

# **Bulgarian Teacher Programme 2024**

**Introduction to Particle Physics**

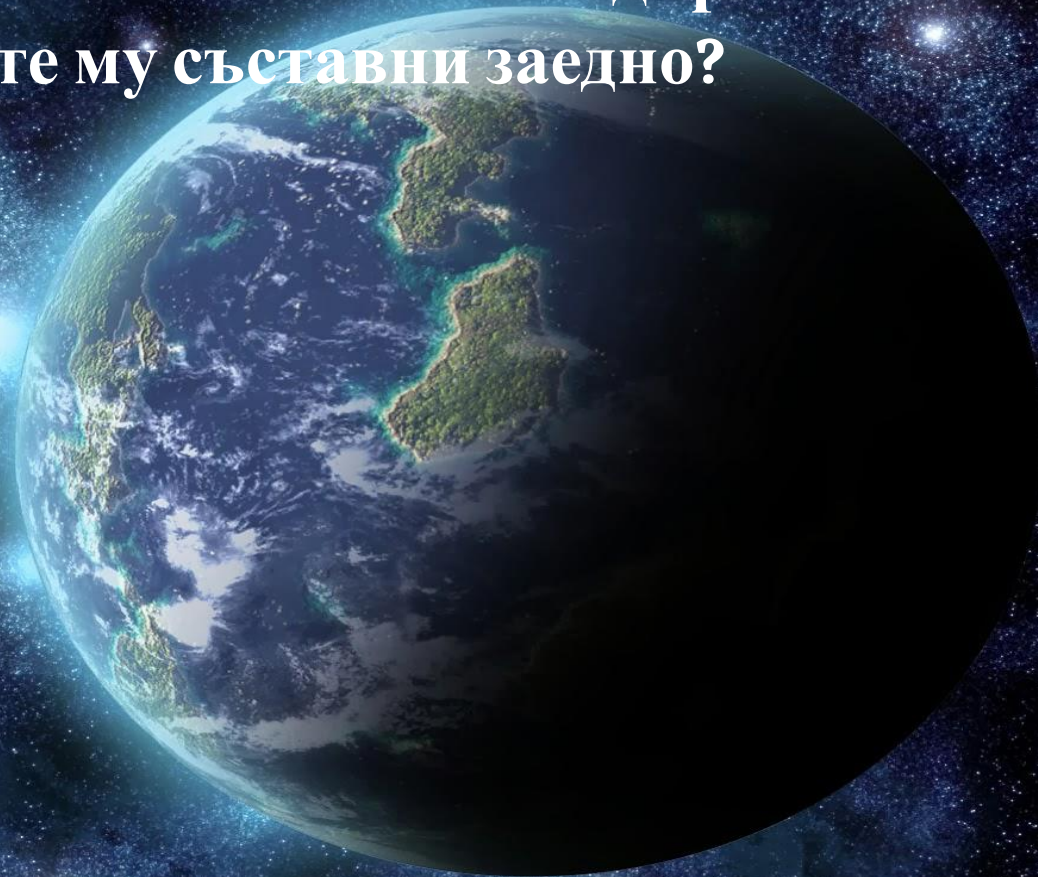
**Въведение във физиката на елементарните частици**

**Roumyana Hadjiiska  
Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy  
Bulgarian Academy of Sciences**

**15.07.2024 - CERN**

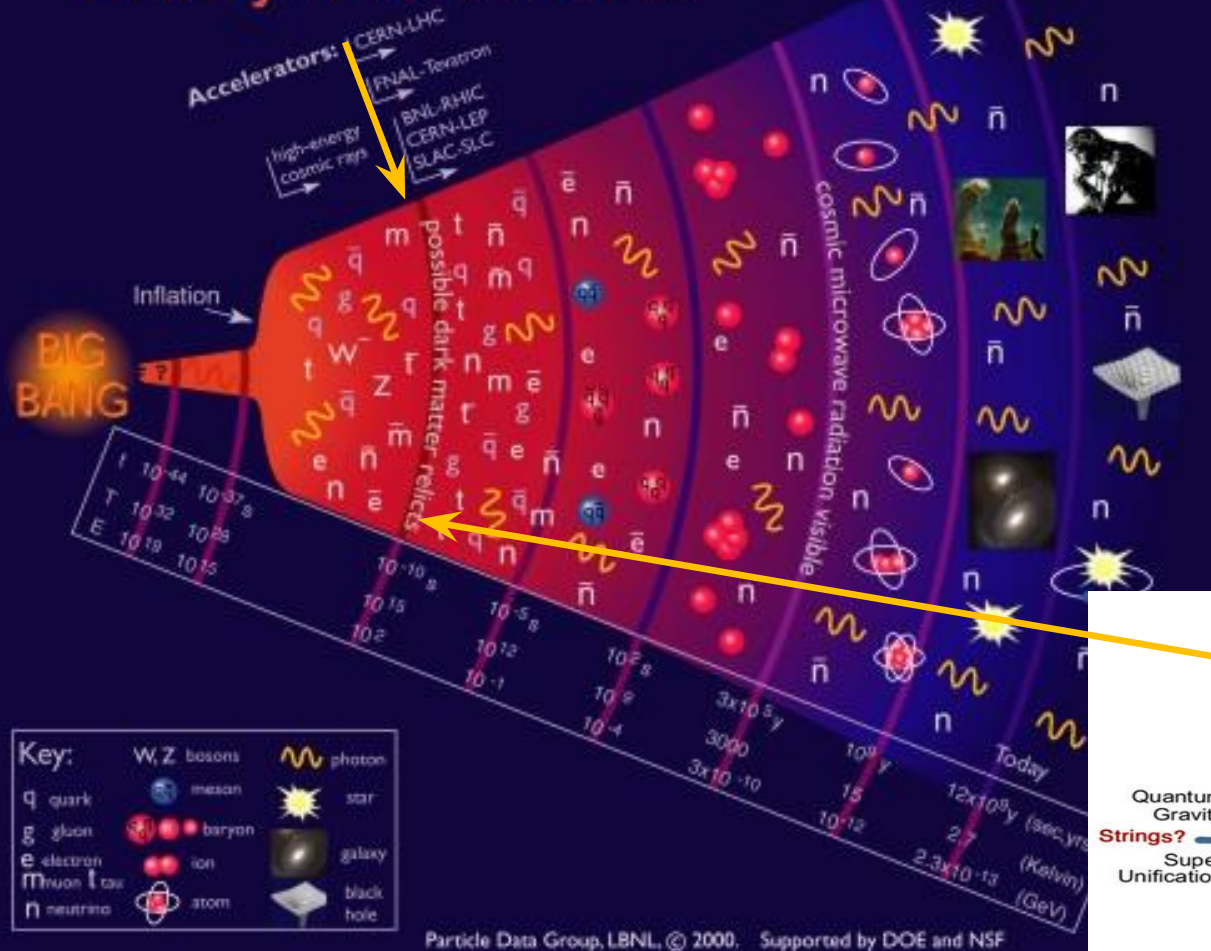
# От какво е направен светът и какво задържа фундаменталните му съставни заедно?

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

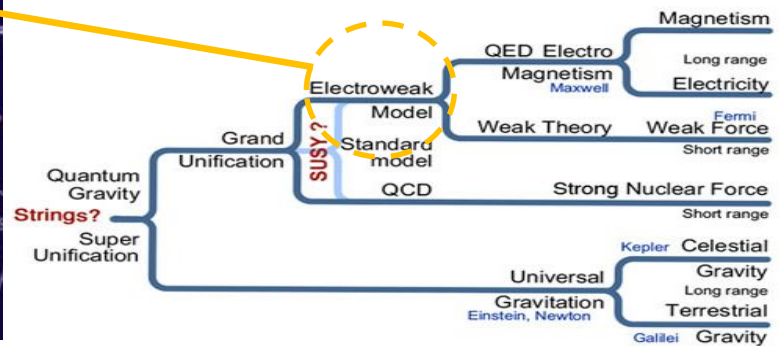




# History of the Universe



*Експериментална проверка на Стандартния модел и нови елементарни частици на експериментите на LHC в ЦЕРН*



# Вселената, както я познаваме

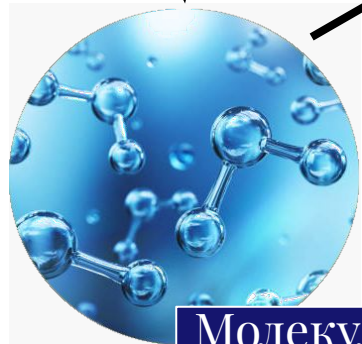




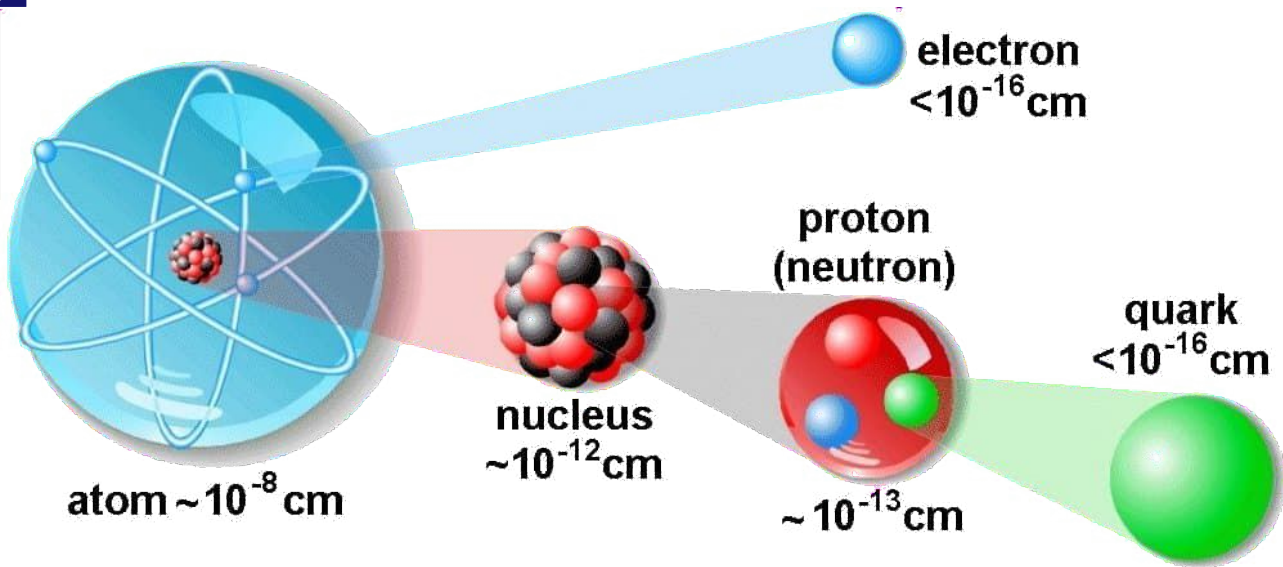
# От какво е изграден светът около нас

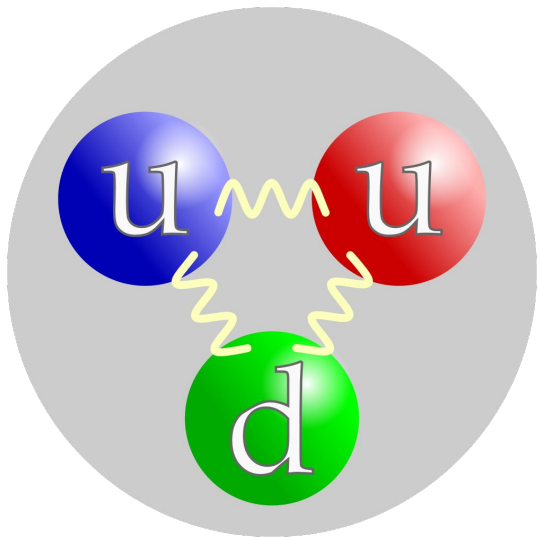


Материя



Молекули





**Протон**

3 кварка: 2 горни и един долен

?

**Виж по нататък в слайдовете!**

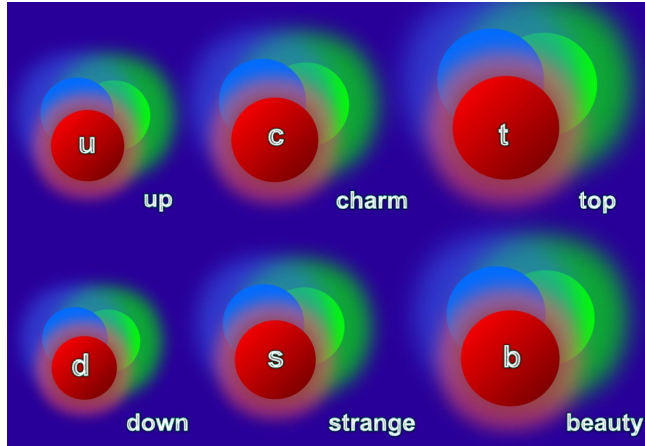


Murray Gell-Mann

## Кварков строеж на адроните

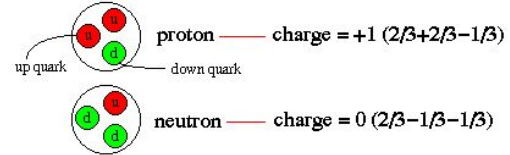
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици, 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

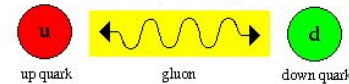
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks

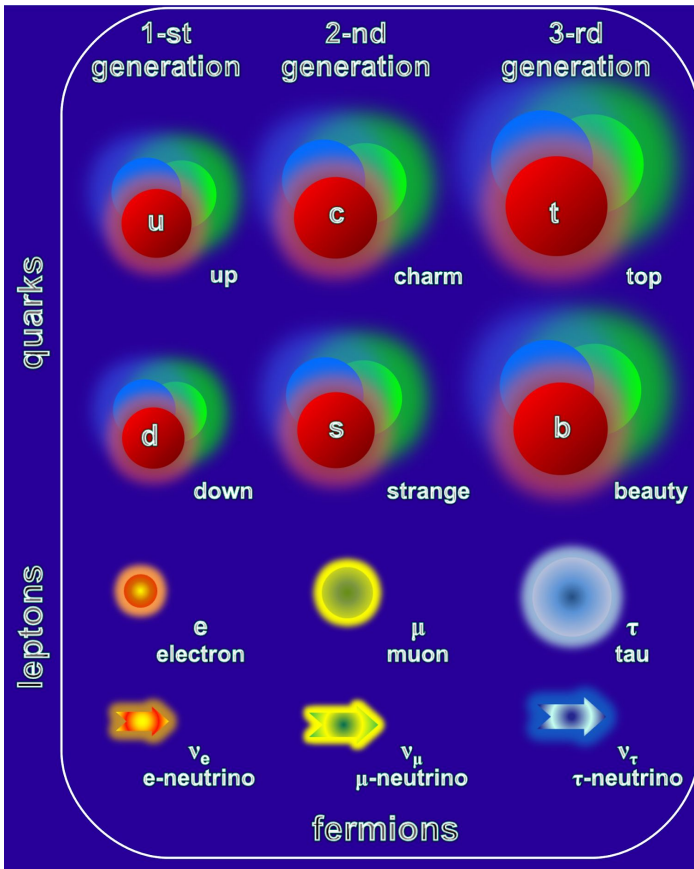


What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

# Стандартен модел на елементарните частици

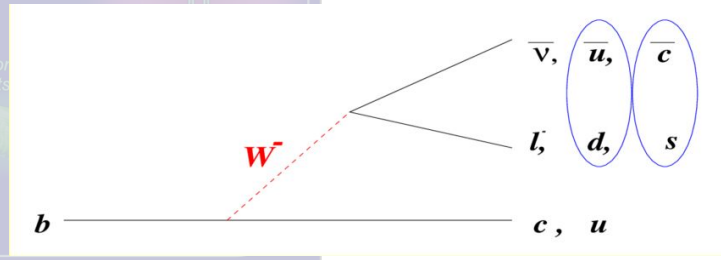


Три поколения фермиони ( $\pm\frac{1}{2}$  спин):

- Кварки (q)
- Лептони (l,  $\nu$ )

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

Пример с анимация: раждане и разпадане на двойка топ кварки (credit: [The Particle Adventures](#))

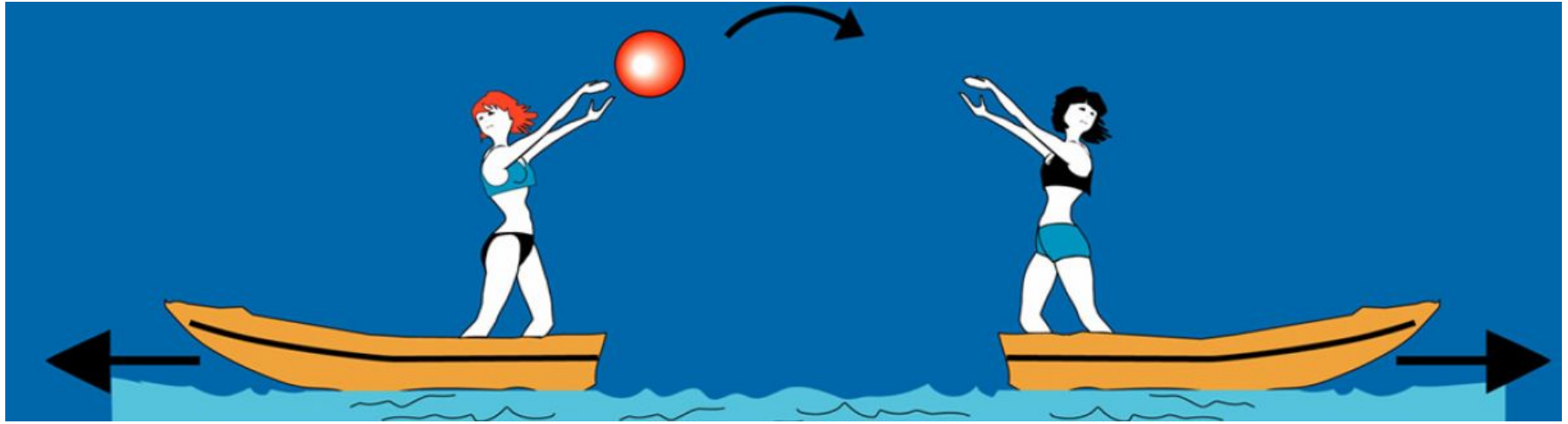




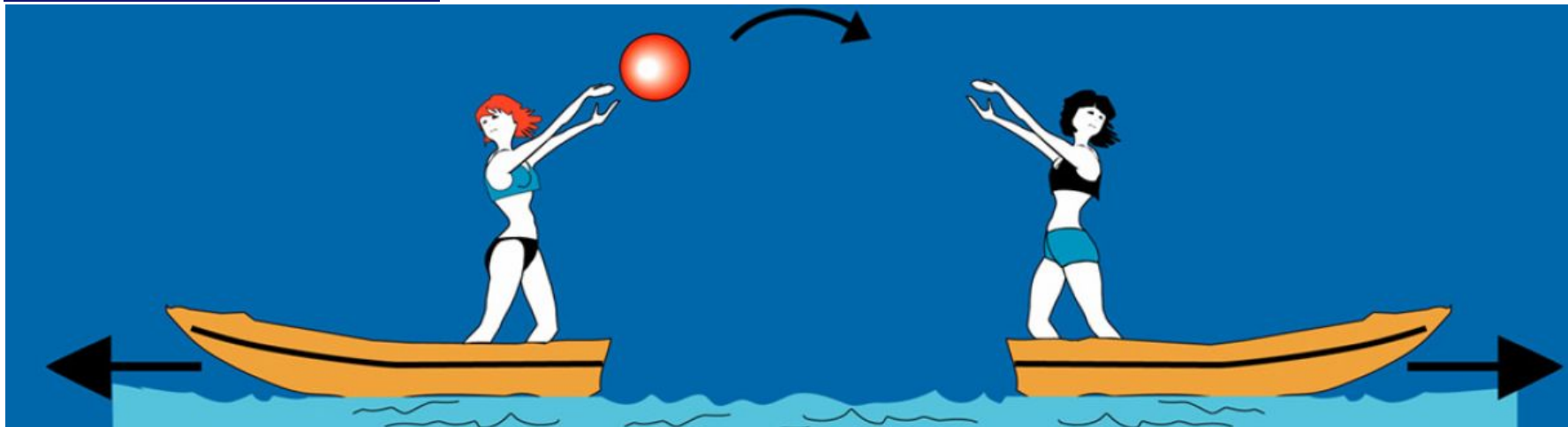


## Взаимодействия

# Взаимодействия



# Взаимодействия



**Електромагнитно:** Най-изследваното взаимодействие, светлина, електричество, електроника ...., в основата на почти всички технологии.

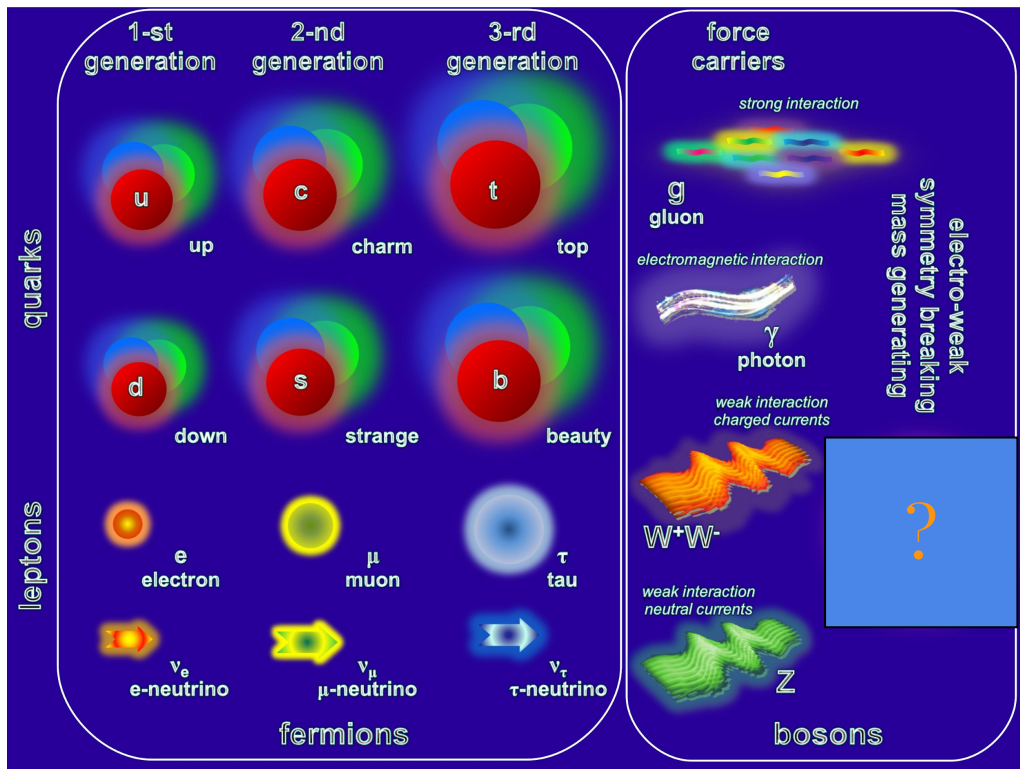
**Силно:** Взаимодействия на протоните и неутроните в ядрото, взаимодействия на кварките и глюоните;

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

**Гравитационно:** Задържа ни на Земята, Слънчева система,...



# Стандартен модел на елементарните частици



- Три поколения фермиони:
  - Кварки
  - Лептони
- Преносители на фундаменталните взаимодействия - бозони (целочислен спин)
  - Глюони - Силно
  - Фотони - Електромагнитно
  - $W^+$ ,  $W^-$  и Z - Слабо
  - Гравитон - гравитационно
    - не се разглежда в СМ
- **Маси на частиците???**

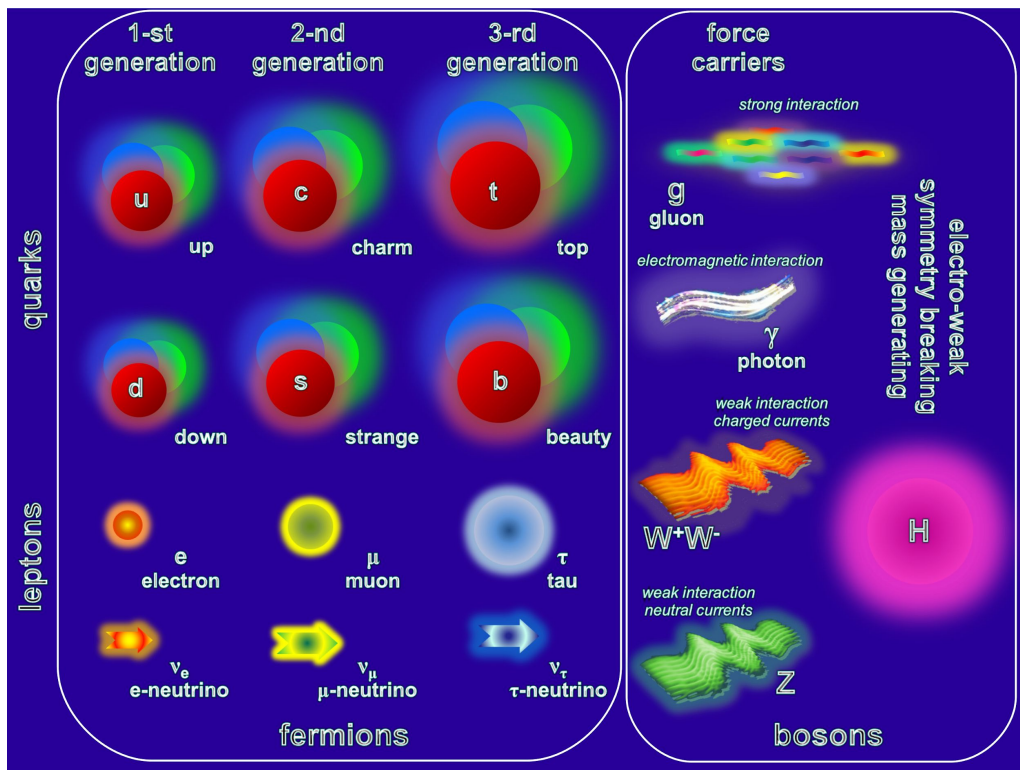
Тежките частици имат кратък живот и се разпадат на други по-леки частици.

Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие

Стандартен модел на елементарните частици

**СМ не включва гравитация!**

# Стандартен модел на елементарните частици



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

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

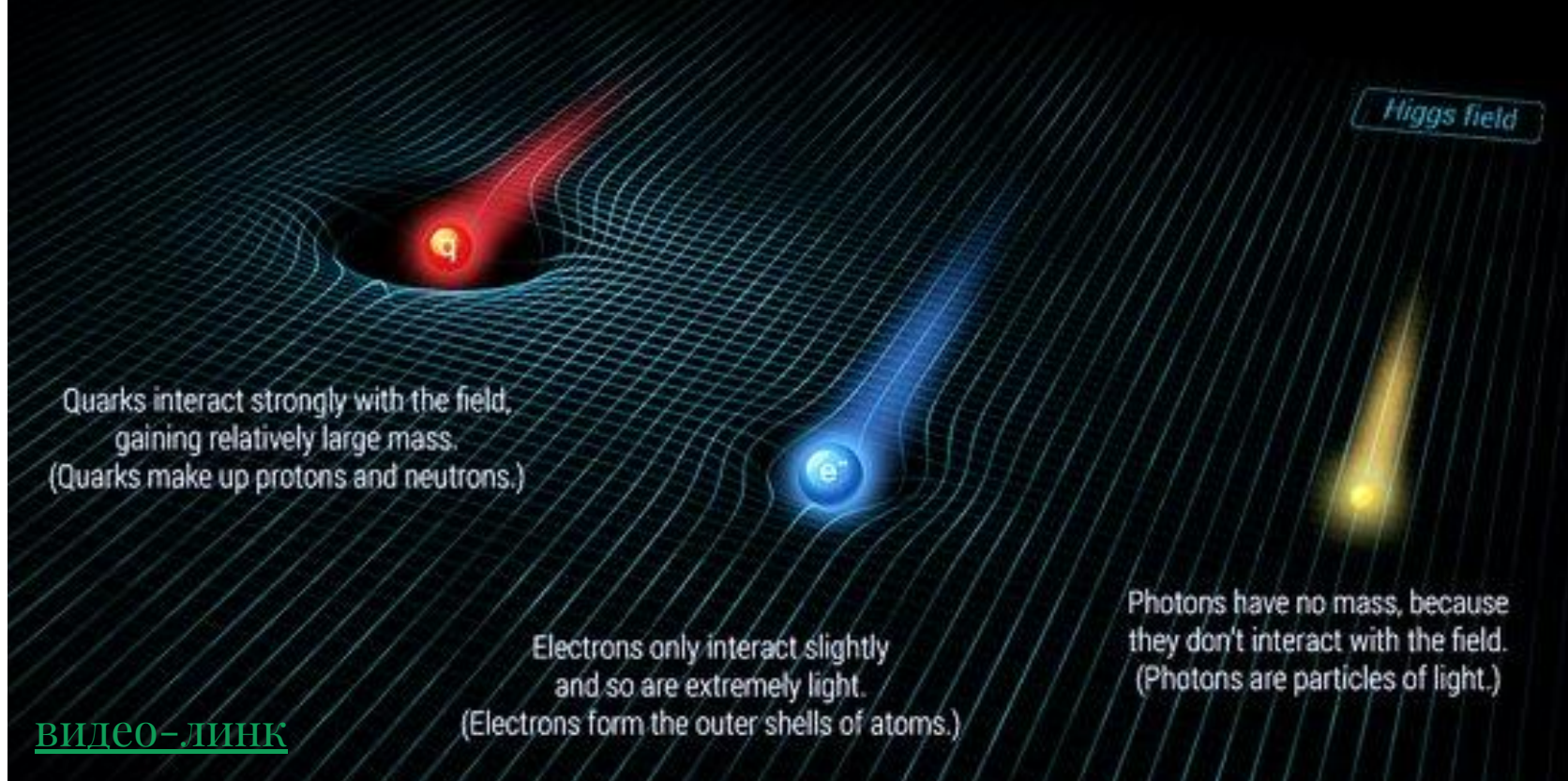
Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие

Стандартен модел на елементарните частици

СМ не включва гравитация!

# The Higgs Field

Existing everywhere, the Higgs field gives particles their mass.



Quarks interact strongly with the field,  
gaining relatively large mass.  
(Quarks make up protons and neutrons.)

Electrons only interact slightly  
and so are extremely light.  
(Electrons form the outer shells of atoms.)

Photons have no mass, because  
they don't interact with the field.  
(Photons are particles of light.)

[ВИДЕО-ЛИНК](#)





Коктейлно парти  
Поле на Хигс – изпълва  
цялата Вселена



VIP персона преминава през залата –  
Елементарната частица взаимодейства с  
полето на Хигс



VIP персоната придобива маса поради  
струпването на журналисти и затрудняване на  
придвижването – **частиците придобиват маса**



VIP персоната не преминава през  
залата, а само прави важно  
съобщение – LHC концентрира  
енергия в точката на сблъскване на  
протоните



Журналистите бързат към изхода за да  
предадат важното съобщение – **Полето на  
Хигс генерира самовъзбуждане – Хигс  
бозон**

Полето на Хигс генерира собствени  
възбудени състояния при концентрация  
на енергия на LHC – наблюдава се Хигс  
– бозон (регистрират се разпадните  
продукти – 2 фотона или 4 лептона .....)

*Всичко във Вселената от галактиките до планините и молекулите е изградено от кварки и лептони.*

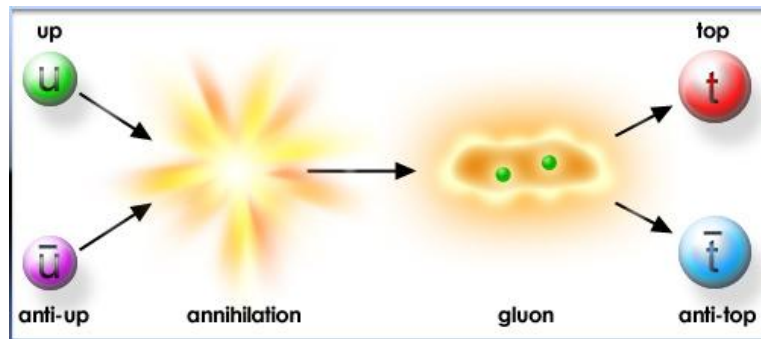
## *Но дали това е всичко?*

Кварките и лептоните са различни.

Освен това за всеки тип частица съществува и античастица.

Античастиците имат същите свойства като съответните частици, но имат противоположни заряди.

Когато взаимодействат частица и античастица те анихилират.



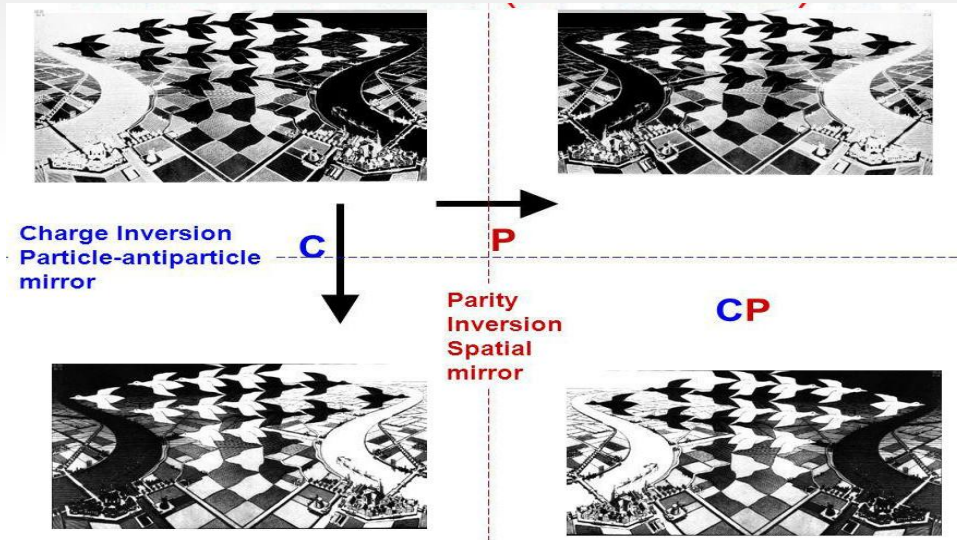
# Симетрията като обединяващ принцип

## Дискретни симетрии

„P“ - пространствена четност, преобразование на координатите, огледално отражение, аксиалните вектори запазват посоката си, докато полярните я променят противоположно

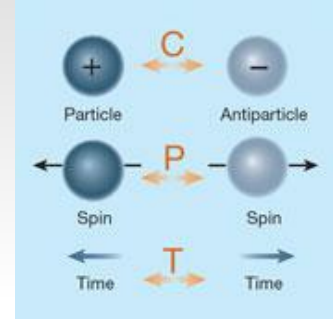
„C“ - зарядова четност, преобразуване на зарядите

„T“ – временна четност, обръщане на посоката на времето



credit: Chris Parkes

<http://slideplayer.com/slide/774084/>



Нарушение на симетриите:

Общата CPT симетрията се запазва,

Но слабите взаимодействия  
нарушават P, а също и комбинираната  
CP инвариантност



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

Енергията, която придобива електрон, който се ускорява в полето на източник на напрежение от 1 волт.

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

### Системи от мерни единици

Величина	SI	GCS (g cm s)	$c=\hbar=1$
Дължина	[m]	[cm]	[1/eV]
Време	[s]	[s]	[1/eV]
Енергия	[J]	[erg]	[eV]
Импулс	[kg.m/s]	[g.cm/s]	[eV/c]
Маса	[kg]	[g]	[eV/c <sup>2</sup> ]
....			

Примерно:

Маса на електрона (e-) и позитрона (e+)

$$m_e = 9.1 \times 10^{-28} \text{ [g]} \quad (\text{GCS})$$

$$m_e = 511 \text{ [KeV]} \quad (c=\hbar=1)$$

**Ако знаем колко е масата, може да познаем коя е частицата с точност до нейния електрически заряд.**

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

What the Human Eye Can See

What CTA Will See

Wavelength in Metres

Electron Volts (eV)



Relative Wavelength Size



Building



Baseball

This Dot



Cell



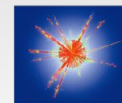
Viruses



Atom



Atomic Nuclei



Smallest Size Resolvable by the Large Hadron Collider

Spectrum



Radio Waves

Microwaves

Infrared

Visible Light

Ultra-violet

X-Rays

Gamma Rays

Sources



AM/FM Radio



Microwave Oven



People and Other Living Beings



The Sun



X-Ray Machines



Radiotherapy Machines



Very-High Energy Cosmic Source

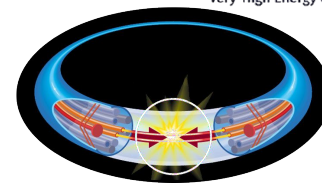
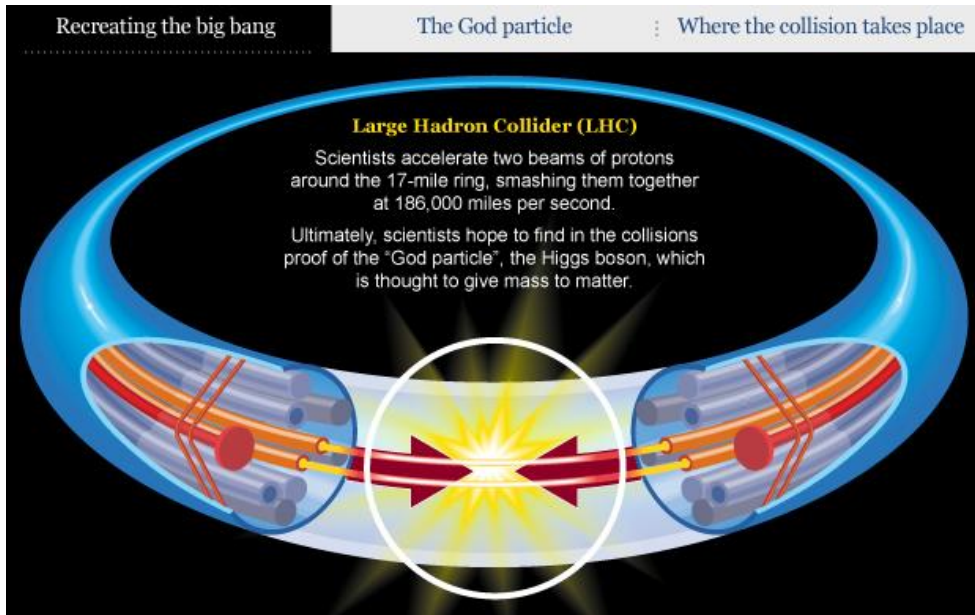


Image credits: Vecteezy.com, Dragonartz.net, NAOJ, NCI, CERN, NASA

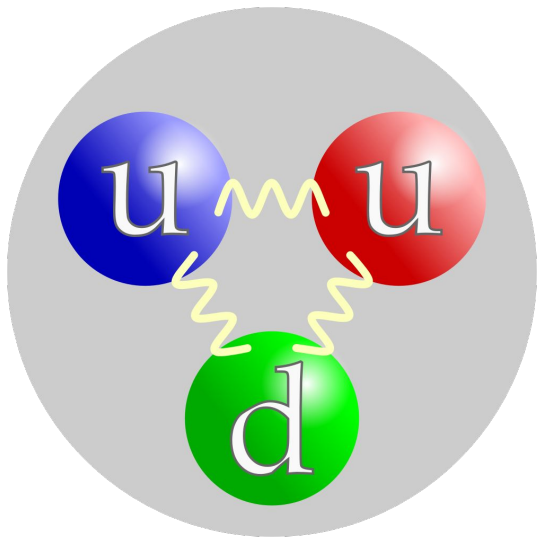


- Ускорител на заредени частици - в нашия случай протони
- Сблъскване на частици - енергия на взаимодействието:
  - $E = E(\text{сноп 1}) + E(\text{сноп 2})$
- Енергия на сблъсъците на LHC 2023 г.:
  - $E = 13.6 \text{ [TeV]} = 2 \times 6.8 \text{ [TeV]}$
  - Проектна енергия на LHC: 14 TeV
- Всеки сноп е разделен на групи от протони. Във всяка група има  $\sim 10^{11}$  протона,

- Връзка (превръщане) между енергия и маса:  $E = mc^2$
- При сблъсък 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.





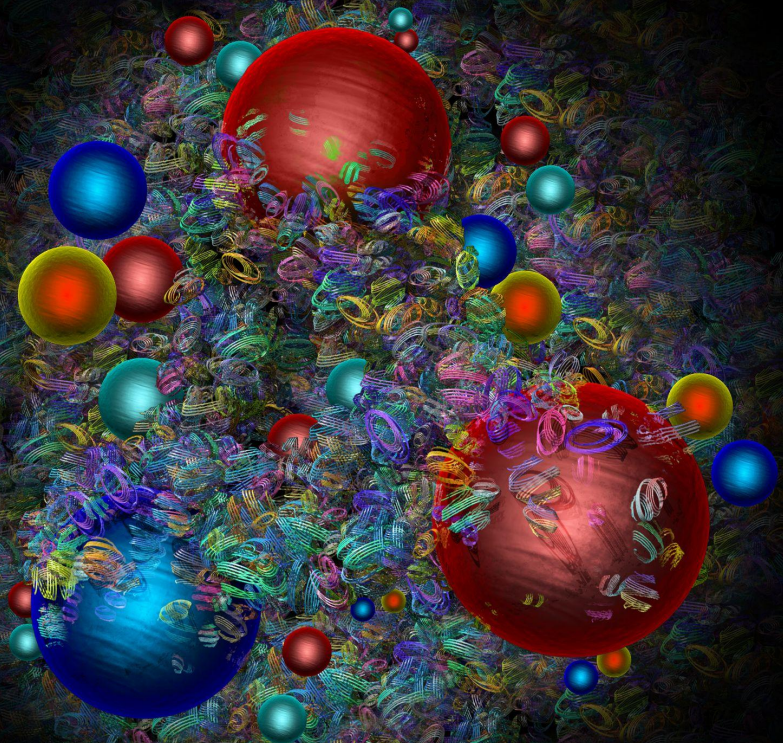


**Протон**

3 кварка: 2 горни и един долен

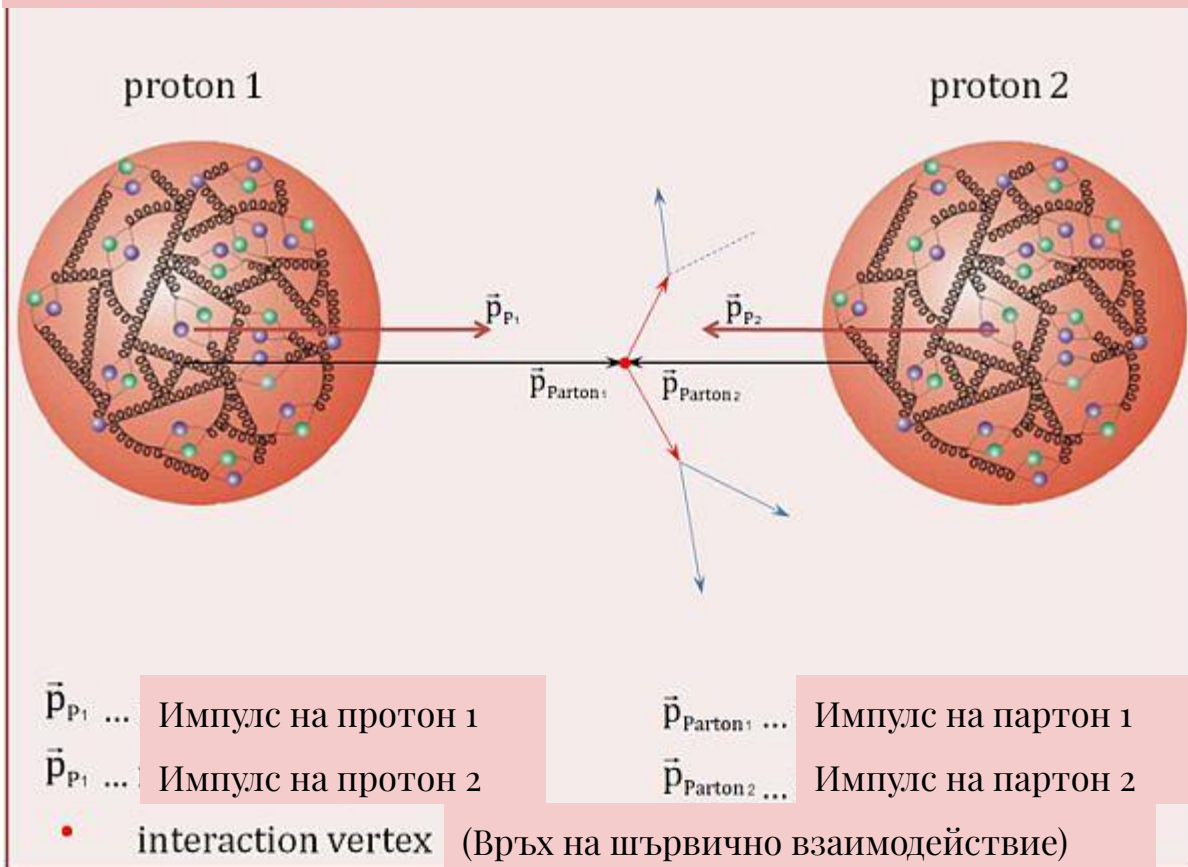
Протон

Партони: 3 кварка, морски кварки и глюони



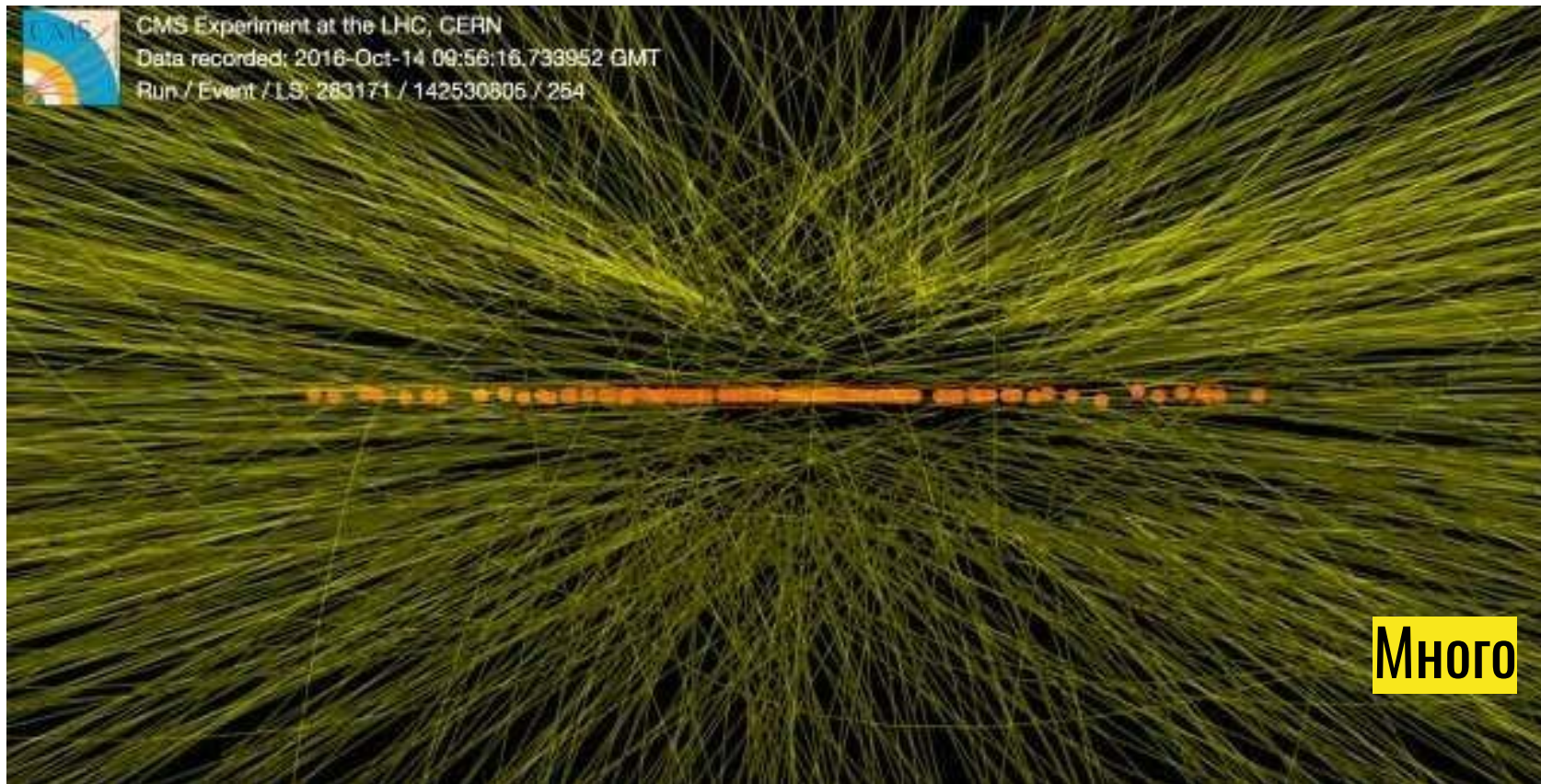
CERN-GRAPHICS-2019-001-1  
*Photograph: Dominguez, Daniel*

## Взаимодействия на партоните от сблъскващите се протони

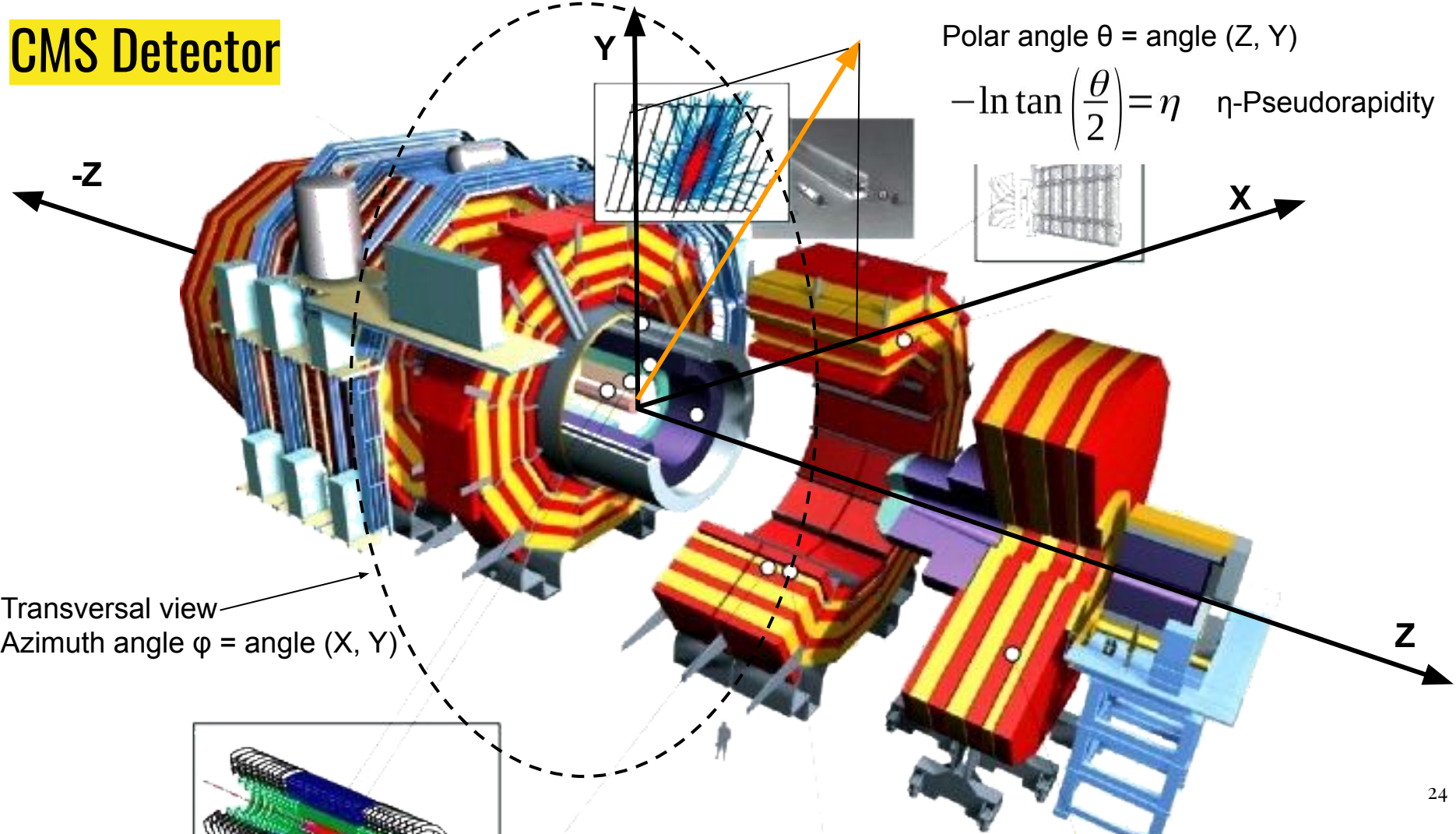




# Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?

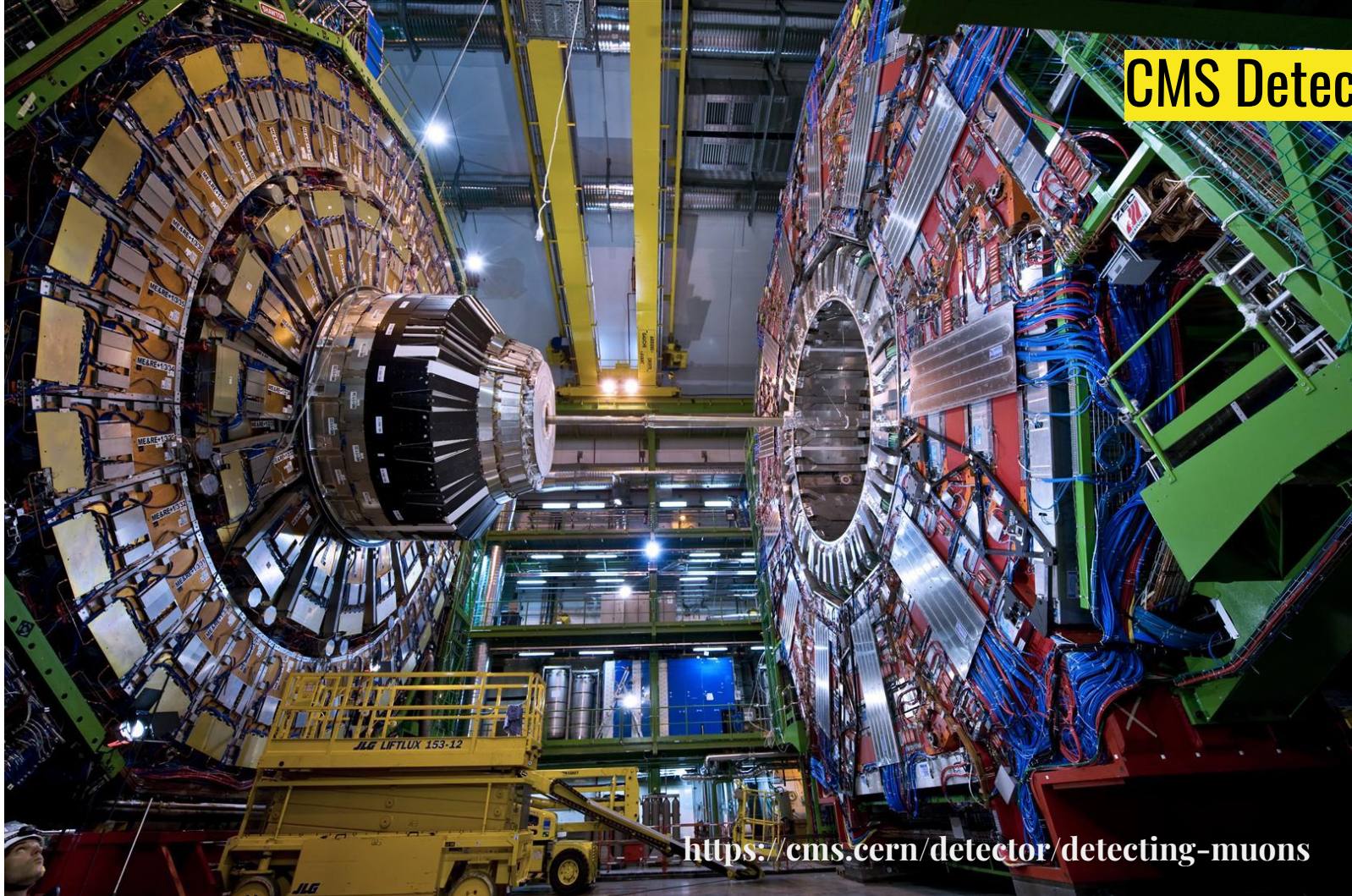


# CMS Detector





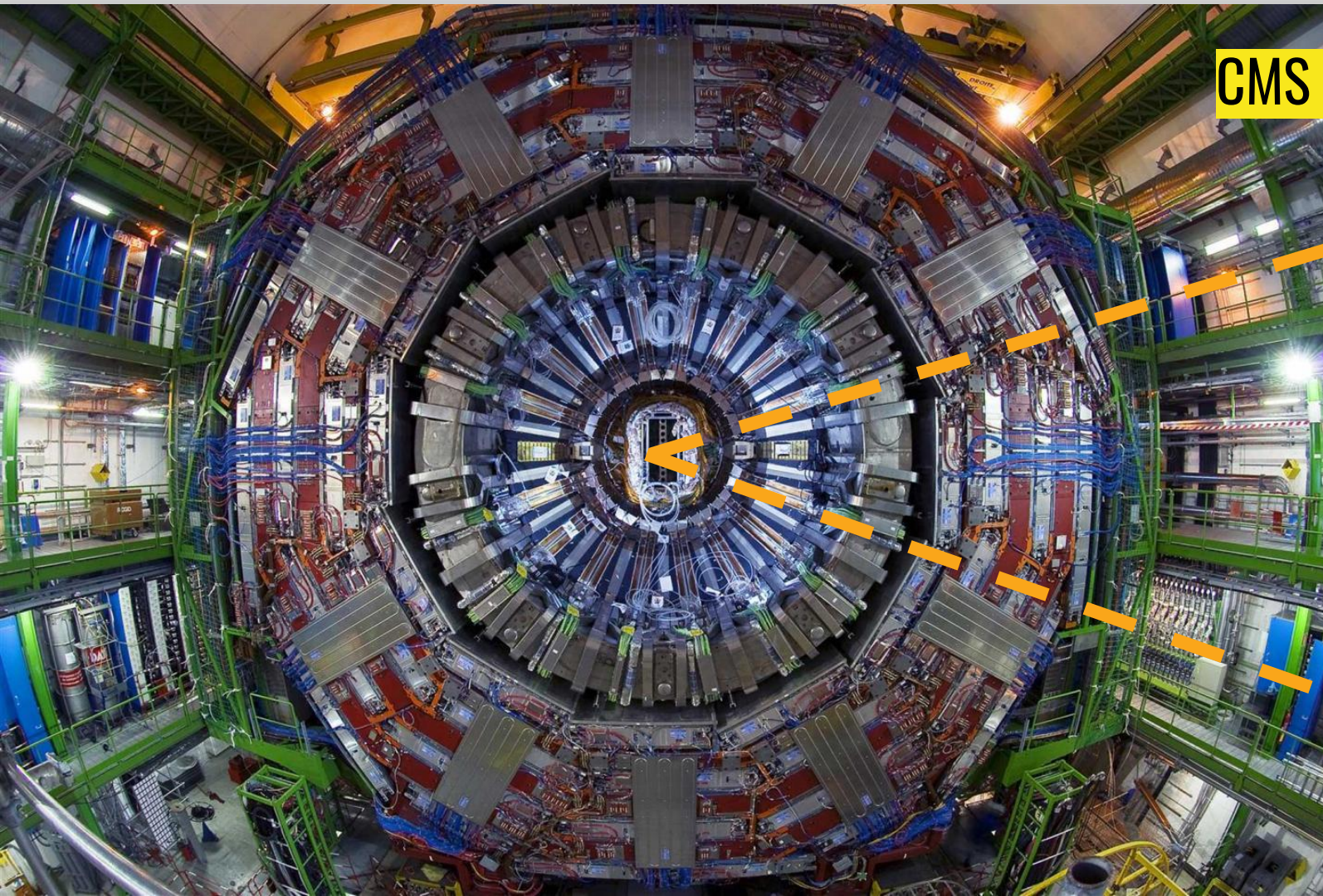
# CMS Detector



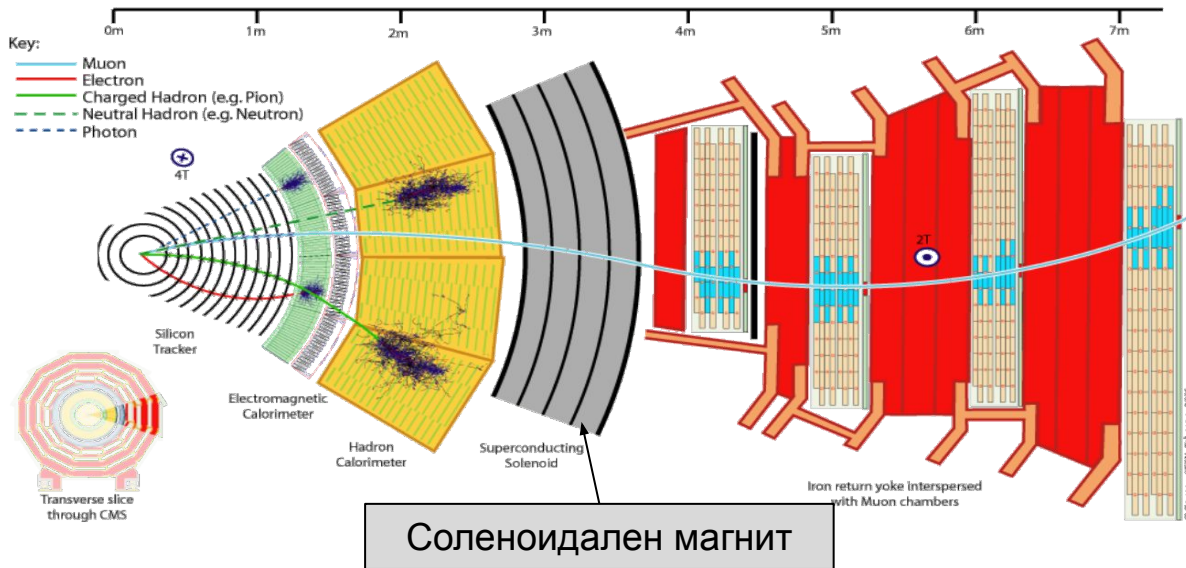
<https://cms.cern/detector/detecting-muons>



# CMS Detector



# Как се регистрира частици със CMS



- Мюонна система (извън магнита,  $B = 1.8 \text{ T}$ )
  - Регистрира електрически заредени частици, преминали през всички останали системи и магнита.
  - Ние предполагаме, че в CMS такива могат да бъдат само мюоните

В обема, затворен от магнита ( $B=3.8 \text{ T}$ )

- 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

Комбиниране информацията от отделните детекторни системи!



# Симетрията като обединяващ принцип



Еми Нютер (Emmy Noether)

**Връзка между глобалните симетрии и законите за запазване**

**Хомогенност на пространството**

Транслация във пространството ( $x \rightarrow x + \Delta x$ )  $\rightarrow$  **Закон за запазване на импулса;**

Общата инерция на една изолирана система е константа, или  $dp/dt=0$

**Еднородност на времето**

Транслация във времето ( $t \rightarrow t + \Delta t$ )  $\rightarrow$  **Закон за запазване на енергията;**

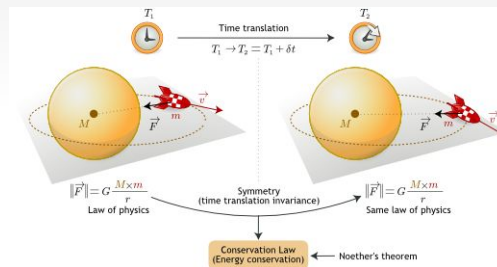
Енергията на една изолирана система е константа, или  $dE/dt=0$



**Изотропност на пространството**

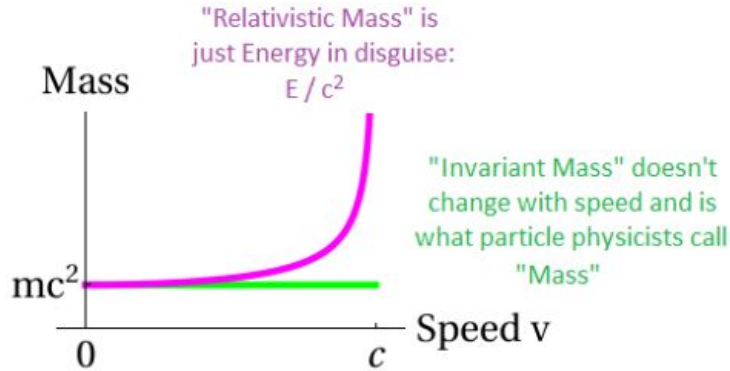
Ротация във пространството  $\rightarrow$  **Закон за запазване на ъгловия момент.**

Общият ъглов момент на една изолирана система е константа, или  $dL/dt=0$ , където  $L = \sum L_i$ , а  $L_i = r_i \times p_i$





# Коя маса на частицата искаме да измерим?



$$E = mc^2$$

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

(ИЗПОЛЗВАМЕ:  $m = m_0 / (1 - v^2/c^2)$ )

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



$m_0$  - маса на покой на частицата.

Не се променя в различните отправни координатни системи.

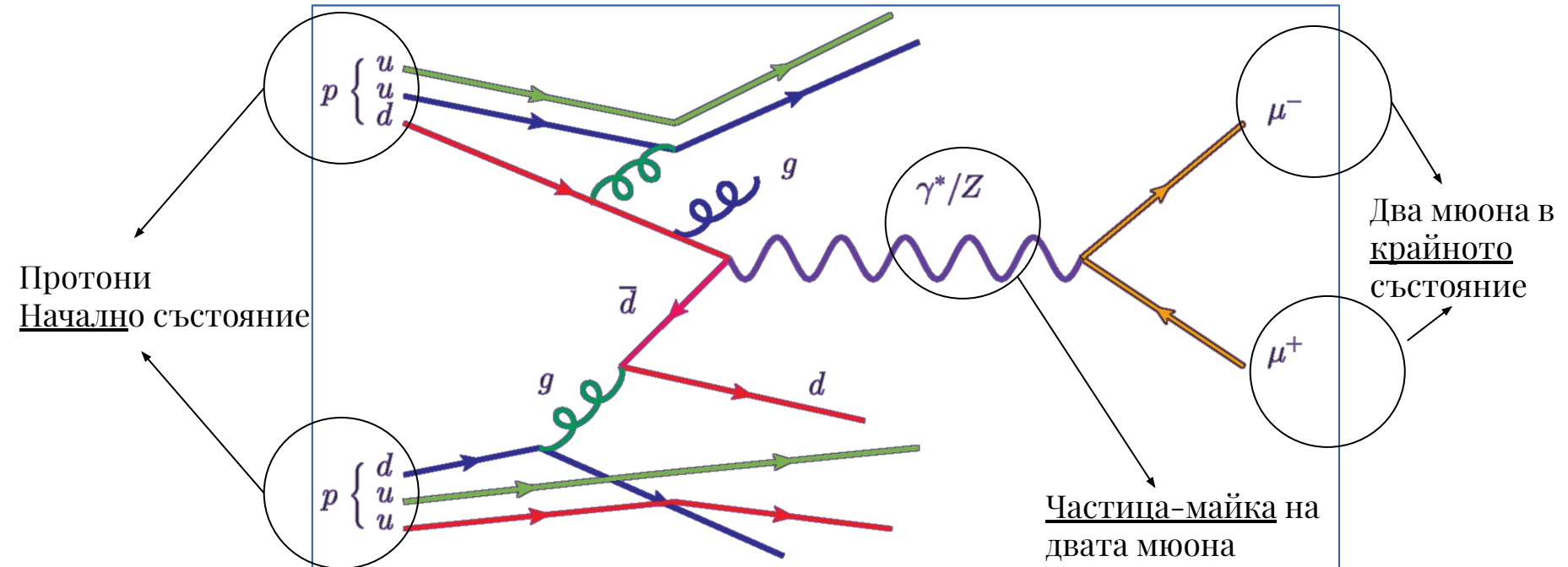
Затова се нарича още **инвариантна маса**.

**Ако знаем масата на частицата, която сме регистрирали, може да познаем коя е частицата.**

# Взаимодействия - Пример (не изчерпва всички възможни крайни състояния!!!)

Протон-протонен сблъсък и раждане на двойка мюони:

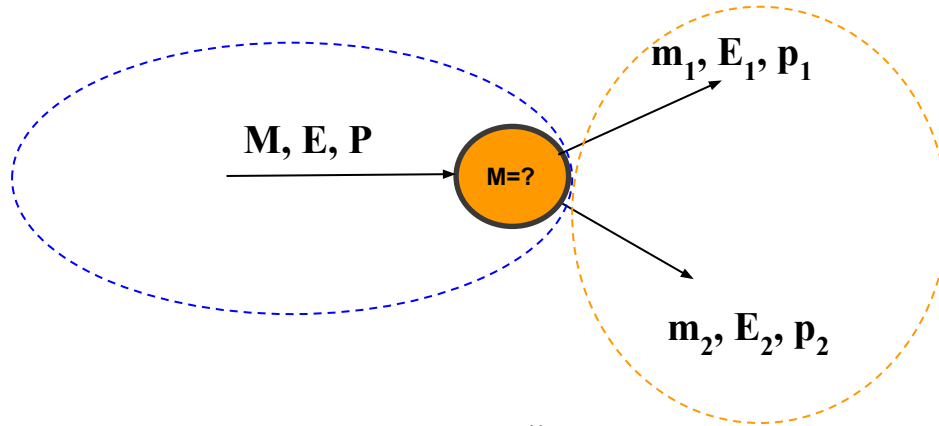
- Силно взаимодействие
- Електрослабо (Електромагнитно & слабо взаимодействие)



# Как да измерим масата на разпадналата се частица?

## Начално състояние:

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



## Крайно състояние:

Частицата се е разпаднала на две други частици в маси, енергии и импулси, съответно  $m_1, E_1, p_1$ , които са се разлетели една спрямо друга на ъгъл  $\alpha$

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

Използваме закона за запазване на енергията и импулса.

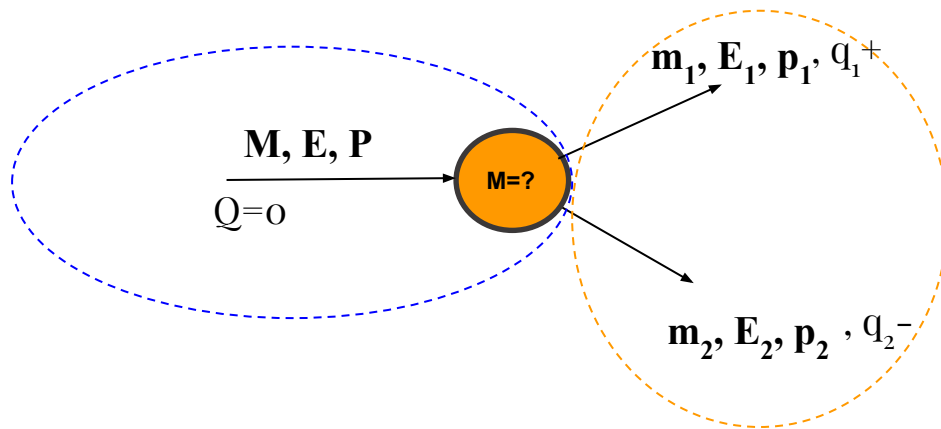
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 - p_1 \cdot p_2 \cos \alpha)$$

Маса на частицата-майка

# Закон за запазване на електрическия заряд

**Начално състояние:**

Примерно: Частица с електрически заряд  $Q = 0$ .



**Крайно състояние:**

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

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



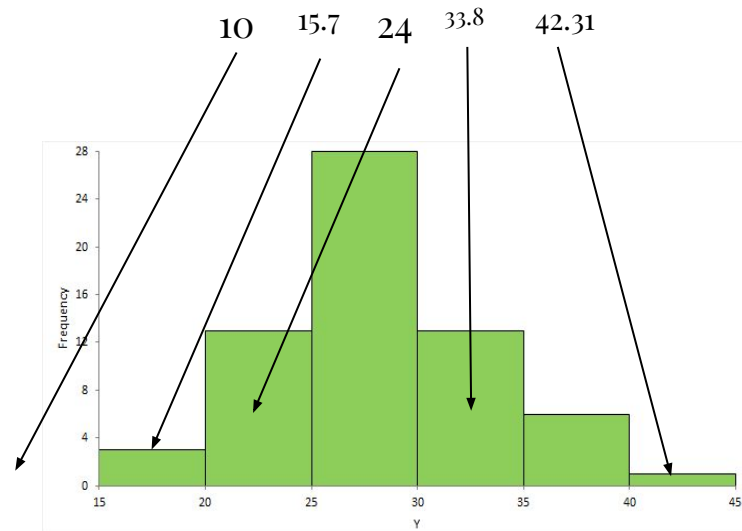
# Достатъчно ли е само едно измерване? Хистограма

**Едно събитие не е достатъчно.**

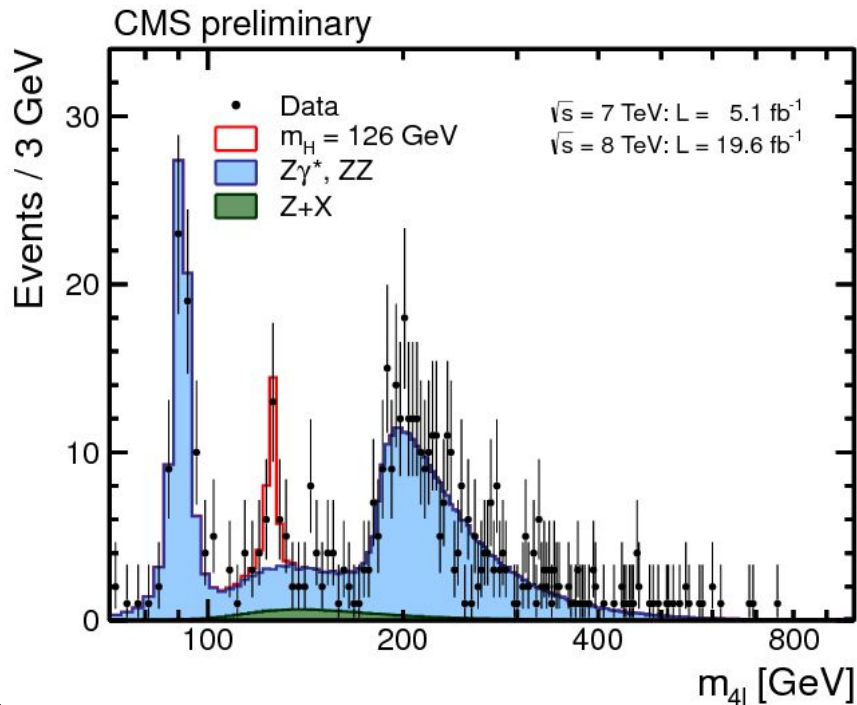
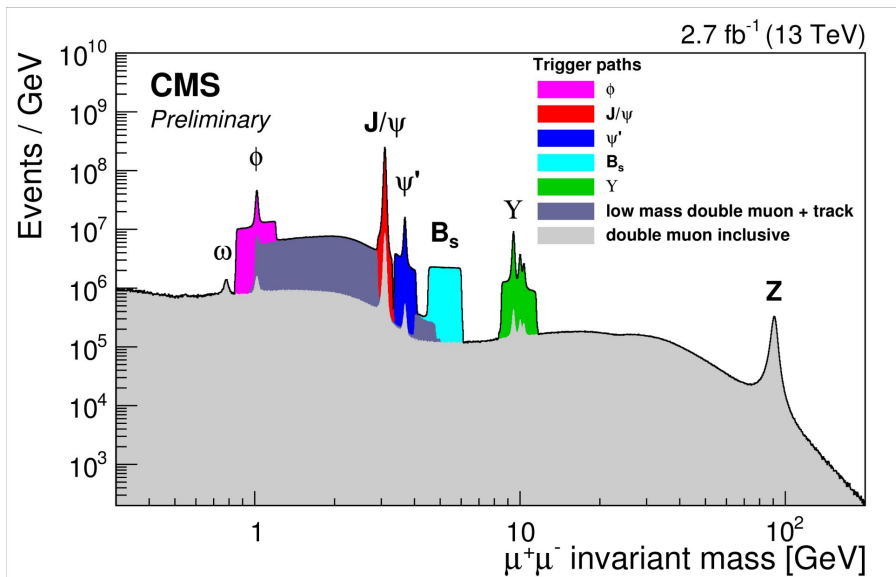
- То може да бъде случайно.
- Освен това различните частици се раждат с различна вероятност.
- Колкото по-рядко се ражда една частица, толкова по-голям брой събития е необходимо да анализираме за да я открием.

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.**



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

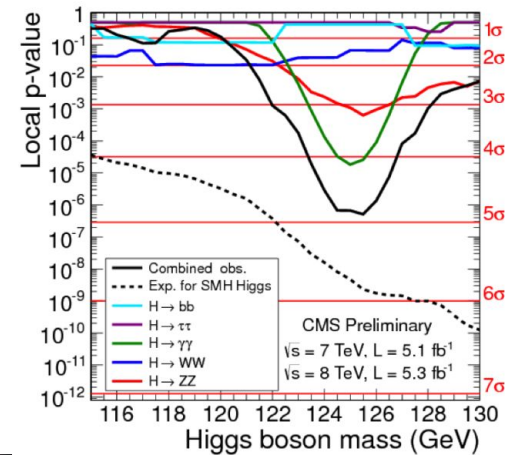
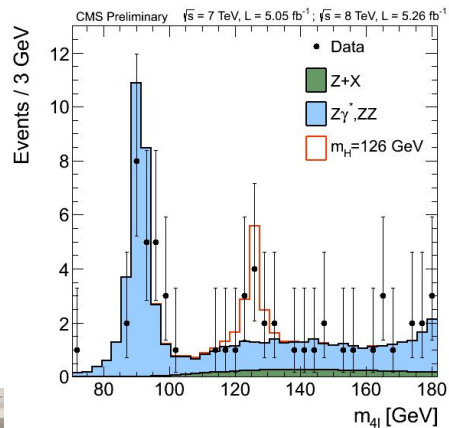
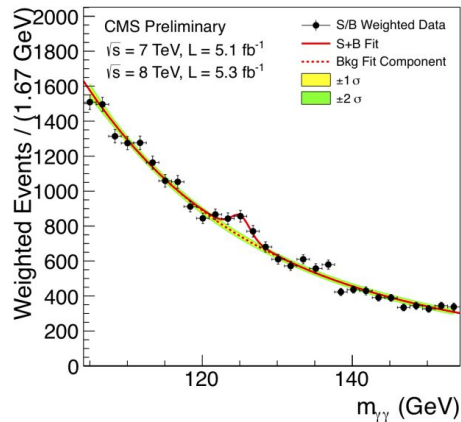


Да видим какво ще получите вие.



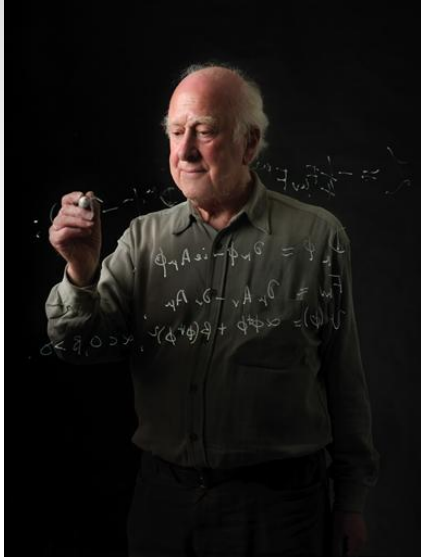
# Higgs Boson Discovery – 2012

## CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

# 2013 Nobel Prize in Physics Awarded to François Englert and Peter W. Higgs



*Peter Higgs*

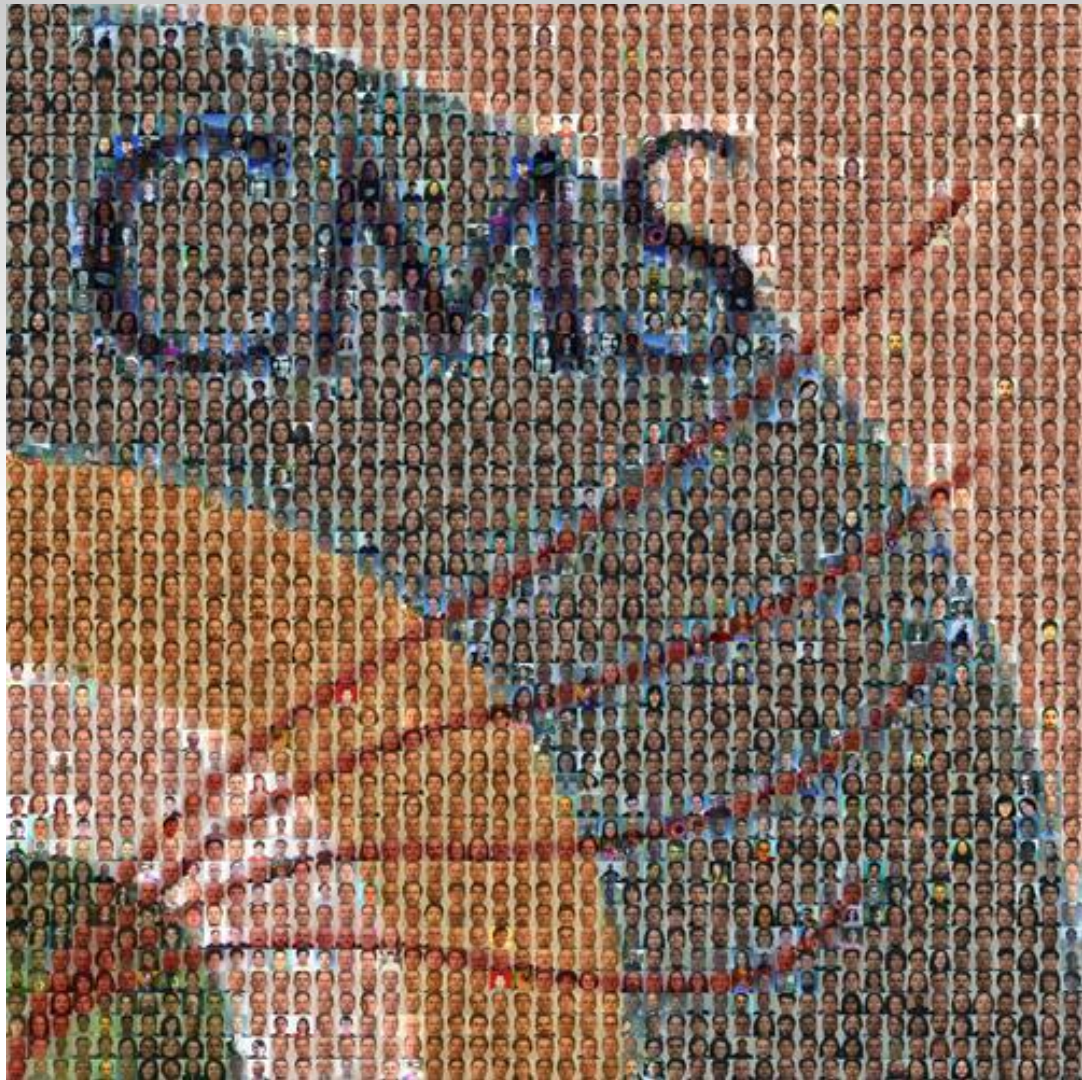
*Credit: CERN PhotoLab*



*François Englert*

High Energy and Particle Physics Prize  
by the European Physical Society 1977 awarded to  
P. Higgs, F. Englert and R. Brout





*Б  
Л  
А  
Г  
О  
Д  
А  
Р  
Я  
!*

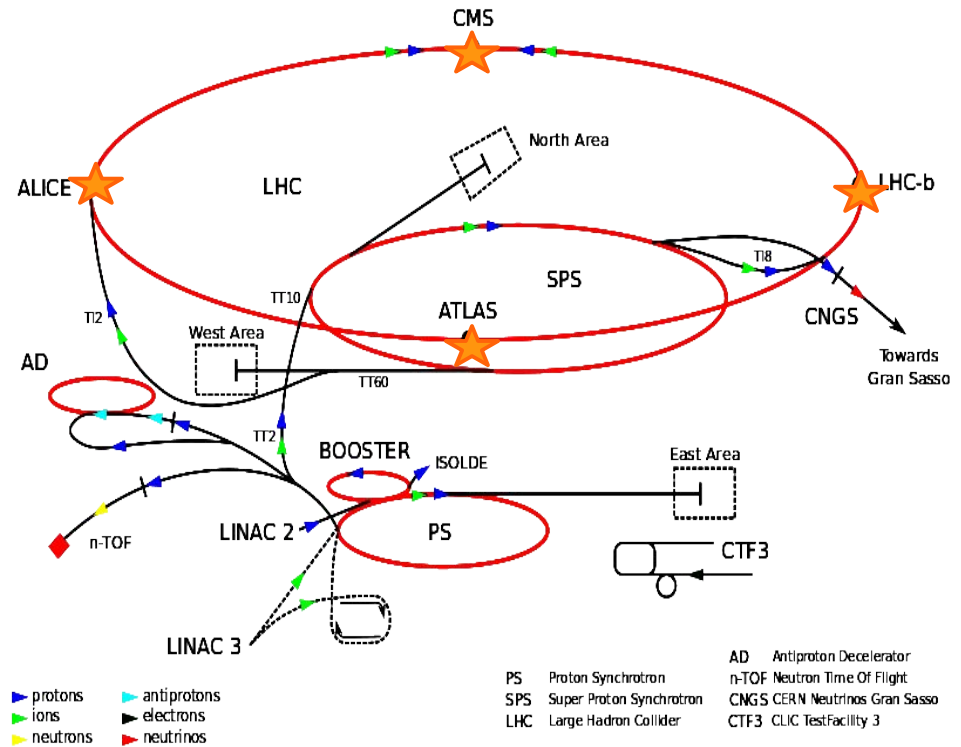
# Допълнителни слайдове



# Големия адронен колайдер LHC

Построен на територията на Швейцария и Франция.  
 Разположен е на около 100 м дълбочина.  
**Ускоряването на сноповете се постига чрез система от ускорители**

На четири места по контура на LHC са обособени точките, където се пресичат сноповете и се осъществяват колизиите.  
 Около тези точки ★ са разположени основните детекторни комплекси – CMS, ATLAS, LHCb и ALICE



[ВИДЕО-ЛИНК](#)

## Кварки, глюони и цветен заряд

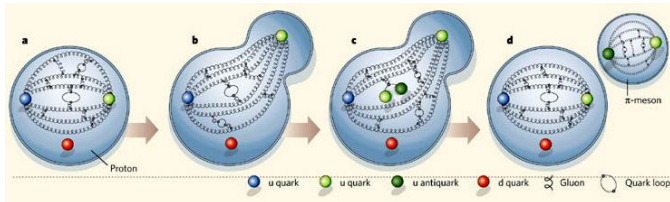
Силните взаимодействия задържат кварките заедно в адроните.

Преносителите на силните взаимодействия се наричат глюони (от английската дума glue - лепило).

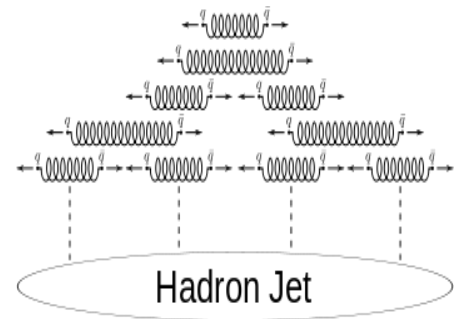
Кварките и глюоните имат цветни заряди. **Композитните частици, изградени от кварки са цветово неутрални.** Цветните заряди и взаимодействия се държат различно от електромагнитните. Кварките не могат да съществуват индивидуално. При опит да раздалечим два кварка, силната на цветното взаимодействие нараства 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./*

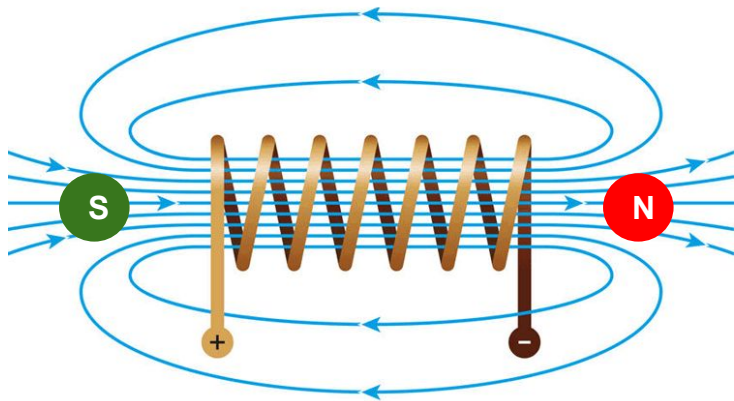


*Новите адрони, родени при този процес (адронизация) се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“ които се регистрират в детектора*

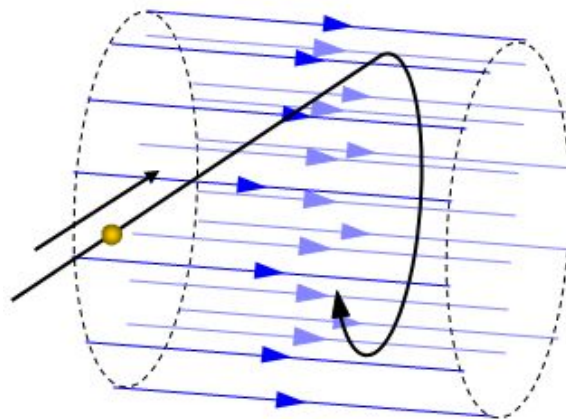




# Движение на заредена частица в магнитно поле



Соленоидално 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.

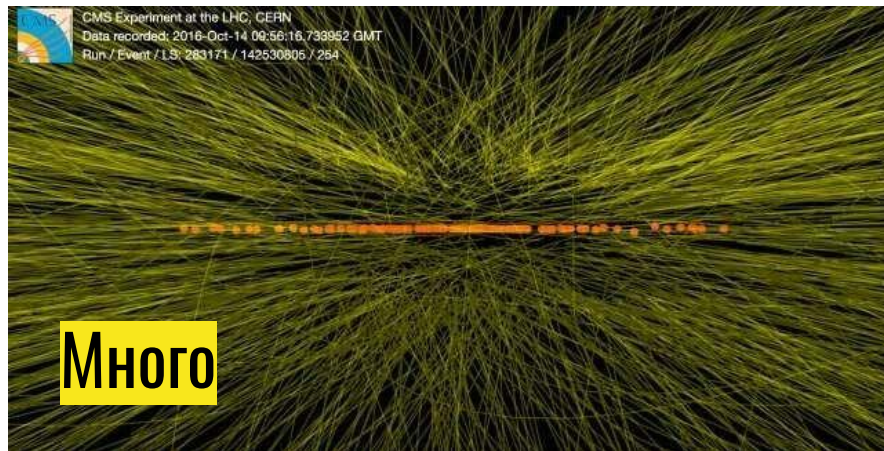
В CMS посоката на магнитното поле във вътрешността на магнита е по посока на оста Z. В основния ху изглед на приложението iSpyWebGl, оста z е насочена към наблюдателя.



# Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?



Как някои хора си представят откритието на нова частица.



**Много**



Каква е действителността.