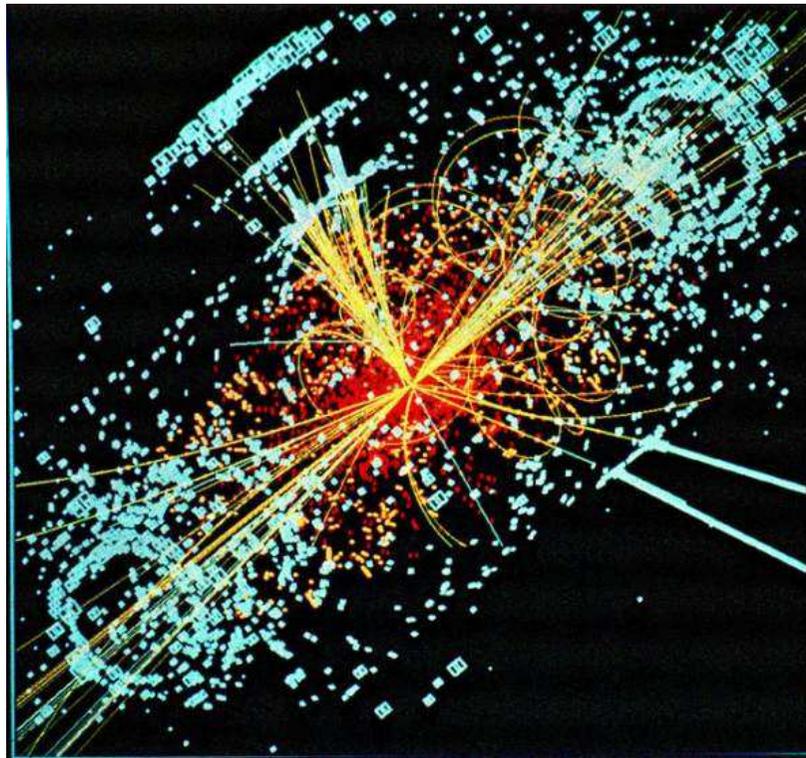


# Тайны устройства микромира Коллайдер LHC

Э.Э. Боос  
ОЭФВЭ и ОТФВЭ НИИЯФ МГУ



# План

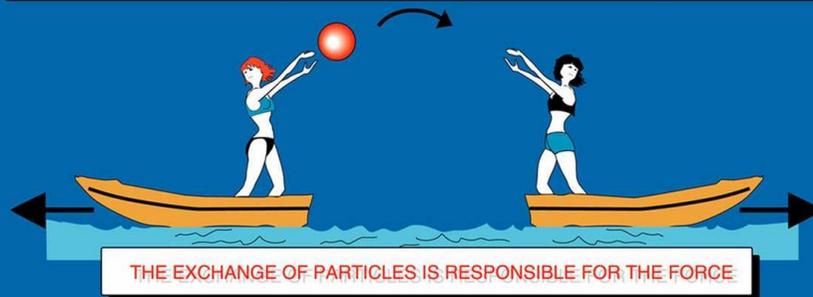
- Стандартная Модель как основа понимания микромира
- Вопросы, вопросы, вопросы ...
- Варианты расширения СМ
- Коллайдер LHC  
вглубь материи и вглубь истории Вселенной

## Мы знаем со школы о четырех видах взаимодействия

Однако, все понятия требуют уточнения с современной точки зрения

### The forces in Nature

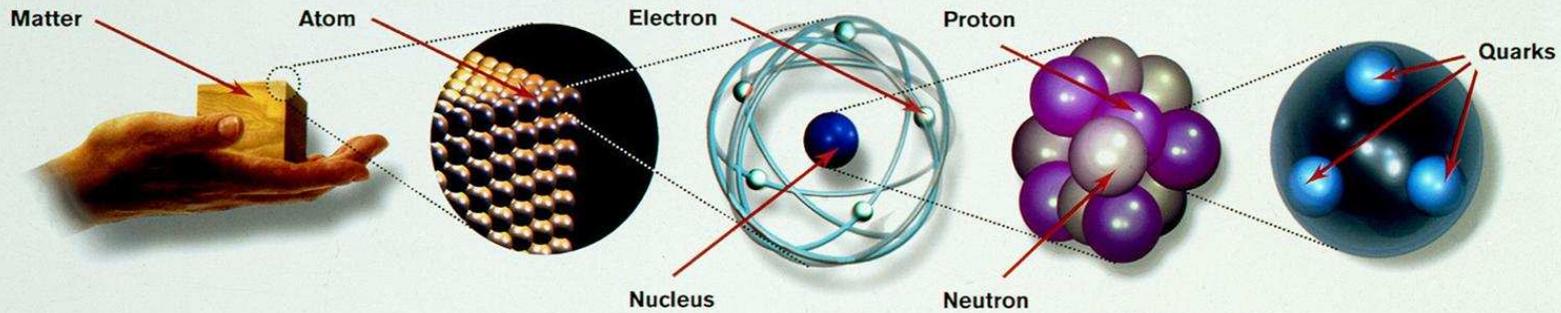
TYPE	INTENSITY OF FORCES (DECREASING ORDER)	BINDING PARTICLE (FIELD QUANTUM)	OCCURS IN :
STRONG NUCLEAR FORCE	$\sim 1$	GLUONS (NO MASS)	ATOMIC NUCLEUS
ELECTRO -MAGNETIC FORCE	$\sim 10^{-3}$	PHOTONS (NO MASS)	ATOMIC SHELL ELECTROTECHNIQUE
WEAK NUCLEAR FORCE	$\sim 10^{-5}$	BOSONS $Z^0, W^+, W^-$ (HEAVY)	RADIOACTIVE BETA DESINTEGRATION
GRAVITATION	$\sim 10^{-38}$	GRAVITONS (?)	HEAVENLY BODIES



CERN AC\_Z04\_V25/8/1992

Gravity	Weak	Electromagnetic	Strong
Graviton (not yet observed)	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup> (Electroweak)		Gluon
All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W <sup>+</sup> W <sup>-</sup>	Quarks and Gluons

# Со времен древнегреческих философов мы пытаемся проникнуть в глубины устройства материи



**Matter particles**  
All ordinary particles belong to this group

These particles existed just after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and accelerators

LEPTONS			
<b>FIRST FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td><b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1</td> <td><b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second</td> </tr> </table>	<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second
<b>Electron</b> Responsible for electricity and chemical reactions; it has a charge of -1	<b>Electron neutrino</b> Particle with no electric charge, and possibly no mass; billions fly through your body every second		
<b>SECOND FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td><b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second</td> <td><b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay</td> </tr> </table>	<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay
<b>Muon</b> A heavier relative of the electron; it lives for two-millionths of a second	<b>Muon neutrino</b> Created along with muons when some particles decay		
<b>THIRD FAMILY</b>	<table border="1"> <tr> <td><b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975</td> <td><b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist</td> </tr> </table>	<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist
<b>Tau</b> Heavier still; it is extremely unstable. It was discovered in 1975	<b>Tau neutrino</b> not yet discovered but believed to exist		

QUARKS	
<b>Up</b> Has an electric charge of plus two-thirds; protons contain two, neutrons contain one	<b>Down</b> Has an electric charge of minus one-third; protons contain one, neutrons contain two
<b>Charm</b> A heavier relative of the up; found in 1974	<b>Strange</b> A heavier relative of the down; found in 1964
<b>Top</b> Heavier still	<b>Bottom</b> Heavier still; measuring bottom quarks is an important test of electroweak theory

**Force particles**  
These particles transmit the four fundamental forces of nature although gravitons have so far not been discovered

<p><b>Gluons</b> Carriers of the <b>strong force</b> between quarks</p> <p>Felt by: quarks</p> <p>The explosive release of nuclear energy is the result of the <b>strong force</b></p>	<p><b>Photons</b> Particles that make up light; they carry the <b>electromagnetic force</b></p> <p>Felt by: quarks and charged leptons</p> <p>Electricity, magnetism and chemistry are all the results of <b>electro-magnetic force</b></p>
--	---

<p><b>Intermediate vector bosons</b> Carriers of the <b>weak force</b></p> <p>Felt by: quarks and leptons</p> <p>Some forms of radio-activity are the result of the <b>weak force</b></p>	<p><b>Gravitons</b> Carriers of <b>gravity</b></p> <p>Felt by: all particles with mass</p> <p>All the weight we experience is the result of the <b>gravitational force</b></p>
---	--

# Стандартная модель как периодическая таблица Менделеева в мире элементарных частиц

## Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

### FERMIONS

**Leptons** spin = 1/2

Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \cdot 10^{-6}$	0
e electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

**Quarks** spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

### Structure within the Atom

Atom Size ~ 10<sup>-10</sup> m

Neutron and Proton Size ~ 10<sup>-16</sup> m

Electron Size ~ 10<sup>-18</sup> m

Quark Size ~ 10<sup>-18</sup> m

Nucleus Size ~ 10<sup>-14</sup> m

### BOSONS

**Unified Electroweak** spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
W <sup>-</sup>	80.4	-1
W <sup>+</sup>	80.4	+1
Z <sup>0</sup>	91.187	0

**Strong (color)** spin = 1

Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
g gluon	0	0

**Force carriers** spin = 0, 1, 2, ...

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

**Quarks Confined in Mesons and Baryons**  
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** (q $\bar{q}$ ) and **baryons** (qqq).

**Residual Strong Interaction**  
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual nuclear interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

### PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction	Fundamental			
		Gravitational	Weak (short-range)	Electromagnetic	Strong (Residual)
Acts on:		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)	W <sup>+</sup> W <sup>-</sup> Z <sup>0</sup>	$\gamma$	Gluons
Strength relative to electromagnetism for two u quarks at:		10 <sup>-41</sup> (at 10 <sup>-16</sup> m)	0.8 (at 10 <sup>-16</sup> m)	1 (at 10 <sup>-16</sup> m)	25 (at 10 <sup>-16</sup> m)
for two protons in nucleus		10 <sup>-41</sup> (at 10 <sup>-16</sup> m)	10 <sup>-4</sup> (at 10 <sup>-16</sup> m)	1 (at 10 <sup>-16</sup> m)	80 (at 10 <sup>-16</sup> m)
		10 <sup>-36</sup> (at 10 <sup>-10</sup> m)	10 <sup>-7</sup> (at 10 <sup>-10</sup> m)	1 (at 10 <sup>-10</sup> m)	Not applicable to hadrons

### Baryons qqq and Antibaryons q $\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermions, hadrons. There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	uds	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	sss	-1	1.672	3/2

### Mesons q $\bar{q}$

Mesons are bosons, hadrons. There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass (GeV/c <sup>2</sup> )	Spin
$\pi^+$	pion	u $\bar{d}$	+1	0.140	0
K <sup>-</sup>	kaon	s $\bar{u}$	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	u $\bar{d}$	+1	0.770	1
B <sup>0</sup>	beauty	d $\bar{b}$	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	c $\bar{c}$	0	2.380	0

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c$ ,  $\eta_b$ ,  $\eta_c$ ,  $\eta_b$ ,  $\eta_c$ ,  $\eta_b$ ) are their own antiparticles.

**Figures**  
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green (shaded) areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron  $\beta$  decay.

$e^- + e^+ \rightarrow B^0 + \bar{B}^0$

An electron and positron (antimatter) colliding at high energy can annihilate to produce B<sup>0</sup> and  $\bar{B}^0$  mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

$p + p \rightarrow Z^0 Z^0 + \text{excited hadrons}$

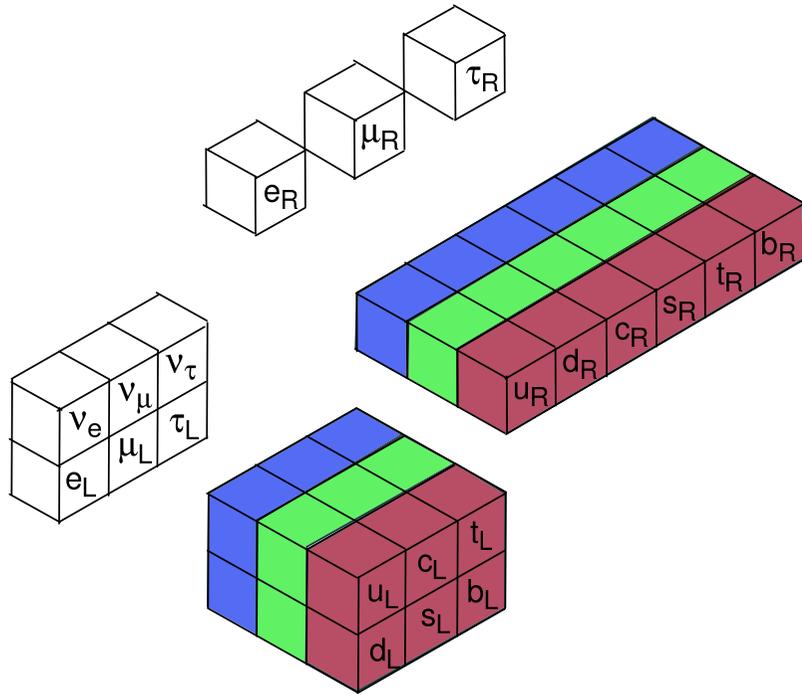
Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

**The Particle Adventure**  
Visit the award-winning web feature The Particle Adventure at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:  
 U.S. Department of Energy  
 U.S. National Science Foundation  
 Lawrence Berkeley National Laboratory  
 Stanford Linear Accelerator Center  
 American Physical Society, Division of Particles and Fields  
**DURILE** INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators, funded by CPEP, MIT, SLAC, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, test materials, hands-on classroom activities, and workshops, see <http://CPEPweb.org>

## Фермионы трех поколений объединяются в левые дублеты и правые синглеты по слабому изотопическому спину



$$f_{L,R} = \frac{1}{2}(1 \mp \gamma_5)f$$

$$I_f^{3L,3R} = \pm \frac{1}{2}, 0 : \quad \begin{aligned} L_1 &= \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, & e_{R1} &= e_R^-, & Q_1 &= \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, & u_{R1} &= u_R, & d_{R1} &= d_R \\ L_2 &= \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, & e_{R2} &= \mu_R^-, & Q_2 &= \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, & u_{R2} &= c_R, & d_{R2} &= s_R \\ L_3 &= \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L, & e_{R3} &= \tau_R^-, & Q_3 &= \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L, & u_{R3} &= t_R, & d_{R3} &= b_R \end{aligned}$$

Основой понимания устройства микромира является  
**Стандартная Модель**  
сильных и электрослабых взаимодействий

**Три базовые идеи**

1. Калибровочный характер взаимодействия  
(сохранение заряда в каждой точке)

**Калибровочная группа SM:  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$**

2. Алгебра токов. (V-A) структура тока (Fermi)

$$\frac{G_F}{\sqrt{2}} \cdot [\bar{\nu}_\mu \cdot \gamma_\alpha (1 - \gamma_5) \cdot \mu] \cdot [\bar{e} \cdot \gamma_\alpha (1 - \gamma_5) \cdot \bar{\nu}_e] + h.c.$$

3. Спонтанное нарушение симметрии (механизм Хиггса)

### **SU(3)<sub>c</sub> x SU(2)<sub>L</sub> x U(1)<sub>Y</sub>**

$$\mathcal{L}_{\text{SM}} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} W_{\mu\nu}^a W_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} \\ + \bar{L}_i i D_\mu \gamma^\mu L_i + \bar{e}_{Ri} i D_\mu \gamma^\mu e_{Ri} \\ + \bar{Q}_i i D_\mu \gamma^\mu Q_i + \bar{u}_{Ri} i D_\mu \gamma^\mu u_{Ri} + \bar{d}_{Ri} i D_\mu \gamma^\mu d_{Ri}$$

+  $\mathcal{L}_H$

$$G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a + g_s f^{abc} G_\mu^b G_\nu^c$$

$$D_\mu \psi = \left( \partial_\mu - ig_s T_a G_\mu^a - ig_2 T_a W_\mu^a - ig_1 \frac{Y_q}{2} B_\mu \right) \psi$$

$$B_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu$$

$$Y_f = 2Q_f - 2I_f^3 \Rightarrow Y_{L_i} = -1, Y_{e_{R_i}} = -2, Y_{Q_i} = \frac{1}{3}, Y_{u_{R_i}} = \frac{4}{3}, Y_{d_{R_i}} = -\frac{2}{3}$$

$\mathcal{L}_H$  включает взаимодействие поля Хиггса с калибровочными бозонами и фермионами

Часть SM, описывающая сильные взаимодействия, называется квантовой хромодинамикой (КХД). Группа  $SU(3)_c$

$$L_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^{(a)} F^{(a)\mu\nu} + i \sum_q \bar{\psi}_q^i \gamma^\mu (D_\mu)_{ij} \psi_q^j - \sum_q m_q \bar{\psi}_q^i \psi_{qi}$$

$$F_{\mu\nu}^{(a)} = \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_s f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c,$$

$$(D_\mu)_{ij} = \delta_{ij} \partial_\mu + ig_s \sum_a \frac{\lambda_{i,j}^a}{2} A_\mu^a,$$

Каждый кварк может находиться в трех, а глюон в восьми цветных состояниях

Описание легких и тяжелых мезонов и нуклонов как бесцветных связанных состояний лептонов и кварков

Эффективная константа связи зависит от характерного импульса

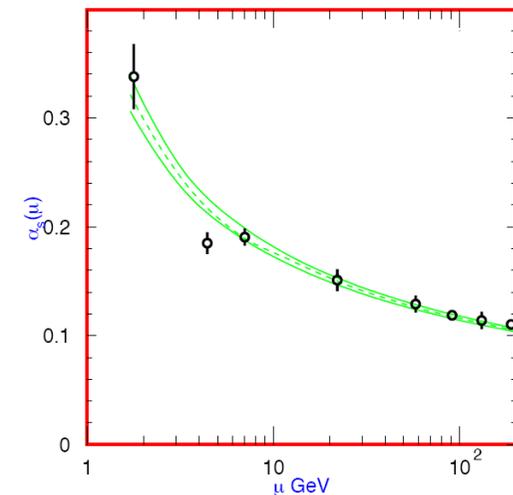
$$\alpha_s(\mu) = \frac{4\pi}{\beta_0 \ln(\mu^2/\Lambda^2)} \left[ 1 - \frac{2\beta_1}{\beta_0^2} \frac{\ln[\ln(\mu^2/\Lambda^2)]}{\ln(\mu^2/\Lambda^2)} + \frac{4\beta_1^2}{\beta_0^4 \ln^2(\mu^2/\Lambda^2)} \times \left( \left( \ln[\ln(\mu^2/\Lambda^2)] - \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{\beta_2\beta_0}{8\beta_1^2} - \frac{5}{4} \right) \right].$$

Падает с увеличением переданного импульса

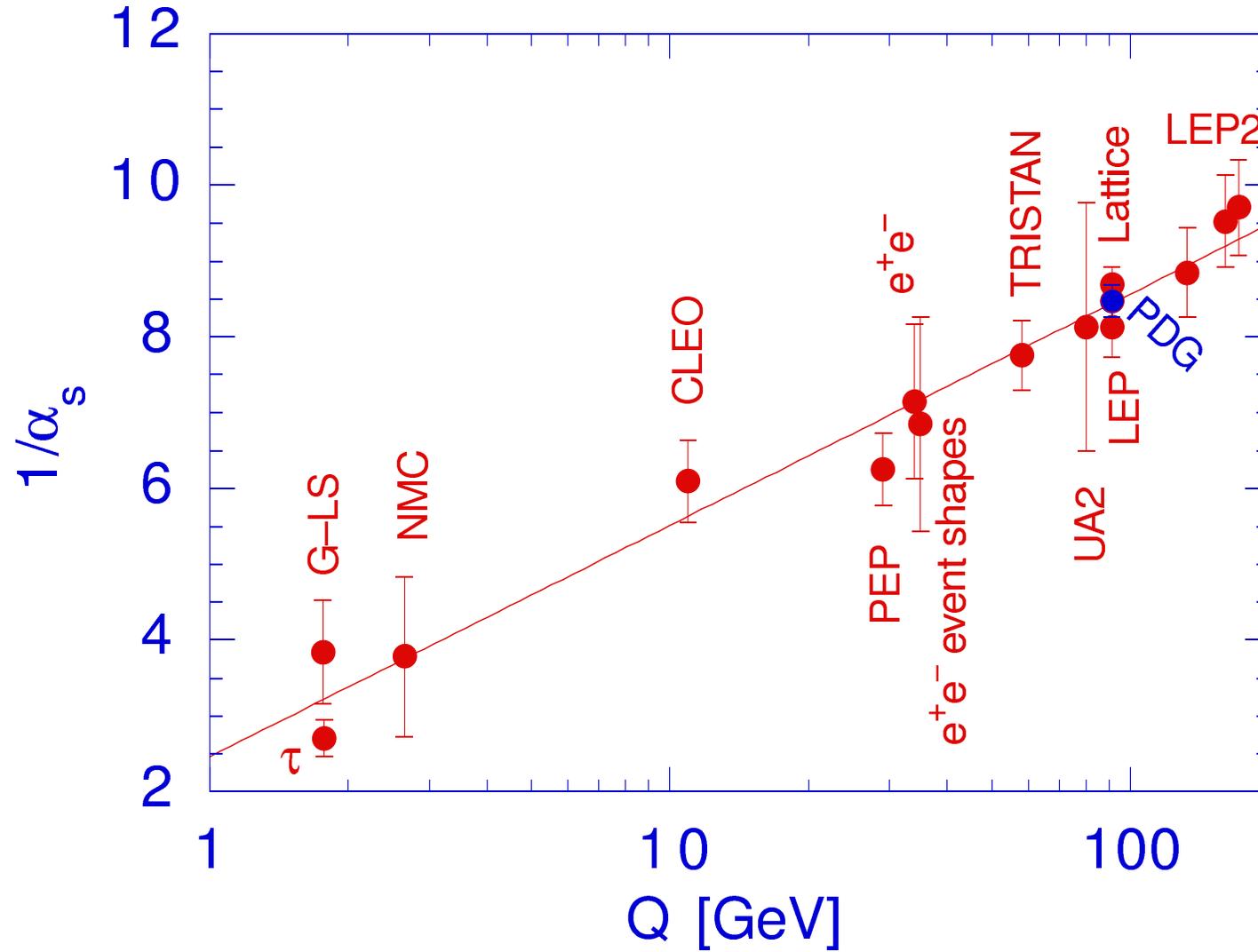
**Асимптотическая свобода**

Растет с уменьшением переданного импульса

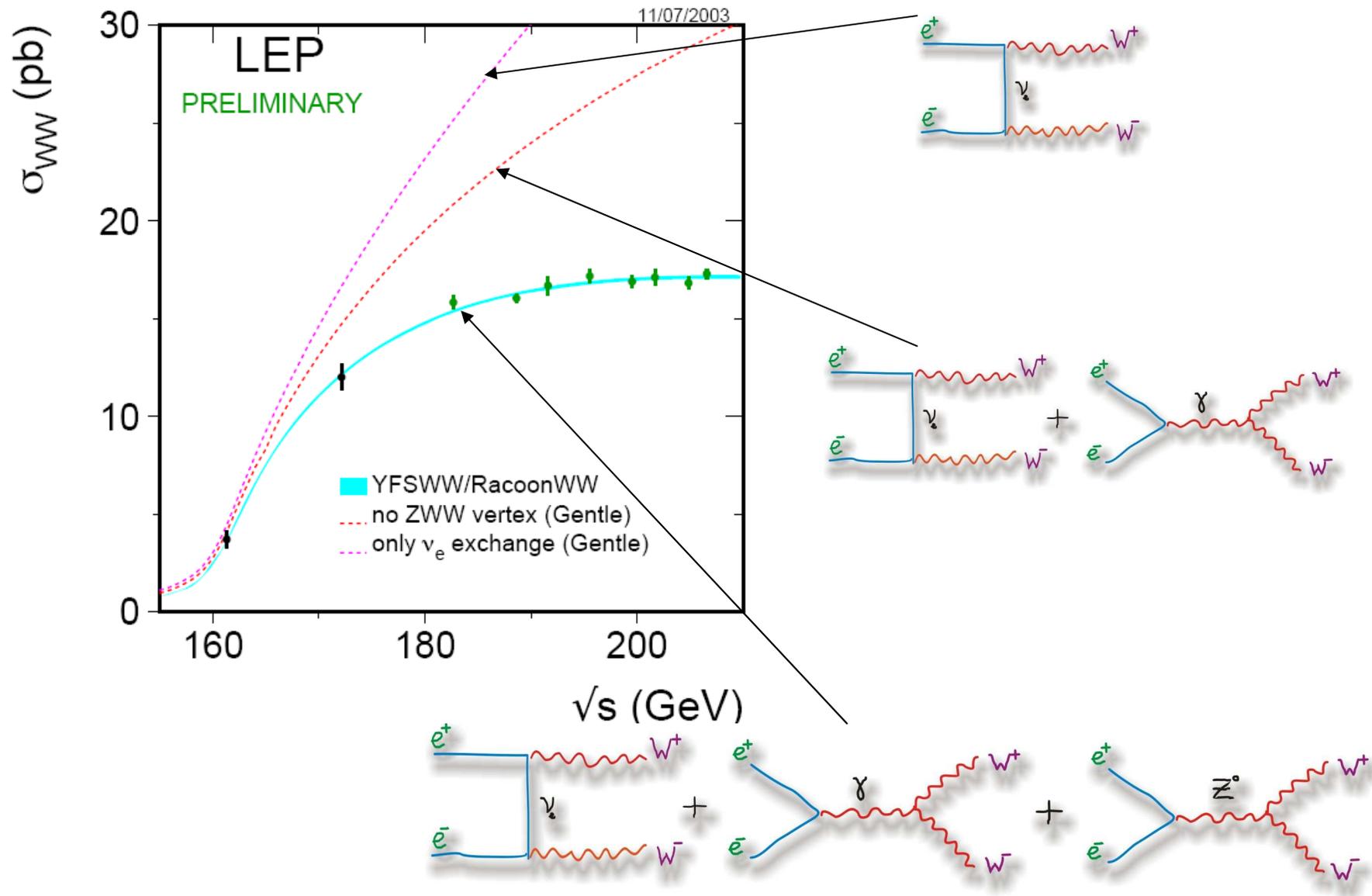
**Конфайнмент**



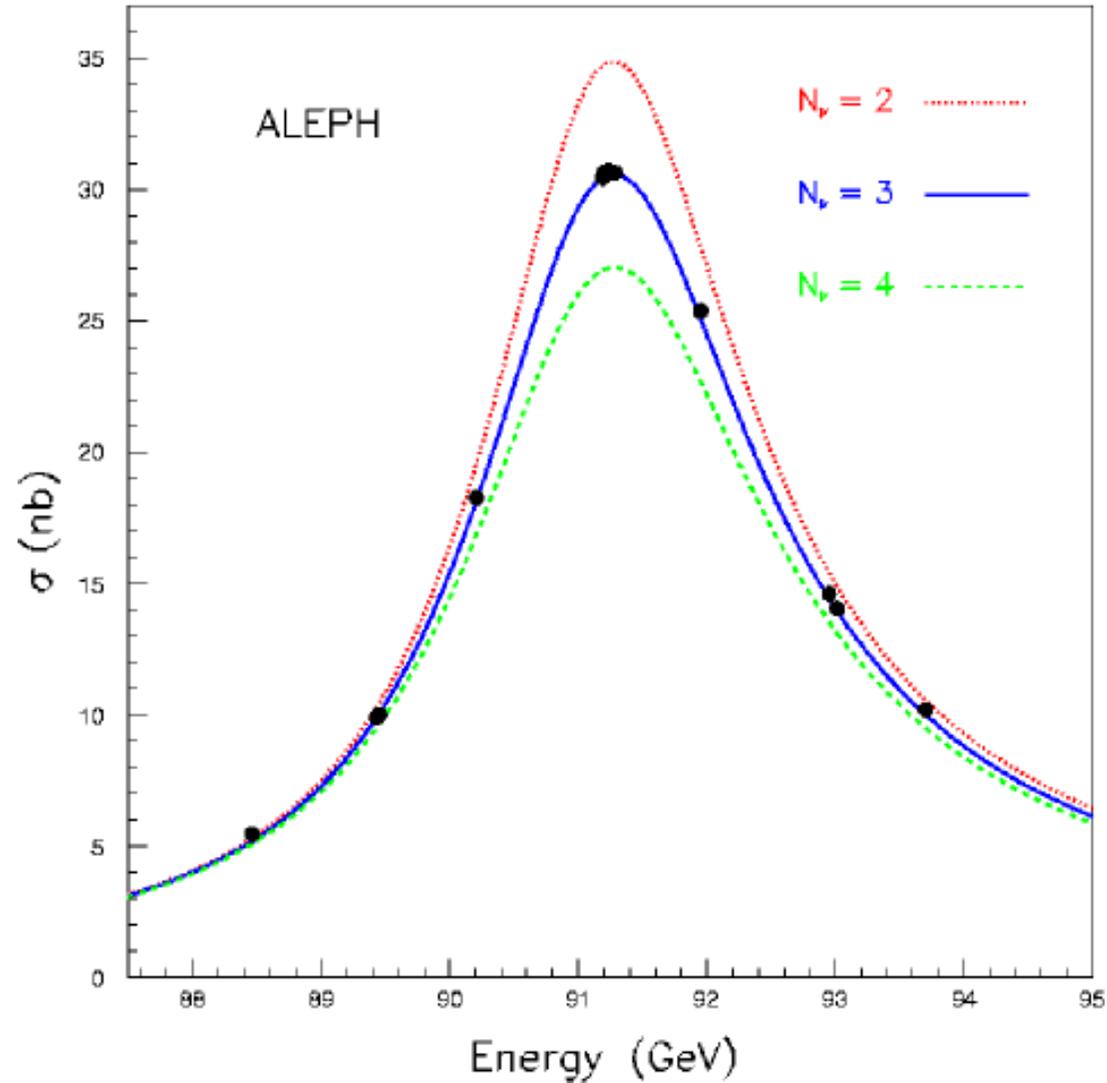
# Подтверждение зависимости "бегущей константы" сильных взаимодействий от переданного импульса



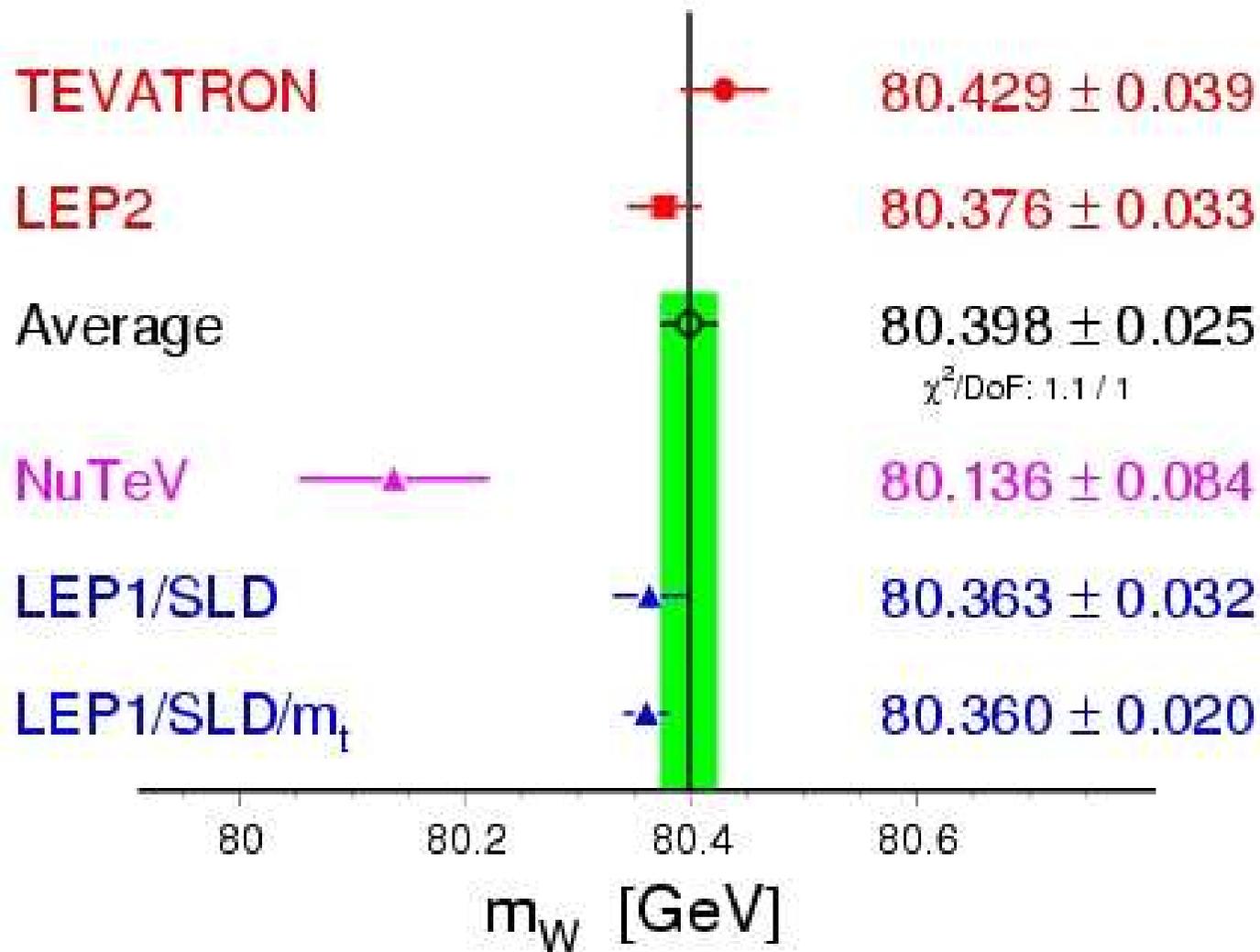
# Подтверждение структуры взаимодействия электрослабых бозонов



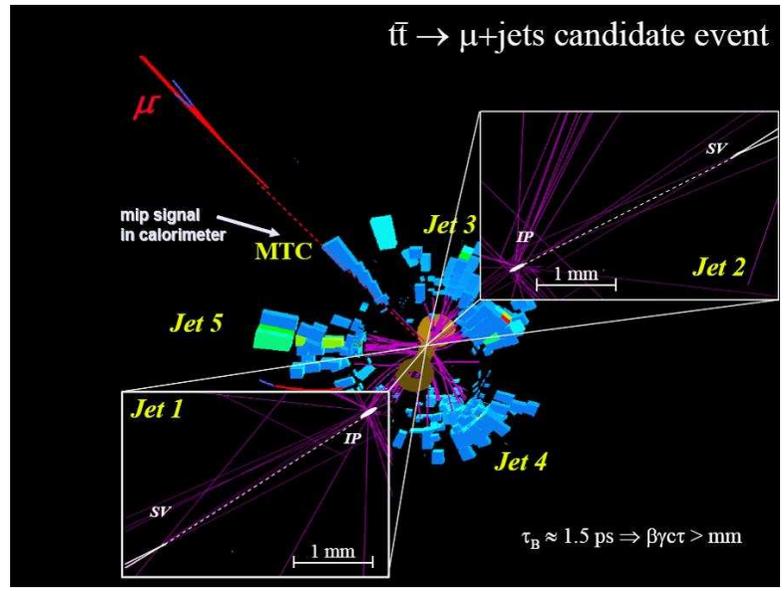
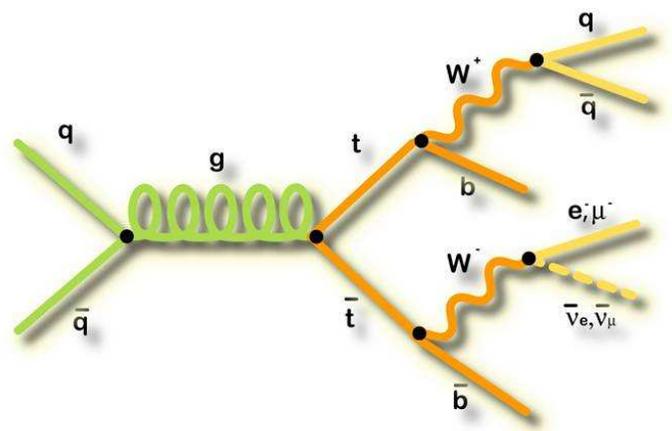
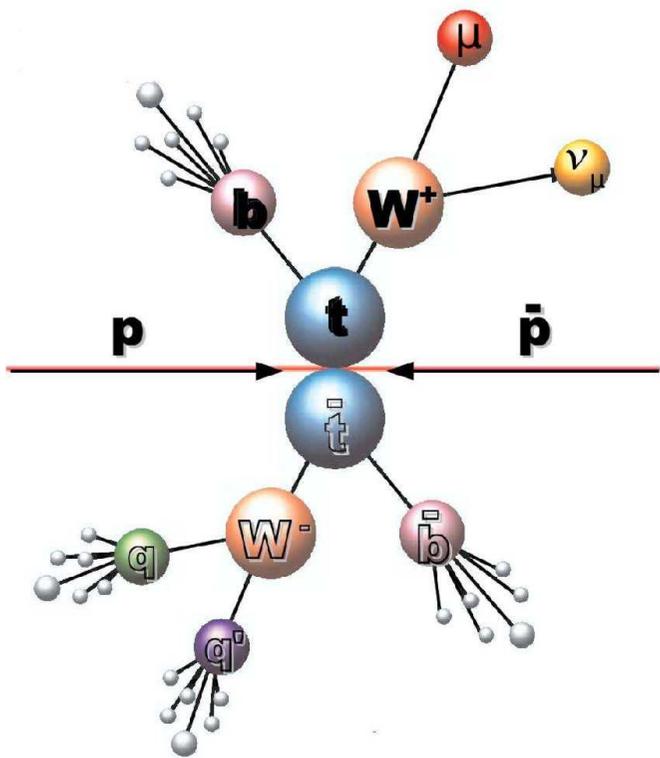
Данные LEP - в природе существует не более трех легких нейтрино



# W-Boson Mass [GeV]

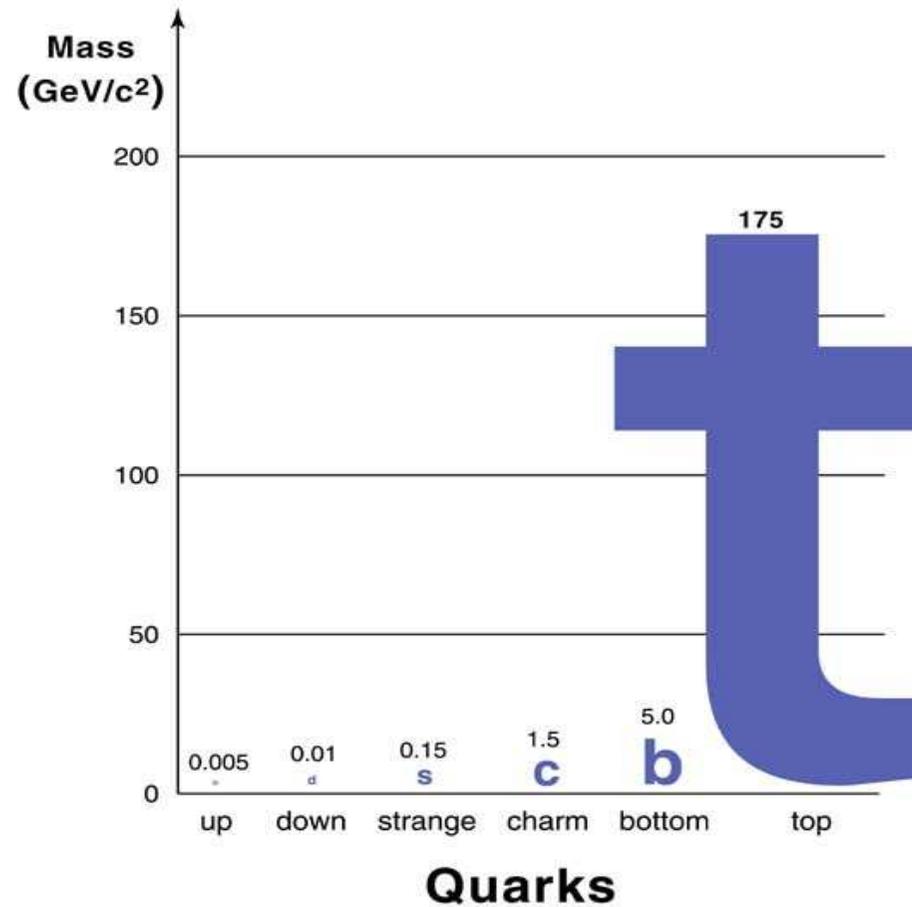


Самая тяжелая из существующих частиц (Тор quark) был открыт в Fermilab в 1995 году коллаборациями CDF и D0



Топ-кварк чуть легче ядра золота, но точечная элементарная частица до  $10^{-17}$  см

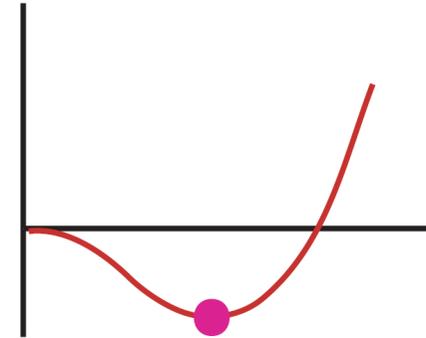
## QUARK MASSES



$$\mathcal{L} = |D_\mu \varphi|^2 - V(|\varphi|) - \frac{1}{4}(F_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{4}(G_{\mu\nu})^2 - \lambda_e \bar{e}_R \varphi^\dagger \cdot L - \lambda_d \bar{d}_R \varphi^\dagger \cdot Q - \lambda_e \bar{u}_R \varphi_\alpha \epsilon_{\alpha\beta} Q_\beta$$

$$V(|\varphi|) = \mu^2 |\varphi|^2 + \lambda |\varphi|^4 \quad \mu^2 < 0$$

$$\varphi = \begin{pmatrix} \pi^+ \\ (v + h + i\pi^0)/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$



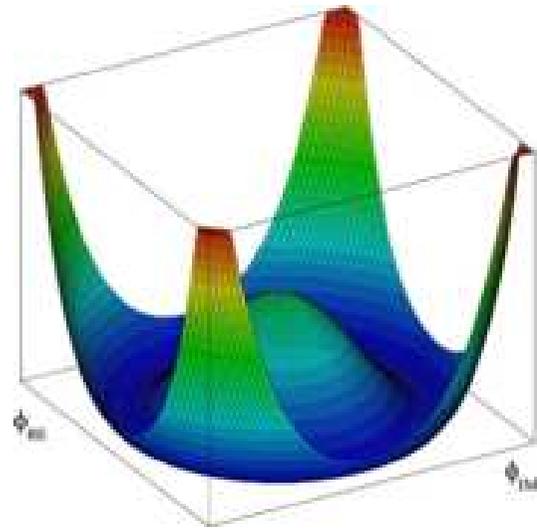
Голстоуновские бозоны  $\pi^\pm, \pi^0$  переходят в продольные степени свободы приобретающих массы калибровочных бозонов

$$|D_\mu \Phi|^2 = \left| \left( \partial_\mu - ig_2 \frac{\tau_a}{2} W_\mu^a - ig_1 \frac{1}{2} B_\mu \right) \Phi \right|^2$$

$$W^\pm = \frac{1}{\sqrt{2}}(W_\mu^1 \mp iW_\mu^2), \quad Z_\mu = \frac{g_2 W_\mu^3 - g_1 B_\mu}{\sqrt{g_2^2 + g_1^2}}, \quad A_\mu = \frac{g_2 W_\mu^3 + g_1 B_\mu}{\sqrt{g_2^2 + g_1^2}}$$

$$M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu + \frac{1}{2} M_A^2 A_\mu A^\mu \quad M_W = \frac{1}{2} v g_2, \quad M_Z = \frac{1}{2} v \sqrt{g_2^2 + g_1^2}, \quad M_A = 0$$

$$\begin{aligned} A &\equiv B \cos \theta_W + W^3 \sin \theta_W & e &= g_2 \cos \Theta_W & \frac{G_F}{\sqrt{2}} &= \frac{g_2^2}{8M_W^2} \\ Z &\equiv -B \sin \theta_W + W^3 \cos \theta_W & v &= 246 \text{ GeV} \end{aligned}$$



# Бозон Хиггса

Единственная не открытая частица СМ

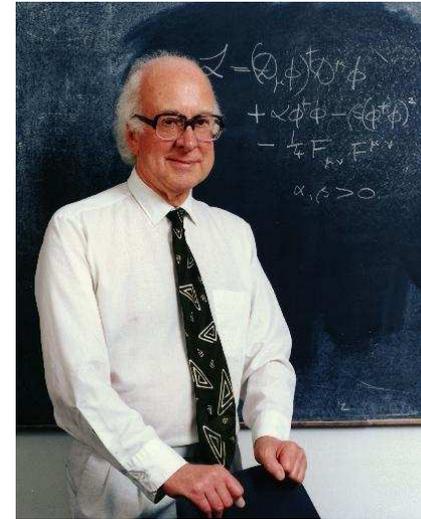
Массы кварков и лептонов

Массы W и Z бозонов

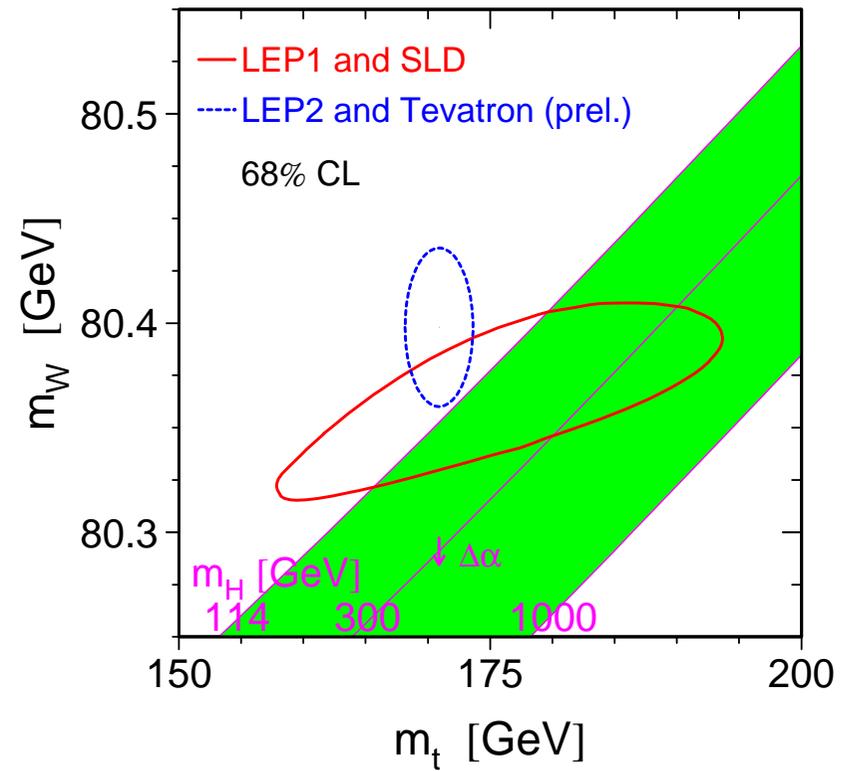
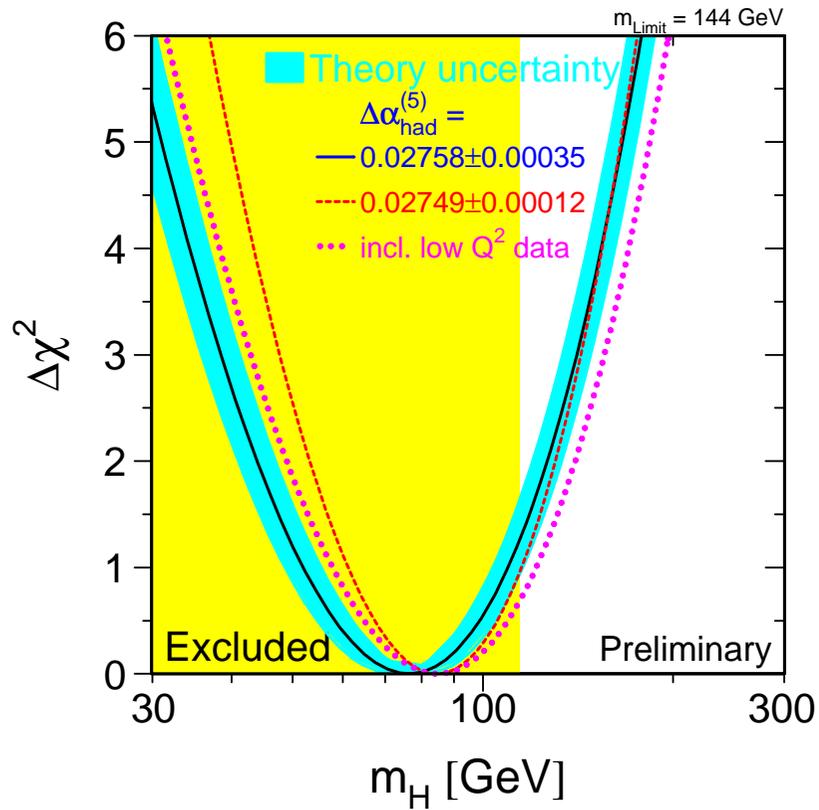
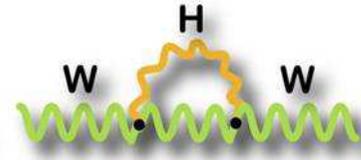
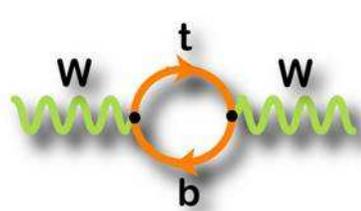
Унитарное поведение и перенормируемость СМ

$M_H > 114 \text{ GeV}$  из прямых поисков на LEP II

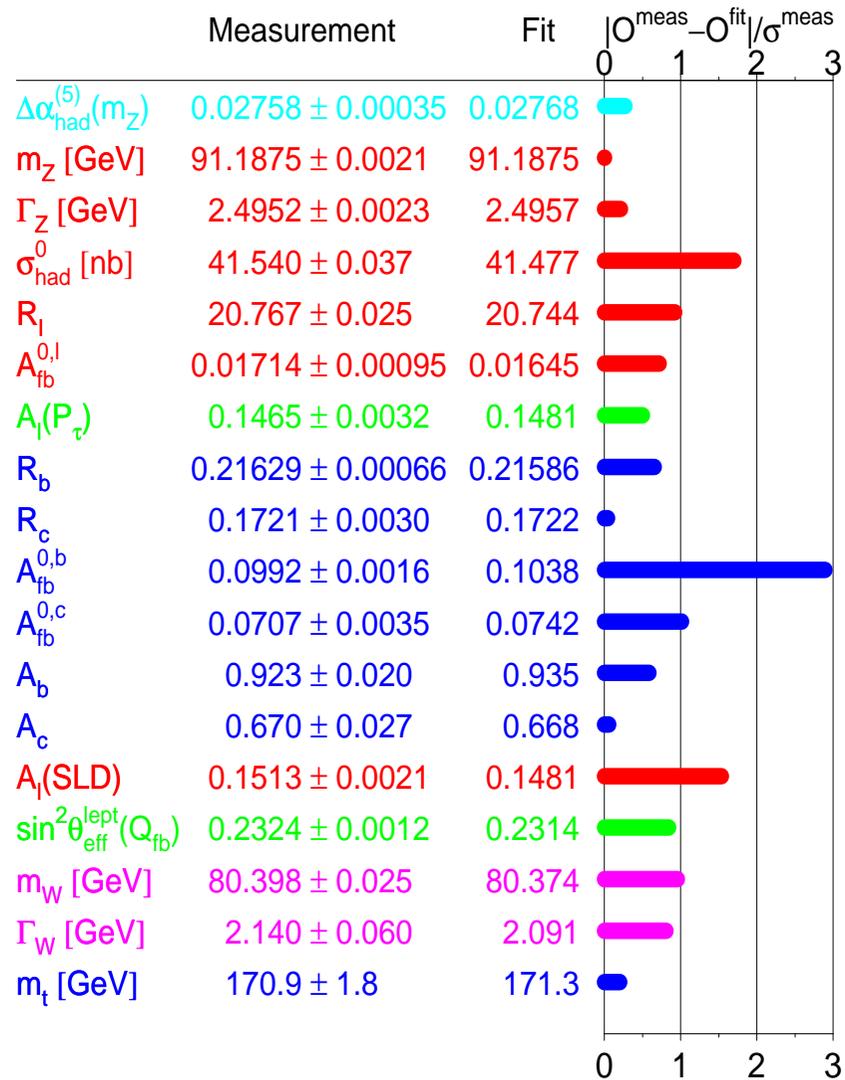
$M_H < 160 \text{ GeV}$  из фита прецизионных измерений на  
LEP, SLD, Tevatron



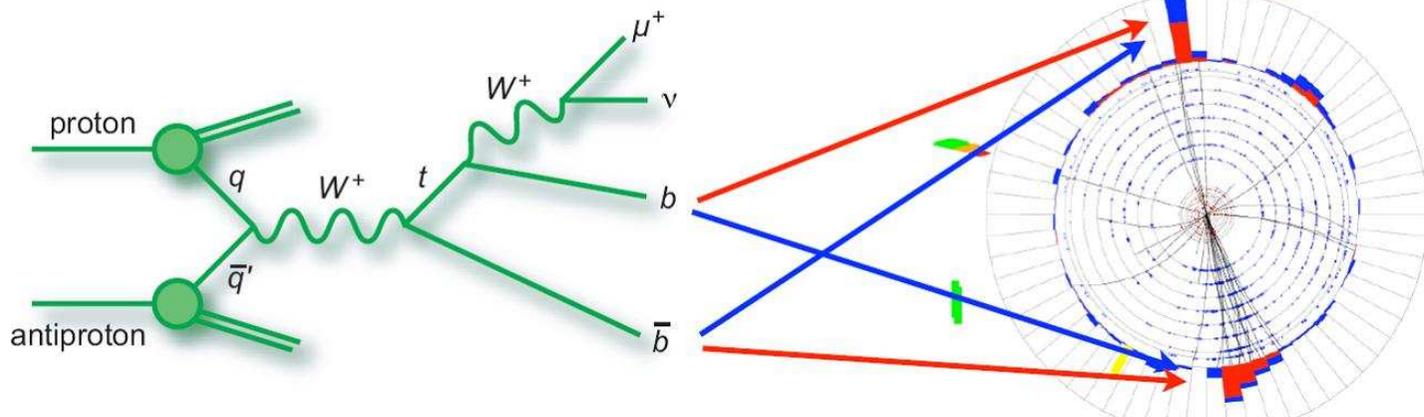
# Петлевые поправки связывают массы частиц между собой



# SM прекрасно согласуется с экспериментом

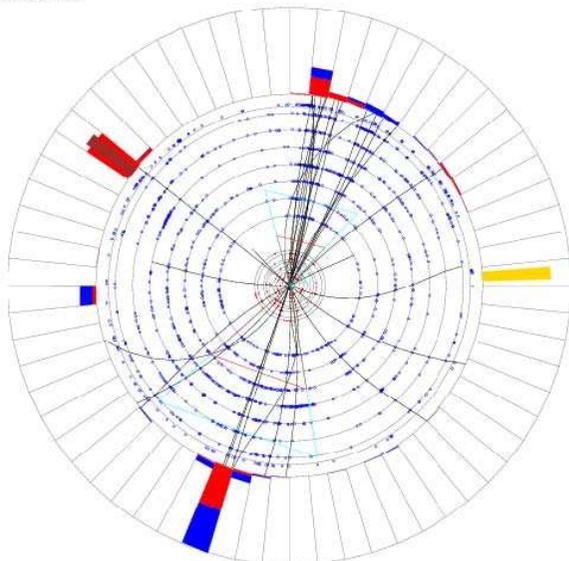


# Одиночное рождение топ-кварка впервые наблюдалось в конце 2006 - начале 2007 годов в Fermilab коллаборацией D0



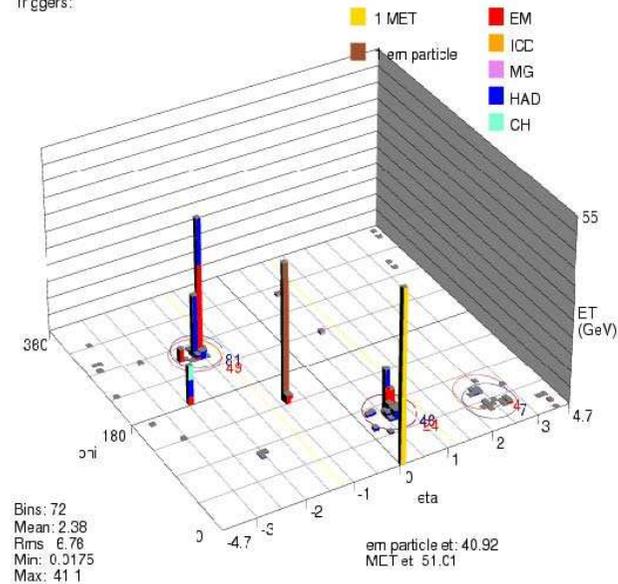
Run 208571 Evt 30280925

ET scale: 88 GeV

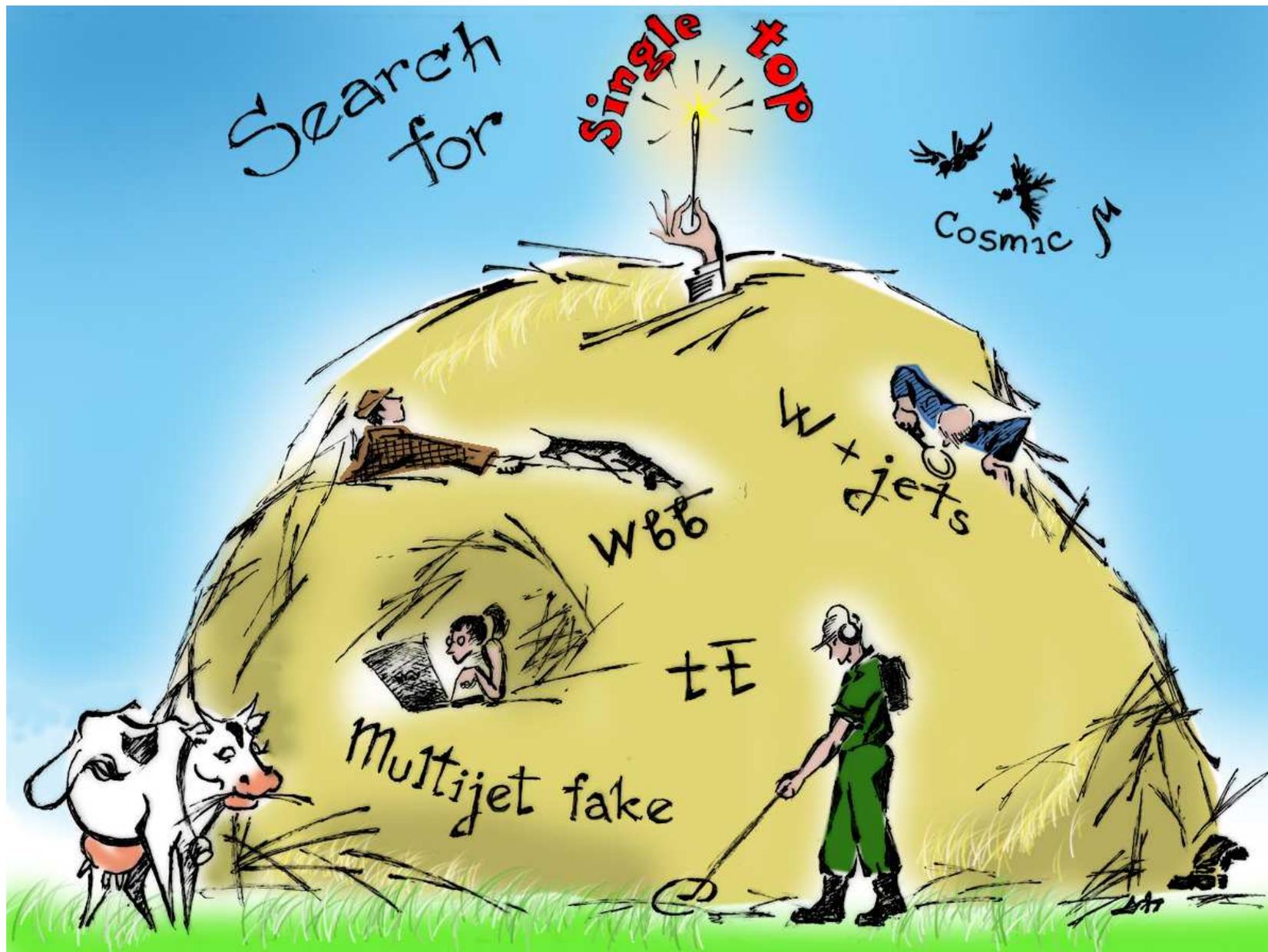


Run 208571 Evt 30280925

Triggers:



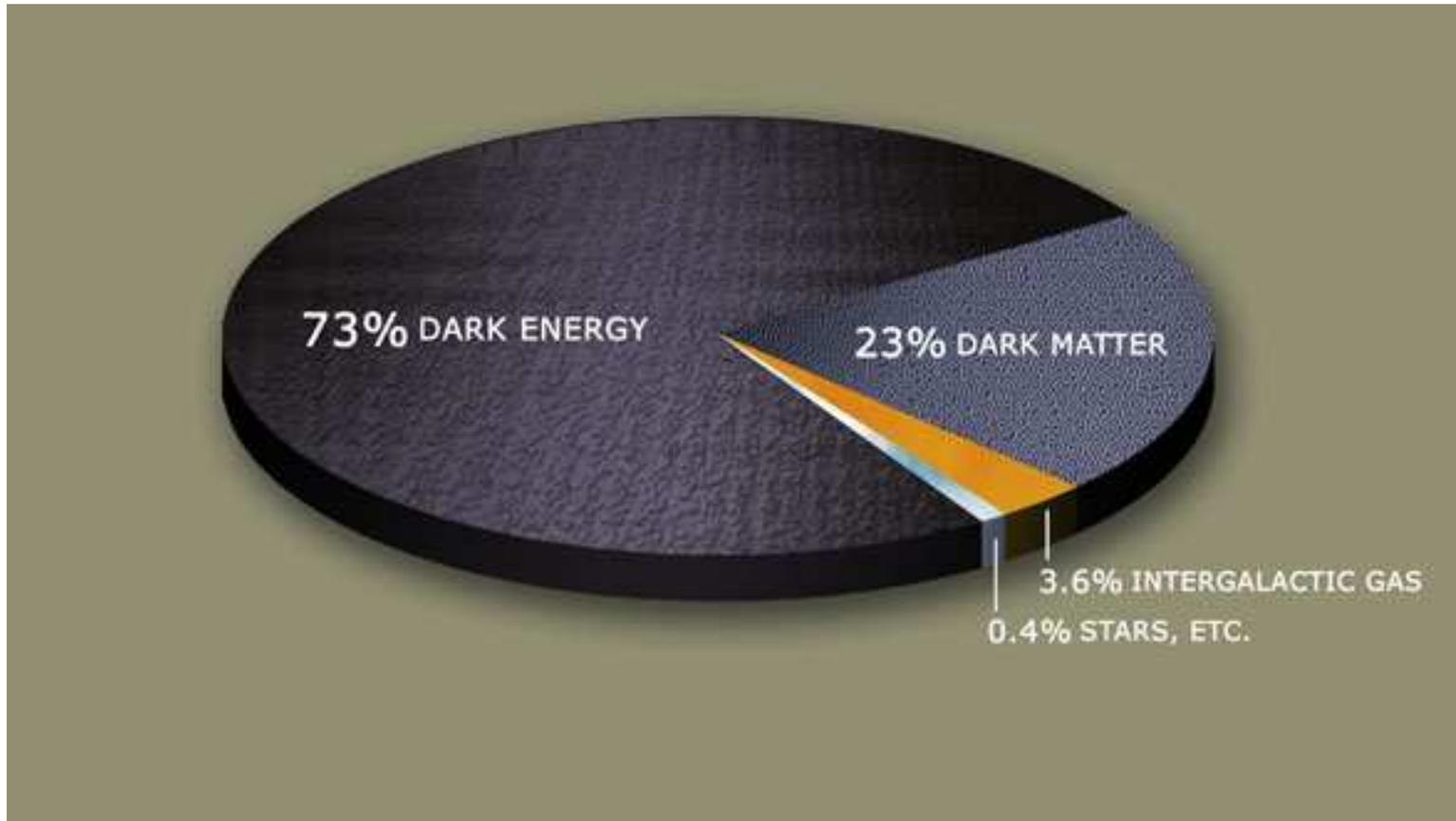
Сигнал одиночного топ-кварка было очень сложно выделить из фонов



# Остается множество вопросов

- Почему электрослабый масштаб столь мал по сравнению с массой Планка?
- Что такое поколение? Почему поколений только 3?
- Какова природа кварк-лептоной аналогии? Как соотносятся друг другу лептоны и кварки?
- Элементарны ли кварки и лептоны?
- Существуют ли новые кварки и лептоны?
- Что определяет калибровочные симметрии? Почему квантуются заряды частиц?
- Существуют ли новые калибровочные взаимодействия?
- Что формирует потенциал поля Хиггса?
- Почему гравитация столь слаба? Как ее включить в общую схему?
- Почему столь мала космологическая постоянная?
- Насколько точна CPT-симметрия?
- Существуют ли новые симметрии в природе?
- Существуют ли дополнительные измерения пространства-времени?
- Что такое темная энергия и темная материя?
- .....

Мы знаем только, как устроены чуть менее 5% Вселенной



# Направления выхода за рамки Стандартной модели

- Суперсимметрия
- Дополнительные измерения пространства-времени
- Новая внутренняя структура (preon models, technicolor, little Higgs)

Суперсимметрия фермионным степеням свободы ставит в соответствие бозонные степени свободы и наоборот

## Minimal particle content

### □ Gauge / Gaugino Sector

Standard Bosons	Supersymmetric Partners
$W^\pm$ $H^\pm$	Charginos $\chi_1^\pm$ $\chi_2^\pm$
$g$ $Z$ $h$ $H$ $A$	Neutralinos $\chi_1^0$ $\chi_2^0$ $\chi_3^0$ $\chi_4^0$
$g_i$	Gluinos $\tilde{g}_i$

[Two Higgs doublets]

[All fermions]

And also ...

Graviton $G$	Gravitino $\tilde{G}$
--------------	-----------------------

### □ Particle / Sparticle Sector

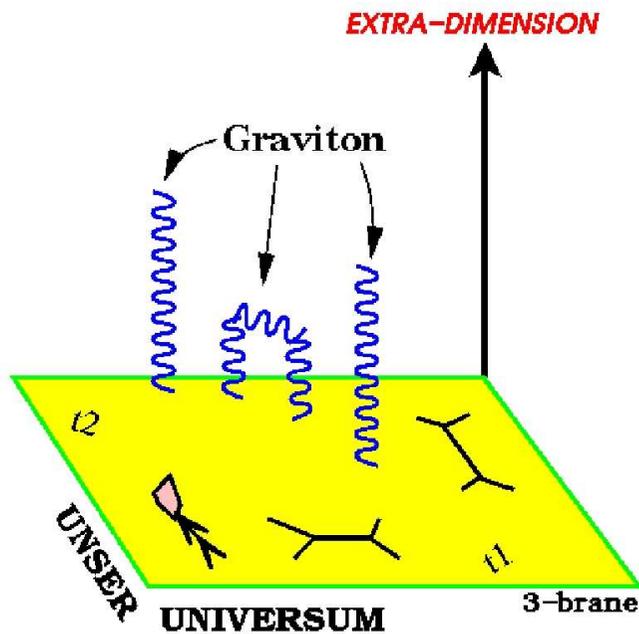
Standard Particles	Supersymmetric Partners
Leptons $l$	Sleptons $\tilde{l}_{R,L}$
Neutrinos $\nu_l$	Sneutrinos $\tilde{\nu}_l$
Quarks $q$	Squarks $\tilde{q}_{R,L}$

[All scalars]



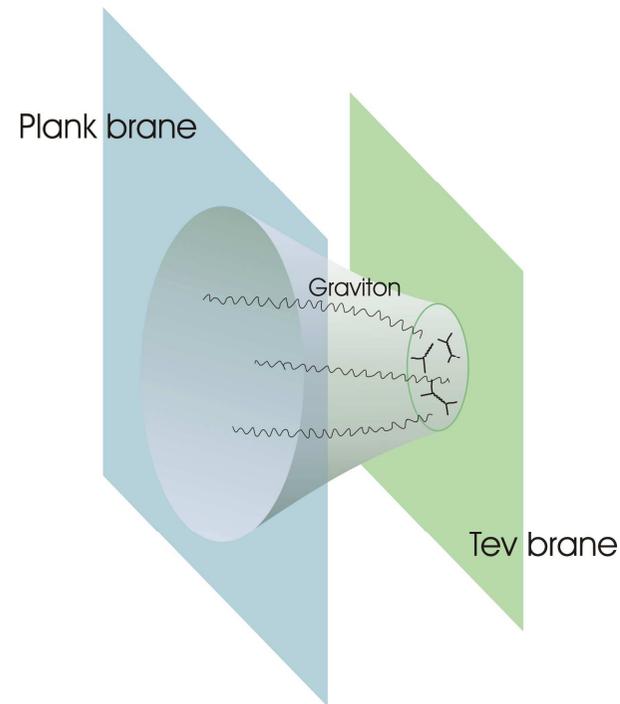
**Популярные сценарии моделей с дополнительными измерениями в плоской и экспоненциально спадающей метрике**

**ADD сценарий**



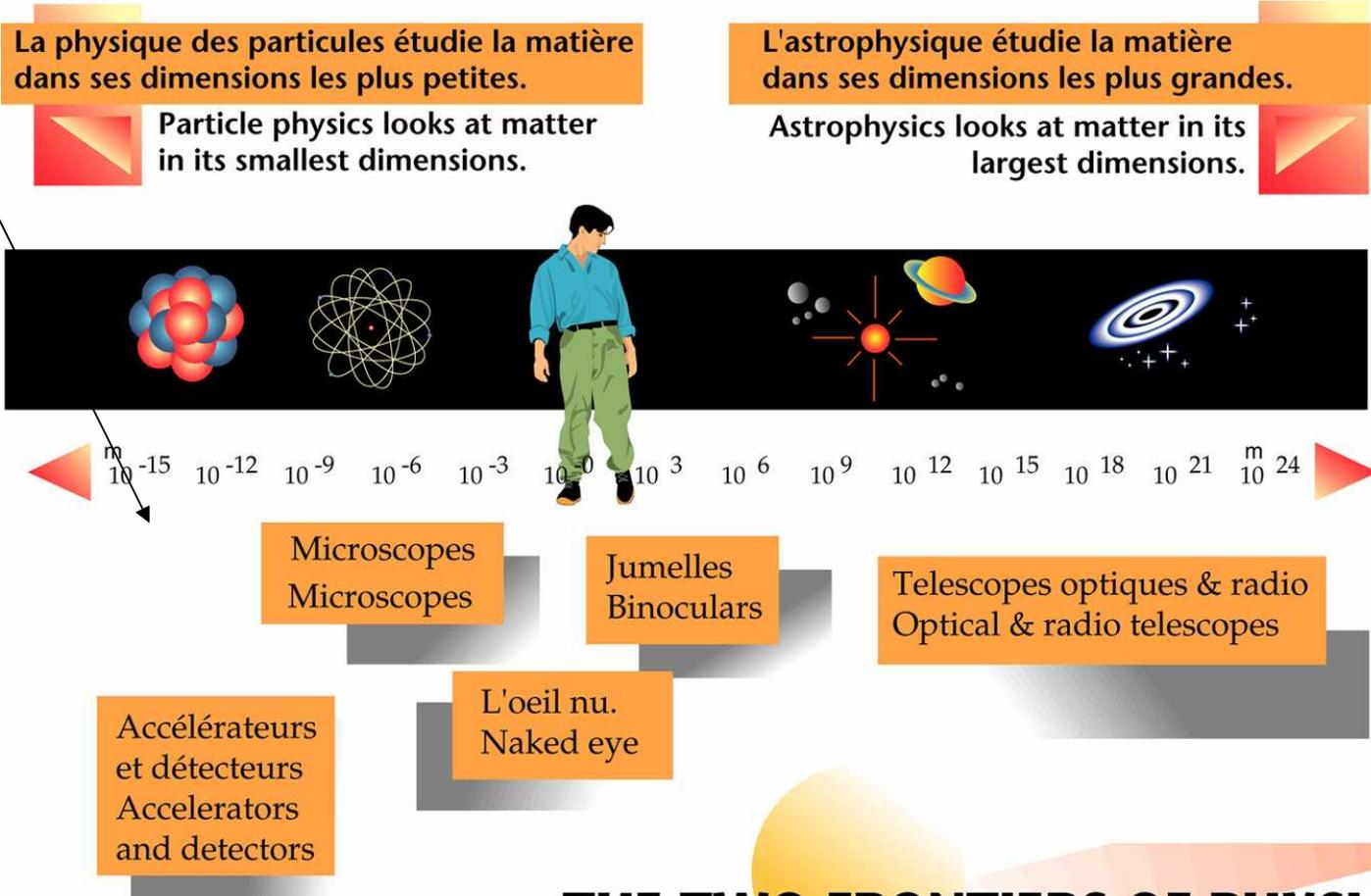
Процессы с кажущимся нарушением закона сохранения энергии-импульса

**RS сценарий**



Процессы с рождением массивных резонансов спина 2

# Коллайдеры: LEP I, LEP II, HERA, Tevatron, LHC, ILC ...

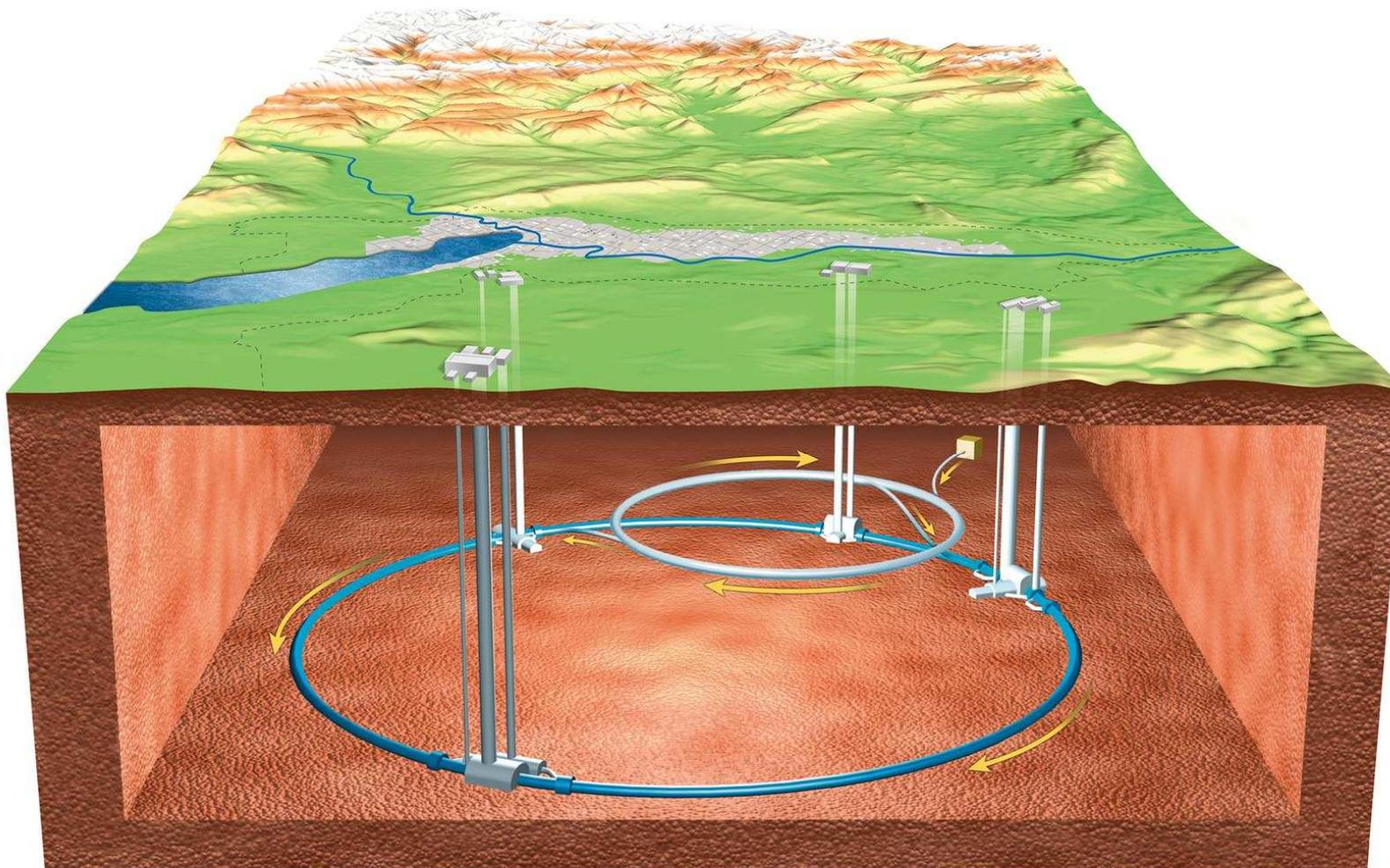


## THE TWO FRONTIERS OF PHYSICS LES DEUX FRONTIÈRES DE LA PHYSIQUE

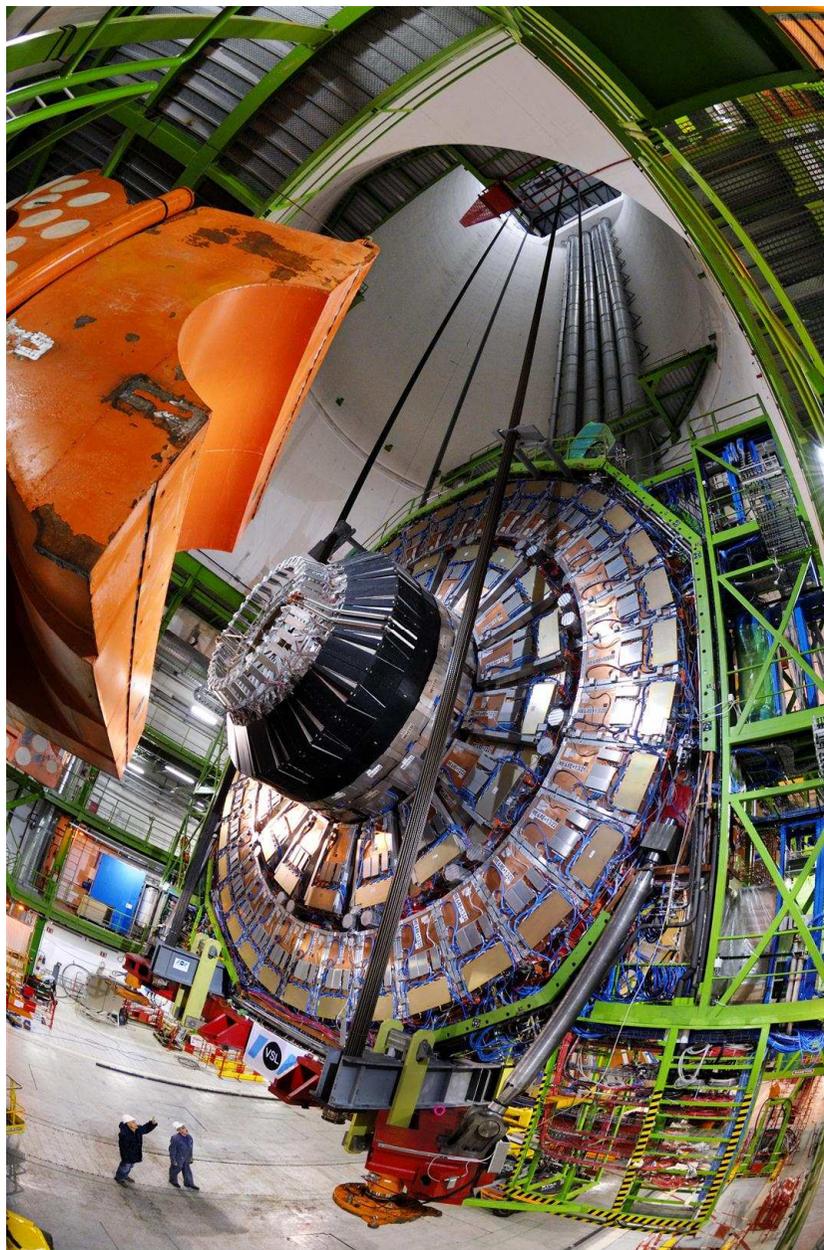
# Коллайдер LHC



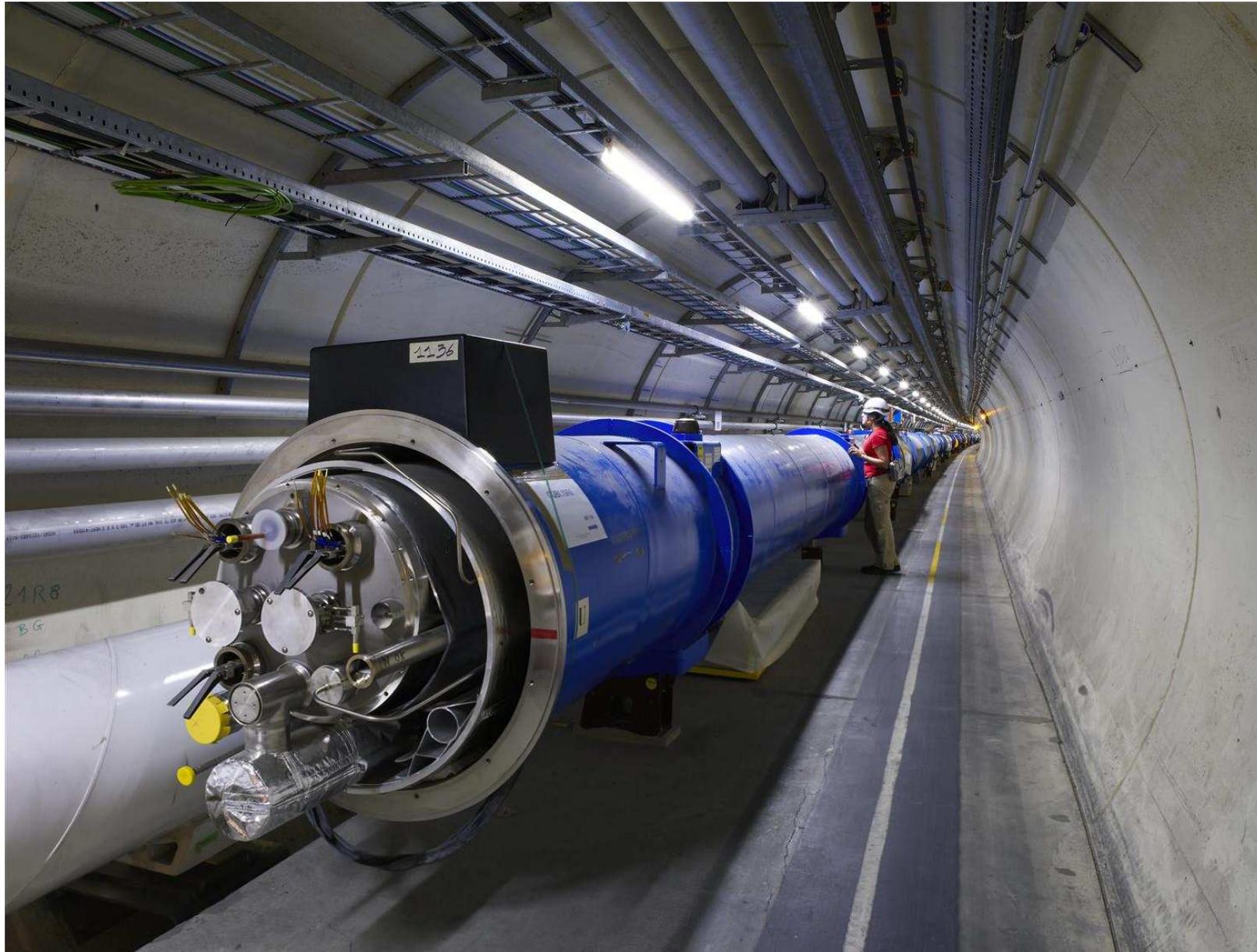
Основное кольцо и детекторы ЛHC на глубине примерно 70-100 м.  
Энергия столкновений 14 ТэВ, интегральная светимость до  $100 \text{ fb}^{-1}$



# Детектор СМС. Существенный вклад российской науки и промышленности



## Наладка магнитов в 27 километровом тоннеле LHC



# Женева



## Кафетерий ЦЕРНА - излюбленное место для научных дискуссий



# Control room



# Физическая программа исследований на LHC

ATLAS, CMS, ALICE, LHCb

Детальное исследование различных процессов в СМ, сравнение с NLO (Next to Leading Order), NNLO вычислениями

Поиск бозона Хиггса во всех возможных модах

Поиск различных отклонений от предсказаний СМ в парном и одиночном рождении  $t$ -кварка

Поиск суперсимметрии (скаварки, глюино, слептоны, отличные от СМ хиггсовские состояния)

Поиск проявлений дополнительных измерений в различных сценариях

Поиск проявлений составной структуры (возбужденные состояния лептонов и кварков, новые резонансы...)

Поиск другой экзотики (лептокварки, мини черные дыры...)

Исследование  $b$ -физики, осцилляции  $b$ -мезонов и CP нарушение

Исследование кварк-глюонной плазмы в столкновениях тяжелых ионов

# На LHC будет возможность детально изучить процессы на ранних стадиях Вселенной

