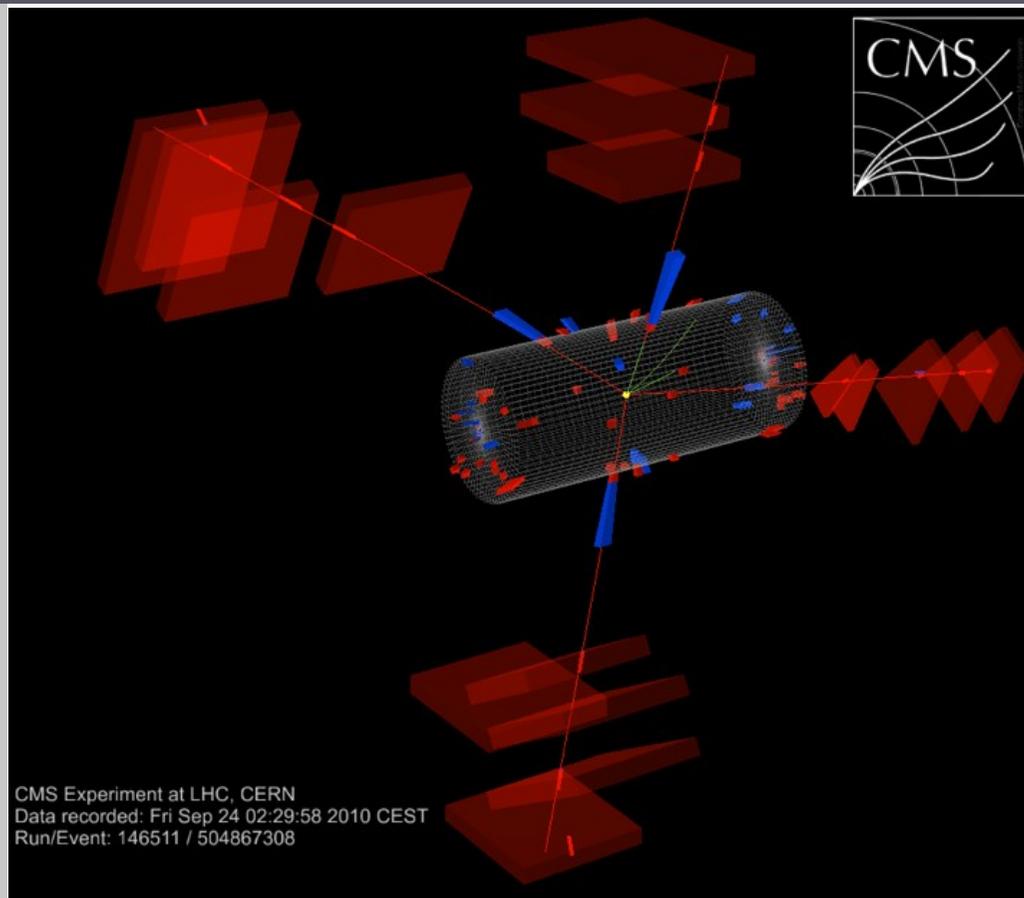


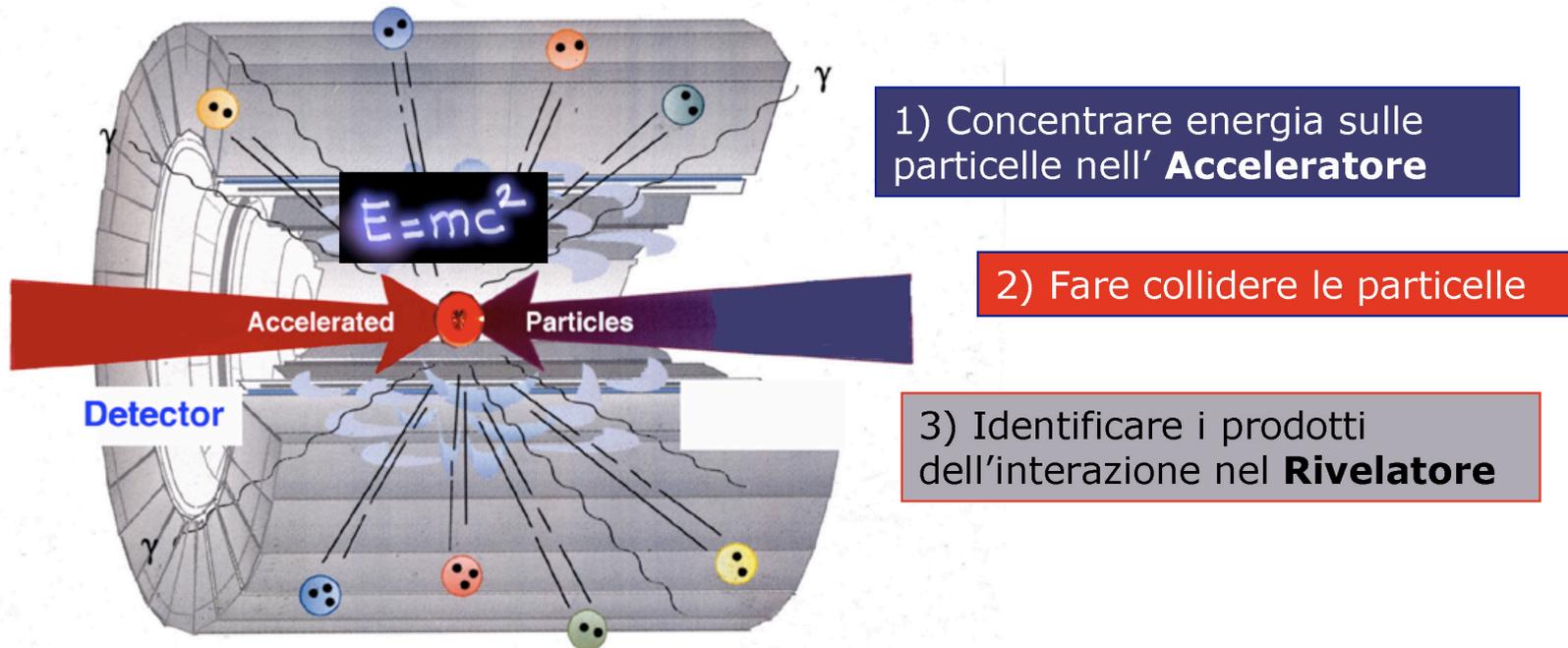
Rivelatori “general purpose” ad LHC: ATLAS e CMS

Fabio Cossutti – INFN Trieste

26 Febbraio 2012



Perchè un collisionatore ?



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

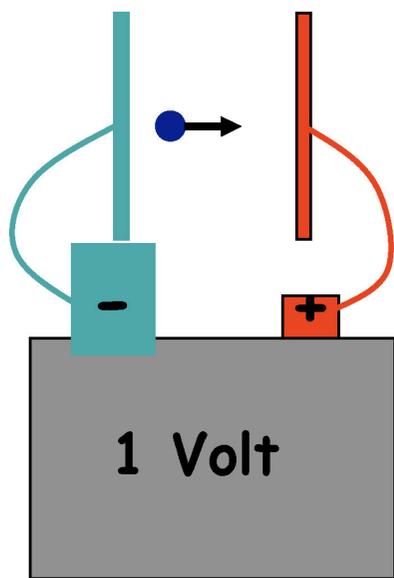
Collider vs bersaglio fisso: più energia nel centro di massa a parità di energia del fascio

Massa ed energia

1 GeV (Giga ElectronVolt) = 10^9 eV

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

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



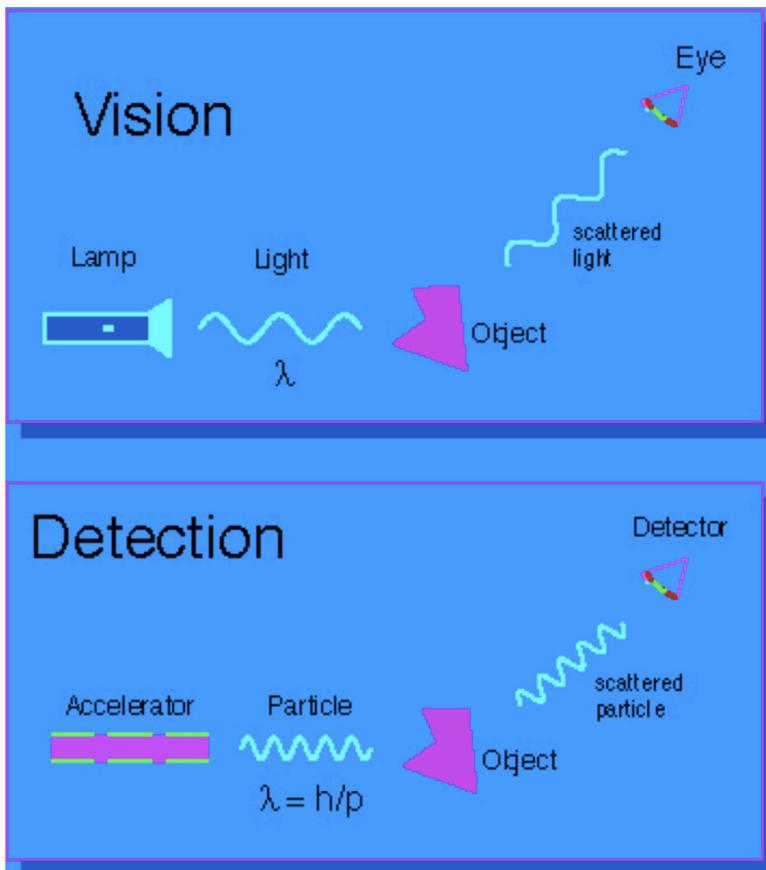
$E = 1 \text{ eV}$

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

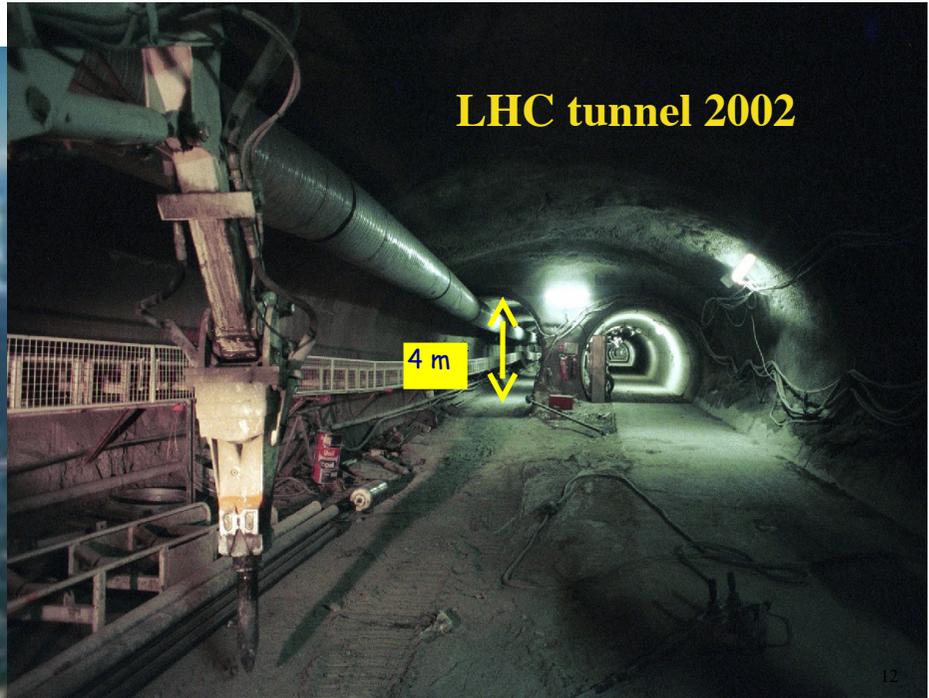


Particelle di alta energia sono gli "esploratori del microcosmo"

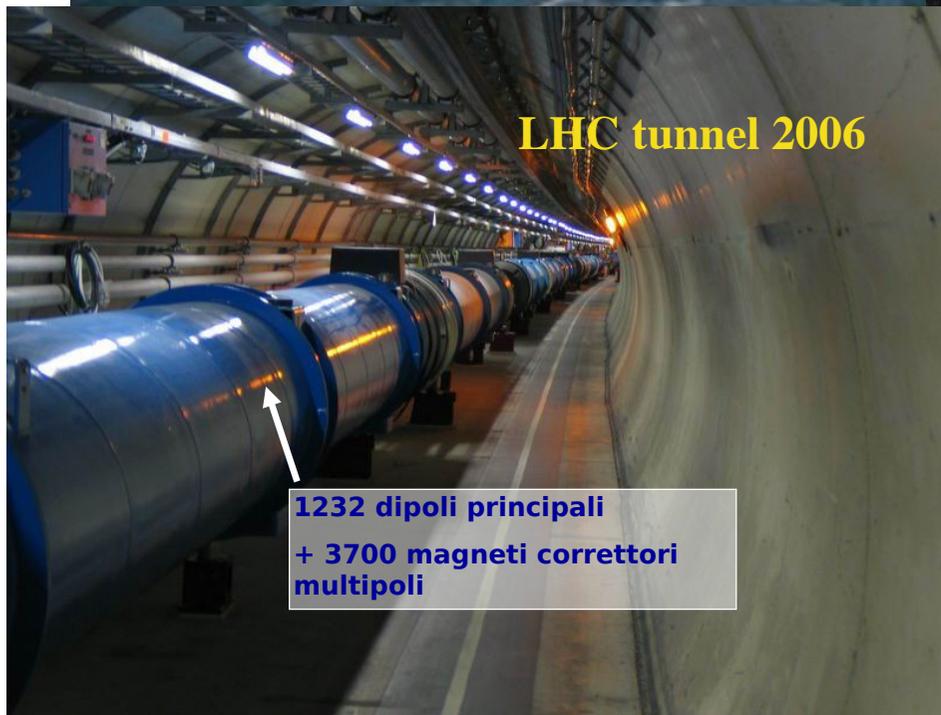
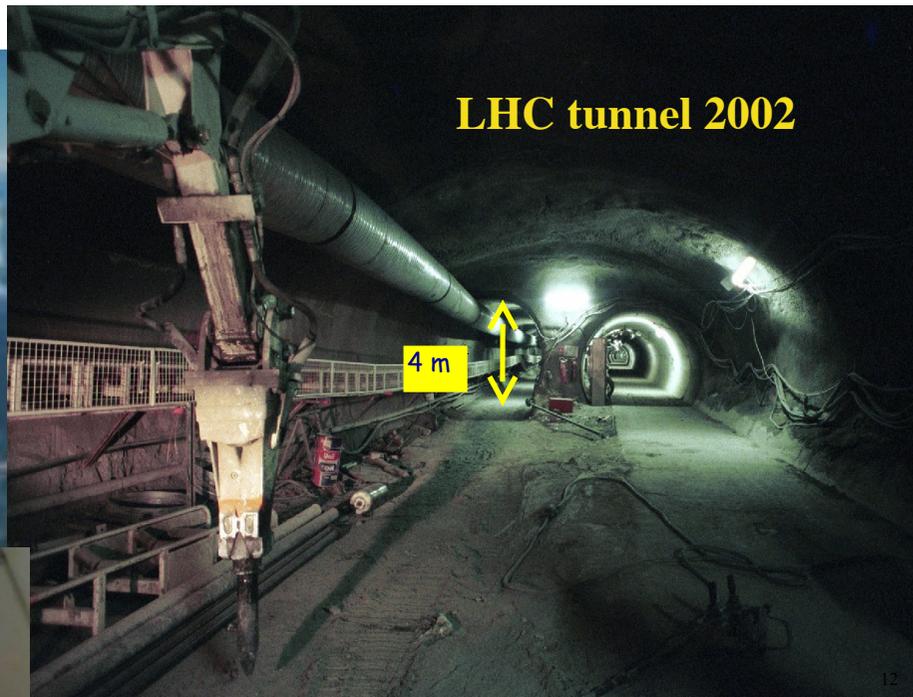
Large Hadron Collider



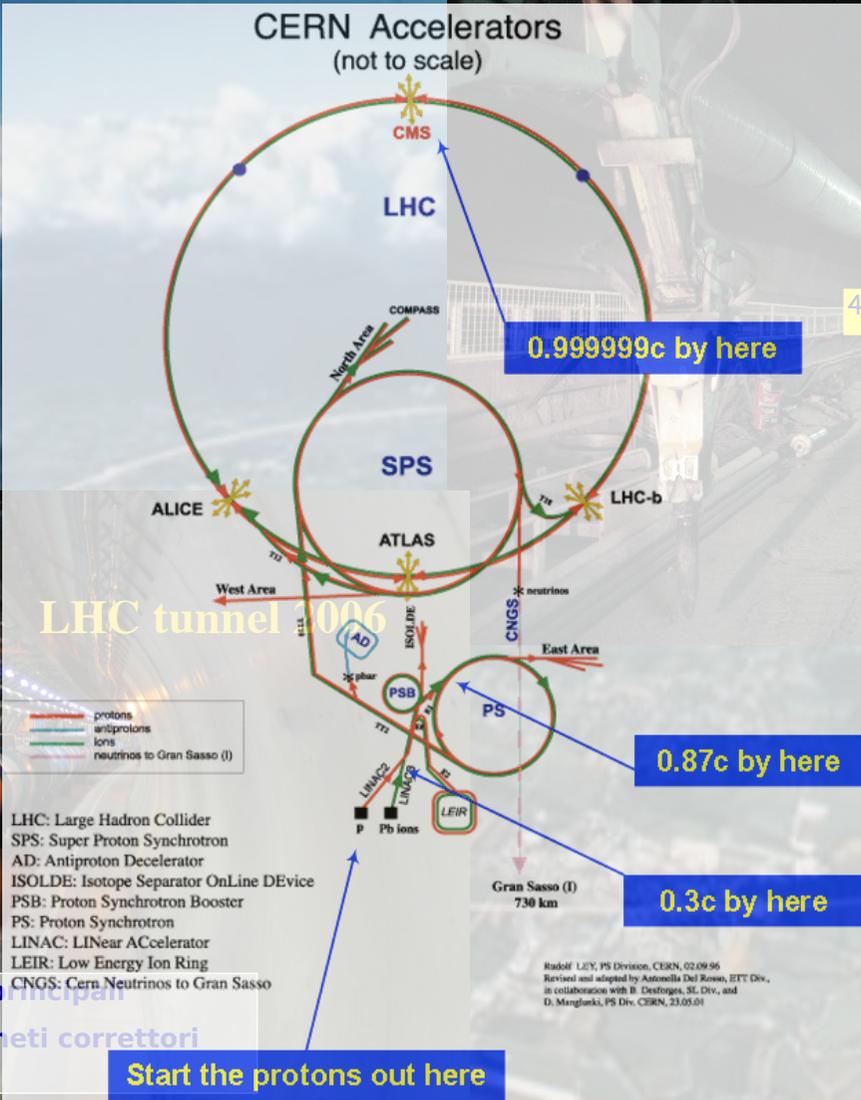
Large Hadron Collider



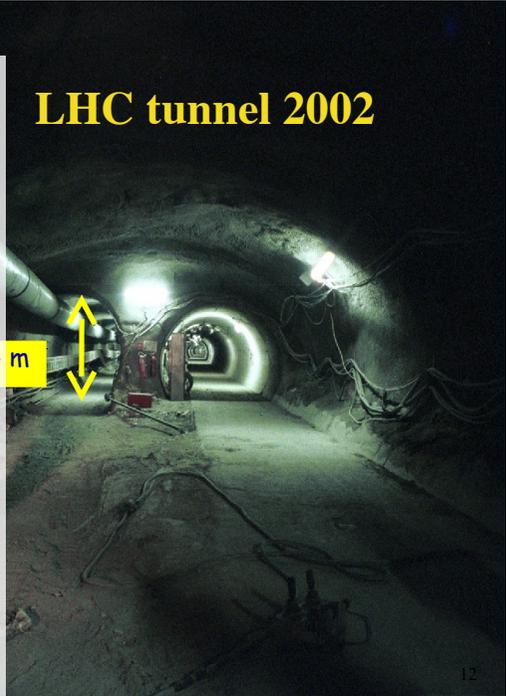
Large Hadron Collider



Large Hadron Collider



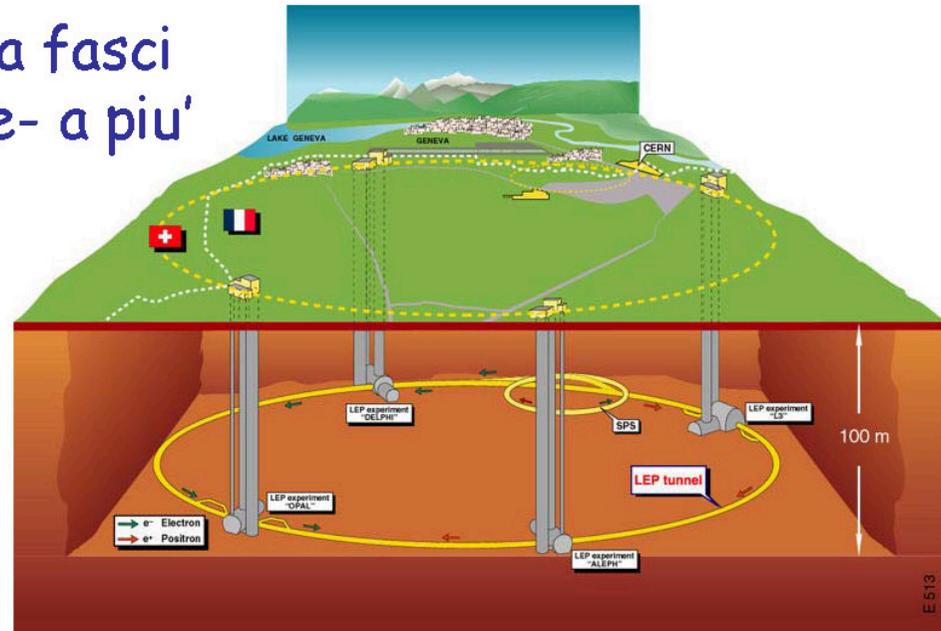
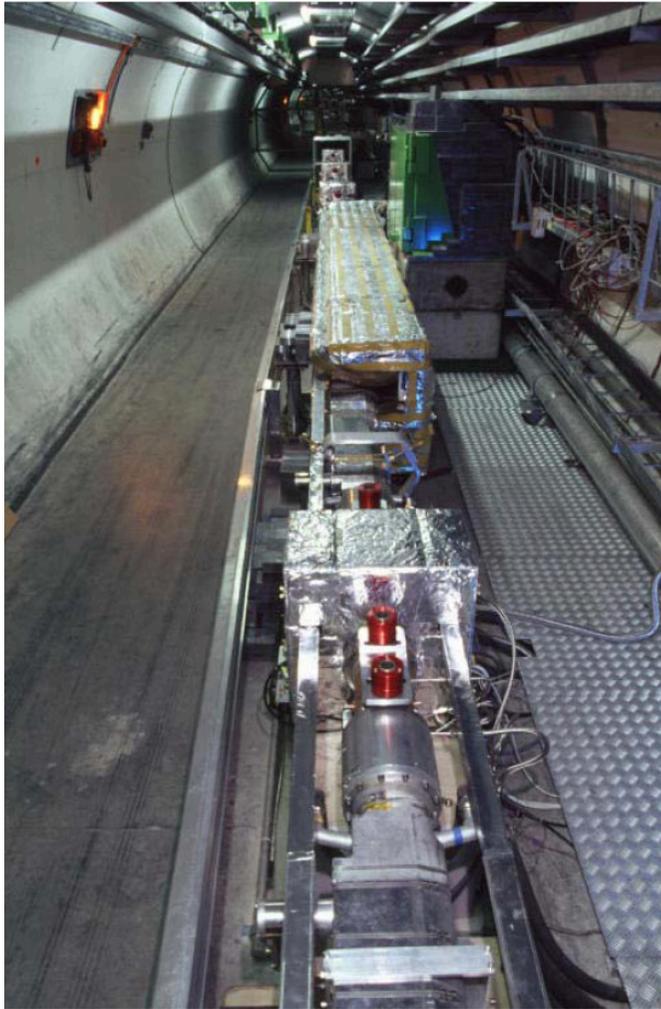
LHC tunnel 2002



Un po' di storia:

LEP

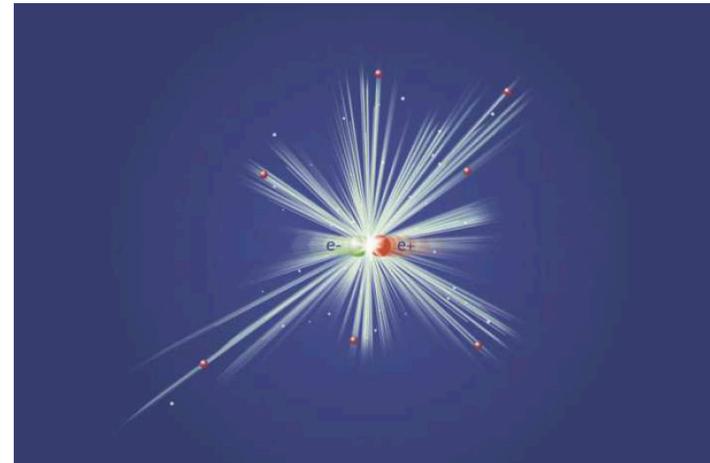
La macchina a fasci
incrociati e^+e^- a piu'
alta energia



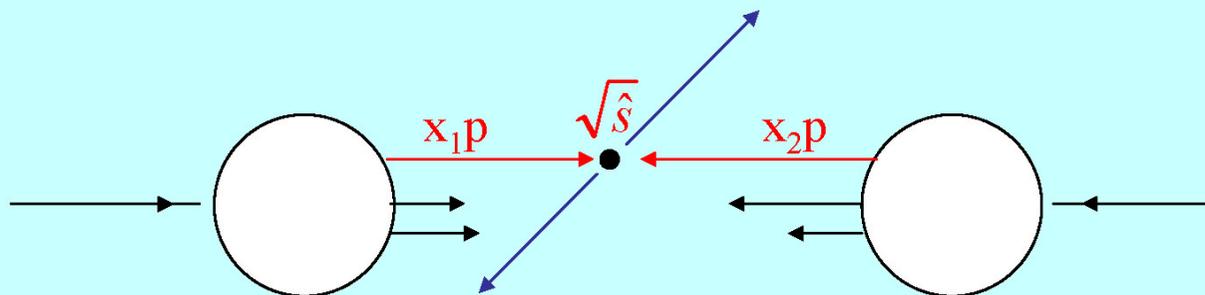
- LEP, un anello di 27 Km
- Fasci di elettroni e positroni di oltre 100 GeV
- In funzione dal 1989 al 2000
- Smontato nel 2001 per far posto a **LHC** : fasci di protoni da 7 TeV

Macchine a fasci incrociati: *Collisori*

- Le macchine moderne per la fisica fondamentale sono Colliders (*Collisori*)
- Si producono collisioni frontali tra **elettroni** e **positroni** oppure tra **protoni** e **(anti)protoni** o anche **elettroni** e **protoni**.



I protoni sono particelle composite: si sfrutta solo parte dell'energia



Per protoni ad altissima energia la maggior parte di interazioni sono tra gluoni

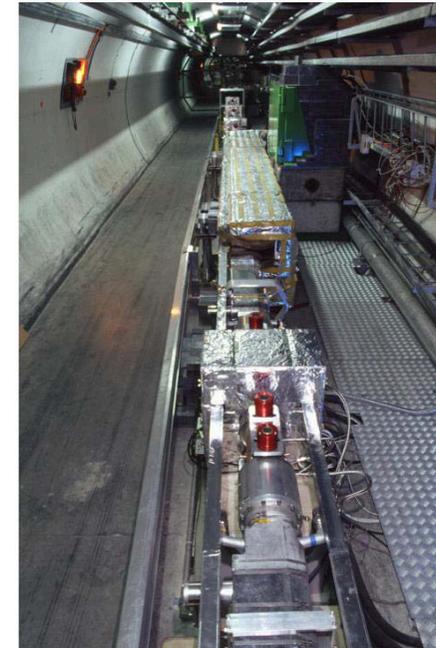
Acceleratori Circolari e..... bolletta della luce

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

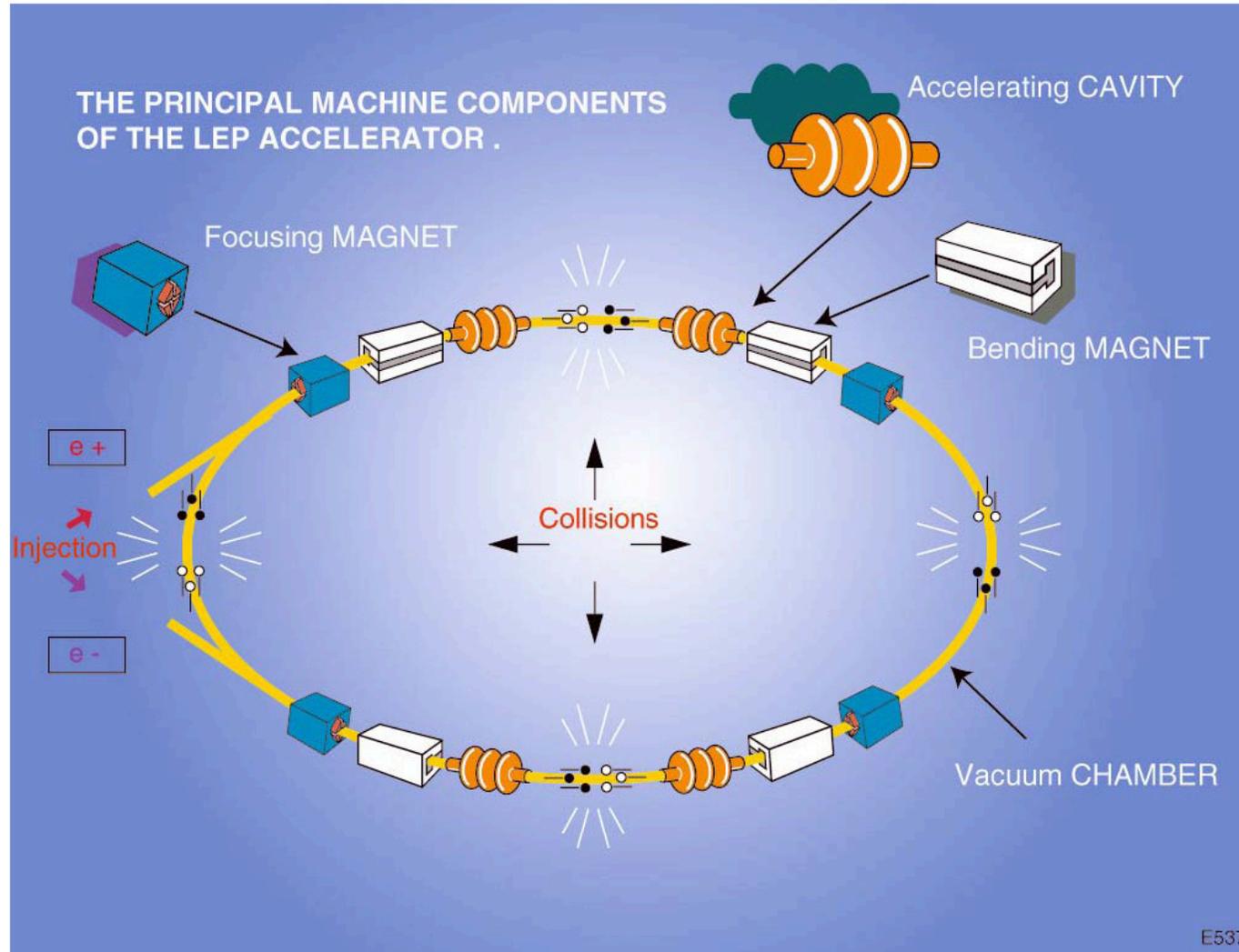
$$\text{Bolletta della luce} \propto \frac{\text{Energia}^4}{\text{massa}^4} \frac{1}{\text{raggio della macchina}}$$

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

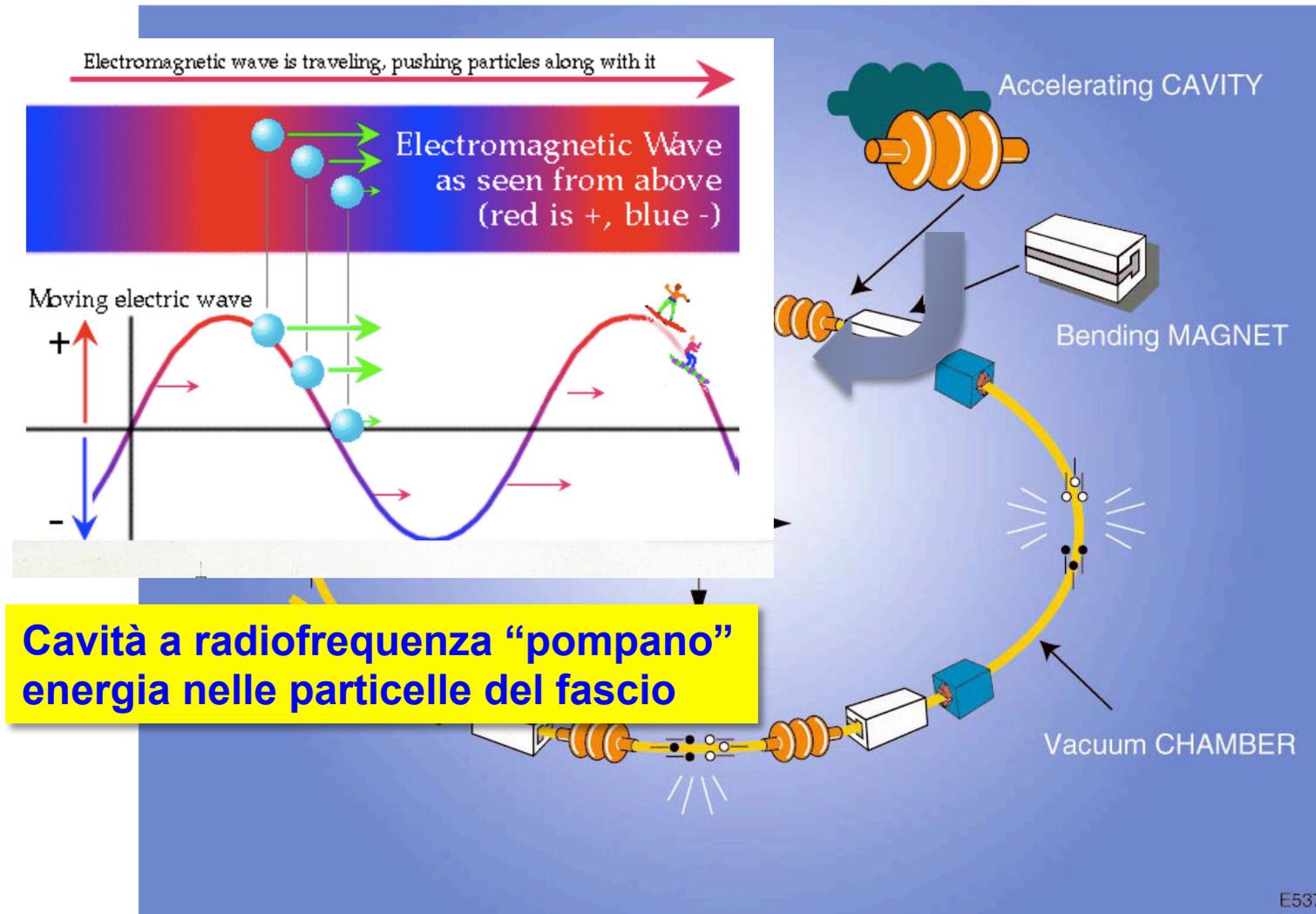
LEP : 27 Km di circonferenza ! 



Componenti principali di un acceleratore



Componenti principali di un acceleratore

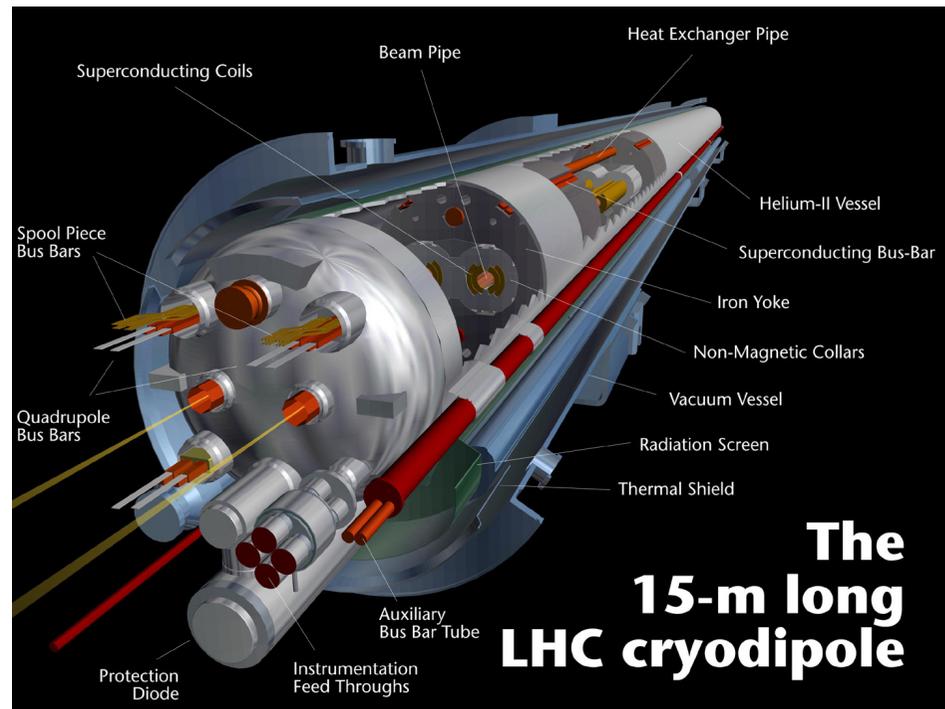


Componenti principali di un acceleratore



LHC: la sfida tecnologica

- ▶ Filo singolo del cavo superconduttore: 6 micron per 20 km
- ▶ Intensità di corrente del filo completo: 12000 ampere
- ▶ Massa fredda: nuova tecnica di saldatura per acciaio inossidabile
- ▶ Magneti lunghi 15 metri consegnati nel 2006, sistema pronto nel 2008
- ▶ Refrigeratori a 4.5 kelvin (già usati da LEP2)
- ▶ Energia immagazzinata: 360 Mjoule per fascio (1 Jumbo lanciato a ~ 154 km/h)
- ▶ Dimensioni del fascio: la Spagna su una moneta da un Euro
- ▶ Fascio focalizzato nelle zone di interazione (esperimenti): 20 micron



LHC cross sections and rates

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

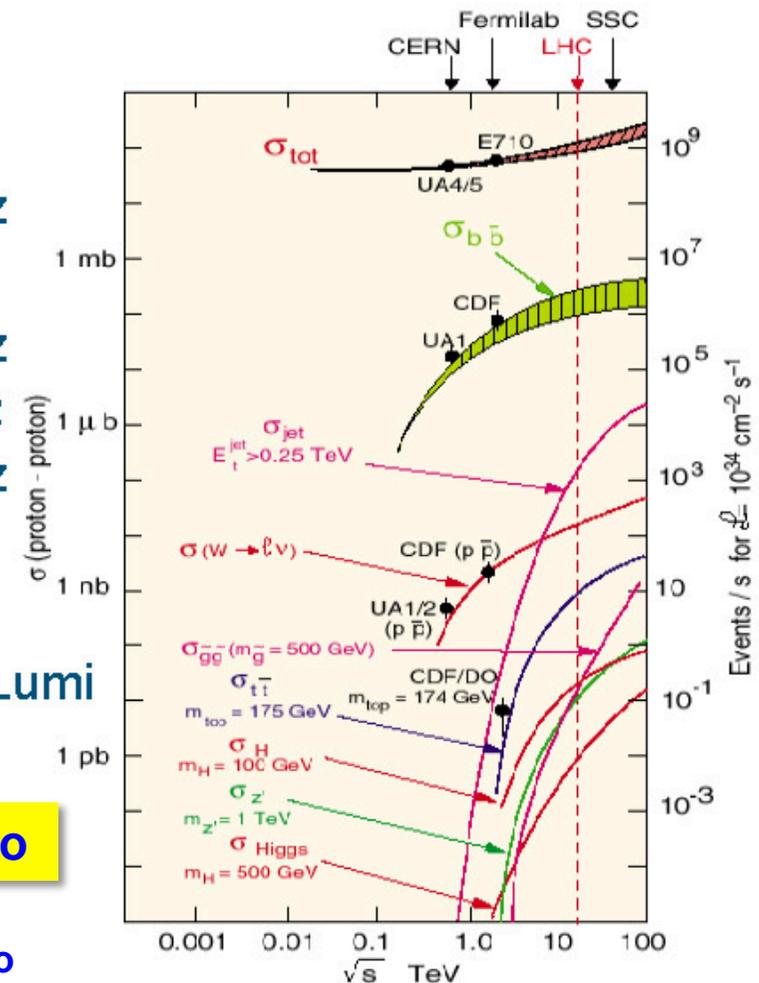
SM Higgs ($115 \text{ GeV}/c^2$):	$\rightarrow 0.1 \text{ Hz}$
$t \bar{t}$ production:	$\rightarrow 10 \text{ Hz}$
$W \rightarrow \ell \nu$:	$\rightarrow 10^2 \text{ Hz}$
bb production:	$\rightarrow 10^6 \text{ Hz}$
Inelastic:	$\rightarrow 10^9 \text{ Hz}$

Beam crossing every 25 ns

25 pileup event / beam crossing at High Lumi

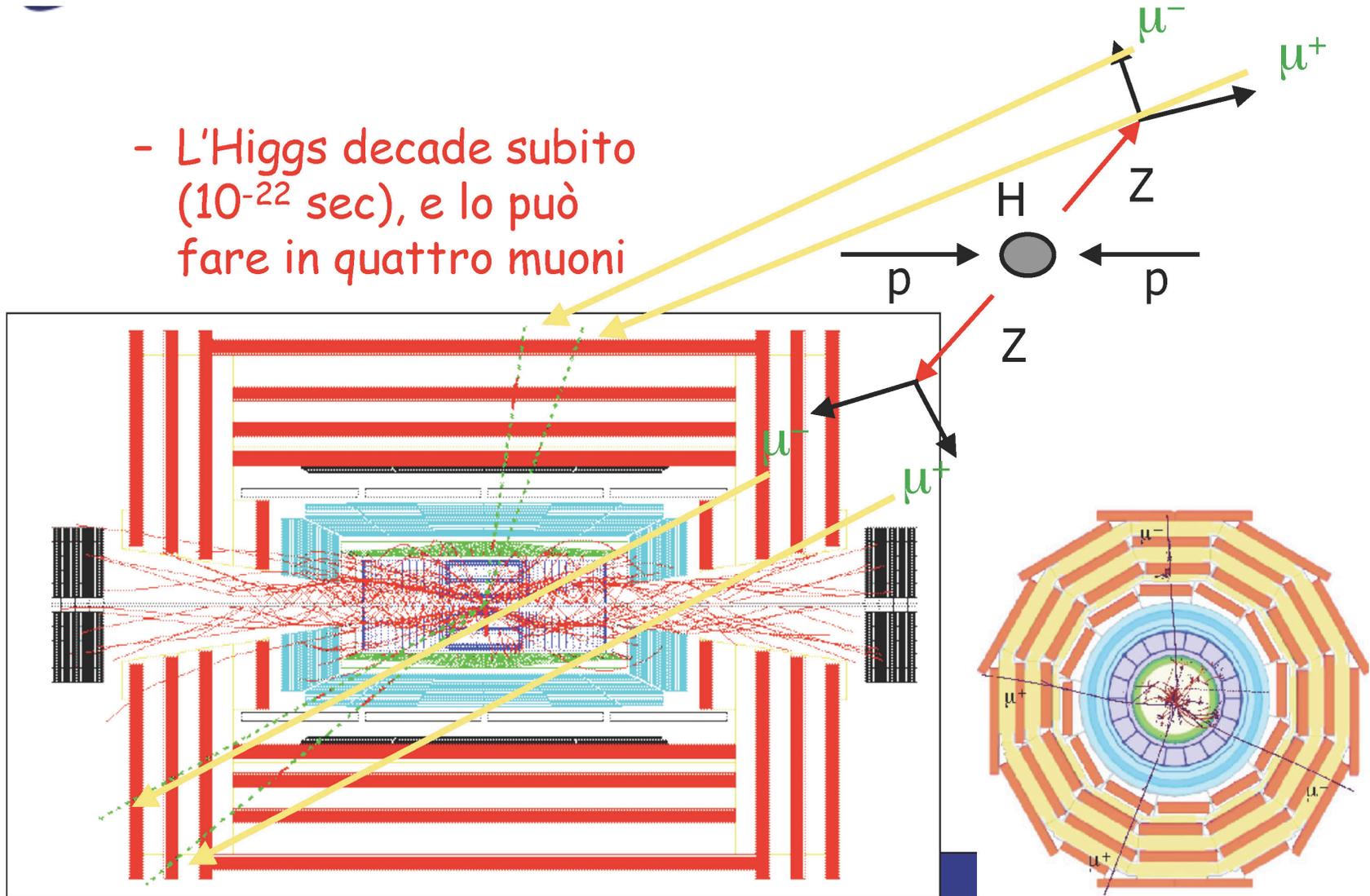
Numero di eventi = Luminosità \times sezione d'urto

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

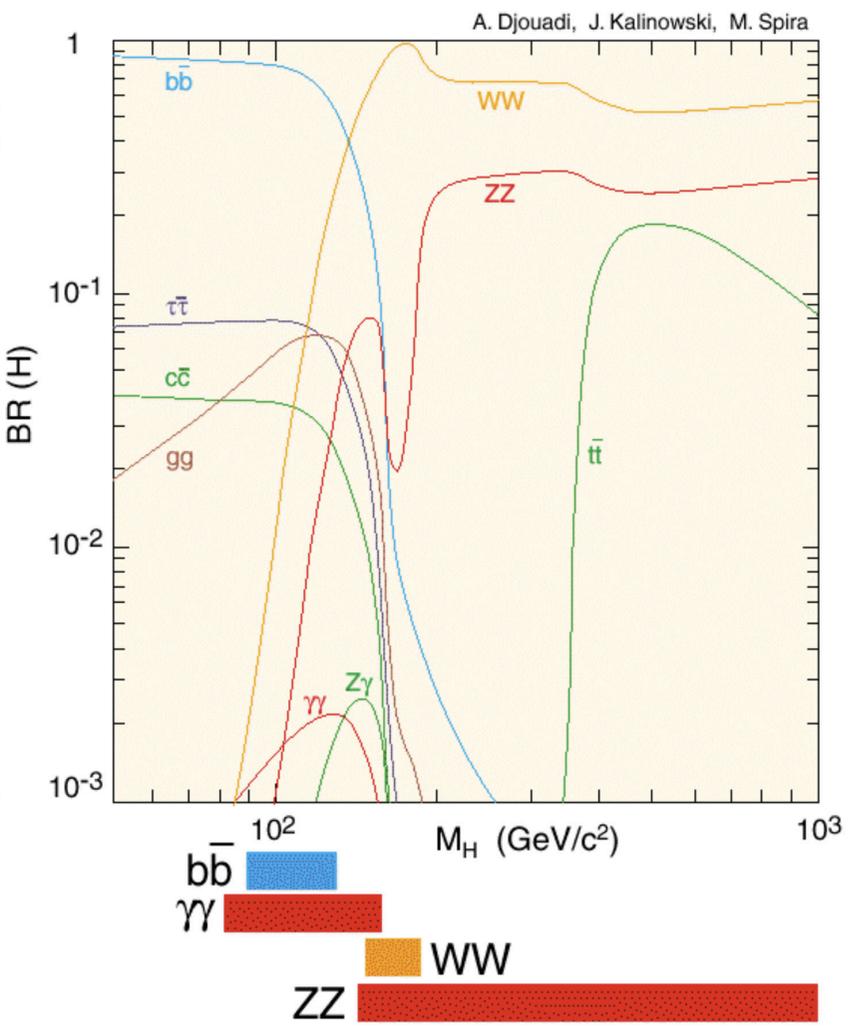
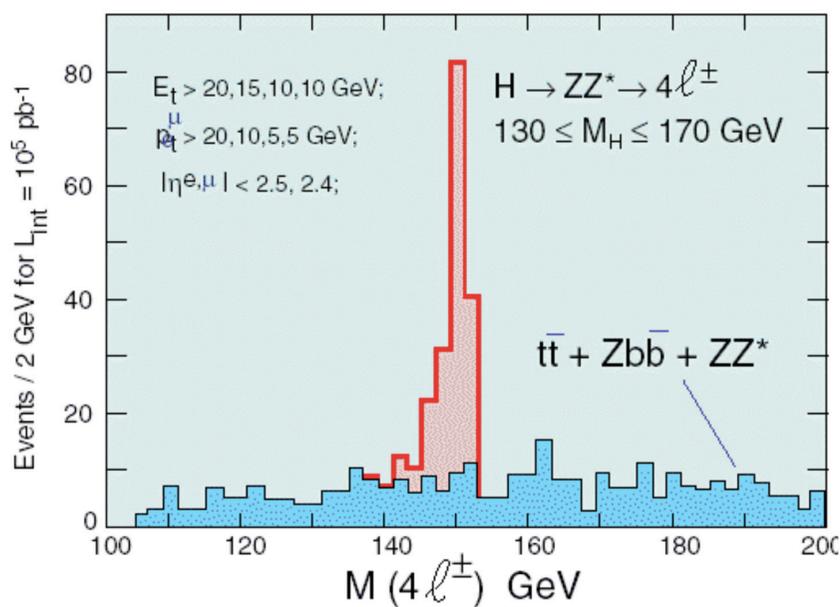
- L'Higgs decade subito (10^{-22} sec), e lo può fare in quattro muoni



Decadimenti del bosone di Higgs a LHC

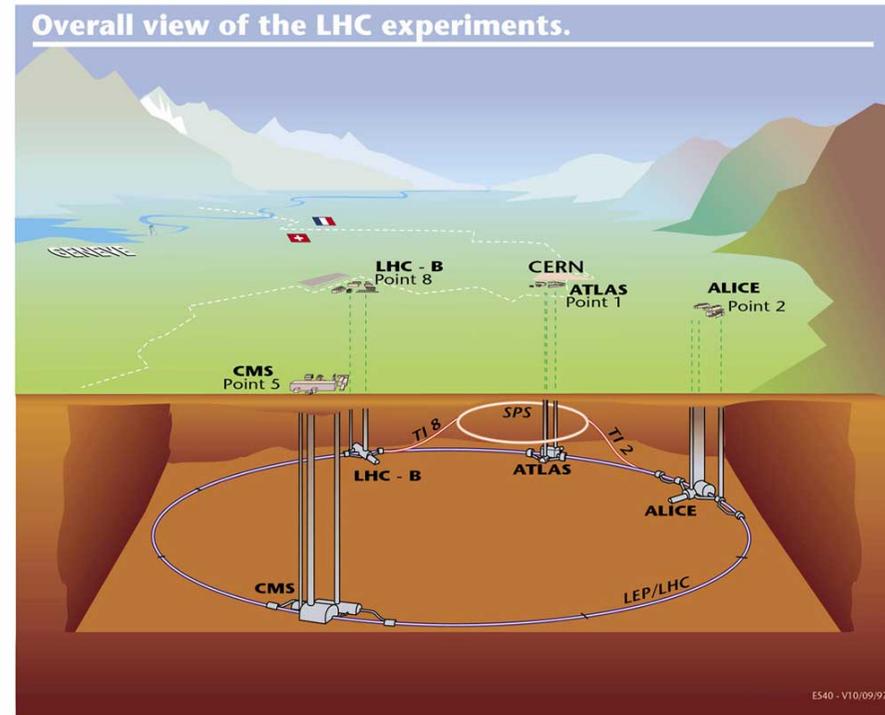
Cerco eventi :

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



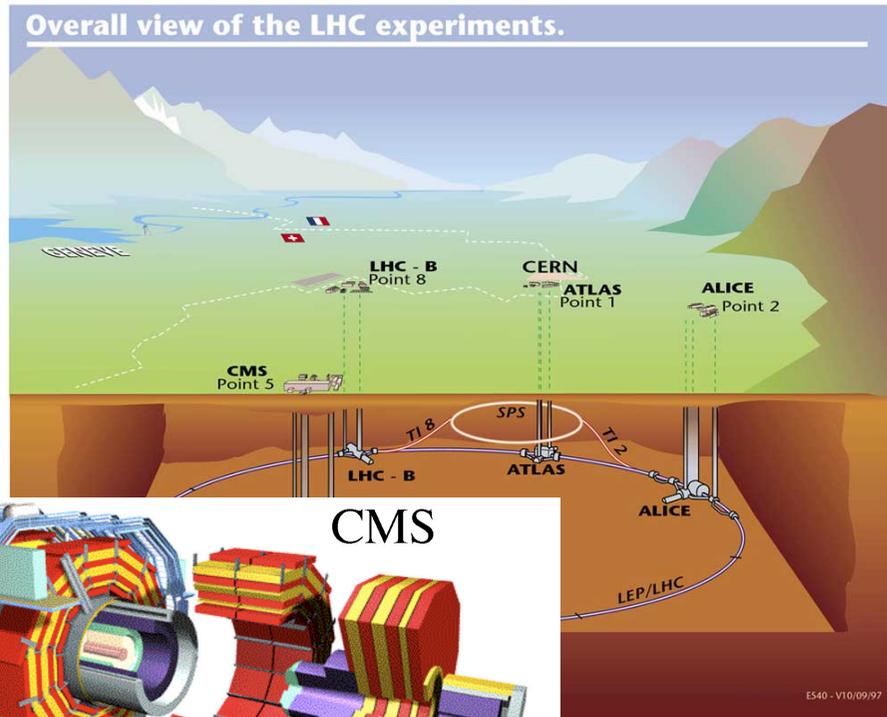
Esperimenti a LHC

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

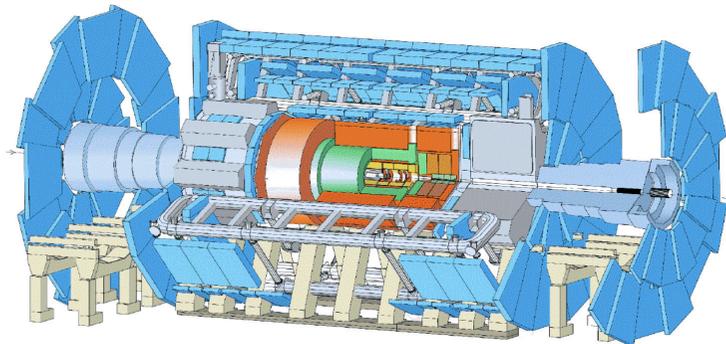


Esperimenti a LHC

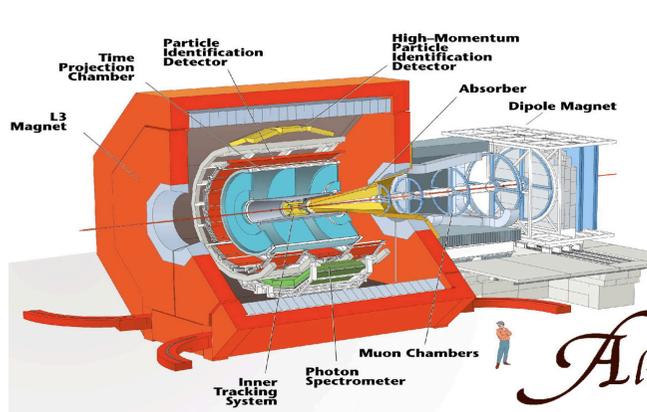
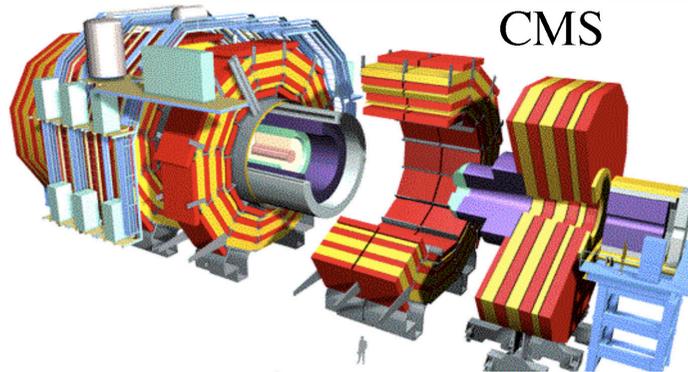
	Energia cm TeV	Luminosità cm ⁻² s ⁻¹
LEP e ⁺ e ⁻	0.209	10 ³²
LHC pp	14	10 ³⁴
LHC Pb Pb	1312	10 ²⁷



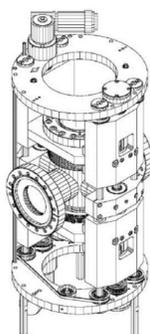
ATLAS



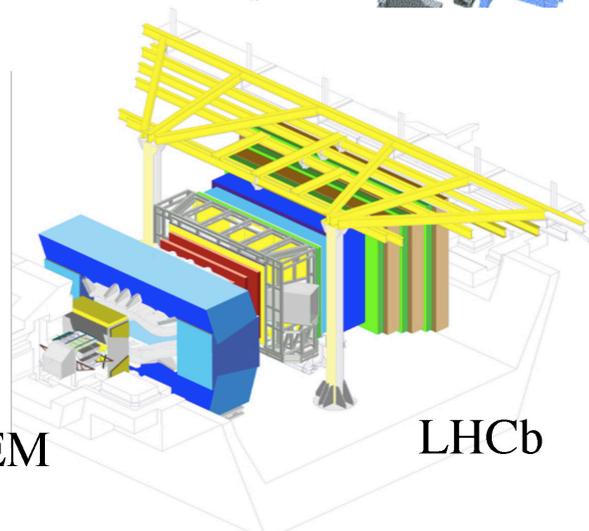
CMS



Alice



TOTEM



LHCb

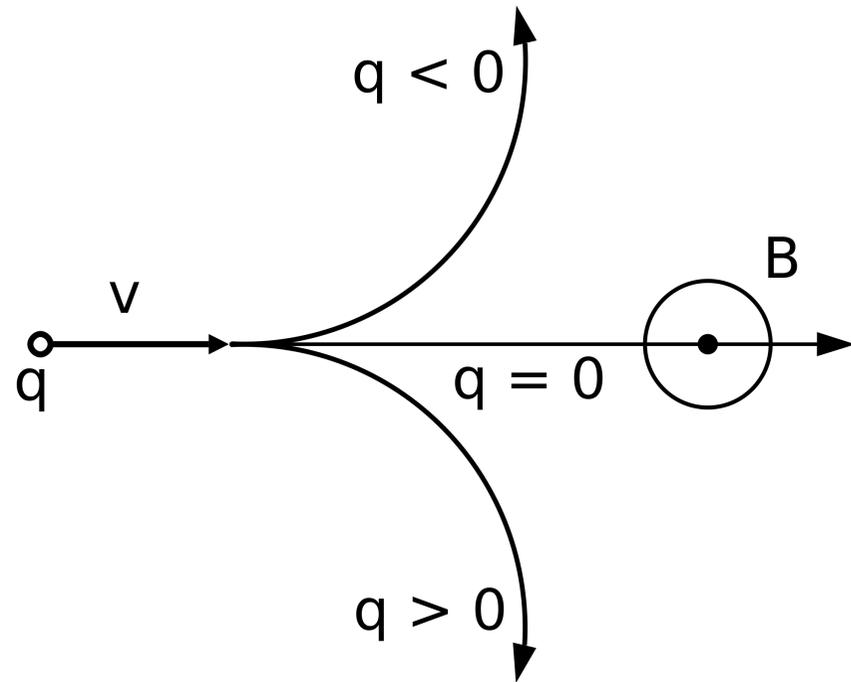
Rivelatori di particelle per un esperimento su collisore

- ▶ 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



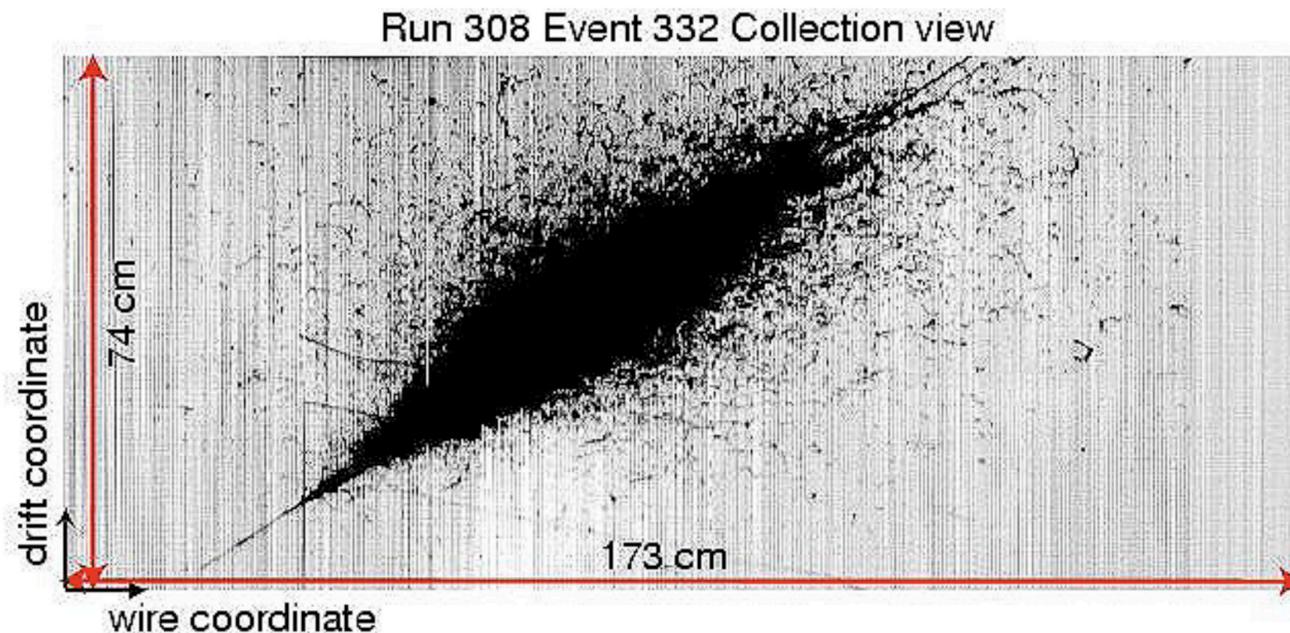
$$p_T = 0.3 z B r \leftarrow m$$

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

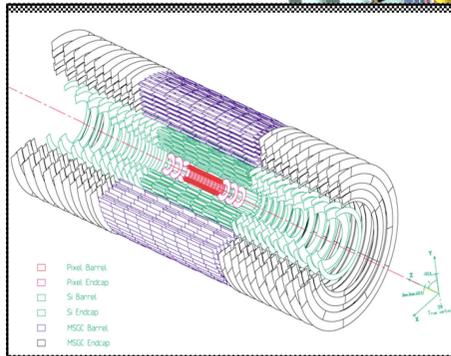
ECAL: cristalli PbWO4

HCAL: scintillatore plastico

CALORIMETRI

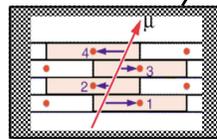
GIOGO RITORNO

TRACKER

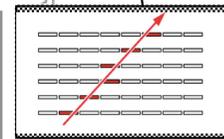


Microstrisce Silicio
Pixels

MUONI BARREL

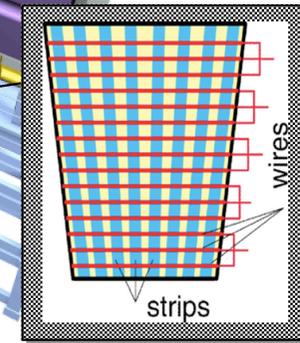


Drift Tube
Chambers (DT)



Resistive Plate
Chambers (RPC)

**MUONI
ENDCAP**



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

Diametro: 15 m

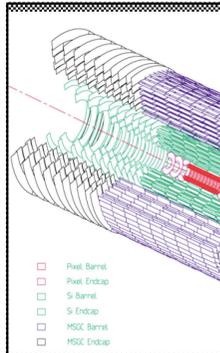
Lunghezza: 21.5 m

Peso: 12500 ton.

Un esempio reale: Compact Muon Solenoid

BOBINA SUPER

TRACKER



Microstrisce Si
Pixels



Drift Tube
Chambers (DT)

Resistive Plate
Chambers (RPC)

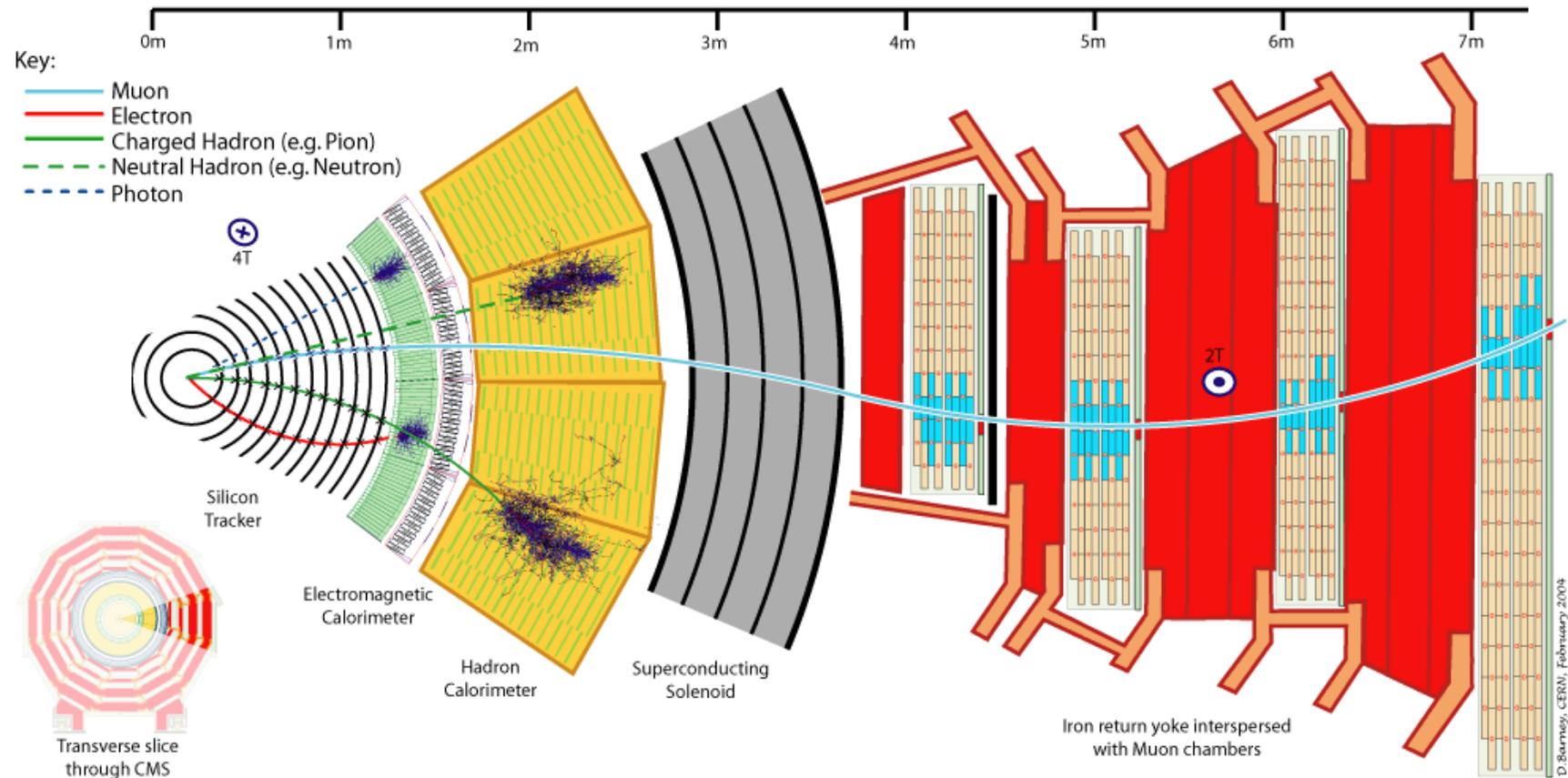
Cathode Strip Chambers (CSC)
Resistive Plate Chambers (RPC)

Diametro: 15 m

Lunghezza: 21.5 m

Peso: 12500 ton.

Combinare più tecniche: la ricostruzione completa di un evento

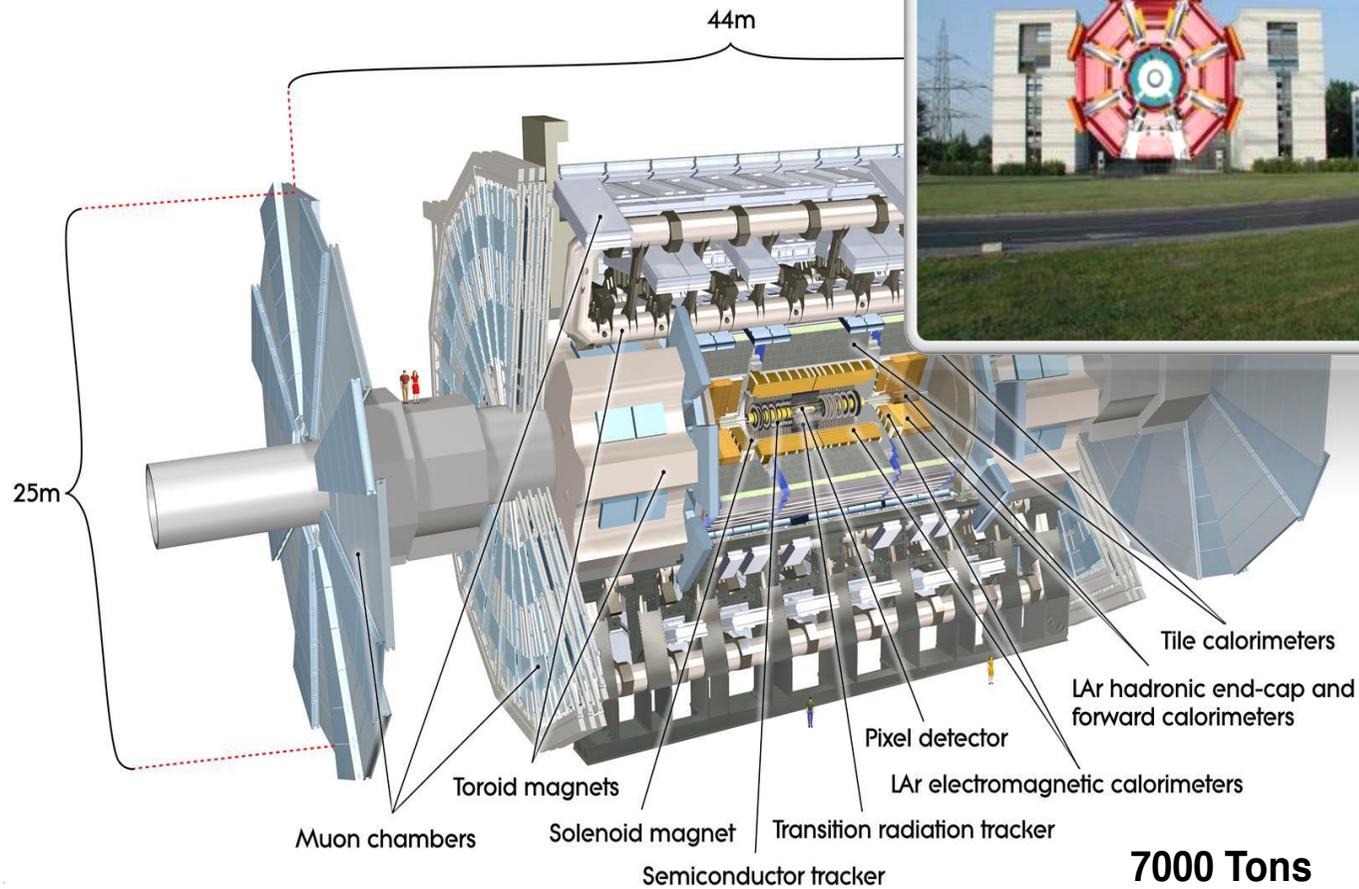


Due sono meglio di uno solo: ATLAS

Più grande è l'energia:

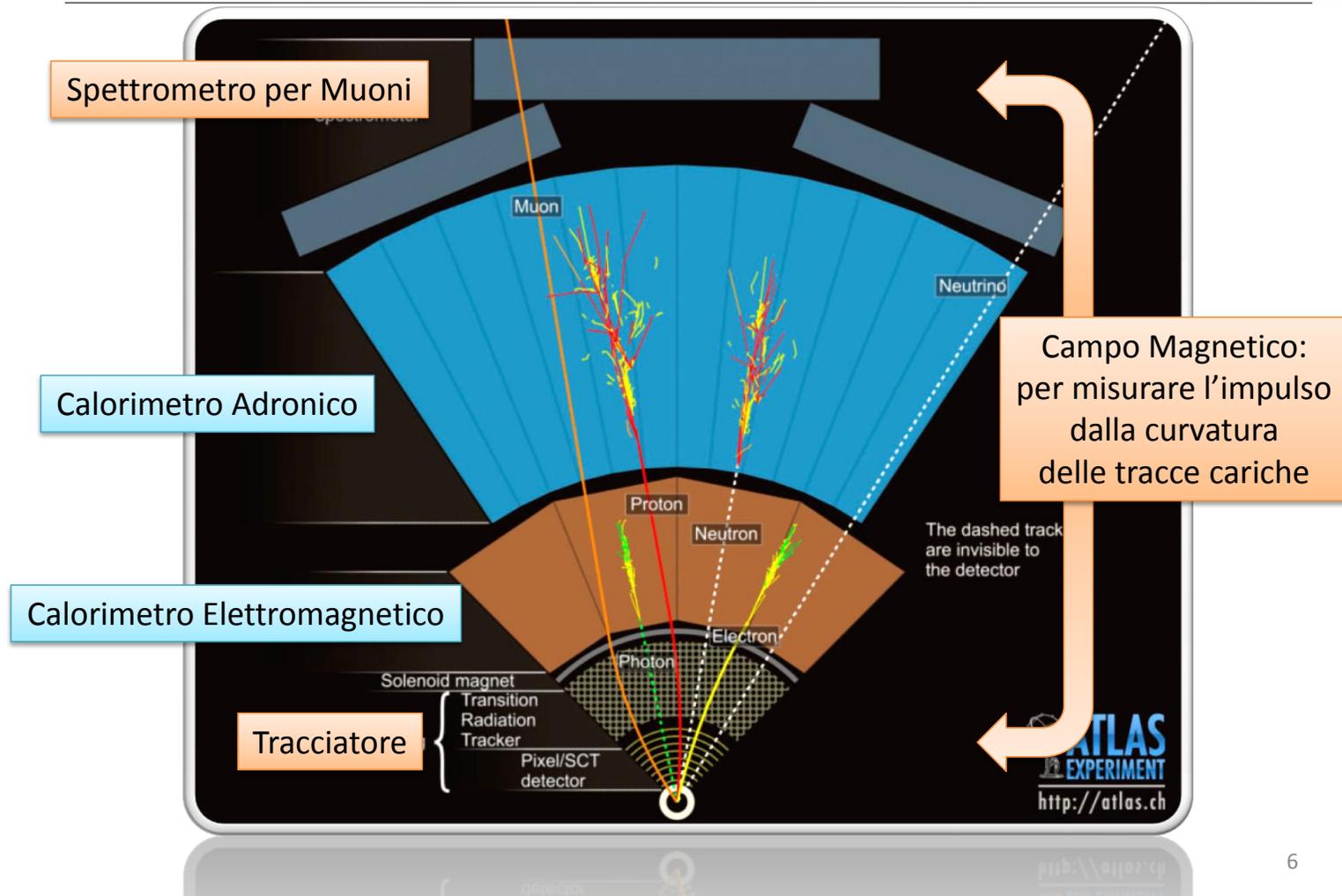


✓ Più grande è il rivelatore:



ATLAS: tecniche differenti, struttura analoga

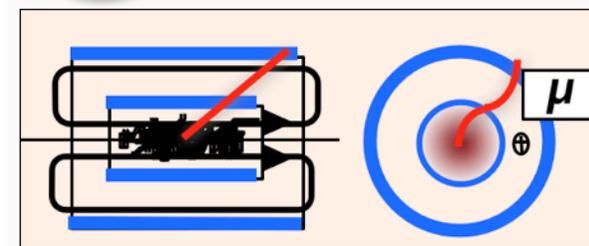
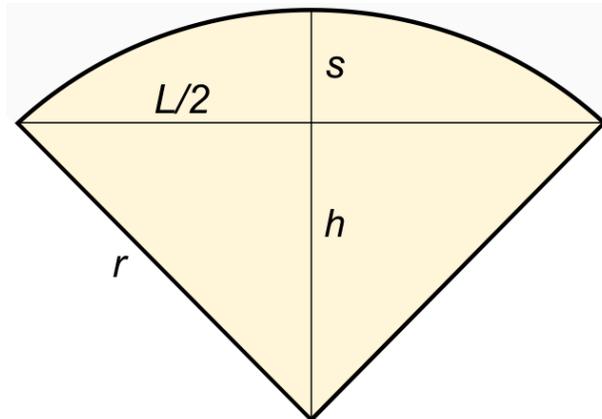
Un "microscopio" a strati specializzati



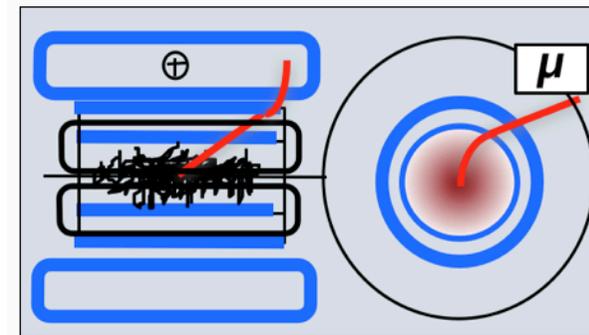
La differenza chiave: il campo magnetico

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

Da massimizzare per ottimizzare la risoluzione



CMS



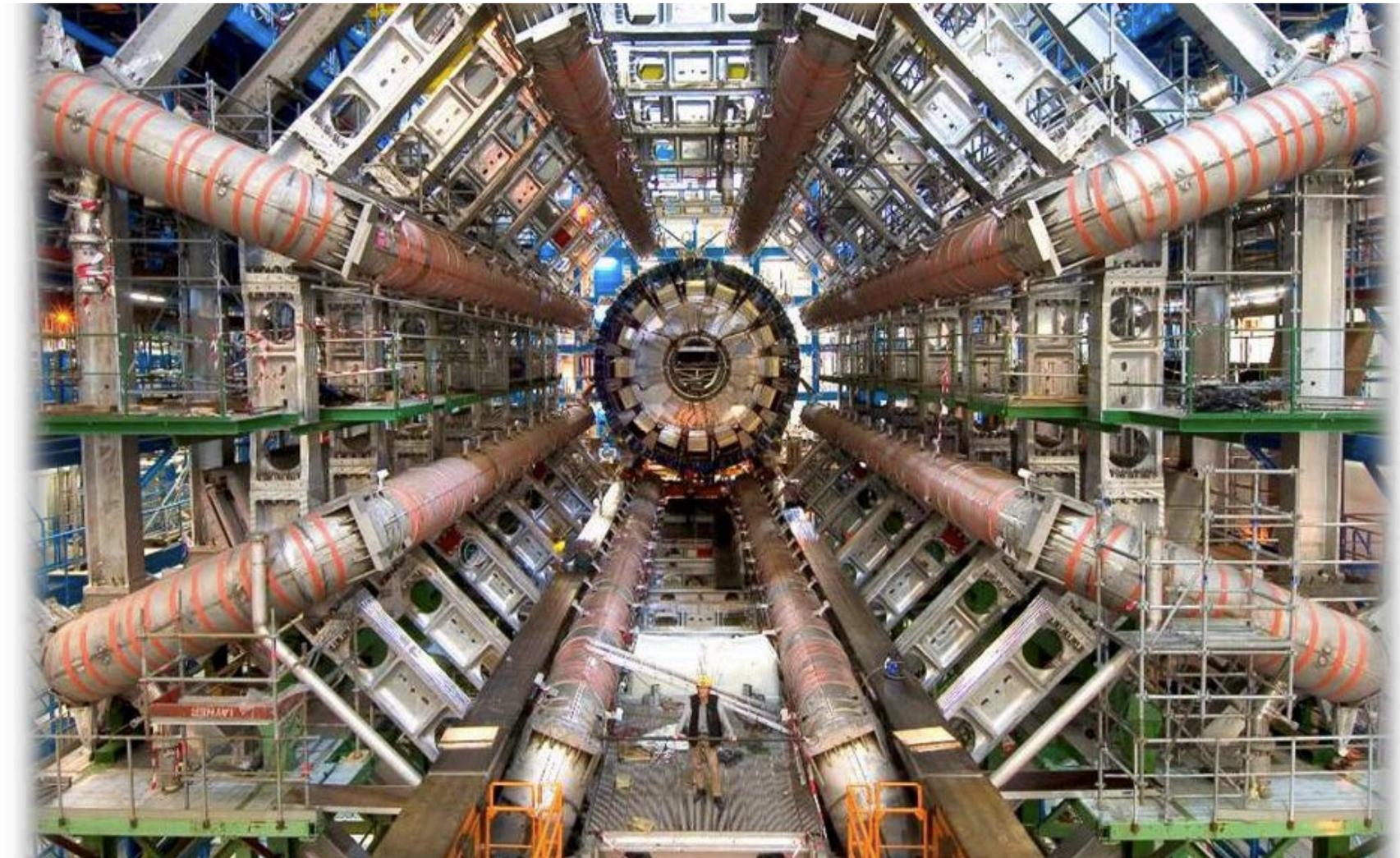
ATLAS

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

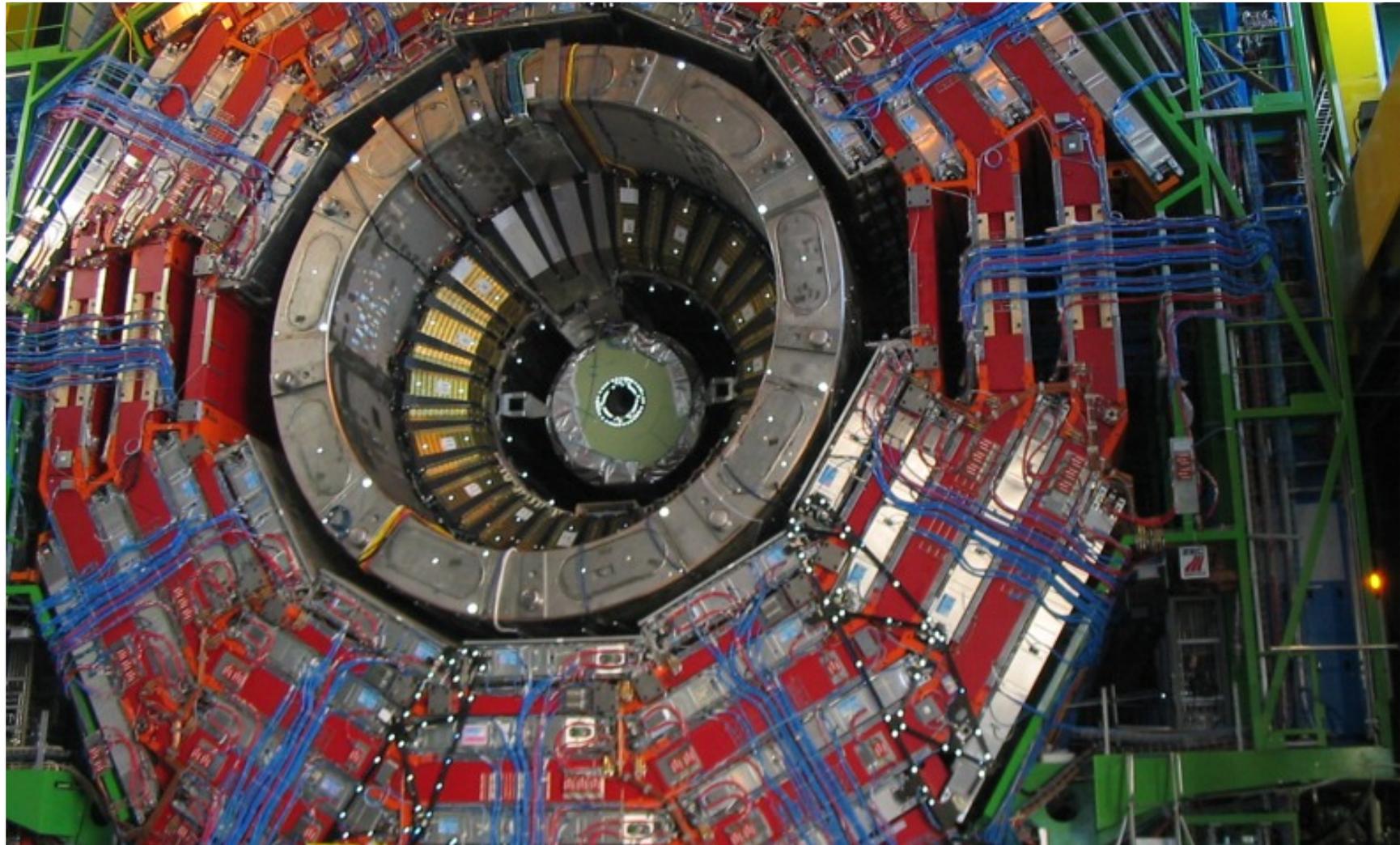
ATLAS: piccolo solenoide per il tracciatore + toroide in aria: ottimo L^2B anche
 in avanti, ma dimensioni giganti $\sim 44\text{ m}$, campo magnetico molto complesso,

► Beneficio limitato per il tracciatore

Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



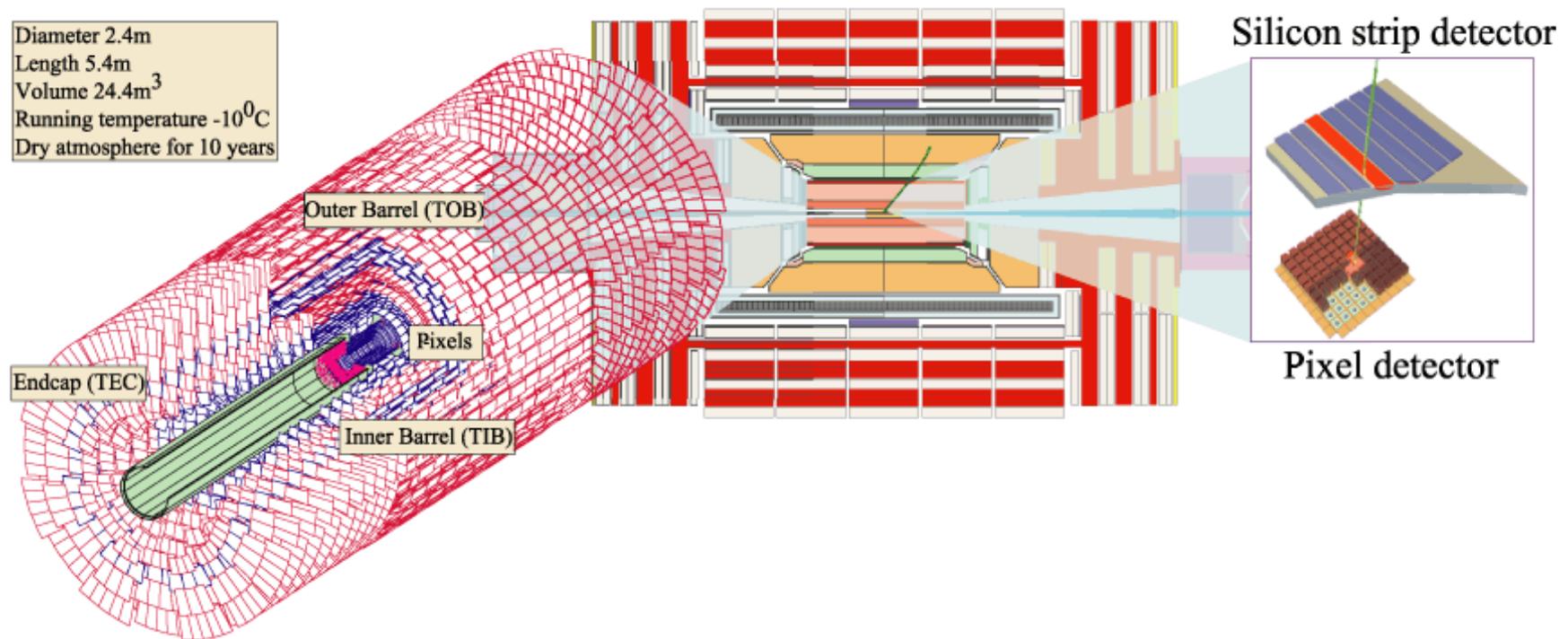
Dalla simulazione al calcolatore alla realtà



Perchè avere un rivelatore sofisticato?

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

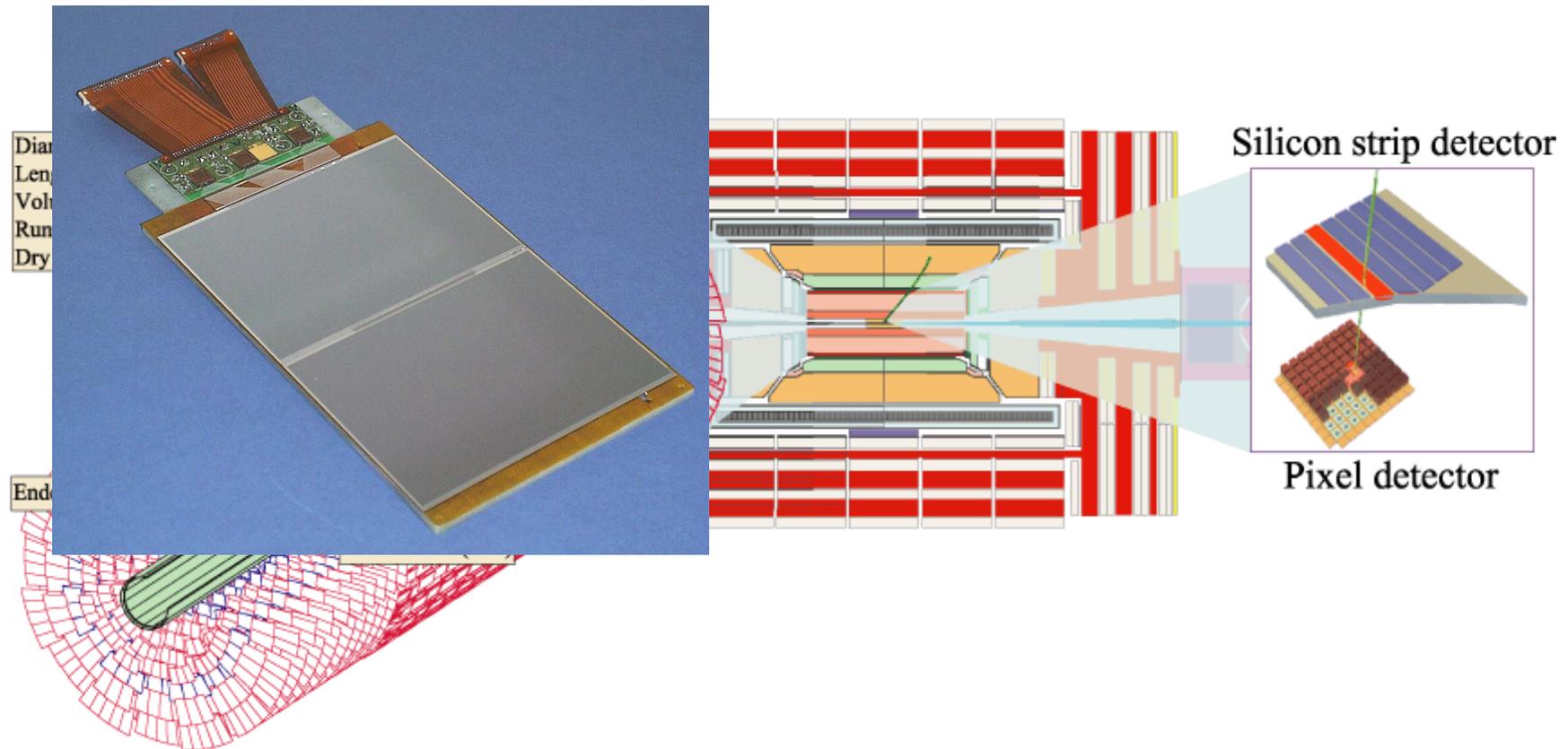
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori



Ad es. CMS tracker...

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

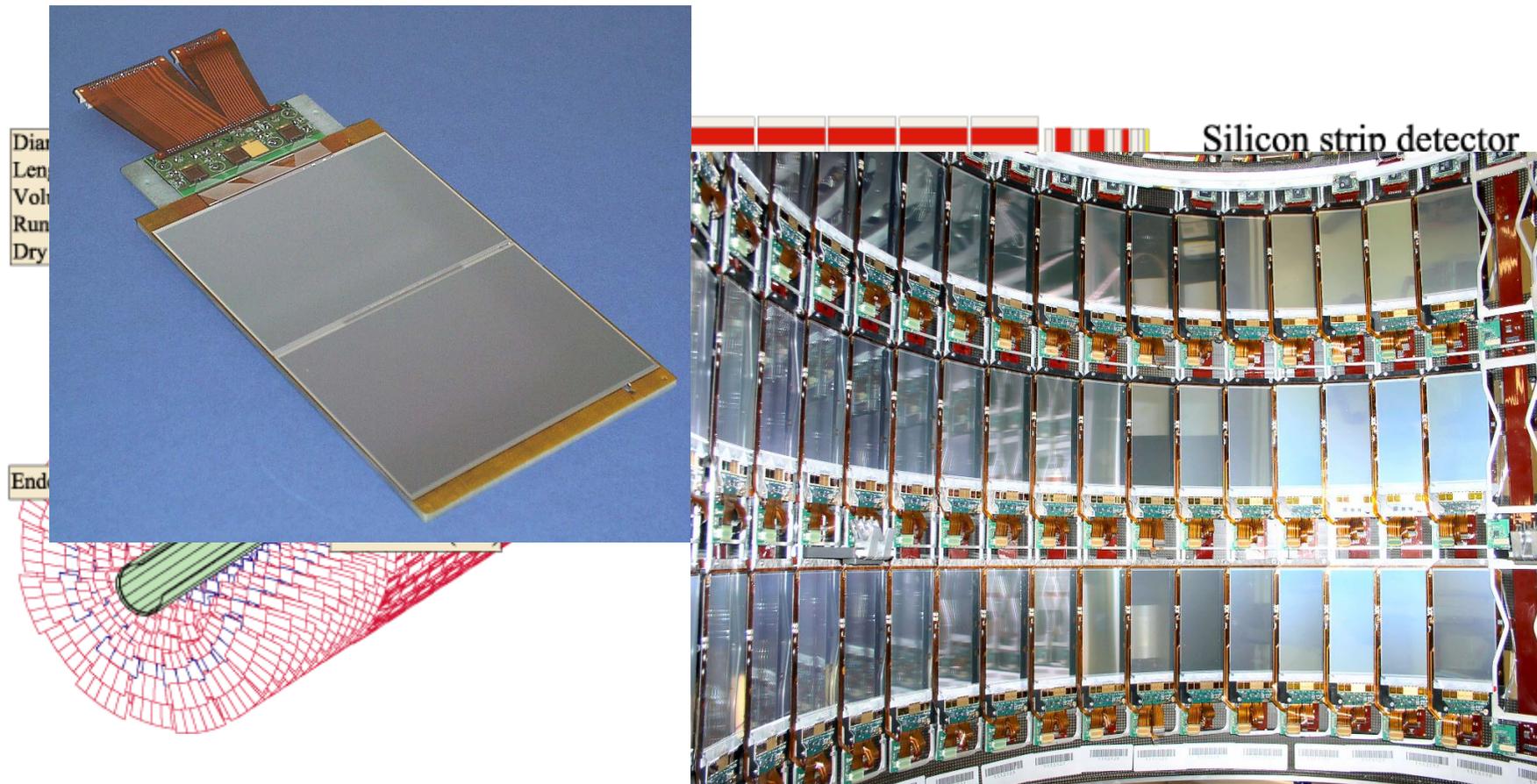
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori



Ad es. CMS tracker...

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

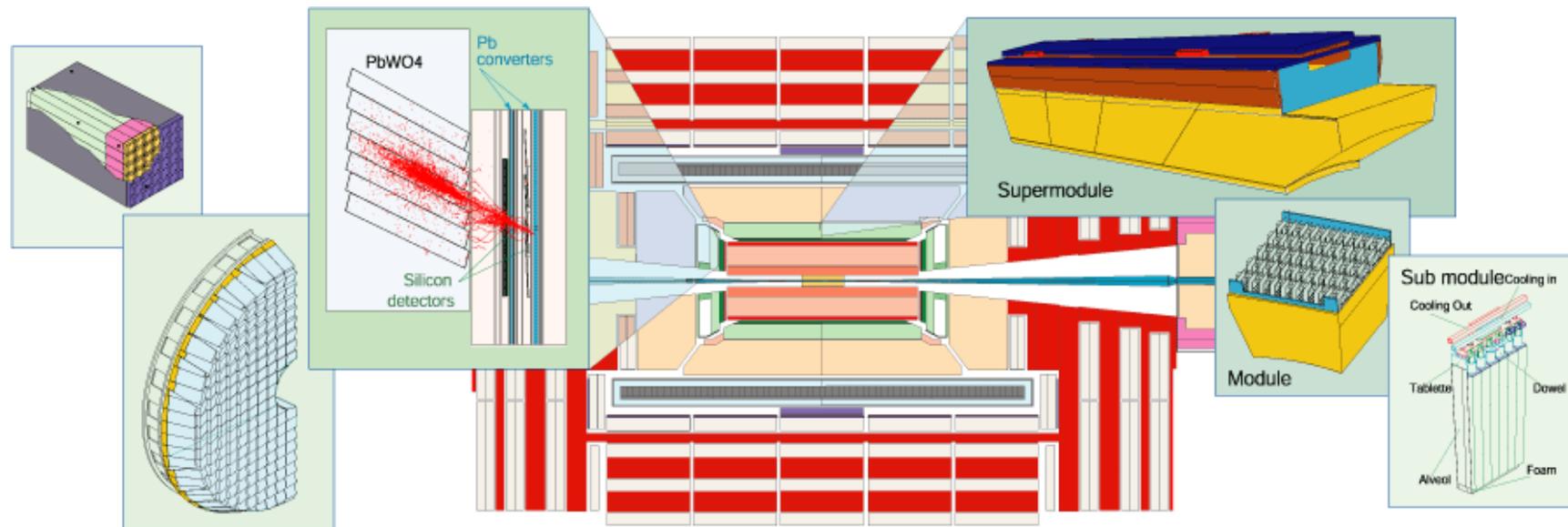
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: tracciatori



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



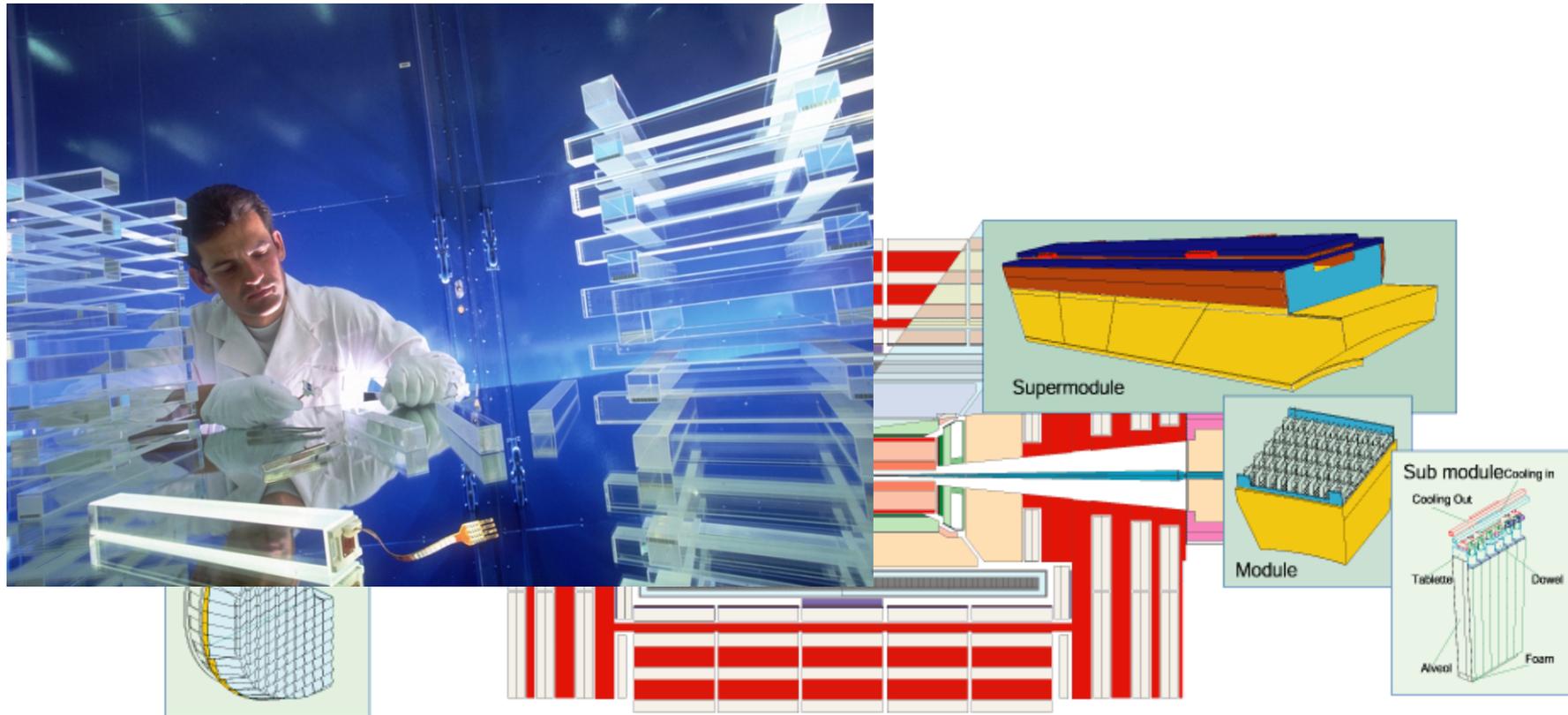
Ad es. CMS ECAL...

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



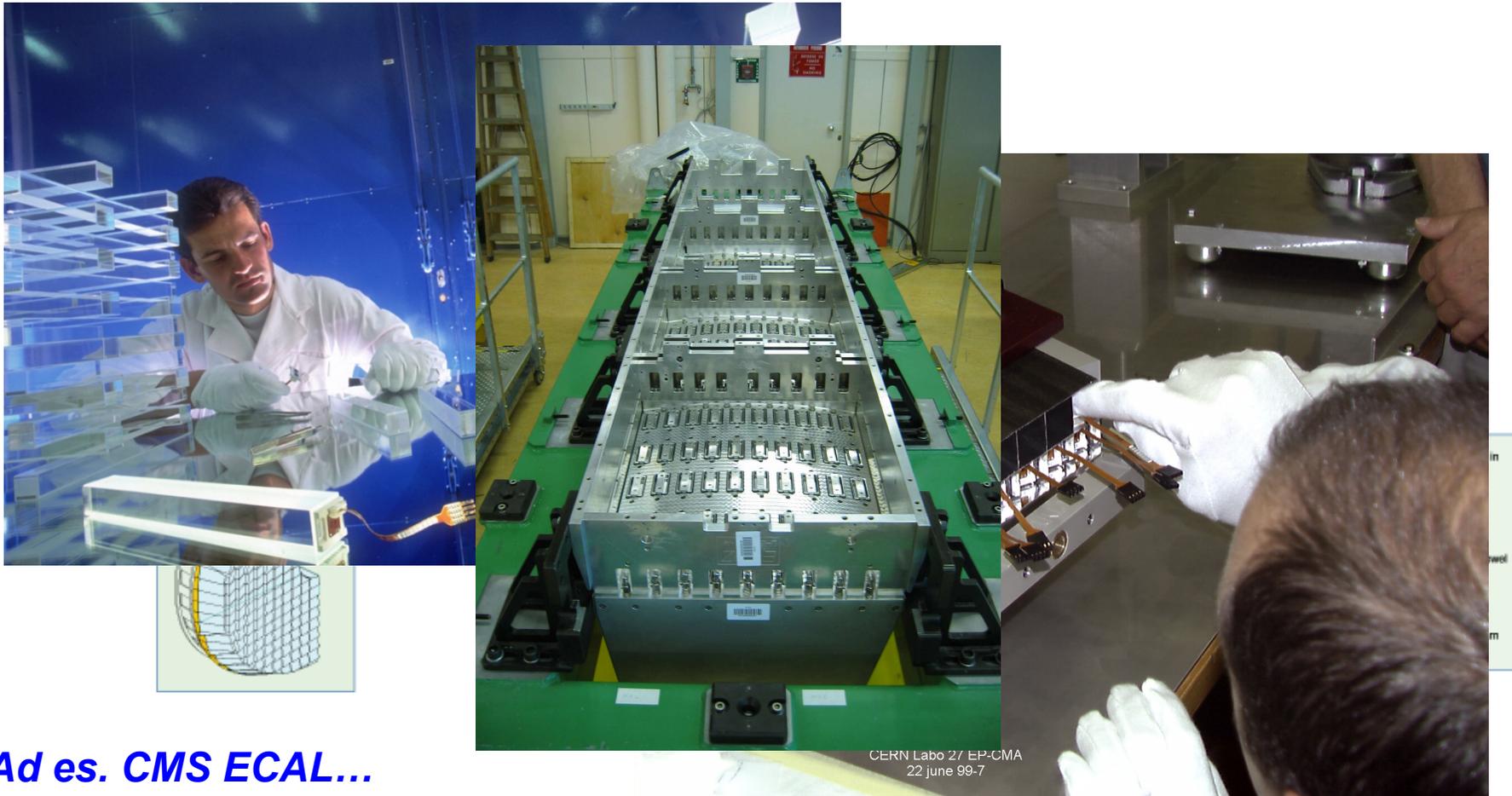
Ad es. CMS ECAL...

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: calorimetri



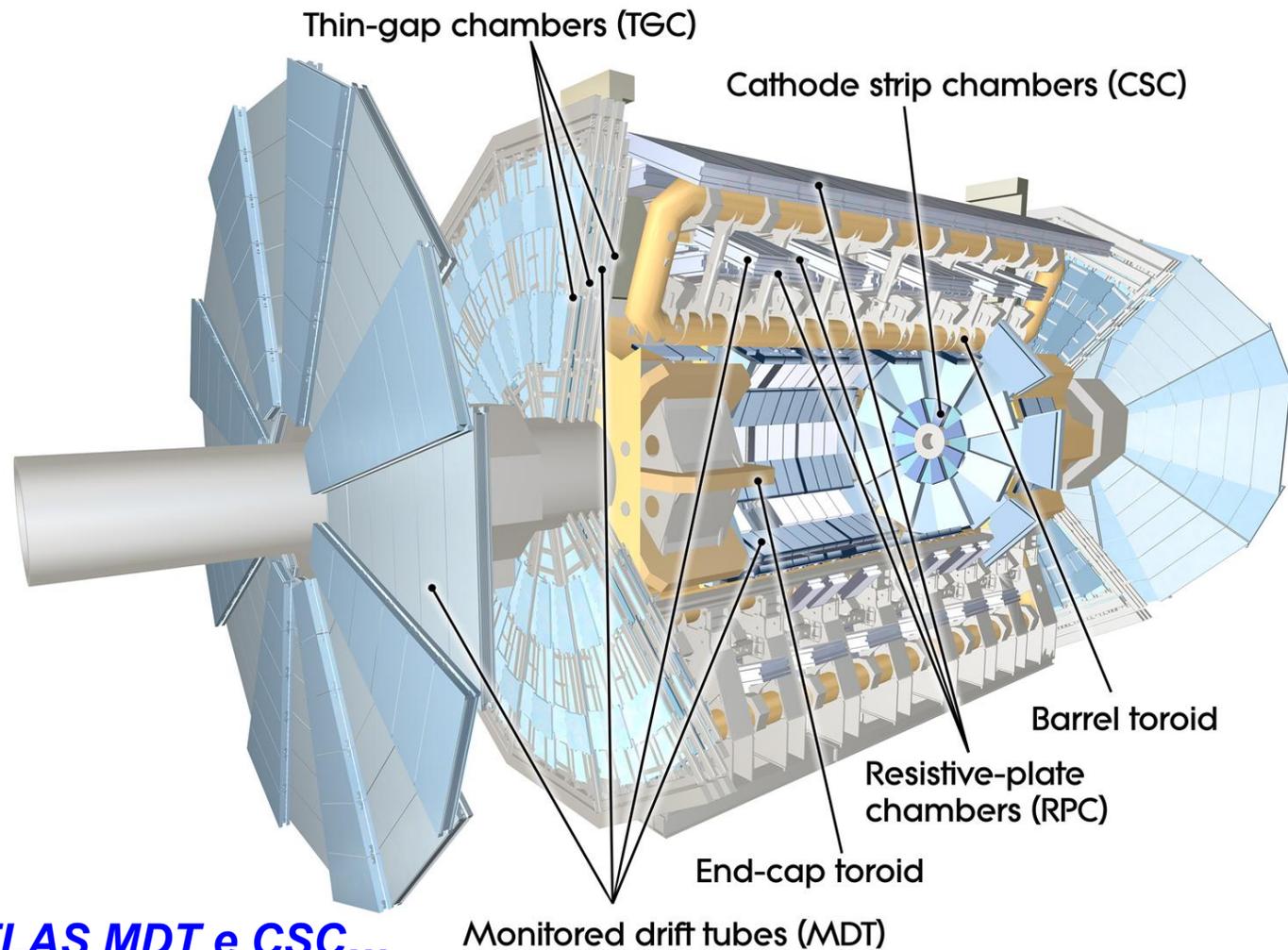
Ad es. CMS ECAL...

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

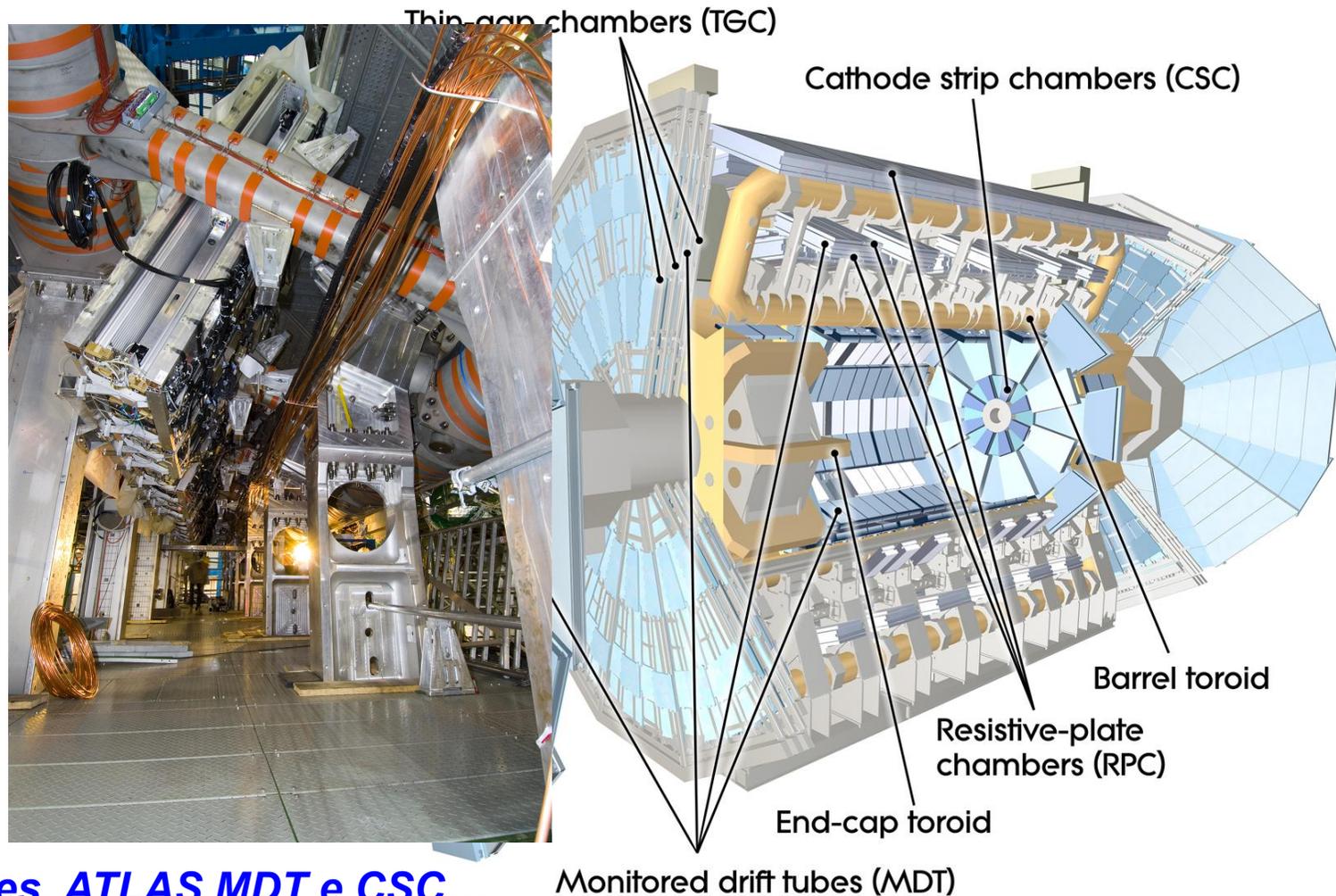
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



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

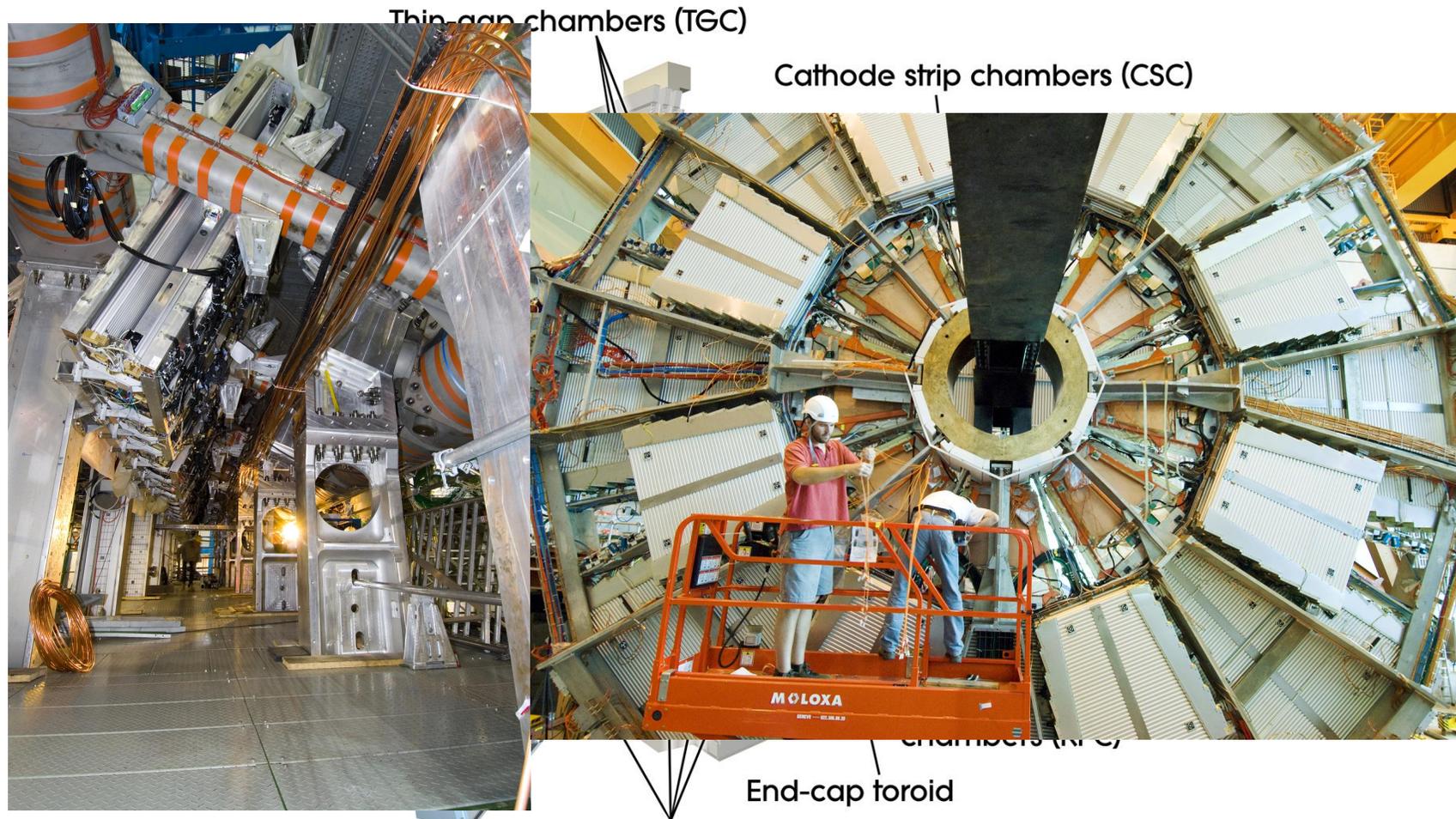
I rivelatori: dal principio fisico all'oggetto reale: camere per i muoni



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

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

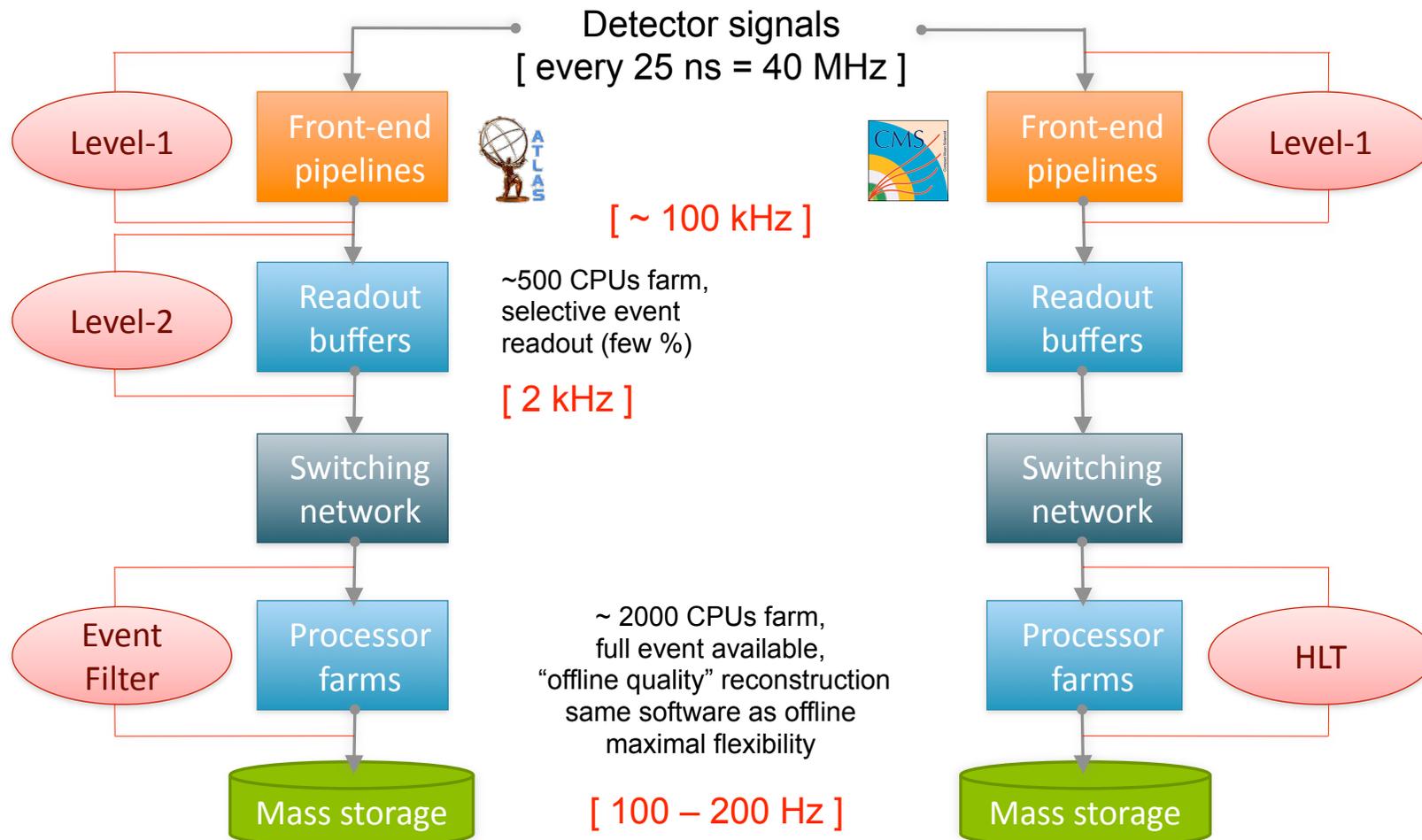
= 6 PetaBytes = 6 milioni di GigaBytes

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

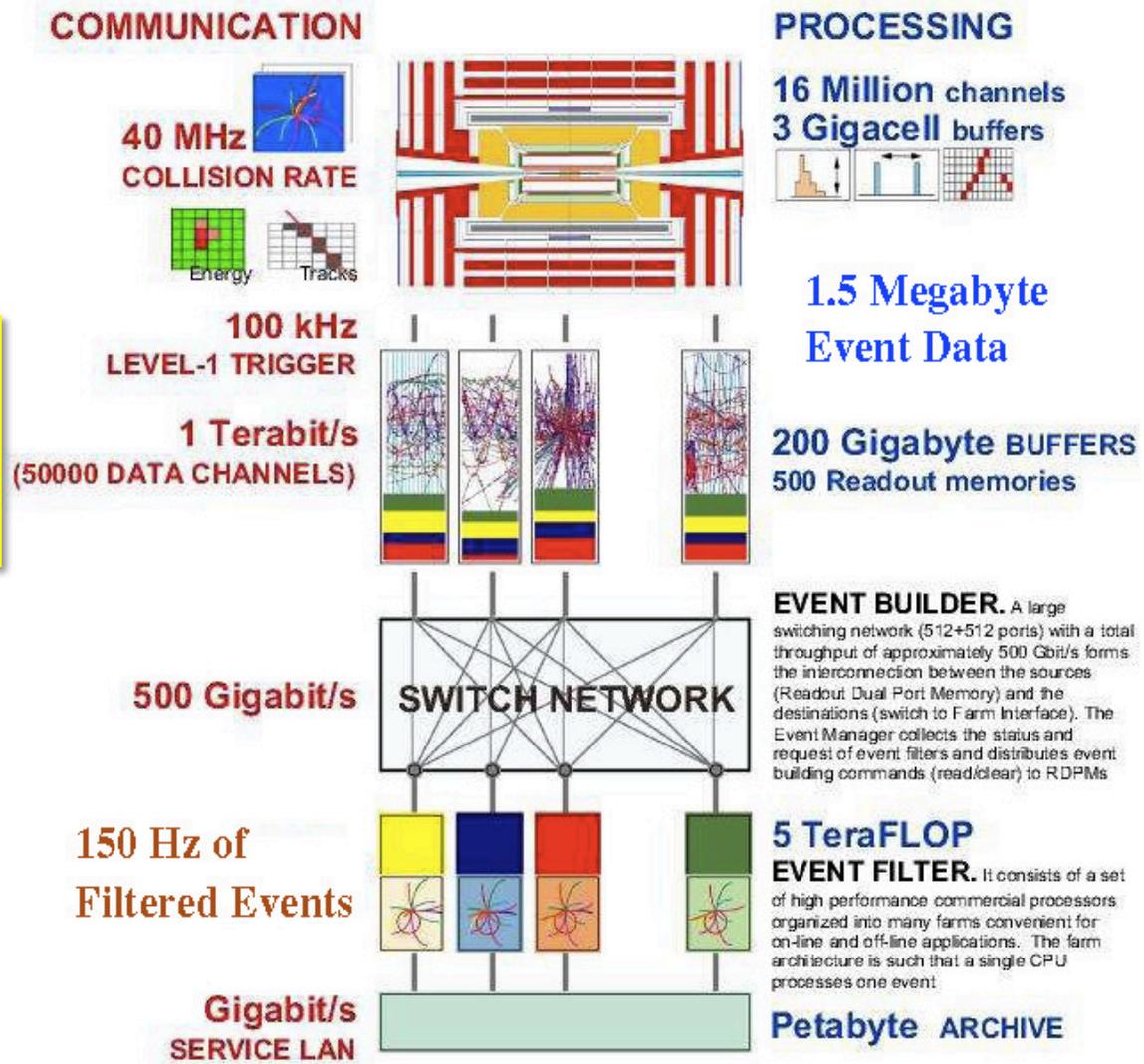


Varie strategie possibili per l'acquisizione dei dati



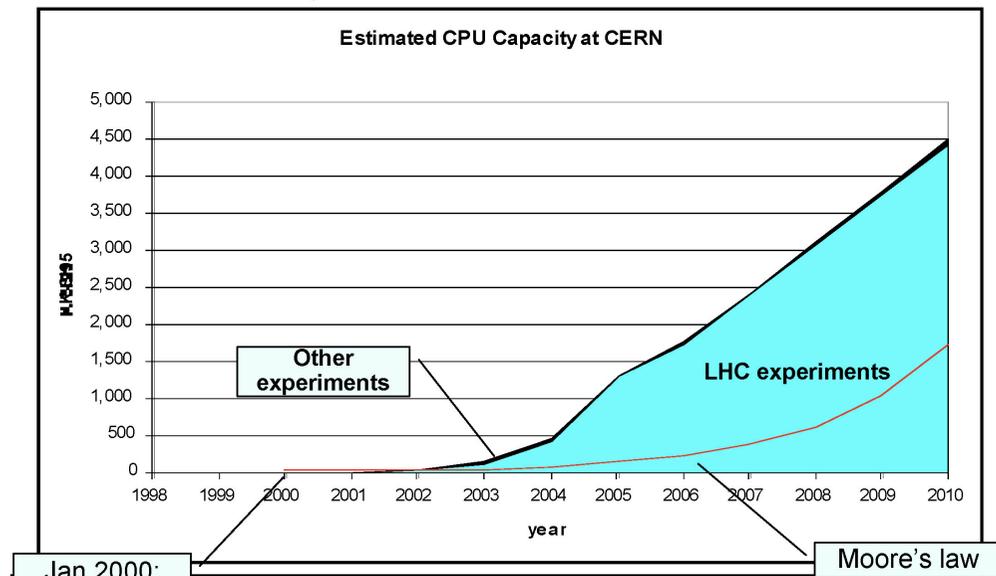
Dal principio alla pratica, la costruzione di un evento

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

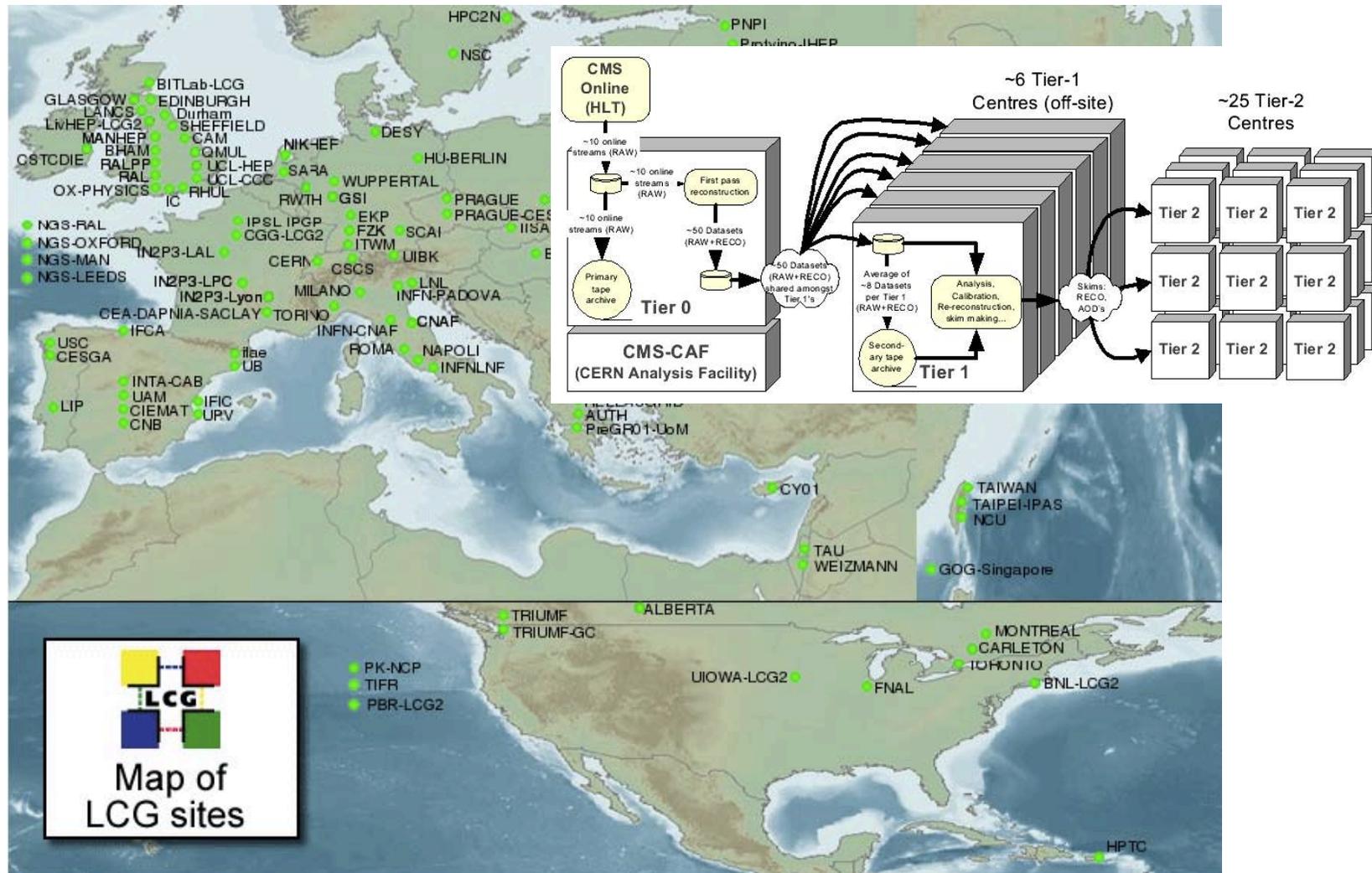


Non basta avere un buon rivelatore...

- ▶ 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

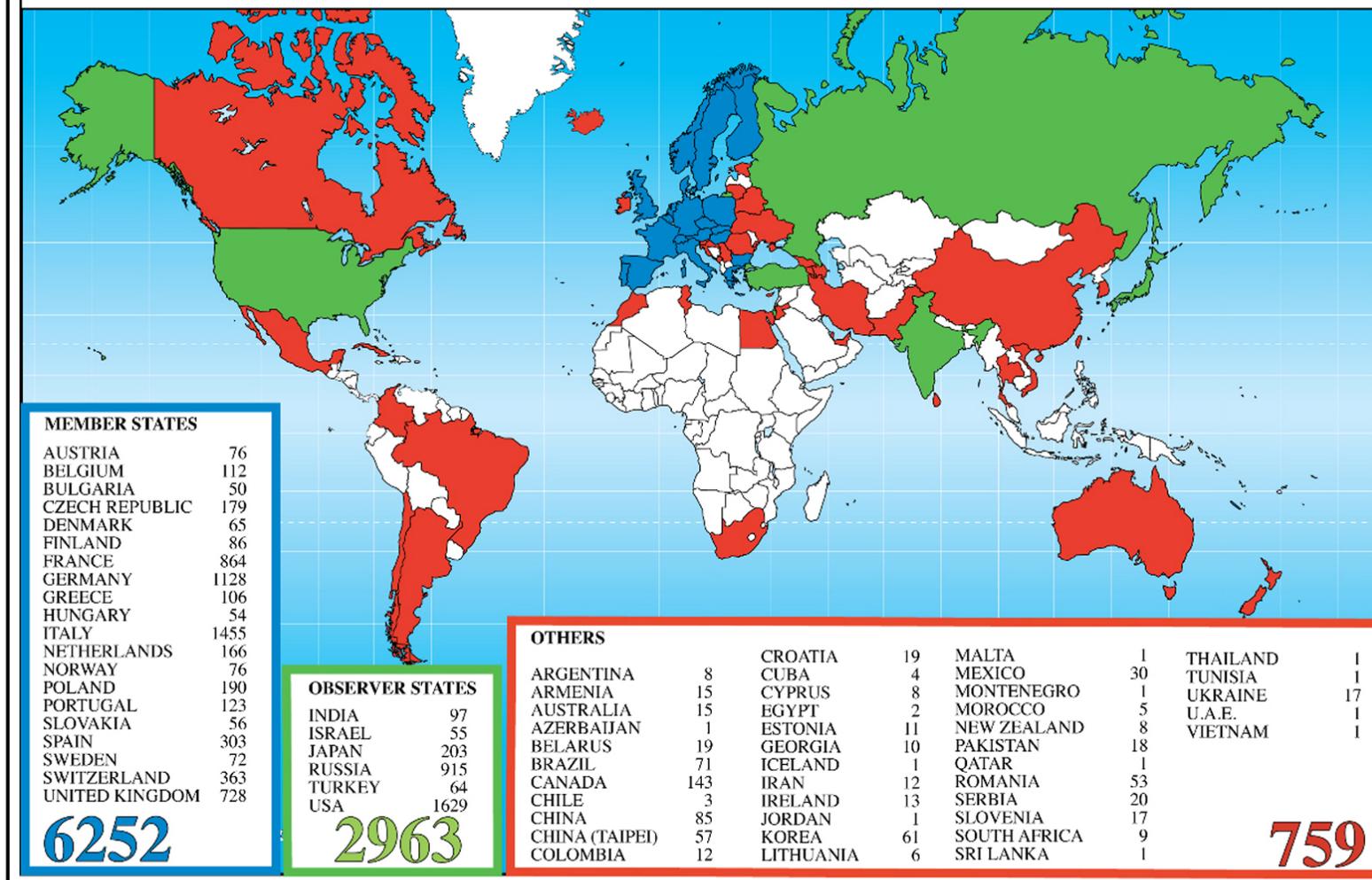


... ma bisogna essere alla frontiera del calcolo: la Grid e il modello a Tier



LHC@CERN: Collaborazioni internazionali

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



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...
- ▶ Nel 2011 LHC con $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$: una fluttuazione vista sia da ATLAS che da CMS nella ricerca del bosone di Higgs ha stuzzicato l'appetito
 - ▶ Troppo poco per dire che abbiamo scoperto qualcosa
 - ▶ Troppo per non cercar di scoprirlo definitivamente nel 2012
- ▶ Ci sono molte persone che hanno lavorato per anni, anche 20, per poter arrivare a questo momento
- ▶ **Voi siete dei privilegiati: l'avete a portata di mano**



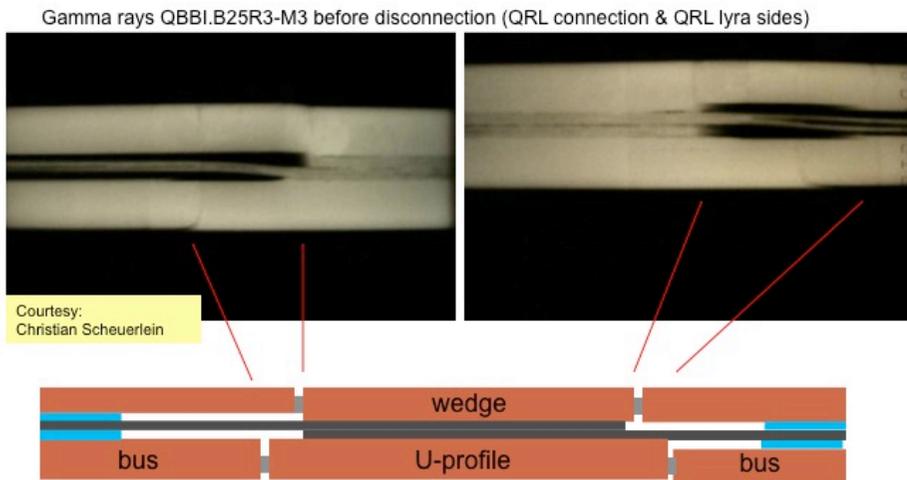
BACKUP



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



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

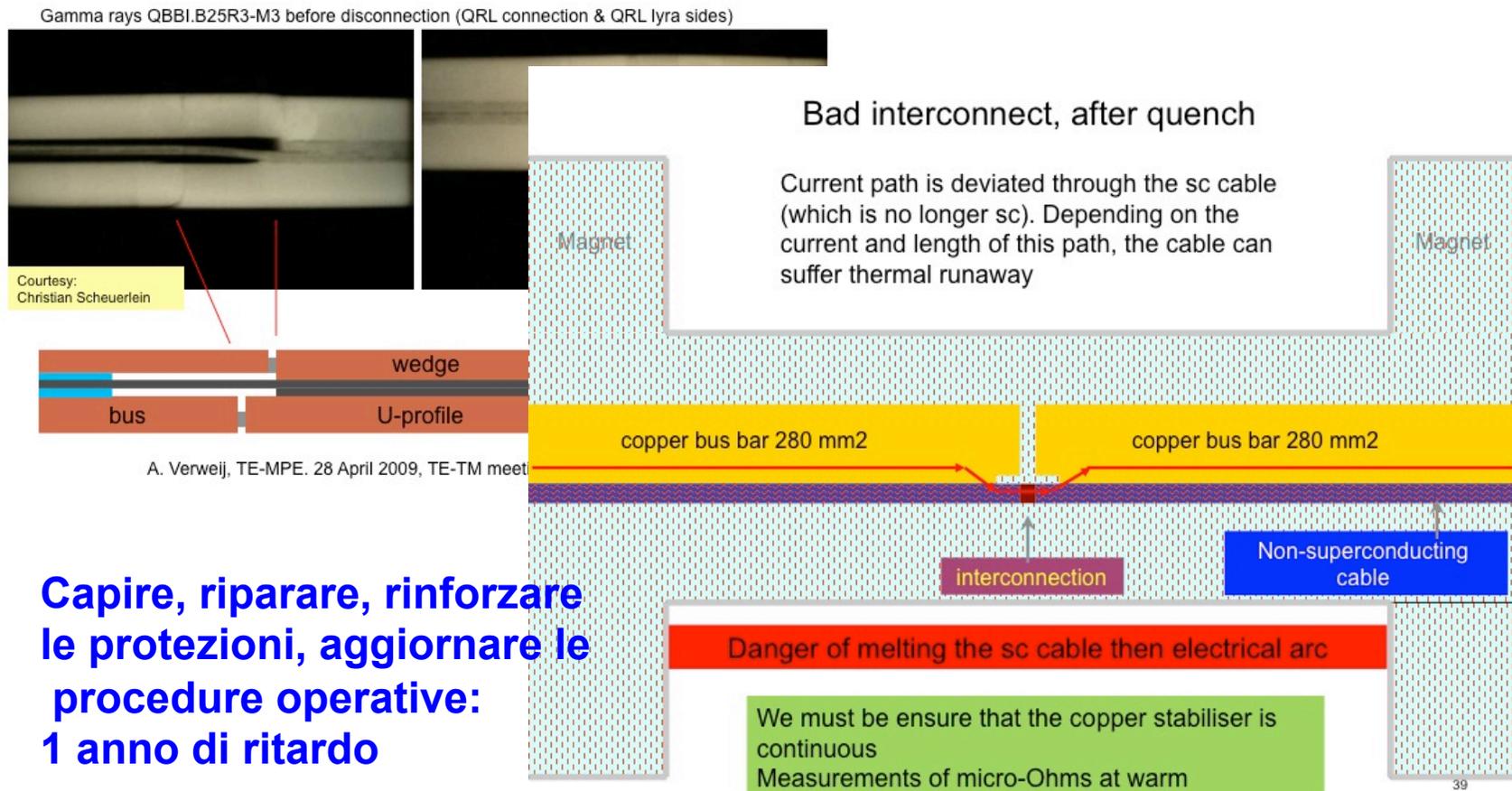
45

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

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