



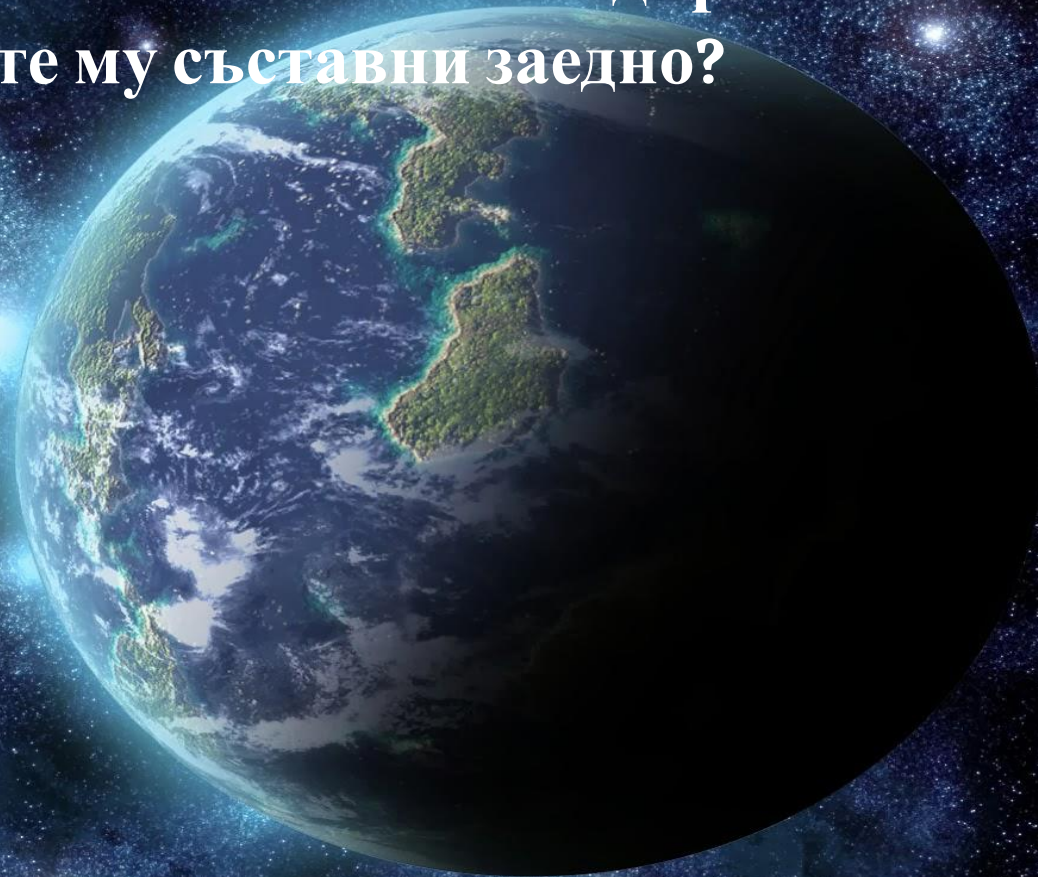
В света на елементарните частици

Въведение

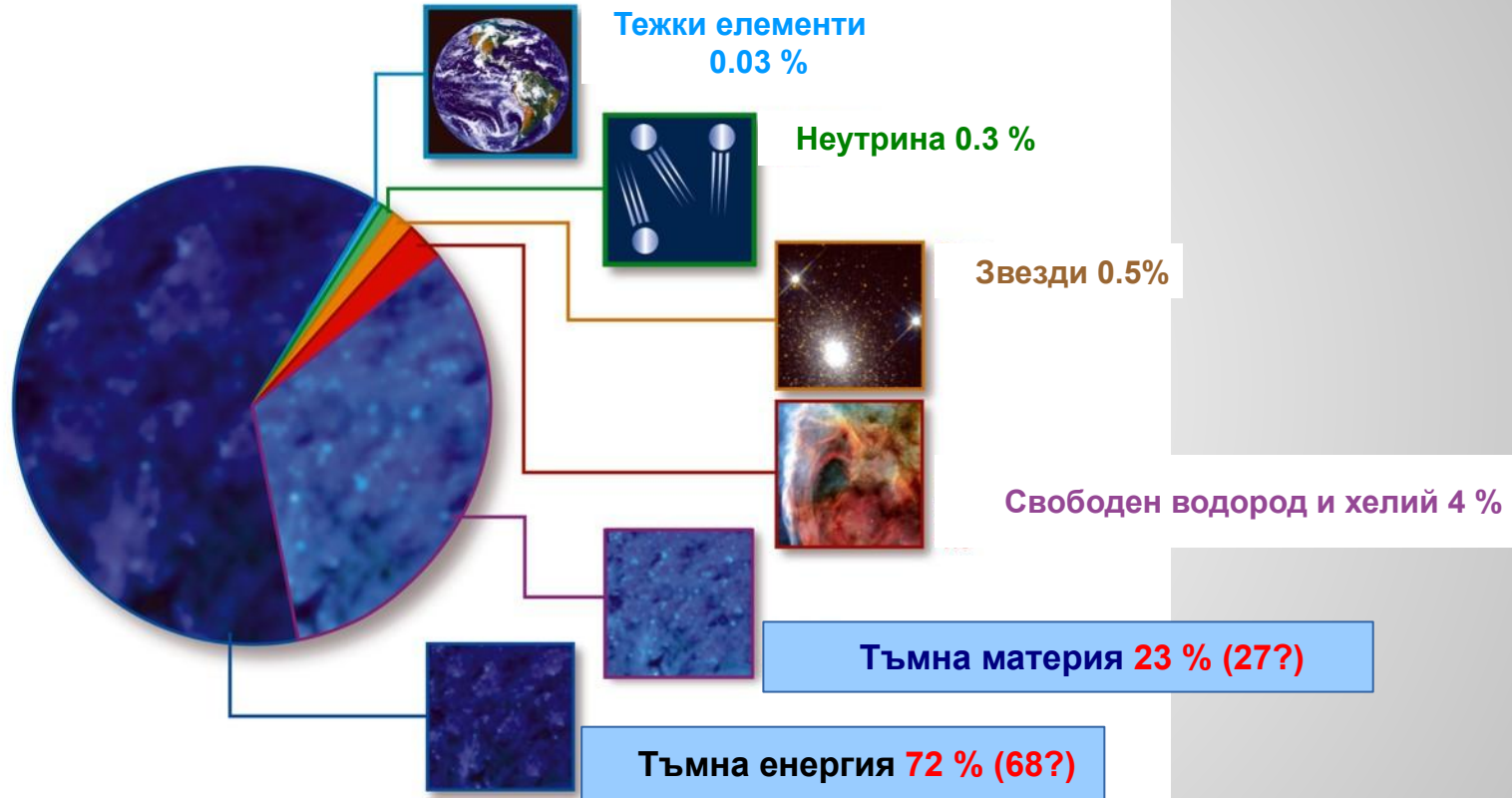
Румяна Хаджийска
ИЯИЯЕ - Българска академия на науките

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

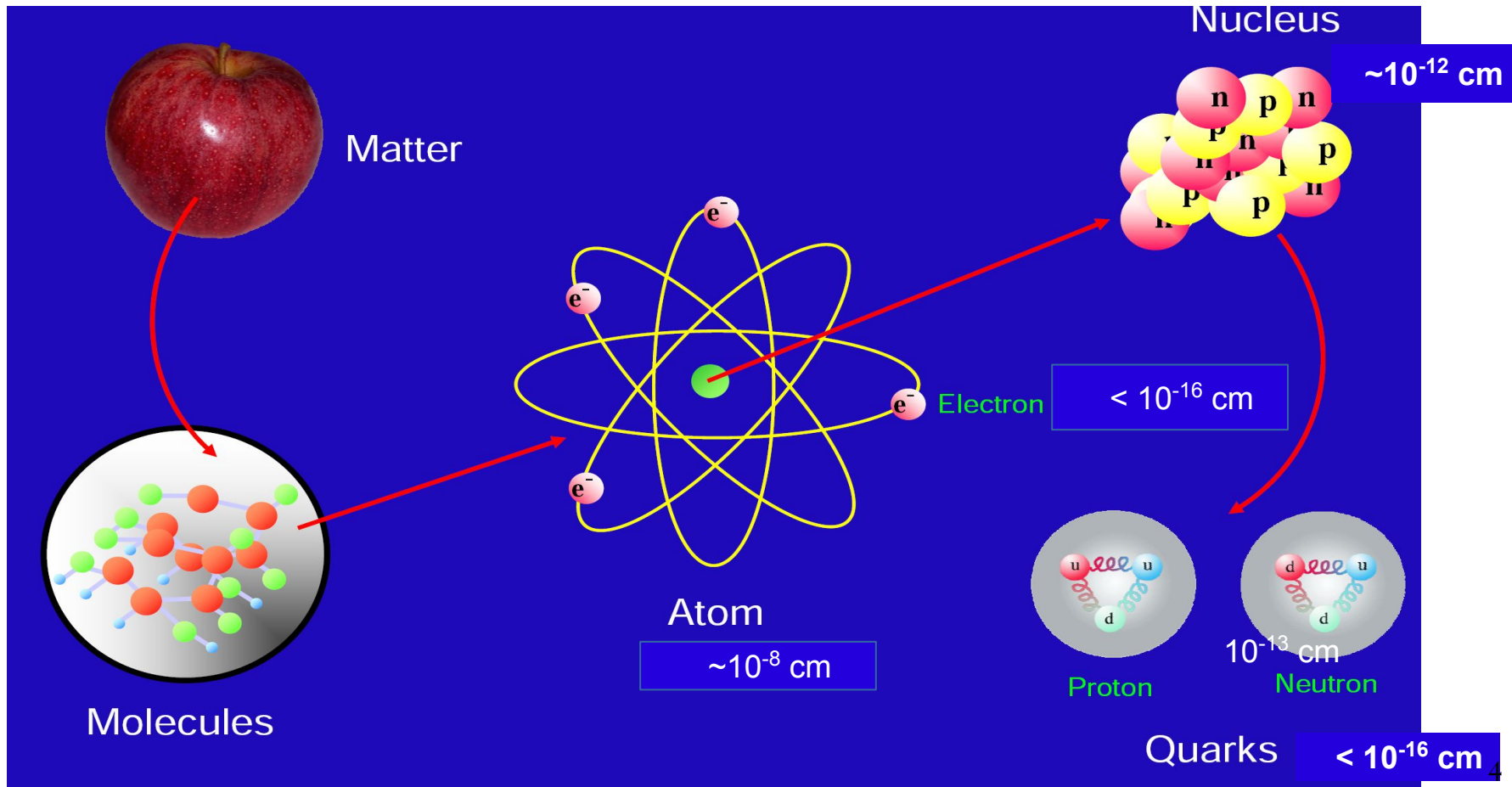
Под фундаментални обекти ние
имаме предвид, че те нямат
структура и не са съставени от
други по-малки обекти.



COMPOSITION OF THE COSMOS



СВЕТЪТ ОКОЛО НАС



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;*

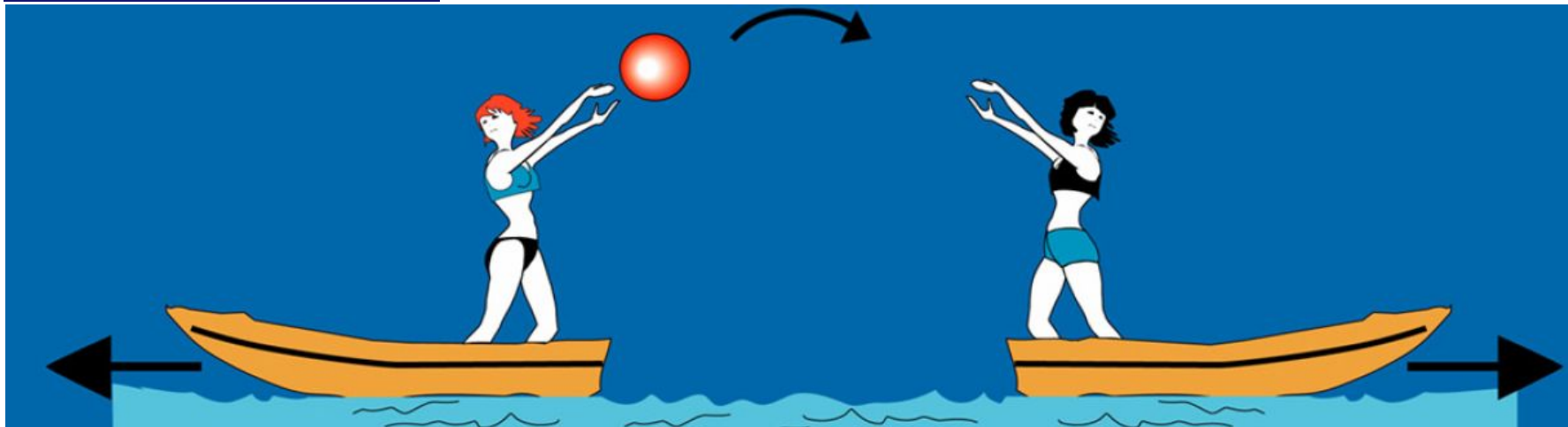
Гравитационно: *Задържа ни на Земята, Слънчева система,...*

Взаимодействащи си частици + преносители на взаимодействие

Стандартен модел на елементарните частици

СМ не включва гравитация!

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;

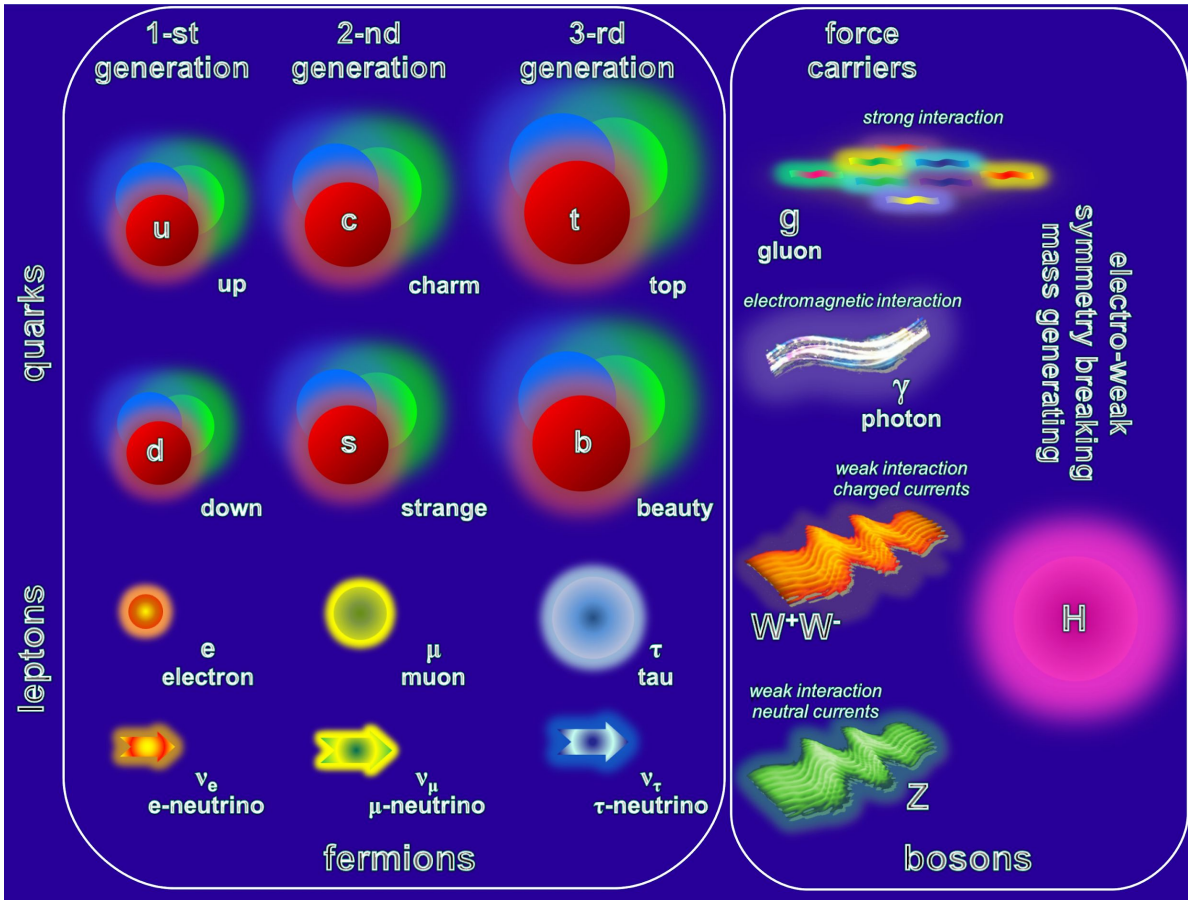
Гравитационно: Задържа ни на Земята, Слънчева система,...

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
- Маса на частиците - Хигс бозон (H)

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

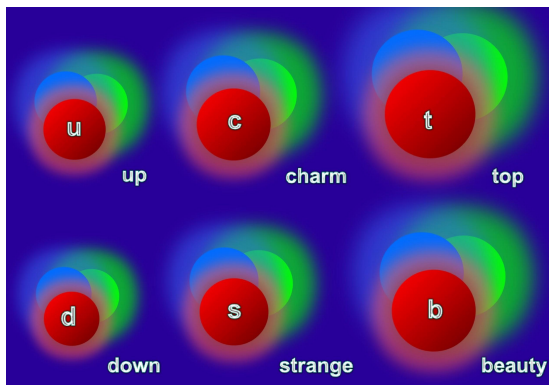
Кварков строеж на адроните



Murray Gell-Mann

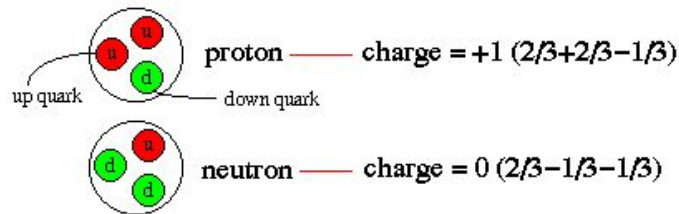
В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени като комбинация единствено на три фундаментални частици,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

Те постулират дробен електричен заряд на кварките. **Различни комбинации от три кварка изграждат барионите, а комбинациите от два кварка изграждат мезони.**

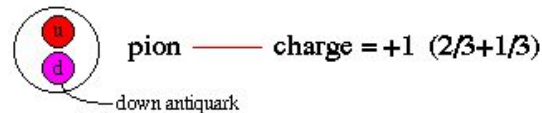


Atomic Nuclei = Combinations of Quarks

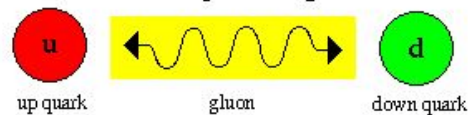
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

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

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

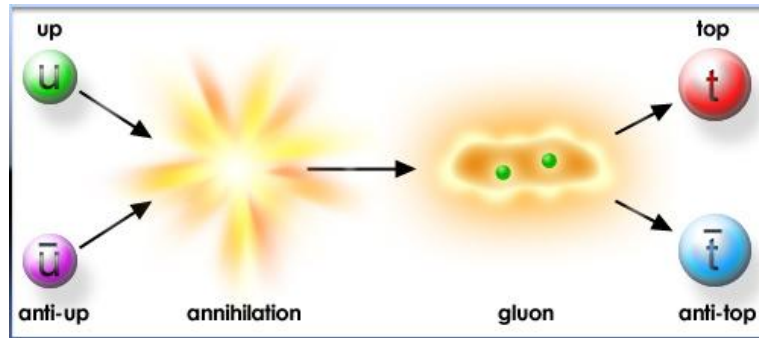
Но дали това е всичко?

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>



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;**

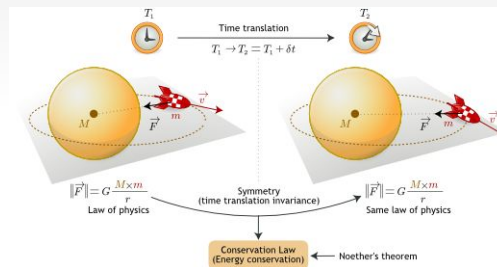
Енергията на една изолирана система е константа, или $dE/dt=0$



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 $L_i = r_i \times p_i$

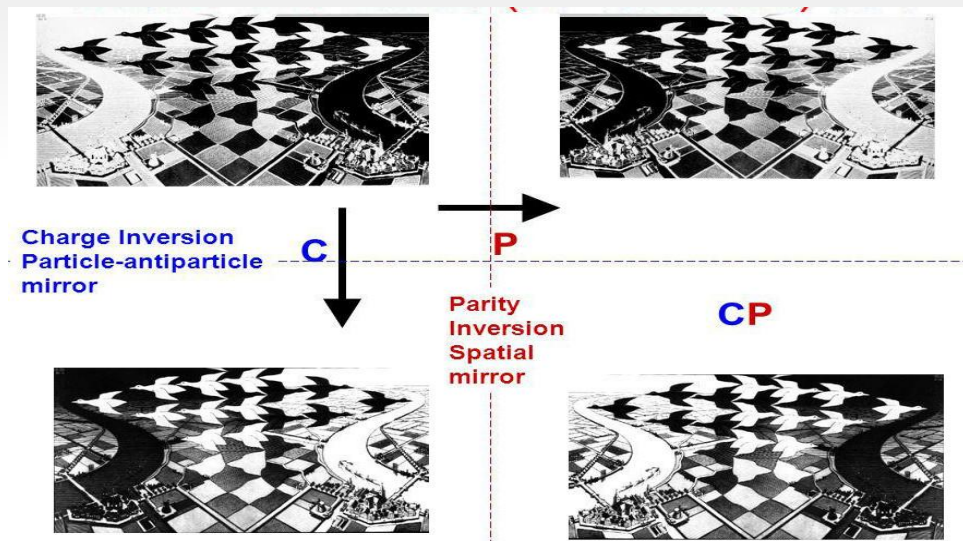


Дискретни симетрии

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

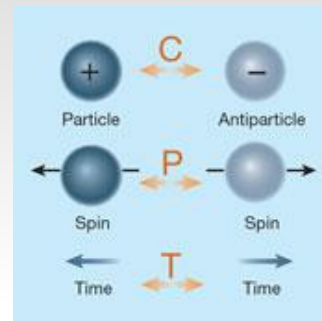
„C“ - зарядова четност, преобразуване на зарядите

„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



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)

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+)

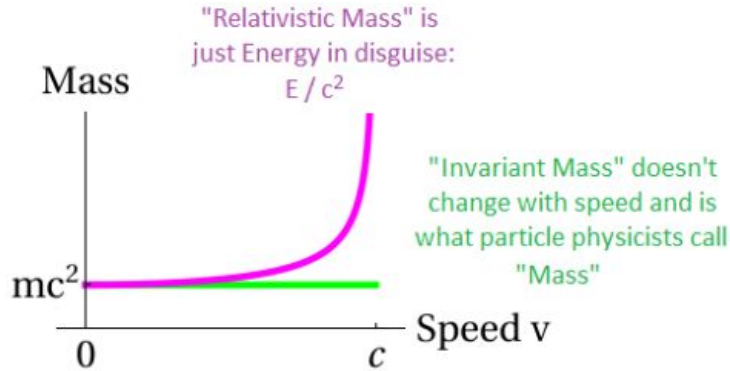
$$m_e = 9.1 \times 10^{-28} \text{ [g]} \quad (\text{GCS})$$

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

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.



What the Human Eye Can See

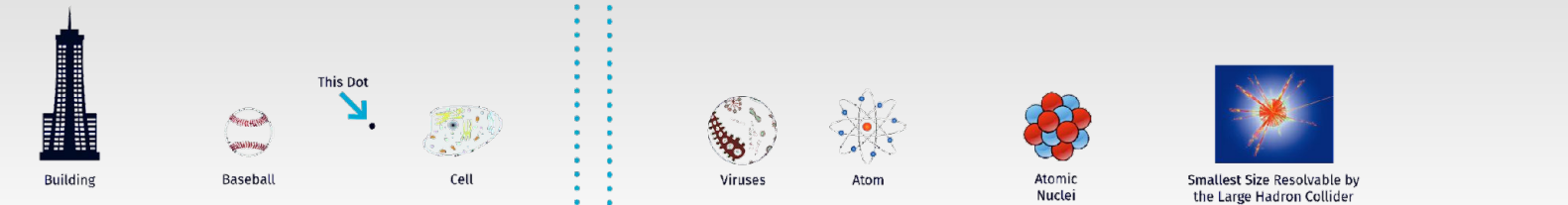
What CTA Will See

Wavelength in Metres

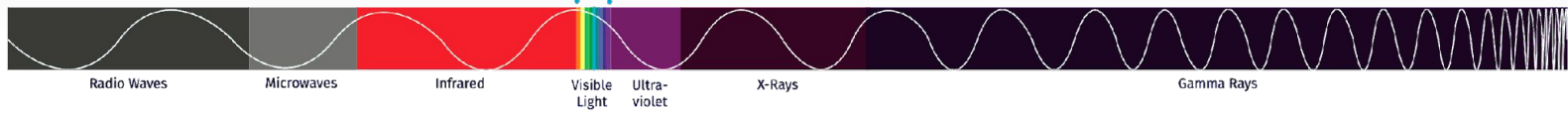
Electron Volts (eV)



Relative Wavelength Size



Spectrum



Sources

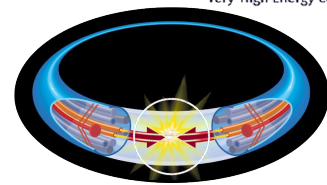
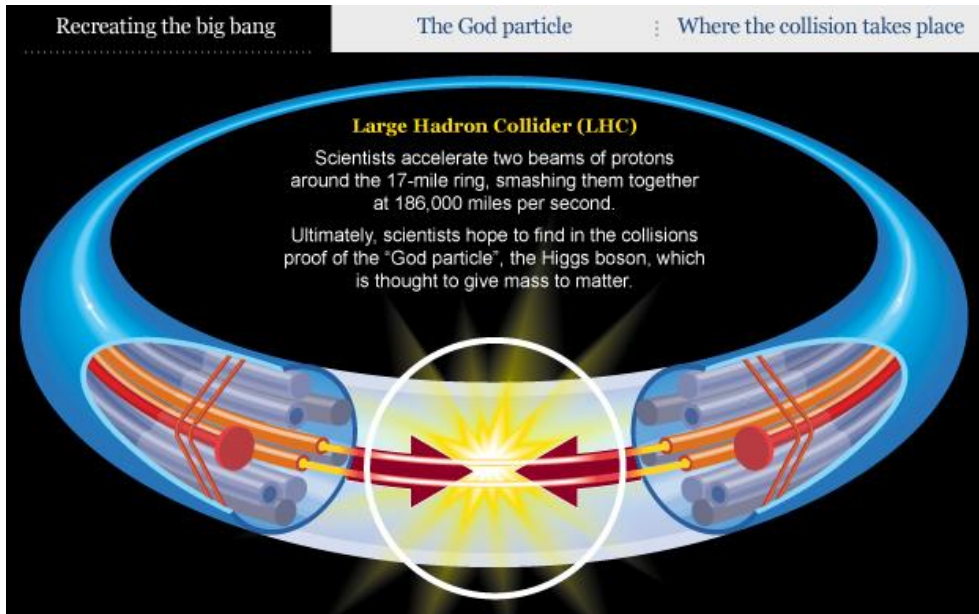


Image credits: Vecteezy.com, Dragonartz.net, NAOJ, NCI, CERN, NASA



- 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 до 2018:
 - $E = 13 \text{ [TeV]} = 2 \times 6.5 \text{ [TeV]}$ (2015 - 2018 г.)
- Най-висока енергия през 2022 и 2023
 - $E = 13.8 \text{ TeV}$
- Проектна енергия на LHC:
 - $E = 14 \text{ TeV}$

- 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.

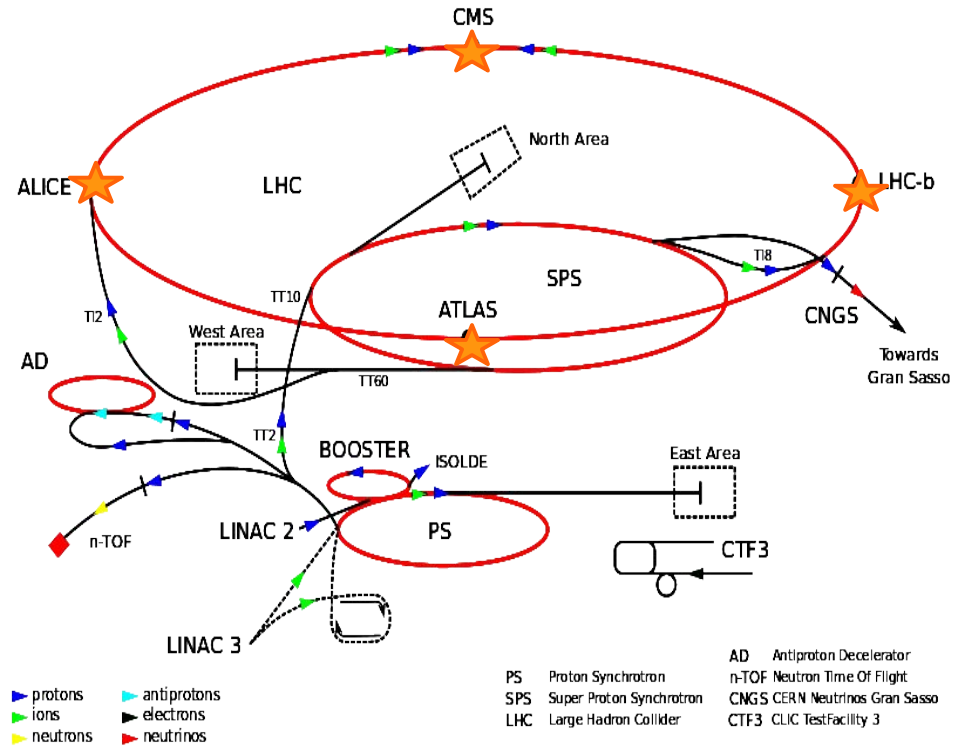


Големия адронен колайдер LHC

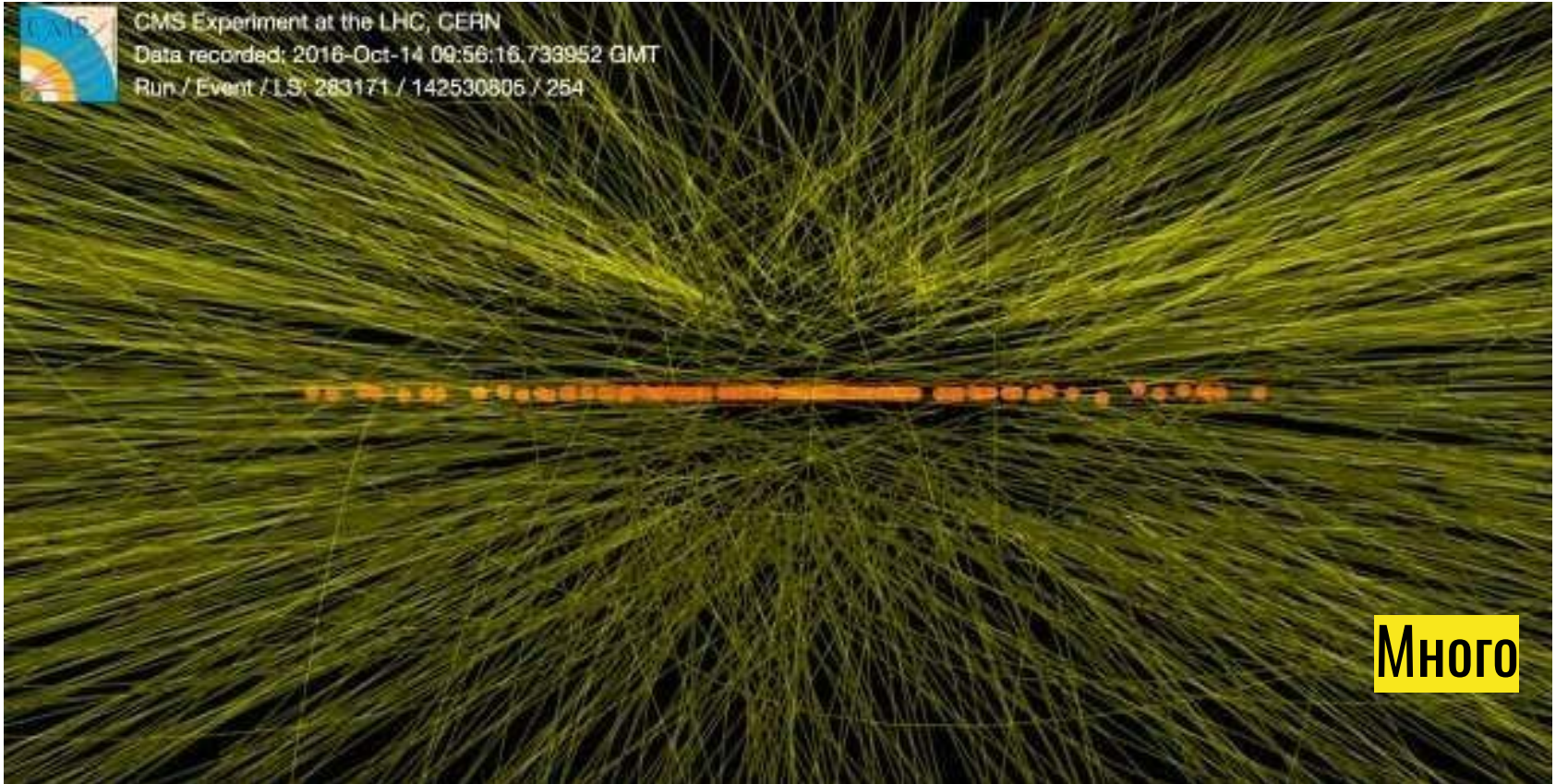


Построен на територията на Швейцария и Франция.
 Разположен е на около 100 м дълбочина.
Ускоряването на сноповете се постига чрез система от ускорители

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



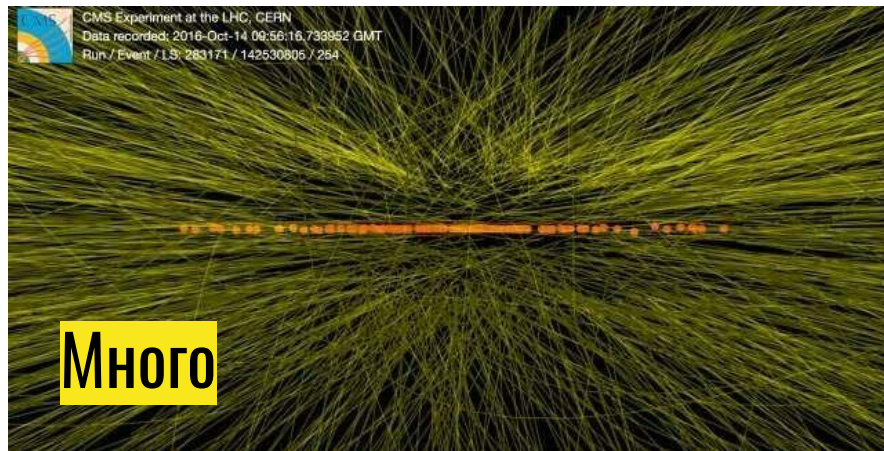
Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?



Колко частици могат да се родят при сблъсъка на протоните?

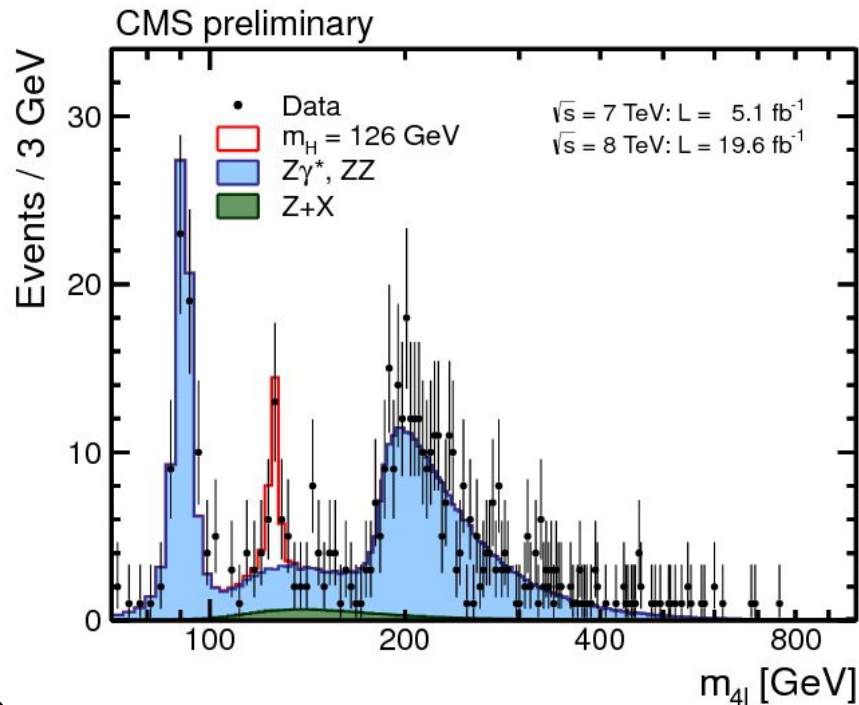
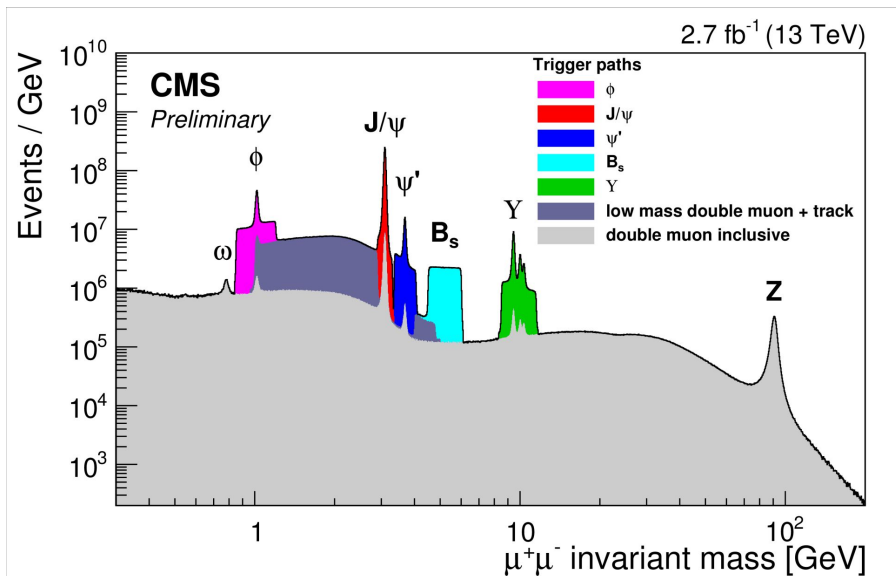


Как някои хора си представят откритието на нова частица.



Каква е действителността.

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

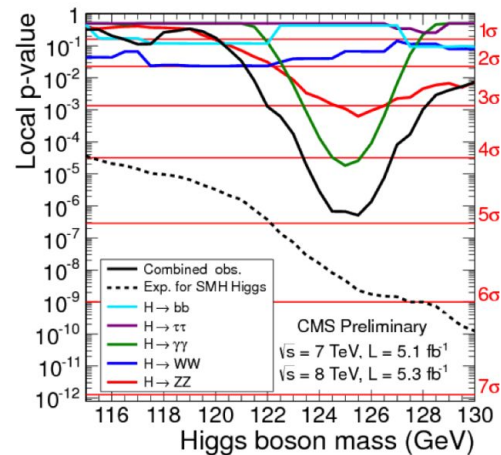
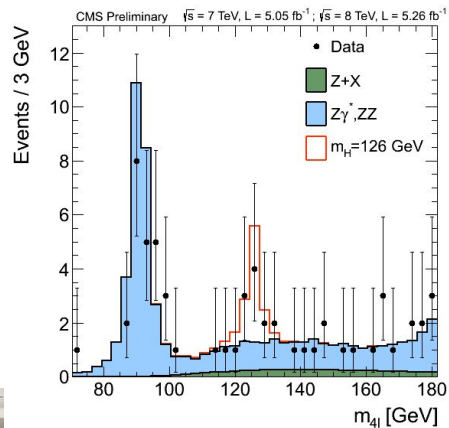
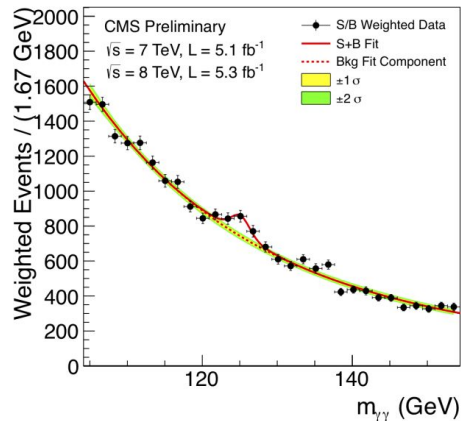


Да видим какво ще получите вие.



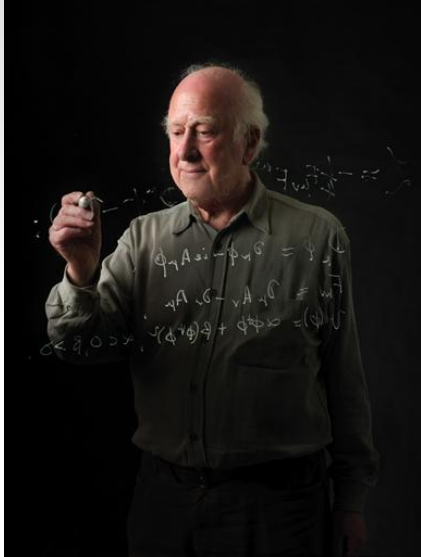
Higgs Boson Discovery – 2012

CMS & ATLAS



Credit: Weforum.org

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



Peter Higgs

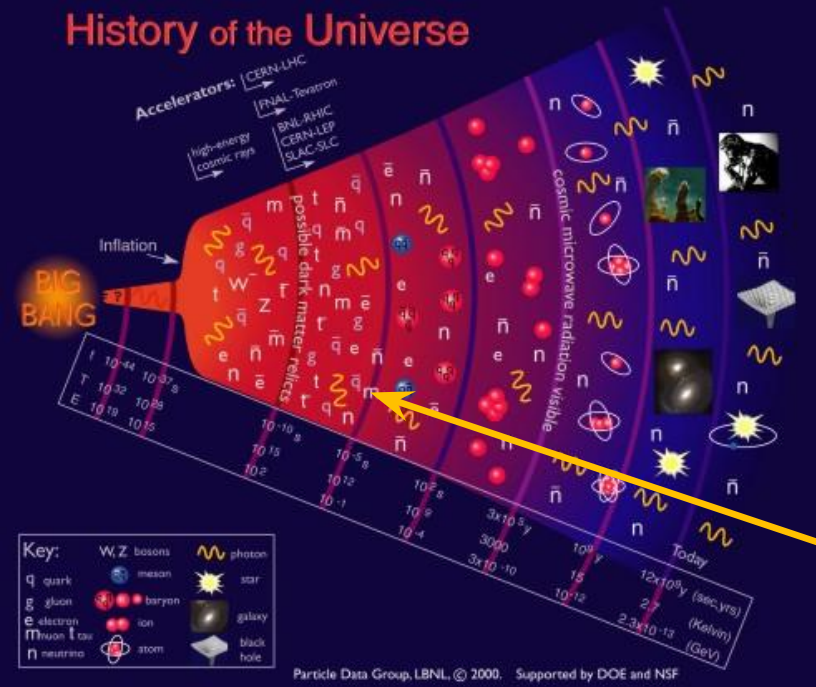
Credit: CERN PhotoLab



François Englert

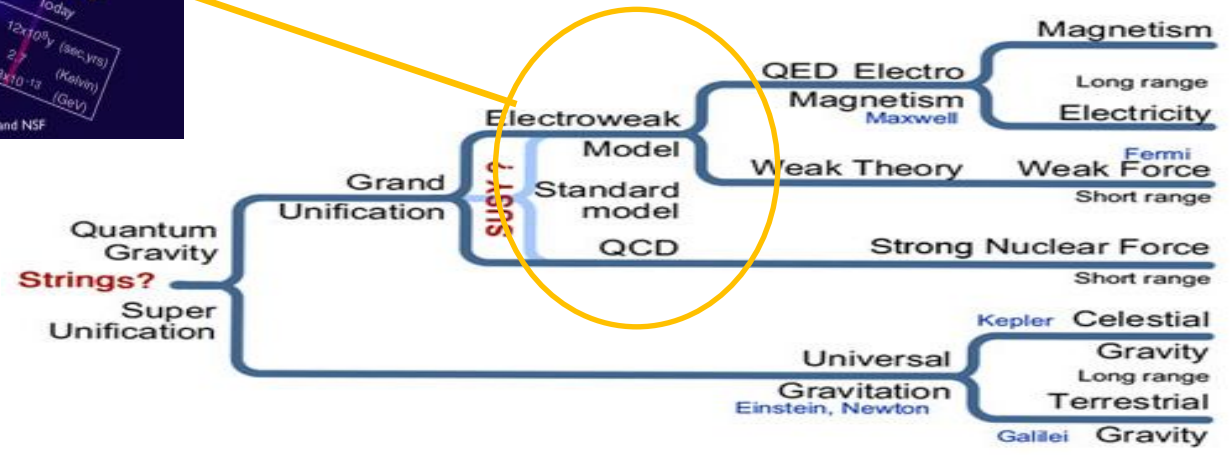
High Energy and Particle Physics Prize
by the European Physical Society 1977 awarded to
P. Higgs, F. Englert and R. Brout

History of the Universe



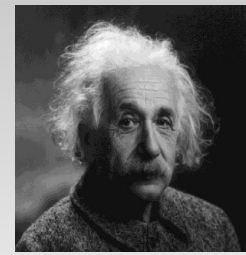
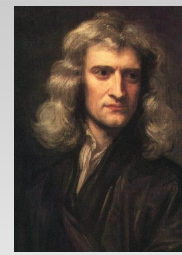
Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици в експеримента CMS на LHC

Граница на нашето познание до днес



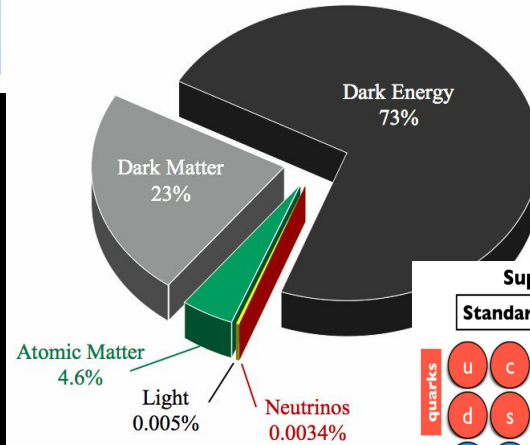
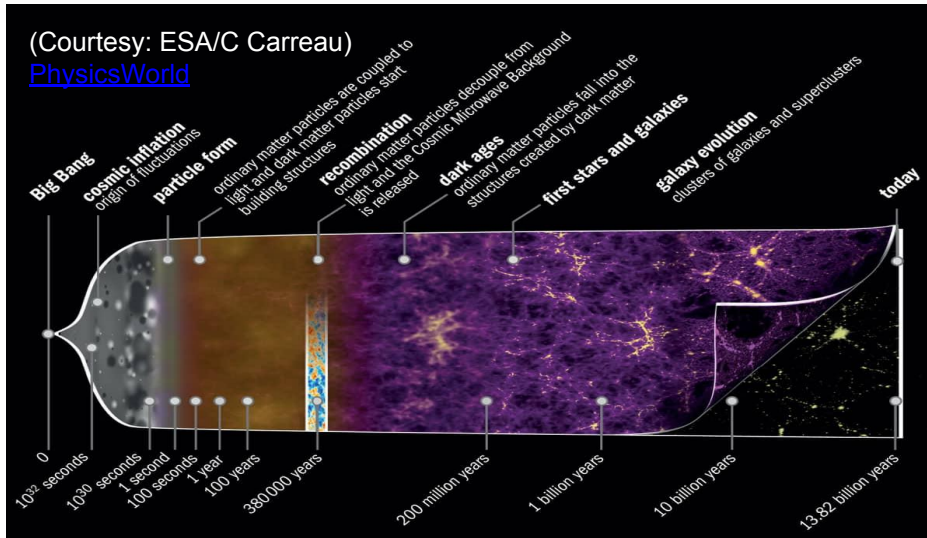
Отворени въпроси пред Стандартния Модел

- Как се определят масите на е.ч.? – Механизъм на Хигс
- Защо имаме 3 поколения елементарни частици?
- Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?
- От какво е съставена “тъмната материя” и “тъмната енергия” във Вселената?
- Свойствата на материята в първите мигове на Вселената? (кварк-глюонна плазма?)
- Съществуват ли допълнителните измерения?
- Има ли нова симетрия? SUSY?



$$F = ma \quad E = mc^2$$

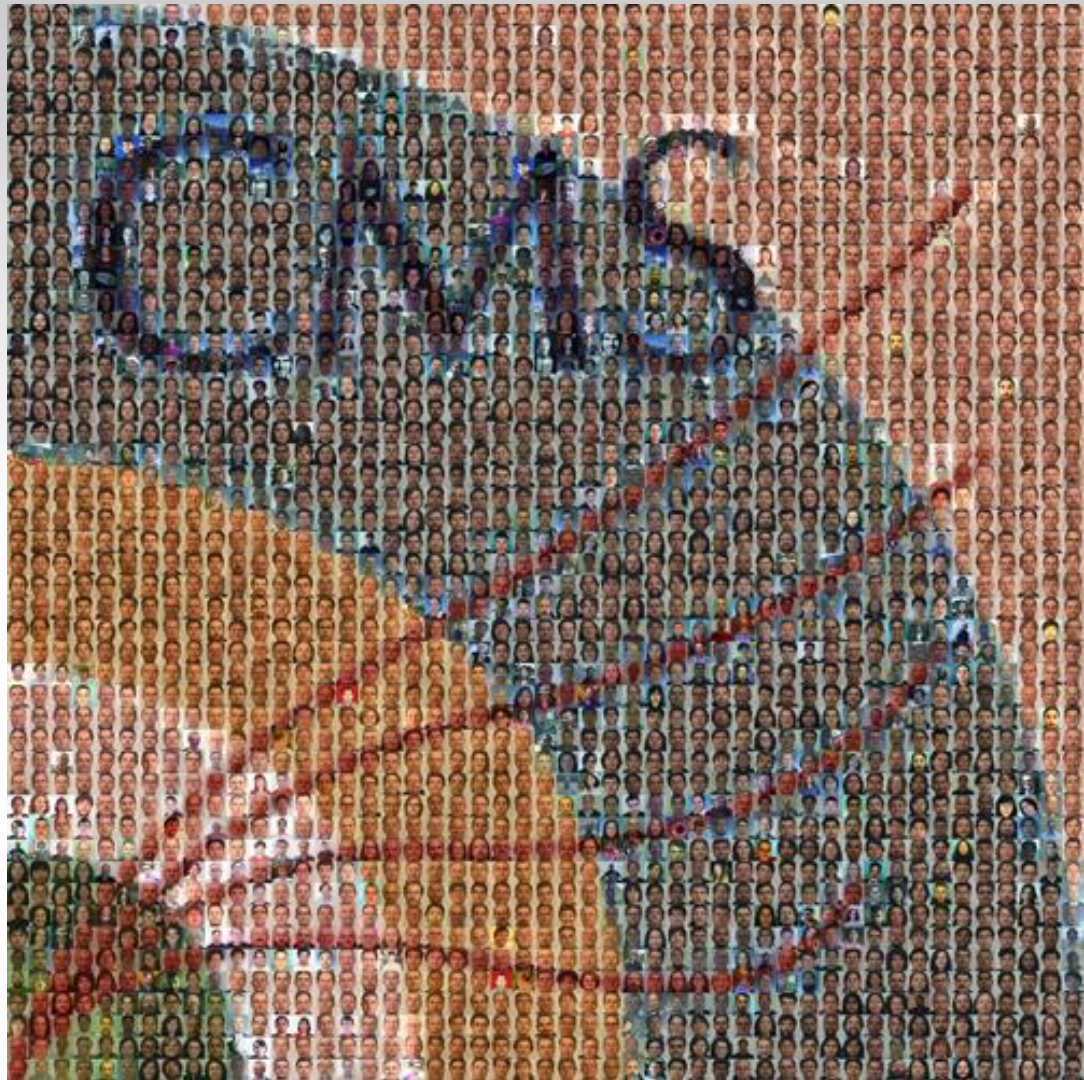
Всичко това е правилно. Но как един обект става масивен?



Supersymmetric particle content

Standard Model				Supersymmetry						
quarks	u	c	t	g	squarks	\tilde{u}	\tilde{c}	\tilde{t}	\tilde{g}	
	d	s	b	γ		\tilde{d}	\tilde{s}	\tilde{b}	$\tilde{\chi}_1^+$	$\tilde{\chi}_2^+$
leptons	e	μ	τ	W	sleptons	\tilde{e}	$\tilde{\mu}$	$\tilde{\tau}$	$\tilde{\chi}_1^0$	$\tilde{\chi}_2^0$
	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z		$\tilde{\nu}_e$	$\tilde{\nu}_\mu$	$\tilde{\nu}_\tau$	$\tilde{\chi}_3^0$	$\tilde{\chi}_4^0$
force carriers				force carriers						
higgs sector (minimally extended)				higgs sector (minimally extended)						
h				h						
H				H						
A				A						
H^\pm				H^\pm						
H^0				H^0						

$\tilde{\chi}$: combinations of the partners to the gauge bosons and higgs fields



*Б
Л
А
Г
О
Д
А
Р
Я
!*

Взаимодействия

Силни

- глюон, $M_g = 0$
- Относителна сила - 1

Електромагнитни:

- фотон, $M_\gamma = 0$
- Относителна сила – 10^{-2}

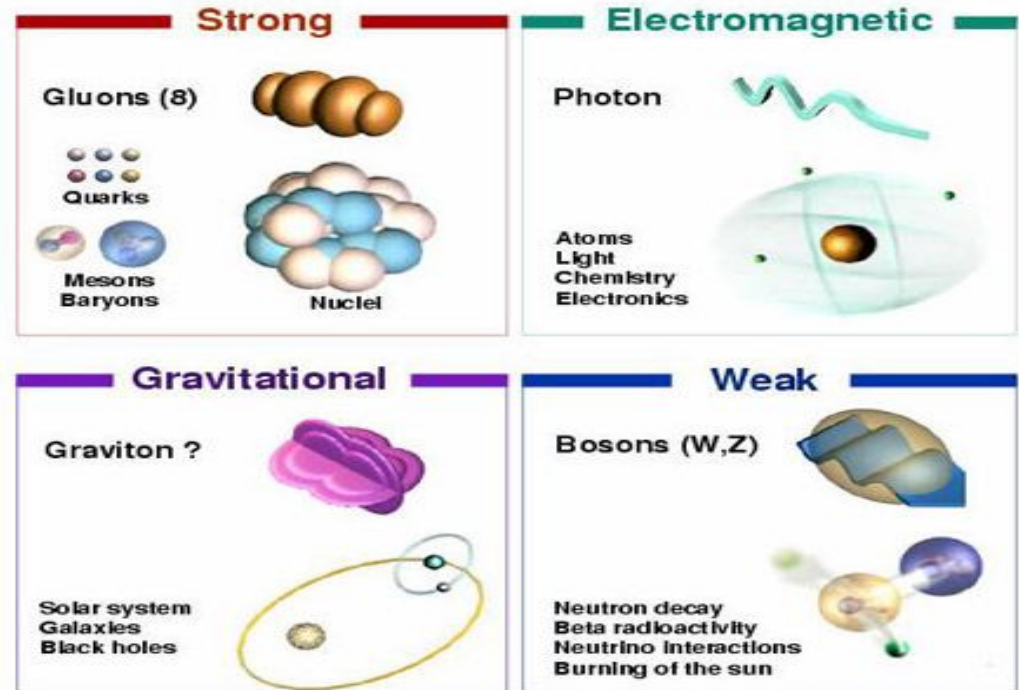
Слаби

- W,Z бозони
- $M_W = 80.43 \text{ GeV}$,
- $M_Z = 91.19 \text{ GeV}$
- Относителна сила – 10^{-7}

Гравитационно

- **гравитон ?**, $M=0$, **спин 2**

Всички преносители са бозони – **спин 1**



The particle drawings are simple artistic representations

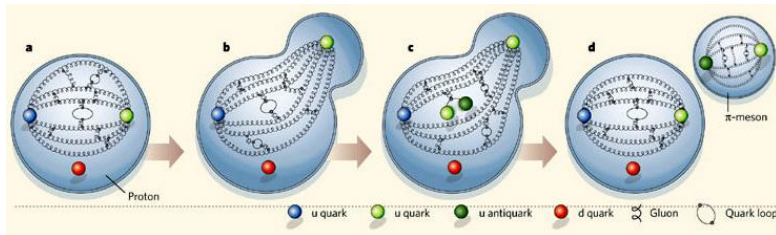
Кварки, глюони и цветен заряд

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

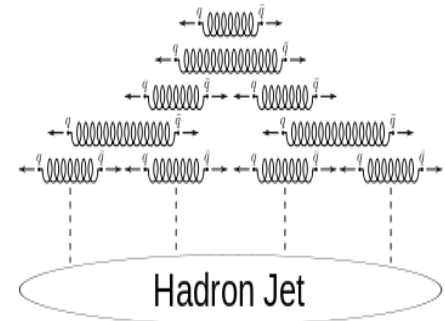
Кварките и глюоните имат цветни заряди. **Композитните частици, изградени от кварки са цветово неутрални.** Цветните заряди и взаимодействия се държат различно от електромагнитните. Кварките не могат да съществуват индивидуално. При опит да раздалечим два кварка, силната на цветното взаимодействие нараства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

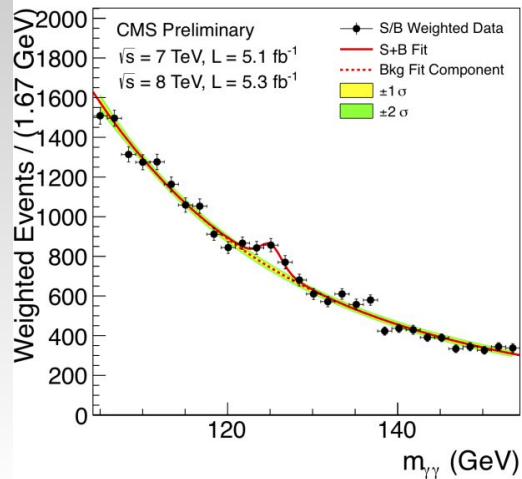
Партони -- кварки + глюони

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./

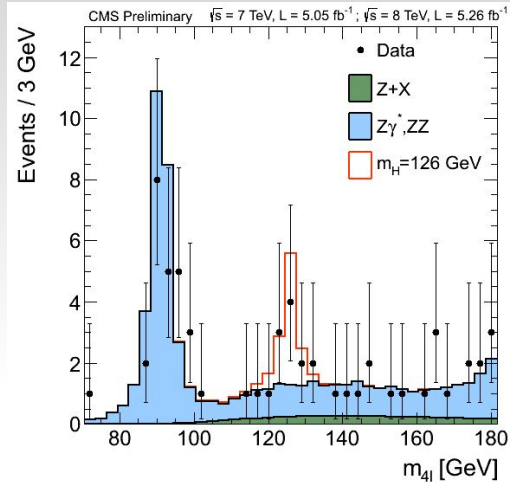


Новите адрони, родени при този процес (адронизация) се групират по направление на импулса на високо енергетичните кварки – образуват се „адронни струи“ които се регистрират в детектора

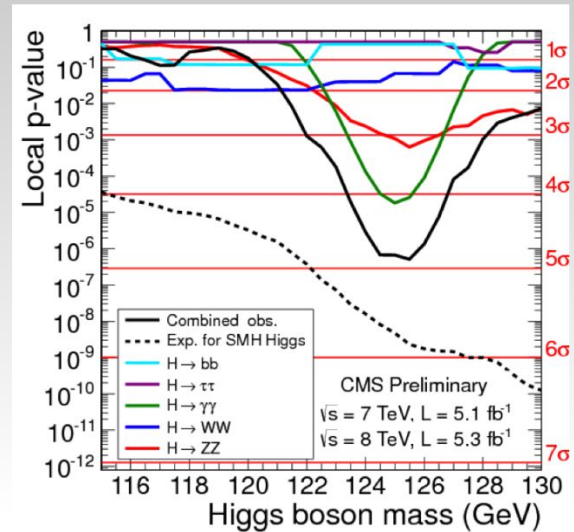




Di-photon ($\gamma\gamma$) invariant mass distribution for the CMS data of 2011 and 2012 (black points with error bars). The data are weighted by the signal to background ratio for each sub-category of events. The solid red line shows the fit result for signal plus background; the dashed red line shows only the background.



Distribution of the four-lepton reconstructed mass for the sum of the $4e$, 4μ , and $2e2\mu$ channels. Points represent the data, shaded histograms represent the background and un-shaded histogram the signal expectations. The distributions are presented as stacked histograms. The measurements are presented for the sum of the data collected at centre of mass energies of 7 TeV and 8 TeV.



The observed probability (local p-value) that the background-only hypothesis would yield the same or more events as are seen in the CMS data, as a function of the SM Higgs boson mass for the five channels considered. The solid black line shows the combined local p-value for all channels.