

Детектори във физиката на елементарните частици

П.Яйджиев, ИЯИЯЕ - БАН

1. Програма на LHC
2. Преминаване на частици през веществото на детектора
3. Елементи на детекторите на елементарни частици на LHC: Трекови детектори, Калориметри, Мюонни детектори
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

Инструментариум

Програма на LHC

Да се намерят нови частици/ нови симетрии/ нови сили?

Произход на масата – Higgs бозон;

Суперсиметрични частици – частици на тъмната материя?

Допълнителни размерности пространство-време: гравитон?

Изучаване на CP нарушението;

Изучаване на кварк-глюонна плазма;

Неочаквани резултати.

Да се излезе извън SM

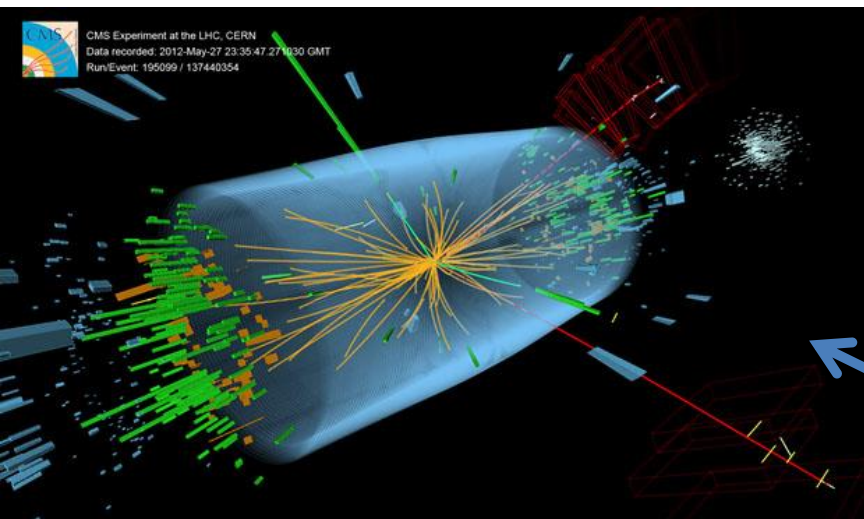
Ускорители - мощни машини, които ускоряват частици до екстремно високи енергии и ги сблъскват с други частици;
Детектори - гигантски инструменти, които записват информацията от родените в точката на сблъскване нови частици;
Компютърни системи – да събират, съхраняват, анализират и разпространяват огромното количество данни, произведени от тези детектори;
Научни колективи – учени и инженери, които да построят, поддържат и използват тези комплексни машини.

LHC



pp взаимодействие при $7 + 7$ TeV, 2 насрещни снопа
 $k = 2808$ пакета от протони в сноп
 $N = 10^{11}$ протона в пакет
 f = пресичане на сноповете = 40 MHz

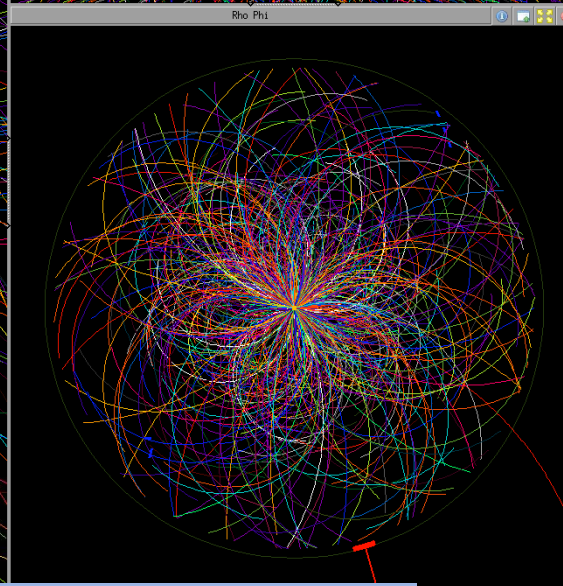
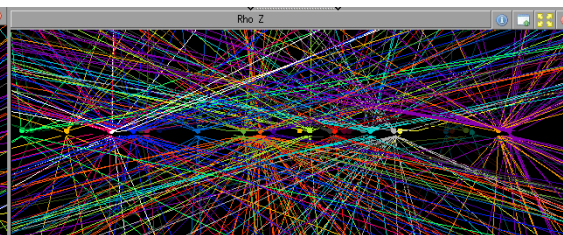
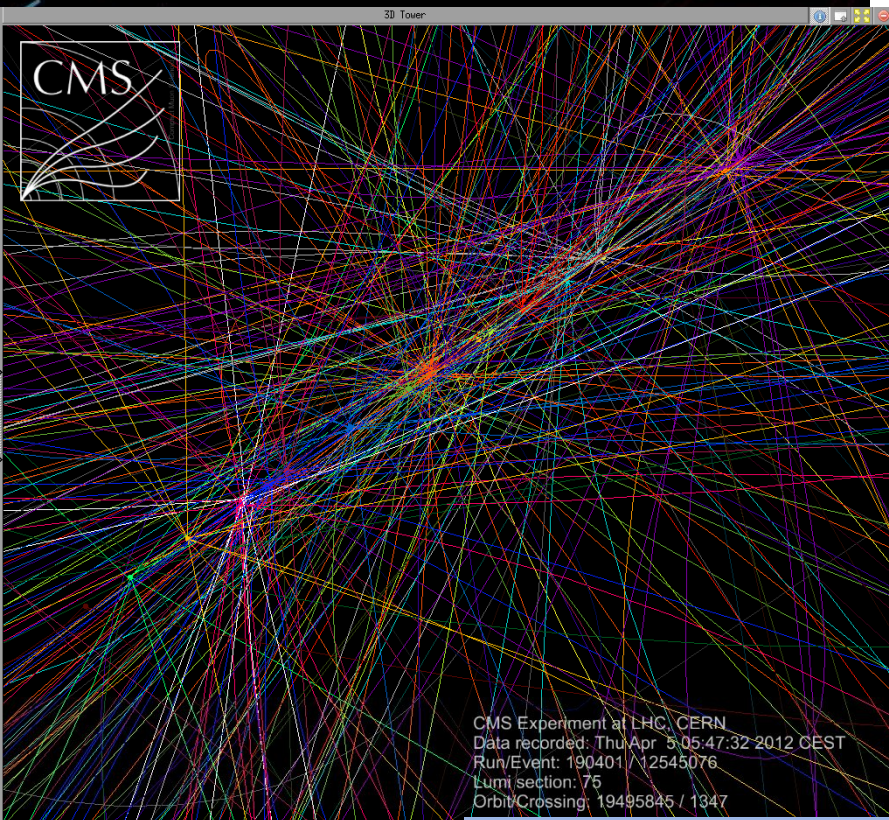
LHC – CMS – запис на 1 събитие



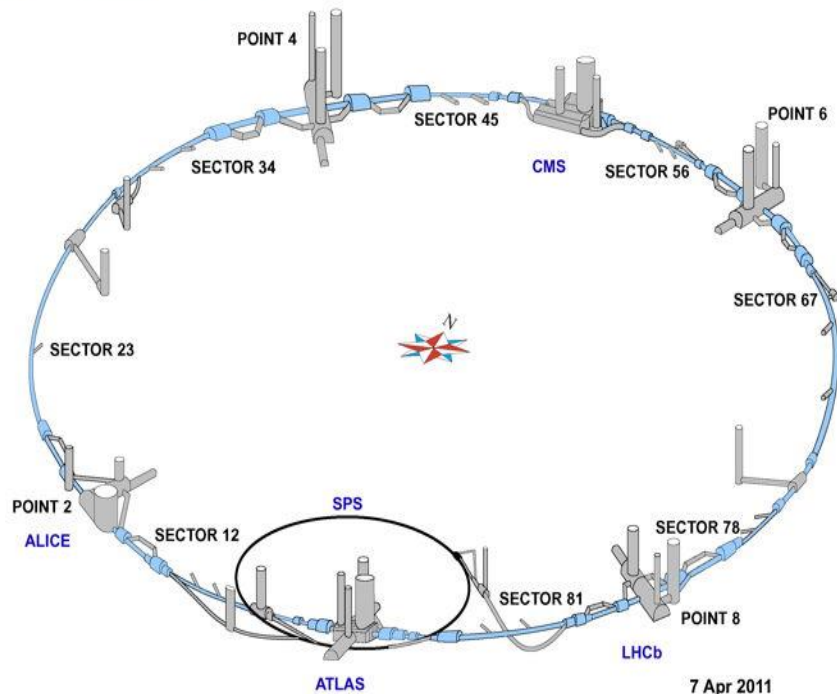
CMS има около 100 милиона канала и прави „цифрови“ снимки 40 милиона пъти в секунда!

/цифрова камера ~ 20 милиона пиксела/

1 събитие



С повишаване на светимостта броят на събития по време на един интервал на сблъскване на протоните /25 наносекунди/ расте до 50



1. ~ 1 милиард протон-протонни взаимодействия за 1 s
Пакети, съдържащи 10^{11} протона, се пресичат 40 милиона пъти в центъра на всеки експеримент
2. Огромни потоци от вторични частици
Хиляди частици пресичат детектора всеки 25 ns
Голям брой канали ~ 100 милиона
Голям брой информация ($1 \text{ MB} / 25 \text{ ns} = 40 \text{ TB}$ за 1 s)
3. Висока радиация от n и γ

Изисквания към детекторите

Многоканален детектор

Да покрива целия телесен ъгъл 4π

Херметична калориметрична система

Да регистрира направлението и идентифицира заряда и масата на всички частици

Да измери техния импулс и енергия

Мощна вътрешна трекова система

Висока разделителна способност на електромагнитния калориметър

Много добра мюонна идентификация и измерване на импулса

Високо радиационно устойчиви материали

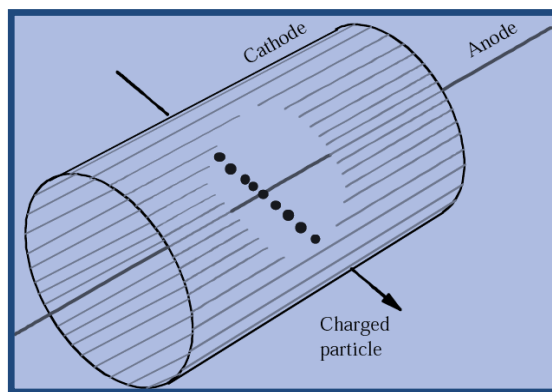
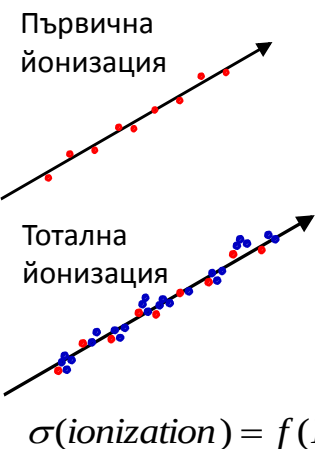
2. Преминане на частици през веществото на детектора

Понастоящем за регистрация на частици се използват следните процеси при тяхното взаимодействие с веществото на детектора:

1. Електромагнитно взаимодействие (всички заредени + γ)
2. Силно взаимодействие (адрони, включително и неутралните – n)
3. Слабо взаимодействие (неутрино - ν)

Основни процеси при преминане на ел. частици през веществото на детекторите

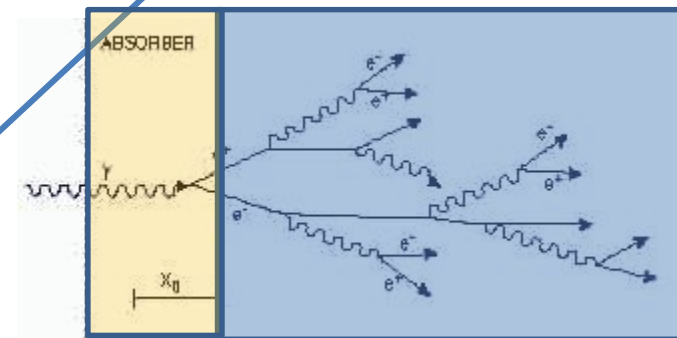
Йонизация



Газово усилване

Електромагнитна лавина

Чувствителен елемент



X_0 - Радиационна дължина – средната дължина на проникване във веществото преди да се предизвика ЕМ лавина само от електрони, позитрони и фотони

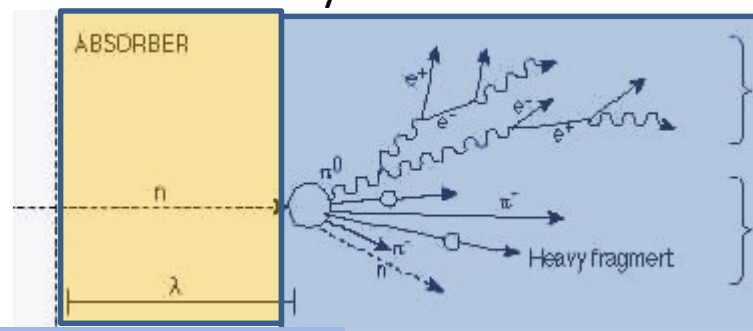
1. Масата (e) конвертира в енергия (γ)
2. Раждат се e^+e^- двойки

Адронна лавина

λ - Интеракционна дължина – средната дължина на проникване във веществото преди да се предизвика адронна лавина

Раждат се различни частици - $p, n, \pi, \nu, \lambda, K, \Theta$

Чувствителен елемент

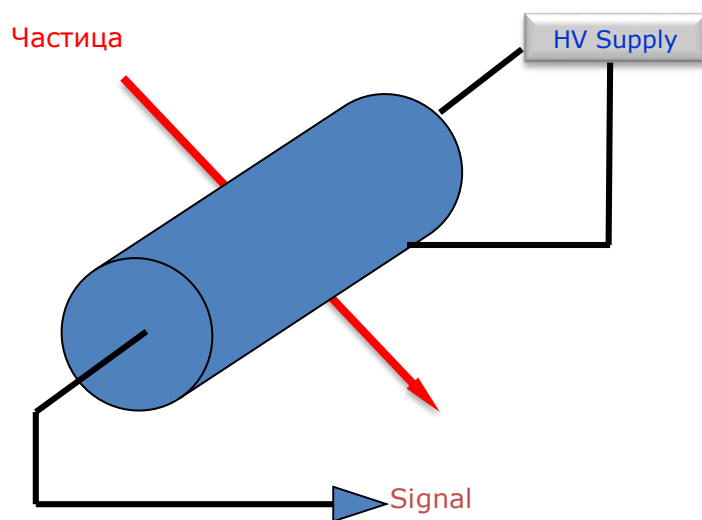


ЕМ каскад

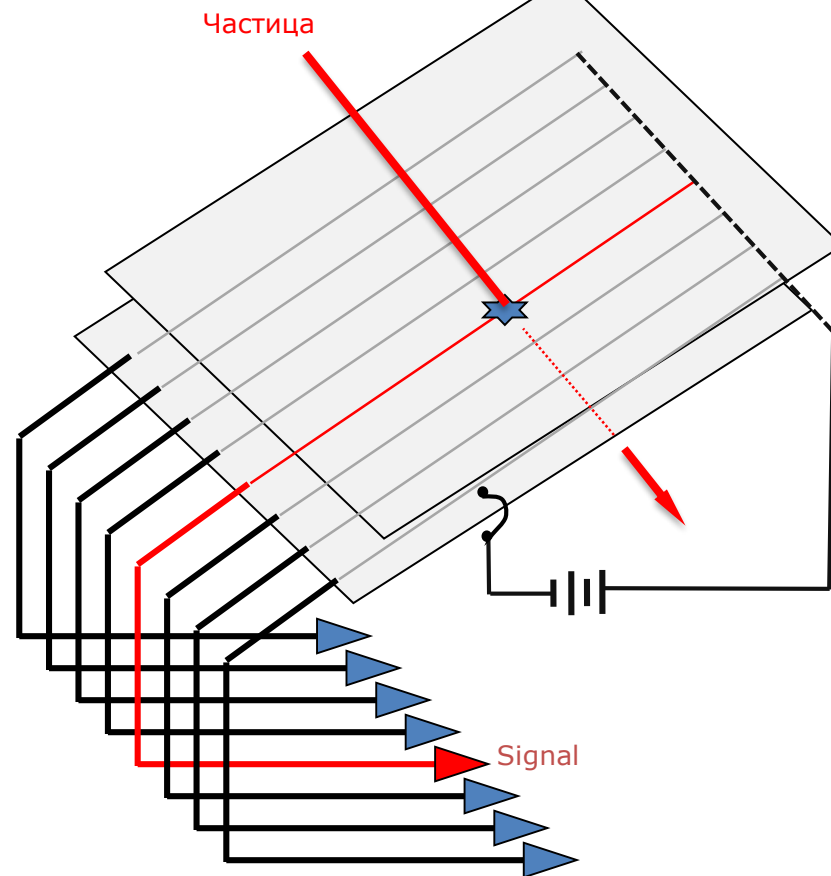
Адронен каскад

2. Преминаване на частици през веществото на детектора - йонизация

Единична газова камера



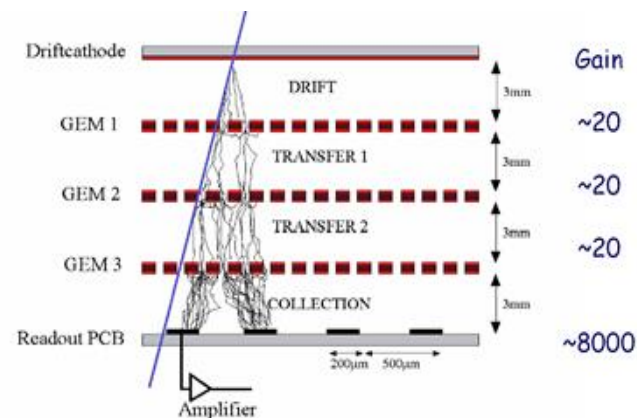
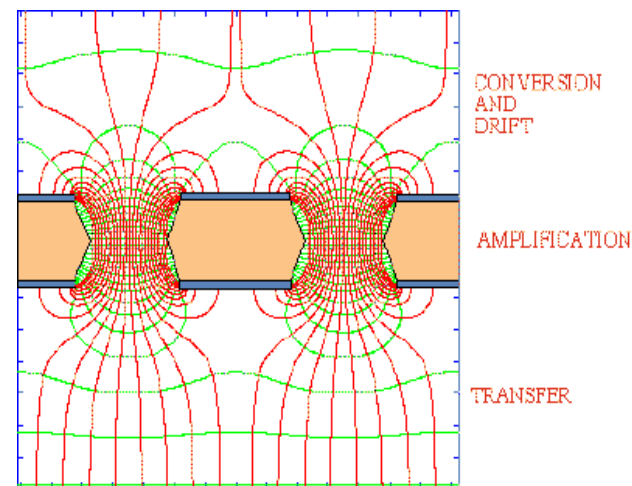
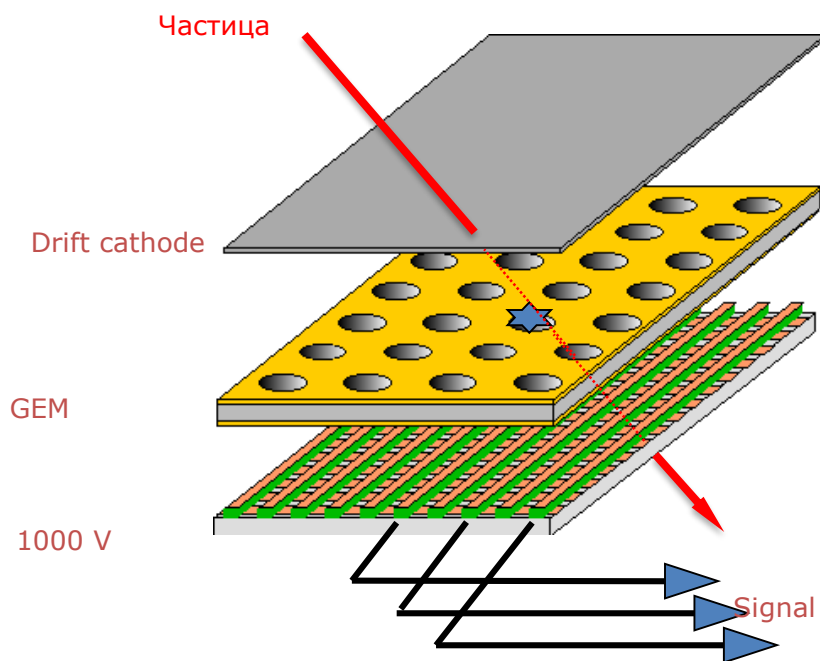
Многожична газова камера



2. Преминаване на частици през веществото на детектора - йонизация

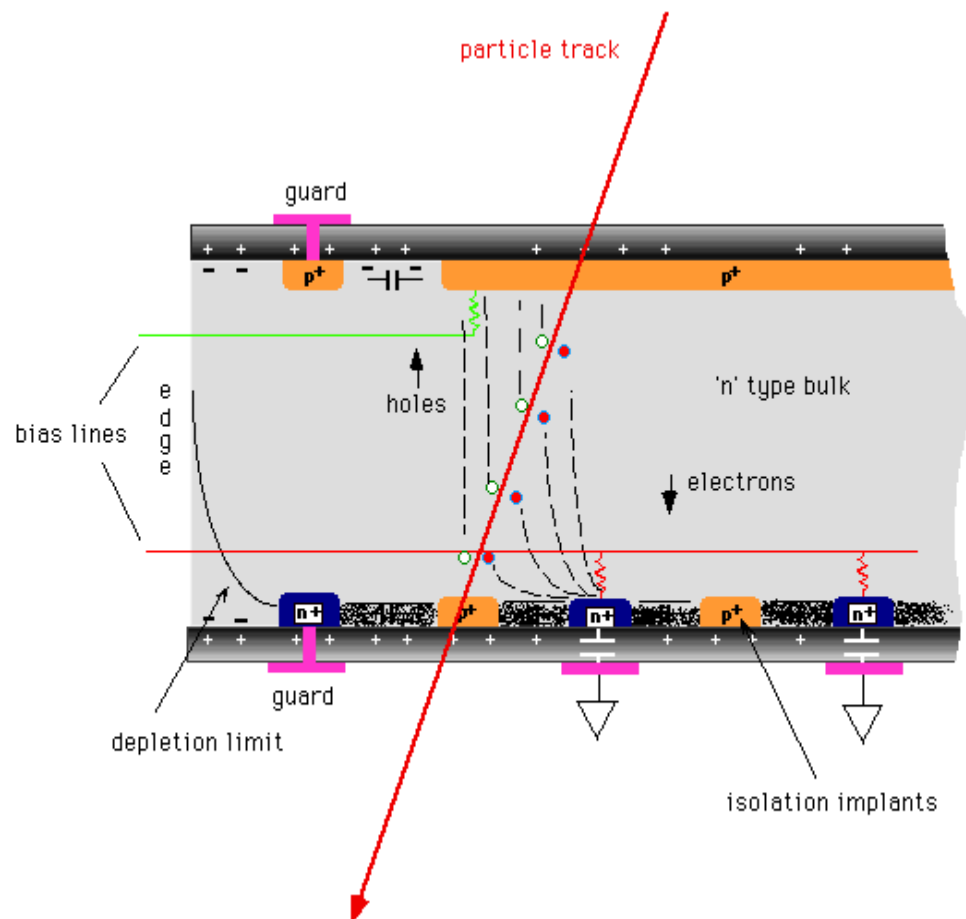
Йонизационна мултипликационна камера (GEM)

(умножаване на броя на електроните и йоните чрез по-висок градиент на електрическото поле)

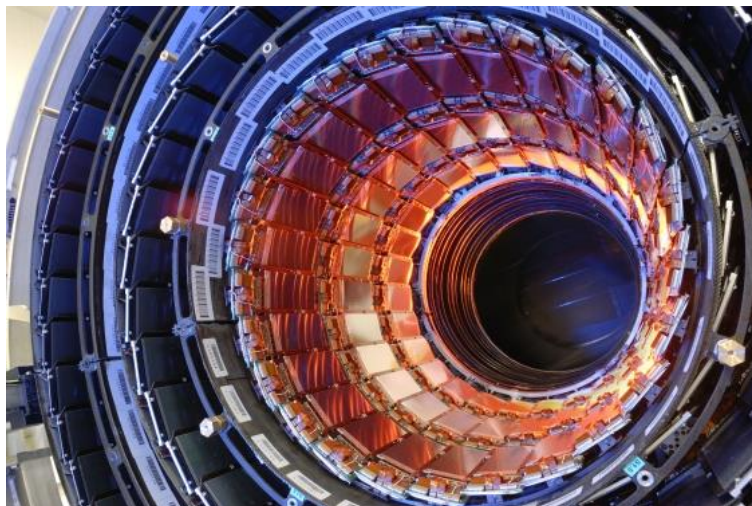


2. Преминаване на частици през веществото на детектора - йонизация

Силициев детектор



2. Преминаване на частици през веществото на детектора - йонизация

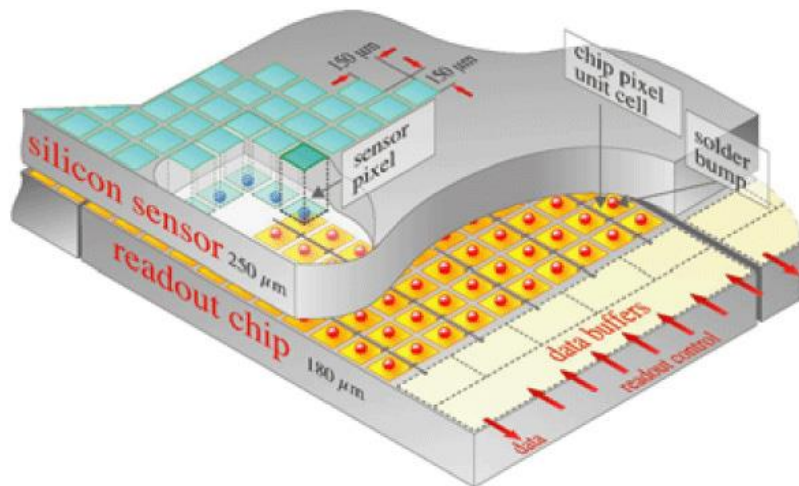


10 layers of Silicon Strip Sensors surrounding 2-3 layers of Silicon Pixel Sensors.

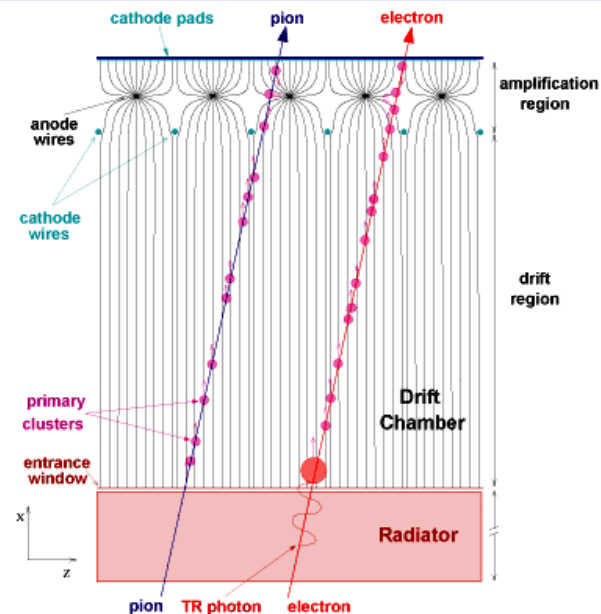
15k silicon modules containing 76M pixels + strips

The World's largest Silicon Tracker = 250 m² !

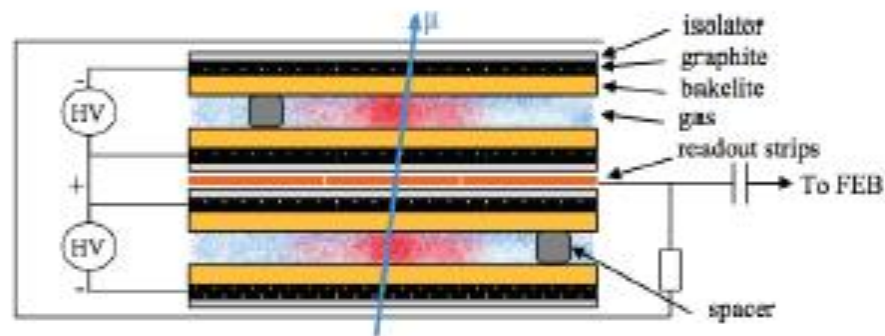
Полупроводников детектор на трекове



Пикселен детектор на трекове – многослоен полупроводников детектор от тънки пластинки с нанесена върху им електроника

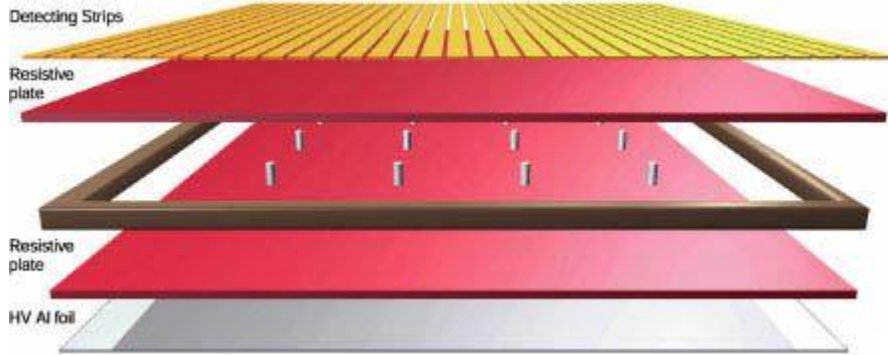


Дрейфова камера – сигнал от времето на „дрейф“ на електроните

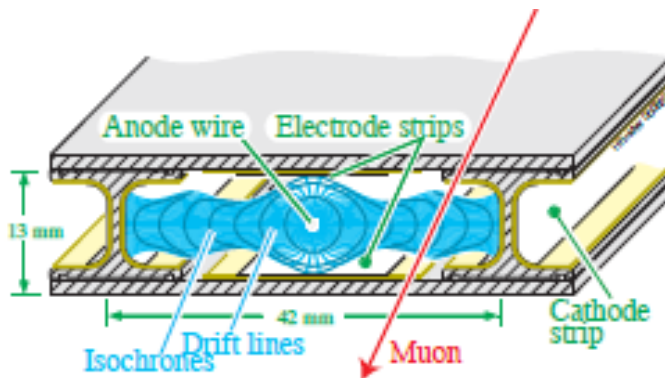


Мюонни камери със съпротивителна плоскост – 2 наносекунди сигнал за преминал мюон

3. Елементи на детекторите на елементарни частици на LHC: Мюонни камери, камери със съпротивителна плоскост

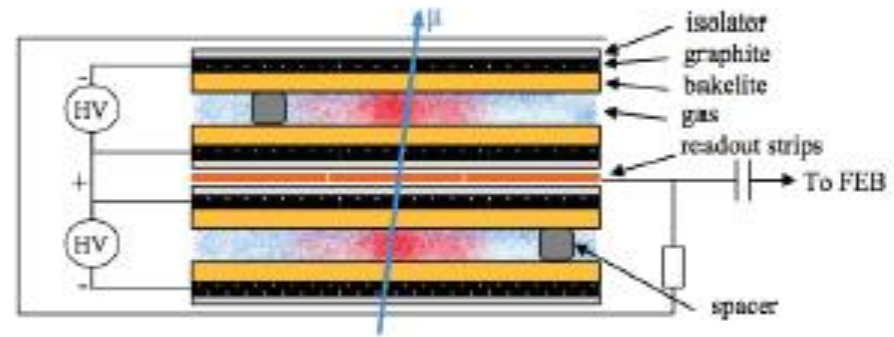


Предният фронт на регистрираният импулс е около 1 ns и позволява да се подаде сигнал на дрейфовите камери на мюонния детектор, които са по бавни, но имат по-висока разделителна способност.



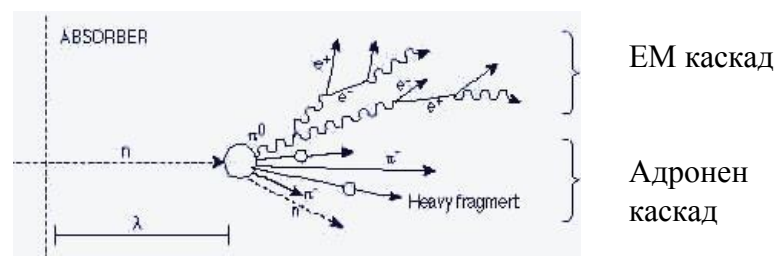
Конструкция – газов обем ограничен от две пластмасови плоскости с високо съпротивление и система от стрипове за регистрация на импулсите от йонизацията на преминалите мюони.

На двете плоскости се подава високо напрежение /около 10 kV/ и разряда се гаси бързо в резултат на високото съпротивление.



Дрейфова камера – 3.6 kV, време на дрейф около 400 ns, ρ - ϕ координати с точност 100 μ .

3. Елементи на детекторите на елементарни частици на LHC: Адронен калориметър



В адронният калориметър се получава отдаване на енергията от адрони, като има и част от енергията свързана с електромагнитната компонента на взаимодействие с веществото на детектора.

Отдадената от заредени пиони енергия може да бъде описана като

$$\pi^{\pm} = f_{em}e + f_h h$$
$$f_h = 1 - f_{em}$$

Където $\pi^{\pm}$ е енергията от заредените пиони,
 e – енергията от електромагнитното взаимодействие,
 h – енергията на адроните,
 f_h – част от енергията на свързана с адроните,
 f_{em} – част от енергията свързана с електромагнитното взаимодействие - около 30% от общата енергия,
Електромагнитната част флукутира значително и е зависима от енергията на началната частица,
в следствие на тези особености на отдадената енергия в адронния калориметър

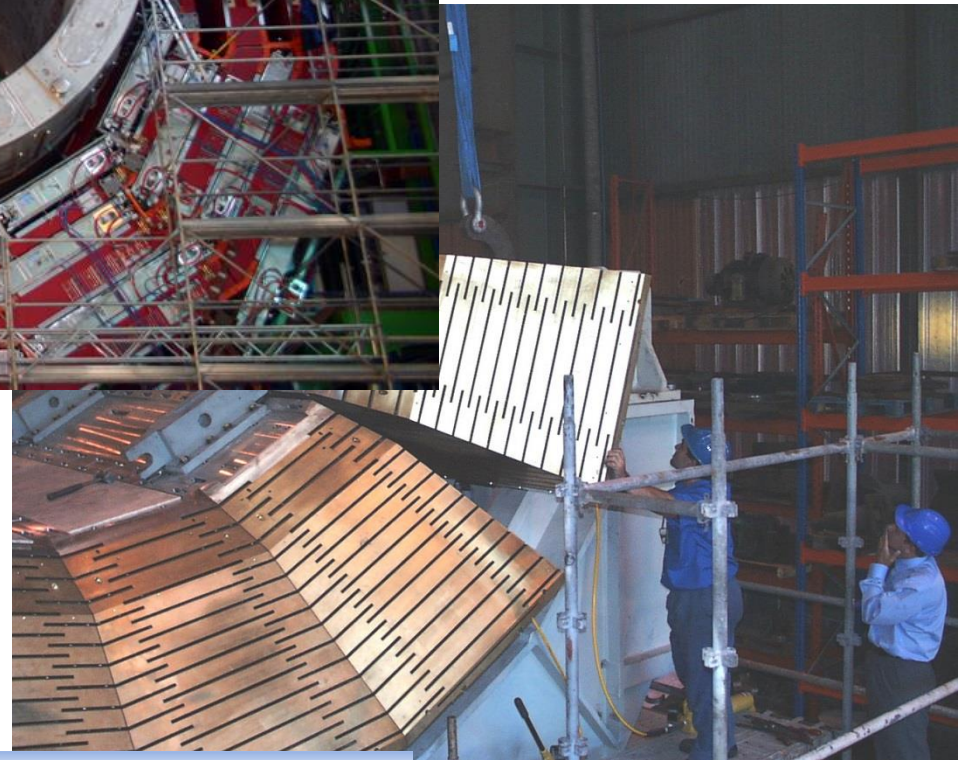
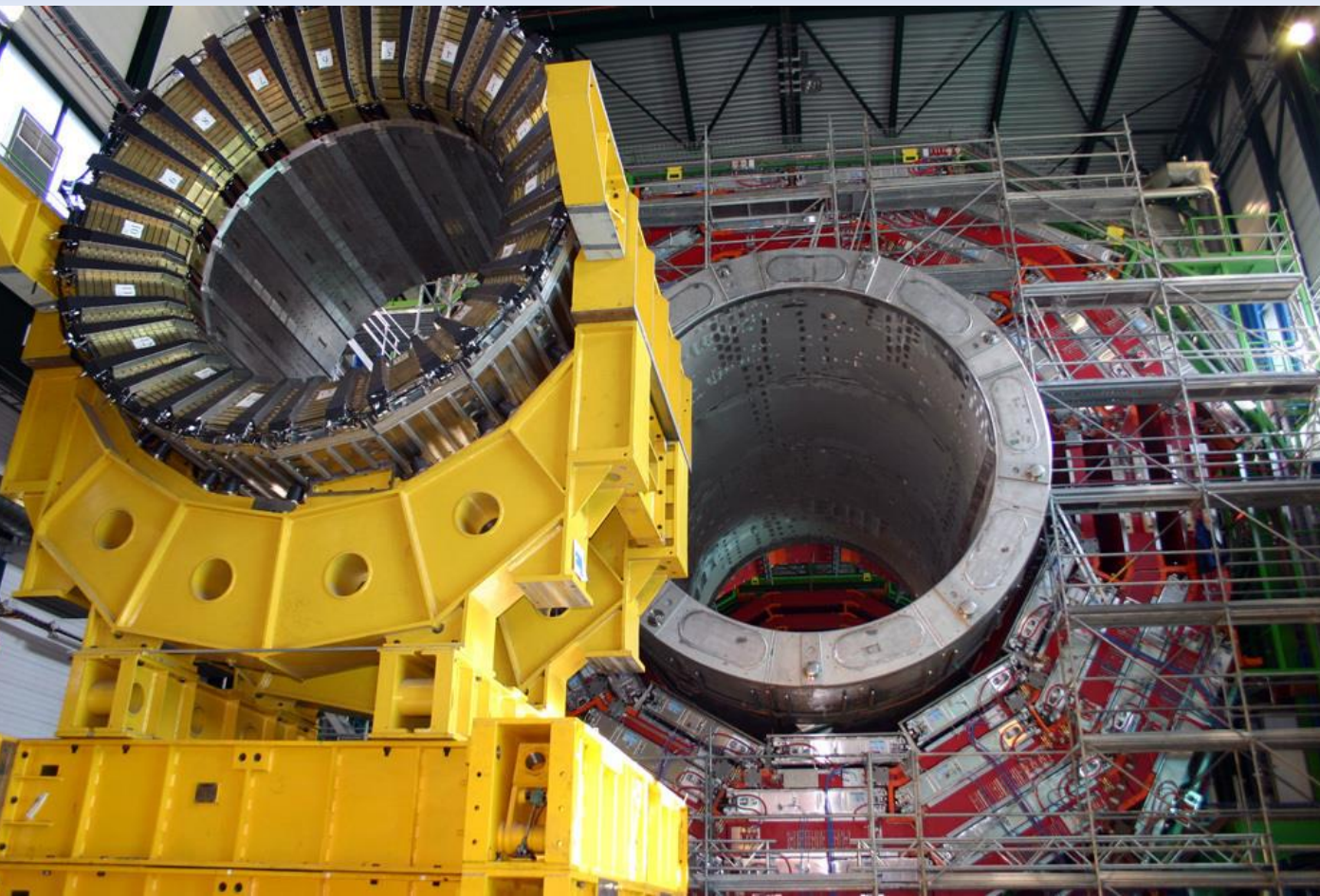
-> $\frac{\sigma(E)}{E}$ не е пропорционална на $\frac{1}{\sqrt{E}}$,

-> отдадената от адроните енергия не е линейно зависима от енергията на частиците,

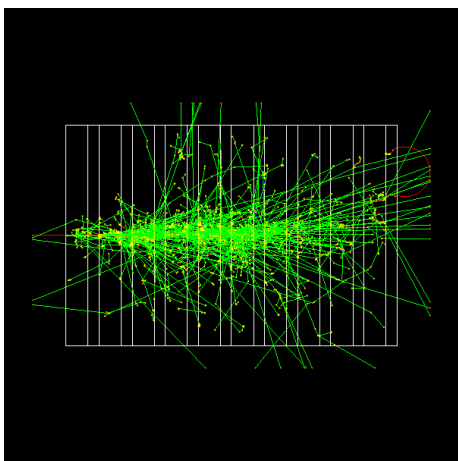
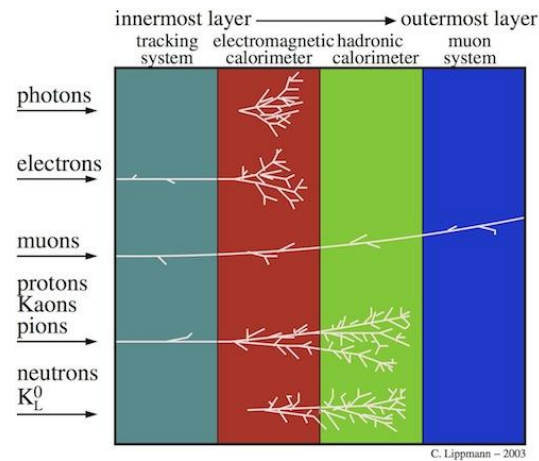
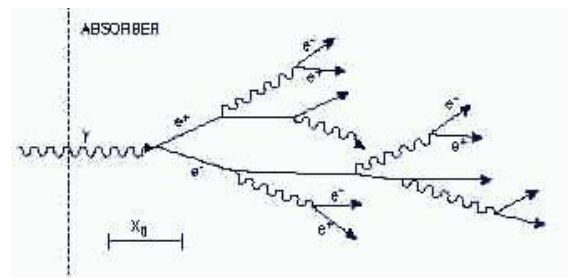
-> разпределението на енергията не е поасоново.



3. Елементи на детекторите на елементарни частици на ЛНС: Адронен калориметър



3. Елементи на детекторите на елементарни частици на LHC: Електромагнитен калориметър



1 GeV енергия в ЕМ калориметър



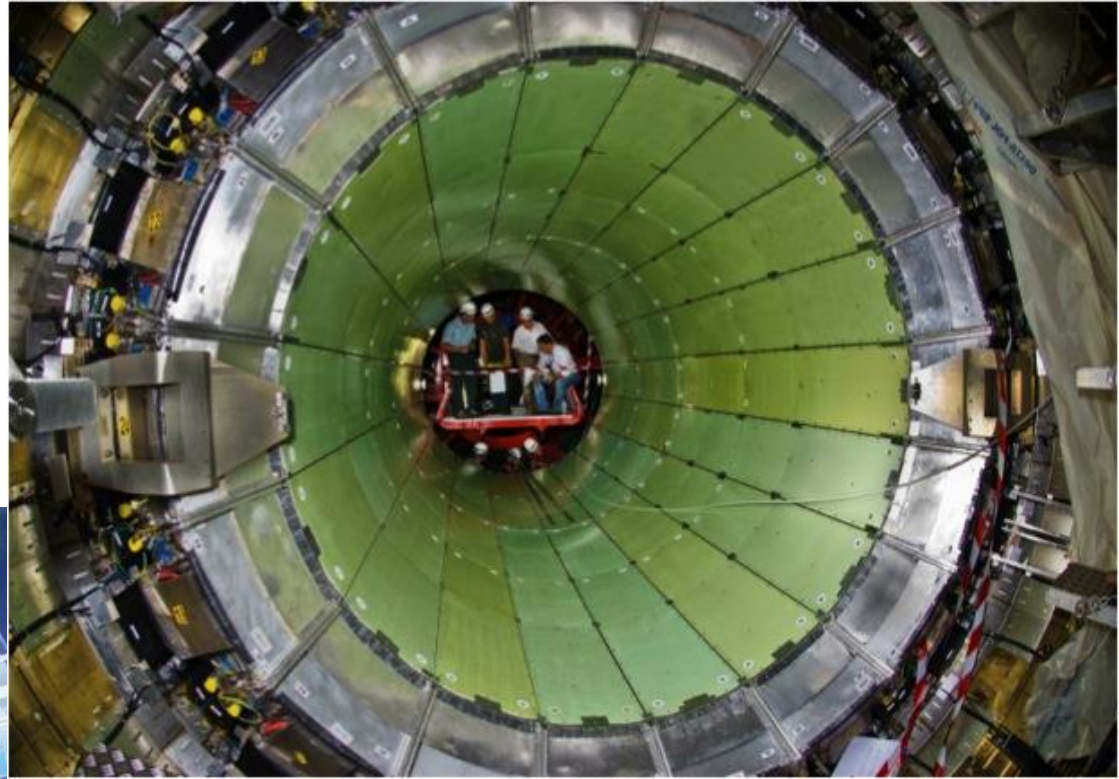
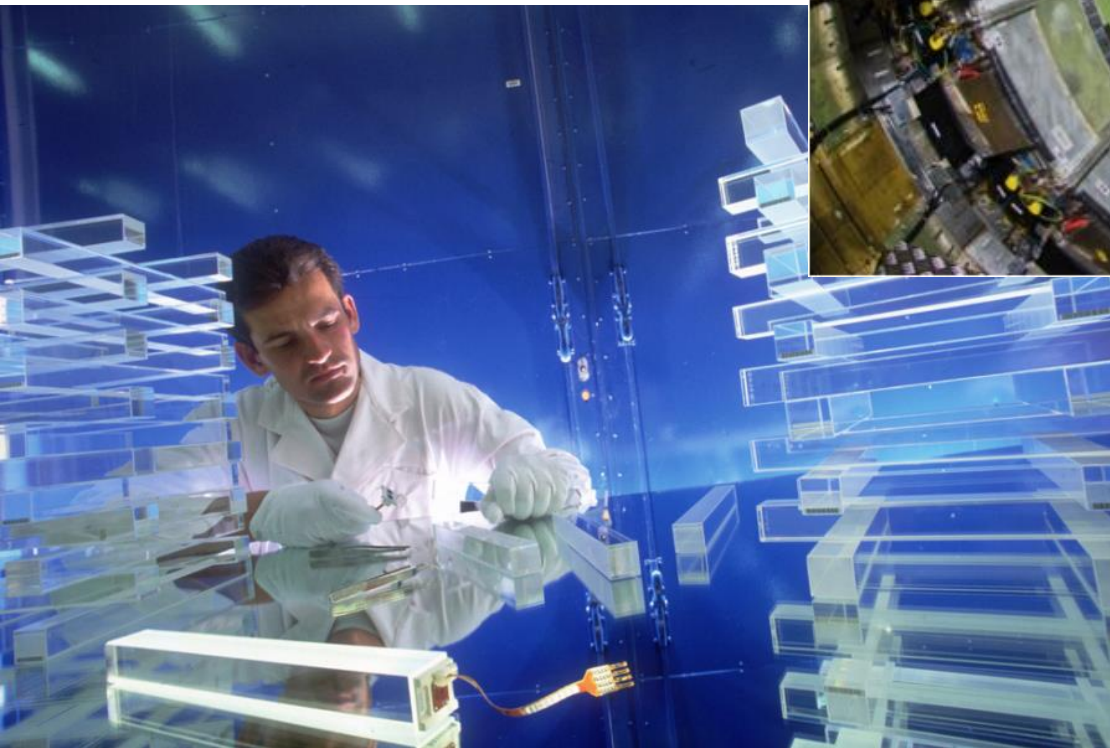
Енергията на ЕМ струя се отделя на максималното разстояние на развитие на струята – t_{max} , броят на йоните N_{max} е пропорционален на отделената енергия. Отдадената в ЕМ калориметър енергия е пропорционална на $\sqrt{E}$ от енергията на началната частица.

$$t_{max} = \frac{\ln(E_0/E_c)}{\ln 2}$$

$$N_{max} = e^{t_{max} \ln 2} = E_0/E_c$$

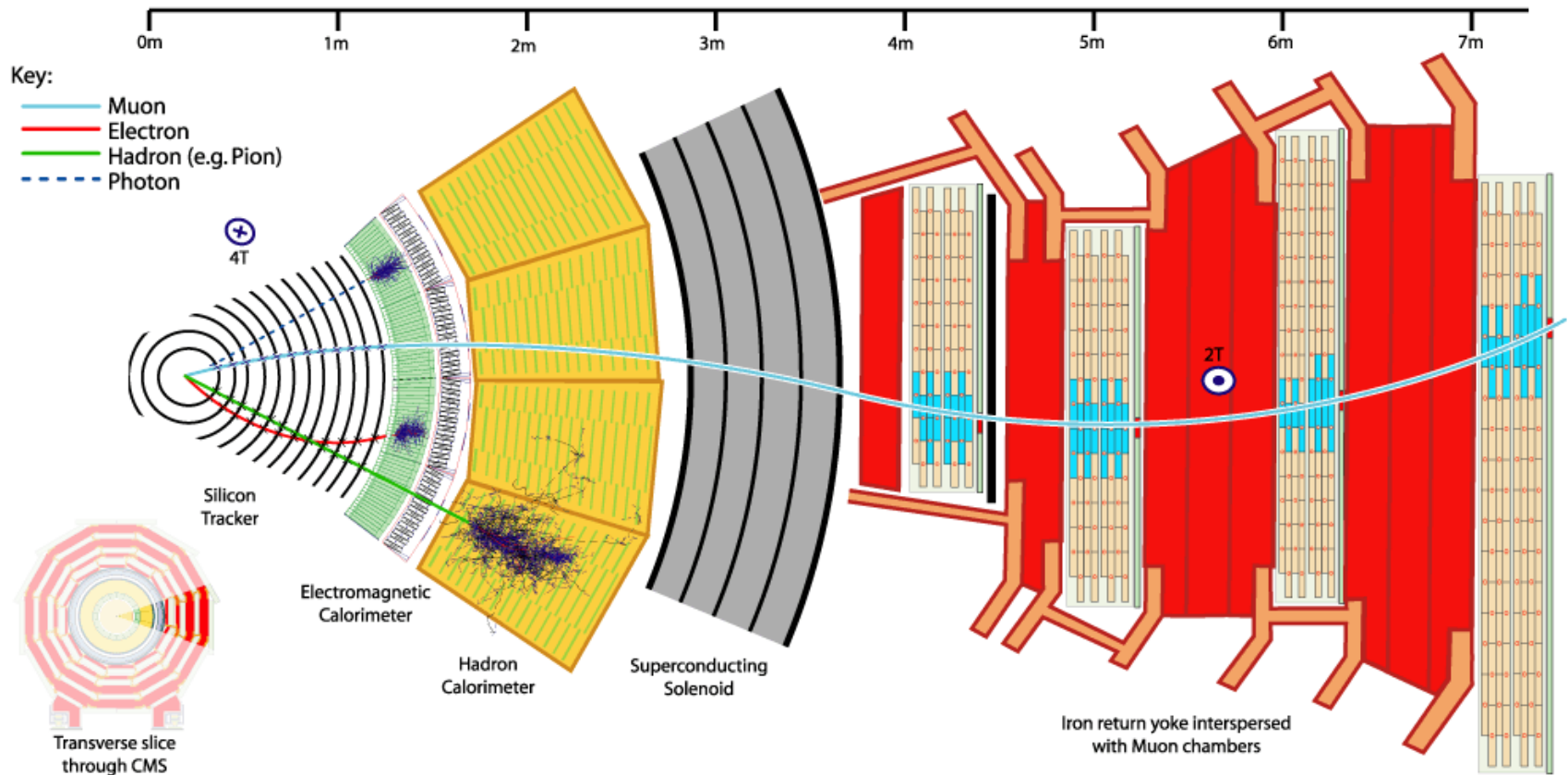
$$\frac{\sigma(E)}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

3. Елементи на детекторите на елементарни частици на ЛНС: Електромагнитен калориметър



3. Елементи на детекторите на елементарни частици на LHC: Трекови детектори, Калориметри, Мюонни детектори

Елементи на детектор за елементарни частици на Compact Muon Solenoid - CMS LHC

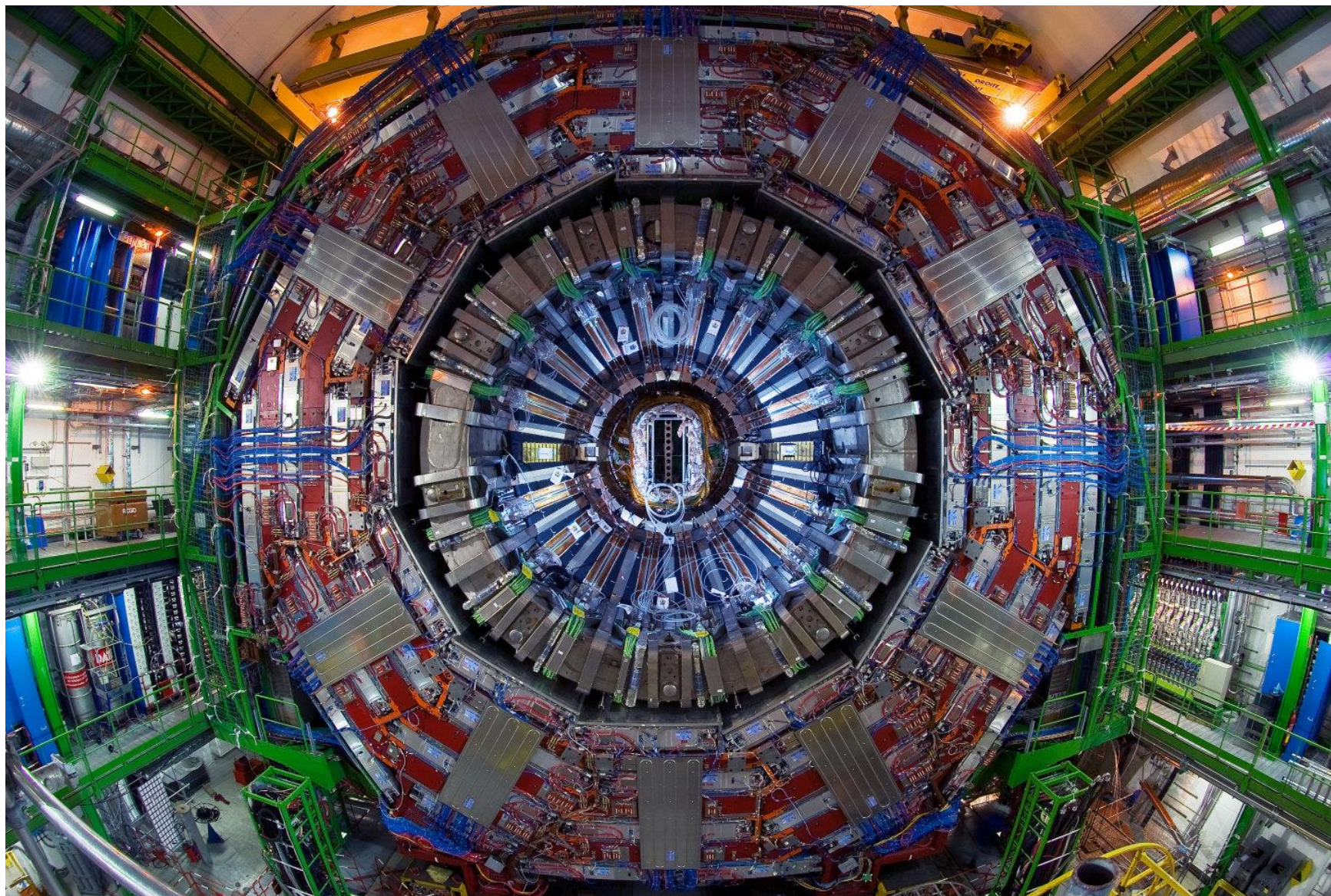


Елементи на детектора CMS :

- 1.Треков детектор /траектория на заредените частици/
- 2.Електромагнитен калориметър /ЕМ компонента на енергията на заредени частици и фотони/
3. Адронен калориметър /енергия на заредени и неутрални частици/
4. Мюонен детектор / траектория и време на прелитане на мюони /.

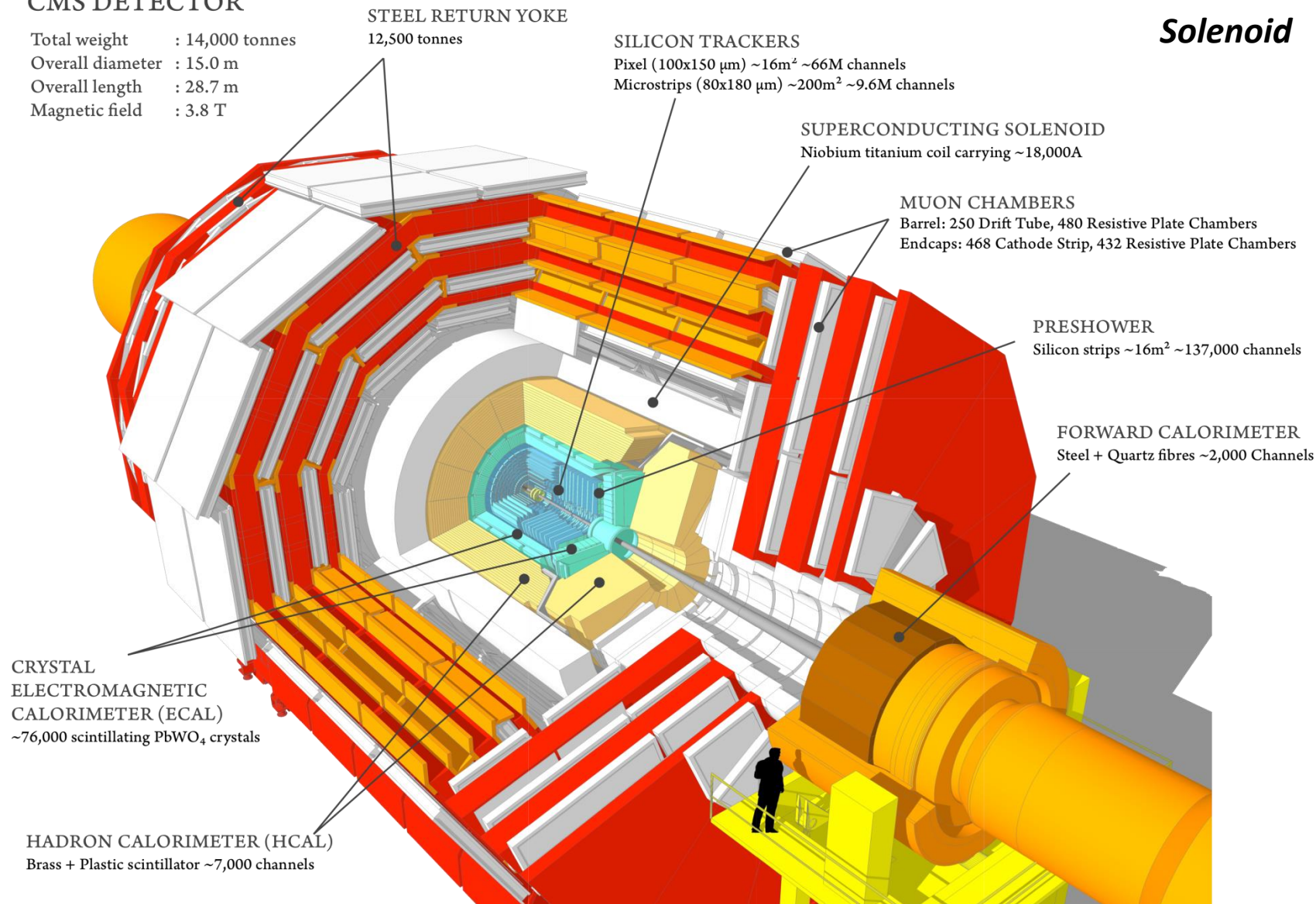
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

CMS - Compact Muon Solenoid



CMS DETECTOR

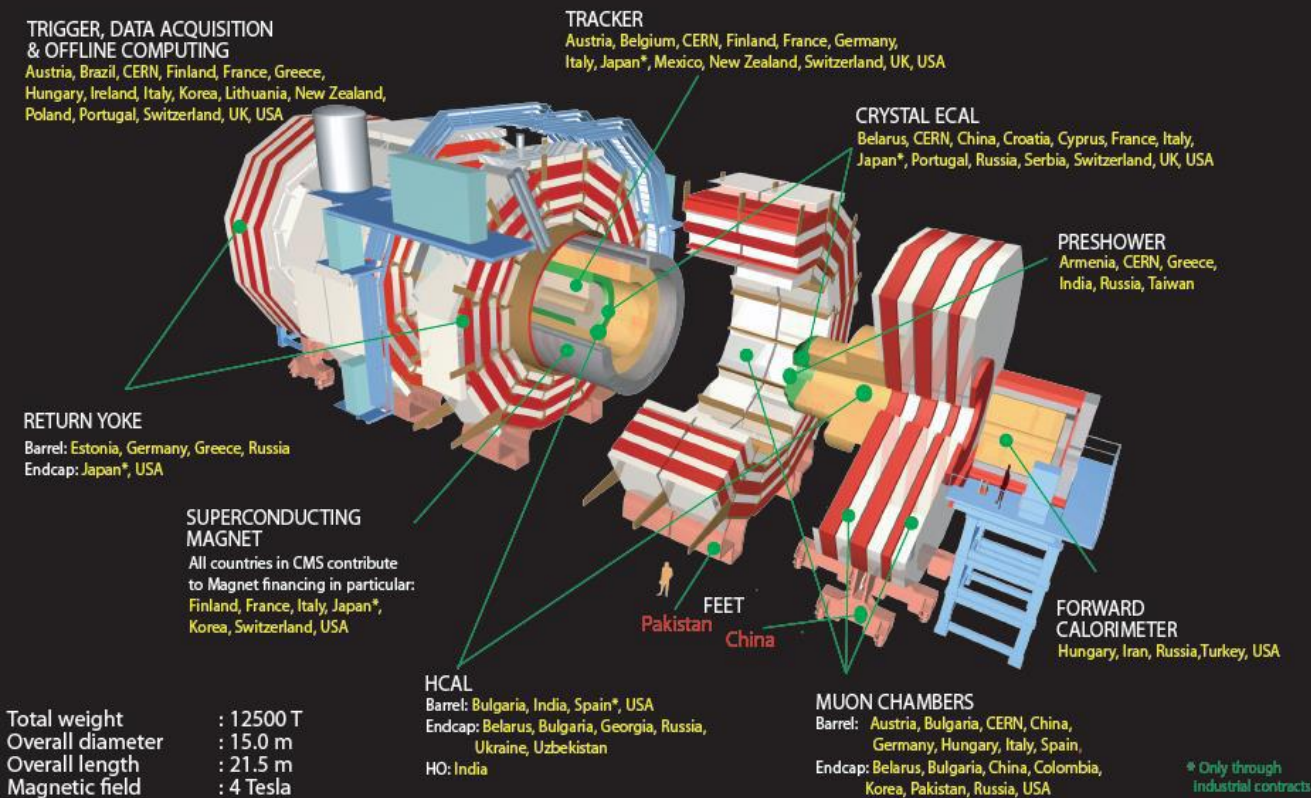
Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T



38 Countries, 183 Institutes, 3000 scientists and engineers (including 400 students)

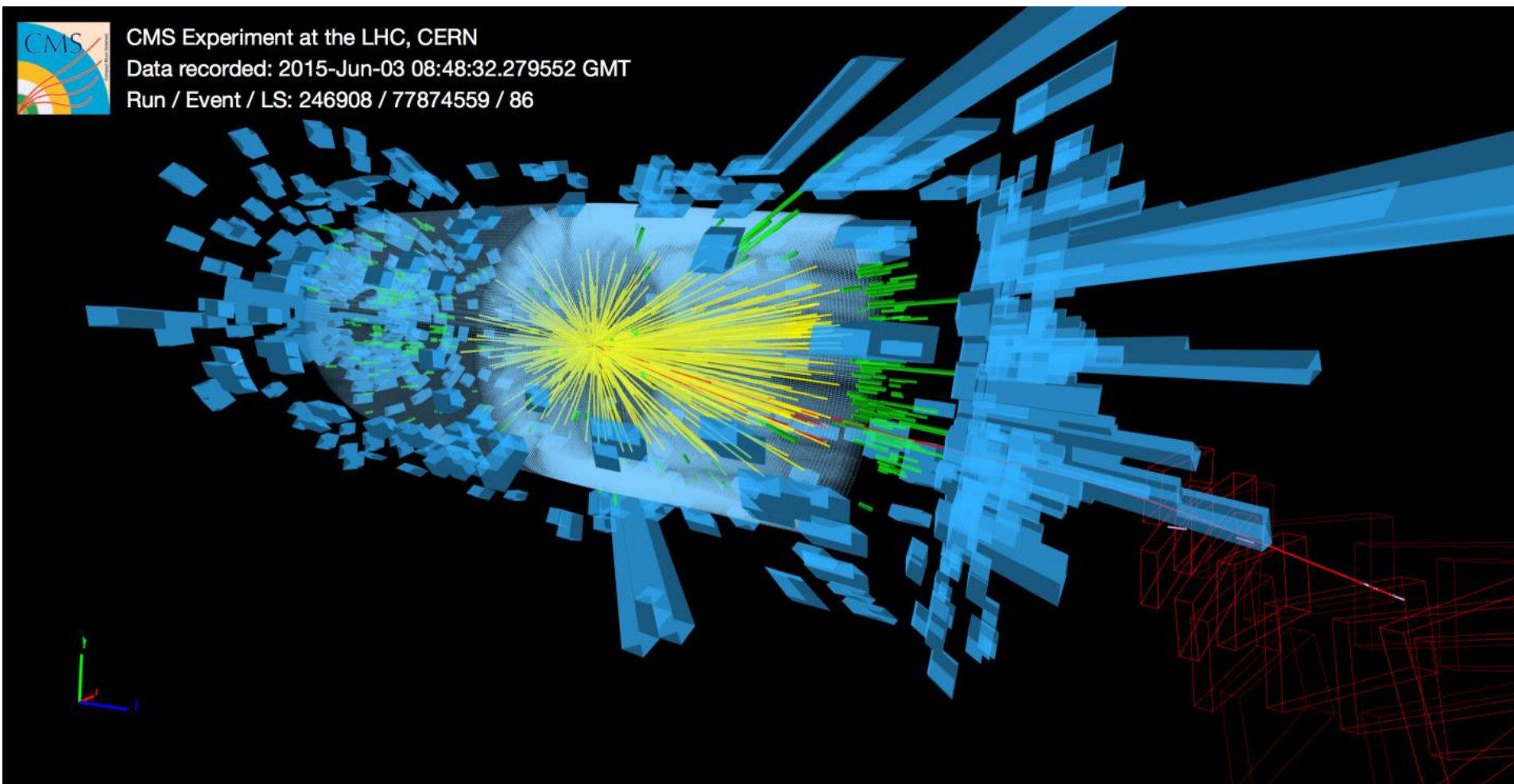
CMS

Compact Muon Solenoid



4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

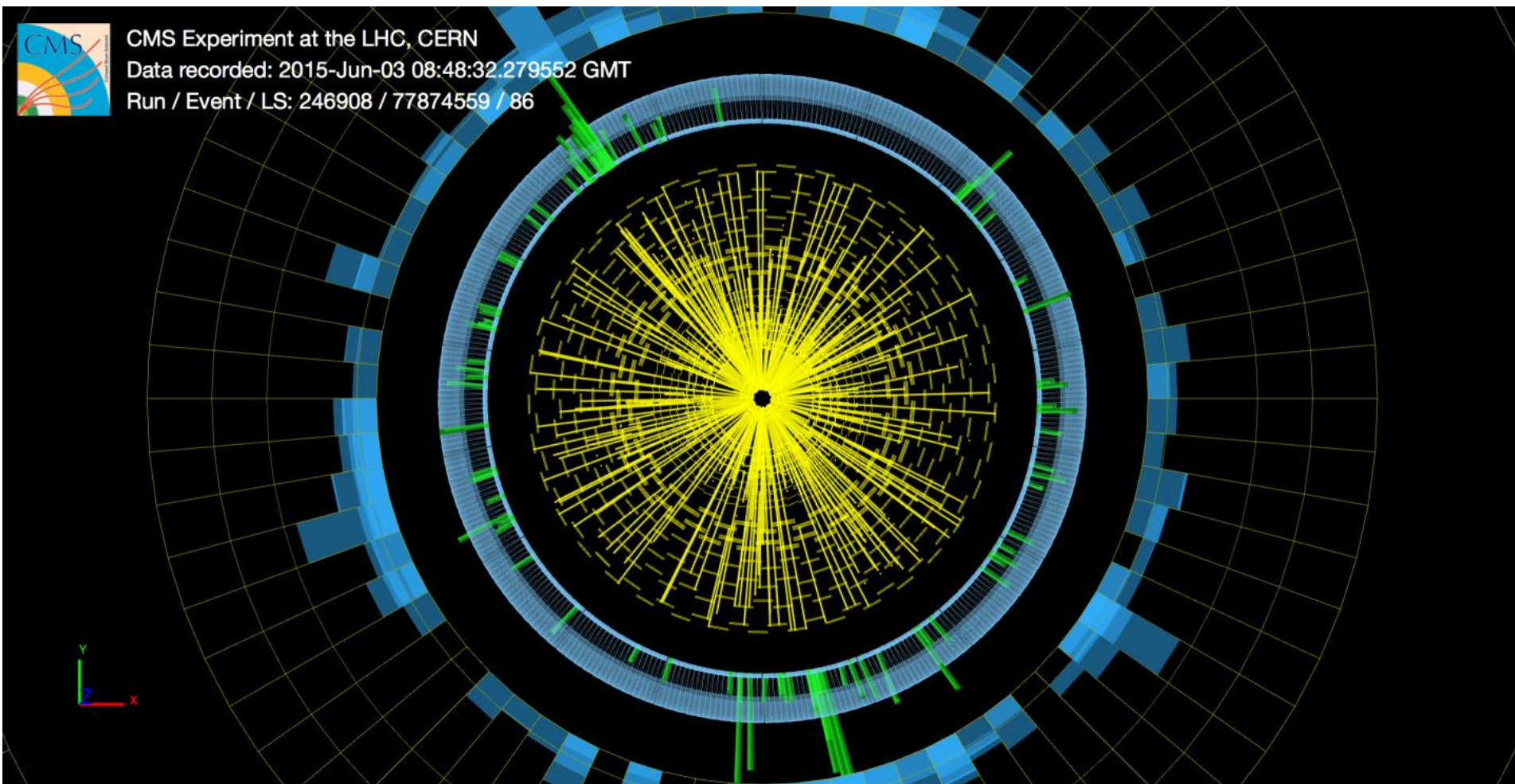
Регистрация на събития в CMS при 13 TeV – 2015 г.



Частичите, създадени при сблъскването на протоните в снопа, излизат от центъра на CMS детектора. Те първо се регистрират от Силиконовия тракер, чиито данни се използват за реконструкция на траекторията на частиците /жълти линии/. Електромагният калориметър регистрира енергията, натрупана от електрони и фотони, които могат да се видят като зелени следи. Дължината на следата е пропорционална на отдадената енергия. Енергията, регистрирана в Адронния калориметър /основен компонент на струи/, се представя със сини следи. Частиците, достигащи до най-външните участъци на детектора, се регистрират от Мюонните детектори и са показани в червено.

4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

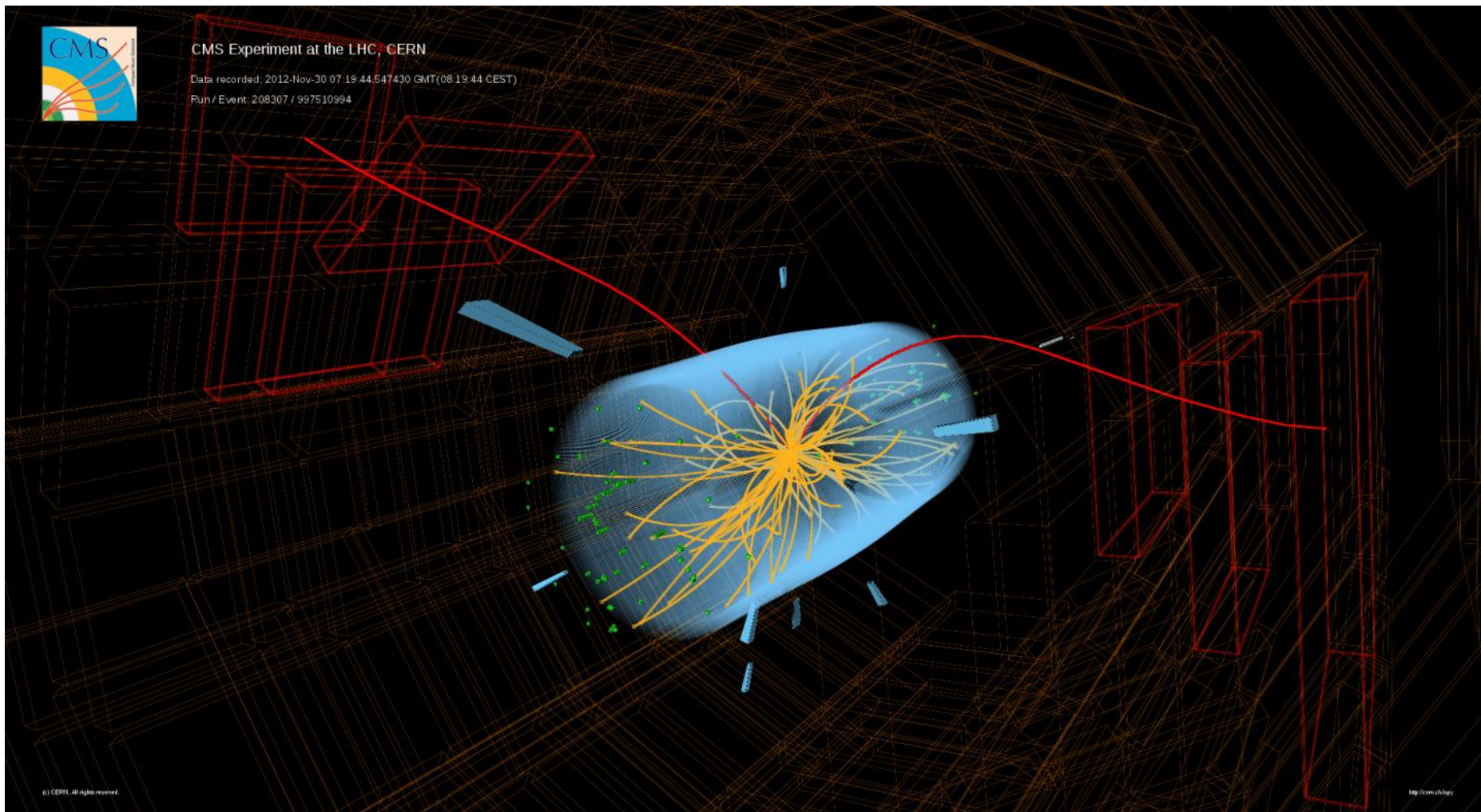
Регистрация на събития в CMS при 13 TeV



Particles created from the proton collision stream out from the center of the CMS detector. They are first detected by the Silicon Tracker, whose data can be used to reconstruct the particle trajectories as indicated by yellow lines. An Electromagnetic Calorimeter detects energy deposited by electrons and photons which can be seen as the green boxes. The length of the box represents the energy deposit. The energy detected by the Hadronic Calorimeter, the primary component of jets, is represented by the blue boxes. The particles reaching the outermost reaches of the detector are detected by the Muon Detectors, and are indicated in red.

4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

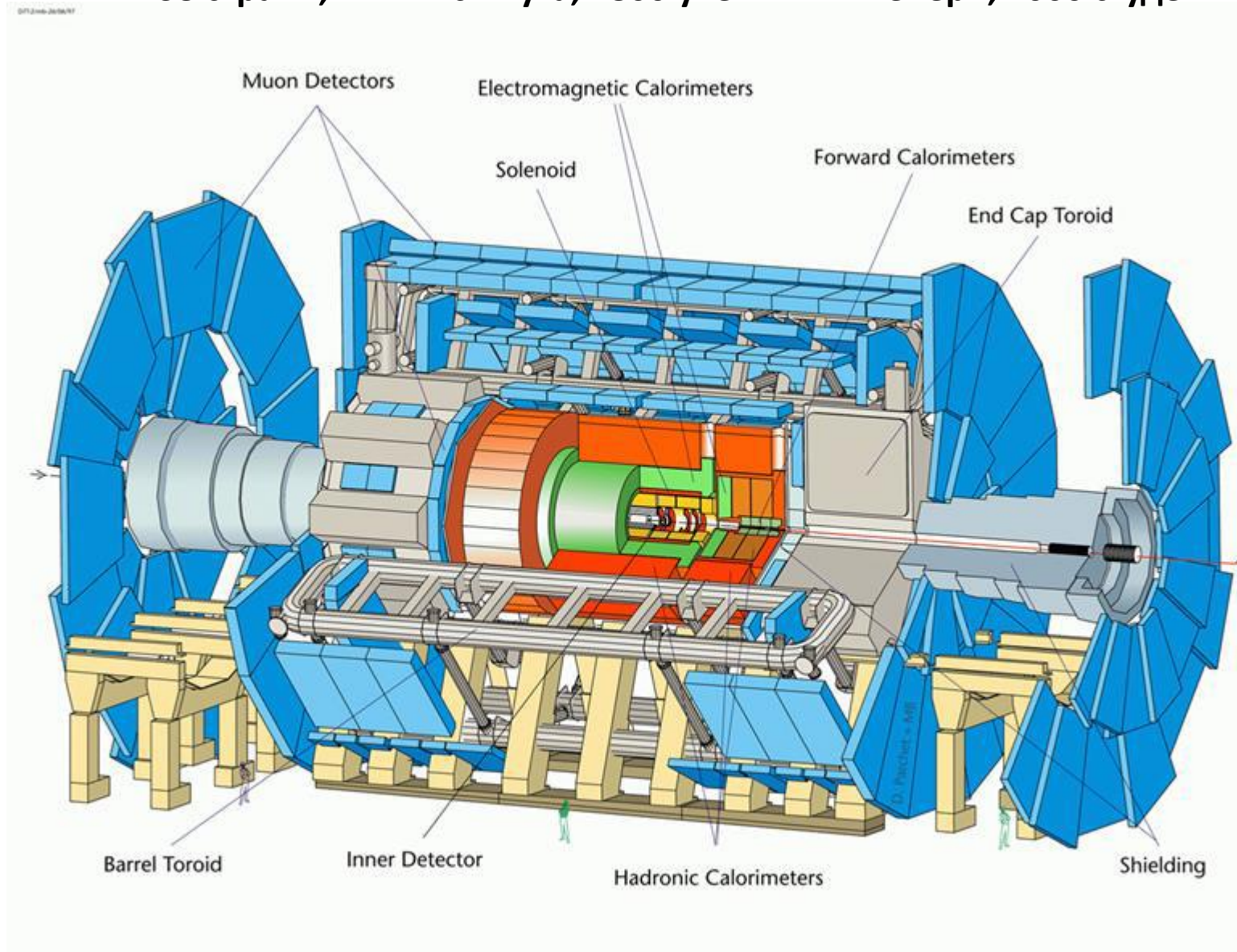
Регистрация на събития в CMS при 8 TeV 2010 – 2012 г. Илюстрация на работата на мюонния детектор



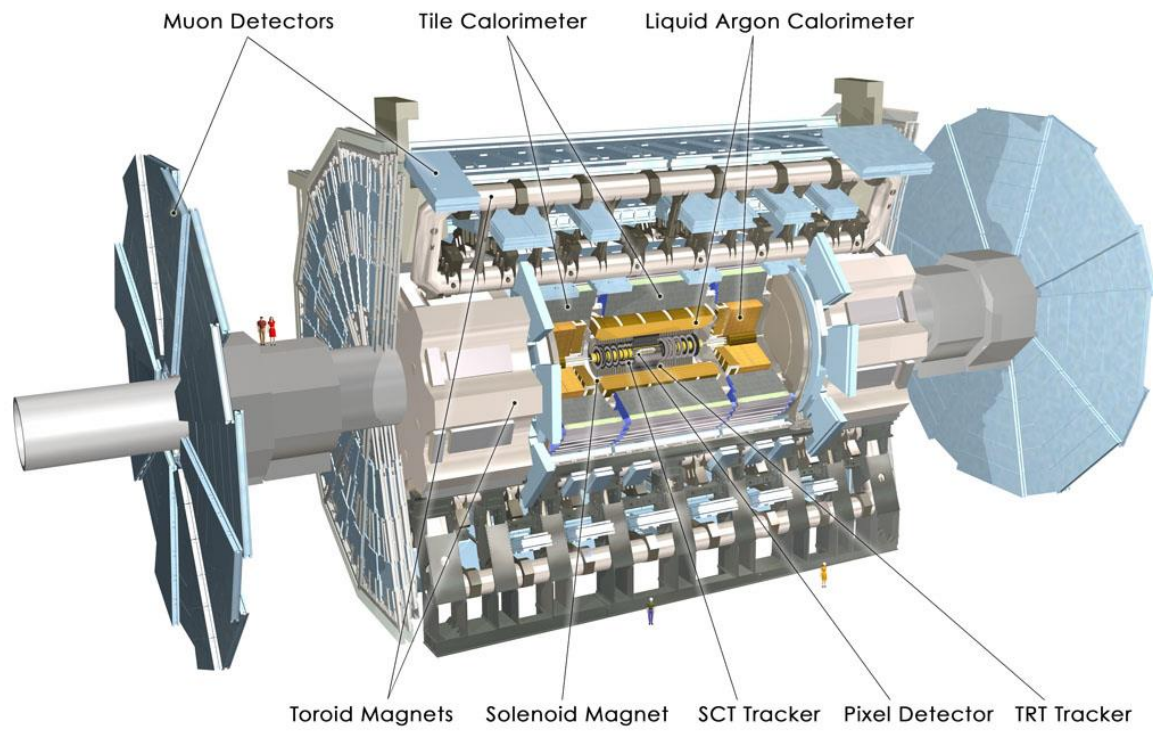
A candidate " $B_s \rightarrow \mu\mu$ " event recorded in the CMS detector in 2012, produced in proton-proton collisions at 8 TeV

4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

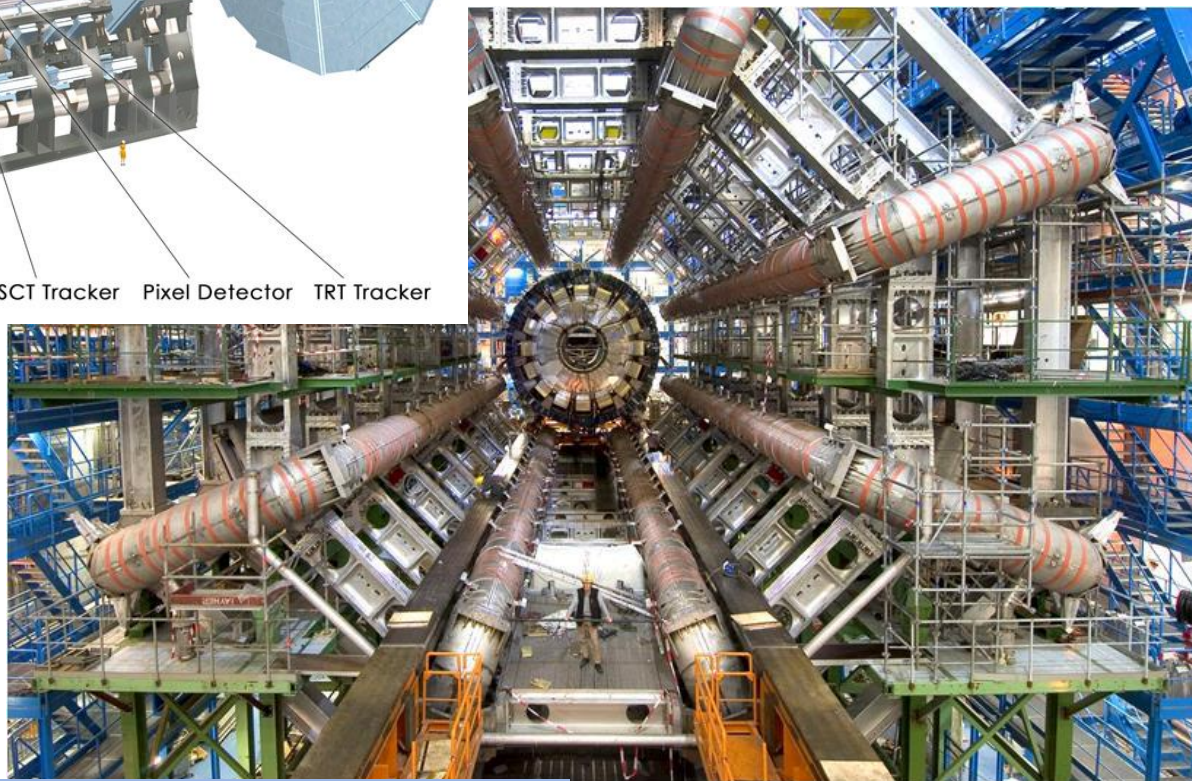
ATLAS 38 страни, 177 Института, 2800 учени и инженери, 1000 студенти



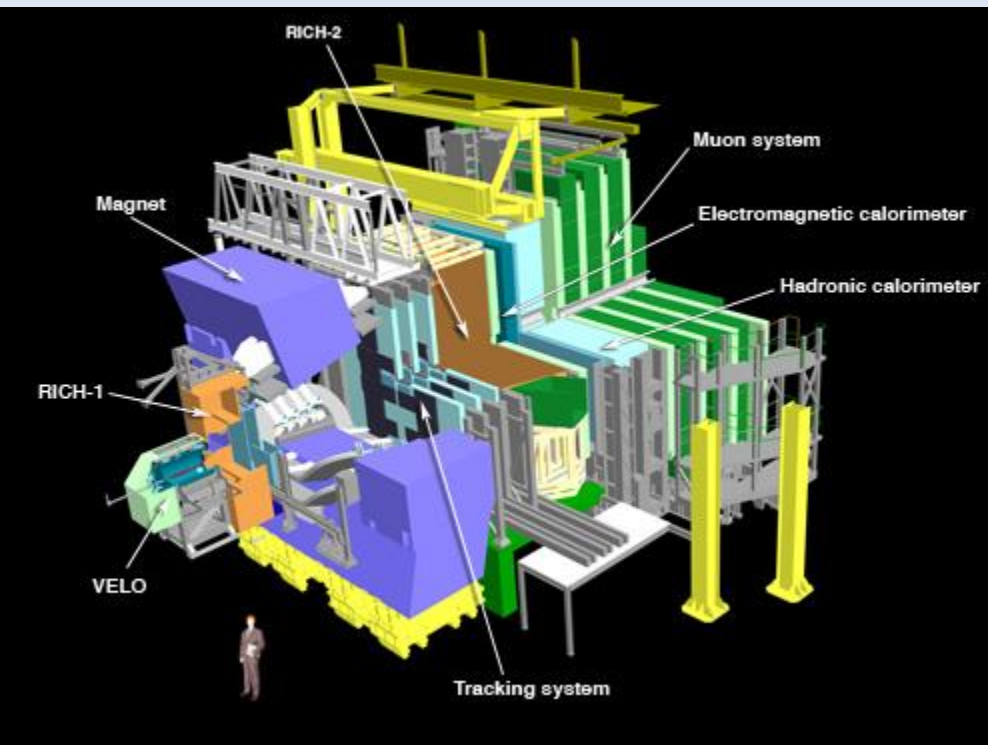
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE



ATLAS
A
Toroidal
LHC
ApparatuS



4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE



LHCb

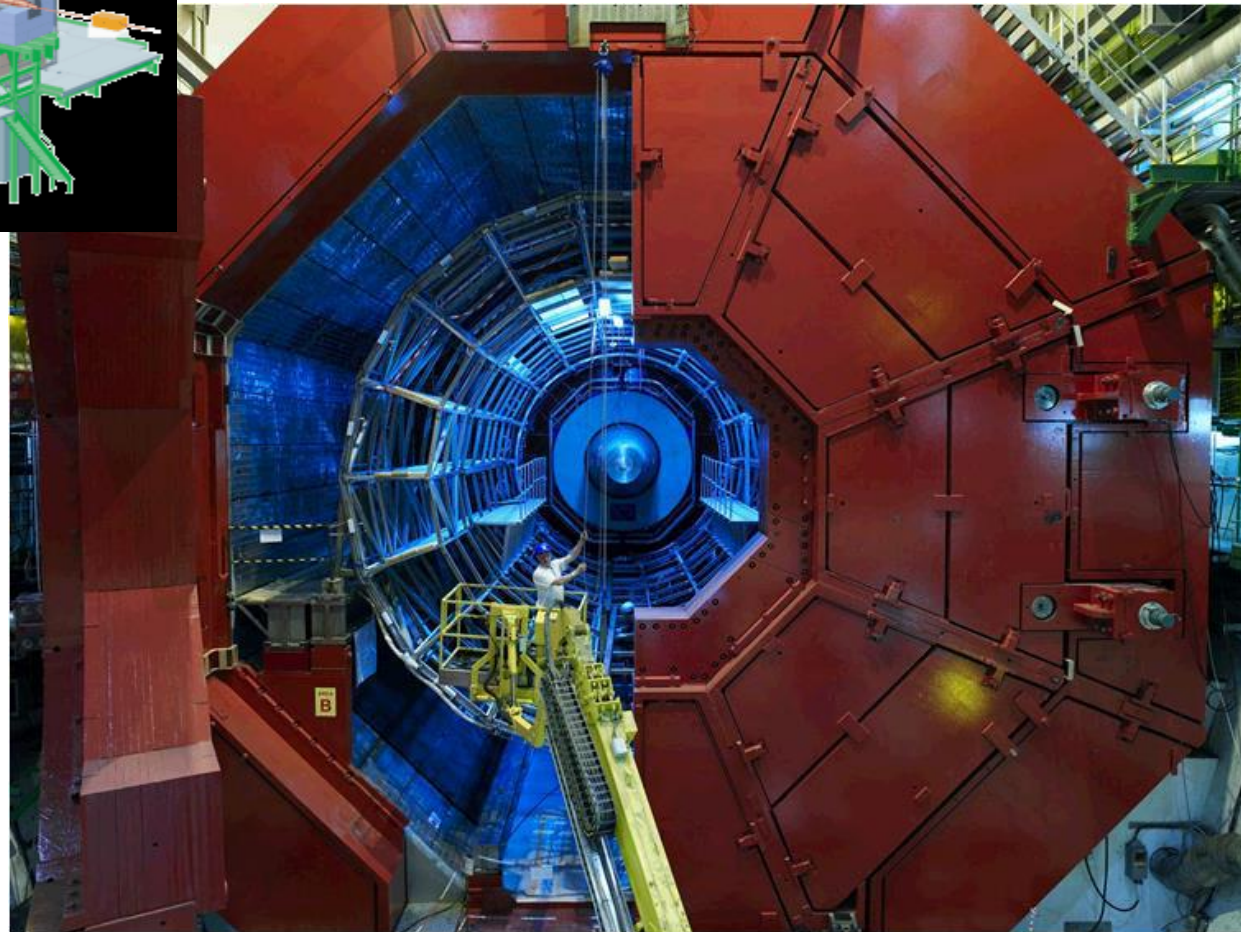
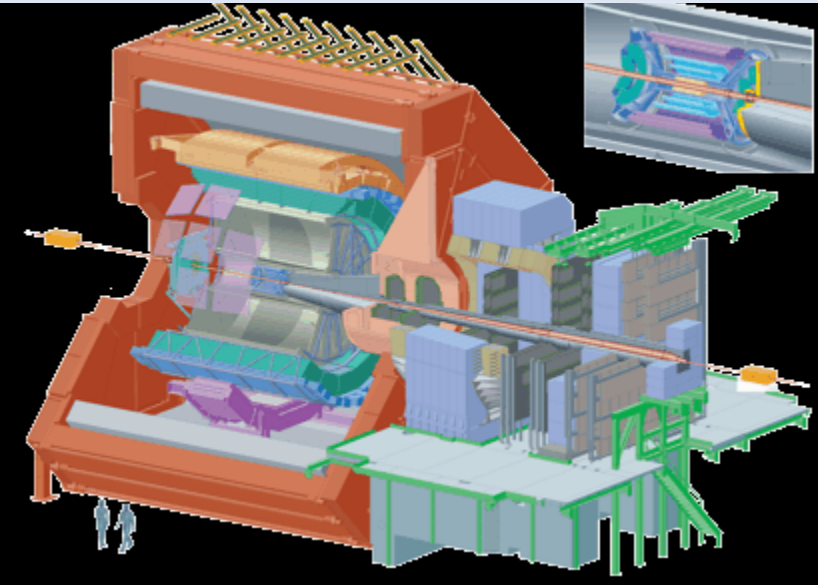
*Large
Hadron
Collider
beauty*



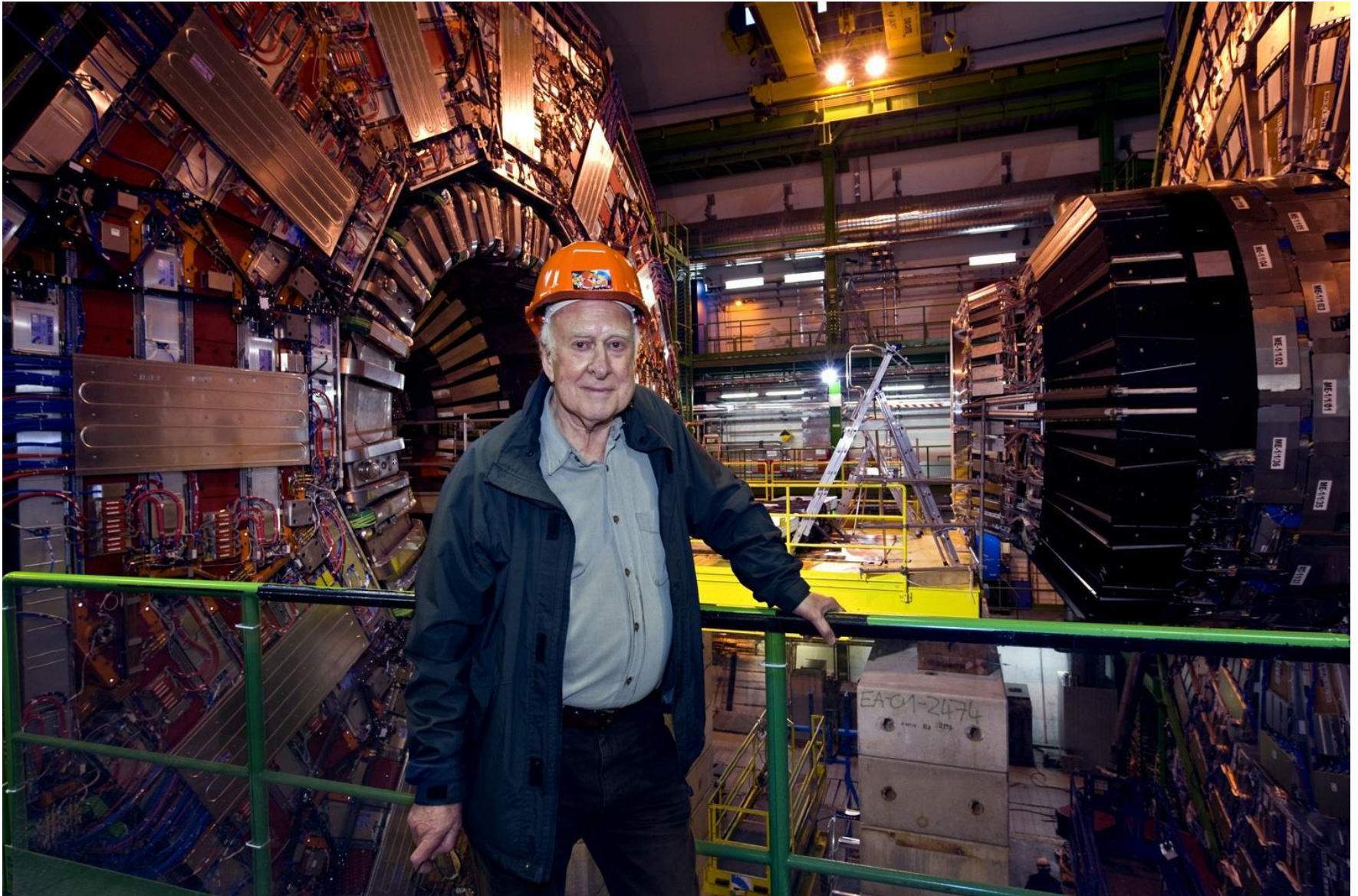
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

ALICE

A
Large
Ion
Collider
Experiment

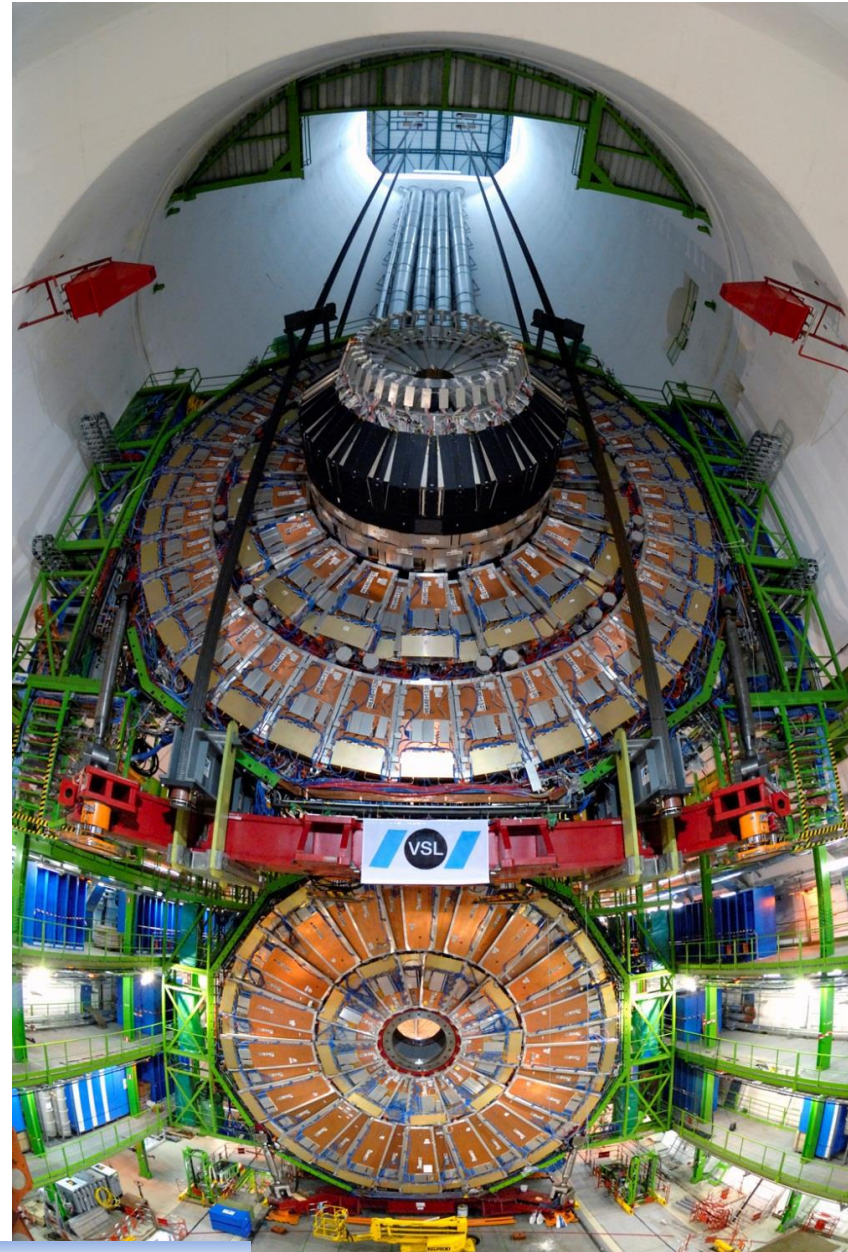
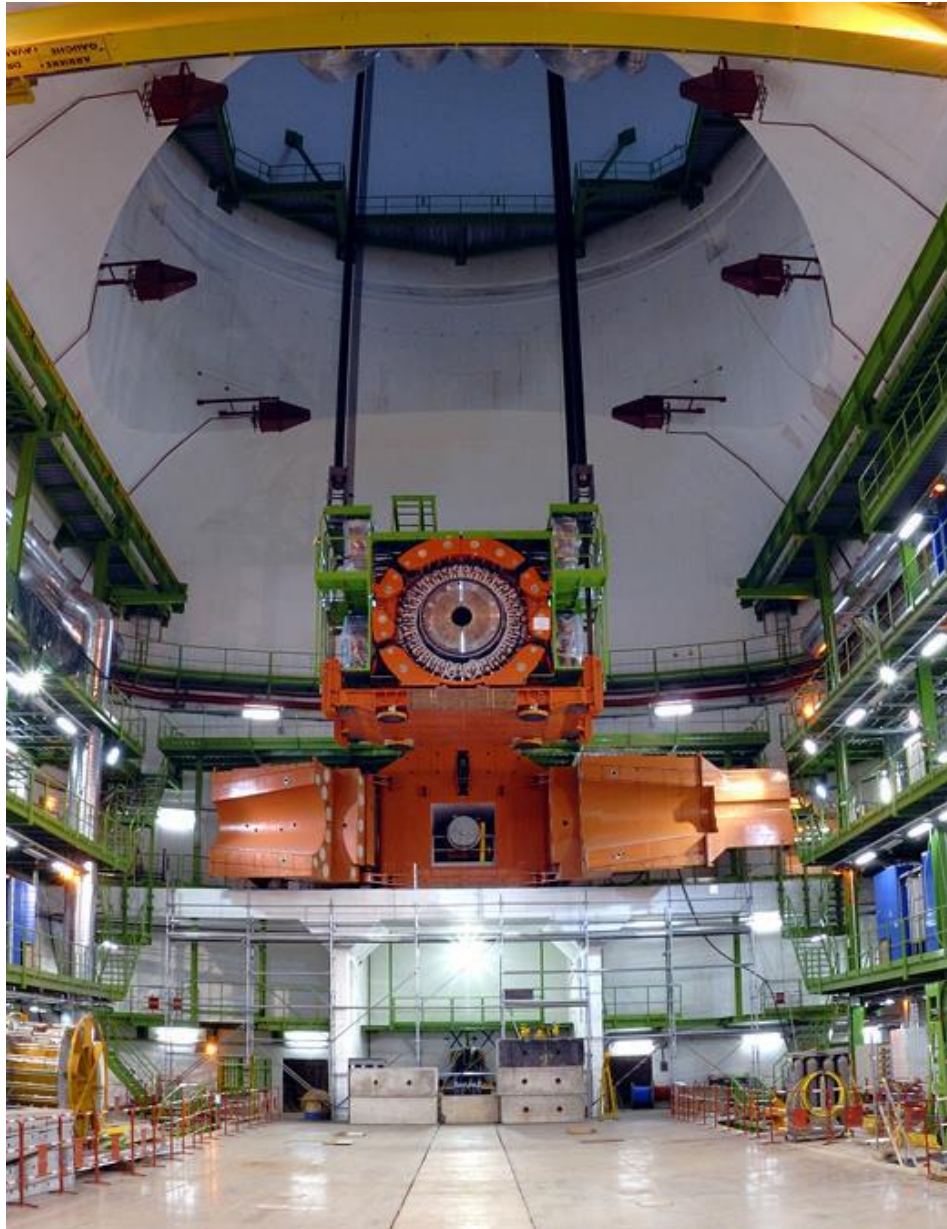


2010 - Higgs на CMS



4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

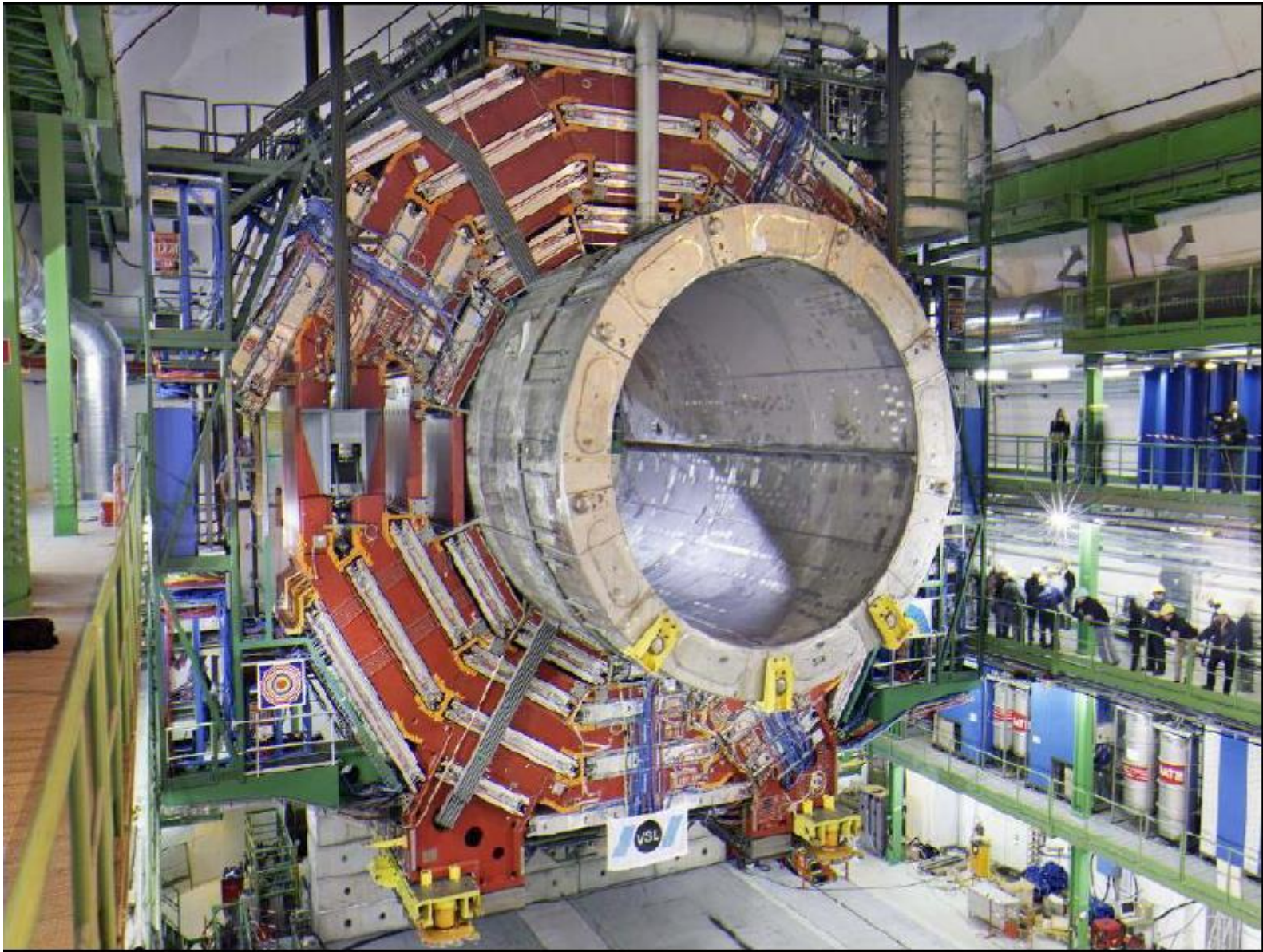
Инсталиране на детектора CMS



П.Яйджиев – ИЯИЯЕ – БАН, ЦЕРН 24.07.2017

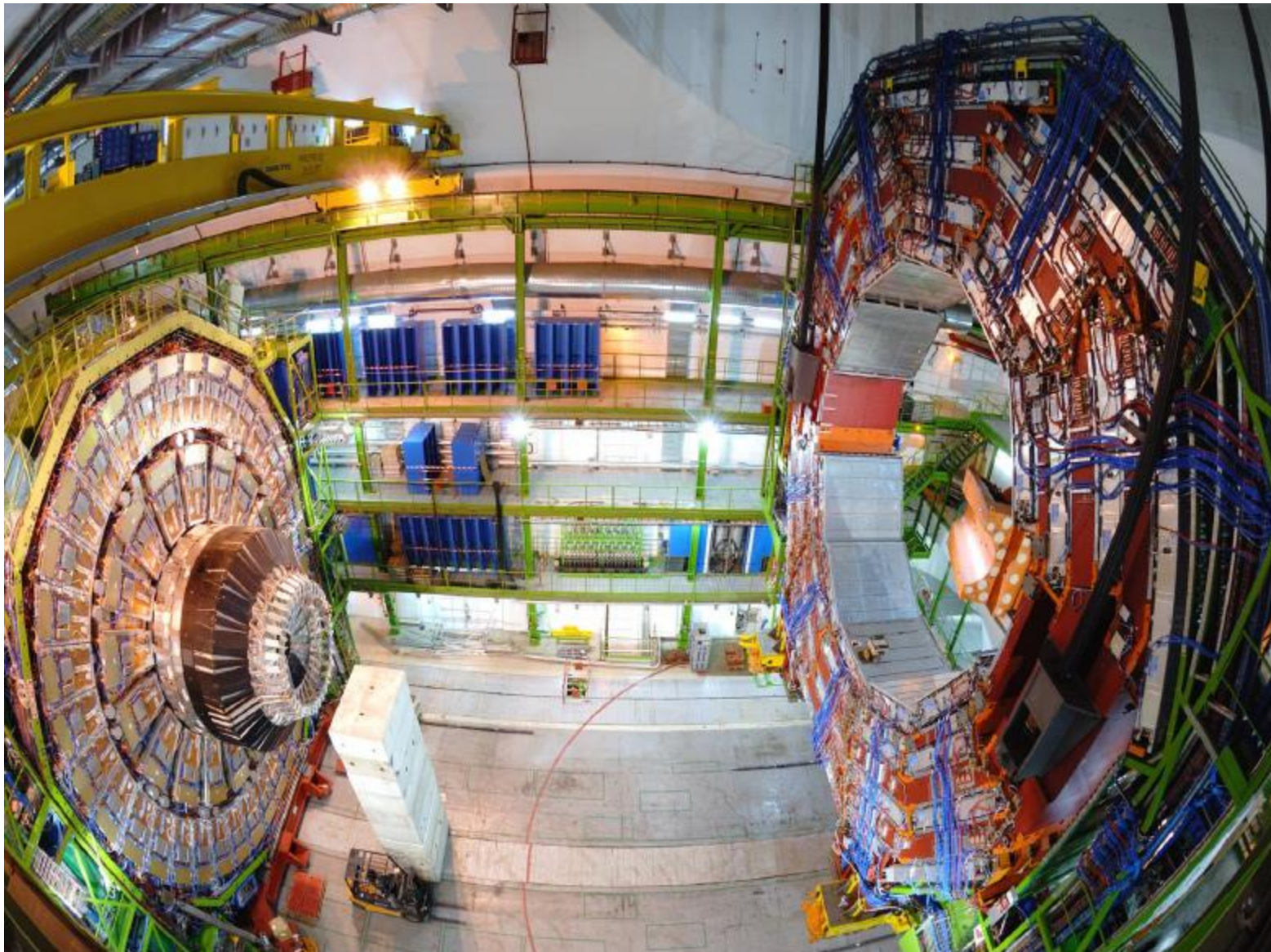
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

Инсталиране на детектора CMS



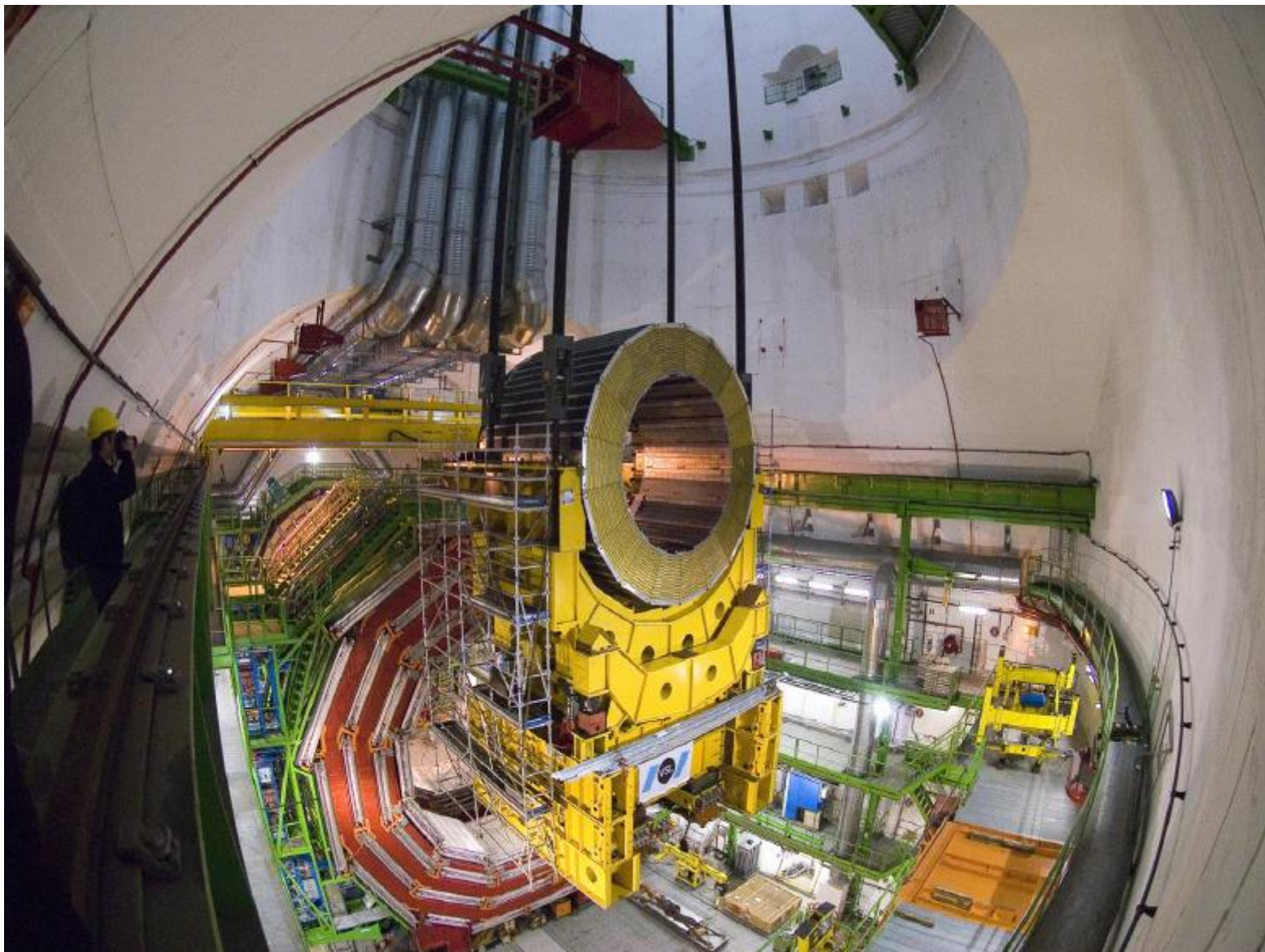
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

Инсталиране на детектора CMS



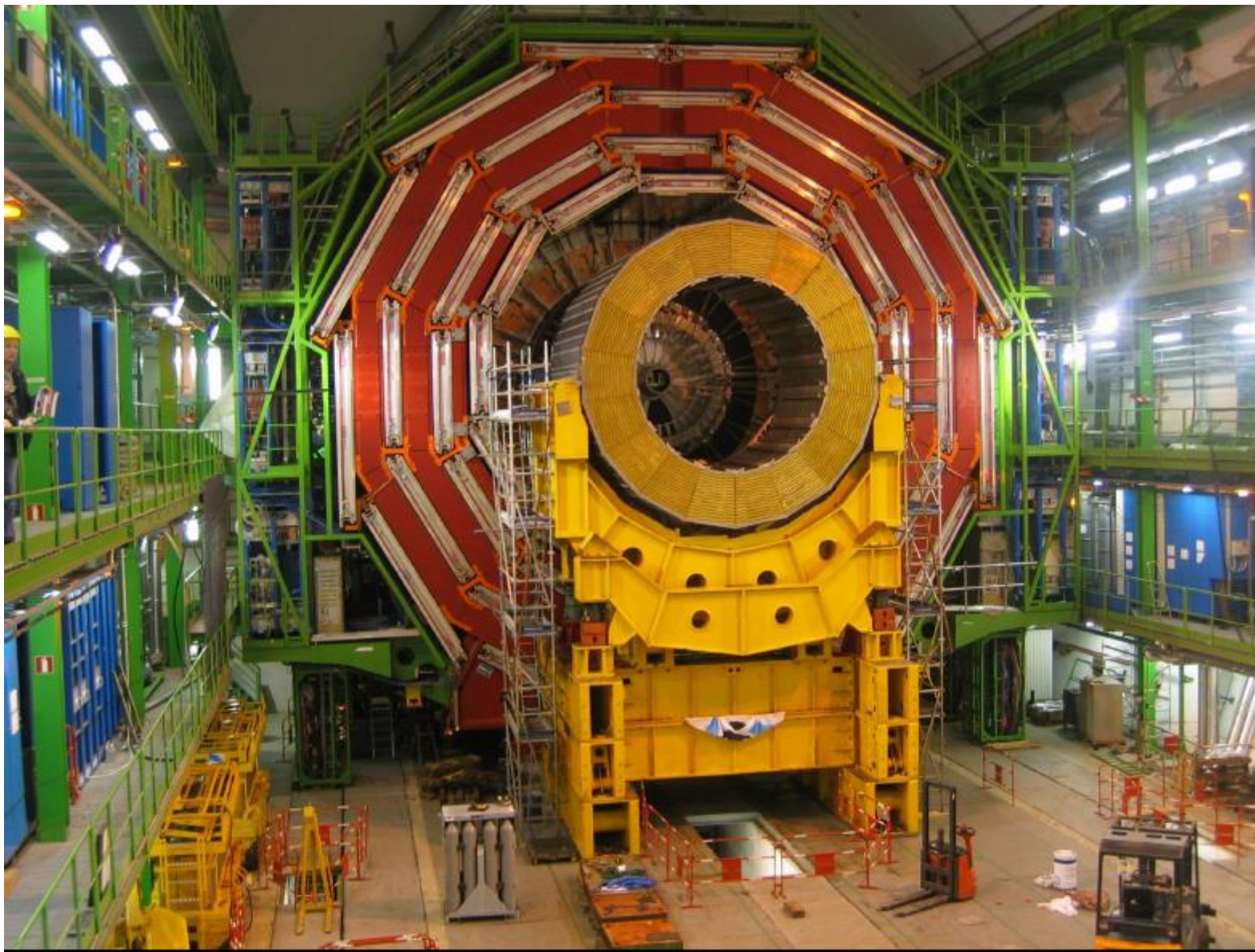
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

Инсталиране на детектора CMS

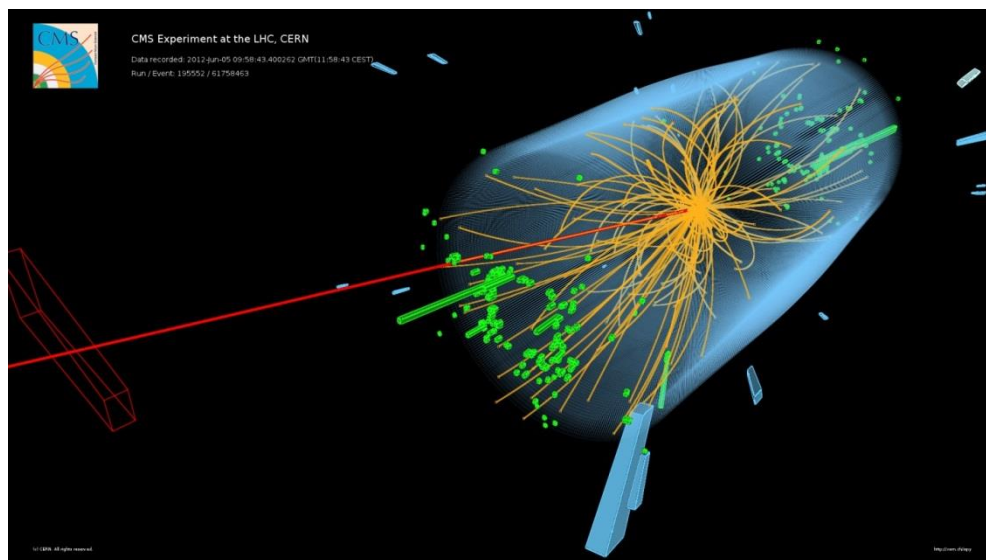
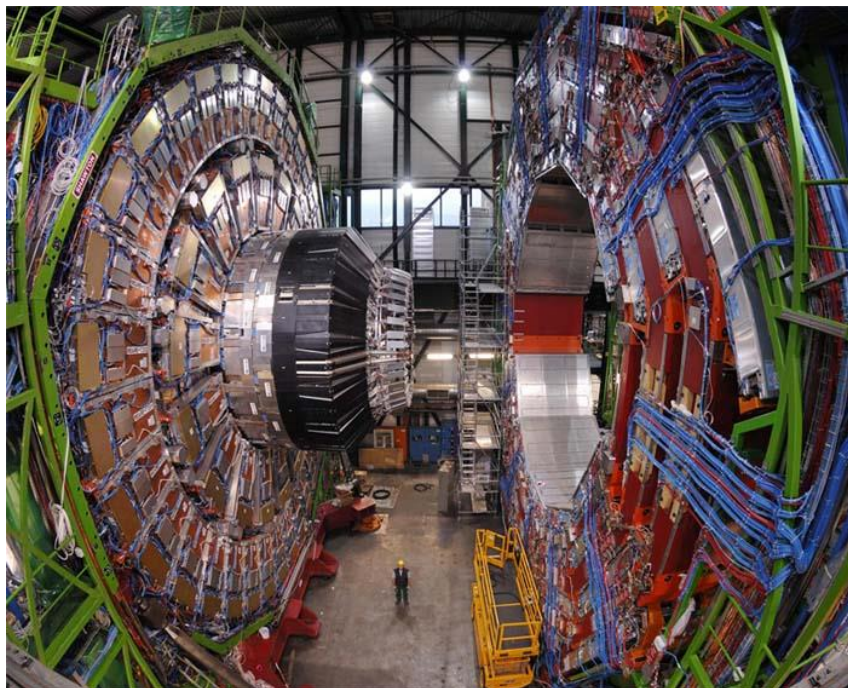


4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE

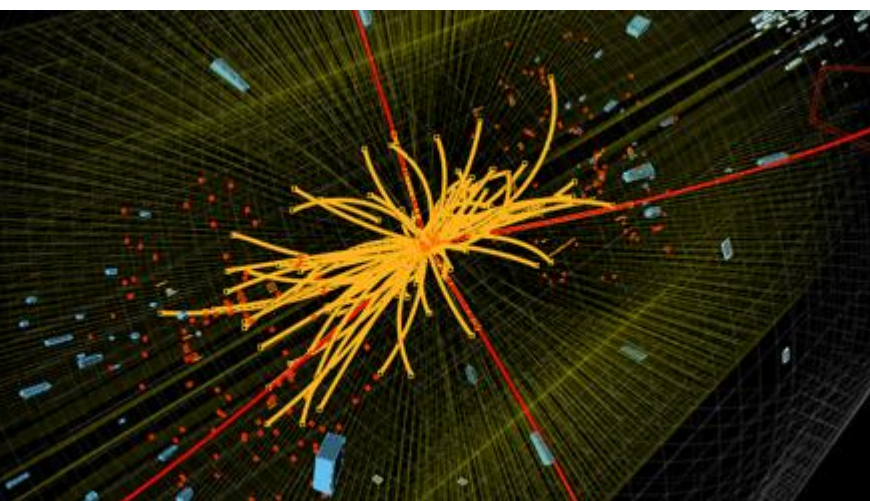
Инсталиране на детектора CMS



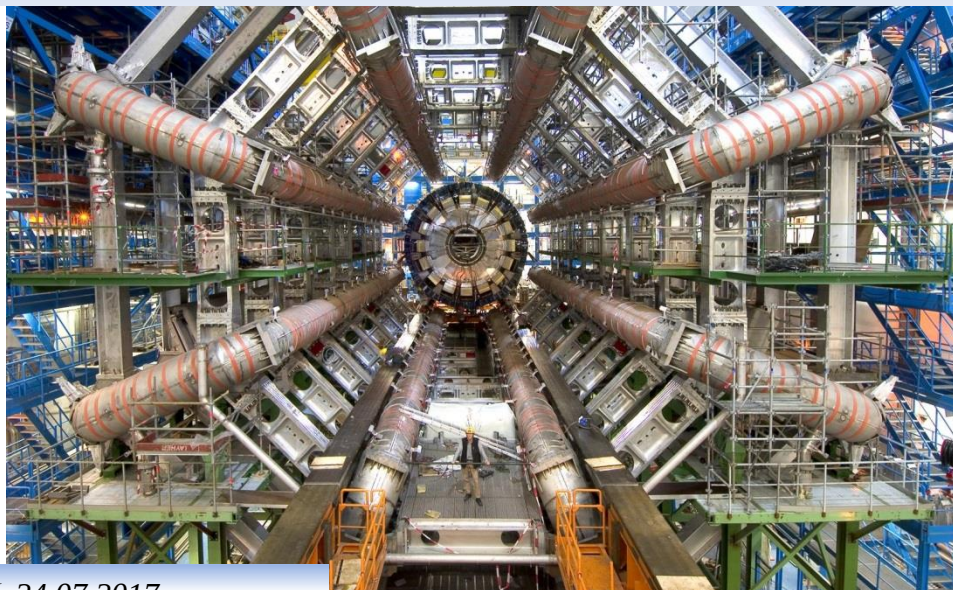
4. Детекторни комплекси на LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE



CMS-разпад на Хигс бозон на 2 тау лептона, един лептон се разпада на мюон и невидима следа от неутрино, а вторият лептон на заредени адрони и неутрино.



$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$ reaction



П.Яйджиев – ИЯИЯЕ – БАН, ЦЕРН 24.07.2017