



Введение в физику элементарных частиц

В.Т. Ким

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



План лекций

I

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

II

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 нм = 10^{-9} м молекула

1 ФМ = 10^{-15} м протон

10^{-3} ФМ = 10^{-18} м \geq электрон

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

возможность проверить на БАК

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

Единицы измерений и масштабы

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

- свет проходит $l_{\text{Фм}} = 10^{-15}$ м (размер протона)

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

характерные энергии:

$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж

молекулы ~ 0.02 эВ

фотоны ~ 2 эВ

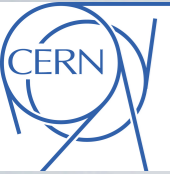
ядерные реакции: $1 \text{ МэВ} = 10^6$ эВ

структура протона: $1 \text{ ГэВ} = 10^9$ эВ

БАК (1 стадия):

$3.5 \text{ ТэВ} \times 3.5 \text{ ТэВ}$

$1 \text{ ТэВ} = 10^{12}$ 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

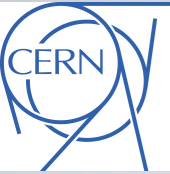
длина 4-вектора: инвариант

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

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

угол \longrightarrow быстрота

cos, sin \longrightarrow ch, sh



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

$$(E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2) = (2E, \vec{0})$$

$$(E^L + m, \vec{p}^L + \vec{0})$$

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

$$p^2 = (E^L + m)^2 - (\vec{p}^L)^2 =$$

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

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

$$\text{Фермилаб: } 1 \text{ ТэВ} \times 1 \text{ ТэВ} \longrightarrow E^L = 2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ} \quad 2 \cdot 10^3$$

$$\text{БАК: } 3.5 \text{ ТэВ} \times 3.5 \text{ ТэВ} \longrightarrow E^L = 2 \cdot 10^4 \text{ ТэВ} \quad 6 \cdot 10^3$$

$$\text{БАК: } 7 \text{ ТэВ} \times 7 \text{ ТэВ} \longrightarrow E^L = 10^5 \text{ ТэВ} \quad 1.4 \cdot 10^4$$



Современные коллайдеры



Фермилаб Тэватрон (Чикаго)

pp: 1 ТэВ x 1 ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^3 \text{ ТэВ}$$

BNL RHIC (Нью-Йорк)

AA: 100 ГэВ/н x 100 ГэВ/н

$$E^L = 20 \text{ ГэВ/н}$$

AuAu

ЦЕРН БАК (Женева)

pp: 3.5 ТэВ x 3.5 ТэВ

$$E^L = 2 \cdot 10^4 \text{ ТэВ}$$

7 ТэВ x 7 ТэВ

$$E^L = 10^5 \text{ ТэВ}$$

AA: 5.5 ТэВ/нуклон-нуклон

PbPb

БАК: 27км 11000 оборотов/с

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

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

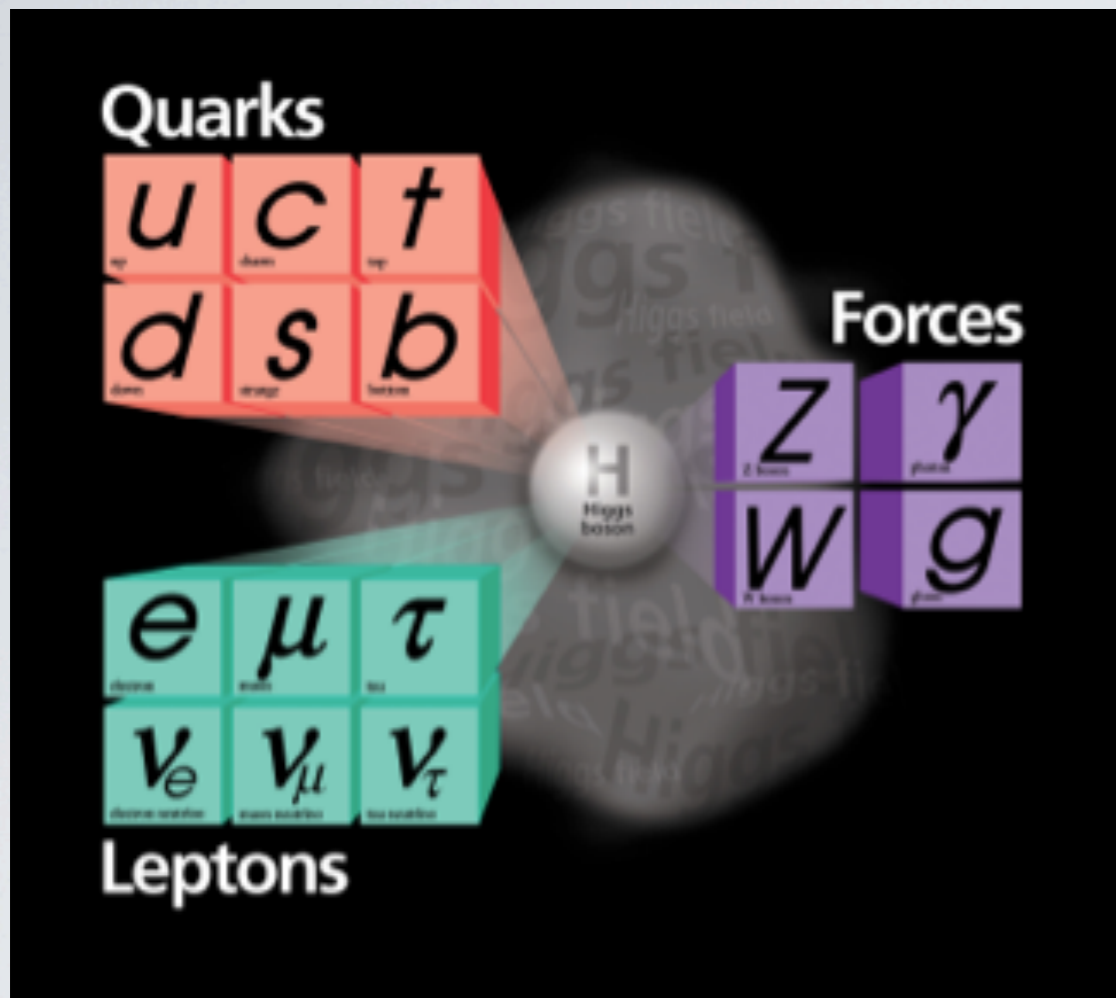
Спин (внутренний угловой момент): квантуется

фермионы: полуцелый спин (принцип Паули)

бозоны: целый спин (возможна конденсация)

Уравнение Дирака для релятивистских частиц:

существуют античастицы



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
$\Gamma(\text{had})$ [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
$s_\tau^2(A_{FB}^{(0,q)})$	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
	0.1498 ± 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_b^2	0.30005 ± 0.00137	0.30378 ± 0.00021	-2.7
g_W^2	0.03076 ± 0.00110	0.03006 ± 0.00003	0.6
g_V^e	-0.040 ± 0.015	-0.0396 ± 0.0003	0.0
g_A^e	-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
$\frac{\Gamma(b \rightarrow s\gamma)}{\Gamma(b \rightarrow \text{had})}$	$3.35^{+0.50}_{-0.44} \times 10^{-3}$	$(3.22 \pm 0.09) \times 10^{-3}$	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



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)

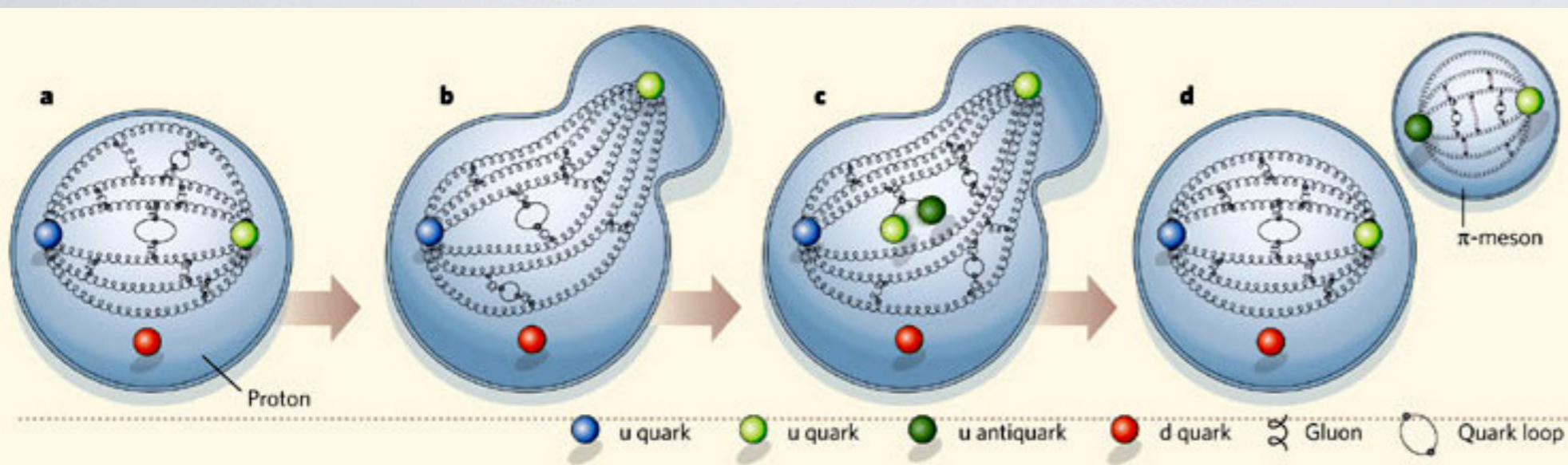
три цвета (сильный заряд)

дробные электрические заряды

глюоны: 8 цветов

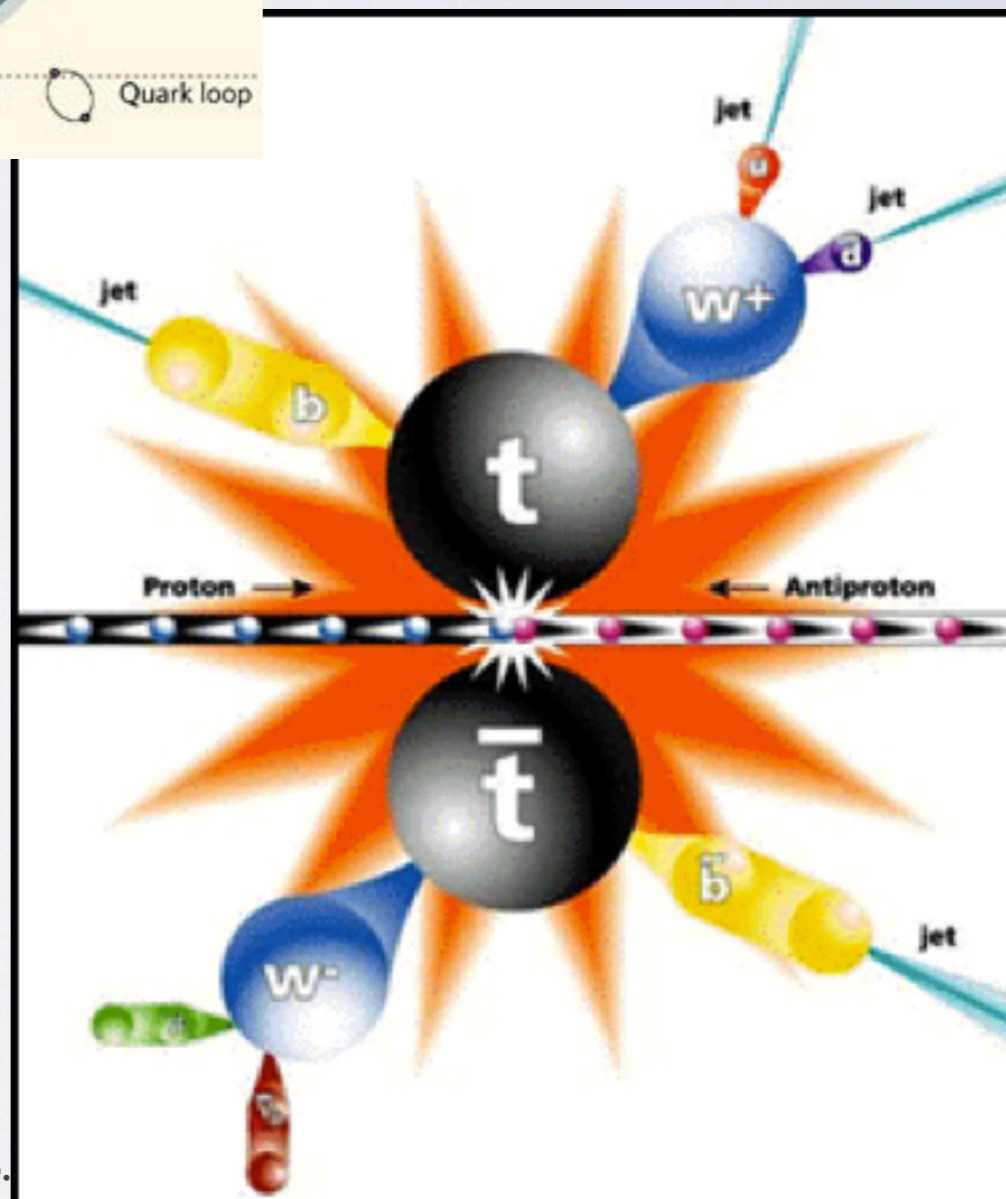
электрически нейтральны

Асимптотическая свобода и конфайнмент



Адроны при реакциях:

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





М. Гелл-Манн: “quarks” (1964)

С. Цвейг: “aces”

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

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 (Tsukaba -> 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 Стандартной Модели

а также:

- проверка СМ при новых энергиях
- поиски новой динамики СМ

Спонтанное нарушение симметрии

концепция: Н.Н. Боголюбов - конденсированные среды
Й. Намбу (1960), Дж.Голдстоун (1961) - физика частиц

Механизм Хиггса образования массивных частиц:

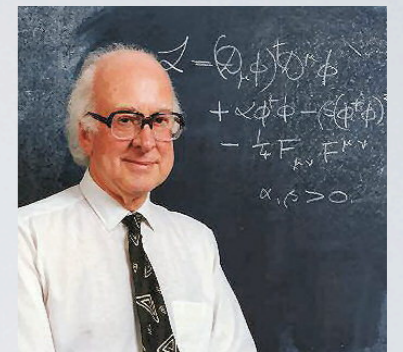
- нерелятивистский вариант: Ф. Андерсон (1962)

- релятивистский вариант:

Р. Брут, Ф.Энглерт (1964)

П. Хиггс (1964)

Дж.Гуралник, К.Хаген, Т. Киббл (1964)

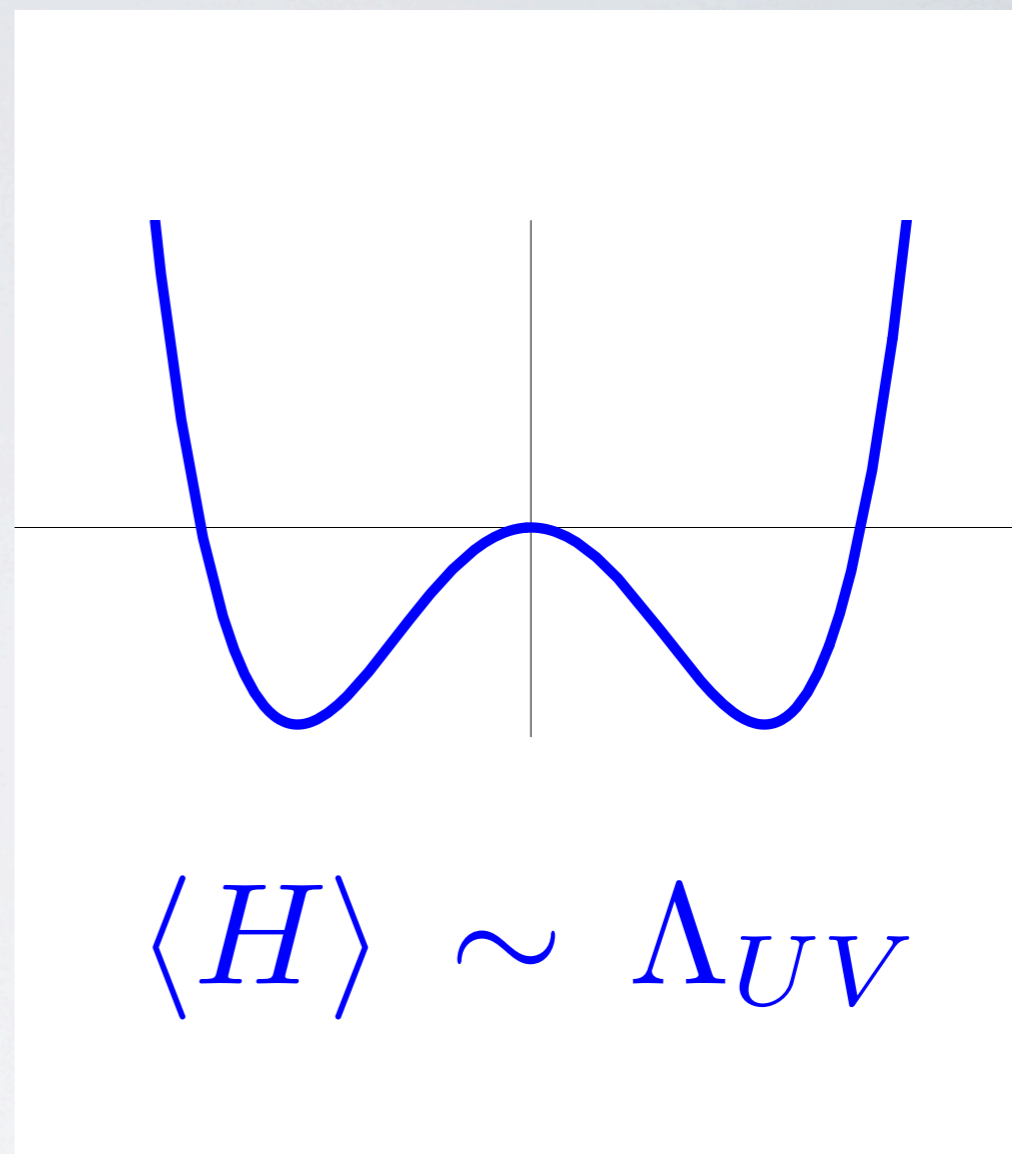
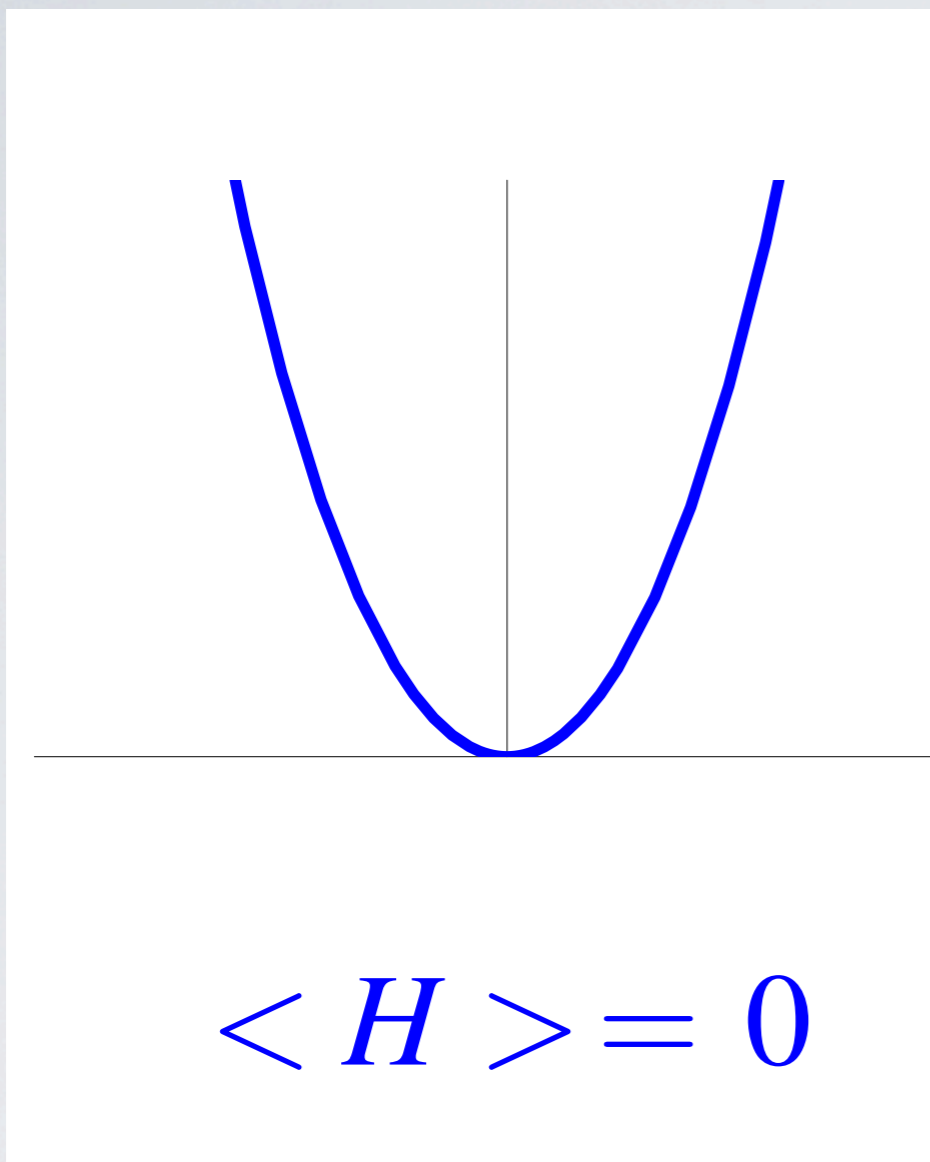


С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1968) применили механизм Хиггса к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962)

->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами W и Z

Спонтанное нарушение симметрии

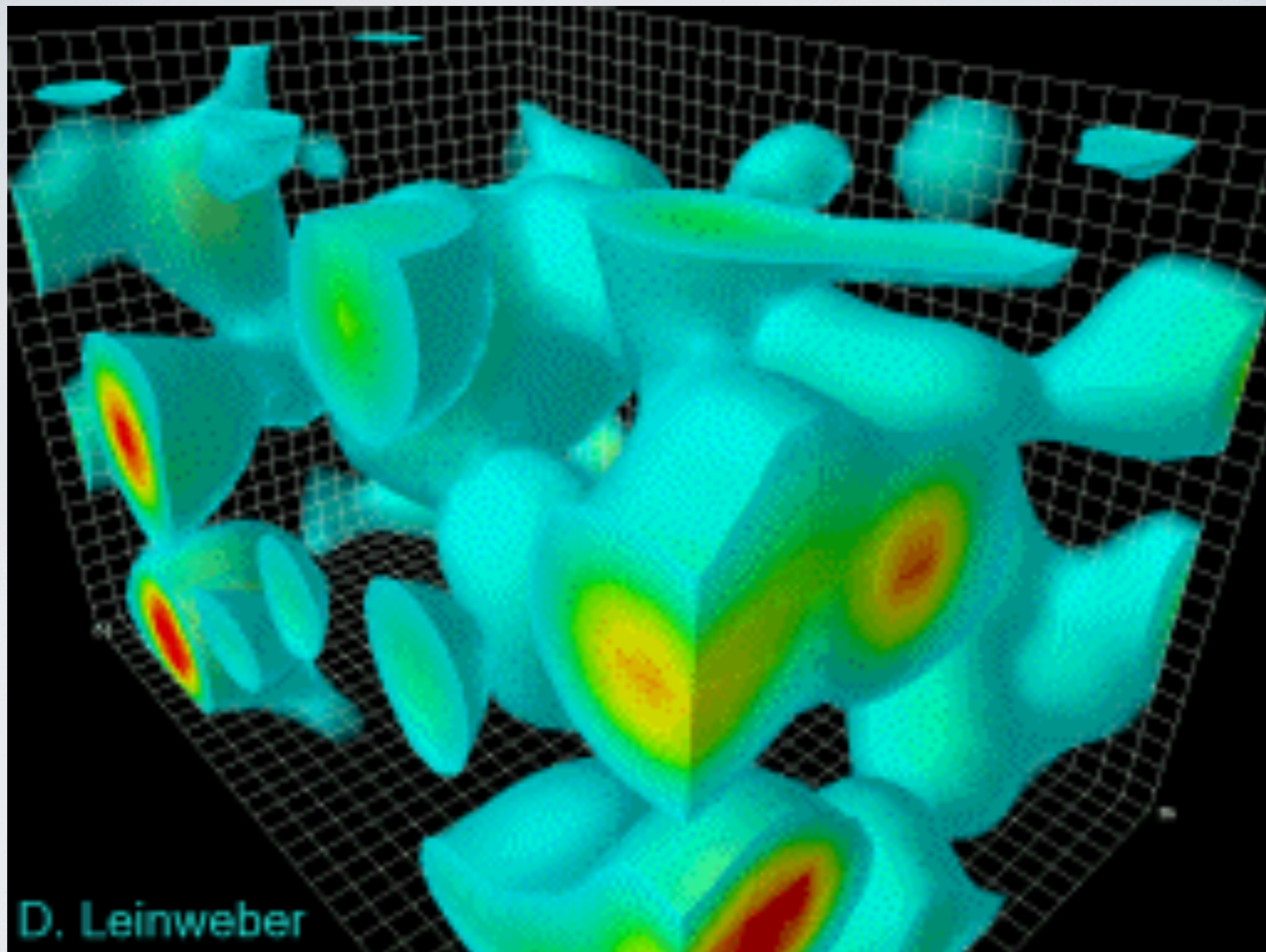


квантовые флуктуации

->

**несимметричное
вакуумное состояние**

Физический вакуум



Спонтанное нарушение симметрии





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

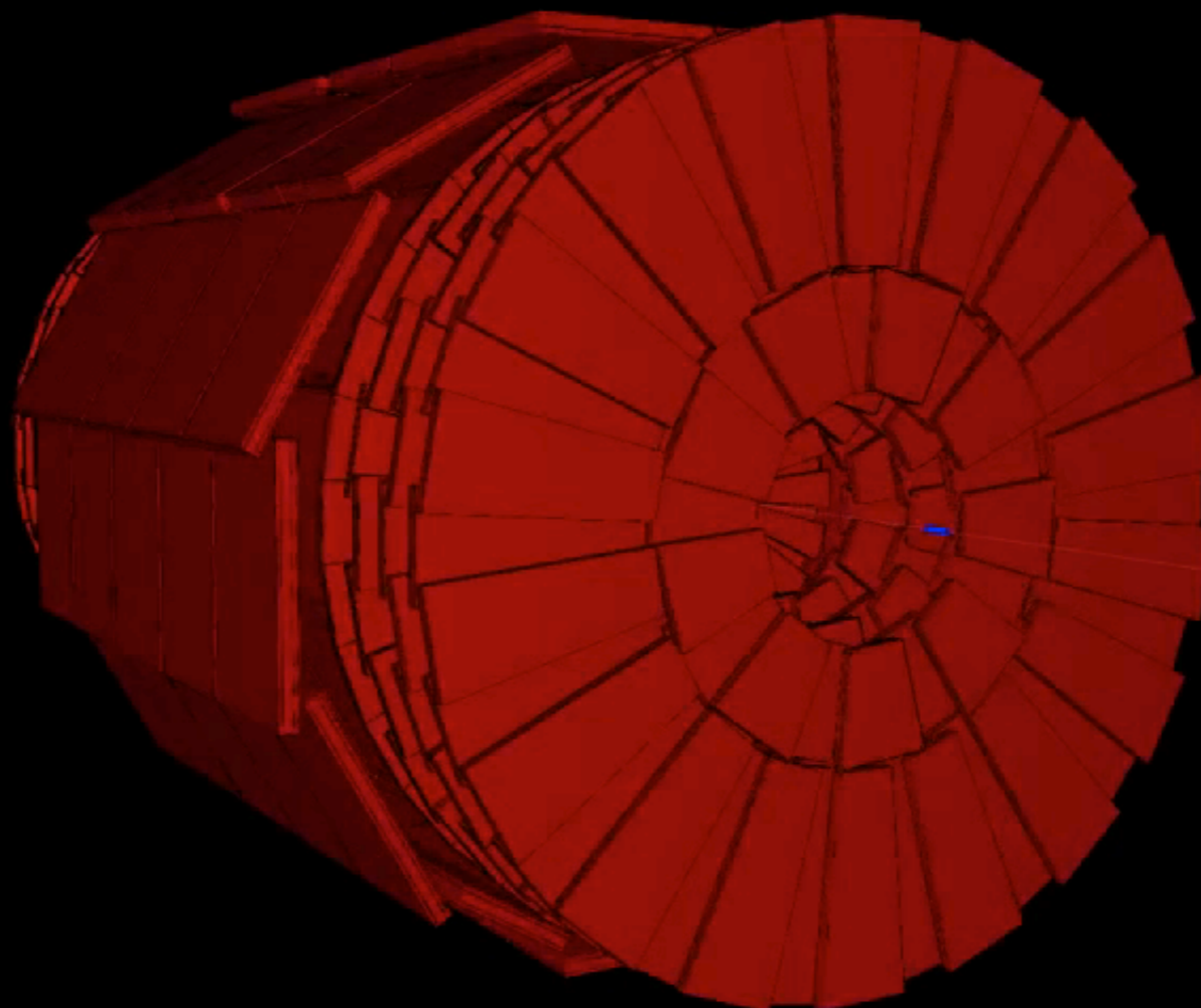
(закон сохранения вероятности) при рассеянии
тяжелых векторных бозонов



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>ZZ>4mu candidate

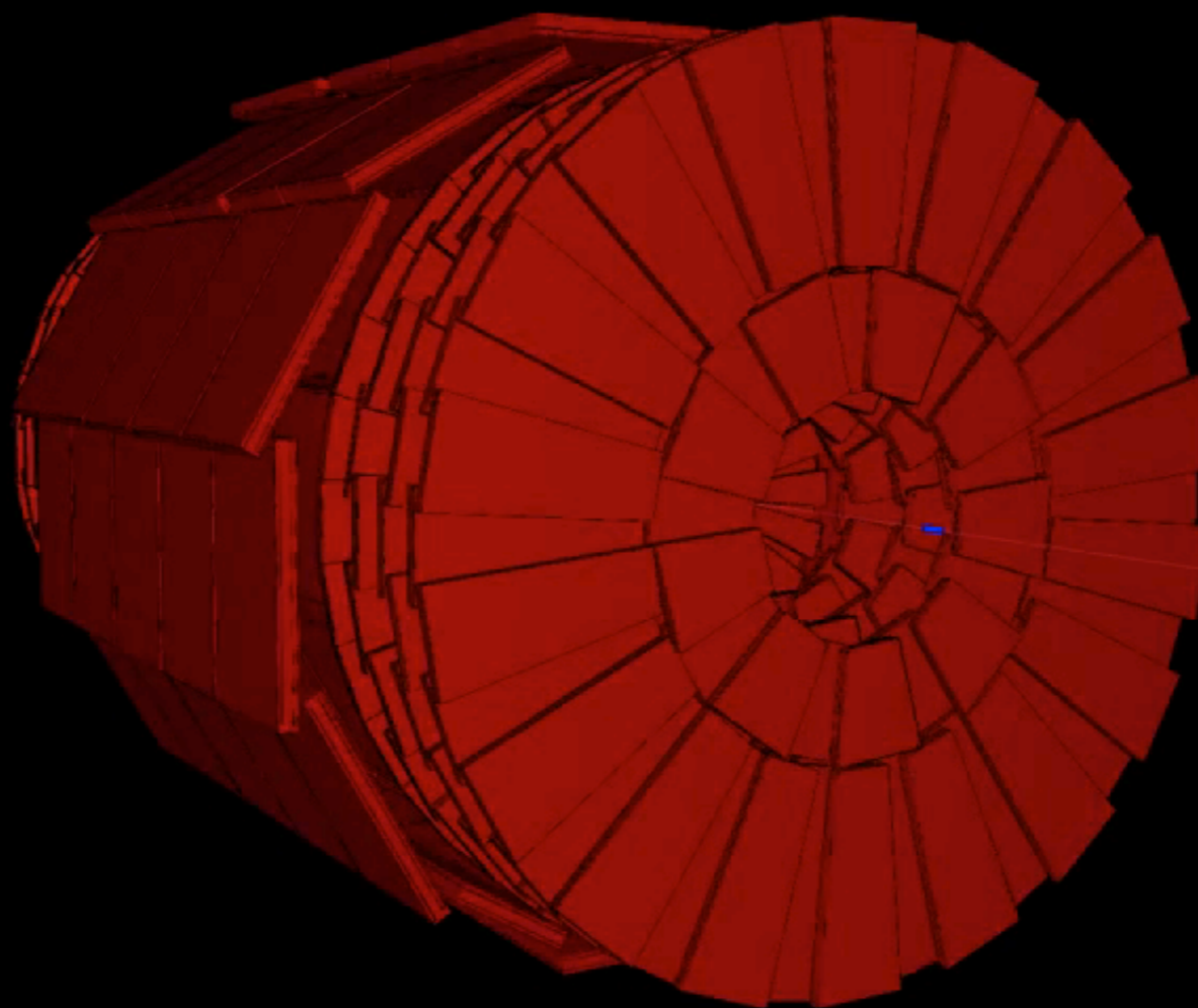




поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



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



Новая частица!

Новая частица ATLAS CMS:
бозон 125 ГэВ

Бозон Хиггса Стандартной Модели?

Сечение образования: SM

Квантовые свойства:

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



продолжение следует



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

Лекция 2

Стандартная Модель электрослабых взаимодействий
Поиски бозона Хиггса

Поиски новой физики за пределами Стандартной Модели