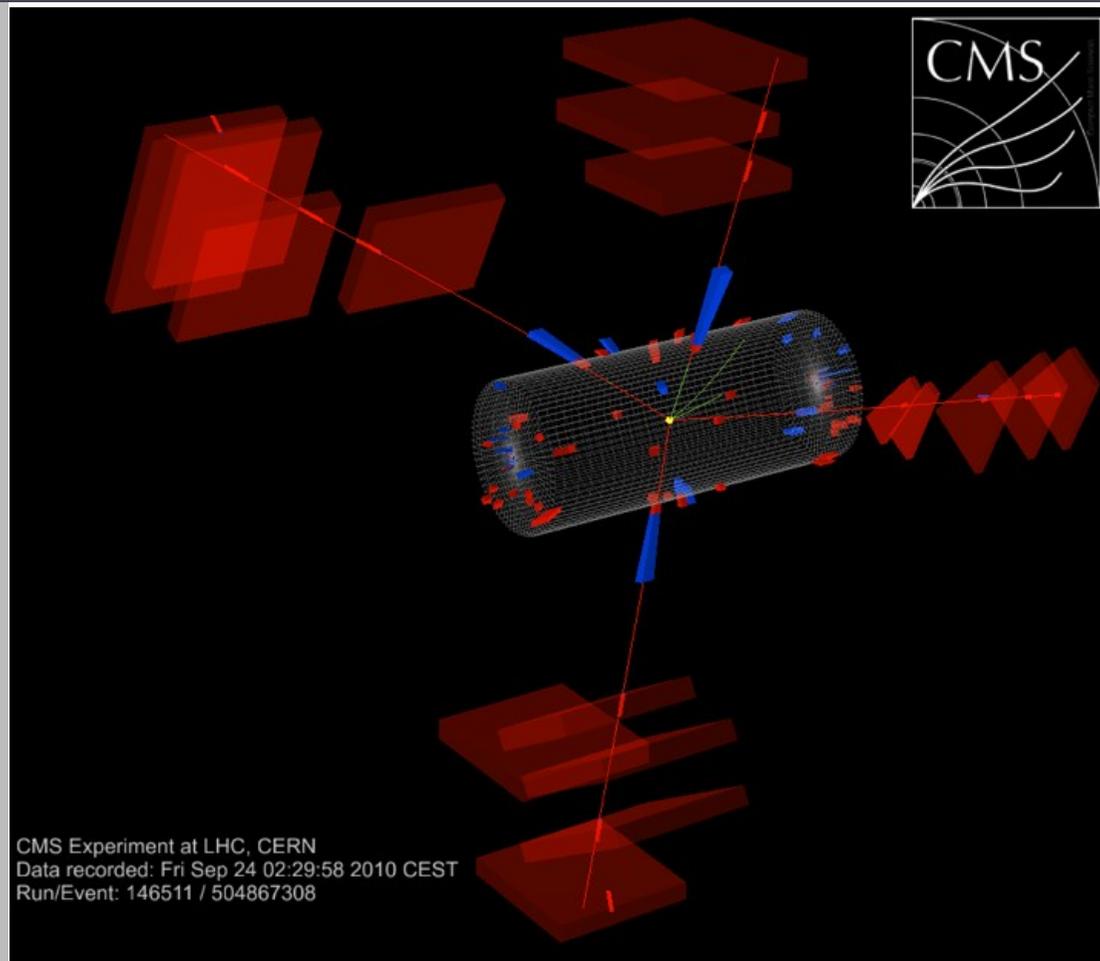
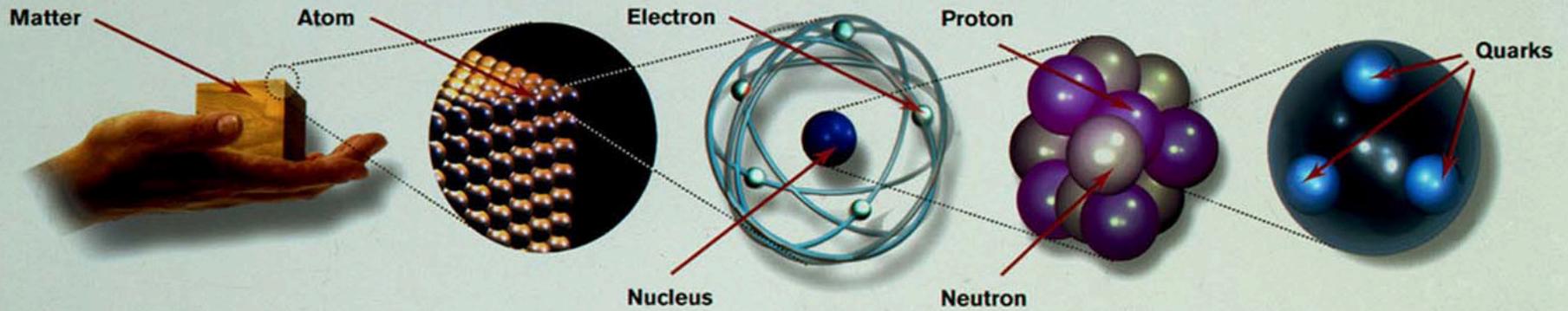


La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

Fabio Cossutti – INFN Trieste

Masterclass 2018





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

QUARKS	
Up Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	Down Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
Charm A heavier relative of the up; found in 1974	Strange A heavier relative of the down; found in 1964
Top Heavier still	Bottom 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

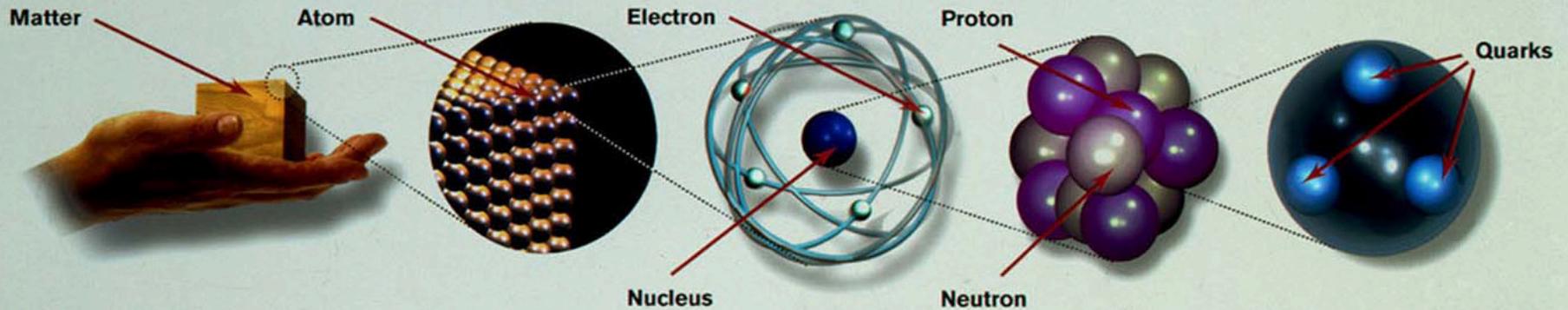
Some forms of radio-activity are the result of the **weak force**

Gravitons
Carriers of **gravity**

Felt by: all particles with mass

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

GRAPHICS: PETER CROWTHER



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

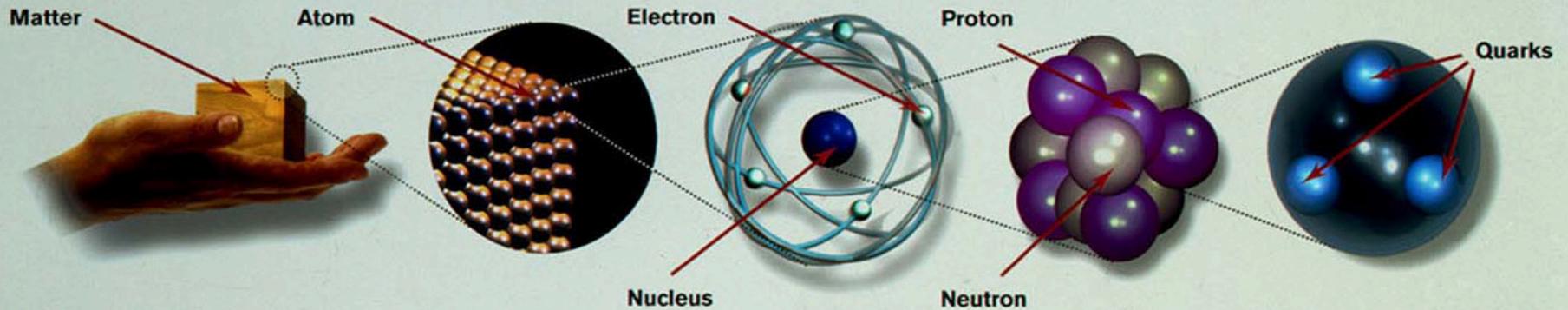
LEPTONS		QUARKS		
FIRST FAMILY	Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of minus one 	Electron neutrino Created along with electrons when some particles decay 	Up Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one 	Down Has an electric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

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 CROWTHER

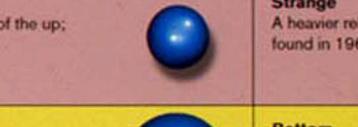
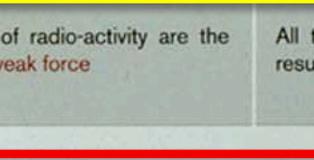


Matter particles
All ordinary particles belong to this group

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

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

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

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  Some forms of radio-activity are the result of the weak force	Gravitons Carriers of gravity  All the weight we experience is the result of the gravitational force
---	--	--	---

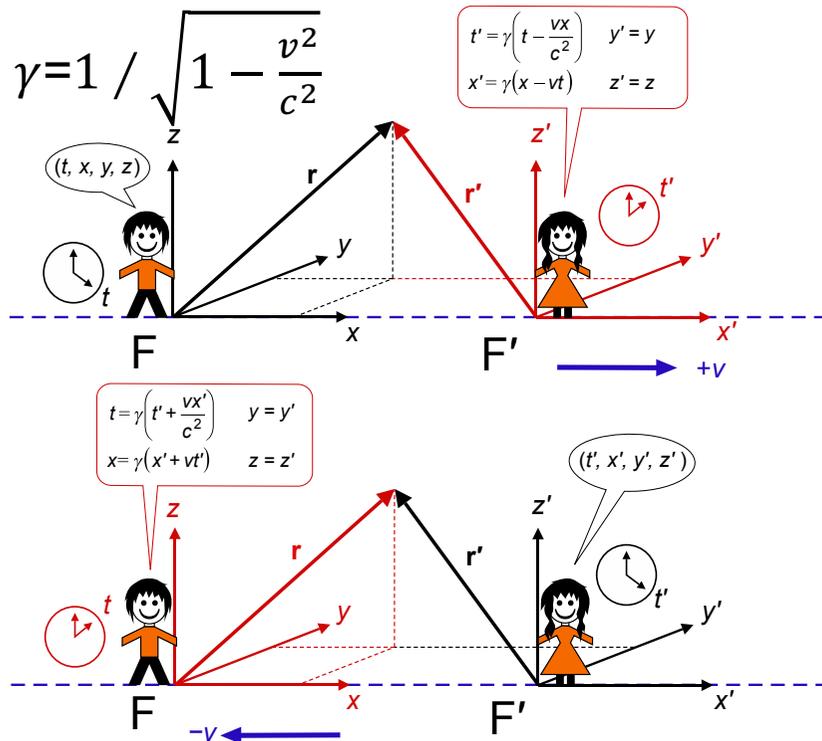
Costituenti della materia

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 Matrix element for the interaction Density of final states

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

Wavefunction for final state Wavefunction for initial state

Operator for the physical interaction which couples the initial and final states of the system.

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

= **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...

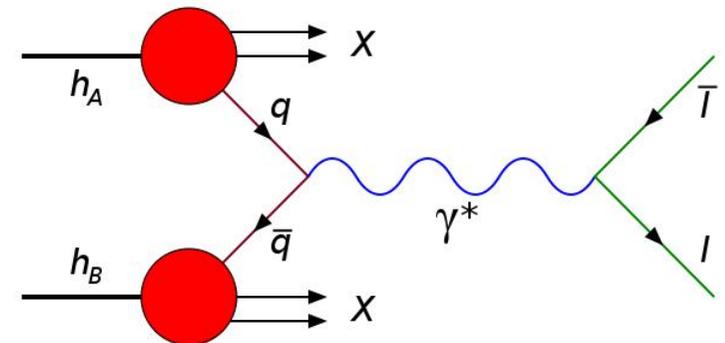
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu} - \frac{1}{2}(F_W^\dagger)_{\mu\nu}(F_W)^{\mu\nu} \\
 & + \frac{1}{2}\partial_\mu H\partial^\mu H + \frac{1}{2}M_Z^2 Z_\mu Z^\mu + M_W^2(W_-)_\mu(W_+)^{\mu} - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 \\
 & + \bar{e}(i\not{\partial} - m_e)e + i\bar{\nu}\not{\partial}\nu \\
 & + ig(\partial_\mu W_{+\nu} - \partial_\nu W_{+\mu})W_-^\nu(\cos\theta_W Z^\mu + \sin\theta_W A^\mu) \\
 & + ig(\partial_\mu W_{-\nu} - \partial_\nu W_{-\mu})W_+^\nu(\cos\theta_W Z^\mu + \sin\theta_W A^\mu) \\
 & + ig(W_-^\mu W_+^\nu - W_+^\mu W_-^\nu)\partial_\mu(\cos\theta_W Z_\nu + \sin\theta_W A_\nu) \\
 & - g^2 W_{+\mu}W_-^\mu(\cos\theta_W Z_\nu + \sin\theta_W A_\nu)(\cos\theta_W Z^\nu + \sin\theta_W A^\nu) \\
 & + g^2 W_{+\nu}W_-^\nu(\cos\theta_W Z_\mu + \sin\theta_W A_\mu)(\cos\theta_W Z^\mu + \sin\theta_W A^\mu) \\
 & + \frac{g^2}{2}W_{-\nu}W_{+\mu}(W_-^\nu W_+^\mu - W_+^\nu W_-^\mu) + e\bar{e}\gamma_\mu e A^\mu \\
 & - \frac{g}{2\cos\theta_W}\left[\frac{1}{2}\bar{\nu}\gamma_\mu(1-\gamma^5)\nu + \bar{e}\gamma_\mu(g_V - g_A\gamma^5)e\right]Z^\mu \\
 & - \frac{g}{2\sqrt{s}}\left[\bar{\nu}\gamma_\mu(1-\gamma^5)eW_+^\mu + \bar{e}\gamma_\mu(1-\gamma^5)\nu W_-^\mu\right] \\
 & + \frac{g^2}{4}(2vH + H^2)W_{-\mu}W_+^\mu + \frac{(g^2 + g'^2)}{8}(2vH + H^2)Z_\mu Z^\mu \\
 & - \frac{\lambda}{4}(4vH^3 + H^4) - \frac{m_e}{v}\bar{e}eH
 \end{aligned}$$

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

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

- ▶ 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

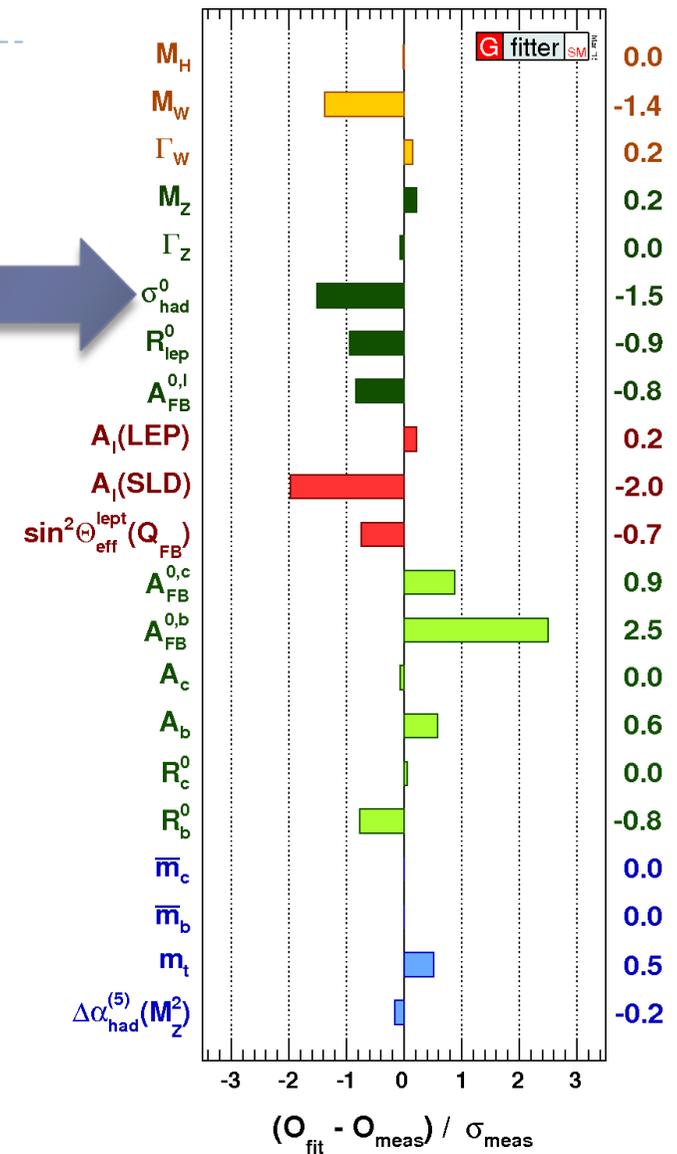


- ▶ Potete calcolare le caratteristiche di un urto tra particelle
 - ▶ diagrammi di Feynman: ad ogni linea e vertice corrisponde una espressione matematica

... alla misura sperimentale

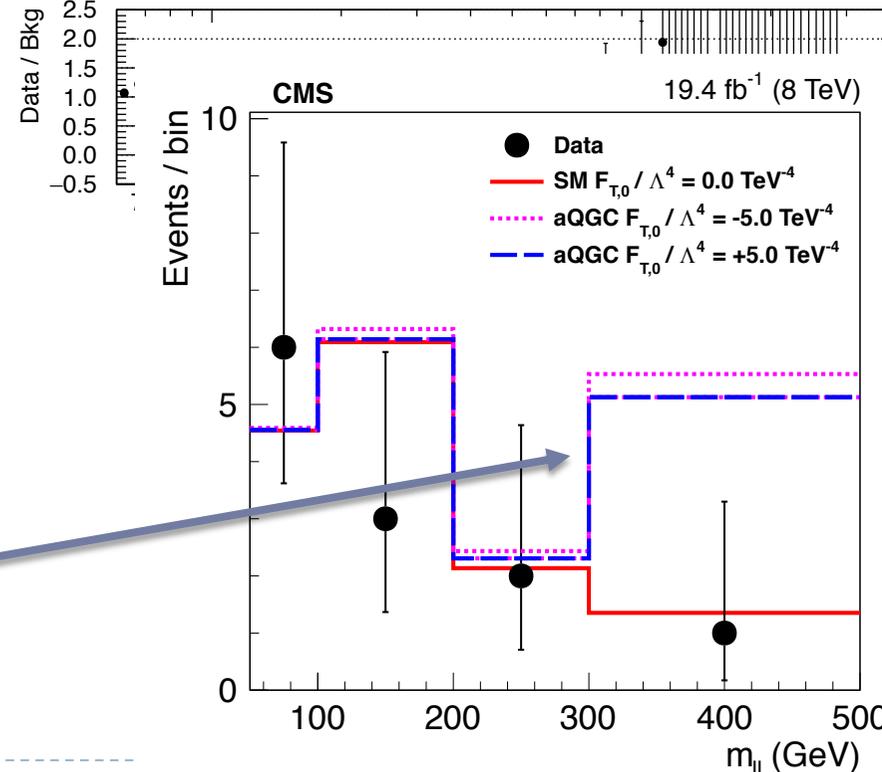
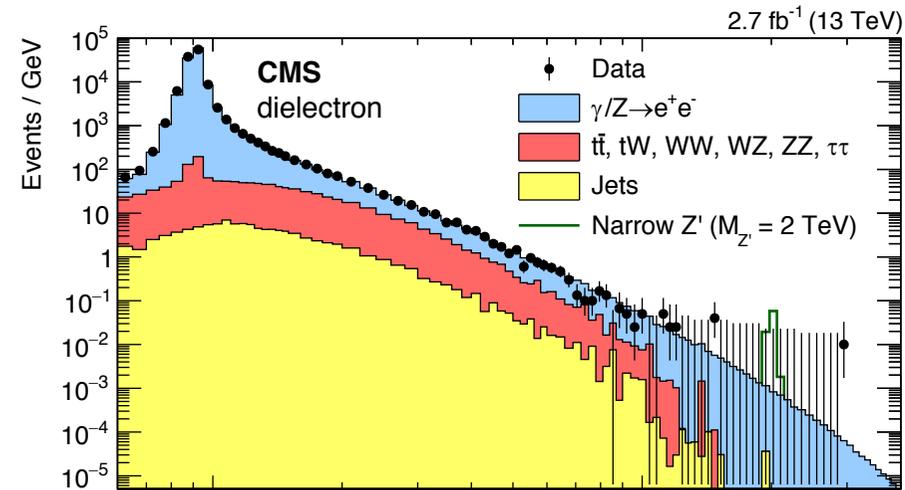
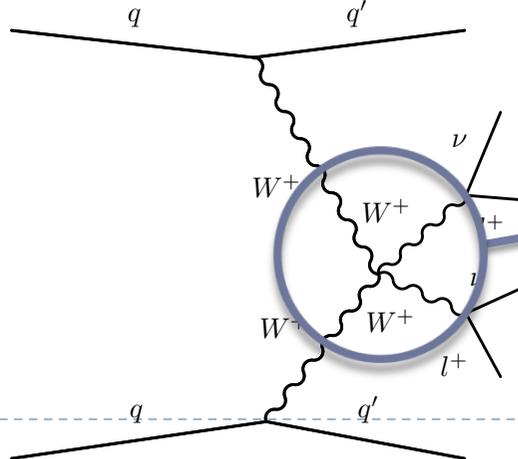
▶ Due tipi di analisi sperimentali:

- ▶ 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”



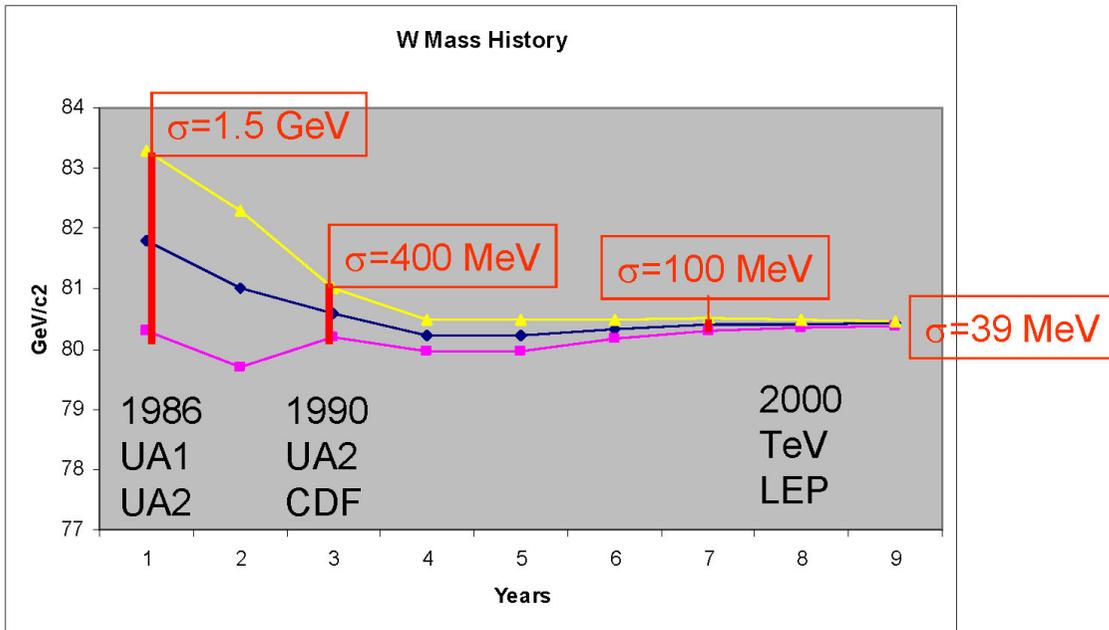
Due facce della stessa medaglia

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

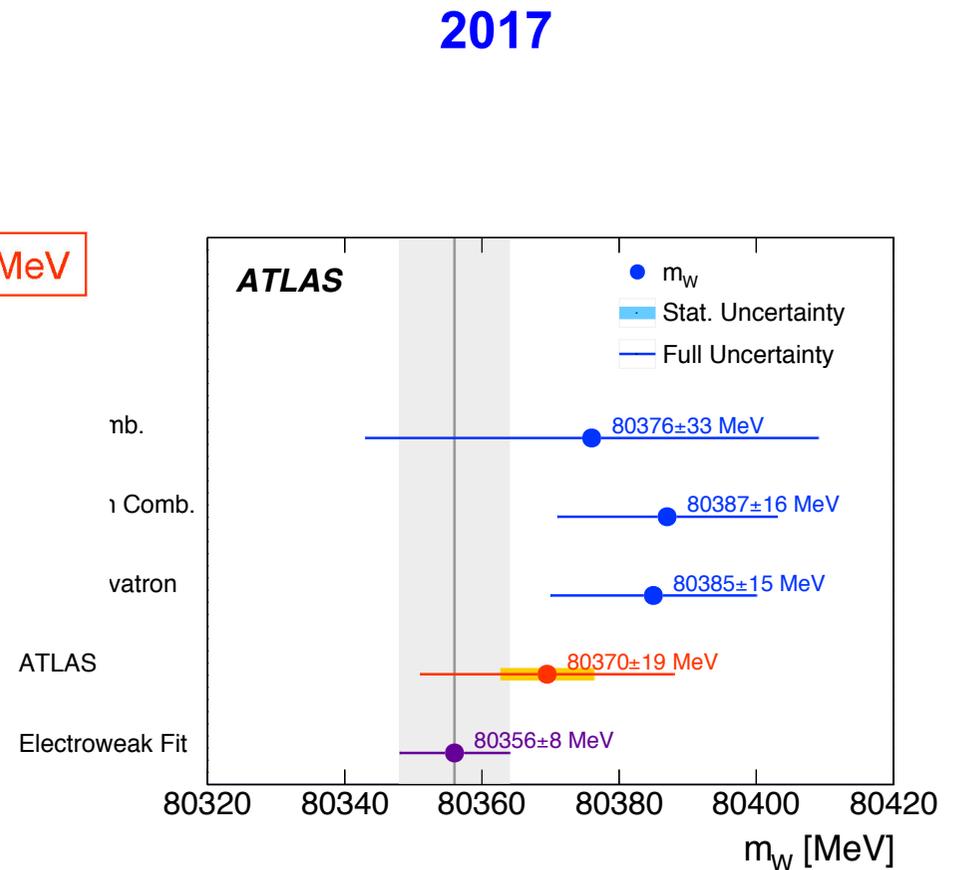


Se nuove particelle scambiate nel vertice tra 4 W

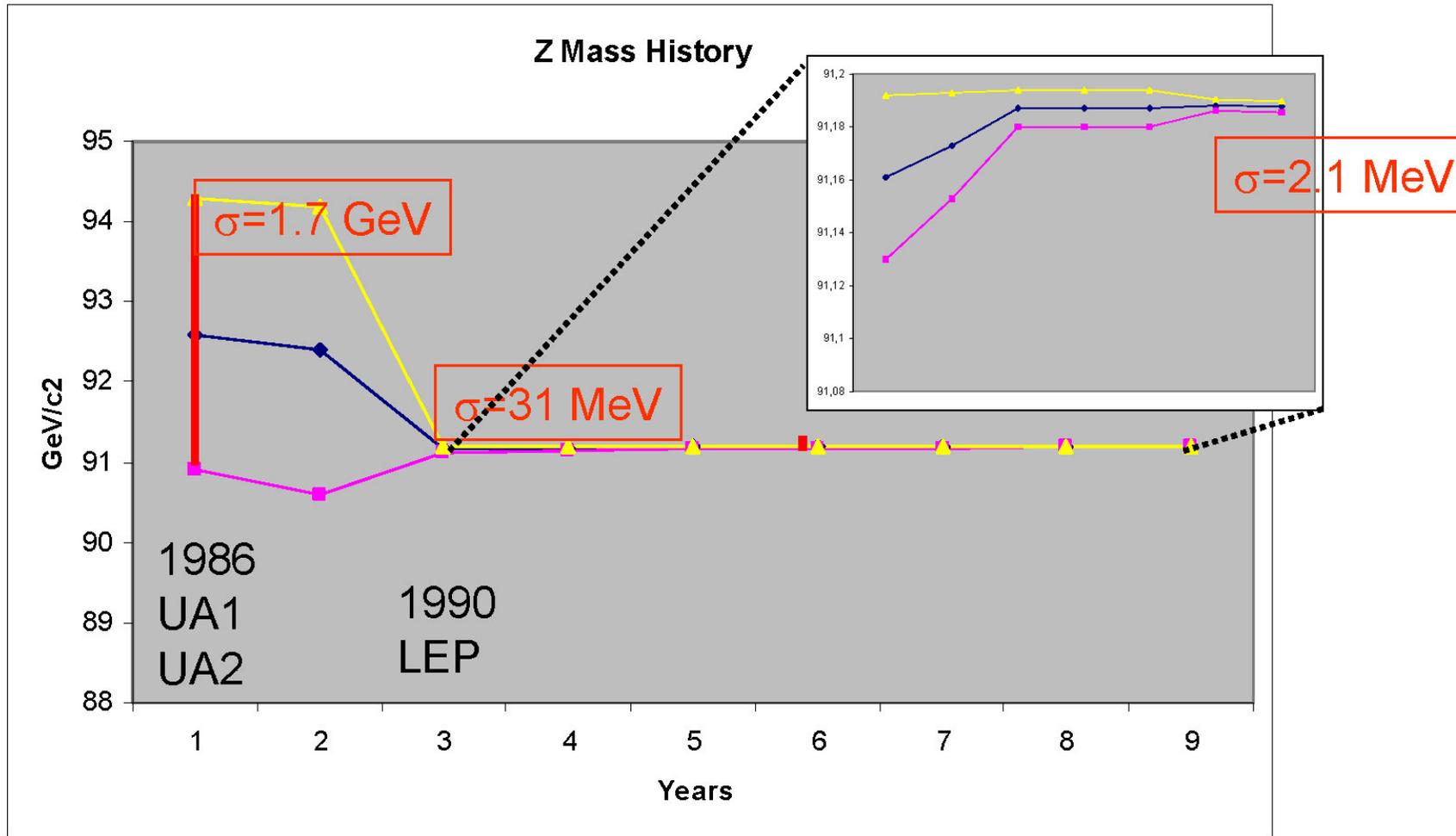
I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



Only Published Results

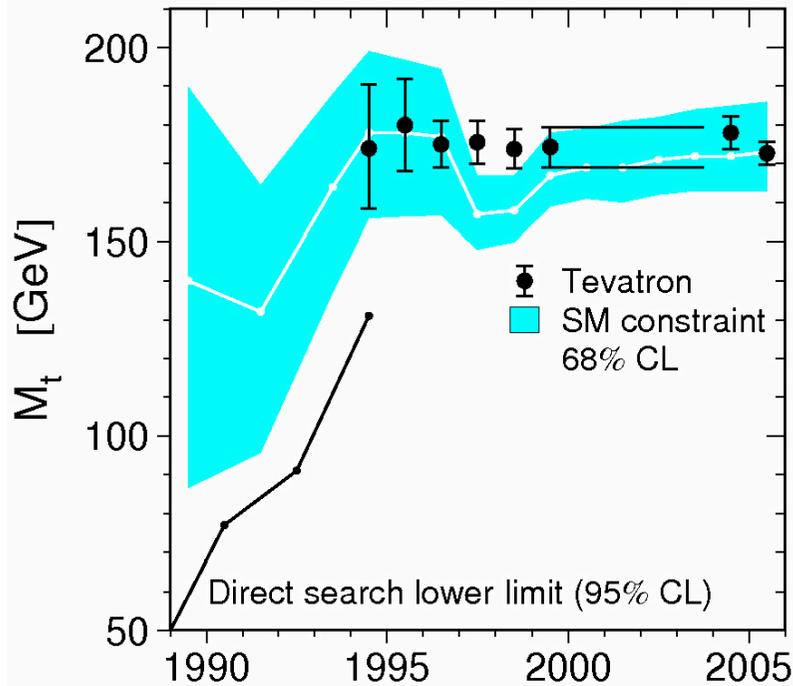


I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi

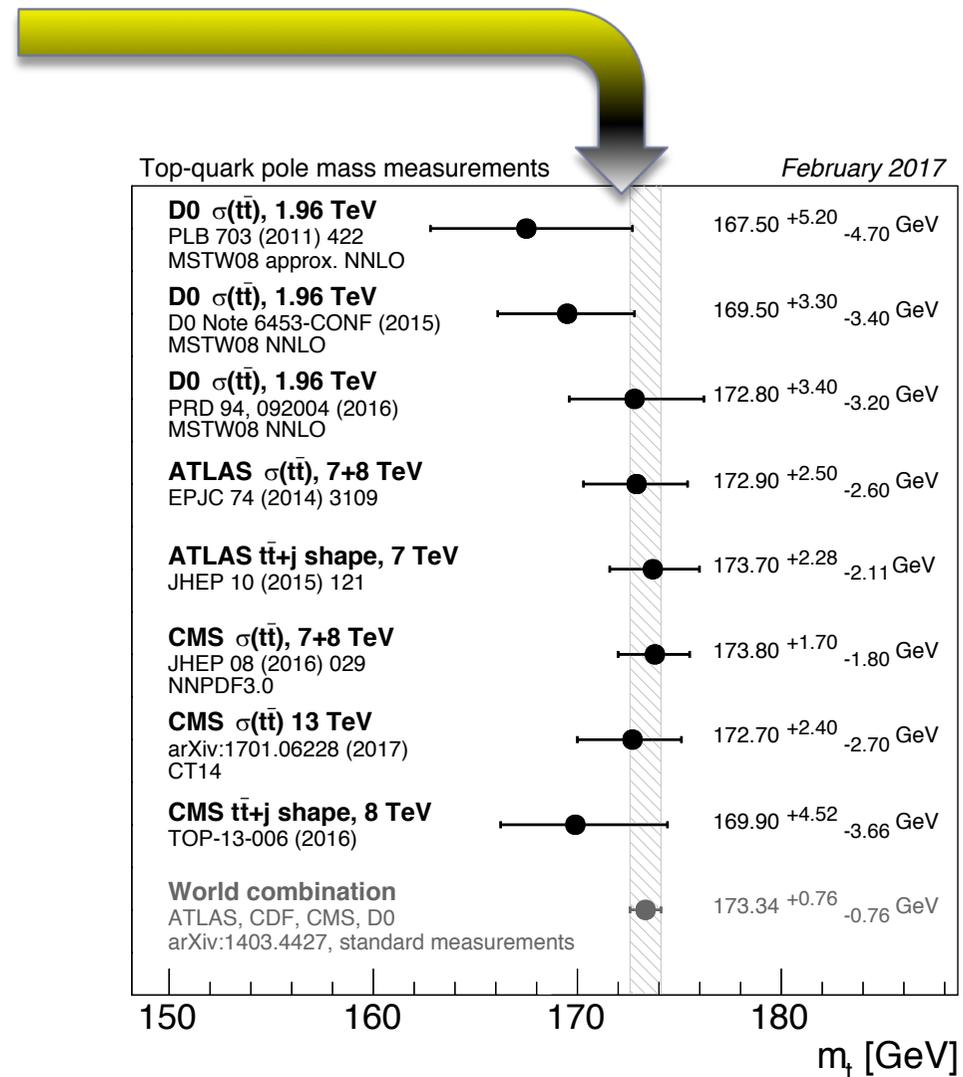


Only Published Results

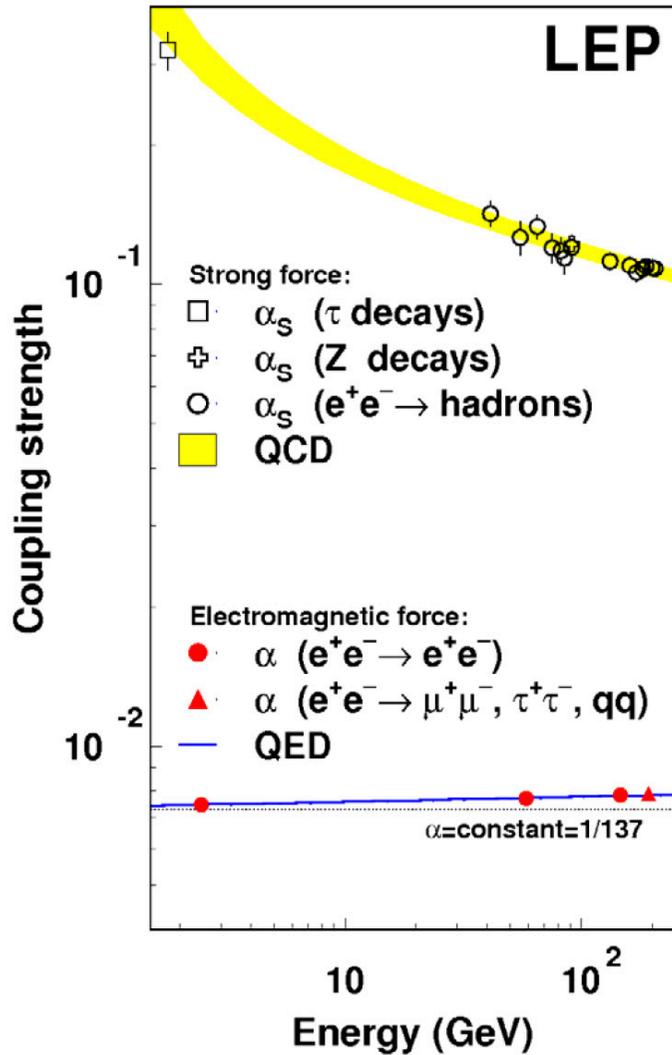
20 anni di quark top: trovato dove doveva essere



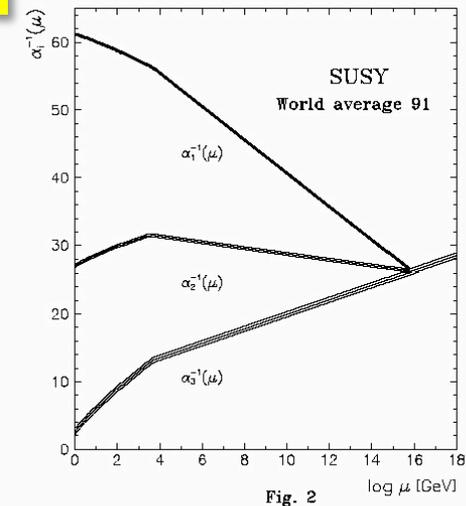
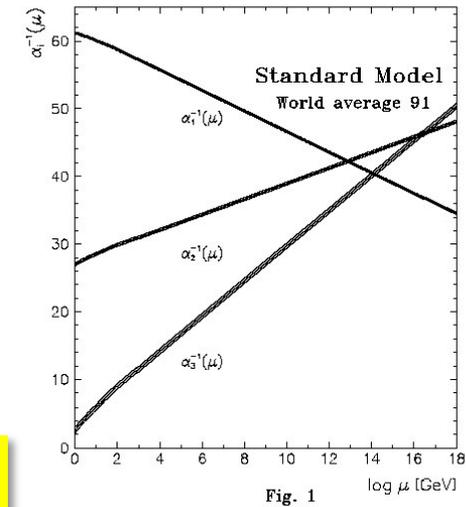
**Ricerca diretta
al Tevatron guidata
dai vincoli dati dal
Modello Standard
Mediante le misure
di LEP**



Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

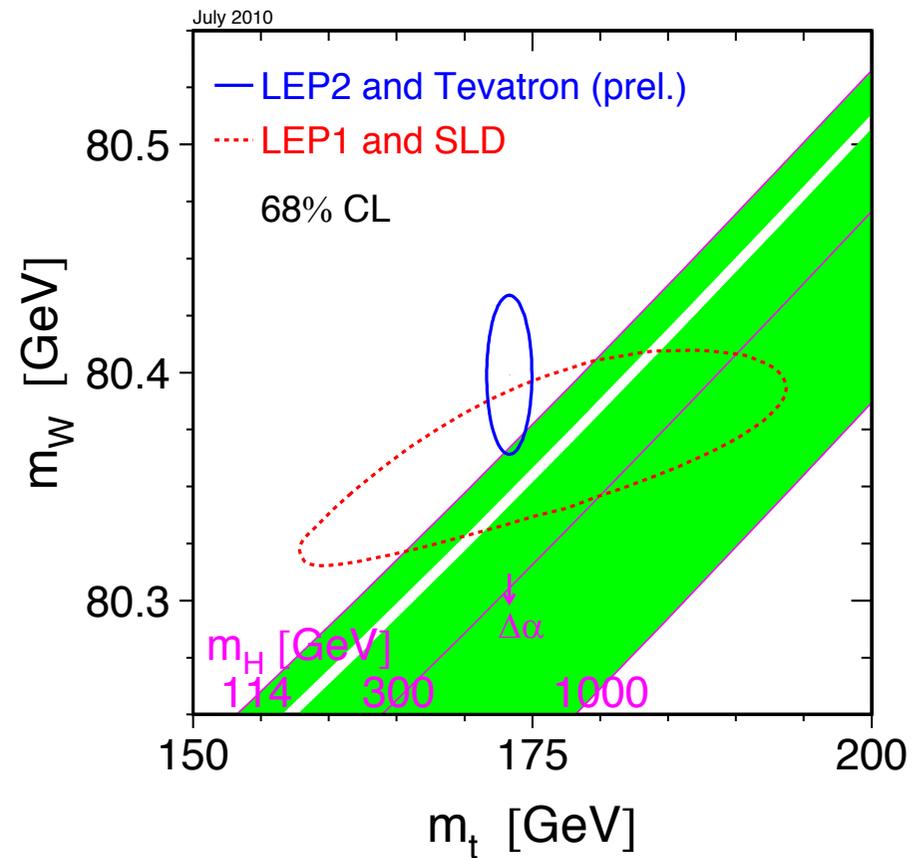
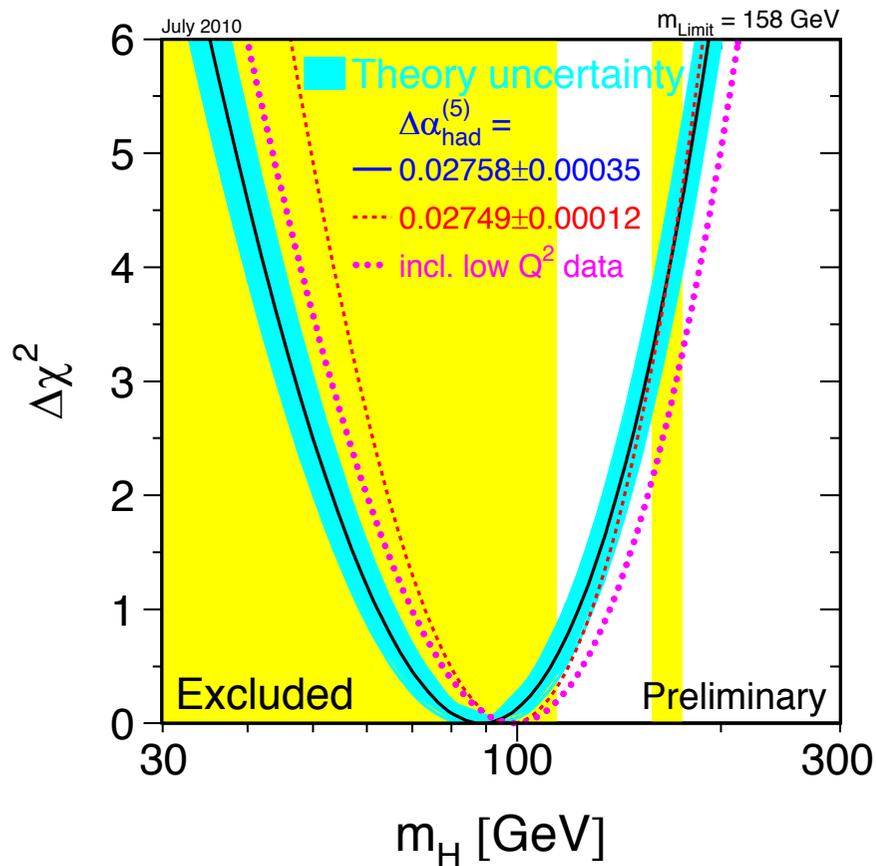


La “forza” con cui le particelle si accoppiano dipende dall’energia a cui lo fanno



Perché tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

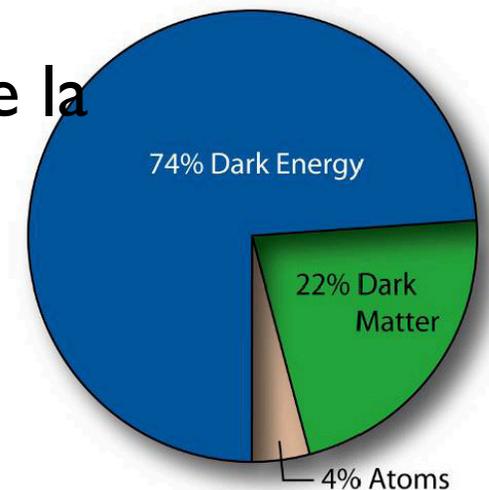
2010:
 $M_H = 89^{+35}_{-26}$ GeV @ 68% C.L.



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 segnature 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?

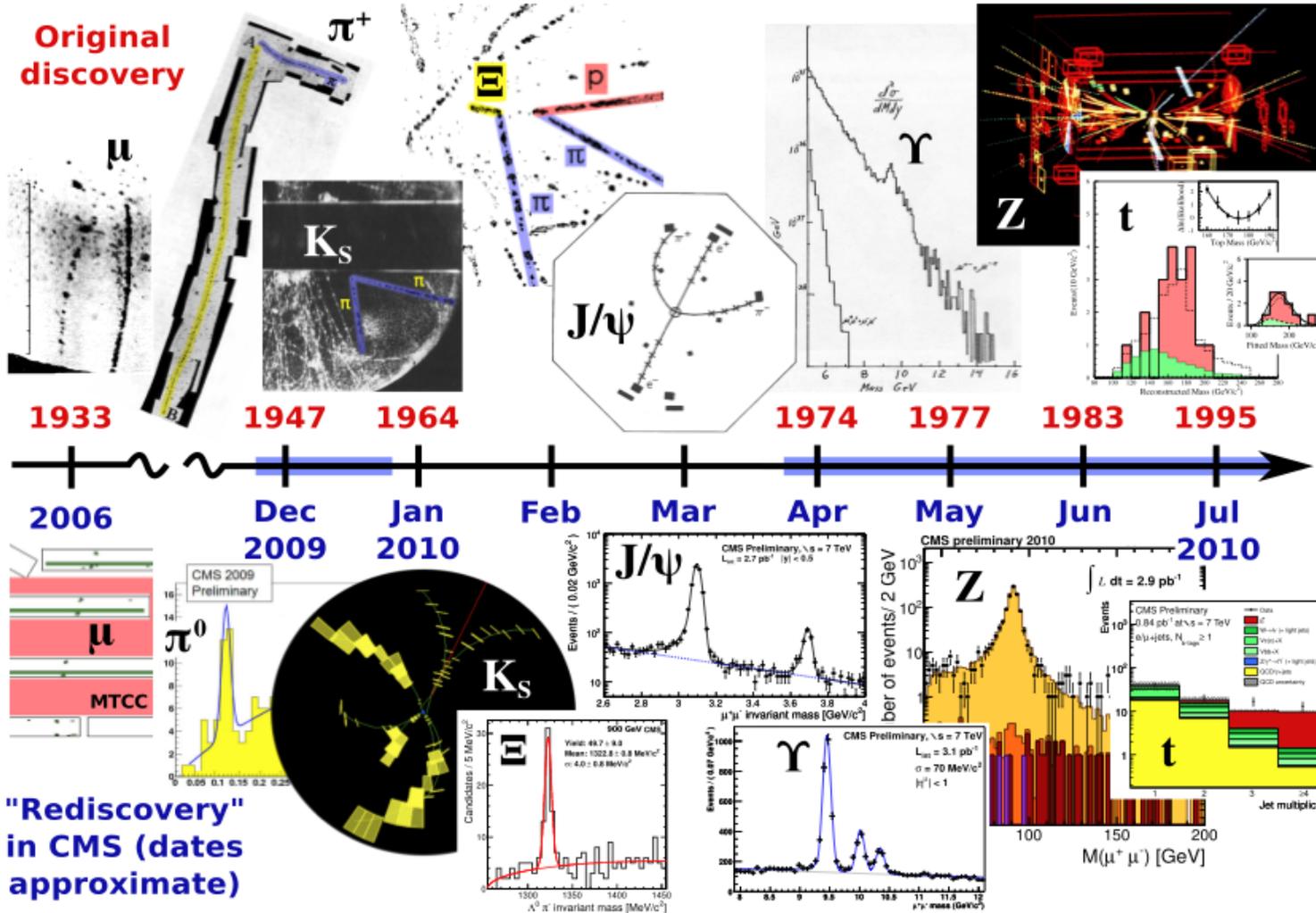
Il Modello Standard non può essere la fine della storia...



Dopo pochi mesi di run nel 2010...



Re-discovered the Standard Model at 7TeV



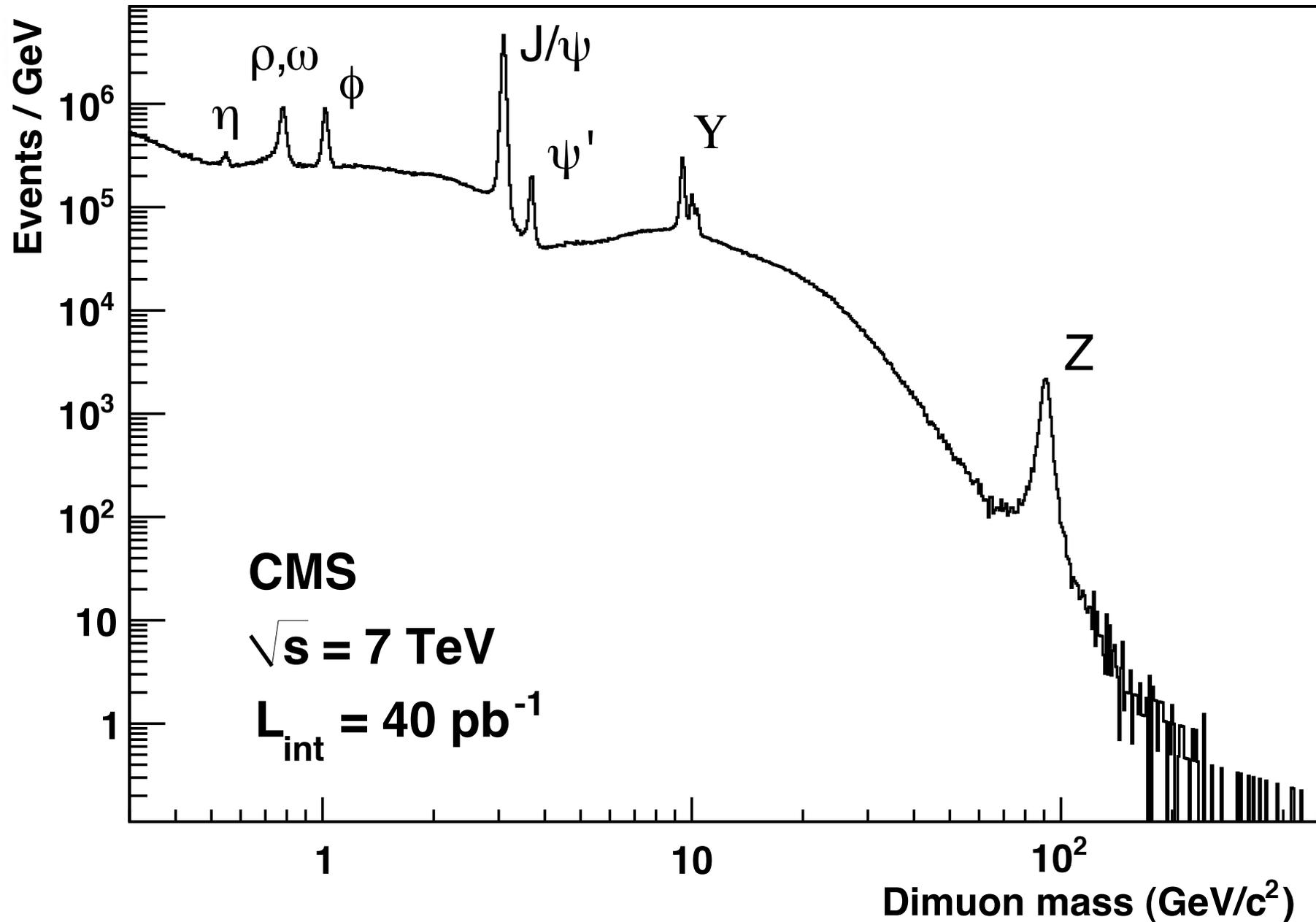
G. TONELLI, CERN/INFN/UNIPISA

LHCC

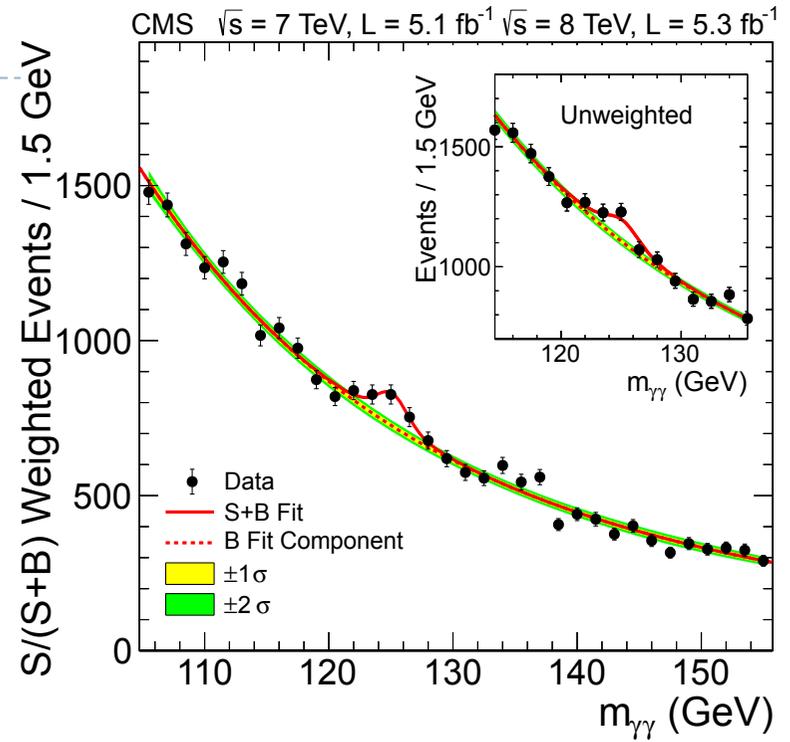
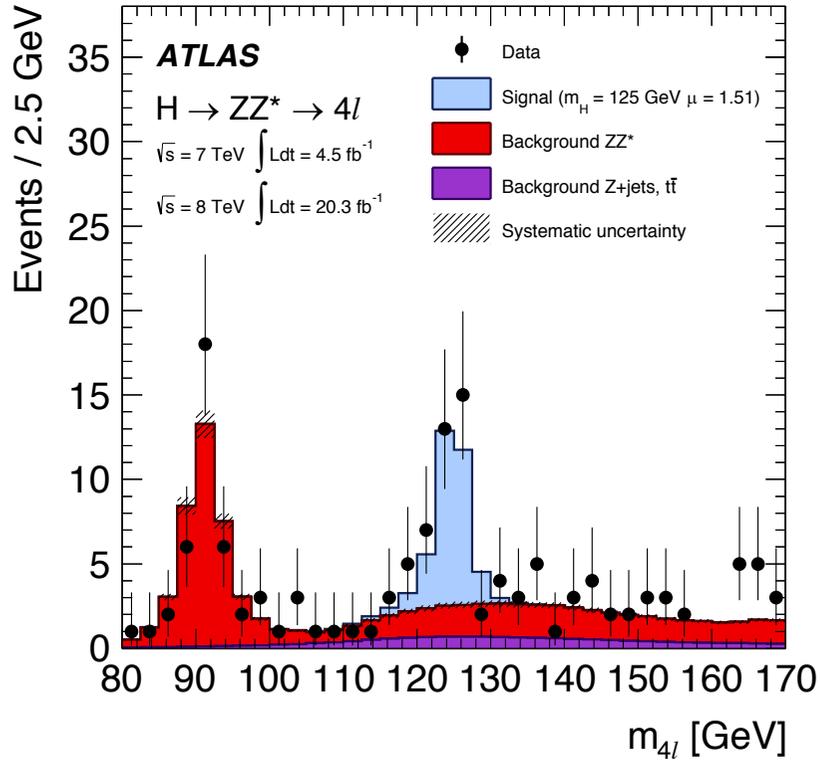
NOVEMBER 16, 2010

4

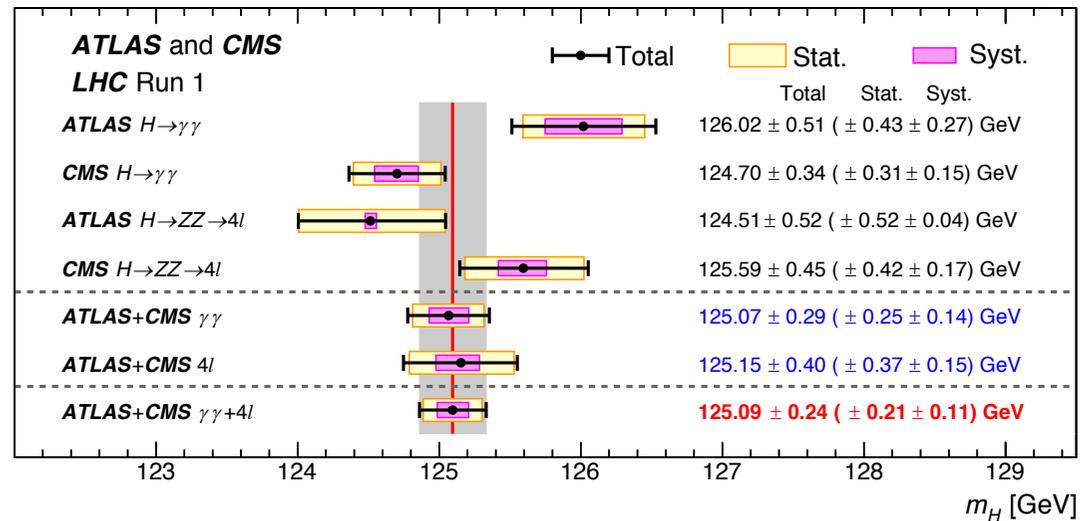
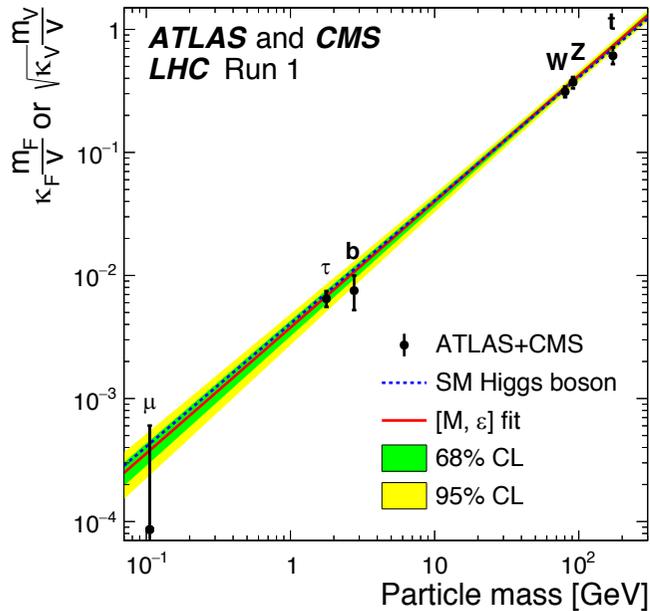
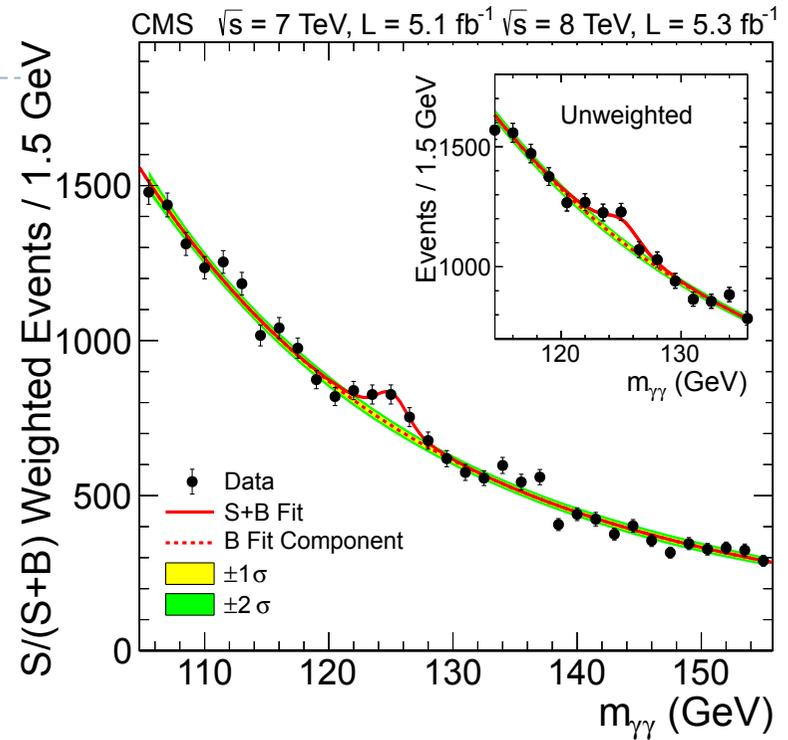
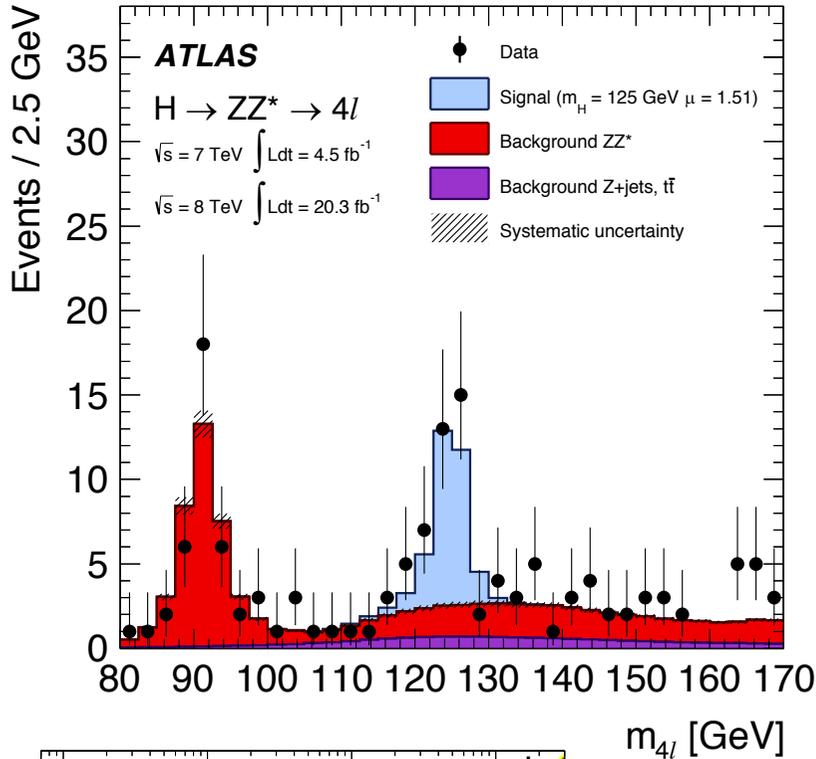
Dopo pochi mesi di run nel 2010...



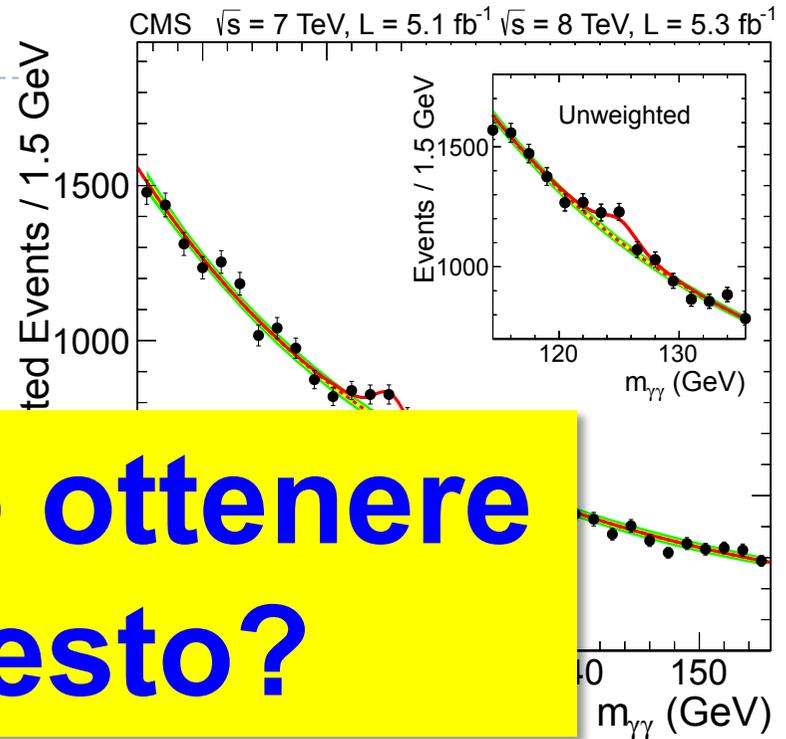
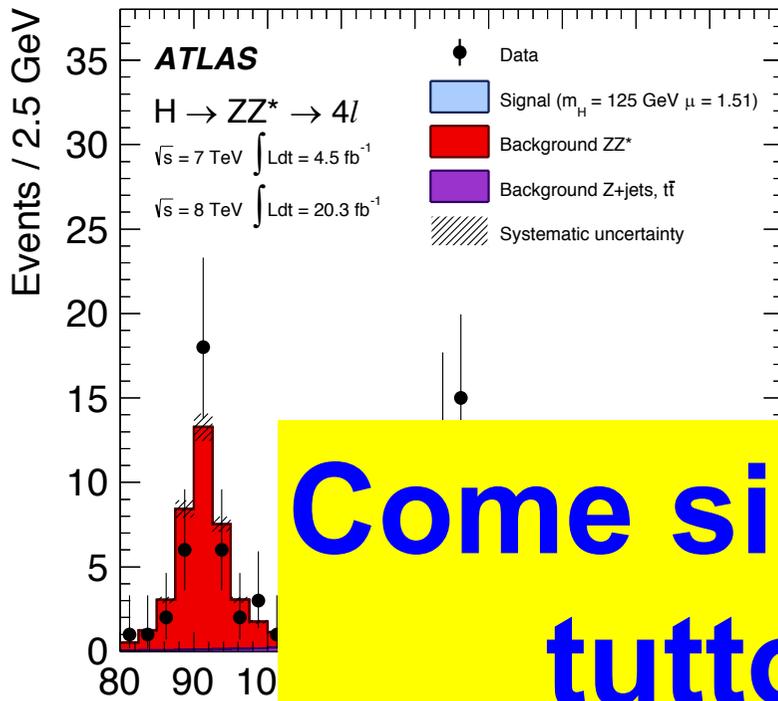
Dopo 3 anni di run...



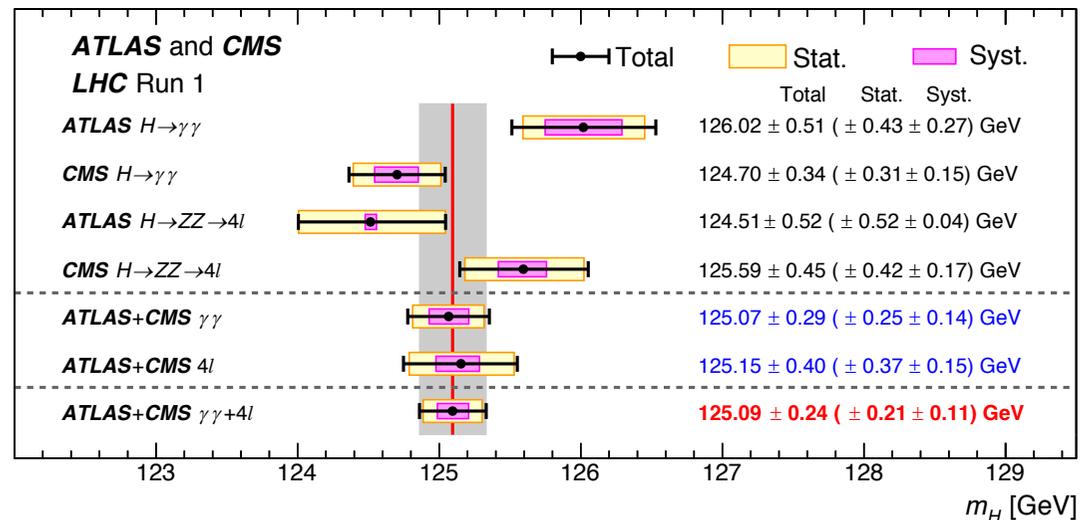
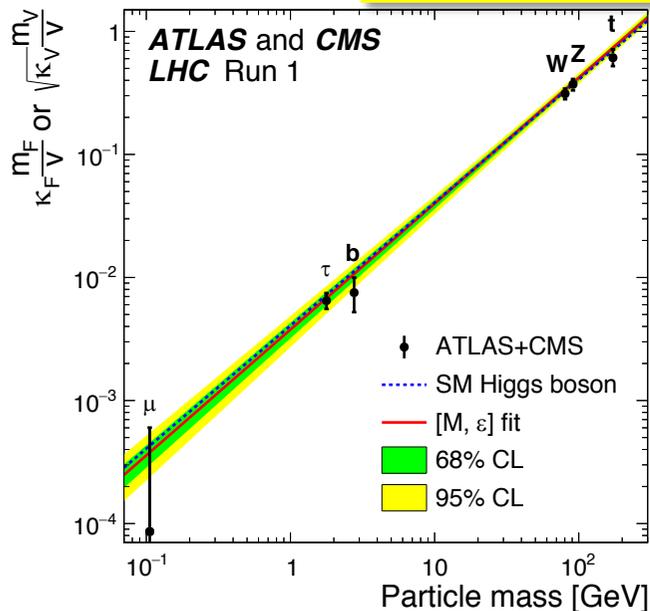
Dopo 3 anni di run...



Dopo 3 anni di run...



Come si può ottenere tutto questo?

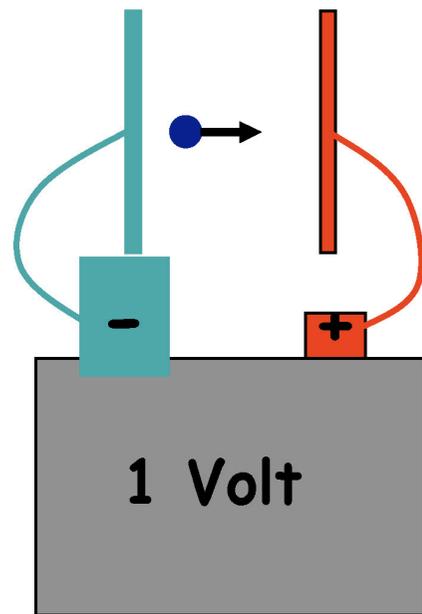


Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) = 10^9 eV

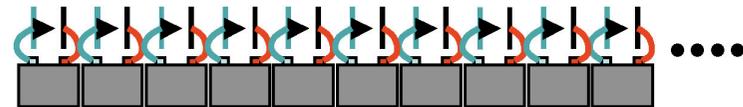
$m_{\text{protone}} = 0.938 \text{ GeV} = 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

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



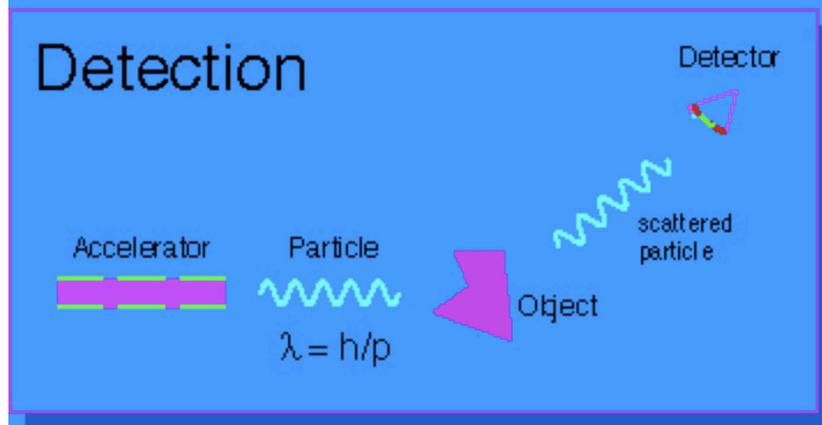
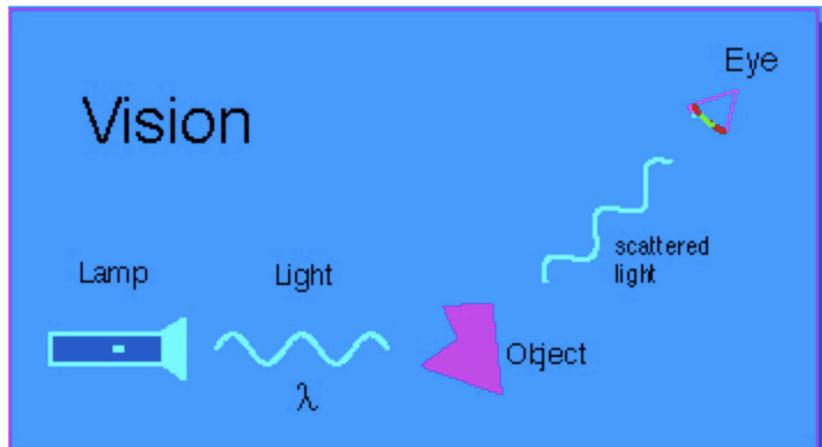
$E = 1 \text{ eV}$

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

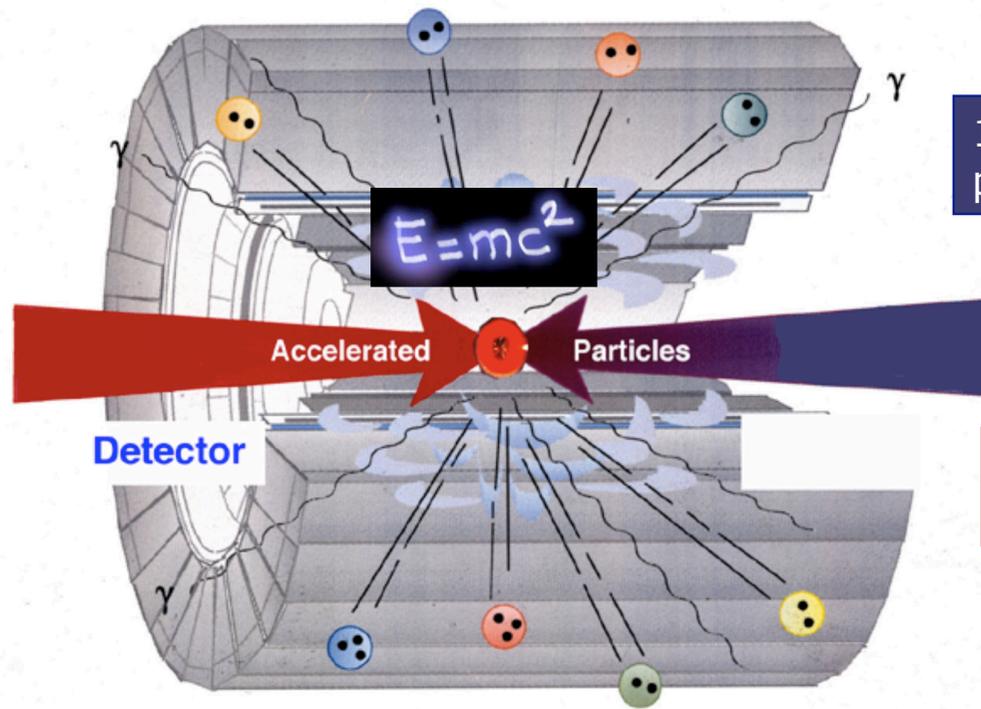


I più piccoli dettagli “risolvibili” hanno dimensioni confrontabili con λ della radiazione incidente.



Particelle di alta energia sono gli “esploratori del microcosmo”

Perché un collisionatore ?



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

2) Fare collidere le particelle

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

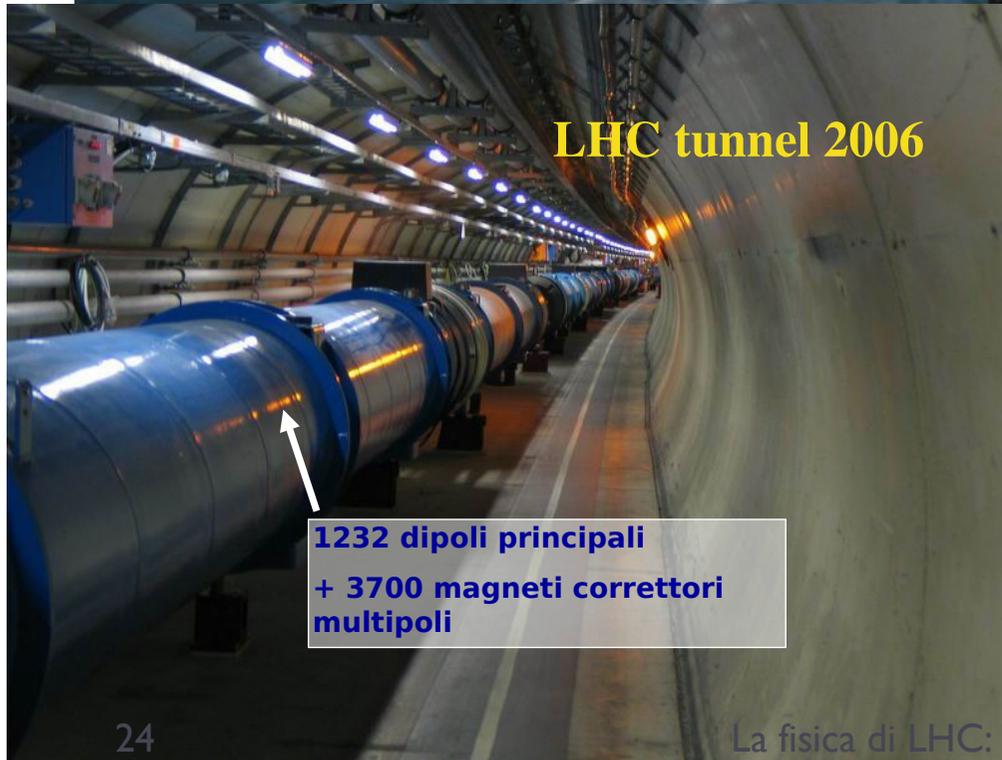
$E=mc^2$: la massa si può trasformare in energia e viceversa

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

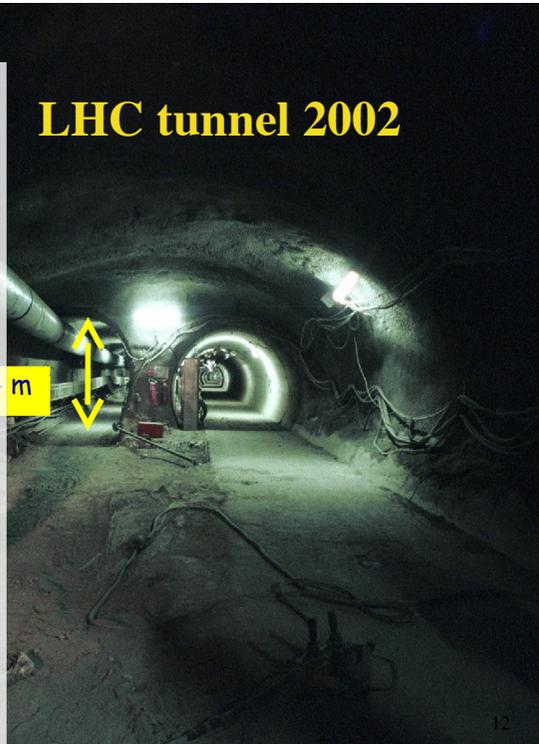
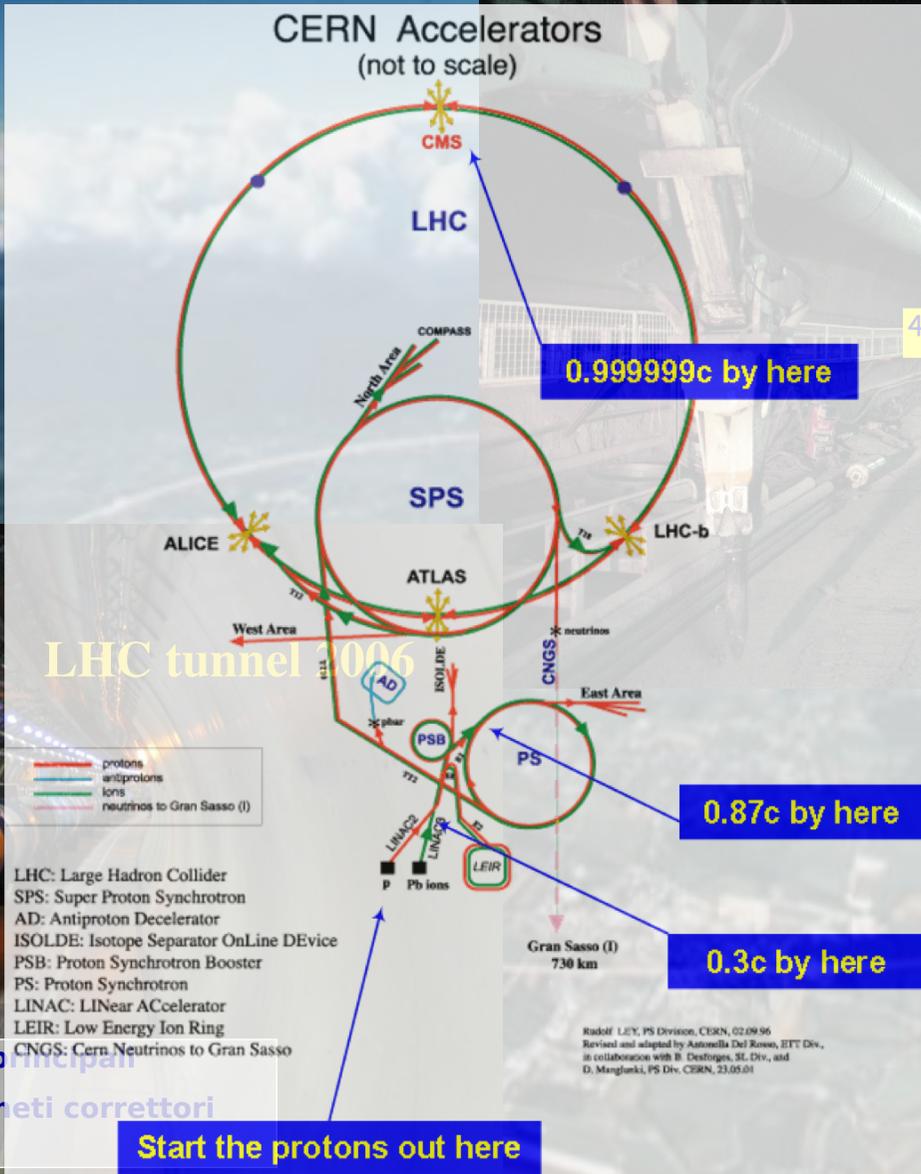
Large Hadron Collider



Large Hadron Collider



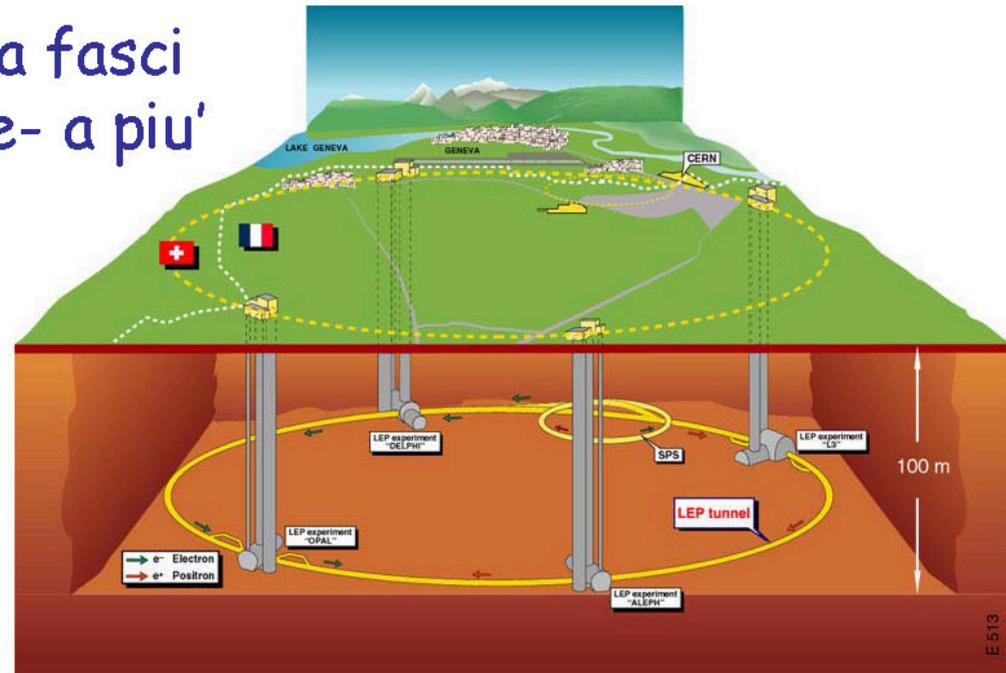
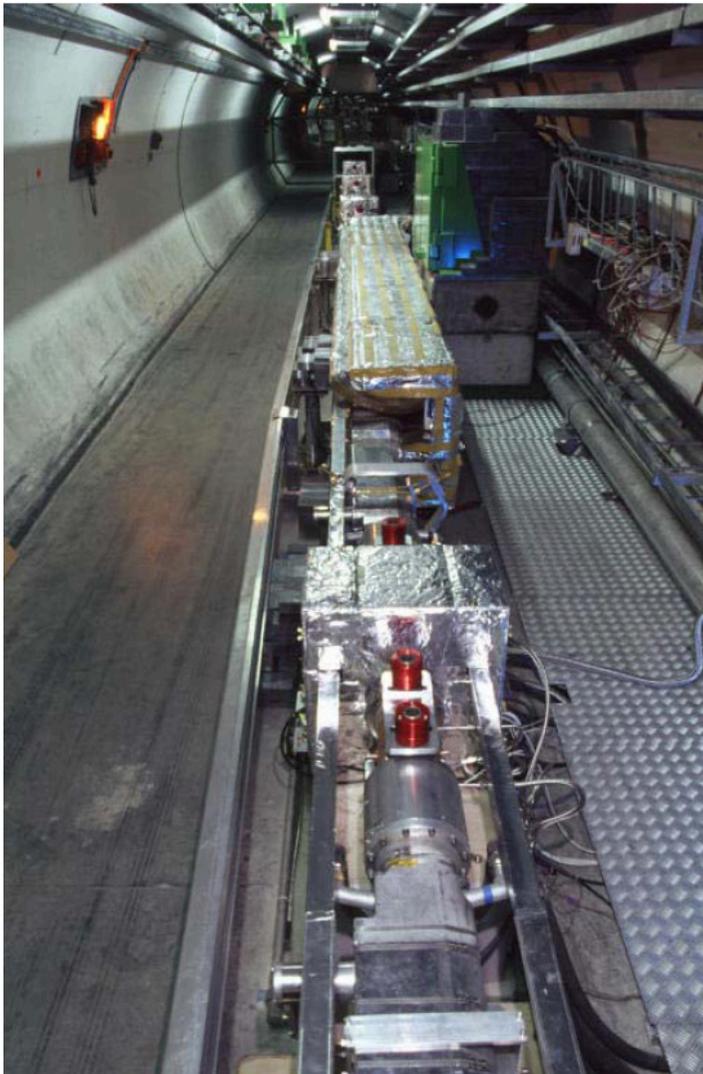
Large Hadron Collider



Un po' di storia:

LEP

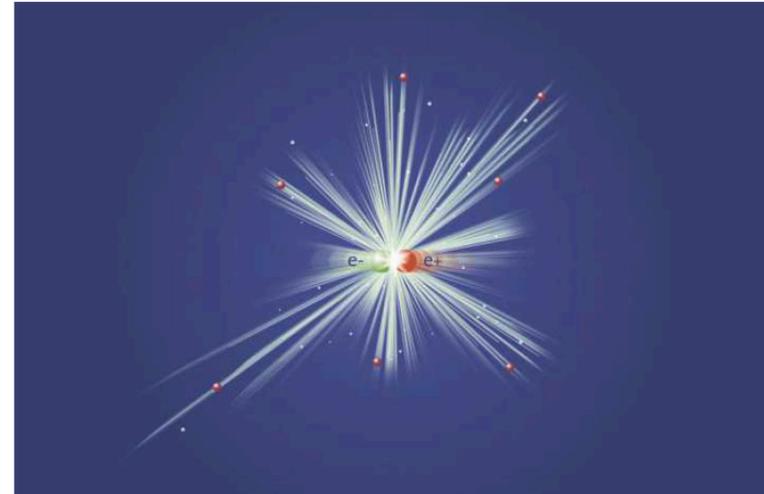
La macchina a fasci incrociati e^+e^- a piu' alta energia



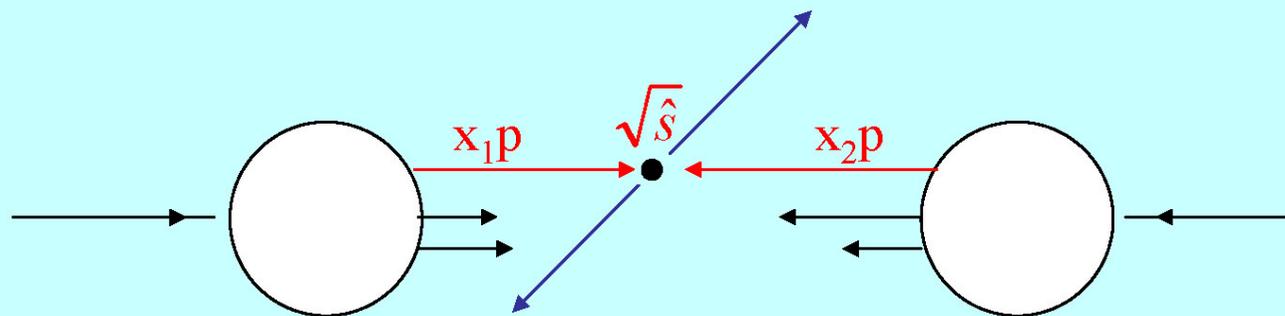
- LEP, un anello di 27 Km
- Fasci di elettroni e positroni di oltre 100 GeV
- In funzione dal 1989 al 2000
- Smontato nel 2001 per far posto a **LHC : fasci di protoni da 7 TeV**

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.....

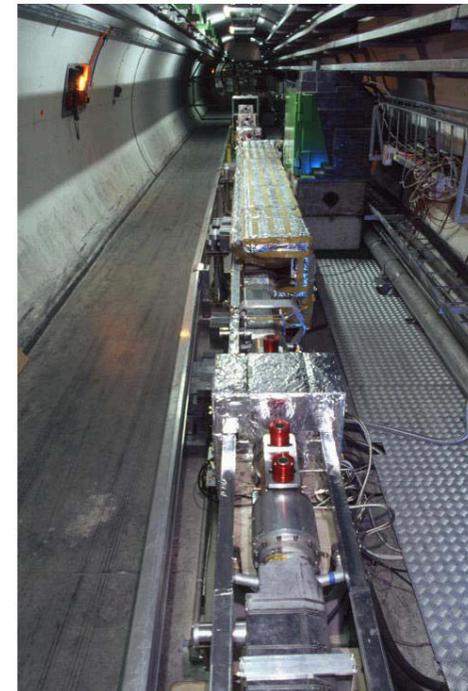
bolletta della luce

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

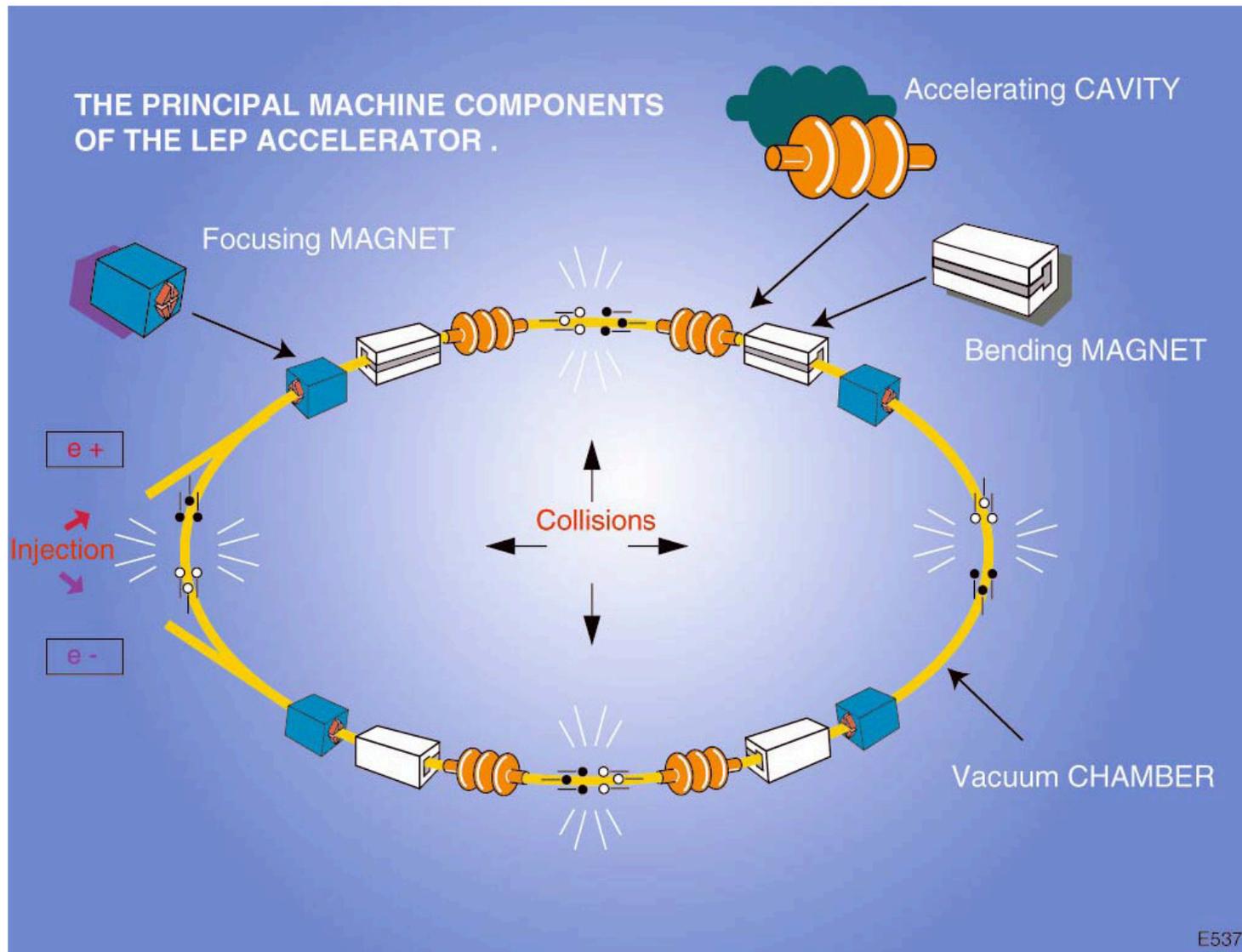
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

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

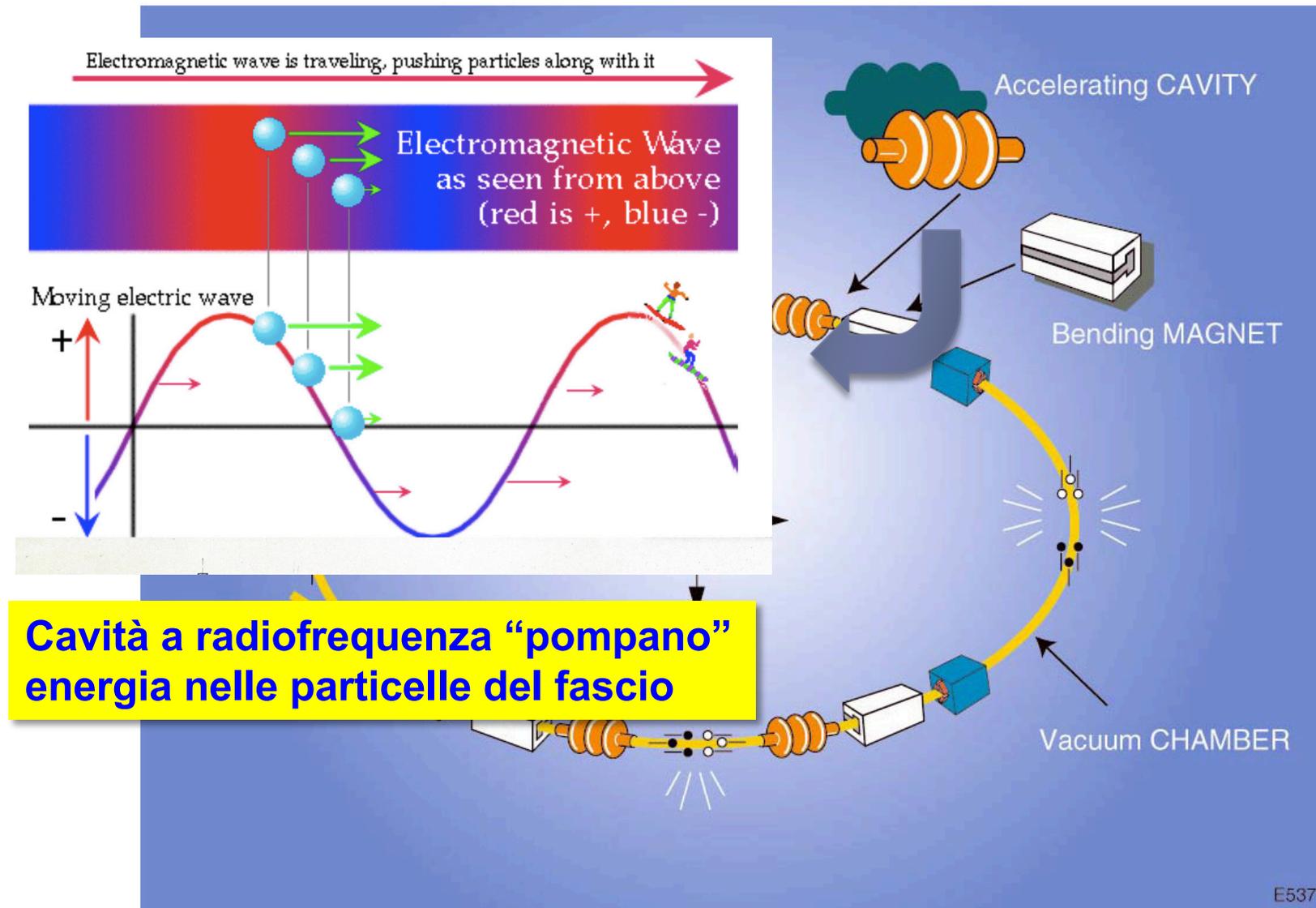
LEP : 27 Km di circonferenza ! 



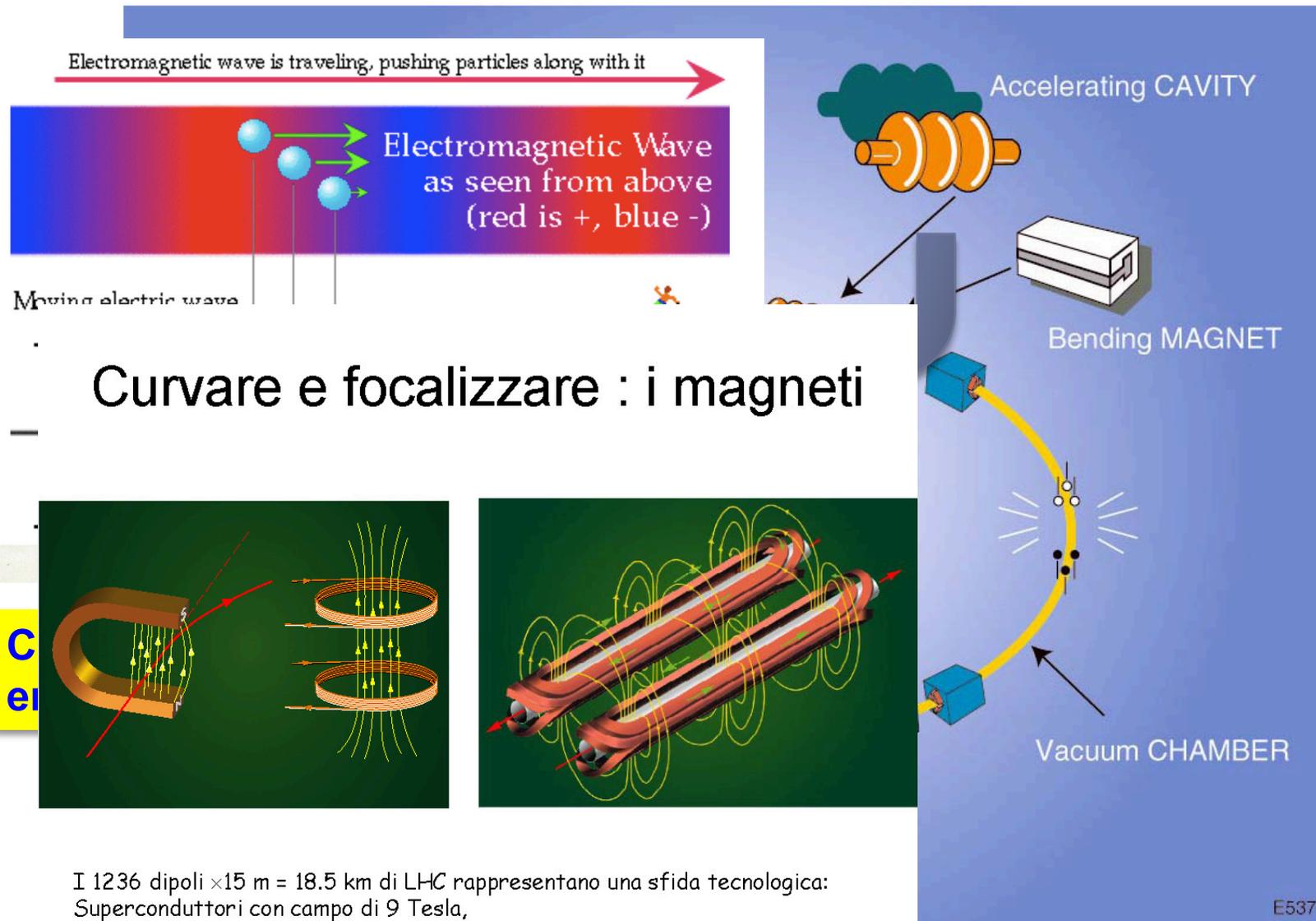
Componenti principali di un acceleratore



Componenti principali di un acceleratore

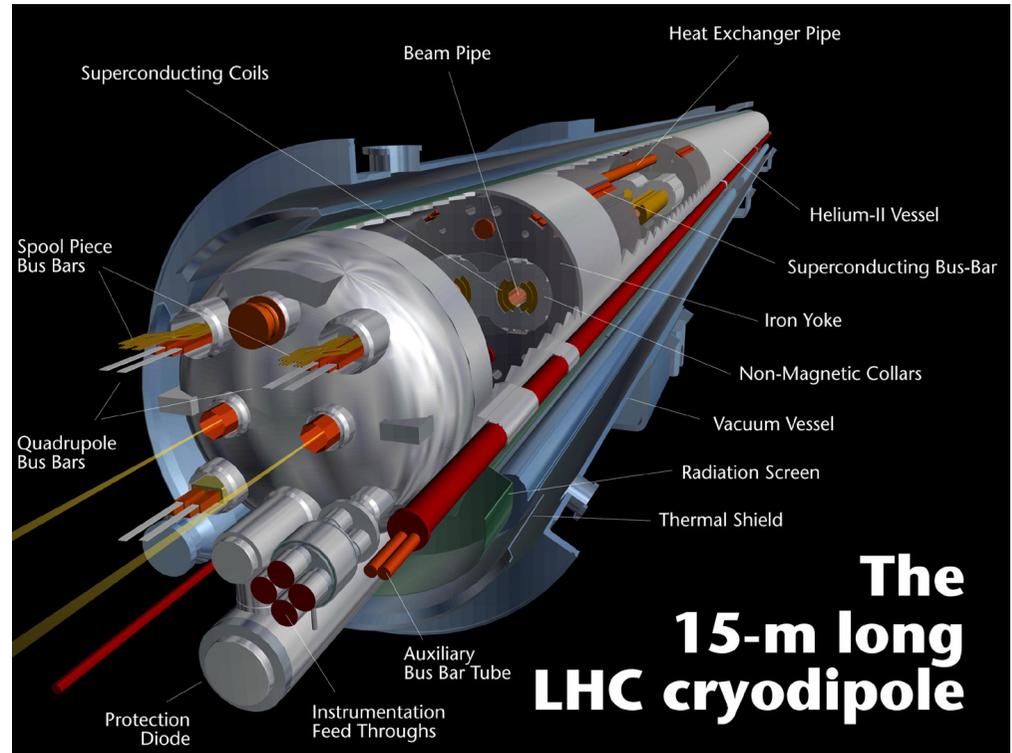


Componenti principali di un acceleratore



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

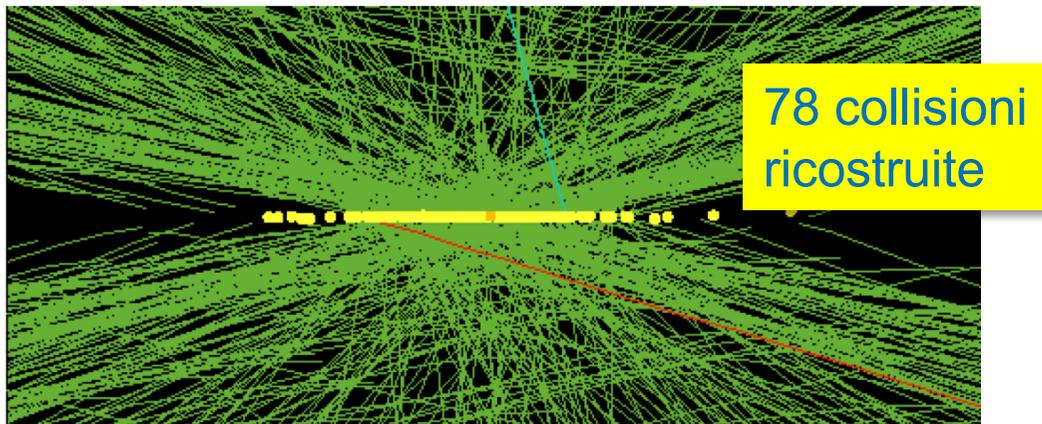
Sezione d'urto: probabilità che un processo accada in un urto

↳ dal quadrato dell'“elemento di matrice” per il processo d'urto

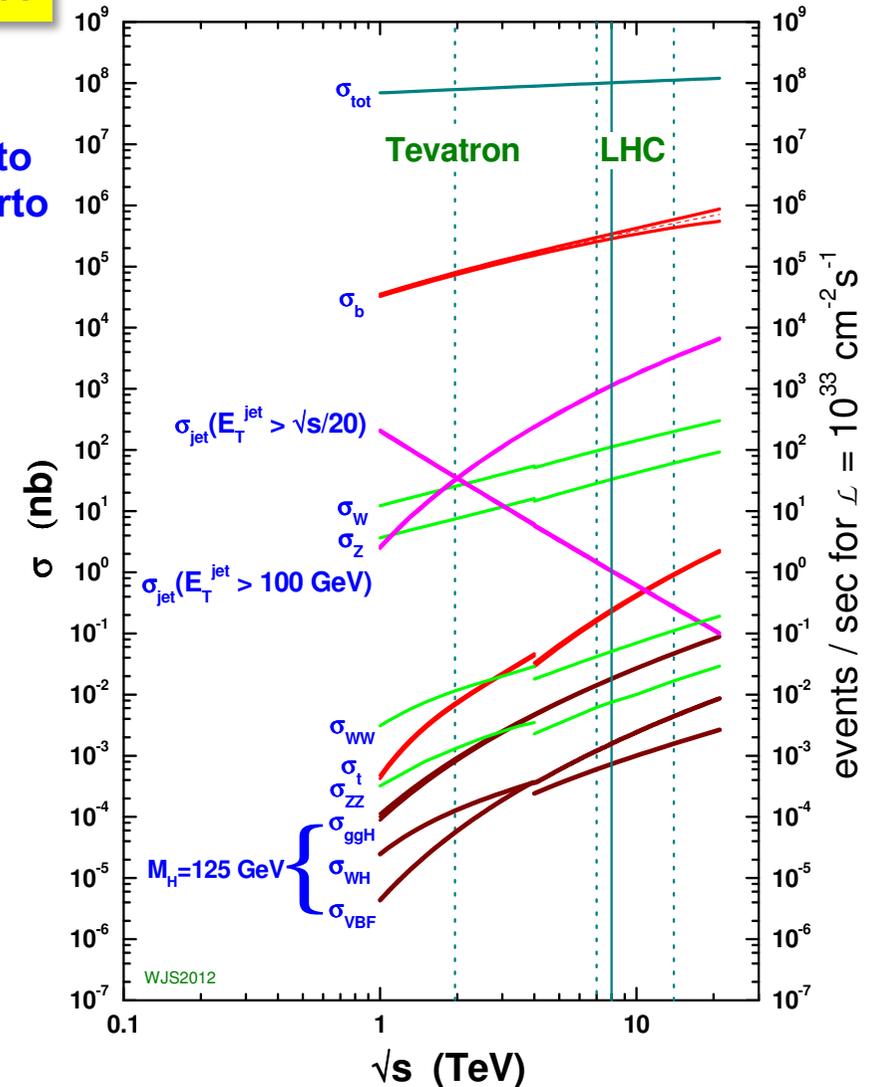
Ad alta luminosità ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

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

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

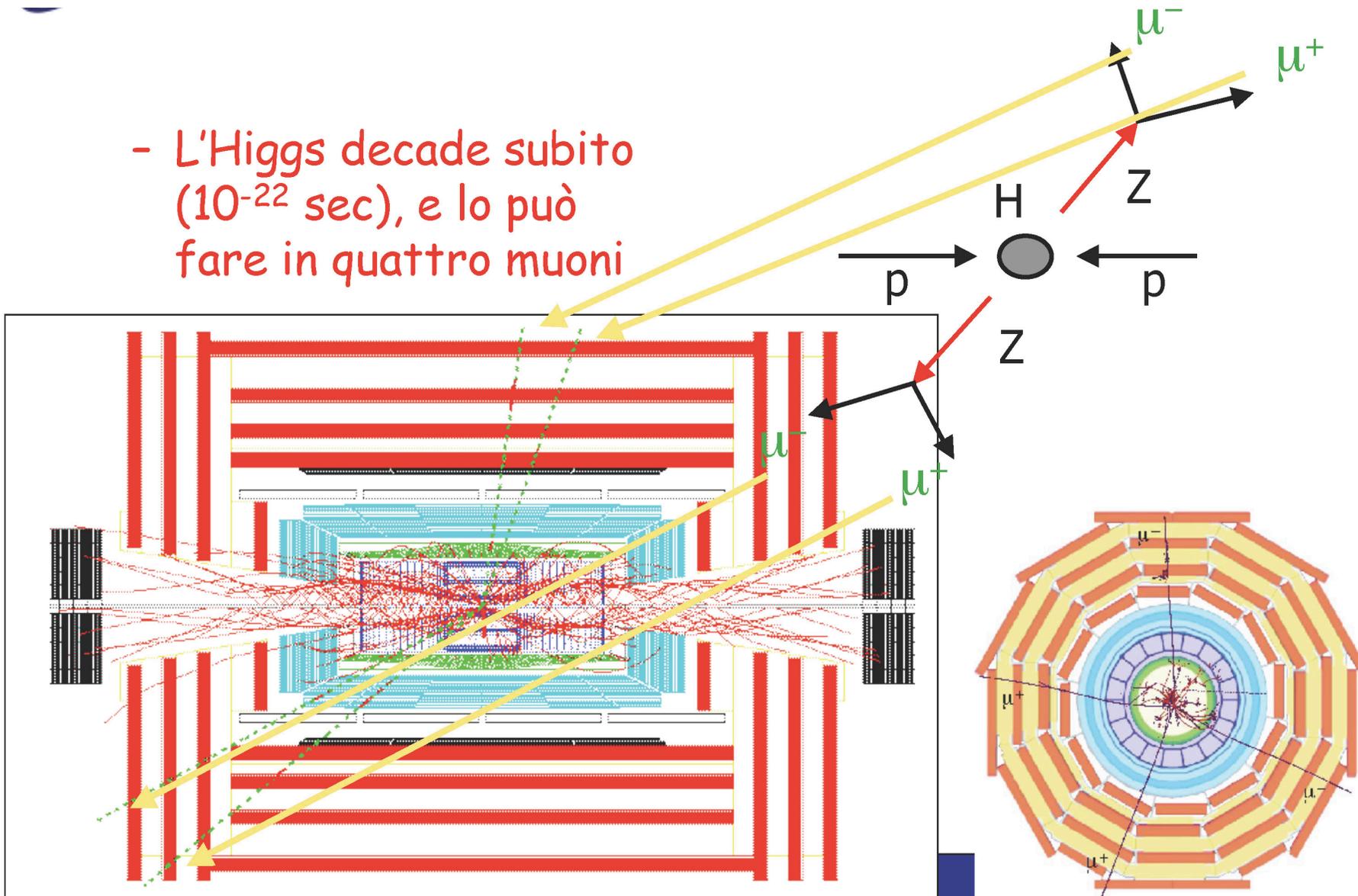


proton - (anti)proton cross sections



Rivelazione dai prodotti di decadimento

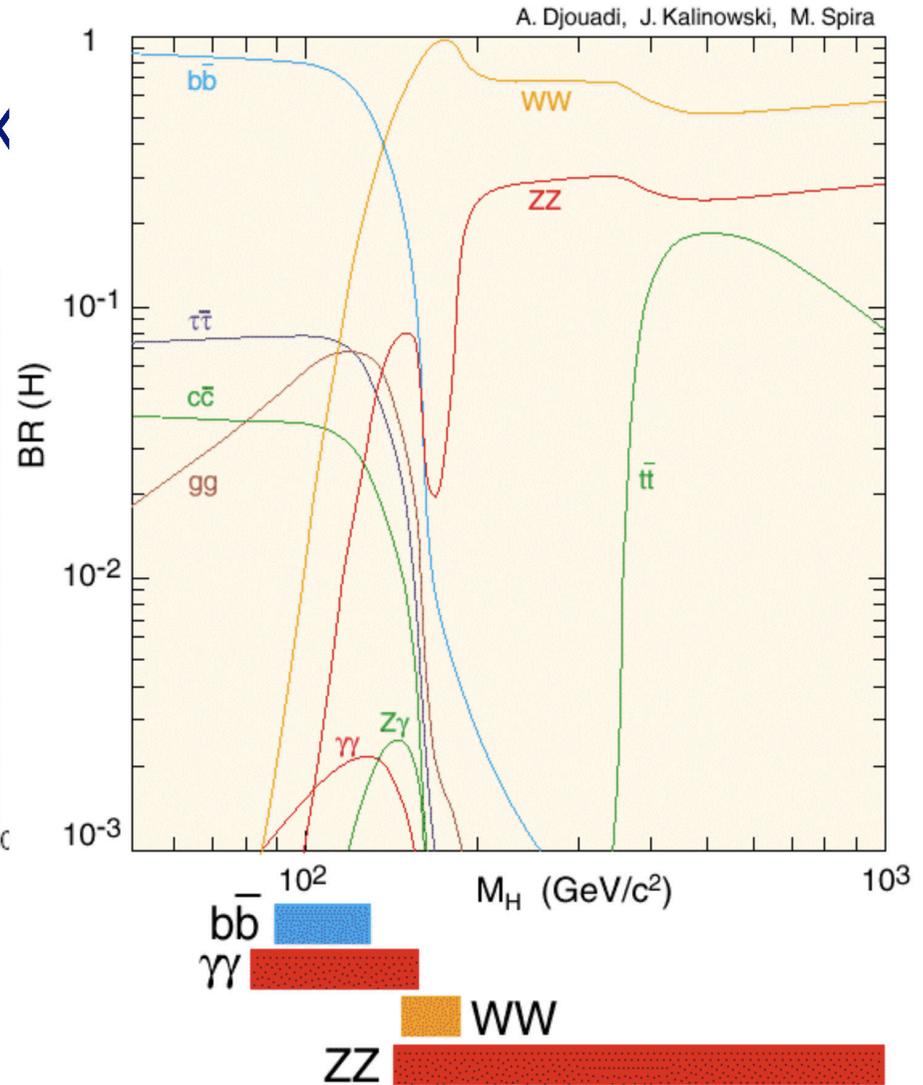
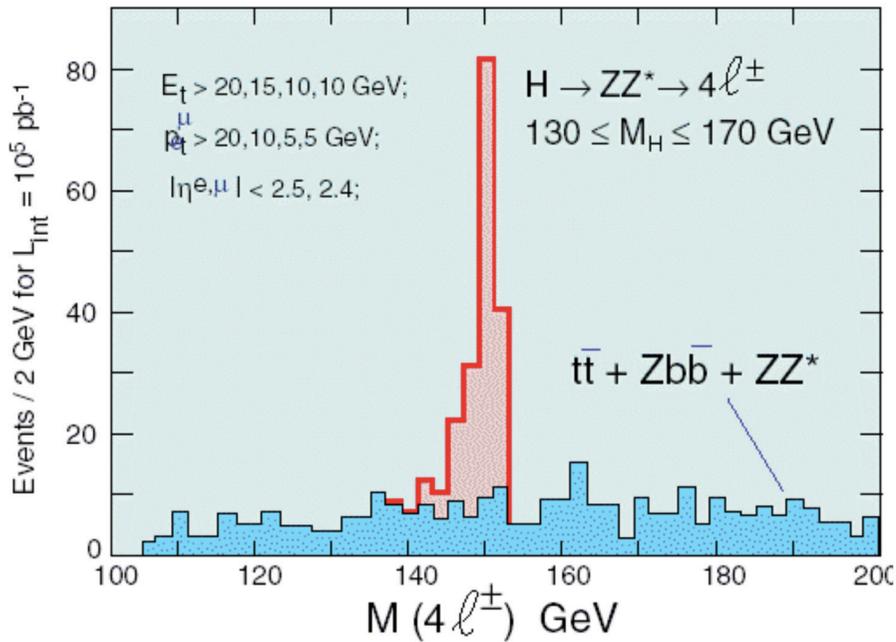
- L'Higgs decade subito (10^{-22} sec), e lo può fare in quattro muoni



Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

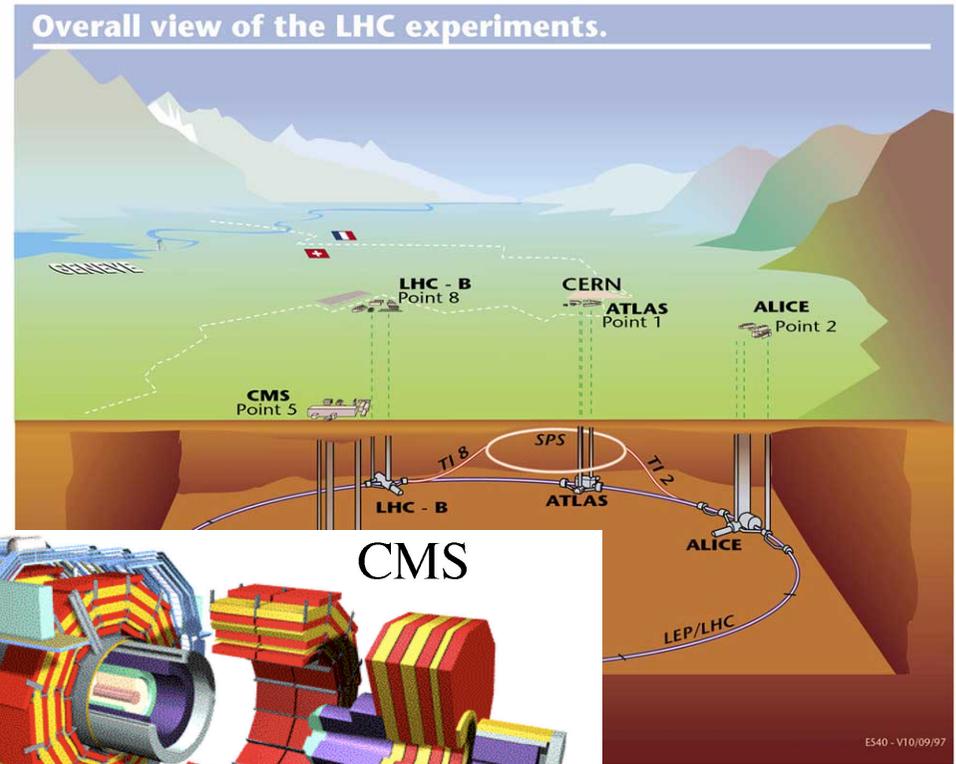
Cerco eventi :

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

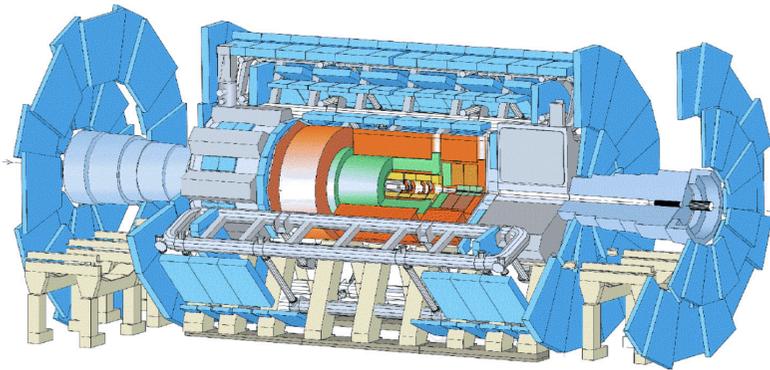


Esperimenti a LHC

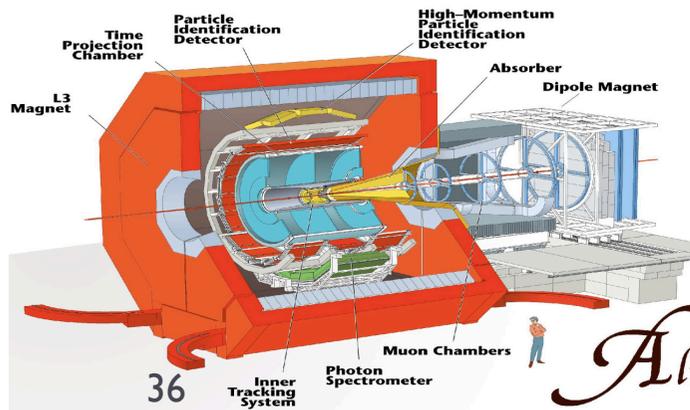
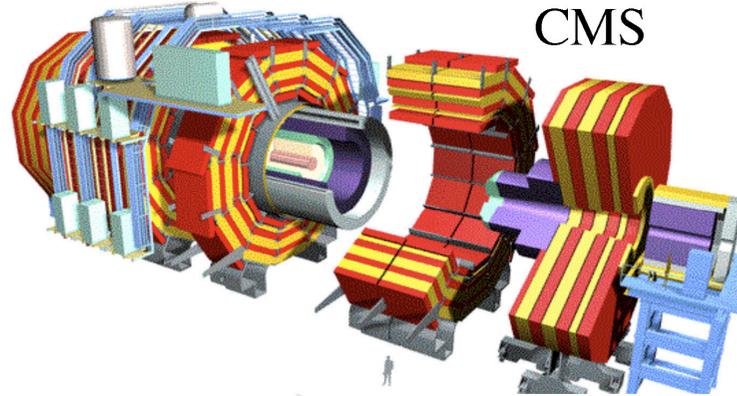
	Energia cm TeV	Luminosità $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
LEP e^+e^-	0.209	10^{32}
LHC pp	14	10^{34}
LHC Pb Pb	1312	10^{27}



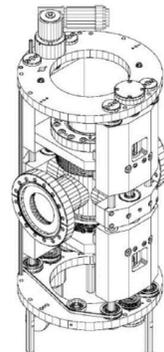
ATLAS



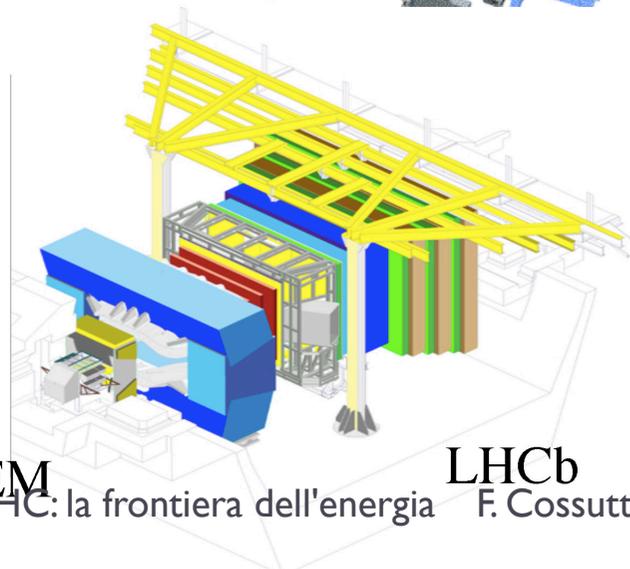
CMS



Alice



TOTEM



LHCb

La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

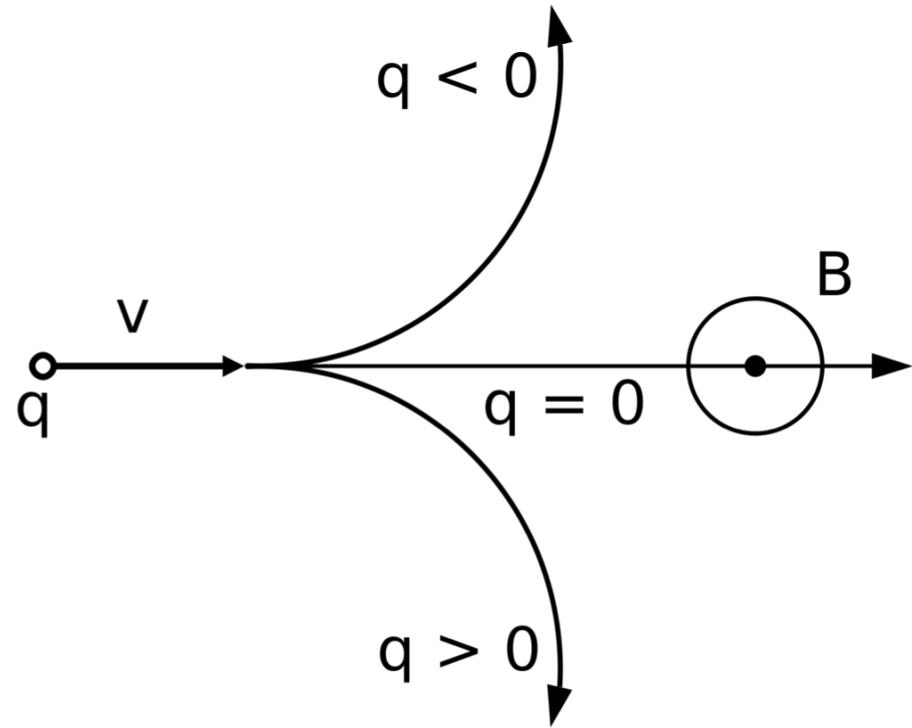
F. Cossutti - 20/2/2018

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



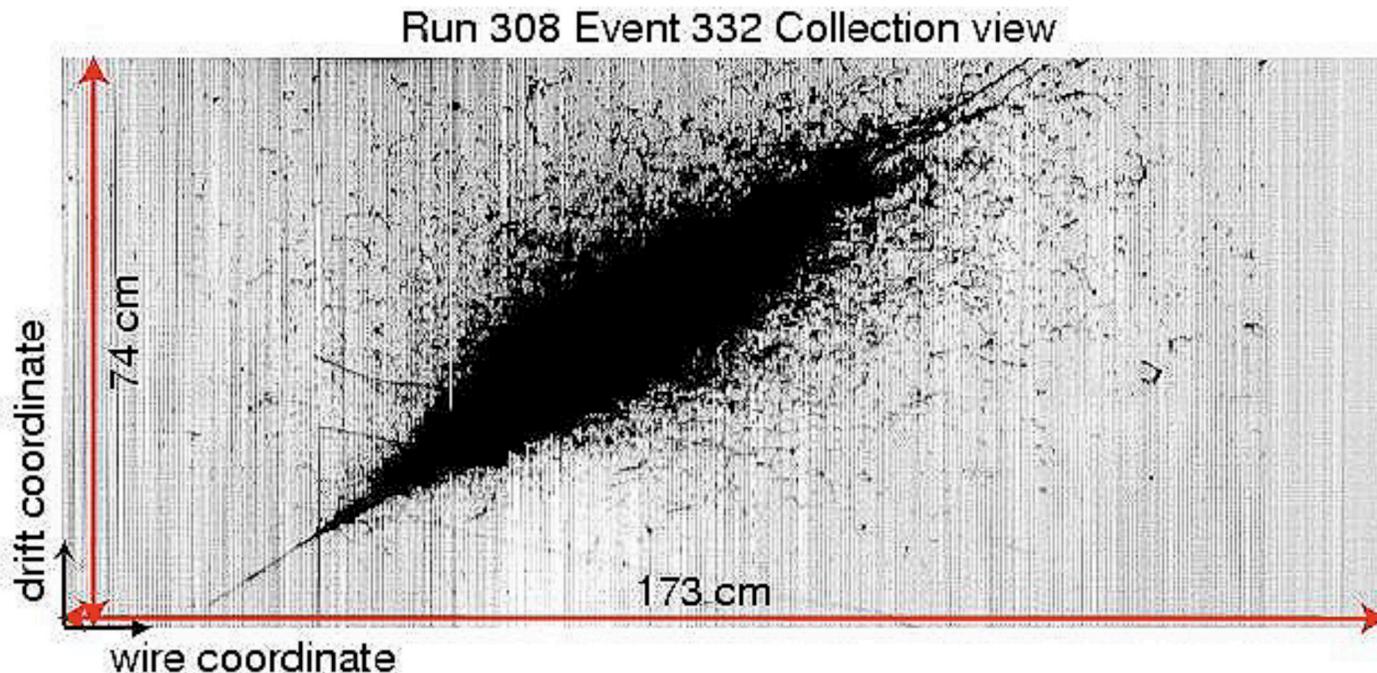
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

GeV/c q/e T

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

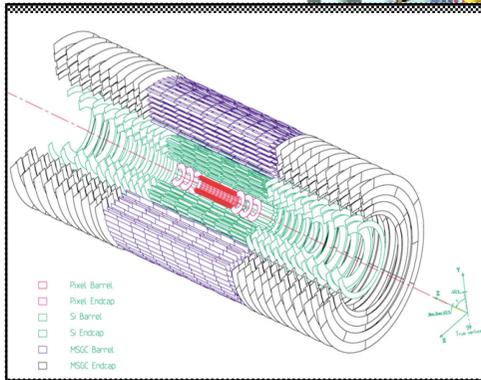
ECAL: cristalli PbWO₄

HCAL: scintillatore plastico

CALORIMETRI

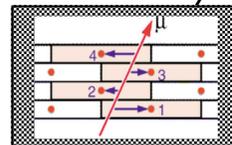
GIOGO RITORNO

TRACKER

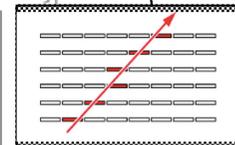


Microstrisce Silicio
Pixels

MUONI BARREL

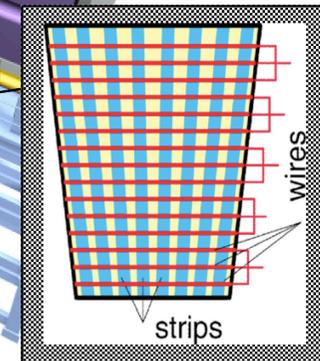


Drift Tube
Chambers (DT)



Resistive Plate
Chambers (RPC)

**MUONI
ENDCAP**



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

Diametro: 15 m

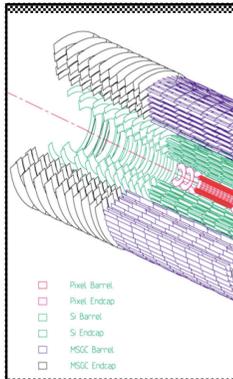
Lunghezza: 21.5 m

Peso: 12500 ton.

Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



Microstrisce Si
Pixels



Diametro: 15 m

Lunghezza: 21.5 m

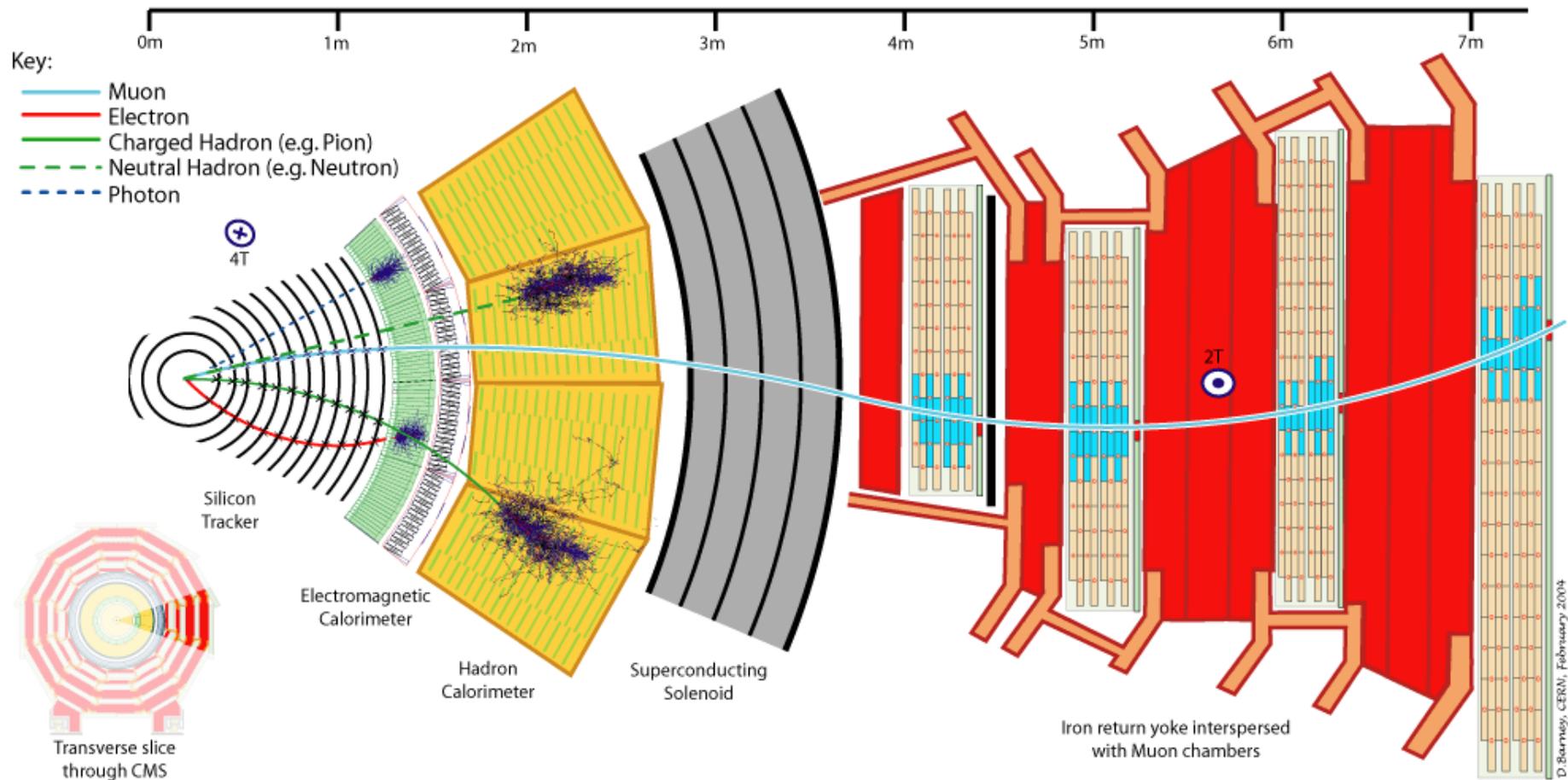
Peso: 12500 ton.

Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

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

Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento

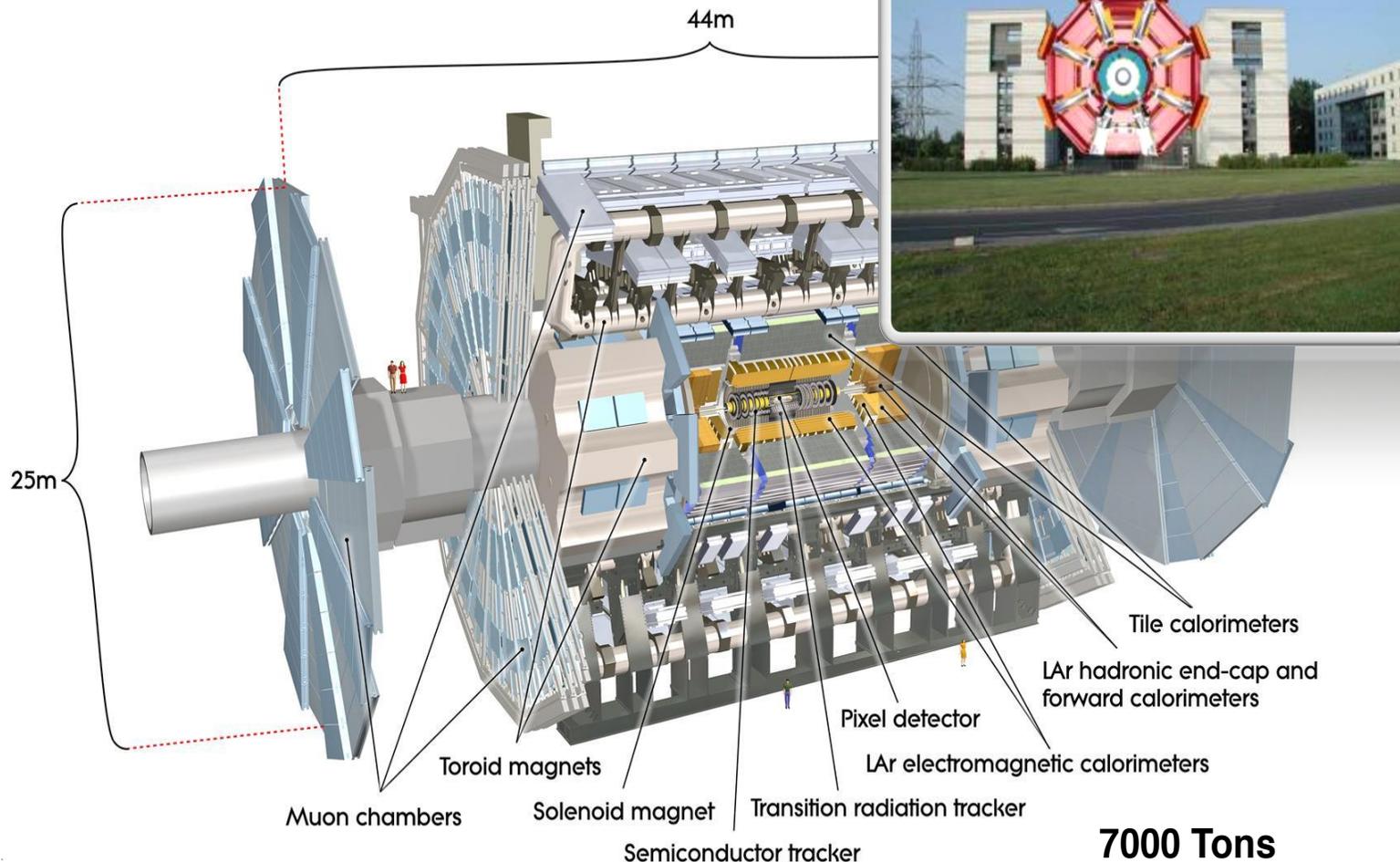


Due sono meglio di uno solo: ATLAS

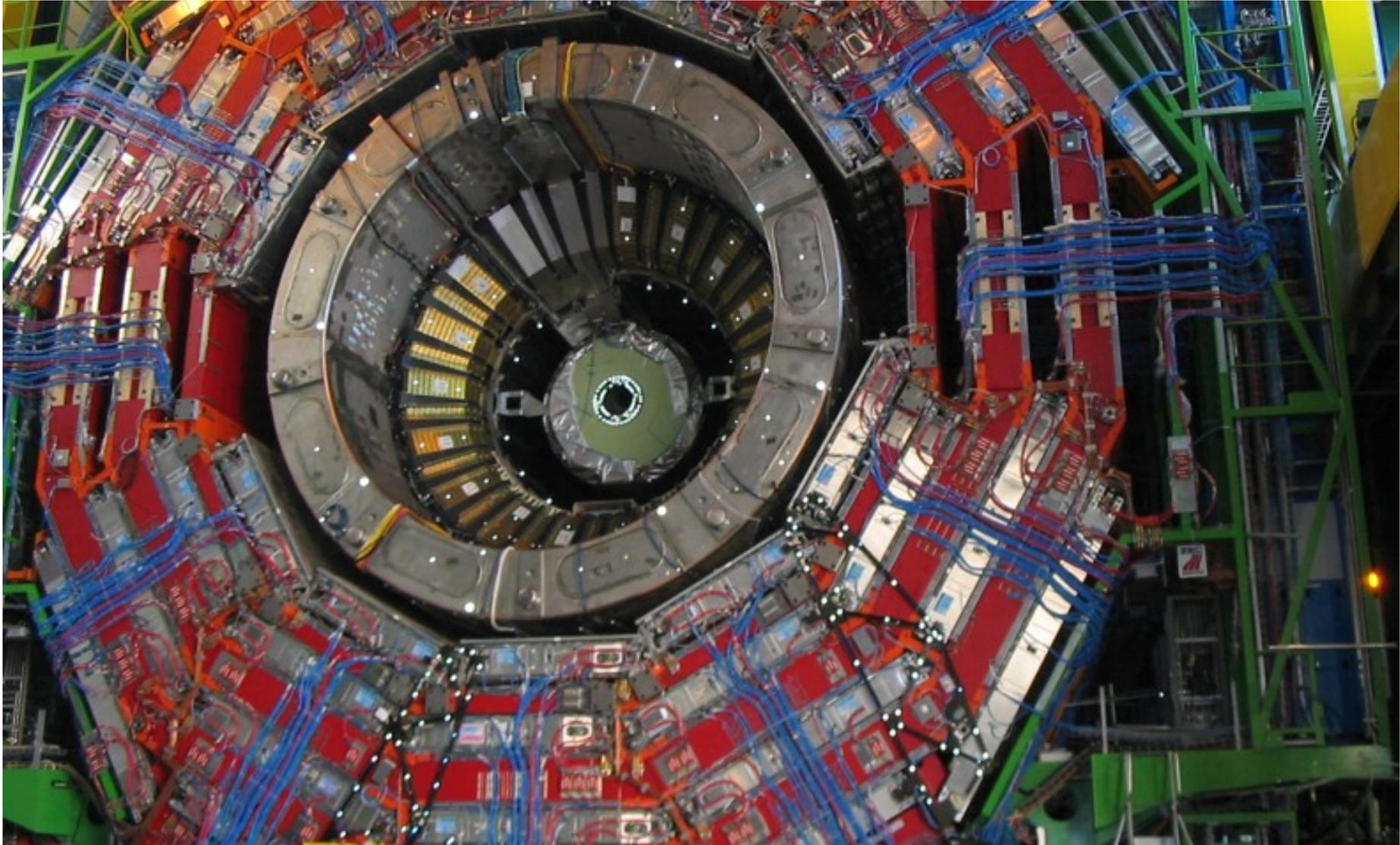
Più grande è l'energia:



✓ Più grande è il rivelatore:



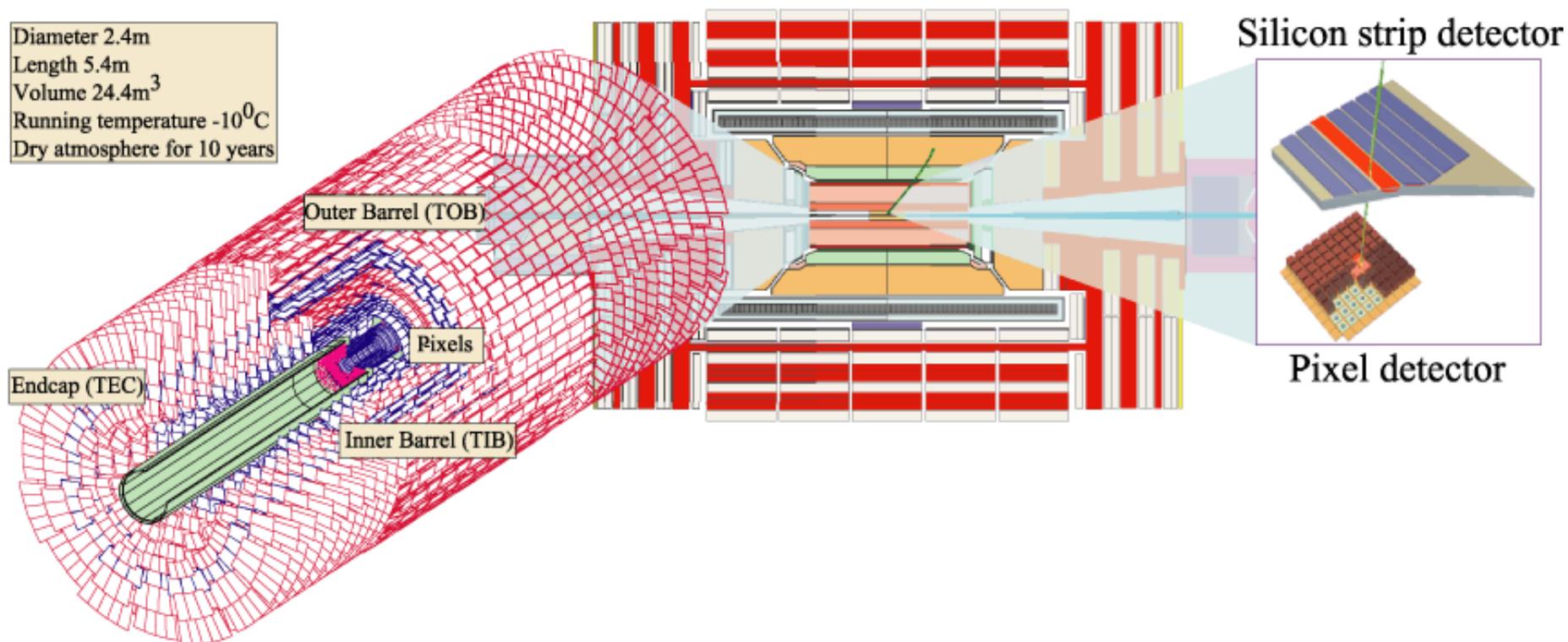
Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Perchè avere un rivelatore sofisticato?

- ▶ Le potenzialità di misura e scoperta di un apparato dipendono dalla qualità degli oggetti ricostruiti (e, μ , γ ,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

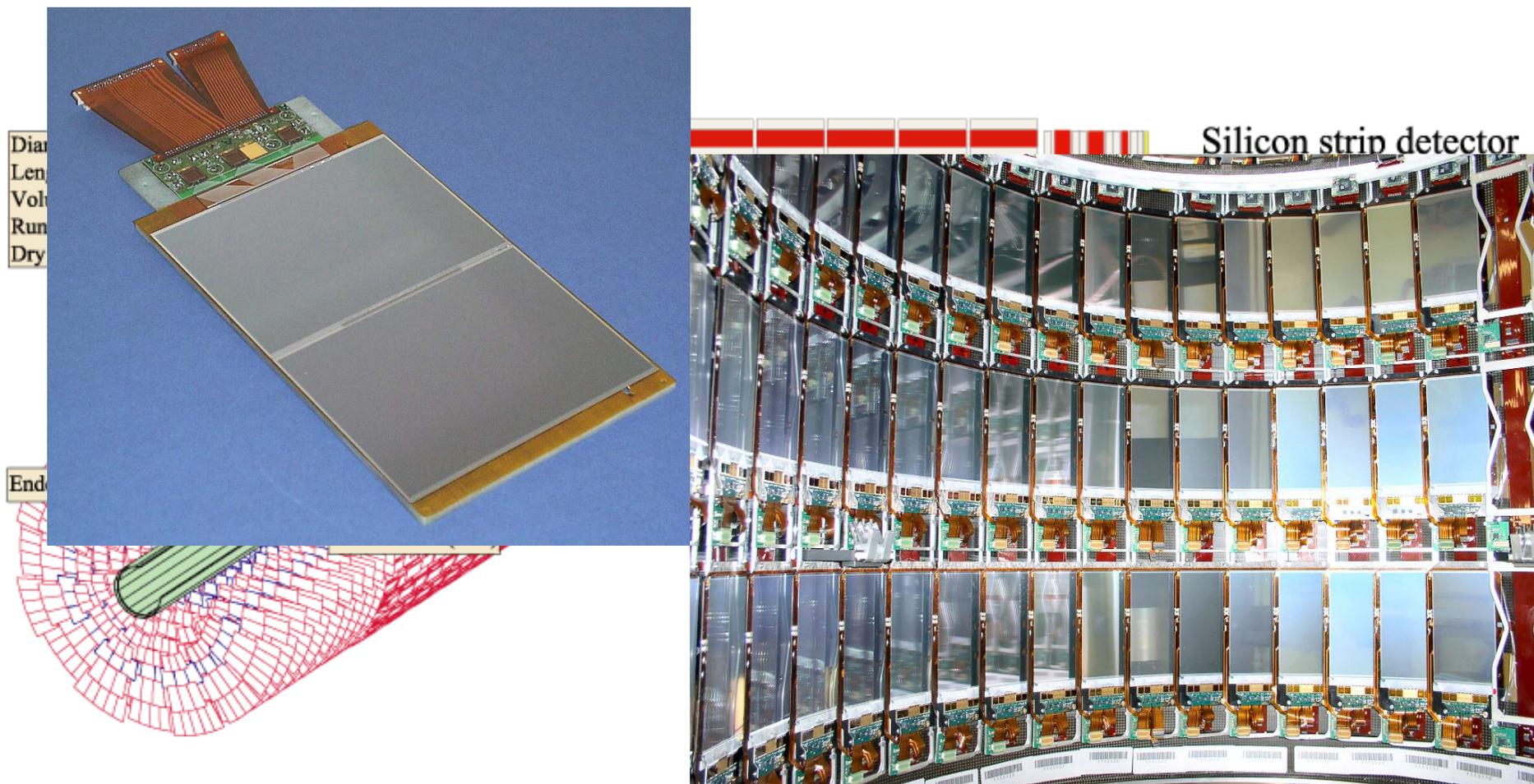


Ad es. CMS tracker...

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

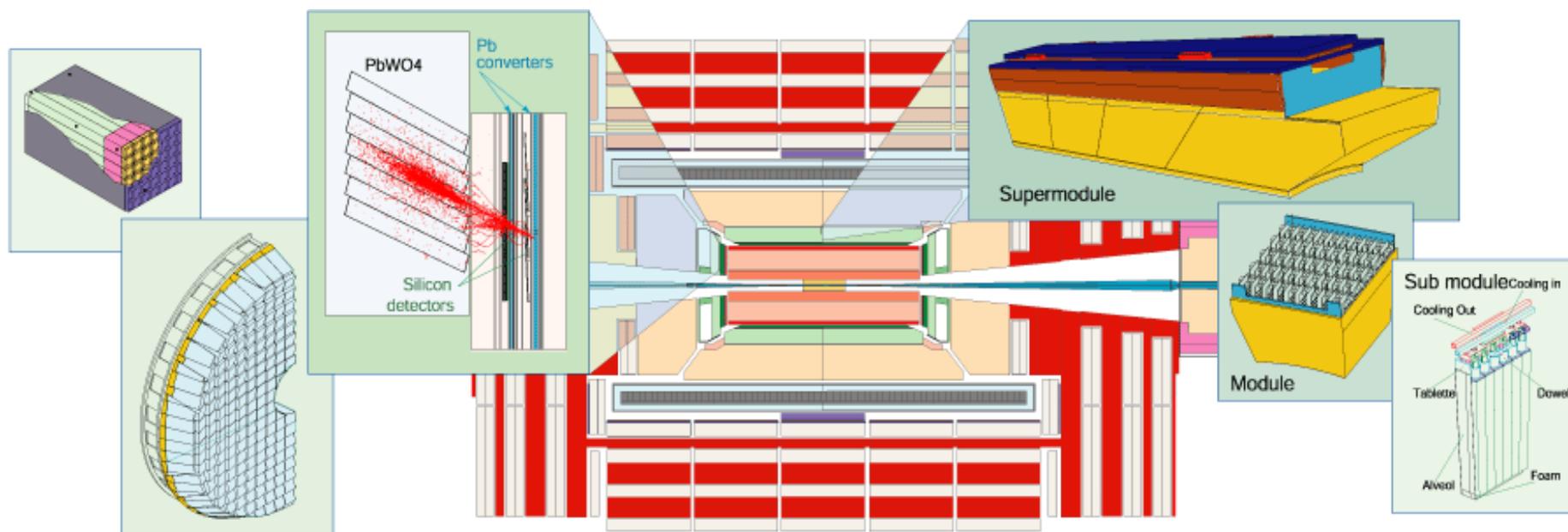


Ad es. CMS tracker...

L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio

▶ *viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale* - 20/2/2018

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



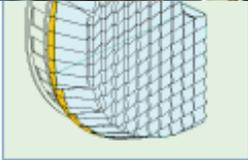
Ad es. CMS ECAL...

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

La luce viene misurata da fotodivelatori 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

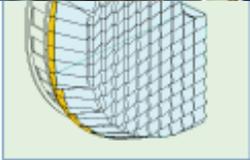
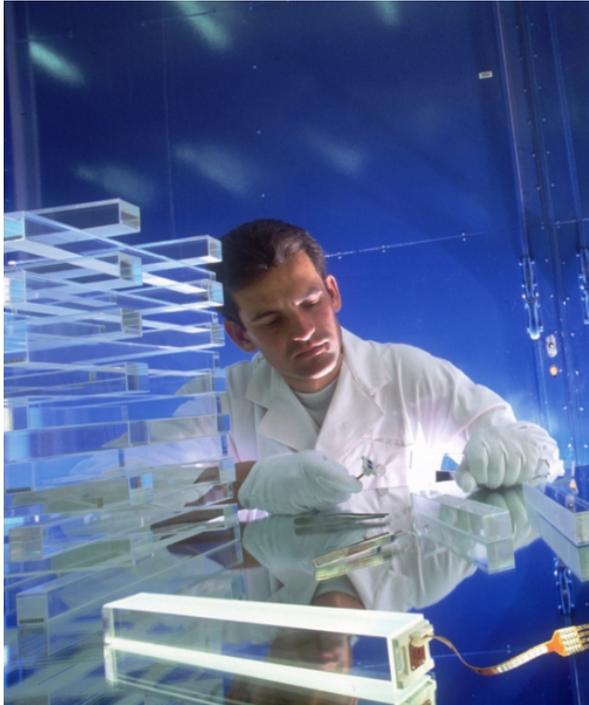
Ad es. CMS ECAL...

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

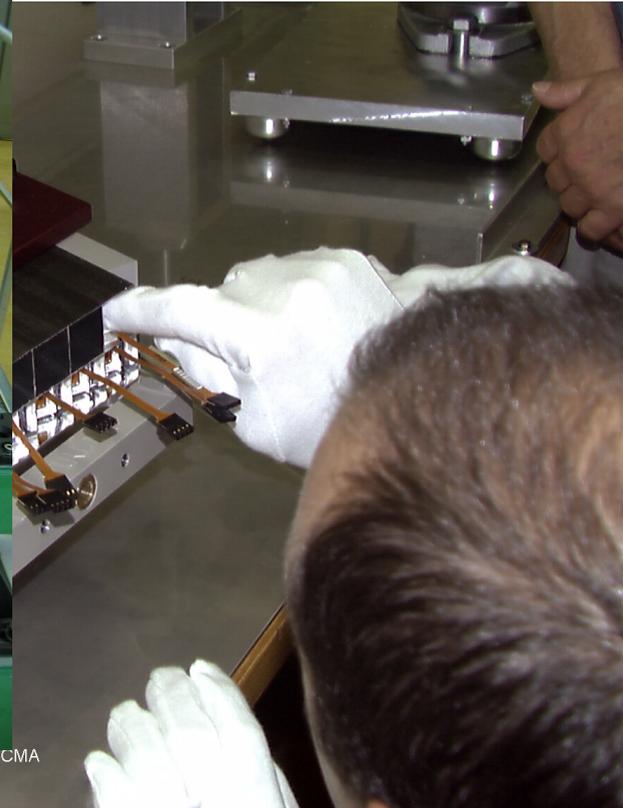
La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale

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

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



CERN Labo 27 EP-CMA
22 June 99-7



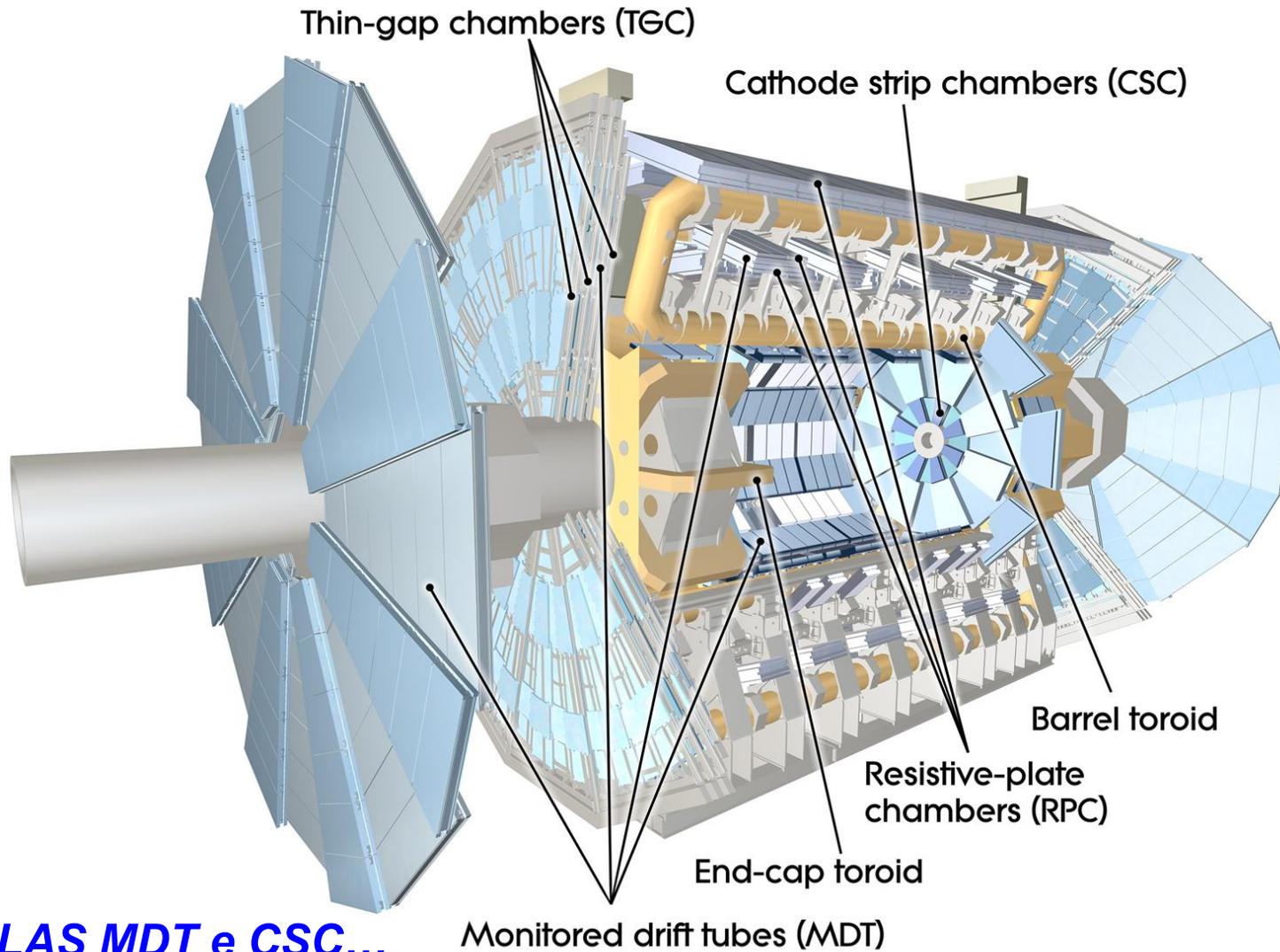
Ad es. CMS ECAL...

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

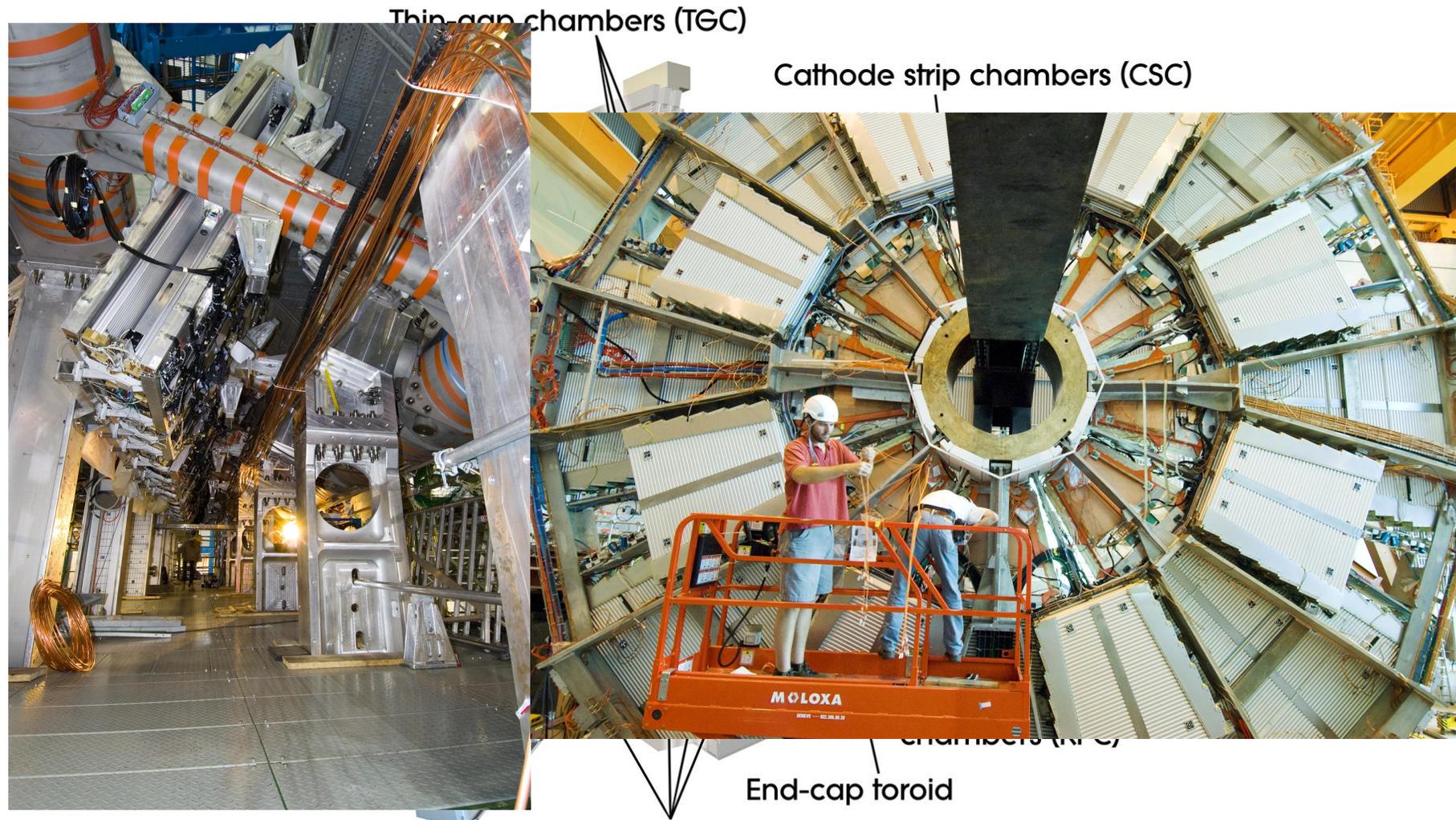
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



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



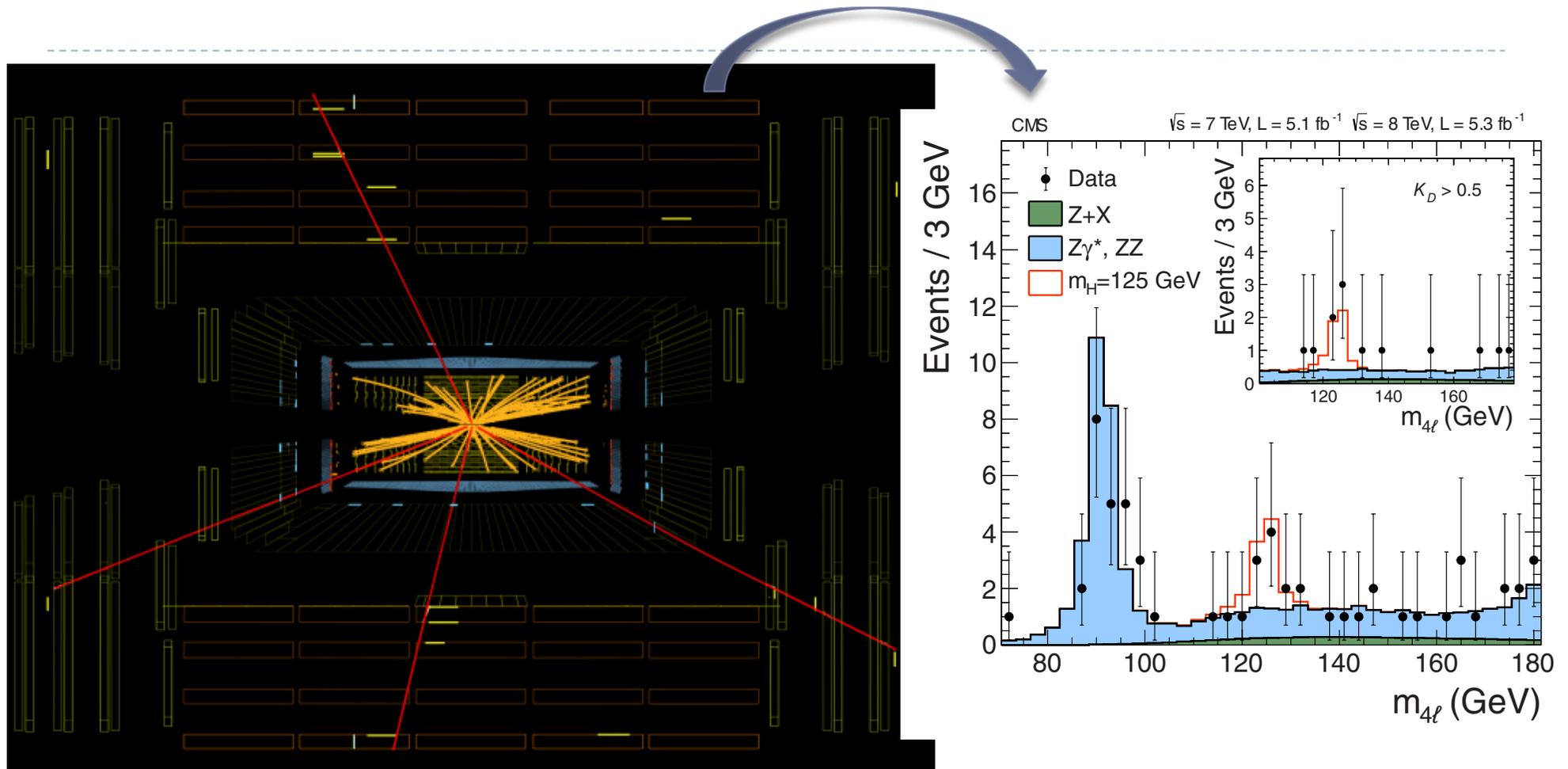
Ad es. ATLAS MDT e CSC...

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 μ)

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

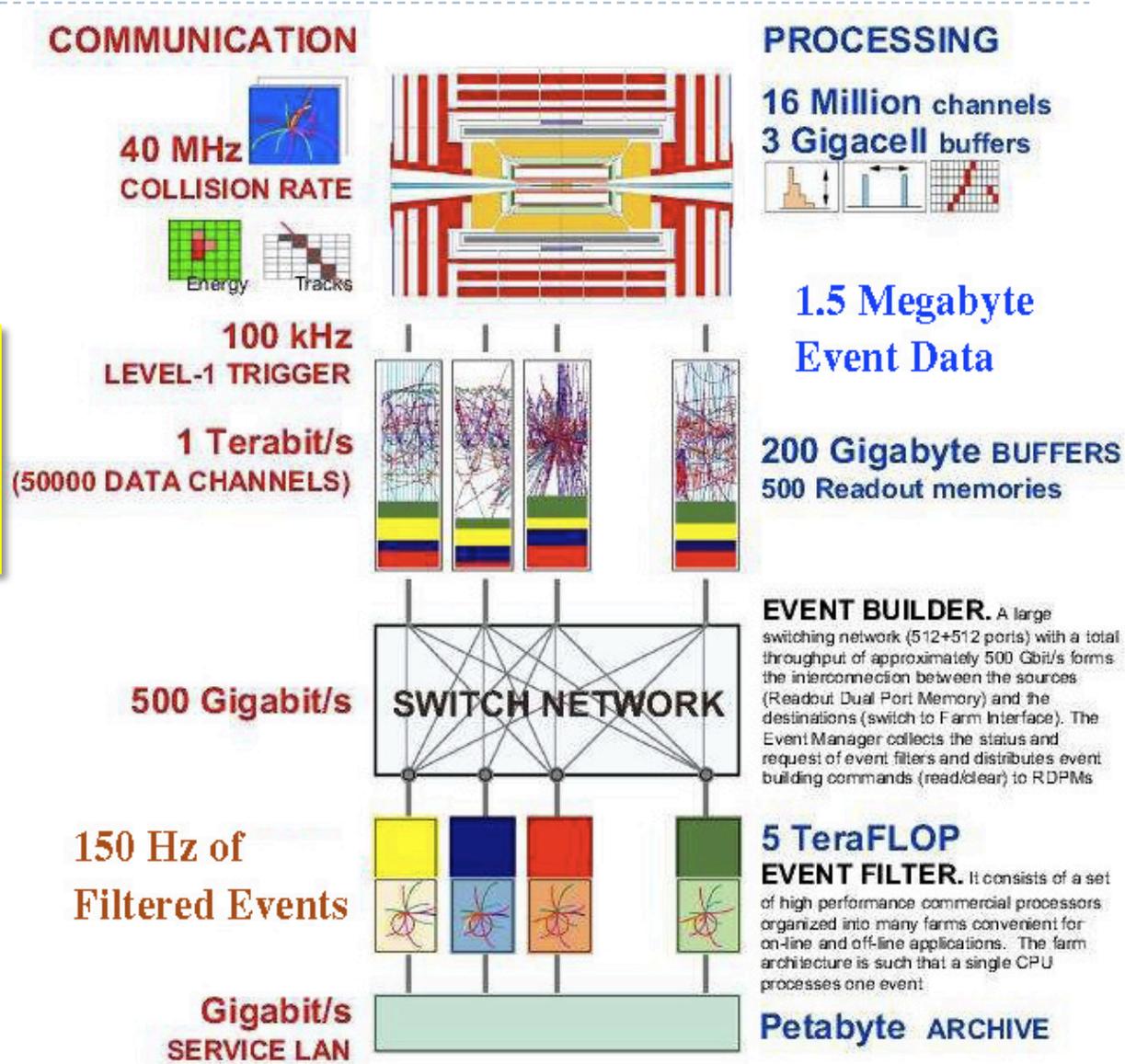
= 6 PetaBytes = 6 milioni di GigaBytes

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

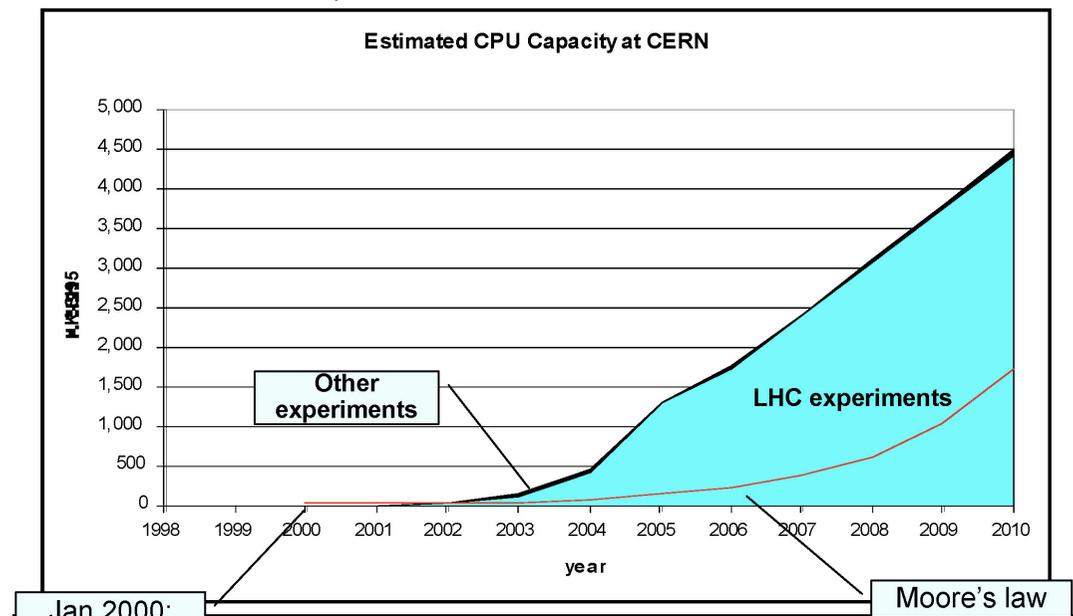
Dal principio alla pratica, la costruzione di un evento

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

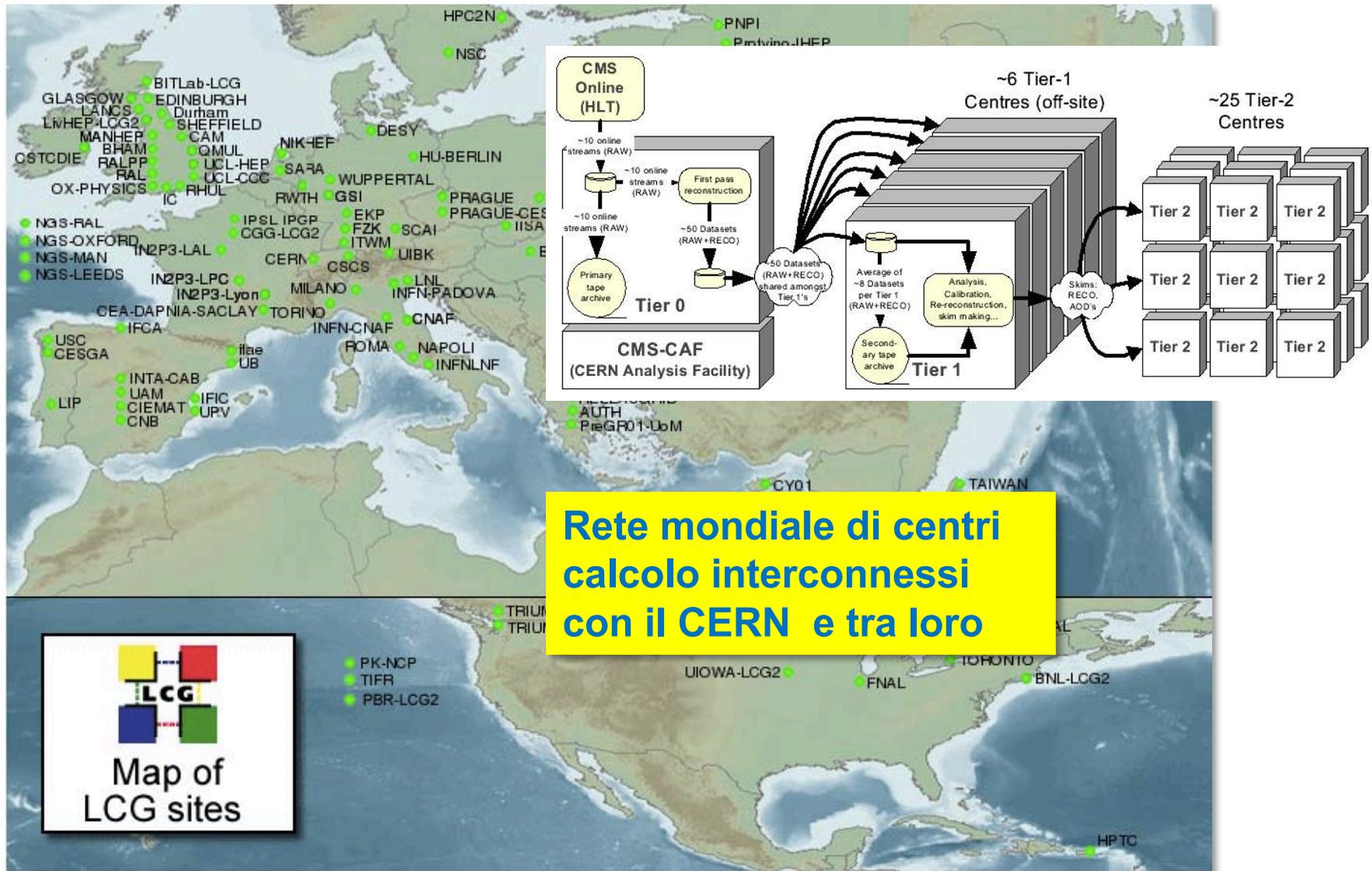


Non basta avere un buon rivelatore...

- ▶ 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

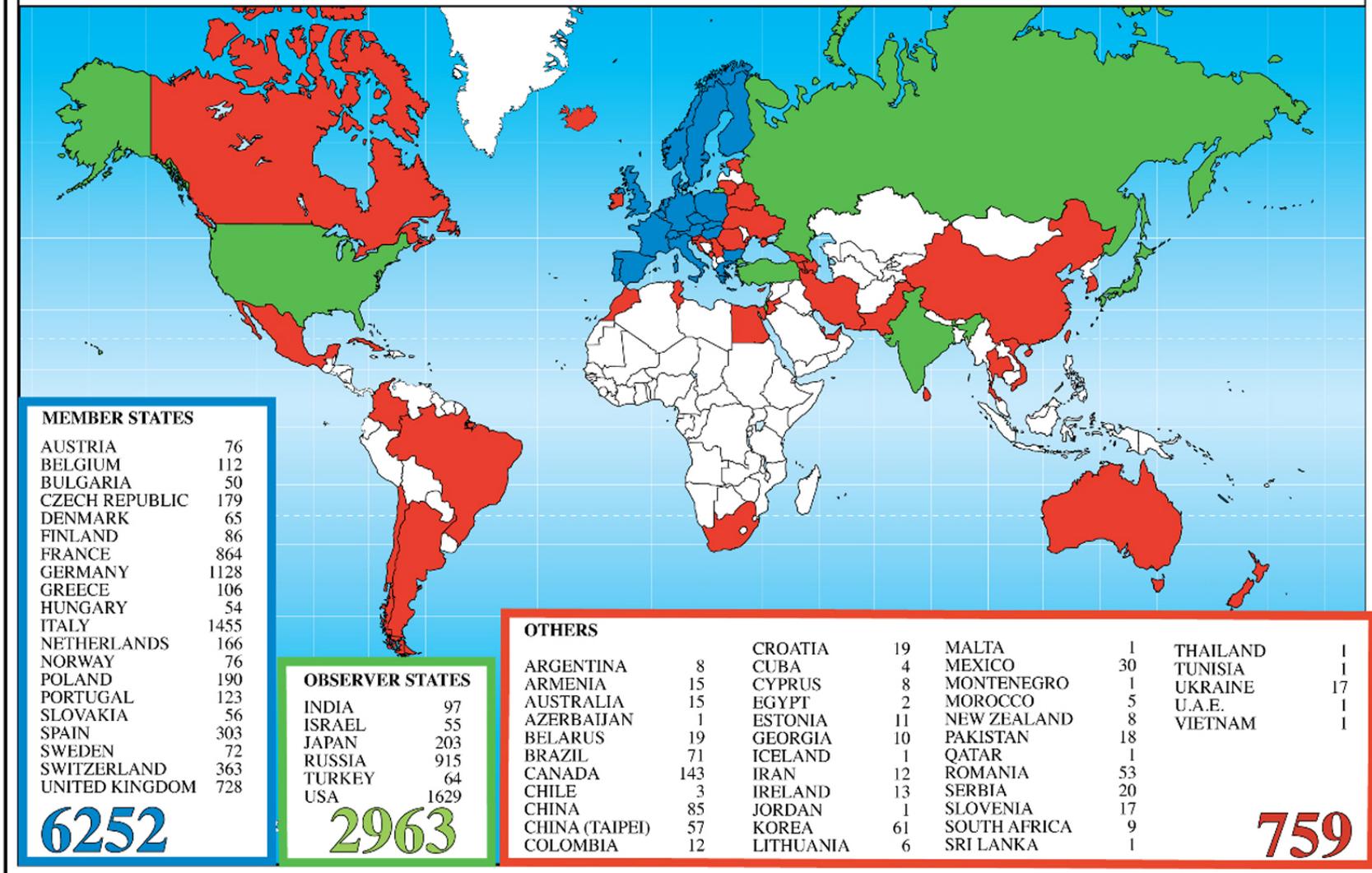


... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier



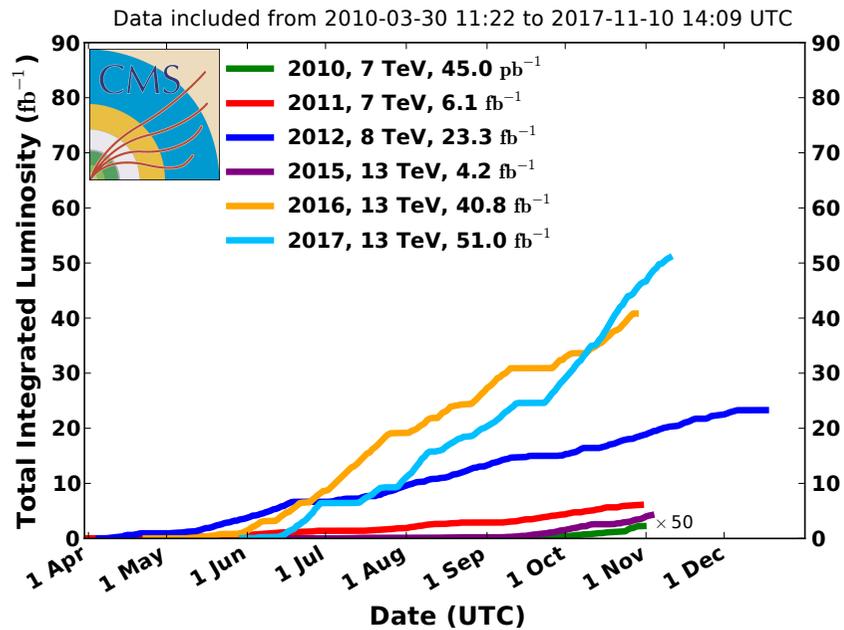
LHC@CERN: Collaborazioni internazionali

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

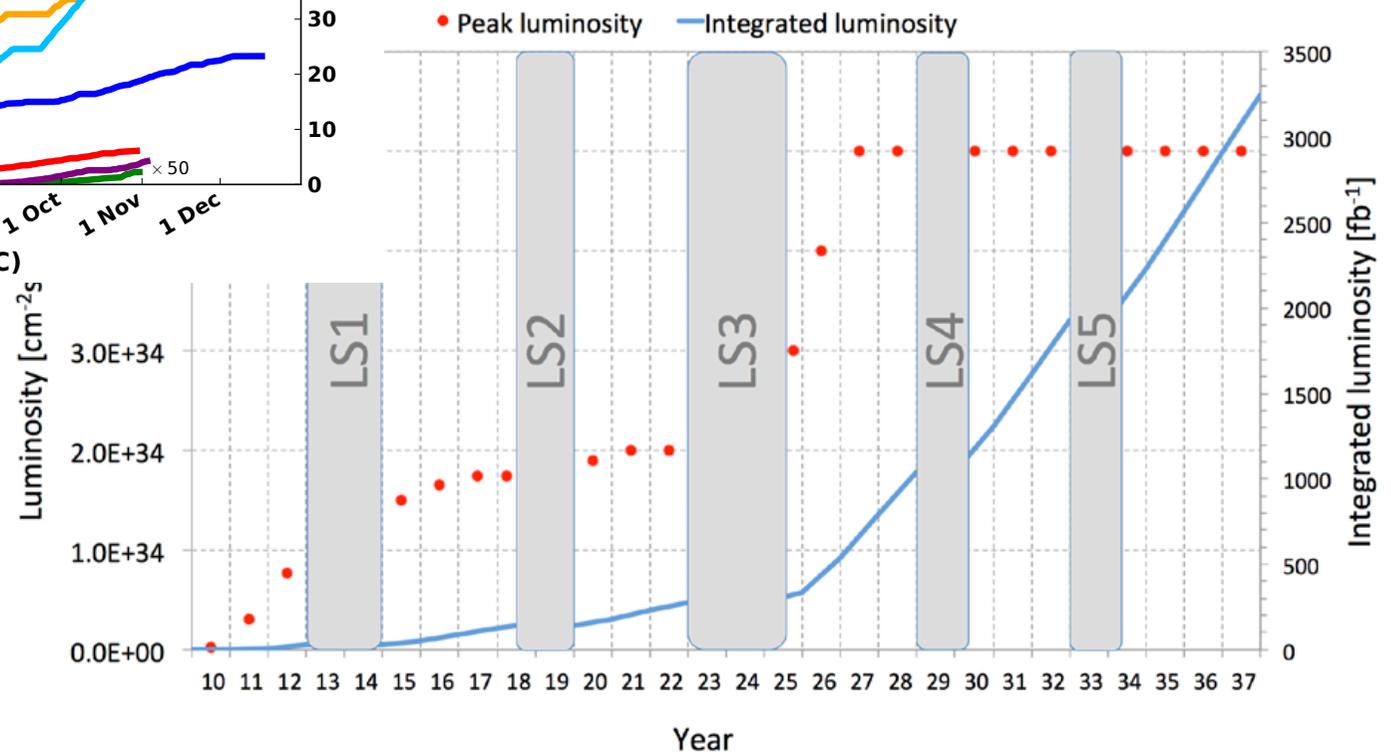


Presente e futuro: High Luminosity LHC

CMS Integrated Luminosity, pp



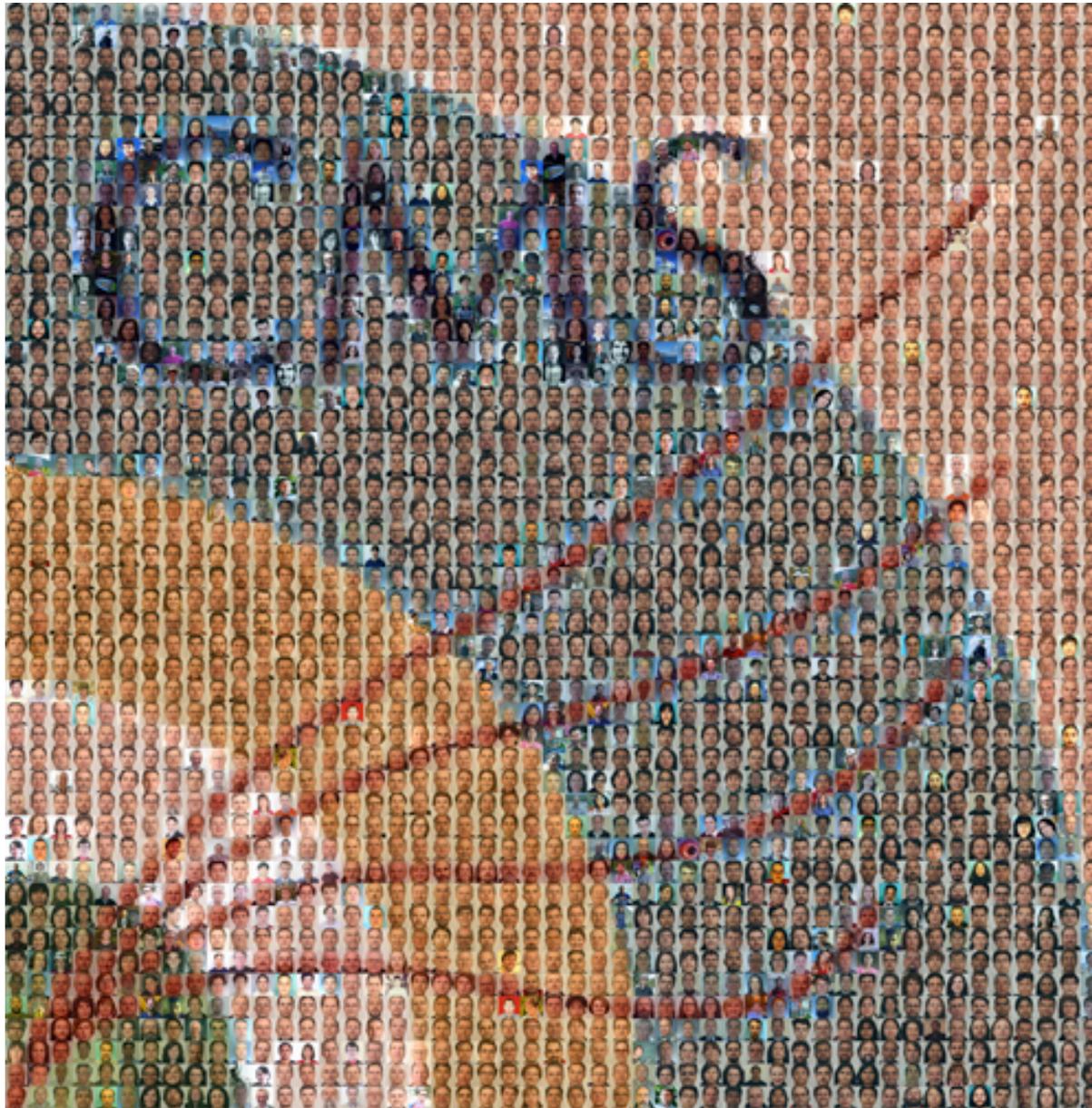
- LHC: obiettivo raccogliere 300 fb⁻¹
- HL-LHC: decuplicare la statistica
 - misure di precisione sul bosone di Higgs



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 fb^{-1} (7 TeV) + 20 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?

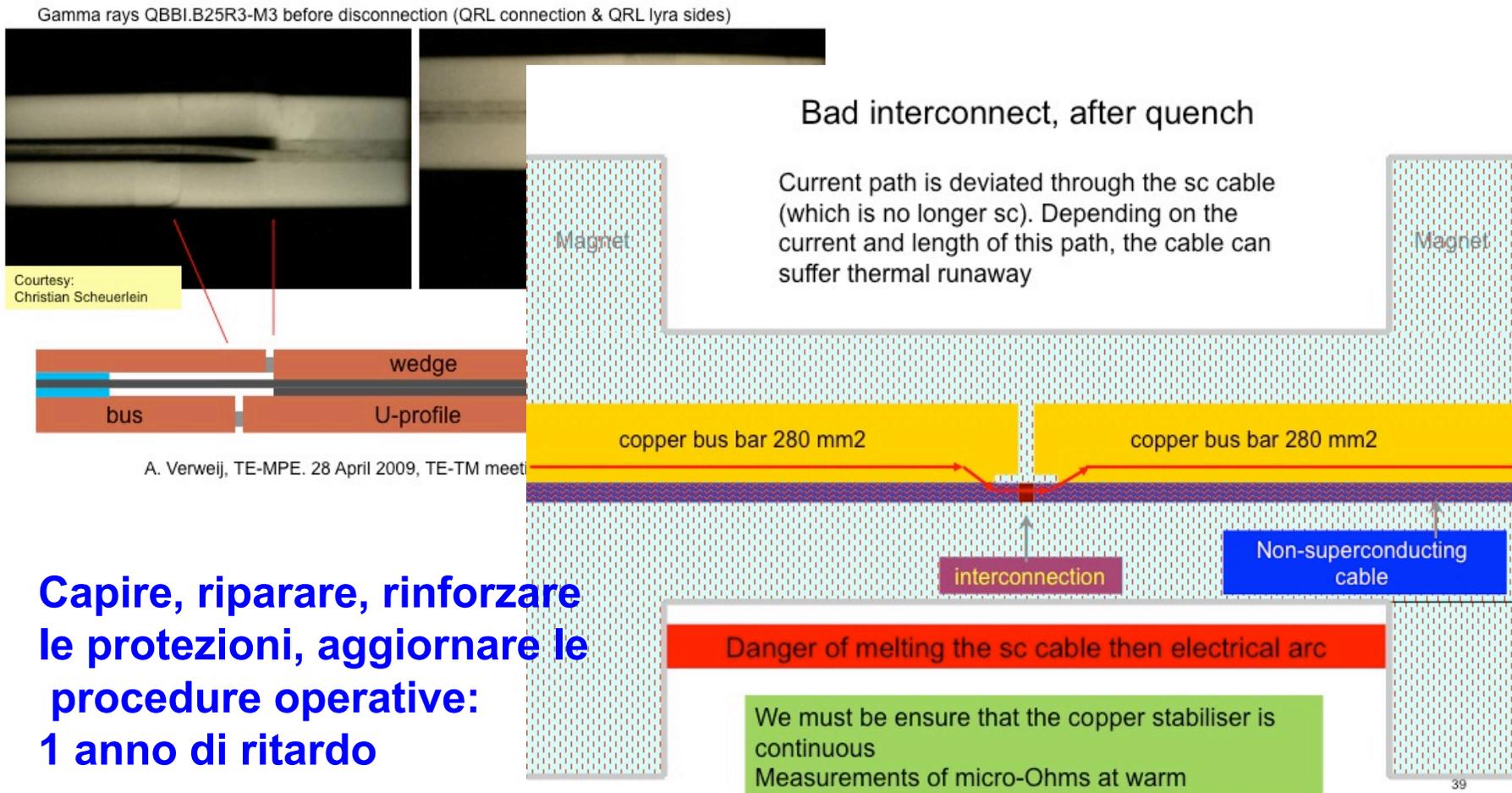


BACKUP

Cosa ti può combinare una saldatura fatta male...

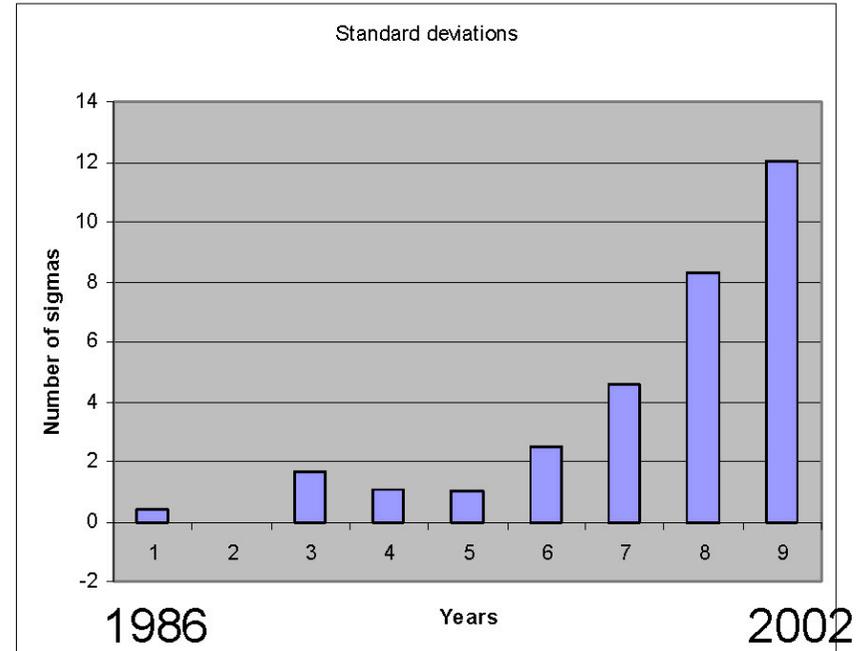
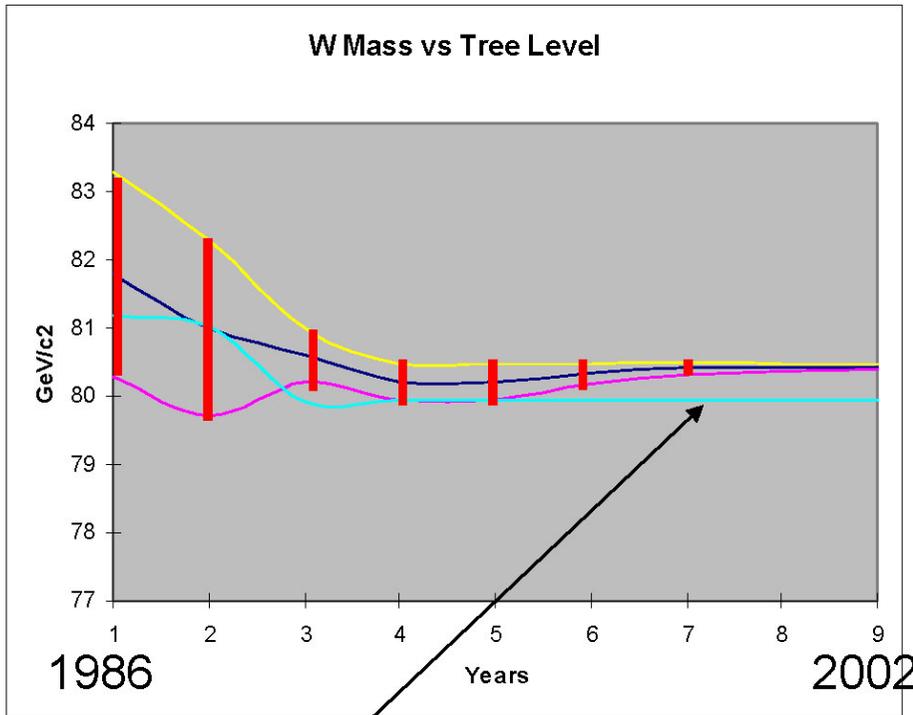
Bad surprise after gamma-ray imaging of the joints: Void is present in most of bus extremities because SnAg flows out during soldering of the joint

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

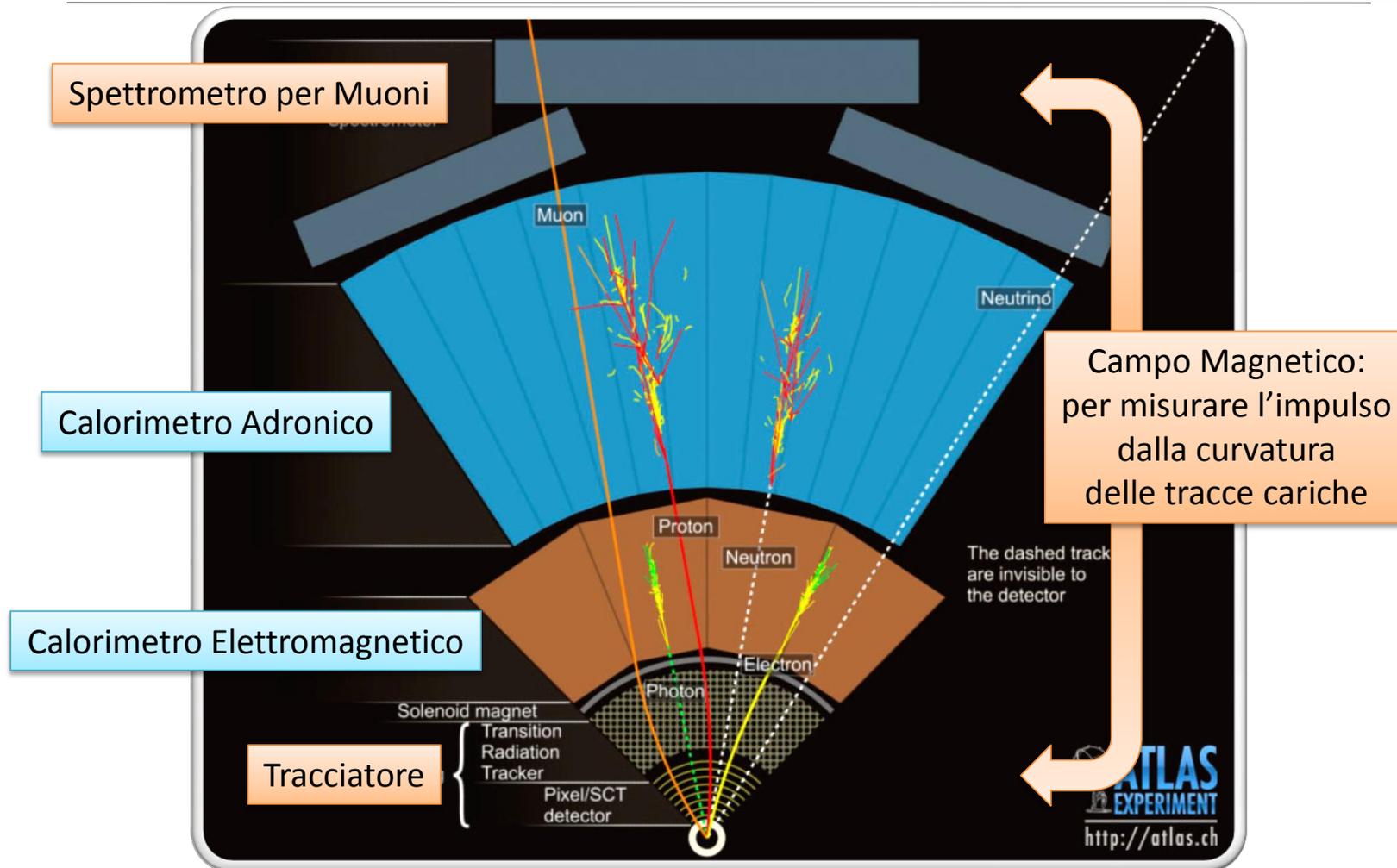
E.W. Tree level SM relation
(with running α QED)

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

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

ATLAS: tecniche differenti, struttura analoga

Un "microscopio" a strati specializzati

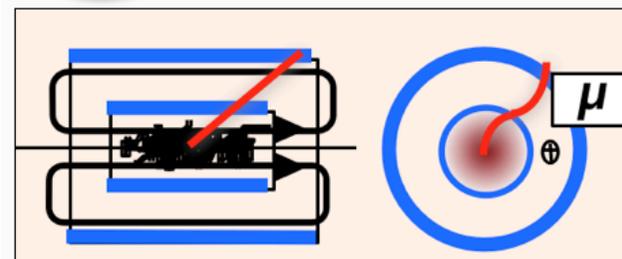
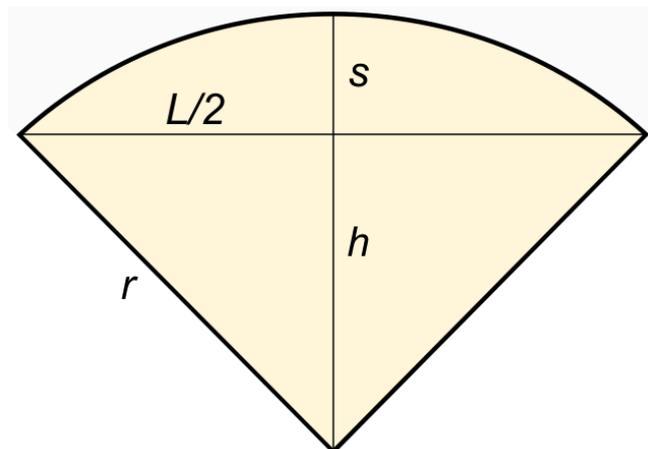


6

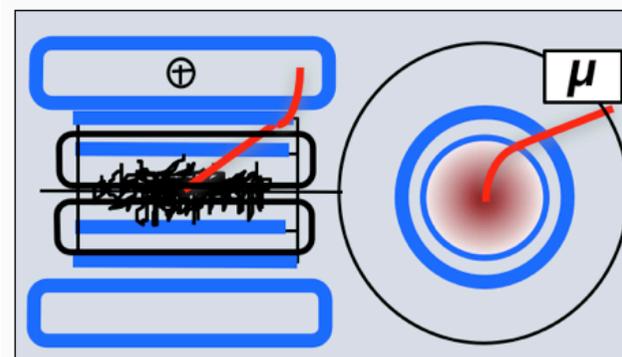
La differenza chiave: il campo magnetico

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

Da massimizzare per ottimizzare la risoluzione



CMS



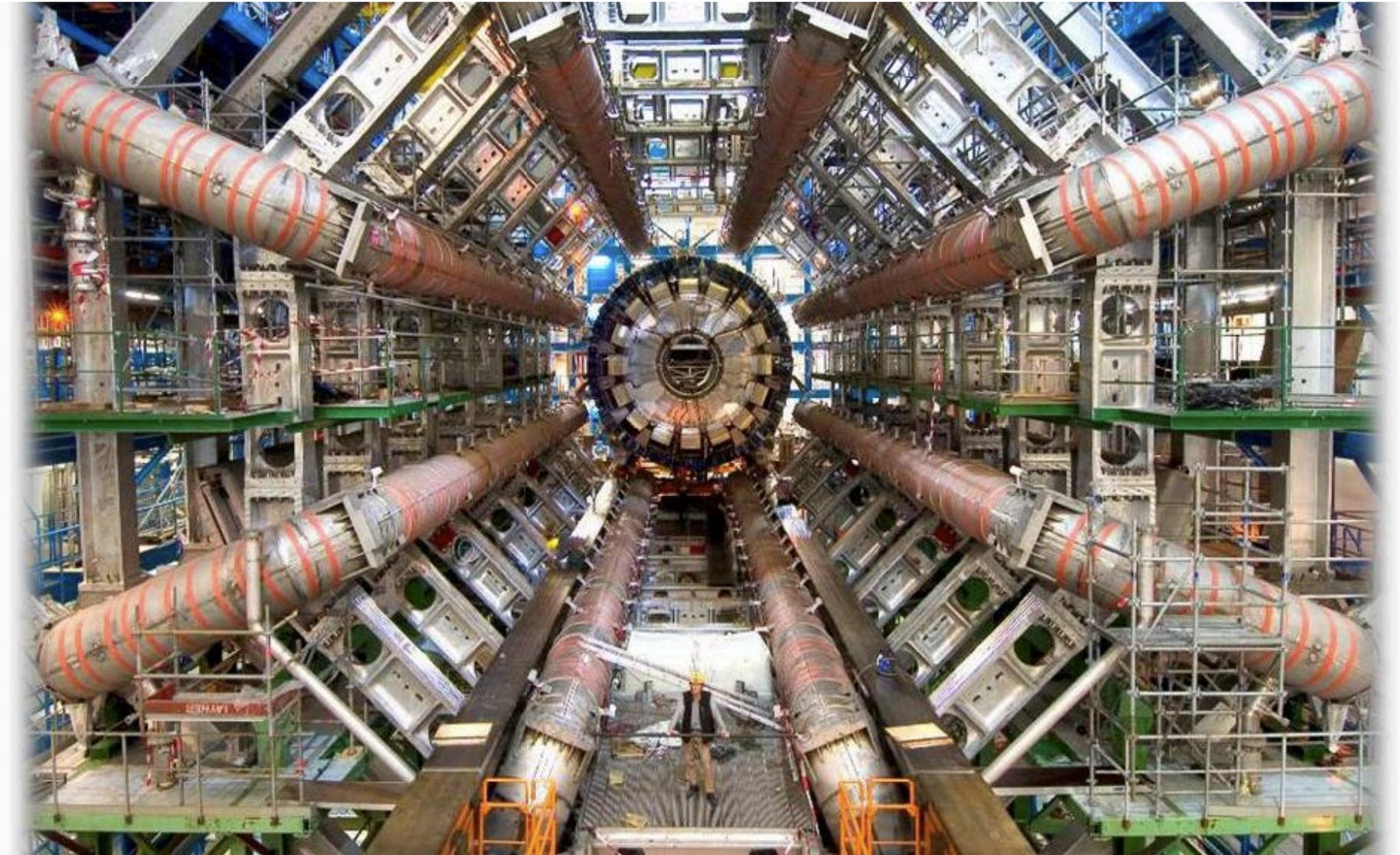
ATLAS

CMS: solenoide con giogo di ritorno strumentato (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 $L^2 B$ anche
 in avanti, ma dimensioni giganti $\sim 44\text{ m}$, campo magnetico molto complesso,

► Beneficio limitato per il tracciatore

Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Varie strategie possibili per l'acquisizione dei dati

