



Регистрация нейтринных источников с помощью детектора Borexino

по материалам кандидатской диссертации

Громов Максим Борисович

Кафедра Общей Ядерной Физики
Физического Факультета МГУ

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., с.н.с. Чепурнов А.С.

Семинар ОЭПВАЯ

14.02.2017

Научная программа эксперимента



Регистрация нейтринного излучения в детекторе Borexino

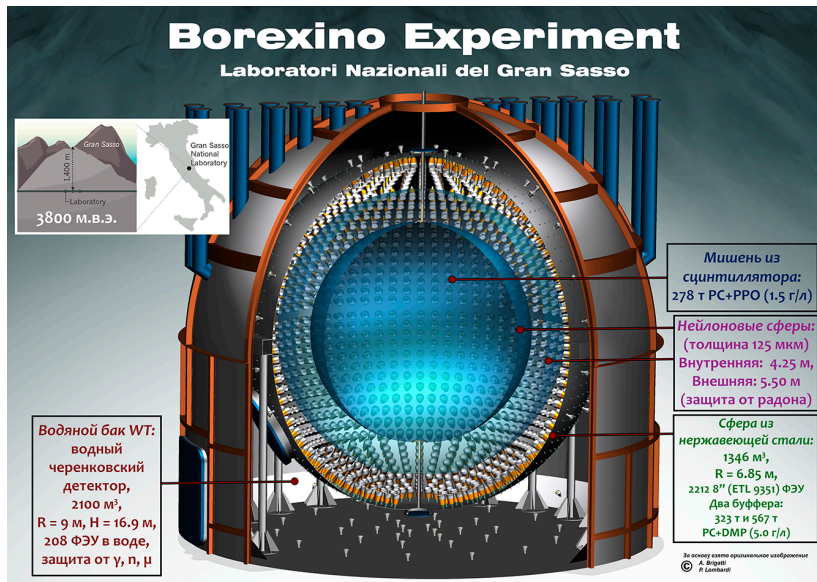
arXiv:1402.6953v1 [astro-ph.SR] 27 Feb 2014

№	Реакция	$E_{\text{пор}}^{\nu}$, МэВ	Комментарий
1	$\bar{\nu}_e + p \longrightarrow n + e^+$ $e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$ (мгн.) $n + p \longrightarrow d + \gamma$ (2.22 MeV) (зап.)	1.806	Обратный β-распад (ОБР) Основной канал СС
2	$\nu_x + e^- \longrightarrow \nu_x + e^-$	-	Упругое рассеяние (УР) на электронах NC Основной канал (с ν_e)
3	$\nu_x + p \longrightarrow \nu_x + p$	-	УР на протонах NC
4	$\nu_x + {}^{12}\text{C} \longrightarrow {}^{12}\text{C}^* + \nu_x$ ${}^{12}\text{C}^* \longrightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ (15.11 MeV)	15.11	Сверхразрешённый NC и монолиния
5	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \longrightarrow {}^{12}\text{N} + e^-$ ${}^{12}\text{N} \longrightarrow {}^{12}\text{C} + e^+ + \nu_e$	17.34	Сверхразрешённый СС и β^+ -распад СС
6	$\bar{\nu}_e + {}^{12}\text{C} \longrightarrow {}^{12}\text{B} + e^+$ ${}^{12}\text{B} \longrightarrow {}^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e$	14.37	Сверхразрешённый СС и β^- -распад СС
7	$\nu_e + {}^{13}\text{C} \longrightarrow {}^{13}\text{N} + e^-$ ${}^{13}\text{N} \longrightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$	2.22	Сверхразрешённый СС и β^+ -распад СС
8	$\nu_x + {}^{12}\text{C} \longrightarrow {}^{11}\text{B} + p + \nu_x$	$\simeq 15.9$	Выбивание протона NC
9	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \longrightarrow {}^{11}\text{C} + p + e^-$	~ 15	Выбивание протона СС

NC -- Neutral Current, реакция через Нейтральный Ток;

СС -- Charged Current, реакция через Заряженный Ток.

Borexino - низкофоновый ЖС детектор реального времени



Особенности детектора Borexino

- Спектрометрическая (Laben) и счётная (FADC) системы сбора данных
- Световыход: ~ 470 ф.э./МэВ
- Энергетическое разрешение:
 - Система Laben $5\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$ ● Система FADC $10\%/\sqrt{E(\text{МэВ})}$
- Координатная чувствительность детектора
Разрешение по координате:
 - Система Laben $11 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$ ● Система FADC $20 \text{ см}/\sqrt{E(\text{МэВ})}$
- Разделение событий по форме импульса

Характерные потоки нейтрино $\Phi \sim 10^6 - 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$

Регистрация процессов с малыми сечениями $\sigma \sim 10^{-43} \text{ см}^2$

Четыре шага к низкофоновым измерениям для спектроскопии нейтрино:

- 1) Все АЭС далеко от детектора
Среднее взвешенное расстояние ~ 1200 км
- 2) Многослойная защита от внешнего и внутреннего фона
- 3) Высокая радиохимическая чистота материалов
- 4) Оффлайн анализ данных
(критерии отбора + изучение фона)

Радиохимическая чистота сцинтиллятора Borexino

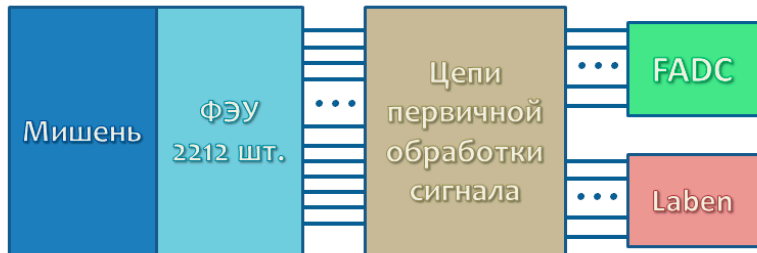
Основные технологические достижения

Нуклид	Ест. распротр. (и источник)	Цель счёт ∨ мас. фр.	Фаза I счёт ∨ мас. фр.	Фаза II счёт ∨ мас. фр.
^{14}C	10^{-12} г/г (космоген.)	$\sim 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г	$2.7 \cdot 10^{-18}$ г/г
^{39}Ar	17 мБк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	$\ll ^{85}\text{Kr}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$
^{40}K	$2 \cdot 10^{-6}$ г/г (пыль)	$\sim 10^{-15}$ г/г	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ г/г (95% Д.И.)	$< 1.7 \cdot 10^{-15}$ г/г (95% Д.И.)
^{85}Kr	1 Бк/м ³ (воздух)	~ 1 свд/100 т	30.4 ± 5.5 свд/100т	< 7 свд/100 т (95% Д.И.)
^{210}Bi	В равновесии с ^{222}Rn или ^{210}Pb	Не указано	~ 70 свд/100 т	~ 25 свд/100 т
^{210}Po	Поверхностные загрязнения	100 свд/100 т	~ 6000 свд/100 т	~ 200 свд/100 т
^{222}Rn	100 атомов/см ³ (воздух)	~ 10 свд/100 т	1 свд/100 т	0.1 свд/100 т
^{232}Th	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или 10^{-6} Бк/т	6.8 ± 1.5 10^{-18} г/г	$< 1.2 \cdot 10^{-18}$ г/г (95% Д.И.)
^{238}U	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16}$ г/г или 10^{-6} Бк/т	1.6 ± 0.1 10^{-17} г/г	$< 9.7 \cdot 10^{-19}$ г/г (95% Д.И.)

свд - событий в день; Д.И. - доверительный интервал.

Системы сбора данных

- ФЭУ работают в однофотозлектронном режиме
- Общие цепи первичной обработки сигнала
- Переполнение усилителей в этих цепях происходит при энергии события больше 100 МэВ



Системы сбора данных

Система Laben	Система FADC
Физические задачи:	
Солнечные нейтрино Гео-нейтрино Стерильные нейтрино Редкие процессы	Вспышки сверхновых Гео-нейтрино Стерильные нейтрино Редкие процессы
Диапазон измерений:	
200 кэВ - 18 МэВ (2 порядка!)	1 — 100 МэВ (2 порядка!)
Проблемы к началу работы над диссертацией (2013 г):	
• Мёртвое время после триггера • Не более 3 — 5 событий за 1 мс • Отбор по форме импульса - Gatti • Пропускает 1 мюон раз в 3 дня • Сбои и долгий перезапуск	• Плохая калибровка • Нет простр. реконструкции • Сопоставление данных FADC и Laben • Низкая эффективность мюонного и шум. фильтров • Меньшая экспозиция (Laben - с 2007 г; FADC - с 2009 г)

Преимущества системы сбора данных FADC (2017 г)

Система FADC, или Flash ADC system, или система на быстрых АЦП базируется на 400 МГц 8 бит CAEN V896.
 $V_{pp} = 512$ мВ, длина окна события 1280 нс с шагом 2.5 нс

- регистрация событий от 1 до ~ 100 МэВ
- гибкая логика выработки главного триггера на базе цифрового модуля с ПЛИС
- отсутствие мёртвого времени между событиями
- рабочий цикл $\sim 100\%$
- независимость комплекса FADC от системы сбора данных Laben

Калибровки детектора Borexino



Калибровка системы FADC

Онлайн калибровка

С помощью радиоактивных источников и светодиодов

**Первая калибровочная
кампания в IV:**

Окт 2008 - Июль 2009

Только Laben

**Вторая калибровочная
кампания в IV:**

Лето - Осень 2017 ?

Laben и FADC

Испытание UV LED системы

Оффлайн калибровка

Реперные точки: 2.22 МэВ, 4.945 МэВ, 13.37 МэВ, 53 МэВ

- Захват нейтронов ядрами водорода ^1H

$$n + p \longrightarrow d + \gamma \text{ (2.22 МэВ)}$$
- Захват нейтронов ядрами углерода ^{12}C

$$n + ^{12}\text{C} \longrightarrow ^{13}\text{C}^* \quad ^{13}\text{C}^* \longrightarrow ^{13}\text{C} + \gamma \text{ (4.945 МэВ)}$$
- максимум β^- -спектра от распада космогенного бора ^{12}B

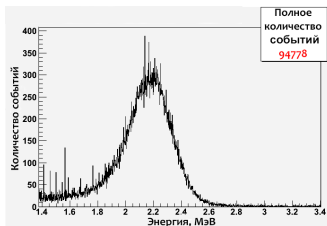
$$^{12}\text{B} \longrightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (} Q_\beta = 13.37 \text{ МэВ)}$$
- Максимум спектра мишелевских электронов ([Атрощенко В.](#))

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \text{ (} Q_{\text{макс}} \approx 53 \text{ МэВ)}$$

Оффлайн калибровка

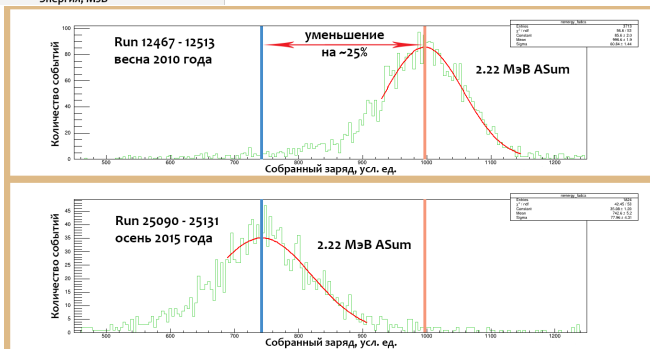
- Калибровка
- **Коррекция энергетической шкалы со временем**
Медленный контроль за детектором и электроникой
 - учёт выхода из строя ФЭУ
 - наблюдение за дрейфом характеристик элементной базы электроники из-за смены внешних условий эксплуатации (чаще всего, из-за изменения температурного режима)
 - общий контроль за изменениями в детекторе (например, за изменениями при обновлении электроники)

Оффлайн калибровка: захват нейтрона на водороде ^1H



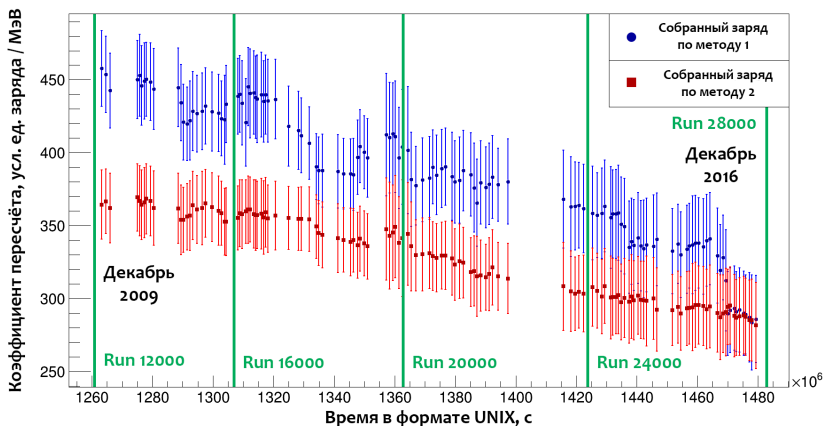
Метод: наблюдение за шириной γ -линии 2.22 МэВ при увеличении статистики

Выполняется поиск минимума дисперсии



Оффлайн калибровка: захват нейтрона на водороде ^1H

Смещение γ -линий 2.22 МэВ за 5.5 лет работы детектора Borexino



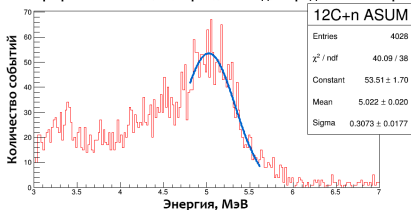
Изменение значения коэффицента пересчёта собранного заряда в энергию с течением времени

Ошибка по энергии лежит в коридоре 5 — 9% и растёт со временем

Оффлайн калибровка: захват нейтрона на углероде ^{12}C

Проверка линейности энергетической шкалы по монолинии от захват нейтрона на углероде

Спектр при использовании первого метода определения энергии

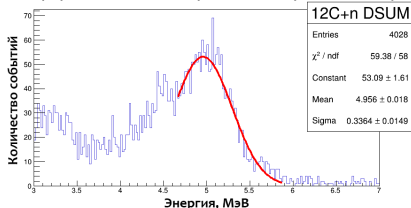


Отклонения от линейной энергетической шкалы

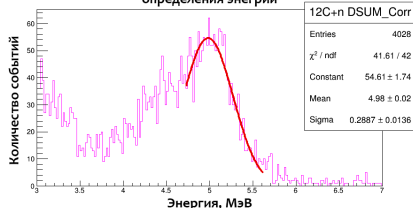
по первому методу - 1.6%
 по второму методу - 0.2%
 по модифицированному второму методу - 0.7%

Все отклонения в пределах ошибки линейной энергетической шкалы

Спектр при использовании второго метода определения энергии



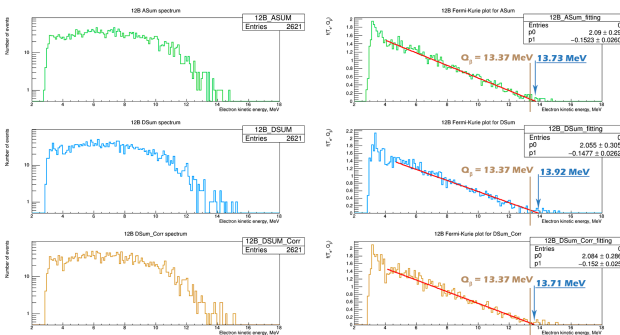
Спектр при использовании модифицированного второго метода определения энергии



Максимум β -спектра от распада космогенного бора ^{12}B

Линеаризация β -спектра с применением функции Ферми-Кюри $f(T_e, Q_\beta)$:

$$f(T_e, Q_\beta) = \sqrt{\frac{N_e(T_e)}{\sqrt{T_e(T_e + 2m_e c^2)}(T_e + m_e c^2)F(T_e, Z)}}$$



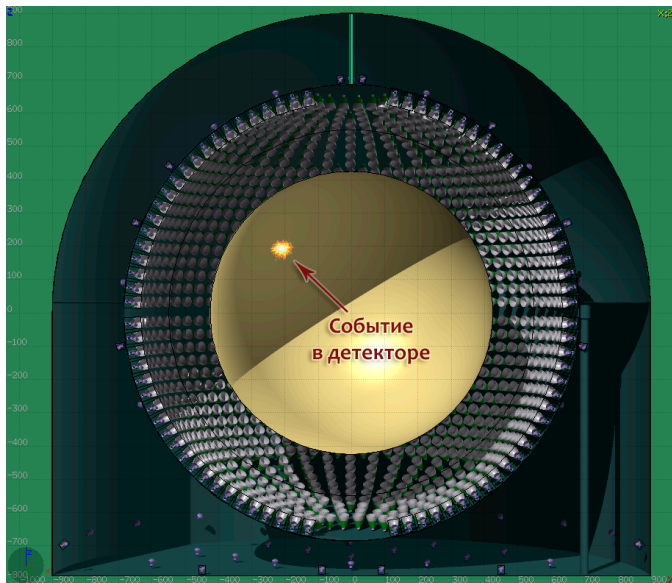
Отклонения при разных методах определения энергии:

метод 1: 2.7%; метод 2: 4.1%; мод. метод 2: 2.5%

Все отклонения в пределах ошибки линейной энергетической шкалы

Использование оффлайн калибровки до энергий в 13 — 15 МэВ допустимо

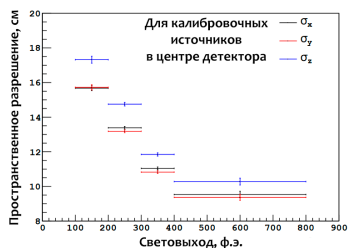
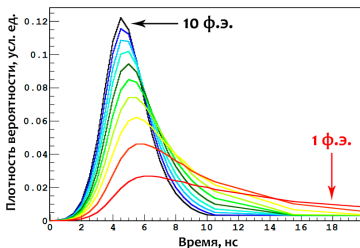
Пространственная реконструкция в детекторе Borexino



Пространственная реконструкция для системы Laben: ММП

$$\mathcal{L}(\vec{r}_0, t_0) = \prod_i f_{q_i}(t_{f,i}) = \prod_i f_{q_i}\left(t_i - t_0 - n_{\text{эфф}} \frac{d_i(\vec{r}_0)}{c}\right)$$

Момент сцинтилляции (красная стрелка)
 Плотность вероятности для времени пролёта (синяя стрелка)
 Момент регистрации первого ф.э. (фиолетовая стрелка)
 Расстояние до ФЭУ (розовая стрелка)
 Положение события в детекторе (красная стрелка)
 Измеренный за 80 нс заряд (синяя стрелка)
 Номер ФЭУ (фиолетовая стрелка)
 Эффективный показатель преломления (розовая стрелка)



Пространственная реконструкция для системы FADC

Основная проблема:

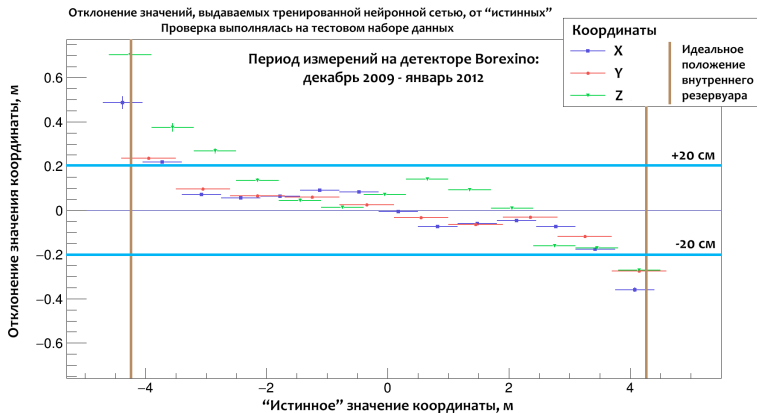
В Laben оцифровывается **каждый** канал

В FADC на 1 канал АЦП приходится **до 24 ФЭУ**,
расположенных **практически случайным** образом по сфере (SSS)

Решение:

Метод:	Нейронная сеть (ROOT Multi-Layer Perceptron)
Оценка точности:	$V_{Bx} \approx 320 \text{ м}^3 \sim 3.2 \cdot 10^5 \text{ соб.} \Rightarrow \sim 10 \text{ см}$
Данные:	Формат: 17 цикл; Дек 2009 - Окт 2015 3 набора по ~ 400 точечных событий
Настройки сети:	• 80% тренировочный набор, 20% тестовый • 182 входа: 91 канал АЦП, время и амплитуда • 2 скрытых уровня: 27 и 12 нейронов • 3 выхода: x, y, z • 6 методов обучения: Robbins-Monro или Метод обратного распространения ошибки, Batch, Steepest Descent, Polak-Ribiere, Fletcher-Reeves, BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno)

Результаты пространственной реконструкции (FADC)



Ошибка по координате ≤ 22 см, по радиусу ≤ 30 см

Мотивация поиска гео-нейтрино

Физические задачи:

- Подтвердить наличие гео-нейтрино
- Объяснить наблюдаемый тепловой поток из недр Земли
- Внутренняя структура Земли
- Компонентный состав нашей планеты
- Физические процессы, включая радиоактивные распады и гео-реактор, в недрах Земли
- Эволюция Земли и Солнечной системы

Т.е. гео-нейтрино

Это потенциальный новый инструмент для исследования Земли, планет и Солнечной системы

О загадке теплового излучения Земли

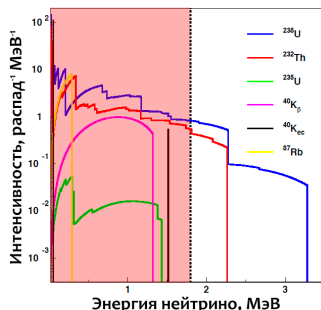
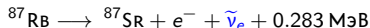
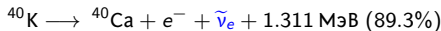
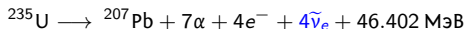
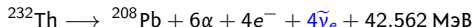
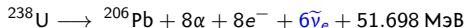
Сравнение разных источников подогрева Земли

Источник	Тепловыделение, Вт/м ²
Солнце	~ 1370
Недра Земли	~ (0.06 – 0.09)
Космические лучи	~ 10 ⁻⁸

Но полный поток из недр Земли **(47 ± 2) ТВт** (~ 20000 ядерных реакторов!), где доля **радиогенного тепла** около **10 – 35 ТВт** (согласно разным СМЗ (BSE))

Ожидаемый поток гео-нейтрино на поверхности Земли $\Phi_{\bar{\nu}} \sim 10^{-6} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$

Распады долгоживущих радиоактивных изотопов, дающих основной вклад в тепловой поток:



Оценка скорости счёта гео-нейтринных событий

$$L(U + Th) \approx H/\Delta E, \quad \Phi^{\text{дет}}(U + Th) \approx \langle P_{ee} \rangle L/(4\pi R_{\oplus}^2),$$

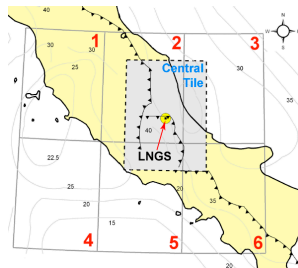
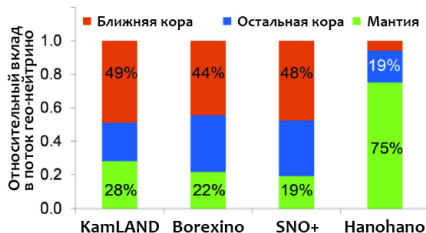
$$\langle P_{ee} \rangle \simeq \sin^4 \vartheta_{13} + \cos^4 \vartheta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\vartheta_{12}\right) \approx 0.54,$$

$$G(U + Th) \approx \sigma_{\text{ОБР}} f \Phi^{\text{дет}}(U + Th) N_p \approx 43 \text{ TNU},$$

если $H = 40 \text{ ТВт}$, $\Delta E \approx 10 \text{ МэВ}$, $R_{\oplus} \approx 6371 \text{ км}$, $\sigma_{\text{ОБР}} \sim 10^{-43} \text{ см}^2$, $f \approx 0.05$ и $N_p = 10^{32}$ (детектор с мишенью в 1 кт), где f - доля антинейтрино с кинетической энергией выше порога ОБР, N_p - число ядер водорода в мишени.

Модель компонентного состава Земли	Скорость счёта соб/(100 т · г)	Скорость счёта TNU
СМЗ (BSE) Версия 1	$2.5^{+0.3}_{-0.5}$	25^{+3}_{-5}
СМЗ (BSE) Версия 2	2.5 ± 0.2	25 ± 2
СМЗ (BSE) Версия 3	3.6	36
Модель макс. радиоакт. Земли (Max. Radiogenic Earth)	3.9	39
Модель мин. радиоакт. Земли (Min. Radiogenic Earth)	1.6	16

Оценка скорости счёта гео-нейтрино: влияние коры



Источник	Borexino TNU
Ближняя кора (LOC)	9.7 ± 1.3
Остальная кора (ROC)	$13.7^{+2.8}_{-2.3}$
Кора в целом	$23.4^{+3.1}_{-2.6}$
Континентальная Литосферная Мантия (CLM)	$2.2^{+3.1}_{-1.3}$
Мантия	8.7
Кора + мантия	$34.3^{+4.4}_{-2.9}$

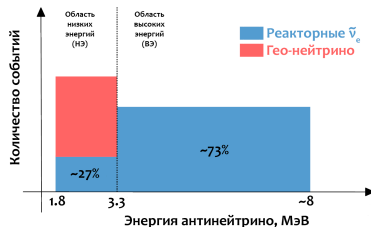
TNU (Terrestrial Neutrino Unit) - Земная Нейтринная Единица, является единицей скорости счёта гео-нейтрино в ЖС детекторе

Оценка скорости счёта фоновых реакторных событий

Общая формула:

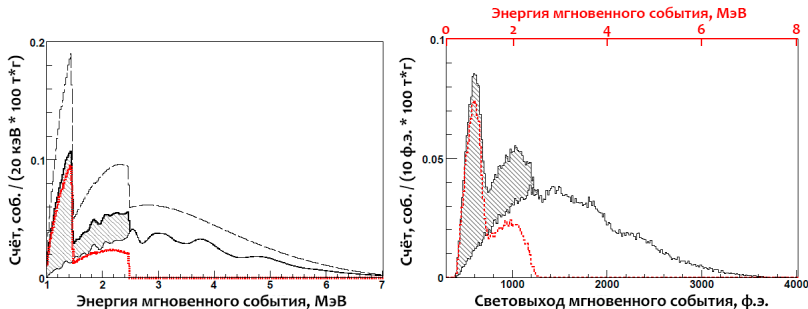
$$N_{\text{реак}} = \varepsilon(E_{\bar{\nu}_e}) N_p \tau \sum_{m=1}^{M_{\text{реак}}} \frac{P_{\text{теп}}^m}{4\pi L_m^2} \langle K_{\text{КИУМ}}^m \rangle \times$$

$$\times \int dE_{\bar{\nu}_e} \sum_{i=1}^4 \frac{P_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) P_{ee}(E_{\bar{\nu}_e}, L_m) \sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e})$$



Модельный спектр реакторных антинейтрино	Скорость счёта $R_{\text{НЭ+ВЭ}}$, TNU	Скорость счёта $R_{\text{НЭ}}$, TNU
С учётом неравновесного вклада от долгоживущих изотопов		
Mueller et al. [1]	$83.3^{+2.0}_{-1.9}$	$22.2^{+0.6}_{-0.6}$
Без учёта неравновесного вклада от долгоживущих изотопов		
Mueller et al. [1]	$83.2^{+2.0}_{-1.8}$	$22.1^{+0.6}_{-0.5}$
Huber [2] и Mueller et al. [1] для ^{238}U	$83.9^{+2.0}_{-1.8}$	$22.0^{+0.6}_{-0.5}$
Huber and Schwetz [3] и Mueller et al. [1] для ^{238}U	$81.2^{+2.0}_{-1.8}$	$21.7^{+0.6}_{-0.5}$
Vogel and Engel [4]	$81.2^{+2.0}_{-1.8}$	$21.6^{+0.5}_{-0.6}$

Ожидаемый спектр антинейтрино в детекторе Borexino



Левый график: Ожидаемый энергетический спектр мгновенных событий в детекторе Borexino, возникающих в результате реакции ОБР.

- Штриховая чёрная линия - суммарный спектр гео- и реакторных антинейтрино без учёта осцилляций
- Сплошная толстая чёрная линия - с учётом осцилляций
- Пунктирная красная линия - спектр гео-нейтрино с учётом осцилляций
- Сплошная тонкая чёрная линия - спектр реакторных антинейтрино с учётом осцилляций

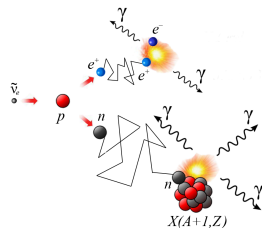
Правый график: Ожидаемый спектр мгновенных событий, полученный для детектора Borexino с помощью Монте-Карло моделирования. Спектр дан в единицах световыхода, т.е. в зависимости от числа зарегистрированных фотоэлектронов.

Замечания:

- Правый график получен для системы Laben
- Данные на левом графике использовались в качестве входной информации при моделировании

Отбор антинейтринных событий в данных системы FADC

- 1) $E_{\text{мгн}} > 0.95 \text{ МэВ}$ - энергия мгновенного события
- 2) $1.8 < E_{\text{зап}} < 2.5 \text{ МэВ}$ - энергия запаздывающего события
- 3) $R_{\text{мгн-зап}} < 1 \text{ м}$
- 4) $20 < t_{\text{мгн-зап}} < 1280 \text{ мкс}$
- 5) Отбор по форме импульса:
в Laben - метод Gatti $G_{\text{del}} < 0.015$,
в FADC - визуально
- 6) Вето $\Delta t_{\mu}^{\text{OD}} > 2 \text{ мс}$ - мюон только
во внешнем детекторе
- 7) Вето $\Delta t_{\mu}^{\text{ID}} > 2 \text{ с}$ - мюон во внутреннем детекторе
 $\sim 10\%$ потери экспозиции
- 8) Отбор по кратности: нет иных событий с энергией $> 0.95 \text{ МэВ}$ в окне 2 мс до
и после события-кандидата
- 9) Динамические доверительный объём - все события должны быть не ближе
чем в 30 см от внутреннего нейлонового резервуара
Критерии, выделенные фиолетовым, были выбраны так, чтобы найти
максимум событий связанных во времени и пространстве при
максимальном подавлении случайных совпадений



Обратный β -распад

Уровни неустраняемых фонов

Источник	Фон* [соб./(907 т · г)]
${}^9\text{Li} - {}^8\text{He}$	$0.194^{+0.125}_{-0.089}$
Случайные совпадения	0.221 ± 0.004
Коррелированные во времени события	$0.035^{+0.029}_{-0.028}$
(α, n) в сцинтилляторе	0.165 ± 0.010
(α, n) в буфере	< 0.51
Быстрые n (от μ в WT)	< 0.01
Быстрые n (от μ в скальных породах)	< 0.43
Незарегистрированные мюоны	0.12 ± 0.01
Спонтанное деление в ФЭУ	0.032 ± 0.003
${}^{214}\text{Bi} - {}^{214}\text{Po}$	0.009 ± 0.013
Итог	$0.78^{+0.13}_{-0.10}$ < 0.65 (Монте-Карло)

* Фон дан для полной экспозиции, использованной в анализе.

Ожидаемый остаточный фон для антинейтринных событий после применения критериев отбора. Данные приводятся при доверительном интервале 90%.

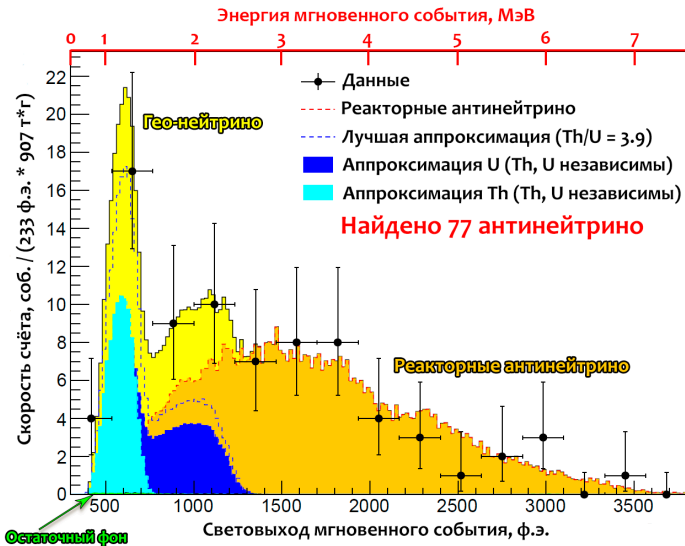
Результаты отбора антинейтрино

Phys. Rev. D 92, 031101(R) (2015) – Опубликовано 7 августа 2015

Сопоставление результатов систем Laben и FADC	
Количество событий в Laben	78
Количество событий в FADC	46*
Количество отброшенных	1 (мюон)
Конечное число событий	77
* Различие в цифрах обусловлено разницей в периодах сбора данных	
Экспозиция	$(904 \pm 44) \text{ т} \cdot \text{г}$ $(5.5 \pm 0.3) \cdot 10^{31} \text{ прот.} \cdot \text{г}$
Живое время Laben	1841.9 дней $\approx 5.04 \text{ лет}$
Живое время FADC	1072.3 дней $\approx 2.93 \text{ лет}$
Эффективность регистрации в Laben	$(84.5 \pm 1.5)\%$
Эффективность регистрации в FADC	$(83.0 \pm 2.0)\%$
Соотношение сигнал/шум	100

Измеренный спектр антинейтрино до 8 МэВ

Phys. Rev. D 92, 031101(R) (2015) – Опубликовано 7 августа 2015

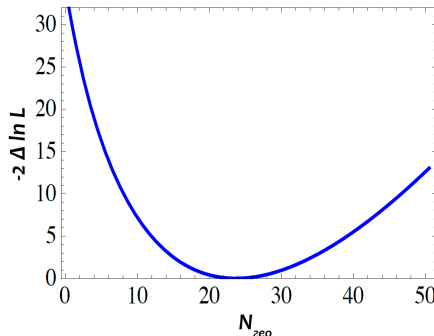
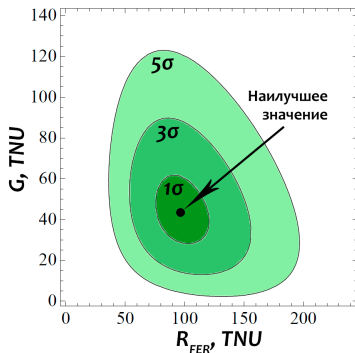


Разделение вкладов от гео-нейтрино и реакторных антинейтрино

Метод максимального правдоподобия (Unbinned maximum likelihood estimation)

$$\ln \mathcal{L} (N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{гео}}, S_{\text{FV}}) = -N_{\text{теор}} (N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{гео}}, S_{\text{FV}}) +$$

$$+ \sum_{i=1}^N \ln [f_{\bar{\nu}} (Q_i, N_{\text{гео}}, N_{\text{реакт}}, S_{\text{гео}}, S_{\text{FV}}) + f_B (Q_i)] - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{S_{\text{реакт}}}{\sigma_{\text{реакт}}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\text{FV}}}{\sigma_{\text{FV}}} \right)^2 \right]$$



Сравнение результатов по регистрации потока гео-нейтрино

	KamLAND[5] (2013)	Borexino[6] (2013)	Borexino[7] (2015)
$N_p, 10^{32}$	0.598 ± 0.013	0.109 ± 0.006	0.109 ± 0.006
$\xi, 10^{32}$ протон · год	4.90 ± 0.10	0.369 ± 0.016	0.55 ± 0.03
N_{geo}	116^{+28}_{-27}	14.3 ± 4.4	$23.7^{+6.5+0.9}_{-5.7-0.6}$
$G_{\text{ЭКС}}, \text{TNU}$	$23.7^{+6.2}_{-6.0}$	38.8 ± 12.0	$43.5^{+11.8+2.7}_{-10.4-2.4}$
G^{**}, TNU	$31.5^{+4.9}_{-4.1}$	$40.3^{+7.3}_{-5.8}$	$40.3^{+7.3}_{-5.8}$
$\Phi, 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$3.4^{+0.8}_{-0.8}$	--	--
$\Phi_{\text{ЭКС}}(\text{U}), 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	--	2.1 ± 1.5	2.7 ± 0.7
$\Phi_{\text{ЭКС}}(\text{Th}), 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	--	2.6 ± 3.1	2.3 ± 0.6
P	$2 \cdot 10^{-6} (\sim 4.2\sigma)$	$6 \cdot 10^{-6} (\sim 4.5\sigma)$	$3.6 \cdot 10^{-9} (\sim 5.9\sigma)$

* Данный результат получен автором, используя данные из статьи [5].

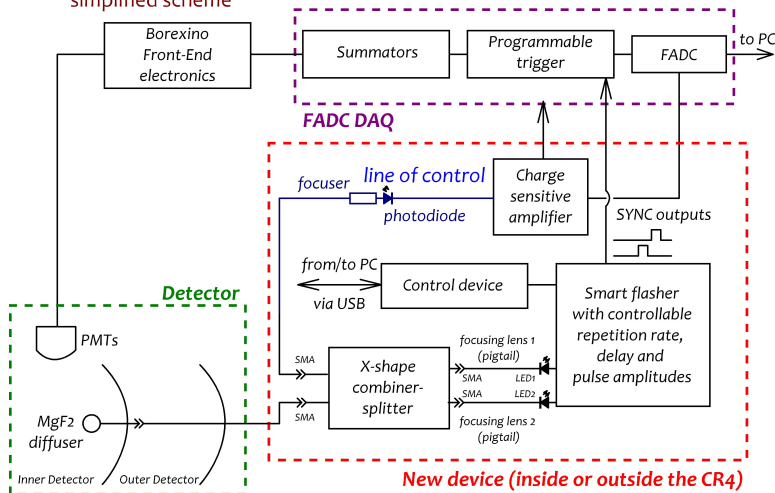
** По данным статьи [8].

Необходимость онлайн калибровки

- Уточнение и актуализация энергетической шкалы в области 1 – 10 МэВ
- Потенциальная калибровка на энергиях 10 – 100 МэВ
- Изучение отклика в детекторе в зависимости от пространственного положения события
- Реперные сигналы для пространственной реконструкции событий в детекторе
- Опорные данные для алгоритмов отбора событий по форме импульса
- Настройка программного пакета для Монте-Карло моделирования
- Исследование формы нейлонового резервуара

Светодиодная калибровка

The Calibration System Based On the Controllable UV/Visible LED Flasher simplified scheme



Концепция управляемого генератора УФ коротких импульсов

- Двухканальная (двухдиодная) схема
- Управляемый уровень мощности для каждого из каналов
- Относительные измерения и линия контроля выходной мощности
- УФ светодиоды (опционально голубые и т.д.)
- Повышение изотропности с помощью диффузора на конце оптоволоконна
- Удалённый контроль и задание нужной последовательности импульсов
- В чистой комнате и в детекторе только оптоволоконно и диффузор
- Горячая замена компонент

Оценка реализуемости

Если потерянная частицей энергия $E = 50$ МэВ полностью преобразуется в сцинтилляцию с $\tau = 20$ нс, то

$$\text{Мощность светодиода } P = \frac{E \cdot n_{\text{eff}}}{\tau} \approx 4 \text{ mW}$$

$$\text{Число УФ фотонов с } \lambda = 260 \text{ нм } m \approx \frac{\lambda n_{\text{eff}} E}{2\pi\hbar c} \approx 10^8$$

Моделирование в Borexino: $1 \text{ МэВ} \iff 1.1 \cdot 10^4$ УФ фотонов с $\lambda = 260 \text{ нм}$

Заключение

- Выполнена оффлайн калибровка системы FADC детектора Borexino и разработана система для онлайн калибровки с использованием управляемого светодиодного генератора УФ коротких импульсов.
- Создана программа для пространственной реконструкции событий в детекторе Borexino по данным системы FADC.
- В комплексе с результатами коллег гарантирована возможность проведения физических анализов с применением системы сбора данных детектора Borexino на быстрых АЦП.
- Выполнена апробация созданных инструментов на гео-нейтринном анализе.
- Измерен поток гео-нейтрино. Гипотеза отсутствия нейтринного излучения из недр Земли исключена с достоверностью 5.9σ .

Положения, выносимые на защиту

1. Доказано существование нейтринного излучения (гео-нейтрино) от внутренних слоёв Земли.
2. Разработан и применён универсальный метод оффлайн коррекции энергетической шкалы жидкого сцинтилляционного детектора большого объёма в связи с изменением светосбора. Метод также позволяет контролировать долговременную стабильность работы экспериментальной установки, помогая выявлять проблемы в системе сбора данных и изменения в мишени детектора.
3. Разработана методика калибровки жидких сцинтилляционных детекторов большого объёма в области энергий от 1 до ~ 100 МэВ с использованием управляемого светодиодного генератора УФ коротких импульсов.
4. Создана система пространственной реконструкции событий в детекторе со сферической геометрией при условиях большого количества ($> 10^3$) ФЭУ и их произвольной группировки. Система основана на нейронных сетях.

Личный вклад диссертанта

Для регистрации нейтрино и проведения исследований с использованием системы сбора данных FADC выполнено:

1. Оффлайн калибровку системы FADC
2. Мониторинг долговременной стабильности работы детектора
3. Исследование возможностей калибровки детектора при энергиях от 10 до ~ 100 МэВ
4. Проектирование системы для онлайн калибровки детектора Borexino
5. Тестирование и изучение характеристик калибровочной системы и её компонентов
6. Исследование возможностей пространственной реконструкции событий по данным системы FADC и создание программного модуля, реализующего восстановление положения сигнала в детекторе

В рамках измерения потока гео-нейтрино:

1. Отбор событий в данных системы FADC
2. Сопоставление данных систем FADC и Laben
3. Выделены вклады от различных источников в спектр антинейтрино в области энергий от 1.8 до ~ 8 МэВ
4. Получено число зарегистрированных гео-нейтрино, оценен соответствующий поток и вероятность отсутствия нейтринного излучения из недр Земли

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях. Из них 3 статьи удовлетворяют требованиям ВАК

1. Borexino's search for low-energy neutrino and antineutrino signals correlated with gamma-ray bursts / M. Agostini et al. // *Astropart. Phys.* 2017. Vol. **86**. Pp. 11-17. (*Preprint* 1607.05649v2). Публикация в составе коллаборации. Издание рецензируемое и индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
2. Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data / M. Agostini et al. // *Phys. Rev. D.* 2015. Vol. **92**, no. 3. P. 031101. (*Preprint* 1506.04610v2). Публикация в составе коллаборации. Издание рецензируемое и индексируется в международных базах Web of Science и Scopus.
3. Громов М. Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Бorexино // *Ядерная физика и инжиниринг.* 2014. Vol. 5, 9-10. С. 782. (*Online version* elibrary.ru). Рецензируемое издание, включено в Перечень ВАК.

Публикации

Прочие статьи по теме диссертации

4. Chepurinov A., Gromov M., Shamarin A. Online calibration of neutrino liquid scintillator detectors above 10 MeV // J. Phys.: Conf. Series. 2016. Vol. **675**, no. 1. P. 012008. URL IOP website.
5. The Calibration System Based On the Controllable UV/visible LED Flasher for the Veto System of the DarkSide Detector / A. Chepurinov et al. // J. Phys.: Conf. Series. 2017. Vol. **TBA**, TBA. TBA. *(статья принята к печати)*
6. Громов М. Б. Гео-нейтрино и исследования строения Земли // Труды XV межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». НИИЯФ МГУ. Москва, Россия : МГУ, 2014. *(Труды XV школы)*.

Апробация работы I

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах:

1. The Calibration System Based On the Controllable UV/visible LED Flasher for the Veto System of the DarkSide Detector. MEPhI. Moscow, Russia, October 10-14, 2016. The 2nd International Conference on Particle Physics and Astrophysics. (*Abstract* ICPPA-2016).
2. Online calibration of neutrino liquid scintillator detectors above 10 MeV. MEPhI. Moscow, Russia, October 5-10, 2015. International Conference on Particle Physics and Astrophysics. (*Abstract* ICPPA-2015).
3. Antineutrino physics in Borexino. MSU. Moscow, Russia, August 20-26, 2015. The 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics. (*Presentation* 17LomConf).

Апробация работы II

4. Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте BOREXINO. ИЯИ РАН. Троицк, Россия, 19 января 2015. Доклад на семинаре ОФВЭ ИЯИ РАН (рук. Ю.Г. Куденко). *(Презентация на сайте семинара).*
5. Гео-нейтрино и исследования строения Земли. НИИЯФ МГУ. Москва, Россия, 25-26 ноября 2014. XV межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». *(Труды XV школы).*
6. Исследования антинейтрино и его источников в эксперименте Борексино. НИЯУ МИФИ, ОФН РАН. Москва, Россия, 17-21 ноября 2014. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий» - 2014 *(Презентация ICSSNP-2014).*

Спасибо за внимание!

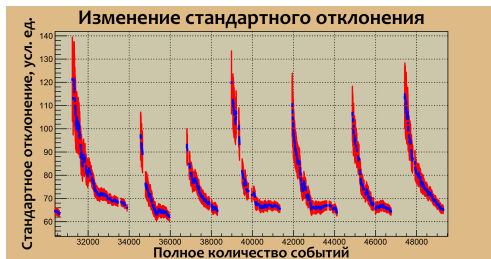
Дополнительные слайды

Оффлайн калибровка: захват нейтрона на водороде ^1H

Метод: наблюдение за шириной γ -линии при увеличении статистики.

Основное условие нахождения минимума дисперсии: $\sigma_i > \sigma_{\min} + \alpha \cdot (\delta\sigma_{\min})$

где α - параметр, подбираемый вручную. Алгоритм хорошо работает при $\alpha = 2$.



Настр. и исходные данные:

- Аппроксимация распределением Гаусса
- Мин. число событий: 1400
- Нач. знач. σ : 4000
- Нач. знач. ошибки σ : 3000

Удачная аппроксимация, если

- $\sigma_{ASUM} > 35$ усл.ед., $\sigma_{DSUM} > 35$ усл.ед.
- Критерий согласия $(\chi^2/ndf)_{ASUM} > 0.65$

Проверка минимальности σ_{ASUM} , если

- $\sigma_{ASUM} > 35$ усл.ед. • $\delta\sigma_{\min} < 60$ усл.ед.
- $(\chi^2/ndf)_{ASUM} < 1.40$ • $(\chi^2/ndf)_{DSUM} < 3.00$

Область аппроксимации:

- $[max - 80, max + 160]$, где max - макс. гистогр.

Условия перезапуска:

- Базовое правило
- Макс. число соб.: 3500
- $\delta\sigma_{\min} < 0.1$ усл.ед.

Максимум β -спектра от распада космогенного бора ^{12}B

Предварительный отбор событий в Laben (Михаэль Вурм)
Сопоставление событий и формирование спектра по данным FADC

Критерии отбора:

Система Laben

- dst-файлы 16 цикла
- Электроны после мюонов
- Окно после мюона (тр. tt128):
0 – 110 мс ($\tau_B = 29.1$ мс)
- Триггер (btb4 & tt1)
- Не мюон: триггер btb $\neq 4$
- Усл. на энергию: ≥ 1500 ф.э.
- $R < 4$ м

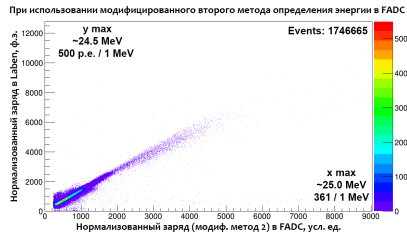
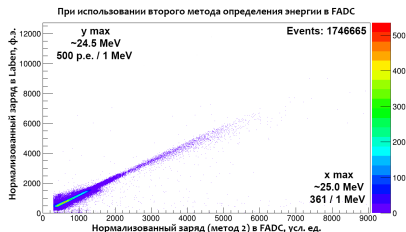
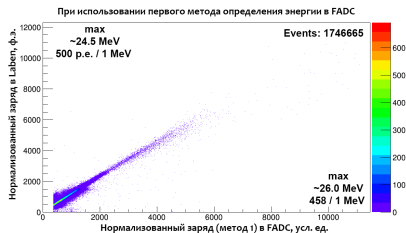
Система FADC

- ран FADC прошёл проверку
- dst-light-файл 18 цикла
- dst-light открывается, не "zombie"
- событие есть в Laben
- событие есть в FADC
- Не мюон
- Не фоновое
- Сопоставлялись кластеры по энергии:
до 10 МэВ по ASUM, выше по DSUMcorr
- Условия на энергию:

$$E_{\text{FADC}} > (0.75 \times q_{\text{Laben}}[\text{ф.э.}]/483 \text{ ф.э.})$$

$$E_{\text{FADC}} < (1.25 \times q_{\text{Laben}}/483)$$

Сравнение энергетических шкал Laben и FADC



Список литературы I

-  Т. А. Mueller и др. Англ. В: Phys. Rev. C 83.5 (2011). Report number: IRFU-10-280 (*Preprint* 1101.2663v3), с. 054615.
-  P. Huber. Англ. В: Phys. Rev. C 84.2 (2011). Erratum 2012. Phys. Rev. C. **85**, no. 2. P. 029901., с. 024617.
-  P. Huber и T. Schwetz. Англ. В: Phys. Rev. D 70.5 (2004). Report number: TUM-HEP-552/04 (*Preprint* hep-ph/0407026v2), с. 053011.
-  P. Vogel и J. Engel. Англ. В: Phys. Rev. D 39.11 (1989), с. 3378—3383.
-  A. Gando и др. Англ. В: Phys. Rev. D 88.3 (2013). (*Preprint* 1303.4667v2), с. 033001.

Список литературы II

- 
 G. Bellini и др. Англ. В: Phys. Lett. B 722.4--5 (2013).
 (*Preprint* 1303.2571v2), с. 295—300.
- 
 М. Agostini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 92.3 (2015).
 (*Preprint* 1506.04610v2)., с. 031101.
- 
 М. Baldoncini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 91.6 (2015).
 (*Preprint* 1411.6475v2), с. 065002.