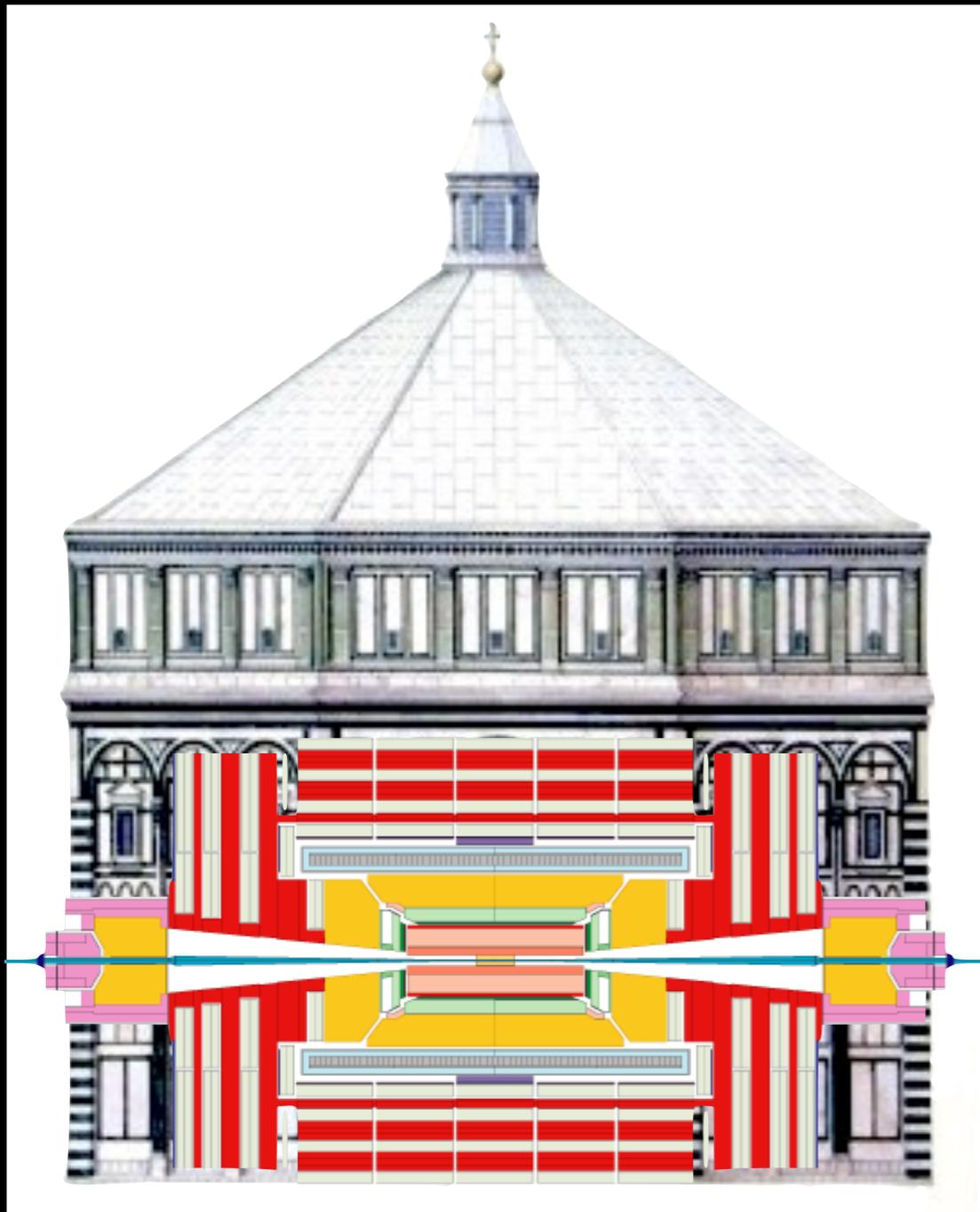


Progetto “Art and Science Across Italy” IV Edizione

<https://artandscience.infn.it>



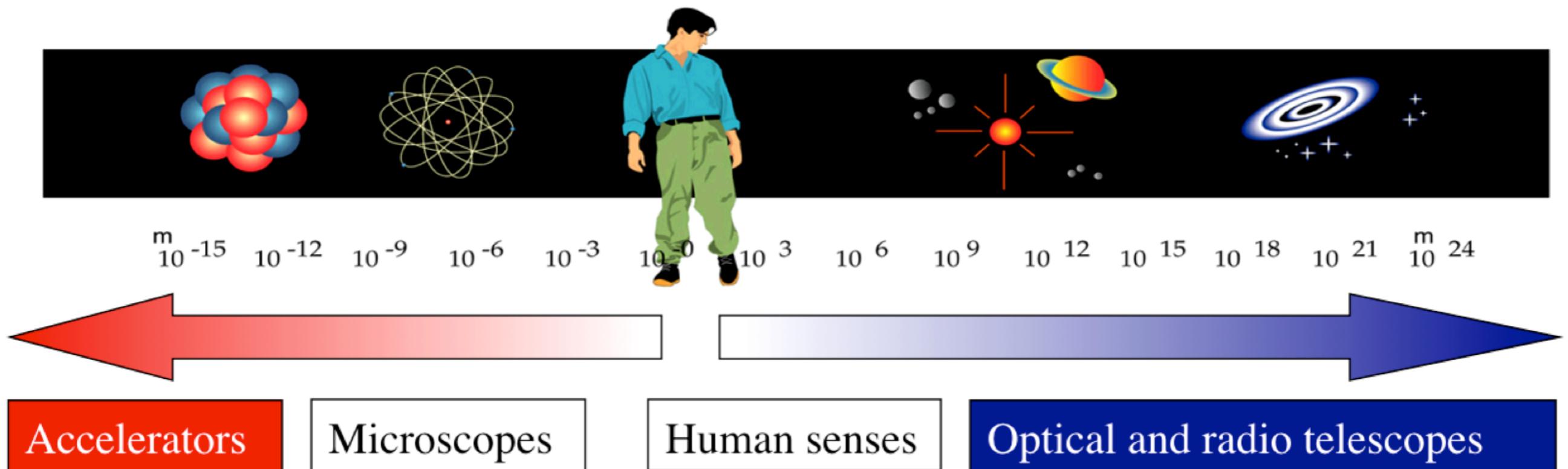
Fotografando il Bosone di Higgs

Incontro con
Liceo L. da Vinci
20 APR 2023

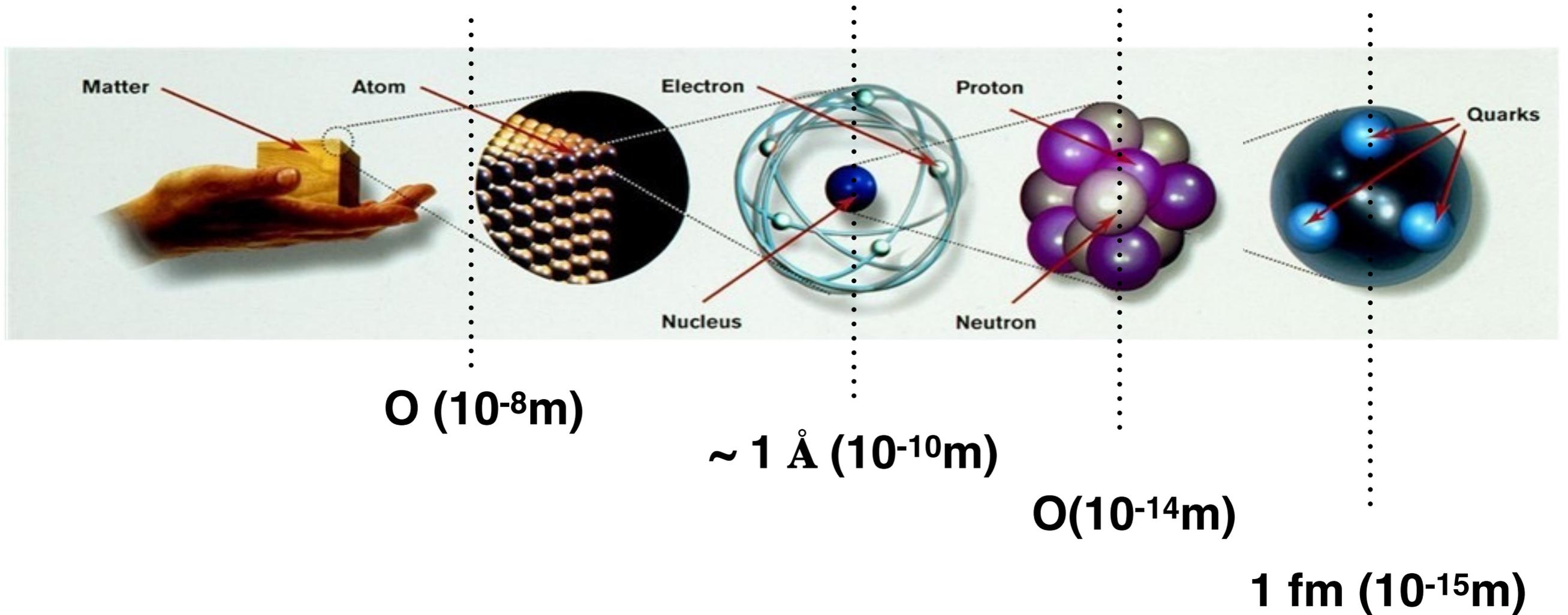
S. Paoletti (INFN Firenze)
per il comitato organizzatore di Firenze:
Giuseppe Latino, Elena Vannuccini, Andrea Tesi

La missione: capire la natura

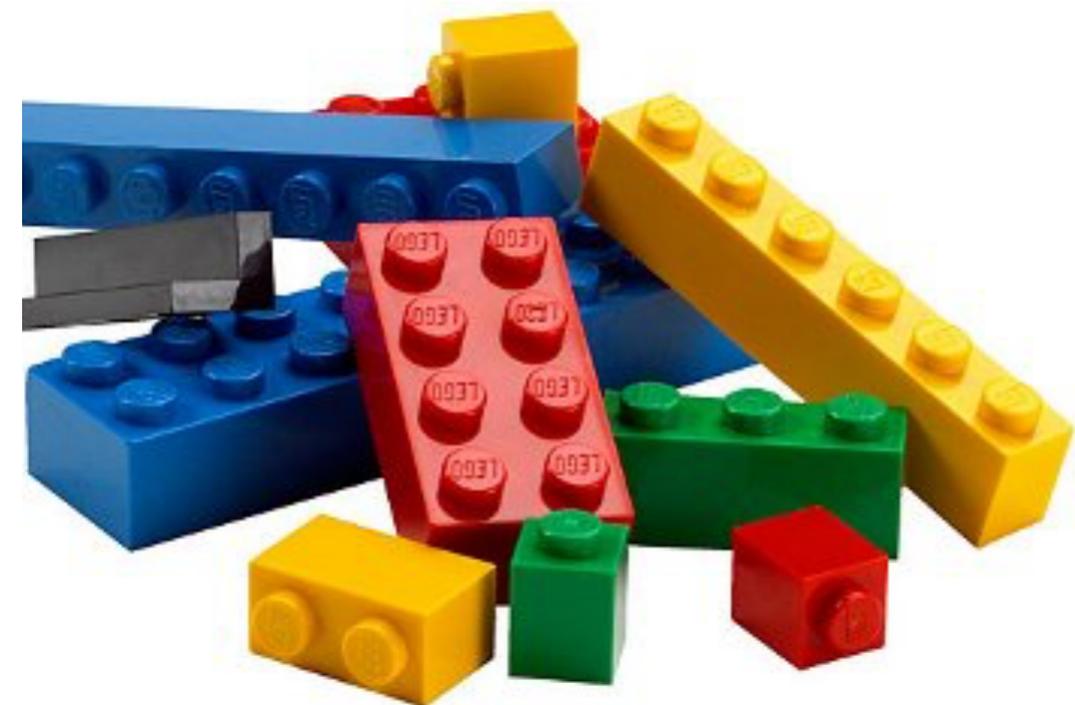
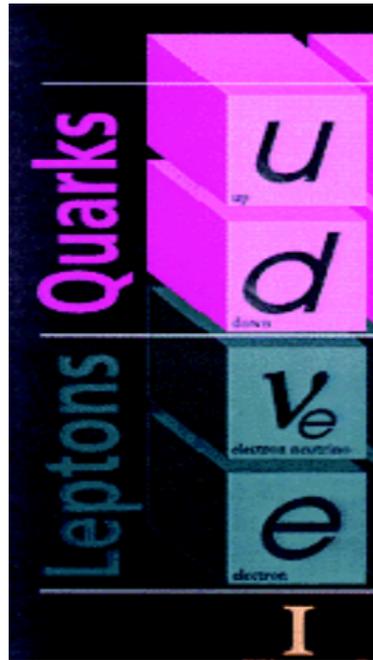
- ◆ Di cosa siamo fatti ?
- ◆ Come interagisce la materia tramite le forze ?



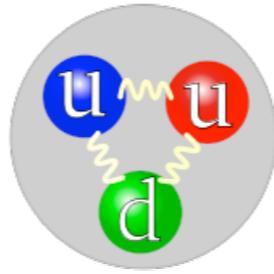
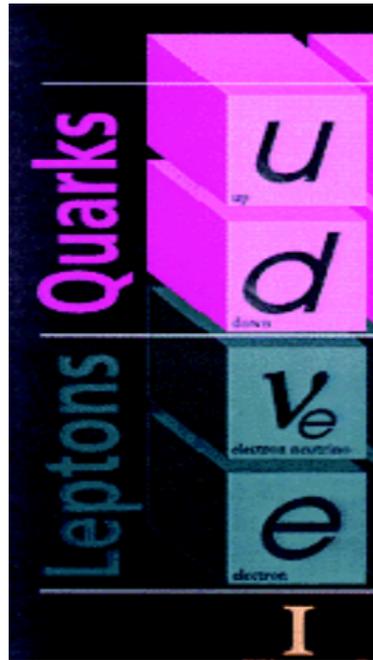
La struttura della Materia



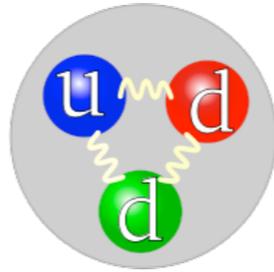
Tutto con pochi mattoni



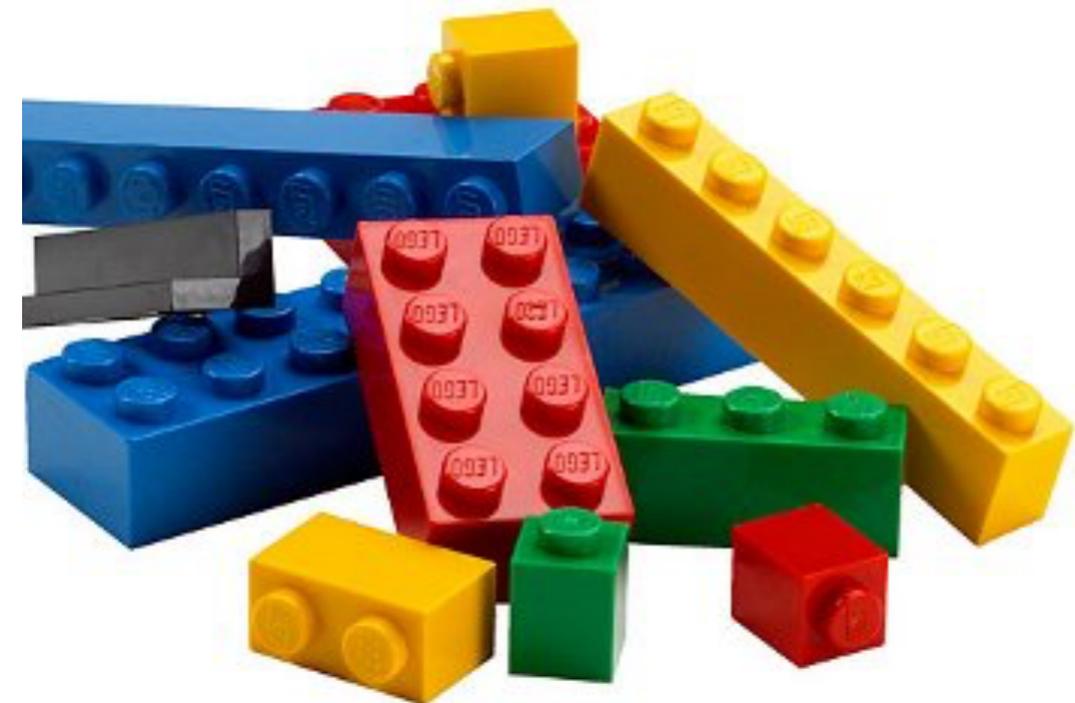
Tutto con pochi mattoni



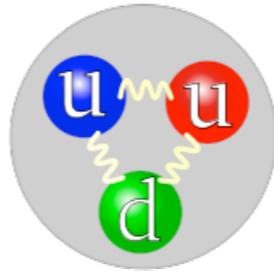
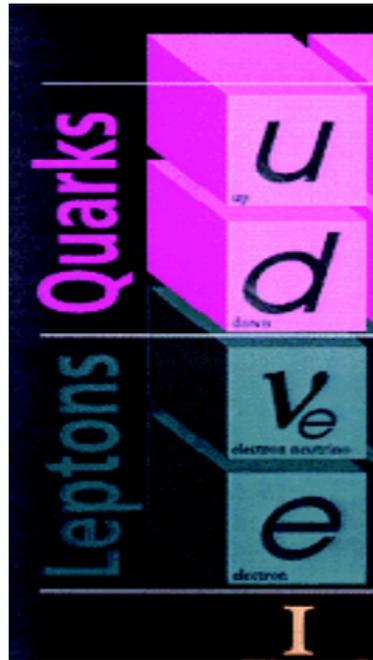
protone



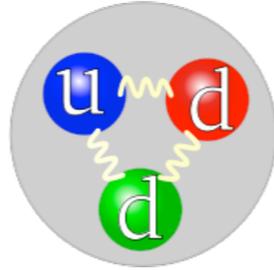
Il neutrone



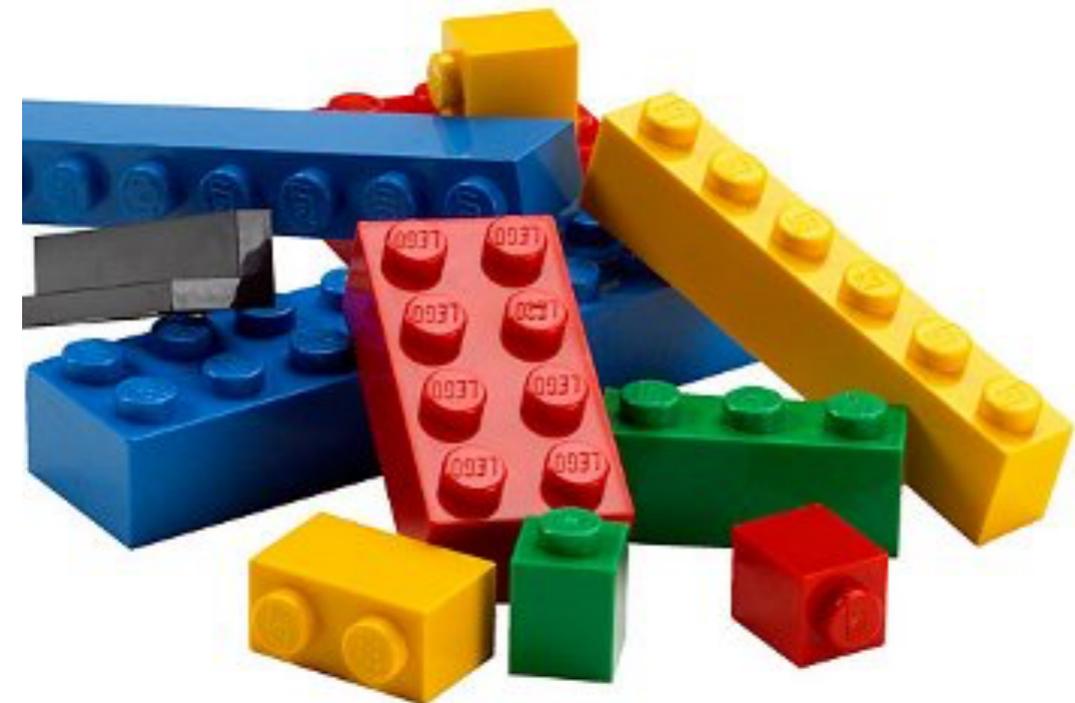
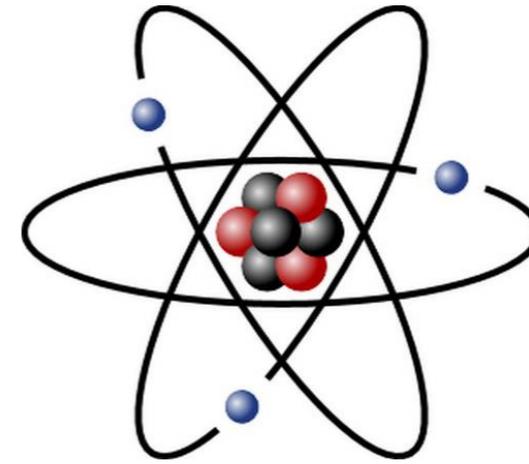
Tutto con pochi mattoni



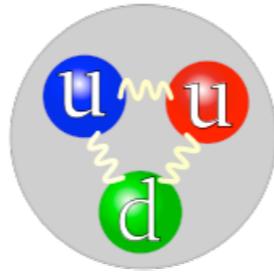
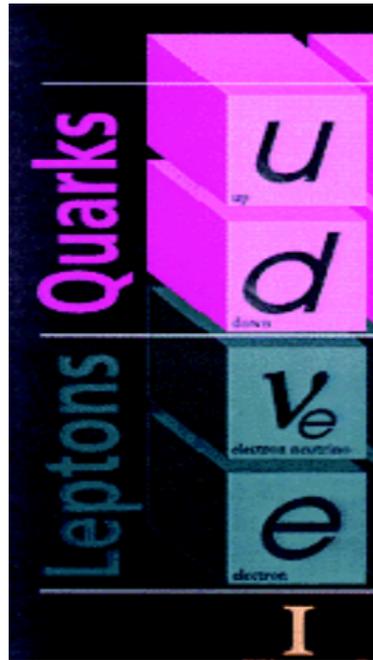
protone



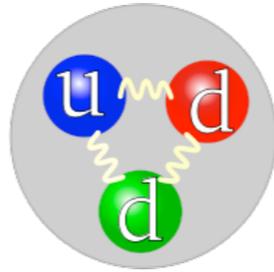
Il neutrone



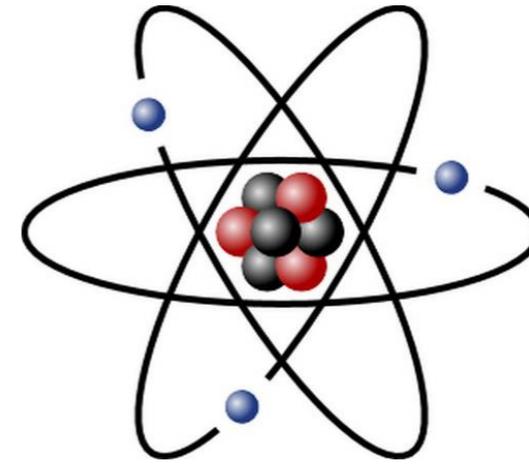
Tutto con pochi mattoni



protone



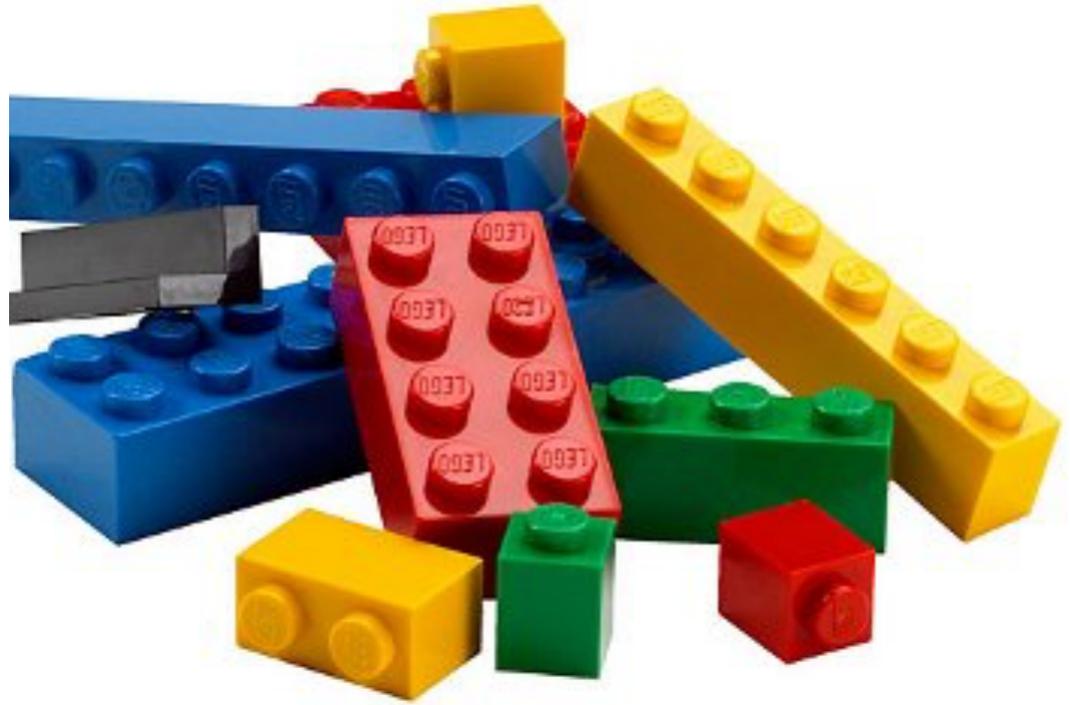
Il neutrone



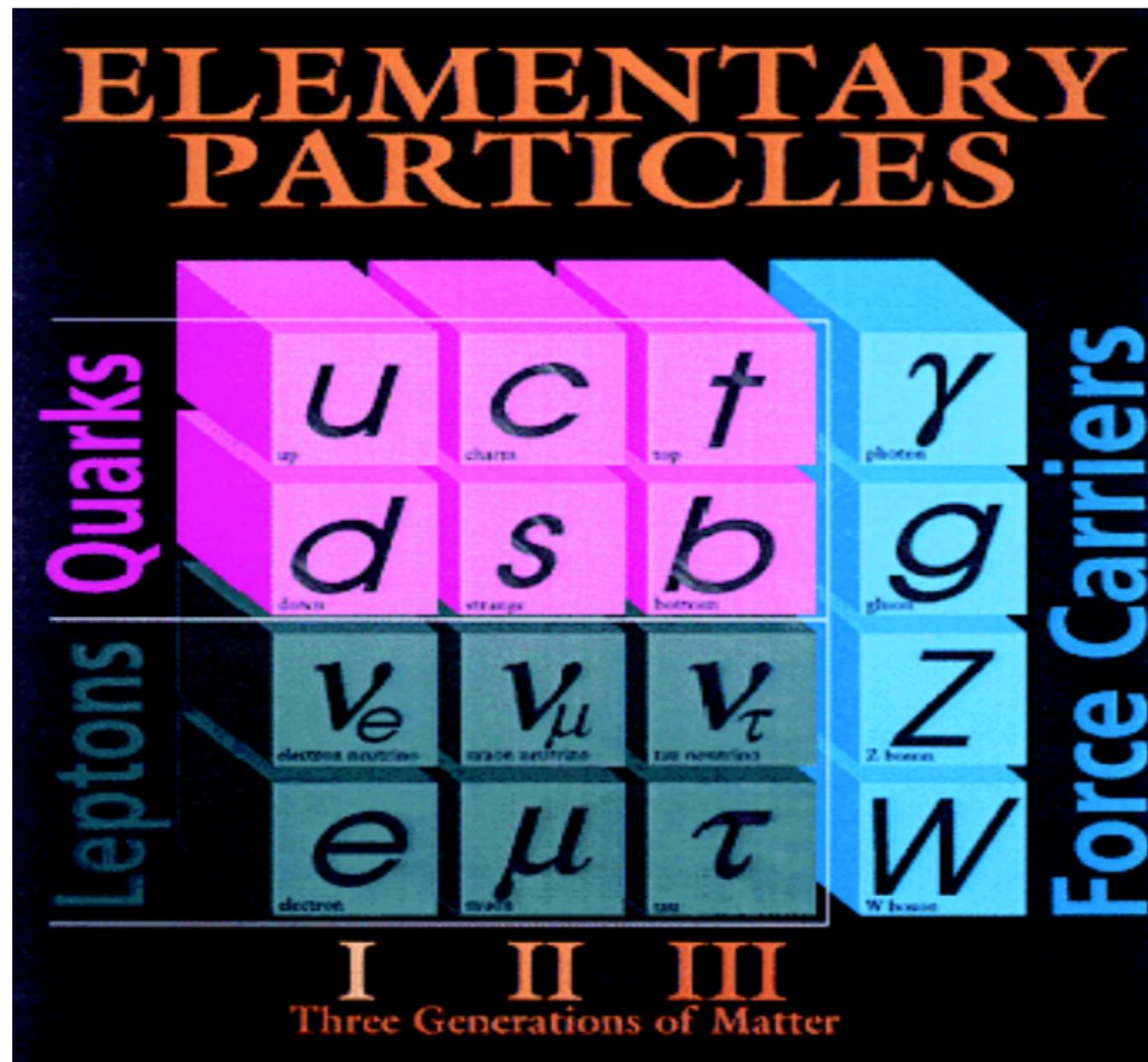
	I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII	
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	
6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo	
8	119 Uun																		

* Lanthanides	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Actinides	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

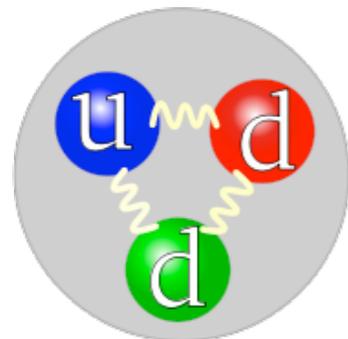
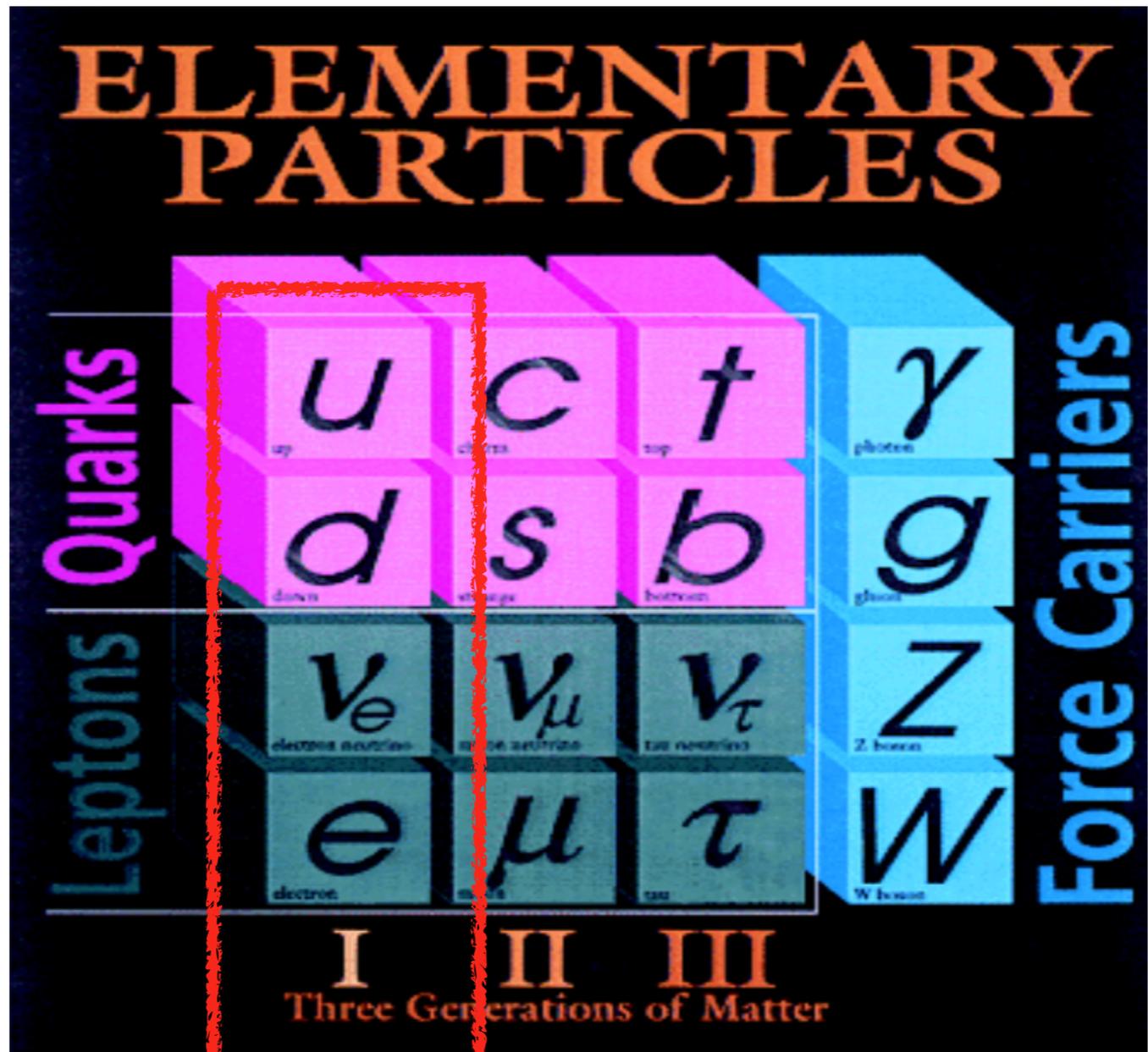
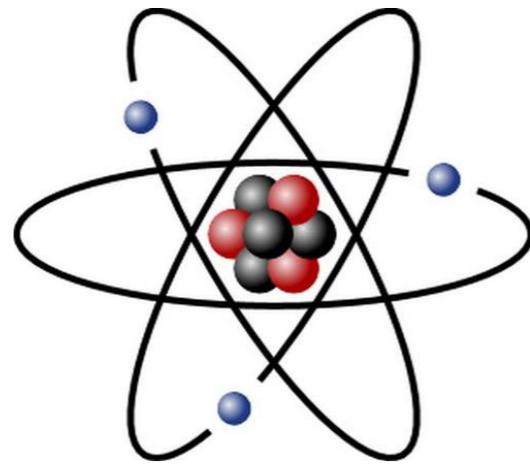
Alkali metals	Alkaline earth metals	Lanthanides	Actinides	Transition metals
Poor metals	Metalloids	Nonmetals	Halogens	Noble gases



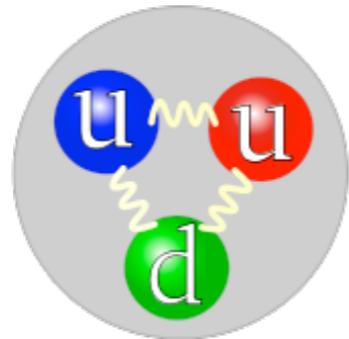
II Modello Standard



Il Modello Standard



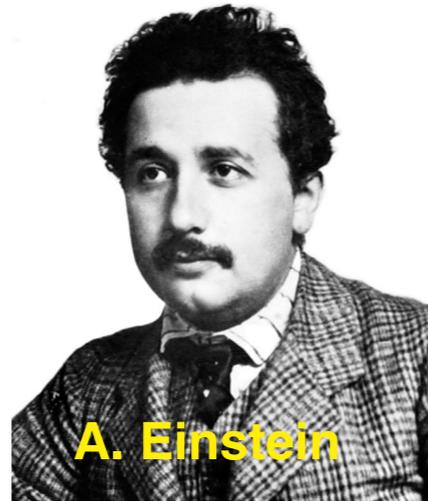
Il neutrone



protone

Nuove regole del gioco

Relatività
 $E = mc^2$
 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$



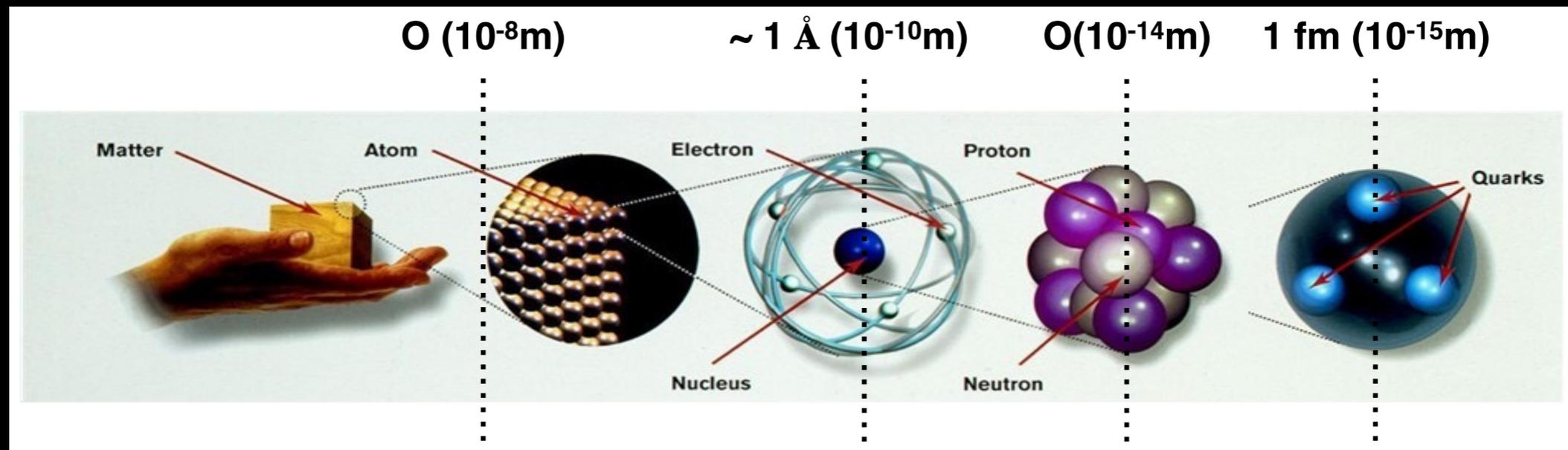
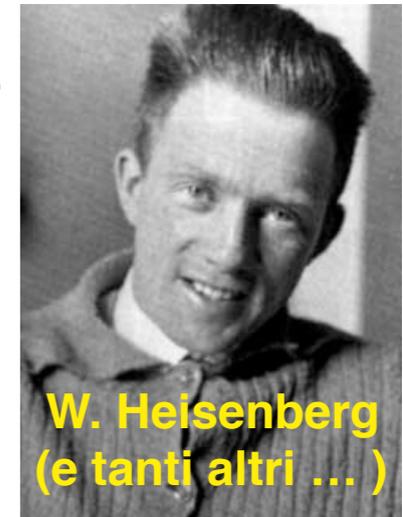
Meccanica quantistica

$$\Delta p \times \Delta x \gtrsim \hbar$$

$$\Delta E \times \Delta t \gtrsim \hbar$$

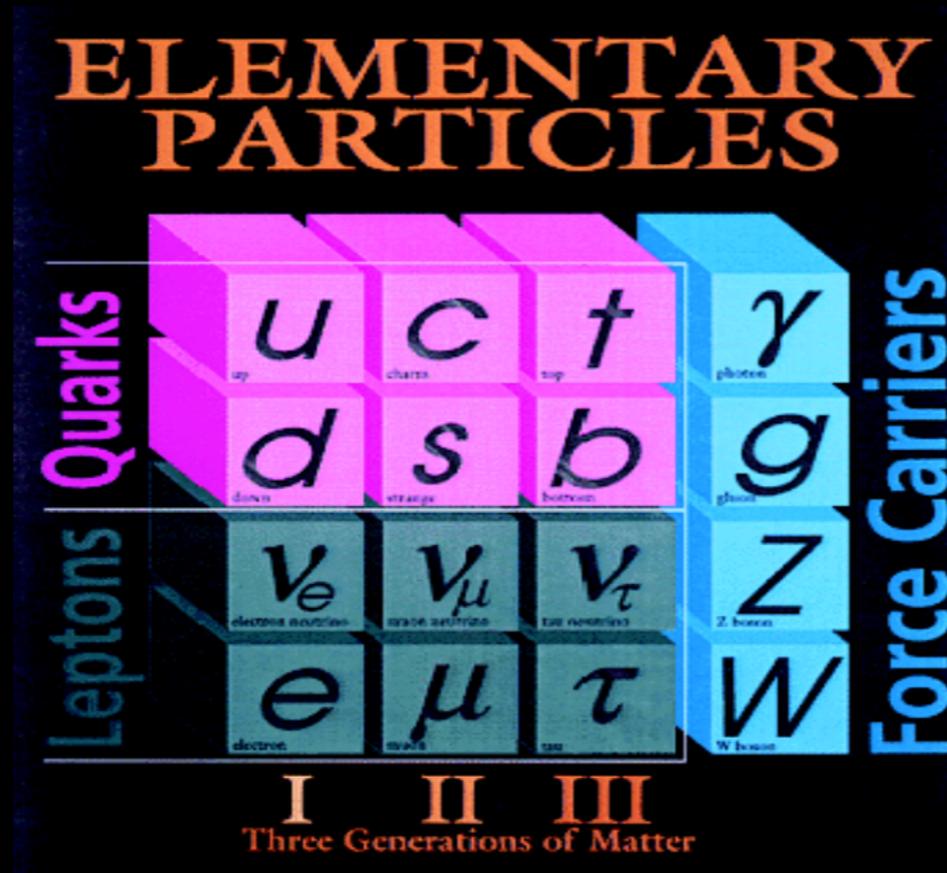
$$\hbar = h/2\pi$$

$$h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js}$$





onde o corpuscoli ?



La forma è il contenuto !

Le Forze

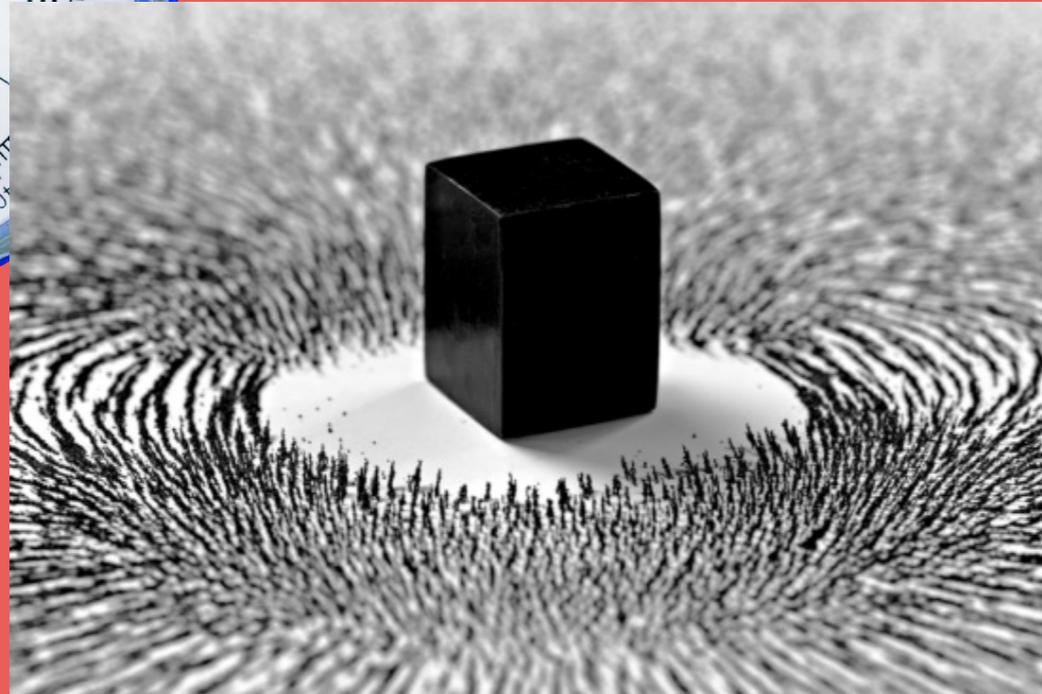
- Tantissimi tipi di forze diverse, ma tutte riconducibili a un insieme ridotto di interazioni fondamentali



La forza gravitazionale



La forza elettromagnetica



Radio waves



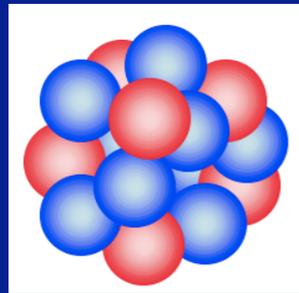
Microwaves



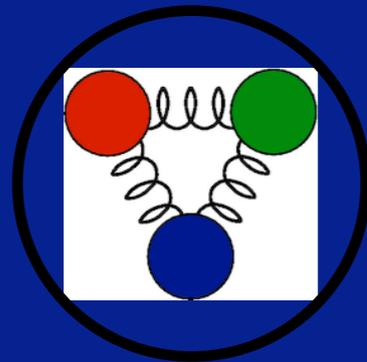
Light



Forza “forte”



- Tiene insieme i nucleoni (protoni e neutroni) nel nucleo atomico



- Confina quark diversi all'interno della stessa particella

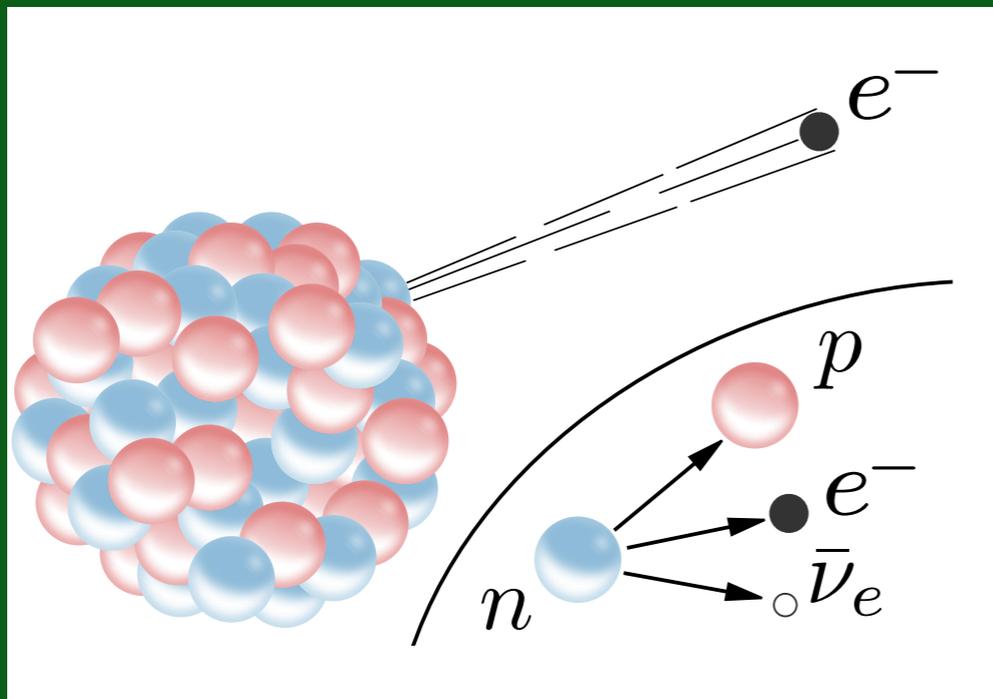
== range limitato ==

Forza “debole”

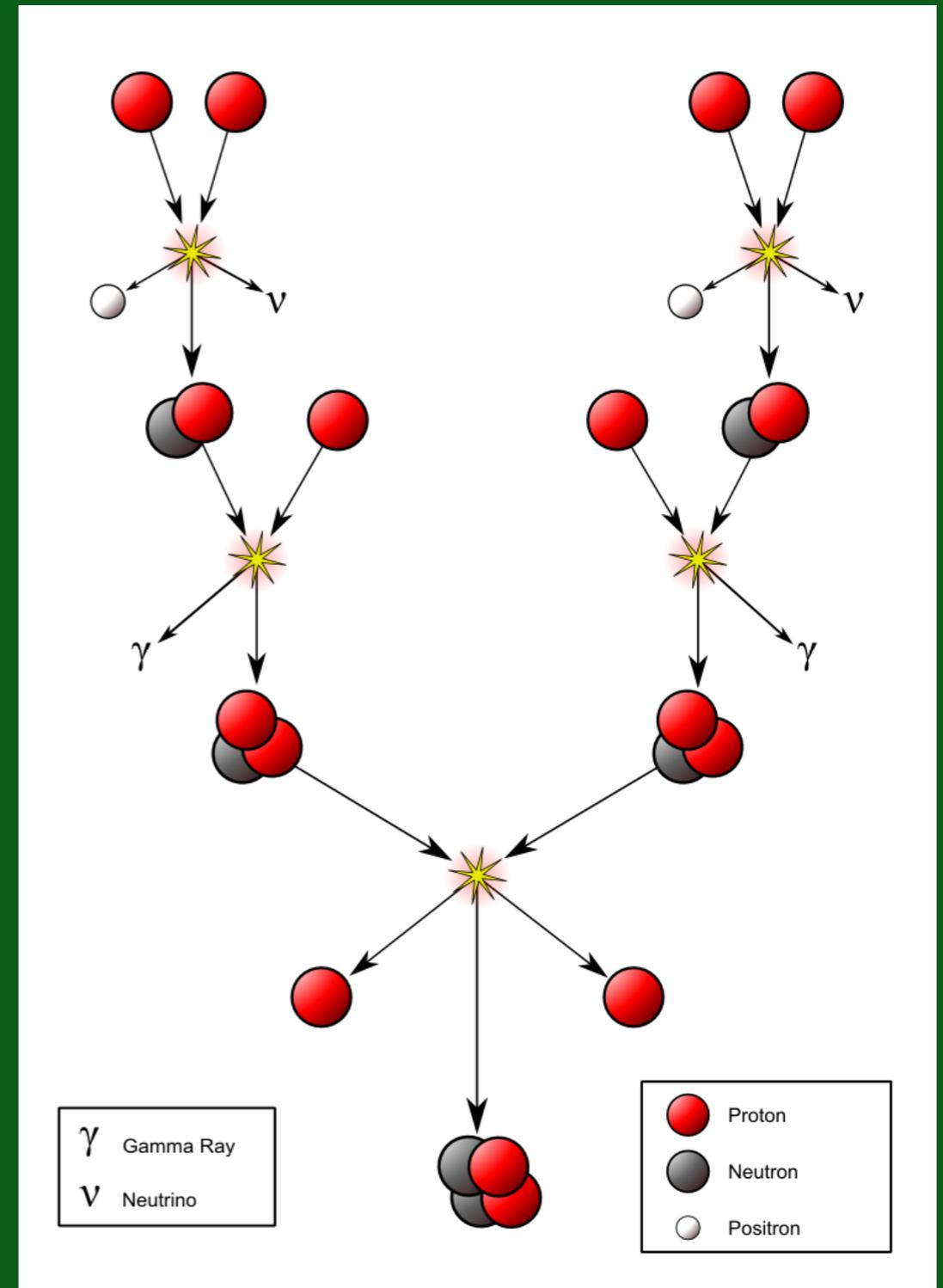
Catena protone-protone nel sole

Responsabile di un'ampia casistica di interazioni tra le particelle

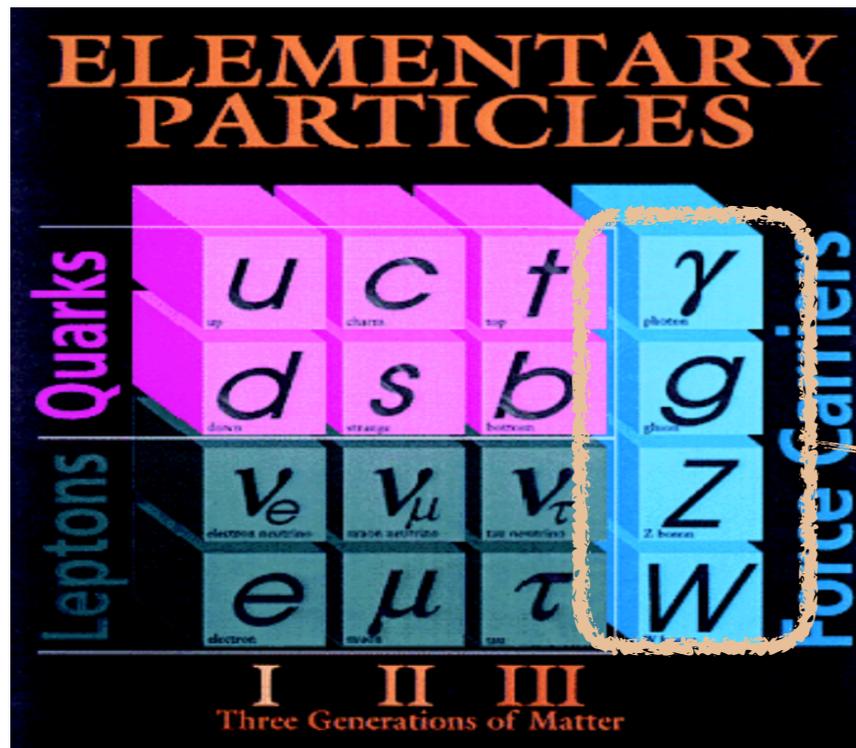
decadimento β del neutrone
→ trasmutazioni nucleari



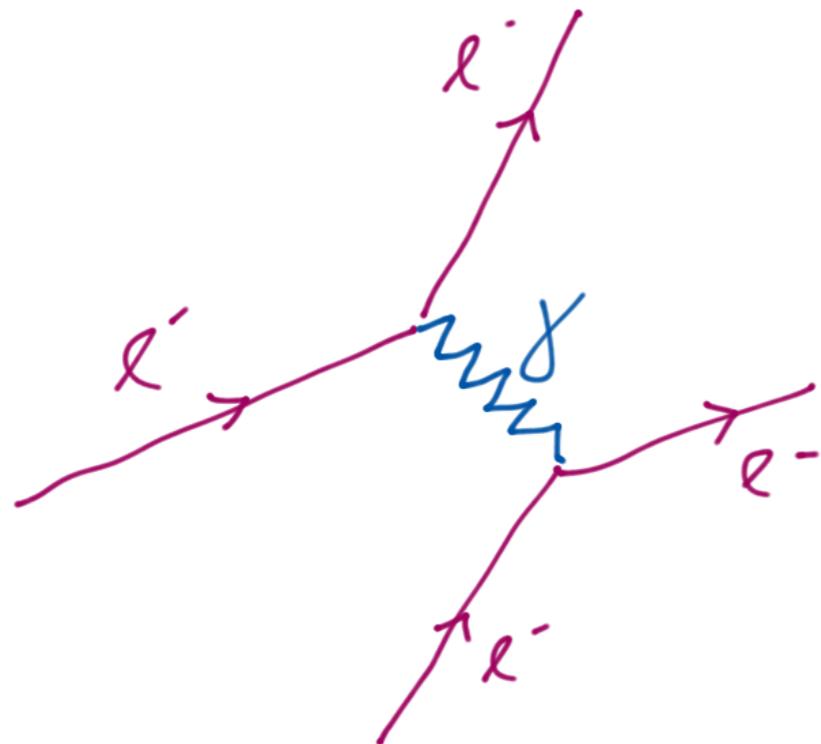
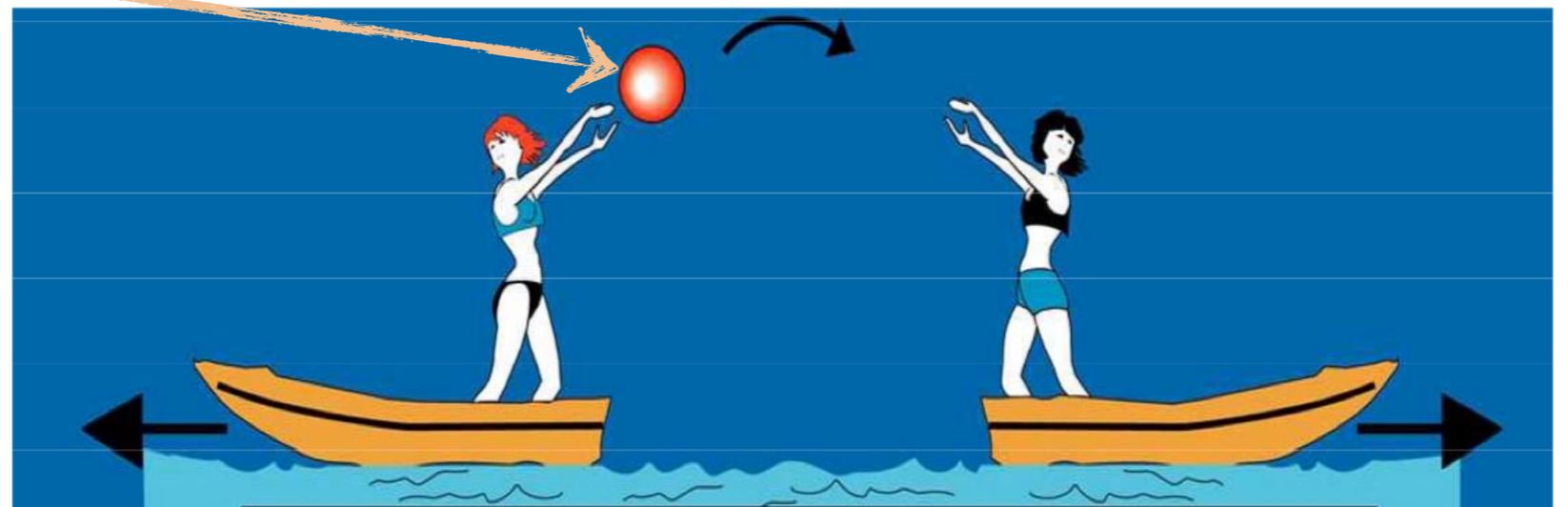
== range limitato ==



Un modello per le interazioni



Le particelle elementari interagiscono tra loro scambiandosi i quanti del campo di interazione, ovvero una terza particella (un bosone)



Esempio: forza elettromagnetica tra due elettroni

Il Modello Standard descrive una grande quantità di dati sperimentali e mette ordine nella classificazione delle particelle

È basato su un importante principio di SIMMETRIA: le interazioni elettromagnetiche e deboli sono aspetti diversi della stessa interazione (elettrodebole)

γ , Z , W^+ , W^- sono i portatori di questa interazione

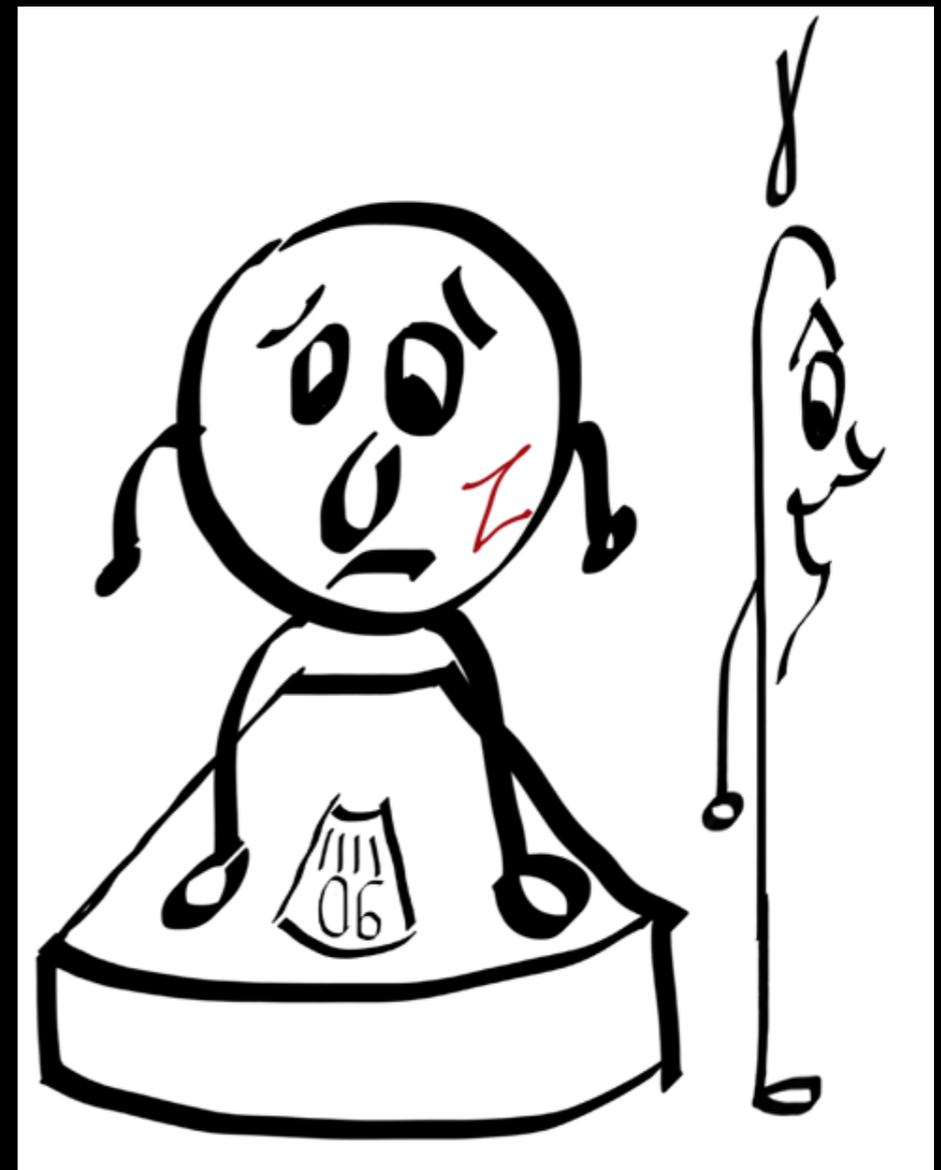
le forze derivano da principi di simmetria



... ma c'è un problema ...

la teoria funziona soltanto se le particelle
non hanno massa !!!

È difficile spiegare perché Z ,
 W^+ e W^- abbiano masse
molto diverse dal γ .



Il campo di Higgs

- Z, W⁺ e W⁻ devono la loro massa all'interazione con un nuovo tipo di particella: il bosone di Higgs
- Tutte le particelle fondamentali derivano la loro massa a riposo dall'interazione col campo di Higgs
- Questo meccanismo “salva” la simmetria alla base del Modello Standard e dell'unificazione elettrodebole

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field

about the “vacuum” solution $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:



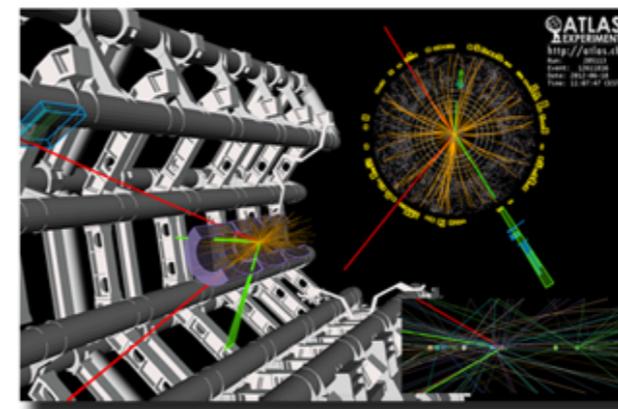
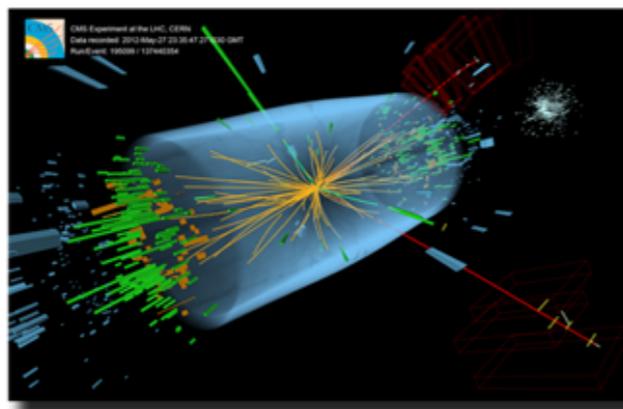
François Englert, Robert Brout, Peter Higgs

**Per anni questa
particella è stata il
tassello mancante
nel quadro del
Modello Standard**

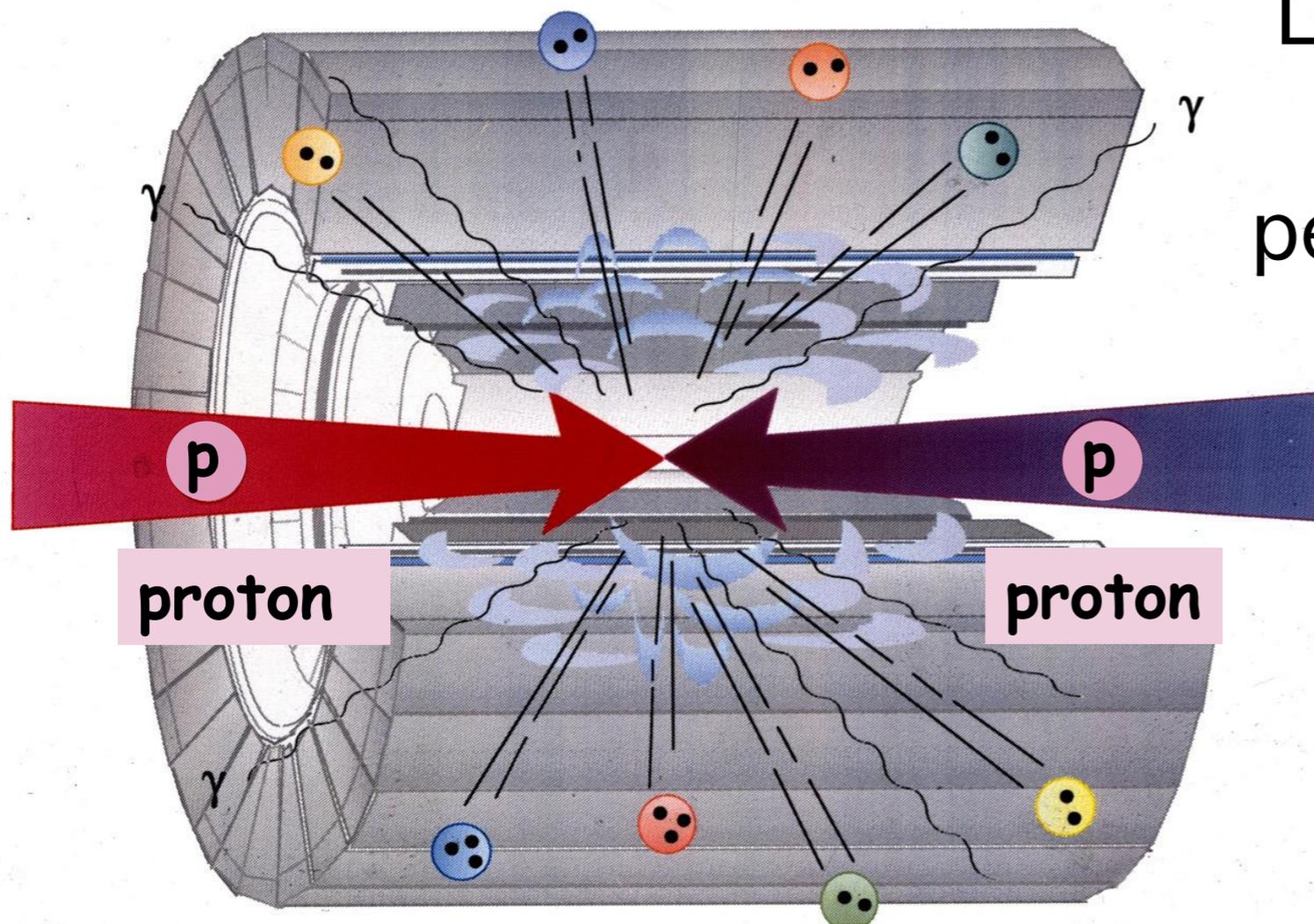
4 luglio 2012: le collaborazioni degli esperimenti **ATLAS** e **CMS** ad **LHC** annunciano la scoperta di una nuova particella di massa intorno a $125 \text{ GeV}/c^2$ con caratteristiche consistenti con quelle aspettate per il **bosone di Higgs**



8 ottobre 2013 - Premio Nobel per la Fisica a François Englert e Peter Higgs

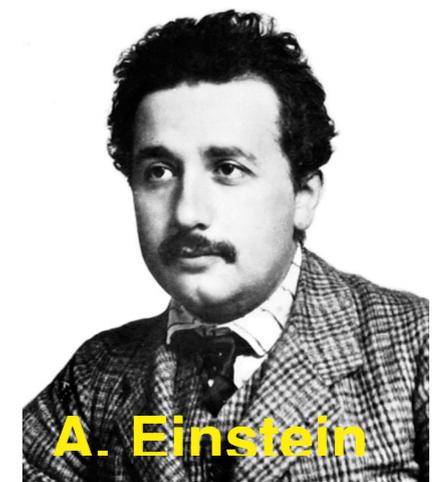


**Ma come è stato visto il
bosone di Higgs ?**



L'energia resa disponibile dall'urto delle particelle permette di materializzare altre particelle

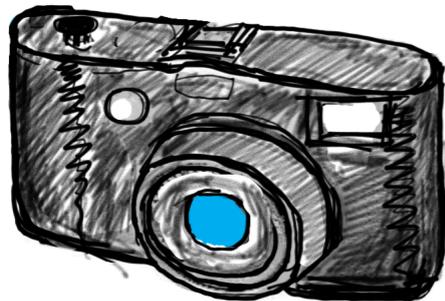
$$E = mc^2$$



Gli ingredienti della fisica agli acceleratori:



- Acceleratori per produrre le collisioni



- rivelatori per registrare e studiare le particelle prodotte nella collisione

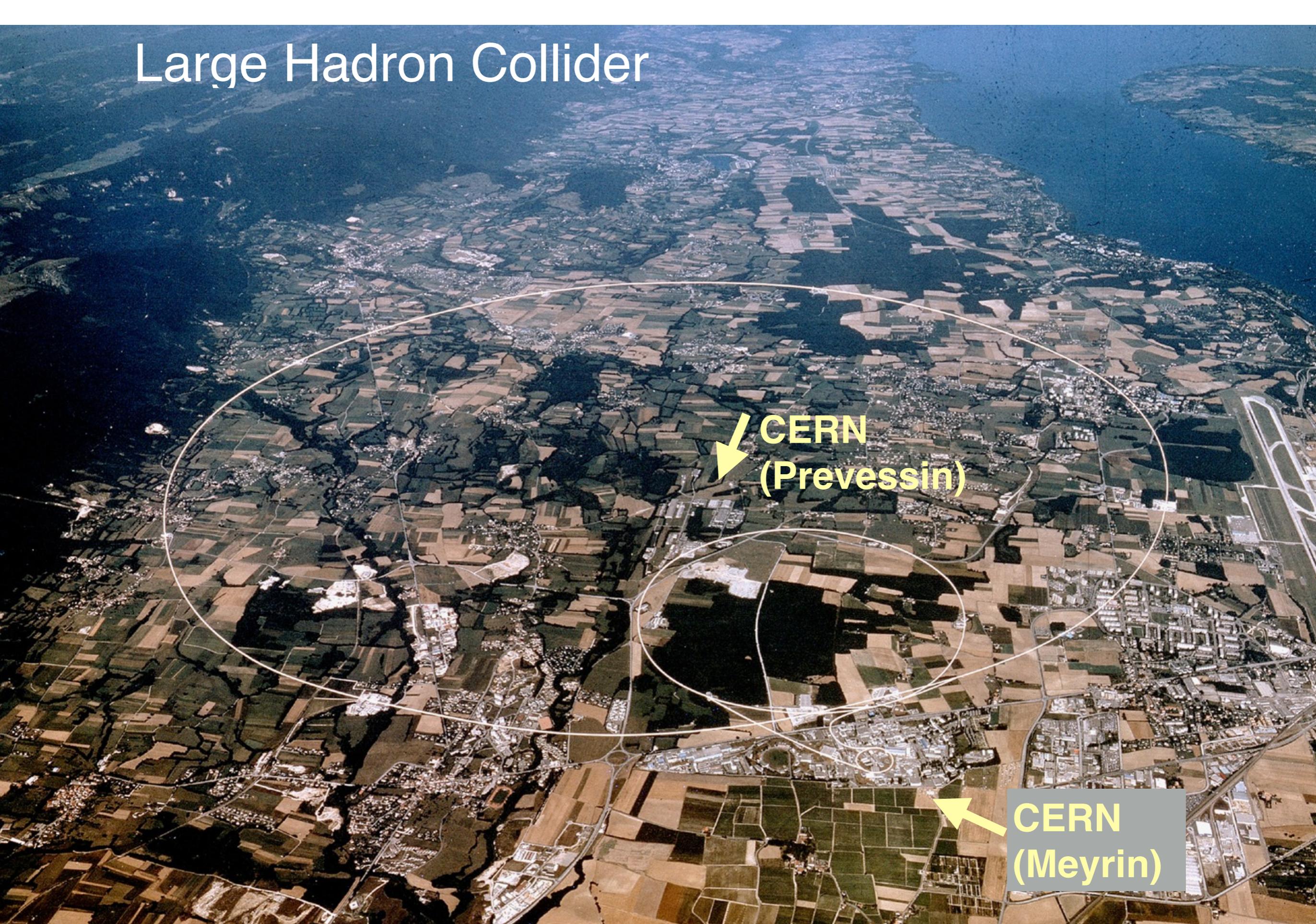


- computers per registrare, distribuire ed analizzare i dati raccolti

Acceleratori per produrre le collisioni



Large Hadron Collider



CERN
(Preessin)

CERN
(Meyrin)

Large Hadron Collider

Collisore protone-protone al CERN
NOV 2009: Inizio presa dati
2010-2011: 3.5 TeV + 3.5 TeV
2012: 4. TeV + 4. TeV
2015-2018: 6.5 TeV + 6.5 TeV
2022-2024: 6.8 TeV + 6.8 TeV
(1 TeV = 1000 GeV ~ 1000 Mp)

CMS

CERN
(Preveessin)

LHCb

ATLAS

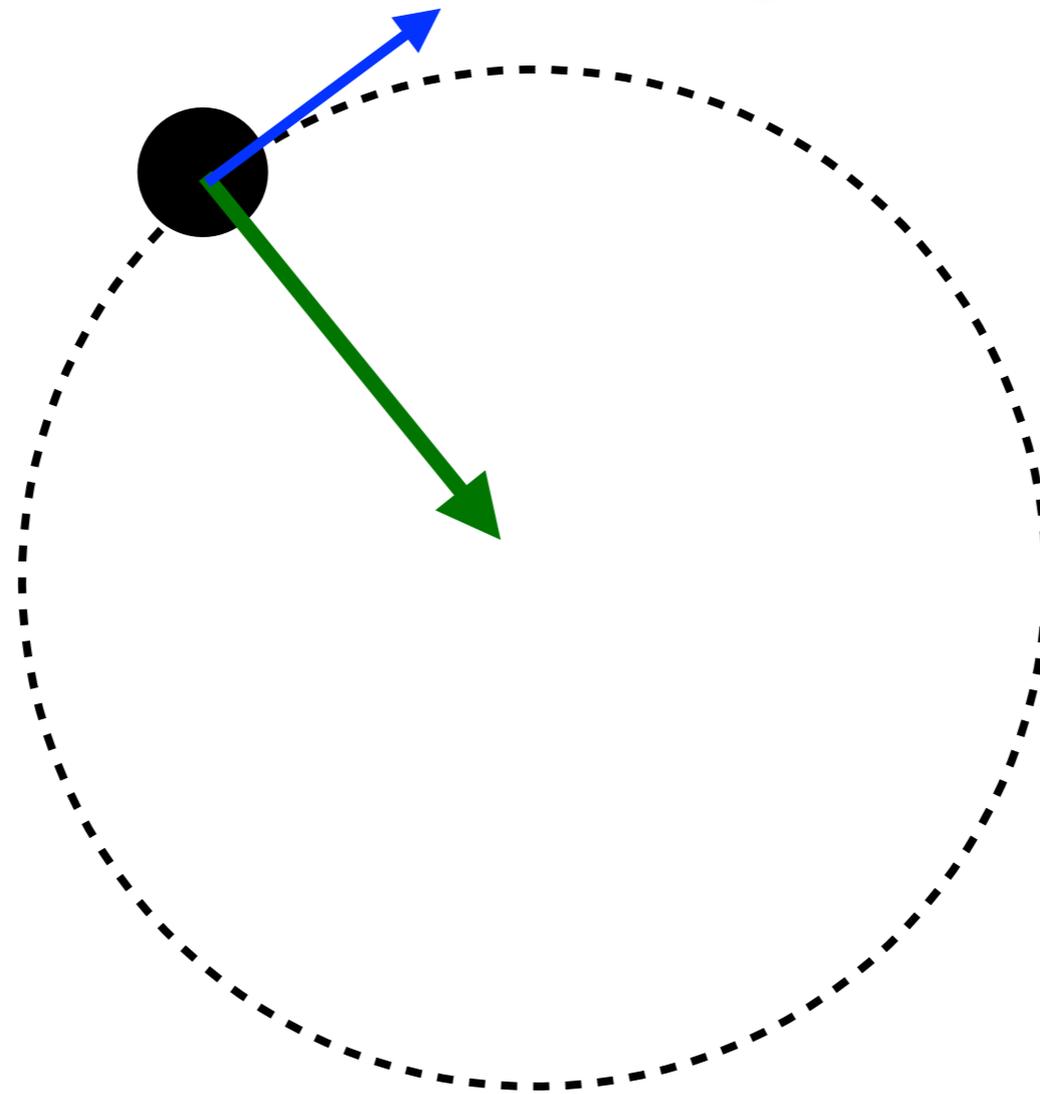
ALICE

CERN
(Meyrin)

Le componenti principali di un acceleratore

campi **elettrici** per
accelerare le particelle

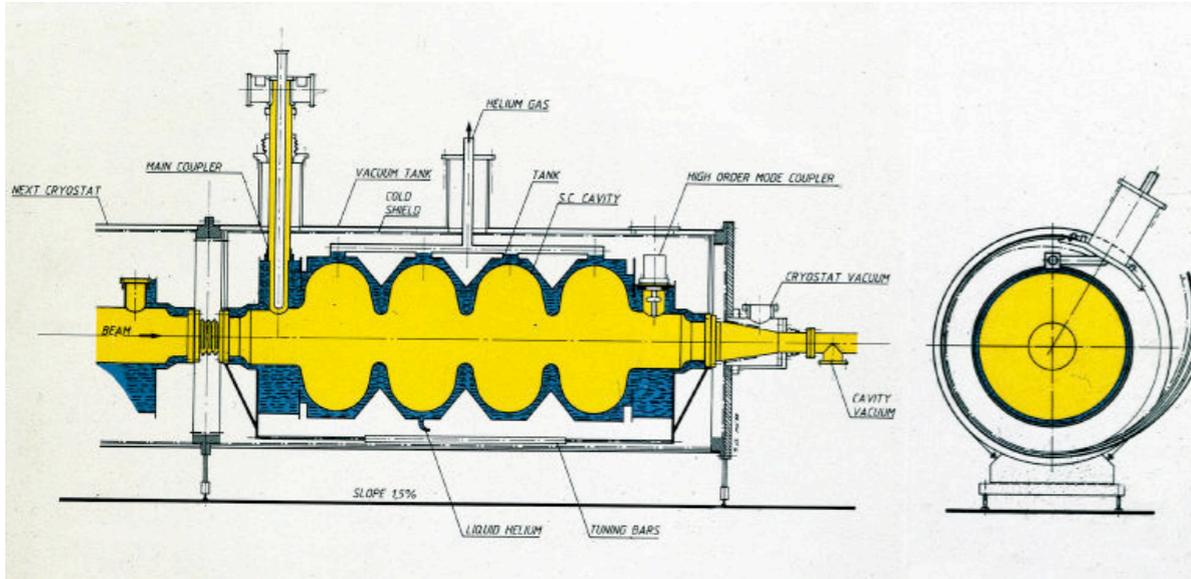
campi **magnetici** per
guidare le particelle



Le componenti principali di un acceleratore

campi elettrici per accelerare le particelle

campi magnetici per guidare le particelle

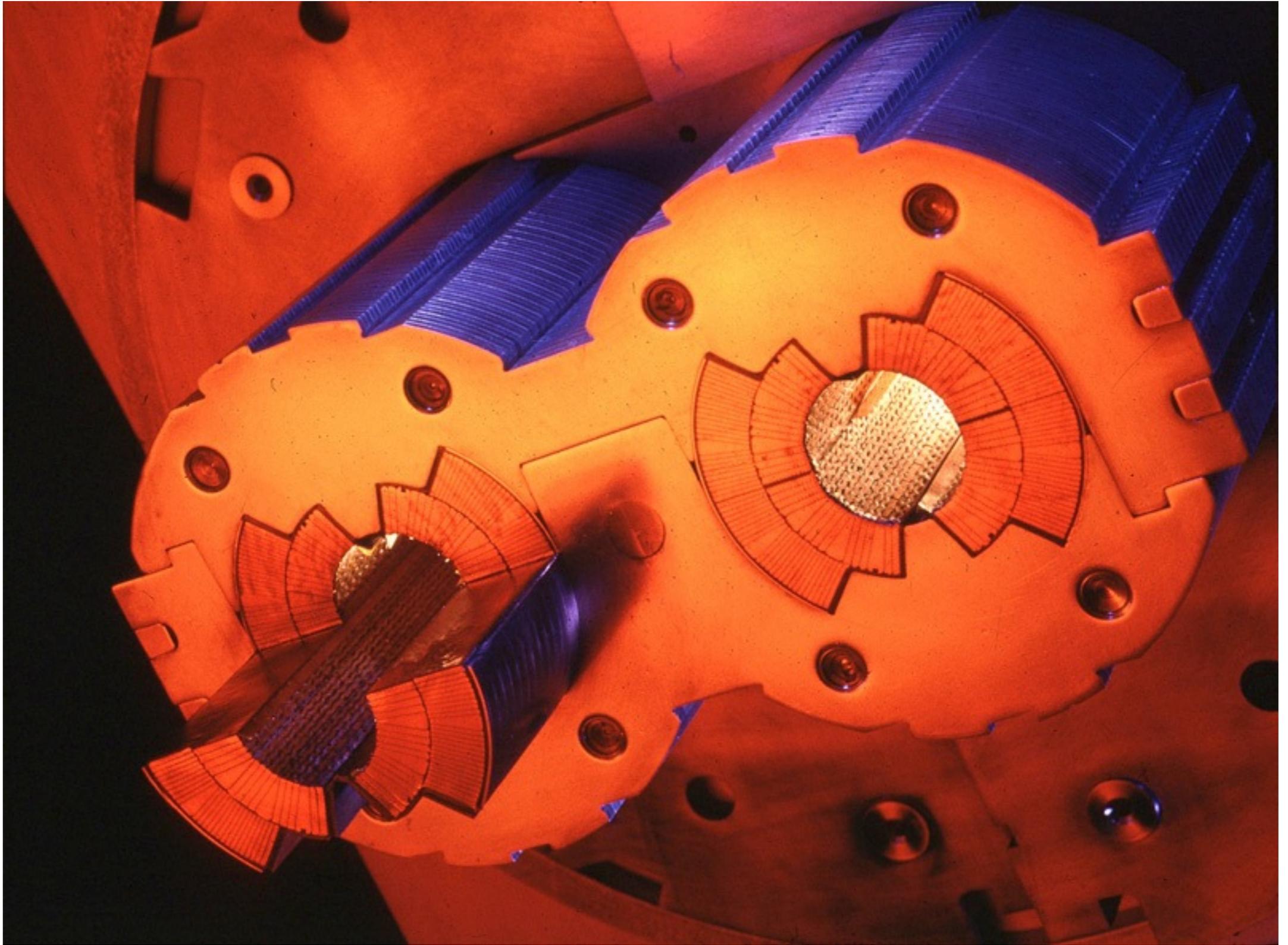


I numeri di LHC

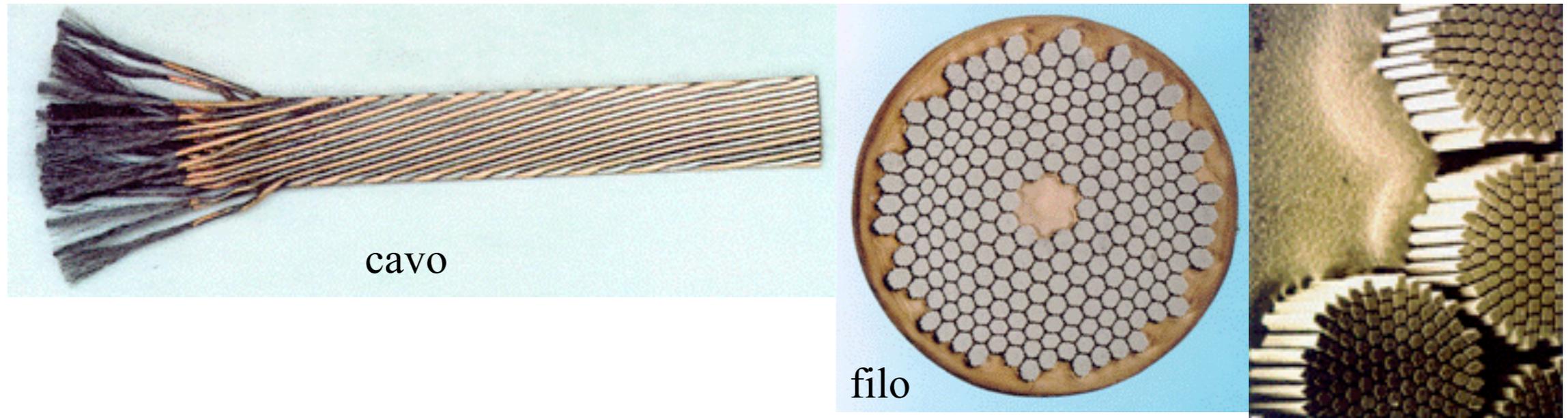


I numeri di LHC

- 1232 dipoli superconduttori ($B_{\max} = 8.4 \text{ T}$) che lavorano a 1.9 K ($-271 \text{ }^\circ\text{C}$)
- 33 000 tonnellate di massa fredda (il più grande sistema di criogenia mai costruito)
- Energia immagazzinata in 1 fascio: 350 MJoule (treno da 400 t a 150km/h)
- 40 MHz: la frequenza con cui si incrociano i fasci
- $\sigma_x = \sigma_y \sim 15 \text{ } \mu\text{m}$ sezione trasversa del fascio nei punti di collisione



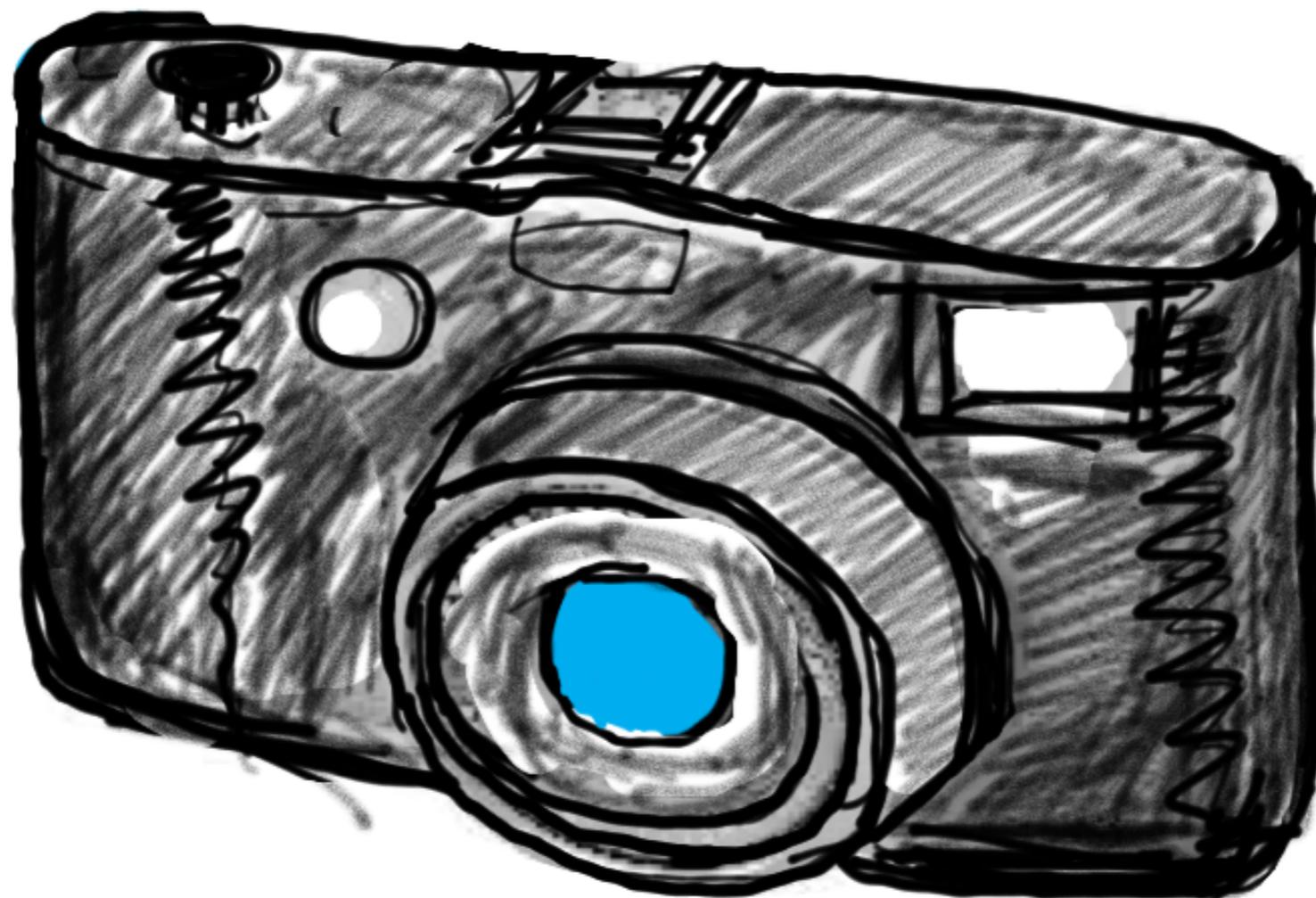
il cavo superconduttore



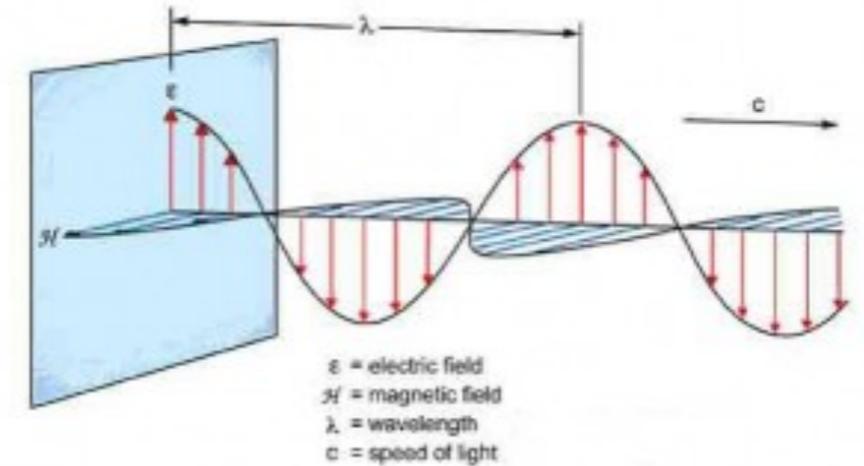
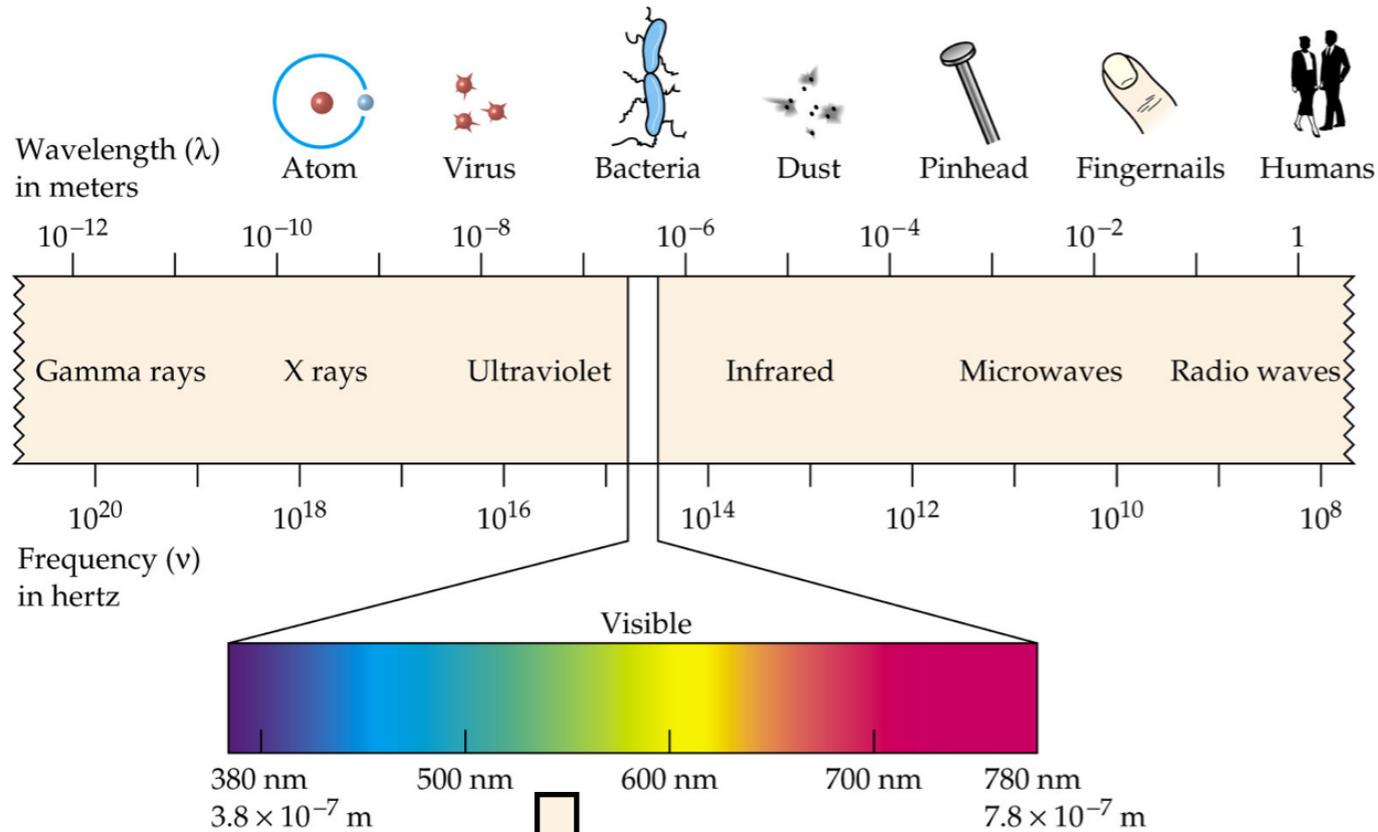
Cavi composti da 36 fili superconduttori, per 6300 filamenti di Niobio-titanio (NbTi) immersi in rame puro. NbTi è una lega superconduttrice sotto i $-263\text{ }^{\circ}\text{C}$.



I rivelatori



Si possono vedere le particelle ?

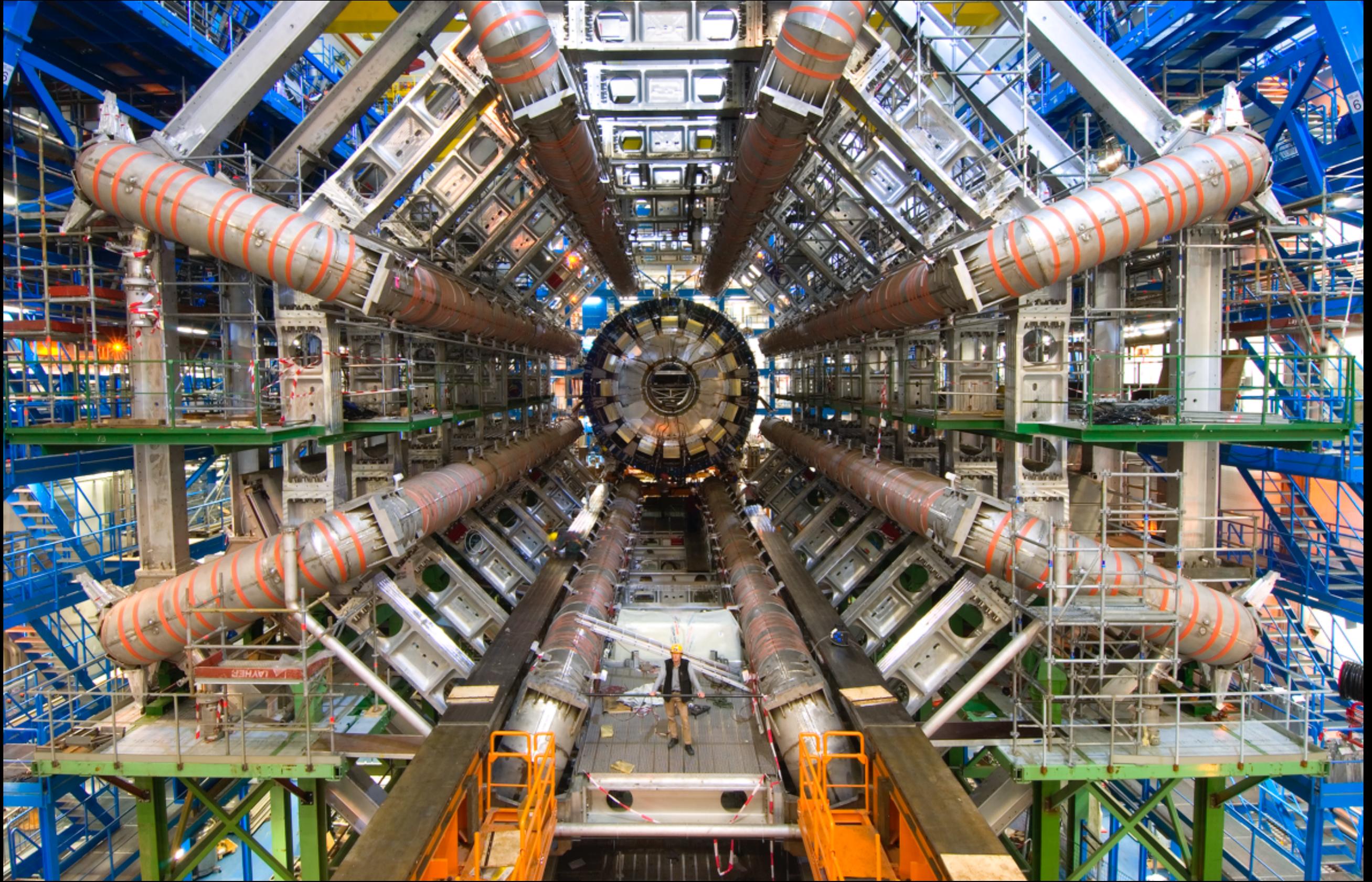


Esiste un limite alle dimensioni che posso “risolvere” con la luce.

Nei rivelatori registriamo gli effetti del passaggio delle particelle



ATLAS: è grande come una cattedrale ed è un vero capolavoro di tecnologia. È come una macchina che fotografa la collisione, facendo circa 300 foto al secondo.



CMS DETECTOR

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

CMS Detector

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel (100x150 μm) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips (80x180 μm) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ 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

14000 t

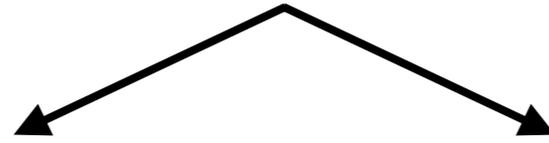
7m

29m

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

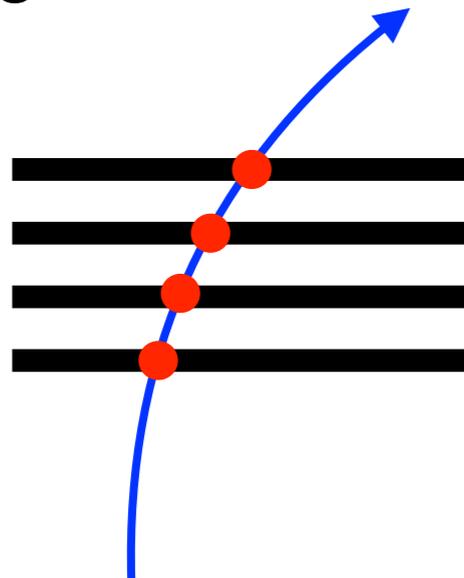
HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels

Due grandi famiglie di rivelatori



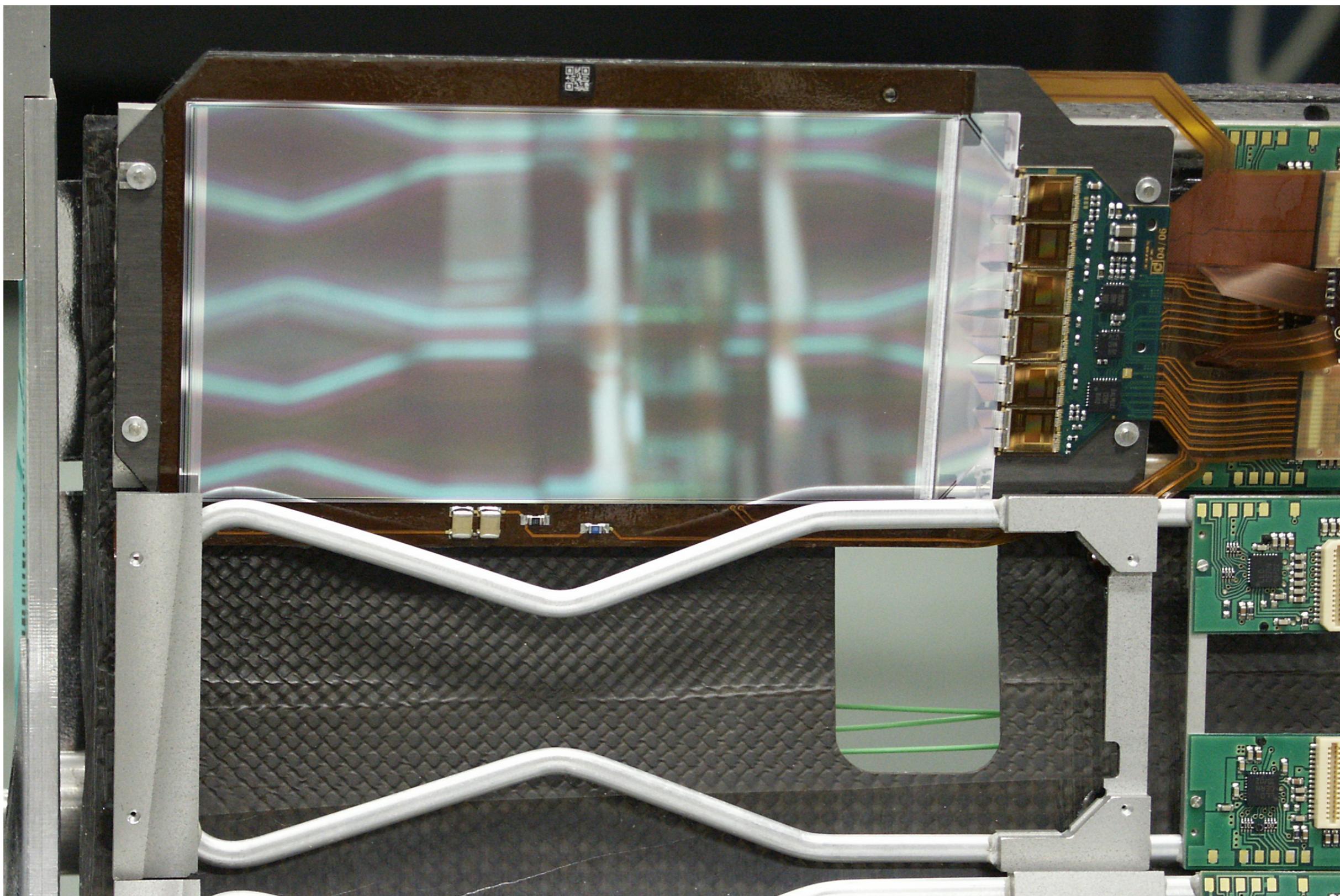
Tracciatori

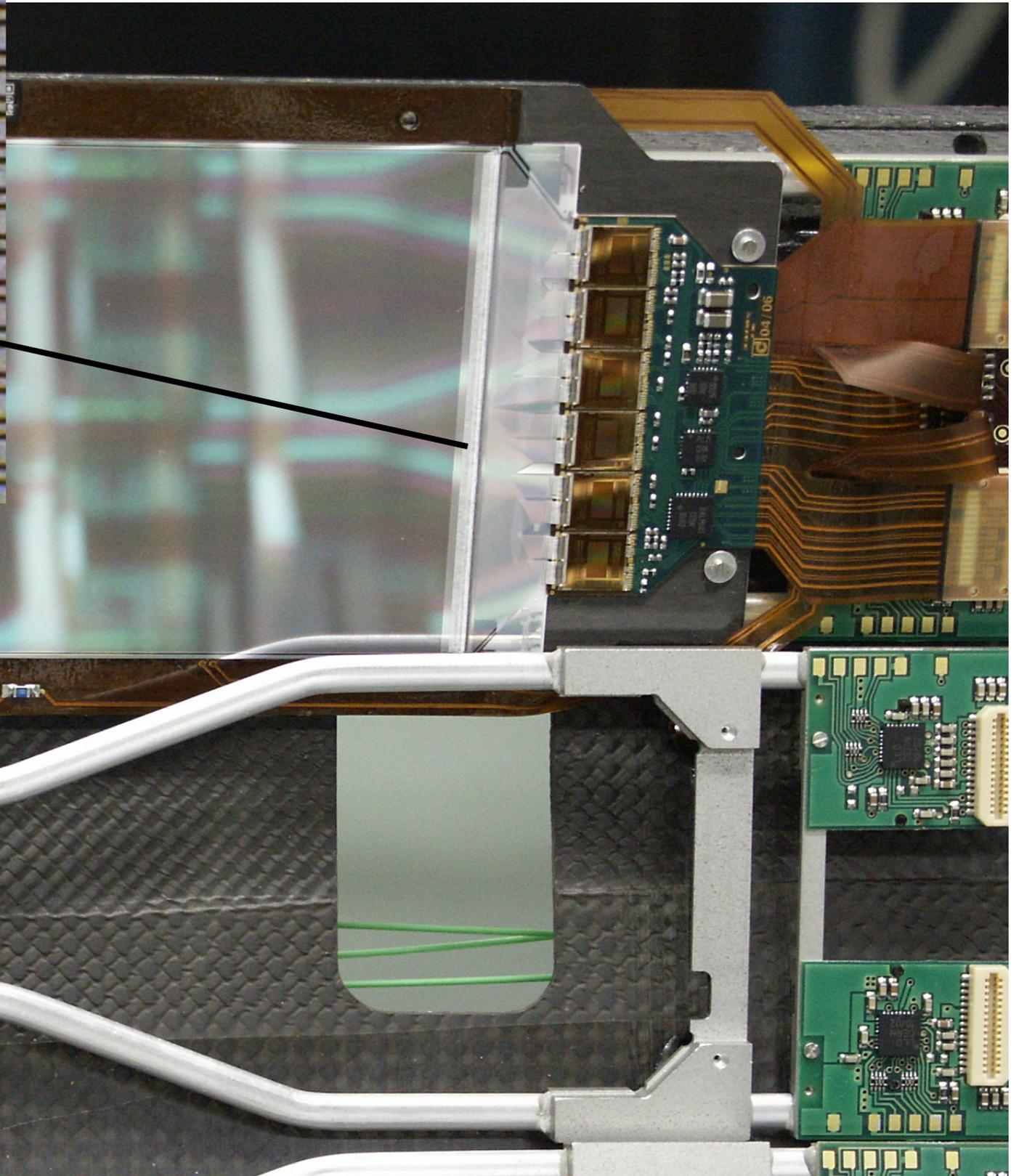
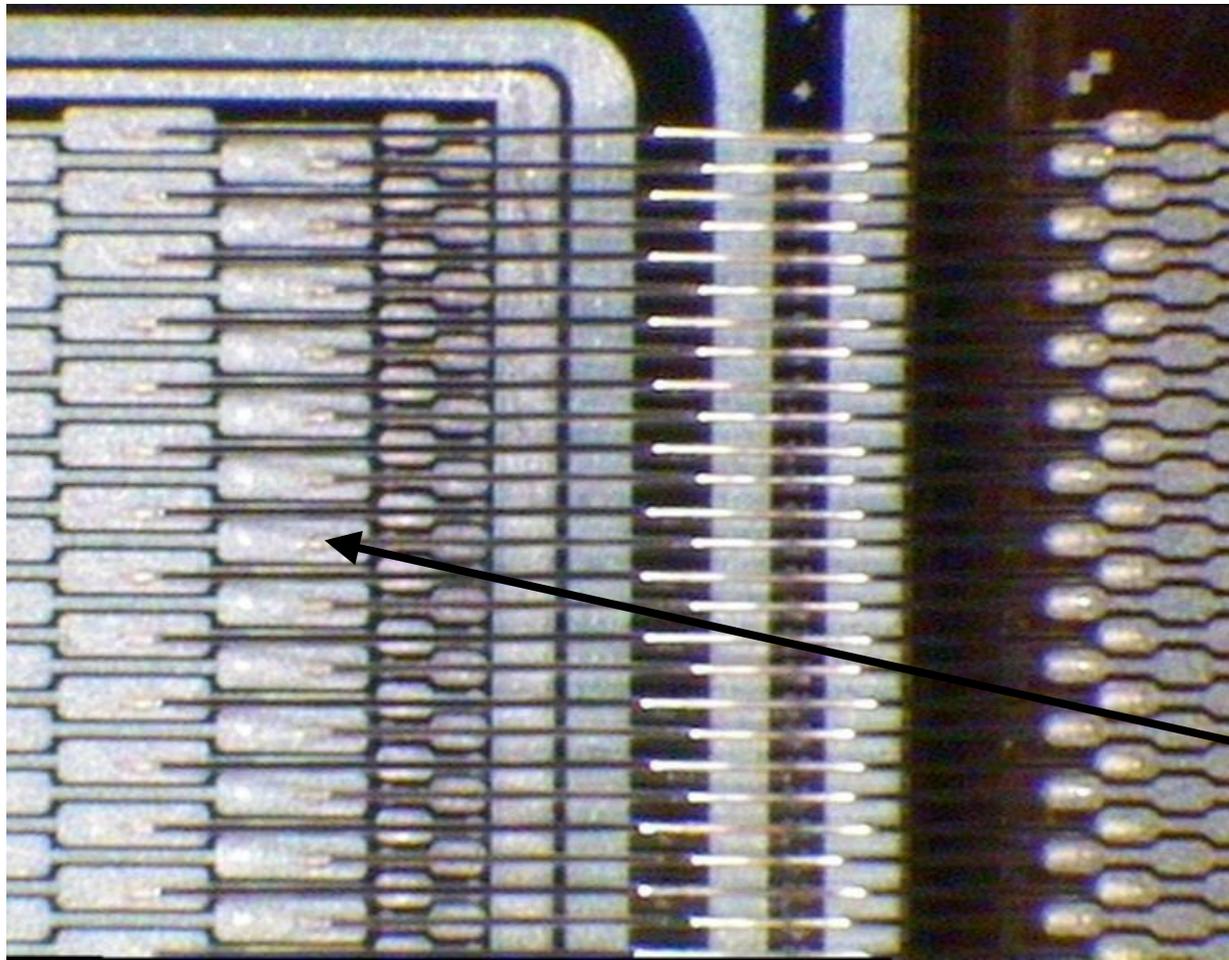
- rivelano il passaggio di particelle cariche
- NON fermano la particella
- Impulso della particella misurato dalla curvatura della traccia in campo magnetico

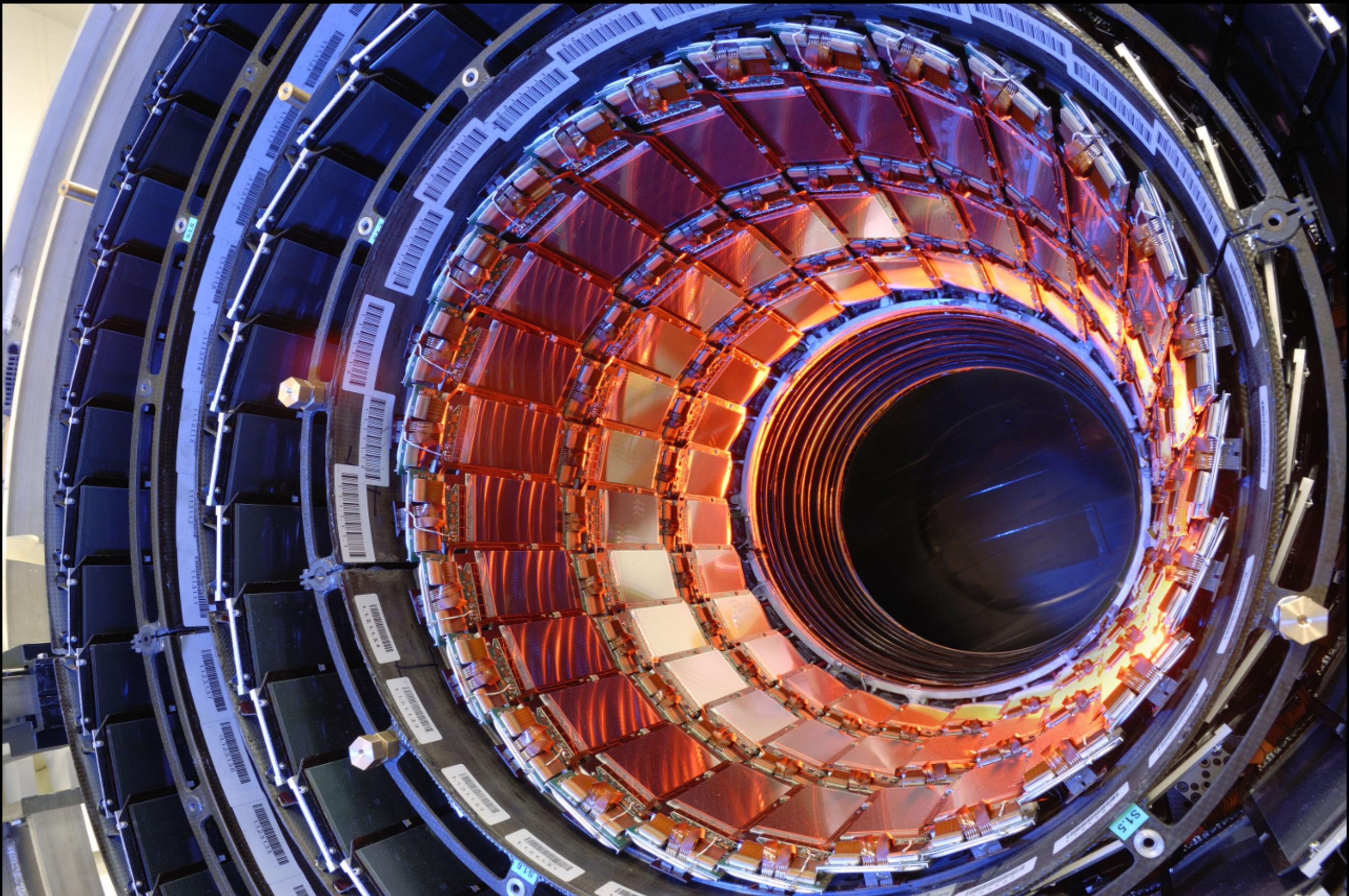


Calorimetri

- assorbono le particelle (cariche e neutre)
- restituiscono un segnale proporzionale all'energia assorbita
- possono essere specializzati per determinati tipi di particelle
- esempio: calorimetro elettromagnetico per e^- e fotoni

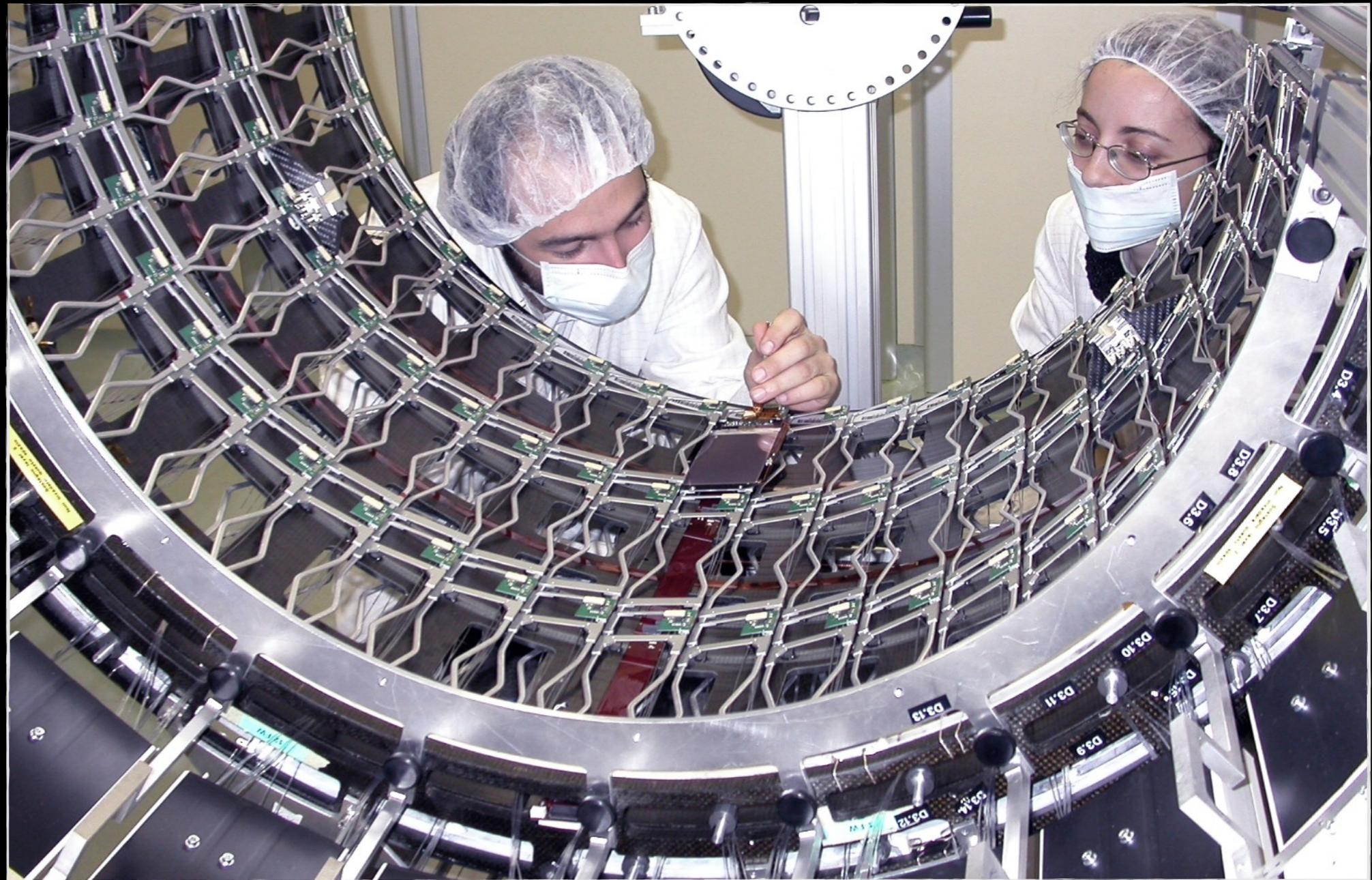




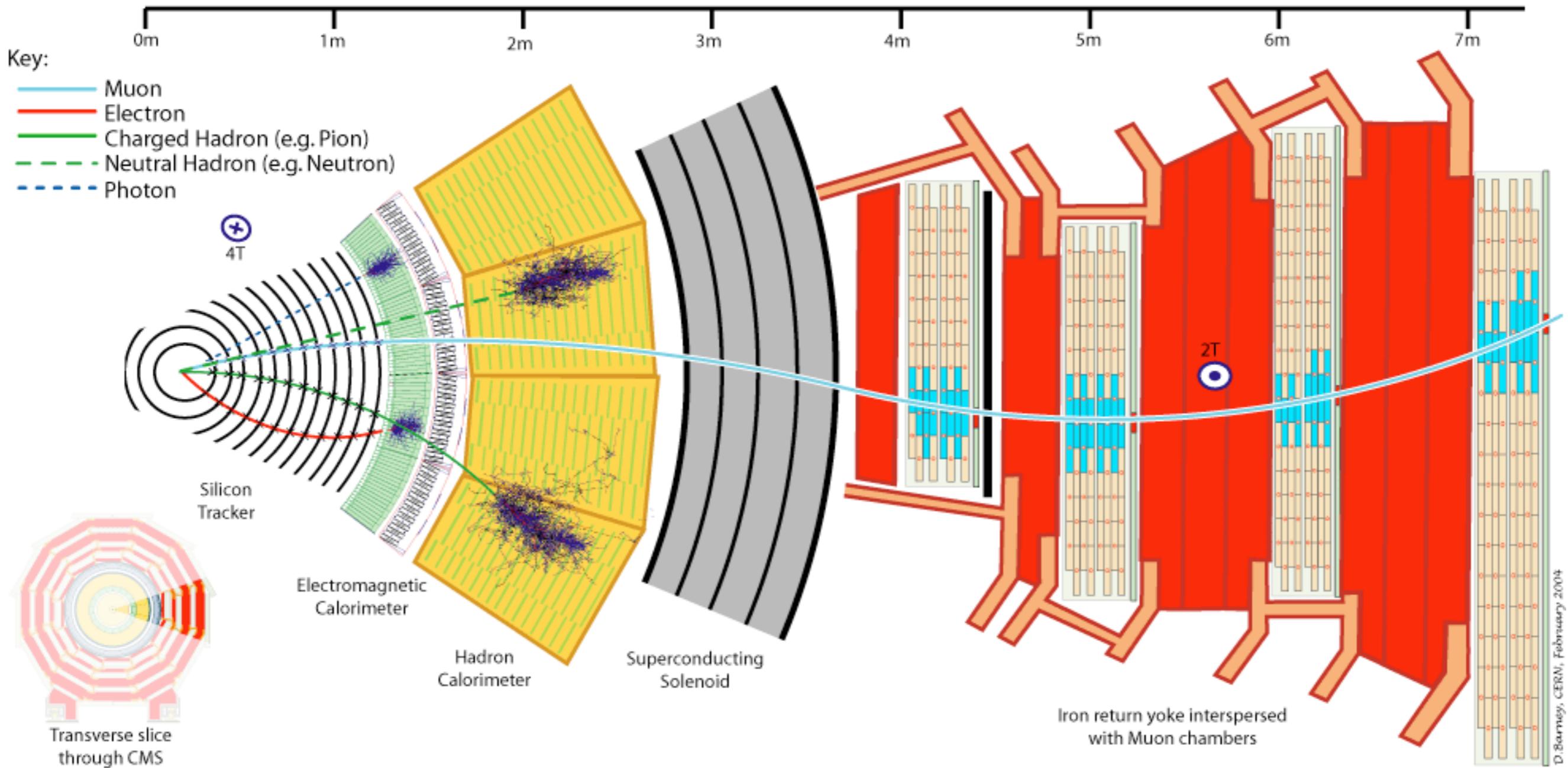


Metà del tracciatore interno centrale, il cuore dell'apparato CMS, è nata nei laboratori del Polo Scientifico di Sesto Fiorentino.

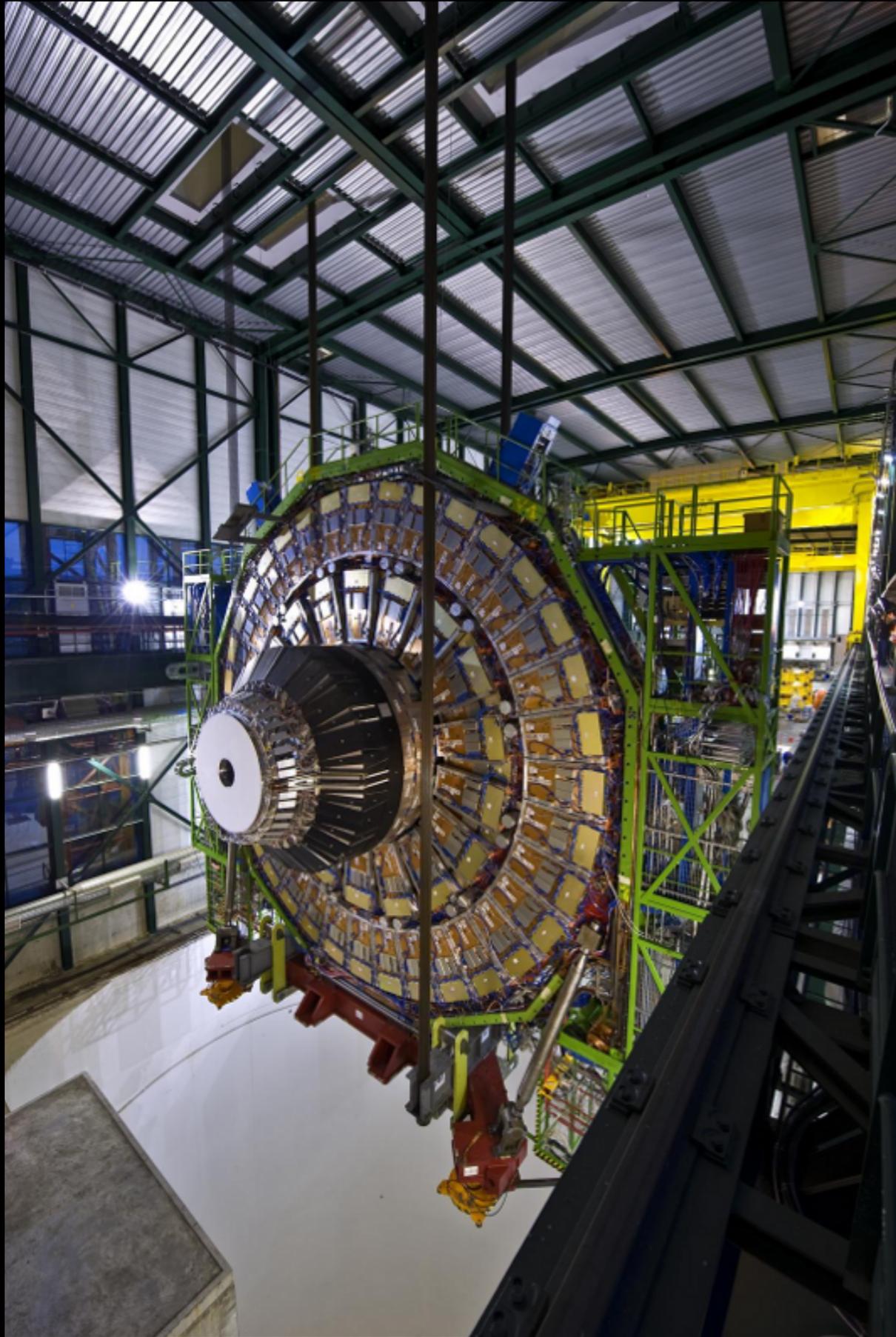
Un sofisticato sistema di circa 15 mila sensori al silicio che coprono una superficie totale di 200 m², circa 10 milioni di canali di elettronica, che scatta 40 milioni di fotografie al secondo !

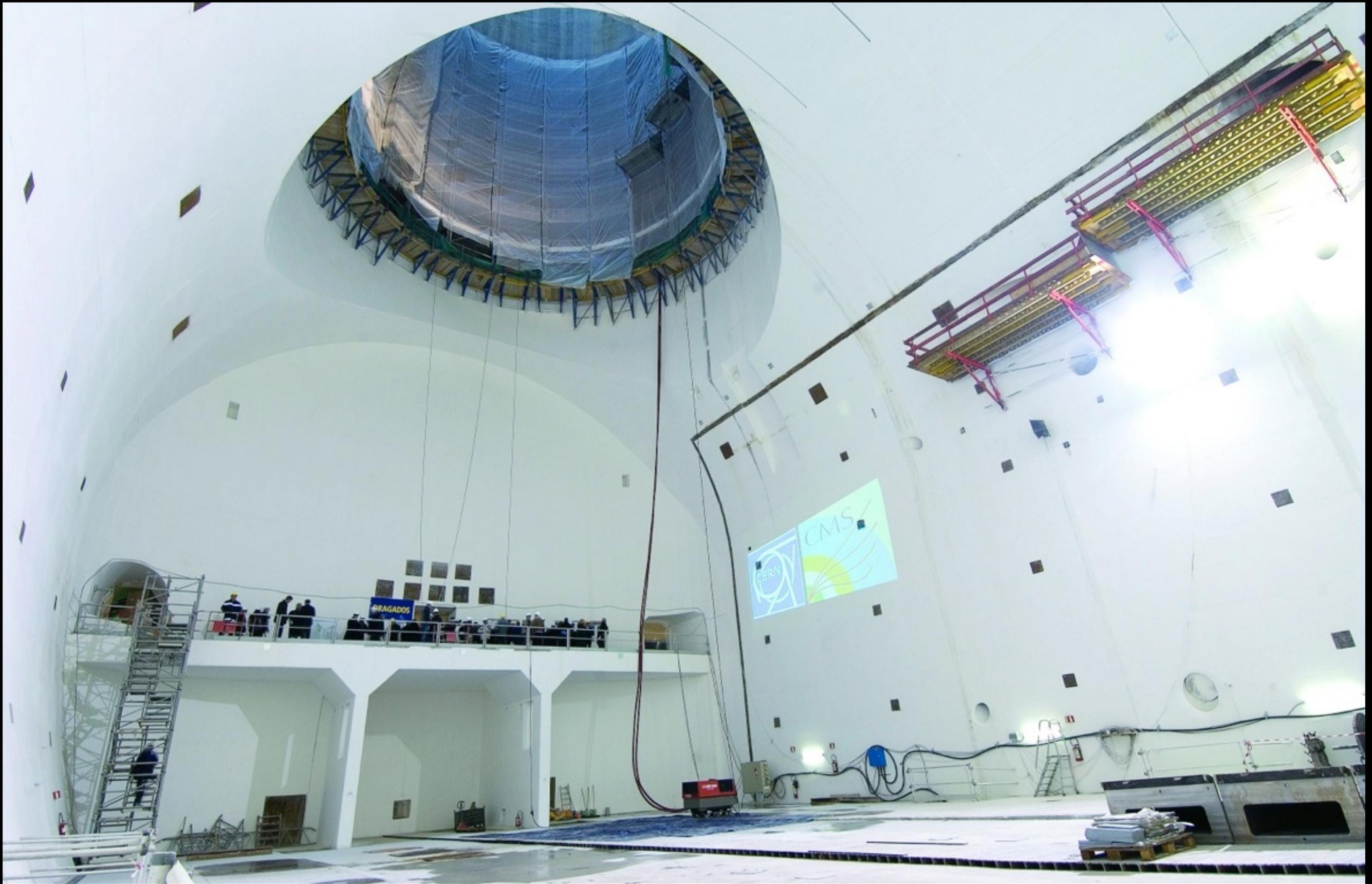


Uno spaccato di CMS



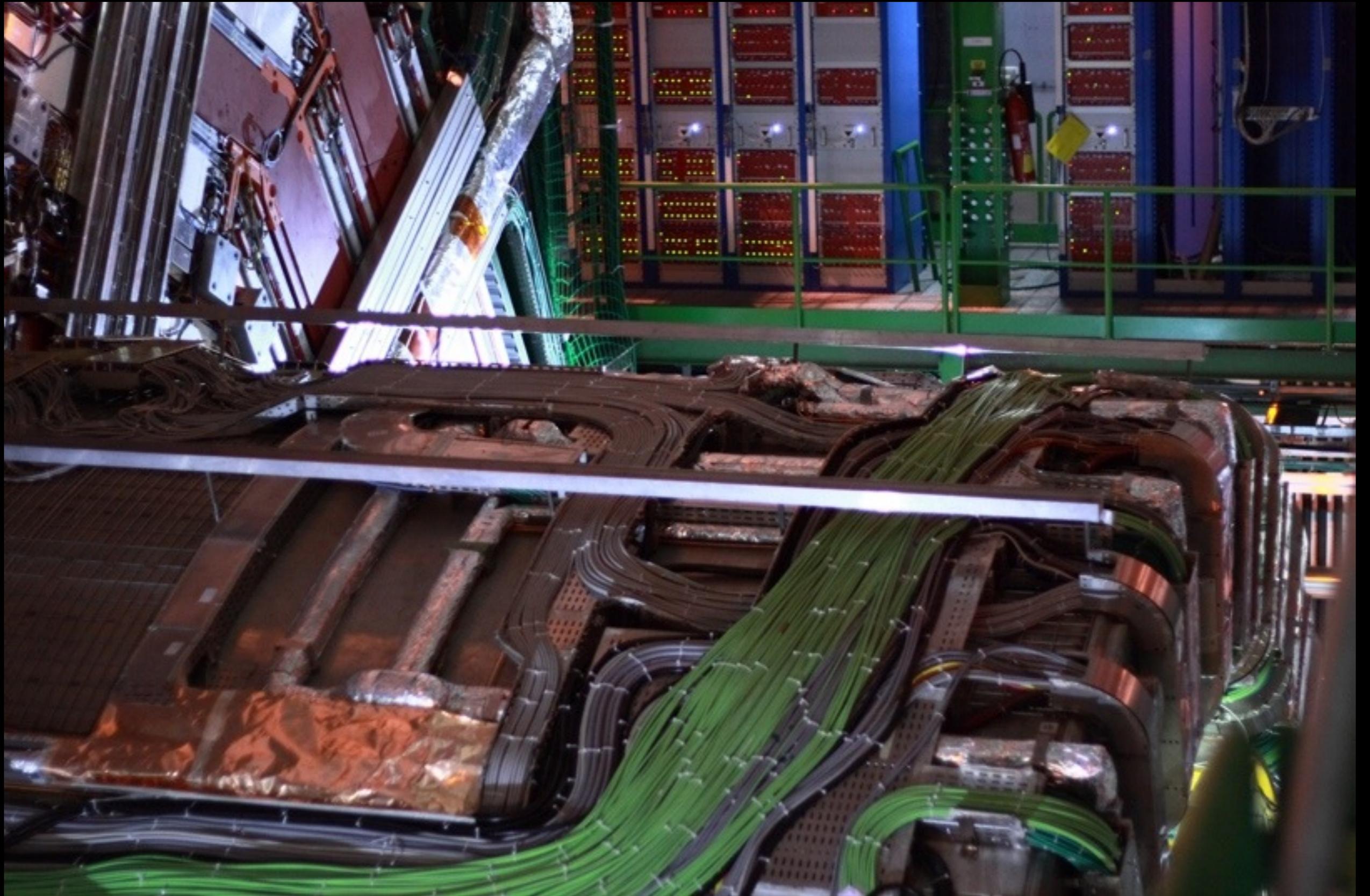
1993-2008 15 anni di sviluppo e costruzione !

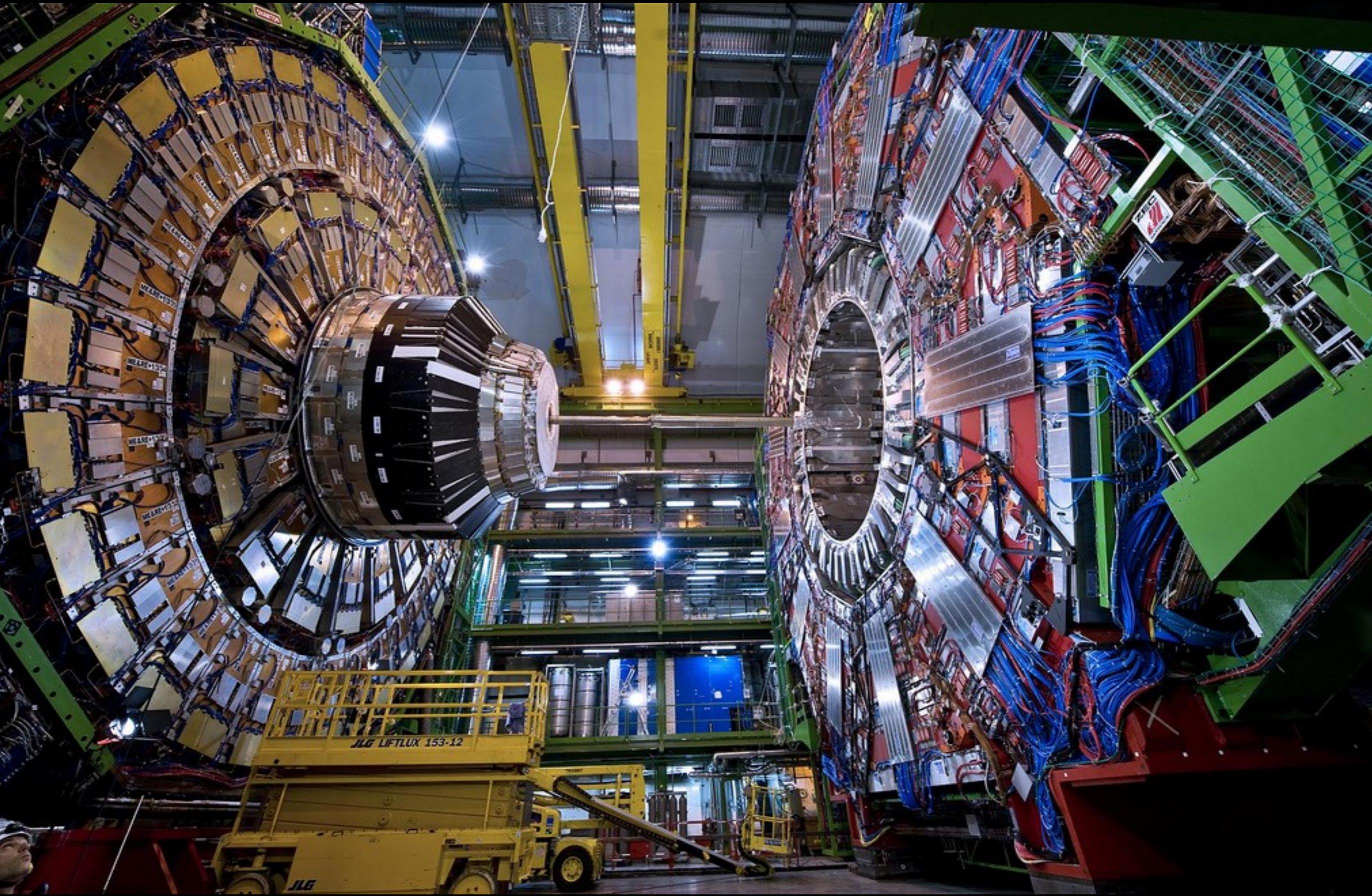




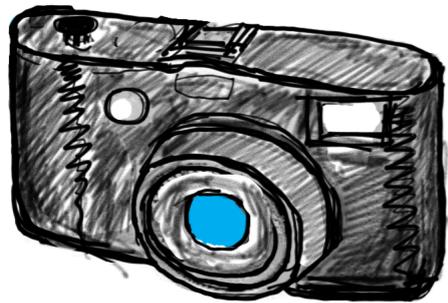


ME-11/04
HE-RBX 04
ME-11/07
ME-11/06
ME-11/05
ME-11/04
HE-RBX 03
ME-11/03
ME-11/02
HE-RBX 02
ME-11/01
ME-11/01
HE-RBX 01
ME-11/36
HE-RBX 18
ME-11/35
ME-11/34





I computers





Il CERN è sempre stato all'avanguardia nel campo del calcolo:

- ricostruzione degli eventi
- simulazione
- controlli automatici



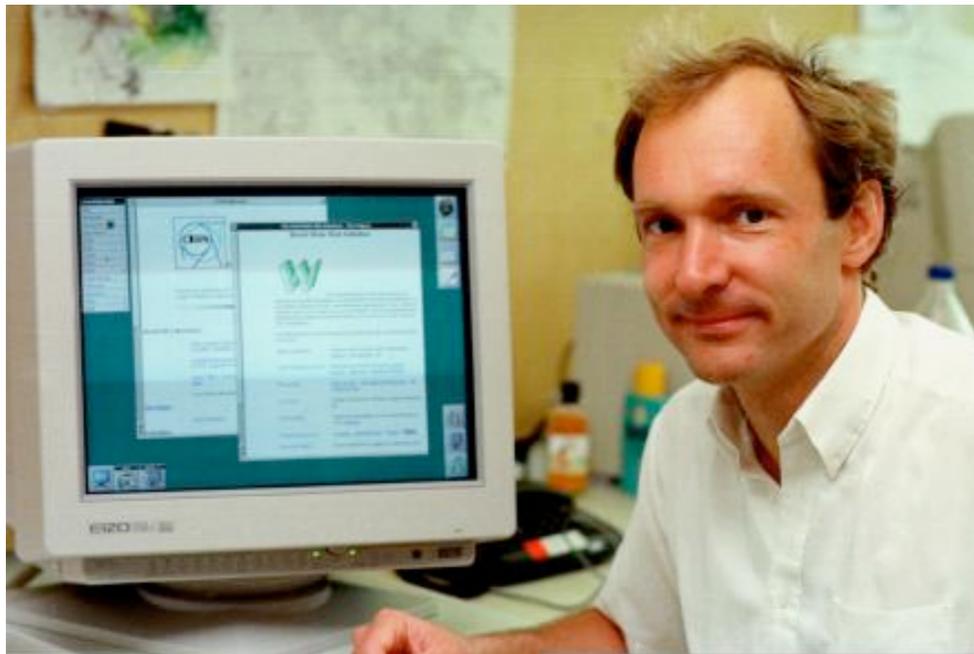
GRID = Big data

> 20 Peta-byte per esperimento

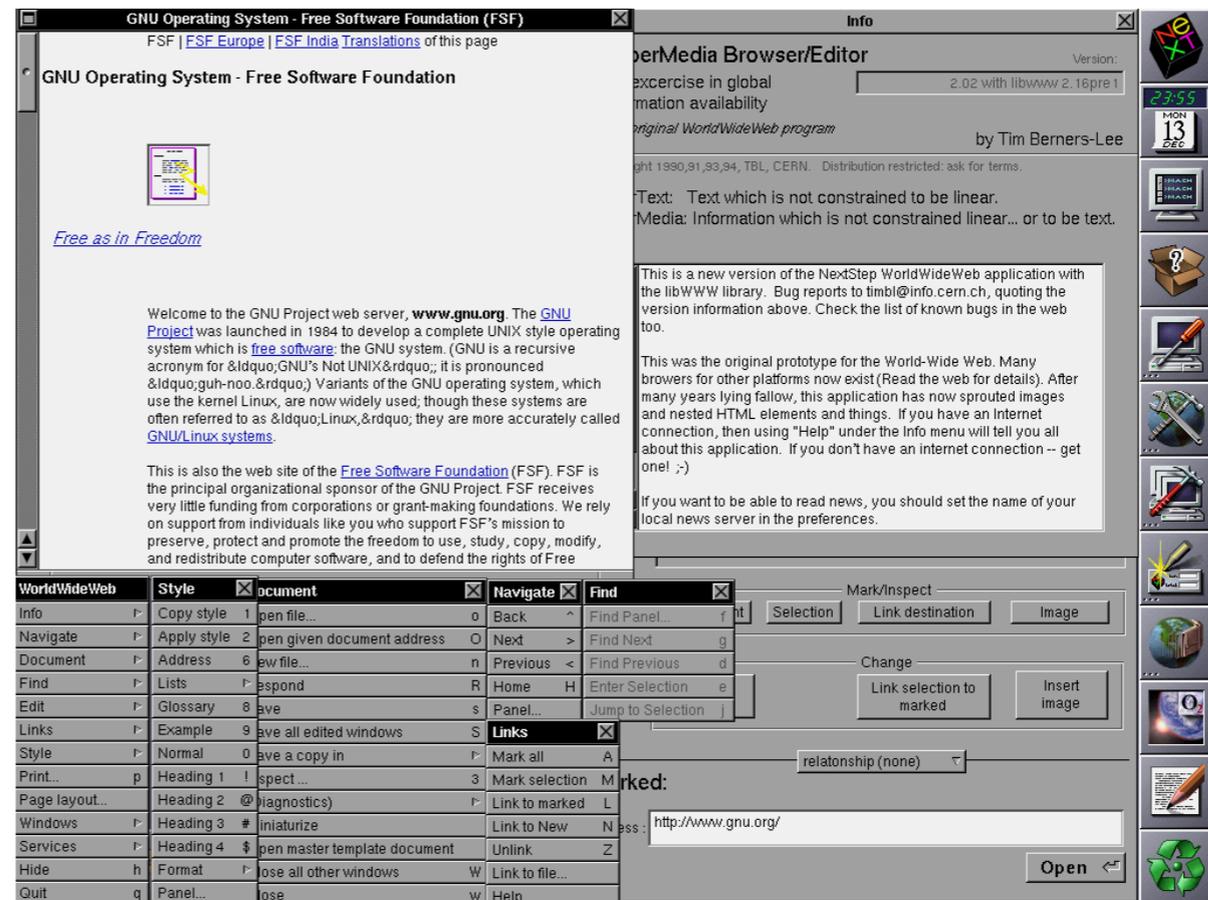


http://www

il world wide web

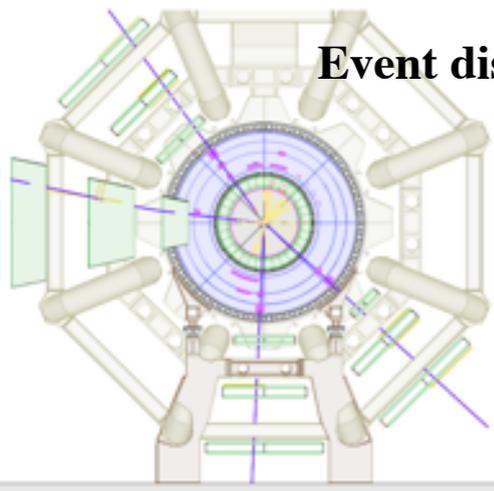


Nel 1989, Tim Berners Lee lavorava al CERN quando inventò il web, insieme a Robert Cailliau



Event display of a 4mu candidate with the 4 muons invariant mass: $m(4\mu) = 124.6 \text{ GeV}$.

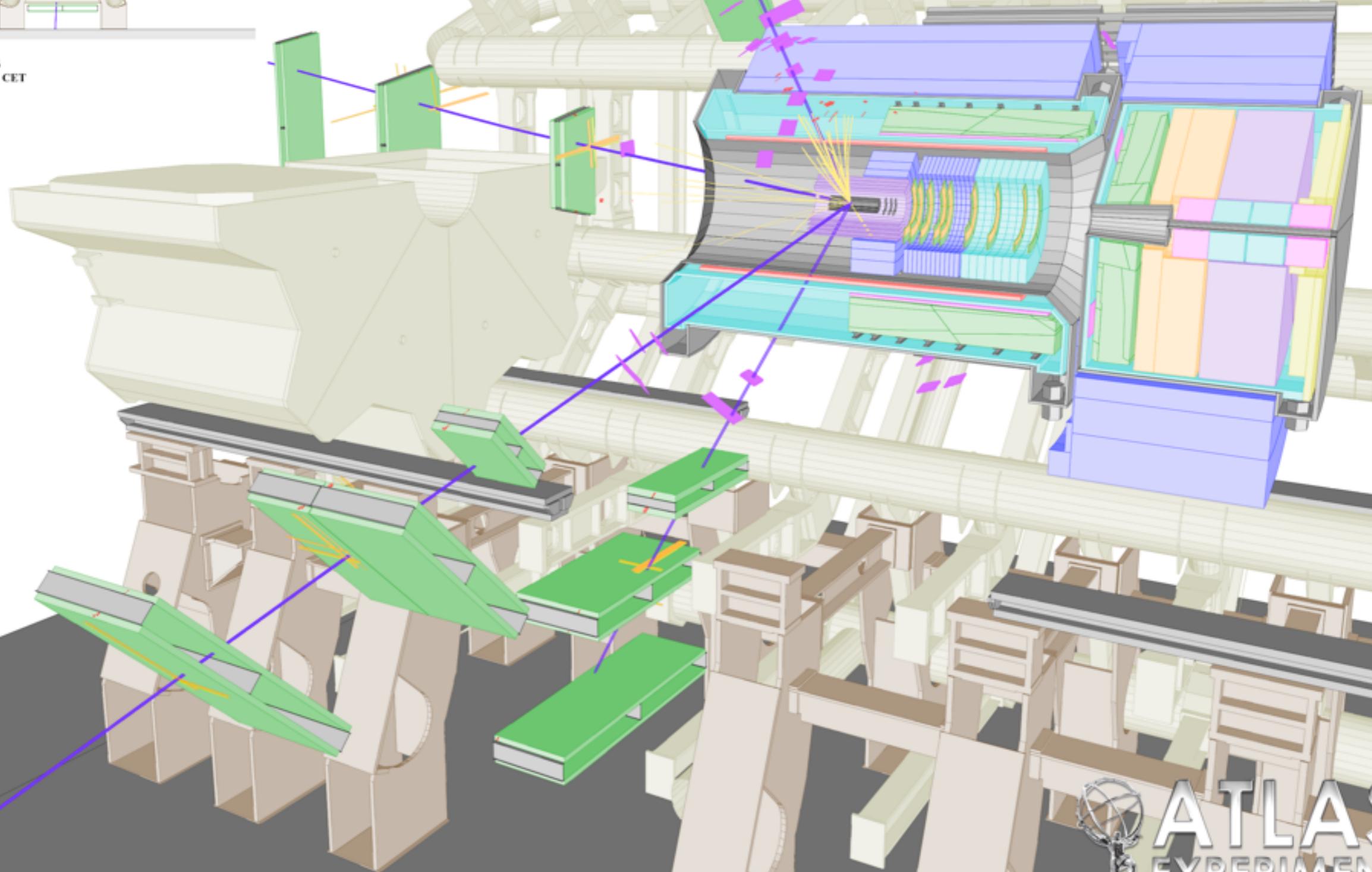
RunNumber: 189280, EventNumber: 143576946



Run Number: 189280,
Event Number: 143576946
Date: 2011-09-14, 11:37:11 CET

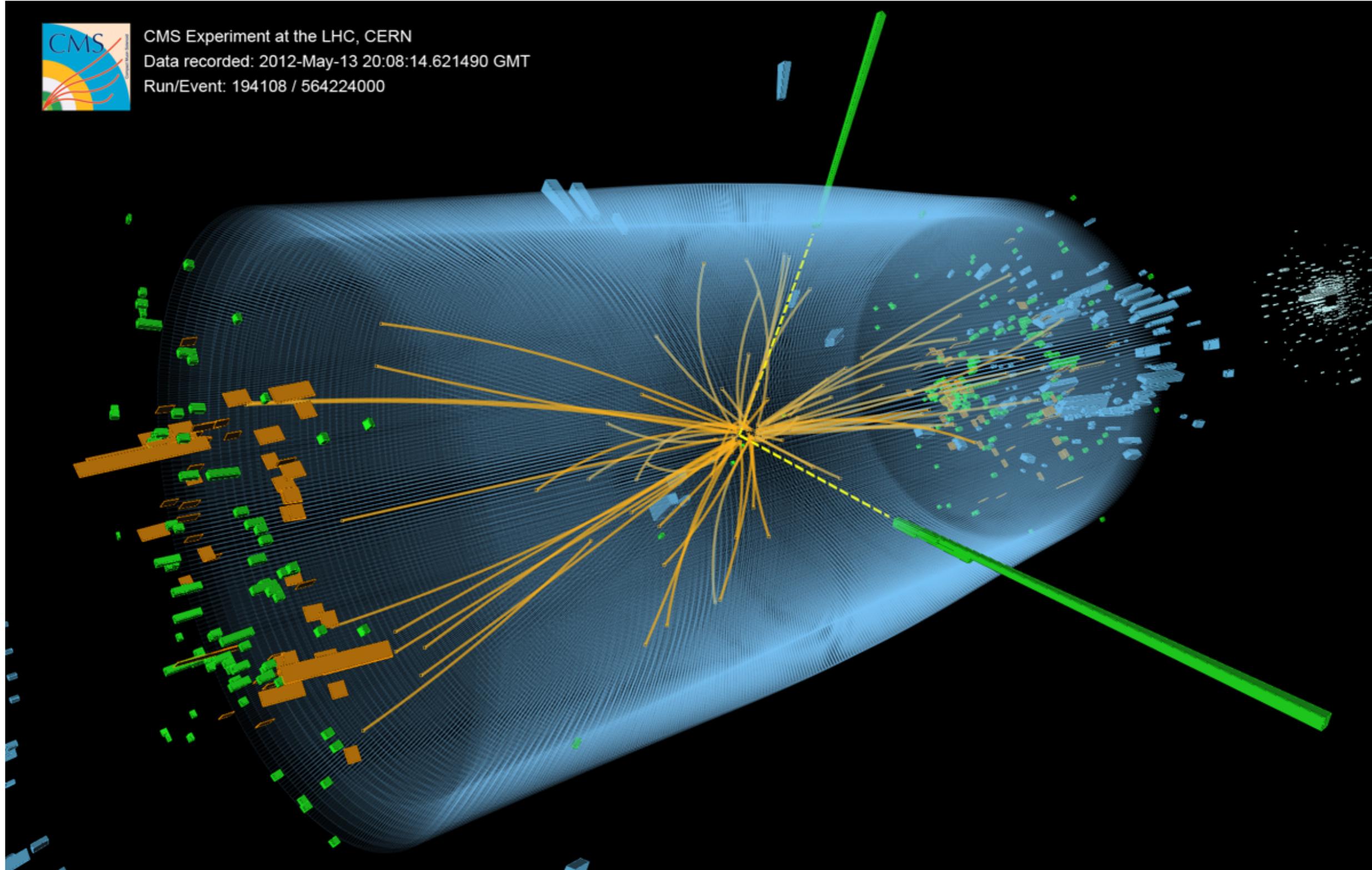
EtCut=0.3 GeV
PtCut=3.0 GeV
Vertex Cuts:
Z direction <1cm
Rphi <1cm

Muon: blue
Cells: Tiles, EMC





CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000





CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2011-Jun-05 09:01:21.346043 GMT(04:01:21 CDT)

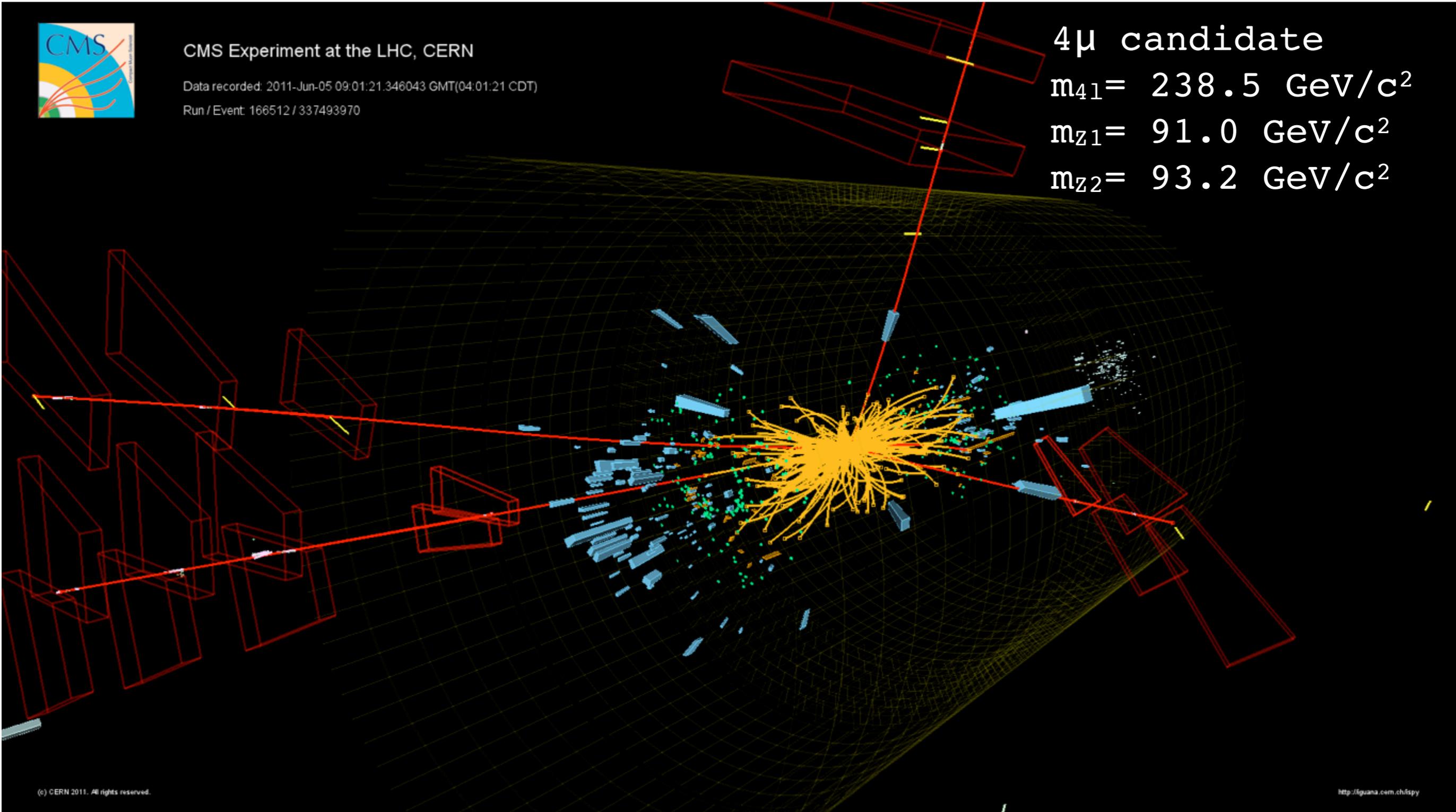
Run / Event: 166512 / 337493970

4 μ candidate

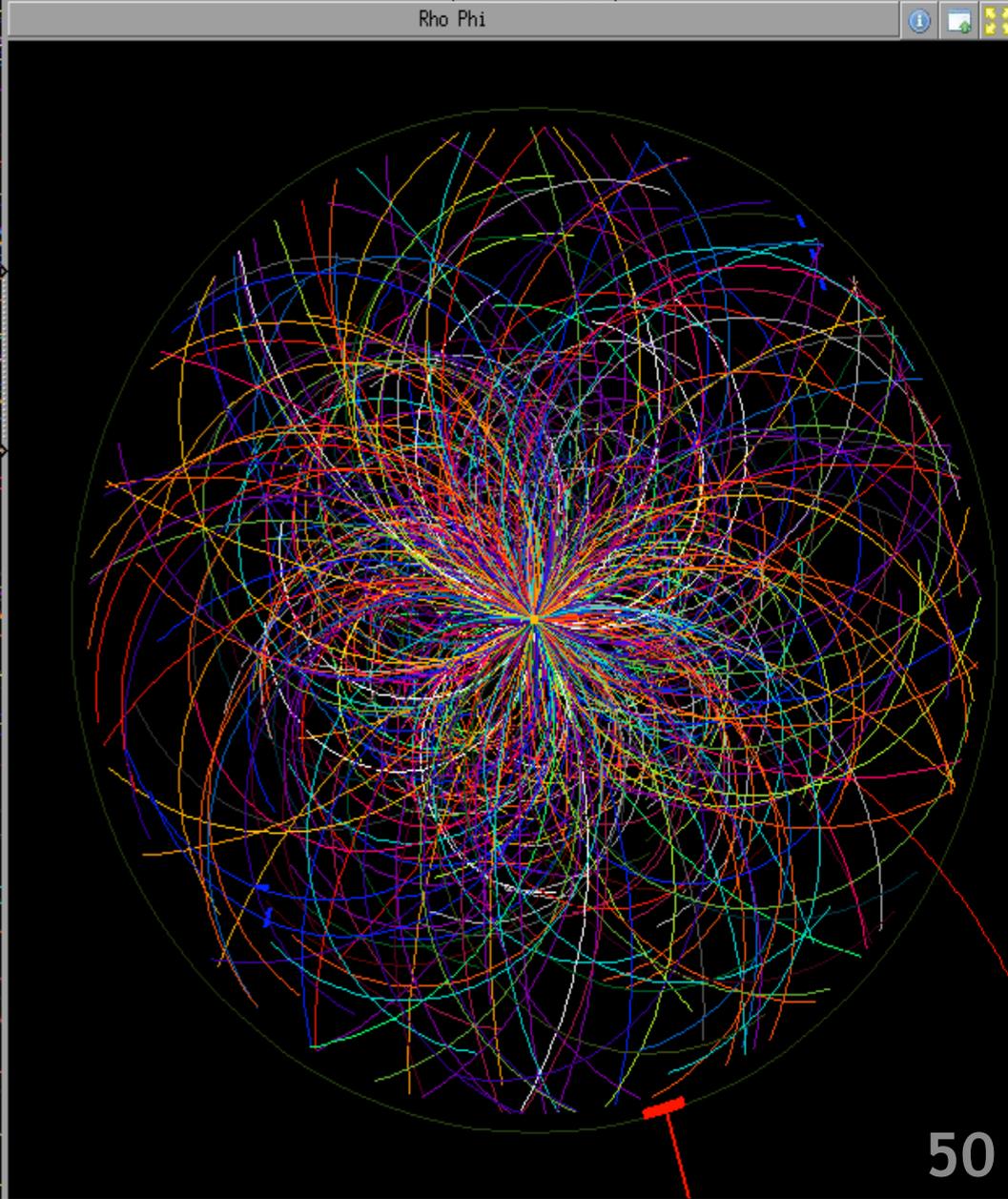
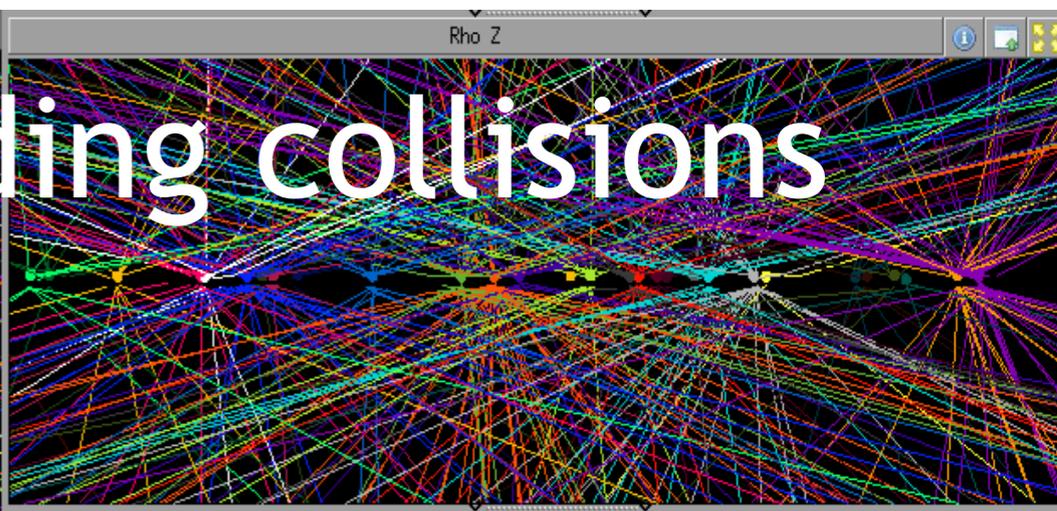
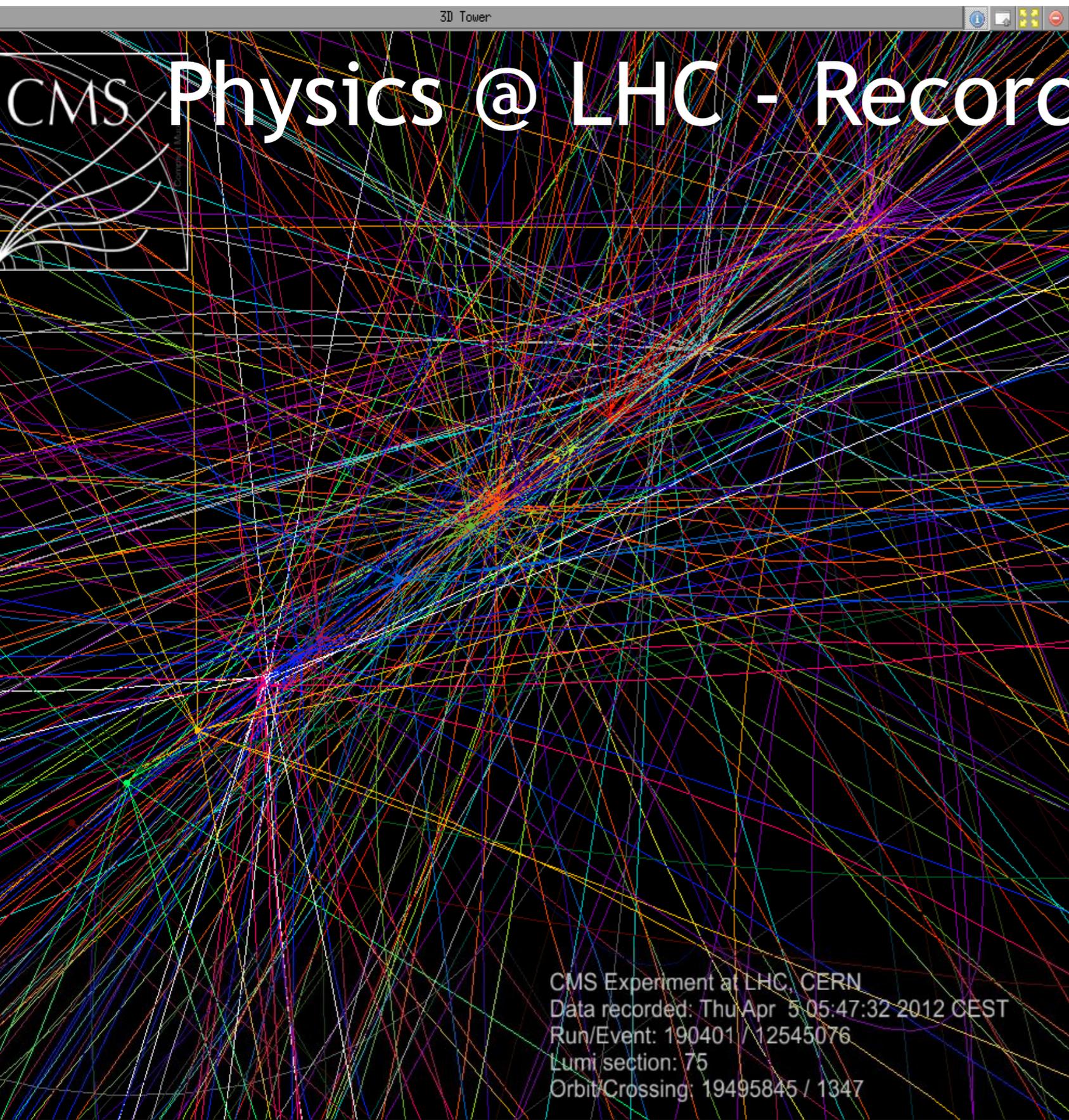
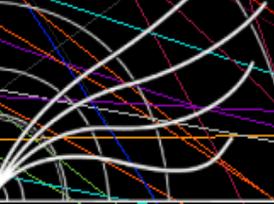
$$m_{41} = 238.5 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_{Z1} = 91.0 \text{ GeV}/c^2$$

$$m_{Z2} = 93.2 \text{ GeV}/c^2$$

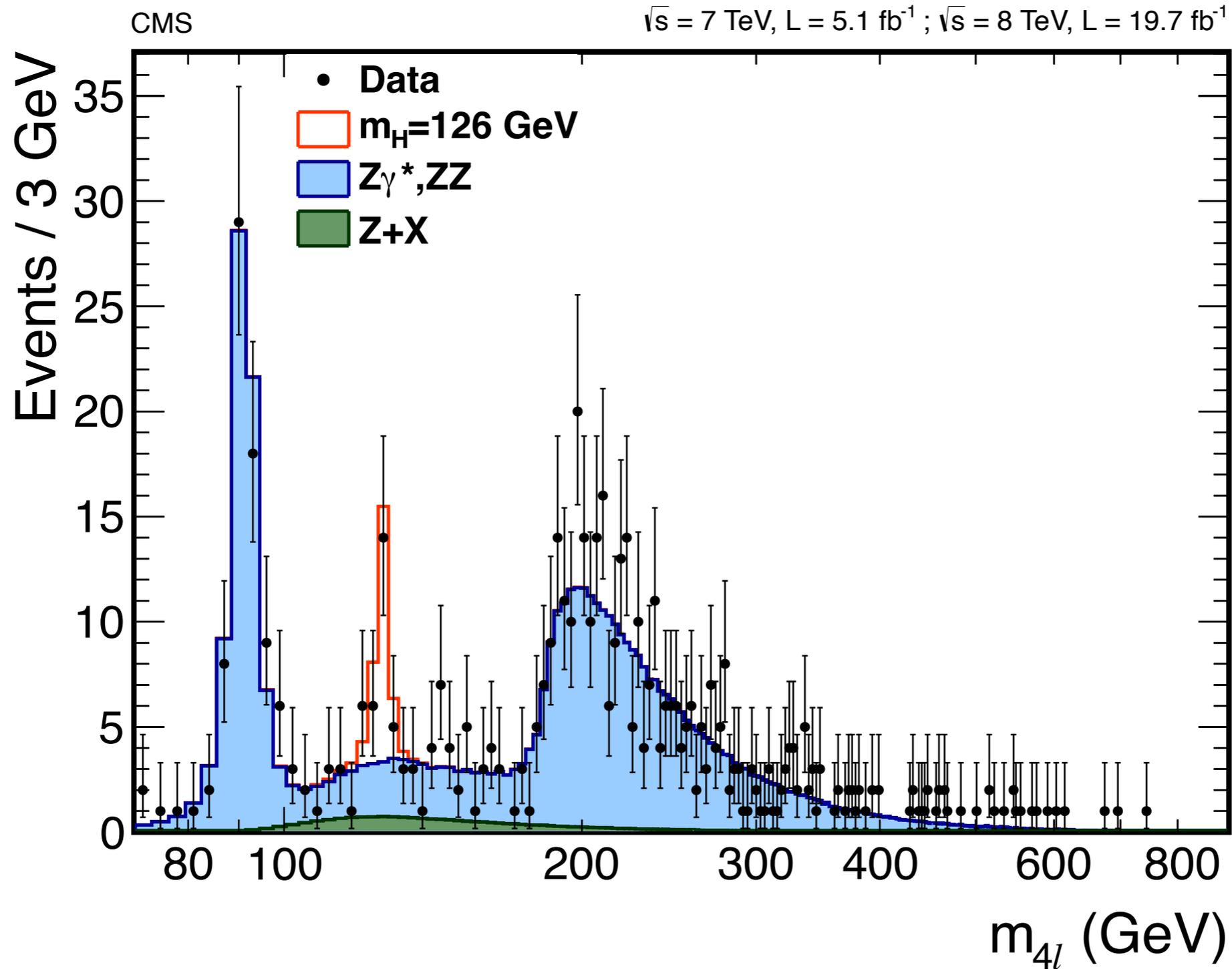


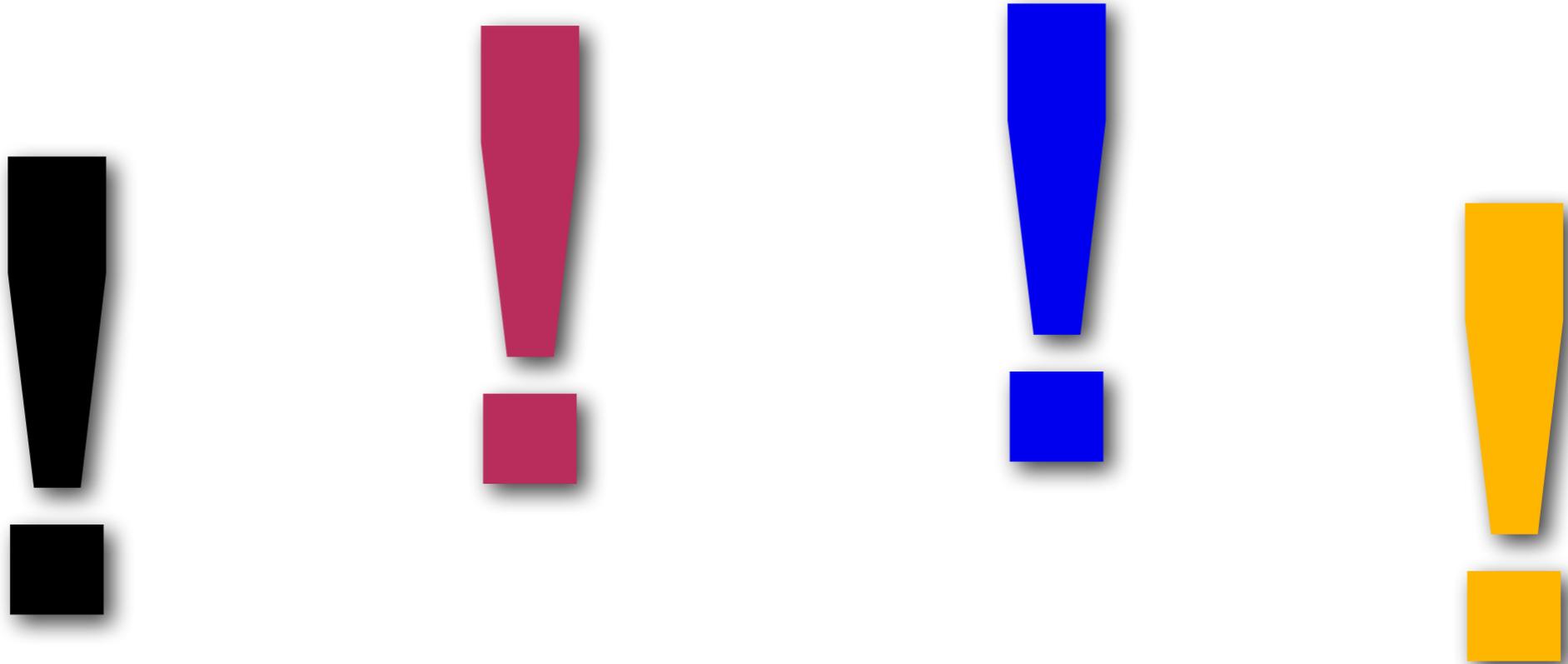
CMS Physics @ LHC - Recording collisions



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Thu Apr 5 05:47:32 2012 CEST
Run/Event: 190401 / 12545076
Lumi section: 75
Orbit Crossing: 19495845 / 1347

CMS: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$





**Abbiamo scoperto
tutto !**

... È impressionante quello che NON sappiamo !



- **Siamo solo all'inizio !**
 - ci sono altre particelle di Higgs ?
 - quali altre particelle ci consentirà di scoprire ?
 - di cosa è fatto il nostro universo ?
 - esistono altre dimensioni oltre alle 4 conosciute ?
- **Cosa è la materia oscura ?**

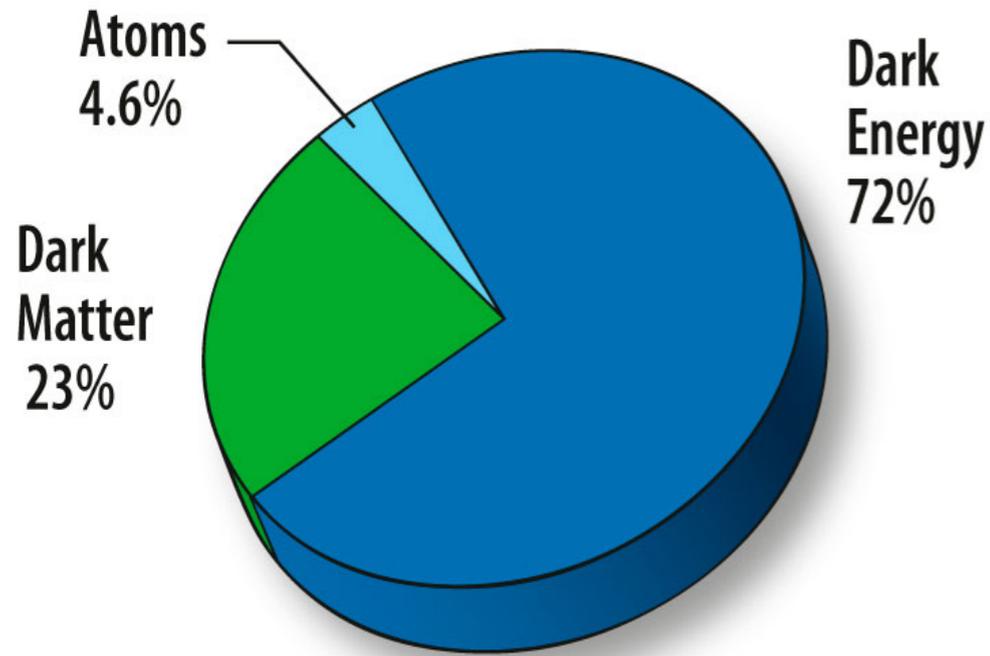


Materia Oscura (Dark Matter) = materia che non interagisce con la radiazione elettromagnetica

Non le possiamo vedere, ma sappiamo della sua presenza dagli effetti gravitazionali

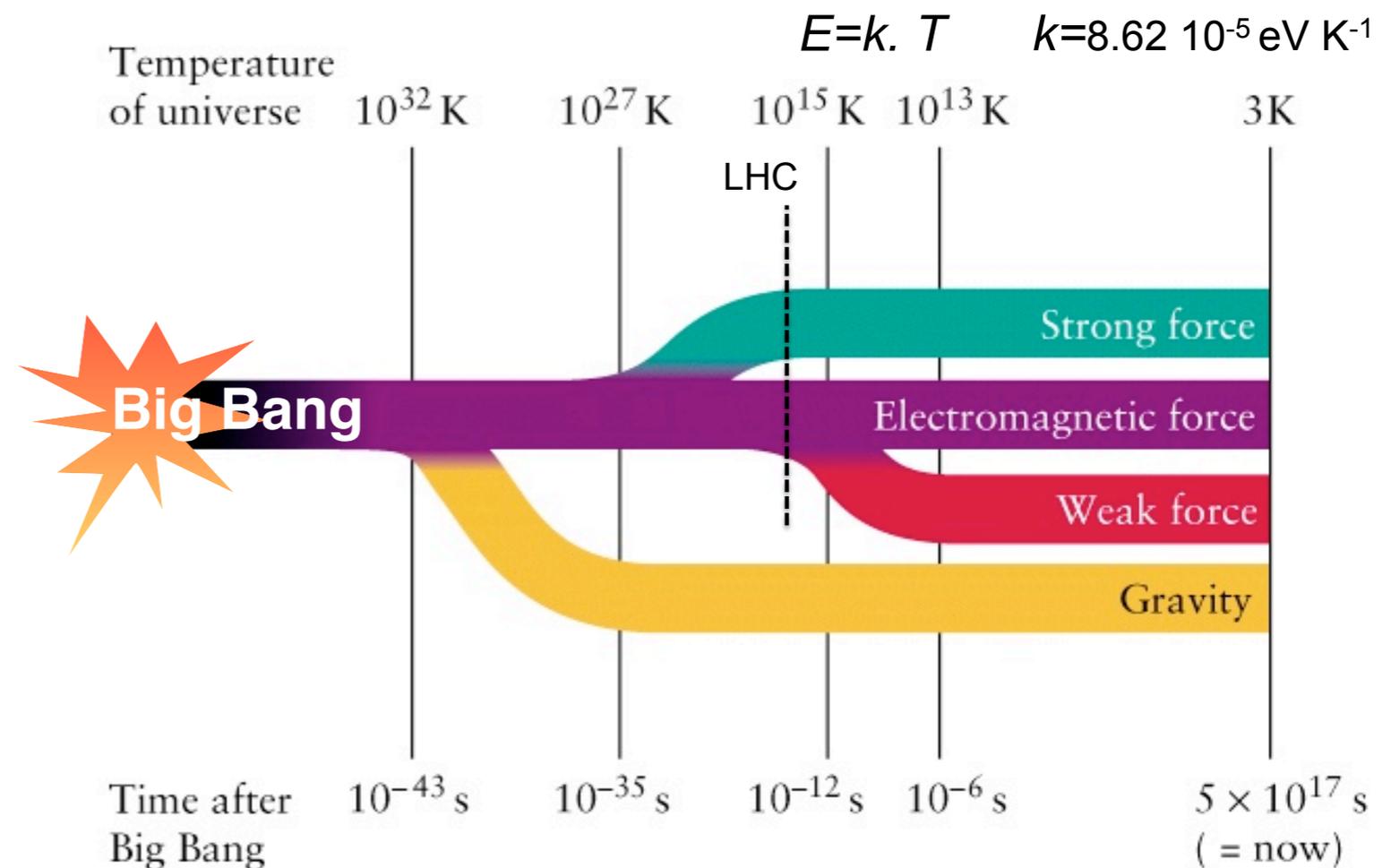
Per esempio è necessaria per tenere insieme le galassie, e per tenere insieme gli ammassi di galassie

La materia oscura che tiene insieme l'universo è costituita da un insieme di particelle elementari create al momento del Big Bang.



Le particelle che conosciamo compongono solo il 4% di tutto l'universo. Gran parte della massa non è visibile ma ne misuriamo gli effetti gravitazionali

È possibile che ad alta energia tutte le forze siano unificate in una sola interazione fondamentale ?



... buon lavoro !

- La fisica seleziona un aspetto della realtà: ciò che posso misurare in modo riproducibile
- Misurare significa mettere cose in relazione
 - è alla base dei nostri processi cognitivi.
- La fisica propone sempre una schematizzazione della realtà
 - l'ambito di validità di ogni modello non è infinito
 - l'esperimento è sovrano → una teoria cessa di valere non appena contraddetta dall'esperimento
- **Il mondo di oggi richiede innovazione, interdisciplinarietà e creatività:**
 - non si può prescindere dalla visione data dalla scienza fondamentale



Alcuni link

Arte e Scienza	https://web.infn.it/artandscience/index.php/en/
Rivista Asimmetrie	www.asimmetrie.it
Fisicast	http://www.radioscienza.it/2016/06/25/la-materia-oscura/
INFN:	http://home.infn.it/it/ home.infn.it/it/comunicazione
CERN TV:	www.youtube.com/cern

BACKUP

BACKUP

L'energia di un acceleratore

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

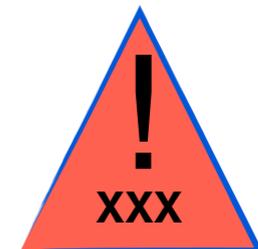
$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} \quad (M_p \sim 1 \text{ GeV}/c^2)$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV}/c^2 = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} : \text{sempre vera}$$

“Dall'annichilazione di un protone a riposo posso ottenere una energia nel centro di massa pari a 0.938 GeV”

→ conseguenza della relativita' ristretta: $E = mc^2$



Group

		Group																	
		I	II											III	IV	V	VI	VII	VIII
Period	1	1 H																	2 He
	2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
	6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
	7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
	8	119 Uun																	
		* Lanthanides		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
		** Actinides		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Alkali metals	Alkaline earth metals	Lanthanides	Actinides	Transition metals
Poor metals	Metalloids	Nonmetals	Halogens	Noble gases

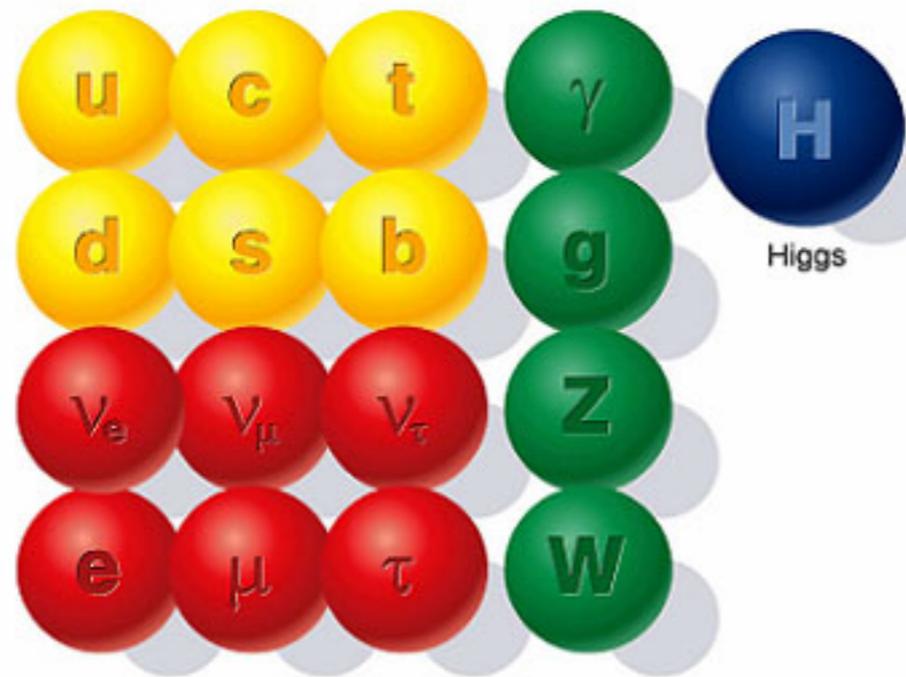
State at standard temperature and pressure

- Atomic number in red: gas
- Atomic number in blue: liquid
- Atomic number in black: solid

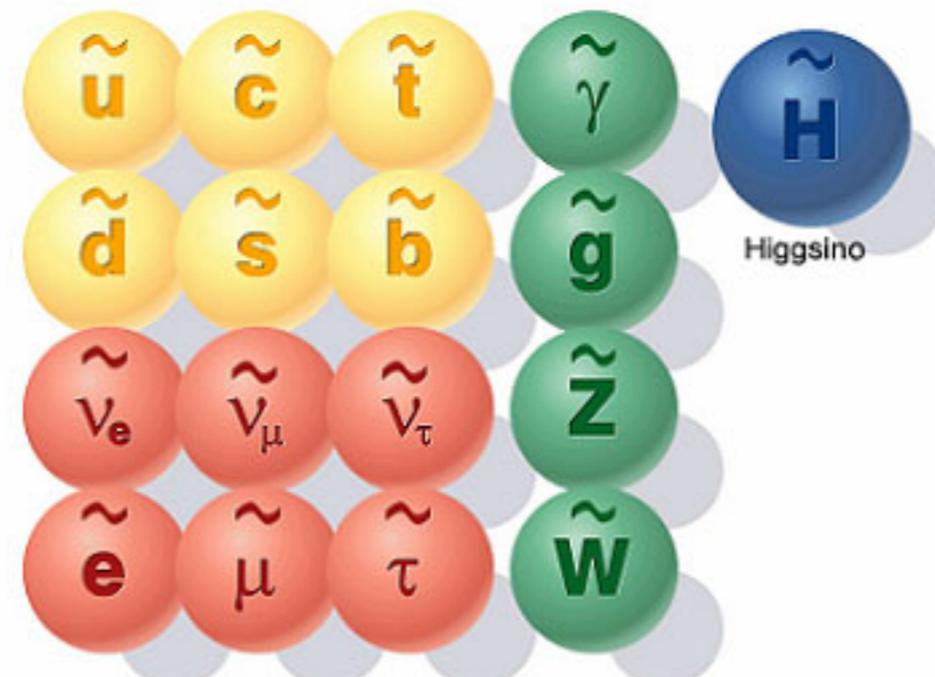
solid border: at least one isotope is older than the Earth (Primordial elements)
dashed border: at least one isotope naturally arise from decay of other chemical elements and no isotopes are older than the earth
dotted border: only artificially made isotopes (synthetic elements)
no border: undiscovered

Supersymmetry

SEEN



MISSING



La ricerca del bosone di Higgs

Circa 1 collisione p-p su 5 miliardi produce un bosone di Higgs. Come lo individuavo ?

