

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УТВЕРЖДАЮ
директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук
22 января 2018

УДК 539.1, 539.12, 539.123

№ государственной регистрации АААА-А16-116022510114-8

Инв.№

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика элементарных частиц, физика высоких энергий, теория
калибровочных полей и фундаментальных взаимодействий, космология

(промежуточный за 2017 год)

Научный руководитель темы

заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н.

Либанов М.В.
22 января 2018

Москва 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы

д.ф.-м.н.Либанов М.В. (введение, заключение)
22 января 2018

Исполнители:

д.ф.-м.н. Красников Н.В. (раздел 1,10,11)
22 января 2018

д.ф.-м.н. Ткачёв И.И. (раздел 2-9)
22 января 2018

РЕФЕРАТ

В отчёте стр. 76, рис. 33, таб.3

Ключевые слова:

БОЛЬШОЙ АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД, СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ, ТЯЖЁЛОЕ НЕЙТРИНО, ПРАВЫЙ W-БОЗОН, РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭНЕРГИИ, ОСЦИЛЛЯЦИИ НЕЙТРИНО, АДРОННЫЙ АКСИОН, КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ.

Эта тема включает в себя 18 проектов Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика», в которых участвовал ИЯИ РАН. В рамках этих проектов проводились экспериментальные исследования по физике высоких энергий и нейтринной астрофизике, ускорительной и не ускорительной физики частиц. Исследования проводились на ускорителе LHC(БАК) в международном европейском исследовательском центре CERN, на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН), на Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН и в других исследовательских центрах.

Исследования проводились в основном международными коллаборациями с участием российских институтов, среди которых ИЯИ РАН.

Нумерация проектов сохранена в соответствии со документом: «Структура программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика»». Сайт Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика»: <http://hepna.inr.ru/>

Важнейшими результатами 2017 года при выполнении данной темы являются:

В рамках программы работ по проекту создания на оз.Байкал глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом порядка кубического км, выполнен монтаж и запуск в режиме постоянного набора данных второго кластера детектора в составе восьми гирлянд глубоководных оптических модулей (по 36 модулей на каждой). (ИЯИ РАН, ОИЯИ).

Международной коллаборацией GERDA с участием ИЯИ РАН, КИ, ИТЭФ и ОИЯИ создан детектор нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . Об этом успехе опубликована статья в журнале Nature. Получен наилучший верхний предел на время полураспада ^{76}Ge по этому процессу $T_{1/2} > 8 \cdot 10^{25}$ лет.

Получено лучшее в мире ограничение на существование нового типа частицы – стерильного нейтрино – в диапазоне масс 0.1 – 2 кэВ в ИЯИ РАН в эксперименте по поиску стерильных нейтрино в распаде трития на установке Троицк ню-масс.

Работы по проектам данной темы будут продолжены в 2018 году в рамках новой Программы фундаментальных исследований РАН «Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии» с координатором Программы ак. В.А.Рубаковым

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|---|------|
| Реферат | 3 |
| Введение | 6 |
| 1 Проект 5-6: изучение гравитационных свойств антиматерии на установке AEGIS в ЦЕРНе. Поиск легкой темной материи на установке p348 в ЦЕРНе | 7 |
| 2 Проект 7: экспериментальные исследования на детекторе Компактный мюонный соленоид (CMS) | 9 |
| 3 Проект 8-9: поиск новой физики в распадах заряженных каонов в эксперименте NA62 (ЦЕРН). Разработка и создание новых нейтринных детекторов в проекте LBNO DEMO, эксперимент WA105 (ЦЕРН) | 11 |
| 4 Проект 10: Исследование CP-нарушения и поиск новой физики в редких распадах B-мезонов в эксперименте БАК-БИ на Большом адронном коллайдере | 15 |
| 5 Проект 11: Исследование энергетической зависимости множественности частиц и плотности их распределения по псевдобыстроте от энергии в pp, p-pb и в pb+pb столкновениях на установке ALICE | 17 |
| 6 Проект 12: Исследование рождения адронов в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях на ускорителе SPS в ЦЕРН | 20 |
| 7 Проект 20: Разработка и создание измерителей формы сгустков для линейного ускорителя LINAC-4 ЦЕРН и исследование продольного движения в ускорителе | 24 |
| 8 Проект 23. Исследование нейтринного излучения СОЛНЦА и нестандартных свойств нейтрино | 28 |
| 9 Проект 24: Байкальский нейтринный эксперимент | 29 |
| 10 Проект 25: Исследования спектра массовых состояний нейтрино - эксперимент «Троицк ню-масс». Прямые лабораторные поиски тяжёлой компоненты нейтрино в кинематике радиоактивных распадов | 34 |
| 11 Проект 26: Поиск всплесков гравитационного излучения на подземном детекторе ОГРАН | 38 |
| 12 Проект 27: Неускорительная физика частиц: двойной безнейтринный бета распад ядер, осцилляции реакторных нейтрино | 44 |
| 13 Отчет по эксперименту ГЕРДА | 48 |
| 14 Проект 28, 29, 31: исследование космических лучей высоких и сверхвысоких энергий и свойств нейтрино на установках TELESCOPE ARRAY, PRISMA-LHAASO, NOVA и E938 (MINERVA) | 50 |
| 15 Разработка и создание высокогорной установки PRISMA-YBJ для изучения космических лучей в рамках международного эксперимента LHAASO | 53 |
| 16 Проект 30: Осцилляционные эксперименты с интенсивными пучками нейтрино и антинейтрино на протонном ускорителе JPARC (Япония) | 55 |
| 17 Проект 32: Подземная физика на детекторах АСД, LVD, OPERA. Поиск нейтринного излучения на детекторах АНС И LVD. Разработка метода измерения генерации нейтронов мюонами космических лучей в аргоне. Поиск редких событий с помощью эмульсионно-трекового детектора OPERA | 60 |
| 18 Проект 33: Эксперимент ТУНКА/TAIGA | 67 |
| 19 Проект 34: Проверка экспериментально наблюдаемого эффекта годовых и суточных вариаций константы распада ядра ^{214}Po на короткоживущем ядре ^{213}Po | 71 |
| 20 Проект 36: Исследование первичного космического излучения и поиск астрофизических источников космического излучения на комплексе установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН. | 72 |
| Заключение | 76 |

ВВЕДЕНИЕ

Эта тема включает в себя 18 проектов Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика», в которых участвовал ИЯИ РАН. В рамках этих проектов проводились экспериментальные исследования по физике высоких энергий и нейтринной астрофизике, ускорительной и не ускорительной физики частиц. Исследования проводились на ускорителе LHC(БАК) в международном европейском исследовательском центре CERN, на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (БНО ИЯИ РАН), на Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН и в других исследовательских центрах.

Исследования проводились в основном международными коллаборациями с участием российских институтов, среди которых ИЯИ РАН.

Нумерация проектов сохранена в соответствии со документом: «Структура программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика»». Сайт Программы фундаментальных исследований президиума РАН «Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика»: <http://hepna.inr.ru/>

1 ПРОЕКТ 5-6: ИЗУЧЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ АНТИМАТЕРИИ НА
УСТАНОВКЕ AEGIS В ЦЕРНЕ. ПОИСК ЛЕГКОЙ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ НА
УСТАНОВКЕ P348 В ЦЕРНЕ.

Руководитель: В.А.Матвеев, С.Гниненко

Из анализа данных, полученных в эксперименте NA64 (или P348) на ускорителе SPS CERN в 2016 году, найдено, что нет доказательств существования тёмного фотона с массой меньше 1 ГэВ, который распадается на две лёгкие частицы тёмной материи.

Результаты опубликованы в печати в следующих работах:

[1] D. Banerjee et al. [NA64 Collaboration], Phys. Rev. Lett. 118, 011802 (2017).

[2] D. Banerjee et al. [NA64 Collaboration], arXiv:1710.00971 [hep-ex].

2 ПРОЕКТ 7: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ДЕТЕКТОРЕ КОМПАКТНЫЙ МЮОННЫЙ СОЛЕНОИД (CMS)

Рук.: В.А.Матвеев, Н.В.Красников (ИЯИ РАН)

1. Поиск тяжелого нейтрино и правого W_R -бозона

В 2017 году была продолжена работа по поиску правого W_R -бозона и тяжелого нейтрино на основе данных детектора CMS с полной энергией сталкивающихся протонов 13 ТэВ.

Произведен поиск правого WR -бозона и тяжелого нейтрино в событиях, содержащих один электрон или мюон, один распадающийся на адроны тау- лептон и как минимум две адронные струи. Получены новые ограничения на массу WR -бозона и массу тяжелого нейтрино. Для случая, когда масса тяжелого нейтрино равна половине массы правого нейтрино, правый WR -бозон с массой 2900 ГэВ и меньше исключен.

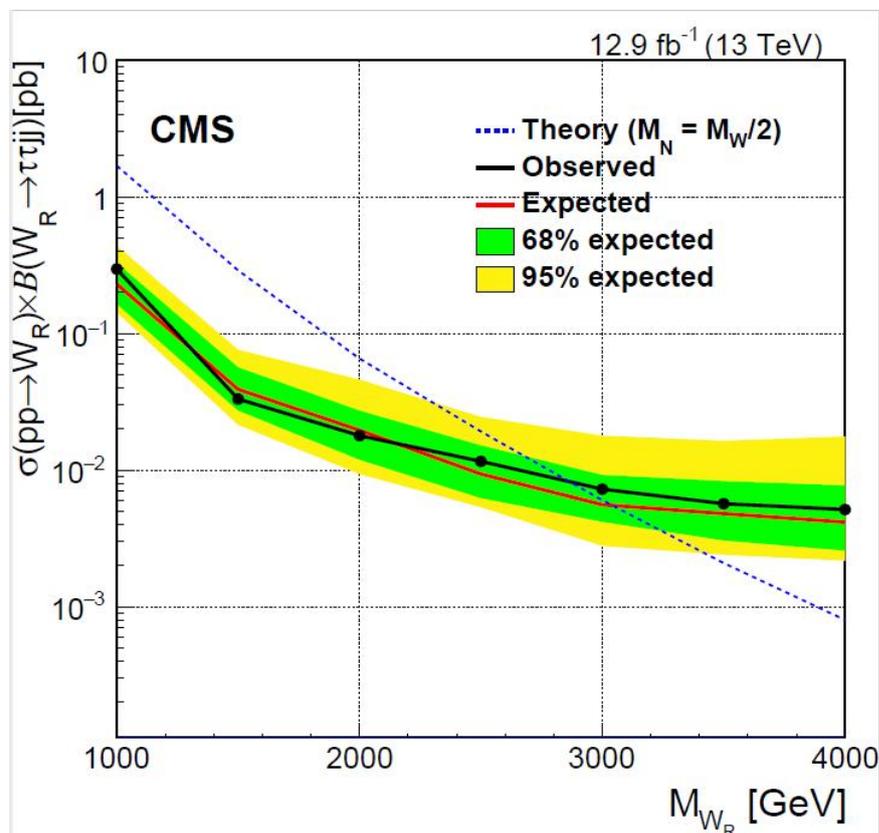


Рисунок 1 - Ограничения на массу WR -бозона и массу тяжелого нейтрино.

Поиск проявлений БФКЛ-померона

Как известно, адронные струи в рассеянии частиц при высоких энергиях отражают динамику рассеянных и образованных партонов: кварков и глюонов. Стандартная эволюция КХД Грибова-Липатова-Альтарелли-Паризи-Докшицера (ГЛАПД) описывает динамику рассеяния партонов на большие углы (малые быстроты) с большими поперечными

импульсами, сравнимыми по величине с начальными импульсами партонов. При этом конечные партоны имеют сильное упорядочение по поперечному импульсу: каждый последующий испущенный партон имеет поперечный импульс много меньше родительского. С ростом энергии соударения начинает играть все более важную роль кинематический режим, при котором конечные партоны сильно упорядочены в широком интервале быстрот, имея при этом импульсы сравнимые с друг другом. Такой кинематический режим, доминирующий при стремлении энергии соударения к бесконечности, описывается эволюционным уравнением Кураева-Липатова-Фадина-Балицкого (БФКЛ).

Целью программы исследований группы в эксперименте CMS является поиск указаний на проявление новых эффектов асимптотической динамики КХД в данных CMS на БАК. Уточнение теоретического и экспериментального поведения асимптотической КХД в новом, ранее недостижимом, режиме позволит, в свою очередь, сильно расширить кинематическую область поисков новой физики за пределами Стандартной модели.

Продолжены измерения отношения сечений инклюзивных двухструйных событий к выходу двухструйных событий как функции относительной быстроты между струями с вето на дополнительные струи по поперечному импульсу с использованием данных при 2,76, 7 и 8 ТэВ. Новая наблюдаемая - отношение двухструйных сечений (К-фактор) с применением вето на рождение дополнительных струй значительно усиливает чувствительность к вкладу эффектов асимптотического поведения КХД.

На рисунке 2 показаны отношения сечений двухструйных событий: инклюзивных событий к «эксклюзивным» как функция интервала быстроты между струями для струй с $p_T \min = 35$ ГэВ (левая колонка) при 2,76 ТэВ. На нижнем ряду показаны относительные величины для предсказаний ГЛАПД-генераторов. На рисунке 3 показано то же самое, только для частного случая инклюзивного события, когда учитывается только пара струй с максимальным разделением по быстройте (пары струй Мюллера-Навеле). Из рисунков видно, что как и в случае 7 ТэВ «К-фактор» и при 2,76 ТэВ описывается ГЛАПД-генератором RUTHIA, однако при наложении вето на образование дополнительных струй в случае «эксклюзивных» событий, ни один из ГЛАПД-генераторов уже не описывает данные.

Таким образом, получено еще более яркое указание на возможное проявление эффектов асимптотического поведения КХД (БФКЛ-эффекты) в образовании адронных струй на БАК.

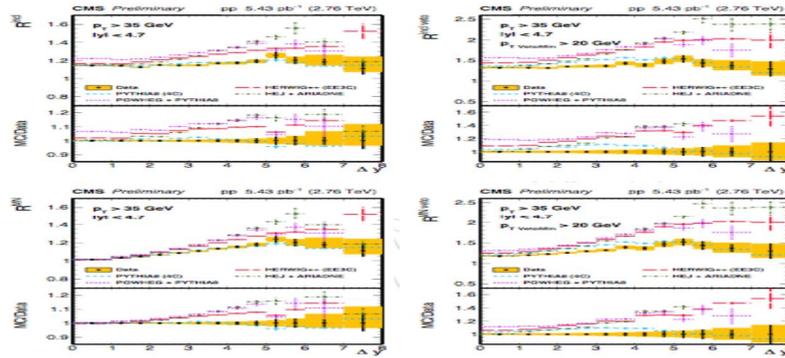


Figure 2: Ratios of the inclusive to “exclusive” dijet production cross sections, R^{incl} (upper left) and R^{MN} (lower left), as well as the ratios of the inclusive to “exclusive with veto” dijet cross sections $R^{incl veto}$ (upper right) and $R^{MN veto}$ (lower right) as a function of rapidity separation Δy between two jets, compared to the predictions of the LO DGLAP-based MC generators PYTHIA8 and HERWIG++, NLO DGLAP-based prediction of the POWHEG+PYTHIA8 generator package, as well as LL BFKL prediction provided by HEJ+ARIADNE MC generator package. The ratios are calculated for jets with $p_T > 35$ GeV and $|\eta| < 4.7$. The veto threshold is defined at $p_{T(veto) min} > 20$ GeV. Systematic uncertainty is presented by the shaded band while statistical uncertainty is presented by the error bars.

Рисунок 2 - Отношение сечений двухструйных событий («К-фактор») при 2,76 ТэВ для струй с $p_T \min = 35$ ГэВ.

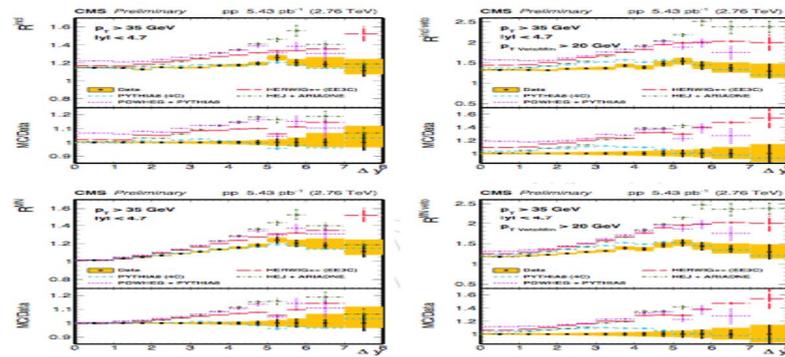


Figure 2: Ratios of the inclusive to “exclusive” dijet production cross sections, R^{incl} (upper left) and R^{MN} (lower left), as well as the ratios of the inclusive to “exclusive with veto” dijet cross sections $R^{incl veto}$ (upper right) and $R^{MN veto}$ (lower right) as a function of rapidity separation Δy between two jets, compared to the predictions of the LO DGLAP-based MC generators PYTHIA8 and HERWIG++, NLO DGLAP-based prediction of the POWHEG+PYTHIA8 generator package, as well as LL BFKL prediction provided by HEJ+ARIADNE MC generator package. The ratios are calculated for jets with $p_T > 35$ GeV and $|\eta| < 4.7$. The veto threshold is defined at $p_{T(veto) min} > 20$ GeV. Systematic uncertainty is presented by the shaded band while statistical uncertainty is presented by the error bars.

Рисунок 3 - Отношение сечений двухструйных событий («К-фактор») при 2,76 ТэВ для струй с $p_T \min = 35$ ГэВ, где учитываются пары струй с максимальным разделением по быстроте.

Исследования по шумам адронного калориметра

Работа в этом направлении велась по тематике рабочей группы Noise WG, изучающей шума адронного калориметра. Проблема связана с тем что адронный калориметр может случайно зарегистрировать чрезвычайно большой сигнал с аномально большим шумом, что приводит к заметному искажению регистрируемого события.

Изучались способы борьбы с шумами в передней и задней (HF) частях адронного калориметра, расположенных в непосредственной близости от пучка. Основные фильтры для подавления шума в HF используют разность сигналов с длинных и коротких волокон (топологические фильтры). Первым фильтром является PЕT-фильтр (Polynomial Energy Threshold), в котором строится отношение $R = (L-S)/(L+S)$, где L и S – сигналы с длинных и коротких волокон соответственно. Вторым топологическим фильтром является S9S1-фильтр. Это изоляционный фильтр, предназначенный для борьбы с шумом в длинных волокнах, он определяет изолированность энерговыделения в длинном волокне по отношению к энерговыделению в окружающих волокнах (длинных и коротких). Изучен суммарный эффект от применения различных HF-фильтров.

Литература:

1.Khachatryan V. et al. (CMS Collaboration). Search for heavy neutrinos or third-generation leptoquarks in final states with two hadronically decaying τ leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=13$ TeV // JHEP. V.1703. P.077. 2017

2.Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for a heavy composite Majorana neutrino in the final state with two leptons and two quarks at $\sqrt{s}=13$ TeV // Phys.Lett.B V.775. P.315-337. 2017

3.Sirunyan A.M. et al. (CMS Collaboration). Search for third-generation scalar leptoquarks and heavy right-handed neutrino in final states with two tau leptons and two jets in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV // JHEP. V.1707. P.121. 2017

3 ПРОЕКТ 8-9: ПОИСК НОВОЙ ФИЗИКИ В РАСПАДАХ ЗАРЯЖЕННЫХ КАОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ NA62 (ЦЕРН). РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ НОВЫХ НЕЙТРИННЫХ ДЕТЕКТОРОВ В ПРОЕКТЕ LBNO DEMO, ЭКСПЕРИМЕНТ WA105 (ЦЕРН)

Рук.: ИЯИ РАН, Ю.Г.Куденко

Участники Проекта:

ИЯИ РАН, Число участников проекта: 20 человек, из них 14 человек моложе 35 лет, 4 аспиранта, 7 студентов.

Важнейшие результаты, полученные в 2017 г

1. Проведен физический сеанс с каонным пучком высокой интенсивности в эксперименте NA62 с апреля по декабрь 2017 г. Набрано примерно 60% от полной статистики. Ведется анализ данных.

2. В результате анализа накопленных данных по распаду каона $K^+ \rightarrow e^+ \nu_H$ получено новое ограничение на параметры смешивания тяжелых нейтрино с массами до 500 МэВ с активными нейтрино. Было проанализировано 3×10^8 распадов каонов.

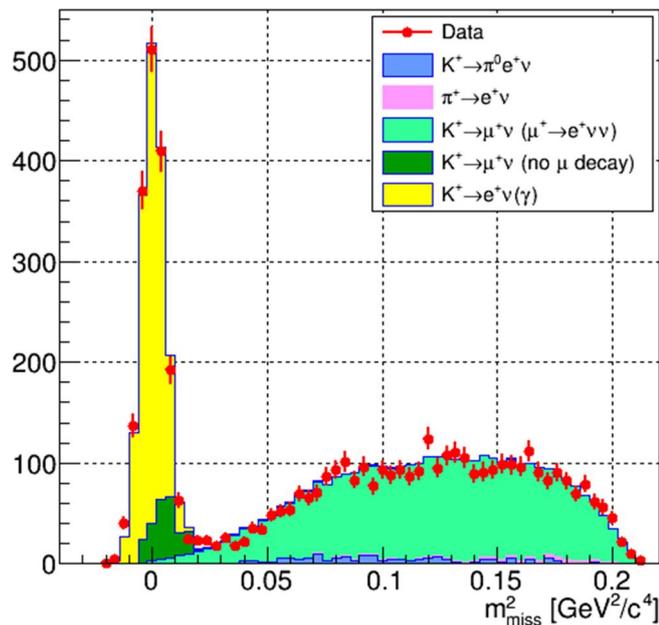


Рис.1. Распределение по квадрату недостающих масс в распаде $K^+ \rightarrow e^+ + X$
 $m_{miss}^2 = (PK^+ - pe^+)^2$.

На Рис.1 представлено распределение по квадрату недостающих масс в распаде $K^+ \rightarrow e^+ + X$: $m_{miss}^2 = (PK^+ - Pe^+)^2$. Пик при $m_{miss}^2 = 0$ соответствует распаду $K^+ \rightarrow e^+ \nu_e$ (~1600 событий), а события с тяжелым нейтрино давали бы пик при $m_{miss}^2 = m_{\nu H}^2$. Это распределение использовалось для получения верхнего предела на параметр смешивания тяжелого нейтрино с ν_e : $|U_{eH}|^2$. Это ограничение представлено на Рис. 2.

совместно с другими данными. Видно, что в области $m_{\nu H} > 150$ МэВ это ограничение является лучшим для смешивания с электронным нейтрино, а в области $m_{\nu H} > 300$ МэВ. - лучшим среди всех данных.

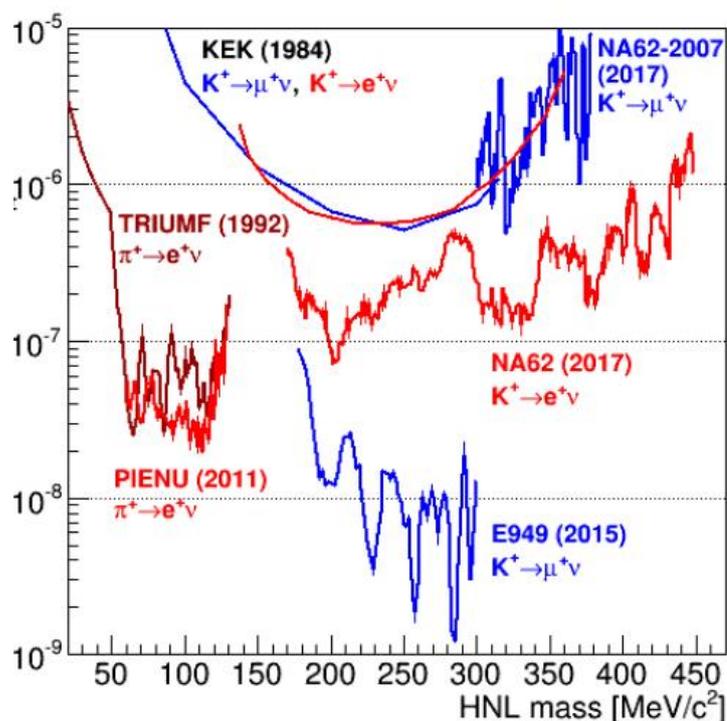


Рис.2. Верхние пределы на уровне достоверности 90% на параметры смешивания $|U_{eH}|^2$ и $|U_{\mu H}|^2$.

3. В рамках нейтринной платформы ЦЕРН в 2017 году проведена разработка магнитного нейтринного детектора Baby-MIND (рис.3), который состоит из 33 слоев (модулей) намагниченных железных пластин (поле 1.5 Тесла), между которыми располагаются сегментированные сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами. Изготовление детектора было завершено в 2017 году, было проведено 2 тестовых сеанса на канале заряженных частиц в ЦЕРНе. В результате работы в течение 2017 года эта работа была полностью выполнена: смонтирован детектор, проведены тесты на канале заряженных частиц в ЦЕРНе, с магнитным полем детектора, начат анализ данных. Предварительные результаты анализа показывают, что полученные параметры Baby-MIND удовлетворяют требованиям, необходимым для измерения нейтринных сечений при энергии около 1 ГэВ. После завершения всех работ по исследованию детектор в декабре 2017 года был перевезен в JPARC (Япония).

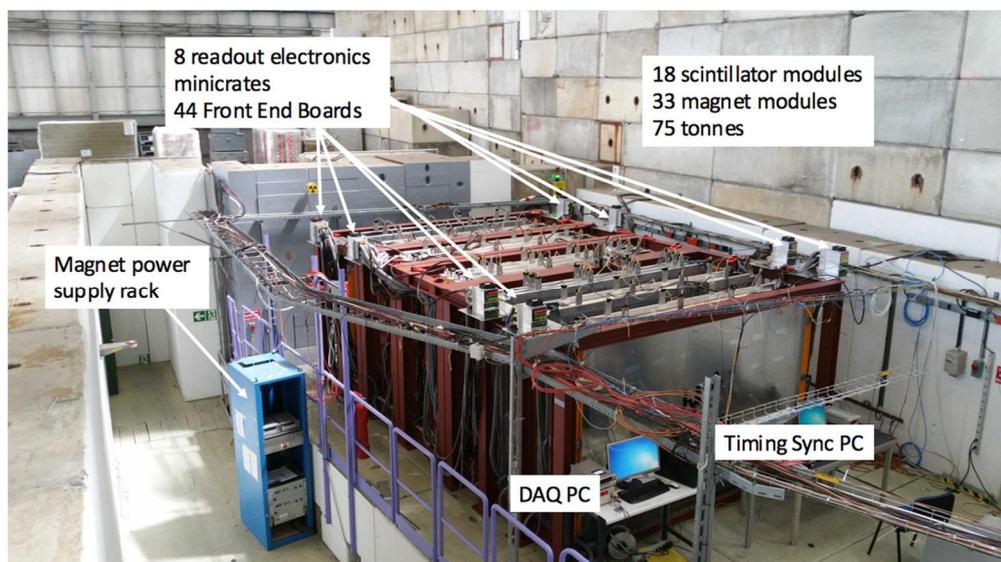


Рис.3. Общий вид детектора Baby-MIND, установленного на канале заряженных частиц T10 в ЦЕРНе.

Публикации:

1. M. Zamkovsky et al. "Neutral pion form factor measurement by the NA62 experiment". J.Phys.Conf.Ser. 873 (2017) no.1 012016.

2. C. Lazzeroni et al. "Search for heavy neutrinos in $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ decays " Phys.Lett. B772(2017) 712-718."

3. E. C. Gil et al. "The Beam and detector of the NA62 experiment at CERN " JINST 12(2017) no.05, P05025.

4. C. Lazzeroni et al. "Measurement of the π^0 electromagnetic transition form factor slope " Phys.Lett. B768(2017)38-45.

5. R. Volpe et al. "Search for $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$ at NA62 " Nucl.Part.Phys.Proc. 282-284(2017)101-105.

6. E. Maurice et al. "Study of π^0 Dalitz decays in the NA62 and NA48/2" Nucl.Part.Phys.Proc. 282-284(2017)106-110.

7. A. Mefodiev, Y. Kudenko, O. Mineev and A. Khotjantsev, Baby-MIND neutrino detector, Phys. Part. Nucl. 48 (2017) 1002.

8. D. Sgalaberna, A. Blondel... Y. Kudenko, O. Mineev et al. A fully active fine grained detector with three readout views, arXiv: 1707.01785.

9. M. Antonova, A. Mefodiev et al. Baby-MIND experiment construction status, arXiv:1704.08917.

10. M. Antonova, A. Mefodiev et al. Baby-MIND: a magnetized spectrometer for WAGASCI experiment, arXiv:1704.07467.

11.M.Antonova et al. Baby MIND: A Magnetized Segmented Neutrino Detector for the WAGASCI Experiment, JINST, 12 (2017) C07028.

- доклады на конференциях и школах

1. V. Duk, Search for K^+ to π^+ ν nubar at NA62, UK Flavour 2017 Durham (UK), 4-6 сентября.2017

2. V. Duk, New limits on heavy neutrinos from NA62, NNN17 Warwick (UK), октября 2017

3. A. Shaikhiev, “NA62 experiment at CERN, status and recent results”, The XXIII International Workshop High Energy Physics and Quantum Field Theory, Yaroslavl, Russia, June 26– July 3, 2017

4. Федотов С.А. Мюонное гало в эксперименте NA62 (CERN) / Доклад на конференции: III Межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология», Долгопрудный, Россия, 27-28 апреля 2017 года (<http://npm.mipt.ru/conf>)

5.Федотов С.А. The New CHOD detector for the NA62 experiment at CERN / Доклад на конференции: Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РФН «Физика фундаментальных взаимодействий», посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, Нальчик, Россия, 6-8 июня 2017 года (<http://icssnp.inr.ac.ru/ru/>).

6.M.Antonova et al. Baby MIND: magnetized segmented neutrino detector for the WAGASCI experiment, talk at International Conference Instrumentation17, Novosibirsk, Russia, 26 February – 3 March 2017.

7. A.Mefodiev, Status of detector Baby-MIND, talk at International Conference ICPPA17, Moscow 2-5 October 2017.

8. А.Костин, А.Мефодьев, Статус детектора Baby-MIND, доклад на III Молодежной конференции «Физика элементарных частиц и космология», Москва, 27-28 апреля 2017 г.

- подготовка дипломных (бакалаврских, магистерских) работ

Магистерские работы, защищенные в 2017

А.Костин, МАГНИТНЫЙ ДЕТЕКТОР НЕЙТРИНО «BABY-MIND», магистерская диссертация, МФТИ

М.Медведева, Измерение времени жизни положительного каона, магистерская диссертация, МФТИ

А.Смирнов, Измерение параметров фотодиодов для время-пролетных систем, бакалаврскую работа, МФТИ

Веб страницы проекта:

<http://na62.web.cern.ch/na62/>

<http://cenf-baby-mind.web.cern.ch/>

4 ПРОЕКТ 10: ИССЛЕДОВАНИЕ CP-НАРУШЕНИЯ И ПОИСК НОВОЙ ФИЗИКИ В РЕДКИХ РАСПАДАХ B-МЕЗОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ БАК-БИ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ.

ИЯИ РАН в коллаборации LHCb, руководитель Е.Н. Гуцин

Исполнители: Научных сотрудников – 5, инженерный состав – 4.

Основная цель международного эксперимента LHCb – исследование CP-нарушения и поиск Новой Физики в редких распадах B-мезонов на ускорителе LHC в CERN. К 2017 году на ускорителе LHC проведены работы, в результате которых энергия пучков увеличена до 13 ТэВ. Эксперимент LHCb в 2017 г. продолжил набор статистики и обработку набранных данных. Получен ряд новых результатов о CP-нарушении в редких распадах B- и D-мезонов, превосходящих по точности лучшие мировые измерения.

Основные публикации в 2017 г.

Observation of five new narrow states decaying to LHCb Collaboration (Roel Aaij (CERN) et al.). Mar 14, 2017. 10 pp. Published in Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.18, 182001 DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.182001 e-Print: arXiv:1703.04639 [hep-ex]

Measurement of the branching fraction and effective lifetime and search for decays LHCb Collaboration (Roel Aaij (CERN) et al.). Mar 16, 2017. 11 pp. Published in Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.19, 191801 DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.191801 e-Print: arXiv:1703.05747 [hep-ex]

Test of lepton universality with decays LHCb Collaboration (R. Aaij (CERN) et al.). May 16, 2017. Published in JHEP 1708 (2017) 055 DOI: 10.1007/JHEP08(2017)055 e-Print: arXiv:1705.05802 [hep-ex]

5 ПРОЕКТ 11: ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ
МНОЖЕСТВЕННОСТИ ЧАСТИЦ И ПЛОТНОСТИ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО
ПСЕВДОБЫСТРОТЕ ОТ ЭНЕРГИИ В PP, P-PB И В PB+PB СТОЛКНОВЕНИЯХ НА
УСТАНОВКЕ ALICE

Рук.: ИЯИ РАН А.Б.Курепин

Множественность заряженных частиц, образующихся в результате высокоэнергетических pp столкновений, является одним из ключевых наблюдаемых для описания глобальных свойств pp-взаимодействия. Эта характеристика была и остается предметом экспериментальных исследований, выполняемых сотрудниками ИЯИ РАН в рамках коллаборации ALICE на Большом адронном коллайдере (БАК). Сотрудники группы ИЯИ, МИФИ совместно с University of Jyväskylä (Финляндия) в рамках коллаборации ALICE-T0 приняли участие в круглосуточных дежурствах в сменах и обеспечивали непрерывное, круглосуточное экспертное сопровождение детектора T0 в ходе сеансов по набору физических данных. В 2017 году особое внимание было уделено систематизации и уточнению полученных ранее данных по множественности заряженных частиц в центральной области быстрой, изучению зависимости множественности от энергии столкновений во всем интервале энергий, доступном на БАК.

Было проведено детальное исследование [1] распределения первичных заряженных частиц по псевдобыстроте и распределения множественности заряженных частиц в протон-протонных столкновениях при $\sqrt{s} = 0.9, 2.36, 2.76, 7$ и 8 ТэВ. Измерения были выполнены в области псевдобыстроты $|\eta| < 2$ с использованием детектора ALICE для трех классов событий: неупругие, неодионочные дифракционные и события хотя бы с одной заряженной частицей в интервале псевдобыстроты $|\eta| < 1$. Значительное увеличение количества событий, включенного в анализ, по сравнению с предыдущими публикациями ALICE, в сочетании с усовершенствованными методами измерения позволили изучить эволюцию множественности заряженных частиц по всему диапазону энергий столкновений, который был доступен до сих пор на БАК. Повышенную точность результатов по сравнению с предыдущими результатами ALICE обеспечил улучшенный алгоритм определения треков частиц в совокупности с оценками вклада дифракционных процессов. Исследование KNO-скейлинга проводилось в интервалах псевдобыстроты $|\eta| < 0.5$, $|\eta| < 1.0$ и $|\eta| < 1.5$.

В работе [2] измерены плотности распределения множественности заряженных частиц $dN_{ch}/d\eta$ в широком диапазоне псевдобыстроты ($-3.4 < \eta < 5$) для pp столкновений при энергиях $\sqrt{s} = 0.9, 7$ и 8 ТэВ на БАК. Эти результаты получены в расширенном по сравнению с более ранними работами интервале η благодаря использованию как Silicon

Pixel Detector, так и Forward Multiplicity Detector установки ALICE. Полученные в работах [1,2] данные сравниваются с другими экспериментальными результатами, в частности, с результатами эксперимента CMS на БАК и с теоретическими моделями, реализованными в Монте-Карло генераторе событий PHOJET и в генераторах PYTHIA6, PYTHIA8 и EPOS с актуальными наборами параметров соответствующих физических моделей.

В работе [3] даны результаты измерений на установке ALICE плотности распределения множественности заряженных частиц по псевдобыстроте $dN_{ch}/d\eta$ в Pb-Pb столкновениях при $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Результаты даны отдельно для каждого из диапазонов центральности, от 0-5% до 80-90%. Поскольку измерения охватывают широкий диапазон η от -3.5 до 5., это позволяет достоверно оценить общую среднюю множественность заряженных частиц, образующихся в Pb-Pb столкновениях. Для самых центральных (0-5%) столкновений она составила рекордные 21400 ± 1300 , тогда как для наиболее периферических (80-90%) только 230 ± 38 . Эти значения множественности соответствует увеличению на $27 \pm 4\%$ по сравнению с результатами полученными ранее на установке ALICE при вдвое меньшей энергии $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ ТэВ. Обнаружено, что энергетическая зависимость общего числа заряженных частиц, образующихся при столкновениях тяжелых ионов, подчиняется модифицированному степенному закону. Для наиболее центральных событий $dN_{ch}/d\eta$ сравнивается с расчетами по гидродинамической модели Ландау в предположении полного стопинга партнеров по столкновению и последующего термодинамического разлета. Однако обнаружено, что экспериментальные данные демонстрируют более широкое в сравнении с модельным распределение по быстроте.

Полученные результаты позволяют планировать дальнейшие исследования множественности рождающихся частиц при других энергиях столкновений и исследования плотности распределения заряженных частиц по псевдобыстроте в новых кинематических диапазонах. Эксперимент AFTER на пучках БАК с фиксированной мишенью может быть выполнен на существующих на LHC установках, например, на установке ALICE. Он позволит изучать протон-протонные, протон-ядерные и ядро-ядерные столкновения при энергии в нуклон-нуклонной системе центра масс $\sqrt{s_{NN}}$ от 30 до 115 ТэВ. В 2017 году было продолжено изучение возможности поместить мишень в форме тонкого кольца в гало пучка БАК, как было предложено ранее сотрудниками ИЯИ РАН. Проведен расчет светимости для различных мишеней толщиной 500 мкм. Например, интегральная светимость для пучка ядер свинца на мишени из вольфрама при энергии $\sqrt{s_{NN}} = 72$ ТэВ составит 0.3/нбарн для измерений в течение месяца. Рассчитаны множественности

заряженных частиц как для протонного пучка, так и для пучка ядер свинца. Показано, что при быстротах $\eta_{lab} < 6$ множественность, полученная на фиксированных мишенях, оказывается меньше, чем полученная на БАК на встречных пучках. Показано, что образующиеся после взаимодействия с фиксированной мишенью частицы могут быть зарегистрированы существующей установкой ALICE. Ожидается также большой выход чармония в эксперименте с фиксированной мишенью.

Публикации:

[1] ALICE Collaboration, Charged-particle multiplicities in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ to 8 TeV, *Eur. Phys. J. C* 77 (2017) 33

[2] ALICE Collaboration, Charged-particle multiplicity distributions over a wide pseudorapidity range in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9, 7,$ and 8 TeV, *Eur. Phys. J. C* 77 (2017) 852

[3] ALICE Collaboration, Centrality dependence of the pseudorapidity density distribution for charged particles in Pb–Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}}=5.02$ TeV, *Phys. Lett. B* 772 (2017) 567

6 ПРОЕКТ 12: ИССЛЕДОВАНИЕ РОЖДЕНИЯ АДРОНОВ В АДРОН-ЯДЕРНЫХ И ЯДРО-ЯДЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ НА УСКОРИТЕЛЕ SPS В ЦЕРН ИЯИ, руководитель Ф.Ф. Губер

Группа ИЯИ РАН в международной колаборации NA61 (9 чел. из них 1 д.ф.м.н., 3 к.ф.м.н., 2 молодых ученых).

Цели и задачи проекта, их научная и практическая значимость

Программа научно-исследовательских работ эксперимента NA61/SHINE включает несколько направлений:

- поиск критической точки фазового перехода в сильновзаимодействующей ядерной материи, которая образуется в релятивистских ядро-ядерных столкновениях и детальное исследование начала деконфайнмента, т.е. поиск и исследование перехода между двумя фазами сильно взаимодействующей материи;

- измерения сечений образования и выходов заряженных адронов, необходимых для экспериментов в области нейтринной физики;

- измерения сечений образования пионов и каонов в адрон-ядерных реакциях для физики космических лучей.

Поиск критической точки фазового перехода в сильновзаимодействующей материи в эксперименте NA61/SHINE ведется посредством сканирования фазовой диаграммы, что достигается проведением измерений выходов заряженных частиц в диапазоне энергий 13 – 150 АГэВ для разных размеров сталкивающихся систем. Программа экспериментов NA61/SHINE включает проведение измерений выходов заряженных частиц в $p+p$, $p+Pb$ и в центральных столкновениях ядер $7Be+9Be$, $Ar+Sc$, $Xe+La$ и $Pb+Pb$ при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150/158 ГэВ/с.

В NA61/SHINE помимо исследований обычных распределений по множественности и поперечным импульсам вторичных адронов, включая странные барионы/антибарионы, исследуются также пособытийные флуктуации так называемых сильно интенсивных величин. Последние представляют собой комбинации первых и вторых моментов распределений таких физических величин, как множественность, поперечные импульсы вторичных частиц и энергии неprovзаимодействовавших нуклонов-спектаторов. Особенностью сильно интенсивных величин является то, что они не зависят ни от объема, ни от флуктуации объема взаимодействующих ядер. Таким образом, резкое изменение величины таких флуктуаций может являться отличительной чертой новых физических явлений, ожидаемых вблизи критических областей.

По предложению ИЯИ и НИЯУ МИФИ, научная программа исследований NA61/SHINE была расширена – теперь она включает еще и исследование коллективных

потоков в ядро-ядерных столкновениях в том же диапазоне энергий. Анизотропные потоки, проявляющие себя в анизотропии испускания частиц в плоскости, поперечной направлению пучка, являются одним из важных наблюдаемых, чувствительных к уравнению состояния образованной материи.

Экспериментальное наблюдение эффектов, связанных с фазовым переходом первого рода между адронной и партонной или кварковой материей заканчивающимся критической точкой было бы важным прорывом в нашем понимании свойств ядерной материи в экстремальном состоянии.

Группа ИЯИ отвечает в эксперименте NA61 за подготовку, экспертное обслуживание во время сеансов и калибровку переднего адронного калориметра (PSD – Projectile Spectator Detector), который используется в этом эксперименте для пособытийного определения центральности и угла плоскости реакции, Группа участвует также в анализе полученных на этой установке экспериментальных данных.

Краткий отчет

В 2017 году получены новые экспериментальные данные по измерению выходов заряженных частиц в реакции Xe+La при импульсах 13, 19, 30, 40, 75, 150 ГэВ/с. Тем самым, завершена программа измерений по сканированию фазовой диаграммы. Предварительный анализ распределений по флуктуациям сильно интенсивных величин в реакциях p+p, Be+Be и Ag+Sc показал отсутствие указаний на существование каких-либо особенностей в этих распределениях, которые могли бы свидетельствовать об обнаружении критической точки фазового перехода, рис.1, слева. Полученные новые экспериментальные данные для реакции Xe+La, а также данные, полученные в 2016г. для реакции Pb+Pb при импульсах ядер свинца 30, 40 и 150 ГэВ/с. позволят значительно расширить область поиска критической точки на фазовой диаграмме.

Выполнен предварительный анализ экспериментальных данных, полученных в 2016 г., по исследованию прямых потоков пионов и протонов в столкновениях ядер свинца в зависимости от центральности столкновений при импульсе налетающих ядер свинца 30А ГэВ/с. Для оценки плоскости события и центральности взаимодействия использовался передний адронный калориметр. На рис. 1, справа, показаны предварительные результаты анализа для прямого потока заряженных пионов и их сравнение с существующими данными.

В 2017гг. получены также новые экспериментальные данные по рождению пионов и каонов в столкновениях протонов и пионов с импульсами 30 - 120 ГэВ/с с легкими ядрами, которые необходимые для нейтринных экспериментов в FERMILAB и для физики космических лучей.

Адронный калориметр, разработанный и изготовленный в ИЯИ РАН, использовался во всех физических сеансах для пособытийного определения центральности и плоскости реакции в столкновениях тяжелых ядер. Группа ИЯИ, осуществляла постоянную экспертную поддержку функционирования калориметра во время сеансов, вела постоянный мониторинг процесса набора и качества получаемых данных с калориметра, дежурила в регулярных сменах во время экспериментов, проводила калибровку в специально выделенных для этой цели тестовых сеансах.

Группой ИЯИ РАН в 2017г. был разработан и подготовлен проект модернизации переднего адронного калориметра для новых экспериментов NA61/SHINE после 2020г. Планируется, что все работы по модернизации адронного калориметра установки NA61, включая их монтаж, установку фотодетекторов, аналоговой и цифровой электроники будут проведены в течение 2018-2019гг силами ИЯИ РАН в ЦЕРН. В течение 2019 – 2020гг будет проведена интеграция системы считывания калориметров в DAQ NA61/SHINE и проведены тесты на космических мюонах и пучках SPS.

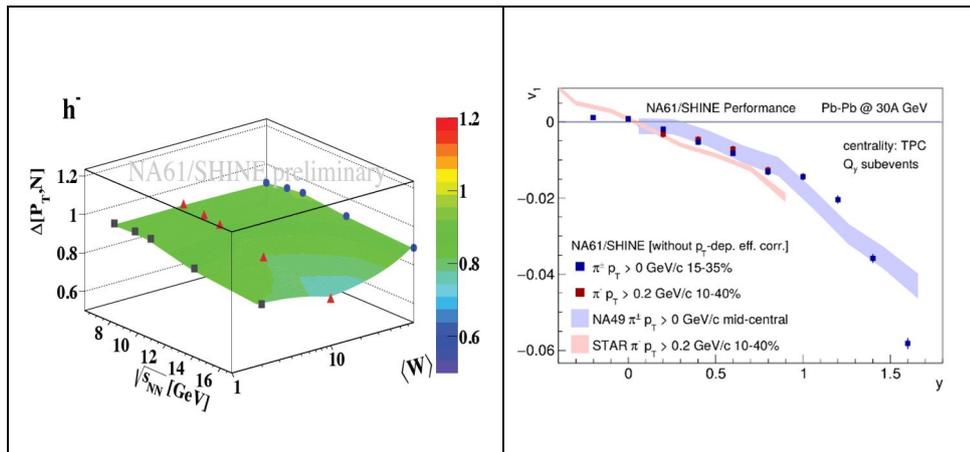


Рисунок 1. Слева - зависимость сильно интенсивной величины $\Delta(P_T, N)$ от энергии и среднего числа возбужденных нуклонов. Значения $\Delta(P_T, N)$, полученные для отрицательных пионов в $p+p$, и для 5% наиболее центральных событий в реакциях $W+W$ и $Ag+Sc$ показаны черными, красными и синими символами, соответственно. Справа – зависимость прямого потока заряженных пионов для 15-35% (синий) и 10-40% (красный) классов центральности в сравнении с другим экспериментами.

Список статей в научных журналах, опубликованных в 2017г.

1 Measurement of meson resonance production in π^-+C interactions at SPS energies, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U.), ... E.V. Andronov, O. Busyгина, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I.

Selyuzhenkov, A. Taranenko, ..., et al.). Eur.Phys.J. C77 (2017) no.9, 626 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5184-z

2 Measurements of π^\pm , K^\pm , p and p^- spectra in proton-proton interactions at 20, 31, 40, 80 and 158 GeV/c with the NA61/SHINE spectrometer at the CERN SPS, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U.), ... O. Busygina, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov, A. Taranenko, V.V. Vechernin, ... et al.). Eur.Phys.J. C77 (2017) no.10, 671 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-5260-4

3 Two-particle correlations in azimuthal angle and pseudorapidity in inelastic p + p interactions at the CERN Super Proton Synchrotron, NA61/SHINE Collaboration (A. Aduszkiewicz (Warsaw U. (main)), ... O. Busygina, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Kurepin, S. Morozov, O. Petukhov, A. Sadovsky, I. Selyuzhenkov,

4 A. Taranenko, et al.). Eur.Phys.J. C77 (2017) no.2, 59 DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4599-x

5 Hadron calorimeter (PSD) with new photo-detectors (MPPC) in NA61 experiment at CERN, M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, A. Izvestnyy, A. Kurepin (Moscow, INR), S. Morozov, O. Petukhov (Moscow, INR & Moscow Phys. Eng. Inst.), I. Selyuzhenkov (Moscow Phys. Eng. Inst. & Darmstadt, GSI), A. Taranenko (Moscow Phys. Eng. Inst.). 2017. 4 pp. J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012073 DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012073

6 Hadron calorimeter (Projectile Spectator Detector - PSD) of NA61/SHINE experiment at CERN M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin, S. Morozov (Moscow, INR), A. Senger (GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH (GSI), Darmstadt, Germany) (for NA61/SHINE Collaboration) Submitted to Journal of Physics: Conference Series

7 ПРОЕКТ 20: РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ФОРМЫ СГУСТКОВ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ LINAC-4 ЦЕРН И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В УСКОРИТЕЛЕ.

ИЯИ РАН, А.В.Фещенко

Число участников проекта: 12.

Важнейшие результаты, полученные в 2017 г.

Измерители формы сгустков, создаваемые в ИЯИ РАН, позволяют наблюдать форму сгустков в линейных ускорителях ионов с временным разрешением около 10 пикосекунд, а также ее эволюцию в течение импульса тока пучка. Работы по разработке и созданию измерителей формы сгустков для ускорителя Linac-4 были начаты в 2009 году. За прошедшие годы были разработаны, изготовлены, налажены и внедрены на ускорителе Linac-4 два измерителя. Особенностью требований к измерителям для ускорителя Linac-4 является тип частиц – отрицательные ионы водорода, широкий диапазон энергии пучка от 3 МэВ до 160 МэВ, широкий диапазон интенсивностей (импульсный ток до 65 мА), малые габариты первого измерителя, поскольку решение о его использовании было принято уже после определения состава измерительного канала, а также большая (100 мм) апертура второго измерителя. Первый измеритель использовался в нескольких местах на ускорителе по мере его запуска, начиная с выхода RFQ при энергии 3 МэВ.

В 2017 году первый измеритель был установлен непосредственно на выходе ускорителя в предусмотренном проектом месте, второй – временно на расстоянии примерно 30 м от выхода ускорителя. При проведенных монтажных работ работоспособность обоих измерителей была нарушена. Необходимо было восстановить работоспособность измерителей и провести измерения продольных характеристик. Работоспособность обоих измерителей была полностью восстановлена. С помощью первого измерителя были проведены исследования поведения формы сгустков в течение импульса тока пучка, продемонстрирована зависимость от внутриимпульсной модуляции ускоряющего поля, возникающей из-за нагрузки пучком. К сожалению, внутриимпульсные нестабильности полей в ускоряющих резонаторах приводят к разгруппировке пучка на дрейфе, поэтому на втором измерителе сгустки оказались размытыми.

На рисунке 1 представлена эволюция формы сгустков $j(\varphi, t)$ на выходе ускорителя в стандартном режиме работы ускорителя. Видно, что в первой половине импульса тока пучка длительностью 60 мкс наблюдается сильная модуляция фазового положения сгустков. Фазовое положение сгустков стабилизируется к концу импульса.

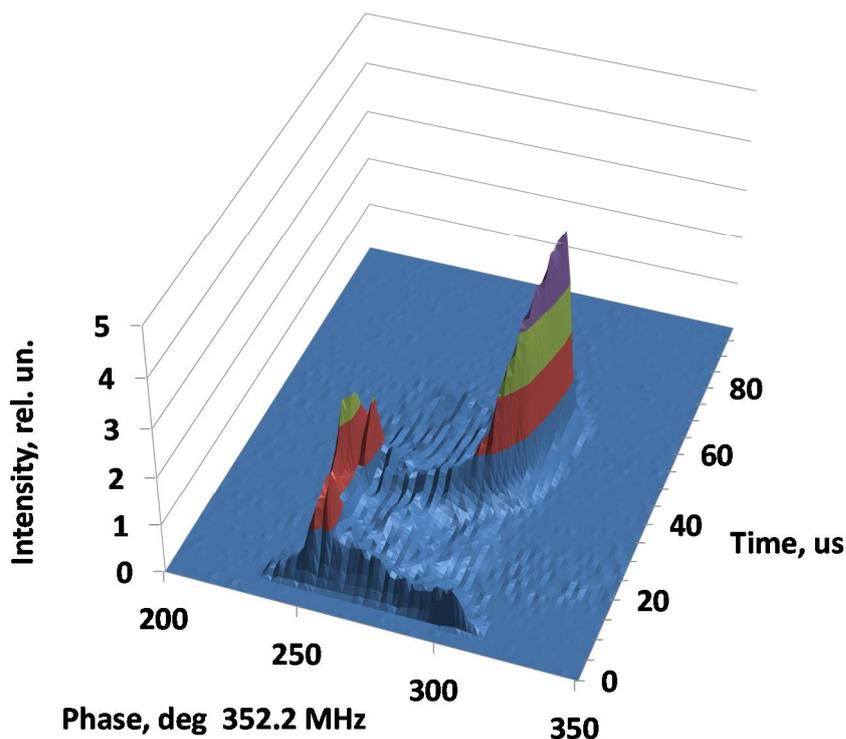


Рисунок 1 – Эволюция формы сгустков в течение импульса тока пучка.

Интегральная форма сгустков $I(\varphi)$, полученная интегрированием функции $j(\varphi, t)$ по времени в течение всего импульса, показана на рисунке 2. Отметим, что при проведении измерений регулирование фазы отклоняющего ВЧ поля в дефлекторе измерителя производится таким образом, что в получаемых экспериментально данных «голова» сгустков находится на графике справа. На рисунке 2 также приведена форма сгустков проинтегрированная для последних 10 микросекунд импульса, когда фазовое положение сгустков стабилизируется.

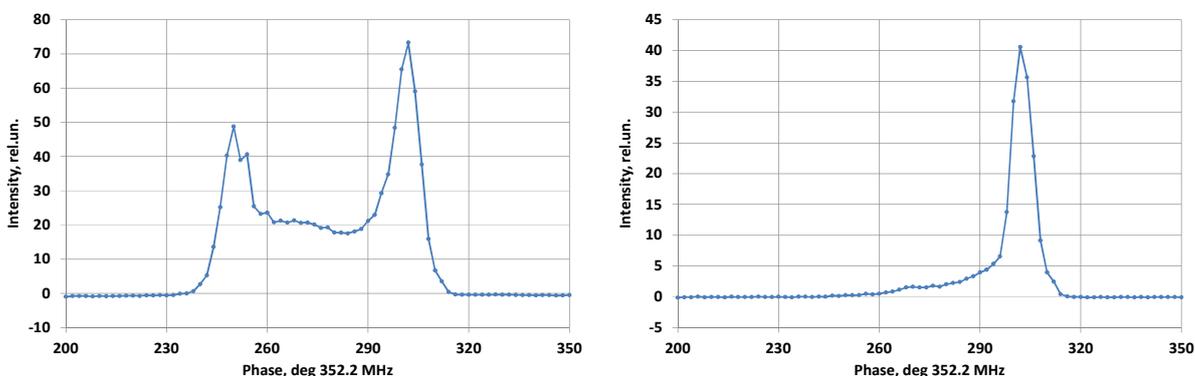


Рисунок 2 –Интегральная форма сгустков (слева) и форма сгустков, проинтегрированная в диапазоне 50÷60 мкс (справа)

Причиной модуляции фазового положения сгустков является модуляция амплитуд и фаз полей в ускоряющих резонаторах. В качестве примера на рисунке 3 приведена

огибающая поля в ускоряющем резонаторе с трубками дрейфа №3 DTL3. При инжекции пучка происходит просадка поля, которая компенсируется системой обратной связи (“feedback”) в течение нескольких десятков микросекунд. Имеющаяся система упреждающей компенсации (“feedforward”) должна существенно улучшить стабилизацию полей, но при проведении измерений она не была задействована.

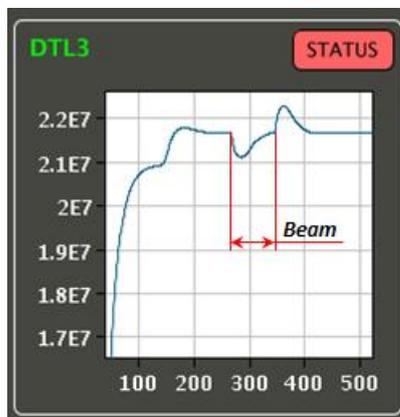


Рисунок 3 – Огибающая ВЧ поля резонаторе DTL3.

Были проведены измерения формы сгустков при регулировании фазы ускоряющего поля в диапазоне 360° одновременно в последнем и предпоследнем резонаторах ускорителя PIMS 11 и PIMS 12. На рисунке 4 показана зависимость фазового положения центров сгустков для временного диапазона 40÷60 мкс.

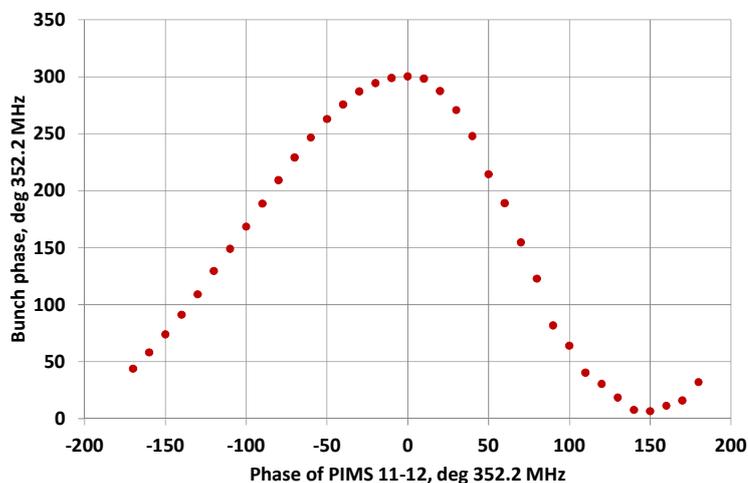


Рисунок 4 – Поведение фазового положения центра тяжести сгустков при регулировании фазы ускоряющего поля.

Представленные на рисунке 4 данные могут быть использованы для установки требуемых значений амплитуды и фазы ускоряющего поля в резонаторах путем сравнения экспериментальных данных с расчетными.

Публикации в 2017 г.:

- реферируемые журналы (включая работы, принятые к печати)

S. Gavrilov, A. Feschenko, D. Chermoshentsev, “Bunch Shape Monitors for modern ion linacs”, Journal of Instrumentation (JINST), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12014>.

- доклады на конференциях и школах

S. Gavrilov, A. Feschenko. “Bunch Shape Monitors for modern ion linacs.” Доклад на конференции International Beam Instrumentation Conference 2017 (IBIC17), East Lansing, MI, USA, August 20 – 25, 2017 (в печати).

S. Gavrilov, A. Feschenko. ”Design and development of Bunch Shape Monitor for FRIB MSU”. Доклад на конференции International Beam Instrumentation Conference 2017 (IBIC17), East Lansing, MI, USA, August 20 – 25, 2017 (в печати)

8 ПРОЕКТ 23. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА И НЕСТАНДАРТНЫХ СВОЙСТВ НЕЙТРИНО

Руководитель: чл.-к. РАН Владимир Николаевич Гаврин ИЯИ РАН

На БНО ИЯИ РАН в Лаборатории галлий-германиевого нейтринного телескопа и в Москве в Лаборатории радиохимических методов детектирования нейтрино ОЛВЭНА ИЯИ РАН в 2017 году были проделаны следующие работы:

1. Исследование спектров внутреннего тормозного излучения радиоактивных изотопов.
2. Разработка методики исследования непрерывных гамма-спектров и поиск собственных состояний нейтрино с массами выше 20 кэВ по искажениям спектров ВТИ.

Публикации:

1.Measurement of the spectrum of the internal bremsstrahlung from ^{51}Cr
V.V. Gorbachev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, Yu M. Malyshkin, A.A. Shikhin
(Moscow, INR). 2017. 4 pp. Published in J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012104
DOI: 10.1088/1742-6596/798/1/012104

2.Measurement of the activity and spectrum of internal bremsstrahlung of a ^{51}Cr source
V.V. Gorbachev, V.N. Gavrin, T.V. Ibragimova, A.V. Kalikhov, Yu.M. Malyshkin, A.A. Shikhin.
2017. 3 pp. Published in Phys.Part.Nucl. 48 (2017) no.6, 974-976, Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra 48
(2017) no.6, DOI: 10.1134/S106377961706017X Conference: C16-04-12.1, Conference: C16-04-
12.1 Proceedings

9 ПРОЕКТ 24: БАЙКАЛЬСКИЙ НЕЙТРИННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ.

Рук. чл.-к. РАН Г.В.Домогацкий

В 2017 году на комплексе установок Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (БГНТ) выполнялись экспериментальные исследования по программам изучения природных потоков мюонов и нейтрино высоких и сверхвысоких ($E > 10$ ТэВ) энергий, по поиску проявлений массивных частиц - кандидатов на роль холодной темной материи.

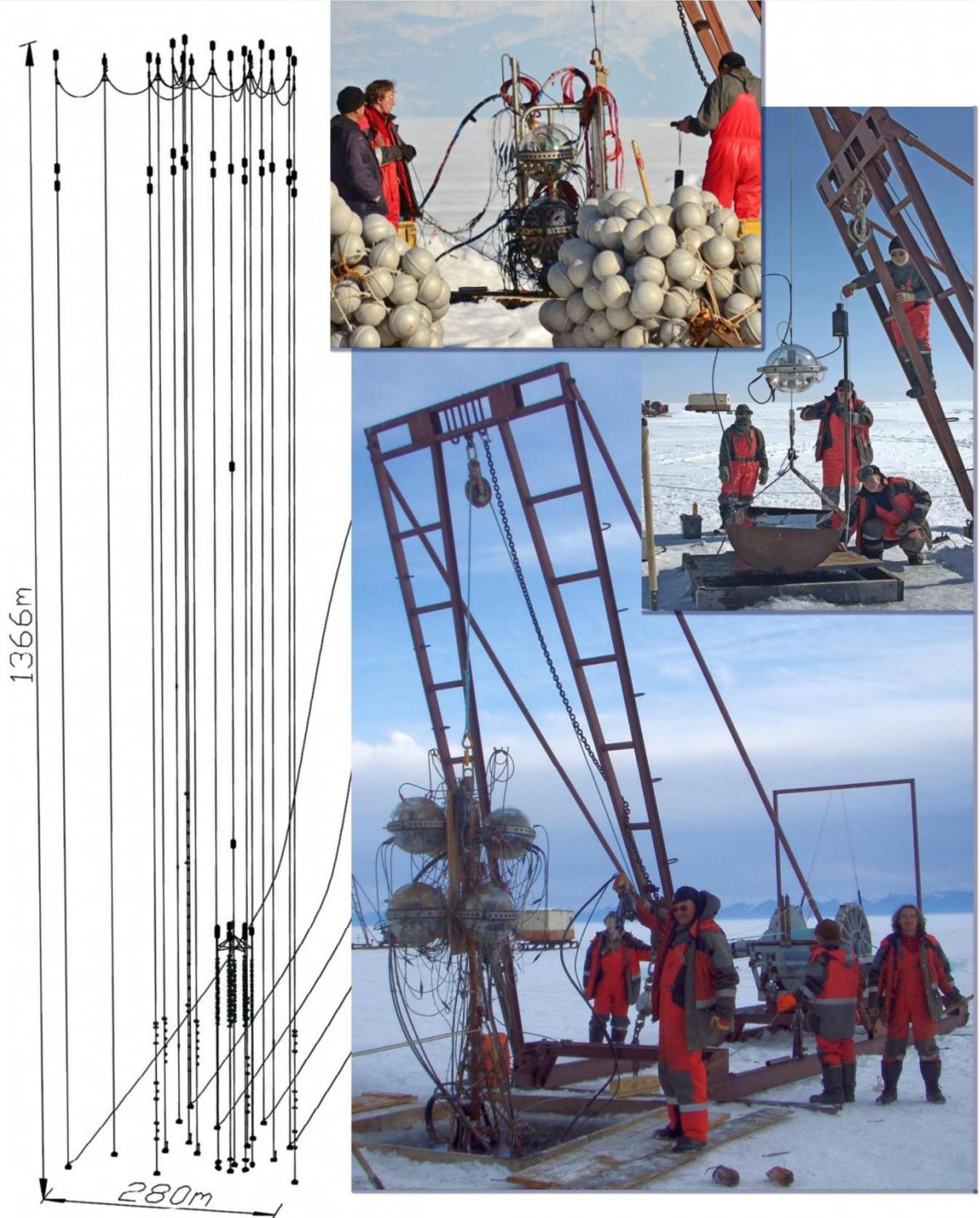
В период зимней экспедиции 2017 года на оз. Байкал выполнены работы по анализу состояния, ремонту, частичной замене и модернизации глубоководной аппаратуры и подводных линий кабельной связи первого кластера нейтринного телескопа Baikal-GVD, содержавшего 288 оптических модуля (ОМ) с фотодетекторами и успешно функционировавшего в течение 2016 г. В дополнение к первому кластеру телескопа, развернут и введен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных второй полномасштабный кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD. Установка 2017 года содержит в общей сложности 576 оптических модулей, размещенных на 16 вертикальных гирляндах (по 8 гирлянд в каждом кластере) в интервале глубин от 750 до 1275 метров. Нейтринный телескоп Baikal-GVD в конфигурации 2017 г., является глубоководным детектором с эффективным объемом порядка 0.1 км³ для регистрации нейтрино по каскадной моде, способным вести исследование потока нейтрино астрофизической природы, обнаруженного в экспериментах на нейтринном телескопе IceCube.

В течение 2017 года осуществлялась эксплуатация телескопа Baikal-GVD в режиме непрерывного набора данных и в тестовых режимах. Проведена калибровка временных и амплитудных измерительных каналов установки, выполнен предварительный анализ экспериментальных данных и ведется формирование банка качественных событий для последующего физического анализа.

В рамках работ по развитию комплекса вычислительных и служебных программ BARS разработана и реализована автоматизированная процедура формирования события из данных отдельных секций.

В течение 2017 г. велся анализ экспериментальных данных первого кластера за 2016 год. В задаче поиска нейтрино астрофизической природы с использованием каскадной моды детектирования, был использован набор экспериментальных данных содержащий 686 млн. событий соответствующий 182 дням живого времени набора данных. В результате применения критериев отбора и процедуры восстановления параметров ливней выделено 57 событий с восстановленной энергией ливней выше 10 ТэВ и 5 событий с энергией выше 100 ТэВ, удовлетворяющих всем критериям отбора. Все выделенные события с энергией

выше 100 ТэВ, кроме одного, имеют множественность сработавших оптических модулей меньше 15 и их число соответствует ожидаемому числу фоновых событий от атмосферных мюонов. Одно событие имеет множественность сработавших ОМ равное 38. Вероятность регистрации подобного события от нейтрино астрофизической природы сопоставимо с вероятностью регистрации фонового события от атмосферных мюонов.



На протяжении 2017 года выполнялась работа по комплектации, сборке и испытаниям в лабораторных условиях оптических модулей и измерительных систем двух

последующих (третьего и четвертого) кластеров телескопа Baikal-GVD, содержащих в общей сложности порядка 600 ОМ. К сожалению, начиная с ноября 2017 года началось заметное отставание от графика работ в связи с задержкой поставок комплектующих элементов (высоковольтных источников питания) фирмой TRACO POWER (Япония), передвинувшей, в нарушение условий контракта, сроки поставок с ноября 2017 года на январь-февраль 2018 года. К настоящему времени завершена подготовка примерно половины ОМ третьего кластера и мы сохраняем надежду на то, что нам удастся развернуть третий кластер в период зимней экспедиции на оз. Байкал в 2018 г., что позволит увеличить детектирующий объем установки до 0.15 км³.

Байкальский нейтринный телескоп является в настоящее время одним из трех наиболее крупных действующих нейтринных телескопов по своей эффективной площади и эффективному объему по отношению к регистрации природных потоков нейтрино высоких энергий.

Работу над проектом вела группа российских институтов - Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук (головная организация), НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, НИИ ядерной физики Московского государственного университета, Нижегородский государственный политехнический университет, Санкт - Петербургский государственный морской технический университет, международный центр ОИЯИ (г.Дубна), с участием специалистов исследовательского центра EvoLogics (Германия), университета (Bratislava, Slovakia) и Технического университета (Prague, Czech Republic).

Публикации

1. A.D. Avrorin et al.. "Status of the Baikal-GVD Project: First Cluster Dubna", DOI: 10.1142/9789813224568_0025, Conference Proceedings: C15-08-20, p.160-163
2. N.M. Budnev et al.. "Acoustic Search for High Energy Neutrinos in Lake Baikal: Status and Perspectives", EPJ Web Conf. 135 (2017) 06004; DOI:10.1051/epjconf/201713506004
3. A.D. Avrorin et al.. " Dark matter constraints from an observation of dSphs and the LMC with the Baikal NT200". J.Exp.Theor.Phys. 125 (2017) no.1, 80-90, Zh.Eksp.Teor.Fiz. 152 (2017) no.1, 97-109, DOI: 10.1134/S1063776117070135
4. A.D. Avrorin et al.. "Gigaton Volume Detector (GVD) in Lake Baikal: status of the project", PoS(NEUTEL2017)063.
5. A.D. Avrorin et al.. "Status of the Baikal-GVD experiment - 2017", PoS(ICRC2017)1034.

6. A.D. Avrorin et al.. “Data management and processing system for the Baikal-GVD telescope”, PoS(ICRC2017)1046.
7. A.D. Avrorin et al.. “Calibration and monitoring units of the Baikal-GVD neutrino telescope”, PoS(ICRC2017)1032.
8. A.D. Avrorin et al.. “Baikal-GVD: Time Calibrations in 2016”, PoS(ICRC2017)1036.
9. A.D. Avrorin et al.. “Hydroacoustic Positioning System for the Baikal-GVD”, PoS(ICRC2017)1033.
10. A.D. Avrorin et al.. “Cascades in GVD”, PoS(ICRC2017)962.

10 ПРОЕКТ 25. ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРА МАССОВЫХ СОСТОЯНИЙ НЕЙТРИНО:
ЭКСПЕРИМЕНТ «ТРОИЦК РЮ-МАСС». ПРЯМЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ПОИСКИ
ТЯЖЁЛОЙ КОМПОНЕНТЫ НЕЙТРИНО В КИНЕМАТИКЕ РАДИОАКТИВНЫХ
РАСПАДОВ.

Руководитель темы: дф-мн В.С. Пантуев

Сотрудников-исполнителей: всего 9, из них кф-мн - 4, аспирант-стажер в возрасте до 29 лет – 1.

Цели и задачи проекта.

Определение массовой шкалы абсолютных и число нейтрино массовых состояний является фундаментальной задачей как для физики элементарных частиц, так и для космологии и астрофизики. Предположение о том, одного очень легкого состояния нейтрино в дополнение к трем активных состояниям кажется спорным в стандартной космологии, но может быть совместимо с современными космологическими данными. Стерильные нейтрино в диапазоне масс несколько кэВ могут является естественным кандидатом на роль темной материи. В проекте расширяется энергетический диапазон измерения бета спектра трития с целью поиска стерильные нейтрино в диапазоне масс до нескольких кэВ.

Полученные результаты.

Основным результатом проведенной в 2017 году работы является проведение трёх полноценных сеансов измерений по 3 недели каждый. Продолжен набор статистики прецизионного измерения бета спектра трития с целью поиска сигналов стерильного нейтрино в диапазоне энергии электронов 14-18.5 кэВ. Данные находятся в стадии обработки. Параллельно с имеющейся системой регистрации был разработан и реализован вариант с полной оцифровкой сигналов с детектора. Это позволило полностью устранить проблему учета мертвого времени электроники и сузить временной интервал сигналов с наложениями. Данные накапливались параллельно обоими системами, однако новый вариант стал основным для процесса обработки данных. Выполнен ряд запланированных методических и расчетных работ по оптимизации режима работы электронной пушки. В двух сеансах были проведены совместные тестовые испытания образцов пиксельного детектора нового типа на основе кремниевого дрейфового детектора (SDD). SDD были изготовлены в Мюнхене, Германия, в рамках коллаборации TRISTAN. Два прототипа имели по 7 пикселей размером в 1 и 2 мм. Измерения продемонстрировали, что такой тип детектора существенно улучшит качество данных при измерении бета спектра трития и даст возможность сдвинуться к самому нижнему краю бета спектра. В течение 2017 года

постоянно проводились работы по профилактике и ремонту криогенного и вакуумного оборудования. Запущены новые системы хранения и транспортировки гелия.

Для перехода от стандартного канала с АЦП для измерения амплитуды с кремниевого детектора был выбран промежуточный вариант с сохранением старого канала и нового параллельно с ним на базе платы–осциллографа ЛАН10 – 12РСІ. Плата позволяет проводить параллельный набор данных с фиксированным мертвым временем в 87.5%, определяемым внутренними временными характеристиками платы на считывание и запись. Для оптимальной обработки получаемой с карты информации был выполнен ряд подготовительных работ с полным моделированием входных сигналов, рис. 6, и шума электроники. Все это было необходимо для развития методики выделения импульсов в реальных условиях при использовании больших загрузок. Данные трех сеансов обрабатываются.

На Рис. 9 приводится один из измеренных спектров бета-электронов от трития, получаемый прямо во время набора и до введения необходимых систематических поправок. Обработка спектров требует тщательного учета различных поправок. Процесс окончательной обработки спектров продолжается.

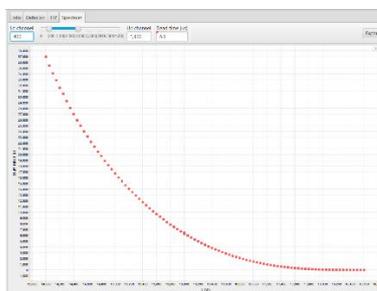


Рис. 9 Интегральный он-лайн спектр электронов по энергии в зависимости потенциала на спектрометре в одном из сотен файлов измерений с тритием.

Для расширения возможностей по измерению спектра электронов необходимо иметь низко шумящие детектор и электронику, которые позволили бы опустить порог регистрации и существенно уменьшить ряд систематических эффектов. Такие возможности открываются с использованием кремниевых дрейфовых детекторов, SDD. Было предложено испытать эти детекторы для низкоэнергичных электронов.

В 2017 году в двух сеансах участвовала группа из Института Макса Планка, Мюнхен. Образцы 7-пиксельных детекторов были прокалиброваны на различных источниках электронов доступных только на «Троицк ню-масс». Это электронная пушка с

энергией до 20 кэВ, электроны автоэмиссии при определенной конфигурации магнитных полей, и электроны от трития.

Испытания показали, что детектор имеет очень хорошие параметры по уровню шумов и энергетическому разрешению, которое составило примерно 400 эВ (ширина на полу высоте) для электронов с энергией 20 кэВ. Дальнейшее лучшение шумов возможно с применением численных фильтров шумов.

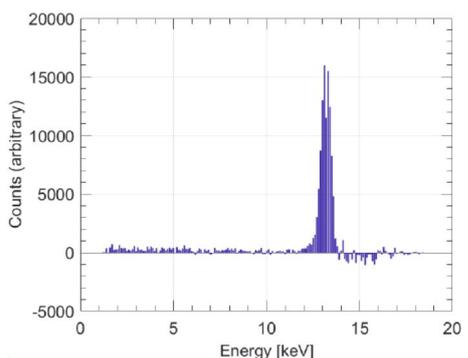


Рис. 11 Дифференциальный спектр трития, полученный вычитанием двух интегральных спектров при 13.0 и 13.5 кВ. Ширина пика определяется преимущественно шириной выбранного бина в 0.5 кВ.

Основные публикации в 2017 году:

D.A. Abdurashitov et al., First measurements in search for keV sterile neutrino in tritium beta-decay in the Troitsk nu-mass experiment, JETP Letter 105 (2017), 753 [arXiv:1703.10779].

11 ПРОЕКТ 26. ПОИСК ВСПЛЕСКОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОДЗЕМНОМ ДЕТЕКТОРЕ ОГРАН

Руководители: ИЯИ Безруков Л.Б, ГАИШ МГУ (совместитель) Руденко В.Н

Исполнители: ИЯИ Гаврилюк Ю.М.,

ГАИШ МГУ (совместители) Орешкин С.И. Крючков Д.

(только ГАИШ) Кувшинский М.В., Попов С.М., Юдин И.С., Благов С.В.

ИЛФ СО РАН Квашнин Н.Н., Скворцов М.Н.

11.1 РЕФЕРАТ

Выполнены подготовительные работы по мониторингу грави-градиентного наземного фона в килогерцевом диапазоне частот с целью детектирования слабых всплесков гравитационного излучения, порождаемых коллапсирующими объектами в Галактике и её близкой окрестности радиусом в 100 кпк. Для наблюдений используется новая опто-акустическая гравитационная антенна (ОГРАН), синтезирующая акустический и оптический принципы детектирования гравитационных волн с чувствительностью 10^{-19} Гц^{1/2} к метрическим вариациям. Подавление радиационного фона и снижение уровня сейсмо - гравитационных помех реализуется за счет дислокации антенны в подземной лаборатории ПК-14, БНО ИЯИ РАН. Регистрации астрофизических сигналов предусмотрена в реальном времени посредством анализа совпадений с выбросами фона нейтринного телескопа БПСТ. Эффективное снижение частоты появления шумовых всплесков ОГРАН осуществляется фильтрацией анти корреляций с данными гравитационного детектора веберовского типа (УЛИТКА) геофизического уровня чувствительности 10^{-16} Гц^{1/2}, также размещенного на ПК-14. Выполнены эксперименты по измерению опто-механических параметров криогенной пилотной модели ОГРАН с целью исследования путей повышения чувствительности гравитационных антенн данного типа

11.2 ВВЕДЕНИЕ

В течение 2017 года планом работ предусматривалось выполнение следующих исследований на пути подготовки детектора ОГРАН

к режиму непрерывных наблюдений .

- Решение проблем температурной стабилизации и автоматизации управления установкой ОГРАН.

- Расширение полосы приема антенны за счет высоко отражательных зеркал на опто-акустическом детекторе (резкость до 30 тыс.)

- Экспериментальное исследование баланса акустических, оптических и электронных шумов по отношению к шумам окружения;

- Выполнение тестовых экспериментов по детектированию имитационных сигналов, вводимых через системы калибровки антенны; пробная серия непрерывных наблюдений.

11.3 СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНОЙ ЧАСТИ (ВЫПОЛНЕННЫЕ РАБОТЫ)

Монтаж и наладка радио - электронных систем термо стабилизации акустического детектора на уровне температурных вариаций ~ 0.01 С.

Необходимость прецизионного хранения температуры опто - акустического детектора ОГРАН (длиной ~ 2 м и массой ~ 2 т) была продиктована эффектом теплового изменения его длины (и соответственно базы вмонтированного ФП – резонатора) , которая может превысить динамический диапазон опто-электронных систем автоподстройки рабочего режима антенны (удержание оптического резонанса). С учетом радиационного нагрева детектора от стенок вакуумной камеры, требуемая расчетная стабилизация её температуры составляет сотые доли градуса. Задача была решена с помощью системы активного контроля температуры помещений (боксов), окружающих вакуумную камеру ОГРАН. Достигнута требуемая стабилизация составившая 0.02 С. Принципы и технические детали системы теплового контроля представлены в приложенном файле.

Выполнено на 100%.

Расширение полосы приема антенны за счет монтажа высокотехнологичных зеркал (резкость до 30 тыс.) .

ОГРАН является резонансным детектором; его эффективная (проектная) чувствительность реализуется за счет высокой акустической добротности детектора в узкой полосе вокруг резонансной частоты 1.3 кГц, что априори снижает вероятность регистрации коротких ГВ всплесков (по сравнению с нерезонансными детекторами на свободных массах). Расширение полосы приема опто-акустической антенны возможно при снижении относительного уровня широкополосного оптического (квантового) шума за счет увеличения мощности оптической накачки и резкости (финессе) оптических резонаторов детектора и опорного резонатора. Реконструкция ОГРАН, связанная с установкой высокоотражательных зеркал , была проведена ранее (2016). На данном этапе осуществлялась прецизионная юстировка зеркал и согласование оптических мод с излучением накачки. В итоге: а) достигнут рекордно узкий оптический резонанс ;

экспериментальная оценка резкости (числа многократных отражений) составила 25 тыс.- величину предельную для данной конструкции антенны: б) достигнут высокий уровень контраста 50% при оптической мощности в 20 -50 мвт. Результатом этой модернизации явился возросший на два порядка коэффициент преобразования гравитационного возмущения в измеряемый выходной оптический сигнал. Это расширило полосу эффективного приема (зону высокой чувствительности) на порядок от 3 до 30 Гц вокруг резонансной частоты акустического детектора. При этом была использована новая конструкция крепления зеркал к детектору сохраняющая добротность акустической моды на уровне ненагруженного детектора ~160 тыс.. Выполнено на 100%.

Экспериментальное исследование баланса акустических, оптических и электронных шумов по отношению к шумам окружения.

Инструментальные шумы антенны ОГРАН подобно исследовались до модернизации установки (т.е. с резонаторами умеренной резкости $\sim 10^{\{3\}}$) В узкой полосе приема 3- 4 Гц они являлись доминирующими над шумами окружения (сейсмо – акустика). Увеличение коэффициента преобразования антенны после модернизации привело к потере помехоустойчивости по отношению к сейсмическим и акустическим шумам (главным образом за счет их воздействия на оптический тракт (светопровод) и опорный резонатор, расположенных на оптическом столе вне камеры опто-акустического детектора). В отчетный период были приняты специальные меры по восстановлению помехоустойчивости, в том числе:

- замена легкого оптического стола (платформы светопровода) ~ 70 кг на существенно более тяжелый (инерционный) ~ 700 кг;

- замена патрона-держателя опорного резонатора (дискриминатора) вертикальной конфигурации на многозвенный антисейсмический фильтр [9 звеньев, общая масса ~ 100 кг (при массе резонатора 32 кг), частота среза в нагруженном состоянии $\sim 3-5$ Гц]; подавление сейсмике выше частоты среза более трех порядков по амплитуде);

- установка звукопоглощающего колпака на камеру опорного резонатора, с ослаблением амплитуды звукового давления в 20 раз для частот выше 10 Гц.

Детали конструкции и иллюстрации перечисленных узлов представлены в приложенном файле.. Фильтрующие свойства каждого тестировались отдельно. В комплексе восстановление помехоустойчивости антенны пока не исследовалось в связи с необходимостью адаптации её оптоэлектронных блоков под возросший уровень полезного сигнала.

Улучшение помехозащищенности выполнено на 100%.

Выполнение тестовых экспериментов по детектированию имитационных сигналов, вводимых через системы калибровки антенны; пробная серия непрерывных наблюдений

Данное исследование не проводилось в связи незавершенностью модернизации оптоэлектронных блоков антенны. Перенесено на первый квартал 2018 г.

Вместо работ по пункту 4 проведено экспериментальное исследование возможности повышения чувствительности на криогенной пилотной модели ОГРАН (созданной ранее в рамках гранта РФФИ офи-м 2016) Результаты представлены в публикации 2017 Ядерная Физика и Инжиниринг (см список ниже)

11.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение этапа 2017 года выполнены важные исследования по сейсмо – акустической защите прецизионной установки ОГРАН

Задержка с проведением тестовых экспериментов модернизированной антенны обусловлена необходимостью решения нетривиальной технической задачи – обеспечение эффективной мощности

оптической накачки антенны в сотни мвт при условии возросшего на два порядка коэффициента передачи опто - акустического детектора .

Требование достаточно мощной накачки (0.2-0.4 вт) продиктовано величиной проектного отношения сигнал/шум. Проблема возникла в связи с отсутствием в коммерческом доступе фотоприемников, способных работать на таком уровне мощности (типичные значения как правило на порядок меньше). Решение представляется в виде мультисканального фото детектирования параллельной линейкой 10 фотоприемников при соответствующем делении выходного оптического луча и когерентном сложении их откликов. Реализация этого плана требует временных и финансовых затрат. Технический проект и заказ принят ИЛФ СО РАН. Исполнение ожидается в 1м квартале 2018 года

Также перенесено на 2018 год завершение работ по автоматизации процедуры удержания рабочего режима антенны и его восстановление после срывов вызванных природными и техногенными возмущениями.

11.5 СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2017 г.:

1.Руденко В Н. "Гравитационно-волновой эксперимент в России" УФН 187 892–905 (2017):

2. Квашнин Н.Н., Кувшинский М.В., Орешкин С.И., Попов С.М., Руденко В.Н., Скворцов М.Н., Юдин И.С., Благов С.В. Криогенная модель гравитационной антенны ОГРАН. Ядерная физика и инжиниринг 2017, т

ом 7, № 6 стр 535-542

Материалы конференций (тезисы)

1. Материалы XVI Всероссийской гравитационной конференции «Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике» (RUSGRAV-16), 24 июня – 30 июня 2017 года, Калининград / Под общей редакцией д.ф.-м.н, профессора Юрова А.В. — Калининград: Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта, 2017. 106 с.

Тезисы докладов участников гранта на стр. 25, 99, 104.

ISBN 978-5-9971-0457-3

Доклады на конференциях

1. Rudenko V.N. "100 years of Black Holes" workshop , Лондон (London, head quarter of the Royal Society at Chicheley Hall), Великобритания, 10-12 апреля 2017; пленарный доклад: Current relativistic gravitational experiments in Russian Academy of Science.

2. Rudenko V.N. Ginzburg centennial conference on physics., Москва Физический институт РАН им Лебедева П.Н., Россия, 29 мая - 3 июня 2017; устный доклад секционный: Current trend in relativistic gravitational experiments.

3. Rudenko V.N. Международная сессия-конференция Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященная 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, г.Нальчик Кабордино-Балкария, Россия, 6 – 8 июня 2017; устный доклад секционный: Present state of the gravitational-wave experiment.

4. Rudenko V.N. XVI Всероссийская гравитационная конференция: Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике (RUSGRAV-16), г. Калининград, Россия, 26-30 июня 2017; пленарный доклад: Current status of relativistic gravitational experiments.

5. Azarova V.V., Blagov S.V., Kuvshinskii M.A., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Yudin I.S. XVI Всероссийская гравитационная конференция: Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике (RUSGRAV-16), г. Калининград, Россия, 26-30 июня 2017; устный доклад секционный: Optical parameters of FP-cavities with cryogenic mirrors.

6. Kuvshinskii M.A., Oreshkin S.I., Popov S.M., Rudenko V.N., Yudin I.S. XVI Всероссийская гравитационная конференция: Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике (RUSGRAV-16), г. Калининград, Россия, 26-30 июня 2017,

устный доклад секционный: Improvement of the opto-acoustical gravitational antenna sensitivity due to cooling of acoustical degree of freedom.

7.Rudenko V.N., Oreshkin S.I., Popov S.M., Semenov V.V., Silin V.A., Yudin I.S. XVI Всероссийская гравитационная конференция: Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике (RUSGRAV-16) , г.Калининград, Россия, 26-30 июня 2017, устный доклад секционный: Characteristics of the gravitational detector OGRAN with Hi-Tech mirrors.

8.Rudenko V.N., Popov S.M. SN 1987A, Quark Phase Transition in Compact Objects and Multimessenger Astronomy , Терскол - Нижний Архыз, Россия, 2-8 июля 2017; пленарный доклад: Current status of the GW-experiment and a discovery of gravitational waves.

Адреса ресурсов в Интернет по проекту

<https://istina.msu.ru/projects/59150370/>

12 ПРОЕКТ 27: НЕУСКОРИТЕЛЬНАЯ ФИЗИКА ЧАСТИЦ: ДВОЙНОЙ БЕЗНЕЙТРИННЫЙ БЕТА РАСПАД ЯДЕР, ОСЦИЛЛЯЦИИ РЕАКТОРНЫХ НЕЙТРИНО

Руководители: Леонид Борисович Безруков, Валерий Витальевич Синёв;
Исполнители: Баярто Константинович Лубсандоржиев, О.И. Селиваненко,
Е.А.Дорошкевич

12.1 РЕФЕРАТ

Проблема осцилляций нейтрино в данном проекте исследовалась в рамках коллаборации Double Chooz, а двойной безнейтринный бета распад атома германия исследовался в рамках коллаборации GERDA.

Детекторы Double Chooz (дальний и ближний) продолжали функционировать, измеряя спектр реакторных антинейтрино на двух расстояниях. Получены новые значения угла смешивания θ_{13} при анализе событий реакции обратного бета распада с захватом нейтрона на водороде и гадолинии. Комбинированная величина для захватов нейтрона на водороде и гадолинии составляет $\sin^2 2\theta_{13} = 0.107 \pm 0.016$. Измерены выходы космогенных изотопов ^8He и ^9Li при захвате мюонов ядрами углерода ^{12}C и ^{13}C : 7.98 ± 0.52 и 4.37 ± 0.49 соответственно для ближнего и дальнего детекторов в единицах $10^{-8} \text{ г}^{-1} \text{ см}^2$. Проведен анализ фона, измеренного за время остановки сразу двух реакторов, которое длилось более 20 дней.

В рамках коллаборации GERDA была смонтирована в лаборатории Гран-Сассо установка для очистки отходов германия.

12.2 ВВЕДЕНИЕ

Ведущийся во Франции эксперимент с реакторными антинейтрино Double Chooz вступил в завершающуюся фазу. За семь лет измерений накоплена большая статистика зарегистрированных событий реакции обратного бета распада (ОБР) на двух детекторах. Преимущество расположения эксперимента на АЭС с только двумя реакторами позволило тщательно измерить фон детекторов во время остановки обоих реакторов. Измерен спектр от распада радиогенного изотопа ^9Li . Измерены выходы космогенных изотопов ^8He и ^9Li при захвате мюонов ядрами углерода ^{12}C и ^{13}C . Выход ^9Li : 7.98 ± 0.52 и 4.37 ± 0.49 соответственно для ближнего и дальнего детекторов в единицах $10^{-8} \text{ г}^{-1} \text{ см}^2$. Выход ^8He оказался близок к нулю. За время работы детекторов получен огромный опыт эксплуатации сцинтилляционных детекторов и изучены их характеристики. Измеренное значение угла смешивания немного превышает величину, полученную в других аналогичных экспериментах Daya Bay и RENO. Отличие находится в пределах двух стандартных отклонений.

12.3 ОСЦИЛЛЯЦИИ РЕАКТОРНЫХ НЕЙТРИНО

В 2017 г. Коллаборация Double Chooz продолжала набор статистики двумя детекторами. Улучшена погрешность измерения. Сотрудники ИЯИ принимали участие в удалённых дежурствах на детекторах при помощи программного обеспечения, созданного в Коллаборации.

Сделан анализ проходящих сквозь детектор потоков мюонов [1]. Получены годовые вариации этих потоков за время работы двух детекторов. Поток мюонов, проходящих через ближний детектор $(3.64 \pm 0.04) \times 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и через дальний $(7.00 \pm 0.05) \times 10^{-5} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

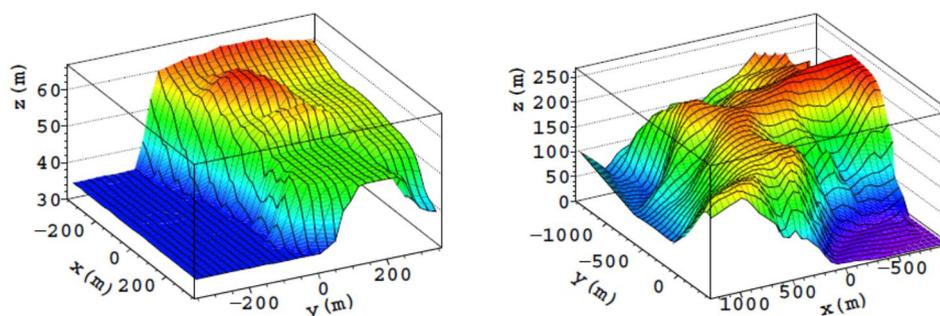


Рис.1. Профиль горных пород в Double Chooz над детекторами ближним (слева) и дальним (справа), измеренный по мюонным потокам.

Предложена система анализа, основанная на Фурье анализе совокупного амплитудного распределения импульсов от фэу [2]. На рис. 2 показано, как данный анализ позволяет отличать события, произошедшие в мишени и гамма-захватчике.

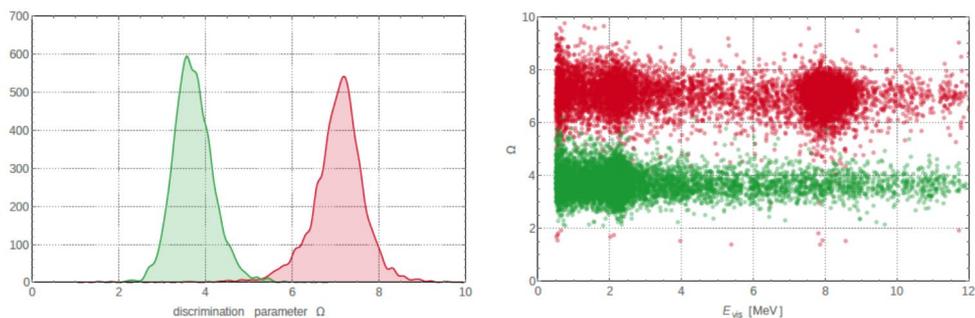


Рис. 2. Распределения событий в мишени и гамма-захватчике (слева) как функция параметра дискриминации Ω . Справа распределение дискриминирующего параметра Ω в зависимости от выделяемой энергии.

В 2017 году более 20 дней оба реактора АЭС не работали, что позволило тщательно измерить коррелированные фоны. На рис. 3 показаны спектры ^9Li в обоих детекторах, измеренные в этот период. Получена зависимость выхода ^9Li от эффективной глубины расположения детектора, что позволяет предсказывать фон в детекторах других экспериментов, в частности Daya Bay и RENO [3].

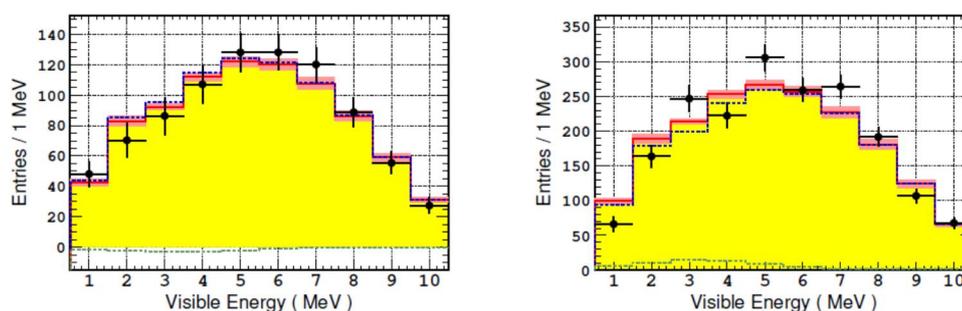


Рис. 3. Измеренный спектр ^9Li в ближнем (слева) и дальнем (справа) детекторах. Вклад от ^8He показан розовым цветом.

На базе лучшего анализа фонов уменьшена систематическая погрешность в измерениях $\sin^2\theta_{13}$. Получено новое значение $\sin^2\theta_{13} = 0.107 \pm 0.016$, которое на два стандартных отклонения отличается от значения Daya Bay в большую сторону.

12.4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделан анализ проходящих сквозь детектор потоков мюонов и определены профили толщин пород над детекторами.

Улучшен анализ сигналов фэу и получены дополнительные каналы уменьшения фона детекторов.

Во время остановки двух реакторов измерен выход ^9Li от проходящих мюонов. Фон от ^8He оказался пренебрежимо мал. Можно предсказывать фон от космогенных изотопов в других подземных установках.

Уменьшена систематическая ошибка в определении $\sin^2\theta_{13}$. Хотя она остается в пять раз больше, чем в эксперименте Daya Bay.

12.5 ПУБЛИКАЦИИ 2017 ГОДА ПО ТЕМЕ.

1. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, ...V. Sinev, et al., «Cosmic-muon characterization and annual modulation measurement with Double Chooz detectors», *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 02 (2017) 017; arXiv:1611.07845 [hep-ex].

2. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, ...V. Sinev, et al., «Novel event classification based on spectral analysis of scintillation wave-forms in Double Chooz», submitted to JINST; arXiv:1710.04315 [physics.ins-det].

3. T. Abrahao, H. Almazan, J.E. dos Anjos, ...V. Sinev, et al., «Yields and production rates of ^9Li and ^8He measured with the Double Chooz near and far detectors», Prepared for submission to JCAP.

13 ОТЧЕТ ПО ЭКСПЕРИМЕНТУ GERDA

13.1 ВВЕДЕНИЕ

Поиск безнейтринного двойного бета-распада ядер является в настоящее время одной из центральных задач экспериментальной физики низких энергий. Его целью является определение природы массы нейтрино (Дираковской или Майорановской) и возможное нарушение лептонного числа. Решение этих задач будет иметь фундаментальные следствия как для физики частиц так и для космологии. Международный эксперимент GERDA предполагает создание и эксплуатацию детектора нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge в подземной лаборатории LNGS INFN Италии. Основным преимуществом проекта является применение пассивной защиты из жидкого инертного газа и создание германиевых кристаллов нового типа, обеспечивающих высокую степень дискриминации фоновых событий по форме импульса. Проект включает три последовательные фазы. В 2013 г. Завершена первая фаза эксперимента. В результате получен верхний предел для периода полураспада ^{76}Ge – $2,1 \cdot 10^{25}$ лет (90%) и начата подготовка второй фазы эксперимента. В течение 2016 г полностью введена в строй вторая фаза эксперимента Герда, в которой наряду с модифицированными старыми коаксиальными кристаллами, использованы 30 новых кристаллов нового типа (кристаллы с точечным анодом, так наз. BEG кристаллы) и получен первый результат – новый верхний предел для $0\nu 2\beta$ распада Ge-76 - $T_{1/2} > 4 \cdot 10^{25}$ лет. . В течение 2017 г полностью налажены все элементы установки второй фазы эксперимента: использован сцинтилляционный сигнал от жидкого аргона в антисовпадении с сигналом германиевых детекторов, введены в строй 30 новых кристаллов и продолжен набор статистики и ее анализ. В результате получен новый верхний предел для $0\nu 2\beta$ распада Ge-76 - $T_{1/2} > 8 \cdot 10^{25}$ лет. Полученное значение является наилучшим для аналогичных современных установок.

13.2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.

Большое значение для поиска $0\nu\beta\beta$ распада германия является увеличение исследуемой массы германия. Для этого коллаборация GERDA планирует закупить в России новую партию обогащённого германия и очистить накопившиеся отходы от производства германиевых детекторов. Технология очистки германиевых отходов разработана в ИЯИ РАН (ЛГАРН ОЭФ) совместно с Университетом Тюбингена (Германия). В 2017 году в Лаборатории Гран-Сассо силами сотрудников ЛГАРН ОЭФ ИЯИ РАН смонтирована установка на основе этой технологии. На рисунке 1 ниже приведена фотография этой установки в момент монтажа в Лаборатории Гран-Сассо.

На базе эксперимента GERDA создаётся новая коллаборация: LEGEND. Российские физики из ИЯИ РАН, ИТЭФ, КИ и МИФИ примут участие в работе этой новой коллаборации.

13.3 ПУБЛИКАЦИИ:

GERDA Col.” Background free search for neutrinoless double- β decay with GERDA”
Nature 544, 47-52, (06 April 2017)

GERDA Col “Limits on uranium and thorium bulk content in Gerda Phase I detectors”
Astroparticle Physics 91 (2017) 15-21



Рис.1. Вид установки по очистке германия в лаборатории Гран-Сассо.

14 ПРОЕКТ 28, 29, 31: ИССЛЕДОВАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И СВОЙСТВ НЕЙТРИНО НА УСТАНОВКАХ TELESCOPE ARRAY, PRISMA-LHAASO, NOVA И E938 (MINERVA) ИЯИ, Г.И.Рубцов, Ю.Стенкин, А.Буткевич

Источники космических лучей сверхвысоких энергий до сих пор не идентифицированы, химический состав первичных частиц на этих энергиях остается неопределенным, а физическая природа подавления спектра на высоких энергиях не бесспорна. Соответствующие проблемы являются приоритетными в астрофизике частиц и задача их решения входит в «дорожную карту» развития европейской и мировой науки. Для достижения поставленной цели недавно были построены и вошли в строй две самые крупные в истории обсерватории космических лучей: им. Пьера Оже в южном полушарии Земли, и "Telescope Array" в северном. Целью проекта является исследование всего круга вышеописанных проблем, на основе данных, собранных обсерваторией Telescope Array, и в составе международной коллаборации.

В составе установки Telescope Array одновременно работают 3 флуоресцентных телескопа и наземная решетка из 507 детекторов, регистрирующие ШАЛ, вызванные космическими лучами сверхвысоких энергий. Также функционирует лидар, центральный лазер и линейный ускоритель электронов с энергией 40 МэВ и низкоэнергетическое расширение обсерватории, TALE. Физики из ИЯИ РАН входят в состав коллаборации "Telescope Array".

При обработке данных "Telescope Array" в 2017 году получен следующий результат. Имеются свидетельства того, что космические лучи с энергиями порядка ЭэВ являются протонами. Если эти протоны имеют Галактическое происхождение, то должна наблюдаться анизотропия направлений их прихода, вызванная отклонениями в Галактическом магнитном поле. Ни усиление потока вдоль Галактической плоскости, ни его дефицит в направлении Галактического антицентра обнаружены не были. Получено ограничение сверху на уровне 1.3% на долю Галактических протонов 95% уровнем достоверности.

R.U. Abbasi, ..., O. Kalashev, B. Lubsandorzhiev, M. Pshirkov, G. Rubtsov, I. Tkachev, S. Troitsky .. et al, "Search for EeV Protons of Galactic Origin", *Astropart.Phys.* 86 (2017) 21-26.

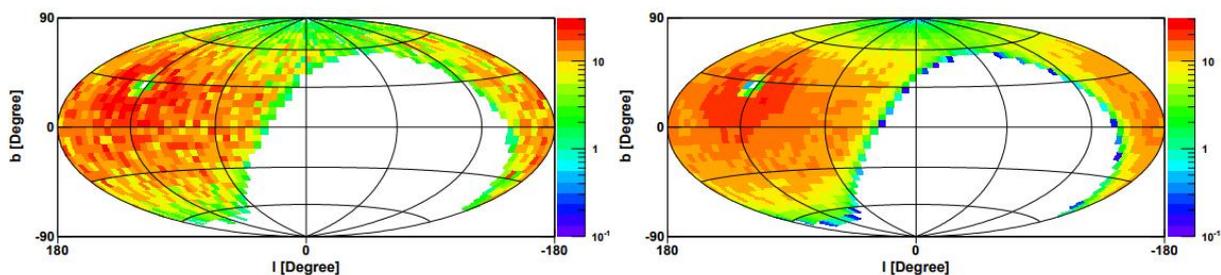


Рис.1 Данные (слева) и изотропная модель (справа)

НЕЙТРИННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ИЯИ РАН ВО ФНАЛ: ЭКСПЕРИМЕНТ E929 (NOVA)

Руководитель: ИЯИ РАН, А.В. Буткевич

Состав участников Проекта: ИЯИ РАН ак. Матвеев В.А , аспирант-стажер Лучук С.В.

Целью эксперимента NOvA (NuMI Off-axis ν_e Appearance) является определение параметров нейтринной осцилляции. Программа эксперимента включает измерение числа событий, обусловленных взаимодействием электронных (анти)нейтрино, которые могут появиться в пучках мюонных (анти)нейтрино, в результате $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. Это дает возможность измерить вероятность таких переходов, а следовательно, и угол смешивания θ_{23} , фазу нарушения CP инвариантности в лептонном секторе, а также определить иерархию масс нейтринных состояний. Наблюдение нарушения CP-инвариантности в лептонном секторе, которое само по себе является открытием, явилось бы экспериментальным базисом для фундаментальной идеи лептогенезиса, которая объясняет барионную асимметрию Вселенной. Описание программы исследований и детекторов можно найти на сайте www-nova.fnal.gov. В этом эксперименте используется самый мощный пучок (мощностью 700 кВт) мюонных нейтрино с энергией 1-3 ГэВ и два подобных детектора - ближний и дальний. Ближний детектор расположен вблизи источника нейтрино (Фермилаб, США), а дальний детектор находится на расстоянии 810 км Аш-Ривер (шт. Миннесота, США). Для экспозиции $6 \cdot 10^{20}$ протонов на мишень получены следующие результаты.

1. Регистрация мюонных нейтрино.

На дальнем детекторе зарегистрировано 78 событий (включая 7 фоновых событий), рожденных мюонными нейтрино. В отсутствие осцилляций ожидалось зарегистрировать 473 события. Полученные ограничения на разности квадратов масс нейтрино $|\Delta m_{232}^2| = |m_{23}^2 - m_{22}^2|$ и значения $\sin^2(\theta_{23})$ угла смешивания θ_{23} представлены на рисунке

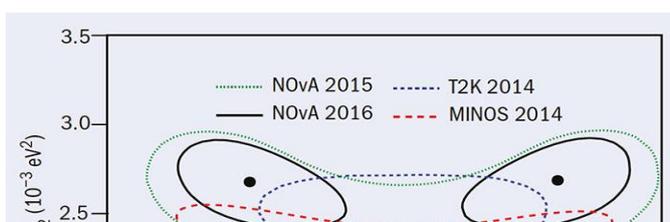


Рис.1. В плоскости $(\Delta m_{23}^2, \sin^2 \theta_{23})$ имеется две изолированных области разрешенных значений параметров осцилляций.

Впервые было показано, что максимальное смешивание, т. е. значение $\theta_{23}=\pi/4$, когда примеси мюонных ν_μ и тау ν_τ нейтрино в третьем массовом состоянии ν_3 одинаковы (т. н. μ - τ симметрия в состоянии ν_3) исключается со значимостью 2.6 σ . Этот результат позволяет, также, исключить ряд моделей, предложенных для описания больших углов смешивания лептонов и нарушения CP-инвариантности, которые основываются на μ - τ симметрии.

2. Регистрация электронных нейтрино.

На дальнем детекторе зарегистрировано 33 события кандидата (ожидаемый фон 8 событий), рожденных электронными нейтрино ν_e , которые появились в пучке мюонных нейтрино из-за $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ осцилляций. В результате фитирования спектров мюонных и электронных событий, как функций параметров Δm_{23}^2 , $\sin^2 2\theta_{23}$ и фазы нарушения CP-инвариантности δ_{CP} получены вырожденные решения:

а) $\theta_{23} < \pi/4$, нормальная иерархия масс ($m_1 < m_2 < m_3$) и $\delta_{CP} \sim 3\pi/2$ (максимальное нарушение CP-инвариантности)

б) $\theta_{23} > \pi/4$, обратная иерархия масс ($m_3 < m_1 < m_2$) и $\delta_{CP} \sim 3\pi/2$, или нормальная иерархия масс и $\delta_{CP} \sim \pi/2$ (минимальное нарушение CP-инвариантности)

Публикации за 2017 год.

(1) NovA Collaboration: P. Adamson et al. Phys. Rev. Lett. 118, 151802 (2017)

NovA Collaboration: P. Adamson et al. Phys. Rev. Lett. 118, 231801 (2017)

NovA Collaboration: P. Adamson et al. Phys. Rev. D96, 072006 (2017)

15 РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ВЫСОКОГОРНОЙ УСТАНОВКИ PRISMA-YBJ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА LHAASO

рук.: ИЯИ РАН, Стенькин Ю.В.

В 2016 г. были получены новые результаты по изучению космических лучей сверхвысоких энергий разработанным в ИЯИ РАН методом (проект PRISMA). С помощью специализированных сцинтилляционных детекторов (эн-детекторы) были измерены функции пространственного распределения тепловых нейтронов в ШАЛ и получен спектр мощностей ШАЛ по числу тепловых нейтронов на двух уровнях наблюдения: на уровне моря (установка PRISMA-32) на высоте 4300 м над уровнем моря (установка PRISMA-YBJ). Проведено детальное моделирование экспериментов и получено хорошее согласие расчета с экспериментальными данными. Начата разработка нового метода измерения химического состава космических лучей при энергиях выше 1 ПэВ.

Разработан проект и начато создание полномасштабной установки PRISMA-LHAASO в рамках международного проекта LHAASO. Собран и настроен первый кластер из 16 эн-детекторов на основе нового недорогого борного сцинтилляционного светосостава, разработанного в сотрудничестве с ЗАО «Люминофор». Заказано и частично получено оборудование для расширения установки до 4 кластеров.

Список публикаций по проекту в 2016 г.:

O.B. Shchegolev, V.V. Alekseenko, D.M. Gromushkin, X. Ma, Yu.V. Stenkin, V.I. Stepanov, J. Zhao. Electron and thermal neutron lateral distribution functions in EAS at high altitude, *JoP*, 718 (2016) 052038.

. B. Bartoli, P. Bernardini, X.J. Bi, et al. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in extensive air showers selected by the ARGO-YBJ experiment. *Astroparticle Physics*, 81, pp. 49–60 (2016).

О.Б. Щеголев, Ю.В. Стенькин. Функция пространственного электронов и тепловых нейтронов в широких атмосферных ливнях на уровне моря. *Краткие сообщения по физике*. №7, (2016), сс. 24-31.

Ю.В. Стенькин, О.Б. Щеголев от имени коллаборации PRISMA. Новый метод изучения химического состава космических лучей. Доклад на 34 ВККЛ, (2016), *Известия РАН, серия физическая* (2017), в печати

Стенькин Ю.В., Громушкин Д.М., Петрухин А.А., Степанов В.И., Щеголев О.Б., Яшин И.И. Применение нового метода изучения химического состава космических лучей на примере данных установки PRISMA-32. Доклад на 34 ВККЛ, (2016)

Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in an environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. EPJ,Web of Conf. (2017), in press

Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Exotic geophysical phenomena observed in an environmental neutron flux study using EAS PRISMA detectors. EPJ,Web of Conf. (2017), in press

Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. The PRISMA - LHAASO project: status and overview. EPJ,Web of Conf. (2017), in press

Victor Alekseenko, Ananstasia Bagrova, Shuwang Cui, et al. Study of the EAS size spectrum in thermal neutrons measured by PRISMAYBJ array. EPJ,Web of Conf. (2017), in press

16 ПРОЕКТ 30: ОСЦИЛЛЯЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ИНТЕНСИВНЫМИ ПУЧКАМИ НЕЙТРИНО И АНТИНЕЙТРИНО НА ПРОТОННОМ УСКОРИТЕЛЕ JPARC (ЯПОНИЯ)

Руководитель: Ю.Г.Куденко

Участники Проекта

ИЯИ РАН, Число участников проекта: 18 человек, из них 11 человек моложе 35 лет, 2 аспиранта, 9 студентов.

Важнейшие результаты, полученные в 2017 г

В нейтринном эксперименте T2K проведены измерения осцилляций мюонных нейтрино и антинейтрино и получены в электронные нейтрино и антинейтрино. Основываясь на одновременном анализе данных по осцилляциям мюонных нейтрино в электронные нейтрино и мюонных антинейтрино в электронные антинейтрино, накопленных в 2015, 2016 годах, а также в первой половине 2017 года, а также данных реакторных экспериментов, эксперимент T2K впервые получил указание на максимальное нарушение CP симметрии в нейтринных осцилляциях и указание на величину CP нечетной фазы около -90 градусов, как показано на рис.1.

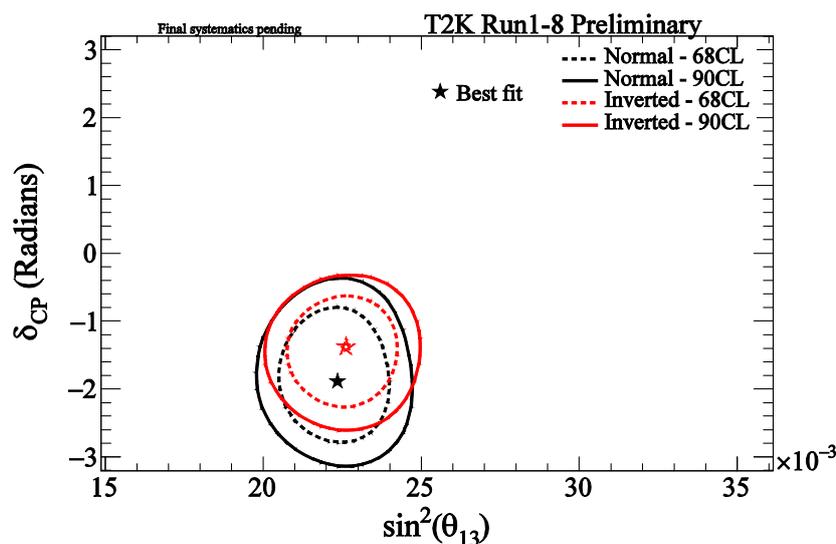


Рис.1. Наиболее вероятные значения CP нечетной фазы и ограничение на параметры δ и $\sin^2\theta_{13}$ на уровне 68% и 90% после использования данных реакторных экспериментов.

T2K исключил CP сохранение на уровне статистической значимости более 2σ , как видно из рисунка 2.

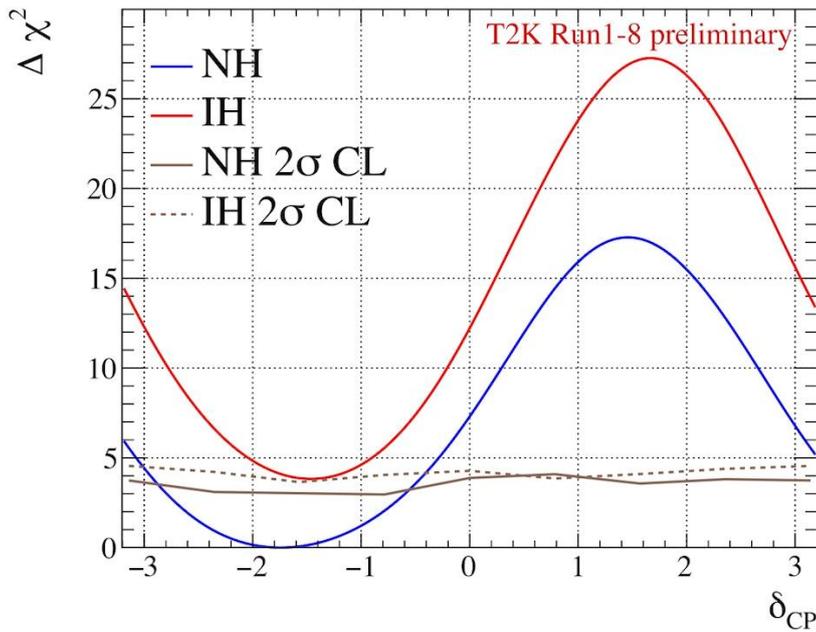


Рис.2. Вероятность исключения CP нечетной фазы δ . Кривая синего цвета соответствует нормальной иерархии масс, оранжевая кривая – инверсной иерархии масс. Наиболее вероятной величиной фазы δ является $-\pi/2$ для обеих возможных иерархий масс.

В эксперименте T2K были измерены осцилляционные параметры в при измерении «дефицита» мюонных нейтрино в дальнем детекторе СуперКамиоканде.

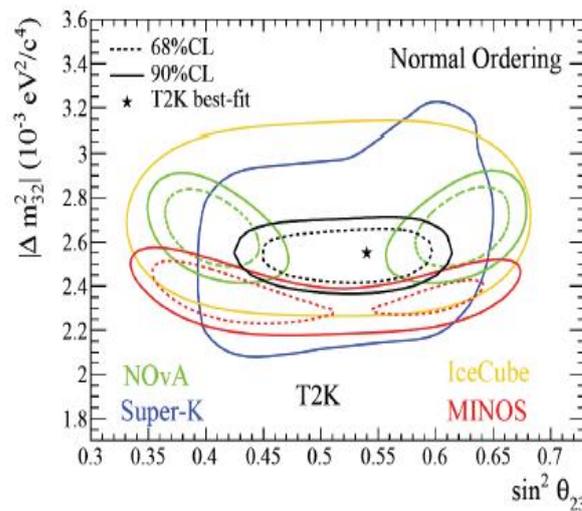


Рис.2. Параметры смешивания $|\Delta m_{32}^2|$ и угол смешивания θ_{23} , измеренные в эксперименте T2K (сплошная черная линия). Также показаны результаты, полученные в экспериментах MINOS, Super-Kamikande, IceCube и NOvA.

Результаты T2K указывают на величину угла θ_{23} близкую к максимальному смешиванию 45 градусов, что подтверждается (с меньшей точностью) экспериментами

Супер-Камиоканде и IceCube. Однако эксперименты MINOS и NOvA указывают на значительное отклонение возможной величины этого угла от 45 градусов.

Запущен в работу первый модуль детектора WAGASCI, состоящий из активных элементов (сцинтилляционных детекторов) и пассивных (вода) в соотношении 20:80. Начаты измерения на нейтринном пучке T2K. Активные элементы этих детекторов (сцинтилляционные детекторы со спектросмещающими волокнами и лавинными фотодиодами) были разработаны и созданы сотрудниками ИЯИ РАН, входящими в этот научный коллектив.

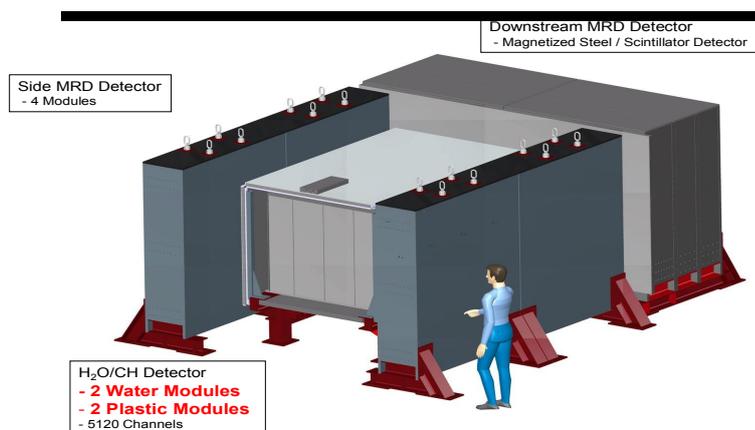


Рис. Общий вид детектора WAGASCI

Проведены тесты и начат монтаж детектора мюонного пробега (MRD) для центральной мишени WAGASCI. Один из 2-х MRD детекторов собран и готов к набору статистики на нейтринном пучке.

Завершена работа по подготовке к монтажу на нейтринном канале T2K магнитного детектора Baby-MIND. Детектор общей массой около 60 тонн был протестирован на канале заряженных частиц T10 в ЦЕРНе и перевезен в Японию в декабре 2017 г. Предварительные результаты тестов показали хорошие параметры и способность измерять импульс мюона при низких энергиях около 500 МэВ.

Публикации:

T. Ovsianikova, M. Antonova, A. Izmaylov et al. New experiment WAGASCI to measure cross sections of neutrino interactions in water and hydrocarbon using J-PARC beam, Phys.Part.Nucl. 48 (2017) 1014.

K.Abe... M.Khabibullin et al. First measurement of the ν_{μ} charged-current cross section without pions in the final state on a water target, arXiv:1708.06771.

D.Sgalaberna, A.Blondel... Y.Kudenko, O.Mineev et al. A fully active fine grained detector with three readout views, arXiv: 1707.01785.

K.Abe... M.Khabibullin et al. Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector, Phys.Rev. D96 (2017) 092006.

K.Abe... M.Khabibullin, A.Khotjantsev et al. Measurement of $\nu^- \mu$ and $\nu \mu$ charged current inclusive cross sections and their ratio with the T2K off-axis near detector, Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052001

Yu.Kudenko, Neutrino detectors for oscillation experiments, JINST, 12 (2017) C06003.

K.Abe... M.Khabibullin et al. Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target, Phys.Rev.D96 (2017) 011102.

K.Abe... M.Khabibullin, A.Khotjantsev et al. Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline, Phys.Rev. D95 (2017) 111101.

K.Abe... M.Khabibullin, A.Khotjantsev et al. Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K, Phys.Rev.Lett, 118 (2017) 151801.

Y.Kudenko and D.Wark Neutrino oscillations: status and prospects of accelerator and reactor experiments, J.Phys.Conf.Ser. 934 (2017) no.1, 012001.

- доклады на конференциях и школах

1.Yury Kudenko, Neutrino detectors for oscillation experiments, invited talk at International Conference Instrumentation17, Novosibirsk, Russia, 26 February – 3 March 2017.

2. Yury Kudenko Experimental study of neutrino oscillations and search for sterile neutrinos, review talk at International Conference Baksan-50, Nalchik, 6-8 June 2017.

3. Yu.Kudenko and D.Wark, Neutrino oscillations: status and prospects of accelerator and reactor experiments review talk at International Conference ICPPA17, Moscow 2-5 October 2017.

4. A.Mefodiev, Status of detector Baby-MIND, talk at International Conference ICPPA17, Moscow 2-5 October 2017.

5. Y.Kudenko, J.Raaf, Z.Wang, summary talk at International Conference NNN2017, Warwick, UK, 24-26 November 2017.

6. S.Suvorov, Recent oscillation results of the T2K experiment, talk at International Conference Baksan-50, Nalchik, 6-8 June 2017.

7.A.Izmaylov, T2K Neutrino Experiment: Recent Results and Plans, talk at International Conference Flavour2017, Vietnam, 13-19 August 2017.

8. A.Izmaylov, T2K Neutrino Experiment: Results and Future Perspectives,

talk at International Conference Neutrino Telescopes 2017, Venice, Italy, 13-17 March 2017.

9. М.Антонова, Recent results from the T2K experiment, talk at International Conference ICPPA17, Moscow 2-5 October 2017.

- подготовка дипломных (бакалаврских, магистерских) работ

Магистерские работы, Защищенные в 2017 г

С.Суворов, студент МФТИ

М.Антонова, студентка МИФИ

Бакалаврские работы, защищенные в 2017 г.

В.Волков, А.Кичкин, Н.Шайкина - студенты МФТИ.

17 ПРОЕКТ 32: ПОДЗЕМНАЯ ФИЗИКА НА ДЕТЕКТОРАХ АСД, LVD, OPERA:
ПОИСК НЕЙТРИННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЕТЕКТОРАХ АНС И LVD.
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ГЕНЕРАЦИИ НЕЙТРОНОВ МЮОНАМИ
КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В АРГОНЕ. ПОИСК РЕДКИХ СОБЫТИЙ С ПОМОЩЬЮ
ЭМУЛЬСИОННО-ТРЕКОВОГО ДЕТЕКТОРА OPERA.

Рук. ИЯИ, чл.-к. РАН О.Г.Ряжская

Работы по Программе фундаментальных исследований президиума РАН направлены на проведение исследований в области нейтринной астрофизики и физики космических лучей. Установки АСД (Артемовской Научной станции) и LVD (Гран Сассо, Италия), построенные сотрудниками Лаборатории электронных методов детектирования нейтрино ИЯИ РАН, работают по программе поиска нейтринного излучения от коллапсов звездных ядер. Установки OPERA и NEWSdm (Гран Сассо, Италия) предназначены для изучения осцилляций нейтрино и поиска темной материи.

Редкие события, зарегистрированные детектором LVD и АСД

Для регистрации потока электронных антинейтрино разработаны и построены сцинтилляционные детекторы АСД и LVD. Основной реакцией взаимодействия антинейтрино в сцинтилляторе C_nH_{2n+2} является реакция обратного бета распада (IBD), которая дает два детектируемых сигнала: быстрый сигнал от позитрона (видимая энергия $E(\nu_e) - 1.8 \text{ МэВ} + 2 m c^2$) и следующий за ним сигнал от захвата $n+p \rightarrow d+\gamma$ ($E_\gamma=2.2 \text{ МэВ}$, среднее время захвата около 185 мкс).

Основой поиска нейтринных всплесков является идентификация кластеров событий по времени с низкой вероятностью имитации событий за счет флуктуации фона.

К характерным чертам регистрации антинейтрино в реакции IBD от вспышки сверхновой звезды относится: повышение скорости счета установки, равномерное по объему распределение взаимодействий, 80% событий коррелируют по времени с захватом нейтрона.

В эксперименте проводится анализ данных в режимах on-line и off-line. Режим on-line поиска кластеров одинаков для обоих детекторов.

Поиск кластеров кандидатов-событий в режиме on-line осуществляется во временном окне $\Delta t < 20 \text{ с}$ и с энергией импульсов выше пороговой $E_{th} > 4 \text{ МэВ}$. Число импульсов в кластере пропорционально массе детектора и эффективности регистрации позитрона. Вероятность имитации фоном импульсов, при ожидаемой частоте коллапсов в

Галактике – один раз в $5 \div 50$ лет, равна $m \frac{(m\tau)^{k-1}}{(k-1)!} \exp(-m\tau)$, где m – частота фоновых импульсов, τ - длительность пачки импульсов, k – число импульсов в пачке. Информация о кластерах LVD с низкой частотой имитации в режиме on-line посылаются в систему

SNEWS. Информация о кластерах АСД –выводится на экран дежурного и записывается на цифровой носитель для дальнейшей обработки.

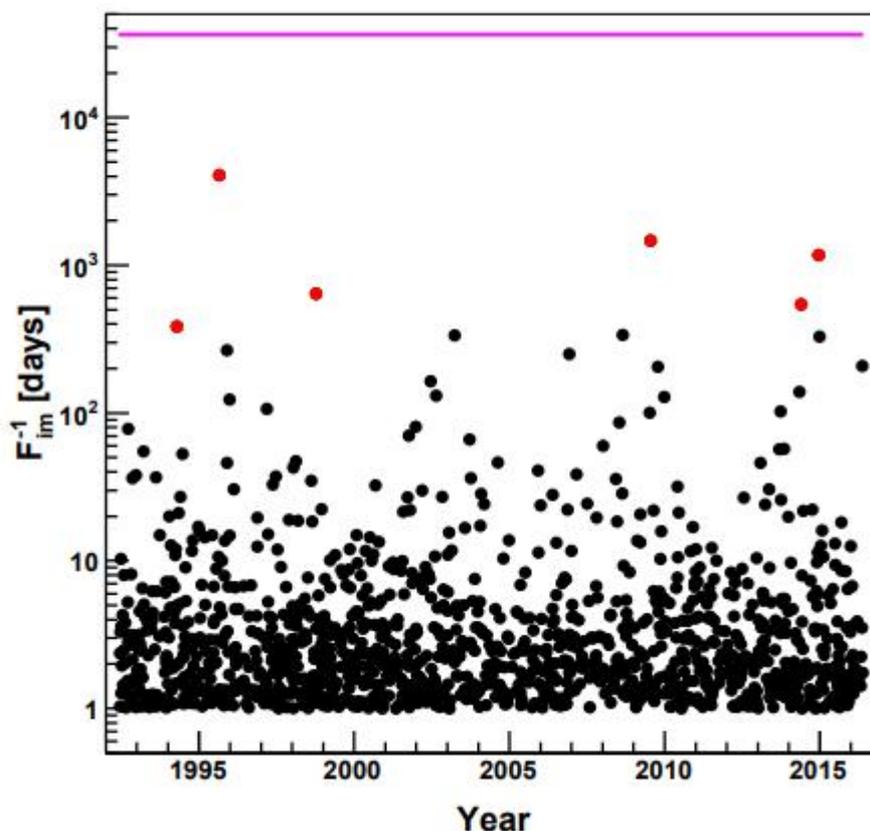


Рис.3.1. Зарегистрированные кластеры с $F_{im} < 1$ день⁻¹. Красным отмечены кластеры с высокой значимостью, зарегистрированные с 1992 по 2017 год.

В эксперименте LVD поиск кластеров $\bar{\nu}_e$ -событий off-line осуществляется в течение определенного временного окна с длительностью Δt до 100 с шагом 100 мс. Каждый кластер характеризуется Δt и количеством событий m (множественность), внутри Δt . Подробно методика поиска и выбранные критерии отбора счетчиков и кластеров описаны в работе N. Y. Agafonova, et al., *The Astrophysical Journal*, 802, 47 (2015). Для каждого кластера, была определена частота имитации F_{im} . Кластеры с высокой значимостью, т.е. которые имели низкую частоту имитации (менее одного в месяц) за все время работы LVD представлены в табл. 3.1. Распределение, зарегистрированных кластеров с $F_{im} < 1$ день⁻¹ представлено на рис. 3.1.

Из 27 миллионов обнаруженных кластеров ни один из них не имеет частоты имитации менее 1/100 г⁻¹. Таким образом, можно сделать вывод о том, что не было зафиксировано никаких сигналов от вспышек сверхновых, на расстоянии до 25 кпк в период наблюдения.

Табл. 3.1. Характеристики кластеров со значимостью $F_{im} < 1 \text{ г}^{-1}$

| Дата и время кластера | Множественность кластера m | Длительность $\Delta t, \text{с}$ | Энергия $E, \text{МэВ}$ | Частота имитации $1/F_{im}, \text{г}^{-1}$ |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|--|
| 16.04.1994 10:40:49.263 | 7 | 18.88 | 26.5 | 1.06 |
| 27.08.1995 16:18:10.478 | 7 | 5.49 | 36.2 | 11.16 |
| 07.10.1998 15:41:41.775 | 12 | 90.05 | 32.2 | 1.76 |
| 18.07.2009 7:39:20.510 | 12 | 42.71 | 14.6 | 4.02 |
| 10.01 2014 | 8 | 10 | | 1.6 |
| 10.08 2014 | 14 | 61 | | 2.7 |

Предел на частоту вспышек сверхновых в нашей галактике для LVD (1992 - 2017) составляет менее 1 события в 10.86 лет ($f=0.092$) коллапсов в год при 90% C.L.

Предел на частоту вспышек сверхновых в нашей галактике для АСД (1987 - 2017) составляет менее 1 события в 17.37 лет ($f= 0.058$) коллапсов в год при 90% C.L.

Поиск темной материи с помощью эмульсионного эксперимента NEWSdm

Эксперимент OPERA был крупнейшим эмульсионным экспериментом (2008 - 2015). Его осуществление стало возможным благодаря созданию сканирующих систем для анализа изображений эмульсии современного поколения. Использование ядерной эмульсии в трековых детекторах физики высоких энергий и астрофизики позволяет выделять частицы с высокой точностью (400 до 1000 нм) при очень большой плотности треков и с высокой точностью определять координаты первичного взаимодействия частиц.

Эксперимент OPERA закончил набор экспериментальных данных, хотя обработка их еще продолжается. Впервые экспериментально установлено наличие осцилляций мюонных нейтрино в тау-нейтрино путем прямого наблюдения взаимодействий тау-нейтрино. Однако, еще имеется много данных, полученных в ходе эксперимента, требующих продолжения анализа и обработки. Это рождение очарованных частиц, осцилляции мюонного нейтрино в электронное, оценка возможностей существования стерильного нейтрино, анализ зарегистрированных событий прохождения космических лучей и др.

В предлагаемом новом международном эксперименте NEWSdm в Лаборатории Гран Сассо (Nuclear Emulsion for WIMP Search – Dark Matter, участниками нового проекта являются научные группы из INFN, ИЯИ РАН, ФИАН, НИИЯФ МГУ и др.) полученное угловое распределение ядер отдачи будет ориентировано относительно направления на созвездие Лебедя, в то время как распределение фона должно быть изотропным. Перспективы проекта NEWSdm, открывающего уникальную возможность для открытия частиц галактической темной материи, связаны с использованием твердотельного детектора, состоящего из недавно разработанных наноразмерных ядерных эмульсий и оптических сканирующих систем, достигающих беспрецедентного наноразмерного разрешения.

Использование мелкозернистых ядерных эмульсий как в качестве мишени, так и нанометрического устройства регистрации для направленного поиска частиц темной материи дает уникальную возможность для высокоактивного обнаружения галактической ТМ (Рис.3.2.). Действительно, обнаружение направленных треков частиц является единственным способом расширения возможностей прямого обнаружения темной материи за пределами фона нейтрино. Сделана оценка потенциала обнаружения в проекте NEWSdm частиц WIMP, возникших в галактическом гало, при условии, что порог длины трека частицы отдачи 100 нм. [N. Agafonova et al, “Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions” arXiv:1705.00613]

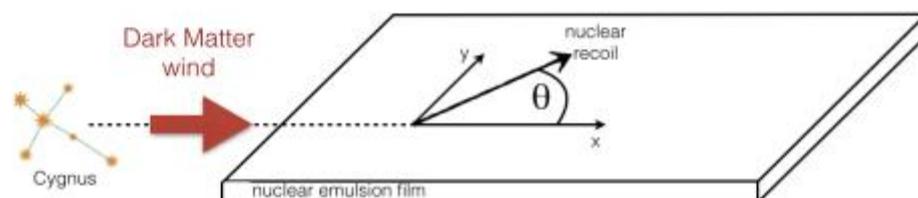


Рис.3.2. Схема взаимодействия частиц темной материи в эмульсионной пластине в плоскости xy . Ось x направлена против созвездия Лебедя, а θ - угол между осью x и проекцией ядерной отдачи в плоскости xy .

Наличие в эмульсионном геле более легких ядер, таких как углерод, кислород и азот, в дополнение к более тяжелым ядрам серебра и брома, является ключевой особенностью проекта NEWS, что позволяет получить хорошую чувствительность к WIMP как с легкими, так и с тяжелыми массами. Чувствительность связана с минимально возможной регистрируемой длиной трека. В результате продолжающихся работ по

совершенствованию в области технологий производства наноразмерной ядерной эмульсии в ближайшем будущем предусматриваются соответствующие успехи в уменьшении порога длины трека, что позволит значительно расширить исследуемый диапазон энергий частиц ТМ.

При сканировании эмульсии на первом этапе необходим анализ изображения для распознавания кластеров из темных зерен на нескольких глубинах по всей толщине эмульсионной пластины. Ключевым элементом является анализ формы кластеров. Кластер из нескольких зерен будет иметь эллиптическую форму с большой осью вдоль направление движения частицы, в то время как кластер, создаваемый одним зерном, имеет сферическую форму. Чтобы смоделировать эффект индуцированных WIMP ядер отдачи, и измерить эффективность и разрешение нового оптического микроскопа со сверхвысоким разрешением, была выполнена серия тестовых облучений пучками низкоэнергичных ионов. Использовался ионный пучок Кг с энергиями 200 и 400 кэВ и ионный пучок С с энергиями 60, 80 и 100 кэВ. Ионы Кг и С таких энергий производят в эмульсии треки длиной в диапазоне от 100 до 300 нм (рис.3.3).

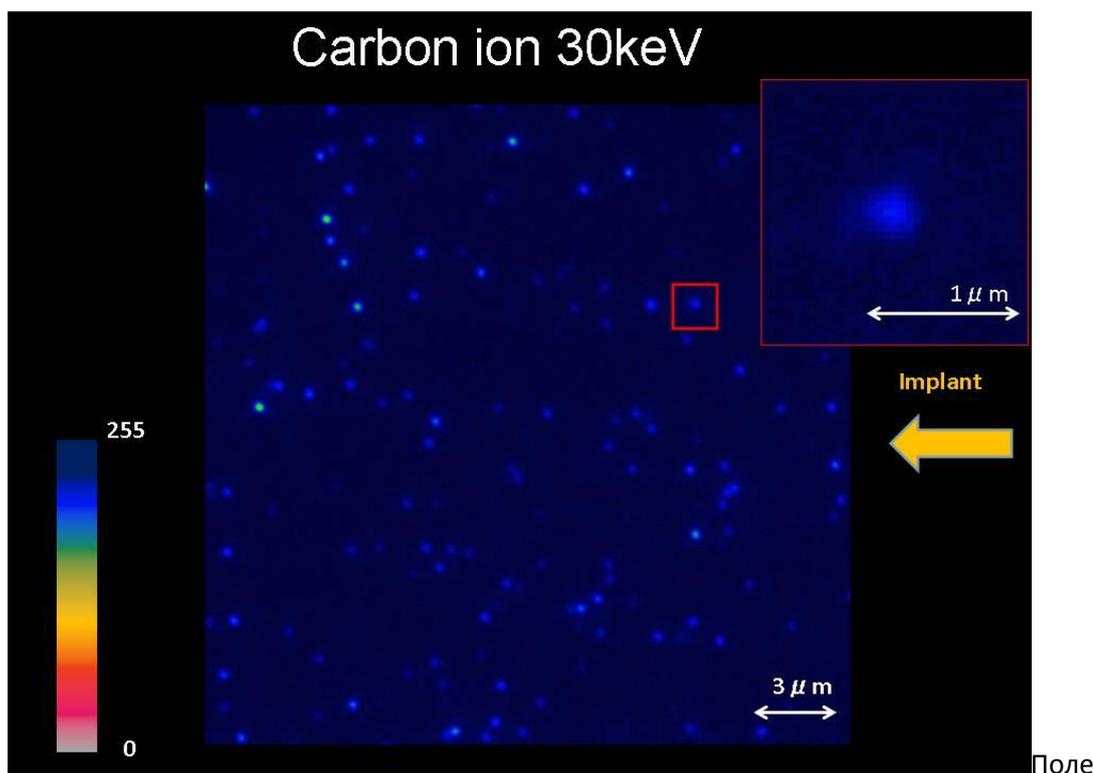


Рис.3.3. Поле зрения микроскопа с зарегистрированным и распознанным треком ядра углерода с энергией 30 кэВ. На вставке сверху трек в увеличенном виде.

В настоящее время проводится сканирование эмульсий и анализ результатов первого эксперимента по измерению фоновых условий.

Таким образом, NEWSdm - это первый эксперимент с трековым детектором для поиска темной материи, в котором эмульсия используется как мишень и как регистрирующее устройство одновременно. Использование детектора на основе ядерной эмульсии позволит исследовать область низких сечений взаимодействий в фазовом пространстве на основе указаний результатов эксперимента DAMA.

Публикации и доклады в 2017 году

Оригинальные статьи за 2017

K. V. Manukovsky, O.G.Ryazhskaya, N. M. Sobolevsky and A. V. Yudin, "Neutron Production by Cosmic-Ray Muons in Various Materials" arXiv:1703.06407 [physics.ins-det]

A.S. Malgin "Phenomenology of muon-induced neutron yield" PHYSICAL REVIEW C 96, 014605 (2017), arXiv:1704.04993

N. Agafonova et al, "Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions" arXiv:1705.00613 [astro-ph.CO]

N. Agafonova et al. (OPERA Collaboration) "Study of charged hadron multiplicities in charged-current neutrino-lead interactions in the OPERA detector" arXiv:1706.07930

N. Yu. Agafonova (on behalf of the LVD Collaboration) "Measurement of the muon-induced neutron seasonal modulation with LVD" arXiv:1701.04620 (XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3)

G. Bruno, A. Molinario, W. Fulgione, C. Vigorito for the LVD Collaboration "The core collapse supernova rate from 24 years of data of the Large Volume Detector" arXiv:1701.06765 (XXV ECRS 2016 Proceedings - eConf C16-09-04.3)

Н.Ю. Агафонова, В.В. Ашихмин, В.Л. Дадыкин, Е.А. Добрынина, Р.И. Еникеев, А.С. Мальгин, О.Г. Рязжская, И.Р. Шакирьянова, В.Ф. Якушев и Коллаборация LVD "Сезонные вариации потока нейтронов, генерируемых мюонами, и фона естественной радиоактивности в подземной Лаборатории Гран Сассо" Известия РАН. Сер. Физ., 2017, т.81 №4, с. 551-554

N. Agafonova on behalf the LVD Collaboration "Measurement of the muon-induced neutron yield in Fe and Pb using Large Volume Detector at LNGS" Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at the Year of Light", Moscow, Russia 20-26 August 2015 (Editor Alexander I. Studenikin World Scientific, Singapore, 2017), p. 374

O.G. Ryazhskaya "Some remarks on the experiments for dark matter search" Proceedings of the Seventeenth Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics "Particle Physics at

the Year of Light”, Moscow, Russia 20-26 August 2015 (Editor Alexander I. Studenikin World Scientific, Singapore, 2017), p. 371

L. Patrizii (for the OPERA Collaboration) “Results from the OPERA Experiment” Poster presented at NuPhys2016 (London, 12-14 December 2016), arXiv:1705.02454 [hep-ex].

A. M. Guler, for the NEWSdm Collaboration “Discovery potential for directional dark matter detection with nuclear emulsions” IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 869 (2017) 012048 doi :10.1088/1742-6596/869/1/012048

18 ПРОЕКТ 33. ЭКСПЕРИМЕНТ ТУНКА/TAIGA

Руководитель: ИЯИ РАН Б.К.Лубсандоржиев, исполнитель: аспирант ИЯИ РАН А.Сидоренков.

Основной физической задачей Гамма-обсерватории высоких энергий TAIGA (Tunka Advanced Instrument for cosmic ray physics and Gamma-ray Astronomy) является исследование гамма-излучения и потоков заряженных космических лучей в диапазоне энергий 10¹³ – 10¹⁸ эВ. Эксперимент включает в себя сеть широкоугольных черенковских станций с углом обзора ~0.6 стерадиан (60°×60°) (TAIGA-HiSCORE), атмосферных черенковских телескопов изображения с углом обзора 10°×10° (TAIGA-IACT) и сцинтилляционных детекторов для регистрации мюонной и электромагнитной компонент широких атмосферных ливней (TAIGA-GRANDE).

В январе 2017 года произведен физический пуск первого атмосферного черенковского телескопа изображения (TAIGA-IACT). На сегодняшний день этот телескоп – самый северный телескоп такого типа в мире, рис.1а.

Атмосферный черенковский телескоп изображения TAIGA-IACT состоит из составного зеркала системы Дэвиса-Коттона площадью ~10 м² из 29 сегментов – индивидуальных зеркал, фокусное расстояние каждого составляет 4,75м. Поверхность зеркал после фиксации их к жесткой раме телескопа образует сферическую поверхность с радиусом 4.75 м.

В фокальной плоскости зеркал телескопа установлена чувствительная камера из 548-ми малогабаритных фотоумножителей XP1911В с бищелочным фотокатодом диаметром ~2 см. Диаметр камеры около 110 см. Угол обзора камеры – 10×10 градусов. Фотоумножители камеры объединены в кластеры по 28 фотоумножителей в каждом кластере, рис.1. В свою очередь каждый кластер состоит из 4-х групп по 7 ФЭУ, имеющих единую плату делителей напряжения питания и единый для всех фотоумножителей группы высоковольтный источник питания. Каждый фотоумножитель камеры снабжен концентратором света – камерой Вильсона. На рис. 2 показана камеры телескопа изображения в сборе, вид с лицевой стороны.

Для отбора и тестирования параметров фотоумножителей камеры изображения атмосферных черенковских телескопов изображения был разработан и создан электронный измерительный стенд. Всего протестировано ~800 фотоумножителей XP1911В. Все отобранные фотоумножители объединены в группы по относительной чувствительности, усилению и напряжениям питания.

Также нами разработан и создан измерительный стенд для тестирования и отбора фотоумножителей для сцинтилляционной установки TAIGA-GRANDE. Протестированные и отобранные фотоумножители установлены в сцинтилляционных детекторах установки TAIGA-GRANDE во время осеннего сезона (сентябрь-октябрь 2017 года) и успешно работают.



Рис. 1. Первый атмосферный черенковский телескоп изображения TAIGA-IACAT.

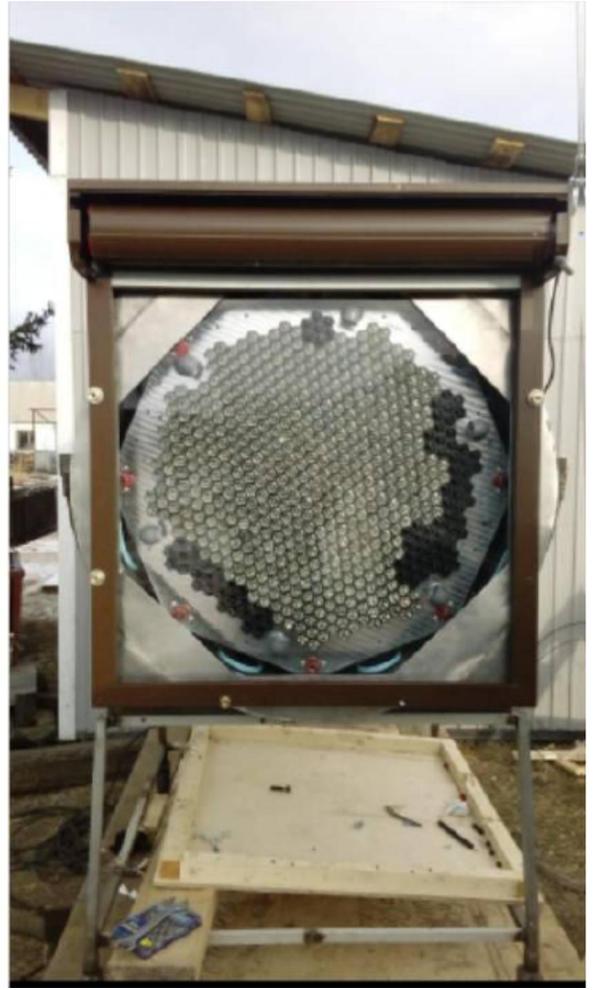


Рис. 2. Камера атмосферного черенковского телескопа изображения TAIGA-IACT. На рисунке слева хорошо видны концентраторы света.

Основные результаты за 2017 год опубликованы в следующих статьях:

1. Studying ultrahigh-energy cosmic rays with the Tunka Radio Extension Tunka-Rex Collaboration (O.L. Fedorov et al.). 2017. 3 pp. Published in Bull. Russ. Acad. Sci. 81 (2017) no.4, 523-525 DOI: 10.3103/S1062873817040190 Conference: C16-08-15.3 Proceedings
2. TAIGA experiment: present status and perspectives N. Budnev (Irkutsk State U.) et al.. 2017. Published in JINST 12 (2017) no.08, C08018 DOI: 10.1088/1748-0221/12/08/C08018 Conference: C17-02-27 Proceedings
3. Search for Anisotropy in the Ultra High Energy Cosmic Ray Spectrum using the Telescope Array Surface Detector Telescope Array Collaboration (R.U. Abbasi (Utah

U.) et al.). Jul 16, 2017. 17 pp. Published in Submitted to: Phys.Rev.Lett.e-Print:
arXiv:1707.04967 [astro-ph.HE]

4. Tunka Advanced Instrument for cosmic rays and Gamma Astronomy (TAIGA):
Status, results and perspectives L. Kuzmichev (SINP, Moscow & Irkutsk State U.) et al..
2017. 8 pp.
Published in EPJ Web Conf. 145 (2017) 01001 DOI: 10.1051/epjconf/201614501001
Conference: C16-08-22.6 Proceedings
5. The Tunka-Grande experiment Tunka Collaboration (R.D. Monkhoev (Irkutsk
State U.) et al.). 2017. 6 pp. Published in JINST 12 (2017) no.06, C06019 DOI:
10.1088/1748-0221/12/06/C06019 Conference: C17-02-27 Proceedings
6. The TAIGA experiment: From cosmic-ray to gamma-ray astronomy in the
Tunka valley N. Budnev (Irkutsk State U.) et al.. 2017. 4 pp. Published in
Nucl.Instrum.Meth. A845 (2017) 330-333 DOI:
10.1016/j.nima.2016.06.041 Conference: C16-02-15 Proceedings

19 ПРОЕКТ 34: ПРОВЕРКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОГО ЭФФЕКТА ГОДОВЫХ И СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ КОНСТАНТЫ РАСПАДА ЯДРА ^{214}Po НА КОРОТКОЖИВУЩЕМ ЯДРЕ ^{213}Po .

Рук. ИЯИ, В.В.Кузминов

В 2017 году на установке ТАУ-3 с источником ^{229}Th , расположенной в низкофоновой лаборатории БНО ИЯИ РАН НЛГЗ-4900, набрана статистика за 812 дней (июль 2015–декабрь 2017), обработана статистика за 622 дня (09.07.2015-29.03.2017). В результате обработки временного ряда значений периода полураспада дочернего изотопа ^{213}Po обнаружены солнечно-суточная вариация константы распада с усреднённой амплитудой $\Delta C = (5.3 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$, лунно-суточная с $\Delta L = (4.8 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$ и звёздно-суточная с $\Delta Z = (4.2 \pm 1.7) \cdot 10^{-4}$. Набор статистики и обработка данных продолжается. Исследуются возможные причины вариаций.

В 2017 году по теме работы были сделаны публикации:

1. E. N. Alexeev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenکو, S. S. Ratkevich. "Observation of daily and annular variations in the ^{214}Po half-life". *Physics of Particles and Nuclei*, November 2017, Volume 48, Issue 6, pp 873–875

2. E. N. Alexeev, Yu. M. Gavrilyuk, A. M. Gangapshev, A. M. Gezhaev, V. V. Kazalov, V. V. Kuzminov, S. I. Panasenکو, S. S. Ratkevich. "Search for variations of the decay half-life of ^{213}Po ". Доклад на Международной сессии-конференции Секции ядерной физики ОФН РАН "Физика фундаментальных взаимодействий", посвященной 50-летию Баксанской нейтринной обсерватории, [ICS SNP-2017 (Nalchik, June 06-08 , 2017)].

3. E.N. Alexeev, Yu.M. Gavrilyuk, A.M. Gangapshev, A.M. Gezhaev, V.V. Kazalov, V.V. Kuzminov, S.I. Panasenکو, S.S. Ratkevich. "Results of two years search for the ^{213}Po half-life variations". The talk at the Mount Elbrus Conference: from Deep Underground up to the Sky. – 2017 (Pyatigorsk, September 11-15, 2017).

20 ПРОЕКТ 36: ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРВИЧНОГО КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И
ПОИСК АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА
КОМПЛЕКСЕ УСТАНОВОК БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИЯИ
РАН.

Рук. ИЯИ РАН В.Б.Петков

1. В 2017 году на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) проводились работы по поддержанию его работоспособности и продолжению набора экспериментальных данных по программе регистрации мюонных нейтрино из нижней полусферы. За период с 01.01.2017 по 30.12.2017 чистое время регистрации по данной задаче составило 7632 часов (87.1% календарного времени), выделено 42 кандидата на нейтринные события. Полное живое время набора информации по нейтринной программе за весь период с 1978 года составляет 276383 часа (31.53 года). Всего за это время было зарегистрировано 1658 событий из нижней полусферы.

2. По данным БПСТ проведен поиск локальных источников мюонных нейтрино с энергиями ≥ 1 ГэВ. Измеренный на БПСТ поток мюонов из нижней полусферы в пределах погрешностей согласуется с потоком, ожидаемым от атмосферных нейтрино, т.е. атмосферные нейтрино являются основным фоном при поиске астрофизических источников мюонных нейтрино.

Для поиска локальных источников использовались угловые ячейки с радиусом 5° , в центре которых находился исследуемый астрофизический объект. Оптимальный размер ячейки был получен моделированием методом Монте-Карло, с учетом энергетического спектра нейтрино, многократного кулоновского рассеяния мюонов от нейтрино в горной породе и углового разрешения БПСТ (2°). Анализ данных БПСТ, полученных за период с декабря 1978 по май 2017 года (1635 нейтринных события, чистое время набора 31.05 года) не выявил значимых превышений над фоном ни в одной из угловых ячеек. Для известных астрофизических объектов были установлены ограничения на поток мюонов, рожденных мюонными нейтрино (Табл.1).

Таблица 1: Ограничения на поток мюонов от нейтрино для астрофизических объектов

| Объект | $\alpha(^{\circ})$ | $\delta(^{\circ})$ | Фон | Эксп. | F_{μ} ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) 90% д.у. |
|----------|--------------------|--------------------|-----|-------|---|
| G.C. | 265.6 $^{\circ}$ | -28.9 | 6.5 | 5 | $0.32 \cdot 10^{-14}$ |
| NGC 1952 | 83.6 | +22.0 | 1.9 | 0 | $0.87 \cdot 10^{-14}$ |

| | | | | |
|------------|-------------|-----|---|-----------------------|
| Vela X-1 | 135.5 -40.3 | 6.5 | 4 | $0.15 \cdot 10^{-14}$ |
| SS433 | 288.0 +5.0 | 2.8 | 1 | $0.63 \cdot 10^{-14}$ |
| 3C273 | 187.3 +2.0 | 2.9 | 4 | $0.52 \cdot 10^{-14}$ |
| NGC 5128 | 201.4 -43.0 | 6.8 | 5 | $0.15 \cdot 10^{-14}$ |
| Cen. X-3 | 170.3 -60.6 | 6.3 | 3 | $0.11 \cdot 10^{-14}$ |
| Cyg. X-3 | 307.7 +40.8 | 0.1 | 0 | $0.99 \cdot 10^{-14}$ |
| Scorp. X-1 | 245.0 -15.6 | 4.2 | 3 | $0.37 \cdot 10^{-14}$ |

3. Измерен поток нейтронов с пороговой энергией 28.6 МэВ на глубине расположения БПСТ. Для измерения потока нейтронов был использован темп образования нестабильного радиоактивного изотопа ^{12}B в (n, p) реакции на ядрах углерода в органическом сцинтилляторе БПСТ. Оценка количества изотопов ^{12}B , наработанных за время наблюдения (2001-2017 гг.) на каждой из плоскостей телескопа, была получена путем аппроксимации распределения интервалов между срабатываниями одного и того же одиночного счетчика. Для аппроксимации использовалась распадная кривая с фиксированным параметром $\tau = 29.1$ мс, соответствующим времени жизни данного изотопа. С учетом результатов экспериментов по изучению взаимодействия нейтронов с углеродом и предположения, что энергетический спектр нейтронов при энергиях $E_n > 10$ МэВ ведет себя как E_n^{-1} , был получен поток нейтронов для каждой из плоскостей БПСТ (табл. 2). Как видно из таблицы, фон быстрых нейтронов на внутренних плоскостях телескопа (6, 7, 8) существенно подавлен по сравнению с внешними плоскостями. В среднем, в пересчете на один сцинтилляционный счетчик, отношение измеренных потоков быстрых нейтронов на внешних и внутренних плоскостях составляет 7.5, что можно объяснить поглощением нейтронов в сцинтилляторе внешних плоскостей БПСТ.

Табл. 2. Интегральный поток нейтронов по плоскостям

| Плоскость | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|
| $\Phi \cdot 10^{-9},$ $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ | 15.56 | 21.78 | 13.6 | 24.1 | 15.29 | 2.59 | 2.08 | 2.56 |

4. Проводились работы по увеличению рабочей площади Мюонного Детектора (МД)ливневой установки “Ковер-2”. В 2017 году были изготовлены, закреплены на кожухах ФЭУ и настроены в лабораторных условиях 235 полных комплектов электроники пластических сцинтилляционных счетчиков. Проведено тестирование 205 комплектов

электроники сцинтилляционных счетчиков на контрольном сцинтилляционном счетчике непосредственно в тоннеле МД. Кожухи с ФЭУ и электроникой установлены на 205 счетчиков первого тоннеля МД. Полностью проложена кабельная сеть (сигнальная и силовая) первого тоннеля МД.

Публикации.

1. М.М. Болиев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, Ю.Ф. Новосельцев, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А. Ф. Янин. Поток нейтронов на глубине 850 м.в.э. по данным БПСТ. Известия РАН. сер.физ., т. 81, № 4, с. 547, 2017.

2. Д.Д. Джаппуев, В.Б. Петков, А.С. Лидванский, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Дзапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, К.В. Птицына, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Эксперимент «Ковер-3» – поиск диффузного гамма- излучения с энергией свыше 100 ТэВ. Известия РАН. сер.физ., т. 81, № 4, с. 461, 2017.

3. M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko and A.F. Yanin. Measuring Muon-Induced Fast Neutrons at the Baksan Underground Scintillation Telescope. Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012111

4. D.D. Dzhappuev, V.B. Petkov, A.S. Lidvansky, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova, K.V. Ptitsyna, M.M. Khadzhiev, and A.F. Yanin. Search for diffuse cosmic gamma rays of energy $E > 100$ TeV with the Carpet-3 air shower array. Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012028

5. A.F. Yanin, I.M. Dzaparova, E.A. Gorbacheva, A.N. Kurenya, M.M. Kochkarov, V.B. Petkov and A.V. Sergeev. Development of a scintillation detector with a photosensor based on matrices of silicon photomultipliers. Journal of Physics: Conf. Series 798 (2017) 012169

6. Ю.Ф. Новосельцев, М.М. Болиев, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, И.М. Дзапарова, М.М. Кочкаров, Р.В. Новосельцева, В.Б. Петков, А.Ф. Янин. Поиск нейтринных вспышек в Галактике; 36 лет экспозиции. ЖЭТФ, т. 152, вып. 1 (7), стр. 89, 2017.

7. А.Ф. Янин, И.М. Дзапарова, В.И. Волченко, Е.А. Горбачева, А.Н. Куреня, В.Б. Петков. Многоканальная измерительная система для сбора данных с матриц из кремниевых фотоумножителей. Измерительная техника, № 3, стр. 8 – 11, 2017.

8. A.S. Lidvansky, V.B. Petkov, D.D. Dzhappuev, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, E.A. Gorbacheva, I.M. Dzaparova, N.F. Klimenko, A.U. Kudzhaev, A.N. Kurenya, O.I. Mikhailova,

M.M. Khadzhiev, A.F. Yanin. Search for diffuse gamma radiation with energy > 100 TeV at the Carpet-3 experiment. PoS(ICRC2017)702

9. M.M. Kochkarov, M.M. Boliev, I.M. Dzaparova, A.N. Kurenya, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.I. Volchenko, G.V. Volchenko, A.F. Yanin. The search for neutrino bursts from supernovae at the Baksan Underground Scintillation Telescope; 36 years of exposure. PoS(ICRC2017)960

10. M.M. Boliev, A.V. Butkevich, I.M. Dzaparova, M.M. Kochkarov, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, P.S. Striganov, V.V. Volchenko, A.F. Yanin. Search for astrophysical sources of muon neutrinos with 38 years of data from the BUST detector. PoS(ICRC2017)943

11. M.M. Boliev, M.M. Kochkarov, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov. Neutron flux measurement using fast-neutron activation of ^{12}B and ^{12}N isotopes in hydrocarbonate scintillators. PoS(ICRC2017)216

12. М.М. Кочкаров, М.М. Болиев, И.М. Дзапарова, Р.В. Новосельцева, Ю.Ф. Новосельцев, В.Б. Петков, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, А.Ф. Янин. Измерение потока нейтронов под землей на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе ИЯИ РАН. ЭЧАЯ, т.49, в.1, с. 168–175, 2018.

13. В.Б. Петков. Изотропный поток нейтрино от взрывов сверхновых звёзд во Вселенной. ЭЧАЯ, т.49, в.1, с. 197–203, 2018.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшими результатами 2017 года при выполнении данной темы являются:

В рамках программы работ по проекту создания на оз.Байкал глубоководного нейтринного телескопа Baikal-GVD с эффективным объемом порядка кубического км, выполнен монтаж и запуск в режиме постоянного набора данных второго кластера детектора в составе восьми гирлянд глубоководных оптических модулей (по 36 модулей на каждой). (ИЯИ РАН, ОИЯИ).

Международной коллаборацией GERDA с участием ИЯИ РАН, КИ, ИТЭФ и ОИЯИ создан детектор нового поколения с ультранизким фоном для поиска безнейтринного двойного бета-распада ^{76}Ge . Об этом успехе опубликована статья в журнале Nature. Получен наилучший верхний предел на время полураспада ^{76}Ge по этому процессу $T_{1/2} > 8 \cdot 10^{25}$ лет.

Получено лучшее в мире ограничение на существование нового типа частицы – стерильного нейтрино – в диапазоне масс 0.1 – 2 кэВ в ИЯИ РАН в эксперименте по поиску стерильных нейтрино в распаде трития на установке Троицк ню-масс.

Работы по проектам данной темы будут продолжены в 2018 году в рамках новой Программы фундаментальных исследований РАН «Физика фундаментальных взаимодействий и ядерные технологии» с координатором Программы ак. В.А.Рубаковым.