



# **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  $\sim 0.02$  эВ

фотоны  $\sim 2$  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  $8 \text{ тэВ}$ )  $\approx 10 \text{ пб}$

$1$  событие за  $10$  сек.

# квантовая физика

Соотношение неопределенности Гейзенберга:

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

Высокие энергии  $\longleftrightarrow$  малые расстояния

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

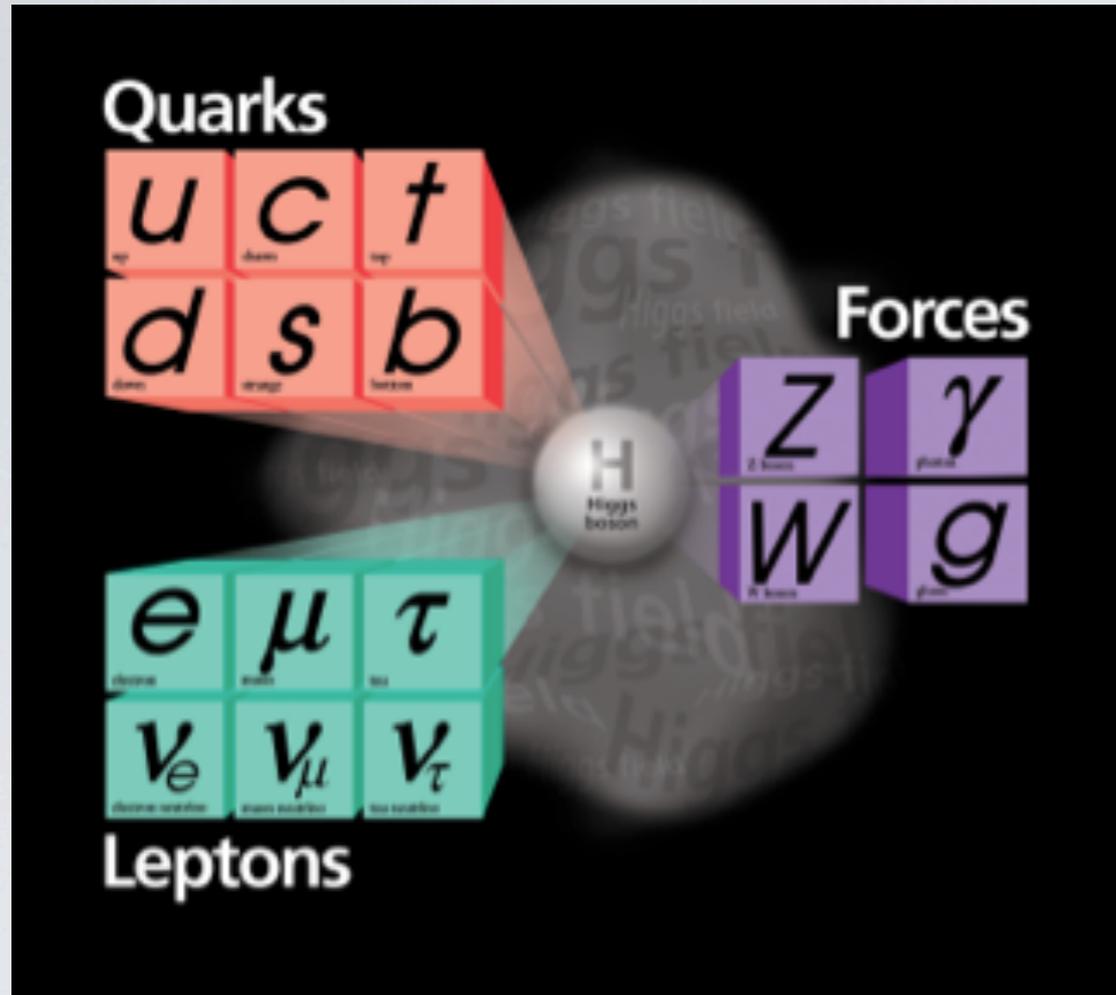
Спин (внутренний угловой момент): квантуется

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]	$172.7 \pm 2.9 \pm 0.6$	$172.7 \pm 2.8$	0.0
$M_W$ [GeV]	$80.450 \pm 0.058$	$80.376 \pm 0.017$	1.3
	$80.392 \pm 0.039$		0.4
$M_Z$ [GeV]	$91.1876 \pm 0.0021$	$91.1874 \pm 0.0021$	0.1
$\Gamma_Z$ [GeV]	$2.4952 \pm 0.0023$	$2.4968 \pm 0.0011$	-0.7
$\Gamma(\text{had})$ [GeV]	$1.7444 \pm 0.0020$	$1.7434 \pm 0.0010$	—
$\Gamma(\text{inv})$ [MeV]	$499.0 \pm 1.5$	$501.65 \pm 0.11$	—
$\Gamma(\ell^+\ell^-)$ [MeV]	$83.984 \pm 0.086$	$83.996 \pm 0.021$	—
$\sigma_{\text{had}}$ [nb]	$41.541 \pm 0.037$	$41.467 \pm 0.009$	2.0
$R_e$	$20.804 \pm 0.050$	$20.756 \pm 0.011$	1.0
$R_\mu$	$20.785 \pm 0.033$	$20.756 \pm 0.011$	0.9
$R_\tau$	$20.764 \pm 0.045$	$20.801 \pm 0.011$	-0.8
$R_b$	$0.21629 \pm 0.00066$	$0.21578 \pm 0.00010$	0.8
$R_c$	$0.1721 \pm 0.0030$	$0.17230 \pm 0.00004$	-0.1
$A_{FB}^{(0,e)}$	$0.0145 \pm 0.0025$	$0.01622 \pm 0.00025$	-0.7
$A_{FB}^{(0,\mu)}$	$0.0169 \pm 0.0013$		0.5
$A_{FB}^{(0,\tau)}$	$0.0188 \pm 0.0017$		1.5
$A_{FB}^{(0,b)}$	$0.0992 \pm 0.0016$	$0.1031 \pm 0.0008$	-2.4
$A_{FB}^{(0,c)}$	$0.0707 \pm 0.0035$	$0.0737 \pm 0.0006$	-0.8
$A_{FB}^{(0,s)}$	$0.0976 \pm 0.0114$	$0.1032 \pm 0.0008$	-0.5
$s_\tau^2(A_{FB}^{(0,q)})$	$0.2324 \pm 0.0012$	$0.23152 \pm 0.00014$	0.7
	$0.2238 \pm 0.0050$		-1.5
$A_e$	$0.15138 \pm 0.00216$	$0.1471 \pm 0.0011$	2.0
	$0.1544 \pm 0.0060$		1.2
	$0.1498 \pm 0.0049$		0.6
$A_\mu$	$0.142 \pm 0.015$		-0.3
$A_\tau$	$0.136 \pm 0.015$		-0.7
	$0.1439 \pm 0.0043$		-0.7
$A_b$	$0.923 \pm 0.020$	$0.9347 \pm 0.0001$	-0.6
$A_c$	$0.670 \pm 0.027$	$0.6678 \pm 0.0005$	0.1
$A_s$	$0.895 \pm 0.091$	$0.9356 \pm 0.0001$	-0.4
$g_b^2$	$0.30005 \pm 0.00137$	$0.30378 \pm 0.00021$	-2.7
$g_b^2$	$0.03076 \pm 0.00110$	$0.03006 \pm 0.00003$	0.6
$g_V^e$	$-0.040 \pm 0.015$	$-0.0396 \pm 0.0003$	0.0
$g_A^e$	$-0.507 \pm 0.014$	$-0.5064 \pm 0.0001$	0.0
$A_{PV}$	$-1.31 \pm 0.17$	$-1.53 \pm 0.02$	1.3
$Q_W(\text{Cs})$	$-72.62 \pm 0.46$	$-73.17 \pm 0.03$	1.2
$Q_W(\text{Ti})$	$-116.6 \pm 3.7$	$-116.78 \pm 0.05$	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
$\frac{1}{2}(g_\mu - 2 - \frac{g}{2})$	$4511.07 \pm 0.82$	$4509.82 \pm 0.10$	1.5
$\tau_\tau$ [fs]	$290.89 \pm 0.58$	$291.87 \pm 1.76$	-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)

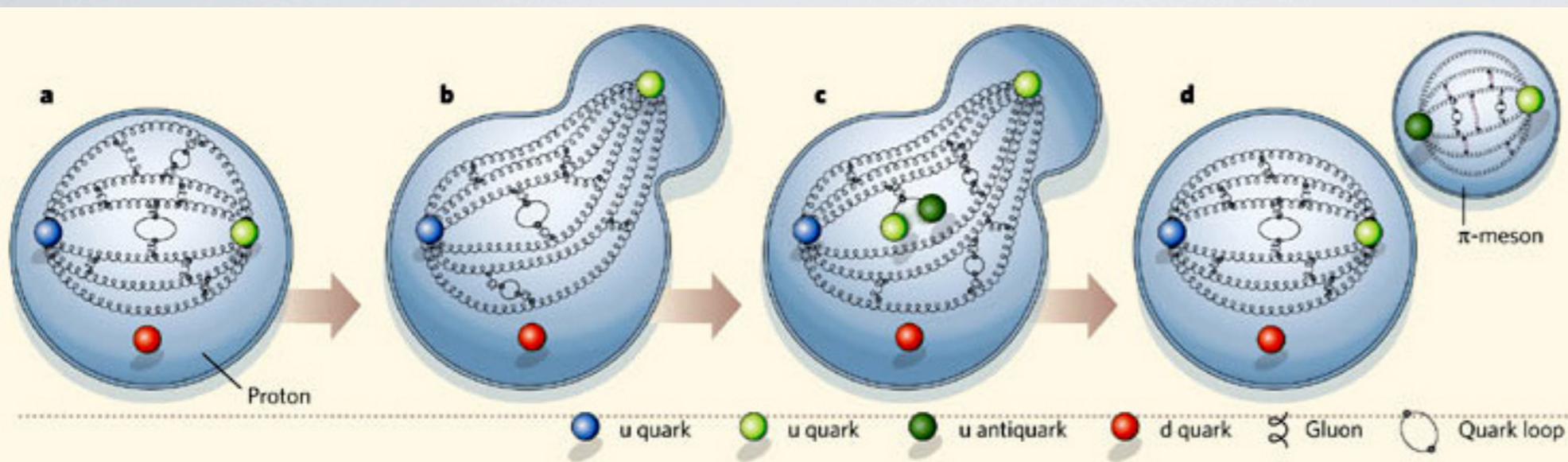
три цвета (сильный заряд)

дробные электрические заряды

глюоны: 8 цветов

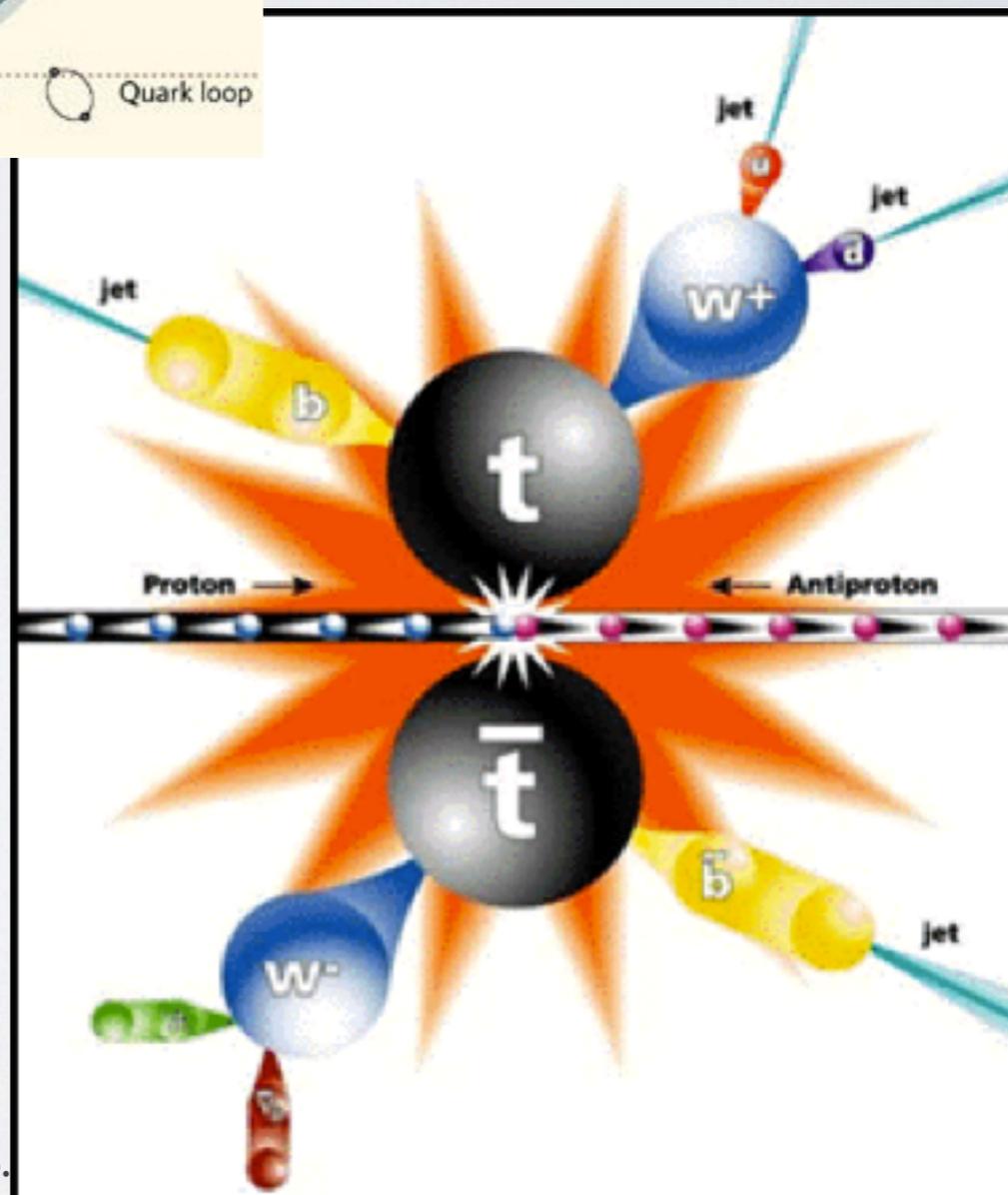
электрически нейтральны

# 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”

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:

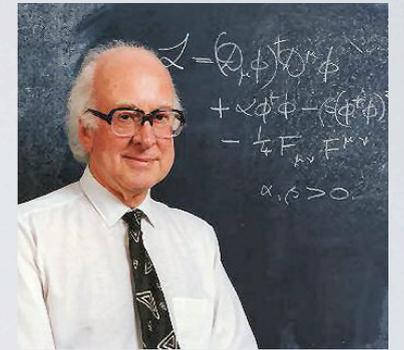
- бозон Хиггса СМ
- новые частицы и взаимодействия за пределами Стандартной Модели

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)

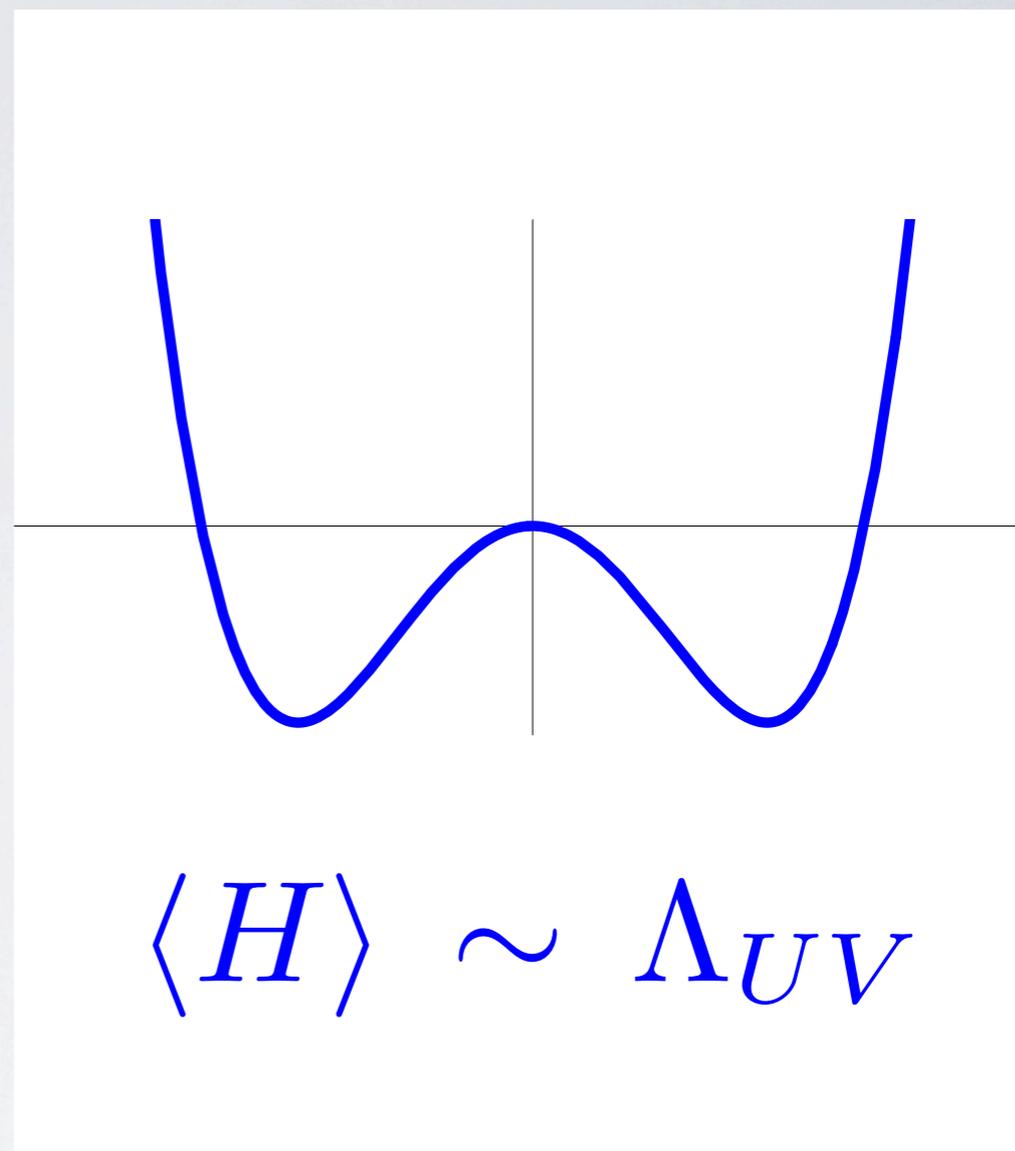
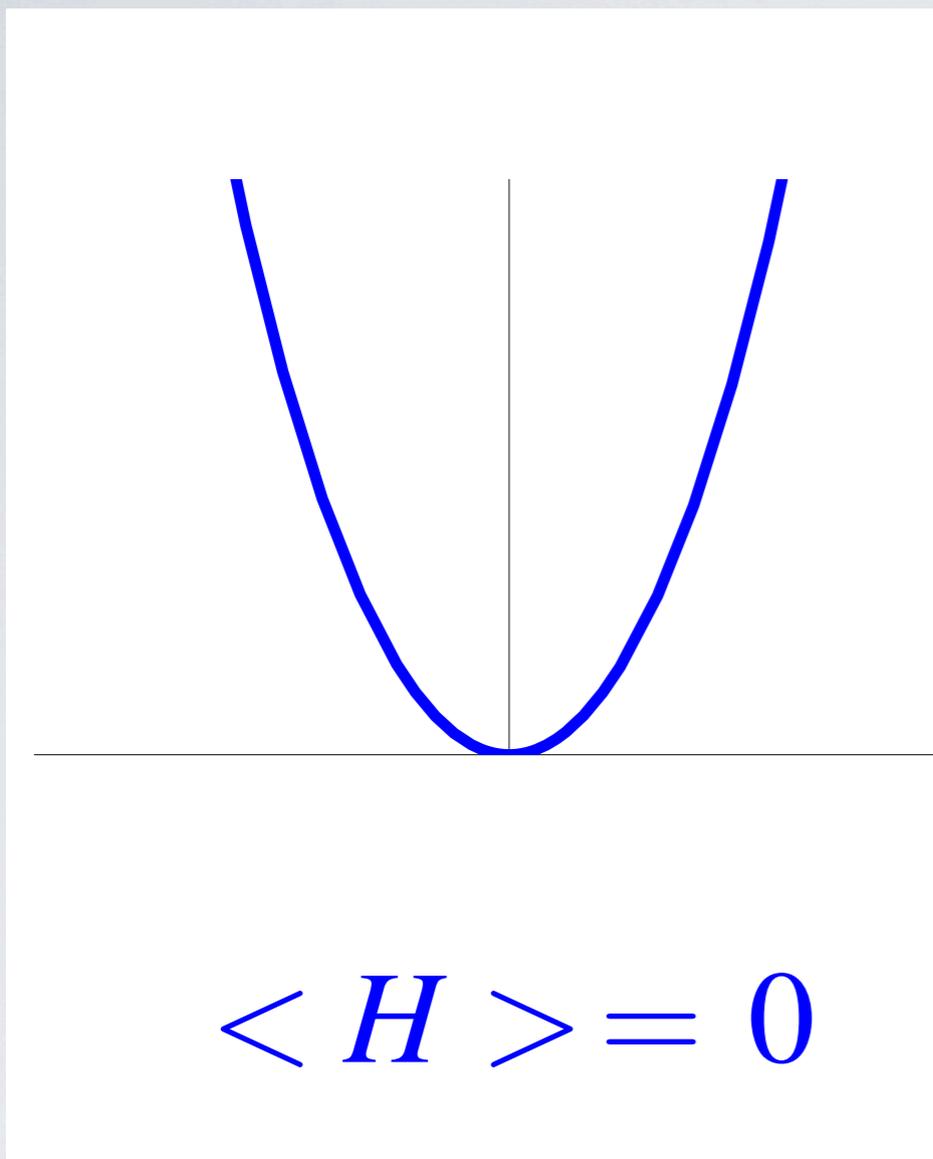


С. Вайнберг (1967) и А. Салам (1968) применили механизм Хиггса  
к электрослабой теории Ш. Глэшоу (1962)

->

Стандартная Модель с тяжелыми векторными бозонами  $W$  и  $Z$

# Спонтанное нарушение симметрии

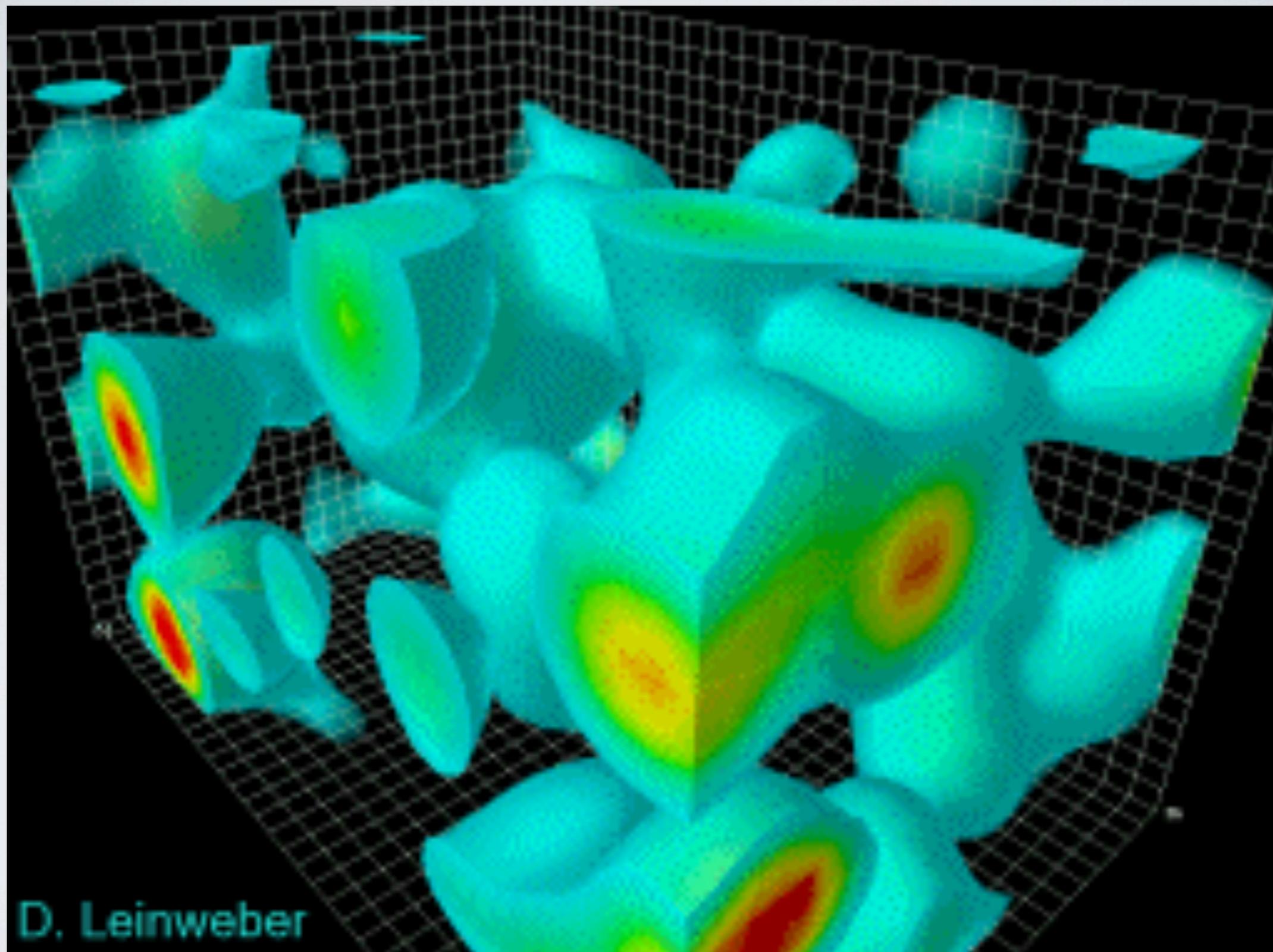


**квантовые флуктуации**

**->**

**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

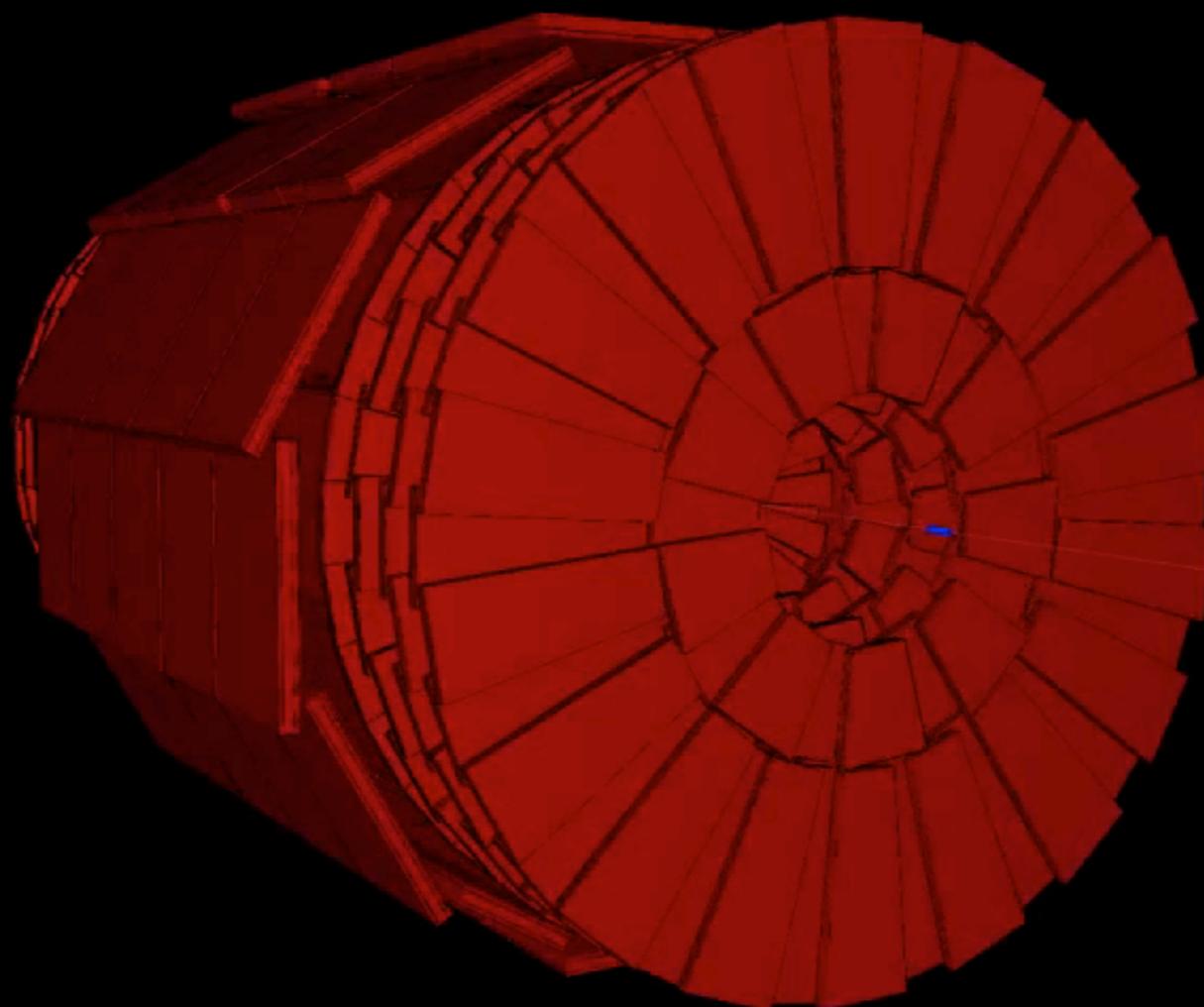
(закон сохранения вероятности) при рассеянии  
тяжелых векторных бозонов



# 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

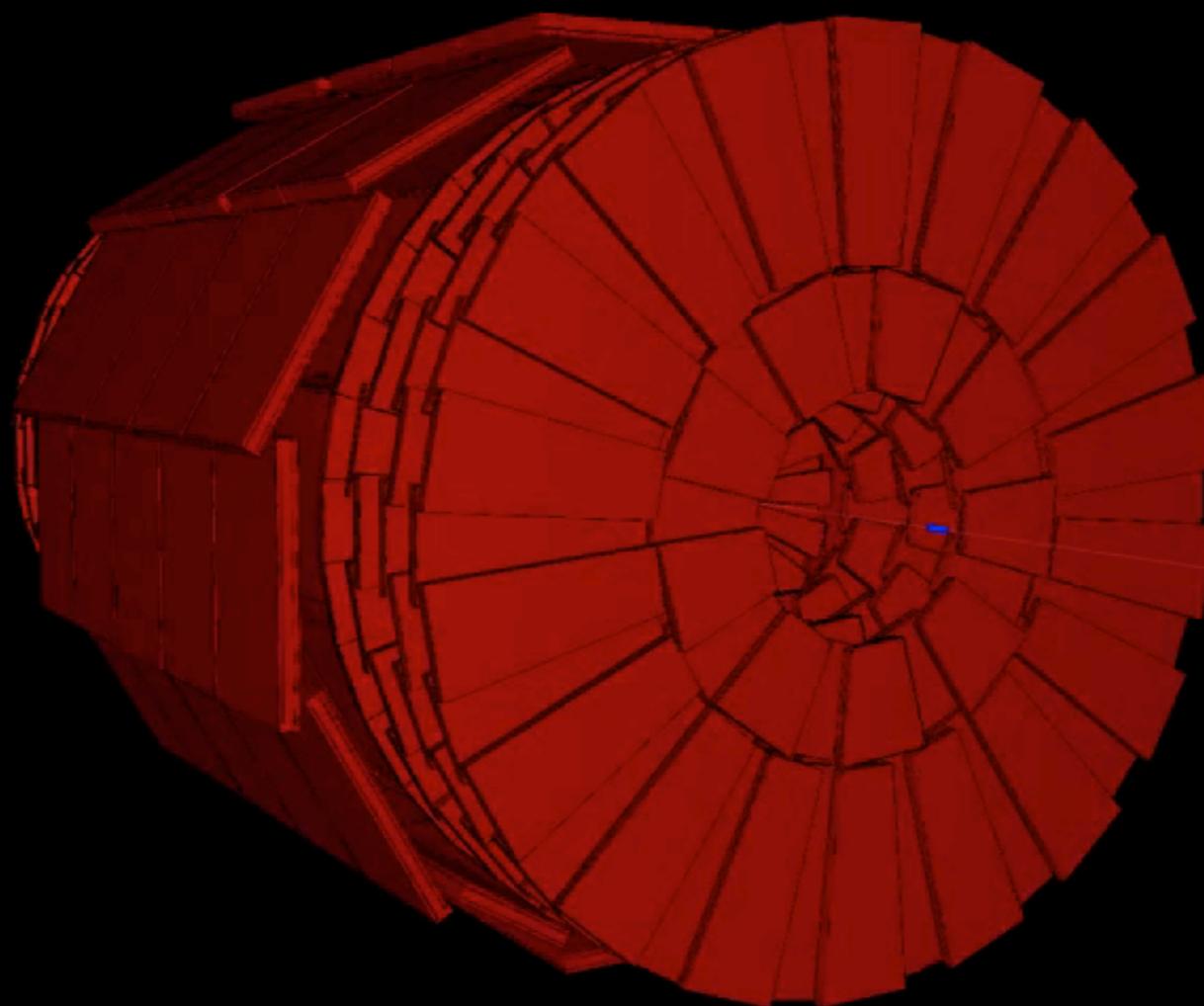




# поиски бозона Хиггса на БАК (CMS)



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