

Измерение спектра антинейтрино ^{144}Pr

С. В. Бахланов, А. В. Дербин, И. С. Драчнев, И. М. Котина, В. Н. Муратова,
Н. В. Ниязова, Д. А. Семенов, М. В. Трушин, Е. В. Унжаков, Е. А. Чмель

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия

April 2, 2024

Проблема стерильного нейтрино

- Реакторная нейтринная аномалия
- Галлиевая нейтринная аномалия
- Эксперименты с искусственным источником антинейтрино

Бета-спектры

- Структура бета-спектра
- Виды бета-спектрометров

Полупроводниковые бета-спектрометры

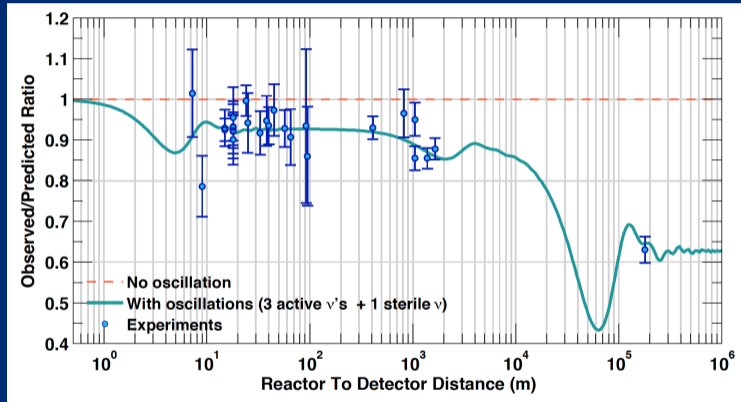
- Конструкция полупроводниковых бета-спектрометров
- Функции отклика

Получение спектра нейтрино ^{144}Pr

- Схема распада ^{144}Pr
- Измерение спектра ^{144}Pr
- Спектр нейтрино ^{144}Pr

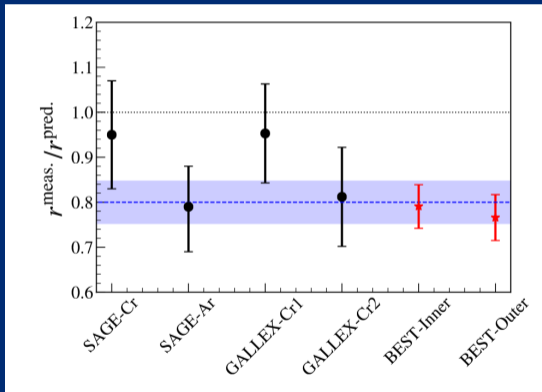
Заключение

Реакторная нейтринная аномалия



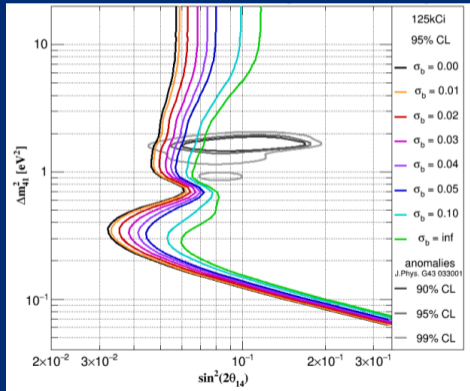
Во множестве реакторных экспериментов наблюдается дефицит нейтрино на средних дистанциях от источника.

Галлиевая нейтринная аномалия



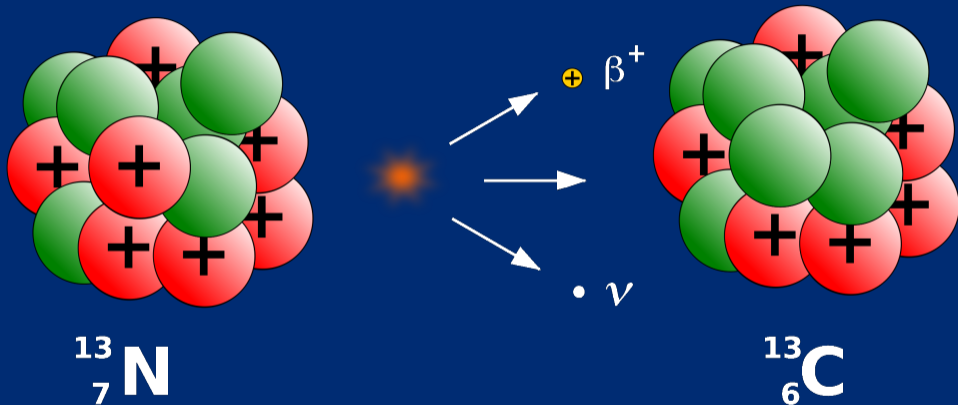
Уже при калибровке экспериментов SAGE и GNO с источником ^{51}Cr и ^{37}Ar был обнаружен дефицит нейтрино, в дальнейшем подтвержденный экспериментом BEST с высоким уровнем достоверности.

Эксперименты с искусственным источником антинейтрино



Эксперимент с большим сцинтилляционным детектором и искусственным радиохимическим источником антинейтрино, регистрирующий нейтрино по реакции обратного бета-распада на водороде мог бы пролить свет на имеющиеся аномалии. Оптимальный источник - ^{144}Pr , имеющий граничную энергию в 2997.5 кэВ. Однако, чувствительность такого эксперимента напрямую зависит от точности определения спектра этого источника.

Структура бета-спектра



$$S(W) = PW(W - W_0) \times F(W, Z) \times S(W, Z),$$

где $PW(W - W_0)$ - фазовый объем, $F(W, Z)$ - функция Ферми, $S(W, Z)$ - ядерный форм-фактор

Виды бета-спектров

- Разрешенные переходы:

$$\Delta\pi = +1, \Delta I = 0, 1$$

Для разрешенных переходов в подавляющем большинстве случаев $S(W,Z) = 1$

- Запрещенные переходы:

$\Delta\pi = -1, \Delta I = 0, 1$ - первого порядка запрещения

$\Delta\pi = -1, \Delta I = 2$ - первого порядка запрещения уникальные

$\Delta\pi = +1, \Delta I = 2$ - второго порядка запрещения и т.д.

Для запрещенных переходов функция форм-фактора $S(W)$ отлична от единицы и подчас весьма существенно. Эта величина требует экспериментального определения.

Поправки к функции Ферми

Функция Ферми рассчитывается для точечного ядра как

$$F_0(Z, W) = 4(2pR)^{2(\gamma-1)} e^{\pi y} \frac{|\Gamma(y + iY)|^2}{|\Gamma(1 + 2\gamma)|^2}$$

, где $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2 Z^2}$, $y = \pm \alpha ZW/p$, $R = 1.121A^{1/3} + 2.462A^{1/3} - 6.614A^{-1}$

К ней могут быть применены поправки на

- Конечный размер ядра

[1] D.H. Wilkinson, Evaluation of beta decay II: Finite mass and size effects, NIM A 290, 1990, DOI:10.1016/0168-9002(90)90570-V90570-V))

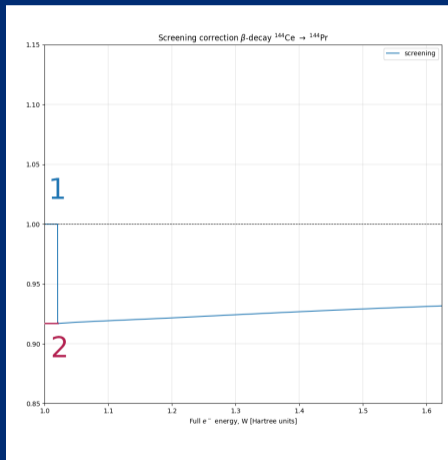
- Слабое взаимодействие
- Радиационные поправки

[2] A.Sirlin, General Properties of the Electromagnetic Corrections to the Beta Decay of a Physical Nucleon, Phys. Rev. 164, (1967), DOI:10.1103/PhysRev.164.1767

- Поправка на экранирование

[3] [1] H.Behrens, W.Buhring, Electron Radial Wave Functions and Nuclear Beta Decay, Clarendon Oxford, (1982)

Поправка на экранирование



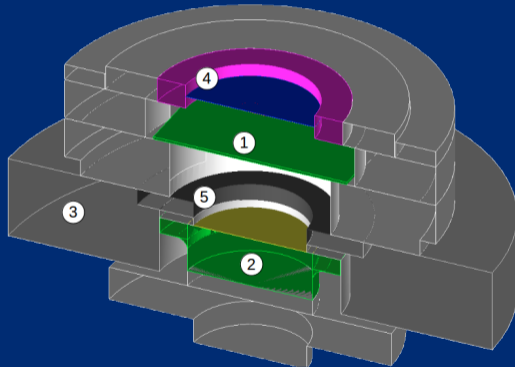
Так как потенциал поправки на экранирование может быть определен различными способами, можно рассматривать минимальное (1) и максимальное (2) возможные значения и учитывать разницу как систематическую неопределенность расчета.

Виды бета-спектрометров

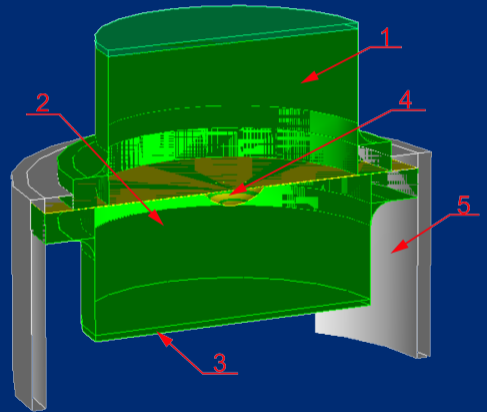
бета-спектры могут быть измерены при помощи различных спектрометров:

- магнитные и электростатические спектрометры
- сцинтилляционные кристаллы и органические сцинтилляторы
- криогенные, болометрические и иные специфические спектрометры
- полупроводниковые спектрометры

Конструкция полупроводниковых бета-спектрометров



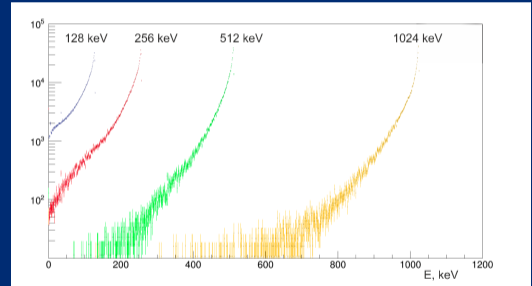
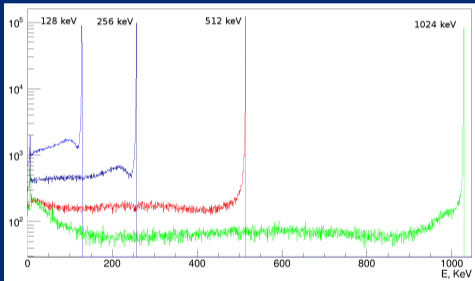
Спектрометр в схеме мишень-детектор



Спектрометр с 4π-геометрией

Функции отклика

функции отклика вычислялись при помощи пакета GEANT4.10.6 с использованием пакета электромагнитных взаимодействий G4EmStandardPhysics_option4

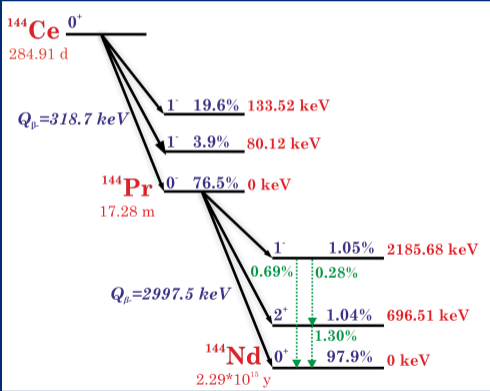


Спектрометр в схеме мишень-детектор

Спектрометр с 4π-геометрией

Для 4π-геометрии использовалось аналитическое описание в форме $e^{A(T_e)E+B(T_e)} \times \theta(E - T_e)$ с выравниванием энергетической зависимости дисперсии с дополнительным параболическим множителем

Схема распада ^{144}Pr

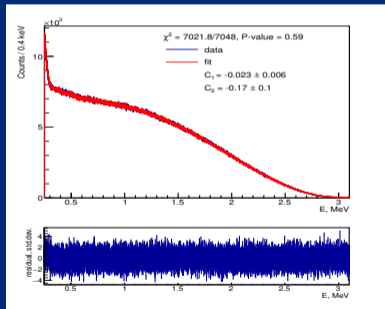


В схеме распада $^{144}\text{Ce} - ^{144}\text{Pr}$ содержится шесть основных переходов, среди них 4 - первого запрещения, один - первого запрещения уникальный и один - разрешенный

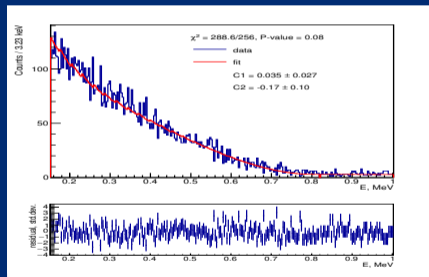
Измерение при помощи спектрометра “мишень-детектор”

Подгонка экспериментального спектра осуществляется функцией вида

$$F(E) = \int N(W)R(E, W)dW$$



подгонка спектра для спектрометра с геометрией “мишень-детектор”

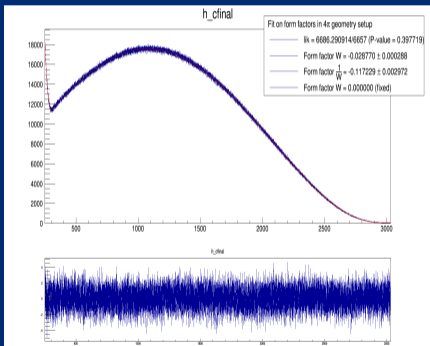


Подгонка спектра разрешенного перехода, полученного в совпадении с гамма-линиями. $S(W)$ согласуется с единицей

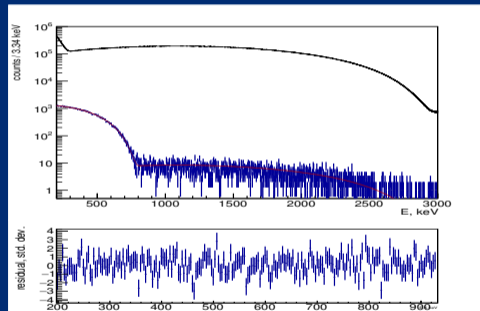
Измерение при помощи 4π спектрометра

Подгонка экспериментального спектра осуществляется функцией вида

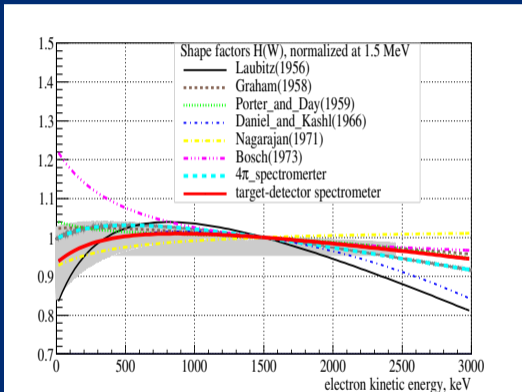
$$F(E) = \int N(W)R(E, W)dW$$



подгонка спектра спектрометра с 4π -геометрией

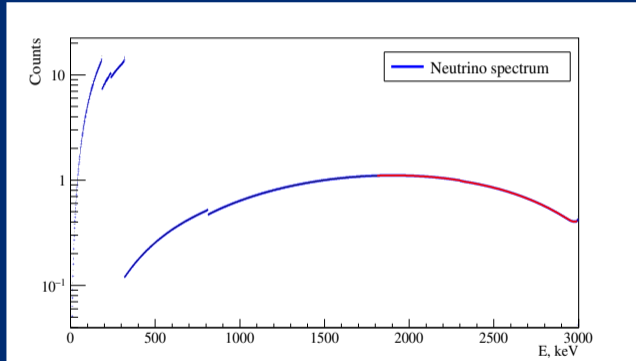


Подгонка спектра разрешенного перехода, полученного в совпадении с гамма-линиями. $S(W)$ согласуется с единицей

Форм-фактор ^{144}Pr 

Сравнение полученного форм-фактора с результатами предшествующих экспериментов

Полученный форм-фактор сравнивался с существующими исследованиями, согласие между которыми отсутствует. Полученная форма близка к ожидаемой для аксиально-векторного перехода в соответствии с работой [Konopinski et al., PR v.60 pp 308-320, 1941]

Спектр нейтрино ^{144}Pr 

На основе полученного бета-спектра можно вычислить спектр нейтрино. С учетом неопределенностей, связанных со статистическим разбросом, а также с неопределенностями, связанными с расчетом поправки функции Ферми на экранирование, можно определить часть спектра выше 1811 кэВ как $0.50467 \pm 0.00003_{\text{stat}} \pm 0.00022_{\text{syst}}$, а интегральное сечение обратного бета-распада как $(0.47091 \pm 0.00003_{\text{stat}} \pm 0.00022_{\text{syst}}) \times 10^{-43} \text{ cm}^2 (\text{decay})^{-1}$ (0.05 %)

- Полупроводниковые детекторы могут успешно применяться для прецизионного измерения бета-спектров. Созданы точные бета-спектрометры на их основе.
- Бета-спектр ^{144}Pr измерен с беспрецедентной точностью при помощи двух различных полупроводниковых спектрометров
- Определен спектр нейтрино от ^{144}Pr , интегральное сечение реакции обратного бета-распада на водороде определено как $(0.47091 \pm 0.00003_{\text{stat}} \pm 0.00022_{\text{syst}}) \times 10^{-43} \text{cm}^2(\text{decay})^{-1}$ (0.05 %)

Благодарю за внимание