



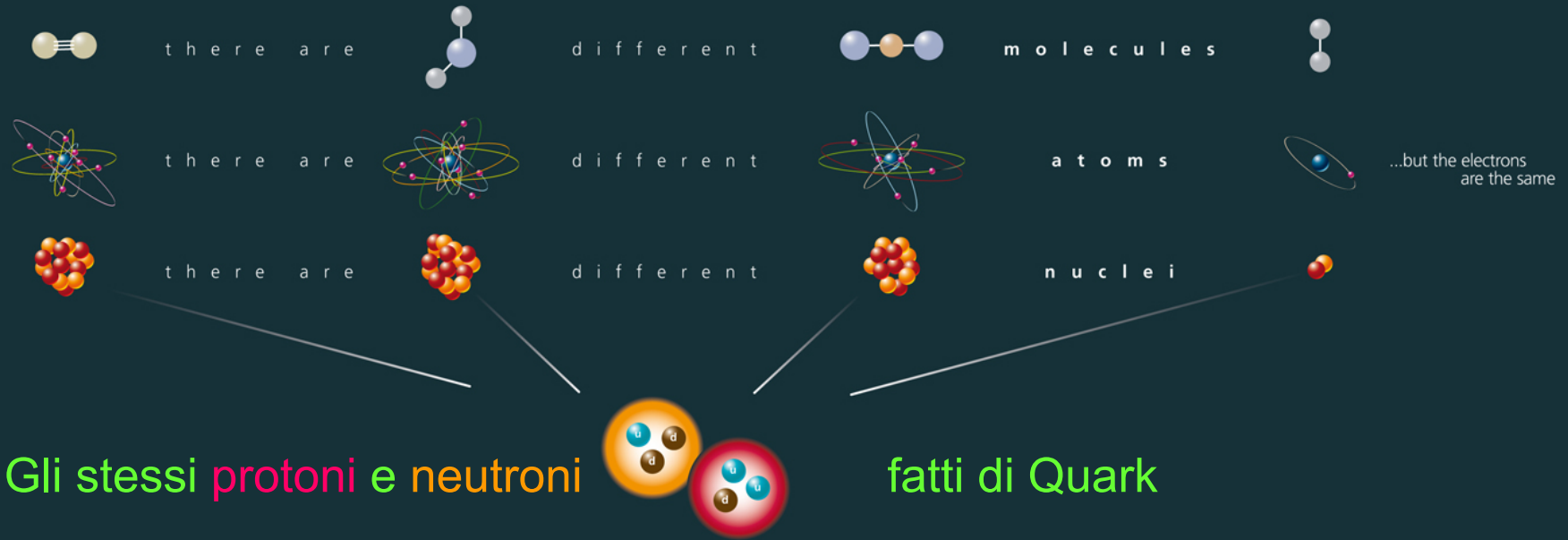
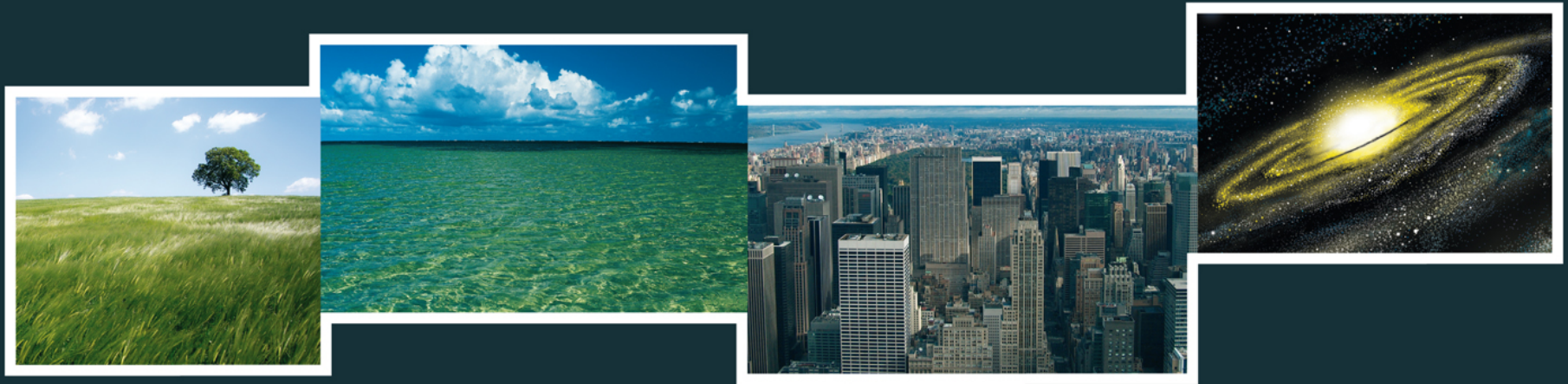
Dall'atomo ai quark: 100 anni di collisioni di particelle

Marco Costa - MasterClass 2013

Sommario

- ❑ Quello di cui siamo fatti
- ❑ Vedere l'invisibile
- ❑ Gli acceleratori di particelle
- ❑ I rivelatori di particelle
- ❑ LHC: Viaggio all'origine dell'Universo

La complessita' e' riducibile:



Vedere l'invisibile / 1



Per vedere dettagli piu' piccoli bisogna illuminare la materia con sonde (onde o particelle) di alta frequenza ossia alta energia (Unita' di misura: 1 eV (elettronVolt) energia acquisita da una carica elettrica elementare quando attraversa una differenza di potenziale di 1 Volt)

Vedere l'invisibile /2



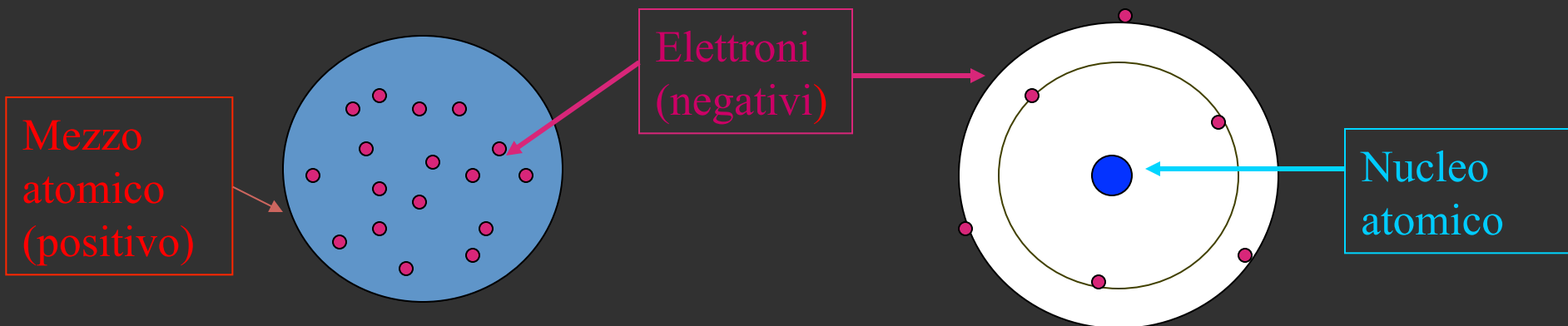
Per capire che cosa si vede in un esperimento di fisica nucleare o subnucleare bisogna tornare al 1911 quando tutto incomincio' ...

La nascita della Fisica Subatomica - I

- ❶ **Esperimenti di Thompson (1895):** studio delle scariche elettriche nei gas ➡ **scoperta dell' elettrone.**
- Questi “granuli di materia” dotati di **carica elettrica negativa** venivano emessi qualunque fosse il tipo di gas e di elettrodo utilizzato ➡ **gli elettroni sono presenti in tutti gli atomi.**
- **Modelli atomici:**

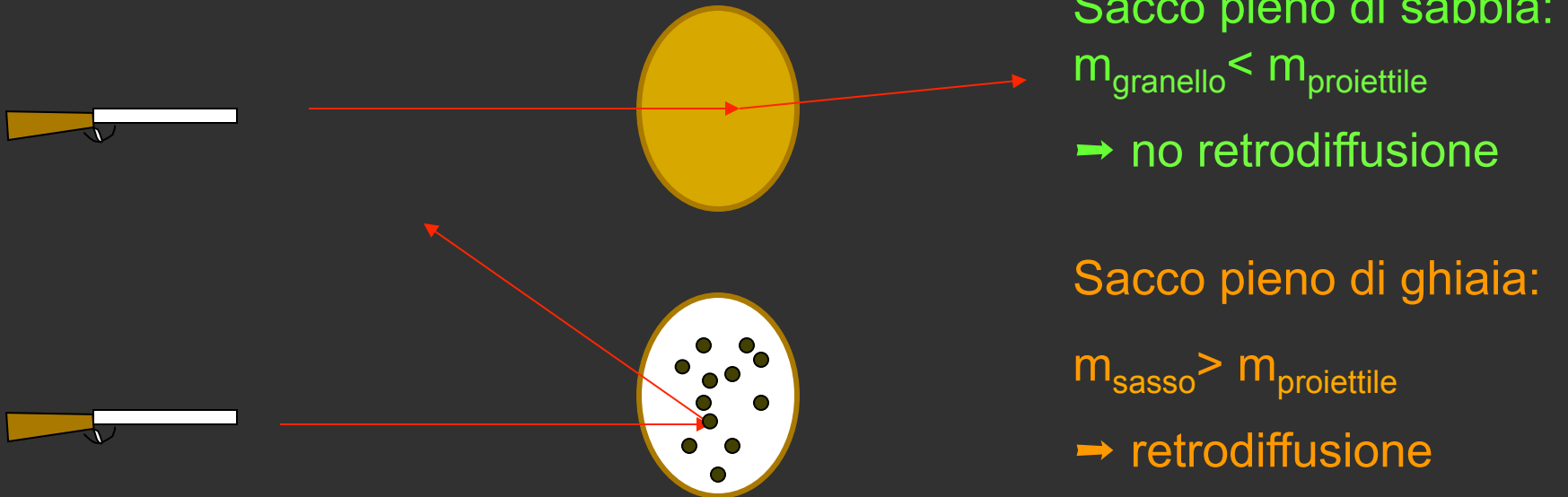
di Thompson.....

e di Rutherford (Bohr)

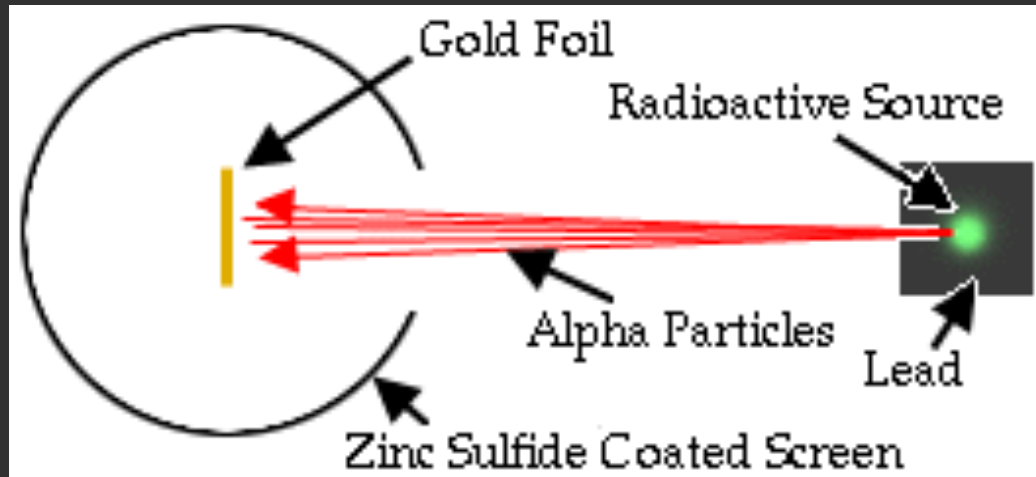


La nascita della Fisica Subatomica - II

L'idea di base di un **esperimento di diffusione** (scattering):
capire come e' fatto un bersaglio da come il proiettile viene deviato

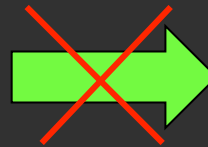


L'esperimento di Rutherford (1911)



Particelle α da
4.8 MeV (10^6 eV)

Modello di Thomson

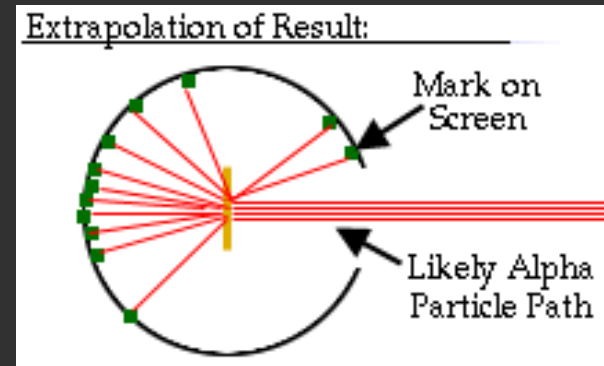
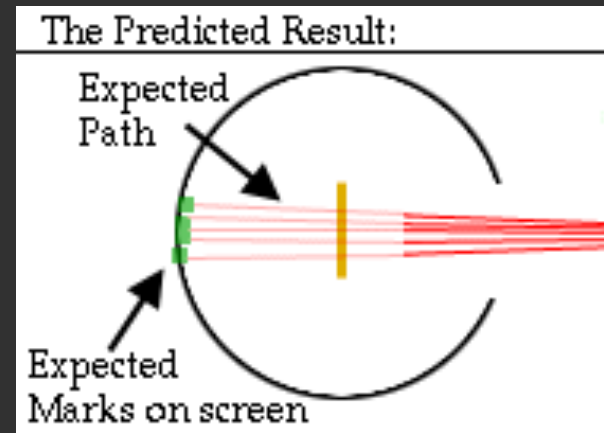


NO

Modello di Rutherford



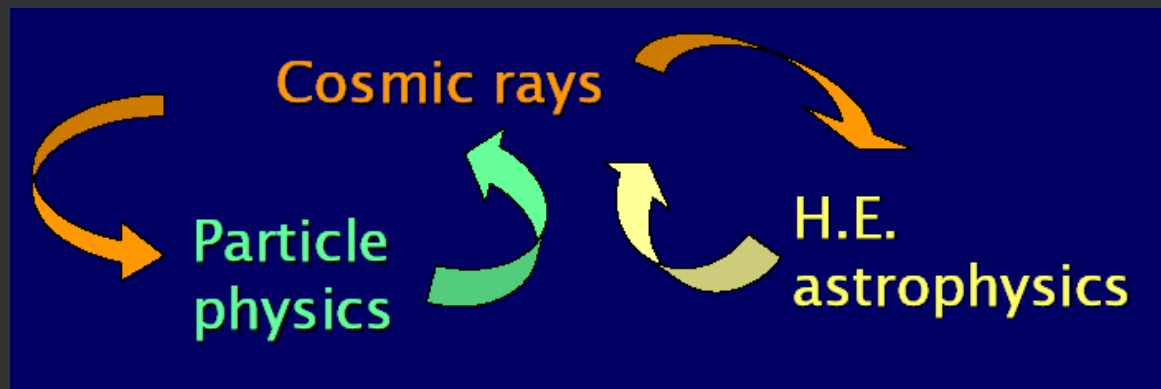
SI



Cento anni di collisioni “a’ la Rutherford”

La fisica nucleare e delle particelle si e’ sviluppata utilizzando:

- Sorgenti radioattive
- Raggi cosmici (RC) (vd prossime presentazioni)
- **Acceleratori di particelle** ← questa presentazione



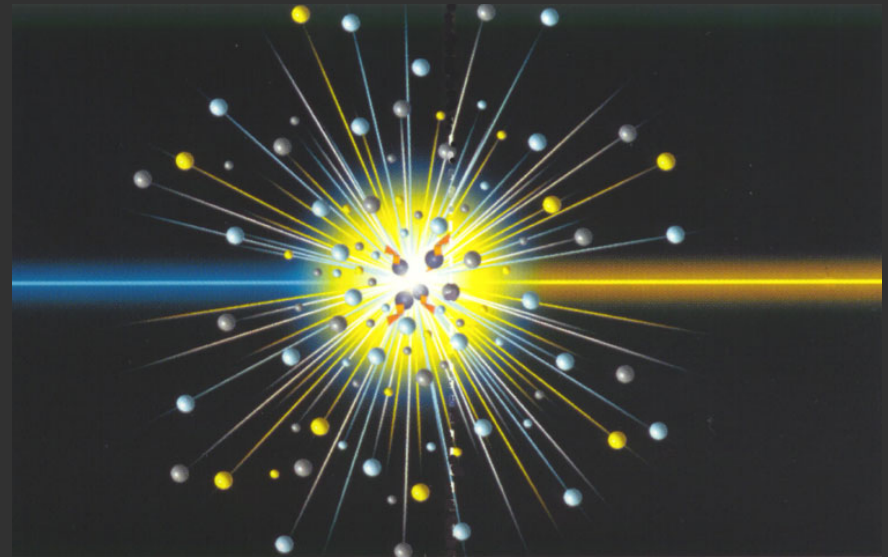
Acceleratori di particelle

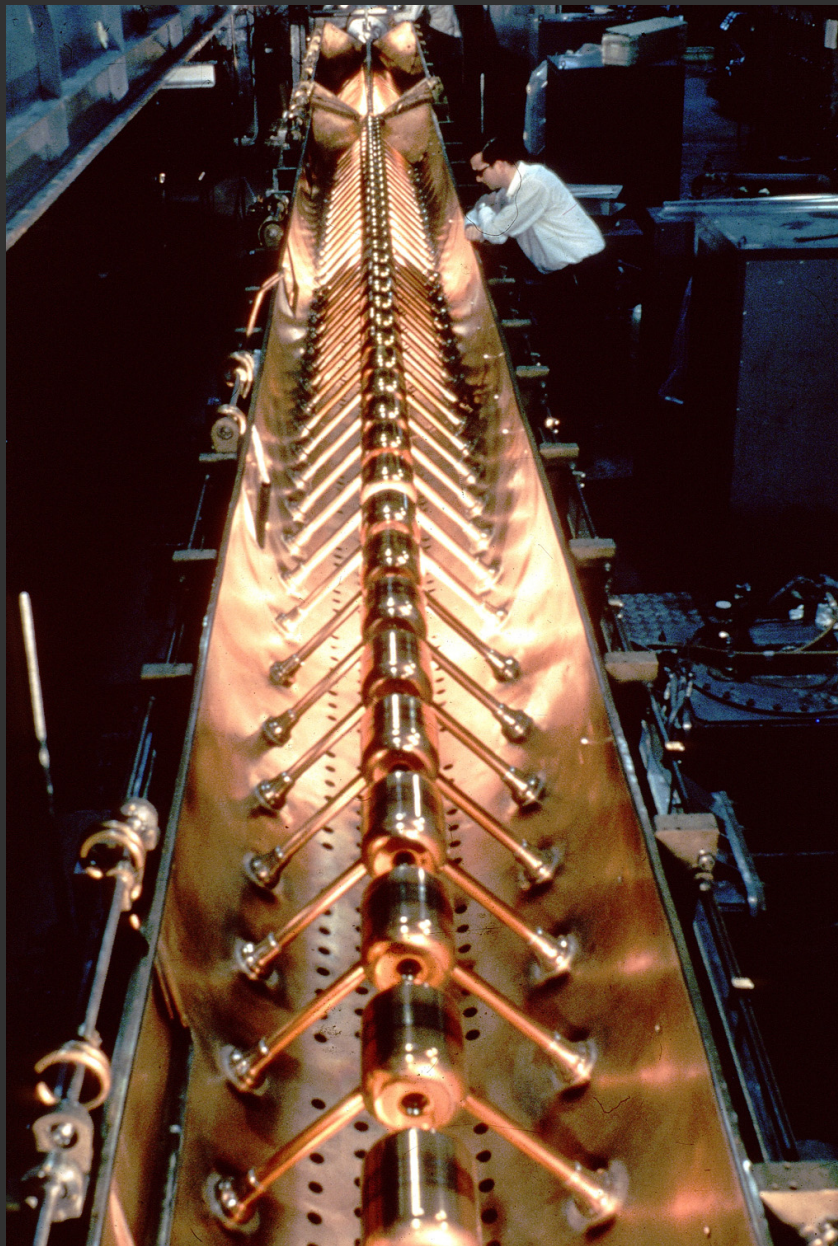
- Permettono di eseguire esperimenti di laboratorio ripetuti, in maniera controllata (tipo di particella, energia..)
- Si accelerano particelle cariche “stabili” (elettroni, protoni, nuclei) portandole a energie molto elevate (10^9 eV (GeV), 10^{12} eV (TeV))

1. Per esplorare la materia su scale di lunghezza $< 10^{-14}$ m

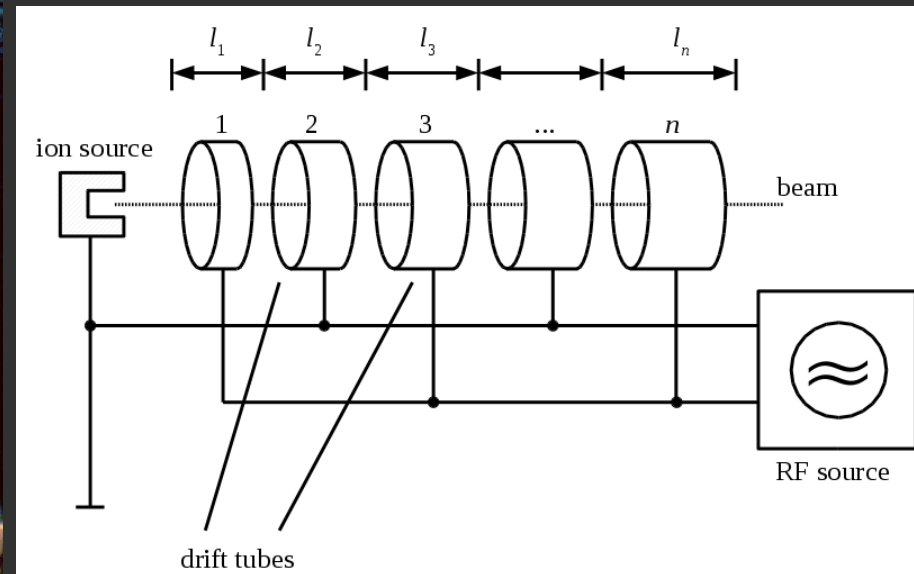
1. Per produrre nuove particelle

$$E=mc^2 (+ E_{cinetica})$$





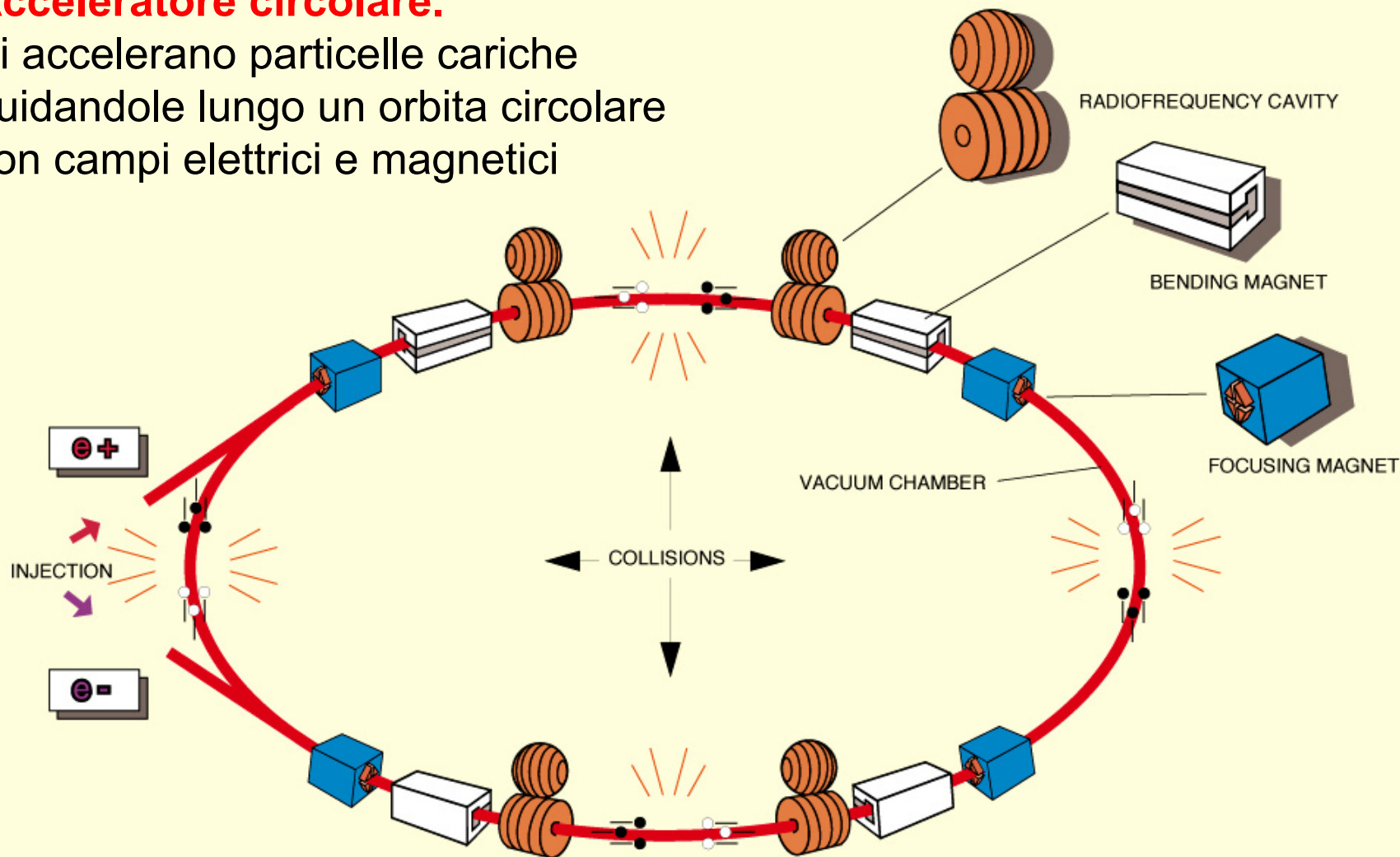
Acceleratore lineare tipo Wideroe



THE PRINCIPAL MACHINE COMPONENTS OF THE LEP ACCELERATOR.

Acceleratore circolare.

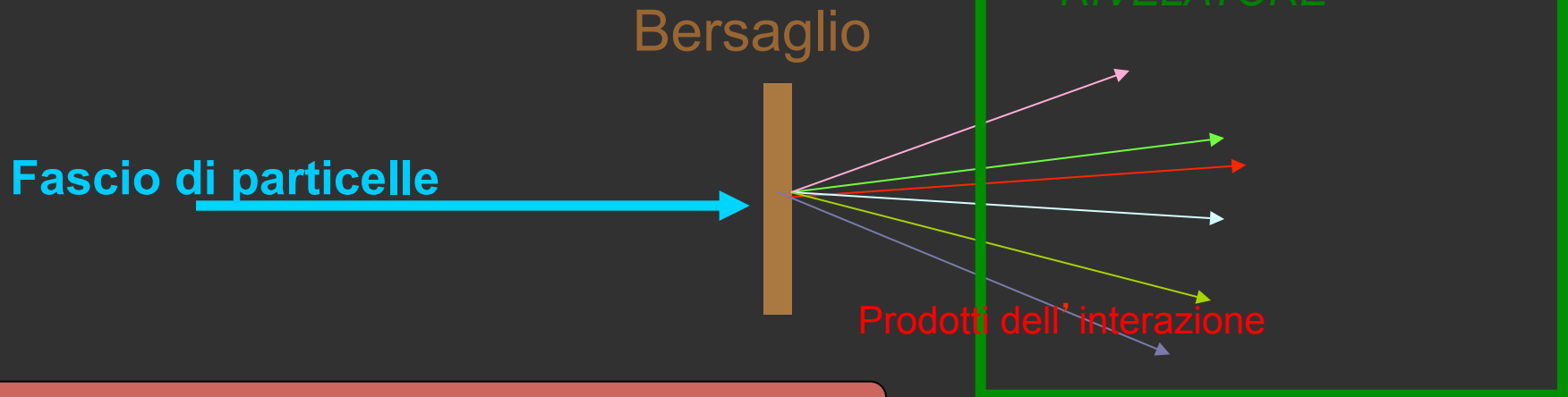
Si accelerano particelle cariche guidandole lungo un'orbita circolare con campi elettrici e magnetici



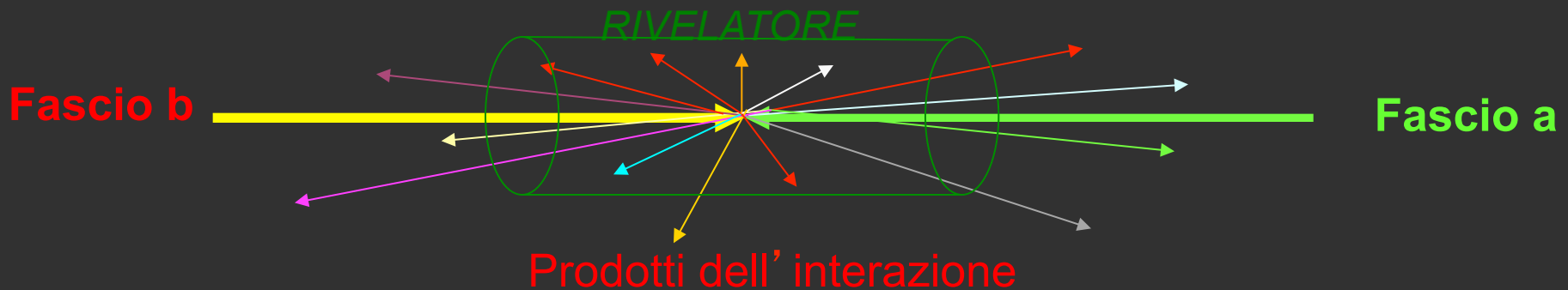
Le particelle sono accelerate fino ad un'energia massima limitata dal raggio della macchina e dall'intensità dei magneti

2 modi di eseguire un esperimento:

Esperimento a bersaglio fisso



Esperimento al collider



Rivelatori di particelle

- Sfruttano le proprietà di interazione delle particelle con i materiali (e.g. eccitazione, ionizzazione) e la conseguente formazione di un segnale misurabile (luce, carica elettrica)
- Servono a:
 - Identificare il tipo di particelle prodotte
 - Misurare energia e quantità di moto delle particelle
- Per ricostruire:
 - Che cosa è accaduto nella collisione
 - Se si è prodotto qualche fenomeno interessante
- Molte particelle sono instabili e decadono in particelle più leggere:
 - Si rivelano queste ultime
 - Dalle loro caratteristiche si risale alle proprietà delle particelle che le hanno generate

Esempio di rivelatore per esperimento a bersaglio fisso



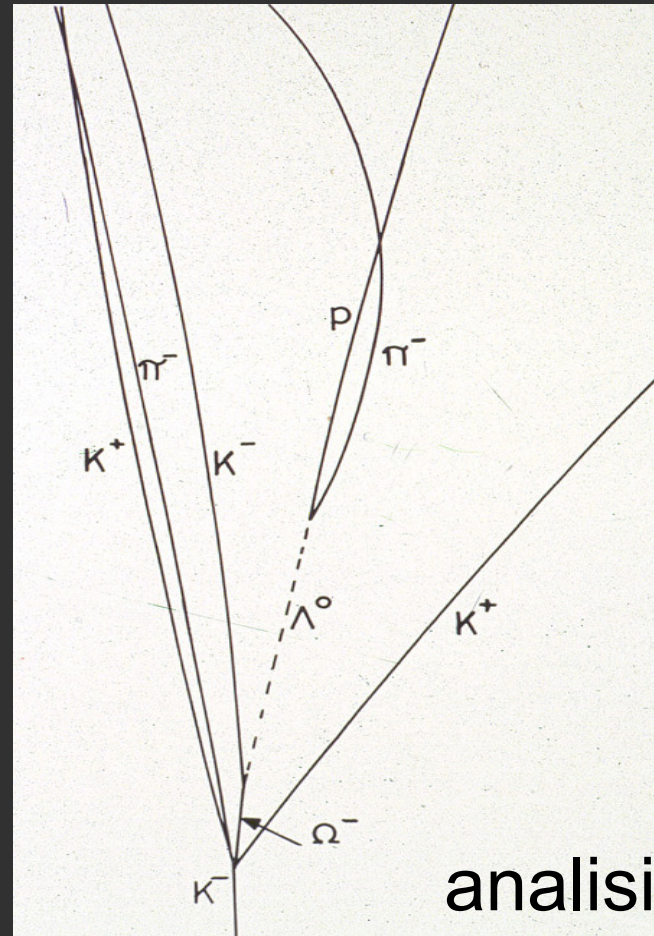
BEBC: Camera a Bolle a idrogeno liquido
L' idrogeno funge da bersaglio e da Rivelatore

Principio di funzionamento

- Jet nel cielo: il calore dei reattori vaporizza l'aria e forma una scia che individua la traiettoria del Jet
- BEBC: L'energia persa dalle particelle cariche nel passaggio attraverso il gas forma una traccia di bollicine che si può fotografare



Esempio di ricostruzione in camera a bolle



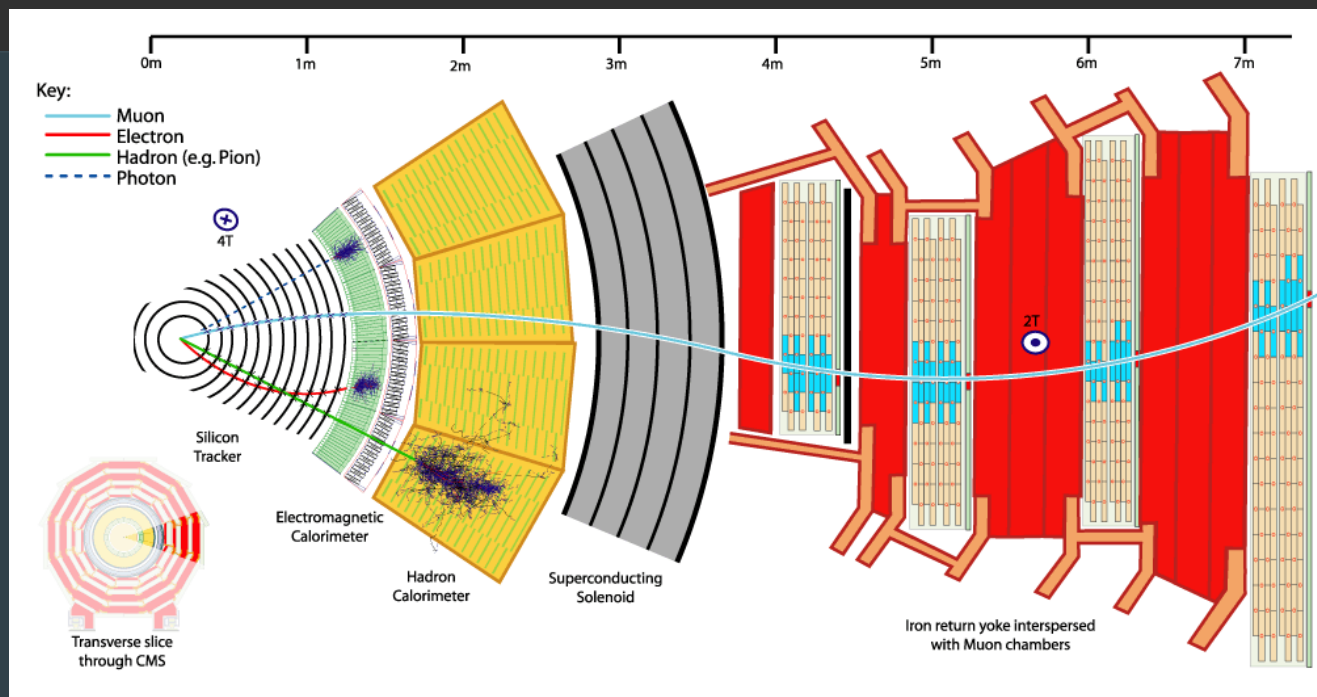
I rivelatori di questo tipo sono ottimi, ma lenti (>ms)

Non si possono raggiungere elevati ritmi di conteggio

Esempio di apparato per fasci collidenti formato da strati di rivelatori diversi ciascuno dedicato ad un particolare aspetto della misura

in sezione ...

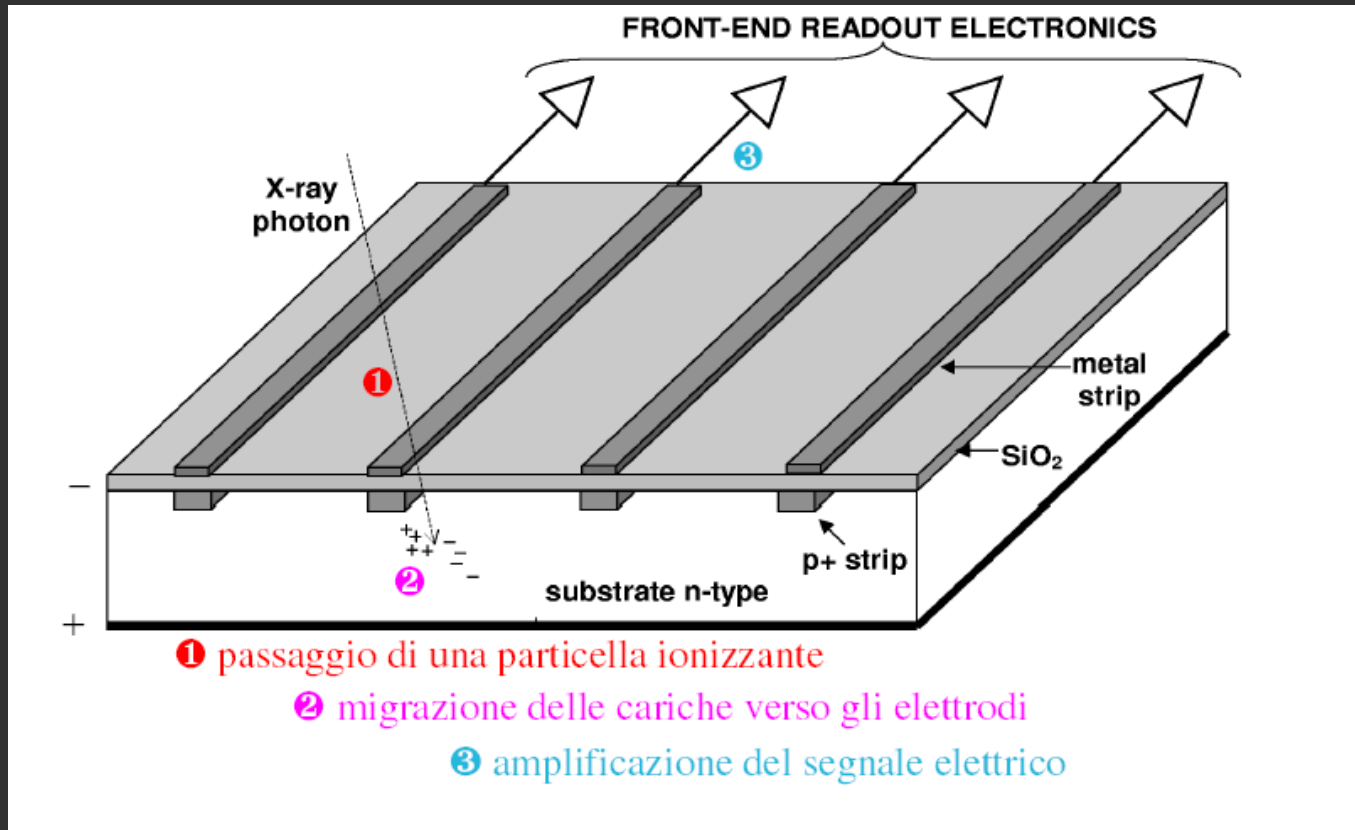
detector



Non si osserva direttamente lo scontro fra i due fasci ma si fotografano i prodotti della reazione e da questi si ricostruisce la dinamica dell'urto

Rivelatori al silicio (ionizzazione)

risoluzione spaziale micrometrica

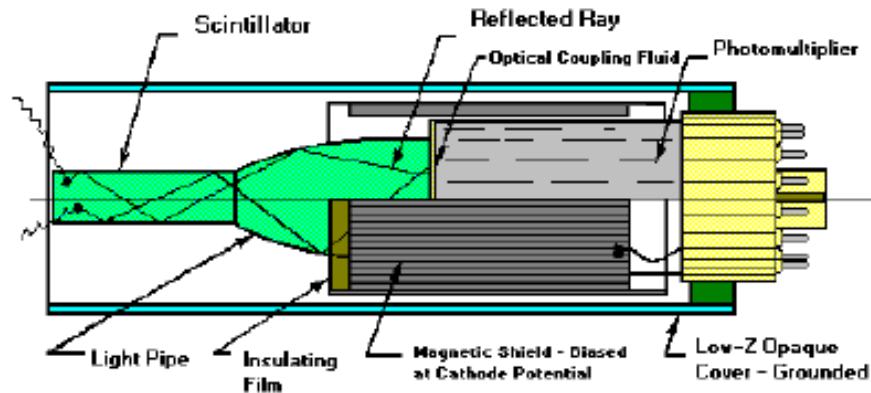


La carica elettrica liberata dal passaggio della particella permette di ricostruire con grande precisione “Dove” essa e’ passata

Scintillatori (luce di fluorescenza)

risoluzione temporale < nanosec

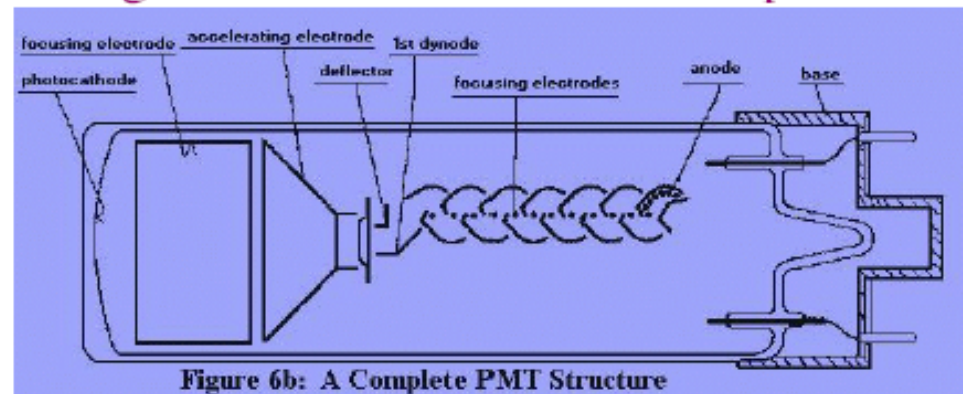
① produzione di luce nello scintillatore



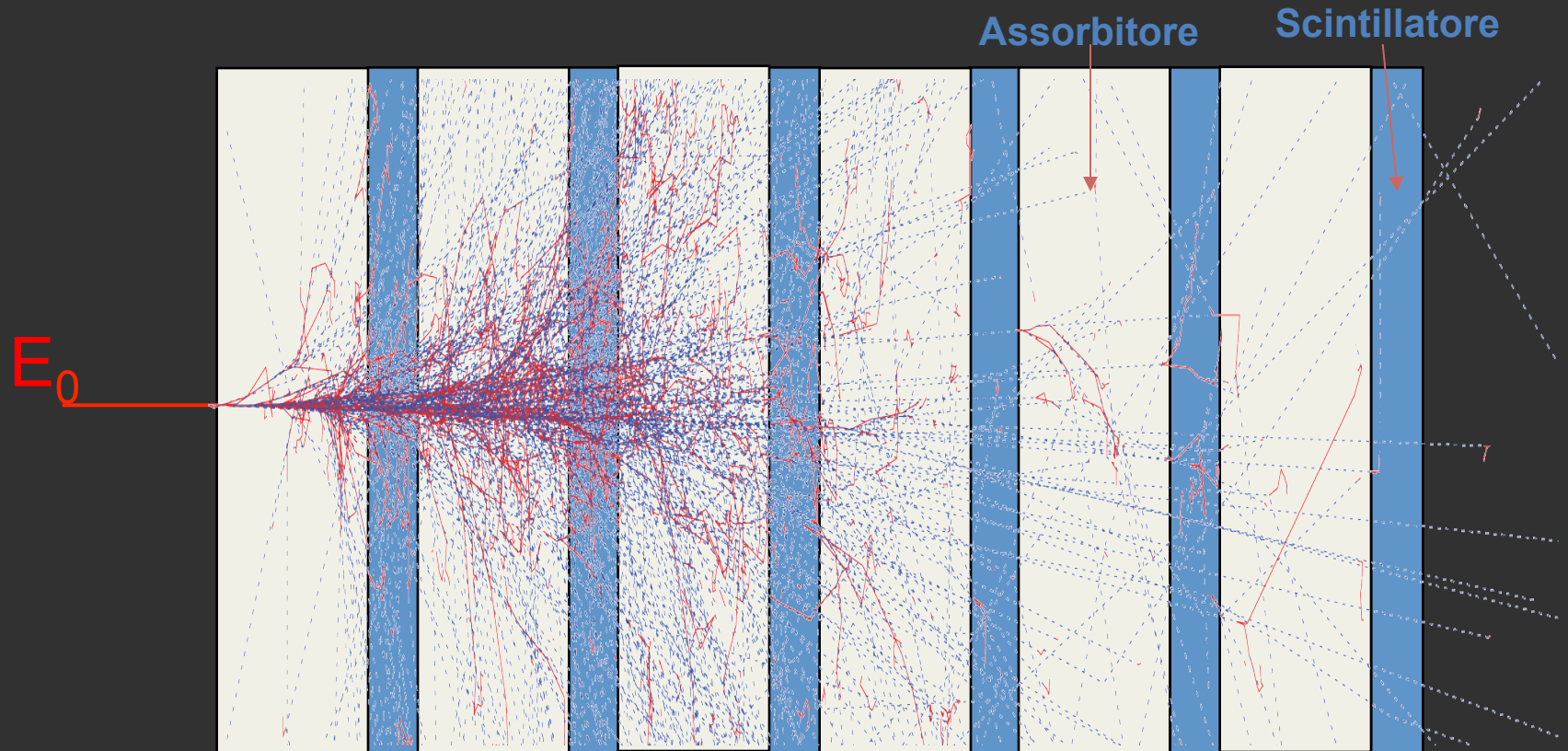
② trasporto nella guida di luce



③ effetto fotoelettrico e moltiplicazione degli elettroni nel tubo fotomoltiplicatore

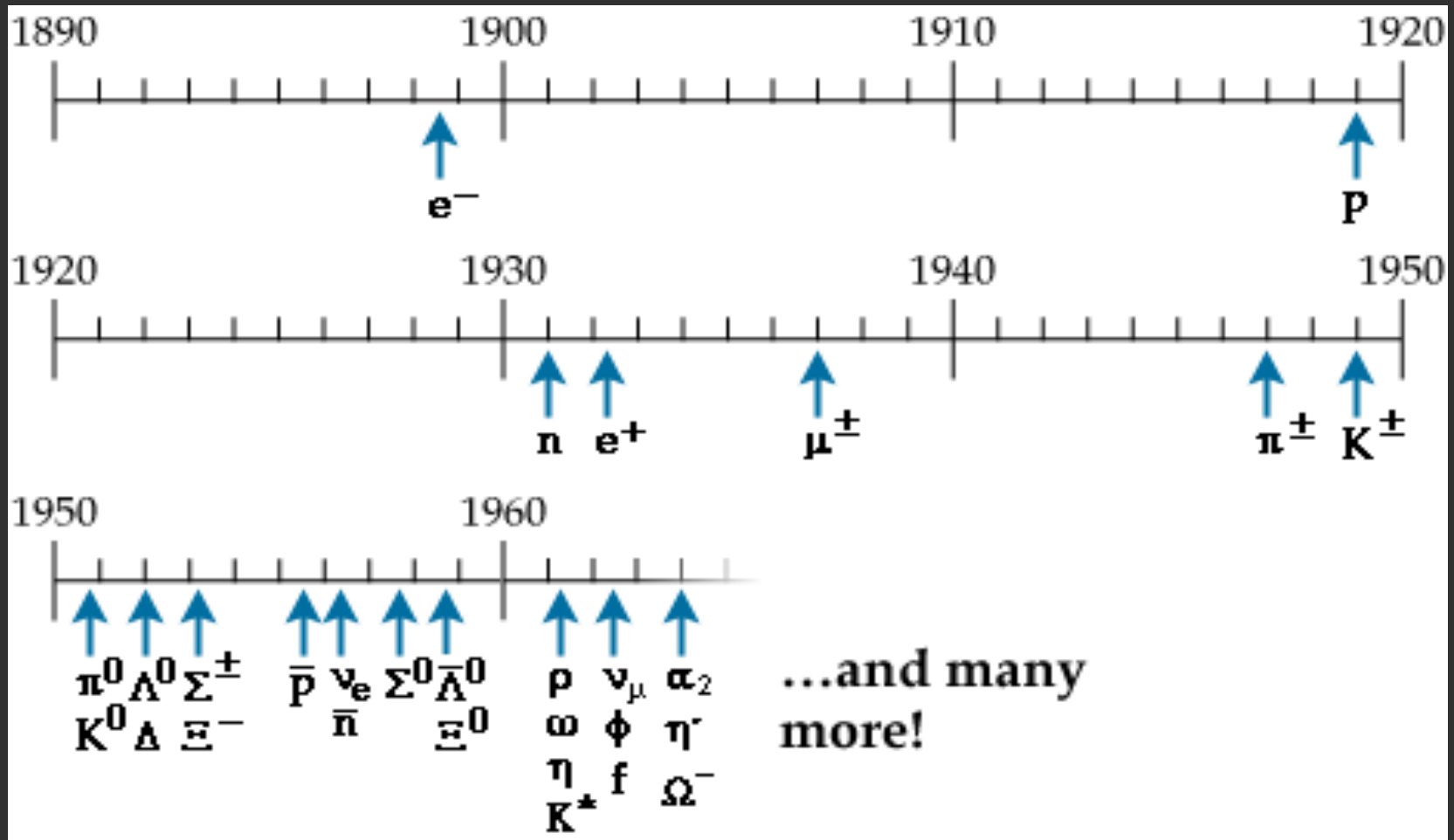


Calorimetri per la misura dell'energia

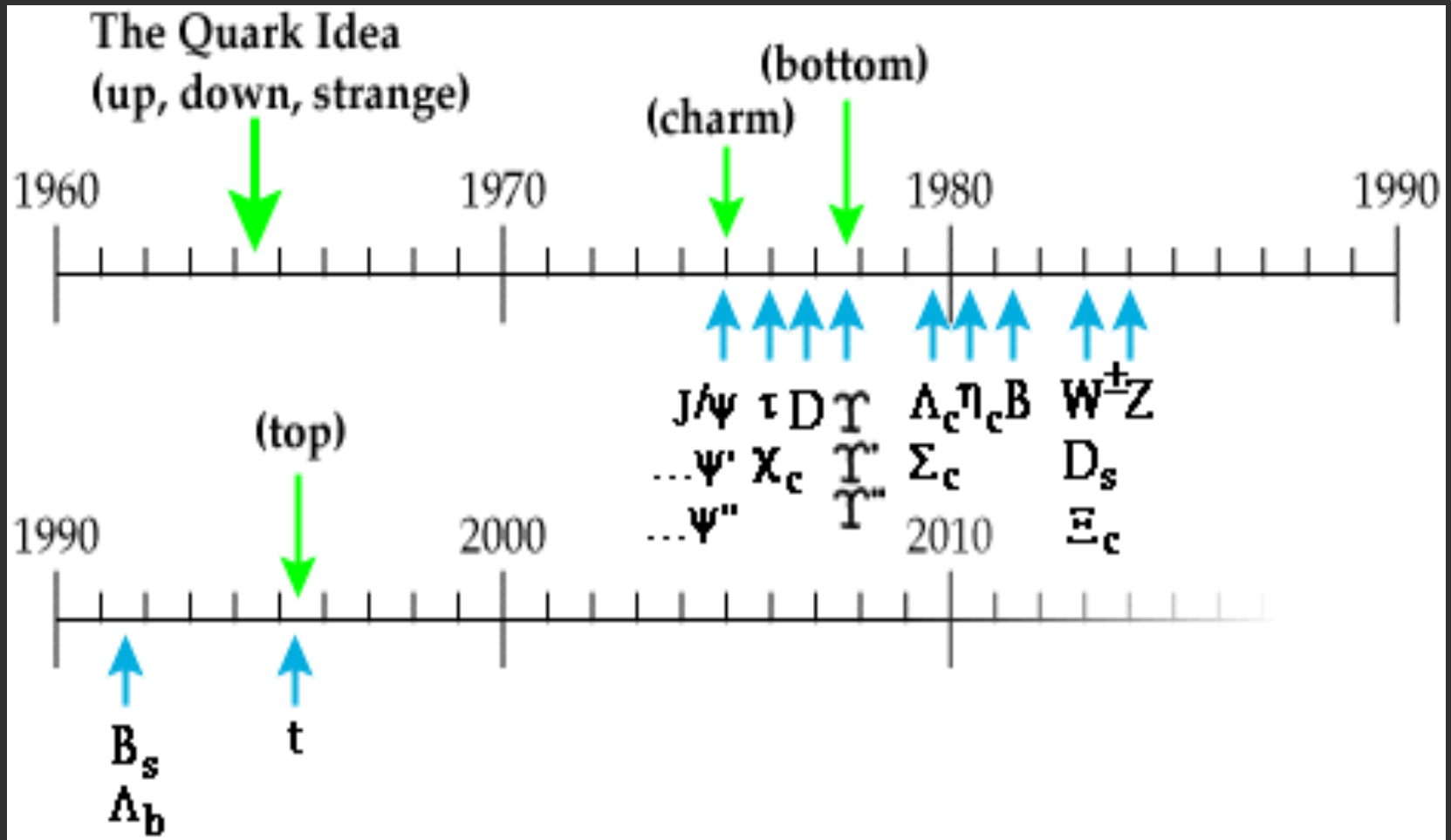


Fermano la particella primaria e dalla "frenata" (sciame) si deduce l'energia cinetica iniziale E_0

Con gli esperimenti di raggi cosmici e quelli agli acceleratori
 e' stata scoperta una grande varieta' di particelle



Continua ...



Riconducibili tutte pero' ad uno schema di particelle "di base", elementari (6 Quark , 6 Leptoni)

Quark



UP

Charge = +2/3*
Mass = 0.0033*



DOWN

Charge = -1/3
Mass = 0.0033*



CHARM

Charge = +2/3
Mass = 1.27*



STRANGE

Charge = -1/3
Mass = 0.09*



TOP

Charge = +2/3
Mass = 173.1*



BOTTOM

Charge = -1/3
Mass = 4.18*

Leptoni



ELECTRON

Charge = -1
Mass = 0.000511*



ELECTRON NEUTRINO

Charge = 0
Mass = 0.000000001*

Electrone ν_e



MUON

Charge = -1
Mass = 0.10566*



MUON NEUTRINO

Charge = 0
Mass = 0.000000001*

Muone ν_μ



TAU

Charge = -1
Mass = 1.77686*



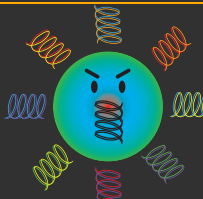
TAU NEUTRINO

Charge = 0
Mass = 0.000000001*

Tau ν_τ

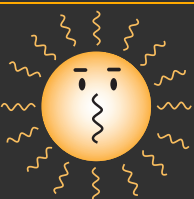
Modello Standard

I Quark pero' non li osserviamo liberi ma confinati dall'interazione Forte all'interno degli Adroni Come ad esempio protone, neutrone, etc



Forte

Mass = 0



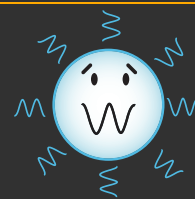
Elettromagnetica

Mass = 0



Debole

Mass = 91.9



Higgs boson

Mass = 80.4

Marco Costa

MasterClass 2013

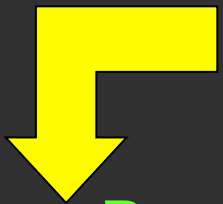
3 tipi di interazioni (forze) la gravitazionale e' ininfluyente a livello delle particelle

* Charge unit = Elementary charge e

** Mass units are Giga-electron Volts or GeV; 1 GeV = mass of proton

Il Modello Standard e' una teoria "efficace"...

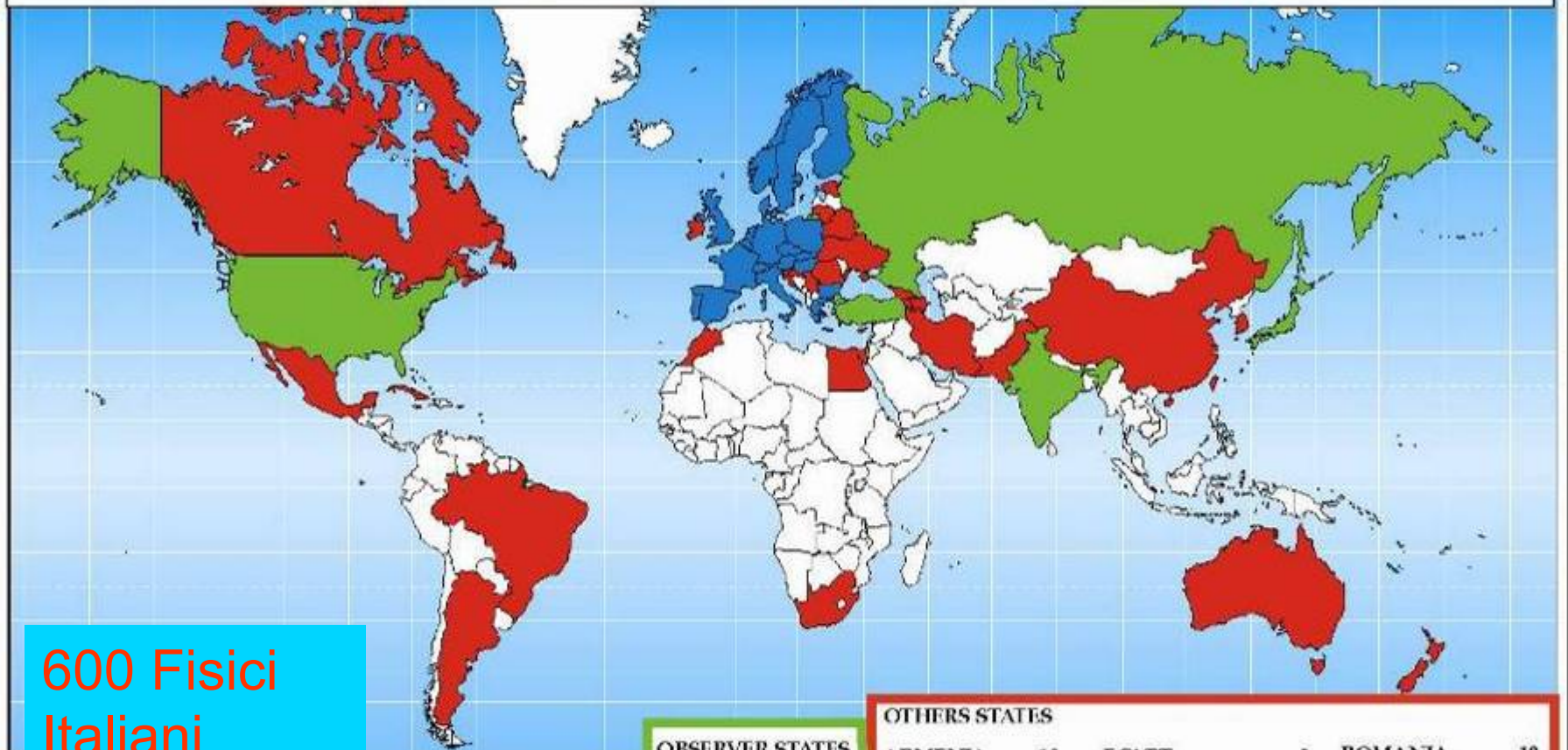
- Finora abbiamo parlato di quello che sappiamo, ma esistono cose che non capiamo ed esistono cose che pensiamo di capire ma di cui manca una verifica sperimentale
- La risposta puo' essere compatibile con il Modello Standard o aprire le porte per Nuove Teorie Fisiche



Per questo e' stato costruito l'acceleratore LHC presso il laboratorio del CERN di Ginevra

Una collaborazione mondiale

Distribution of All CERN Users by Institute on 8 September 2004



600 Fisici
Italiani

OBSERVER STATES

INDIA	62
ISRAEL	33
JAPAN	94
RUSSIA	774
TURKEY	24
USA	631

1621

OTHERS STATES

ARMENIA	10	EGYPT	3	ROMANIA	19
ARGENTINA	1	GEORGIA	6	SLOVENIA	6
AUSTRALIA	10	CROATIA	15	TAIWAN	20
AZERBAIJAN	2	IRELAND	6	UKRAINE	11
BRAZIL	29	IRAN	4	YUGOSLAVIA	11
BEIARUS	14	KOREA	19	SOUTH AFRICA	2
CANADA	69	LITHUANIA	1		
CHINA	55	MOROCCO	8		
CUBA	3	MEXICO	15		
CYPRUS	5	NEW ZEALAND	2		
ESTONIA	6	PAKISTAN	11		

363

MEMBER STATES

AUSTRIA	GERMANY	
BELGIUM	GREECE	
BULGARIA	HUNGARY	
CZECH REPUBLIC	ITALY	
DENMARK	NETHERLANDS	
FINLAND	NORWAY	
FRANCE	POLAND	
	PORTUGAL	
	SLOVAKIA	
	SPAIN	
	SWEDEN	
	SWITZERLAND	
	UNITED KINGDOM	

4419

30 anni di preparativi...

- ◆ **1982:** Iniziano gli studi preliminari
- ◆ **1994:** il CERN Council approva il progetto LHC
- ◆ **1996:** Decisione finale di cominciare la costruzione di LHC
- ◆ **2004:** Inizio dell'installazione dell'acceleratore
- ◆ **2006:** Inizia il commissioning dell'hardware
- ◆ **2008:** Primi fasci
- ◆ **2009:** Primi dati di fisica

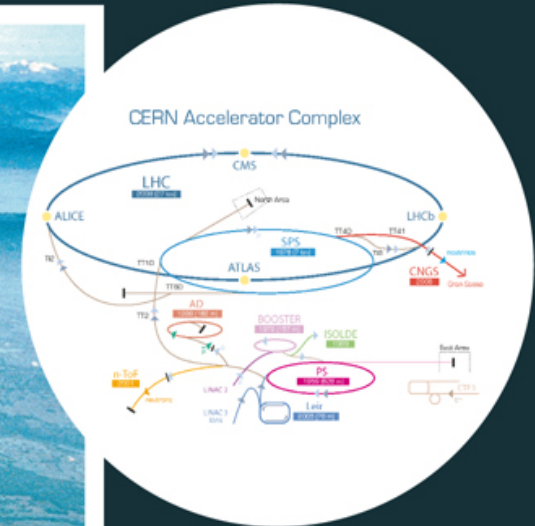
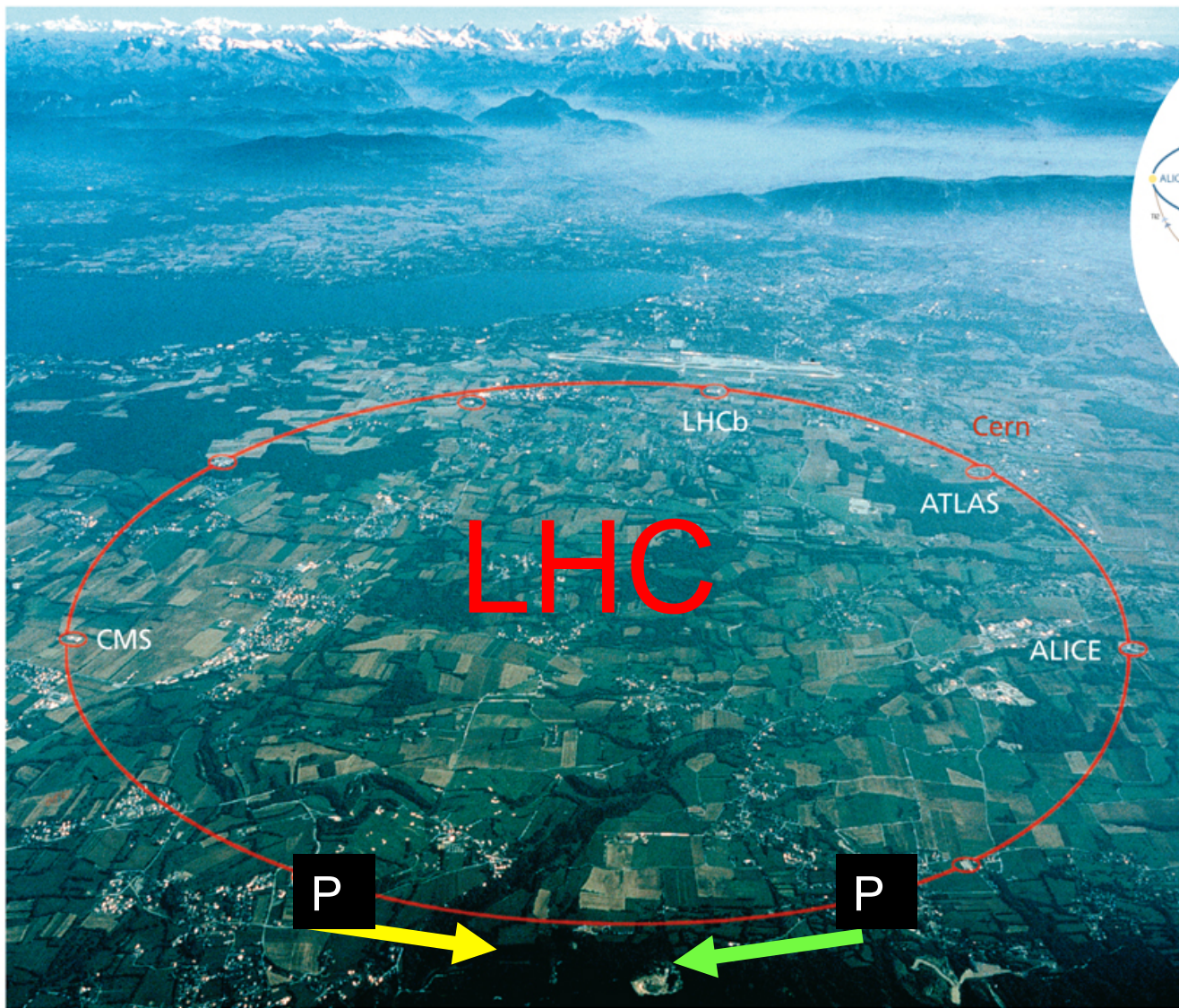


- Perché ci vogliono apparati così complessi, collaborazioni così grandi, così tanto tempo?
- In cosa consistono e come funzionano gli apparati sperimentali?
- Come si svolge l'attività di ricerca sperimentale in questo campo?

The Large Hadron Collider



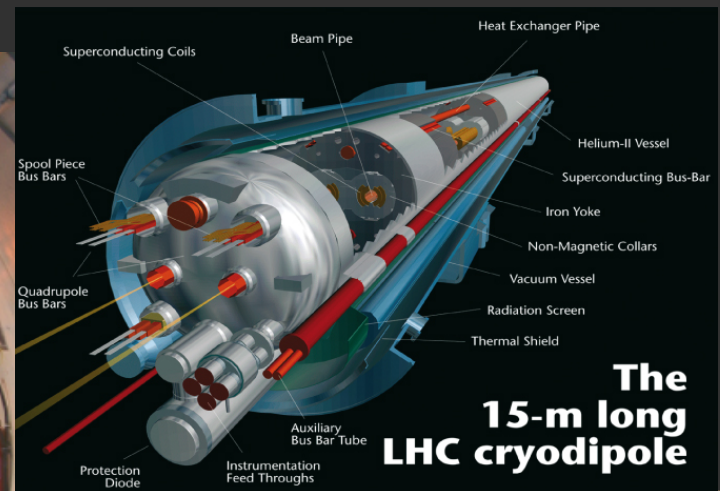
European Organization for Nuclear Research



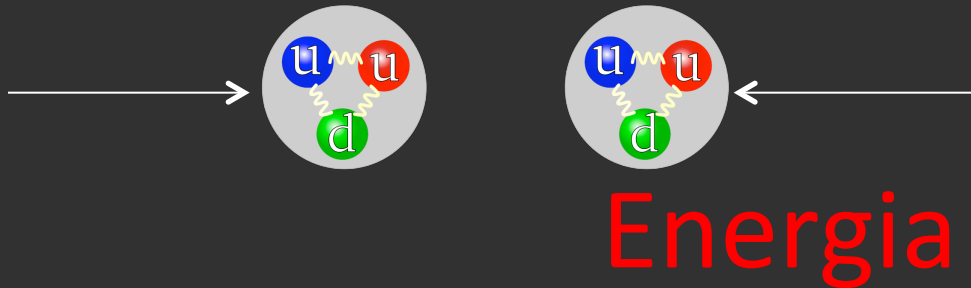
Acceleratore circolare di 27 km a cavallo della frontiera fra Svizzera e Francia
In un tunnel a 150 m sotto-terra

Si scontrano fasci di protoni o di ioni piombo

Scendiamo sottoterra...

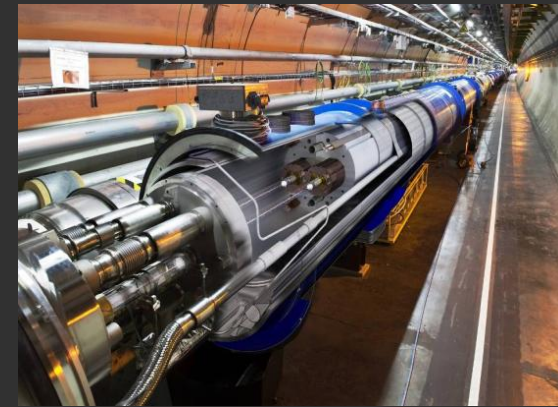


~1700 magneti superconduttori che operano con correnti fino a 10000 Ampere e ad una temperatura $T = -271.3 \text{ C}$. E' il luogo piu' freddo dell'universo!

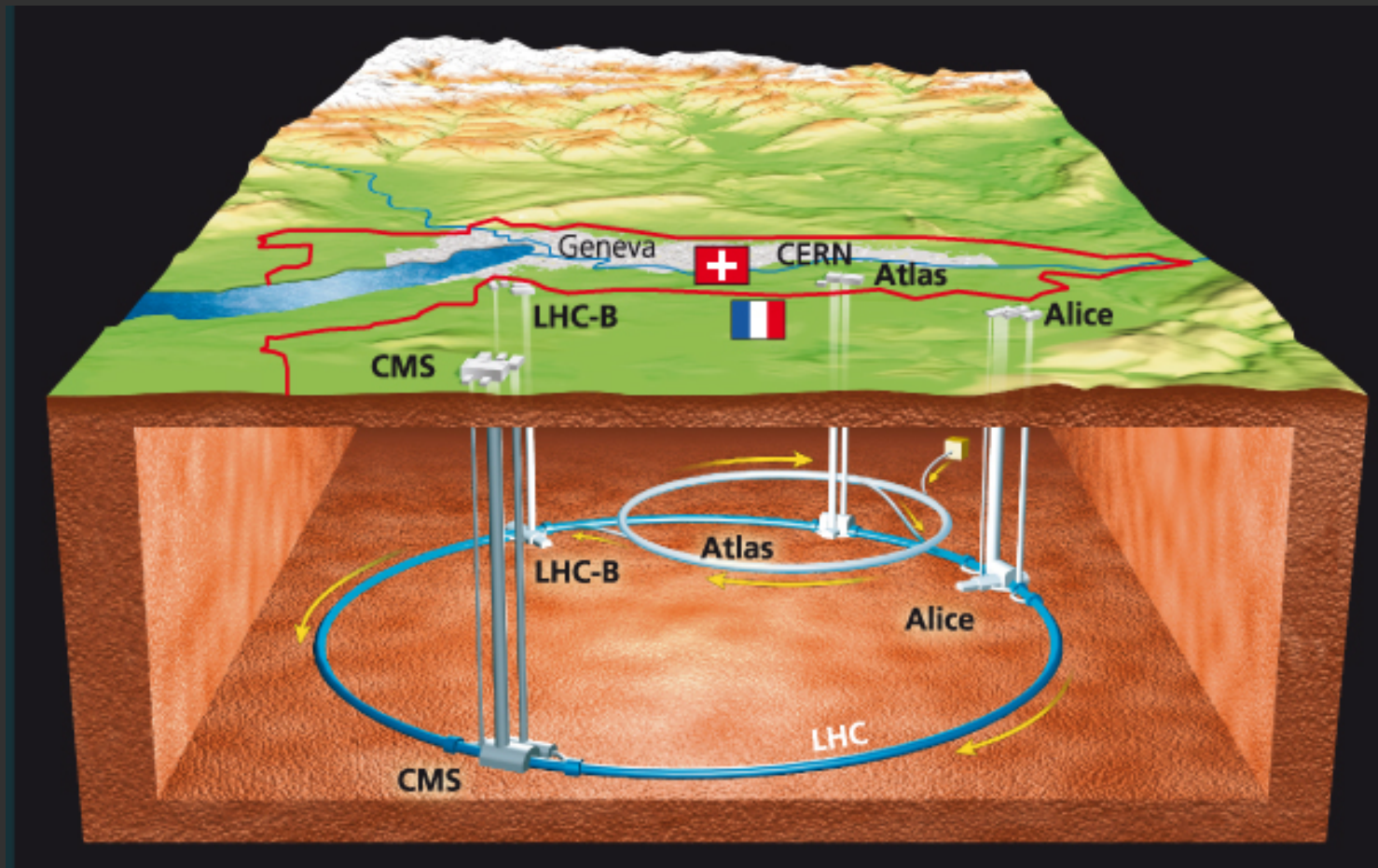


- Collisione di protoni: interazione fra partoni (q, g)
 - I partoni che interagiscono portano solo una frazione x dell'energia totale del protone:
 - Abbiamo bisogno di collisioni di protoni a **~ 10 TeV** per raggiungere **1 TeV**
 - Vantaggio: scan di un amplissimo range di energia

- LHC: Collisore di protoni da 14 TeV (7 per fascio)
 - $p = 0.3 \cdot B \cdot R \Rightarrow$ il limite è il **campo magnetico necessario** curvare p^+ su traiettoria circolare di 27 km
 - 1232 dipoli superconduttori (-271°), **8.3 T**
 - ~ 9300 magneti in tutto
 - Energia immagazzinata: **~ 10 GJ**

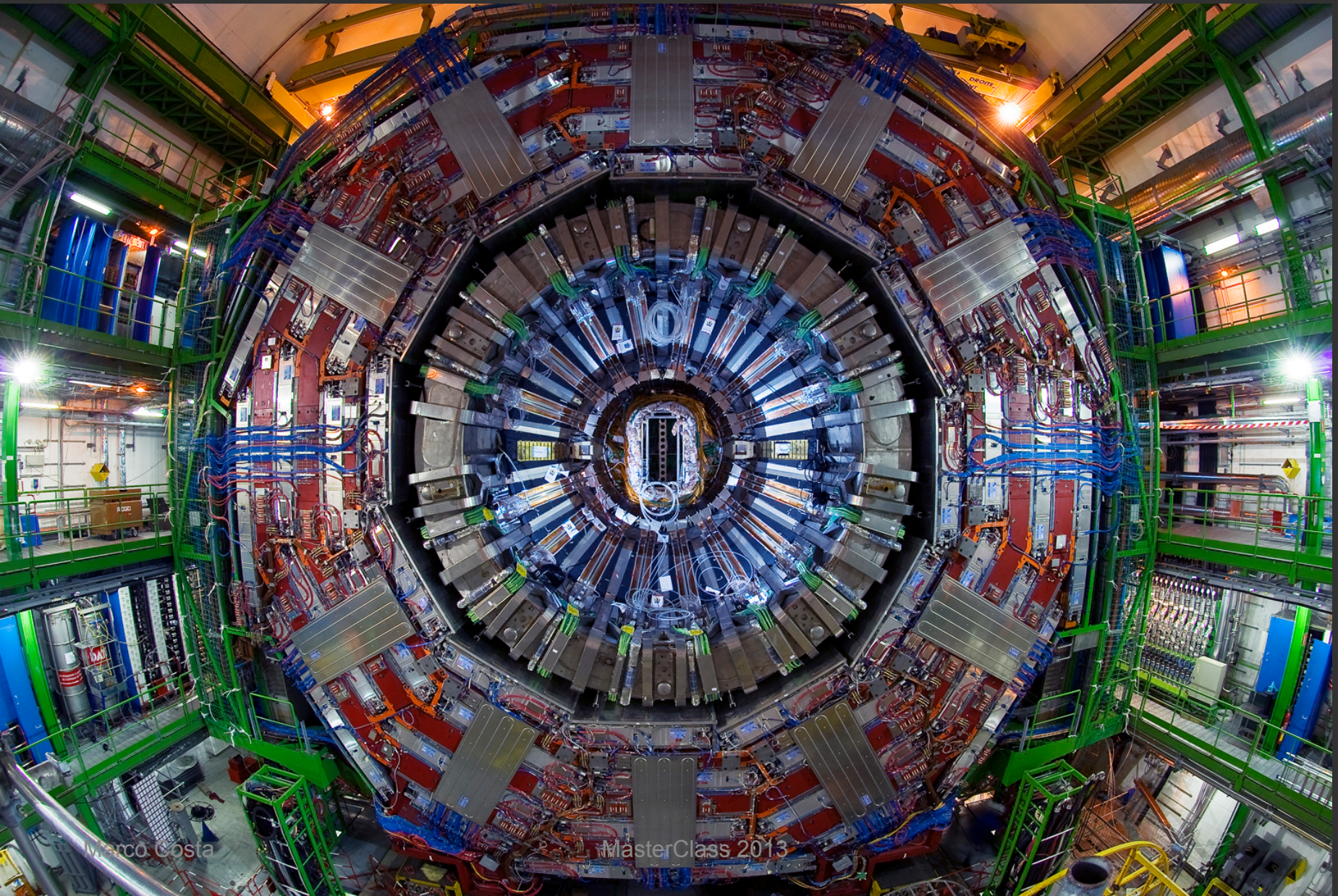


4 grandi apparati sperimentali ricostruiscono
ogni dettaglio di questi micro Big Bang
Torino e' in ALICE e CMS





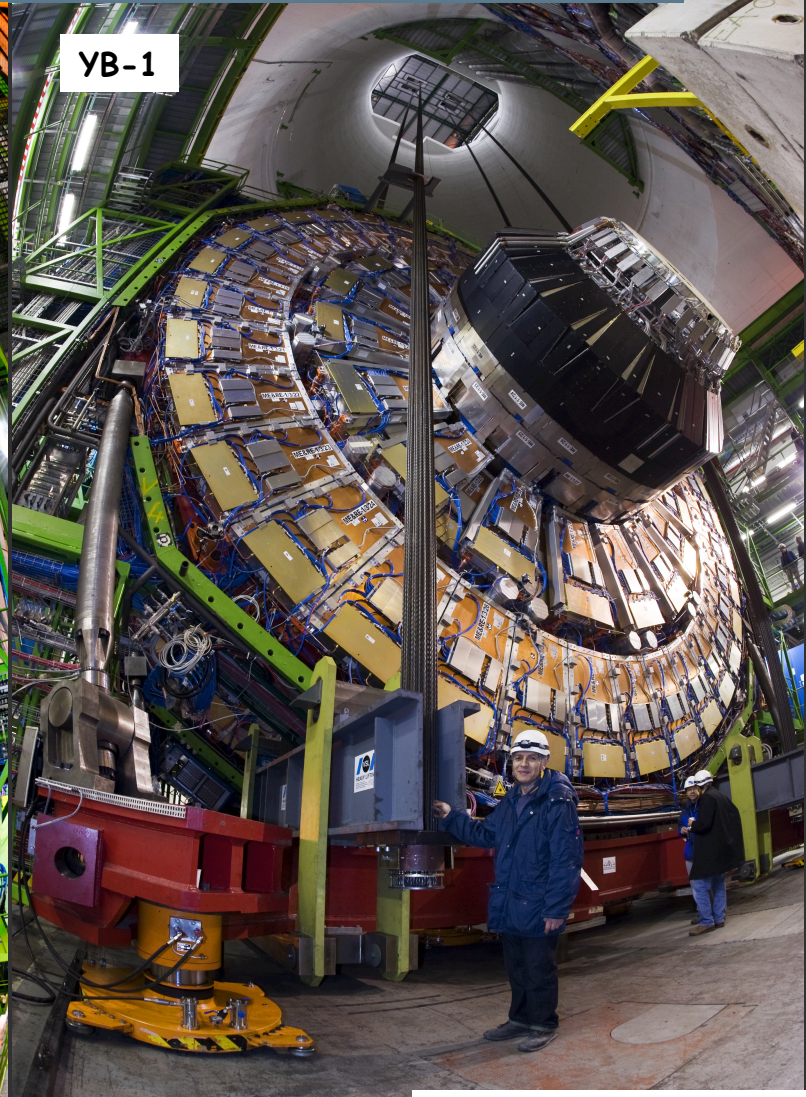
CMS (Compact Muon Solenoid)





YB+1

9-Jan-2007

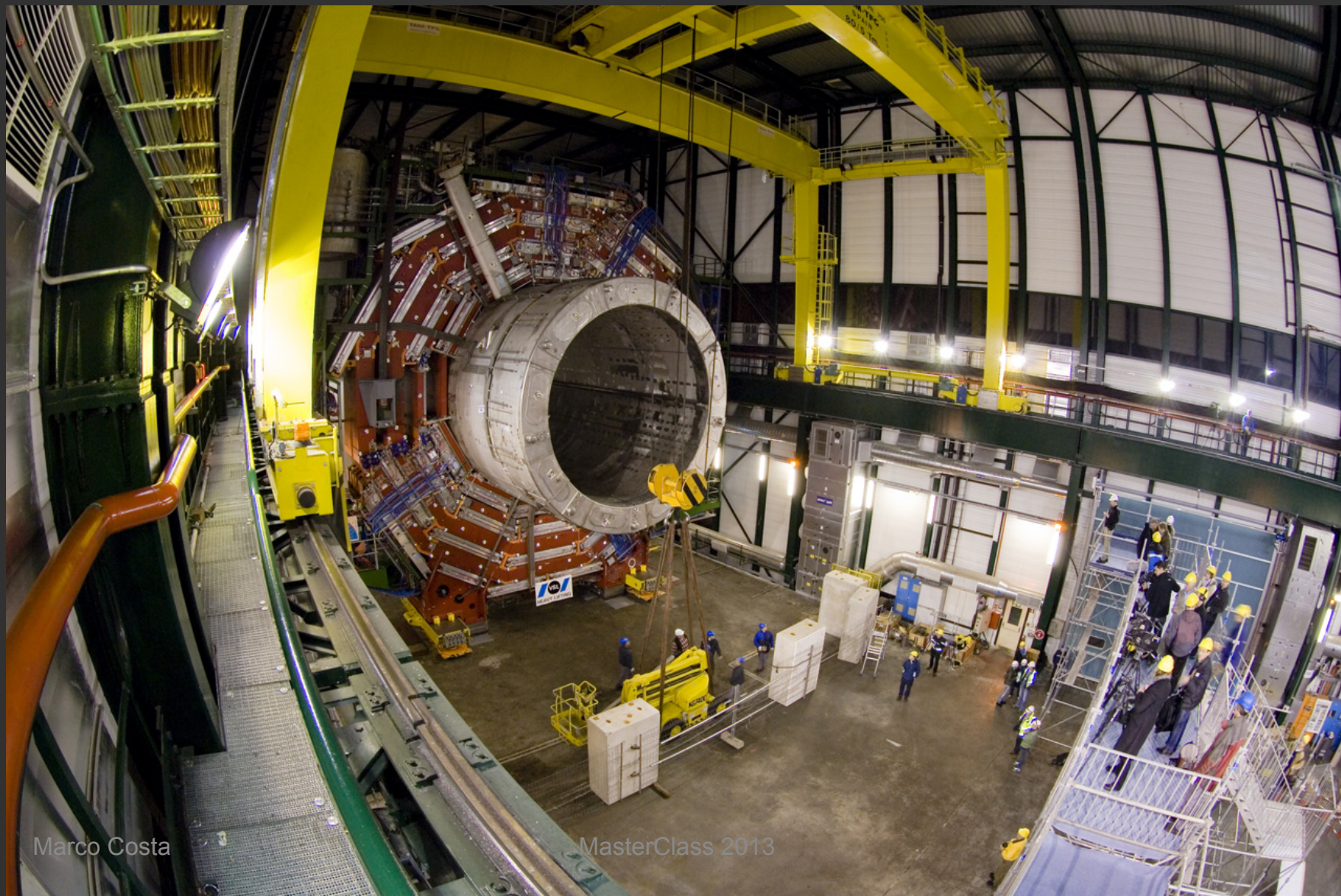


YB-1

17-Jan-2008

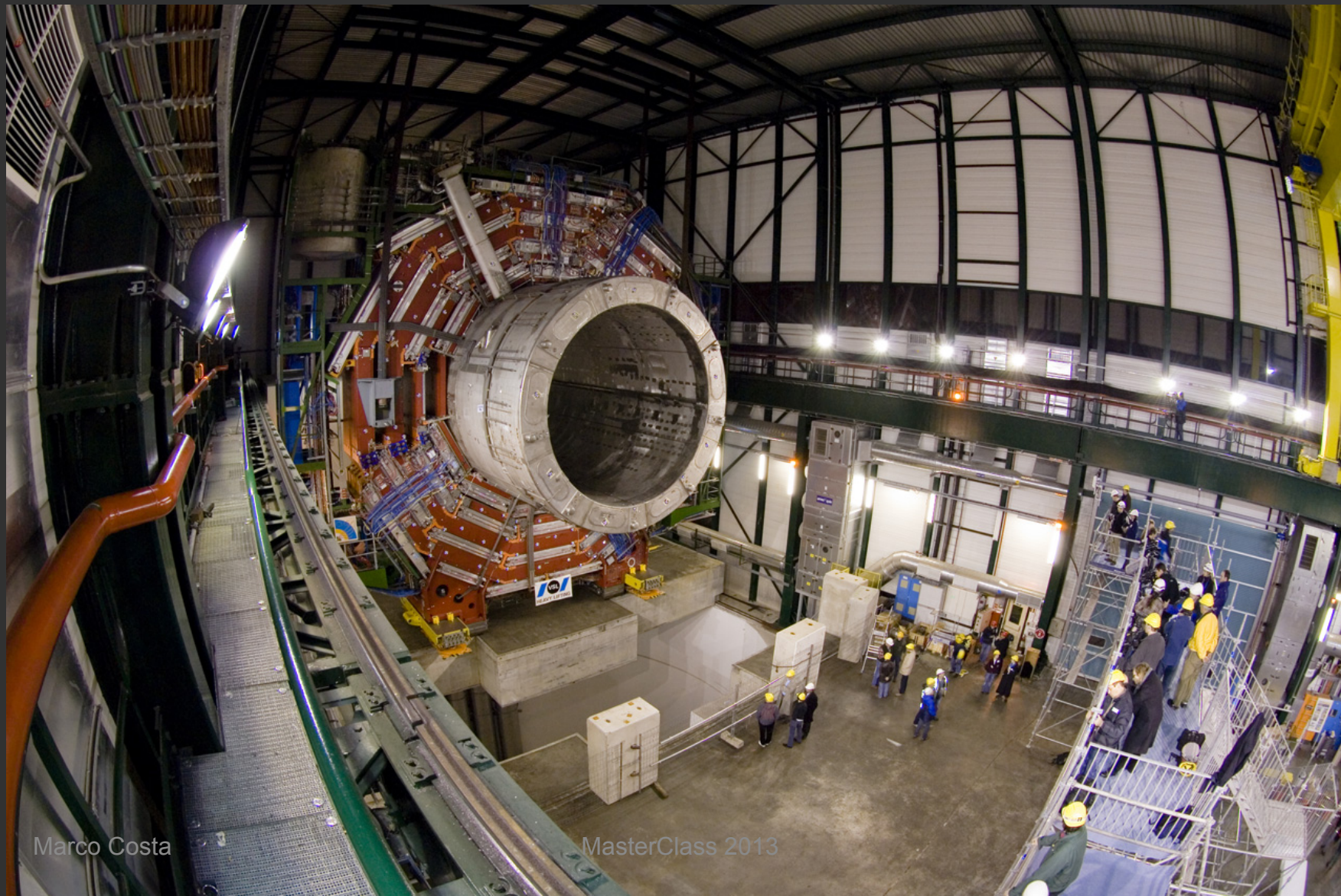


Installazione in caverna



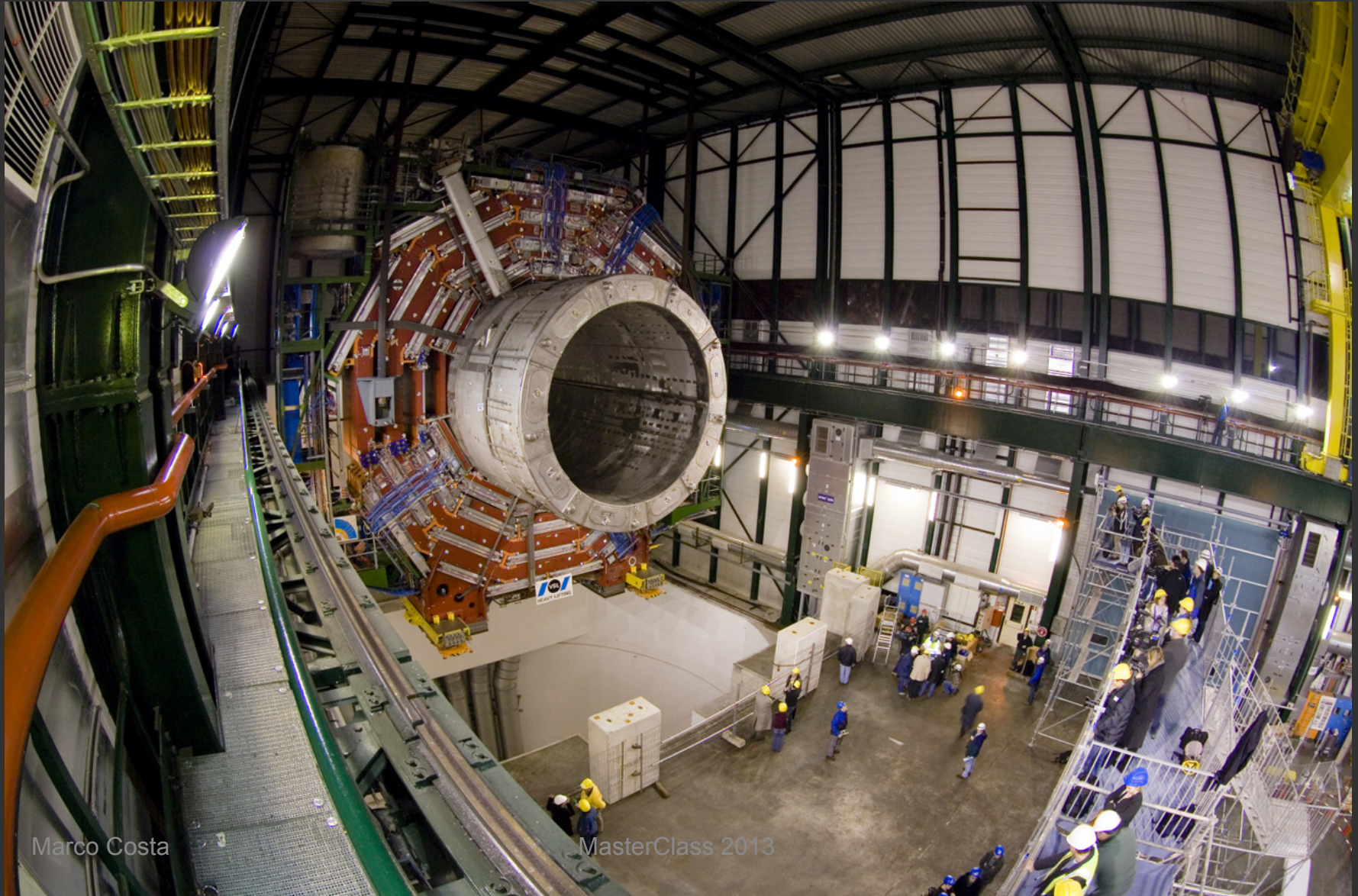


Installazione in caverna



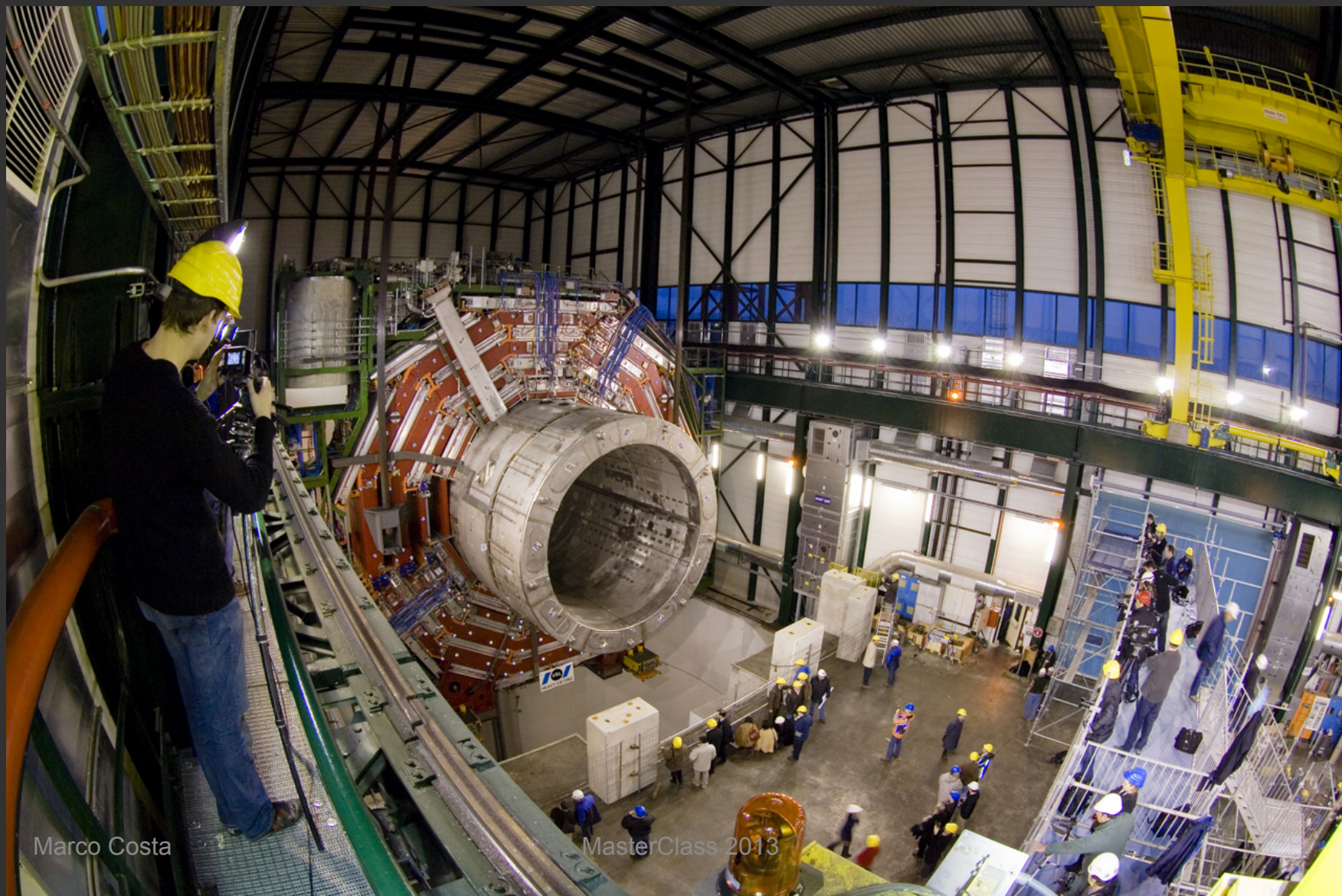


Installazione in caverna





Installazione in caverna



Marco Costa

MasterClass 2013



Installazione in caverna





Installazione in caverna





Installazione in caverna





Installazione in caverna



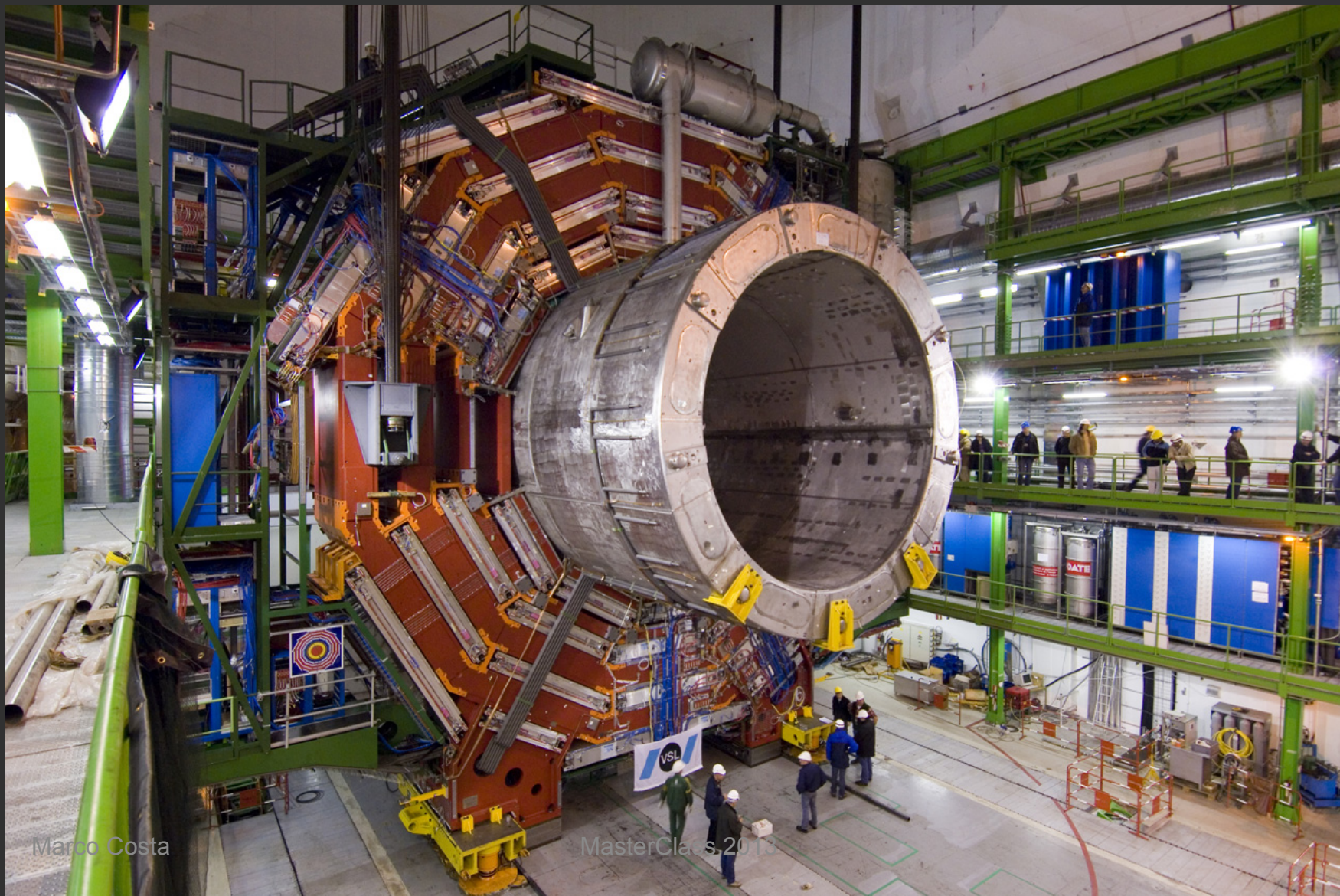


Installazione in caverna





Installazione in caverna

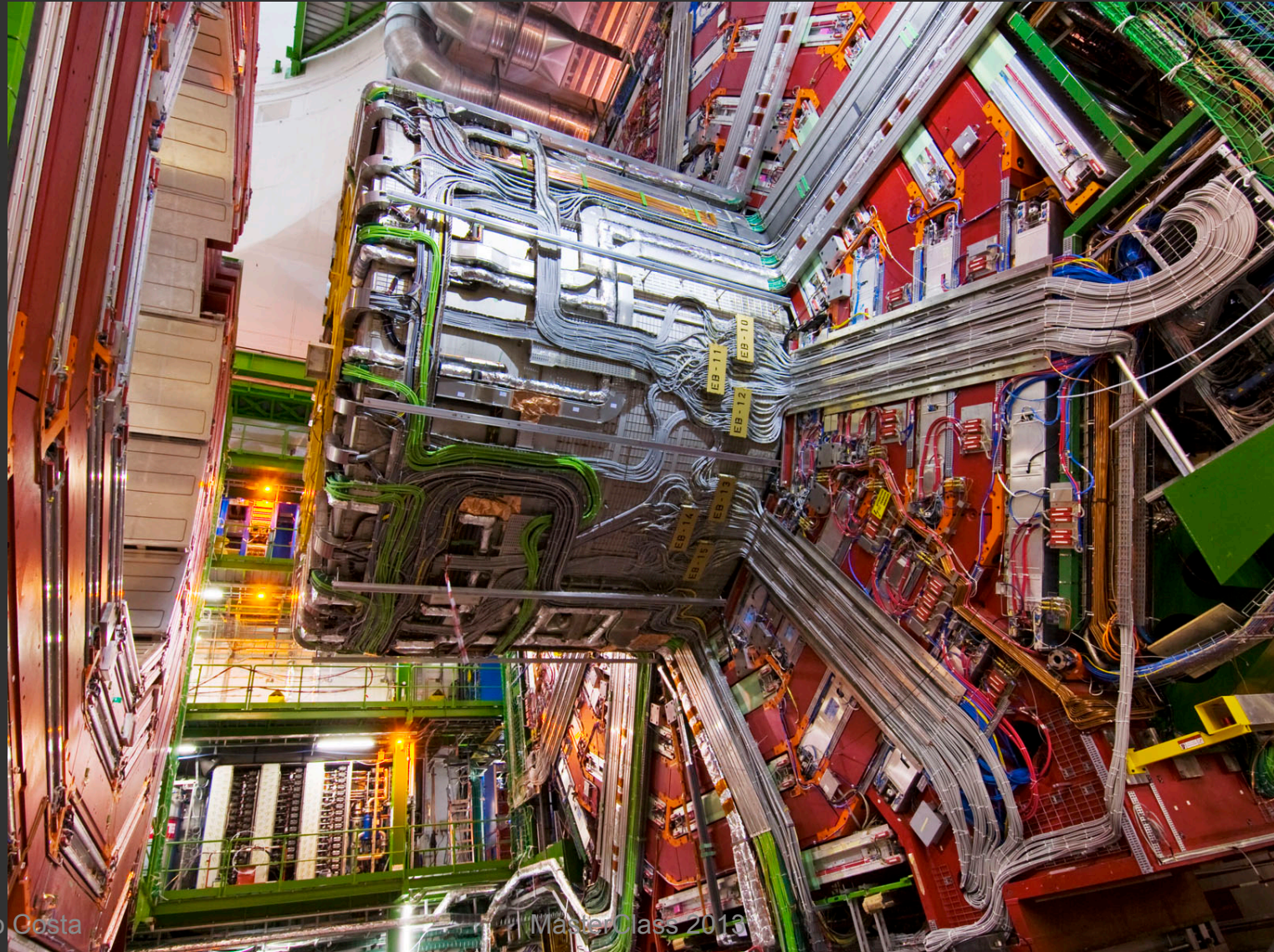


Marco Costa

MasterClass, 2015



Cablaggio e completamento dei servizi



Costruzione di CMS: il contributo di TO

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER

Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER

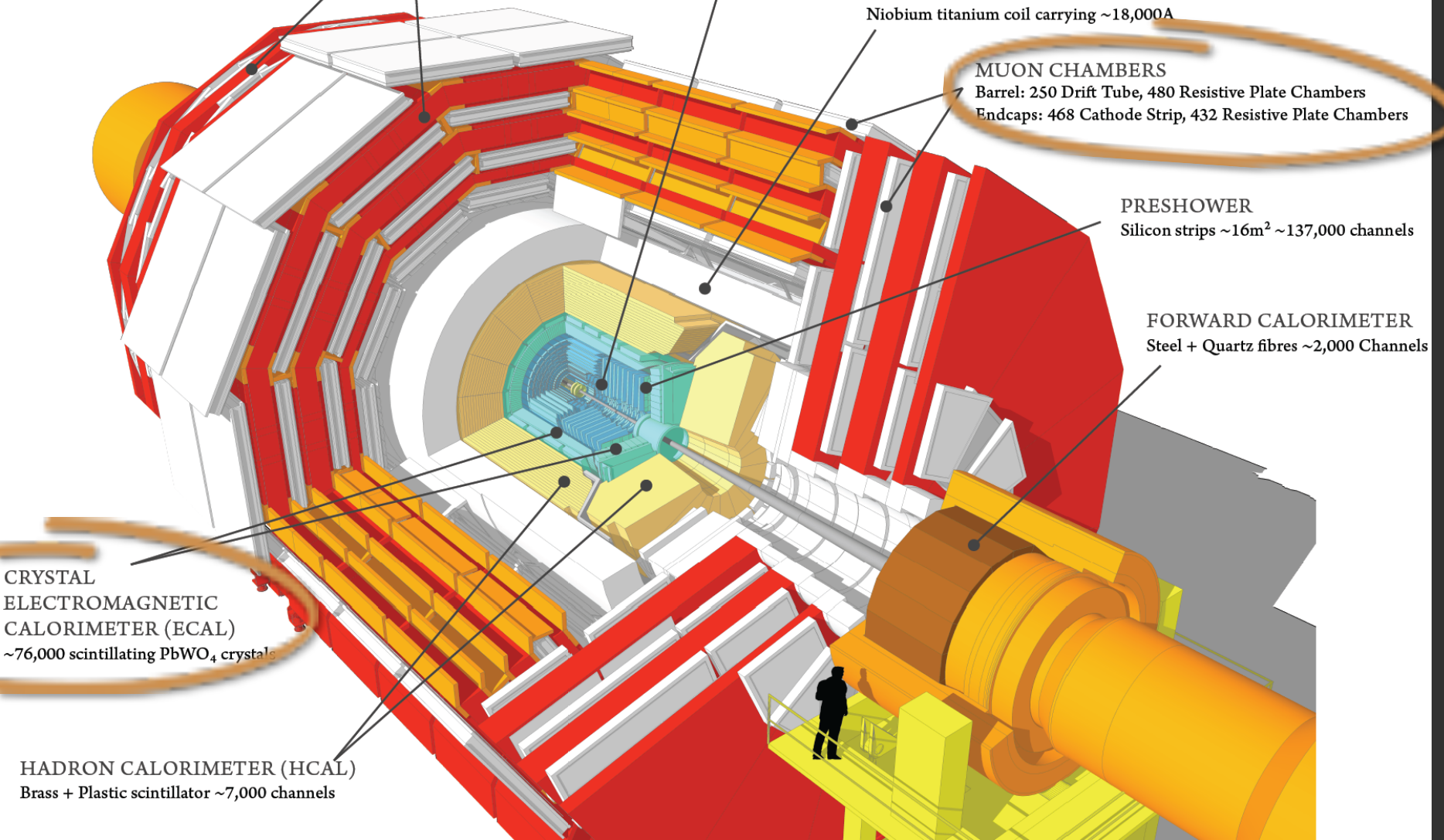
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)

$\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

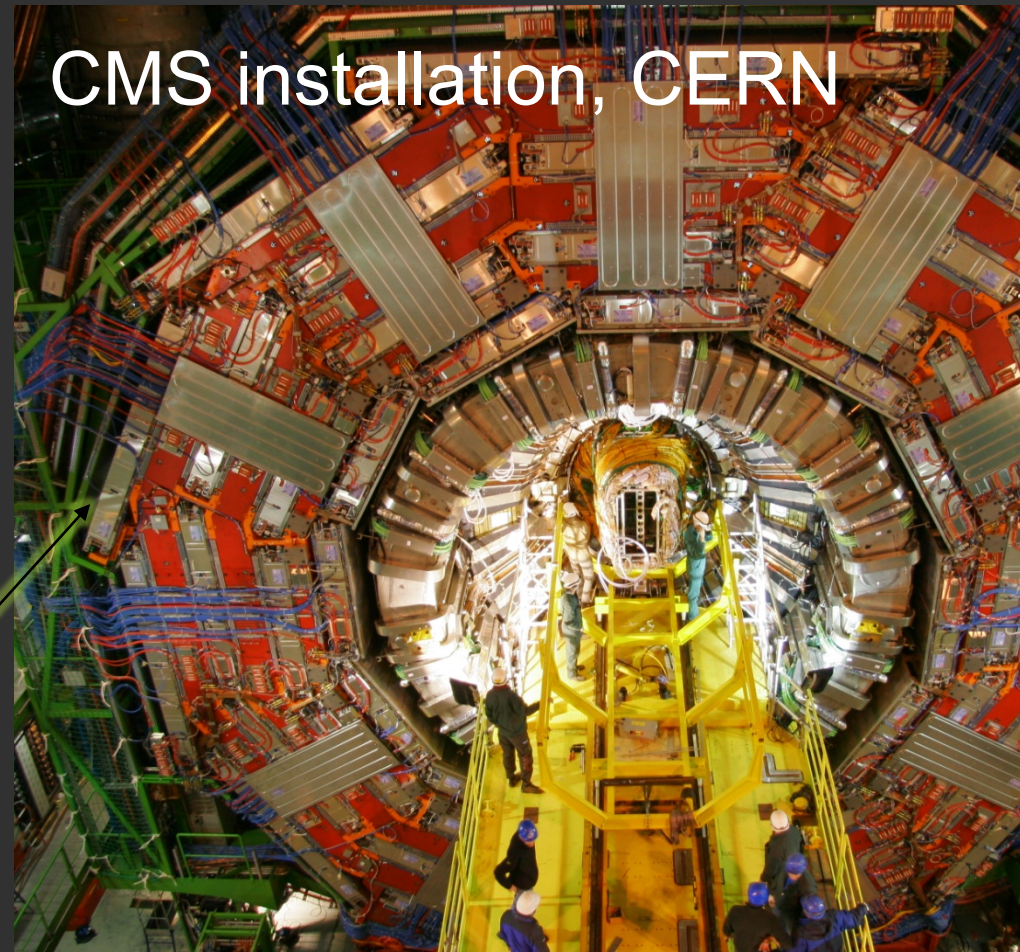
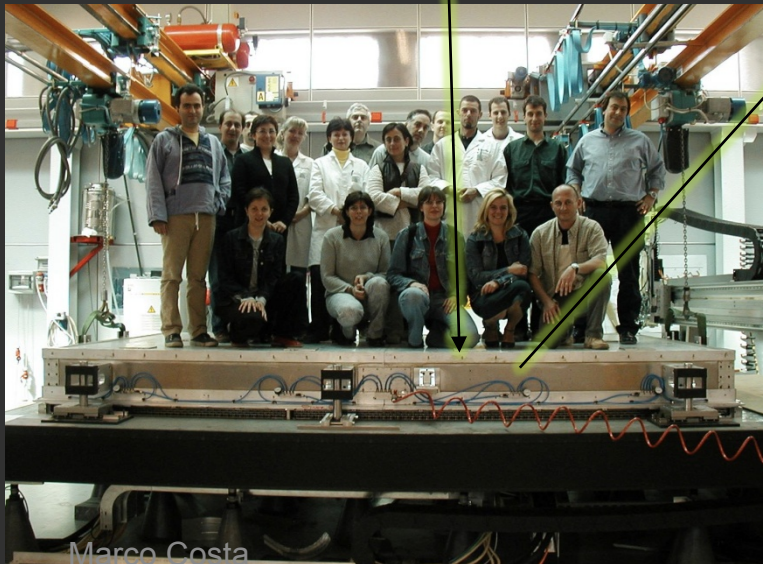
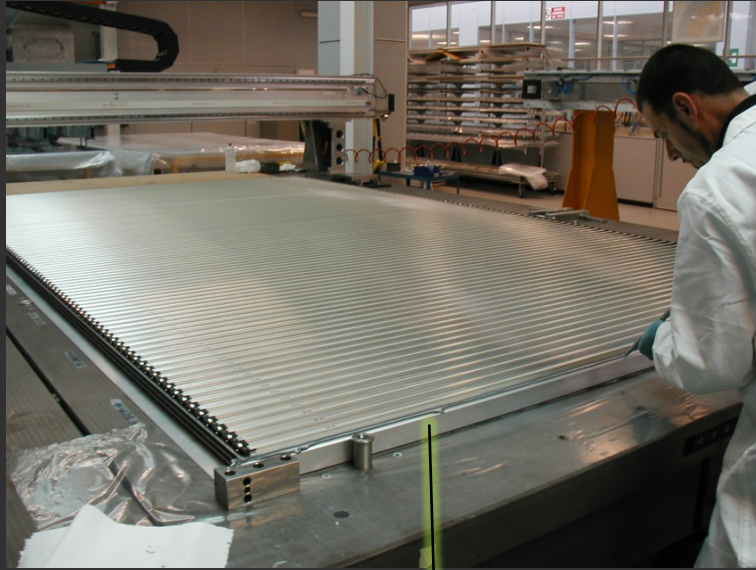
HADRON CALORIMETER (HCAL)

Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



Costruzione di CMS: il contributo di TO

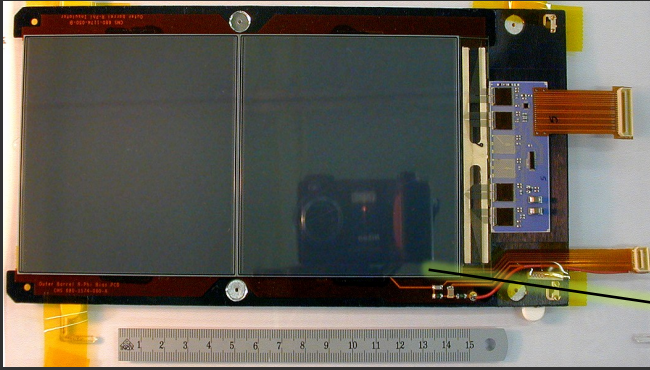
Laboratori INFN TO



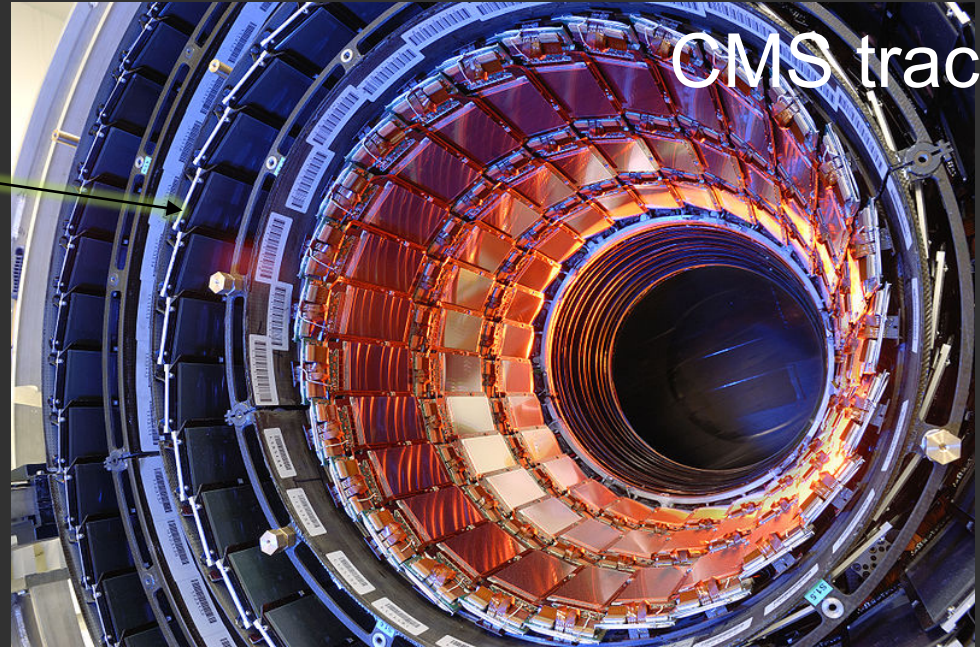
CMS installation, CERN

- Costruzione camere a drift per l'identificazione dei muoni presso i laboratori INFN

Costruzione di CMS: il contributo di TO



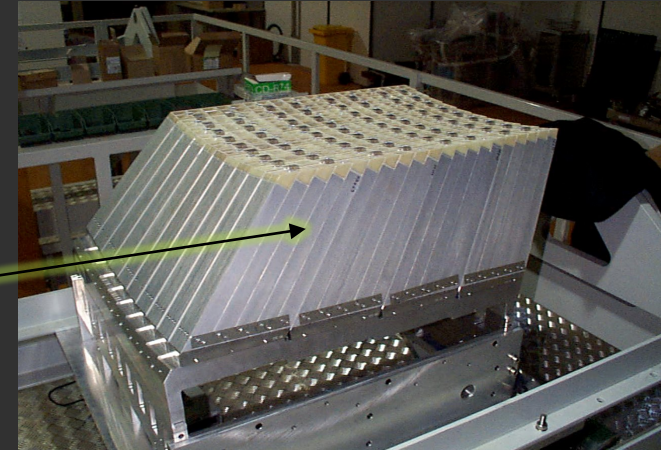
Produzione di 500 dei 4000 moduli che compongono la parte interna del Tracker



Laboratori INFN TO



Test e installazione di parte dell'elettronica di read-out del calorimetro elettromagnetico



Le questioni aperte a cui gli
esperimenti a LHC cercano di dare
una risposta...

Un viaggio all'indietro nel tempo...

2.7 Kelvin
13.7Mldy

1MldKelvin
3 min

1MIMldKelvin
10⁻¹² sec

0



Oggi

LHC

LHC's area of study

LHC produce 600 Millions di collisioni al sec

1-L'origine della massa: Il bosone di Higgs

- La massa e' una proprieta' intrinseca dei sistemi viventi dalla piccola particella alla grande galassia
- 3 modi per inquadrare il concetto di massa:
 1. Newton $M = F / a$
 2. Sorgente del campo gravitazionale
 3. La Massa e' Energia $E = Mc^2$

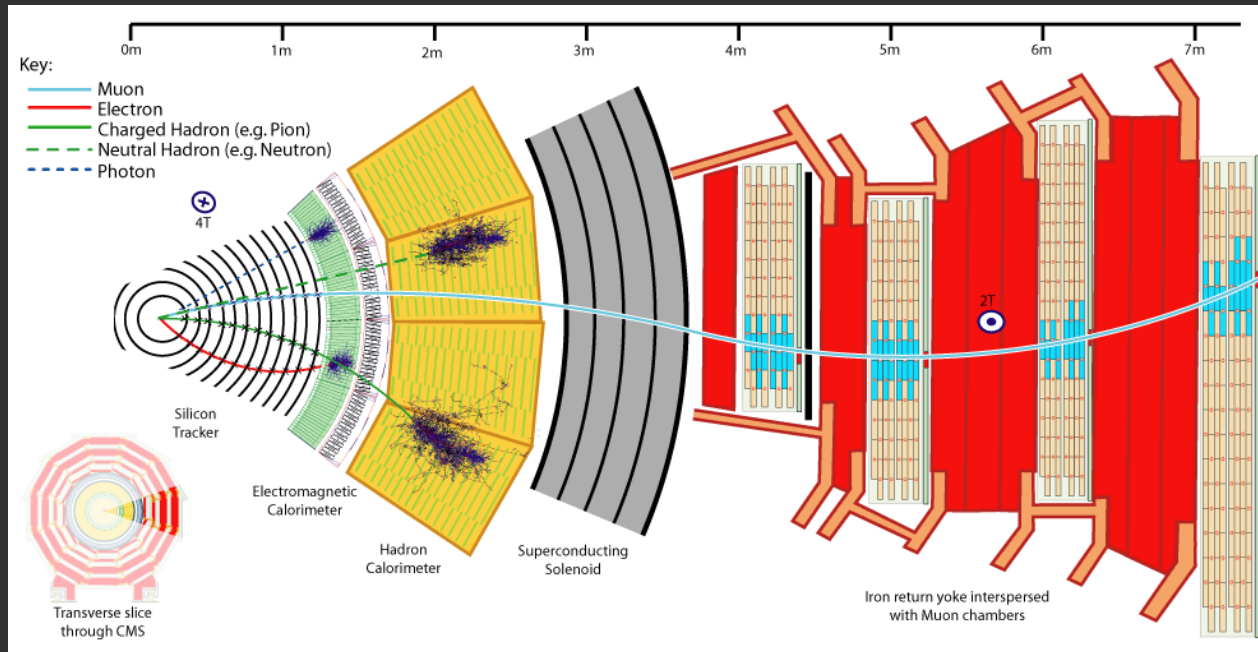
Il bosone di Higgs/2

- Abbiamo scoperto tante particelle alcune leggere altre pesanti, alcune “puntiformi” altre composite. I rapporti fra le loro masse sono molto diversificati: ad esempio un elettrone è 1836,149 volte più leggero di un protone il quale a sua volta è 336.595 volte più leggero di un quark top; un muone è 193.74 volte più pesante di un elettrone e 8.9 volte più leggero di un neutrone.
- Se l'elettrone avesse una massa più piccola gli atomi sarebbero più piccoli e così il mondo attorno a noi.
Capire cosa sta dietro al problema della gerarchia fra le masse ha a che fare con le dimensioni del mondo che ci circonda
- Perché è così? Quale meccanismo determina la massa di una particella? Perché i valori sono così disparati?

Il bosone di Higgs/3

- Peter Higgs (1964): l'universo e' permeato da un campo simile per qualche verso al campo elettromagnetico. Le particelle interagendo con questo campo acquisiscono massa in maniera proporzionale all'intensita' dell'interazione.
- Se esiste il campo esiste allora almeno una particella ad essa associata (come il fotone per il campo elettromagnetico) che prende il nome di bosone di Higgs
- Scoprire l'esistenza di questa particella e' essenziale per dimostrare la teoria del Prof. Higgs

Il bosone di Higgs si forma e decade molto rapidamente nel punto stesso dell'interazione, producendo particelle che poi vengono fotografate dall'apparato sperimentale



La legge di conservazione di energia e impulso permette di ricostruire la **Massa** del bosone di higgs misurando le **Energie** e gli **Impulsi** delle particelle prodotte nel suo decadimento

$$Mc^2 = \sqrt{(E^2 - (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2)c^2)}$$

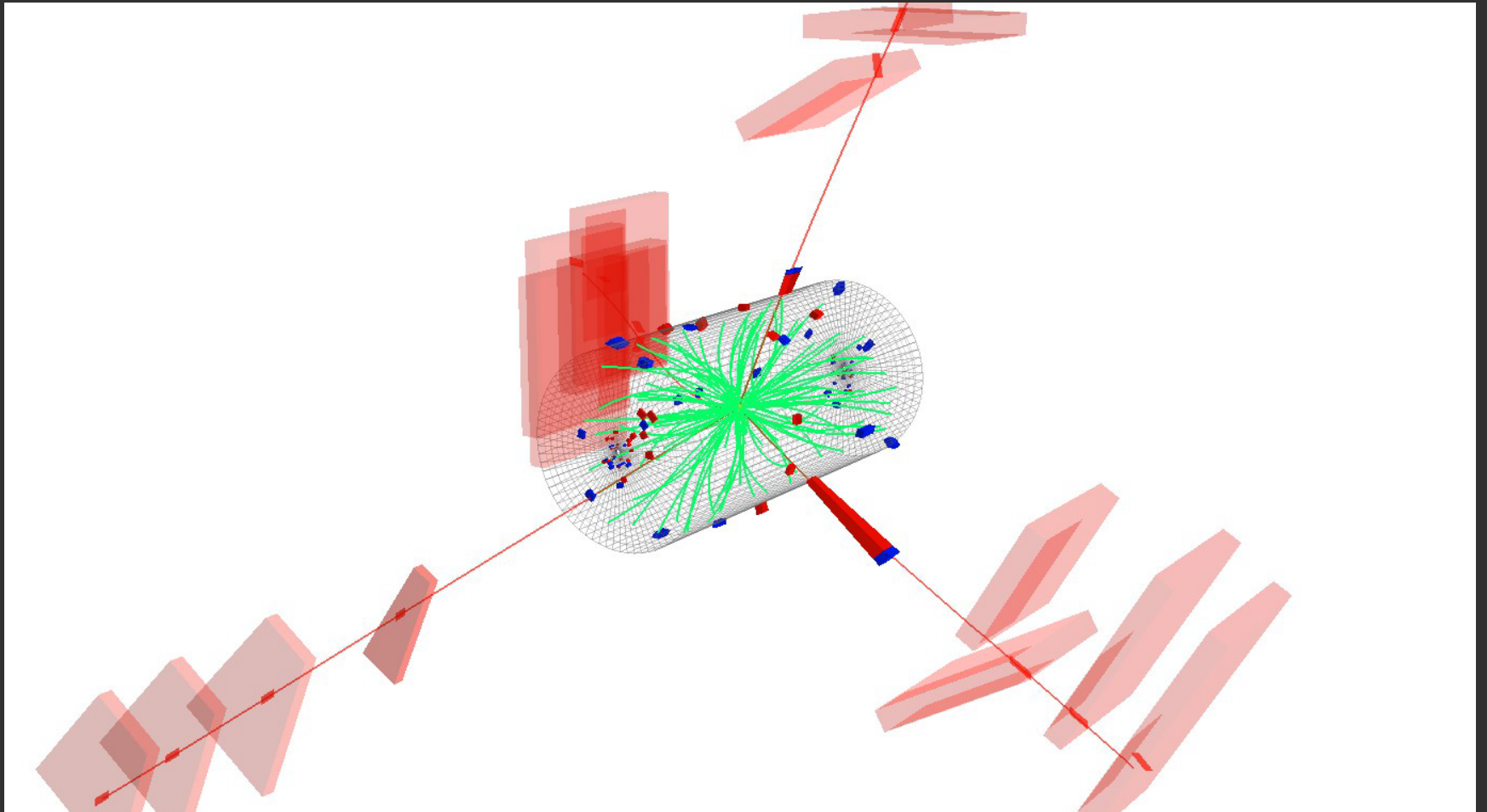
$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

$$p_x = p_{x1} + p_{x2} + p_{x3} + \dots$$

$$p_y = p_{y1} + p_{y2} + p_{y3} + \dots$$

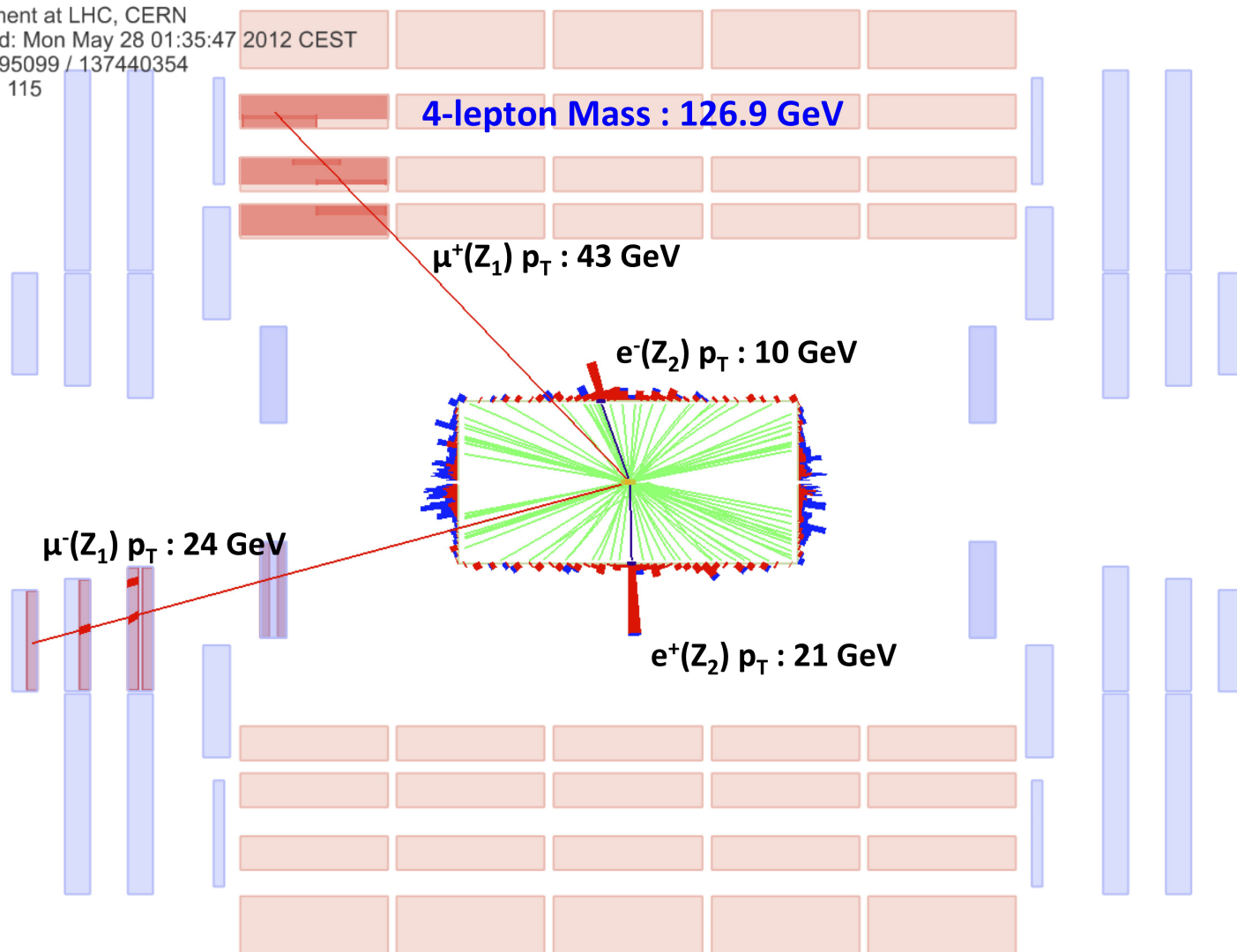
$$p_z = p_{z1} + p_{z2} + p_{z3} + \dots$$

Un canale relativamente pulito: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ muoni}$



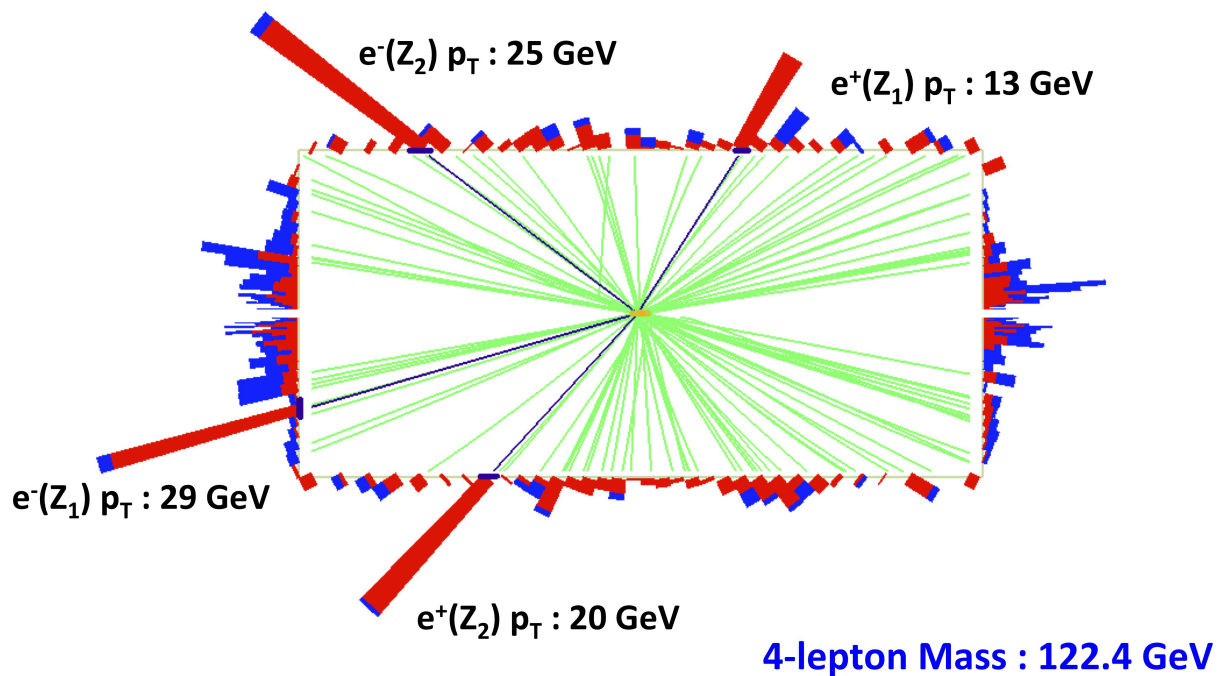
Oppure: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 2 \text{ muoni e } 2 \text{ elettroni}$

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:35:47
Run/Event: 195099 / 137440354
Lumi section: 115

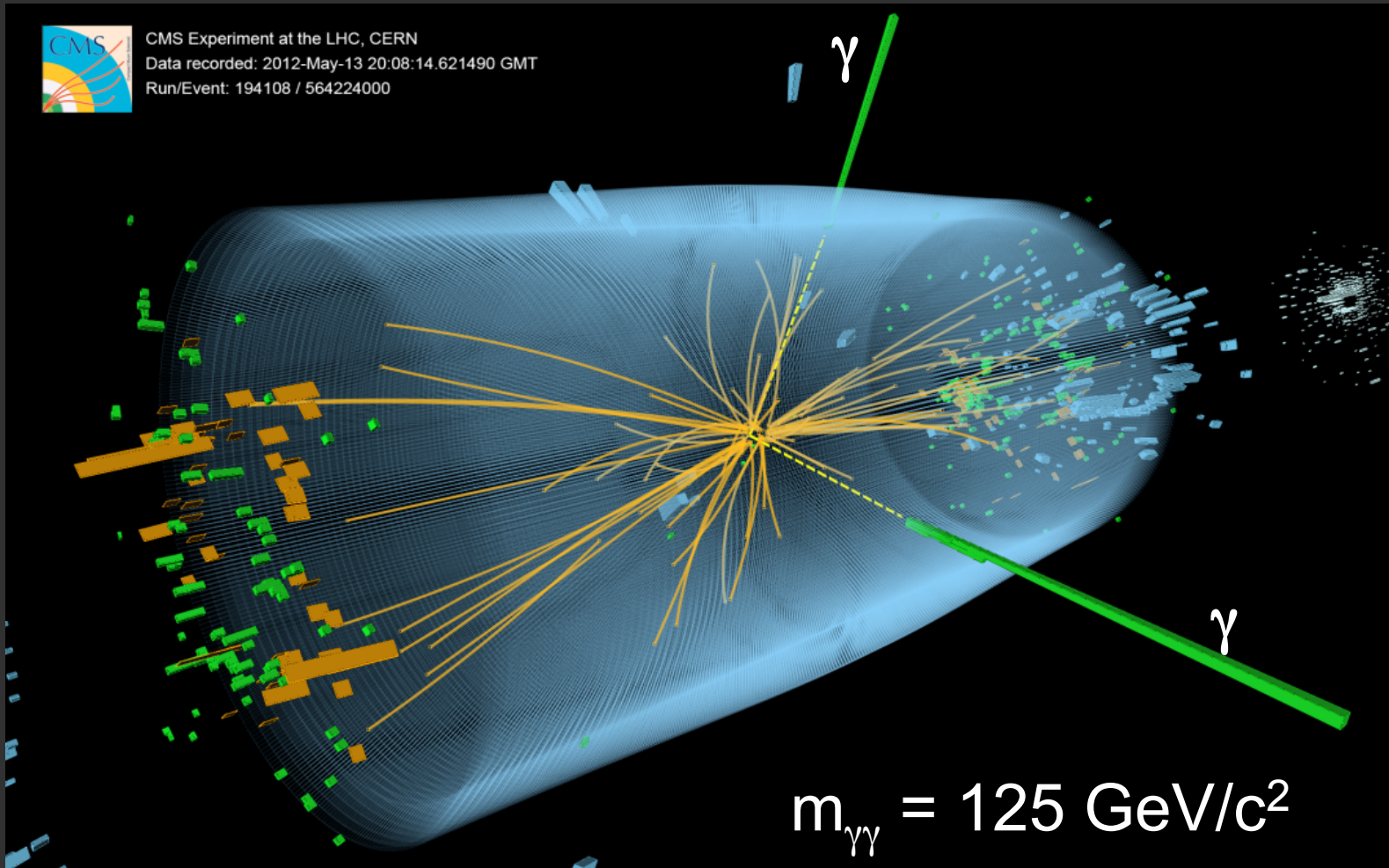


H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 elettroni

CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 7 09:46:20 2012 CEST
Run/Event: 193575 / 400912970
Lumi section: 523



H \rightarrow 2 fotoni





Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC ☆

CMS Collaboration *

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of the contributions to the achievement of this

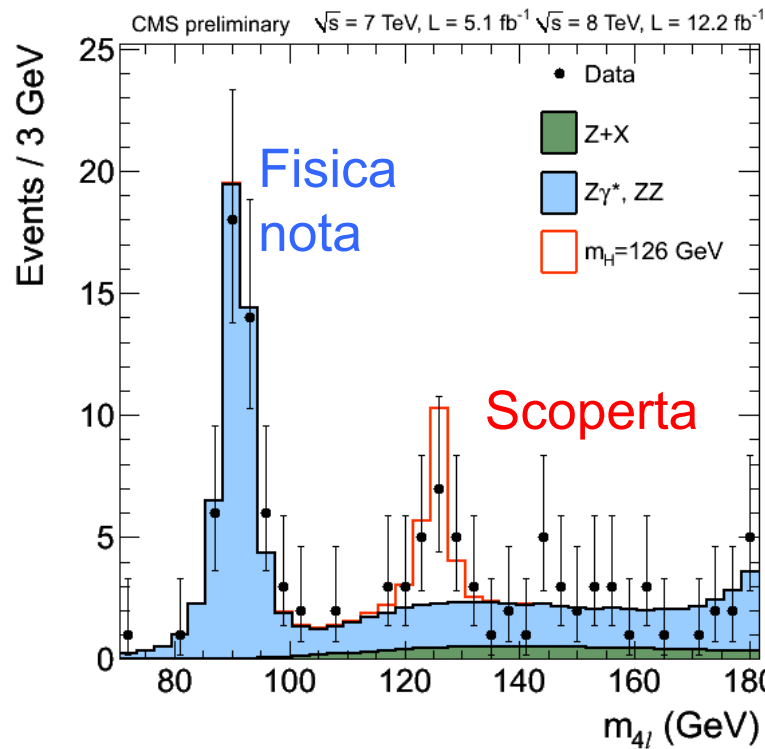
ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012
Received in revised form 9 August 2012
Accepted 11 August 2012
Available online 18 August 2012
Editor: W.-D. Schlatter

Keywords:

CMS
Physics
Higgs



ignition of their many

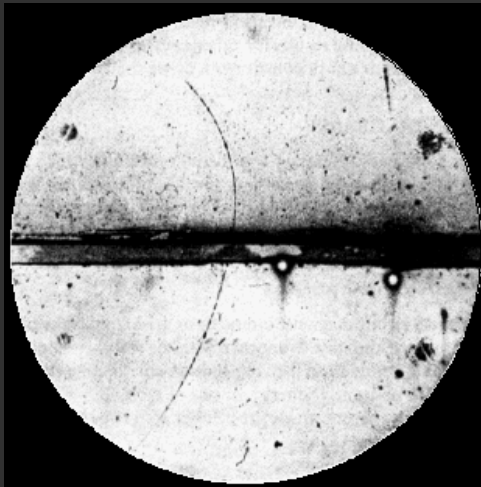
proton-proton collisions at the LHC, using data samples collected at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ and $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$. The search for a new boson is observed above a mass near 125 GeV, consistent with the Standard Model Higgs boson.



2-Materia e Antimateria

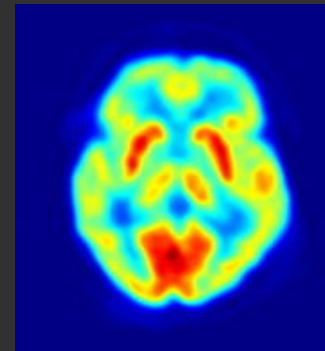
Antimateria: un'immagine allo specchio della materia?

- L'antimateria esiste



Carl Anderson nel 1933 studiando con una camera a nebbia eventi di raggi cosmici scopre il positrone, una copia esatta dell'elettrone ma di carica opposta (positiva)

Oggi l'antimateria si usa in medicina (PET)

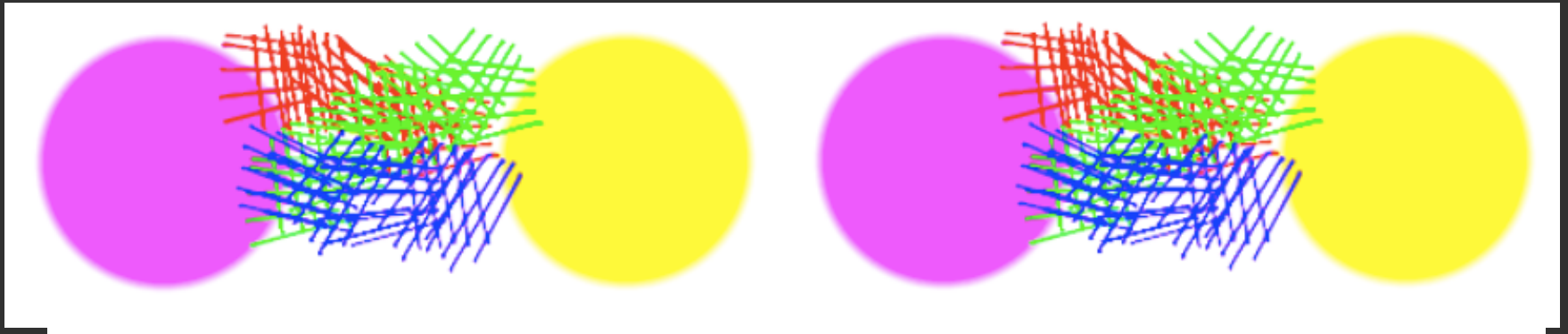


Antimateria /2

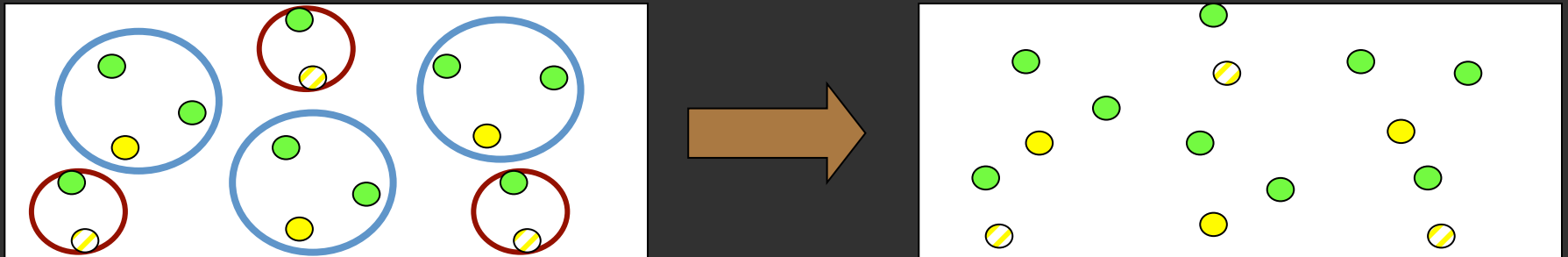
- Per ogni particella esiste la sua anti-particella
- Se una particella e una anti-particella si incontrano avviene un'annichilazione e tutto si converte in pura energia
- Analogamente l'energia si puo' convertire in particelle e rispettive antiparticelle ed e' quello che avviene ad ogni collisione in un acceleratore.
- Al momento del Big Bang materia e antimateria devono essersi create in uguale quantita'
- Noi oggi viviamo in un mondo di materia. Dove e' finita l'antimateria?
- A LHC, si sta cercando di rispondere a questa domanda

3-II confinamento dei quark (esperimento ALICE)

I quark non sono liberi ma vivono confinati e se provo a separarli....?

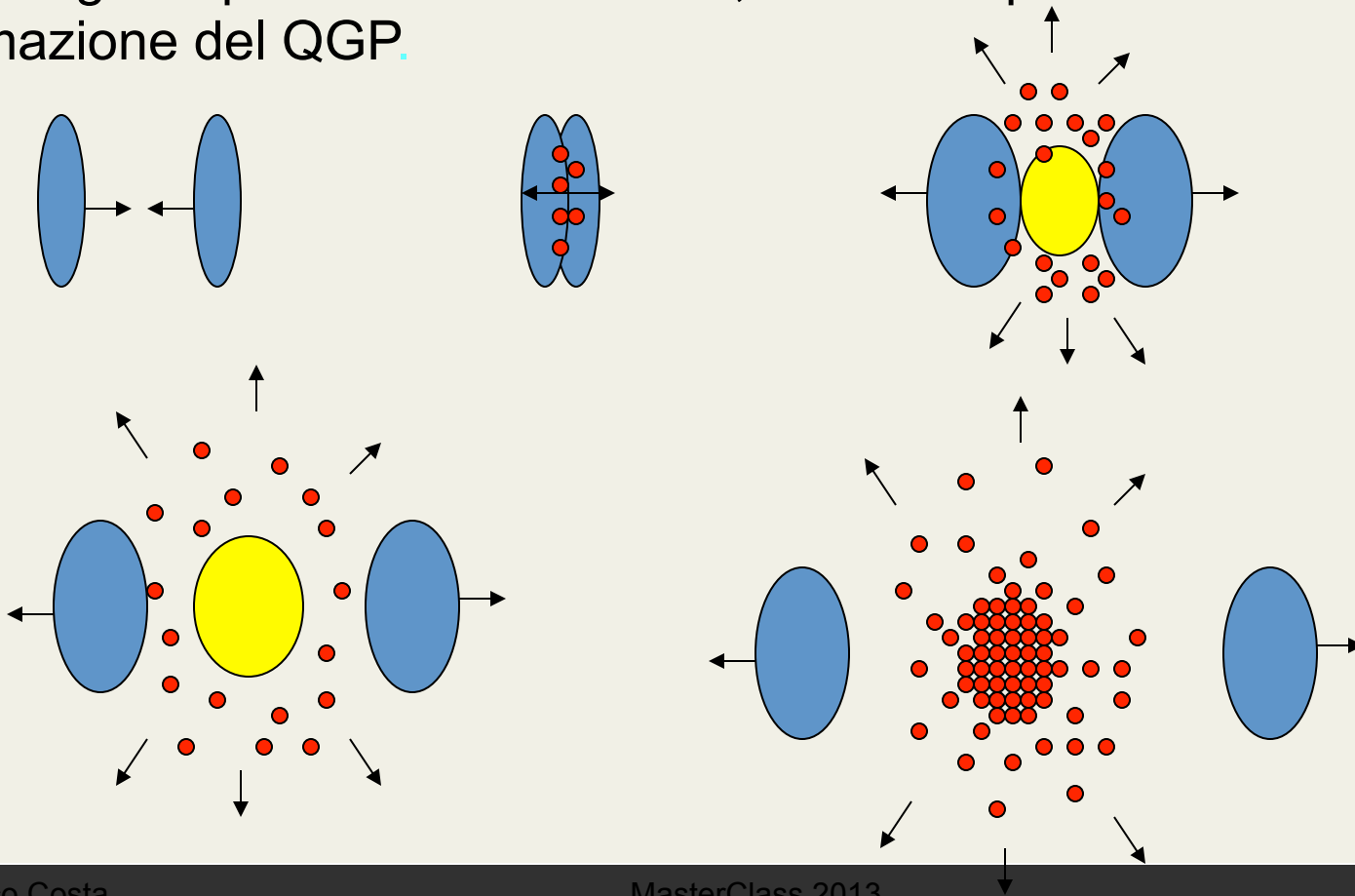


Scaldando moltissimo la materia alla temperatura di LHC posso ricreare quella condizione iniziale in cui i quark erano liberi (Quark Gluon Plasma)

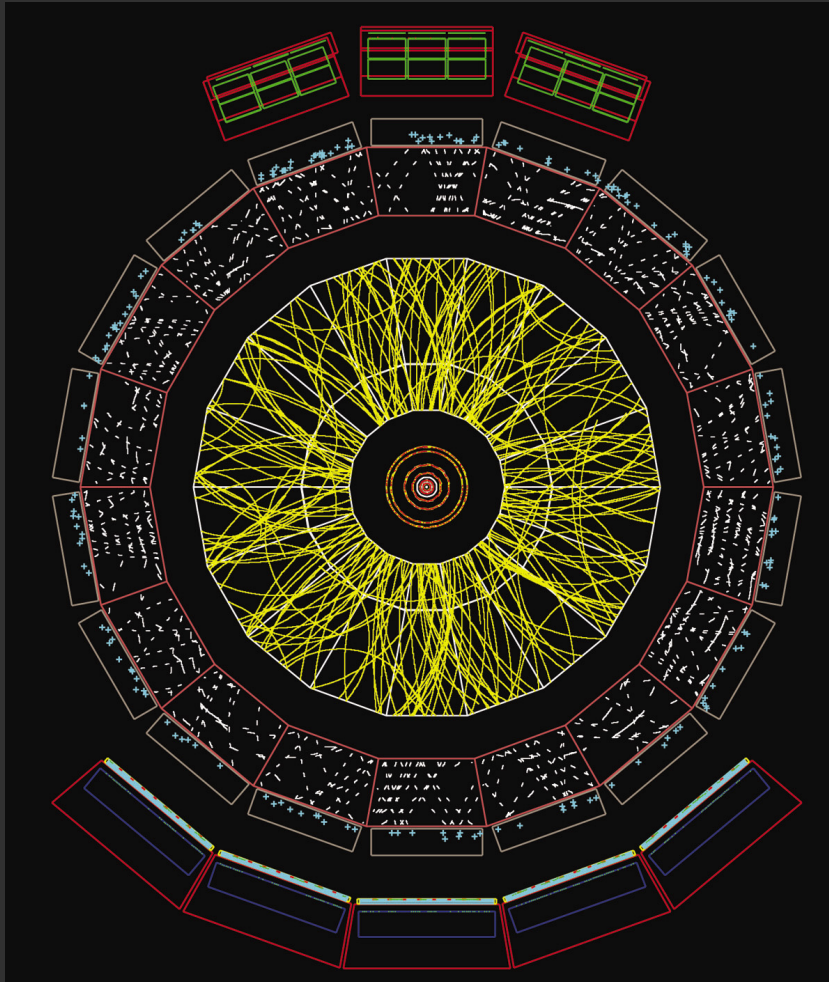


Collisioni di ioni Pb ultrarelativistici

- Idea di base: nella collisione posso raggiungere una densità di energia superiore ad $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$, sufficienti per la formazione del QGP.

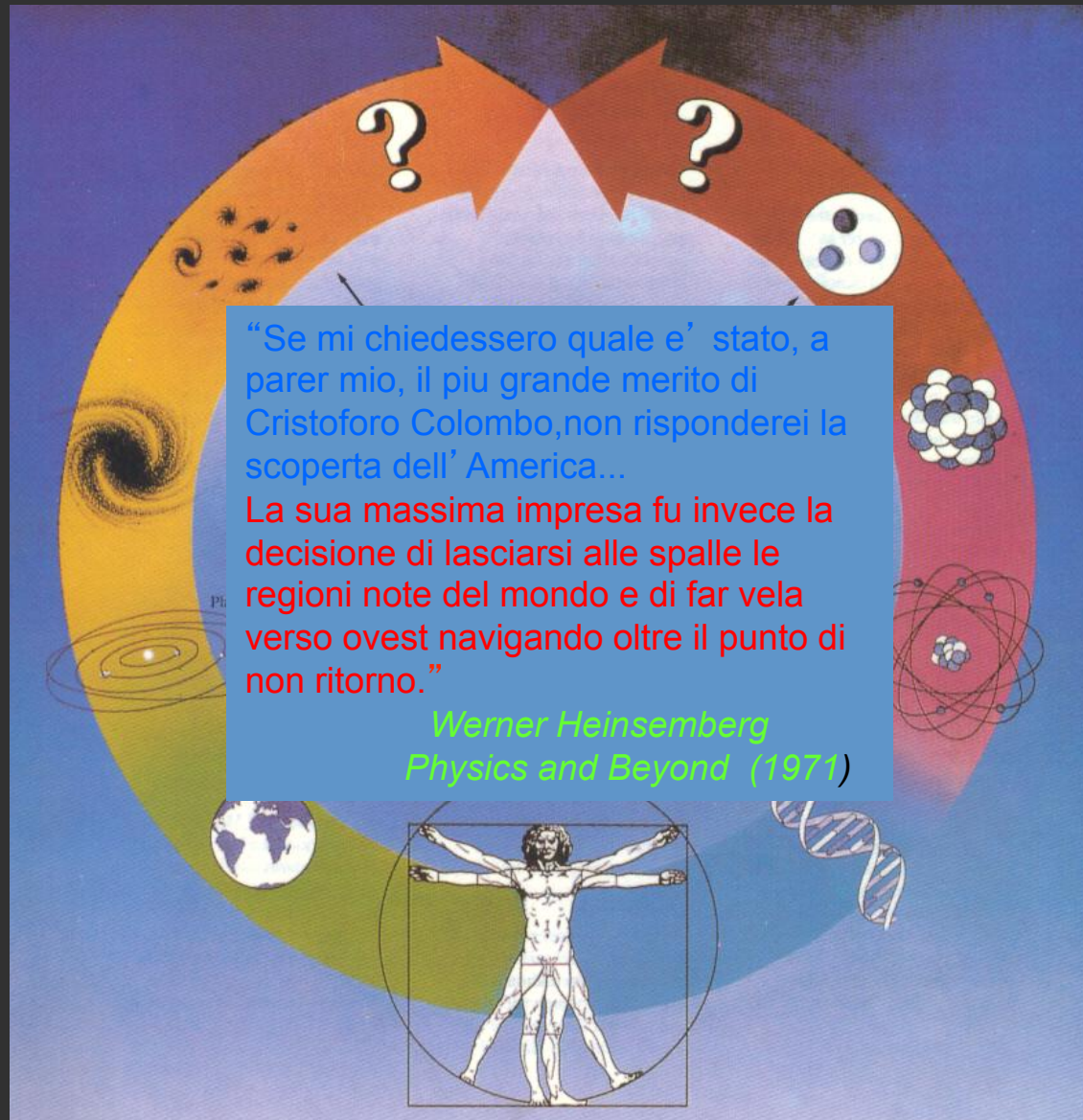


L' enigma del confinamento dei quark / 2



Osservando e misurando le particelle prodotte nel micro Big Bang ad LHC si ripercorre la transizione dalla condizione in cui i Quark sono liberi a quella in cui essi ritornano a essere confinati nella materia e si cerca di capire il meccanismo del confinamento

Concludendo



Una Scuola di eccellenza

- Un'occasione per i nostri studenti per entrare nel mondo della ricerca di alto livello, collaborando con istituzioni di livello internazionale
- “Esportiamo” postdoc in tutto il mondo
 - In questo momento presso: CERN, Johns Hopkins University, University of California Santa Barbara, Université Catholique de Louvain, Université de Lyon, Northeastern University, ...
 - Ruoli di rilievo nel coordinamento di gruppi internazionali in CMS e Alice, già durante il post-doc a Torino

GRAZIE per l'attenzione!