



NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY

Майнор

“Мир глазами физиков”

2017-2019

Осень 2017

Квантовая физика 'для чайников'

Лекция 14:

Ядерная физика III:

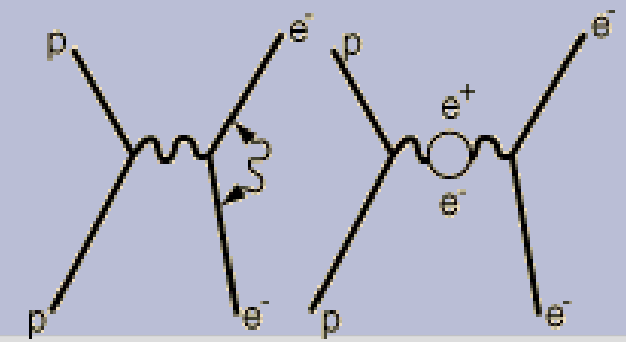
Красивые эксперименты атомной и
ядерной физики: Виртуальные частицы,
Бозон Хиггса, Осцилляции нейтрино

Концепция виртуальных частиц: экспериментальные обоснования



<http://www.treda.ru/i/photos/b/5586/898495a52b9c344d3a05a1848c879b86.jpg>

Сдвиг Лэмба



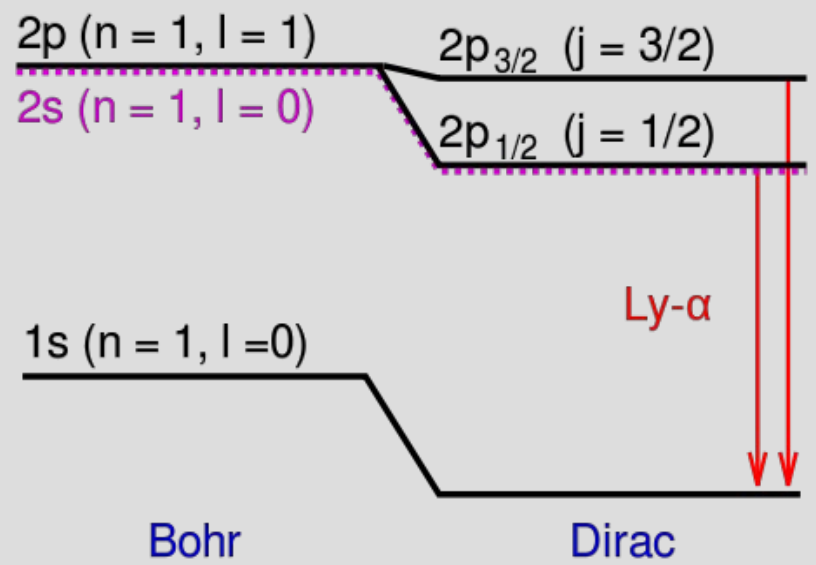
Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

С учётом спин-орбиты (в рамках теории возмущений)

$$E(2^2 P_{1/2}) \neq E(2^2 P_{3/2})$$

Строгое релятивистское решение задачи (Дирак)

$$E = E(n, j) \Rightarrow E(2^2 S_{1/2}) = E(2^2 P_{1/2})$$

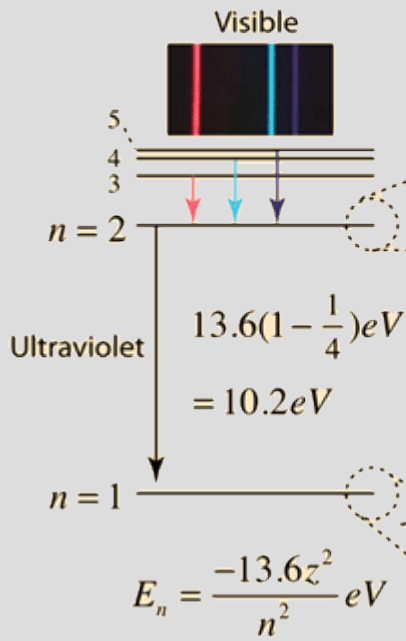


Эксперимент (Лэмб, 1947): $2^2 S_{1/2}$ на 1ГГц выше, чем $2^2 P_{1/2}$

Перенормировка массы электрона в S-состоянии за счёт взаимодействия с виртуальными фотонами в интенсивном поле вблизи ядра

Сдвиг Лэмба

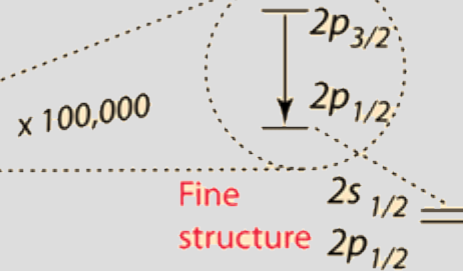
Hydrogen energy levels



Less than thermal energy $\rightarrow 4.5 \times 10^{-5} eV = \frac{3}{2} kT$ at 0.35 K

$\Delta E = 4.5 \times 10^{-5} eV$
 $\nu = 10.9 GHz$
 $\lambda = 2.8 cm$

Barely resolvable since the Doppler broadening is about 4 GHz



$\Delta E = 4.372 \times 10^{-6} eV$
 $\nu = 1.0576 GHz$
 $\lambda = 28.37 cm$
Lamb shift

$\times 100,000$

Hyperfine structure

NE $\Delta E = 5.9 \times 10^{-6} eV$
 $\uparrow\uparrow \nu = 1.42 GHz$
 $\uparrow\downarrow \lambda = 21 cm$

N = nuclear spin
 E = electron spin

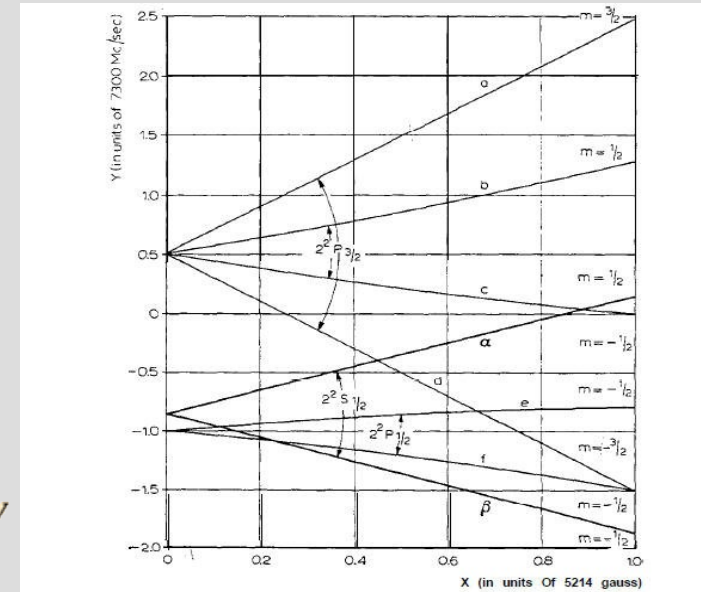


Fig. 4. Zeeman energy levels with the $2^2S_{1/2}$ pattern raised by 1000 Mc/sec.

Сдвиг Лэмба

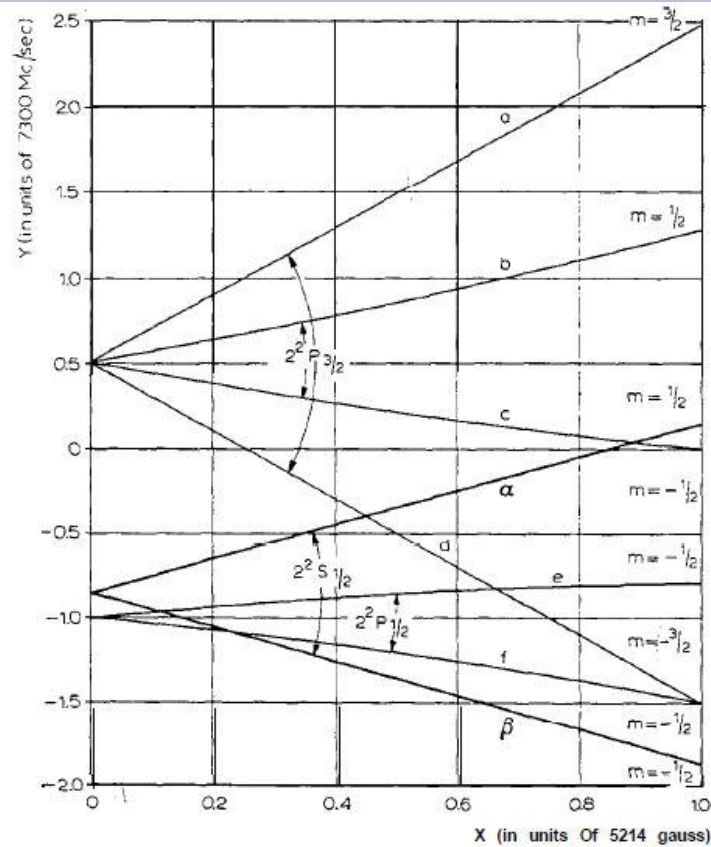


Fig. 4. Zeeman energy levels with the $2^2S_{1/2}$ pattern raised by 1000 Mc/sec.

Положение резонансных пиков поглощения зависит от расщепления уровней – позволяет измерить расстояние между $2s$ и $2p_{1/2}$

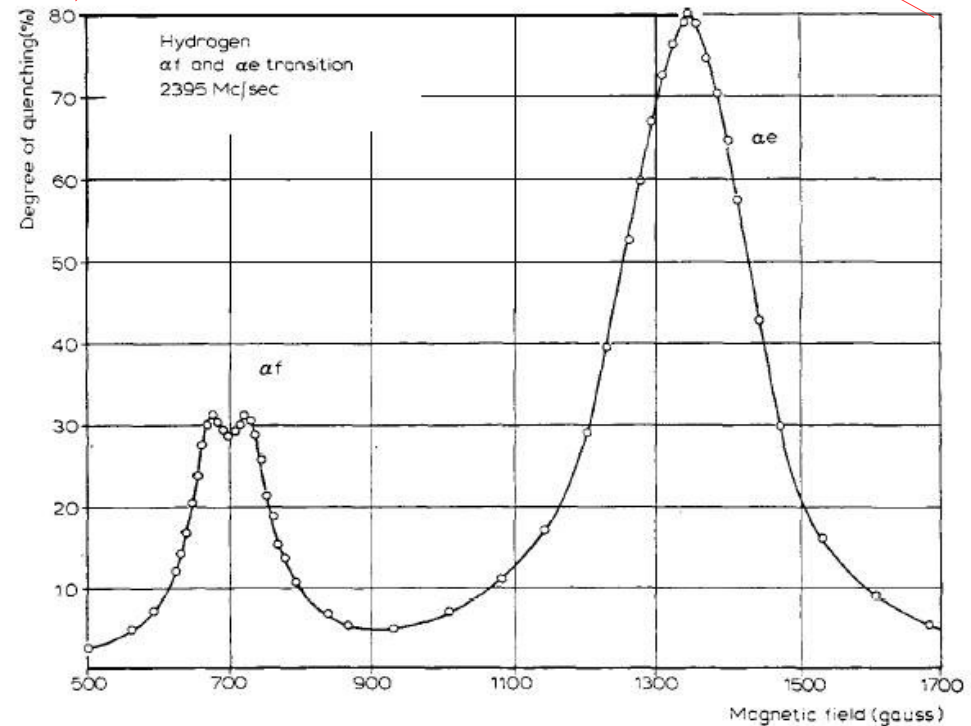
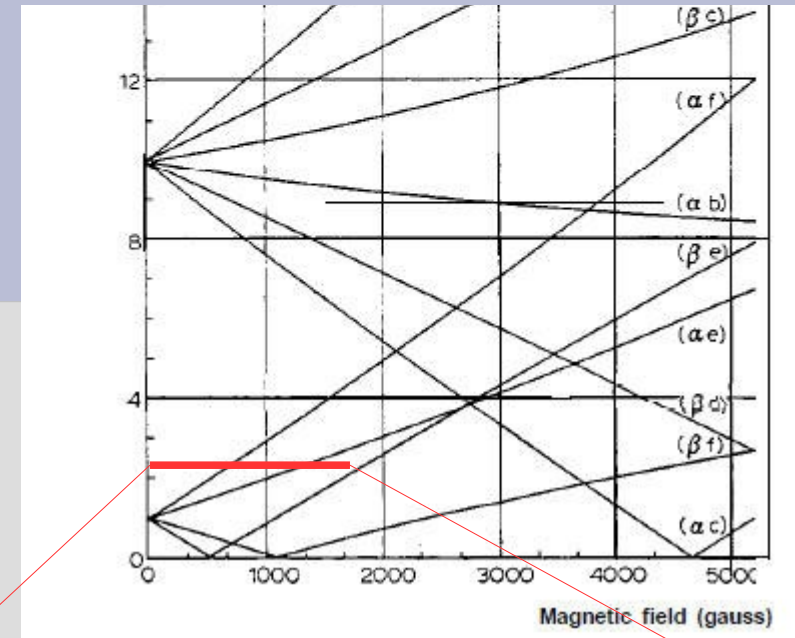
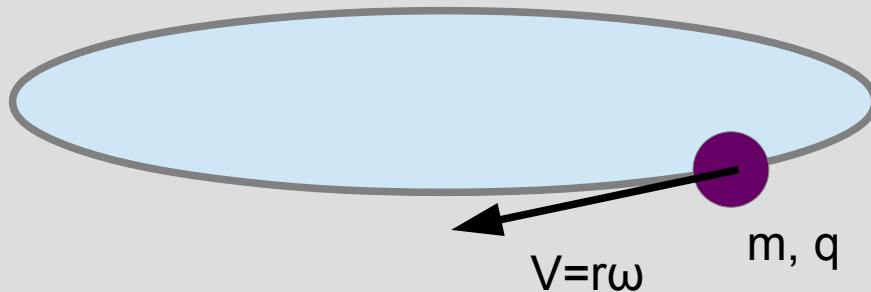


Fig. 7. Observed resonance curves for hydrogen.

Гиромагнитное отношение (напоминание)



$$L = m \omega r^2$$

$$M = I S = q \frac{\omega}{2\pi} \pi r^2 = q \omega r^2 / 2$$

$$g_0 = \frac{M}{L} = \frac{1}{2} \frac{q}{m}$$

Не зависит от
траектории!

С моментом импульса и спином заряженной частицы связан магнитный момент, для электрона

$$\hat{M}_z = g \mu_B \hat{S}_z \quad \mu_B = \frac{e \hbar}{2m}$$

Измерения на атомах

Hydrogen energy levels

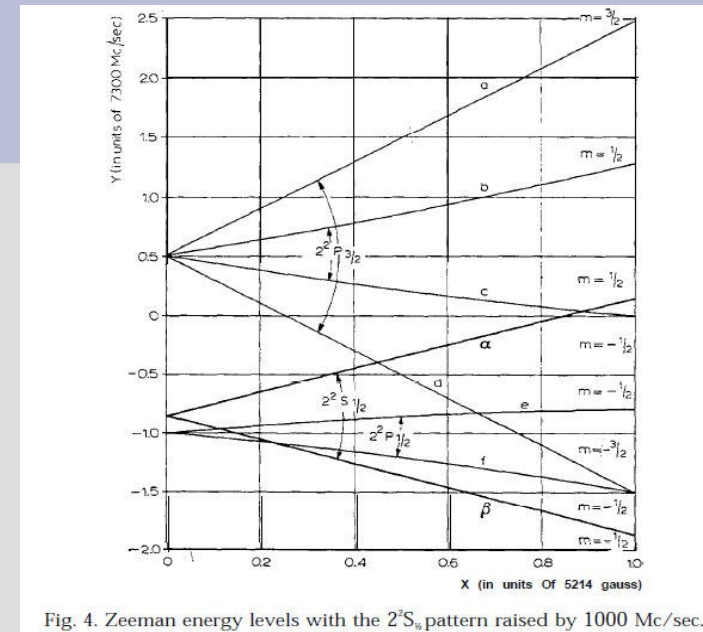
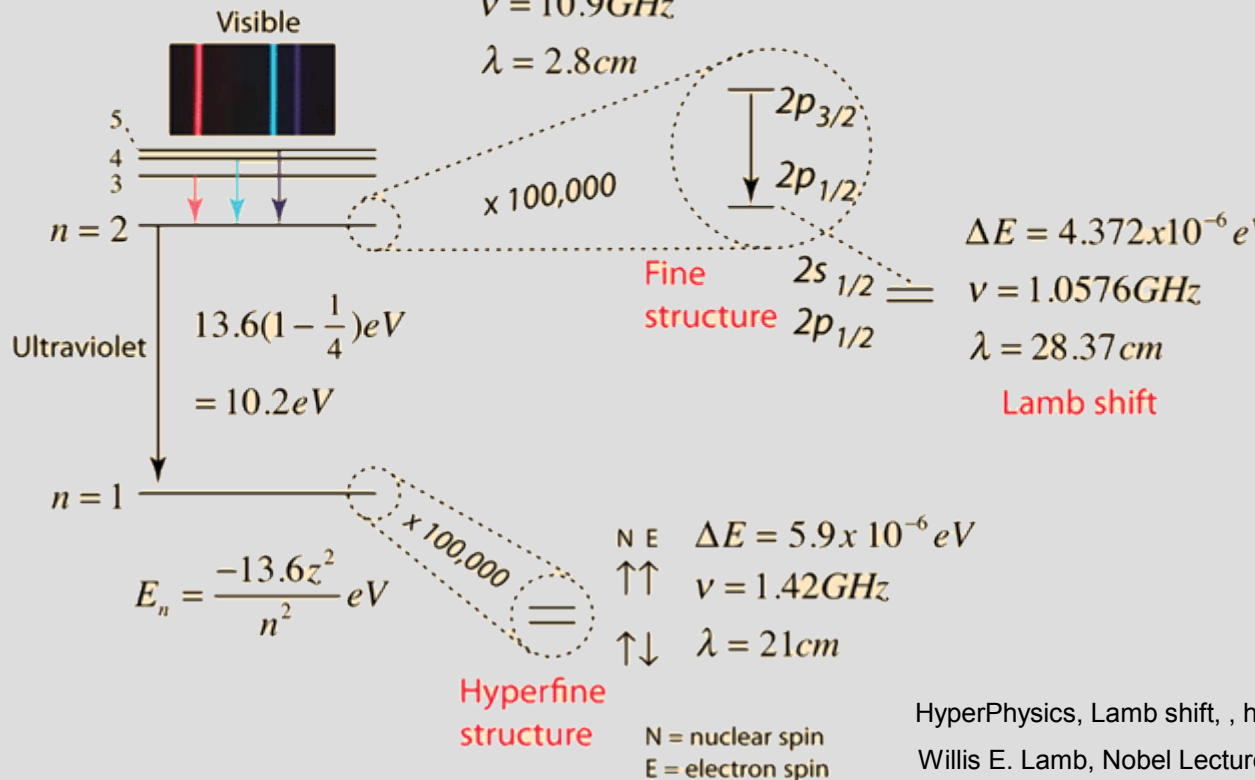


Fig. 4. Zeeman energy levels with the $2^2S_{1/2}$ pattern raised by 1000 Mc/sec.

Несовпадение
(на доли %!)
вычисленной
сверхтонкой
структуры водорода и
наклона зависимостей
 $E(B)$ с теорией

Аномальный магнитный момент электрона и мюона

Релятивистская теория предсказывает $g=2$ для чисто спинового g -фактора

Взаимодействие с виртуальными фотонами, электрон-позитронными парами приводит к небольшому отличию, называемому *аномальным магнитным моментом*

$$a = \frac{g-2}{2}$$

$$a_e^{\text{э}} = 0,00115965218073 (28)$$

$$a_e^m = 0,001159652181643 (764)$$

$$a_{\mu}^{\text{э}} = 0,0011659209 (6)$$

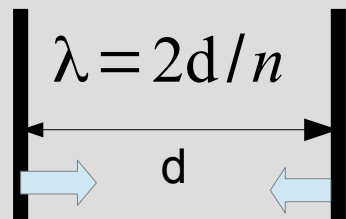
$$a_{\mu}^m = 0,00116591804 (51)$$

Одна из самых точных измеряемых и вычисляемых величин в физике

Эффект Казимира



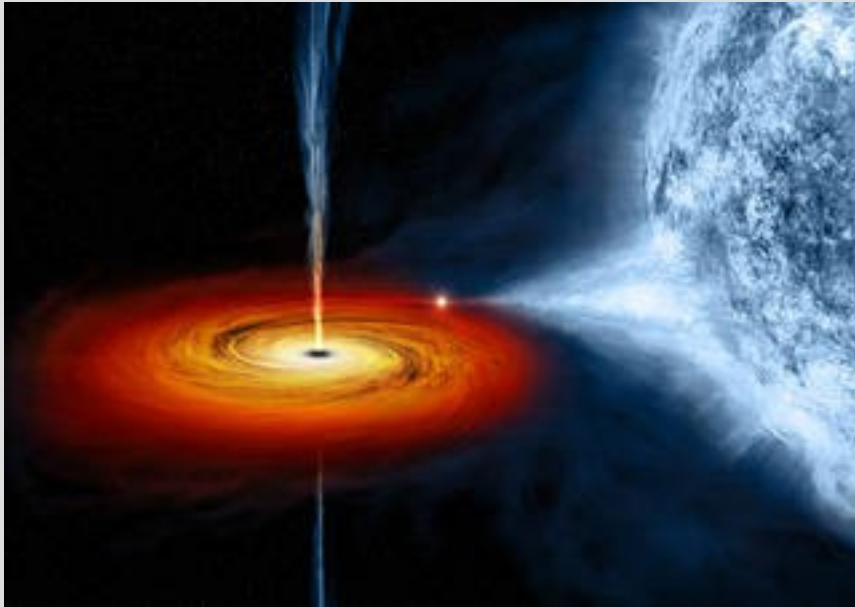
И. К. Айвазовский «Смотр Черноморского флота в 1849 году»



$$F = -\left(\frac{\pi^2}{240}\right) \frac{\hbar c}{d^4}$$

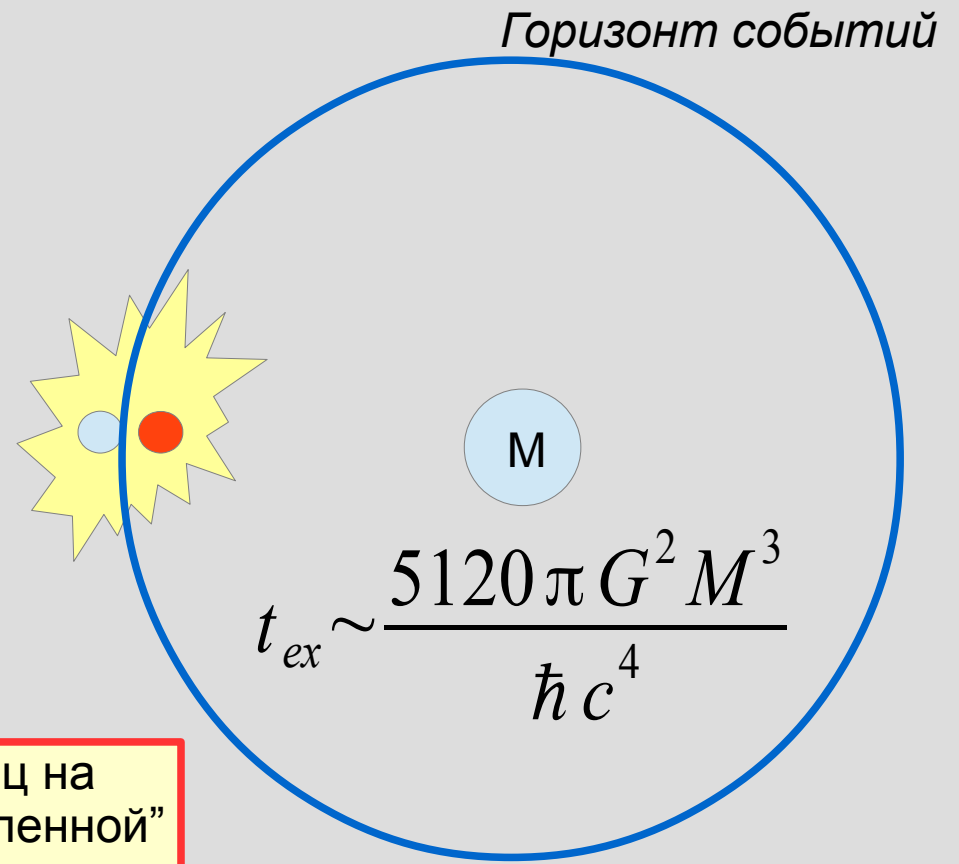
1 кв.см & 1 мкм $\implies 10^{-8}$ Н

Излучение Хокинга



An artist's drawing a black hole named Cygnus X-1. It formed when a large star caved in. This black hole pulls matter from blue star beside it.
Credits: NASA/CXC/M.Weiss

(теория!) При образовании пары частиц на границе горизонта событий “в нашей Вселенной” остаётся одна из частиц пары. Чёрная дыра как бы излучает эту частицу, теряет энергию, “испаряется” (для 200 тонн за 1 сек)



Бозон Хиггса

$$E = p c \quad \text{vs.} \quad E = \sqrt{(m c^2)^2 + p^2 c^2}$$

Без учёта бозона Хиггса нет причины для появления массы (и короткодействия) у переносчиков слабого взаимодействия

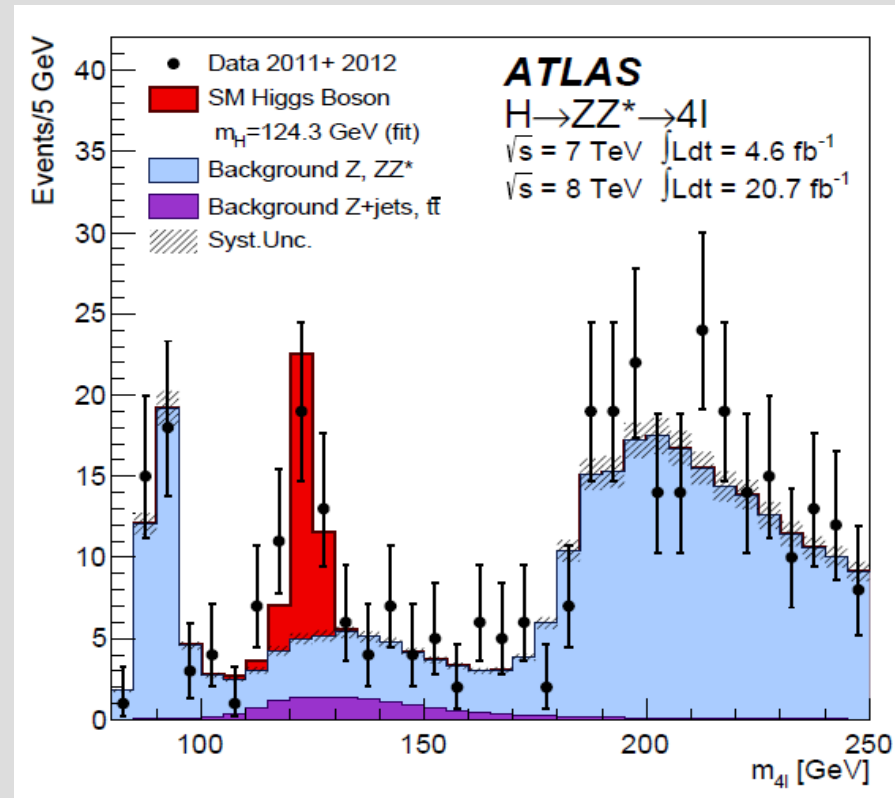
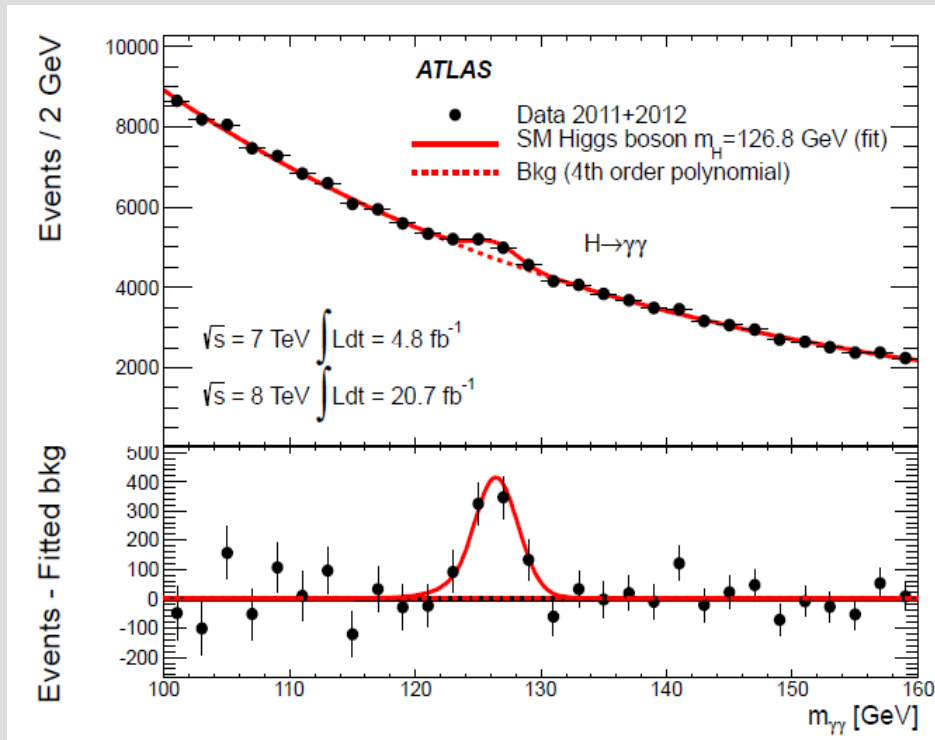
Упрощая: роль взаимодействия Хиггса (взаимодействия с некоторым полем) – появление конечной “цены” создания частицы.

Наблюдение бозона Хиггса

Decay channel	Mass resolution
$H \rightarrow \gamma\gamma$	1-2%
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell'^+ \ell'^-$	1-2%
$H \rightarrow W^+ W^- \rightarrow \ell^+ \nu_{\ell} \ell'^- \bar{\nu}_{\ell'}$	20%
$H \rightarrow b\bar{b}$	10%
$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$	15%

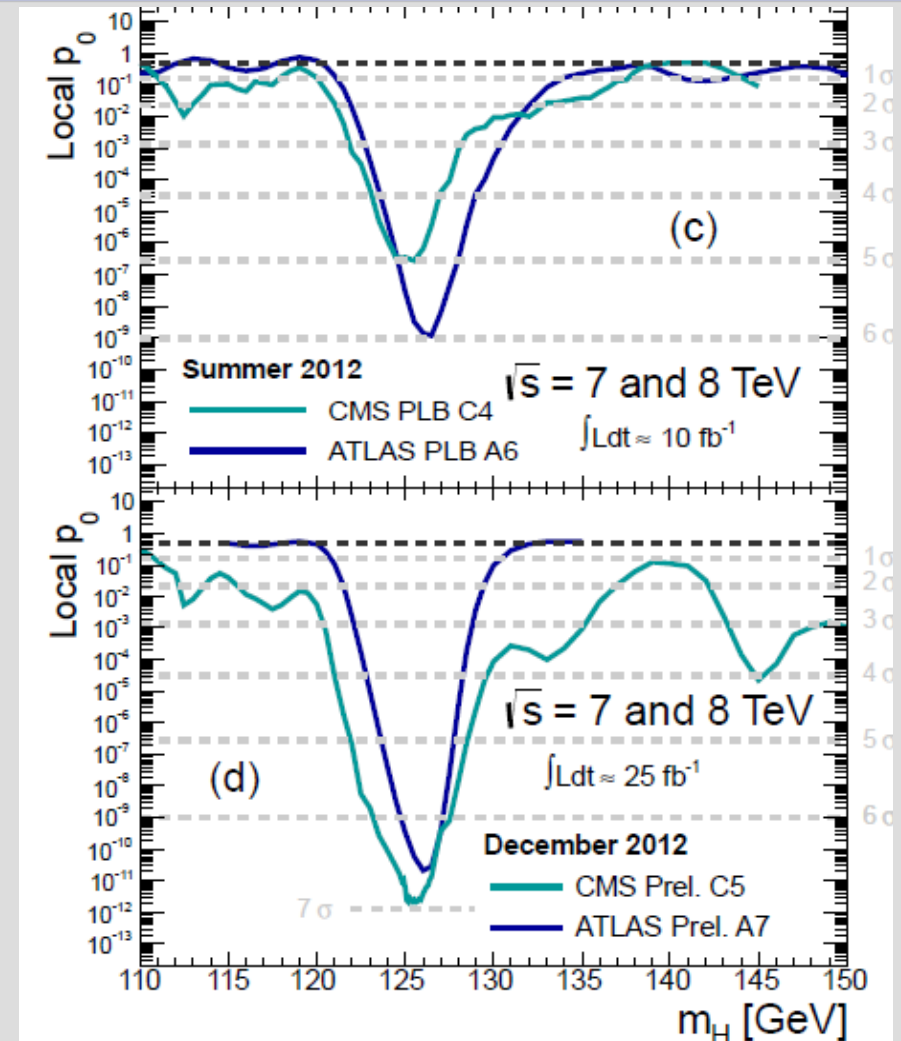
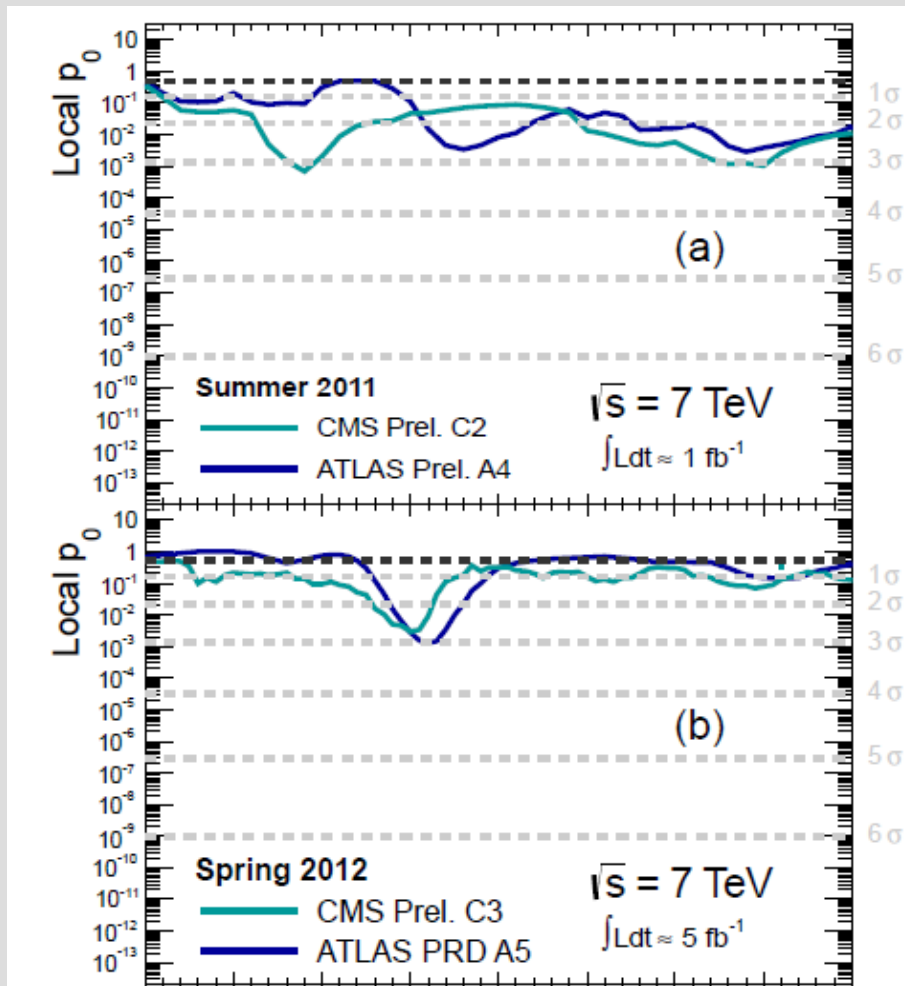
точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада.

Эксперимент...



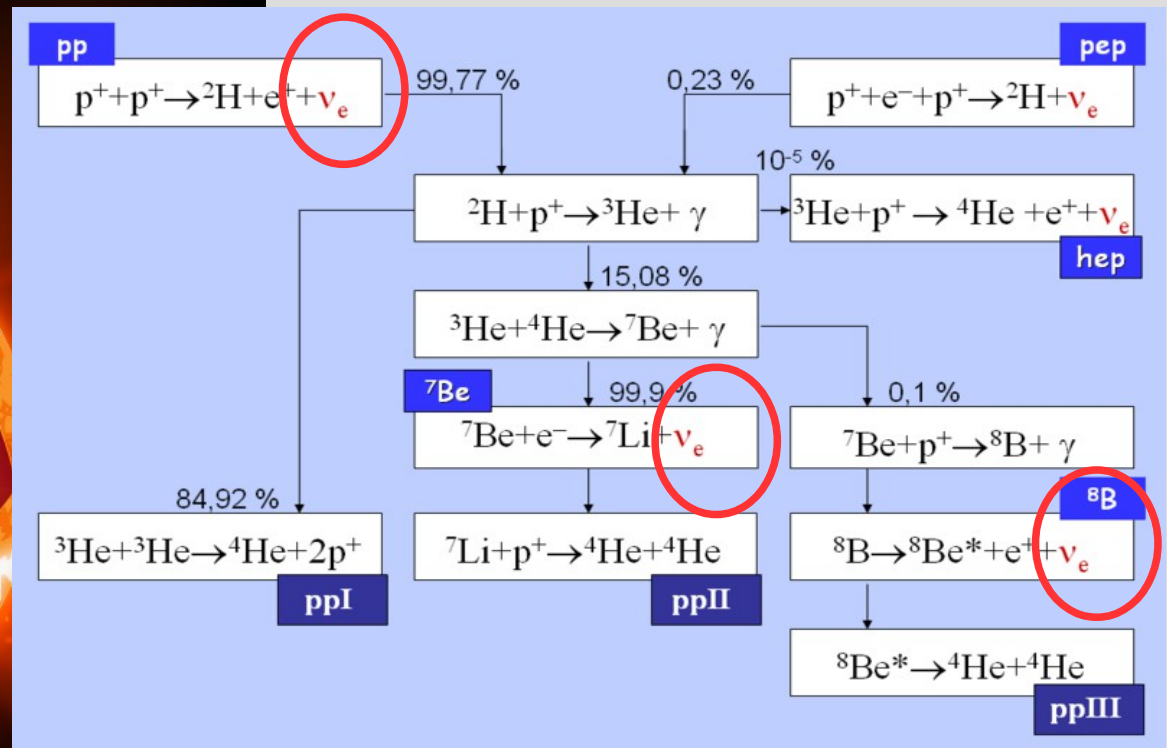
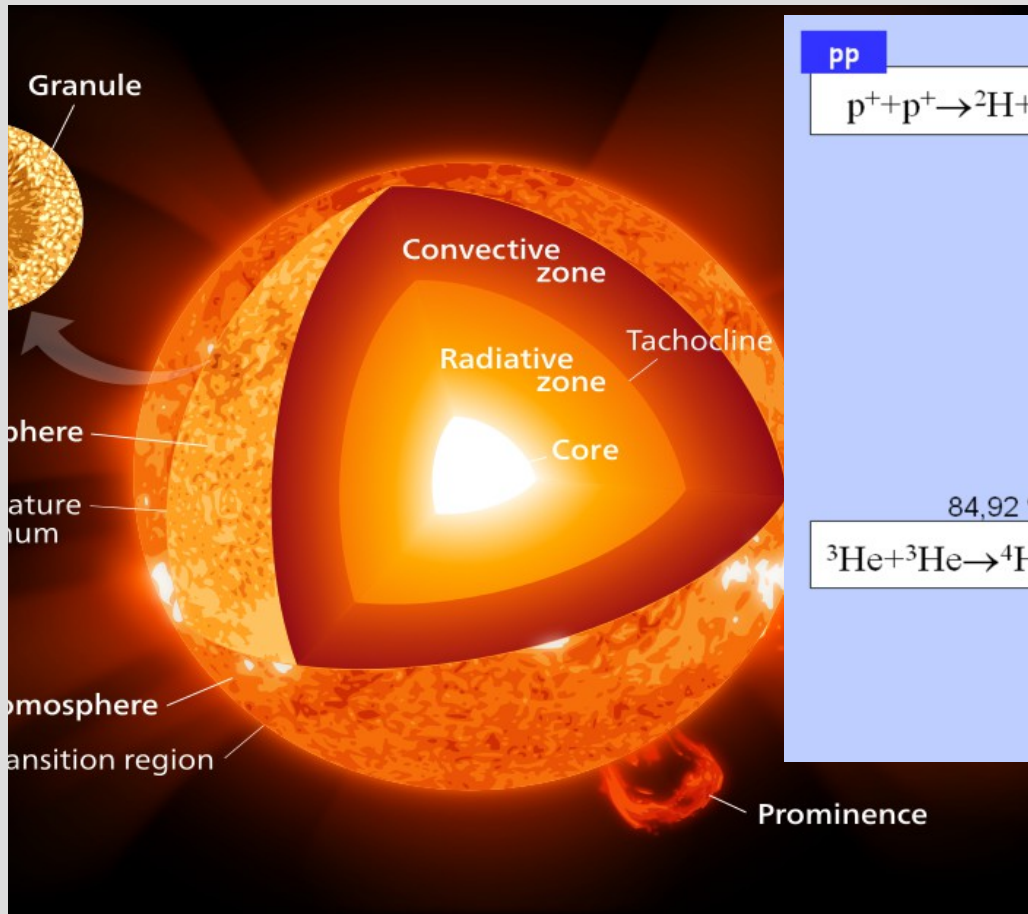
Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса. Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса.

Накопление статистики



Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на Большом адронном коллайдере в лета 2011 по декабрь 2012 года.

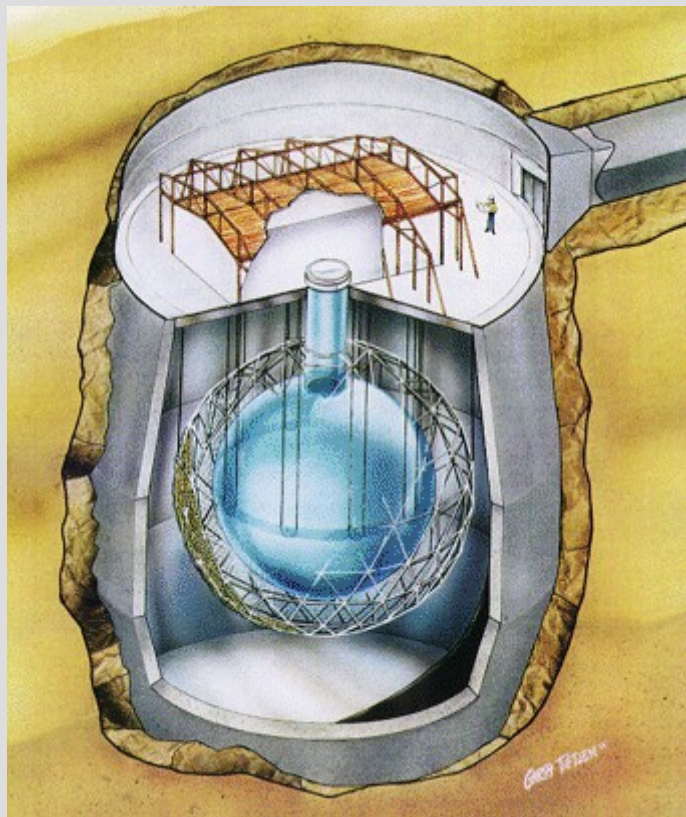
Проблема солнечных нейтрино и осцилляции нейтрино



Поток нейтрино, обнаруживаемый на Земле оказался в первых экспериментах на 30% ниже, чем ожидается!

Обнаружение всех нейтрино (Sudbury)

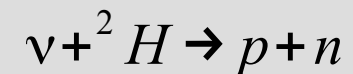
<https://www.sno.phy.queensu.ca/>



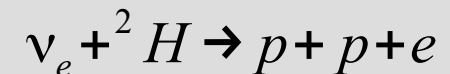
Детектор с тяжелой водой, три канала детектирования нейтрино:

1) нейтральный, комптоновское рассеяние на электронах – **все типы нейтрино, но электронное в 6 раз эффективнее**

2) нейтральный
все типы нейтрино

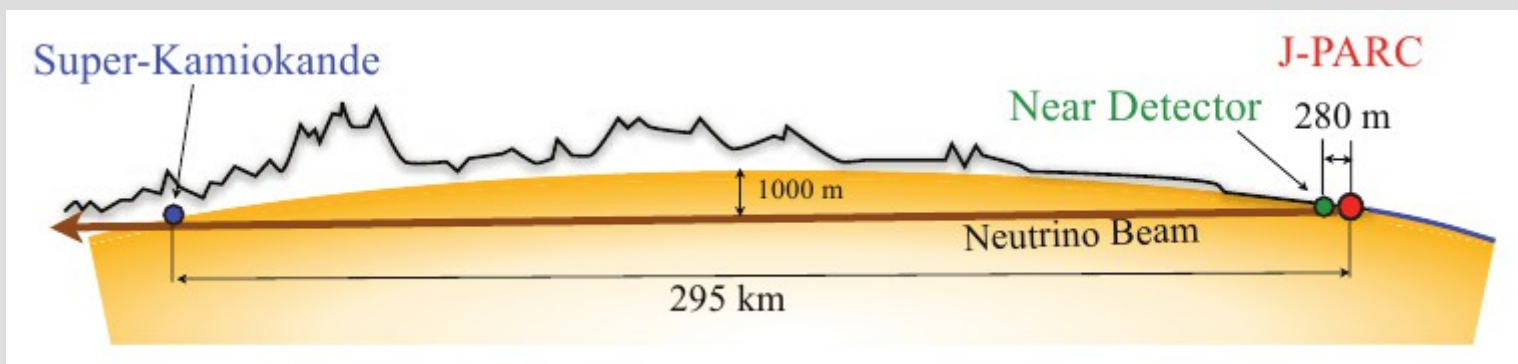


3) заряженный
только электронное нейтрино

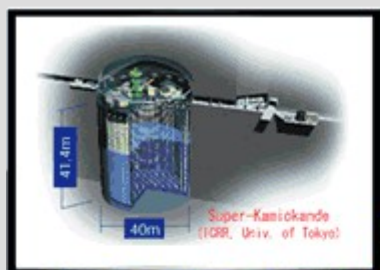


Ускорительные эксперименты по нейтринным осцилляциям

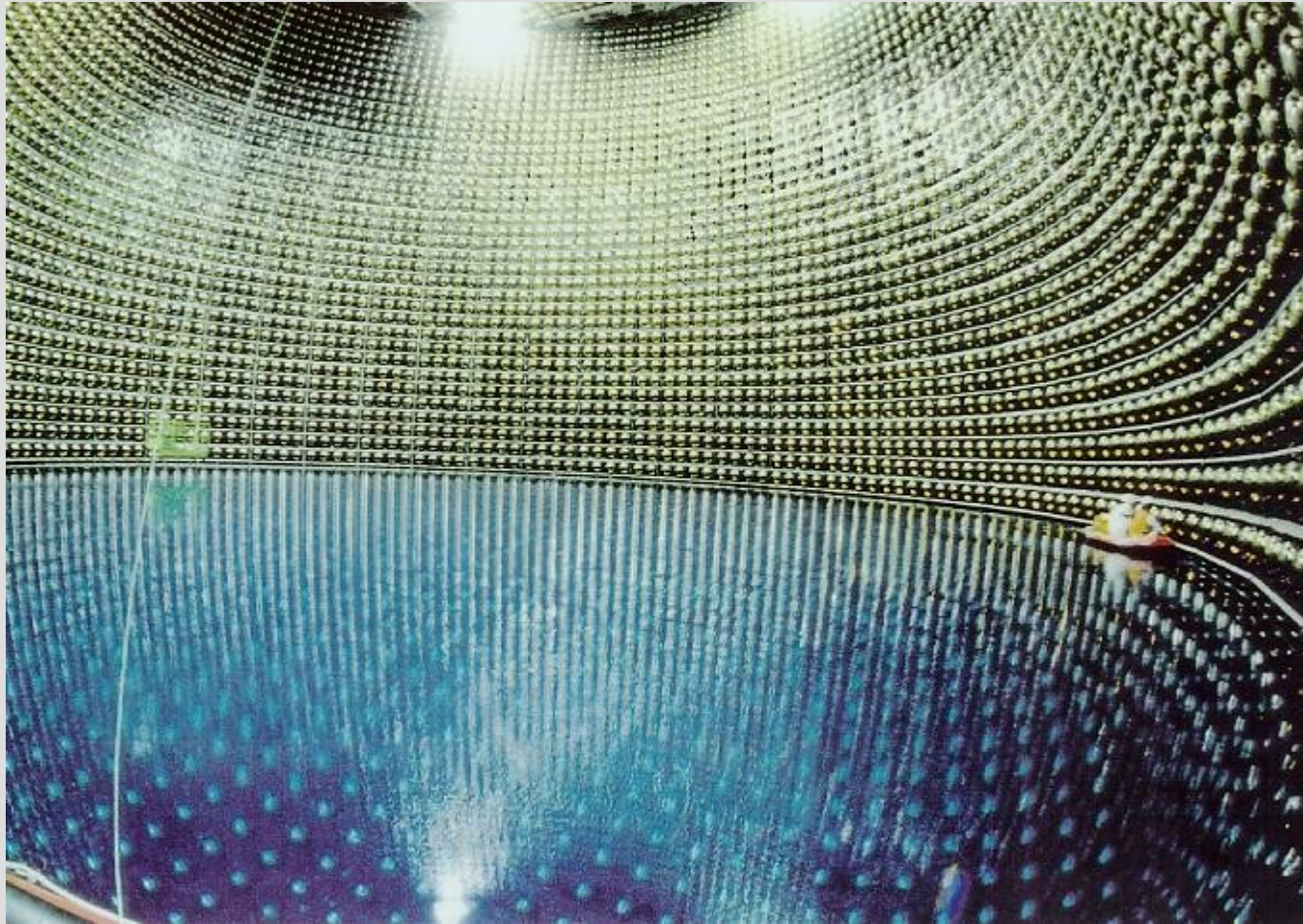
- MINOS: источник Фермилаб, детектор в Миннесоте (735 км)
- T2K: источник Токай, детектор в Камиоканде (295 км)



Направление пучка нейтрино в эксперименте T2K

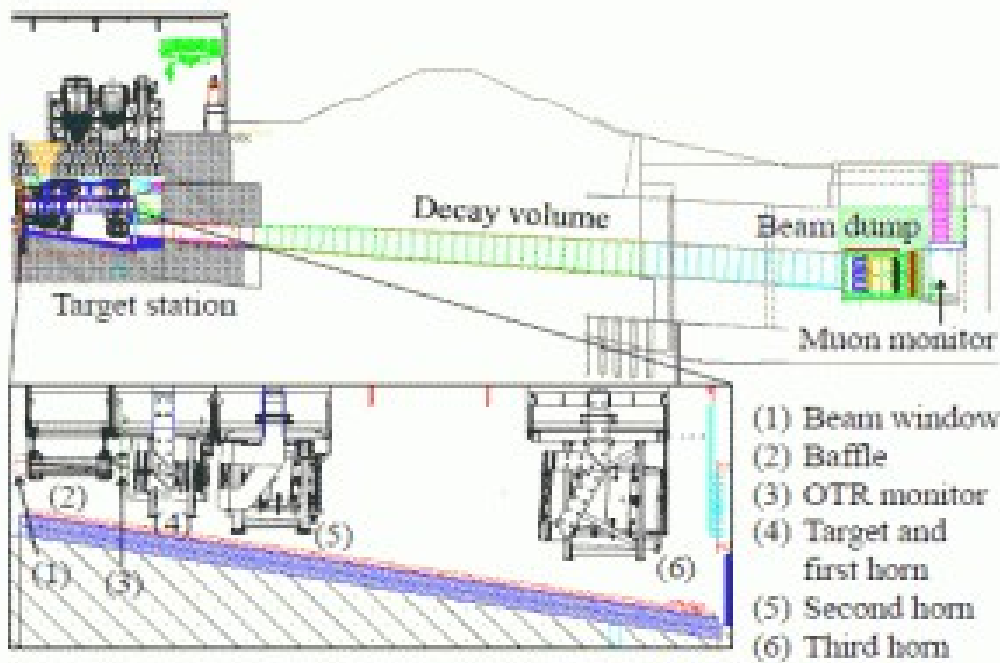


Детектор Супер-Камиоканде

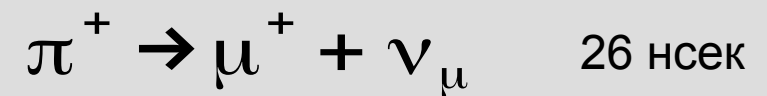


40 метров
50,000 тонн чистой
воды
~10,000 ФЭУ

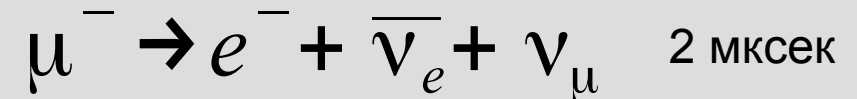
Получение нейтринного пучка



протонный ускоритель бомбардирует мишень и получаются пионы



пионы распадаются в движении, поток нейтрино по ходу пучка

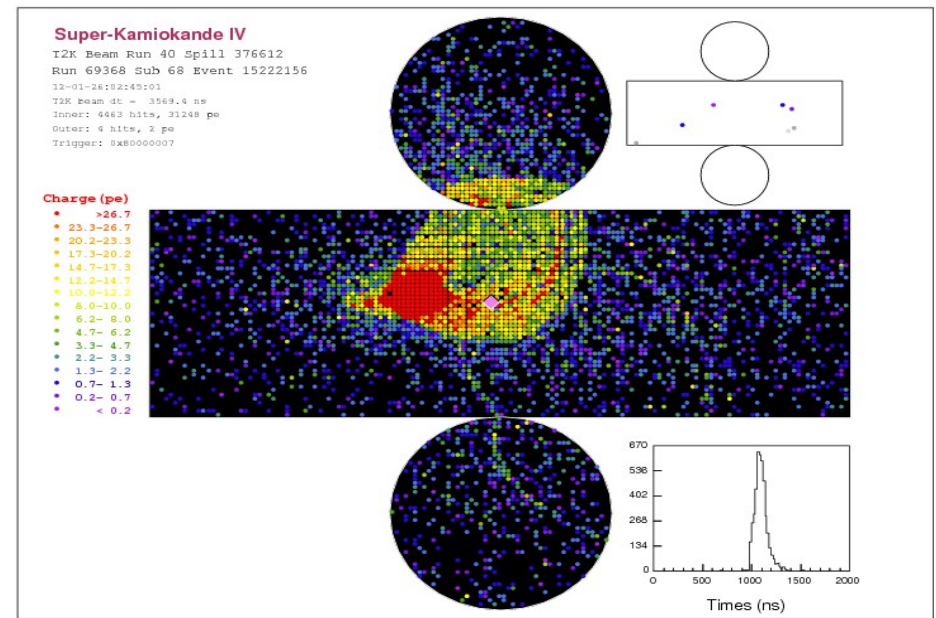
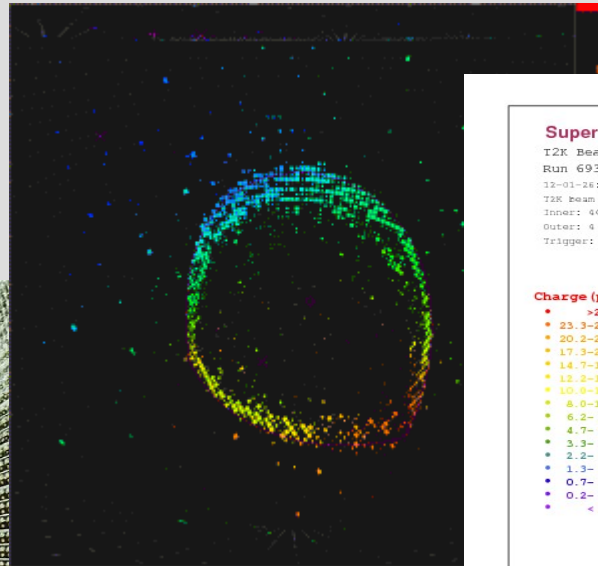
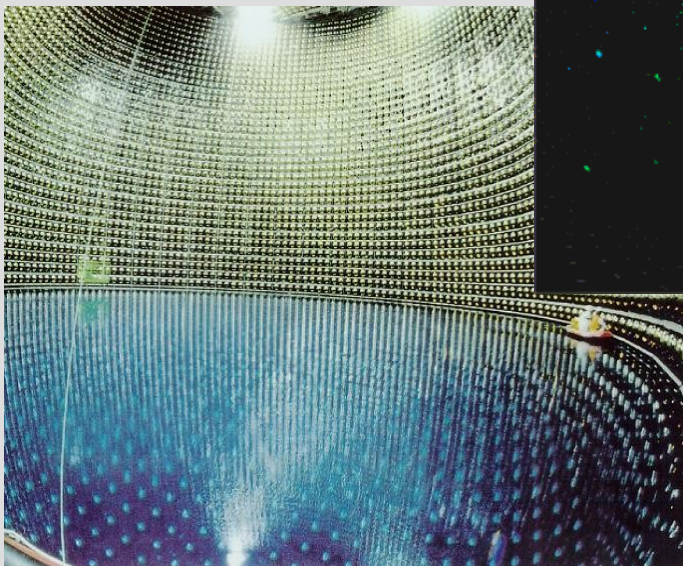


мюоны распадаются после остановки, поток нейтрино изотропен

Результат T2K

В детекторе возможна реакция $\tilde{\nu}_\mu + {}^1_1H \rightarrow \mu^+ + {}^1_0n$

черенковский спектр мюона отличается от спектра электрона. В 2010-2011 году наблюдается 31 вместо ожидаемых 104 событий



Обнаружение мюонного нейтрино в детекторе Супер-Камиоканде. Первое мюонное нейтрино эксперимента T2K обнаружено после приостановке эксперимента из-за землетрясения и цунами 2011 года.

Модельная задача про нейтринные осцилляции

Для простоты – только два аромата.

Электронное и мюонное нейтрино представляются как комбинация некоторых “истинных” нейтрино

$$\nu_e = \cos \Theta \nu_1 + \sin \Theta \nu_2$$

$$\nu_\mu = -\sin \Theta \nu_1 + \cos \Theta \nu_2$$

$$\hat{H} \nu_1 = E_1 \nu_1 \quad \hat{H} \nu_2 = E_2 \nu_2$$

$$i \hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$

$$\Psi = -\sin \Theta e^{i E_1 t / \hbar} \nu_1 + \cos \Theta e^{i E_2 t / \hbar} \nu_2$$

$$\Psi(t) = \frac{1}{2} \sin 2 \Theta \left(e^{i E_2 t / \hbar} - e^{i E_1 t / \hbar} \right) \nu_e + \left(\sin^2 \Theta e^{i E_1 t / \hbar} + \cos^2 \Theta e^{i E_2 t / \hbar} \right) \nu_\mu$$

Модельная задача про нейтринные осцилляции

$$\Psi(t) = \frac{1}{2} \sin 2\Theta \left(e^{iE_2 t/\hbar} - e^{iE_1 t/\hbar} \right) \nu_e + \left(\sin^2 \Theta e^{iE_1 t/\hbar} + \cos^2 \Theta e^{iE_2 t/\hbar} \right) \nu_\mu$$

Квантовая механика! Вероятность=квадрат модуля волновой функции

$$w_e = \frac{1}{4} \sin^2(2\Theta) \left(2 - 2 \cos \frac{(E_2 - E_1)t}{\hbar} \right) = \sin^2(2\Theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar}$$

$$w_\mu = \sin^4 \Theta + \cos^4 \Theta + \frac{1}{2} \sin^2 2\Theta \cos \frac{(E_2 - E_1)t}{\hbar} = 1 - \sin^2(2\Theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar}$$

$$\sin^2(2\Theta) \approx 0.8$$

Наблюдаемые нейтрино осциллируют во времени или с расстоянием от точки получения нейтрино.
Осцилляции будут только если энергии нейтрино с одинаковыми импульсами разные! То есть, есть масса!

Период осцилляций

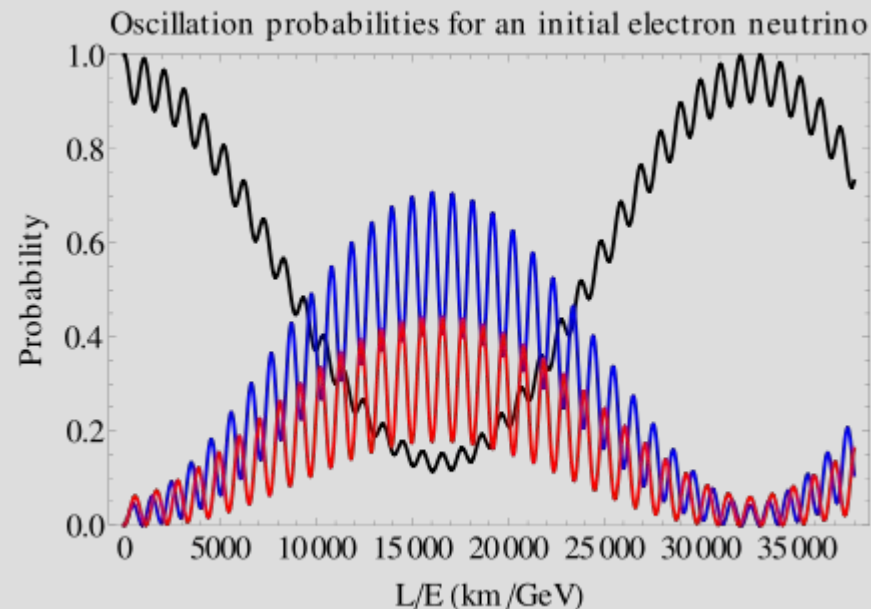
$$w_{\mu} = \sin^4 \Theta + \cos^4 \Theta + \frac{1}{2} \sin^2 2\Theta \cos \frac{(E_2 - E_1)t}{\hbar} = 1 - \sin^2(2\Theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar}$$

$$T = \frac{\hbar}{E_2 - E_1}$$

$$E_{1,2} = \sqrt{(pc)^2 + m^2 c^4} \approx pc + \frac{1}{2} \frac{m^2 c^4}{pc}$$

$$E_2 - E_1 \approx \frac{(m_2^2 - m_1^2) c^4}{2E}$$

$$L = cT = \frac{2E\hbar}{(m_2^2 - m_1^2) c^3}$$



Модельный расчёт вероятности обнаружения мюонного (голубая кривая) и тау-нейтрино (красная) в потоке изначально чисто электронных (черная) нейтрино как функции параметра L/E .



NATIONAL RESEARCH
UNIVERSITY

Майнор
“Мир глазами физиков”
2017-2019

Удачи на итоговом
тестировании!

Наш курс закончился,
но майнор
продолжается...

