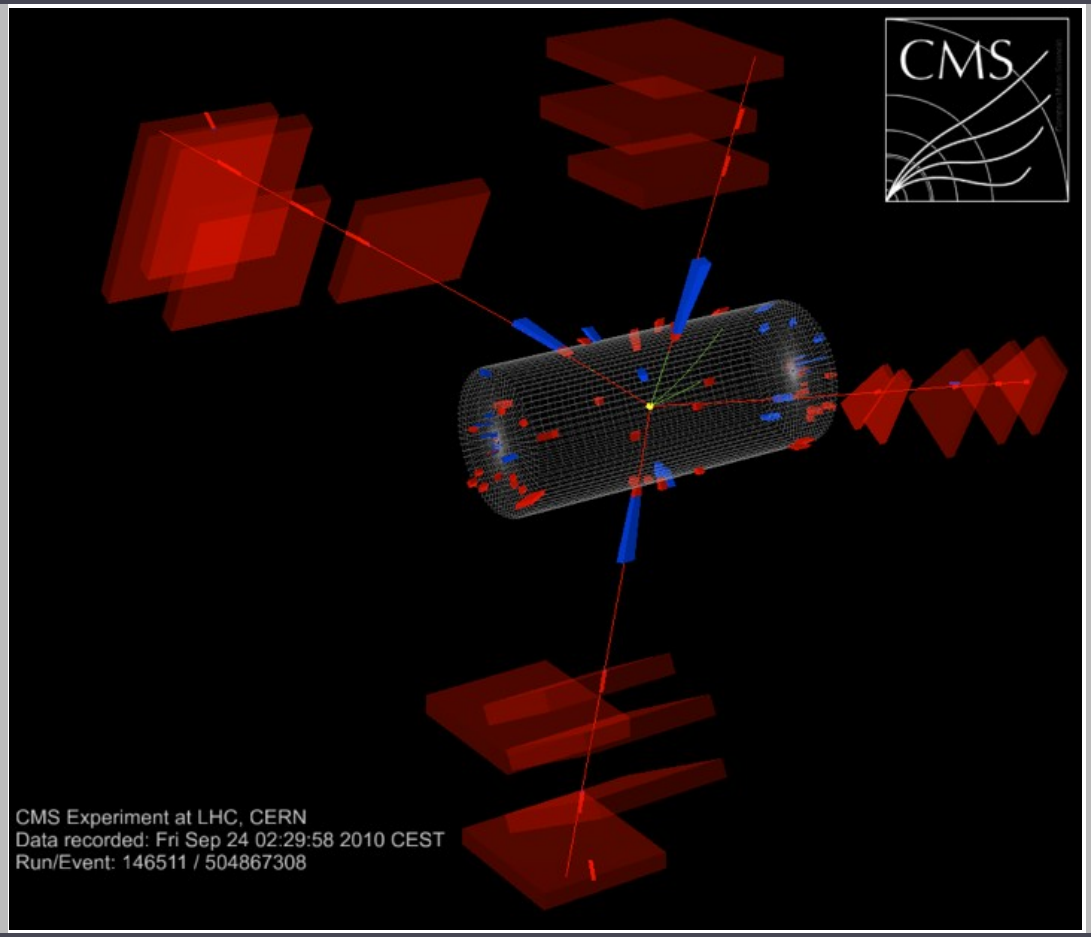
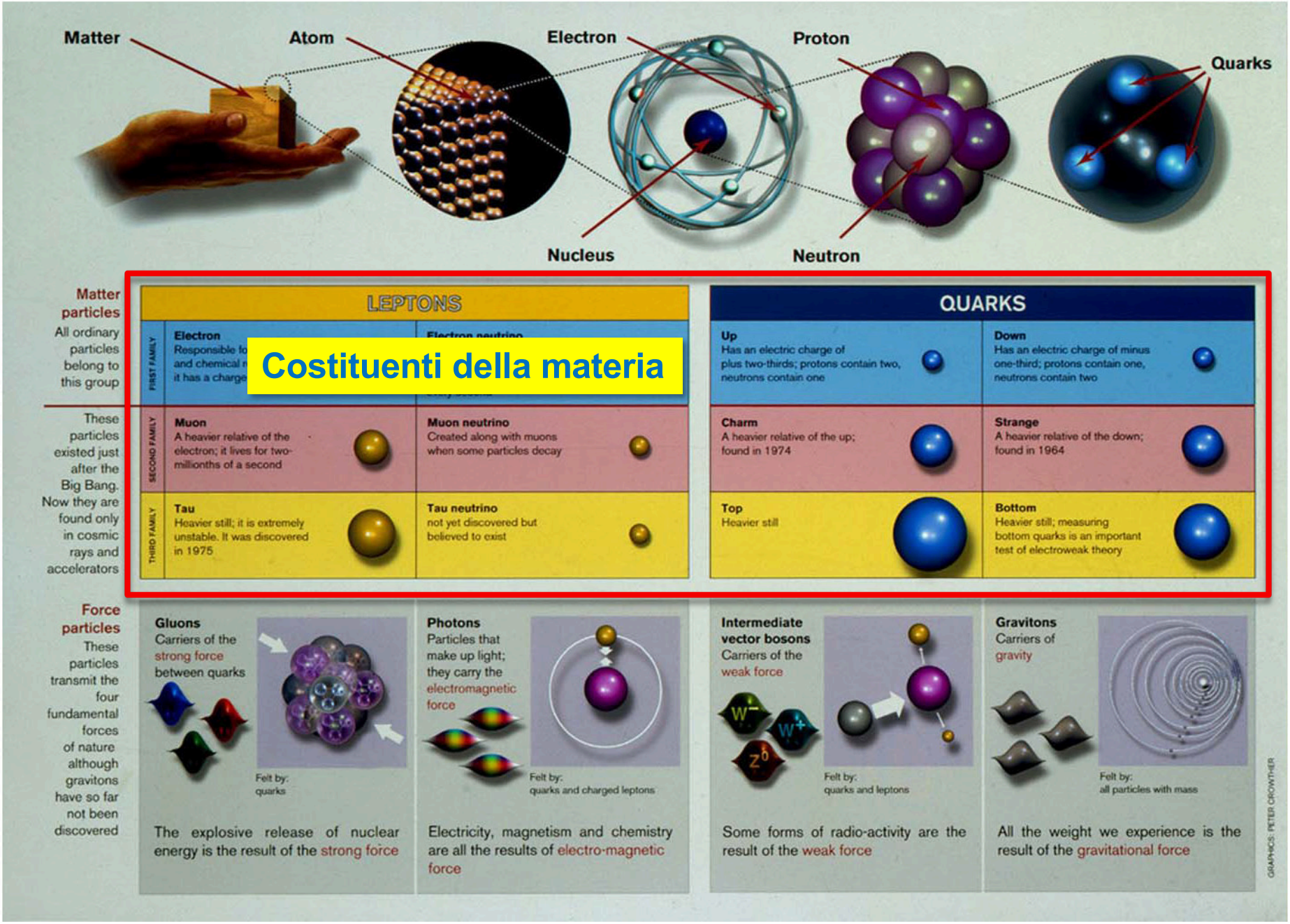
La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

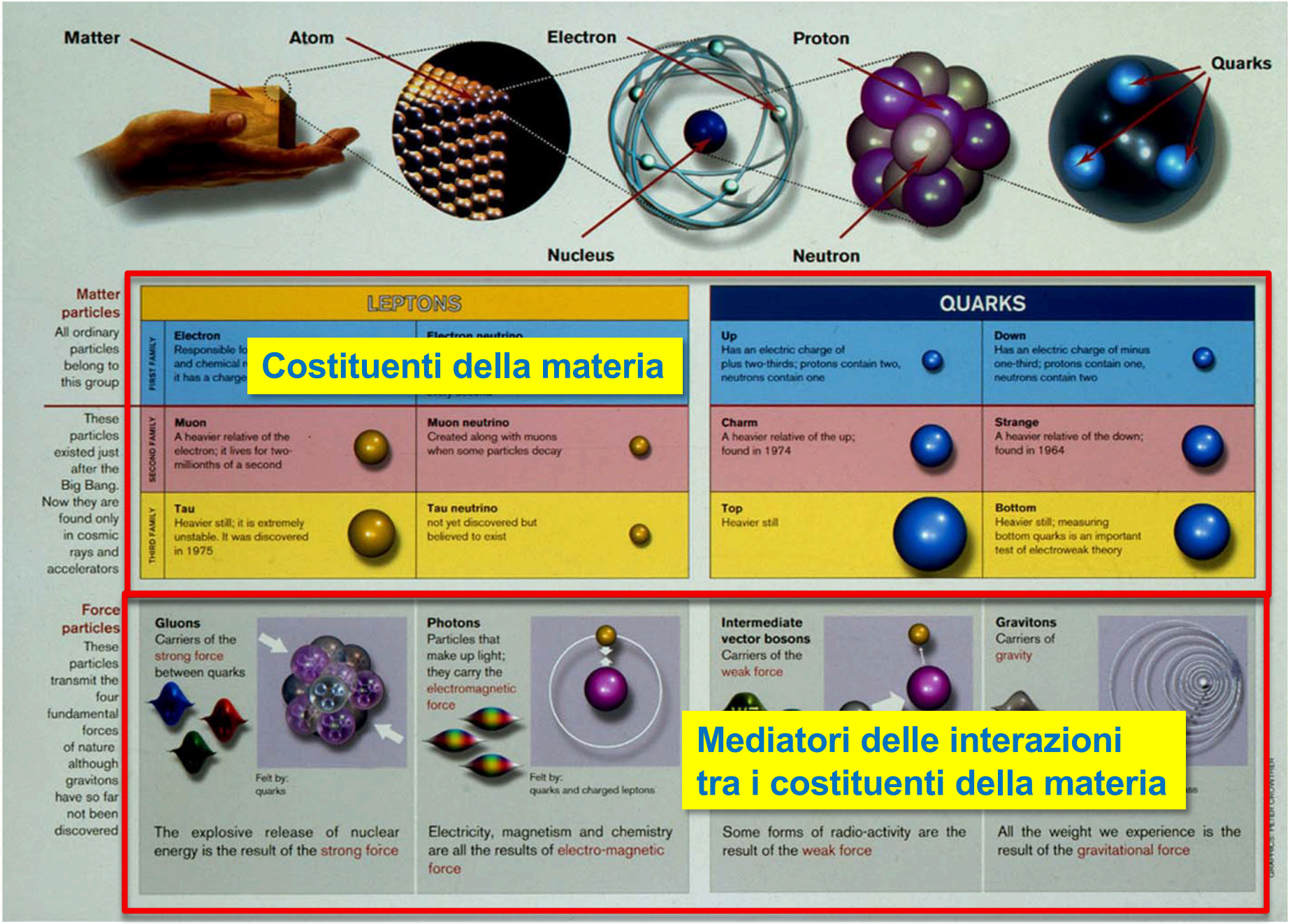
Fabio Cossutti – INFN Trieste

Masterclass 2022



Matter
Atom
Electron
Proton
Quarks
Nucleus
Neutron
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

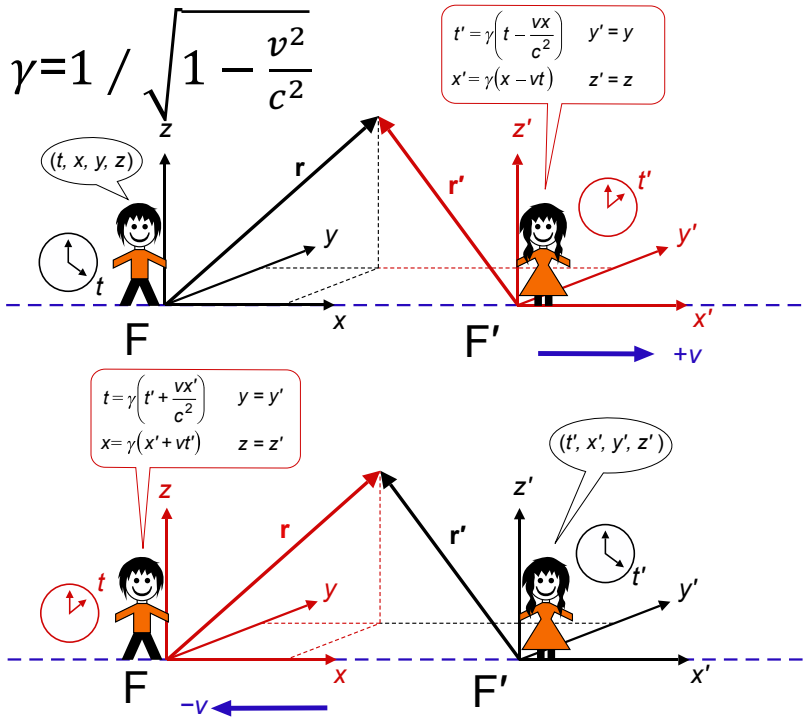

Matter
Atom
Electron
Proton
Quarks
Nucleus
Neutron
Matter particles
All ordinary particles belong to this group
These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators
LEPTONS
QUARKS
FIRST FAMILY
Electron
Responsible fo
and chemical r
it has a charge
Electron neutrino
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
Atom
Electron
Proton
Quarks
Nucleus
Neutron
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
SECOND FAMILY
THIRD FAMILY
Electron
Electron neutrino
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
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
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
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
Mediatori delle interazioni tra i costituenti della materia

Fisica delle particelle elementari

Relatività ristretta

$$\gamma = 1 \Big/ \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



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

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:

+

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

Fermi's Golden Rule

Transition probability — *Matrix element for the interaction* — *Density of final states*

Wavefunction for final state — *Wavefunction for initial state*

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

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

= **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

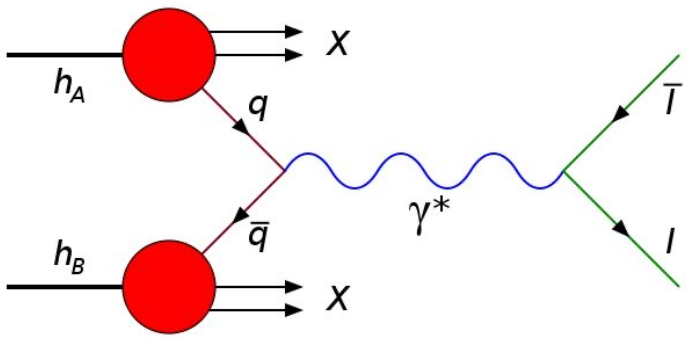
Dalla teoria...

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

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

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

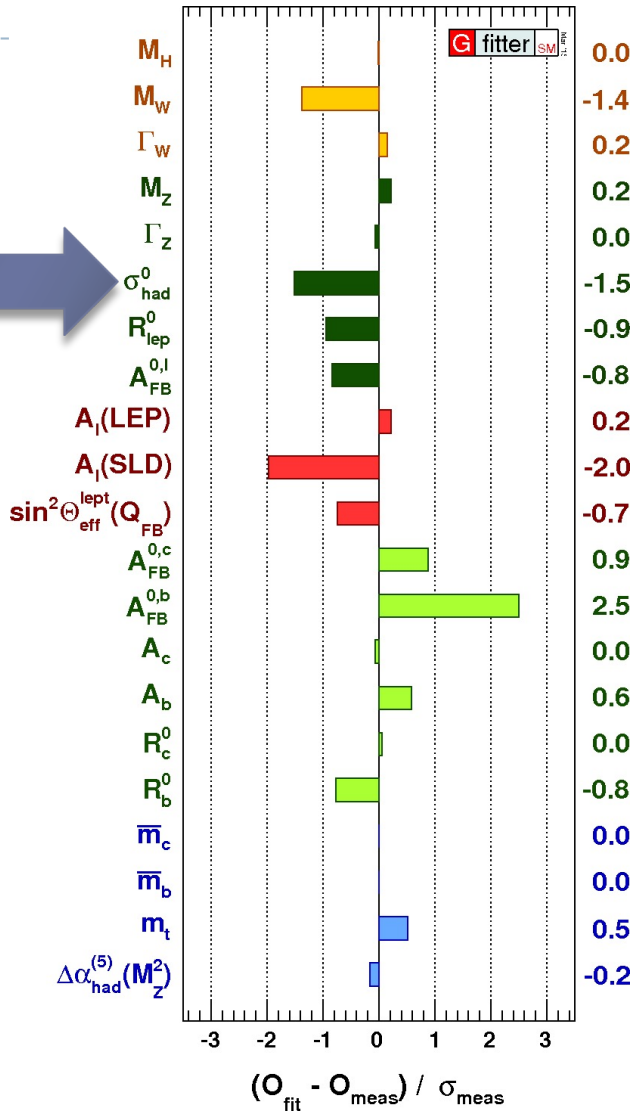
- Potete condensare il Modello Standard in una espressione matematica che spiega le interazioni tra particelle
  - Parametri liberi: masse e accoppiamenti
    - la "forza" con cui le particelle interagiscono tra loro



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

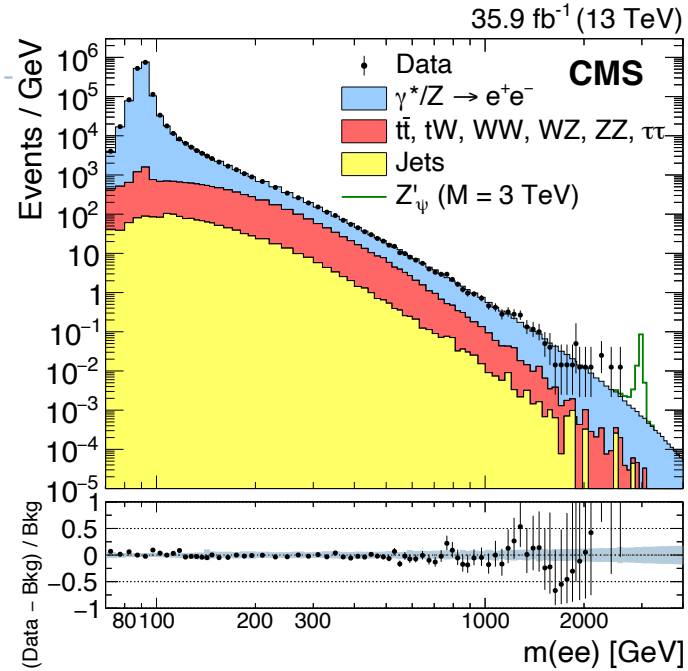
… alla misura sperimentale

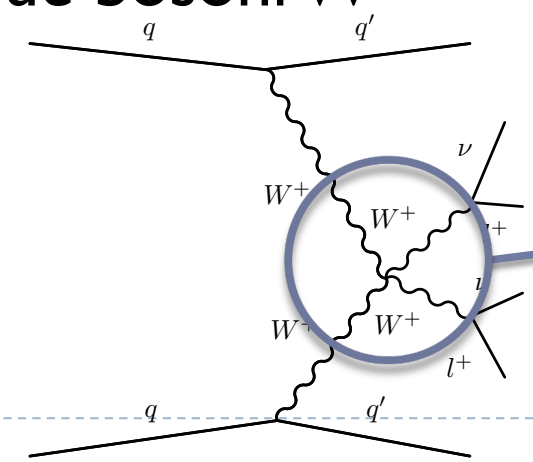
- Due tipi di analisi sperimentali:
  - Misure di precisione delle caratteristiche predette dal modello (parametri fondamentali, grandezze misurabili in urti tra particelle ad esse collegate…)
    - deviazioni dalle predizioni possono indicare fisica oltre il Modello Standard
  - Ricerca diretta di "nuova 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"

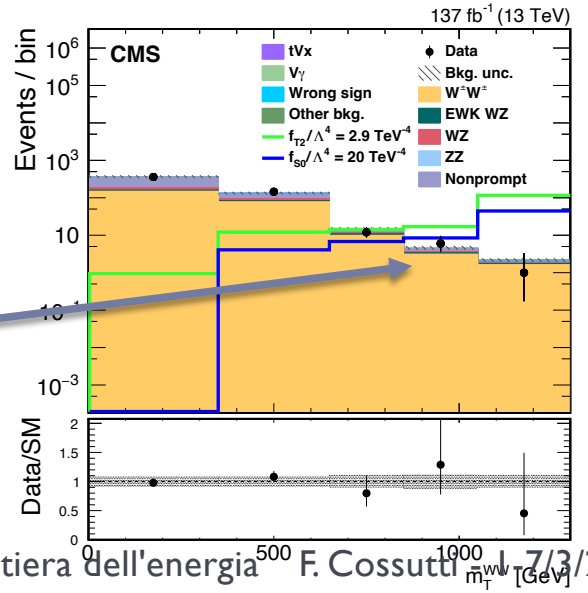


Due facce della stessa medaglia

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

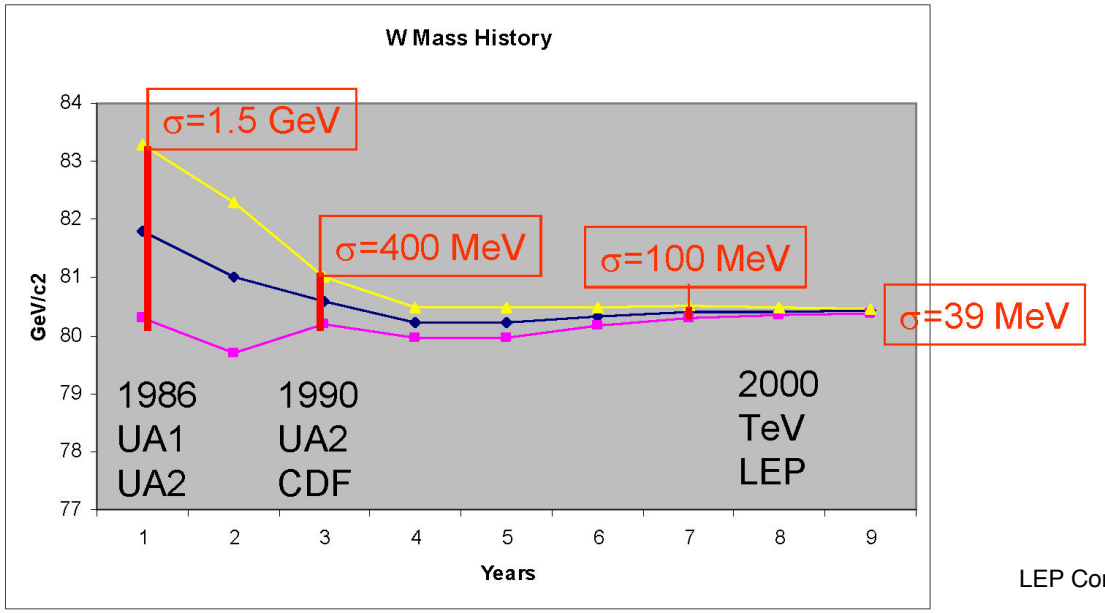






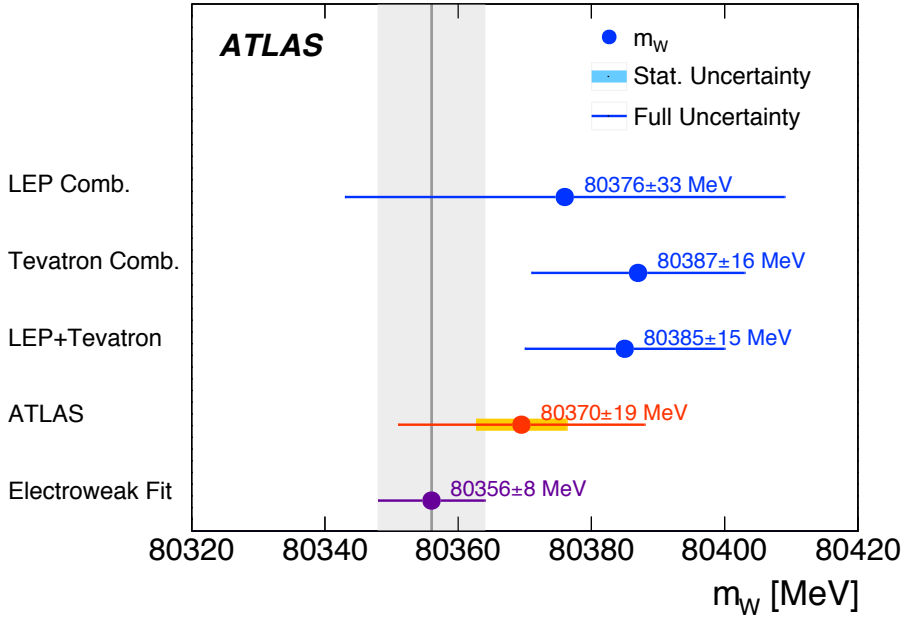
Se nuove particelle scambiate nel vertice tra 4 W

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

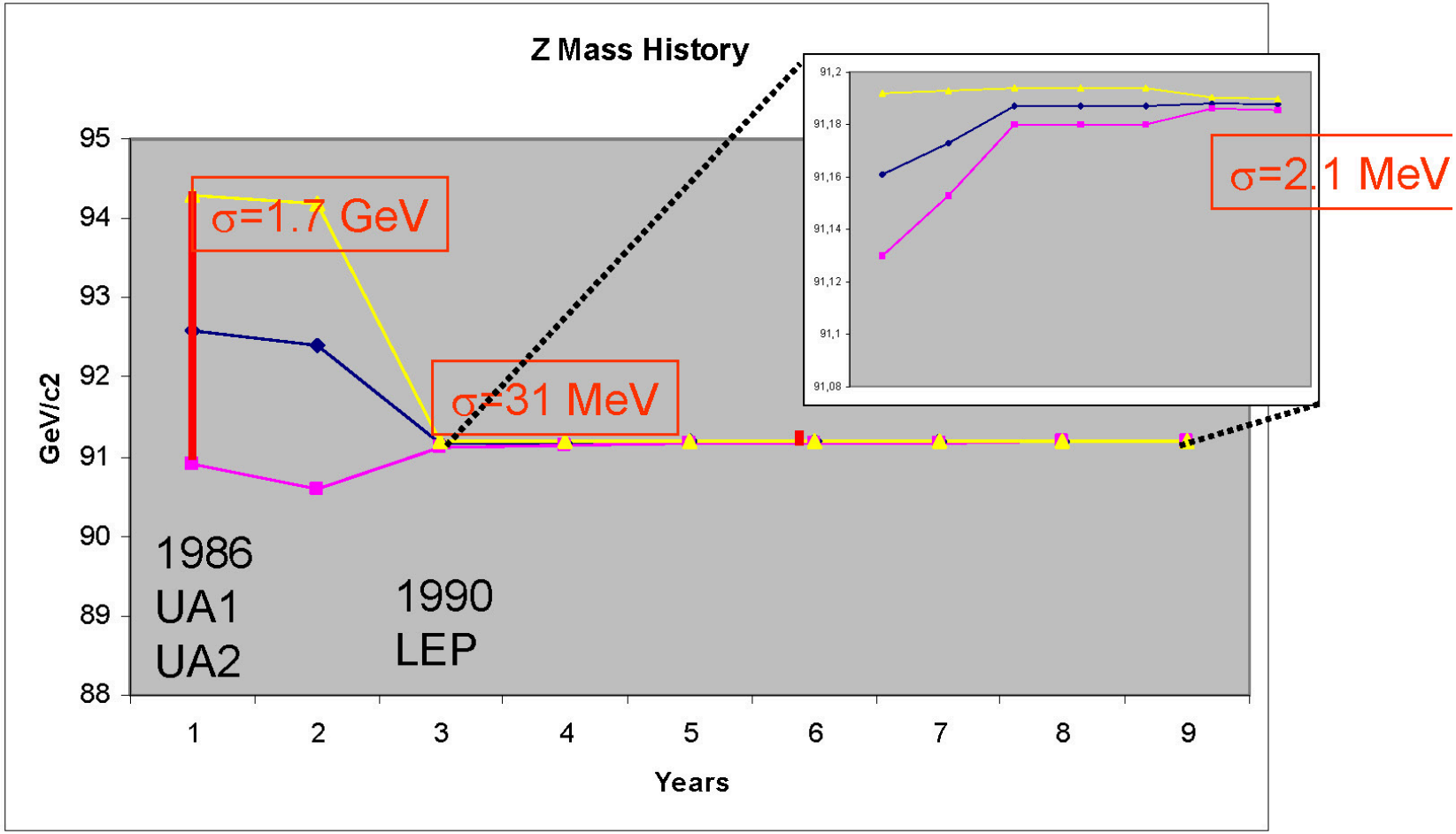


Only Published Results

2017

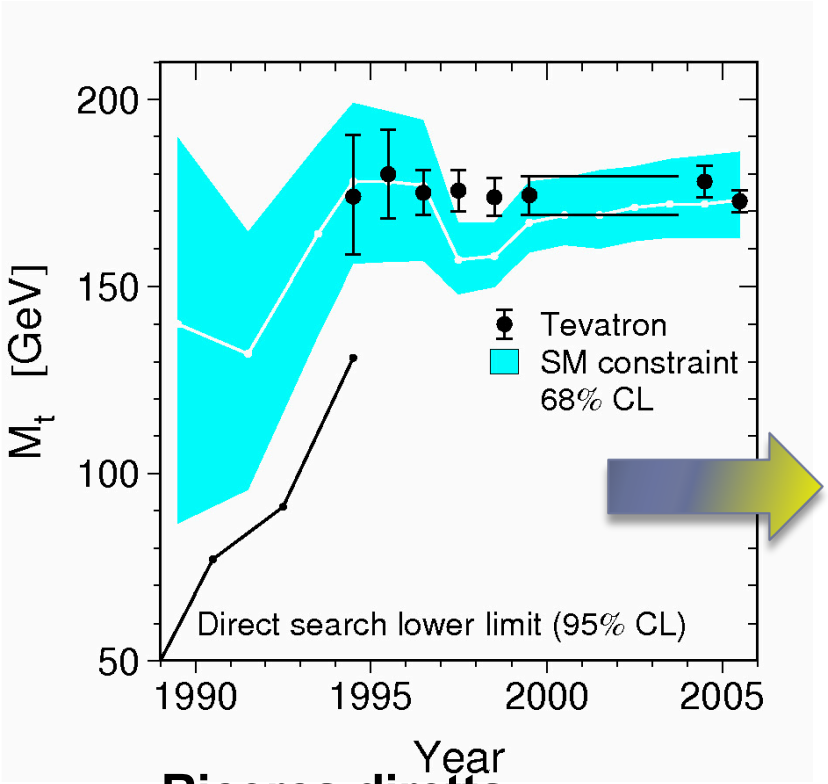


I bosoni vettori W e Z: dalla scoperta di Rubbia a noi

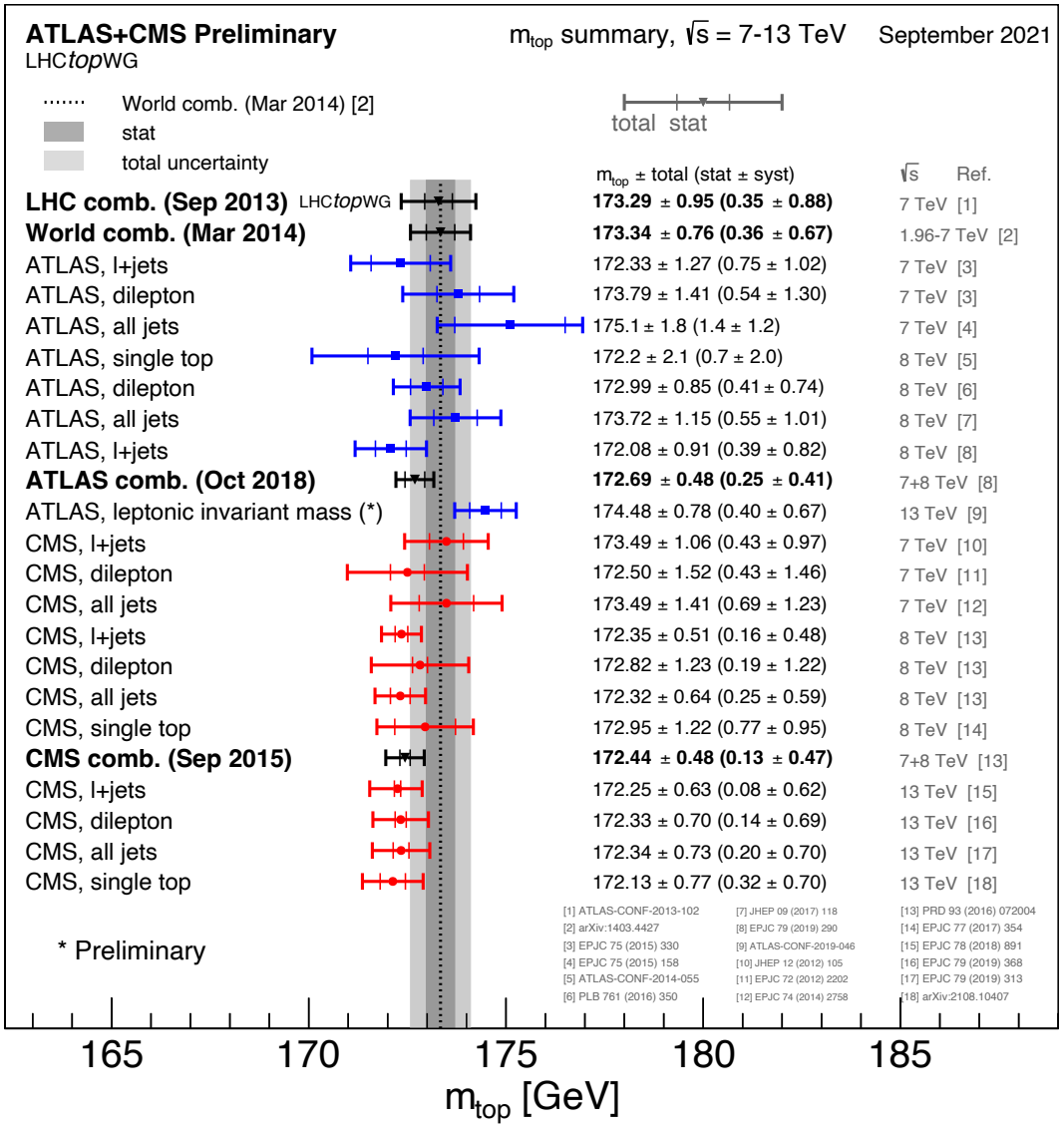


Only Published Results

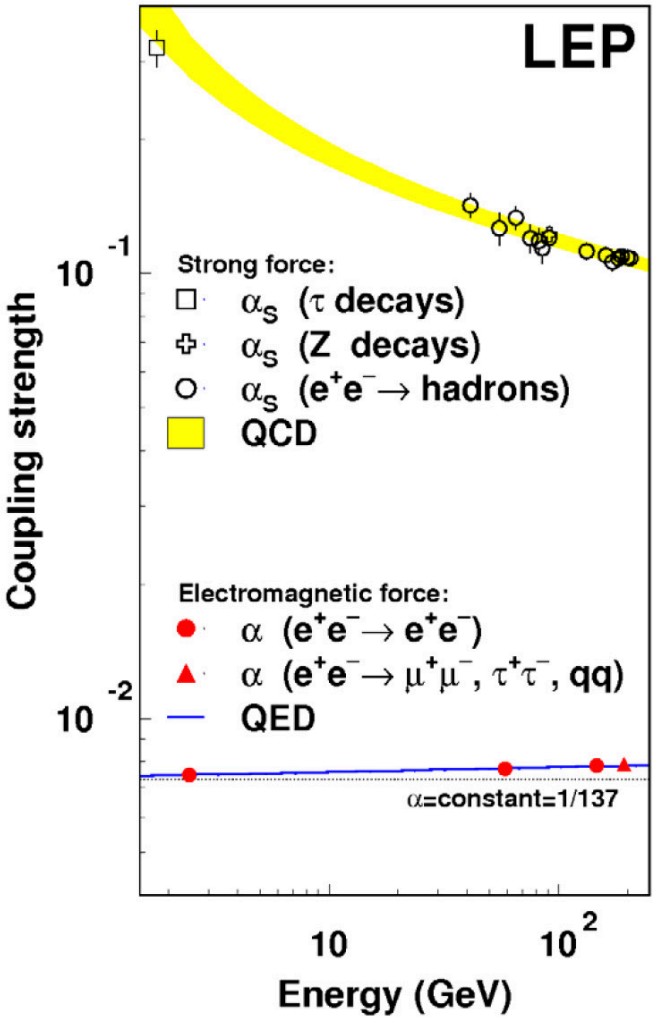
20 anni di quark top: trovato dove doveva essere



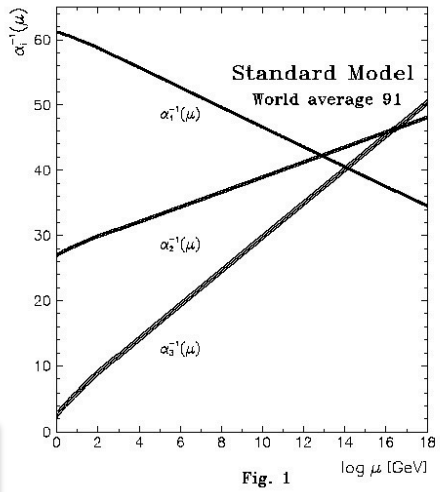
Ricerca diretta al Tevatron guidata dai vincoli dati dal Modello Standard Mediante le misure di LEP

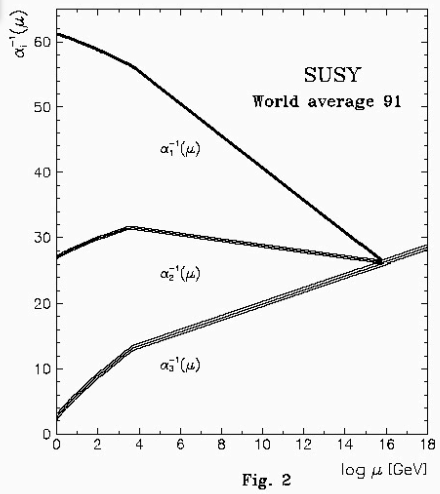


Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento



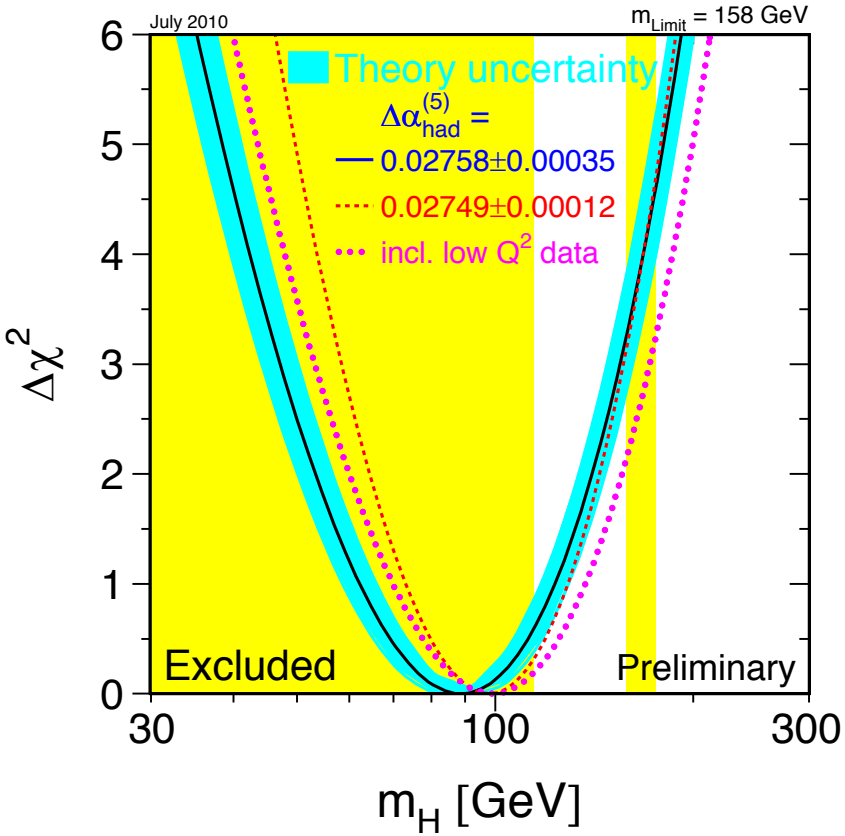
La "forza" con cui le particelle si accoppiano dipende dall'energia a cui lo fanno

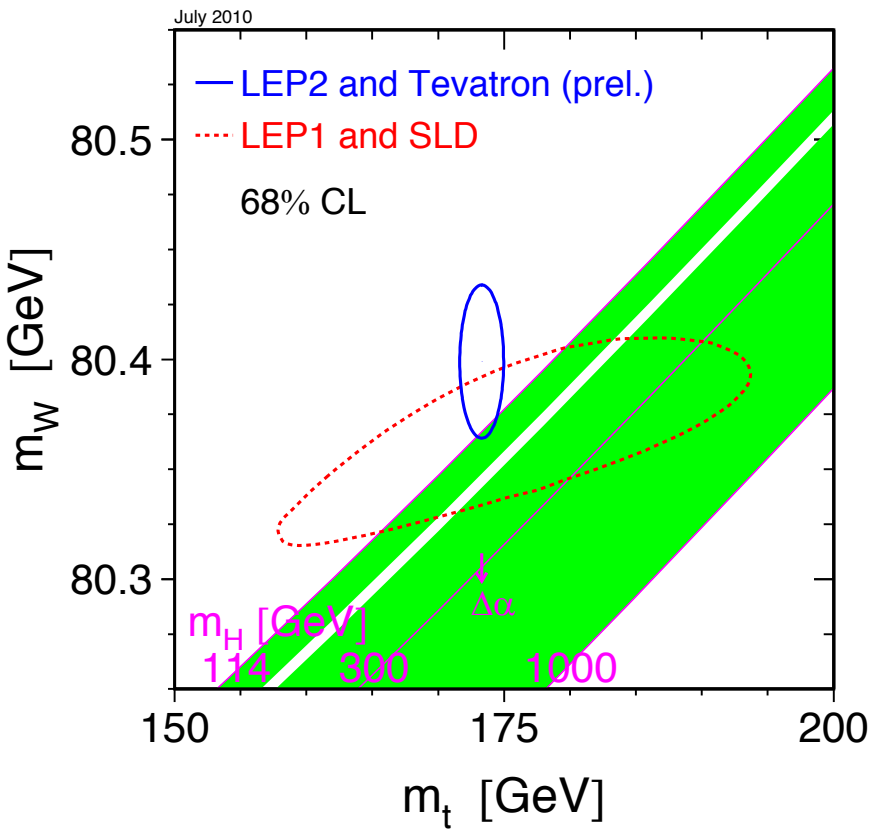




Perchè tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

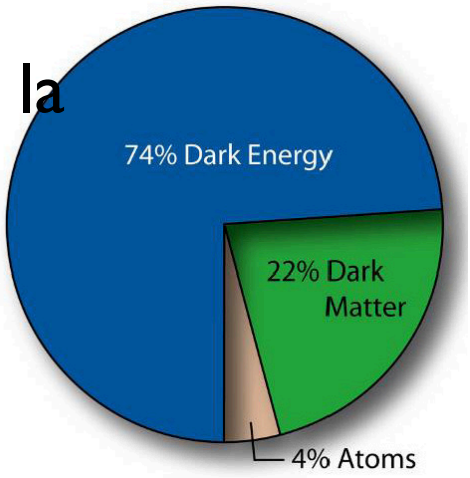
2010:
M_H=89+35-26 GeV @ 68% C.L.





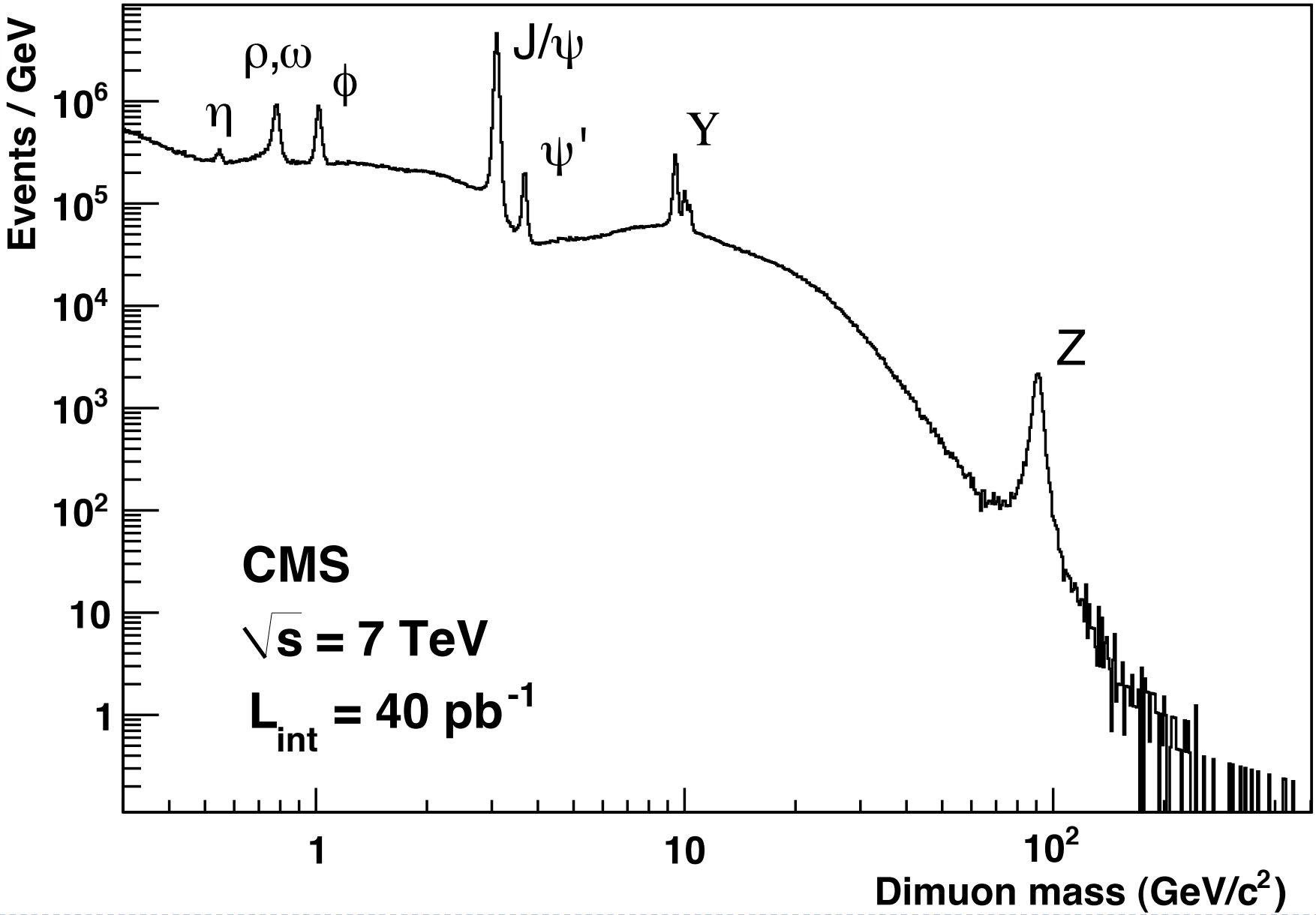
Le domande per LHC

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

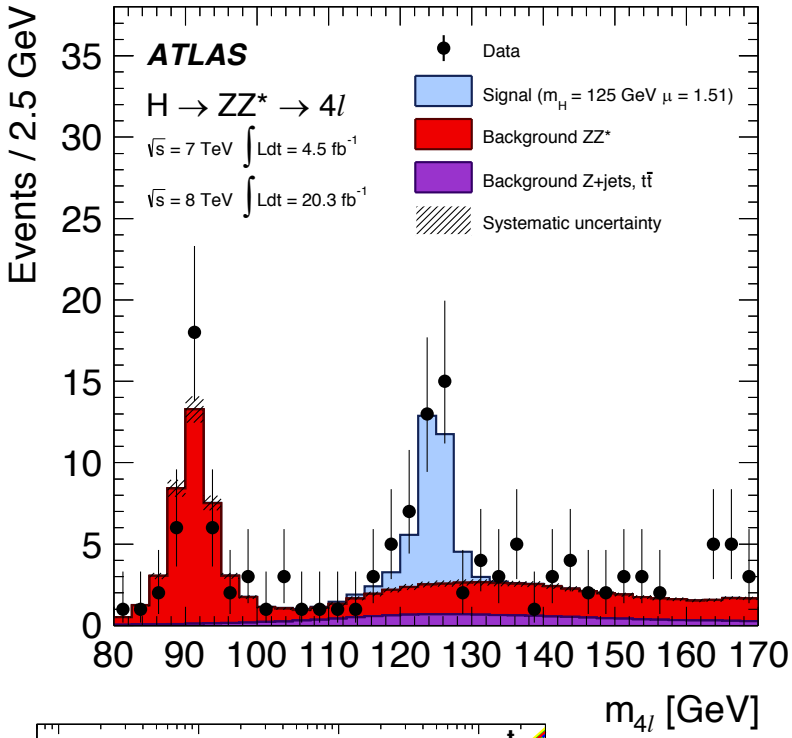


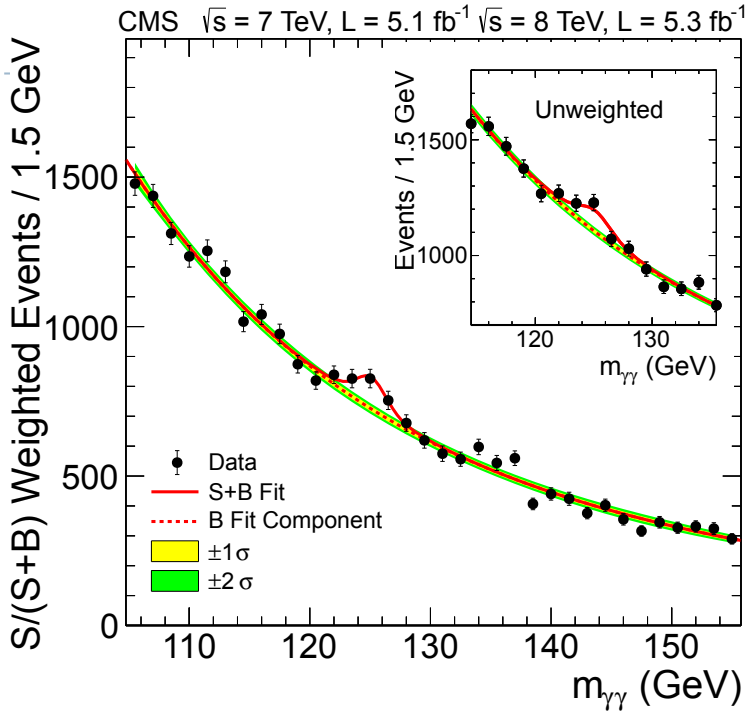
Il Modello Standard non può essere la fine della storia…

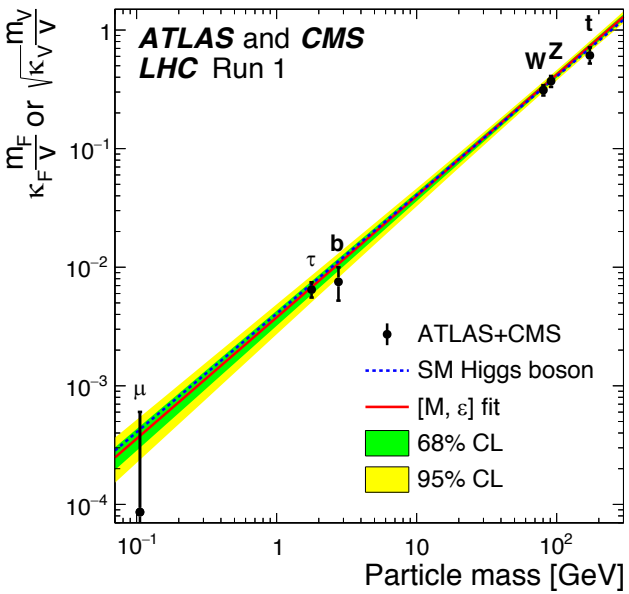
Dopo pochi mesi di run nel 2010...

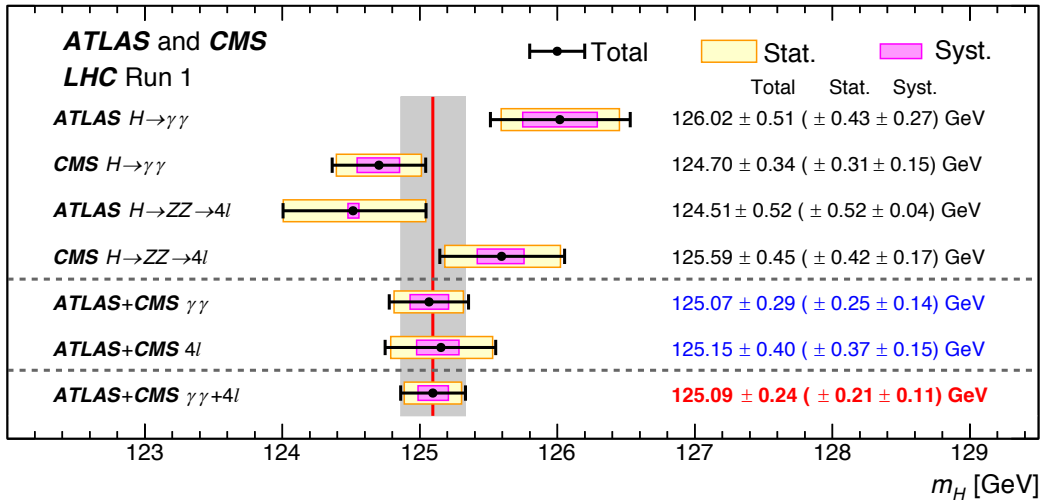


Dopo 3 anni di run...



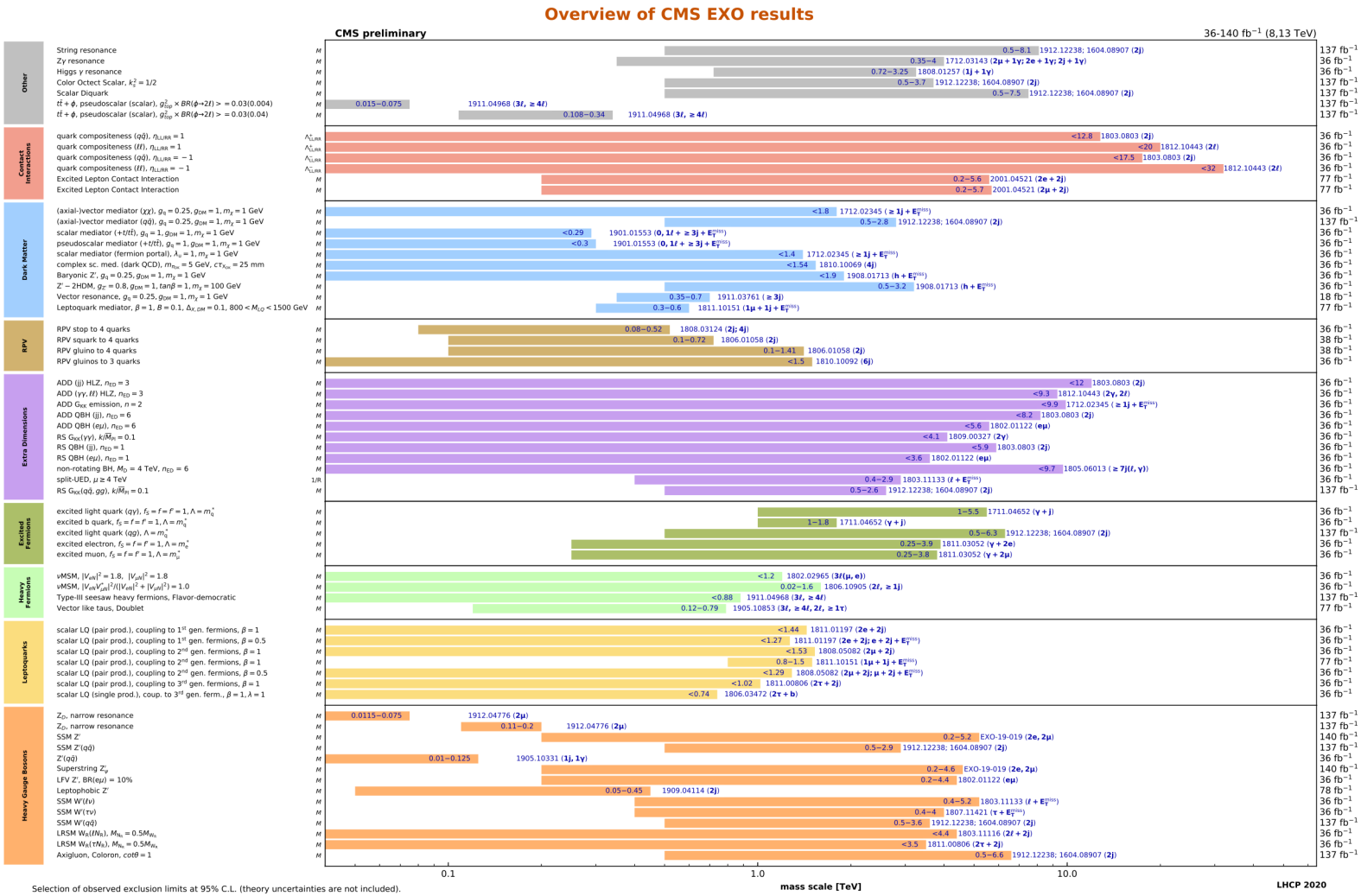






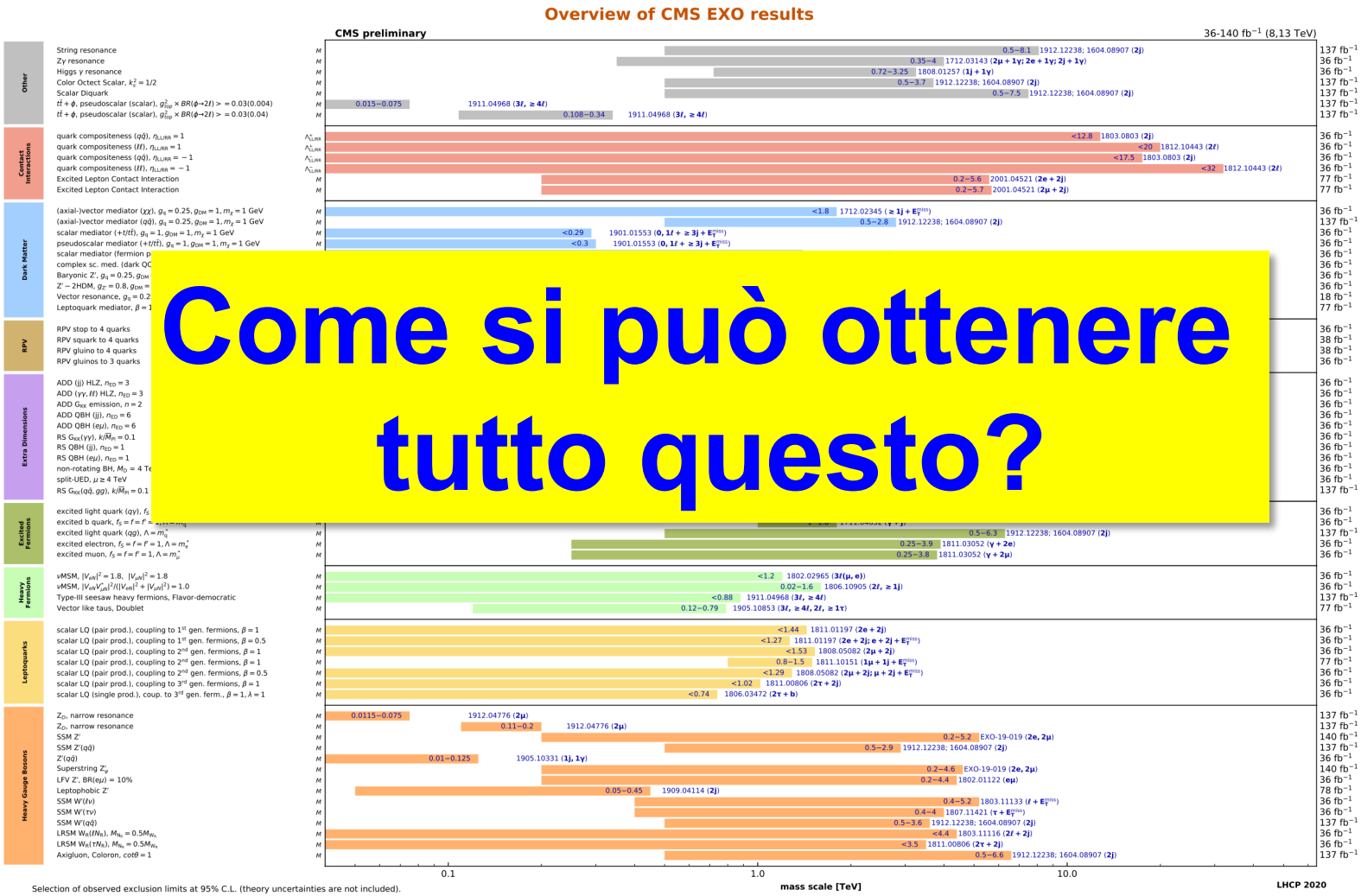
Oggi

Massa caratteristica di nuovi modelli di interazione esclusi dalle ricerche dirette a LHC



Oggi

Massa caratteristica di nuovi modelli di interazione esclusi dalle ricerche dirette a LHC



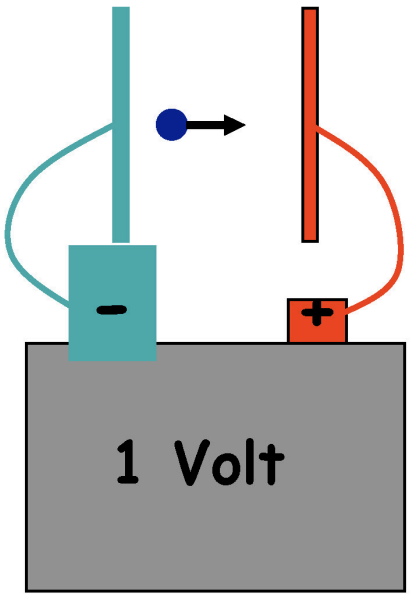
Come si può ottenere tutto questo?

Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) = 10^9 eV

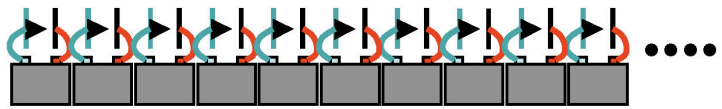
$m_{protone}$ = 0.938 GeV = 1.67262158(31) x 10^{-27} Kg

$m_{elettrone}$ = 0.0005 GeV = 9.109 x10^{-31} Kg



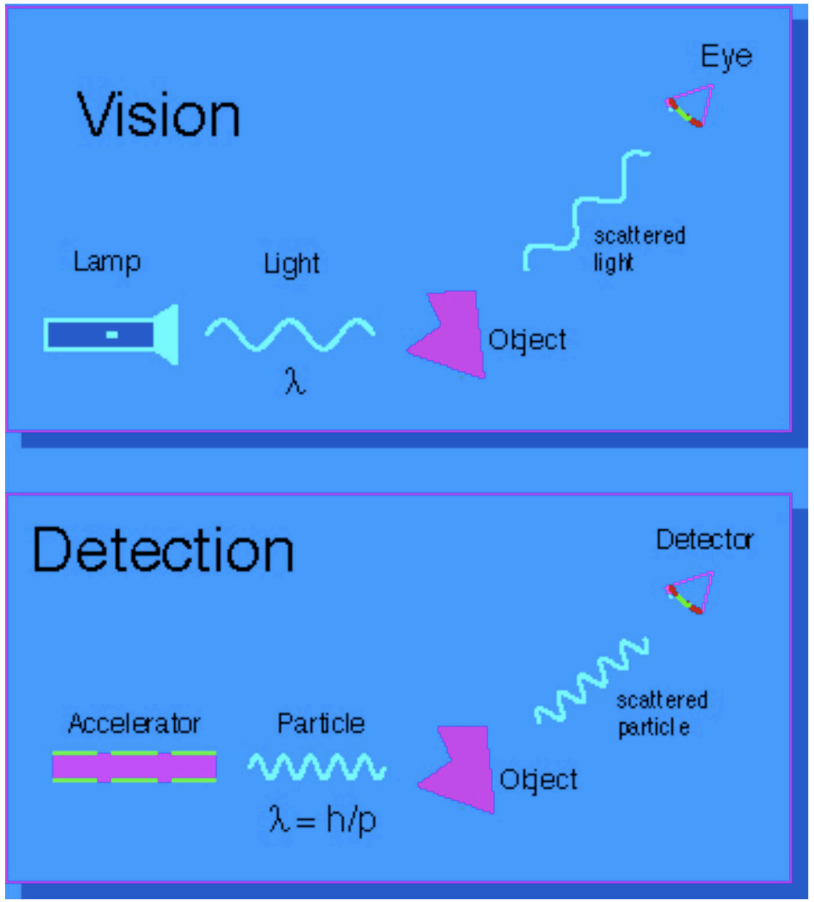
E =1 eV

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



Perché vogliamo accelerare le particelle a così alte energie?

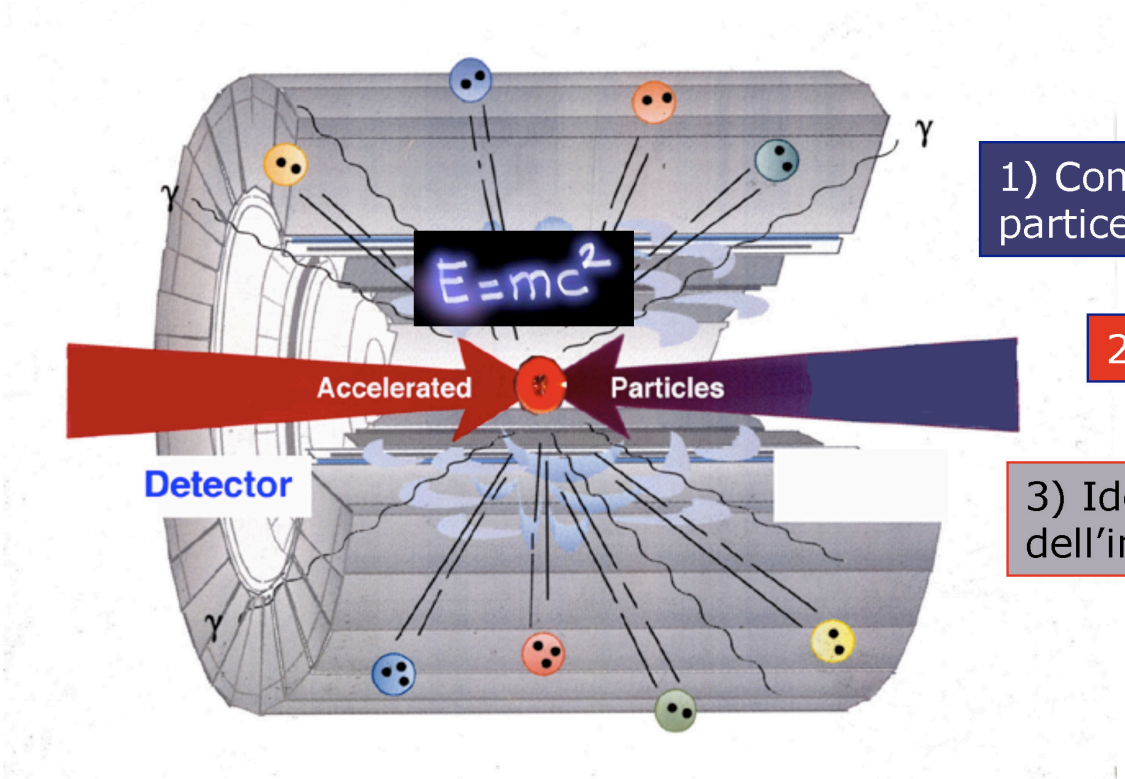
L' osservazione del microcosmo



I piu` piccoli dettagli "risolvibili" hanno dimensioni confrontabili con λ della radiazione incidente.

Particelle di alta energia sono gli "esploratori del microcosmo"

Perchè un collisionatore ?



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

2) Fare collidere le particelle

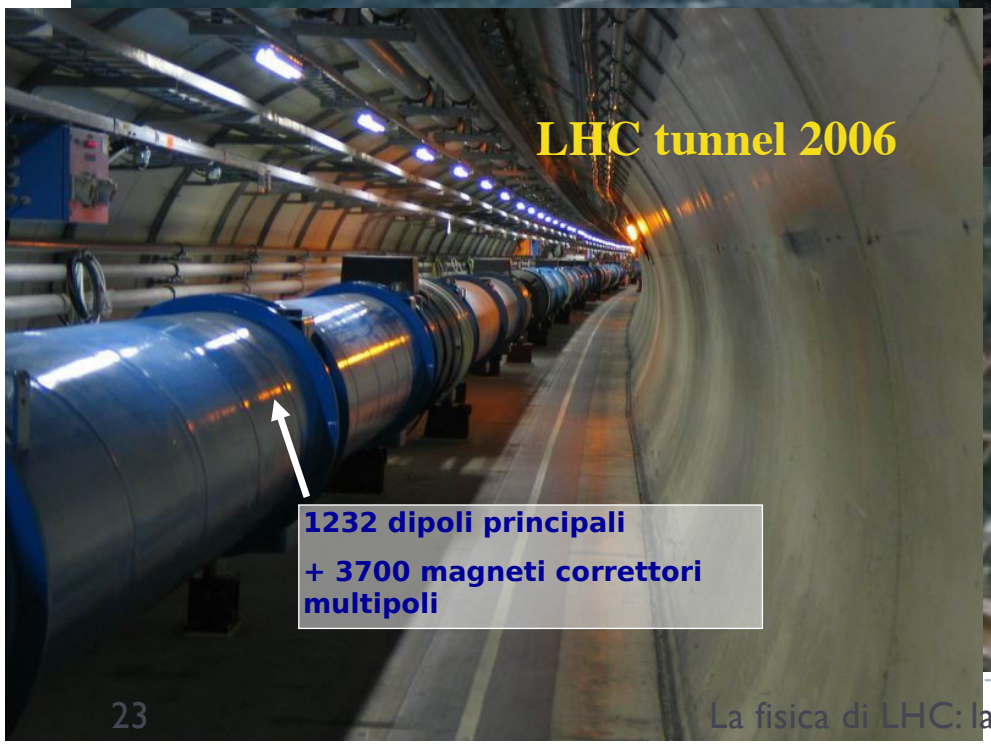
3) Identificare i prodotti dell'interazione nel **Rivelatore**

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

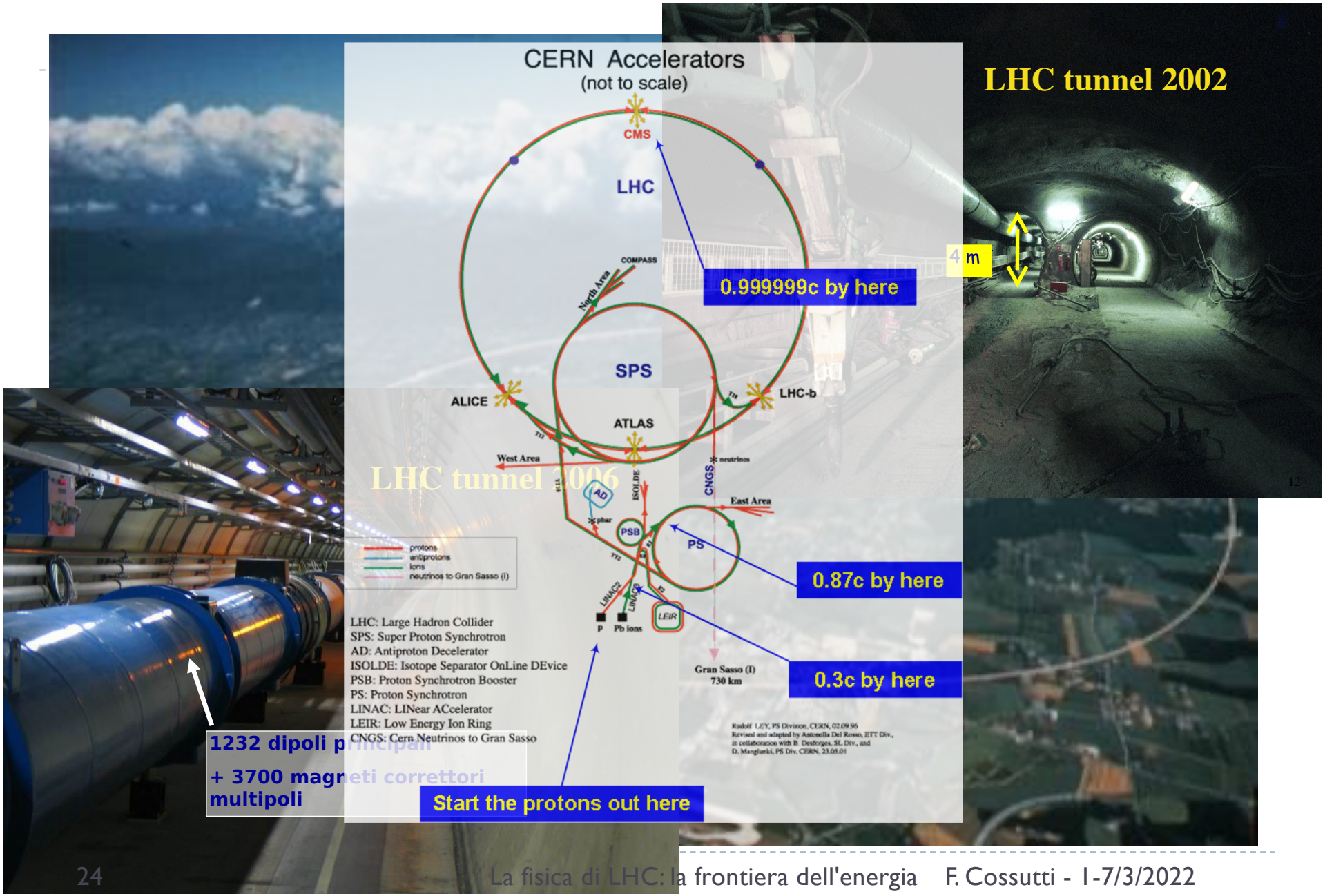
Collider vs bersaglio fisso: più energia nel centro di massa a parità di energia del fascio

Large Hadron Collider

Large Hadron Collider



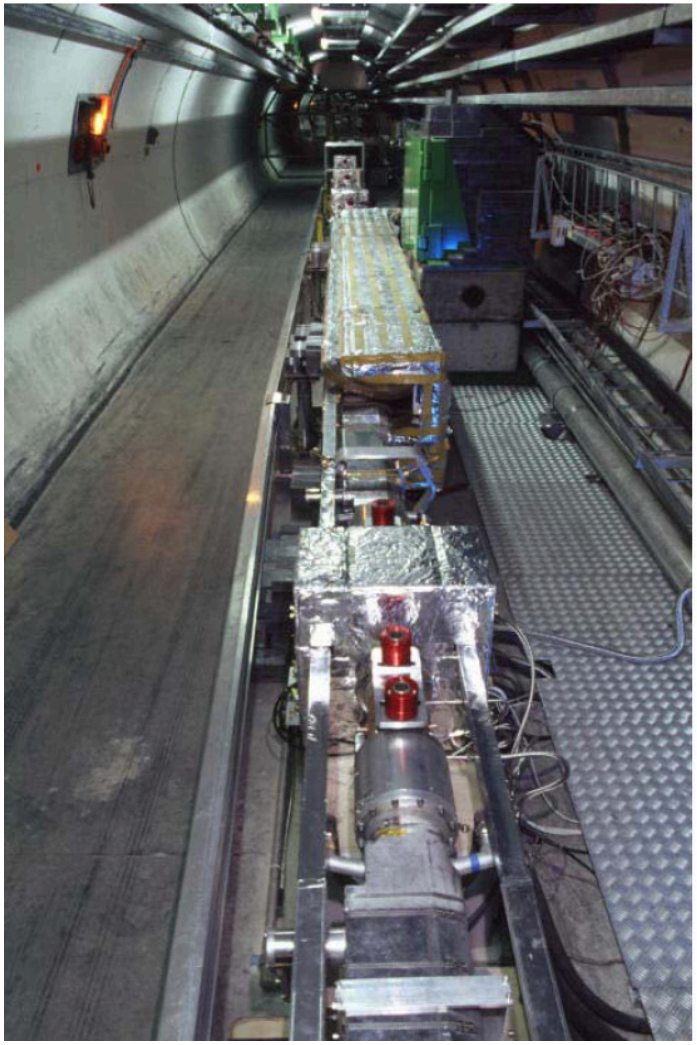
Large Hadron Collider

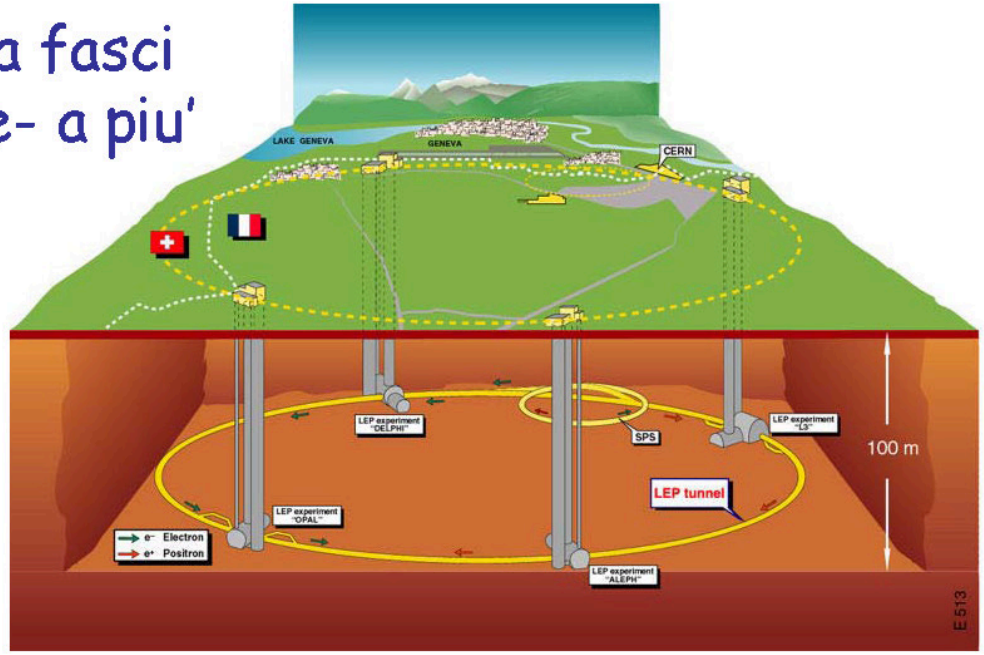


Un po' di storia:

LEP

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

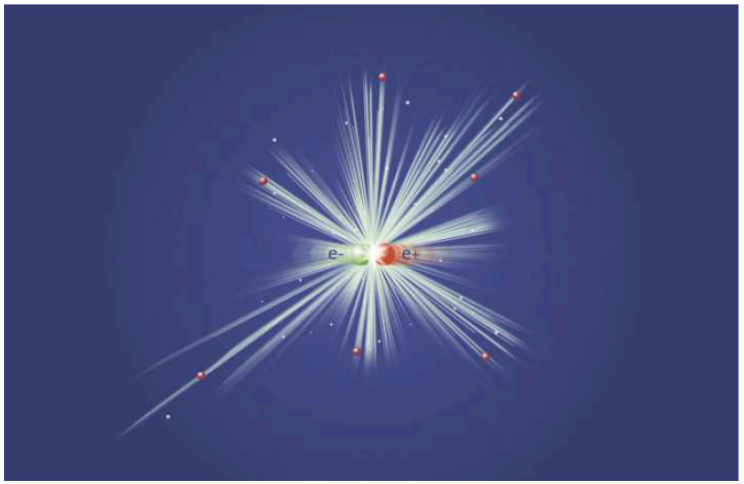




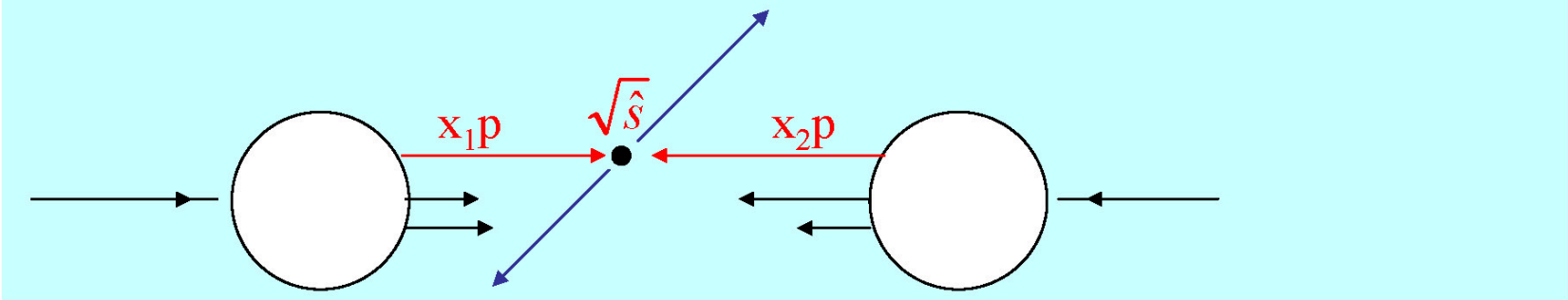
- LEP, un anello di 27 Km
- Fasci di elettroni e positroni di oltre 100 GeV
- In funzione dal 1989 al 2000
- Smontato nel 2001 per far posto a LHC : fasci di protoni da 7 TeV

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

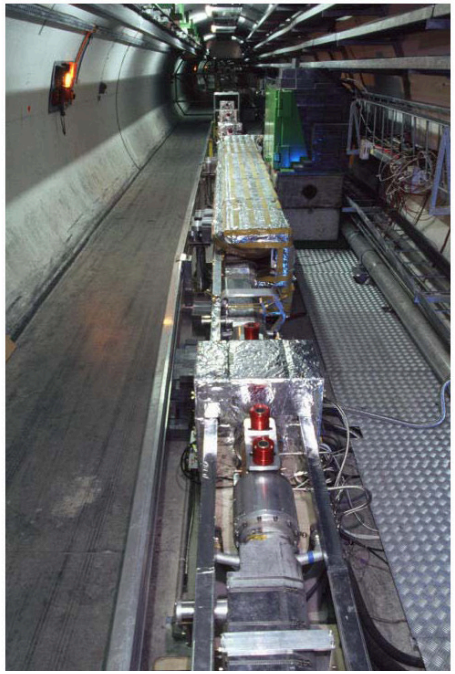
Acceleratori Circolari e……..
bolletta della luce

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

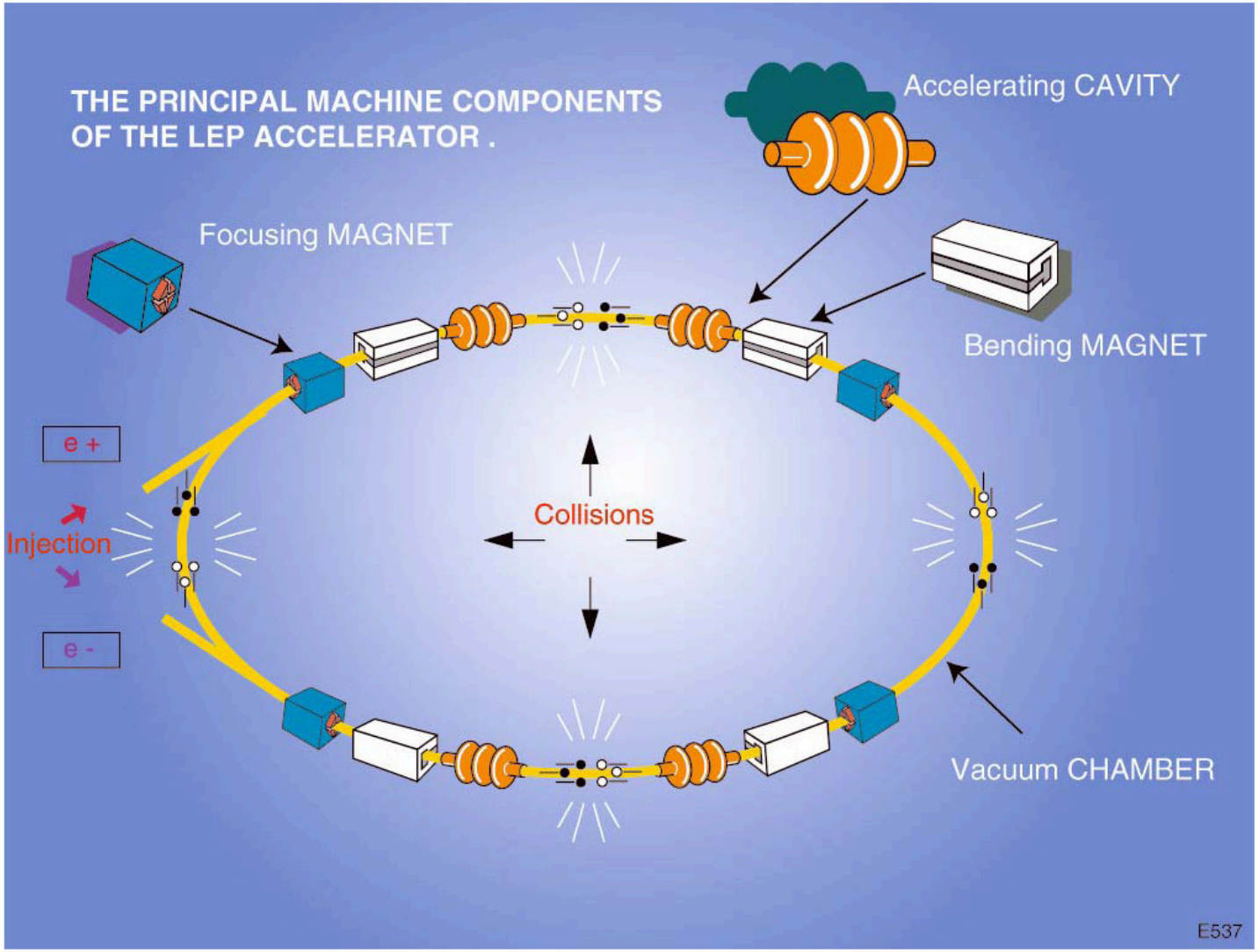
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

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

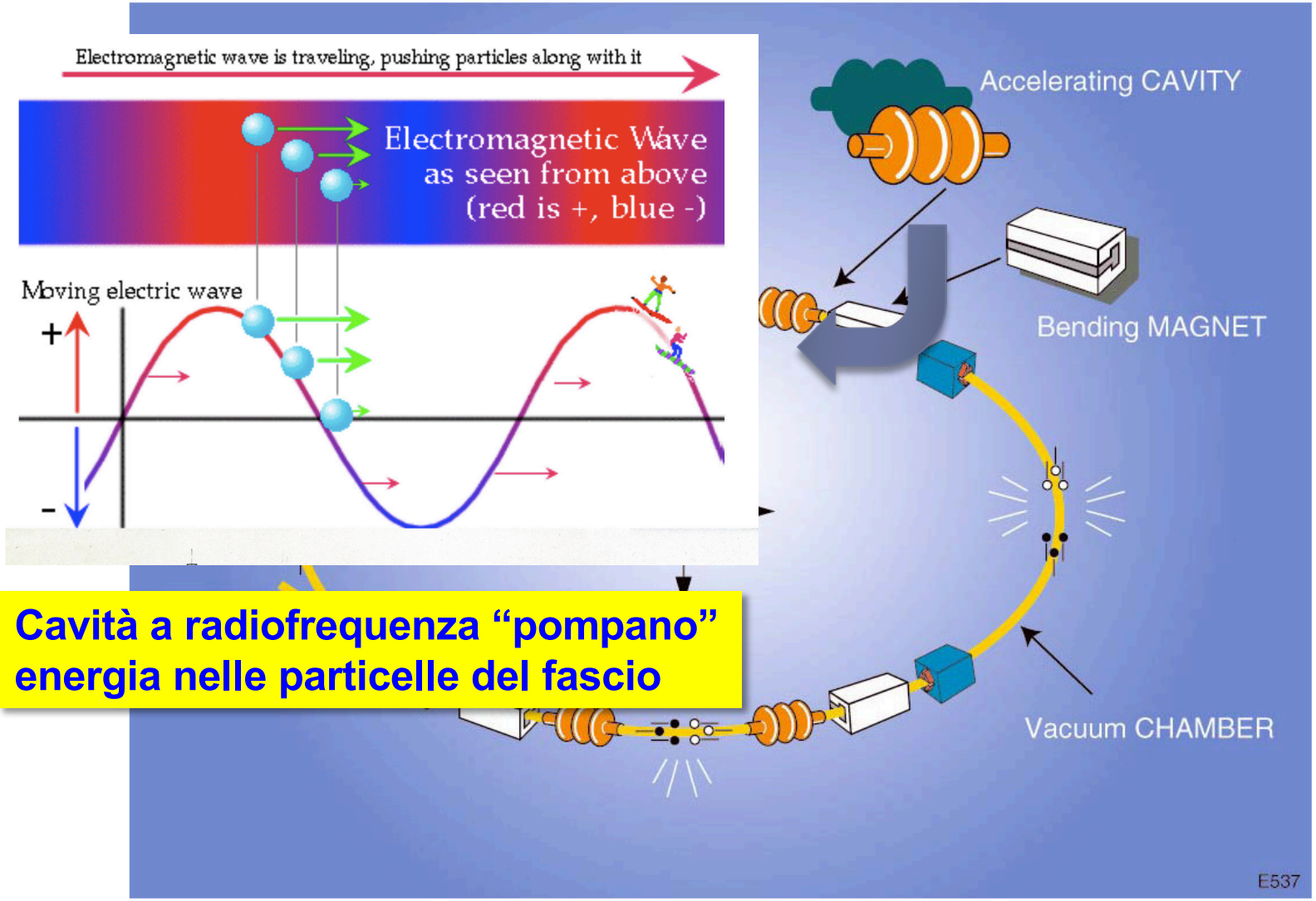
LEP : 27 Km di circonferenza !



Componenti principali di un acceleratore

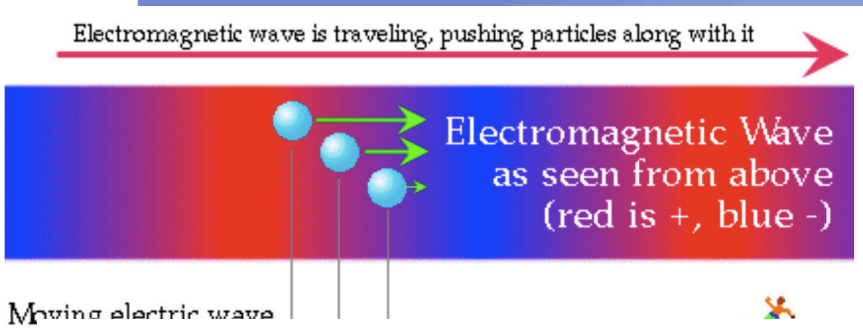


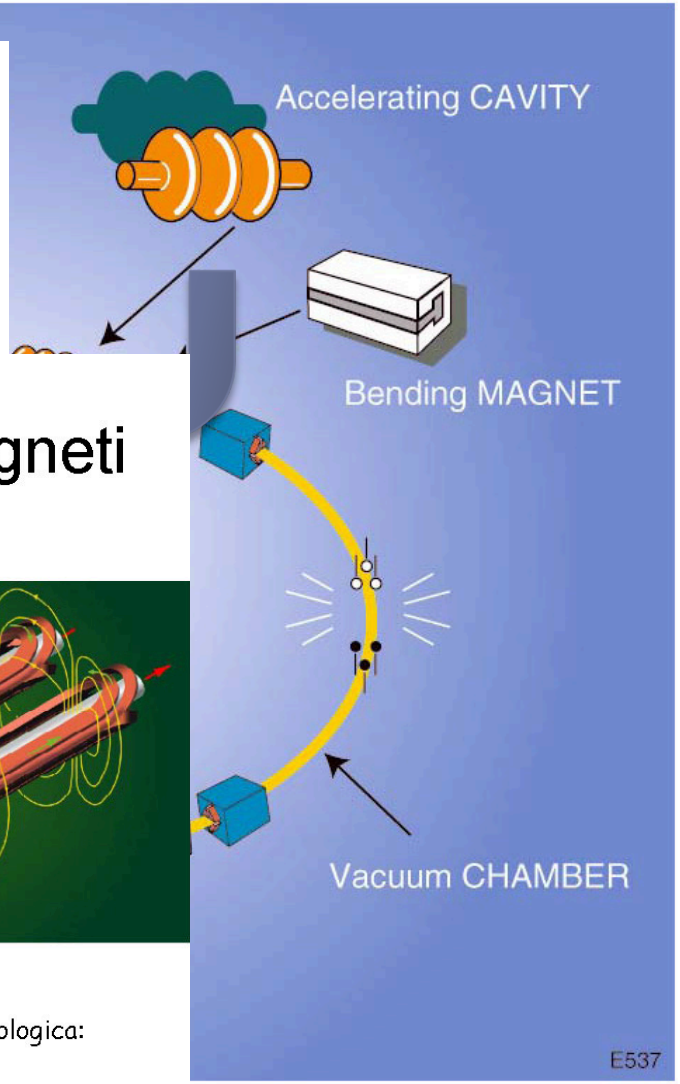
Componenti principali di un acceleratore



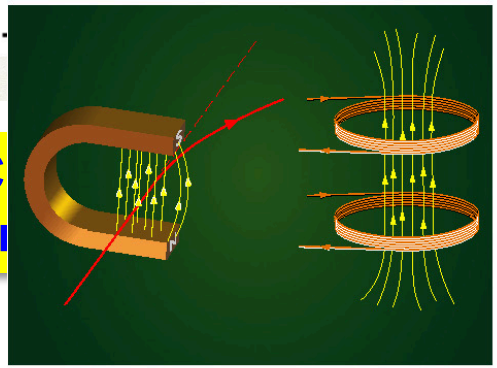
Cavità a radiofrequenza "pompano" energia nelle particelle del fascio

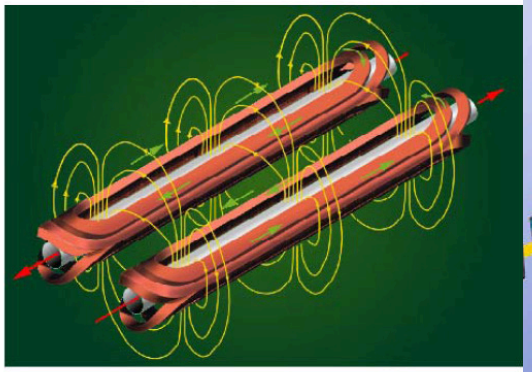
Componenti principali di un acceleratore





Curvare e focalizzare : i magneti

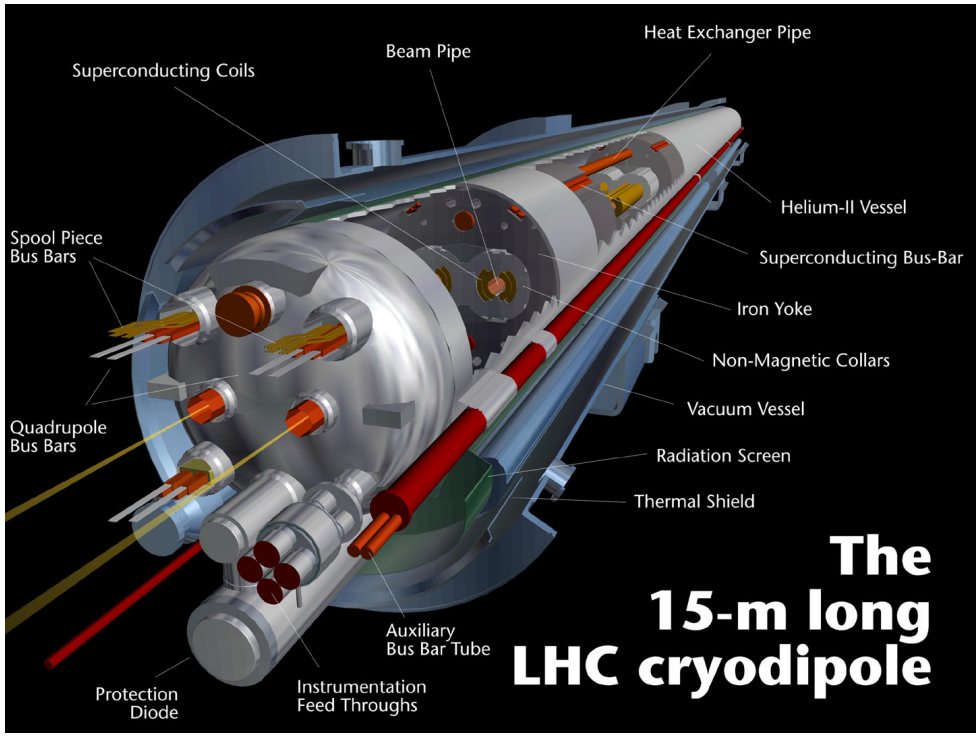




I 1236 dipoli ×15 m = 18.5 km di LHC rappresentano una sfida tecnologica:
Superconduttori con campo di 9 Tesla,
complicati dal dover accelerare cariche uguali in direzione opposta.

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

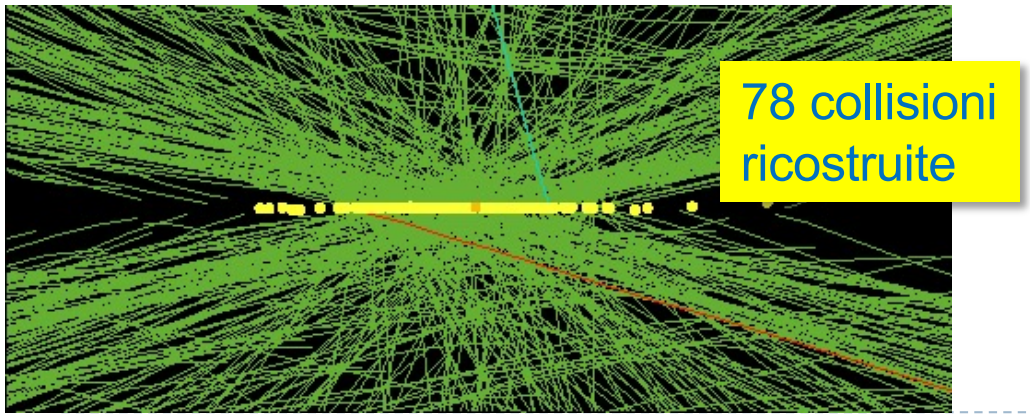
Numero di eventi = Luminosità × sezione d'urto

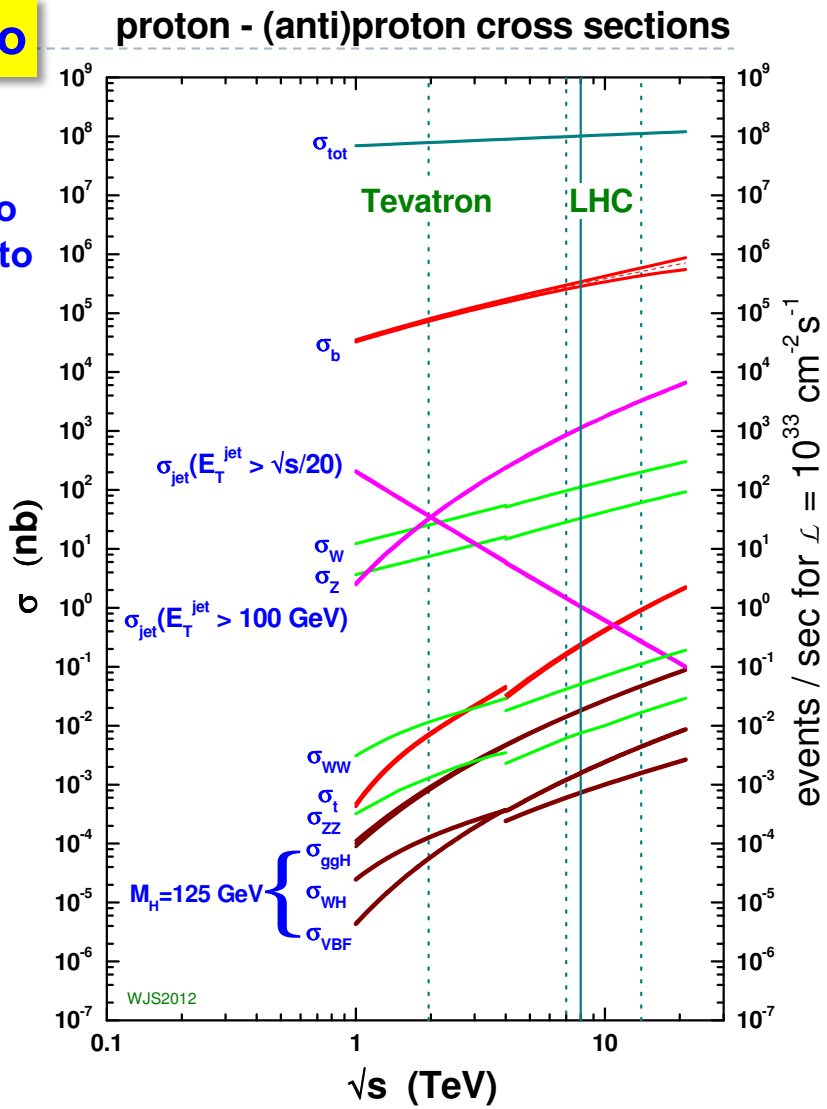
Luminosità: densità di particelle nei fasci per unità di tempo
Sezione d' urto: probabilità che un processo accada in un urto
↳ dal quadrato dell'"elemento di matrice" per il processo d'urto

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

inelastico	**~ 10^9 Hz**
$W \to l\nu$	**~ 10^3 Hz**
tt	**~ 10 Hz**
Higgs	**~ 1 Hz**

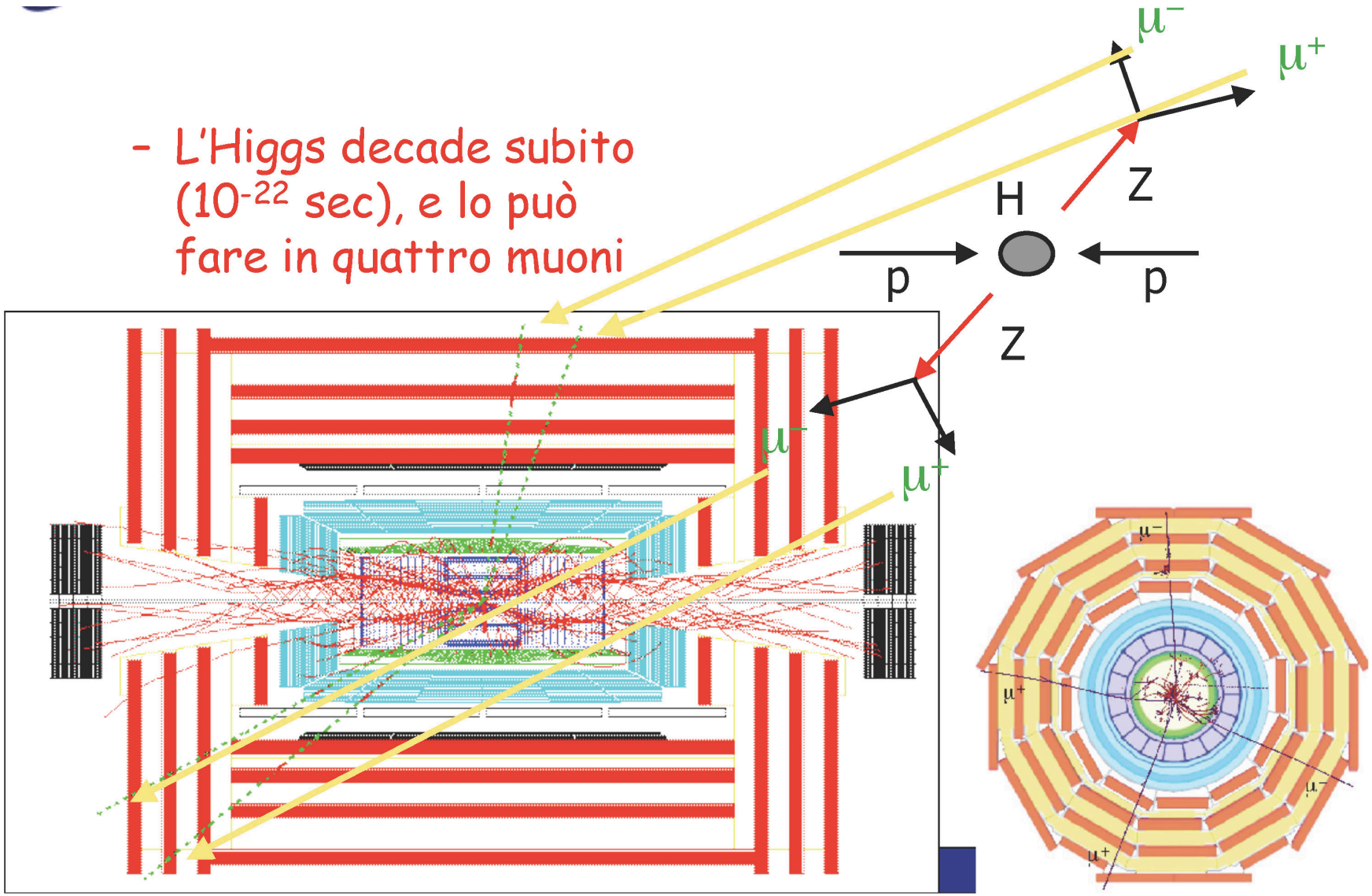
Una collisione tra fasci ogni 25 ns
~ 30 collisioni multiple per incrocio





Rivelazione dai prodotti di decadimento

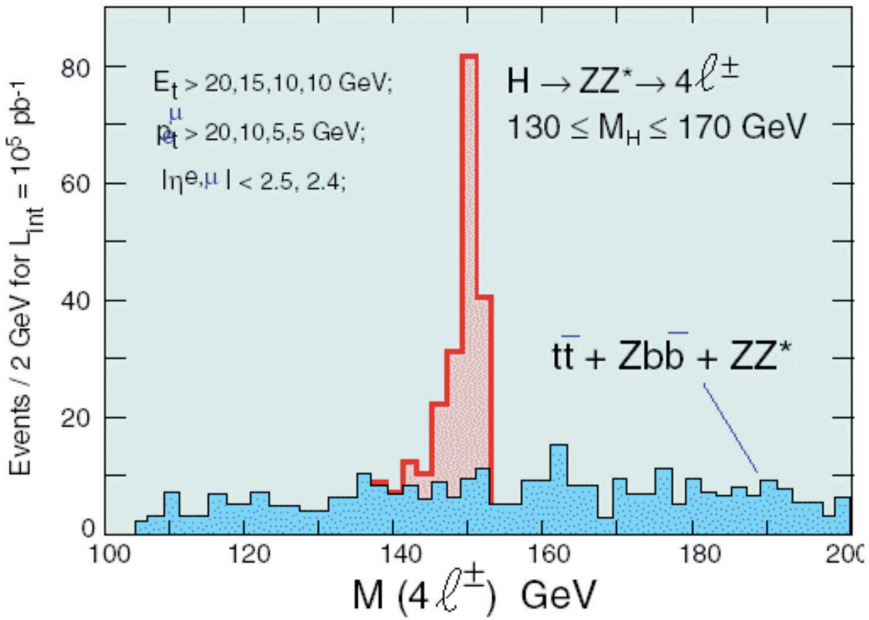
- L'Higgs decade subito (10^{-22} sec), e lo può fare in quattro muoni

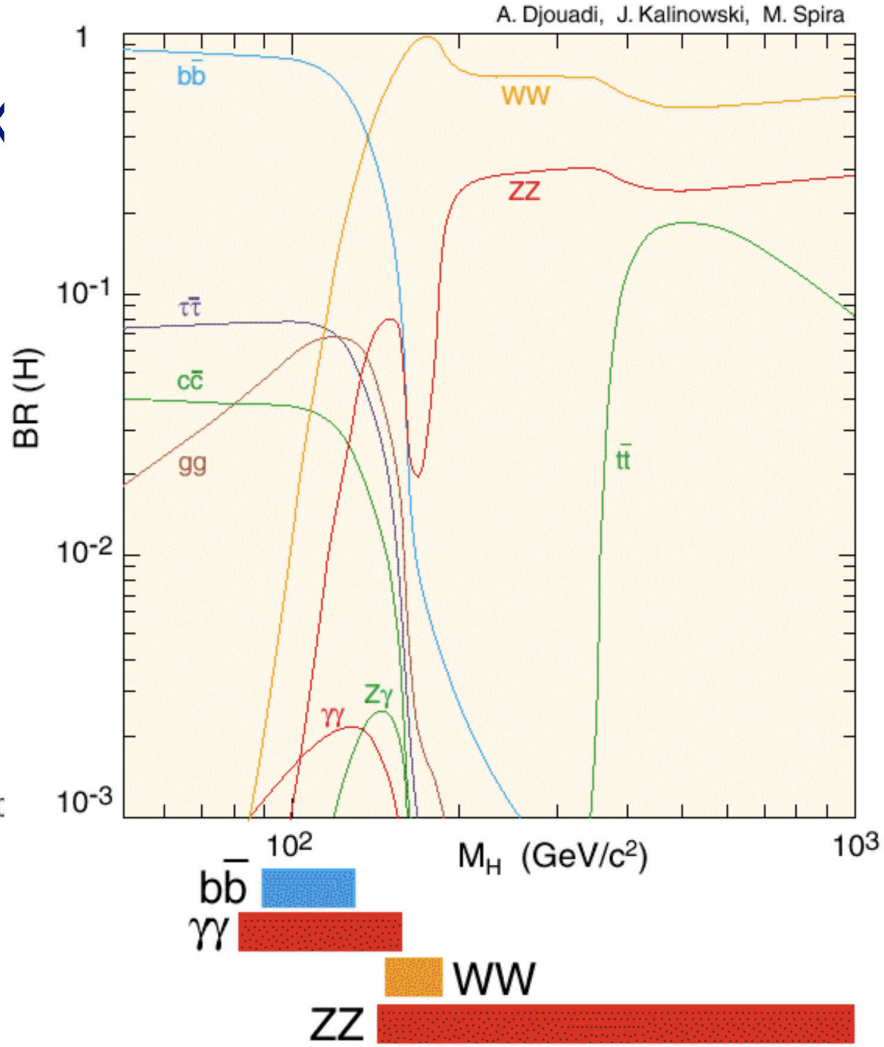


Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

Cerco eventi :

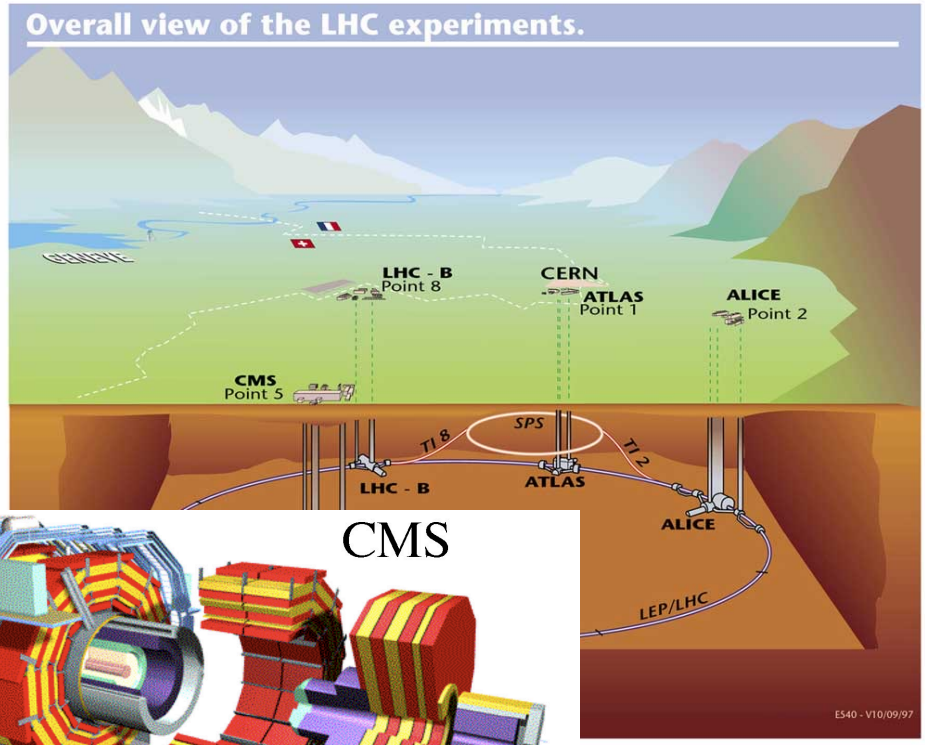
$pp \rightarrow H + X \rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^- + X$



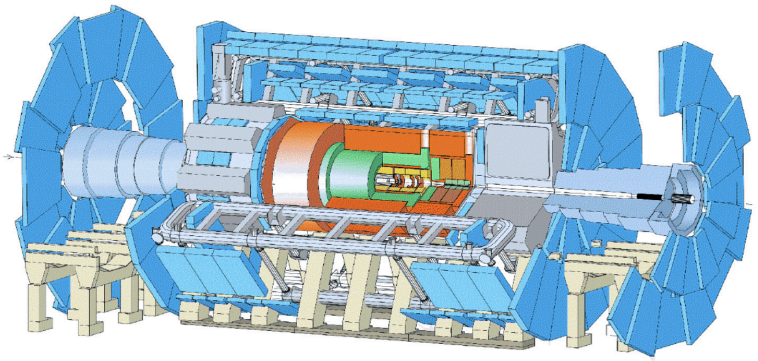


Esperimenti a LHC

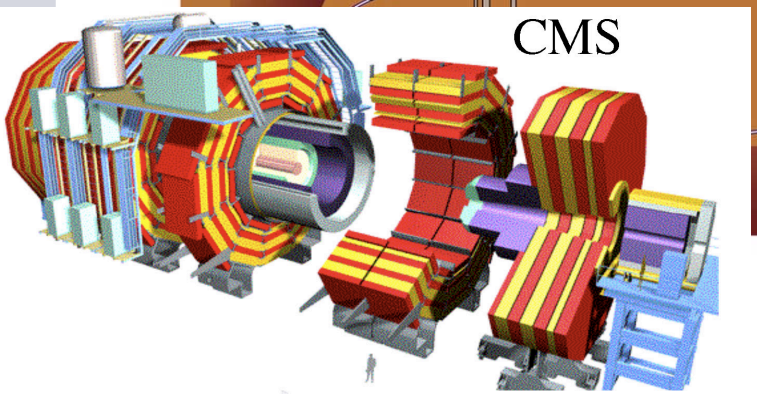
	Energia cm TeV	Luminosità $cm^{-2}s^{-1}$
LEP e^+e^-	0.209	10^{32}
LHC pp	14	10^{34}
LHC Pb Pb	1312	10^{27}

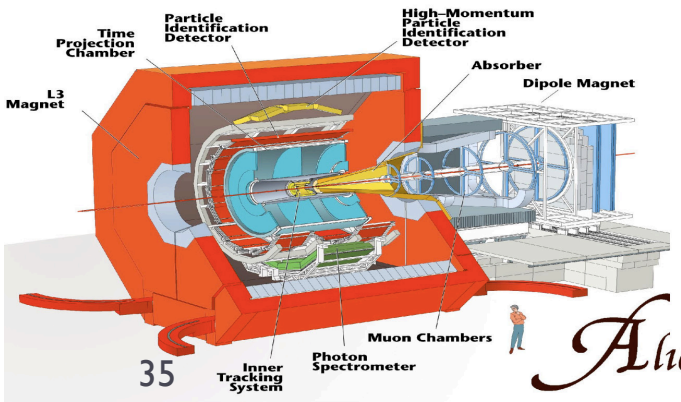


ATLAS

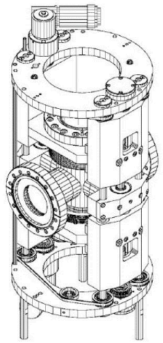


CMS

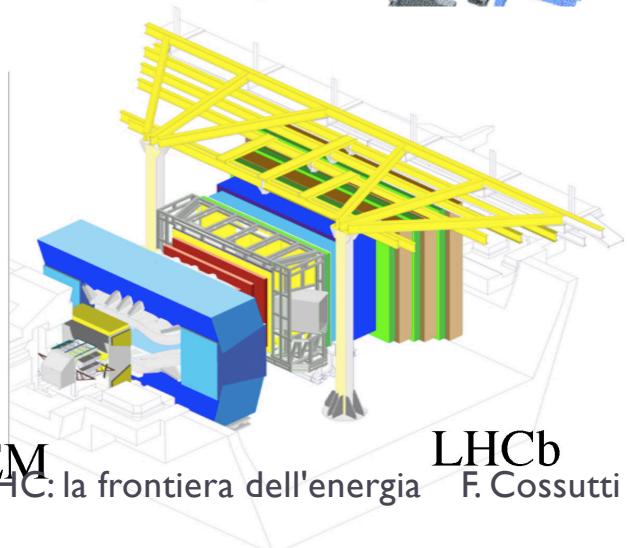




Alice



TOTEM



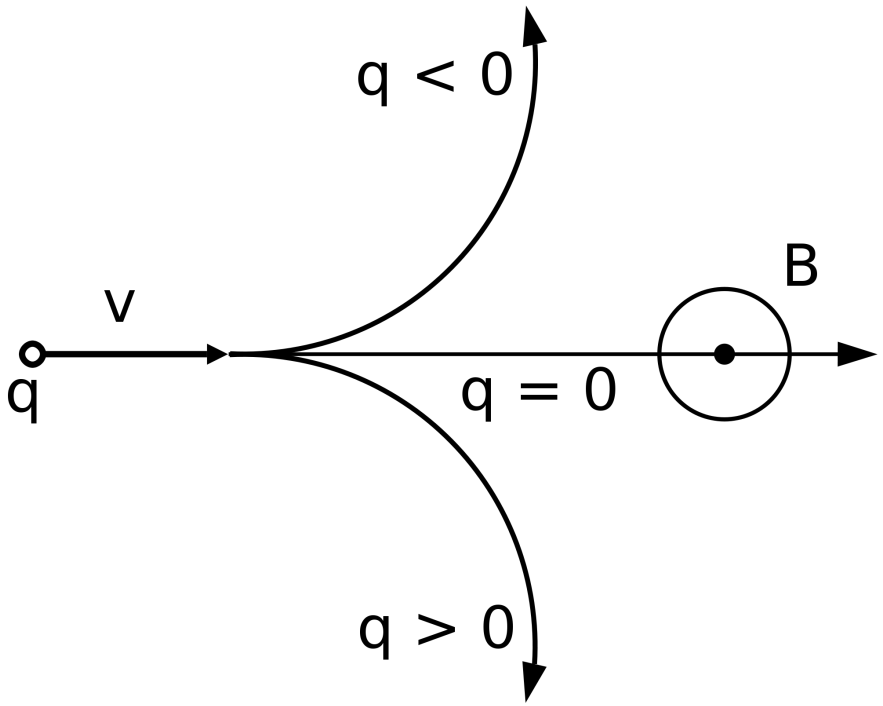
LHCb

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



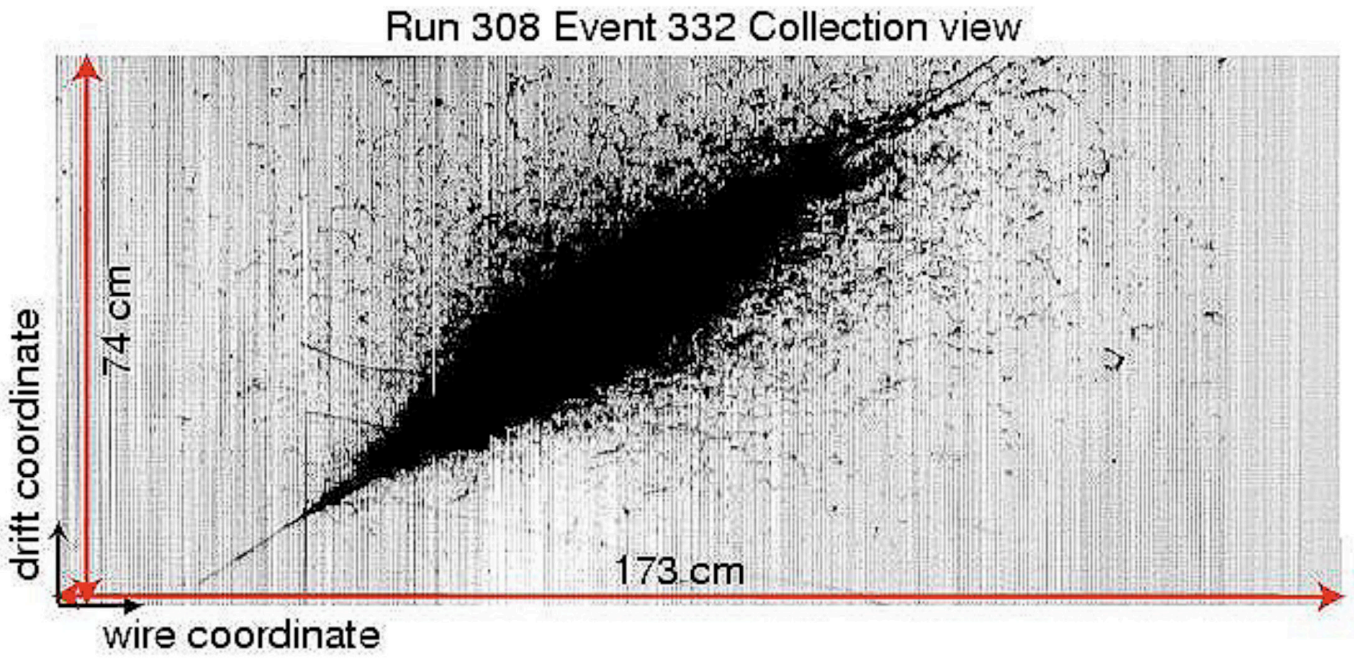
$$p_T = 0.3zBr$$

GeV/c q/e T m

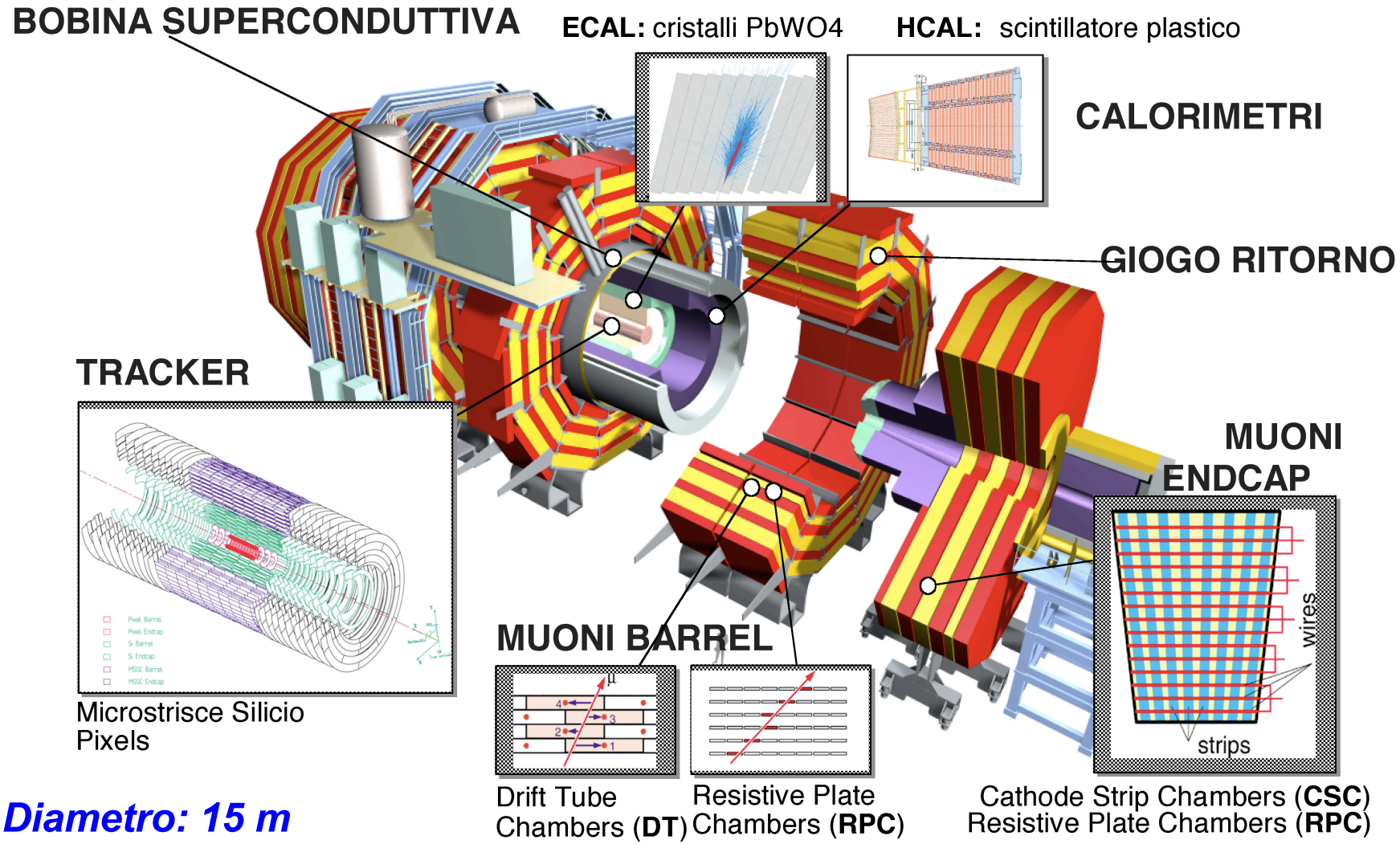
Misura di energia: i calorimetri

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

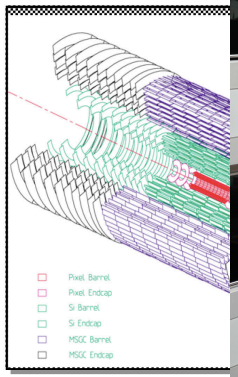


Diametro: 15 m
Lunghezza: 21.5 m
Peso: 12500 ton.

Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPE

TRACKER



Microstrisce Si
Pixels

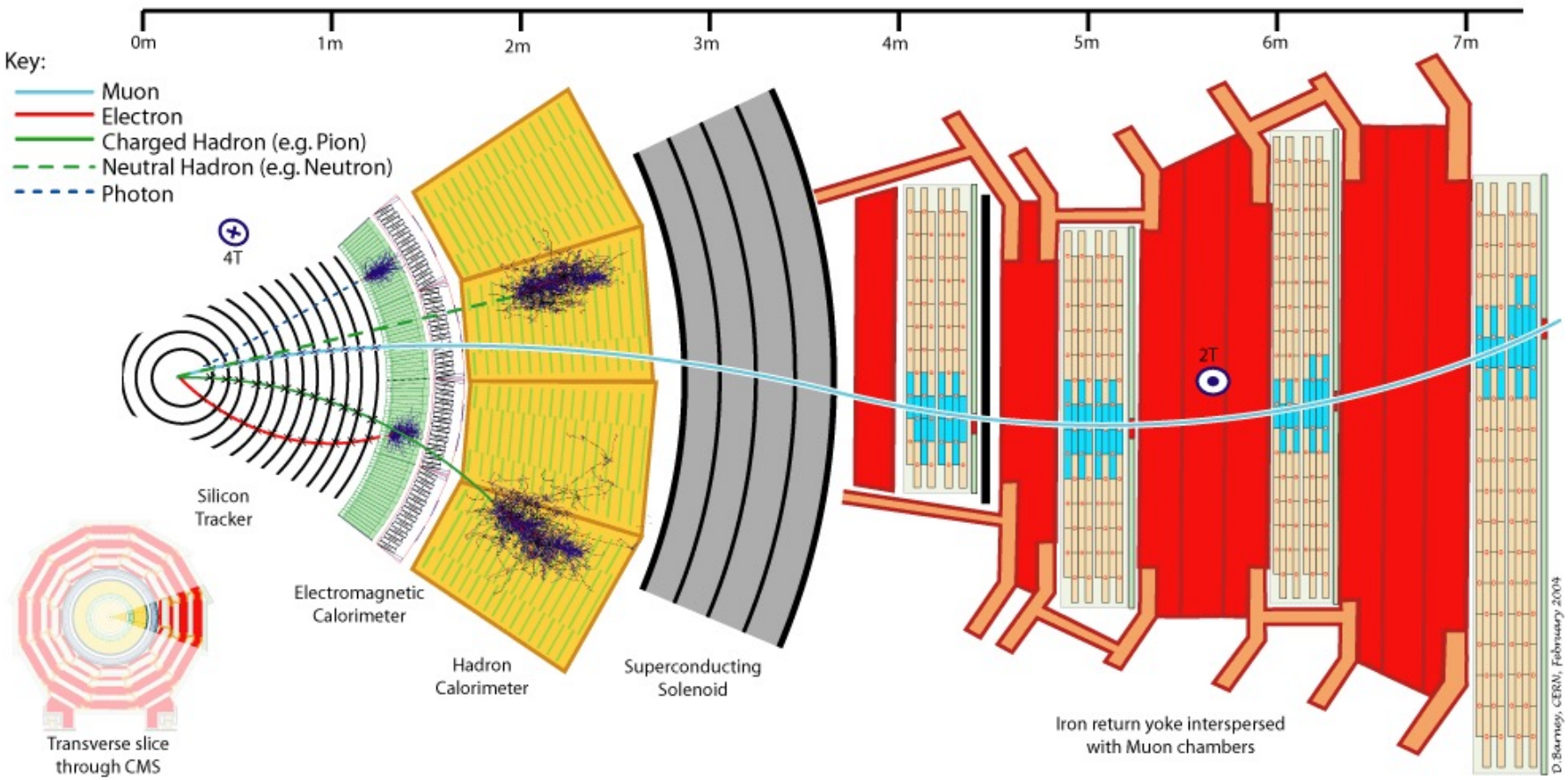
Drift Tube Chambers (**DT**)

Resistive Plate Chambers (**RPC**)

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

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

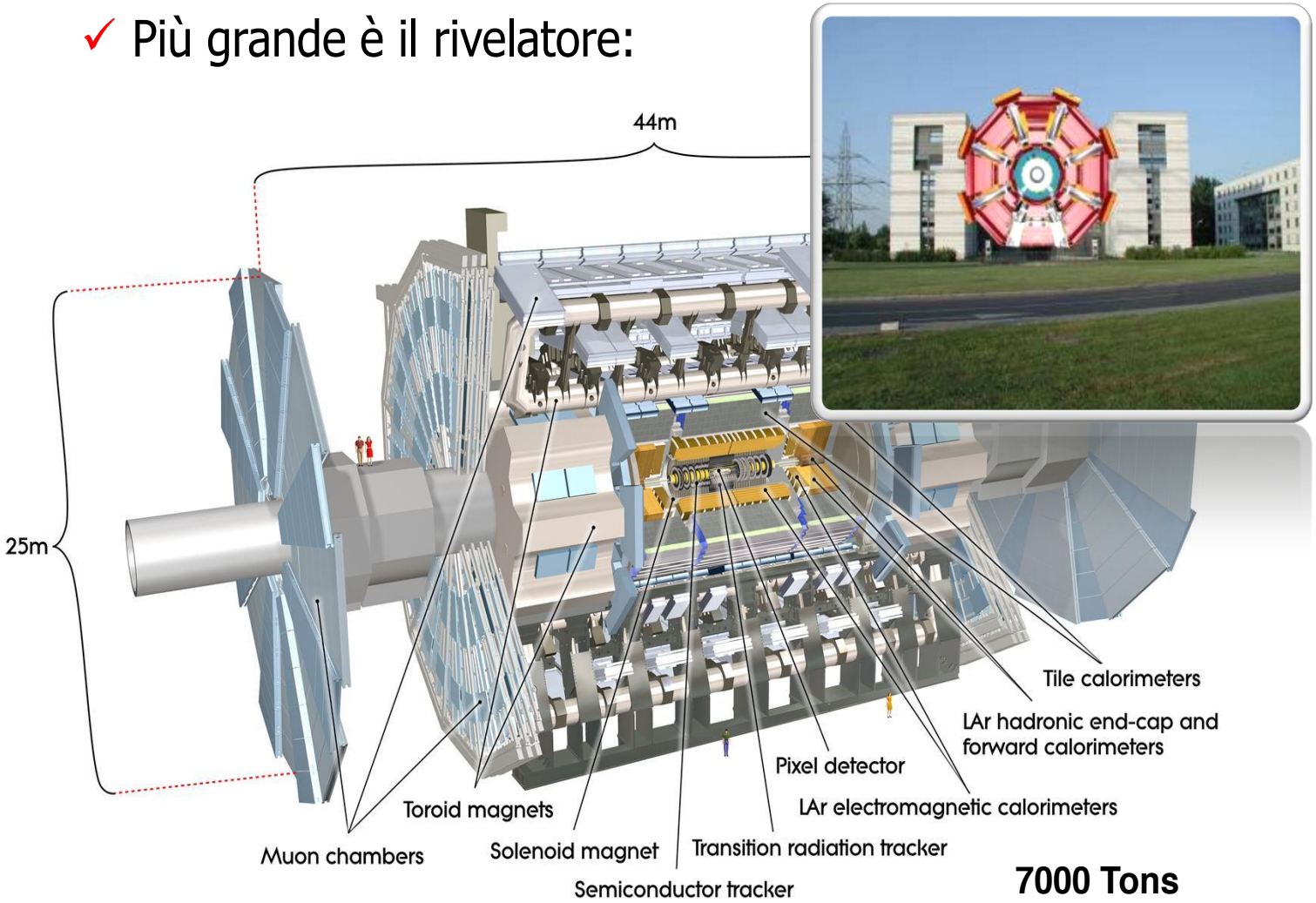
Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento



Due sono meglio di uno solo: ATLAS

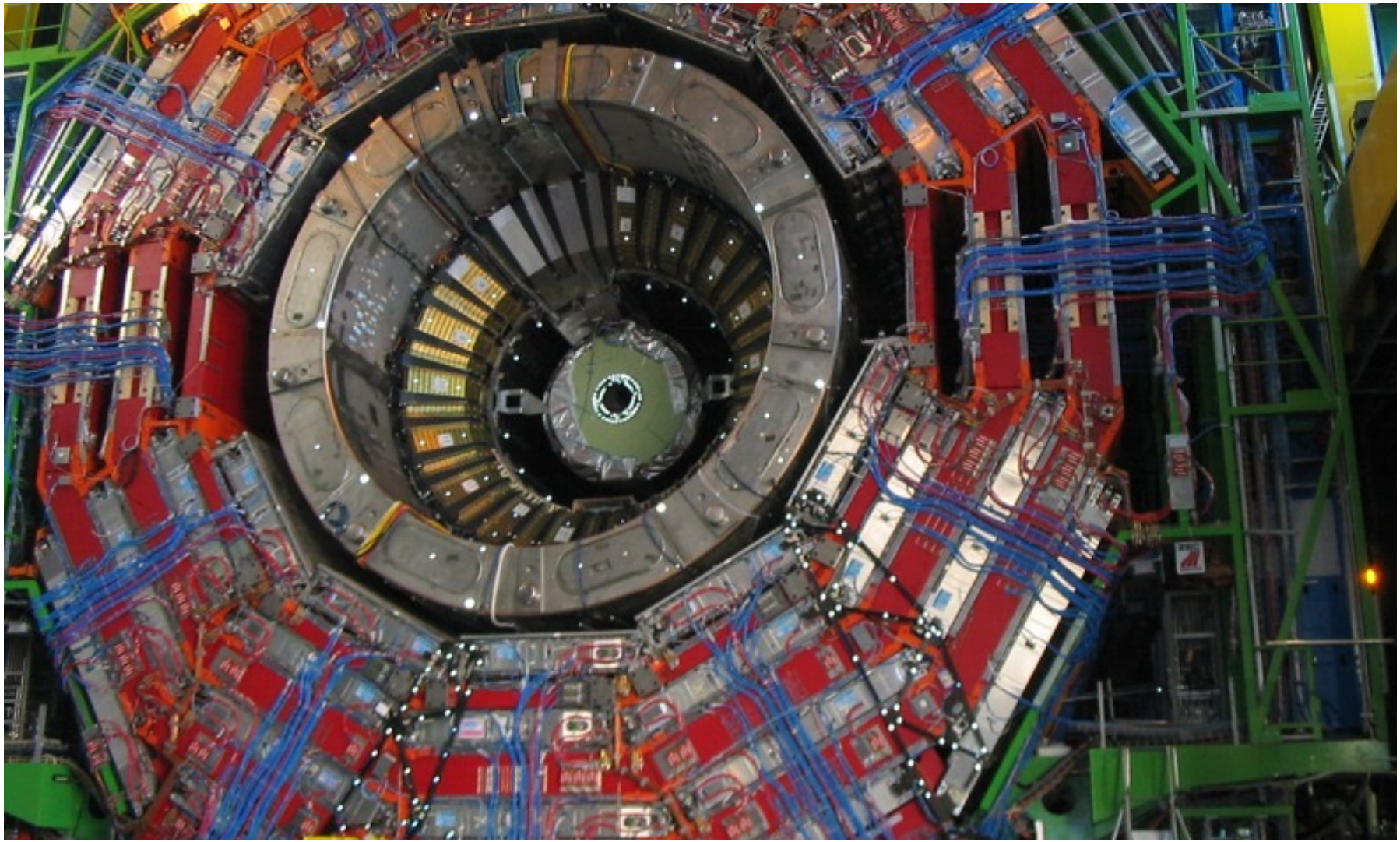
Più grande è l'energia:

✓ Più grande è il rivelatore:



7000 Tons

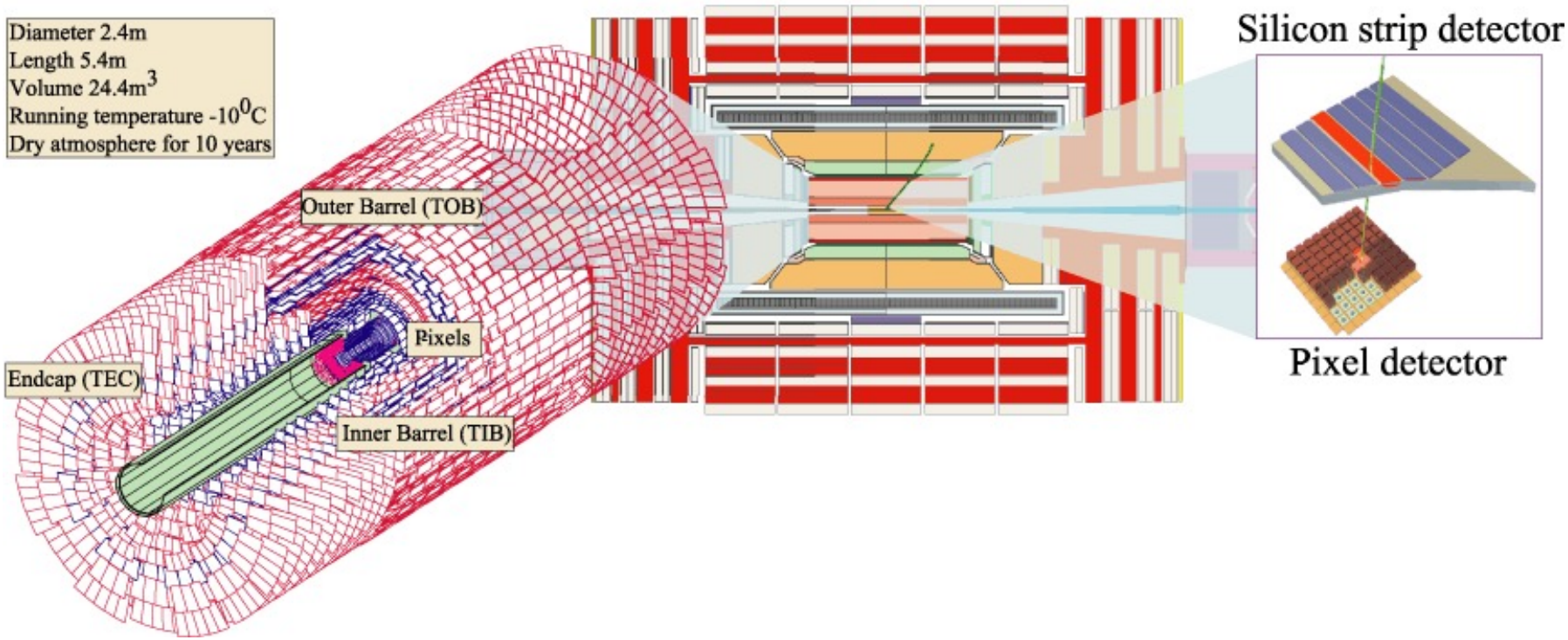
Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



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 sucessivo?
    - Ogni 25 ns si potrebbe avere una collisione...
- Tutto ciò dipende dalle caratteristiche dell'apparato
  - Numero di canali e loro granularità, ermeticità, quantità di materiale, velocità di risposta al segnale degli elementi sensibili e dell'elettronica di lettura, rumore intrinseco

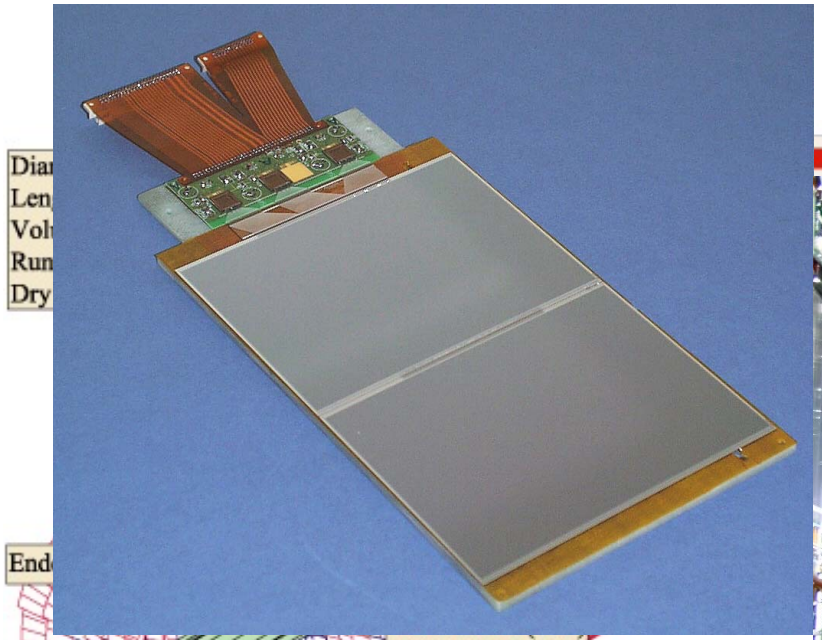
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori

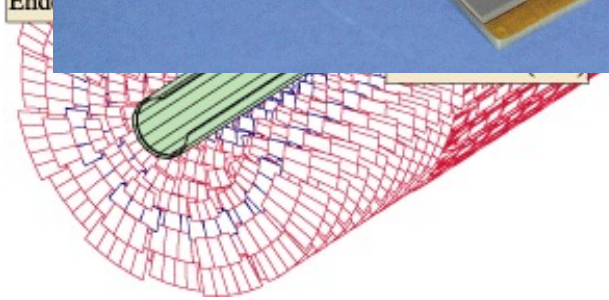


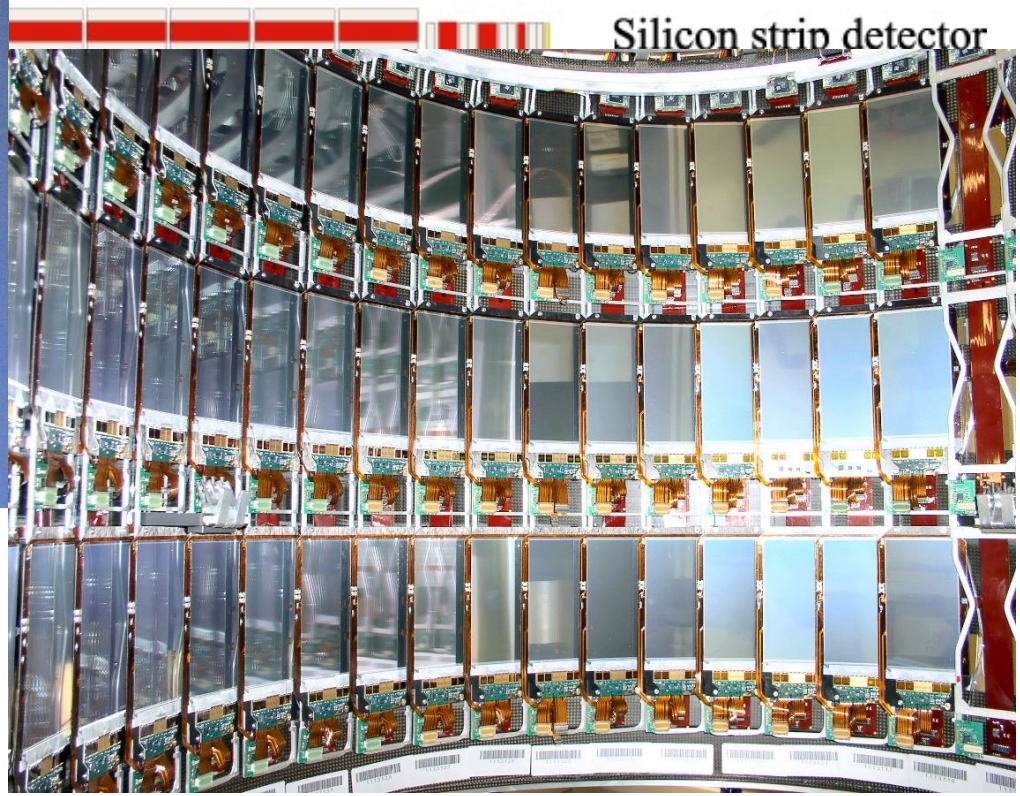
Ad es. CMS tracker…

L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale

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



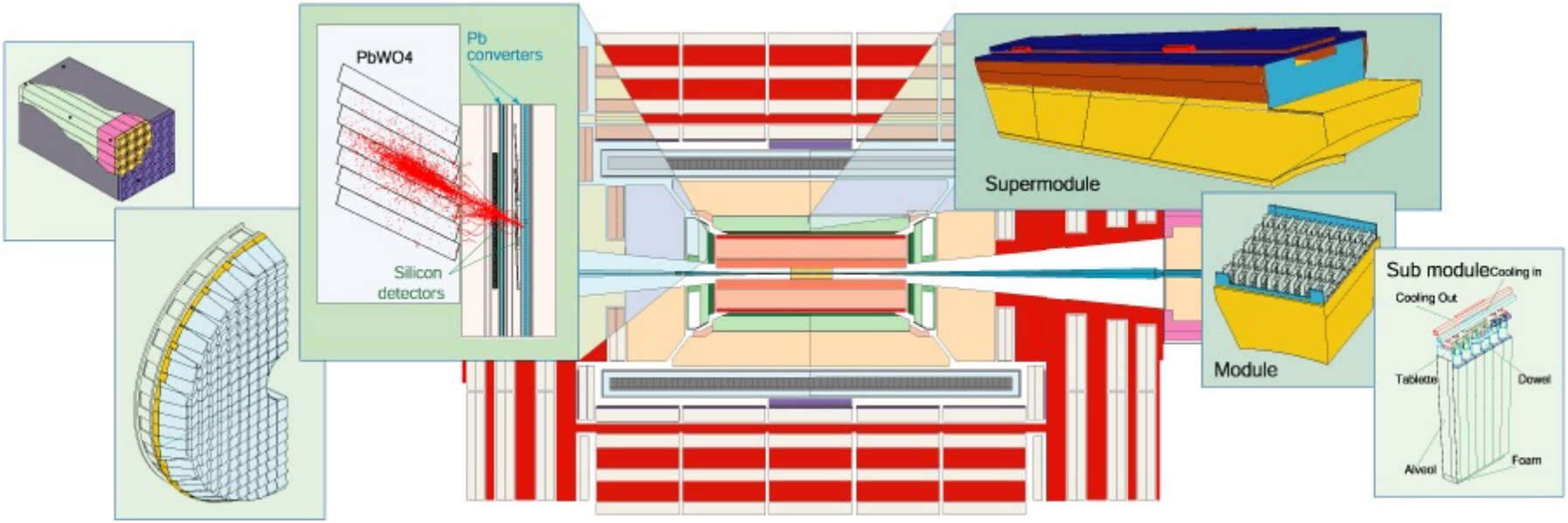




Ad es. CMS tracker…

L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale

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



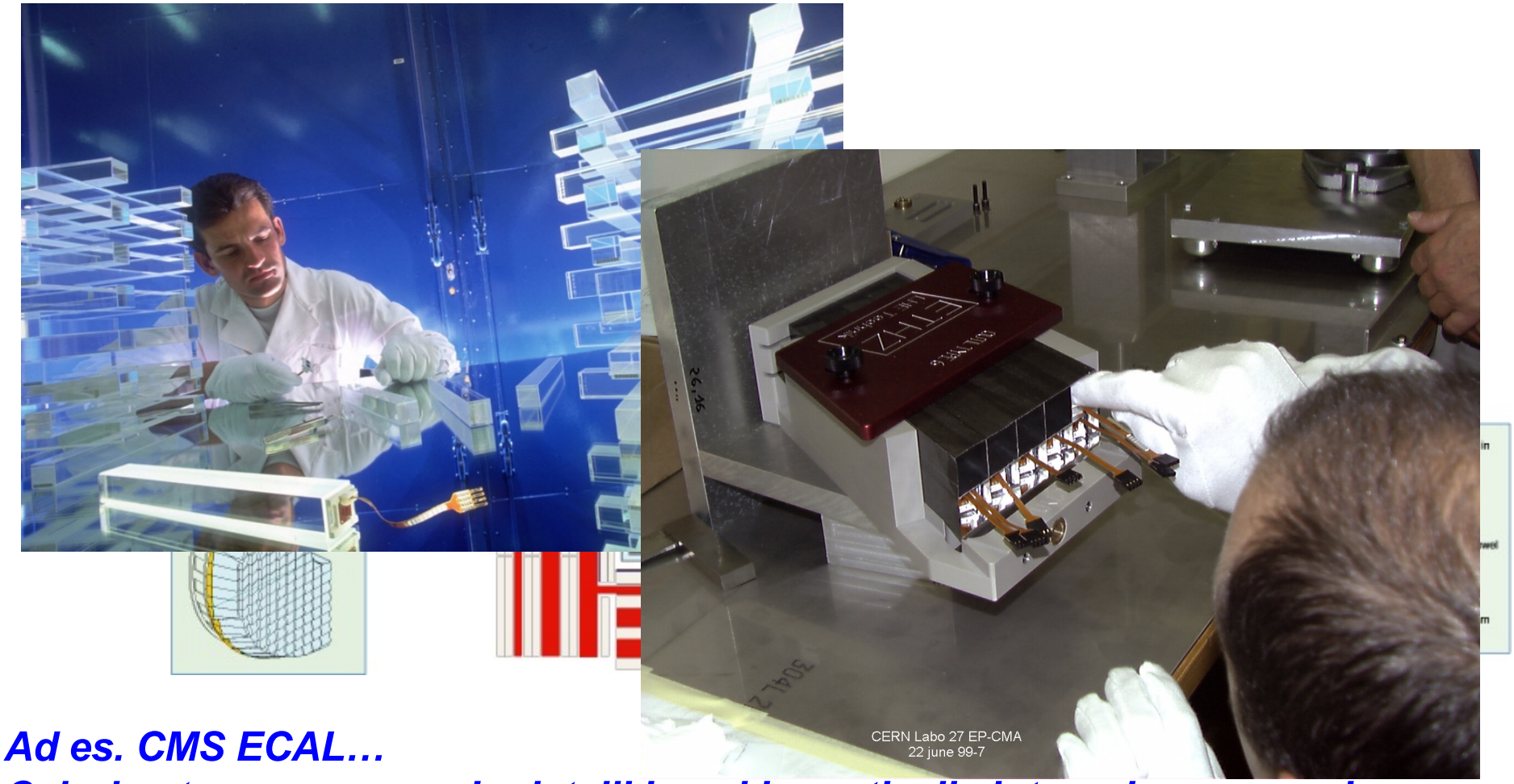
Ad es. CMS ECAL…

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

La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale

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

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



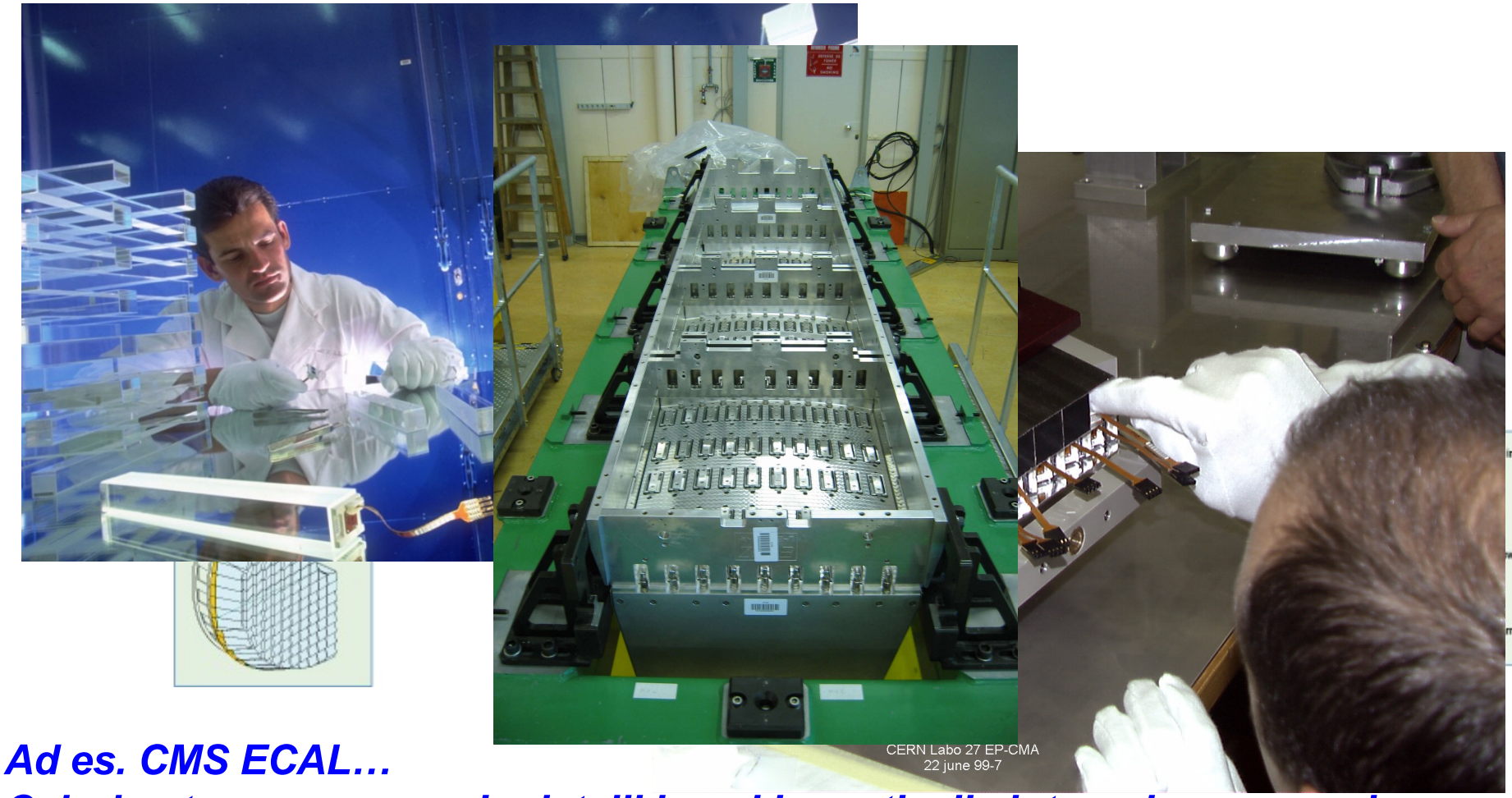
Ad es. CMS ECAL…

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

La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale

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

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



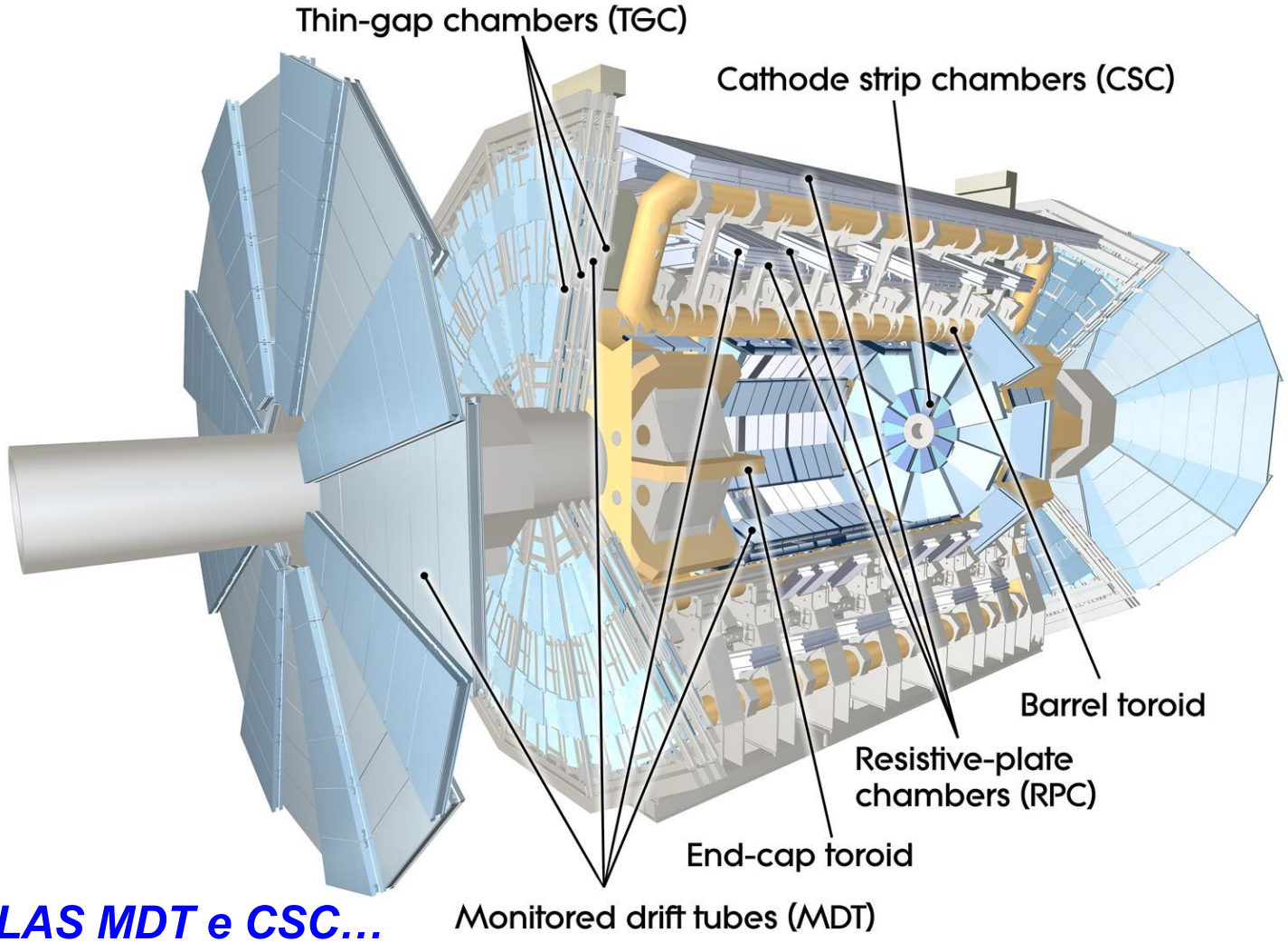
Ad es. CMS ECAL…

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

La luce viene misurata da fotorivelatori e trasformata in segnale digitale

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

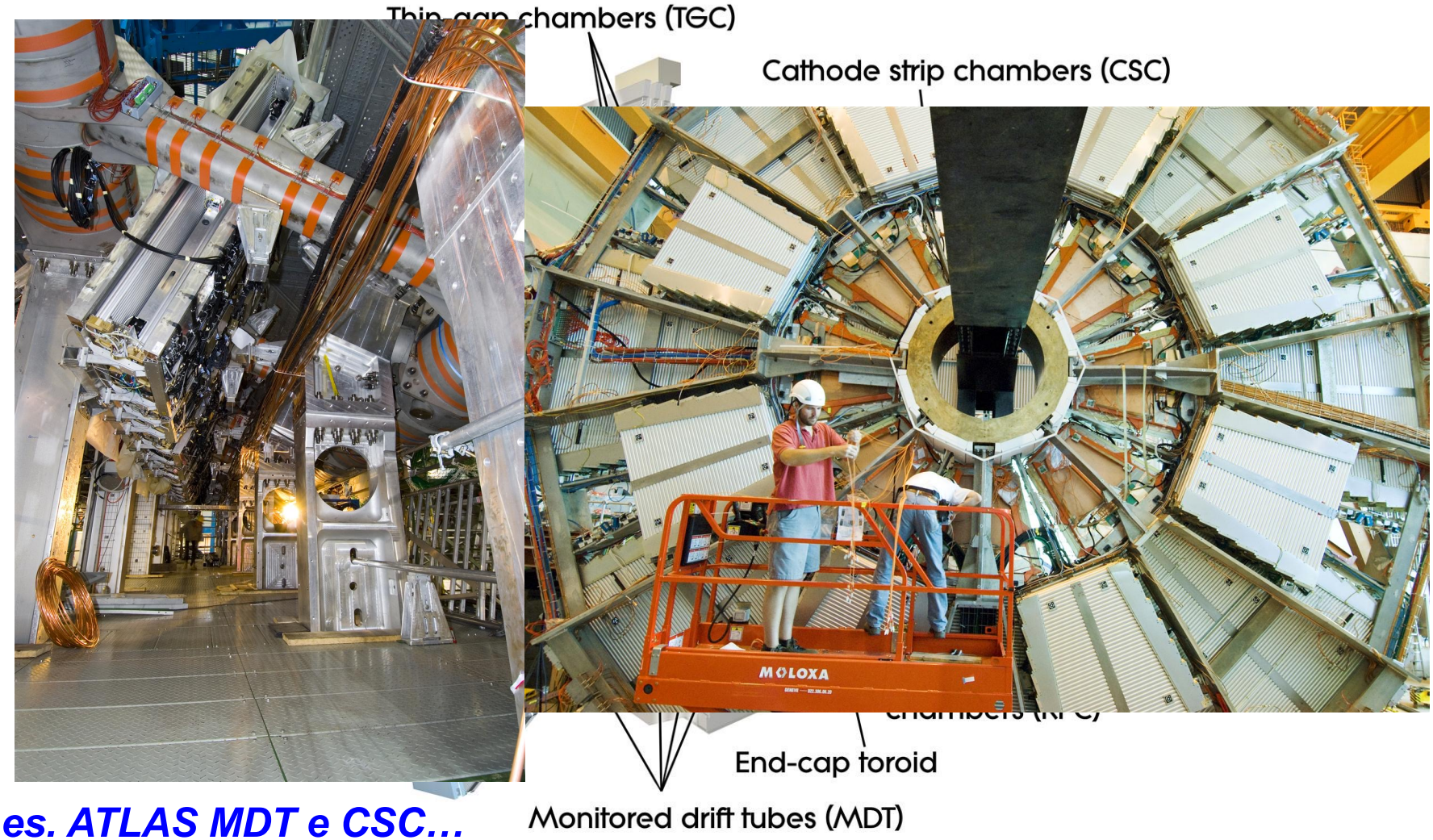
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



Ad es. ATLAS MDT e CSC…

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

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



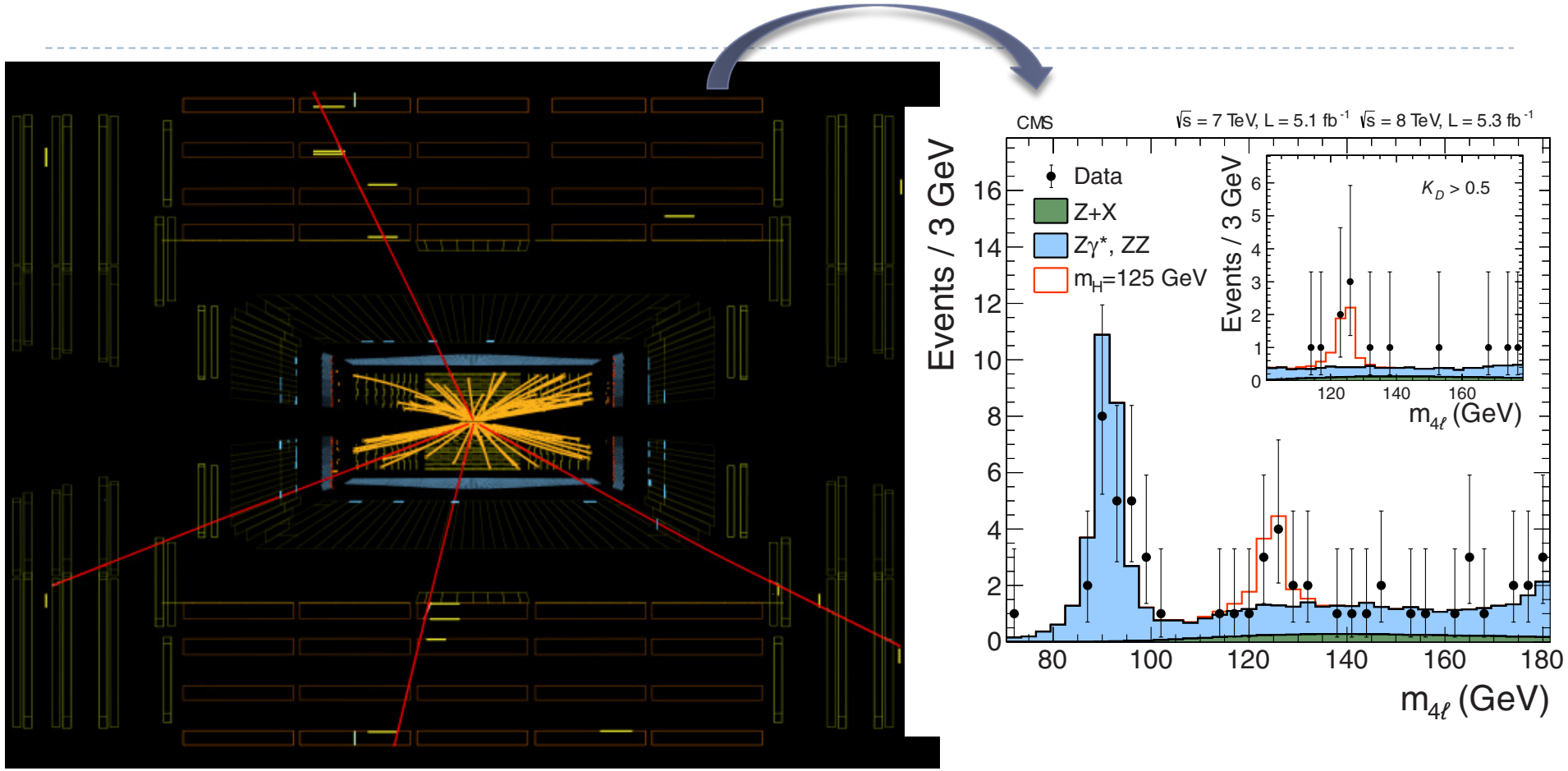
Ad es. ATLAS MDT e CSC…

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

Dall'oggetto reale all'oggetto di fisica

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

Dalla ricostruzione all'analisi



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

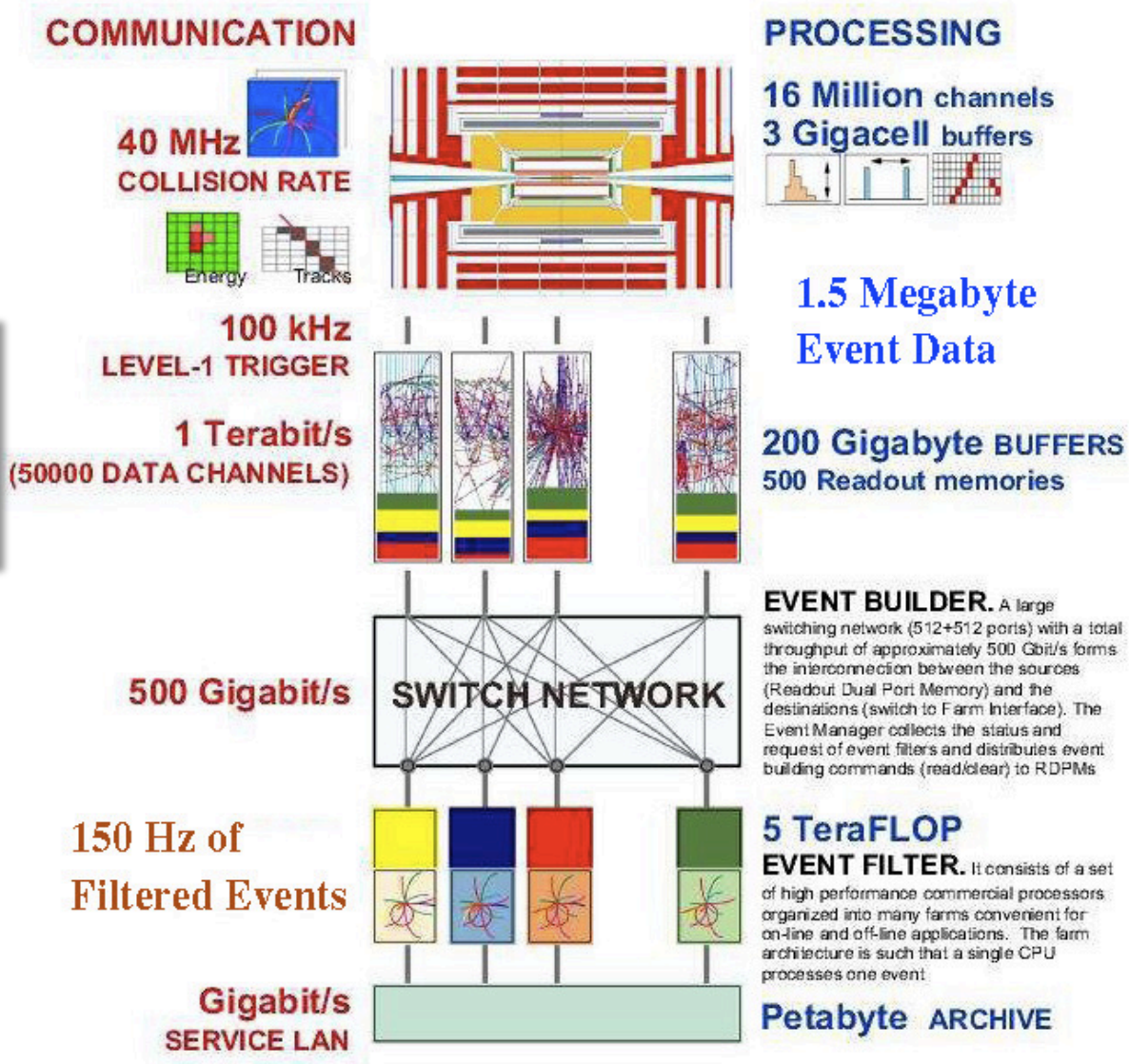
Per trovare il bosone di Higgs necessari ~ 3 anni di dati raccolti, a 100 eventi al secondo
= 6 PetaBytes = 6 milioni di GigaBytes

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

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

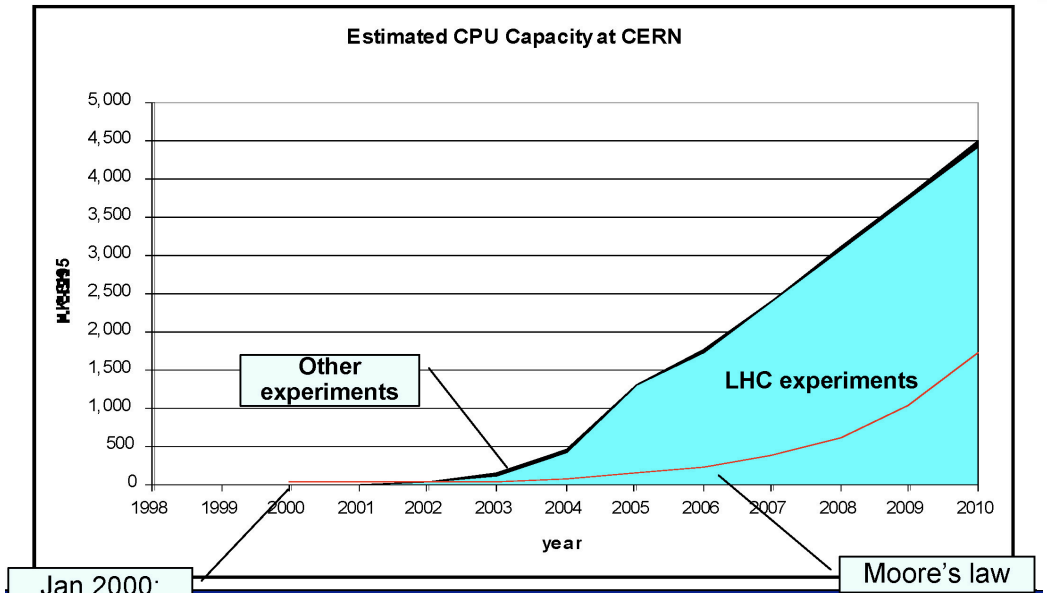
Dal principio alla pratica, la costruzione di un evento

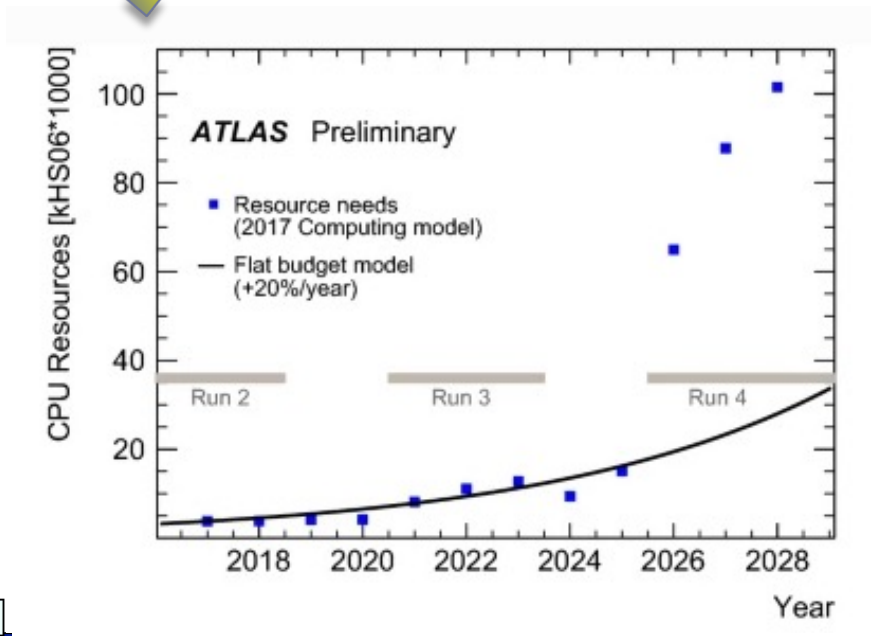
Segnali prodotti dai moderni rivelatori:
impulsi ellettrici tradotti in segnale digitale



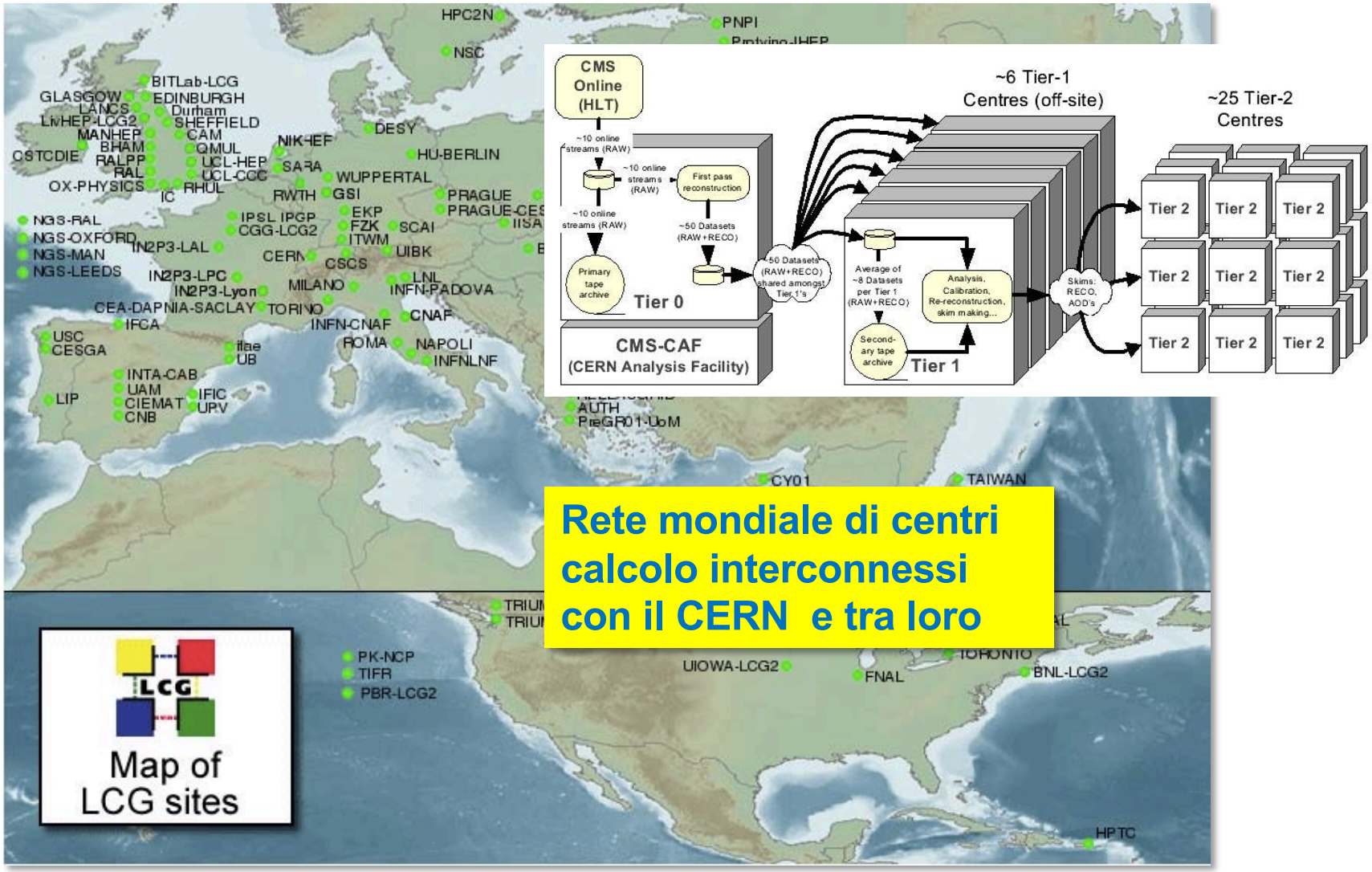
Non basta avere un buon rivelatore…

- 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 varie volte più potenti
  - E stanno in uno zaino





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

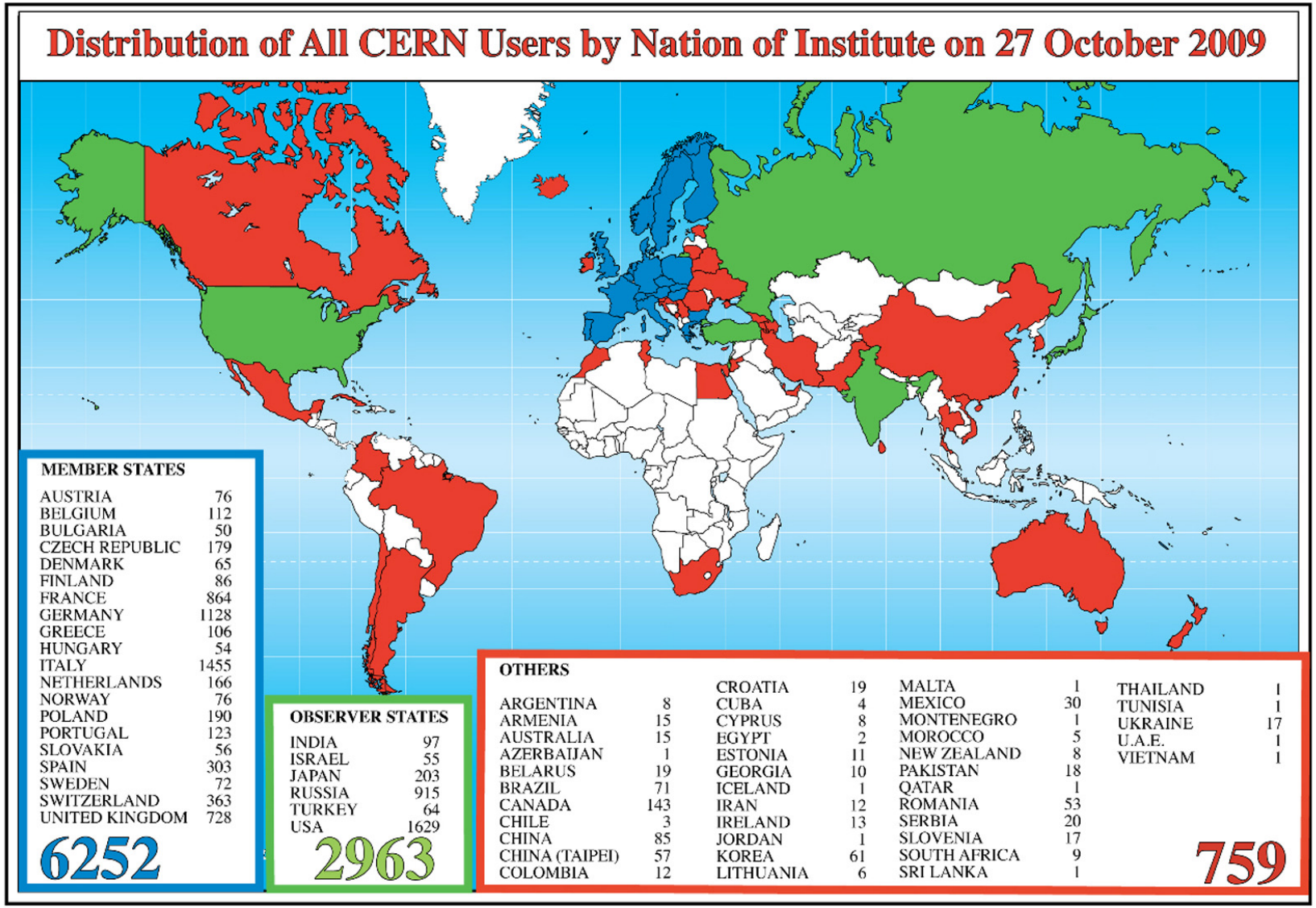


… ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier

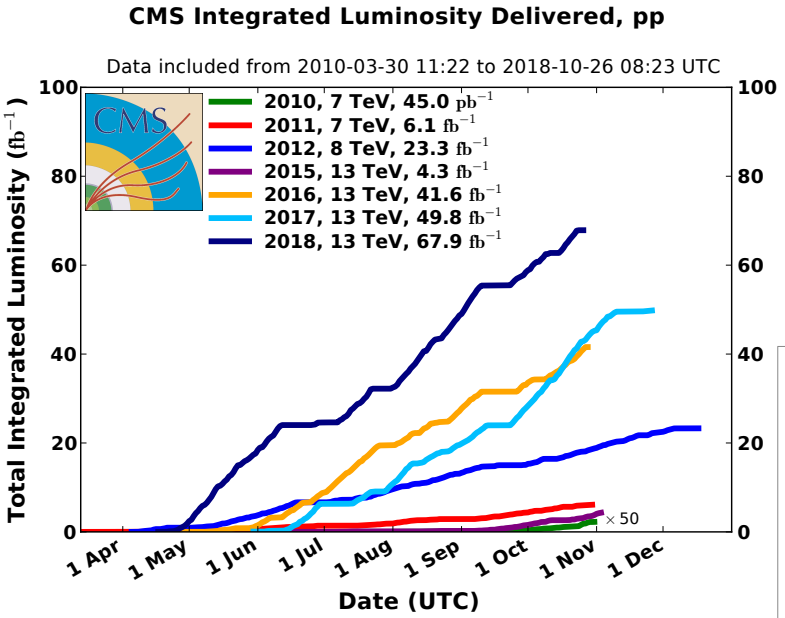
Il segreto del successo è nell'eccellente funzionamento del trasferimento dei dati.

La vostra analisi può essere eseguita ovunque nel mondo, e ricevete i risultati sul vostro computer

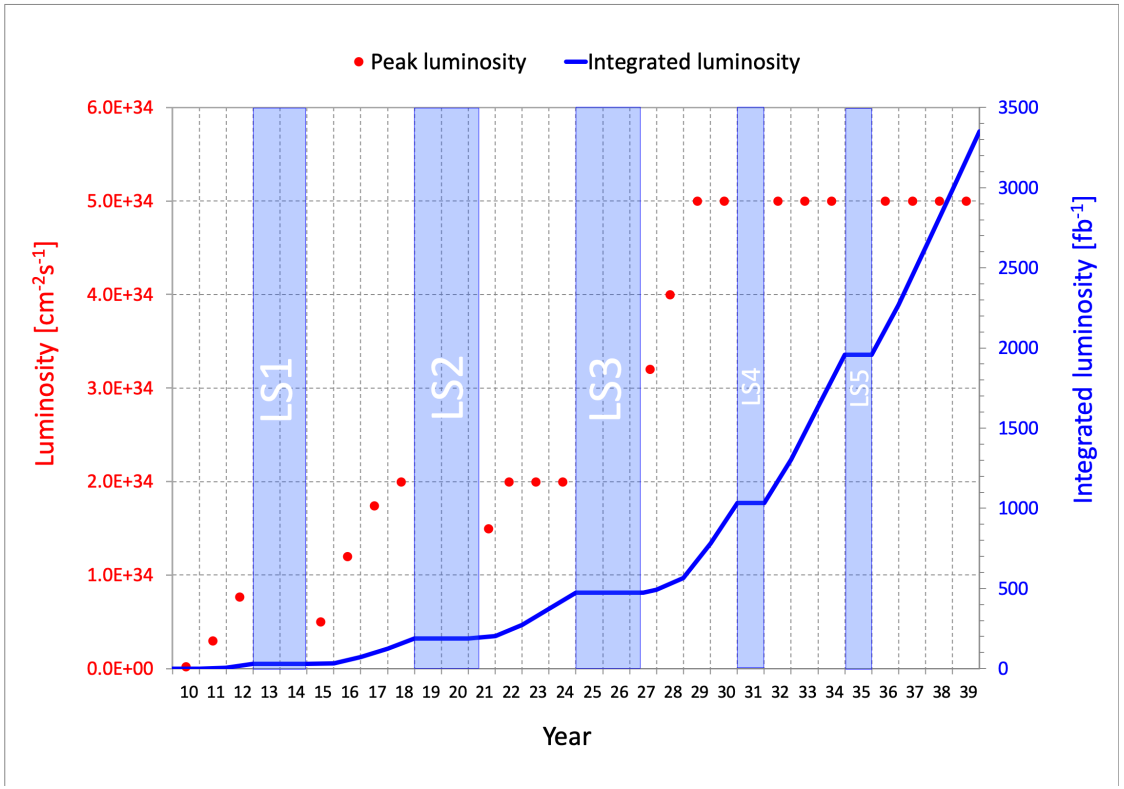
LHC@CERN: Collaborazioni internazionali



Presente e futuro: High Luminosity LHC



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

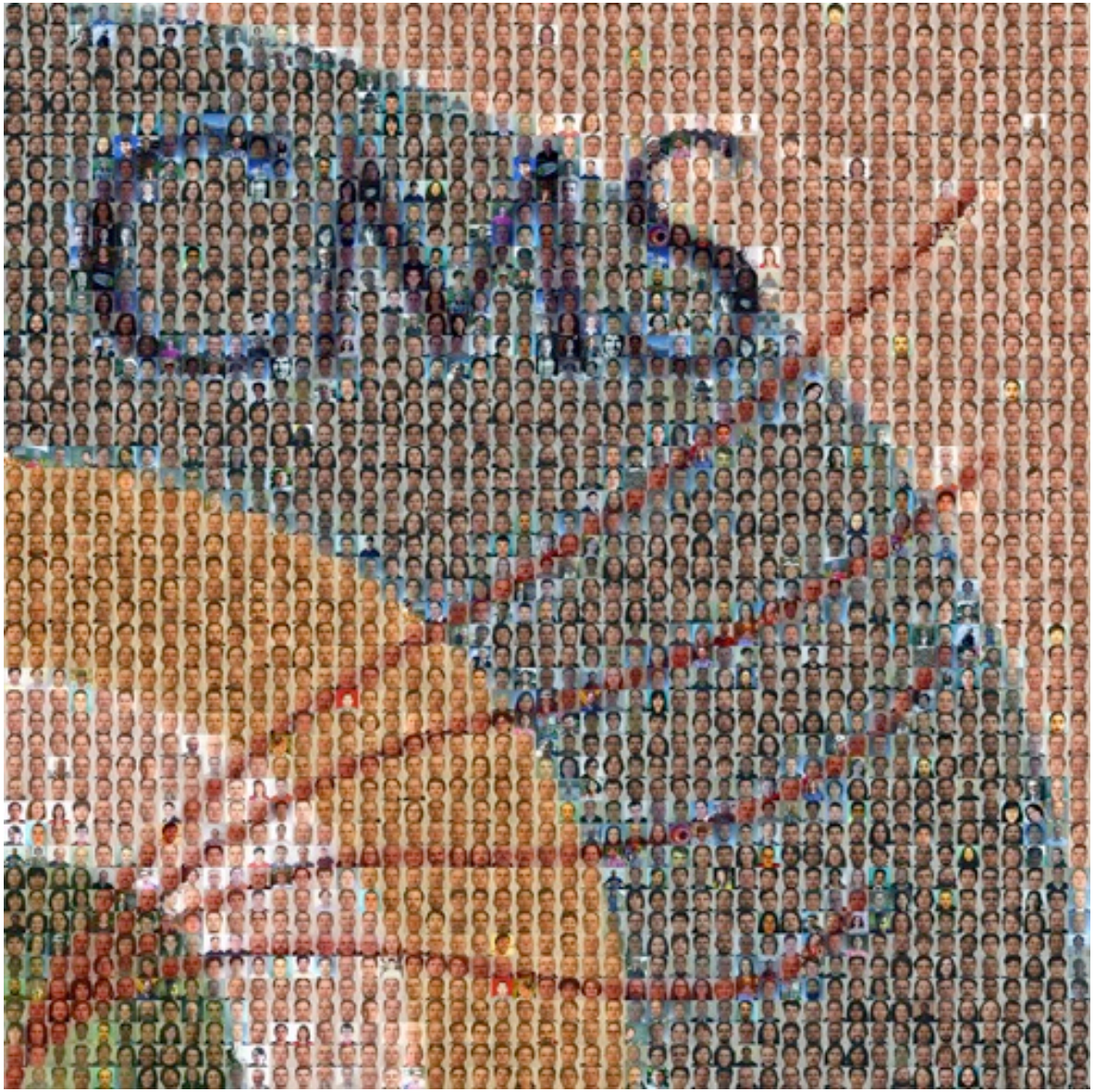


- Rivelatore in gran parte rinnovati
- Nuovi modelli di calcolo e analisi
  - Supercomputing, GPU+CPU
  - Uso sempre più massiccio di intelligenza artificiale nelle analisi

Per concludere

- Dopo 12 anni dall'inizio della presa dati, e ~ 180 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 semplicemnete "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 riparte, mentre si sta correndo per costruire I rivelatori per HL-LHC
  - Con quanto c'è da fare, il 2029 è dopodomani…
  - Attivita` destinata a durare per i prossimi 15 anni almeno
- Ci sono molte persone che hanno lavorato per anni, anche 20, solo per vedere le prime collisioni, ora una nuova fase sta per partire…
- **Voi l'avete a portata di mano**

Domande?



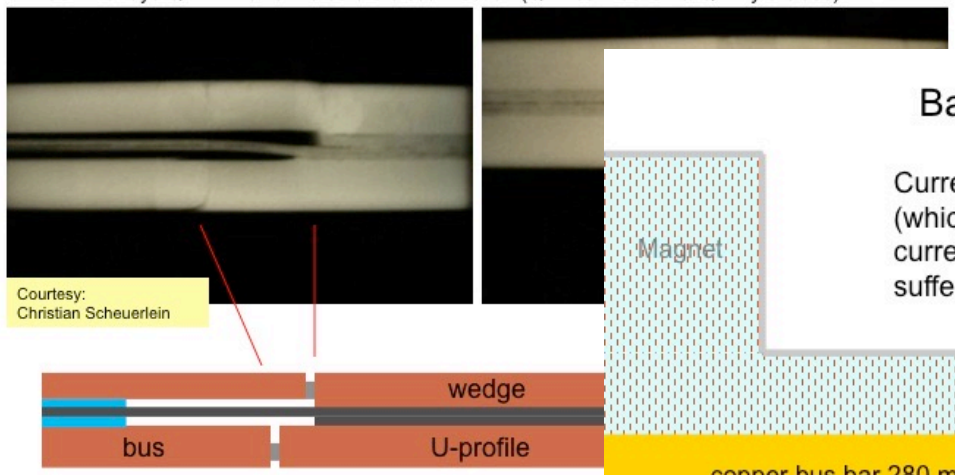
BACKUP

Cosa ti può combinare una saldatura fatta male…

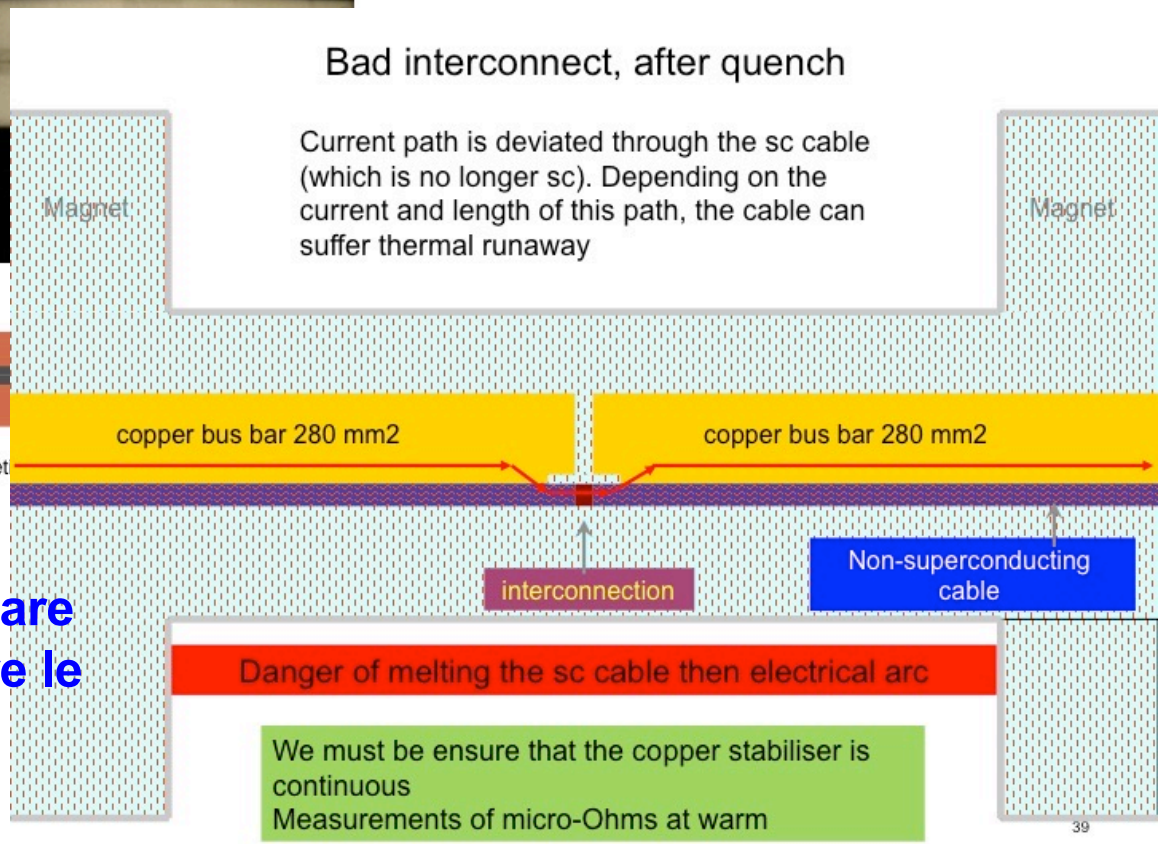
Bad surprise after gamma-ray imaging of the joints: Void is present in most of bus extremities because SnAg flows out during soldering of the joint

Cos' è accaduto a settembre 2009

Gamma rays QBBI.B25R3-M3 before disconnection (QRL connection & QRL lyra sides)

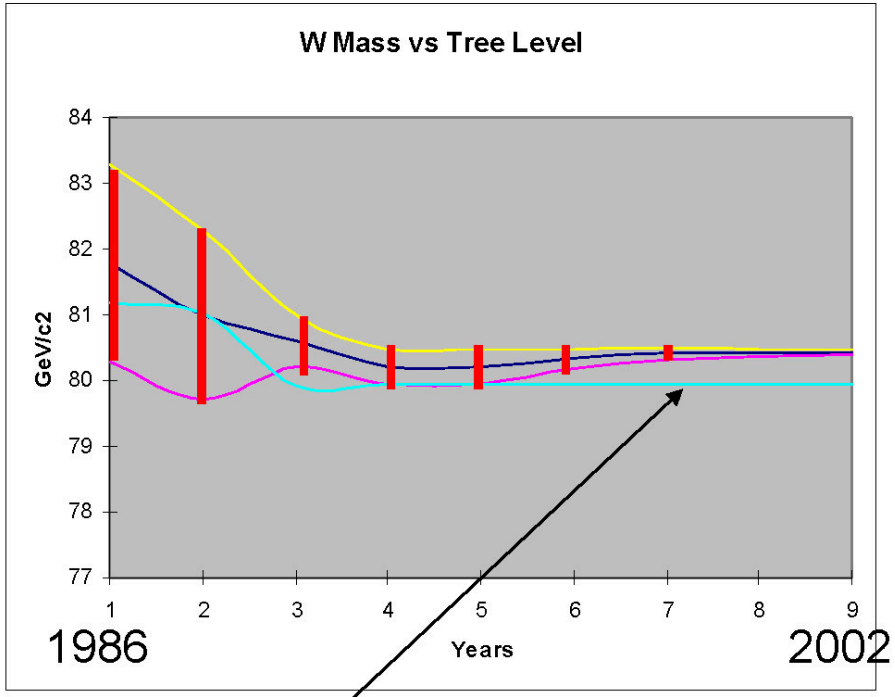


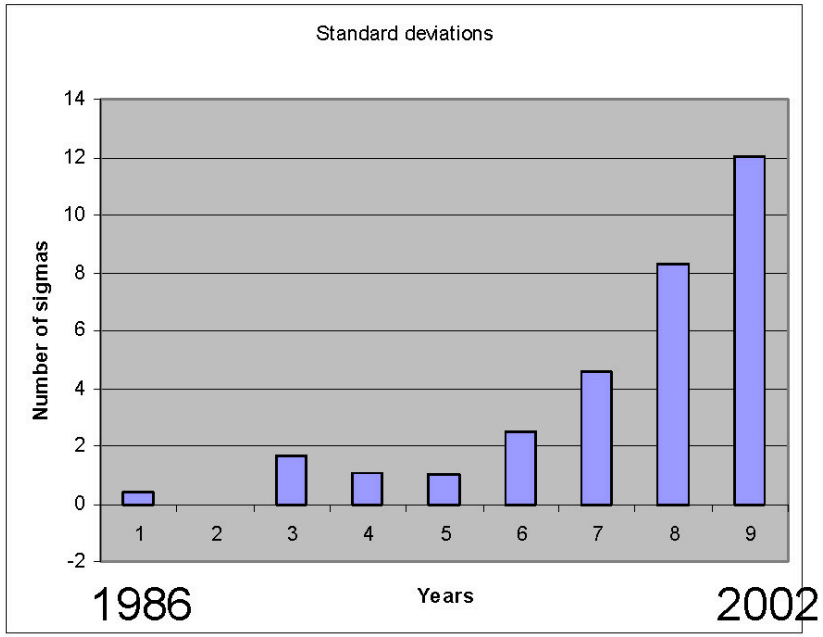
A. Verweij, TE-MPE. 28 April 2009, TE-TM meet



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

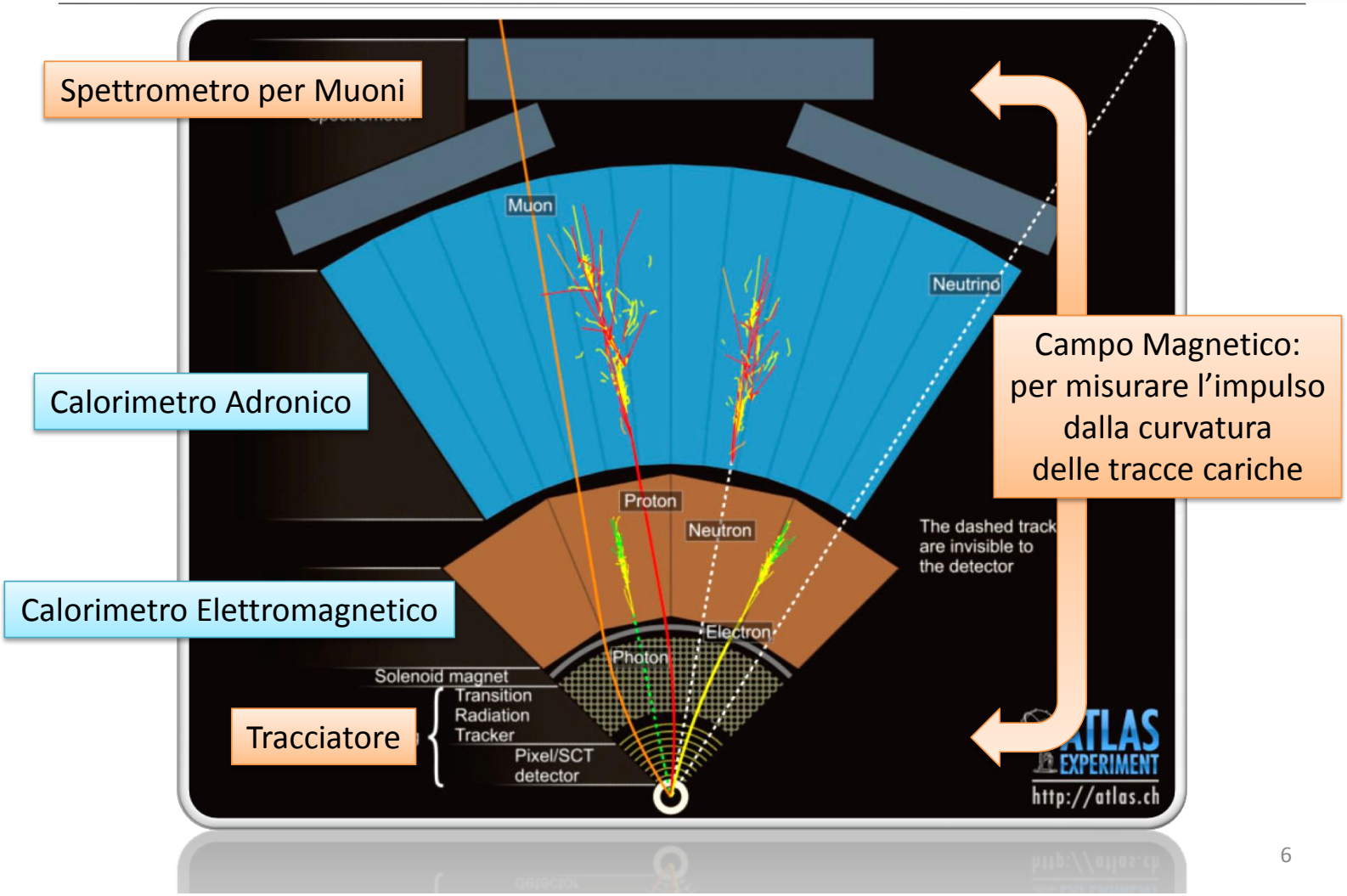
(with running α QED)

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

$$\alpha(\sqrt{s}=\mathrm{M_Z})=\frac{1}{128.936\pm0.046}$$

ATLAS: tecniche differenti, struttura analoga

Un "microscopio" a strati specializzati

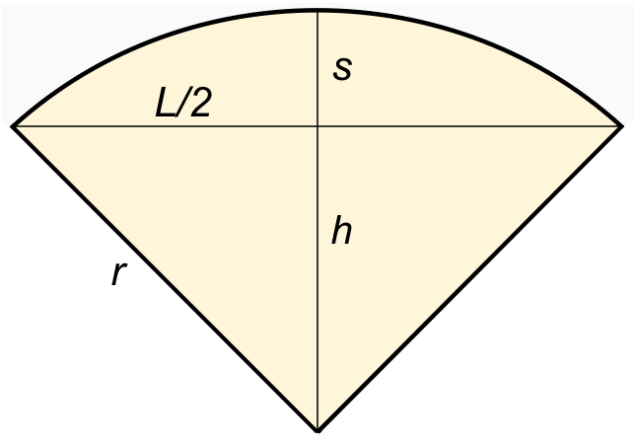


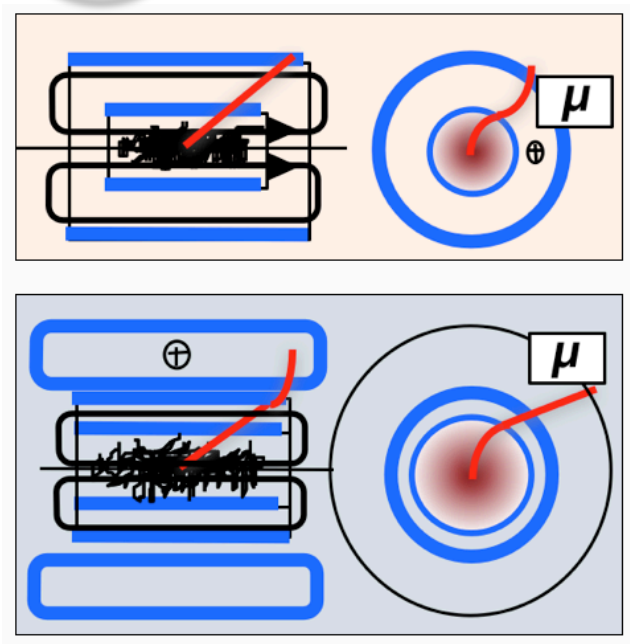
6

La differenza chiave: il campo magnetico

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

Da massimizzare per ottimizzare la risoluzione



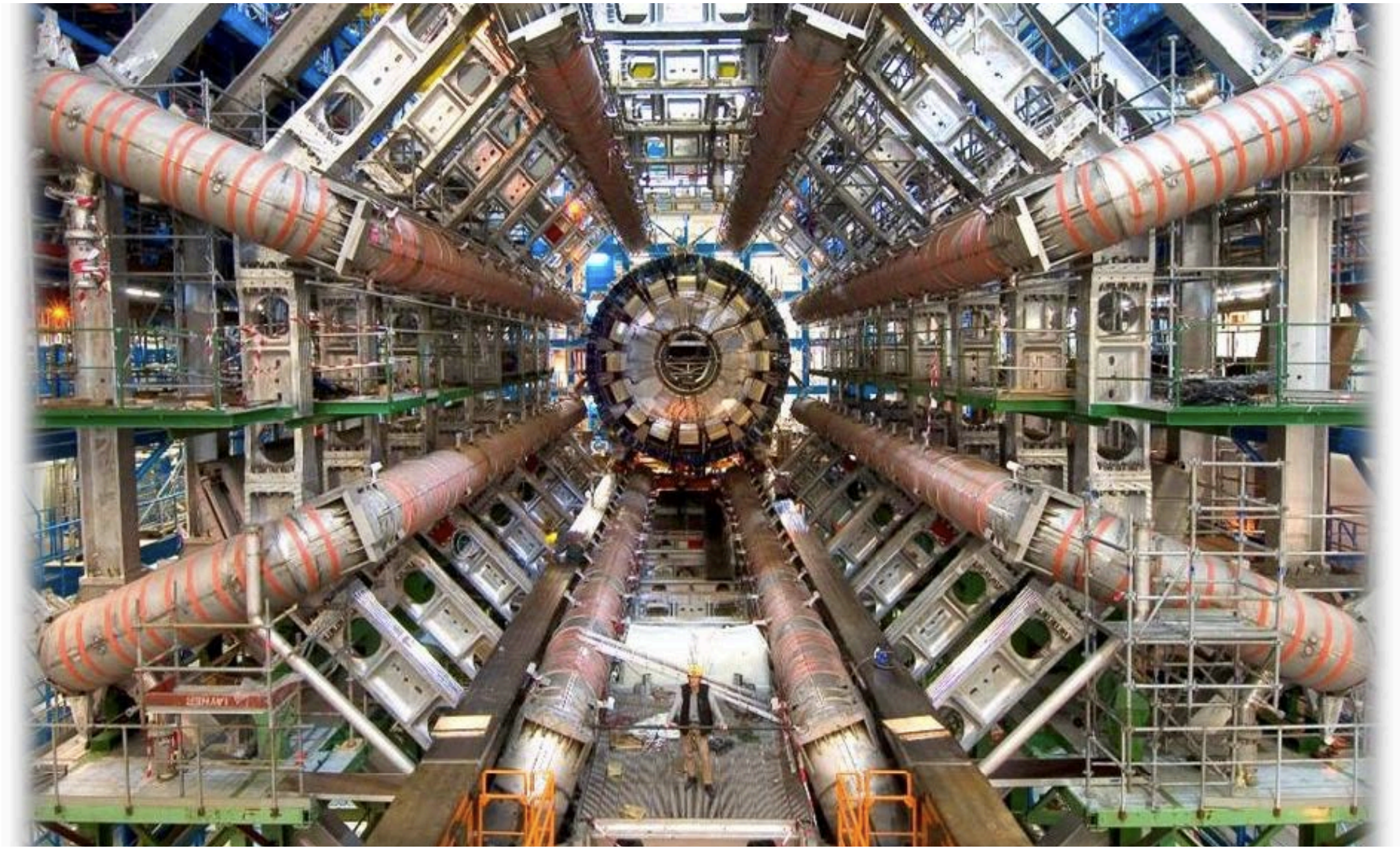
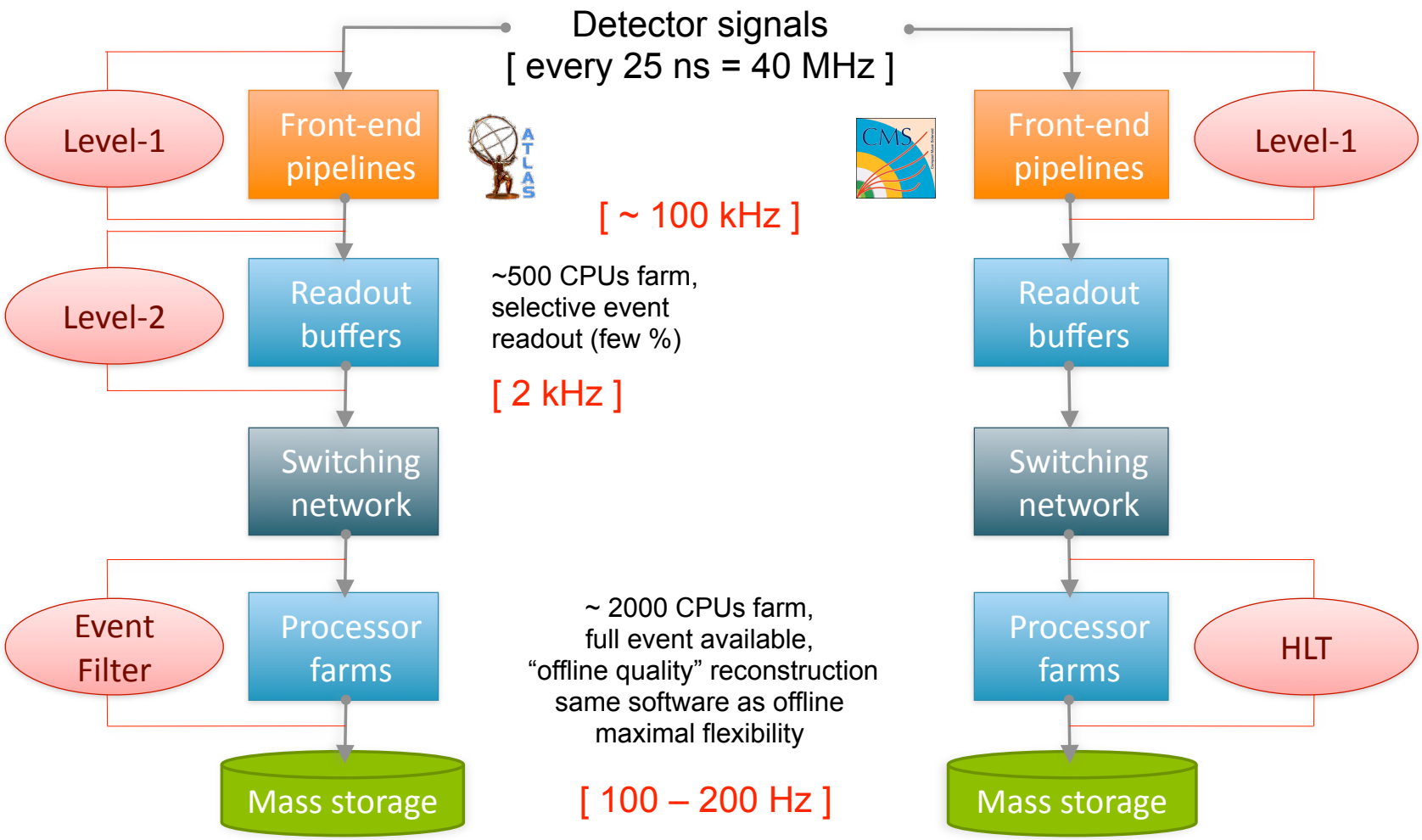


CMS

ATLAS

CMS: solenoide con giogo di ritorno instrumentato (camere a muoni)
B = 4T, L ~ 3m, compatto (basso costo), ottima risoluzione al centro
ma povera in avanti, muoni a basso angolo attraversano molto materiale
ATLAS: piccolo solenoide per il tracciatore + toroide in aria: ottimo L^2B anche in avanti, ma dimensioni giganti ~ 44 m, campo magnetico molto complesso, Beneficio limitato per il tracciatore

Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Varie strategie possibili per l'acquisizione dei dati