

NATIONAL RESEARCH  
UNIVERSITY

# Майнор "Мир глазами физиков"

Весна 2019

Введение в квантовую физику

Лекция 14:

Красивые эксперименты атомной и  
ядерной физики:

Определение возраста Земли;

Виртуальные частицы;

БАК и Бозон Хиггса;

Осцилляции нейтрино

# Часть 1: Миллиард лет тому назад...

# Геологическая датировка

Шкала времен – миллионы и миллиарды лет, радиоуглеродный метод – слишком “быстрый”!

# Геологическая датировка

Шкала времен – миллионы и миллиарды лет, радиоуглеродный метод – слишком “быстрый”!

Простейшее: накопление гелия (Резерфорд) и аргона-40 в минералах.

Практически используется калий-аргоновый метод, в том числе на марсоходе (<https://mars.nasa.gov/news/nasa-curiosity-first-mars-age-measurement-and-human-exploration-help/>, результат: возраст пород от 3.9 до 4.6 млрд.лет)

калий-40 (период полураспада 1.248 млрд.лет) с вероятностью 11% распадается в аргон-40

# Рубидий-стронциевый метод

Рубидий-87 распадается в стронций-87 (48.81 млрд.лет). Стронций-87 и стронций-86 стабильные изотопы.

Рубидий и стронций соседи в таблице Менделеева (щелочной и редкоземельный), встречаются вместе в разных минералах

На времени формирования горной породы из расплава проявляется кристаллизационное фракционирование (рубидиевые соединения кристаллизуются несколько дольше), изотопное фракционирование для стронция не существенно.

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left( 1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

$${}^{87}\text{Rb} = {}^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Исходные концентрации неизвестны, но отношение рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное

# Рубидий

Рубидий-87 и стронций-86 стабильны

Рубидий и стронций встречаются в природе

На временах кристаллизации и кристаллизации не существует

$$\frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} = \left( \frac{{}^{87}\text{Sr}}{{}^{86}\text{Sr}} \right)^{(0)} + \frac{{}^{87}\text{Rb}}{{}^{86}\text{Sr}} \left( 2^{t/T_{1/2}} - 1 \right)$$

↑  
измеряем сейчас

←  
постоянно в серии образцов из-за отсутствия изотопного фракционирования

Построенная по серии (с разным *стартовым* составом рубидия и стронция) зависимость должна быть прямой!!!

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^{(0)} + {}^{87}\text{Rb}^{(0)} \left( 1 - 2^{-t/T_{1/2}} \right)$$

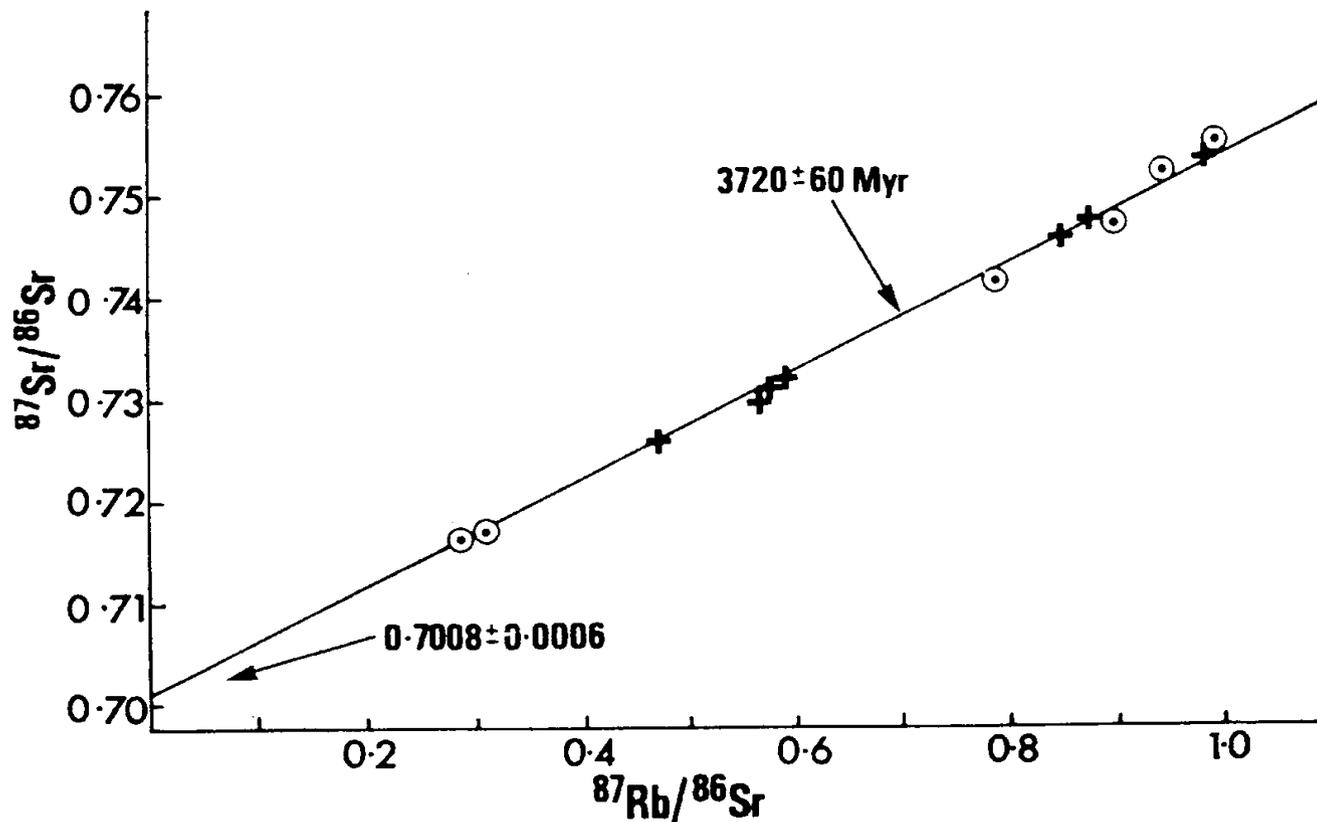
$${}^{87}\text{Rb} = {}^{87}\text{Rb}^{(0)} 2^{-t/T_{1/2}}$$

Исходные концентрации неизвестны, но отношение рубидия и стронция в разных частях формирующейся породы было разное

# Примеры применения

described elsewhere<sup>8</sup>. Rb/Sr ratios were determined by a precise X-ray fluorescence technique<sup>9</sup>. The decay constant of  $^{87}\text{Rb}$  was taken as  $1.39 \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1}$ .

**Fig. 2** Rb–Sr whole rock isochron plot for Amitsoq gneisses from Isua.  $\odot$ , Gneissic veins cutting supracrustals (Group 1, Table 1) and Gneisses far away from contact with supracrustals (Group 2, Table 1). +, Gneisses from near contact with supracrustals (for full details and analytical data, see ref. 6).



# Ещё примеры (Sm-Nd)

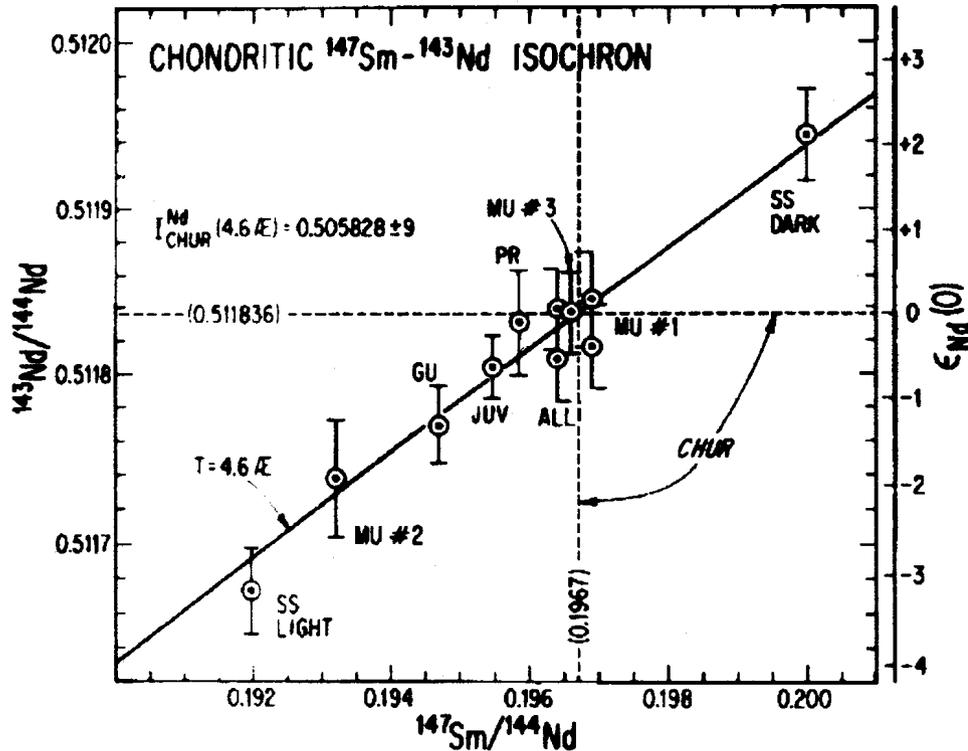
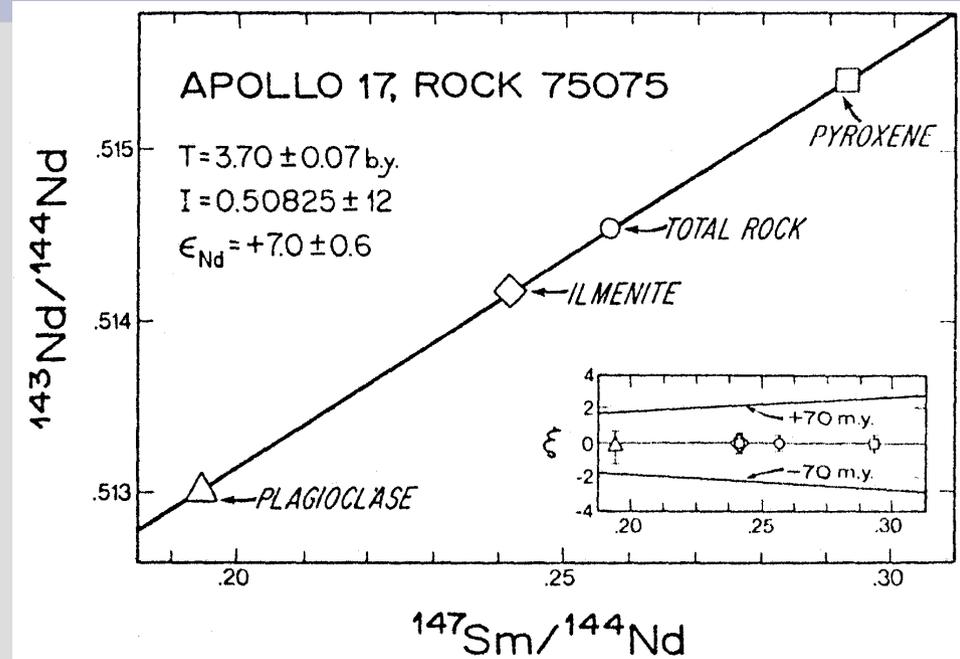


Fig. 2. Sm-Nd evolution diagram for chondrite samples and Juvinas. A reference line with a slope of 4.6 AE is shown. The dashed lines represent the new values selected for average chondrites (CHUR).

Jacobsen S.B., Wasserburg G.J., Sm-Nd isotopic evolution of chondrites, Earth and Planetary Science Letters, 50, 139 (1980)



Mineral isochron for lunar basalt 75075 (Lugmair et al. 1975)

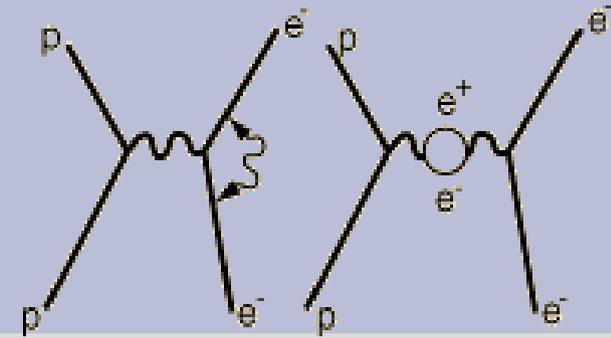
Ю.А.Костицын, Геохимия изотопов и геохронология., [http://wiki.web.ru/wiki/Геологический\\_факультет\\_МГУ:Геохимия\\_изотопов\\_и\\_геохронология](http://wiki.web.ru/wiki/Геологический_факультет_МГУ:Геохимия_изотопов_и_геохронология)

# Часть 2. Реальность виртуальных частиц



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

# Сдвиг Лэмба



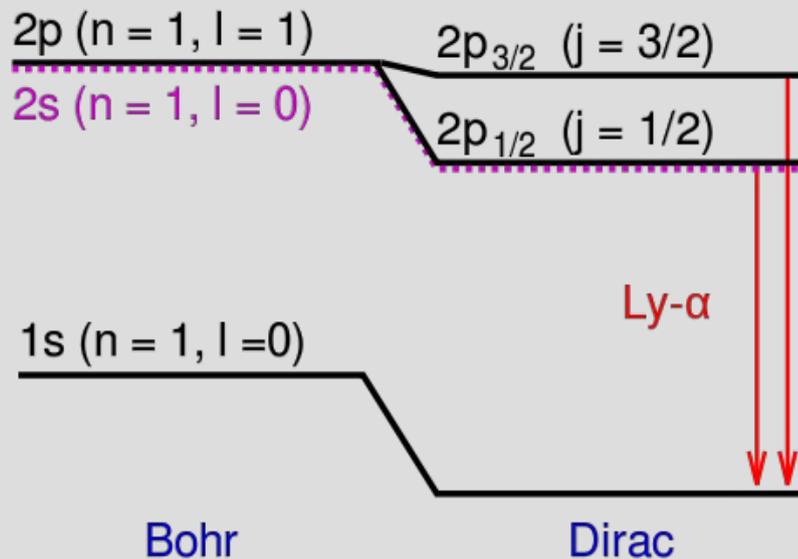
Атом водорода  $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

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)

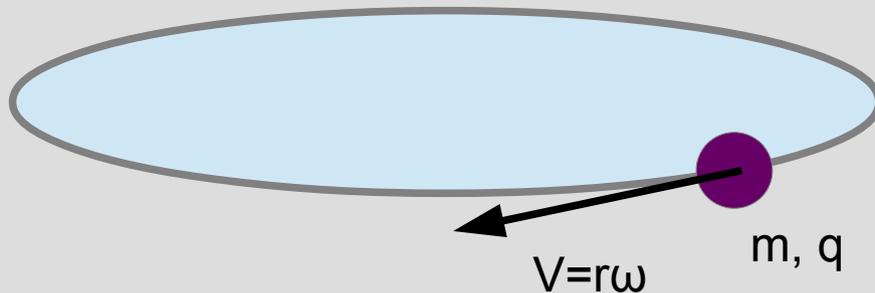
$$E = E(n, j) \Rightarrow E(2^2 S_{1/2}) = E(2^2 P_{1/2})$$



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

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

# 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

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

# 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*

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

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

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

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

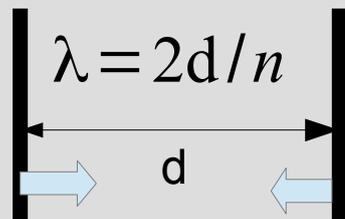
$$a_{\mu}^m = 0,00116591804 (51)$$

Одна из самых точных измеряемых и вычисляемых величин в физике

# Эффект Казимира



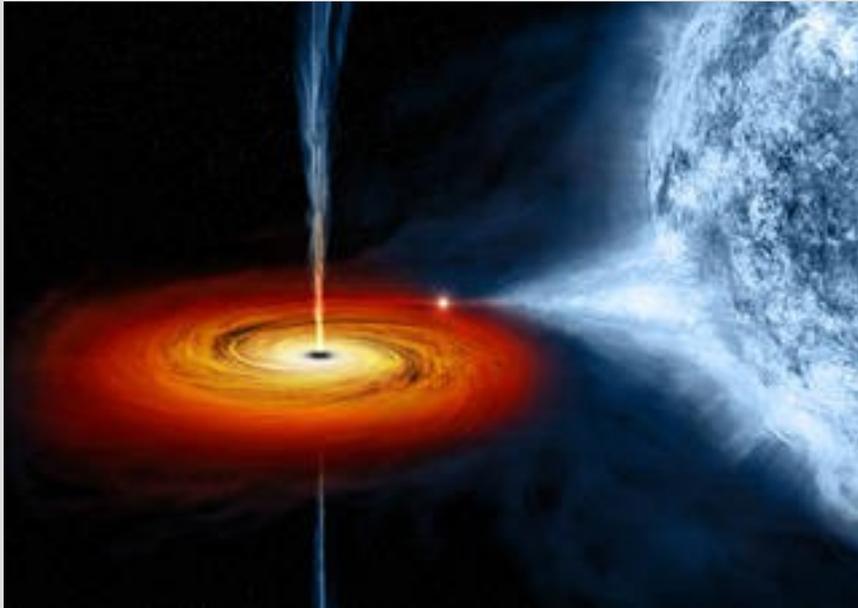
И. К. Айвазовский «Смотр Черноморского флота в 1849 году»



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

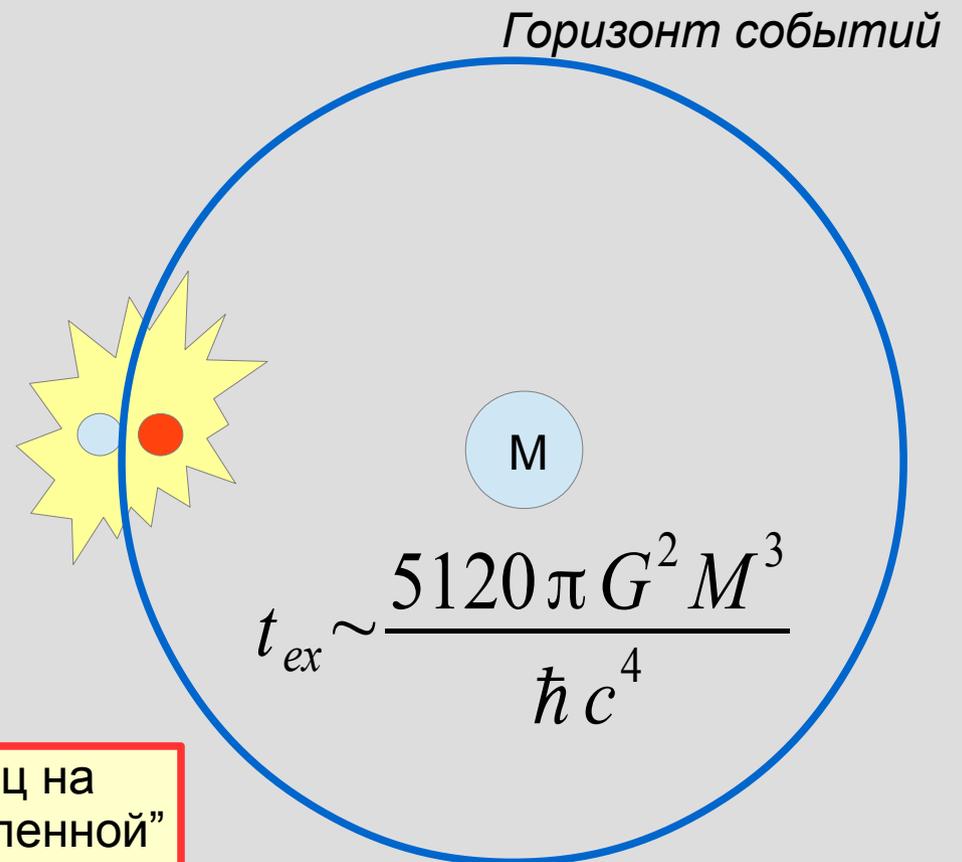
$$1 \text{ кв. см} \& 1 \text{ мкм} \implies 10^{-8} \text{ Н}$$

# 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)



# Часть 3. **Strike hard and true**

# Немного истории. Камера Вильсона



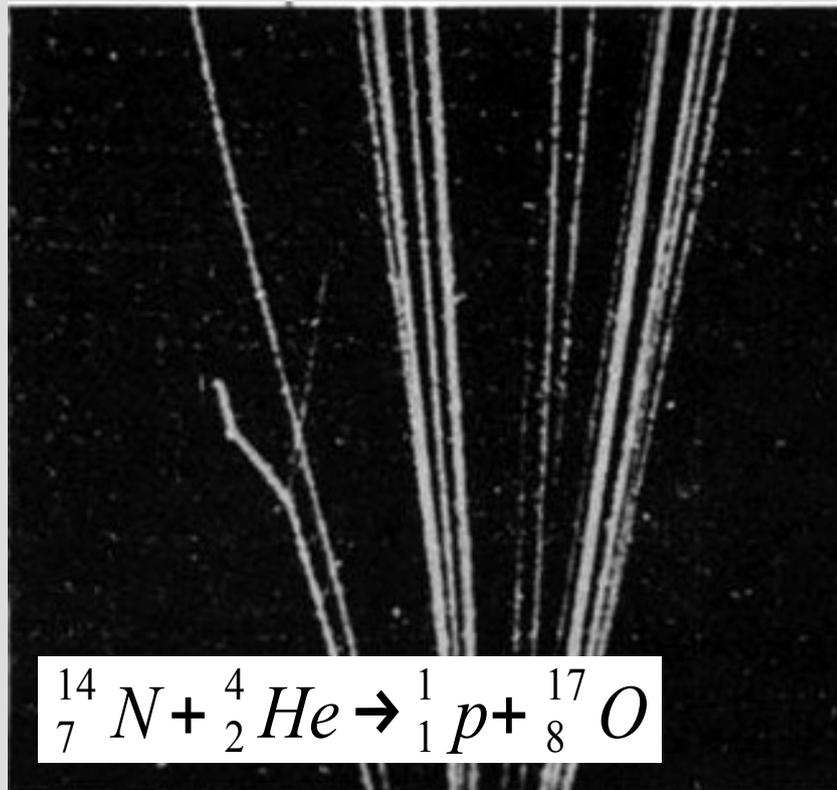
Wilson Chamber Demo, <http://www.darvill.clara.net/mydown.htm>



Сделанная Ч.Вильсоном камера Вильсона. Из экспозиции музея Кавендишской лаборатории.

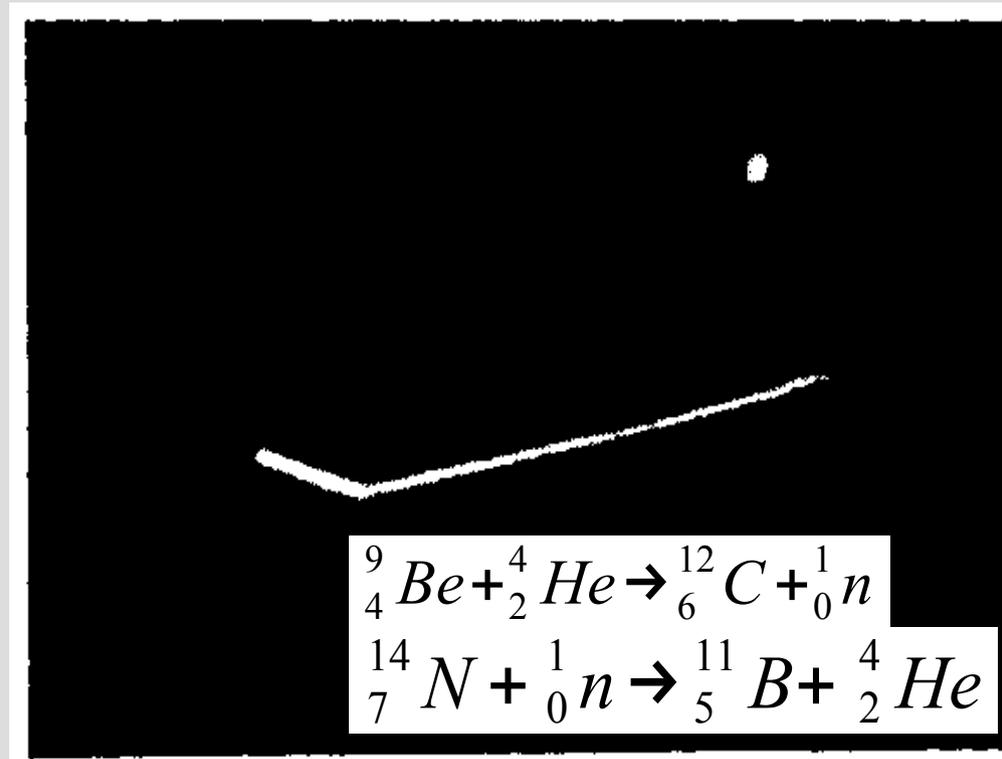
Memorial museum of Cavendish Laboratory, Wilson Chamber Discovery, <http://chambrebrouillard.wifeo.com/history-and-achievements.php>

# Открытие протона и нейтрона



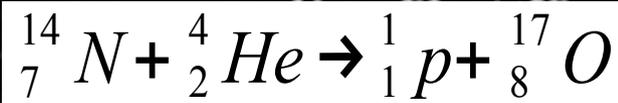
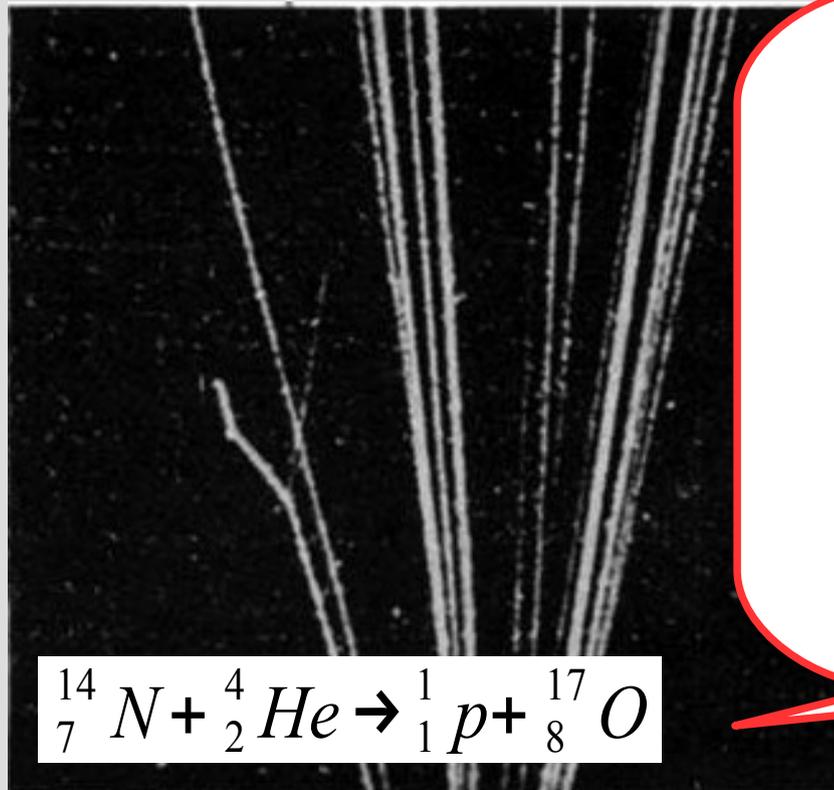
Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)



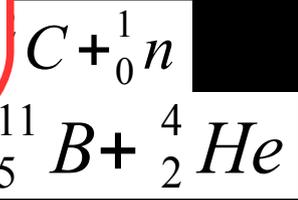
Треки частиц, образовавшихся при расщеплении азота нейтроном. Трек нейтрального нейтрона не виден. Из нобелевской лекции Чедвика

# Открытие протона и нейтрона



один год,  
23000 фотографий,  
400000 треков  
частиц

**ВОСЕМЬ**  
“удачных” событий



Треки частиц, образовавшихся при расщеплении азота нейтроном. Трек нейтрального нейтрона не виден. Из нобелевской лекции Чедвика

Трек альфа-частицы при взаимодействии с атомом азота. Источник частиц снизу по фотографии, наблюдается "развилка" на самом левом треке.

P. M. S. Blackett, The Ejection of Protons from Nitrogen Nuclei, Photographed by the Wilson Method, Proc. R. Soc. Lond. A, 107, 349 (1925)

# Ускорители: зачем?

$E = m c^2$  для получения новых тяжелых частиц нужен большой «запас» энергии

для быстрого накопления статистики необходима большая «светимость»: большое количество столкновений частиц в единицу времени

# SLAC (1966-...),

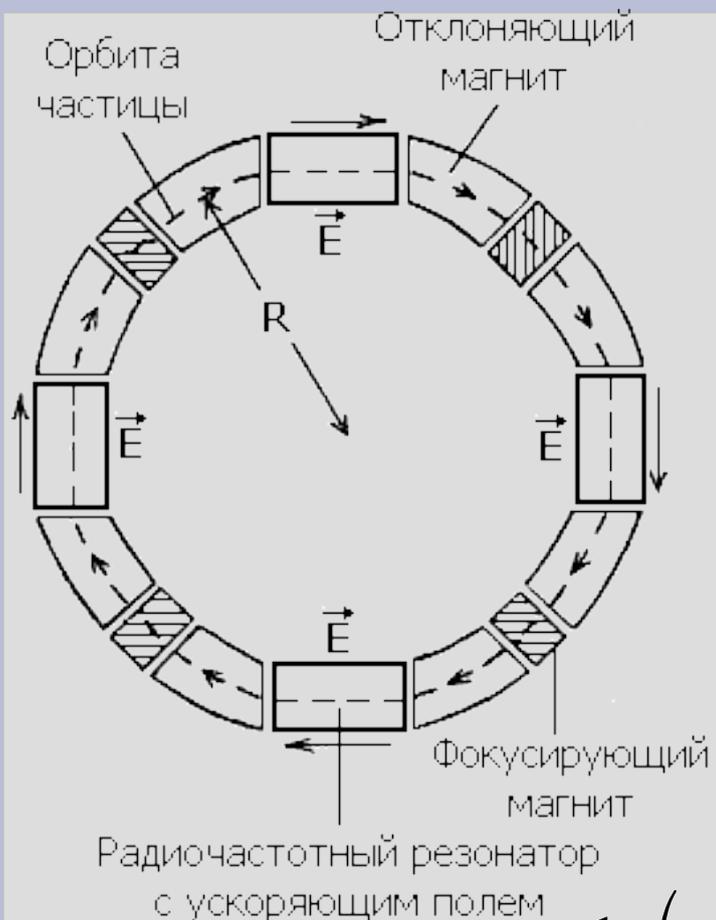


Вид с воздуха на комплекс зданий Стэнфордского линейного ускорителя. Детекторный комплекс справа. Сам канал ускорителя находится на глубине 10 метров под землёй.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford\\_Linear\\_Accelerator\\_Center](http://en.wikipedia.org/wiki/Stanford_Linear_Accelerator_Center)

- до 2017 года – самое длинное прямое здание (2 мили)
- Нобелевские премии: с-кварк (1976), кварковая структура протона и нейтрона (1990), тау-лептон (1995)
- 50 ГэВ энергия пучка, до 90 ГэВ в с.ц.м. в режиме коллайдера (1987-1998)

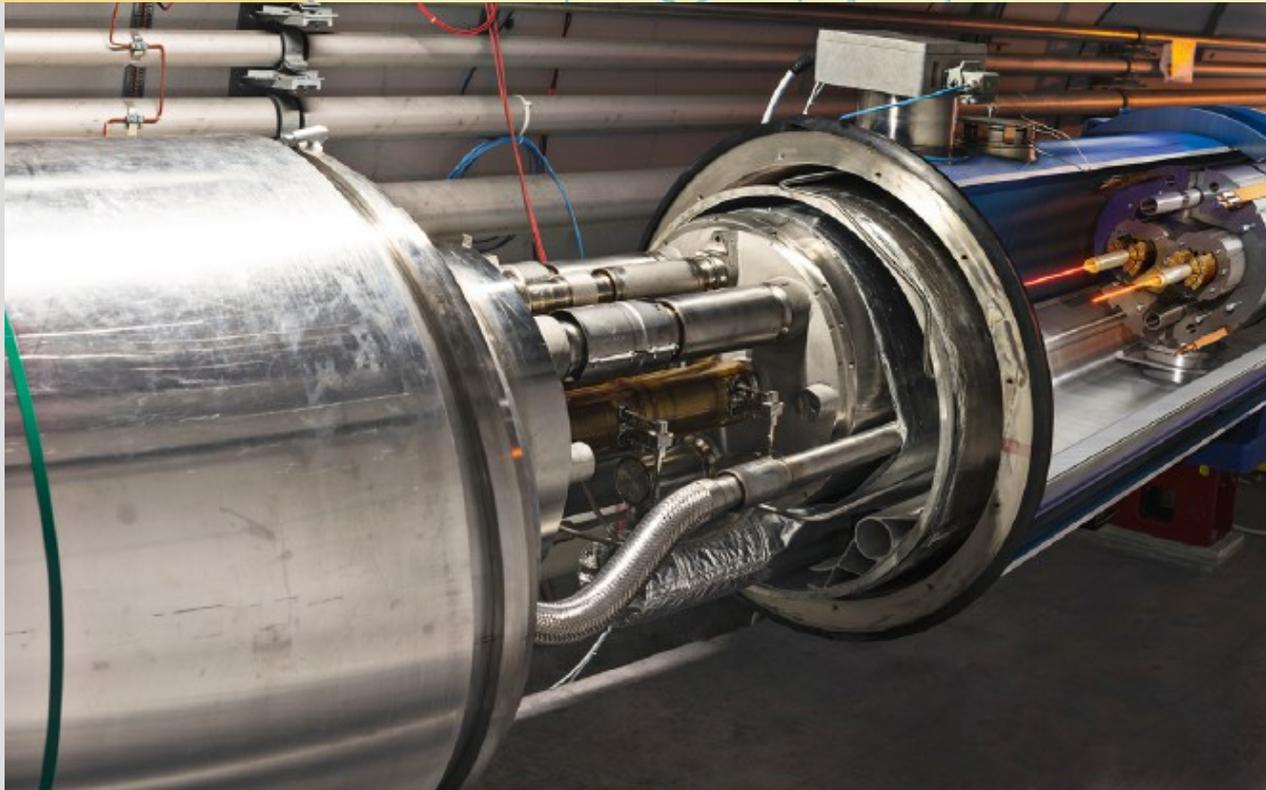
# Синхротроны



$$P \propto \frac{1}{R^2} \left( \frac{E}{mc^2} \right)^2$$

- Движение по фиксированной траектории
- Магнитное поле и частота/фаза ускоряющего поля подстраиваются по мере роста энергии
- Принципиально работает импульсами (bunch)
- Частицы и античастицы можно разогнать одновременно в противоположных направлениях
- Одно из ограничений по энергии: синхротронное излучение (100-200 ГэВ для электронов)

# БАК



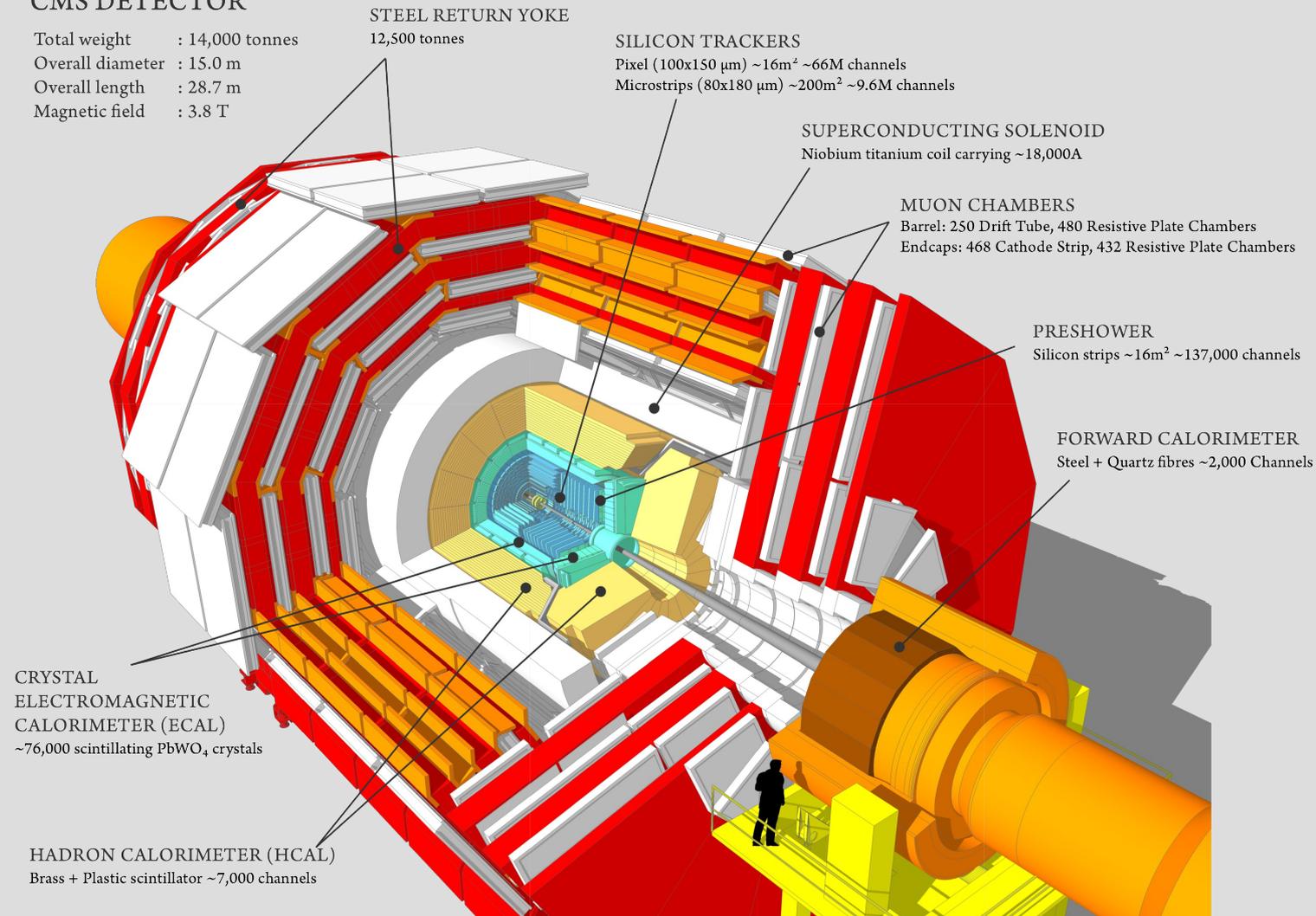
- длина кольца 27 км
- 14 ТэВ в p-p столкновениях
- 3 ТэВ/нуклон в Pb-Pb столкновениях

# Современные детекторы (БАК)



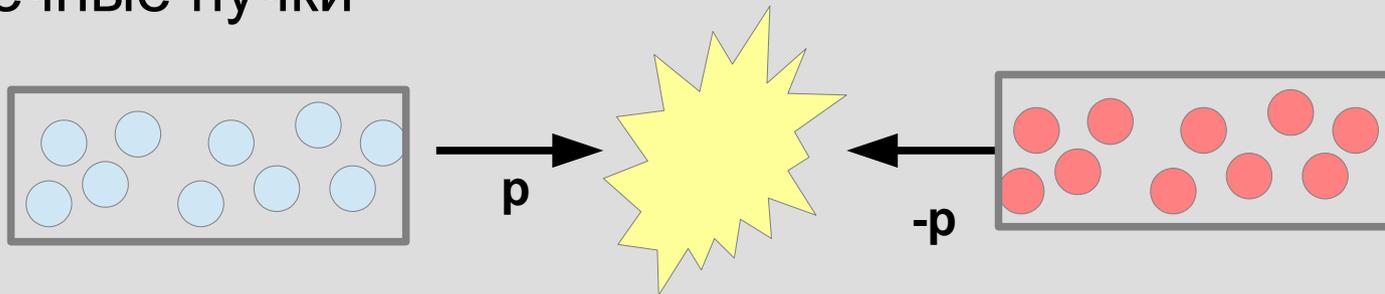
## CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes  
Overall diameter : 15.0 m  
Overall length : 28.7 m  
Magnetic field : 3.8 T



# Сечение реакции

Встречные пучки



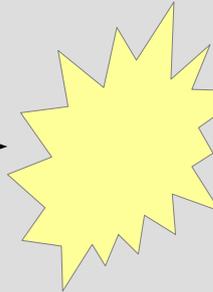
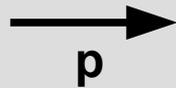
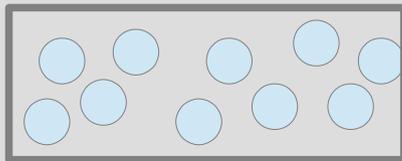
Число реакций  
интересующего  
типа:

$$\propto \frac{N_A \times N_B}{A} \sigma$$

$N_{A,B}$  – число частиц в импульсе,  
 $A$  – сечение пучка

# Сечение реакции

Встречные пучки



«Наблюдение» частицы  
= наблюдение роста  
сечения реакции при  
некоторой энергии  
сталкивающихся пучков

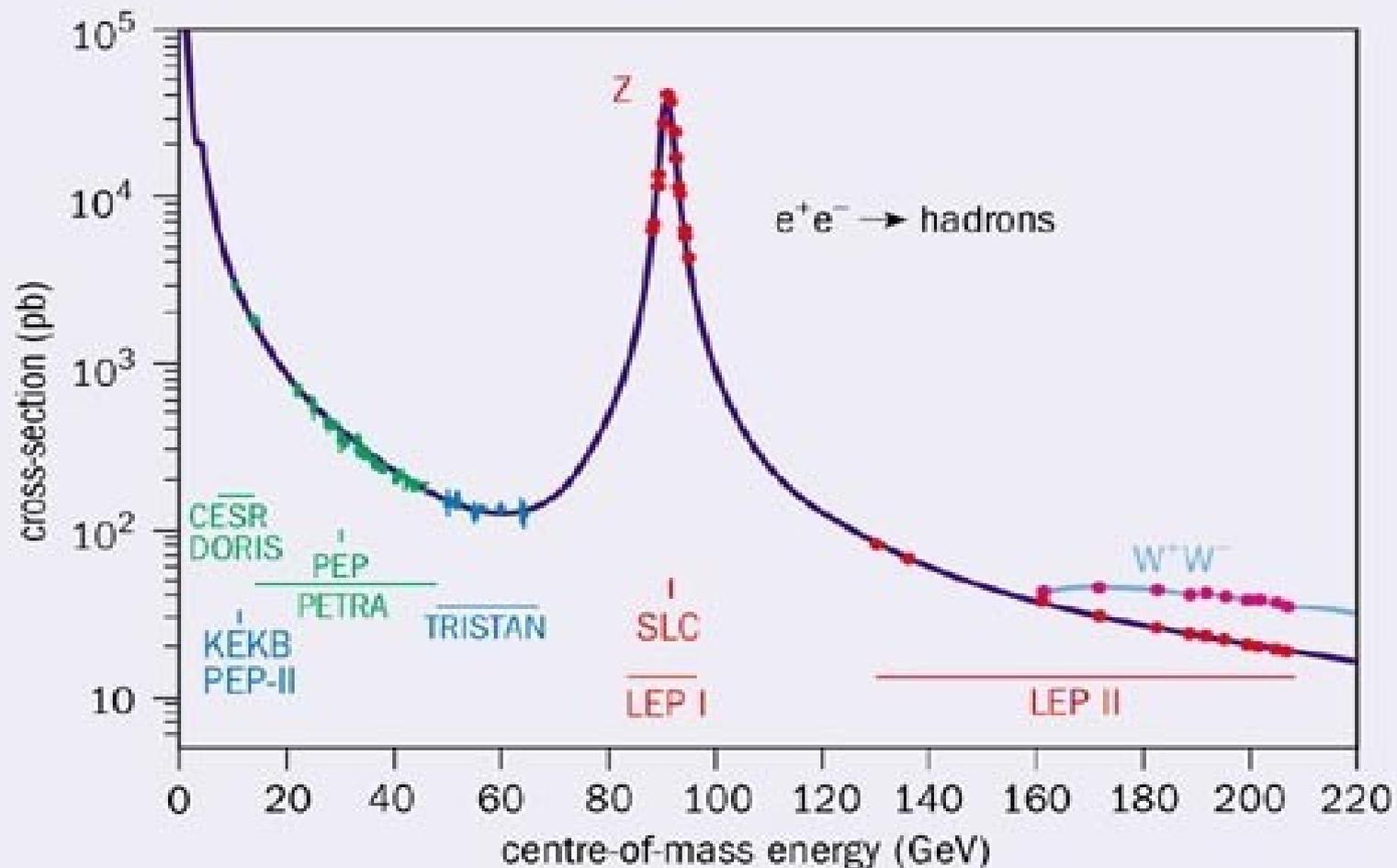
Число реакций  
интересующего  
типа:

$$\propto \frac{N_A \times N_B}{A} \sigma$$

$N_{A,B}$  – число частиц в импульсе,  
 $A$  – сечение пучка

# Наблюдение $W$ и $Z$ бозонов в эксперименте.

<https://www.quora.com/What-is-the-evidence-we-get-for-W-Z-bosons>



# 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

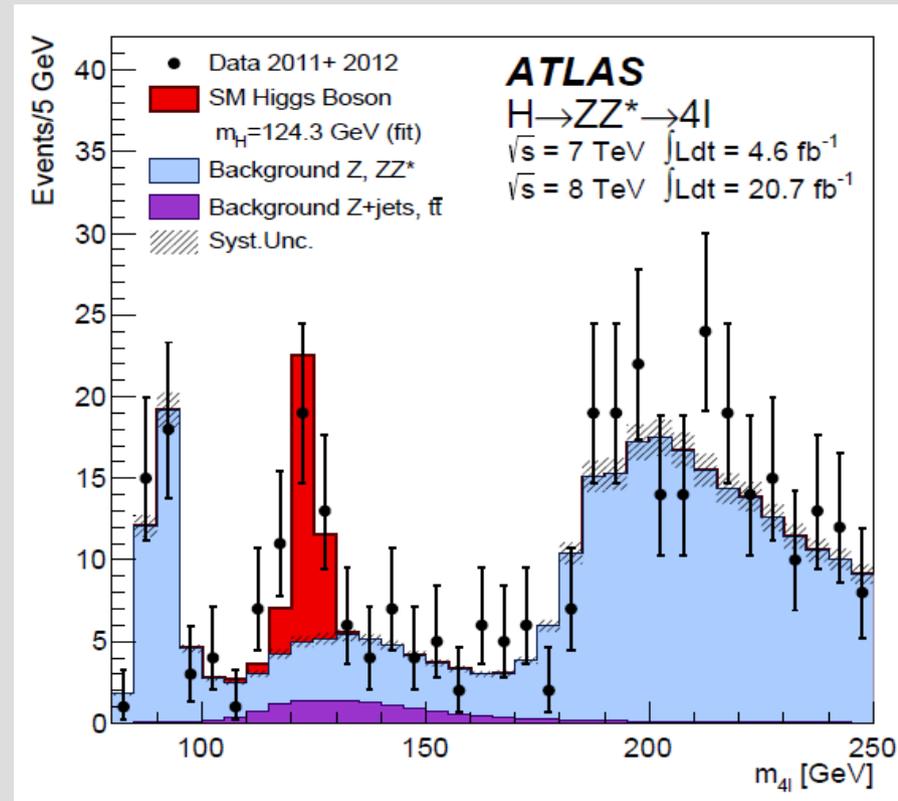
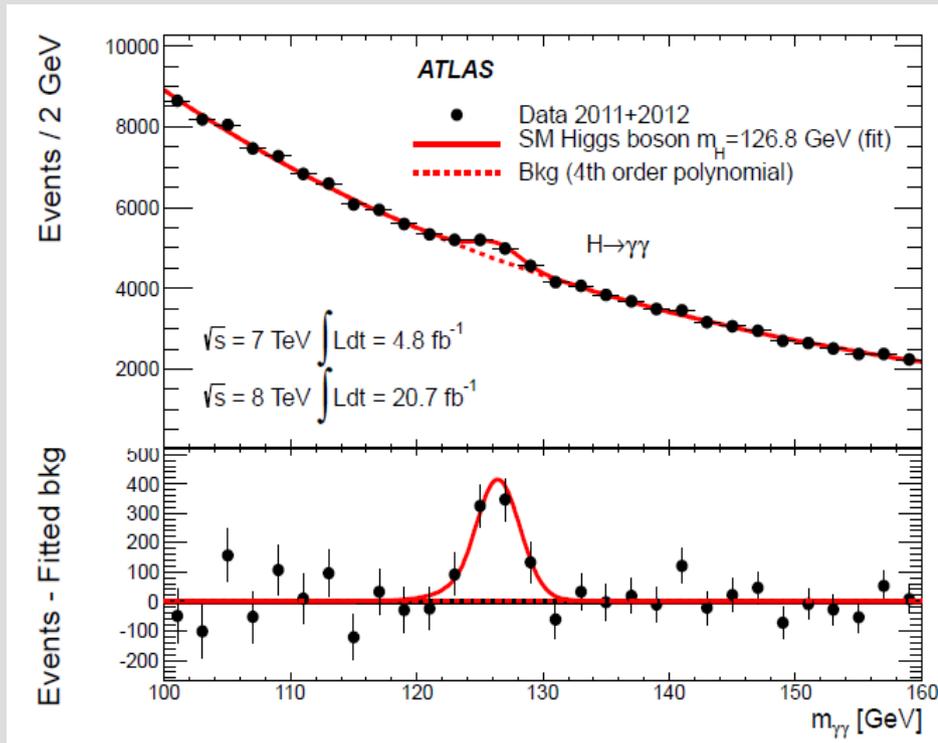
Упрощая: роль взаимодействия Хиггса (взаимодействия с некоторым полем) – появление конечной “цены” создания частицы.

# 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%             |

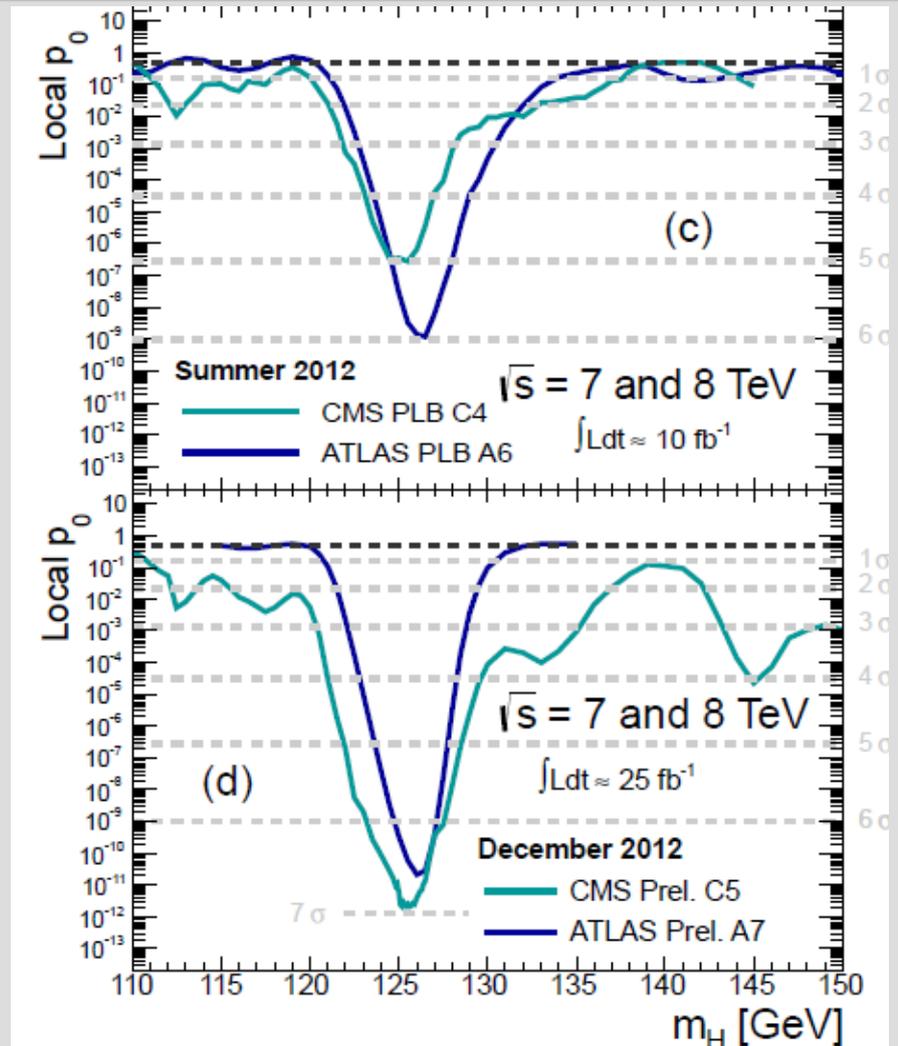
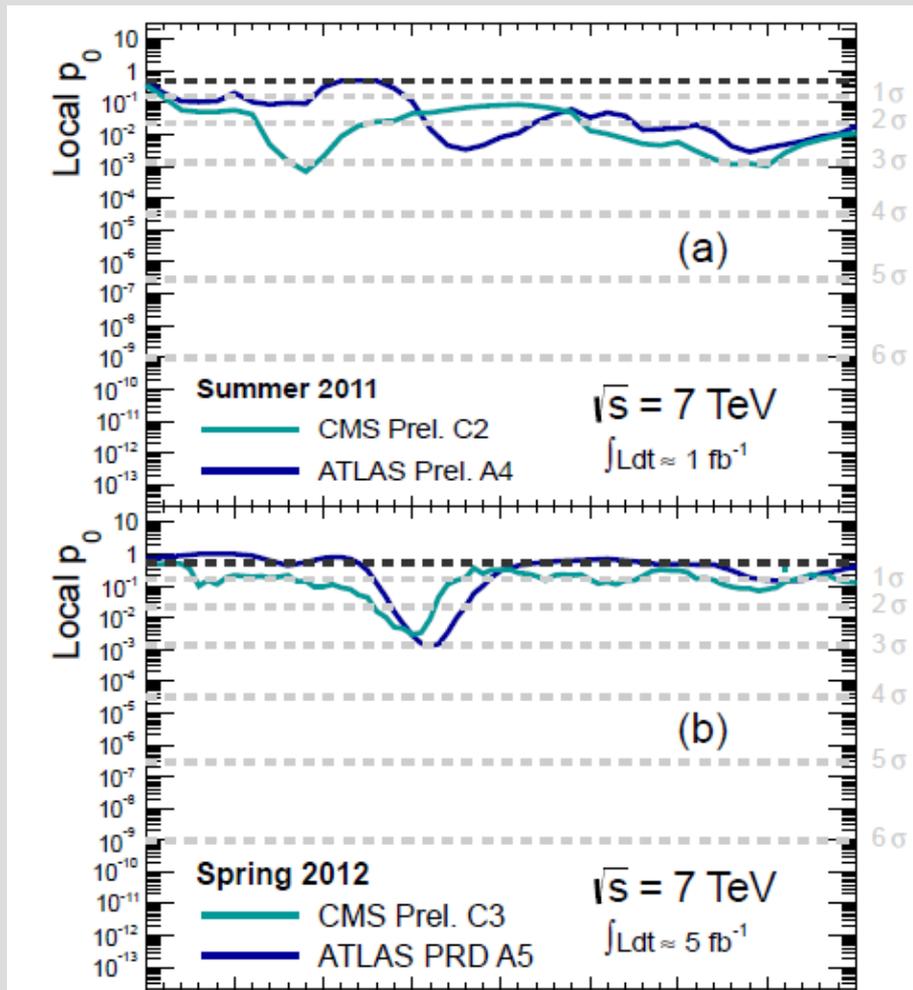
точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада.

# Эксперимент...



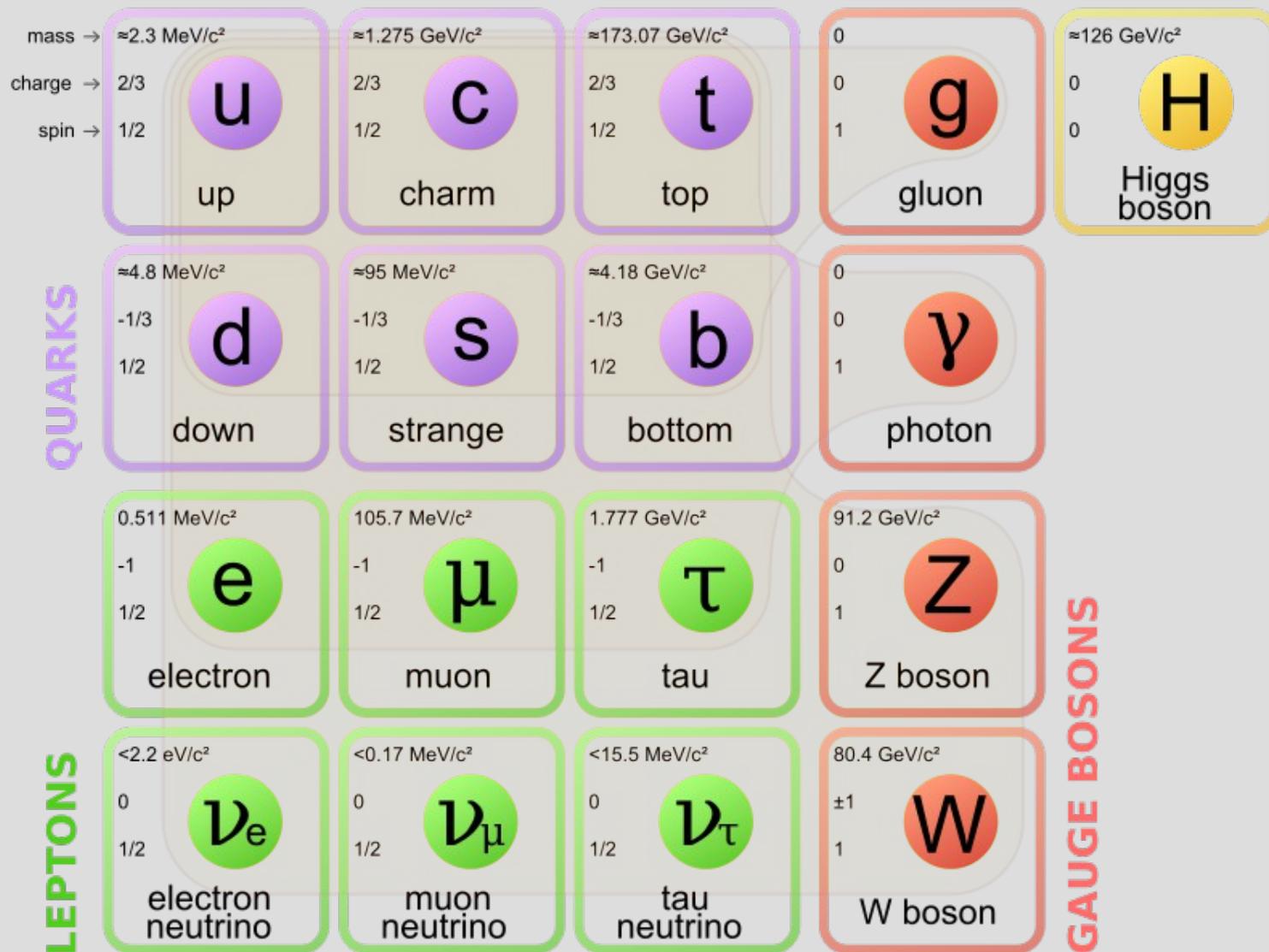
Слева: статистика двухфотонных распадов бозона Хиггса. Справа: статистика четырёхлептонных распадов бозона Хиггса.

# Накопление статистики

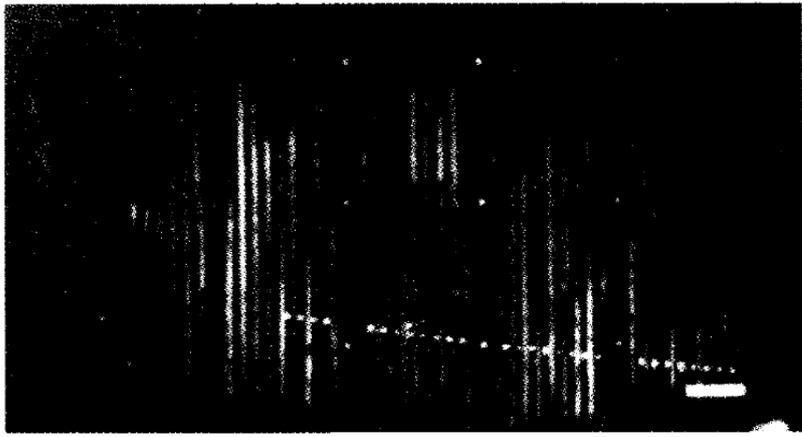


Накопление статистики распадов бозона Хиггса по мере развития экспериментов на Большом адронном коллайдере в лета 2011 по декабрь 2012 года.

# Стандартная модель

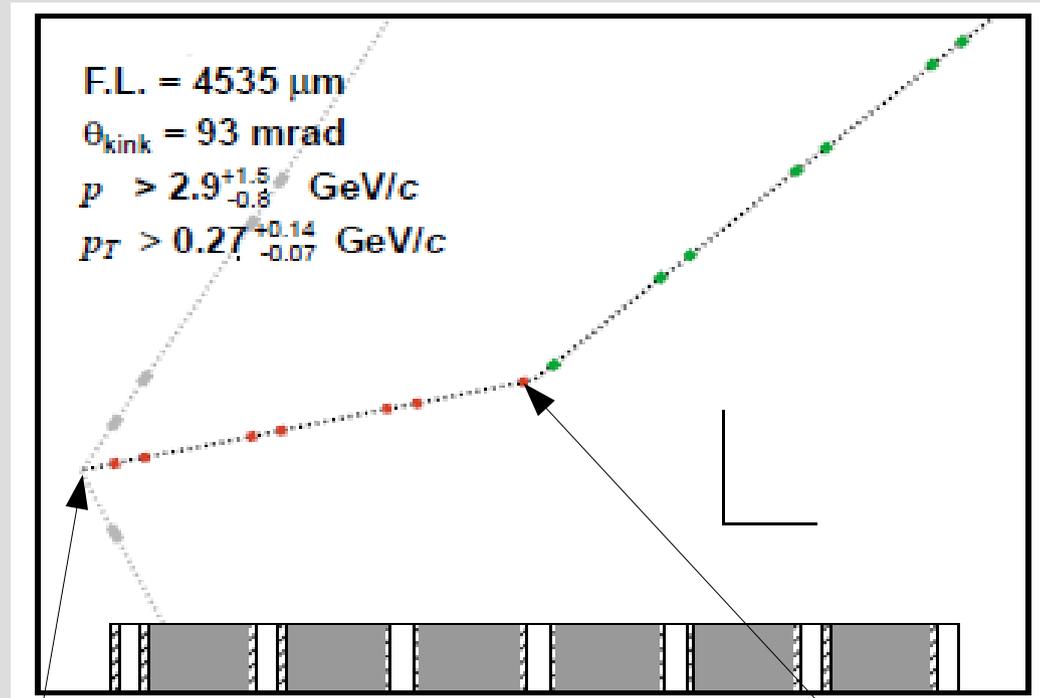


# Лептоны



Возникновение мюона в искровой камере при поглощении мюонного нейтрино (почти горизонтальный трек). Вертикальные полосы - пластины искровой камеры. Из Нобелевской лекции Шварца

мюон: ~100 МэВ, 2 мксек  
таон: ~1800 МэВ, 0.3 псек



<https://arxiv.org/ftp/hep-ex/papers/0012/0012035.pdf>

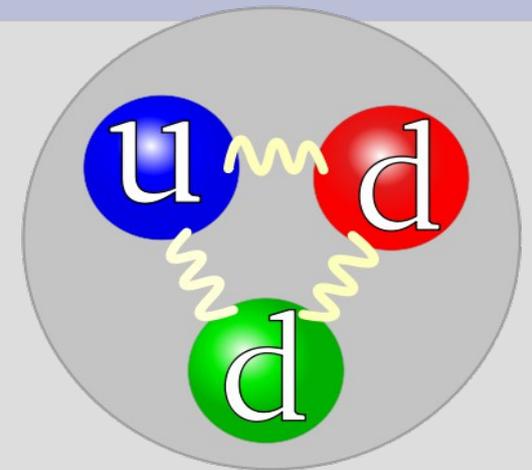
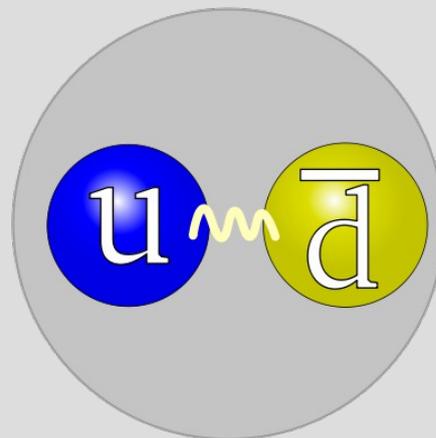
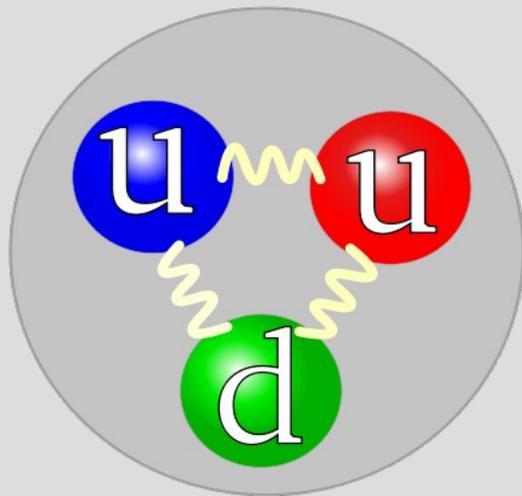


распад  
тау-  
лептона

# Кварки, внутренняя структура нуклонов

Экспериментальные факты:

- магнитный момент нейтрона
- g-фактор протона 5.585694713(46), а не 2
- сечения рассеяния на высоких энергиях
- все тяжелые частицы описываются в кварковой модели



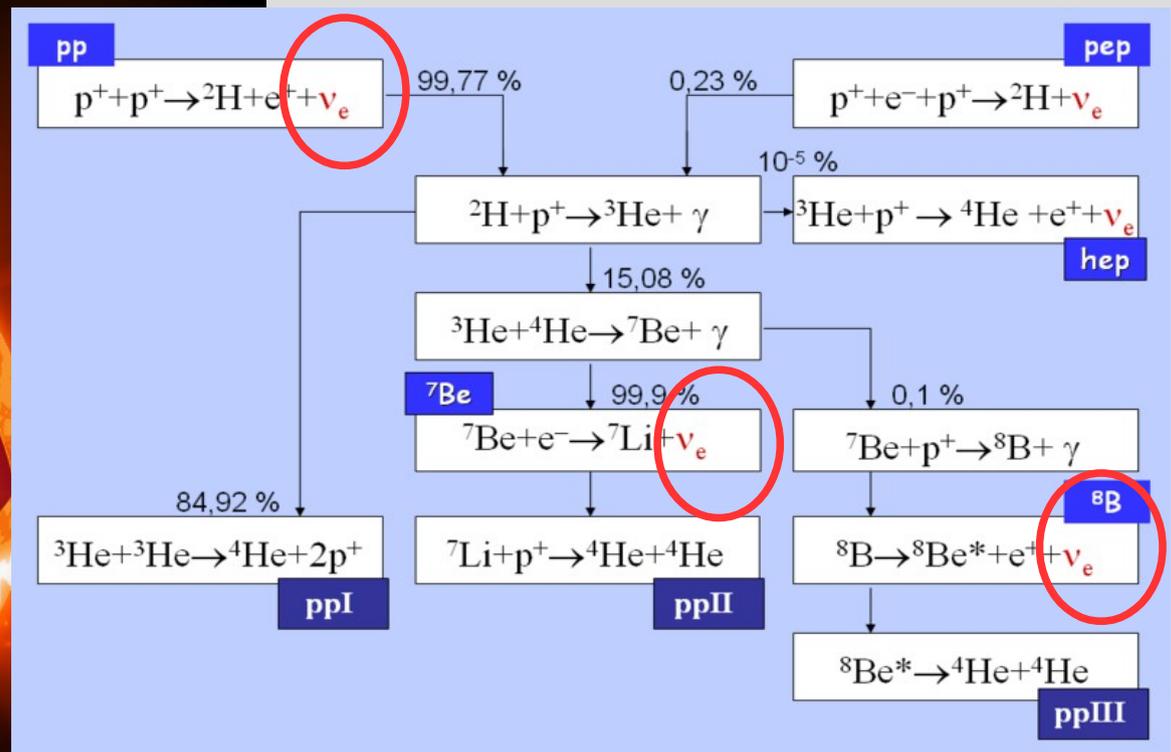
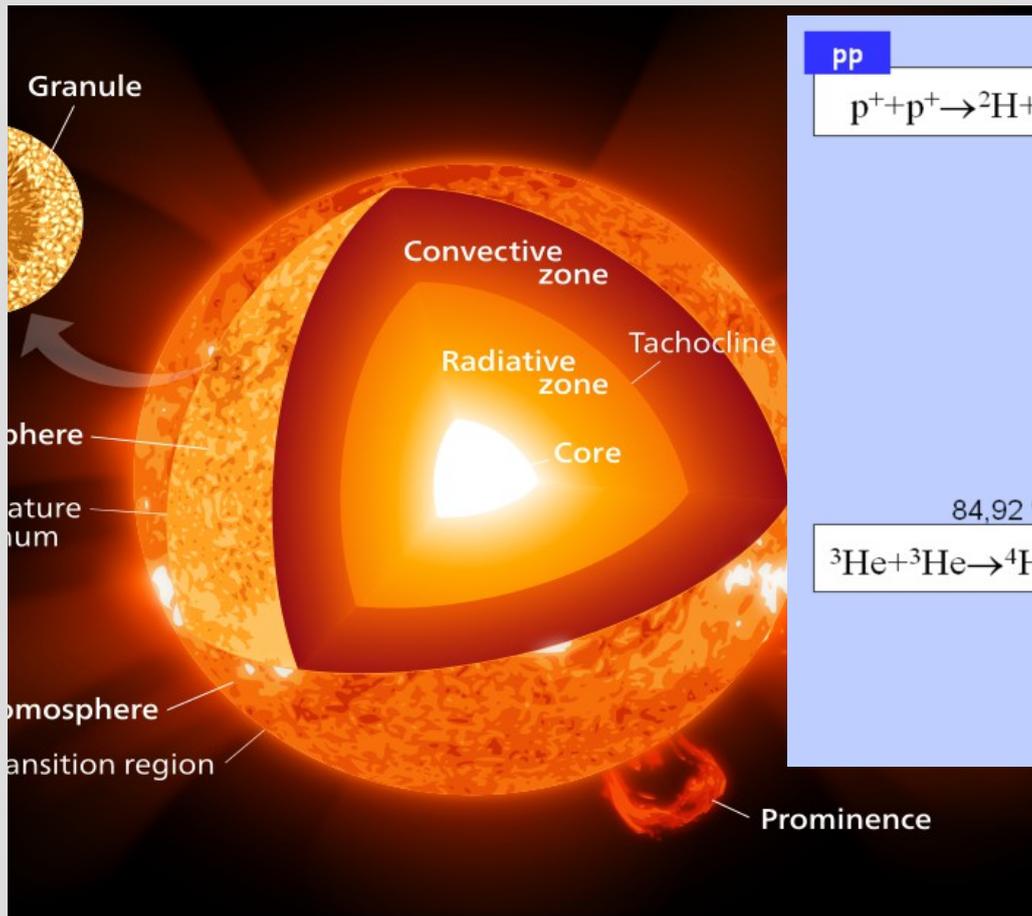
Два кварка (кварк+антикварк) – мезоны

Три кварка – барионы

Экзотические, короткоживущие, но обнаруженные в экспериментах на ускорителях тетракварки и пентакварки

# Часть 4. Пусть всегда светит Солнце

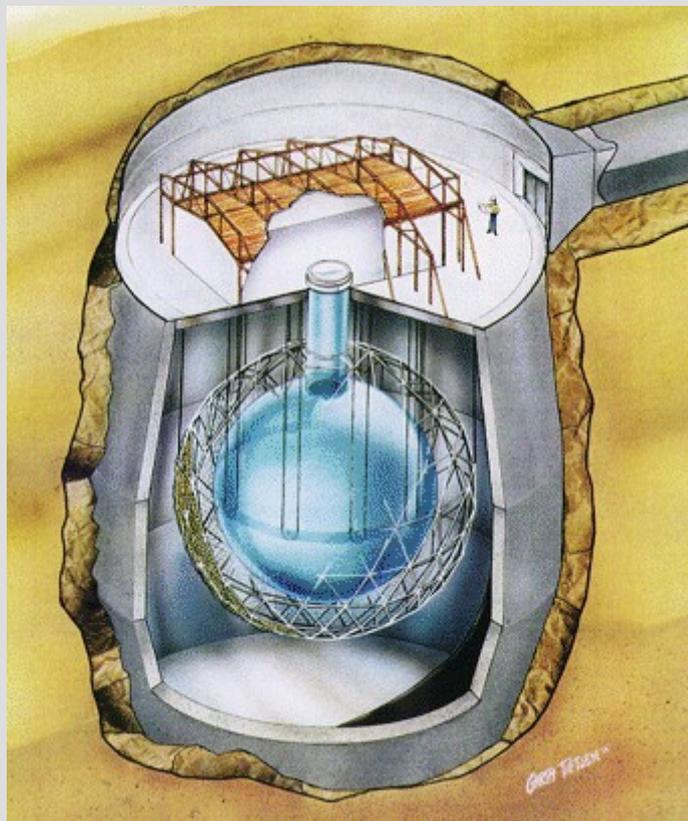
# Проблема солнечных нейтрино и осцилляции нейтрино



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

# Обнаружение всех нейтрино (Sudbury)

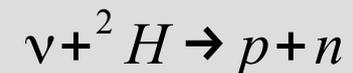
<https://www.sno.phy.queensu.ca/>



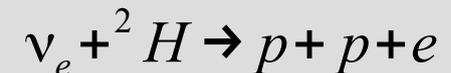
Детектор с тяжелой водой, три канала детектирования нейтрино:

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

2) нейтральный  
**все типы нейтрино**

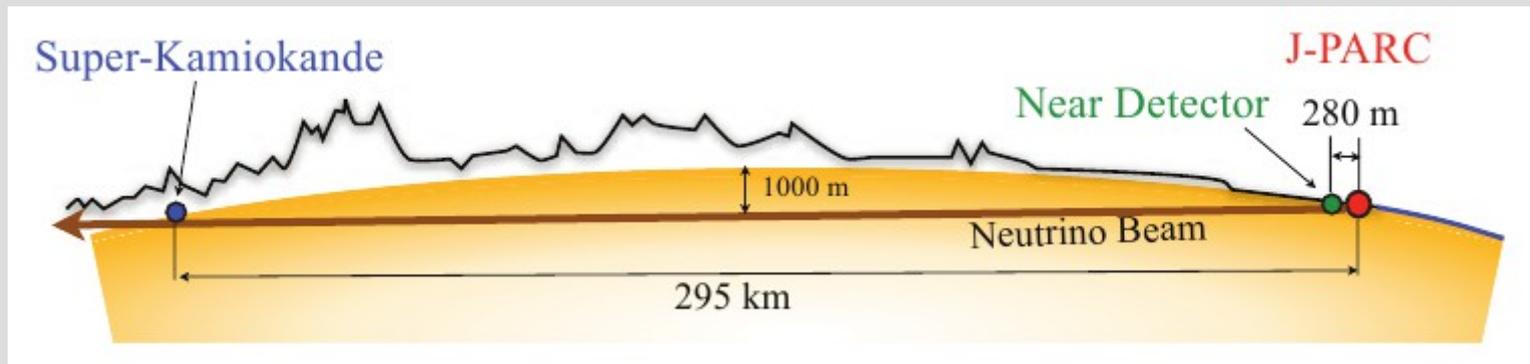


3) заряженный  
**только электронное нейтрино**

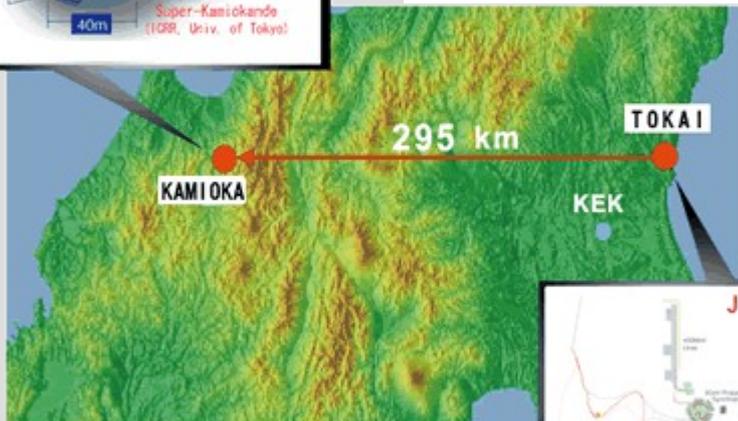
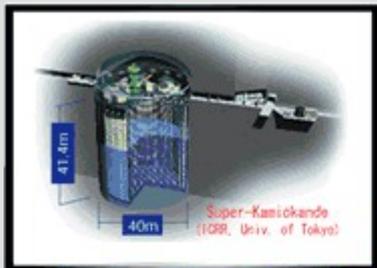


# Ускорительные эксперименты по нейтринным осцилляциям

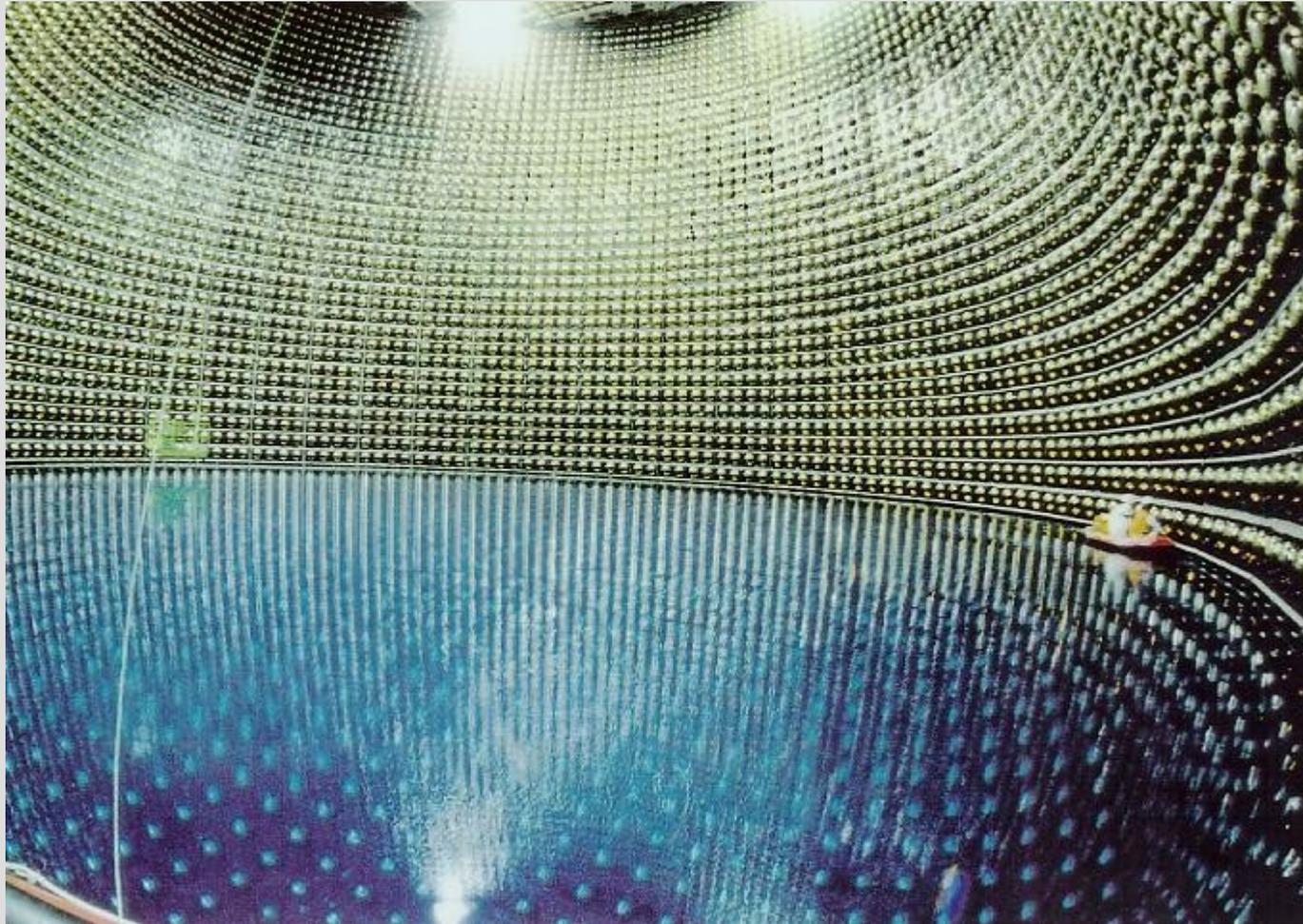
- MINOS: источник Фермилаб, детектор в Миннесоте (735 км)
- T2K: источник Токай, детектор в Камиоканде (295 км)



Направление пучка нейтрино в эксперименте T2K

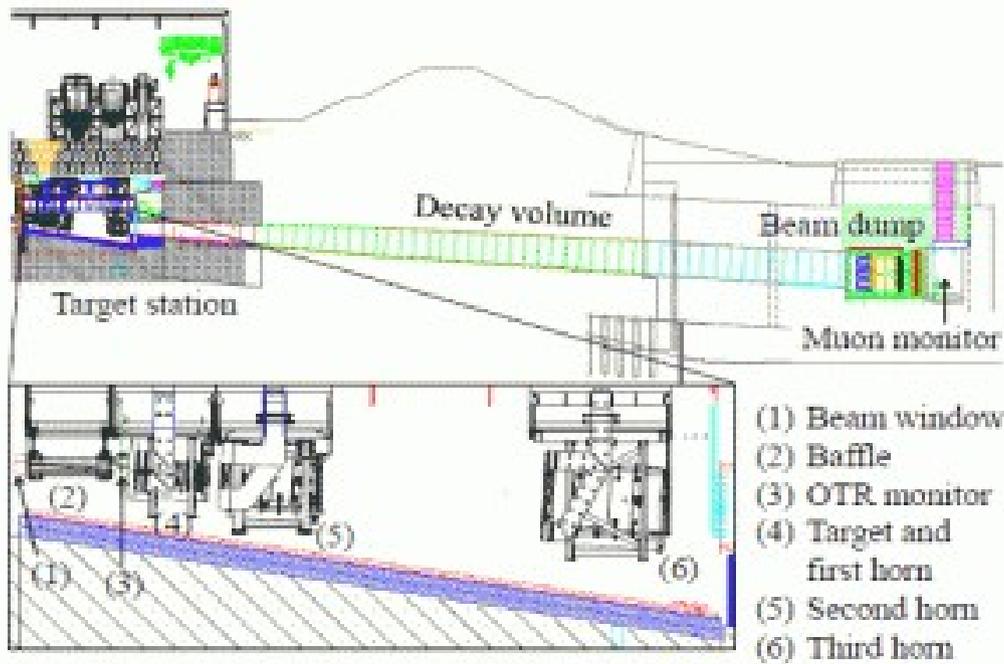


# Детектор Супер-Камиоканде



40 метров  
50,000 тонн ЧИСТОЙ  
ВОДЫ  
~10,000 ФЭУ

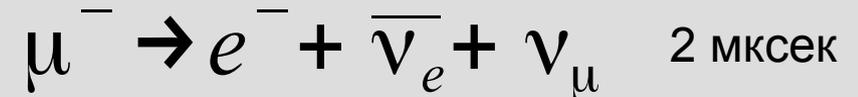
# Получение нейтринного пучка



протонный ускоритель бомбардирует мишень и получаются пионы



пионы распадаются в движении, поток нейтрино по ходу пучка

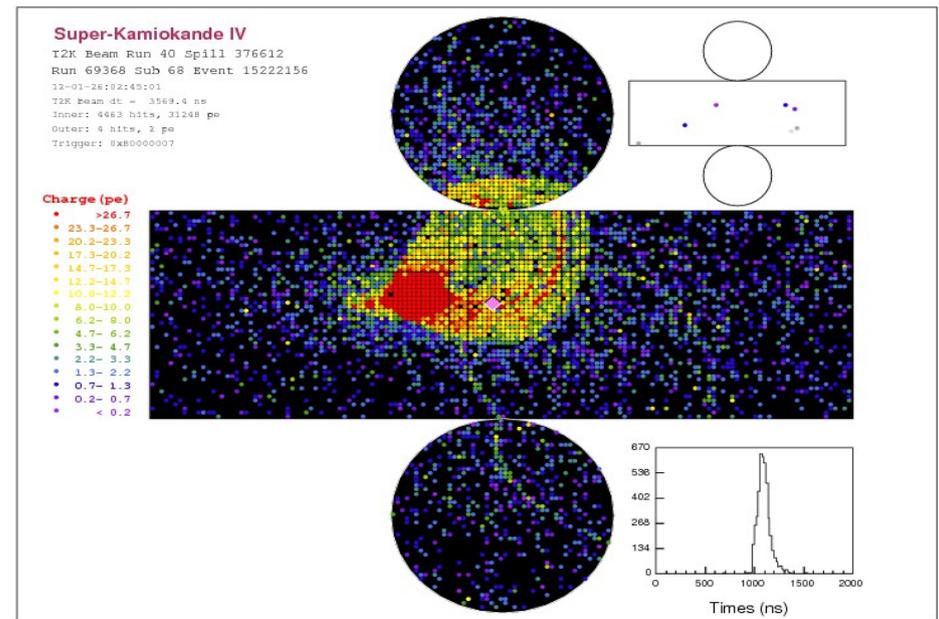
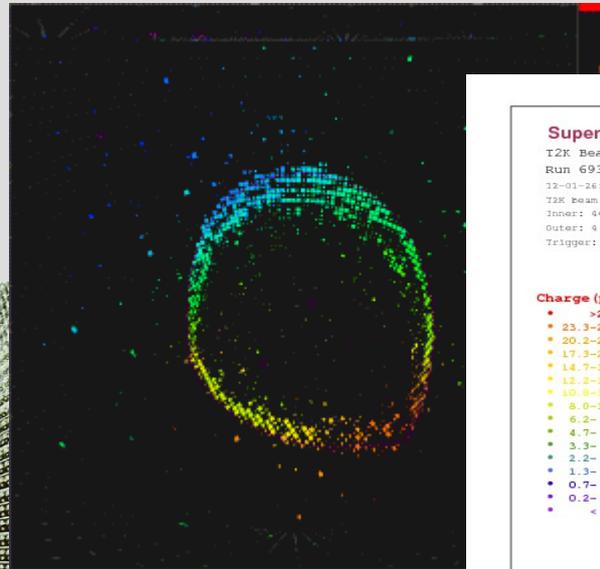
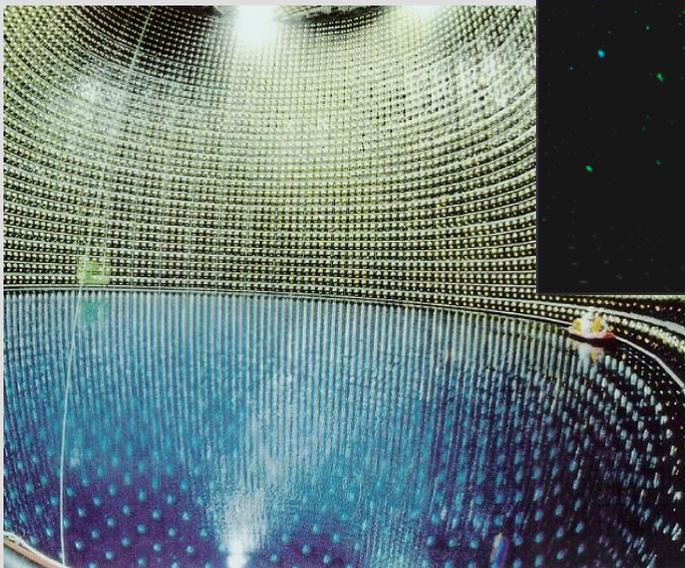


мюоны распадаются после остановки, поток нейтрино изотропен

# 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

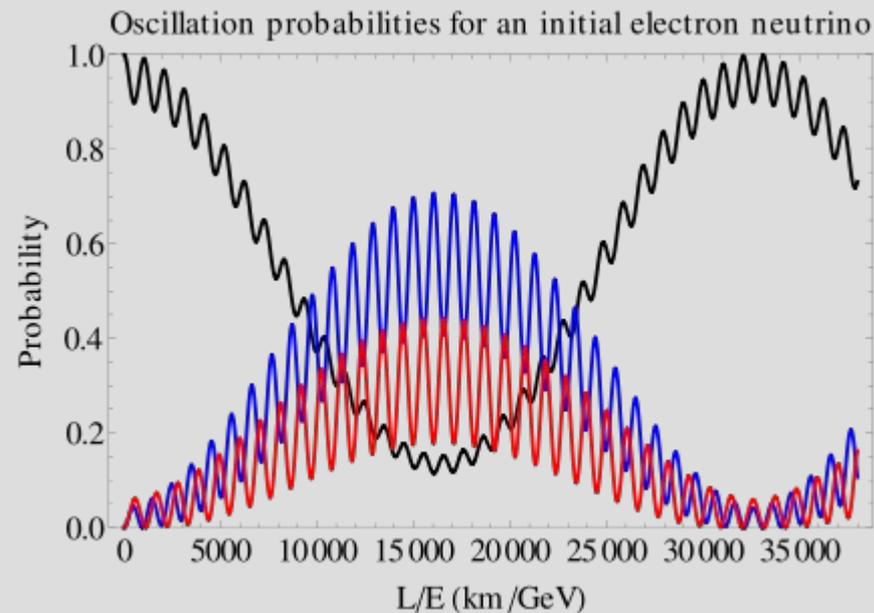
$$w_{\mu} = \sin^4 \Theta + \cos^4 \Theta + \frac{1}{2} \sin^2 2\Theta \cos \frac{(E_2 - E_1)t}{\hbar} = 1 - \sin^2(2\Theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2\hbar}$$

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

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

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

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



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”

Удачи на итоговом  
тестировании!

Наш курс закончился,  
но майнор  
продолжается...

