



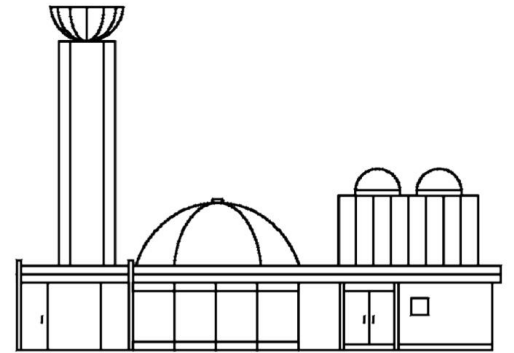
# **CMS Masterclasses Bulgaria - 2024**

**Introduction to High energy  
and Particle physics,  
Methodology and Practical work**

**Mariana Shopova (CMS)**

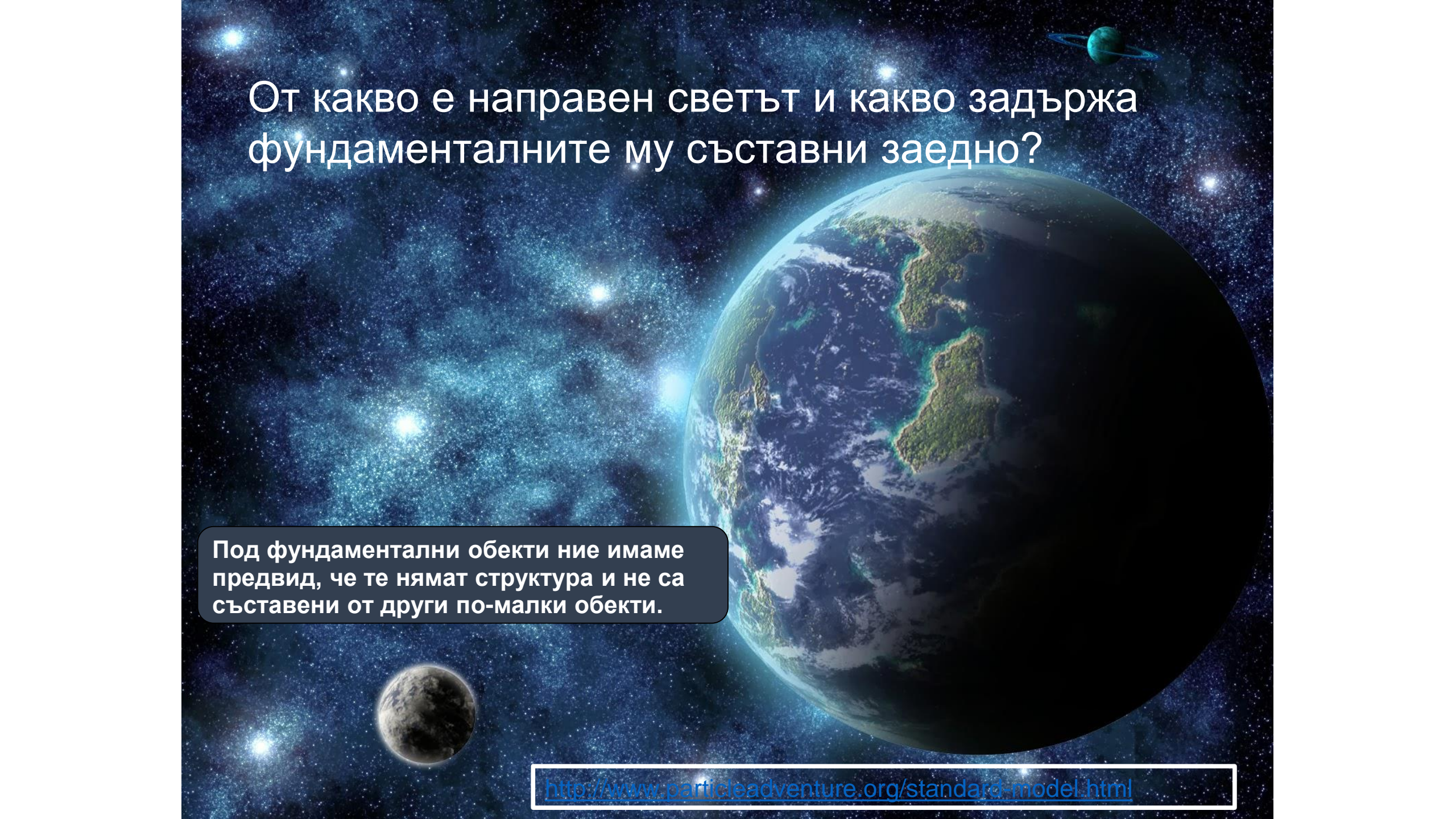
Plovdiv University "Paisii Hilendarski"  
INRNE – Bulgarian Academy of Sciences

**08.03.2024 – Zlatograd**



**Да започнем с това, което знаем ...**



A composite image of space featuring Earth, the Moon, Saturn, and a starry background. The Earth is the largest object, showing continents and oceans. The Moon is in the bottom left, and Saturn is in the top right. The background is filled with stars and a nebula.

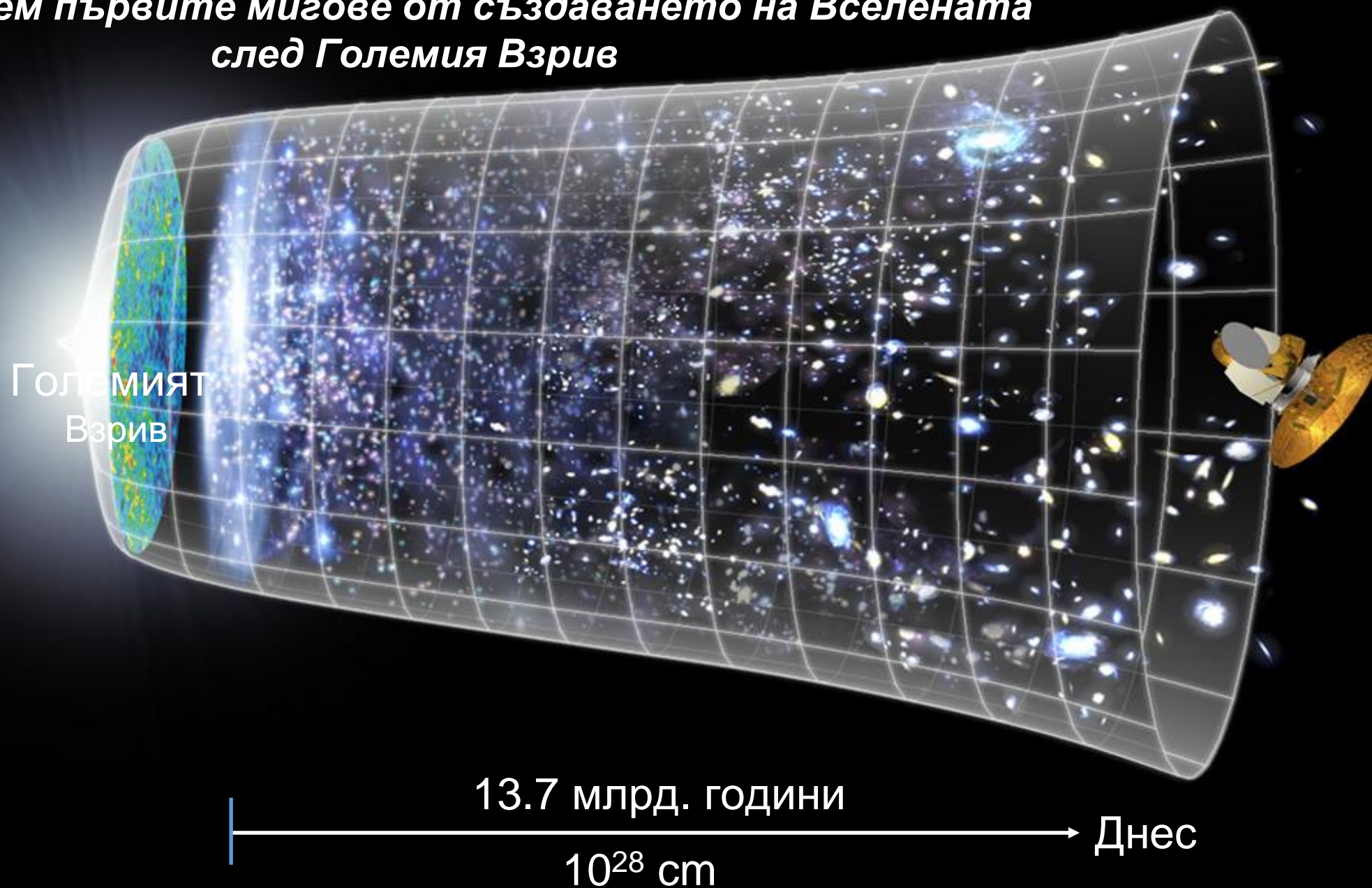
От какво е направен светът и какво задържа  
фундаменталните му съставни заедно?

Под фундаментални обекти ние имаме предвид, че те нямат структура и не са съставени от други по-малки обекти.

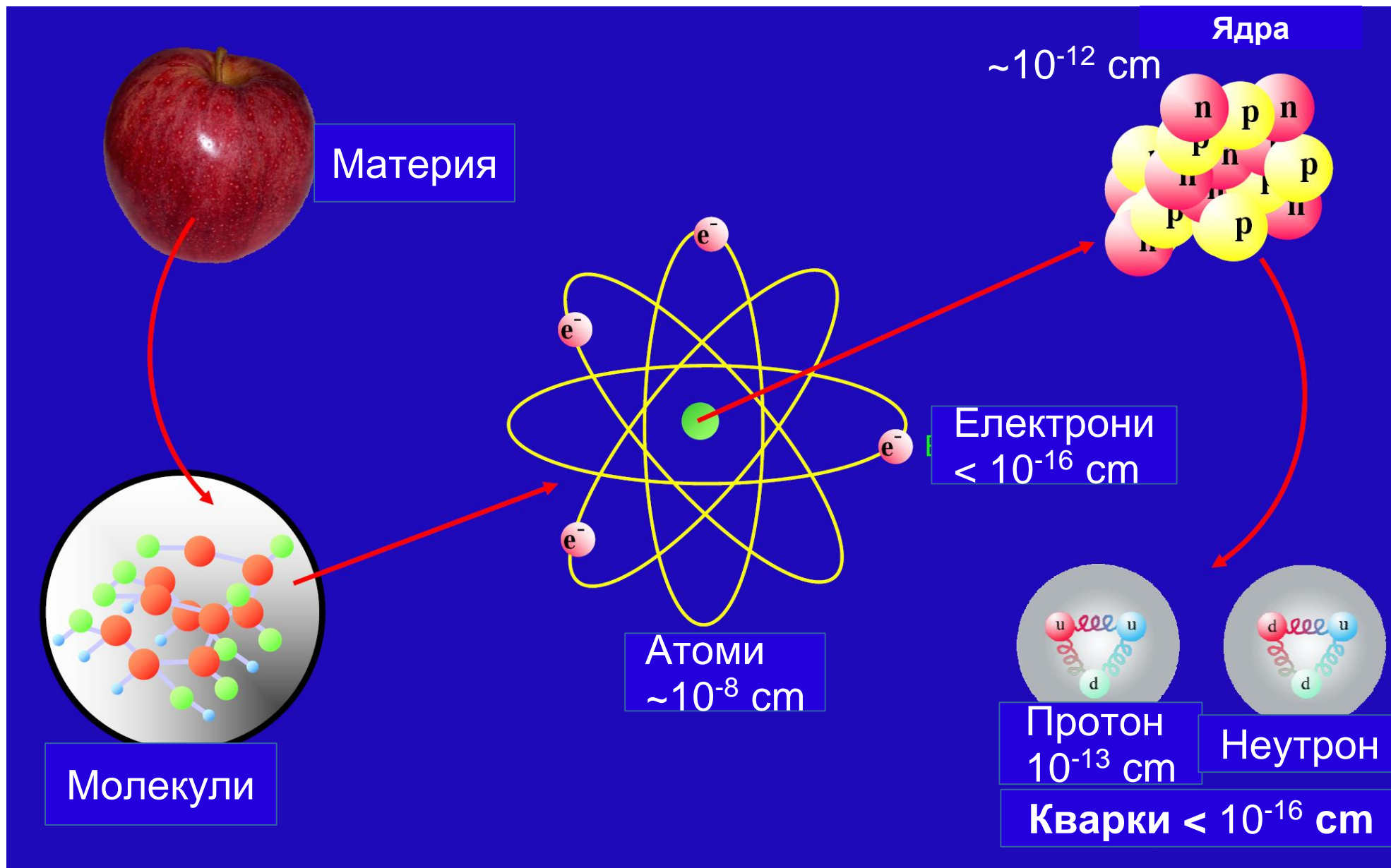
<http://www.particleadventure.org/standard-model.html>



**Предизвикателство пред науката:  
да разберем първите мигове от създаването на Вселената  
след Големия Взрив**



# Светът около нас



# Класическа представа за сила

## TYPES OF FORCE

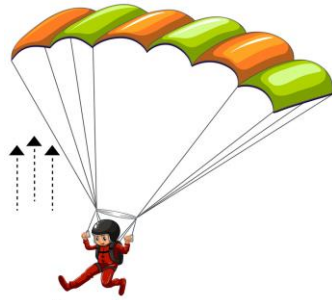
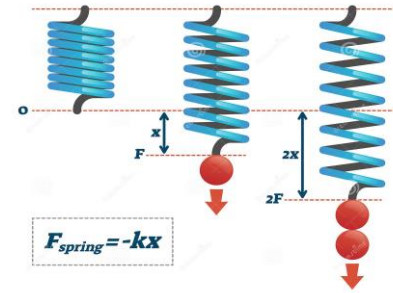


FRICTION FORCE

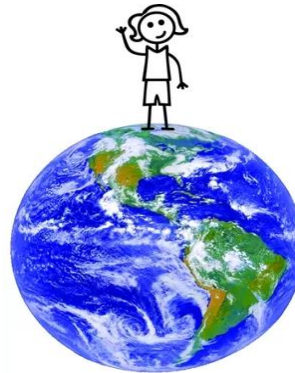
## Forces - Pushes and Pulls



## HOOKE'S LAW



Drag Force



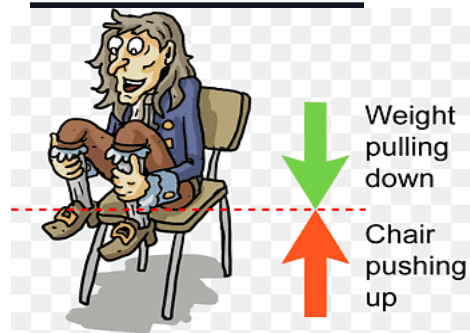
My **WEIGHT** on Earth is around 560N



My **WEIGHT** on the moon is around 90N



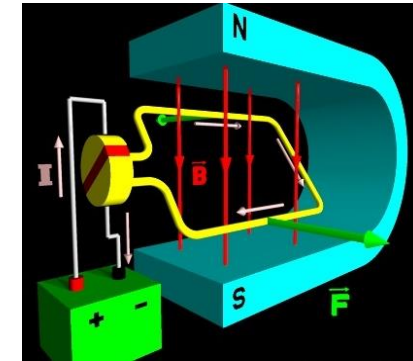
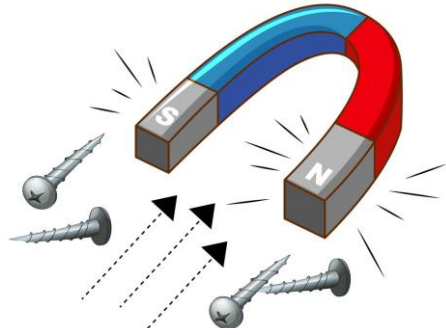
My **MASS** is always 56kg!!



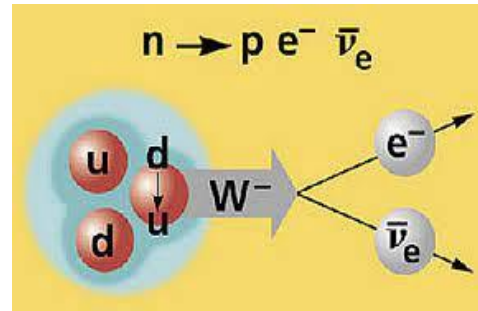
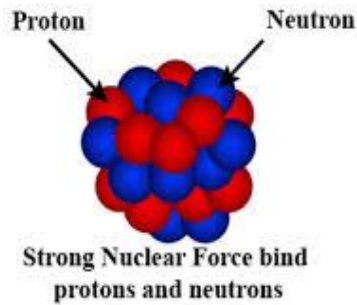
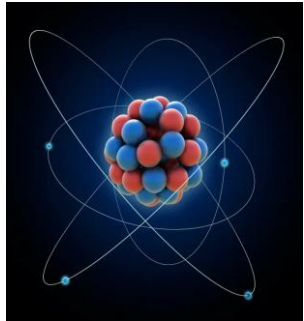
**Сила** е всяко влияние, което причинява промяна в скоростта или формата на дадено тяло.



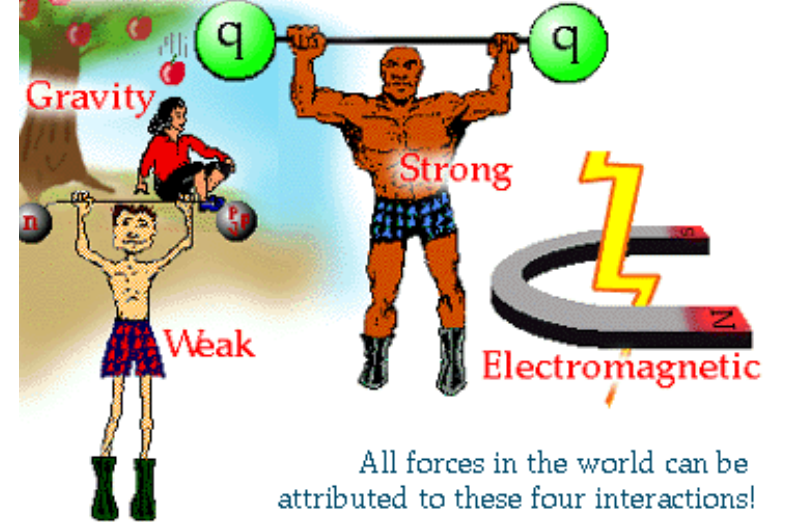
# Magnetic Force



# Фундаментални взаимодействия



# The Four Fundamental Interactions

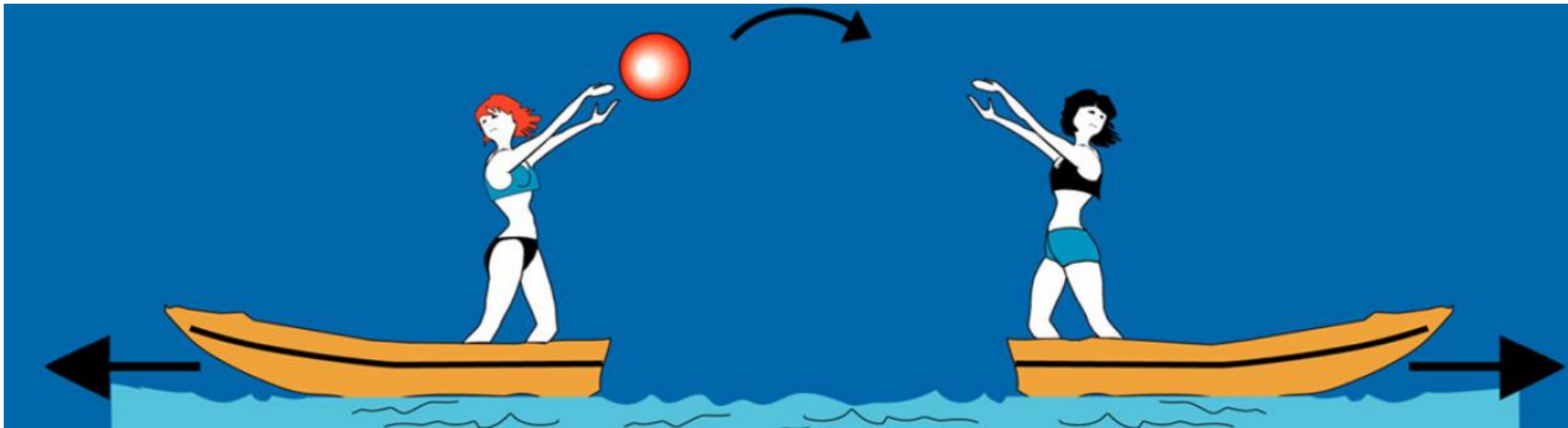


# Frank and Ernest



© by Thaves. Distributed from www.thecomics.com.

- 1) Силно взаимодействие
- 2) Слабо взаимодействие
- 3) Електромагнитно взаимодействие
- 4) Гравитация



**Частиците** си взаимодействат посредством обмен на **частици**.

**Електромагнитно:** :)

**Силно:** *придържа протоните и неутроните в ядрото*

**Слабо:** *Енергия на слънцето, радиоактивно разпадане*

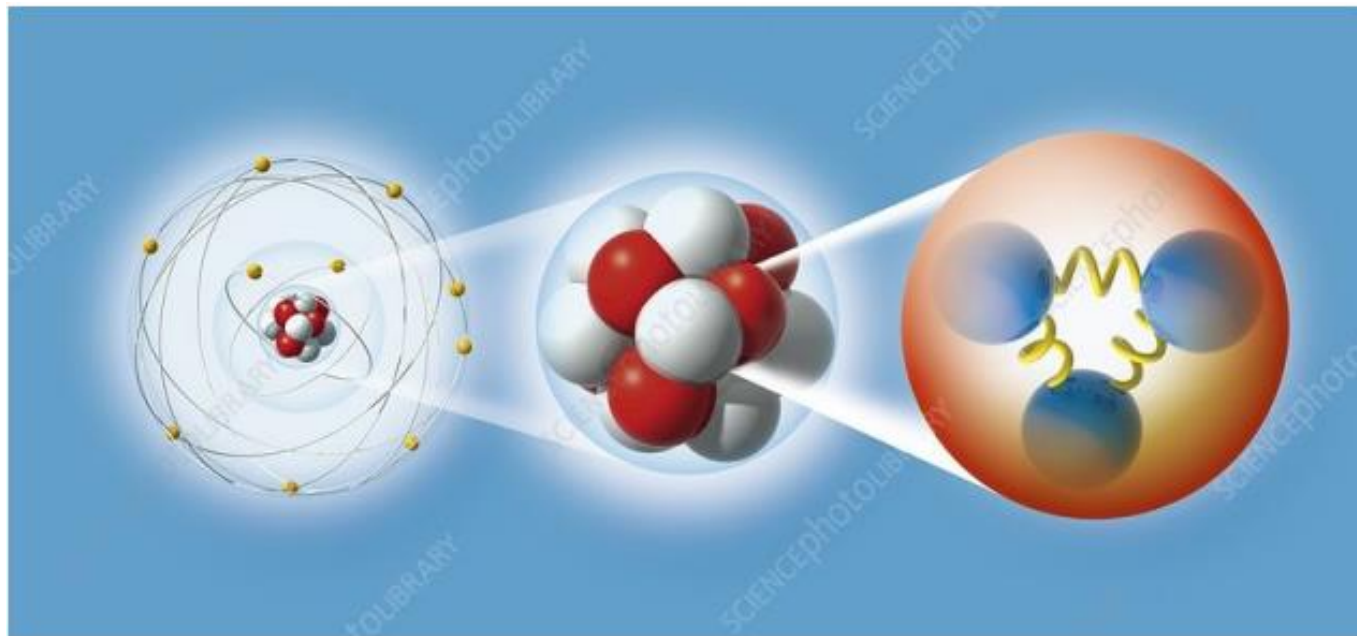
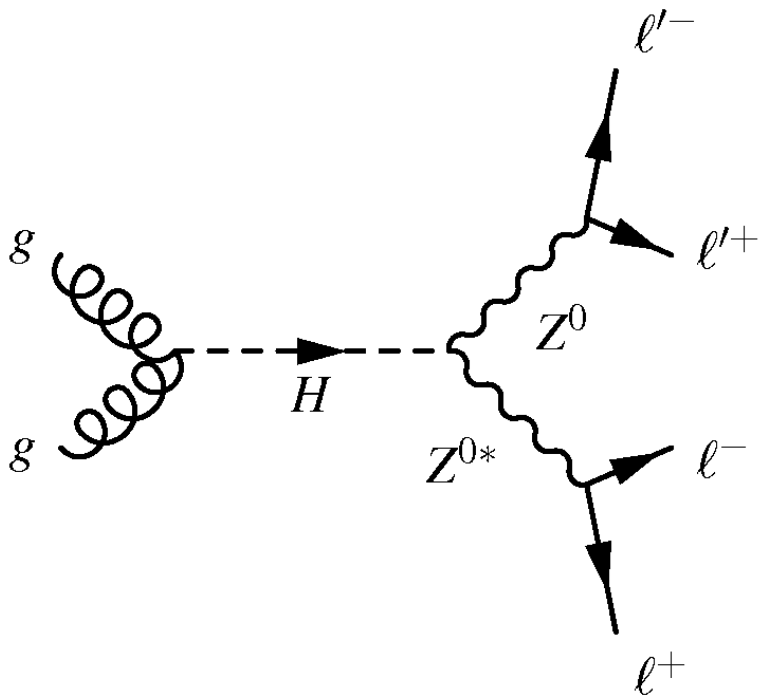
**Гравитационно:** *държи ни на Земята*

Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие

**Стандартен Модел**

**Не включва гравитация !!!**

# Физика на елементарните частици



Източник: <https://www.sciencephoto.com/media/669750/view/structure-of-matter-illustration>

изучава фундаменталните съставни части на материята  
и взаимодействията между тях.



**Елементарна частица** е частица, за която няма експериментални доказателства за наличието на вътрешна структура, т.е. не е съставена от други, по-малки частици.

## Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
	I	II	III	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

QUARKS  
LEPTONS  
GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS  
SCALAR BOSONS

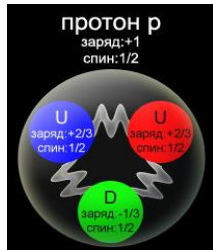
- **Три поколения фермиони:**
  - Кварки
  - Лептони
- **Четири фундаментални взаимодействия и техните преносители**
  - Глуони - Силно
  - Фотони - Електромагнитно
  - W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup> и Z - Слабо
  - Гравитон - гравитационно
    - не се разглежда в СМ
- **Маси на частиците - Хигс бозон (H)**

**Ние можем да измерим частиците в крайното състояние и да познаем (реконструираме) частицата в началното състояние.**

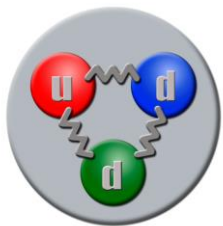
Тежките частици имат кратък живот и се разпадат на други по-леки частици.

# Колко на брой са частиците?

## Бариони (qqq)

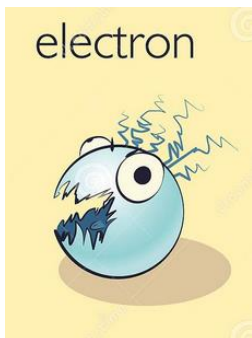


$p (u u d)$   $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
 $\sim 10^{33} \text{ years}$



$n (u d d)$   $1.674 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
 $\sim 15 \text{ minutes (free neutron)}$

## Лептони

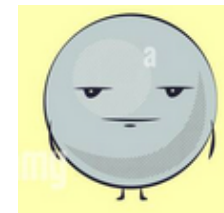


$(\text{-----})$   $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$   
 $\infty$

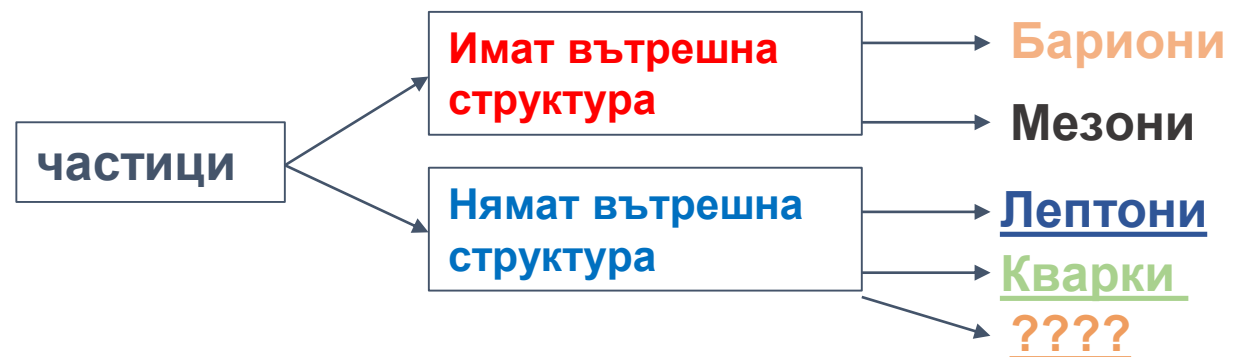
## Мезони (q anti-q)



$J/\psi (c \bar{c})$   $5.521 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
 $\sim 7 \times 10^{-21} \text{ s}$



$\Phi (s \bar{s})$   $1.817 \times 10^{-27} \text{ kg}$   
 $\sim 1.55 \times 10^{-22} \text{ s}$

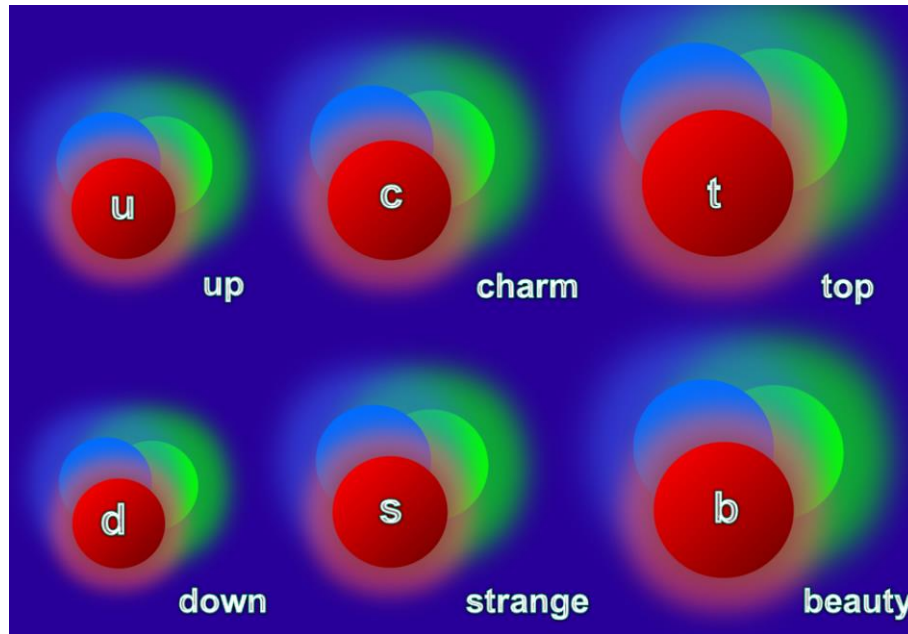


# Кварков строеж на адроните



Murray Gell-Mann

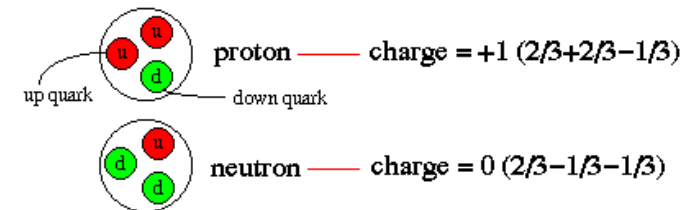
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици, които те наричат **кварки**. Те постулират дробен електричен заряд на кварките. **Различни комбинации от три кварка изграждат барионите, а комбинациите от два кварка изграждат мезони.**



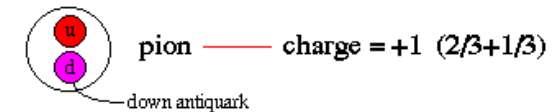
По-нататъшните експерименти показват, че **всъщност адроните се изграждат не от три, а от 6 кварка.**

Atomic Nuclei = Combinations of Quarks

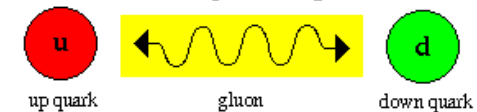
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons



# Кварки, глюони и цветен заряд

**Силните взаимодействия задържат кварките заедно в адроните.** Преносителите на силните взаимодействия се наричат **глюони** (от английската дума glue - лепило).



QUARKS CARRY A  
COLOR



ANTI-QUARKS CARRY AN  
ANTI-COLOR



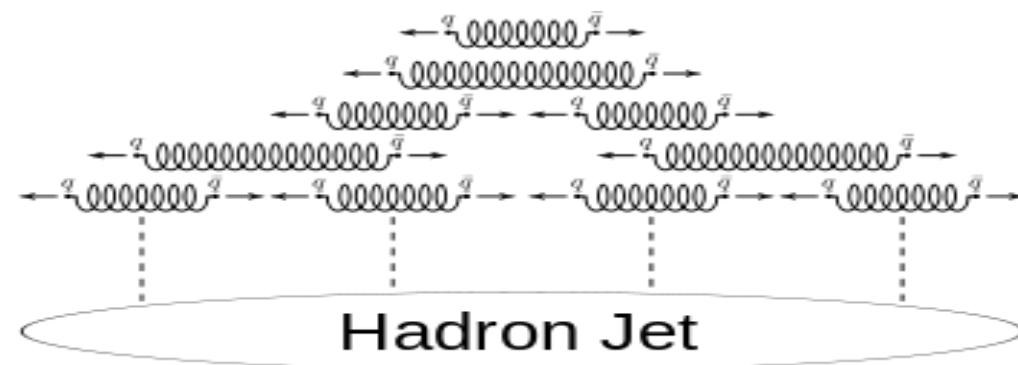
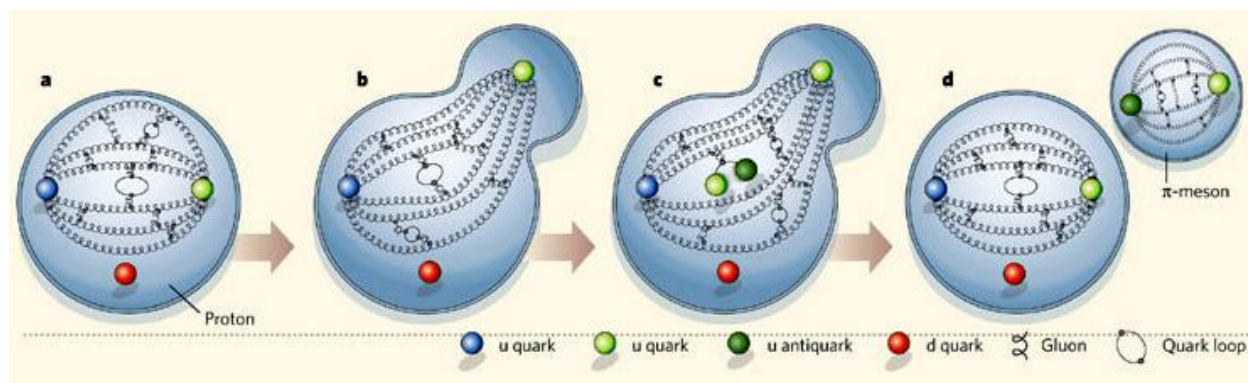
GLUONS CARRY A  
COLOR AND AN  
ANTI-COLOR

Кварките и глюоните имат цветни заряди. **Композитните частици, изградени от кварки са цветово неутрални.**

Цветните заряди и взаимодействия се държат различно от електромагнитните. Кварките не могат да съществуват индивидуално. При опит да раздалечим два кварка, силната на цветното взаимодействие нараства и задържа кварките в така наречения кварков затвор.

# Партони – кварки + глюони

При достатъчно висок импулс един отделен кварк може да се отдели от протона, при това силата на привличане нараства с разстоянието и глюонното поле ражда допълнителни кварк-антикваркови двойки – ражда се пион или различни видове адрони /пиони, каони и др./



Новите адрони, родени при този процес (адронизация) се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“, които се регистрират в детектора.

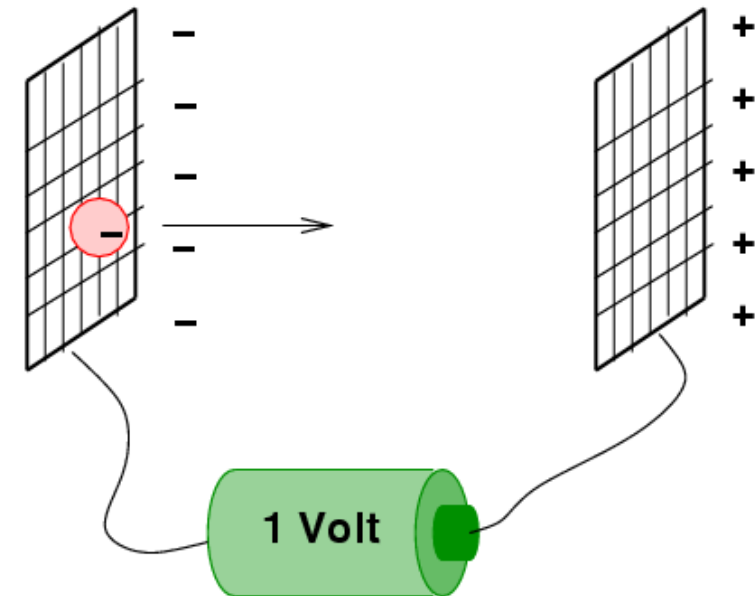
# Мерни единици и какво е един електрон-волт [eV]?

Електронволт е кинетичната енергия, която е придобита от електрон при преминаването му през потенциална разлика от 1 волт във вакуум.

1 TeV =  $10^{12}$  eV; 1 GeV =  $10^9$  eV; 1 KeV = 1000 eV

## Системи от мерни единици

Величина	SI	NU $c=\hbar=1$
Дължина	[m]	[1/eV]
Време	[s]	[1/eV]
Енергия	[J]	[eV]
Импулс	[kg.m/s]	[eV/c]
Маса	[kg]	[eV/c <sup>2</sup> ]
....		



$$E = qU = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ J/C} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$



## Колко енергия е 1TeV?



Почти колкото е кинетичната енергия на един летящ комар

$$1 \text{ TeV} = 1\,000\,000\,000\,000 \text{ eV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$\text{Комар има маса около } 2 \text{ mgr} = 2 \times 10^{-6} \text{ kg}$$

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

$$1 \text{ TeV} = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{12} \text{ Joules} = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joules}$$

$$\frac{1}{2} m v^2 = 1.6 \times 10^{-7} \text{ Joules}, \quad m = 2 \times 10^{-6} \text{ kg} \text{ следователно } v = 0.4 \text{ m/s} = 1.4 \text{ km/h}$$

Комарите могат да летят около 1,6 – 2,4 km/h.



**Това, което прави LHC толкова необикновен е, че смачква/съсредоточава енергия в пространство около милион милион пъти по-малко от комар.**

# Мерни единици и какво е един електрон-волт [eV]?

Електронволт е кинетичната енергия, която е придобита от електрон при преминаването му през потенциална разлика от 1 волт във вакуум.

1 TeV =  $10^{12}$  eV; 1 GeV =  $10^9$  eV; 1 KeV = 1000 eV

## Системи от мерни единици

Величина	SI	NU $c=\hbar=1$
Дължина	[m]	[1/eV]
Време	[s]	[1/eV]
Енергия	[J]	[eV]
Импулс	[kg.m/s]	[eV/c]
Маса	[kg]	[eV/c <sup>2</sup> ]
....		

$$E = mc^2 \rightarrow c=\hbar=1 \rightarrow E = m$$

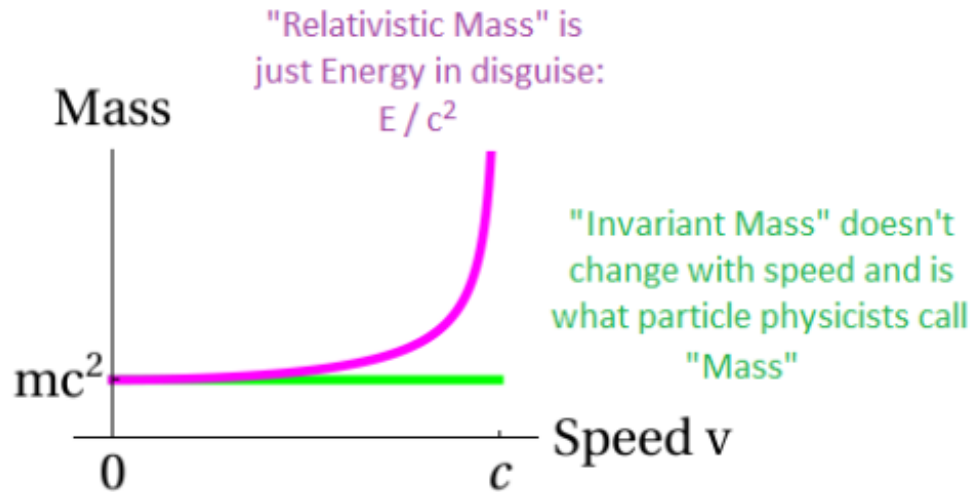


$$\left( \text{-----} \right) \frac{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}{\infty} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$



$$p (u u d) \quad \frac{1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}}{\sim 10^{33} \text{ years}} = 0.9383 \text{ GeV}/c^2$$

# Коя маса на частиците искаме да измерим?



$$E = mc^2$$

$$\begin{aligned} E^2 &= m^2 c^4 \\ &= m^2 c^2 (c^2 + v^2 - v^2) \\ &= m^2 c^2 v^2 + m^2 c^2 (c^2 - v^2) \\ &= p^2 c^2 + m^2 c^4 (1 - v^2/c^2) \\ &= p^2 c^2 + (m_0^2 c^4 / (1 - v^2/c^2)) \cdot (1 - v^2/c^2) \\ &= m_0^2 c^4 + p^2 c^2 \end{aligned}$$

$$\text{от } c = \hbar = 1 \quad \Rightarrow \quad E^2 = m_0^2 + p^2$$



$m_0$  - маса на покой на частицата.

Не се променя в различните отправни координатни системи.

Затова се нарича още **инвариантна маса**.

**Ако знаем масата на частицата, която сме регистрирали, може да познаем коя е частицата с точност до нейния електрически заряд.**

Например  $e^-$  и  $e^+$  са частица и античастица с еднаква маса, но с различен електрически заряд.



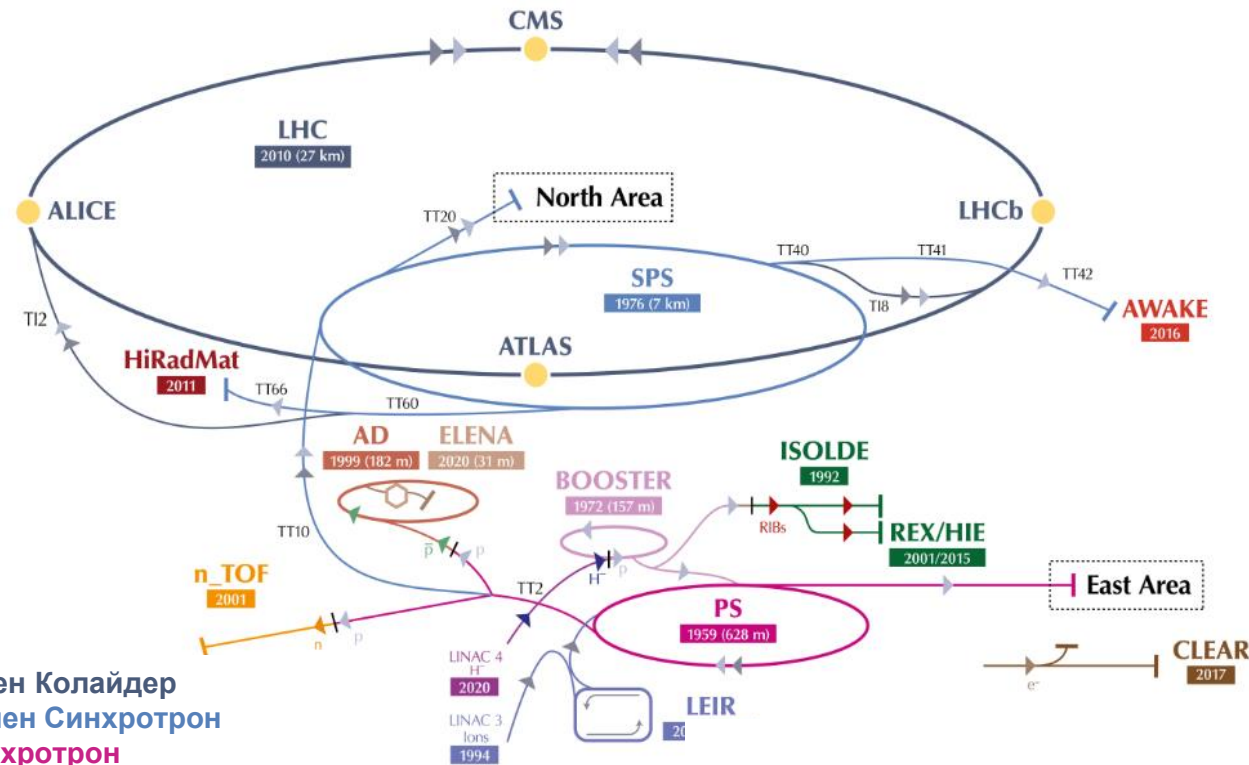
# Детектори - експериментът CMS

# Голям адронен колайдер LHC



# Система от ускорители на ЦЕРН

The CERN accelerator complex  
*Complexe des accélérateurs du CERN*



## Ускорители

LHC – Голям Адронен Колайдер

SPS – Супер Протонен Синхротрон

PS – Протонен Синхротрон

AD – Антипротонен деселератор

STF3 – Тестов Стенд за Експеримента CLIC

CNGS – Неутринен сноп от ЦЕРН за Гран

Сацо

ISOLDE – Установа за изучаване на Ядрени

Изотопи

LEIR – Пръстен за Йони с Ниски Енергии

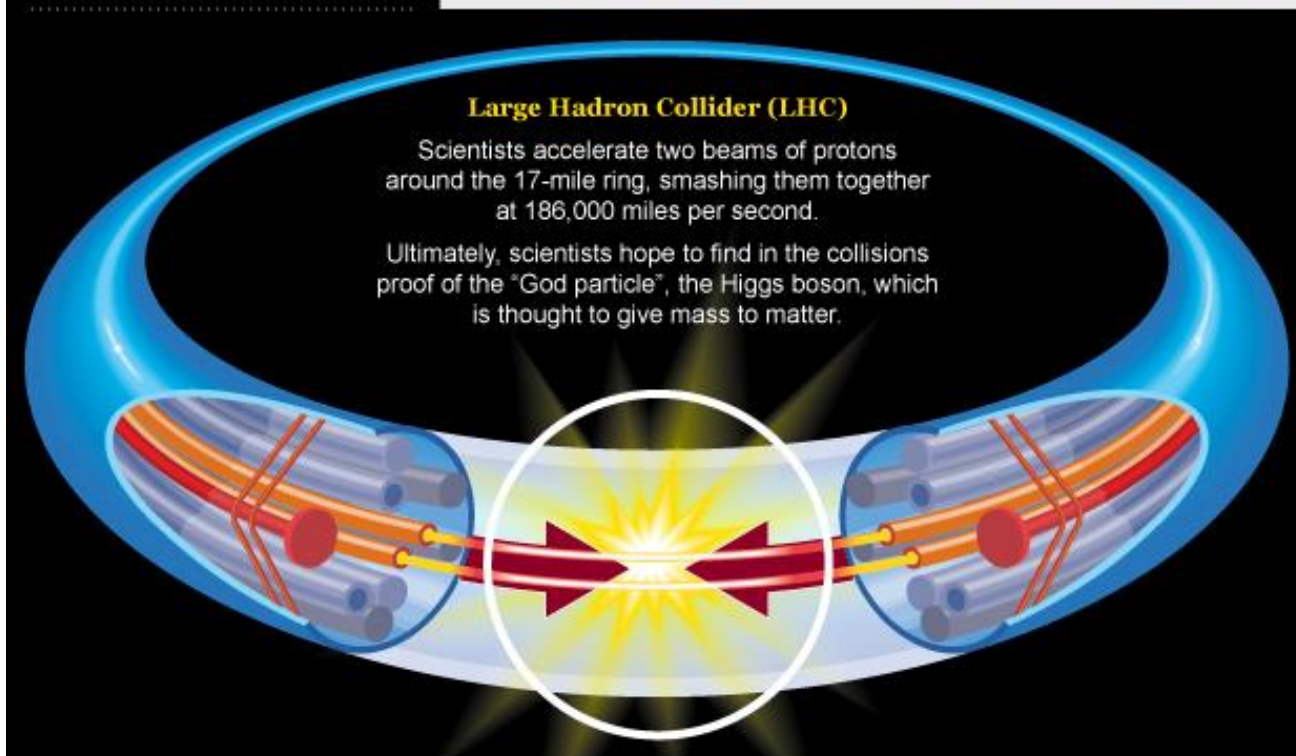
LINAC 2 – Линеен Ускорител 2

N-TOF – Неутрона Установа

## Снопове:

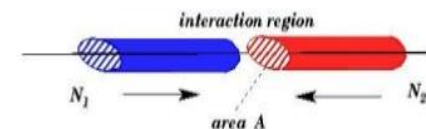
- ▶ Протони
- ▶ Йони
- ▶ Неутрони
- ▶ Антипротони
- ▶ Електрони





- Връзка (превръщане) между енергия и маса:  $E = mc^2$
- При сблъсъка на сноповете от протони се раждат много нови частици.
- По-тежките частици са нестабилни и се разпадат бързо до по-леки частици, които можем да измерим.

- Ускорител на заредени частици - в нашия случай протони
- Сблъскване на частици - енергия на взаимодействието:
  - $E = E(\text{сноп 1}) + E(\text{сноп 2})$
- Най-висока енергия на сблъсъците на LHC досега:
  - $E = 13 \text{ [TeV]} = 2 \times 6.5 \text{ [TeV]}$  (2015 - 2018 г.)
- Проектна енергия на LHC:
  - $E = 14 \text{ TeV}$





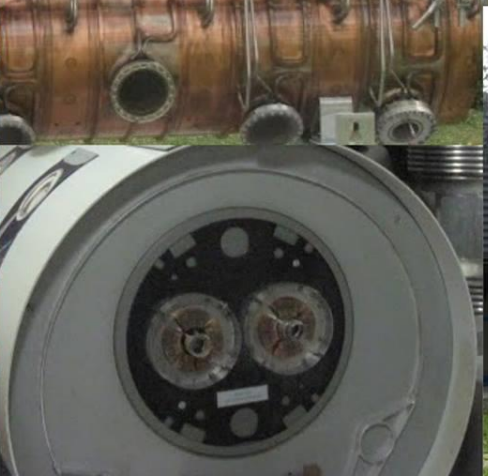
Ако сме създали частици при сблъсък в ускорител, искаме да можем да ги разглеждаме и изучаваме. И тук идват детекторите за частици. Ние ги изграждаме в точките на сблъсък в ускорител и ги използваме, за да идентифицираме колкото се може повече от това, което е произведено при сблъсъка.

Принципът на детектора за частици е прост. Той никога няма да „види“ частица директно, но показва къде е пътувала, какви следи оставя след себе си и ефекта, който има върху детектора, когато бъде спряна, докато излита от сблъсъка.

Детекторите се състоят от слоеве от различни видове материал, които се използват или да ни покажат пътя на частицата, докато се движат, или да я абсорбират, за да накарат частицата да спре.

Можем да идентифицираме различни видове частици в зависимост от това къде спират в детектора и как изглежда пътят им. Това е малко като полицейско разследване след автомобилна катастрофа – ако знаем какви частици са се образували при сблъсъка, в каква посока са летяли и колко енергия са имали, можем да реконструираме какво точно се е случило при сблъсъка.

**Как изглежда един детектор?**





# Експериментът CMS (Run1&2) (Компактен мюонен соленоид)

Електромагнитен калориметър  
Кристали от оловен волфрамат

Желязна конструкция (юке) на детектора  
През него се затварят магнитните силови линии

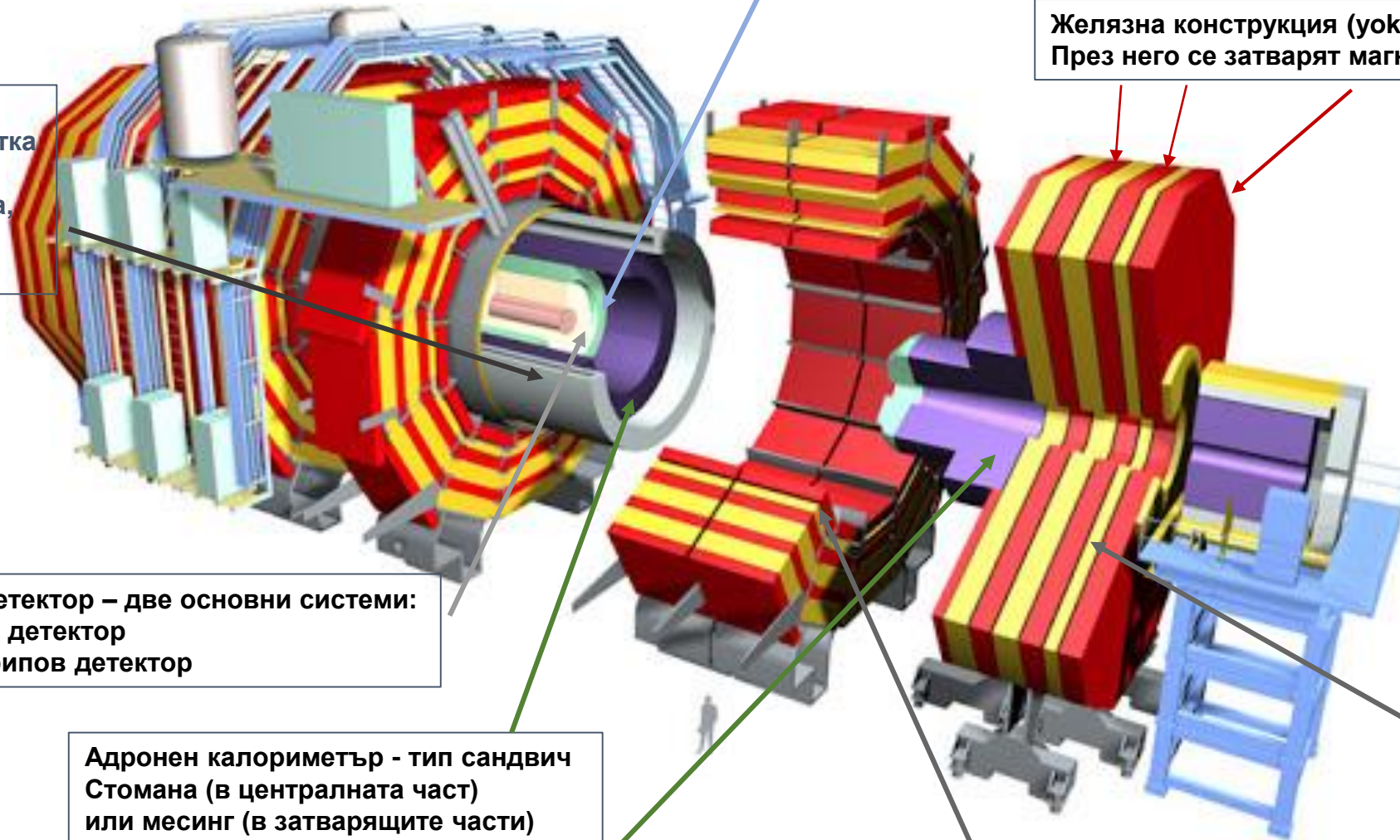
Соленоидален магнит  
Суперпроводяща намотка  
Магнитно поле:  
3.8 T във вътрешността,  
затворена от магнита  
~1.8 T извън магнита

Вътрешен треков детектор – две основни системи:  
Силициев пикселов детектор  
Силициев микрострипов детектор

Адронен калориметър - тип сандвич  
Стомана (в централната част)  
или месинг (в затварящите части)  
и пластмасови сцинтилатори

Мюонна система - централна част:  
Камери с дрейфови тръби (DT)  
Камери със съпротивителна плоскост (RPC)

Мюонна система –  
затварящи части:  
Катодни стрипови  
камери (CSC)  
Камери със  
съпротивителна  
плоскост (RPC)



Цилиндрична геометрия

-z

Y

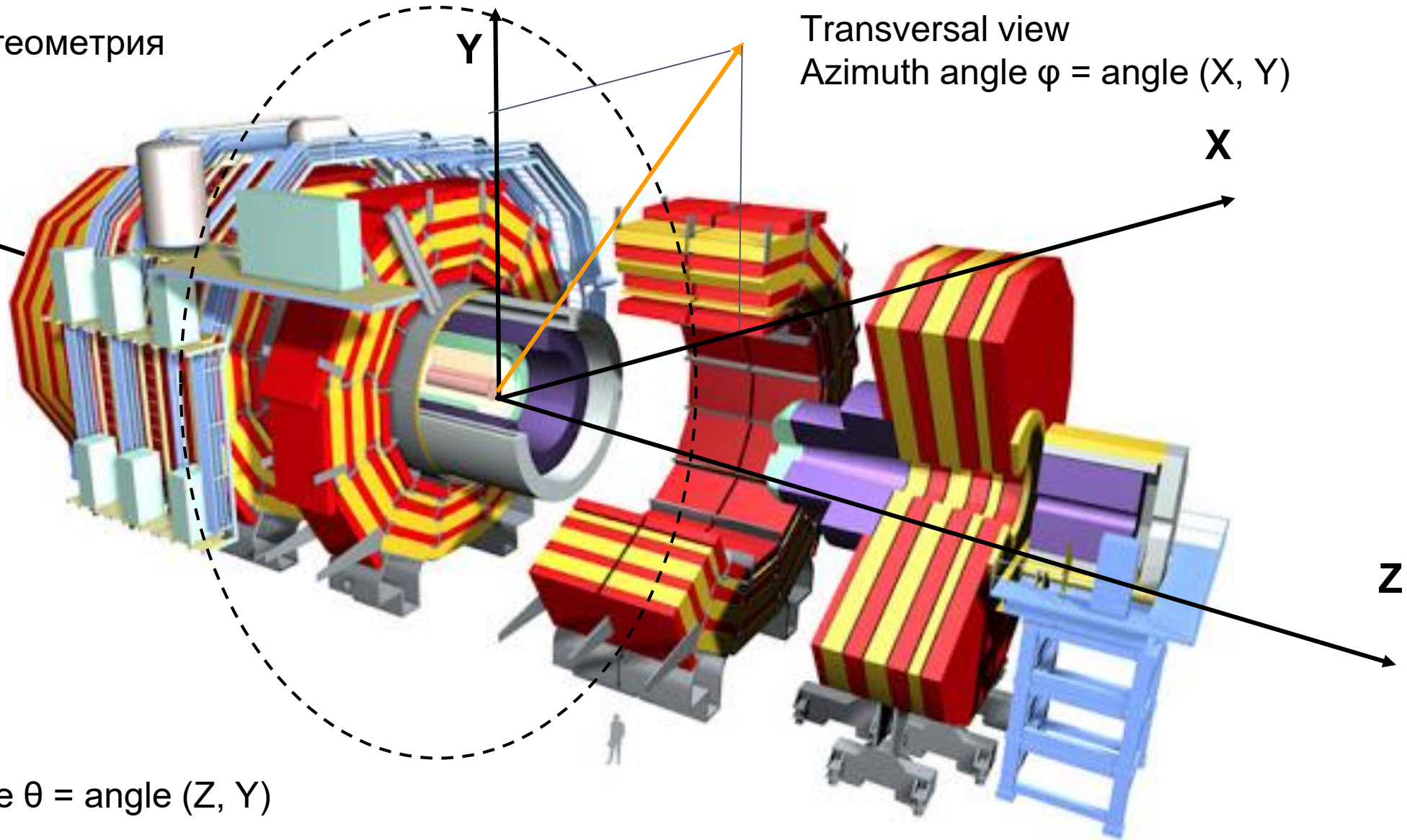
Transversal view  
Azimuth angle  $\varphi = \text{angle}(X, Y)$

X

Z

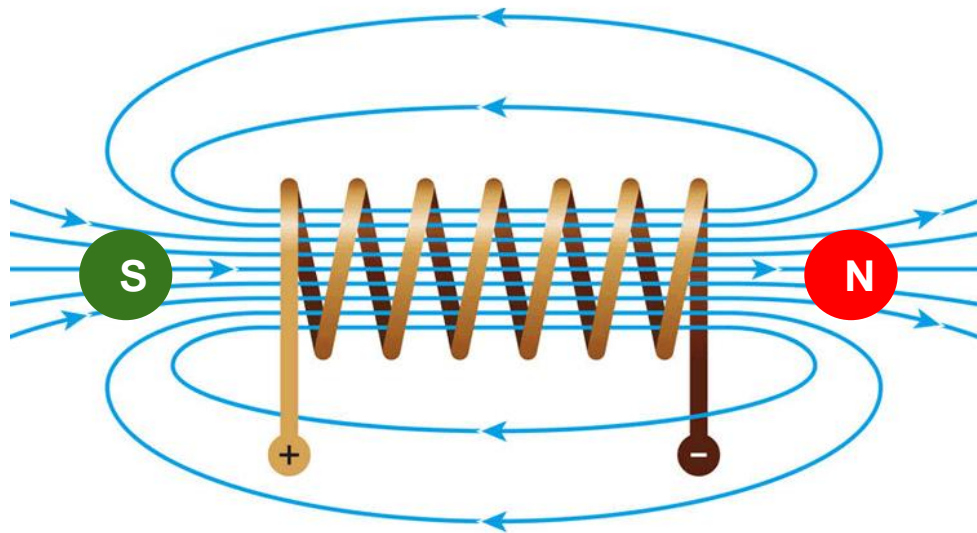
Polar angle  $\theta = \text{angle}(Z, Y)$

$$-\ln \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) = \eta \quad \eta\text{-Pseudorapidity}$$

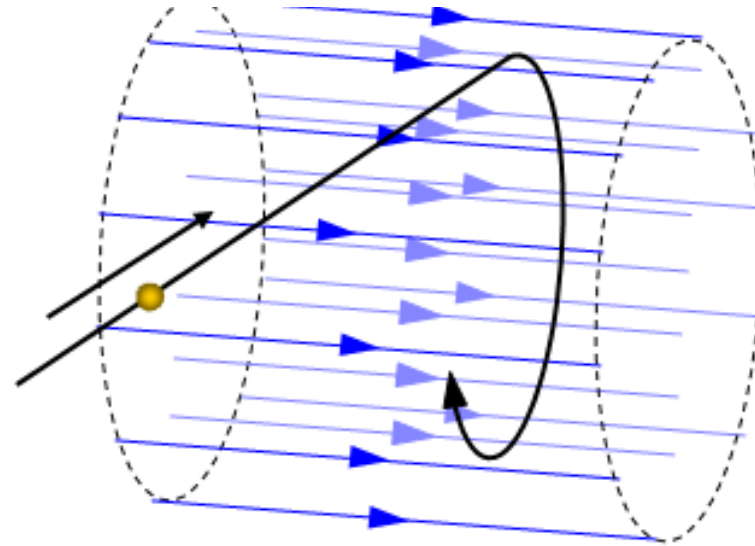




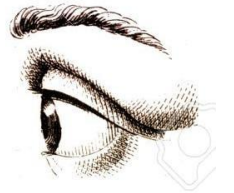
# Движение на заредена частица в магнитно поле



Соленоид (магнитно поле)



Траекторията на заредена частица се закривява в магнитно поле.

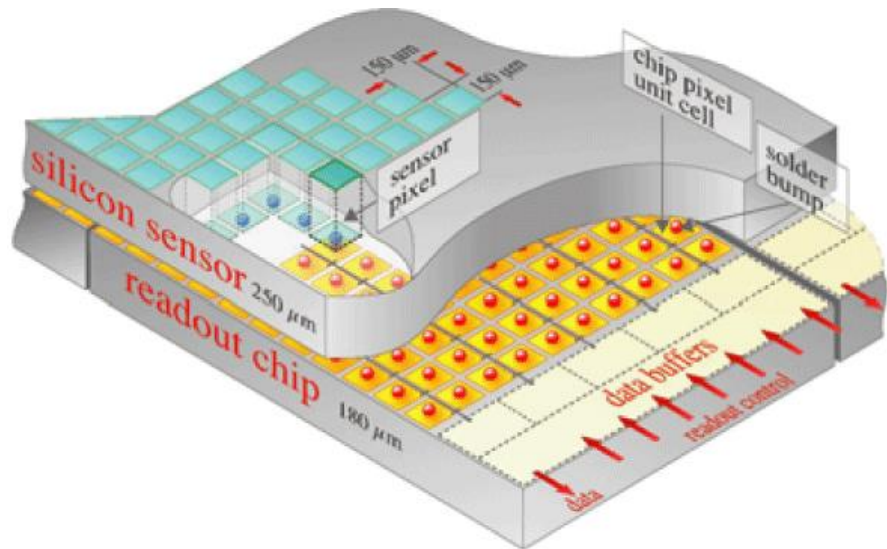


Ако гледаме срещу посоката на магнитното поле, положително заредените частици ще се отклоняват по посока на часовниковата стрелка, а отрицателно заредените в обратна посока.

В приложението iSpyWebGl, посоката на магнитното поле във вътрешността на магнита е по посока на оста Z. В основния XY изглед, оста Z е насочена към наблюдателя.

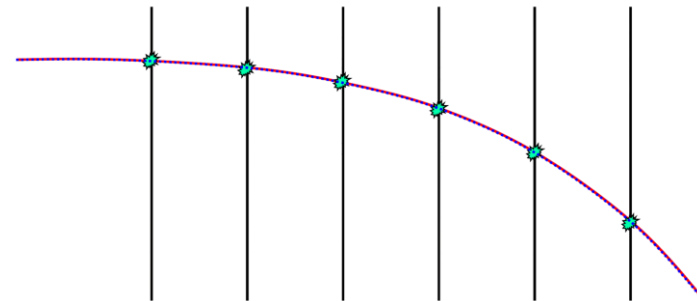
# Определяне на импулс и заряд – Вътрешен треков детектор

## Полупроводников детектор на трекове



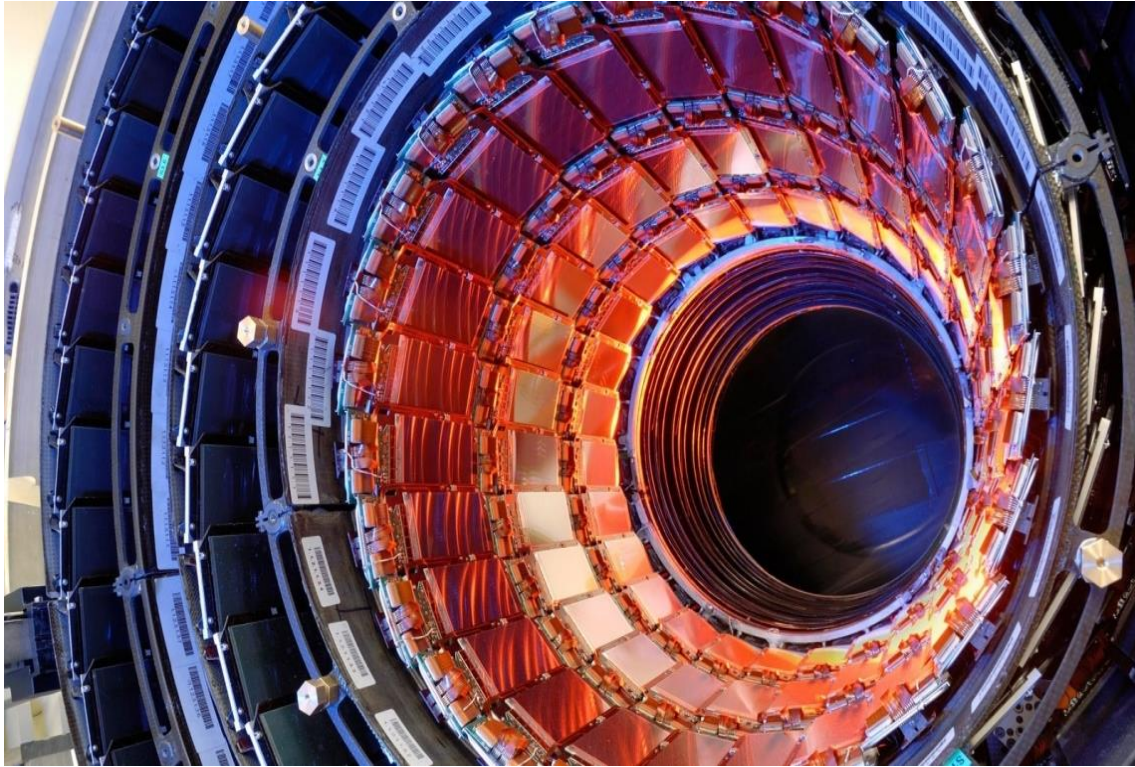
Пикселен детектор на трекове – многослоен полупроводников детектор от тънки пластинки с нанесена върху им електроника

\*\*\***Трек** е следата, която оставя заредена частица при преминаването си през детектор



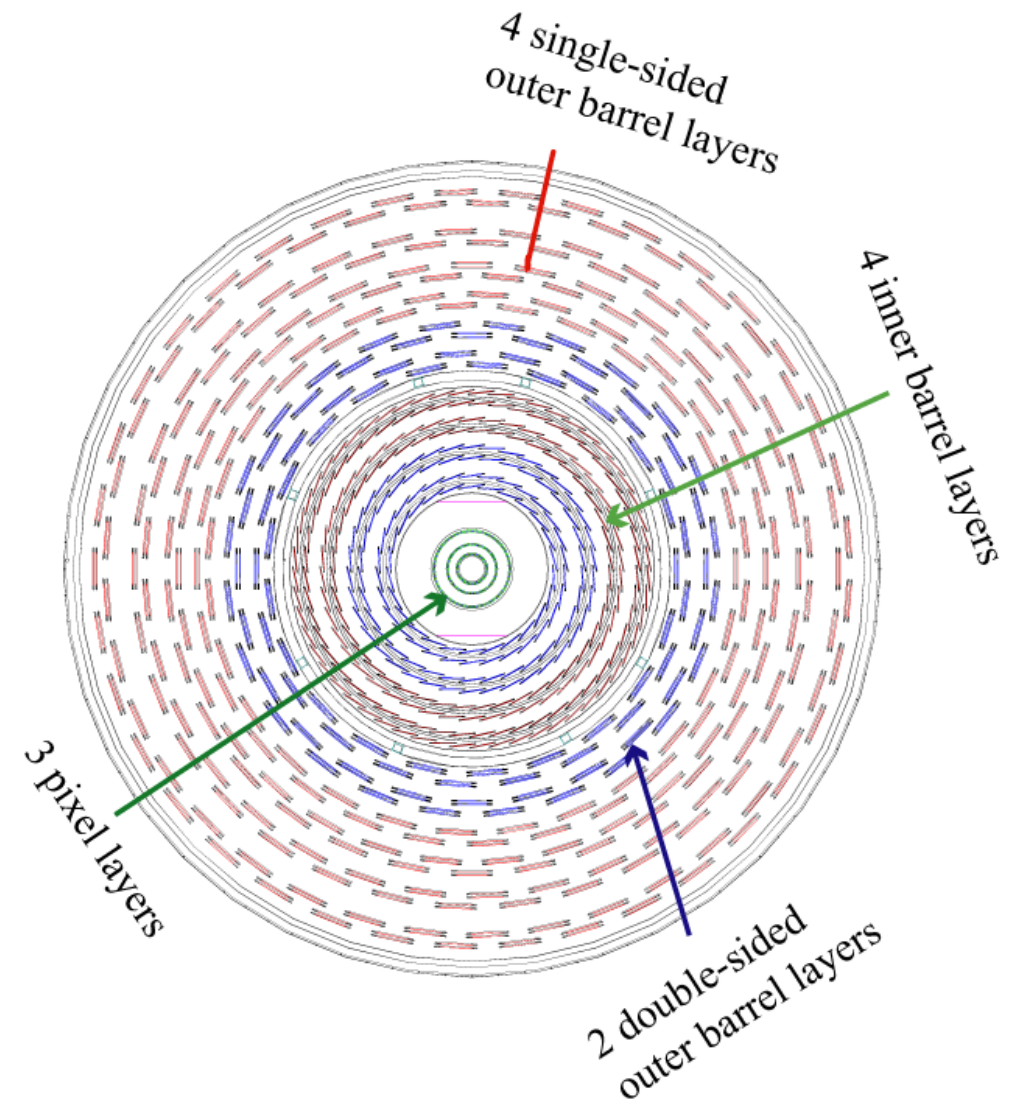
Сигналите от вътрешния треков детектор, позволяват да се реконструират техните траектории. Големината на закривяване на техните траектории позволяват определянето на техния импулс по формулата  $r \sim p/B$ , където  $r$  [m] е радиусът на кривината,  $p$  [GeV/c] – импулсът на електрона, а  $B$  [T] е магнитното поле.

# Определяне на импулс и заряд – Вътрешен треков детектор



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

15k silicon modules containing 76M pixels + strips



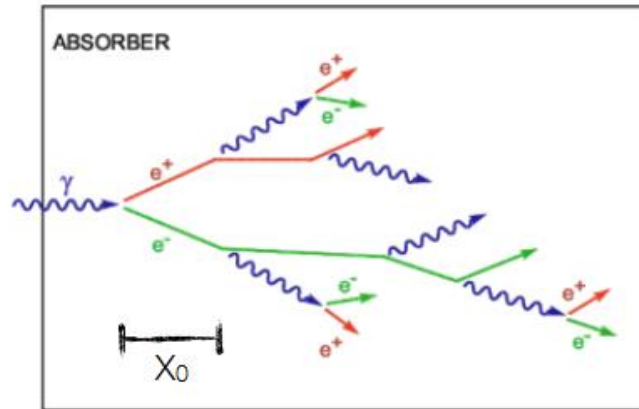
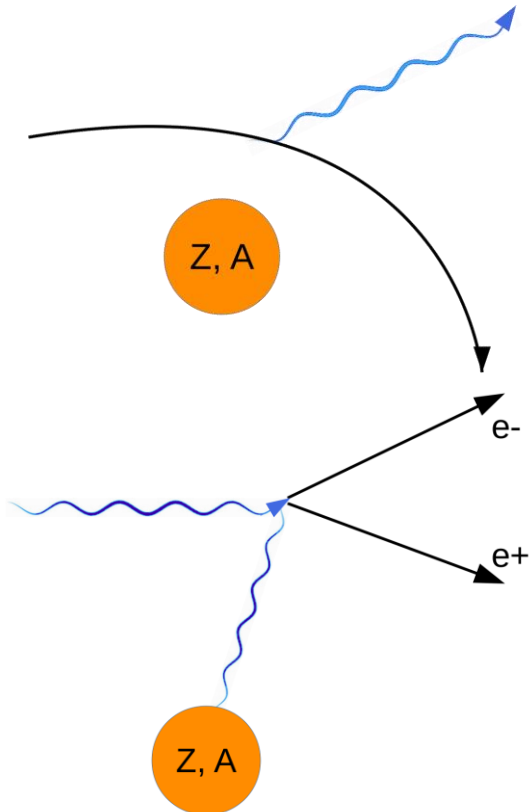


# Детектиране на електрони, позитрони и фотони

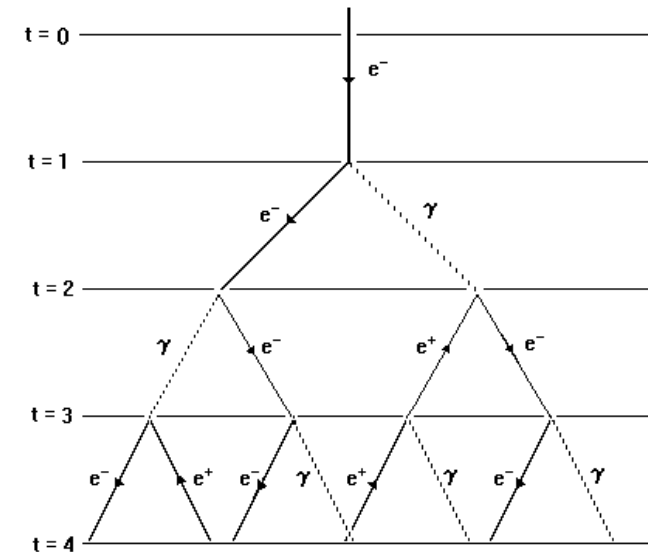
## Електромагнитна лавина във вещество

Два процеса на загуба на енергия в плътна среда за  $e^\pm$  с  $E > 1 \text{ GeV}$  или фотони:

- излъчване на фотон от заредена частица (примерно  $e^+$  или  $e^-$ ) при движение в полето на ядро от средата
- раждане на  $e^+e^-$  двойки от фотон, в полето на ядро от средата



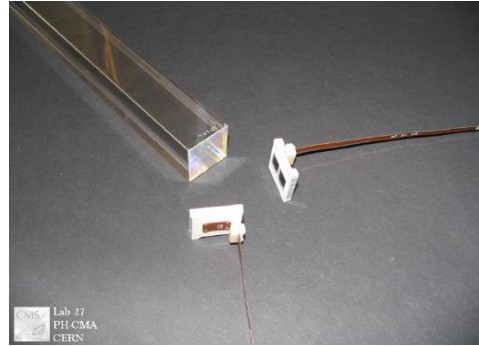
Енергията на частицата, иницирала лавината е пропорционална на броя изсветени фотони



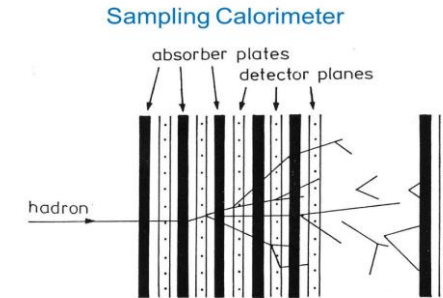


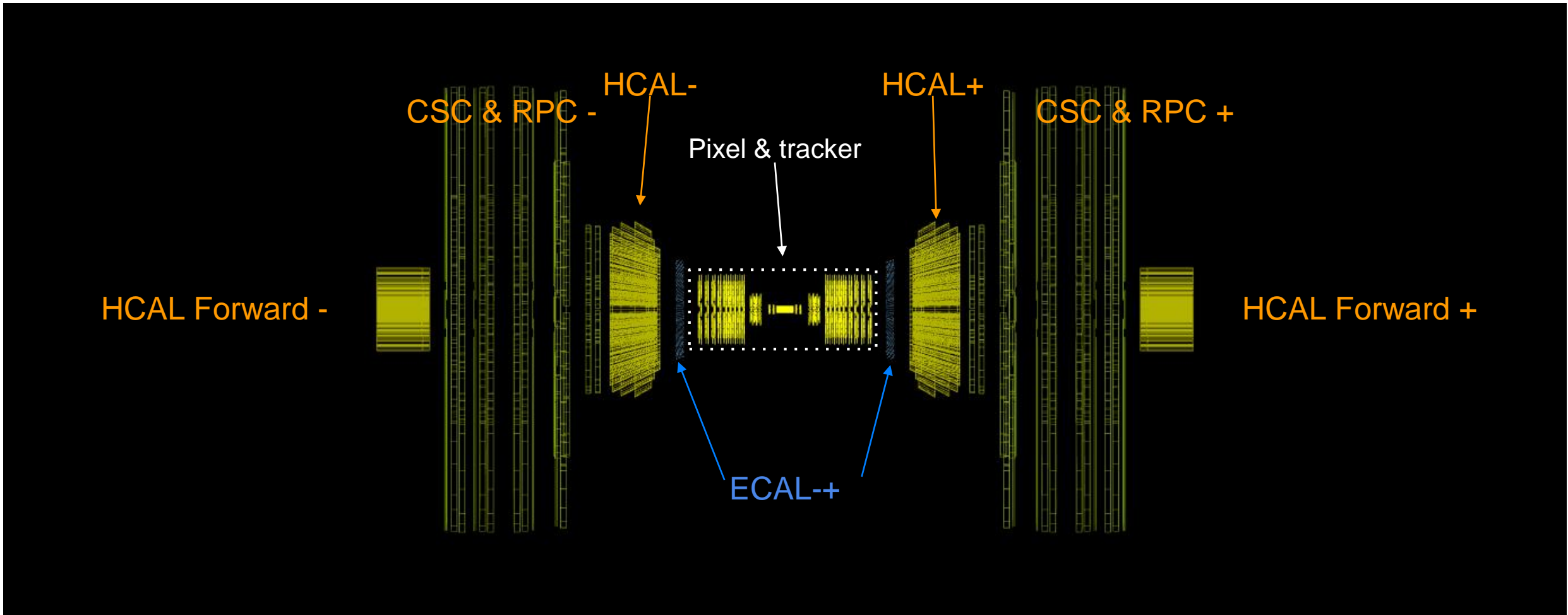
## ECAL – електромагнитен калориметър на CMS

Кристал от оловен волфрамат и лавинни фотодиоди, използвани в ECAL на CMS



## HCAL – адронен калориметър на CMS



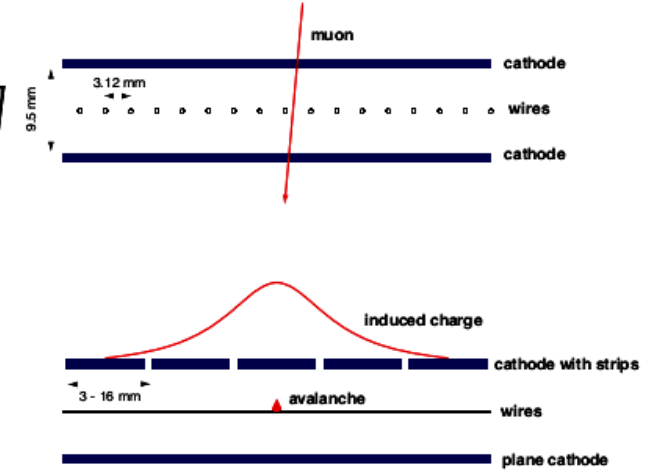
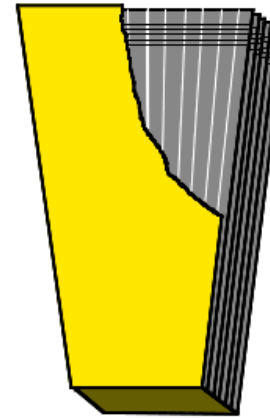
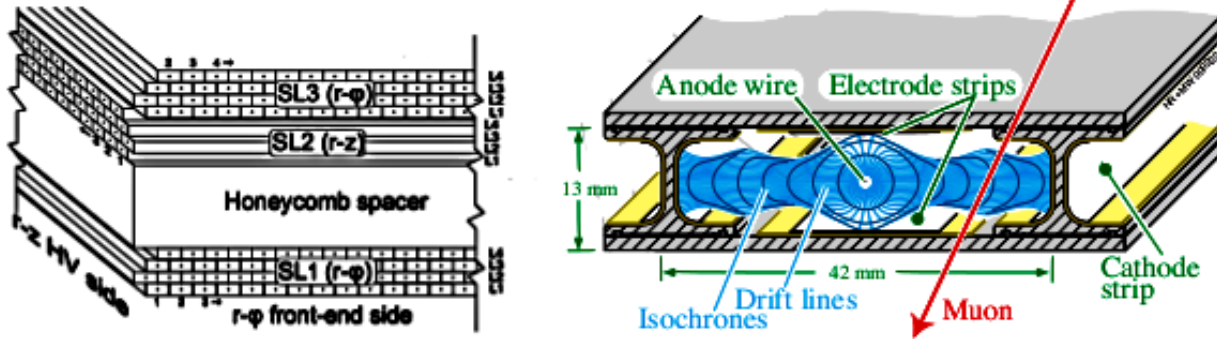


Забележка: не са показани всички детекторни слоеве, за да не се претрупва фигурата.

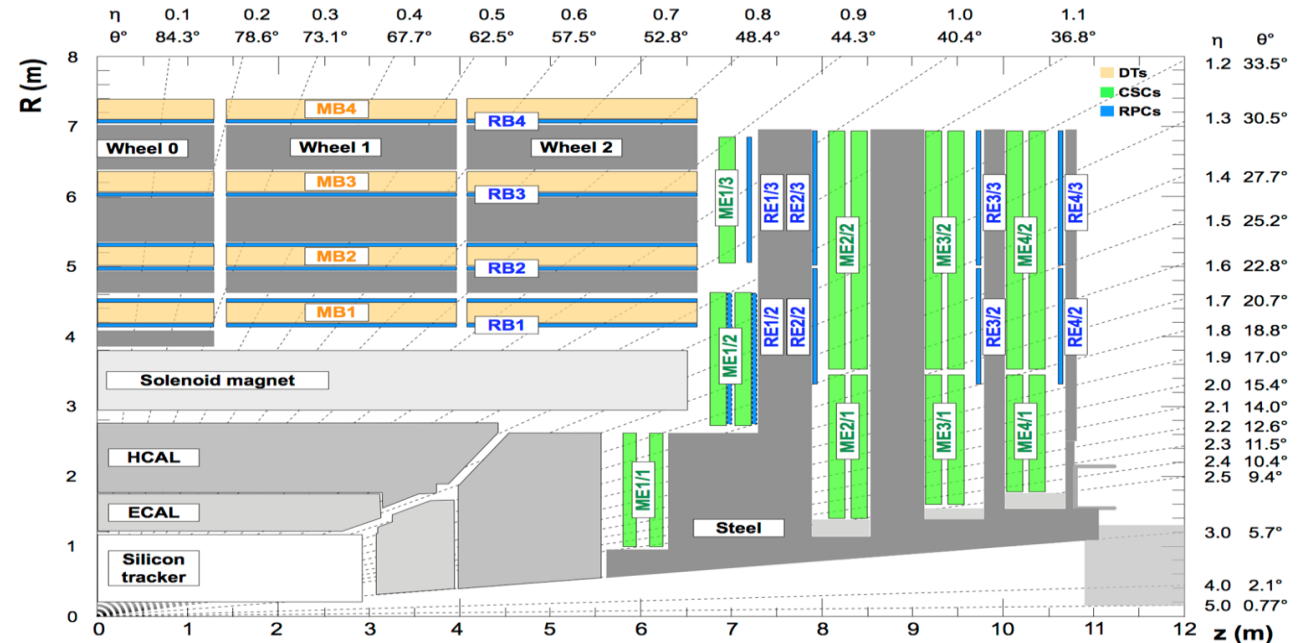
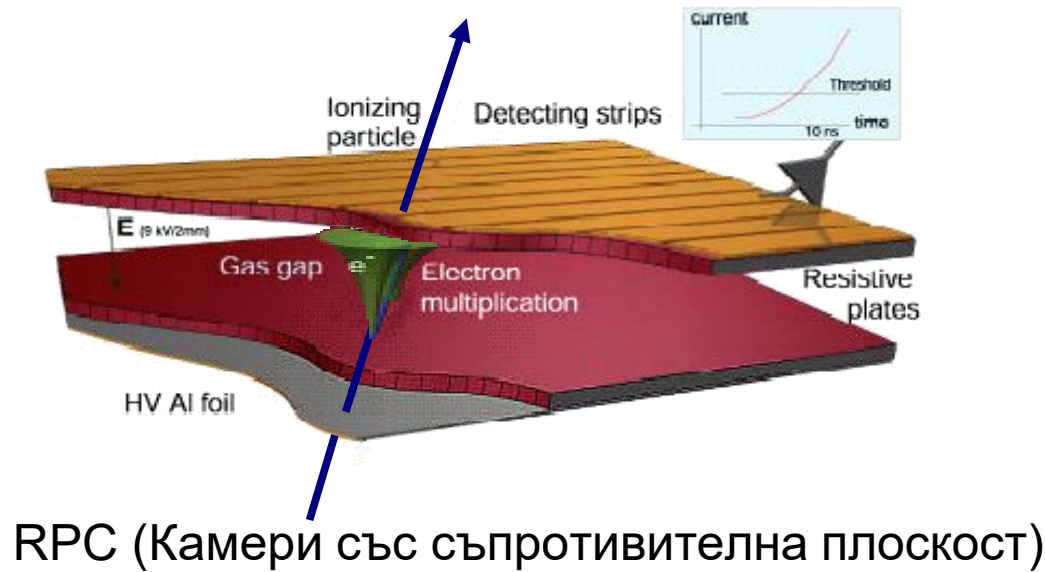


# Мюонна система на CMS (Run1 & Run2)

DT (Камери с дрейфови тръби)

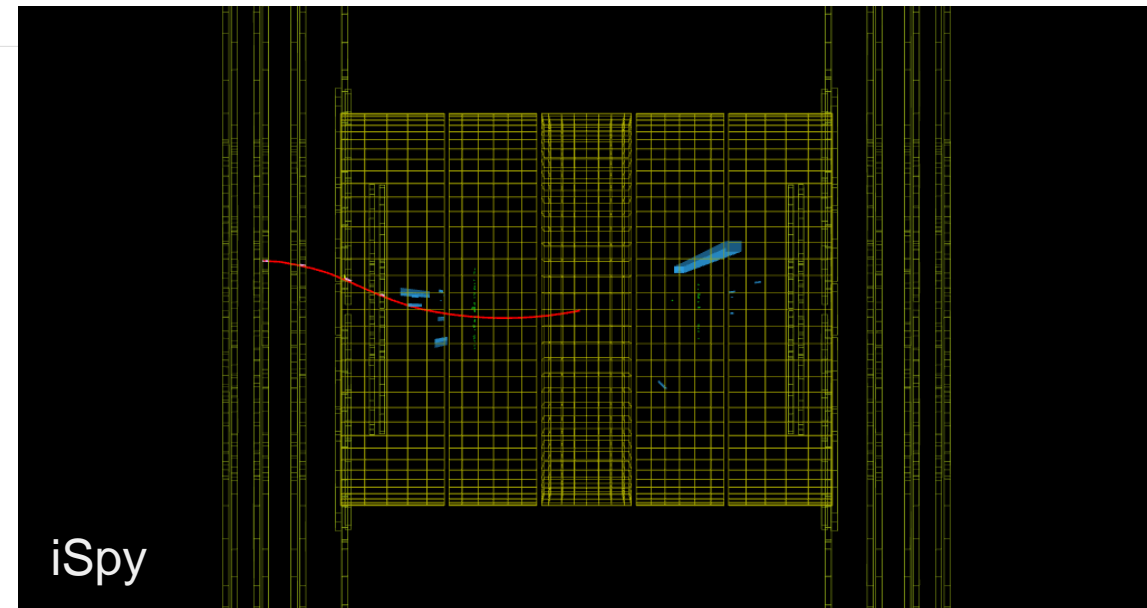
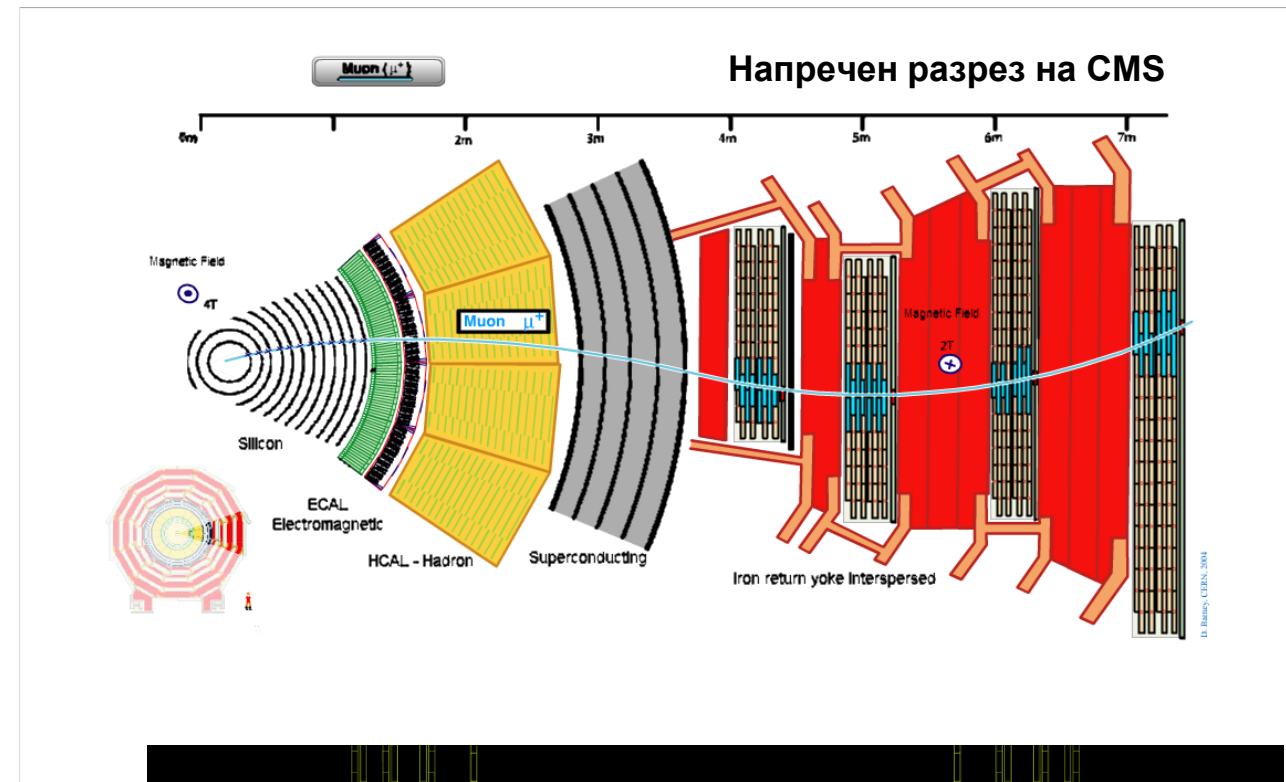


CSC (Катодно стрипови камери)

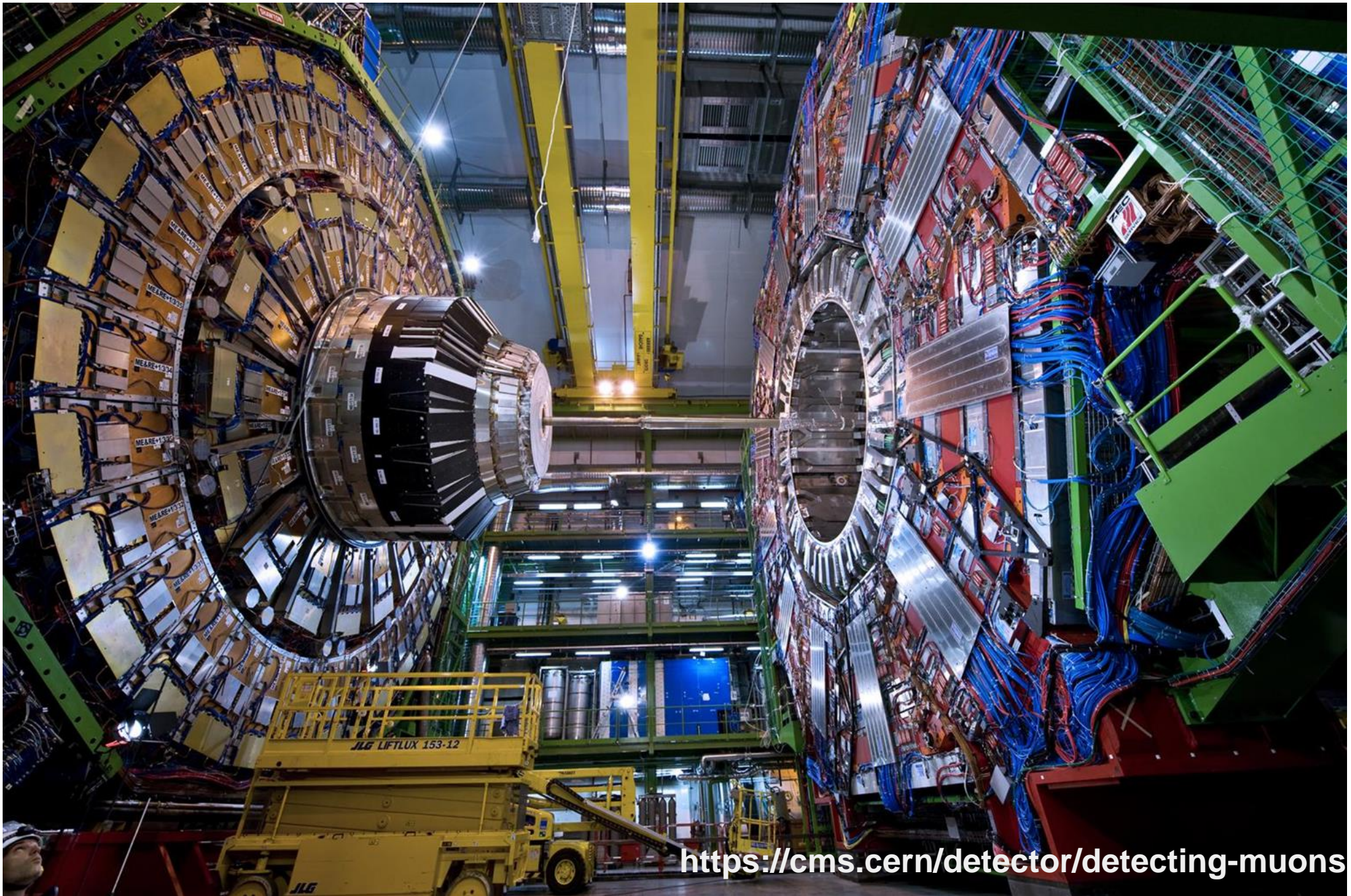


# Регистриране на мюон

- Сигнали във вътрешния треков детектор и в мюонните камери;
- Почти не се наблюдават взаимодействия в калориметричната система;
- Имат електрически заряд и техните траектории се изкривяват в магнитното поле - измерване на импулс и определяне на заряд;
- Голяма проникваща способност, преминават през магнита и целия детектор;
- Раждат се в резултат от разпадането на по-тежки частици и носят информация за случването на интересни събития – примерно раждане и разпад на Хигс бозон.

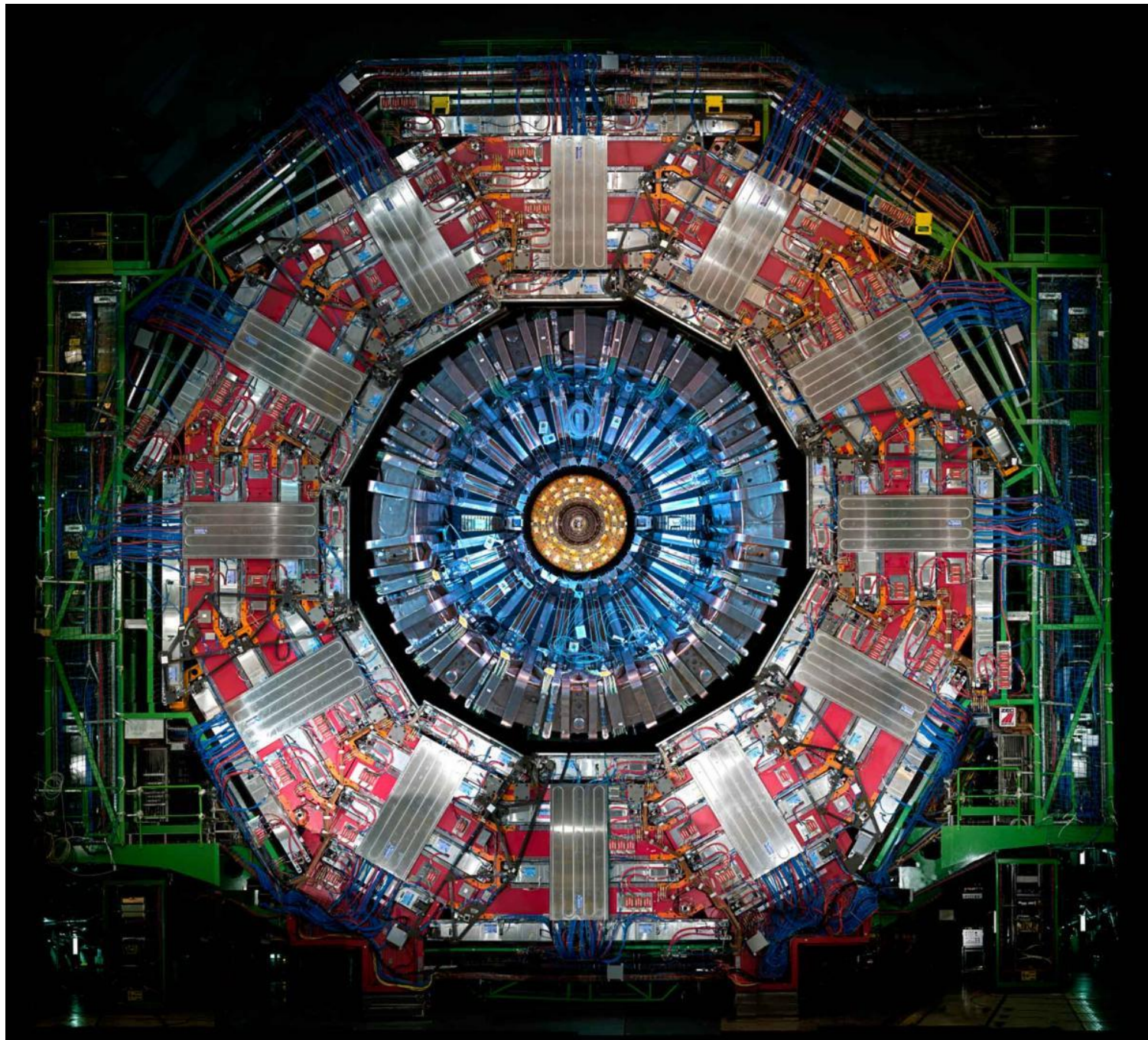






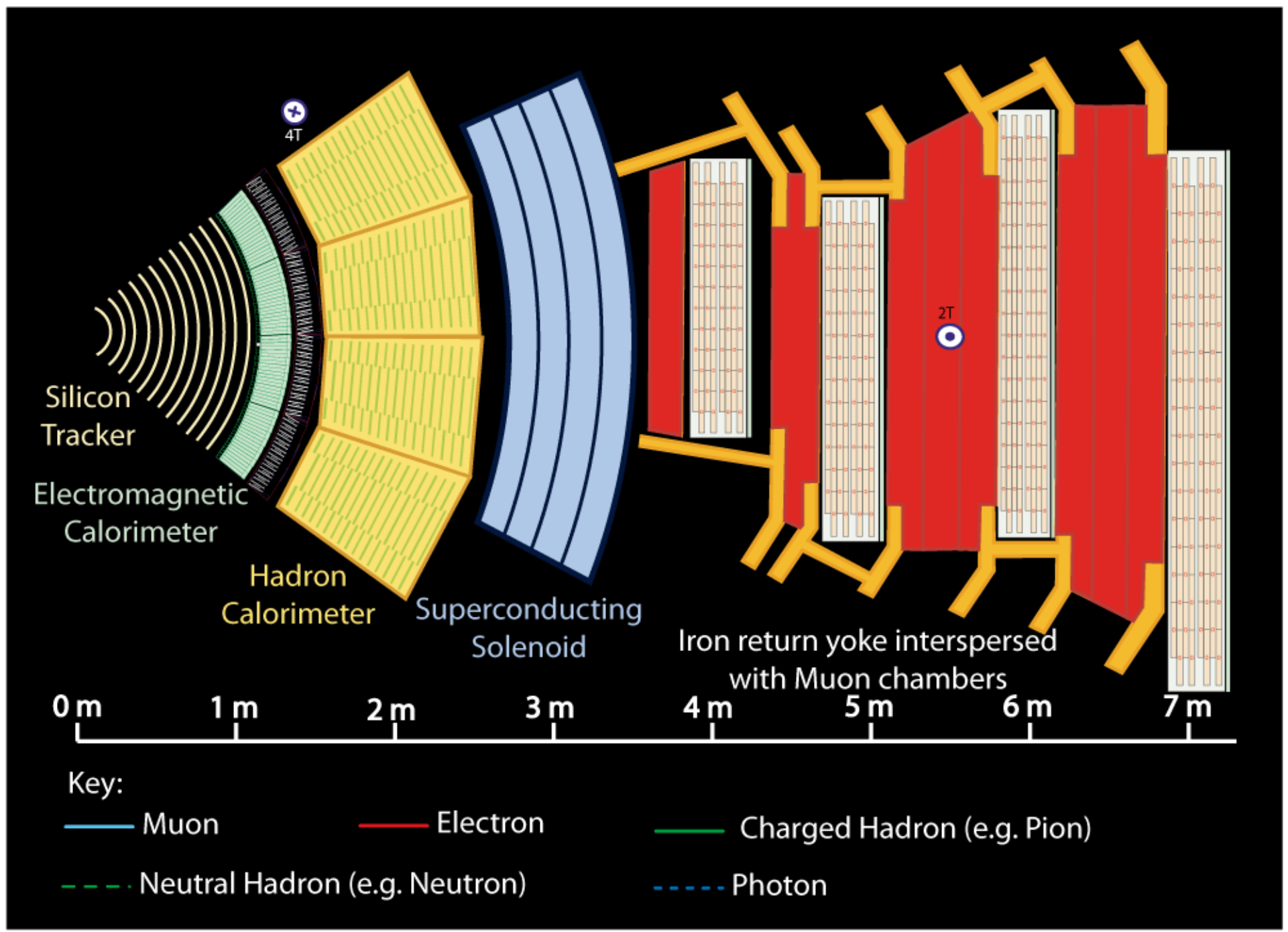
<https://cms.cern/detector/detecting-muons>

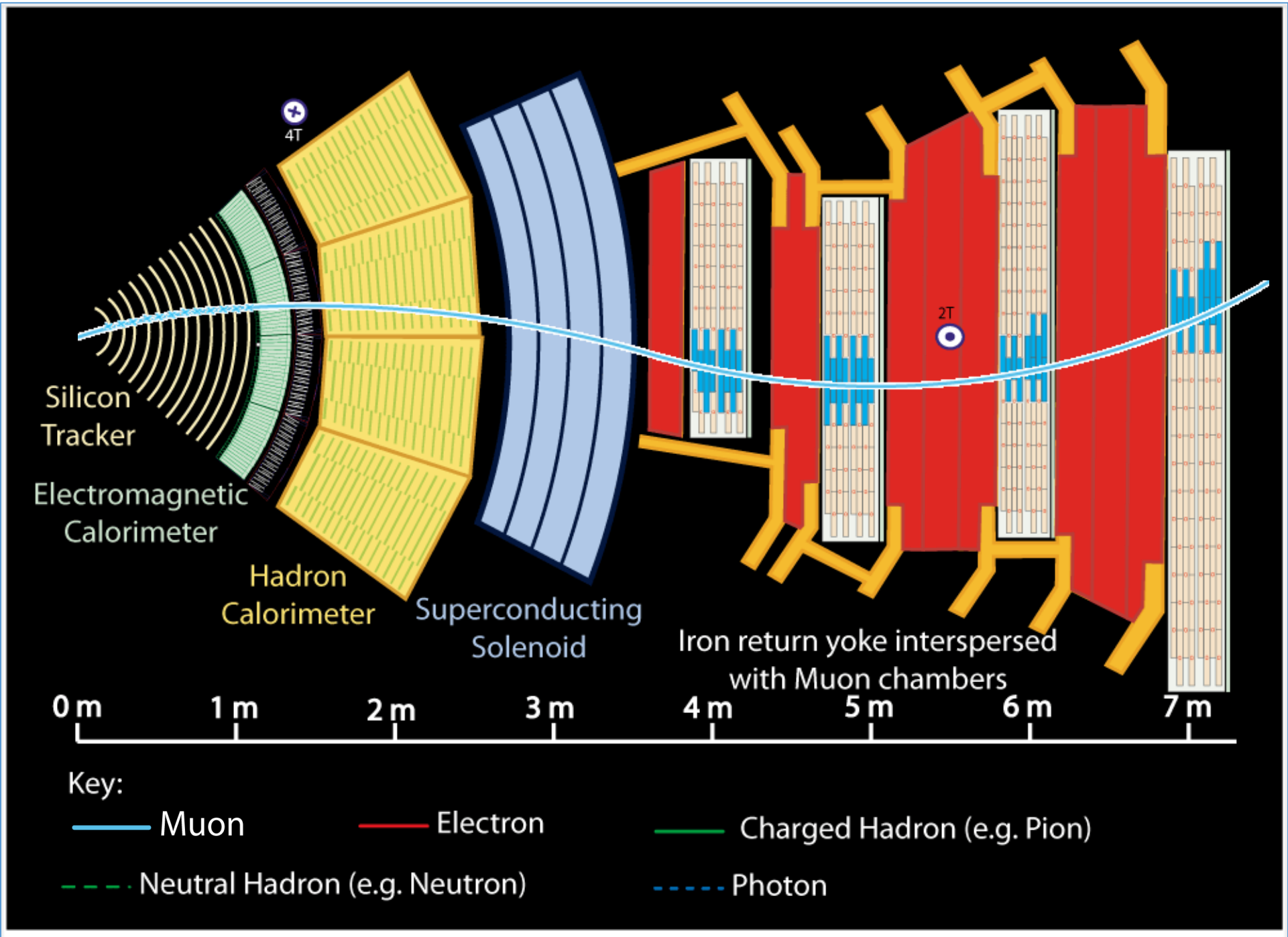


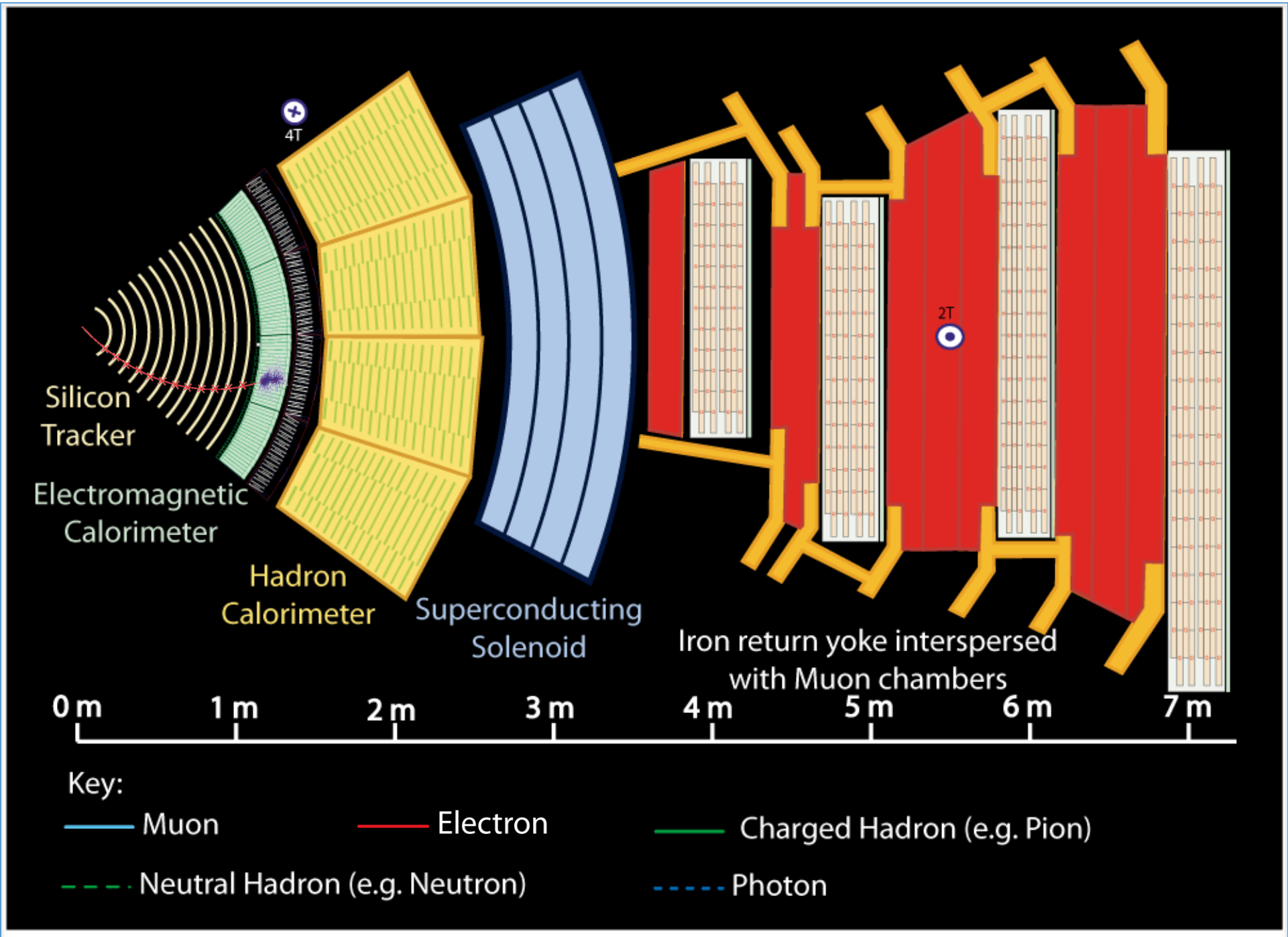


**Как се регистрират частици със CMS**









4T

Silicon Tracker

Electromagnetic Calorimeter

Hadron Calorimeter

Superconducting Solenoid

Iron return yoke interspersed with Muon chambers

2T

0 m 1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m

Key:

— Muon

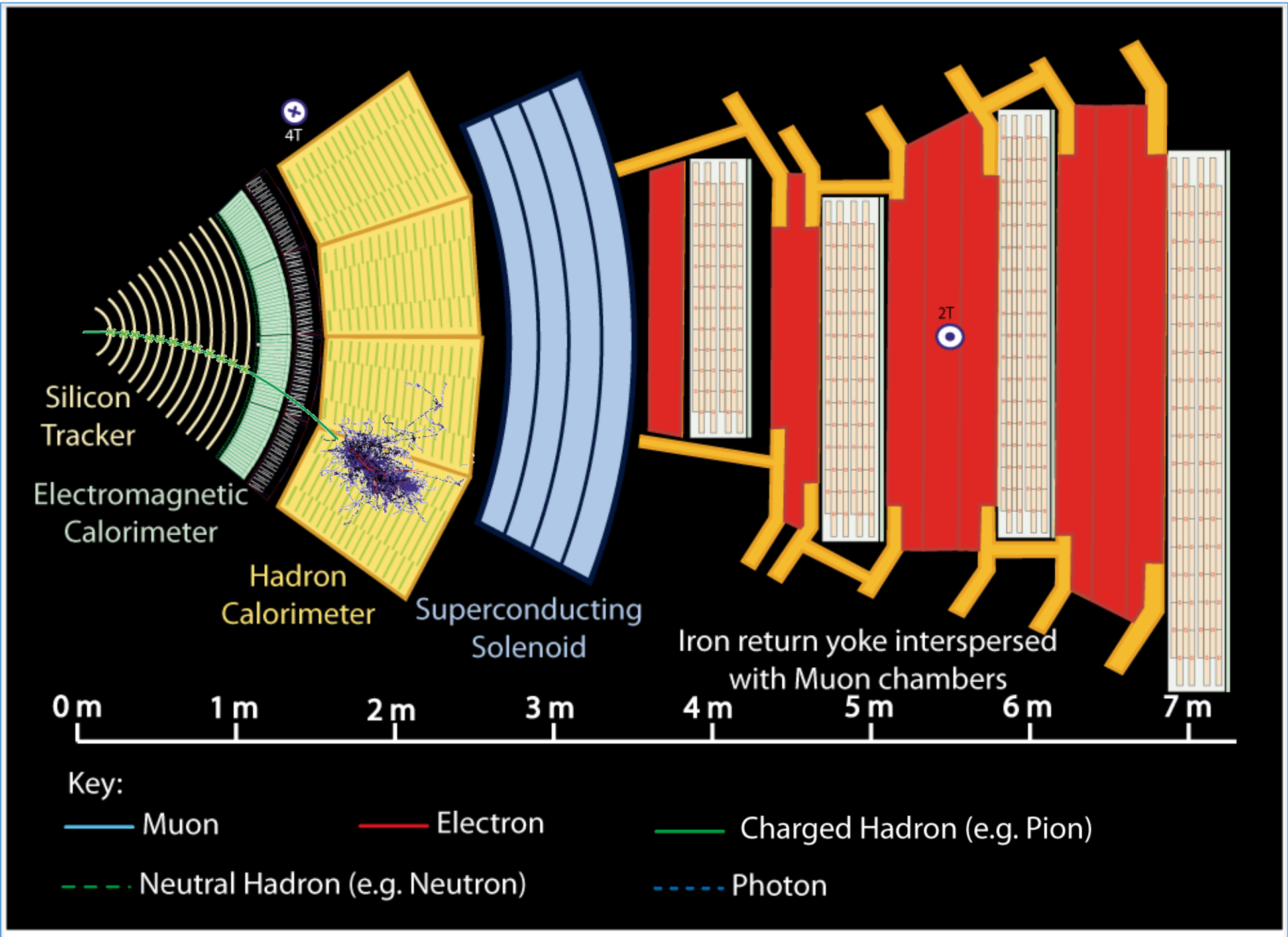
— Electron

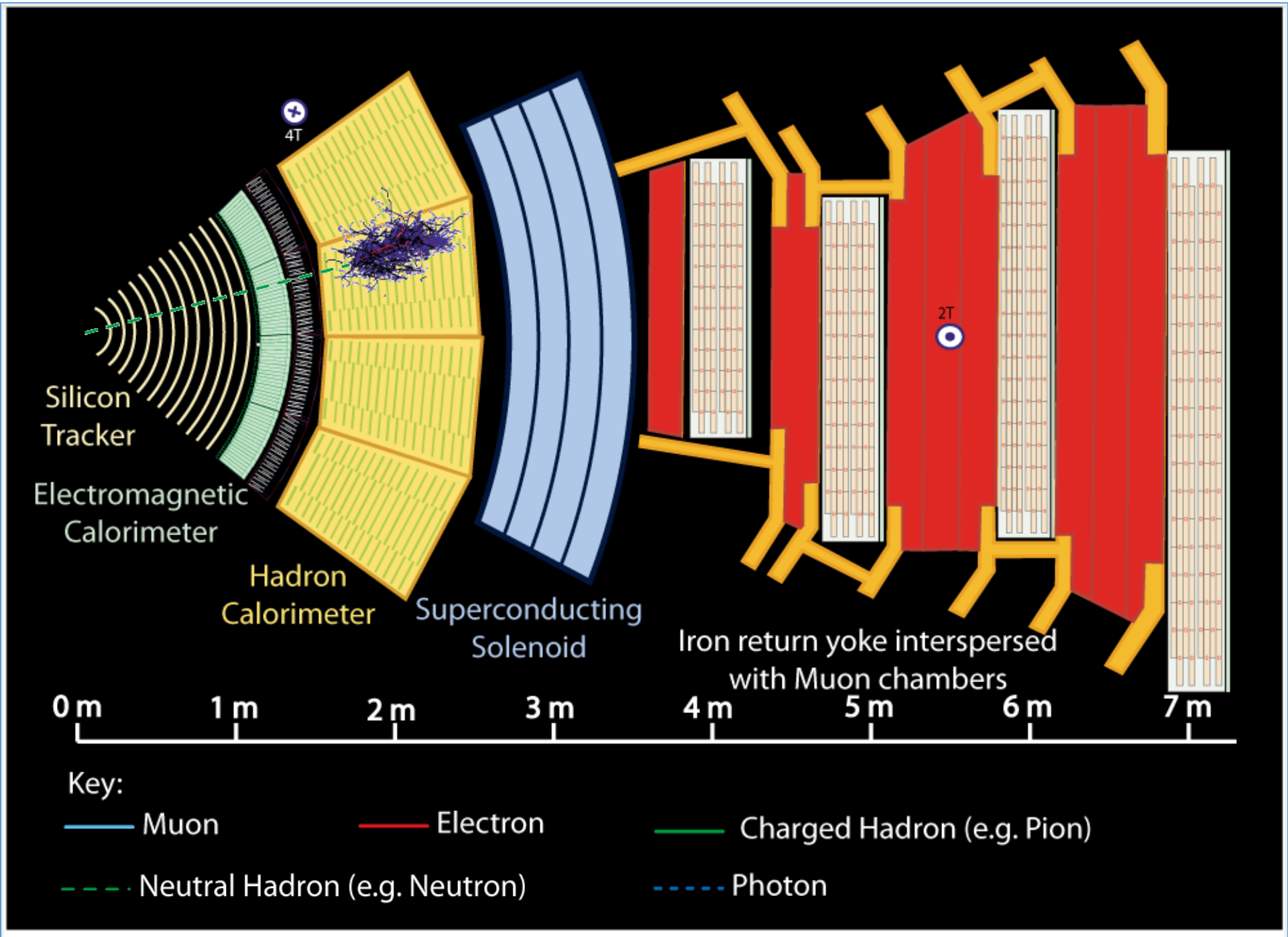
— Charged Hadron (e.g. Pion)

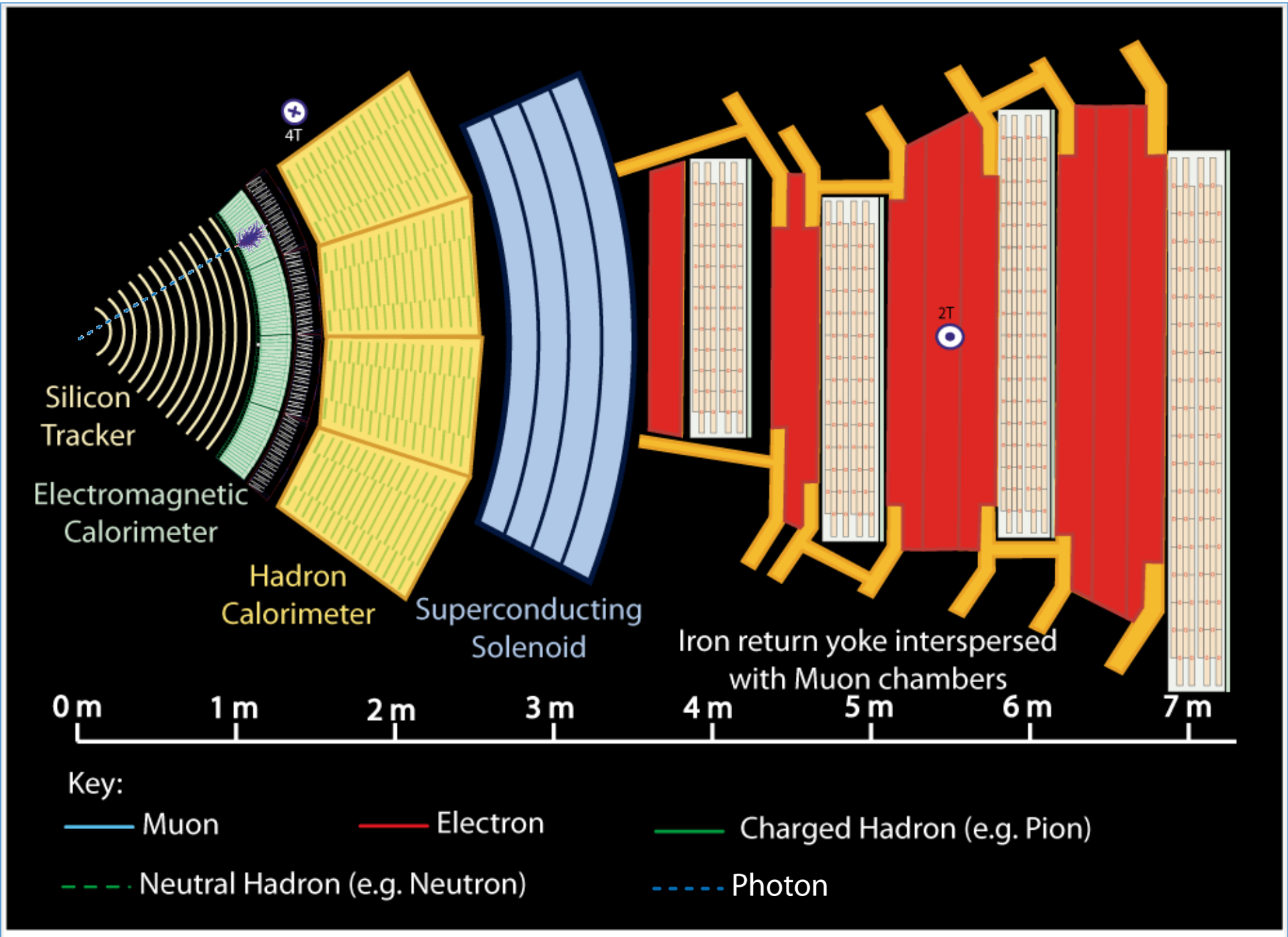
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



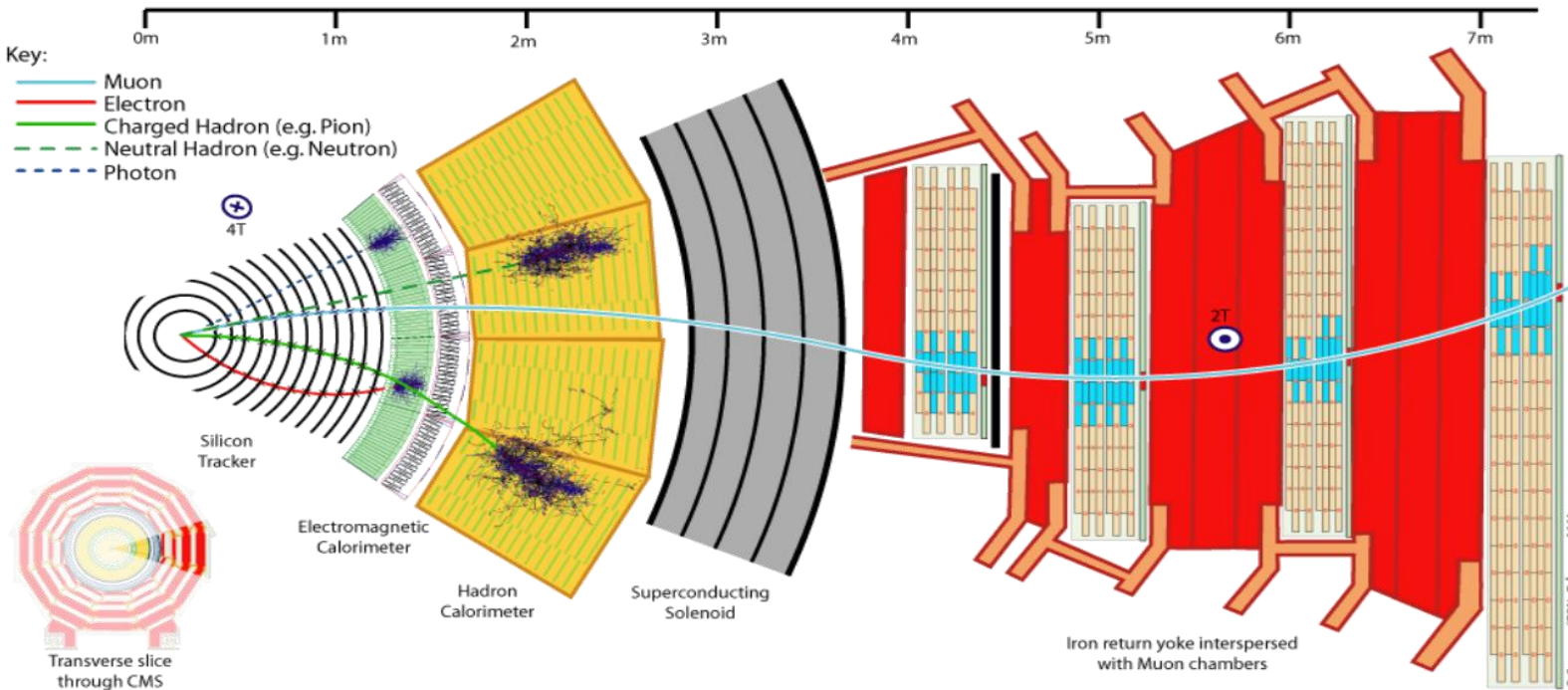








# Как се регистрира частица със CMS



- Силициев детектор:
  - Регистрира попадения на електрически заредени частици.
- Електромагнитен калориметър:
  - Регистрира електрони, позитрони и фотони
  - Те отлагат пълната си енергия в него
- Адронен калориметър
  - Регистрира адрони, които отлагат пълната си енергия в него

- Мюонна система:

- Регистрира електрически заредени частици, преминали през всички останали системи и магнита.
- Ние предполагаваме, че такива могат да бъдат само мюоните.

Комбиниране информацията от отделните детекторни системи!

# Липсваща енергия

- Частици, които не могат да бъдат регистрирани с нашия детектор
  - Неутрино - трябва ни много по-голям детектор
  - Частици, които не познаваме
- Но ние може да направим оценка какво количество енергия или импулс са отнесли тези частици!

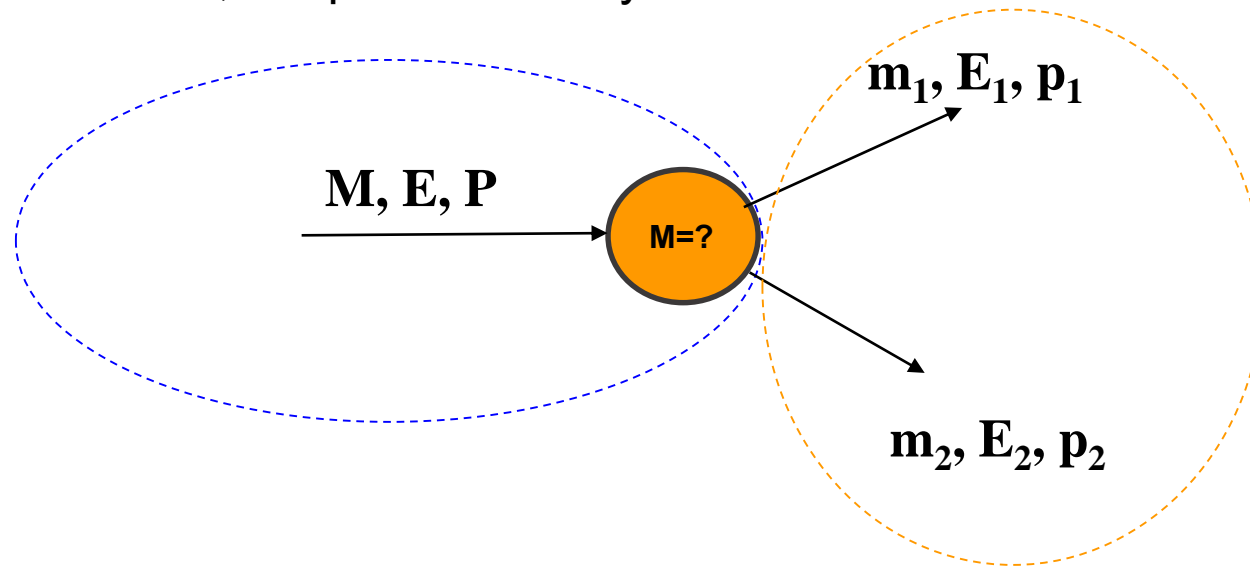
Величината, която ще използваме в нашия анализ се нарича **Missing Energy** и съдържа в себе си сумата от енергиите, отнесени от всички частици, които не сме успели да регистрираме и измерим. А също и информация за посоката, в която е отнесена тази енергия.

- Забележете, липсващата енергия може да е отнесена от повече от една частица!

# Разпадане на частица → идентифициране

Начално състояние (НЕИЗВЕСТНО):

Частица с маса  $M$ , енергия  $E$  и импулс  $P$



Краино състояние (ИЗВЕСТНО):

Частицата се е разпаднала на две други частици в маси, енергии и импулси, съответно  $m_i, E_i, p_i$ , които са се разлетели една спрямо друга на ъгъл  $\alpha$

Използваме закона за запазване на енергията и импулса.

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 - p_1 \cdot p_2 \cos \alpha)$$

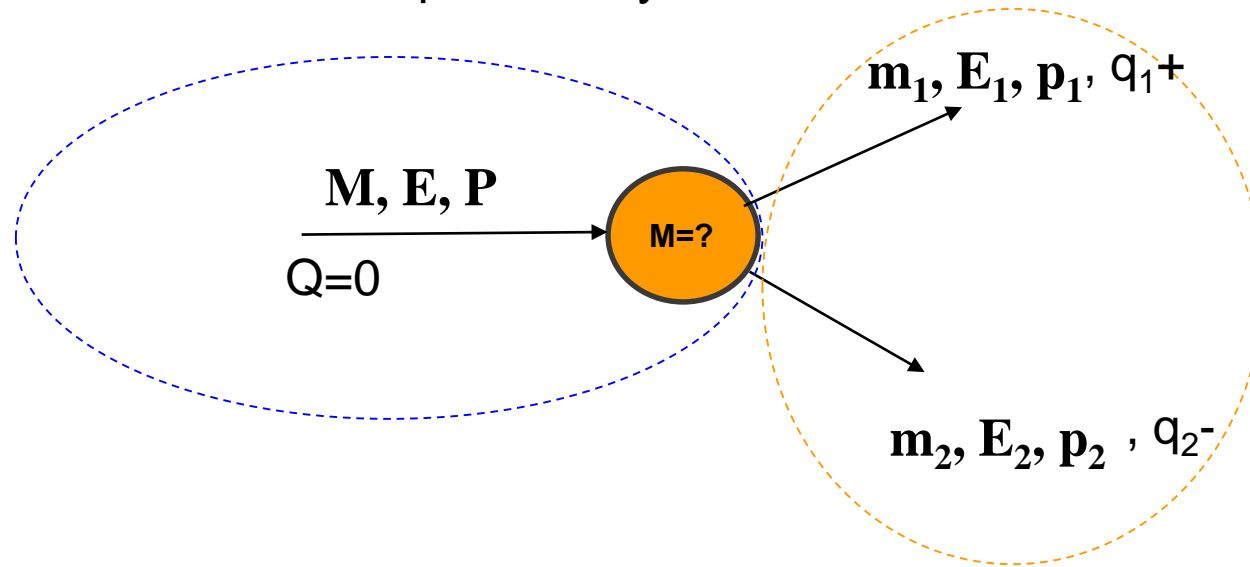
Маса на частицата-майка



# Закон за запазване на електрическия заряд

**Начално състояние:**

Примерно: Частица със заряд  $Q = 0$ .



**Крайно състояние:**

Сборът на електрическите заряди на дъщерните продукти в крайното състояние, трябва да бъде колкото е зарядът в началното състояние.

В конкретния пример трябва да имаме две частици едната с положителен, а другата с отрицателен електрически заряд.

**Теоретична част на практическата задача**

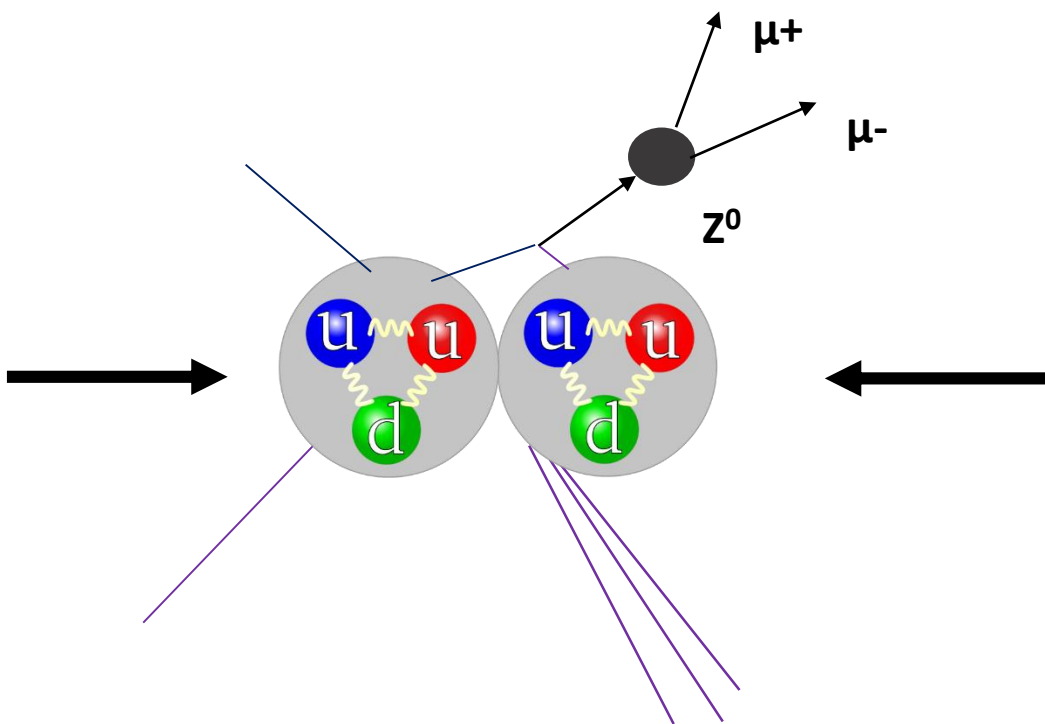
## Цели на практическата част:

- Да се разбере научния процес на анализ на експериментални данни
- Да се направи анализ на реални измервания
- Да се разбере какво се наблюдава (значението на анализираното събитие)
- Да се разбере къде се вписват тези измервания и каква е ролята им за разбиране на познатата ни Вселена

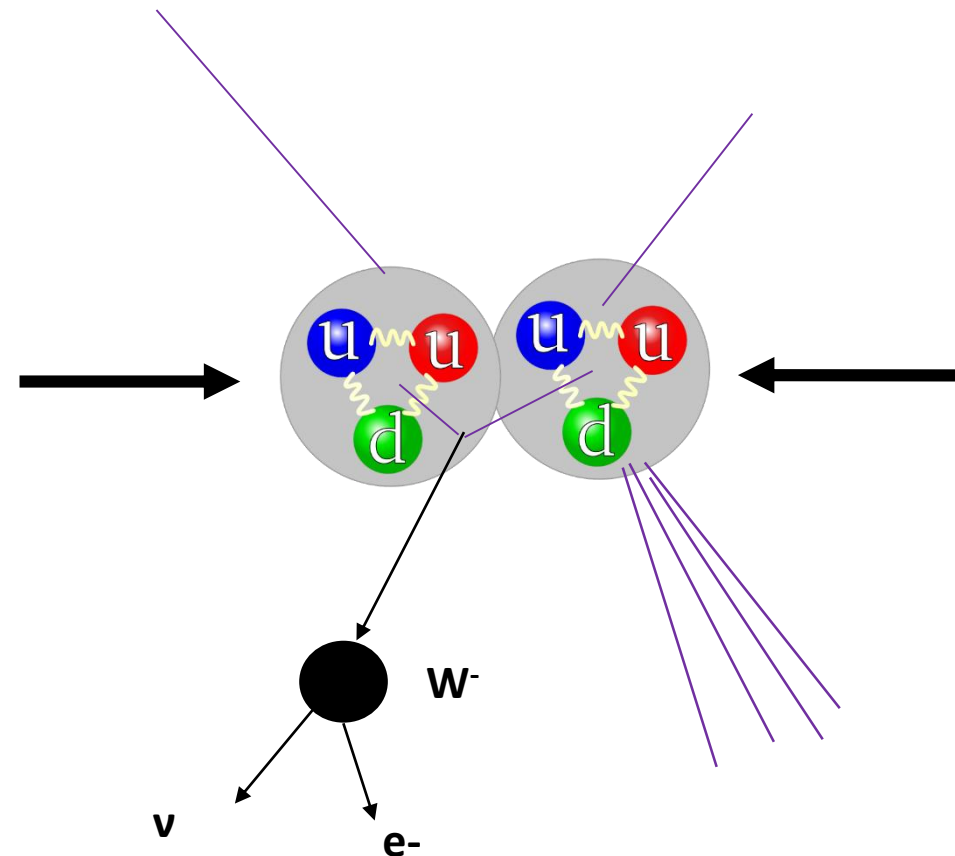


За разлика от електромагнитните сили, които са пренасяни на големи разстояния от безмасовите фотони, **слабите взаимодействия се пренасят от тежки (масивни) частици, което ги ограничава до много малки разстояния.**

Ние търсим **медиаторите на слабите взаимодействия:**  
електрически заредените  **$W^\pm$**  бозони & неутралният  **$Z$**  бозон.



Сблъсъци с достатъчно голяма енергия могат да създадат  $W$  и  $Z$  или други частици.

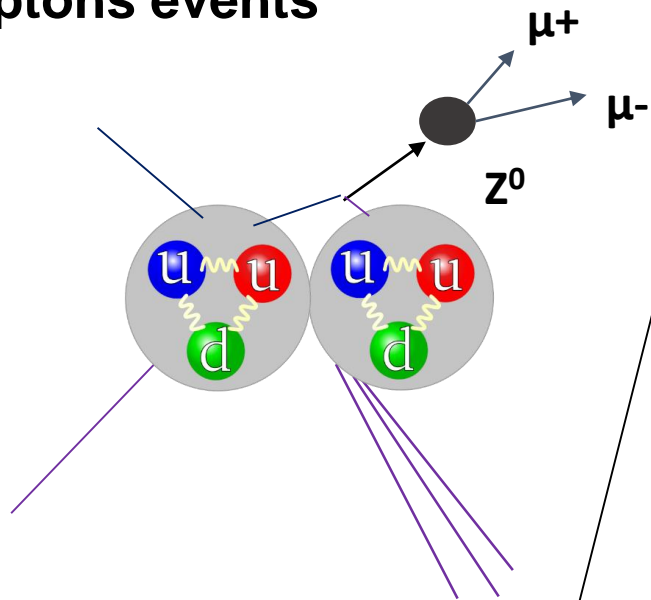


Ще се ограничим само с няколко вида разпада!

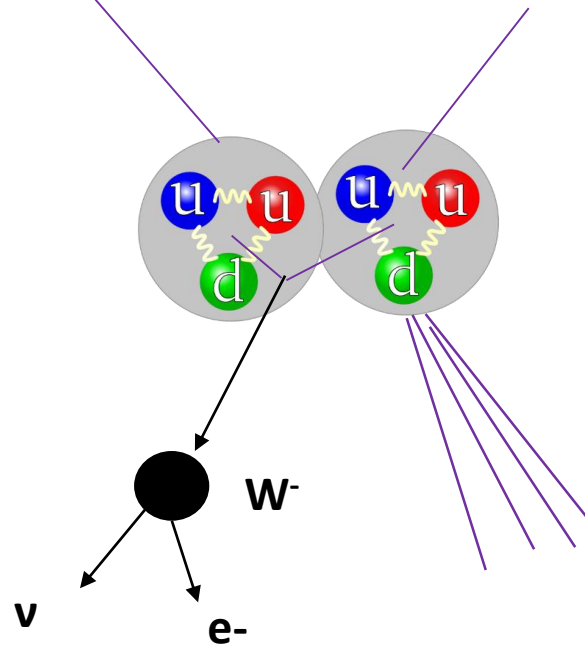
Ще анализираме само събития с един, два или четири лептона  
в крайното състояние.

Ще се ограничим върху събитията с мюони и електрони.

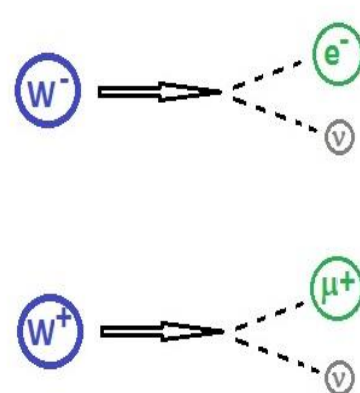
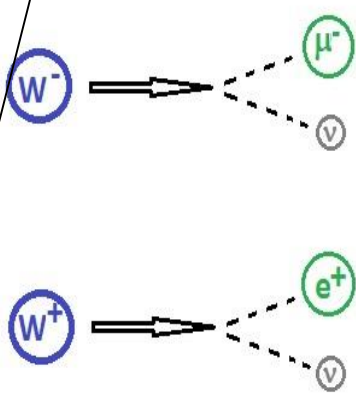
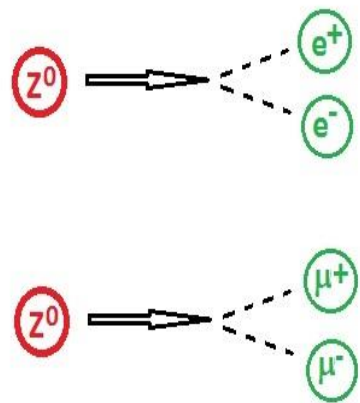
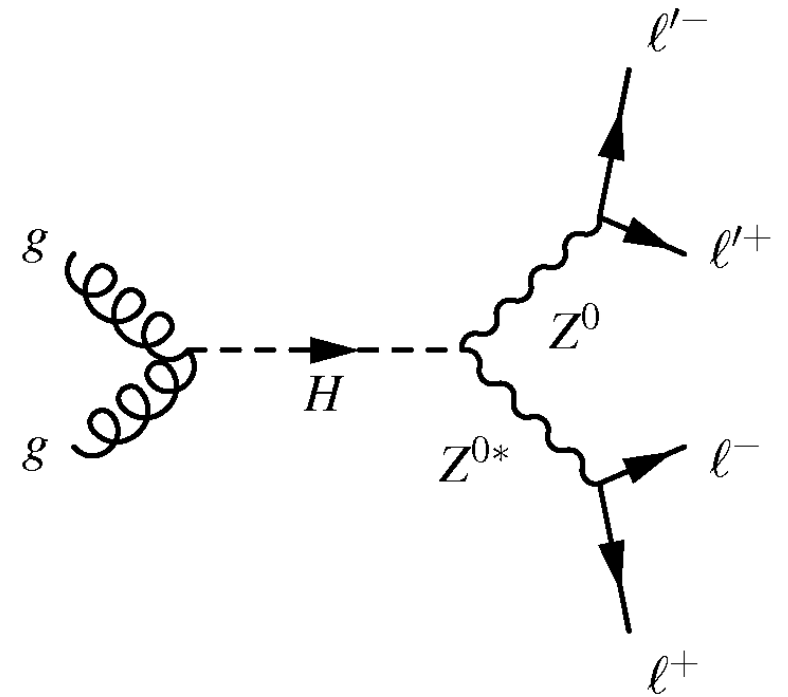
## 2 leptons events



## 1 leptons event



## 4 leptons events



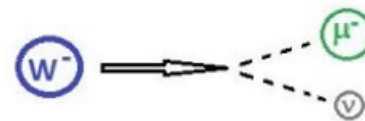
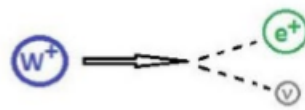
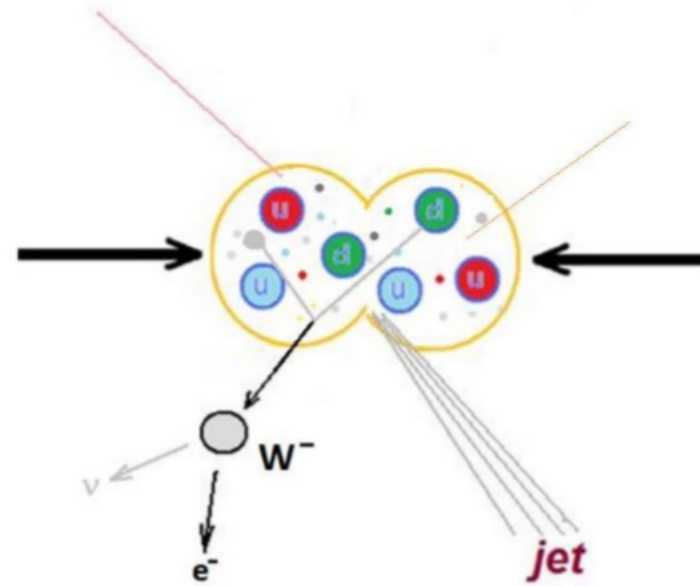
?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$   
 or  
 ?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow (e^+ e^- e^+ e^-)$   
 or  
 ?  $H \rightarrow Z Z \rightarrow (\mu^+ \mu^- e^+ e^-)$



# Събития с 1 лептон в крайното състояние

Положително и отрицателно заряденият  $W$  бозон позволява радиоактивно разпадане чрез превръщане на неутрони в протони.

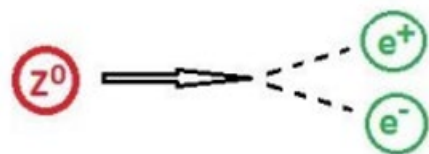
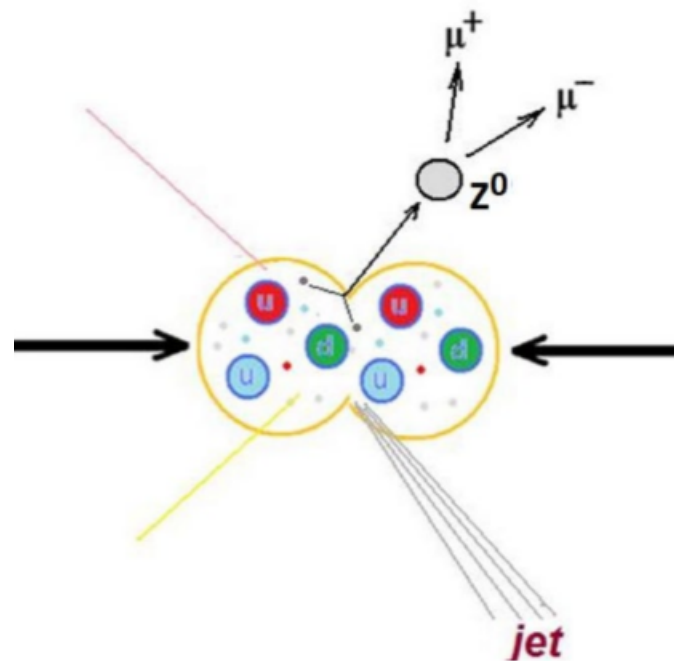
Този бозон се разпада на неутрино и друг лептон. Тъй като CMS не може да измери директно неутриното, може да приемем, че в крайното състояние има само 1 лептон.



# Събития с 2 лептона в крайното състояние

Z бозона е неутралния братовчед на W. Той позволява „слабият неутрален поток“.

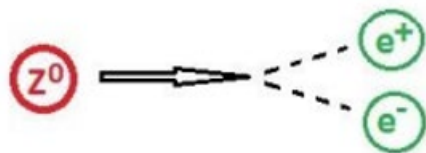
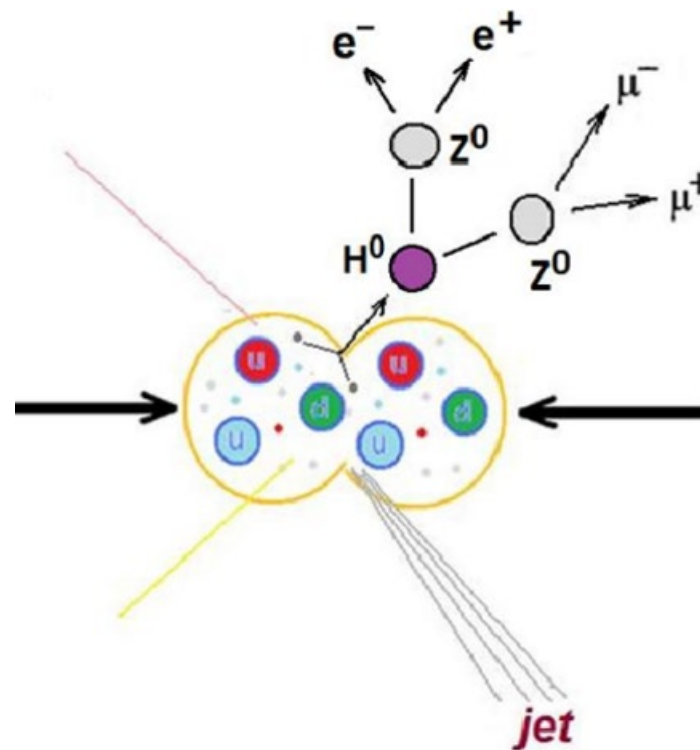
Този бозон се разпада на два лептона от един и същи вид, но с различни заряди – електрон и позитрон или мюон и анти-мюон. Той има и други процеси, по които се разпада, но в това упражнението разглеждаме само тези начини за неговото разпадане.



# Събития с 4 лептона в крайното състояние

Хигс бозона е частицата преносител на полето, което задава масата на всички останали частици.

Един от начините за разпад на Хигс е на два Z бозона, които след това се разпадат по вече разгледаните начини. Така в крайното състояние, което наблюдаваме може да получим 2 мюона и 2 електрона *или* 4 мюона *или* 4 електрона.





# Обобщение

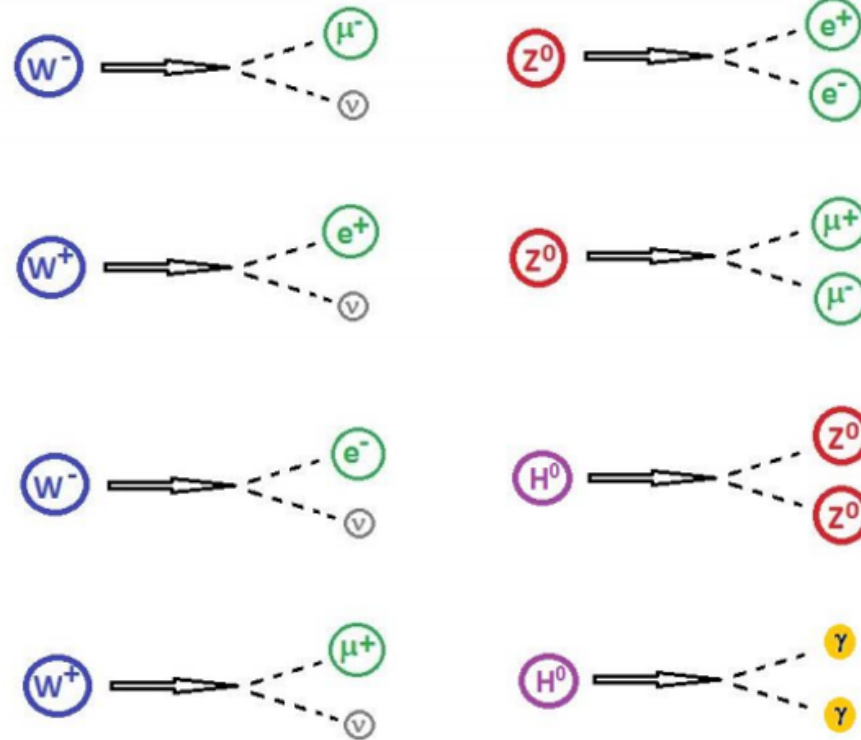
Тъй като бозоните могат да изминат изключително малко разстояние преди да се разпаднат, CMS не може да ги „види“ директно.

**CMS** може да разпознае:

- Електрони
- Мюони
- Фотони

**CMS** може да определи:

- Нейтроните по „липсващата енергия“



# Разпади на елементарни частици, разгледани в този урок

$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu$$

$$W^+ \rightarrow e^+ \nu$$

$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$$

$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}$$

Събития с 1 лептон в крайното състояние

$X^0$  - електрически неутрална частица  
Може да бъде Хигс бозон или Z бозон или друга частица

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2\mu)$$

$$X^0 \rightarrow e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2e)$$

Събития с 2 лептона в крайното състояние

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 4\mu)$$

$$X^0 \rightarrow e^+ e^- e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 4e)$$

Събития с 4 лептона в крайното състояние

$$X^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- e^+ e^- \quad (\text{или } X^0 \rightarrow 2\mu 2e)$$

$$? \rightarrow Z \text{ or } \dots$$

Събития, които не асоциираме с нито една от горните схеми

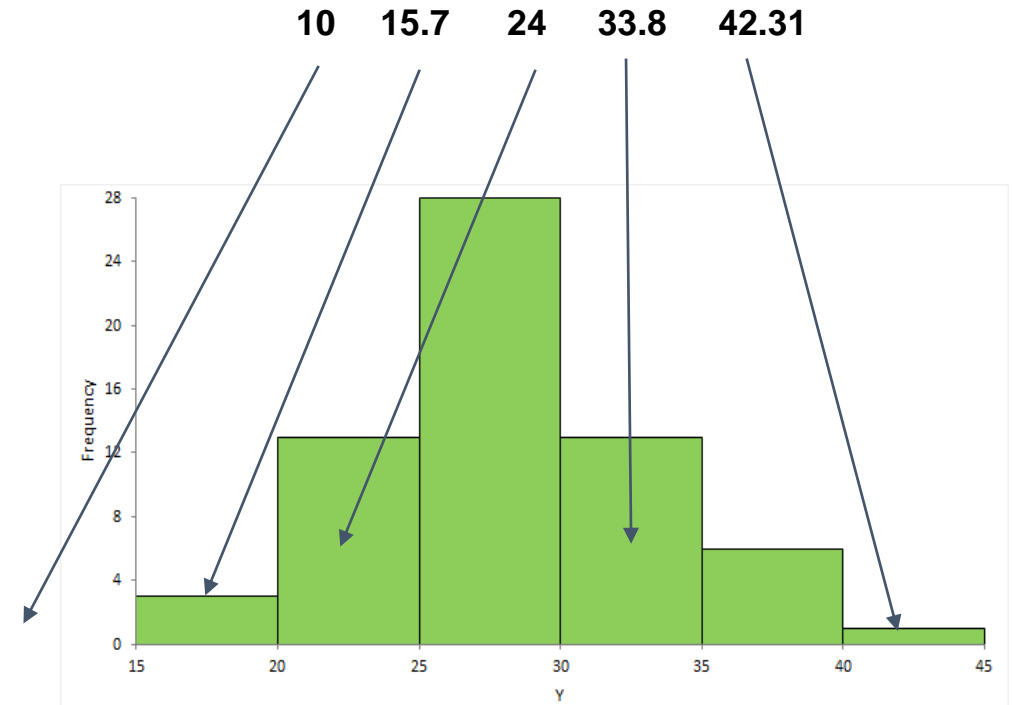
# Достатъчно ли е само едно измерване?

**Едно събитие (event) не е достатъчно.**

- То може да бъде случайно.
- Освен това различните частици се раждат с различна вероятност.
- Колкото по-рядко се ражда една частица, толкова по-голям брой събития е необходимо да анализираме за да я открием.

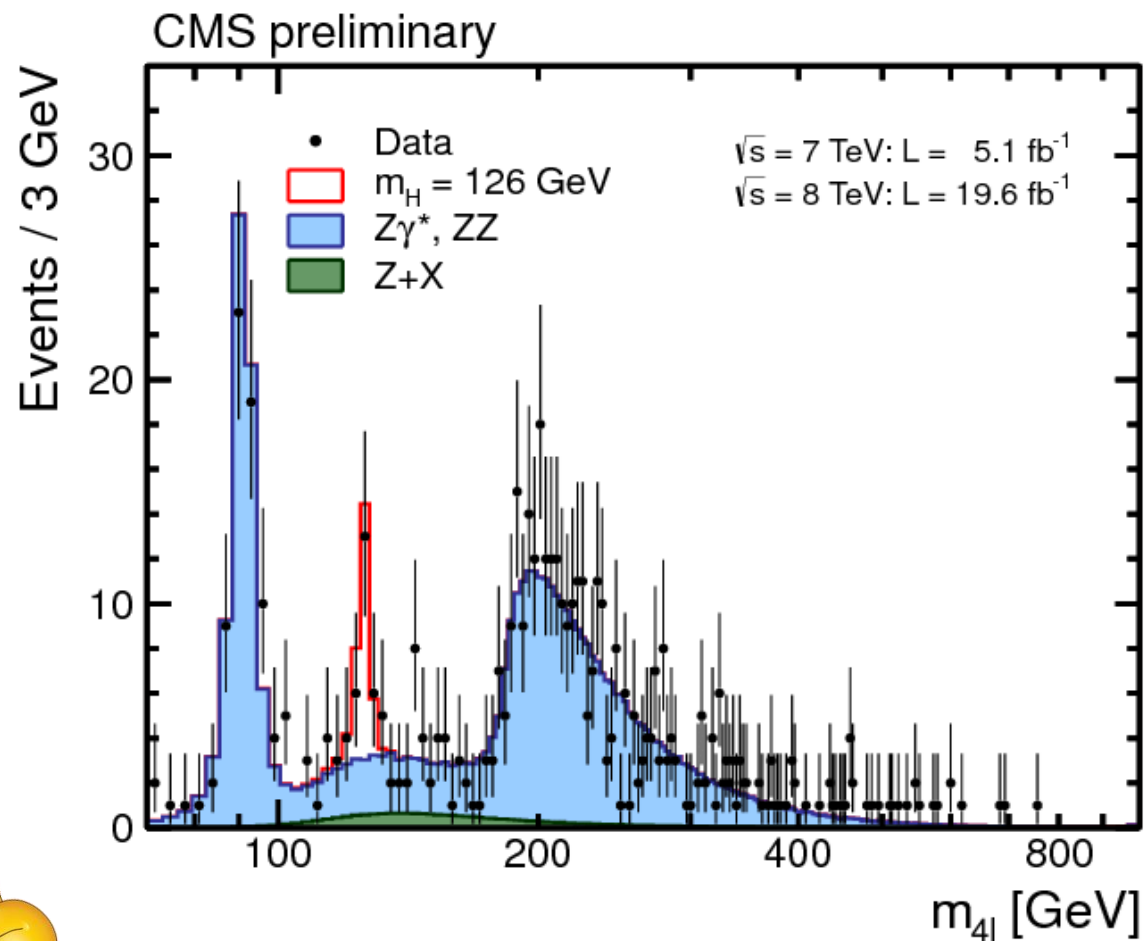
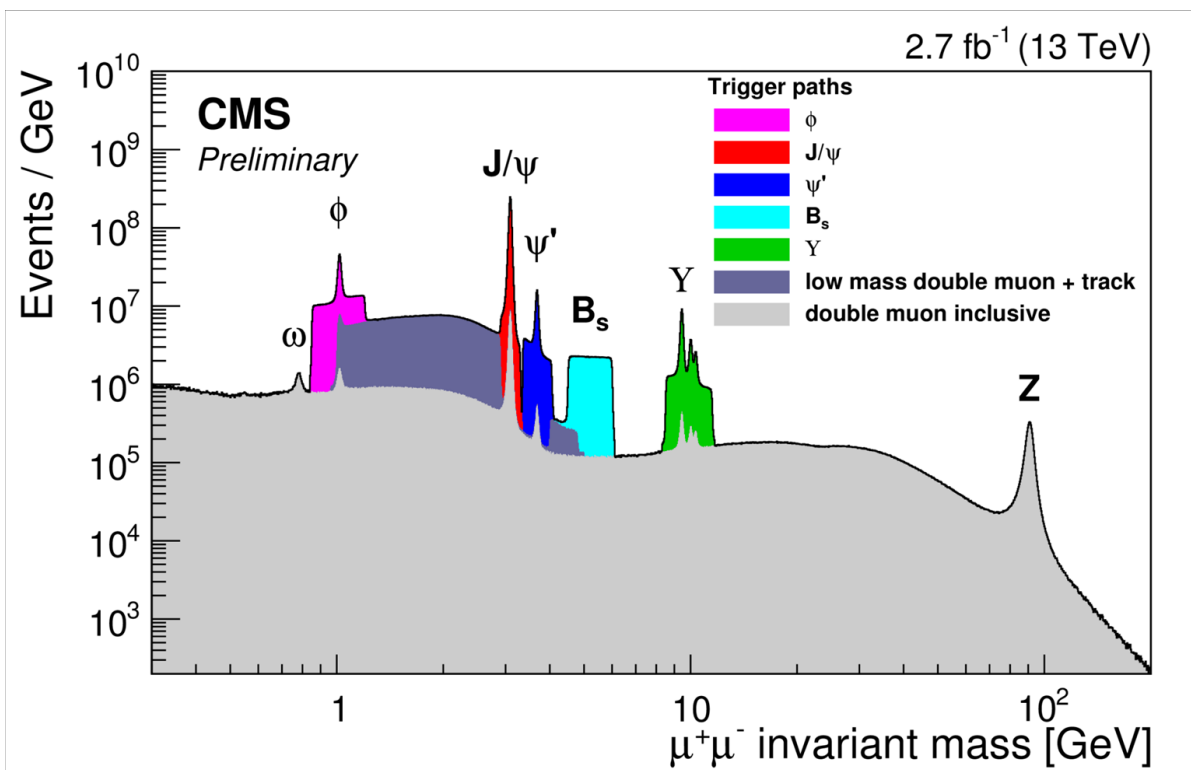
Хистограмата ни показва с каква честота (колко често) се случва дадено събитие.

- В нашия случай - как са разпределени масите на частиците, които сме определили.
- Наличието на пик в хистограмата е указание за частица с маса, равна на стойността, при която имаме пик.



Хистограма

# Пример за разпределение по инвариантна маса на дву- и четири лептонни събития с данни на CMS



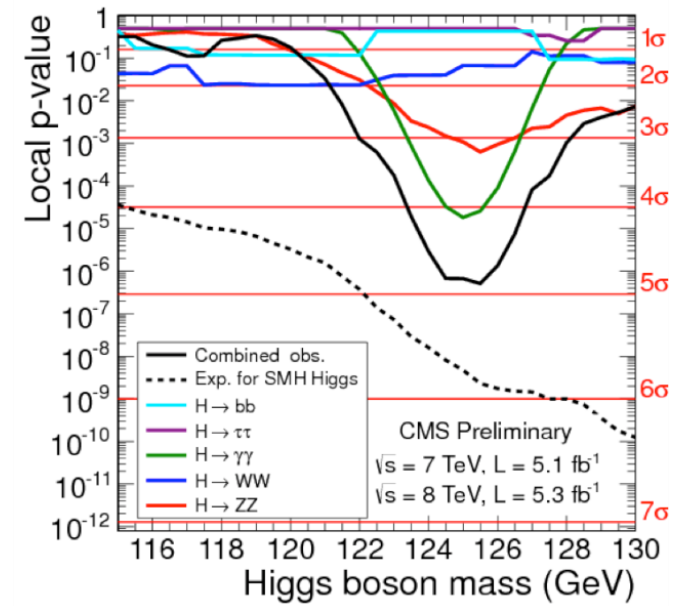
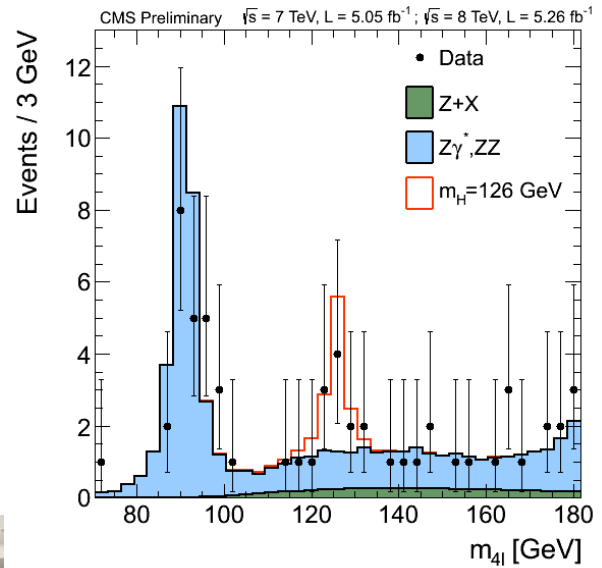
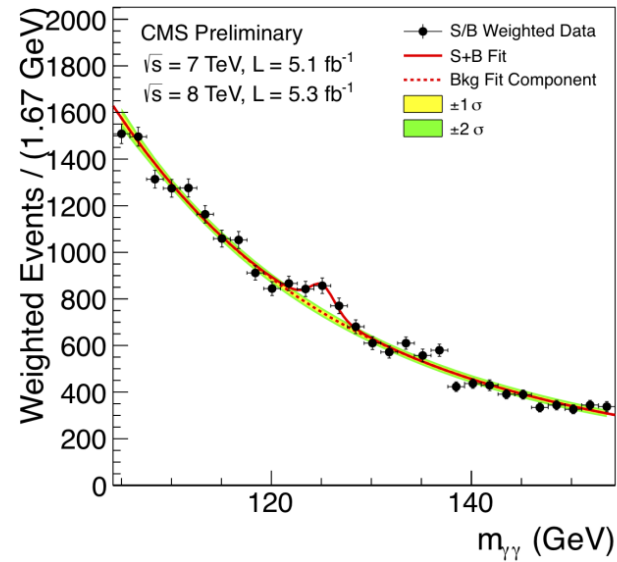
Да видим какво ще получите вие.





# Higgs Boson Discovery – 2012

## CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

# Практическа част





# Данни - Кои са моите данни за анализ и къде да ги намеря

← ↻ 🏠 🔒 <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima-wzh/index.php> 🔍 🔊 ☆ 📄 ⚙️ 🗄️ 🌐 ⋮

# CIMA





CMS Instrument for Masterclass Analysis

**Основно приложение:**  
**CIMA - [link](#)**

Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your data file
TestEvents-01Jan2022	Constantine2024-C	100.11
Santander-13May2024	Zlatograd2024	100.12
CERN-27Nov2023	BudapestWigner2024	100.13
Salo-07Dec2023	ViennaHEPHY2024	100.14
Sofia-13Dec2023		100.15
CERN-LAMAP-08Dec2023		100.16
MP-15Jan2024		100.17
Cakovec-24Jan2024		100.18
Bristol-27Mar2024		100.19
CERN-09Feb2024		100.2
Sandbox-31Dec2023		100.3
CERN-20Feb2024		100.4
CERN-26Feb2024		100.5
CERN-29Feb2024		100.6
CERN-22Feb2024		100.7
CERN-01Mar2024		25.1
CERN-04Mar2024		25.11
CERN-06Mar2024		25.12
CERN-08Mar2024		25.13
CERN-11Mar2024		25.14
CERN-13Mar2024		25.15
CERN-19Mar2024		25.16
CERN-22Mar2024		25.17
CERN-27Mar2024		25.18
FNAL-01Mar2024		25.19
FNAL-08Mar2024		25.2
FNAL-09Mar2024		25.21
FNAL-13Mar2024		25.22
FNAL-14Mar2024		25.23
FNAL-15Mar2024		25.24

**CERN-08Mar2024 - Zlatograd**

# Данни - Кои са моите данни за анализ и къде да ги намеря

## Извадки с данни:

- Всяка извадка е номерирана с два числа, примерно 100.19
- Всяка извадка съдържа 100 събития;
- Една извадка се използва от двама ученика, примерно:
  - Марин обработва събития от 1 до 50;
  - Габриела събития - събития от 51 до 100

Choose your data file

100.11  
100.12  
100.13  
100.14  
100.15  
100.16  
100.17  
100.18  
100.19  
100.2  
100.3  
100.4  
100.5  
100.6  
100.7  
25.1

клик!



## За всяко събитие учениците трябва:

1. Да определят дали разпада е електронен или мюонен, както и дали той отговаря на:
  - $W^+$  или  $W^-$  кандидат (може да се запише като "W" ако заряда не може да бъде определен);
  - NP (Z или друг кандидат за „неутрална частица“);
  - Кандидат за Хигс бозон;
  - zoo събитие (необикновено или такова, което не може да се категоризира).
2. Да направят запис в таблицата на CIMA.



# Таблица за данни

За конкретната индивидуална извадка от данни, прим. 100.19

Общи хистограми на класа - маси на реконструираните частици

Общи резултати на класа (ключови отношения и обобщение)

Browser address bar: <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima-wzh/DataTable.php>

Navigation tabs: Back | Events Table (Group 100.19) | Mass Histogram (Zlatograd2024) | Results (Zlatograd2024) | Event Display

Masterclass: CERN-08Mar2024  
Location: Zlatograd2024  
Group: 100.19

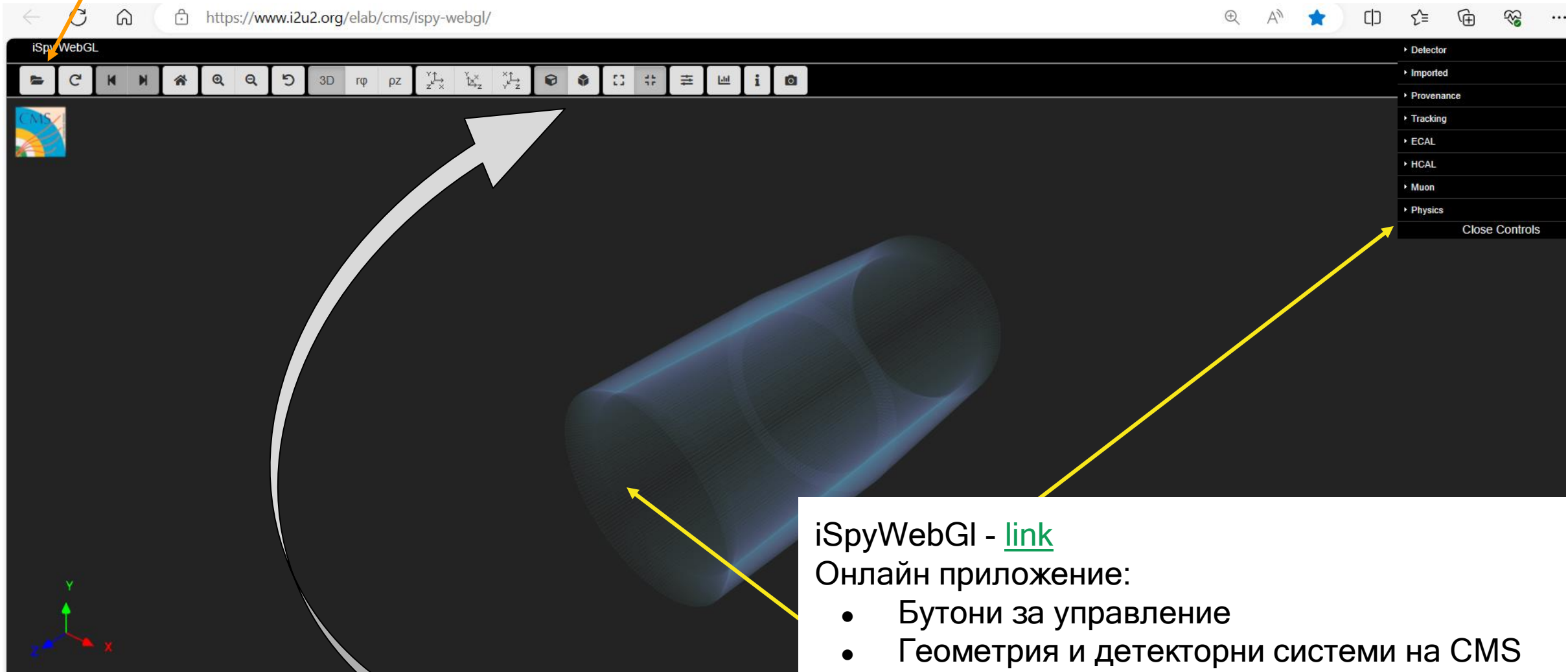
Линк към event display.

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> Event number: 100.19-1	<b>Final State</b> <input type="radio"/> e v <input type="radio"/> $\mu$ v <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> $\mu$ $\mu$ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 $\mu$ <input type="radio"/> 2e 2 $\mu$	<b>Primary State</b> Charged Particle: <input type="radio"/> W+ <input type="radio"/> W- <input type="radio"/> W $\pm$ <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	<b>Enter Mass</b> <input type="text"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Next"/>
--	--	--	---

Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
-------------	--------------	-------------	---------------	------

## Зареждане на данни

## Основно приложение - iSpyWebGL



iSpyWebGL - [link](#)

Онлайн приложение:

- Бутони за управление
- Геометрия и детекторни системи на CMS
- Реконструирани обекти
- Измерени физични величини

# Основно приложение - iSpyWebGl

## Реконструирани обекти и цветова конвенция

- Мюонни (мюонни трекове) - червени
- Електрони и позитрони (електронни трекове) - зелено
- Липсваща енергия - лилаво (розово)
- Фотони - зелено (без попадения в централния треков детектор)
- Адрони - жълти конуси

iSpyWebGl - [link](#)

## Електрически заряд

“+” Ако траекторията се закривява по посока на часовниковата стрелка

“-” Ако траекторията се закривява **обратно** на посоката на часовниковата стрелка

Липсваща енергия (в крайното състояние) - **Missing energy transverse (MET)**

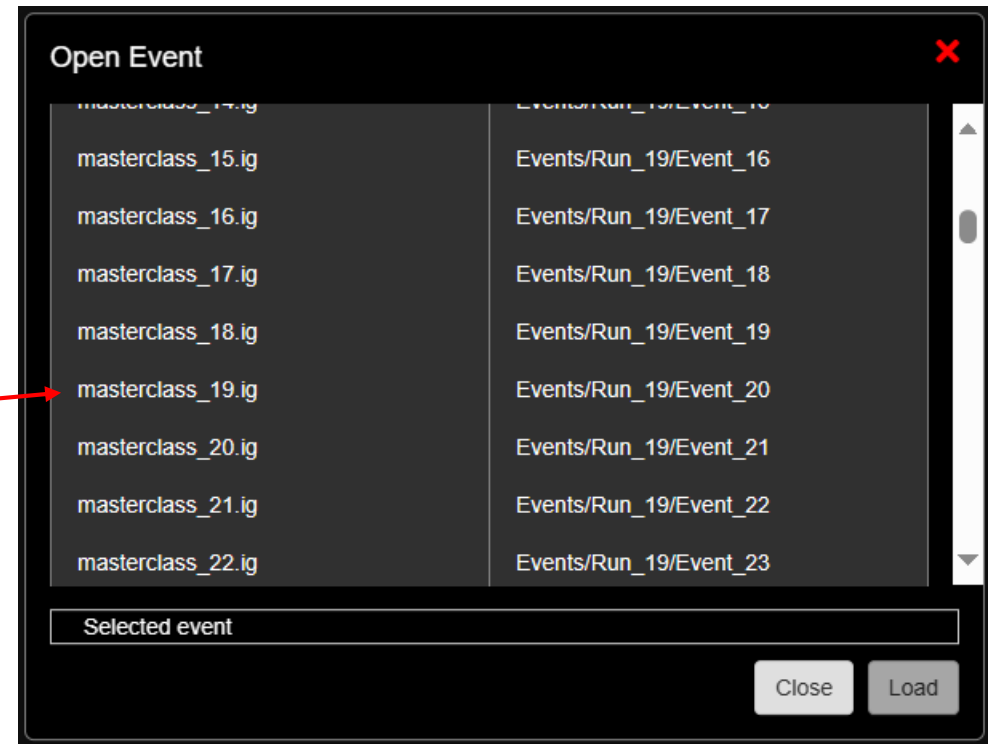
Определя се от закона за запазване на енергията и импулса.

Изглед в различни равнини, 3D изглед

Таблица с измерените физични величини - енергия, импулс, ъгли.

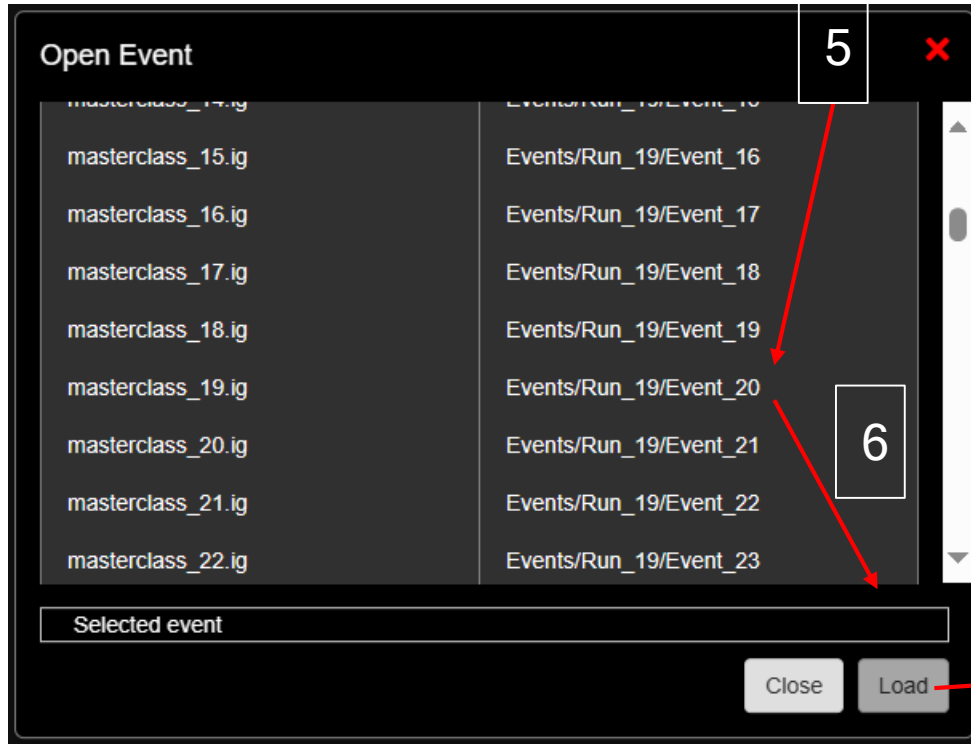
# Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 100.19

1. Зареждане на данни
2. Избираме данни от Web
3. Избираме извадка 100
4. Избираме данни с номер 19





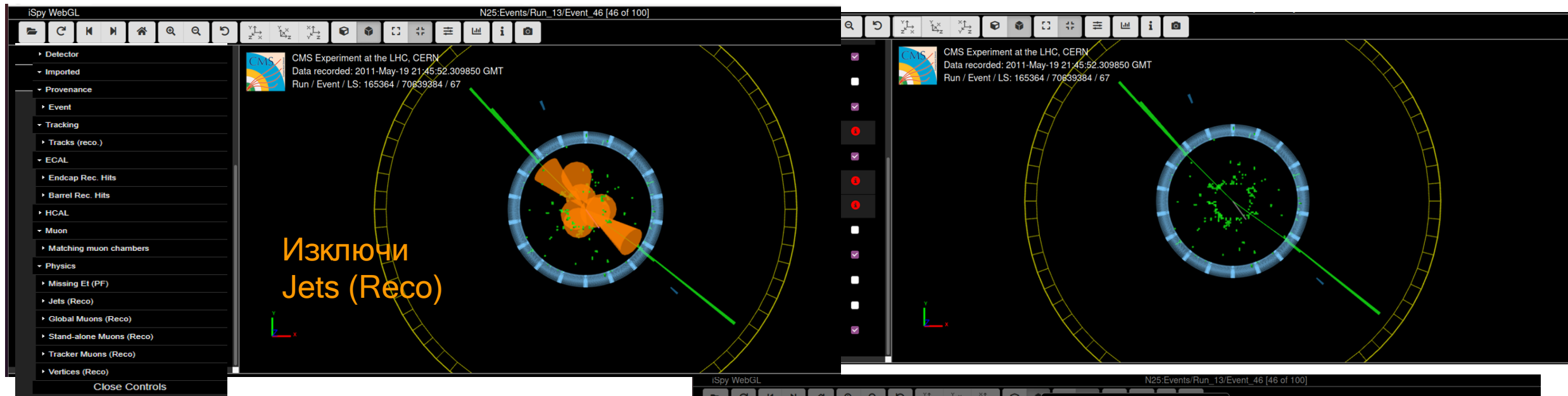
# Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 100.19



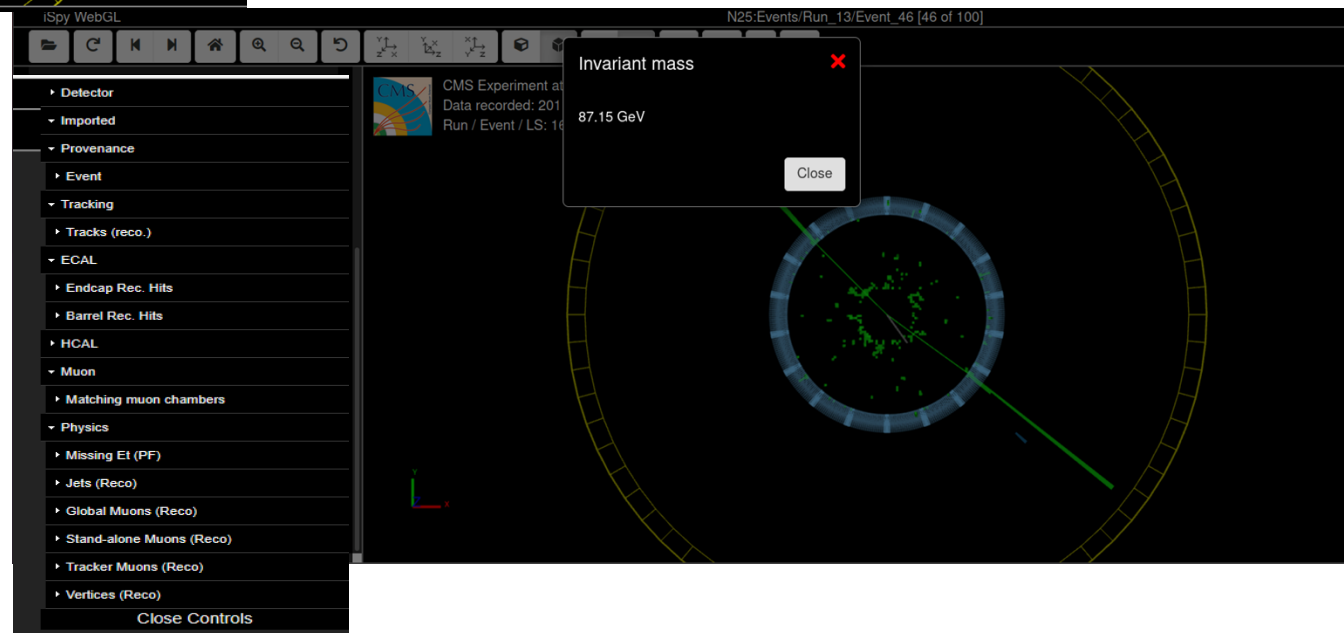
5. Избираме събитие № 1 (или № 50 за втората половина от данните);
6. Зареждаме;
7. Визуализиране на събитие;
8. За зареждане на следващото събитие използвайте бутоните на приложението



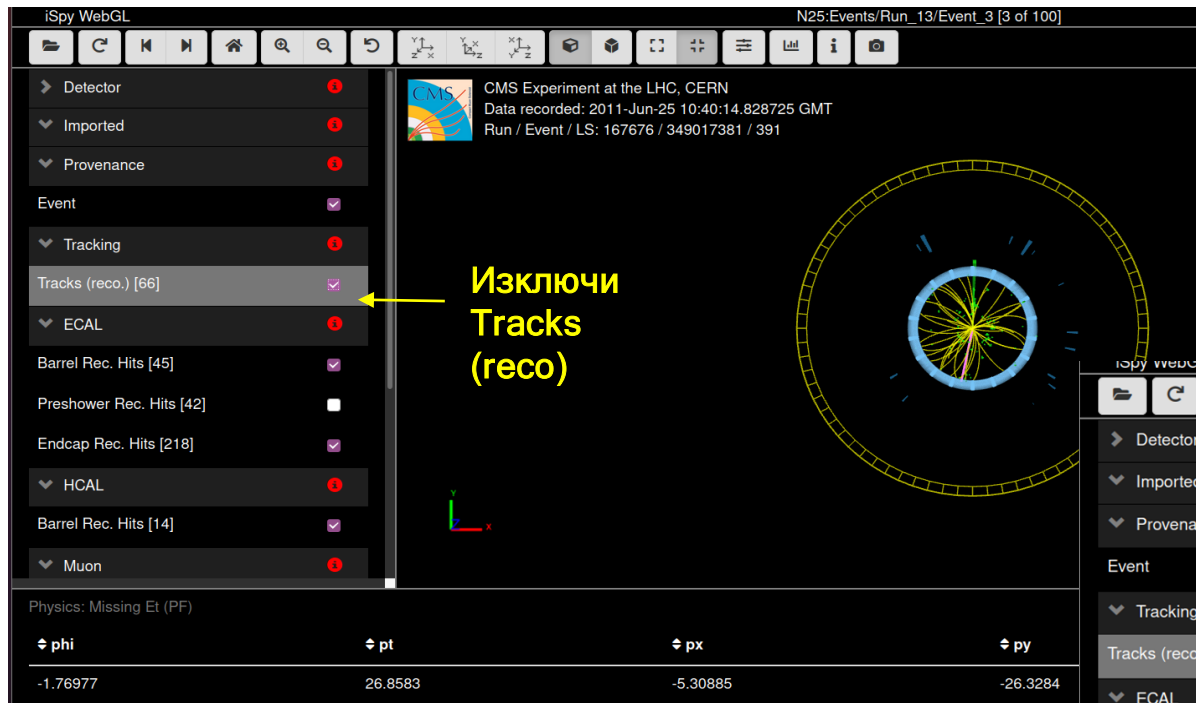
# “Изчистване” на събитието - разглеждаме само необходимото



- Оранжеви конуси - Адронна активност в калориметричната система;
- Не се разглежда в това упражнение;
- След като се изключат от анализа, се вижда събитие кандидат за разпад на  $Z \rightarrow \mu\mu$



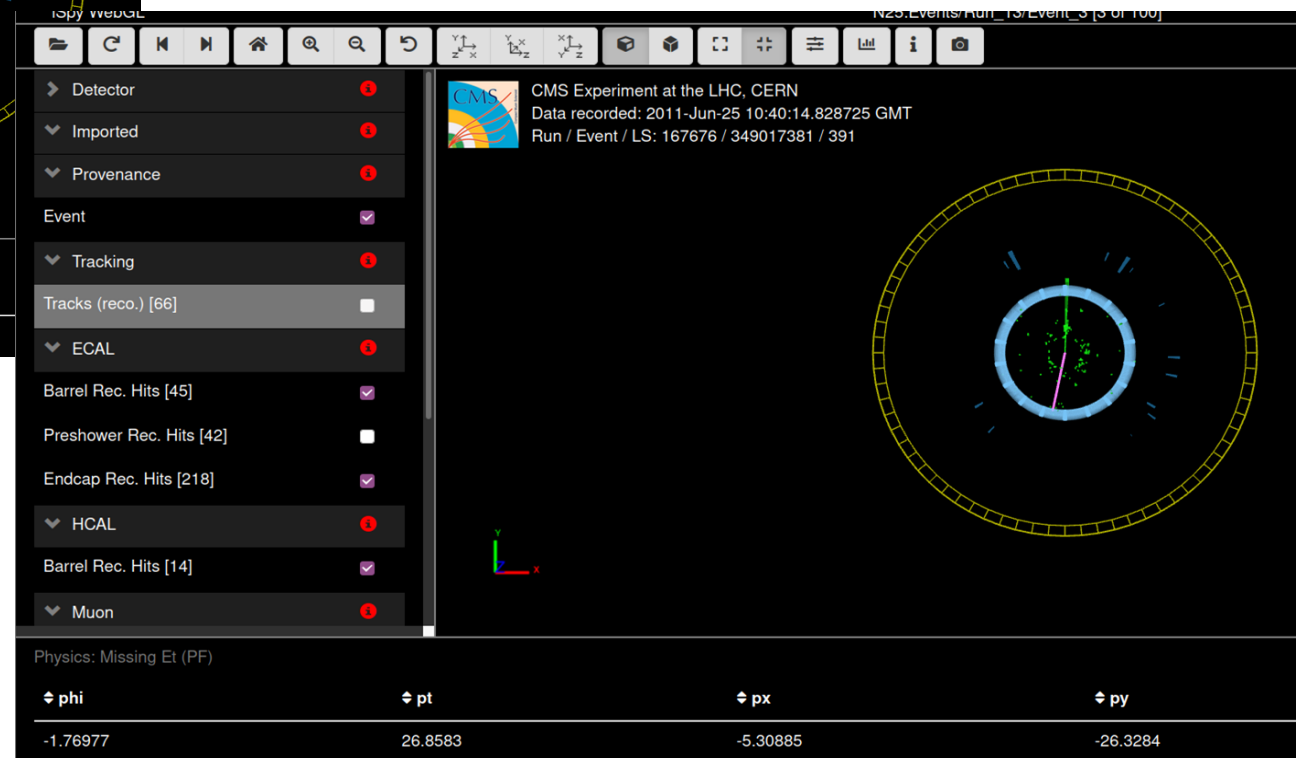
# “Изчистване” на събитието - разглеждаме само необходимото



След изключване на излишните обекти, се вижда чисто събитие, кандидат за разпад на  $W^- \rightarrow e^- \nu$

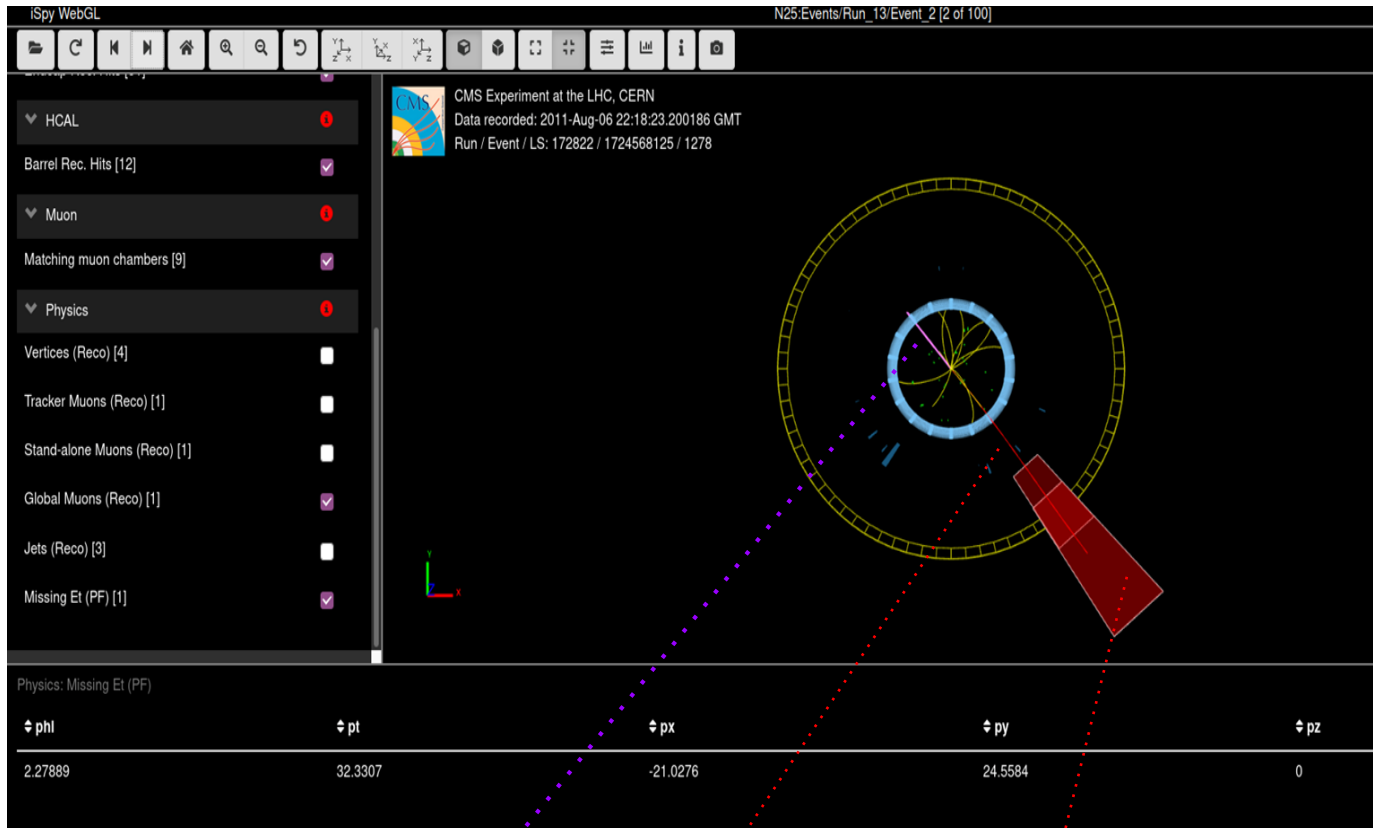
Електронните трекове са показани в зелено.

В лилаво - липсващата енергия.



Трековете на заредени частици (в жълто) във вътрешния треков детектор припокриват трековете, които ни интересуват. Просто ги изключете.

# Анализ - видове събития - един мюон в крайното състояние ( $W \rightarrow \mu\nu$ )



Липсваща енергия

Мюонна станция

Мюонна траектория (трек)

Мюонните траектории (трекове) са оцветени в червено.

В червено са показани и мюонните станции, в които са засечени мюоните.

В лилаво(розово) е показана липсващата (неизмерена) енергия, определена в напречната равнина (X, Y)

1. Открили сме един мюон и голямо количество липсваща енергия ;
2. Проверяваме електрическия заряд на мюона
  - a. Положителен, ако траекторията се закривява по часовниковата стрелка.
3. Кандидат за разпад на  $W$  на два мюон и неутрино
  - a. Електрическият заряд (на мюона) в крайното състояние = електрическият заряд на  $W$ .
    - i. (Запазване на електрическия заряд).
  - b. В този случай не се пресмята реконструираната маса.



# Анализ - видове събития - един мюон в крайното състояние ( $W^- \rightarrow \mu \nu$ )

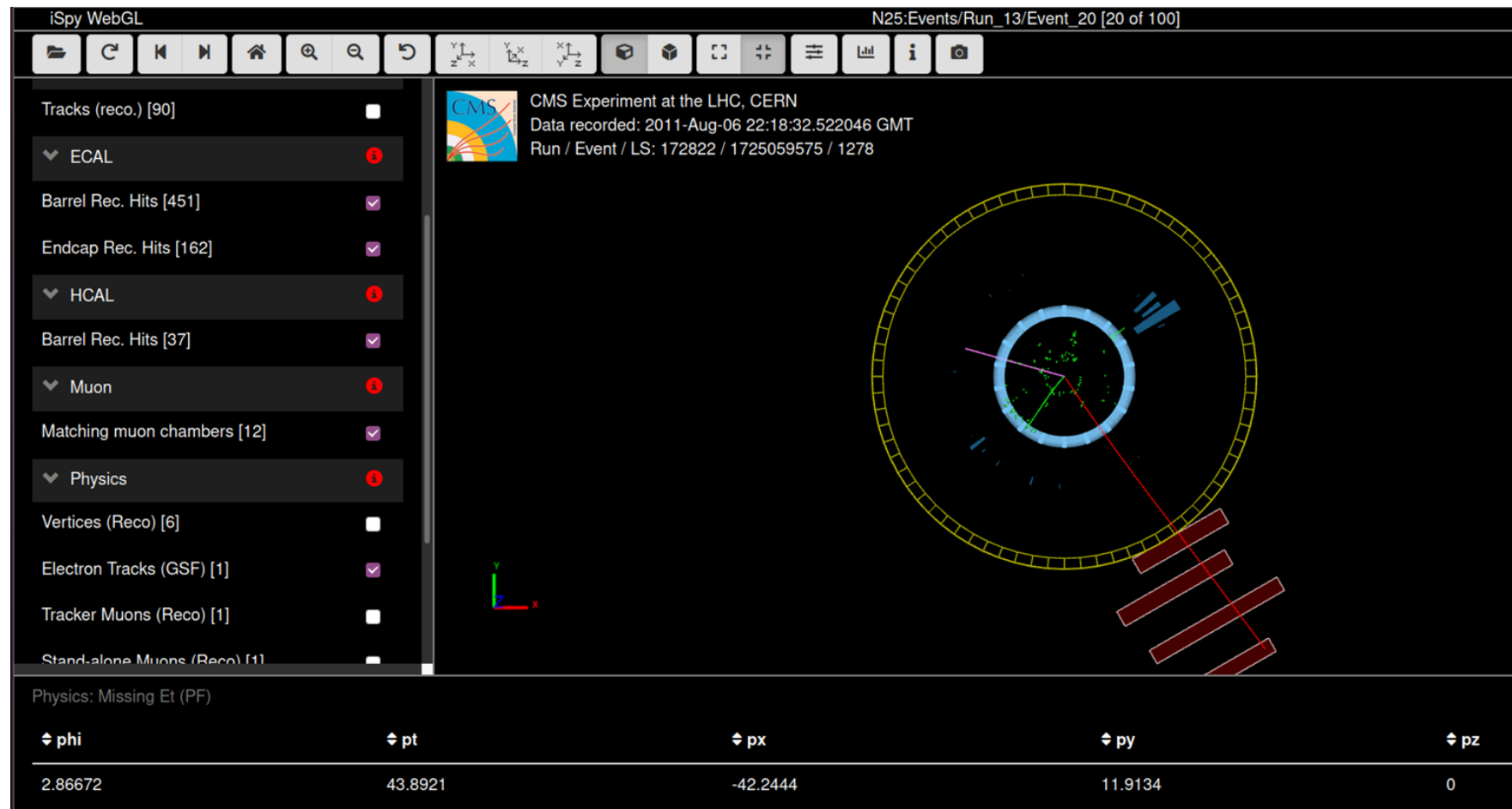
## Нанасяне на резултатите в таблицата

<b>Select Event</b> Event index: <input type="text" value="1"/> <input type="button" value="v"/> Event number: 25.13-1	<b>Final State</b> <input type="radio"/> e $\nu$ <input checked="" type="radio"/> $\mu \nu$ <input type="radio"/> e e <input type="radio"/> $\mu \mu$ <input type="radio"/> 4e <input type="radio"/> 4 $\mu$ <input type="radio"/> 2e 2 $\mu$	<b>Primary State</b> Charged Particle: <input checked="" type="radio"/> W <sup>+</sup> <input type="radio"/> W <sup>-</sup> <input type="radio"/> W $\pm$ <input type="radio"/> Neutral Particle (Z, H) <input type="radio"/> Zoo	<b>Enter Mass</b> <input type="text"/> GeV/c <sup>2</sup> <input type="button" value="Next"/>
--	---	---	---

Red annotations: 1 points to  $\mu \nu$  in Final State; 2 points to W<sup>+</sup> in Primary State; 3\* points to W $\pm$  in Primary State; 4 points to the Next button.

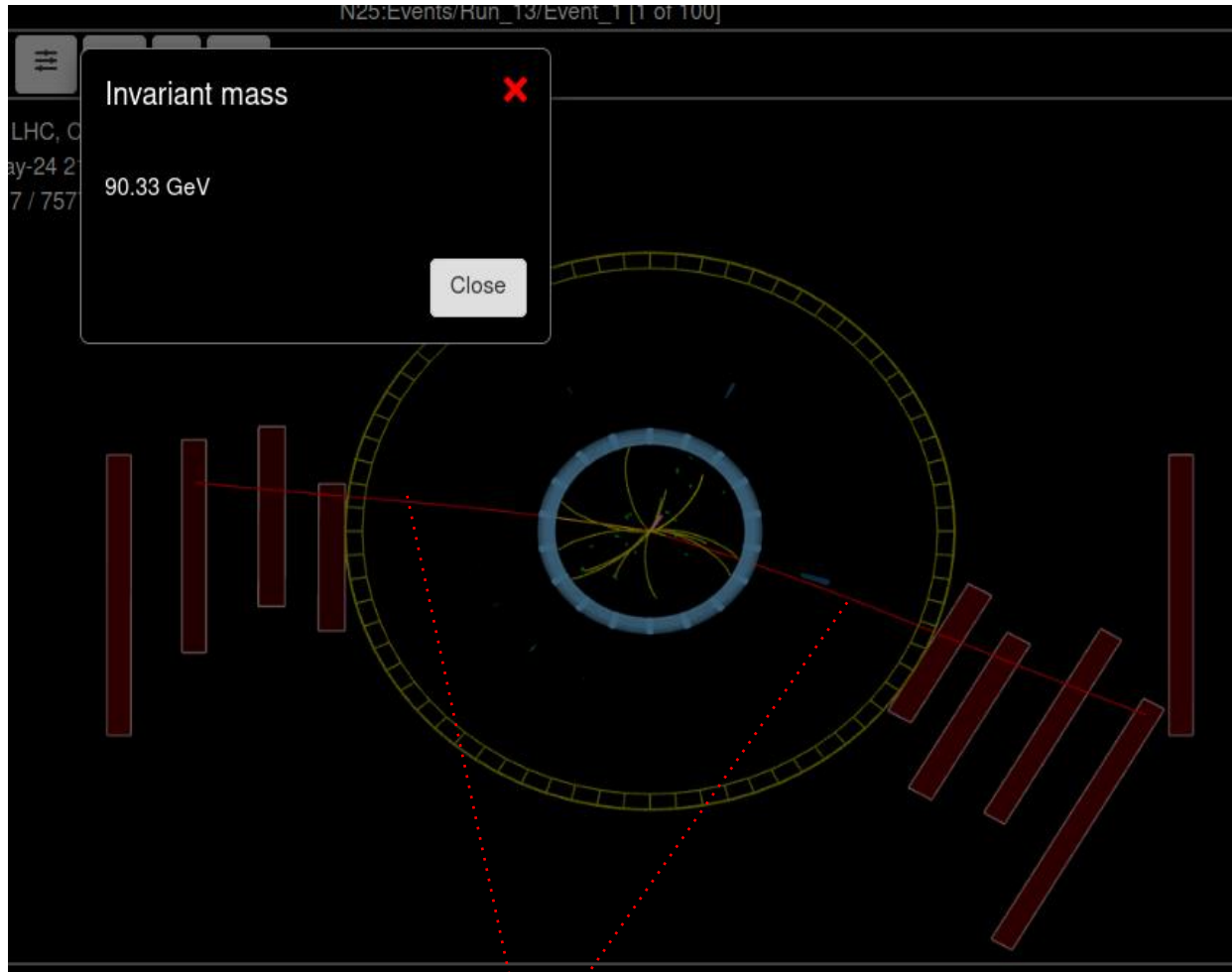
1. Отбелязваме мюон и неутрино в крайното състояние
2. Отбелязваме W<sup>+</sup> началното състояние
  - a. + е определен от заряда на мюона
3. (\*)Ако не сме сигурни за заряда, посочваме W<sup>+/-</sup>
4. Въвеждаме "Next"
5. И към следващото събитие ...

# Анализ - видове събития: ( $W \rightarrow \mu\nu$ ) или ( $W \rightarrow e\nu$ )



За крайното състояние (мюон и липсваща енергия) или (електрон и липсваща енергия) избираме лептона с по-голям напречен импулс ( $p_T$ ).

# Анализ - видове събития - два мюона в крайното състояние



Мюонни траектории (трекове)

Мюонните траектории (трекове) са оцветени в червено.

В червено са показани и мюонните станции, в които са засечени мюоните.

1. Открили сме два мюона
2. Проверяваме дали са с противоположен електрически заряд
3. Ако да, значи имаме събитие, кандидат за разпад на електрически неутрална частица на два мюона (Закон за запазване на електрическия заряд)
4. Пресмятане масата на тази частица:
  - a. Последователно избираме с мишката по веднъж върху двата мюонни трека
  - b. Натискаме клавишът M (на латиница) и се отваря прозорец с изчислената маса.

*3.\* Ако в даденият случай, зарядите на двата мюона не са с противоположен знак, значи имаме някакво друго събитие, което не познаваме или не изследваме в момента - отбелязваме го в таблицата като Zoo.*

# Анализ - видове събития - два мюона в крайното състояние

## Нанасяне на резултатите в таблицата

Select Event

Event index: 1

Event number: 25.13-1

Final State

e v      $\mu$  v

e e      $\mu$   $\mu$

4e     4 $\mu$

2e 2 $\mu$

Primary State

Charged Particle:

W+     W-     W $\pm$

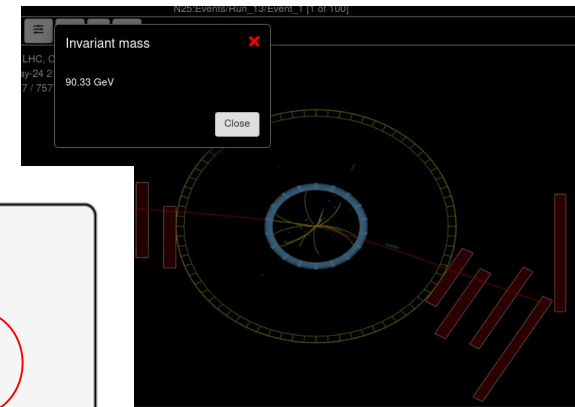
Neutral Particle (Z, H)

Zoo

Enter Mass

90.33 GeV/c<sup>2</sup>

Next



Select Event

Event index: 2

Event number: 25.13-2

Final State

e v      $\mu$  v

e e      $\mu$   $\mu$

4e     4 $\mu$

2e 2 $\mu$

Primary State

Charged Particle:

W+     W-     W $\pm$

Neutral Particle (Z, H)

Zoo

Enter Mass

GeV/c<sup>2</sup>

Next

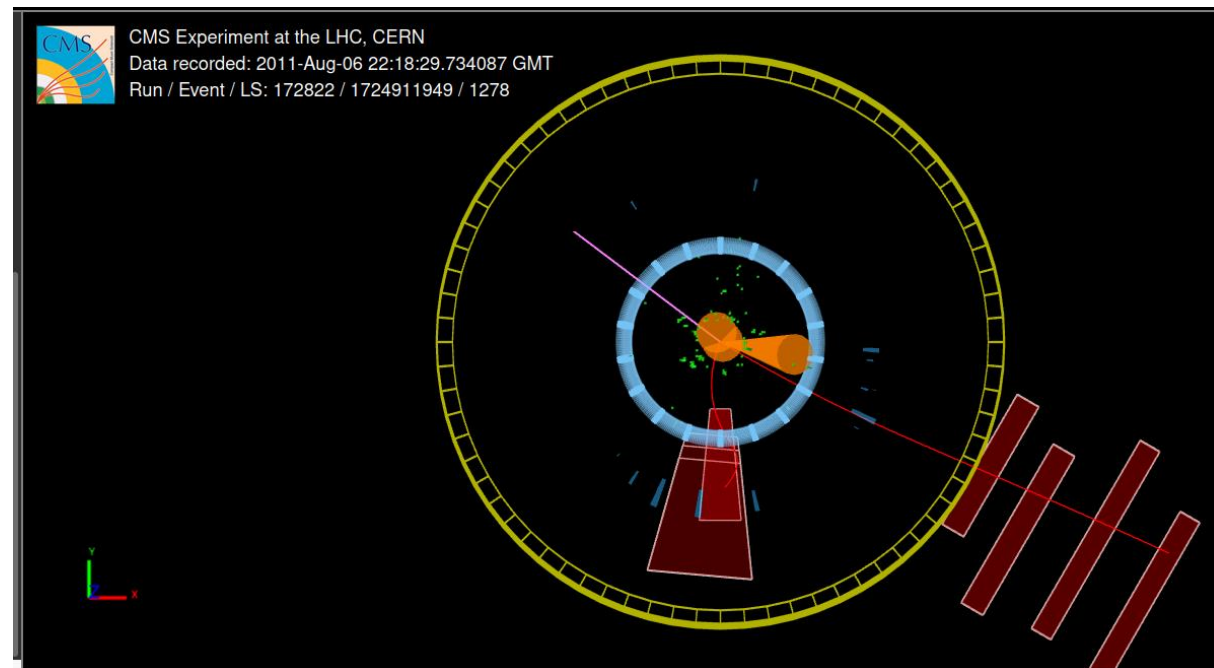
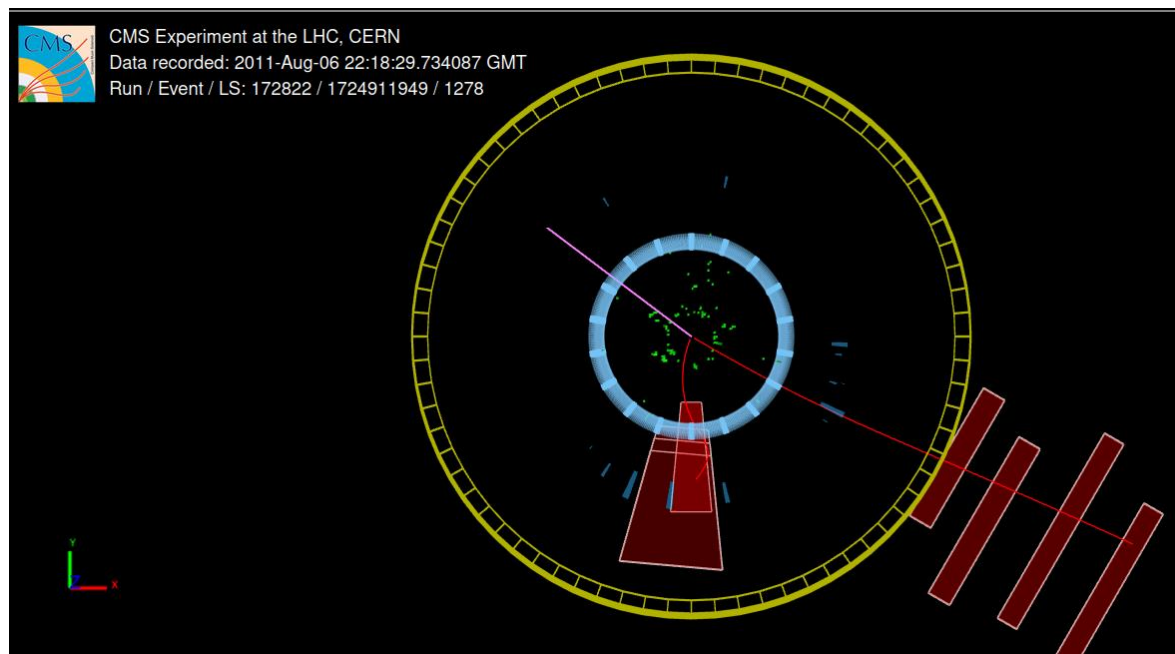
Event index	Event number	Final state	Primary state	Mass
28001	25.13-1	$\mu\mu$	neutral	90.33

1. Отбелязваме 2 мюона
2. Отбелязваме, че се е разпаднала неутрално електрическа частица
3. Въвеждаме нейната маса
4. Въвеждаме "Next"
5. Записът се появява в таблицата и преминаваме към следващото събитие



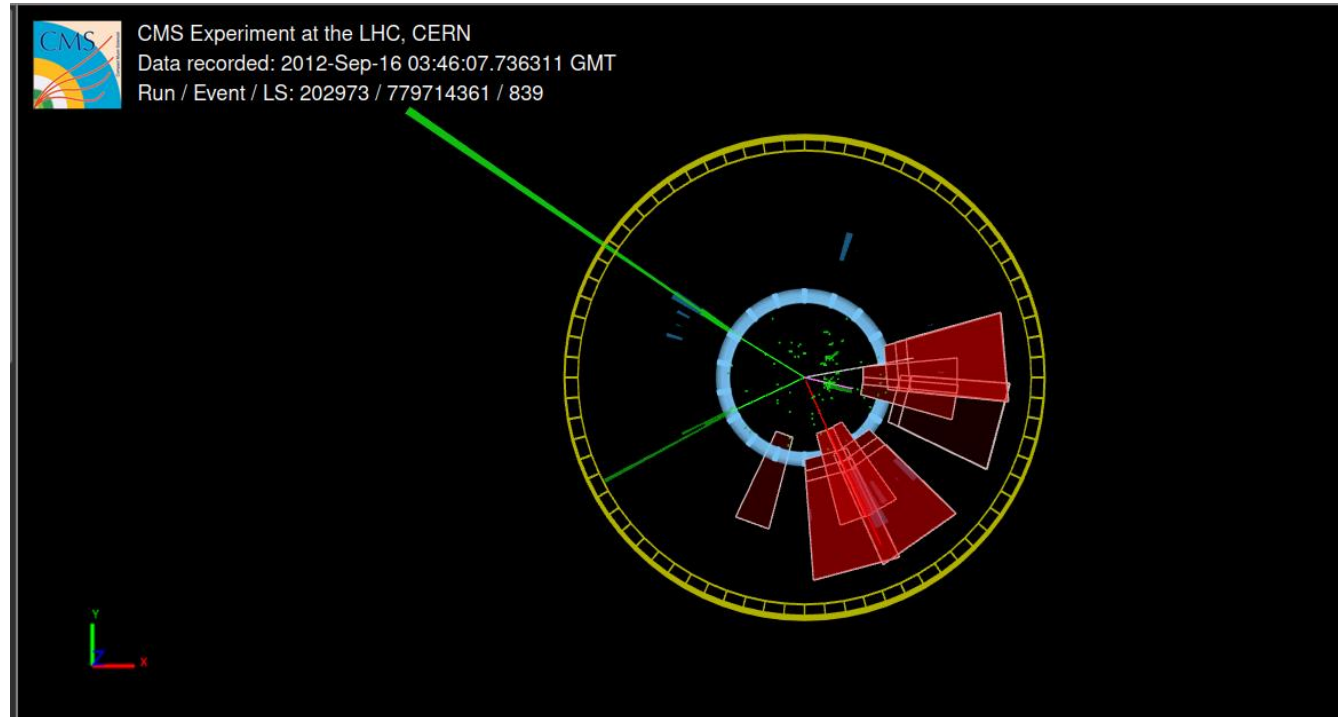
# W, Z или Zoo?

Zoo - събития, които не може да класифицираме към нито една от схемите на разпад, които изследваме



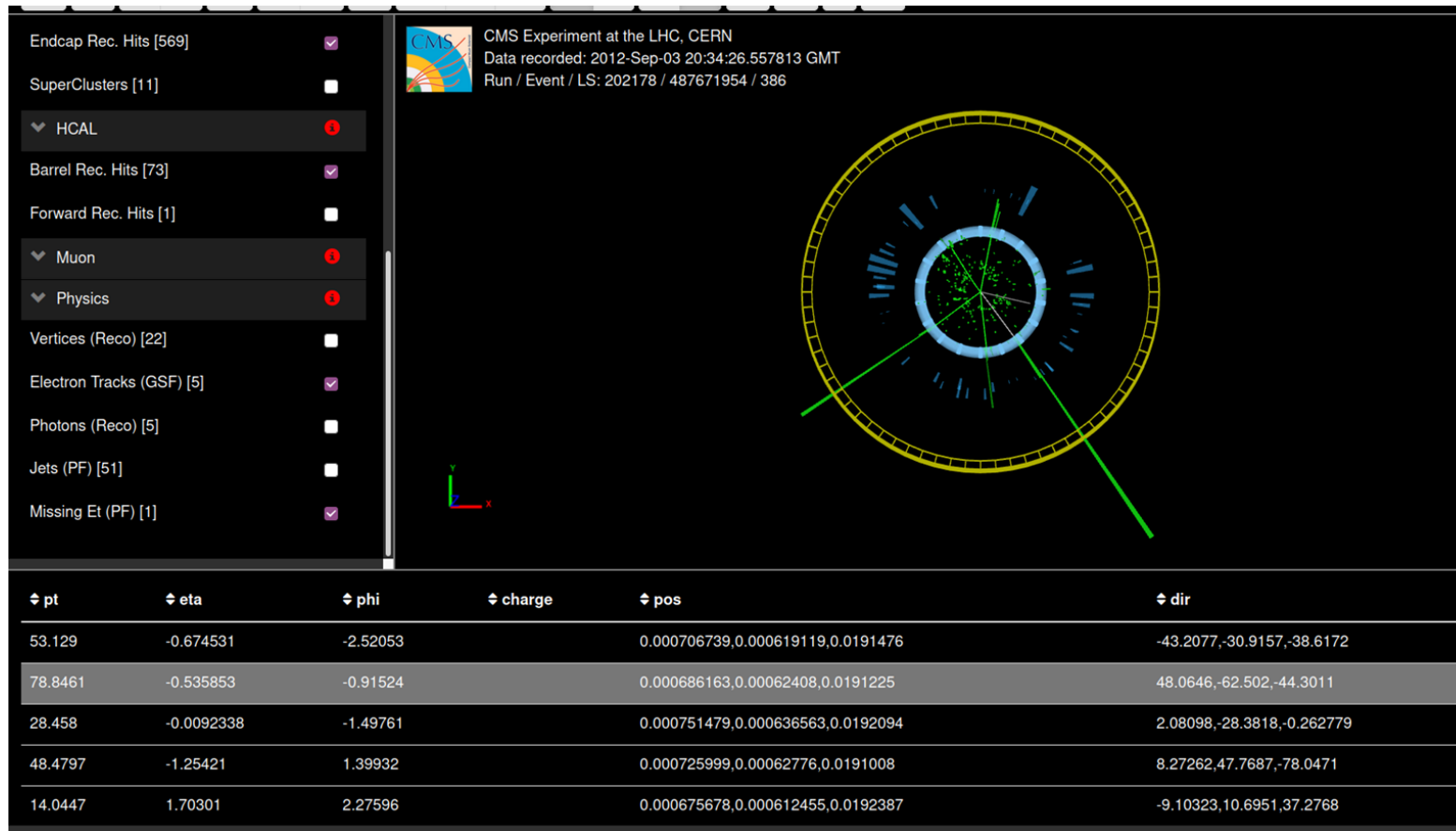
- Проверява се заряда на мюоните - и двата изглеждат с отрицателен заряд!
- Проверяваме напречните импулси на мюоните и липсващата енергия.
- Проверяваме за наличие на силна адронна активност.
- Взимаме решение - ако не сме сигурни, в таблицата с резултатите отбелязваме събитието като Zoo

# Анализ - видове събития - 4 мюона - ( $X^0 \rightarrow 2e2\mu$ )



- Проверяваме поотделно дали общия заряд на двойката електрони и двойката мюони е нула. Ако да - пресмятаме масата на частицата-майка:
  - Избираме (кликваме) последователно четирите трека (2-та зелени на електроните и 2-та червени на мюоните) и натискаме клавиша M от клавиатурата (на латиница).
- Нанасяме резултатите в таблицата.

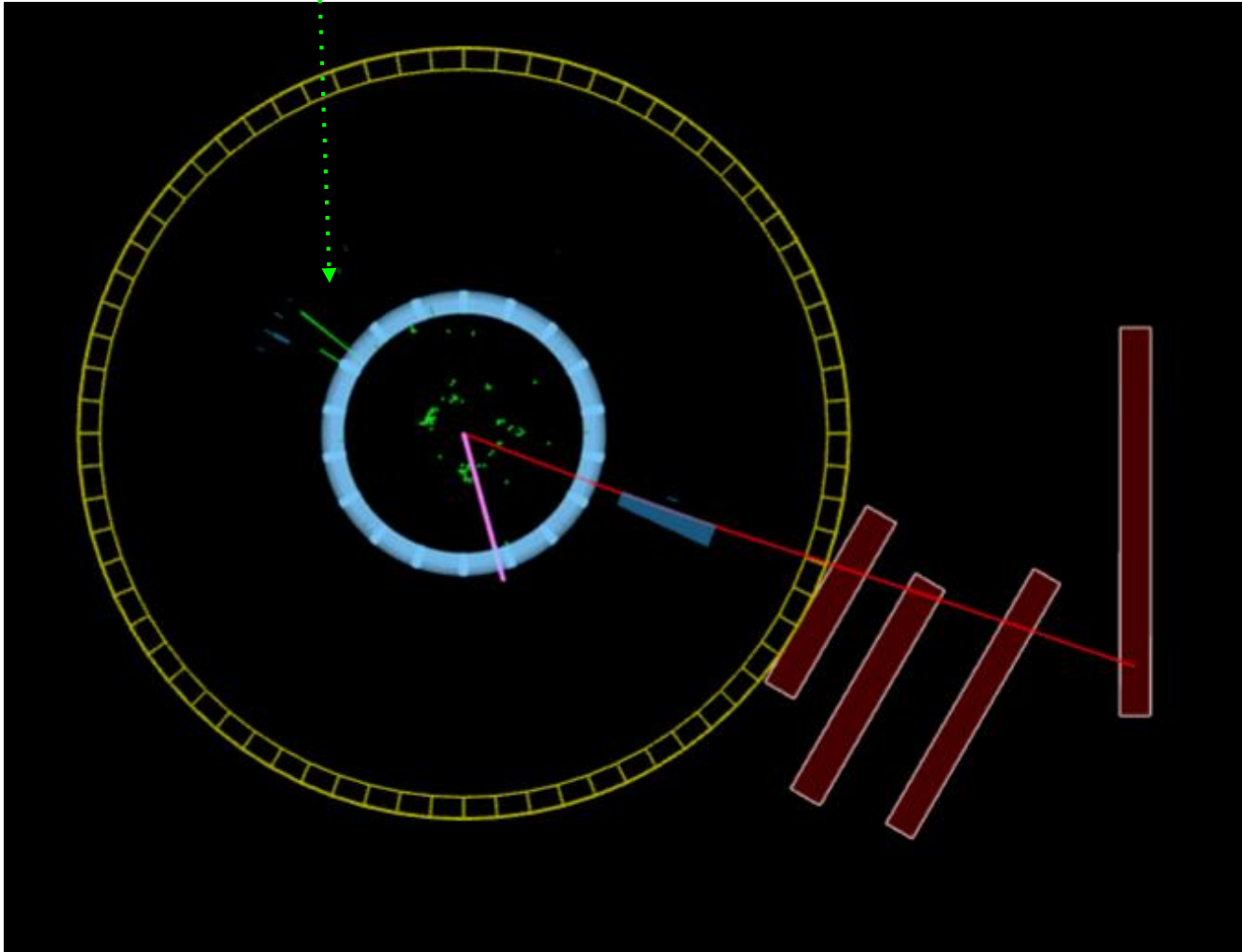
# Анализ - видове събития - 4 мюона - ( $X^0 \rightarrow 4e$ )



- В конкретния случай има 5 реконструирани електрона.
- Определянето на техния заряд не винаги е лесно.
- Кои точно 4 електронни трека да изберем?
- Друг критерий - избираме първите 4 с най-висок напречен импулс (pT).

- Импулсите на частиците се показват в таблицата под събитието, или ако кликнете върху съответния трек.
- Масата на частицата-майка се пресмята по вече обяснения начин.

# ФОТОНИ



- Анализът на събития с фотони не влиза в това упражнение.
- Но е добре да се знае, какво не разглеждаме.
- Фотоните са визуализирани като зелени трекове, които обаче не са регистрирани във вътрешния треков детектор.
- Примерът от ляво показва два фотонни, един мюонен трек и липсваща енергия.



# Полезни връзки

[Видео](#) - как се анализират данните в този урок ( 4 минути - на английски)

Таблица [CIMA](#)

[iSpyWebGl](#)

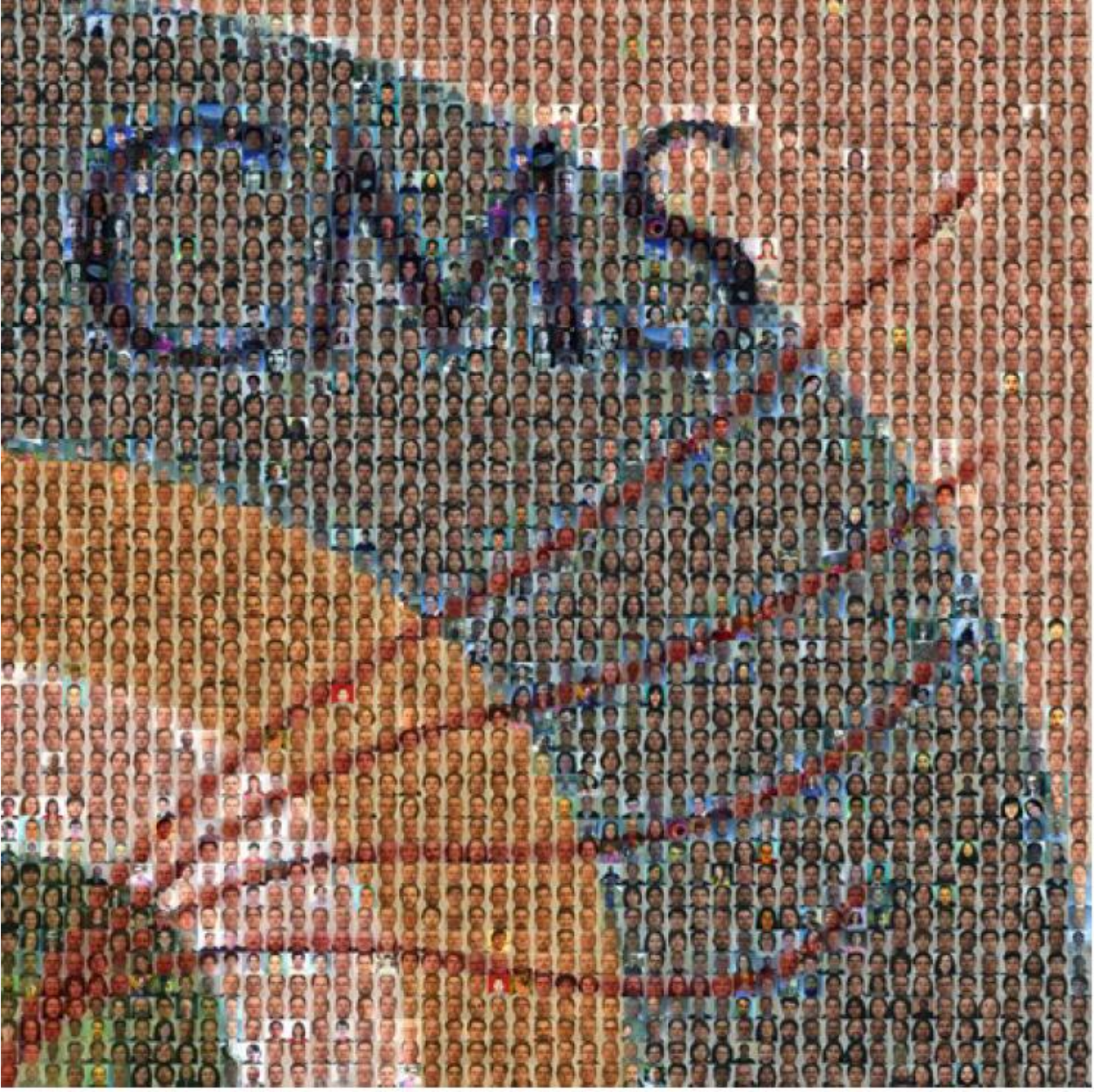
[WZH measurement](#)

[IPPOG](#)

[International Masterclasses](#)

[Quarknet](#)

[CERN Open Data Portal](#)



*Б  
Л  
А  
Г  
О  
Д  
А  
Р  
Я*