

Спектральная антинейтринная аномалия и изучение структуры коррелированного фона детектора iDREAM

Подготовил: ст. гр. М23-11 Нуркенов Айдар Александрович

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Литвинович Е.А.

Спектральная антинейтринная аномалия

Фундаментальная значимость нейтринных экспериментов на реакторах обусловлена двумя основными причинами:

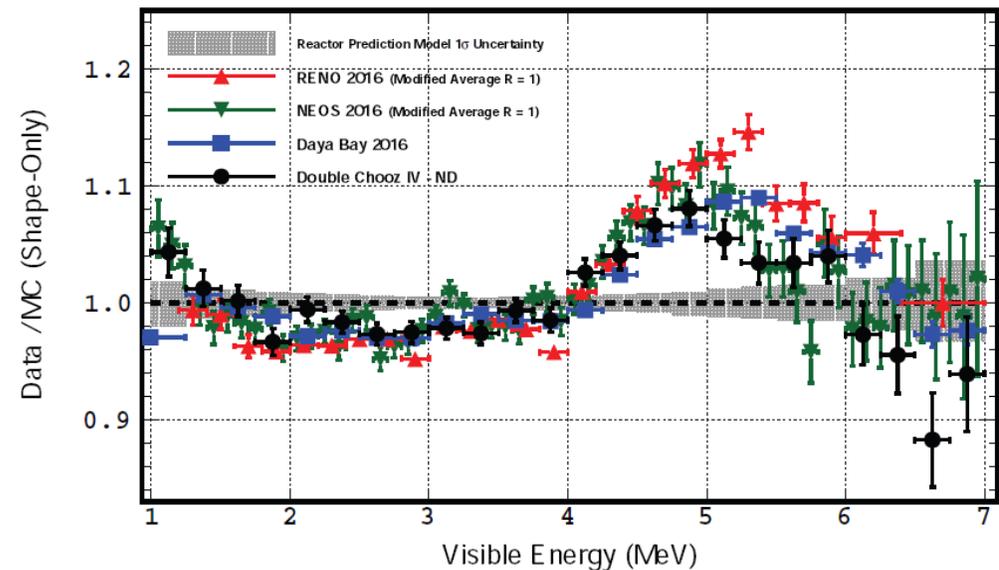
- Обнаружение двух аномалий, которые могут быть связаны с неполным пониманием процессов внутри ядерных реакторов или проявлениями Новой физики
- Возможность удалённого контроля реакторов по нейтринному излучению

Аномалии:

- Реакторная антинейтринная аномалия
- Спектральная антинейтринная аномалия (bump-эффект)

Суть спектральной антинейтринной аномалии:

Превышение регистрируемых событий над ожидаемым спектром в области 4-6 МэВ примерно на 10%.



“The 5MeV reactor neutrino excess” by Patrick Huber

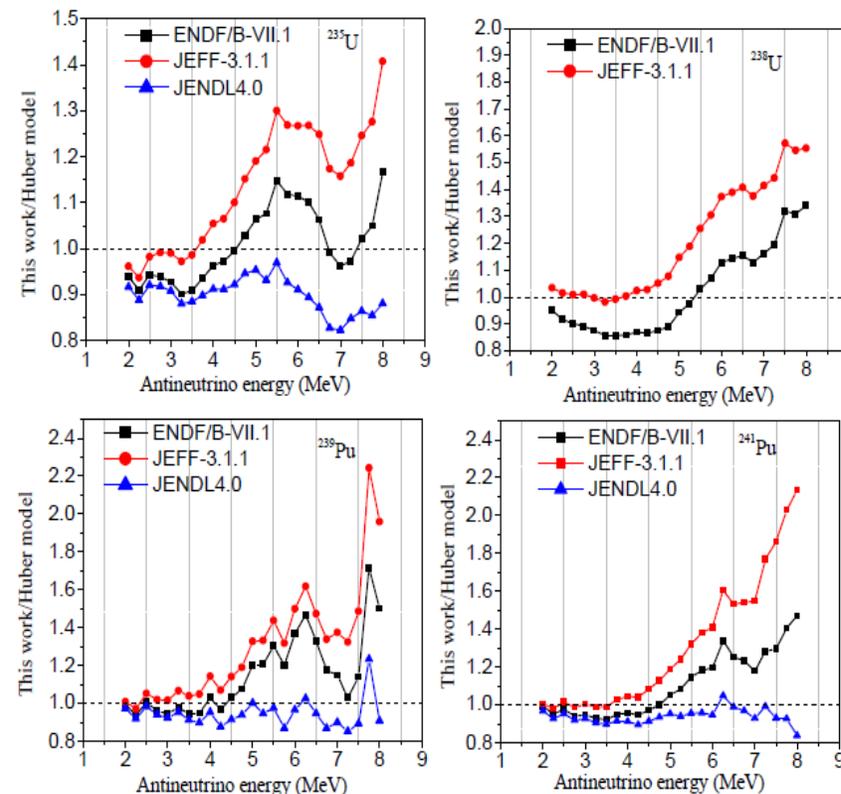
Спектральная антинейтринная аномалия

Возможные объяснения спектральной аномалии:

- Несовершенство баз данных
- Природа конкретных изотопов и зависимость от продуктов деления
- Реакция $^{13}\text{C}(\bar{\nu}_e, n\bar{\nu}_e)^{12}\text{C}$ в органических сцинтилляторах

Были составлены соотношения спектров двух теоретических моделей с данными из трёх разных библиотек данных.

Как показано на графиках есть большая разница между разными данными.



Спектральная антинейтринная аномалия



Количество реакций оценивалось по формуле:

$$N = \Phi \cdot \sigma \cdot N_{13\text{C}} \cdot \varepsilon,$$

где Φ – поток антинейтрино, регистрируемый детектором;

σ – сечение реакции ${}^{13}\text{C}(\tilde{\nu}_e, n\tilde{\nu}_e){}^{12}\text{C}^*$;

$N_{13\text{C}}$ – количество ядер ${}^{13}\text{C}$ в мишени;

ε – эффективность детектора, для расчёта, принимаем равным 1.

Оценочное значение:

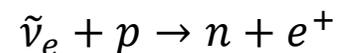
$$N = 9.965 \cdot 10^{-15} \cdot 86400 = 8,6 \cdot 10^{-10} \text{ день}^{-1}$$

Устройство детектора iDREAM

Детектор расположен на 3-ем энергоблока Калининской АЭС на расстоянии 20 метров от АЗ, на уровне земли

Мишень представляет собой 1 тонну жидкого сцинтилятора на основе LAB (линейный алкилбензол) с добавлением гадолиния с концентрацией 1 грамм/литр

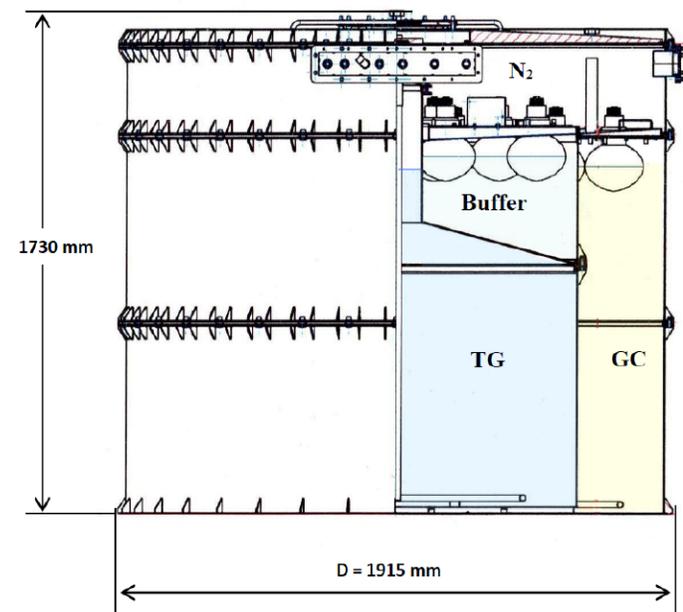
Регистрация антинейтрино из активной зоны реактора производится по реакции обратного бета-распада (ОБР):



с пороговой энергией $E_{\nu}^{thr} = 1.8$ МэВ

Рождённый позитрон быстро теряет свою энергию аннигилирует с электроном, испуская два гамма-квантов, что формирует мгновенный сигнал. Рождённый нейтрон замедляется до тепловых энергий и захватывается на гадолинии, испуская каскад гамма-квантов, что формирует задержанный сигнал.

Таким образом, реакция ОБР регистрируется методом задержанных совпадений



<https://arxiv.org/abs/2112.09372>

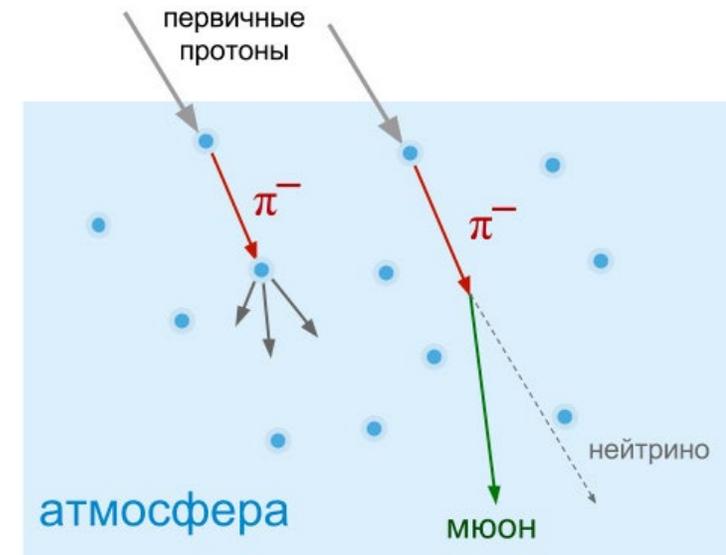
- TG – мишень
- GC – гамма-кетчер
- Buffer – буферная зона

Источники коррелированного фона детектора iDREAM

- Остановки мюонов
- Космогенные радионуклиды ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$
- Быстрые космогенные нейтроны

Вышеперечисленные реакции в силу своей природы могут имитировать взаимодействия нейтрино по реакции ОБР (мгновенный и задержанный сигналы)

Останавливающиеся в детекторе μ^- , как правило, захватываются на орбиту ядра, образуя мезоатом, после чего распадаются со временем, соответствующим времени жизни мюона в вакууме 2,2 мкс. Распад мюона происходит по схеме $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + 2\nu$, так что образующийся при распаде электрон (позитрон) регистрируется детектором.



Изучение структуры коррелированного фона детектора iDREAM

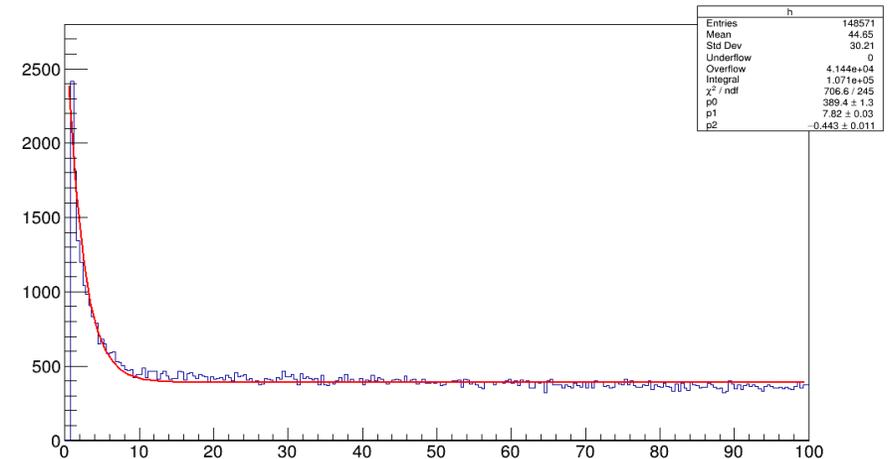
С целью отбора таких событий, после каждого отобранного мюона открывалось временное окно 100 мкс

Событием, имитирующим позитрон реакции ОБР, является останавливающийся мюон, а событием, имитирующим нейтрон – электрон (позитрон), образовавшийся при распаде отрицательного (положительного) мюона.

При этом, первое событие должно иметь энергию в диапазоне $E_1 = (3 \div 8)$ МэВ, а второе – в диапазоне $E_2 = (5 \div 10)$ МэВ, в соответствии с условиями отбора кандидатов на взаимодействия антинейтрино

В ходе анализа было отобрано 142764 мюонов с энерговыделением в области E_1 . Из них только в 372-х случаях в течение 100 мкс было найдено событие с энерговыделением в области E_2

Учитывая уровень фоновых событий, представляющих собой случайные попадания во временное окно, получаем для скорости счёта останавливающихся мюонов при отборе по энергии E_1, E_2 : $R_\mu = (490 \pm 60)$ соб./сутки.



Изучение структуры коррелированного фона детектора iDREAM

Хоть можно достаточно легко исключить влияние космогенных мюонов на количество антинейтринных событий, введя задержку на сбор данных после регистрирования мюона, они всё ещё представляют опасность, т.к. при взаимодействии с углеродом могут образовывать радиоактивные изотопы, бета-распад которых может наложиться на захват нейтрона в реакции ОБР, наибольшее влияние оказывают ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$

Nucifer collaboration имеет детектор с аналогичными детектору iDREAM характеристиками мишени. В своей работе «Online monitoring of the Osiris reactor with the Nucifer neutrino detector» была проведена оценка влияния космогенных ${}^9\text{Li}$ и ${}^8\text{He}$ на основе данных эксперимента Double Chooz.

Для детектора Nucifer была получена верхняя оценка:

12 событий/день

Данная оценка может быть также применена и для детектора iDREAM

Изучение структуры коррелированного фона детектора iDREAM

В работе «Cosmic-Ray-Produced Neutrons at Ground Level: Neutron Production Rate and Flux Distribution» определён поток быстрых нейтронов на уровне моря для энергий в диапазоне 1-10 МэВ:

$$N = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ нейтронов}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$$

Измеренный поток нейтронов в помещении, где установлен детектор iDREAM составляет $\Phi_n = 42$ нейтронов/(м²·с), что оказывается больше, чем вне помещения (порядка 17 нейтронов/(м²·с))

Скорость счета нейтронов внутри защиты составила: R_n (iDREAM) = 0,03 нейтронов/с. Таким образом, пассивная защита iDREAM обеспечила подавление потока нейтронов более чем в 100 раз. *

Заключение

В результате выполнения учебной практики были выполнены следующие задачи:

- Анализ возможных объяснений спектральной антинейтринной аномалии, заключающейся в экспериментальном превышении ожидаемого числа событий в области энергий 4-6 МэВ;
- Изучение основных компонентов регистрируемого коррелированного фона детектора iDREAM