



# **Нарушаване на симетрията Хигс бозон и експериментални наблюдения**

***Румяна Хаджийска  
ИЯИЯЕ - Българска академия на науките***

quarks

leptons

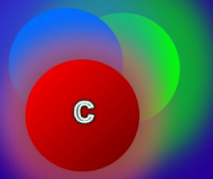
1-st generation

2-nd generation

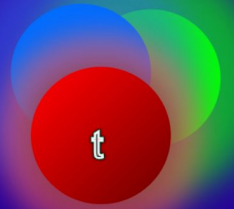
3-rd generation



up



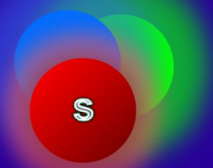
charm



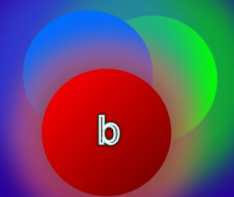
top



down



strange



beauty



e  
electron



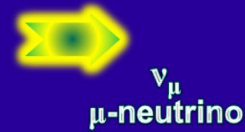
μ  
muon



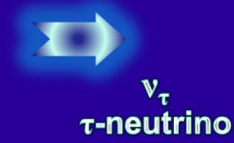
τ  
tau



ν<sub>e</sub>  
e-neutrino



ν<sub>μ</sub>  
μ-neutrino

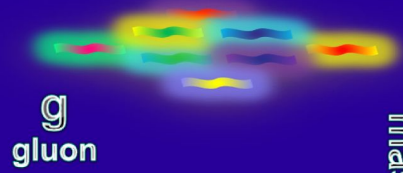


ν<sub>τ</sub>  
τ-neutrino

fermions

force carriers

strong interaction



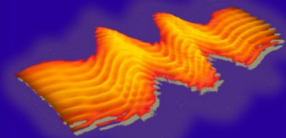
g  
gluon

electromagnetic interaction



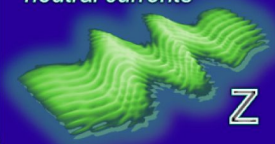
γ  
photon

weak interaction  
charged currents



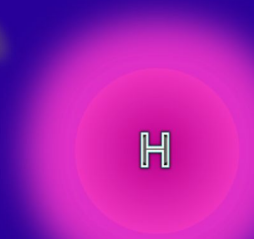
W<sup>+</sup>W<sup>-</sup>

weak interaction  
neutral currents



Z

electro-weak  
symmetry breaking  
mass generating



H

bosons

През 1964 г., шест теоретични физика предлагат хипотезата за съществуването на ново поле (като електромагнитното), което прониква през цялото пространство и би трябвало да реши критичен проблем на нашето разбиране на вселената [1].



Франсоа Енглерт и Питър Хигс по време на официалното анонсиране на наблюдаването на Хигс бозона 04.07.2012

Независимо от тях, други физици - Глешоу, Вайнберг и Салаам, изграждат теорията за фундаменталните частици, в крайна сметка наречена „Стандартен модел“, която се оказва изключително точна.

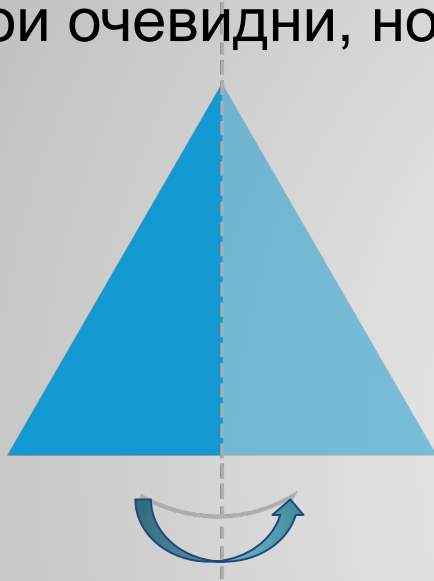
Експерименталните тестове на прецизността на отделните части на Стандартния модел показват точност от порядъка на 1 на милиард. (Примерно разстоянието от Ню Йорк до Сан Франциско с точност до 0.4 mm).

Тези иначе несвързани усилия се оказват тясно свързани помежду си, тъй като Стандартният модел се нуждае от механизъм, който да даде маса на фундаменталните частици.

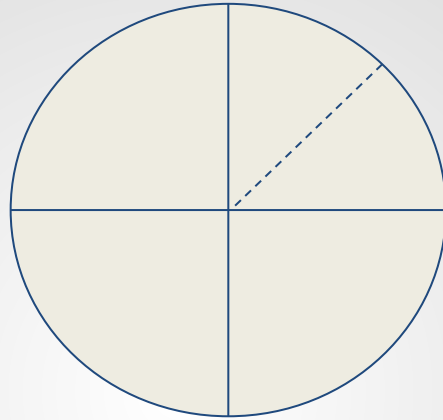
Теорията, разработена от Питър Хигс, Робърт Браут, Франсоа Енглерт, Джералд Гуралник, Карл Хаген и Томас Кибъл, направи точно това. 3

# Симетрии - примери

Някои очевидни, но фундаментални факти



Огледална симетрия  
**Дискретна** симетрия  
Ляво  $\leftrightarrow$  Дясно



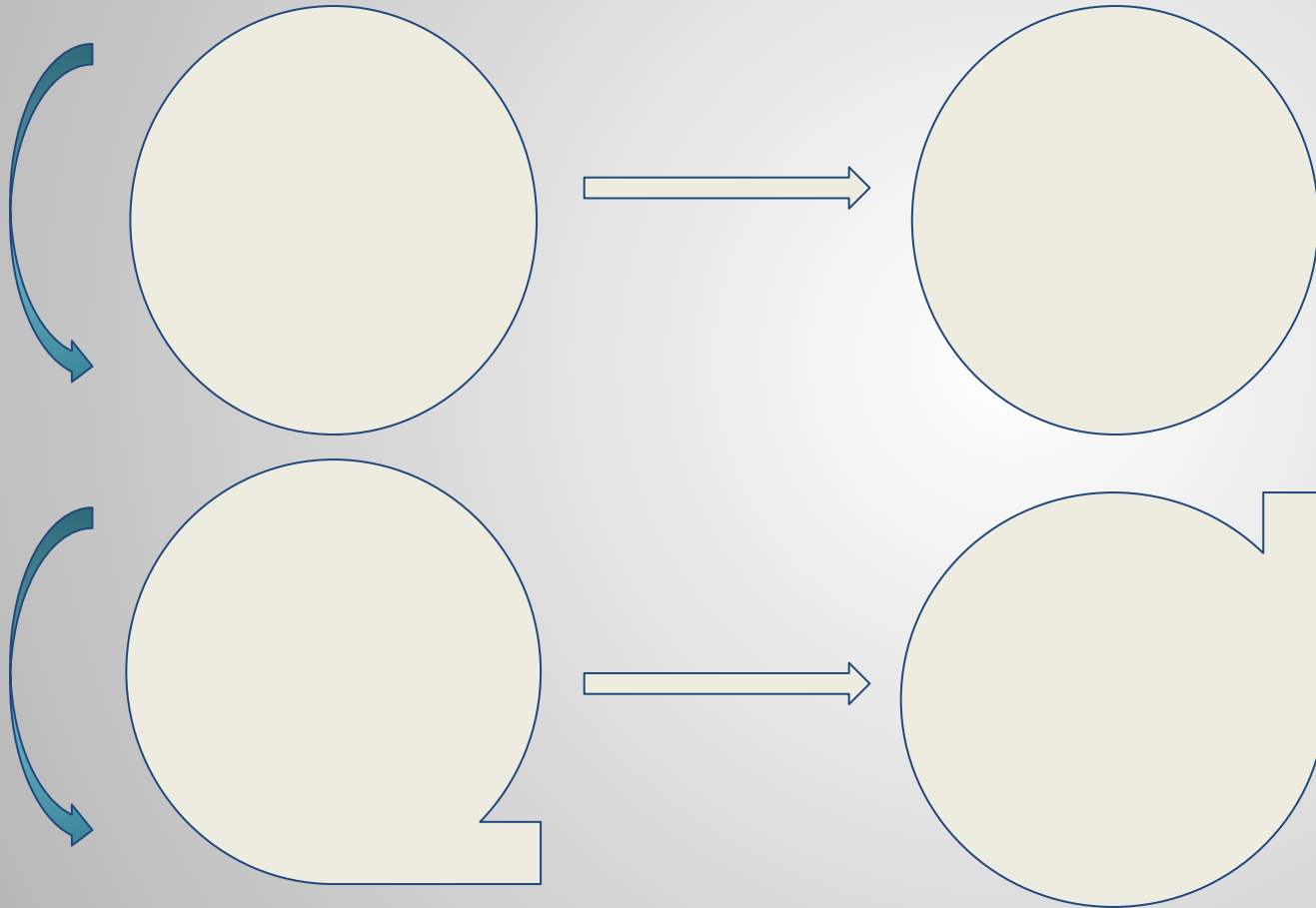
Окръжност - симетрия спрямо ротация на произволен ъгъл около нейния център, който ние наричаме понякога фаза.  
**Непрекъснатата** симетрия  
**Група на симетрия** -  $U(1)$

Групите на симетрии имат характерни свойства. Математическият апарат, свързан с групите на симетрии е основен и за описание на взаимодействията на елементарните частици.

Като илюстративен пример - електромагнитните взаимодействия, пренасяни от фотона са описват с групата на симетрия  $U(1)$ .

# Нарушаване на симетрията

## Явно нарушаване на симетрията



Без промяна на физическите свойства на системата.

Нарушаването на симетрията променя физическите свойства на системата.

## Електрослаба група

Слабо взаимодействие  $\longrightarrow$   $SU(2) \times U(1)$   $\longleftarrow$  ЕМ взаимодействие

$SU(2)$  – три генератора,  
Спонтанно нарушаване на слабата  
симетрия  
Три масивни бозона –  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$

Един бозон – фотон  
 $U(1)$  симетрията остава ненарушена –  
безмасов фотон

Група на симетрия

Генератори на група

Броя генератори = броя на бозони

Броя на нарушените генератори = броя на “омасените” бозони

Броя на запазените генератори = броя безмасови бозони



# Малко терминология

Уравнение на движението -> Лагранжиан:  $L=T-V$

$T$  - кинетична енергия,  $V$  - потенциална енергия

Инвариантна величина - не се променя при трансформации ...

Частича - Поле на частица, възбужданията на полето - самата частица

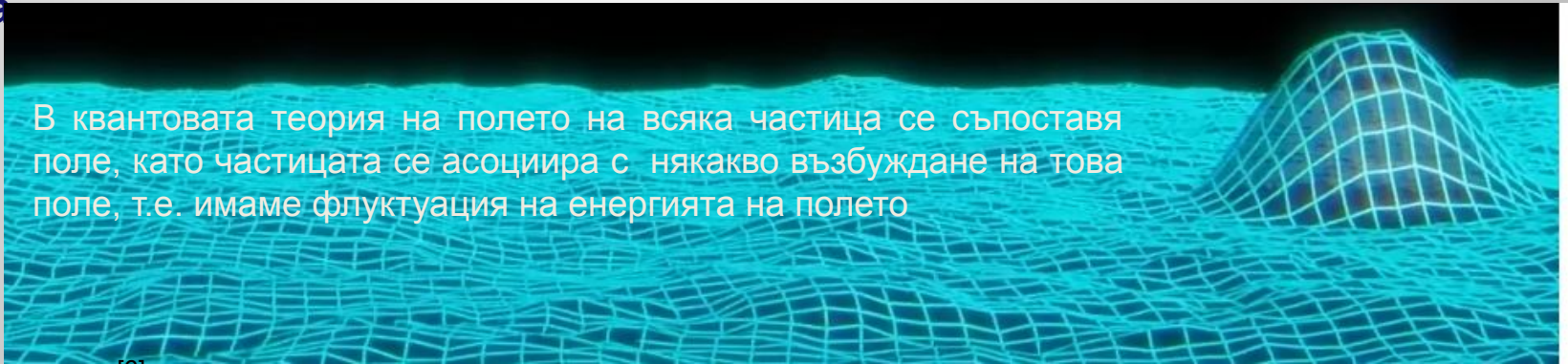
Поле - потенциал на полето

Описание на частиците и техните взаимодействия - Симетрии и групи на симетрии

Най-ниско енергетично състояние на полето - вакуум

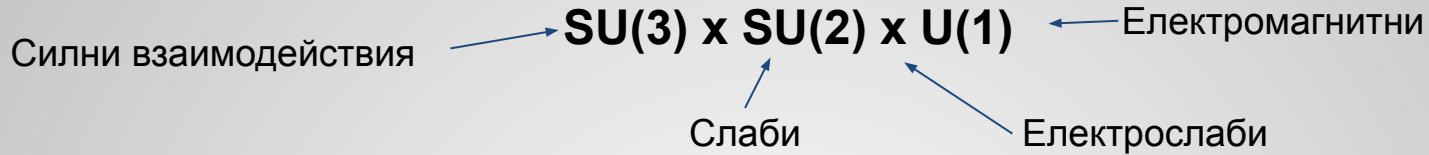
Начално състояние - не винаги съвпада с вакуумното състояние

Може да има повече от едно вакуумно състояние - предпоставка за нарушаване на симетрията



В квантовата теория на полето на всяка частица се съпоставя поле, като частицата се асоциира с някакво възбуждане на това поле, т.е. имаме флуктуация на енергията на полето

# Симетрии на стандартния модел на елементарните частици

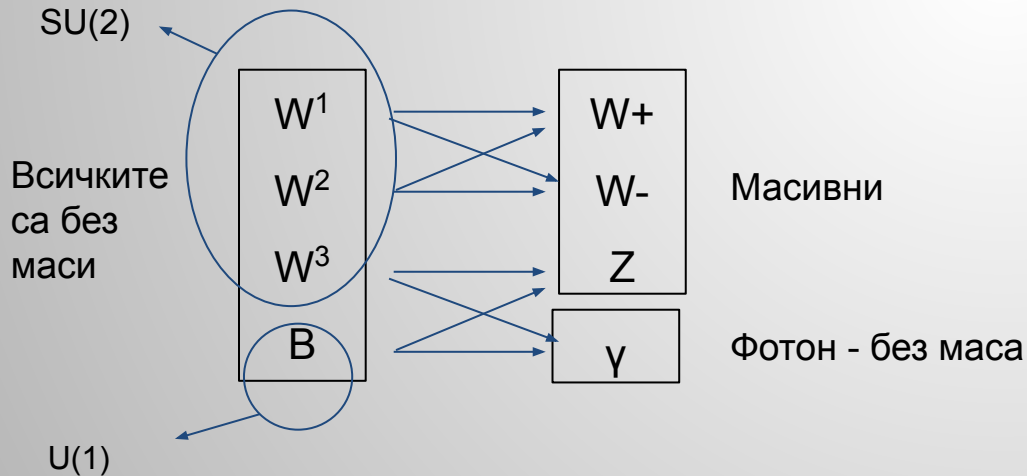


## Електрослабо взаимодействие: $SU(2) \times U(1)$

**Слабо взаимодействие + ЕМ взаимодействие = Електрослаба теория**

*Обединяват се при енергии, много по-високи от тези в нашето ежедневие.*

*Ние не усещаме това сливане, но може да възпроизведем тези енергии на LHC.*



Без масови членове в Лагранжиана, т.е. частиците се описват от безмасови полета. Как тогава  $W^+$   $W^-$  и  $Z$  имат маси?

Решението – Да се наруши електрослабата симетрия

Това нарушаване ще генерира маси на слабите бозони и ще запази фотонът безмасов

## Механизъм на Хигс

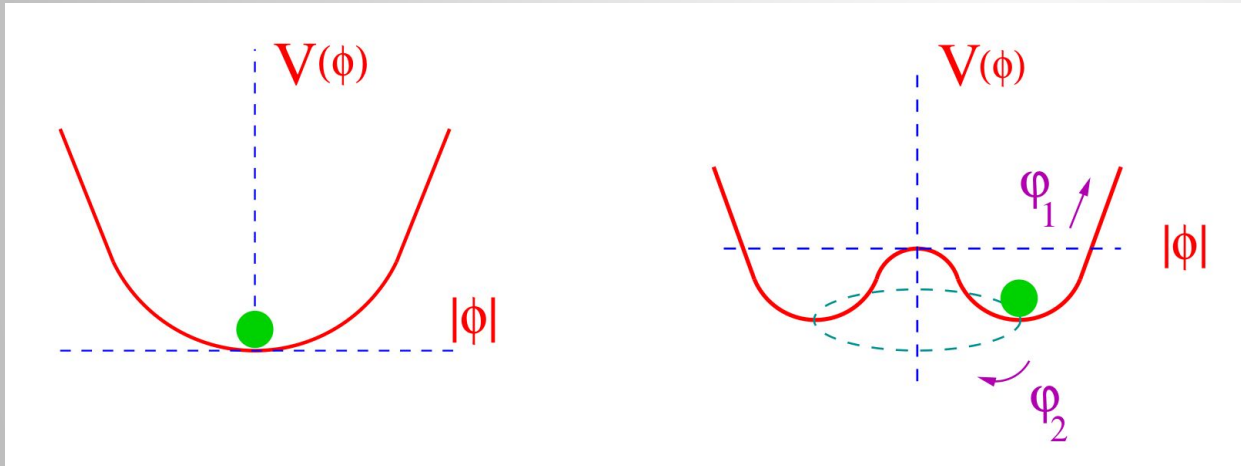


# Механизъм на Хигс - Поле на Хигс

Дефиниция: VEV (Vacuum expectation value) - Средна стойност на полето в най-ниско енергетично състояние

VEV на Хигсовото поле - единствения масов параметър в стандартния модел

Всяка фундаментална масивна частица има връзка с VEV на хигсовото поле



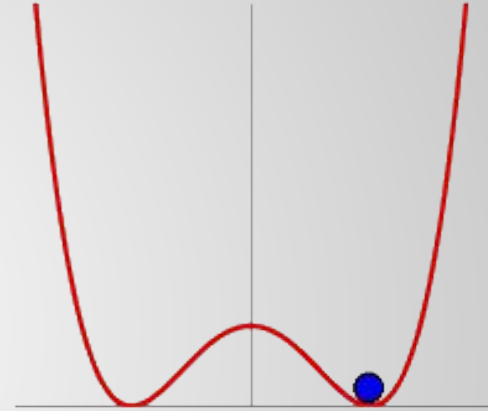
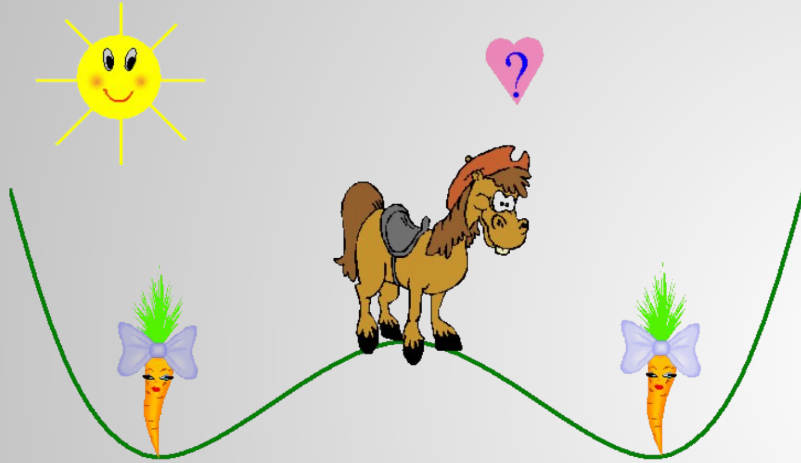
При енергии над 160 GeV

Параболична форма

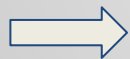
VEV:  $v = 0$  GeV

- При енергии под 160 GeV, формата на полето се променя до тази на **“Мексиканска шапка”**
- Всяка физична система се стреми към минимално енергетично състояние;
- В случая вакуумното състояние е на разстояние от центъра на полето и  $VEV = 246$  GeV
- Спонтанно нарушаване на симетрията.

# Спонтанно нарушаване на симетрията - [видеоклип](#)

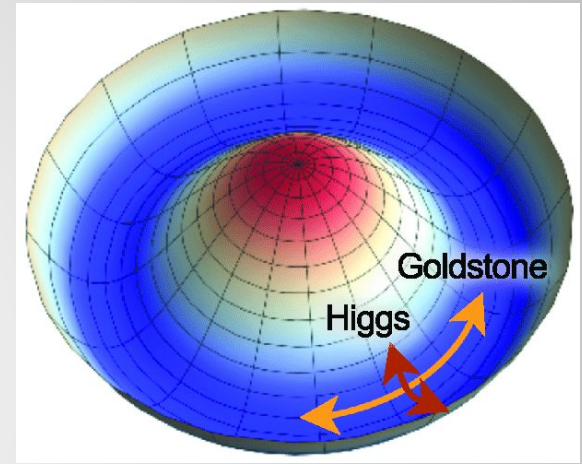
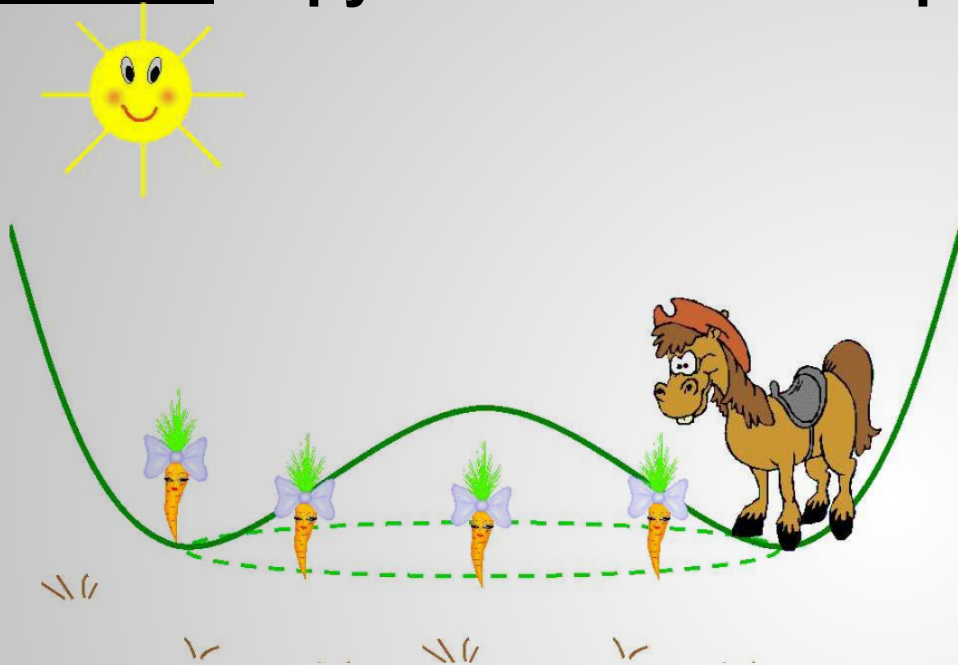


Система с две вакуумни състояния (състояния с най-ниска енергия);  
Физическата система се стреми към състоянието с най-ниска енергия;  
Но може да избере само едно от тях;



**Симетрията е спонтанно нарушена!**

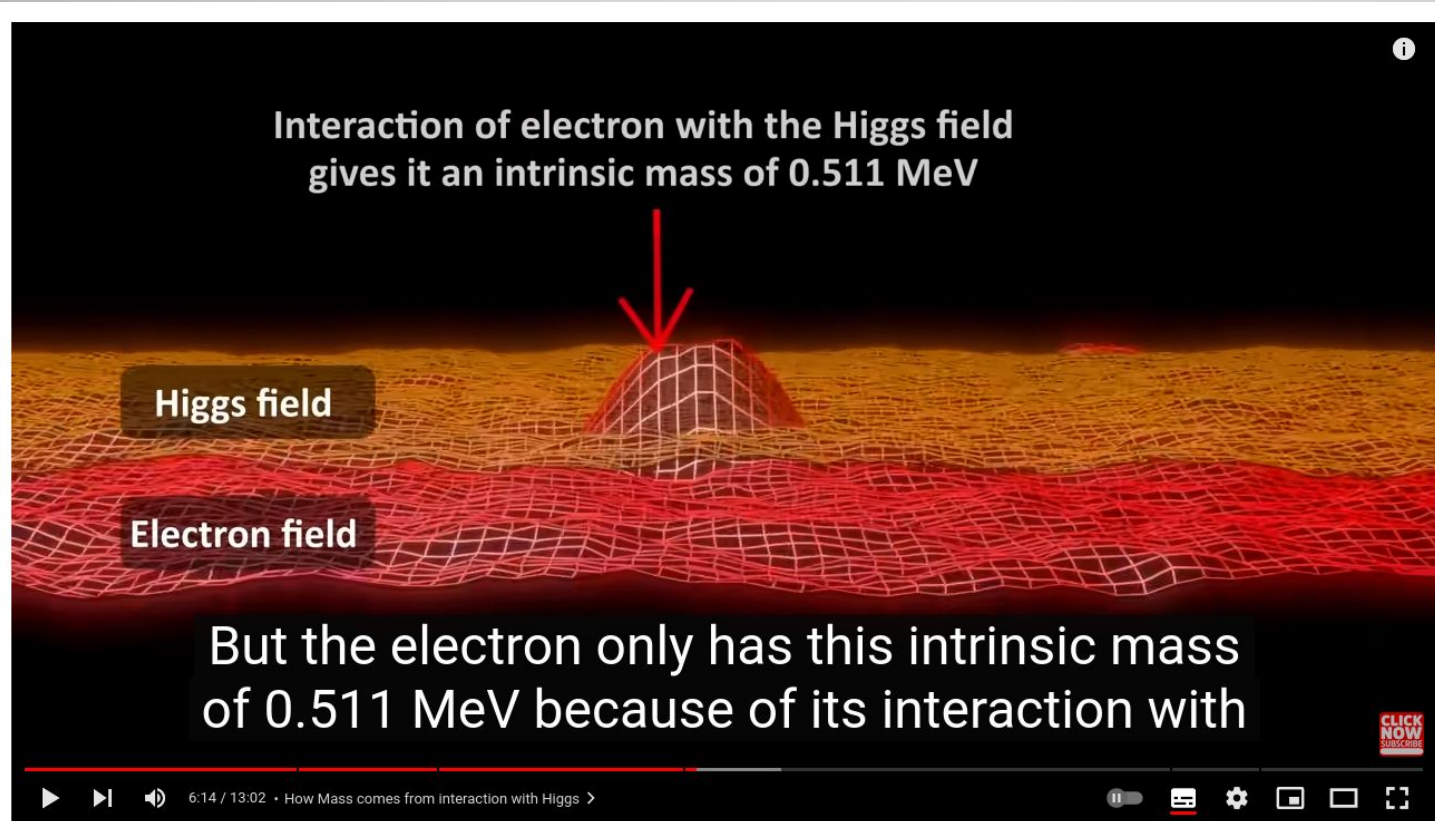
# Спонтанно нарушаване на симетрията - [видеоклип](#)



- Безрой състояния, между които може да се движим без загуба на енергия.
- Аксиалните колебания - безмасови частици или бозони на Намбу-Голдстон
- Радиалните колебания - повишаване на енергията - масивна частица.

Полето на Хигс нарушава симетрията.

Полетата получават маси, когато взаимодействат с полета, които спонтанно нарушават симетрията.



The Crazy Mass-Giving Mechanism of the Higgs Field Simplified



Arvin Ash  
847 хил. абонати

Станете член

Абониране

[гледай тук](#)

👍 24 хил.



🔗 Споделяне

Частичите получават точно определени маси, когато взаимодействат с полето на Хигс.

Масата на частиците е уникална.

Ако знаем масата на частицата - знаем коя е частицата с точност до електрически заряд





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  
продвижването – **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 .....)



## Спин на Хигс бозона

Хигсовото поле нарушава спонтанно симетрията. Така че не трябва да се променя при под действието на пространство-времени трансформации. Такава частица би трябвало да има спин нула.

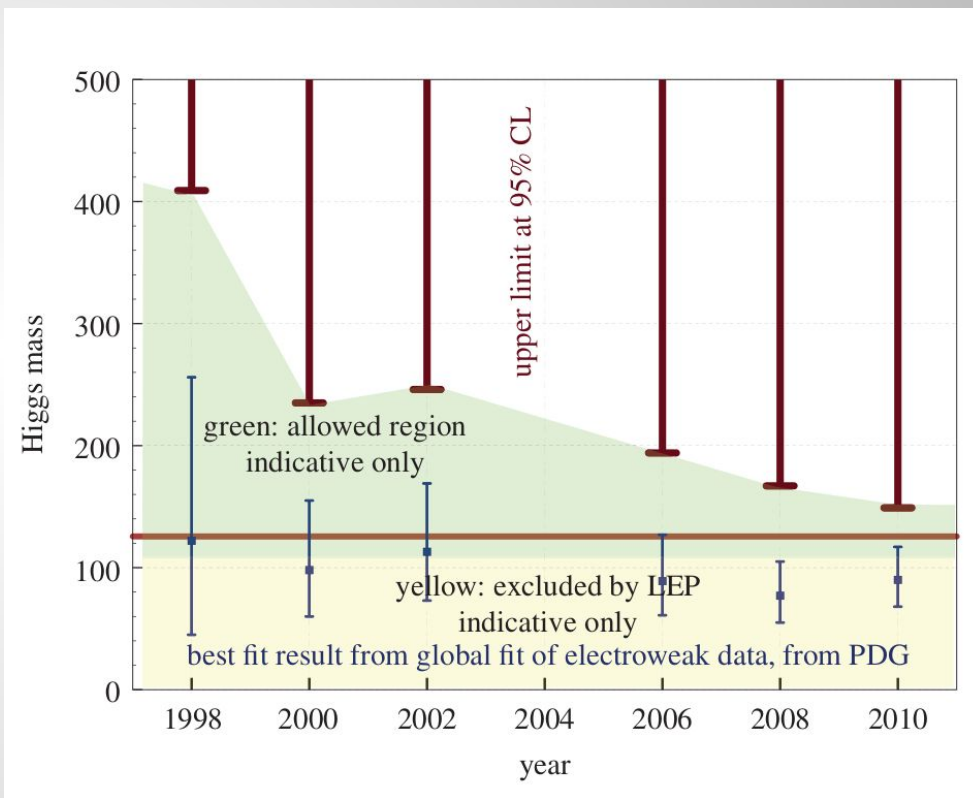
## Маса на Хигс бозона

За съжаление теорията, която предрича съществуването на Хигс бозона, не отговаря на въпроса колко е неговата маса. С течение на времето става все по-ясно, че Хигс бозонът трябва да има голяма маса, като най-вероятно не може да бъде открит на експериментите, построени преди LHC. ( $E = mc^2$ )

**Преди 2010**, времето, когато LHC започва да набира данни, експериментите на други ускорители успяват да поставят долна граница на неговата маса, а именно, че тя трябва да е по-голяма от  $115 \text{ GeV}/c^2$ .

Маса на Хигс бозона -  $125 \text{ GeV}$

## Спин и маса на Хигс бозона



Еволюция във времето на оценките за маса на Хигс бозона. [2]

# Раждане на Хигс бозон

a) Сливане на глюони (ggF) - основен механизъм на раждане на LHC и Tevatron

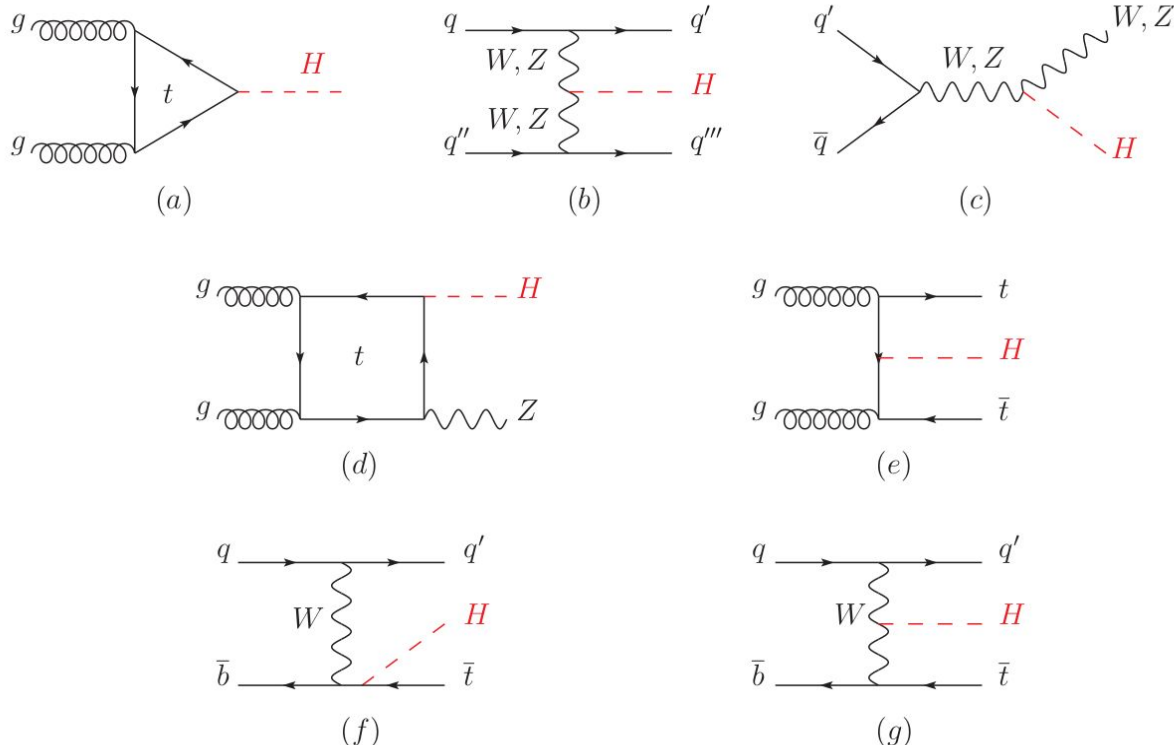
b) Сливане на векторни бозони (VBF)

c) Higgs-strahlung (излъчване на Хигс) - или асоциирано раждане с калибровъчен бозон при кварк-кварк взаимодействие

d) Асоциирано раждане с калибровъчен бозон при глюон-глюонно взаимодействие

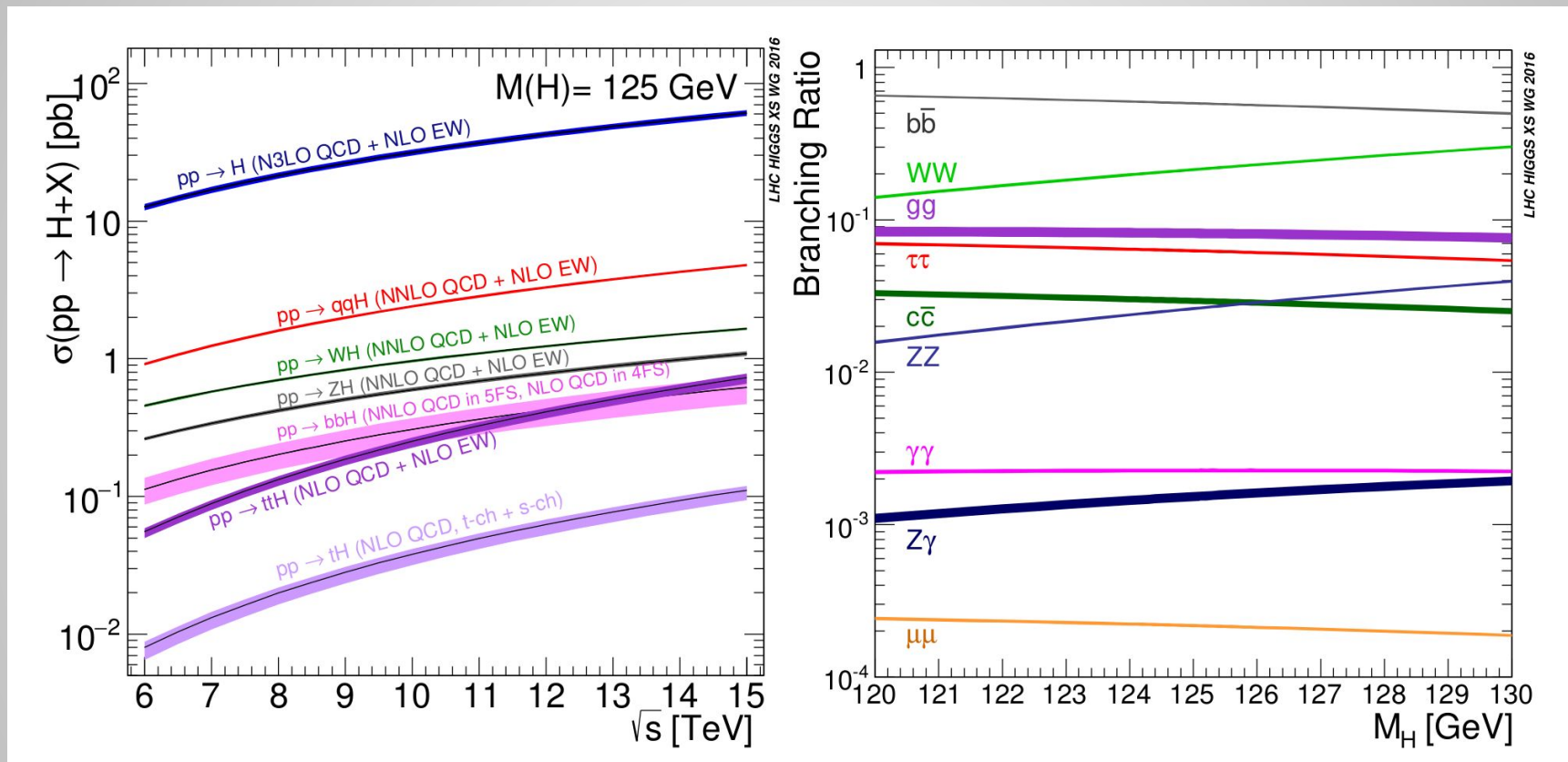
e) Асоциирано раждане с двойка топ кварки (аналогична диаграма с раждане на двойка красиви (bb) кварки)

f-g) Асоциирано раждане с единичен топ кварк.

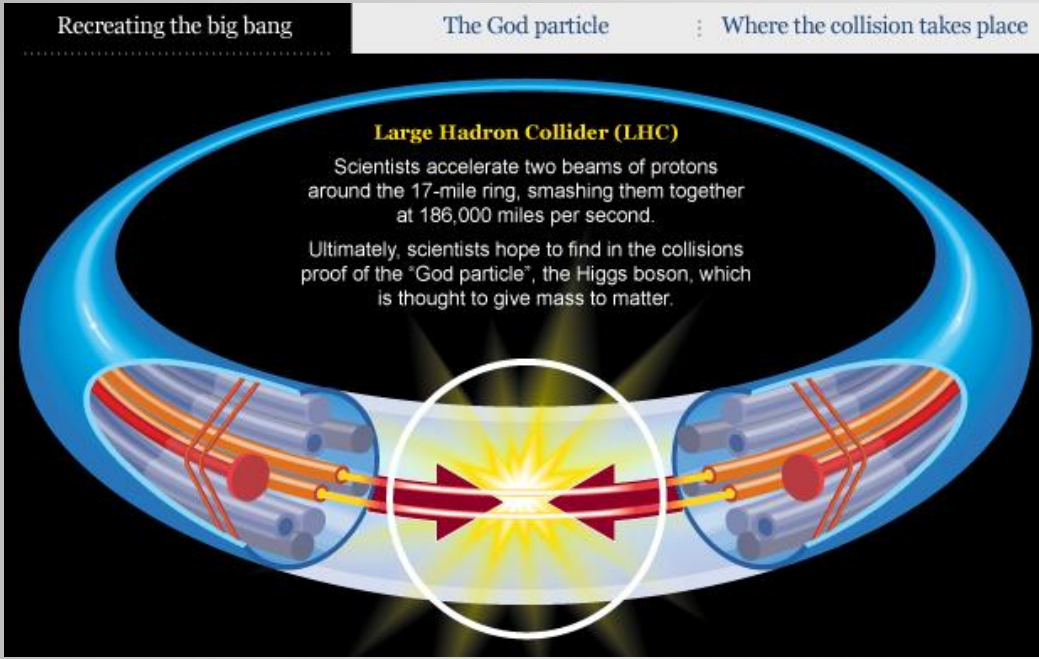


Основни механизми за раждане на Хигс бозон [3].

# Механизми на раждане и разпадане на Хигс бозона



(Ляво) Сечения за раждане на Хигс бозон от стандартния модел като функция на енергията в система център на масите за протон-протонни сблъсъци. (Дясно) Парциални вероятности за основните канали на разпадане на Хигс бозон с маса, близка до 125 GeV [3].



- Ускорител на заредени частици - в нашия случай протони
- енергия на взаимодействието:
  - $E = E(\text{сноп 1}) + E(\text{сноп 2})$
- Най-висока енергия през 2022 и 2023
  - $E = 13.8 \text{ TeV}$
- Проектна енергия на ЛНС:  $E = 14 \text{ TeV}$
- Светимост:

- Моментна светимост

$$L \sim \frac{f N_1 N_2}{4 \pi \sigma_x \sigma_y}$$

$f=40 \text{ MHz}$ ,  $N_1, N_2$  - брой протони в бънч,  $\sigma$  - напречно сечение на снопа.

- Моментна светимост към момента

$$L \sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

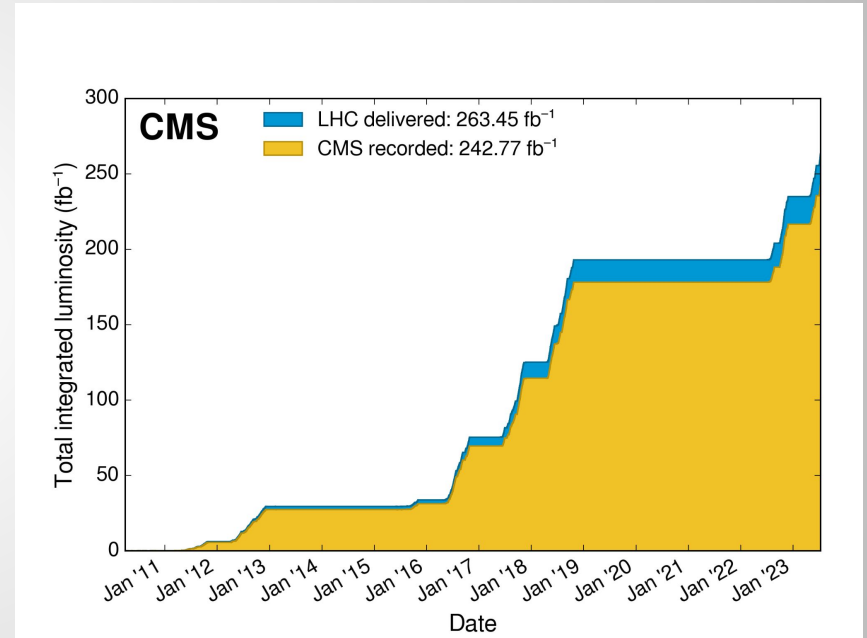
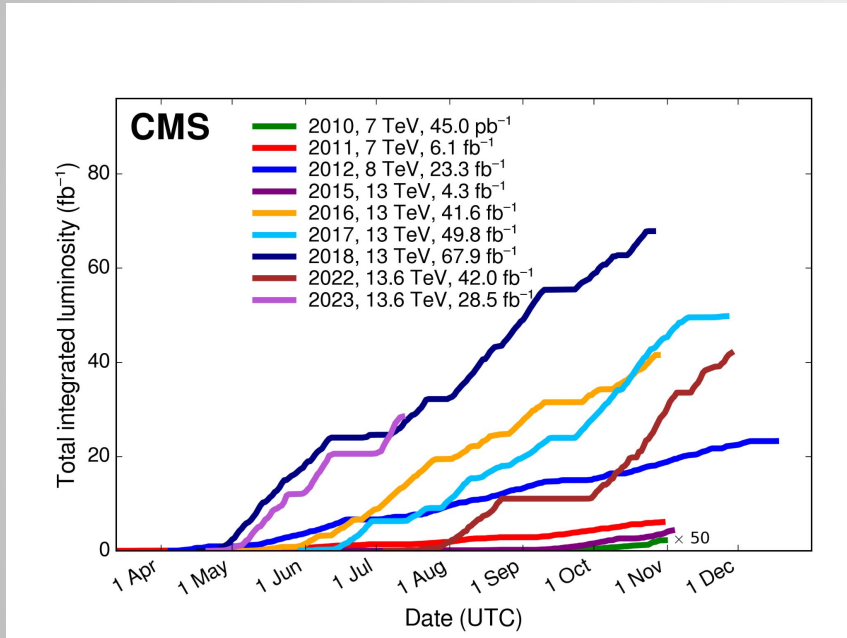
- Интегрална светимост

$$\mathcal{L} = \int L dt$$

- мерни единици:  $1/\text{fb}$ ,  $1/\text{pb}$ , ...

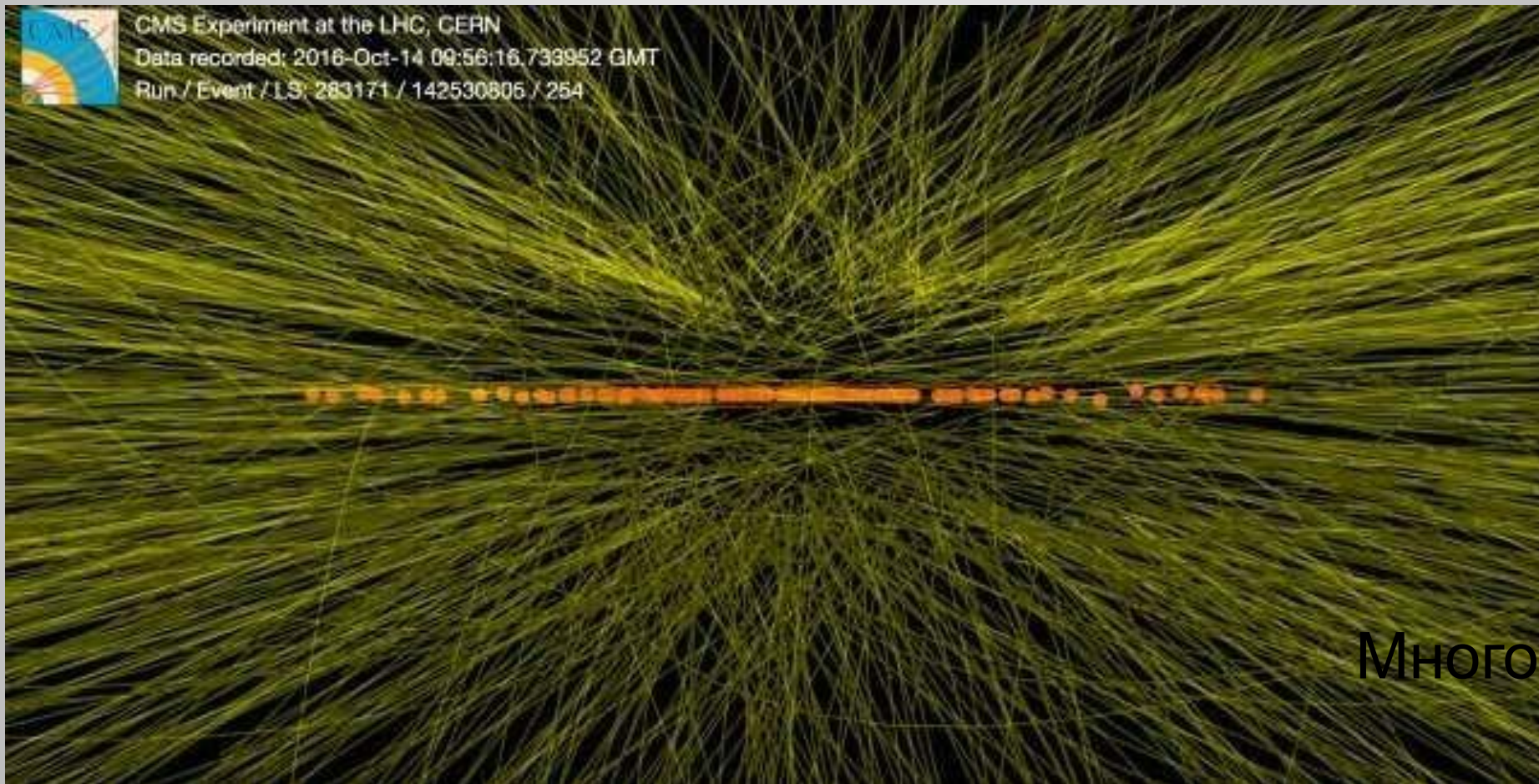
- Барн
  - $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$
- Сечение (вероятност) за процес:
  - измерваме в  $\text{cm}^2$ , в барни или в производните  $\text{pb} = 10^{-36}$ ,  $\text{fb} = 10^{-39}$  ...

# Интегрална светимост записана от експеримента CMS





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

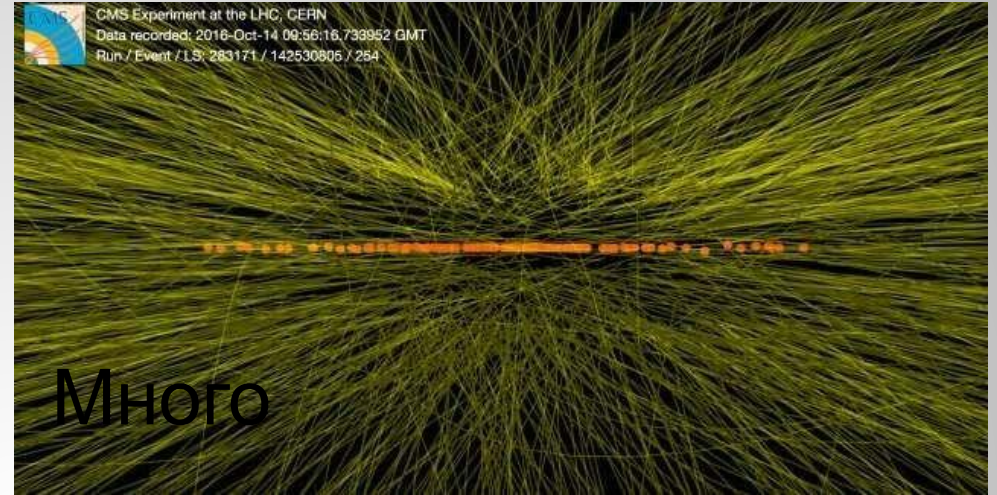




# Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?

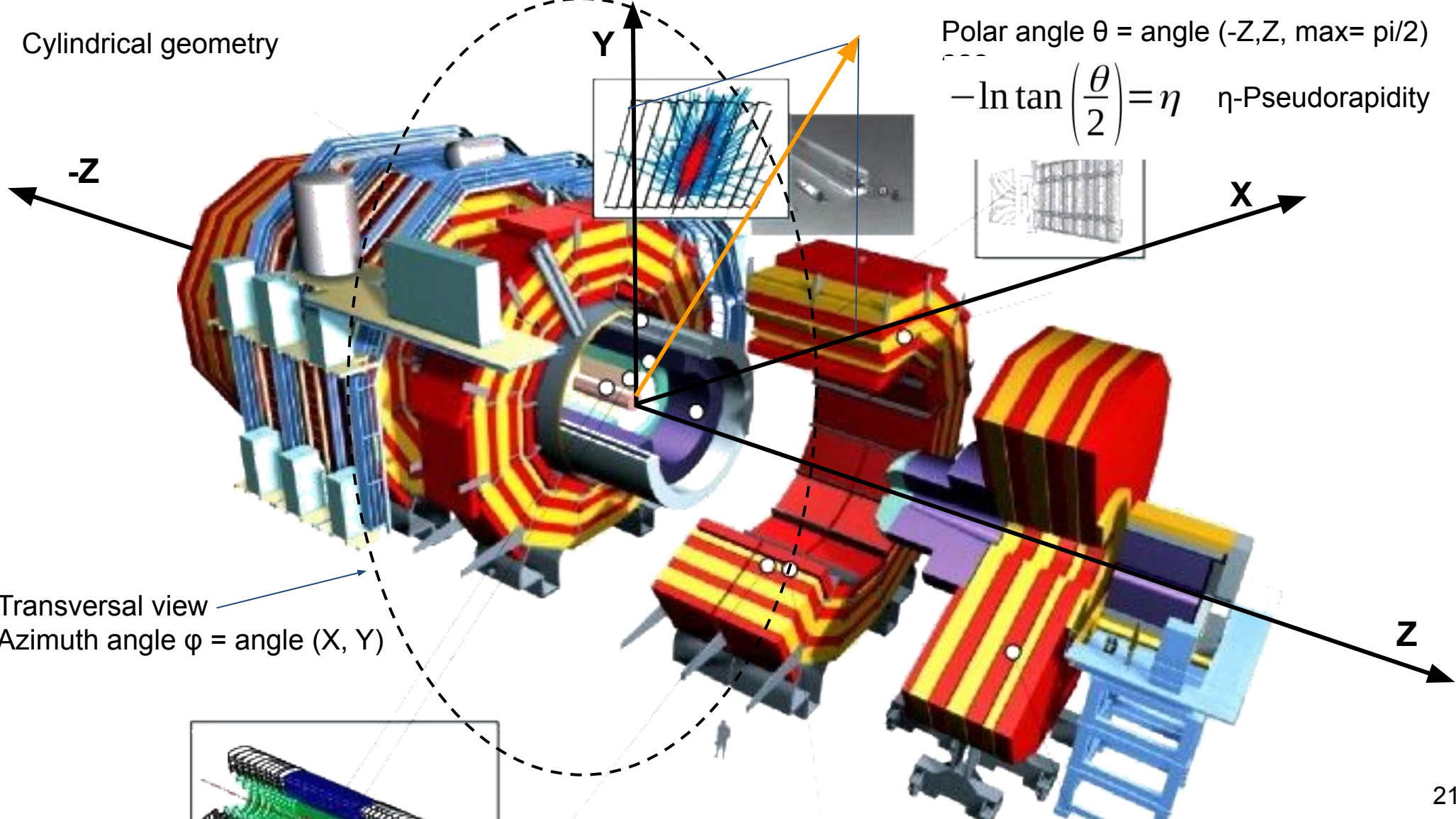


Как някои хора си представят откритието на нова частица.



Каква е действителността.

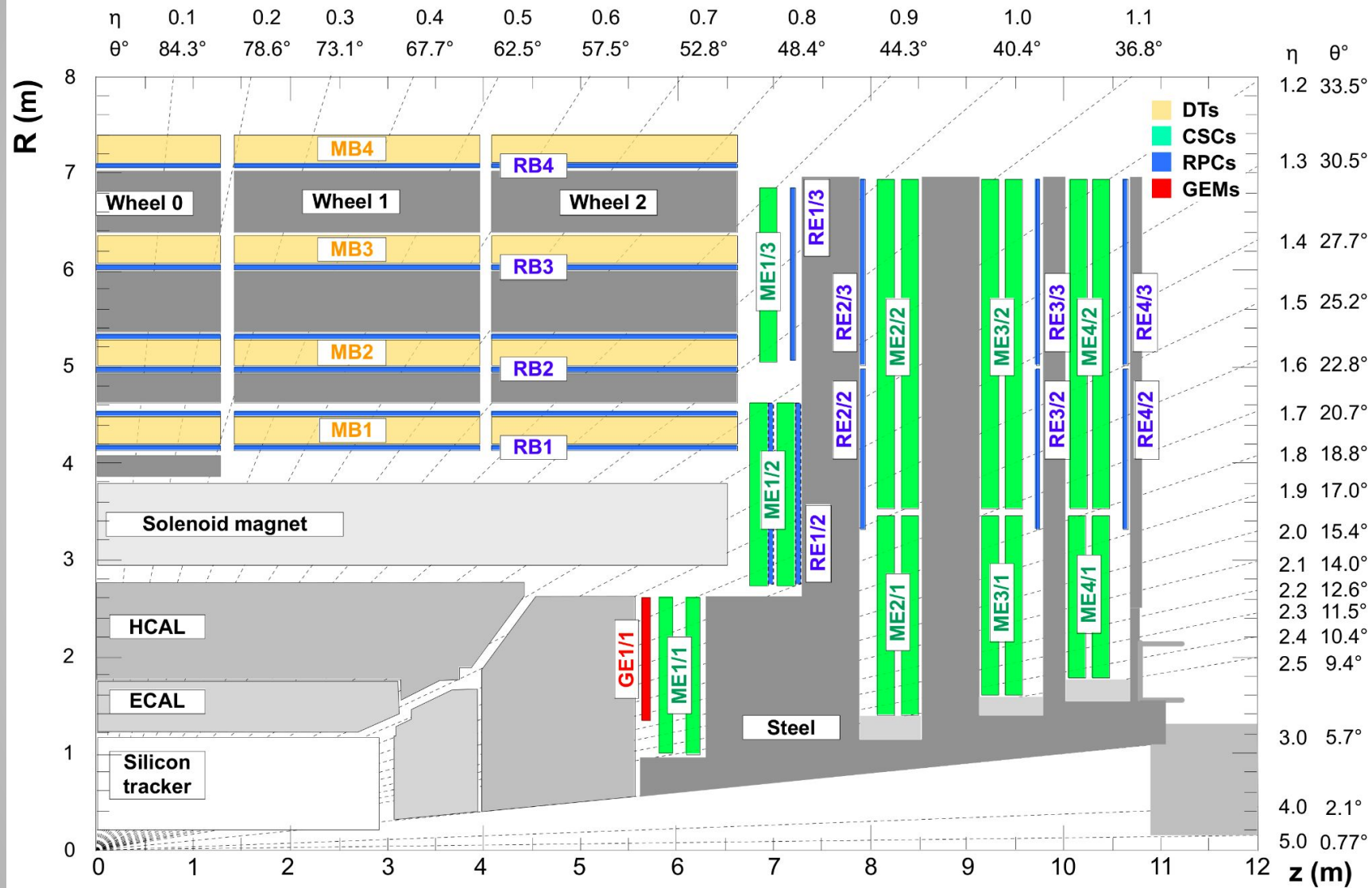
Cylindrical geometry



Polar angle  $\theta = \text{angle}(-Z, Z, \text{max} = \pi/2)$   
 $-\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \eta$   $\eta$ -Pseudorapidity

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

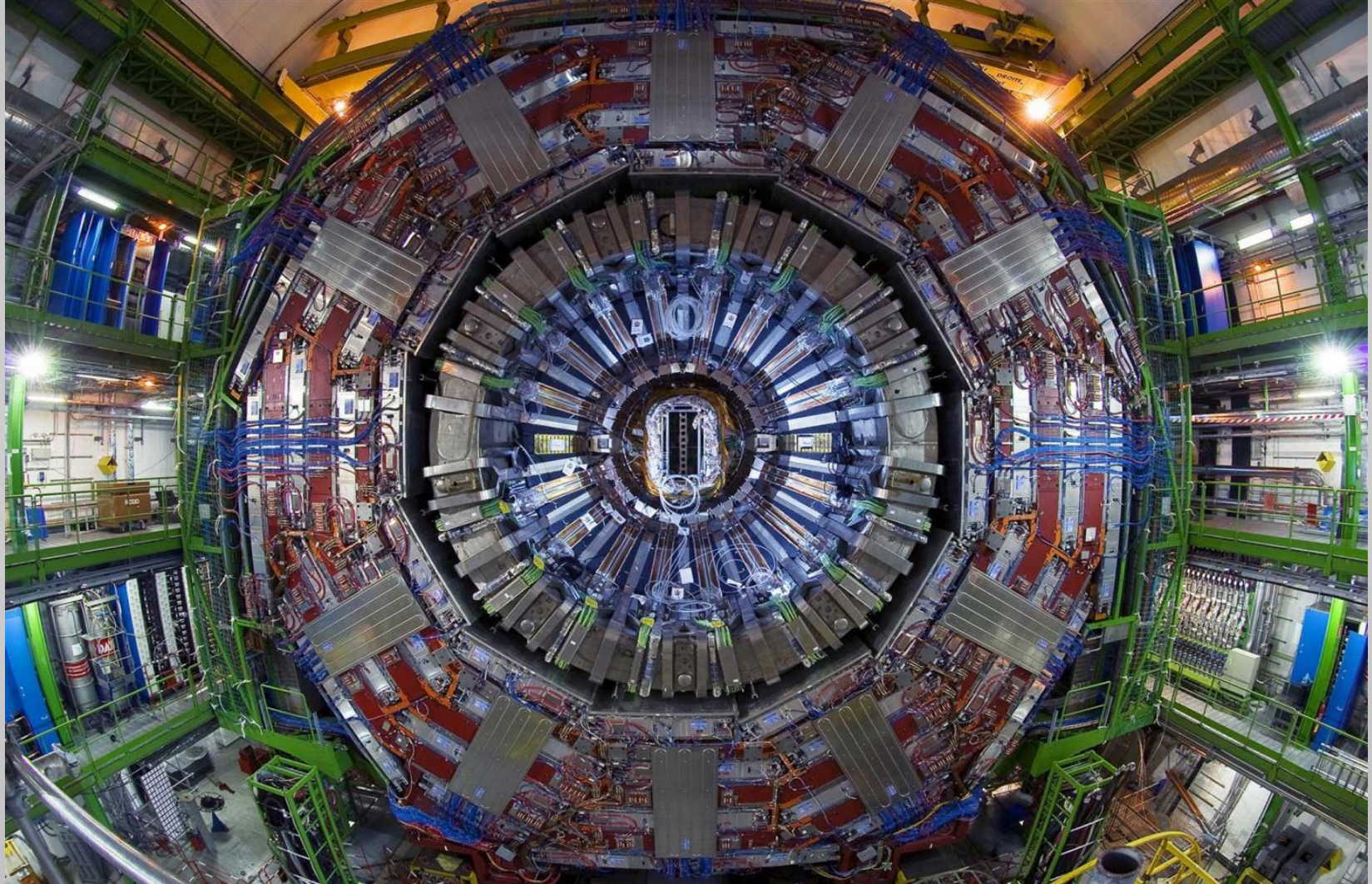




**CMS  
Run 3 -  
NOW!**

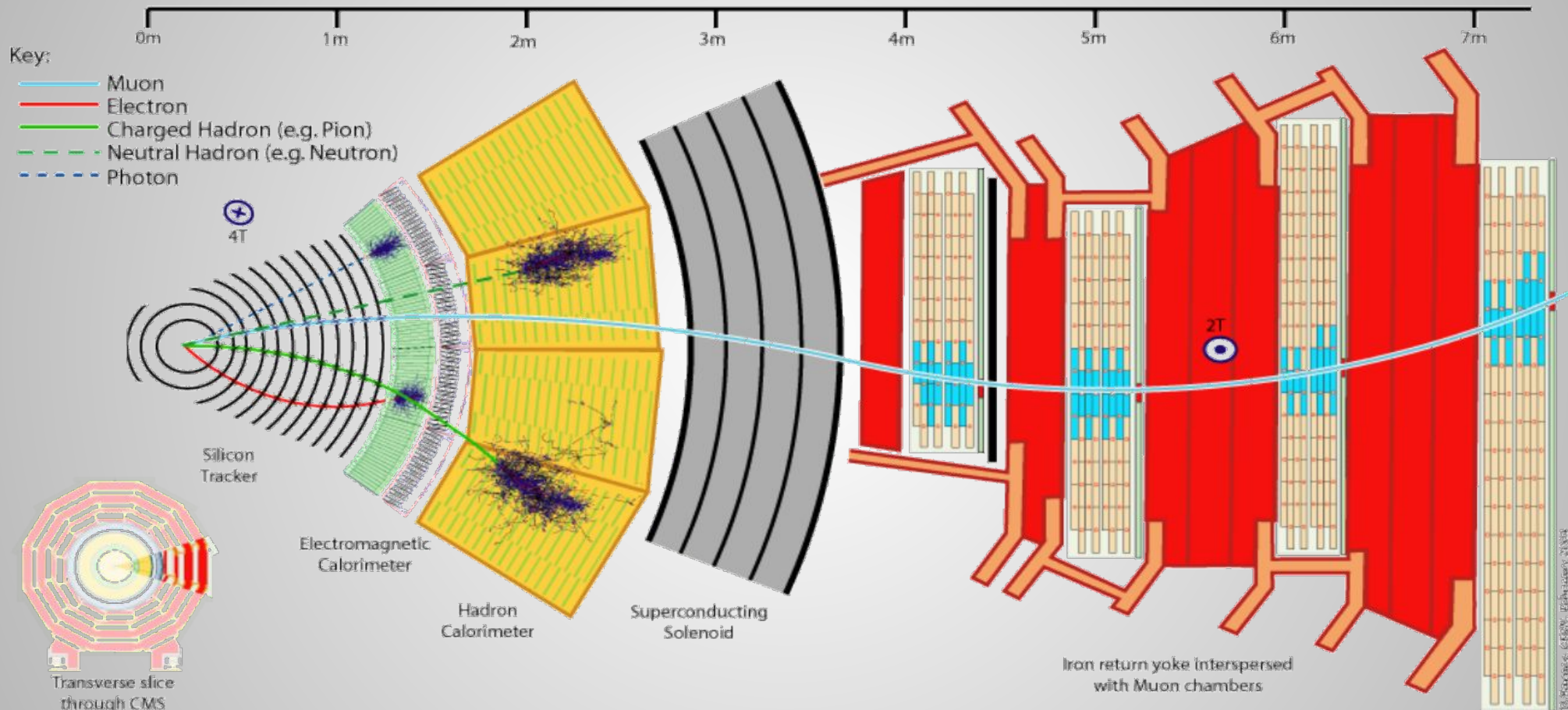


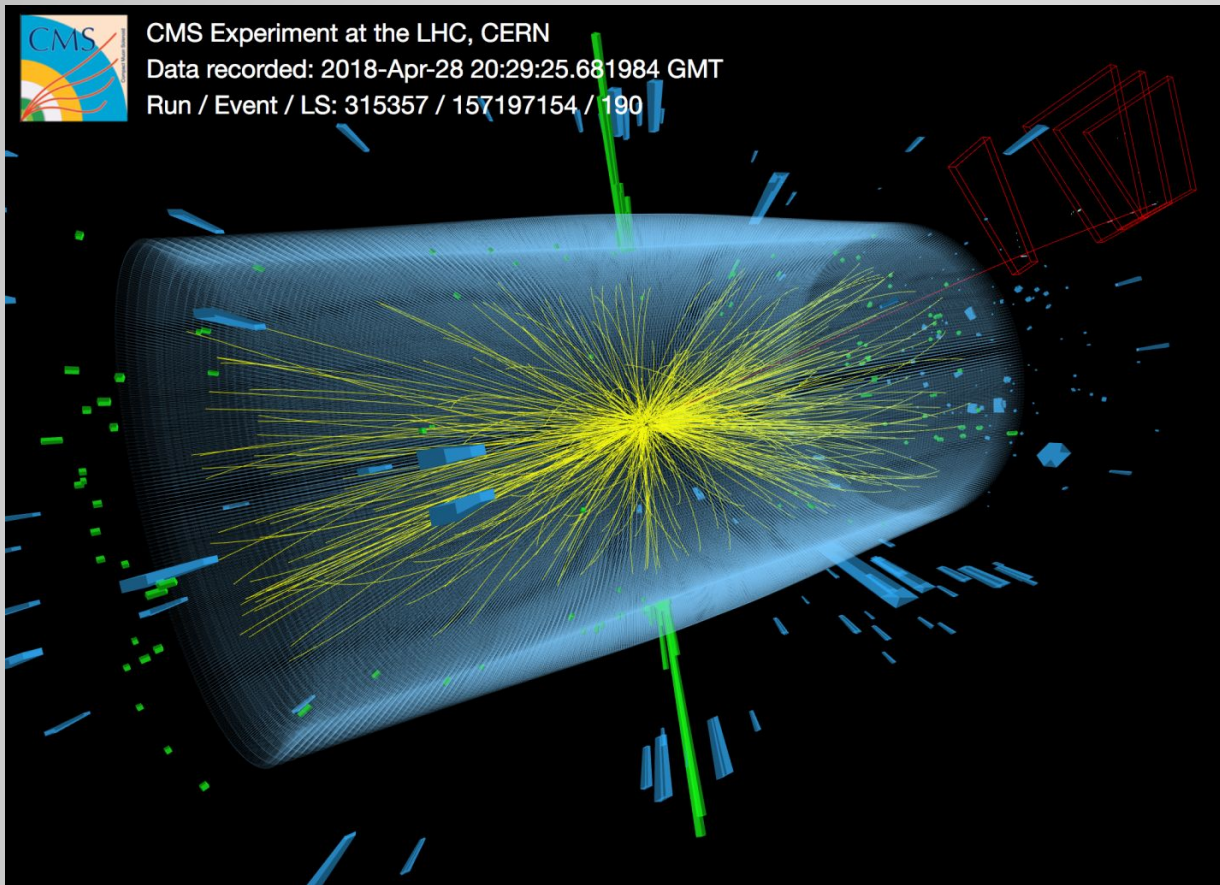
# Детекторът CMS





# Transverse slice of the CMS Detector





*The image depicts collisions recorded by the CMS detector on 28 April 2018 from 1200 proton bunches in each circulating beam. The yellow lines represents reconstructed particle trajectories in the tracker. The green and blue rectangles represent energy deposits in the electromagnetic and hadronic calorimeters, respectively. The long red lines represent reconstructed muon trajectories.*

# Симетрията като обединяващ принцип



Еми Нюотер (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;**

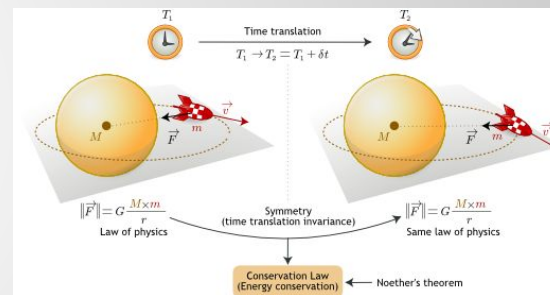
Енергията на една изолирана система е константа, или  $dE/dt=0$



**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  $L_i = r_i \times p_i$



## 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<sup>-</sup>) и позитрона (e<sup>+</sup>)

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

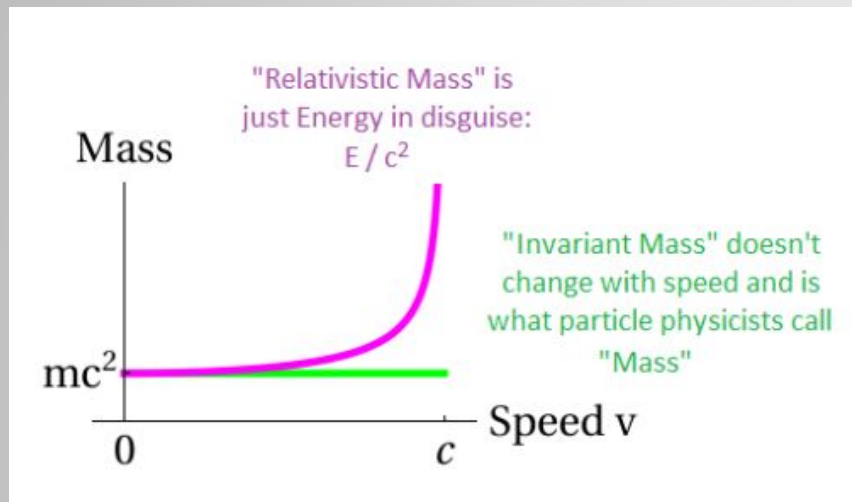
$$m_e = 511 \text{ [KeV]} \quad (c=\hbar=1)$$

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

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



# Коя маса на частицата искаме да измерим?



$$E = mc^2$$

$$E^2 = m^2c^4$$

$$= m^2c^2(c^2+v^2-v^2)$$

$$= m^2c^2v^2 + m^2c^2(c^2-v^2)$$

$$= p^2c^2 + m^2c^4(1-v^2/c^2)$$

(използваме:  $m_0 = m/(1-v^2/c^2)$ )

$$= p^2c^2 + (m_0^2c^4/(1-v^2/c^2)).(1-v^2/c^2)$$

$$= m_0^2c^4 + p^2c^2$$

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

$m_0$  – маса на покой на частицата.

Не се променя в различните отправни координатни системи.

Затова се нарича още **инвариантна маса**.

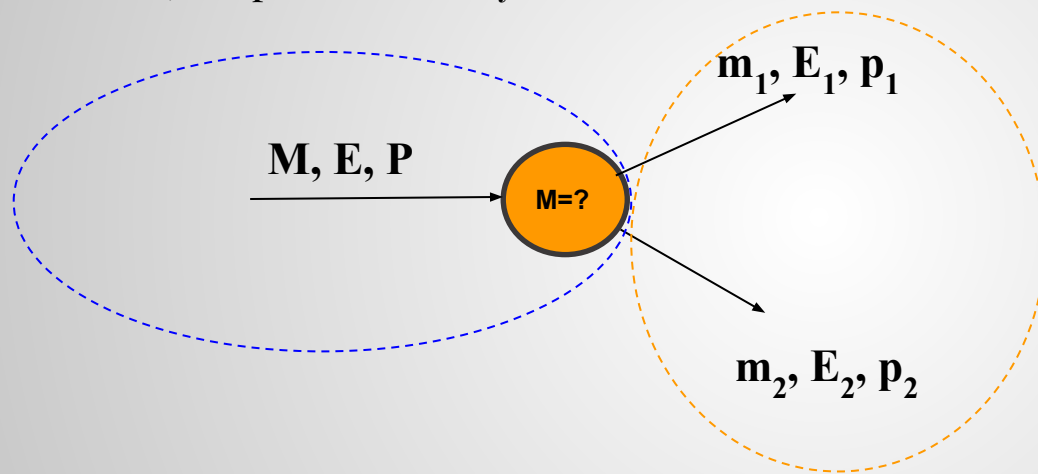
**Ако знаем масата на частицата, която сме регистрирали, може да познаем коя е частицата.**



# 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  $\alpha$

Използваме закона за запазване на енергията и импулса.

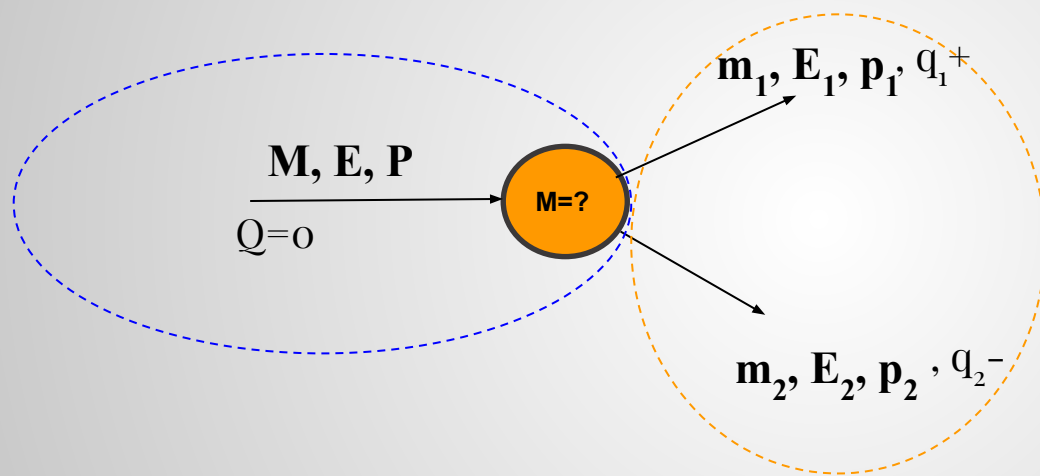
$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 \cdot E_2 - p_1 \cdot p_2 \cos \alpha)$$

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.

# Визуализация на събития - събития, кандидати за Хигс - Практическа задача

<http://opendata.cern.ch/record/300>

Да се открият трековете на частици, показващи вероятен разпад на  $H$  или  $Z$  бозон.

Да се пресметне инвариантната маса на кандидата за  $Z$  бозон

Могат да се използват данните от csv файла и да се работи с калкулатор или ексел

Могат да се използват и данните, включени в графичния интерфейс.

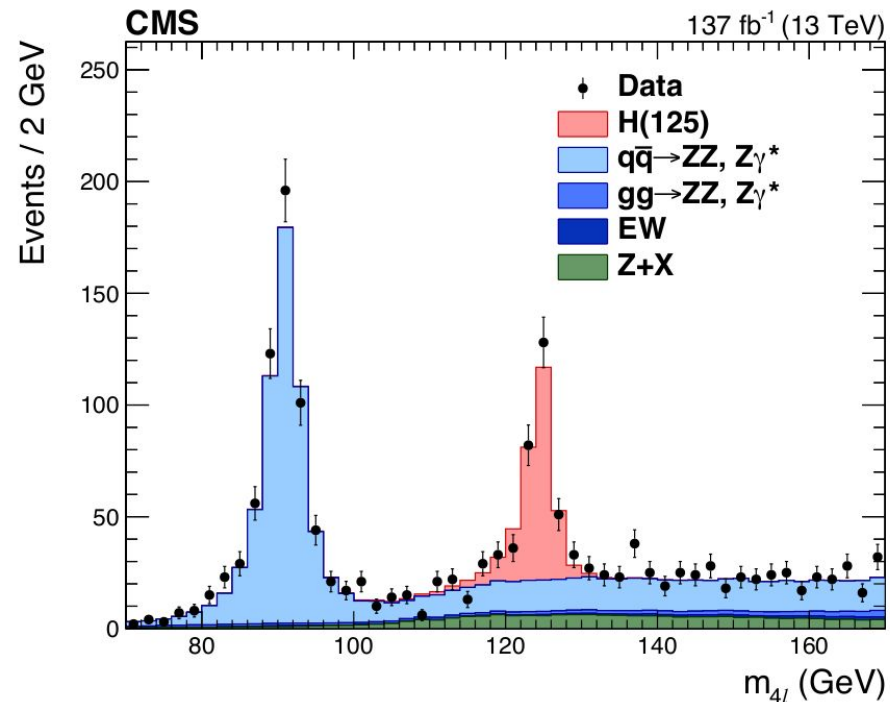
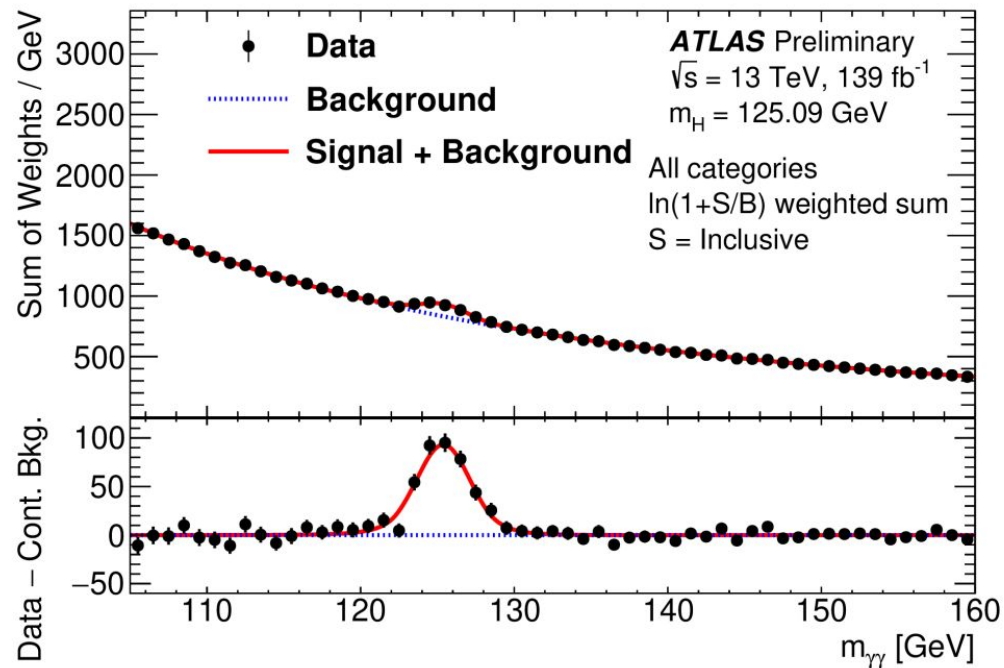
В този случай да се работи с напречните импулси и енергия (ако остане време)

Достатъчно ли е едно добро събитие?

Видео на линка по-долу:

<https://particleadventure.org/images/4l-FloatingScale-NoMuProf2.gif>

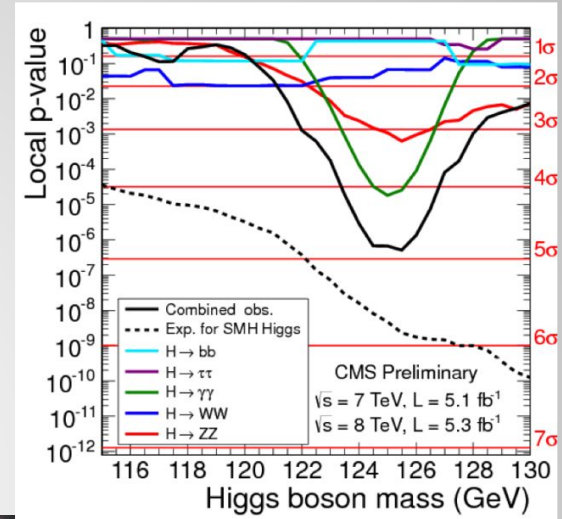
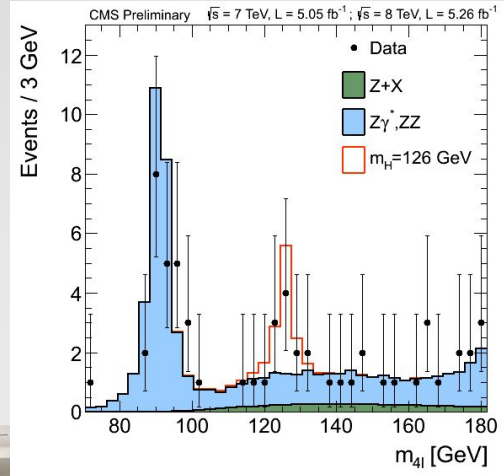
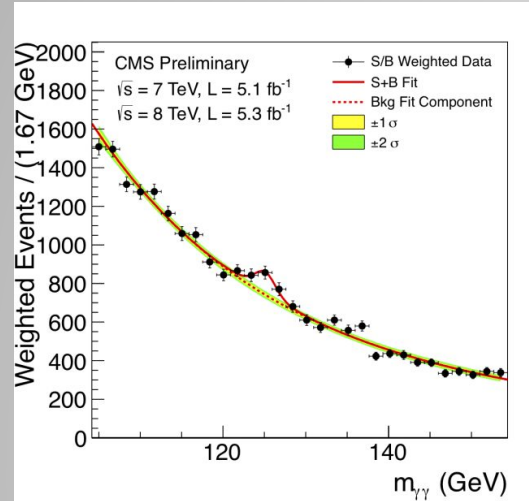




(Ляво) Разпределение по инвариантни маси от кандидати за Хигс от двуфотонни събития, наблюдавани от експеримента ATLAS на Run2. (Дясно) Разпределение по инвариантна маса на 4 лептона с данни от експеримента CMS на Run2 [3].

# Higgs Boson Discovery – 2012

## CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

**Благодаря за вниманието!**

**Въпроси?**

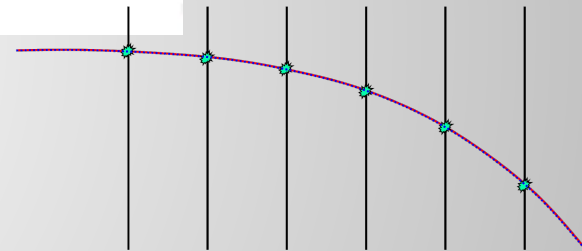
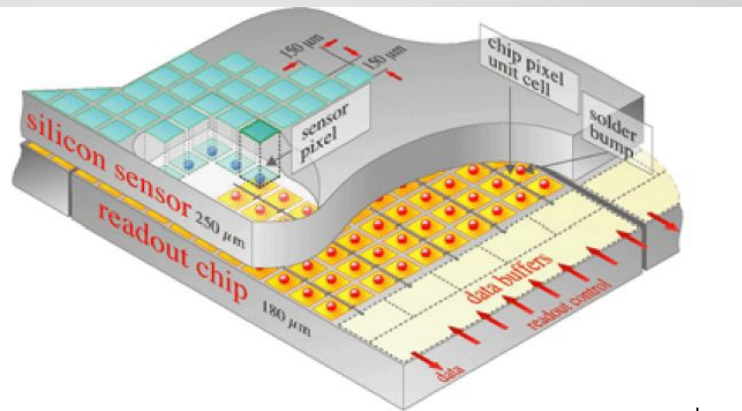
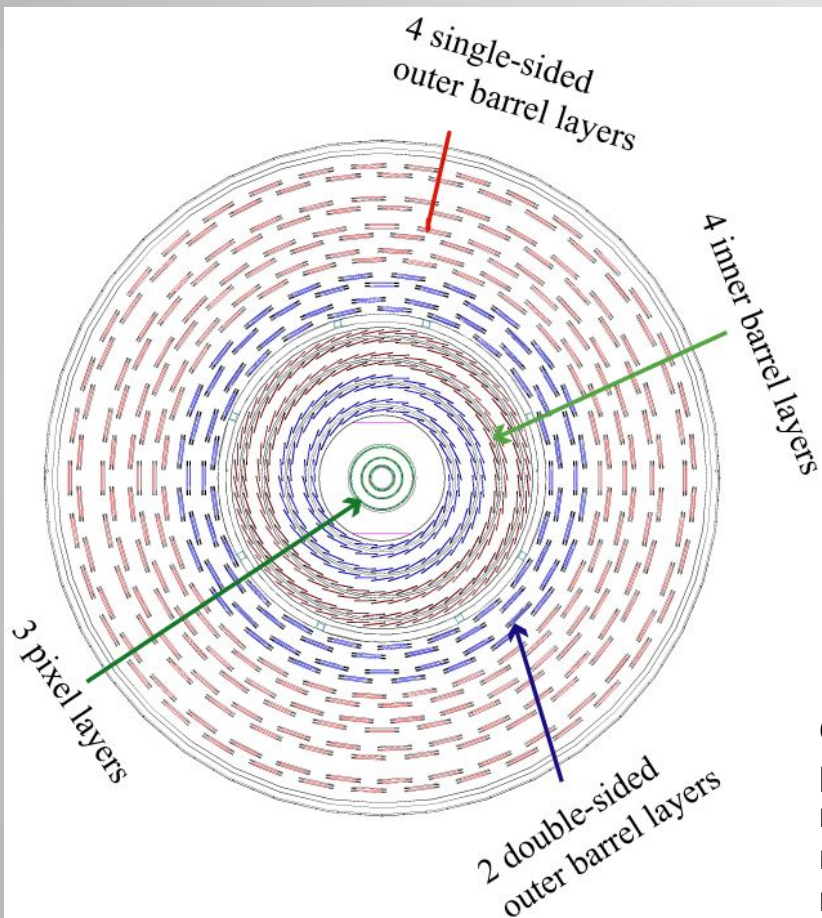


## Библиография и източници:

1. Particle Adventures [side](#)
2. Dissertori G. 2015 The pre-LHC Higgs hunt. Phil. Trans. R. Soc. A 373:20140039. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0039>
3. R.L. Workman et al. ([Particle Data Group](#)), Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 083C01 (2022) and 2023
4. Antonio Pich, The Standard Model of Electroweak Interactions, [arXiv:1201.0537](https://arxiv.org/abs/1201.0537), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1201.0537>
5. ZAP Physics, Spontaneous Symmetry Breaking and The Higgs Mechanism - [видеоклип](#)
6. Arvin Ash, The Crazy Mass-Giving Mechanism of the Higgs Field Simplified - [видеоклип](#)
7. Dark Energy, Dark Matter, NASA Science, [link](#)
8. Gianfranco Bertone, Dan Hooper, "How dark matter became a particle", CERN Courier, 2017, [link](#)
9. Mattia, The Minimal Supersymmetric extension of the Standard Model (MSSM), Particles and friends, [link](#)
10. Conversations About Science with Theoretical Physicist Matt Strassler, Of Particular Significance, [link](#)
11. Search for WISPs gains momentum, CERN Courier, [link](#)
12. Álvarez Melcón, A., Arguedas Cuendis, S., Baier, J. et al. First results of the CAST-RADES haloscope search for axions at 34.67  $\mu\text{eV}$ . J. High Energ. Phys. 2021, 75 (2021). [link](#)
13. CAST Collaboration, An improved limit on the axion-photon coupling from the CAST experiment, JCAP04(2007)010, [link](#)
14. University of Toronto, Invisible Architects: New Link Discovered Between Dark Matter and Clumpiness of the Universe, SciTechDaily, June 19, 2023, [link](#)
15. Stefan Theisen, "Extra dimensions – and how to hide them" in: Einstein Online Band 04 (2010), 03-1013

# Допълнителни слайдове

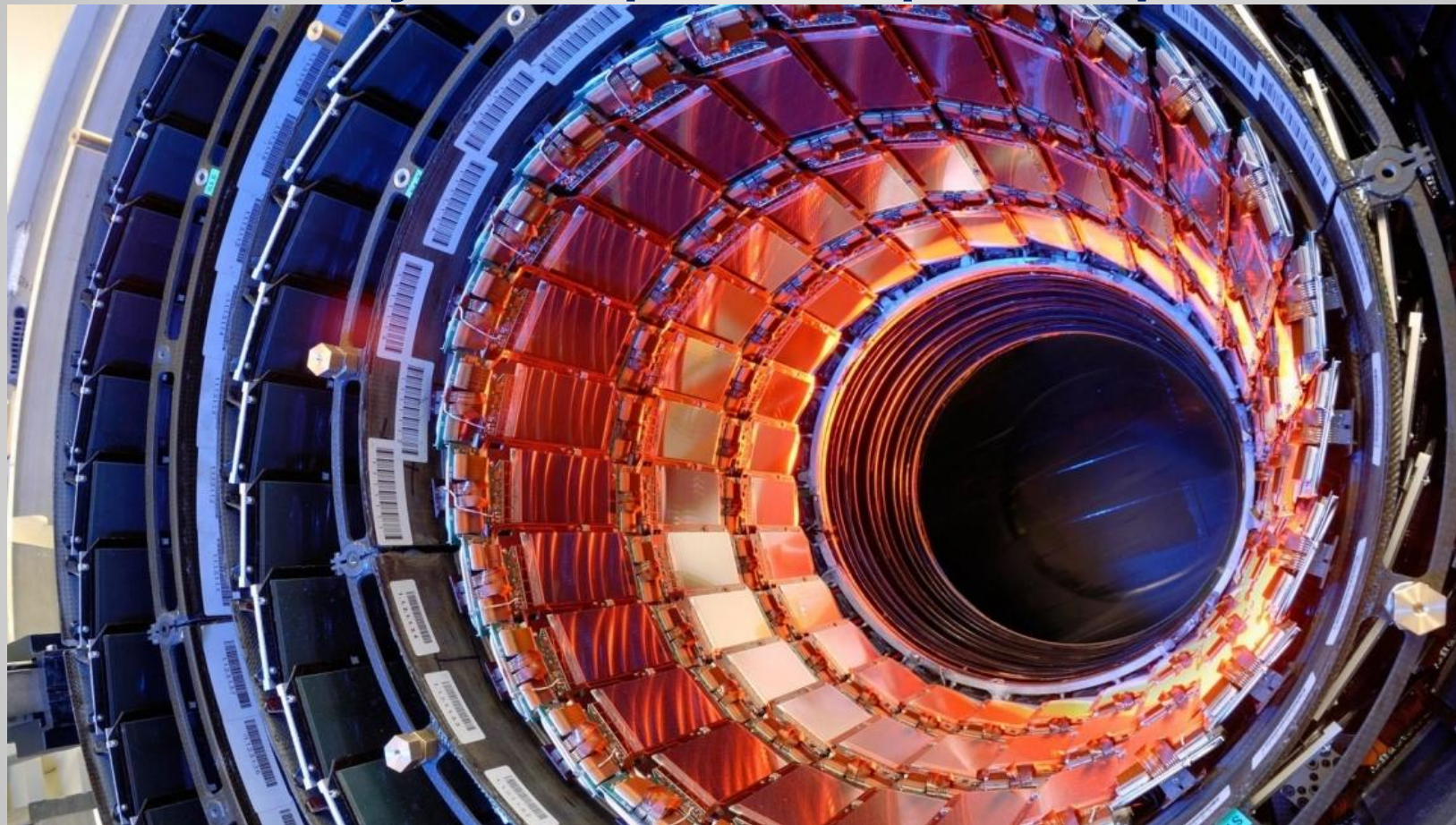
# Определяне на импулс и заряд - Вътрешен треков детектор



Сигналите от вътрешния треков детектор, позволяват да се реконструират техните траектории. Големината на закривяване на техните траектории позволяват определянето на техния импулс 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



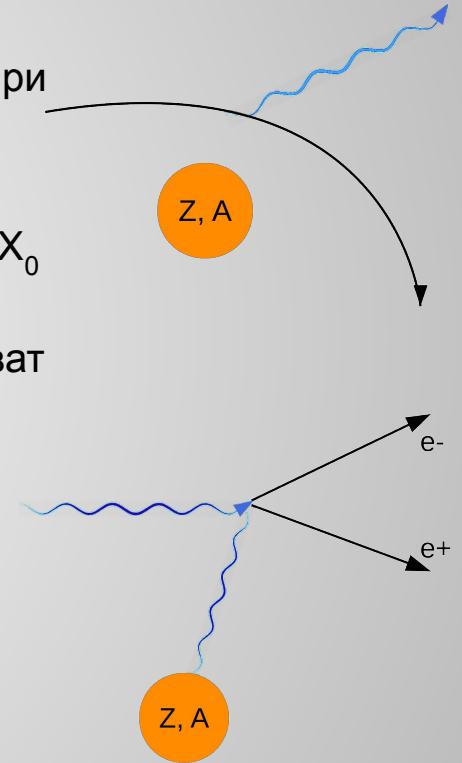


# Детектиране на електрони, позитрони и фотони

## 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
  - радиационна дължина  $X_0 \sim 180 A/Z^2 \text{ [g.cm}^{-2}\text{]}$ 
    - енергията намалява като:  $E = E_0 e^{-x/X_0}$ , т.е.  $e(2.71)$  пъти за една  $X_0$
    - пример: в олово ( $Z=82$ ),  $X_0 \sim 5.6 \text{ mm}$
    - енергийните загуби  $dE/dX \sim (E.Z^2)/m^2$ , затова мюоните излъчват едва при енергии над  $1 \text{ TeV}$
- раждане на  $e^+e^-$  двойки от фотон, в полето на ядро от средата
  - дължина на свободен пробег преди раждане на двойка  $e^+e^-$ :
    - $\Lambda_{\text{pair}} = 9/7 X_0$
    - в олово  $\Lambda_{\text{pair}} \sim 7.2 \text{ mm}$
    - Интензитета на лъчението намалява:  $I = I_0 \exp(-7x/9X_0)$



# Детектиране на електрони, позитрони и фотони

## Електромагнитна лавина във вещество

Да предположим:  $X_0 = \Lambda_{\text{pair}}$

и на всяка стъпка броят частици нараства два пъти:

Брой частици след  $t$  радиационни дължини:  $N(t) = 2^t \Rightarrow E(t) = E_0 \cdot 2^{-t}$

Процесът протича до  $E(t) < E_c$  ( $E_c$  - критична енергия)

$$\Rightarrow t_{\text{max}} = \frac{\ln E_0 / E_c}{\ln 2}$$

$$\Rightarrow N^{\text{Total}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{max}}} 2^t = 2^{(t_{\text{max}}+1)} - 1 \approx 2.2^{t_{\text{max}}} = 2 \frac{E_0}{E_c}$$

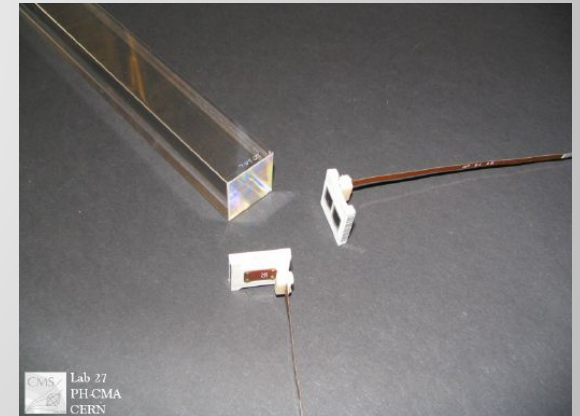
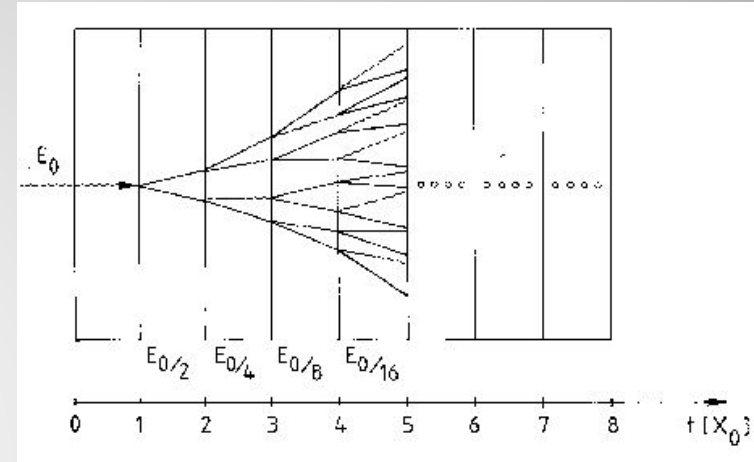
$$\Rightarrow N^{\text{total photons}} \sim E_0$$

Регистрирането на фотони - чрез подходящи фотодетектори

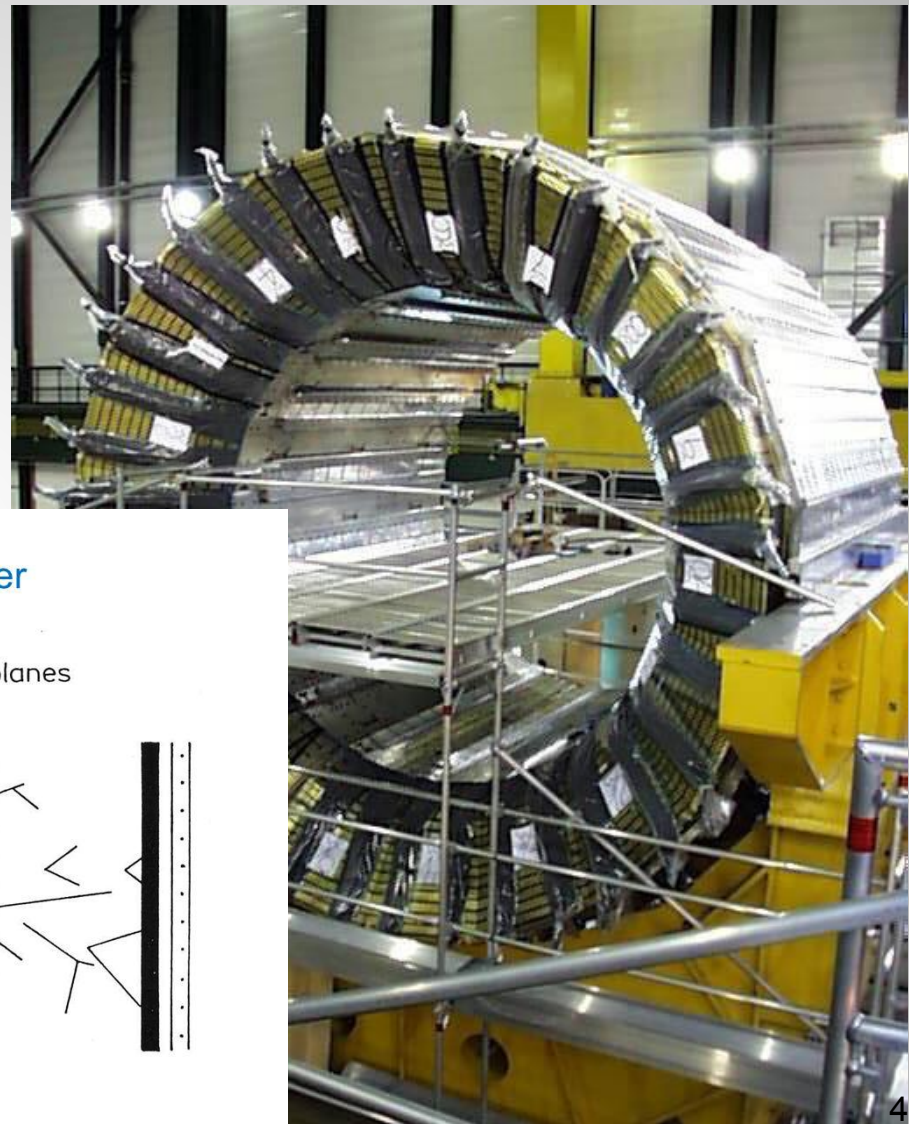
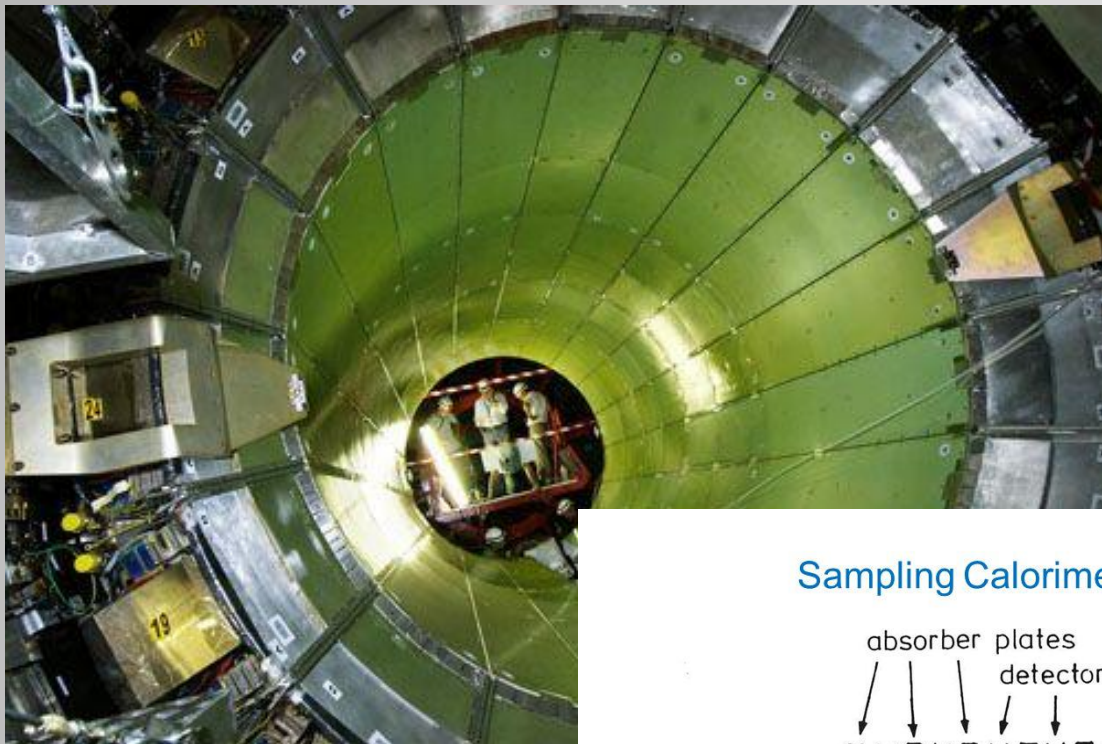
Оценка на необходимата дължина на средата:

Пример за електрон с енергия 50 GeV:

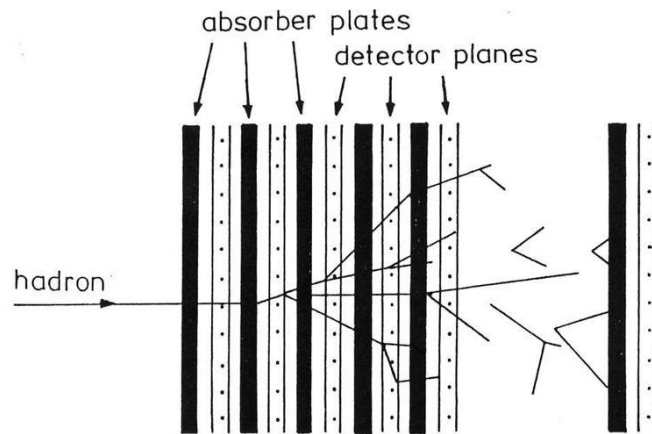
$N^{\text{total}} \sim 14000$  частици, а  $t_{\text{max}} \sim 13 X_0 \sim 72.8 \text{ mm}$



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



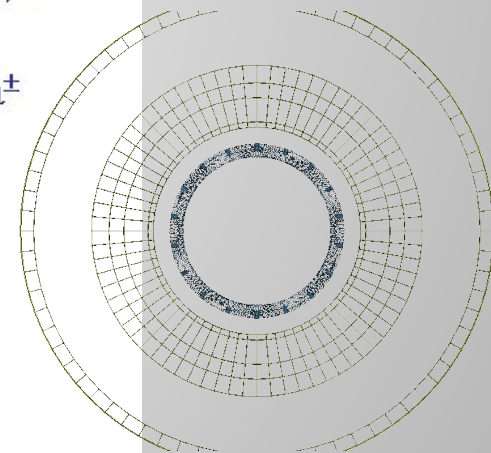
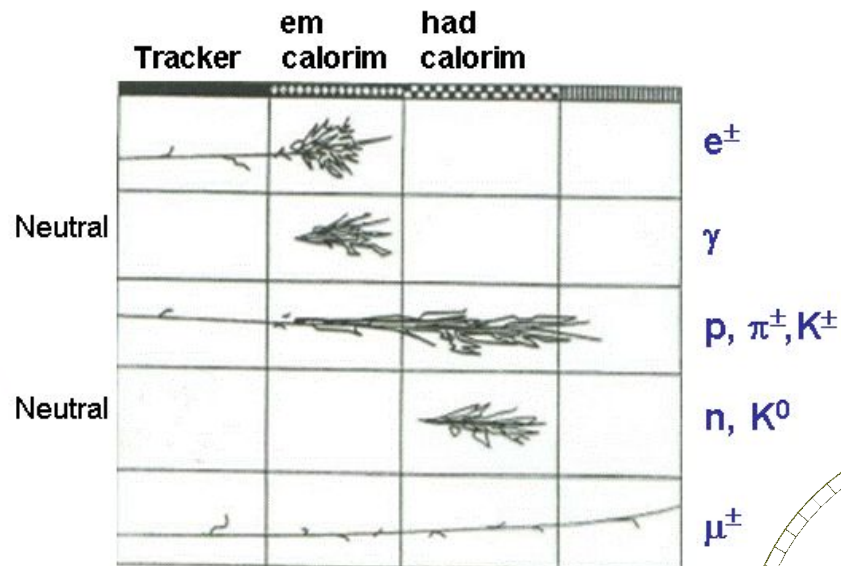
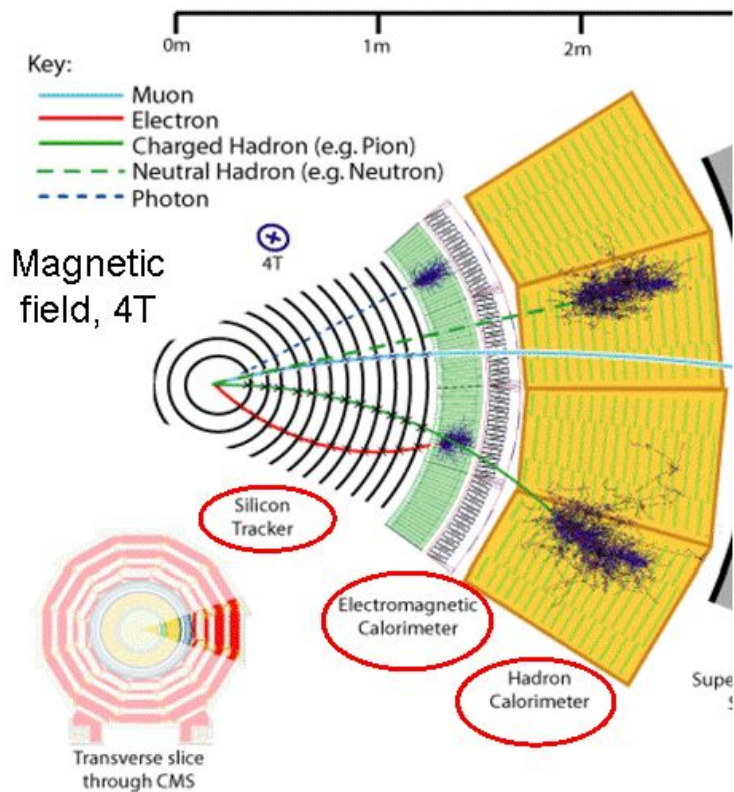
### Sampling Calorimeter



*ECAL - електромагнитен  
калориметър на CMS  
(в ляво)  
HCAL - адронен  
калориметър на CMS  
(в дясно)*



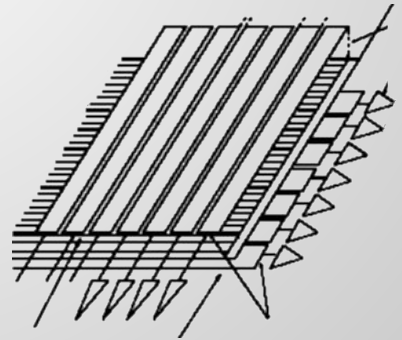
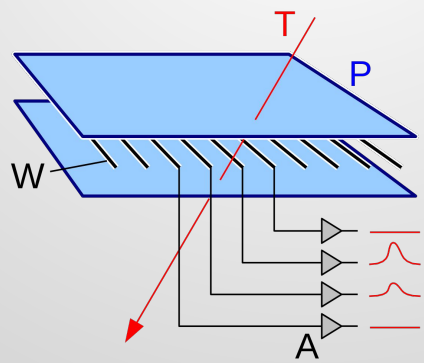
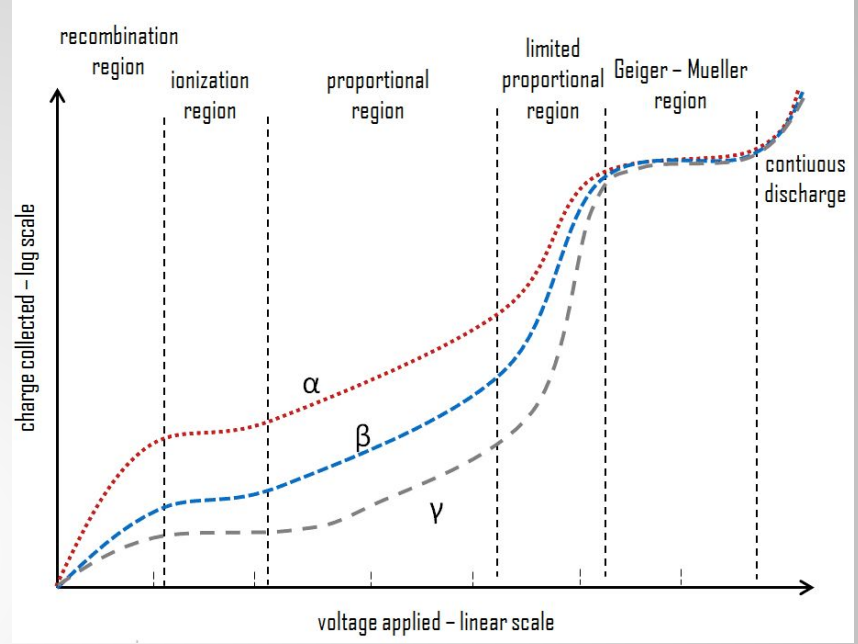
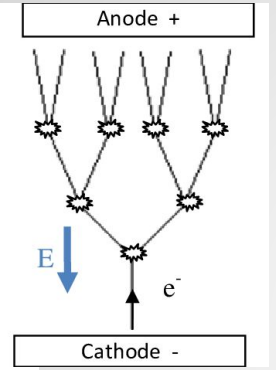
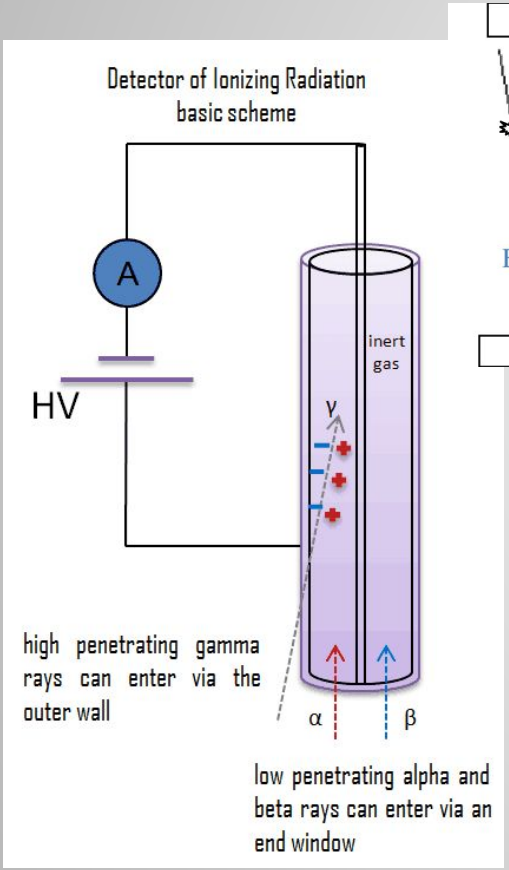
# Калориметрична система електромагнитен (ECAL) и адронен калориметър (HCAL)





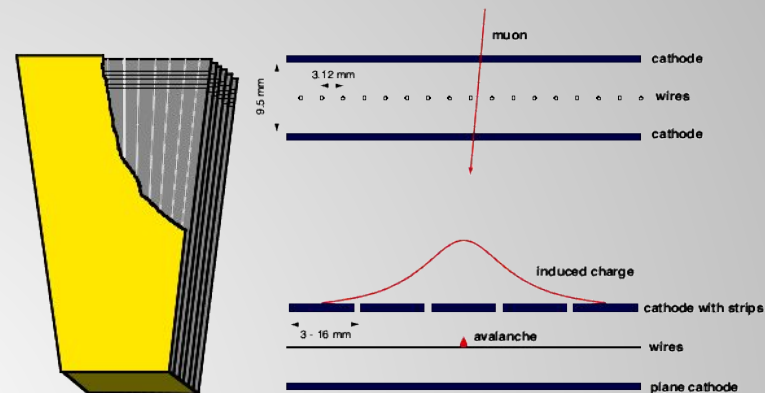
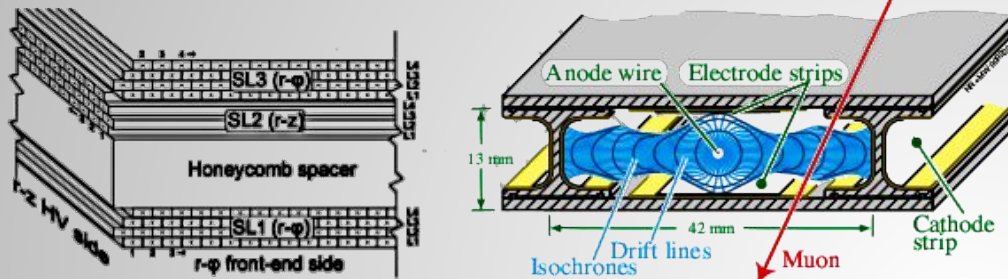
# Газонапълнени детектори

## Основен принцип на действие

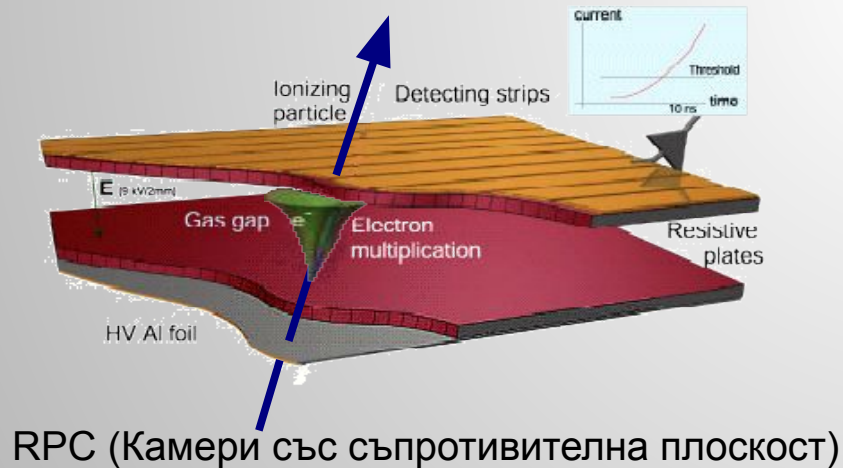


# Мюонна система на CMS (Run1 & Run2)

## DT (Камери с дрейфови тръби)



## CSC (Катодно стрипови камери)



## RPC (Камери със съпротивителна плоскост)

