

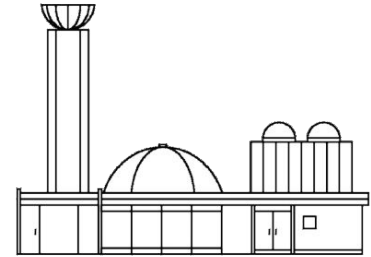
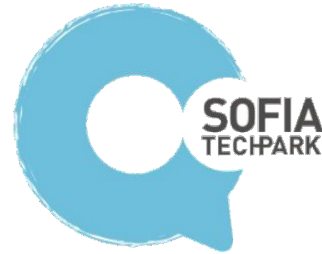
CMS Masterclasses Bulgaria 2024

Roumyana Hadjiiska

**Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy
Bulgaria Academy of Sciences**

19.03.2024

**Astronomical Observatory and Planetarium
Nicolaus Copernicus, Varna**

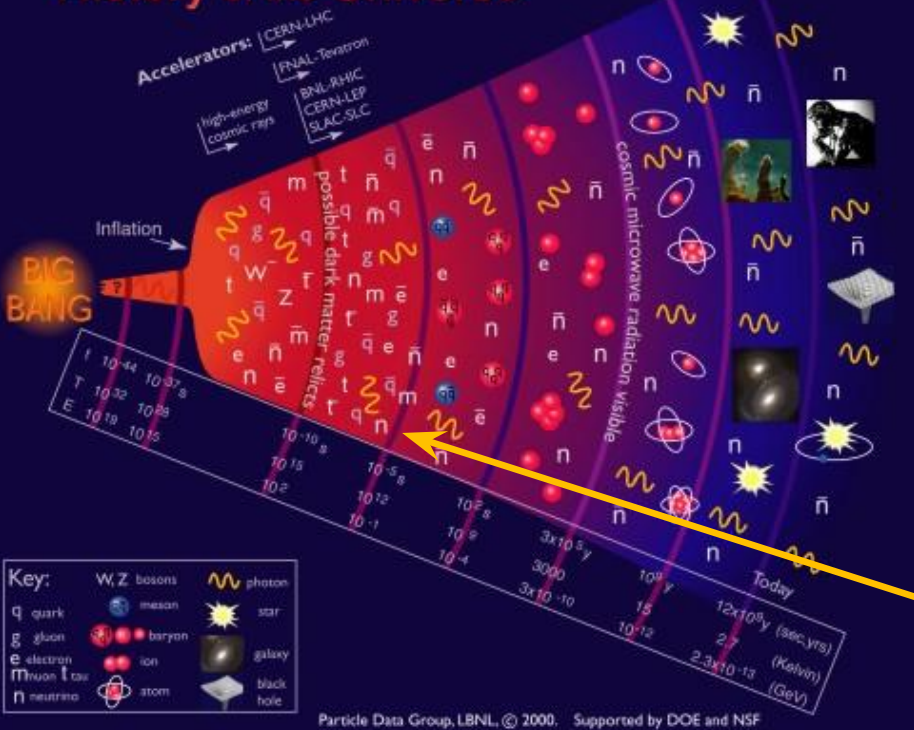


България е член на [IPPOG](#) от 2021 г.
(International Particle Physics Outreach Group)
International Masterclasses ([IMC](#)) – част от програмите, предлагани от IPPOG

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

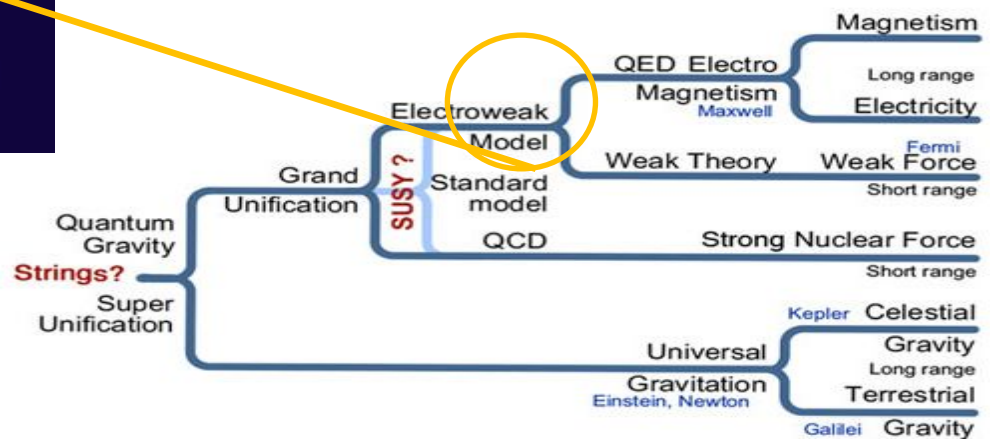
Под фундаментални обекти ние
имаме предвид, че те нямат
структура и не са съставени от
други по-малки обекти.

History of the Universe



Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC

Граница на нашето познание до днес



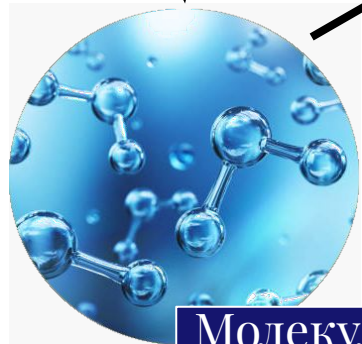
Вселената, както я познаваме



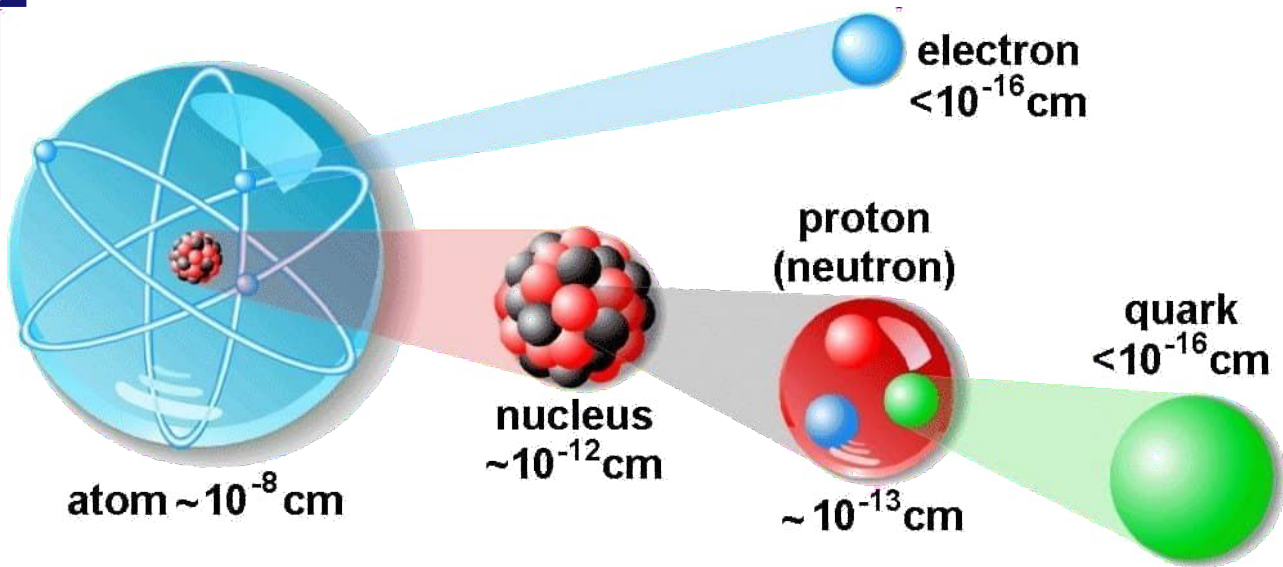
От какво е изграден светът около нас

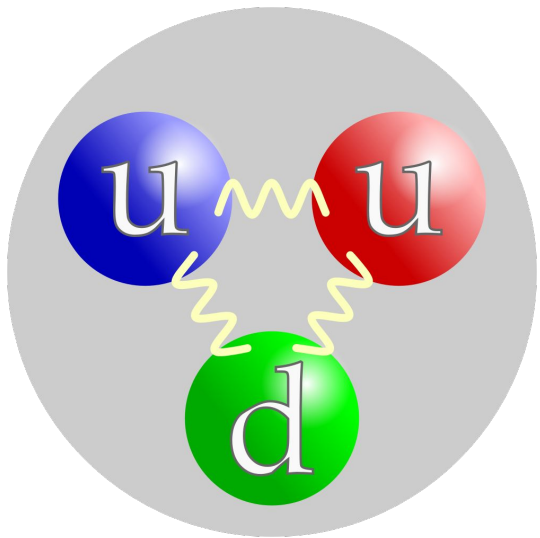


Материя



Молекули





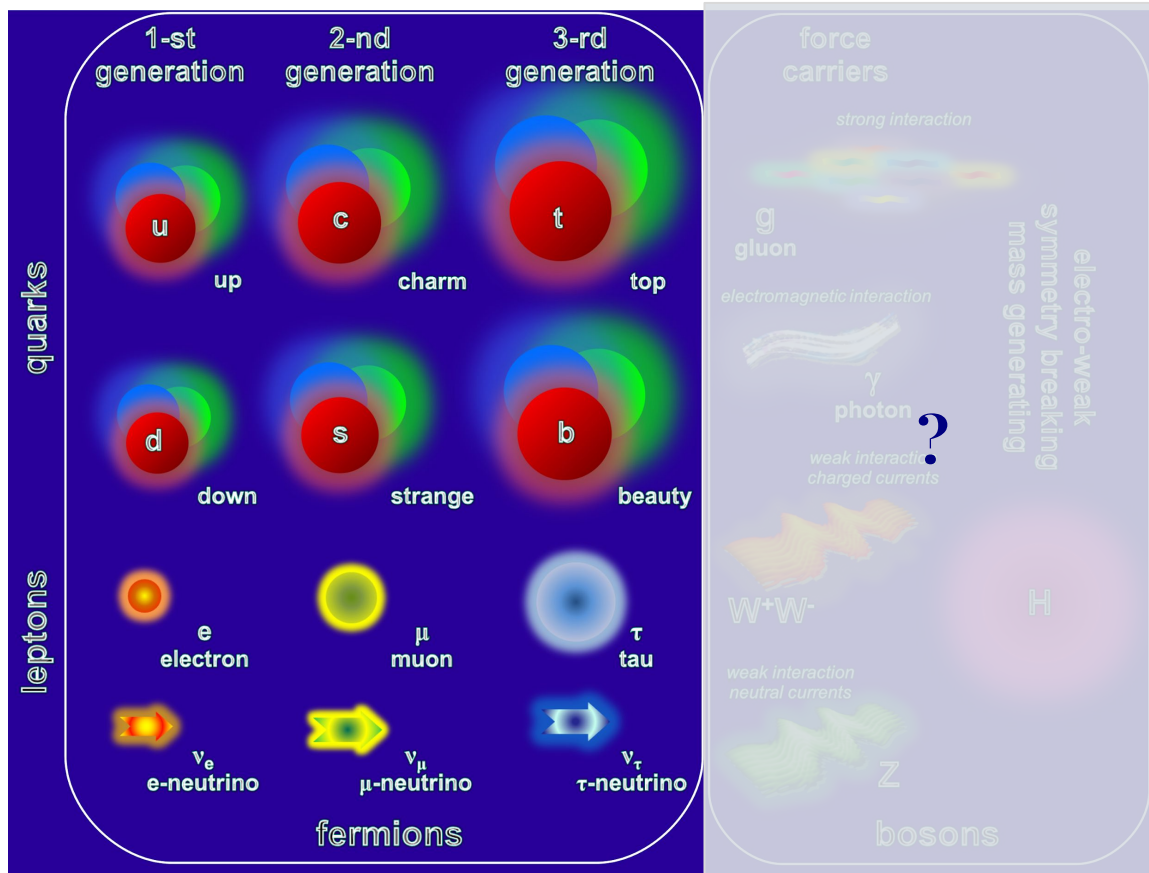
Протон

3 кварка: 2 горни и един долен

?

Виж по нататък в слайдовете!

Стандартен модел на елементарните частици

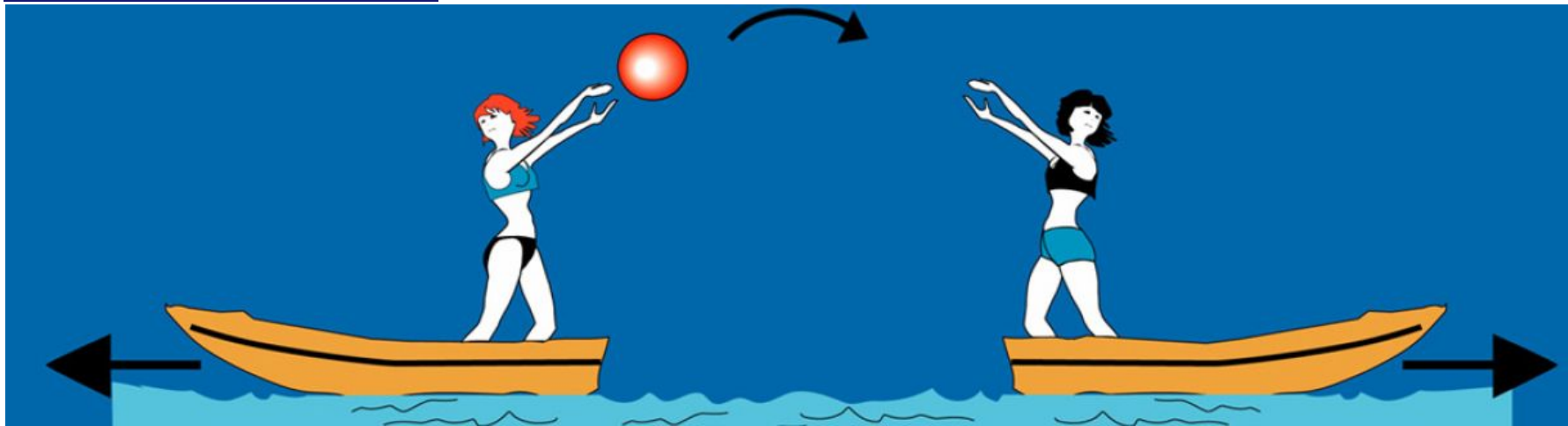


- Три поколения фермиони:
 - Кварки
 - Лептони
- Тежките частици имат кратък живот и се разпадат на други по-леки частици.

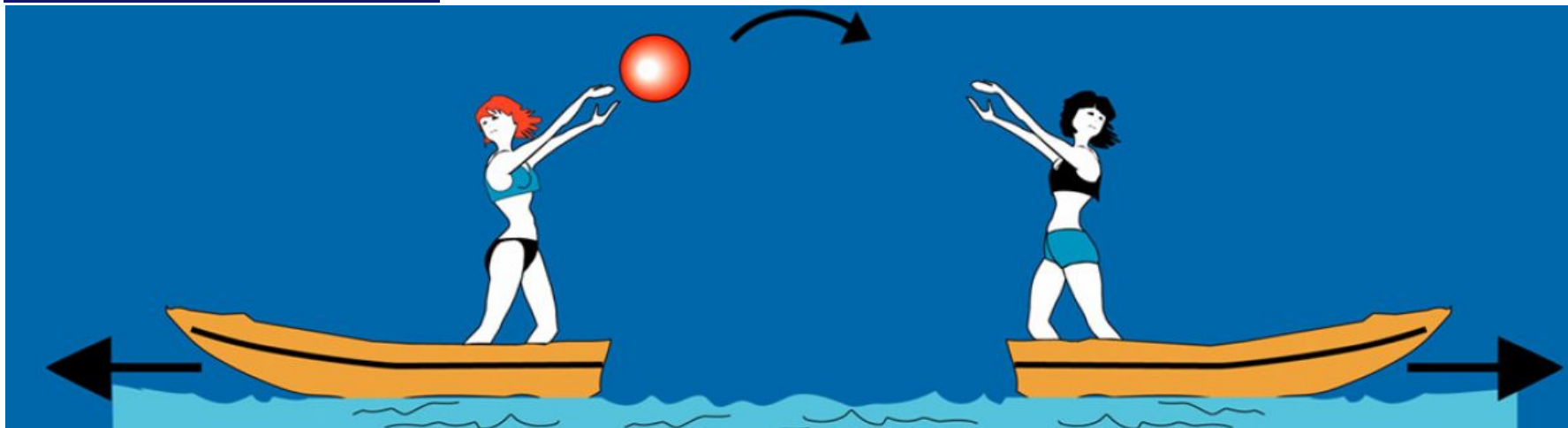


Взаимодействия

Взаимодействия



Взаимодействия



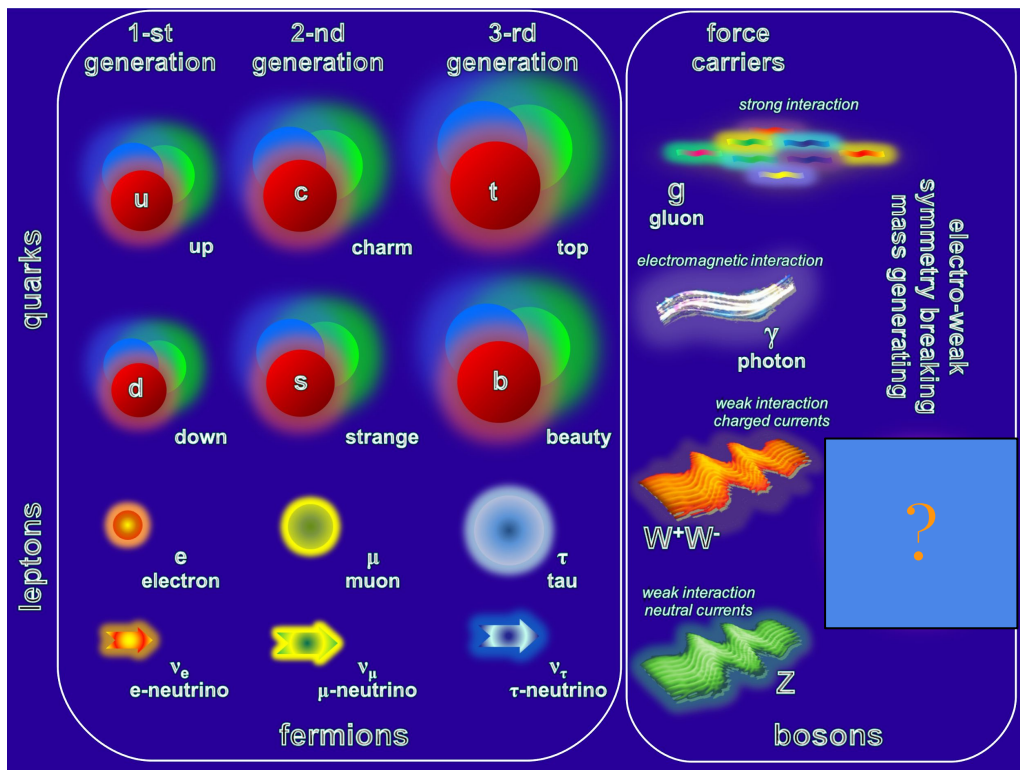
Електромагнитно: Най-изследваното взаимодействие, светлина, електричество, електроника, в основата на почти всички технологии.

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
- 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???**

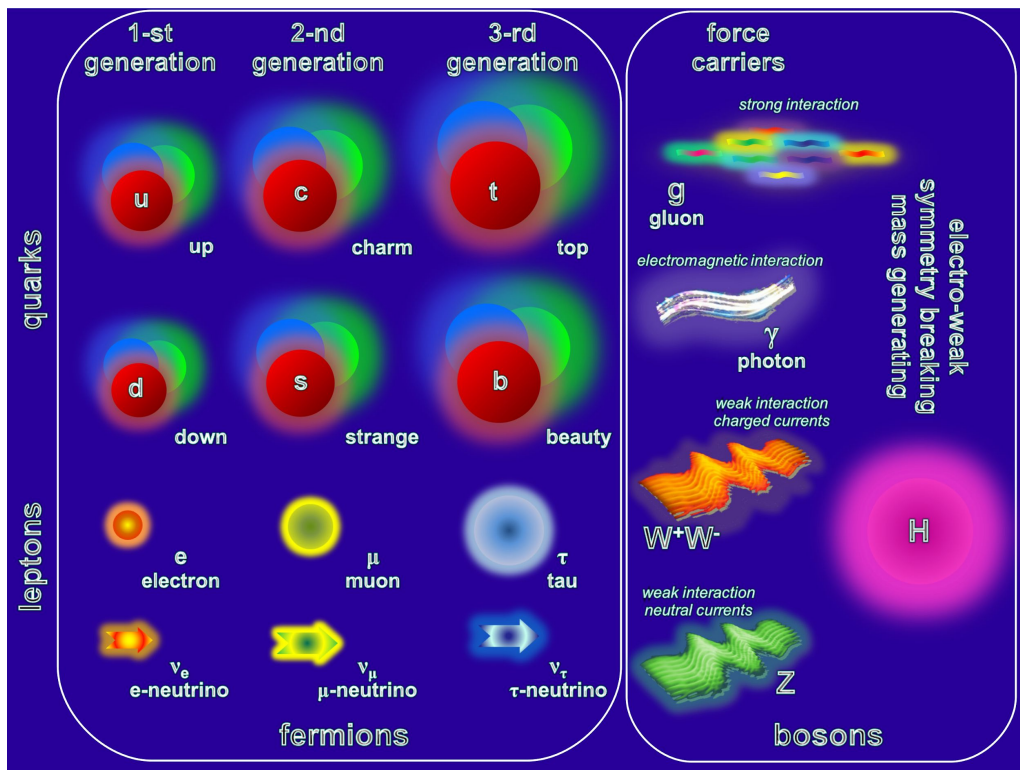
Тежките частици имат кратък живот и се разпадат на други по-леки частици.

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.

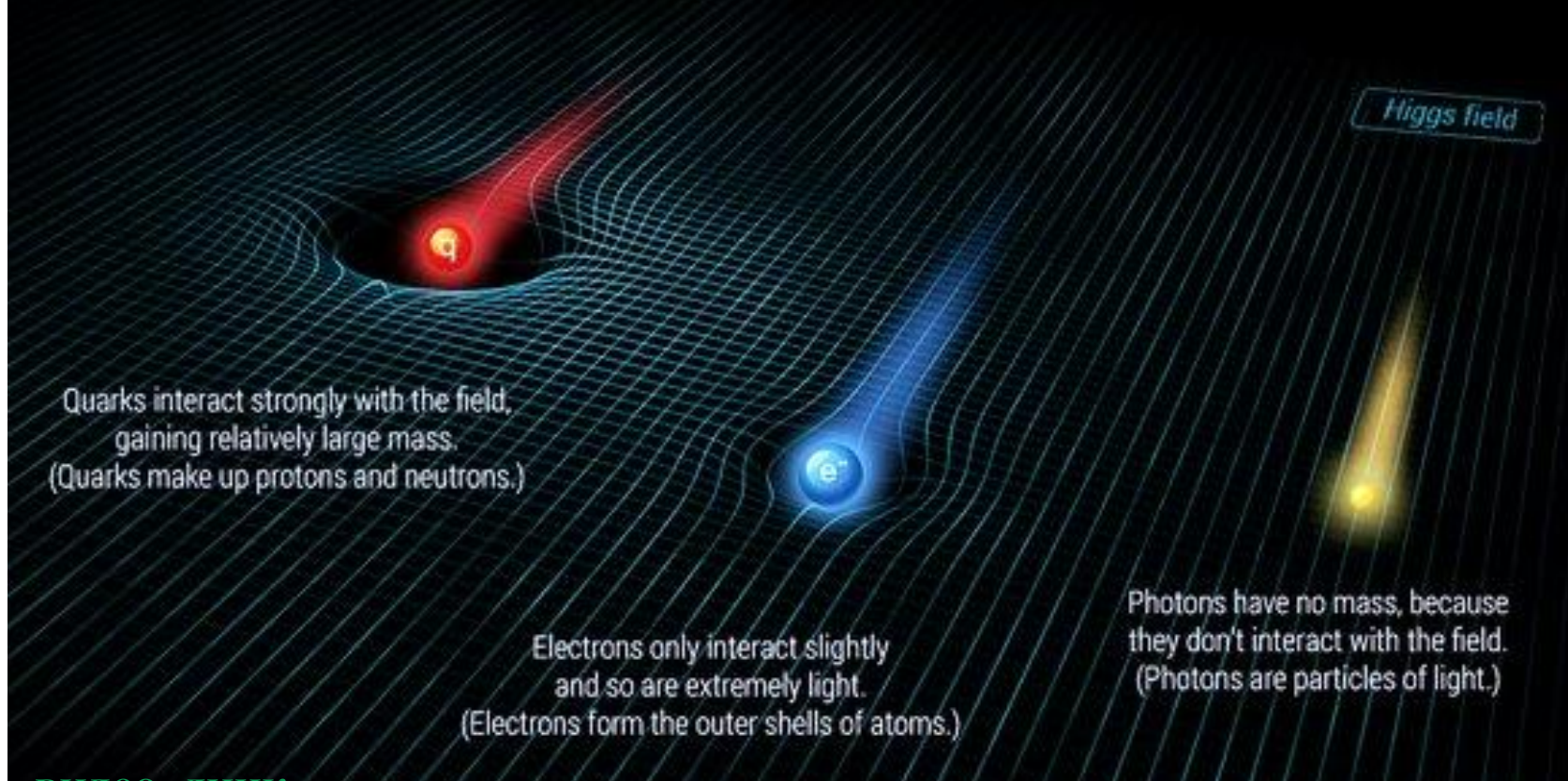
Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие

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.)

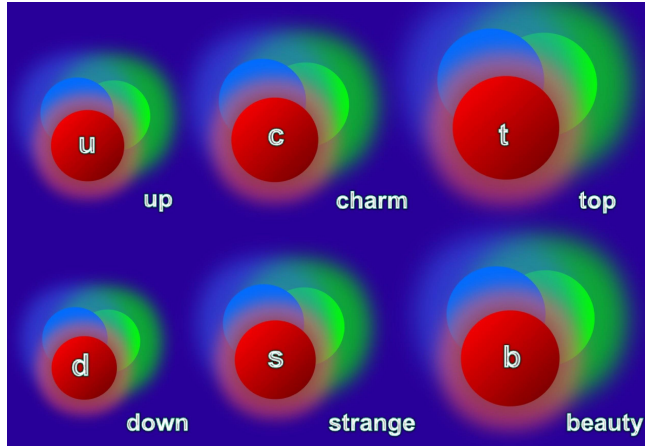


Murray Gell-Mann

Кварков строеж на адроните

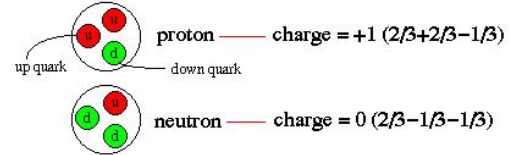
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици,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

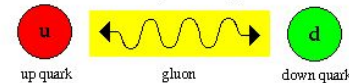
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

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.

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

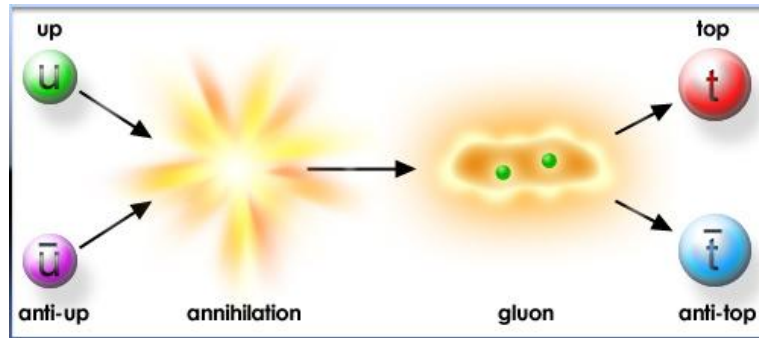
Но дали това е всичко?

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 аниhilират.



<http://www.particleadventure.org/antipreface.html>



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 TeV = 10^{12} eV; 1 GeV = 10^9 eV; 1 KeV = 1000 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 ²]
....			

Примерно:

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

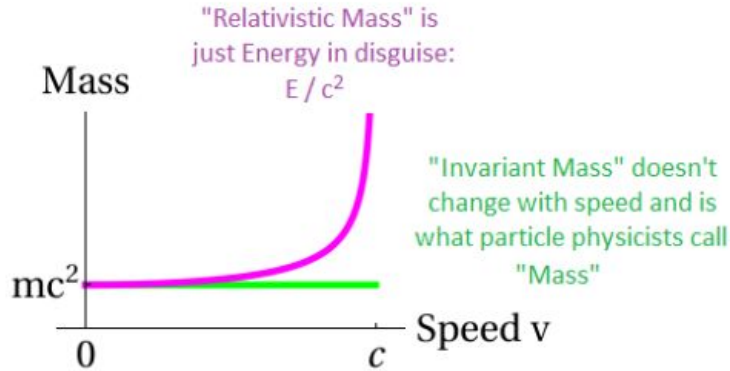
$$m_e = 9.1 \times 10^{-28} \text{ [g]} \quad (\text{GCS})$$

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

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.

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

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



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.

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;**

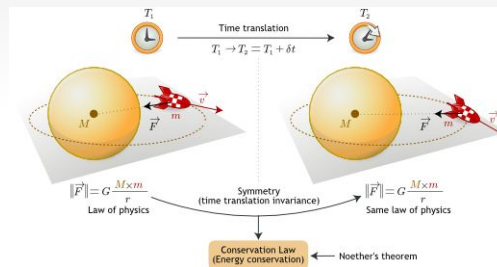
Енергията на една изолирана система е константа, или $dE/dt=0$



Изотропност на пространството

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

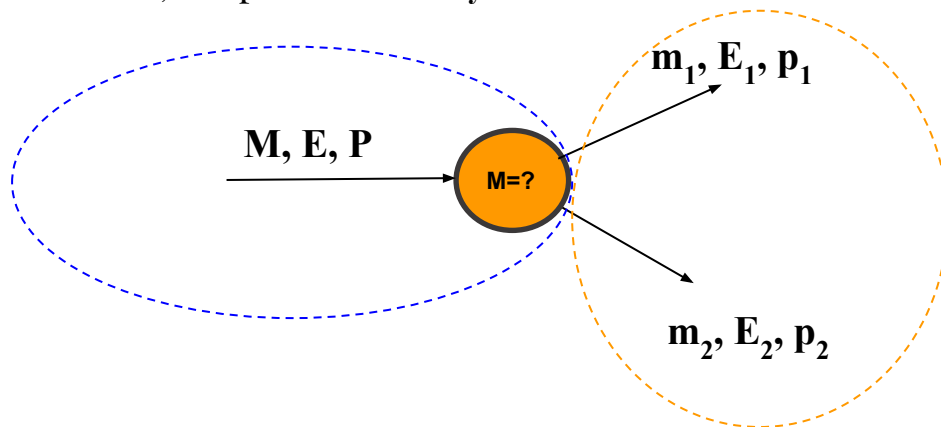
Общият ъглов момент на една изолирана система е константа, или $dL/dt=0$, където $L = \sum L_i$, а $L_i = r_i \times p_i$



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 α

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

Използваме закона за запазване на енергията и импулса.

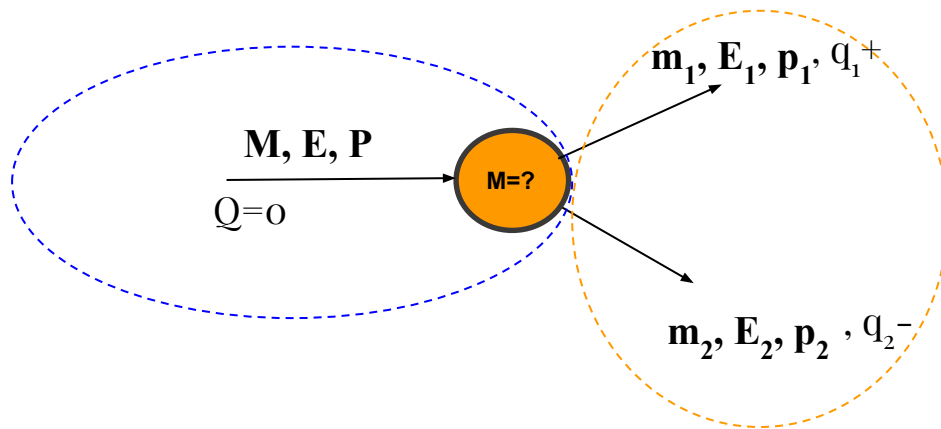
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 - p_1 \cdot p_2 \cos \alpha)$$

Маса на частицата-майка

Закон за запазване на електрическия заряд

Начално състояние:

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

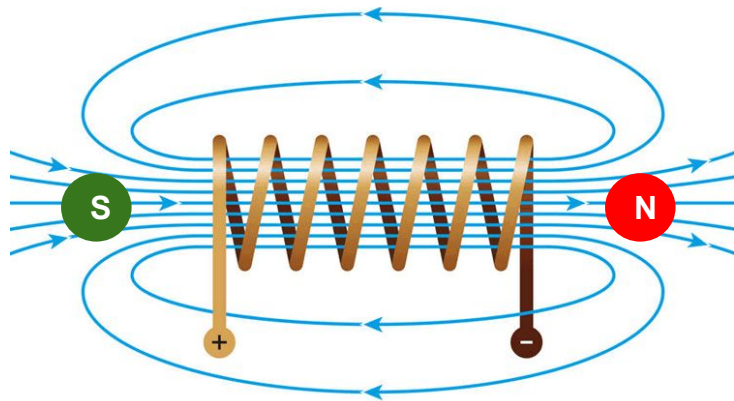


Крайно състояние:

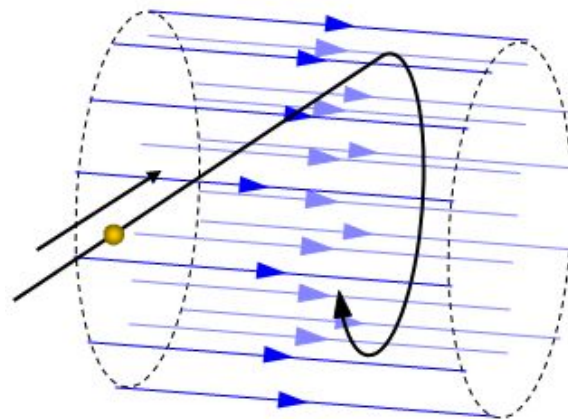
Сборът на електрическите заряди на дъщерните продукти в крайното състояние, трябва да бъде толкова, колкото е електрическият заряд в началното състояние.

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

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.

What the Human Eye Can See

What CTA Will See

Wavelength in Metres

Electron Volts (eV)



Relative Wavelength Size



Building



Baseball

This Dot



Cell



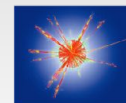
Viruses



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



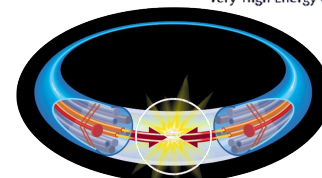
X-Ray Machines



Radiotherapy Machines



Very-High Energy Cosmic Source



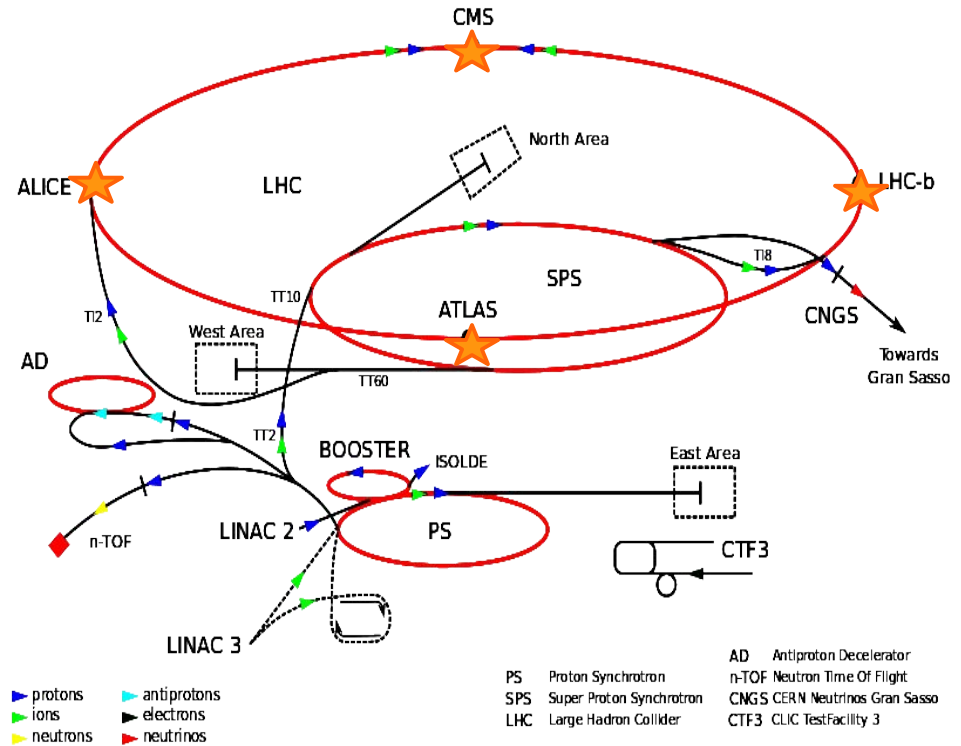


Големия адронен колайдер LHC

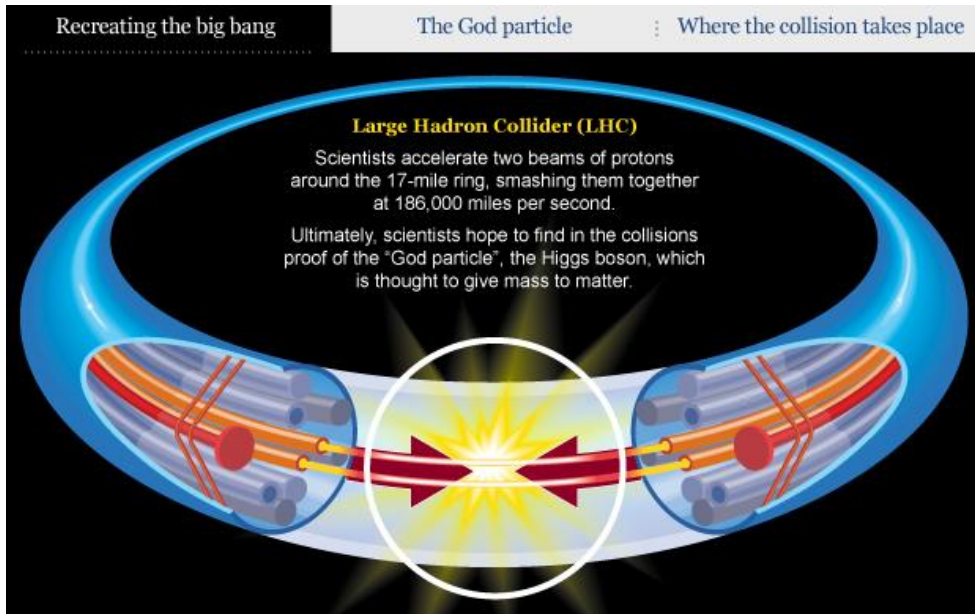
Построен на територията на Швейцария и Франция.
 Разположен е на около 100 м дълбочина.
Ускоряването на сноповете се постига чрез система от ускорители

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



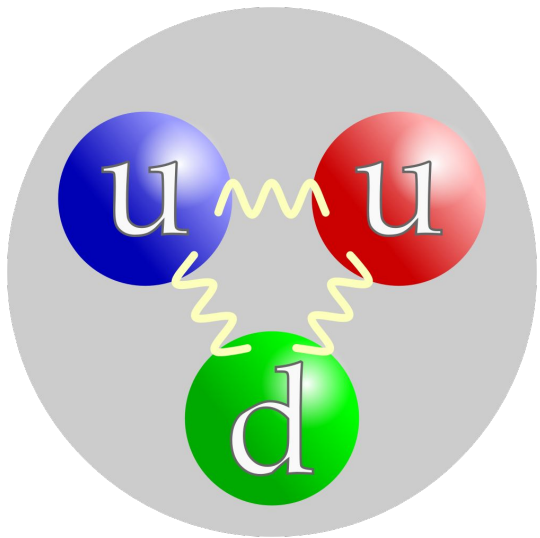
[ВИДЕО-ЛИНК](#)



- 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.



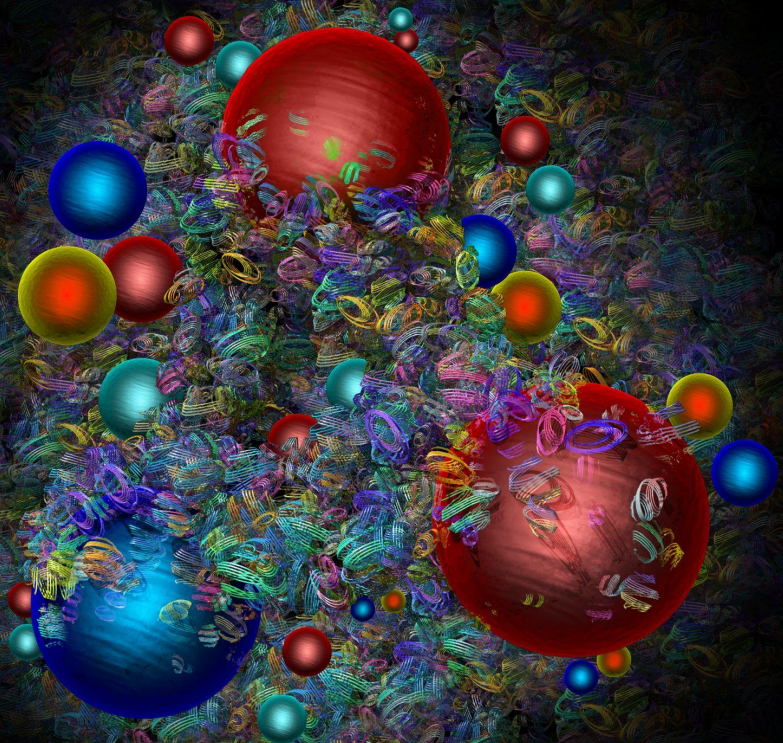


Протон

3 кварка: 2 горни и един долен

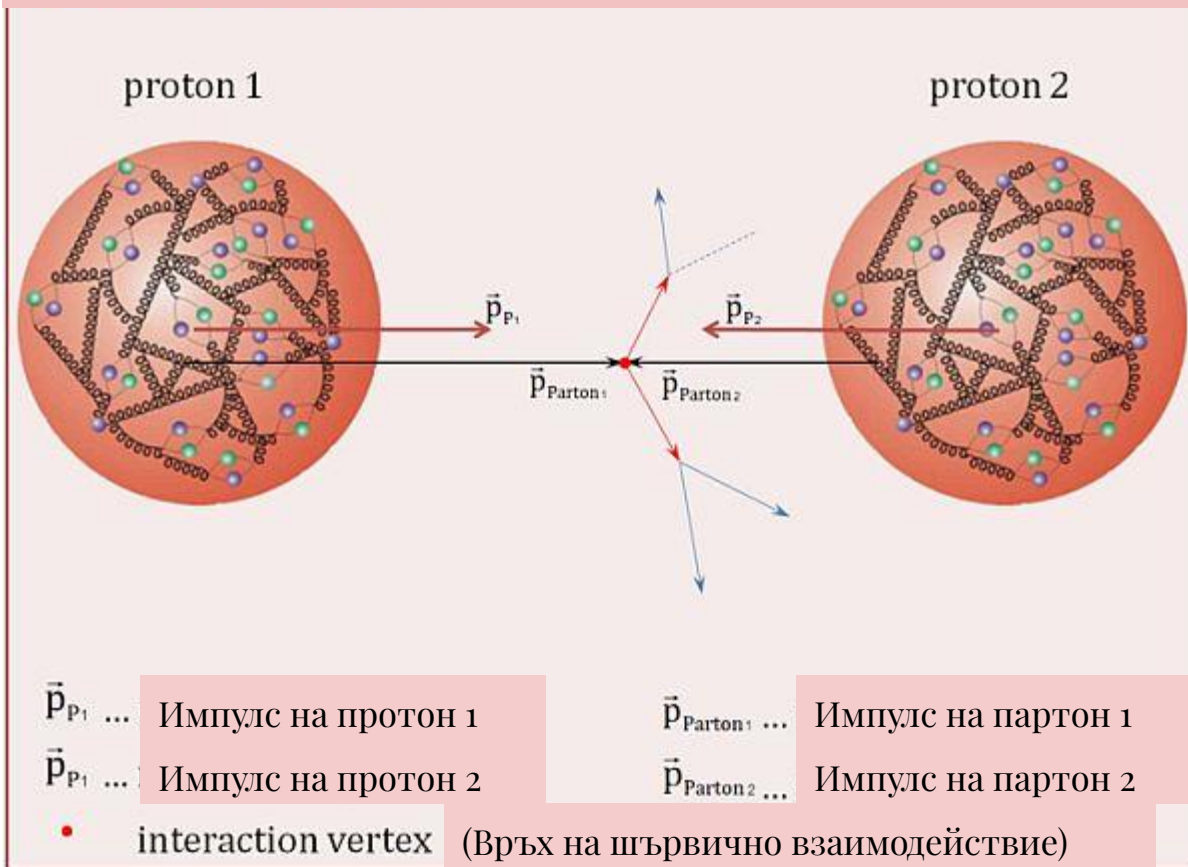
Протон

Партони: 3 кварка, морски кварки и глюони



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

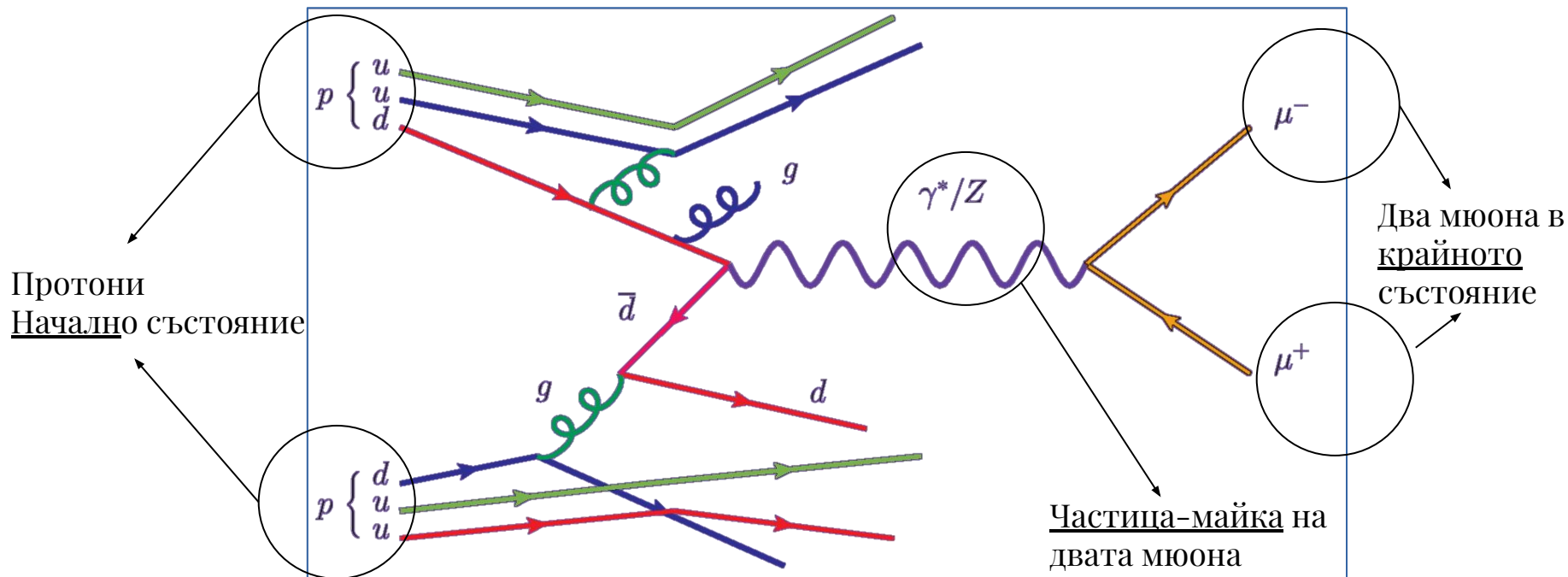
Взаимодействия на партоните от сблъскващите се протони



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

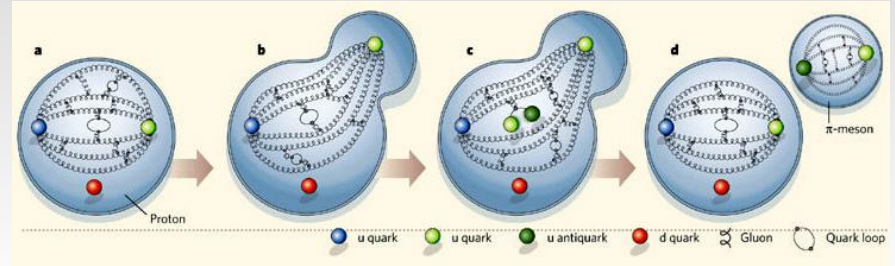
Протон-протонен сблъсък и раждане на двойка мюони:

- Силно взаимодействие
- Електрослабо (Електромагнитно & слабо взаимодействие)

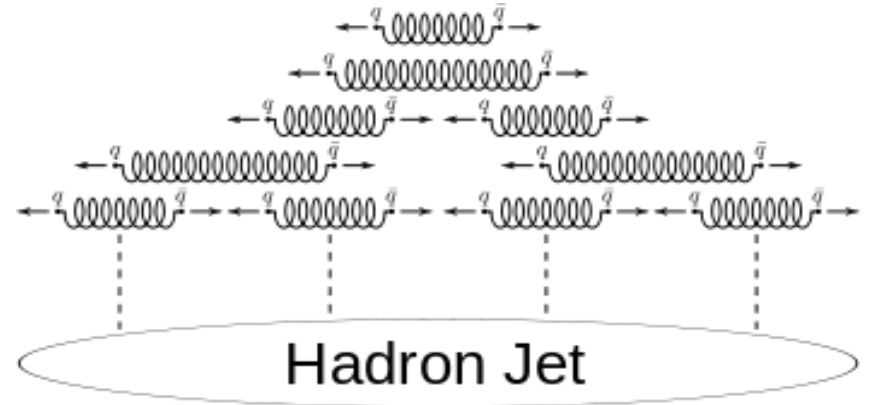


Партони -- кварки + глюони

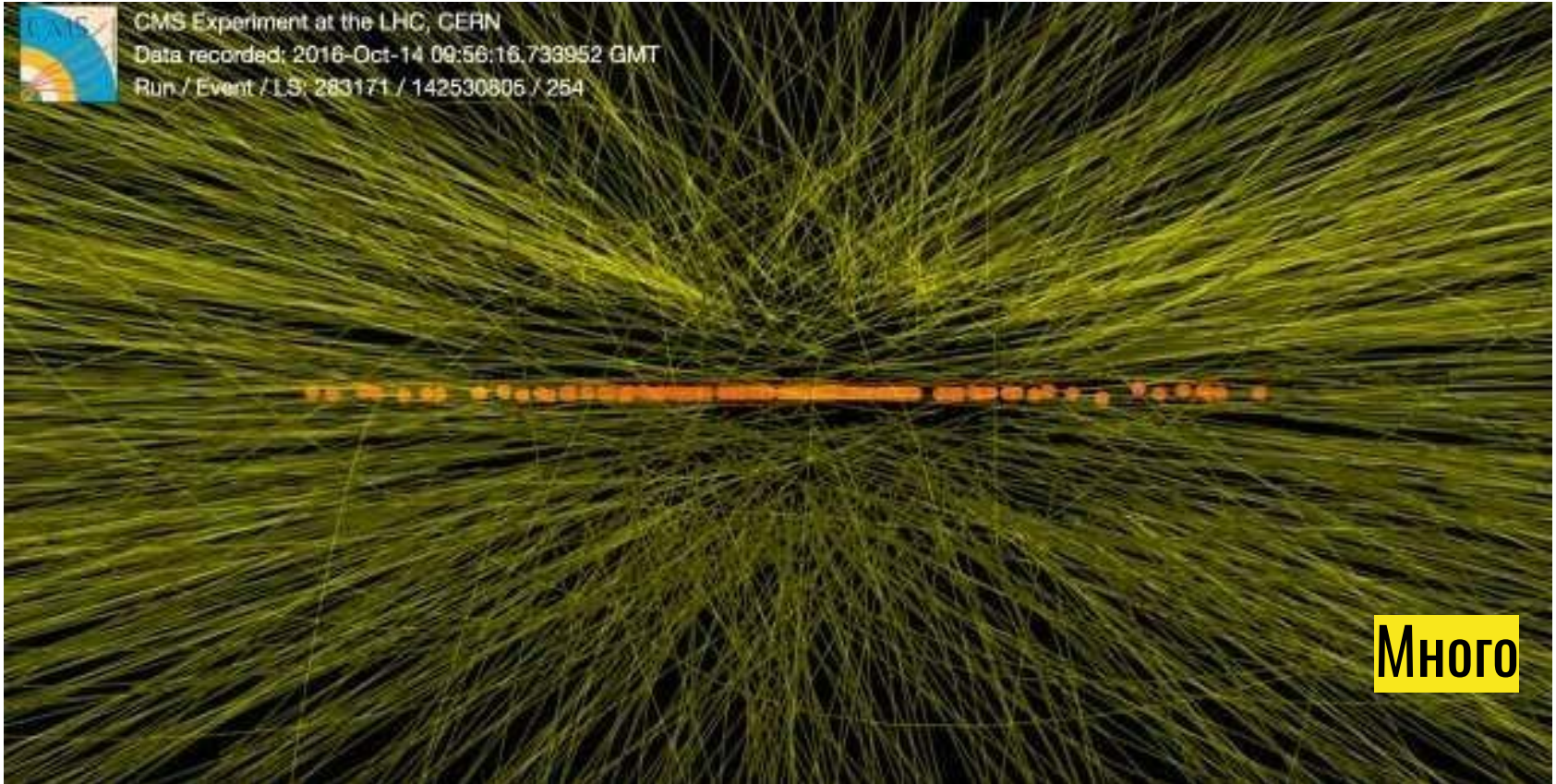
При достатъчно висок импулс един отделен кварк може да се отдели от протона, при това силата на привличане нараства с разстоянието и глюонното поле ражда допълнителни кварк-антикваркови двойки – ражда се пион или различни видове адрони /пиони, каони и др./



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



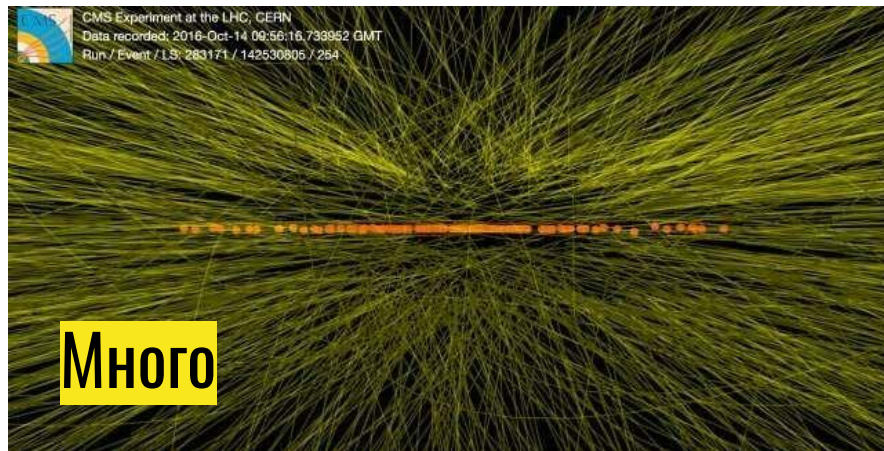
Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?



Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?



Как някои хора си представят откритието на нова частица.



Много

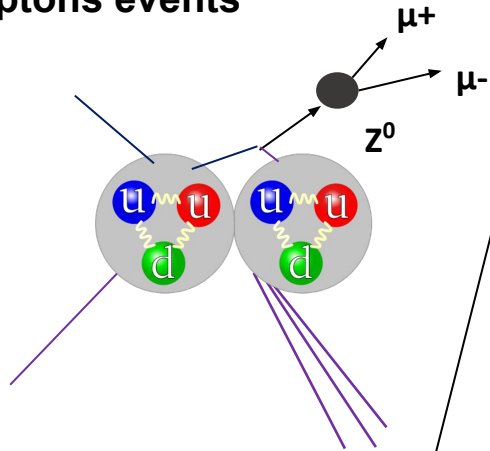


Каква е действителността.

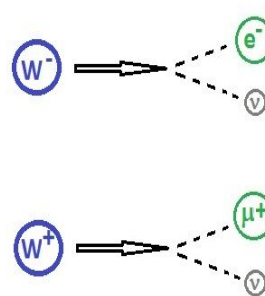
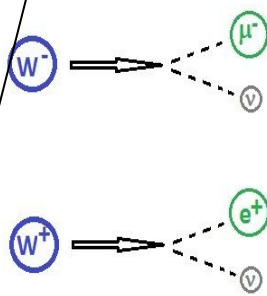
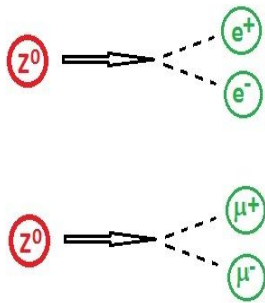
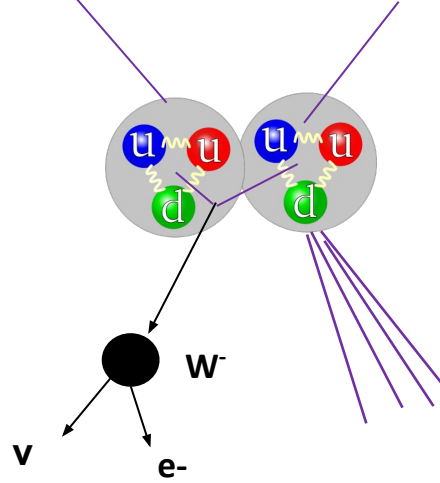
Нека се ограничим само с няколко вида разпада! Засега ;)

Ще анализираме само събития с един, два или четири лептона в крайното състояние.
Ще се ограничим върху събитията с мюони и електрони.

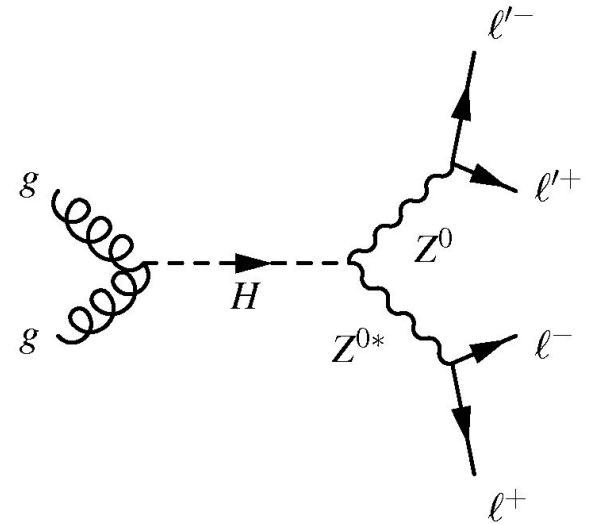
2 leptons events



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

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

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

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

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

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

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

$$? \Rightarrow Z\text{oo}$$

Събития, които не асоциираме с нито една от горните схеми

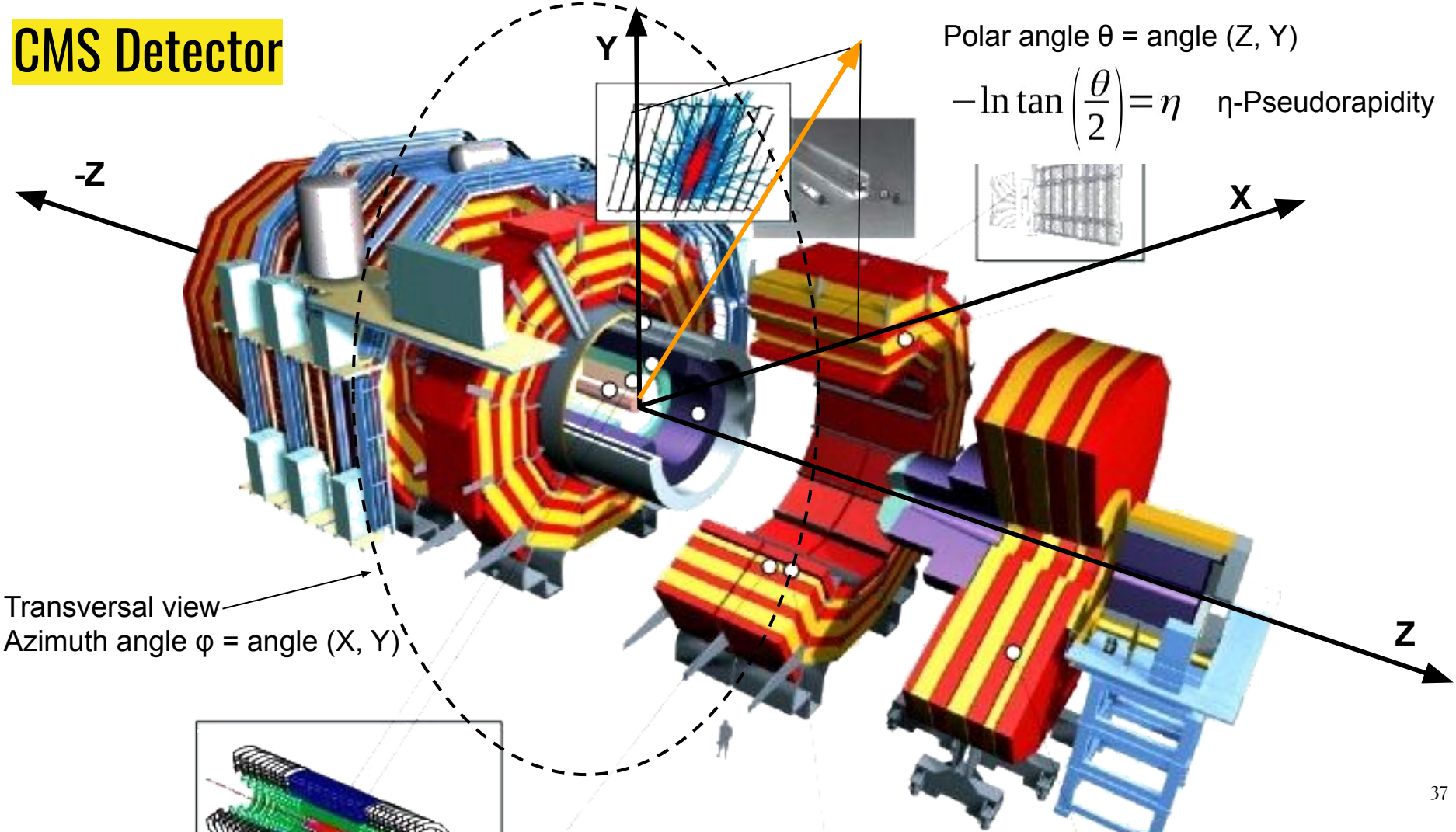
X^0 - електрически неутрална частица
Може да бъде Хигс бозон или Z бозон или
друга частица.
Не знаем преди да определим нейната маса.

Събития с 2 лептона в крайното състояние

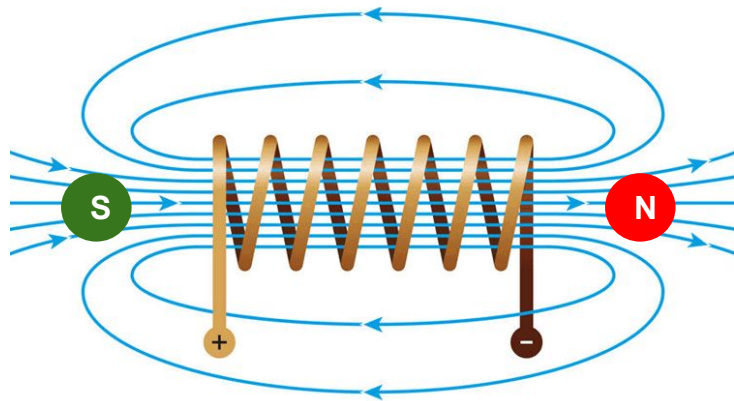
Събития с 4 лептона в крайното състояние

Детектори и методи за измерване на частици

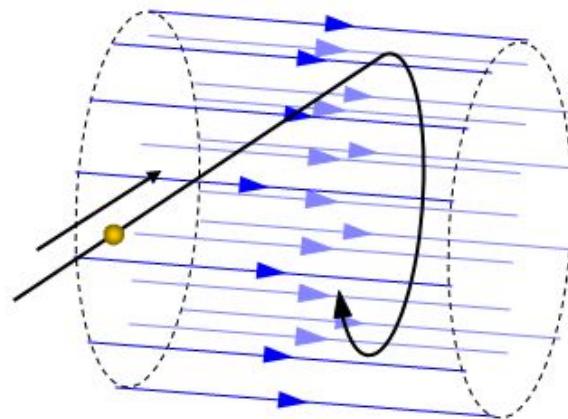
CMS Detector



Движение на заредена частица в магнитно поле



Соленоидално магнитно поле



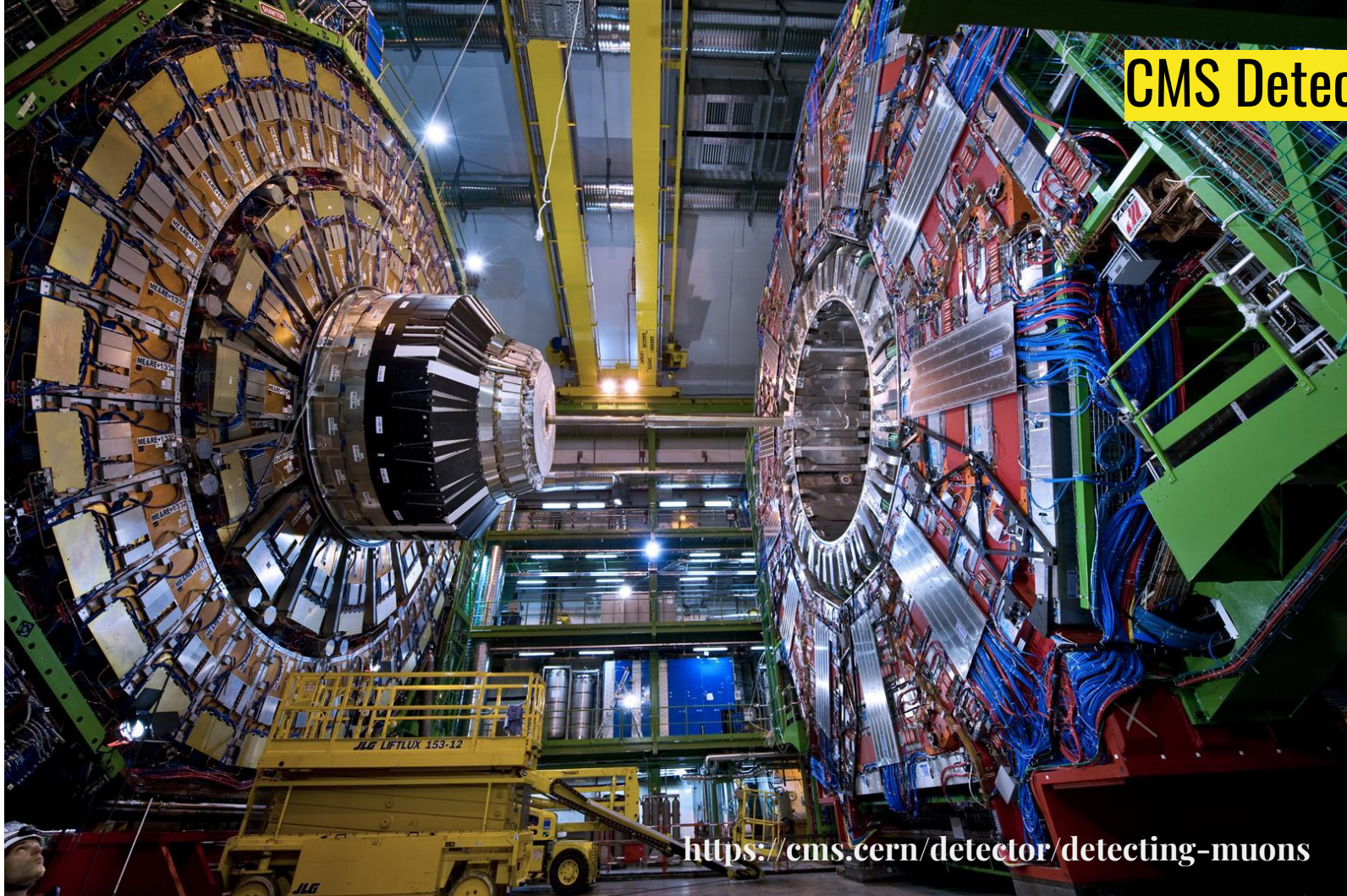
Траекторията на заредена частица се закривява в магнитно поле.



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

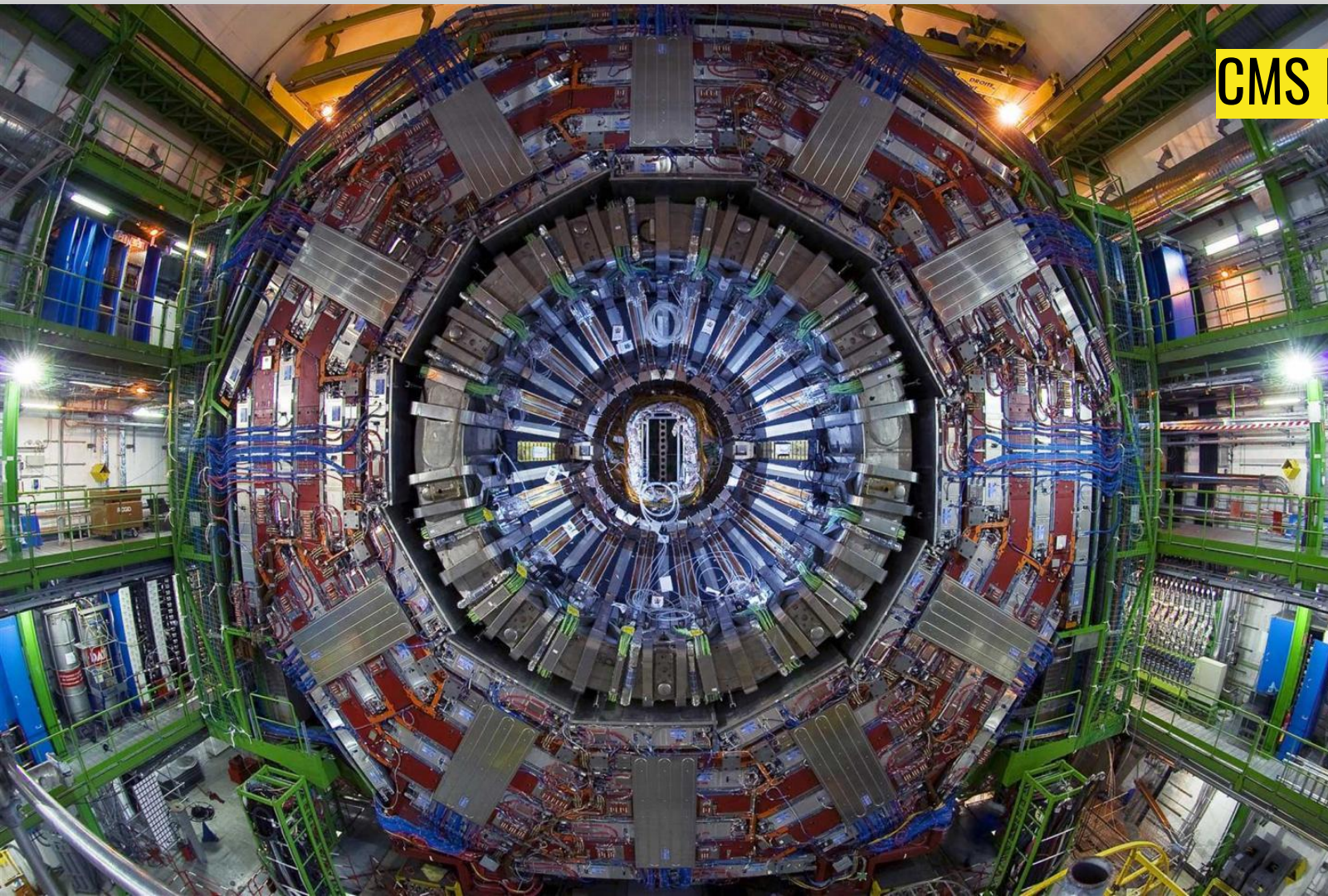
В CMS посоката на магнитното поле във вътрешността на магнита е по посока на оста Z. В основния ху изглед на приложението iSpyWebGl, оста z е насочена към наблюдателя.

CMS Detector

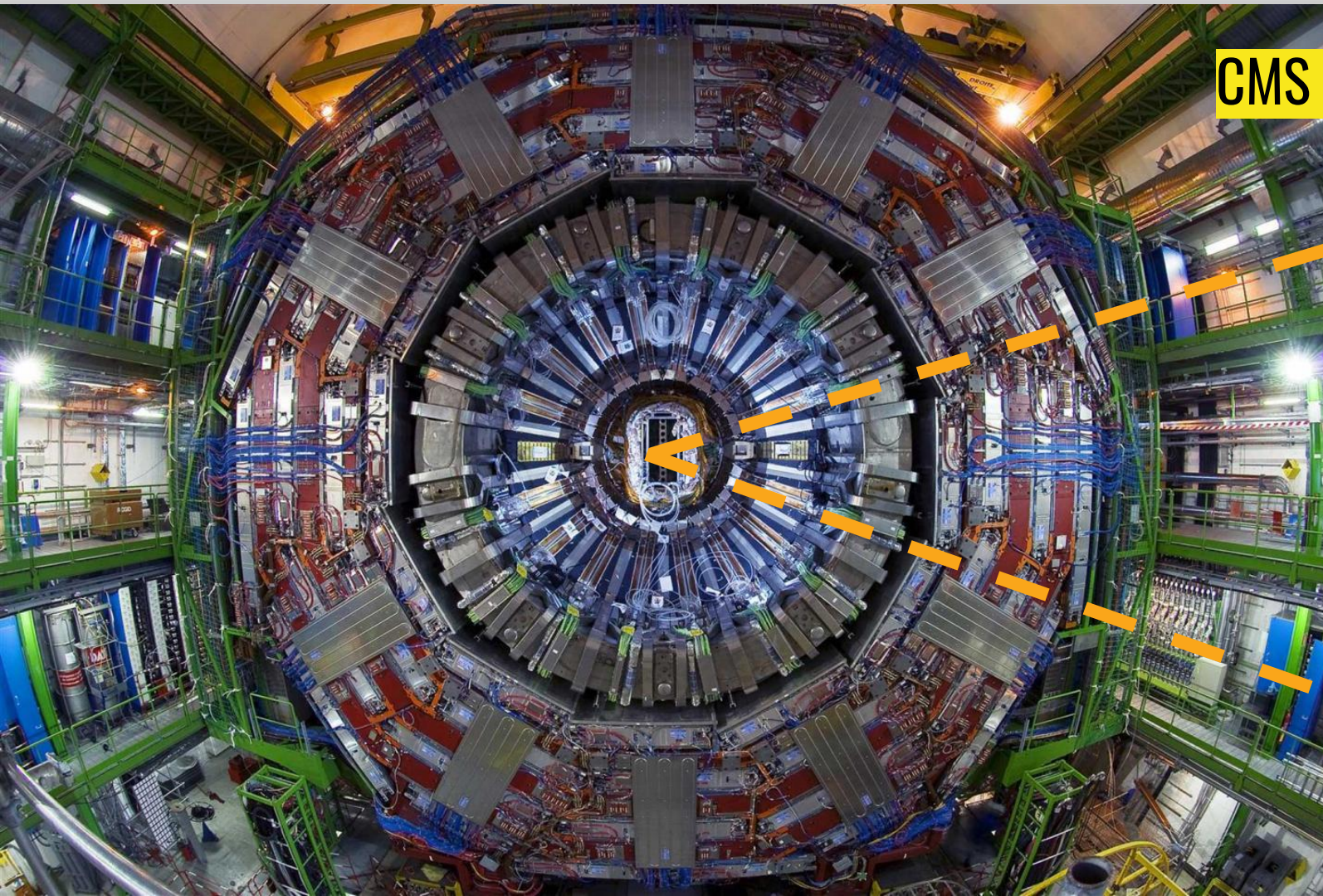


<https://cms.cern/detector/detecting-muons>

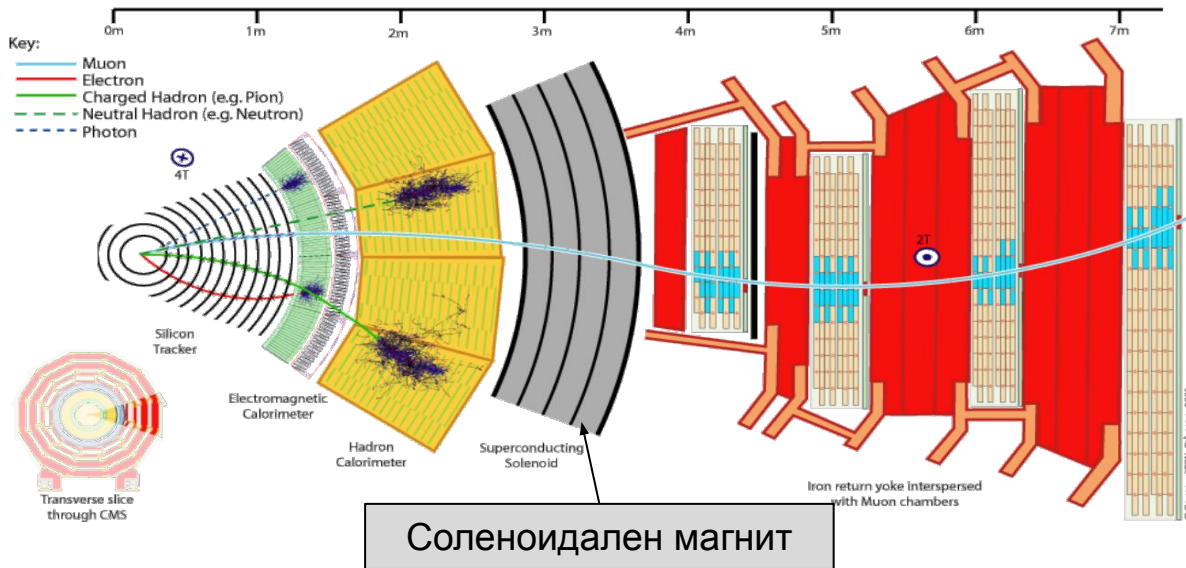
CMS Detector



CMS Detector



Как се регистрира частици със CMS



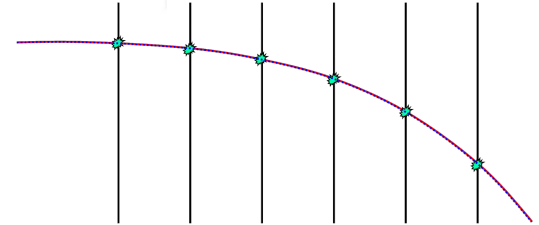
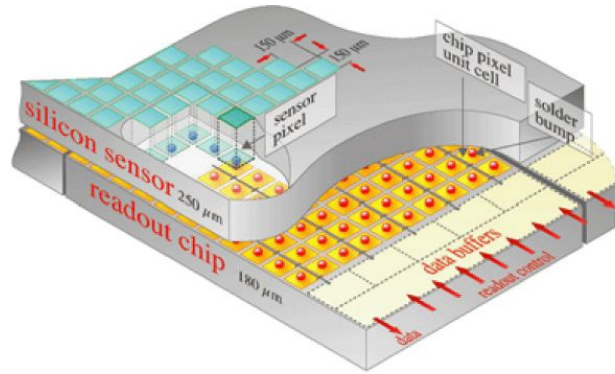
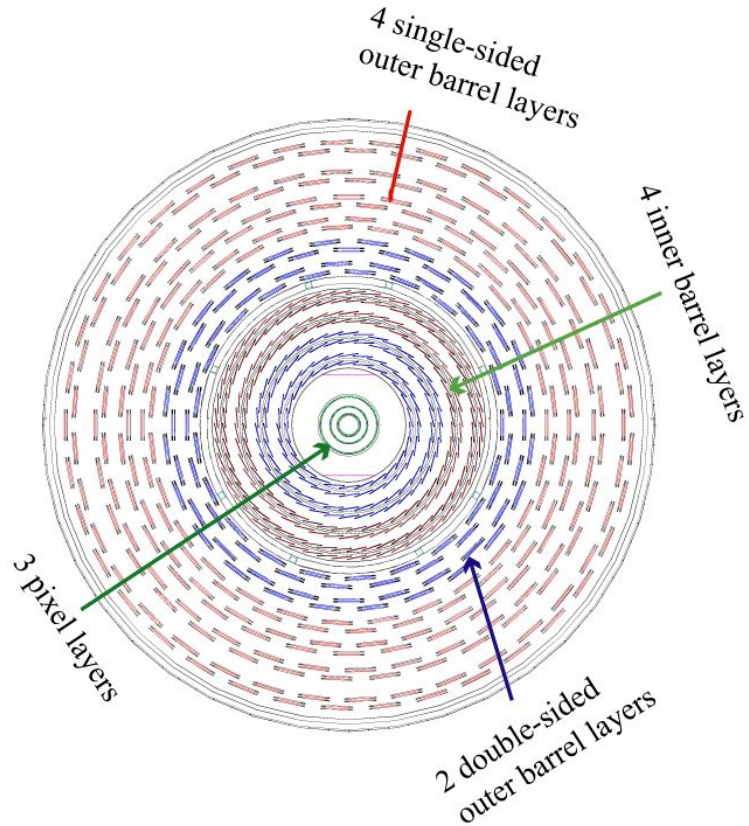
- Мюонна система (извън магнита, $B = 1.8 \text{ T}$)
 - Регистрира електрически заредени частици, преминали през всички останали системи и магнита.
 - Ние предполагаме, че в CMS такива могат да бъдат само мюоните

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

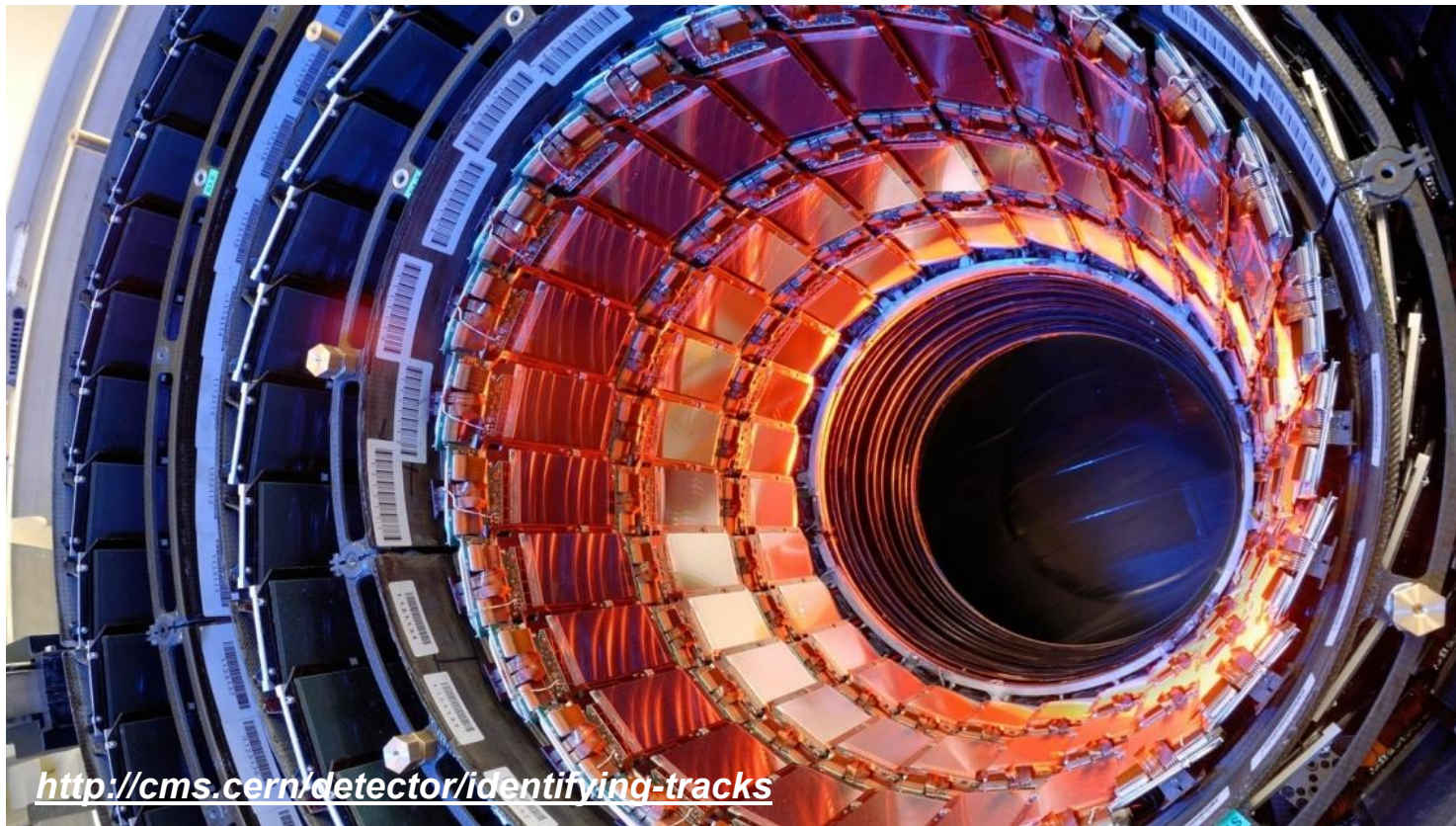
Комбиниране информацията от отделните детекторни системи!

Определяне на импулс и заряд - Вътрешен треков детектор



- Сигналите от вътрешния треков детектор, позволяват да се реконструират техните траектории.
- Големината на закривяване на техните траектории позволяват определянето на техния импулс.
- Колкото по-голям е импулсът на частицата, толкова по изправена е неговата траектория.

Определяне на импулс и заряд - Вътрешен треков детектор



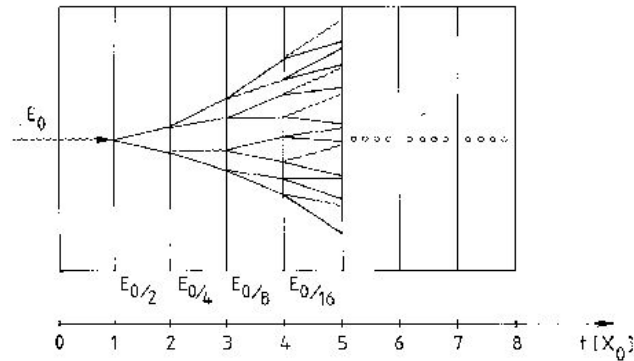
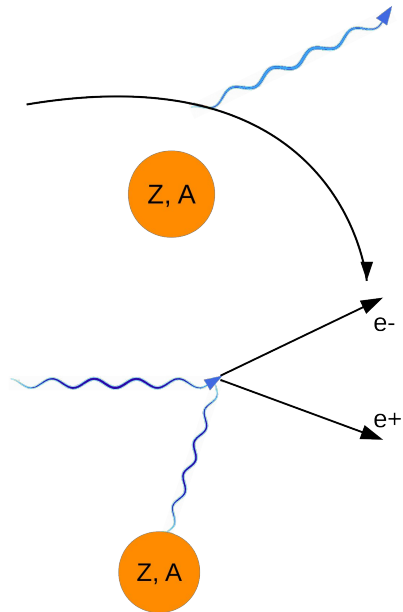
<http://cms.cern/detector/identifying-tracks>

Детектиране на електрони, позитрони и фотони

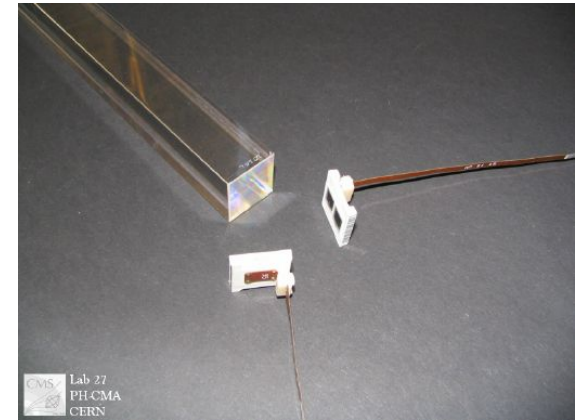
Електромагнитна лавина във вещество

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

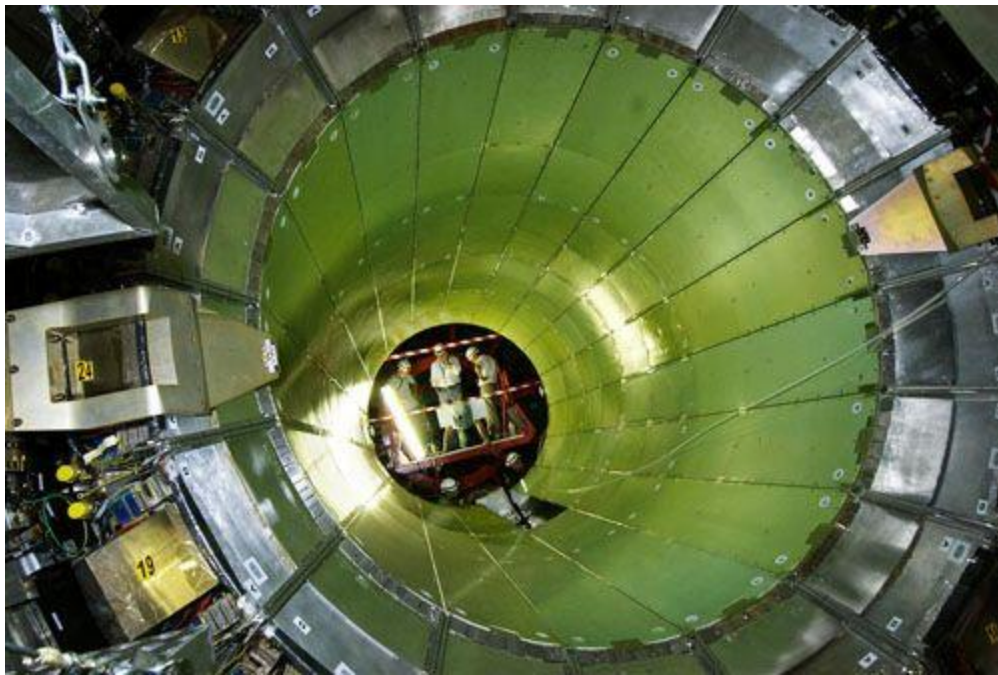
- излъчване на фотон от заредена частица (примерно e^+ или e^-) при движение в полето на ядро от средата
- раждане на e^+e^- двойки от фотон, в полето на ядро от средата



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

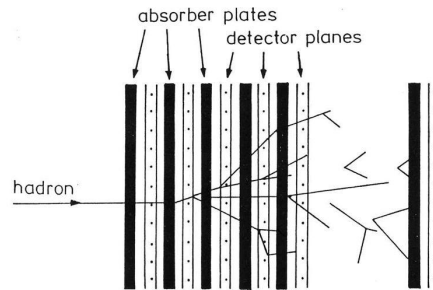


Кристал от оловен волфрама и лавинни фотодиоди, използвани в ECAL на CMS



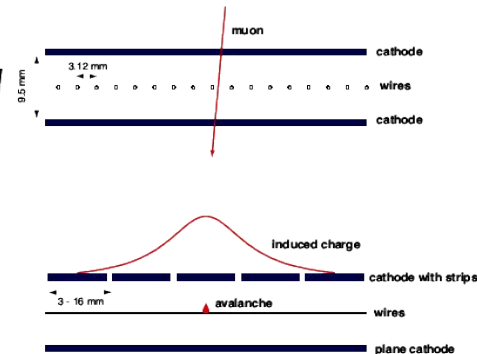
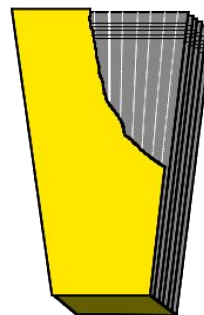
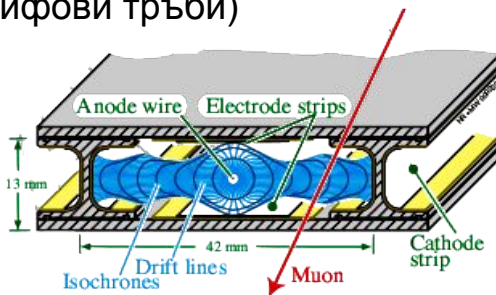
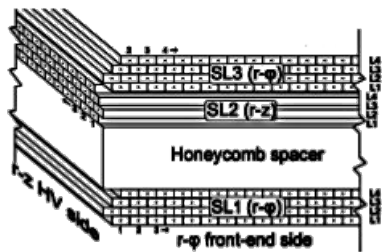
ECAL - електромагнитен калориметър на CMS (в ляво)

HCAL - адронен калориметър на CMS (в дясно)

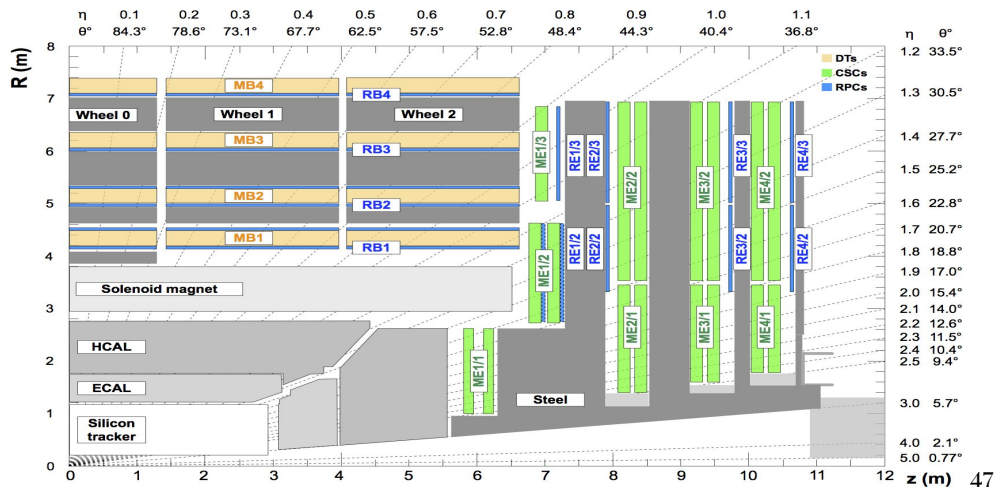
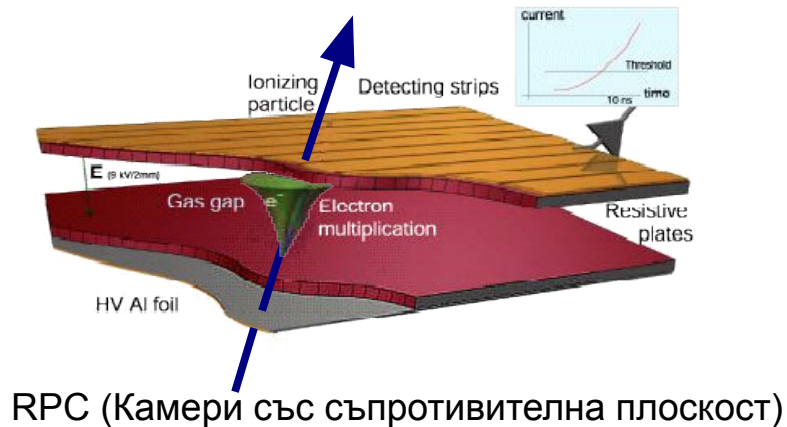


Мюонна система на CMS (Run1 & Run2)

DT (Камери с дрейфови тръби)

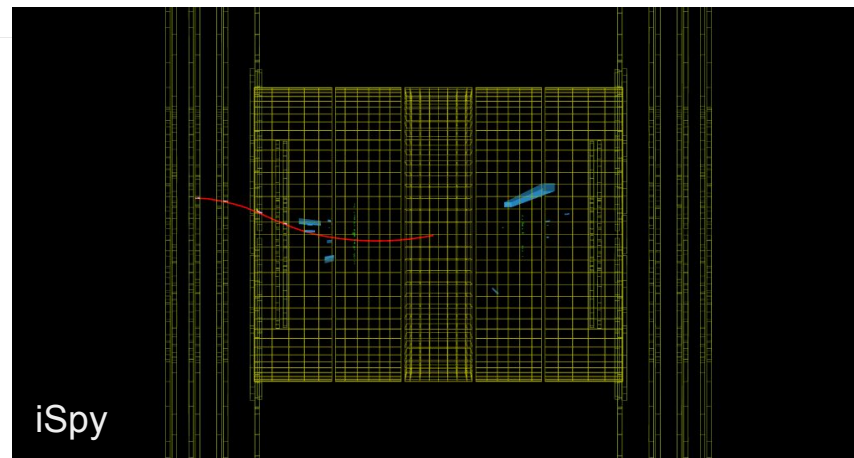
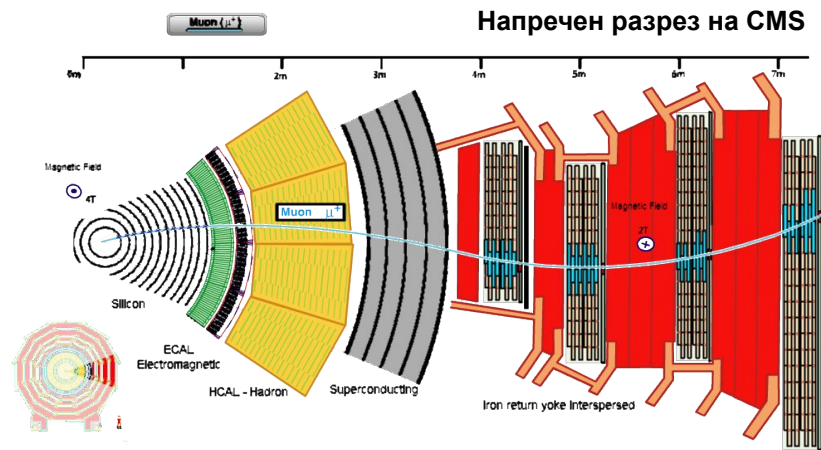


CSC (Катодно стрипови камери)



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 потезки частици и носят информация за случването на интересни събития – примерно раждане и разпад на Хигс бозон.

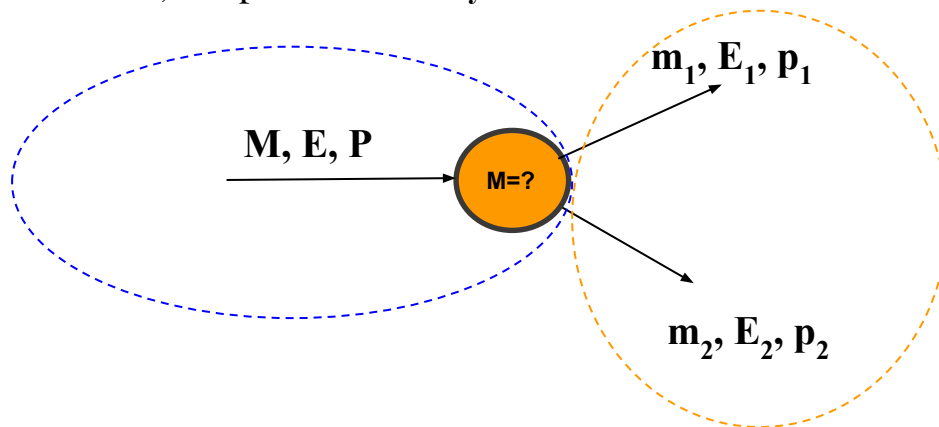


Припомняме:

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 α

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

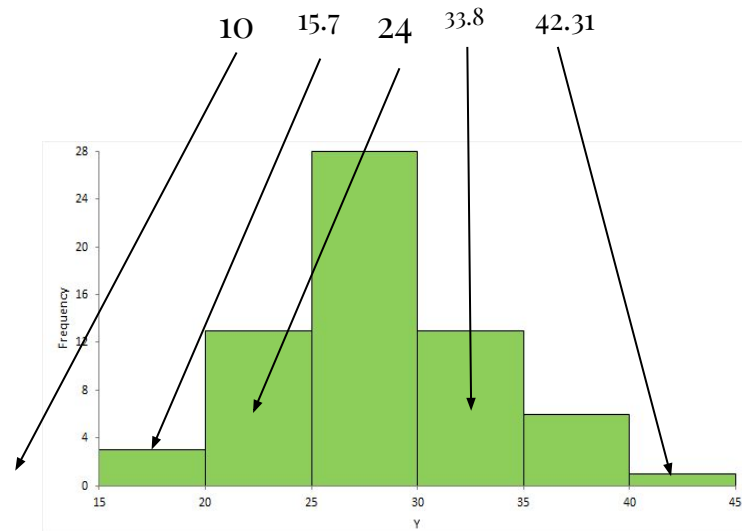
Достатъчно ли е само едно измерване? Хистограма

Едно събитие не е достатъчно.

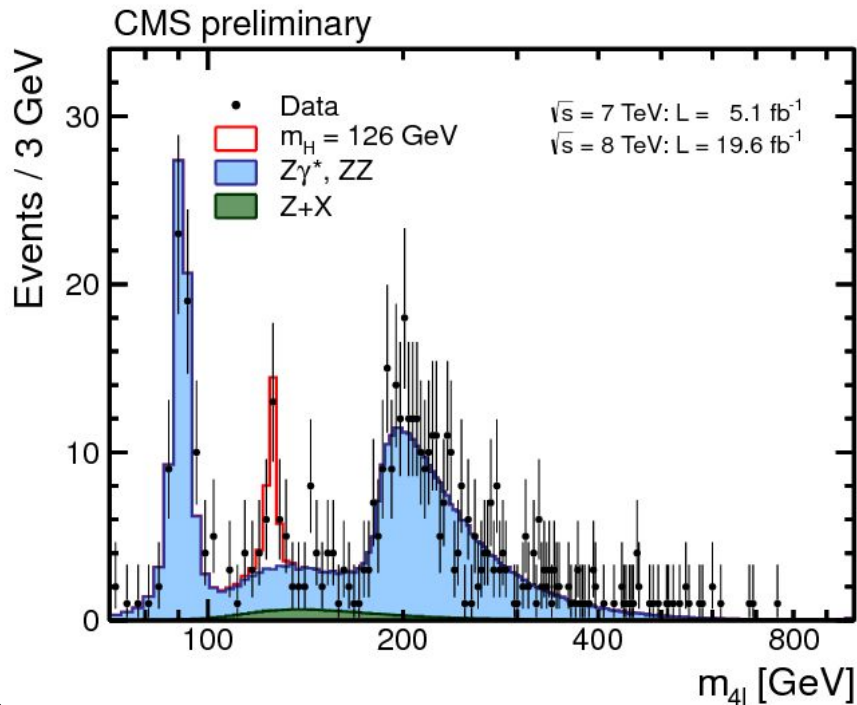
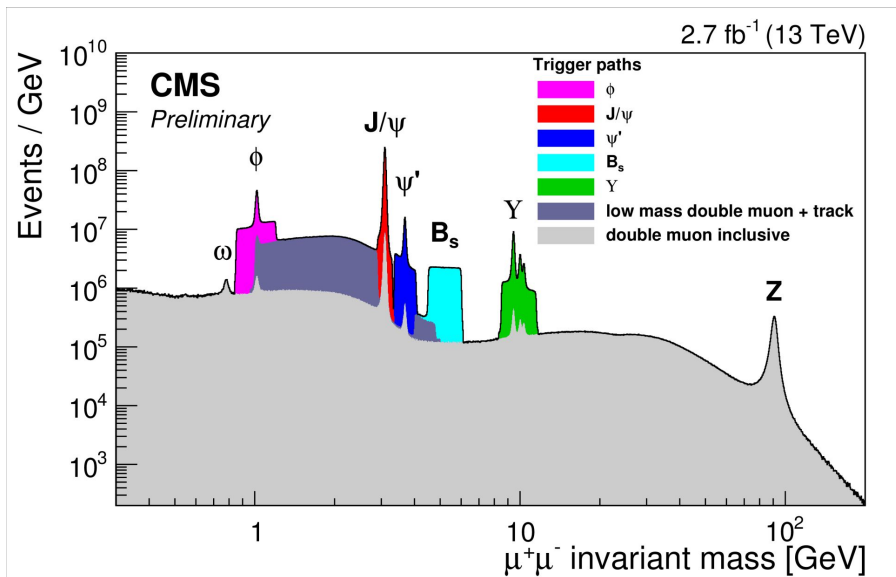
- То може да бъде случайно.
- Освен това различните частици се раждат с различна вероятност.
- Колкото по-рядко се ражда една частица, толкова по-голям брой събития е необходимо да анализираме за да я открием.

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

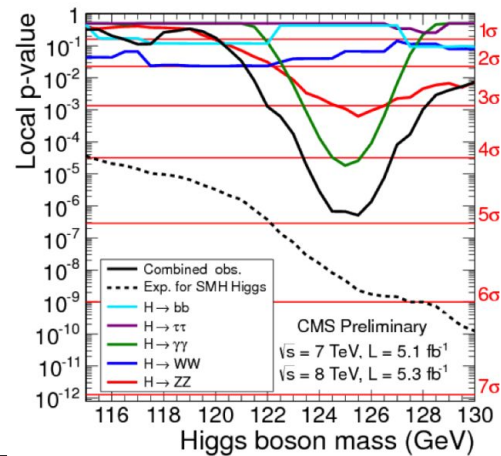
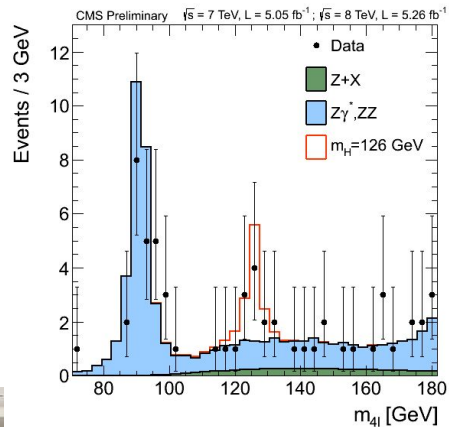
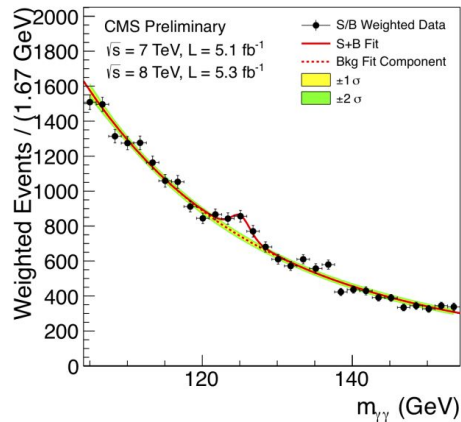


Да видим какво ще получите вие.



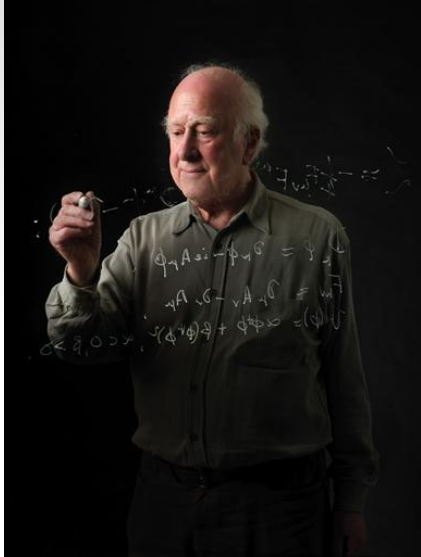
Higgs Boson Discovery – 2012

CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

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



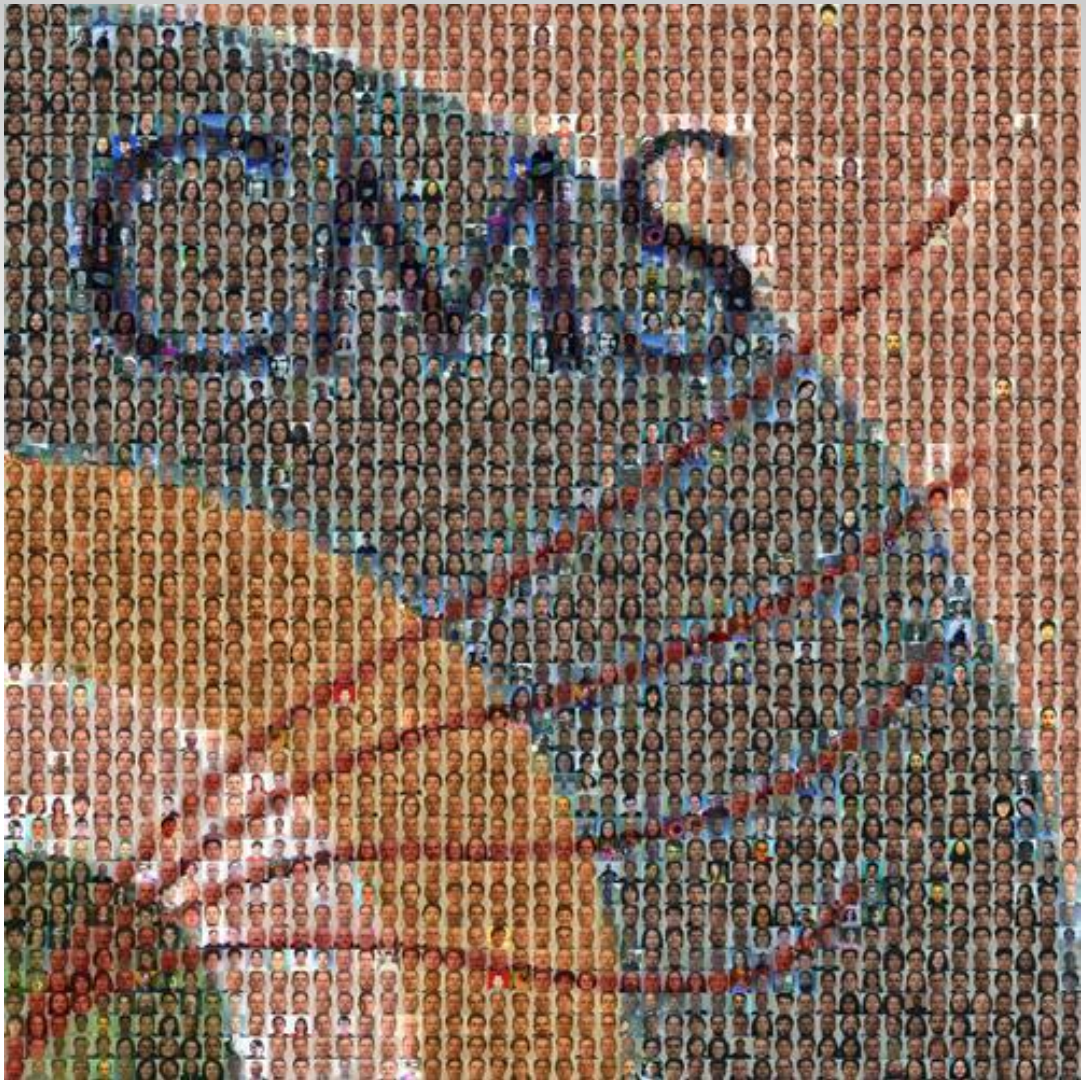
Peter Higgs



François Englert

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

Credit: CERN PhotoLab



*Б
Л
А
Г
О
Д
А
Р
Я
!*

Практическа част

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

→ ↻ 🏠 ☆ 🔍 Search



Основно приложение:
CIMA - [link](#)



Choose your Masterclass	Choose your location	Choose your data file
SampleTables-Jan2021	Trieste2022A	10.1
Kharkov-CMLTP-10Jun2021	Perugia2022	10.2
Medford-15Jun2021	IstanbulOzyegin2022A	10.3
Hammond-24Jun2021	Dimitrovgrad2022	10.4
NotreDame-09July2021	Colmar2022	10.5
CERN-28Jul2021		10.6
CERN-09Jul2021		10.7
VCONF-Stavanger-03Aug2021		10.8
Seattle-10Sep2021		10.9
CERN-Fermilab-HCP-04Sep2021		100.36
Oviedo-12Oct2021		100.37
Test-14Sep2021		100.38
CIEMAT-02Nov2021		100.39
Vilnius-03Dec2021		100.41
CERN-03Dec2021		100.42
Sofia-03Jan2022		100.43
Cantabria_2-5May2022		100.44
Viterbo-16Feb2022		100.45
IDWGS-11Feb2022		100.46
CERN-01Mar2022		100.47
CERN-05Mar2022		100.48
CERN-04Mar2022		100.49
CERN-07Mar2022		100.51
CERN-09Mar2022		100.52
CERN-15Mar2022		100.53
CERN-17Mar2022		100.54
CERN21Mar2022		100.55
CERN-22Mar2022		100.56
CERN-24Mar2022		100.57
CERN-28Mar2022		100.58
CERN30Mar2022		100.59
CERN-05Apr2022		100.61

CERN-01Mar2022 - Димитровград
CERN-15Mar2022 - Плевен
CERN-17Mar2022 - София
CERN-21Mar2022 - Варна



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

Choose your data file

25.1
25.11
25.12
25.13
25.14
25.15
25.16
25.17
25.18
25.19
25.2
25.21
25.22
25.23
25.24
25.25
25.3
25.4
25.5
25.6
25.7
25.8
25.9

КЛИК!

Извадки с данни:

- Всяка извадка е номерирана с два числа, примерно 25.13
- 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

Разпределението на данните между учениците ще бъде направено в края на втората сесия с уводни лекции от водещия на лекцията по методология.

Таблица за данни

За конкретната индивидуална извадка от данни, прим. 25.13

Общи хистограми на класа – маси на реконструираните частици

Общи резултати на класа (ключови отношения и обобщение)

Back Events Table (Group 25.13) Mass Histogram (Plovdiv2021) Results (Plovdiv2021) [Event Display](#)

Masterclass: CERN-04Mar2021
Location: Plovdiv2021
Group: 25.13

Select Event
Event index: 1
Event number: 25.13-1

Final State
 e v $\mu \nu$
 e e $\mu \mu$
 4e 4 μ
 2e 2 μ

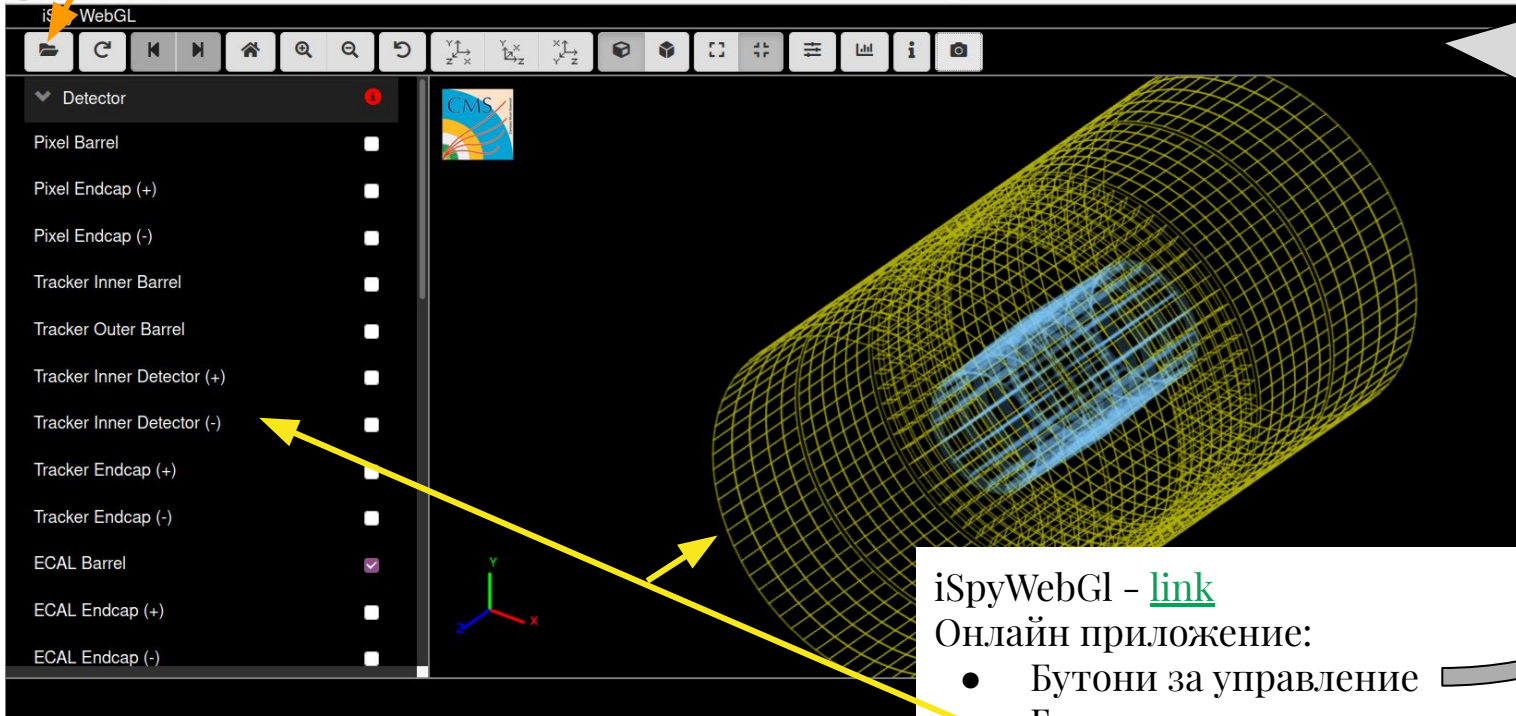
Primary State
Charged Particle:
 W+ W- W \pm
 Neutral Particle (Z, H)
 Zoo

Enter Mass
 GeV/c²
[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 физически величини

Основно приложение - iSpyWebGL

Реконструирани обекти и цвятова 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

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)**

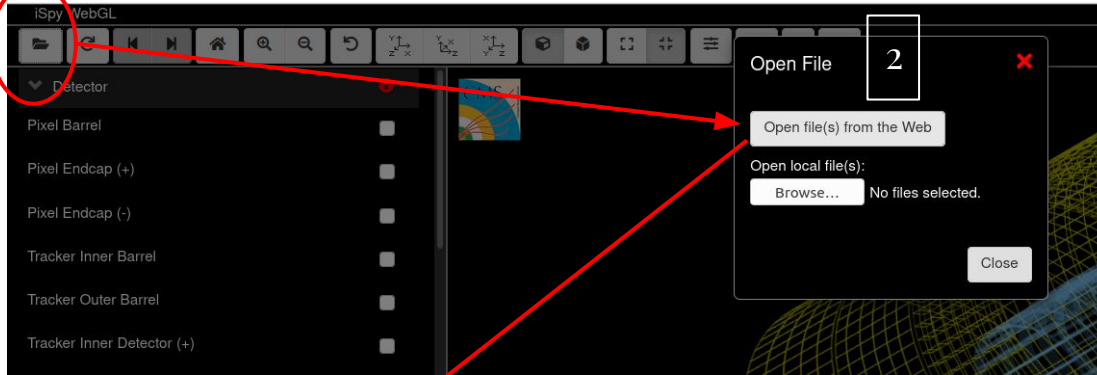
Определя се от закона за запазване на енергията и импулса.

Изглед в различни равнини, 3D изглед

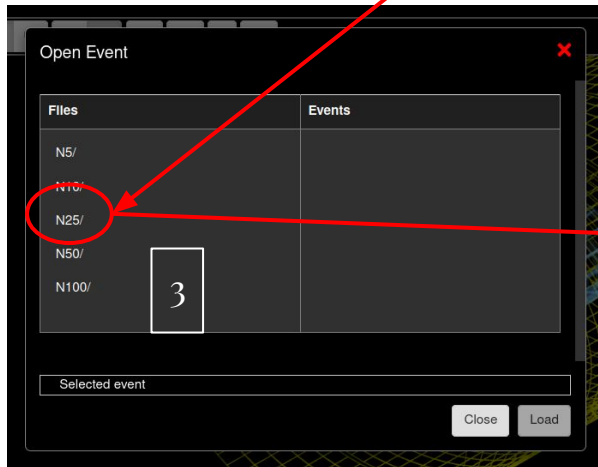
Таблица с измерените физични величини – енергия, импулс, ъгли.

Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 25.13

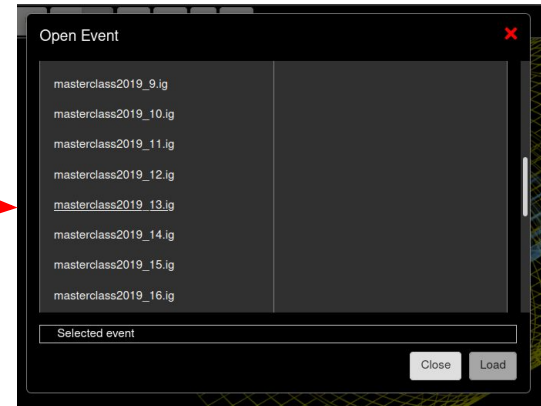
1



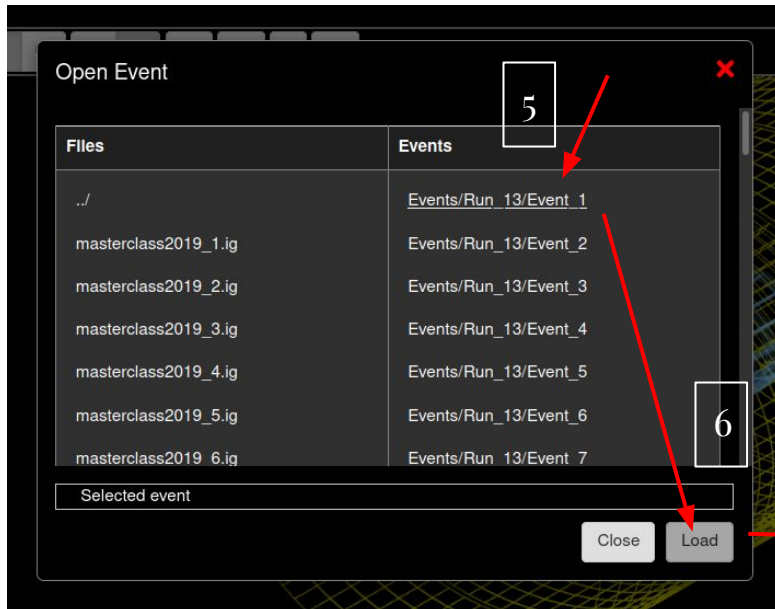
1. Зареждане на данни
2. Избираме данни от Web
3. Избираме извадка 25
4. Избираме данни с номер 13



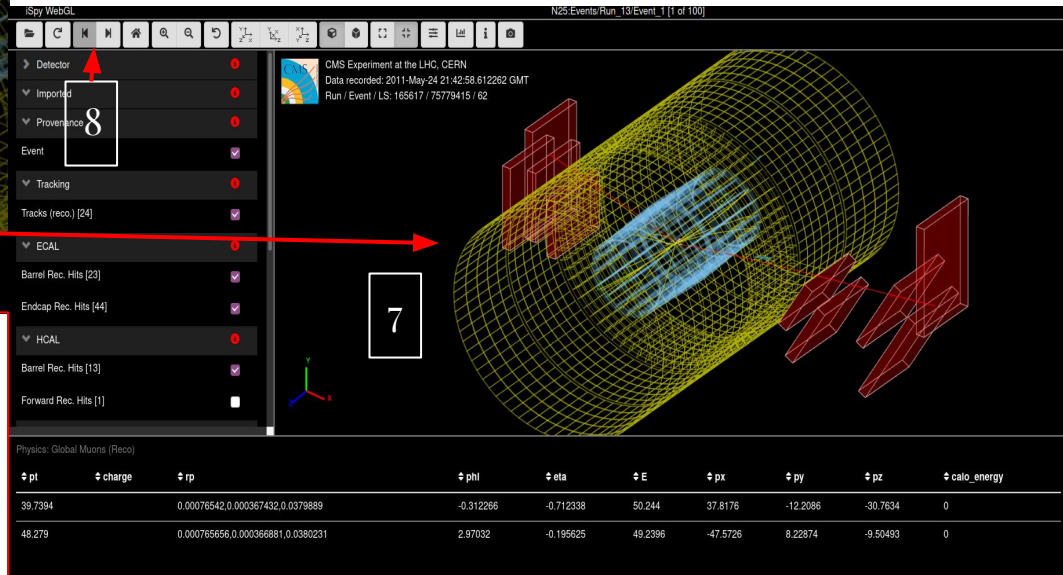
4



Зареждане на данни в iSpyWebGL - пример с извадка 25.13



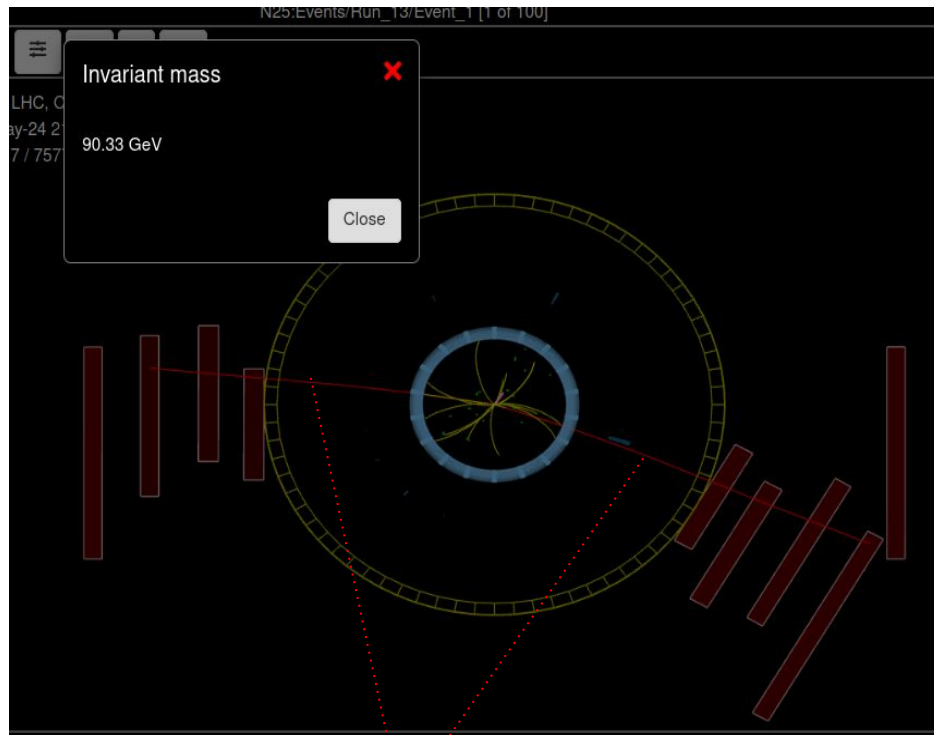
5. Избираме събитие № 1 (или № 50 за втората половина от данните);
6. Зареждаме;
7. Визуализиране на събитие;
8. За зареждане на следващото събитие използвайте бутоните на приложението



Важни числа при рапортуване на проблем или задаване на въпрос!!!
Пълен номер на извадка и номер на събитие:

примерно 25.13/събитие 5

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 М (на латиница) и се отваря прозорец с изчислената маса.

з. 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 Z_{00} .*

Анализ - видове събития - два мюона в крайното състояние

Нанасяне на резултатите в таблицата

Select Event

Event index:

Event number: 25.13-1

Final State

e v μ v

e e μ μ

4e 4 μ

2e 2 μ

Primary State

Charged Particle:

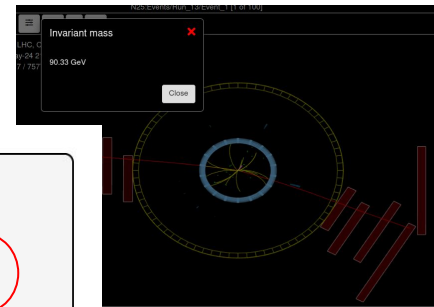
W+ W- W \pm

Neutral Particle (Z, H)

Zoo

Enter Mass

GeV/c²



Select Event

Event index:

Event number: 25.13-2

Final State

e v μ v

e e μ μ

4e 4 μ

2e 2 μ

Primary State

Charged Particle:

W+ W- W \pm

Neutral Particle (Z, H)

Zoo

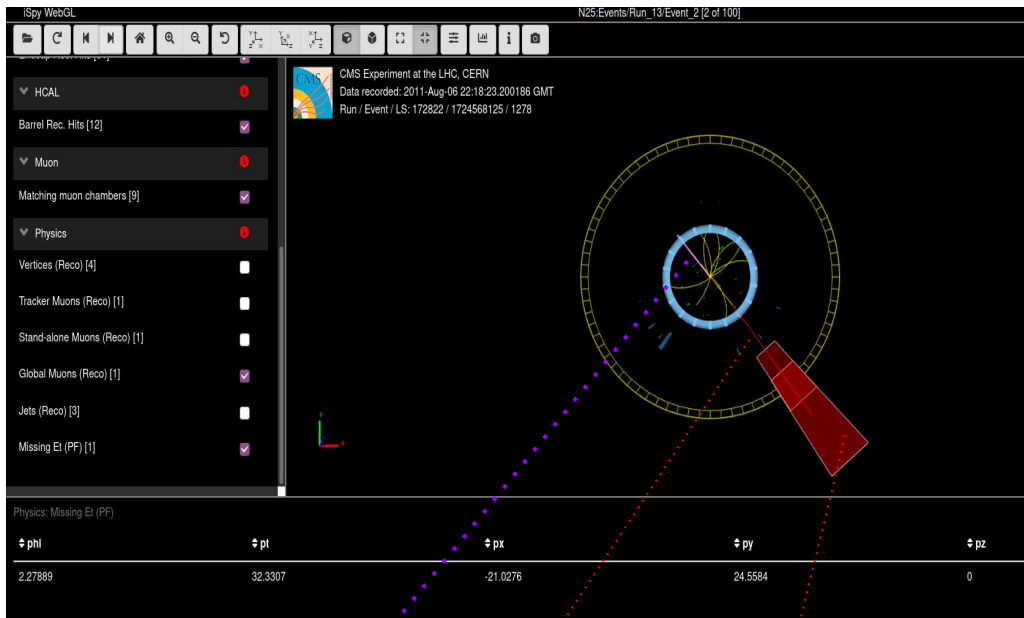
Enter Mass

GeV/c²

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

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.

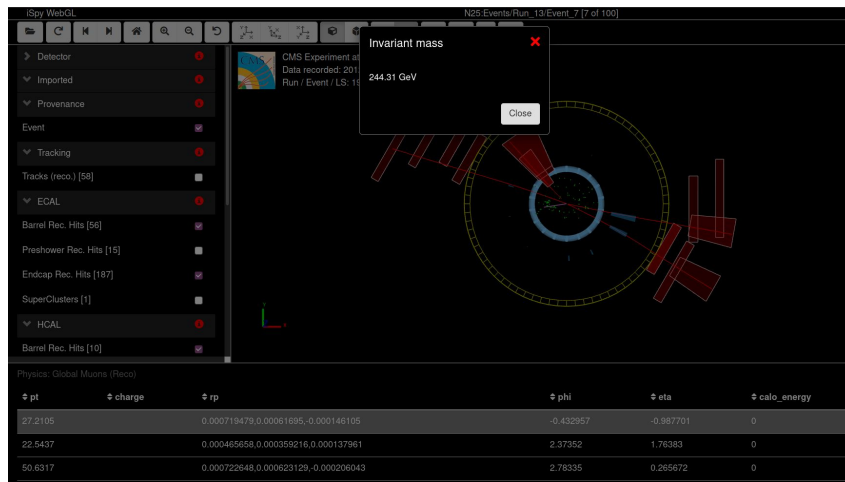
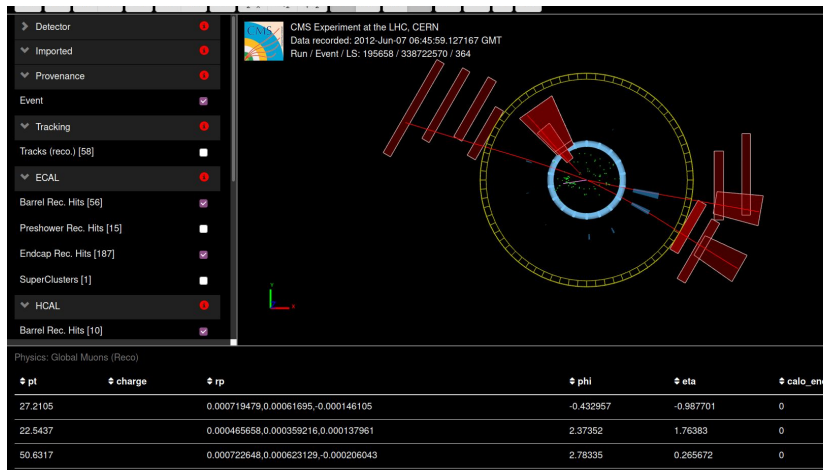
Анализ - видове събития - един мюон в крайното състояние ($W^- \rightarrow \mu \nu$) Нанасяне на резултатите в таблицата

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

1. Отбелязваме мюон и неутрино в крайното състояние
2. Отбелязваме W⁺ началното състояние
 - а. + е определен от заряда на мюона
3. (*)Ако не сме сигурни за заряда, посочваме W^{+/-}
4. Въвеждаме “Next”
5. И към следващото събитие ...

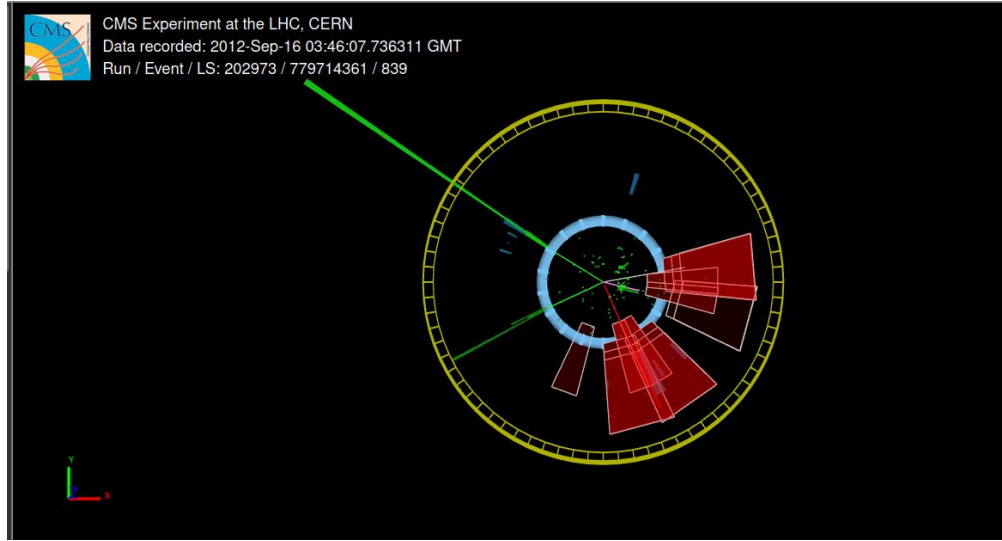
Анализ - видове събития - 4 мюона - ($X^0 \rightarrow 4\mu$)

X^0 - някаква електрически неутрална частица. Може да е Хигс (H) или Z или друга. Може да определим каква е само ако пресметнем нейната маса.



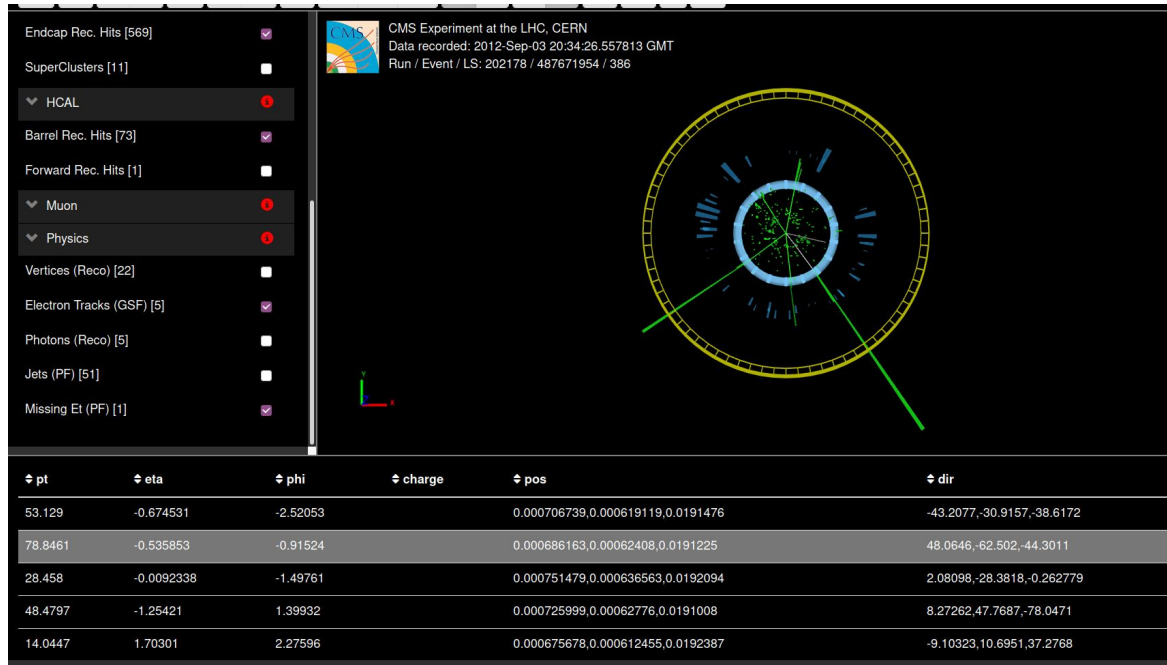
- Проверяваме дали сумата от заряда на четирите мюона е нула.
- Ако да - пресмятаме масата на частицата-майка:
 - Избираме (кликваме) последователно четирите мюони трека и натискаме клавиша M от клавиатурата (на латиница).
- Нанасяме резултатите в таблицата.
- Процедурираме по същия начин и за събития от типа: $X^0 \rightarrow 4e$ или $X^0 \rightarrow 2\mu 2e$. Виж, примерите на следващия слайд

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.

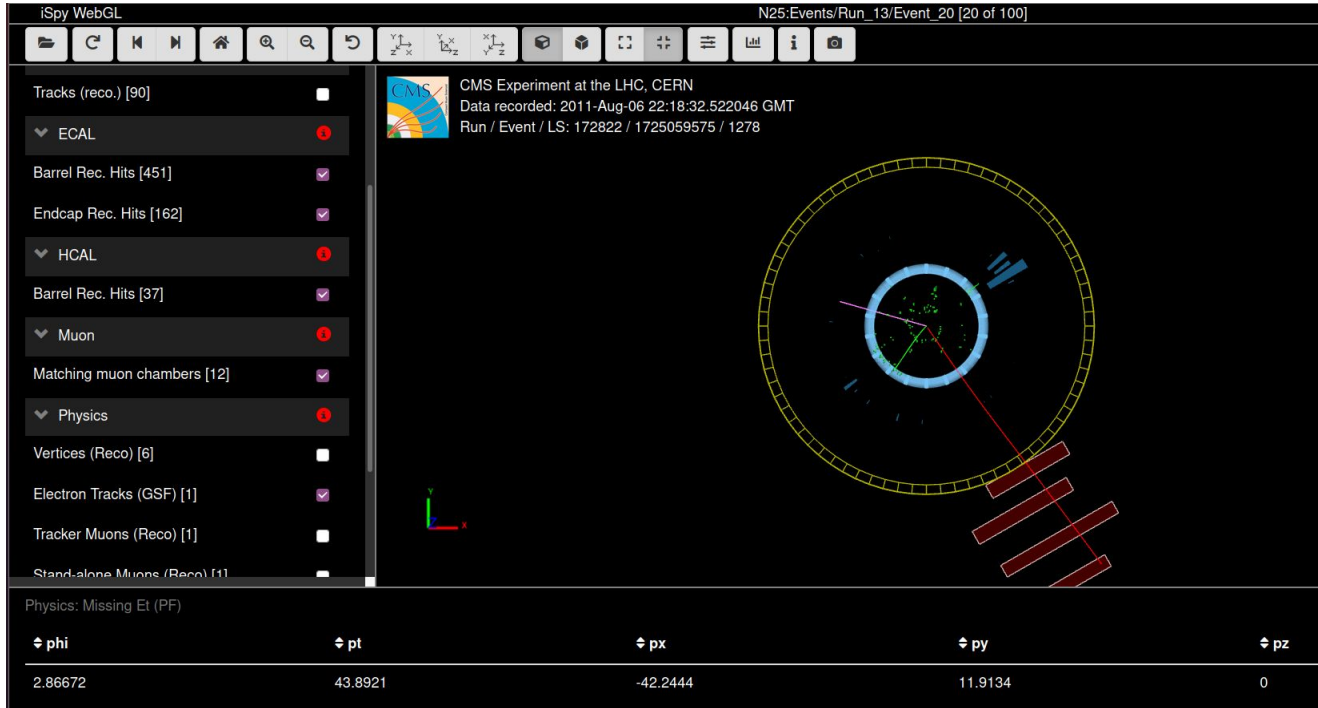
Анализ - видове събития - 4 мюона - ($X^0 \rightarrow 4e$)



- 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.

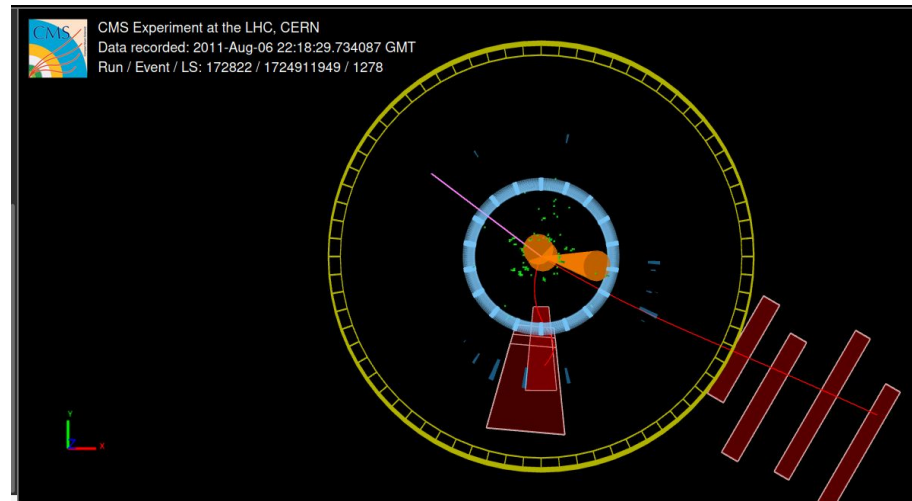
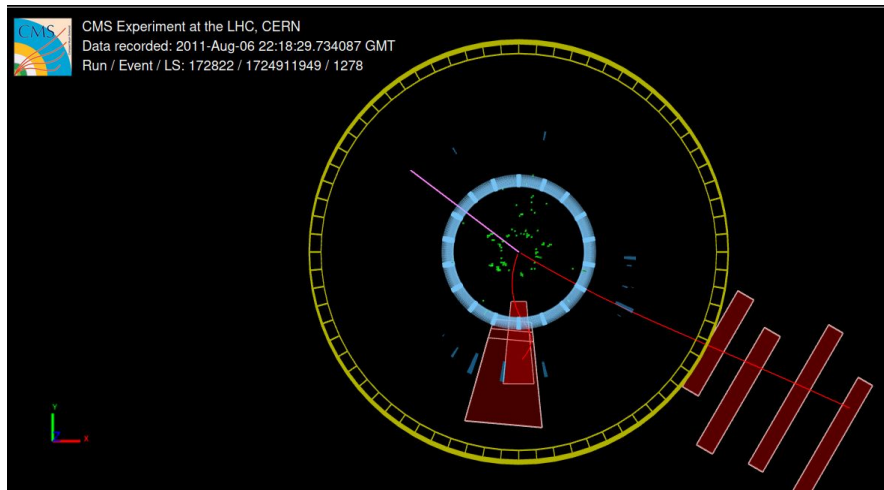
Анализ - видове събития: ($W \rightarrow \mu\nu$) или ($W \rightarrow e\nu$)



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

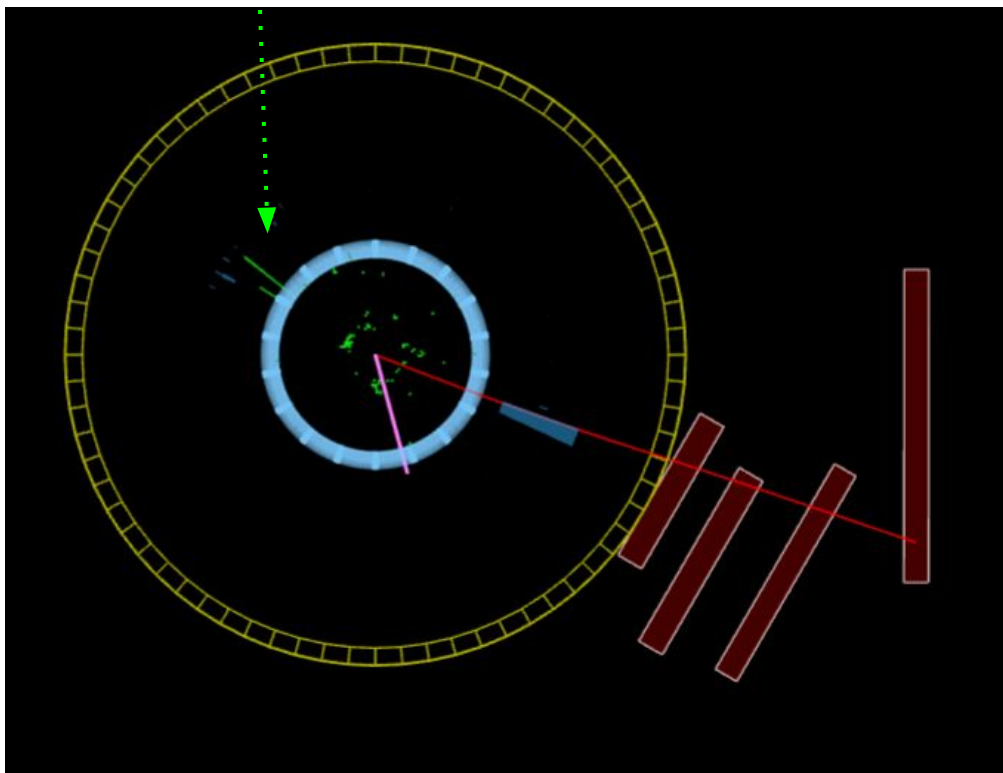
W, Z или Zoo?

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



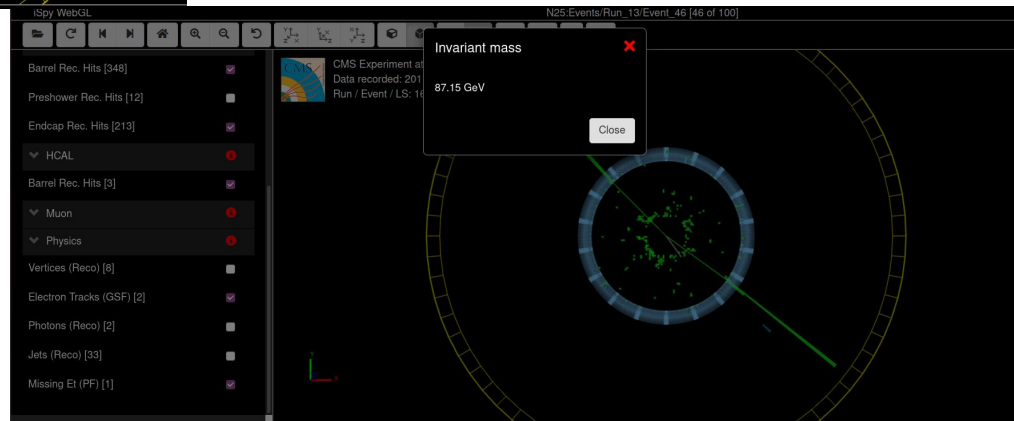
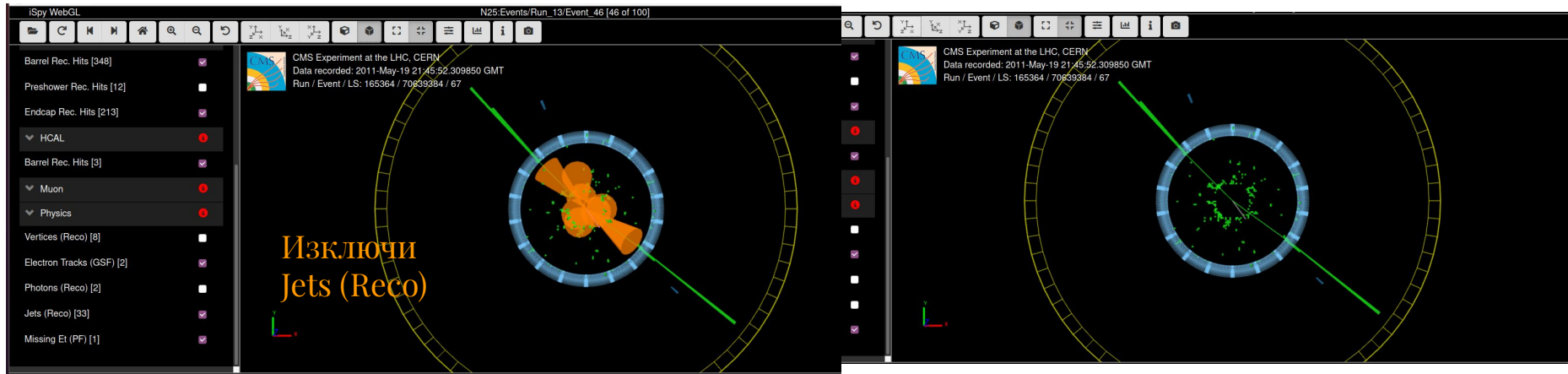
- Проверява се заряда на мюоните – и двата изглеждат с отрицателен заряд!
- Проверяваме напречните импулси на мюоните и липсващата енергия.
- Проверяваме за наличие на силна адронна активност.
- Взимаме решение – ако не сме сигурни, в таблицата с резултатите отбелязваме събитието като Zoo .

ФОТОНИ



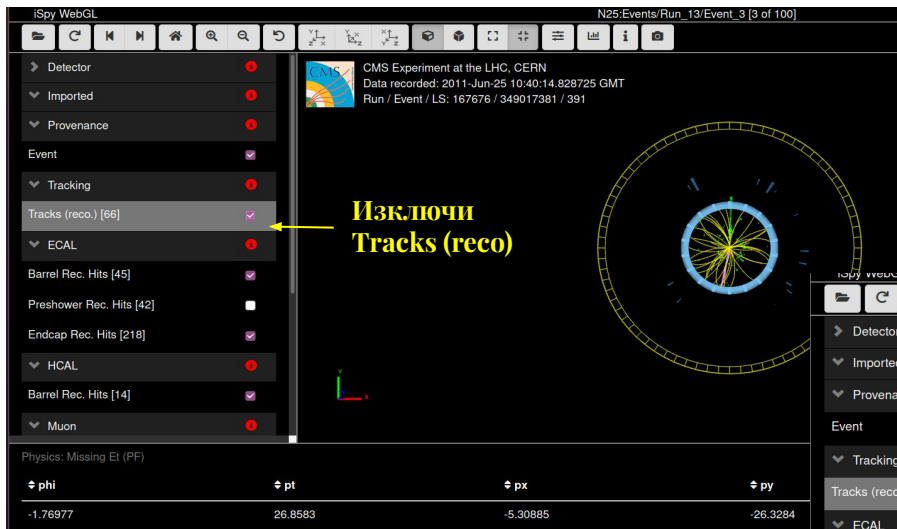
- Анализът на събития с фотони не влиза в това упражнение.
- Но е добре да се знае, какво не разглеждаме.
- **Фотоните са визуализирани като зелени трекове, които обаче не са регистрирани във вътрешния треков детектор.**
- Примерът от ляво показва два фотонни, един мюонен трек и липсваща енергия.

“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 $Z \rightarrow \mu\mu$

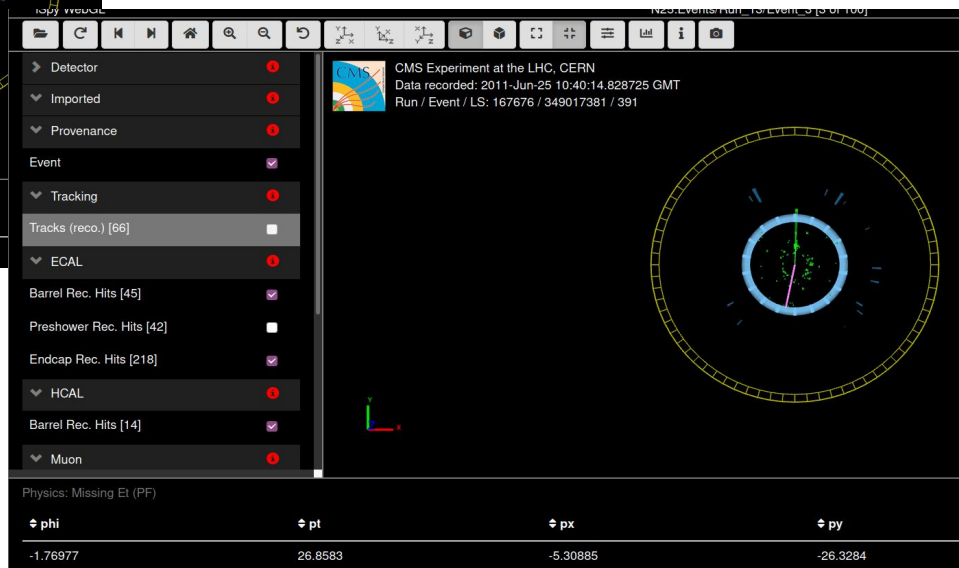
“Изчистване” на събитието - разглеждаме само необходимото



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.

Полезни връзки

IPPOG Collaboration - [activities](#)

IPPOG Collaboration Meeting in Sofia, Bulgaria - [program](#)

International MasterClasses - [URL](#)

CIMA Table - [URL](#)

iSpyWebGL - [URL](#)

Благодаря за вниманието!

Допълнителни слайдове

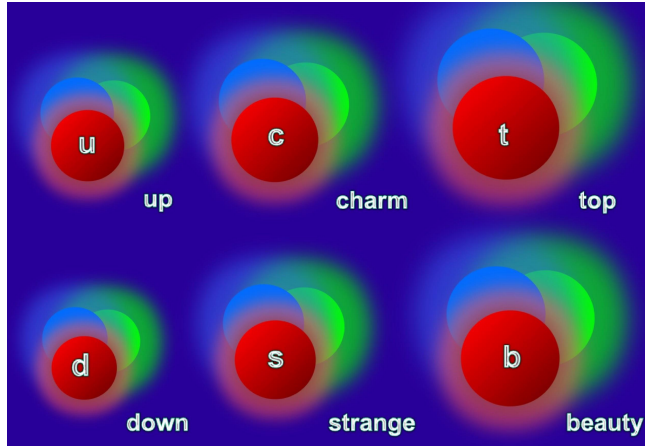


Murray Gell-Mann

Кварков строеж на адроните

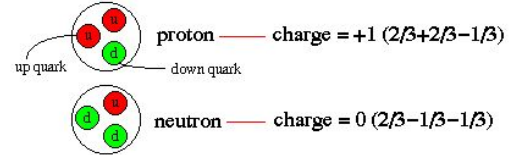
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици,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

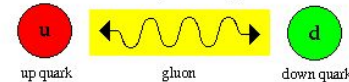
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

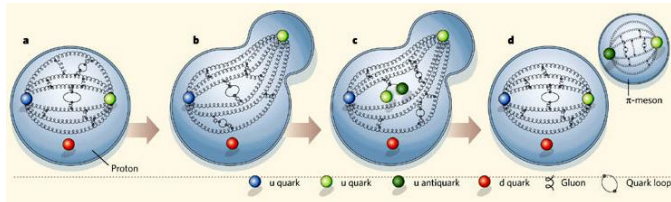
Кварки, глюони и цветен заряд

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

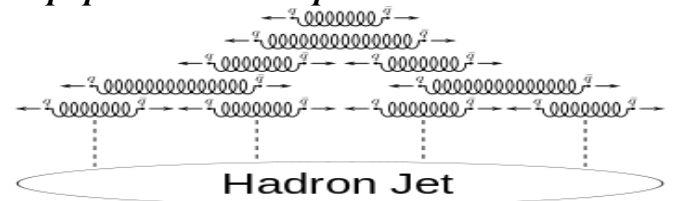
Кварките и глюоните имат цветни заряди. **Композитните частици, изградени от кварки са цветово неутрални.** Цветните заряди и взаимодействия се държат различно от електромагнитните. Кварките не могат да съществуват индивидуално. При опит да раздалечим два кварка, силната на цветното взаимодействие нараства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



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

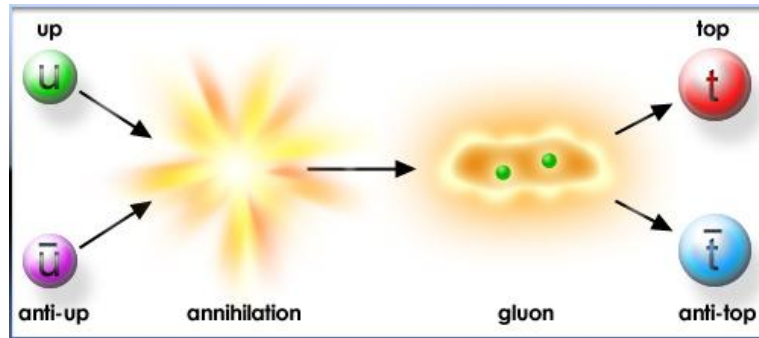
Но дали това е всичко?

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.



<http://www.particleadventure.org/antipreface.html>



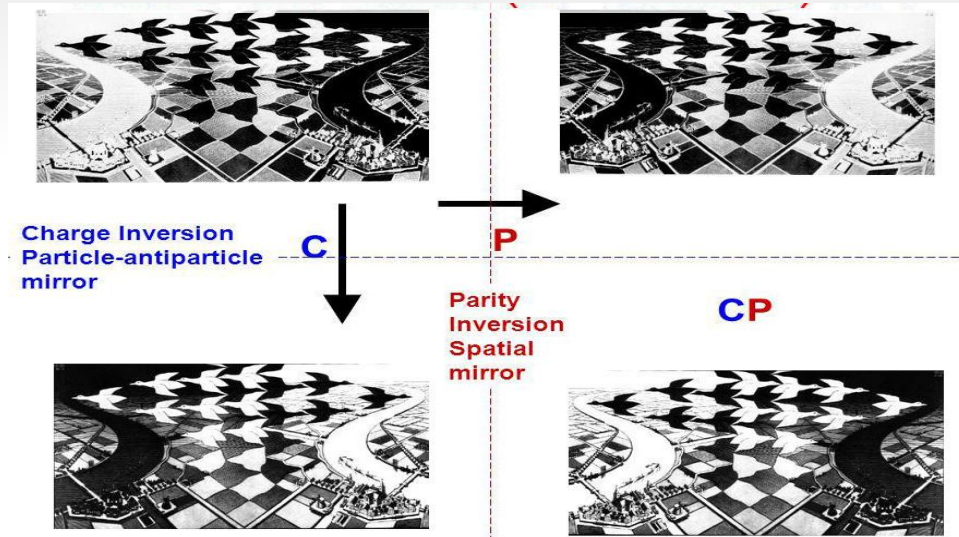
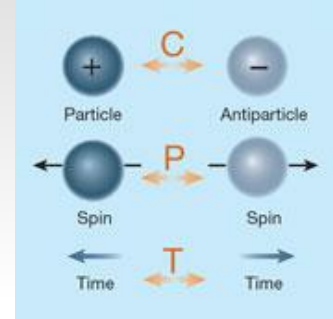
Симетрията като обединяващ принцип

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



Charge Inversion
Particle-antiparticle
mirror

C

P

Parity
Inversion
Spatial
mirror

CP

Нарушение на симетриите:

Общата CPT симетрията се запазва,

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

credit: Chris Parkes

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



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**

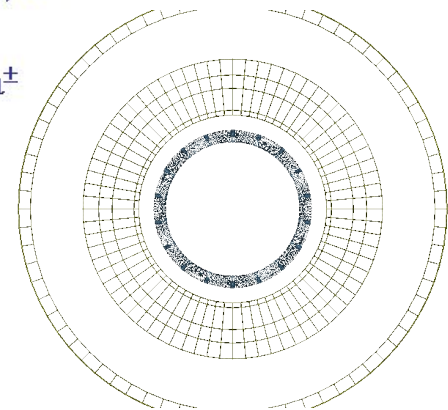
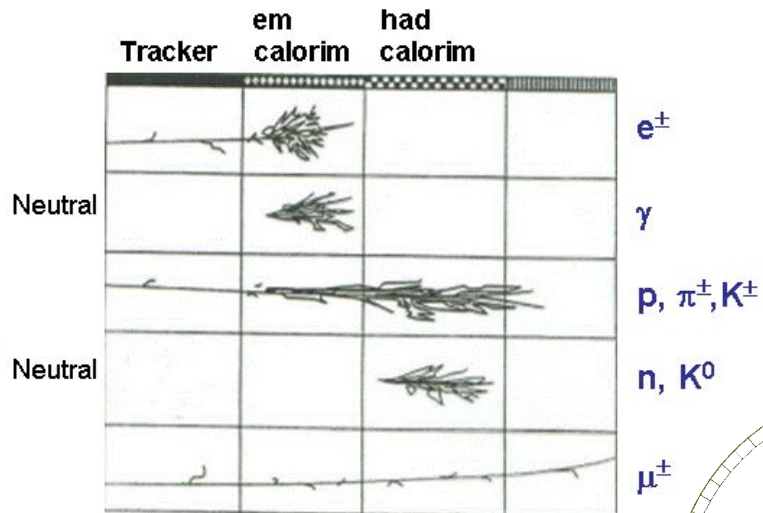
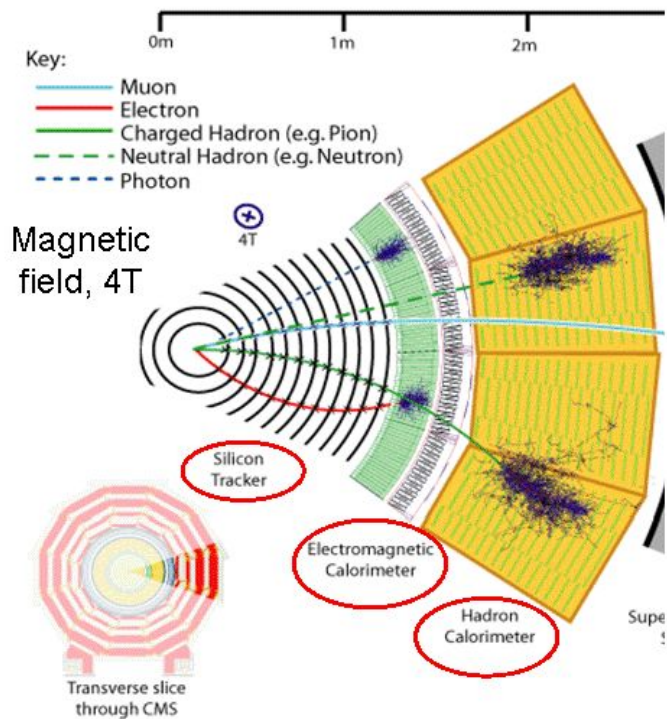
Полето на Хигс генерира собствени
възбудени състояния при концентрация
на енергия на LHC – наблюдава се Хигс
– бозон (регистрират се разпадните
продукти – 2 фотона или 4 лептона)

Стандартен модел на елементарните частици

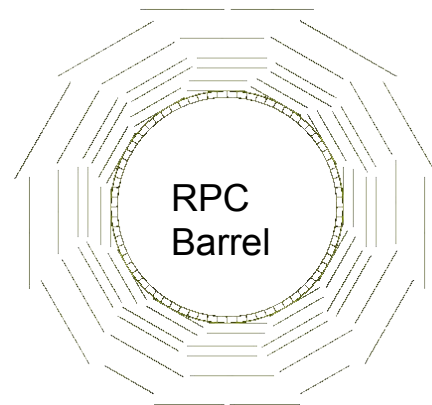
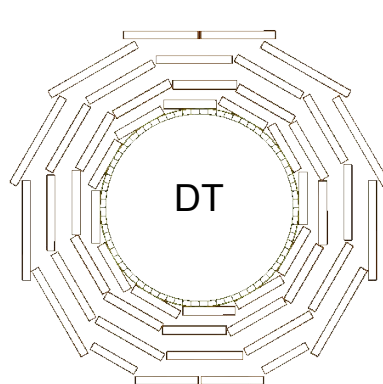
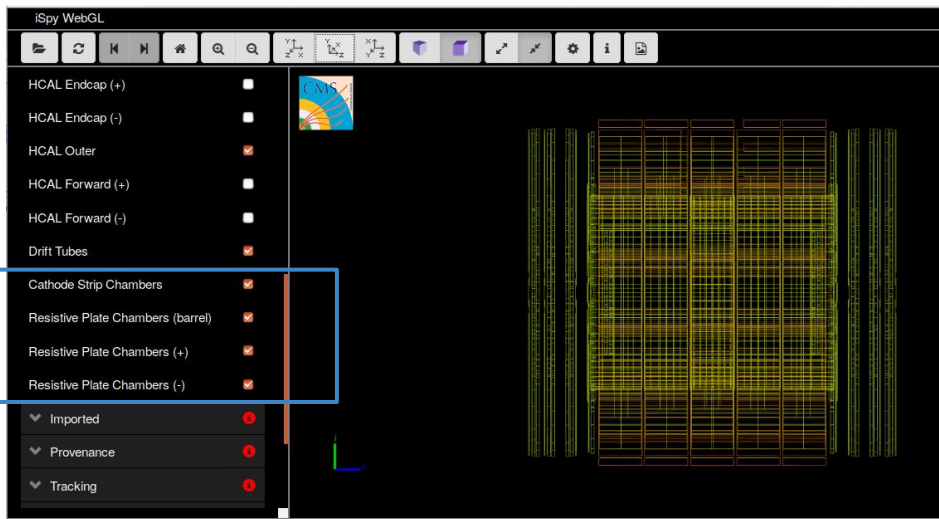
$$\begin{aligned}\mathcal{L}_F = & \sum_i \bar{\psi}_i \left(i\gamma^\mu \partial_\mu - m_i - \frac{gm_i H}{2M_W} \right) \psi_i && \text{Higgs Interactions} \\ & - \frac{g}{2\sqrt{2}} \sum_i \bar{\Psi}_i \gamma^\mu (1 - \gamma^5) (T^+ W_\mu^+ + T^- W_\mu^-) \Psi_i && \text{Weak Charged Interactions} \\ & - e \sum_i q_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu \psi_i A_\mu && \text{Electromagnetic Interactions} \\ & - \frac{g}{2 \cos \theta_W} \sum_i \bar{\psi}_i \gamma^\mu (d_V^i - d_A^i \gamma^5) \psi_i Z_\mu && \text{Electroweak Neutral Interactions}\end{aligned}$$

<http://pdg.lbl.gov/>

Калориметрична система електромагнитен (ECAL) и адронен калориметър (HCAL)

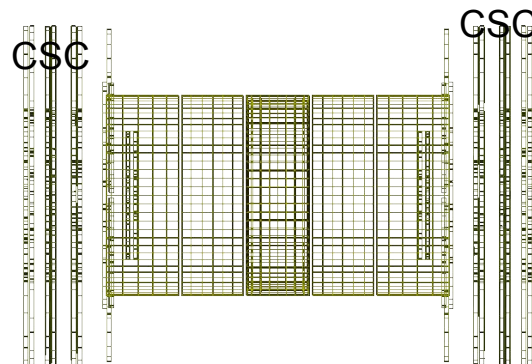
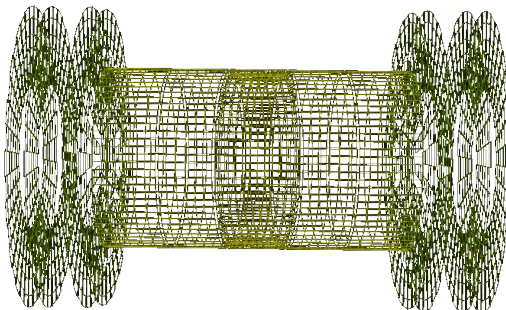


Мюонна система на CMS (Run1 & Run2)

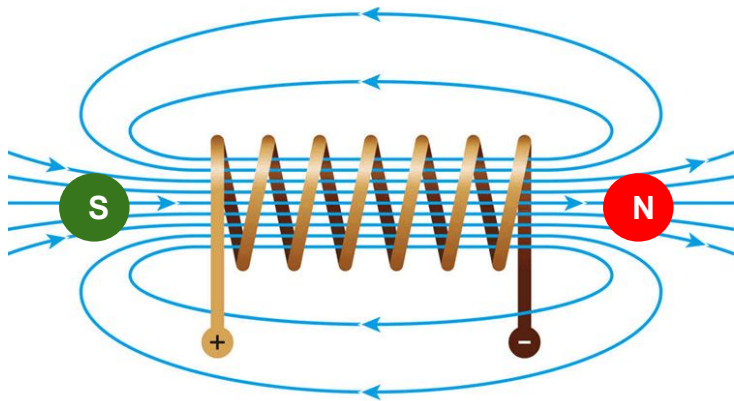


Изглед на мюонната система
в [iSpyWebGL](#)

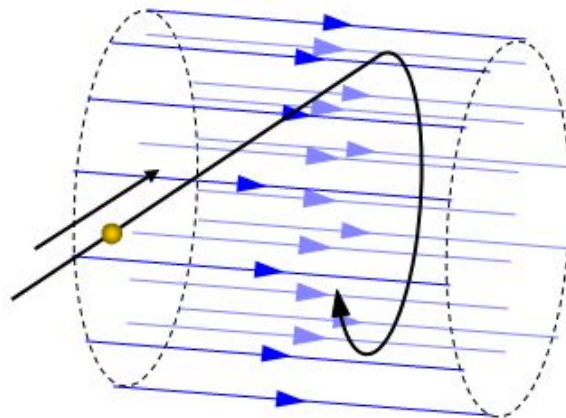
RPC
Endcap



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.

Обобщение на резултатите и подготовка за финалната дискусия с ЦЕРН и другите международни участници

- Учениците работят индивидуално. Но имат общи резултати!
 - Разпределение по маси на реконструираните частици:
 - Какво значи, когато наблюдаваме пик в такива разпределения?
 - Колко пика и при какви стойности се наблюдават?
 - Други въпроси, възникнали в процеса на работа.
 - Ключови отношения между:
 - брой частици с +/- електрически заряд:
 - Какво е нашето очакване за това отношение и ако се различава с получения резултат, защо?
 - брой мюони и брой електрони:
 - Какво е нашето очакване за това отношение и ако се различава с получения резултат, защо?
 - Други въпроси, възникнали в процеса на работа.
- Подгответе предварително кратък списък от въпроси, които учениците искат да зададат на модераторите от ЦЕРН, както свързани с упражнението, така и извън него.

Полезни връзки

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

Таблица [CIMA](#)

[iSpyWebGl](#)

[WZH measurement](#)

[IPPOG](#)

[International Masterclasses](#)

[Quarknet](#)

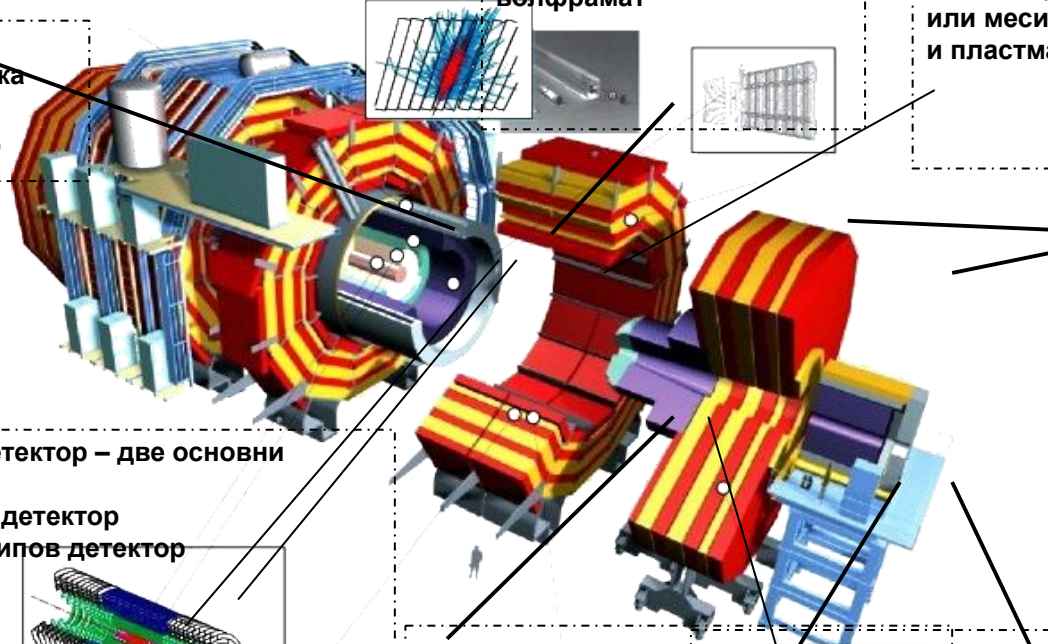
[CERN Open Data Portal](#)

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

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

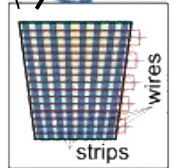
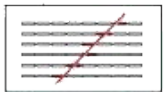
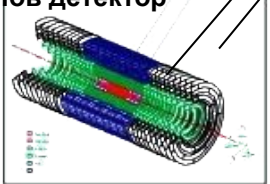
Електромагнитен
калориметър
Кристали от оловен
волфрамат

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



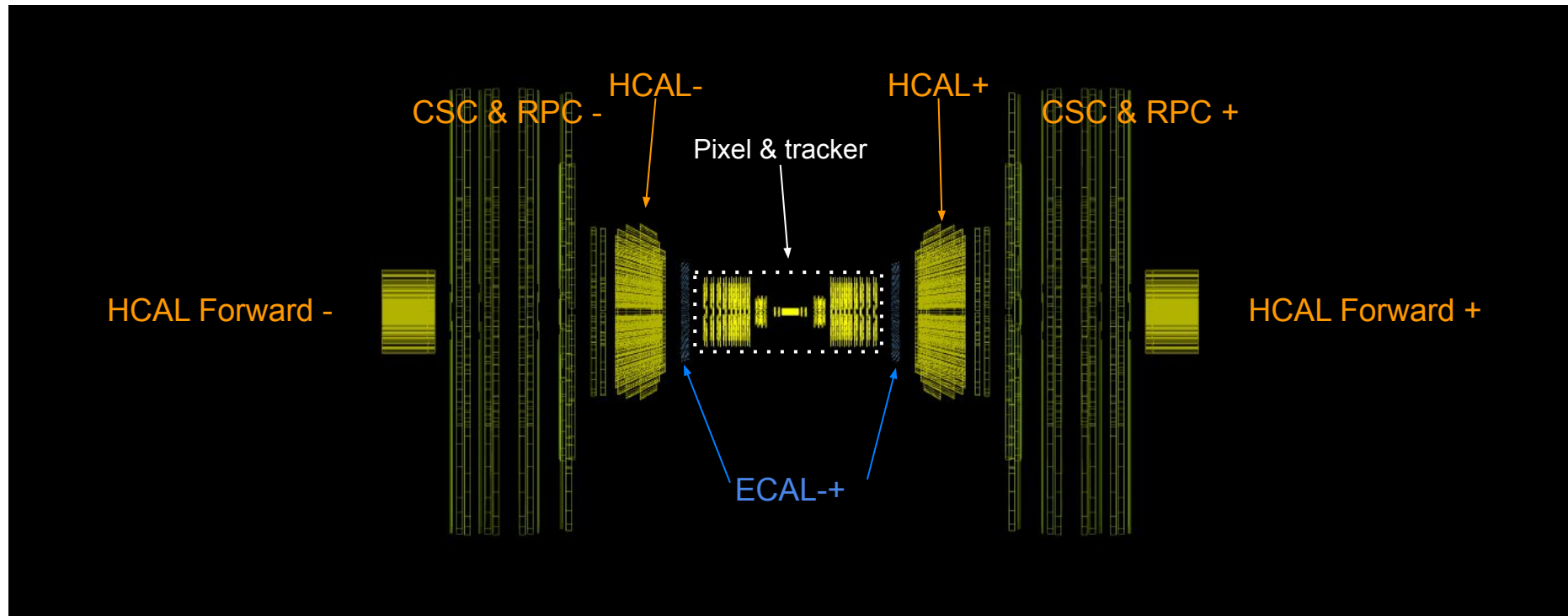
Железен хамут на
детектора;
През него се затварят
магнитните силови линии.

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



Тегло 12.5 t
Диаметър 15 m
Дължина 21.6 m

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



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

Вселената, както я познаваме

