



CMS Masterclasses Bulgaria - 2024

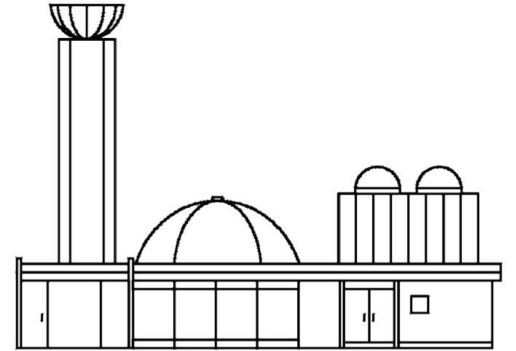


**Introduction to High energy,
Particle physics
and CMS experiment**

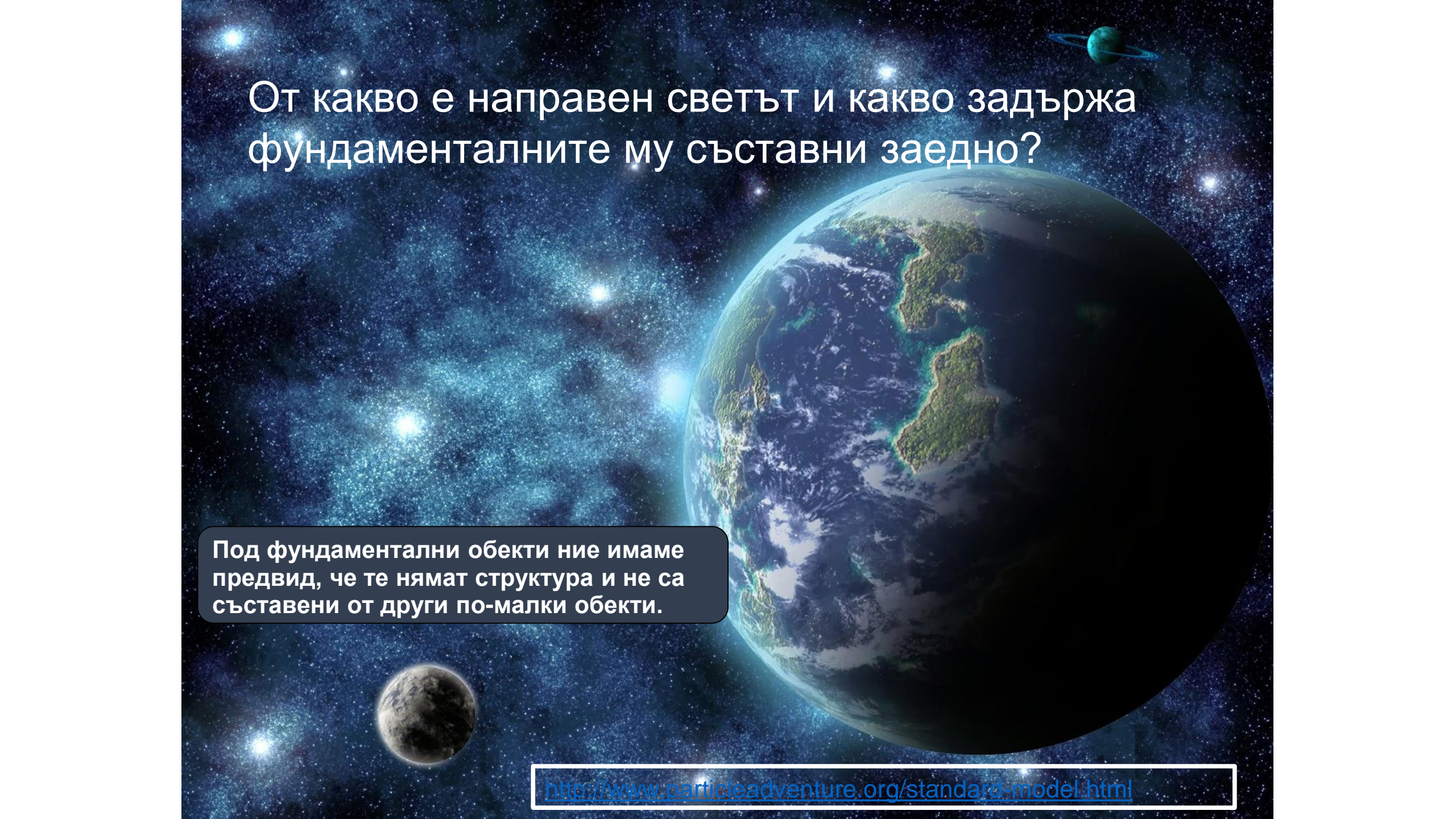
Mariana Shopova (CMS)

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

11.03.2024 – Blagoevgrad



Да започнем с това, което знаем ...

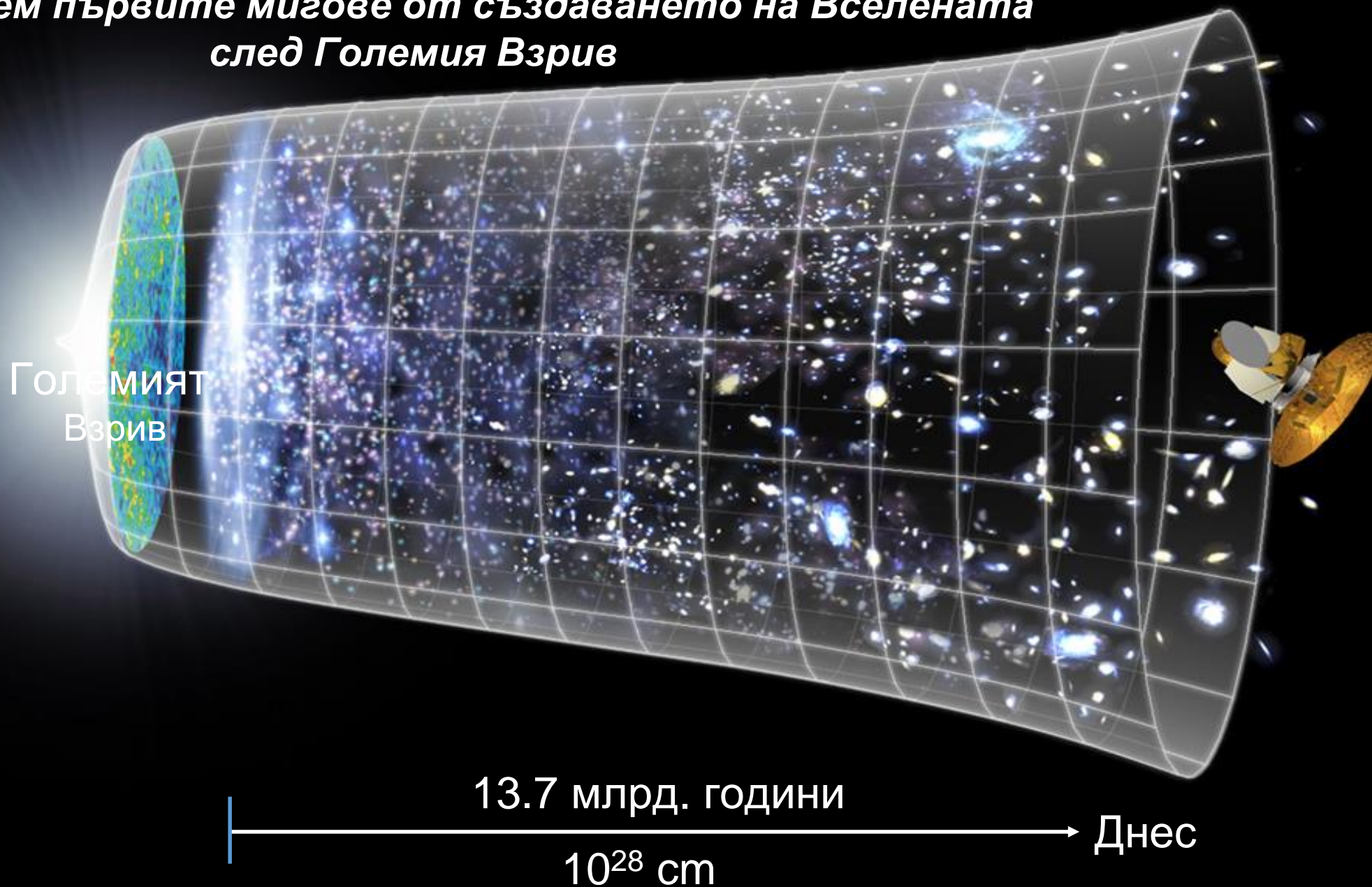
A composite image of space featuring the Earth, the Moon, Saturn, and a starry background. The Earth is the largest object, showing continents and oceans. The Moon is in the bottom left, and Saturn is in the top right. The background is filled with stars and a nebula.

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

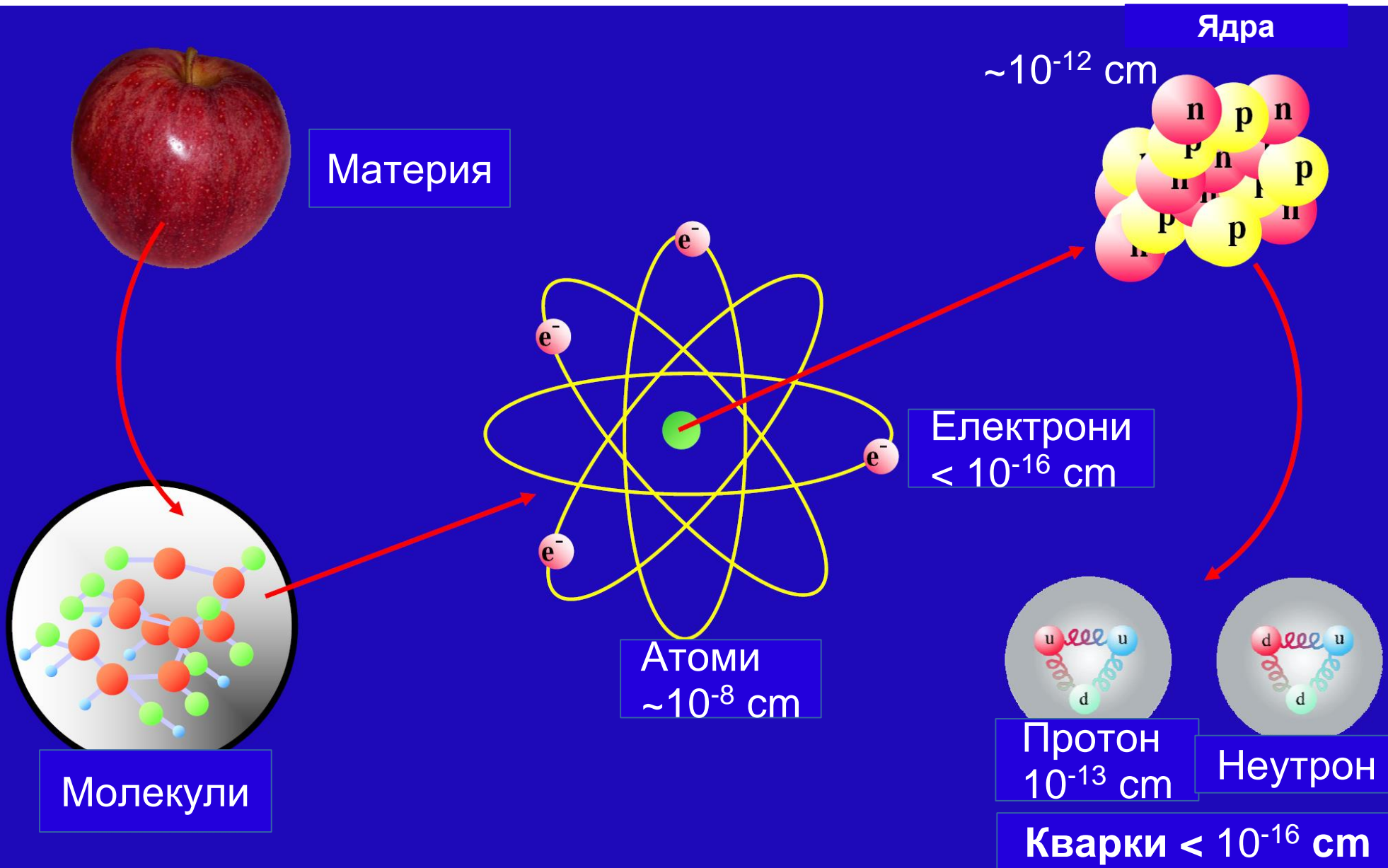
Под фундаментални обекти ние имаме предвид, че те нямат структура и не са съставени от други по-малки обекти.

<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

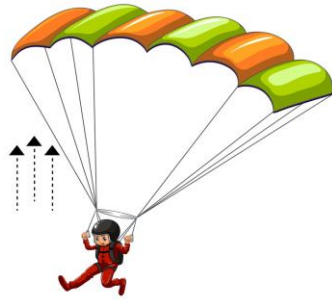
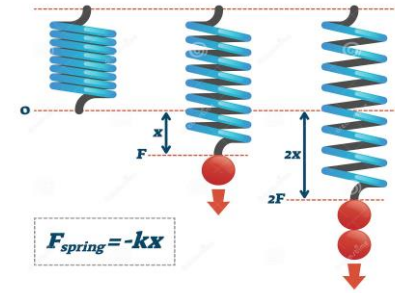


FRICTION FORCE

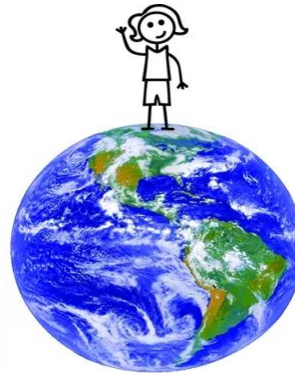
Forces - Pushes and Pulls



HOOKE'S LAW



Drag Force



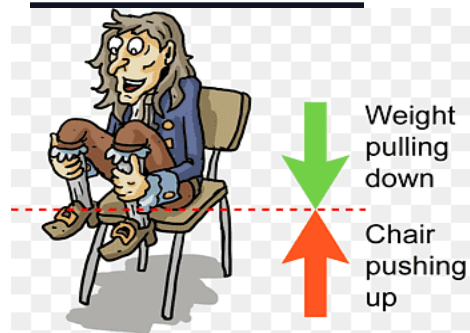
My **WEIGHT** on Earth is around 560N



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

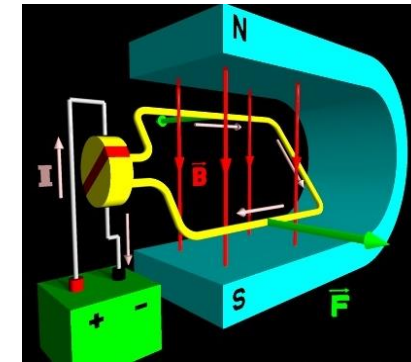
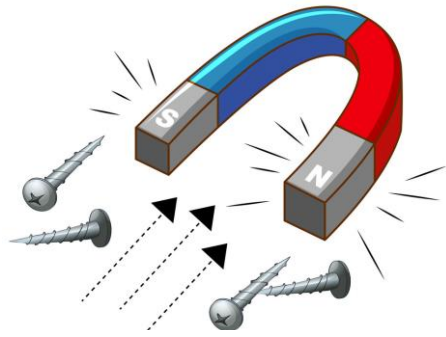


My **MASS** is always 56kg!!

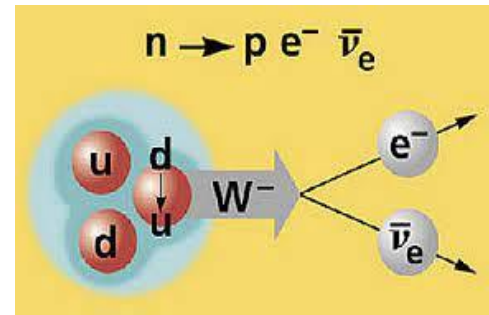
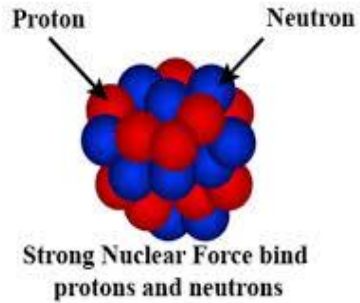
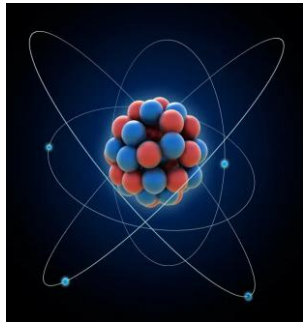


Сила е всяко влияние, което причинява промяна в скоростта или формата на дадено тяло.

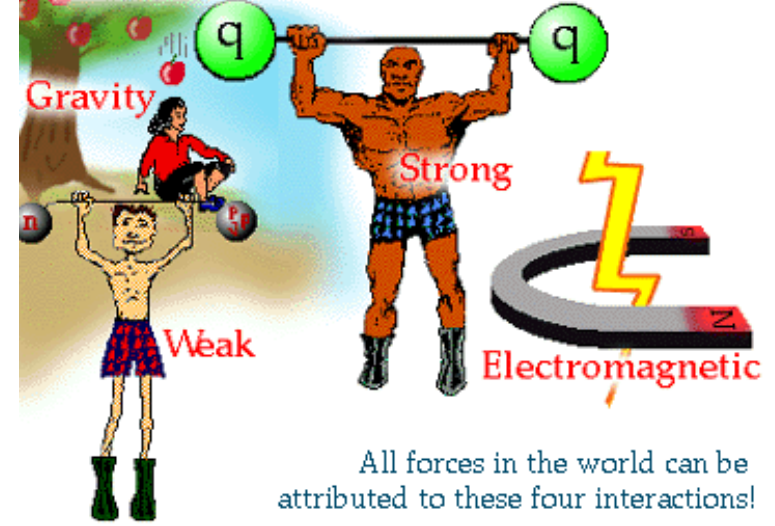
Magnetic Force



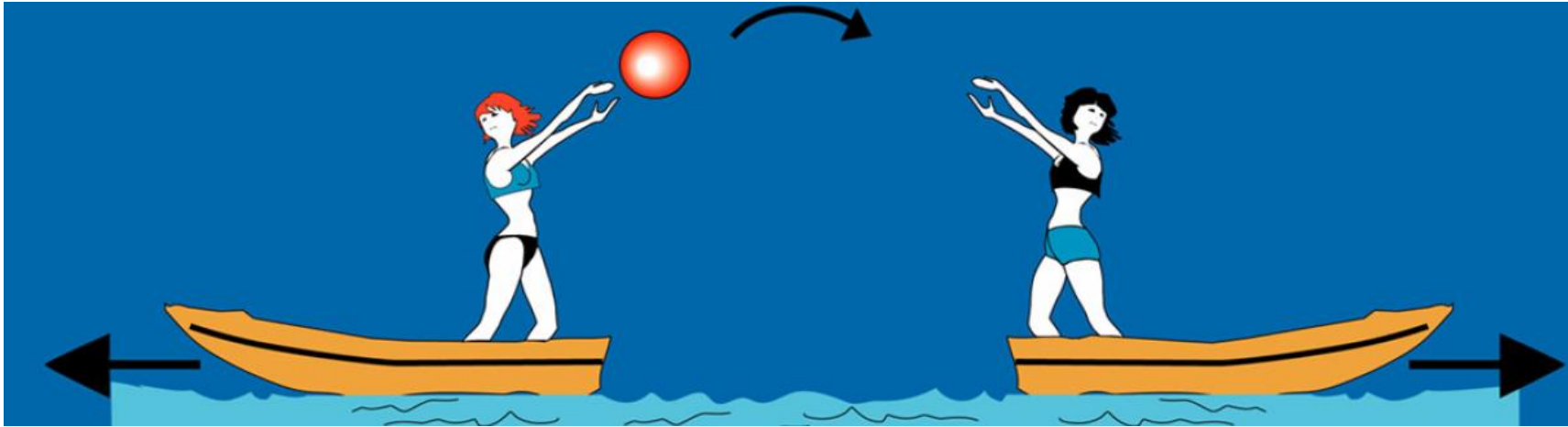
Фундаментални взаимодействия



The Four Fundamental Interactions



- 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*

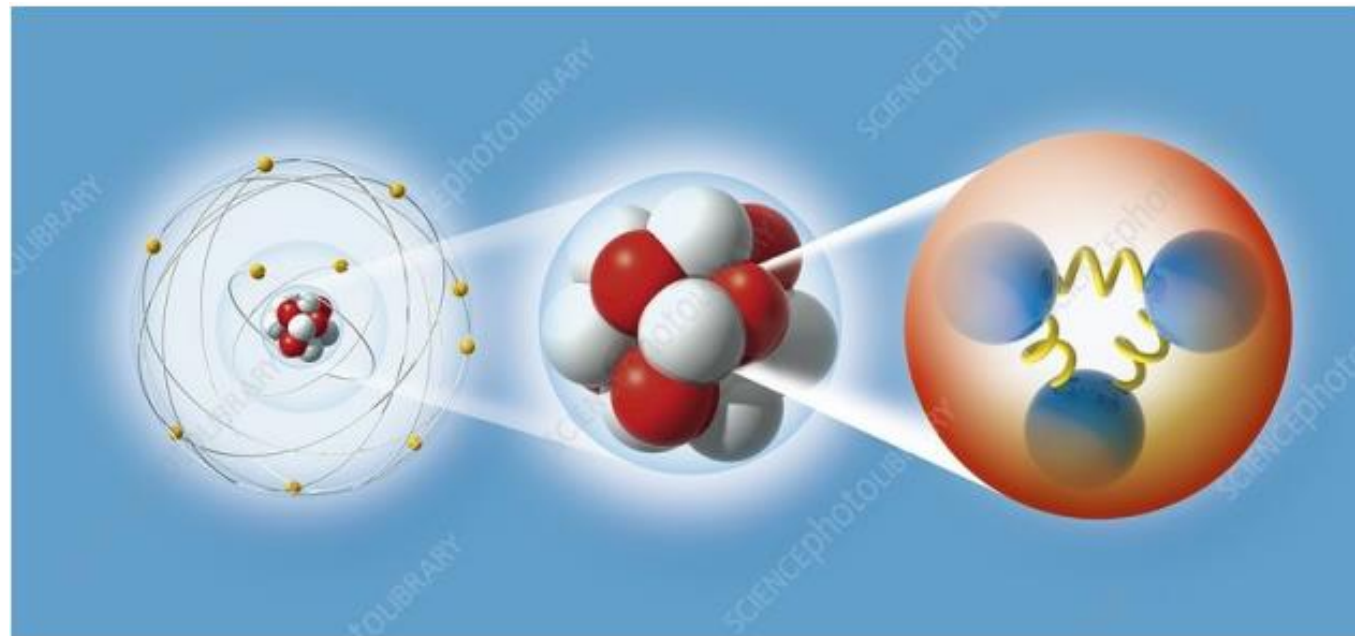
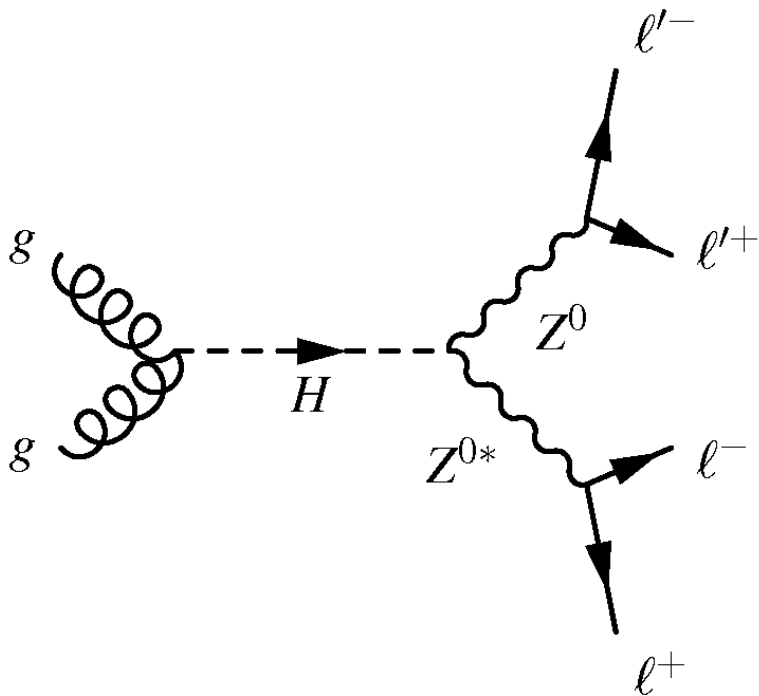
Гравитационно: *държи ни на Земята*

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 $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	mass $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{u} antiup	mass $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{c} anticharm	mass $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{t} antitop	mass 0 charge 0 spin 1 g gluon	mass $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 0 H higgs	
mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ d down	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ s strange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ b bottom	mass $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{d} antidown	mass $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{s} antistrange	mass $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ \bar{b} antibottom	mass 0 charge 0 spin 1 γ photon	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS	SCALAR BOSONS
mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ e electron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tau	mass $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge 1 spin $\frac{1}{2}$ e^+ positron	mass $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ charge 1 spin $\frac{1}{2}$ $\bar{\mu}$ antimuon	mass $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ charge 1 spin $\frac{1}{2}$ $\bar{\tau}$ antitau	mass $\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ charge 0 spin 1 Z Z ⁰ boson		
mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	mass $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_e$ electron antineutrino	mass $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_\mu$ muon antineutrino	mass $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ $\bar{\nu}_\tau$ tau antineutrino	mass $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge 1 spin 1 W^+ W ⁺ boson	mass $\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin 1 W^- W ⁻ boson	

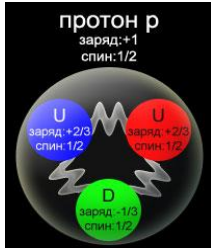
- Три поколения фермиони:
 - Кварки
 - Лептони
- Четири фундаментални взаимодействия и техните преносители
 - Глуони - Силно
 - Фотони - Електромагнитно
 - W⁺, W⁻ и Z - Слабо
 - Гравитон - гравитационно
 - не се разглежда в СМ
- Маси на частиците - Хигс бозон (H)

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

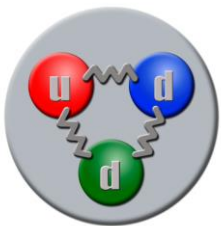
Тежките частици имат кратък живот и се разпадат на други по-леки частици.

Колко на брой са частиците?

Бариони (qqq)

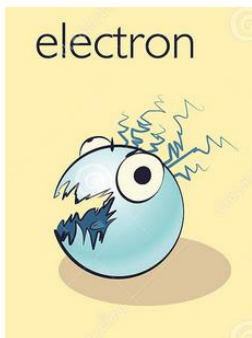


$p (u u d)$ $1.673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $\sim 10^{33} \text{ years}$



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

Лептони

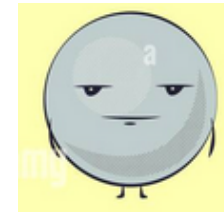


(\dots) $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$
 ∞

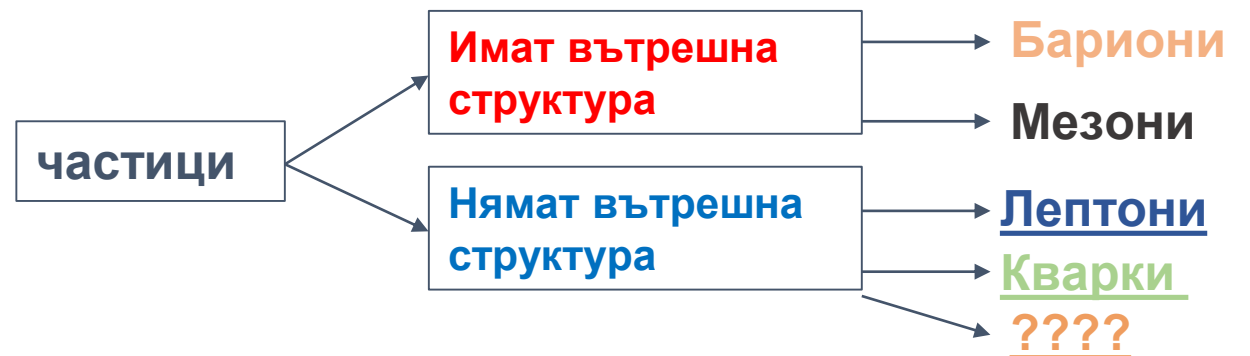
Мезони (q anti-q)



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



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

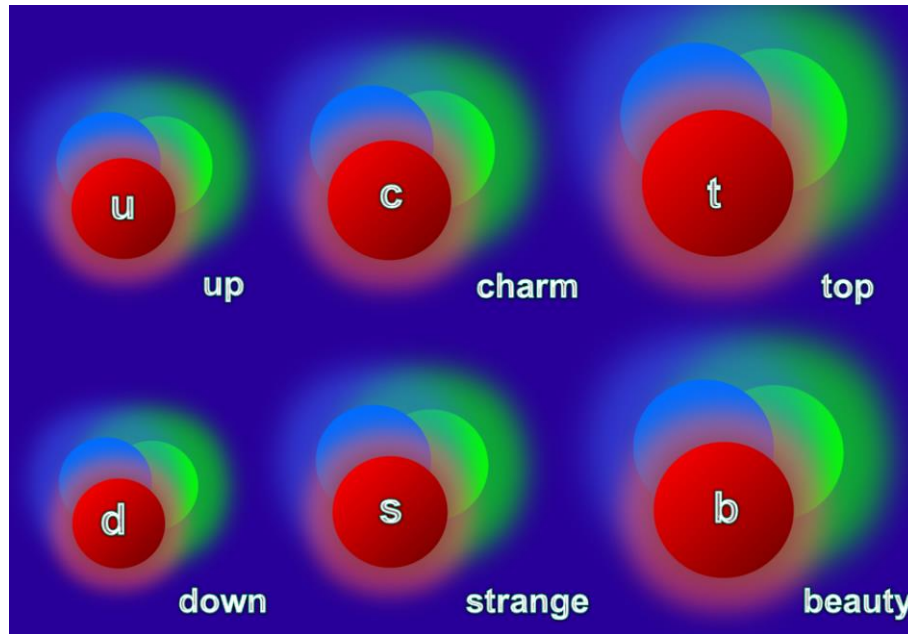


Кварков строеж на адроните



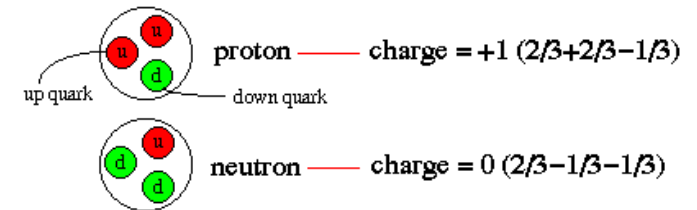
Murray Gell-Mann

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.**

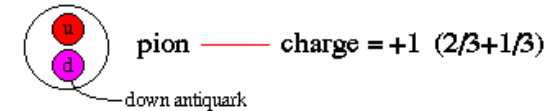


Atomic Nuclei = Combinations of Quarks

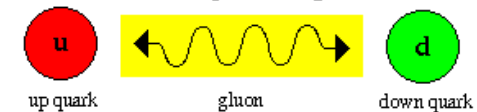
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

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

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



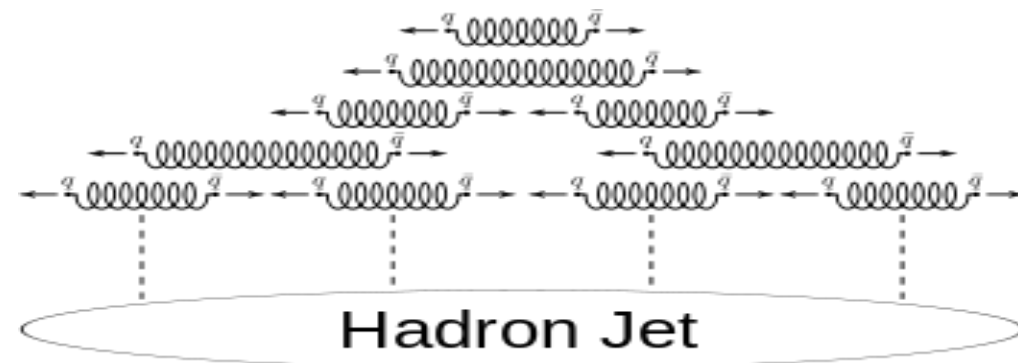
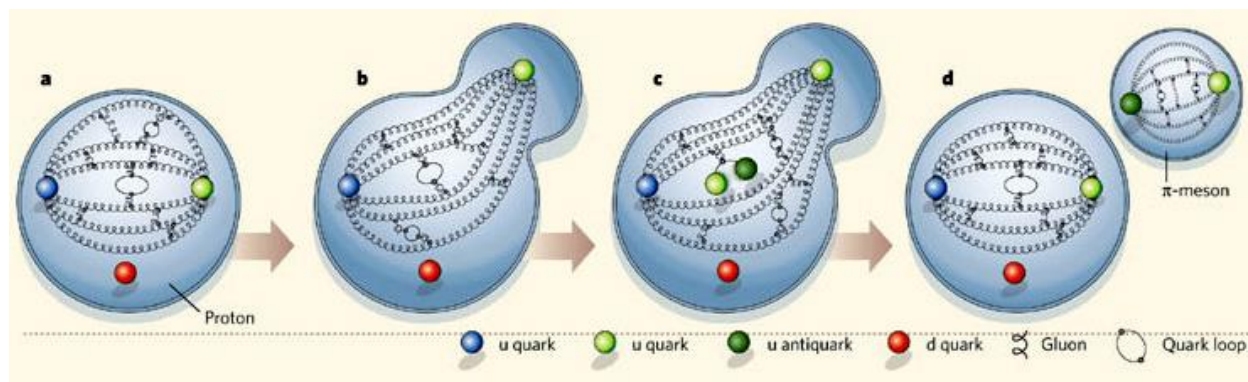
GLUONS CARRY A
COLOR AND AN
ANTI-COLOR

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.

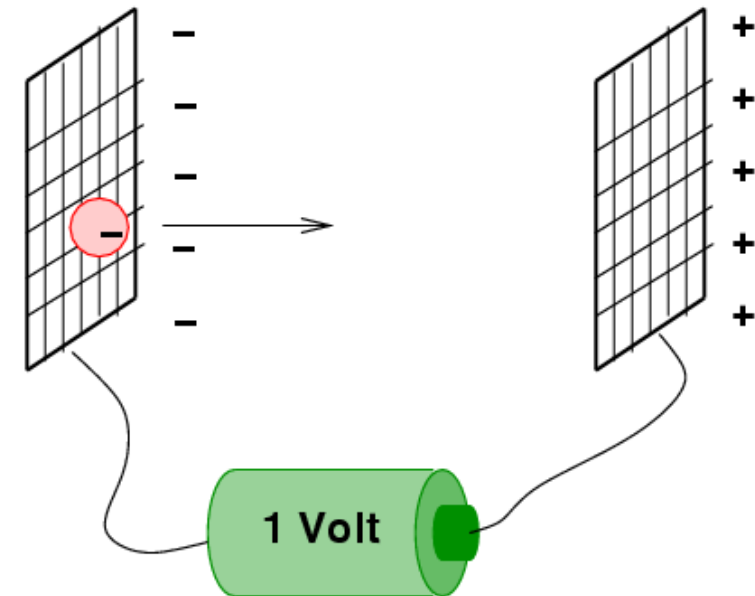
Мерни единици и какво е един електрон-волт [eV]?

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 ²]
....		



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

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

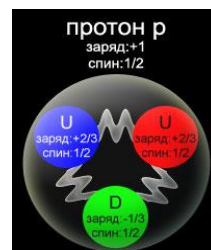
Системи от мерни единици

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 ²]
....		

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



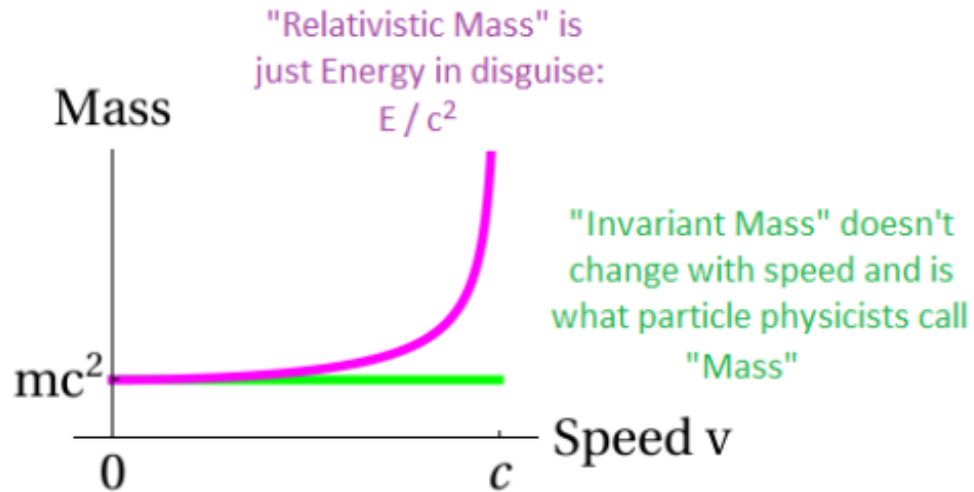
$$\left(\text{-----} \right) \frac{9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}{\infty} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$



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

$\sim 10^{33}$ years

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.

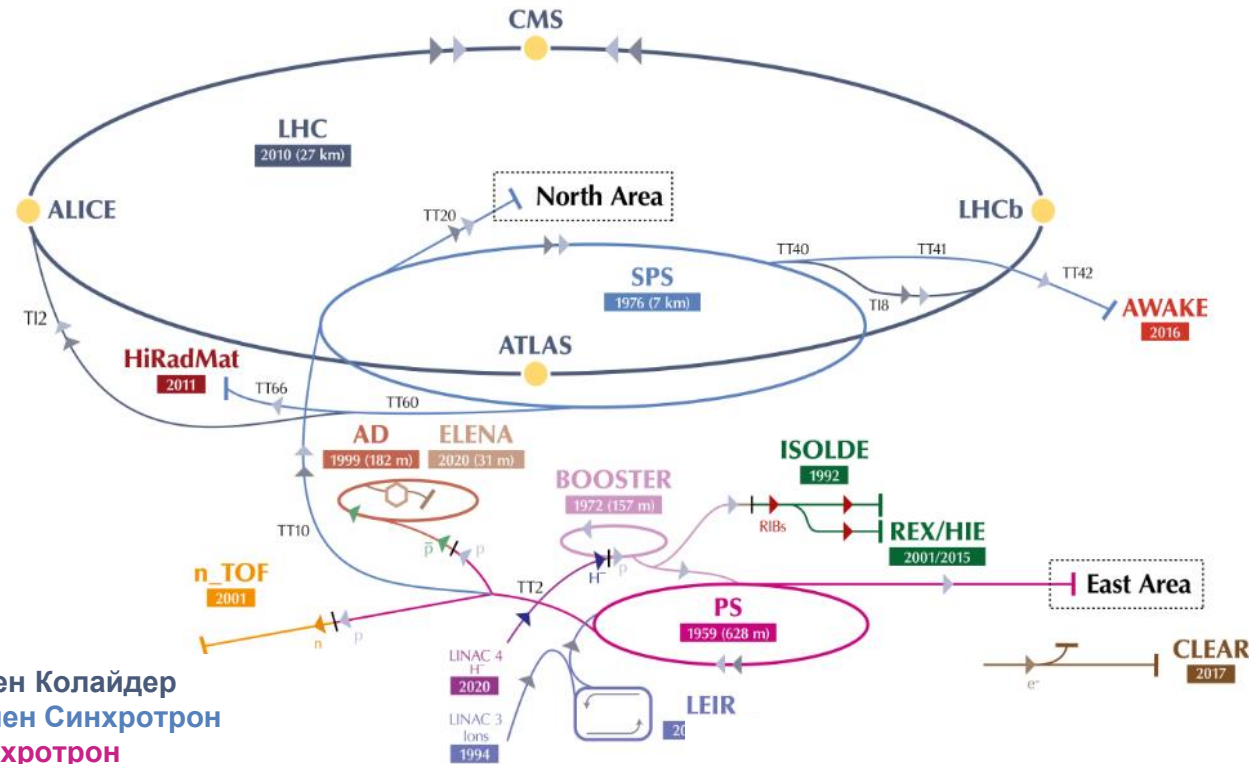
Детектори - експериментът CMS

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

Сасо

ISOLDE – Установа за изучаване на Ядрени

Изотопи

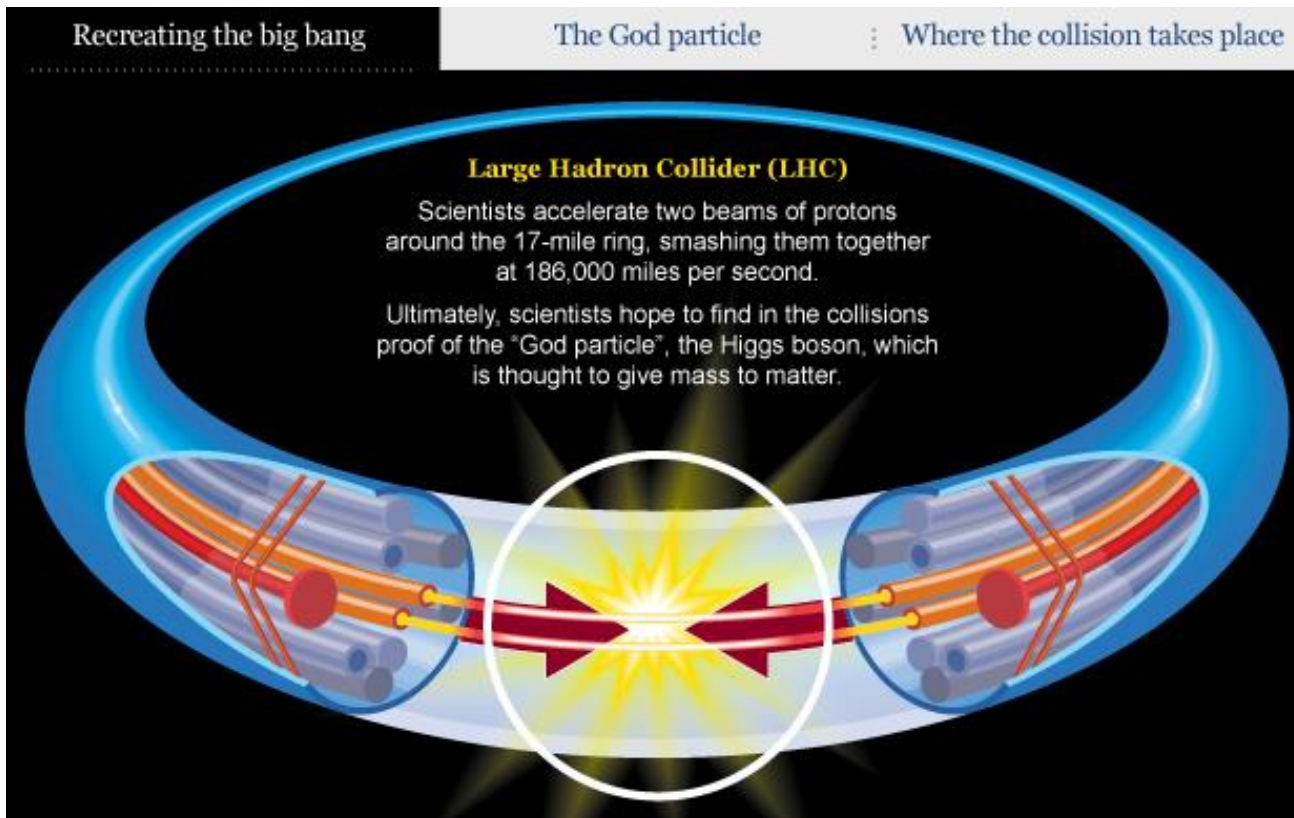
LEIR – Пръстен за Йони с Ниски Енергии

LINAC 2 – Линеен Ускорител 2

N-TOF – Неутрона Установа

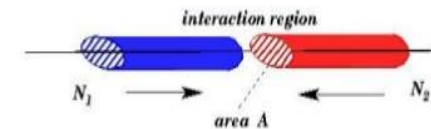
Снопове:

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



- 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:
 - $E = 14 \text{ TeV}$

- 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.



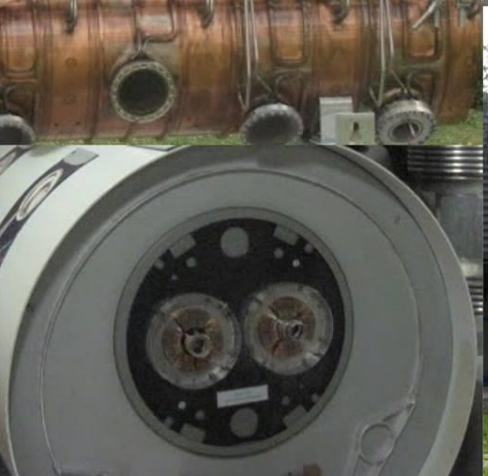
Ако сме създали частици при сблъсък в ускорител, искаме да можем да ги разглеждаме и изучаваме. И тук идват детекторите за частици. Ние ги изграждаме в точките на сблъсък в ускорител и ги използваме, за да идентифицираме колкото се може повече от това, което е произведено при сблъсъка.

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

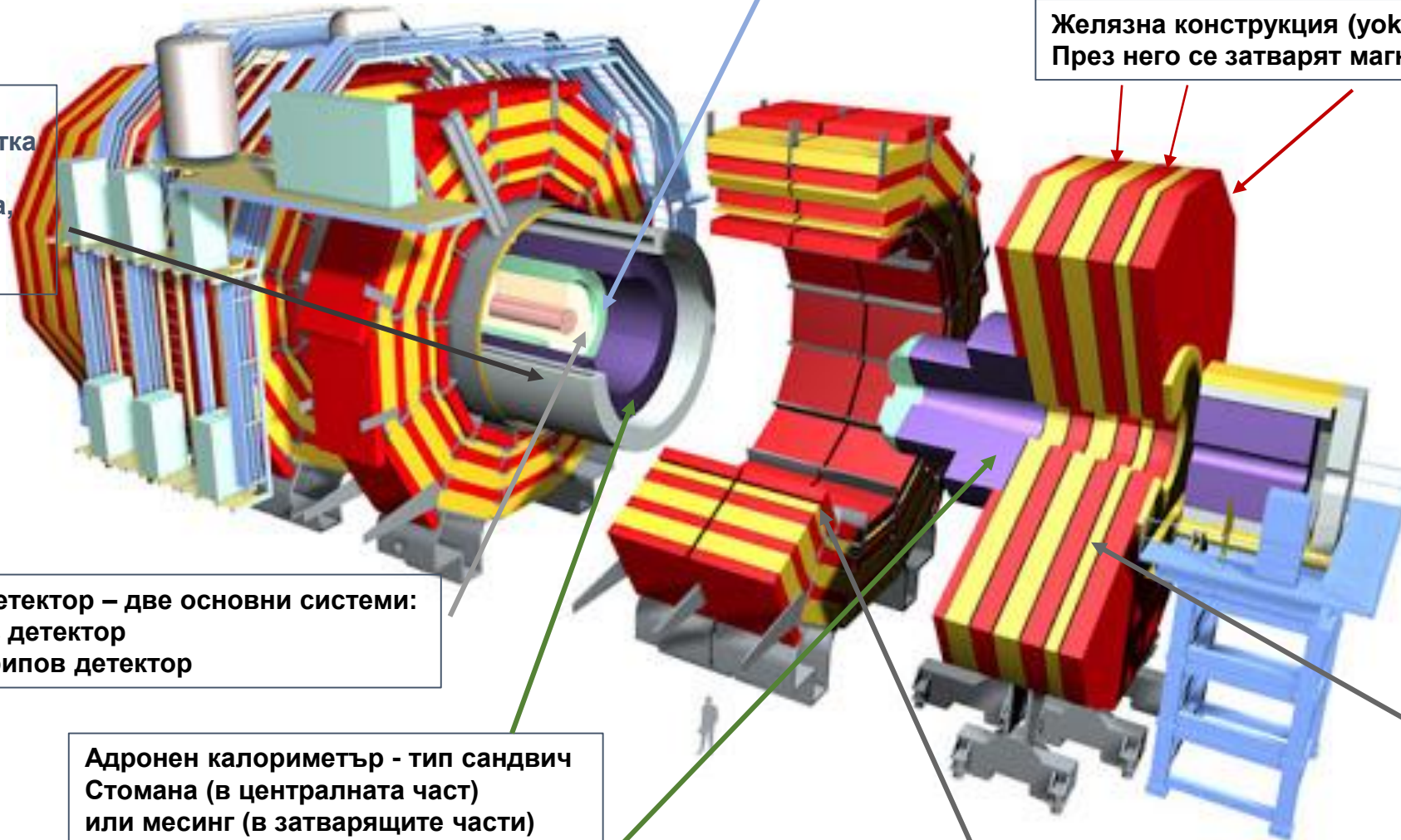
Соленоидален магнит
Суперпроводяща намотка
Магнитно поле:
3.8 T във вътрешността,
затворена от магнита
~1.8 T извън магнита

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

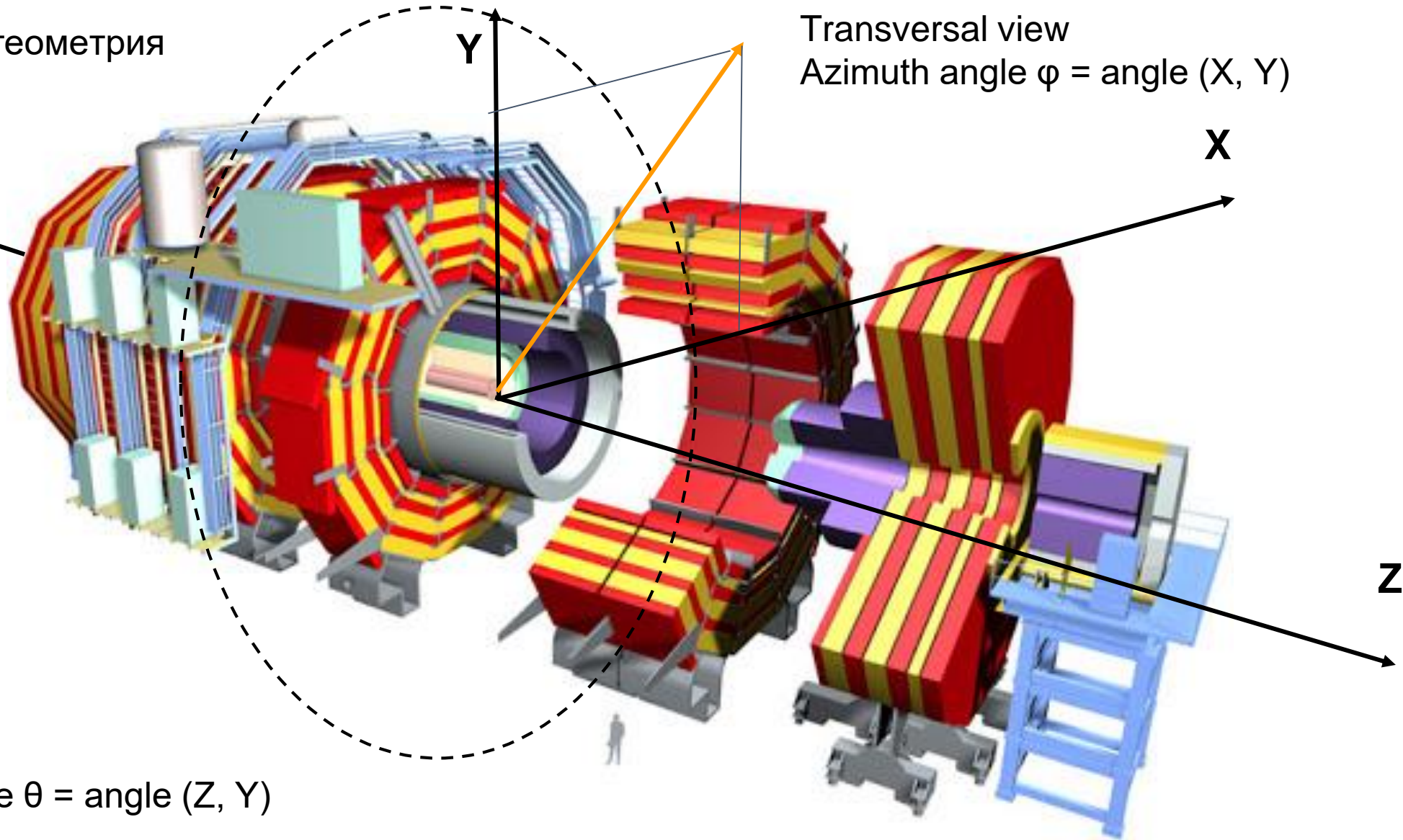
Transversal view
Azimuth angle $\varphi = \text{angle}(X, Y)$

X

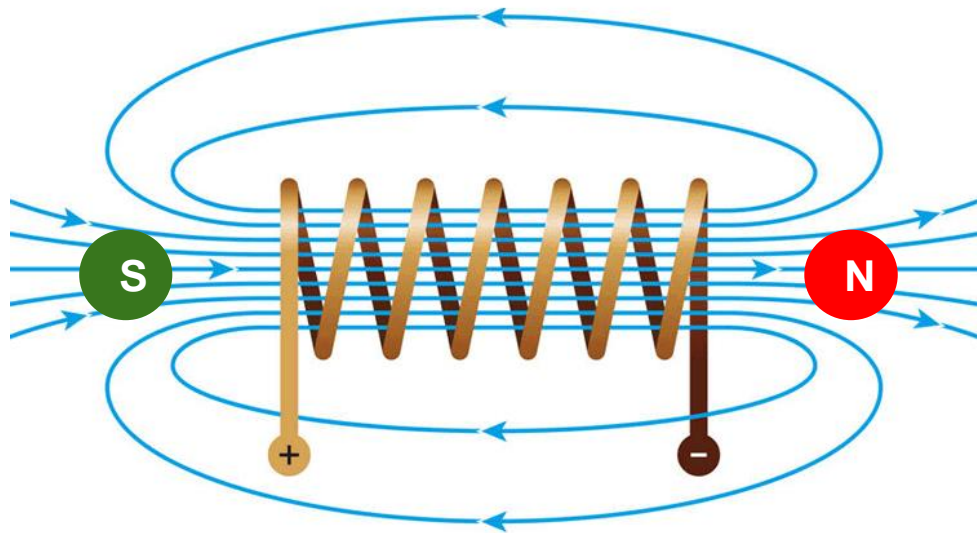
Z

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

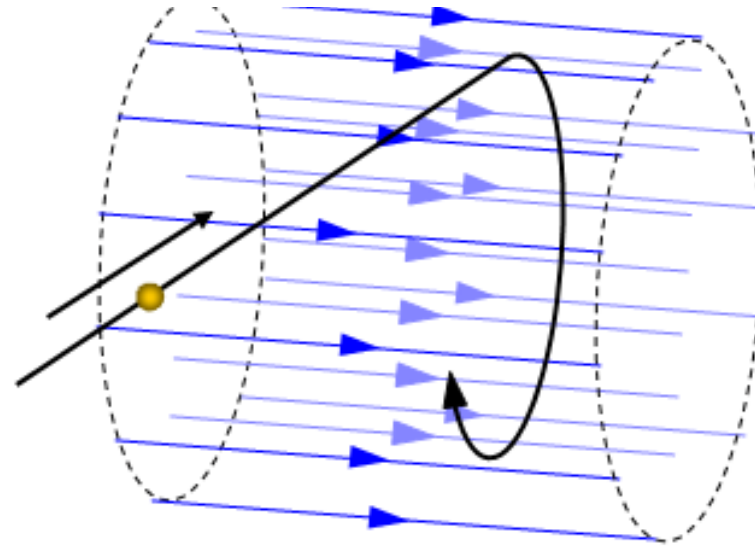
$$-\ln \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) = \eta \quad \eta\text{-Pseudorapidity}$$



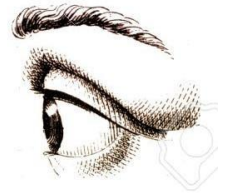
Движение на заредена частица в магнитно поле



Соленоид (магнитно поле)



Траекторията на заредена частица се закривява в магнитно поле.

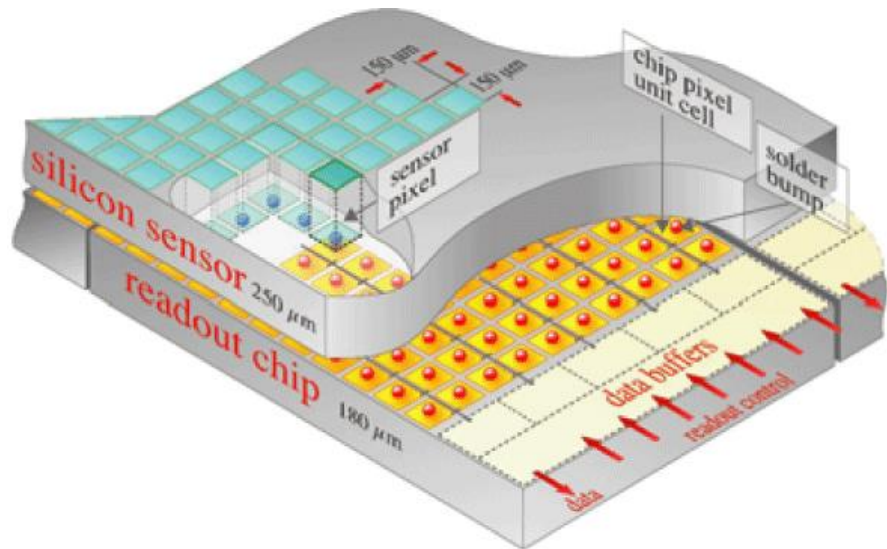


Ако гледаме срещу посоката на магнитното поле, положително заредените частици ще се отклоняват по посока на часовниковата стрелка, а отрицателно заредените в обратна посока.

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.

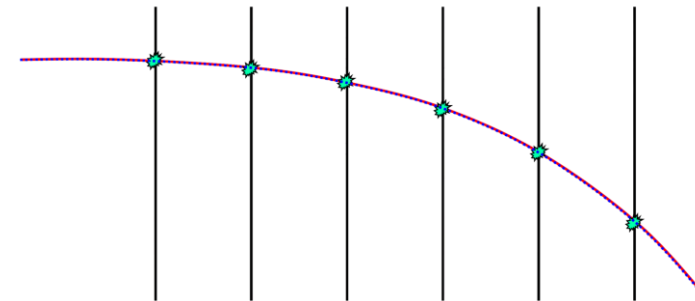
Определяне на импулс и заряд – Вътрешен треков детектор

Полупроводников детектор на трекове



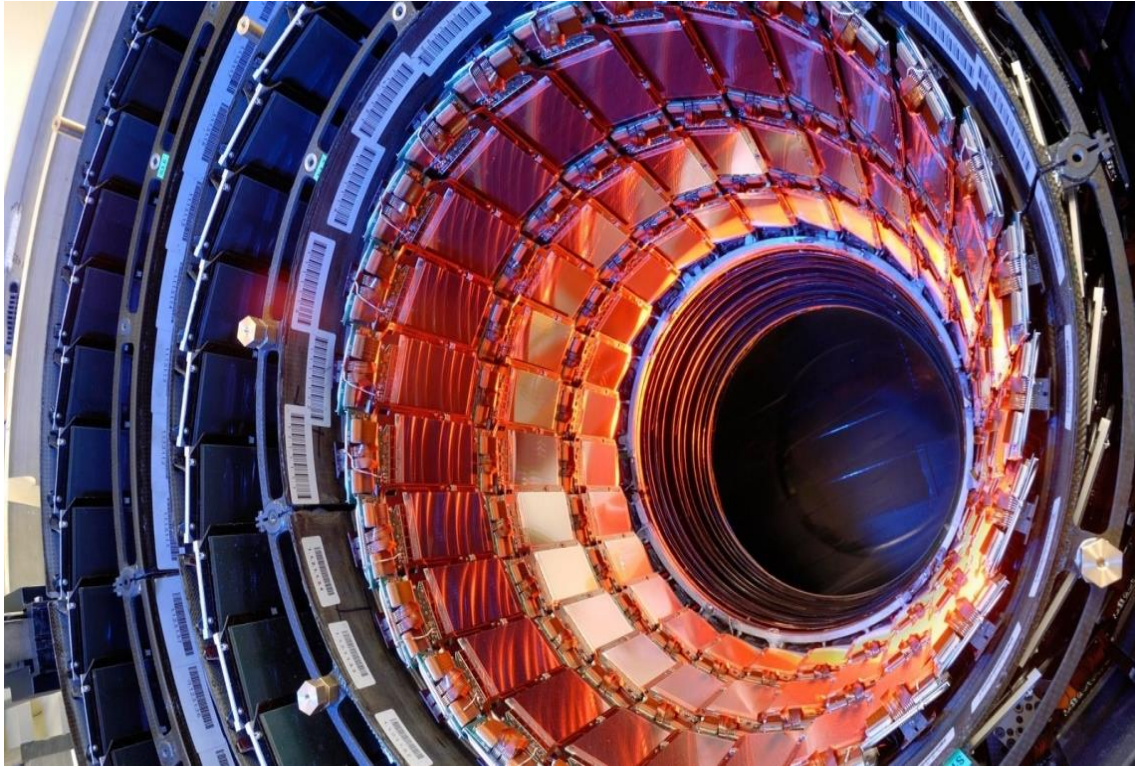
Пикселен детектор на трекове – многослоен полупроводников детектор от тънки пластинки с нанесена върху им електроника

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



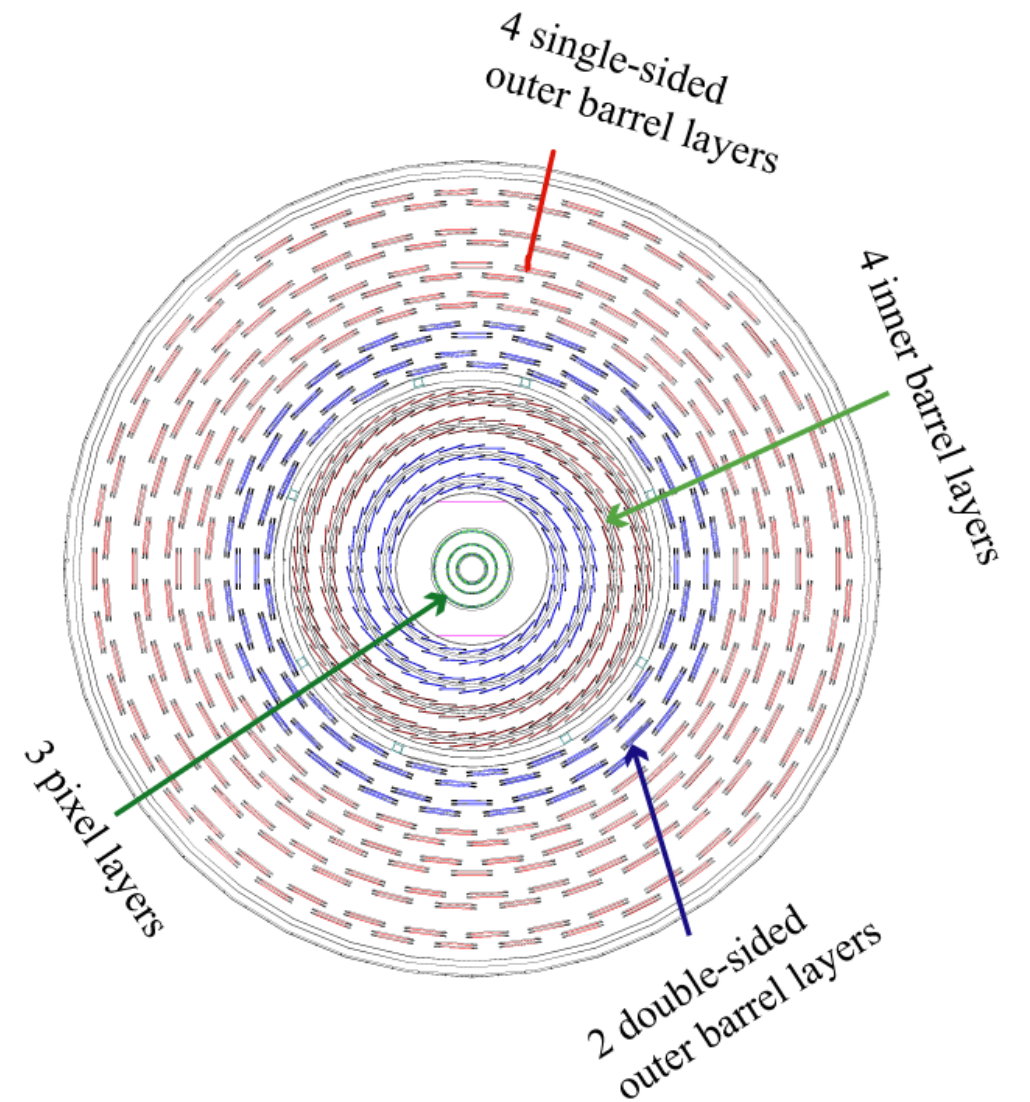
Сигналите от вътрешния треков детектор, позволяват да се реконструират техните траектории. Големината на закривяване на техните траектории позволяват определянето на техния импулс по формулата $r \sim p/B$, където r [m] е радиусът на кривината, p [GeV/c] – импулсът на електрона, а B [T] е магнитното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

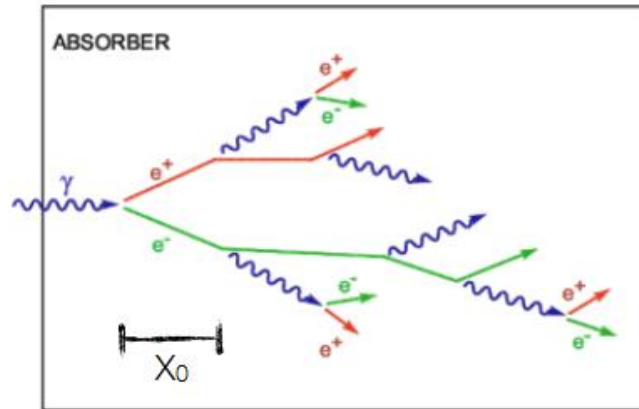
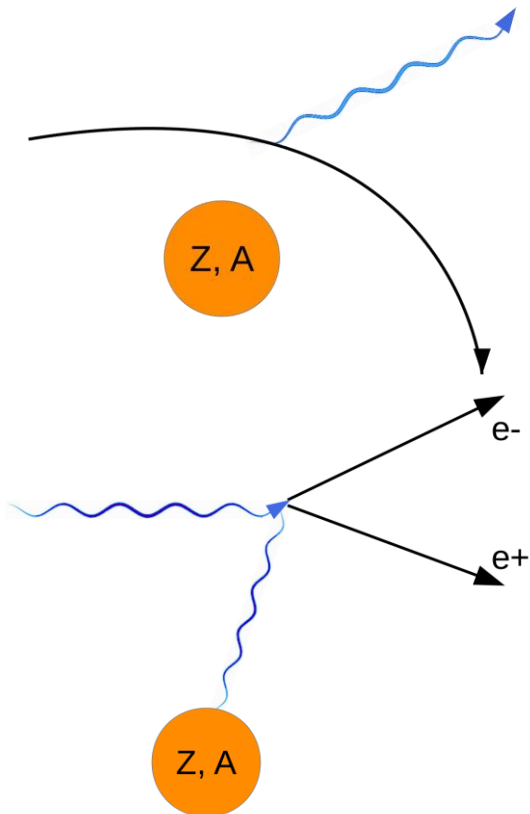


Детектиране на електрони, позитрони и фотони

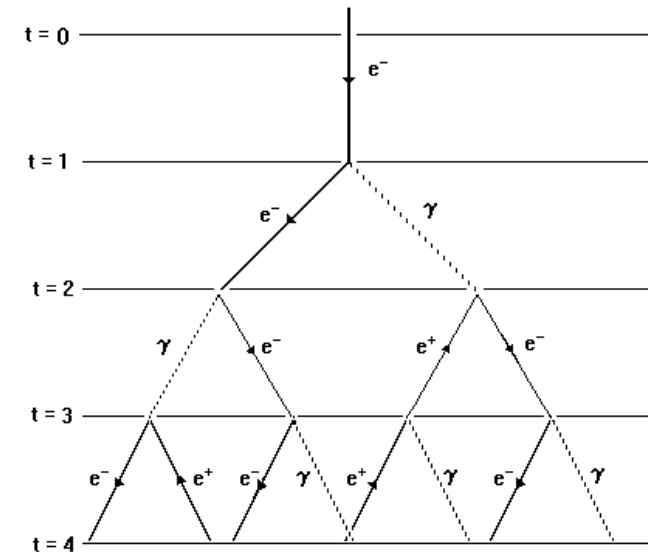
Електромагнитна лавина във вещество

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

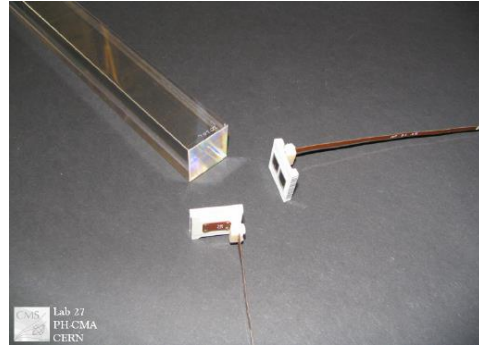


Енергията на частицата, иницирала лавината е пропорционална на броя изсветени фотони

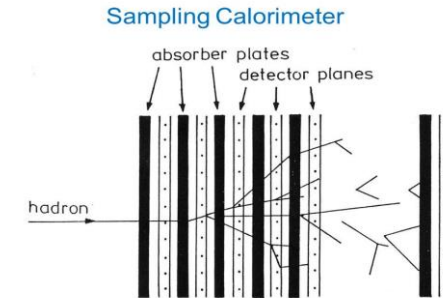


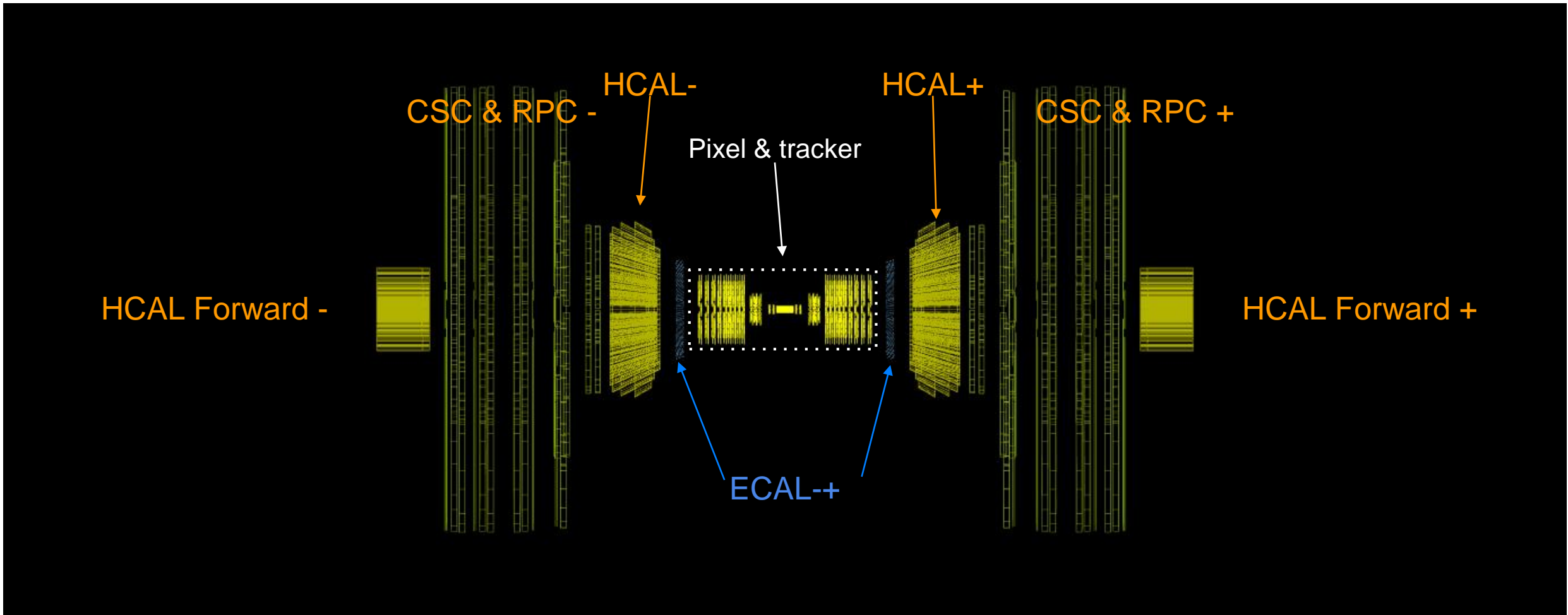
ECAL – електромагнитен калориметър на CMS

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



HCAL – адронен калориметър на CMS

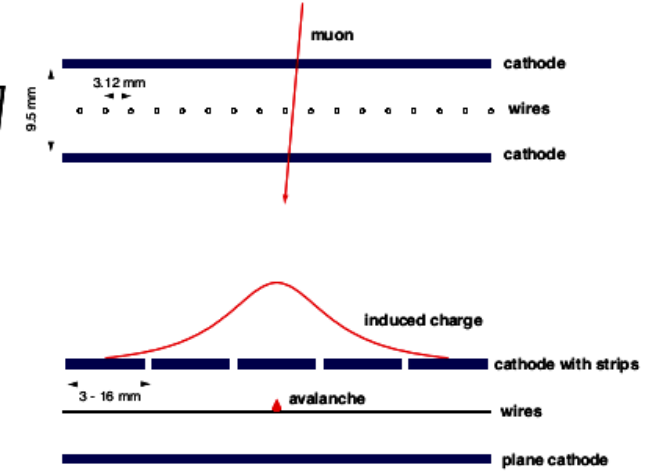
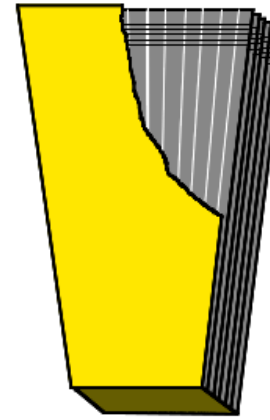
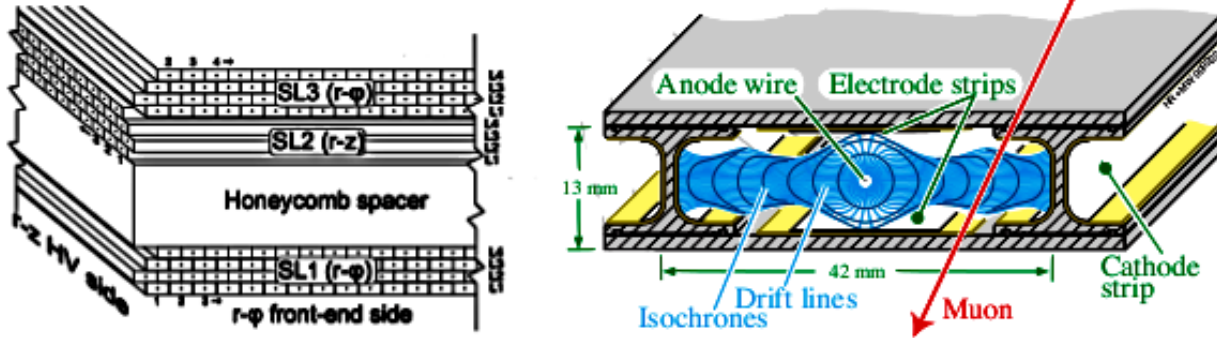




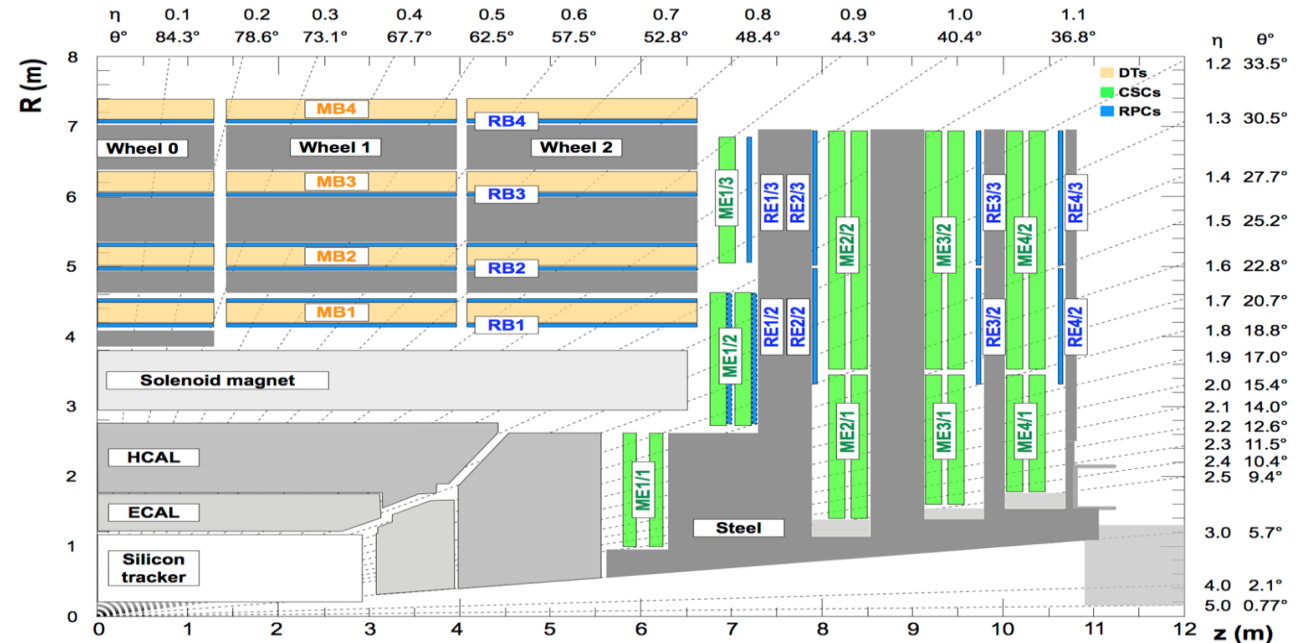
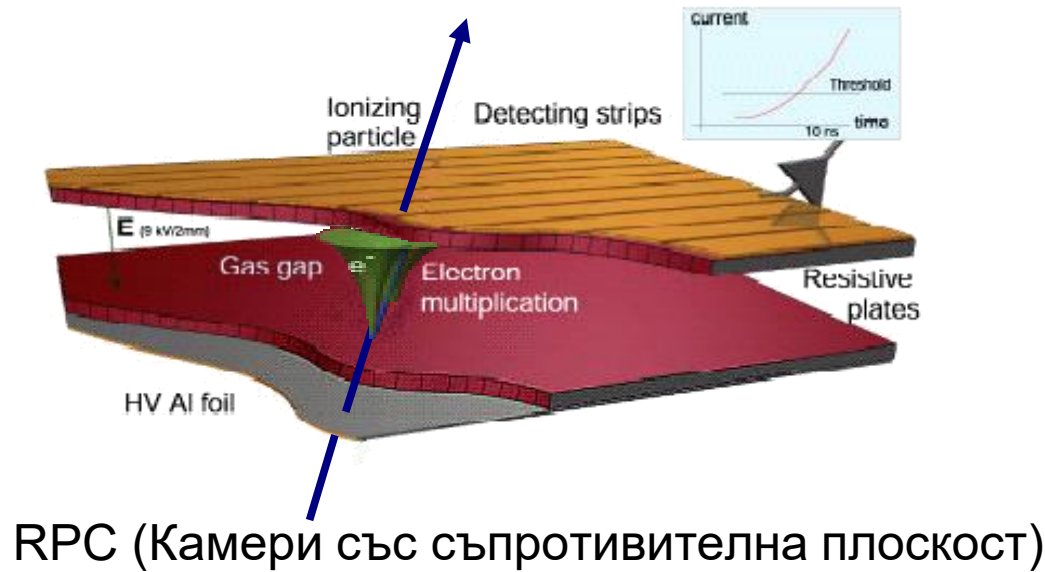
Забележка: не са показани всички детекторни слоеве, за да не се претрупва фигурата.

Мюонна система на CMS (Run1 & Run2)

DT (Камери с дрейфови тръби)

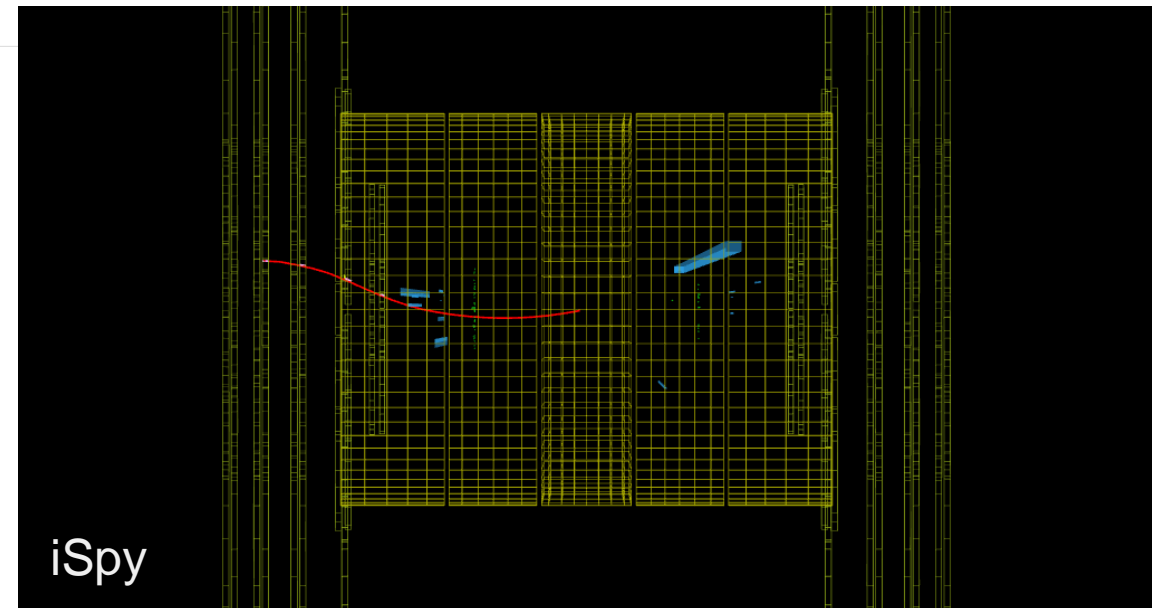
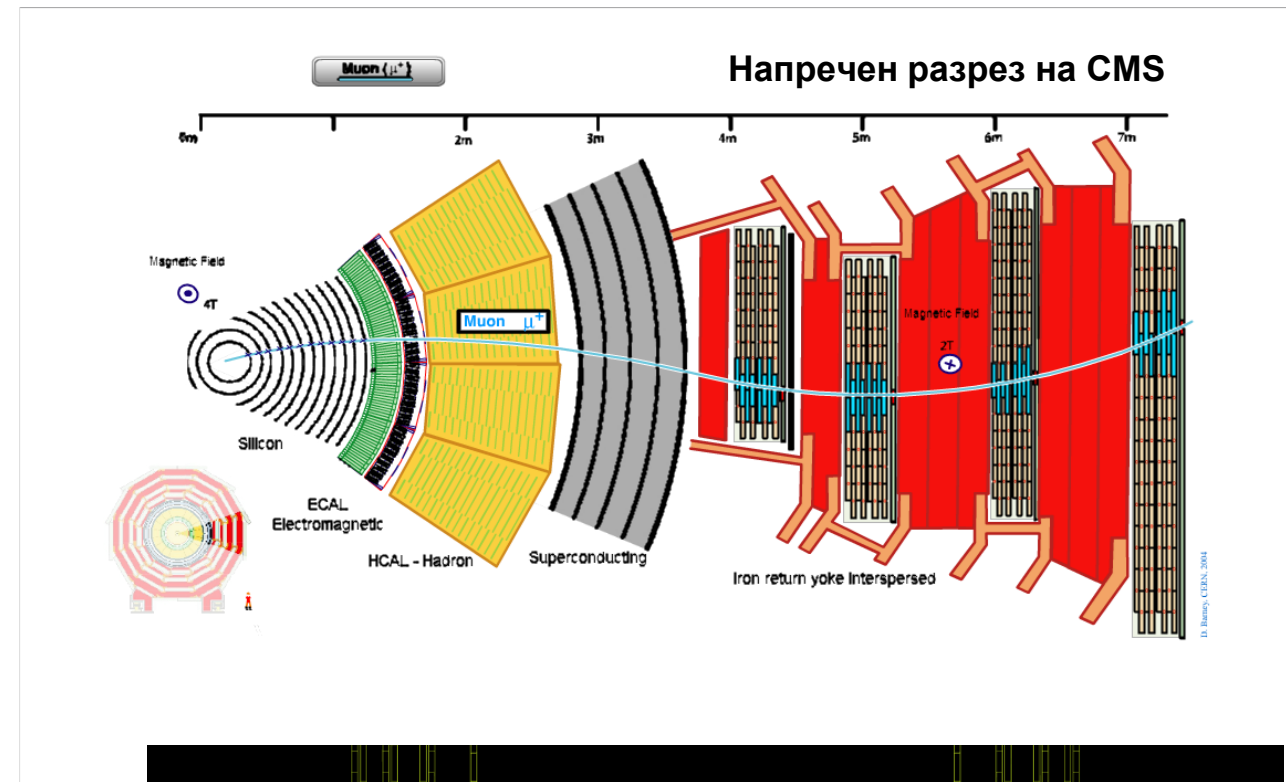


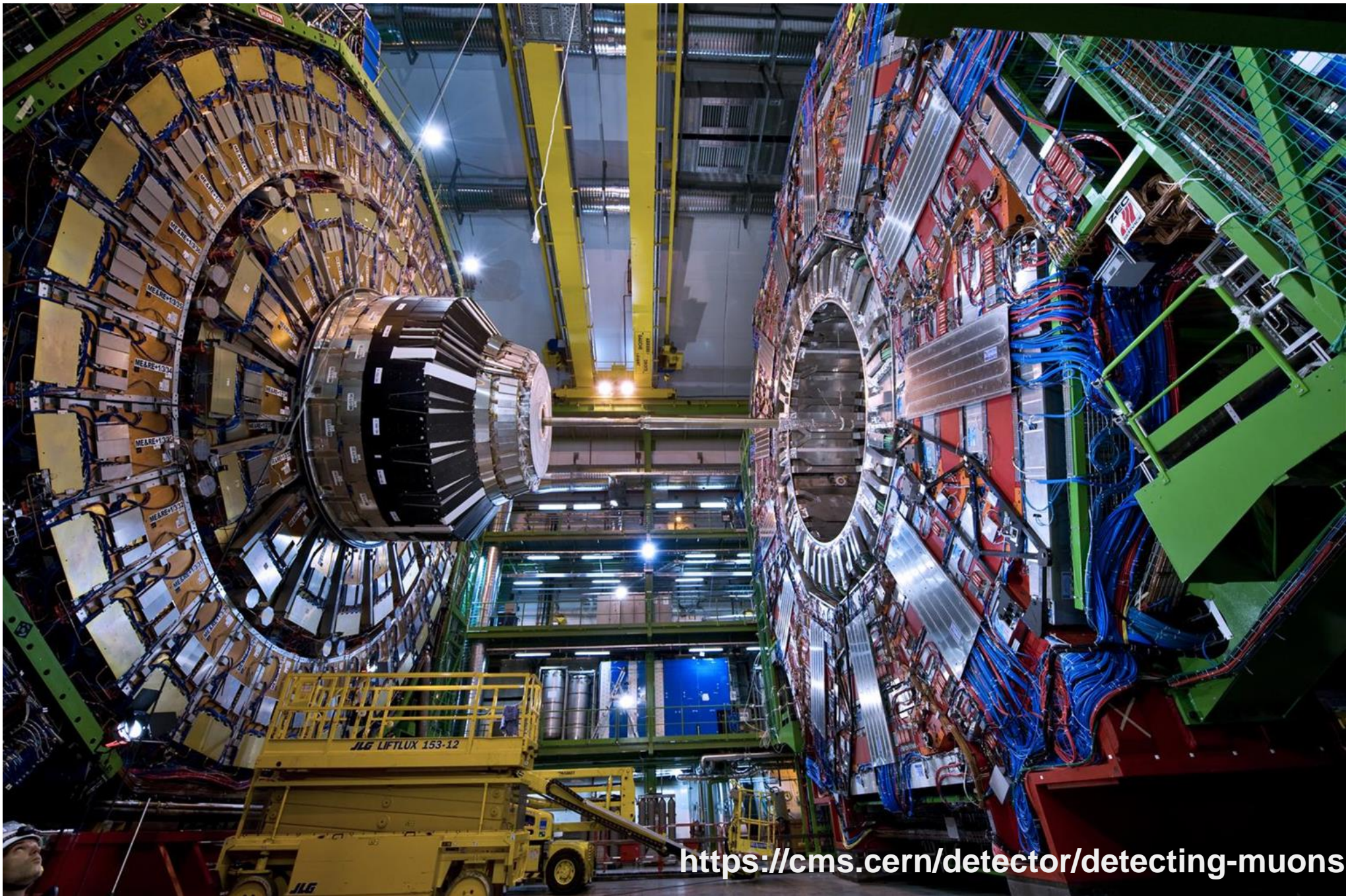
CSC (Катодно стрипови камери)



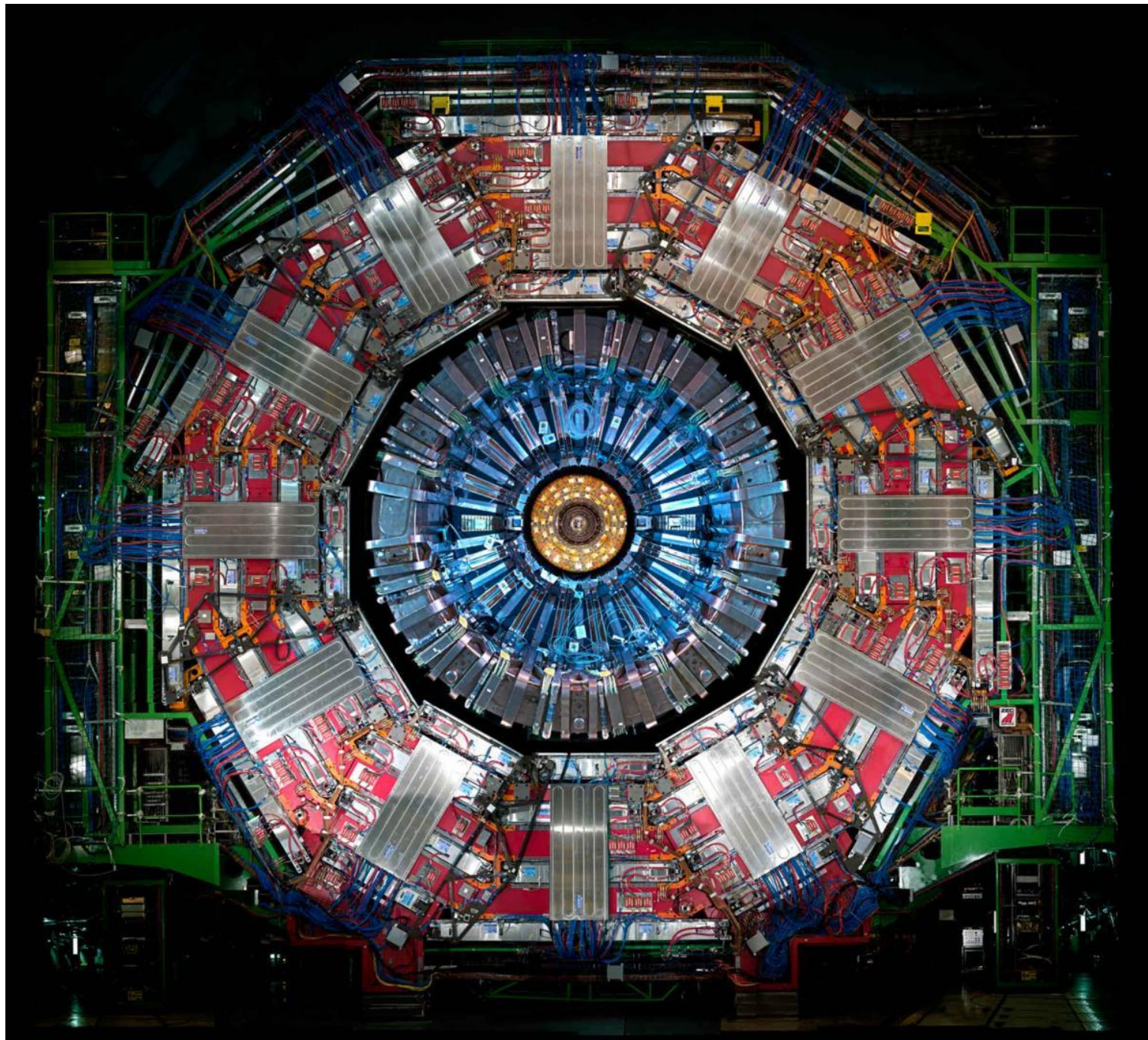
Регистриране на мюон

- 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.

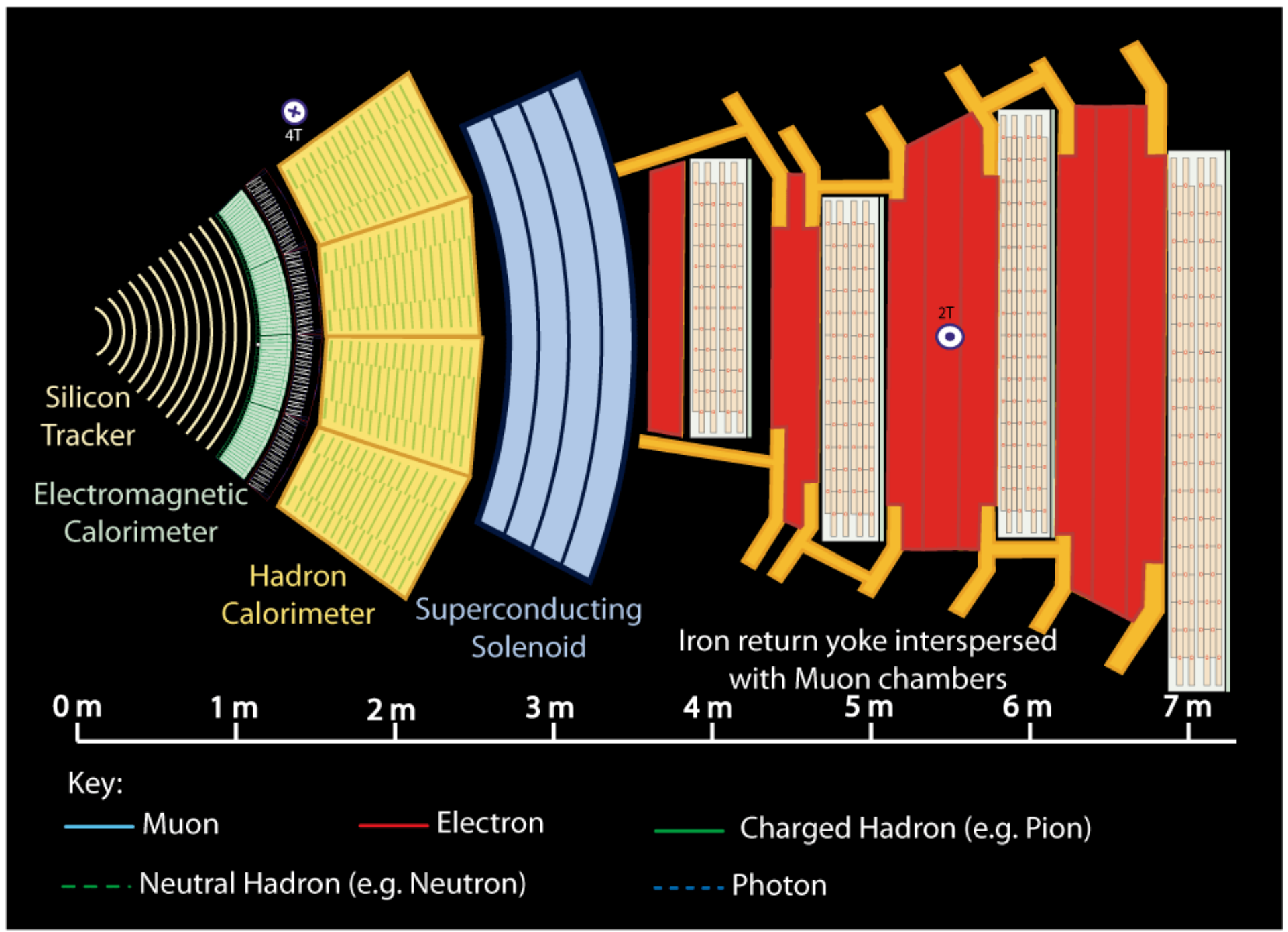


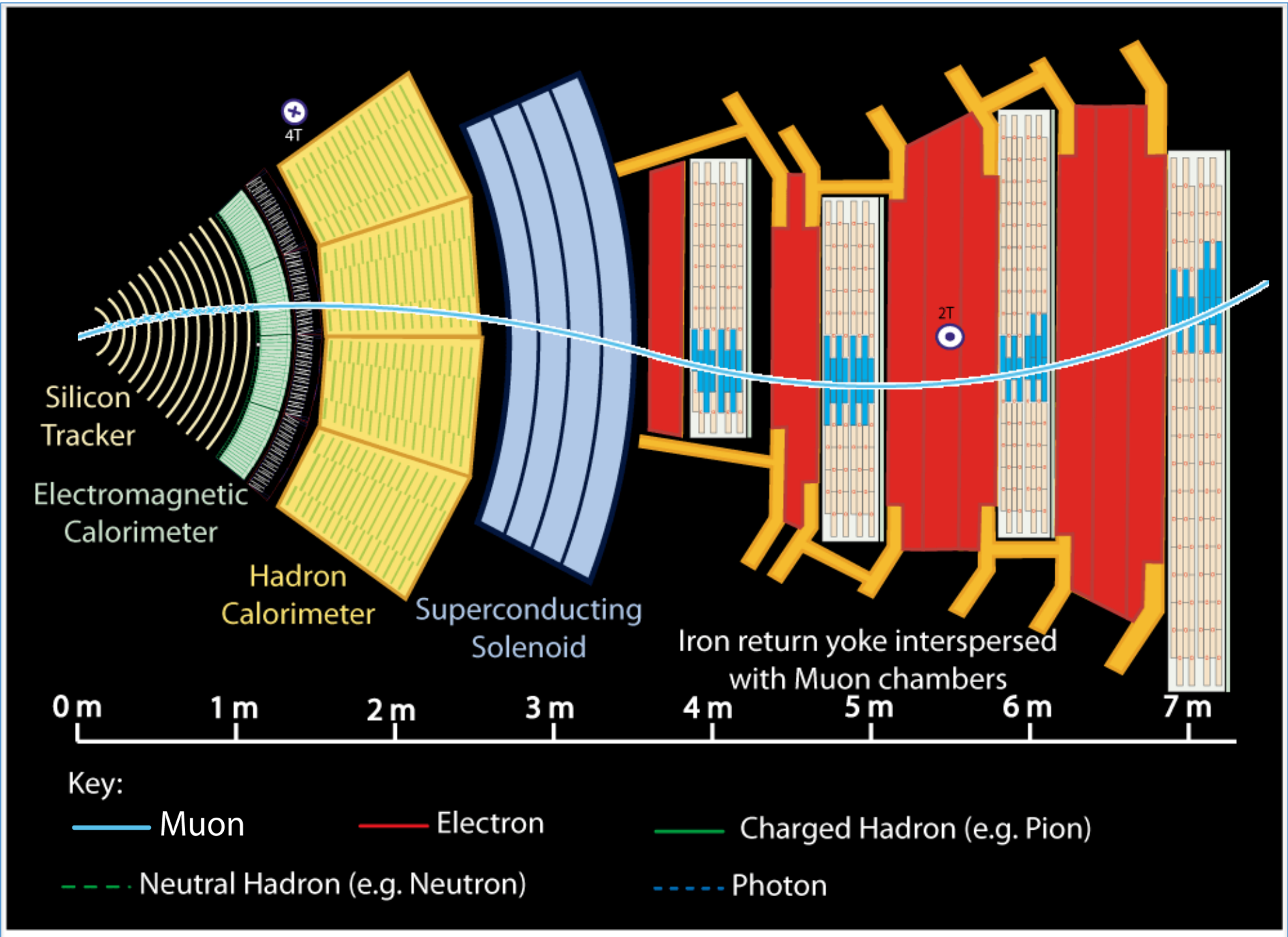


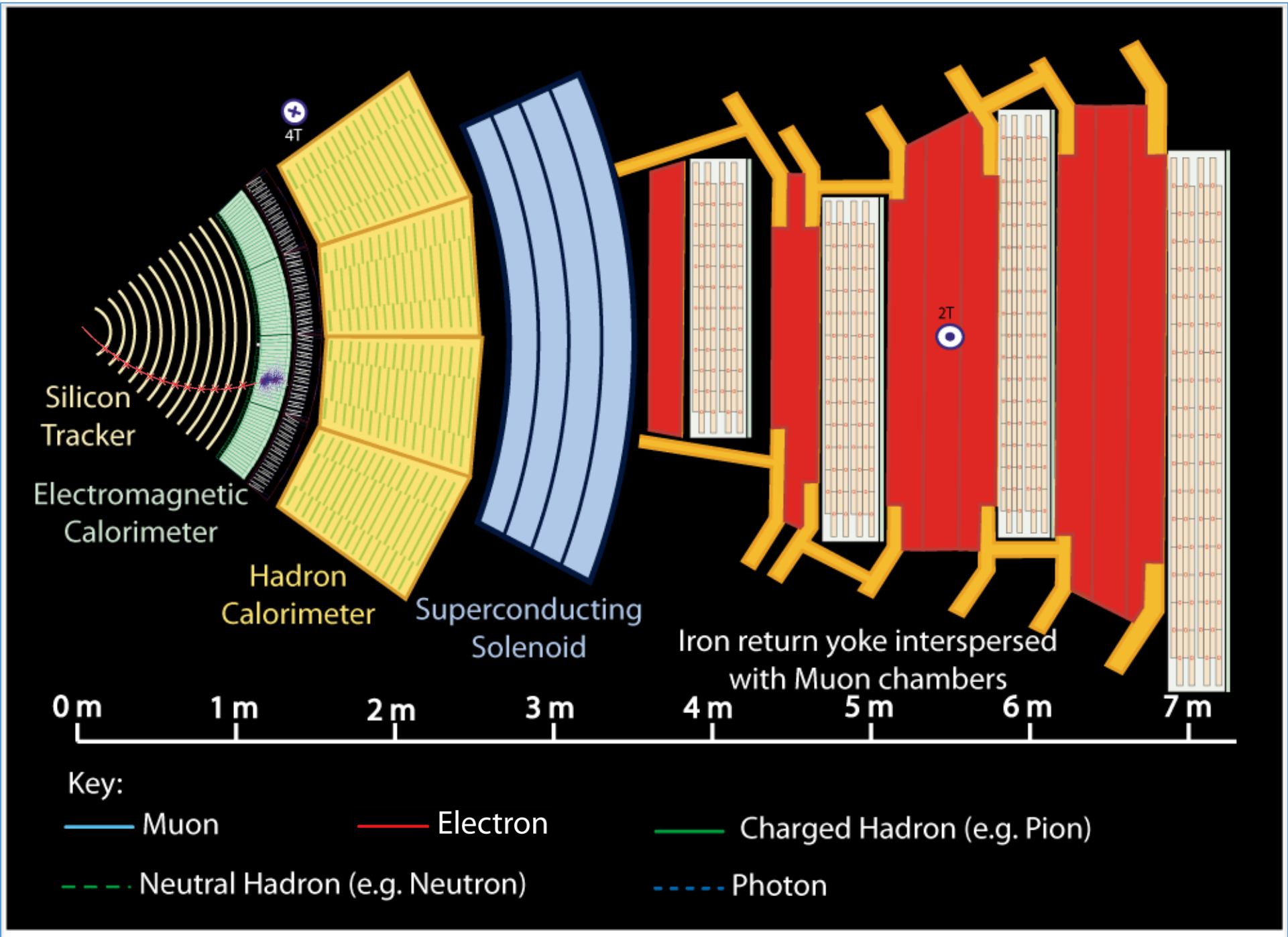
<https://cms.cern/detector/detecting-muons>

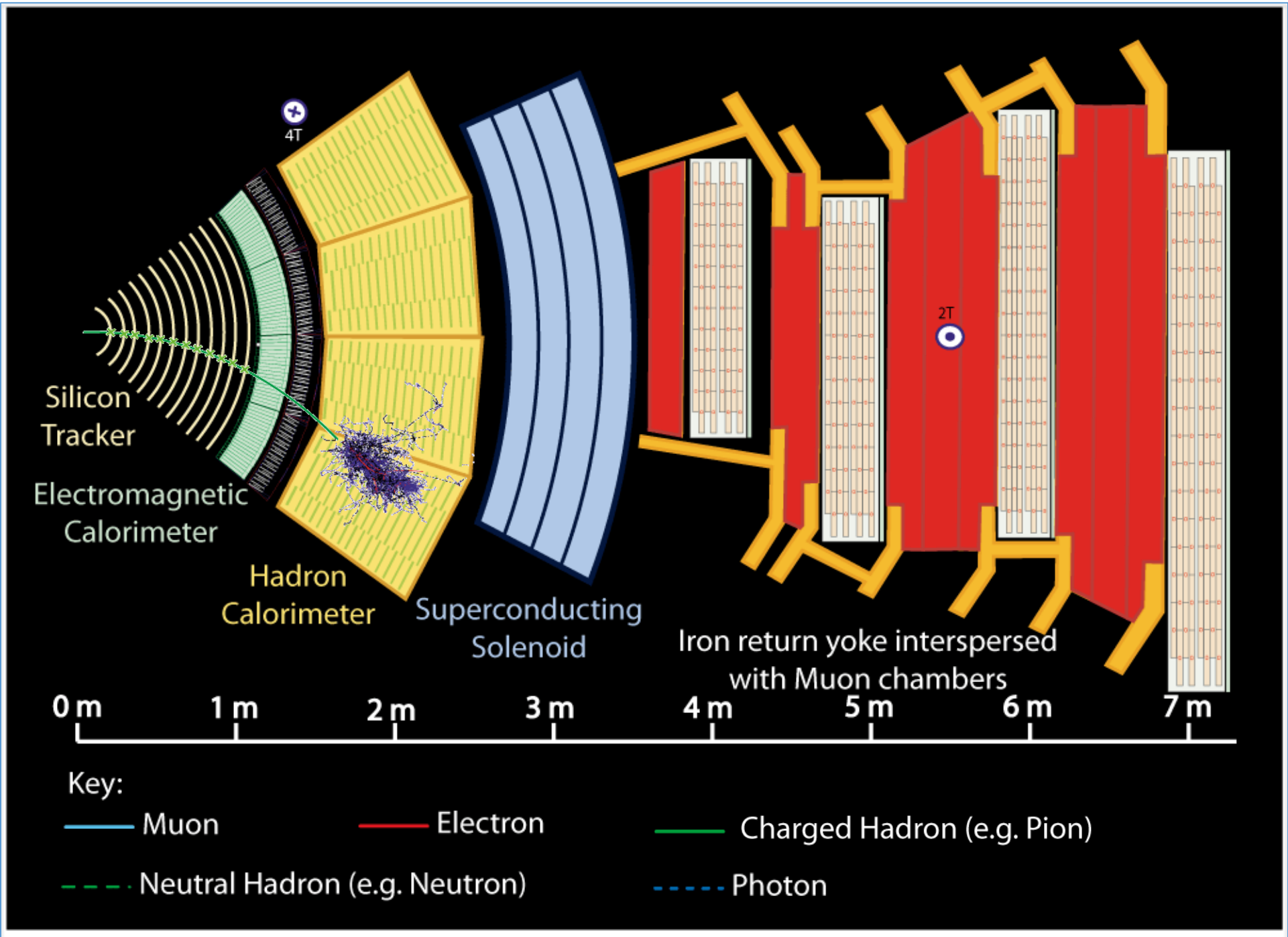


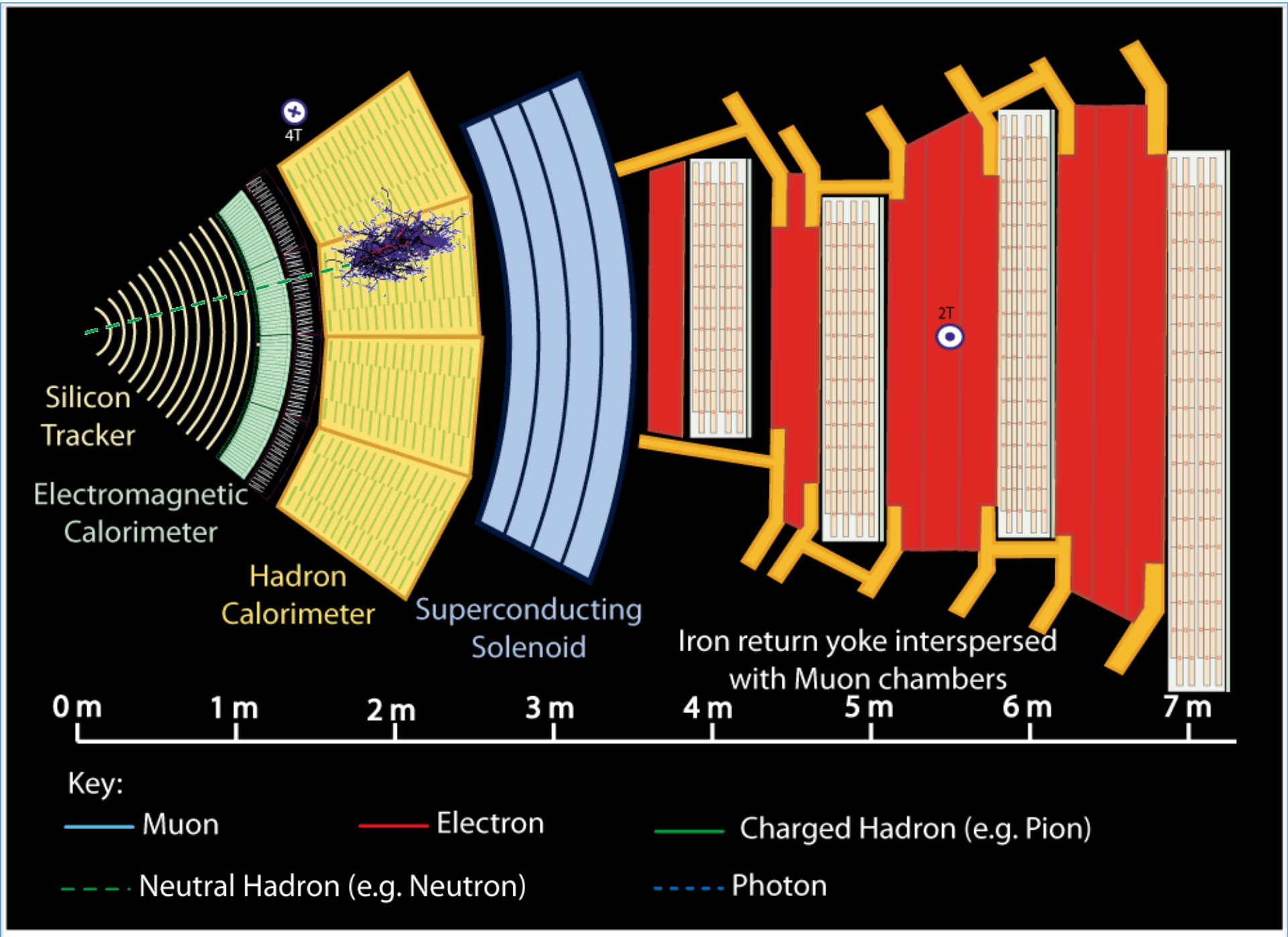
Как се регистрират частици със CMS

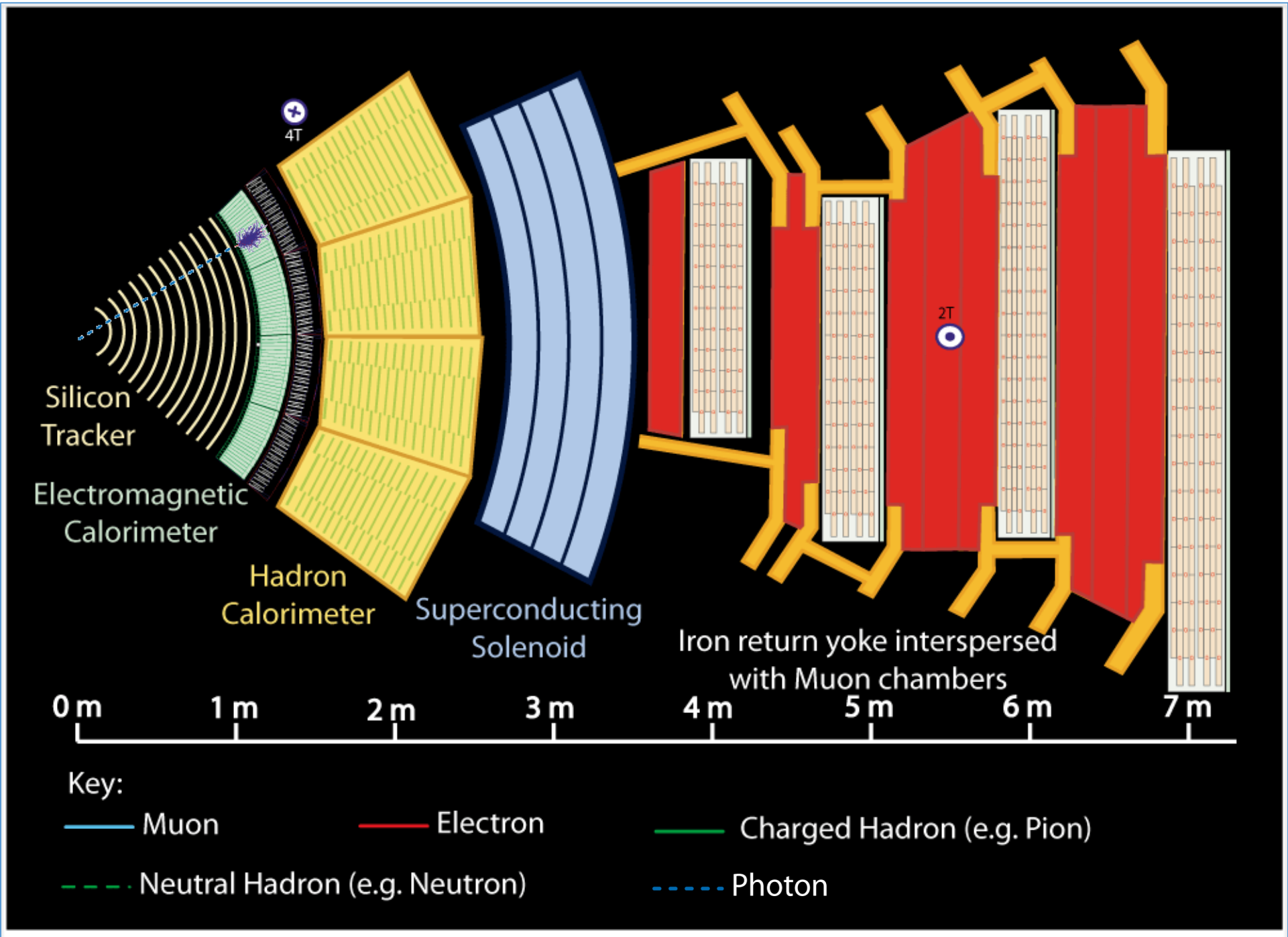




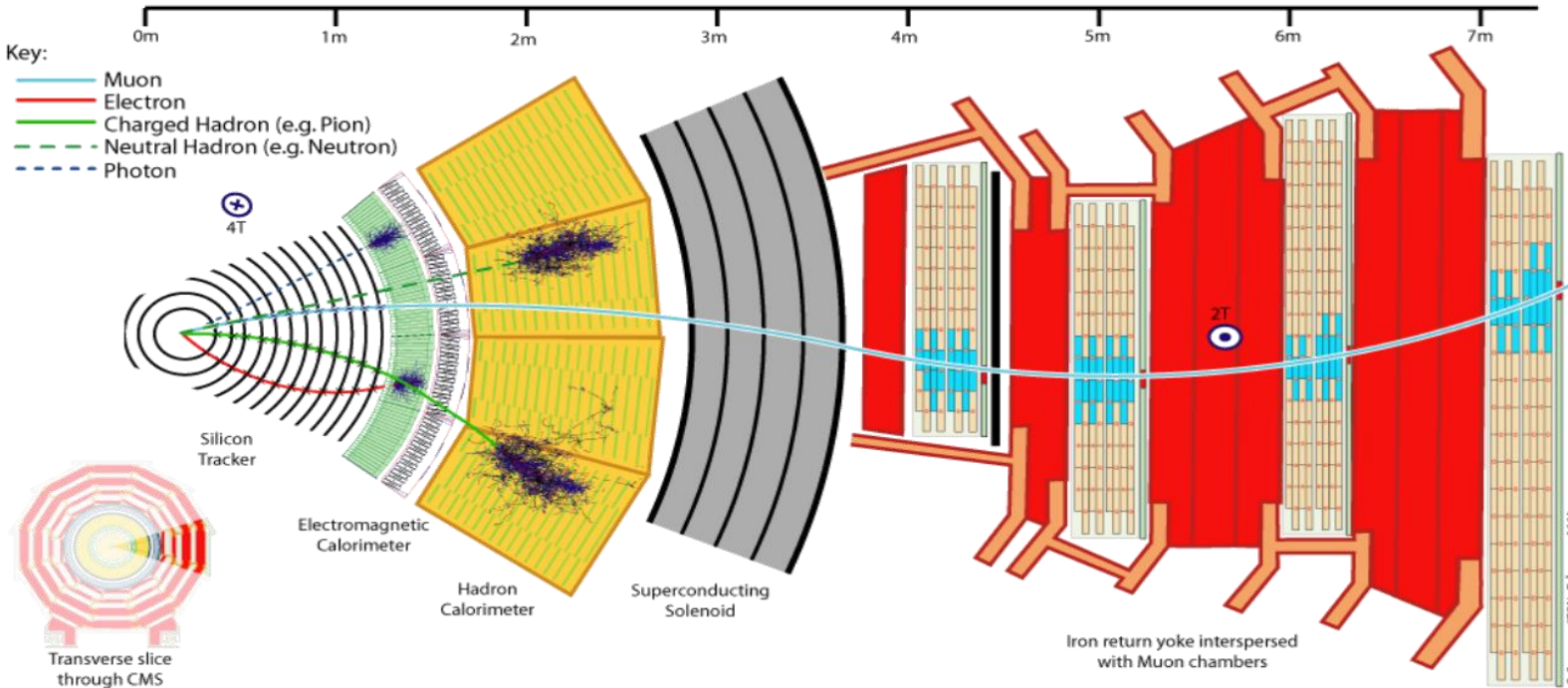








Как се регистрира частица със CMS



- 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!

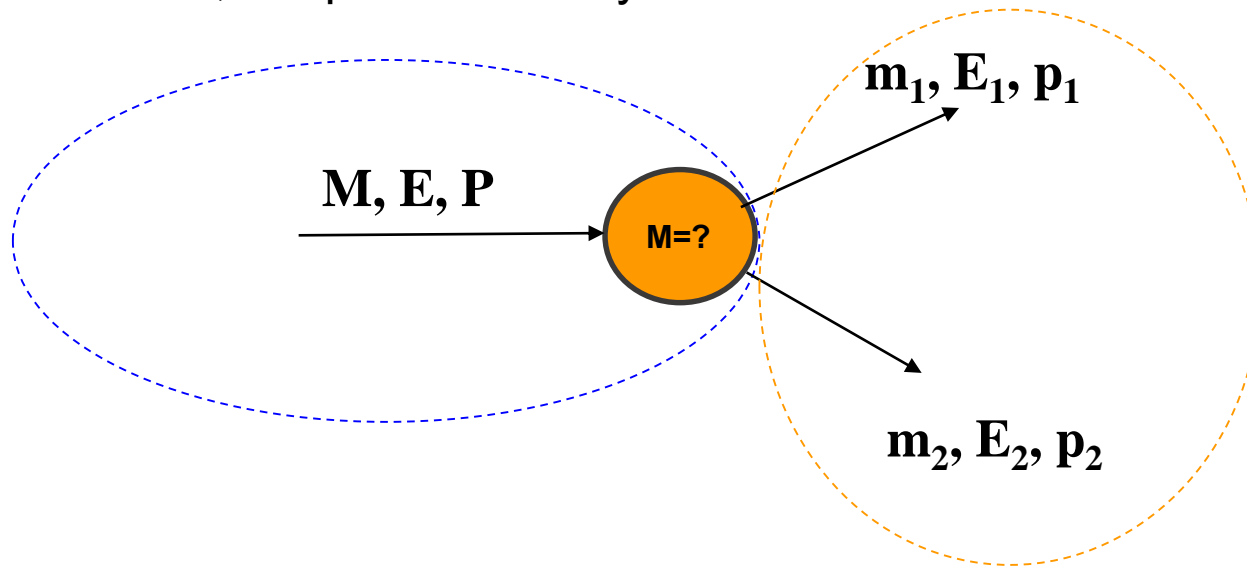
Величината, която ще използваме в нашия анализ се нарича **Missing Energy** и съдържа в себе си сумата от енергиите, отнесени от всички частици, които не сме успели да регистрираме и измерим. А също и информация за посоката, в която е отнесена тази енергия.

- 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 α

Използваме закона за запазване на енергията и импулса.

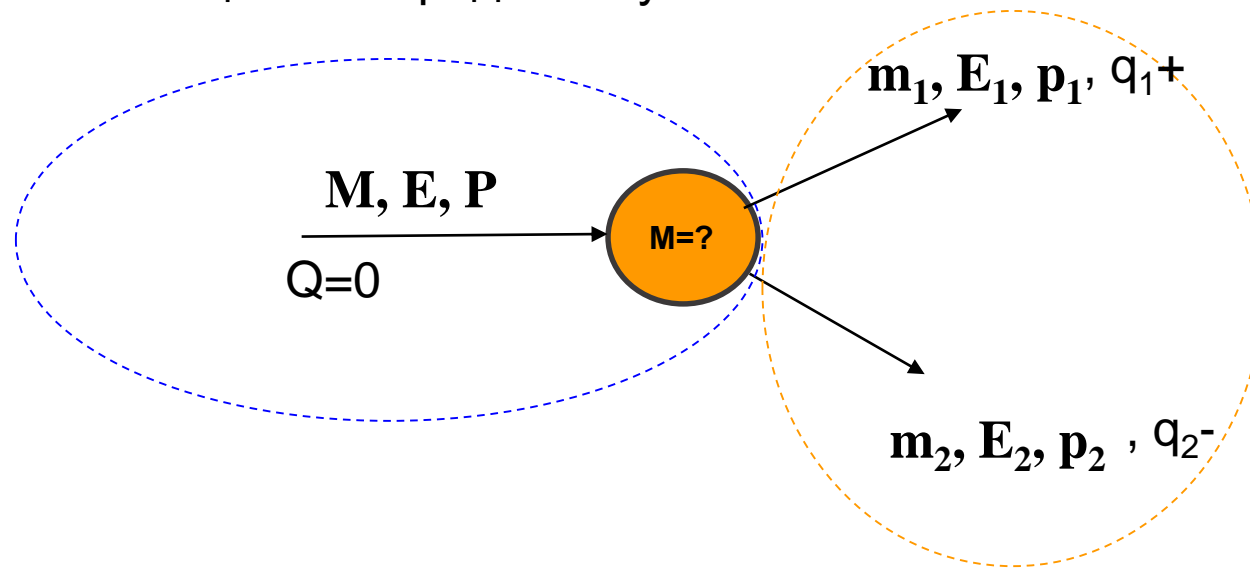
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 - p_1 \cdot p_2 \cos \alpha)$$

Маса на частицата-майка

Закон за запазване на електрическия заряд

Начално състояние:

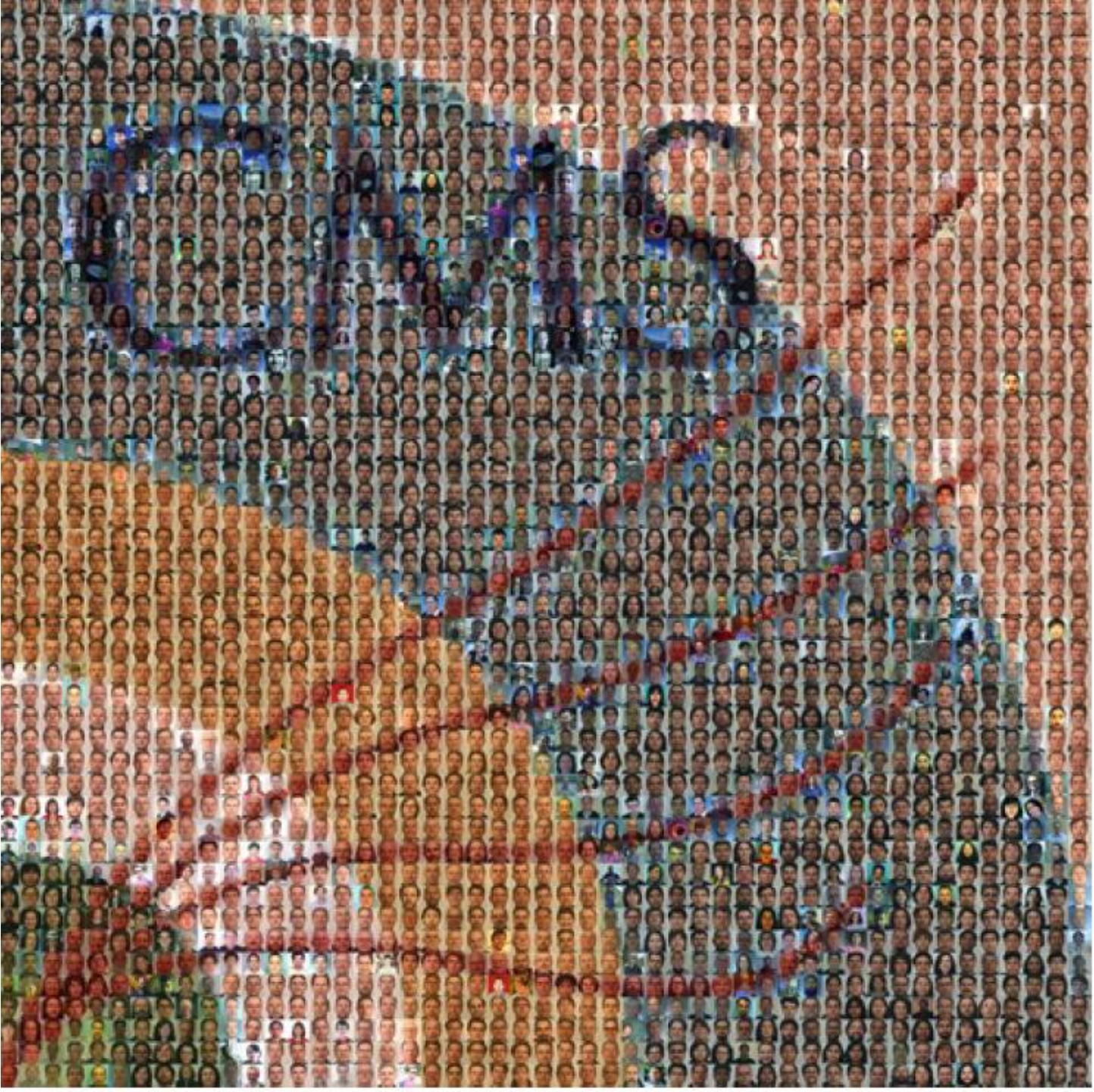
Примерно: Частица със заряд $Q = 0$.



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.



*Б
Л
А
Г
О
Д
А
Р
Я*