

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ БЫСТРЫХ
ОЦИФРОВЩИКОВ ФОРМЫ ИМПУЛЬСА В СОСТАВЕ ДЕТЕКТОРА
БОРЕКСИНО ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ОТ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

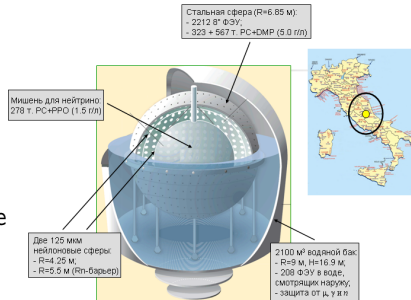
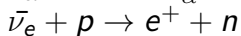
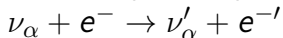
Выступающий: Г.А. Лукьянченко
Руководитель: к.ф.-м.н. Л.А. Литвинович

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

ИЯИ РАН, 18.05.2017

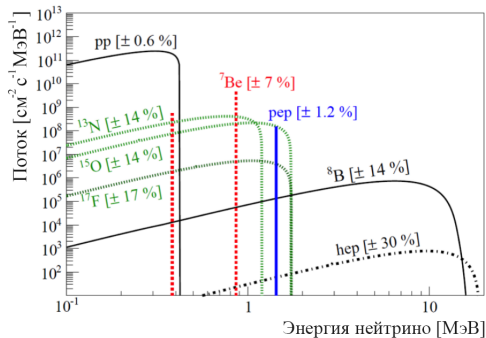
- Разработка и создание экспериментального комплекса на базе быстрых оцифровщиков формы импульса с гибкой триггерной логикой (Курчатовский электронно-измерительный комплекс, КЭИК), исключающей мёртвое время, в составе Борексина для решения задач нейтринной астрофизики в диапазоне энергий $1 \div 100$ МэВ.
- Разработка и реализация на основе данных КЭИК нового метода классификации событий в жидко-сцинтилляционном детекторе Борексина, идентификации космических мюонов, сцинтилляционных и шумовых событий с помощью обучаемых алгоритмов. Разработка алгоритма интеграции данных КЭИК в единую структуру анализа Борексина.
- Измерение по данным КЭИК и других подсистем Борексина параметров удельного выхода и средней множественности нейтронов в жидком органическом сцинтилляторе на основе псевдокумола под воздействием потока космических мюонов на глубине 3800 м водного эквивалента.
- Измерение параметров наработки радиоактивных космогенных изотопов (^{12}B , ^{12}N , ^8He , ^9Li) в жидком органическом сцинтилляторе на основе псевдокумола под воздействием потока космических мюонов на глубине 3800 м водного эквивалента.

- Глубина: 3800 м.в.э.
- Сцинтиллятор: PC + 1.5 г/л PPO
- Масса мишени: 278 т
- Радиус мишени: 4.25 м
- Количество ФЭУ: 2212
- Содержание ^{238}U и ^{232}Th в сцинтилляторе не превышает 10^{-18} г/г
- Внешний детектор: 2100 м³ воды, 208 ФЭУ
- Основные реакции регистрации:



- Солнечные нейтрино
 - Бериллиевые
 - Борные
 - pp, pep
 - CNO
- Антинейтрино
 - Реакторные
 - Гео-нейтрино
- Нейтрино от астрофизических источников
 - Сверхновые
 - Гамма-всплески
 - Диффузный поток нейтрино
- Редкие процессы
 - Распад электрона
 - Распад протона
- Нейтрино от ускорительного источника (CNGS)





	Энергия, МэВ	Ожид. поток (GS98), $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Ожид. поток (AGSS09), $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$	Измер. поток, $\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$
pp	< 0.42	$5.98 \cdot 10^{10}$	$6.03 \cdot 10^{10}$	$(6.6 \pm 0.7) \cdot 10^{10}$
CNO	< 1.74	$5.24 \cdot 10^8$	$3.76 \cdot 10^3$	$< 7.7 \cdot 10^8$
pep	1.442	$1.44 \cdot 10^8$	$1.47 \cdot 10^8$	$(1.6 \pm 0.4) \cdot 10^8$
^7Be	0.862	$4.47 \cdot 10^9$	$4.08 \cdot 10^9$	$(4.4 \pm 0.2) \cdot 10^9$
^8B	< 14.06	$5.58 \cdot 10^6$	$4.59 \cdot 10^6$	$(5.2 \pm 0.9) \cdot 10^6$
hep	< 18.773	$8.04 \cdot 10^3$	$8.31 \cdot 10^3$	—

Взрывы сверхновых являются независимым инструментом исследования истории формирования звезд во Вселенной и производства тяжелых элементов внутри звезд.

Этапы коллапса:

- Коллапс верхних слоев.
- Захват нейтрино.
- Формирование ударной волны.
- Нейтринная вспышка.
- Аккреция вещества на протонейтронную звезду.
- Остывание Кельвина-Гельмгольца.

УРКА-процессы:

- $e^- + (A, Z) \longrightarrow (A, Z - 1) + \nu_e$;
- $(A, Z - 1) \longrightarrow e^- + (A, Z) + \bar{\nu}_e$;

Средние энергии нейтрино:

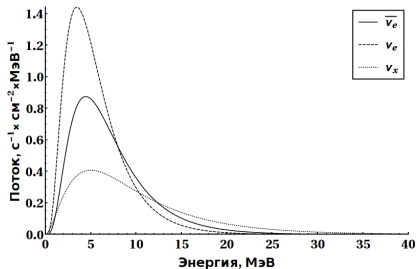
- $E_{\nu_e} = 10 - 12$ МэВ;
- $E_{\bar{\nu}_e} = 14 - 17$ МэВ;
- $E_{\nu_{\mu, \tau}} = 24 - 27$ МэВ;

Борексина входит в систему SNEWS.

Диффузный поток нейтрино от сверхновых (Diffuse Supernova Neutrino Background) — это поток нейтрино и антинейтрино всех сортов, излученных при вспышках сверхновых второго типа, которые произошли за время эволюции Вселенной.

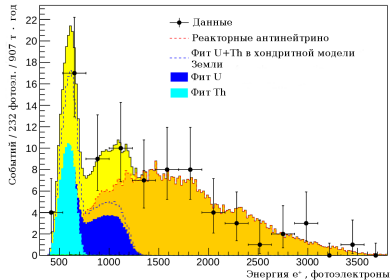
$$R_{SN} \approx 10^{-4} \text{год}^{-1} \text{Мпк}^{-3}$$

$$\frac{d\varphi}{dE_\nu} = \int_0^{z_{max}} \frac{N_{SN}(E(z+1))R_{SN}}{H_0 \sqrt{(z+1)^3 \Omega_m + \Omega_\Lambda}} dz$$



- N_{SN} — эмиссионный спектр сверхновой;
- R_{SN} — функция распространенности сверхновых;
- H_0 — постоянная Хаббла;
- $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$ — относительные плотности вещества и темной энергии;

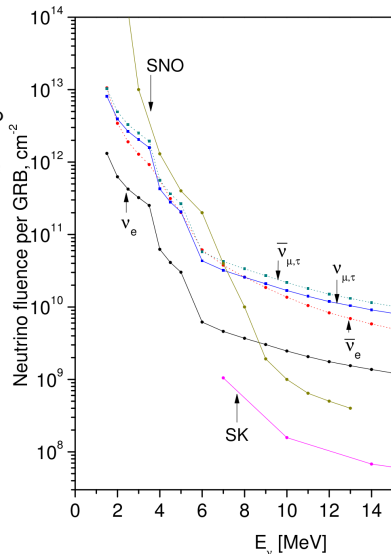
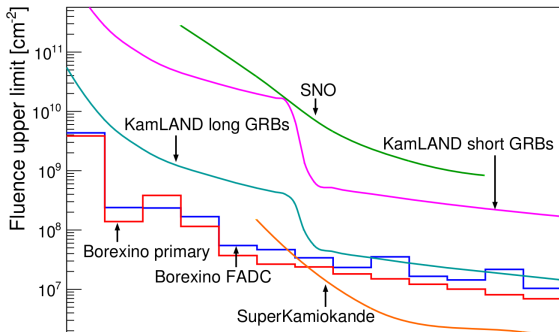
- Тепло, образующееся при распаде радиоактивных элементов, поток антинейтрино и суммарная масса U, Th и K в Земле связаны между собой.
- Экспозиция $(5.5 \pm 0.3) \cdot 10^{31}$ протонов·год за 2056 дней, зарегистрировано $23.7_{-5.7}^{+6.5}$ (стат) $_{-0.6}^{+0.9}$ (сист) гео-нейтринных событий.
- Расстояние от Борексина до ближайшего реактора: 416 км.
- Наличие гео-нейтринного сигнала подтверждается с достоверностью 5.9σ .
- Количество тепла, производимого в Земле радиоактивными распадами U и Th ограничено на уровне 11-52 ТВт (69 % УД).
- При анализе система КЭИК использовалась для повышения эффективности подавления мюонов.



Актуальные задачи Борексино

Нейтрино от гамма-всплесков

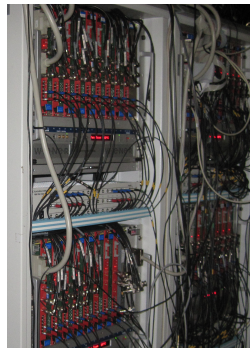
- Некоторые модели космических гамма-всплесков (КГВ) предсказывают существенный поток нейтрино с энергией порядка нескольких МэВ.
- Борексино установлены лучшие в мире ограничения на флюенс электронных антинейтрино от КГВ в области энергий от 2 до 8 МэВ.
- В области меньше 7 МэВ получены лучшие в мире ограничения на флюенс нейтрино всех сортов от КГВ.
- При изучении КГВ использовалась система КЭИК.



Курчатовский электронно-измерительный комплекс (КЭИК)

Основные характеристики

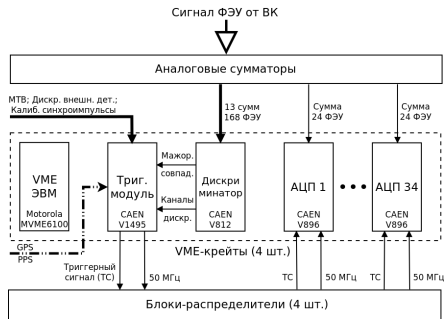
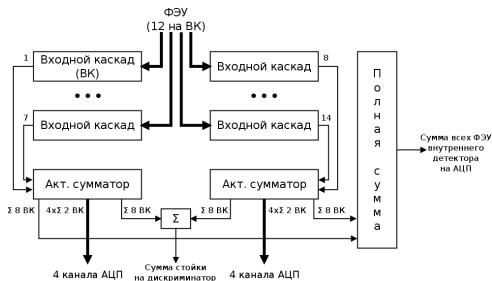
- Широкий энергетический диапазон регистрации событий (от 1 до 100 МэВ).
- 102 канала АЦП.
- Гибкая логика выработки главного триггера регистрации.
- Отсутствие мёртвого времени между событиями.
- Частота дискретизации 400 МГц.
- Глубина буфера 512 событий.
- Скорость обработки непрерывного потока событий до 15 Гц.
- Независимость системы от основного комплекса сбора данных.



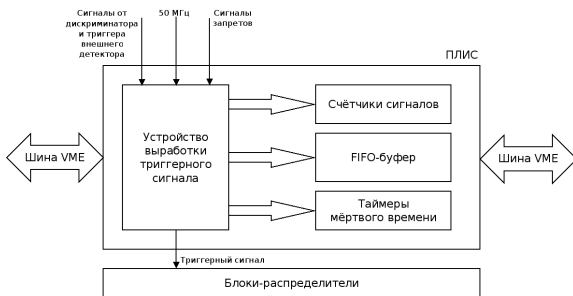
Курчатовский электронно-измерительный комплекс

Основные компоненты

- Аналоговые схемы для суммирования сигналов.
- Набор VME-модулей АЦП (подсистема сбора данных).
- VME-модуль выработки триггера (на основе ПЛИС).
- Модули-распределители триггерных сигналов и тактовых частот.
- VME-модуль программируемых дискриминаторов.
- Дискриминатор внешнего детектора.
- Управляющая одноплатная ЭВМ (в VME-исполнении).

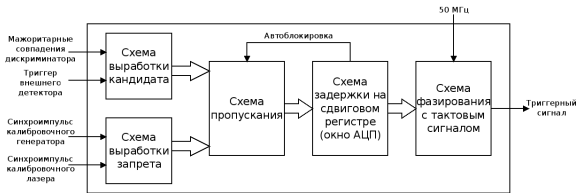


- Устройство выработки триггерных сигналов для АЦП.
- Устройство хранения триггерной информации (FIFO).
- Устройство подсчета мертвого времени.
- Устройство подсчета интенсивностей следования различных сигналов.
- Устройство формирования временной GPS метки.



Стадии формирования триггера:

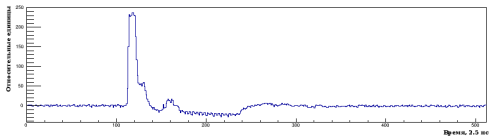
- Задержка-формировка сигналов источников триггеров и запретов.
- Генерация триггерных кандидатов и запретов из источников.
- Схема антисовпадений кандидатов и запретов для формирования конечного триггера.
- Задержка и фазирование с тактовым сигналом конечного триггера.



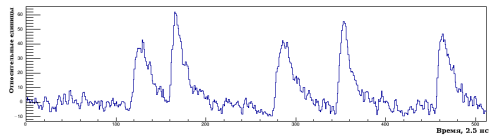
Курчатовский электронно-измерительный комплекс

Примеры событий

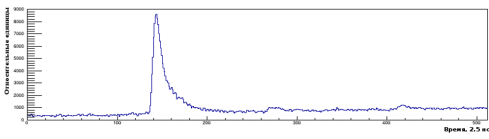
Генератор



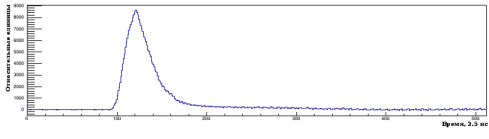
Нейтроны



e^- 45 МэВ



Мюон



Курчатовский электронно-измерительный комплекс

Онлайн программное обеспечение

refresh refresh :: setup :: monitor

D3/D0 state: **ready** (0/0/0) **ready** (0/0/0) **ready** (0/0/0)

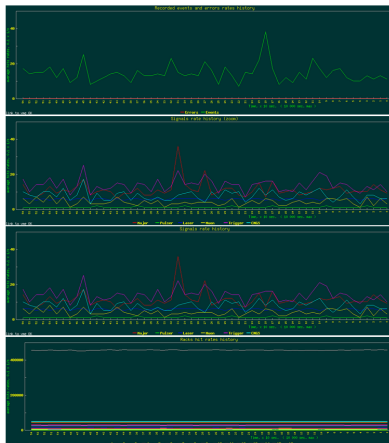
Start

Stop

Full/Idle storage used: 82%

Sent to storage

refresh :: run controller



refresh :: run controller

altera setup form

0000 F00F
0002 001A
0004 0006
0006 F004
0008 0078
000A 8023
000C 0000
000E 8014
0010 FFFF
0012 FFFF
0014 0005
0016 F015
0018 0000
001A F009
001C 0000
001E FFFF
0020 0000
0022 F063
0024 0000
0026 F004
0028 001D
0030 0000
0032 0001
0034 8000
0036 07D2

discriminator setup form

0000 000B
0002 000B
0004 0010
0006 0010
0008 0012
000A 0008
000C 0008
000E 00FF
0010 0012
0012 0011
0014 000C
0016 0012
0018 0011
001A 00FF
001C 000F
001E 001A
0020 000C
0022 000C
0024 000C
0026 0
0028 0
0030 001F
0032 DF7F
0034 0000
0036 0000

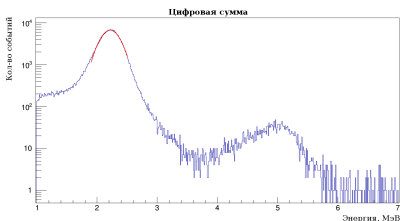
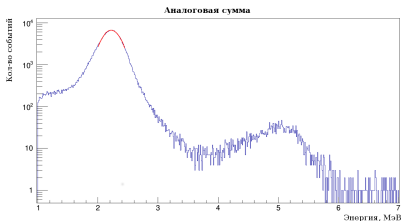
Submit

Submit

Процесс оффлайн анализа данных КЭИК:

- Преобразование первичных данных в формат ROOT.
- Декодирование формы импульса аналоговой и цифровой сумм.
- Выделение кластеров.
- Определение энергосодержания в кластерах.
- Классификация событий.
- Интеграция данных КЭИК в единое дерево анализа Борексина.

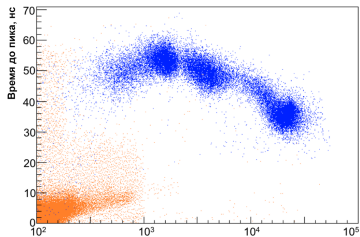
- Энерговывделение события пропорционально площади под формой импульса кластера.
- Аналоговая сумма для низкоэнергетических событий и цифровая для высокоэнергетических.
- Калибровка производится регулярно по пику 2.2 МэВ γ -квантов от захвата нейтронов.
- Энергетическое разрешение на уровне 1 МэВ $\approx 10\%$.



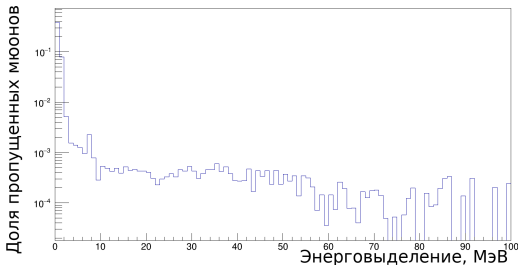
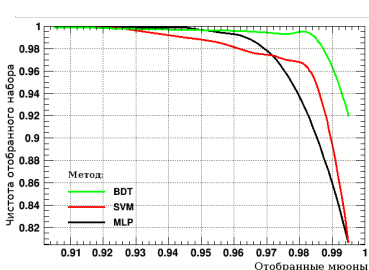
- Мюоны космических лучей - важнейший источник фона в подземных детекторах.
- Основной метод определения - внешний детектор (МТВ), эффективность: $(99.25 \pm 0.02)\%$
- Для повышения мюонной эффективности КЭИК была реализована дискриминация по форме импульса внутреннего детектора с использованием тренируемых алгоритмов.
- Тренировка проводилась на предварительно надёжно классифицированном наборе событий различных типов.
- Размер тренировочного набора - несколько тыс. событий каждого класса.

Использованные алгоритмы:

- Многослойный перцептрон (MLP)
- Метод опорных векторов (SVM)
- Дерево принятия решений с бустингом (BDT)



- Использование нескольких независимых алгоритмов идентификации позволяет гибко настраивать мюонный фильтр при анализе.
- Эффективность нового метода идентификации мюонов в КЭИК составила 0.999969.
- Эффективность соответствует (0.13 ± 0.01) пропущенных мюона за сутки.

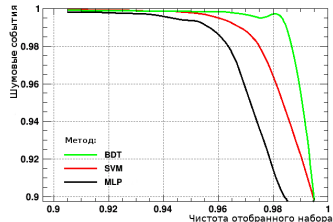
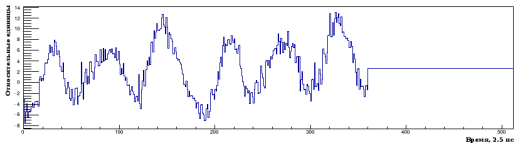


Методики оффлайн-анализа

Выделение событий вызванных шумами электроники

- Несмотря на сложный триггер шумы электроники составляют существенный процент событий.
- Обучаемые алгоритмы аналогичные мюонному фильтру.
- Эффективность отбора шумовых событий 0.987.

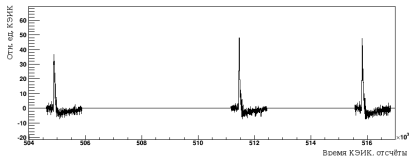
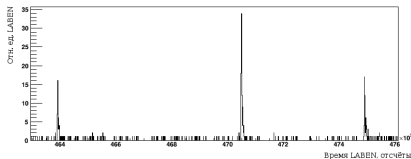
	1-10 МэВ	<1 МэВ	>10 МэВ	Многоклас.	Шумовые
Число событий	7047	1560	99	2517	16467
Мюон, ур. 1	38	4	2	80	23
Мюон, ур. 2	13	1	0	22	2
Мюон, ур. 3	9	1	0	13	0
Шум, ур. 1	27	880	14	126	16430
Шум, ур. 2	12	27	3	100	16405
Шум, ур. 3	3	18	1	63	16207



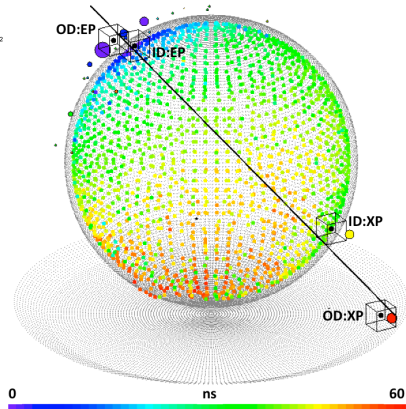
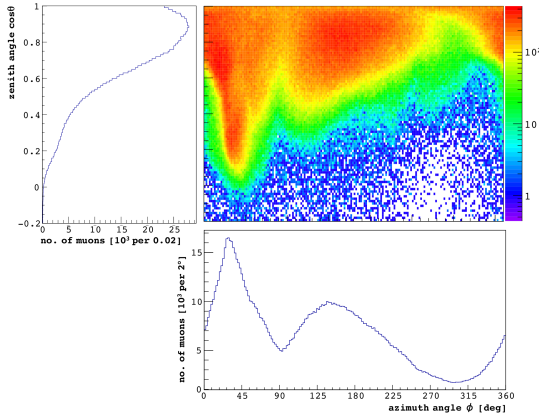
Методики оффлайн-анализа

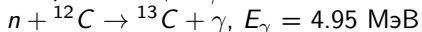
Интеграция данных КЭИК в единое дерево анализа Борексина

- Интеграция данных КЭИК с данными от остальных систем Борексина необходима для проведения комплексного анализа использующего преимущества каждой системы сбора данных.
- Интеграция происходит с использованием маркеров поступающих в аппаратуру КЭИК от триггера низкоэнергетичной системы LABEN.
- В случае наличия в событии GPS-метки производится покластерное сопоставление, иначе - пособытийное.

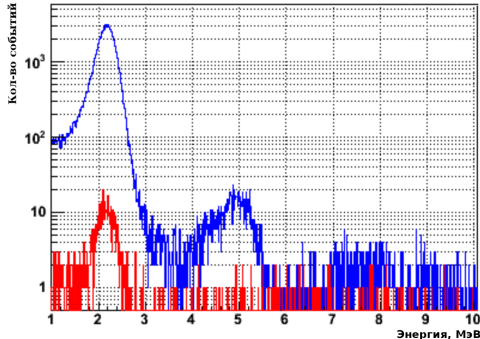


- Измеренный поток космических мюонов через детектор Борексино: $(3.41 \pm 0.01) \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, эквивалентно $(4310 \pm 2_{\text{СТАТ}} \pm 10_{\text{СИСТ}})$ мюонов через детектов в сутки.
- Средняя энергия мюонов: ≈ 280 ГэВ.





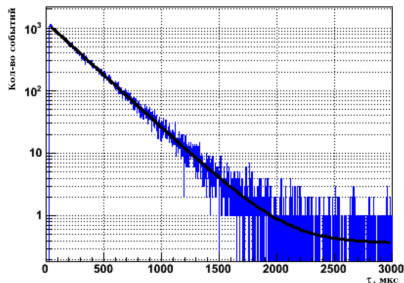
- Отбор нейтронных событий в данных системы КЭИК производился в окне $\Delta t \in [30 \div 1500]$ мкс после мюона.
- Энергетический порог - 1 МэВ.
- Случайные совпадения - аналогично, но во временном окне $[1530 \div 3000]$ мкс.



Удельный выход космогенных нейтронов в сцинтилляторе Борексина:

$$Y_n = \frac{N_n}{N_\mu} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{det} \cdot \varepsilon_t} \cdot \frac{1}{I_\mu^{avg}} \cdot \frac{1}{\rho_{scint}} = (2.87 \pm 0.07_{\text{стат}} \pm 0.15_{\text{сист}}) \cdot 10^{-4} \text{ n}/(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$$

- Время сбора данных 637.3 дней
- $N_\mu = 2686155$
- $N_n = 127501$
- $I_\mu^{avg} = 4/3 R_{SSS}$
- $R_{SSS} = 6.821 \pm 0.005 \text{ м}$
- $\rho_{scint} = 0.88 \text{ г}/\text{см}^3$
- $\varepsilon_{det} = 0.62$
- $\varepsilon_t = 0.89$



Средняя кратность рождения нейтронов на мюон:

$$\overline{M} = (3.61 \pm 0.08_{\text{стат}} \pm 0.07_{\text{сист}}) \text{ n}/\mu$$

Время захвата нейтрона: $\tau_n = (258.7 \pm 0.8_{\text{стат}} \pm 2.0_{\text{сист}}) \text{ мкс}$.

^{12}B

- Время жизни $\tau = 29.1$ мс
- Пороговая энергия $Q = 13.4$ МэВ

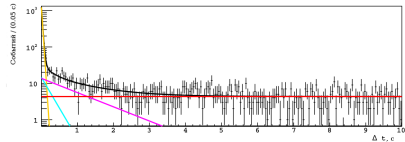
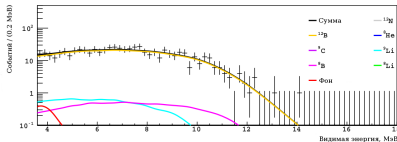
^{12}B - наиболее распространенный космогенный радиоактивный изотоп в ЖОС.

Критерии отбора

- Энергетический диапазон $[3.6 \div 18]$ МэВ
- Временное окно после мюона $\Delta t \in [2 \div 10000]$ мс.
- Расстояние от центра детектора < 3 м

^{12}N

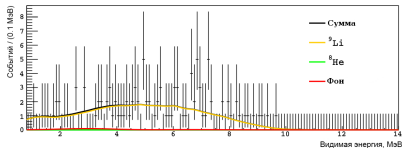
- Время жизни $\tau = 15.9$ мс
- Пороговая энергия $Q = 17.3$ МэВ



- ^8He и ^9Li — β^- -распадчики, которые могут распадаться в возбуждённые дочерние ядра, нестабильные к вылету нейтрона.
- Подобные процессы способны полностью имитировать сигнатуру обратного β -распада.
- Тройное совпадение мюона, β -распада в окне $\Delta t \in [2 \div 2000]$ мс и γ -квантов от захвата нейтрона предоставляет сигнатуру распадов ^9Li и ^8He .

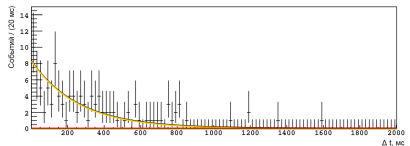
^9Li

- Время жизни $\tau = 257.2$ мс
- Пороговая энергия $Q = 13.6$ МэВ



^8He

- Время жизни $\tau = 171.7$ мс
- Пороговая энергия $Q = 10.7$ МэВ



Измеренный удельный выход для различных радиоактивных изотопов, нарабатываемых в жидком органическом сцинтилляторе при прохождении через него космических мюонов:

	Удельный выход шт/ $(\mu \cdot (\text{г}/\text{см}^2))$		
	Борексино	KamLAND	LVD
n	$(2.87 \pm 0.17) \cdot 10^{-4}$	$(2.79 \pm 0.31) \cdot 10^{-4}$	$(3.6 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$
^{12}N	$< 1.1 \cdot 10^{-7}$	$(1.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$	–
^{12}B	$(56 \pm 3) \cdot 10^{-7}$	$(42.9 \pm 3.3) \cdot 10^{-7}$	–
^8He	$< 1.5 \cdot 10^{-7}$	$(0.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-7}$	–
^9Li	$(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-7}$	$(2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-7}$	–

Автор внёс определяющий вклад в разработку и создание системы КЭИК в составе детектора Борексина, а также проводил анализ данных, полученных при помощи системы. Автором был осуществлён следующий комплекс научных и научно-технических работ:

- 1 Разработка архитектуры экспериментального комплекса.
- 2 Создание и наладка системы сбора данных на базе быстрых АЦП с шиной VME и реализация гибкой триггерной системы на базе ПЛИС.
- 3 Разработка «онлайн» программного обеспечения сбора данных системы.
- 4 Обеспечение работоспособности КЭИК и процесса сбора данных с 2011 по 2016 год.
- 5 Разработка базовых методов и алгоритмов «оффлайн» анализа данных КЭИК, а также алгоритмов интеграции данных КЭИК в общую структуру анализа эксперимента Борексина.
- 6 Разработка метода выделения в данных КЭИК сцинтилляционных событий и событий, вызванных мюонами космических лучей.
- 7 Изучение с помощью КЭИК космогенных нейтронов, нарабатываемых при взаимодействии космических мюонов со сцинтиллятором Борексина.
- 8 Изучение с помощью КЭИК космогенных радиоактивных изотопов в Борексина.

- Разработан и реализован в составе экспериментальной платформы Борексино уникальный электронно-измерительный комплекс на основе быстрых преобразователей формы импульса с гибкой триггерной системой (КЭИК), оптимизированный для регистрации нейтринного излучения от астрофизических источников.
- Реализованы алгоритмы оффлайн-анализа данных от комплекса, включающие в себя поиск событий в данных КЭИК, оценку их энерговыделения в детекторе и идентификацию мюонных, сцинтилляционных и шумовых событий.
- Реализована интеграция данных КЭИК в единую структуру анализа Борексино, что позволило проводить комплексный анализ, используя данные от нескольких подсистем Борексино.
- С 2011 по 2016 год проводилось обеспечение работы системы КЭИК с высоким отношением времени набора данных пригодных для анализа ко времени простоя.

- Данные системы КЭИК были использованы для получения результатов Борексино по потокам нейтрино от космических гамма-всплесков и земных недр.
- С помощью системы КЭИК были произведены измерения и получены новые результаты о частоте рождения космогенных радиоактивных элементов ^{12}B , ^{12}N , ^8He и ^9Li при взаимодействии космических мюонов с жидким органическим сцинтиллятором на основе псевдокумола на глубине 3800 м водного эквивалента.
- Были получены новые результаты о наработке космогенных нейтронов при взаимодействии космических мюонов с жидким органическим сцинтиллятором на основе псевдокумола на глубине 3800 м водного эквивалента.

- 1 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Cosmogenic backgrounds in Borexino at 3800 m water-equivalent depth // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. — 2013. — Vol. 2013, no. 8. — P. 049.
- 2 Lukanchenko G. The status of the study of solar CNO neutrinos in the Borexino experiment // Physics of Atomic Nuclei. — 2015. — Vol. 78, no. 14. — P. 1621-1623.
- 3 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Spectroscopy of geoneutrinos from 2056 days of Borexino data // Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. — 2015. — Vol. 92, no. 3. — 031101.
- 4 Lukanchenko G., Litvinovich E. Data acquisition system based on fast waveform digitizers for large neutrino detectors // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 675, no. 1. — P. 39. — 012037.
- 5 Литвинович Е. А., Лукьянченко Г. А. [и др.] Система сбора данных на основе быстрых оцифровщиков формы импульса / 2013. — Препринт / Нац. исследовательский центр «Курчатовский институт» ИАЭ-6756/2.
- 6 Лукьянченко Г. А. Статус работ по изучению CNO-нейтрино от Солнца в эксперименте Борексино // Ядерная физика и инжиниринг. — 2014. — Т. 5, 11-12. — С. 908.
- 7 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Final results of Borexino Phase-I on low-energy solar neutrino spectroscopy // Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. — 2014. — Vol. 89, no. 11.
- 8 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Neutrinos from the primary proton-proton fusion process in the Sun // Nature. — 2014. — Vol. 512, no. 7515. — P. 383–386.
- 9 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) New limits on heavy sterile neutrino mixing in B8 decay obtained with the Borexino detector // Phys. Rev. D - Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. — 2013. — Vol. 88, no. 7. — 072010.
- 10 Bellini G., .. , Lukanchenko G. [et al.] (Borexino Collab.) Measurement of geo-neutrinos from 1353 days of Borexino // Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and HighEnergy Physics. — 2013. — Vol. 722, 4-5. — P. 295–300.
- 11 Литвинович Е. А., Лукьянченко Г. А. [и др.] Проверка эффекта превышения скорости света нейтрино в эксперименте Церн – Гран Сассо / 2012. — Препринт / Нац. исследовательский центр «Курчатовский институт» ИАЭ-6700/2.

Спасибо за внимание!