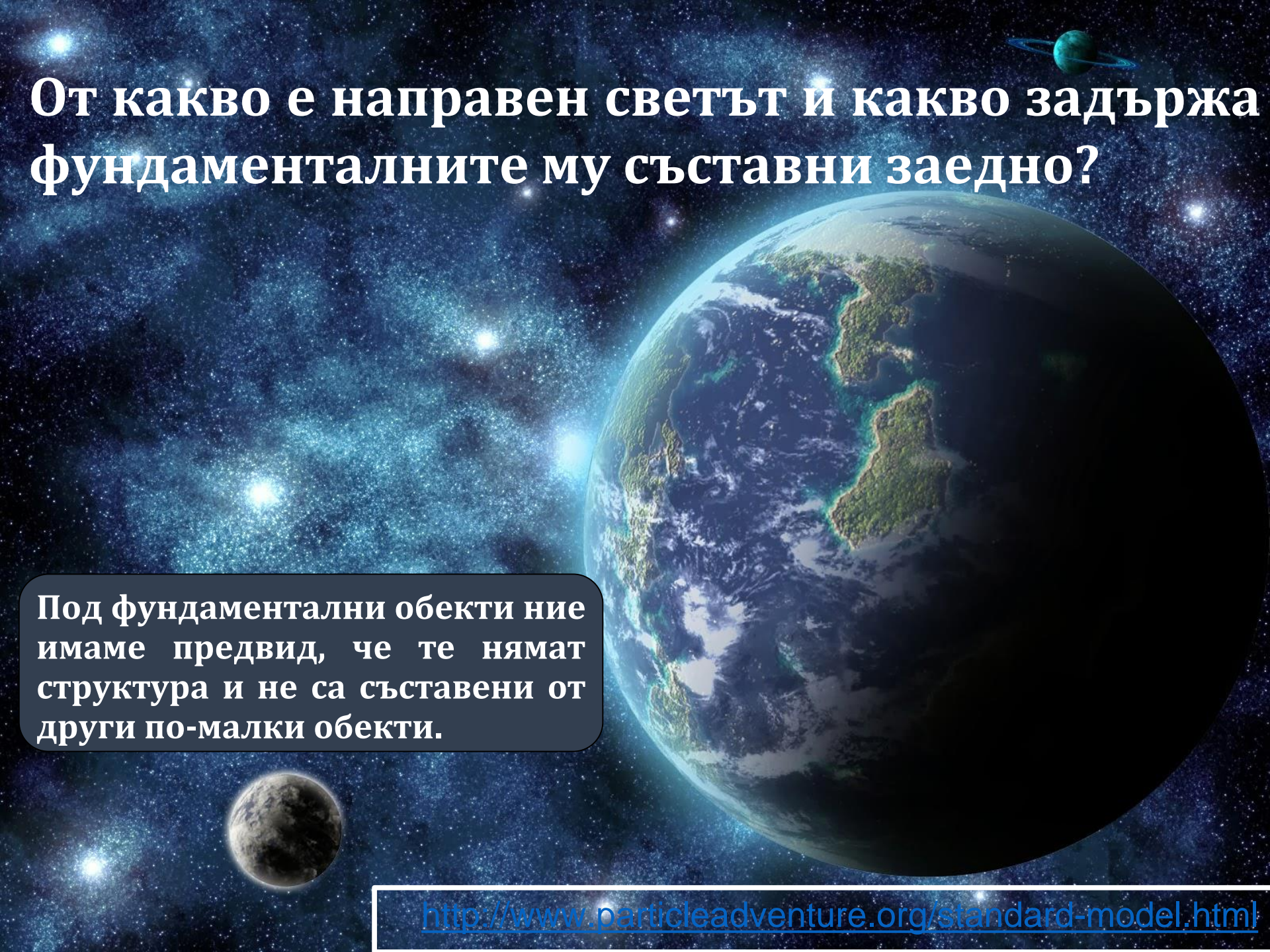


Въведение във физиката на елементарните частици

Мариана Шопова

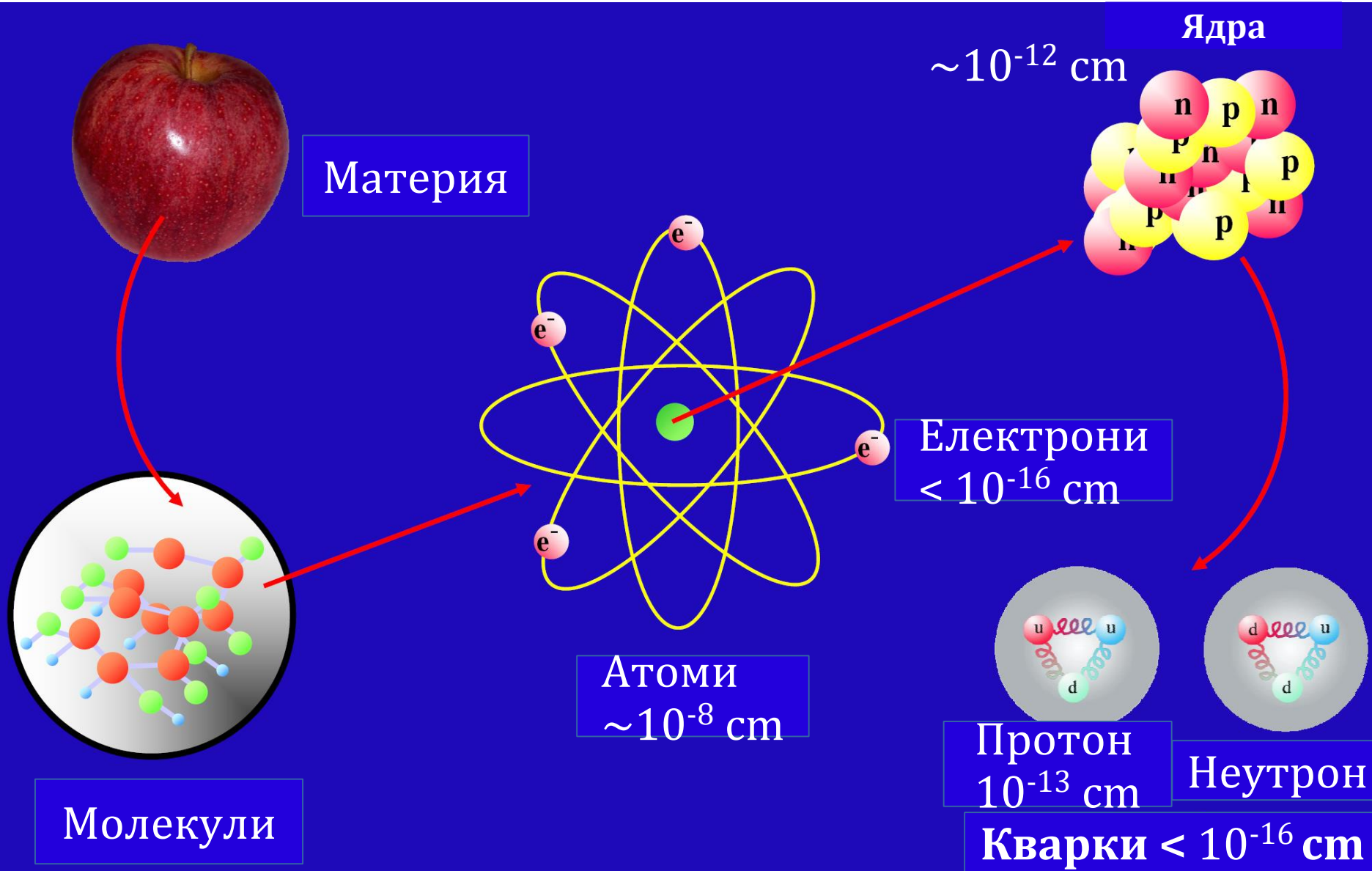
*ИЯИЯЕ, Българска академия на науките
Пловдивски Университет „Паусий Хилендарски“*



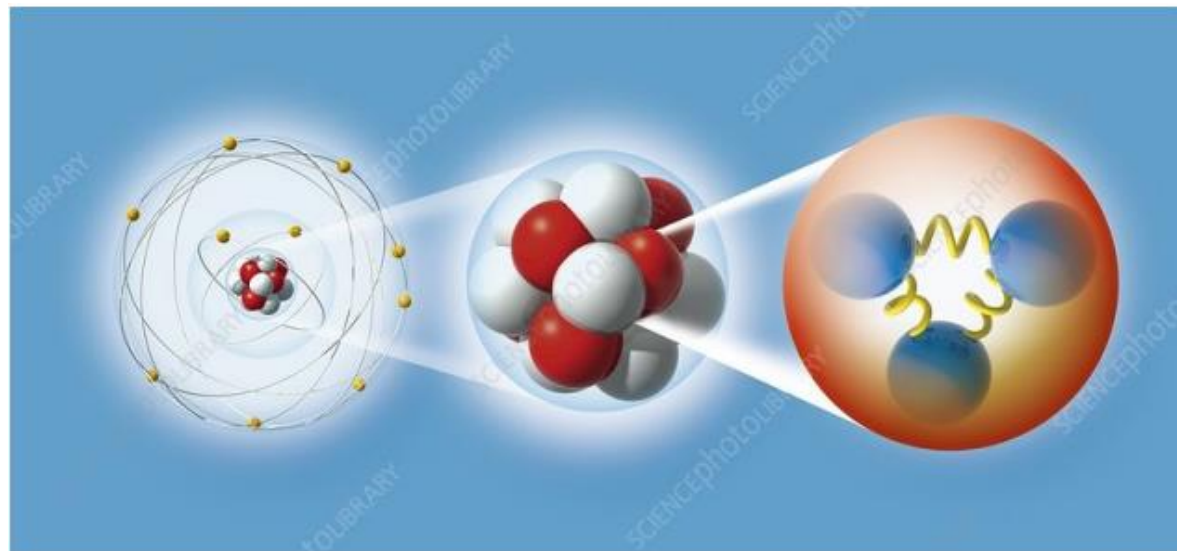
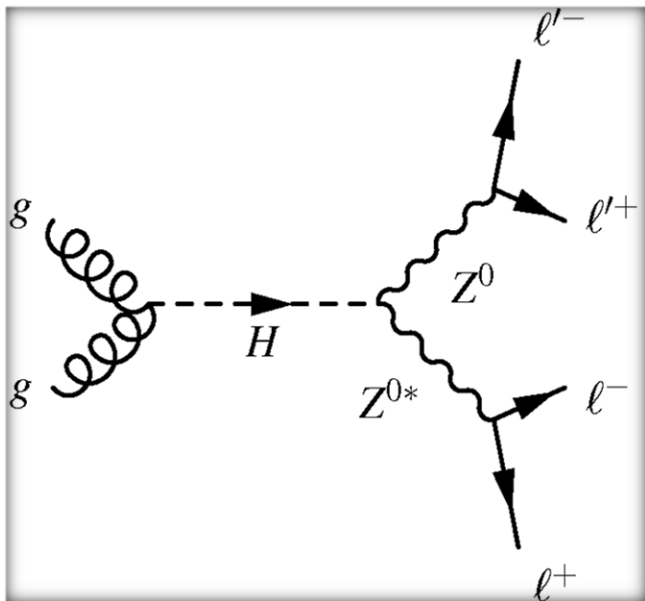
От какво е направен светът и какво задържа фундаменталните му съставни заедно?

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

Светът около нас



Физика на елементарните частици



Източник: <https://www.sciencephoto.com/media/669750/view/structure-of-matter-illustration>

изучава фундаменталните съставни части на материята и взаимодействията между тях.

Симетрията като обединяващ принцип



Еми Ньотер
(Emmy Noether)

Връзка между глобалните симетрии и законите за запазване

- **Пространствени симетрии**

Хомогенно и изотропно пространство-време -> маса, спин, ЗЗЕ, ЗЗИ, ЗЗМИ

- **Вътрешни симетрии**

Закон за запазване на баионното число, лептонно число, ...

- **Глобални симетрии**

Закон за запазване на електричния заряд, цвета, ...

- **Локални/калибровъчни симетрии**

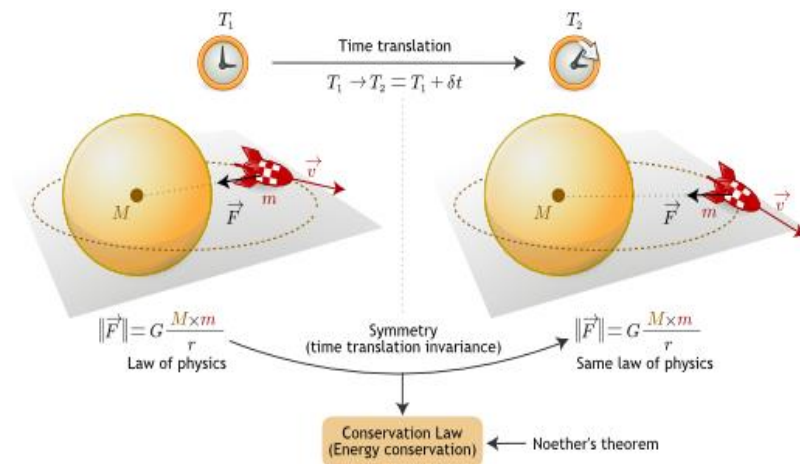
Преносители на взаимодействие

- **Дискретни симетрии**

Пространствено отражение

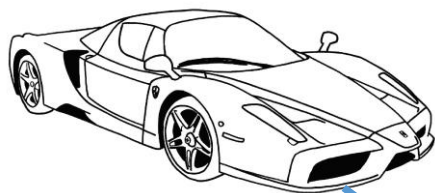
Пространствено отражение

Зарядово спрягане

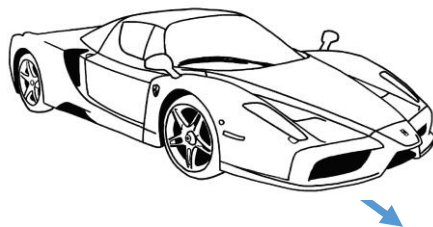


Непрекъснати симетрии

Транслация в пространството



непрекъсната



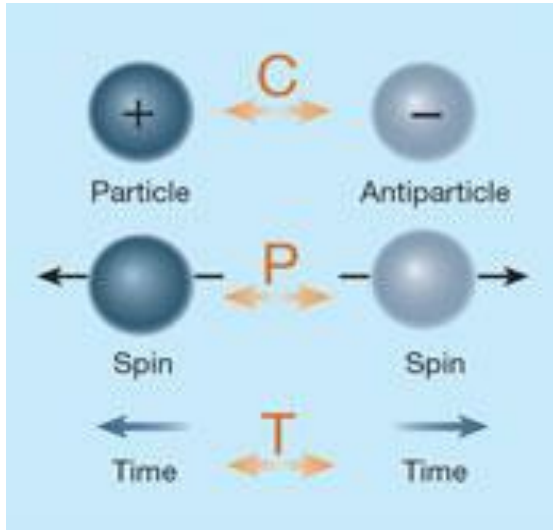
Въртене в пространството



непрекъсната

Ако симетрията остава инвариантна \Rightarrow запазване на импулса и момента на импулса

Дискретни симетрии



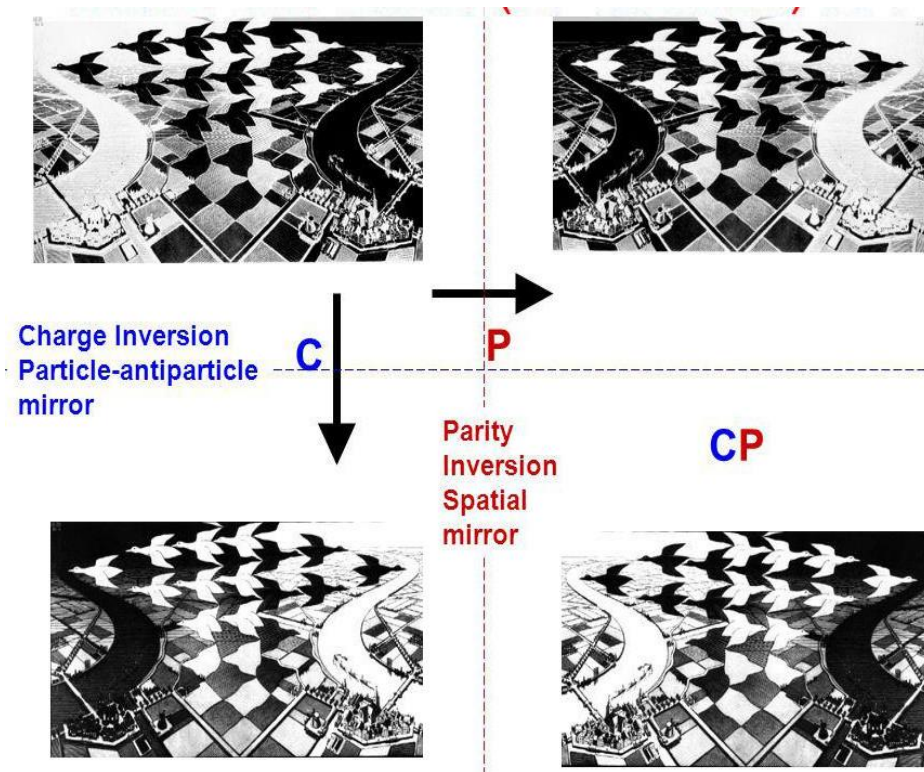
- „P“ - **пространствена четност**, преобразование на координатите, огледално отражение, аксиалните вектори запазват посоката си, докато полярните я променят противоположно

- „C“ - **зарядова четност**, преобразование на зарядите
- „T“ - **временна четност**, обръщане на посоката на времето

Нарушение на симетриите

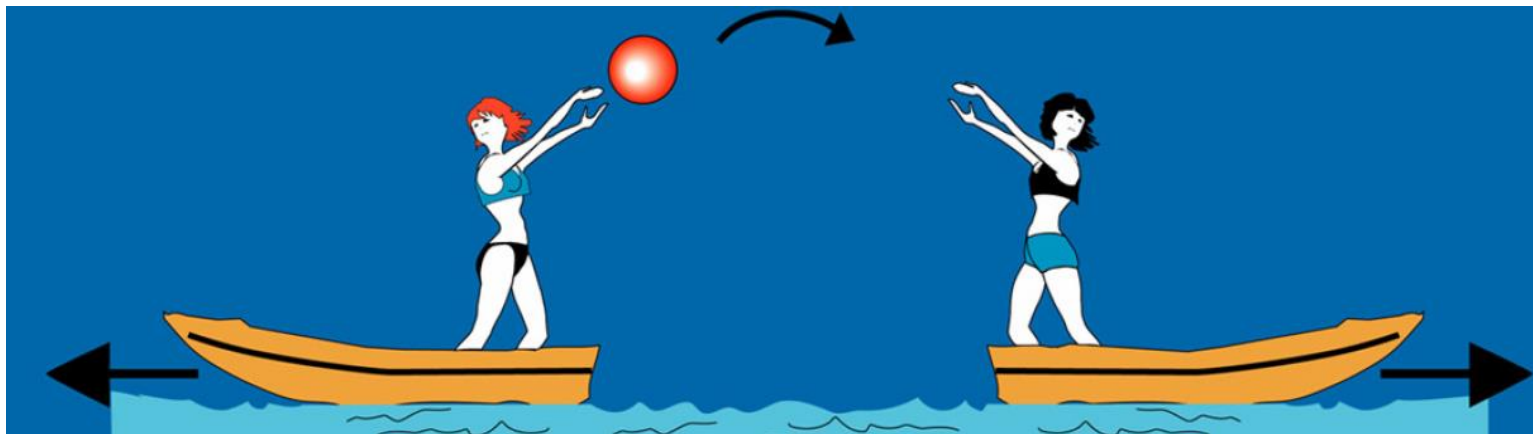
Общата CPT се запазва

Слабите взаимодействия нарушават **P**, а също и комбинираната **CP** инвариантност.



credit: Chris Parkes <http://slideplayer.com/slide/774084/>

Фундаментални 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

- Три поколения фермиони:

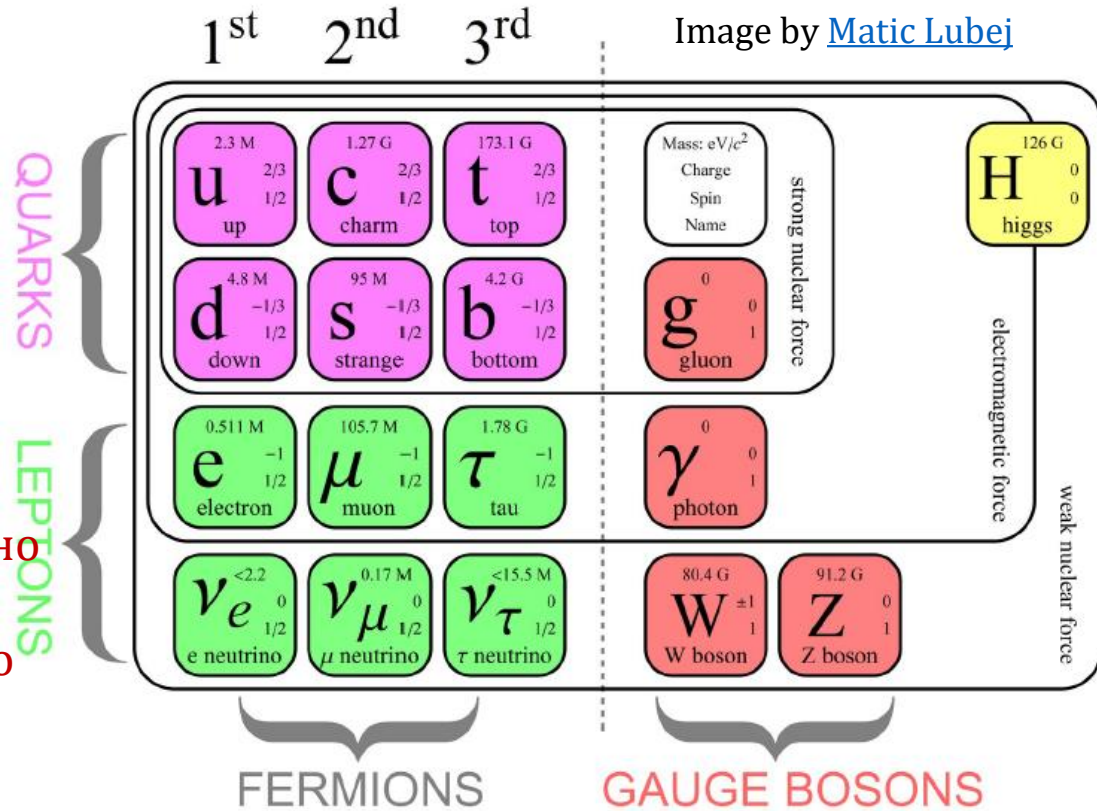
- Кварки
- Лептони

- Четири фундаментални взаимодействия и техните преносители

- **Глуони** - Силно
- **Фотони** - Електромагнитно
- **W⁺, W⁻ и Z** - Слабо
- **Гравитон** - гравитационно
 - не се разглежда в СМ

- Маси на частиците - **Хигс бозон (H)**

- Има въпроси, на които не може да даде отговор → нискоенергетично приближение на по-обща теория



Взаимодействия

Силни

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

Електромагнитни:

- фотон, $M_g = 0$
- Относителна сила - 10^{-2}

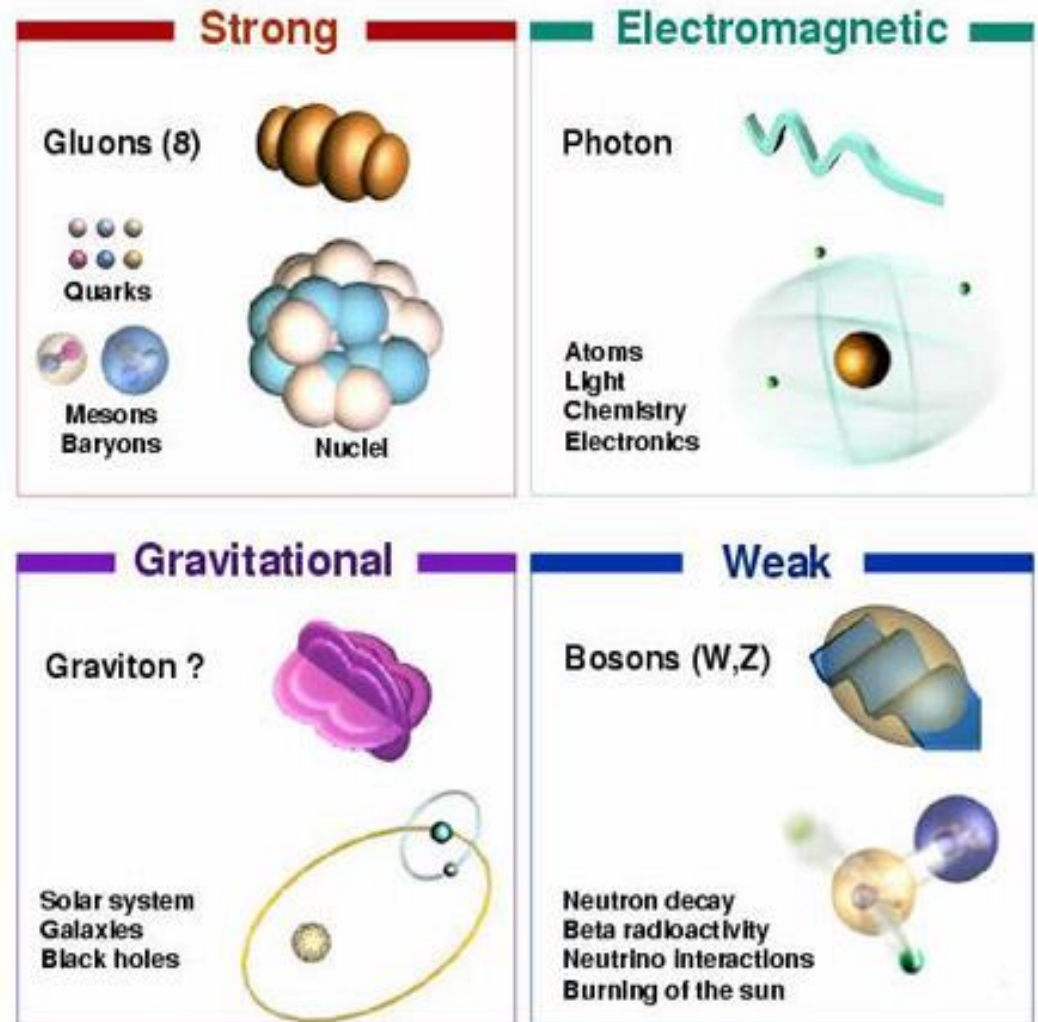
Слаби

- 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*
- *Относителна сила - 10^{-38}*

Всички преносители са бозони - *спин 1*



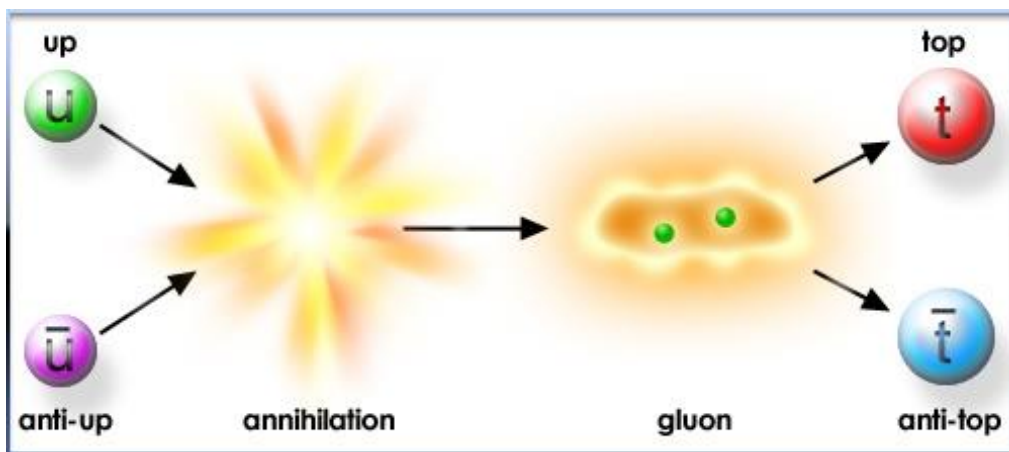
The particle drawings are simple artistic representations

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.



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



Когато взаимодействат частица и античастица те анихилират.

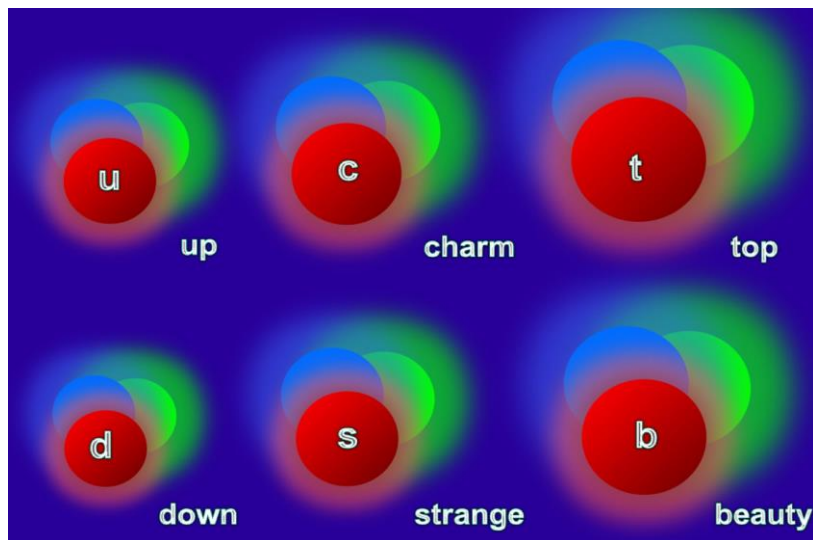
Кварков строеж на адроните



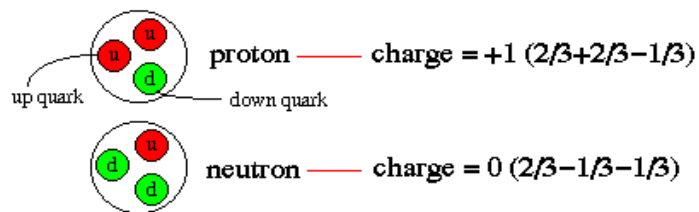
Murray Gell-Mann

В средата на миналия век, учените откриват стотици нови частици. Мъри Гел-Ман (**Murray Gell-Mann**) и Джордж Цвайг (**George Zweig**) изграждат теорията за кварковия строеж на адроните, като предполагат, че всички тези частици могат да бъдат обяснени **като комбинация единствено на три фундаментални частици**, които те наричат **кварки**. Те постулират дробен електричен заряд на кварките. **Различни комбинации от три кварка изграждат барионите, а комбинациите от два кварка изграждат мезони.**

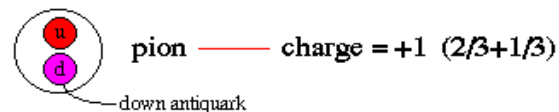
Atomic Nuclei = Combinations of Quarks



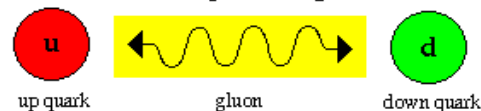
Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



What binds quarks together?



the strong force carried by gluons

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

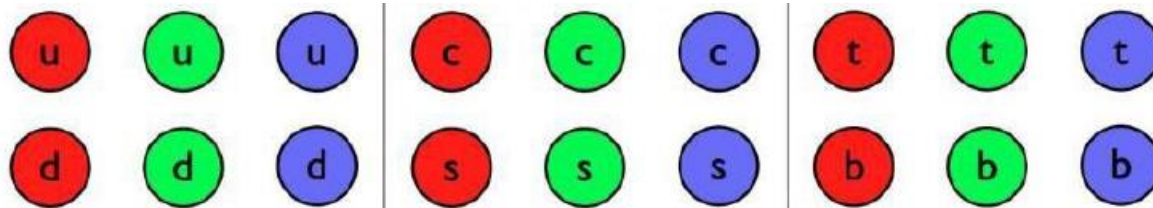
Кварки, глюони и цветен заряд

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

- **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.

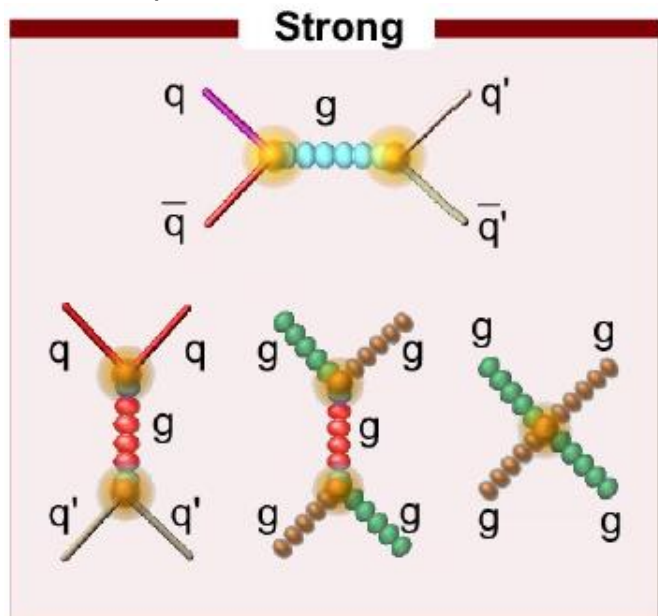
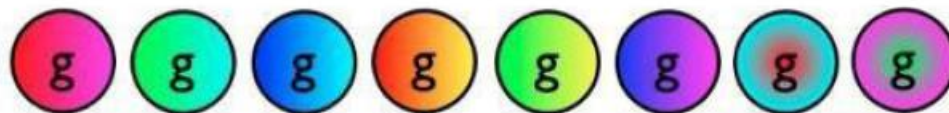
Силни взаимодействия

Квантова хромодинамика



- Цвет – „силен“ заряд
- Кварките има 3 цвята – **червен**, **син** и **зелен**

- Глуоните (преносители на взаимодействието) също имат цвят – 8 цвята



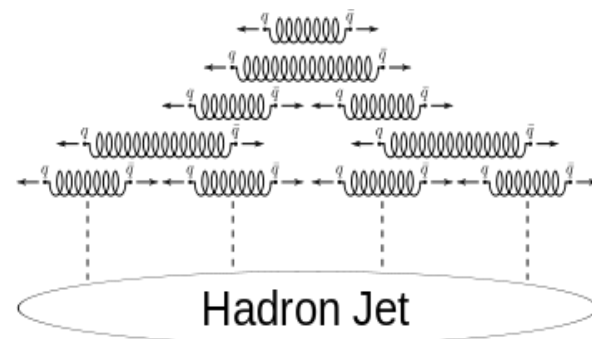
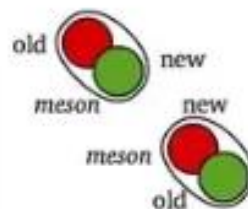
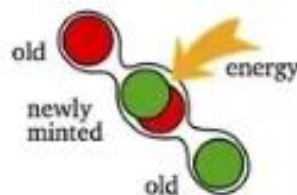
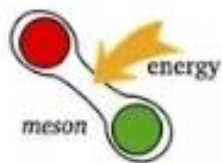
Range ~ 10^{-15} m, relative strength = 1

- Глуоните нямат маса
- Запазва аромата на кварките
- Асимптотична свобода

Квантова хромодинамика удържане (confinement)

УДЪРЖАНЕ: цветните частици са ограничени в рамките на безцветни адрони поради поведението на цветните сили при големи разстояния

Силата на привличане между цветните частици нараства с разстоянието → нарастване на потенциалната енергия → раждане на кварк-антикваркови двойки, което неутрализира цвета → формиране на безцветни адрони (**адронизация**)



Фигурите са от

<https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-5f56c16ebb060ddd52eaf60dd456b527.webp> и https://en.wikipedia.org/wiki/Color_confinement

УДЪРЖАНЕ, АДРОНИЗАЦИЯ: свойства, заключени от наблюдение. До сега, свойствата на цветните сили на големи разстояния нямат точно математическо описание в КХД

Кварки – основни характеристики

https://pdg.lbl.gov/2023/listings/contents_listings.html

Properties	Up (u)	Down (d)	Charm (c)	Strange (s)	Top (t)	Bottom (b)
Mass	2.16 MeV	4.67 MeV	1.27 GeV	93.4 MeV	172.69 GeV	4.18 GeV
Q-charge in unites of (e)	2/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3	-1/3
B-Baryon number	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
C-charmness	0	0	+1	0	0	0
S-strangeness	0	0	0	-1	0	0
b-bottomness	0	0	0	0	0	-1
T-topness	0	0	0	0	+1	0
S-spin	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
I-isospin	1/2	1/2	0	0	0	0
I_z - isospin in z-direction	1/2	-1/2	0	0	0	0
P-parity	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Дискретни симетрии

Във физиката на елементарните частици – обръщат се вътрешните квантови числа.

Заредени състояния

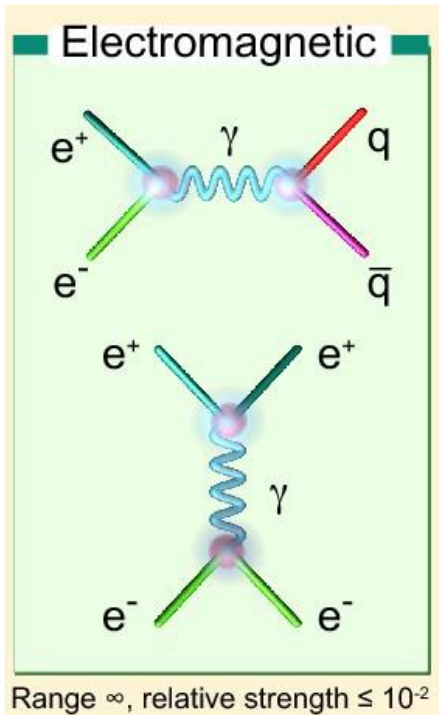
e^- (електрон)	\leftrightarrow	e^+ (позитрон)
p (протон)	\leftrightarrow	\bar{p} (антипротон)
π^+ (положителен пион)	\leftrightarrow	π^- (отрицателен пион)
u (u кварк)	\leftrightarrow	\bar{u} (анти u кварк)

Неутрални състояния

n (неутрон)	\leftrightarrow	\bar{n} (антинейтрон)
K^0 (к-нула мезон)	\leftrightarrow	\bar{K}^0 (анти к-нула мезон)
π^0 (неутрален пион)	\leftrightarrow	π^0 (неутрален пион)

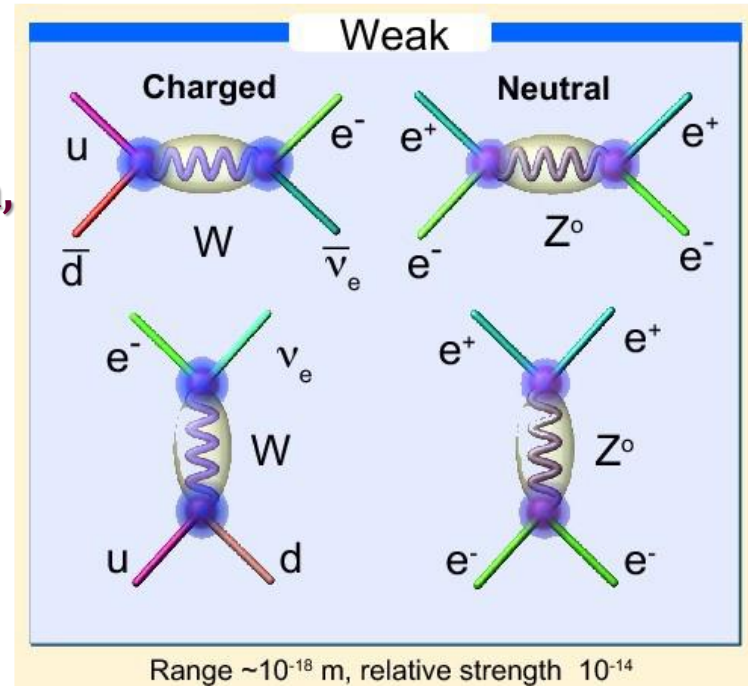
Електрослаби взаимодействия

- Преносители – W^+ , W^- , Z^0 бозони, фотон



- Не запазват **C-четността**, **P-четността** и **CP-четността**

- Могат да променят аромата на кварките



- Слабите взаимодействия – **много малък радиус на действие** – преносителите **имат** маса
- Електромагнитните взаимодействия – **безкраен радиус на действие** – преносителите **нямат** маса

Стандартен модел на елементарните частици

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

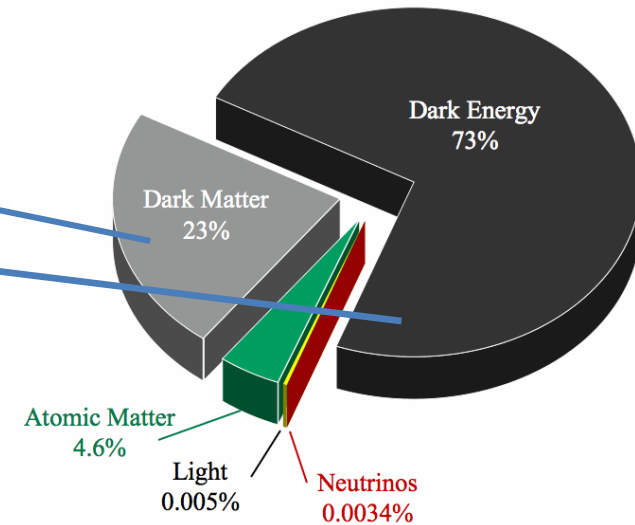
<http://pdg.lbl.gov/>

Вселената, каквато я познаваме

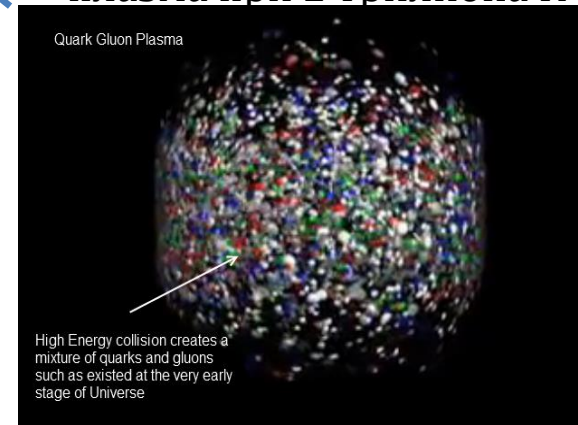
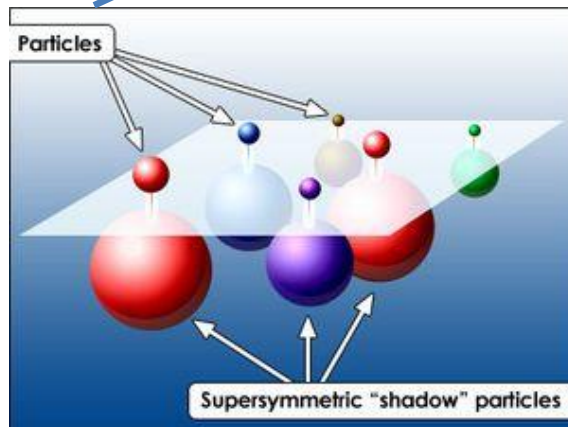


Отворени въпроси пред Стандартния модел

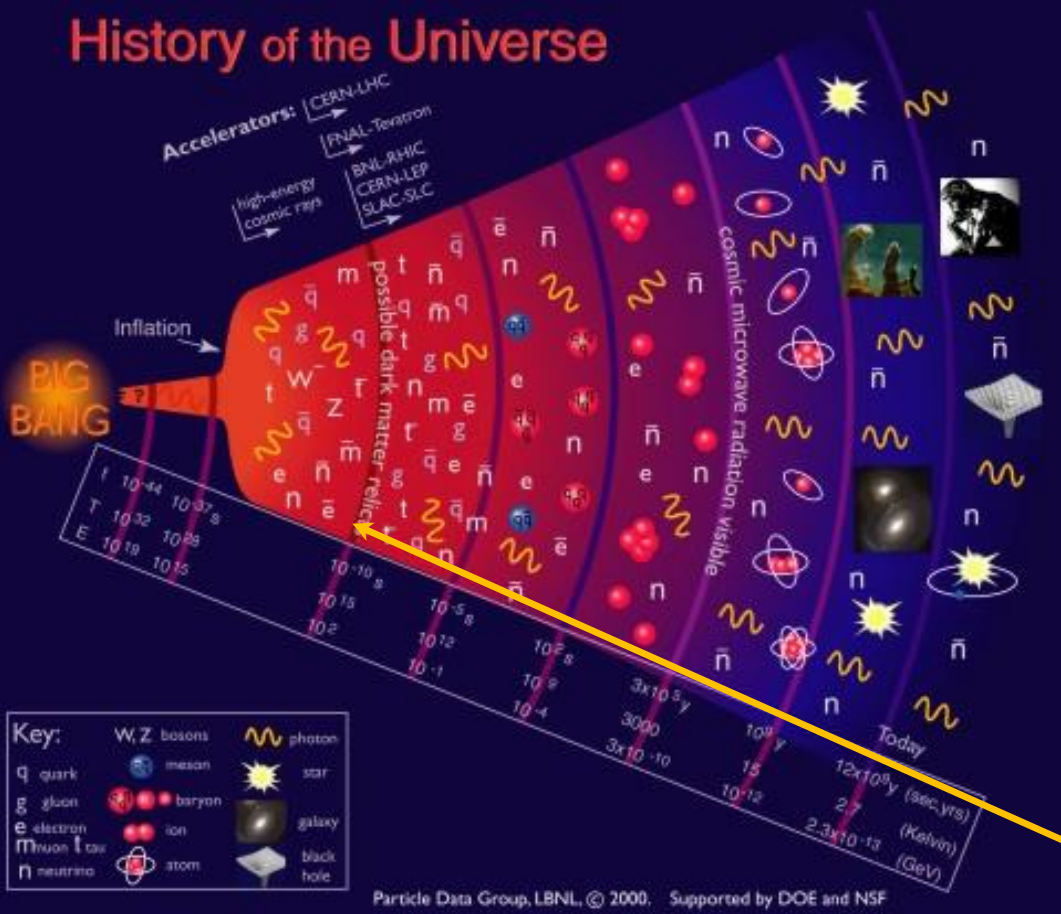
- *Защо имаме 3 поколения елементарни частици ?*
- *Съотношение материя/антиматерия във Вселената и връзка с CP нарушение в Стандартния Модел?*
- *От какво е съставена "тъмната материя" и "тъмната енергия" във Вселената?*
- *Свойствата на материята в първите мигове на Вселената? (кварк-глюонна плазма?)*
- *Съществуват ли допълнителните измерения?*
- *Има ли нова симетрия? SUSY?*



Симулация на кварк глюонна плазма при 2 трилиона К

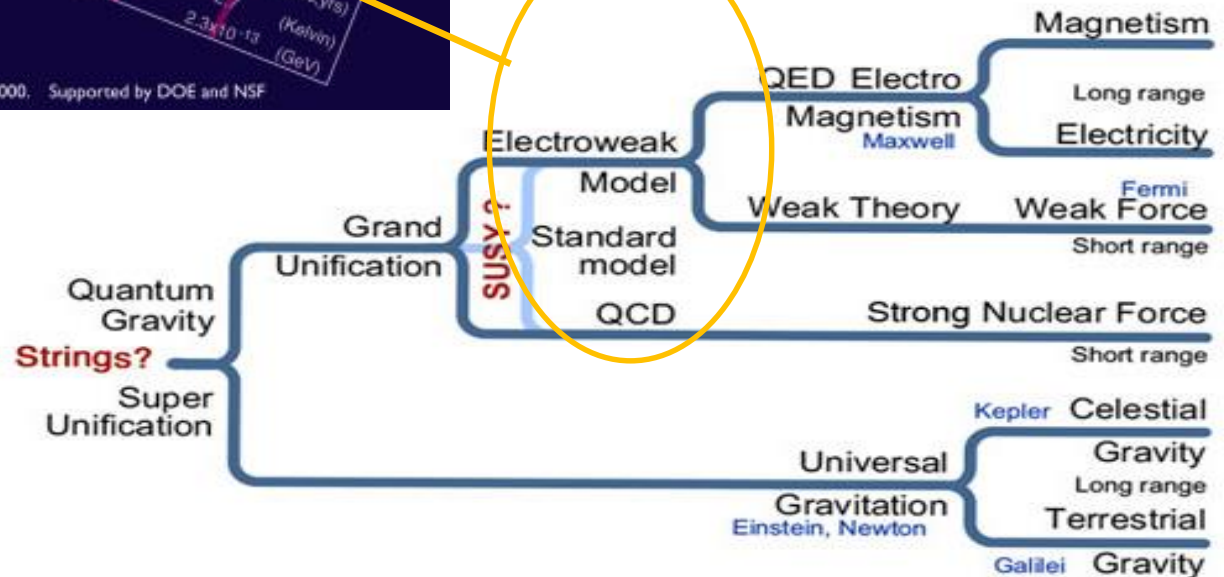


History of the Universe



Експериментална проверка на Стандартния Модел и нови елементарни частици

Граница на нашето познание



Хигс бозон

Открит 2012

2016

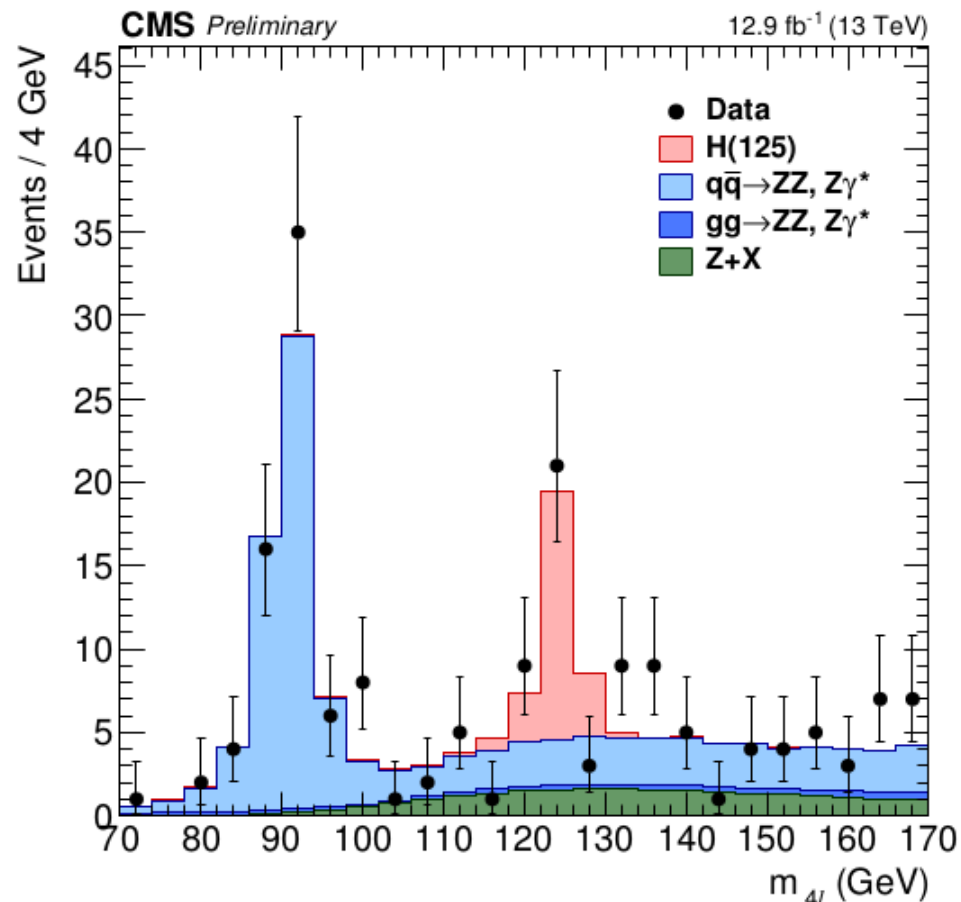
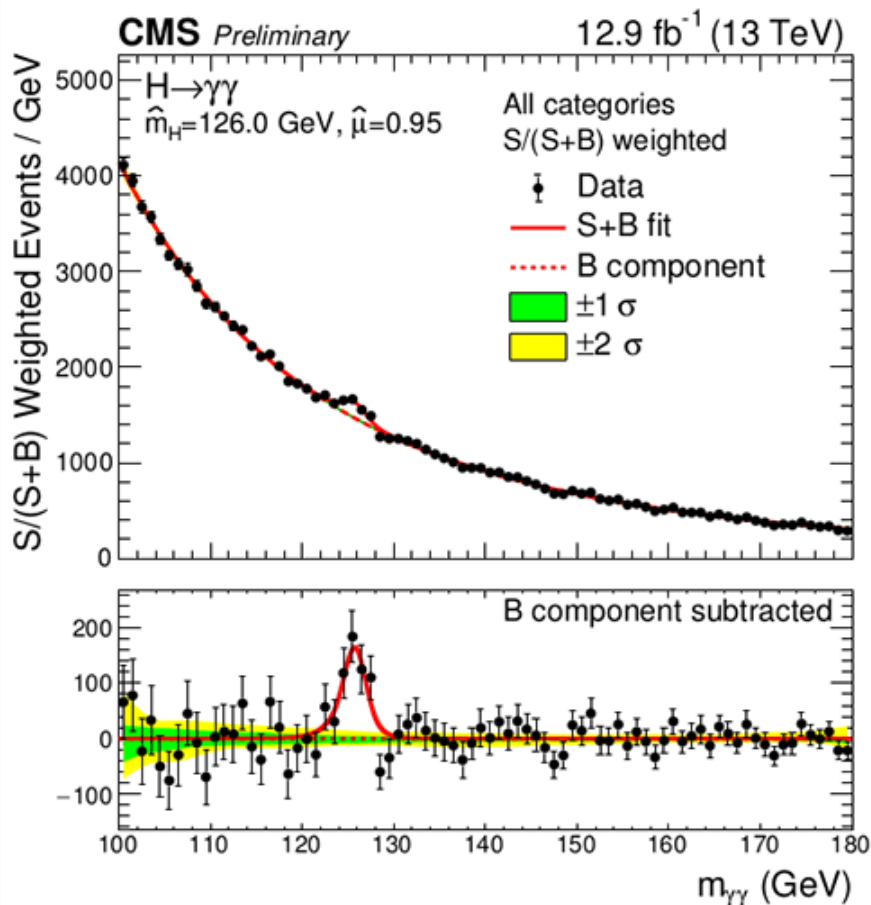
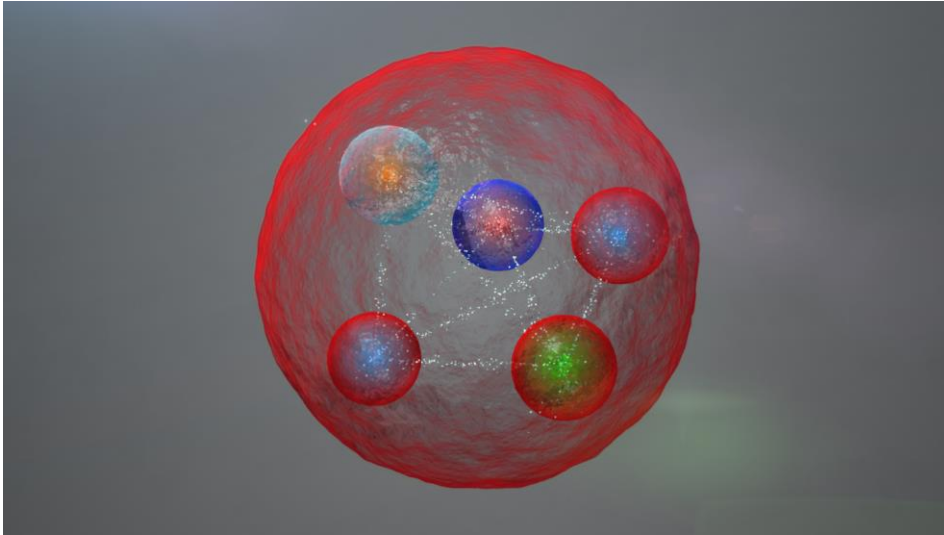


Figure 1: Mass spectra obtained in the 2016 CMS Higgs search using the di-photon (left) and four-lepton (right) decays channels. The significance of the observed signals around 125 GeV is larger than 5 standard deviations in both channels. The analysed data correspond to an integrated luminosity of 13 fb⁻¹, collected with the CMS detector at a centre-of-mass energy of 13 TeV.

Пентакварк

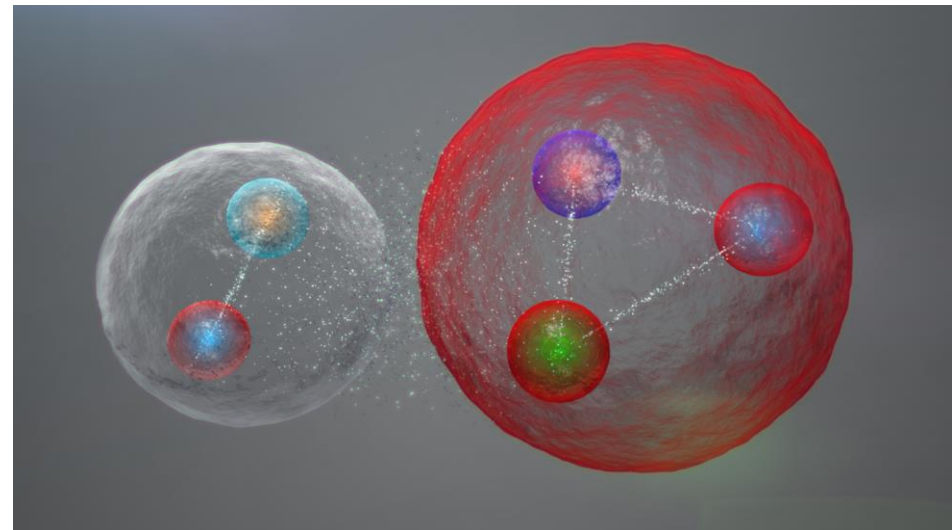
<https://home.cern/news/news/physics/lhcb-experiment-discovers-new-pentaquark>

2019



The [LHCb collaboration](#) has announced the discovery of a new pentaquark particle. The particle, named $P_c(4312)^+$, decays to a proton and a J/ψ particle (composed of a charm quark and an anticharm quark). This latest observation has a statistical significance of 7.3 sigma, passing the threshold of 5 sigma traditionally required to claim a discovery of a new particle.

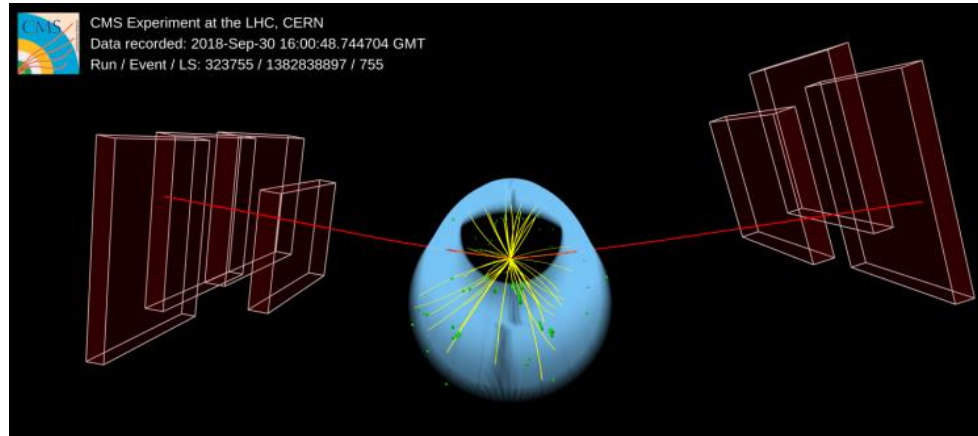
In July 2015, the LHCb collaboration [reported the \$P_c\(4450\)^+\$ and \$P_c\(4380\)^+\$ pentaquark structures](#). The new particle is a lighter companion to these pentaquark structures and its existence sheds new light into the nature of the entire family.



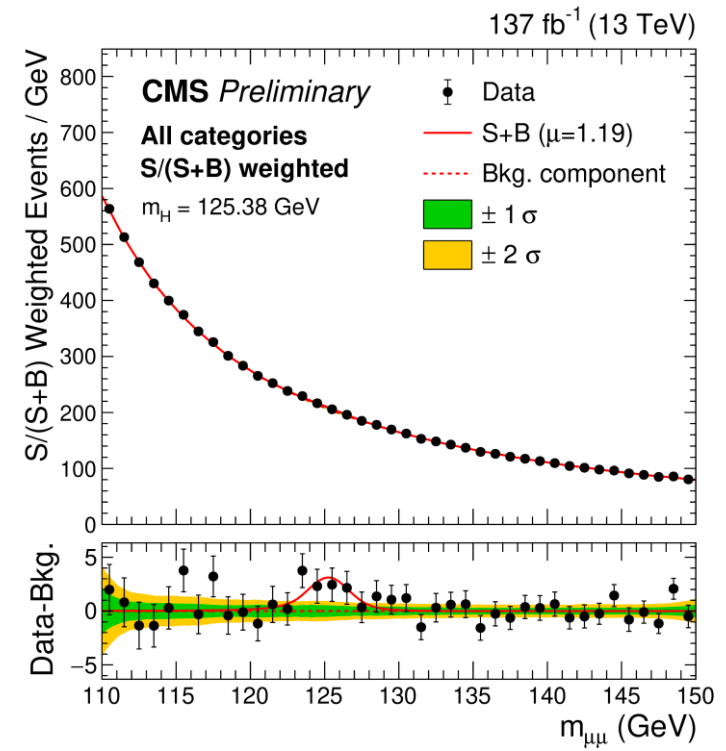
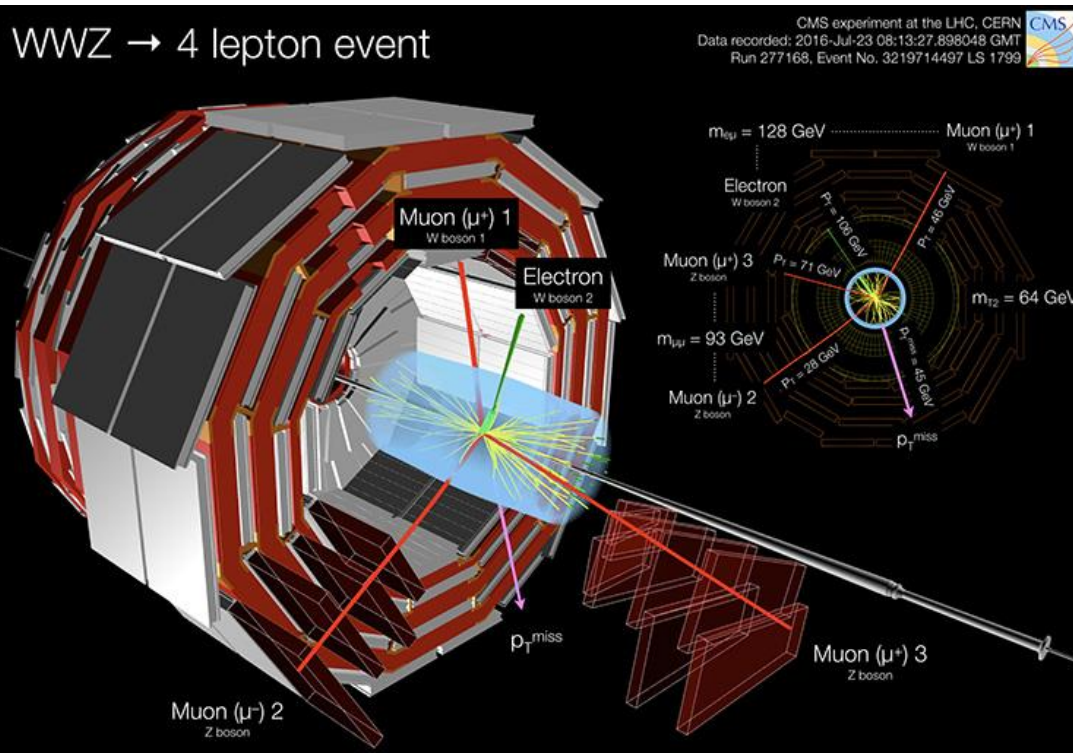
Хигс бозон разпад на два мюона

<https://cms-results.web.cern.ch/cms-results/public-results/publications/HIG-19-006/>

2020



WWZ → 4 lepton event

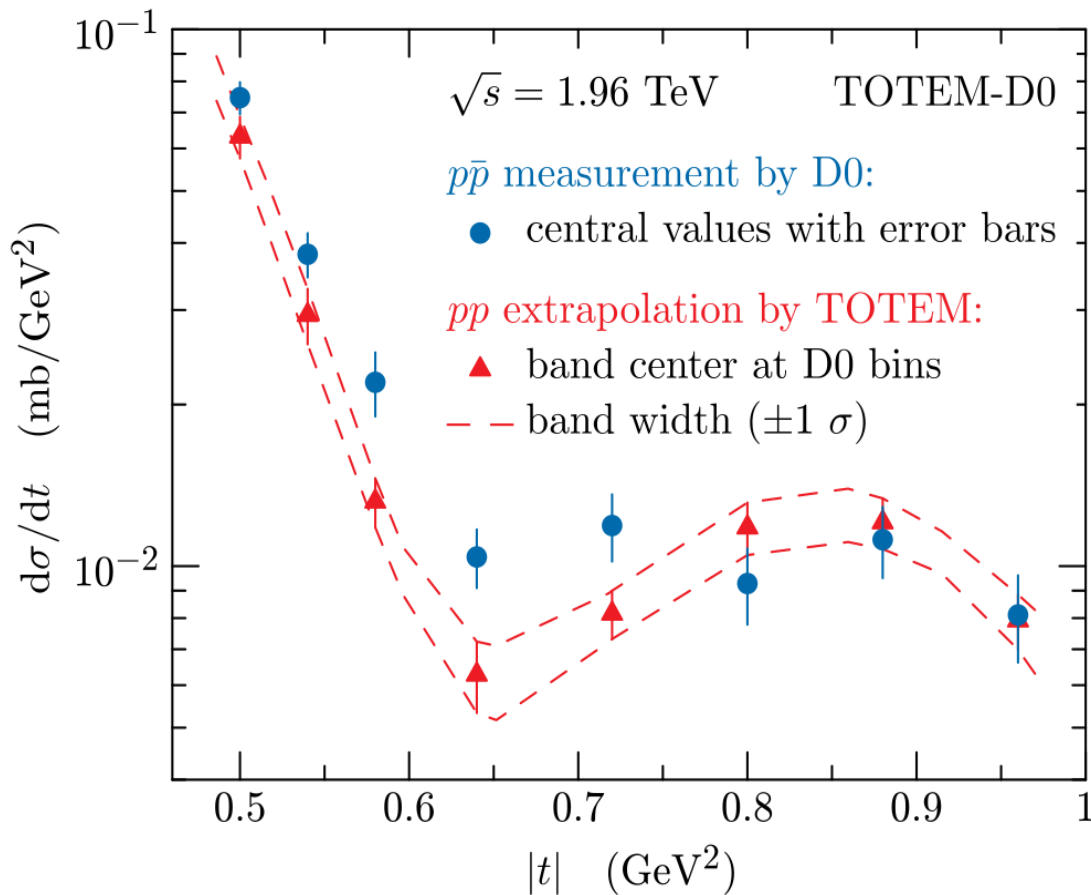


Одерон

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.127.062003>

2021

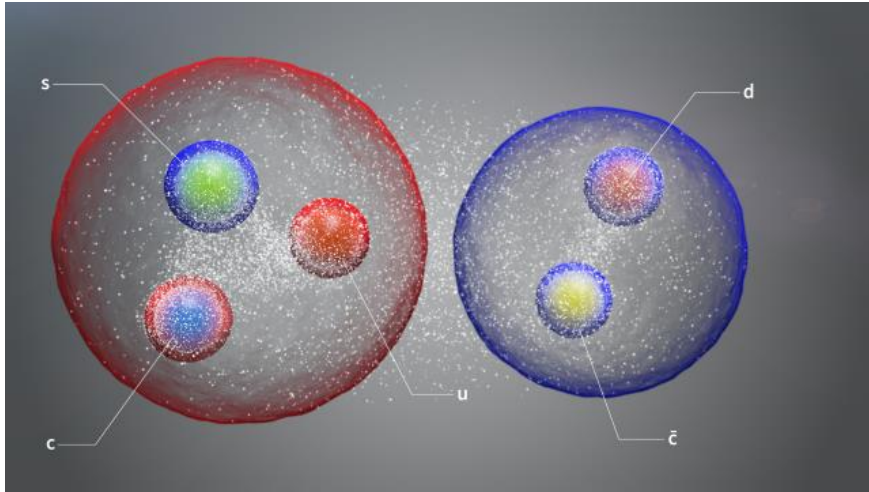
През август 2021 г. учените от TOTEM (CERN), съвместно с колаборацията D0 (Fermi Lab) публикуваха статия, с която **потвърдиха съществуването на Одерона [1]** - неуловимата досега квази-частица, предречена преди 50 години. Статистическата значимост на комбинираните данни от анализ на протон-антипротон (D0) и протон-протонни (TOTEM) взаимодействия е по-голяма от 5 стандартни отклонения и се интерпретира като **първото експериментално наблюдаване на обмен на фамилия от безцветни, зарядово нечетни комбинации от глюони - т.н. одерони.**



Тетракварк

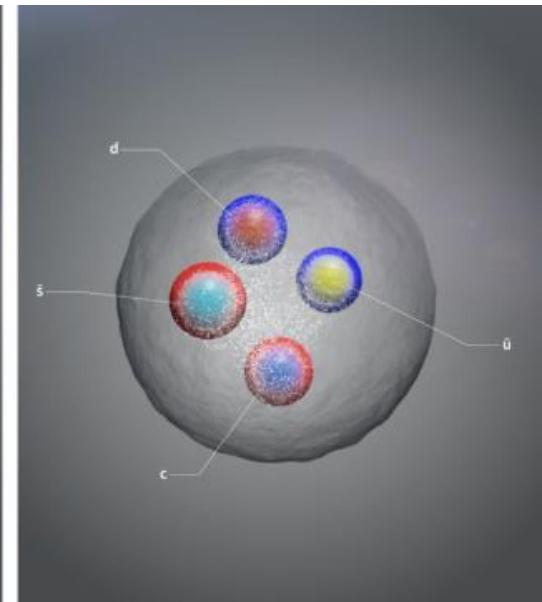
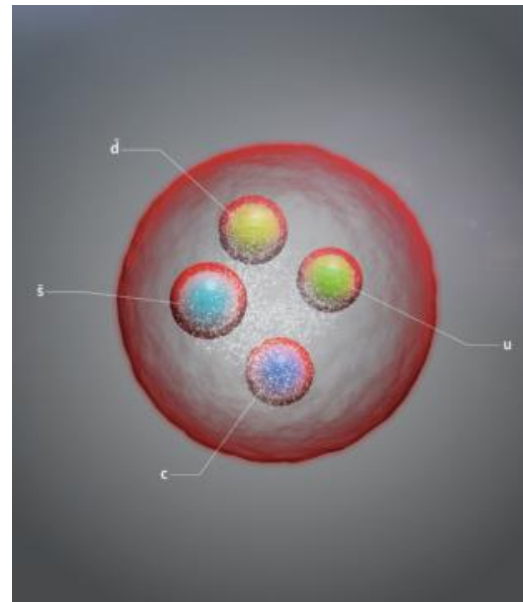
<https://home.cern/news/news/physics/lhcb-discovers-three-new-exotic-particles>

2022



The first kind, observed in an analysis of “decays” of negatively charged B mesons, is a pentaquark made up of a charm quark and a charm antiquark and an up, a down and a strange quark. It is the first pentaquark found to contain a strange quark. The finding has a whopping statistical significance of 15 standard deviations, far beyond the 5 standard deviations that are required to claim the observation of a particle in particle physics.

The second kind is a doubly electrically charged tetraquark. It is an open-charm tetraquark composed of a charm quark, a strange antiquark, and an up quark and a down antiquark, and it was spotted together with its neutral counterpart in a joint analysis of decays of positively charged and neutral B mesons. The new tetraquarks, observed with a statistical significance of 6.5 (doubly charged particle) and 8 (neutral particle) standard deviations, represent the first time a pair of tetraquarks has been observed.



$\tau \rightarrow \text{три лептона}$

<https://cms.cern/news/flavoured-mysteries-searching-tau-leptons-3-muon-decay>

2023

