



Введение в физику элементарных частиц - I

В.Т. Ким

**Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ КИ, Гатчина
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет**



План лекций



Удивительный мир элементарных частиц

Единицы измерений и масштабы

Кинематика реакций

Зоопарк частиц Стандартной Модели

Квантовая хромодинамика: кварки и конфайнмент

Стандартная Модель электрослабых взаимодействий

Спонтанное нарушение симметрии бозон Хиггса

Физика за пределами Стандартной Модели

Поиски новой физики на Большом адронном коллайдере

Удивительный мир

элементарных частиц

Из чего сделан и как устроен мир?

Фундаментальные составляющие материи?

Физика микромира < - > Элементарные частицы

←
Большой Взрыв (Big Bang)

Физика макромира < - > Космология

LHC - Большой адронный коллайдер (БАК):
энергии частиц \sim время 10^{-10} с после Большого
Взрыва



Удивительный мир Элементарных частиц

Из чего сделан и как устроен мир?

Физика элементарных частиц

Квантовая механика

СТО

Теория поля

Релятивистская квантовая механика

Квантовая теория поля



Единицы измерений и масштабы

$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$$

молекула

$$1 \text{ фм} = 10^{-15} \text{ м}$$

протон

$$10^{-3} \text{ фм} = 10^{-18} \text{ м}$$

электрон

$$3 \cdot 10^{-19} \text{ м} \approx$$

кварки (БАК: CMS &

ATLAS)

возможность проверить на БАК

структуру частиц до: $\sim 10^{-5} \text{ фм} = 10^{-20} \text{ м}$



Единицы измерений и масштабы

характерное время реакций = $3 \cdot 10^{-24}$ с

- свет проходит 1 Фм = 10^{-15} м (размер протона)

время жизни адронов в слабых распадах $\sim 10^{-12}$
 -10^{-9} с

характерные энергии:

1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж

молекулы ~ 0.02 эВ

фотоны ~ 2 эВ

ядерные реакции: 1 МэВ = 10^6 эВ

структура протона: ГэВ = 10^9 эВ

БАК (1 стадия):

3.5 ТэВ ~~Х~~ 3.5 ТэВ

1 ТэВ = 10^{12} эВ



релятивистская кинематика СТО

Немного кинематики

$$E = \gamma mc^2 = \gamma m$$

здесь и далее $c = 1$

$= 1$

масса протона = 0.94 ГэВ

масса электрона = 0.5 МэВ

преобразования Лоренца

4D-вращения в пространстве

Минковского

длина 4-вектора: инвариант

псевдоэвклидовое пространство: $p = (E, \mathbf{p})$

$$p^2 = E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2$$

угол

быстрота

\cos, \sin

\cosh, \sinh

релятивистская кинематика СТО $E = \gamma m c^2 = \gamma m$

здесь и далее $c = 1$

масса (покоя)

→ Лоренц-инвариант (длина 4-вектора)

$$p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

преобразования Лоренца:

$$E \rightarrow \gamma(E + \beta p_z) \quad p_z \rightarrow \gamma(p_z + \beta E)$$

псевдо-евклидовое пространство: $p = \rightarrow(E, \vec{p})$

Понятия релятивистской массы и массы покоя не нужны –

есть только инвариантная масса, полная энергия, энергия покоя:

Л. Б. Окунь УФН (2004)



Масса в СТО



При переходе из одной инерциальной системы в другую:

энергия – меняется

масса – не меняется

Но! В каждой системе:

энергия – сохраняется

масса – не сохраняется



Измерение массы частицы по распаду на две частицы



$$1 \rightarrow 2 + 3$$

$$\begin{aligned} p_1 &= p_2 + p_3 \\ &= (E_2 + E_3, p_{2x} + p_{3x}, p_{2y} + p_{3y}, p_{2z} + p_{3z}) \end{aligned}$$

масса \leftarrow Лоренц-инвариант (длина 4-вектора)

$$p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

$$m_1^2 = p_1^2 = (E_2 + E_3)^2 - (\vec{p}_2 + \vec{p}_3)^2$$



ПОЧЕМУ КОЛЛАЙДЕРЫ?

$$p_1 + p_2 = (E_1 + E_2, p_{1x} + p_{2x}, p_{1y} + p_{2y}, p_{1z} + p_{2z})$$

СЦМ

ЛС

$$(E_1 + E_2, p_1 + p_2) = (2E, 0)$$

$$(E^L + m, p^L + 0)$$

$$p^2 = 4(E)^2 \rightarrow$$

$$p^2 = (E^L + m)^2 - (p^L)^2 =$$

$$= 2mE^L + 2m^2 \approx 2mE^L$$

$$E \approx \sqrt{(E^L m)/2}$$

$$E^L \approx 2(E)^2 / m$$

Фермилаб: 1 ТэВ x 1 ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ}$$

$2 \cdot 10^3$

БАК: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ \rightarrow

$$E^L = 2 \cdot 10^4 \text{ ТэВ}$$

$6 \cdot 10^3$

БАК: 7 ТэВ x 7 ТэВ \rightarrow

$$E^L = 10^5 \text{ ТэВ}$$

$1.4 \cdot 10^4$



Современные коллайдеры

Фермилаб Тэватрон (Чикаго)

pp: 1 ТэВ x 1 ТэВ

ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^3$$

BNL RHIC (Нью-Йорк)

AA: 100 ГэВ/н x 100 ГэВ/н

AuAu

$$E^L = 20 \text{ ГэВ/н}$$

ЦЕРН БАК (Женева)

pp: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ

ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^4$$

7 ТэВ x 7 ТэВ

AA: 5.5 ТэВ/нуклон-нуклон

PbPb

$$E^L = 10^5 \text{ ТэВ}$$



Масса в Квантовой Механике



$S \gg \hbar \rightarrow$ классическая теория

$S \sim \hbar \rightarrow$ квантовая теория

\hbar – квант действия

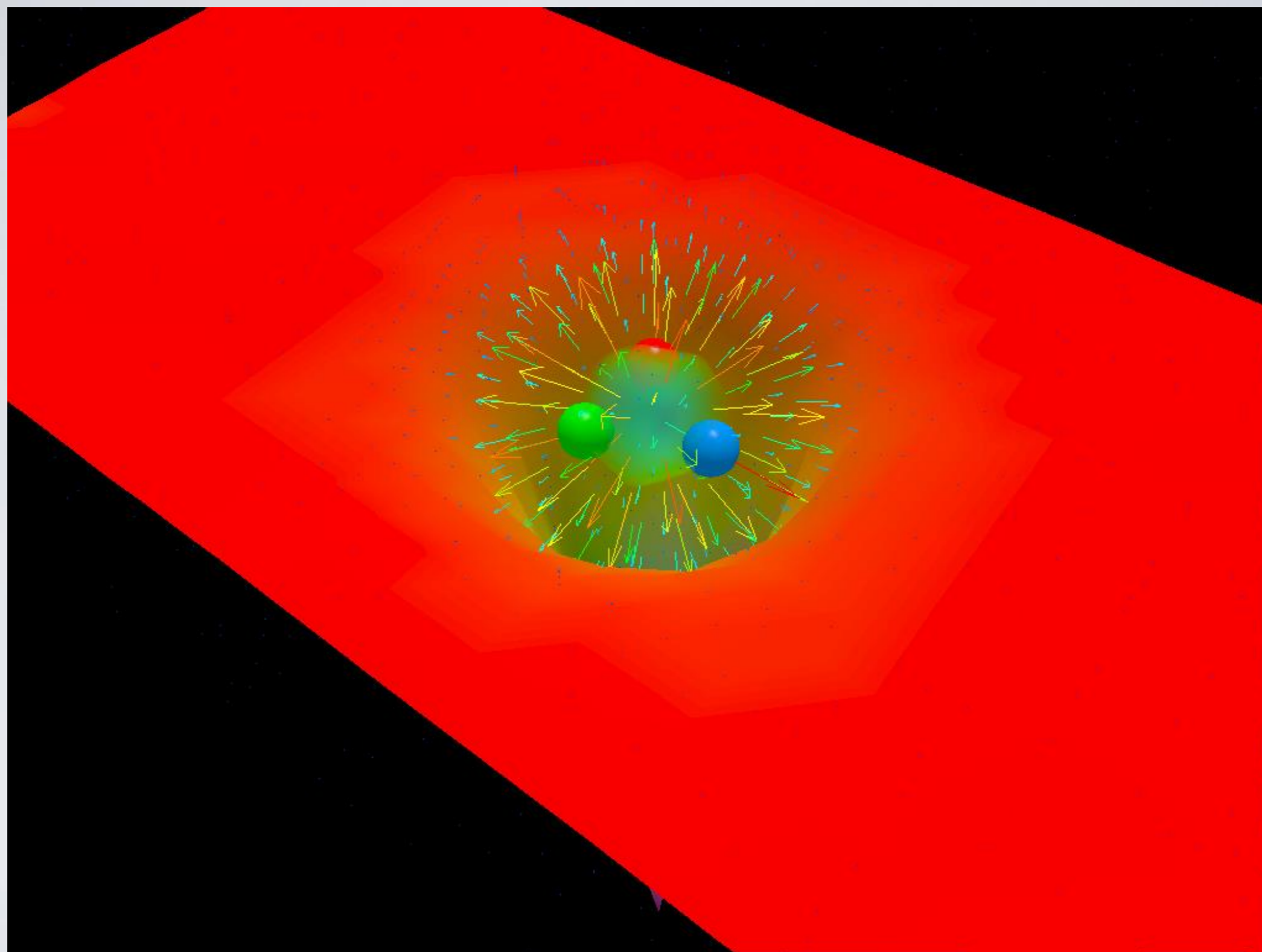
далее $\hbar = 1$

Стабильные и нестабильные частицы

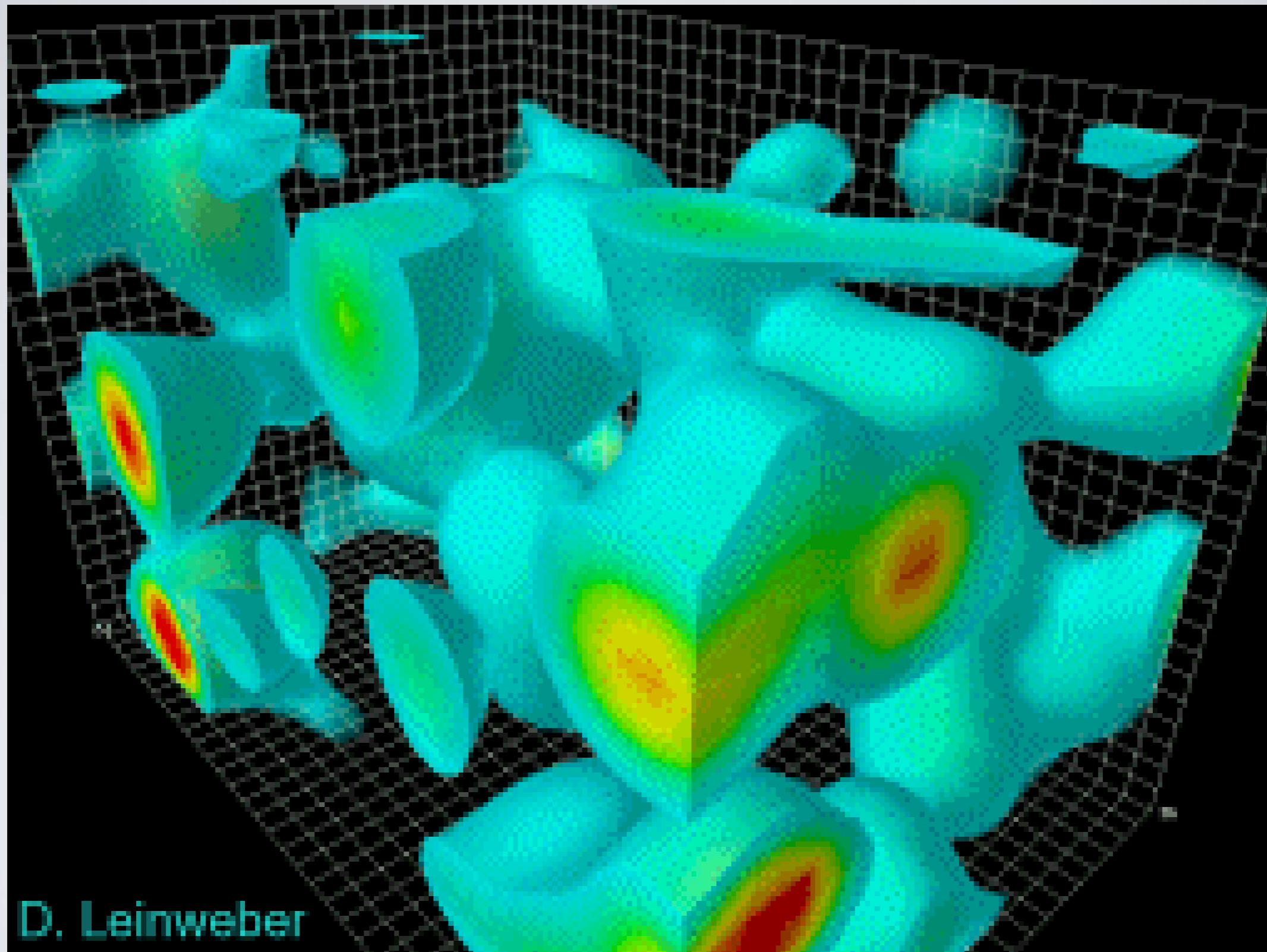
Реальные и виртуальные частицы

R. Фейнман: « ...Только виртуальные частицы могут быть наблюдаемыми ... »

Частица в вакууме



Физический вакуум





(Поперечное) сечение рассеяния



Вероятность и интенсивность взаимодействия:
сечение рассеяния $\sim r^2$

контактное взаимодействие \rightarrow площадь мишени
точка с кулоновским взаимодействием $\rightarrow \infty$

[сечение рассеяния (Квантовая Механика)]
= 2 x [сечение рассеяния (Классическая
Механика)]

Задача: объяснить множитель 2



Единицы измерений и масштабы

Вероятность и интенсивность взаимодействия:
сечение рассеяния $\sim r^2$

барн: $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$

$1 \text{ мб} = 10^{-27} \text{ см}^2$

$1 \text{ пб} = 10^{-36} \text{ см}^2$

Светимость (интенсивность пучков): $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

БАК 2010: $\sim 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2011: $\sim 10^{33} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

2012: $\sim 10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$

Частота реакций = светимость \times сечение

Бозон Хиггса:

сечение ($m = 125 \text{ ГэВ}$ при 8 тэВ) $\approx 10 \text{ пб}$

1 событие за 10 сек.



Квантовая физика



Соотношение неопределенности Гейзенберга:

$$\Delta p \cdot \Delta x \simeq \hbar$$

Высокие энергии \longleftrightarrow малые расстояния

$$\Delta x \sim \frac{\hbar}{E}$$

Спин (внутренний угловой момент): квантуется

фермионы: полуцелый спин (принцип Паули)

бозоны: целый спин (возможна конденсация)

Уравнение Дирака для релятивистских частиц:
существуют античастицы



Физика элементарных частиц: симметрии и их нарушения

Принципы:

наименьшего действия

относительности

локальной калибровочной инвариантности

...

Законы:

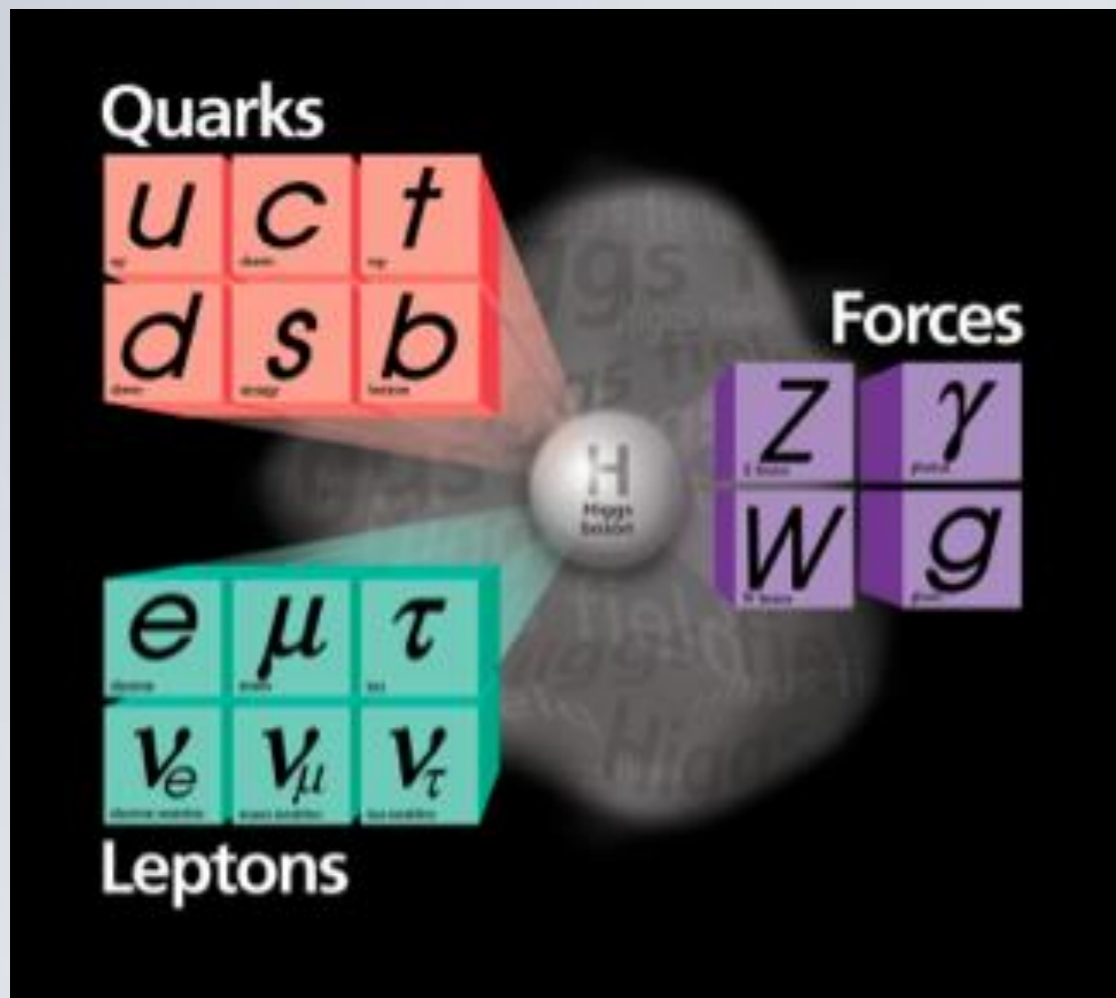
сохранение энергии-импульса

сохранение электрического заряда

сохранение барионного заряда

...

Принципы и законы связаны с симметриями!



e.g. LEP and SM

Quantity	Value	Standard Model	Pull
m_t [GeV]	$172.7 \pm 2.9 \pm 0.6$	172.7 ± 2.8	0.0
M_W [GeV]	80.450 ± 0.058	80.376 ± 0.017	1.3
	80.302 ± 0.039		0.4
M_Z [GeV]	91.1876 ± 0.0021	91.1874 ± 0.0021	0.1
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4968 ± 0.0011	-0.7
$\Gamma(\text{had})$ [GeV]	1.7444 ± 0.0020	1.7434 ± 0.0010	—
$\Gamma(\text{inv})$ [MeV]	499.0 ± 1.5	501.65 ± 0.11	—
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	83.984 ± 0.086	83.996 ± 0.021	—
σ_{had} [nb]	41.541 ± 0.037	41.467 ± 0.009	2.0
R_e	20.804 ± 0.050	20.756 ± 0.011	1.0
R_μ	20.785 ± 0.033	20.756 ± 0.011	0.9
R_τ	20.764 ± 0.045	20.801 ± 0.011	-0.8
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21578 ± 0.00010	0.8
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.17230 ± 0.00004	-0.1
$A_{FB}^{(0,e)}$	0.0145 ± 0.0025	0.01622 ± 0.00025	-0.7
$A_{FB}^{(0,\mu)}$	0.0169 ± 0.0013		0.5
$A_{FB}^{(0,\tau)}$	0.0188 ± 0.0017		1.5
$A_{FB}^{(0,b)}$	0.0992 ± 0.0016	0.1031 ± 0.0008	-2.4
$A_{FB}^{(0,c)}$	0.0707 ± 0.0035	0.0737 ± 0.0006	-0.8
$A_{FB}^{(0,s)}$	0.0976 ± 0.0114	0.1032 ± 0.0008	-0.5
$s_W^2(A_{FB}^{(0,q)})$	0.2324 ± 0.0012	0.23152 ± 0.00014	0.7
	0.2238 ± 0.0050		-1.5
A_e	0.15138 ± 0.00216	0.1471 ± 0.0011	2.0
	0.1544 ± 0.0060		1.2
	0.1408 ± 0.0049		0.6
A_μ	0.142 ± 0.015		-0.3
A_τ	0.136 ± 0.015		-0.7
	0.1439 ± 0.0043		-0.7
A_b	0.923 ± 0.020	0.9347 ± 0.0001	-0.6
A_c	0.670 ± 0.027	0.6678 ± 0.0005	0.1
A_s	0.805 ± 0.091	0.9356 ± 0.0001	-0.4
g_W^2	0.30005 ± 0.00137	0.30378 ± 0.00021	-2.7
g_B^2	0.03076 ± 0.00110	0.03006 ± 0.00003	0.6
g_V^2	-0.040 ± 0.015	-0.0396 ± 0.0003	0.0
g_A^2	-0.507 ± 0.014	-0.5064 ± 0.0001	0.0
A_{PV}	-1.31 ± 0.17	-1.53 ± 0.02	1.3
$Q_W(\text{Cs})$	-72.62 ± 0.46	-73.17 ± 0.03	1.2
$Q_W(\text{Ti})$	-116.6 ± 3.7	-116.78 ± 0.05	0.1
$\frac{\Gamma(b \rightarrow s\gamma)}{\Gamma(b \rightarrow Xc\gamma)}$	$3.35^{+0.50}_{-0.44} \times 10^{-3}$	$(3.22 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	0.3
$\frac{1}{2}(g_\mu - 2 - \frac{g}{2})$	4511.07 ± 0.82	4509.82 ± 0.10	1.5
τ_τ [fs]	290.89 ± 0.58	291.87 ± 1.76	-0.4

Стандартная Модель:
замечательная и
хорошо проверенная
экспериментально теория



Адроны и Кварки

лептоны - “лептос” (легкий)

адроны - “хадрос” (тяжелый)

барион: три кварка

мезон: кварк-антикварк

Квантовая Хромодинамика (КХД)

кварки: 6 флейворов (ароматов)

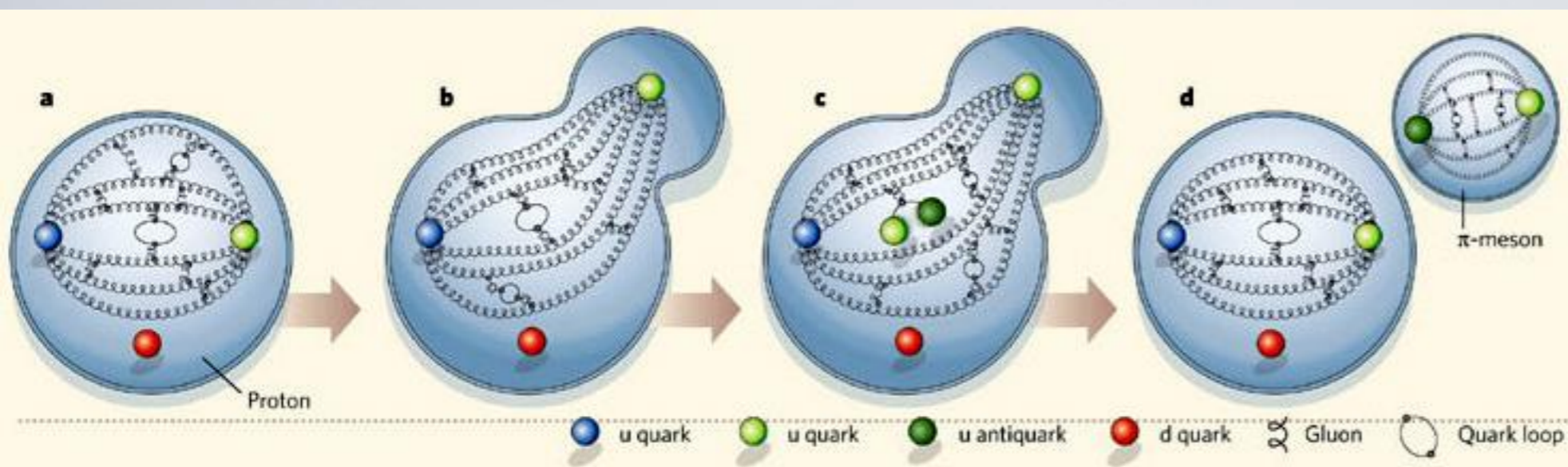
три цвета (сильный заряд)

дробные электрические заряды

глюоны: 8 цветов

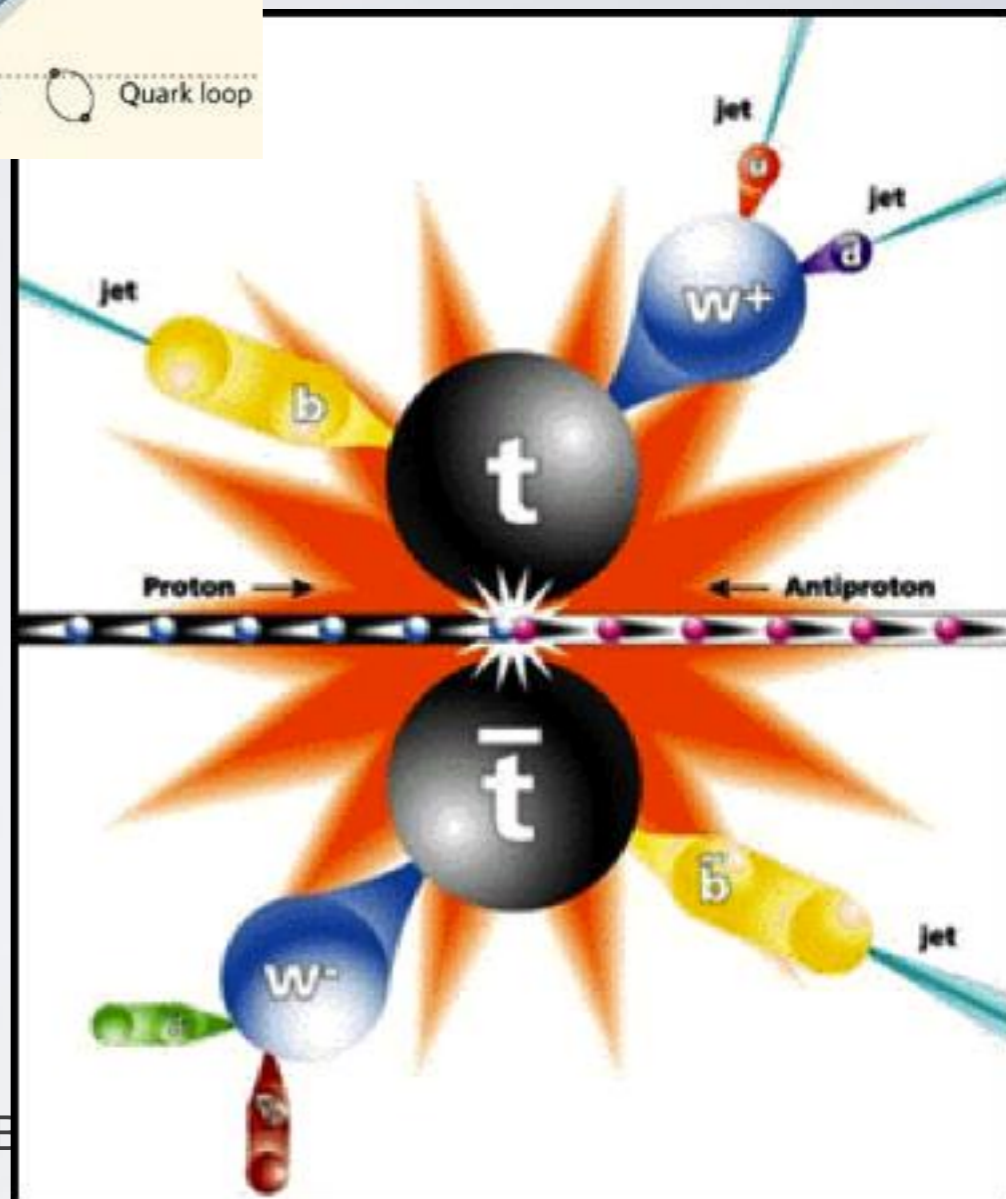
электрически нейтральны

Квантовая хромодинамика: Конфайнмент

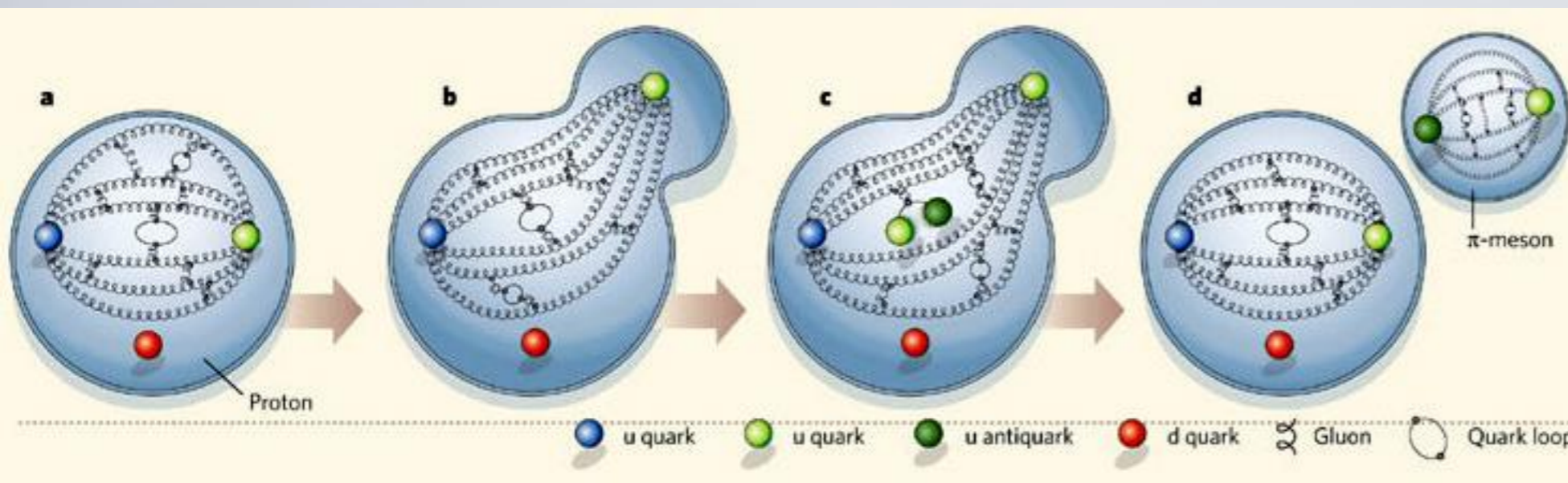


Адроны при реакциях:

- похожи на магниты при разломе
- очень твердые,
но очень хрупкие как стекло



Квантовая хромодинамика: Асимптотическая свобода



Адроны в соударениях при высоких энергиях:
похожи на газ слабо взаимодействующих
партонов (кварков и глюонов)

Асимптотическая свобода: взаимодействие кварков
и глюонов



Квантовая хромодинамика:

Асимптотическая свобода: взаимодействие кварков и глюонов ослабевает с уменьшением расстояния

Асимптотическая свобода

Вакуум: среда виртуальных заряженных частиц

Вакуум может поляризоваться (экранировать взаимодействие)

и/или антиполяризоваться (антиэкранировать взаимодействие)

Кварки имеют сильный заряд (цвет) => экранировка

Глюоны также имеют сильный заряд (цвет)! => антиэкранировка!

Ваняшин, Терентьев (1966)

Хриплович (1969)

Политцер (1973), Гросс, Вильчек (1973): Нобелевская премия

(2004)



Кварки: Этимология



М. Гелл-Манн: “quarks” (1964)

С. Цвейг: “aces”

(Загадка Гелл-Манна ?)

James Joyce “Поминки по Финнегану”:
“Три кварка для мистера Марка! ...”

(Отгадка ?) В.М. Шехтер

«За что мы любим кварки» (1975)



Неускорительная физика: нейтрино



Физика нейтрино:

- нейтрино от солнца
- нейтрино сверхвысоких энергий
- осцилляции нейтрино

Россия (СССР):

Баксанская нейтринная обсерватория

Байкальская нейтринная обсерватория

Фермилаб -> Миннесота

CERN -> Grand Sasso

T2K (Tsukuba -> Kamiokande)

Daya Bay (Китай), RENO (Ю. Корея):

Нарушение CP в нейтринном секторе!

Стерильное нейтрино ?



Основные цели Большого адронного коллайдера

Главные цели БАК:

- бозон Хиггса SM
- новые частицы и взаимодействия за пределами Стандартной Модели

а также:

- проверка SM при новых энергиях
- поиски новой динамики SM



Спонтанное нарушение симметрии В Стандартной модели (СМ) электрослабых взаимодействий

СМ – теория с (нарушенной)локальной калибровочной инвариантностью

Проблема: калибровочная инвариантность требует безмассовость калибровочных векторных бозонов?

Проблема: перенормируемость физических теорий с массивными калибровочными векторными бозонами ?

С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1967) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962) ->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z
Нобелевская премия (1979)

Перенормируемость Стандартной Модели:

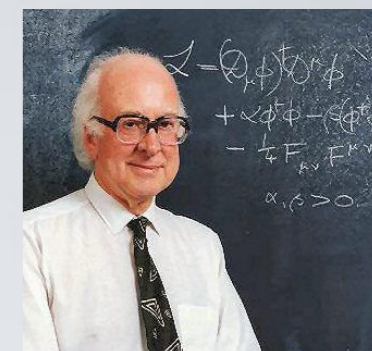
Нобелевская премия: Ж.т'Хуфт, М. Велтман (1999)

Спонтанное нарушение симметрии

идея: В.Л. Гинзбург, Л.Д. Ландау

концепция: Н.Н. Боголюбов - конденсированные среды

Й. Намбу (1960), Дж.Голдстоун (1961) - физика частиц



Механизм Хиггса образования массивных частиц:

- нерелятивистский вариант: Ф. Андерсон (1962)

- релятивистский вариант:

Р. Брут, Ф.Энглерт (1964)

П. Хиггс (1964)

Дж.Гуралник, К.Хаген, Т. Киббл (1964)



С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1968) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962)

->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z



Спонтанное нарушение симметрии: конденсированные среды



Nobel Lecture: Spontaneous symmetry breaking in particle physics:
A case of cross fertilization*

Yoichiro Nambu

Physical system	Broken symmetry
Ferromagnets	Rotational invariance (with respect to spin)
Crystals	Translational and rotational invariance (modulo discrete values)
Superconductors	Local gauge invariance (particle number)

Й. Намбу: Применение методов теории конденсированных сред к физике элементарных частиц

Вакуум как «конденсированная среда»



Спонтанное нарушение симметрии: конденсированные среды

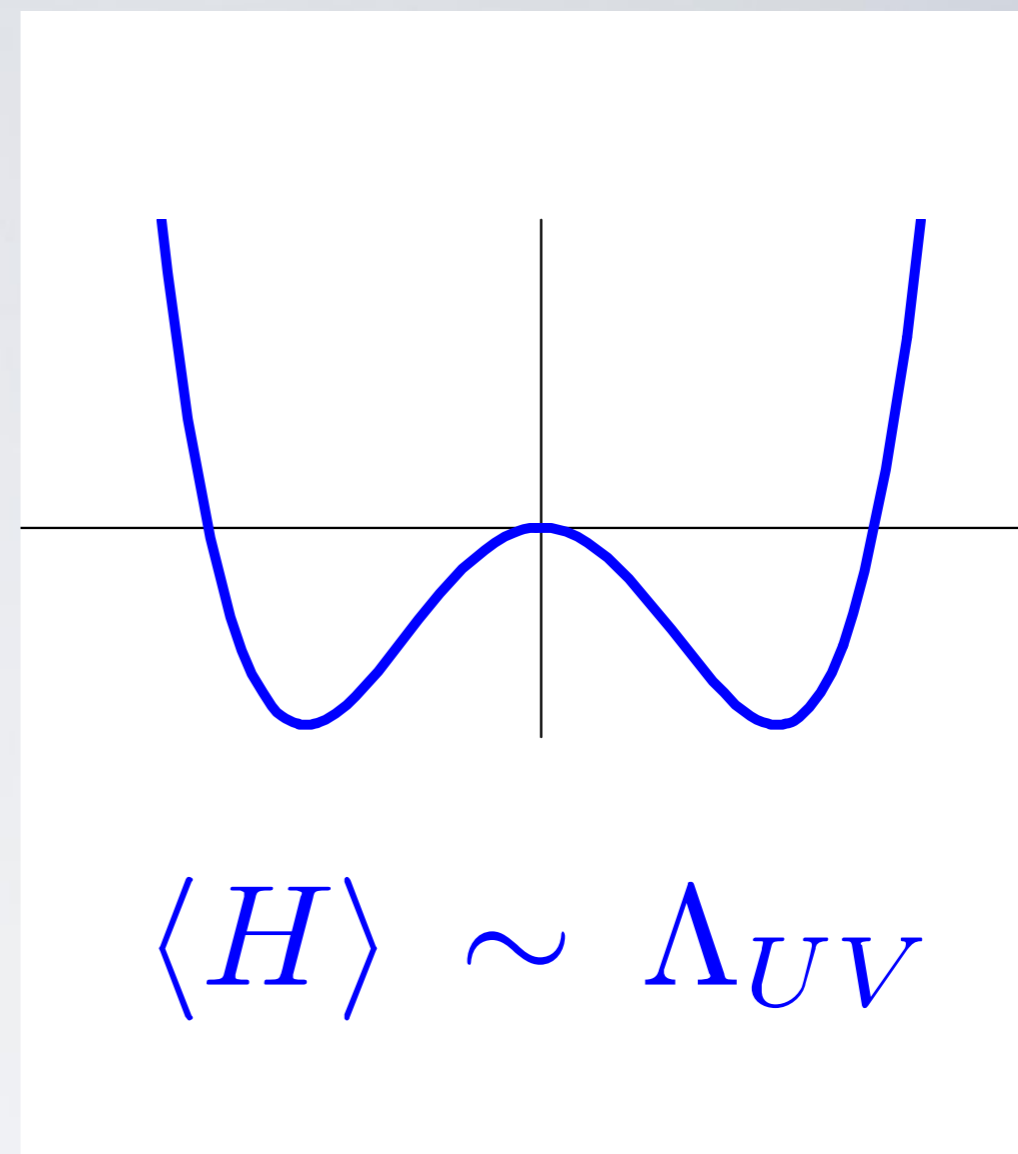
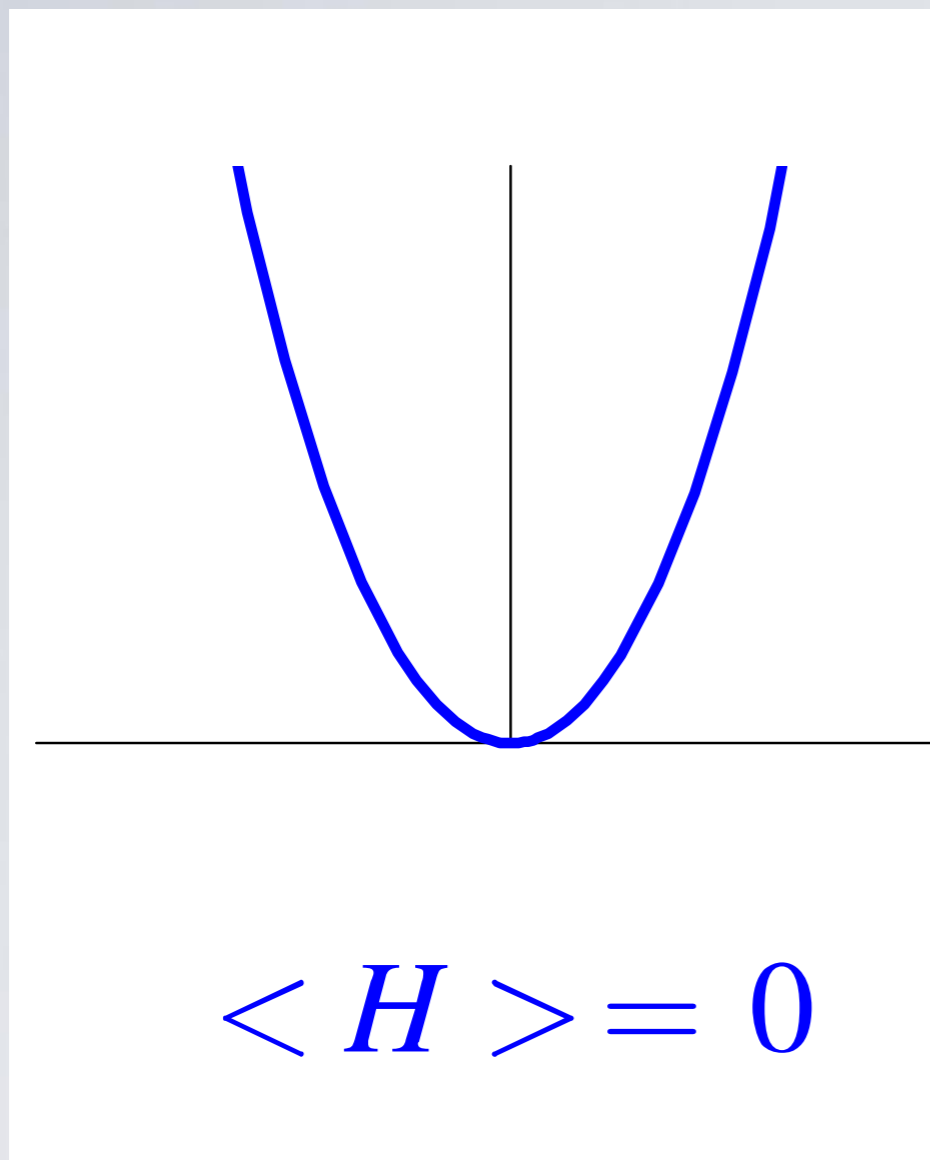


P. Anderson (1962)

Калибровочные бозоны "съедают" бозоны Голдстоуна и приобретают массу аналогично фотону внутри сверхпроводника

It is likely, then, considering the superconducting analog, that the way is now open for a degenerate-vacuum theory of the Nambu type without any difficulties involving either zero-mass Yang-Mills gauge bosons or zero-mass Goldstone bosons. These two types of bosons seem capable of "canceling each other out" and leaving finite mass bosons only.

Спонтанное нарушение симметрии



квантовые флуктуации

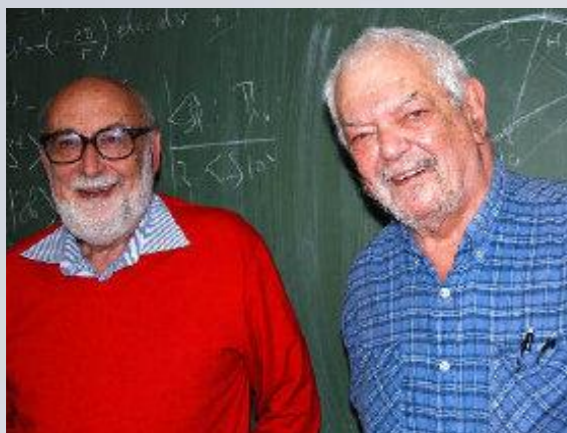
->

**несимметричное
вакуумное состояние**

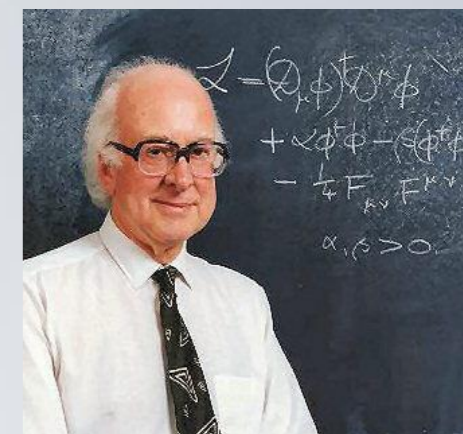
Спонтанное нарушение симметрии



Спонтанное нарушение симметрии: калибровочные поля



R. Brout and F. Englert (1964)
P. Higgs (1964)



Механизм Браута-Энглера-Хиггса:
 фундаментальное скалярное поле может приводить к
 спонтанному нарушению локальной калибровочной симметрии
 и возникновению масс частиц

The purpose of the present note is to report that...the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass...This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson has drawn attention



Спонтанное нарушение симметрии: неабелевы калибровочные поля

Hagen, Guralnik and Kibble (1964)

фундаментальное скалярное поле (4 степени свободы)
приводит к
спонтанному нарушению локальной калибровочной симметрии:

возникновение масс у трех калибровочных векторных бозонов
и появление массивного скалярного бозона (Хиггса)



Спонтанное нарушение симметрии В Стандартной модели (СМ) электрослабых взаимодействий

СМ – теория с (нарушенной) локальной калибровочной инвариантностью

Проблема: калибровочная инвариантность требует безмассовость калибровочных векторных бозонов?

Проблема: перенормируемость физических теорий с массивными калибровочными векторными бозонами ?

С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1967) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962) ->

СМ с тяжелыми векторными бозонами W , Z Нобелевская премия (1979)

Открытие векторных бозонов W , Z (1983) Нобелевская премия (1984)

Квантование неабелевых калибровочных теорий: Фаддеев, Попов (1967)



Бозон Хиггса Стандартной модели

основная роль бозона Хиггса СМ:

получение ненулевых масс векторных бозонов не нарушая калибровочную инвариантность

а также:

- массы лептонов и кварков

- восстановление унитарности

(закона сохранения вероятности) при рассеянии тяжелых векторных бозонов



Охота за бозоном Хиггса СМ!



Ускорители (1970 - 2011):

ИФВЭ (Протвино Моск. обл.) pp 76 ГэВ (Л)

ЦЕРН: ISR pp 31x31 ГэВ

SppS p \bar{p} 315x315 ГэВ

LEP e $^+$ e $^-$ 45x45, 110x110 ГэВ

Фермилаб (США): p \bar{p} 0.98x0.98 ТэВ

ЦЕРН: LHC (БАК) - Новые возможности

3.5 x 3.5 ТэВ 2010-2011

4 x 4 ТэВ 2012

Охота за бозоном Хиггса СМ!!!



Tevatron

pp: 2 TeV

LHC pp: 7,8 TeV  13,14 TeV

Lepton collider (?)

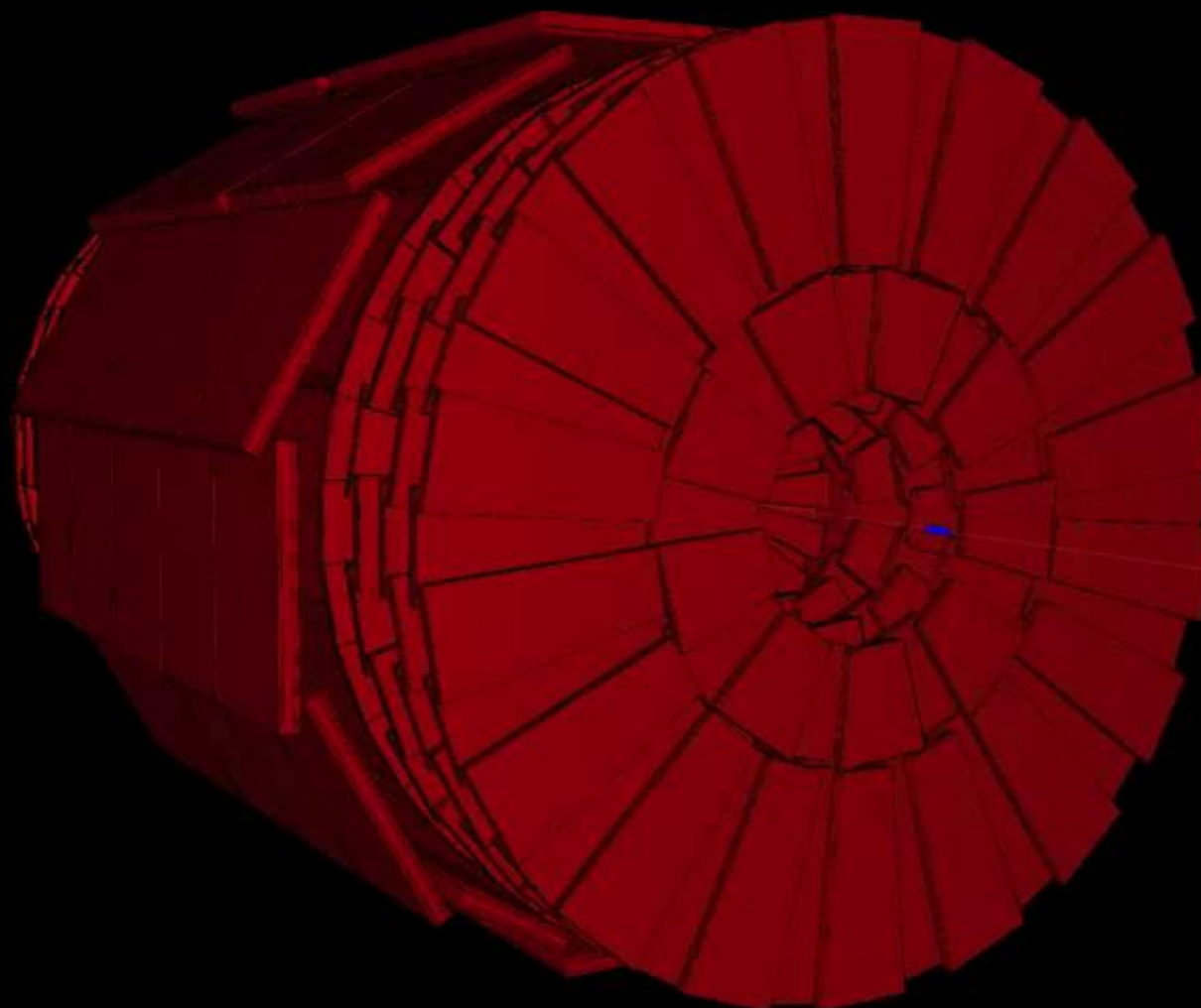
Hadron collider (?)



Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



CMS Experiment at the LHC, CERN
Sun 2011-Aug-07 05:00:32 CET
Run 172822 Event 2554393033
C.O.M. Energy 7.00TeV
H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 μ candidate

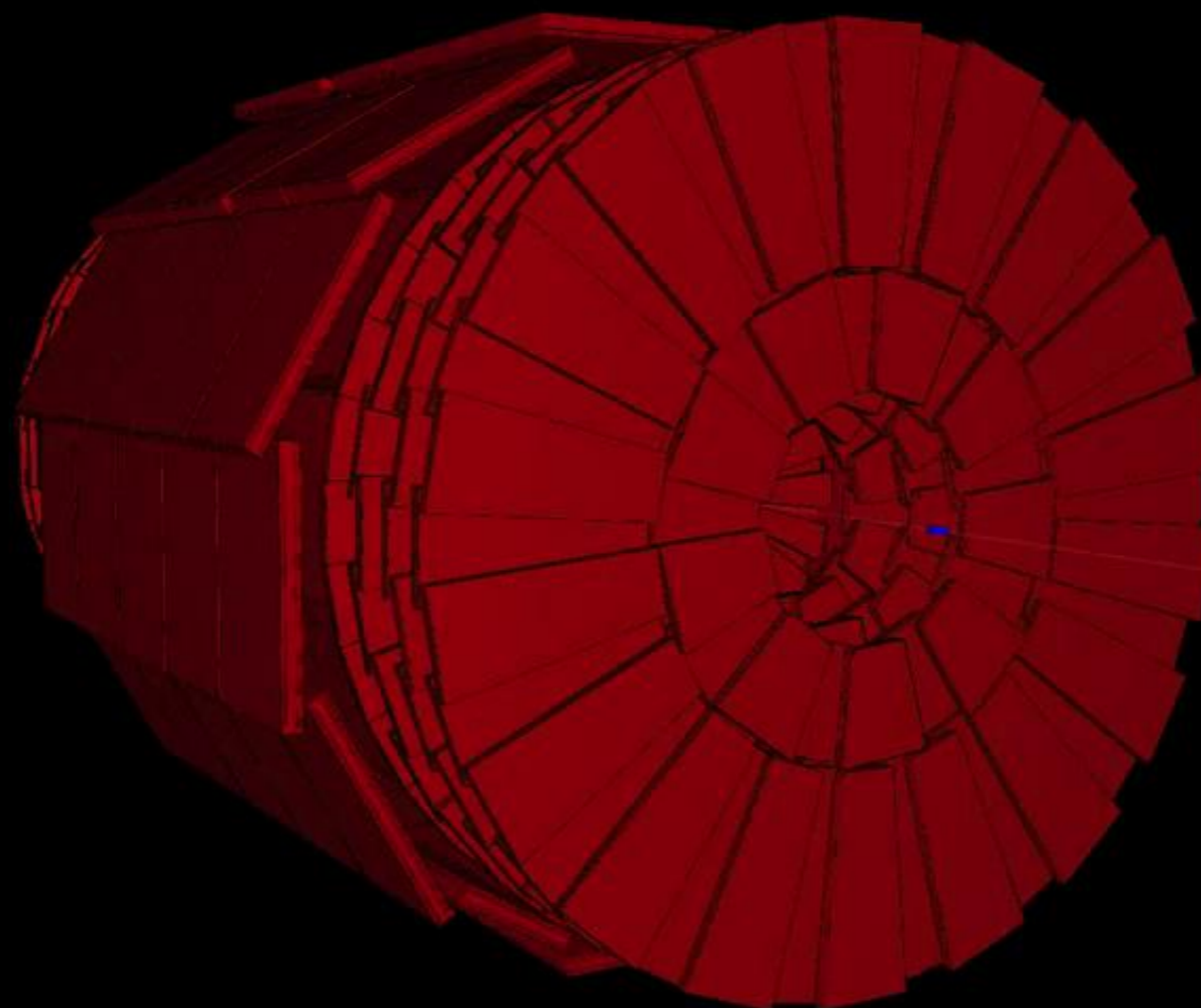




Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



CMS Experiment at the LHC, CERN
Sat 2011-Apr-23 06:05:17 CET
Run 163302 Event 27907479
C.O.M. Energy 7.00 TeV
H→GammaGamma candidate





Новая частица!

Новая частица в ATLAS и CMS с массой 125
ГэВ

Бозон Хиггса Стандартной Модели (!) :

Сечение образования \leftarrow SM

Свойства нового бозона:

-электрический заряд \leftarrow SM

- Спин \leftarrow SM

- зарядовая и пространственная четность \leftarrow
SM

-соотношение между вероятностями
различных распадов \leftarrow SM

-?

Июль 2013: Бозон Хиггса СМ!

**Июль 2013, Конференция Европейского Физ. Общ.
CMS и ATLAS: бозон Хиггса Стандартной Модели 125 ГэВ
на уровне 7σ**



François Englert and Peter Higgs

Photo: © CERN

**2013 Nobel Prize
in Physics**

**осень 2013 – лето 2014, CERN: новые свидетельства
в пользу бозона Хиггса СМ**



продолжение следует



- Популярный сайт Фонда “Династия”:
elementy.ru
- Виртуальная академия ФВЭ (ОИЯИ)

Лекция 2

Физика на Большом Адронном Коллайдере

Поиски бозона Хиггса

Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели