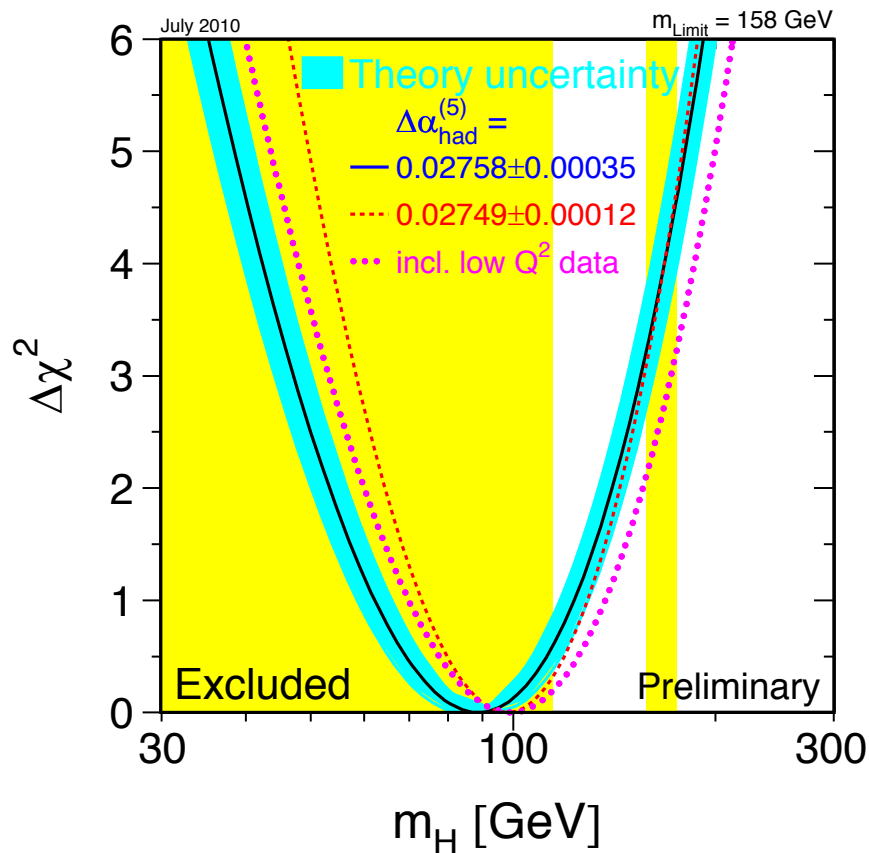
Unification of the Coupling Constants  
in the SM and the minimal MSSM



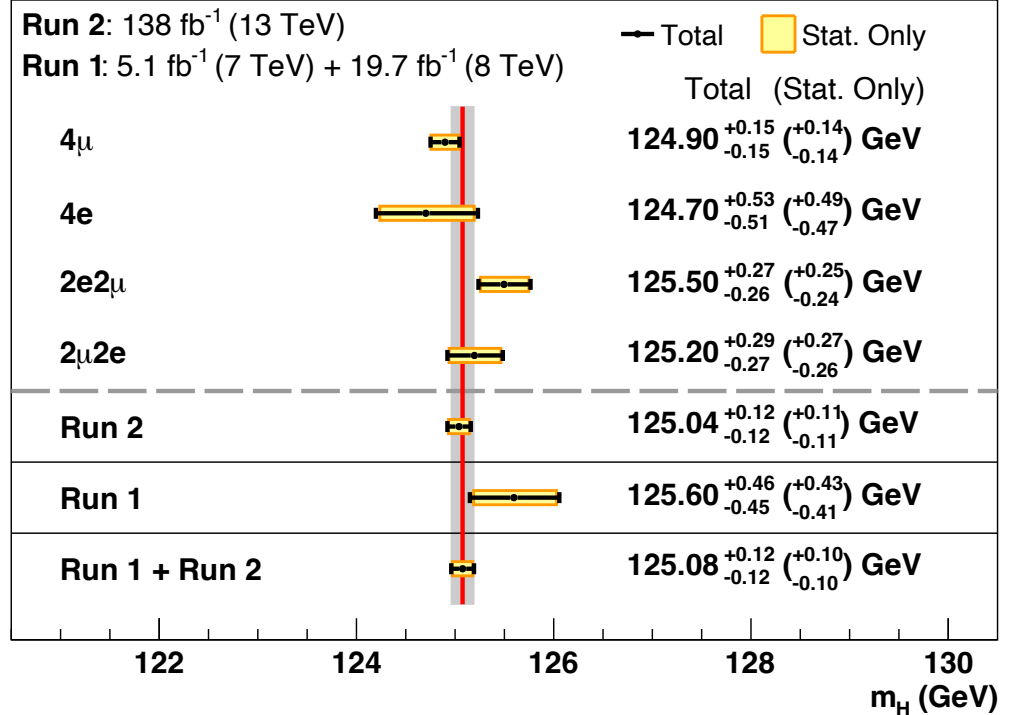
# Perchè tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

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

Oggi: combinazione di misure di alta precisione

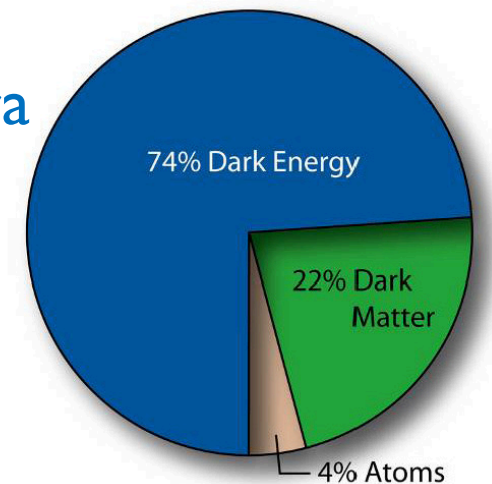


CMS



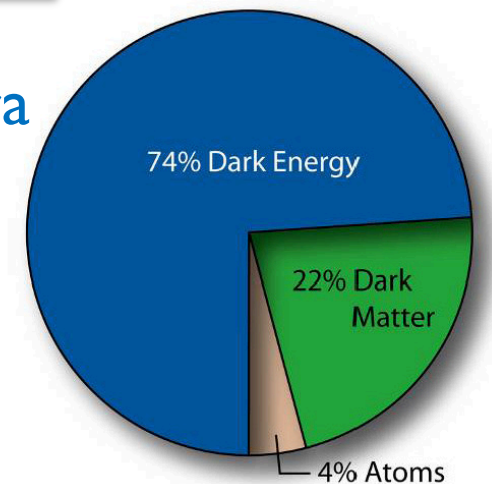
# Le domande per LHC

- ▶ Origine della massa: la particella scoperta nel 2012 è il **bosone di Higgs** come previsto dallo Standard Model e dal suo meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole?
  - ▶ o è una manifestazione di qualcosa di più complesso?
  - ▶ le sue proprietà sono esattamente quelle previste dal Modello Standard?
- ▶ Ci sono segnali che indicano un legame tra la **gravitazione** e le altre tre forze fondamentali?
- ▶ Capiamo il meccanismo che produce **l'asimmetria tra materia e antimateria** osservata nell'Universo?
- ▶ Di cosa e' fatta la **Materia Oscura** che compone la maggior parte della massa dell' Universo?



# Le domande per LHC

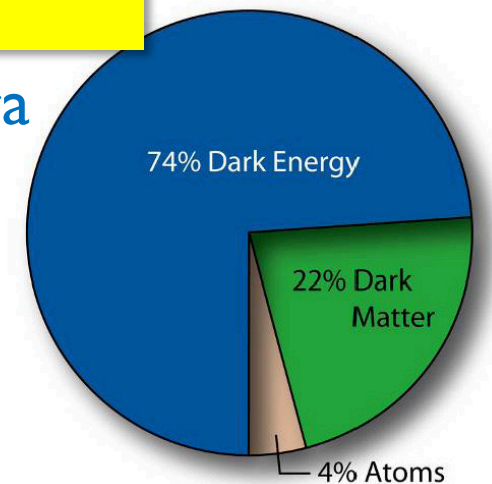
- ▶ Origine della massa: la particella scoperta nel 2012 è il **bosone di Higgs** come previsto dallo Standard Model e dal suo meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole?
  - ▶ o è una manifestazione di qualcosa di più complesso?
  - ▶ le sue proprietà sono davvero Standard?
- ▶ Ci sono segni che **Il Modello Standard non può essere la fine della storia...** **gravitazione** e le altre tre forze fondamentali?
- ▶ Capiamo il meccanismo che produce **l'asimmetria tra materia e antimateria** osservata nell'Universo?
- ▶ Di cosa è fatta la **Materia Oscura** che compone la maggior parte della massa dell'Universo?



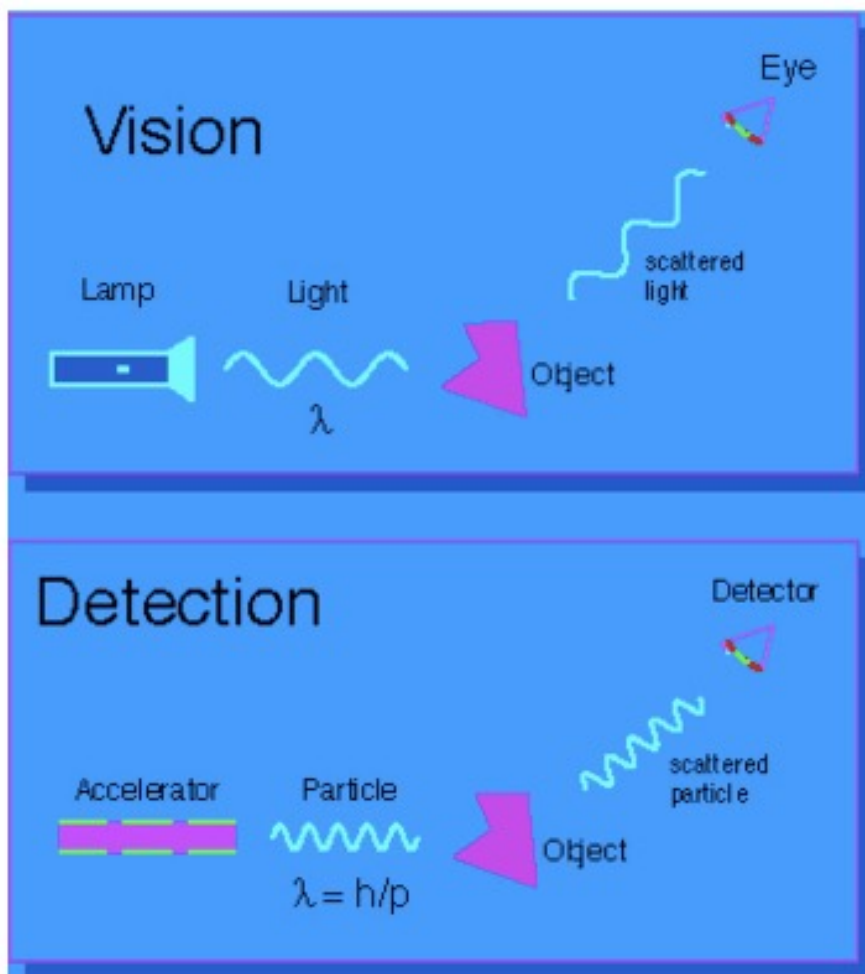
# Le domande per LHC

- ▶ Origine della massa: la particella scoperta nel 2012 è il **bosone di Higgs** come previsto dallo Standard Model e dal suo meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole?
  - ▶ o è una
  - ▶ le sue p
- ▶ Ci sono s  
altre tre
- ▶ Capiamo il meccanismo che produce **l'asimmetria tra materia e antimateria** osservata nell'Universo?
- ▶ Di cosa e' fatta la **Materia Oscura** che compone la maggior parte della massa dell' Universo?

**Come si può ottenere tutto questo?**

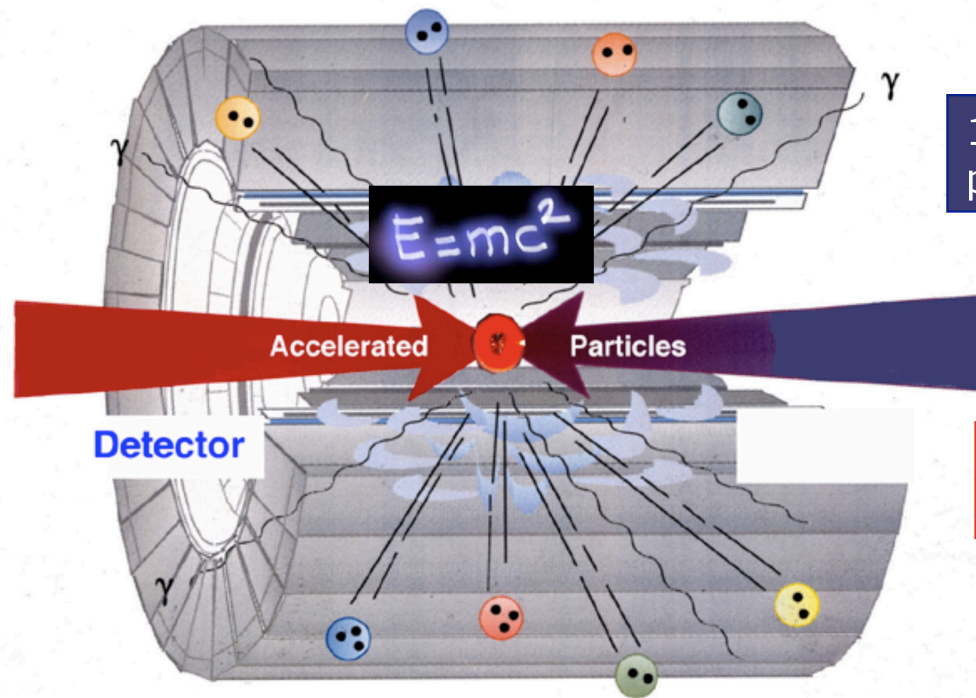


# L'osservazione del microcosmo



- ▶ I dettagli risolvibili più piccoli hanno le dimensioni della  $\lambda$  associata alla radiazione incidente
- ▶ Per ogni onda  $v = \lambda\nu$ 
  - ▶ a velocità fissa:
  - ▶ diminuisce  $\lambda \Rightarrow$  cresce  $\nu$  (e  $p$ )
- ▶ Più piccoli i dettagli dei bersagli da esplorare, maggiore l'energia dei proiettili necessari per sondarli
  
- ▶ 1 eV: energia acquisita da un elettrone accelerato dalla differenza di potenziale di 1 V
  - ▶ massa del protone: 938 MeV
  - ▶ energia in un urto di LHC: 13.6 TeV

# 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**

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

**0.999999c by here**

**0.87c by here**

**0.3c by here**

**Start the protons out here**

**4 m**

**19**

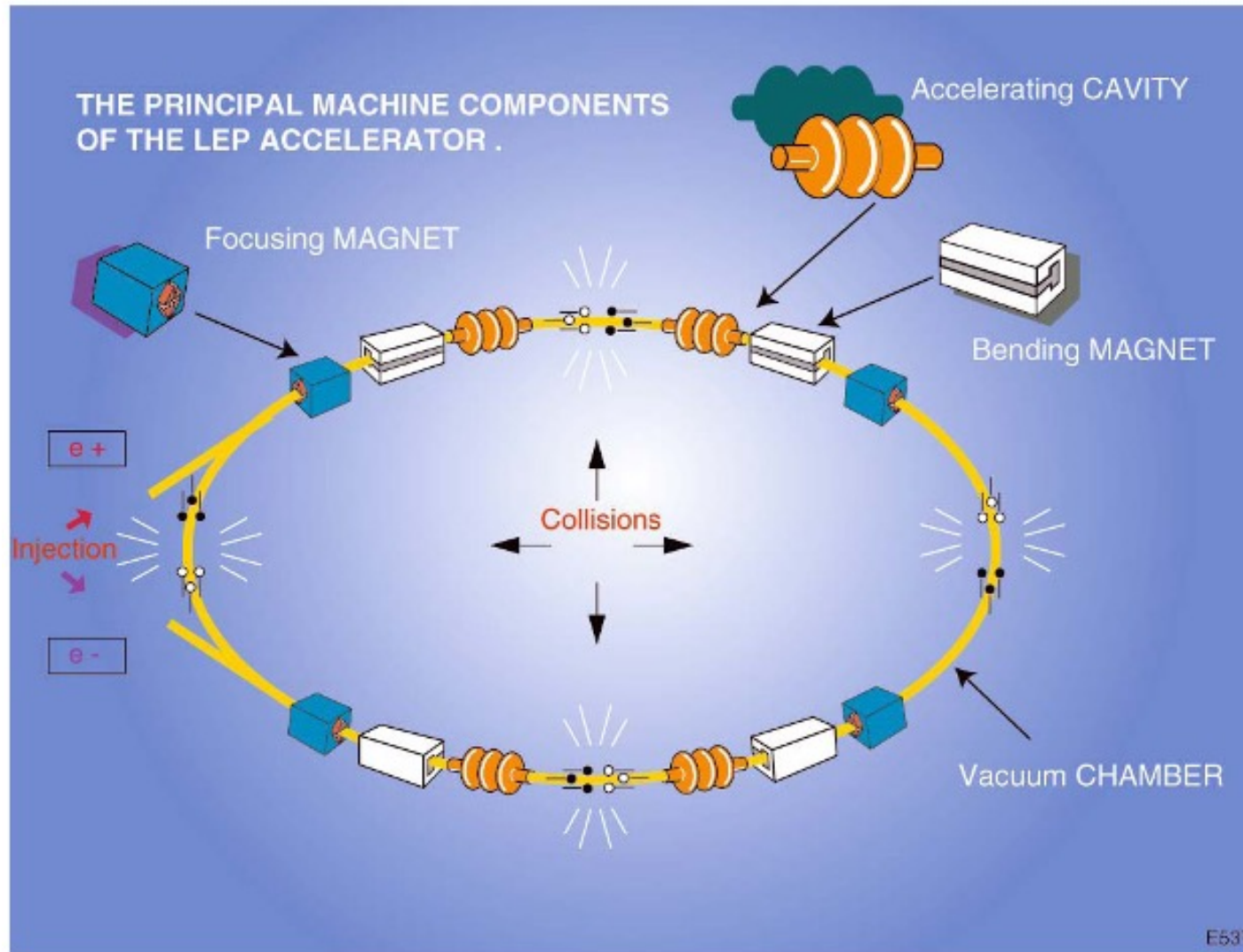
**La fisica di LHC: la frontiera dell'energia F. Cossutti - 4/3/2026**

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

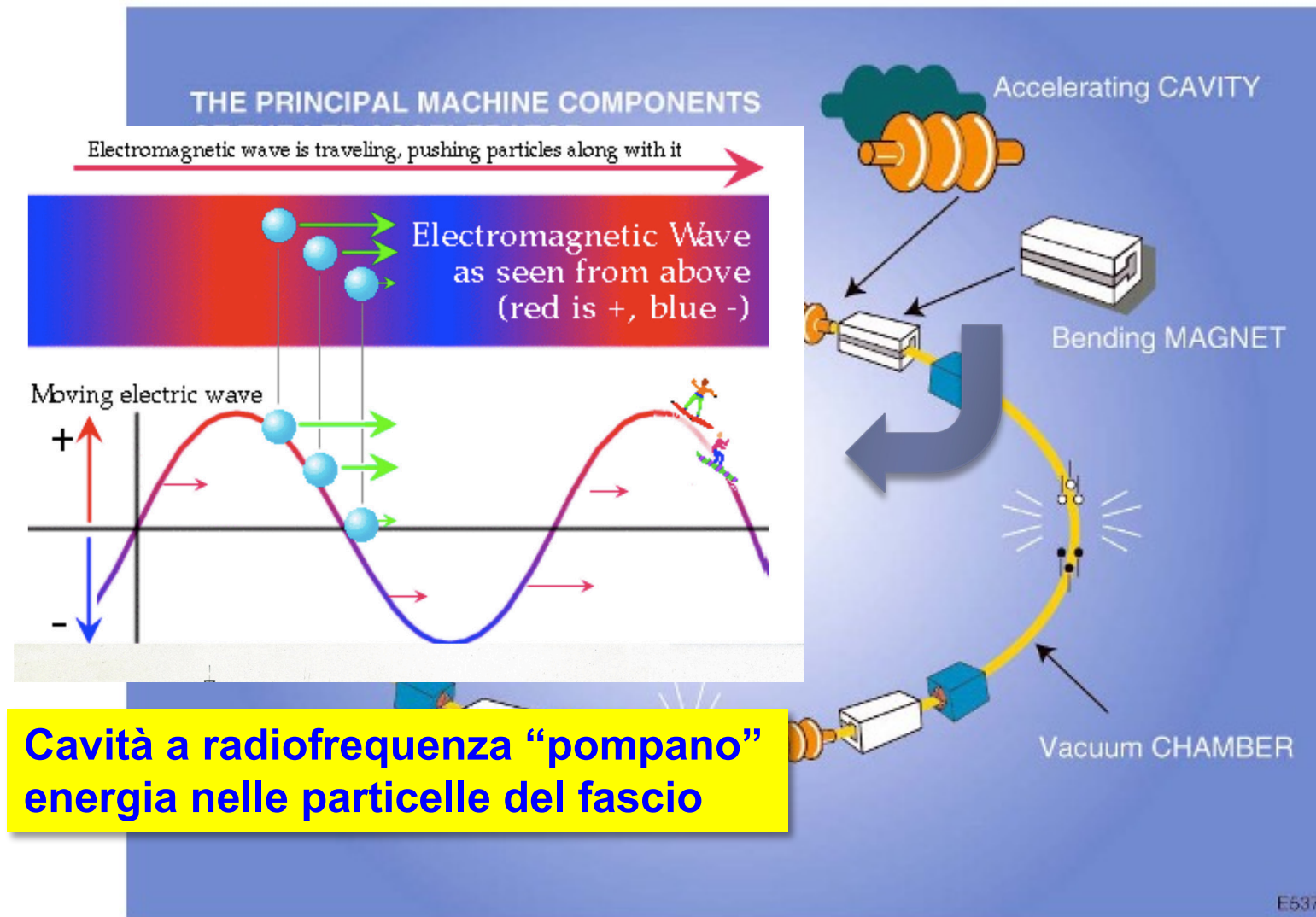
**Legend:**  
 - LHC: Large Hadron Collider  
 - SPS: Super Proton Synchrotron  
 - AD: Antiproton Decelerator  
 - ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
 - PSB: Proton Synchrotron Booster  
 - PS: Proton Synchrotron  
 - LINAC: LINear ACcelerator  
 - LEIR: Low Energy Ion Ring  
 - CNGS: Cern Neutrinos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

Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02.09.96  
 Revised and adapted by Antonella Del Ross, ETT Div.,  
 in collaboration with B. Desportes, ST Div., and  
 D. Manglani, PS Div. CERN, 23.05.01

# Componenti principali di un acceleratore



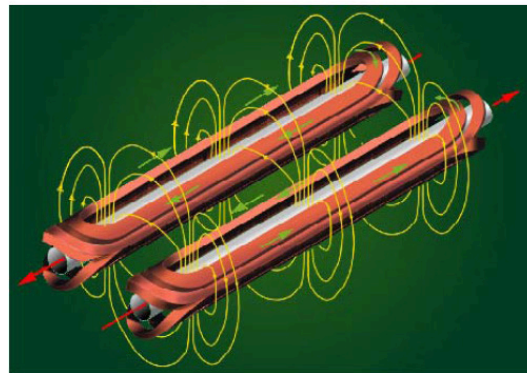
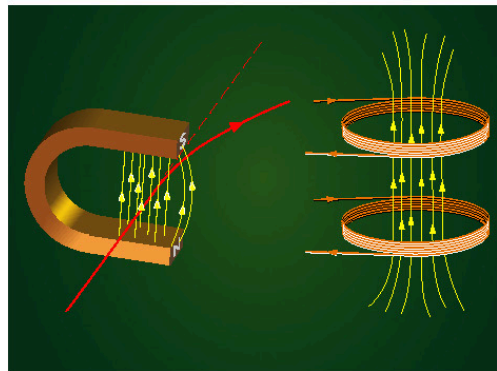
# Componenti principali di un acceleratore



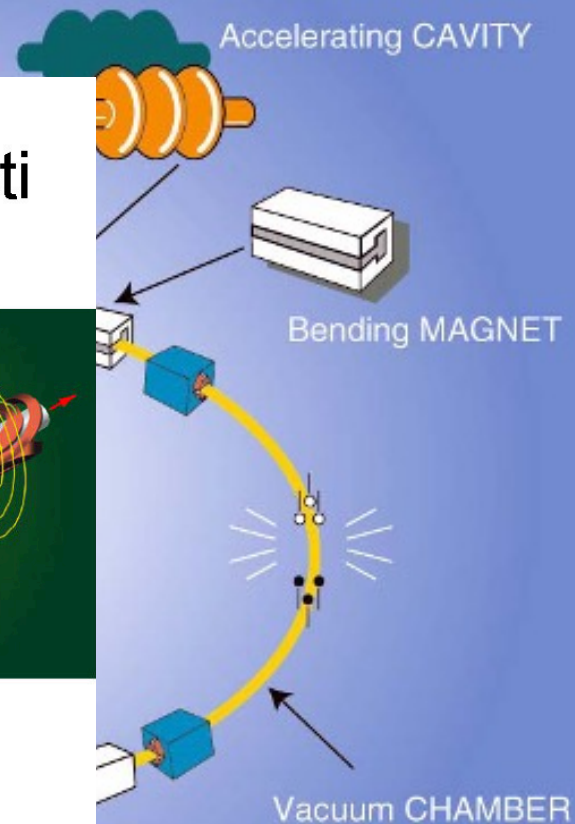
# Componenti principali di un acceleratore

THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS

## Curvare e focalizzare : i magneti



I 1236 dipoli  $\times 15$  m = 18.5 km di LHC rappresentano una sfida tecnologica: Superconduttori con campo di 9 Tesla, complicati dal dover accelerare cariche uguali in direzione opposta.



E537

# Sezioni d'urto a LHC

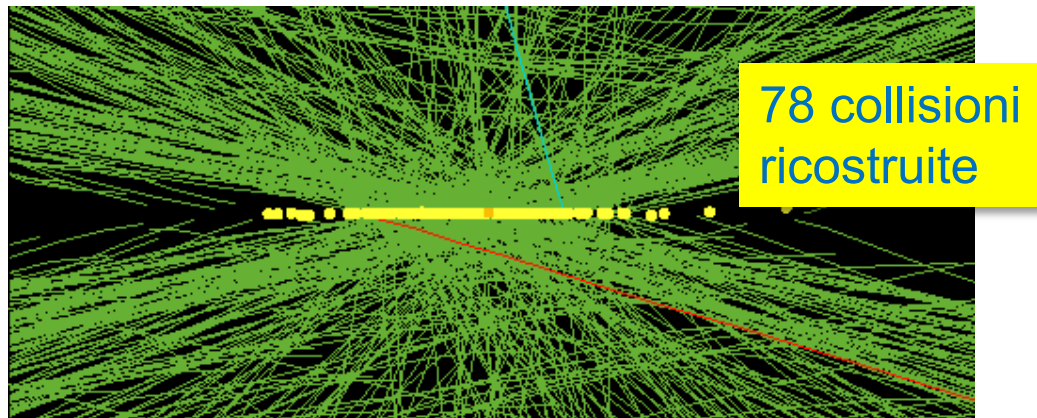
**Numero di eventi = Luminosità × sezione d'urto**

**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

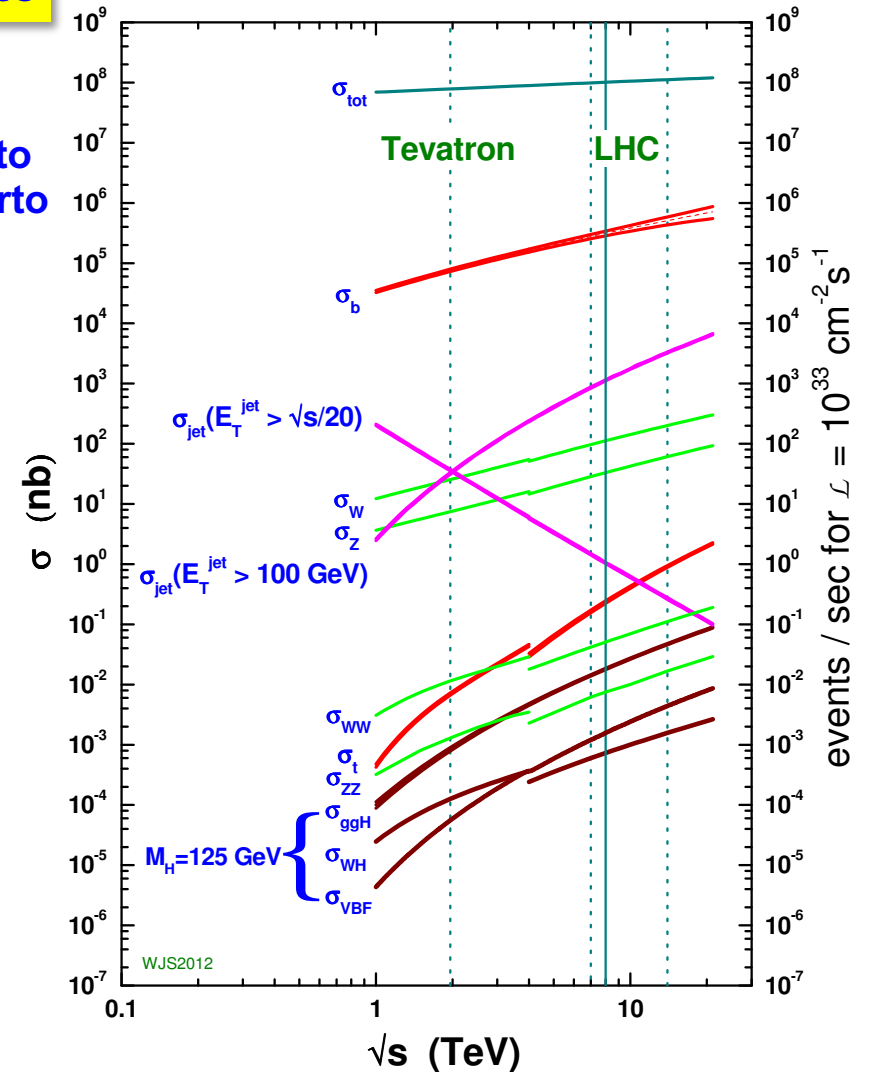
Ad alta luminosità ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ):

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  
 $\sim 30 \text{ 65}$  collisioni multiple per incrocio

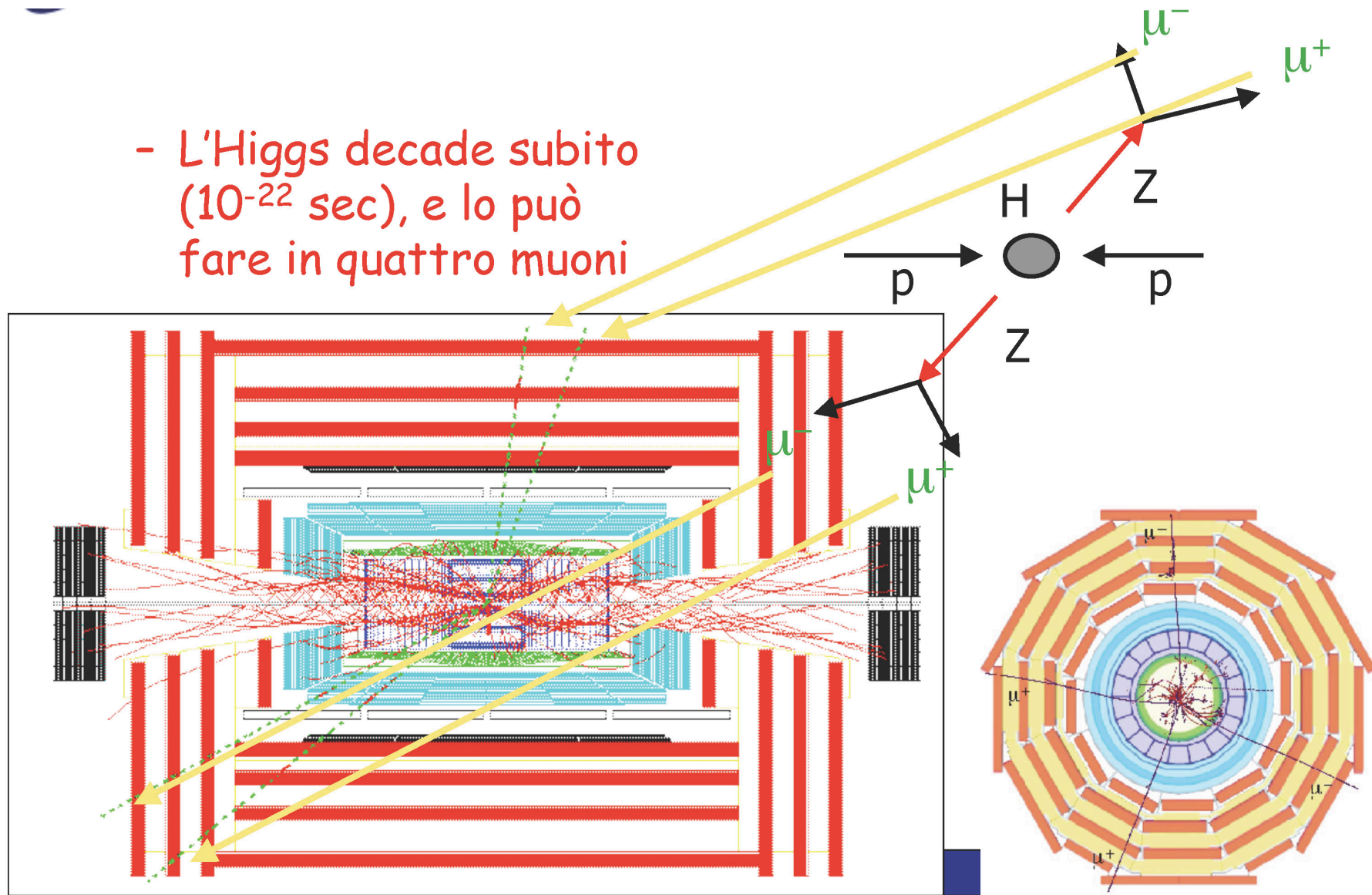


proton - (anti)proton cross sections



# Rivelazione dai prodotti di decadimento

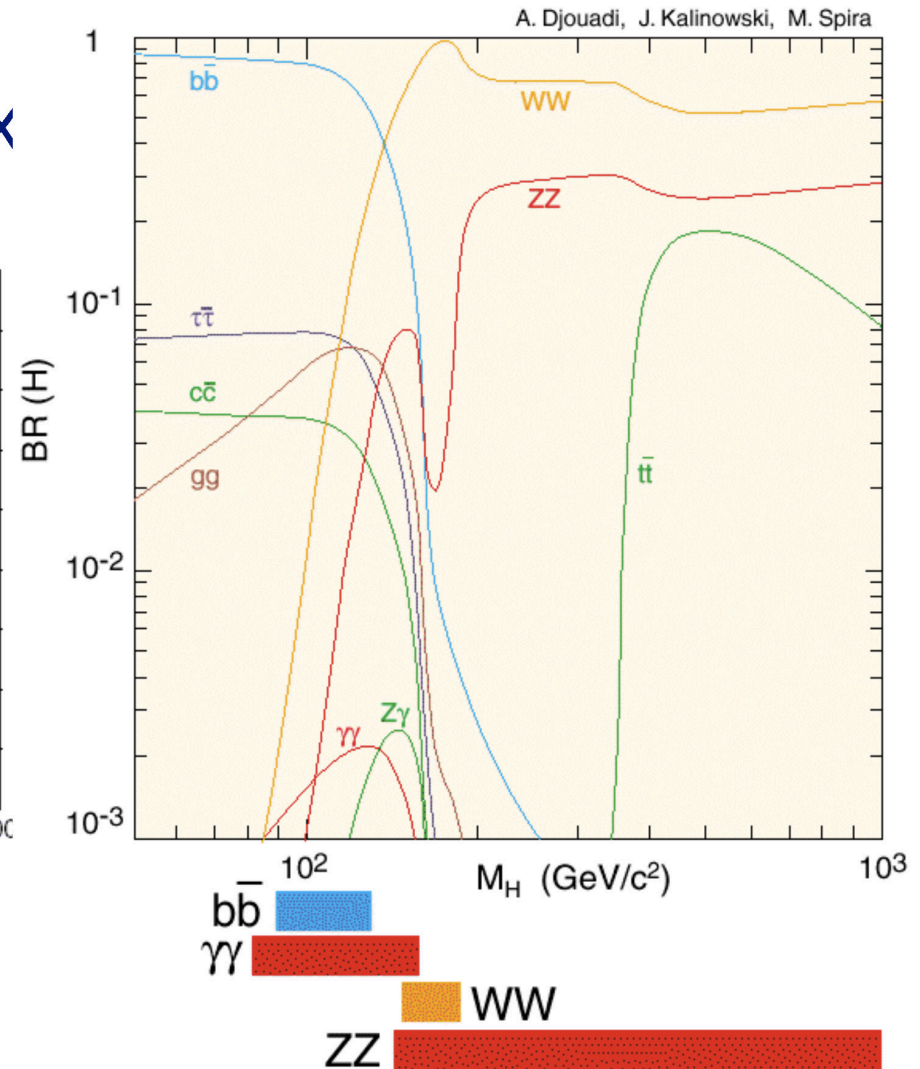
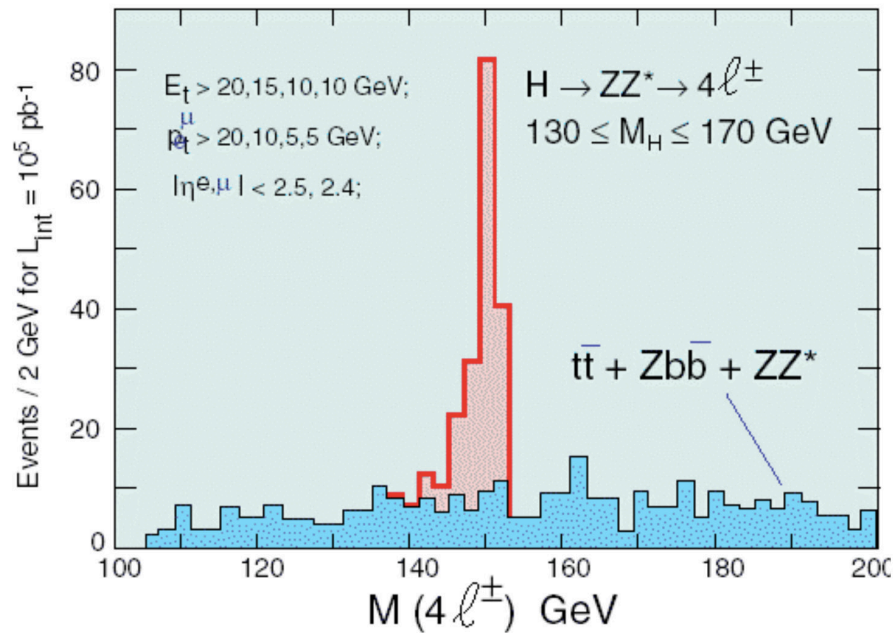
- L'Higgs decade subito ( $10^{-22}$  sec), e lo può fare in quattro muoni



# Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

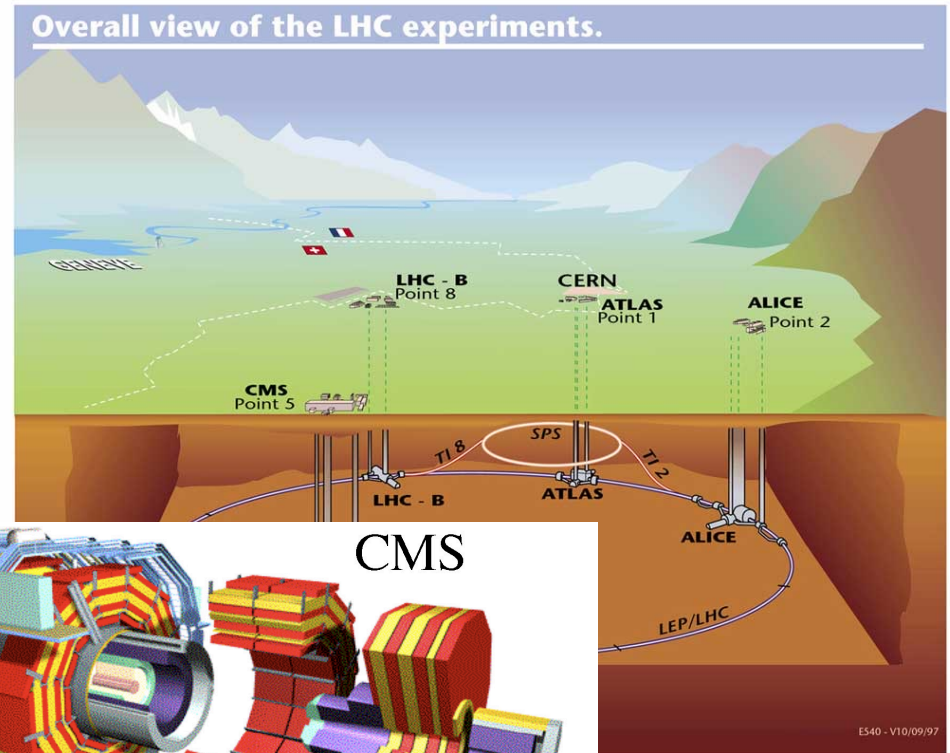
Cerco eventi :

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

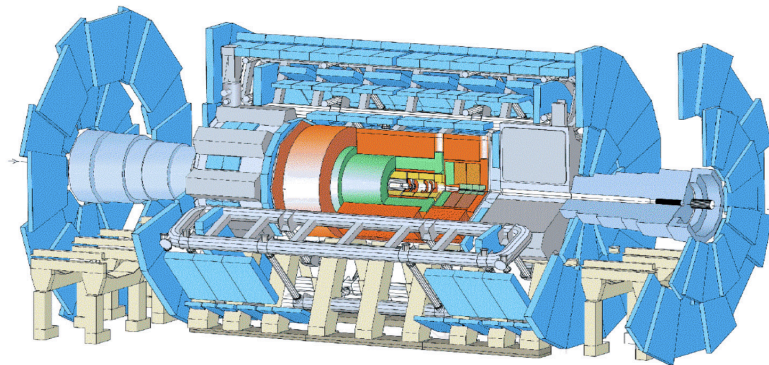


# Esperimenti a LHC

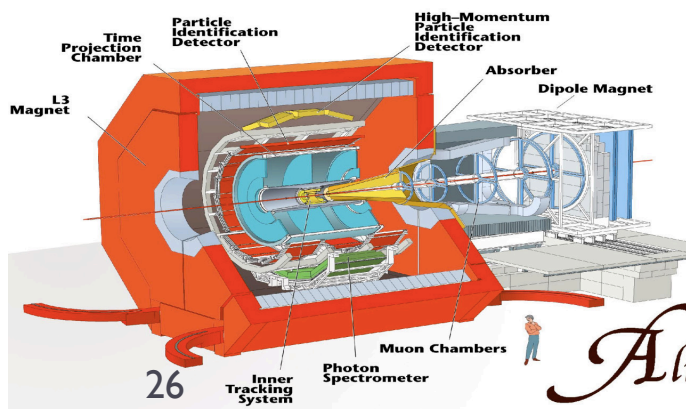
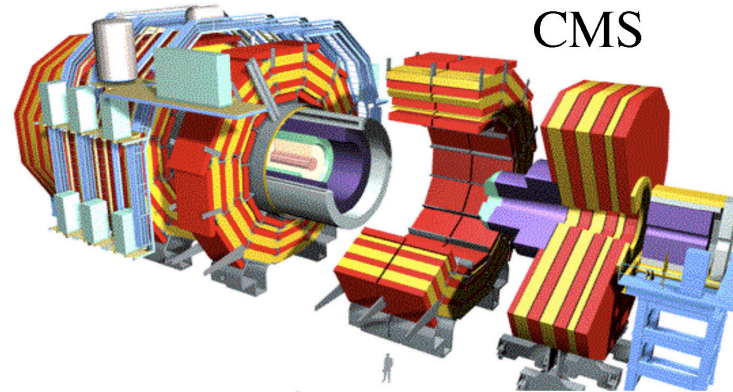
	Energia cm TeV	Luminosità cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
LEP e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	0.209	10 <sup>32</sup>
LHC pp	14	10 <sup>34</sup>
LHC Pb Pb	1312	10 <sup>27</sup>



ATLAS

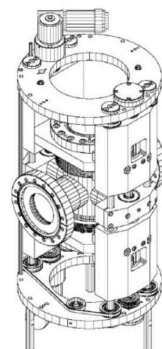


CMS

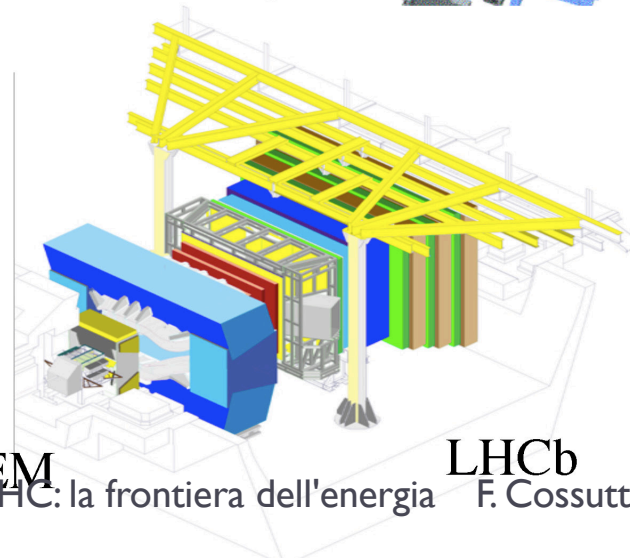


26

*ALICE*



TOTEM



LHCb

La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

F. Cossutti - 4/3/2026

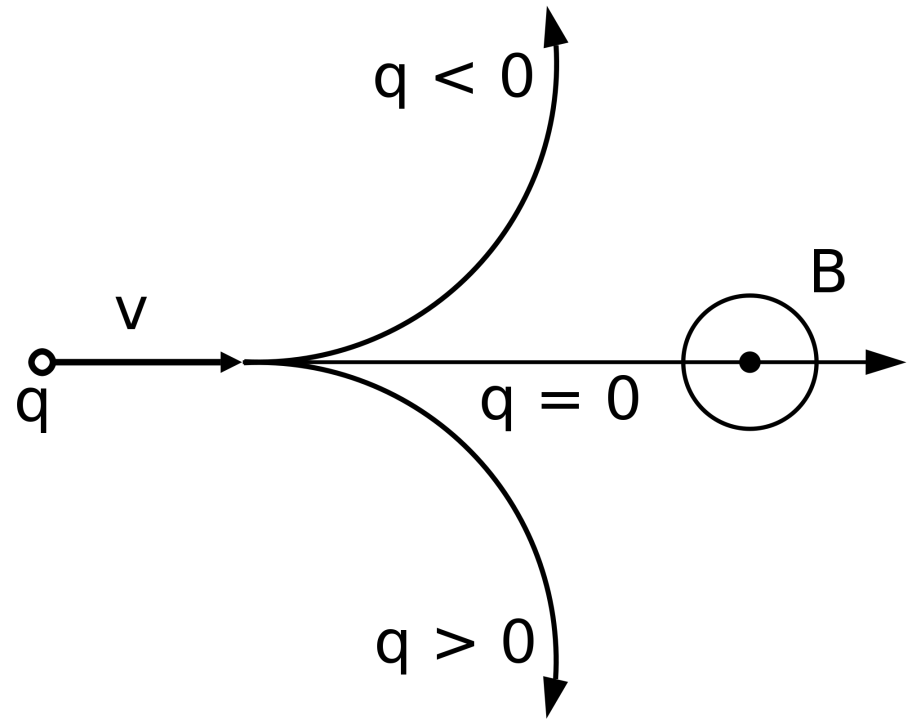
# Rivelatori di particelle per un esperimento su collisore

---

- ▶ 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



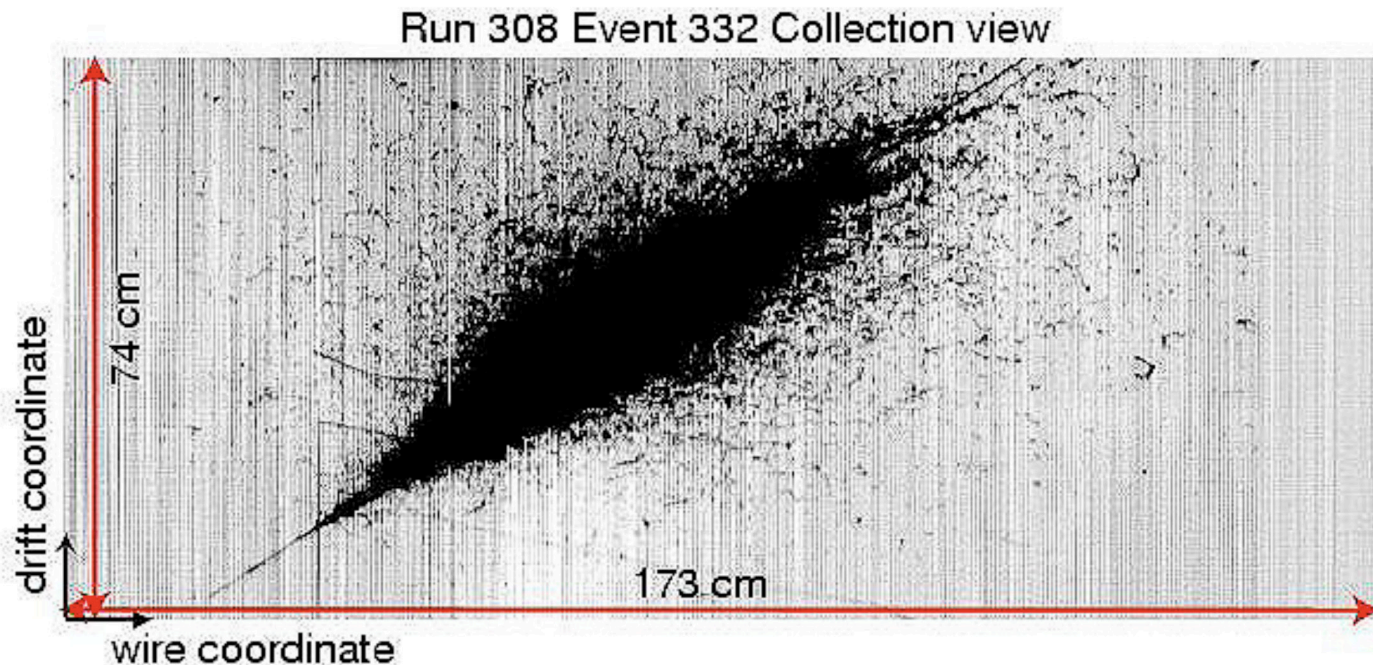
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

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

# 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**

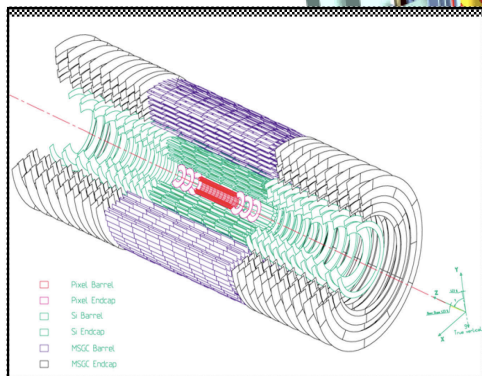
**ECAL:** cristalli PbWO<sub>4</sub>

**HCAL:** scintillatore plastico

**CALORIMETRI**

**GIOGO RITORNO**

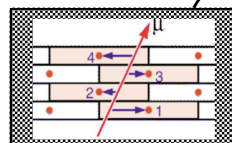
**TRACKER**



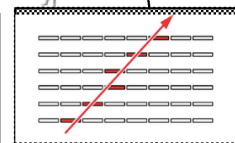
Microstrisce Silicio  
Pixels

**MUONI  
ENDCAP**

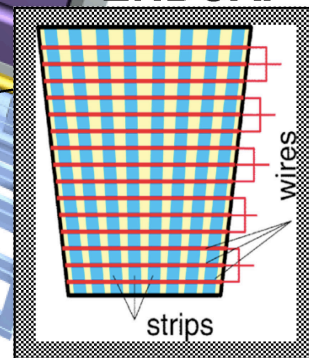
**MUONI BARREL**



Drift Tube  
Chambers (DT)



Resistive Plate  
Chambers (RPC)



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

**Diametro: 15 m**

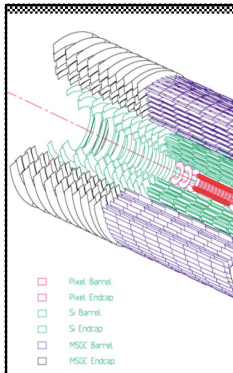
**Lunghezza: 21.5 m**

**Peso: 12500 ton.**

# Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



Microstrisce Si  
Pixels



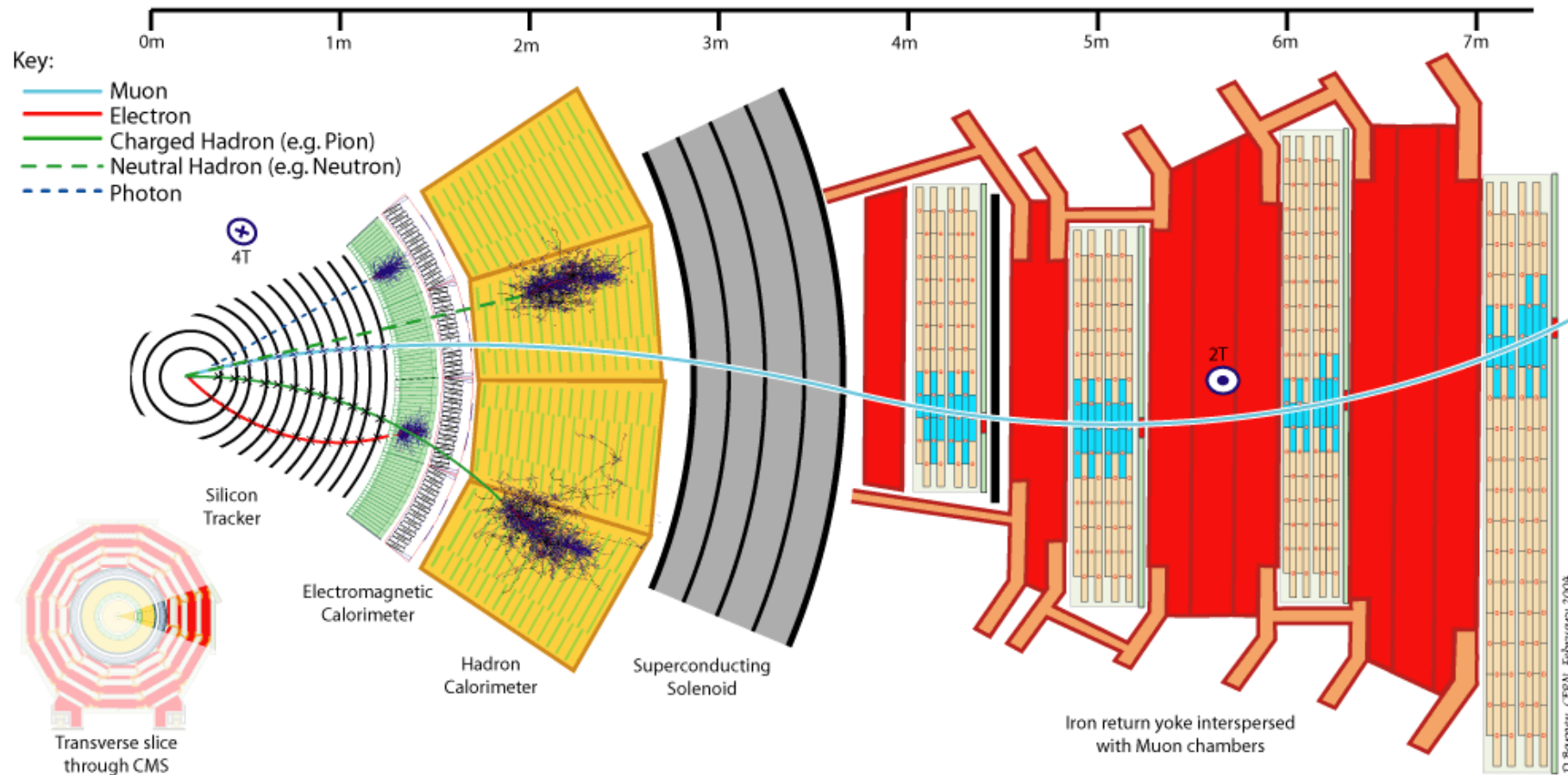
Drift Tube Chambers (DT)      Resistive Plate Chambers (RPC)      Cathode Strip Chambers (CSC)  
Resistive Plate Chambers (RPC)

**Diametro: 15 m**

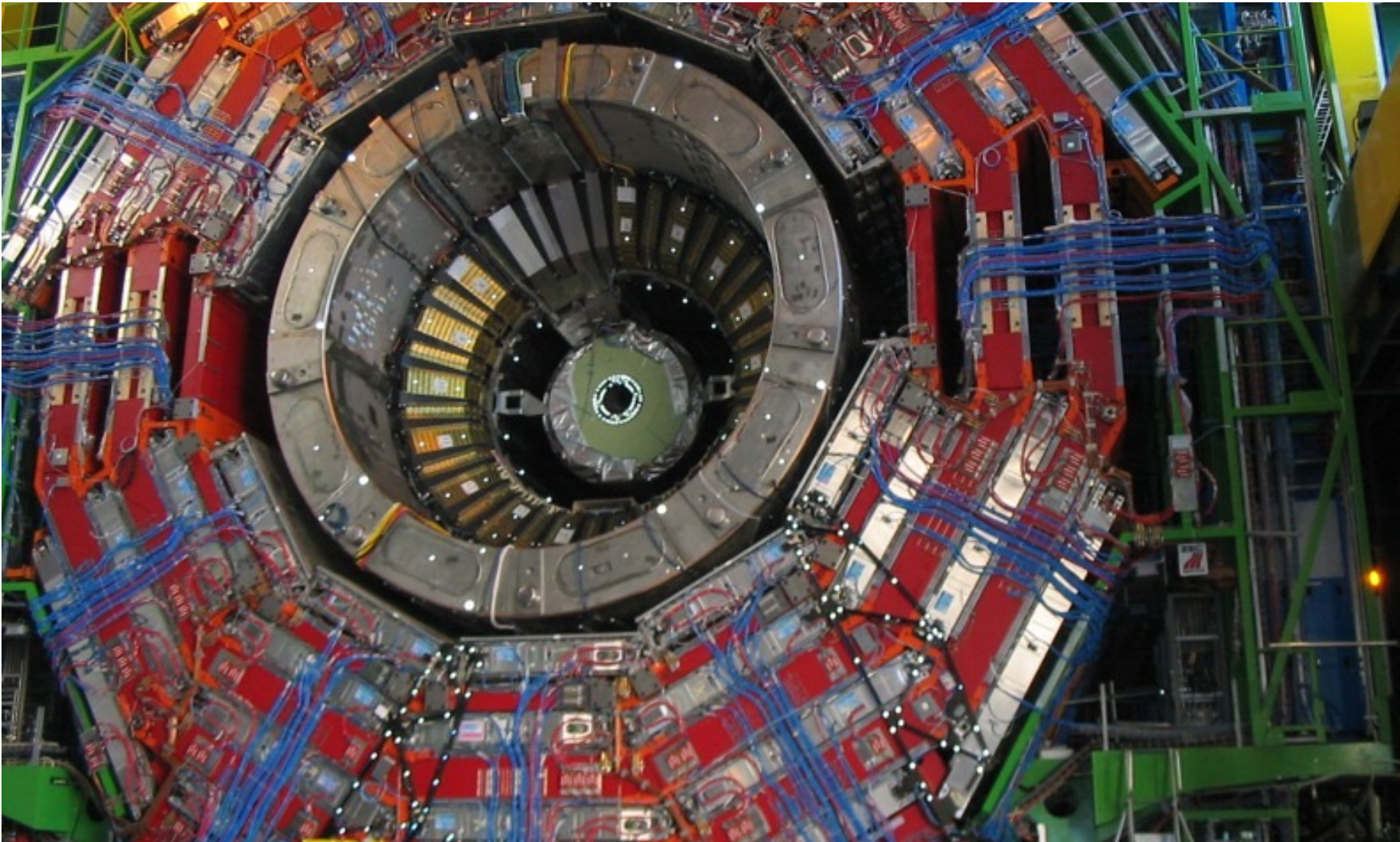
**Lunghezza: 21.5 m**

**Peso: 12500 ton.**

# Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento



# Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



# Perchè avere un rivelatore sofisticato?

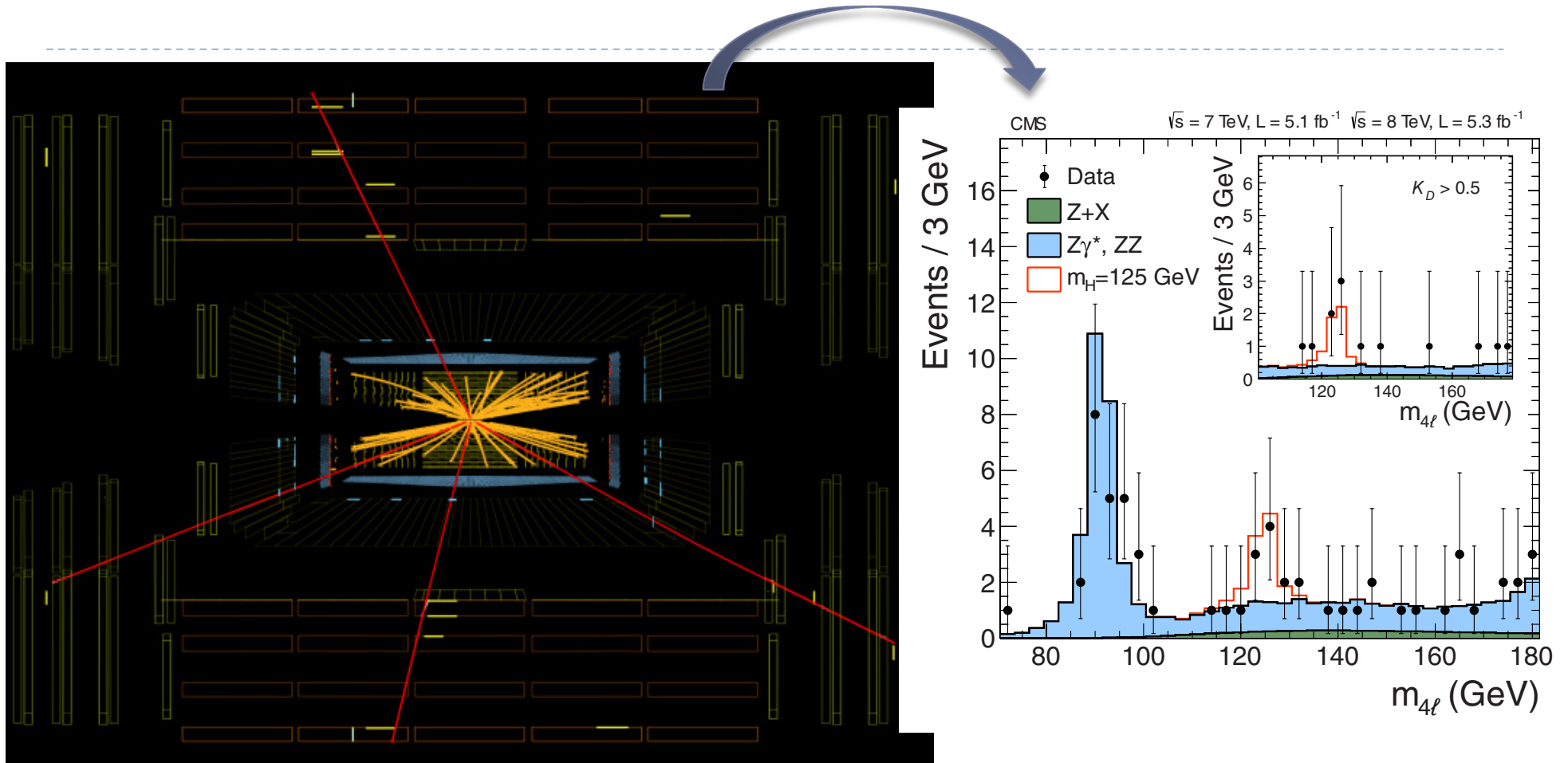
- ▶ Le potenzialità di misura e scoperta di un apparato dipendono dalla qualità degli oggetti ricostruiti (e,  $\mu$ ,  $\gamma$ , adroni carichi e neutri)
  - ▶ **Risoluzione:** con quale precisione misuro una grandezza?
  - ▶ **Efficienza:** quale frazione delle particelle “vere” che attraversano il 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

# 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



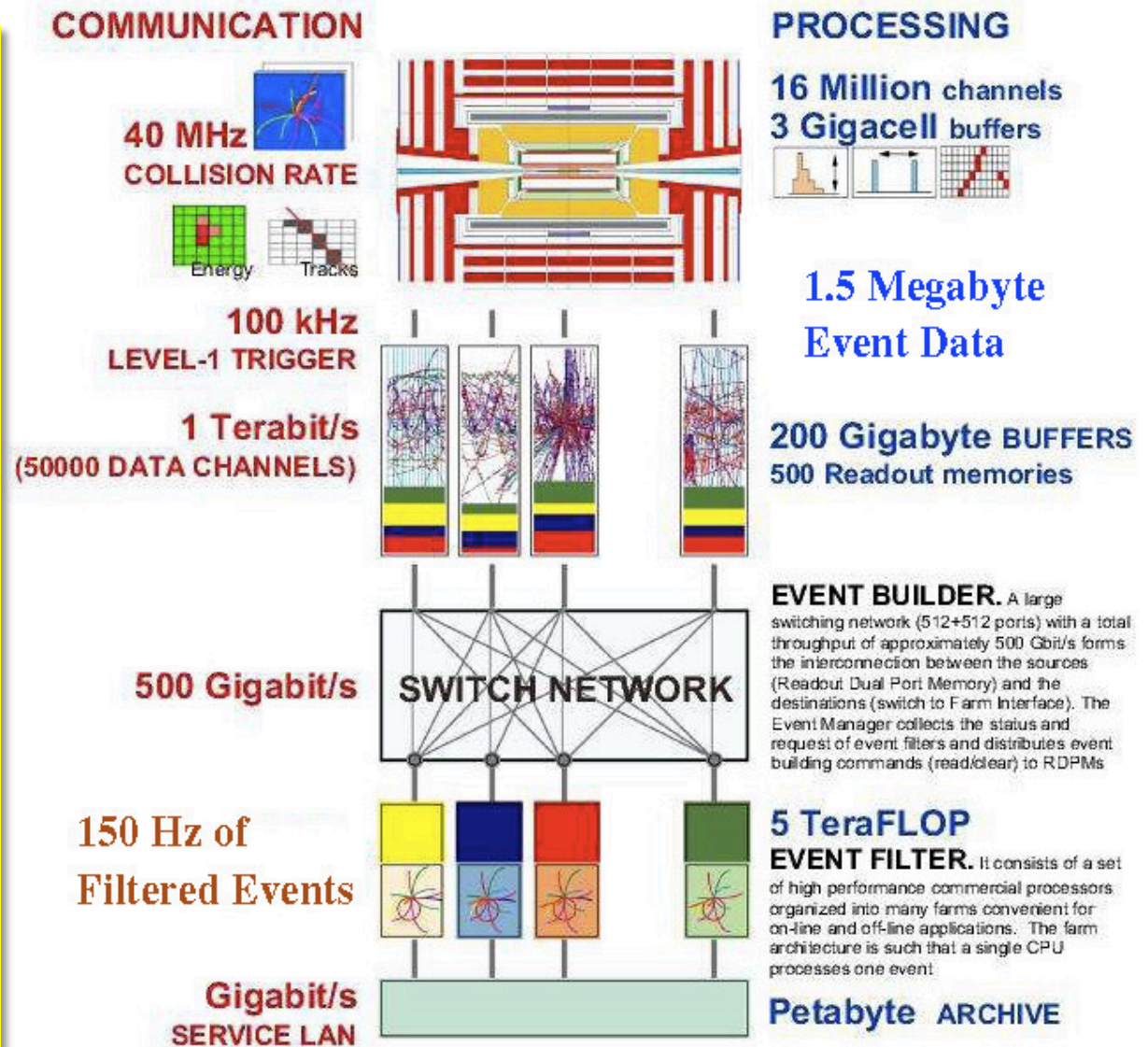
Analisi: studio statistico delle proprietà di un campione di eventi ricostruiti  
Definizione dei criteri di selezione per gli eventi di interesse (es.  $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ )  
Calcolo delle grandezze osservabili di interesse (es. massa invariante dei 4  $\mu$ )

# Dal rivelatore al calcolatore: selezionare e acquisire i dati

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

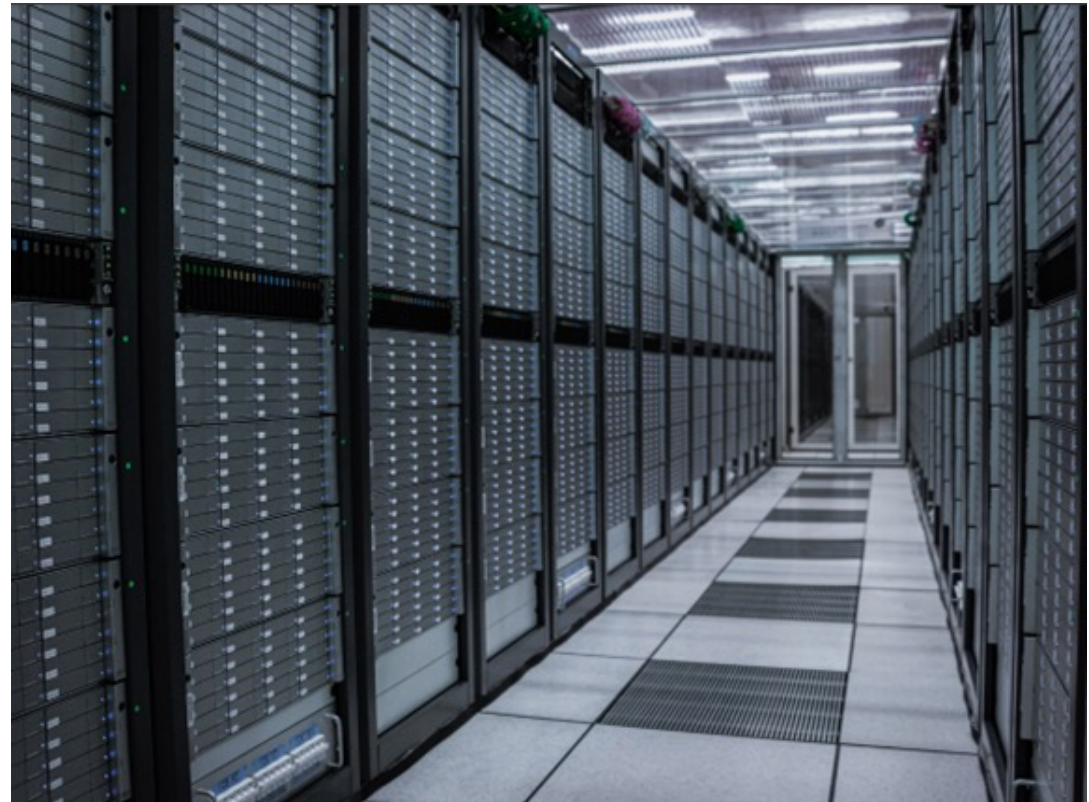
il processo di selezione: trigger

- 1 evento: ~ 1.5 MB
- nel 2022: ~ 2 kHz a livello High Level Trigger
- ⇒ ~ 3 GB al secondo di RAW data
  - che poi vengono processati aggiungendo informazione
  - ai quali affiancare simulazioni in quantità almeno corrispondente



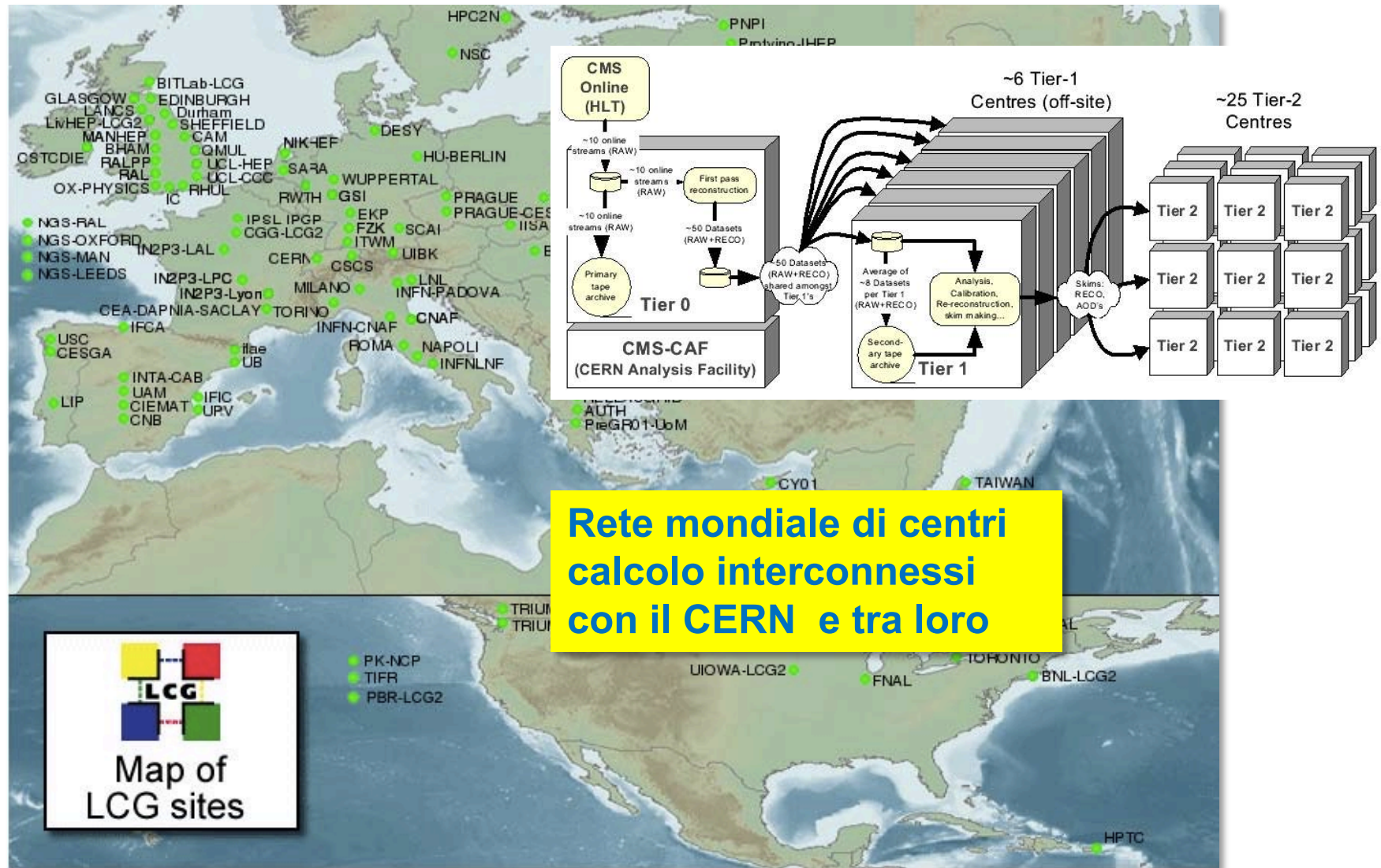
# Non basta avere un buon rivelatore...

- ▶ Simulazione, acquisizione e selezione dei dati, ricostruzione, analisi: tutto richiede calcolatori, storage e software
  - ▶ dovete avere sufficiente spazio disco per conservare immediatamente i dati prodotti, e le successive manipolazioni a cui dovete accedere velocemente
  - ▶ dovete avere sufficiente spazio su nastro per la conservazione di lungo periodo
  - ▶ dovete avere sufficiente potenza di calcolo per processare i dati, e per le simulazioni con cui confrontarli



**CERN data center: processa ~ 1 PB/day  
necessario conservare ~ 600 PB  
pari a 20000 anni di video FHD 24/7**

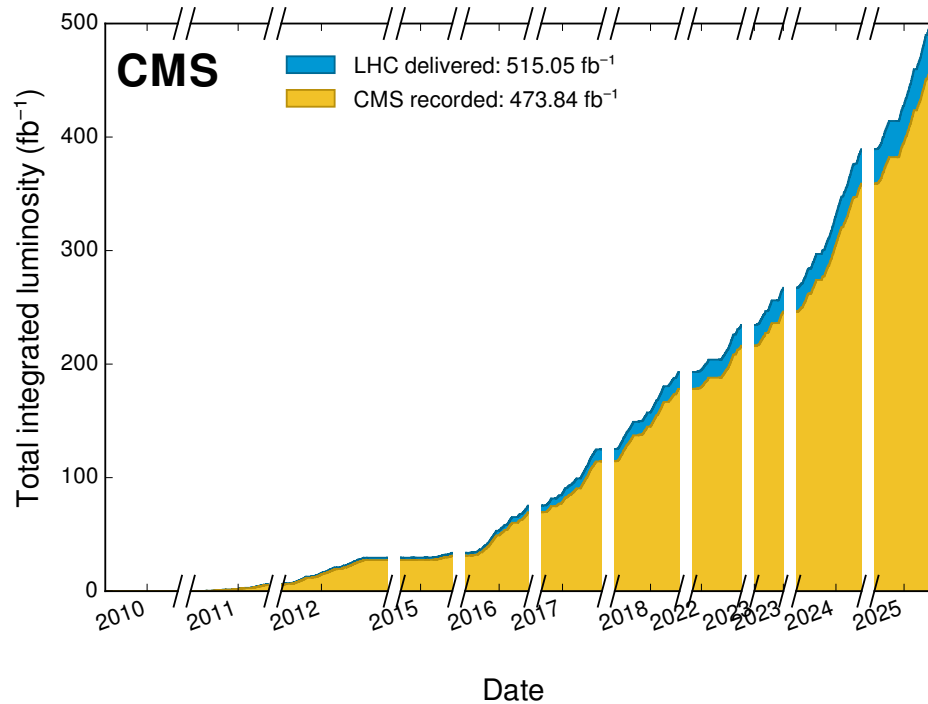
# ... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier



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

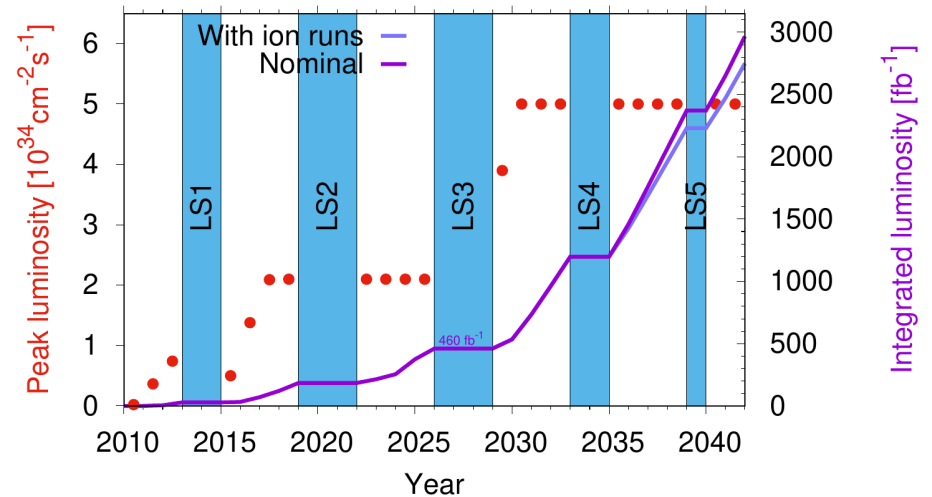


# Presente e futuro: High Luminosity LHC



- Rivelatore in gran parte rinnovati
- Nuovi modelli di calcolo e analisi
  - Supercomputing, GPU+CPU
  - Uso sempre più massiccio di intelligenza artificiale nelle analisi

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



**HL-LHC**

# Per concludere

- ▶ Dopo 15 anni dall'inizio della presa dati, e quasi  $500 \text{ fb}^{-1}$  di dati raccolti:
- ▶ Abbiamo trovato un bosone di Higgs, abbiamo alcuni indizi di discrepanze con il Modello Standard, ma nessuna ricerca diretta di nuova fisica ha dato risultati
  - ▶ 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? La nuova fisica sta semplicemente “un po' più in là”?
  - ▶ Le anomalie viste nei decadimenti dei quark b sono una fluttuazione, un problema di analisi, o la punta dell'iceberg?
- ▶ Nel 2026 LHC termina la sua prima fase, mentre si sta correndo per costruire i rivelatori per HL-LHC
  - ▶ Con quanto c'è da fare, il 2030 è dopodomani...
  - ▶ Attività destinata a durare per i prossimi 15 anni almeno
- ▶ Ci sono molte persone che hanno lavorato per due decenni, solo per vedere le prime collisioni, ora una nuova fase sta per partire...
- ▶ **Voi l'avete a portata di mano**

# Domande?

