Введение в физику элементарных частиц - I

В.Т. Ким
Петербургский Институт Ядерной Физики НИЦ КИ, Гатчина
Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

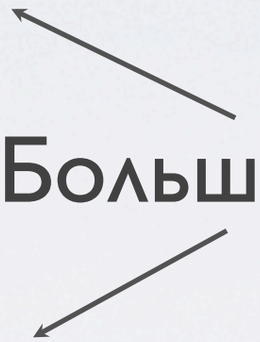
План лекций

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 ~ время 10^{-10}с после Большого Взрыва

Удивительный мир Элементарных частиц

Из чего сделан и как устроен мир?

Физика элементарных частиц

Квантовая механика

СТО

Релятивистская квантовая механика

Теория поля

Квантовая теория поля

Единицы измерений и масштабы

1 нм = 10^{-9} м молекула

1 Фм = 10^{-15} м протон

10^{-3} Фм = 10^{-18} м ≥ электрон

$3 \cdot 10^{-19}$ м ≥ кварки (БАК: CMS & ATLAS)

возможность проверить на БАК

структуру частиц до: ~ 10^{-5} Фм = 10^{-20} 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 ~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 × 3.5 ТэВ

1 ТэВ = 10^{12} эВ

Немного кинематики

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

здесь и далее $c = 1$

масса протона = 0.94 ГэВ

масса электрона = 0.5 МэВ

преобразования Лоренца

4D-вращения в пространстве Минковского

длина 4-вектора: инвариант

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

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

угол ⟶ быстрота

cos, sin ⟶ ch, sh

Масса в СТО

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

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: $p = (E, \vec{p})$

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

$$P_1 = P_2 + P_3$$
$$= (E_2+E_3,\ P_{2x}+P_{3x},\ P_{2y}+P_{3y},\ P_{2z}+P_{3z})$$

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

масса ← Лоренц-инвариант (длина 4-вектора)

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

ПОЧЕМУ КОЛЛАЙДЕРЫ?

Г.И. Будкер (ИЯФ СО АН): встречные пучки

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

СЦМ	ЛС
$(E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2) = (2E, \vec{0})$	$(E^L + m, \vec{p}^L + \vec{0})$
$p^2 = 4\,(E)^2$	$p^2 = (E^L + m)^2 - (\vec{p}^L)^2 =$
	$= 2mE^L + 2m^2 \approx 2mE^L$
$E \approx \sqrt{(E^L m)/2}$	$E^L \approx 2\,(E)^2/\,m$

Фермилаб: 1 ТэВ x 1 ТэВ	$\longrightarrow$	$E^L = 2 \cdot 10^3$ ТэВ	$2 \cdot 10^3$
БАК: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ	$\longrightarrow$	$E^L = 2 \cdot 10^4$ ТэВ	$6 \cdot 10^3$
БАК: 7 ТэВ x 7 ТэВ	$\longrightarrow$	$E^L = 10^5$ ТэВ	$1.4 \cdot 10^4$

Современные коллайдеры

Фермилаб Тэватрон (Чикаго)
pp: 1 ТэВ x 1 ТэВ $E^L = 2 \cdot 10^3$ ТэВ

BNL RHIC (Нью-Йорк)
AA: 100 ГэВ/н x 100 ГэВ/н $E^L = 20$ ГэВ/н
AuAu

ЦЕРН БАК (Женева)
pp: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ $E^L = 2 \cdot 10^4$ ТэВ
7 ТэВ x 7 ТэВ $E^L = 10^5$ ТэВ
AA: 5.5 ТэВ/нуклон-нуклон
PbPb

БАК: 27км 11000 оборотов/с

Масса в Квантовой Механике

S >> h ➔ классическая теория

S ~ h ➔ квантовая теория

h – квант действия

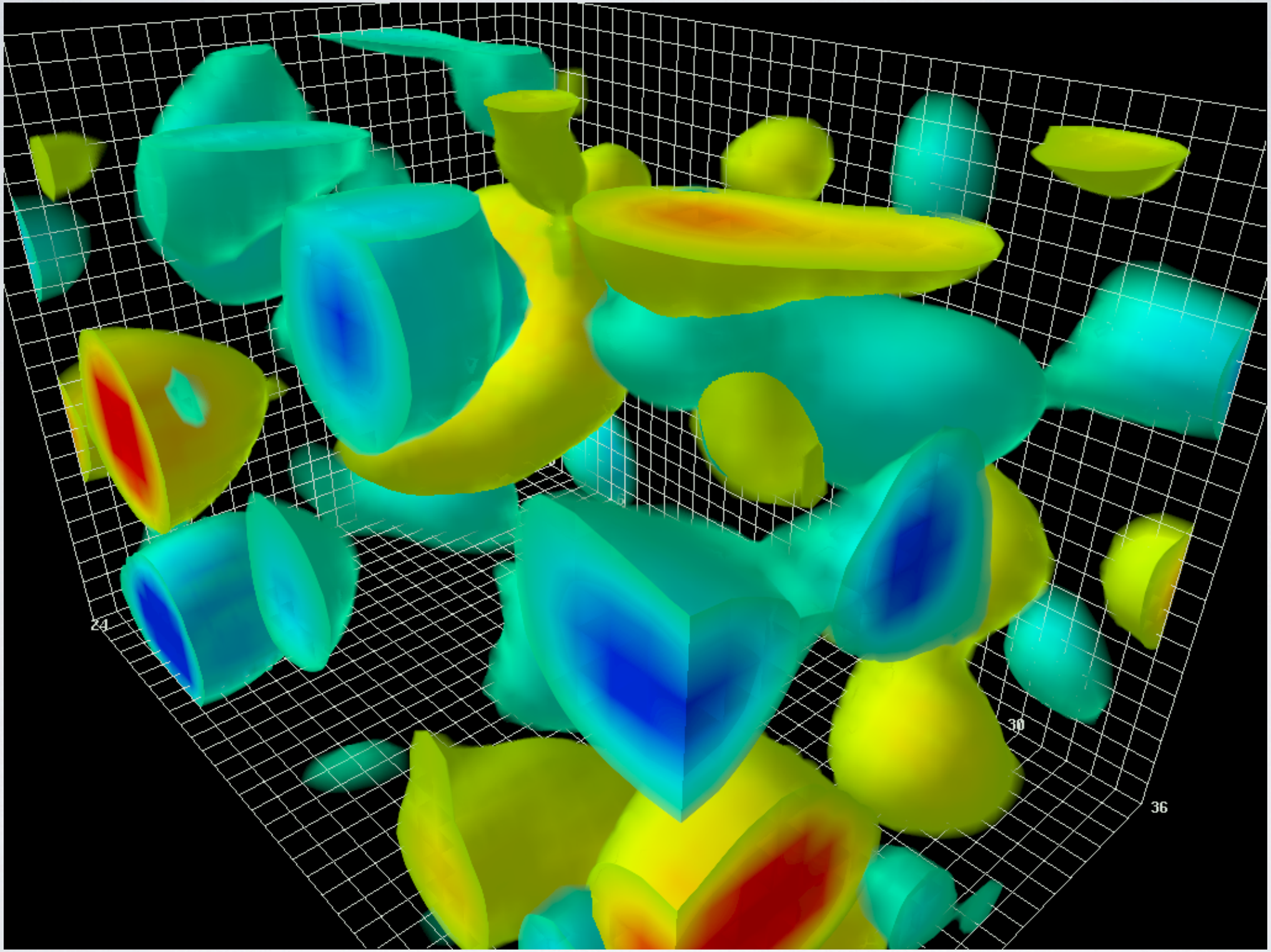
далее h = I

Стабильные и нестабильные частицы

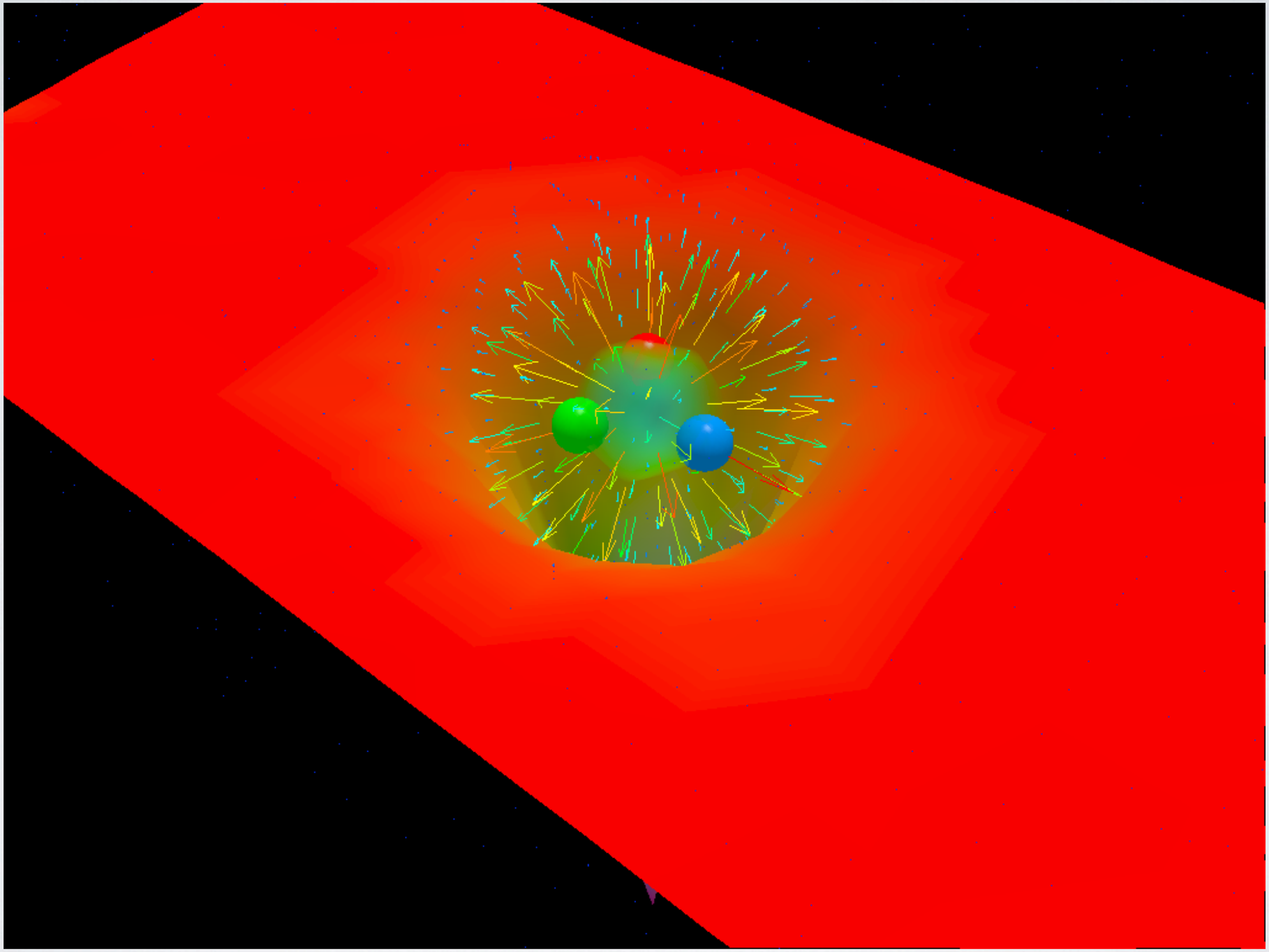
Реальные и виртуальные частицы

R. Feynman: « …Только виртуальные частицы могут быть наблюдаемыми …»

Физический вакуум



Частица в вакууме



(Поперечное) сечение рассеяния

Вероятность и интенсивность взаимодействия:

сечение рассеяния ~ r^2

контактное взаимодействие ➔ площадь мишени

точка с кулоновским взаимодействием ➔ ∞

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

Задача: объяснить множитель 2

Единицы измерений и масштабы

Вероятность и интенсивность взаимодействия:

сечение рассеяния ~ r^2

барн: 1 б = 10^{-24} $см^2$

1 мб = 10^{-27} $см^2$

1 пб = 10^{-36} $см^2$

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

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

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

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

Частота реакций = светимость × сечение

Бозон Хиггса:

сечение (m = 125 ГэВ при 8 тэВ) ≈ 10 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

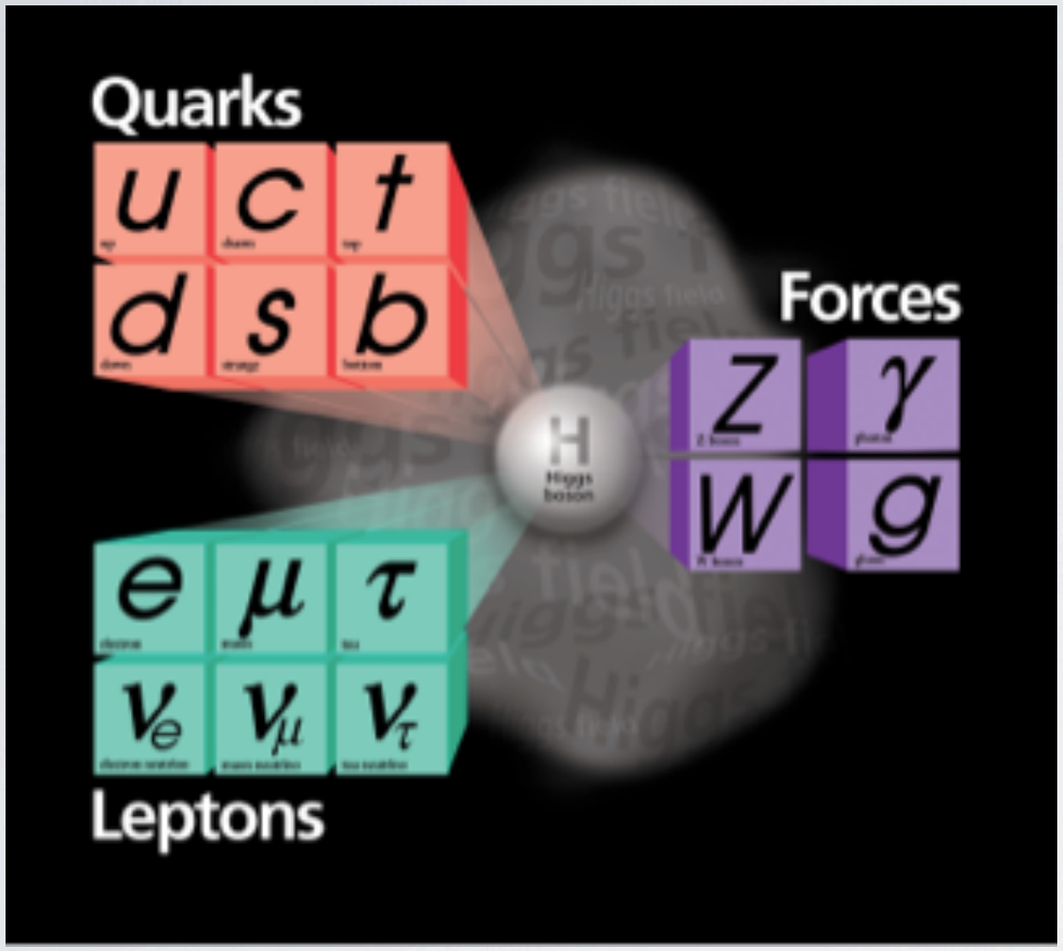
сохранение электрического заряда

сохранение барионного заряда

…

Принципы и законы связаны с симметриями!

Стандартная Модель



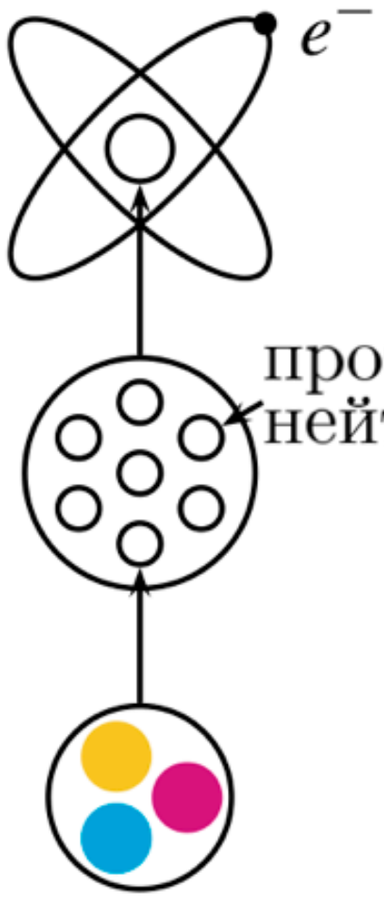
e.g. LEP and SM

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
	80.392 ± 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
Γ(had) [GeV]	1.7444 ± 0.0020	1.7434 ± 0.0010	—
Γ(inv) [MeV]	499.0 ± 1.5	501.65 ± 0.11	—
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	83.984 ± 0.086	83.996 ± 0.021	—
$\sigma_{\rm had}$ [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
$s^2_\ell(A_{FB}^{(0,q)})$	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
	0.1498 ± 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	0.895 ± 0.091	0.9356 ± 0.0001	−0.4
g^2_L	0.30005 ± 0.00137	0.30378 ± 0.00021	−2.7
g^2_R	0.03076 ± 0.00110	0.03006 ± 0.00003	0.6
g^{2e}_V	-0.040 ± 0.015	-0.0396 ± 0.0003	0.0
g^{2e}_A	-0.507 ± 0.014	-0.5064 ± 0.0001	0.0
A_{PV}	-1.31 ± 0.17	-1.53 ± 0.02	1.3
Q_W(Cs)	-72.62 ± 0.46	-73.17 ± 0.03	1.2
Q_W(Tl)	-116.6 ± 3.7	-116.78 ± 0.05	0.1
$\frac{\Gamma(b\to s\gamma)}{\Gamma(b\to X e\nu)}$	$3.35^{+0.50}_{-0.44} \times 10^{-3}$	$(3.22 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	0.3
$\frac{1}{2}(g_\mu - 2 - \frac{\alpha}{\pi})$	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

Зоопарк частиц СМ

лептоны $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$



три семейства частиц

кварки $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

+ АНТИЧАСТИЦЫ

e^+ : позитрон, ...

$\bar{\nu}_e$: антинейтрино, ...

$\bar{u}$: антикварки, ...

+ частицы, ответственные за взаимодействия: фотон, глюоны, W, Z, гравитон + бозон Хиггса (еще не открыт)

Адроны и Кварки

лептоны - “лептос” (легкий)
адроны - “хадрос” (тяжелый)

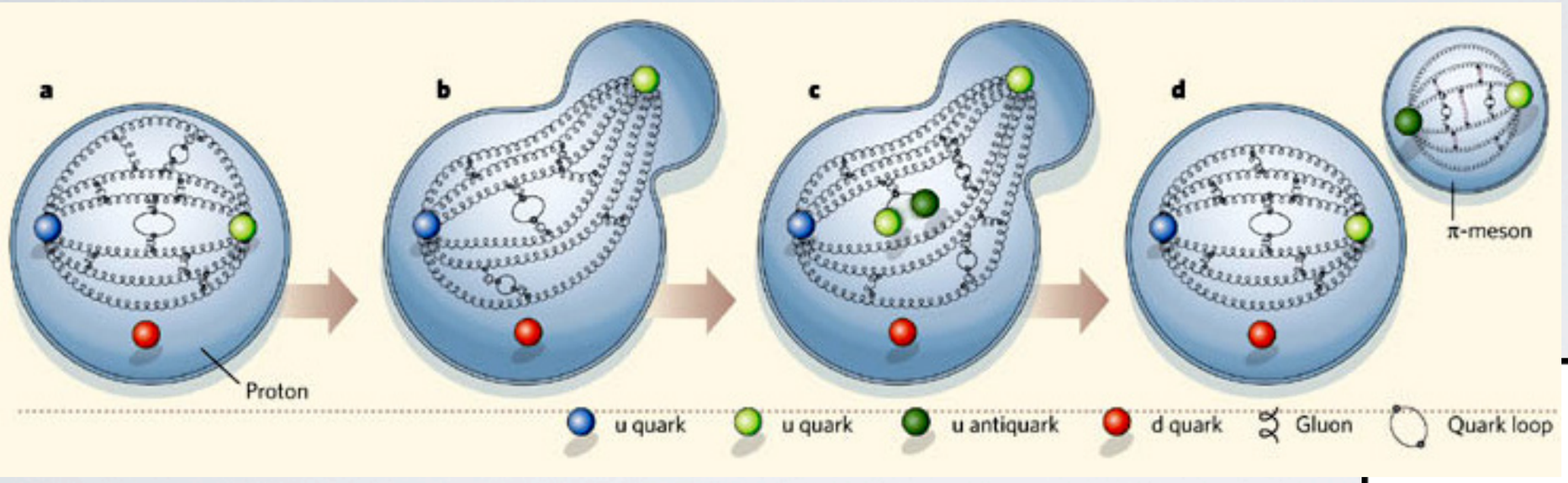
барион: три кварка
мезон: кварк-антикварк

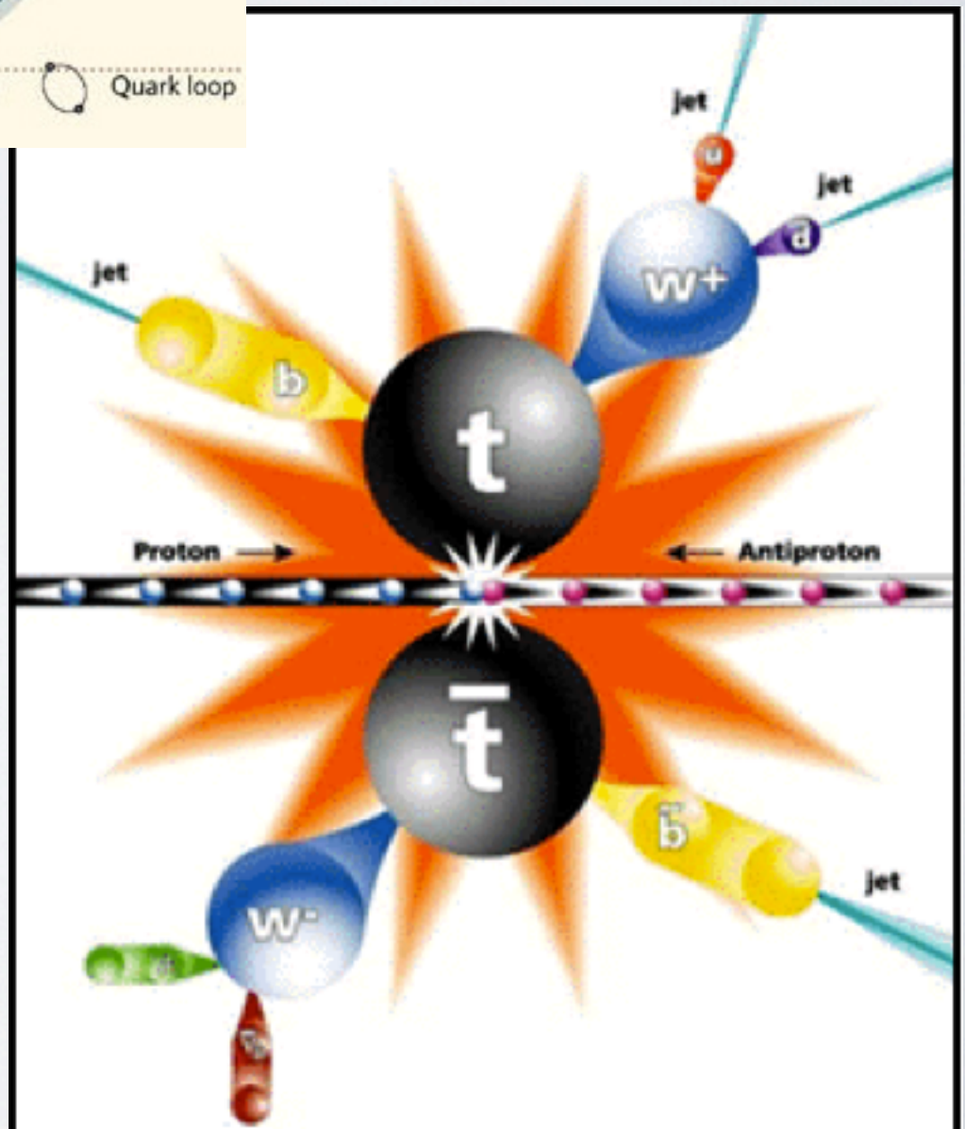
Квантовая Хромодинамика (КХД)

кварки: 6 флейворов (ароматов)
три цвета (сильный заряд)
дробные электрические заряды

глюоны: 8 цветов
электрически нейтральны

Асимптотическая свобода и конфайнмент





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

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 СМ
- новые частицы и взаимодействия за пределами Стандартой Модели

а также:

- проверка СМ при новых энергиях
- поиски новой динамики СМ

Спонтанное нарушение симметрии В Стандартной модели (СМ) электрослабых взаимодействий

СМ – теория с (нарушенной)локальной калибровочной инвариантностью

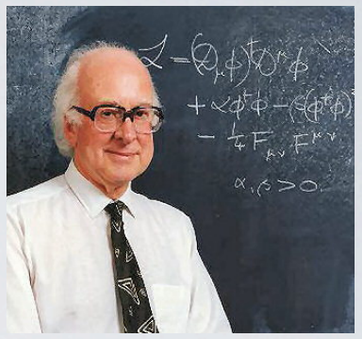
Проблема: калибровочная инвариантность требует безмассовость калибровочных векторных бозонов?
Проблема: перенормируемость физических теорий с массивными калибровочными векторными бозонами ?

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 - конденсированые 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)

->

Стандарная 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»

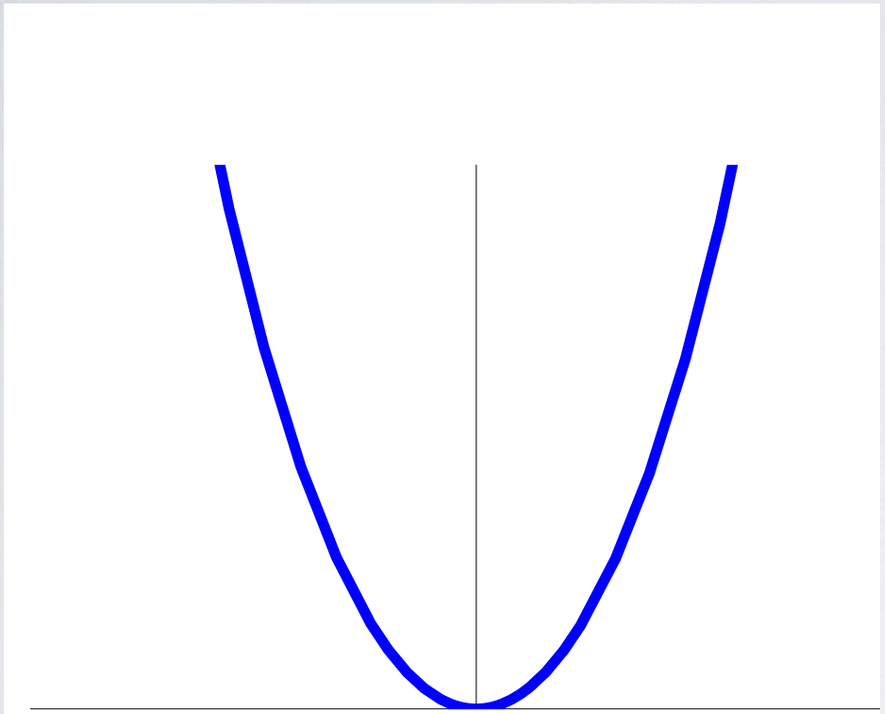
Спонтанное нарушение симметрии: конденсированные среды

P. Anderson (1962)

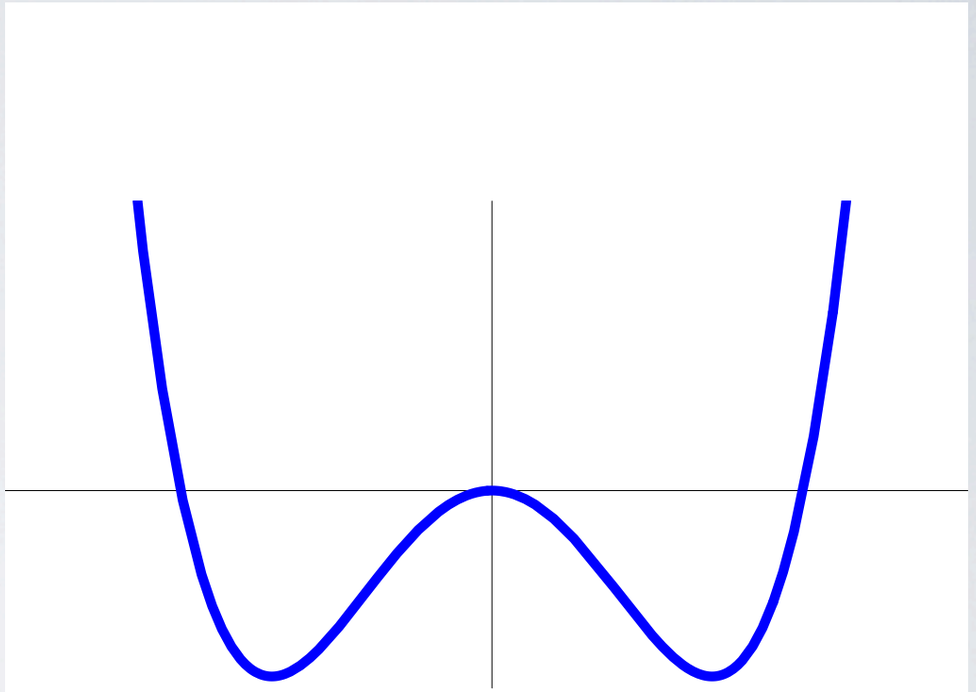
Калибровочные бозоны ”съедают” бозоны Голдстоуна и приобретают массу аналогично фотону внутри сверхпроводника

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



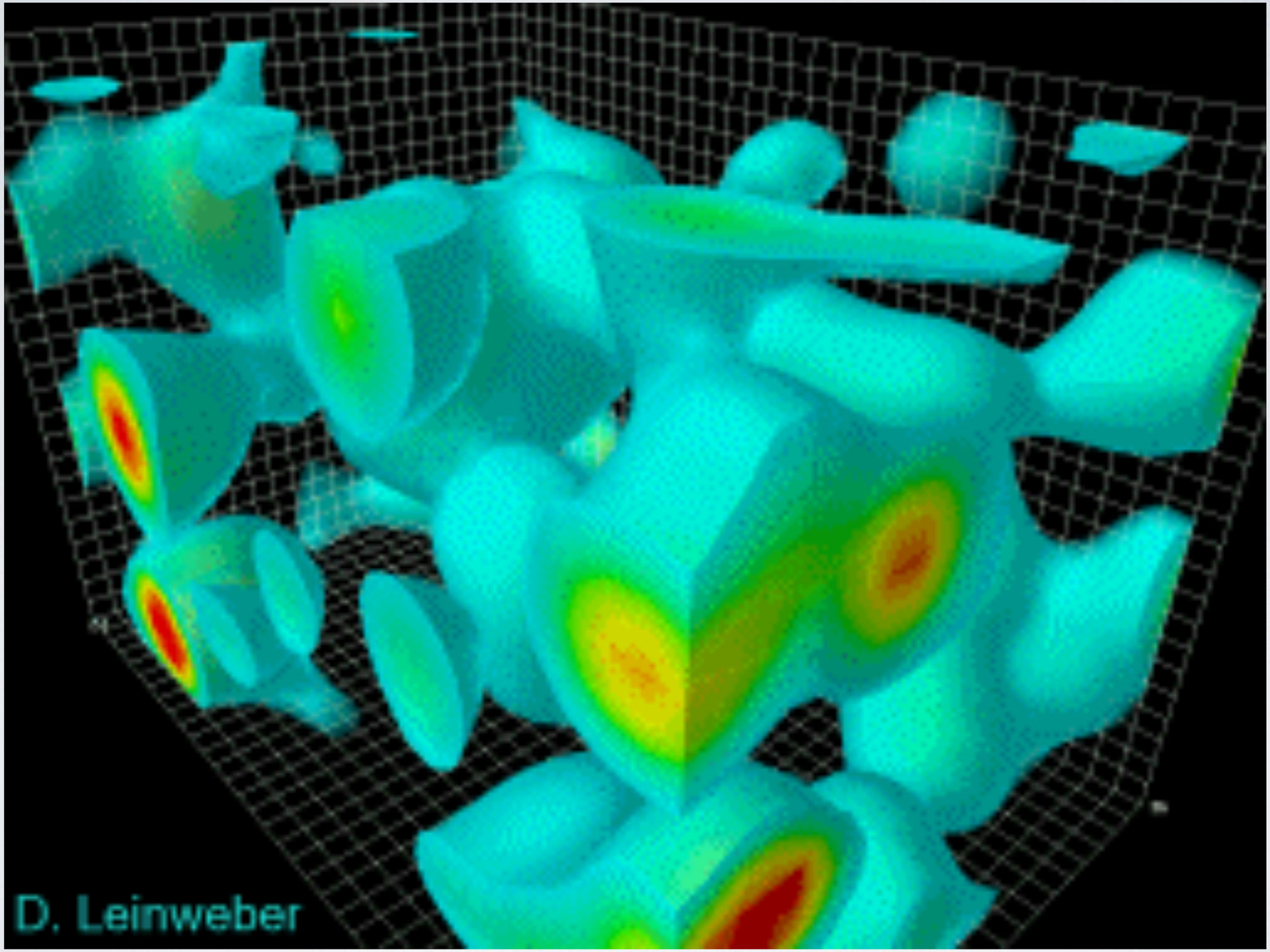
$$< H >= 0$$



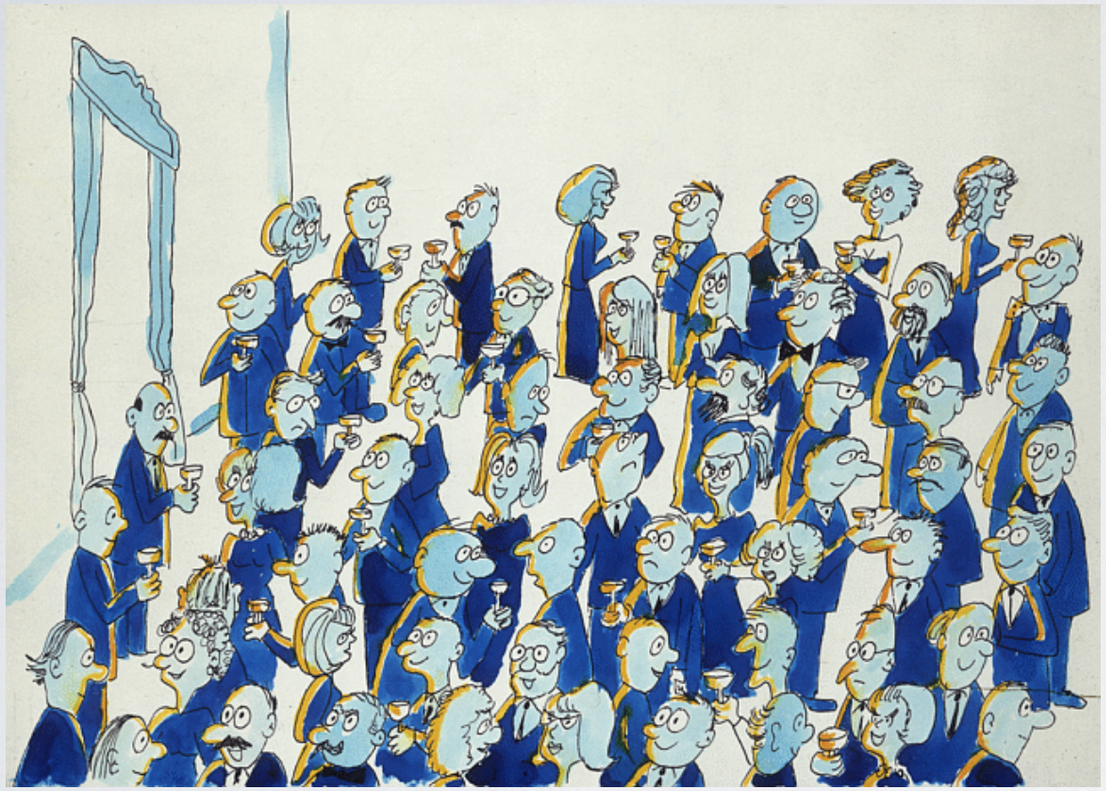
$$\langle H \rangle \sim \Lambda_{UV}$$

квантовые флуктуации
->
несимметричное
вакуумное состояние

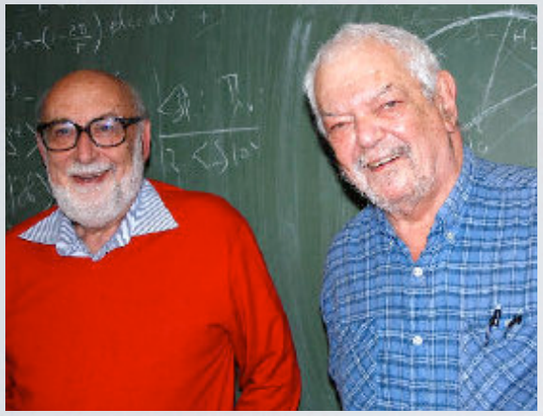
Физический вакуум



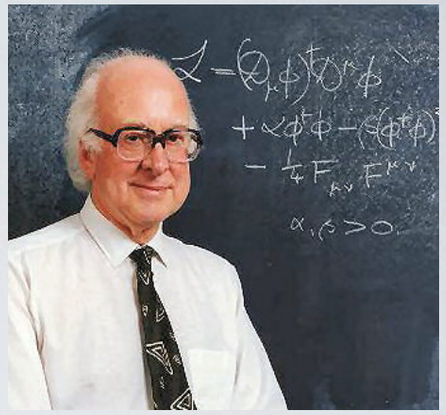
Спонтанное нарушение симметрии



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: неабелевые 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)
Перенормируемость Стандартной Модели:
Нобелевская премия: Ж.т'Хуфт, М.Велтман (1999)

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 (Λ)

ЦЕРН: ISR pp 31x31 ГэВ

SppS ppbar 315x315 ГэВ

LEP e+e- 45x45, 110x110 ГэВ

Фермилаб (США): ppbar 0.98x0.98 ТэВ

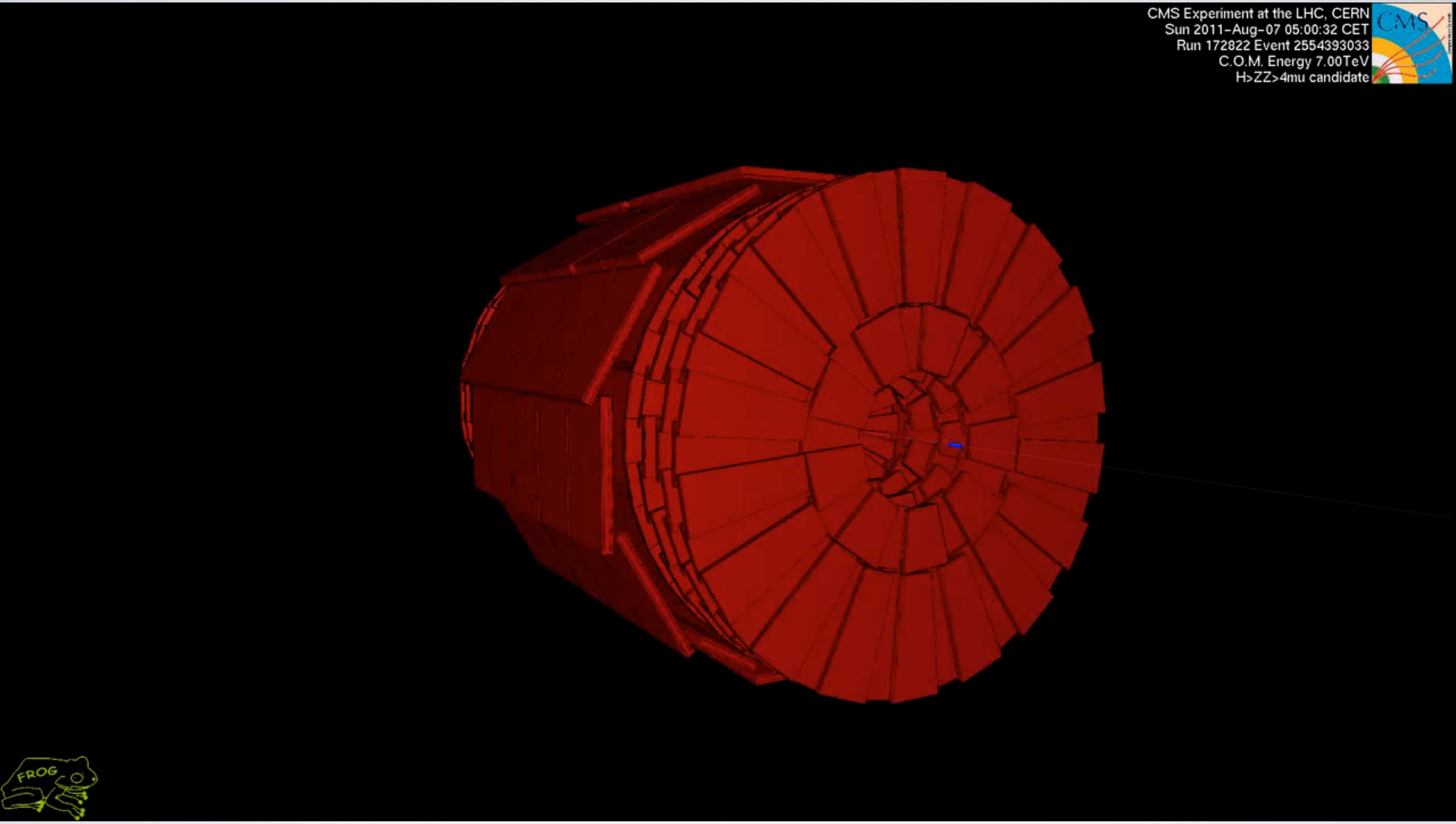
ЦЕРН: LHC (БАК) - Новые возможности

3.5 x 3.5 ТэВ 2010-2011

4 x 4 ТэВ 2012

Охота за бозоном Хиггса СМ!!!

Поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)

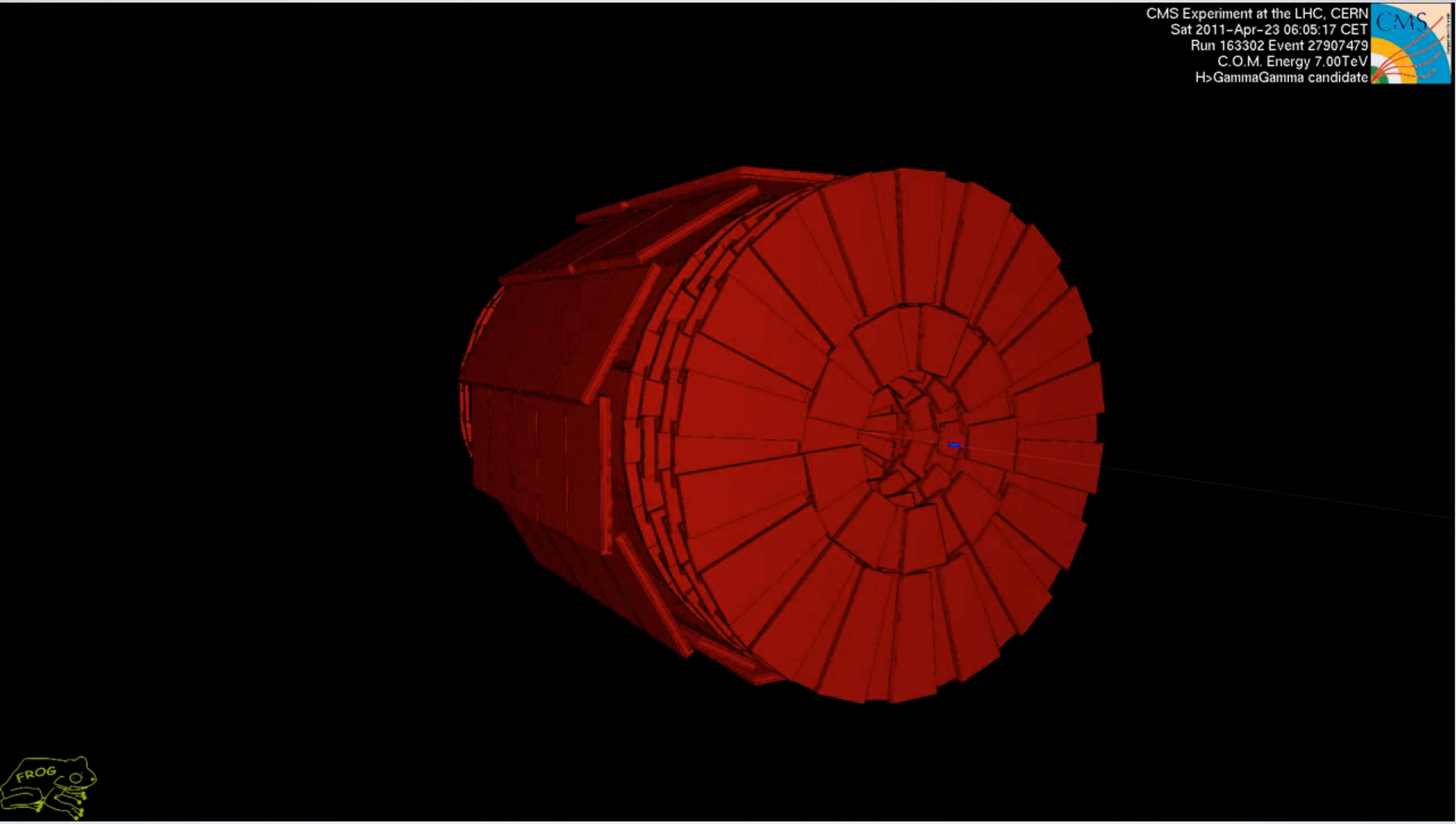


Образовательная Программа, ЦЕРН, Женева, 3 ноября, 2014

В.Т. Ким

ПИЯФ НИЦ КИ, Гатчина & СПбГПУ

поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



Новая частица!

Новая частица в ATLAS и CMS с массой 125 ГэВ

Бозон Хиггса Стандартной Модели (!) :

Сечение образования ← СМ

Свойства нового бозона:

- электрический заряд ← СМ
- Спин ← СМ
- зарядовая и пространственная четность ← СМ
- соотношение между вероятностями различных распадов ← СМ
- ?

Июль 2013: Бозон Хиггса СМ!

Июль 2013, Конференция Европейского Физ. Общ.
CMS и ATLAS: бозон Хиггса Стадартной 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