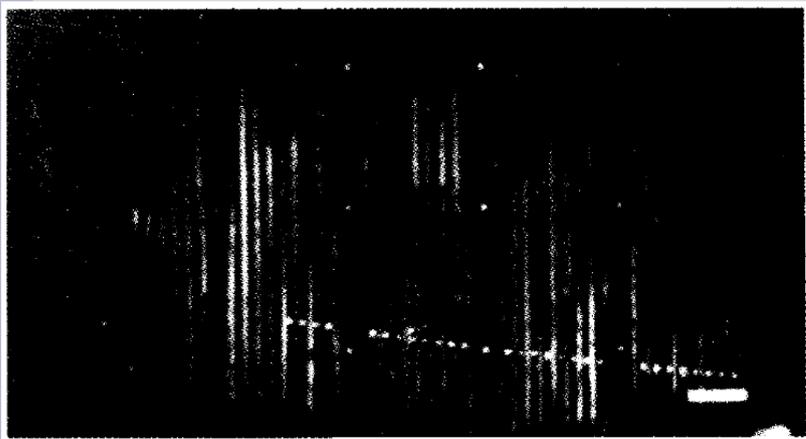


Лекция 14

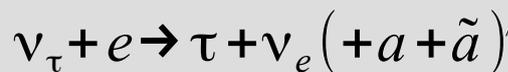
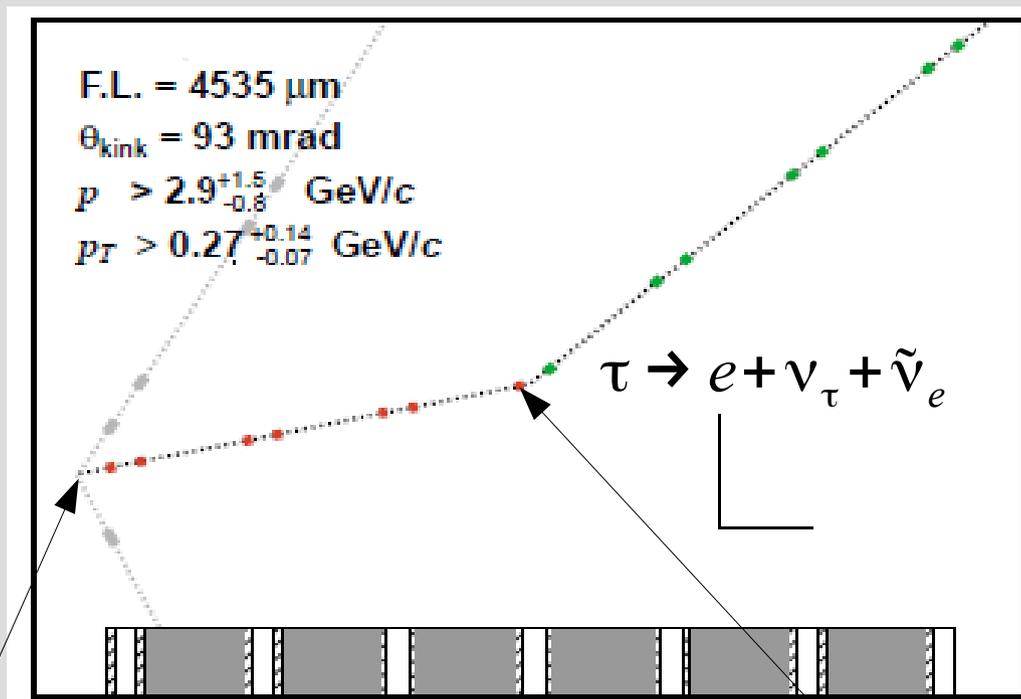
Фундаментальные взаимодействия и элементарные частицы II.

Часть 1. Стандартная модель (продолжение)

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>

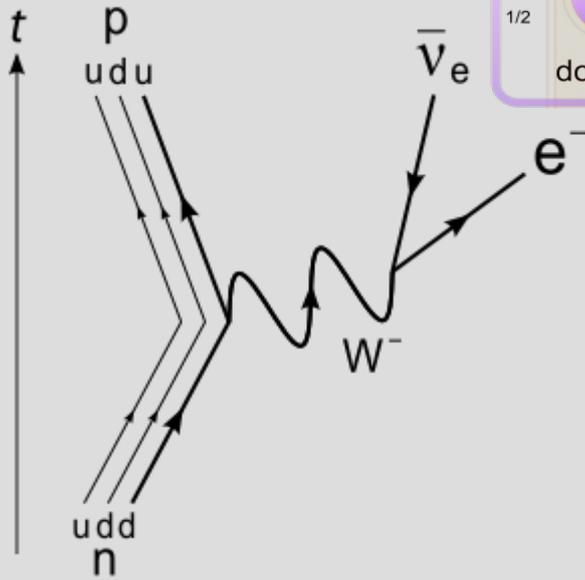
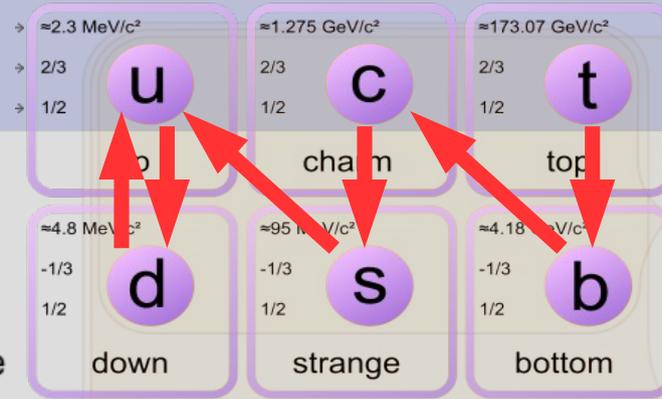
Вертикальный отрезок 0.1мм, горизонтальный 1мм

Внизу: схема детектора. Заштрихованные пластины — фотоэмульсия, серые — сталь, белые — пластик.

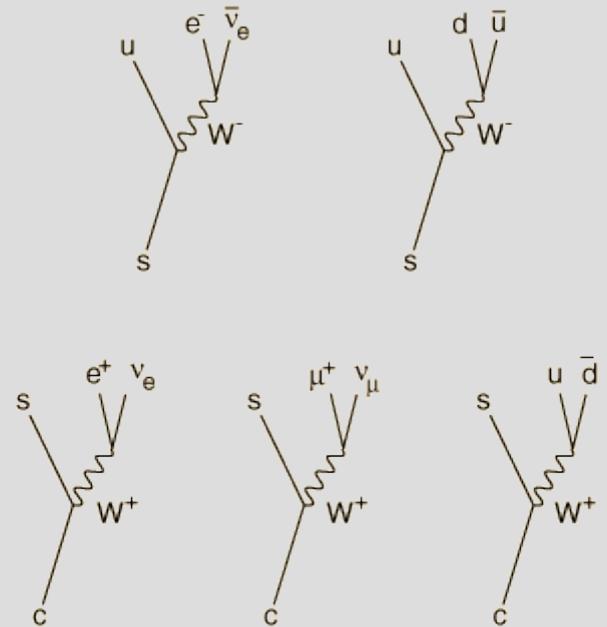
распад тау-лептона

Кстати, длина трека соответствует релятивистскому удлинению времени

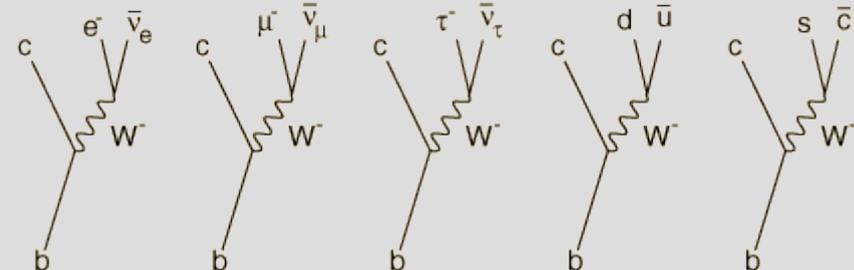
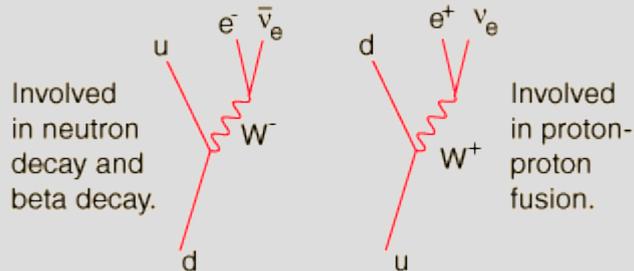
Превращения кварков (слабое взаимодействие)



Feynman diagrams of quark decay by weak interaction

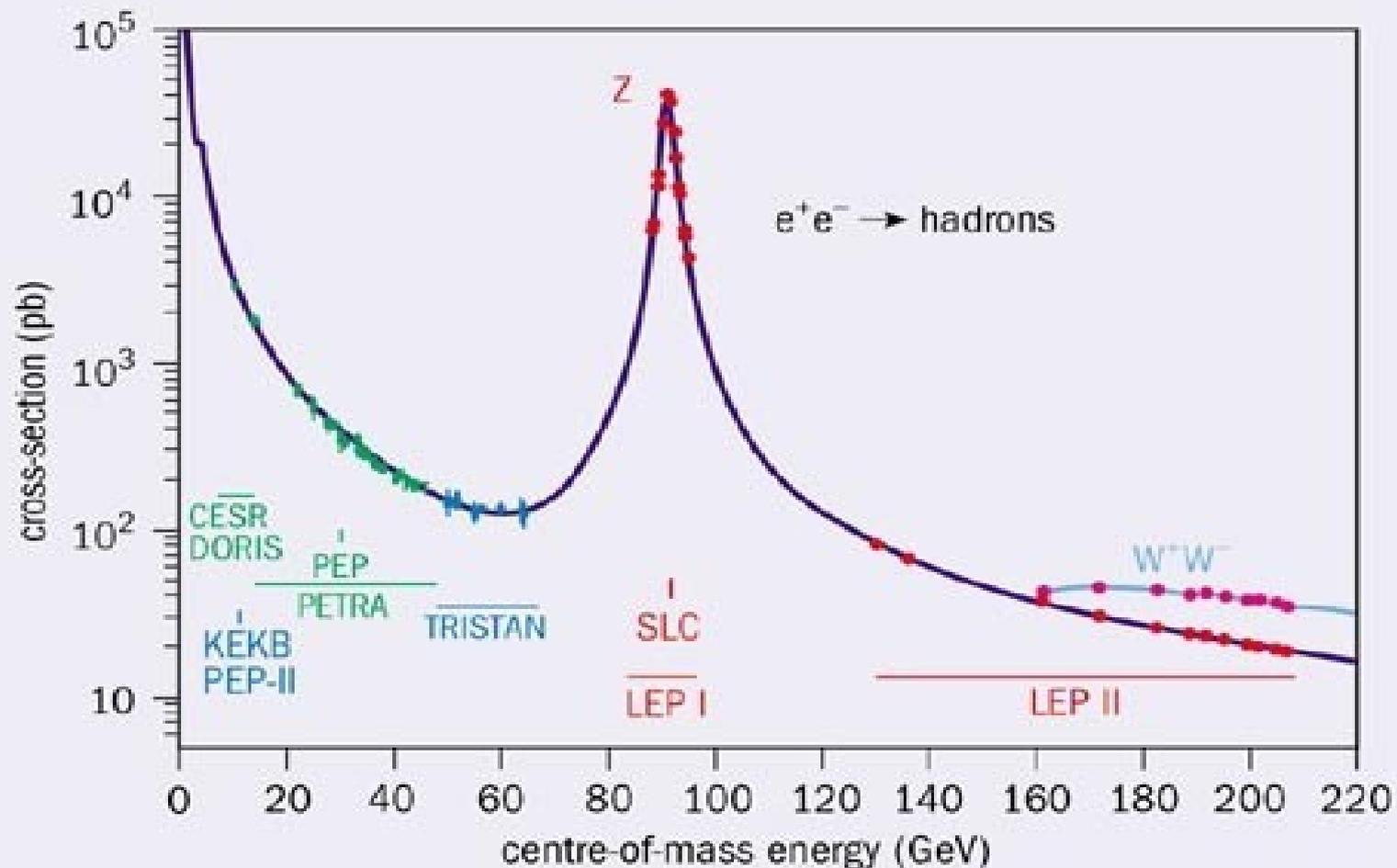


Weak interaction transformations of u and d quarks

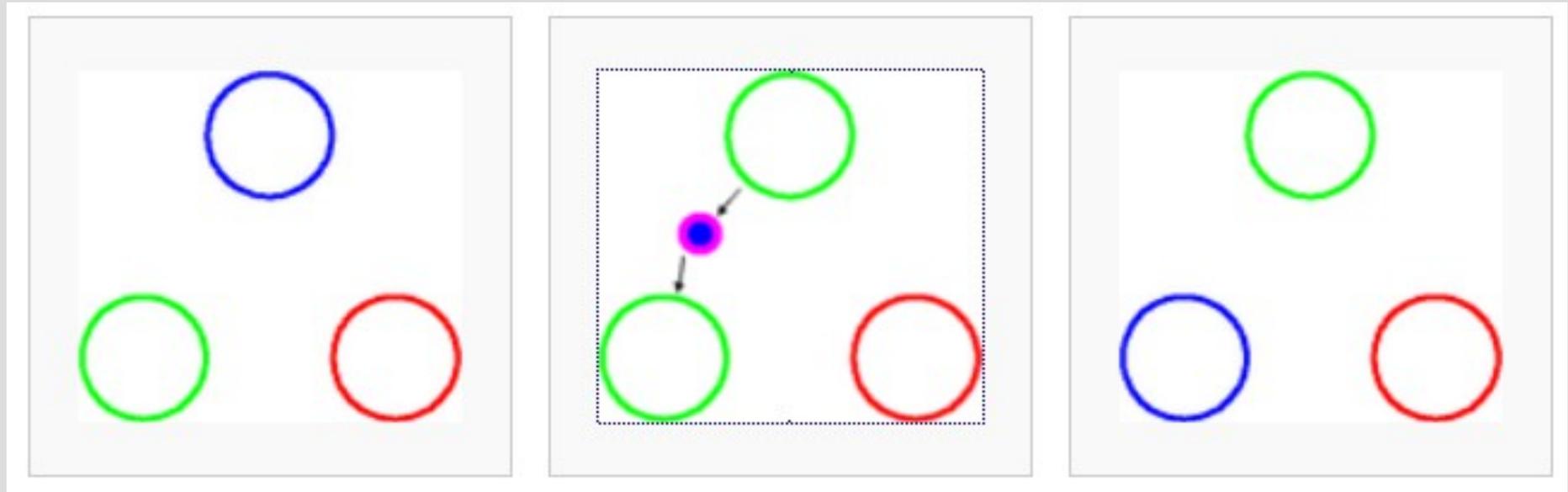


Наблюдение W и Z бозонов в эксперименте.

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



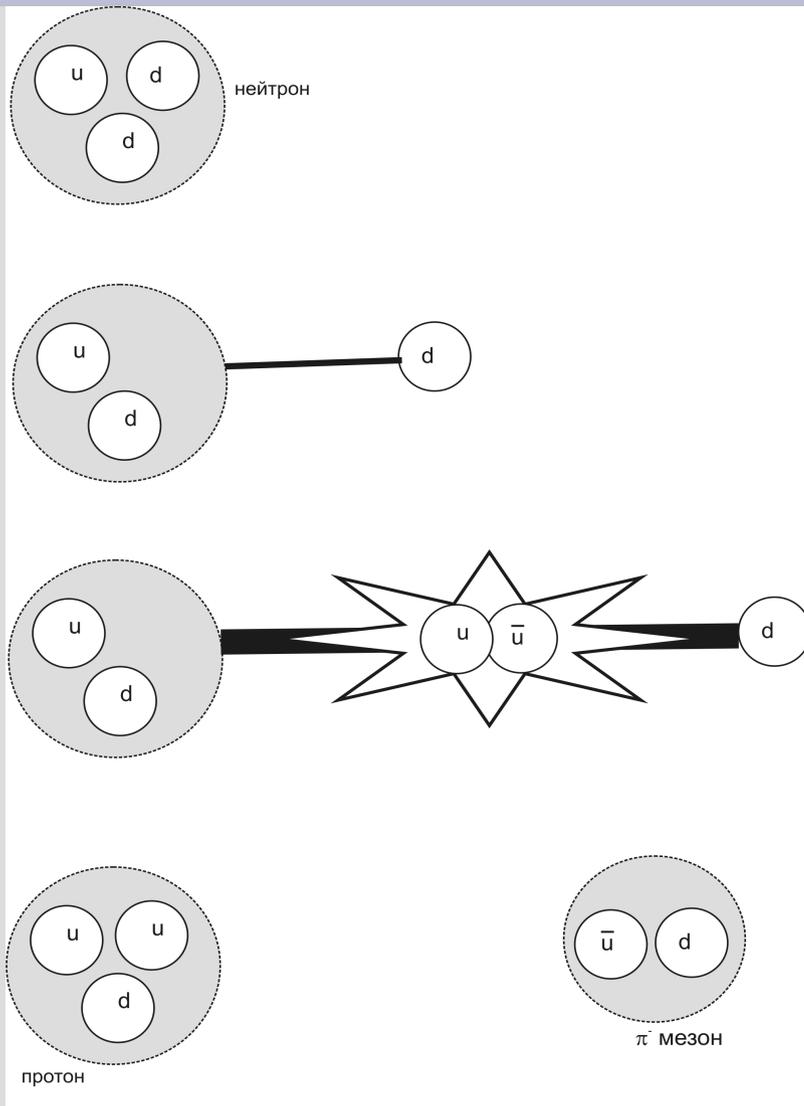
Перенос сильного взаимодействия внутри частицы: ГЛЮОНЫ



Изменение цвета кварка при испускании/поглощении глюона. Левое изображение: исходное состояние адрона с тремя разноцветными кварками. Среднее изображение: синий кварк испускает синий-антизелёный глюон и становится зелёным. Правое изображение: зелёный кварк поглощает синий-антизелёный глюон и становится синим.

Частица в целом “бесцветная” - соответствует короткодействию ядерного взаимодействия: либо RGB, либо пары цвет-антицвет

Конфайнмент и асимптотическая свобода



Энергия взаимодействия кварков друг с другом растёт с их удалением. Поэтому:

- свободных кварков не бывает
- на высоких энергиях (малых расстояниях) взаимодействие (рассеяние) частиц описывается как взаимодействие свободных кварков

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.

Примеры похожего механизма:

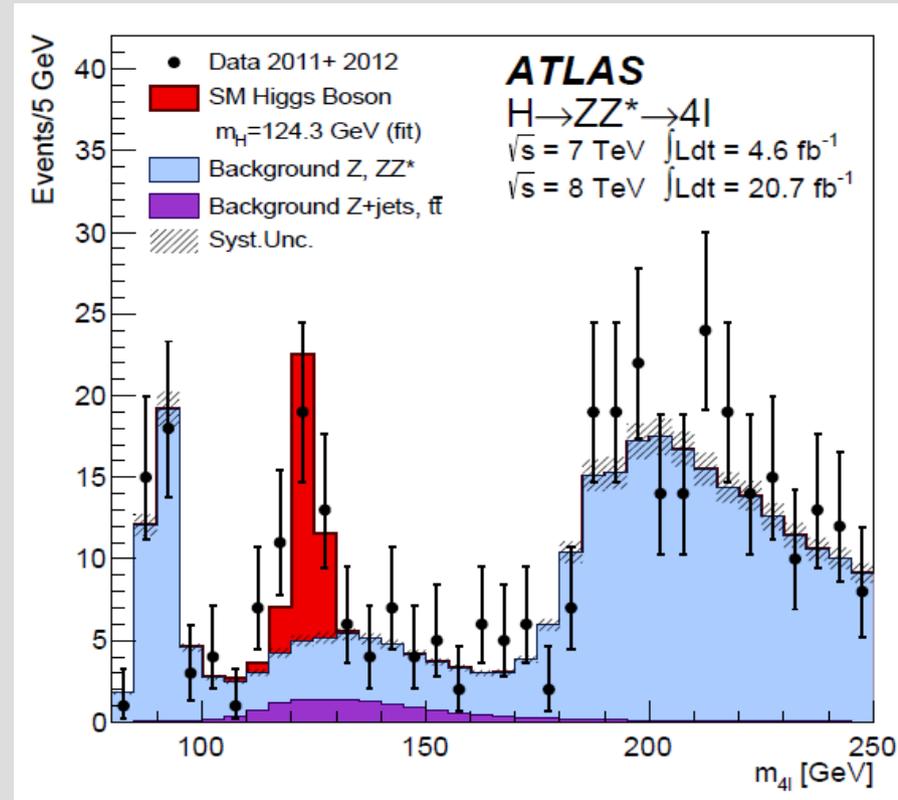
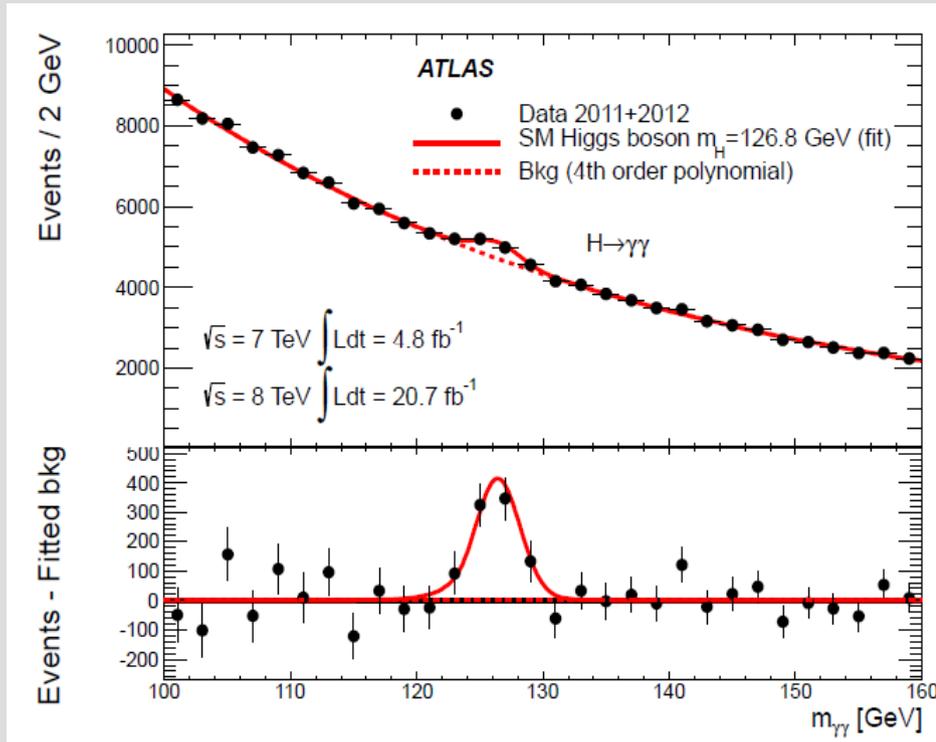
- фотон в волноводе
- фотон в сверхпроводнике
- шарик на упругой пленке

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%

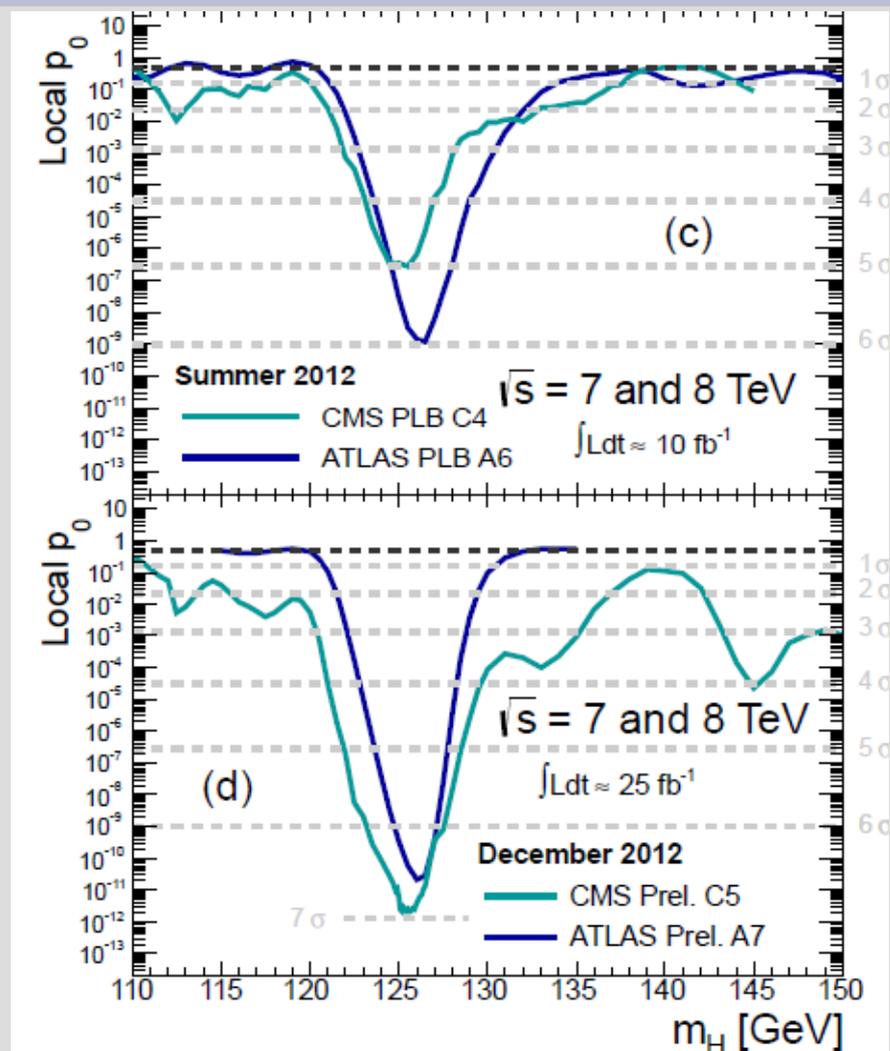
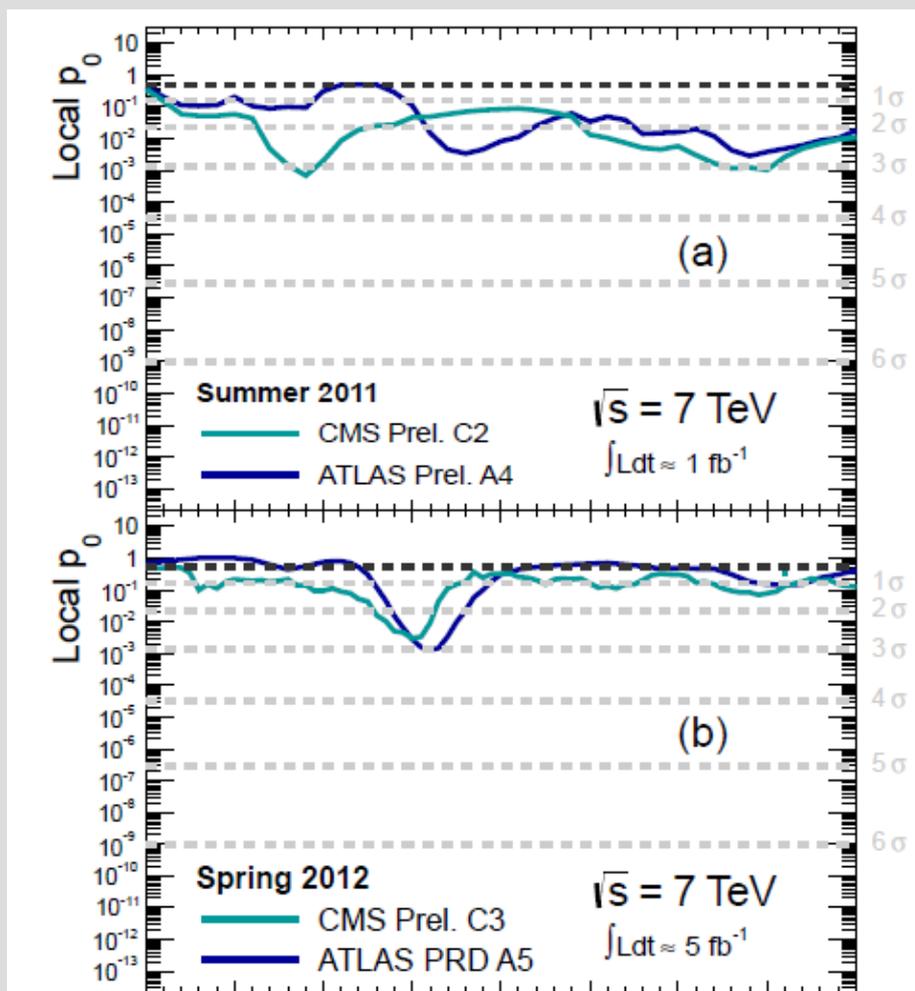
точность определения массы бозона Хиггса для разных процессов распада.

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.

Часть 2. Законы сохранения. Несохранение чётности и применение этого эффекта.

Законы сохранения

Строгие, “привычные”: энергия, импульс, момент импульса, заряд

Примеры:

свободный нейтрон (939.6 МэВ) распадается в протон (938.3) МэВ + электрон (0.51 МэВ) + нейтрино, но не наоборот;

электрон-позитронная пара аннигилирует в не менее чем 2 гамма кванта

Строгие “в современной Вселенной”: сохранение числа кварков (барионного заряда), числа и типа лептонов

предположительно нарушалось в момент рождения Вселенной, что объясняет барионную асимметрию (преобладание вещества над антивеществом)

“Не для всех”: странность, шарм, чётность

нарушаются только для слабого взаимодействия (при взаимопревращении кварков или лептонов)

О странном (и о странности)

П-МЕЗОНЫ (заряженные 140 МэВ,
нейтральный 135 МэВ)

$$\pi^0 = \frac{u\bar{u} - d\bar{d}}{\sqrt{2}}; \pi^+ = u\bar{d}; \pi^- = d\bar{u}$$

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad 10^{-17} \text{ сек}$$



Истинно нейтральная частица

К-МЕЗОНЫ (заряженные 494
МэВ, нейтральный 498 МэВ)

$$K^+ = u\bar{s}; K^- = \bar{u}s; K^0 = d\bar{s}$$



*Электрически
нейтральная, но не
совпадает со своей
античастицей*

Нейтральный К-мезон живёт $10^{-8} \dots 10^{-10}$
сек, на гамма кванты не распадается

Было предположено существование
дополнительного “заряда” - странности,
который тоже должен сохраняться.

В кварковой модели странность равна
минус числу странных кварков

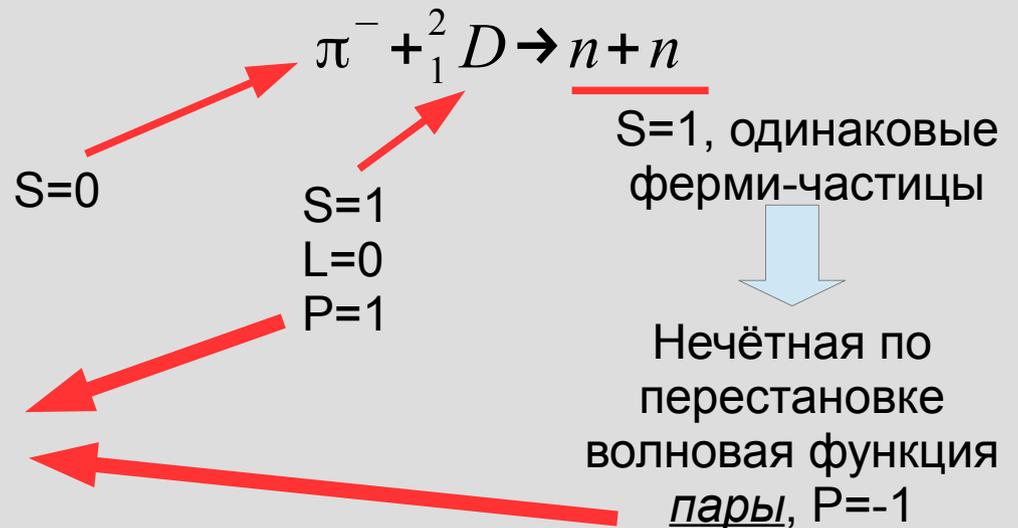
Чётность и распад каонов.

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$$

$$K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$$

Чётность каонов и пионов отрицательна (известно из независимых экспериментов)

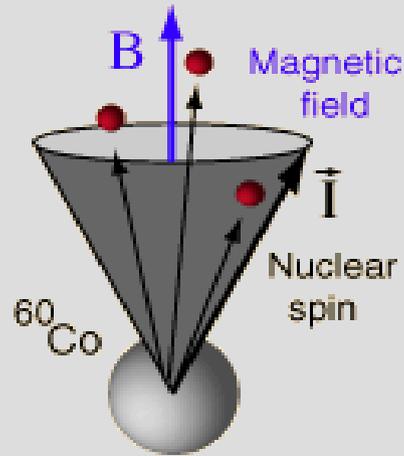
Анализ вероятностей $\rightarrow \pi^0 \rightarrow (2 \gamma) \rightarrow 2 e^- + 2 e^+$



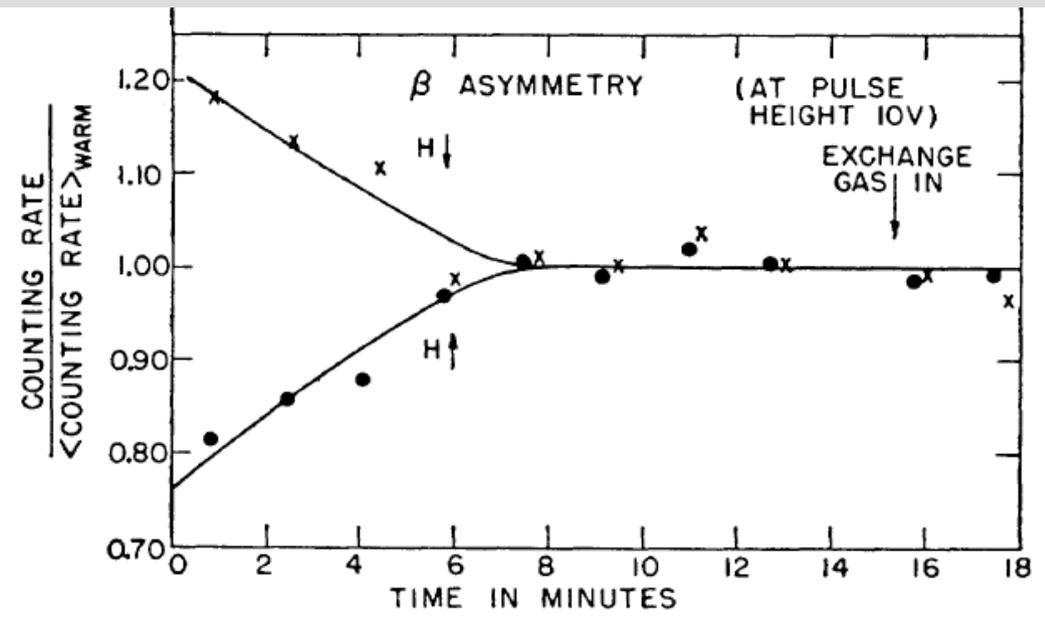
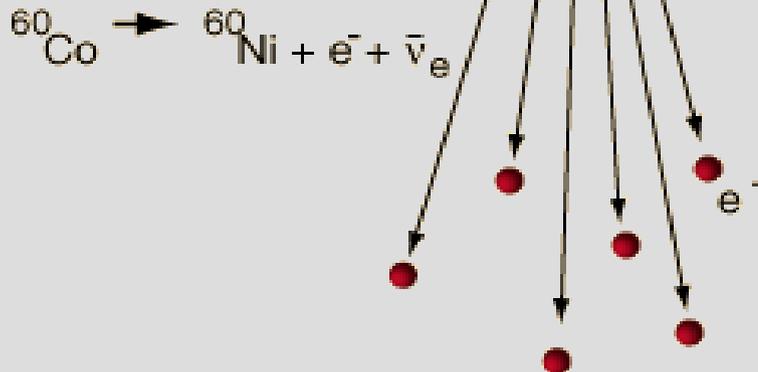
Эксперимент Wu

Если бы была симметрия к инверсии, то направление вылета бета-частиц не зависело бы от направления магнитного момента ядра

Beta emission is preferentially in the direction opposite the nuclear spin, in violation of conservation of parity.



Wu, 1957



Различие числа отсчётов счётчика бета-частиц при разном направлении поляризирующего магнитного поля. В момент $t=0$ достигалась минимальная температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных ядер характеризуется различием числа отсчётов в момент $t=0$. Из работы Ц.Ву

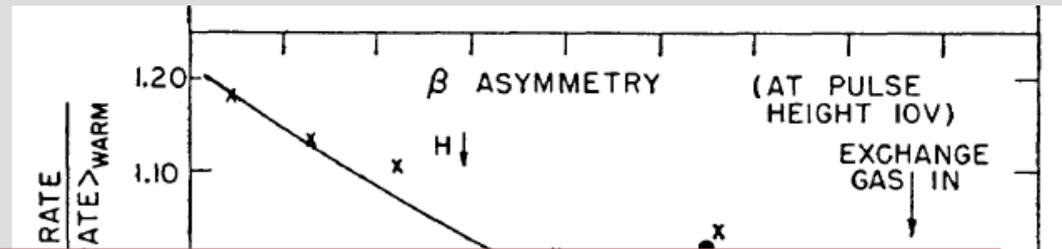
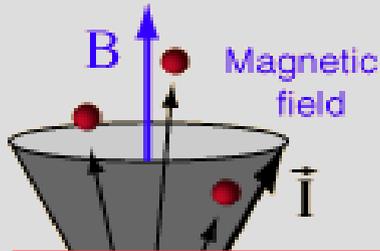
Чётность не сохраняется при слабом взаимодействии: «левый» и «правый» миры отличаются!

Эксперимент Wu

Если бы была симметрия к инверсии, то направление вылета бета-частиц не зависело бы от направления магнитного момента ядра

Beta emission is preferentially in the direction opposite the nuclear spin, in violation of conservation of parity.

Wu, 1957

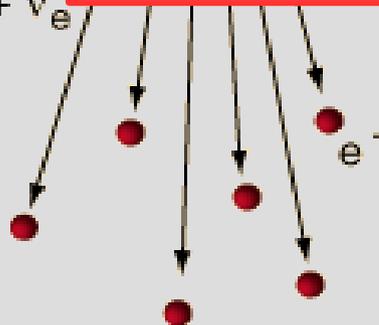


Следствия:

- 1) СРТ-инвариантность законов микромира
- 2) Все нейтрино «левые»: спин направлен против импульса, антинейтрино - «правые».

температура образца кобальта, затем образец нагревался из-за теплоподвода и выделения тепла при распаде, и поляризация пропадала. Анизотропия бета распада поляризованных ядер характеризуется различием числа отсчетов в момент $t=0$. Из работы Ц.Ву

Чётность не сохраняется при слабом взаимодействии

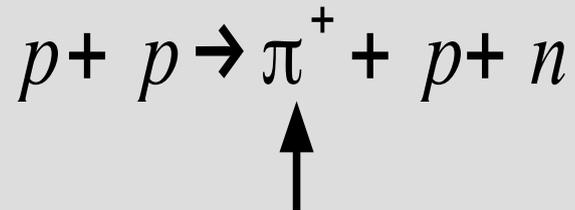


Мюонная спектроскопия

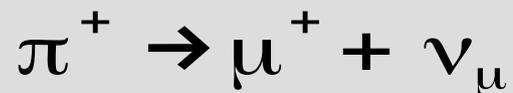


Аналогично опыту Ву, позитроны вылетают преимущественно в направлении спина мюона

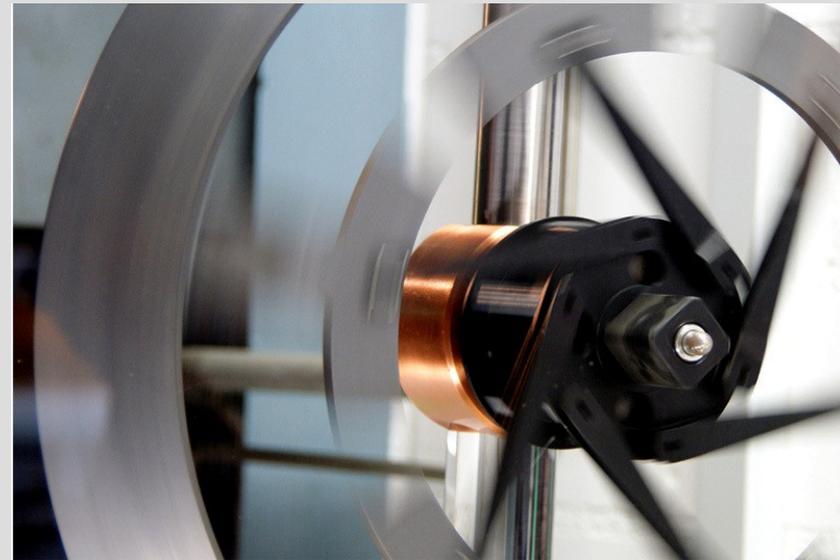
Получение мюонов



тормозится в мишени и в состоянии покоя за 10^{-8} сек распадается далее



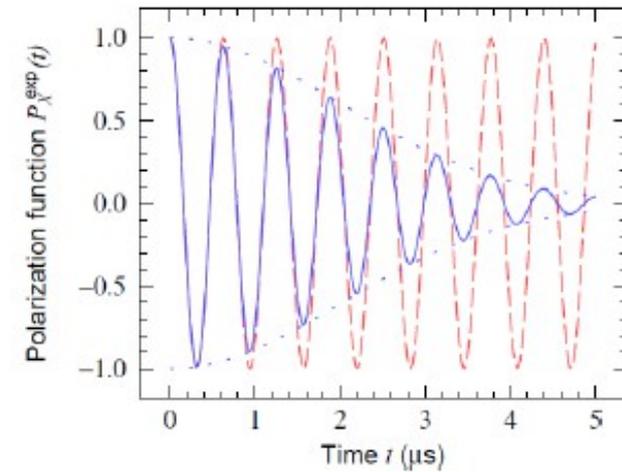
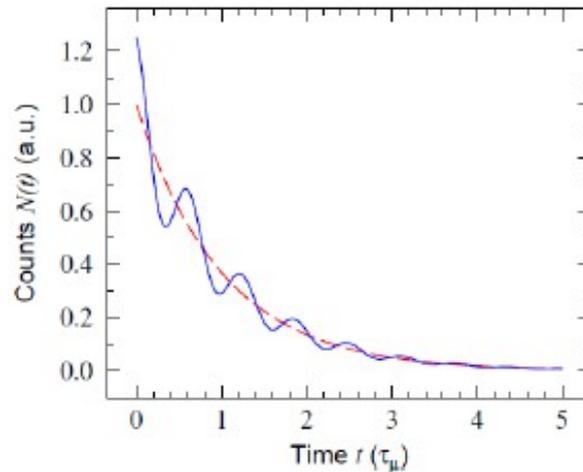
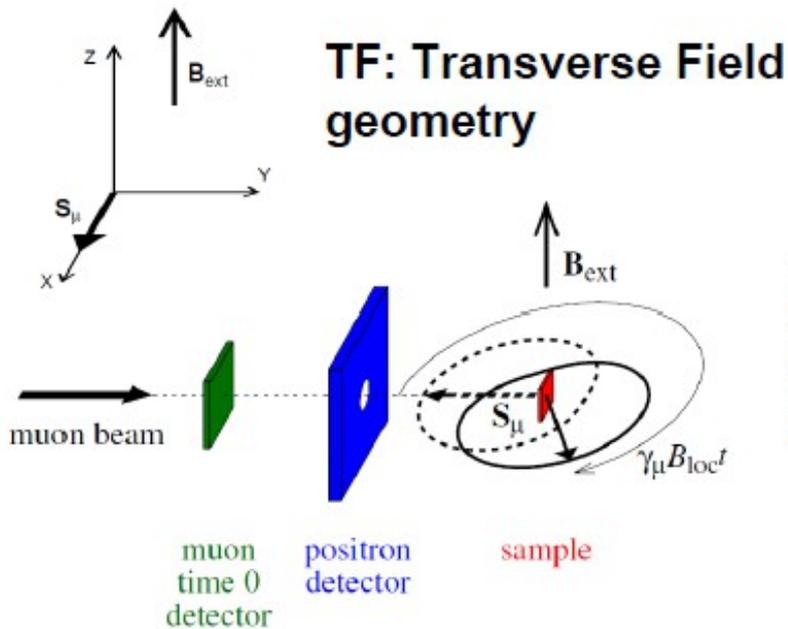
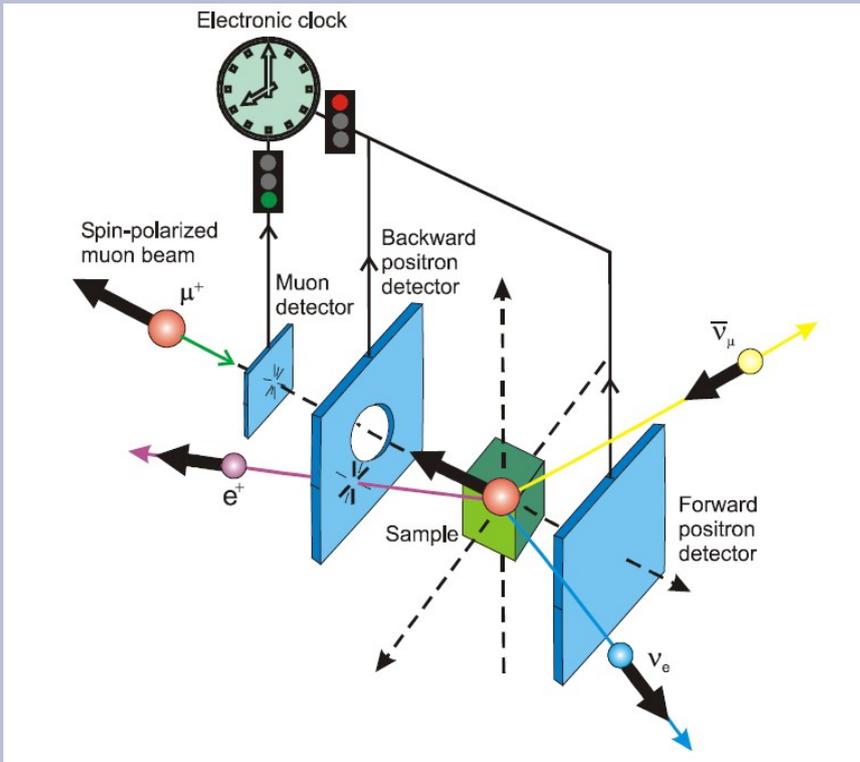
двухчастичный процесс+«левизна»
нейтрино=спин мюона направлен против его импульса, энергия ~ 4 МэВ



Мишень для производства мюонов в Институте Поля Шерера.
<http://www.psi.ch/>

Схема опыта

Осцилляции асимметрии распада мюона, имплантированного в образец, позволяют измерить локальное магнитное поле

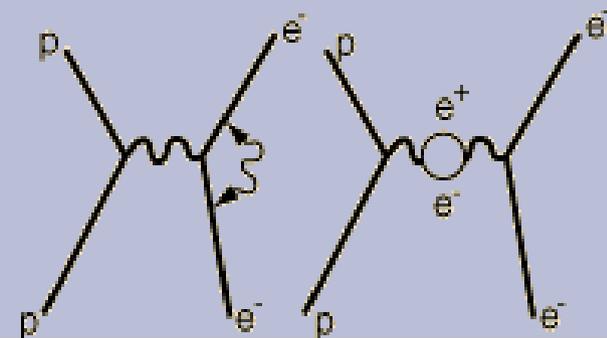


Часть 3. Реальность виртуальных частиц



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

Сдвиг Лэмба



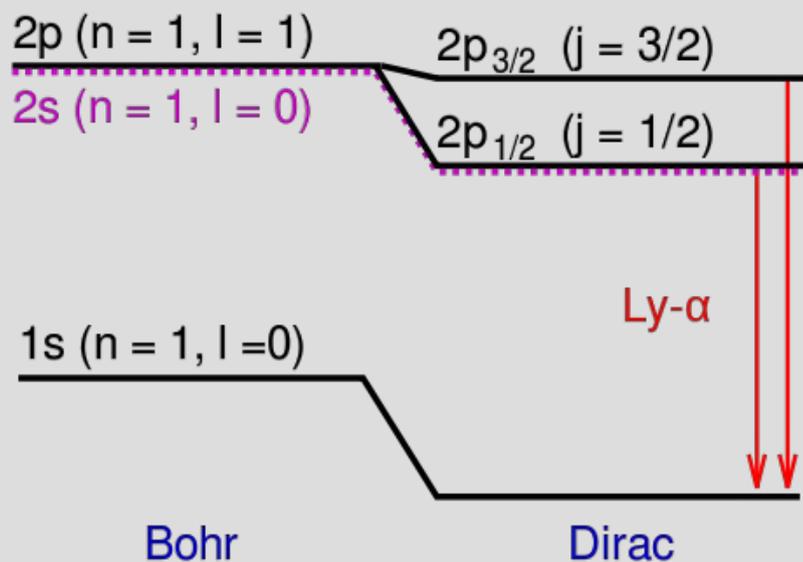
Атом водорода $E_n = -Ry \frac{1}{n^2}$

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)

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

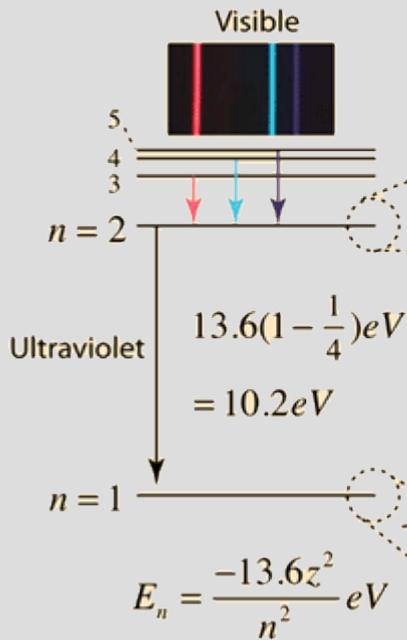


Эксперимент (Лэмб, 1947):
 $2^2 S_{1/2}$ на 1ГГц выше, чем $2^2 P_{1/2}$

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

x 100,000

Fine structure

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

Hyperfine structure

N = nuclear spin
 E = electron spin

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

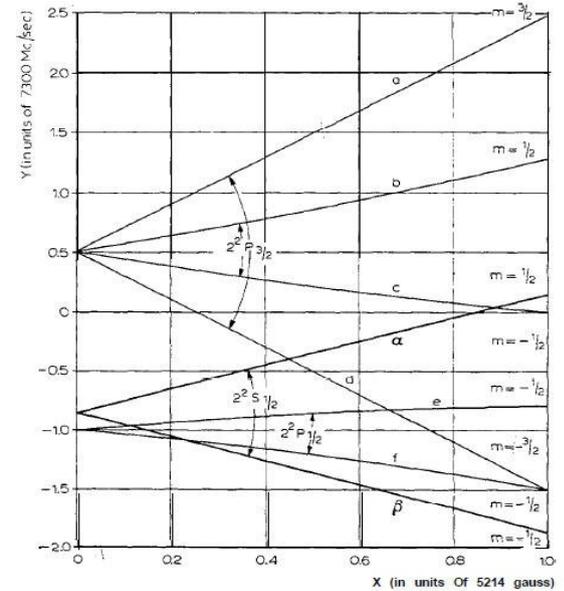


Fig. 4. Zeeman energy levels with the $2^2S_{1/2}$ pattern raised by 1000 Mc/sec.

Сдвиг Лэмба

$${}^2S_{1/2} : g=2$$

$${}^2P_{1/2} : g=2/3$$

E1 фотон: $S \leftrightarrow P$

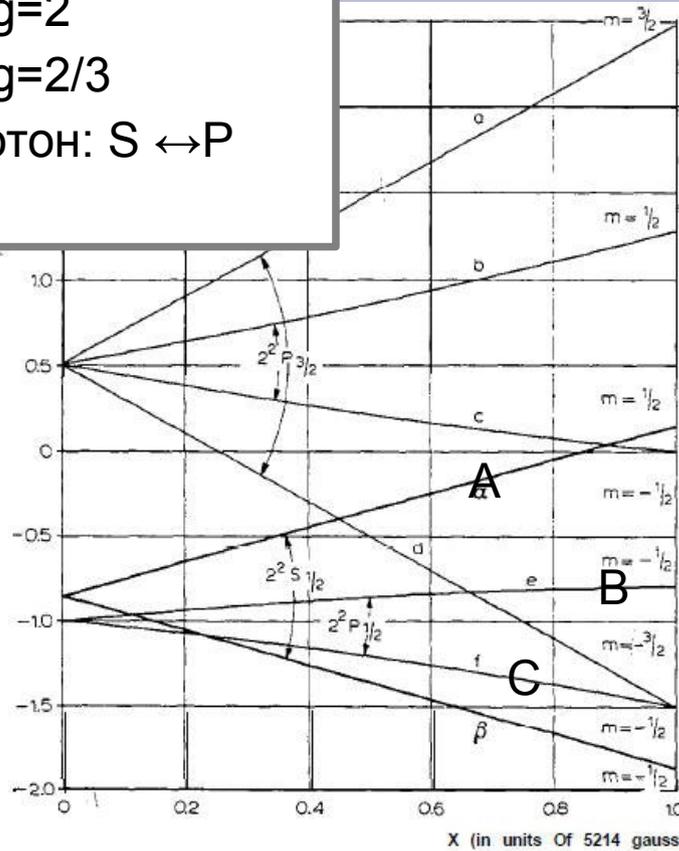


Fig. 4. Zeeman energy levels with the $2^2S_{1/2}$ pattern raised by 1000 Mc/sec.

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

$$\hbar \omega = E_A - E_B = \delta + (2 - 2/3) \times \frac{1}{2} \mu_B B$$

$$\hbar \omega = E_A - E_C = \delta + (2 + 2/3) \times \frac{1}{2} \mu_B B$$

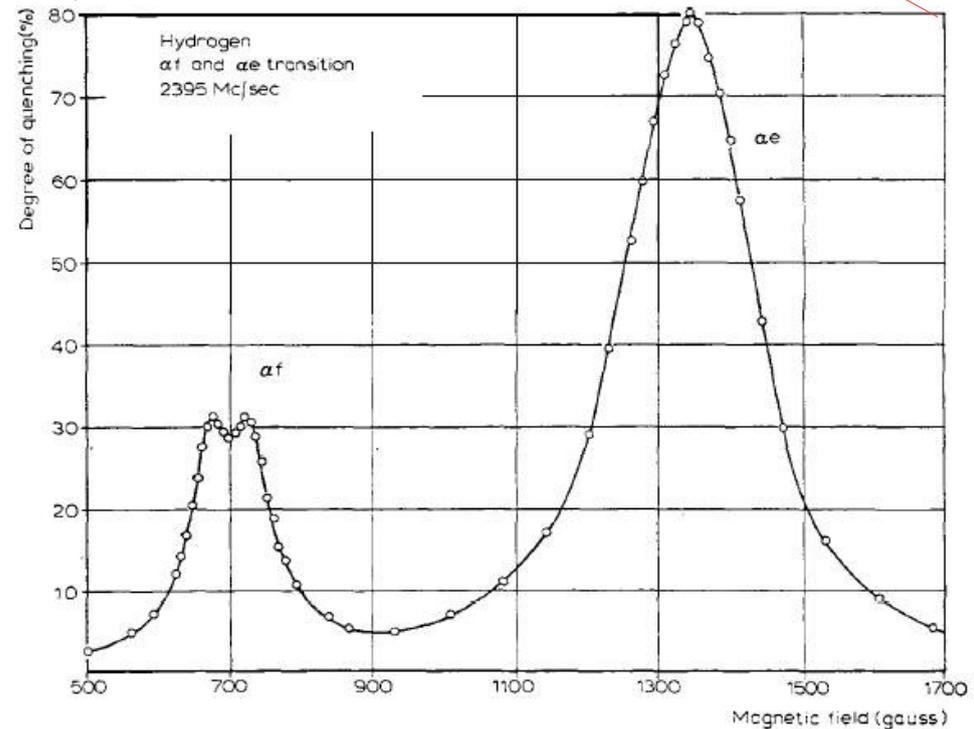
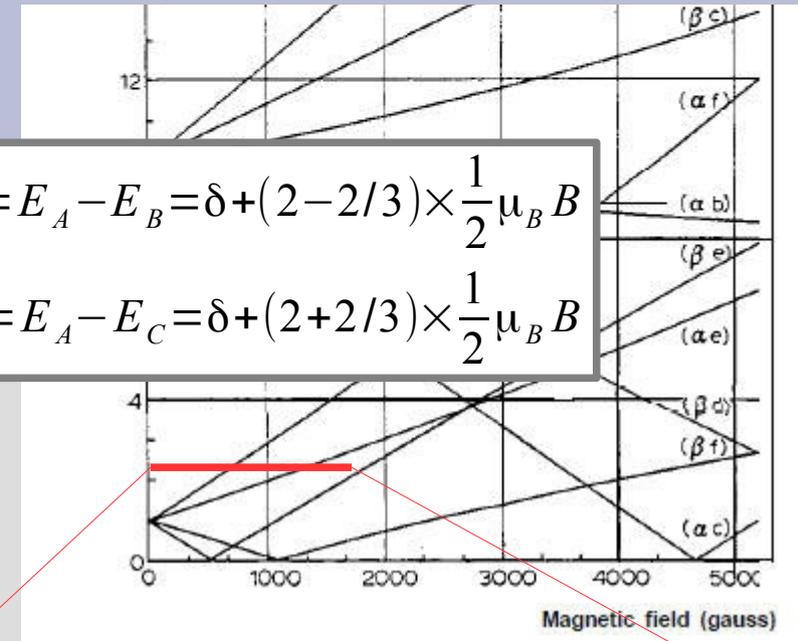


Fig. 7. Observed resonance curves for hydrogen.

Дейтерий vs. водород

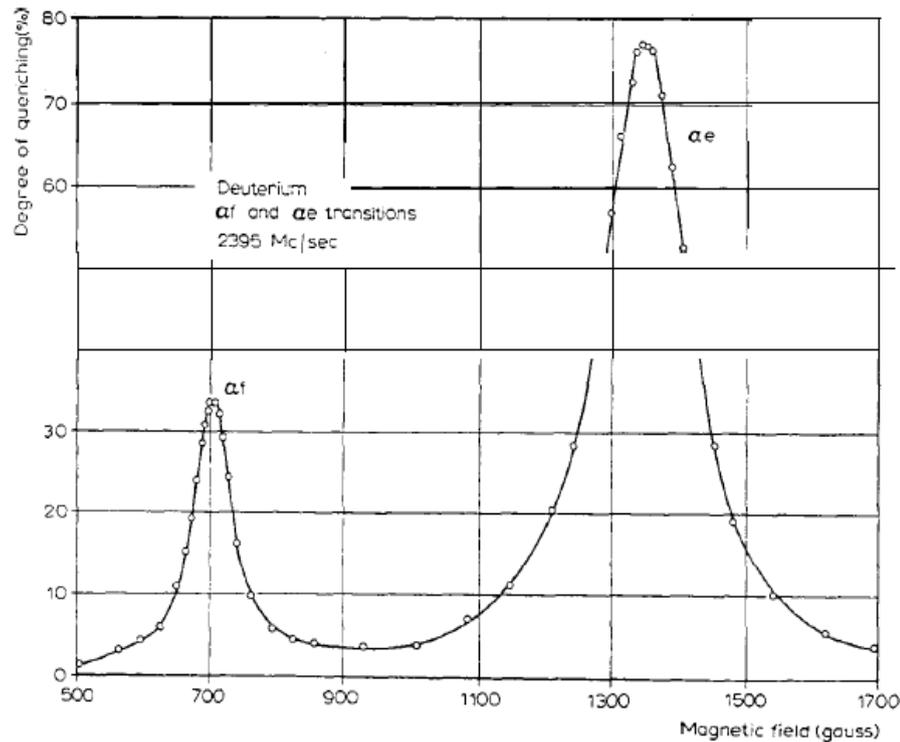


Fig. 6. Observed resonance curves for deuterium.

Спин ядра 0

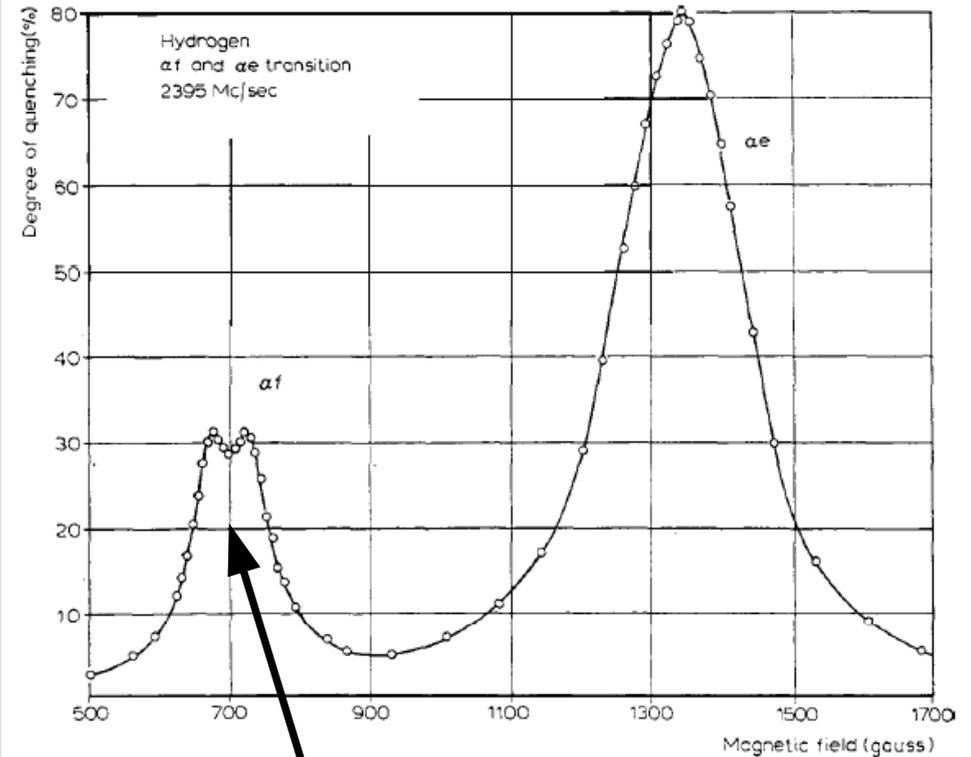
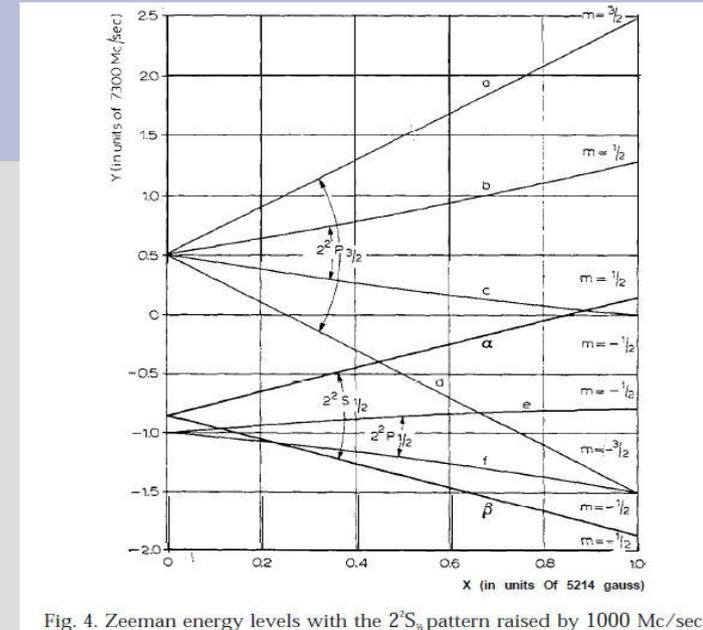
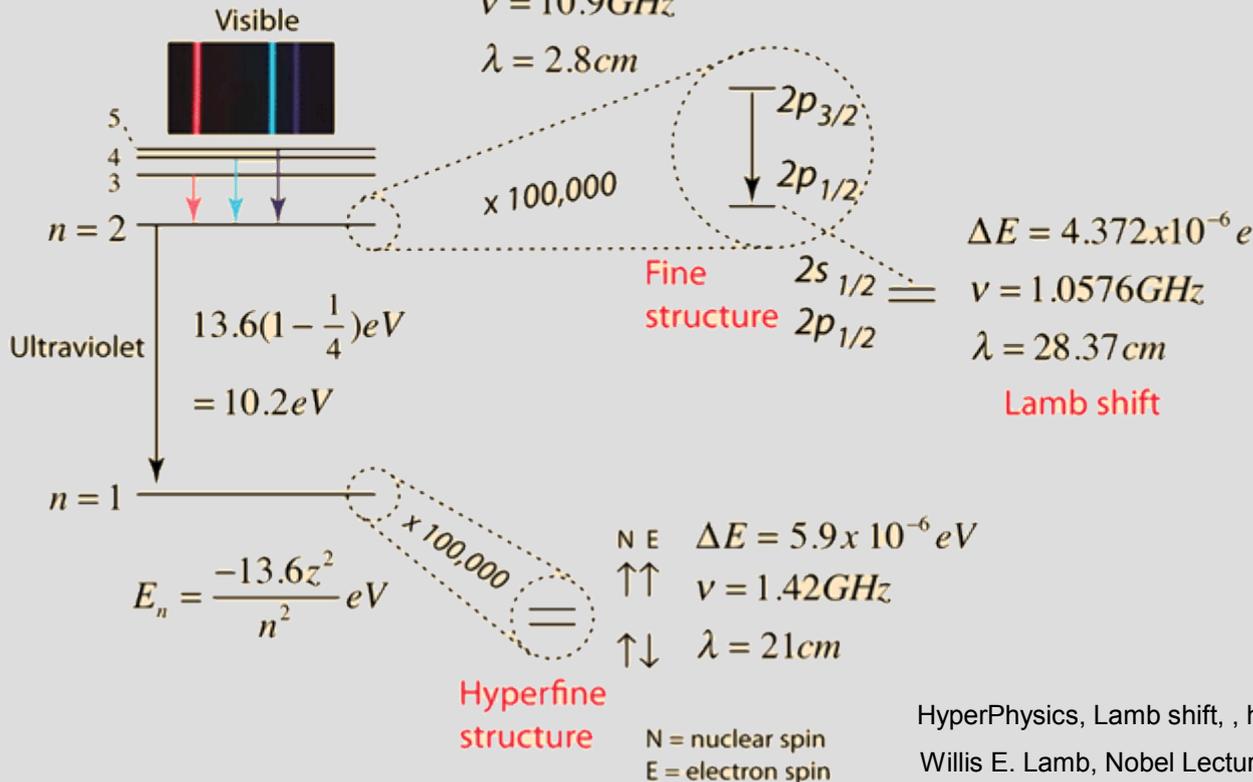


Fig. 7. Observed resonance curves for hydrogen.

Спин ядра 1/2
Есть сверхтонкая структура

Измерения на атомах

Hydrogen energy levels



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*

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

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

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

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

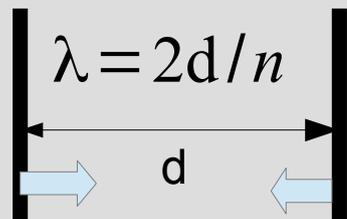
$$a_{\mu}^m = 0,00116591804 (51)$$

Одна из самых точных измеряемых и вычисляемых величин в физике

Эффект Казимира



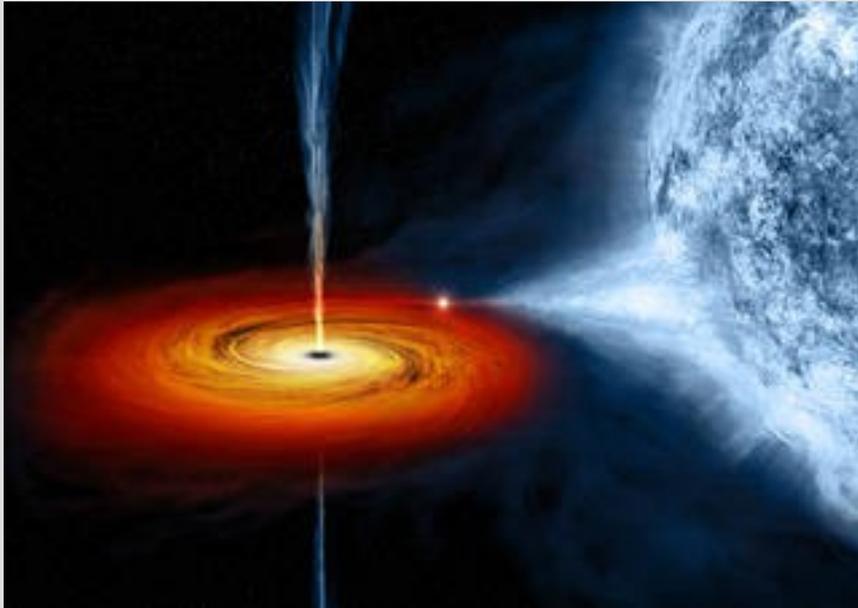
И. К. Айвазовский «Смотр Черноморского флота в 1849 году»



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

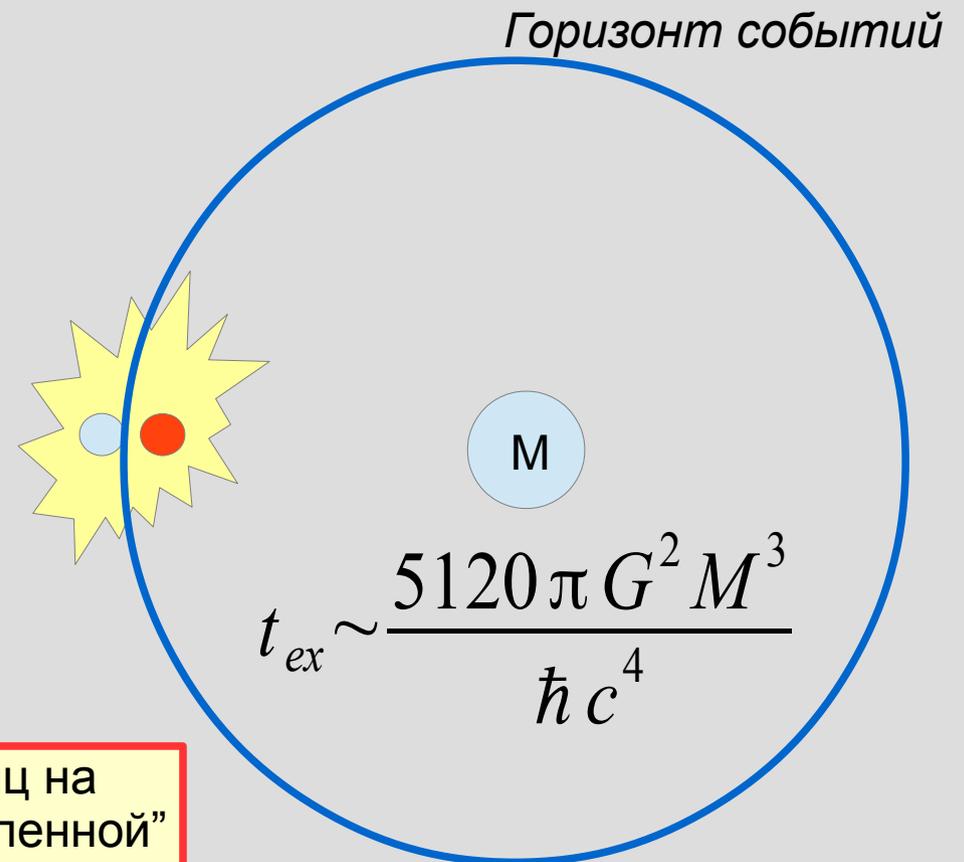
$$1 \text{ кв. см} \& 1 \text{ мкм} \implies 10^{-8} \text{ Н}$$

Излучение Хокинга



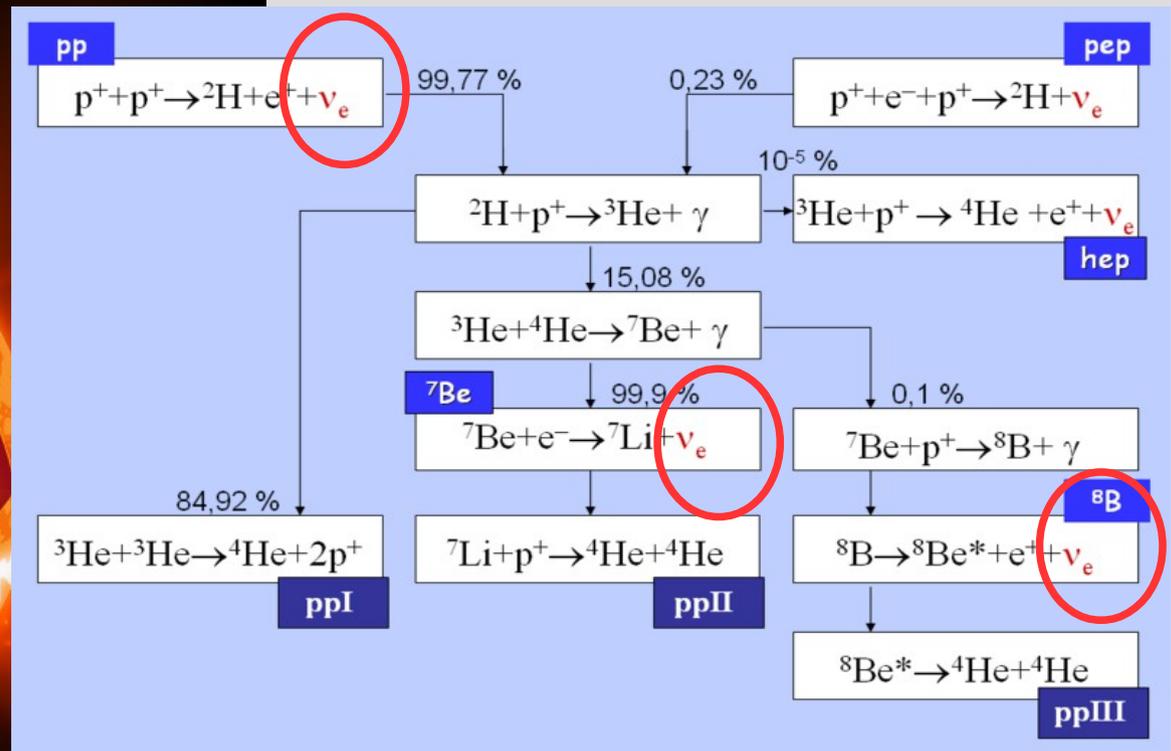
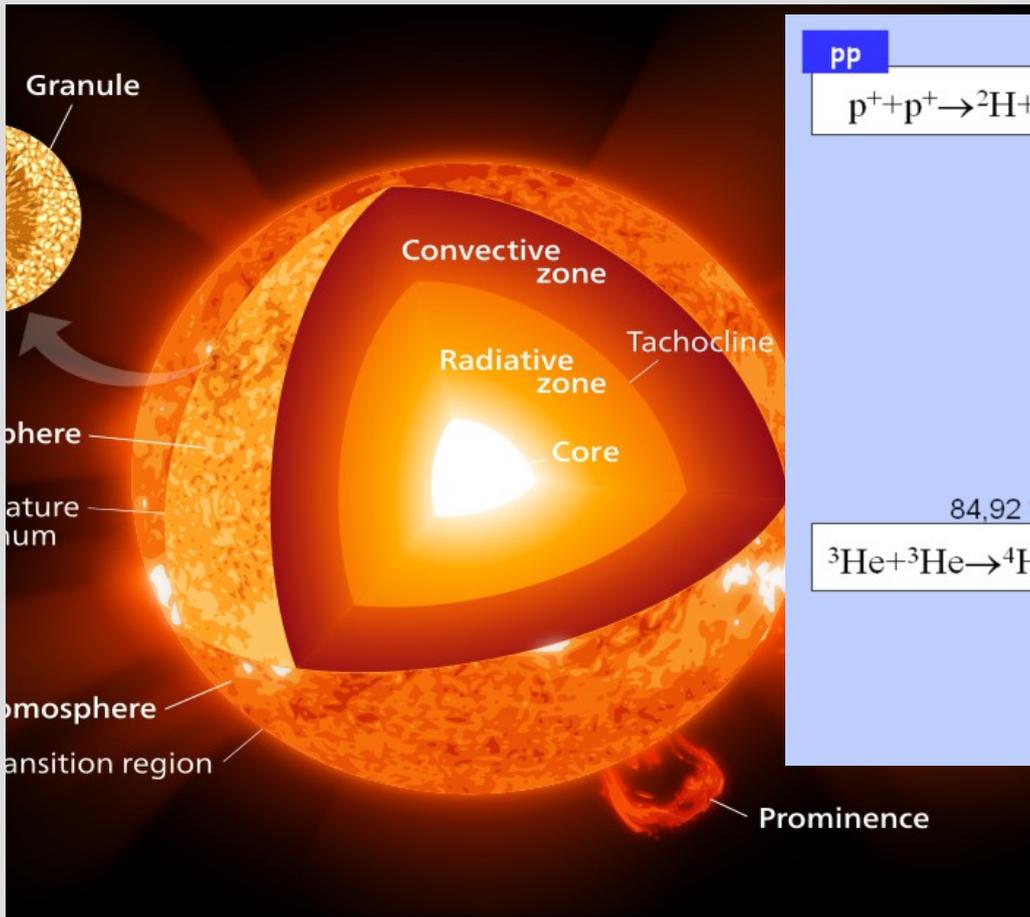
An artist's drawing a black hole named Cygnus X-1. It formed when a large star caved in. This black hole pulls matter from blue star beside it.
Credits: NASA/CXC/M.Weiss

(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)



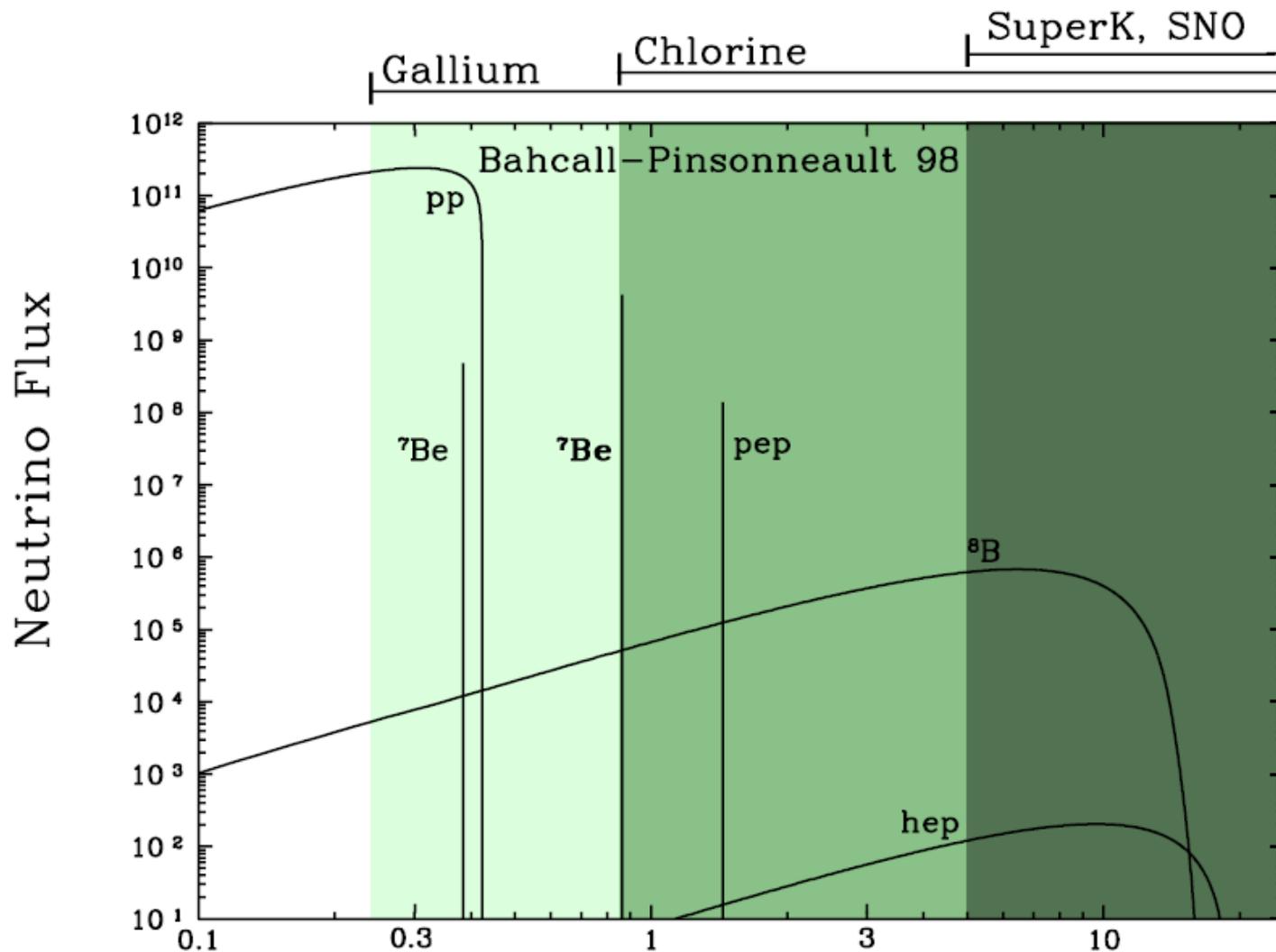
Часть 4. Детектирование нейтрино, проблема солнечных нейтрино, нейтринные осцилляции.

Проблема солнечных нейтрино и осцилляции нейтрино



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

Спектр солнечных нейтрино



<http://www.sns.ias.edu/~jnb/SNviewgraphs/SNspectrum/energyspectra.html>

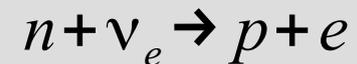
From the paper "Solar Neutrinos: Where We Are, Where We Are Going," ApJ 467, 475 (1996), hep-ph/9512285, updated using the data given in astro-ph/9805135.

Каналы детектирования нейтрино

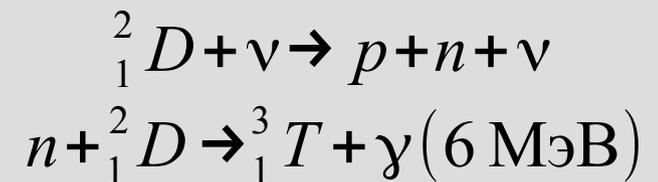
- «Эффект Комптона» Все типы нейтрино, но для электронных больше эффективность.



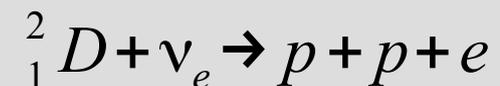
- Обратный бета-распад (галлий-германий, хлор-аргон). Только электронные нейтрино.



- Нейтральный канал в тяжеловодном детекторе. Все типы нейтрино.

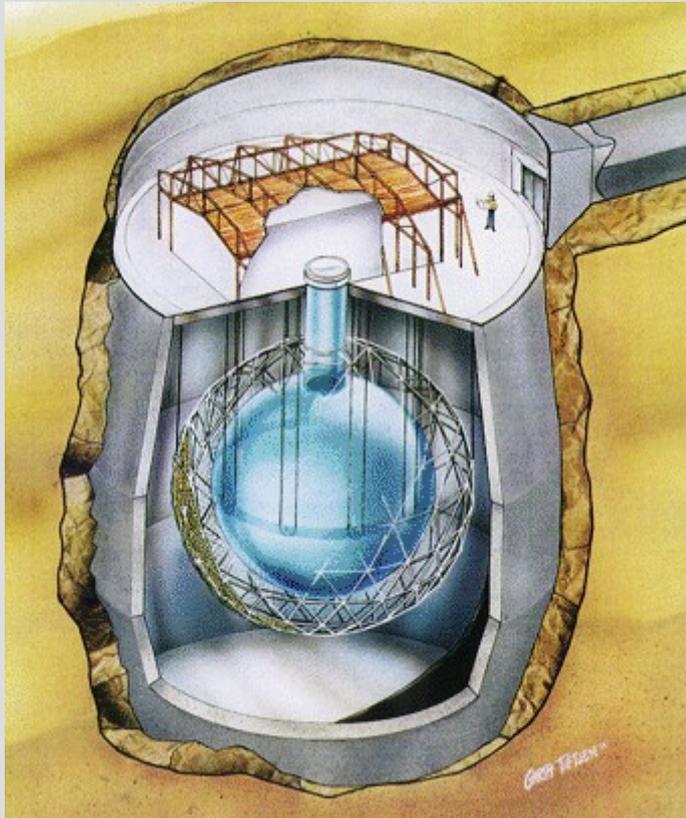


- Заряженный канал в тяжеловодном детекторе. Только электронное нейтрино.



Обнаружение всех нейтрино (Sudbury)

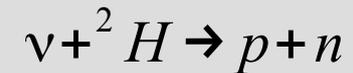
<https://www.sno.phy.queensu.ca/>



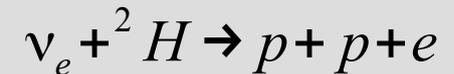
Детектор с тяжелой водой, три канала детектирования нейтрино:

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

2) нейтральный
все типы нейтрино

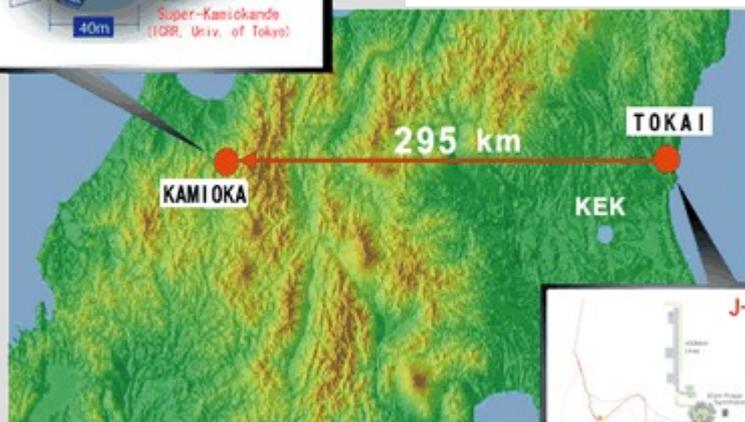
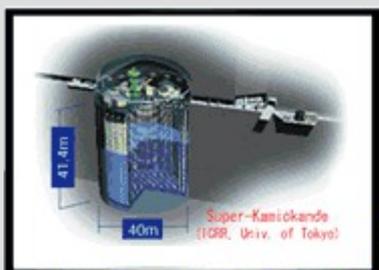
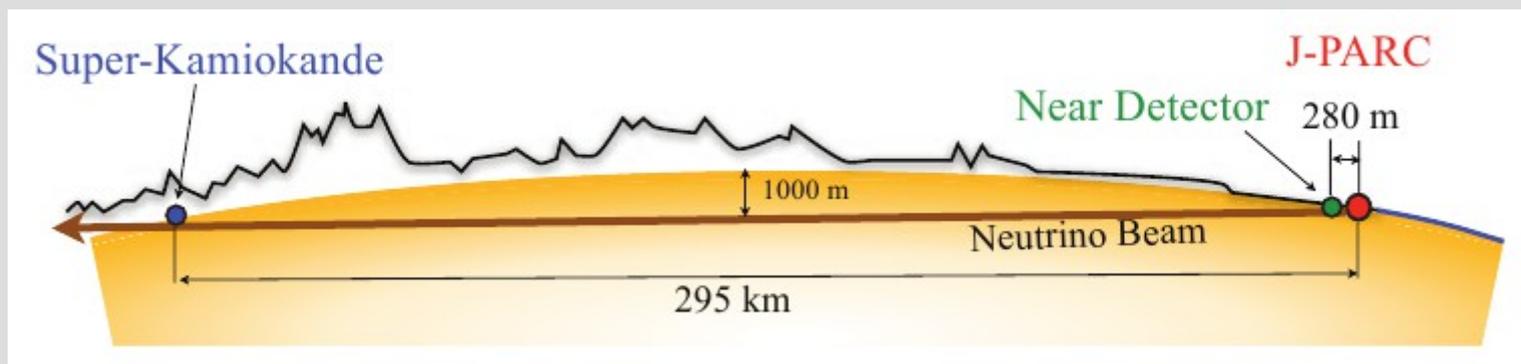


3) заряженный
только электронное нейтрино



Ускорительные эксперименты по нейтринным осцилляциям

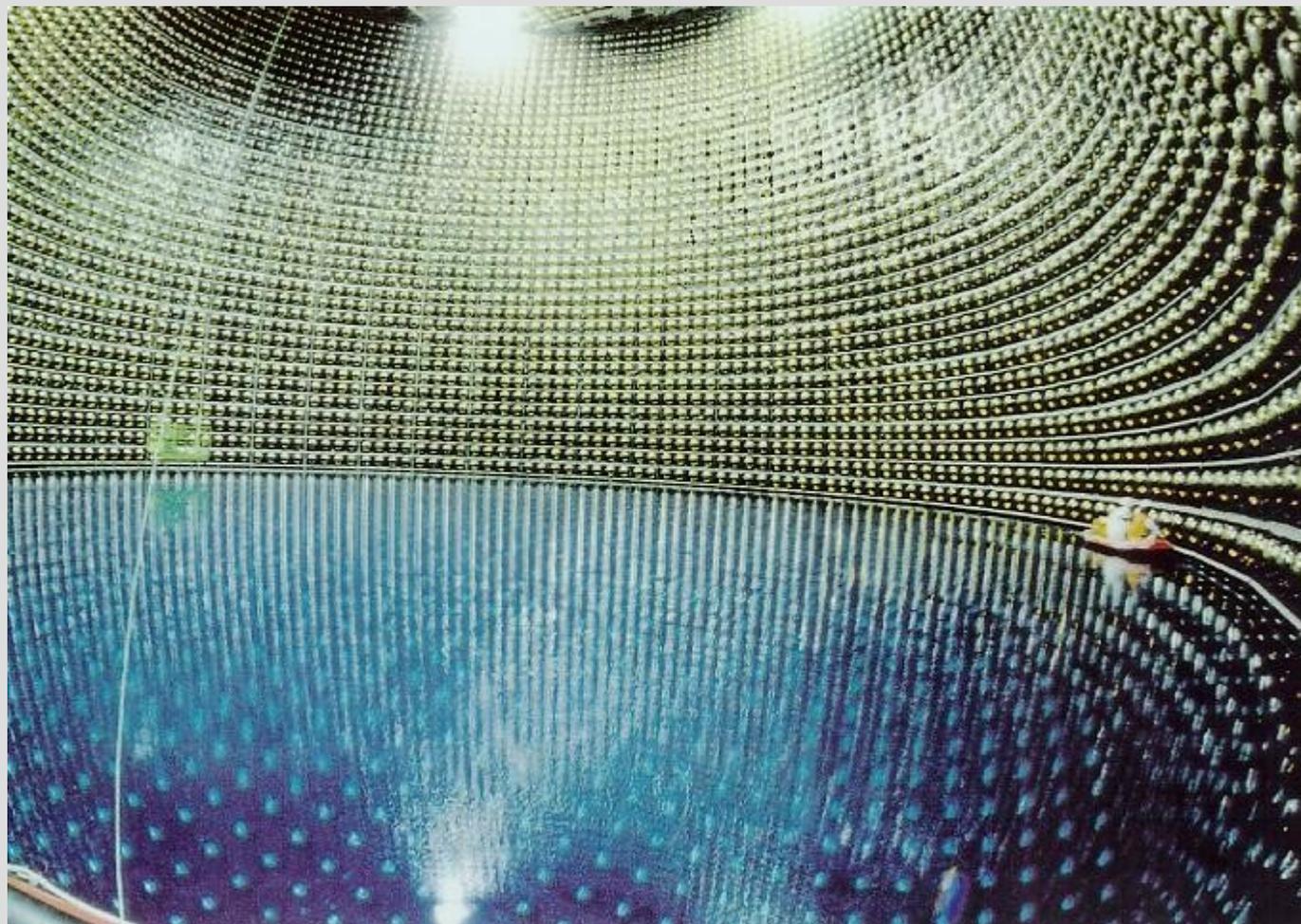
- MINOS: источник Фермилаб, детектор в Миннесоте (735 км)
- T2K: источник Токай, детектор в Камиоканде (295 км)



Направление пучка нейтрино в эксперименте T2K

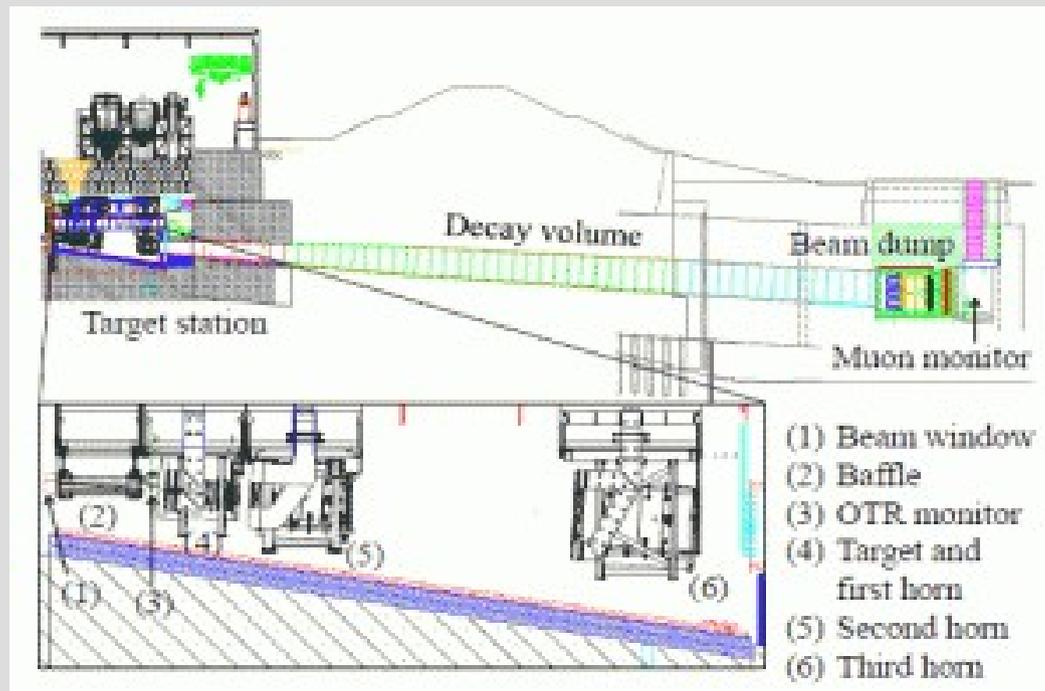
<http://t2k-experiment.org/>

Детектор Супер-Камиоканде

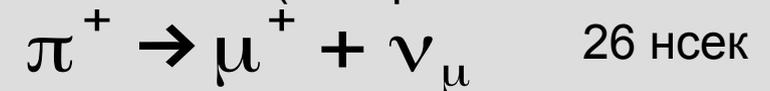


40 метров
50,000 тонн ЧИСТОЙ
ВОДЫ
~10,000 ФЭУ

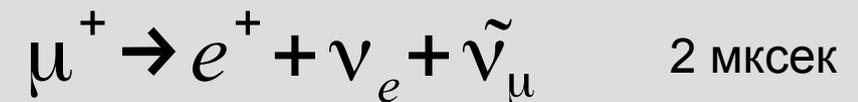
Получение нейтринного пучка



протонный ускоритель бомбардирует мишень и получаются пионы или антипионы (отбор магнитным полем)



пионы распадаются в движении, поток нейтрино по ходу пучка

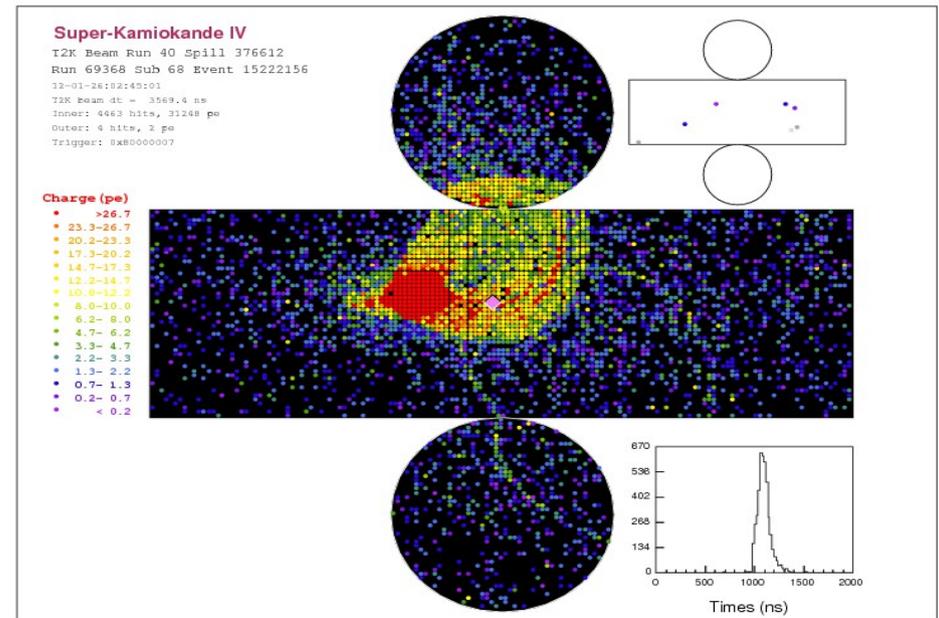
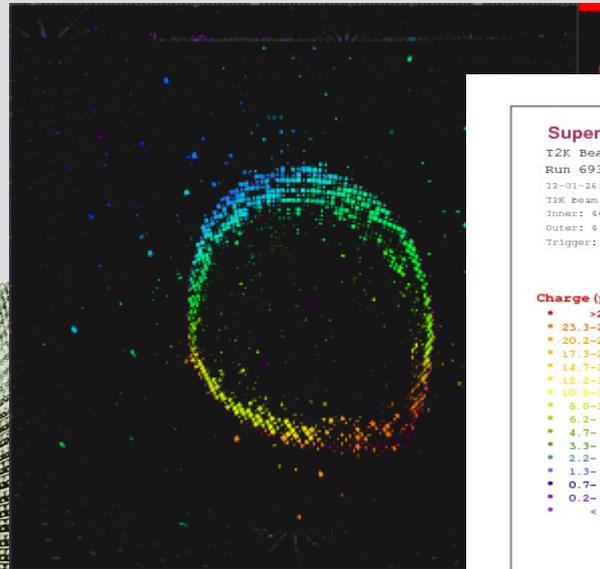
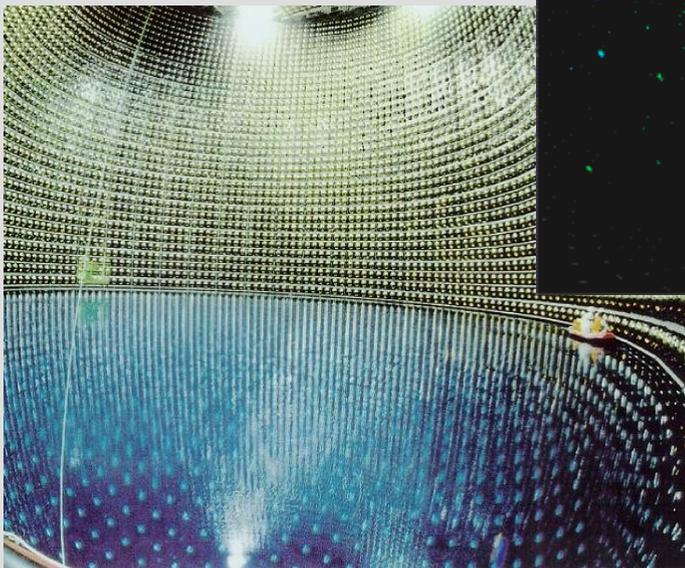


мюоны распадаются после остановки, поток нейтрино изотропен

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

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

Квантовая механика! Вероятность=квадрат модуля волновой функции

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

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

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

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

Период осцилляций
«во времени»

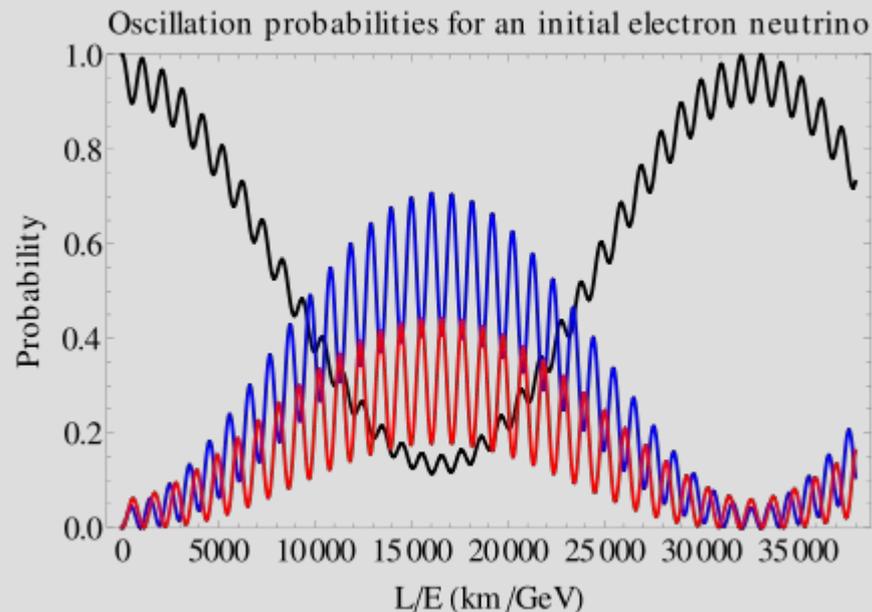
$$T = \frac{\hbar}{E_2 - E_1}$$

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

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

Период осцилляций
«в пространстве»

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



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

Основное на лекции

	mass →	charge →	spin →					
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	c charm
					$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	t top
					0	0	1	g gluon
					$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H Higgs boson
					$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	d down
					$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	s strange
LEPTONS					$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	1	γ photon
					$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	e electron
					$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	μ muon
					$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$\frac{1}{2}$	τ tau
					$91.2 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z Z boson
					$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_e electron neutrino
					$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_μ muon neutrino
					$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$\frac{1}{2}$	ν_τ tau neutrino
					$80.4 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W W boson

