

# 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

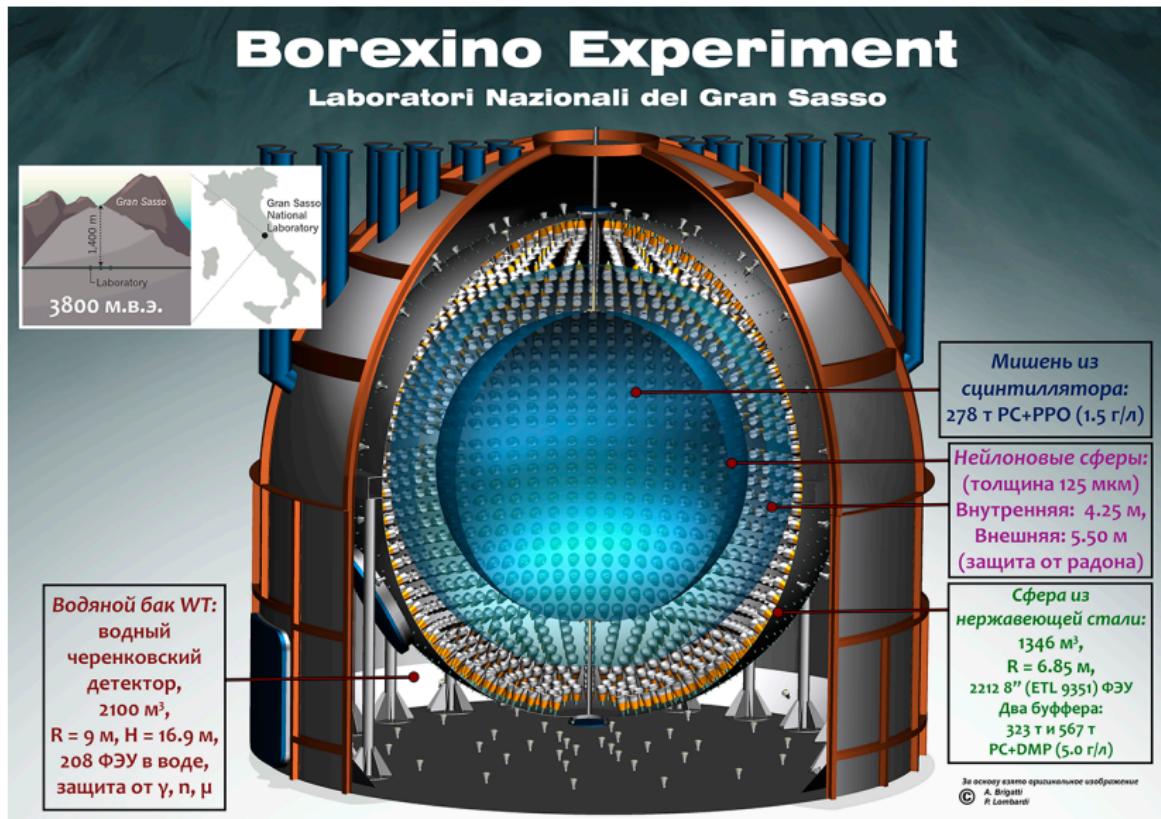
arXiv:1402.6953v1 [astro-ph.SR] 27 Feb 2014

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

NC -- Neutral Current, реакция через Нейтральный Ток;

CC -- Charged Current, реакция через Заряженный Ток.

# Borexino - низкофоновый ЖС детектор реального времени



# Особенности детектора Borexino

- Спектрометрическая (Laben) и счётная (FADC) системы сбора данных
- Световойход:  $\sim 470 \text{ ф.э./МэВ}$
- 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  $\sim 1200 \text{ км}$
- 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. распростран. (и источник)	Цель счёт √ мас. фр.	Фаза I счёт √ мас. фр.	Фаза II счёт √ мас. фр.
$^{14}\text{C}$	$10^{-12} \text{ г/г}$ (космоген.)	$\sim 10^{-18} \text{ г/г}$	$2.7 \cdot 10^{-18} \text{ г/г}$	$2.7 \cdot 10^{-18} \text{ г/г}$
$^{39}\text{Ar}$	$17 \text{ мБк/м}^3$ (воздух)	$\sim 1 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$	$\ll ^{85}\text{Kr}$
$^{40}\text{K}$	$2 \cdot 10^{-6} \text{ г/г}$ (пыль)	$\sim 10^{-15} \text{ г/г}$	$< 1.7 \cdot 10^{-15} \text{ г/г}$ (95% Д.И.)	$< 1.7 \cdot 10^{-15} \text{ г/г}$ (95% Д.И.)
$^{85}\text{Kr}$	$1 \text{ Бк/м}^3$ (воздух)	$\sim 1 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$30.4 \pm 5.5$ свд/100т	$< 7 \text{ свд}/100 \text{ т}$ (95% Д.И.)
$^{210}\text{Bi}$	В равновесии с $^{222}\text{Rn}$ или $^{210}\text{Pb}$	Не указано	$\sim 70 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$\sim 25 \text{ свд}/100 \text{ т}$
$^{210}\text{Po}$	Поверхностные загрязнения	$100 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$\sim 6000 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$\sim 200 \text{ свд}/100 \text{ т}$
$^{222}\text{Rn}$	$100 \text{ атомов/см}^3$ (воздух)	$\sim 10 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$1 \text{ свд}/100 \text{ т}$	$0.1 \text{ свд}/100 \text{ т}$
$^{232}\text{Th}$	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16} \text{ г/г}$ или $10^{-6} \text{ Бк/т}$	$6.8 \pm 1.5$ $10^{-18} \text{ г/г}$	$< 1.2 \cdot 10^{-18} \text{ г/г}$ (95% Д.И.)
$^{238}\text{U}$	$10^{-6} - 10^{-5}$ (пыль)	$\sim 10^{-16} \text{ г/г}$ или $10^{-6} \text{ Бк/т}$	$1.6 \pm 0.1$ $10^{-17} \text{ г/г}$	$< 9.7 \cdot 10^{-19} \text{ г/г}$ (95% Д.И.)

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

## Системы сбора данных

- ФЭУ работают в однофотоэлектронном 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
<b>Физические задачи:</b>	
Солнечные нейтрино	Вспышки сверхновых
Гео-нейтрино	Гео-нейтрино
Стерильные нейтрино	Стерильные нейтрино
Редкие процессы	Редкие процессы
<b>Диапазон измерений:</b>	
200 кэВ - 18 МэВ (2 порядка!)	1 – 100 МэВ (2 порядка!)
<b>Проблемы к началу работы над диссертацией (2013 г):</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Мёртвое время после триггера</li> <li>● Не более 3 – 5 событий за 1 мс</li> <li>● Отбор по форме импульса - Gatti</li>   <li>● Пропускает 1 мюон раз в 3 дня</li>   <li>● Сбои и долгий перезапуск</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Плохая калибровка</li> <li>● Нет простр. реконструкции</li> <li>● Сопоставление данных FADC и Laben</li> <li>● Низкая эффективность мюонного и шум. фильтров</li> <li>● Меньшая экспозиция</li> </ul> <p>(Laben - с 2007 г; FADC - с 2009 г)</p>

## 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  $\sim 100$  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:**

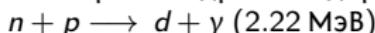
Лето - Осень 2017 ?  
Laben и FADC

Испытание UV LED системы

## Оффлайн калибровка

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

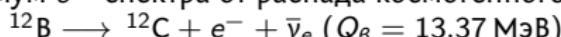
- Захват нейтронов ядрами водорода  $^1\text{H}$



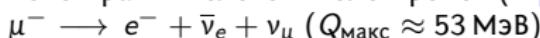
- Захват нейтронов ядрами углерода  $^{12}\text{C}$



- максимум  $\beta^-$ -спектра от распада космогенного бора  $^{12}\text{B}$



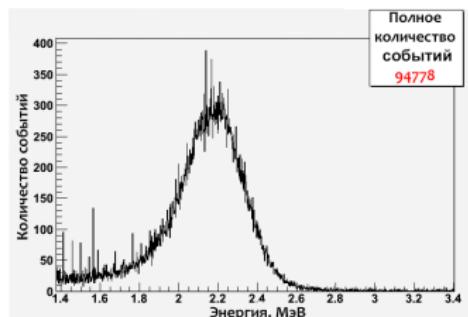
- Максимум спектра мишлевских электронов ([Атрощенко В.](#))



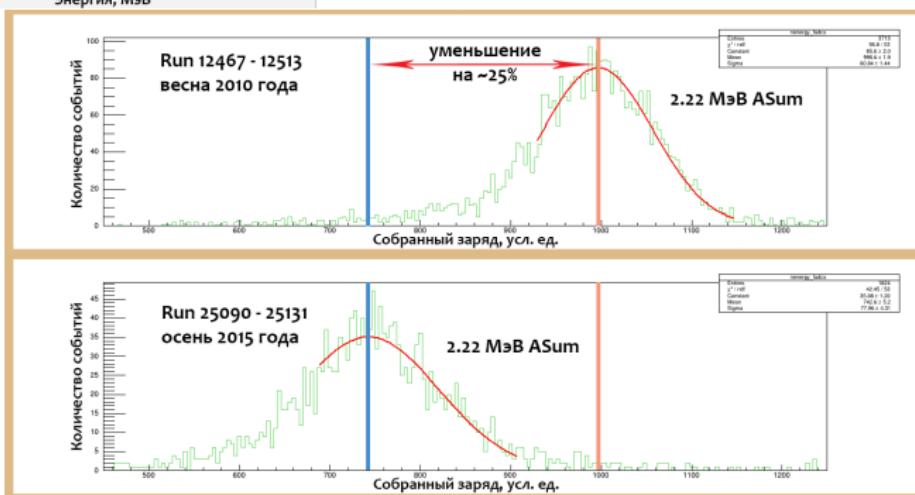
# Оффлайн калибровка

- 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 $^1\text{H}$

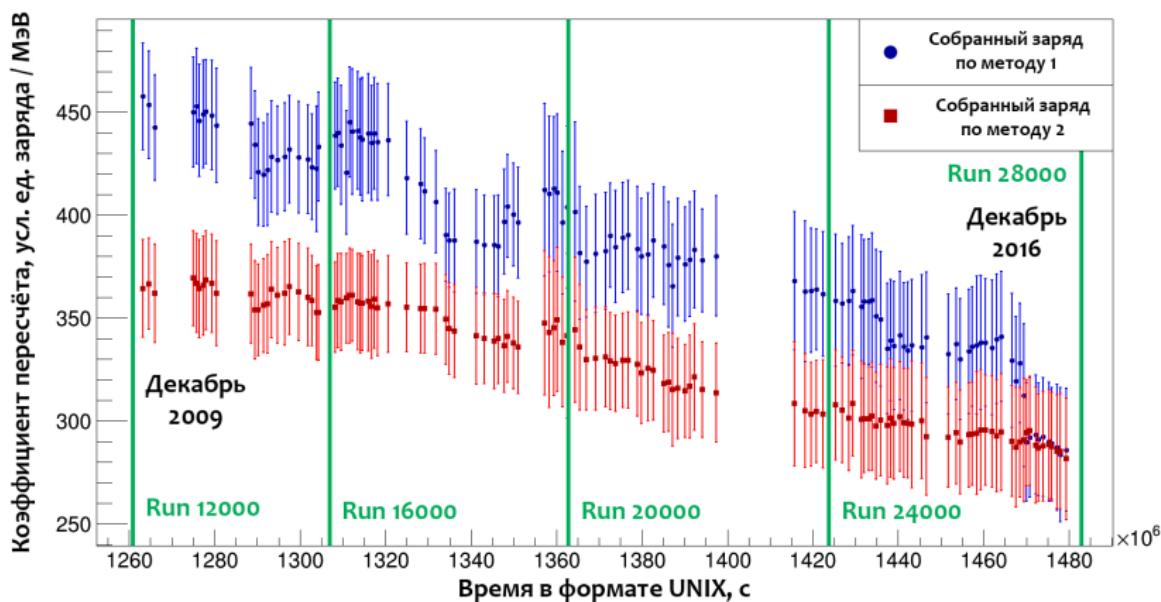


**Метод:** наблюдение за шириной  $\gamma$ -линии 2.22 МэВ при увеличении статистики  
**Выполняется поиск минимума дисперсии**



# Оффлайн калибровка: захват нейтрона на водороде $^1\text{H}$

Смещение  $\gamma$ -линий 2.22 МэВ за 5.5 лет работы детектора Borexino



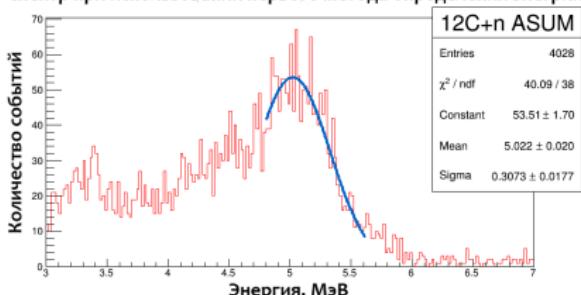
Изменение значения коэффициента пересчёта собранного заряда в энергию с течением времени

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

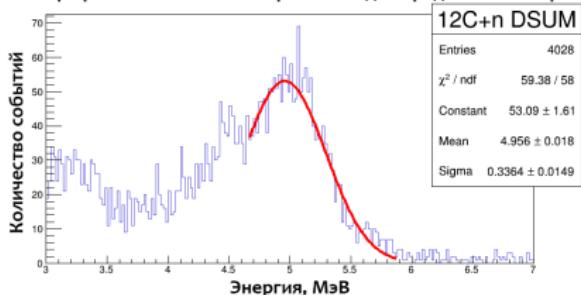
# Оффлайн калибровка: захват нейтрона на углероде $^{12}\text{C}$

## Проверка линейности энергетической шкалы по монолинии от захвата нейтрона на углероде

Спектр при использовании первого метода определения энергии



Спектр при использовании второго метода определения энергии



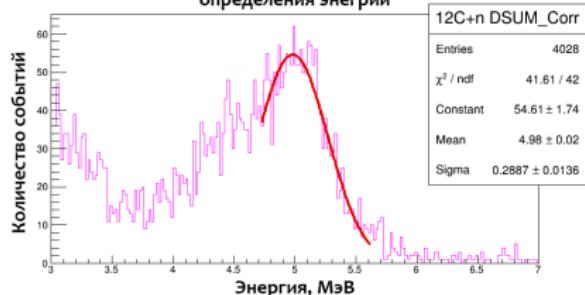
Отклонения от  
линейной энергетической шкалы

по первому методу - 1.6%

по второму методу - 0.2%

по модифицированному  
второму методу - 0.7%

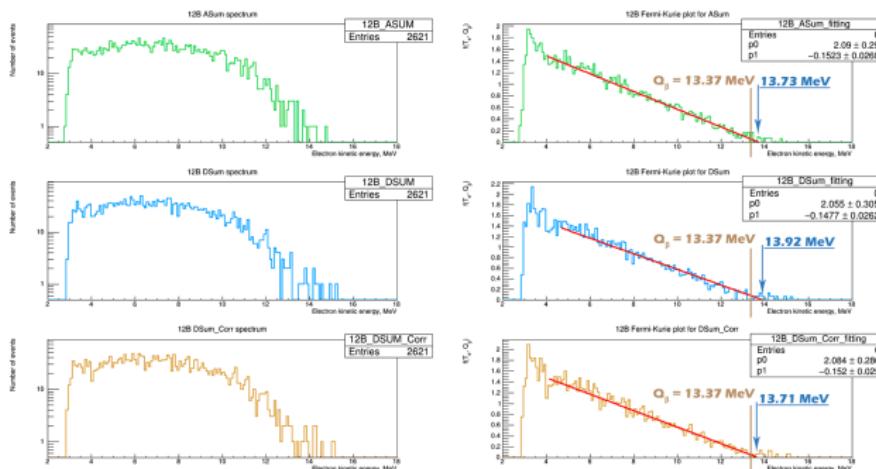
Все отклонения в пределах ошибки  
линейной энергетической шкалы

Спектр при использовании  
модифицированного второго метода  
определения энергии

# Максимум β-спектра от распада космогенного бора $^{12}\text{B}$

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

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



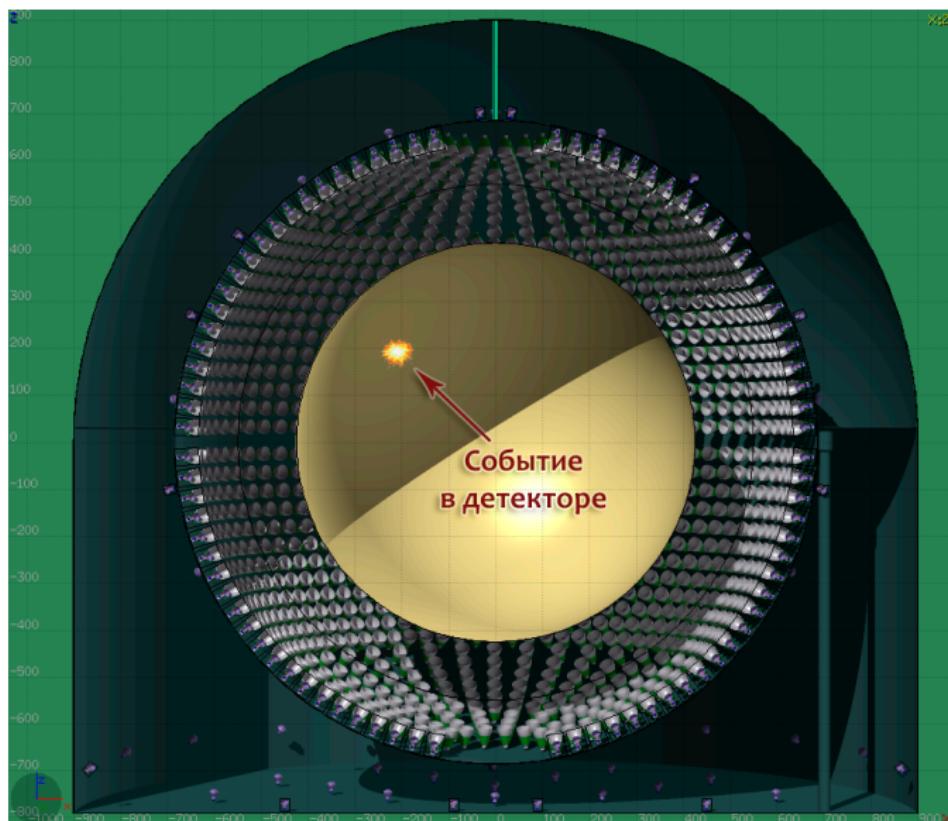
Отклонения при разных методах определения энергии:

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

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

Плотность вероятности

Момент сцинтиляции      для времени пролёта

Момент регистрации первого ф.э.

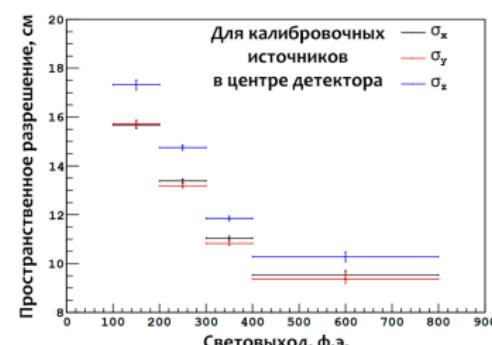
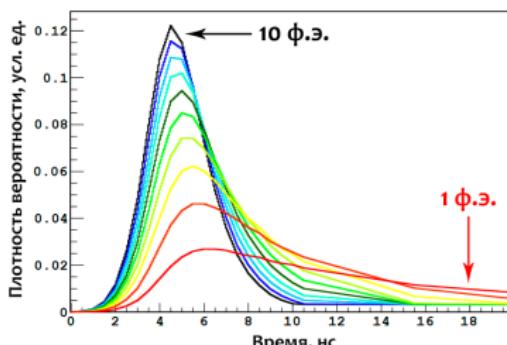
Расстояние до ФЭУ

Положение события в детекторе

Измеренный за 80 нс заряд

Номер ФЭУ

Эффективный показатель преломления



# Пространственная реконструкция для системы FADC

## Основная проблема:

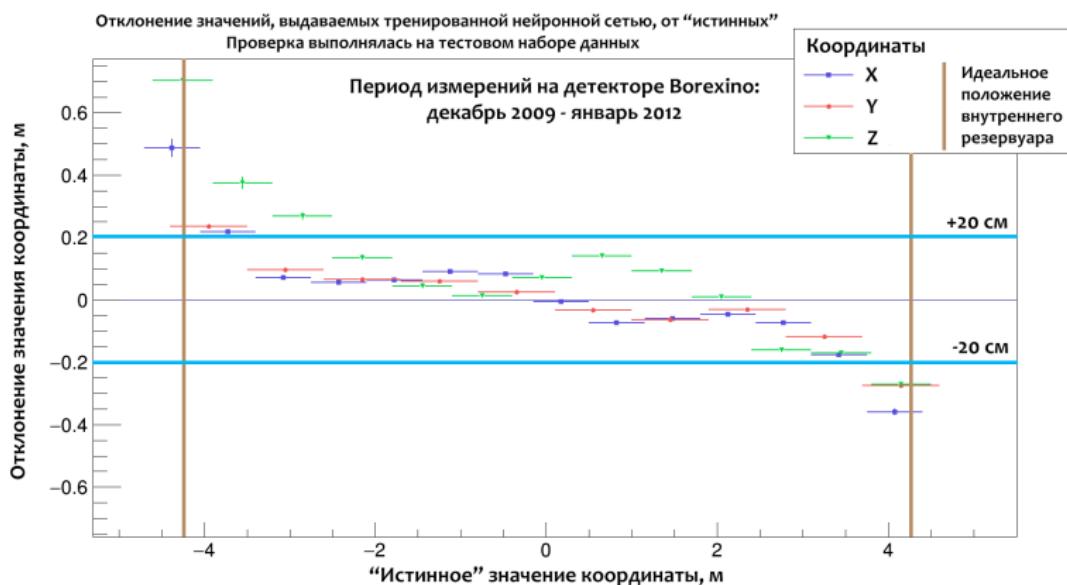
В Laben оцифровывается **каждый** канал

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

## Решение:

<b>Метод:</b>	Нейронная сеть (ROOT Multi-Layer Perceptron)
<b>Оценка точности:</b>	$V_{Bx} \approx 320 \text{ м}^3 \sim 3.2 \cdot 10^5 \text{ соб.} \implies \sim 10 \text{ см}$
<b>Данные:</b>	Формат: 17 цикл; Дек 2009 - Окт 2015 3 набора по $\sim 400$ точечных событий
<b>Настройки сети:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 80% тренировочный набор, 20% тестовый</li> <li>• 182 входа: 91 канал АЦП, <b>время и амплитуда</b></li> <li>• 2 скрытых уровня: 27 и 12 нейронов</li> <li>• 3 выхода: x, y, z</li> <li>• 6 методов обучения: Robbins-Monro или Метод обратного распространения ошибки, Batch, Steepest Descent, Polak-Ribiere, Fletcher-Reeves, <b>BFGS (Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno)</b></li> </ul>

# Результаты пространственной реконструкции (FADC)



Ошибка по координате  $\leq 22$  см, по радиусу  $\leq 30$  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**

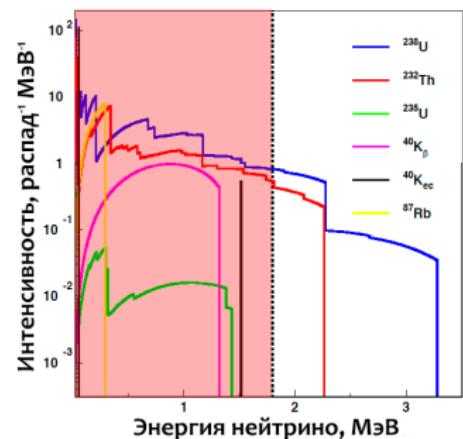
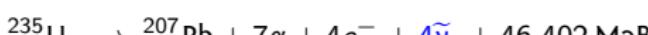
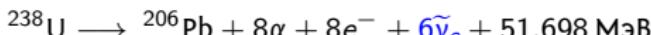
# О загадке теплового излучения Земли

Сравнение разных источников подогрева Земли

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

Но полный поток из недр Земли ( $47 \pm 2$  ТВт) (~ 20000 ядерных реакторов!), где доля **радиогенного тепла** около 10 – 35 ТВт (согласно разным СМ3 (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

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

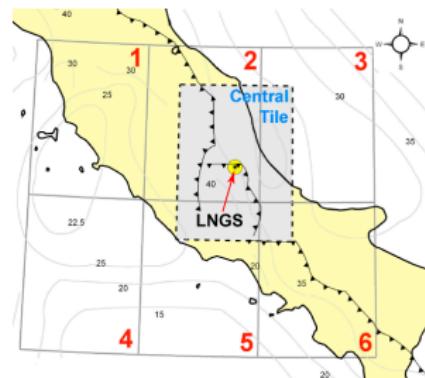
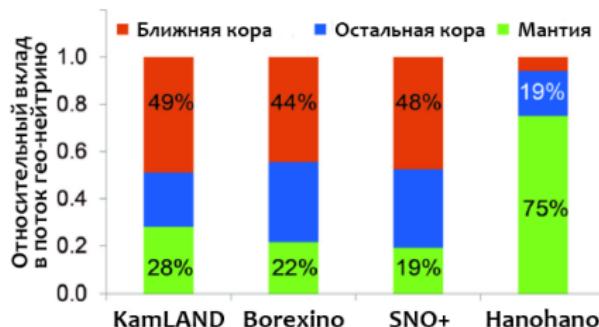
$$\langle P_{ee} \rangle \simeq \sin^4 \vartheta_{13} + \cos^4 \vartheta_{13} \left(1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\vartheta_{12}\right) \approx 0.54,$$

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

если  $H = 40 \text{ ТВт}$ ,  $\Delta E \approx 10 \text{ МэВ}$ ,  $R_{\oplus} \approx 6371 \text{ км}$ ,  $\sigma_{\text{OBR}} \sim 10^{-43} \text{ см}^2$ ,  $f \approx 0.05$  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
CM3 (BSE) Версия 1	$2.5^{+0.3}_{-0.5}$	$25^{+3}_{-5}$
CM3 (BSE) Версия 2	$2.5 \pm 0.2$	$25 \pm 2$
CM3 (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



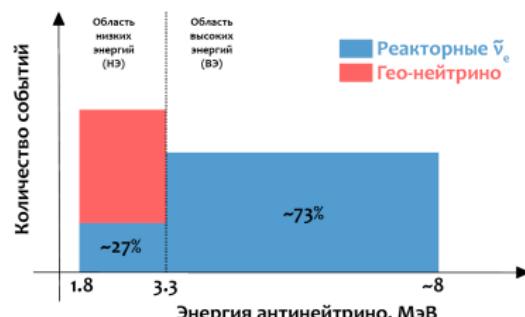
Источник	Borexino TNU
Близкая кора (LOC)	$9.7 \pm 1.3$
Остальная кора (ROC)	$13.7^{+2.8}_{-2.3}$
<b>Кора в целом</b>	$23.4^{+3.1}_{-2.6}$
Континентальная Литосферная Мантия (CLM)	$2.2^{+3.1}_{-1.3}$
Мантия	8.7
<b>Кора + мантия</b>	$34.3^{+4.4}_{-2.9}$

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

# Оценка скорости счёта фоновых реакторных событий

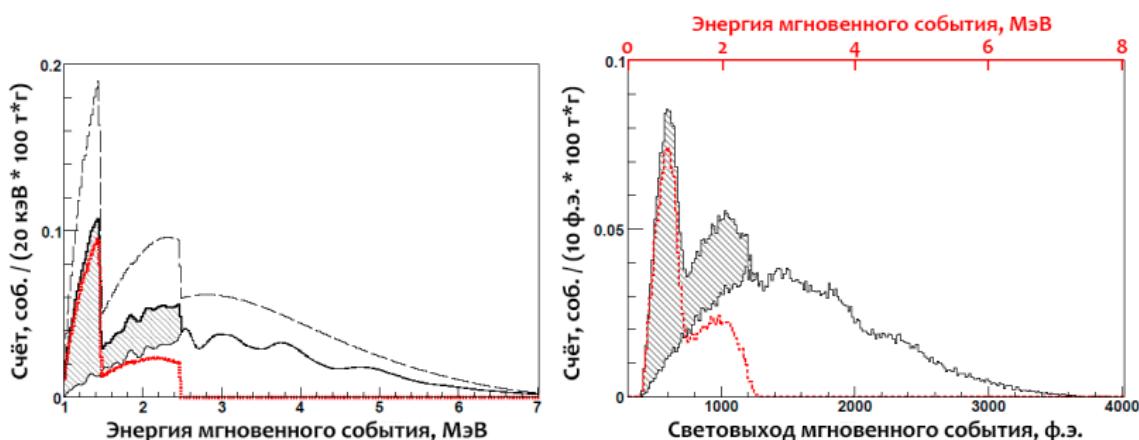
## Общая формула:

$$N_{\text{peak}} = \varepsilon(E_{\bar{\nu}_e}) N_p \tau \sum_{m=1}^{M_{\text{peak}}} \frac{P_{\text{теп}}^m}{4\pi L_m^2} \langle K_{\text{КИУМ}}^m \rangle \times \\ \times \int dE_{\bar{\nu}_e} \sum_{i=1}^4 \frac{p_i}{Q_i} \lambda_i(E_{\bar{\nu}_e}) P_{ee}(E_{\bar{\nu}_e}, L_m) \sigma_{\text{ОБР}}(E_{\bar{\nu}_e})$$



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

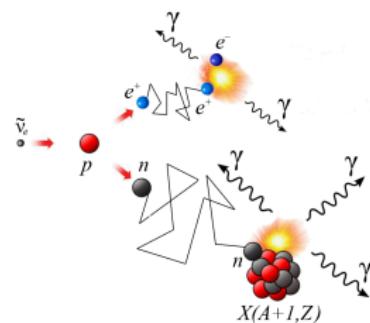
**Правый график:** Ожидаемый спектр мгновенных событий, полученный для детектора Borexino с помощью Монте-Карло моделирования. Спектр дан в единицах световыххода, т.е. в зависимости от числа зарегистрированных фотоэлектронов.

## 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  $\Delta t_{\mu}^{OD} > 2 \text{ мс}$  - мюон только во внешнем детекторе
- 7) Вето  $\Delta t_{\mu}^{ID} > 2 \text{ с}$  - мюон во внутреннем детекторе  
 $\sim 10\%$  потери экспозиции



## Обратный $\beta$ -распад

- 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

# Уровни неустранимых фонов

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

\* 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

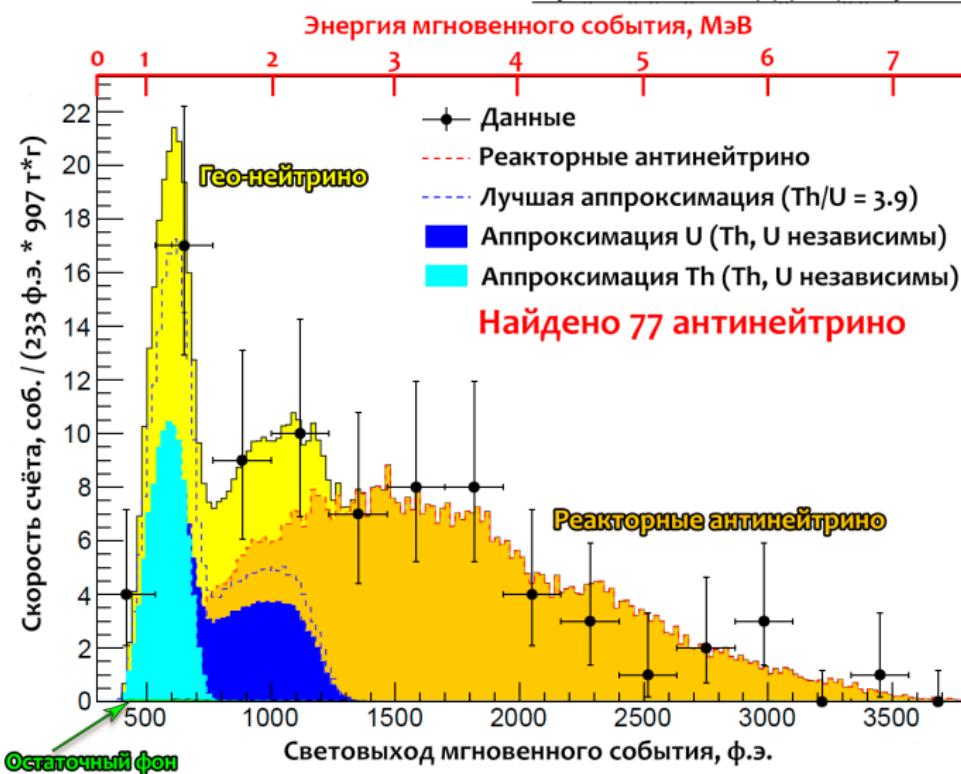
## Сопоставление результатов систем Laben и FADC

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 $\approx 5.04$ лет
Живое время FADC	1072.3 дней $\approx 2.93$ 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

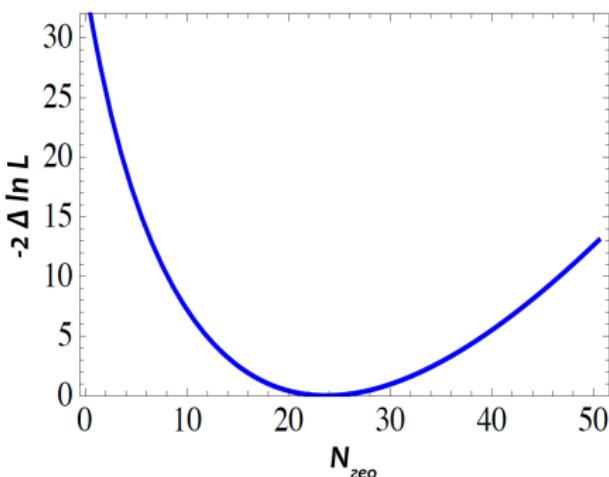
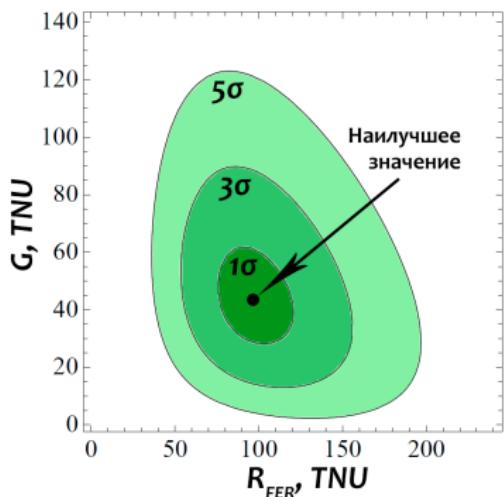


# Разделение вкладов от гео-нейтрино и реакторных антинейтрино

Метод максимального правдоподобия (Unbinned maximum likelihood estimation)

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

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



# Сравнение результатов по регистрации потока гео-нейтрино

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

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

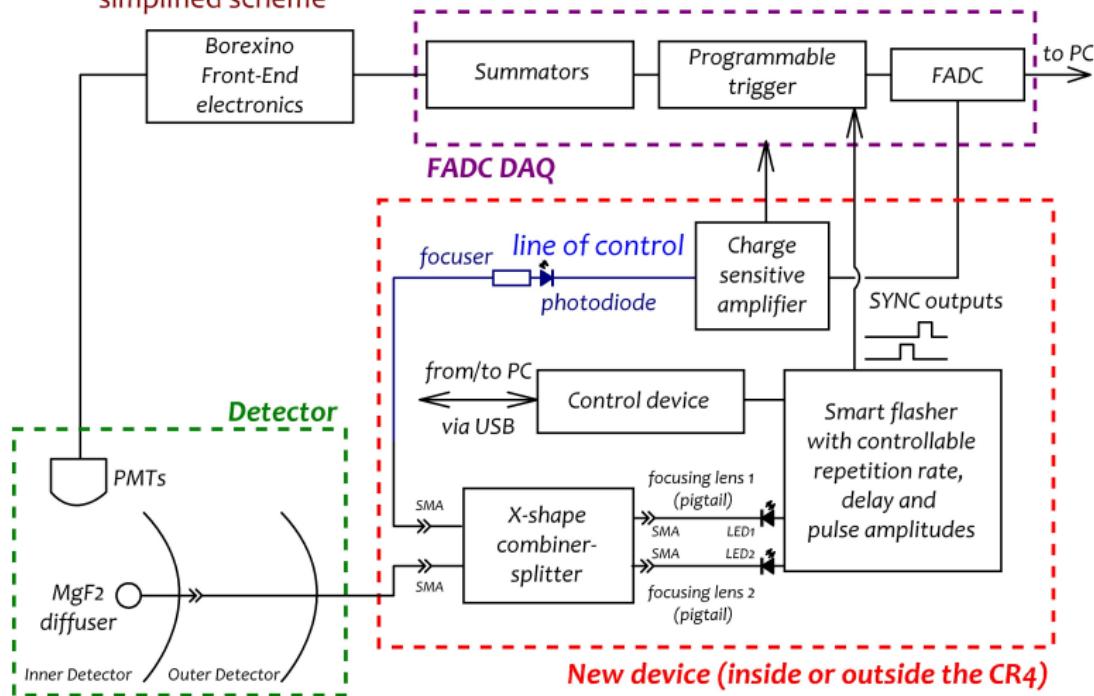
\*\* По данным статьи [8].

# 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 (двуходиодная) 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 оптоволокна
- Удалённый контроль и задание нужной последовательности импульсов
- В чистой комнате и в детекторе только оптоволокно и диффузор
- Горячая замена компонент

## Оценка реализуемости

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

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

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

Моделирование в Borexino: 1 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  $5.9\sigma$ .

## 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 жидкых сцинтилляционных детекторов большого объёма в области энергий от 1 до  $\sim 100$  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  $\sim 100$  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  $\sim 8$  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 Борексино // 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. Chepurnov 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. Chepurnov 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*).

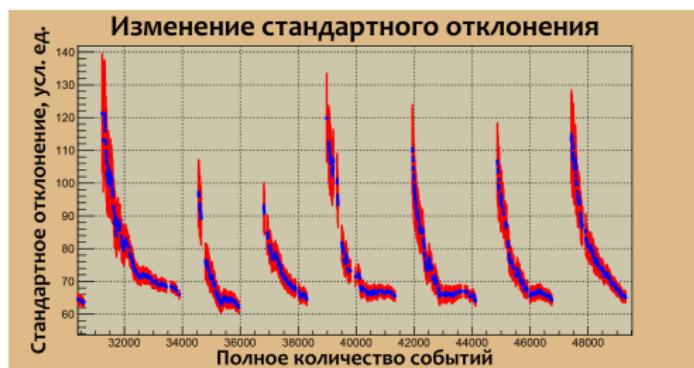
**Спасибо за внимание!**

## Дополнительные слайды

# Оффлайн калибровка: захват нейтрона на водороде $^1\text{H}$

**Метод:** наблюдение за шириной  $\gamma$ -линии при увеличении статистики.

**Основное условие нахождения минимума дисперсии:**  $\sigma_i > \sigma_{\min} + \alpha \cdot (\delta\sigma_{\min})$   
где  $\alpha$  - параметр, подбираемый вручную. Алгоритм хорошо работает при  $\alpha = 2$ .



**Удачная аппроксимация, если**

- $\sigma_{ASUM} > 35$  усл.ед.,  $\sigma_{DSUM} > 35$  усл.ед.
  - Критерий согласия  $(\chi^2/ndf)_{ASUM} > 0.65$
- Проверка минимальности  $\sigma_{ASUM}$ , если**
- $\sigma_{ASUM} > 35$  усл.ед. •  $\delta\sigma_{\min} < 60$  усл.ед.
  - $(\chi^2/ndf)_{ASUM} < 1.40$  •  $(\chi^2/ndf)_{DSUM} < 3.00$

**Настр. и исходные данные:**

- Аппроксимация распределением Гаусса
- Мин. число событий: 1400
- Нач. знач.  $\sigma$ : 4000
- Нач. знач. ошибки  $\sigma$ : 3000

**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 $^{12}\text{B}$

Предварительный отбор событий в Laben ([Михаэль Вурм](#))

Сопоставление событий и формирование спектра по данным FADC

## Критерии отбора:

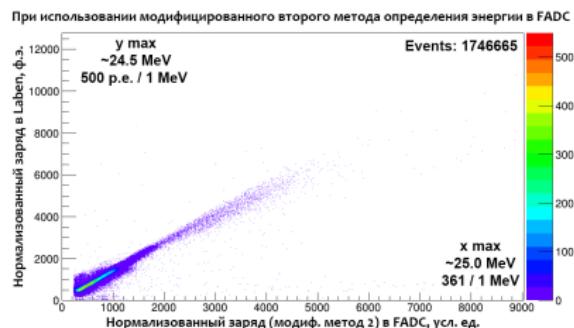
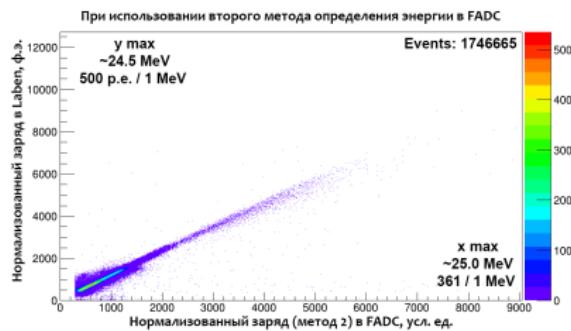
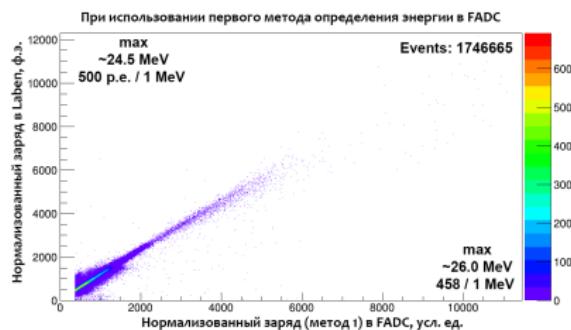
### Система Laben

- 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:  $\geq 1500$  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

-  T. A. 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. Р. 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.
-  M. Agostini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 92.3 (2015).  
*(Preprint 1506.04610v2)*, с. 031101.
-  M. Baldoncini и др. Англ. В: Phys. Rev. D 91.6 (2015).  
*(Preprint 1411.6475v2)*, с. 065002.