

Хиггс, Стандартная Модель, Нейтрино...

или об основах современного мироздания

Бедняков В.А.

Лаборатория Ядерных Проблем им. В.П. Джелепова,
Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна

ЦЕРН, Школа физики,
23.08.2016



- 1 Бозон Хиггса?
- 2 Стандартная Модель. Механизм Хиггса ...
- 3 Да, это Бозон Хиггса Стандартной Модели!
- 4 Большой Адронный Коллайдер и детектор АТЛАС
- 5 Стандартная Модель. Еще много интересного ...
- 6 Нейтрино
- 7 Кварки и Глюоны
- 8 Главные задачи современной физики элементарных частиц
- 9 Что дальше с LHC ...
- 10 ОИЯИ. Уникальность. Физика частиц. Нейтрино. Кварки.
- 11 Заключение



Планета Земля, 21-й век, ЦЕРН —
— это **LHC** и **Бозон Хиггса!!!**





Нобелевская премия по физике 2013



Питер Хиггс



Франсуа Энглер

”... за теоретическое открытие механизма, который помогает нам понять происхождение масс субатомных частиц и который был недавно подтвержден благодаря открытию на Большом адронном коллайдере новой предсказанной частицы”.



Питер Хиггс



Предсказал
существование
бозона Хиггса в

1964 году

Прошел не один десяток лет
безуспешных поисков





Питер Хиггс



Предсказал
существование
бозона Хиггса в

1964 году

4 июля 2012 года

Было объявлено, что бозон Хиггса
наконец-то ~~“пойман”~~

Обнаружен!

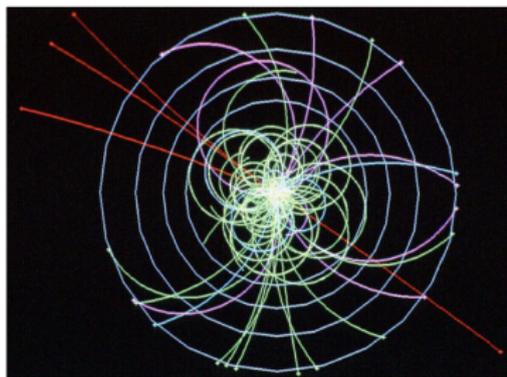




Триумф Питера Хиггса!

Higgs

Выглядело это примерно так →



И ВОТ ТАК:





- **Higgs. Phys.Lett. 12:132 (1964)**
- **Englert, Brout. PRL 13:321 (1964)**
- **Guralnik, Hagen, Kibble. PRL 13:585 (1964)**



Механизм Энглерта-Браута-Хиггса-Гуральника-Хагена-Киббла



HIGGS BOSON

H



The **HIGGS BOSON** is the theoretical particle of the Higgs mechanism, which physicists believe will reveal how all matter in the universe gets its mass. Many scientists hope that the Large Hadron Collider in Geneva, Switzerland, which collides particles at 99.99% the speed of light, will detect the elusive Higgs Boson

\$10.49 PLUS SHIPPING



Wool felt, fleece with gravel fill for maximum mass.

GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEUTRINO MUON UP QUARK
NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON **HIGGS BOSON** NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN
NEUTRINO MUON UP QUARK PROTON NEUTRON DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHY
UP QUARK DOWN QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN
DOWN QUARK UP QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEU
DOWN QUARK UP QUARK TAU GLUON PHOTON NEUTRINO TACHYON ELECTRON UP QUARK DOWN QUARK TAU NEU

The PARTICLE ZOO

- Что за «зверь»?
- Зачем нужен?
- Где искать?
- Какие оставляет следы?
- Как ловить?
- Чем ловить?
- Поймали, ... и что?



Современная картина (физического) Мира "в руках" Стандартной Модели

В ней и все (??) ответы ...



Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents

spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e lightest neutrino ⁺	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0
e^- electron	0.000511	-1
ν_μ middle neutrino ⁺	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0
μ^- muon	0.106	-1
ν_τ heaviest neutrino ⁺	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0
τ^- tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

BOSONS

force carriers

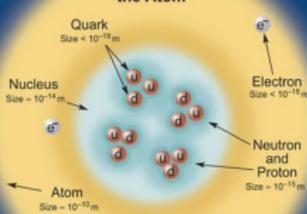
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^\pm	80.39	-1
W^0	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Only quarks and gluons carry "color charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated — 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. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen in nature.

Two types of hadrons have been observed in nature: mesons (q anti-q) and baryons (qqq). Among the many types of baryons observed are the proton (pud), antiproton (anti-p), neutron (nudd), lambda 1 (uds), and omega B⁺ (sss). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge +1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ (ud), kaon K⁺ (us), B⁺ (ub), and η_c (cc). Their charges are +1, -1, 0, respectively.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
	Acts on:	Mass-Energy	Flavor	Electric Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^\pm W^0 Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-16} \\ 3 \times 10^{-17} \end{array} \right.$ m	10^{-41} 10^{-41}	0.6 10^{-4}	1 1	25 60

Visit the award-winning web feature [The Particle Adventure at ParticleAdventure.org](http://TheParticleAdventure.org)

This chart was made possible by the generous support of U.S. Department of Energy, U.S. National Science Foundation, Lawrence Berkeley National Laboratory, G008 Contemporary Physics Education Project, CPEP is a non-profit organization of leaders, physicists, and educators. For more information see CPEPweb.org

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β^- (beta) decay.

An electron and positron (antiparticle) colliding at high energy can annihilate to produce B^+ and B^- mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

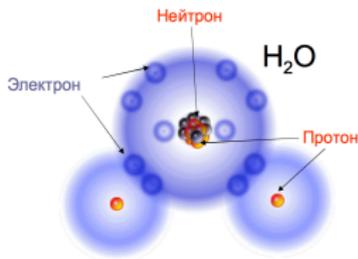
Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?



Из чего все состоит?



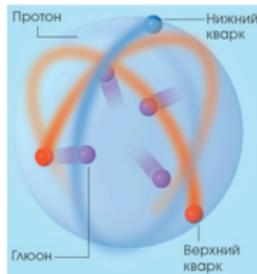
Капля воды
содержит около
 10^{21} молекул H_2O

Размер ядра
примерно $10^{-14} - 10^{-15}$ м

*Если диаметр протона
был бы 10 см, то размер атома
составил бы 10 км!*

Электромагнитное взаимодействие удерживает
ядро и электроны в атоме.

Что там внутри протона?



Кварки и глюоны -
элементарные
частицы, размеры
которых $< 10^{-19}$ м.

Бывают трех цветов

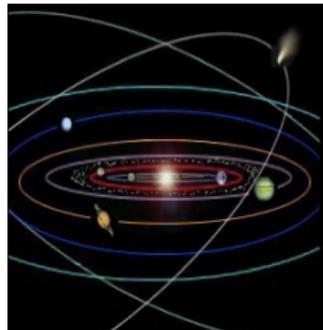
Адроны — частицы,
составленные из кварков
и подверженные сильному
взаимодействию.

Сильное взаимодействие удерживает
кварки в протоне
(глюоны «склеивают» кварки вместе).

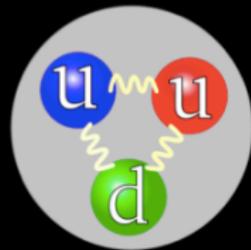
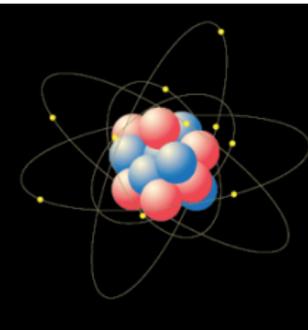
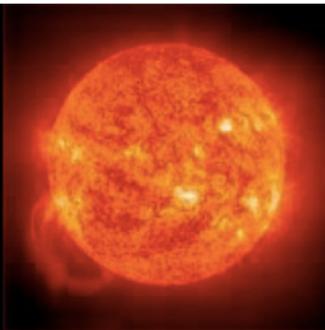




А также к 4-м известным силам Природы



Гравитация



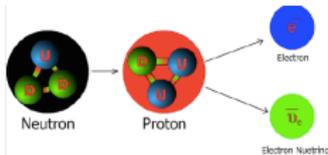
Сильные

Слабые взаимодействия

Электромагнетизм



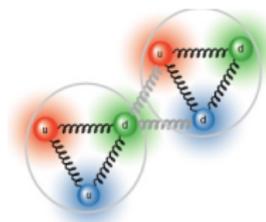
Сила = 1



Сила = 10^{25}



Сила = 10^{36}



Сила = 10^{38}



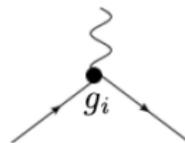
Все они "объединились" в одну Стандартную Модель

Кварки и лептоны (фермионы, спин = 1/2) — составляющие элементы материи
Бозоны (спин = 0, 1) — переносчики взаимодействий

Кварки		Лептоны		Бозоны	
 верхний	 нижний	 электрон	 нейтрино e	 фотон	
 очарованный	 странный	 мюон	 нейтрино μ	 ГЛЮОН	
 истинный	 прелестный	 тау-лептон	 нейтрино τ	 $Z^0 W^\pm$	
The Standard Model		A. Pich - CERN Summer Lectures 2003			

СМ описывает
локальные
взаимодействия
частиц:

- сильное
- слабое (распады)
- электромагнитное
- электро-слабое



Однако: Все кварки — "одинаковые", различие типа верхний–нижний, ...

Лептоны — разные, заряженные лептоны и нейтральные (лептонные) нейтрино



Стандартная Модель — фундаментальная теория, объясняющая (почти) все экспериментальные явления физики элементарных частиц

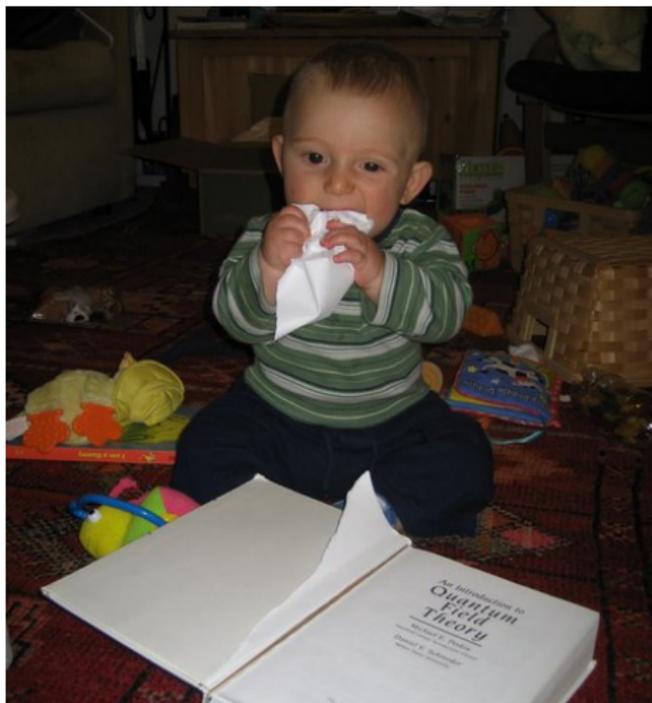


Нобелевские лауреаты: Глэшоу, Салам, Вайнберг. 1979 г.



Стандартная Модель —

- 1 это Квантовая теория поля, согласованно описывающая фермионы и бозоны (частицы), как возбуждения **полей**, организованных специальным образом;
- 2 это Калибровочная симметрия $SU(2)_L \times U(1) \times SU(3)$, однозначно определяющая характер взаимодействия между этими полями (частицами);
- 3 это специфическое скалярное поле Хиггса, приводящее к спонтанному нарушению калибровочной $SU(2)_L \times U(1)$ симметрии (**механизм Хиггса**) и к возникновению масс у калибровочных бозонов (спин = 0 или 1);
- 4 это взаимодействие (Юкавского типа) фермионов с полем Хиггса и возникновение масс у кварков и лептонов (фермионов, спин = 1/2).



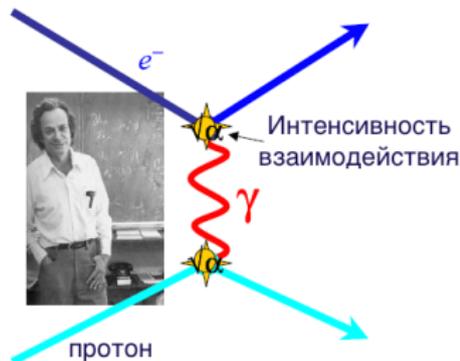
Квантовая Механика —

- **дискретность** (квантование, новый масштаб \hbar — постоянная Планка) и
- **дальнодействие** ($v = \infty$), т.е. взаимодействие (сила, информация?) передается **мгновенно** (нас этот аспект здесь не сильно-то и интересует).

Квантовая теория поля — Квантовая Механика (\hbar) + Специальная Теория Относительности ($c \neq \infty$). Короткодействие, причинность. Поле — та субстанция (её кванты), которая **локально** осуществляет взаимодействие!



Локальность взаимодействия — это значит, что мы весь процесс контролируем, мы знаем что-и-где, что-за-чем происходит, потому что у нас есть явный переносчик взаимодействия (**квант поля взаимодействия**), который два раза в разных точках, но одновременно "общается" с двумя (разными) **квантами полей материи**.



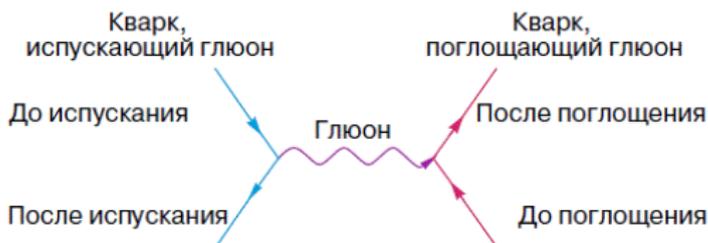
Пример диаграммы Фейнмана

Математический аппарат Квантовой теории поля (после процедуры вторичного квантования) позволяет с высокой точностью (в рамках теории возмущений) вычислять вероятности (сечения) всех процессов с участием частиц Стандартной Модели!

Эти числа на систематической основе хорошо совпадают с данными.



Как это делается. Пример взаимодействия двух кварков путем обмена глюоном:



Сначала совершенно не взаимодействующие частицы летят издалека навстречу друг другу в область взаимодействия. Это начальное состояние $|i\rangle$: $|\Psi_{in}(t = -\infty)\rangle = |i\rangle$

Затем в области взаимодействия что-то с ними происходит под воздействием оператора S , который изменяет их состояние: $|\Psi_{in}(t = +\infty)\rangle = S|\Psi_{in}(t = -\infty)\rangle$

После это эти или уже другие частицы опять совершенно не взаимодействуя улетают на бесконечность. Это конечное состояние $|f\rangle$: $|\Psi_{out}(t = +\infty)\rangle = |f\rangle$

Вероятность такого явления определяется квадратом амплитуды $|S_{if}|^2$:

$$\langle \Psi_{out}(t = +\infty) | \Psi_{in}(t = +\infty) \rangle = \langle f | S | i \rangle = S_{if}.$$

Чтобы вычислить эту вероятность надо знать по крайней мере три вещи — $\langle f |$, $|i\rangle$ и характер взаимодействия S .

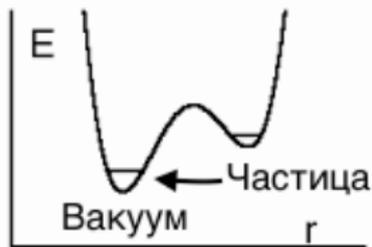


Процедура вторичного квантования позволяет как создавать и уничтожать начальные и конечные состояния $\langle f|$, $|i\rangle$, так и воздействовать на них оператором S . Любое поле разлагается по операторам рождения a^\dagger и уничтожения a его квантов:

$$\varphi(x) = \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3 2E} (e^{-iqx} a(q) + e^{iqx} a^\dagger(q)), \text{ или } \Psi(x) = \int \frac{d^3q}{(2\pi)^3 2E} (e^{-iqx} c(q) + e^{iqx} c^\dagger(q)).$$

Частицы, которые мы ищем и находим — это кванты соответствующего поля, возбужденные состояния около минимума энергии — вакуума $|0\rangle$, в котором нет никаких частиц, т.е. $a(q)|0\rangle = c(q)|0\rangle = 0$.

Тогда $a^\dagger(q)|0\rangle$ — состояние с одной a -частицей (импульс q). $|f\rangle$ и $|i\rangle$ имеют вид $a^\dagger(q)c^\dagger(q')|0\rangle$ — состояний с двумя (разными) частицами и т.д.



Оператор перехода S_{if} определяется Лагранжианом \mathcal{L} взаимодействия:

$$S_{if} = \delta_{fi} + i\langle f| \int_{-\infty}^{\infty} d^4x \mathcal{L}(x) |i\rangle - \frac{1}{2} \langle f| \int_{-\infty}^{\infty} d^4x_1 d^4x_2 T[\mathcal{L}(x_1), \mathcal{L}(x_2)] |i\rangle + \dots$$



$$\begin{aligned}
\mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - eQ_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
& + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
& - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
& - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
& - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
& - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
& + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{GWS} = & \sum_f (\bar{\Psi}_f (i\gamma^\mu \partial_\mu - m_f) \Psi_f - eQ_f \bar{\Psi}_f \gamma^\mu \Psi_f A_\mu) + \\
 & + \frac{g}{\sqrt{2}} \sum_i (\bar{a}_L^i \gamma^\mu b_L^i W_\mu^+ + \bar{b}_L^i \gamma^\mu a_L^i W_\mu^-) + \frac{g}{2c_w} \sum_f \Psi_f \gamma^\mu (I_f^3 - 2s_w^2 Q_f - I_f^3 \gamma_5) \Psi_f Z_\mu + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu - ie(W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 - \frac{1}{2} |\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+ + \\
 & - ie(W_\mu^+ A_\nu - W_\nu^+ A_\mu) + ig' c_w (W_\mu^+ Z_\nu - W_\nu^+ Z_\mu)|^2 + \\
 & - \frac{1}{4} |\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu + ig' c_w (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\mu^+ W_\nu^-)|^2 + \\
 & - \frac{1}{2} M_\eta^2 \eta^2 - \frac{g M_\eta^2}{8 M_W} \eta^3 - \frac{g'^2 M_\eta^2}{32 M_W} \eta^4 + |M_W W_\mu^+ + \frac{g}{2} \eta W_\mu^+|^2 + \\
 & + \frac{1}{2} |\partial_\mu \eta + i M_Z Z_\mu + \frac{ig}{2c_w} \eta Z_\mu|^2 - \sum_f \frac{g}{2} \frac{m_f}{M_W} \bar{\Psi}_f \Psi_f \eta
 \end{aligned}$$

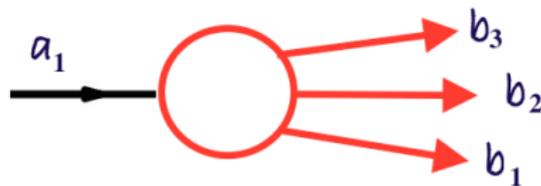
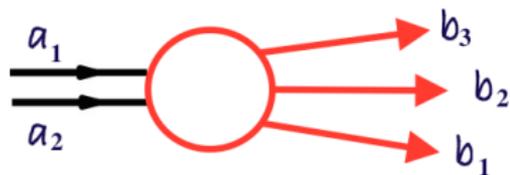


Сечение рассеяния = $\frac{\text{Вероятность перехода} \times \text{Число конечных состояний}}{\text{Начальный поток частиц}}$

$$\sigma(a_1 a_2 \rightarrow b_1 b_2 \dots b_n) = \frac{|S_{if}|^2}{4|\vec{v}_1| E_1 E_2} (2\pi)^4 \delta^4(p_1 + p_2 - \sum_1^n p_i) \int \prod_i^n \frac{dp_i}{2E_i (2\pi)^3}$$

Ширина распада = $\frac{\text{Вероятность распада} \times \text{Число конечных состояний}}{\text{Начальная энергия}}$

$$\Gamma(a_1 \rightarrow b_1 b_2 \dots b_n) = \frac{|S_{if}|^2}{2E_1} (2\pi)^4 \delta^4(p_1 - \sum_1^n p_i) \int \prod_i^n \frac{dp_i}{2E_i (2\pi)^3}$$





Поле — "разлитая" во всем (бесконечном) пространстве субстанция ...

(Квантовое) Поле



Движение воздуха в комнате



АНАЛОГИЯ



Частица = волна
(квант поля)



Звуковые волны

Исследуя свойства частиц,
мы получаем информацию
о соответствующем поле



Поле Хиггса

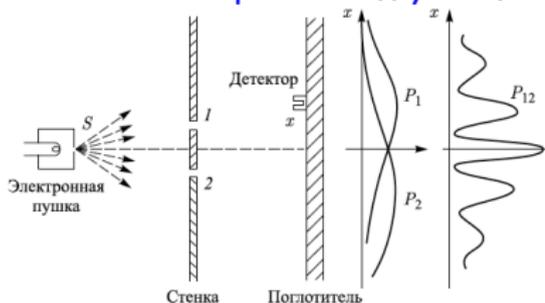
А зачем это поле?
Что в нем особенного?

Исследуя свойства
Бозона Хиггса,
мы получаем
информацию
о Поле Хиггса





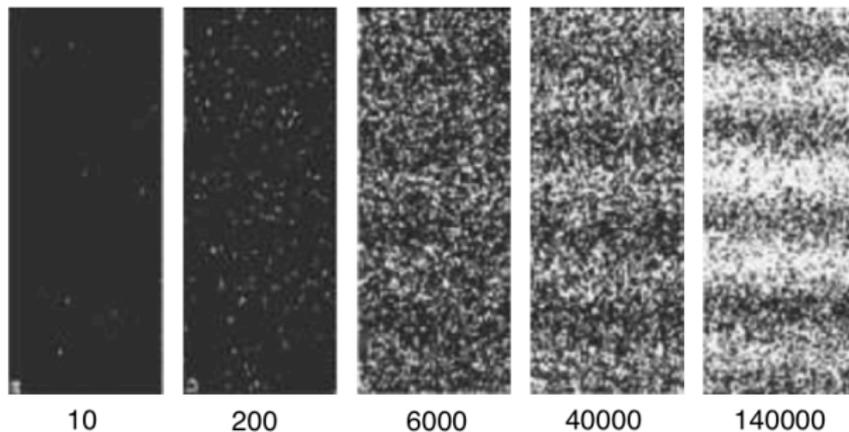
Классический эксперимент с двумя щелями:



Tomomura A. Direct Observation of Thitherto Unobservable Quantum Phenomena by Using Electrons. PNAS. 2005, 102, 14952. Д.А.Славнов. Корпускулярно-волновой дуализм. ЗЧАЯ. 2015, 46, 1199.

Под фотографиями — число зарегистрированных электронов.

При регистрации небольшого числа электронов интерференция не видна. Она появляется только в случае очень большого числа электронов.



Похоже, **отдельный электрон** волновыми свойствами не очень обладает. Они появляются только в ансамбле электронов, сформулированном специальным образом.



Главный ВОПРОС:

Зачем нужно ЭТО поле Хиггса?



Зачем нужно именно такое поле Хиггса?

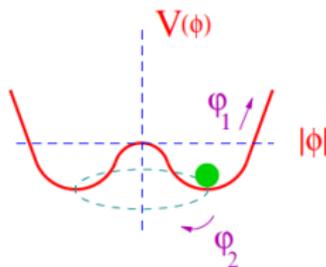
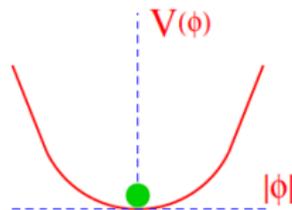
Поле Хиггса играет **важнейшую роль**. Благодаря **взаимодействию с ним** возникают массы у **элементарных частиц** (механизм Хиггса).

Симметрия, лежащая в основе Стандартной модели, требует (допускает) **только нулевые массы** у частиц, что, безусловно, противоречит реальности. Поэтому такая симметрия (строго говоря, $SU(2)_L$ калибровочная симметрия) должна быть нарушена!



Если напрямую (руками) ввести ненулевые массы — т.е. явно нарушить эту симметрию взаимодействия, то теория не будет правильно работать.

Однако симметрию можно нарушить косвенно, спонтанно — на уровне основного состояния (с минимальной энергией) всей системы, когда симметричное состояние равновесия неустойчиво, а **несимметричное состояние равновесия устойчиво!**



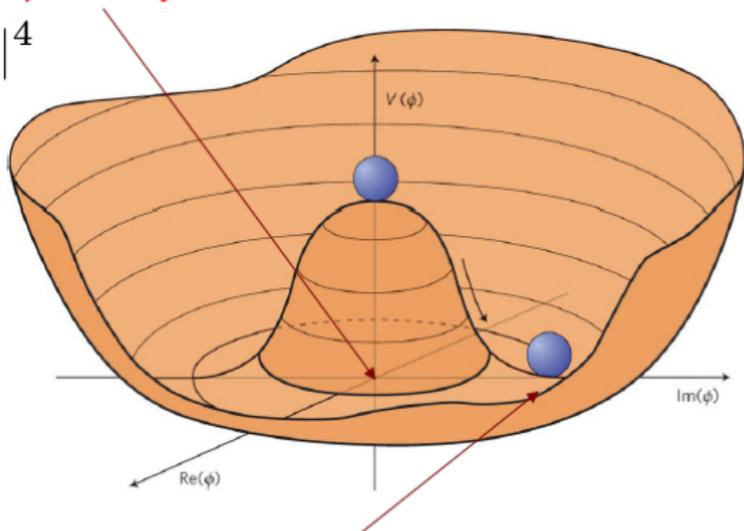
В квантовой теории поля всегда есть основное состояние (вакуум), около которого система ”совершает колебательные движения”. Возбуждения (над вакуумом) и есть наши частицы, наш Мир!

Неустойчивому симметричному состоянию равновесия соответствует ситуация, когда поле Хиггса (в среднем) равно нулю.

$$V(\phi) = m^2|\phi|^2 - \lambda|\phi|^4$$

$$\left. \frac{\partial V(\phi)}{\partial \phi} \right|_{\phi=\langle\phi\rangle} = 0$$

$$\langle\phi\rangle \neq 0$$



Устойчивому **НЕ**симметричному состоянию равновесия соответствует ситуация, когда поле Хиггса **не равно нулю** во всем пространстве.



Зачем нужно именно такое хитрое поле Хиггса?

Итак, чтобы построить СМ-модель Мира, в котором мы все живем, и чтобы иметь возможность вычислять вероятности процессов в нем, нам необходимо выбрать **одно и только одно** строго определенное **основное состояние** этого Мира — вакуум $|0\rangle$ (из многих возможностей на окружности минимума потенциала Хиггса).

Как только это случилось (шарик скатился в какую-то одну точку на окружности) — произошло **спонтанное нарушение симметрии**. Именно "над этим вакуумом мы будем жить", в нем все поля СМ обладают минимум энергии, и только у скалярного поля Хиггса значение поля $\langle\phi\rangle > 0$ (у остальных 0).

Взаимодействие с таким "хитрым" полем и придает элементарным частицам (квантам материи и квантам взаимодействия) массы (т.е. инерционные свойства).

Частицы во время своего движения как бы все время цепляются за это постоянное ненулевое поле и поэтому тормозятся (т.е. становятся массивными). Чем сильнее цепляются — тем больше инерция, т.е. тем больше масса.

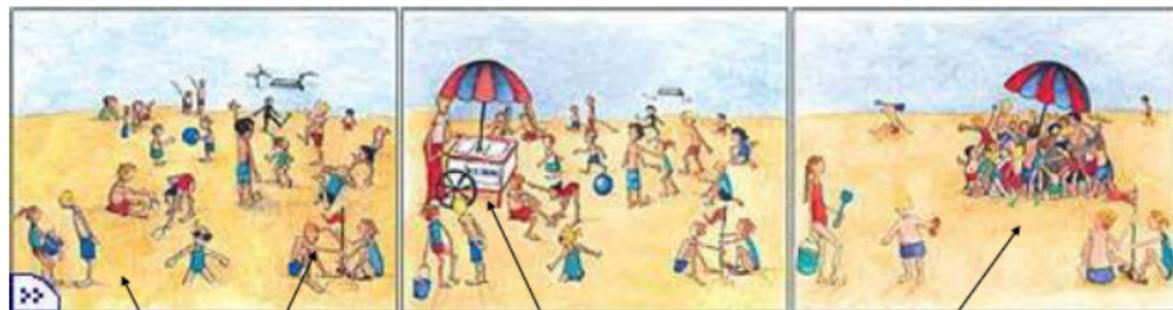
Фермионы: $Y\bar{\psi}\psi\phi \rightarrow [Y\langle\phi\rangle]\bar{\psi}\psi \equiv m_\psi\bar{\psi}\psi$

Бозоны: $g^2 W_\mu^2 \phi^2 \rightarrow [g^2\langle\phi\rangle^2] W_\mu^2 \equiv m_W^2 W_\mu^2$





Действующая (на пляже) модель механизма Хиггса – иллюстрирует возникновение сил инерции



Поле Хиггса, пока
невозмодствующее

Элементарная частица
попала в зону действия
поля Хиггса

Взаимодействие!
Теперь ей трудно двигаться
(ускоряться) – она стала
массивной!



Именно такое взаимодействие — механизм Хиггса — объясняет весь широкий спектр масс элементарных частиц Стандартной Модели.

От почти "невесомых" нейтрино ($\approx 0.1 \text{ эВ}/c^2$) до самого тяжелого (элементарного) фермиона — топ-кварка ($173 \text{ ГэВ}/c^2$).



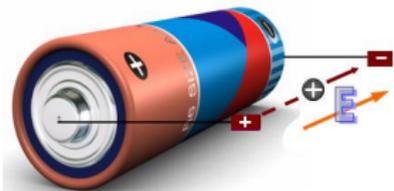
$$M_{\text{вольфрам}} \approx M_{\text{топ}}$$

	масса → $\approx 2.3 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ ГэВ}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ ГэВ}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ ГэВ}/c^2$
	заряд → $2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
	спин → $1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u верхний	c очарованный	t истинный	g глюон	H бозон Хиггса
КВАРКИ	$\approx 4.8 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 95 \text{ МэВ}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ ГэВ}/c^2$	0	
	заряд → $-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	спин → $1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	d нижний	s странный	b прелестный	γ фотон	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ МэВ}/c^2$	$1.777 \text{ ГэВ}/c^2$	$91.2 \text{ ГэВ}/c^2$	
	заряд → -1	-1	-1	0	
	спин → $1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	e электрон	μ мюон	τ тау	Z Z бозон	
ЛЕПТОНЫ	$< 2.2 \text{ эВ}/c^2$	$< 0.17 \text{ МэВ}/c^2$	$< 15.5 \text{ МэВ}/c^2$	$80.4 \text{ ГэВ}/c^2$	
	заряд → 0	0	0	± 1	
	спин → $1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	ν_e электронное нейтрино	ν_μ мюонное нейтрино	ν_τ тау нейтрино	W W бозон	
					КАЛИБРОВОЧНЫЕ БОЗОНЫ



О единицах измерения в физике высоких энергий

1 эВ (электронвольт) — энергия, приобретаемая электроном при прохождении разности потенциалов в 1 вольт.



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

Тепловая энергия поступательного движения одной молекулы при комнатной температуре	0,025 эВ
Энергия ионизации атома водорода	13,6 эВ
Энергия электрона в лучевой трубке телевизора	Порядка 20 кэВ
Энергии космических лучей	1 МэВ — 1000 ТэВ
Типичная энергия ядерного распада:	
альфа-частицы	2-10 МэВ
бета-частицы и гамма-лучи	0-20 МэВ

Кратные				Дольные			
величина	название	Обозначение		величина	название	обозначение	
10^3 эВ	килоэлектронвольт	кэВ	keV	10^{-3} эВ	миллиэлектронвольт	мэВ	meV
10^6 эВ	мегаэлектронвольт	МэВ	MeV	10^{-6} эВ	микроэлектронвольт	мкэВ	μeV
10^9 эВ	гигаэлектронвольт	ГэВ	GeV	10^{-9} эВ	наноэлектронвольт	нэВ	neV
10^{12} эВ	тераэлектронвольт	ТэВ	TeV	10^{-12} эВ	пикоэлектронвольт	пэВ	peV
10^{15} эВ	петаэлектронвольт	ПэВ	PeV	10^{-15} эВ	фемтоэлектронвольт	фэВ	feV

Единицы измерения массы — $\text{эВ}/c^2$ ($E = mc^2$ и $c = 1$).

Масса протона — $1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 938 \text{ МэВ}/c^2 \equiv 938 \text{ МэВ}$.

Масса электрона — $9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 0.51 \text{ МэВ}/c^2 \equiv 0.51 \text{ МэВ}$.



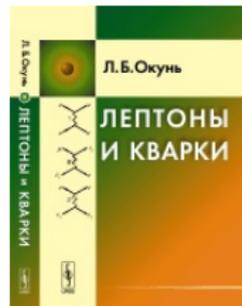
Механизм Хиггса генерации масс элементарных частиц должен быть как-то связан с **гравитацией (!?)**, поскольку в Общей Теории Относительности масса — это одновременно и гравитационный заряд.

Бозон Хиггса — это агент нарушения электро-слабой симметрии Стандартной Модели и одновременно переносчик **нового фундаментального взаимодействия** на масштабе энергий 100 ГэВ.

Далее, согласно Л.Б.Окуню —

Векторные поля отвечают **за динамику взаимодействия** и являются следствием локальной симметрии.

Скалярные поля отвечают **за инерционные свойства** и несут на себе столь же важную функцию на нарушение симметрии.









Симметрии ... симметрии ... Поворот на 60 градусов ?



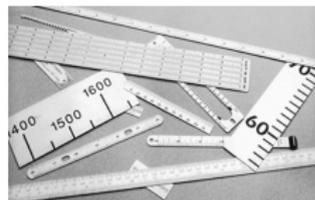
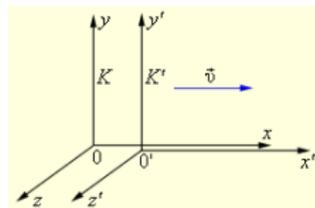
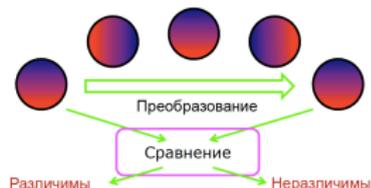


Симметрия (системы, Лагранжиана, вакуумного состояния и т.п.) означает (их) **независимость** (инвариантность) от определенного сорта проведенных (над ними) преобразований (манипуляций).

Лоренц инвариантность — это почти тоже самое, что и инвариантность относительно преобразований Галилея (**сдвиг системы отсчета**). Фактически — это независимость от вмешательства человека (объективность).

Калибровочная инвариантность — это почти тоже самое, что независимость от того, как мы градуируем (**калибруем**) наш измерительный прибор, например, обычную линейку.

В Стандартной модели (калибровочная) симметрия относительно $SU(2)$, $SU(3)$ преобразований определяет динамику (характер) взаимодействия между фермионами (лептонами, кварками) — это, вообще говоря, удивительно!





Что ... если бы не механизм Хиггса ?

Представим, что электро-слабая симметрия Стандартной Модели осталась НЕ нарушенной механизмом Хиггса.

ТОГДА:

- Кварки и лептоны остались без-массовыми (т.е. с массами = 0)
- Протон все же тяжелее нейтрона, но массы их несколько меньше
- Электро-слабая симметрия нарушается только за счет КХД (сильного взаимодействия), массы калибровочных бозонов в 2500 раз меньше, слабые силы "дальнодействующие" ...
- Очень быстрый бета-распад, легчайшее ядро — нейтрон
- Нет атомов (в нынешнем виде), нет химии, нет стабильных структур типа воды и твердого тела ...
- Мир не приспособлен для жизни !

ПОЭТОМУ: Понимание механизма нарушения электр-слабой симметрии — это путь к пониманию того, почему наш Мир именно такой. Это один из самых глубоких вопросов, что ставило и ставит перед собой человечество. Ответ на него — **в лоне физики элементарных частиц!**



Где и как искать **ЭТОТ** бозон Хиггса?



Вероятности распадов:

$$\Gamma(H \rightarrow ff) \sim M_H M_f^2$$

$$\Gamma(H \rightarrow WW) \sim M_H^3/2$$

$$\Gamma(H \rightarrow ZZ) \sim M_H^3/4$$

$$\Gamma(H \rightarrow gg) \sim M_H^3 \frac{\alpha_S^2}{9\pi}$$

$$\Gamma(H \rightarrow \gamma\gamma) \sim M_H^3 \frac{49\alpha_{EM}^2}{32\pi}$$

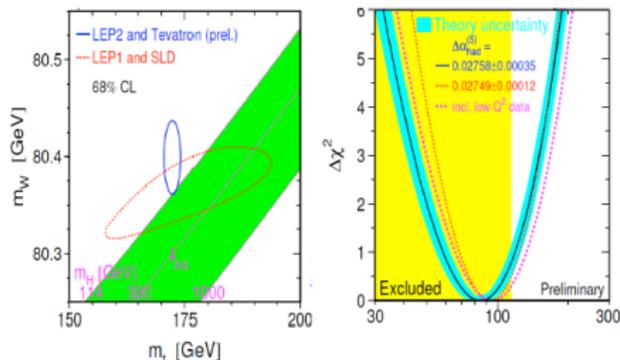
- Ширины фермионных распадов пропорциональны квадрату массы фермиона
- Хиггс-бозон распадается на пару самых тяжёлых фермионов (b-кварки)
- Распады на бозоны WW и ZZ становятся доминирующими, как только $M_H > 2M_{W(Z)}$



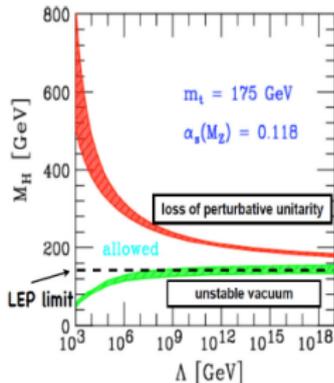
$$\rho = \frac{M_W^2/M_Z^2}{1 - \sin^2\Theta_W} = 1 + \frac{3G_F}{8\pi^2\sqrt{2}} m_t^2 + \frac{\sqrt{2}G_F}{16\pi^2} m_t^2 \left[\frac{11}{3} \ln\left(\frac{M_H^2}{M_W^2}\right) + \dots \right] + \dots$$

Радиационные поправки (квантовые эффекты), чувствительны к массе хиггса

$$M_H = 88 \pm 29 \text{ ГэВ}, \quad M_H < 161 \text{ ГэВ (95\%CL)}$$



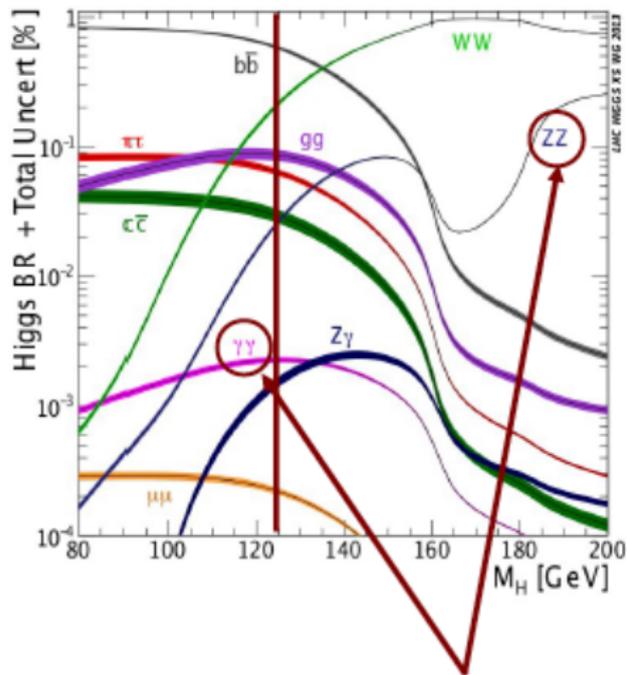
Имеющиеся ограничения



- Если SM выполняется вплоть до 10^{16} ГэВ, то $130 < M_H < 170$ ГэВ
- Если только до 1 ТэВ, тогда $70 < M_H < 700$ ГэВ
- Кроме того, унитарность $WW \rightarrow WW$ рассеяния требует: $M_H < 710$ ГэВ



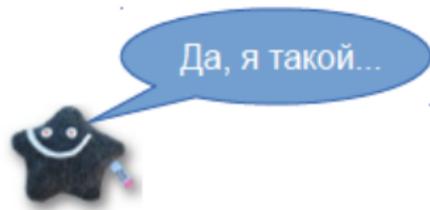
Где искать? — В продуктах его возможных распадов



Зная **массу хиггса** можно предсказать:

Как он рождается,
на что,
и как часто
Он будет распадаться!

При массе 125-126 ГэВ предпочитает распадаться на пару b-кварков (преlestные)



НО с экспериментальной точки зрения легче обнаружить другие следы..

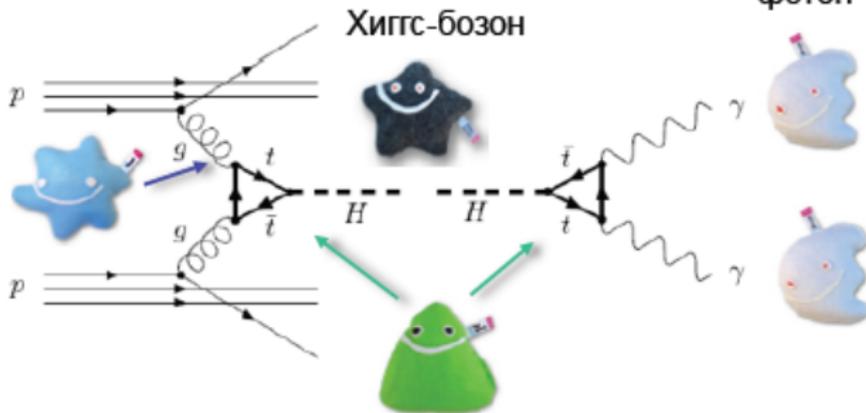


Следы хиггса

протон



ГЛЮОН



фотон



Топ-кварк

Диаграммы Фейнмана – способ представления возможных событий в физике высоких энергий. Каждой диаграмме по определенным правилам (Фейнмана) ставится в соответствие некоторое выражение, связанное с вероятностью рассматриваемого события...

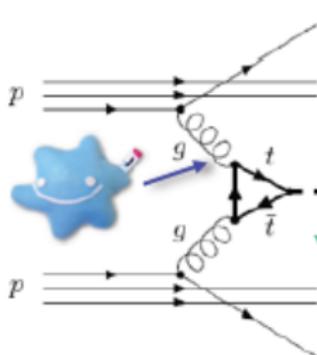


Следы хиггса

протон



ГЛЮОН



Хиггс-бозон



фотон



Топ-кварк



Привет!



Диаграмма описывает событие:

Рождение бозона Хиггса при столкновении двух протонов на Большом адронном коллайдере.

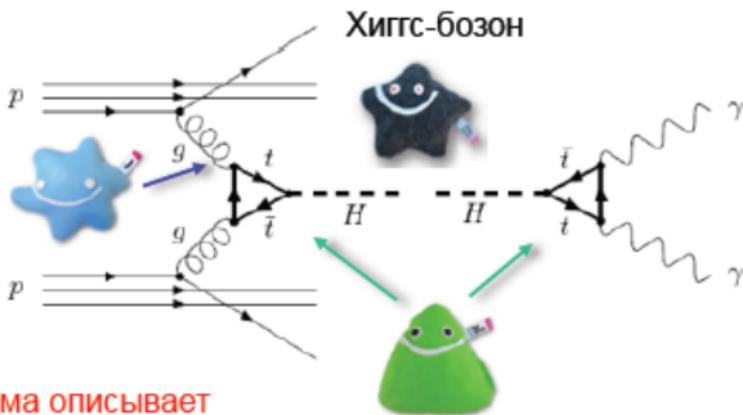


Следы хиггса

протон



ГЛЮОН



Хиггс-бозон



фотон



Диаграмма описывает событие:

Топ-кварк



Его (очень-очень-очень) короткую жизнь $\sim 10^{-22}$ сек.



Я лечу!

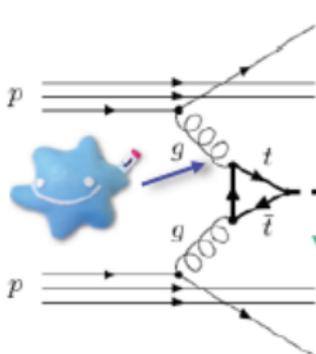


Следы хиггса

протон



ГЛЮОН



Хиггс-бозон



фотон

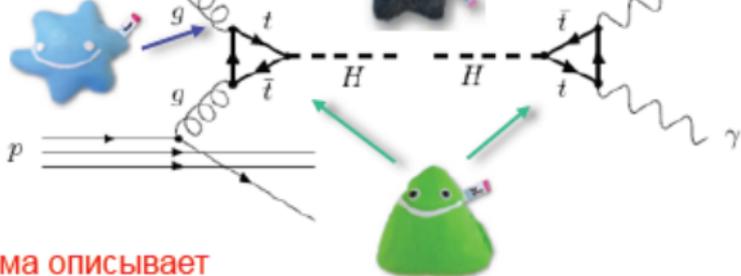


Диаграмма описывает событие:

Топ-кварк

Распад на два фотона

Это одна из **возможных** историй с участием бозона Хиггса!



Ой, 10^{-22} сек уже прошло?

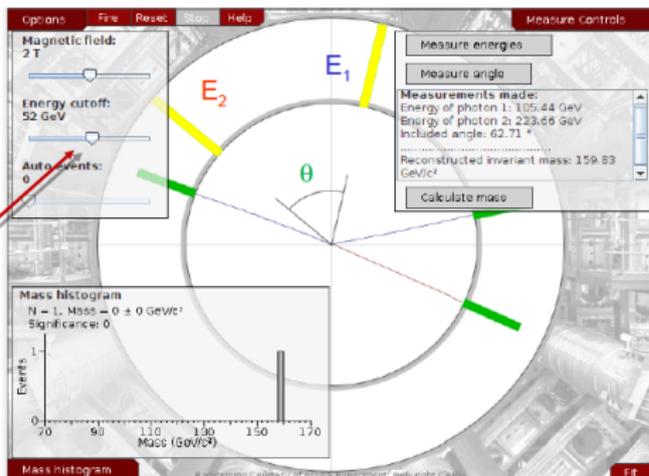


Следы бозона Хиггса — два фотона

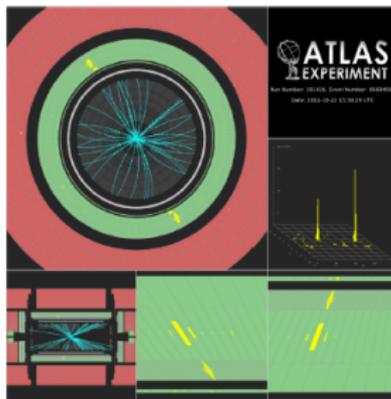
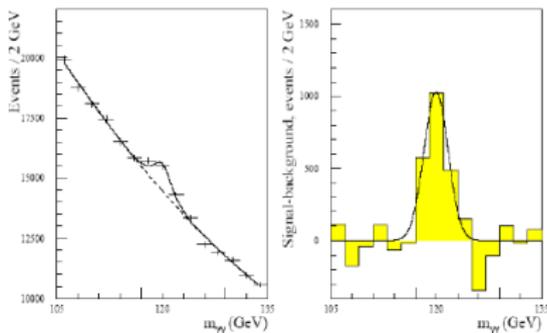
Массы бозона Хиггса вычисляется (реконструируется) из знания энергии фотонов $E_{1,2}$ и угла θ

$$M_H = \sqrt{2E_1E_2(1 - \cos\theta)}$$

Фотоны с меньшей энергий не рассматриваются



Так событие выглядит на самом деле





Как это выглядит ... в столкновениях протонов

Распад новых частиц



Адронизация



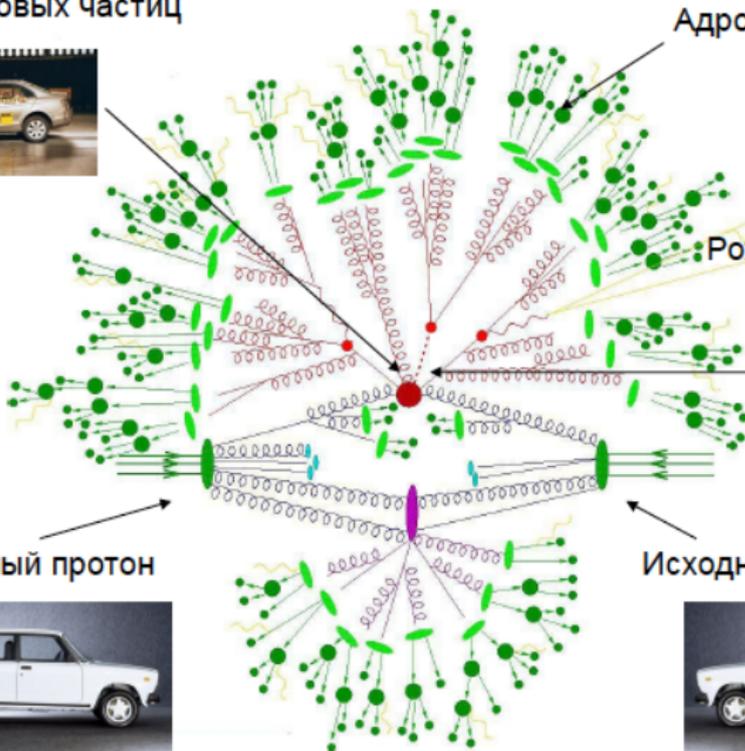
Рождение новых частиц



Исходный протон



Исходный протон





Как это выглядит ... в столкновениях протонов

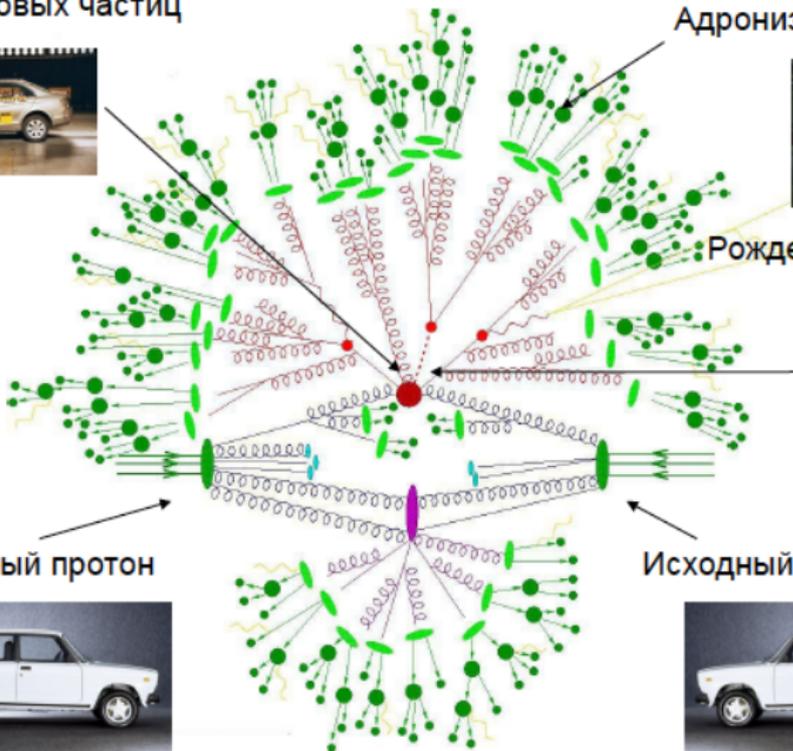
Распад новых частиц



Адронизация



Рождение новых частиц



Исходный протон



Исходный протон





Как это выглядит ... в столкновениях протонов

Распад новых частиц



Адронизация



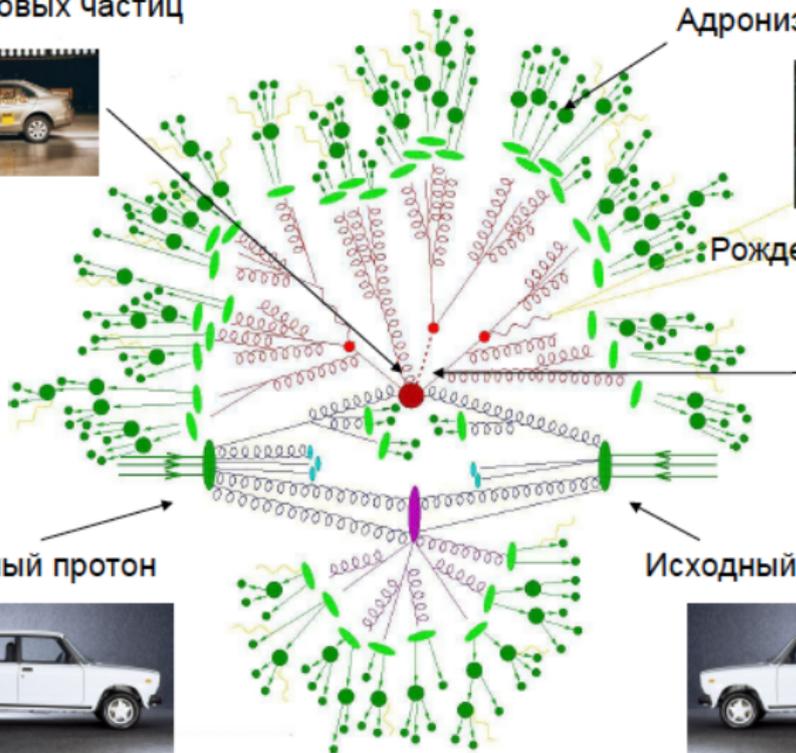
Рождение новых частиц



Исходный протон



Исходный протон





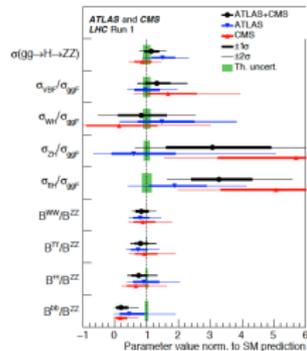
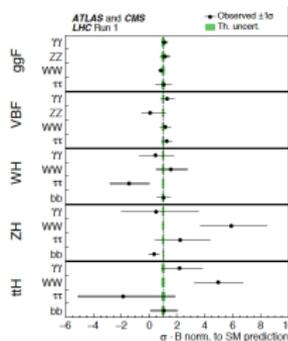
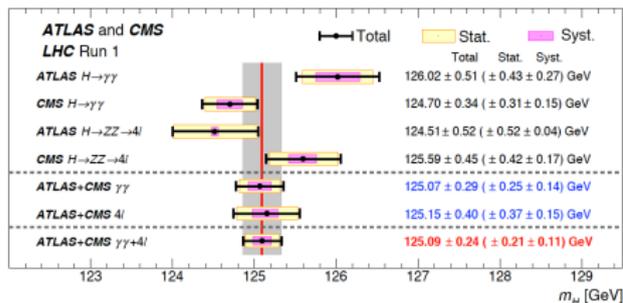
Обнаруженный бозон Хиггса — тот самый ... СМ-ный!

В течение 2013-2015 гг. было потрачено много сил, чтобы понять — какой же все-таки бозон Хиггса было обнаружен?

И сегодня все больше и больше уверенности в том, что это как раз тот самый бозон Хиггса Стандартной Модели!



$$\hat{m}_H = 125.09 \pm 0.21(stat) \pm 0.11(syst) \text{ GeV}$$



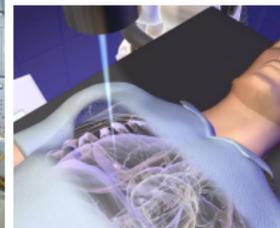
Хорошо это или плохо — вот в чём вопрос ?!



С помощью прибора ЛНС, т.е.
Large Hadron Collider,
что по-русски означает
Большой Адронный Коллайдер (БАК)



Тип микроскопа	зондирующий агент	разрешение
оптический	видимый свет	10^{-4} см
электронный	низко-энергичные e	10^{-7} см
радиоактивный	α -частицы	10^{-12} см
ускоритель	высоко-энергичные e, p	10^{-16} см



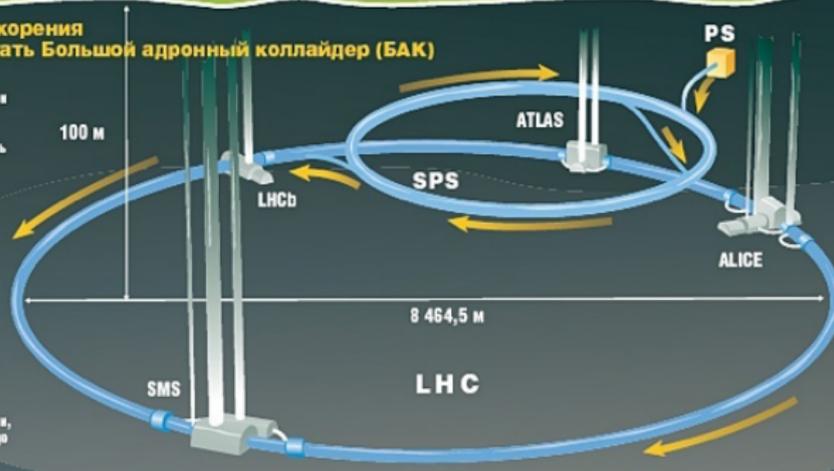
CERN В РАЗРЕЗЕ



Перестройка ускорения Как будет работать Большой адронный коллайдер (БАК)

Детектор LHCb предназначен для исследования частиц, называемых «кварк В». Цель эксперимента — выявить различия между материей и антиматерией.

Детектор CMS — та же задача, что и у ATLAS. Различно в ряде технических характеристик.



Детектор ATLAS — один из двух мегатоннажных детекторов (второй — LHCb). Здесь будут осуществляться исследования в ряде областей физики, в частности поиск бозона Хиггса и исследование частиц, из которых нежестко состоит темная материя.

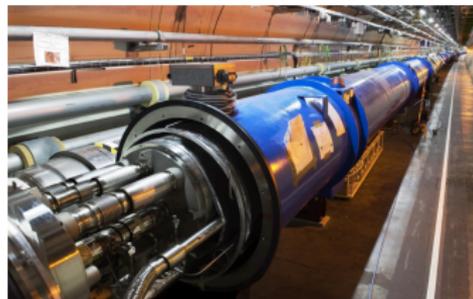
Детектор ALICE. Для этих экспериментов БАК воссоздает условия, которые существовали сразу после Большого взрыва; полученные данные позволят лучше узнать эволюцию материи в зародки Вселенной.

Перед тем как попасть в БАК, протоны будут разогнаны сначала инжекционным синхротроном (PS), затем суперсинхротроном (SPS). Попадая в БАК, протоны будут циркулировать в нем порядка 20 минут, чтобы выйти на максимальный скоростной и энергетический уровень. То, что произойдет с ними дальше, будет замеряться на четырех супердетекторах (по сути, суперлабораториях)

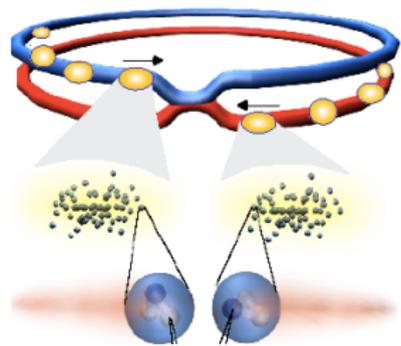


БАК — комплекс ускорителей, способный разогнать протоны до энергий 7 ТэВ.

7 ТэВ — это кин. энергия насекомого весом 60 мг (комар?), летящего со скоростью 20 см/с. Протон имеет скорость $v = c - 10$ км/ч. Очень очень близко к скорости света (в вакууме).



В БАК протоны летят навстречу друг другу в виде сгустков (размером 0.000016 м), содержащих около 10^{11} частиц каждый. 600 миллионов столкновений в секунду.



Энергия сгустка сравнима с кинетической энергией мотоцикла весом 150 кг, летящего по дороге со скоростью 150 км/ч!



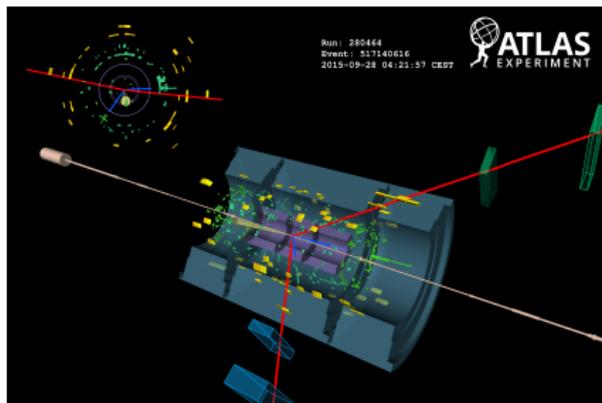
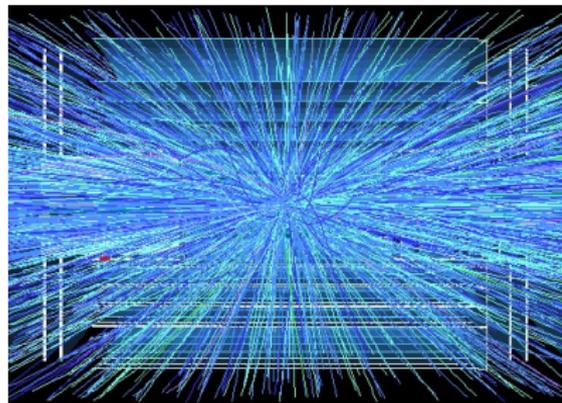
Хотя в пучке около 3000 сгустков, а в сгустке около 100 миллиардов протонов, столкновения между ними также маловероятны, как и попадание одной иголки в другую с расстояния 10 км. Лишь 20 частиц из 200 миллиардов столкнутся!

Светимость:

$$\mathcal{L} \propto \frac{N_1 N_2 n_b}{\sigma^2}$$

N_i — число сгустков/сек
 n_b — полное число сгустков
 σ — размер пучка

Столкновение — это событие. Что именно произойдет при этом столкновении — никто заранее не знает!

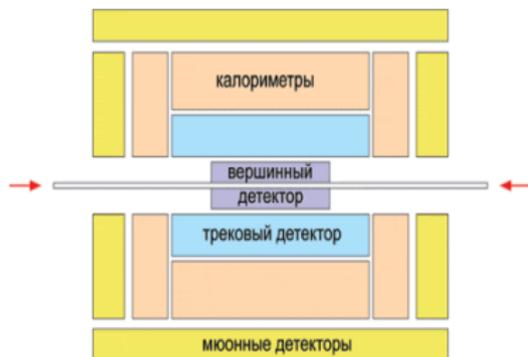
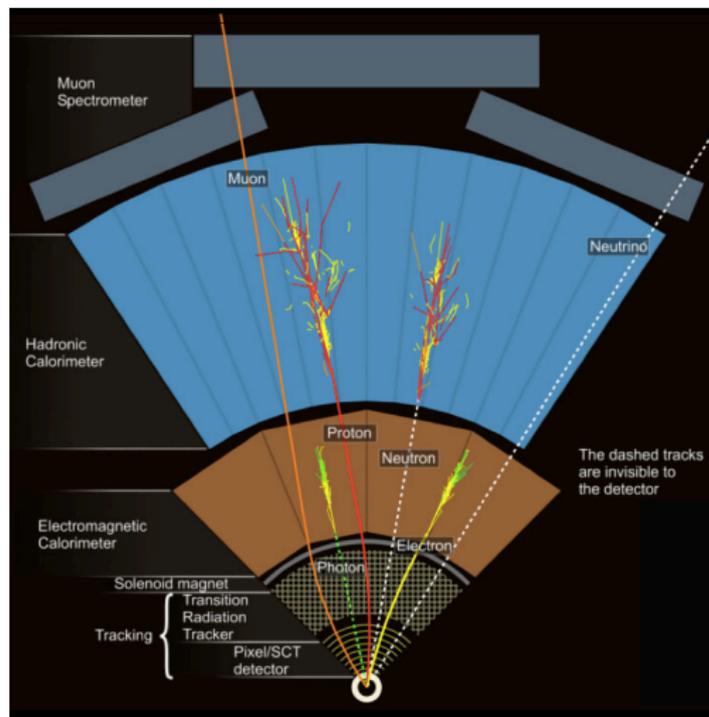
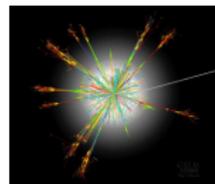


Однако, проследив за **большим количеством событий**, мы обнаружим, что некоторые события возникают чаще других. Надо понять, что это означает и почему?



Детектор ... I

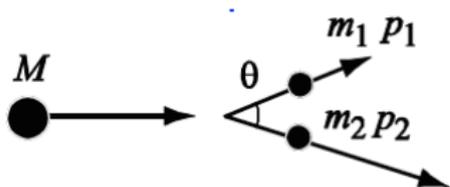
В столкновениях протонов образуются частицы. Чтобы понять, что именно произошло необходимо тщательно измерить их энергии и импульсы. Этим занимаются детекторы, регистрирующие долгоживущие заряженные ($e^\pm, \mu^\pm, \pi^\pm, K^\pm, p$) и нейтральные (γ, n) частицы.



Трееры — "видят" траектории частиц. Калориметры — измеряют энергию, полностью останавливая частицу. Мюонный детектор прослеживает движение мюонов.



Интрига в том, что не все частицы оставляют след в детекторе. Кроме того, частицы могут распадаться. Более того именно этим они и занимаются практически по-головно!



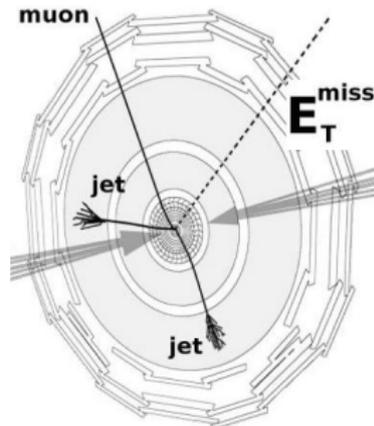
В двухчастичном распаде для восстановления (инвариантной) массы первичной частицы надо знать импульсы, энергии и массы вторичных частиц:

$$M^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2(E_1 E_2 - p_1 p_2 \cos \theta).$$

Восстановление события похоже на детективное расследование, поскольку мы надежно "видим" **мюоны и струи** (условно, сгустки долгоживущих частиц) ... и больше **НИЧЕГО** хорошего!

Сохранение энергии-импульса позволяет вычислить еще E_T^{missing} — недостающую поперечную энергию.

Наконец изощренный **анализ данных** дает физический результат.





General purpose – все с большим p_T

Нарушение электрослабой симметрии: бозон Хиггса или Новая физика?

Пространственно-временные симметрии: дополнительные измерения, черные дыры, КК-состояния?



Суперсимметрия: суперпартнеры? Темная материя?



Загадка аромата

CP-нарушение: новые источники?
Барионная асимметрия.
Непрямой поиск суперпартнеров.



Новое состояние материи

Киральная симметрия: картина восстановления. Деконфайнмент.
Нарушение P-четности в сильных магнитных полях?



Детектор АТЛАС на Большом Адронном Коллайдере



Размер установки АТЛАС не уступает по высоте 6-и этажному дому в ЦЕРН. Это самая большая **компактная** установка! (но ... массивы телескопов)

ATLAS и CMS – многоцелевые установки, нацеленные на решение всего спектра возможных физических задач LHC (бозон Хиггса, Суперсимметрия, Новая физика и т.д.).

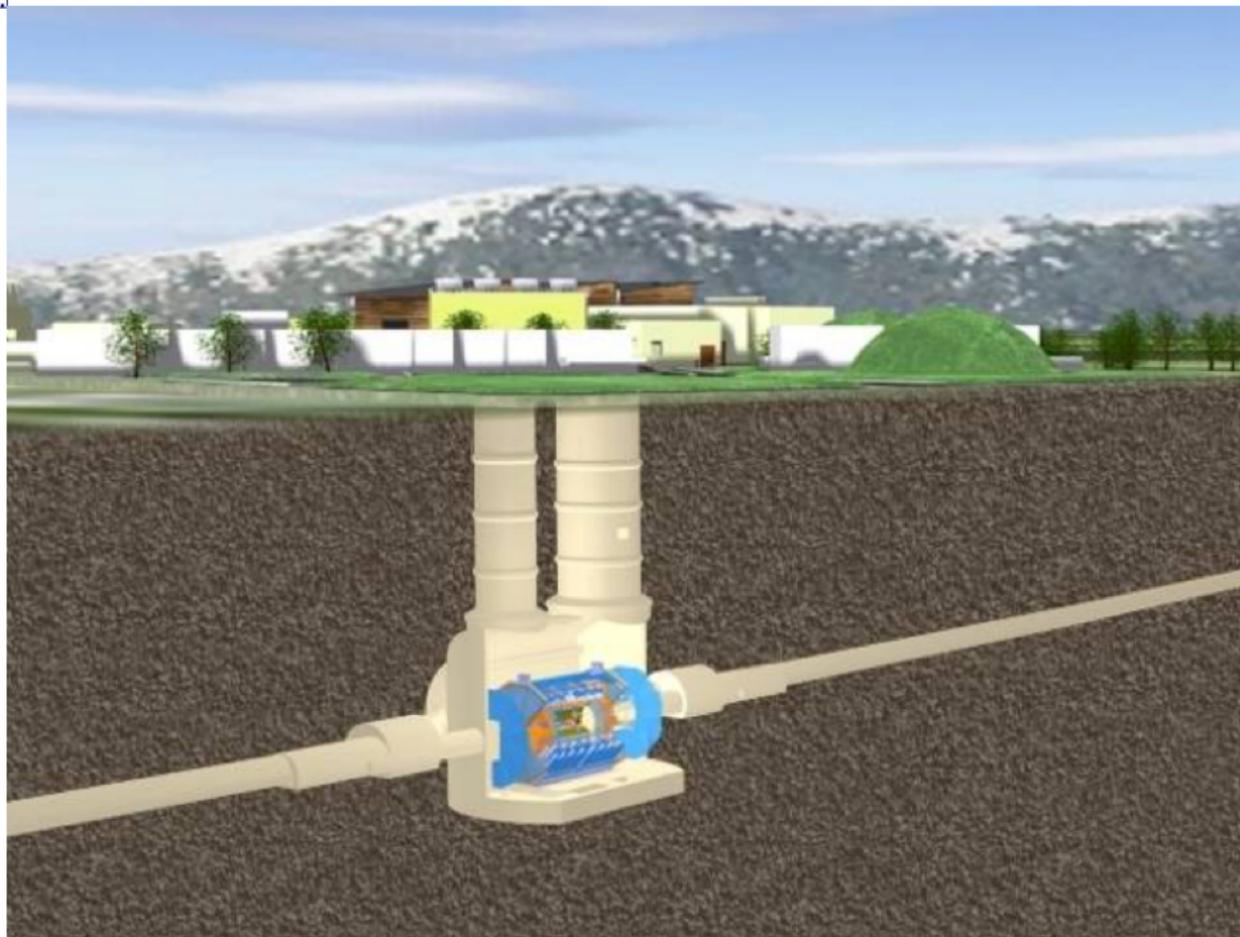


Вид сверху на место расположения АТЛАС



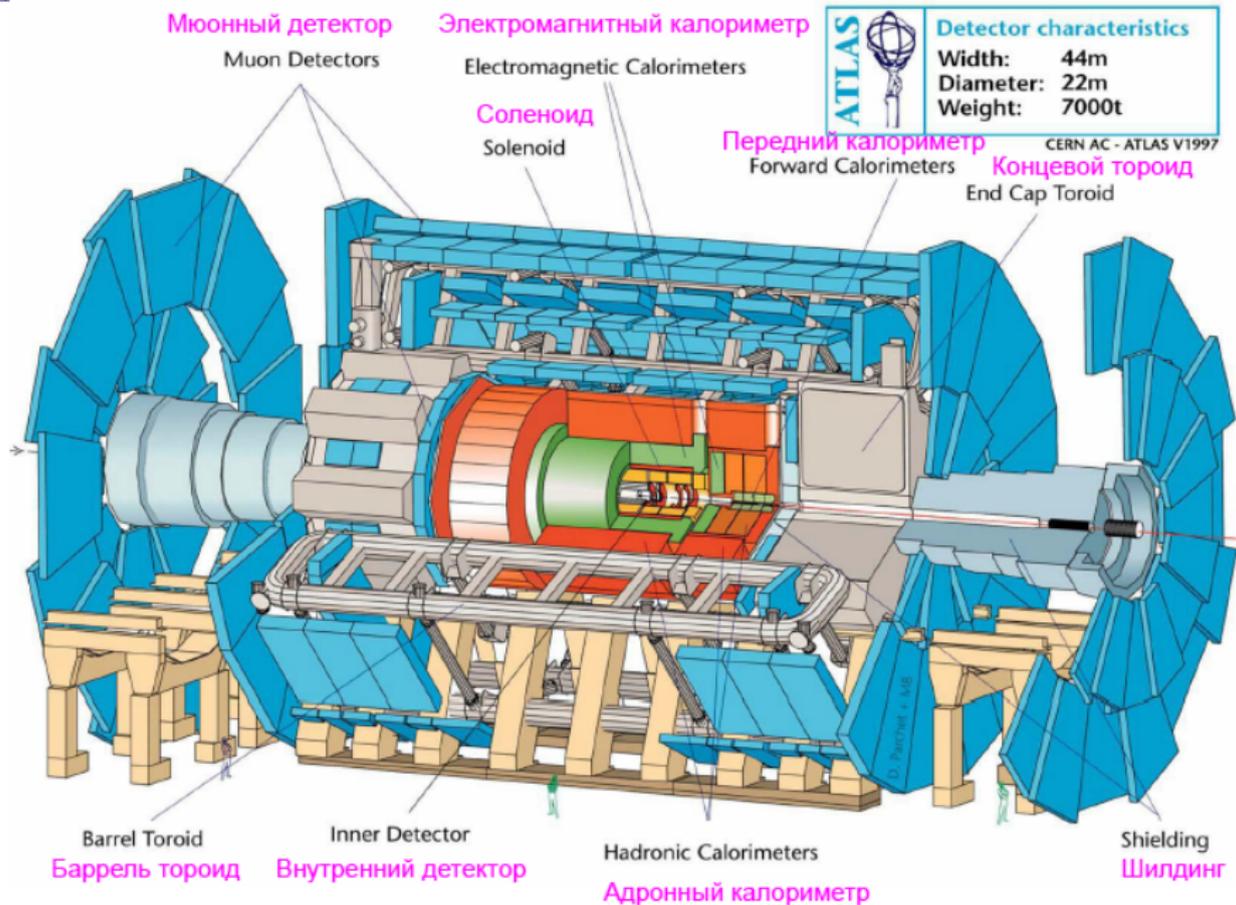


Подземное расположение детектора ATLAS





Из чего состоит детектор ATLAS?





Что делают эти составные части детектора ATLAS?

The ATLAS detector

Для измерения импульсов мюонов

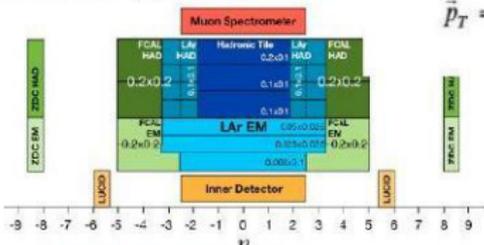
Inner Detector ($|\eta| < 2.5$):
Si pixel, SCT, TRT
Tracking and vertexing. e/π separation
 $\sigma/p_T \sim 0.038\%$ p_T (GeV) $\oplus 1.5\%$

Для измерения импульсов всех заряженных частиц

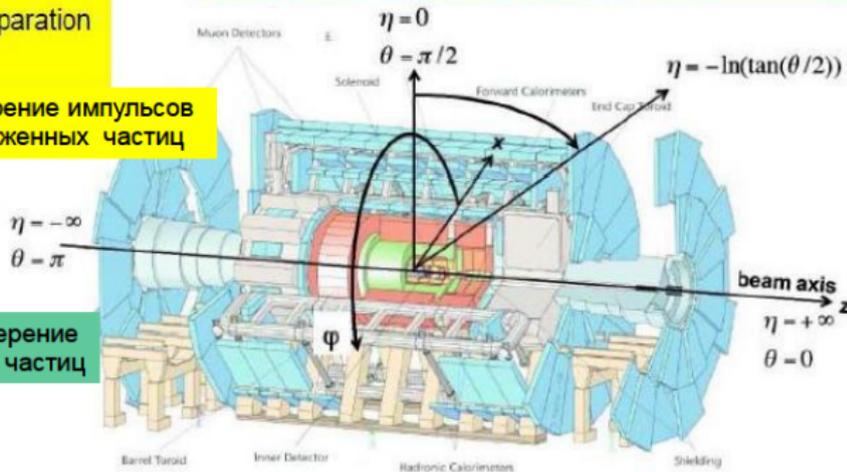
EM calorimeter ($|\eta| < 3.2$):
Pb/LAr accordion
Trigger and e/γ reco and id
 $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E}$ (GeV) $\oplus 0.7\%$

Для измерения энергий частиц

ZDC ($|\eta| > 8.3$):
Zero Degree Calorimeter for Heavy Ions studies



Muon spectrometer ($|\eta| < 2.7$): air-cores toroids with gas-based chambers. Trigger and measurement. Momentum resolution $< 10\%$ up to $E_{\mu} \sim 1$ TeV



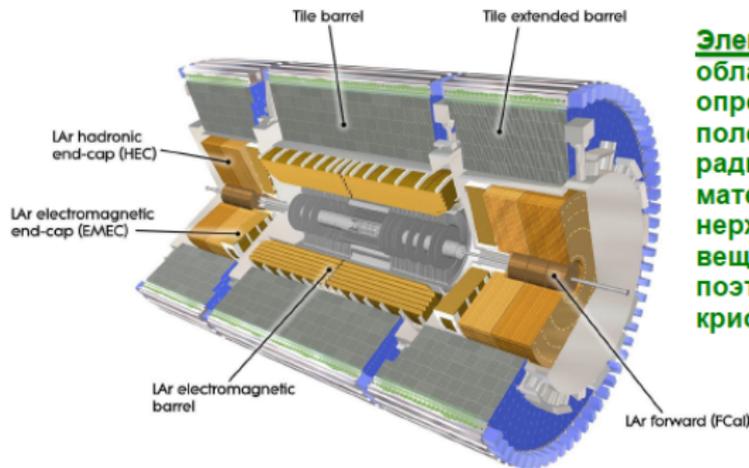
$$\vec{p}_T = (p_x, p_y)$$

$$p_T = p \sin\theta, \quad E_T = E \sin\theta$$

$$\vec{E}_T^{miss} = - \sum_{clusters, i} E_i \hat{n}_i$$

HAD calorimeter ($|\eta| < 5$):
Fe/scintillator tiles (central),
Cu/W Lar (fwd),
Trigger, jets and E_{miss} .
 $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E}$ (GeV) $\oplus 3\%$

Для измерения энергий частиц



Электромагнитный калориметр обладает высокой точностью определения энергии и положения этой энергии (0,025 радиан). Поглощающие энергию материалы — свинец и нержавеющая сталь, а активное вещество — жидкий аргон, поэтому он находится в криостате.

Адронный калориметр обладает меньшей точностью в определении энергии и положения этой энергии (0,1 радиан). Поглощающие энергию материалы — нержавеющая сталь, а активное вещество — сцинтилляционные пластинки.



Это позволяет наиболее точно измерять выделившуюся энергию, а следовательно, и дисбаланс энергии E_T^{missing} — сигнал Новой Физики (Суперсимметрии)!



Проект	Современная оценка
Manhattan Project	16 млрд €
Apollo Program	70 млрд €
Hubble Space Telescope (HST)	4 млрд €
International Space Station (ISS)	70 млрд €
Human Genome Project (HGP)	2 млрд €
International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)	13 млрд €
Large Hadron Collider (LHC)	4-6 млрд €
8-км мост, соединяющий Данию и Швецию	4 млрд €
40-км мост (оценка), между Сицилией и Италией	6 млрд €
2012 Олимпийские Игры в Лондоне	12–15 млрд €

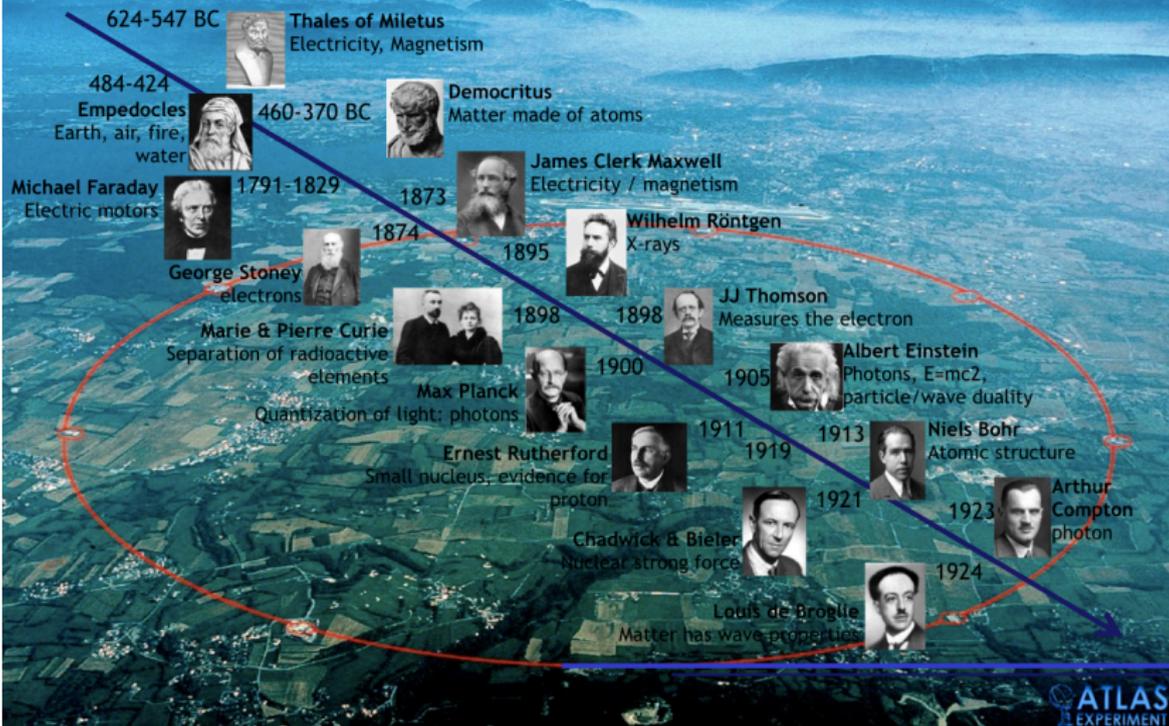
Таблица: Из статьи “BIG SCIENCE AND THE LHC”, автор G.F. Giudice, arXiv:1106.2443



Открытие и формулировка
Стандартной Модели — это
самый выдающийся результат
человеческого интеллекта
за всю его историю

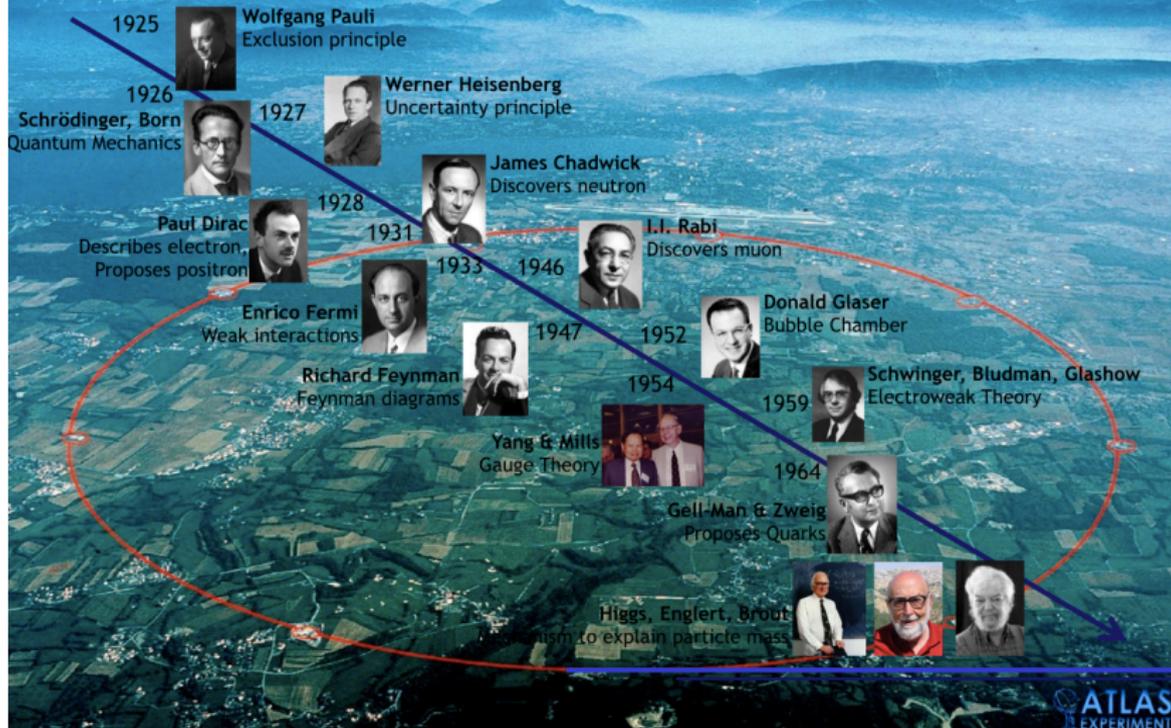


Particle Physics Timeline





Particle Physics Timeline II





Particle Physics Timeline III





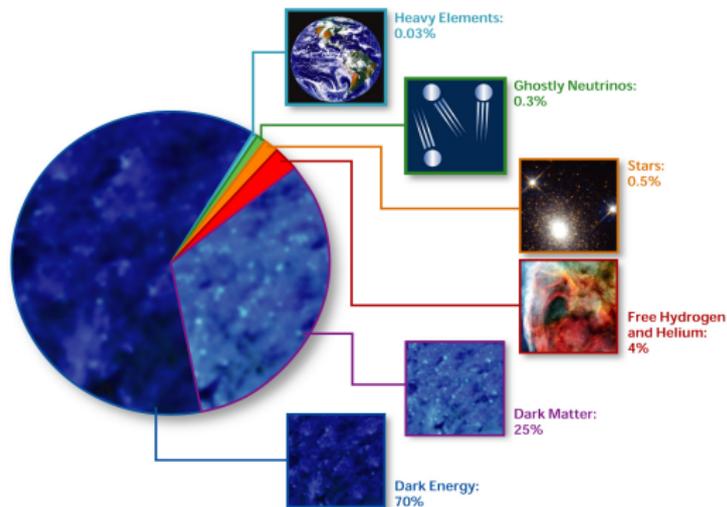
- Каковы границы применимости Стандартной Модели?
- Каково происхождение её свободных параметров, почему их так много?
- Как фундаментальные частицы приобретают массы и почему они так различны (топ-кварк и нейтрино)?
- Почему масса бозона Хиггса “не убегает” на массу Планка?
- Кто подарил это “Сомбреро” полю бозона Хиггса?
- Куда подевалось анти-вещество и реликтовые нейтрино из Ранней Вселенной?
- Что делать с Гравитацией, какова Геометрия Вселенной, существуют ли дополнительные измерения?
- Нет объединения констант взаимодействия — существуют ли новые частицы и взаимодействия?
- Что происходит с адронами (КХД-материей) при больших плотностях энергии, существует ли кварк-глюонная плазма?
- Какова природа нейтрино?
- Астрофизика – Какова природа темной материи и темной энергии?
- и так далее ...



Физика частиц и астрофизика на рубеже великих перемен и открытий – есть интересная работа для молодежи!

Один только пример:

Привычная нам Вселенная, состоящая из кварков и лептонов – это только лишь ничтожная часть Всего. На 95% Вселенная заполнена темной материей и темной энергией — **совершенно мистическими субстанциями.**



Столько неизвестного ждет своего открытия. Благодаря совместным усилиям БАК, Нейтринной физики, Астрофизики и др. мы все ближе приближаемся к новой революции в нашем фундаментальном представлении о Мире.



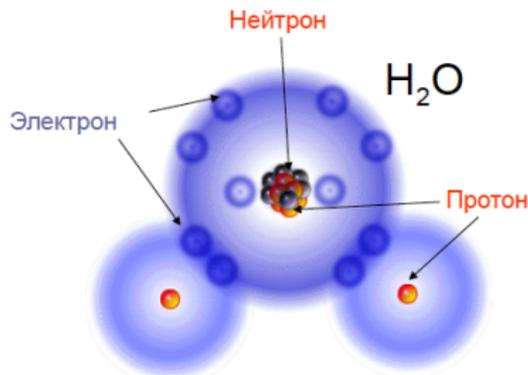
Темная материя,
Темная энергия,
Физика
за рамками Стандартной Модели,
Нейтрино!



НЕЙТРИНО



Сами Мы и все окружающие нас предметы сделаны всего лишь из трех типов маленьких-маленьких составляющих — **электронов, протонов и нейтронов**, которые, будучи собранными вместе, формируют атомы.



Именно из таких атомов сделаны —



Все живые существа



Красивые здания



и вся Земля в целом!

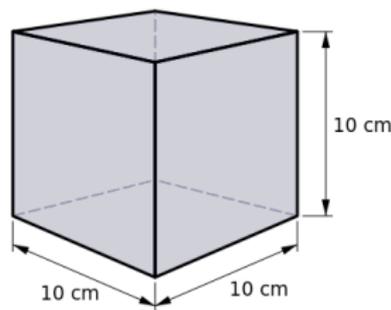


Вопрос: вся наша Вселенная тоже состоит только из этих электронов, протонов и нейтронов?

Ответ: **НЕТ!**

Электроны, протоны и нейтроны — весьма редкие гости во Вселенной. На каждого из них здесь найдется по миллиарду (10^9) нейтрино — ν — электрически нейтральных частиц-фермионов (спин = $1/2$).

Отсюда ясно, чтобы хоть что-то понять про нашу Вселенную — необходимо "разобраться с нейтрино".



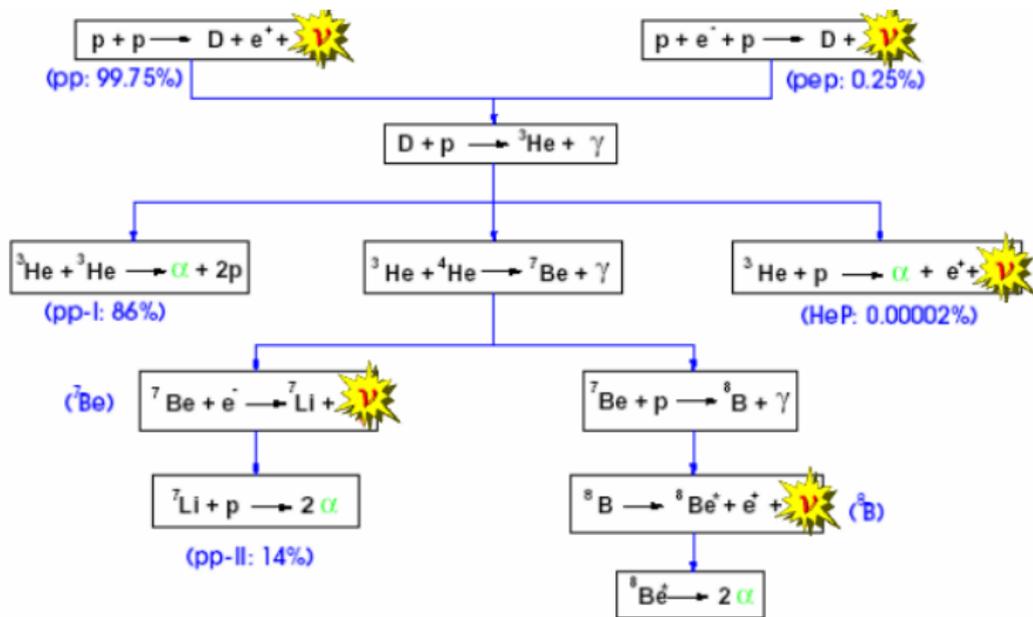
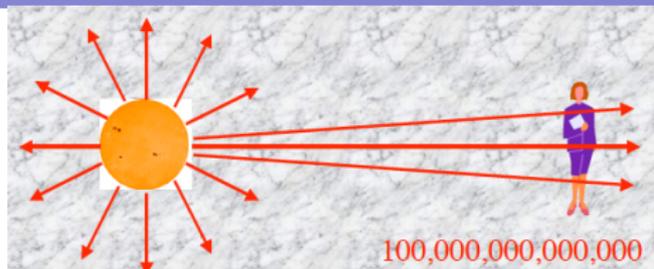
В каждом литре пространства содержится 340 тысяч нейтрино, оставшихся со времен Большого Взрыва.

В каждом из нас находится примерно 30 миллионов таких реликтовых нейтрино! Точнее мы постоянно "медленно плывем сквозь них".



Солнечные нейтрино

Помимо реликтовых нейтрино ...
 Каждую секунду сквозь нас пронесится 10^{14} штук солнечных нейтрино — продуктов слияния ядер, которое производит энергию (свет) и такое число нейтрино.





Для них мы — просто пустое место!

Следует ли беспокоиться по поводу огромного числа пронизывающих нас нейтрино?

Нет! Нейтрино очень-очень слабо (очень-очень редко) взаимодействуют с нами.

Для них мы — просто пустое место. Так, одно солнечное нейтрино должно пролететь сквозь 10^{19} человек, прежде чем хоть с одним из них произойдет взаимодействие. Вероятность такого события ничтожно мала — 10^{-19} .

По этим же причинам нейтрино крайне сложно зарегистрировать. Они подобны "духам" — их везде много, но их совсем "не видно".

Однако, в последнее время, это их свойство — исключительная слабость взаимодействия — стало играть решающее значение в практическом применении нейтрино! Например, в вопросе о контроле за ядерными реакторами.





Можно ли обойтись нам без нейтрино?

Насколько важны для нас с вами эти невидимые и неосязаемые нейтрино?

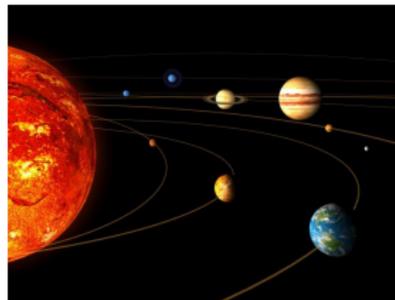
1) Dr. Boris Kayser: Without neutrino (and its $\frac{1}{2}$ spin!), angular momentum would not be conserved, ... the sun would not shine, the life on the Earth would not be possible ...

$$\text{Spin: } p + p \rightarrow d + e^+ + \nu$$

$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
---------------	---------------	---	---------------	---------------

2) Без нейтрино не образовались бы элементы тяжелее водорода. Не было бы углерода, кислорода, воды, Земли ...

3) В конечном итоге, мы сами — результат концентрации в одном месте той звездной пыли (содержащей тяжелые элементы, Zn, Se, Mg, ...), которая образовалась после взрывов самых первых сверх-новых звезд в нашей Вселенной. А взрывы эти тоже невозможны без помощи нейтрино.



Без нейтрино — мы бы здесь не сидели и не рассуждали о нейтрино!



Нейтрино — "начало" Стандартной Модели

Сегодня мы знаем, что нейтрино —

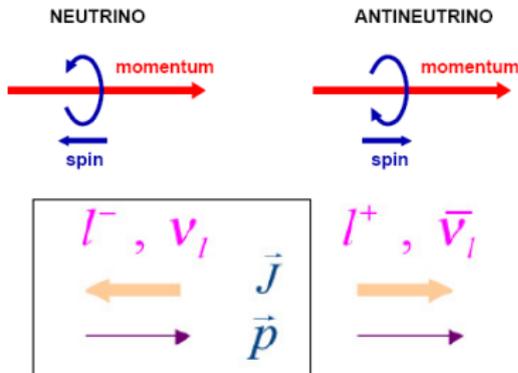
- фермион (имеет спин $j = 1/2$)
- не участвует в сильном взаимодействии
- не участвует в электромагнитном тоже (электро-нейтрально)
- участвует в слабом взаимодействии (если активное)
- подвержено гравитации (если массивно)
- импульс нейтрино \vec{p} всегда антипараллелен его спину \vec{j} !
- **Ключевой момент:**



Есть только **левые** нейтрино ν_L . Правых нейтрино ν_R — нет!

Left-handed / Дублеты:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L, \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$$





Нейтрино — Нарушение пространственной четности



C.S.Wu, 1957

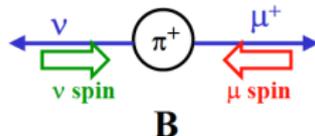
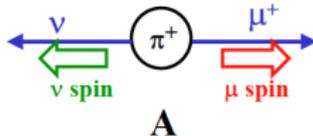
Слабое взаимодействие (Lee-Yang) **не сохраняет пространственную четность** (симметрию). Первое доказательство — эксперимент мадам Wu.



T.D.Lee, C.N.Yang, 1956



Распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (ν_μ — "невидимо"!).



При сохранении пространственной четности варианты А и В одинаково возможны — μ^+ не должен иметь определенной поляризации.

В эксперименте **все μ^+** имеют импульс противоположный спину (вариант В). Максимальное нарушение четности. А — не реализуется!

Электроны при распаде ядра $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$ вылетают в противоположном спину ядра \vec{I} направлении.



Нейтрино — Нарушение пространственной четности



C.S.Wu, 1957

Слабое взаимодействие (Lee-Yang) **не сохраняет пространственную четность** (симметрию). Первое доказательство — эксперимент мадам Wu.

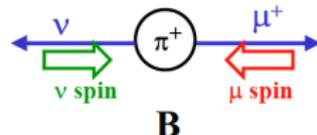
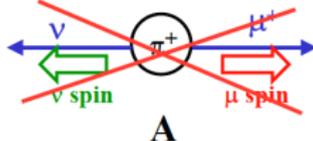


T.D.Lee, C.N.Yang, 1956



Распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

(ν_μ — "невидимо").



При сохранение пространственной четности вариант А и В одинаково возможны — μ^+ не должен иметь определенной поляризации.

В эксперименте **все μ^+** имеют импульс противоположный спину (вариант В). Максимальное нарушение четности. А — не реализуется!

Электроны при распаде ядра $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$ вылетают в противоположном спину ядра \vec{I} направлении.

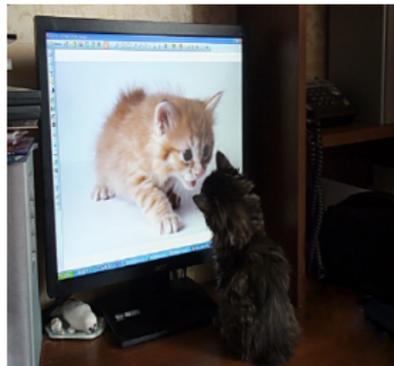
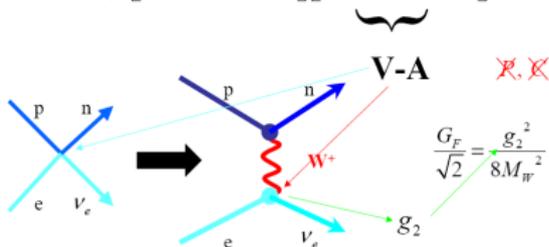




- Фактически, механизм Хиггс необходим нам для придания масс элементарным частицам по той причине, что
- в Стандартной Модели имеет место $SU(2)_L \times U(1)$ калибровочная симметрия, или иными словами,
 - максимальное нарушение четности, или
 - $V-A$ структура слабого взаимодействия, или
 - безмассовость нейтрино ($m_\nu \equiv 0$), или
 - отсутствие правого нейтрино ν_R .

Fermi theory of β decay $n \rightarrow pe \bar{\nu}_e$

$$L = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \left[\bar{u}_n \gamma^\sigma (1 - \gamma_5) u_p \right] \left[\bar{u}_{\nu_e} \gamma_\sigma (1 - \gamma_5) u_e \right]$$





Каков размер нейтрино?

Не более 0.001 атомного ядра ($<10^{-19}$ м)

Какова масса нейтрино (сколько весит)?

До 1998 г. считалось $m_\nu = 0$.

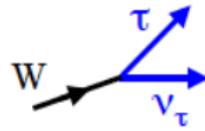
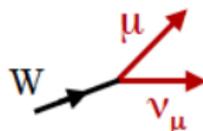
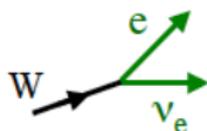
Как мы узнали, что $m_\nu \neq 0$?

Нейтринный Осцилляции!

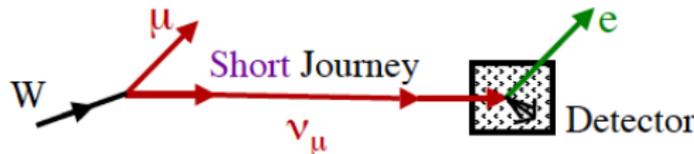
Чем отличаются нейтрино друг от друга?

флейвором \rightarrow поэтому осцилляции?

Все частицы данного типа совершенно одинаковы. Все электроны идентичны. НО, имеется 3 типа (флэйвора) заряженных лептонов: электрон (e , 1), мюон (μ , 200) и тау-лептон (τ , 3500). С каждым ассоциируется свое нейтрино — ν_e, ν_μ, ν_τ . Заряженный лептон и нейтрино возникают и исчезают всегда строго с одним и тем же флэйвором:



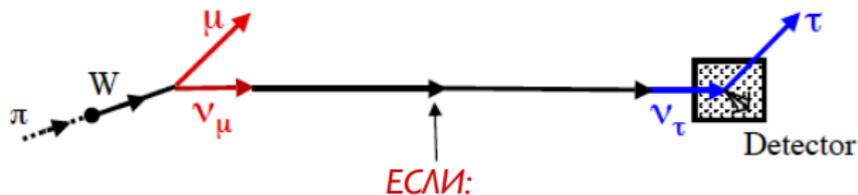
Иными словами, в вершине взаимодействия (в момент детектирования нейтрино) изменение флейвора не происходит. Такой процесс $\nu_\mu \rightarrow e$ не считается возможным:



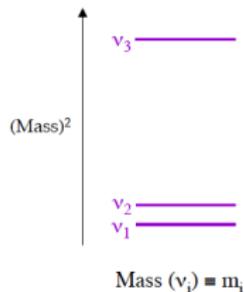


Изменение флейвора — нейтринные осцилляции

Однако, допустимо изменение флейвора нейтрино "за время долгого полета":



Массы нейтрино различны:



И есть смешивание нейтрино, т.е. состояния нейтрино определенного флейвора — суперпозиции состояний нейтрино определенных масс:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i\rangle$$

$\alpha = e, \mu, \text{ or } \tau$
PMNS Leptonic Mixing Matrix

В результате вероятность изменения флейвора (число зарегистрированных ν_τ в детекторе OPERA) зависит от разности масс Δm^2 двух нейтрино и их угла смешивания θ (а также энергии нейтрино E и расстояния L):

$$P(\nu_\alpha^{(-)} \leftrightarrow \nu_\beta^{(-)}) = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\Delta m^2 \frac{L}{4E}\right)$$



Бруно Понтекорво придумал осцилляции в Дубне!!!



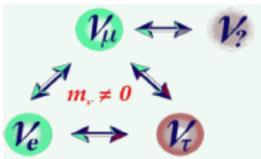
Бруно Понтекорво



Бруно Понтекорво:
“Осцилляции нейтрино
– это простой фокус:

1—2—3 ...

и ... все готово!”



Более 55 лет назад в Дубне
впервые была высказана
идея ν осцилляций!

Weak eigenstates mix to mass eigenstates by Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata matrix U_{ij} :

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta_{12} &= 0.307^{+0.018}_{-0.016} \\ \sin^2 \theta_{23} &= 0.386^{+0.024}_{-0.021} \\ \sin^2 \theta_{13} &= 0.024^{+0.0025}_{-0.0025} \end{aligned}$$

$$\Delta m_{21}^2 = 7.54^{+0.26}_{-0.22} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

$$|\Delta m_{31}^2| = 2.43^{+0.06}_{-0.10} \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

Mass hierarchy:

$$m_3 > m_1 \text{ or } m_3 < m_1?$$



Нобелевская премия по физике 2015



109-я премия вручена **Артуру МакДональду** и **Такааки Кадзита** «за открытие осцилляций нейтрино, что показывает, что у нейтрино есть **масса**».

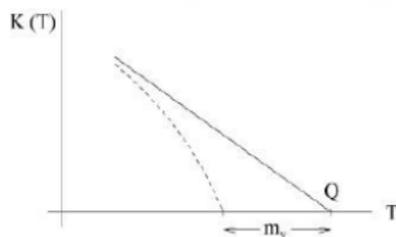


Каковы значения масс ν нейтрино?

Измеряемая вероятность $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$ зависит **только** от разности масс ν . Из "осцилляций" нельзя сказать **чему равна минимальная масса нейтрино, m_1 ?**

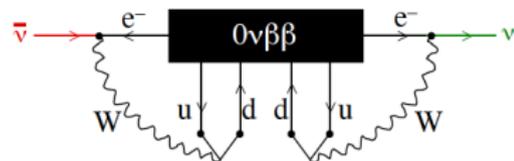
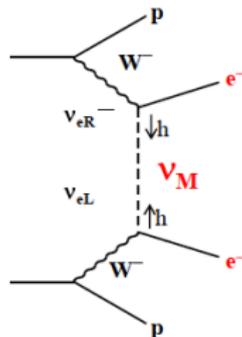
Сегодня источниками такой **уникальной** информации являются β -распад трития и безнейтринный двойной ядерный β -распад (в будущем, быть может, $\mu^- \rightarrow e^+$ конверсия).

Спектр электронов в распад ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e + \bar{\nu}_e$ простирается до максимальной энергии Q , и если $m_\nu \neq 0$, то $T_{\text{max}} = Q - m_\nu$. Измеряется величина $\langle m_\beta \rangle^2 = \sum m_i^2 |U_{ei}|^2$.



$$\langle m_\beta \rangle < 2.2 \text{ эВ.}$$

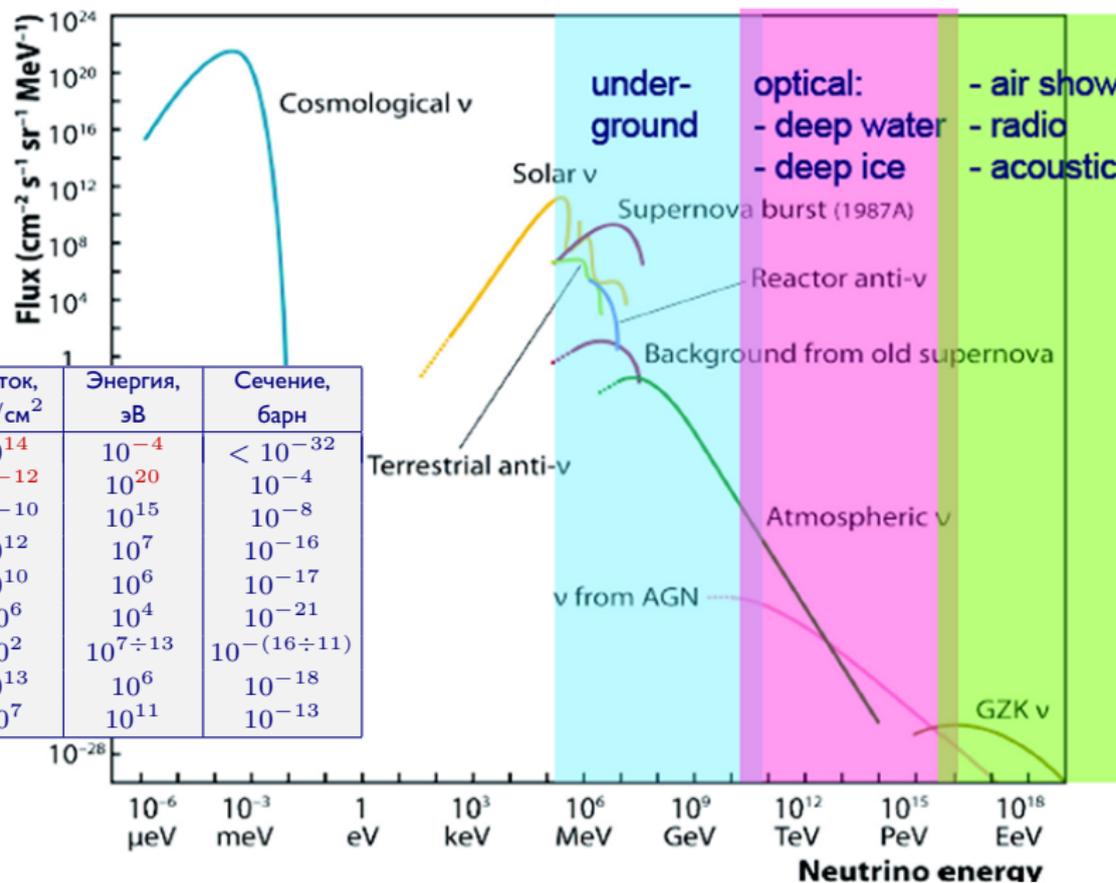
Вероятность запрещенного в СМ $0\nu 2\beta$ ядерного распада $Z \rightarrow (Z + 2) + 2e \propto \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 = |\sum m_i U_{ei}^2|^2$. Он возможен только если нейтрино имеют массы и являются Майорановскими частицами (т.е. $\nu \equiv \bar{\nu}$)



$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.3 - 0.9 \text{ эВ и } \langle m_{\beta\beta} \rangle \simeq 0.3 \text{ эВ (КК).}$$



Спектр и энергии известных источников нейтрино



Источник нейтрино	Поток, $\text{с}^{-1}/\text{см}^2$	Энергия, эВ	Сечение, барн
Big Bang	10^{14}	10^{-4}	$< 10^{-32}$
Extra-Galactic	10^{-12}	10^{20}	10^{-4}
Galactic	10^{-10}	10^{15}	10^{-8}
Super Novae	10^{12}	10^7	10^{-16}
Solar	10^{10}	10^6	10^{-17}
Terrestrial	10^6	10^4	10^{-21}
Atmospheric	10^2	$10^{7 \div 13}$	$10^{-(16 \div 11)}$
Reactor	10^{13}	10^6	10^{-18}
Accelerator	10^7	10^{11}	10^{-13}

10^{-28}

10^{-6} 10^{-3} 1 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18}
 μeV meV eV keV MeV GeV TeV PeV EeV

Neutrino energy

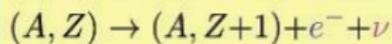


Кто придумал нейтрино?

- The idea of the **neutrino** came in 1930, when **W. Pauli** tried a desperate saving operation of "the energy conservation principle".



In his letter addressed to the "Liebe Radioaktive Damen und Herren" (Dear Radioactive Ladies and Gentlemen), the participants of a meeting in Tübingen. He put forward the hypothesis that a new particle exists as "constituent of nuclei", the "neutron" ν , able to explain the continuous spectrum of nuclear beta decay



- The ν is **light** (in Pauli's words: "the mass of the ν should be of the same order as the e mass"), **neutral** and has **spin 1/2**
- In order to distinguish them from heavy neutrons, **Fermi** proposed to name them **neutrinos**.





Что мы еще НЕ знаем про нейтрино

- Какова все-таки масса легчайшего нейтрино?
- Какова причина такой малости m_ν , стоит ли за этим Большая масса?
- В каком порядке расположились массы — $m_1 > m_2$ или наоборот?
- Почему углы смешивания нейтрино так велики (по сравнению с кварковыми)?
- Есть ли у нейтрино CP-нечетные фазы, и способны ли они объяснить неравенство материи и антиматерии во Вселенной?
- Возможно ли напрямую измерить инертные массы нейтрино?
- Нейтрино частицы Дирака или Майораны ($\nu \equiv \bar{\nu}$, или нет)?
- Единственно ли объяснение изменения флейвора эффектом осцилляций?
- Как связаны свойства нейтрино с другим очень редкими слабыми процессами?
- Где прячутся до сих пор реликтовые нейтрино?
- Есть ли у нейтрино электромагнитные свойства (магнитные моменты)?
- Когда будет измерено когерентное рассеяние нейтрино на ядрах?
- Способны ли нейтрино объяснить космические лучи сверхвысоких энергий?
- Имеется ли реальная возможность увидеть тяжелые нейтрино на LHC (ЦЕРН)?
- Существуют ли другие нейтрино — стерильные, каковы их массы?
- ...



Нейтрино сегодня актуально и многолико

- Наличие ненулевых масс у нейтрино важно для построения теорий элементарных частиц, понимания строения Вселенной и образования в ней крупномасштабных структур типа скоплений галактик. Здесь легкие массивные нейтрино играют роль горячей темной материи.
- Исследование свойств нейтрино (в том числе и электромагнитных) необходимо для решения проблемы дефицита солнечных нейтрино, выяснения механизмов взрыва сверхновых и образования энергии в звездах (Солнце) и в недрах Земли, для понимания причин возникновения космических лучей сверхвысоких энергий.
- Только благодаря исследованию потоков космических нейтрино можно будет получить информацию о самых отдаленных уголках космоса.
- До сих пор не решена проблема реликтовых нейтрино, существование которых следует из современной концепции ранней Вселенной.
- Считается, что наряду с фотонами нейтрино — самые распространенные частицы во Вселенной, и что нейтрино — ключ к объяснению барионной асимметрии Вселенной — за счет нарушения CP симметрии в лептонном секторе с участием массивных нейтрино.

Таким образом, без понимания свойств нейтрино невозможно даже приблизиться к ответу на вопрос о том, почему окружающий нас мир именно так устроен.

”По степени фундаментальности, мировоззренческой важности, потенциалу новых непредсказуемых открытий исследования по нейтринной физике и астрофизике — среди бесспорных лидеров в современной науке” (из решения совета РАН).

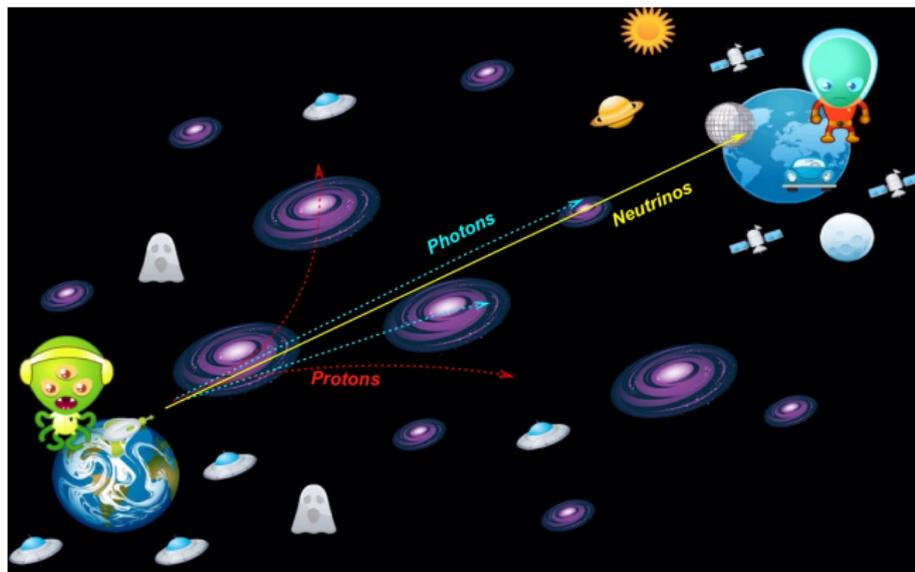


2012 год — начало эры новых прецизионных исследований → физика осцилляций, реакторная аномалий, стерильные и внегалактические нейтрино. Очень скоро нейтрино займут ведущее место в исследованиях на ускорителях (LHC, ILC, ...).

Благодаря новым источникам и новым детекторам нейтрино стали единственным поставщиком уникальной информации (сквозь сверхплотные среды и сверхдальние расстояния, от 10^{-33} до 10^{28} см).

Нет другого способа сегодня узнать, что именно происходит внутри Солнца, Земли, Сверхновой звезды, кора ядерного реактора или в самом отдаленном уголке Космоса.

Только нейтринный сигнал инопланетян наверняка достигнет нас!

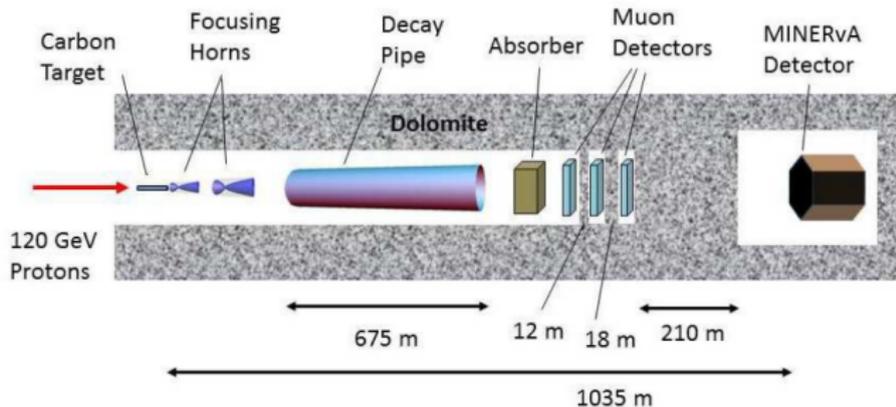




Пример: Кодировка сигнала в нейтринном пучке

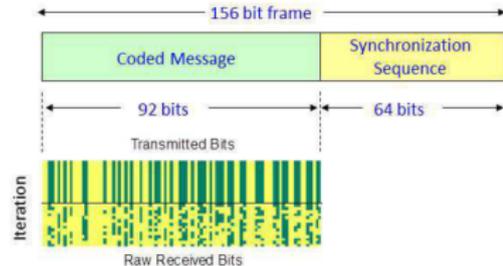
Пучки нейтрино (искусственного происхождения) уже предлагались в качестве носителей информации в таких исключительных ситуациях, как прямой точка-в-точку контакт через всю землю, связь с подводными лодками, особо секретные каналы связи, межзвездные коммуникации и т.п.

В 2012 г. нейтринный пучок NuMI (ФНАЛ) был использован вместе с нейтринным детектором MINERvA для демонстрации возможности передачи цифрового сигнала на большое расстояние с помощью нейтрино.



”Нейтрино” было закодировано и декодировано →

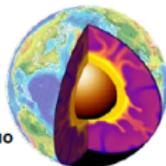
Продемонстрирована сама возможность такой передачи, однако, очевидно, что для практического применения этого метода еще далеко. [arXiv:1203.2847v1](https://arxiv.org/abs/1203.2847v1)





Недавно были зарегистрированы нейтрино из недр Земли (**геонейтрино**). Не говоря уж о фундаментальности этого явления, исследование потоков геонейтрино крайне важно для геофизики – понимания процессов, протекающих внутри нашей планеты, предсказания землетрясений, экстремальных природных явлений и т.п.

Геонейтрино – антинейтрино от β -распадов радиоактивных элементов в

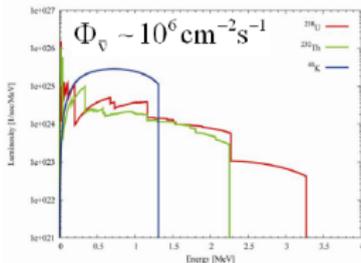


Земле

^{238}U , ^{232}Th и ^{40}K (^{87}Rb , ^{235}U) в Земле \rightarrow тепло (H) + антинейтрино в известной пропорции

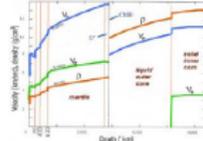
Decay	$T_{1/2}$ [10^9 yr]	E_{max} [MeV]	Q [MeV]	ϵ_p [$\text{kg}^{-1}\text{s}^{-1}$]	ϵ_H [W/kg]
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\ ^4\text{He} + 6e + 6\bar{\nu}$	4.47	3.26	51.7	7.46×10^7	0.95×10^{-4}
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\ ^4\text{He} + 4e + 4\bar{\nu}$	14.0	2.25	42.7	1.62×10^7	0.27×10^{-4}
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e + \bar{\nu}$ (89%)	1.28	1.311	1.311	2.32×10^8	0.22×10^{-4}

- Земля, в отличие от Солнца, излучает гл.обр. антинейтрино.
- Часть антинейтрино из цепочек распадов U и Th имеют энергию выше порога обратного β -распада на протоне: 1.8 MeV
- Вклад от U и Th различим



Геонейтрино – источник информации о строении Земли

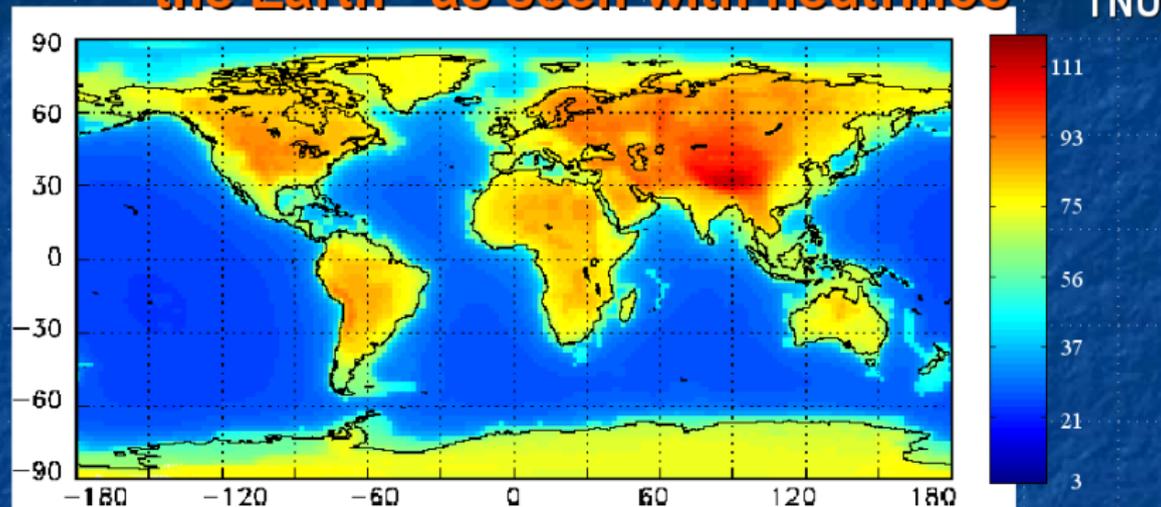
- Самая глубокая шахта – 12 км
- Геохимический анализ производится по образцам из коры и верхней мантии
- Сейсмология воспроизводит профиль плотности, но не состав пород



Регистрация геонейтрино позволит исследовать глубинный состав земных пород



The reference model : the Earth as seen with neutrinos



Predicted U+Th geoneutrino events
[1 TNU= 1 event / (10^{32} protons x year)]

*look at www.fe.infn.it/~fiorenti

41



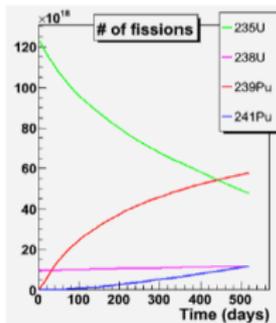
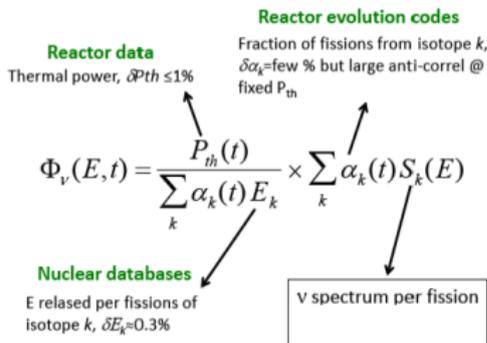
Нейтринный мониторинг ядерных реакторов

На новый уровень сегодня выходят прикладные нейтринные исследования на (промышленных) ядерных реакторах — это изучение процессов внутри реакторов с помощью потоков антинейтрино для задач ядерной энергетики.



ν spectrum emitted by a reactor

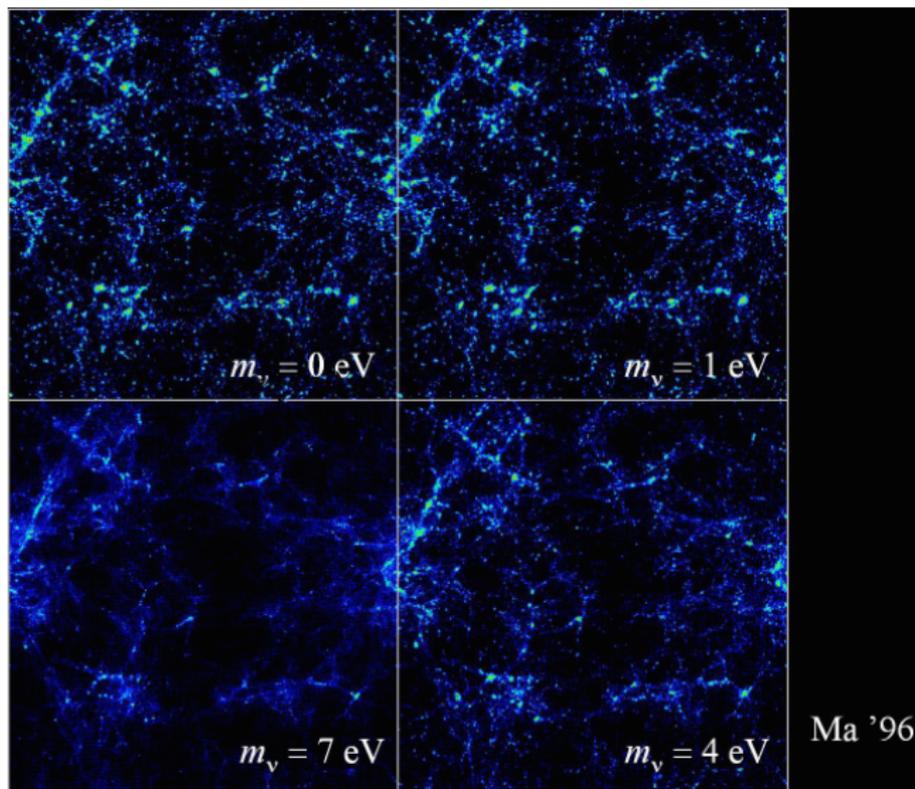
The prediction of reactor ν spectrum is the dominant source of systematic error for single detector experiments



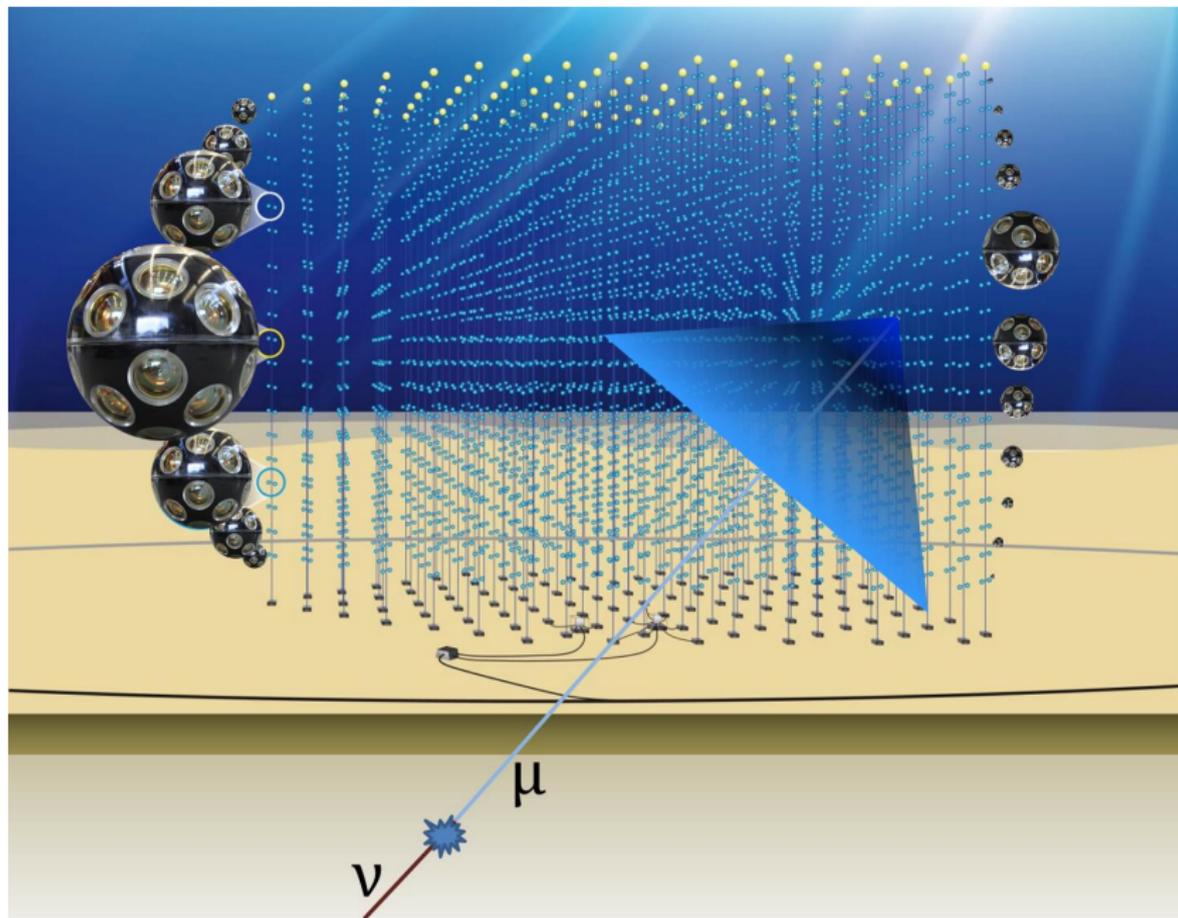
$$k = {}^{235}\text{U}, {}^{238}\text{U}, {}^{239}\text{Pu}, {}^{241}\text{Pu}$$



Они вплотную подошли к возможности непрерывного измерения мощности реактора, степени выгорания и томографии выгорания топлива в реальном времени. Здесь идет процесс создания компактных детекторов антинейтрино для дистанционного контроля наработки и несанкционированного отбора плутония в процессе работы реактора (для предотвращения распространения ядерного оружия) и т.п.



Формирование крупно-масштабных структур (типа скоплений галактик) во Вселенной весьма чувствительно к массе нейтрино.





Физика нейтрино для решения своих внутренних задач требует уникальной аппаратуры,
— на пути создания которой возникают совершенно новые, не менее уникальные знания, технологии, материалы и приборы,
— которые, в свою очередь, оказываются широко востребованными как в самой (прикладной) науке, так и в повседневной жизни людей.



Итак, помимо важнейших задач ЛНС в физике элементарных частиц сегодня **центральной проблемой** является **природа нейтрино**.

Под этим понимаются те фундаментальные свойства нейтрино, которые определяют специфичность их взаимодействия — конкретные значения исключительно **малых нейтринных масс**, их **иерархия** (порядок) и возможность **CP-нарушения**, характер смешивания (превращения друг в друга), число **стерильных нейтрино**, **дираковские** они или **майорановские** частицы, имеют ли они **электромагнитные** или другие «экзотические» свойства, как они взаимодействуют с различными формами материи и каковы их **природные (космические)** источники.

Это действительно ключевая, **междисциплинарная проблема**, которая пронизывает всю физику элементарных частиц, космологию и астрофизику.

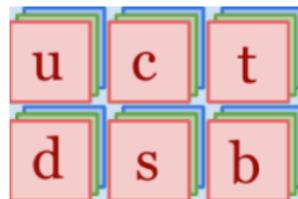


Кварки и Глюоны



Современная теория сильного взаимодействия КХД — кварки взаимодействуют друг с другом на основе **цветовой SU(3)** симметрии.

Каждый кварк существует в трех различных состояниях — **красный**, **синий**, **зеленый** — имеет три разных квантовых числа (цвет): q^i, q^j, q^k . (Антикварки — антицвет).



Никто не видел свободных (цветных) кварков. Они постоянно спрятаны внутри адронов.

Наблюдаемые адроны (сильно взаимодействующие частицы) — бесцветны. Сложение квантовых цветов у них дает строгий белый цвет.

$$\text{Барионы} = \epsilon^{\alpha\beta\gamma} q_{\alpha}^i q_{\beta}^j q_{\gamma}^k;$$

$$\text{Мезоны} = \delta^{\alpha\beta} q_{\alpha}^i \bar{q}_{\beta}^j,$$

$i, j, k = u, d, c, s, b, t;$

$\alpha, \beta, \gamma = \text{красный, синий, зеленый,}$



Барион



Мезон



Пентакварк



Тетракварк



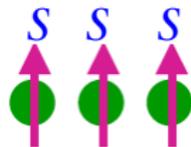
Глюбол



Гибридный мезон



Цвет формально выглядит как необходимость примириться с существованием Ω^- барионов — связанных состояний 3-х одинаковых S -кварков в совершенно одинаковом состоянии (вектор $1/2$ -спина направлен в всех):



Wolfgang Pauli

Согласно Принципу Паули — **этого быть не может!**

Два фермиона (спин=1/2) не могут быть в одном и том же физическом состоянии. Кварки (фермионы) должны чем-то отличаться — этим отличием стал **цвет!**



А если бы не было таких Ω^- ?

Декуплет барионов со спином $3/2$.

"Нестранные" = возбужденные,

т.е. u - и d -кварки в разных состояниях. И не надо никакого цвета?

$$\begin{matrix} N^{*++} \\ uuu \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} N^{*+} \\ uud \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} N^{*0} \\ udd \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} N^{*-} \\ ddd \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \Sigma^{*+} \\ suu \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \Sigma^{*0} \\ sud \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \Sigma^{*-} \\ sdd \end{matrix}$$

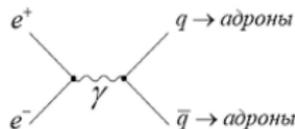
$$\begin{matrix} \Xi^{*0} \\ ssu \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \Xi^{*-} \\ ssd \end{matrix}$$

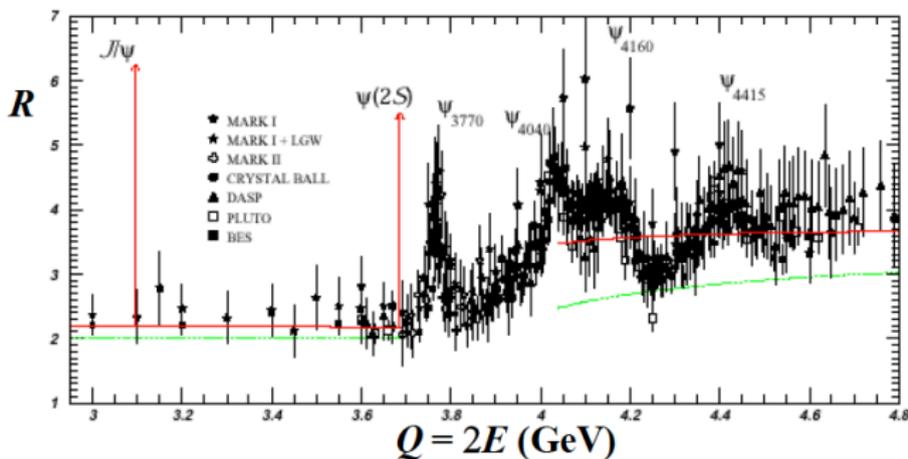
$$\begin{matrix} \Omega^- \\ sss \end{matrix}$$



Если бы не было таких Ω^- (sss), то идею цвета выручило бы R-отношение.
 Предсказание (без цвета) — сумма квадратов зарядов 3-х кварков:



$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = e_u^2 + e_d^2 + e_s^2 = \frac{4}{9} + \frac{1}{9} + \frac{1}{9} = \frac{2}{3}$$



Экспериментально при $Q < 2$ массы с-кварка (3.6 ГэВ) это отношение в 3 раза больше ожидаемого (без цвета). Вот они — 3 "новые" степени свободы! Далее добавка от с-кварка $R(3)+3(4/9) = 3.3$. И тоже работает.



Кварки, в отличие от лептонов, помимо "слабой метки" в виде флейвора (u, d, c, s, b, t) имеют еще и цвет **красный**, **синий**, **зеленый**. Цветовое взаимодействие не замечает и не изменяет флейвора кварка. Цвет ортогонален флейвору. Изменение флейвора — работа слабого взаимодействия, которое "не видит" цвета.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Однако, имеется Матрица Каббиво-Кобаяши-Маскава, что перемешивает кварки в слабом взаимодействии — иногда W-бозон переводит u-кварк не в d-, а в s-кварк и т.п. Впрочем, это перемешивание тоже следствие взаимодействия кварков с полем Хиггса.

$$\begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97427 \pm 0.00015 & 0.22534 \pm 0.00065 & 0.00351^{+0.00015}_{-0.00014} \\ 0.22520 \pm 0.00065 & 0.97344 \pm 0.00016 & 0.0412^{+0.0011}_{-0.0005} \\ 0.00867^{+0.00029}_{-0.00031} & 0.0404^{+0.0011}_{-0.0005} & 0.999146^{+0.000021}_{-0.000046} \end{bmatrix}$$

А почему эти числа именно такие?

"Слабая" сторона сильного взаимодействия ... или "сильная" — слабого ?



Частицы материи, имеющие ненулевой цветовой заряд (кварки и дикварки и т.п.), взаимодействуют (друг с другом) посредством обмена квантами цветового взаимодействия — **глюонами** (от слова glue, пружинка, спин=1, масс=0).



SU(3)-цветовая симметрии требует наличия 8 разных глюонов, которые имеют двойной цветовой заряд — $g_{\alpha\beta}$. Глюоны взаимодействуют также друг с другом, не хуже, чем с кварками.



В этом их кардинальное отличие от (тоже безмассовый) фотонов!

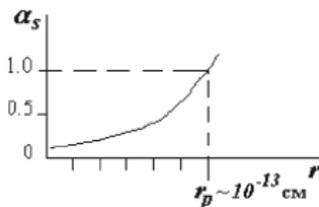
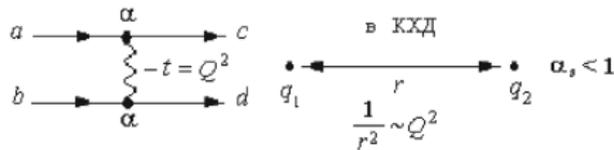
Отсюда **асимптотическая свобода** и **конфайнмент**. Возможность применять методы разложения в ряд по малой константе связи — теория возмущений, пертурбативная и непертурбативная КХД, и много еще чего ...



Сила взаимодействия между кварками **ослабевает с уменьшением расстояний r** между ними — константа сильного взаимодействия $\alpha_s \rightarrow 0$ при $r \rightarrow 0$ (именно в этом роль глюонов).

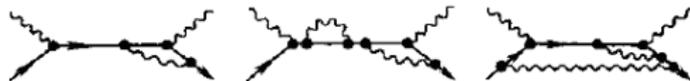
Взаимодействие исчезает, кварки становятся (асимптотически, т.е. в пределе очень малых расстояниях) свободными ...

... и забывают как бы про друг друга.



С другой стороны, малость константы связи $\alpha_s \ll 1$ позволяет проводить точных вычисления наблюдаемых величин путем **разложения в ряд по этой малой константе α_s** . Практически учет (и наблюдение!) квантовых эффектов.

$$V = V_0 + \alpha V_1 + O(\alpha^2)$$

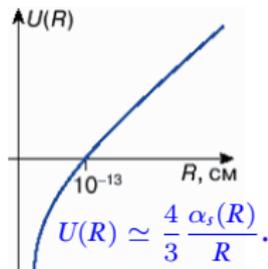


Сфера **пертурбативной** (теоретико-возмущенческой) Квантовой Хромодинамики, которая хорошо работает, когда r — мало, или q -переданный импульс велик ($r \sim 1/q$).



На расстояниях, сравнимых с размером пиона (1 фм, 10^{-13} см) взаимодействие между кварками теряет свою "слабость", (вновь) становится сильным — константа взаимодействия $\alpha_s \sim 1$.

Теория возмущений не работает — НЕ-пертурбативный режим КХД. Зона образования связанных состояний кварков и глюонов.

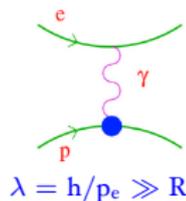


Свободные кварки не даются в руки, мы хотим их оторвать друг от друга, а получаем взамен новые адроны (пионы). Свободные кварки (навечно!?) спрятаны в бесцветных адронах — это **конфайнмент** (невыветание) кварков (и глюонов).

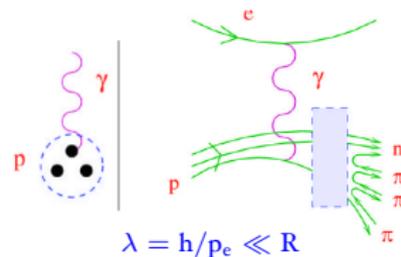
Все сегодня верят, что всем известные протоны, нейтроны, пионы, ядра и все остальное образуется из кварков и глюонов.

НО никто толком не понимает, КАК это происходит!

При достаточно низких энергиях фотон взаимодействует с протоном как целым (практически неделимым) объектом — $e^- p \rightarrow e^- p$. Результат – зависимость от переданного импульса – определяется так называемым форм-фактором протона (непертурбативным).



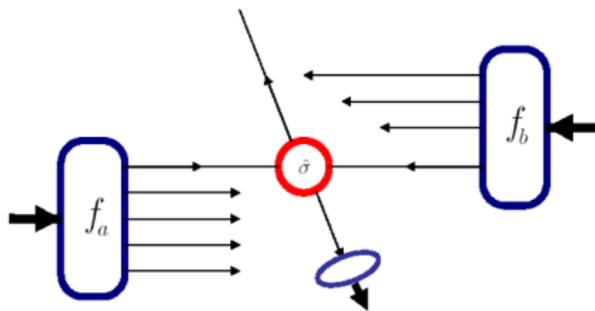
При высоких энергиях (переданных импульсах) фотон **проникает вглубь протона** (разрушая его), и процесс электрон-протонного взаимодействия хорошо описываются исходя из представления о **фейнмановских точечных патронах** — свободных друг от друга (пертурбативная область) составляющих протон кварков:



$$\sigma(e^- p \rightarrow e^- X) \simeq \sum_q f_q \sigma(e^- q \rightarrow e^- q).$$

Полное сечение взаимодействия двух протонов, сталкивающихся с импульсами $P_1 P_2$:

$$\sigma(P_1 P_2) = \sum_{ij} \int dx_1 dx_2 f_i(x_1, \mu_F) f_j(x_2, \mu_F) \hat{\sigma}_{ij}(p_1, p_2, \alpha_s(\mu_R), q^2, \mu_F).$$



$f_i(x_1, \mu_F)$ — функция распределения (непертурбативная) i -го партона в протоне;

μ_F — масштаб разделения пертурбативной и непертурбативной областей;

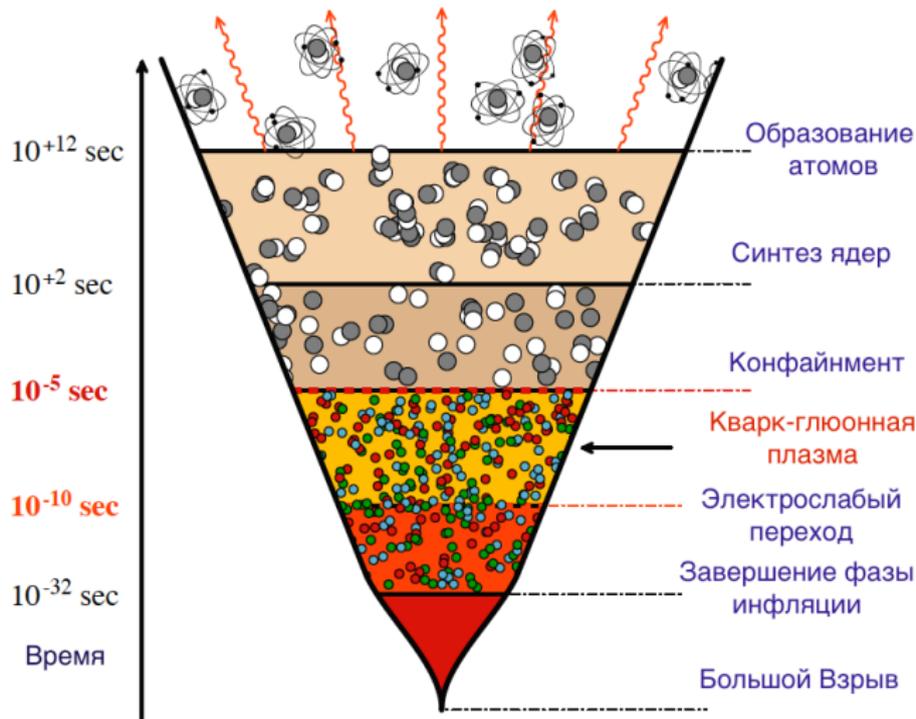
$\hat{\sigma}_{ij}(p_1, p_2, \alpha_s(\mu_R), q^2, \mu_F)$ — ”жесткое” сечение взаимодействия партонов i и j , вычисляемое по теории возмущений с $\alpha_s < 1$.

Помимо функций распределения патронов в адронах $f_{p \rightarrow i}(x_1, \mu_F)$, имеются также непертурбативные функции фрагментации партонов в адроны $f_{i \rightarrow \pi}(x_1, \mu_F)$.



Кварк-глюонная призма — новое состояние вещества?!

Согласно теории Большого Взрыва и формирования вещества во Вселенной неизбежно существовала Кварк-Глюонная Плазма (кварки и глюоны без адронов)!



Осталось её найти на Земле ... и понять природу Конфайнмента ?!

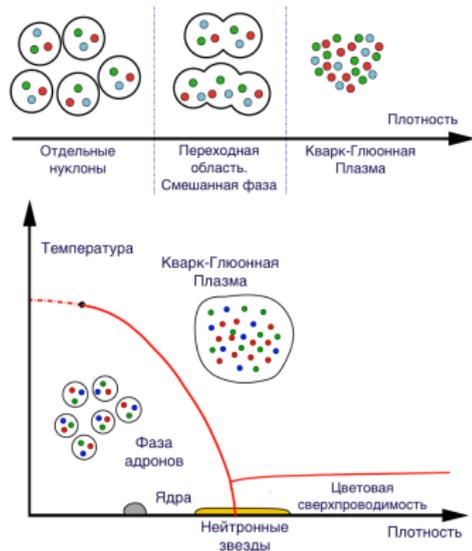


Кварк-глюонная плазма... Где её искать на Земле сегодня?

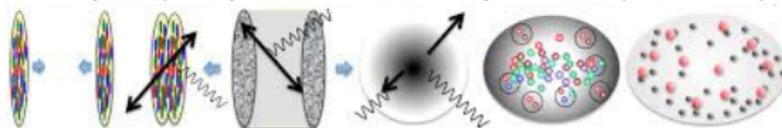
Считается, что с ростом плотности числа нуклонов, они начинают перекрываться, позволяя кваркам и глюонам перемещаться из одного нуклона в другой, ему соседний.

Деконфайнмент — освобождение кварков и глюонов из под влияния адронов под действием, скажем, высокого внешнего давления ...

В случае фазового перехода I-го рода должна существовать также смешанная фаза — смесь кварк-глюонной плазмы и адронов. Именно здесь работает во всю **конфайнмент**.



Поиск КГП связан с исследованием столкновений тяжелых ионов при высоких энергиях, где на *систематической* основе создаются условия для со-существования адронной и кварк-глюонной материи (конфайнмент–деконфайнмент) — **непертурбативная КХД!**

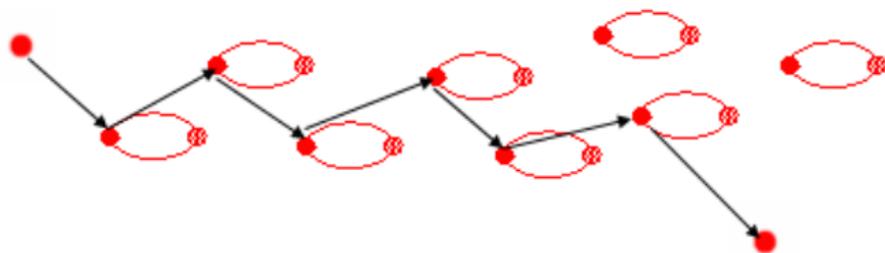




Как "набегает" масса у протона ?

Считается, что примерно так:

Кварк, летая в конденсате из кварк-антикварковых (вакуумных) пар, заменяет по очереди кварки внутри пар, тормозится, увеличивая свои инерционные свойства, т.е. приобретает массу.

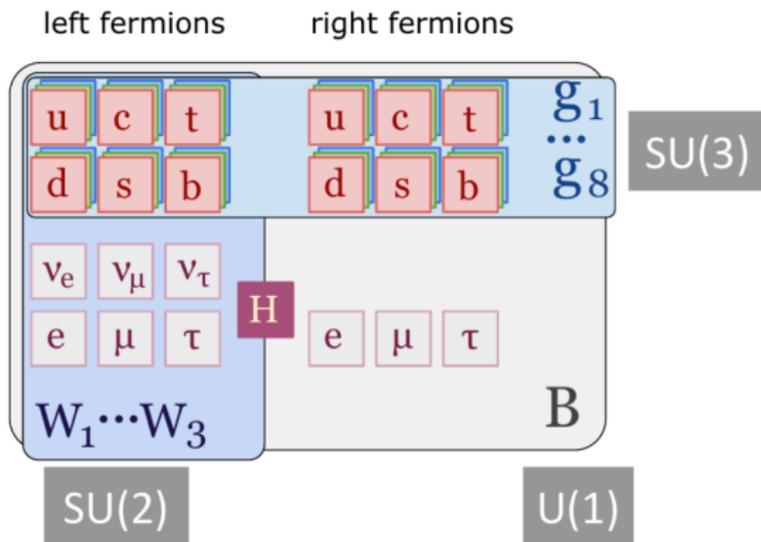


В результате такой процедуры "спонтанного нарушения киральной симметрии" исходно "заправочная" (токовая) масса u - (4 МэВ) или d -кварка (7 МэВ) становится равной массе "составляющего" кварка примерно 330 МэВ. Складывая такие массы трех кварков получаем массу протона (940 МэВ).

КХД-путь в Ядерную Физику ?!



Главные задачи современной физики элементарных частиц



©И.ИВАНОВ



Стратегическая цель физики элементарных частиц и астрофизики состоит в формировании **нового физического мировоззрения**, лишенного «недостатков» современной Стандартной Модели слабых, электромагнитных и сильных взаимодействий, которая представляет собой **выдающееся достижение человеческой мысли!**

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are mediated by forces and by energy flows or virtual particles).

FERMIONS

matter particles spin = 1/2

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass (GeV)	Electric charge	Flavor	Approx. Mass (GeV)	Electric charge
e^- electron	0.511×10^{-3}	-1	u up	0.002	+2/3
μ^- muon	0.105658	-1	d down	0.005	-1/3
τ^- tauon	1.777	-1	s strange	0.173	-1/3
			c charm	1.27	+2/3
			b bottom	4.2	-1/3

Structure within the Atom

BOSONS

force carriers spin = 0, 1, 2

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass (GeV)	Electric charge	Name	Mass (GeV)	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^\pm bosons	80.38	-1, +1			
Z^0 boson	91.188	0			

Properties of the Interactions

	Gravitational Interaction	Weak Interaction	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Asymmetry		Yes (Parity violation)	No	Yes (Color charge)
Acts on	All	Quarks, Leptons	Electric charge	Color charge
Particle exchange	Mass, Energy	Quarks, Leptons	Quarks, Gluons	Quarks, Gluons
Particle mediating	Graviton	W^\pm, Z^0	γ	Gluons
Strength at $r = 10^{-16}$ m	10^{-38}	10^{-5}	1	10^2

Unsolved Mysteries

Particle Processes

These diagrams are an oversimplification. Many other channels exist, represented by the dashed lines.

Dark Matter?

Dark matter is the most abundant form of matter in the universe, but its nature is unknown. It does not interact with light or other electromagnetic forces.

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles, mass comes from the Higgs mechanism. But what about the mass of composite particles like protons and neutrons? Where does that mass come from?



Beyond the Standard Model:

На пути создания новой теории элементарных частиц (новой физической картины Мира) главными источниками решающей информации сегодня считаются:

- 1 **прямой поиск Новой физики** на Большом адронном коллайдере LHC (суперсимметрия, распады бозона Хиггса, дополнительные размерности пространства, новые типы состояния вещества, новые частицы и взаимодействия и т.п.)
- 2 **нейтринная физика и астрофизика**
- 3 природа **Темной материи** и **Темной энергии**, космология
- 4 прецизионные исследования крайне редких превращений лептонов и адронов **нарушающих (флейворную) симметрию поколений** (косвенный поиск Новой Физики)
- 5 важнейшее значение сохраняет проблема структуры вещества, решение которой сегодня видится в рамках **непертурбативной Квантовой Хромодинамики**



- Модернизированный БАК — это
- фабрика для изучения хиггсов (!)
- фабрика для изучения топ-кварков
- фабрика для изучения глюонов
- ”открывашка” (?) **Суперсимметрии**
- ”открывашка” (?) **Темной материи**
- и/или еще чего-то ...



Почему фабрика хиггсов?

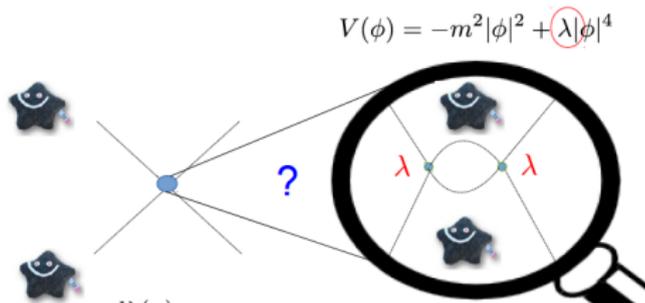
Переход от 300/фб к 3000/фб при 14 ТэВ

- позволяет увеличить статистику по распадам $H \rightarrow ZZ$ на порядок
- улучшить значения вероятностей распадов по ZZ и $\gamma\gamma$
- позволить обнаружить недостающие распады $H \rightarrow \mu\mu$ и $Z\gamma$
- улучшить значения вероятностей распадов в $WW, bb, \tau\tau$.

Все это необходимо для прецизионной проверки "стандарт-модельной" принадлежности обнаруженного в 2012 году бозона Хиггса. — А если НЕТ?

— Например, если подтвердится эффект нарушения закона сохранения лептонного числа в распадах хиггсов: $H \rightarrow \mu\tau$?

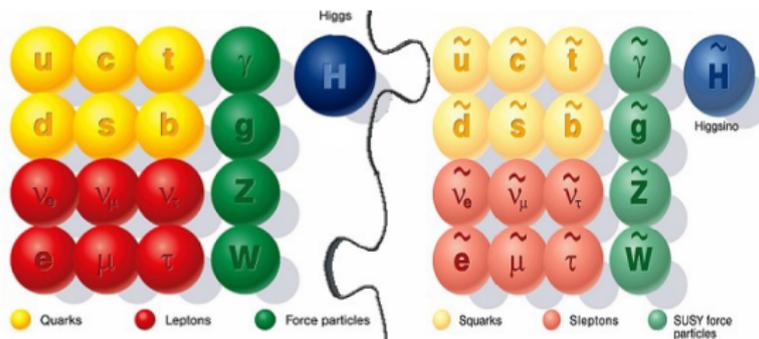
Еще более важно — определение интенсивности самодействия λ бозонов Хиггса, скажем по распадам их в $bb\gamma\gamma$ и $bb\tau\tau$ конечные состояния.





Суперсимметрия — лучший кандидат на замену СМ!

Идея Суперсимметрии — эквивалентность между бозонами (спин=0 или 1) и фермионами (спин=1/2). Каждому элементу СМ (электрону, мюону, кварку, фотону и т.п.) ставится в соответствие единственный супер-партнер (электрон — супер-электрон или скалярный-электрон или С-электрон т.д.), который взаимодействует совершенно эквивалентным образом (неразличимы — это и есть симметрия). Число частиц удваивается — это расплата.



Суперсимметрия должна быть нарушена — нет в Природе пока наблюдаемых супер-партнеров. И если они есть на самом деле, то должны быть заметно тяжелее своих элегантных СМ-сестер.



Будучи корректно математически оформлена, идея Суперсимметрии лучше всех "спасает" Стандартную Модель.

Осталось только обнаружить эти неуловимые супер-партнеры!



Несколько слов про ОИЯИ



Объединённый Институт Ядерных Исследований – международная межправительственная организация в области фундаментальной науки



ОИЯИ образован в 1956 г.
Членами ОИЯИ являются 18 государств

На правительственном уровне заключены соглашения о сотрудничестве с Германией, Венгрией, Италией Южно-Африканской Республикой, Сербией ...

Главные направления фундаментальных исследований —
Физика элементарных частиц,
Ядерная физика и Физика конденсированного состояния

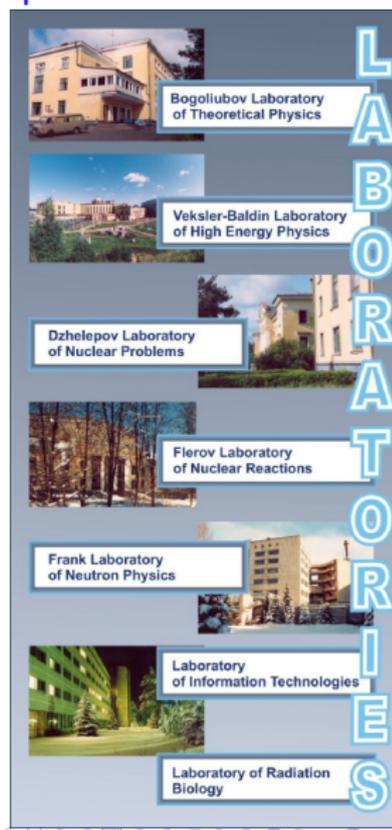


ОИЯИ состоит из 7 Лабораторий

и проводит исследования по следующим основным направлениям:

- теоретическая физика
- физика элементарных частиц
- релятивистская ядерная физика
- физика тяжелых ионов
- физика низких и промежуточных энергий
- ядерная физика с нейтронами
- физика конденсированных сред
- радиационная биология
- современные информационные технологии.

ОИЯИ — это передовая физика сверхтяжелых элементов, прецизионная ядерная спектроскопия, физика материалов и конденсированного состояния, фундаментальные работы с нейтронами, физика элементарных частиц сверх-высоких энергий, прецизионная нейтринная физика и астрофизика, теоретическая и математическая физика, информационные технологии и компьютеринг, передовая техника и методика экспериментов, биофизика и радиобиология и т.д. **В этом уникальность и существенное отличие от ЦЕРН!**





Каждая Лаборатория ОИЯИ представляет собой полноценный Научно-Исследовательский институт, как по составу, так и по вполне специализированному спектру решаемых задач.



**Лаборатория Ядерных Проблем
им. Джелепова**



**Лаборатория Физики Высоких Энергий
им. Векслера и Балдина**



**Лаборатория Теоретической
Физики им. Боголюбова**



**Лаборатория Ядерных Реакций
им. Флерова**



**Лаборатория Нейтронной Физики
им. Франка**



**Лаборатория
Информационных
Технологий.
Университетский Центр
ОИЯИ**



Лаборатория Радиационной Биологии



В ЛЯР ОИЯИ за 10 лет синтезировано 6 новых элементов и новых 49 изотопов

группы элементов

Д.И. Менделеев
1834 - 1907

105
Dubnium
1965

113
Открыт в ОИЯИ в 2003

114
Открыт в ОИЯИ в 1999
флеровий

115
Открыт в ОИЯИ в 2003

116
Открыт в ОИЯИ в 2000
ливерморий

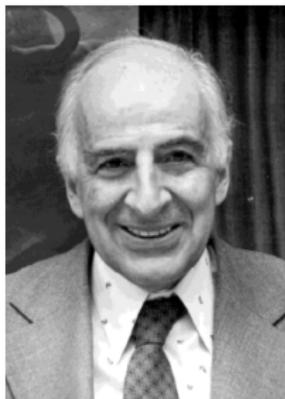
117
Открыт в ОИЯИ в 2009

118
Открыт в ОИЯИ в 2001

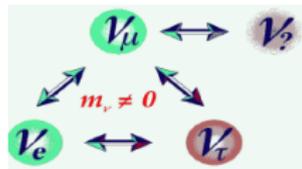


НЕЙТРИНО – ключ к ФЭЧ

Бруно Понтекорво: “Осцилляциии – это простой фокус. 1-2-3 и ... готово!”



Бруно Понтекорво



Более 50 лет назад в Дубне впервые была рождена идея ν осцилляций!



CERN Courier July/August 2015

Detectors

A new neutrino telescope for Lake Baikal

Baikal-GVD takes the first step to becoming a next-generation deep-underwater neutrino telescope.

In early April, members of the Baikal collaboration deployed and started operation of the first cluster of the Gigaton Volume Detector (Baikal-GVD). Named "Dubna", the cluster comprises 192 optical modules arranged at depths down to 1300 m. The modules are glass spheres that house photomultiplier tubes to detect Cherenkov light from the charged particles emerging from neutrino interactions in the water of the lake. By 2020, GVD is set to consist of 10–12 clusters covering a total volume of about 0.4 km³ (GVD phase-1). This is about half the size of the present world leader – the IceCube Neutrino Observatory at the South Pole (CERN Courier December 2014 p30). A planned further extension should then lead towards a second stage containing 27 clusters in a telescope with a total volume of about 1.5 km³.

Neutrino detection in Lake Baikal will be an important part of the effort to understand better the high-energy processes that occur in far-distant astrophysical sources, to determine the origin of cosmic particles of the highest energies ever registered, to search for dark matter, to study properties of elementary particles, and to learn a great deal of new information about the structure and evolution of the universe as a whole. Together with KM3NET in the Mediterranean Sea, the other future Northern-hemisphere neutrino telescope (CERN Courier July/August 2012 p31), GVD will allow an optimal view to the central parts of the Galaxy.

The start of the Baikal neutrino experiment dates back to 1 October 1980, when a laboratory of high-energy neutrino astrophysics was established at the Institute for Nuclear Research of the former Academy of Sciences of the USSR in Moscow – now the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences (INR RAS). This laboratory later became the core of the Baikal collaboration, including at various times the Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna, Irkutsk State University, Moscow State University, DESY-Zeuthen, the Nizhni Novgorod State Technical University, the Saint Petersburg State Marine Technical University, and other scientific research organizations in Russia, Hungary and Germany. At present, the participation of institutes from the Czech Republic, Slovakia and Poland is under discussion.

The idea to register neutrinos in large-scale Cherenkov detectors



Assembling strings of optical modules. (Image credit: INR RAS.)

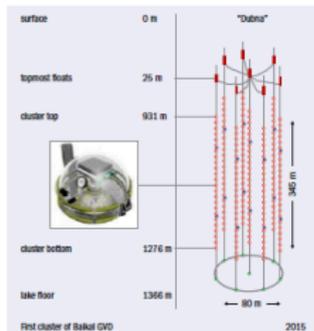
in natural water was expressed for the first time by Moisey Markov, then at Dubna, at the 10th International Conference on High-Energy Physics, in 1960. Two decades later, Alexander Chudalov, of INR, proposed using Lake Baikal as a site both for tests and for future large-scale neutrino telescopes. The choice of this lake – the largest and deepest freshwater reservoir in the world – was determined by the high transparency of its water, its depth, and the ice cover that allows the installation of deep-water equipment during two months in winter.

The predecessor of GVD was constructed during 1993–1998. Named NT200, it comprised 192 photodetectors placed on eight vertical strings at a depth of 1100–1200 m. NT200 covered some 100,000 m³ of fresh water (an order of magnitude less than the present Dubna cluster). Already in 1994, data taken with only 36 of the final 192 photodetectors showed two neutrino events. These two events were the first of several-hundred-thousand atmospheric neutrinos since recorded by deep-underwater and under-ice experiments. Scientific research with NT200 covered a wide programme, most notably the search for a cosmic diffuse neutrino flux leading to tight limits on that flux (CERN Courier July/August 2005 p24). Moreover, limits were derived on the flux of magnetic monopoles and on masses from dark-matter annihilation in the centre of the Earth and the Sun. Last but not least, the NT200 infrastructure was used for innovative environmental studies.

A notable breakthrough in the field came in 2012, when IceCube detected the first high-energy "astrophysical" neutrinos, i.e. high-energy neutrinos generated beyond the solar system >

CERN Courier July/August 2015

Detectors



Schematic of the "Dubna" cluster, the first for the Baikal-GVD neutrino telescope.

(CERN Courier July/August 2013 p35). That marked the birth of high-energy neutrino astronomy, and underlined the need to develop neutrino telescopes of similar capacity in the Northern hemisphere, to be able to study high-energy neutrino sources across the whole celestial sphere. JINR, with many years of experience as a participant in the Baikal neutrino project, recognized this opportunity and decided to treat activities related to Baikal-GVD as a scientific priority.

Baikal-GVD will have a modular structure formed from functionally independent clusters of vertical strings of optical modules. This modular structure will allow data acquisition at early stages in the construction of the facility. The choice of the telescope structure will also allow adjustment of its configuration in response to changes in scientific priorities at different times.

Prototypes of all of the basic elements of the GVD telescope system were designed, manufactured and tested during 2006–2010. The final stage of complex in-situ testing started in 2011 and finished in 2015 with the development of the Dubna cluster. Its 192 optical modules are arranged down to depths of 1300 m on eight vertical strings, each 345-m long. Different from NT200, the optical modules are not grouped in pairs, resulting



The project team. (Image credit: INR RAS.)

in 192 space points per cluster (instead of only 96 for NT200). Moreover, the former custom-made hybrid QUASAR phototube has been replaced by a conventional 10-inch photomultiplier with a high-sensitivity photocathode. The mechanical structure has been simplified compared with NT200, and a totally new system for front-end and trigger electronics and for data acquisition has been designed and implemented.

Deployment of the Dubna cluster is an exciting step towards a next-generation neutrino telescope in Lake Baikal. Such a telescope will be a cornerstone of a future worldwide neutrino observatory, with detectors at the South Pole, in the Mediterranean Sea and in Lake Baikal. The Baikal collaboration pioneered this technology in the 1980s and 1990s, and measured neutrinos generated in the Earth's atmosphere. Two decades later, the long-awaited discovery by IceCube of the first high-energy neutrinos from far beyond the Earth and the solar system has given increased motivation to projects for similar large detectors in the Northern hemisphere. IceCube has lifted the curtain that hides the high-energy neutrino universe, but just by a little. In the future, Baikal-GVD will help to chart this new cosmic territory fully.

Résumé

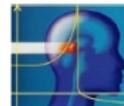
Un nouveau télescope à neutrinos pour le lac Baikal

Les membres de la collaboration du Baikal ont procédé au déplacement et commencé l'exploitation du premier groupe de modules optiques pour le Gigaton Volume Detector (GVD-Baikal), détecteur à un volume d'un gigatonne. Les modules détectent la lumière Tcherenkov qu'émettent les particules chargées engendrées par les interactions des neutrinos dans l'eau du lac. Il est prévu que, d'ici à 2020, le GVD compte 10 à 12 groupes de modules, couvrant un volume total d'environ 0,4 km³ (GVD phase 1). Une autre extension est prévue ; elle permettrait de passer à une deuxième étape, avec 27 groupes et un télescope à neutrinos, d'un volume qui couvrirait un volume total d'environ 1,5 km³.

Grigory Domogatsky, spokesperson of the Baikal neutrino project.

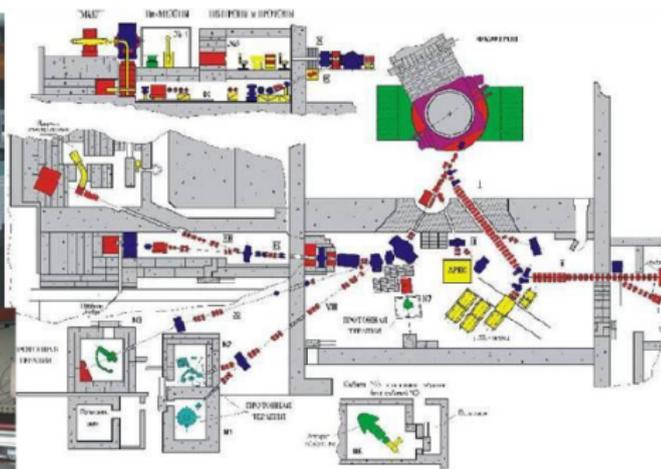
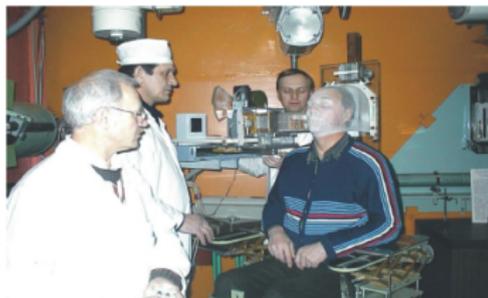
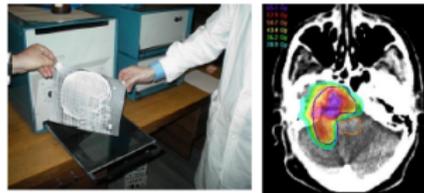


Протонная терапия в ОИЯИ – яркий пример практической роли фундаментальной науки!



Протонная терапия на Фазотроне ОИЯИ:

- Уникальный в России опыт применения адекватного форме опухоли 3D метода лечения онкологии
- Более 100 пациентов в год начиная с 2000 г.
- Разработка нового Центра Протонной терапии





ОИЯИ — это единственная в Мире организация, где уже 60 лет на самом высоком международном уровне успешно проводятся фундаментальные исследования в беспрецедентно широком спектре актуальных научных направлений.



Уникальность ОИЯИ состоит в конструктивном три-единстве **фундаментальности, международности и широкой мультидисциплинарности исследований.**

Многолетняя стабильность успешной научно-исследовательской работы обеспечивает **богатый опыт и высокую квалификацию исполнителей.** Как следствие — возможность наиболее эффективной передачи знаний молодому поколению, а также непревзойденный **потенциал научно-прикладной и инновационной деятельности** в широком спектре возможных применений.

Отсюда — **привлекательность ОИЯИ для молодых исследователей** разной национальности — каждый может для себя всегда найти интересное дело самой высокой научной значимости. И в этом гарантия успешного будущего развития ОИЯИ.

Мультидисциплинарность обеспечивает **стабильность** получения новых научных результатов. Она в глубоком и традиционном сотрудничестве между подразделениями ОИЯИ, в постоянном обмене опытом, оборудованием, идеями. Она связывает воедино все направления исследований путем единого для всех **стандарта ценностей и отношения к работе,** единого стремления к фундаментальным знаниям, в рамках открытого международного сотрудничества, **необходимость и обязательность** которого изначально записана была в основополагающих документах ОИЯИ.

Опыт прошедших трудных лет и логика развития науки показывает, что залог успеха — в сохранении и приумножении наших уникальных традиций, в нашем плодотворном единстве.



**Новая 7-летняя Программа развития ОИЯИ — широкий
и уверенный взгляд в будущее ...
полное новых неожиданных открытий !**

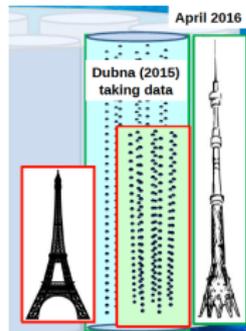
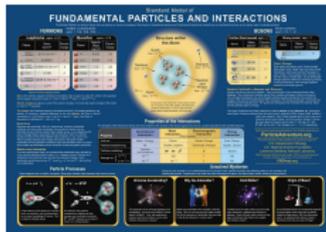
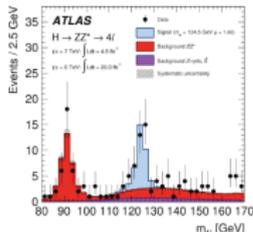
Стратегическая задача Новой научной программы развития ОИЯИ состоит в обеспечении постоянного производства уникальных новых знаний о Природе на основе проверенных временем общих принципов фундаментальности, международности и мультидисциплинарности.



2017 – 2023



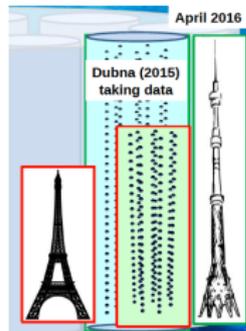
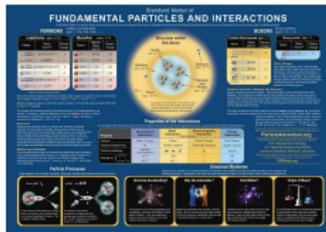
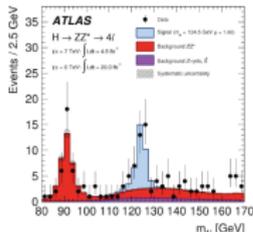
- 1 Бозон Хиггса и его история — триумф интеллекта.
- 2 Стандартная Модель — очень хороша, но надо двигаться дальше.
- 3 Неожиданные сюрпризы — физика и астрофизика нейтрино, кварки-глюоны ...
- 4 ОИЯИ — способен решать все главные задачи современной физики частиц.



Большое СПАСИБО !



- 1 Бозон Хиггса и его история — триумф интеллекта.
- 2 Стандартная Модель — очень хороша, но надо двигаться дальше.
- 3 Неожиданные сюрпризы — физика и астрофизика нейтрино, кварки-глюоны ...
- 4 ОИЯИ — способен решать все главные задачи современной физики частиц.



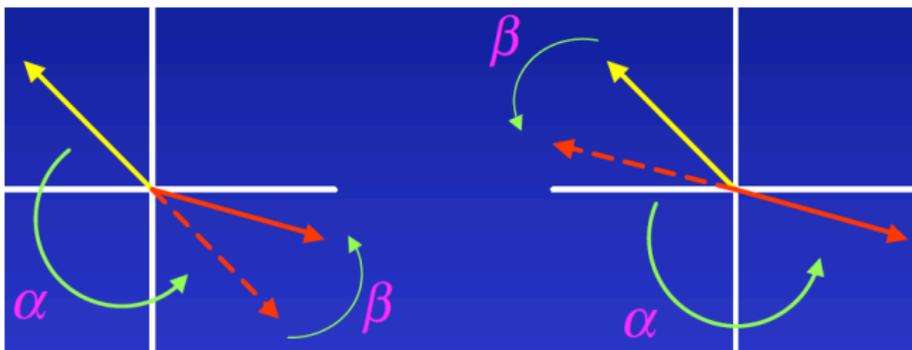
Большое СПАСИБО !



EXTRA SLIDES



Абелевы и НЕ-Абелевы вращения (преобразования)



$$AB - BA = C$$

