

ЛЯП ОИЯИ

Подавление фона от долгоживущих изотопов ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ в эксперименте JUNO

Общелабораторный семинар

Артём Чуканов

27 июля 2022 г.



- ▶ Подавление фона от долгоживущих изотопов ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ в различных нейтринных экспериментах
- ▶ Эксперимент JUNO
- ▶ Рождение ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ в эксперименте JUNO
- ▶ Реконструкция мюонных треков в эксперименте JUNO



- ▶ Реакторные
- ▶ Атмосферные
- ▶ Ускорительные
- ▶ Солнечные

Основной источник фона для реакторных экспериментов (регистрация взаимодействия антинейтрино низких энергий)

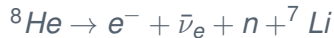


Сигнал: регистрация реакции обратного бета распада:



Фон: взаимодействие мюонов с жидким сцинтиллятором

Рождается ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ (периоды полураспада 171,7 мс и 257,2 мс, что несопоставимо больше мюонного вето), имеющие ту же сигнатуру распада что и обратный бета распад.



Double Chooz



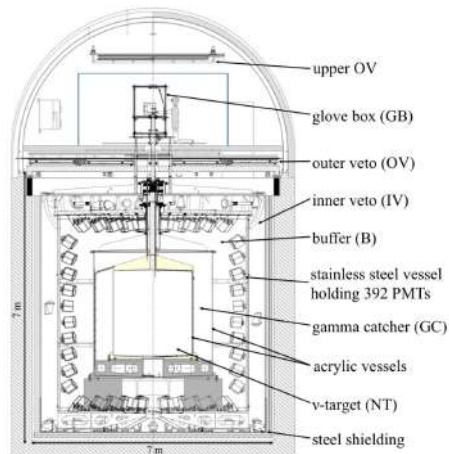
Объём $2 \times 10 \text{ м}^3$

Глубина 120 и 300 м.в.э.

Подавление $^8\text{He}/^9\text{Li}$

применяется функция правдоподобия, основанная на положении вершины, мюонного трека и количества нейтронов до 1 мс после мюонного события.

55% изотопов подавляется этим условием.
Фон - 0,95 шукт в день в дальнем детекторе (1,3% от сигнала)



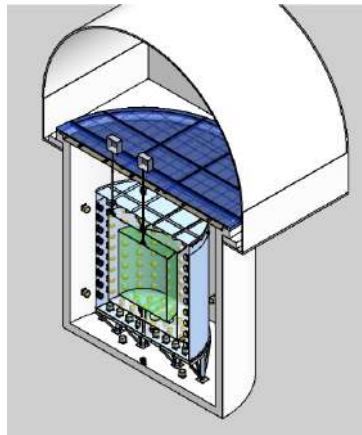
Масса 2х16 т

Глубина 120 и 450 м.в.э.

Поток мюонов - 117 и 13 мюонов в секунду

Фон от ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ не подавлялся

Фон от ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ - 6,49 и 1,71 штук в день,
~ 0.3% и 2.6% от сигнала



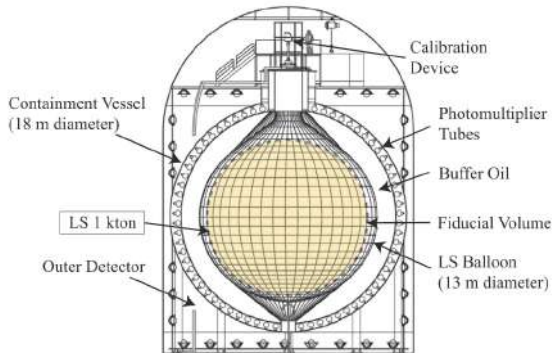
Масса 1 кт

Глубина 2700 м.в.э.

Поток мюонов - 1 мюон в 5 секунд

Подавление фона ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ - 2 секунды
во всём объёме после мюона с эл.маг.
ливнем

Фон от ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ - 13,6 шукт за 5 лет
набора данных, $\sim 0.8\%$ от сигнала



BOREXINO



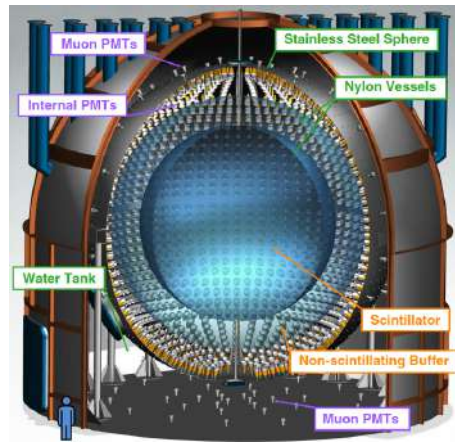
Масса 278 т

Глубина 3800 м.в.э.

Поток мюонов - 1,2 мюона в час через 1 кв.м.

Подавление фона - 1,6-2 секунды после мюона
с эл.маг. ливнем

Фон от ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ - 3,6 шукт за 3263 дня набора
данных (11 календарных лет), $\sim 2\%$ от сигнала
(при регистрации гео-нейтрино)



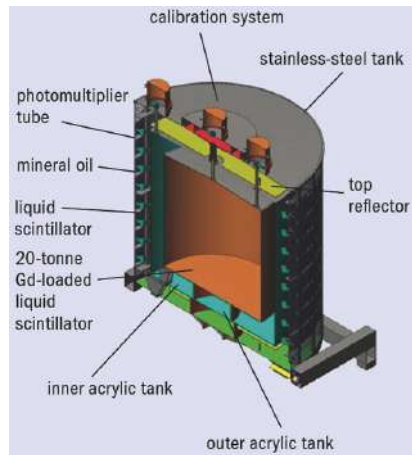
Масса 8x20 т

Глубина 250, 265 и 860 м.в.э.

Поток мюонов - 1,27; 0,95; 0,056 мюона в секунду на 1 кв.м.

Подавление фона - 1 секунда после мюона с эл.маг. ливнем

Фон от ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ - 0,19 - 2,38 штук в день, $\sim 0.06 - 0.2\%$ от сигнала





Основные задачи эксперимента:

- ▶ определение иерархии масс нейтрино - 3σ за 6 лет
- ▶ уточнение параметров осцилляций - $\sin^2 \theta_{12}$, Δm_{21}^2 и Δm_{31}^2 с точностью 0,2 – 0,5%
- ▶ поиск распада протона
- ▶ нейтрино от сверхновой
- ▶ гео-нейтрино
- ▶ солнечные нейтрино
- ▶ атмосферные нейтрино
- ▶ диффузный фон нейтрино от сверхновых

Детектор JUNO



Масса 20 кт

Глубина 700 м

Поток мюонов - 3 мюона в секунду

Диаметр акриловой сферы 35 м

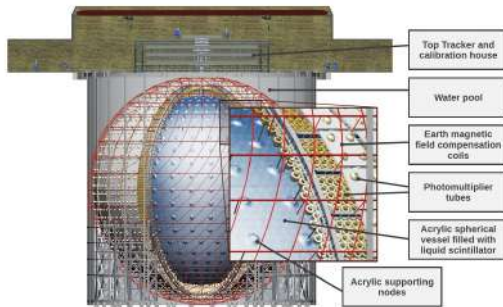
Количество 20" ФЭУ - 17612

Количество 3" ФЭУ - 25600

Количество 20" ФЭУ в водном вето - 2400

Количество антинейтринных взаимодействий - 47 штук в день

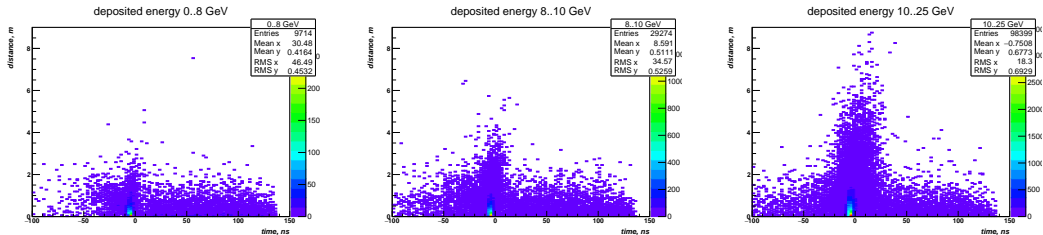
Количество ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$ ~ 60 штук в день





Моделирование вертикальных мюонов, идущих через детектор
Энергетический спектр соответствует спектру в экспериментальном зале.
Количество смоделированных мюонов равно 20-ти летней статистике набора данных.

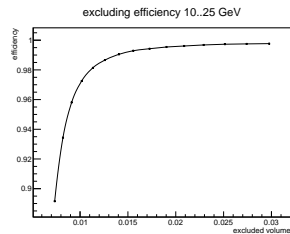
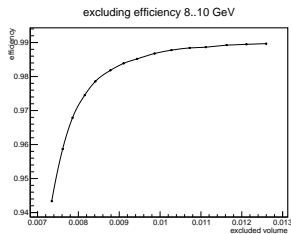
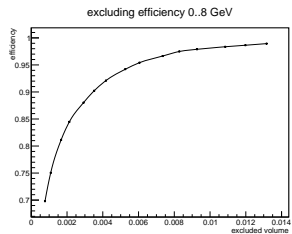
Ось Ox - время максимального энерговыделения



Эффективность изоляции ионов (~ 1 с)

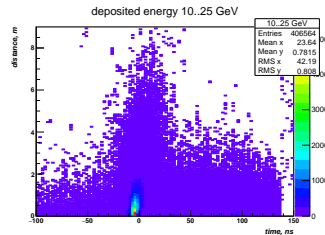
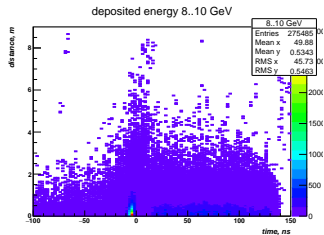
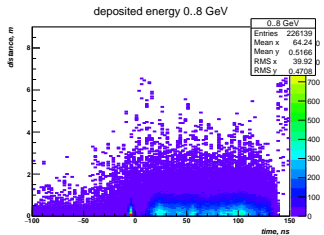


12

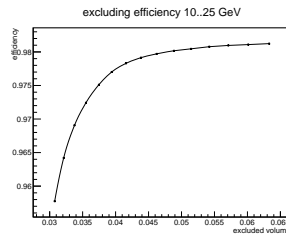
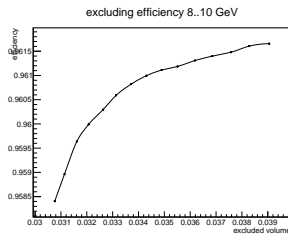
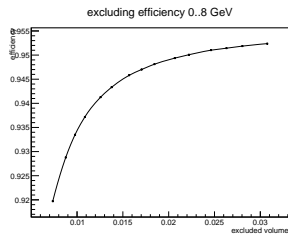




Ось Ox - время максимального энерговыделения



Эффективность изоляции нейтронов (~ 600 мкс)





- ▶ моделирование калибровочных мюонов: вертикальные мюоны с шагом 0,5 м вдоль оси Ox
- ▶ описание отклика детектора на прохождение мюонных треков в зависимости от расстояния до центра детектора
- ▶ снимок отклика детектора на мюонный трек, который должен быть реконструирован
- ▶ вращаем и "двигаем" калибровочный мюон до тех пор, пока он не будет совпадать с сигналом от исходного мюона
- ▶ найденные углы поворота и расстояние до центра - это и есть направление исходного мюонного трека

Вопрос: как найти зависимость отклика детектора от расстояния до центра, на котором проходит калибровочный мюон?



- ▶ моделирование калибровочных мюонов: вертикальные мюоны с шагом 0,5 м вдоль оси Ox
- ▶ описание отклика детектора на прохождение мюонных треков в зависимости от расстояния до центра детектора
- ▶ снимок отклика детектора на мюонный трек, который должен быть реконструирован
- ▶ вращаем и "двигаем" калибровочный мюон до тех пор, пока он не будет совпадать с сигналом от исходного мюона
- ▶ найденные углы поворота и расстояние до центра - это и есть направление исходного мюонного трека

Вопрос: как найти зависимость отклика детектора от расстояния до центра, на котором проходит калибровочный мюон?

Ответ: использование сферических функций



(



Все функции в сферических координатах могут быть представлены в виде суммы сферических функций

$$f(\theta, \varphi) \approx u_0 + u_1 + \dots + u_m = \sum_{n=0}^m u_n(\theta, \varphi) \quad (1)$$

где $u_n(\theta, \varphi)$ может быть представлена в виде суммы $(n + 1)$ гармоник:

$$u_n(\theta, \varphi) = \sum_{k=0}^n P_n^{(k)}(\cos \theta) [c_{nk} \cdot \cos k\varphi + s_{nk} \cdot \sin k\varphi] \quad (2)$$

где $P_n^{(k)}(\cos \theta)$ - присоединённые полиномы Лежандра степени k и порядка n ; c_{nk} , s_{nk} - коэффициенты



Тогда (1) может быть переписано как:

$$f(\theta, \varphi) \approx \sum_{n=0}^m \sum_{k=0}^n P_n^{(k)}(\cos \theta) (c_{nk} \cdot \cos k\varphi + s_{nk} \cdot \sin k\varphi) \quad (3)$$

Неизвестные коэффициенты c_{nk} и s_{nk} in (3) определяются следующими формулами:

$$c_{nk} = \frac{2n+1}{2\pi \cdot \delta_k} \cdot \frac{(n-k)!}{(n+k)!} \int_{\Omega} f(\theta, \varphi) \cdot P_n^{(k)}(\cos \theta) \cdot \cos k\varphi d\Omega, \quad (4)$$

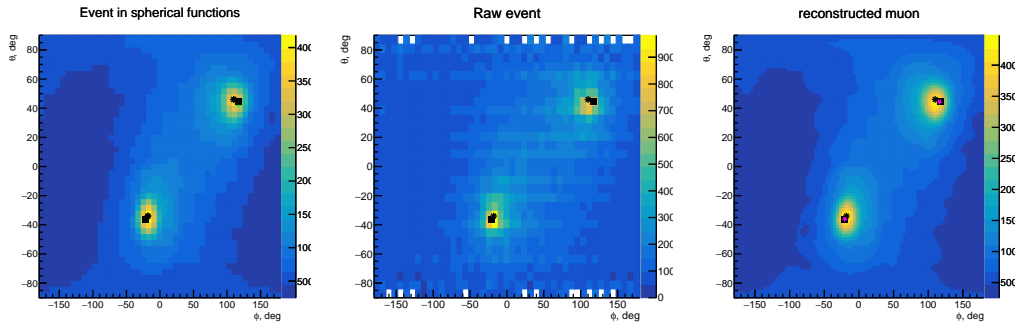
$$s_{nk} = \frac{2n+1}{2\pi \cdot \delta_k} \cdot \frac{(nek)!}{(n+k)!} \int_{\Omega} f(\theta, \varphi) \cdot P_n^{(k)}(\cos \theta) \cdot \sin k\varphi d\Omega, \quad (5)$$

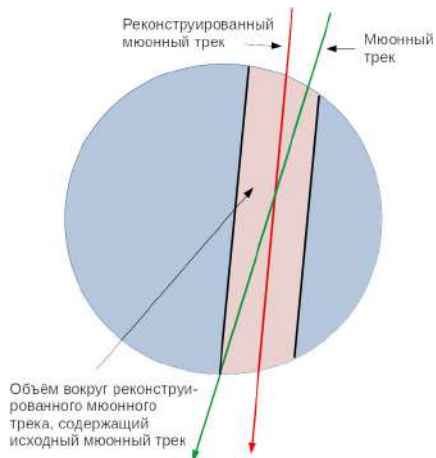
где $n = 0, 1, 2, 3, \dots, m$; $k = 0, 1, 2, \dots, n$; $\delta_0 = 2$, $\delta_k = 1$ для $k > 0$

Наша цель - определить $c_{nk}(r)$ и $s_{nk}(r)$, где r - расстояние от центра детектора до мюонного трека



)

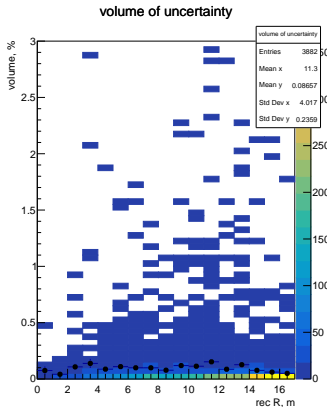




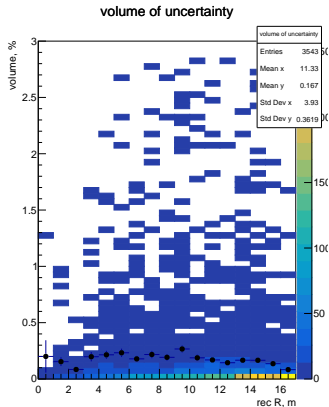
Реконструкция мюонов - объём, содержащий мюонный трек



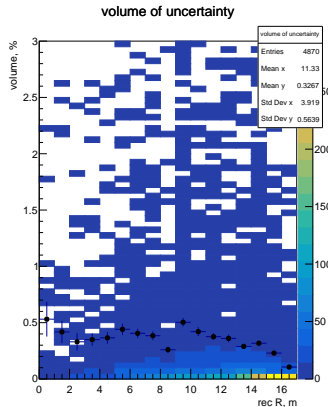
одиначный
мюонный трек



двойной
мюонный трек



тройной
мюонный трек





- ▶ основным фоном к антинейтринным взаимодействиям малых энергий является распад долгоживущих изотопов ${}^8\text{He}/{}^9\text{Li}$, рождающихся при взаимодействии атмосферных мюонов с веществом детектора
- ▶ различные эксперименты в зависимости от объёма и глубины используют различные методы подавления фона
- ▶ для эксперимента JUNO необходима реконструкция направления мюонного трека и исключения определённого объёма вокруг него для анализа антинейтринных взаимодействий
- ▶ исключаемый объём составляет $\sim 3\%$ от общего объёма детектора в течение 1 с
- ▶ применение сферических функций позволяет с хорошей точностью восстанавливать мюонные треки в эксперименте JUNO