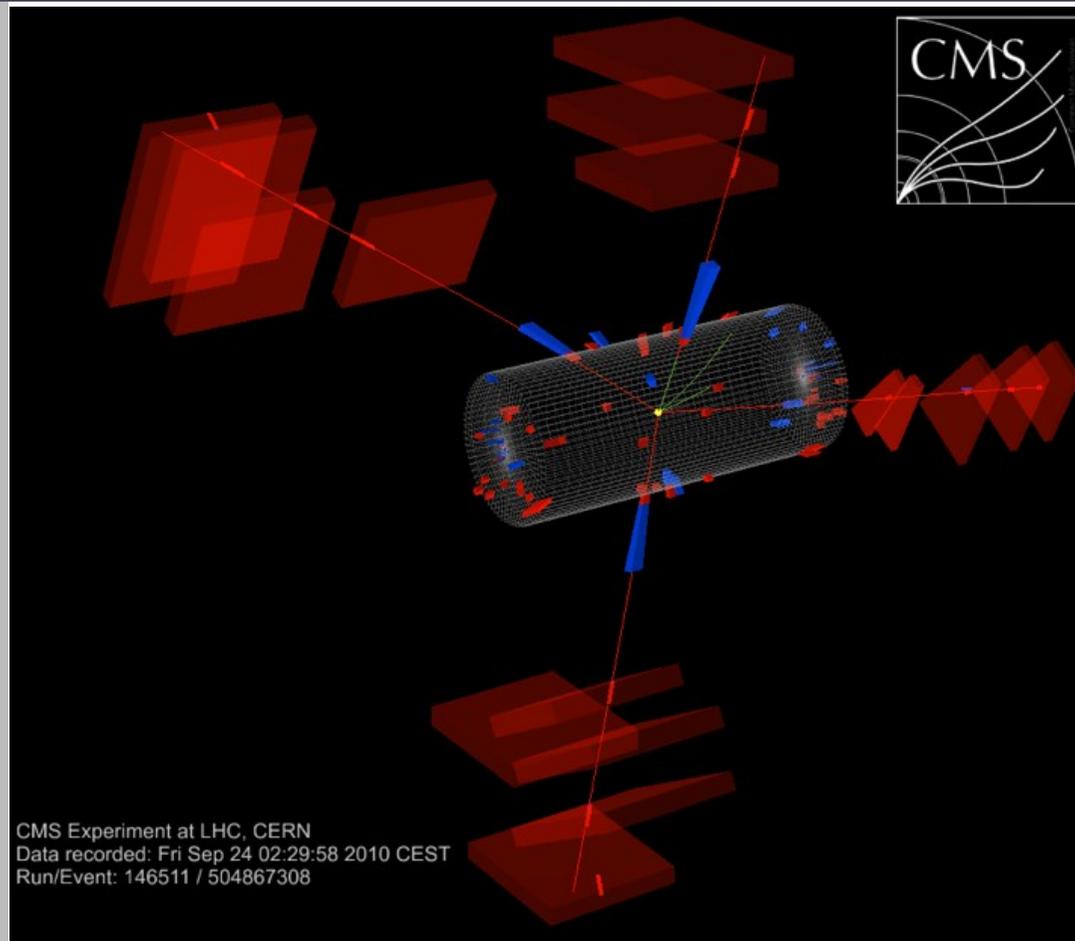
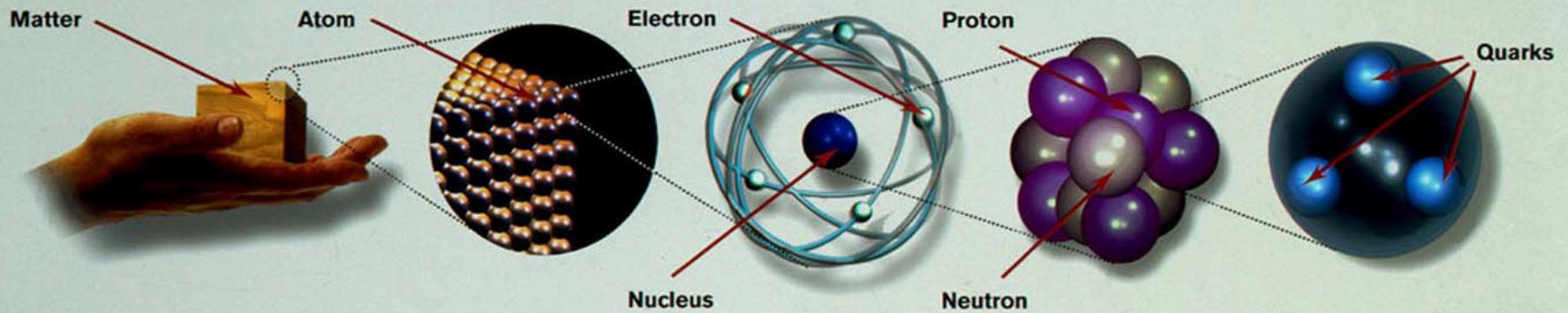


La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

Fabio Cossutti – INFN Trieste

Masterclass 2023





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

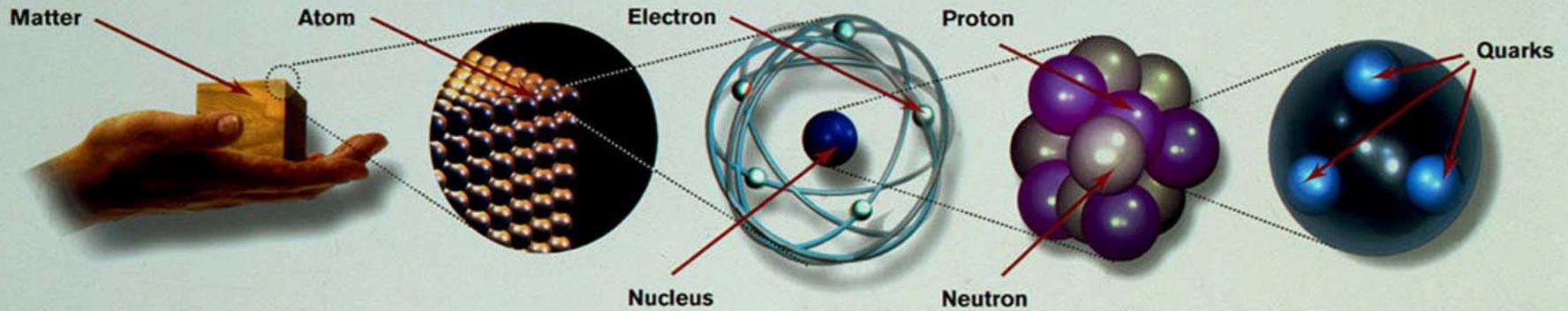


Felt by: all particles with mass

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

GRAPHICS: PETER GROWTHIER





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

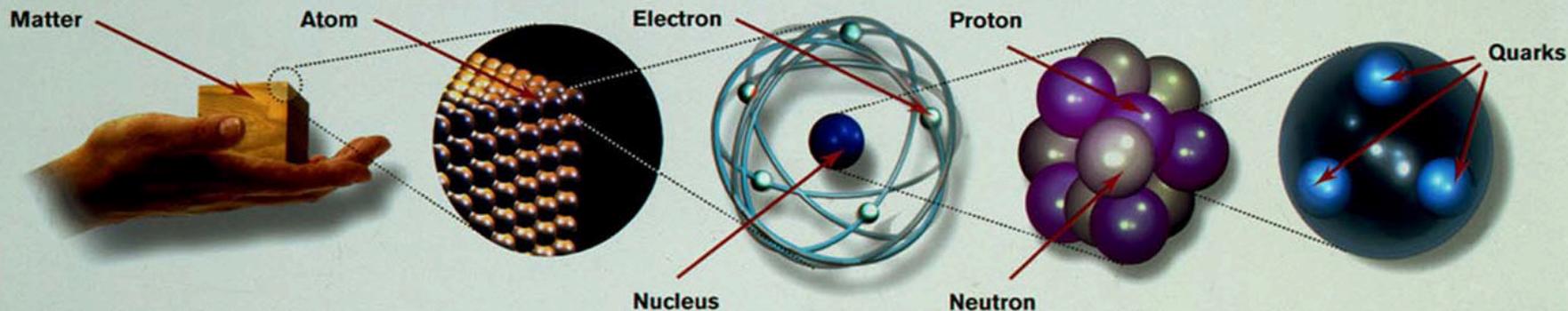
LEPTONS		QUARKS	
FIRST FAMILY	Electron Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	Electron neutrino No electric charge	Up Has an electric charge of $+\frac{2}{3}$; protons contain two, neutrons contain one
SECOND FAMILY	Muon A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	Muon neutrino Created along with muons when some particles decay	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 (con le relative antiparticelle)

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 GROWTHIER



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 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

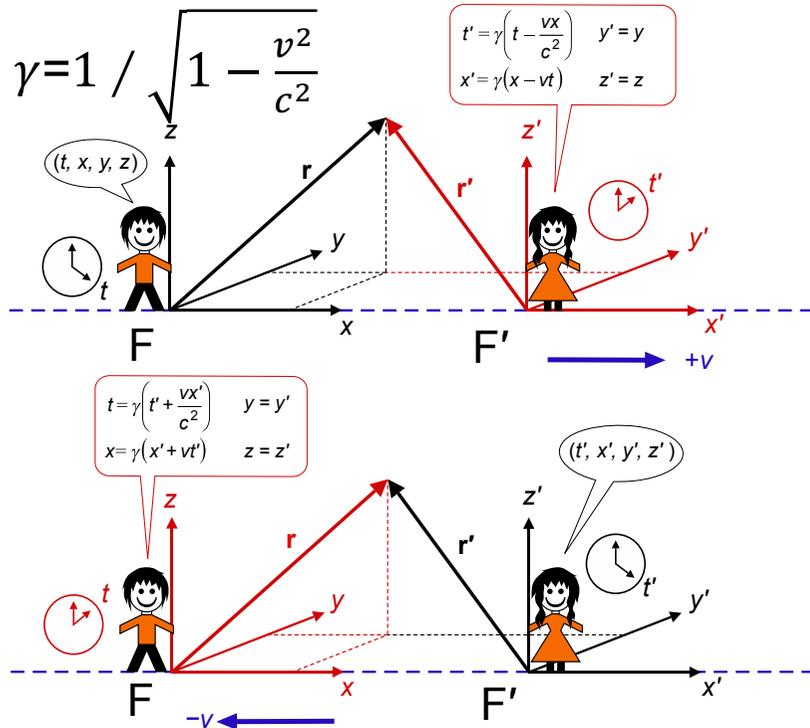
Gluons Carriers of the strong force between quarks Felt by: quarks The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force	Photons Particles that make up light; they carry the electromagnetic force Felt by: quarks and charged leptons Electricity, magnetism and chemistry are all the 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 (con le relative antiparticelle)

Mediatori delle interazioni tra i costituenti della materia

Fisica delle particelle elementari

Relatività ristretta



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

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 λ_{if}
 Matrix element for the interaction $|M_{if}|^2$
 Density of final states ρ_f

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

Wavefunction for final state Ψ_f^*
 Wavefunction for initial state Ψ_i
 Operator for the physical interaction which couples the initial and final states of the system. V

= **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...

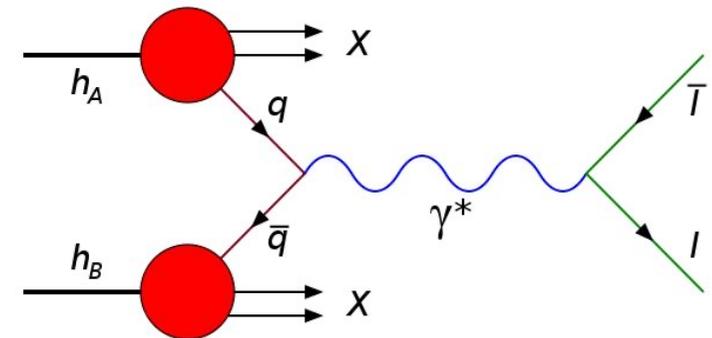
$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}Z_{\mu\nu}Z^{\mu\nu} - \frac{1}{2}(F_W^\dagger)_{\mu\nu}(F_W)^{\mu\nu} \\
 & + \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial^\mu H + \frac{1}{2}M_Z^2 Z_\mu Z^\mu + M_W^2(W_-)_\mu(W_+)^{\mu} - \frac{1}{2}m_H^2 H^2 \\
 & + \bar{e}(i\not{\partial}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

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

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

- ▶ 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



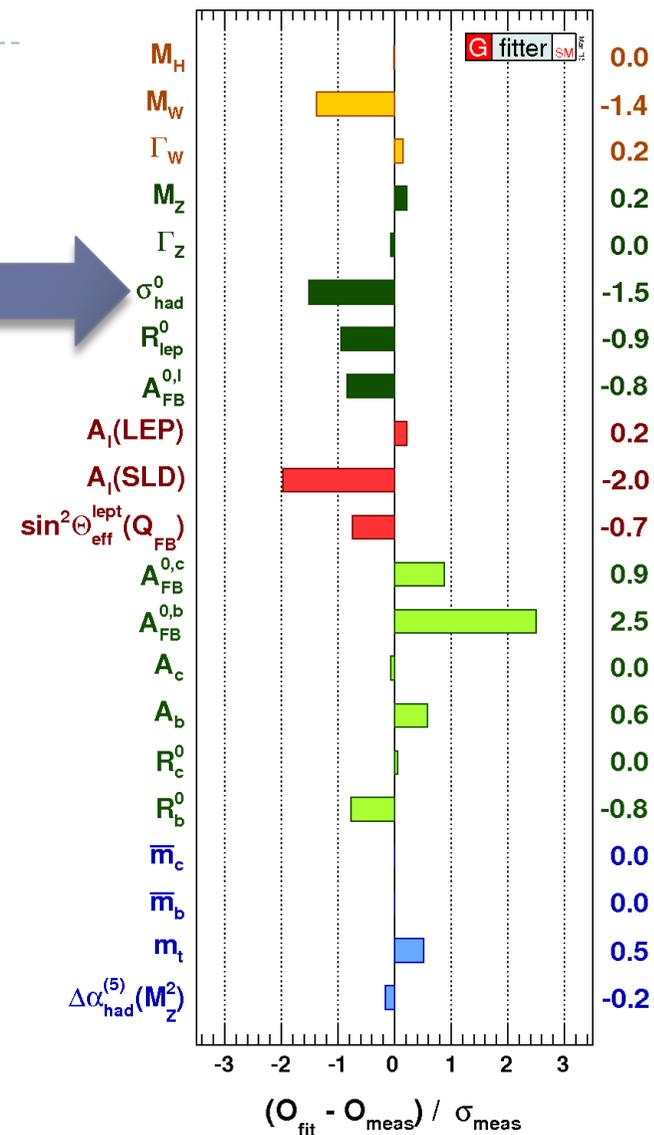
- ▶ Potete calcolare le caratteristiche di un urto tra particelle

- ▶ 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

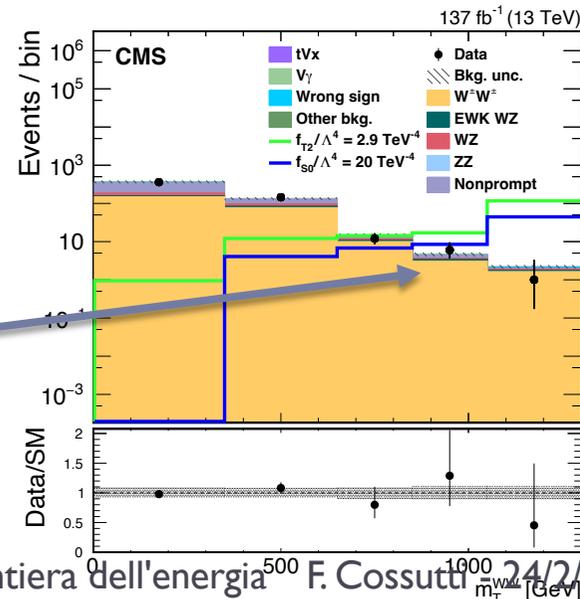
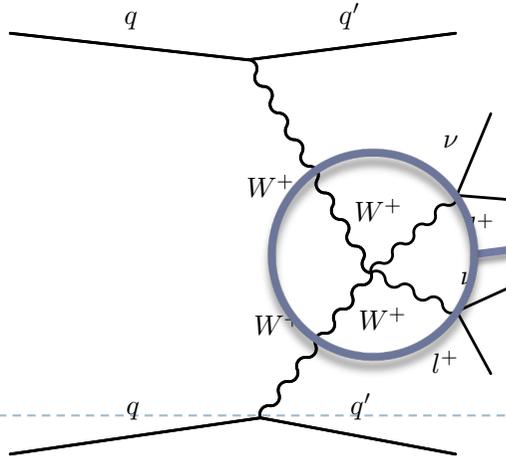
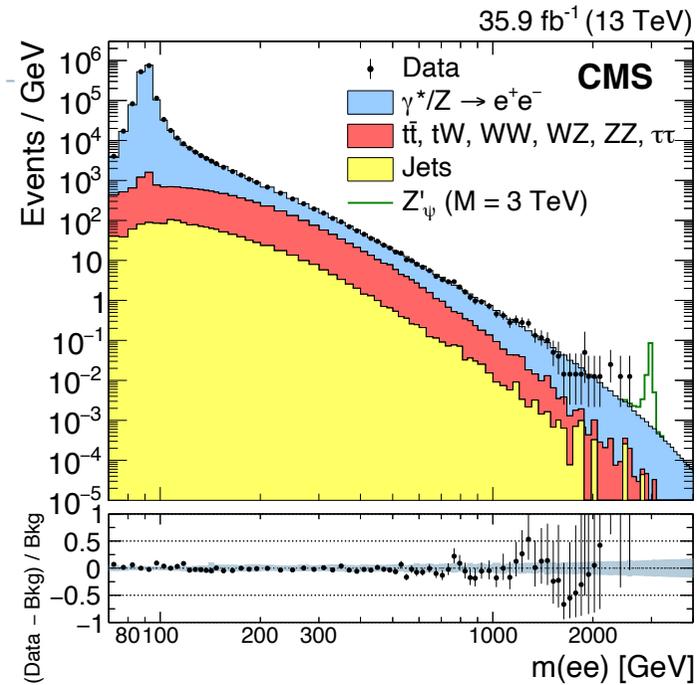


▶ Approcci complementari

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

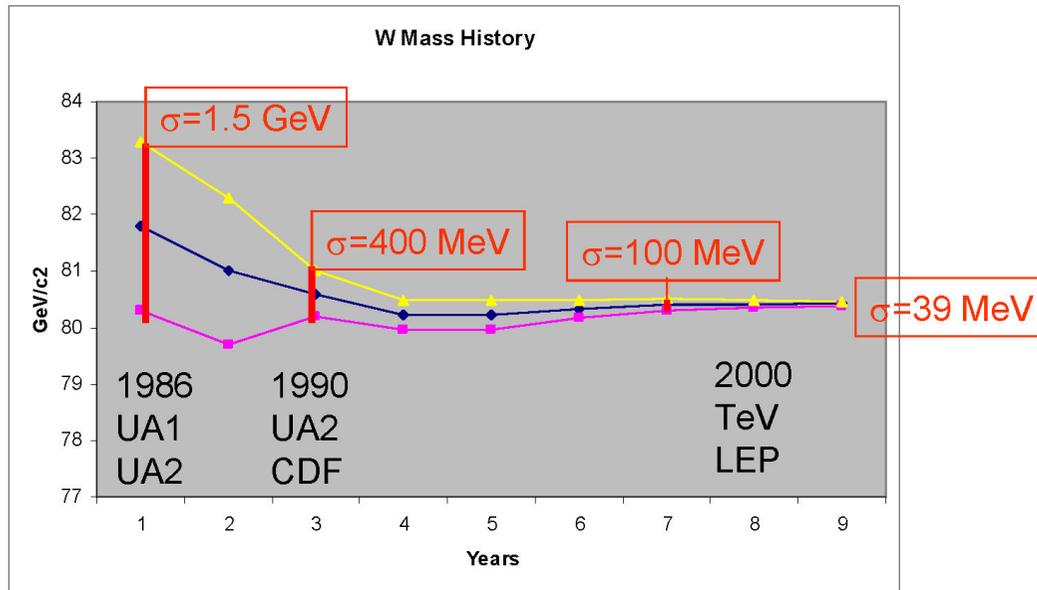
Due facce della stessa medaglia

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

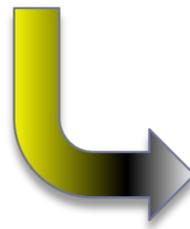


Se nuove
particelle
scambiate nel
vertice tra 4 W

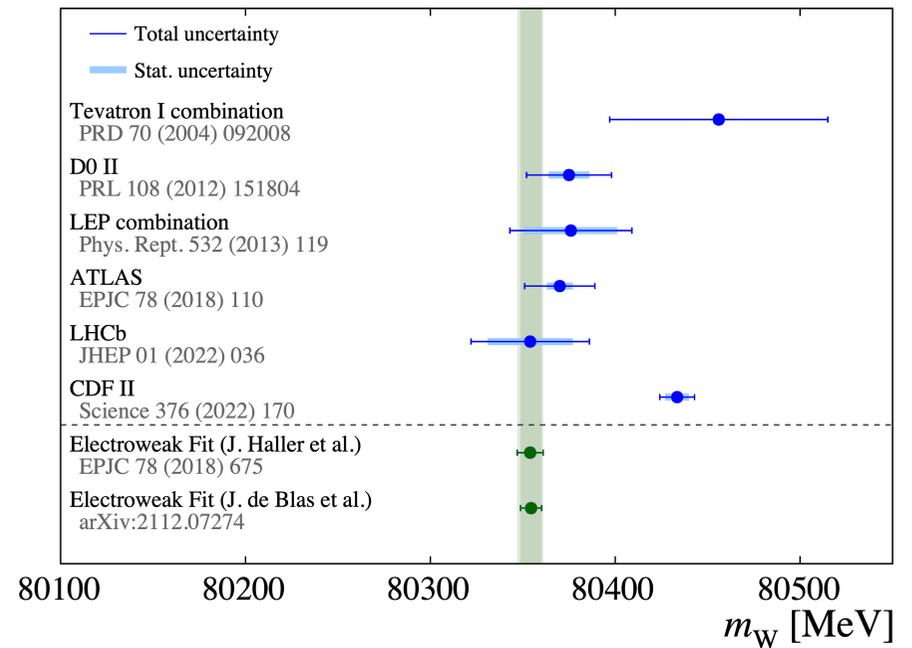
I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



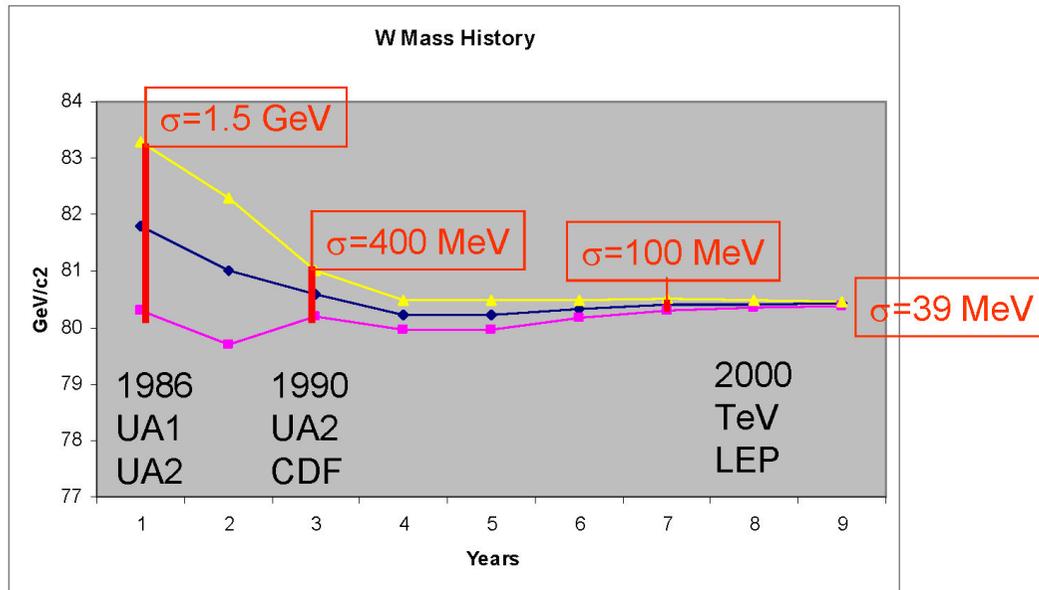
Only Published Results



2022



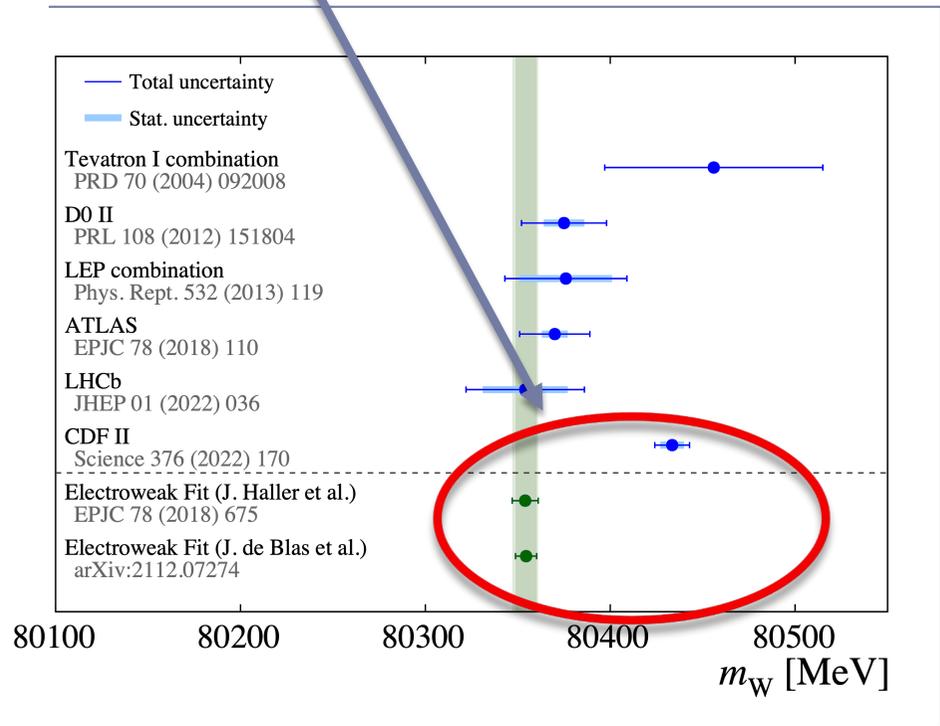
I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



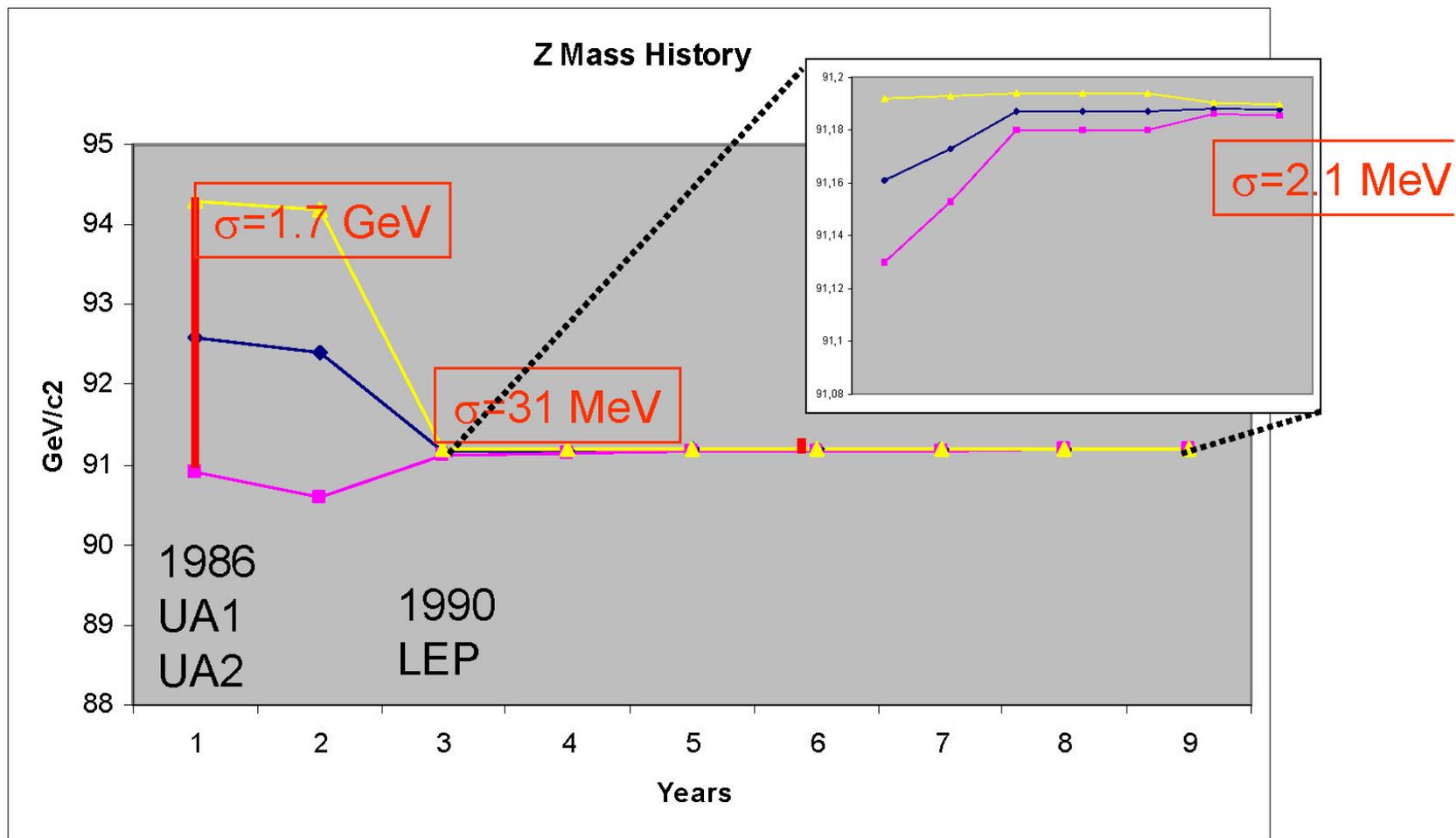
Only Published Results

La discrepanza tra la misura più precisa e i risultati dei fit è un indizio indiretto di fisica oltre il Modello Standard?

2022

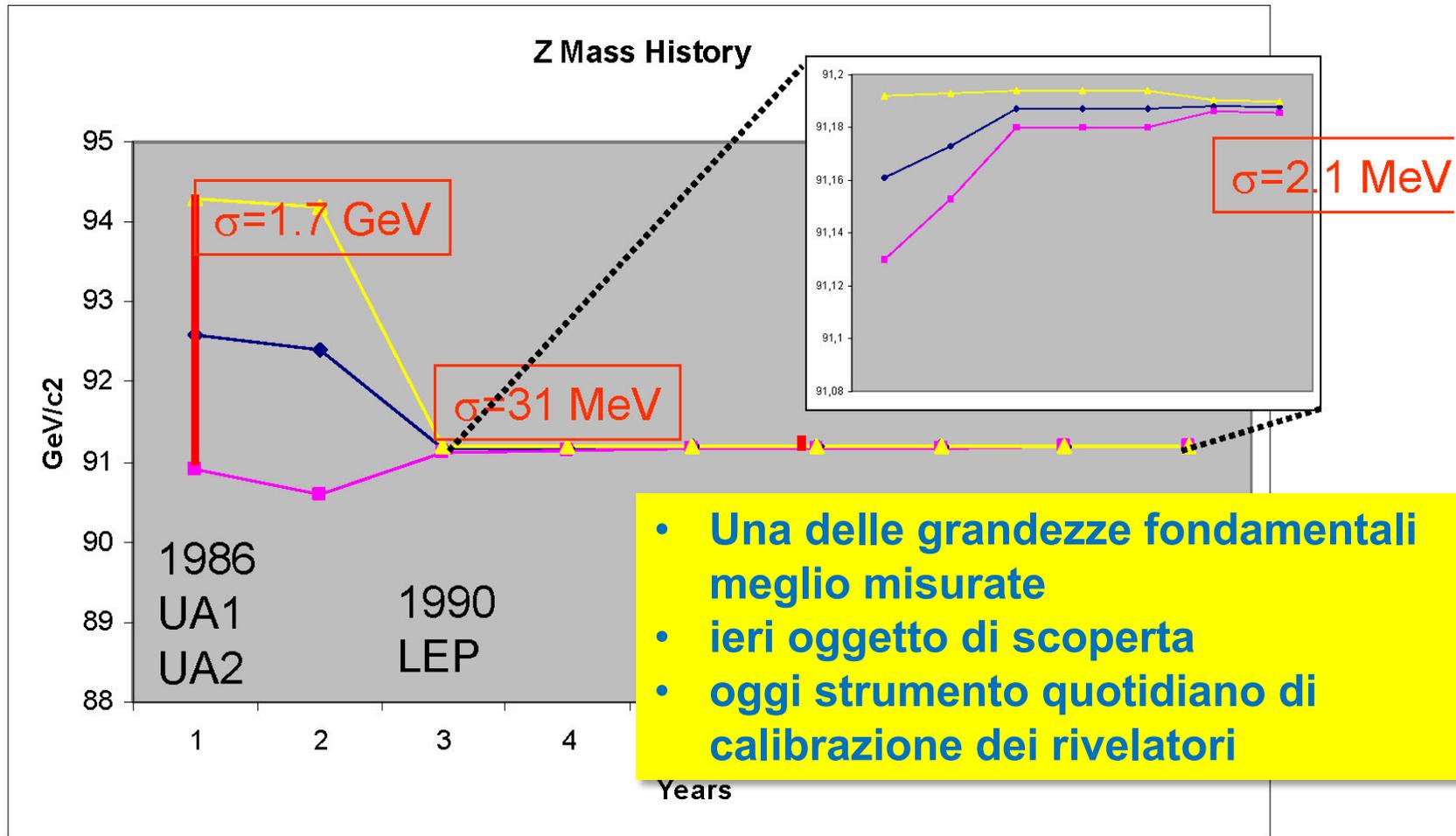


I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi



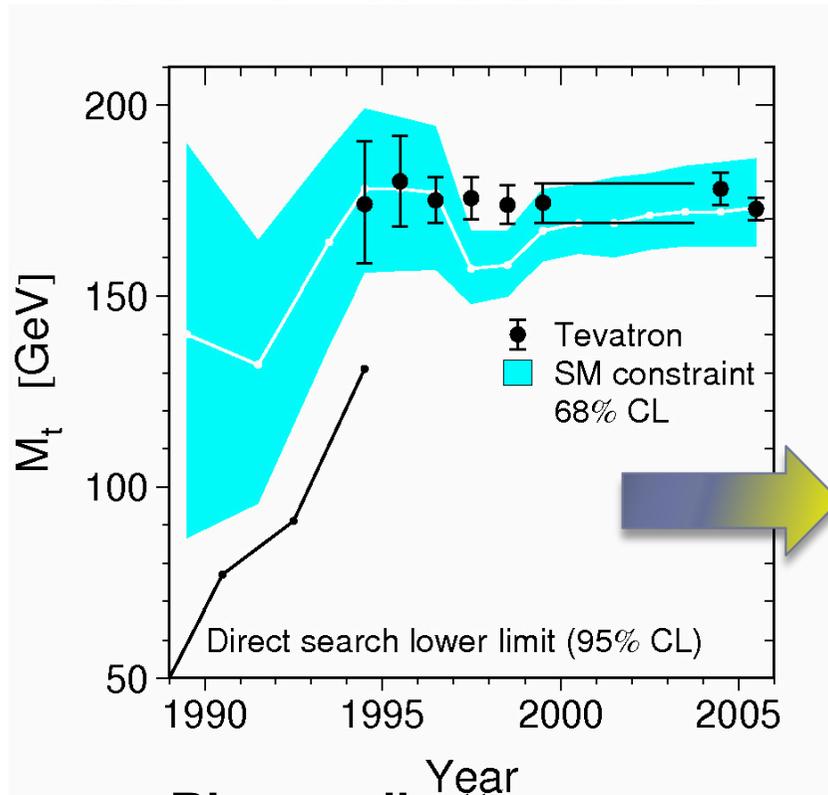
Only Published Results

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

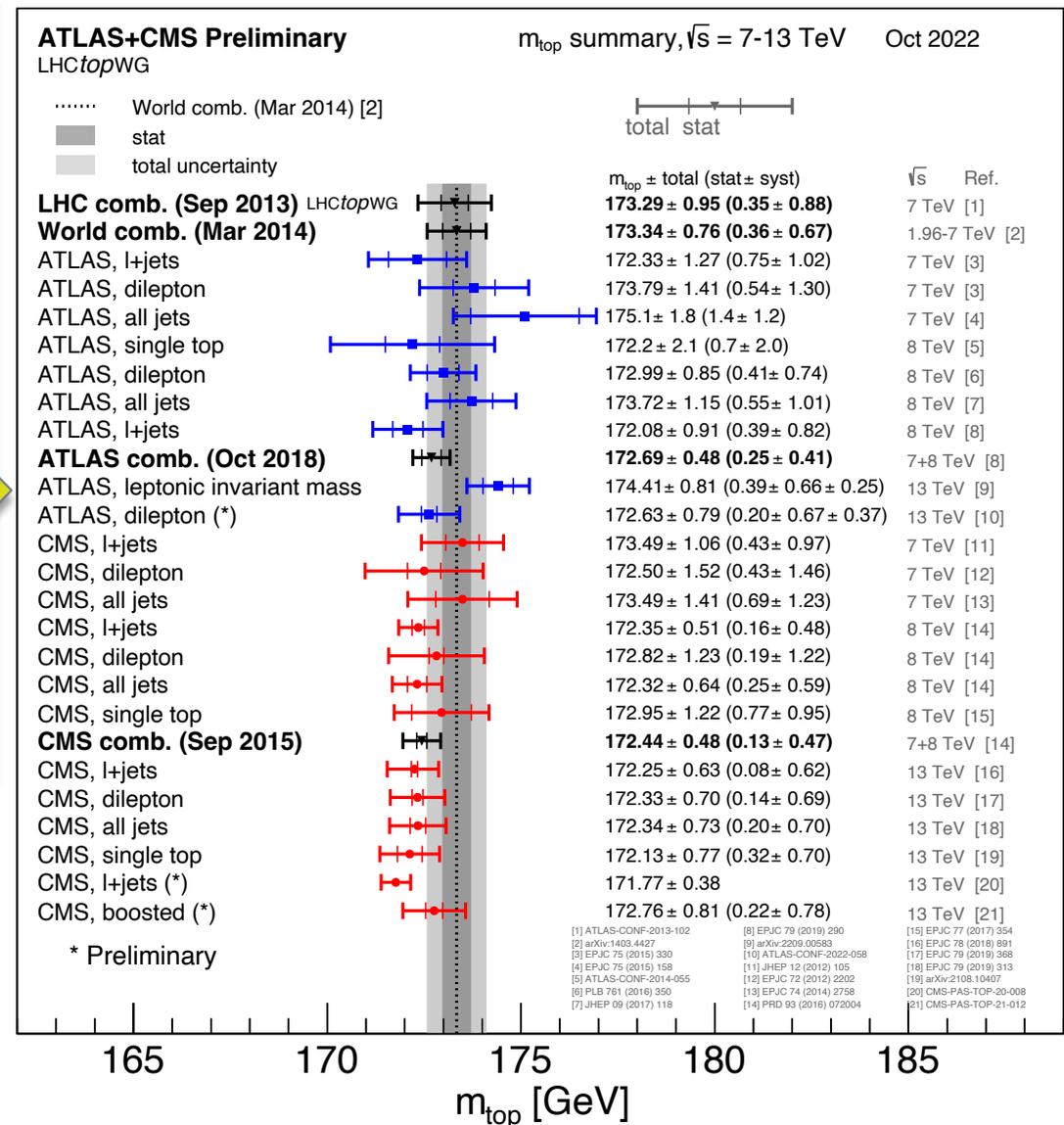


Only Published Results

30 anni di quark top: trovato dove doveva essere

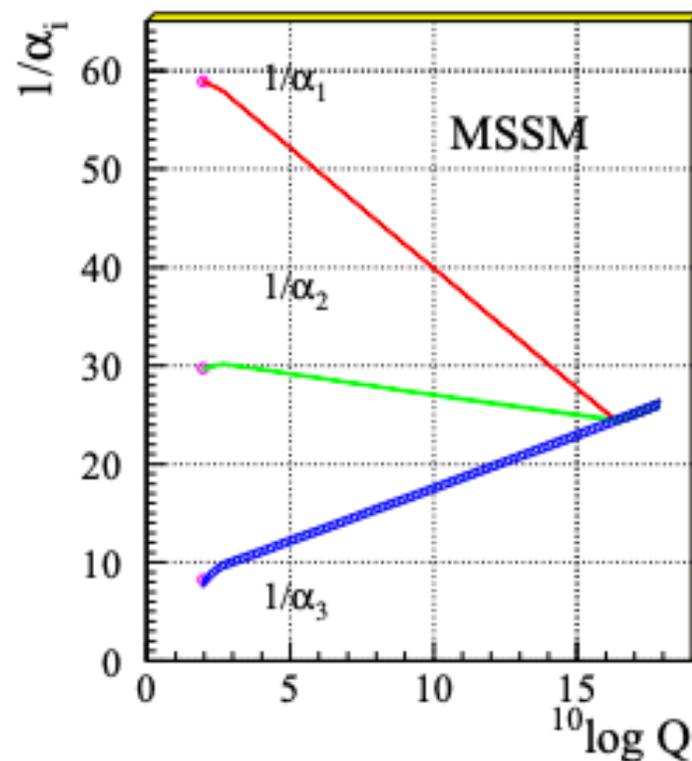
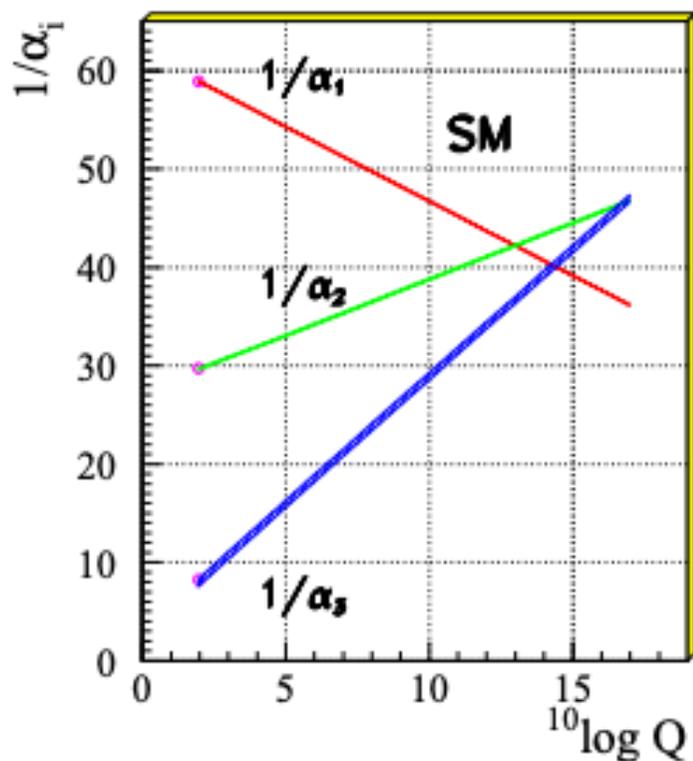


**Ricerca diretta
al Tevatron guidata
dai vincoli dati dal
Modello Standard
Mediante le misure
di LEP**



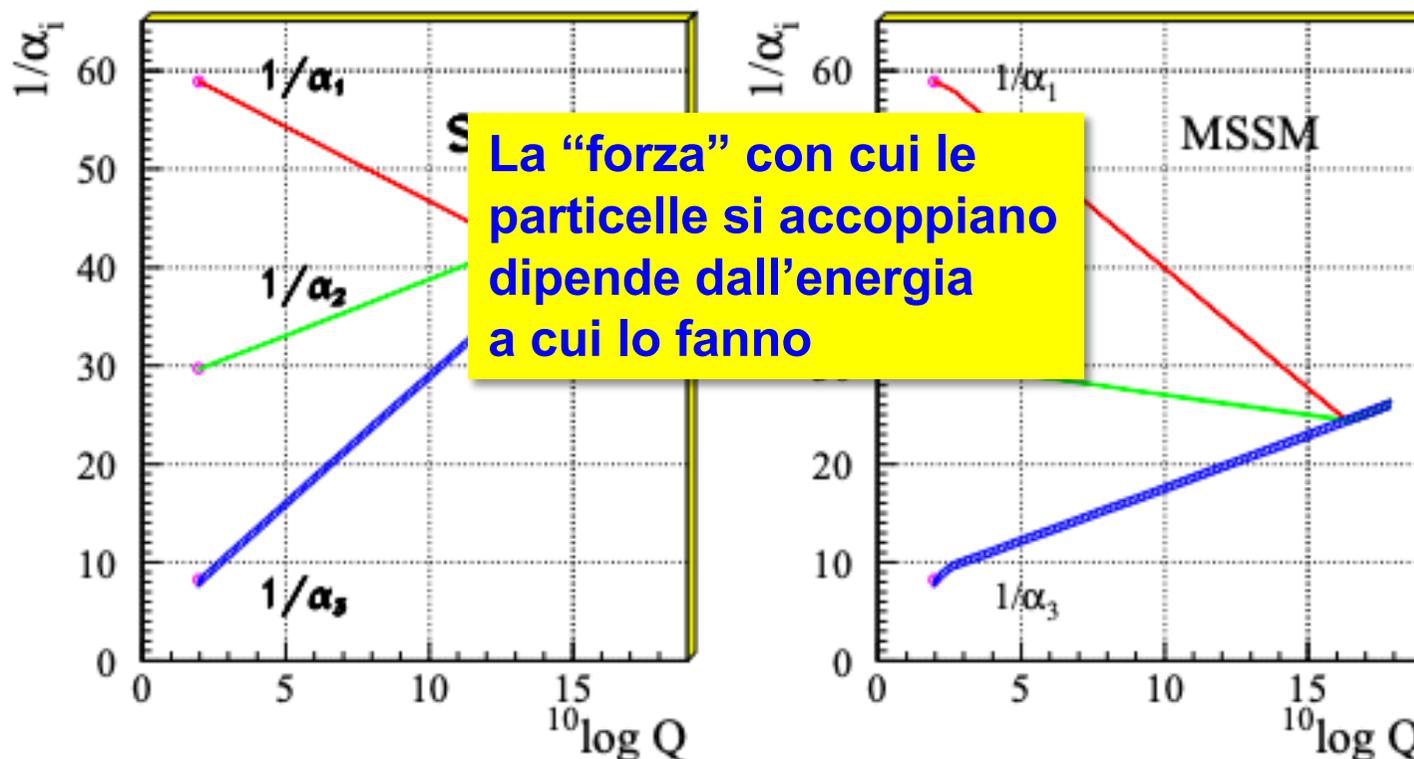
Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

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



Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

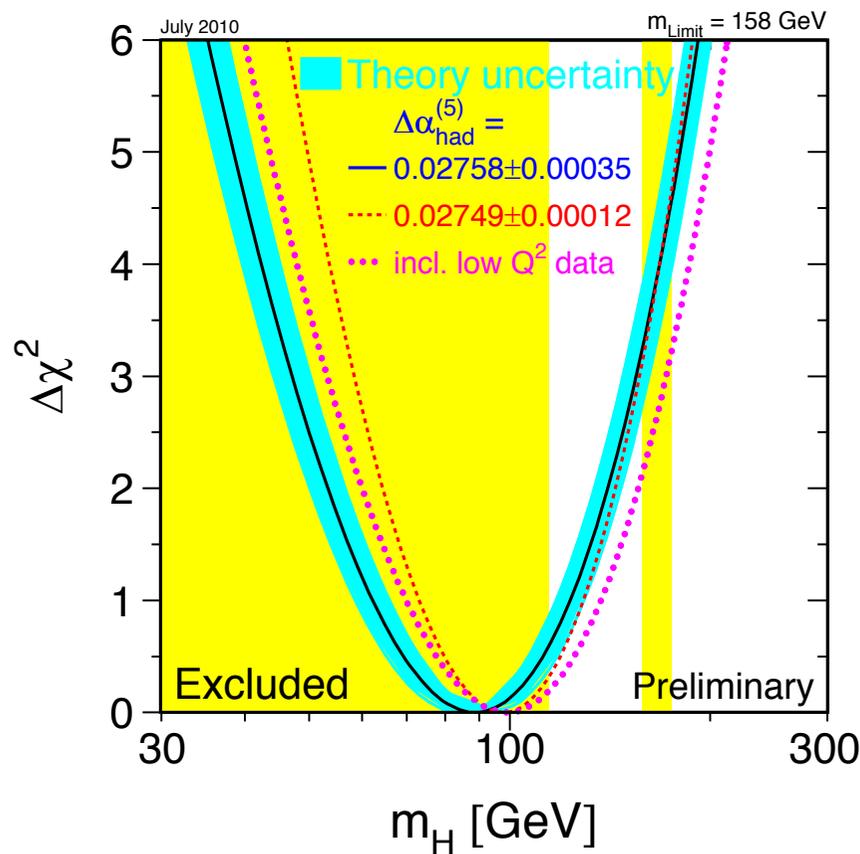
Unification of the Coupling Constants
in the SM and the minimal MSSM



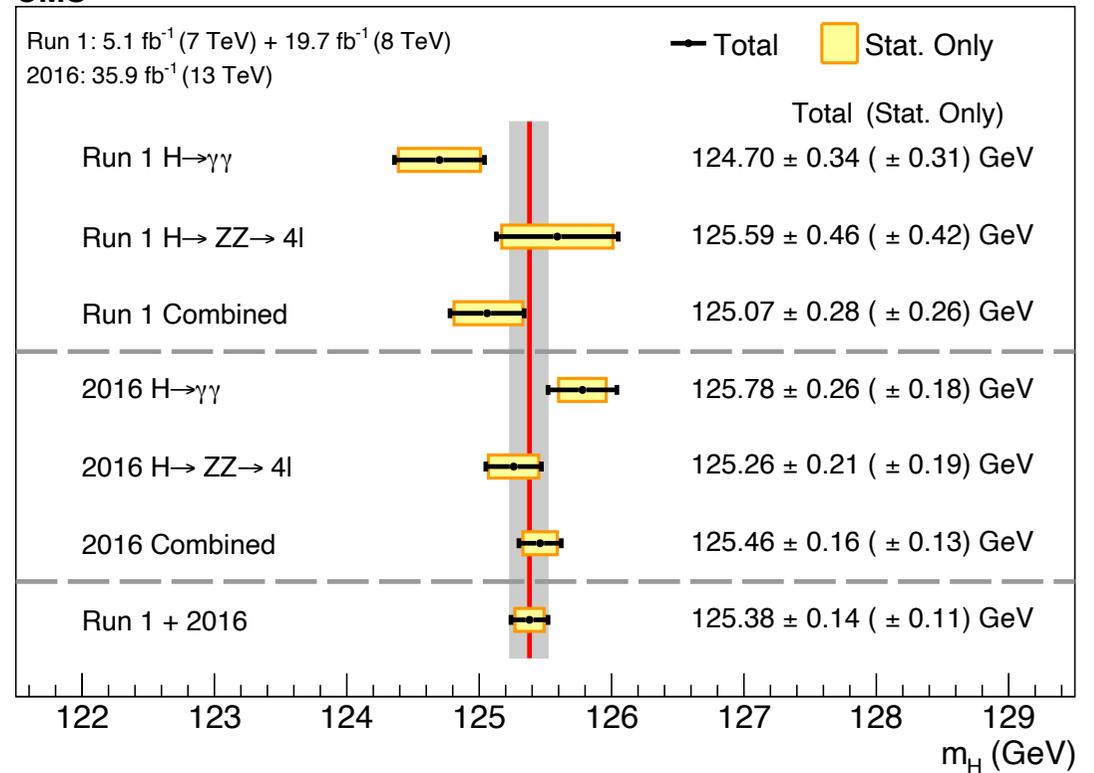
Perchè tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

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

Oggi: combinazione di misure

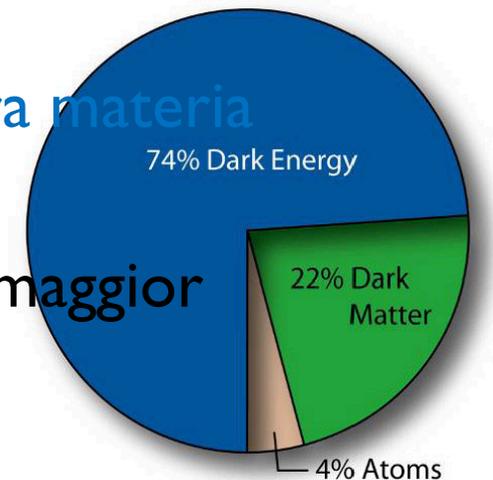


CMS



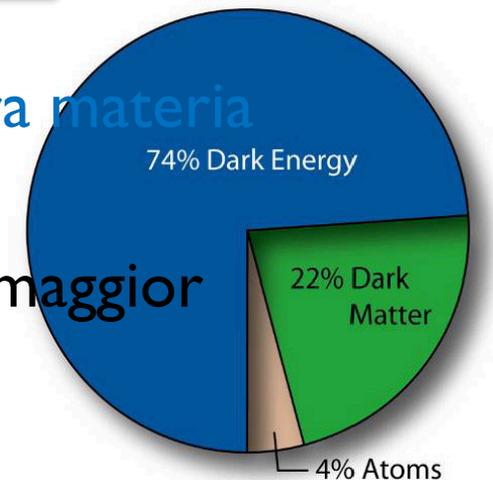
Le domande per LHC

- ▶ 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

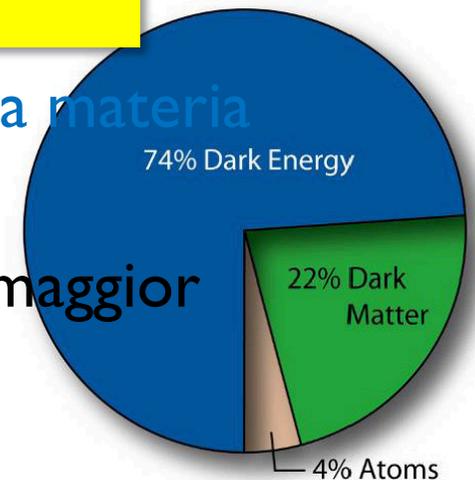
- ▶ Origine della massa: la particella scoperta nel 2012 è il **bosone di Higgs** come previsto dallo Standard Model e dal suo meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole?
 - ▶ o è una manifestazione di qualcosa di più complesso?
 - ▶ le sue proprietà **Il Modello Standard non può essere la fine della storia...** Standard?
- ▶ Ci sono segni **essere la fine della storia...** one 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
 - ▶ 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?

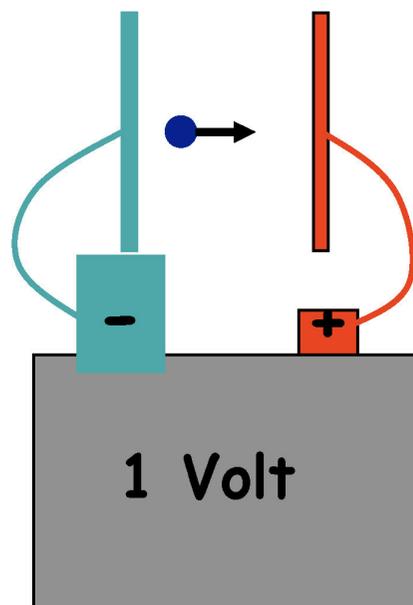


Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) = 10^9 eV

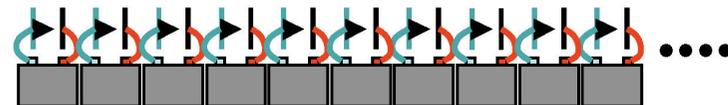
$m_{\text{protone}} = 0.938 \text{ GeV} = 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

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



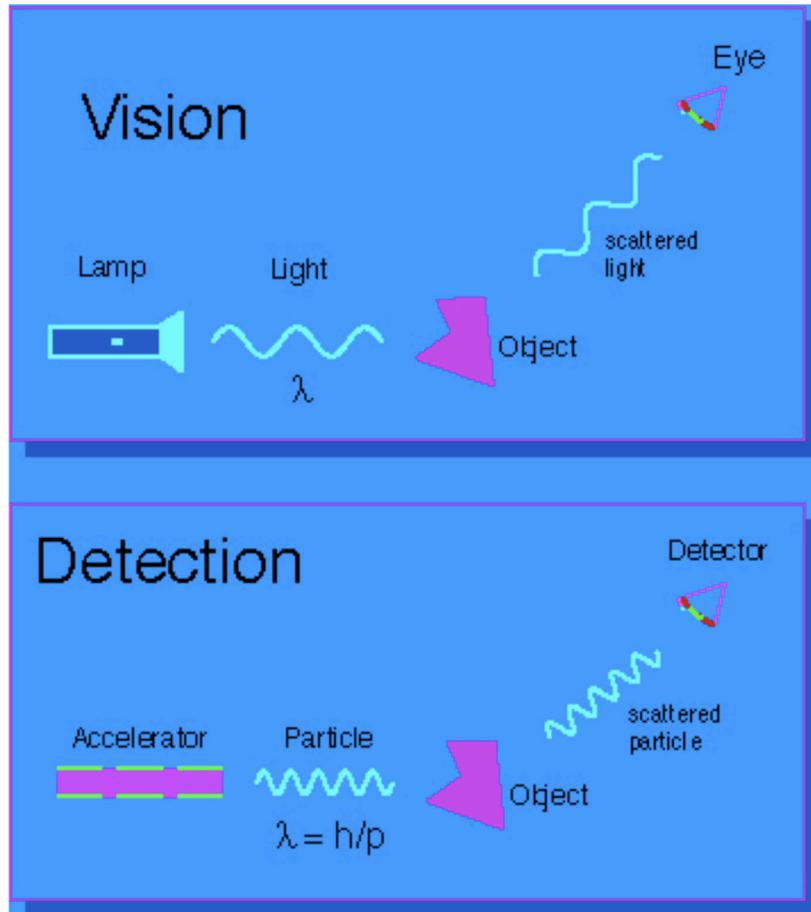
$E = 1 \text{ eV}$

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

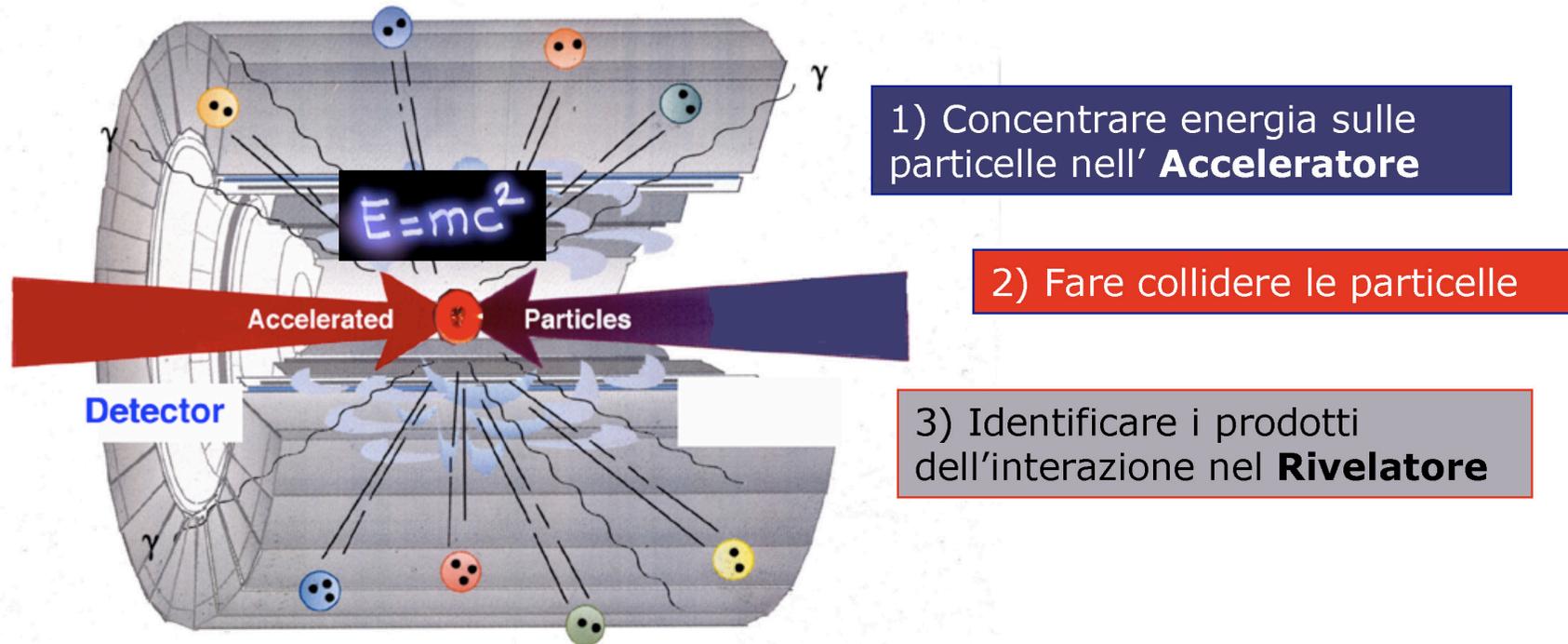


I più piccoli dettagli “risolvibili” hanno dimensioni confrontabili con λ della radiazione incidente.



Particelle di alta energia sono gli “esploratori del microcosmo”

Perché un collisionatore ?



$E=mc^2$: 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

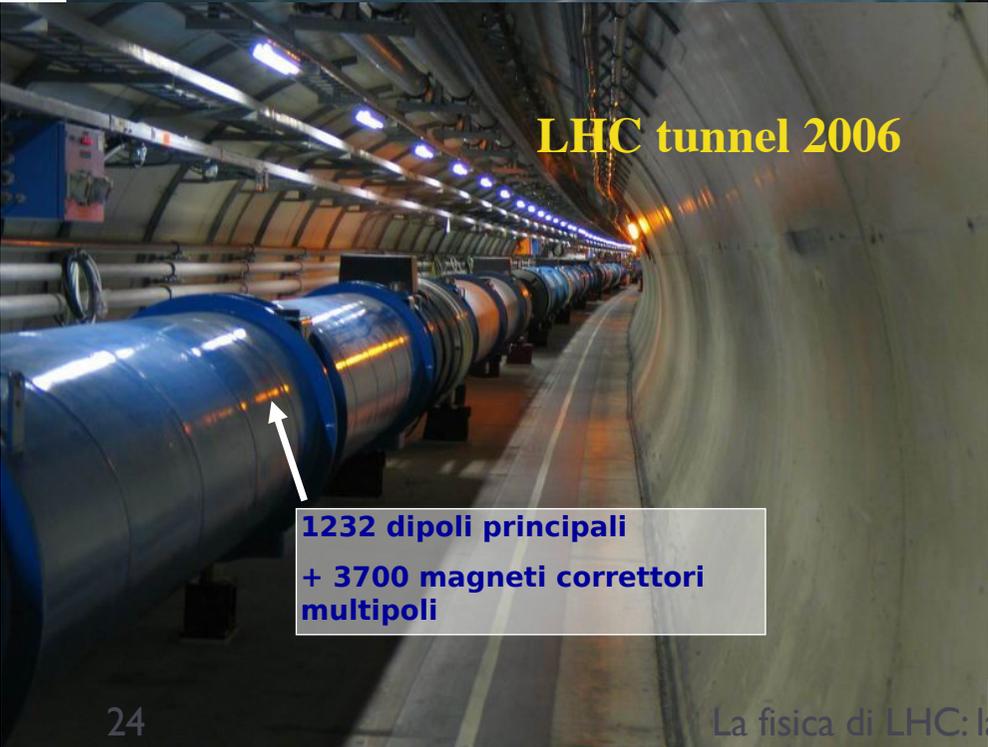


Large Hadron Collider



LHC tunnel 2002

4 m



LHC tunnel 2006

1232 dipoli principali
+ 3700 magneti correttori
multipoli



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

4 m

Start the protons out here

Legend:

- protons
- antiprotons
- ions
- neutrinos to Gran Sasso (I)

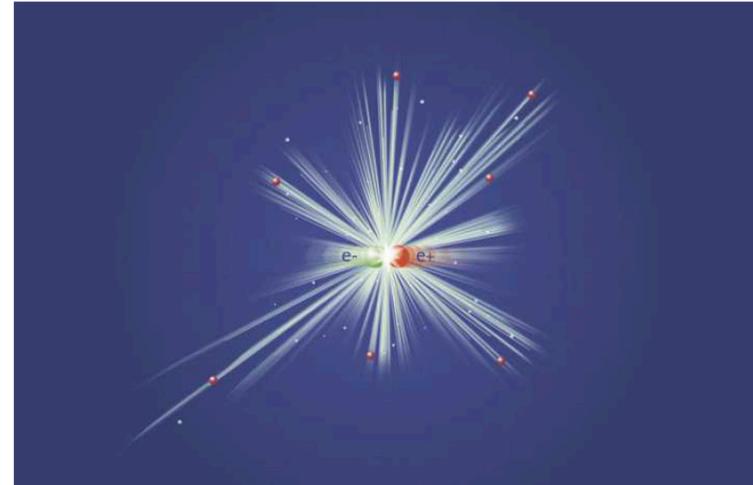
Legend:

- 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

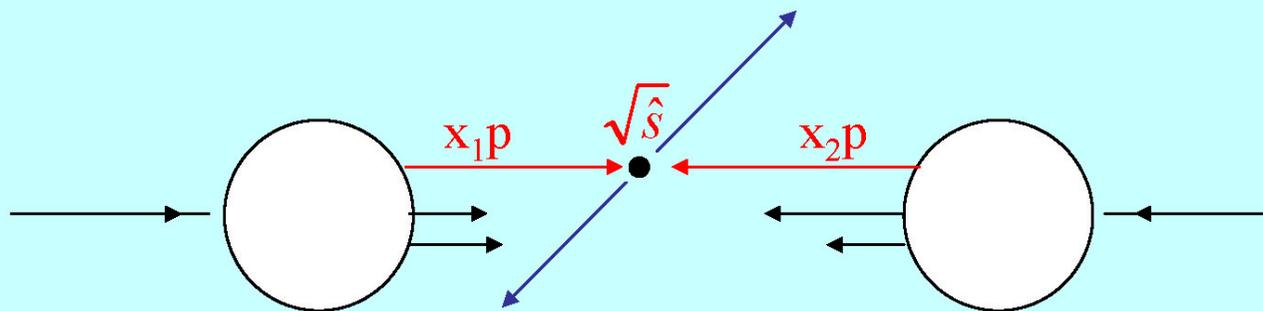
Rudolf LEY, PS Division, CERN, 02/09/96
Revised and adapted by Antonella Del Rosso, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglani, PS Div. CERN, 23.05.01

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

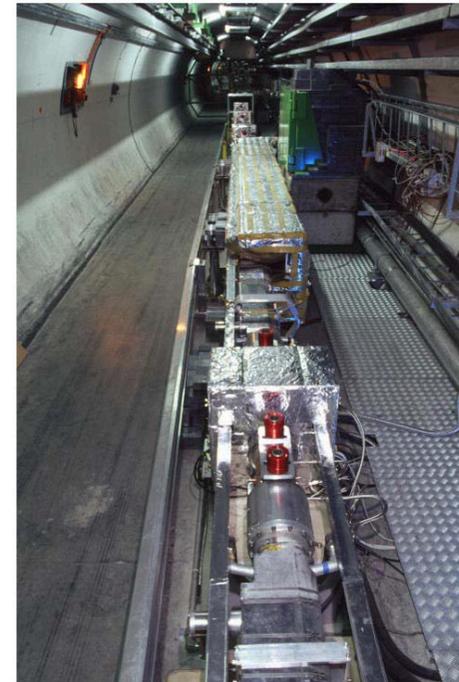
Acceleratori Circolari e..... bolletta della luce

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

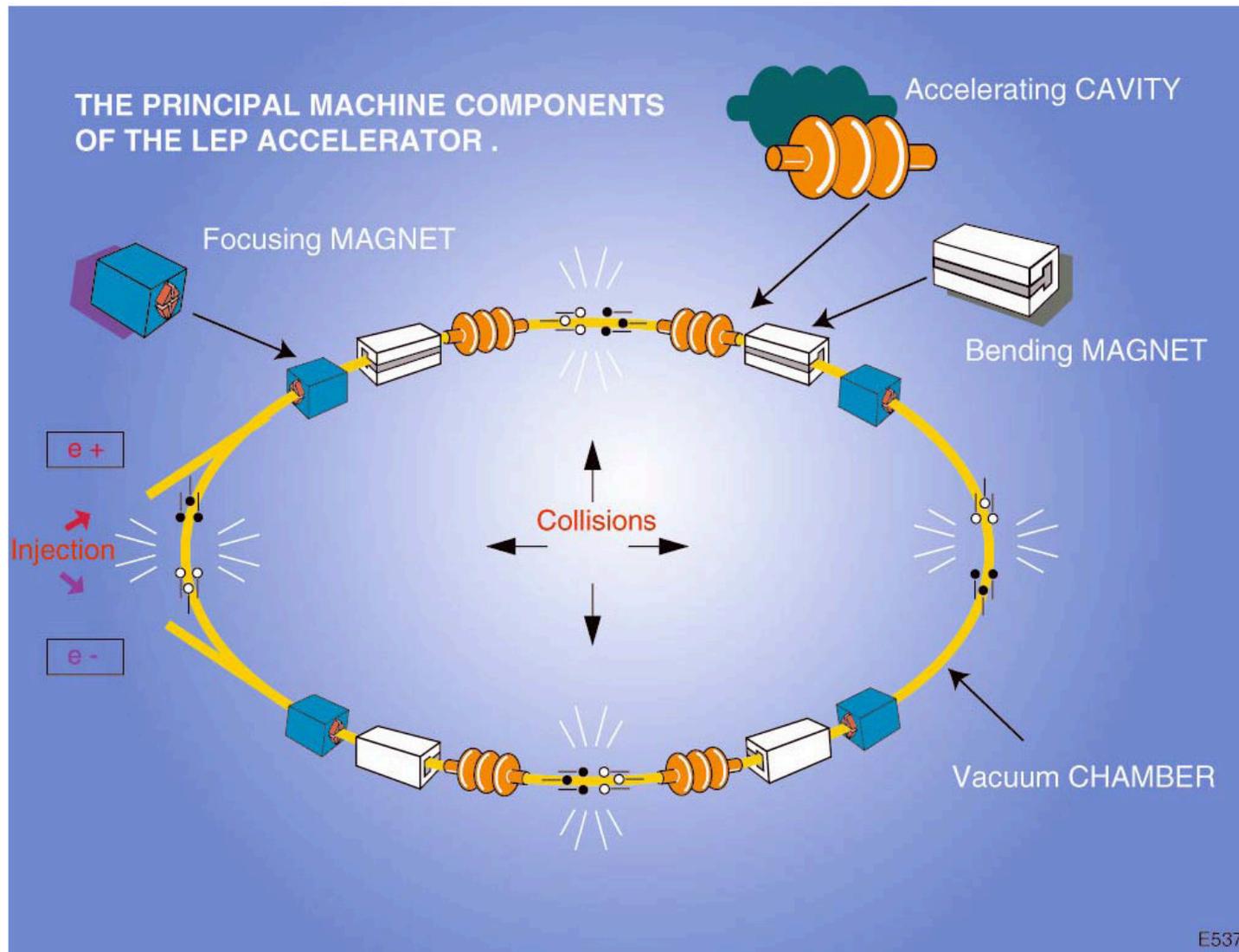
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

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

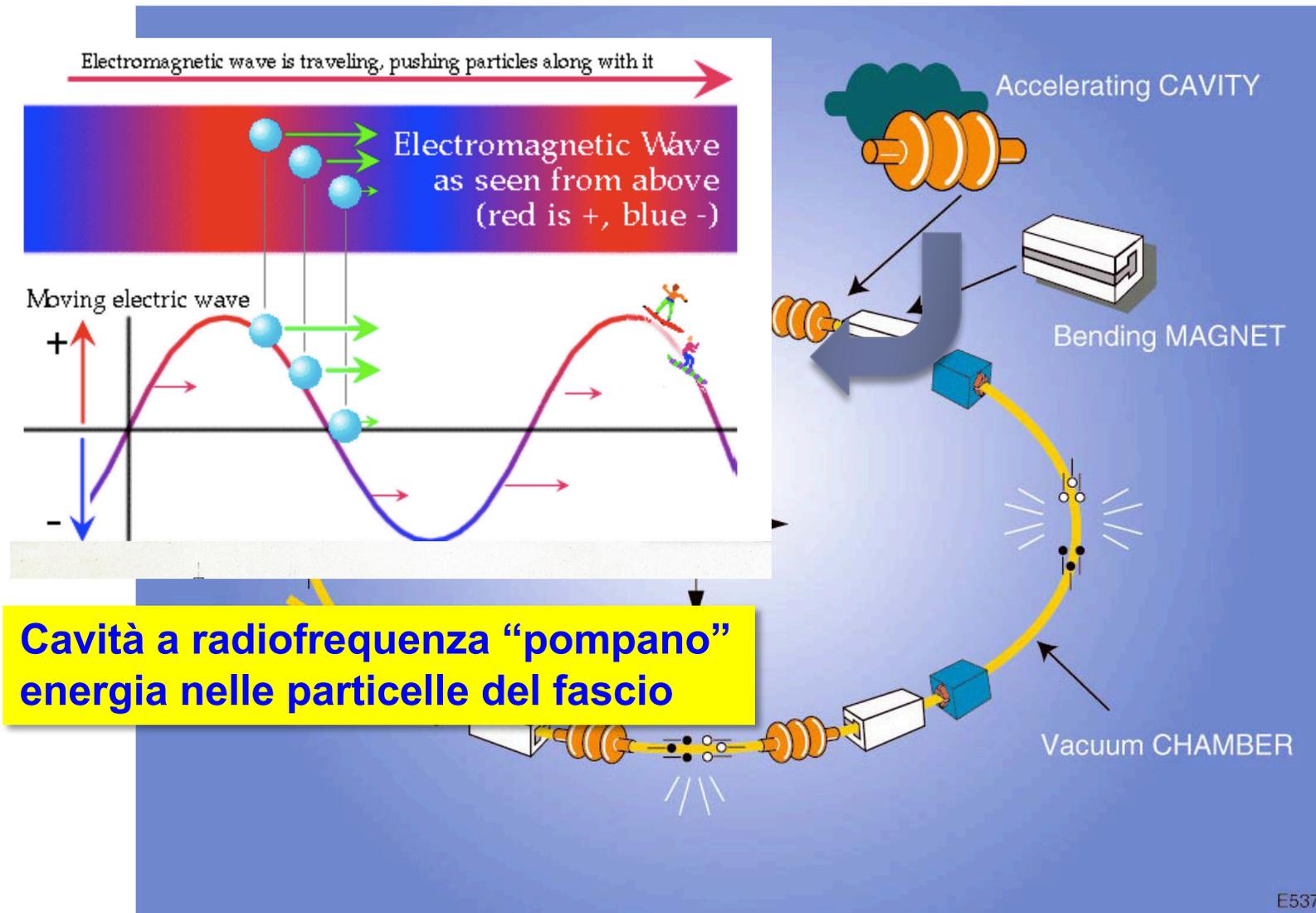
LEP : 27 Km di circonferenza ! 



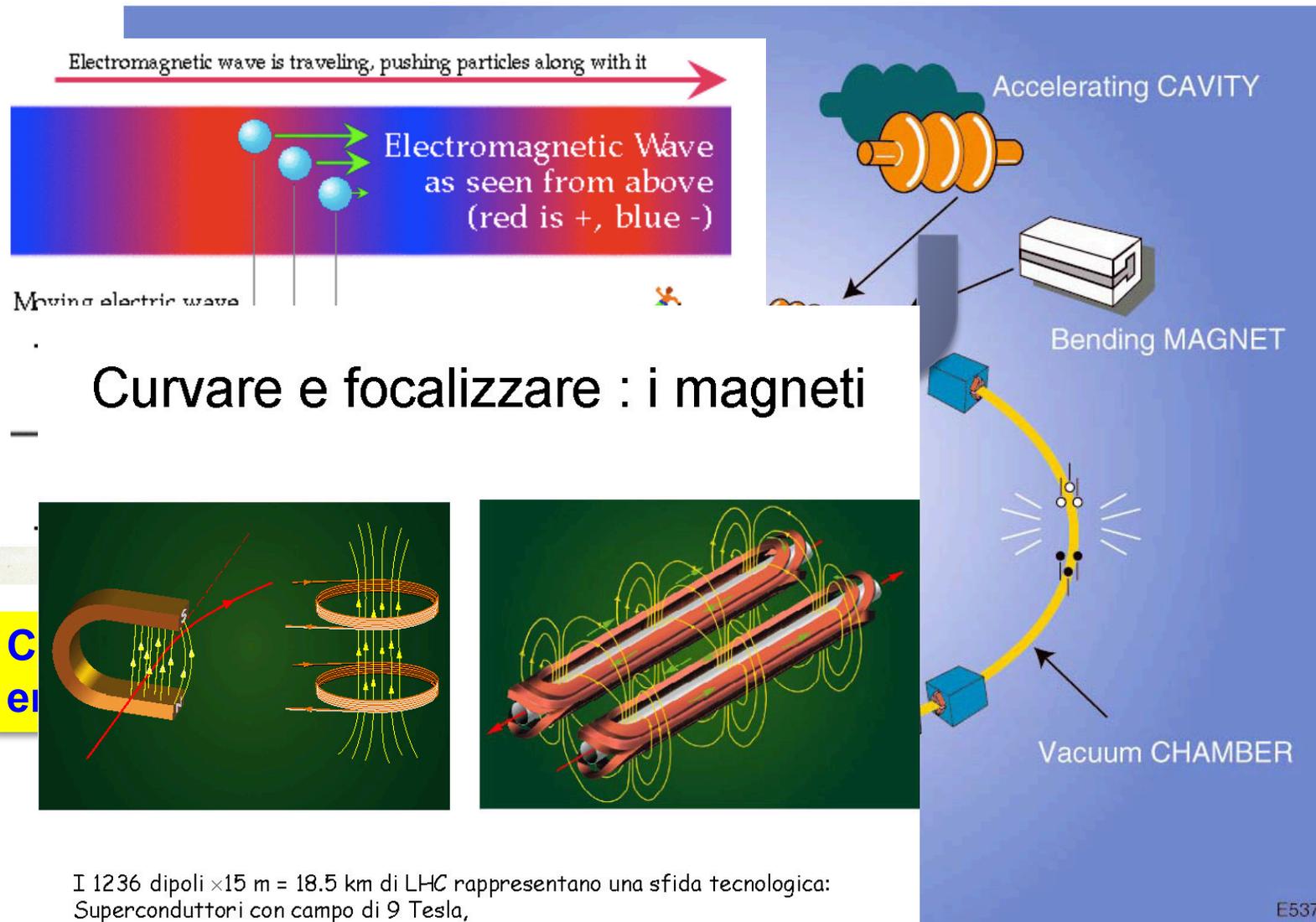
Componenti principali di un acceleratore



Componenti principali di un acceleratore

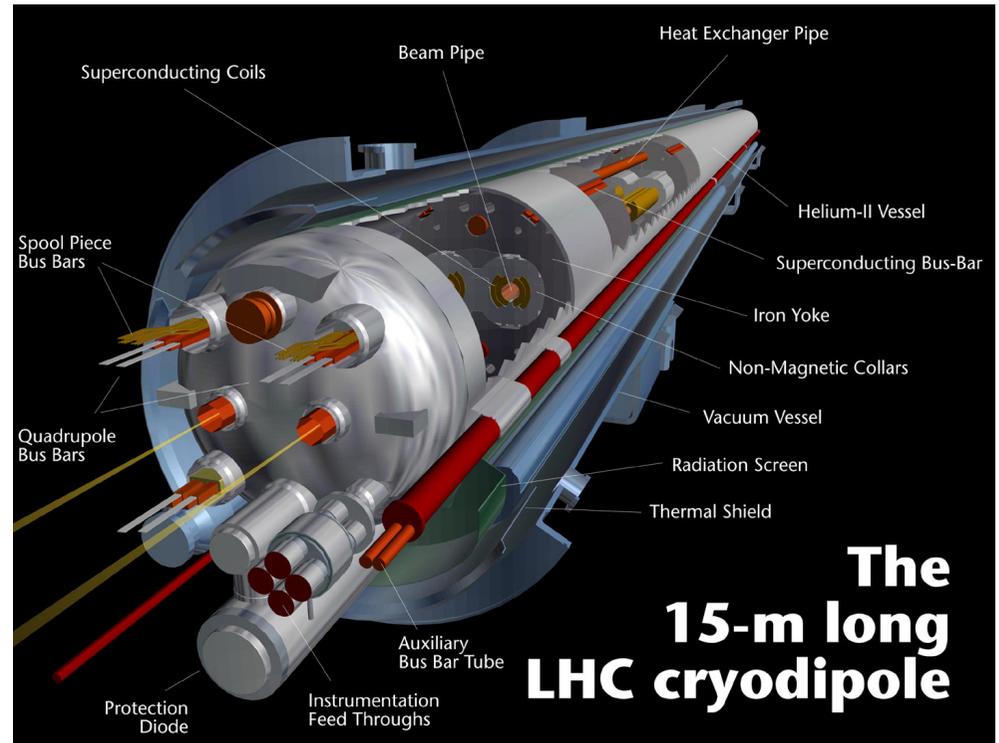


Componenti principali di un acceleratore



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 (I 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 \times sezione d'urto

Luminosità: densità di particelle nei fasci per unità di tempo

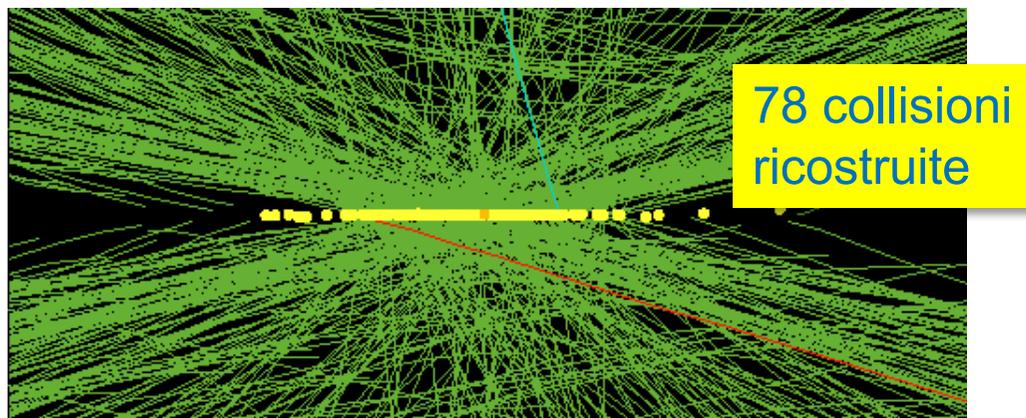
Sezione d'urto: probabilità che un processo accada in un urto

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

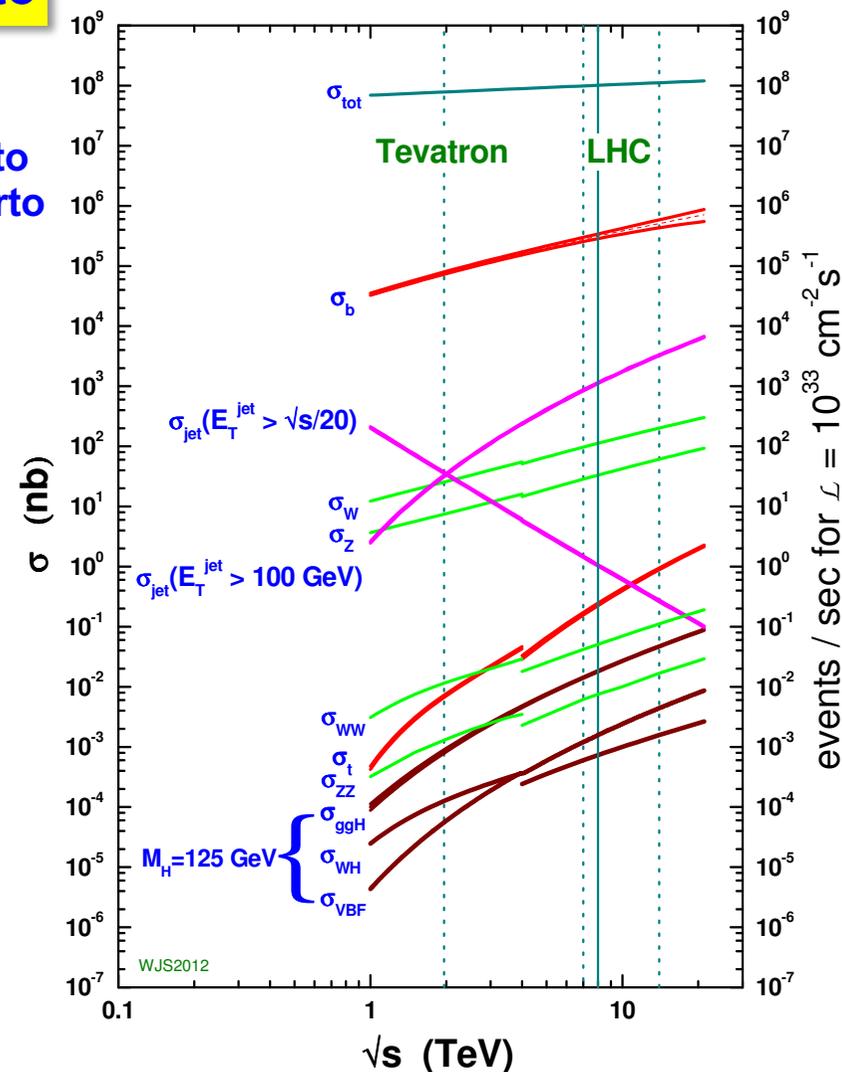
Ad alta luminosità ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$):

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

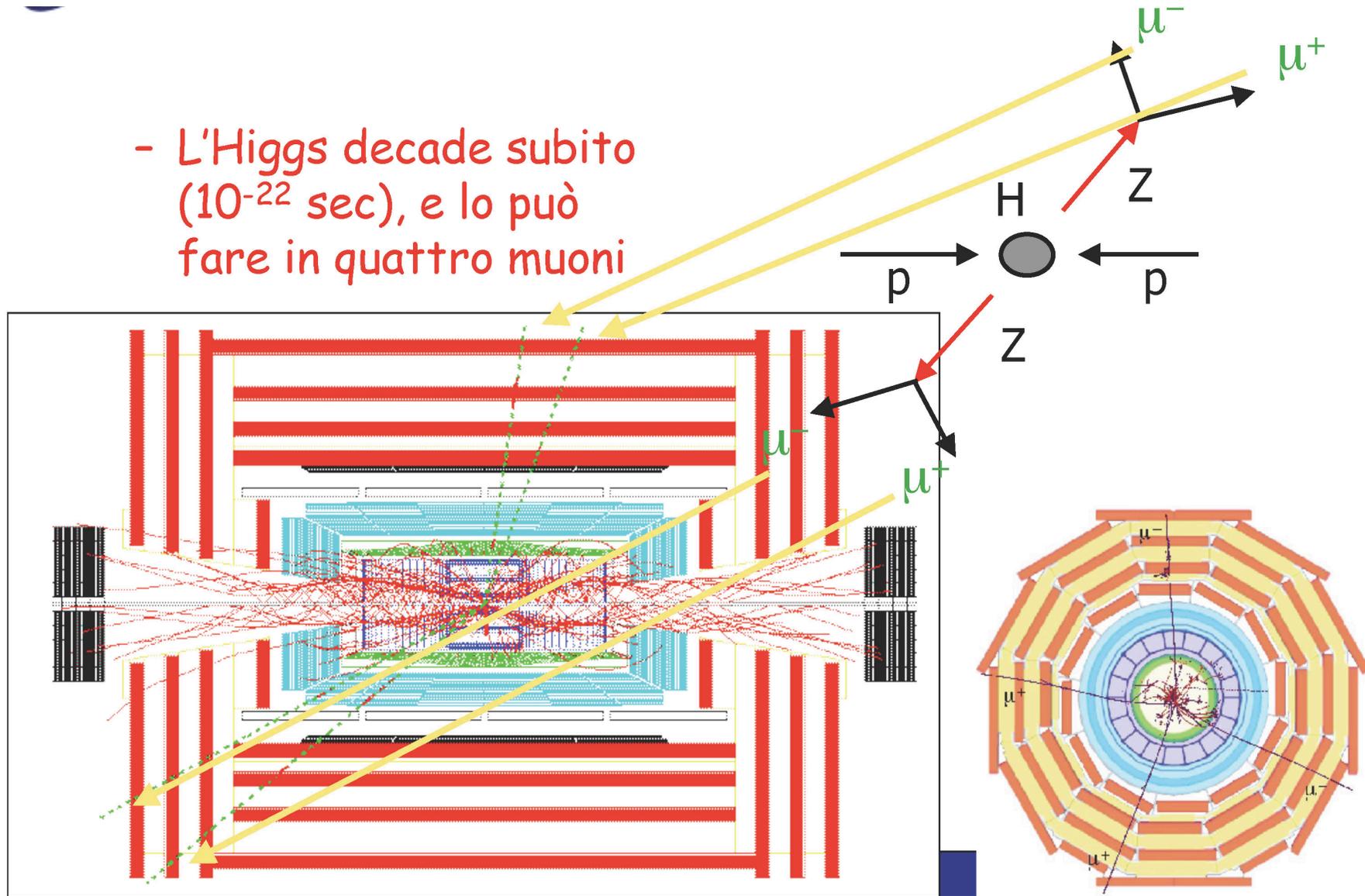


proton - (anti)proton cross sections



Rivelazione dai prodotti di decadimento

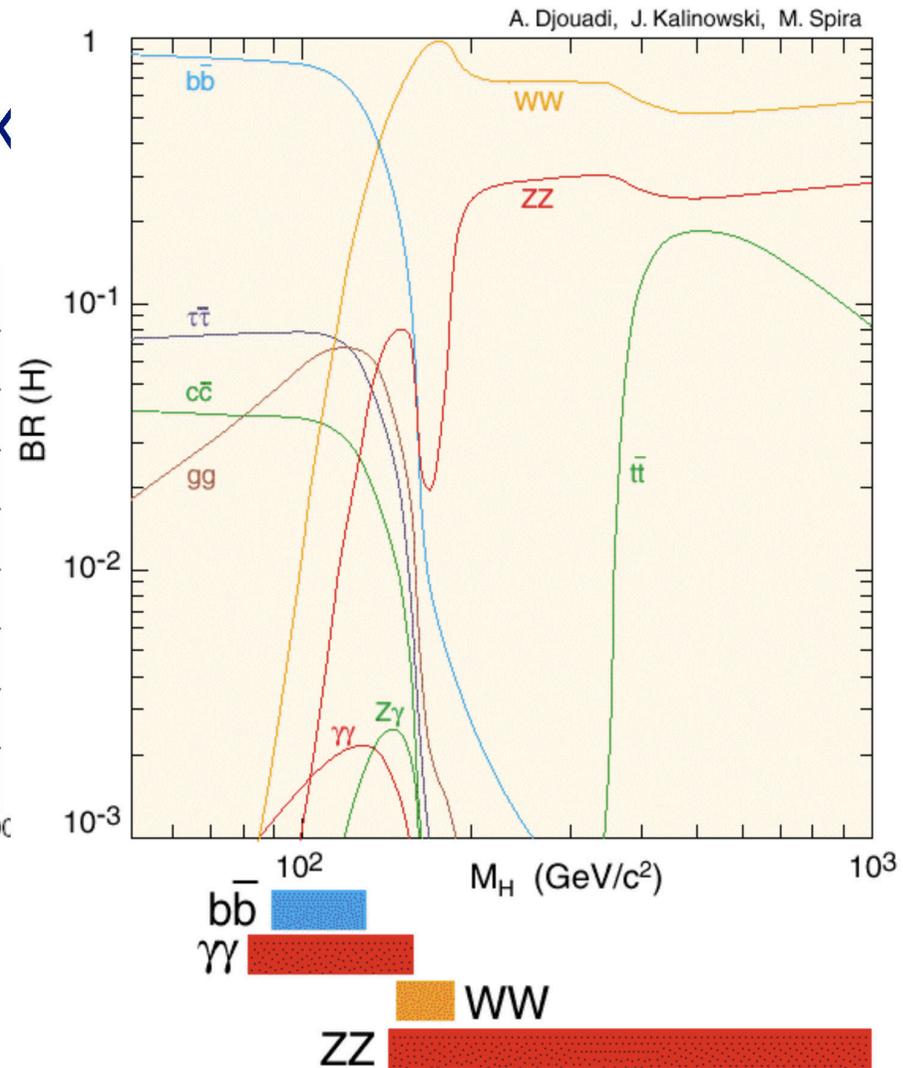
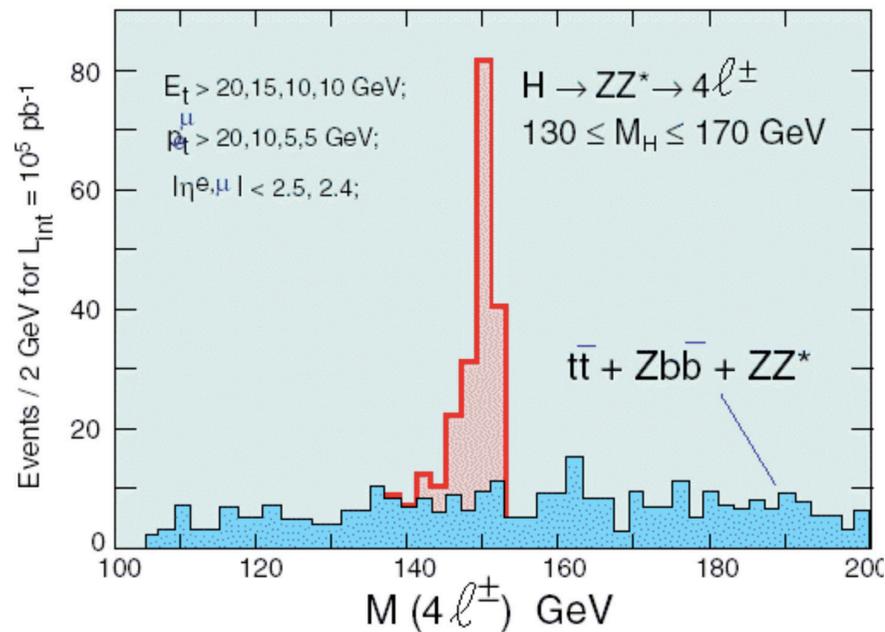
- L'Higgs decade subito (10^{-22} sec), e lo può fare in quattro muoni



Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

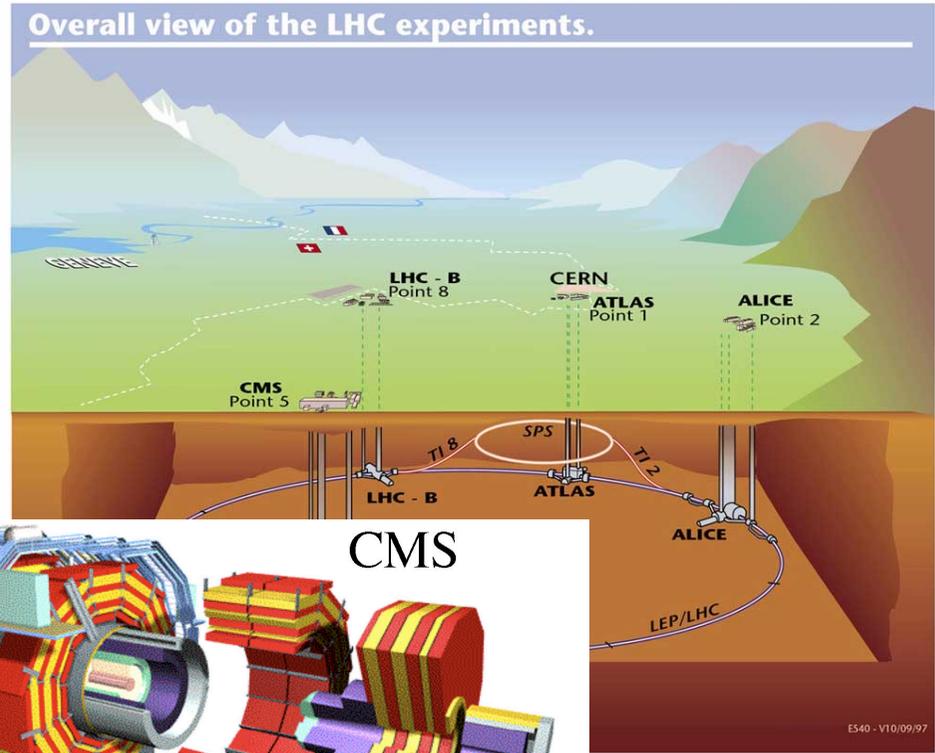
Cerco eventi :

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

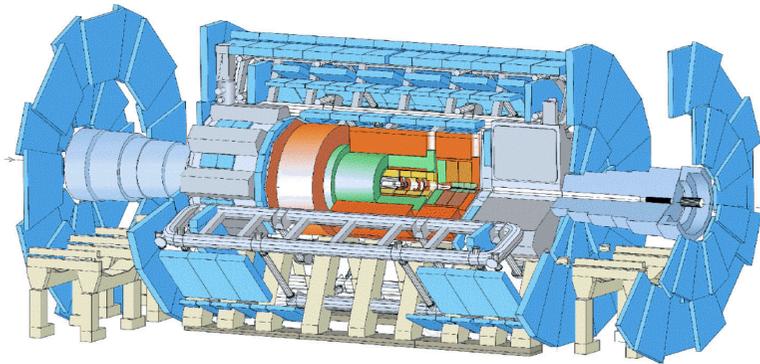


Esperimenti a LHC

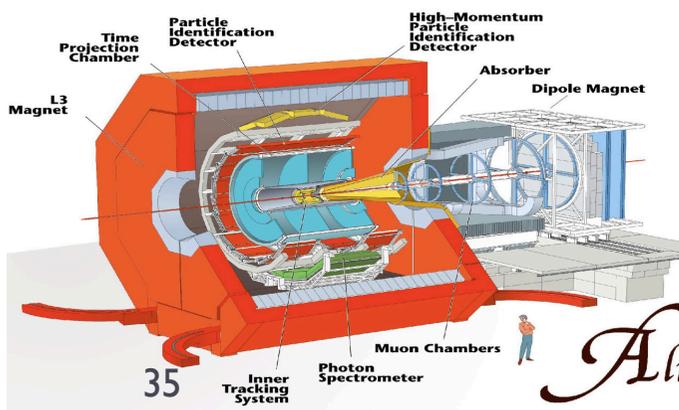
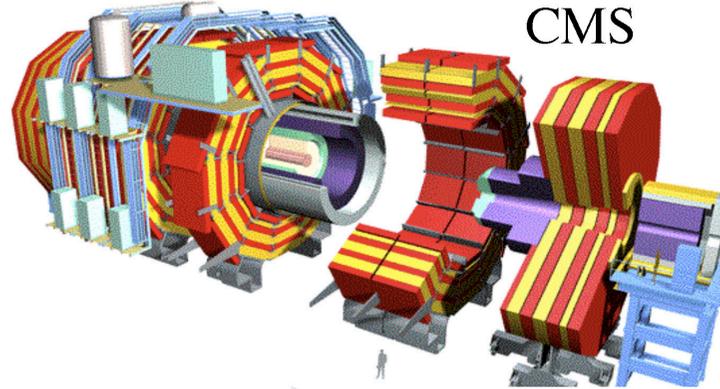
	Energia cm TeV	Luminosità cm ⁻² s ⁻¹
LEP e ⁺ e ⁻	0.209	10 ³²
LHC pp	14	10 ³⁴
LHC Pb Pb	1312	10 ²⁷



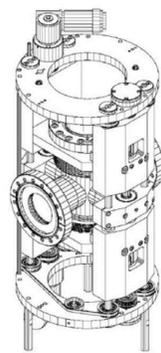
ATLAS



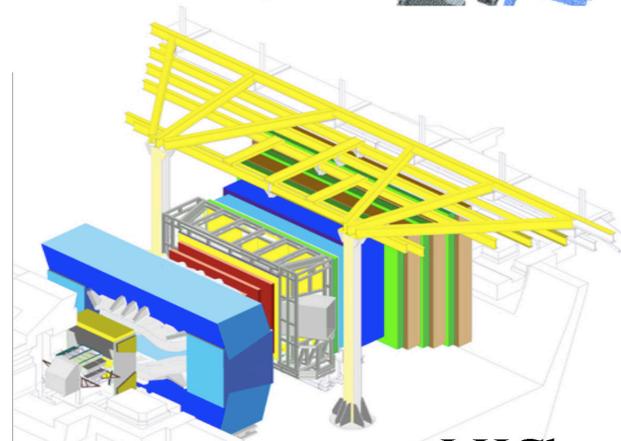
CMS



Alice



TOTEM



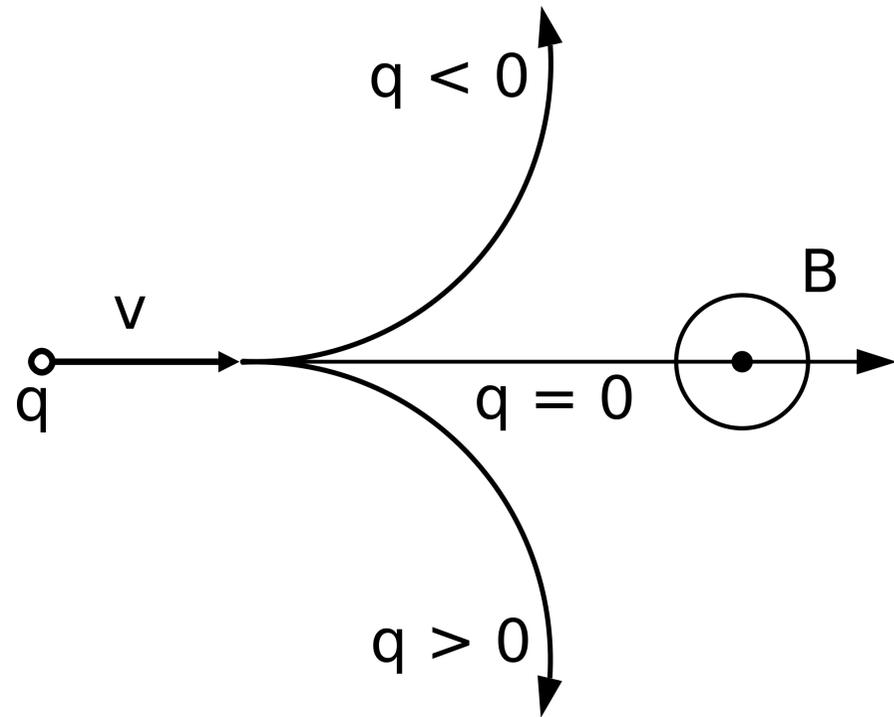
LHCb

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



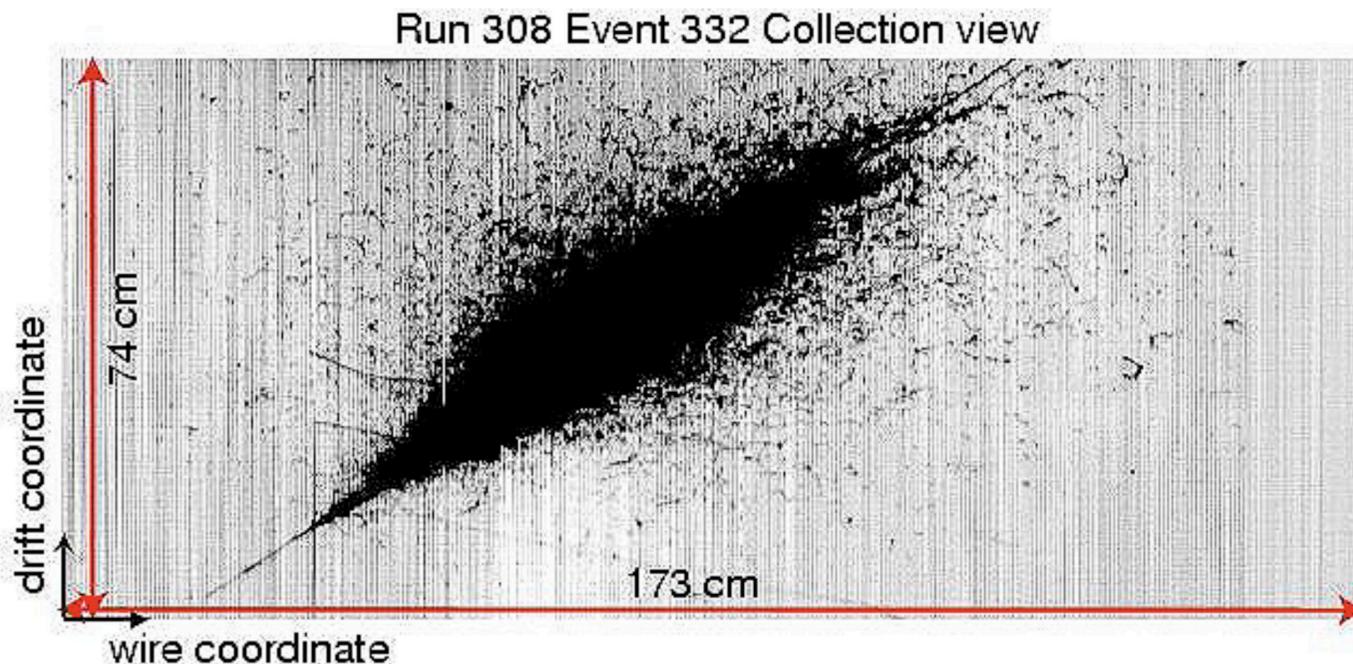
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

GeV/c q/e 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 PbWO4

HCAL: scintillatore plastico

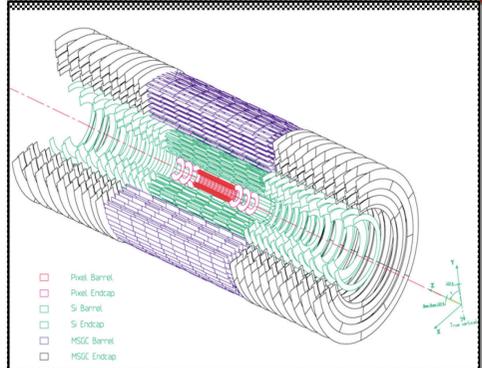
CALORIMETRI

GIOGO RITORNO

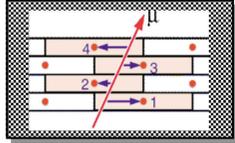
TRACKER

**MUONI
ENDCAP**

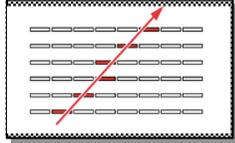
MUONI BARREL



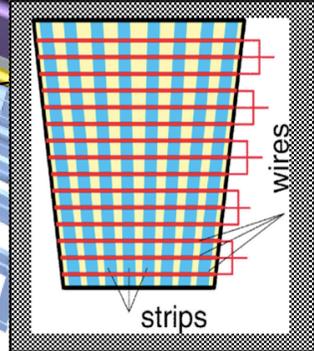
Microstrisce Silicio
Pixels



Drift Tube
Chambers (DT)



Resistive Plate
Chambers (RPC)



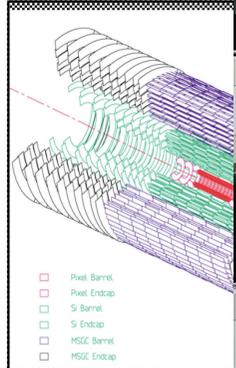
Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Diametro: 15 m
Lunghezza: 21.5 m
Peso: 12500 ton.

Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



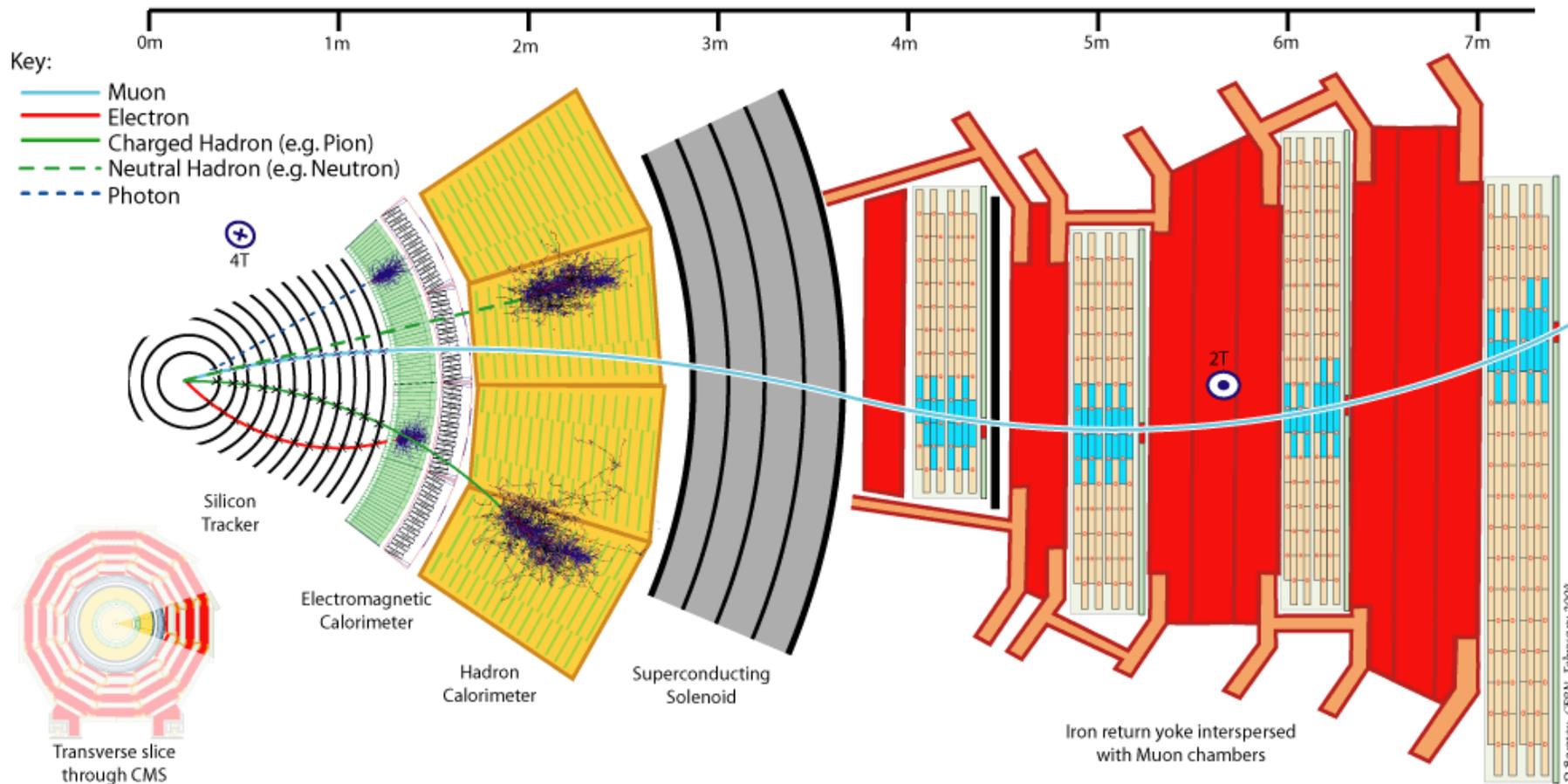
Microstrisce Si
Pixels



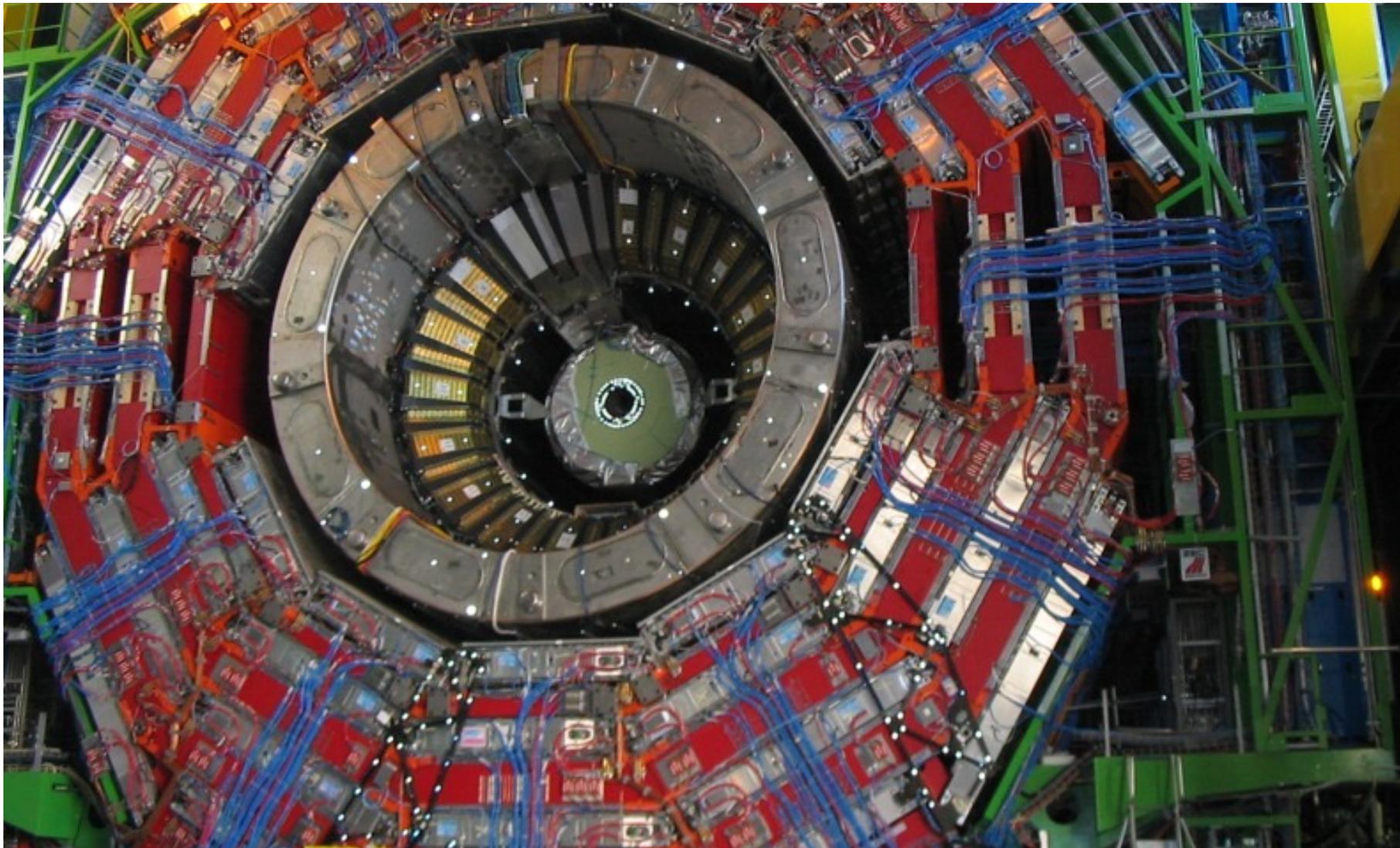
Drift Tube Chambers (DT) Resistive Plate Chambers (RPC) Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

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



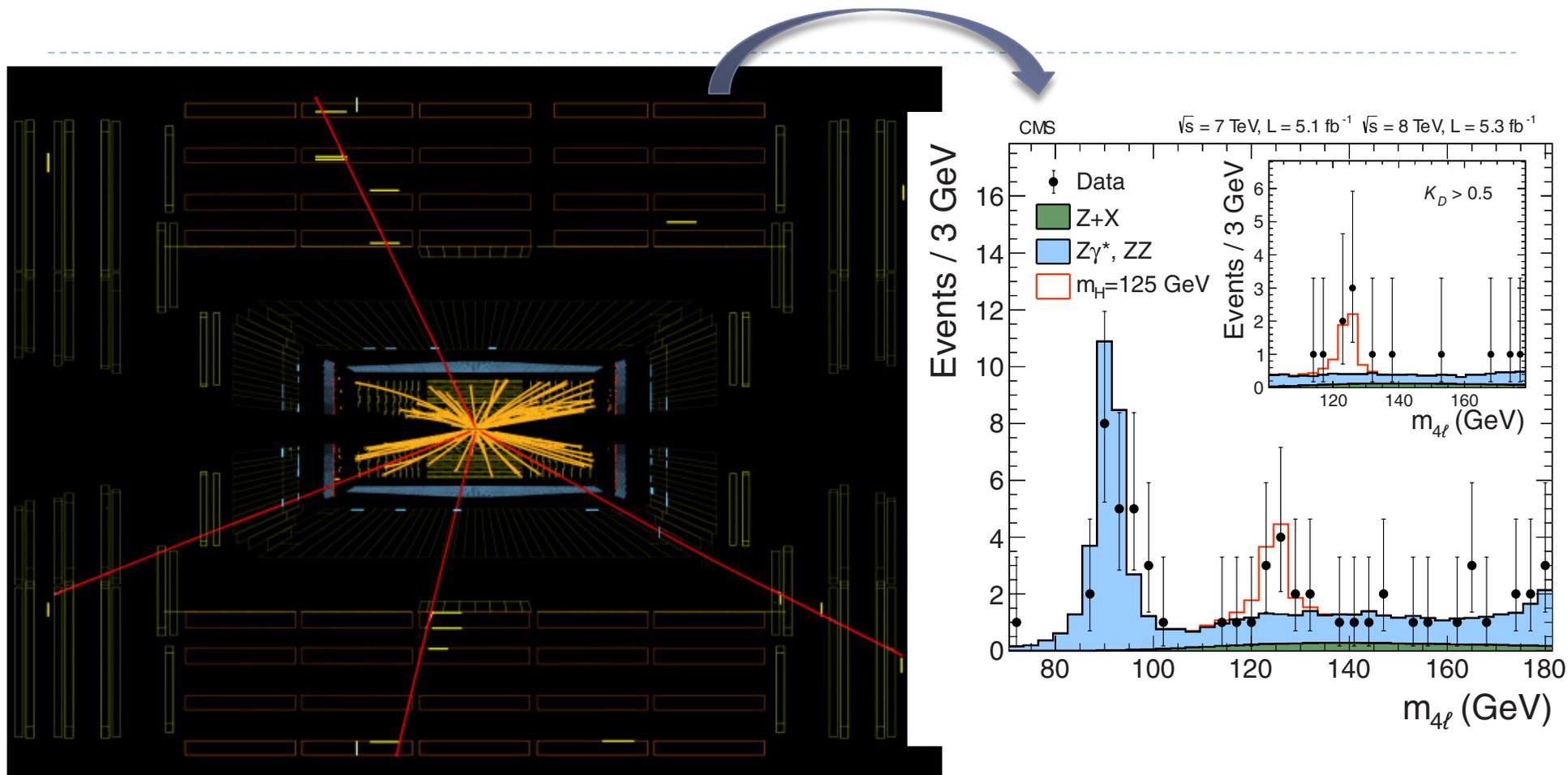
Perchè avere un rivelatore sofisticato?

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

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. $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$)

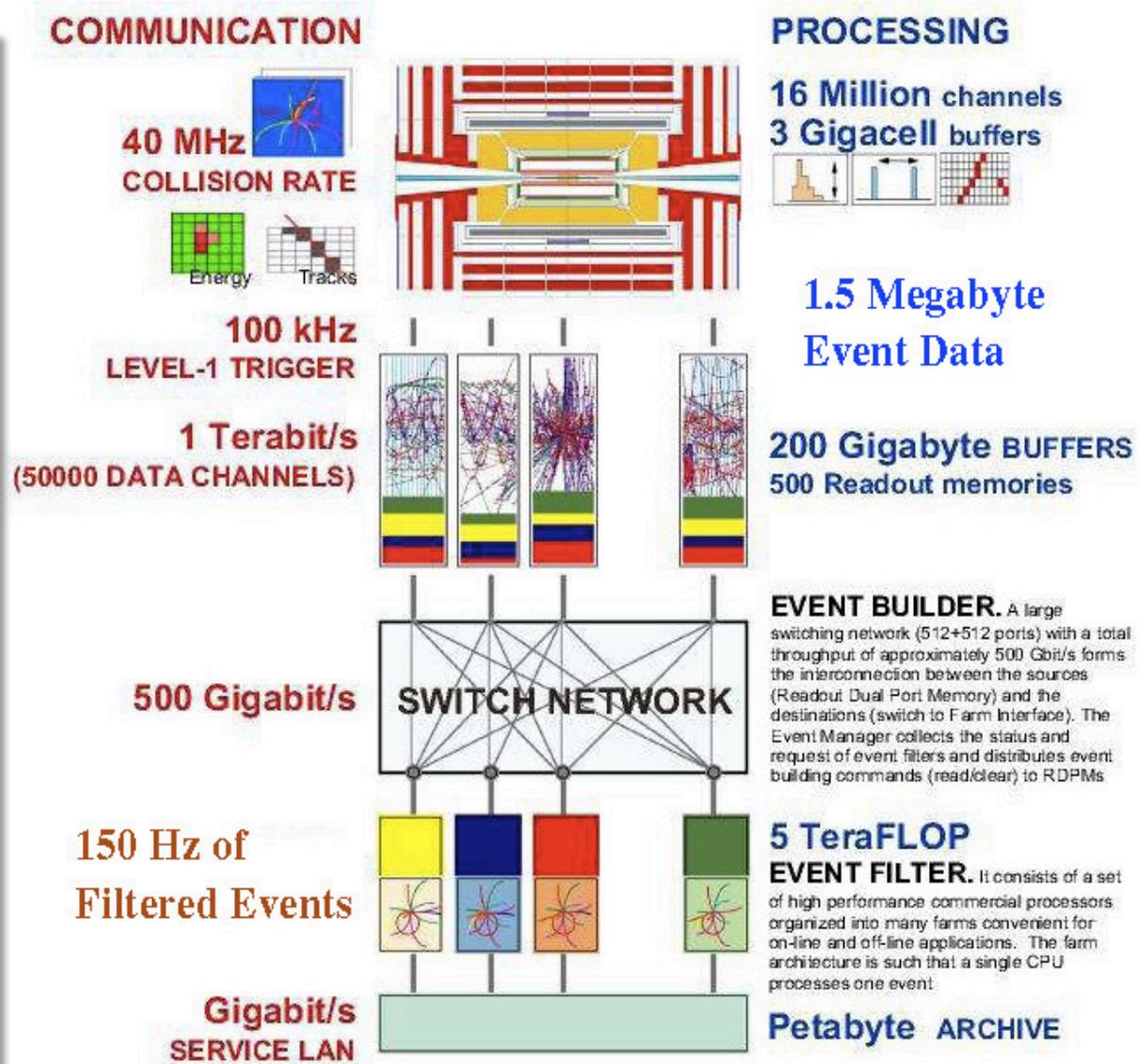
Calcolo delle grandezze osservabili di interesse (es. massa invariante dei 4 μ)

Dal rivelatore al calcolatore: selezionare e acquisire i dati

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

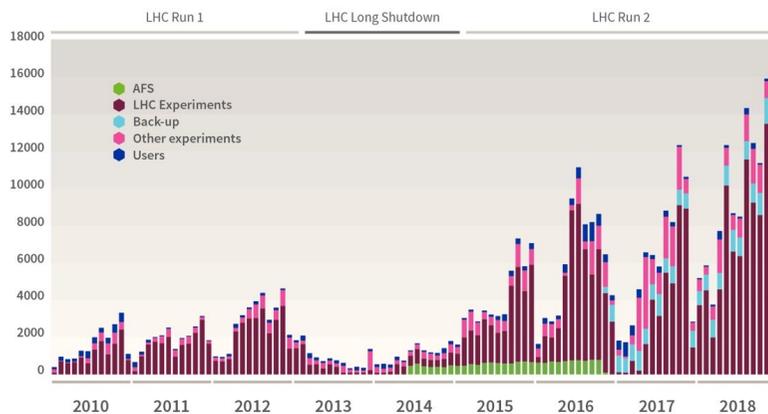
il processo di selezione: trigger

- 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

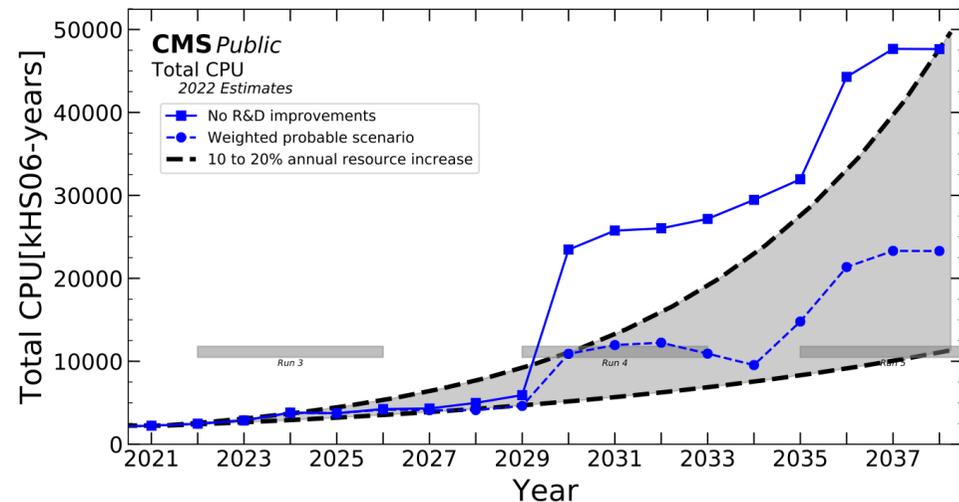


Non basta avere un buon rivelatore...

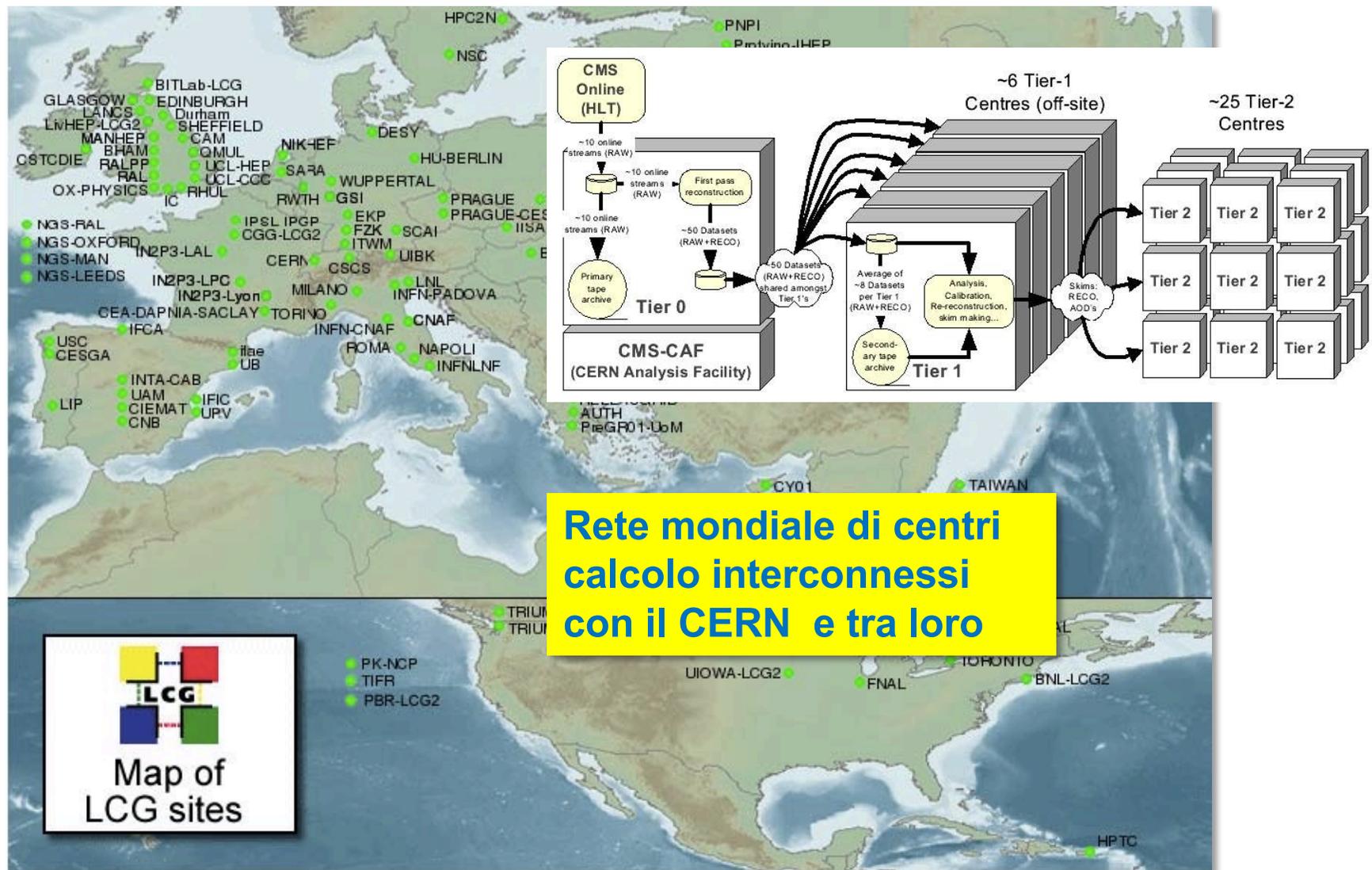
- ▶ Simulazione, acquisizione e selezione dei dati, ricostruzione, analisi: tutto richiede calcolatori, storage e software
 - ▶ dovete avere sufficiente spazio disco per conservare immediatamente i dati prodotti, e le successive manipolazioni a cui dovete accedere velocemente
 - ▶ dovete avere sufficiente 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



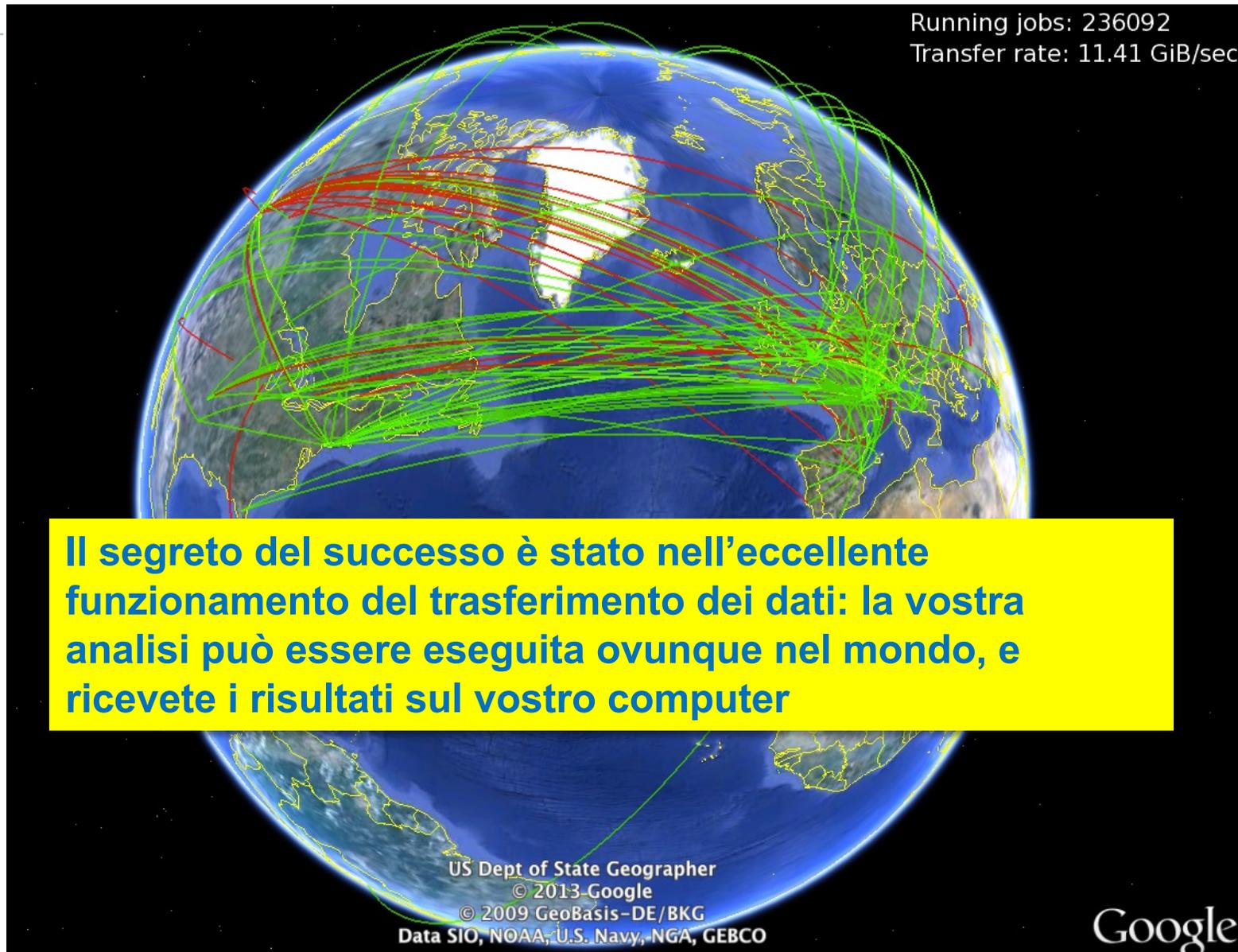
Terabytes mensilmente conservati su nastro al CERN



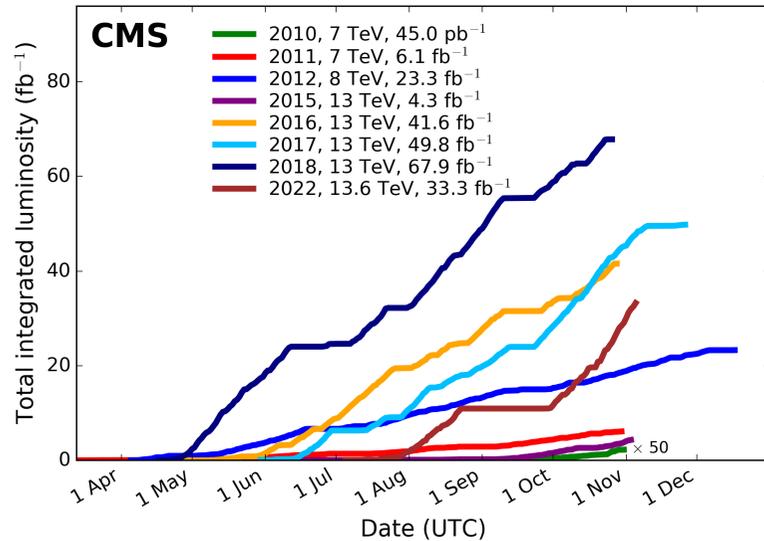
... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier



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

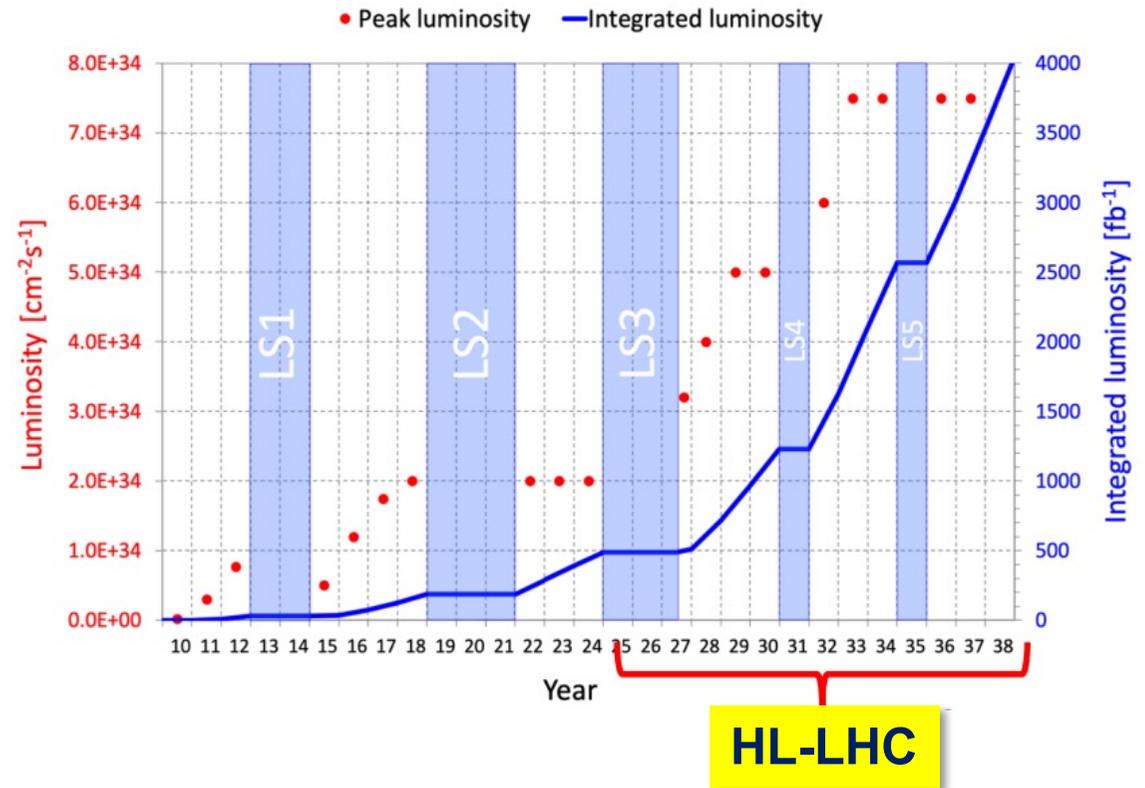


Presente e futuro: High Luminosity LHC



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

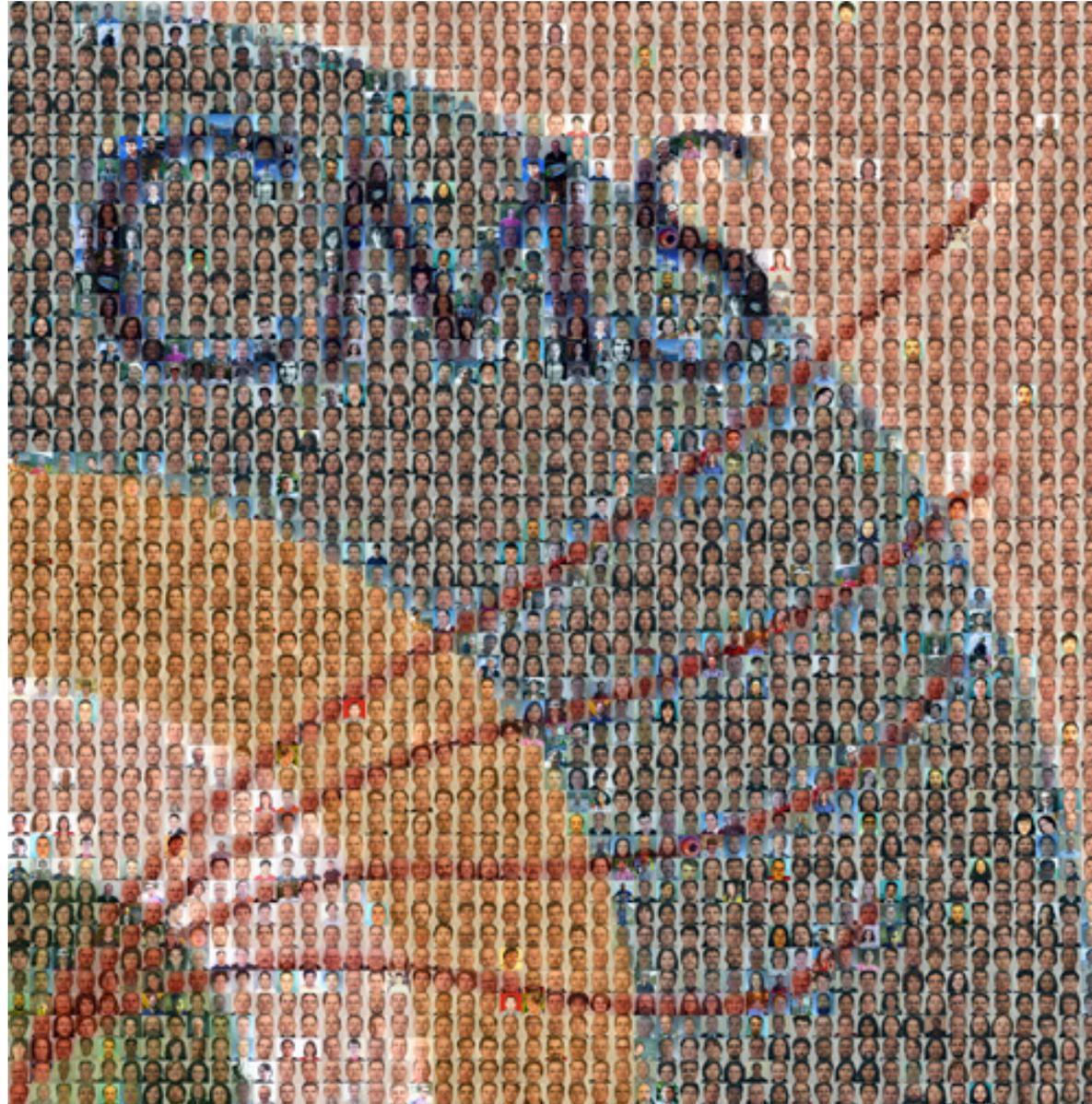
- LHC: obiettivo raccogliere 300 fb⁻¹
- HL-LHC: decuplicare la statistica
 - misure di precisione sul bosone di Higgs



Per concludere

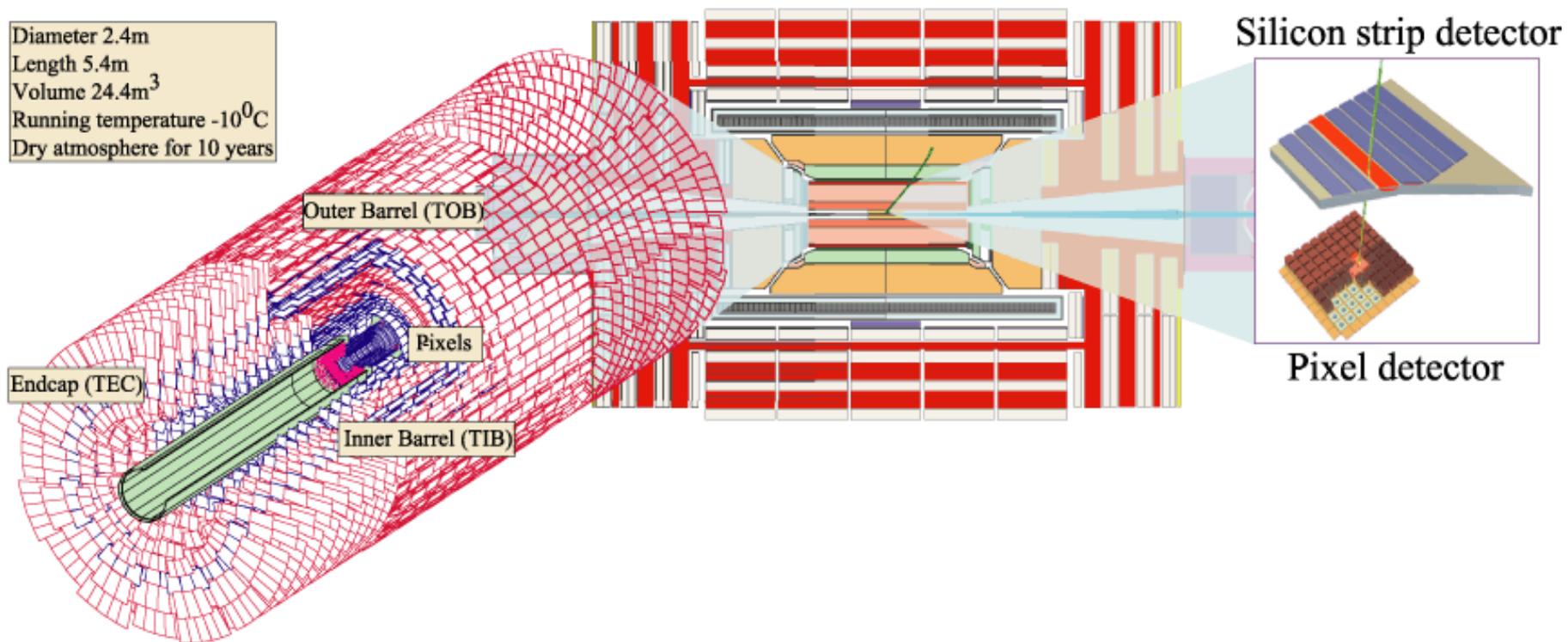
- ▶ Dopo 13 anni dall'inizio della presa dati, e oltre 200 fb⁻¹ di dati raccolti:
- ▶ Abbiamo trovato un bosone di Higgs, abbiamo alcuni indizi di discrepanze con il Modello Standard, ma nessuna ricerca diretta di nuova fisica ha dato risultati
 - ▶ Si tratta dell'Higgs del Modello Standard? È il primo 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?
- ▶ Dal 2022 si è ripartiti, mentre si sta correndo per costruire i rivelatori per HL-LHC
 - ▶ Con quanto c'è da fare, il 2029 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?



BACKUP

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

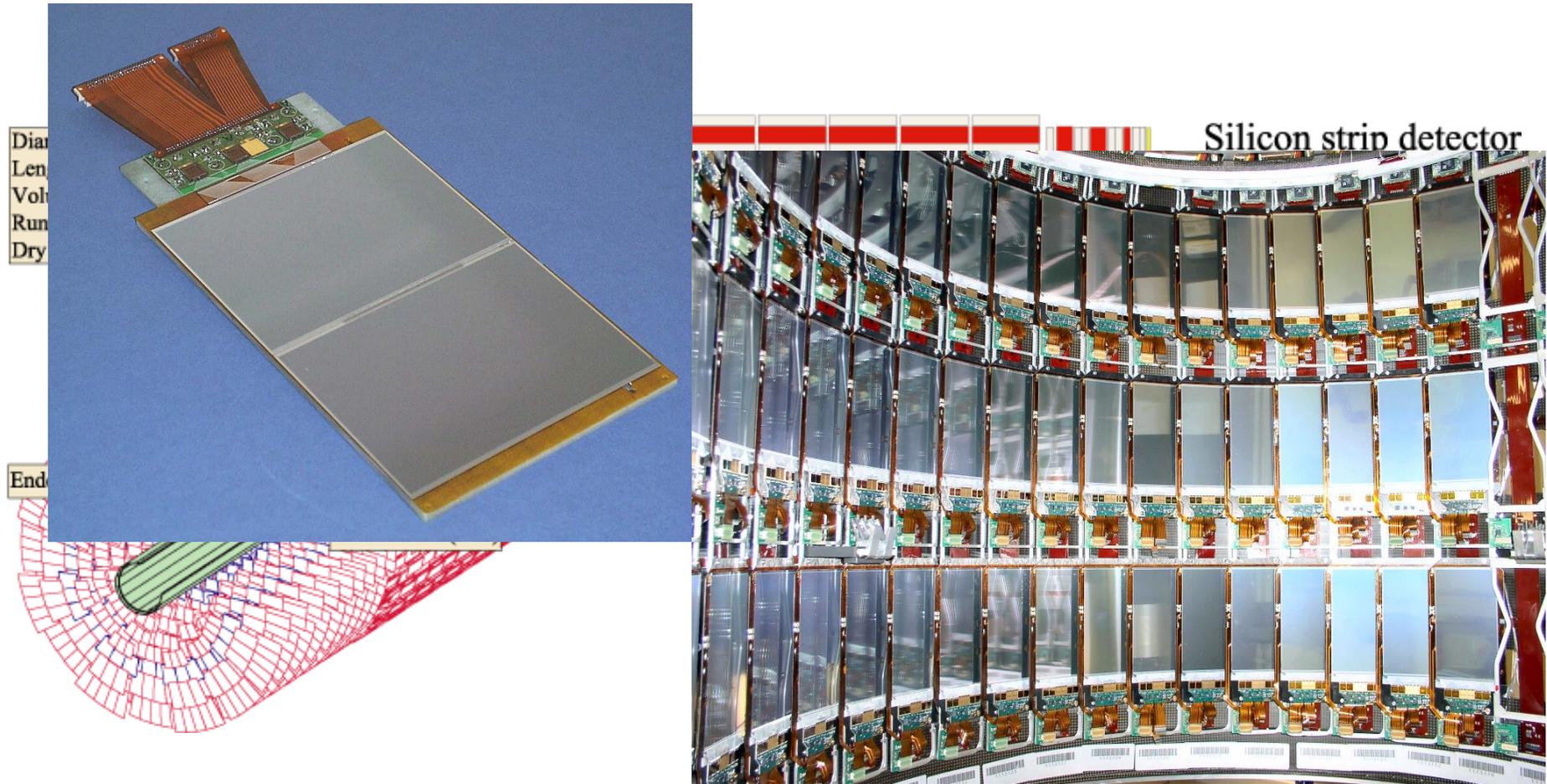


Ad es. CMS tracker...

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

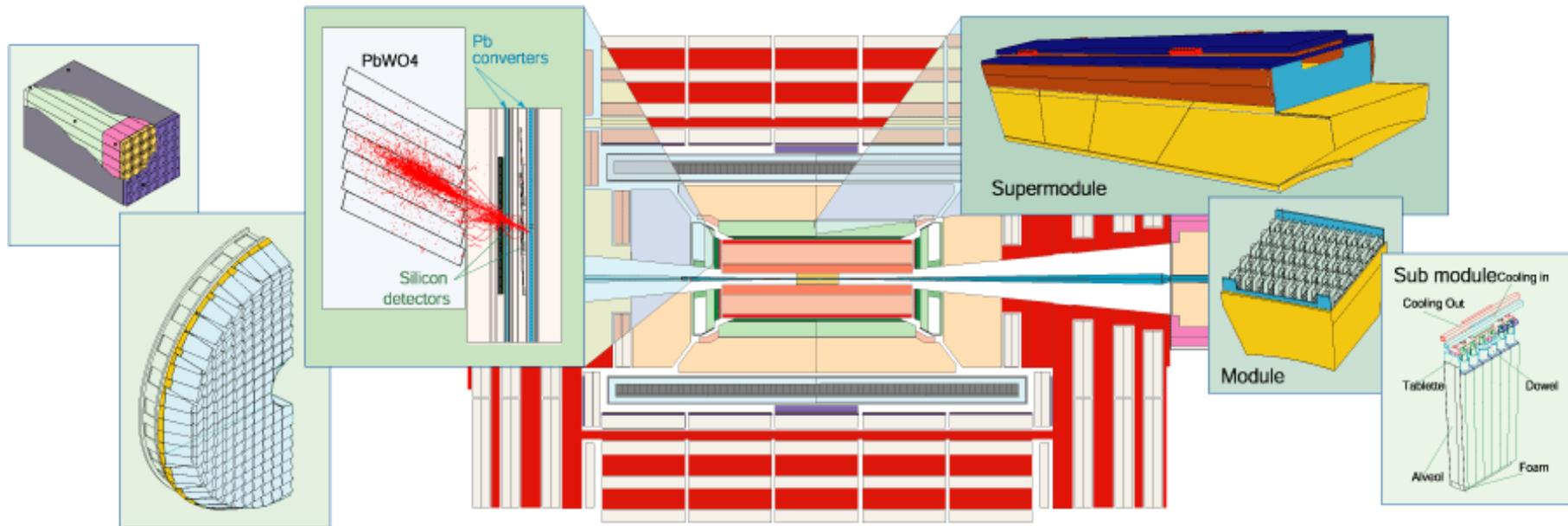


Ad es. CMS tracker...

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



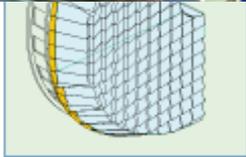
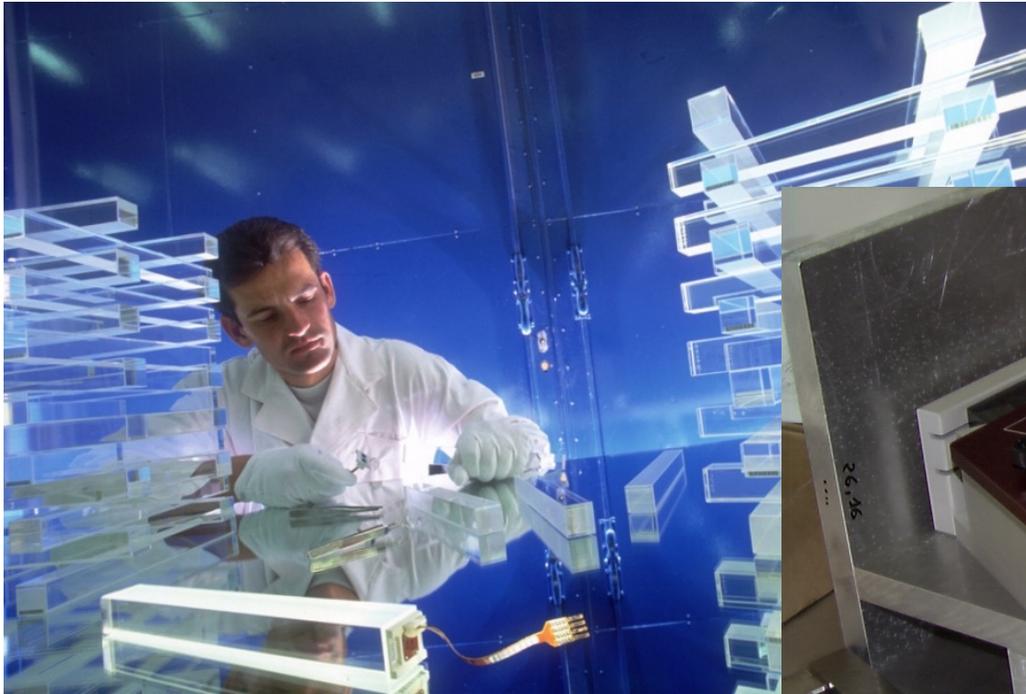
Ad es. CMS ECAL...

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

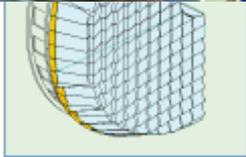
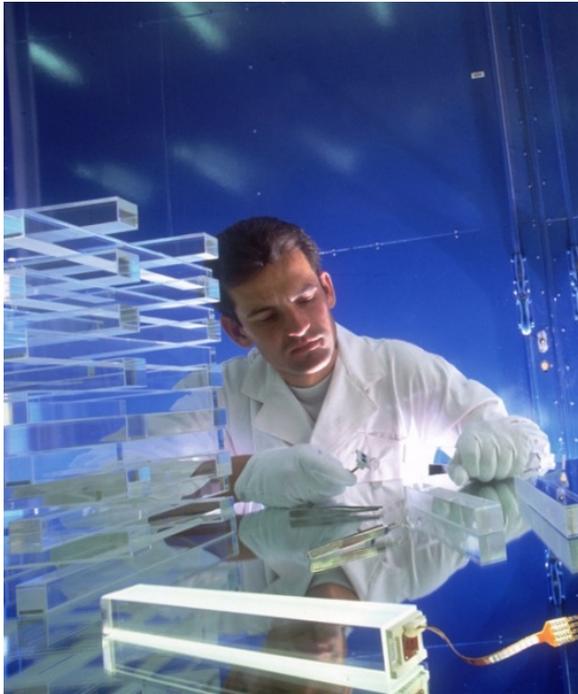
Ad es. CMS ECAL...

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

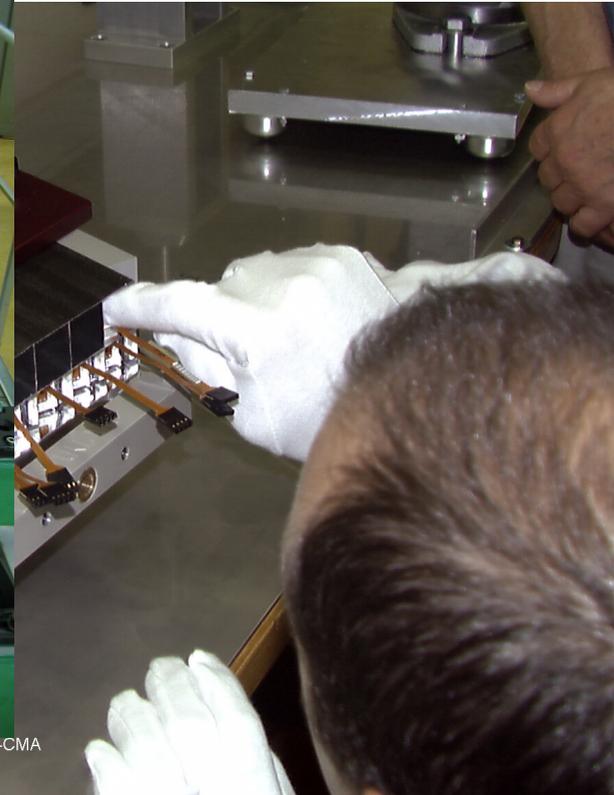
La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale

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

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



CERN Labo 27 EP-CMA
22 June 99-7



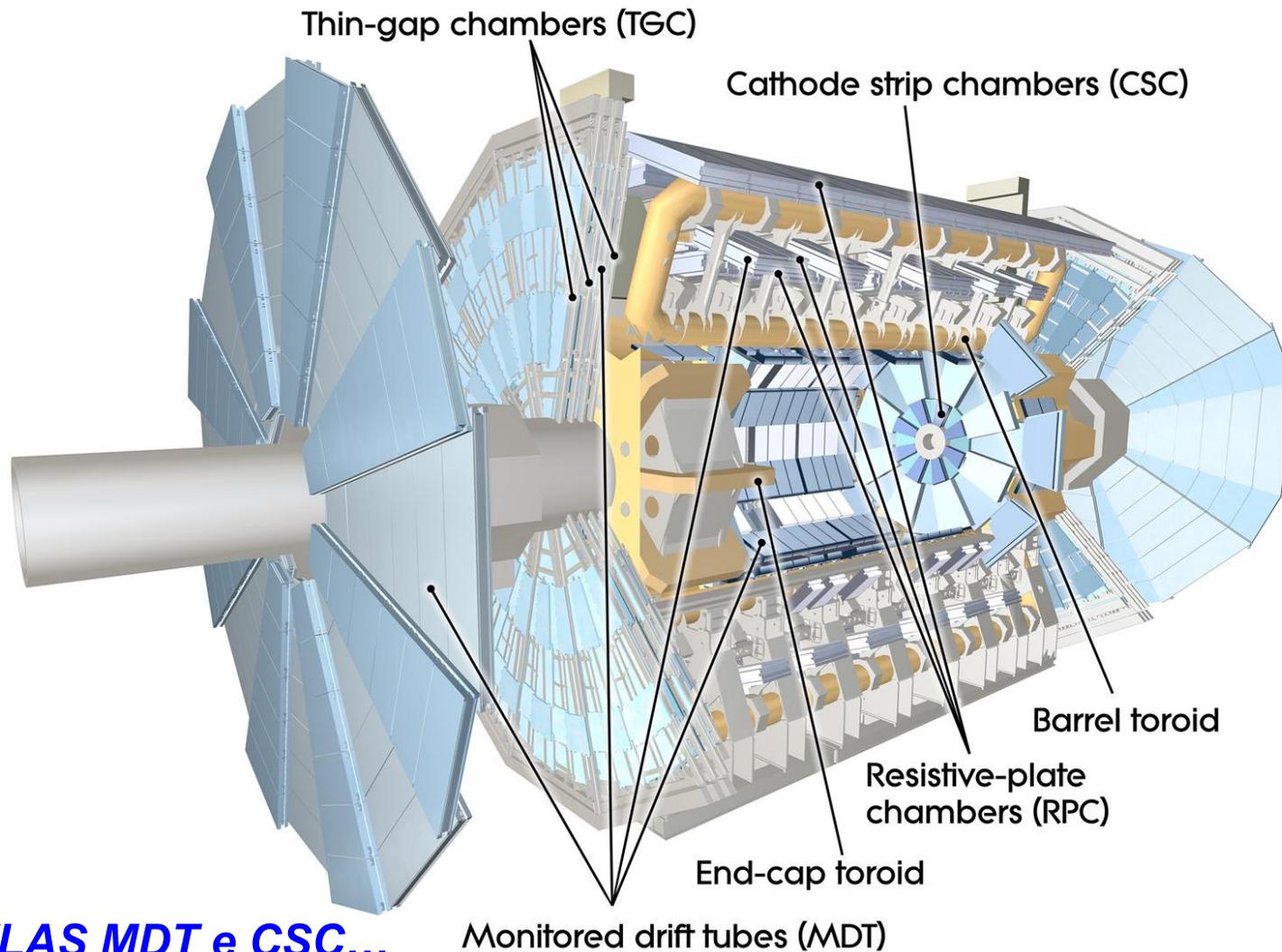
Ad es. CMS ECAL...

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

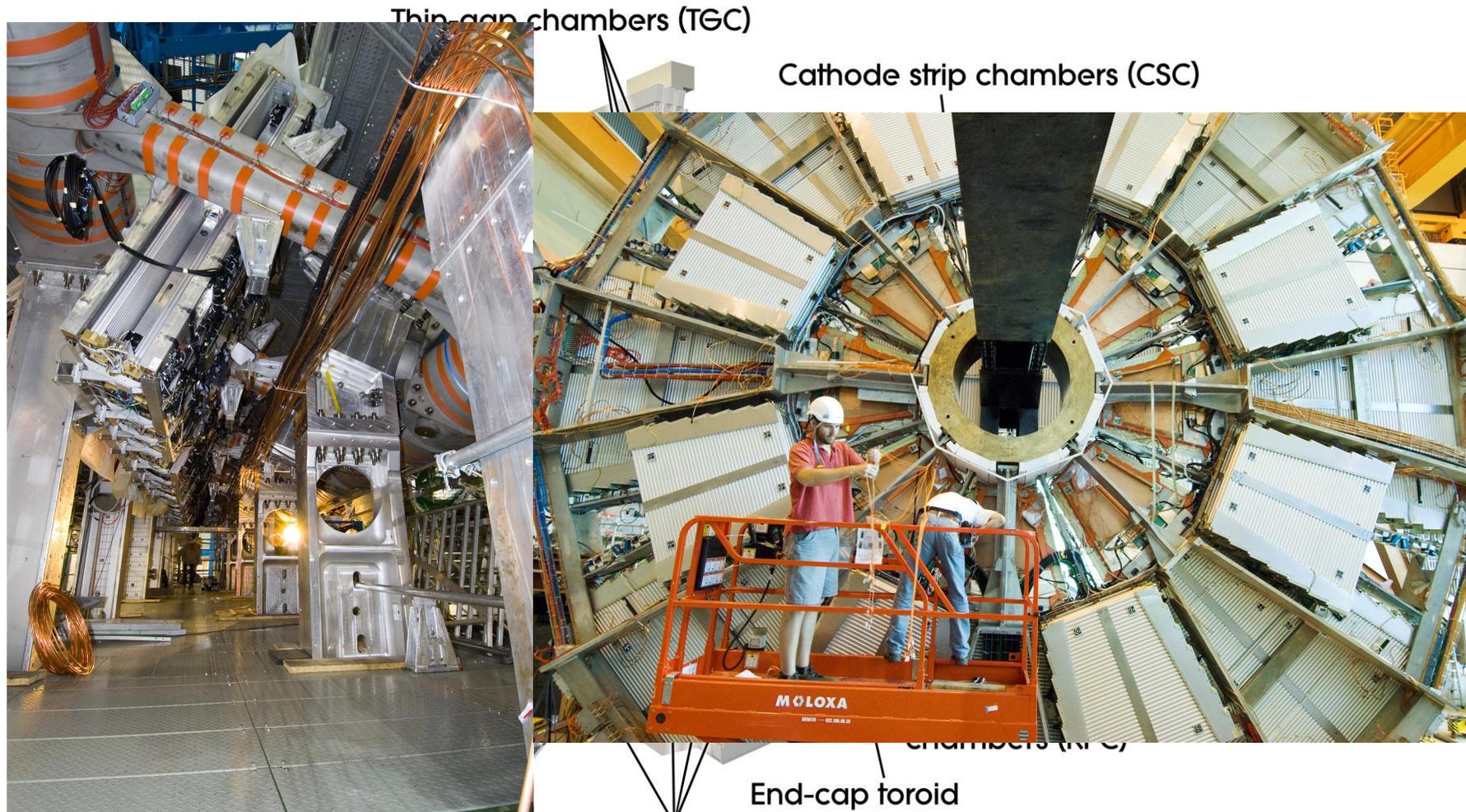
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



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