

Физика нейтрино

Дмитрий В. Наумов

ОИЯИ, Дубна, Россия

**17 Ноября 2011. Женева, ЦЕРН.
Лекция для учителей из Украины**

- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Содержание

- 1** Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Нейтрино — член дублета лептонного мультиплета в лагранжиане Стандартной Модели:

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

В некотором дублете, в некотором мультиплете, да в лагранжиане Стандартной Модели:

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



«Абсолютно точно и не понятно» также плохо, как «Все понятно, но совершенно не правда»

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

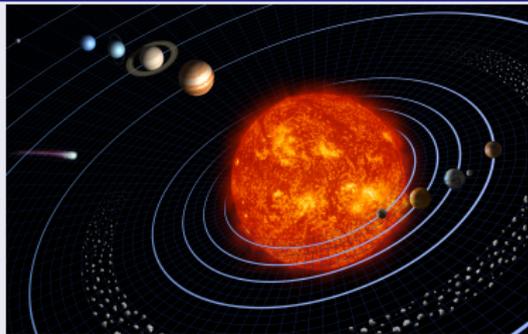


Содержание

- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества**
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Силы, которые действуют в Природе

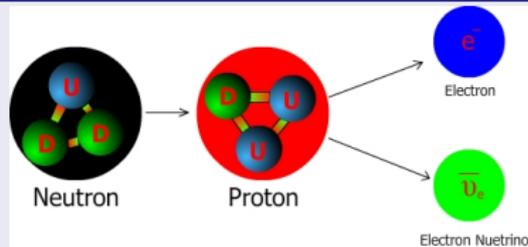
1. Гравитация



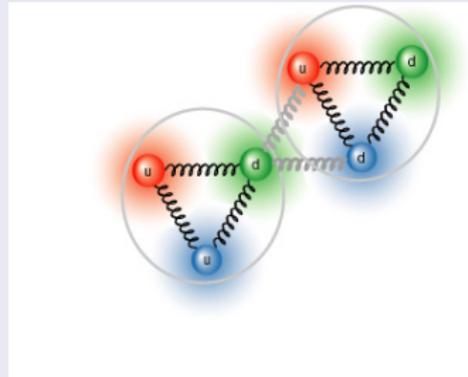
2. ЭМ взаимодействие



3. Слабое взаимодействие



4. Сильное взаимодействие



Свойства взаимодействий

- Все эти силы (кроме гравитации, пока) возникают за счет обмена частицами — переносчиками взаимодействия:
 - ЭМ взаимодействие — фотон (γ)
 - Слабое взаимодействие — (W^\pm, Z)-бозоны
 - Сильное взаимодействие — глюоны (g)
 - Гравитация — гравитон (?)
- у каждого взаимодействия своя интенсивность (“сила“), которая определяется:
 - ”зарядом“ взаимодействия (электрический заряд, слабый заряд, сильный заряд, масса)
 - массой и спином обменной частицы
($m_\gamma = 0, m_{W^\pm} \approx 80m_p, m_Z \approx 90m_p, m_g = 0$)

Свойства взаимодействий

- сохранение энергии, импульса, момента импульса (+ **спин**). Почему они сохраняются?
 - Симметрии законов взаимодействия относительно сдвигов во времени, в пространстве и поворотов в пространстве
- Возможны превращения частиц друг в друга, если это не запрещают законы сохранения
- Какие есть еще законы сохранения?
 - Зависит от теории и заложенных в нее (специально или случайно!) симметрий: барионное число, лептонное число,...

Содержание

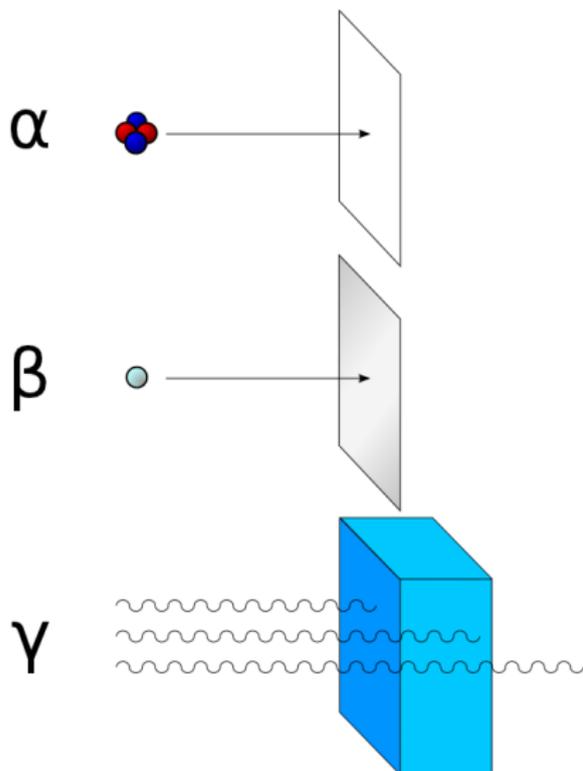
- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?**
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Общий рецепт: перебрать все взаимодействия в попытках объяснить явление и найти либо нужное, либо их комбинацию

- Тележка, катящаяся по наклонной плоскости:
- Двигатель внутреннего сгорания:
- Рентгеновский аппарат:
- Солнце:

Общий рецепт: перебрать все взаимодействия в попытках объяснить явление и найти либо нужное, либо их комбинацию

- Тележка, катящаяся по наклонной плоскости: гравитация, электромагнетизм (трение, реакция опоры)
- Двигатель внутреннего сгорания: электромагнетизм (химическая реакция, термодинамика, крутящий момент,...)
- Рентгеновский аппарат: электромагнетизм (рентгеновские лучи — это фотоны)
- Солнце: электромагнетизм, сильные и слабые взаимодействия, гравитация

Три вида радиоактивности: (α, β, γ) 

Отличаются своим электрическим зарядом q :

- $q_\alpha > 0$
- $q_\beta < 0$
- $q_\gamma = 0$

И разной проникающей способностью. Сегодня мы знаем:

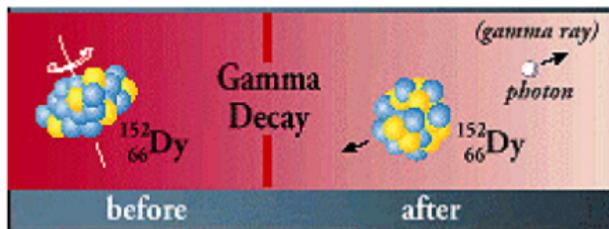
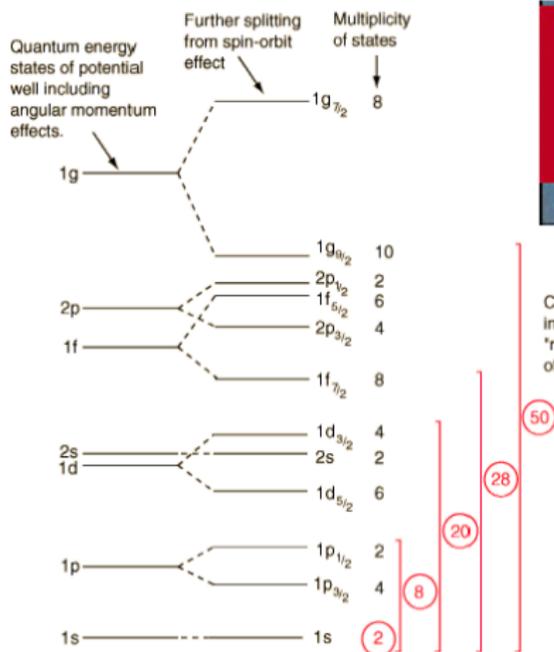
- α — гелий. Сильные в-я
- β — электрон. Слабые в-я.
- γ — фотон. ЭМ в-я.

Три вида радиоактивности: (α, β, γ) . Как узнали тип взаимодействия?

- Разная интенсивность излучения - разные силы. (Но не все так просто. Это долгая история...)
- Проблема с β радиоактивностью: несохранение энергии, импульса
- Проблема со статистикой ядер

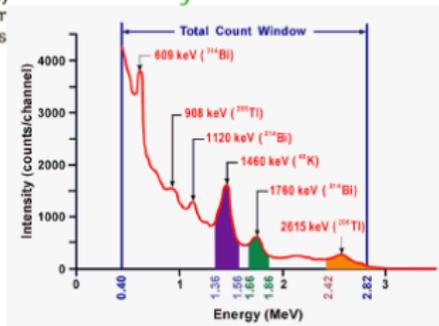
Дискретный спектр согласно квантовой физике

Radioactivity: decays



Closed shells indicated by 'magic num' of nucleons

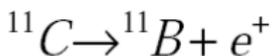
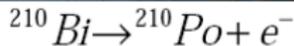
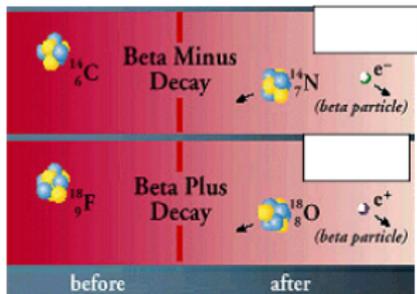
Dominated by EM interaction



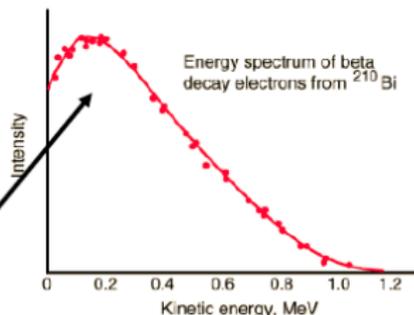
Непрерывный спектр! Проблема

Radioactivity: decay

Continuous energy distribution discovered by J. Chadwick, 1913
(later discovered the neutron, Nobel 1934)



how can this be understood in terms of
nuclear energy levels?



continuous electron(positron) energy
spectrum

Наконец-то, нейтрино!

- В.Паули предположил, что в ядре находятся *нейтроны*, которые испускаются вместе с электроном, унося часть энергии и импульса (объясняя непрерывность спектра электронов. Эту частицу назвали потом *нейтрино*
- Он думал, что та же частица объяснит и другую проблему: *Проблема со статистикой ядер: ${}^6\text{Li}$, ${}^{14}\text{N}$ — целочисленный магнитный спин этих ядер не мог быть объяснен наличием нечетного числа протонов со спином $1/2$ каждый. Но для решения этой проблемы нужен настоящий нейтрон.*
- Э.Ферми построил первую теорию слабых взаимодействий, в которой он ввел понятие нейтрино.

Что мы знаем сегодня о нейтрино?

- Нейтральная частица
- участвует только в слабых и гравитационных взаимодействиях
- Есть три разных типа нейтрино с разными массами:
 m_1, m_2, m_3
- Масса самого тяжелого: $0.05 < m_h < 1 - 2 \text{ эВ}^1$
($m_e = 0.511 \cdot 10^6 \text{ эВ}$)

¹ $1 \text{ эВ} = 1.78 \cdot 10^{-36} \text{ кг}$.

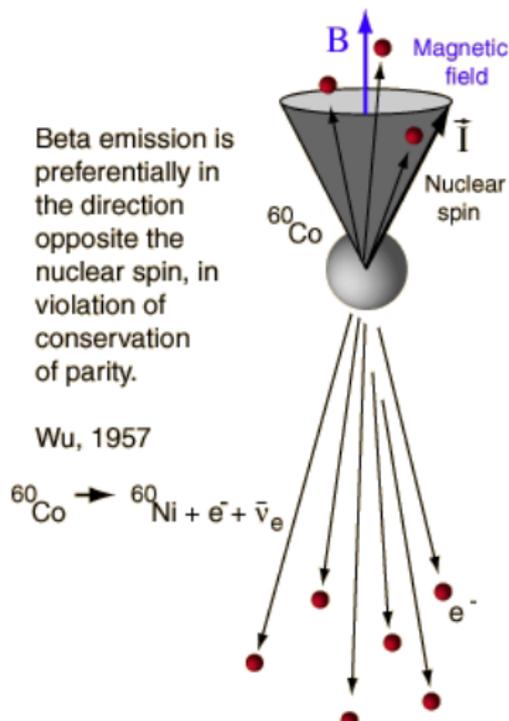
Содержание

- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия**
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

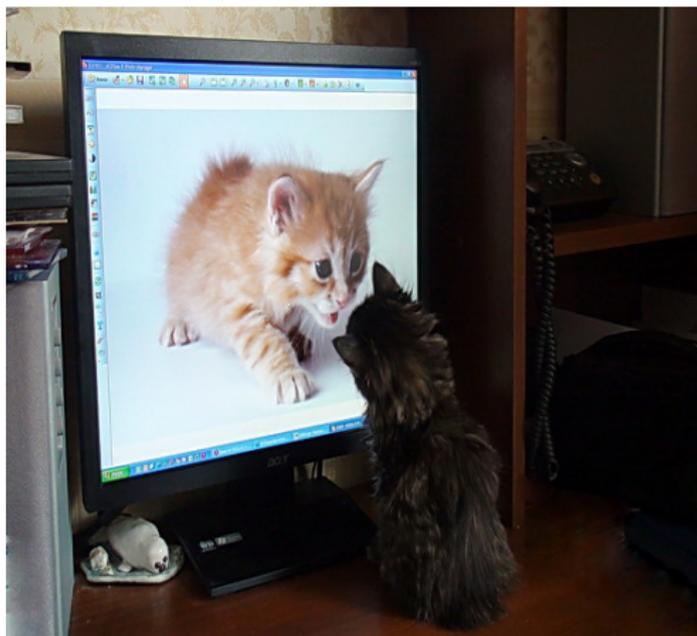
Где важны слабые взаимодействия (СВ)?

- Космология: эволюция Вселенной, нуклеосинтез и др.
- Солнце не может гореть без СВ. СВ определяет также темп горения Солнца
- Эволюция звезды
- Не будь СВ — наш мир был бы совсем другим, заполненным пионами, каонами и др. частицами, которые нестабильны из-за СВ.
- и многое другое...

Нарушение четности - законы физики в зеркальном мире другие!

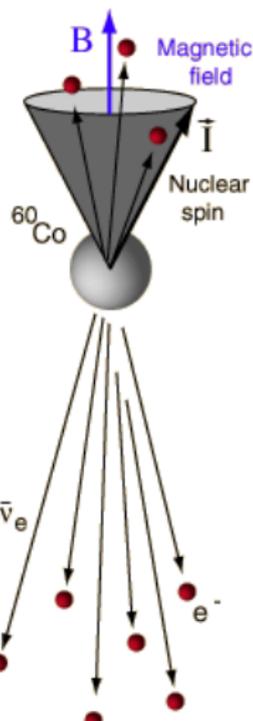
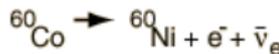


Нарушение четности - законы физики в зеркальном мире другие!



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

Wu, 1957



Почему слабые взаимодействия — “слабые” и насколько?

Сколько времени (τ) в среднем живет нестабильная частица?

$$\tau \sim \frac{1}{\text{интенсивность взаимодействия}}$$

3 примера:

- распад $\rho \rightarrow \pi\pi$ (сильное взаимодействие): $\tau \sim 10^{-24}$ секунды
- распад $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ (электромагнитное взаимодействие): $\tau \sim 10^{-16}$ секунды
- распад $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$ (слабое взаимодействие): $\tau \sim 10^{-8}$ секунды

Сила взаимодействия нейтрино

Какое расстояние пройдет нейтрино с $E_\nu = 1$ МэВ в Солнце до первого взаимодействия?

Это легко вычислить в уме:

$$\lambda = \frac{\langle A \rangle}{\sigma_{\nu e} \langle Z \rangle N_A \rho} \approx \frac{1\text{Г}}{1.723 \cdot 10^{-44} \text{см}^2 \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot 1.4\text{Г см}^{-3}} \approx 7 \cdot 10^{19} \text{см}$$

$$\lambda = 10^9 R_\odot \quad \text{Миллиард Радиусов Солнца!}$$

Для справки:

$$\sigma_{\nu N} = 0.677 \cdot 10^{-38} \frac{E_\nu}{\text{ГэВ}} \text{см}^2, \quad \sigma_{\nu e} = 1.723 \cdot 10^{-44} \frac{E_\nu}{\text{МэВ}} \text{см}^2$$

Вопрос Как же детектировать нейтрино?

Ответ Использовать **ОЧЕНЬ** интенсивные пучки нейтрино и **МАССИВНЫЕ** детекторы!

Сила слабого взаимодействия

- Теоретики во времена Паули считали, что нейтрино НЕВОЗМОЖНО обнаружить из-за слабости взаимодействия.
- Кстати, при больших энергиях взаимодействия - *Слабое взаимодействие СИЛЬНЕЕ электромагнитного*

Содержание

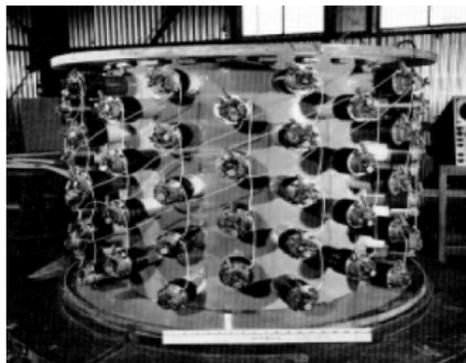
- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино**
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Экспериментальное открытие нейтрино.

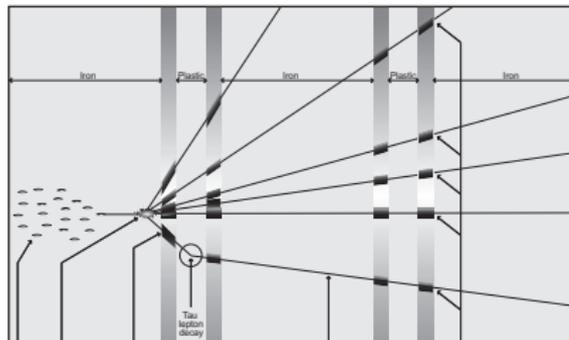
«Они не знали, что это невозможно, поэтому просто сделали это».

Марк Твен

- В 1953 Reines и Cowan открыли электронное антинейтрино $\bar{\nu}_e$ в реакции $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$
- Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger в 1962 году обнаружили мюонное нейтрино ν_μ в распадах $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$
- В эксперименте DONUT в 2000 году открыто третье нейтрино ν_τ в распадах $D_s \rightarrow \tau^- X$, $\tau^- \rightarrow \nu_\tau X'$



Detecting a Tau Neutrino



Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

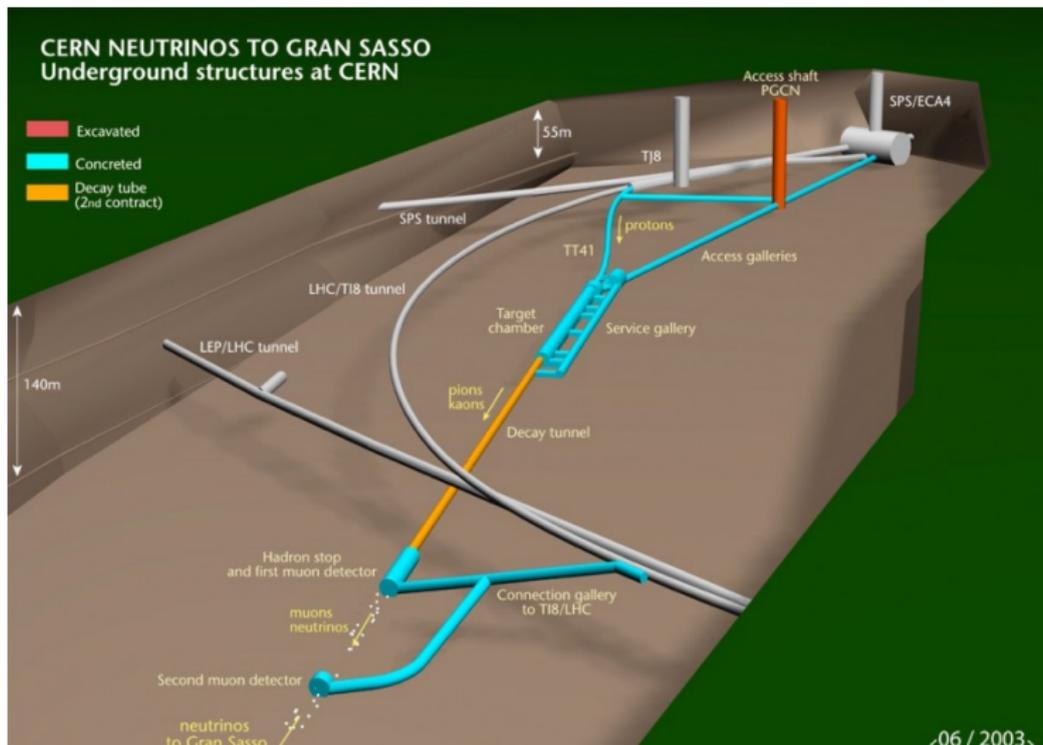
«В жизни всегда полезно время от времени подвергать сомнению то, что испокон веку считается аксиомой.» Бертран Рассел

Принцип измерения очень прост:

- 1 Пучок нейтрино готовится в ЦЕРНе (Швейцария/Франция) (в результате сброса протонов на мишень) и отправляется в сторону Гран-Сассо (Италия) в момент времени t_1 ($\delta t \approx 10$ мкс)
- 2 В момент времени t_2 нейтрино детектируется в установке OPERA (Гран-Сассо)
- 3 Расстояние между точкой сброса протонов на мишень (ЦЕРН) и точкой детектирования в OPERA (Гран-Сассо) измерено при помощи GPS (и методом триангуляции в туннеле) с точностью около 20 см: $L = 731.278$ км
- 4 После этого измеряется скорость нейтрино: $v_\nu = \frac{L}{t_2 - t_1}$

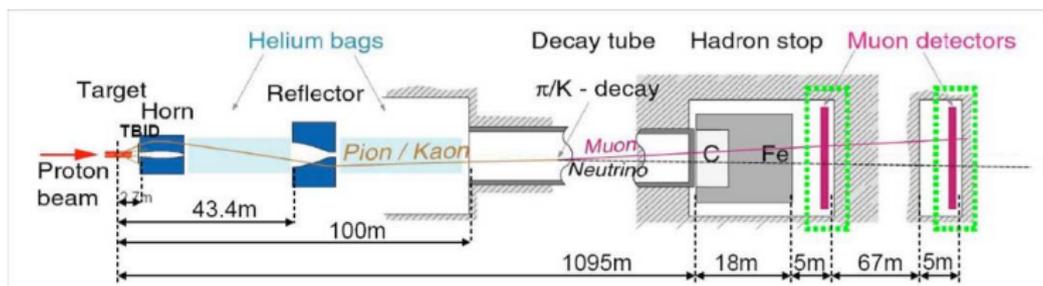
Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Пучок в ЦЕРНе



Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Пучок в ЦЕРНе. Как рождаются нейтрино



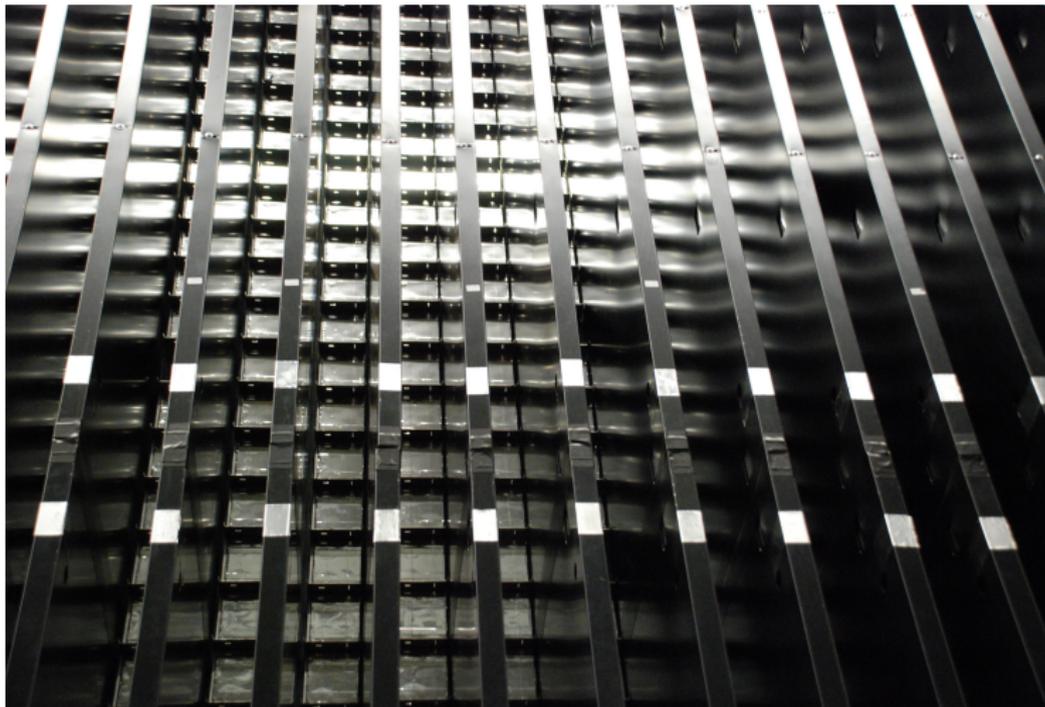
Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Эксперимент OPERA



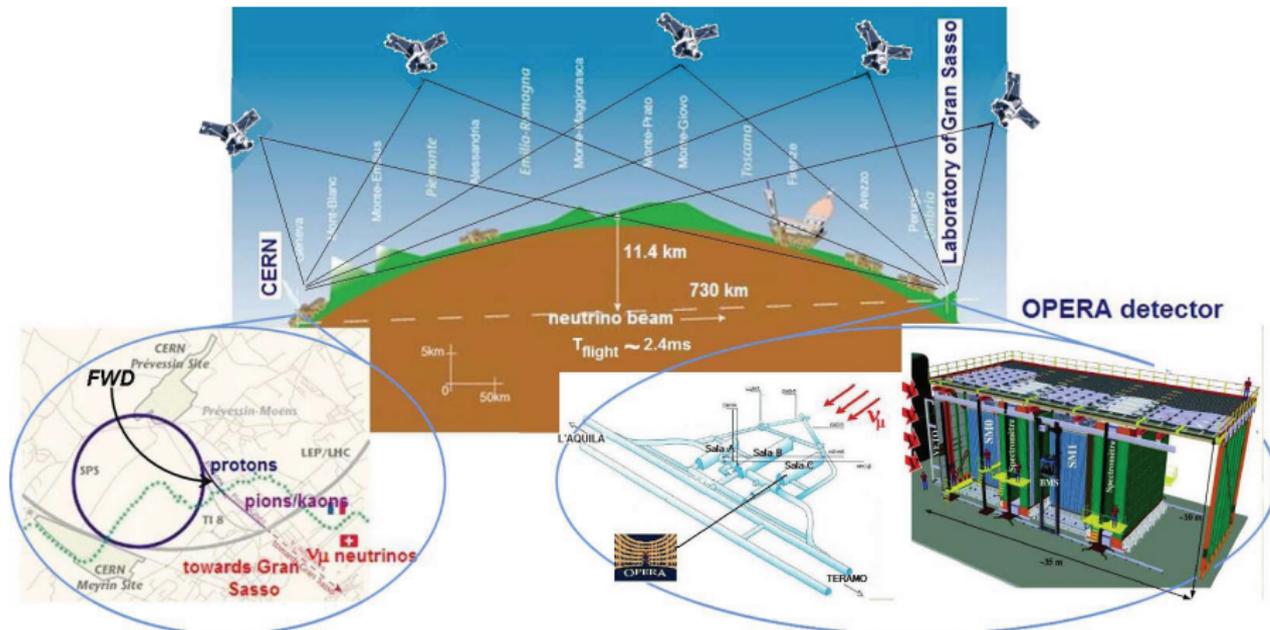
Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Эксперимент OPERA



Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Все вместе



Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA

Результат

$$v_\nu = c \cdot (1 + (2.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-5})$$

Результаты измерения *можно интерпретировать так*, что скорость нейтрино больше скорости света.

Измерение скорости нейтрино экспериментом OPERA. Как к этому относится?

- 1 С осторожностью. Коллаборация OPERA не нашла возможного источника систематической ошибки, который бы объяснил наблюдаемый результат, но это не значит, что его может не быть
- 2 Этот результат нуждается в независимой проверке другими экспериментами, желательно с другими методиками синхронизации времени (MINOS, Borexino, T2K, OPERA)
- 3 Если этот результат окажется правдой, то это потребует пересмотра ВСЕЙ современной физики. Поэтому, нужно тщательно его перепроверить.

Осцилляции нейтрино

- Мы знаем, что существуют три *состояния* нейтрино, которые всегда рождаются вместе с электроном, мюоном и тау-лептоном:

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

- Однако, ν_e, ν_μ, ν_τ — не частицы! Это суперпозиции массивных состояний нейтрино, с массами m_1, m_2, m_3 :

$$\nu_1, \nu_2, \nu_3$$

Осцилляции нейтрино

- Если в точке x_1 в момент времени t_1 родилась суперпозиция

$$\nu_\alpha = \sum_i V_{\alpha i} \nu_i, \quad \alpha = e, \mu, \tau (i = 1, 2, 3),$$

то в другой момент времени t_2 эта суперпозиция состояний может выглядеть уже как другое состояние нейтрино:

$$\nu_\beta = \sum_i V_{\beta i} \nu_i, \quad \beta = e, \mu, \tau (i = 1, 2, 3),$$

- Через некоторое время картина опять вернется к исходной

$$\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha$$

- Вероятность таких переходов - периодическая. Это дало название явлению *осцилляции нейтрино*

Осцилляции нейтрино

- Поскольку нейтрино рождается, как правило, ультрарелятивистским, то за время $t_2 - t_1$ оно успевает улететь на расстояние $L \approx c(t_2 - t_1)$, то осцилляции будут видны как периодическое изменение флэйвора (e, μ, τ) в зависимости от расстояния L .

- Вероятность осцилляций периодически зависит от величины

$$\frac{\Delta m^2 L}{E_\nu}$$

- Все эксперименты по осцилляциям нейтрино измеряют $P_{\alpha\beta}(\Delta m^2 L/E_\nu)$, поставив свой детектор на такое расстояние L , когда вероятность обнаружить осцилляции максимальна или близка к этому.
- Из экспериментов по осцилляциям нейтрино узнают Δm^2

Содержание

- 1 Как не надо рассказывать про физику школьникам
- 2 Физические законы и структура вещества
- 3 Как узнают какие взаимодействия ответственны за физическое явление?
- 4 Слабые взаимодействия
- 5 Эксперименты с нейтрино
- 6 Возможные темы для рефератов. Задачи

Возможные темы для рефератов для школьников

- 1 Солнечные нейтрино
- 2 Атмосферные нейтрино
- 3 Геонейтрино
- 4 Ускорительные нейтрино
- 5 Реликтовые нейтрино
- 6 Масса нейтрино
- 7 Что такое нейтрино Дирака и нейтрино Майорана?
- 8 Стабильно ли нейтрино?
- 9 Проекты по измерению скорости нейтрино
- 10 Безнейтринный двойной β распад
- 11 Нейтринные осцилляции в вакууме
- 12 Нейтринные осцилляции в веществе

Задачи

- 1 Вычислите сколько нейтрино застревает в теле человека за 70 лет, если это нейтрино от Солнца
- 2 Вычислите скорость реликтовых нейтрино, если их температура $T_\nu \approx 1.7$ К, а масса 1 эВ.
- 3 Сколько реликтовых нейтрино находится в среднем в теле человека, если их плотность порядка 50 штук в куб. см на каждый сорт нейтрино?
- 4 Какой толщины должна быть защита из свинца, чтобы защититься от атмосферных нейтрино?

Литература для первого чтения

- <http://elementy.ru>
- <http://igorivanov.blogspot.com/>
- <http://www.nu.to.infn.it/>
- Г. Клапдор-Кляйнротхаус, А.Штаудт, “Неускорительная физика элементарных частиц”, (М.: Наука, 1997)
- Дж. Баккал, “Нейтринная астрофизика”, (М:Мир, 1993)
- Ф.Клозе, “Нейтрино”, (Oxford University Press, New York, 2010)
- А.А.Боровой, “12 шагов нейтринной физики”, (М.:“Знание”, 1985)

Литература для первого чтения

- Naumov, D. V., “Recent results in neutrino physics”, arXiv:1111.2042
- Наумов, В. А., “Солнечные нейтрино. Астрофизические аспекты”, Письма в ЭЧАЯ, 8 №7 (170), 1141-1170, 2011
- Наумов, Д. В., “Введение в физику нейтрино”, Письма в ЭЧАЯ, 8 №7 (170), 1192-1231, 2011