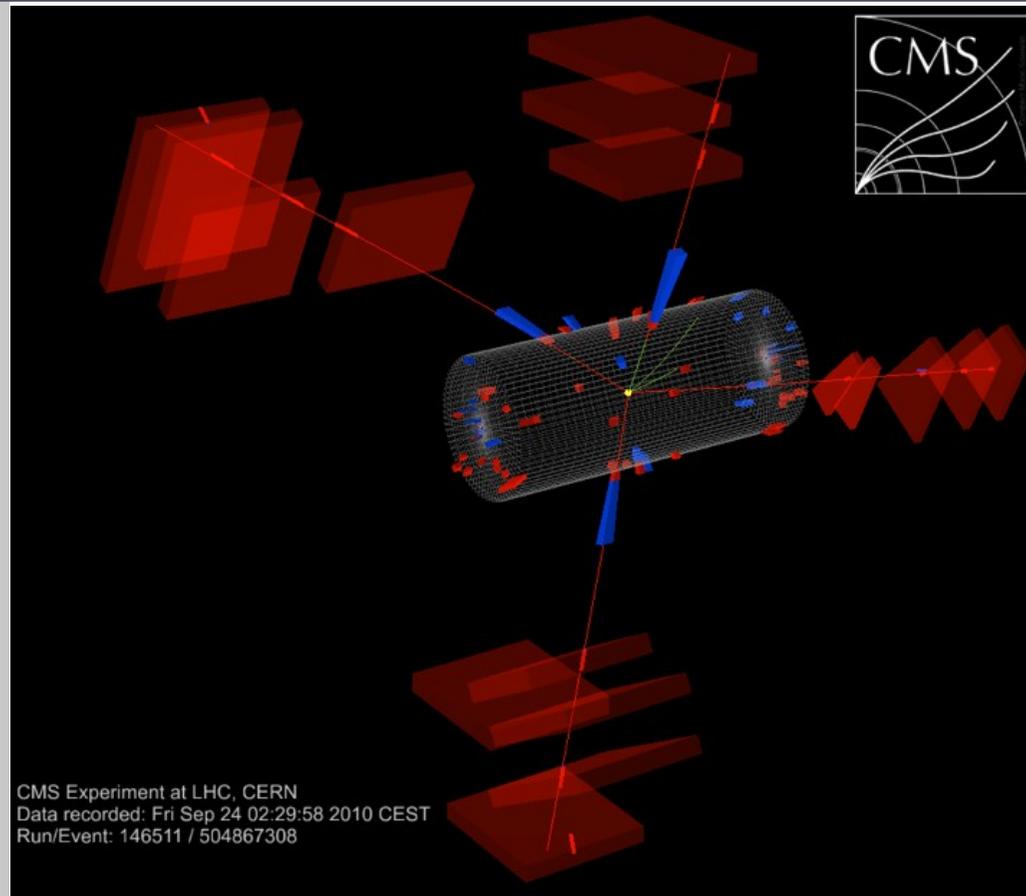


La fisica di LHC: la frontiera dell'energia

Fabio Cossutti – INFN Trieste

10 Maggio 2014



Matter → **Atom** → **Nucleus** → **Electron** → **Proton** → **Neutron** → **Quarks**

Matter particles
All ordinary particles belong to this group

LEPTONS		QUARKS	
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	Up Has an electric charge of plus two-thirds; 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	Down Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
THIRD FAMILY	Tau Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	Tau neutrino not yet discovered but believed to exist	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

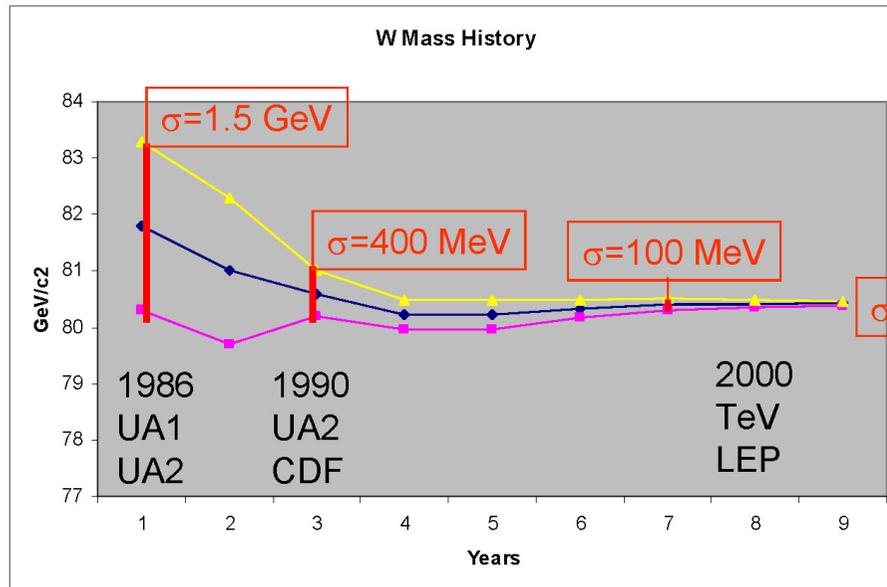
Gluons Carriers of the strong force between quarks Felt by: quarks The explosive release of nuclear energy is the result of the strong force	Photons Particles that make up light; they carry the electromagnetic force Felt by: quarks and charged leptons Electricity, magnetism and chemistry are all the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

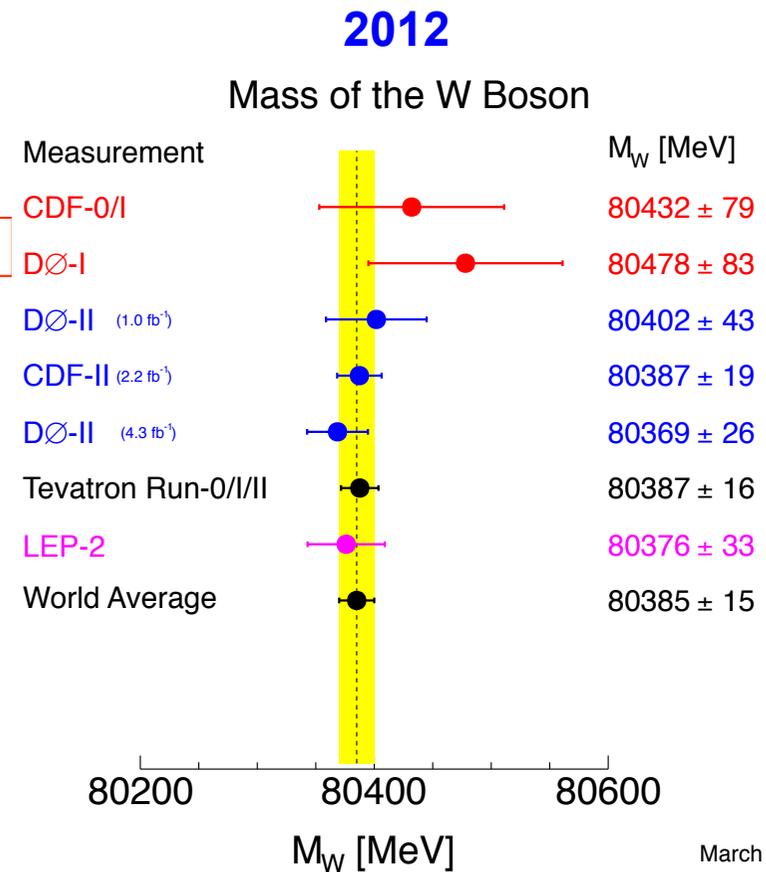
Struttura della materia e forze fondamentali: cosa sappiamo?

- ▶ La materia conosciuta è fatta di **leptoni** e **quark**, organizzati entrambi in 3 famiglie
- ▶ Le **interazioni elettrodeboli** sono molto ben descritte dal **Modello Standard** (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

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

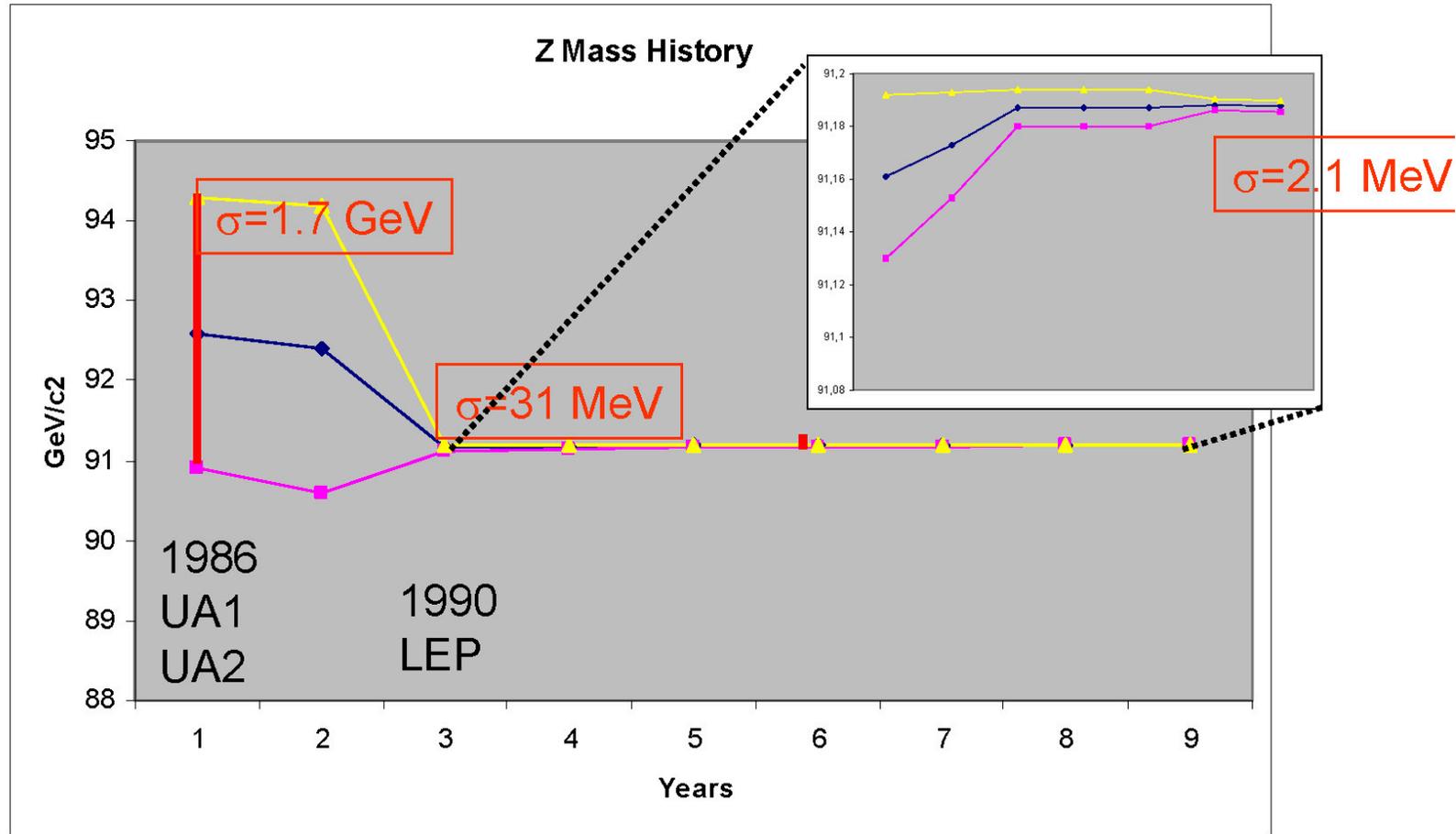


Only Published Results



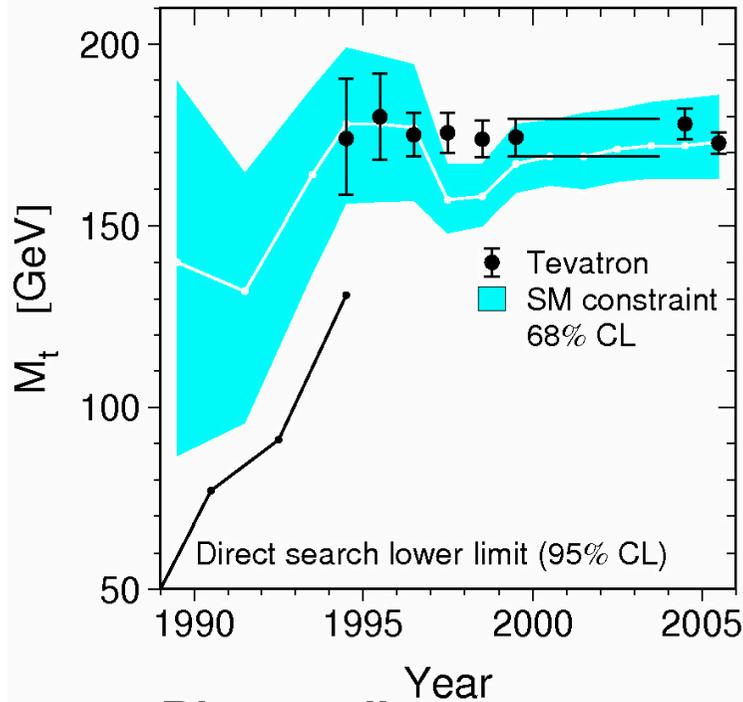
March 2012

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

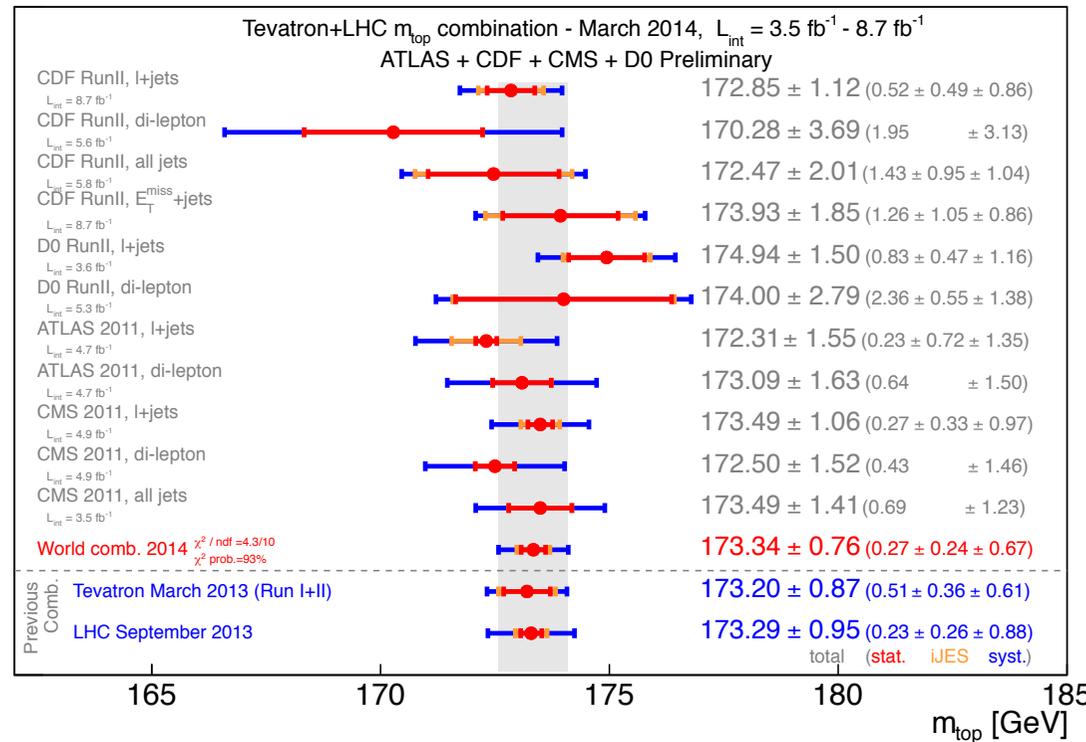


Only Published Results

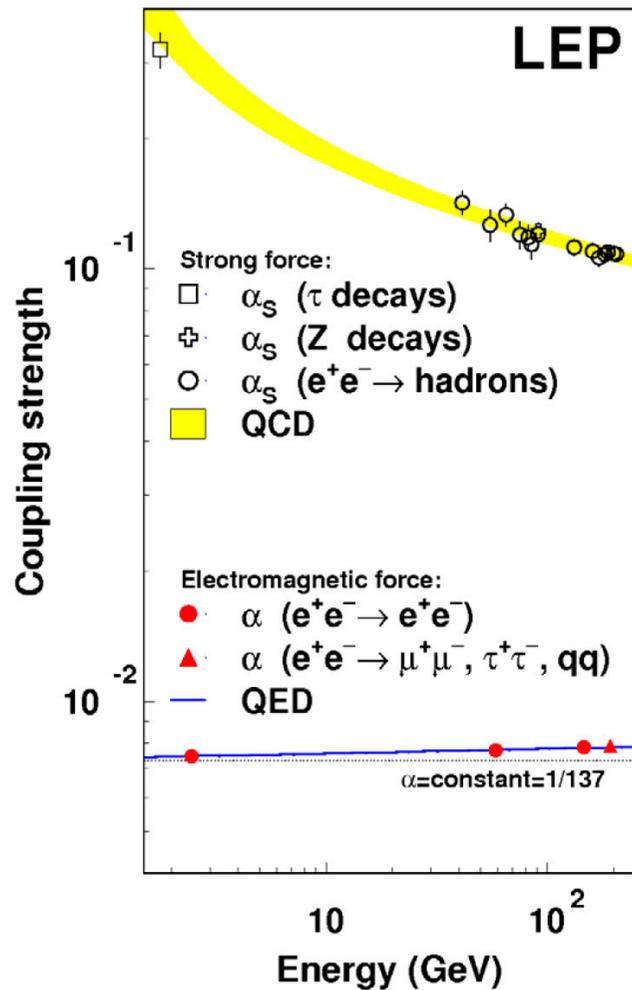
20 anni di quark top: trovato dove doveva essere



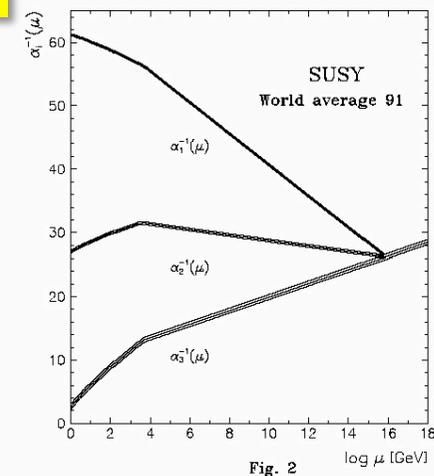
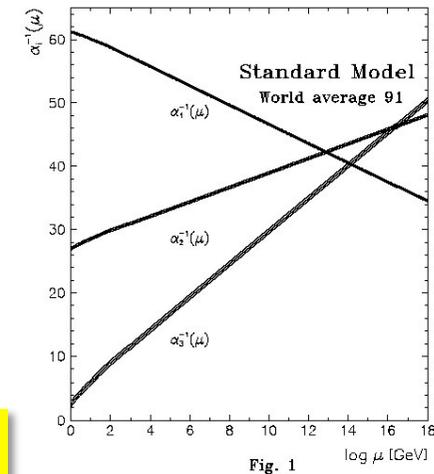
Ricerca diretta al Tevatron guidata dai vincoli dati dal Modello Standard Mediante le misure di LEP



Forze e particelle: le (in)costanti di accoppiamento

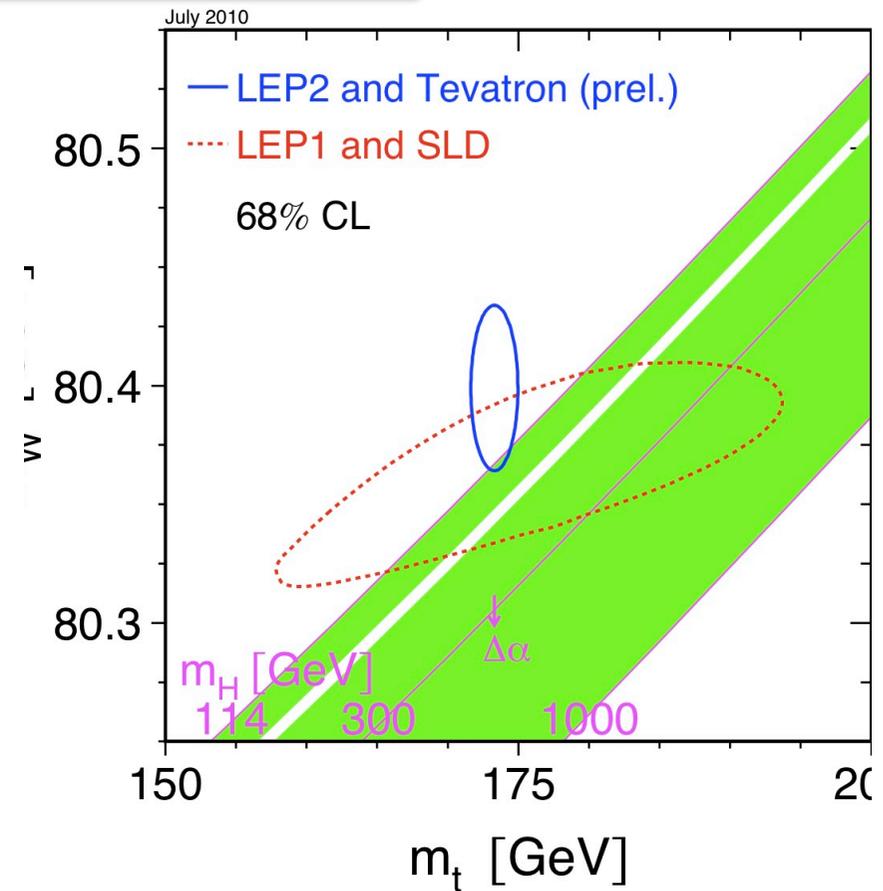
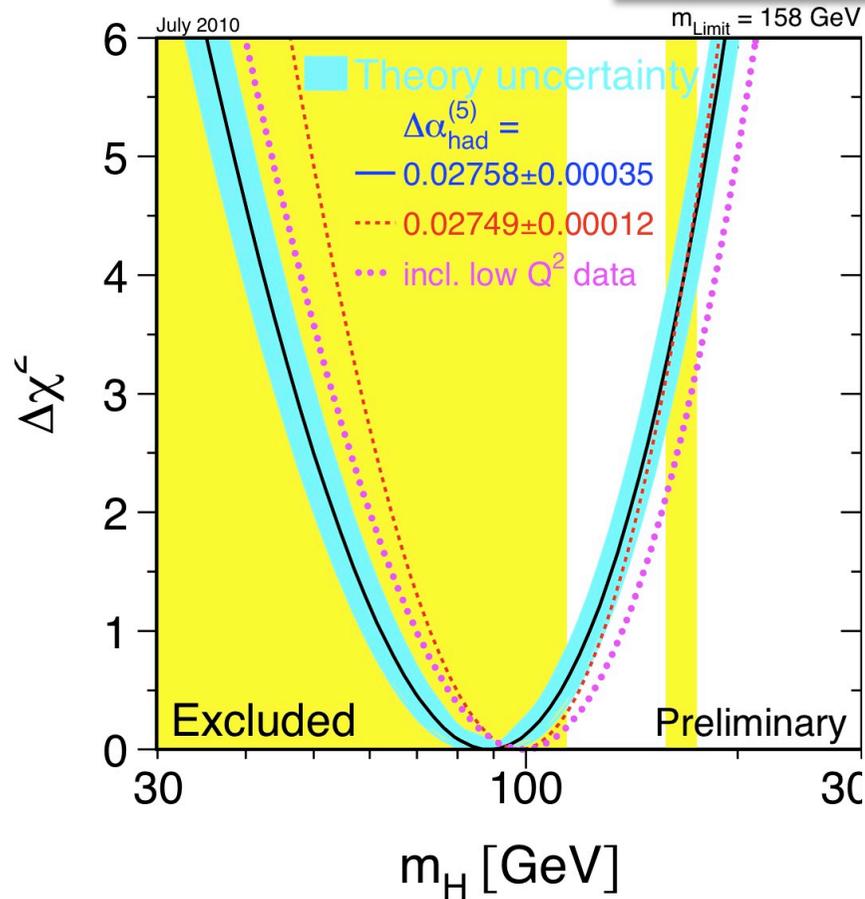


La “forza” con cui le particelle si accoppiano dipende dall’energia a cui lo fanno



Perchè tutte queste particelle hanno massa? Il bosone di Higgs

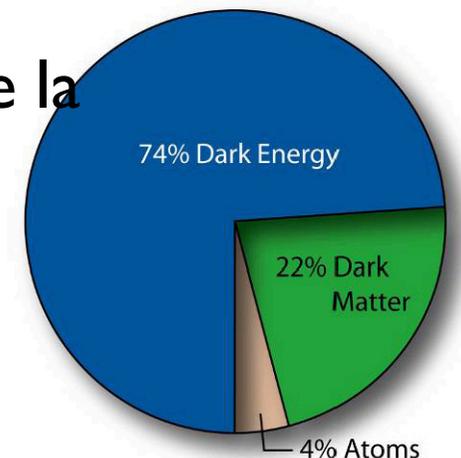
2010:
 $M_H = 89^{+35}_{-26}$ GeV @ 68% C.L.



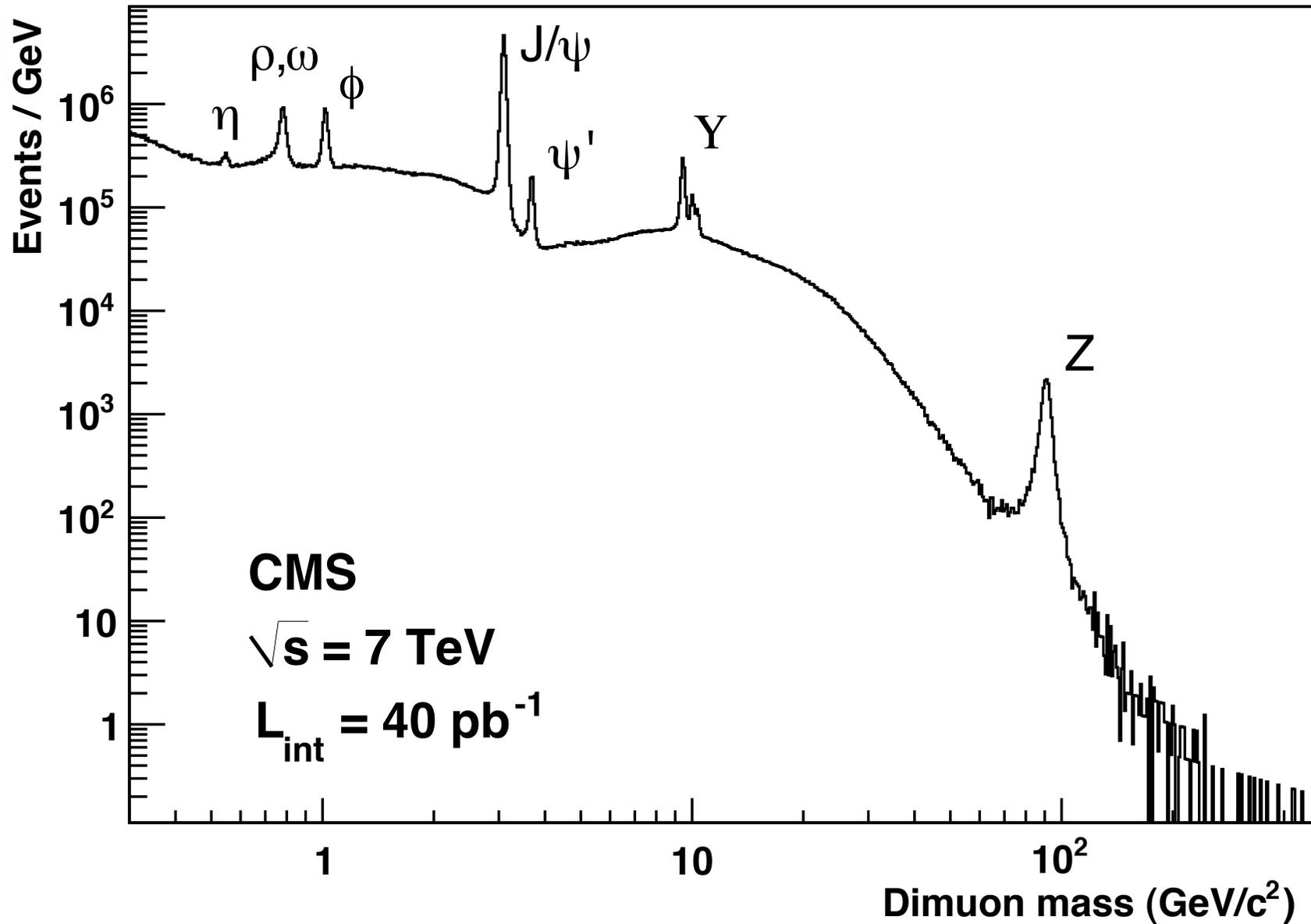
Le domande per LHC

- ▶ 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 è fatta la **Materia Oscura** che compone la maggior parte della massa dell' Universo?

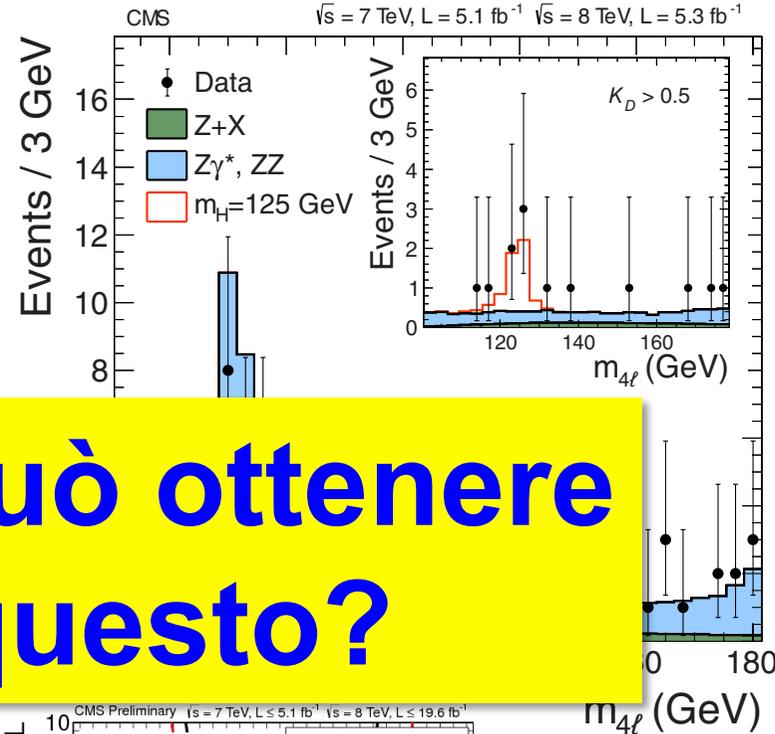
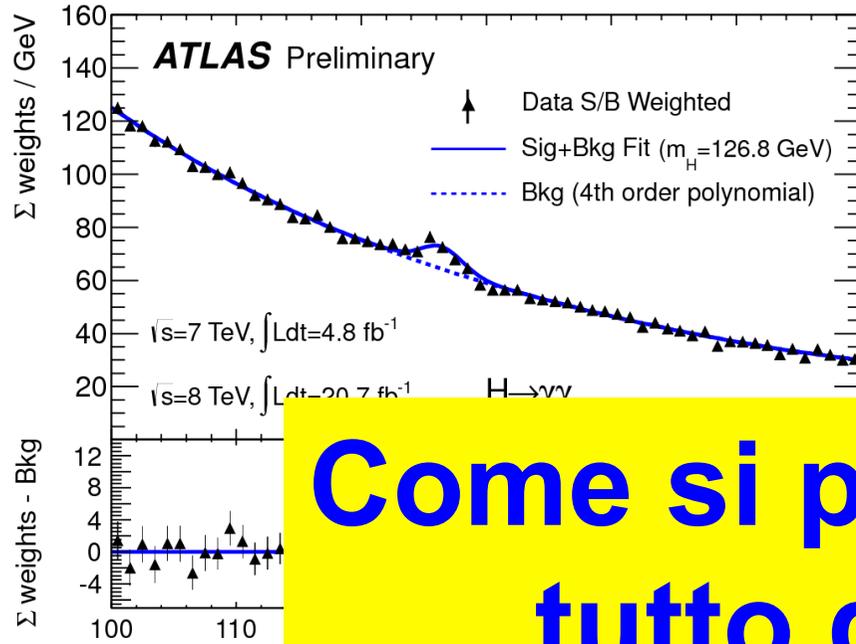
Il Modello Standard non può essere la fine della storia...



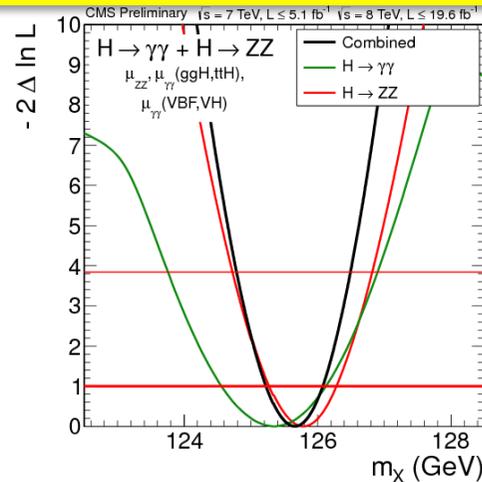
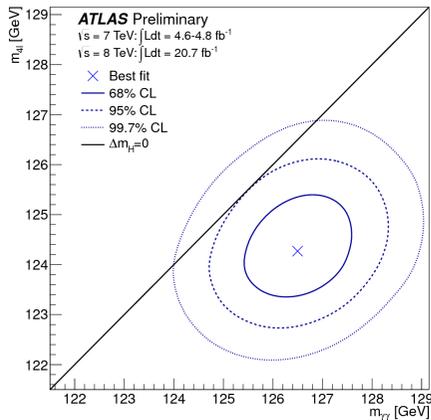
Dopo pochi mesi di run nel 2010...



Dopo 3 anni di run...



Come si può ottenere tutto questo?

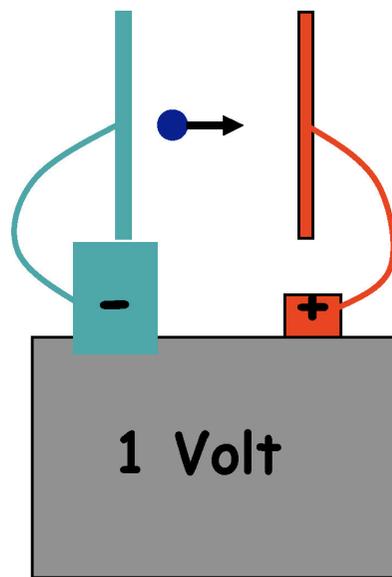


Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) = 10^9 eV

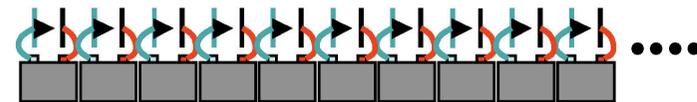
$m_{\text{protone}} = 0.938 \text{ GeV} = 1.67262158(31) \times 10^{-27} \text{ Kg}$

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



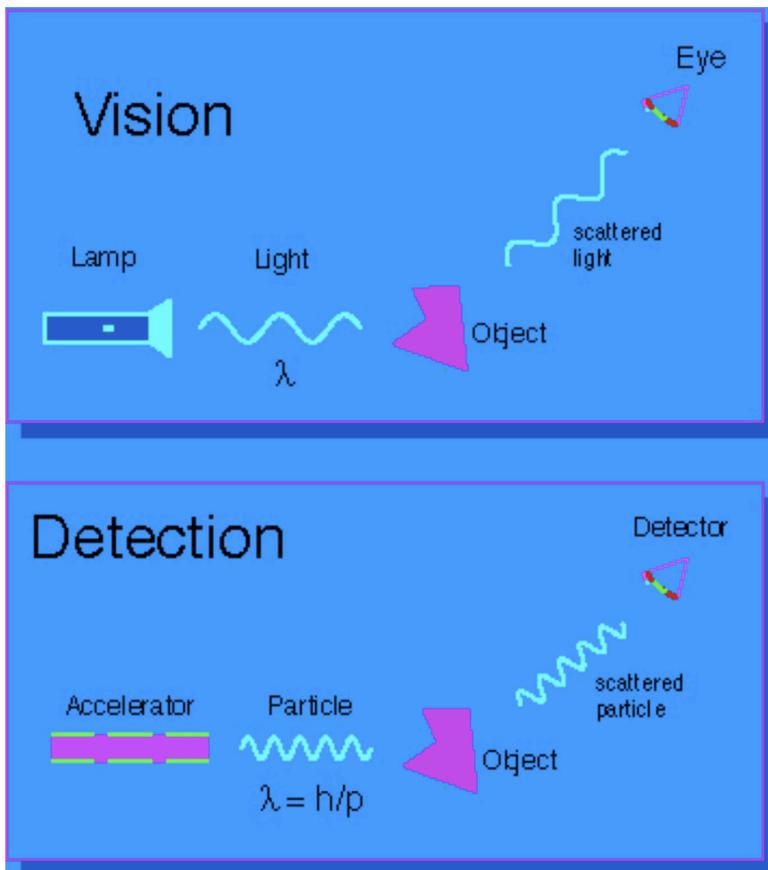
$E = 1 \text{ eV}$

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

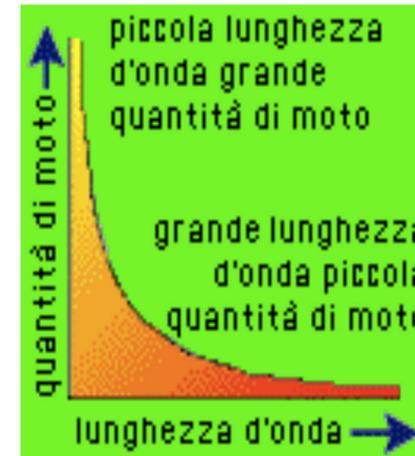


Perché vogliamo accelerare le particelle a così alte energie?

L'osservazione del microcosmo

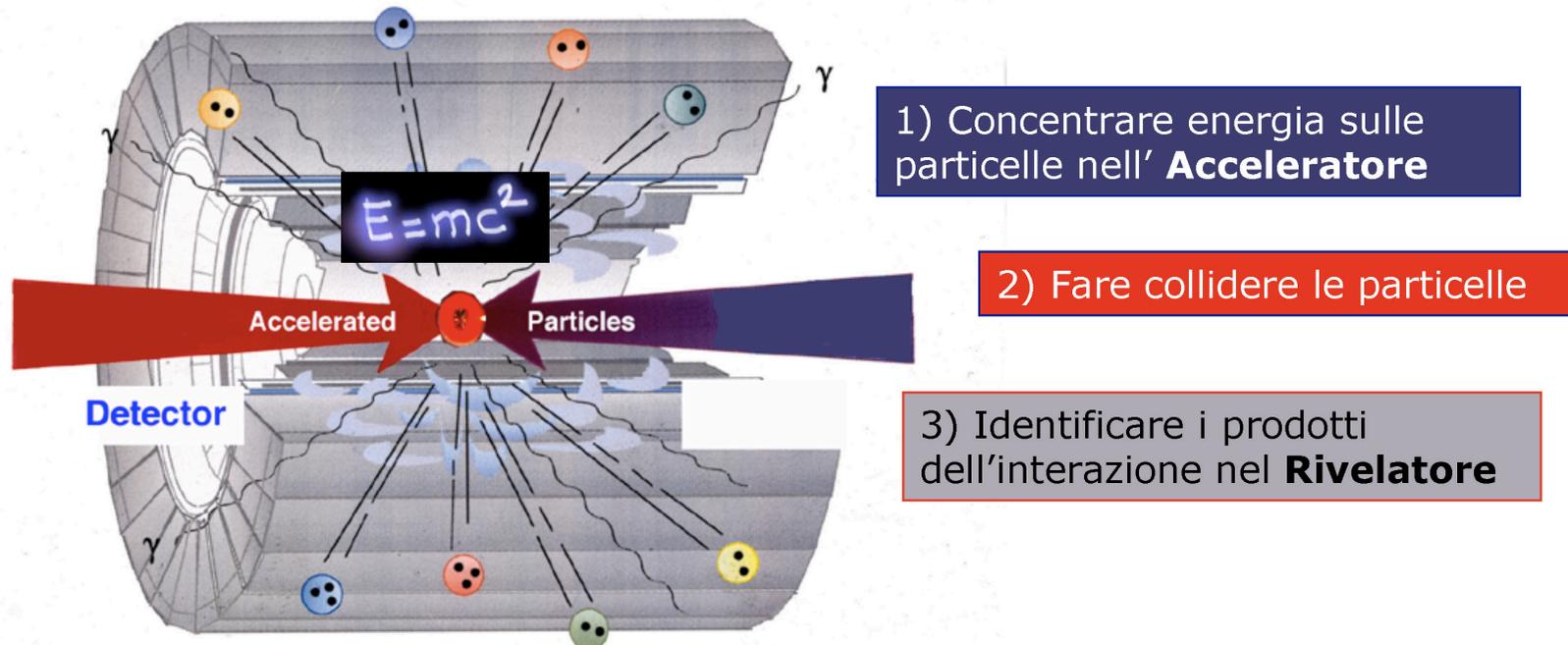


I più piccoli dettagli “risolvibili” hanno dimensioni confrontabili con λ della radiazione incidente.



Particelle di alta energia sono gli “esploratori del microcosmo”

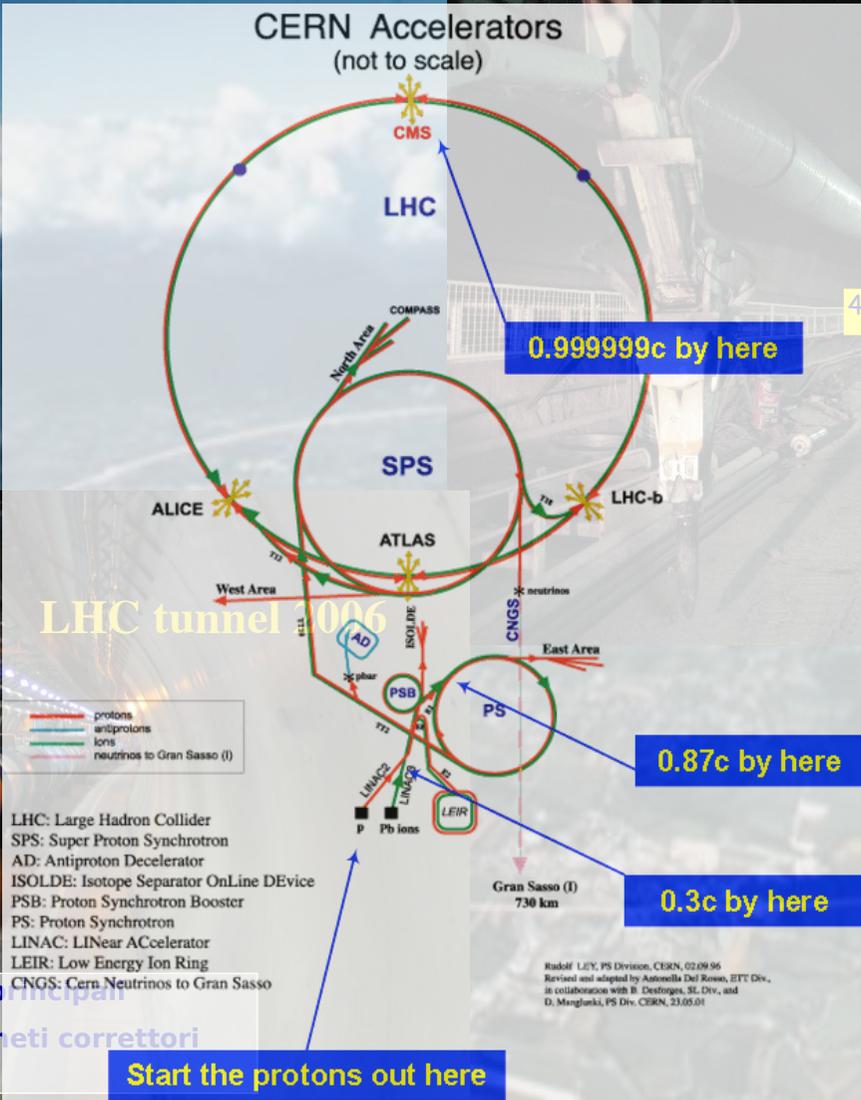
Perchè un collisionatore ?



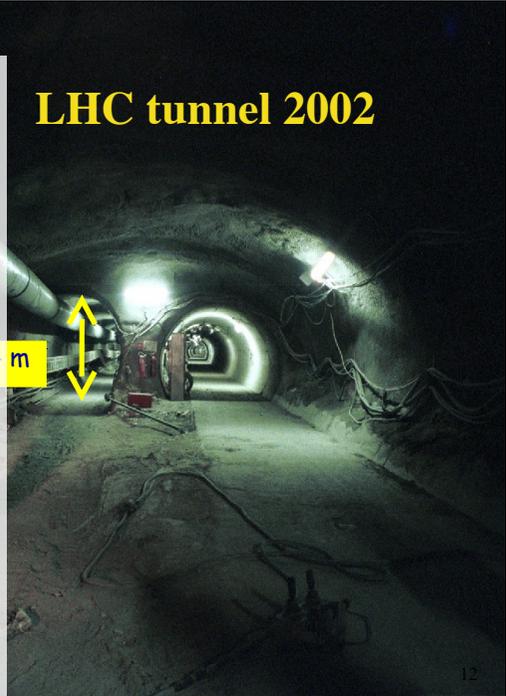
$E=mc^2$: la massa si può trasformare in energia e viceversa

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

Large Hadron Collider



LHC tunnel 2002



1232 dipoli principali
+ 3700 magneti correttivi
multipoli

Start the protons out here

0.999999c by here

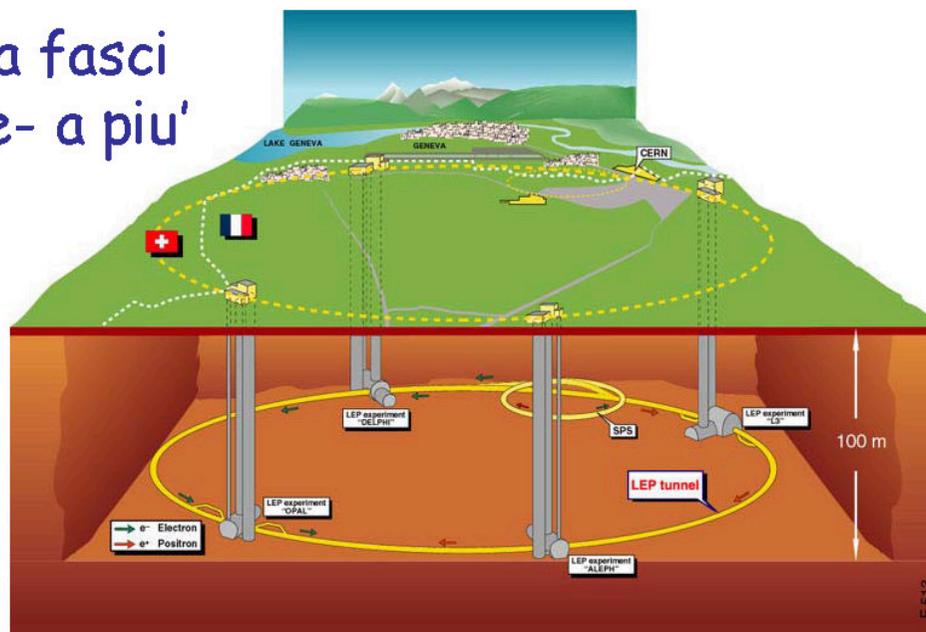
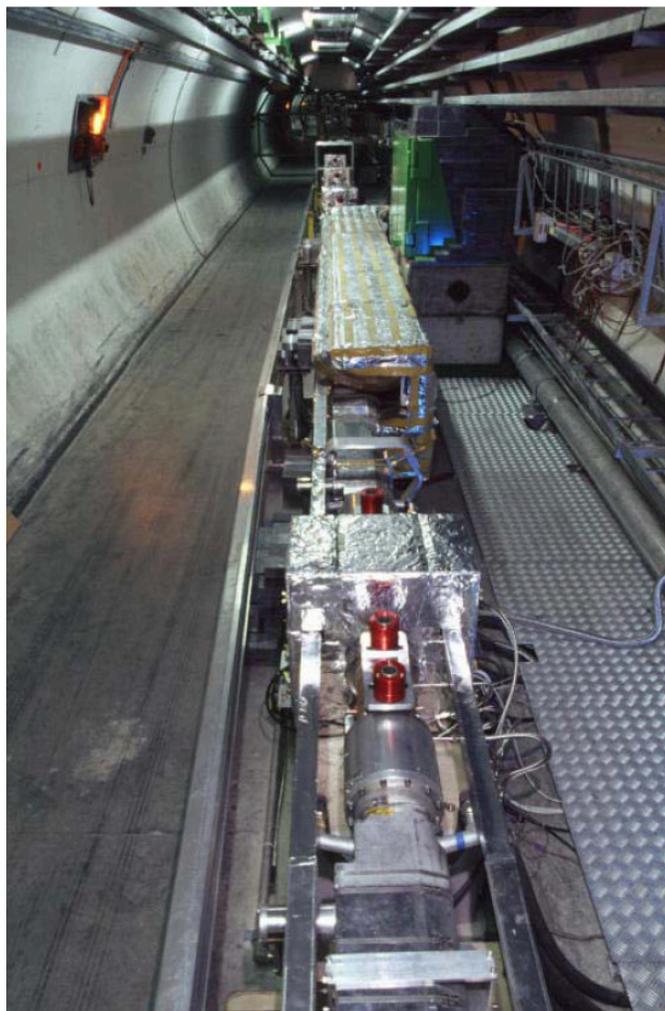
0.87c by here

0.3c by here

Un po' di storia:

LEP

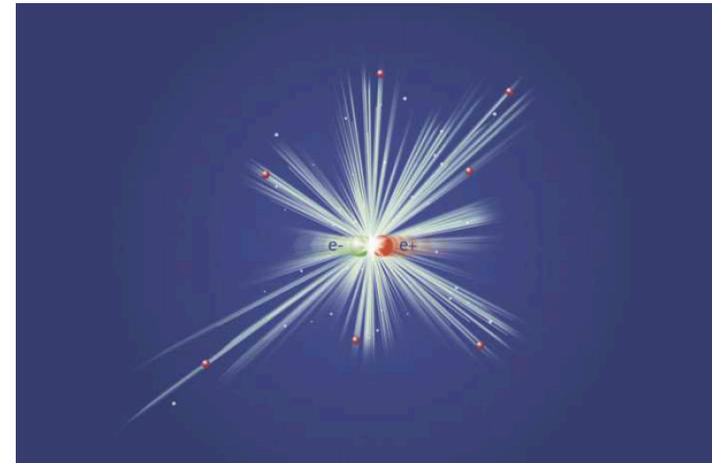
La macchina a fasci
incrociati e^+e^- a piu'
alta energia



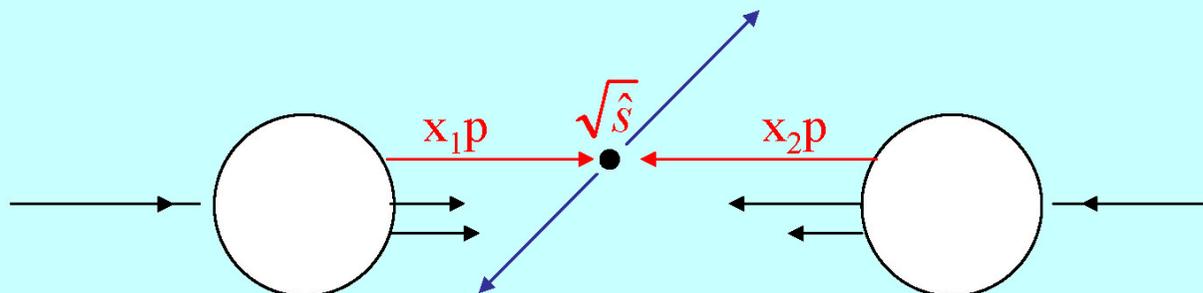
- LEP, un anello di 27 Km
- Fasci di elettroni e positroni di oltre 100 GeV
- In funzione dal 1989 al 2000
- Smontato nel 2001 per far posto a **LHC** : fasci di protoni da **7 TeV**

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

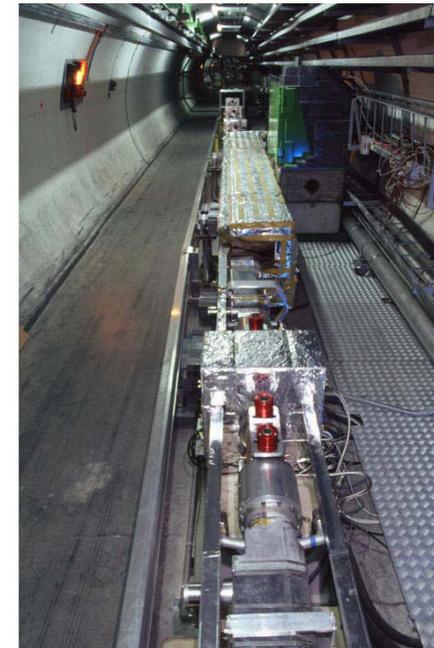
Acceleratori Circolari e..... bolletta della luce

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

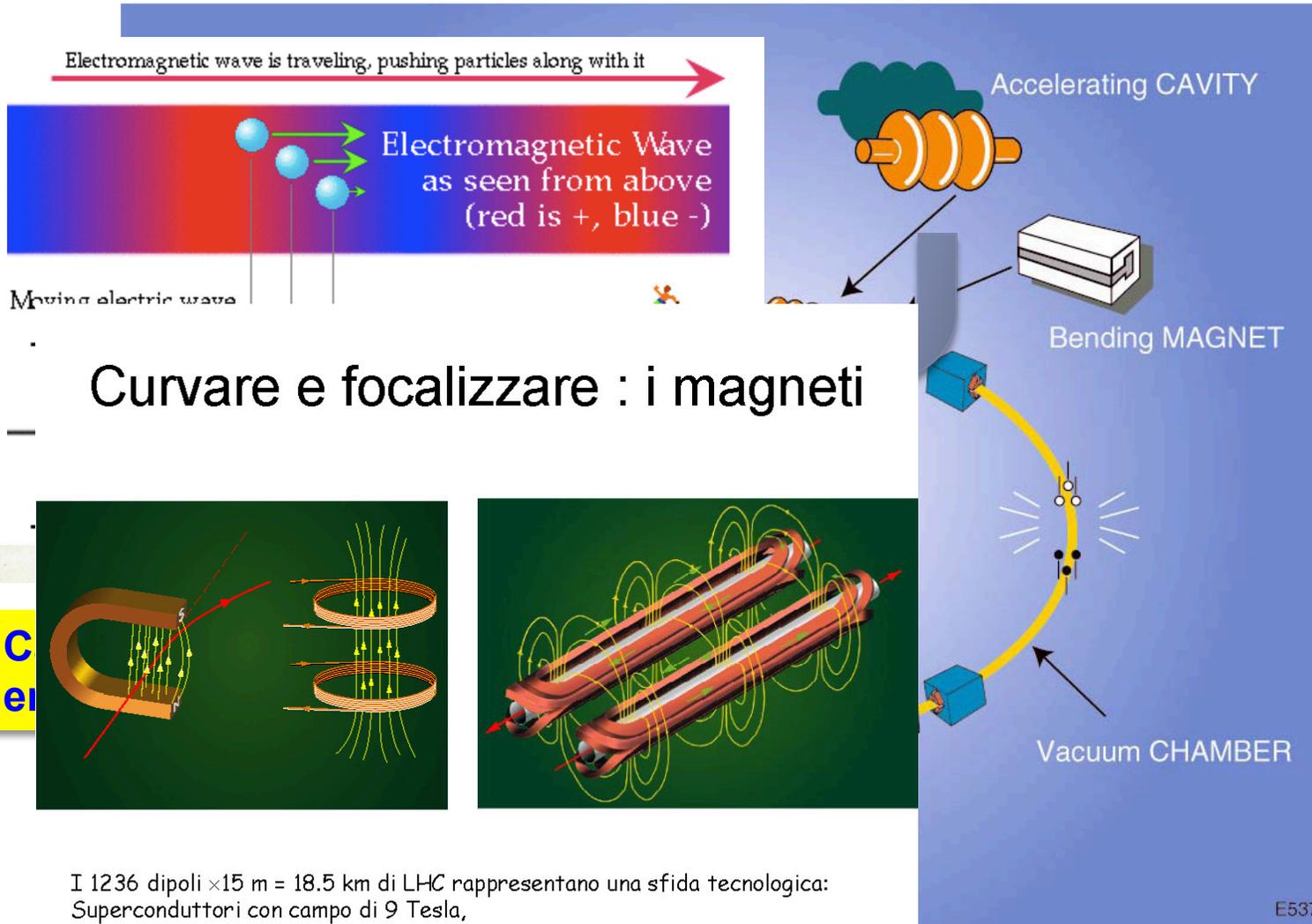
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

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

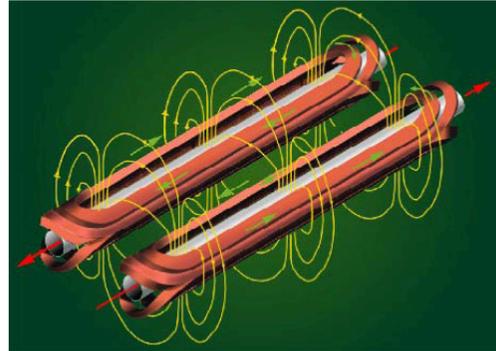
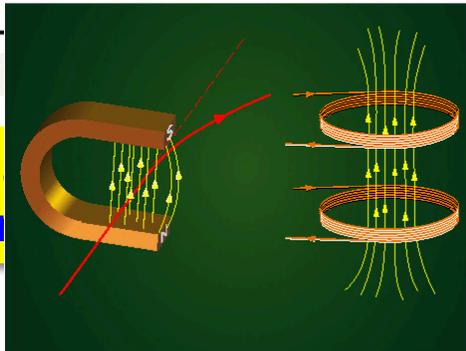
LEP : 27 Km di circonferenza ! 



Componenti principali di un acceleratore



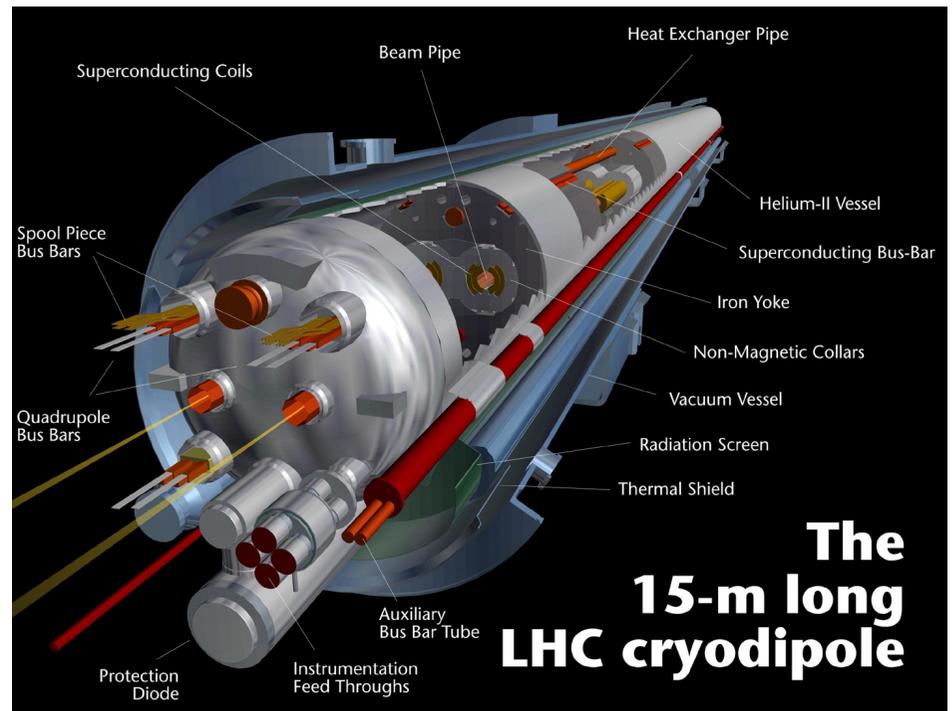
Curvare e focalizzare : i magneti



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

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



LHC cross sections and rates

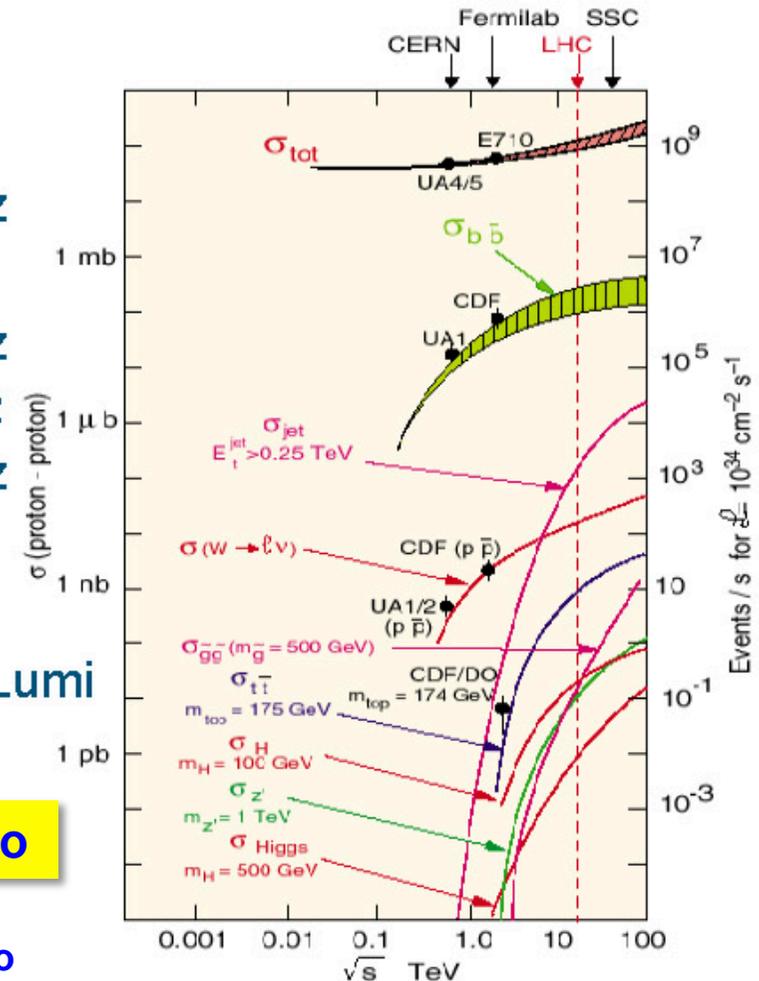
At High Luminosity ($10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

SM Higgs ($115 \text{ GeV}/c^2$):	$\rightarrow 0.1 \text{ Hz}$
$t \bar{t}$ production:	$\rightarrow 10 \text{ Hz}$
$W \rightarrow \ell \nu$:	$\rightarrow 10^2 \text{ Hz}$
bb production:	$\rightarrow 10^6 \text{ Hz}$
Inelastic:	$\rightarrow 10^9 \text{ Hz}$

Beam crossing every 25 ns
 25 pileup event / beam crossing at High Lumi

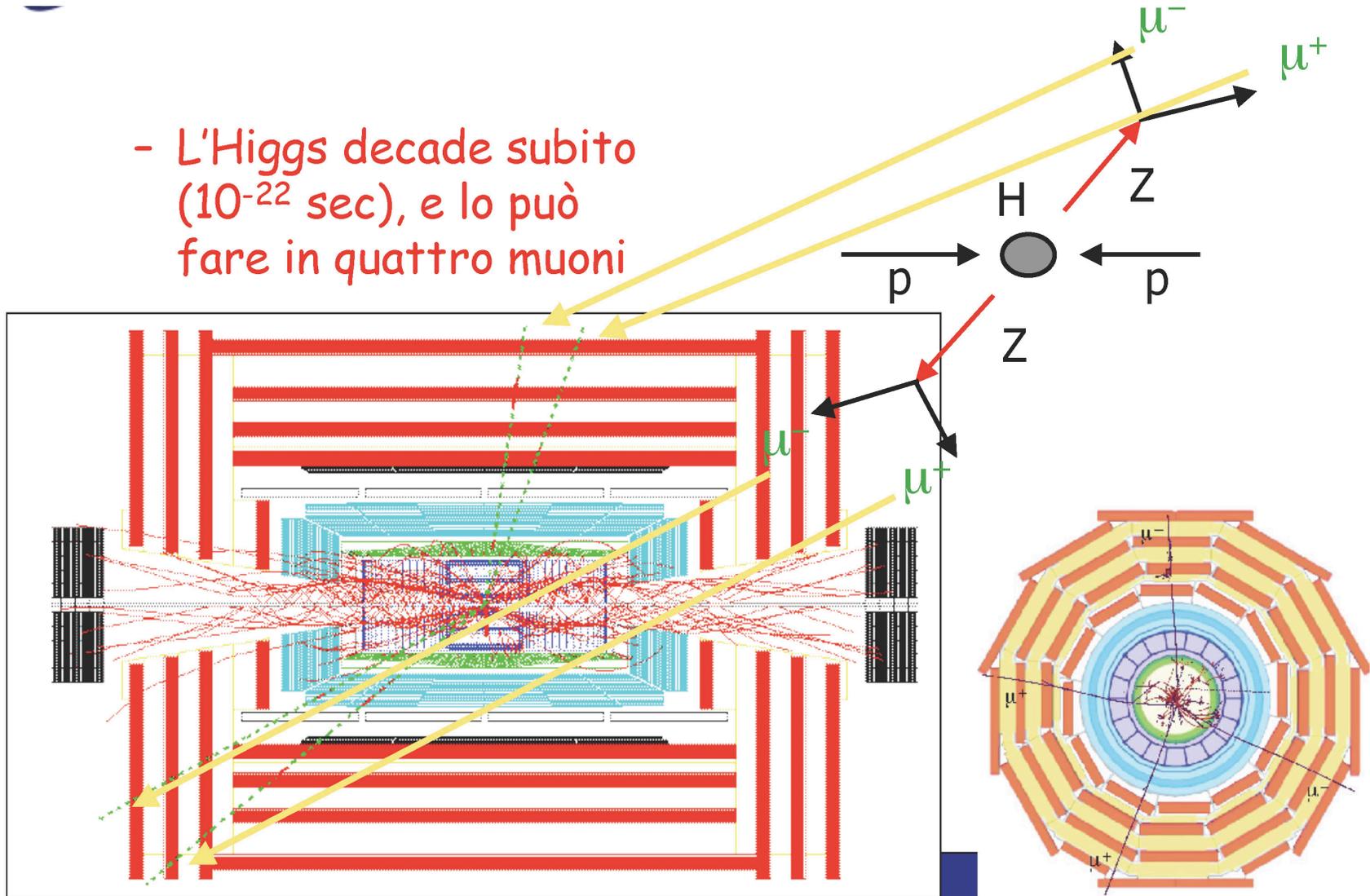
Numero di eventi = Luminosità \times sezione d'urto

Luminosità: densità di particelle nei fasci per unità di tempo
 Sezione d'urto: probabilità che un processo accada in un urto



Rivelazione dai prodotti di decadimento

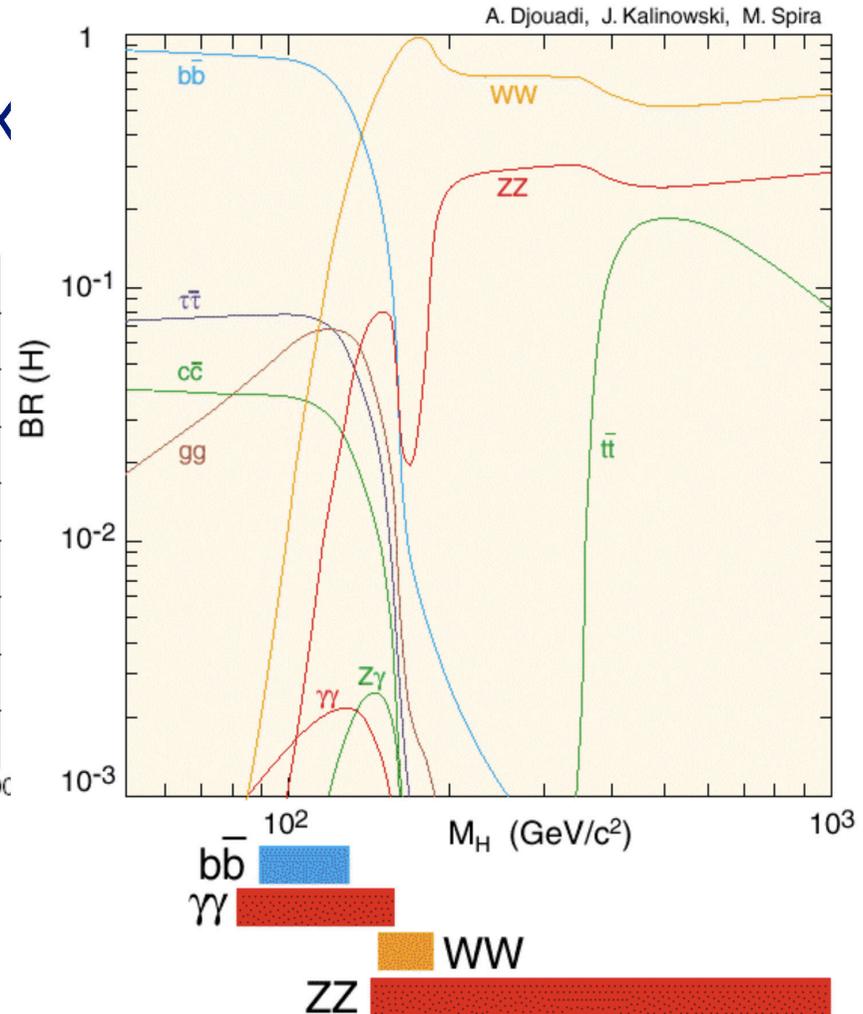
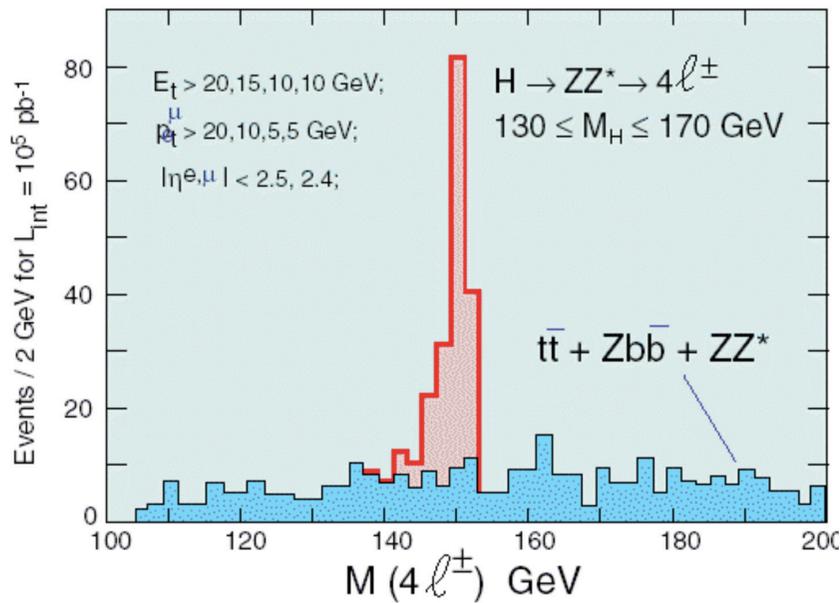
- L'Higgs decade subito (10^{-22} sec), e lo può fare in quattro muoni



Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

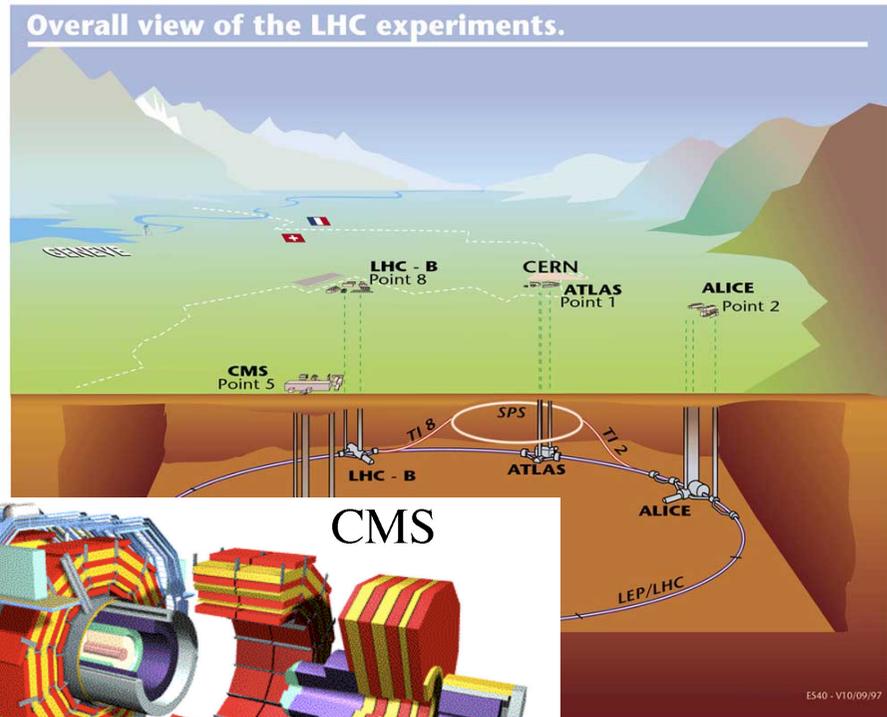
Cerco eventi :

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

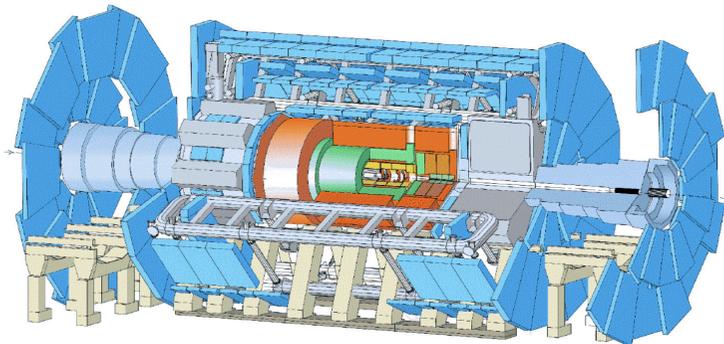


Esperimenti a LHC

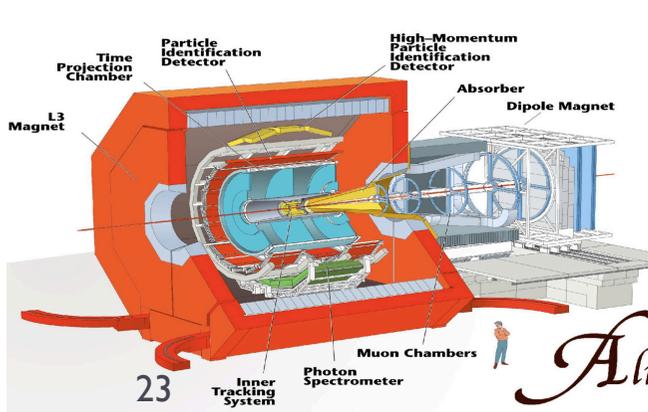
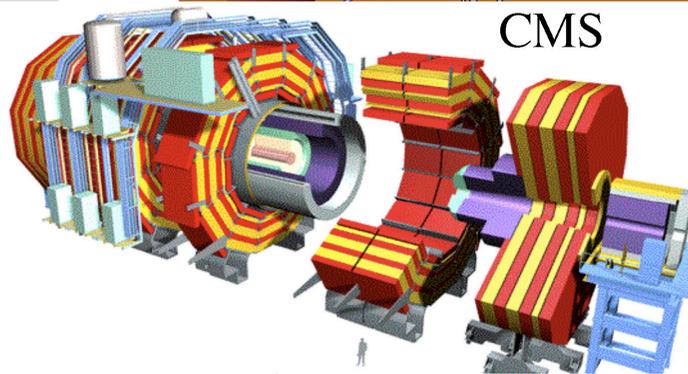
	Energia cm TeV	Luminosità cm ⁻² s ⁻¹
LEP e ⁺ e ⁻	0.209	10 ³²
LHC pp	14	10 ³⁴
LHC Pb Pb	1312	10 ²⁷



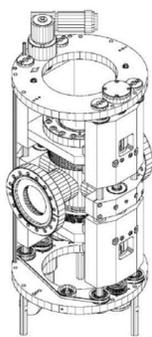
ATLAS



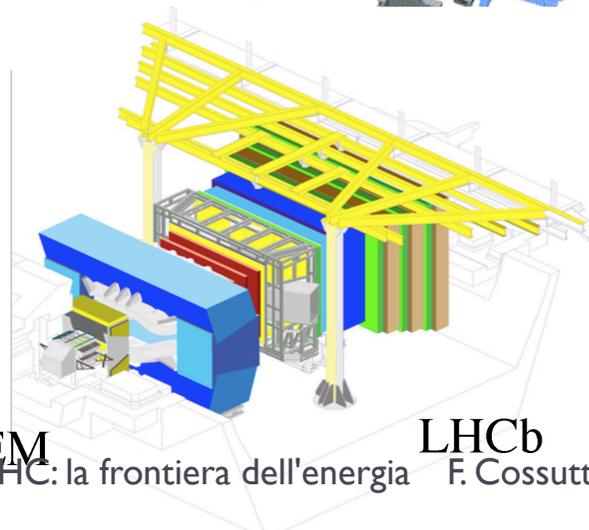
CMS



Alice



TOTEM



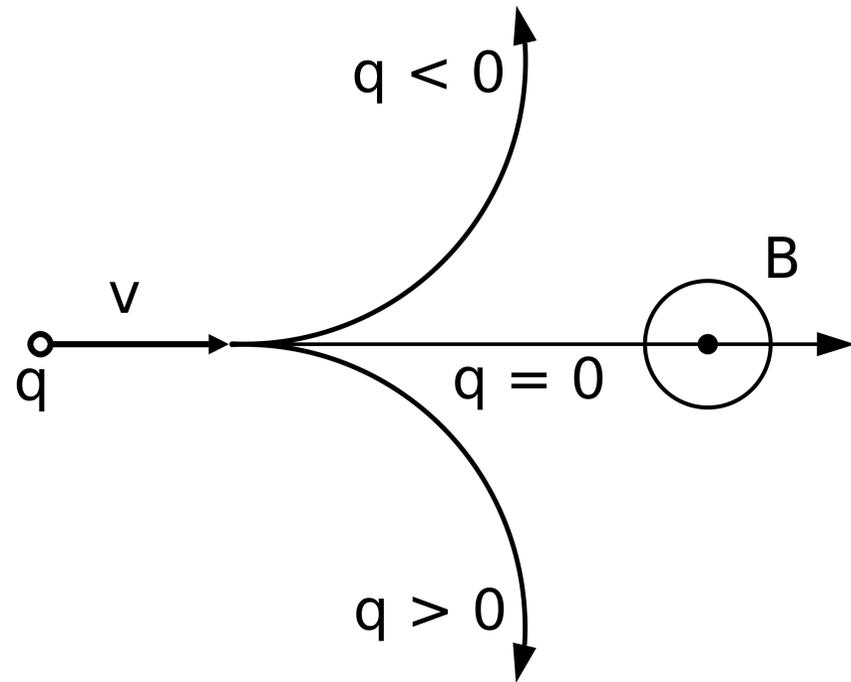
LHCb

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



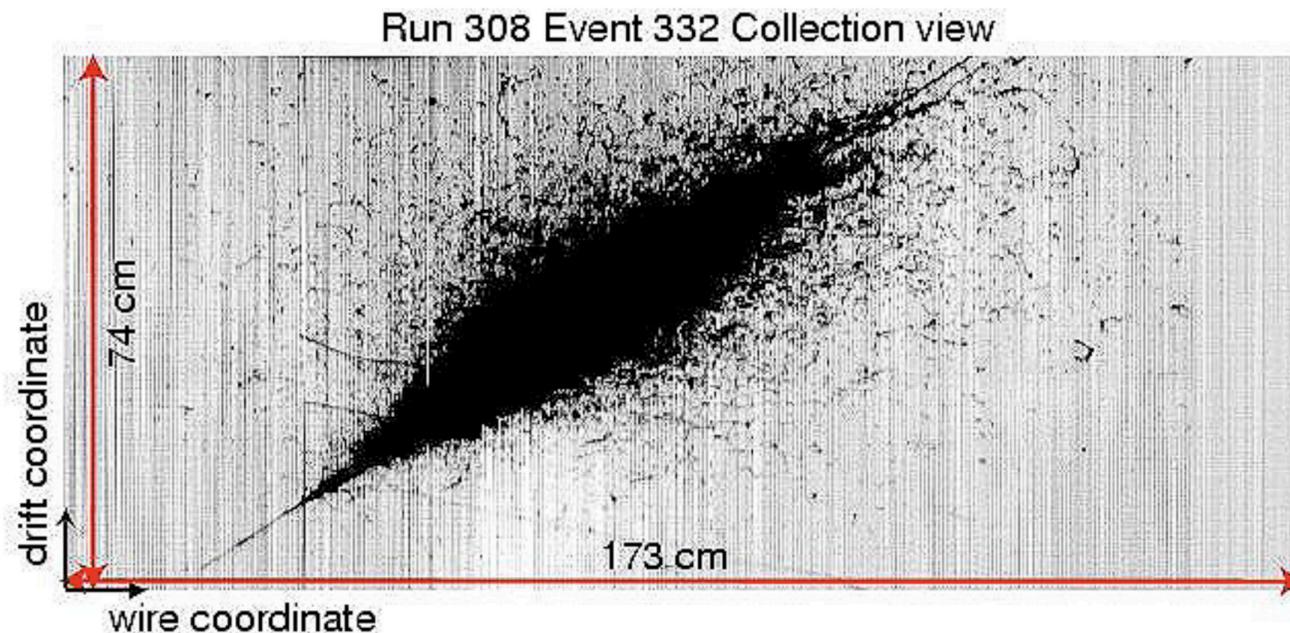
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

GeV/c q/e r

Misura di energia: i calorimetri

Come si misura l'energia di una particella ?

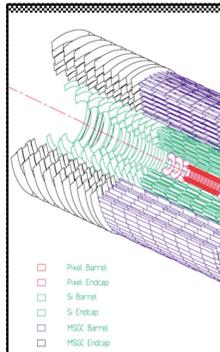
Usiamo una grossa quantità di materiale in modo che le particelle vi rilascino tutta l'energia prima di fermarsi



Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



Microstrisce Si
Pixels



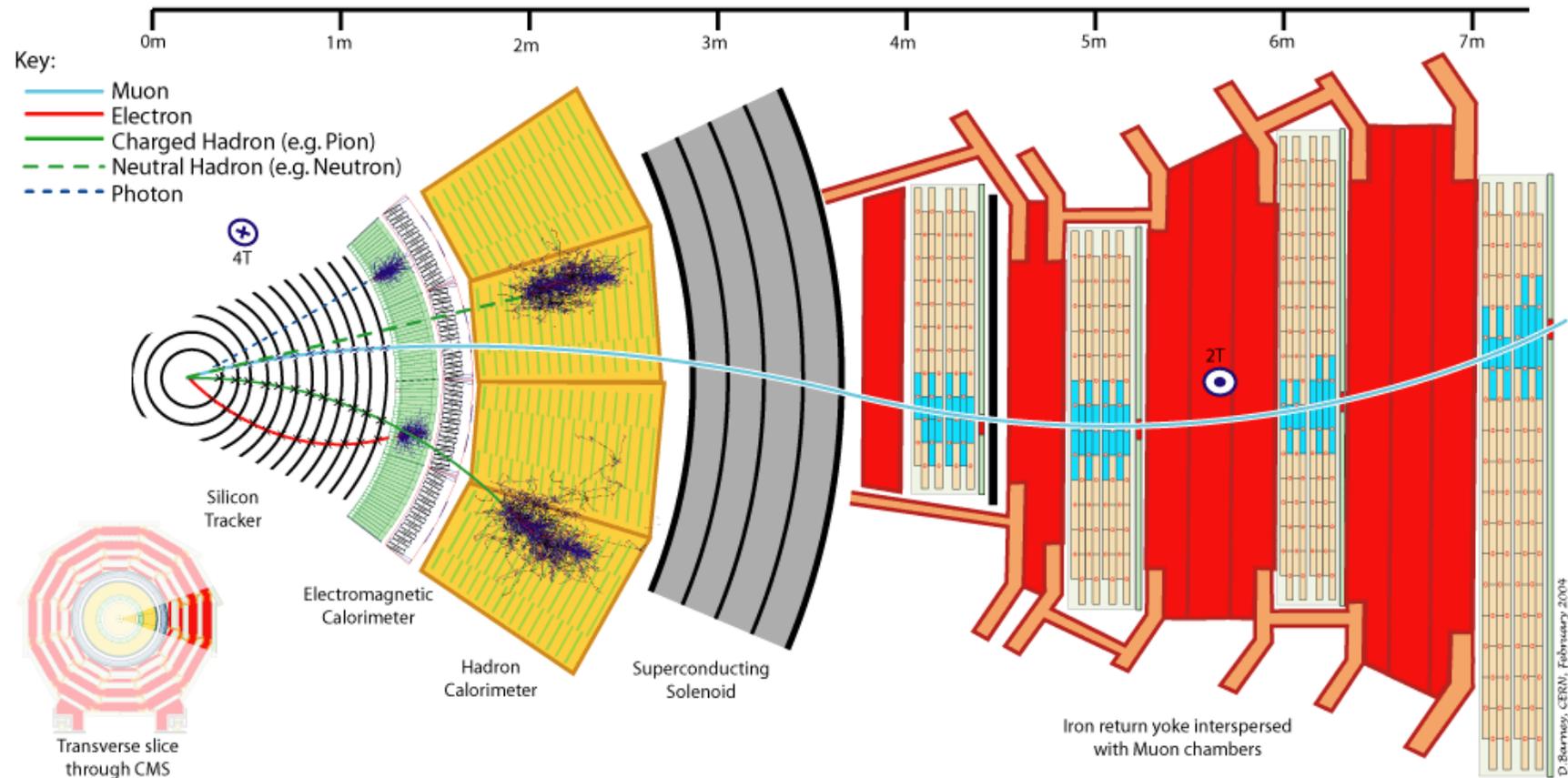
Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

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

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

Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento

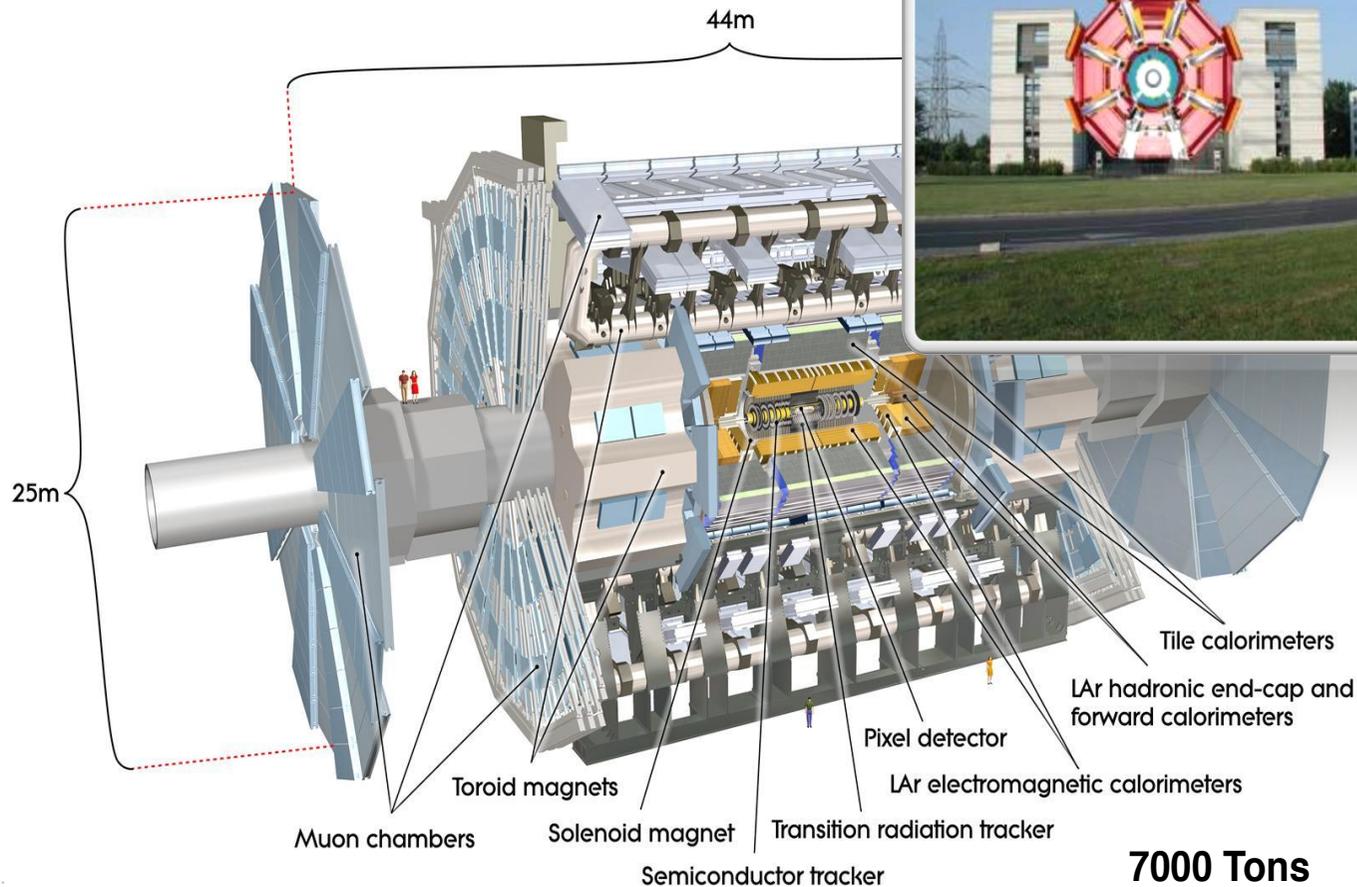


Due sono meglio di uno solo: ATLAS

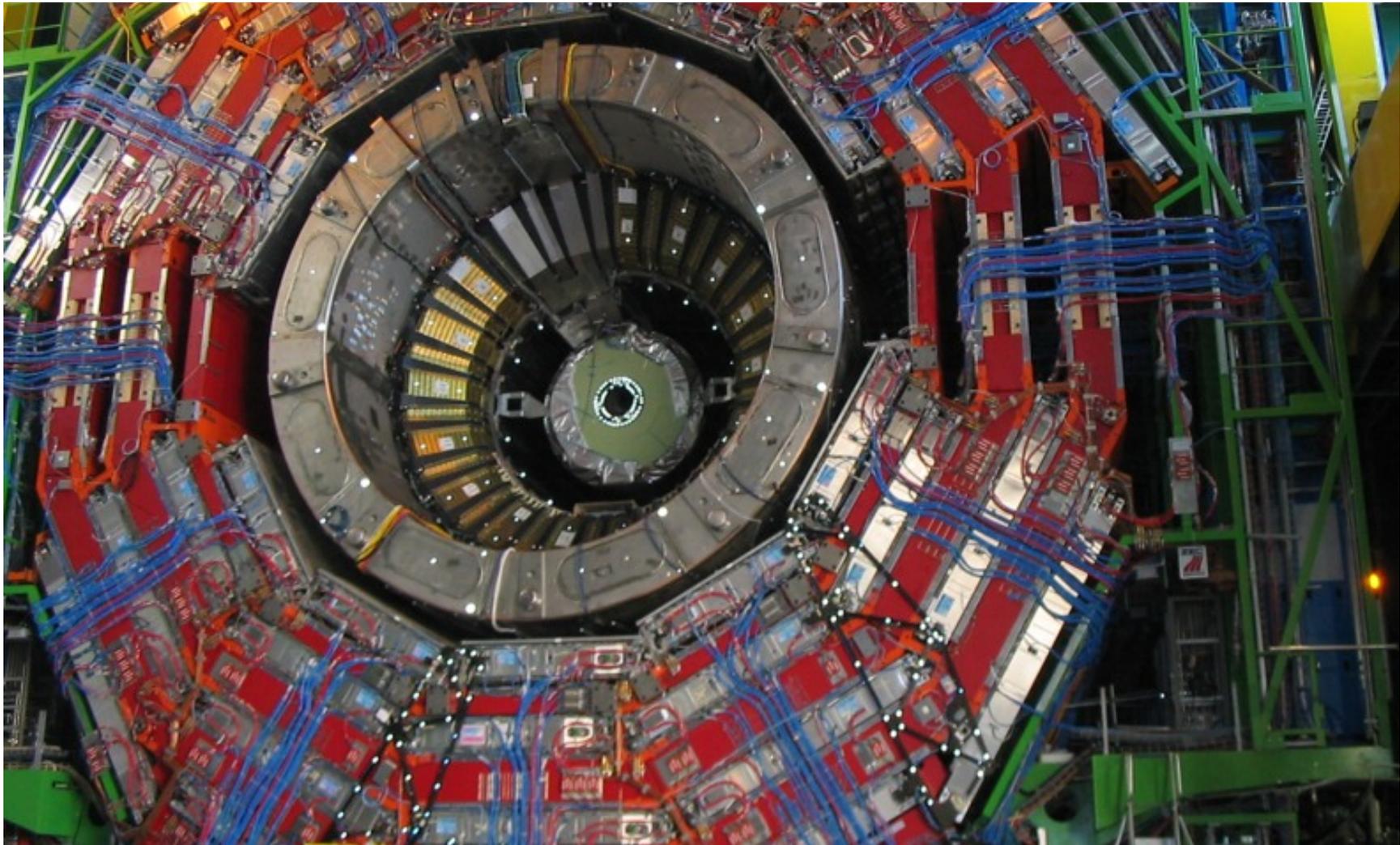
Più grande è l'energia:



✓ Più grande è il rivelatore:



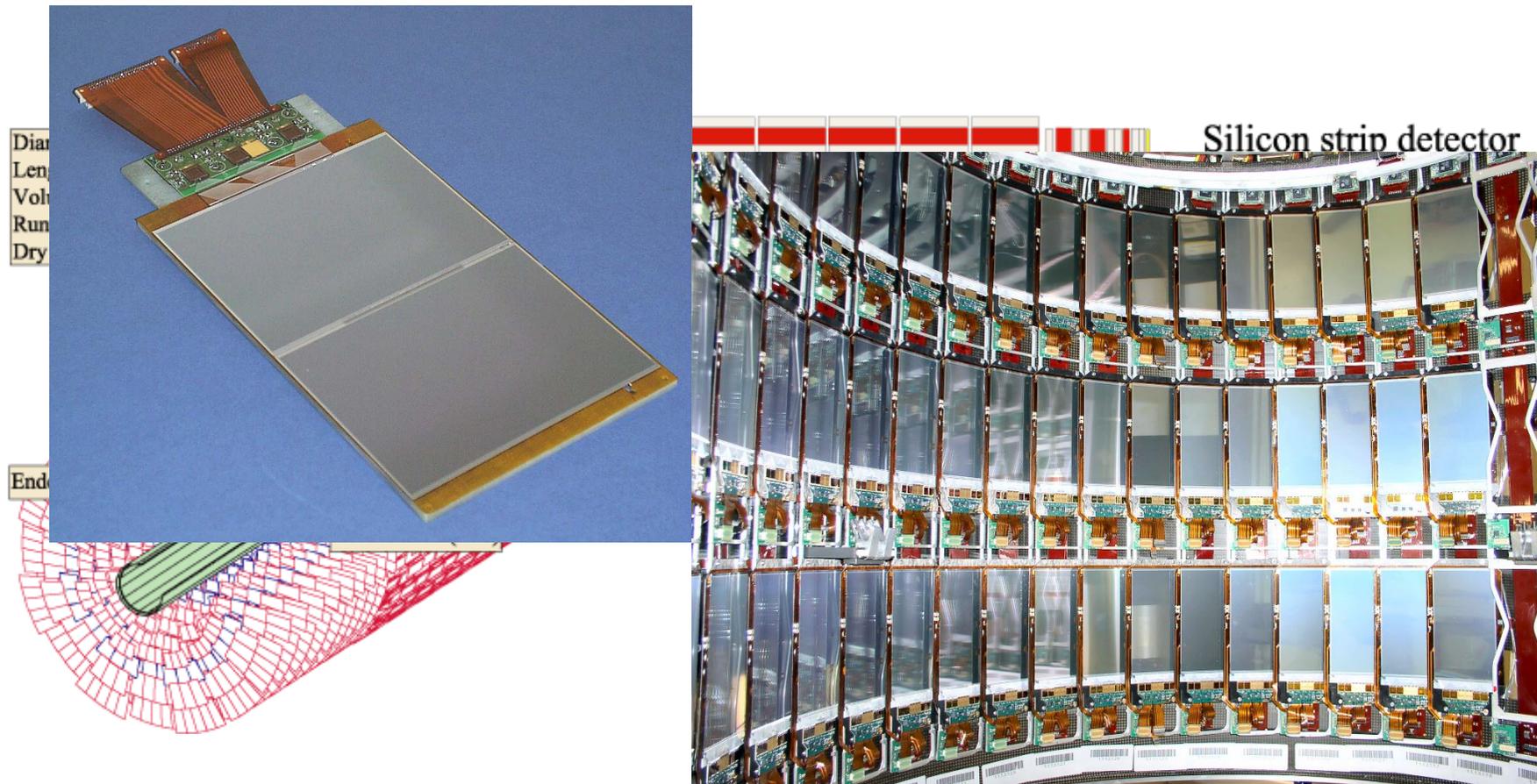
Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Perchè avere un rivelatore sofisticato?

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

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

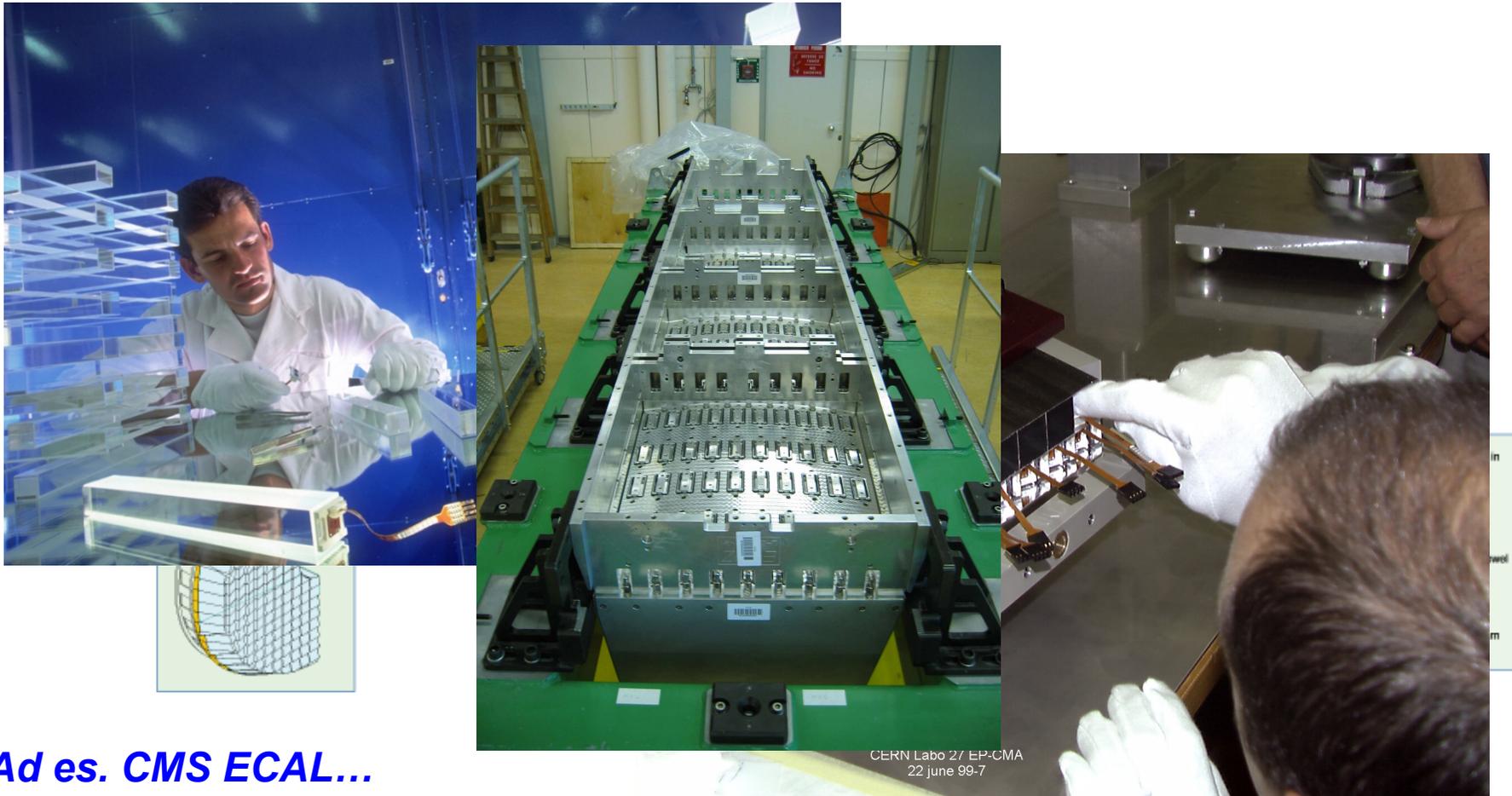


Ad es. CMS tracker...

L'energia depositata dalle particelle incidenti mediante ionizzazione nel silicio

viene letta dall'elettronica e trasformata in un segnale digitale

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



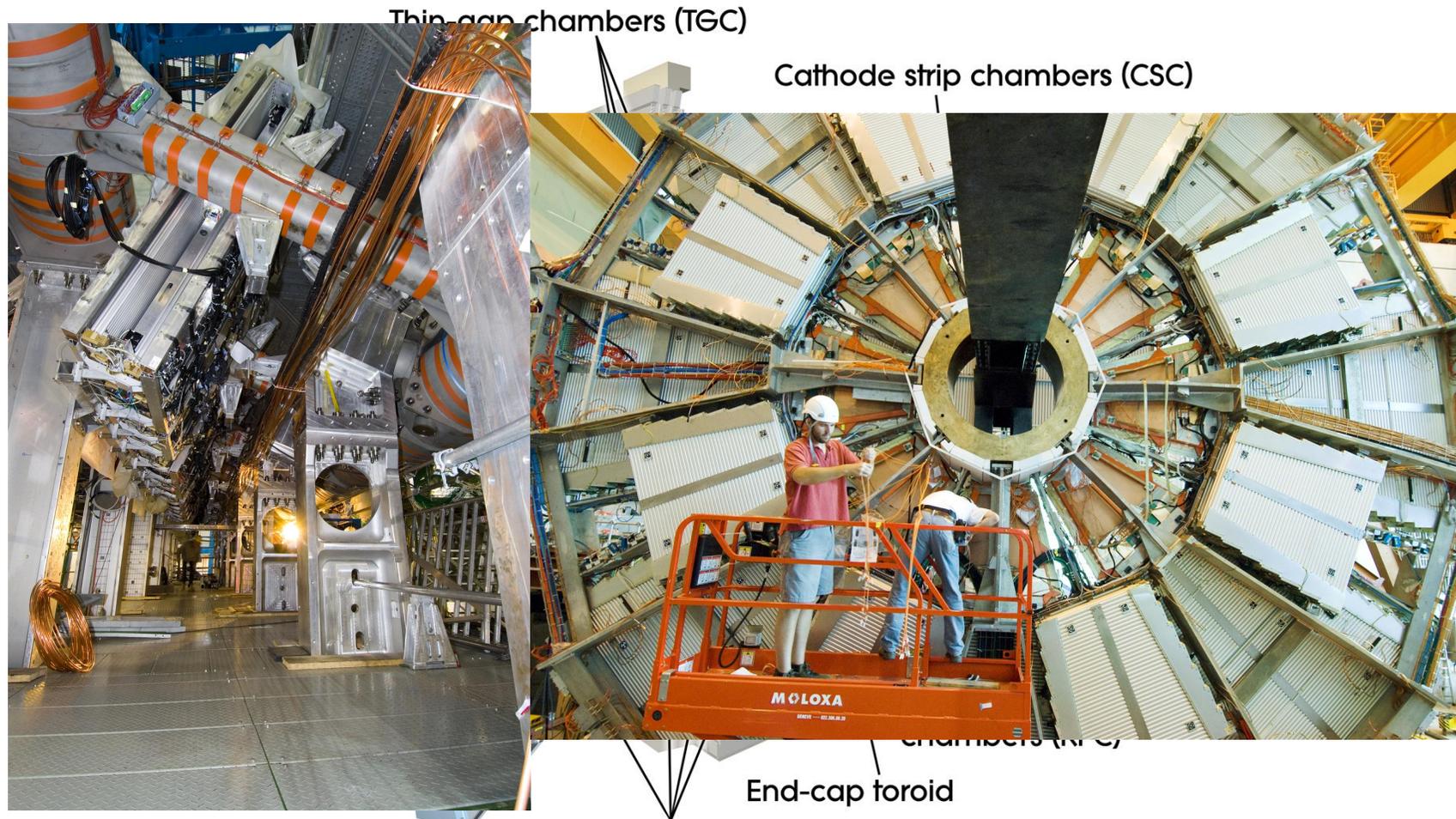
Ad es. CMS ECAL...

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

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

Dal rivelatore al calcolatore: selezionare e acquisire i dati

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

Flusso di dati "vergini": 80 TeraBytes al secondo

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

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

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

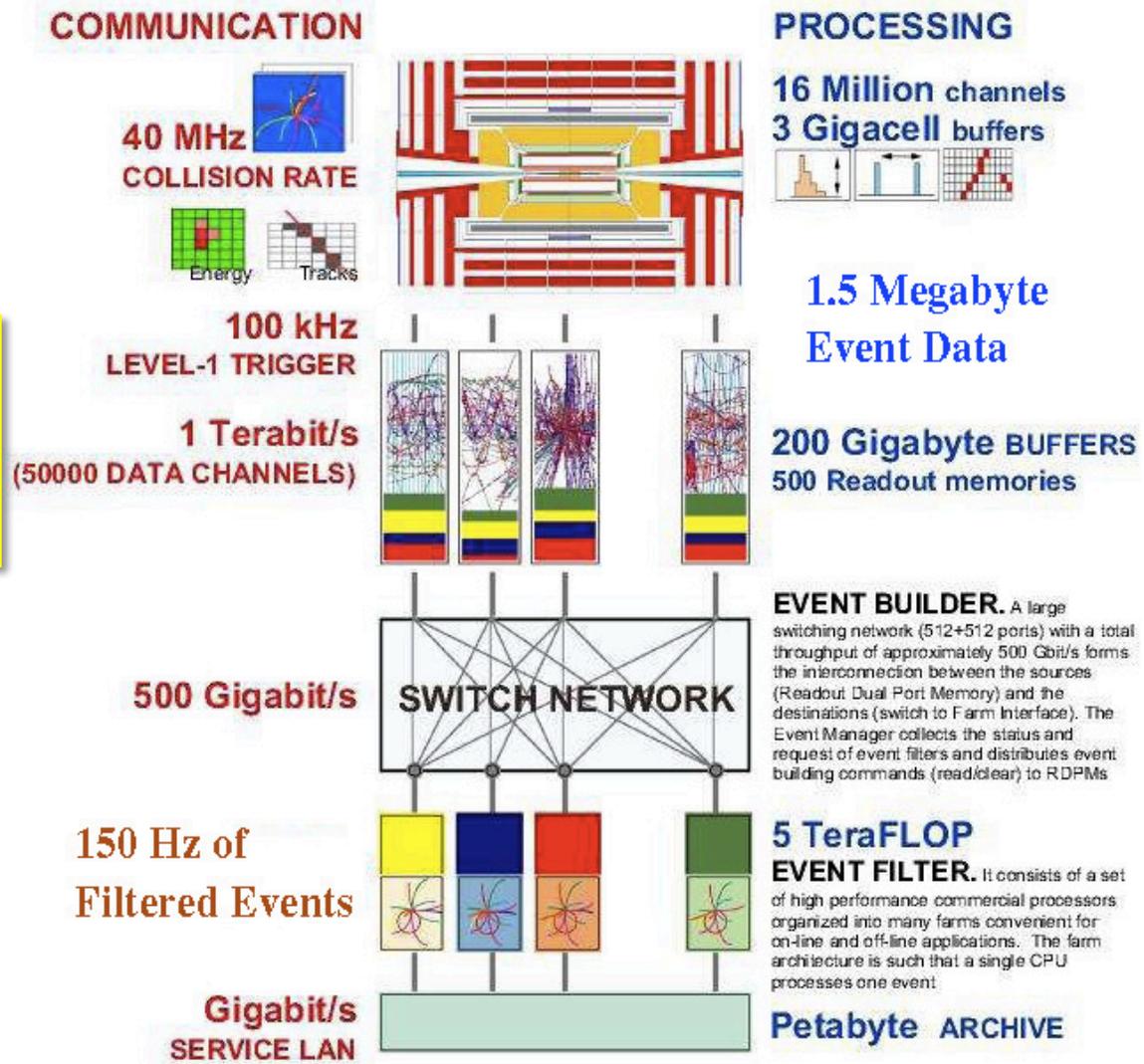
= 6 PetaBytes = 6 milioni di GigaBytes

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

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

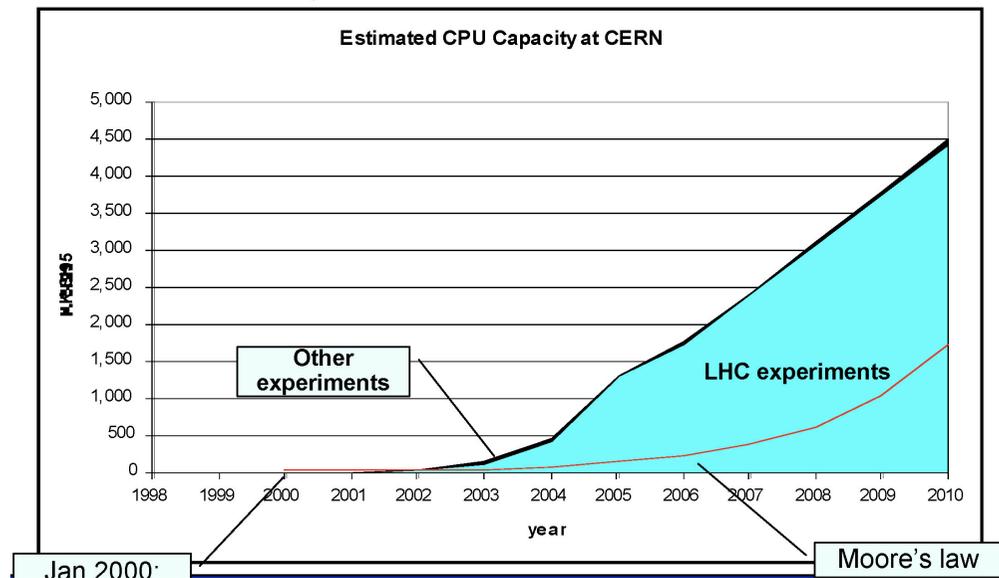
Dal principio alla pratica, la costruzione di un evento

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

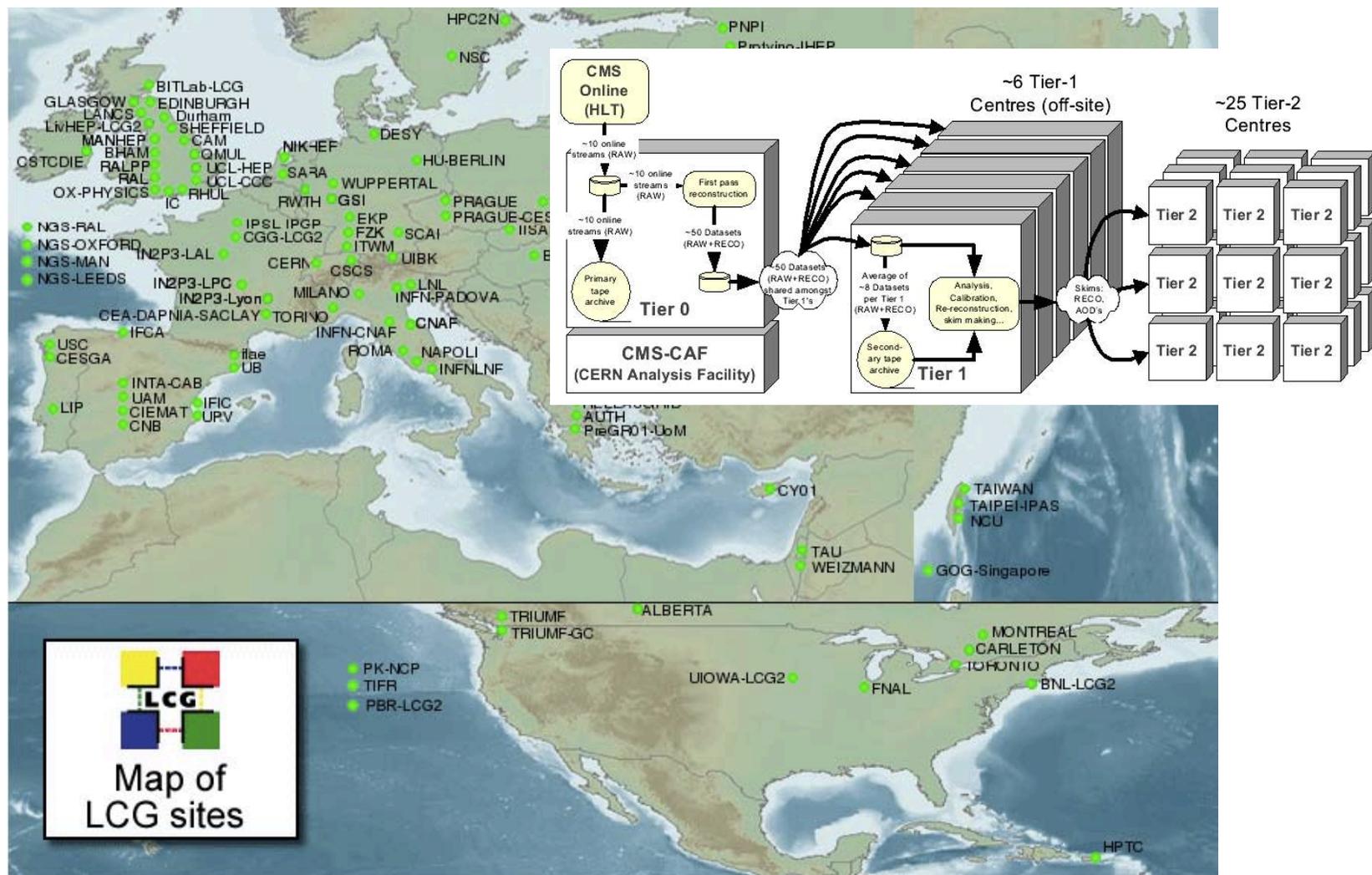


Non basta avere un buon rivelatore...

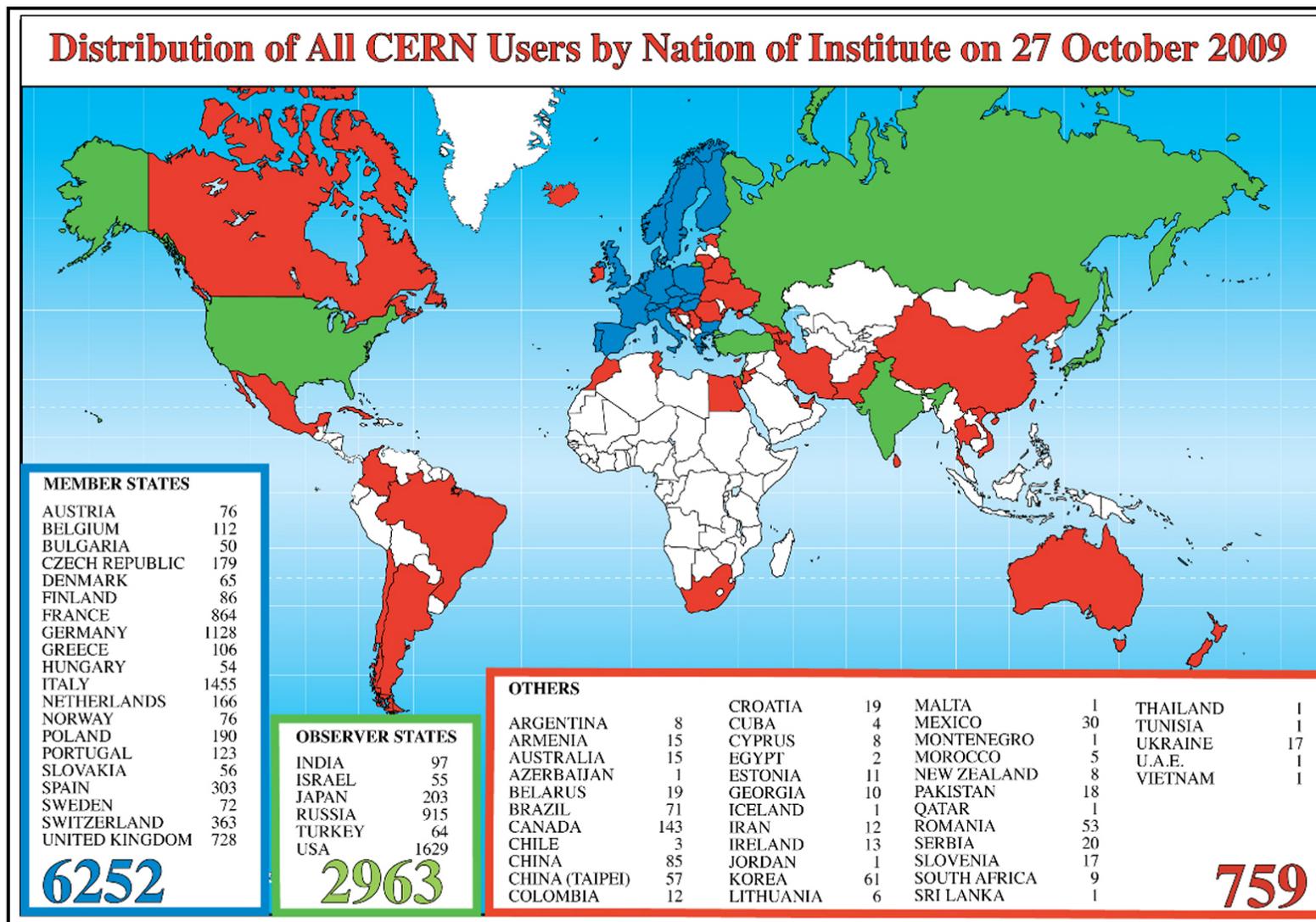
- ▶ Simulazione, acquisizione e selezione, ricostruzione, analisi: tutto richiede calcolatori e software
- ▶ Alla fine degli anni 70 il CERN possedeva un Cray XMP, la macchina più potente d'Europa
- ▶ Oggi la vostra PlayStation o questo notebook sono 2/3 volte più potenti
 - ▶ E stanno in uno zaino



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



LHC@CERN: Collaborazioni internazionali



Per concludere

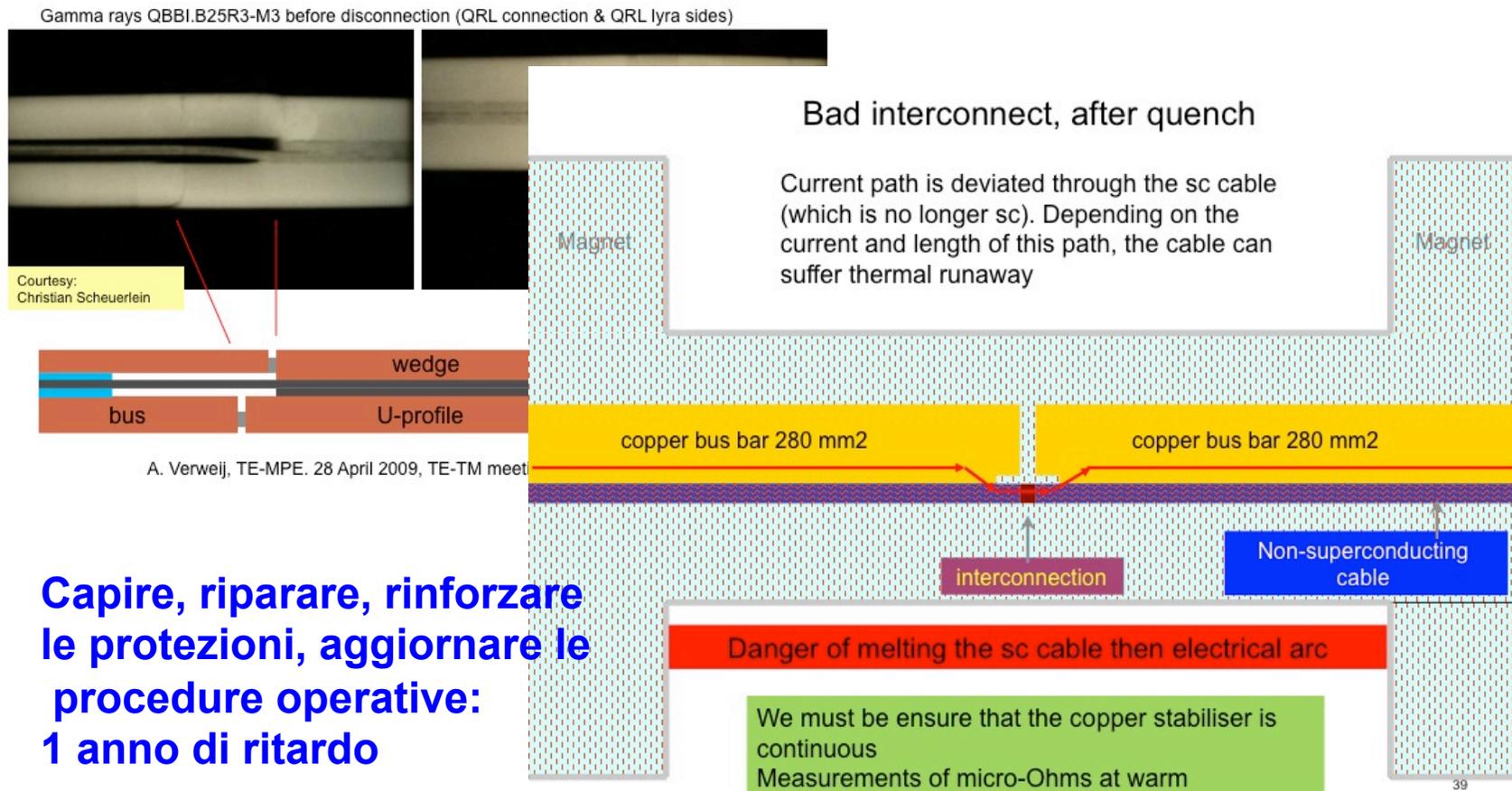
- ▶ Con $\sim 40 \text{ pb}^{-1}$ tra 2009 e 2010 si sono capiti i rivelatori, aggiustate le simulazioni, studiati i processi standard noti, prodotte decine di articoli...
- ▶ Tra il 2011 ed il 2012 LHC ha accumulato una statistica senza precedenti per questo tipo di collider 5 fb^{-1} (7 TeV) + 20 fb^{-1}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

BACKUP

Cosa ti può combinare una saldatura fatta male...

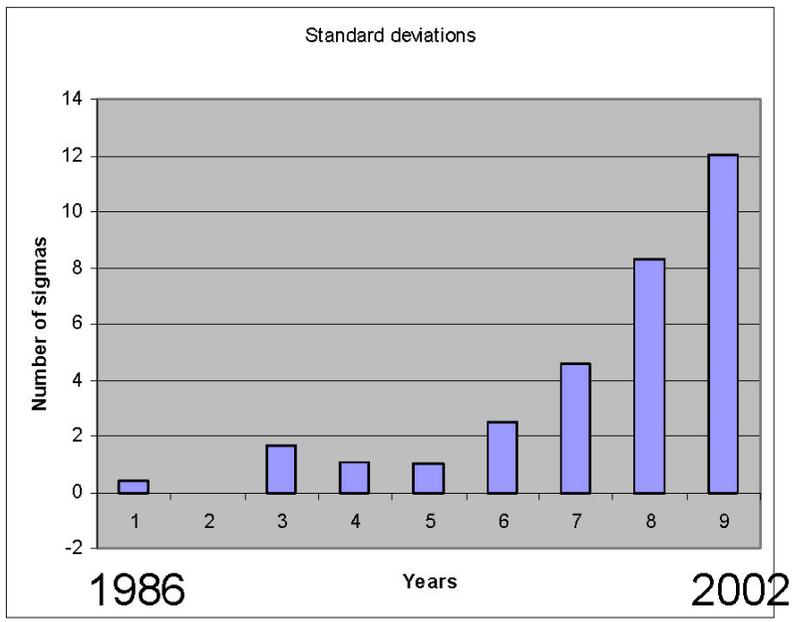
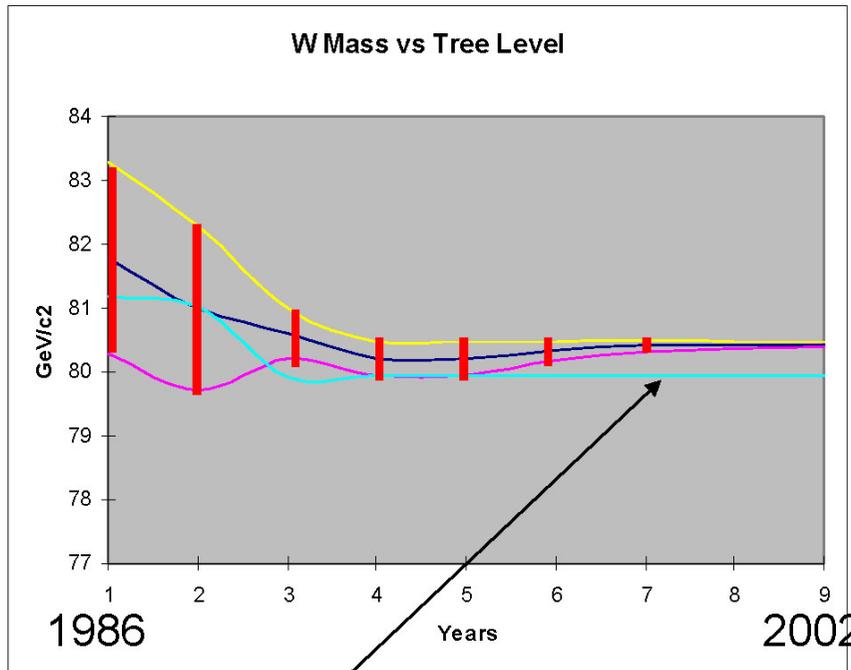
Bad surprise after gamma-ray imaging of the joints: Void is present in most of bus extremities because SnAg flows out during soldering of the joint

Cos'è accaduto a settembre 2009



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

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



Strong Evidence of pure E.W.
Higher Order Corrections

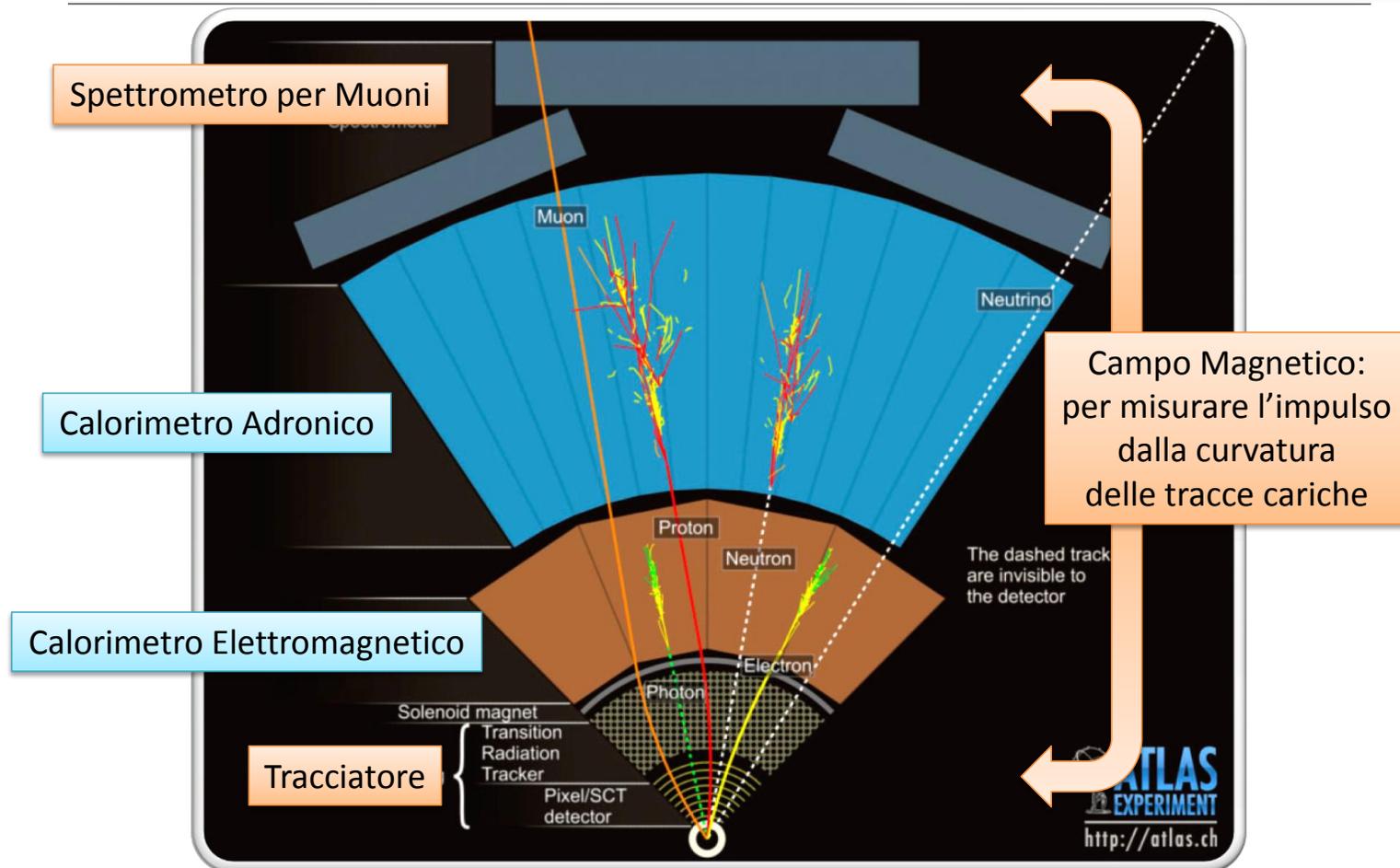
E.W. Tree level SM relation
(with running α QED)

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

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

ATLAS: tecniche differenti, struttura analoga

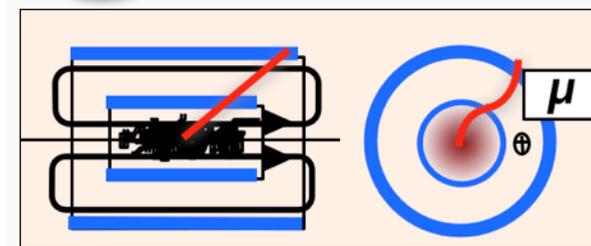
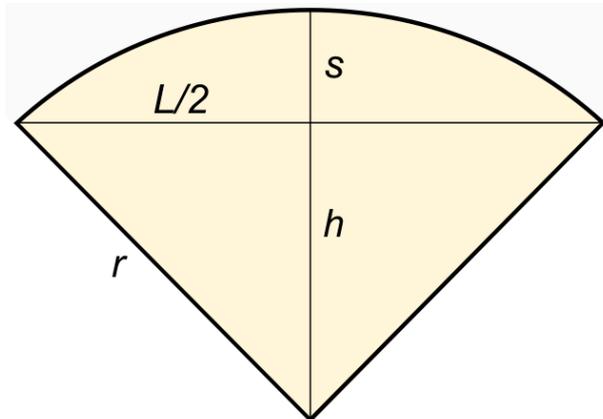
Un "microscopio" a strati specializzati



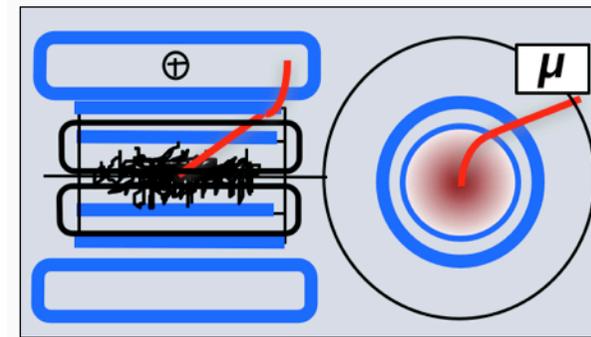
La differenza chiave: il campo magnetico

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

Da massimizzare per ottimizzare la risoluzione



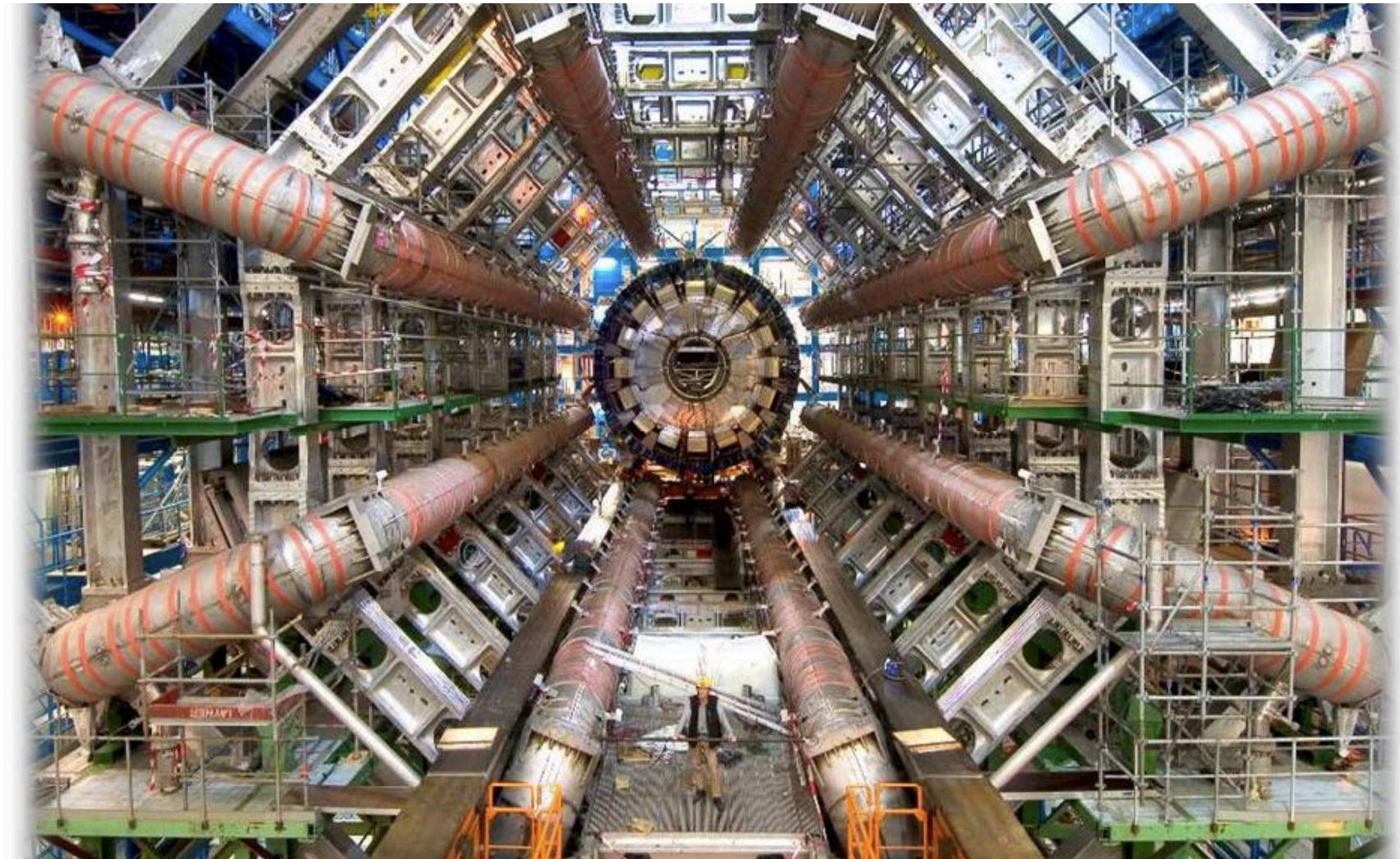
CMS



ATLAS

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

Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Varie strategie possibili per l'acquisizione dei dati

