

Experiment CMS

<http://cms.web.cern.ch/>

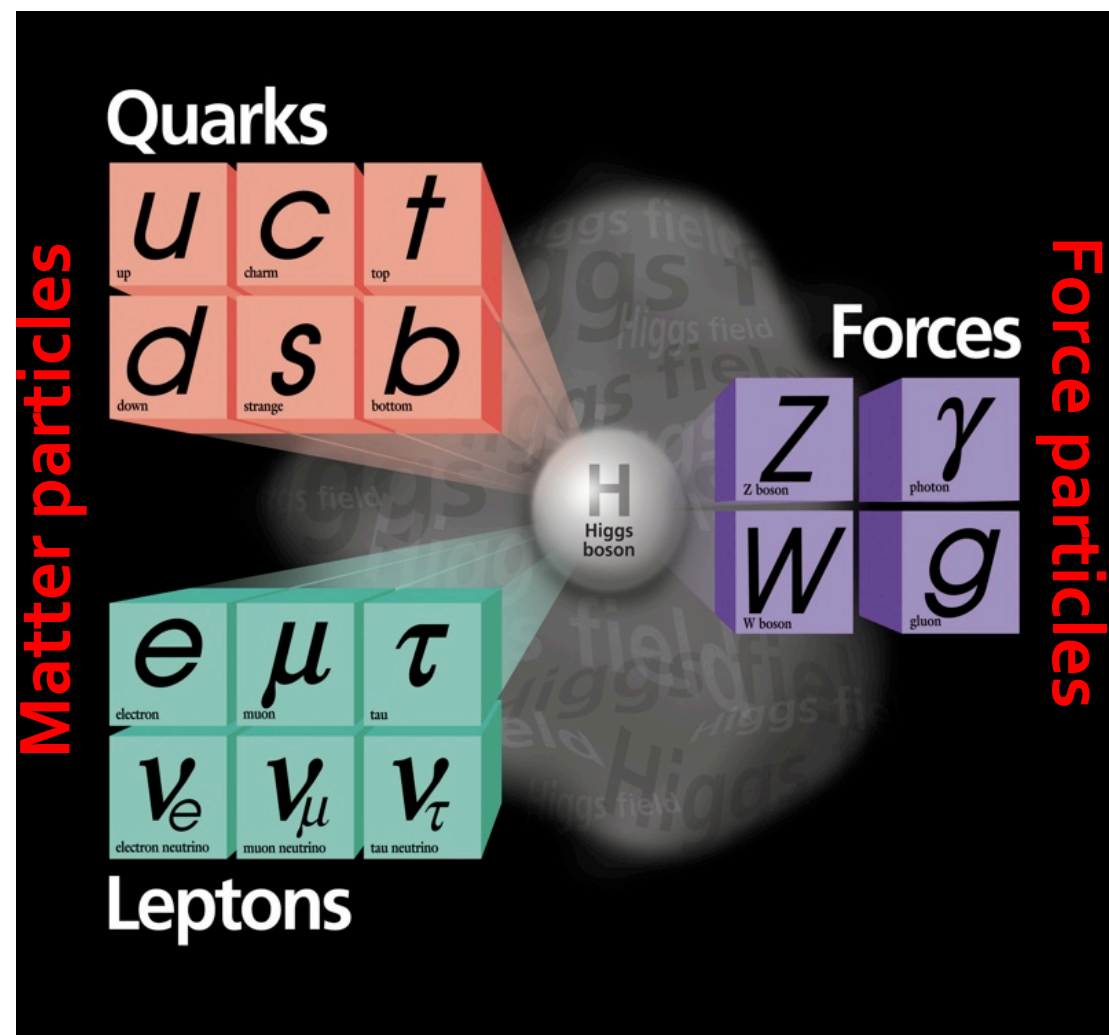
Ivan Mikulec

6 Jún 2013

Českí a Slovenskí učitelja

The “Standard Model”

- Over the last ~100 years: The combination of Quantum Field Theory and discovery of many particles has led to
- **The Standard Model of Particle Physics**
 - With a new “Periodic Table” of fundamental elements



One of the greatest achievements of 20th Century Science

Fermions (Matter)

Quarks

2.4 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.27 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	171.2 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top
---	---	--

4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom
--	---	--

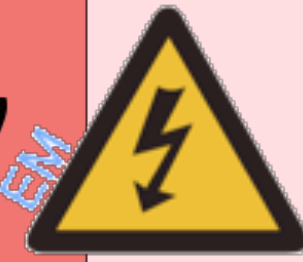
<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino
---	---	---

Leptons

0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau
--	---	---

Bosons (Forces)

0 0 1 γ photon



0 0 2 G graviton?



0 0 1 g gluon



91.2 GeV 0 1 Z⁰ weak force
--



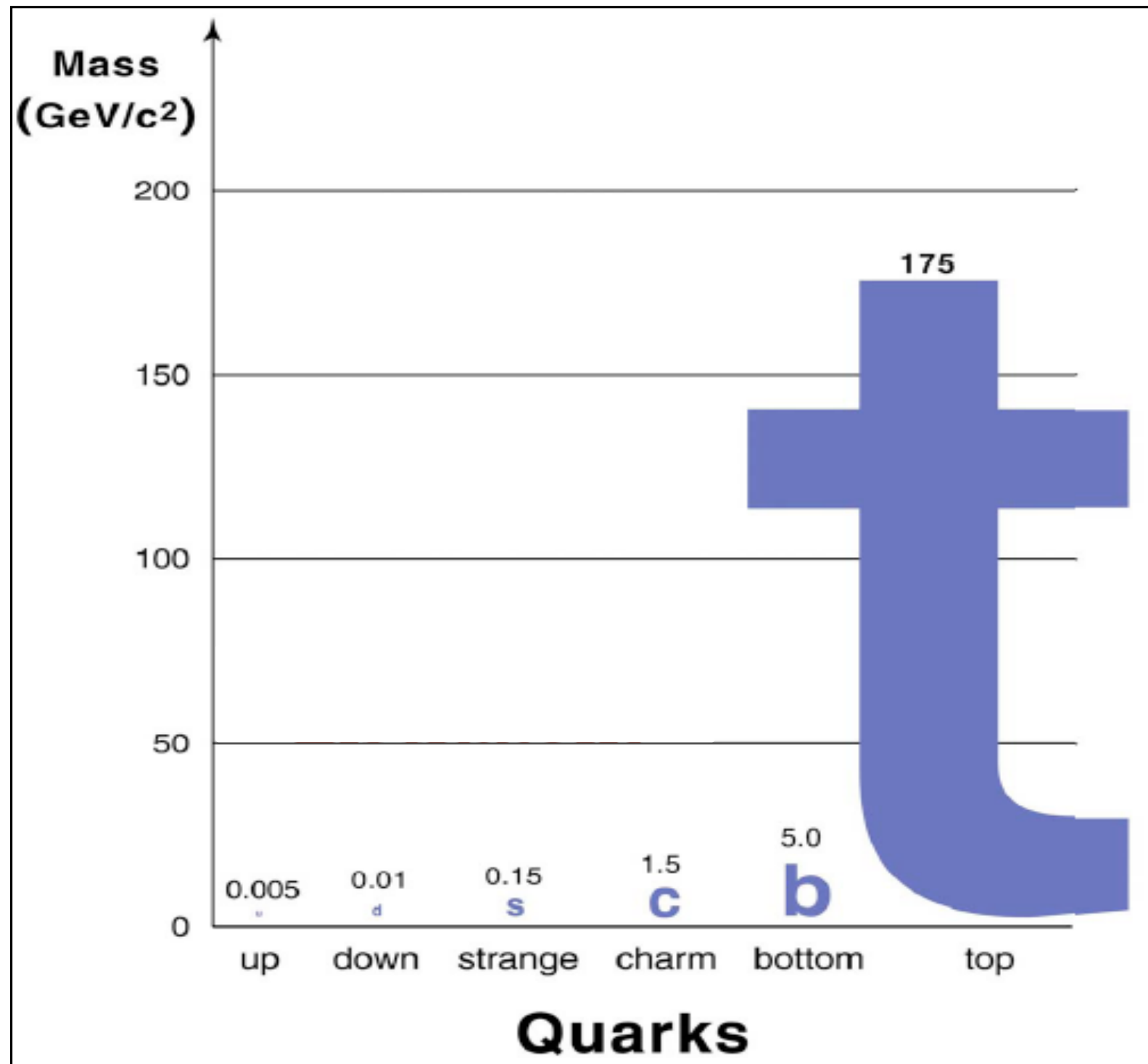
80.4 GeV ± 1 1 W⁺ weak force
--

BOSONS

125 GeV 0 0 H Higgs
--

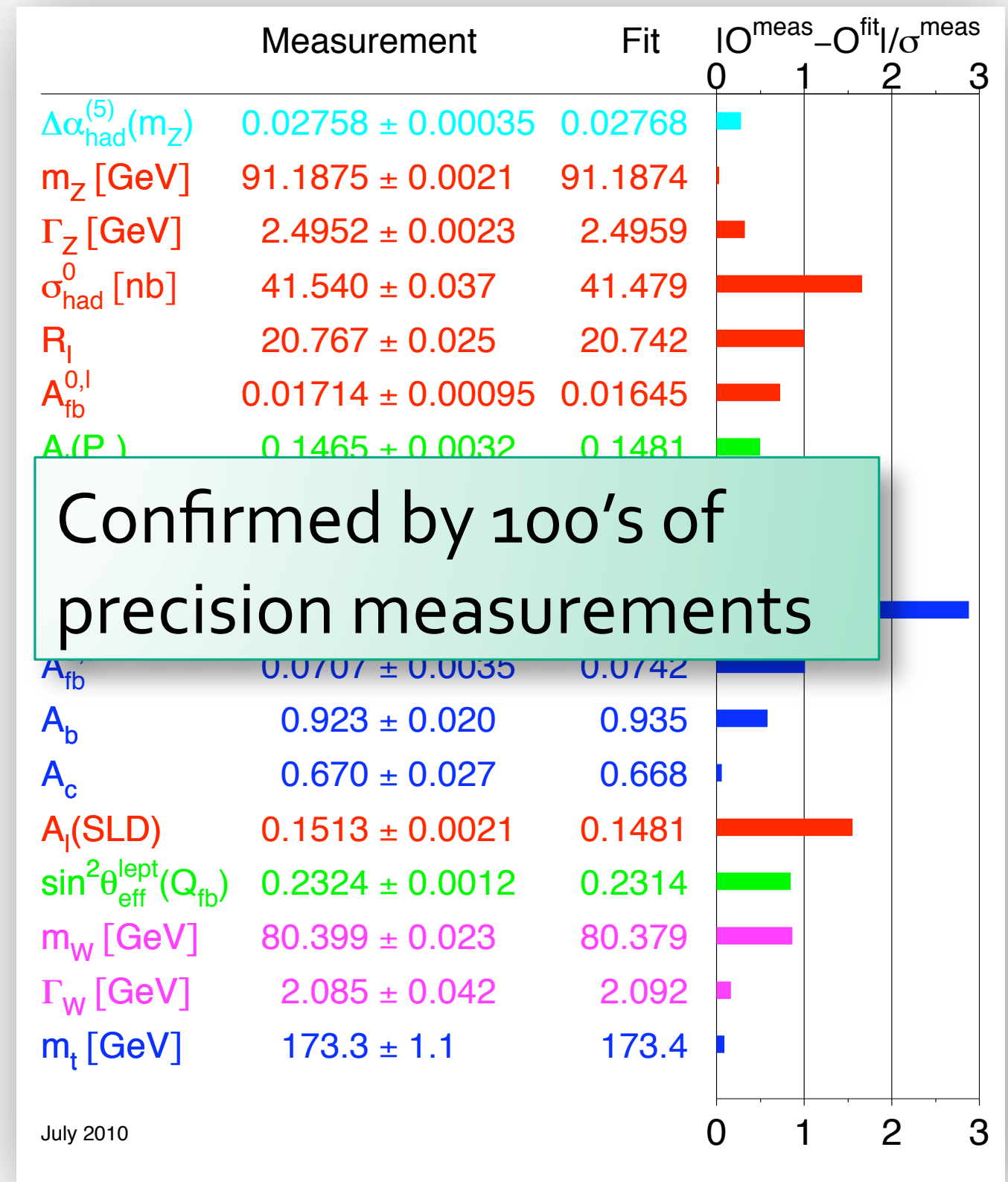
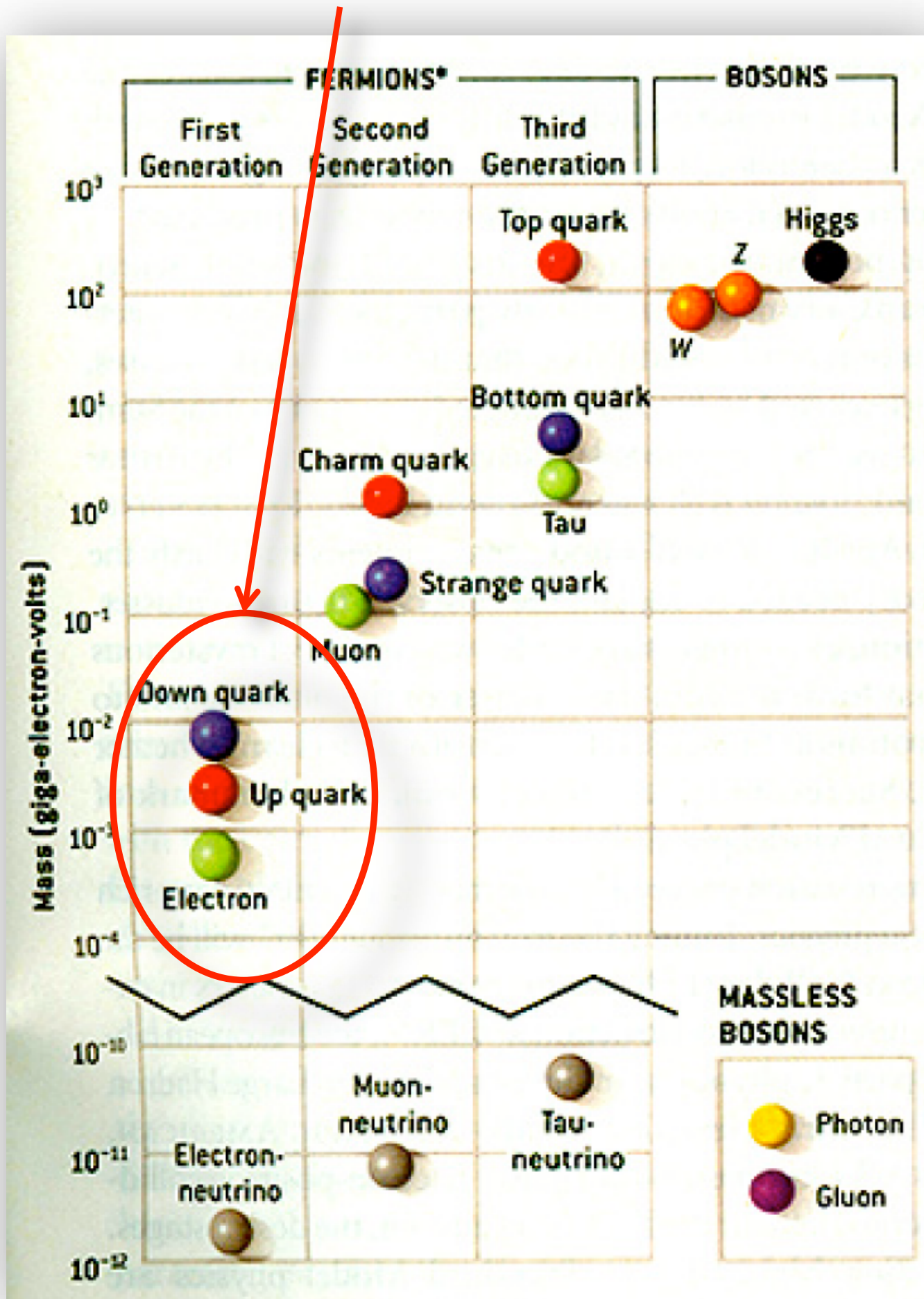


Quark masses



These are all we "see" around us in everyday life but the others are crucial to defining what we are.

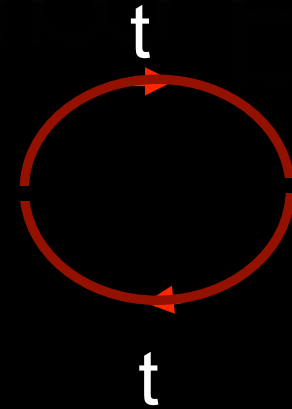
The Standard Model



Quantum Field Theory

- Energy and matter are equivalent

- $(E = mc^2)$



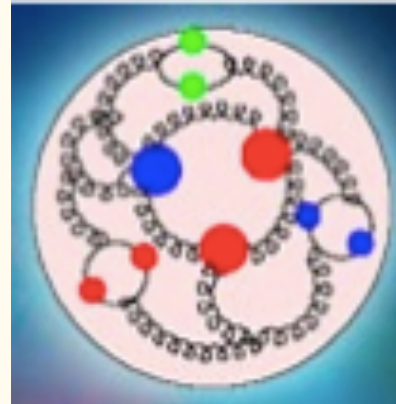
Vacuum Fluctuation
Involving top quarks

- A particle-antiparticle pair can pop out of empty space (“the vacuum”)
- And then vanish back into it
 - **These are *Virtual* particles.**
- This has far-reaching consequences
 - The structure of the universe depends on particles that ***don't exist in the usual sense*** (but did when the Universe was very young and hot)
- This is the reason we do what we do
- We are searching for the “genetic code” of our universe
 - We do not see these particles in everyday life
 - We must recreate the state of the early hot universe to make them

... Štandardný Model nedáva odpoveď na všetko, napr.:

1. Prečo majú elementárne častice hmotnosti ktoré pozorujeme?

- Hmotnosť Viditeľnej Hmoty (my a objekty okolo nás, napr. hviezdy) pochádza zo štruktúry (väzbová energia)



Hmotnosť u a d kvarkov je 100x menšia ako hm. nukleónov

- Pred LHC sme nevedeli prečo elementárne (bodové) častice majú hmotnosť
- Hľadali sme Higgsov bozón, poslednú neobjavenú časticu Št. Modelu
 - Teraz vieme že Higgsov Mechanizmus je zodpovedný za hmotnosť W a Z bozónov a teda za slabosť Slabých Interakcií
 - Vyzerá to že fermióny 3-tej rodiny tiež interagujú s Higgsovým poľom
- Ale nevieme prečo máme 3 rodiny a prečo hmotnosti fermiónov sú také aké sú
- Hľadáme častice 4-tej rodiny a excitácie známych častíc (q', Z', W' a pod.) – známky štruktúry

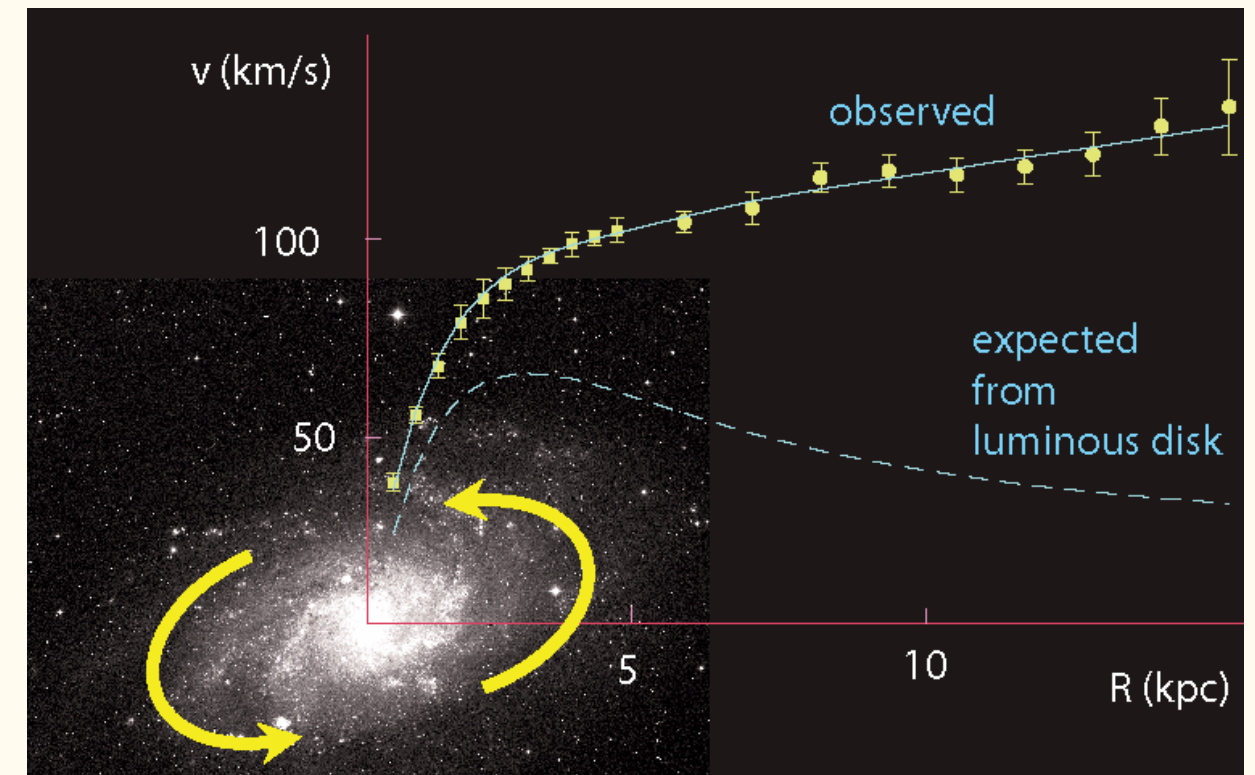
...

2. Z čoho je Tmavá Hmota?

- 25% energie Vesmíru pochádza z Tmavej Hmoty
- Najlepší kandidát na Tmavú Hmotu sú (dosiaľ neznáme) slabo interagujúce ťažké častice
- Hľadáme nerovnováhu v produktoch kolízií (missing energy) v dôsledku ťažkých častíc unikajúcich bez detekcie

3. Ako vznikol vesmír?

- Asyemtria medzi hmotou a antihmotou, zjednotenie fundamentálnych síl, štruktúra času a priestoru
- Hľadáme rozdiely medzi časticami a antičasticami, prejavy nových priestorových dimenzií, mikroskopické čierne diery a iné exotiky



History of the Universe

pp physics at the LHC corresponds to conditions around here

BIG BANG

Inflation

possible dark matter relicts

cosmic microwave radiation visible

t	10^{-44}	10^{-37} s
T	10^{32}	10^{28}
E	10^{19}	10^{15}

	10^{-10} s	10^{-5} s
	10^{15}	10^{12}
	10^2	10^{-1}

	10^2 s	3×10^5 y
	10^9	3000
	10^{-4}	3×10^{-10}

	10^9 y	Today
	15	12×10^9 y (sec,yrs)
	10^{-12}	2.7 (Kelvin)
		2.3×10^{-13} (GeV)

Key:

W, Z bosons		photon	
q quark		meson	
g gluon		baryon	
e electron		ion	
m muon		atom	
t tau		star	
n neutrino		galaxy	
		black hole	

HI physics at the LHC corresponds to conditions around here

Designing a detector: what do we want to look for?

- the stable particles left over from decays of unstable particles that we can create in our collisions, e.g. W^+ , W^- , Z^0 (and H^0)

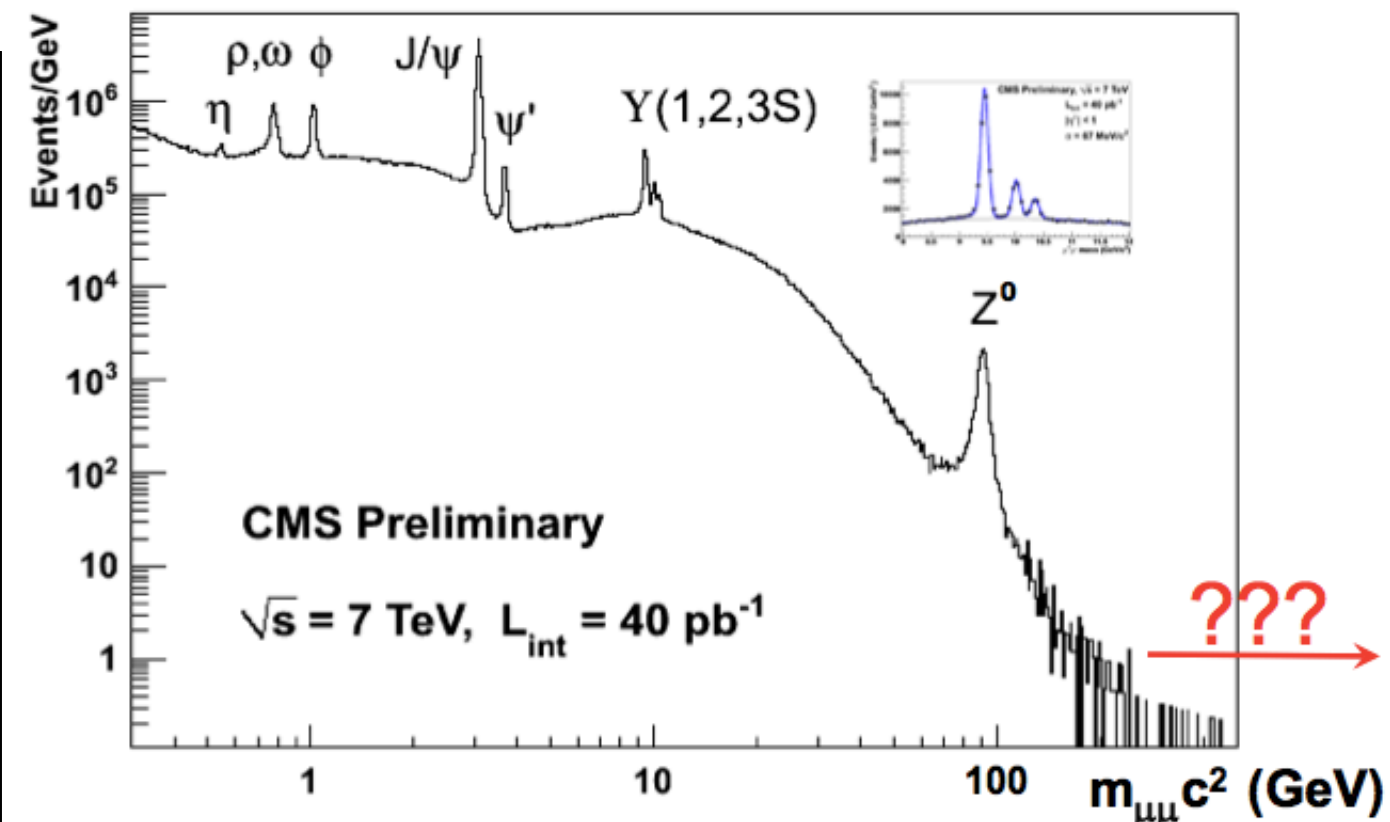
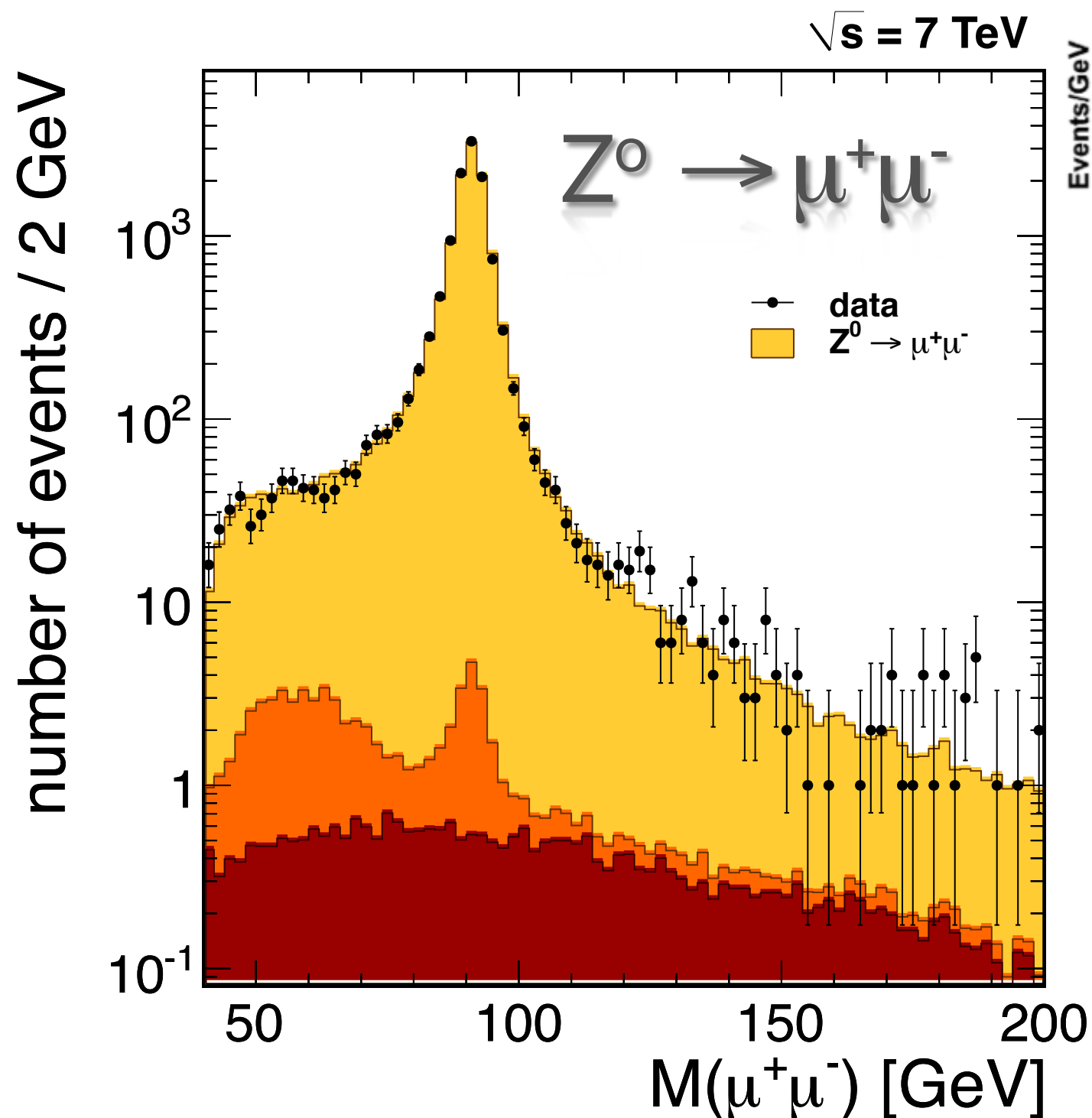
- $W^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$
- $W^+ \rightarrow e^+ + \nu$
- $W^+ \rightarrow \text{hadrons}$
- $W^- \rightarrow \mu^- + \nu$
- $W^- \rightarrow e^- + \nu$

- $W^- \rightarrow \text{hadrons}$
- $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$
- $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$
- $H^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

Hadrons could be:
 π^+ , π^- , K^+ , K^- , Λ ..

- A particle “ i ” will move away from the interaction point with momentum p_i and energy E_i

- Ťažké nestabilné častice ktoré vytvárame vidíme vďaka vzťahu:
 - $(mc^2)^2 = E^2 - (pc)^2$ (invariantna hmotnosť)
- Detekujeme produkty rozpadu, identifikujeme ich a meriame ich hybnosť (veľkosť a smer) – takto dokážeme zrekonštruovať rozpadajúcu sa časticu vrátane jej hmotnosti



Rekonštrukcia známych častíc sa používa na kalibráciu

Detectors

TRIGGER, DATA ACQUISITION & OFFLINE COMPUTING

Austria, Brazil, CERN, Finland, France, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Korea, Lithuania, Mexico, New Zealand, Poland, Portugal, Spain, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Austria, Belgium, CERN, Finland, France, Germany, Italy, Japan*, Mexico, New Zealand, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Belarus, CERN, China, Croatia, Cyprus, France, Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, CERN, Greece, India, Russia, Taiwan

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

*Only through industrial contacts

RETURN YOKE

Barrel: Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing, in particular: Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

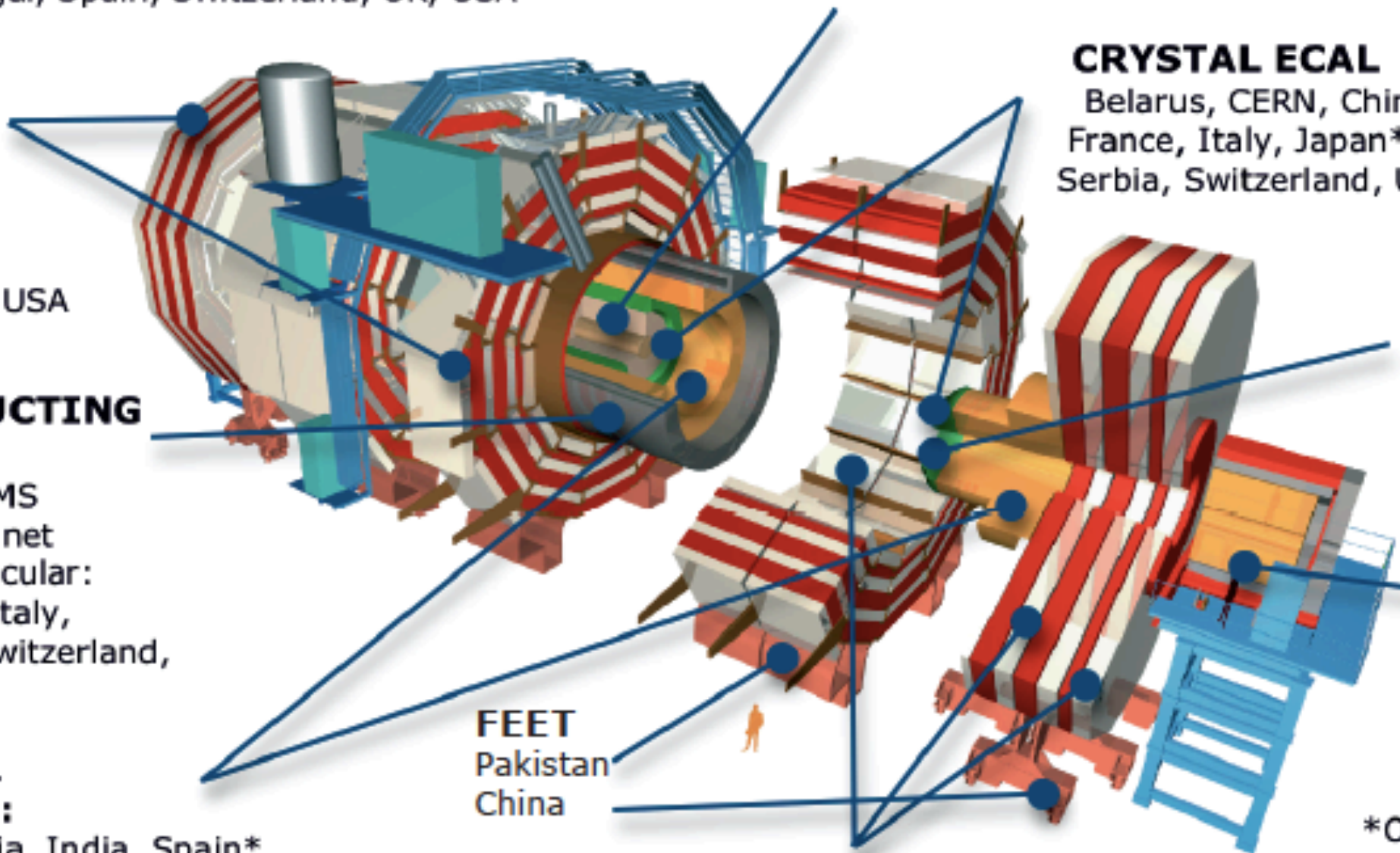
HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Georgia, Russia, Ukraine, Uzbekistan

FEET
Pakistan
China

MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, CERN, China, Germany, Hungary, Italy, Spain.
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Colombia, Korea, Pakistan, Russia, USA



People



The CMS collaboration has

- Around 4300 active people (phys

Of these members there are about:

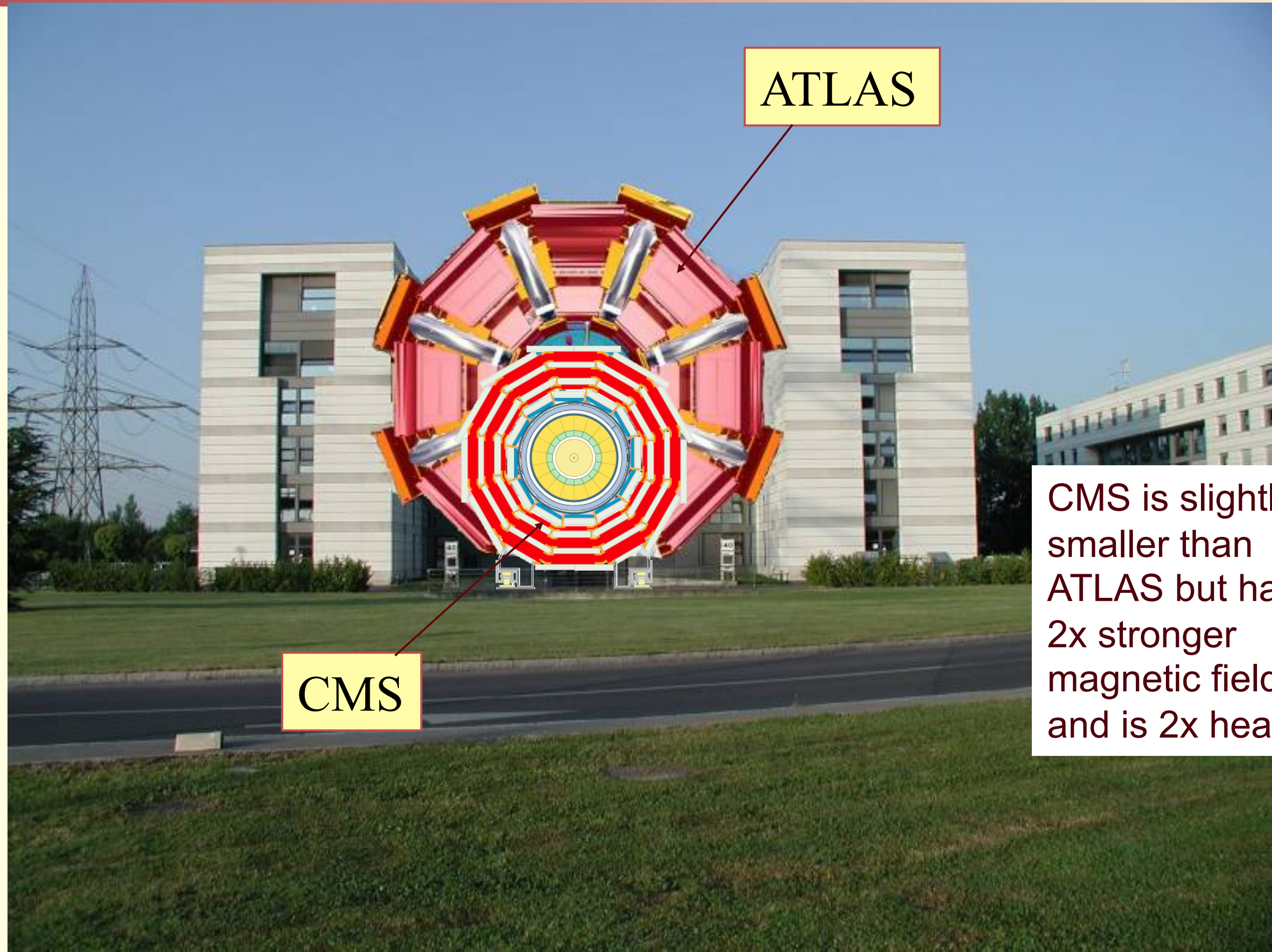
- 1740 PhD physicists (1490 men, 250 women) [latest details & plots]
- 845 physics doctoral students (685 men, 160 women) [latest details & plots]
- 790 engineers (700 men, 90 women) [latest details & plots]
- 690 undergraduates (550 men, 140 women) [latest details & plots]

(the above categories are, by definition, non-overlapping)

A typical CMS physics paper will be signed by the PhD physicists and a significant fraction of the doctoral students meaning it will typically have about 2100 signatories.

CMS = Compact Muon Solenoid

Compact does NOT mean small!



ATLAS

CMS

CMS is slightly smaller than ATLAS but has 2x stronger magnetic field and is 2x heavier



Muons are important



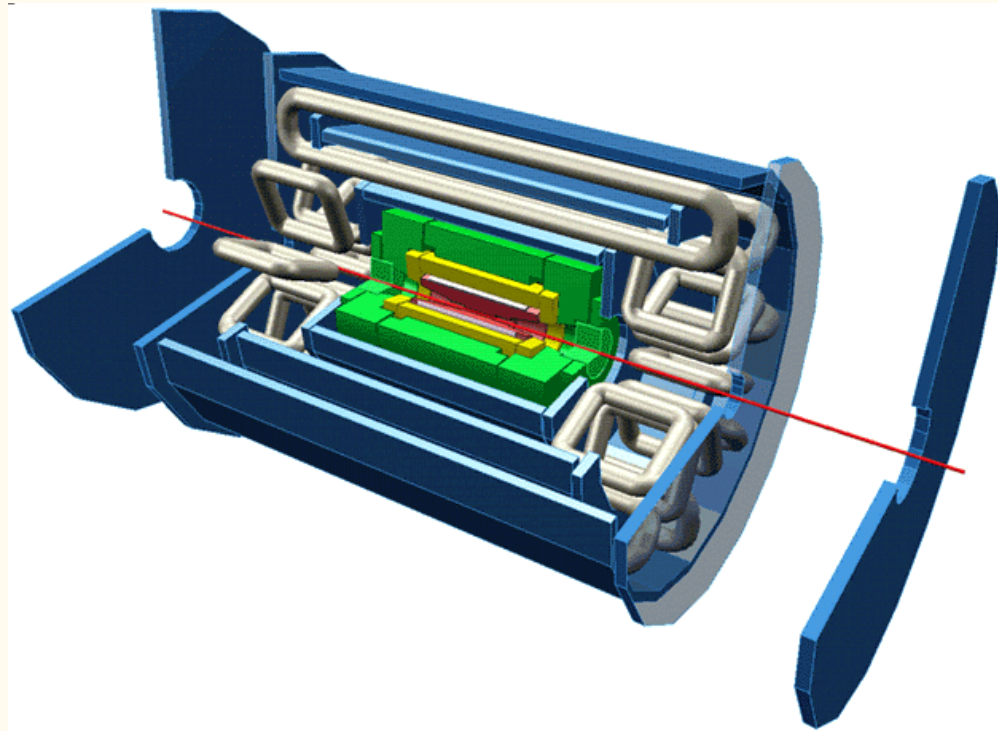
- **Muons are among the decay products of heavier (potentially new) particles**
 - Like e.g. electrons, photons quarks etc.
- **Muons (heavier electrons) are not stable but they live long enough to traverse the whole detector**
- **They are easy to detect (they have charge) and they easily traverse through a lot of matter**
 - E.g. cosmic rays reaching the earth are basically only muons
- **The parameters of muons can be measured in various detectors with high precision**
- **Since they are the particles reaching the outermost regions of the detector, they define its size**



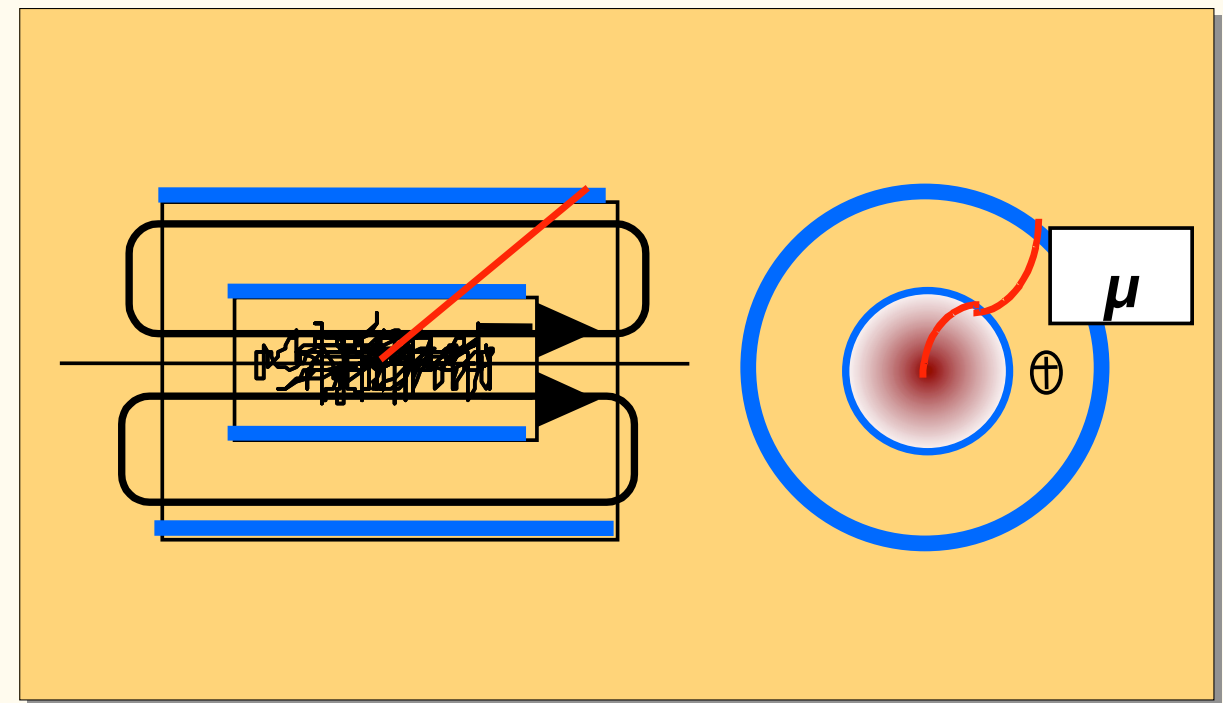
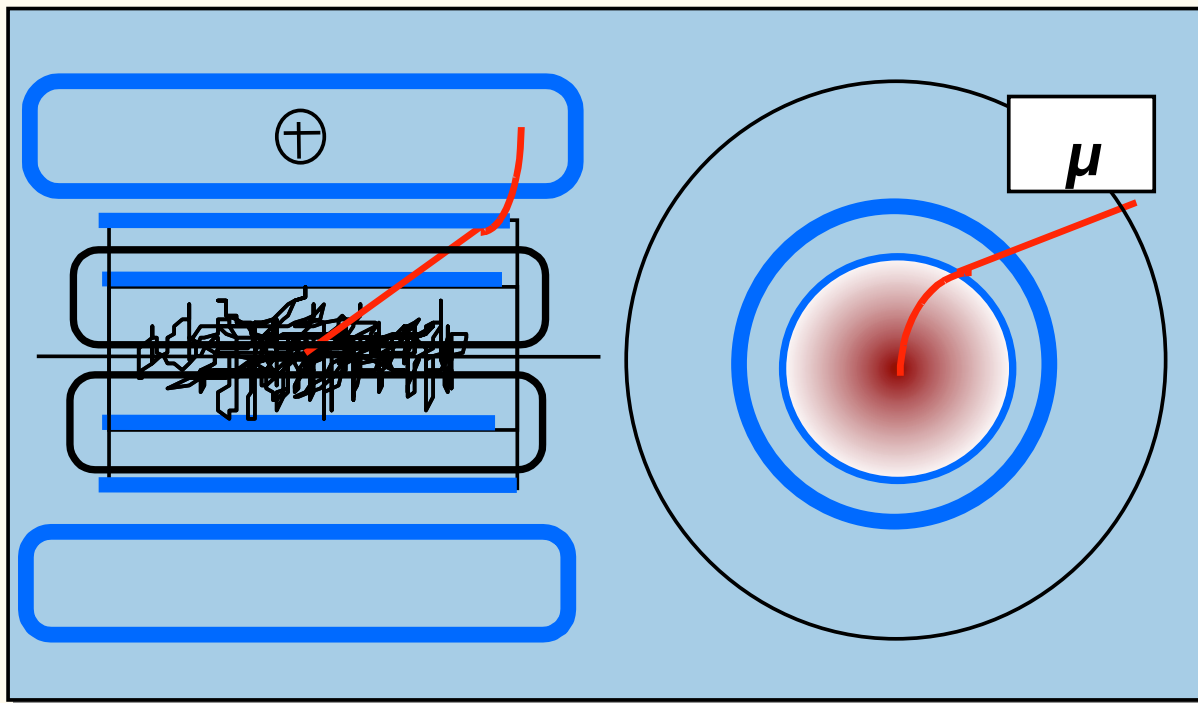
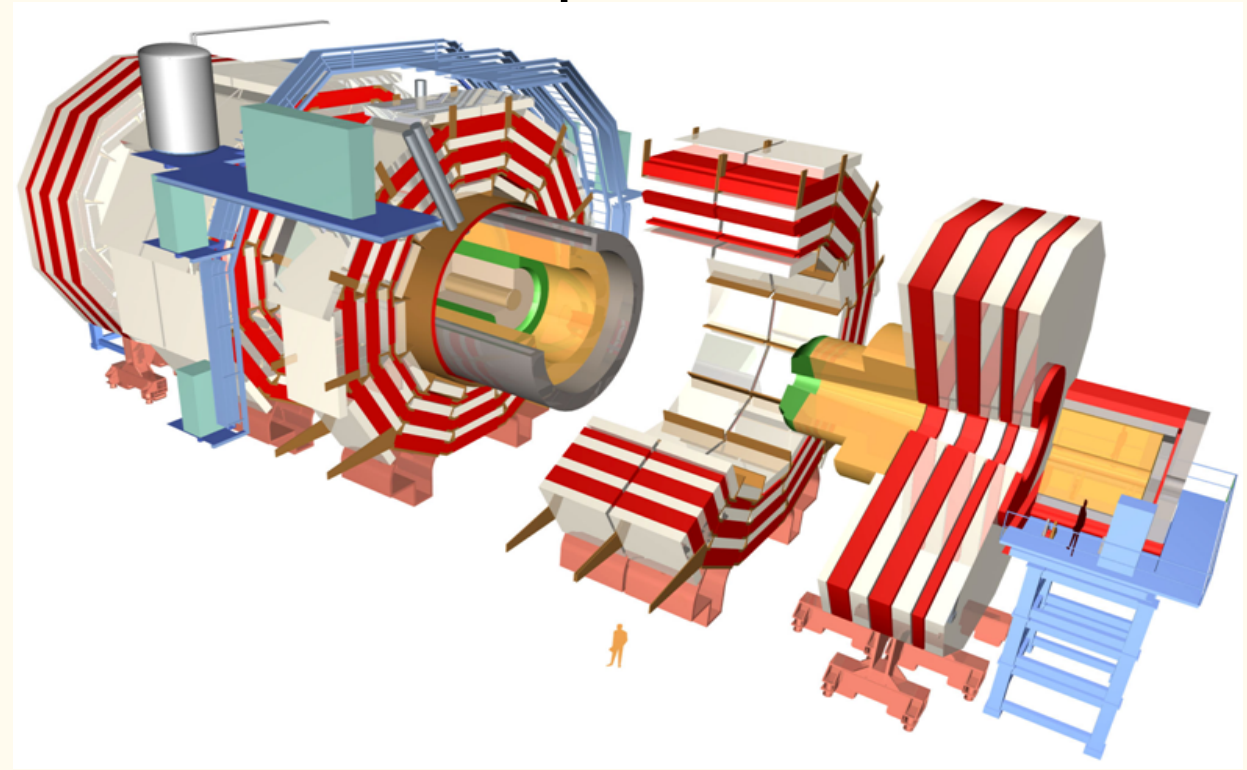
Solenoid is the heart

- Charged particles “bend” in a magnetic field; the amount they bend tells us ~ how fast they are travelling – measure of momentum
- The CMS solenoid is designed to provide an axial magnetic field of 4 Teslas – about 100000 times that of the earth
- The current required is ~20 k Amperes → need to use a superconducting wire (zero resistance)
 - The superconductor chosen is Niobium Titanium (NbTi) wrapped with copper – needs to be cooled to ~4K (-269 °C)
- **The CMS solenoid is 13m long with an inner diameter of 5.9m**
- The solenoid is sufficiently large that the tracking and all central calorimeters can fit inside
 - The full potential of the inner detectors can be realised
- The return yoke is made of > 10 000 tons (~2 Eiffel Towers) of iron (red blocks) and provides a 2 Tesla field outside of the solenoid, helping to improve the precision of the muon momentum measurement

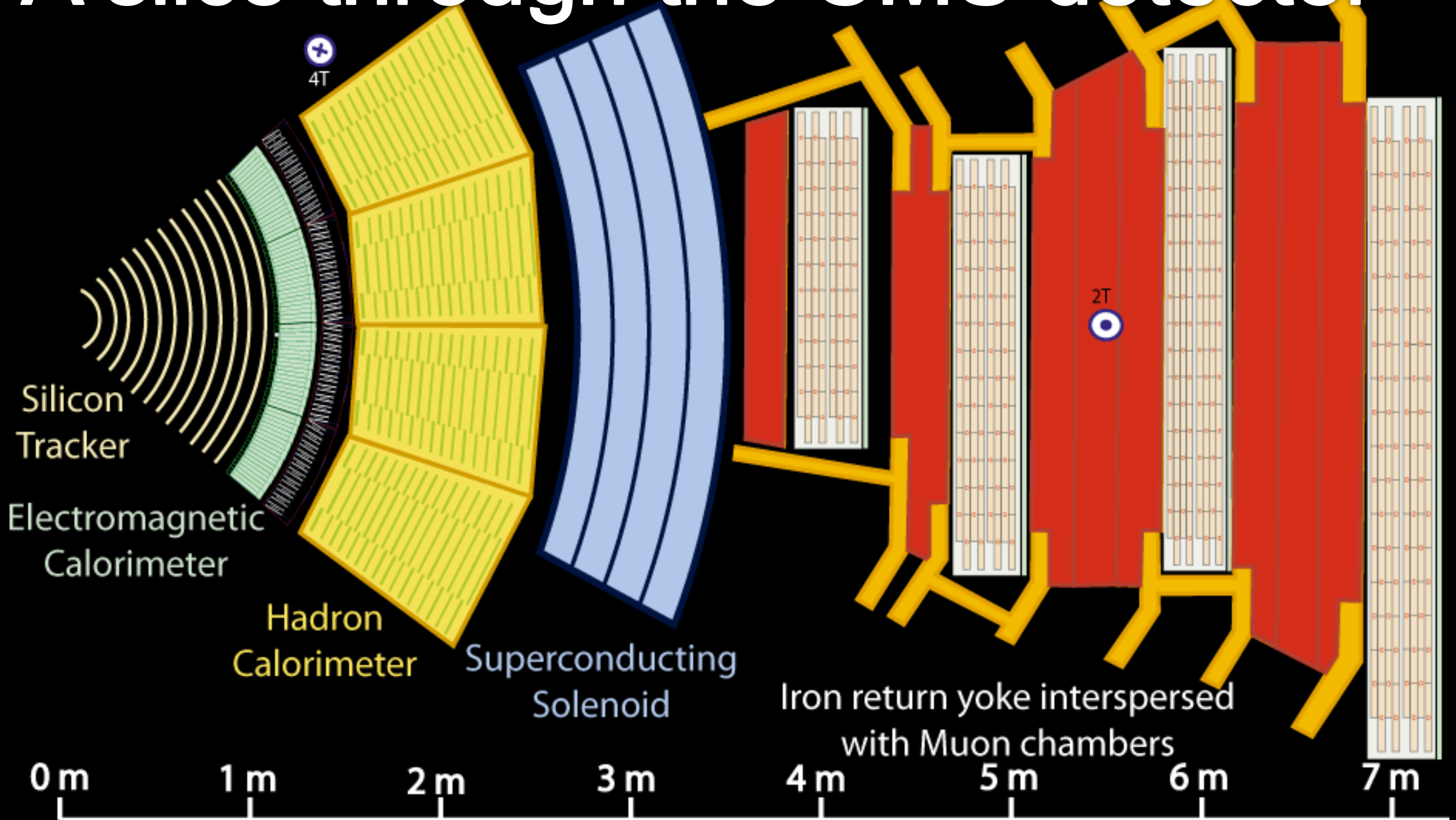
ATLAS A Toroidal LHC Apparatus



CMS Compact Muon Solenoid



A slice through the CMS detector



Key:

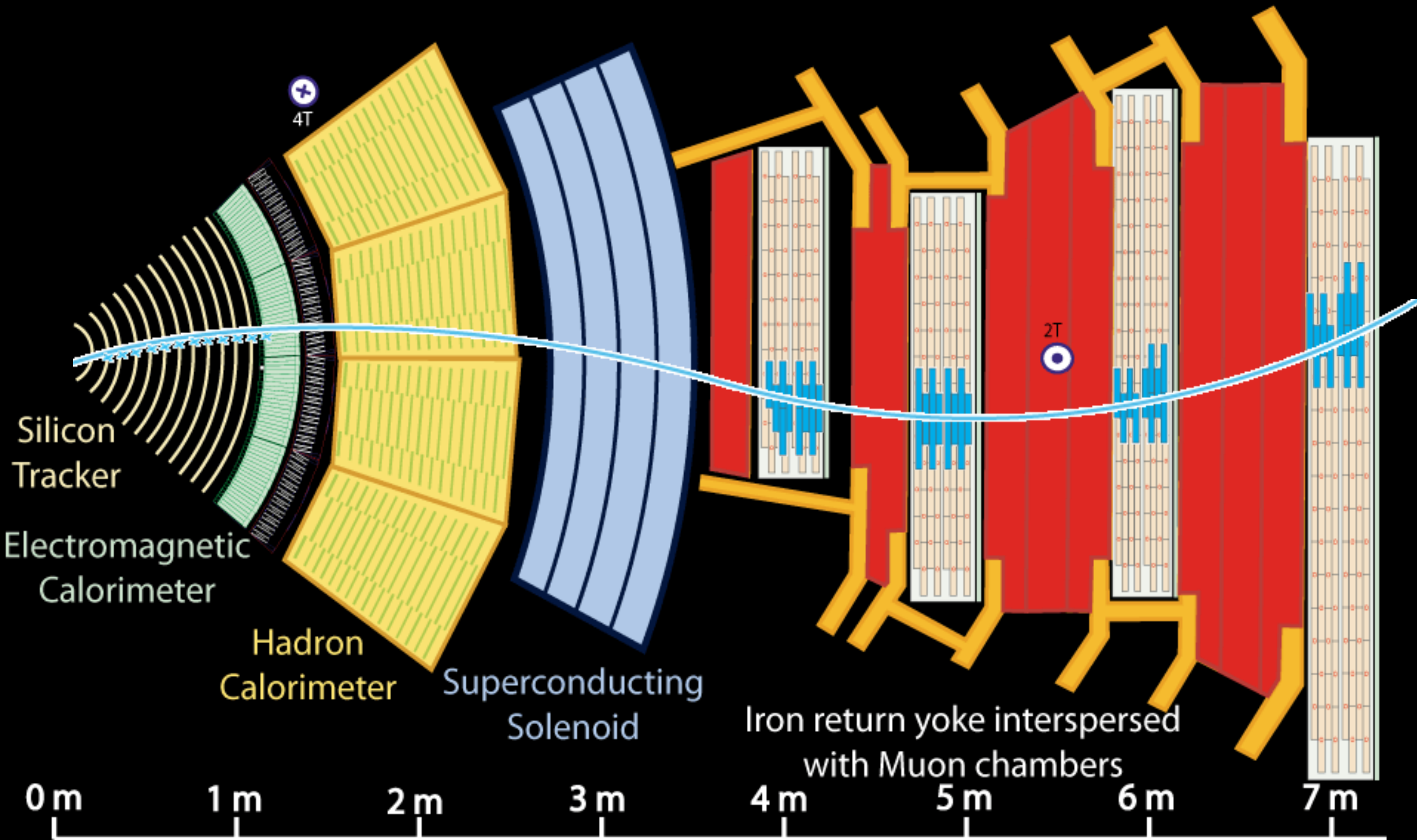
— Muon

— Electron

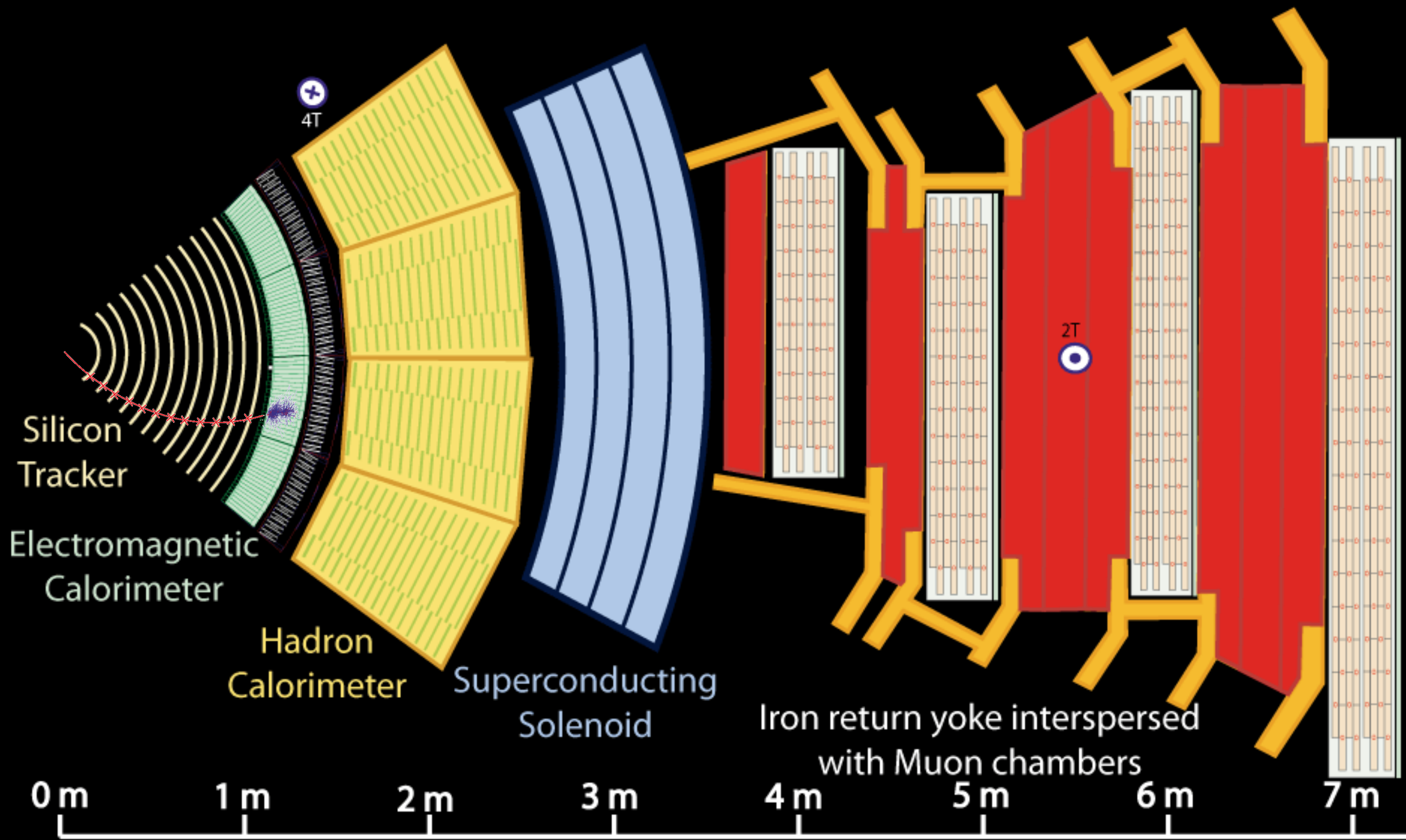
— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



- Key:
- Muon
 - Electron
 - Charged Hadron (e.g. Pion)
 - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
 - · - · Photon



Key:

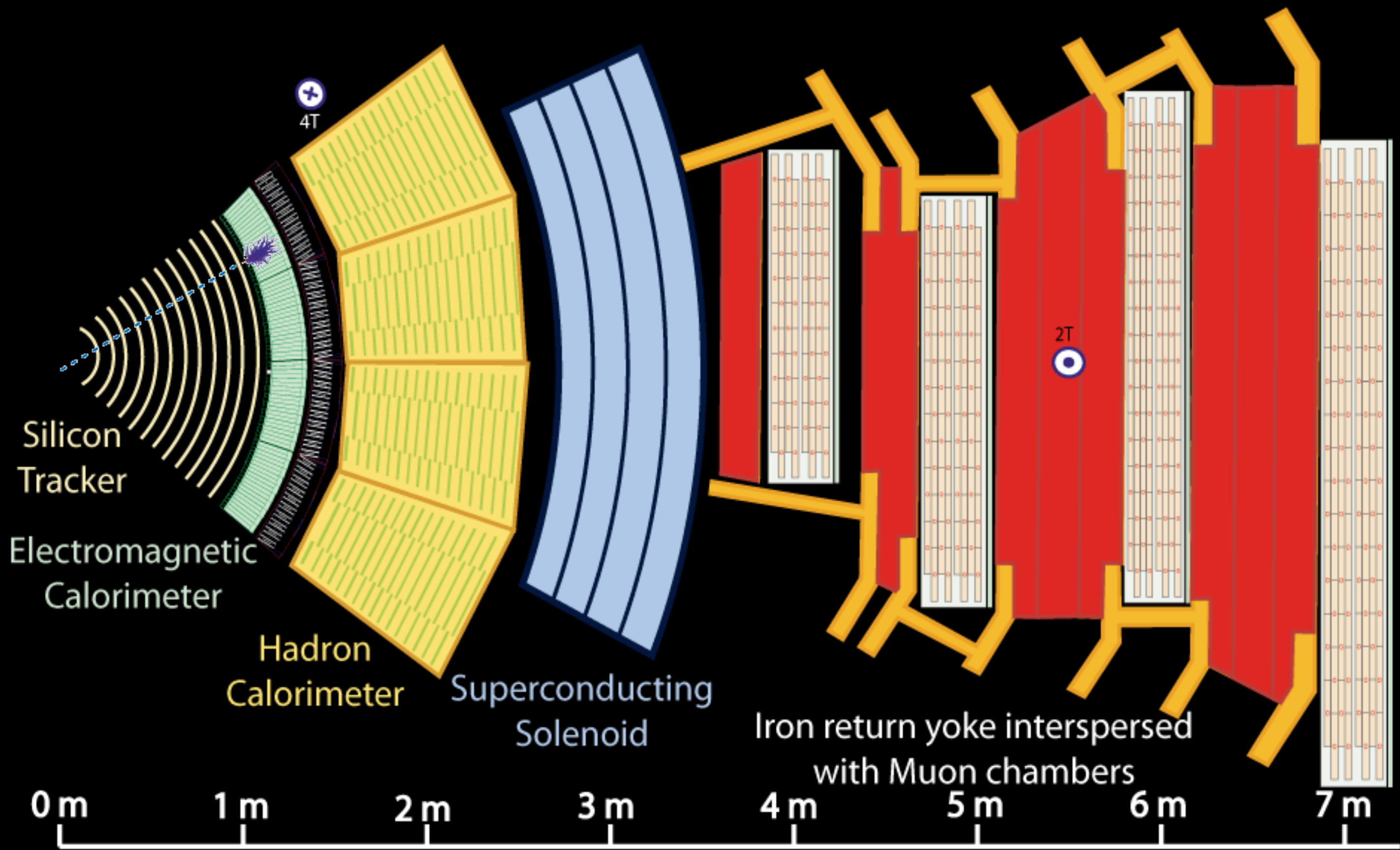
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

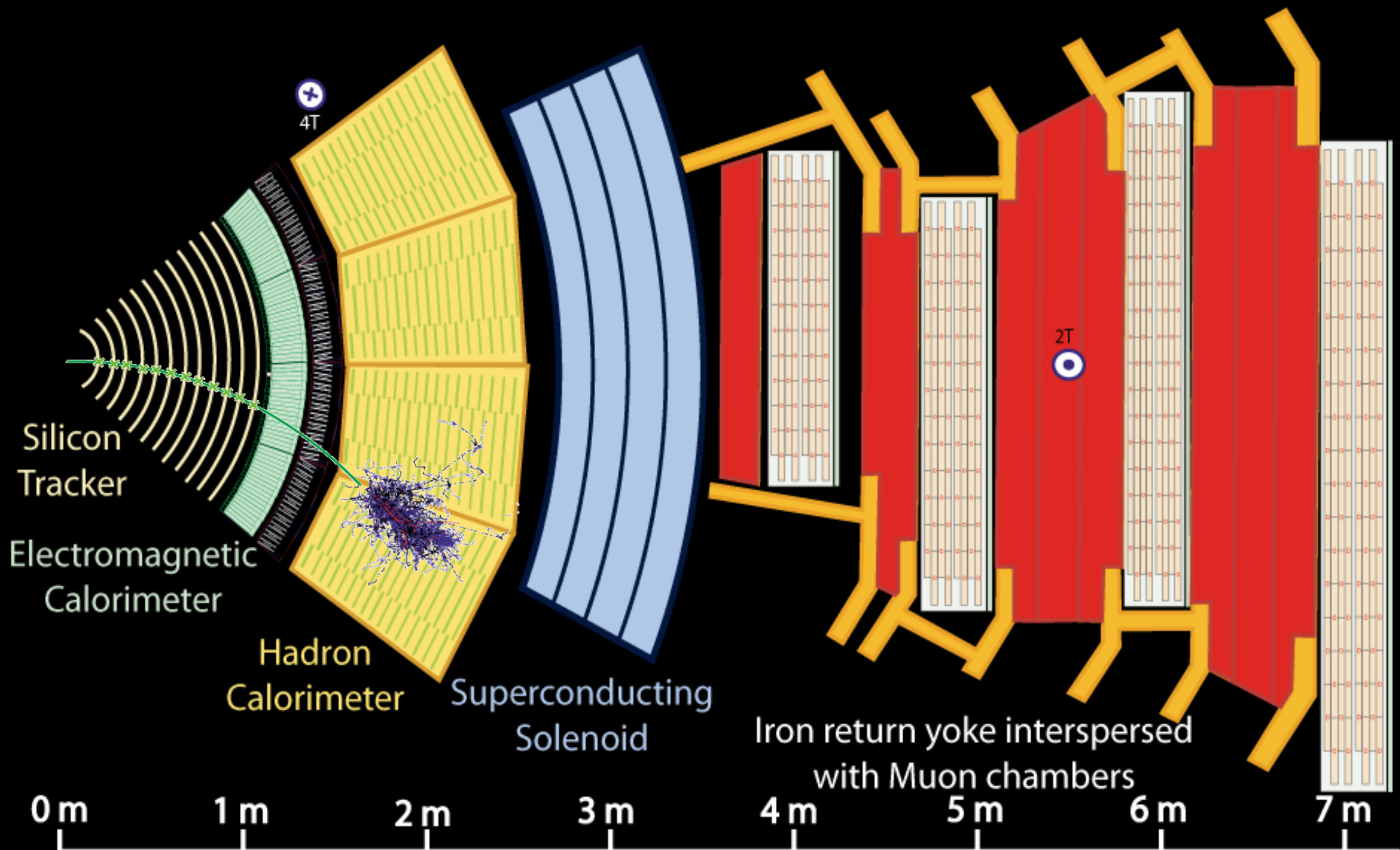
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



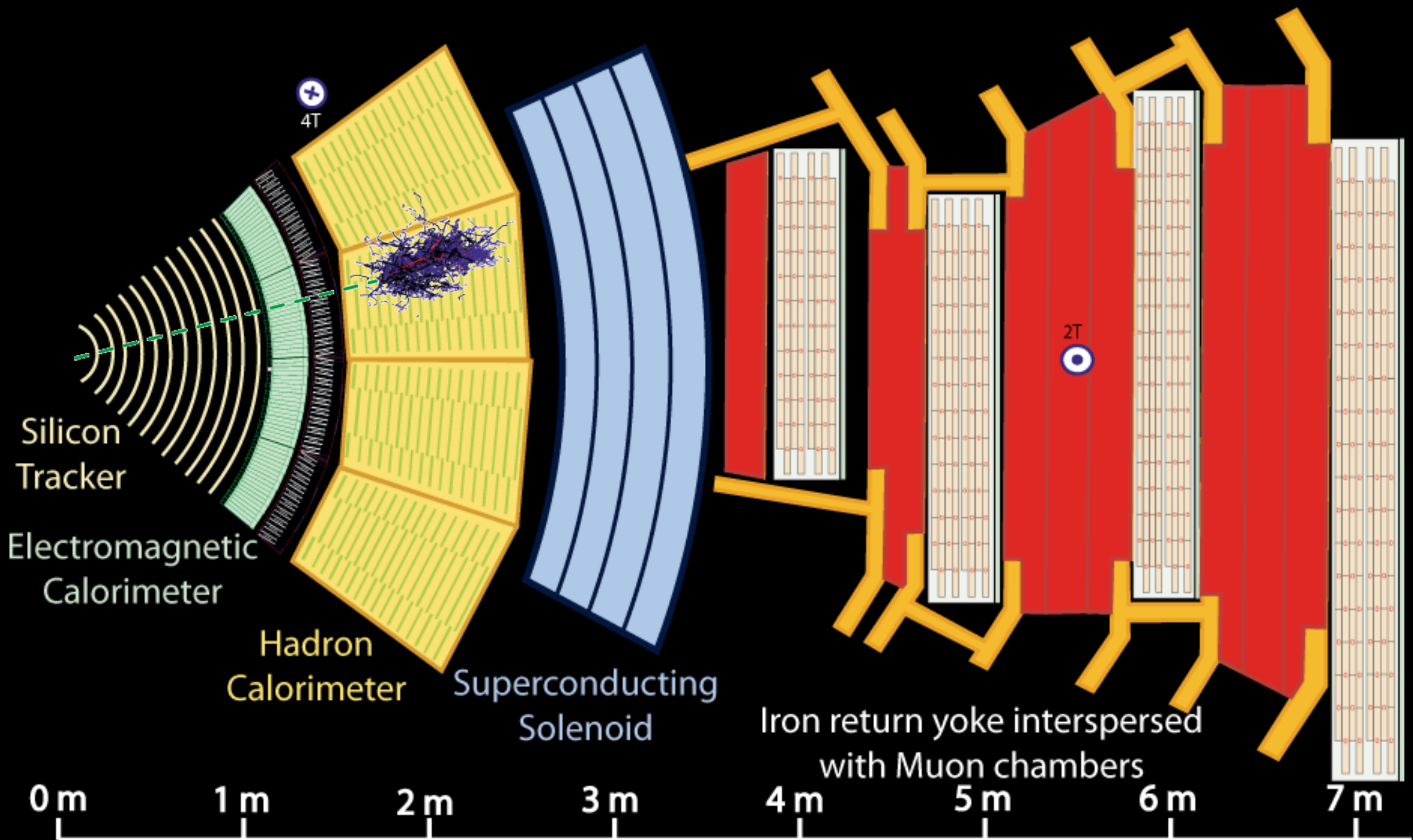
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

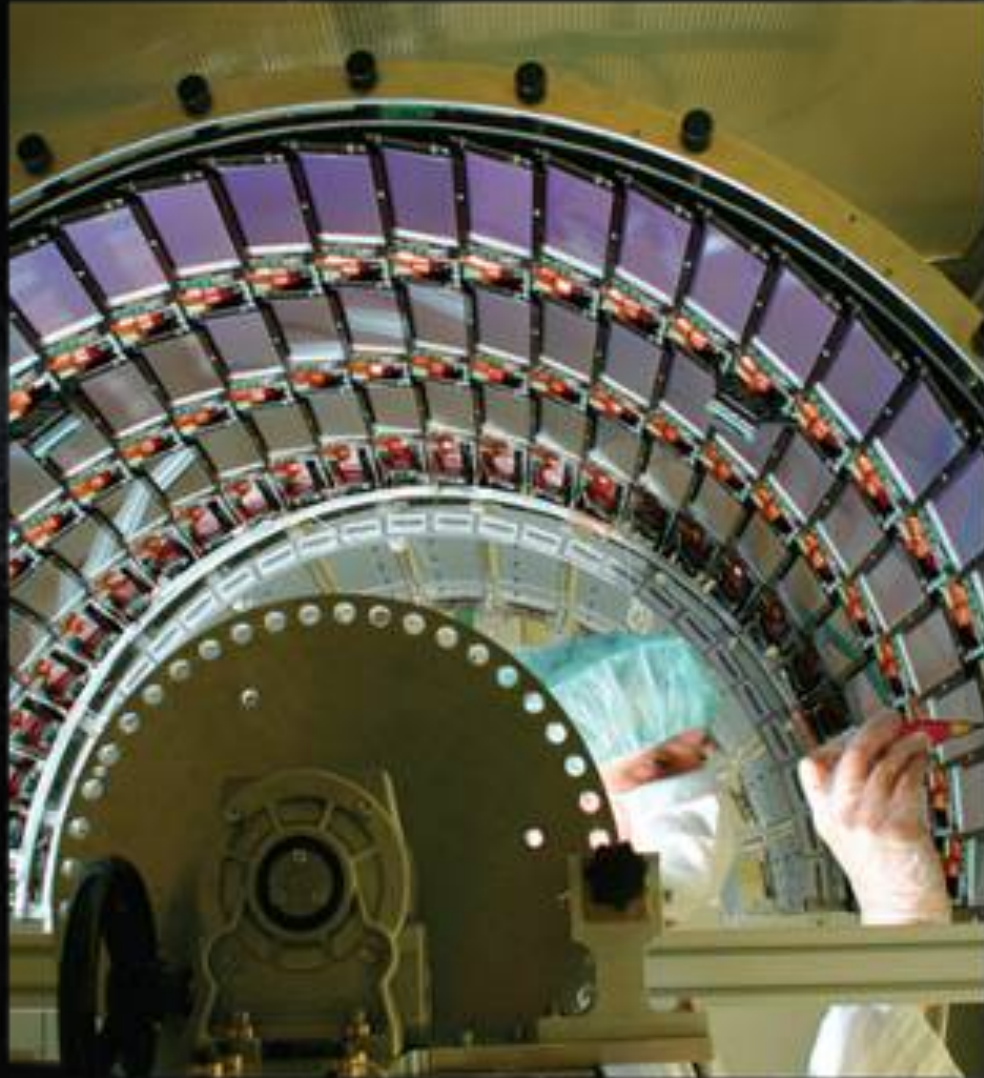
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

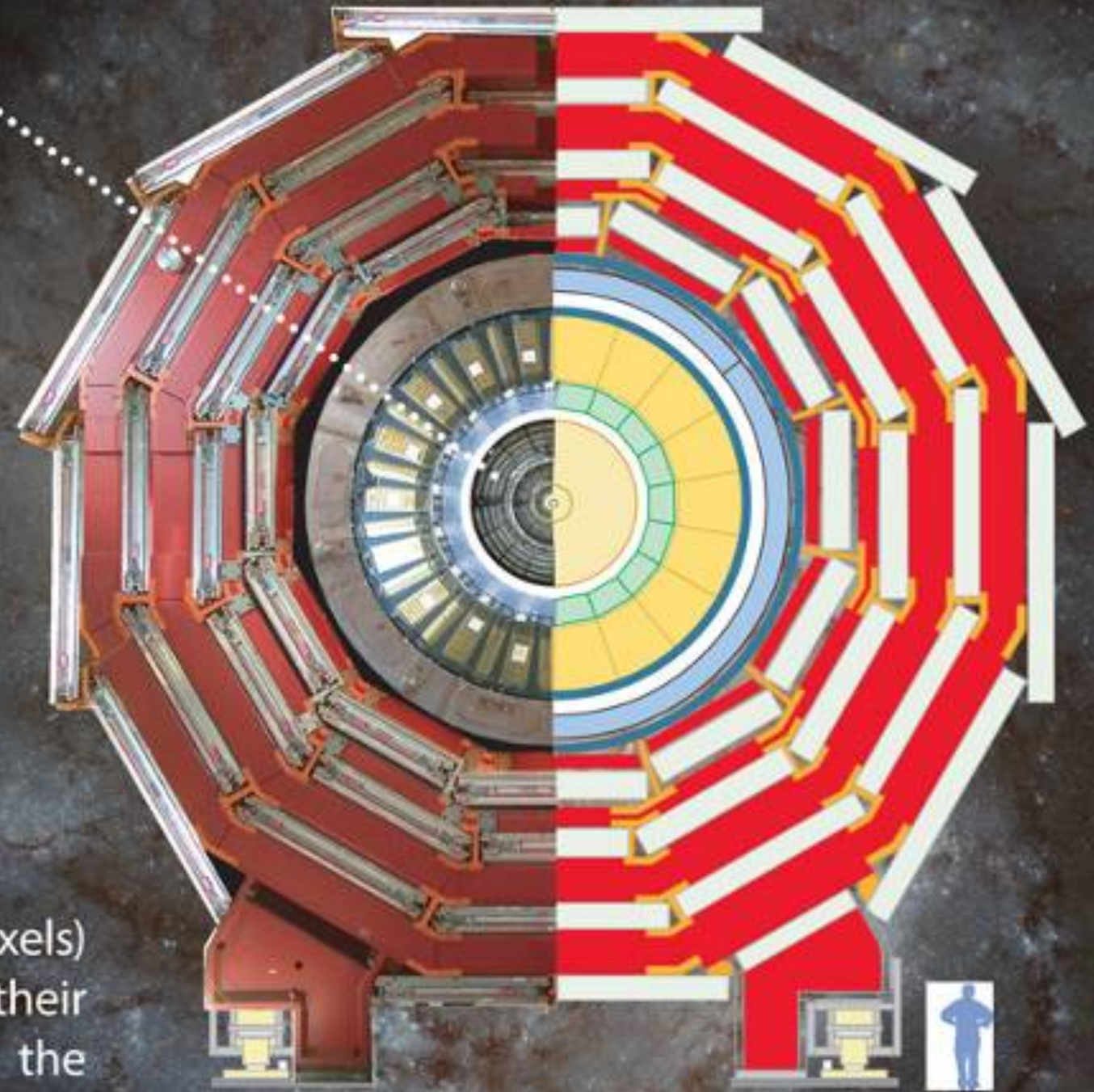
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

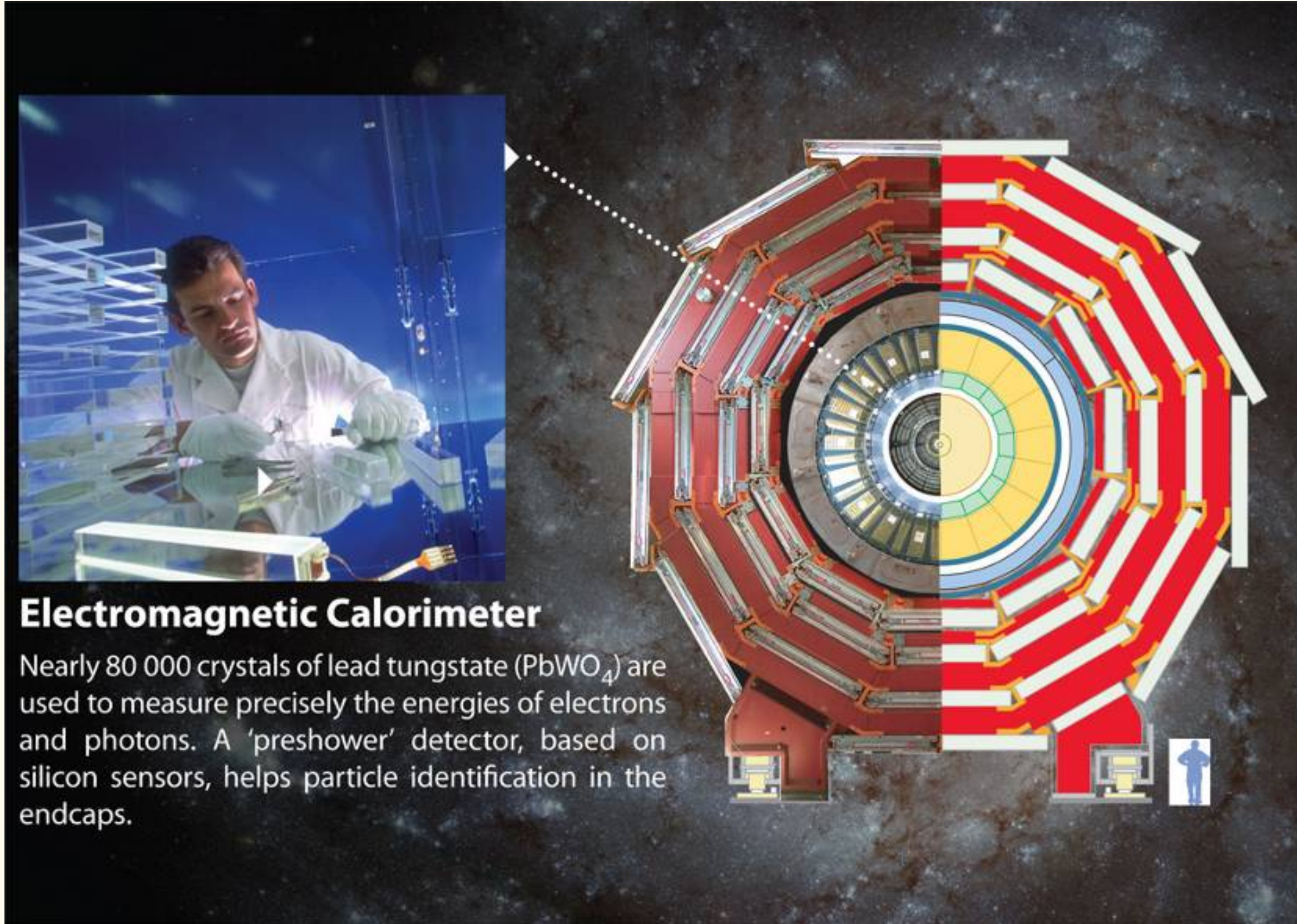


Tracker

Finely segmented silicon sensors (strips and pixels) enable charged particles to be tracked and their momenta to be measured. They also reveal the positions at which long-lived unstable particles decay.



- **Najväčší systém kremíkových senzorov na svete**
 - Viac než 220m² senzorov (ako tenisový kurt)
 - Okolo 75 miliónov elektronických kanálov (pixely a mikrostripy)
 - 6m dlhý, priemer ~2.2m, operuje pri teplote -15°C
- **Vysoká hustota senzorov**
 - 6000 spojov na štvorcový centimeter



Electromagnetic Calorimeter

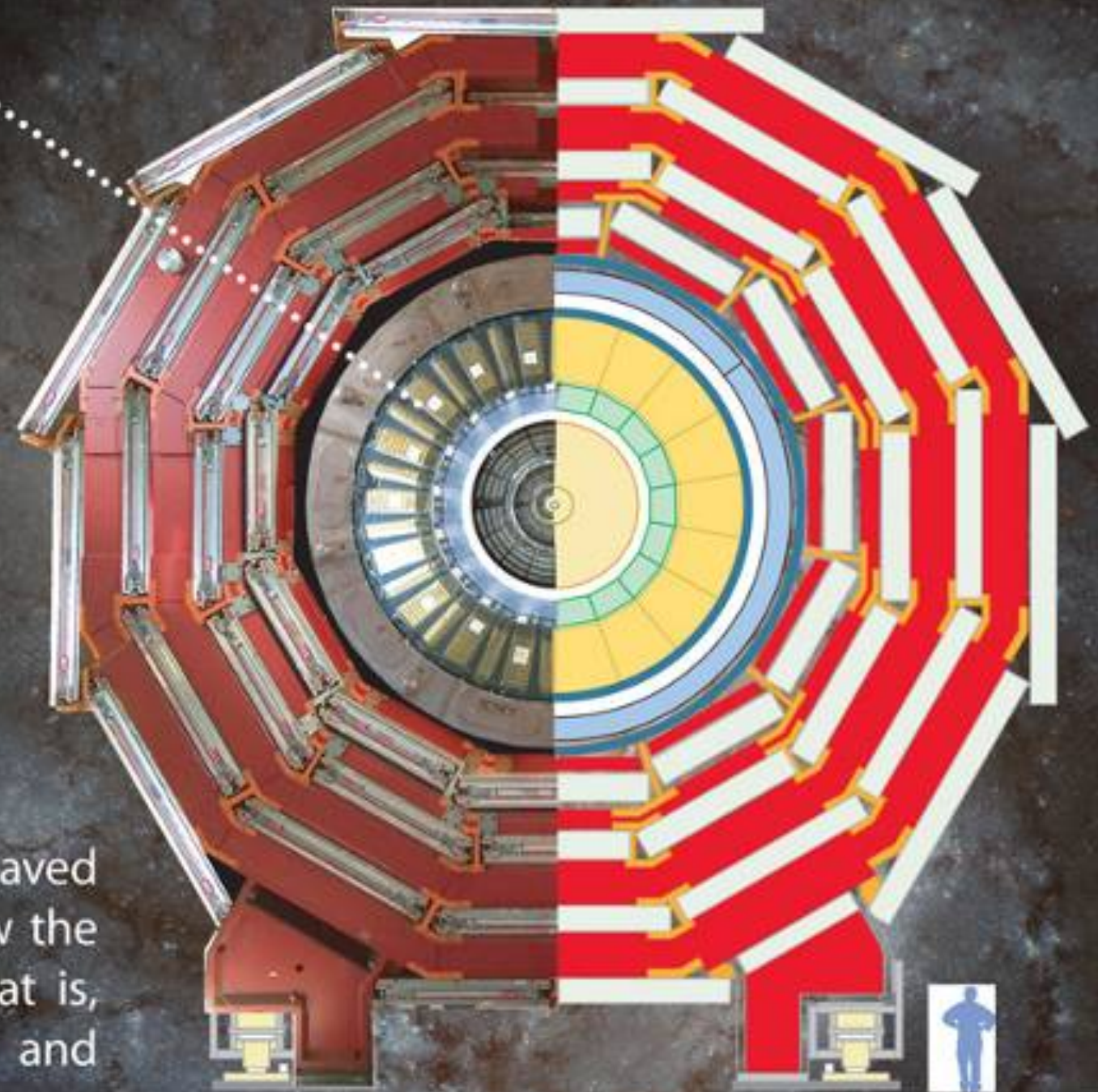
Nearly 80 000 crystals of lead tungstate (PbWO_4) are used to measure precisely the energies of electrons and photons. A 'preshower' detector, based on silicon sensors, helps particle identification in the endcaps.

- **Elektróny a fotóny sú zbrzdené v elektromagnetických sprškach**
- **Homogenický kalorimeter**
 - **Kryštály wolfrámanu olovnatého (PbWO_4) v ktorých častice produkujú scintilčné svetlo zachytené fotonásbičmi**
 - **~80 000 kryštálov**
- **Kryštály**
 - **Každý kryštál potrebuje rásť 2 dni**
 - **Sú transparentné ale skladajú sa z 86% z kovu**
 - **Každý kryštál važi 1.5 kg ale má objem kávovej šálky**



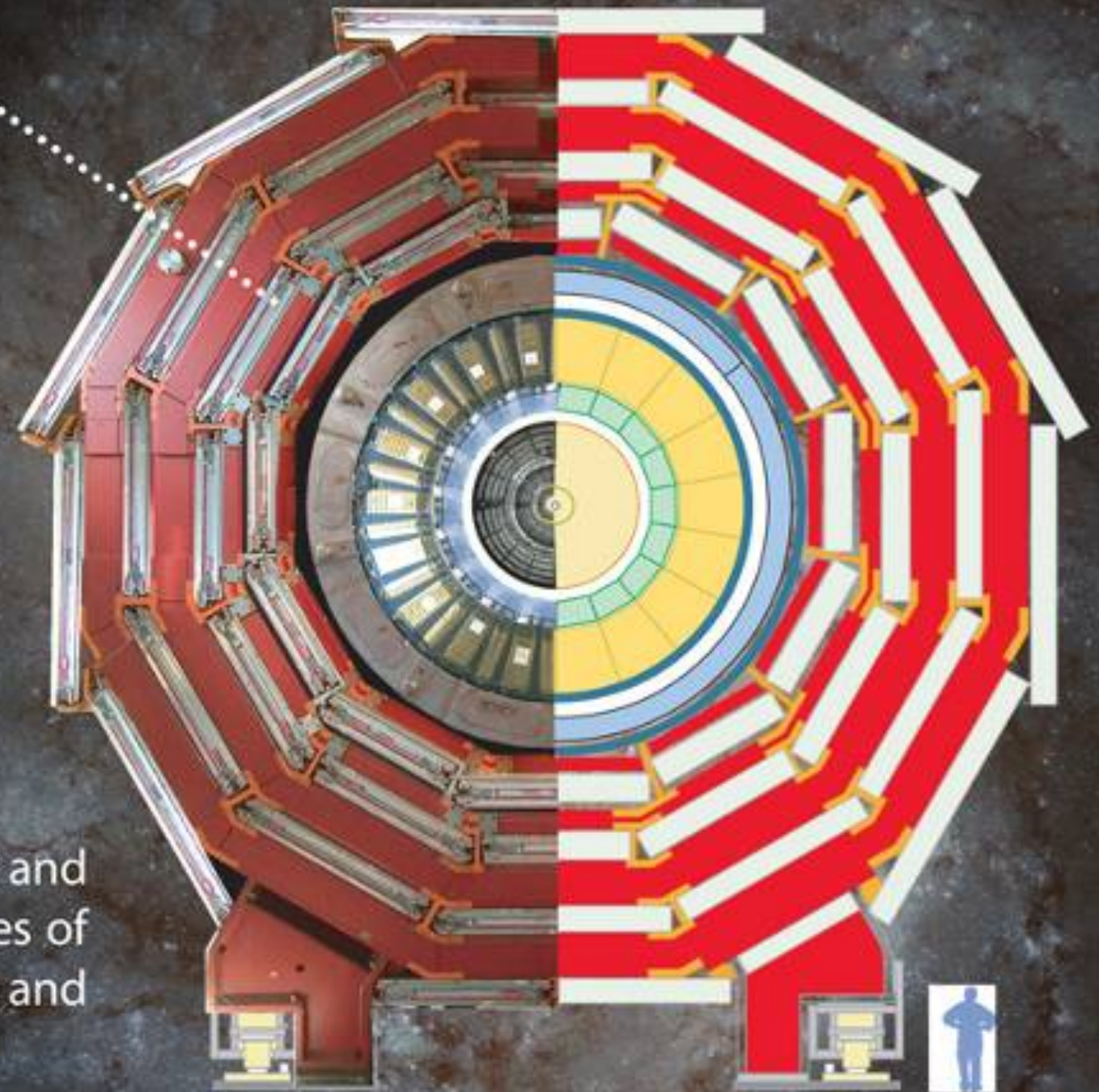
Hadron Calorimeter

Layers of dense material (brass or steel) interleaved with plastic scintillators or quartz fibres allow the determination of the energy of hadrons, that is, particles such as protons, neutrons, pions and kaons.



- **Barrel HCAL: 36 mosadzných dielov, každý vážiaci ~35 ton**
- **Endcap HCAL vyrobený z mosadze pochádzajúcej z milióna ruských delových nábojníc z Druhej Svetovej Vojny**





Muon Detectors

To identify muons (essentially heavy electrons) and measure their momenta, CMS uses three types of detector: drift tubes, cathode strip chambers and resistive plate chambers.



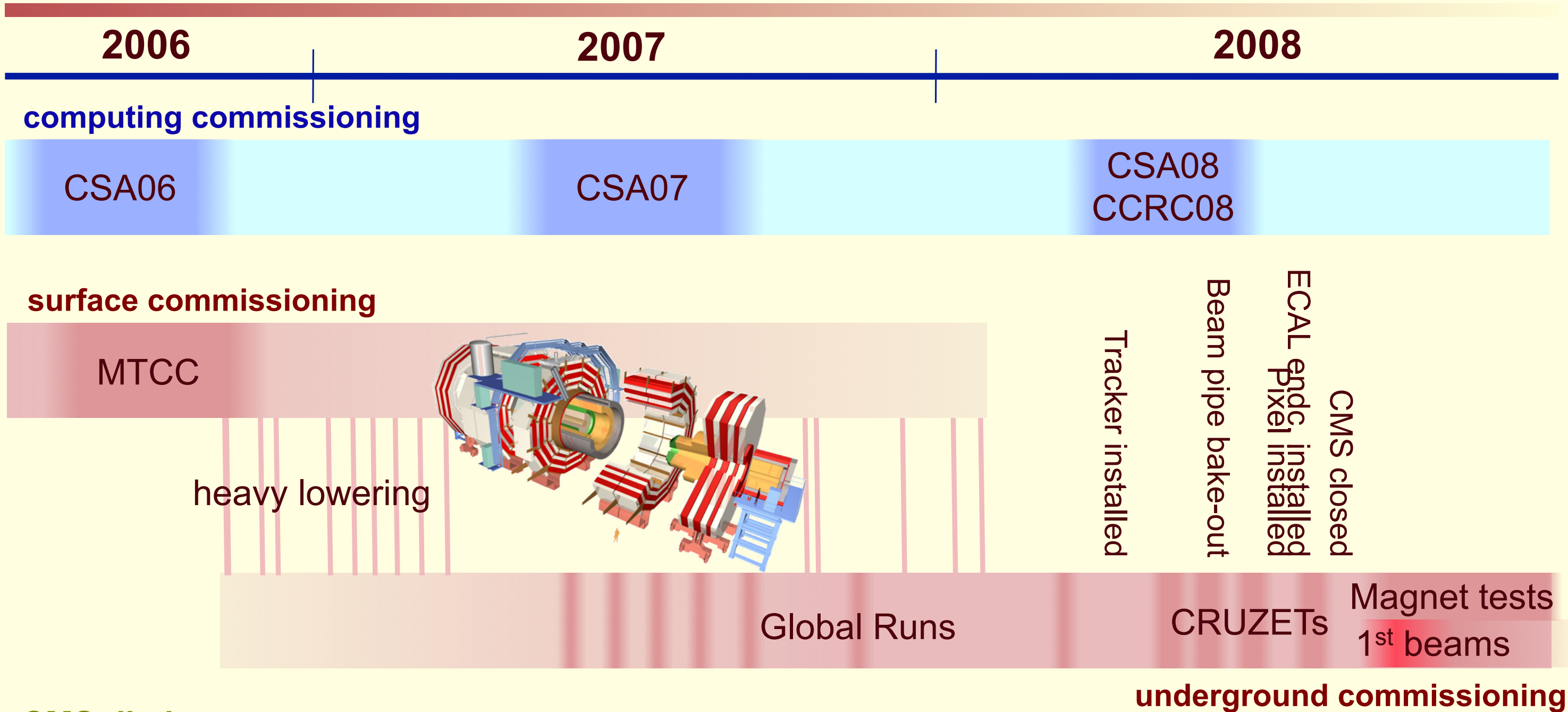
Muónový systém



- **Tri technológie (všetko plynové detektory)**
 - **Drift Tubes (DT) v barrelovej časti**
 - **Cathode Strip Chambers (CSC) v endcapoch**
 - **Resistive Plate Chambers (RPCs) v barreli aj endcapoch**
- **V CMS sa nachádza 1400 muónových plynových komôr. Obsahujú 2 milióny elektródových drôtov tenkých ako ľudský vlas.**
- **Poloha týchto komôr voči centrálnemu trackeru je známa s presnosťou niekoľko sto mikrometrov**



CMS commissioning overview

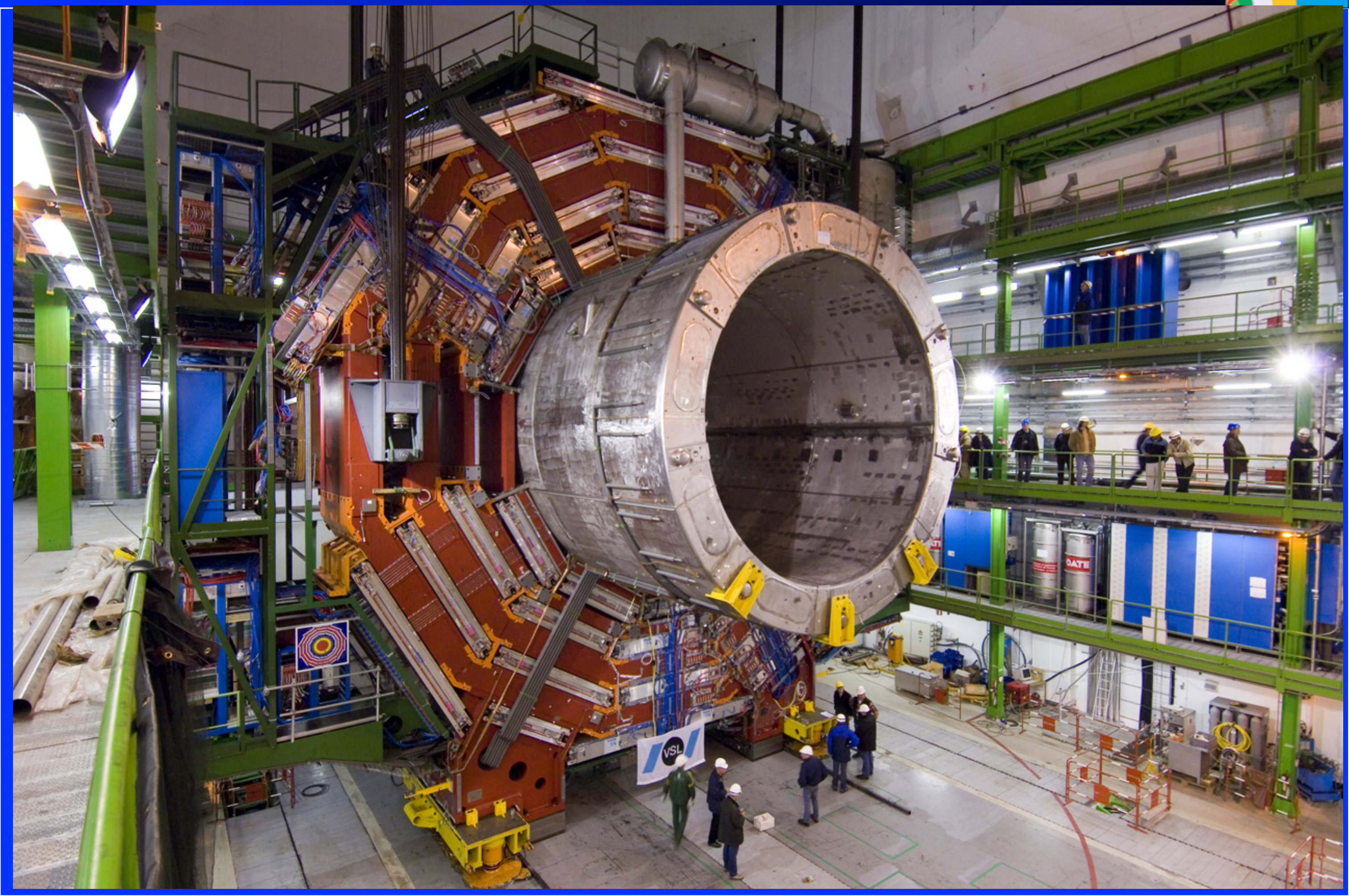


CMS dictionary:

- CSA** – Computing, Software and Analysis challenge
- CCRC** – Common Computing Readiness Challenges
- MTCC** – Magnet Test and Cosmic Challenge
- CRUZET** – Cosmic RUN at Zero Tesla

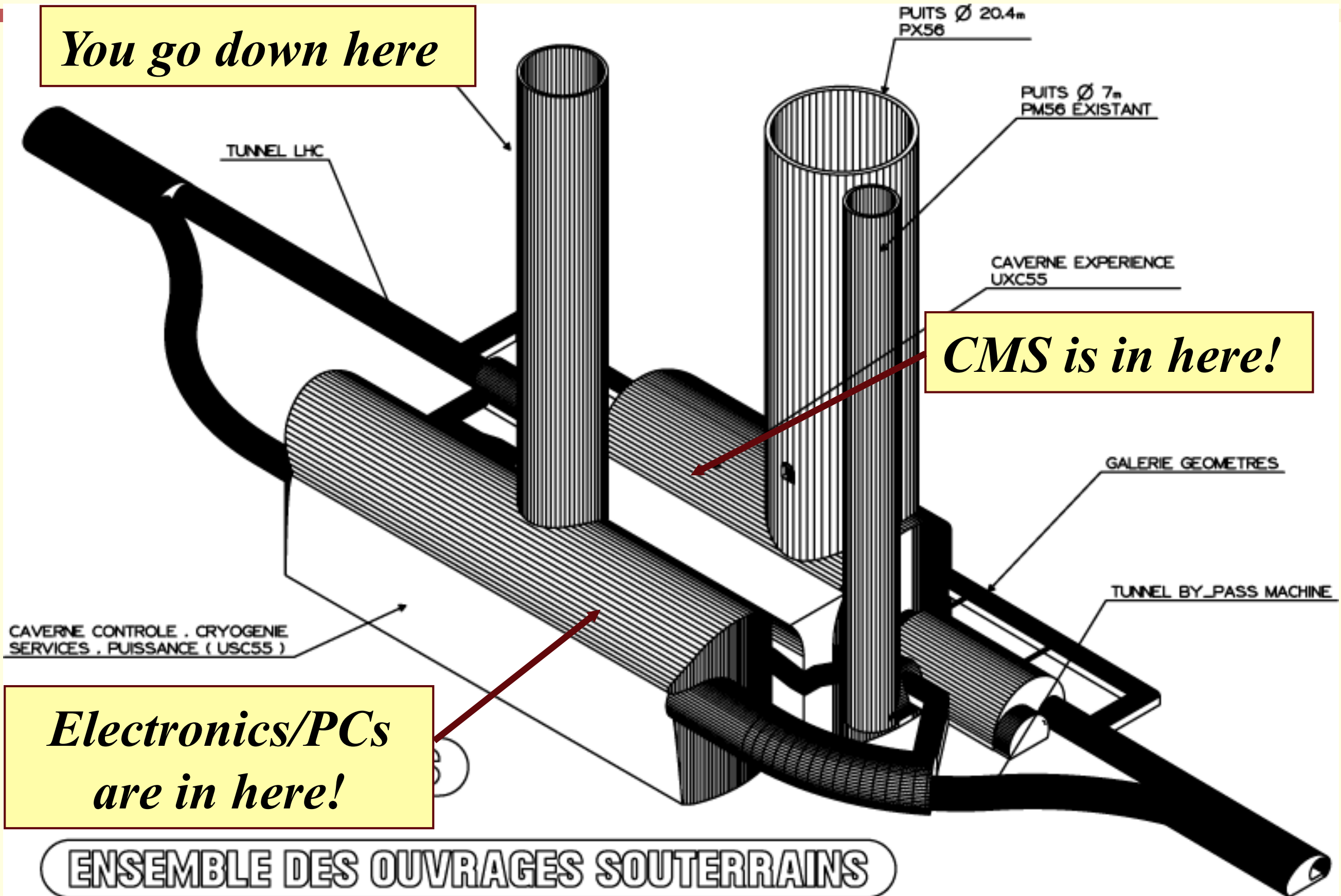
...on the surface and lowered
100m underground!





The underground caverns

You go down here



CMS is in here!

Electronics/PCs are in here!

ENSEMBLE DES OUVRAGES SOUTERRAINS

Ako kamera

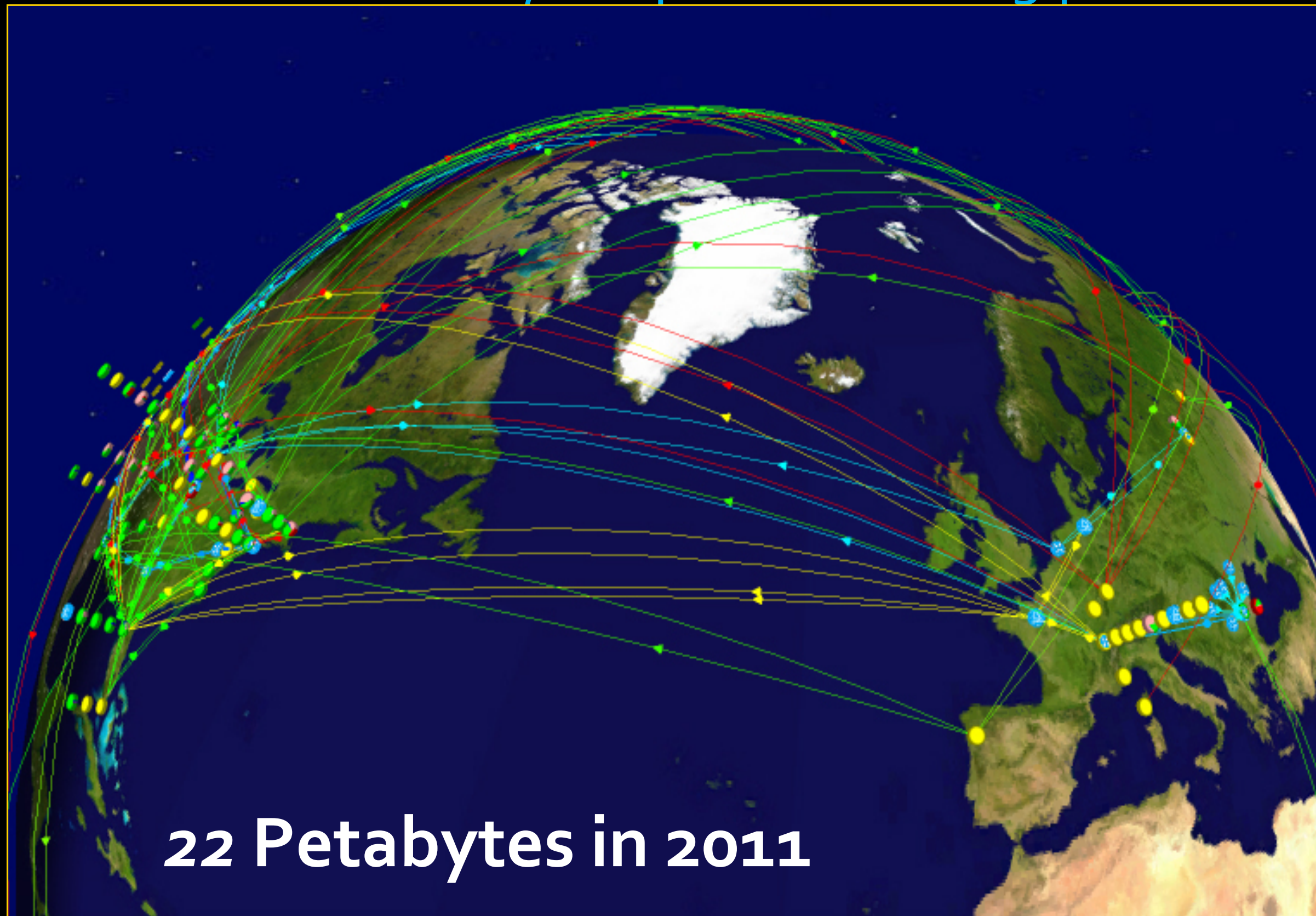
- CMS je ako kamera s 80 miliónmi pixelov
- Ale nie je to obyčajná kamera
 - Dokáže snímať 40 miliónov obrázkov za sekundu
 - Obrázky sú 3 dimenzionálne
 - A so 14000 tonami nie je veľmi prenosná
- Ale hlavný problém je, že nie sme schopní zaznamenať všetky obrázky a preto musíme vybrať tie najdôležitejšie!

Trigger

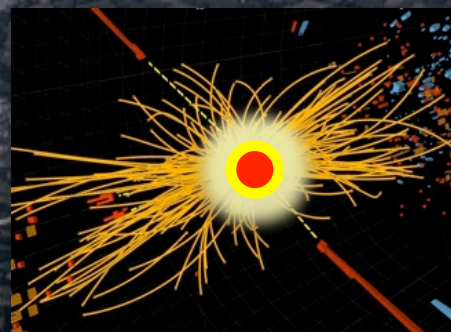
- **Frekvencia kolízií**
 - Zväzky sa križujú ~ 16.5 milión krát za sekundu
 - Okolo 20-30 párov protónov sa zrazí pri každom stretnutí zväzkov
- **Zaujímavé zrážky sú zriedkavé**
 - Nanajvýš jedna z 10 miliárd...
- **Sme schopní zaznamenať okolo 400 zrážok za sekundu.**
- **Musíme vybrať tie správne a to rýchlo!**
- **Úrovne Triggera**
 - Najprv hardwarovo zaznamenávame 100 tisíc snímok z 16.5 milióna za sekundu. Rozhodnutie nesmie trvať viac než niekoľko mikrosekúnd
 - Potom s pomocou ~10000 počítačov, vyberieme výsledných 400 za sekundu
- **Napriek tomu sme zahrnutí množstvom dát!**

Data distribution

- Grid connects >100,000 processors in 34 countries

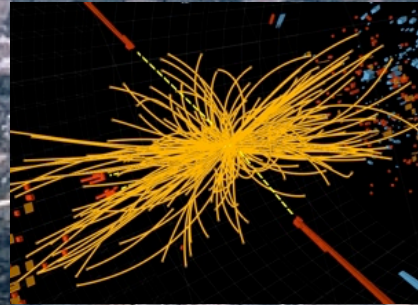


CMS

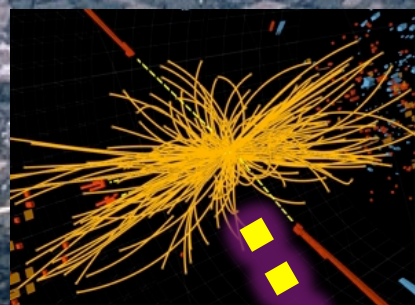


- Proton beams circulate 11,245 times/sec
- >100 million proton-proton collisions/second
- Collisions are a billion times hotter than the centre of the sun and create new particles ($E = mc^2$)

CMS

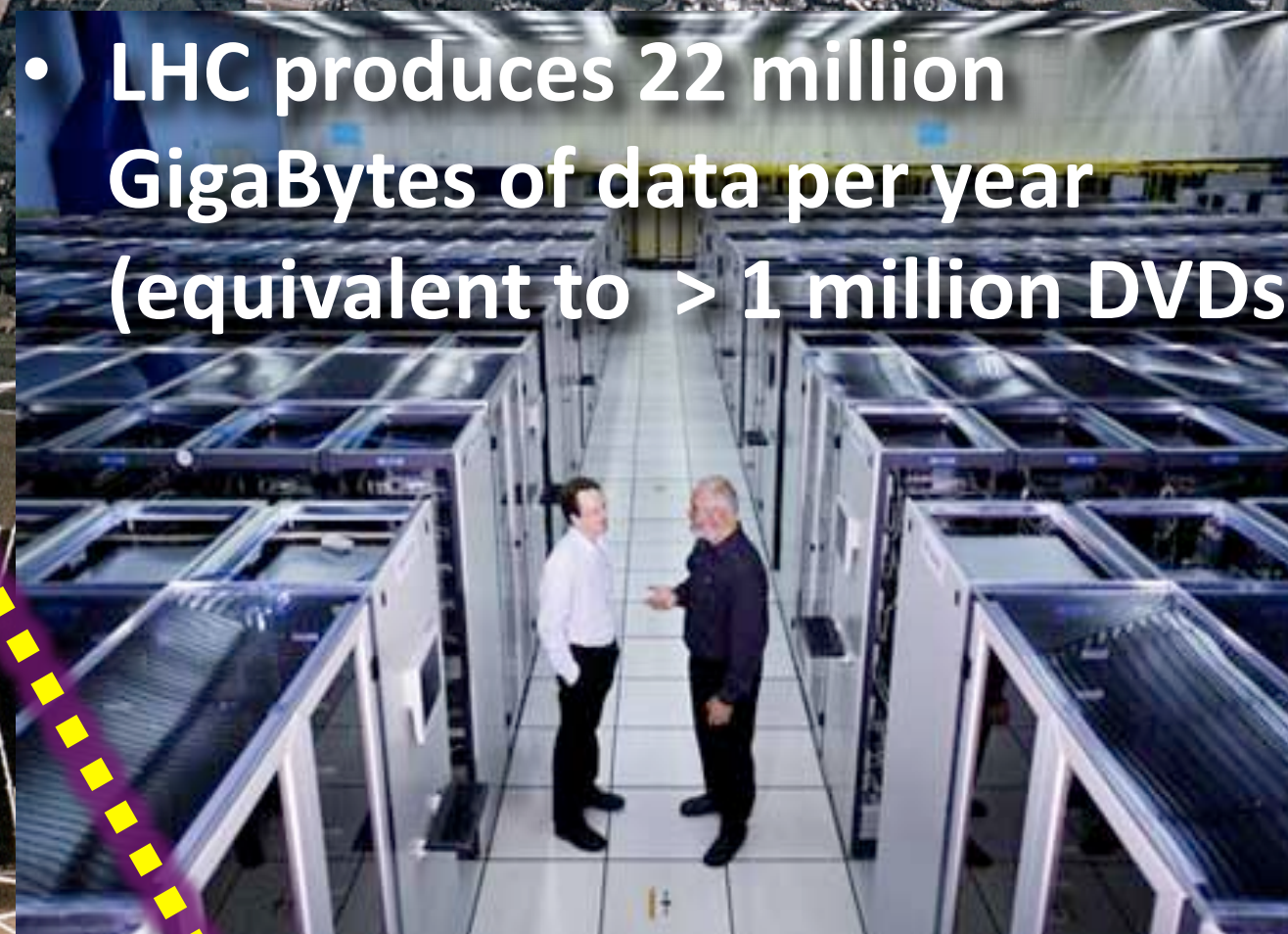


CMS



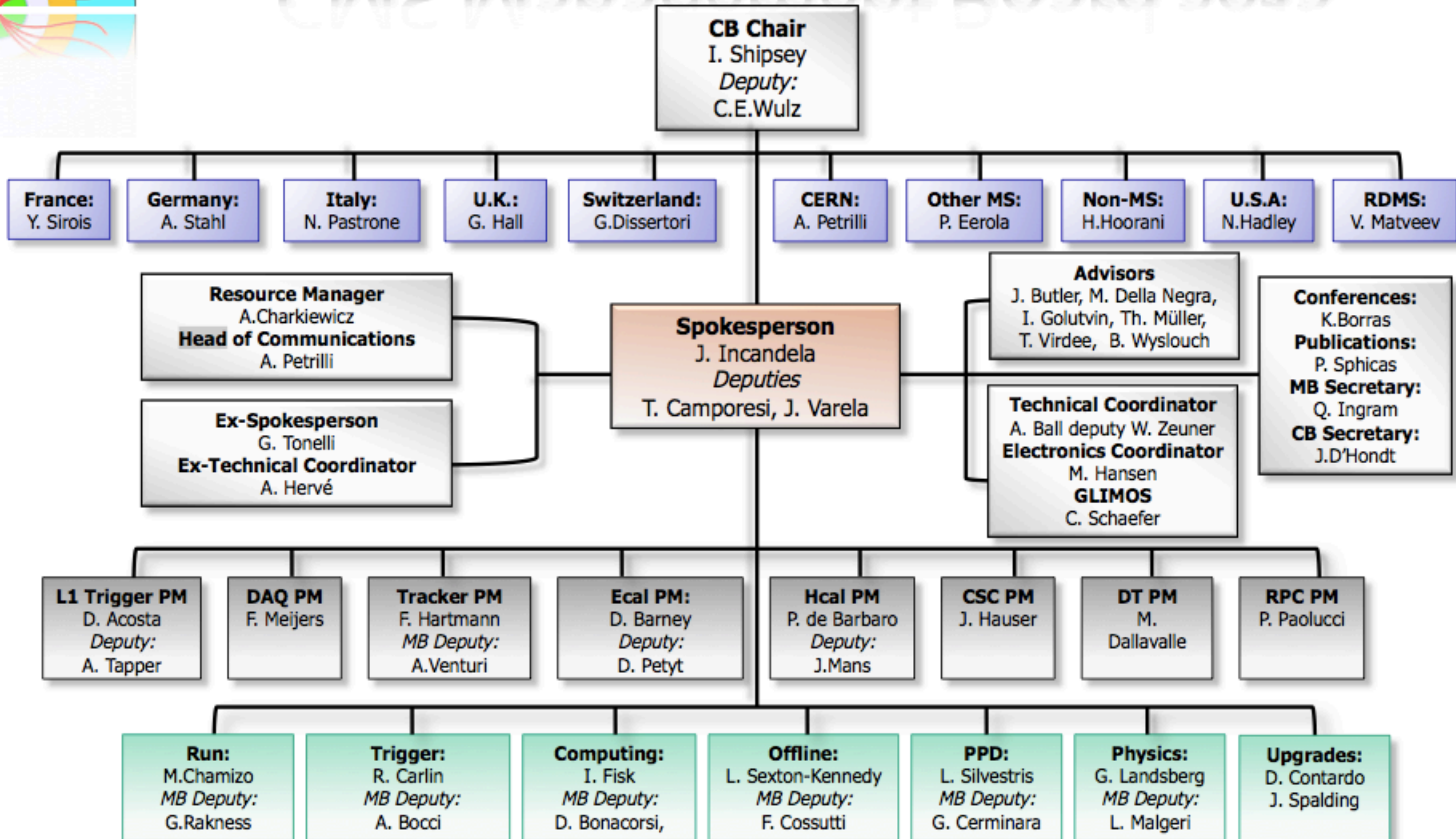
Collision event data

- LHC produces 22 million GigaBytes of data per year (equivalent to > 1 million DVDs)



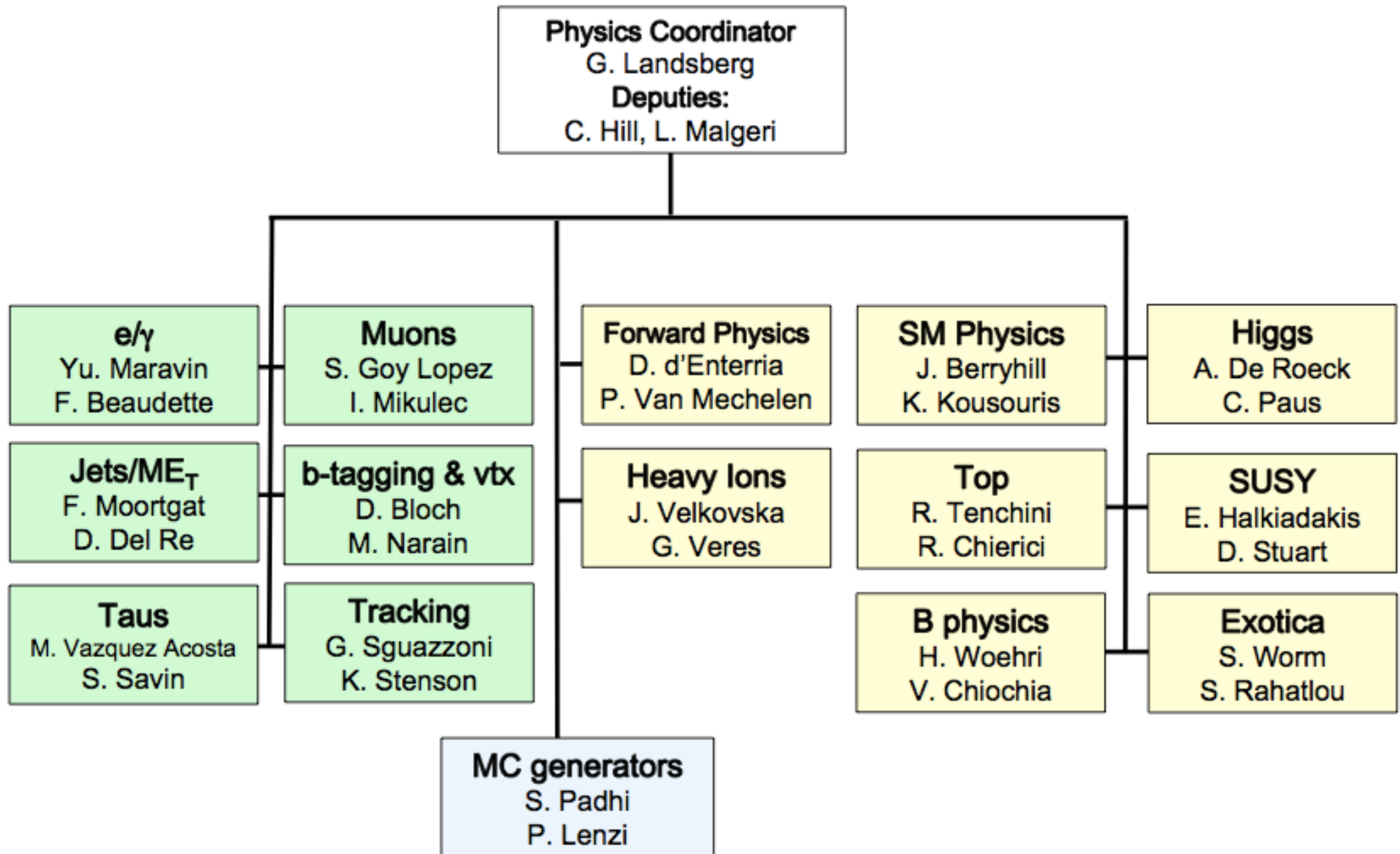


CMS Management Board 2013





Organizácie fyzikálnej analýzy



Hľadanie ihly (Higgsovho bozónu) v kope sena



**Častica interagujúca slabo s
Higgsovým poľom**



Propaguje s vysokou rýchlosťou

**Častica interagujúca silno s
Higgsovým poľom**

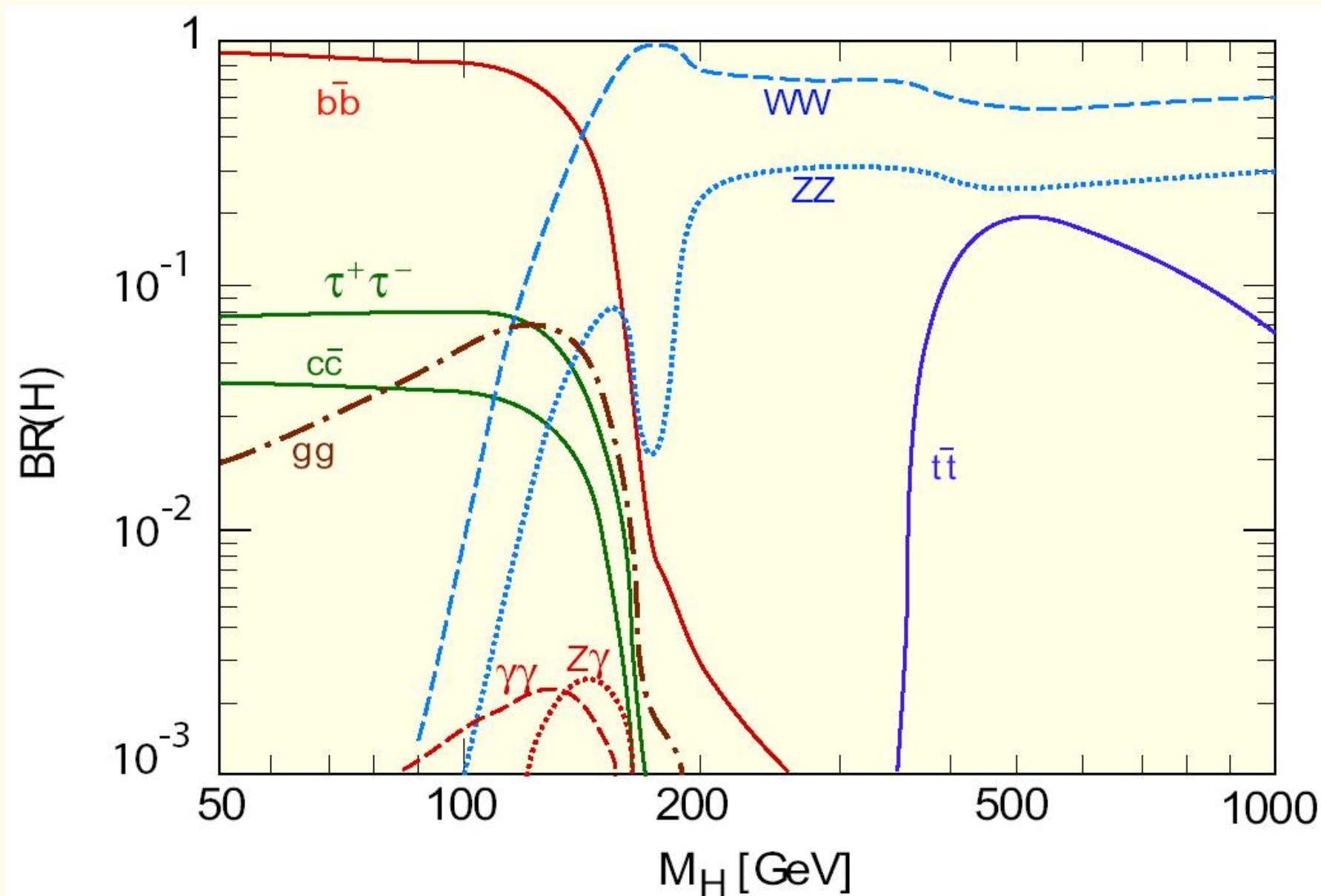


Propaguje s nízkou rýchlosťou

<http://www2.uni-wuppertal.de/FB8/groups/Teilchenphysik/oeffentlichkeit/Animationen/Higgs.html>

- **Higgsov bozón je nevyhnutným dôsledkom existencie Higgsovho poľa**
- **Higgsov bozón je jediný spôsob ako dokazať existenciu Higgsovho mechanizmu**

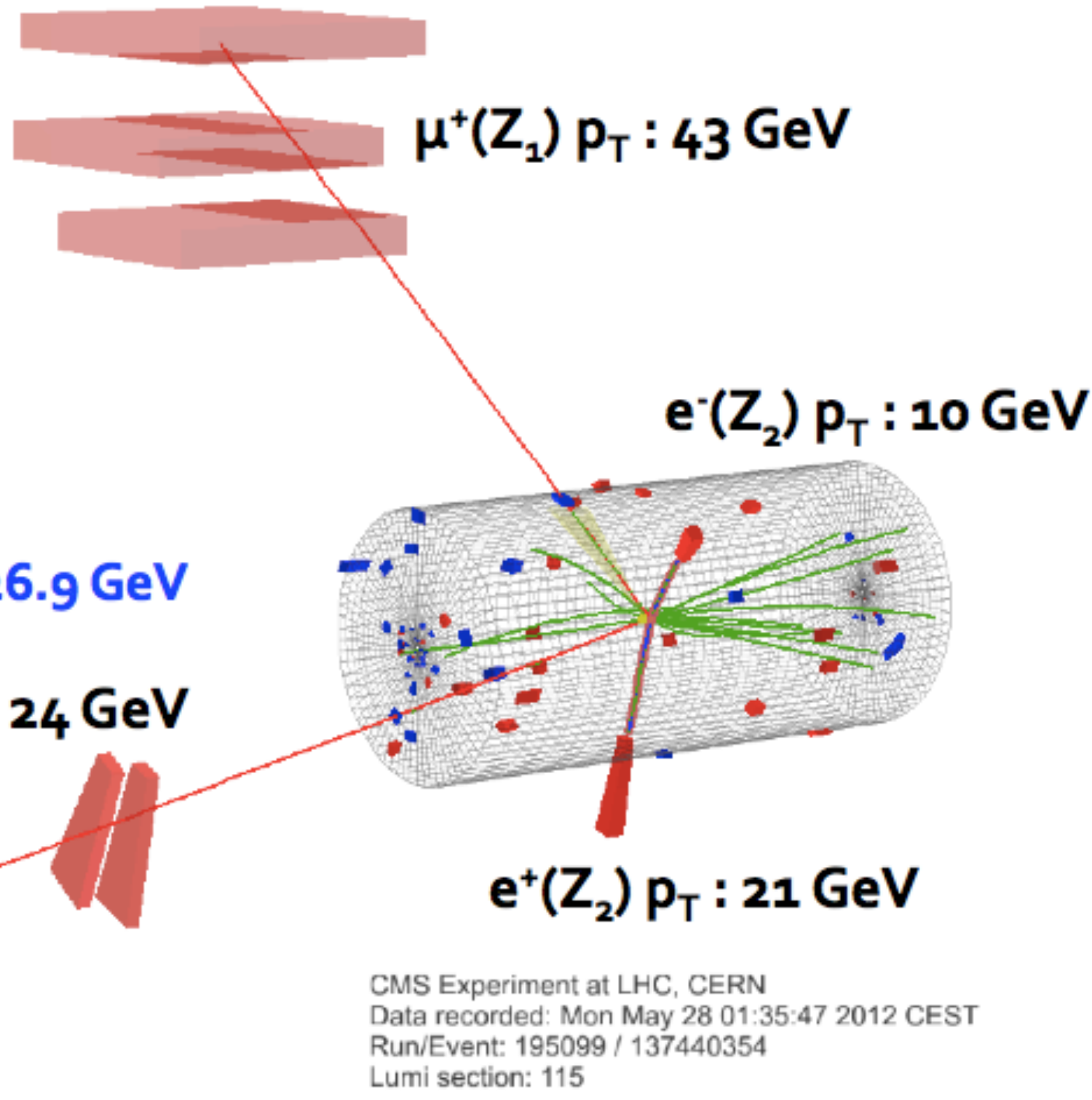
- Nájst' Higgsov bozón nebolo ľahké lebo jeho hmotnosť nebola predpovedaná → treba preskúšať všetky možnosti
- Zbierame zrážky obsahujúce možné produkty rôznych spôsobov rozpadu Higgsovho bozónu



Vieme ako sa Higgsov bozón rozpadá keď má určitú hmotnosť

Higgs kandidát

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e 2\mu$$



8 TeV DATA

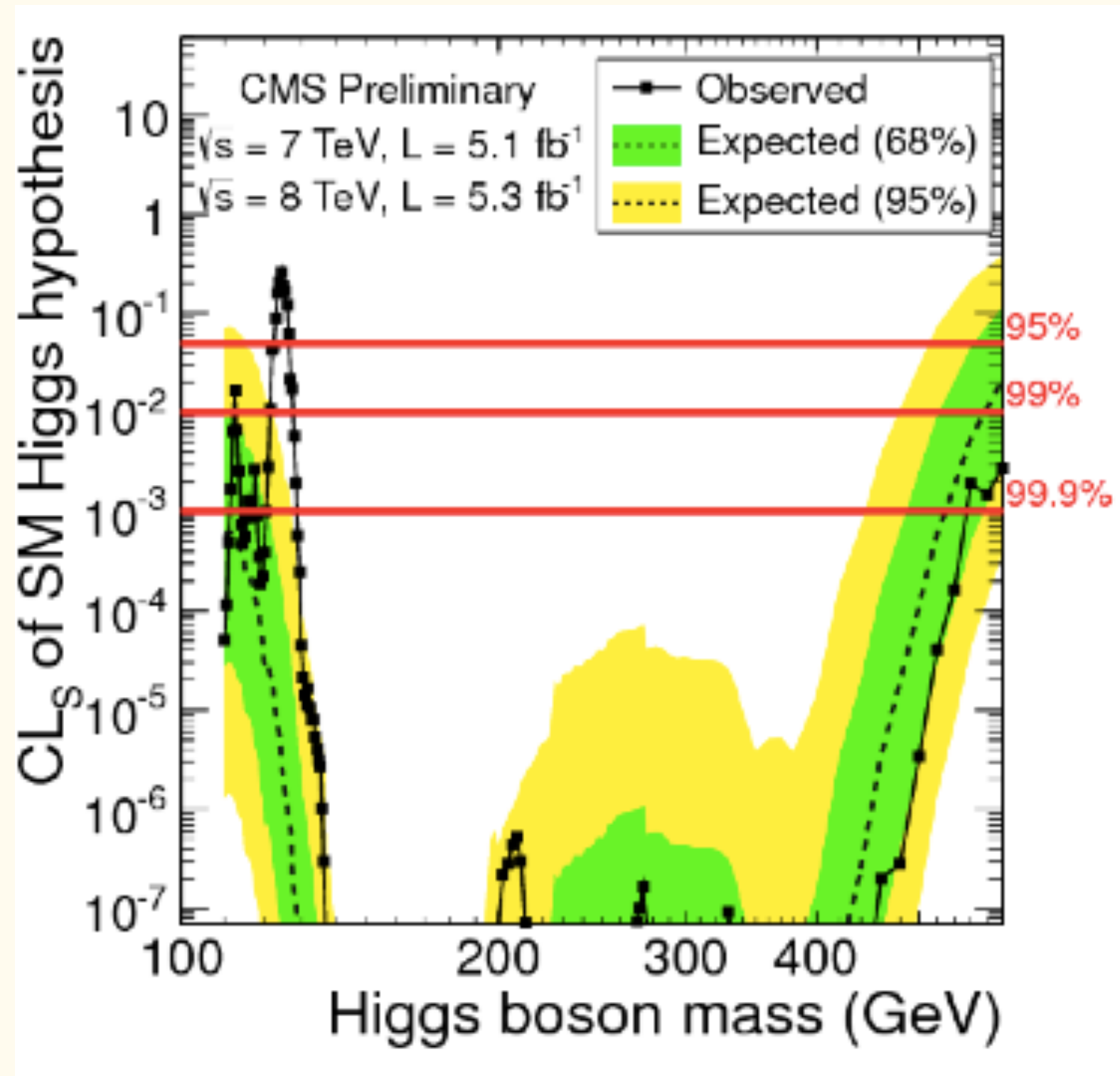
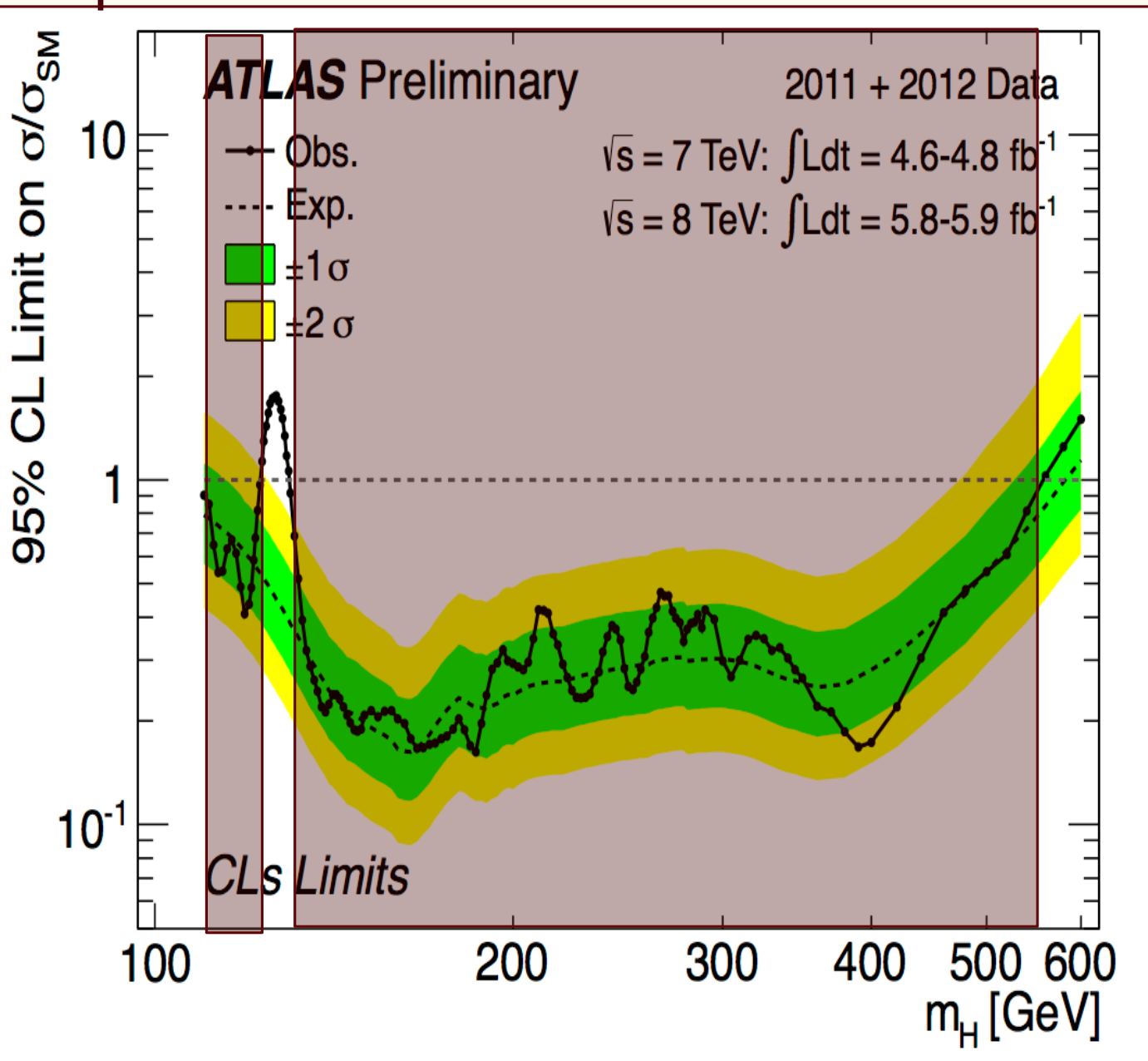
4-lepton Mass : 126.9 GeV

Takéto finálne stavy môžu vzniknúť aj v iných nezaujímavých procesoch

→ Musíme maximálne zredukovať pozadie a zbytok vziať do úvahy

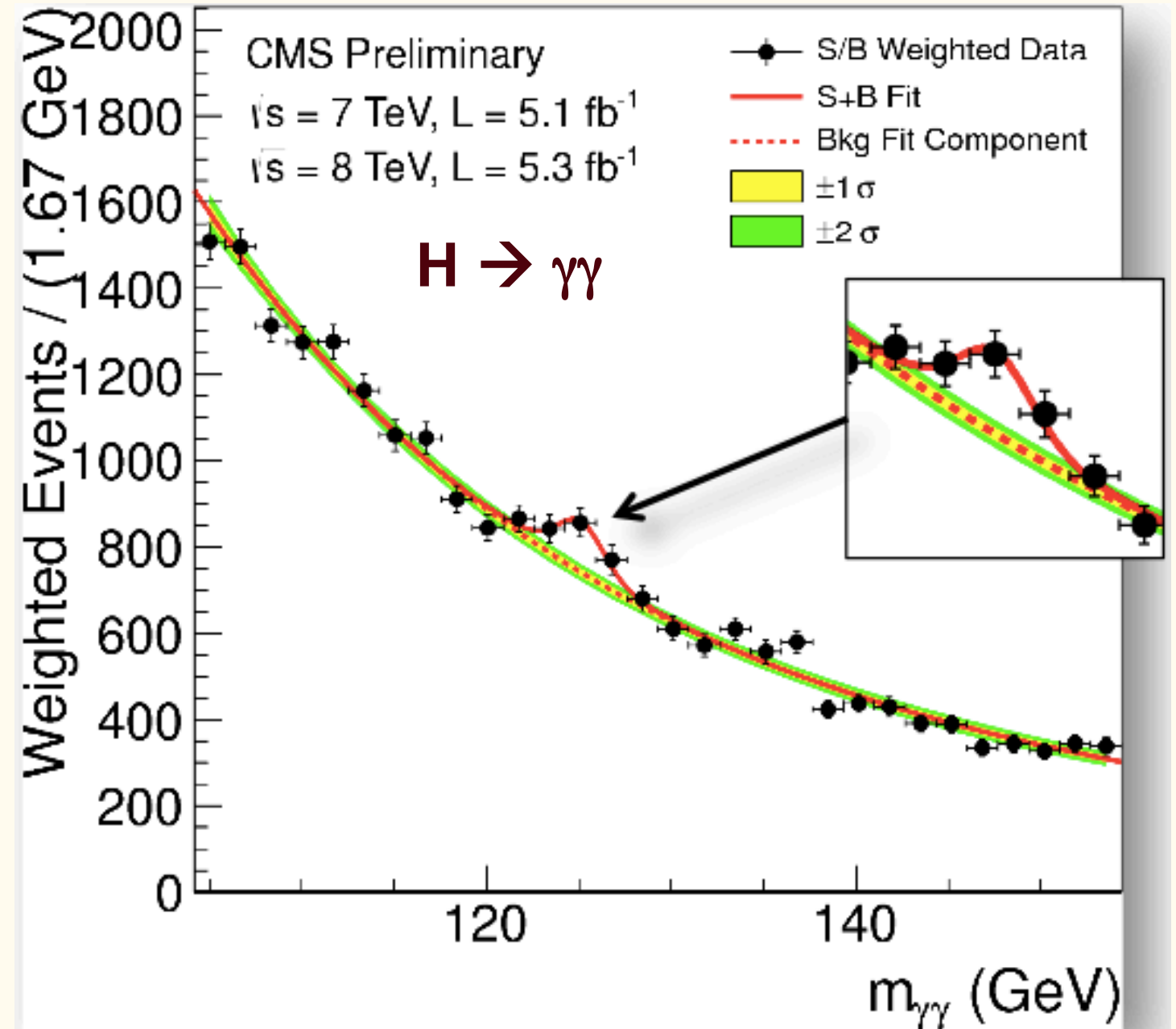
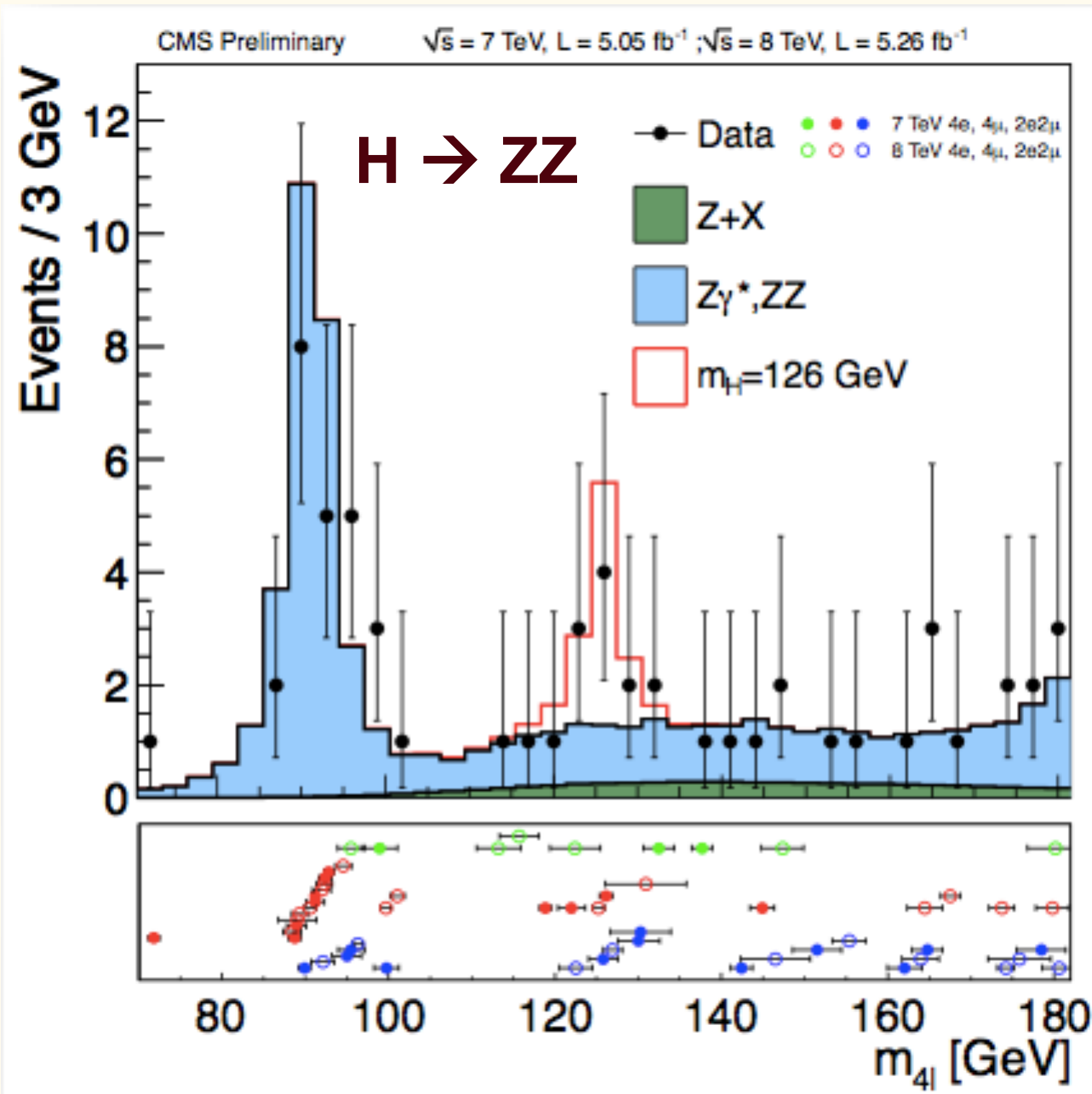
CERN-Seminar 4. July 2012

Rôzne hmotnostné hypotézy boli preskúšané



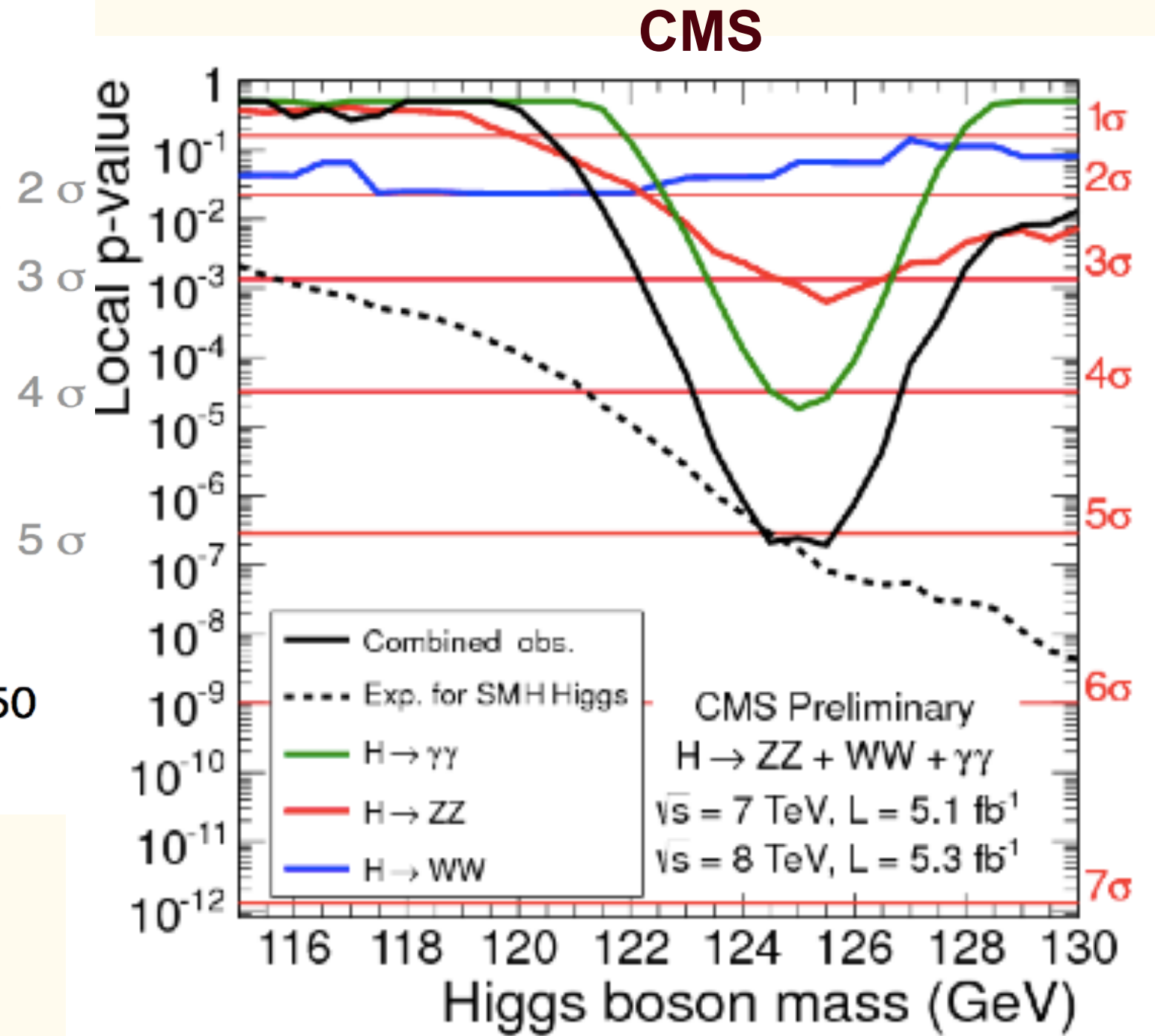
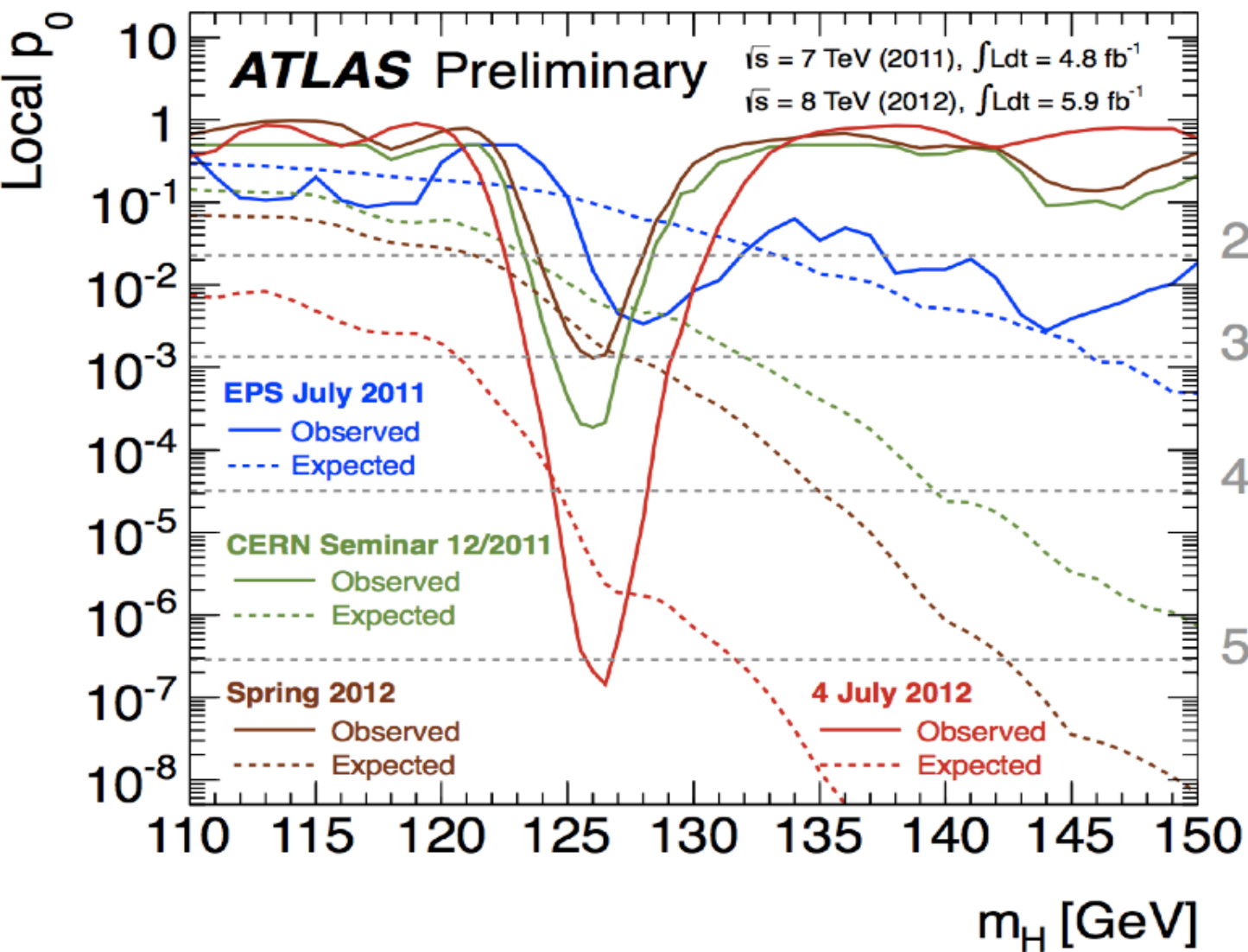
Všetky hmotnosti až po ~600 GeV vylúčené až na malý ostrov

CERN-Seminar 4. July 2012



Signál je ľahko rozoznateľný voľným okom

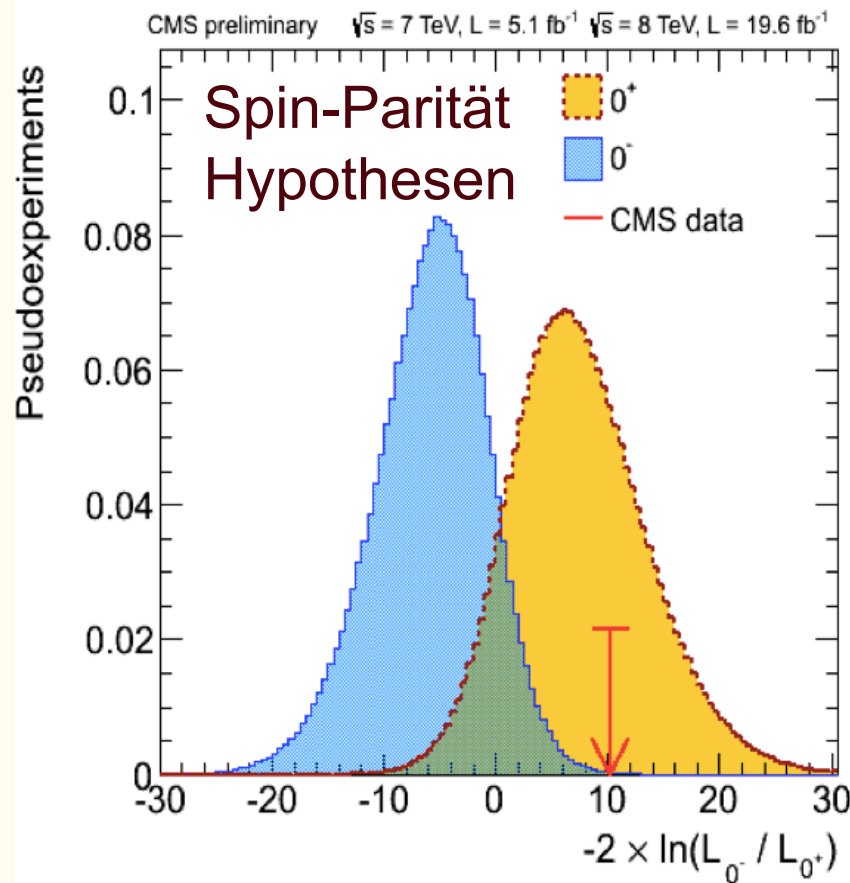
CERN-Seminar 4. July 2012



- Prah uznania objavu: 5 štandardných odchýliek
- Pravdepodobnosť že sa jedná o štatistickú fluktuáciu pozadia: $\sim 3 \times 10^{-7}$!

- Potvrdené v rôznych rozpadových kanáloch a rôznych vzorkách

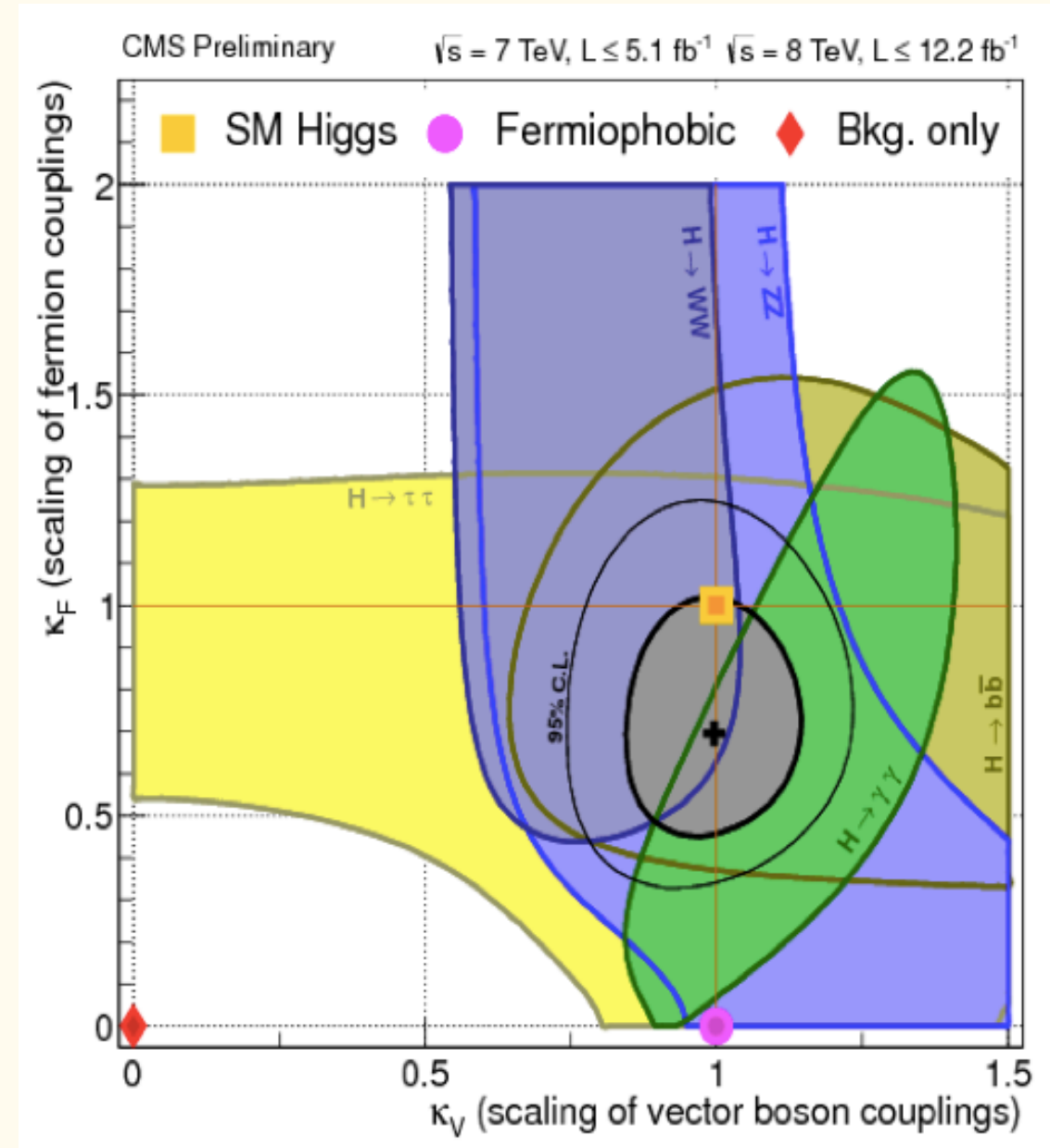
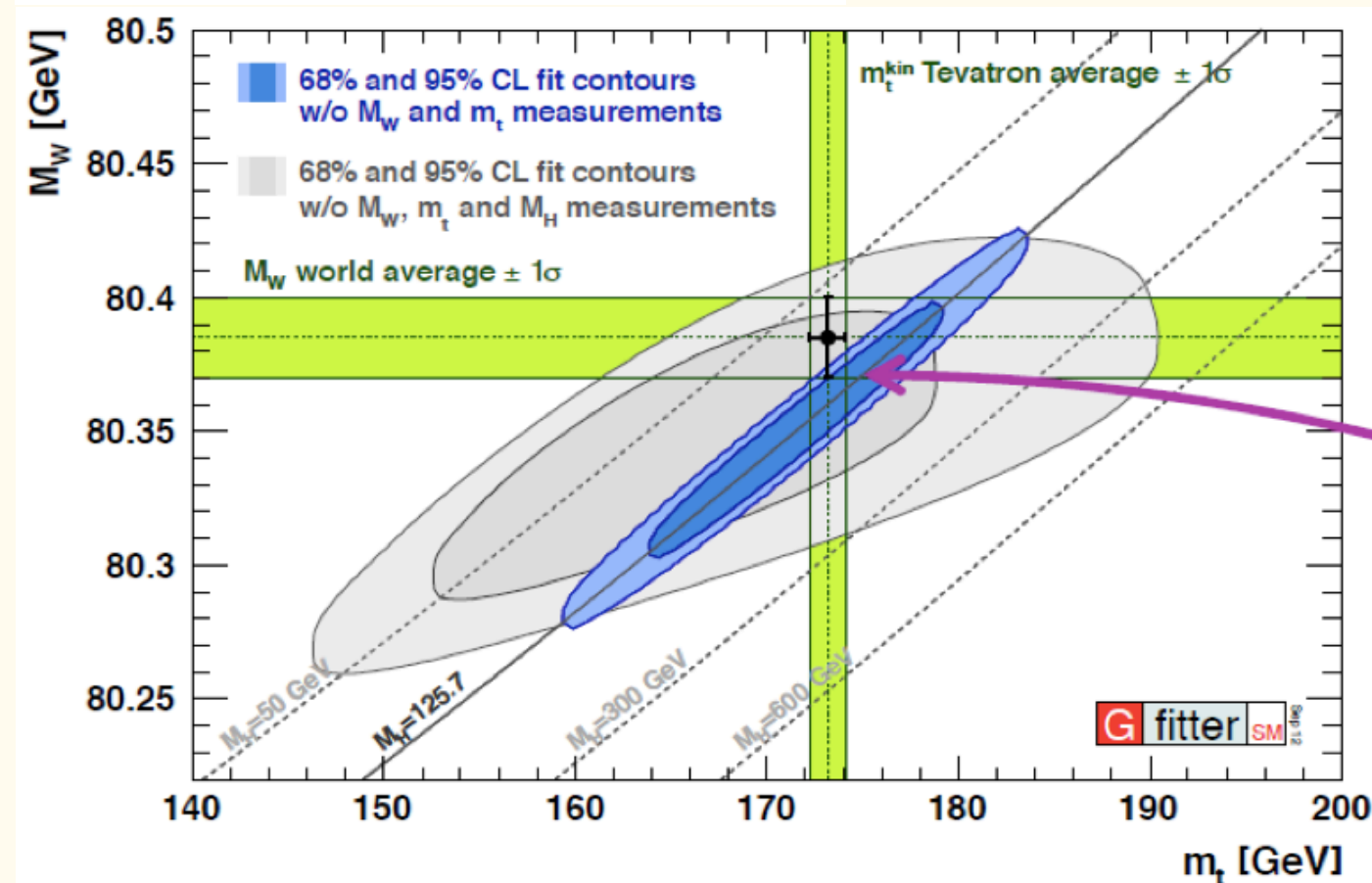
Aký je stav dnes?



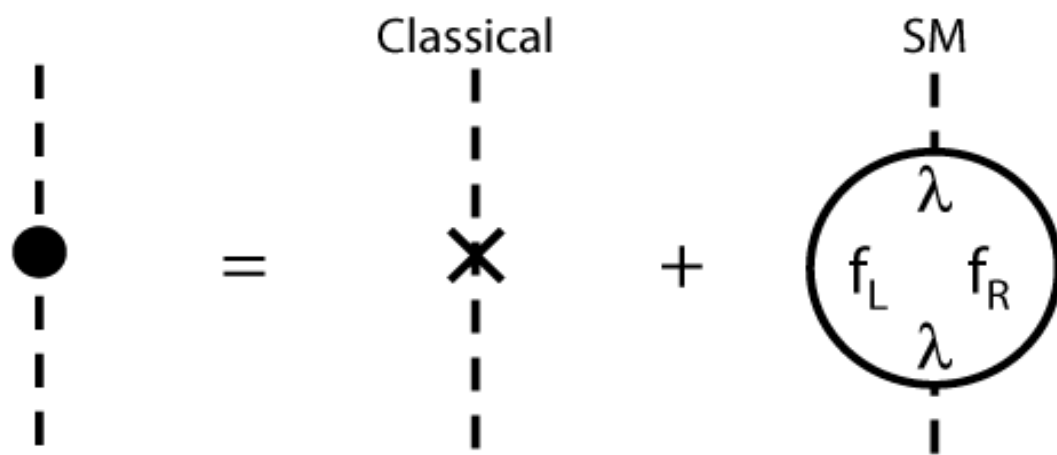
Skúmame vlastnosti objavenej častice:

- Spin-Parita: 0^+ najpravdepodobnejšiaten - ako SM Higgs
- Väzba k bozónom a fermiónom kompatibilná s SM Higgсом
- Nameraná hmotnosť je konzistentná s hmotnosťou W bozónu a top kvarku v rámci obmedzení SM

Všetko ukazuje že sa jedná o (SM) Higgsov bozón!



Problem



$$m_h^2 = (m_h^2)_0 - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2.$$

- Hmotnosť Higgsovho bozónu:
 - Virtuálne častice prispievajú k pozorovanej hmotnosti Higgsovho bozónu obrovskými korektúrami.
 - Λ môže byť 10^{19} krát hmotnosť protónu (Planck scale)
 - To je veľký problém
 - A.K.A. Hierarchy problem
 - Niečo musí vykrátiť tieto príspevky!

Riešenie: partnerské častice

Classical

SM

λ

f_L f_R

λ

\tilde{f}_L, \tilde{f}_R λ^2

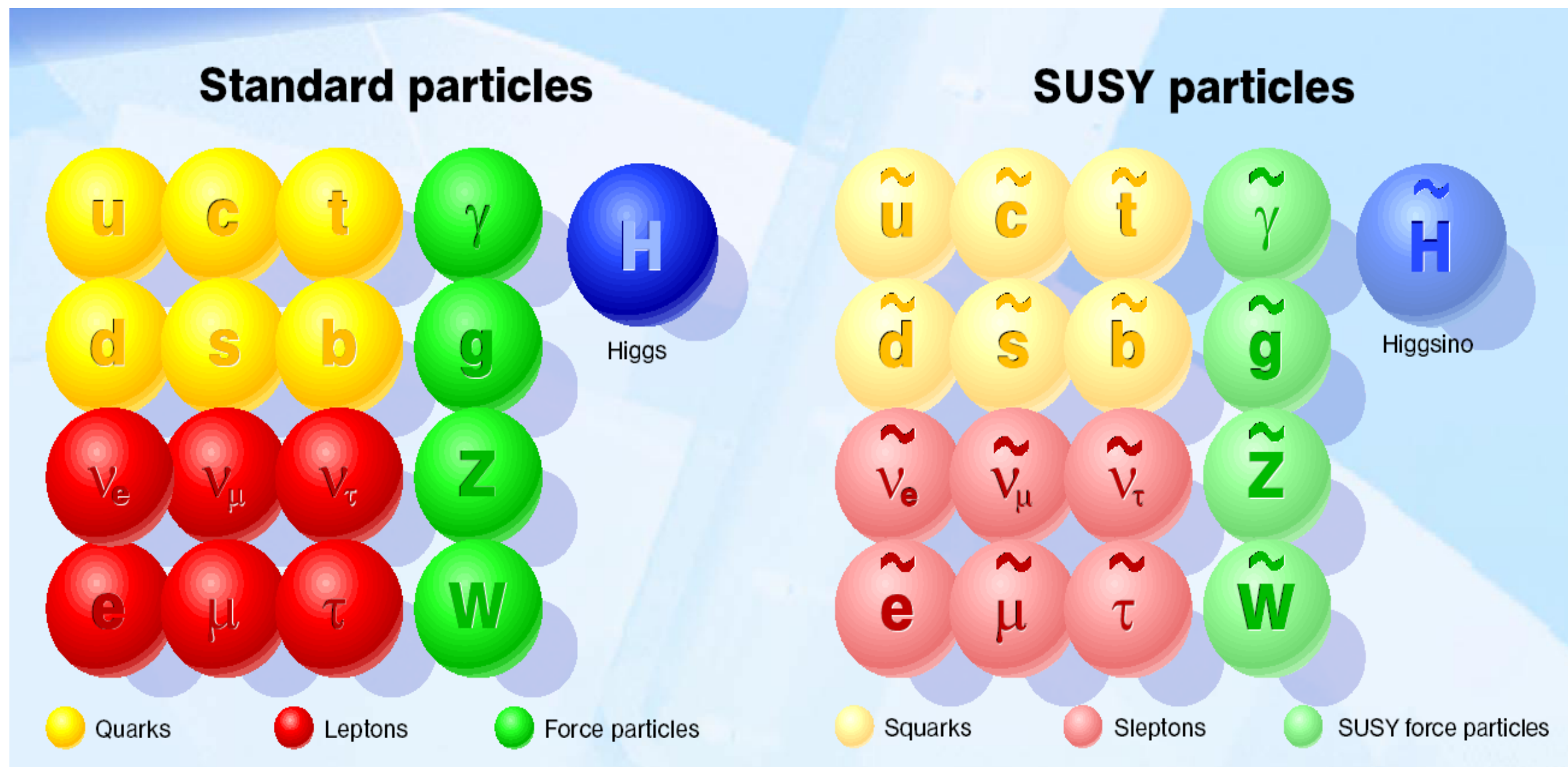
Vzájomné zrušenie

$$m_h^2 = (m_h^2)_0 - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots$$

- Zostávajúce členy sú oveľa menšie
- Ale zodpovedajúce nové častice nesmú byť veľmi ťažké
- Všetko nasvedčuje tomu, že by sme ďalšie nové častice by mali byť v dosahu LHC?

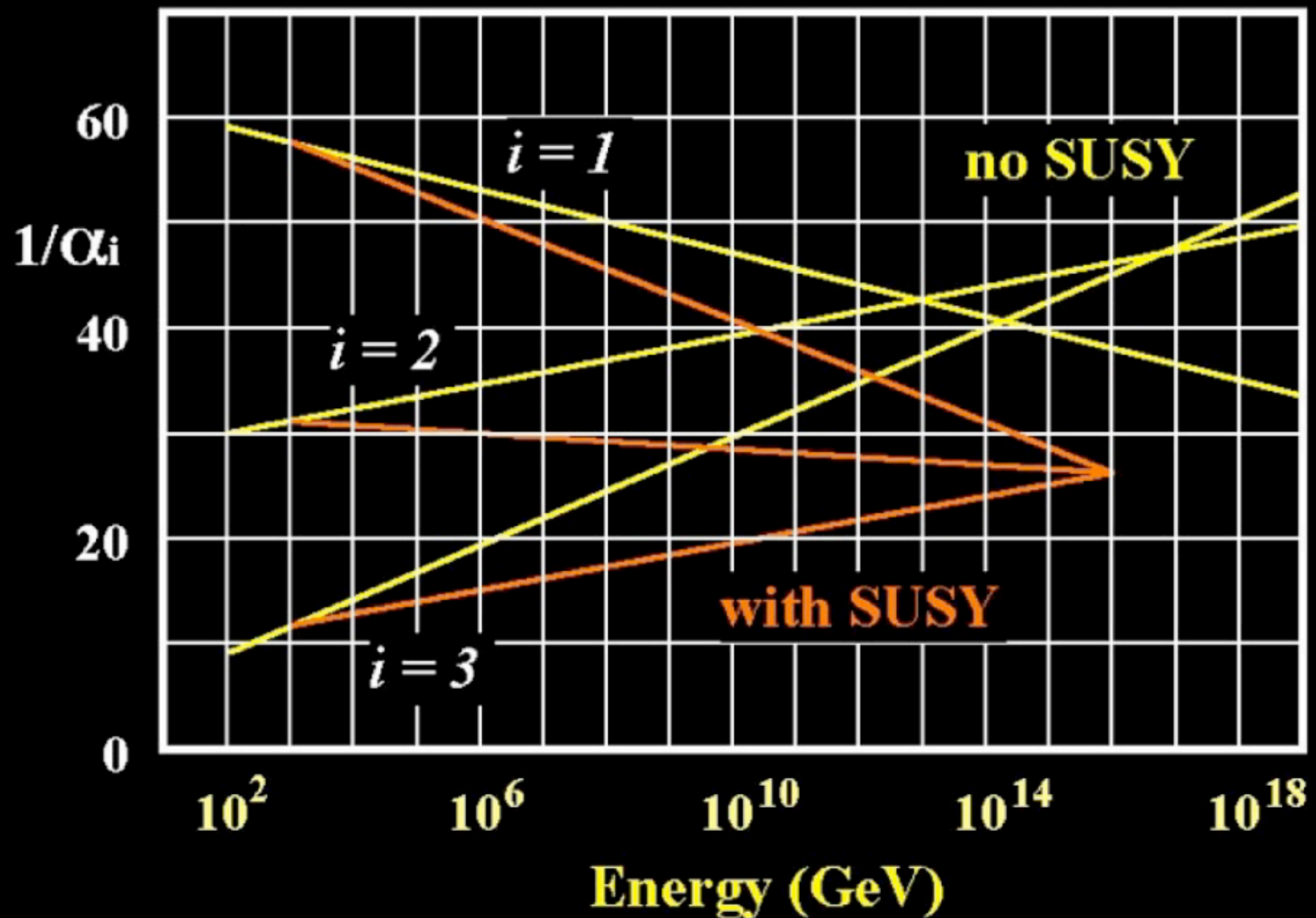
Supersymmetria (SUSY)

- Veľmi elementárna symetria
 - Každý fermión ($1/2$ -číselný spin) má bozónového (celočíselný spin) partnera a vice versa
 - Rozdiel v spine: $1/2$
 - (S)Partneri sú ťažší (inak by sme ich už objavili)



- Teória ktorá je schopná vysvetliť hlavné problémy súčasnej fyziky
 - Rieši problém s Higgsovou hmotnosťou
 - Tmavá Hmota by mohla byť zložená z najľahších a tým stabilných supersymetrických častíc
 - (napr. Neutralino alebo Gravitino)
 - Vede k zjednoteniu fundamentálnych síl

Implications of SUSY: Unification



- SUSY unifies the strengths of all forces at $\sim 10^{16}$ GeV
 - A.k.a.- the Grand Unified Theory (GUT) scale

Alebo aj nie...

- Existuje množstvo iných teórií ktoré predpovedajú nové častice alebo nové priestorové rozmery!
 - Little Higgs (with T Parity)
 - Universal extra dimensions (with KK parity)
 - Strong dynamics
 - Extra dimensions (large or warped)
 - Hidden Valleys
 - Split SUSY
 - ...
- Takže máme čo hľadať a určite sa máme ešte aj na čo tešiť!.