



Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

Институт
ядерных
исследований
Российской
академии
наук



Нейтрино и астрофизика частиц

ПРОГРАММА
РАЗВИТИЯ
Института
ядерных исследований
Российской академии наук

Москва
2016

Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

Институт
ядерных
исследований
Российской
академии
наук



Нейтрино и астрофизика частиц

ПРОГРАММА
РАЗВИТИЯ
Института
ядерных исследований
Российской академии наук

Москва
2016

Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

Институт
ядерных
исследований
Российской
академии
наук

Нейтрино и астрофизика частиц

Программа развития
Института ядерных исследований
Российской академии наук



Основные научные
задачи

Сегодняшние
и перспективные
приоритеты

Описания
экспериментальных
проектов

Москва
2016

Содержание

I. Основные научные задачи	
1. Поиски физики за пределами Стандартной модели. Изучение свойств нейтрино	5
2. Исследование взаимодействий частиц при энергиях или в кинематических режимах, недоступных ускорителям	7
3. Мультимессенджерная астрофизика	8
4. Междисциплинарные исследования на стыке с геофизикой	10
II. Сегодняшние и перспективные приоритеты	
	12
III. Описания экспериментальных проектов	
	14

Подготовлена рабочей группой в составе:
Д.С. Горбунов, С.В. Демидов, С.В. Троицкий

Одобрена ученым советом ИЯИ РАН

Фото сотрудников ИЯИ РАН

Введение

Институт ядерных исследований (ИЯИ) РАН является признанным лидером в исследованиях нейтрино и в астрофизике частиц. Интенсивное развитие этих направлений ставит перед институтом новые задачи, решение которых позволит ИЯИ сохранить ведущие позиции в стране и в мире как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Настоящая Программа развития систематизирует информацию об этом круге физических задач, проектах с участием института и перспективах их реализации.

Текст программы состоит из трех разделов. В первом кратко обсуждаются основные направления исследований и физические задачи, актуальные для физики нейтрино и астрофизики частиц и доступные для экспериментальных групп института. Второй раздел представляет собой очень краткий список приоритетных направлений для трех временных диапазонов – 2-3 года, 3-10 лет и 10-20 лет, – на которые рабочая группа рекомендует обратить особое внимание. Сюда вошли ключевые перспективные проекты, реализуемые или планируемые к реализации на площадках института, а также избранные международные эксперименты, в которых ИЯИ может сыграть важную роль. Разумеется, этот список далеко не является исчерпывающим и должен непрерывно обновляться.

Третий раздел содержит подробное систематизированное описание всех представленных в рабочую группу проектов с указанием источников информации. Все эксперименты, упоминаемые в первых двух разделах, описаны в третьем. Описания проектов, подготовленные рабочей группой, согласованы с их лидерами и основными исполнителями. Рабочая группа выражает благодарность всем принявшим участие в составлении и обсуждении настоящей Программы

развития. Это, в частности, сотрудники ИЯИ РАН Н.Агафонова, Е.Алексеев, И.Барабанов, Л.Безруков, В.Гаврин, А.Гангапшев, С.Гниненко, Д.Джаппуев, Ж.-А.Джилкибаев, В.Докучаев, Г.Домогацкий, И.Железных, В.Жуков, Т.Ибрагимова, В.Казалов, А.Копылов, В.Корноухов, В.Кузьминов, А.Лидванский, Б.Лубсандоржиев, Р.Мухамедшин, А.Нозик, В.Петков, Г.Рубцов, О.Ряжская, В.Синев, Ю.Стенькин, О.Суворова, Н.Титов, И.Ткачев, а также В.Баринов (физический факультет МГУ), А.Быков (ФТИ им. Иоффе РАН), Н.Калмыков и Л.Кузьмичев (НИИЯФ МГУ), К.Постнов, М.Пширков и В.Руденко (ГАИШ МГУ), Zhen Cao (LHAASO).

Рабочая группа:

Горбунов Дмитрий Сергеевич, доктор физ.-мат. наук, профессор РАН
Демидов Сергей Владимирович, кандидат физ.-мат. наук
Троицкий Сергей Вадимович, доктор физ.-мат. наук, профессор РАН

I. Основные научные задачи

1. Поиски физики за пределами Стандартной модели. Изучение свойств нейтрино

Стандартная модель физики элементарных частиц, блестяще описывающая результаты ускорительных экспериментов, неполна. Основным лабораторным подтверждением этого факта являются осцилляции нейтрино, возможные только при ненулевой массе этих частиц и нарушающие законы сохранения лептонных чисел. Дополнительные, хотя и не менее важные, указания на неполноту Стандартной модели связаны с астрономическими наблюдениями, прежде всего с наличием темной материи и барионной асимметрией Вселенной. Расширения теории требуют многие обсуждаемые решения ряда проблем тонкой подстройки параметров Стандартной модели. На сегодняшний день предложено много возможных сценариев новой физики, дополняющих и расширяющих Стандартную модель, но ни один из них не является однозначно выделенным на основе экспериментальных данных. Ответы на целый ряд нерешенных вопросов можно получить с помощью исследований в ультранизкофоновых условиях, экспериментов по выяснению свойств нейтрино как искусственного, так и естественного, в том числе внеземного, происхождения. ИЯИ РАН располагает разнообразными возможностями для получения прорывных результатов в этих направлениях.

Целый ряд результатов последних лет можно было бы объяснить, предположив существование, помимо трех известных, четвертого типа нейтрино — стерильного. В частности, подобные указания были получены в завершенных экспериментах по калибровке галлий-германиевых солнечных нейтринных телескопов на Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН и в лаборатории Гран-Сассо (Италия); эти указания получили условное название «галлиевая аномалия». Эксперимент **BEST**, подготовленный

к проведению в БНО, призван проверить эти указания и способен обнаружить сигнал от стерильного нейтрино. Поискам стерильного нейтрино в другой области масс посвящен эксперимент **Троицк-ню-масс**. В рамках того же проекта предполагается дальнейшее уточнение ограничений на массу электронного антинейтрино (на сегодня ограничение, полученное на предыдущей версии установки Троицк-ню-масс, — самое строгое в мире). Исследования аналогичной тематики ведутся в рамках международного проекта **KATRIN**.

Изучению свойств нейтрино и пониманию природы их массы посвящен ряд экспериментов по поиску процессов с нарушением лептонного числа, в частности, проект **поиска двойного безнейтринного бета-распада Mo-100** (БНО) и крупные международные проекты с участием сотрудников ИЯИ — **GERDA** и **AMORE**. Существенные продвижения в понимании природы масс и смешиваний нейтрино возможны с помощью одного из предлагаемых масштабных экспериментов, использующих нейтрино естественного происхождения, — высокоточной модификации Байкальской нейтринной обсерватории, проект **НЕРПА**.

В последние годы все большее внимание уделяется поиску аксионов и аксионоподобных частиц. Это связано, в частности, с появлением ряда астрофизических аномалий, находящихся свое объяснение в моделях с аксионоподобными частицами. В БНО продолжается эксперимент **по поиску солнечных адронных аксионов**, на сегодняшний день поставивший наиболее строгие в мире ограничения на параметры этих частиц. ИЯИ РАН участвует в работе солнечного гелиоскопа **CAST** (CERN Axion Solar Telescope, ЦЕРН), поставившего лучшие в мире ограничения на аксион-фотонную константу связи для широкой области масс аксионов. Ожидается, что на смену CAST придет новый масштабный международный проект **IA XO** (International Axion Observatory); рассматривается не только перспектива участия ИЯИ в этом эксперименте, но и возможность расположения установки в Троицке. Изучаются перспективы поиска аксионоподобных частиц на установке Кольцо (кольцевой лазерный интерферометр – гироскоп Саньяка, —

который планируется установить в БНО в рамках международного эксперимента). В Троицке успешно реализуется пилотный этап эксперимента **HIPEX** по поиску других слабо взаимодействующих частиц, способных формировать темную материю, — фотонов скрытого сектора.

В Байкальской нейтринной обсерватории в экспериментах Байкал-**GVD** и **НЕРПА** можно будет решать задачи поиска частиц и непрямого ограничения различных сценариев темной материи. Поиск гипотетических слабых отклонений от Лоренц-инвариантности возможен с помощью установки **Кольцо**, а также методами гамма-астрономии высоких энергий на других установках, см. пункт 3 ниже. Поиск отклонений от СРТ-инвариантности возможен путем сравнения результатов **BEST** с результатами экспериментов по исследованию свойств антинейтрино.

2. Исследование взаимодействий частиц при энергиях или в кинематических режимах, недоступных ускорителям

Взаимодействия космических частиц с атмосферой Земли или с веществом детектора дают уникальную возможность исследовать их свойства при энергиях в системе центра масс, превышающих энергии крупнейших земных коллайдеров, а также — в том числе и при меньших энергиях — в кинематических режимах, трудных для изучения на ускорителях. Первые открытия новых элементарных частиц были сделаны более 50 лет назад именно при исследовании космических лучей. На сегодняшний день имеются определенные трудности в описании взаимодействий при высоких энергиях, проявляющиеся в первую очередь в несоответствии результатов моделирования каскадных процессов, сопутствующих проникновению энергичной частицы в вещество, с экспериментальными результатами (сюда относятся систематическая разница в восстановлении энергии, а возможно, и состава первичных частиц космических лучей высоких и сверхвысоких энергий разными методами; предполагаемый существенный избыток мюонов по сравнению с моделями; трудно объяснимые корреляции в кинематике продуктов множественного рождения частиц в адронных

взаимодействиях и т.д.). Основным способом решения таких задач может стать максимально точное и многопараметрическое изучение каскадов, возникающих в результате взаимодействия космических частиц с веществом. Целый ряд проектов ИЯИ РАН ориентирован на гибридное изучение различных компонент широких атмосферных ливней (ШАЛ) — это эксперименты **Ковер-2+** и **Андырчи** в БНО (вместе с Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом, **БПСТ**, они могут быть объединены в единую установку с общим триггером, регистрирующую 6 различных компонент ШАЛ), а также крупные международные проекты с участием сотрудников института — **LHAASO**, **Telescope Array**, **TAIGA**, **Памир-XXI**. Разработанные в ИЯИ нейтронные детекторы могут быть использованы и в других подобных экспериментах.

Отдельное место занимают проекты, направленные на кросс-калибровку методов регистрации и исследования космических лучей, применяемых в различных диапазонах энергий. Среди таких проектов с участием или потенциальным участием ИЯИ — **LHAASO**, комплексы установок **Telescope Array**, **TAIGA**, тяжелый спутник **ОЛВЭ**. Непосредственное изучение адронных взаимодействий с помощью космических частиц ведется на установке Тянь-Шань.

3. Мультимессенджерная астрофизика

Техника классической всеволновой астрономии не работает для высокоэнергичного гамма-излучения, и способы детектирования таких фотонов с необходимостью основаны на методах физики элементарных частиц. С другой стороны, происхождение космических лучей, нейтрино и фотонов столь высоких энергий должно изучаться в комплексе, поскольку предполагает ускорение заряженных частиц в источнике излучения. В силу этих двух обстоятельств современная астрофизика наиболее высоких энергий основана на так называемом мультимессенджерном подходе, в рамках которого для решения той или иной астрофизической задачи информация о космических фотонах, нейтрино и заряженных частицах, полученная сходными методами,

используется совместно. Новая эра в мультимессенджерной астрономии началась три года назад, когда в эксперименте IceCube были обнаружены нейтрино высоких энергий внеатмосферного происхождения. Природа и источники этих нейтрино пока остаются неясными, что стимулировало интенсивное развитие направления во всем мире. ИЯИ РАН — головной институт, координирующий выполнение международного проекта **Байкал-GVD**, в рамках которого будет создана нейтринная обсерватория масштаба IceCube в Северном полушарии. Целый ряд экспериментов, регистрирующих ШАЛ, может использоваться для поиска высокоэнергичных гамма-квантов. Сюда относится установка **Ковер-2+** (БНО ИЯИ), которая уже через 1–2 года сможет достичь лучшей в мире чувствительности к потокам диффузного космического гамма-излучения выше 100 ТэВ и дать ответ на вопрос о галактическом или внегалактическом происхождении астрофизических нейтрино высоких энергий. Развивающиеся с участием ИЯИ международные проекты **TAIGA** (Тункинская долина, Республика Бурятия) и **LHAASO** (Китай), а также предлагаемый эксперимент **Памир-XXI** (Таджикистан) смогут детектировать гамма-кванты внеземного происхождения при энергиях порядка 10 ТэВ – 10 ПэВ. В области наиболее высоких энергий при участии коллектива из ИЯИ продолжит работу международный эксперимент **Telescope Array** — вместе с планируемыми расширениями, **TALE** и **TAx4**, он покроет энергетический диапазон от 10 ПэВ до 100 ЭэВ. Новый проект **Эльбрусской гамма-обсерватории** (ЭГО) включает уникальный низкопороговый черенковский гамма-телескоп, который будет работать в диапазоне энергий от 50 ГэВ до 1 ТэВ, и сцинтилляторный детектор ШАЛ с тесным расположением станций (1–100 ТэВ). Таким образом, ИЯИ будет участвовать в экспериментах мирового уровня по поиску и наблюдению астрофизических фотонов с энергиями от 10^{10} эВ до 10^{20} эВ. Чувствительность упомянутых экспериментов для гамма-астрономии приведена на рис. на стр. 24.

Другой аспект мультимессенджерной астрофизики связан с регистрацией нейтрино более низких энергий и гравитационных волн.

тационных волн от коллапсирующих звезд, в частности, от сверхновых типа II. В настоящее время задача регистрации нейтрино соответствующих энергий в режиме ожидания взрыва сверхновой в нашей Галактике или ее ближайших окрестностях решается сотрудниками ИЯИ на Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (**БПСТ**), на Артемовском сцинтилляционном детекторе (**АСД**, Украина) и на установке **LVD** (Гран-Сассо, Италия). В 2016 г. в БНО начинает работать совместный эксперимент **ОГРАН** по регистрации гравитационных волн, чувствительный к тем же событиям. Принципиально новый уровень чувствительности, позволяющий зарегистрировать диффузный фон нейтрино от взрывов сверхновых во всей Вселенной даже при отсутствии событий в нашей Галактике, может быть достигнут в проектируемом **Сцинтилляционном детекторе большого объема** в БНО. Планируется, что этот детектор позволит также детально изучить поток нейтрино от CNO-цикла термоядерных реакций в Солнце.

К классическим задачам нейтринной астрофизики относится мониторингирование основного потока солнечных нейтрино, проводимое на Галлий-германиевом нейтринном телескопе БНО в рамках эксперимента **SAGE**.

4. Междисциплинарные исследования на стыке с геофизикой

Методы физики элементарных частиц уверенно применяются при исследовании астрофизических объектов (соответствующая область знания получила название астрофизики частиц). Новый этап развития междисциплинарных исследований связан с зарождением еще одной области знания, которую можно было бы назвать «геофизика частиц». Среди первых направлений развития этой науки – изучение связи геофизических процессов с характеристиками потока космических частиц и исследование недр Земли с помощью нейтрино.

Исследование потока солнечных нейтрино уже позволило получить непосредственную информацию о внутреннем строении Солнца, недоступную никаким другим наблюдениям. Следующий этап — изучение внутреннего устройства Земли.

Поиск природных потоков нейтрино, образующихся в ядерных реакциях и радиоактивных распадах в центральной части нашей планеты, составляет одну из основных перспективных задач **Сцинтилляционного детектора большого объема** (БНО). Анализ проходящих сквозь Землю нейтрино, как атмосферных, так и ускорительных, может быть использован для ограничения моделей внутреннего устройства планеты с помощью эксперимента **НЕРПА** (Байкал).

В БНО продолжают также исследования **взаимосвязи атмосферного электричества и потоков космических частиц** (в том числе во время гроз), в рамках которых получен ряд интересных результатов. Уникальное географическое положение БНО позволяет использовать штольню для геофизических лабораторий глубокого залегания в непосредственной близости к спящему вулкану Эльбрус (**Северокавказская геофизическая лаборатория**). Разработка акустических методов детектирования нейтрино сверхвысоких энергий связана с новыми методами исследования моря (**НЕСТОР-САДКО**).

II. Сегодняшние и перспективные приоритеты

Приоритеты сегодняшнего дня (2–3 года)

- ♦ открытие стерильных нейтрино (подтверждение галлиевой аномалии) или существенное ограничение их пространства параметров (опровержение галлиевой аномалии) в эксперименте **BEST**;
- ♦ достижение лучшей в мире чувствительности к космическим гамма-квантам с энергиями выше 100 ТэВ (выяснение природы источников астрофизических нейтрино) на установке **Ковер-2+**;
- ♦ продолжение исследований **взаимосвязи атмосферного электричества и потоков космических частиц**.

Среднесрочные приоритеты (3–10 лет)

- ♦ открытие аксиона или исключение астрофизически разрешенной области его пространства параметров в ряде классических моделей в модернизированном эксперименте **по поиску солнечных адронных аксионов** в БНО;
- ♦ создание первого в Северном полушарии эксперимента по детектированию астрофизических нейтрино высоких энергий кубокилометрового масштаба — **Байкал-GVD**;
- ♦ разработка и создание на озере Байкал высокоточной нейтринной обсерватории **НЕРПА** для целей изучения свойств нейтрино и нейтринной геофизики;
- ♦ поиск стерильного нейтрино и уточнение ограничений на массу электронного антинейтрино в эксперименте **Троицк-ню-масс**;
- ♦ участие в крупных международных многозадачных проектах в области космических лучей, **LHAASO** и **Telescope Array**;
- ♦ участие в международном проекте по поиску двойного безнейтринного бета-распада **GERDA**; изучение возможности создания эксперимента **по поиску двойного**

безнейтринного бета-распада Мо-100 на базе БНО ИЯИ РАН.

- ♦ участие в разработке и последующей реализации проекта **Эльбрусской гамма-обсерватории** для достижения лучшей в мире чувствительности к потокам астрофизического гамма-излучения в диапазоне энергий порядка (5–50) ГэВ.
- ♦ эксплуатация и развитие, с возможным увеличением рабочего объема до 2 куб.км, эксперимента Байкал-**GVD**;
- ♦ разработка и создание в БНО нейтринного **Сцинтиляционного детектора большого объема** для решения междисциплинарных задач на стыке физики частиц, астрофизики и геофизики;
- ♦ участие в разработке (и, возможно, последующей реализации) крупного международного эксперимента по поиску солнечных аксионов, аксионоподобных и других легких гипотетических частиц **IAxO**, с возможностью размещения на территории ИЯИ РАН в Троицке.

Долгосрочные приоритеты (10–20 лет)

III. Описания
экспериментальных проектов

Эксперименты на базе
Баксанской нейтринной обсерватории
ИЯИ РАН

BEST	приоритет сегодняшнего дня
Ковёр	приоритет сегодняшнего дня
Космические лучи и электрическое поле Земли	приоритет сегодняшнего дня
Поиск солнечных адронных аксионов в БНО	среднесрочный приоритет
Эльбрусская гамма-обсерватория	среднесрочный приоритет
Поиск двойного безнейтринного β -распада в БНО	среднесрочный приоритет
Сцинтилляционный детектор нового поколения	долгосрочный приоритет
SAGE	
БПСТ	
Андырчи	
ОГРАН	
Кольцо	
Измерение двойного К-захвата	
Северо-Кавказская геофизическая обсерватория	

Эксперименты на базе
Байкальской нейтринной обсерватории
ИЯИ РАН

Байкал-GVD	среднесрочный приоритет долгосрочный приоритет
НЕРПА	среднесрочный приоритет

Эксперименты на площадке
ИЯИ РАН в Троицке

Троицк-ню-масс среднесрочный приоритет
HIPEX

Участие в межинститутских проектах на других площадках
в Российской Федерации

TAIGA
LunaSKA
ОЛВЭ

Участие в крупных международных проектах на зарубежных
площадках

GERDA среднесрочный приоритет
LHAASO среднесрочный приоритет
Telescope Array среднесрочный приоритет
CAST, IAXO долгосрочный приоритет
LVD
ASD
KATRIN
Нестор-Садко
AMoRE
Памир-XXI
Тянь-Шань



Эксперименты на базе Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

BEST

Ковёр

Космические лучи и электрическое поле Земли

Поиск солнечных адронных аксионов в БНО

Эльбрусская гамма-обсерватория

Поиск двойного безнейтринного β -распада в БНО

Сцинтилляционный детектор нового поколения

SAGE

БПСТ

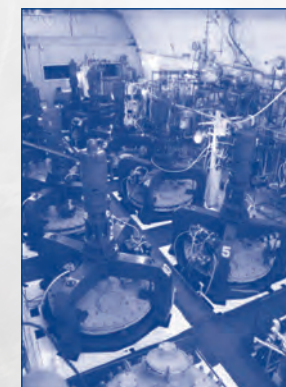
Андырчи

ОГРАН

Кольцо

Измерение двойного К-захвата

Северо-Кавказская геофизическая обсерватория



Baksan Experiment on Sterile Transitions (BEST)

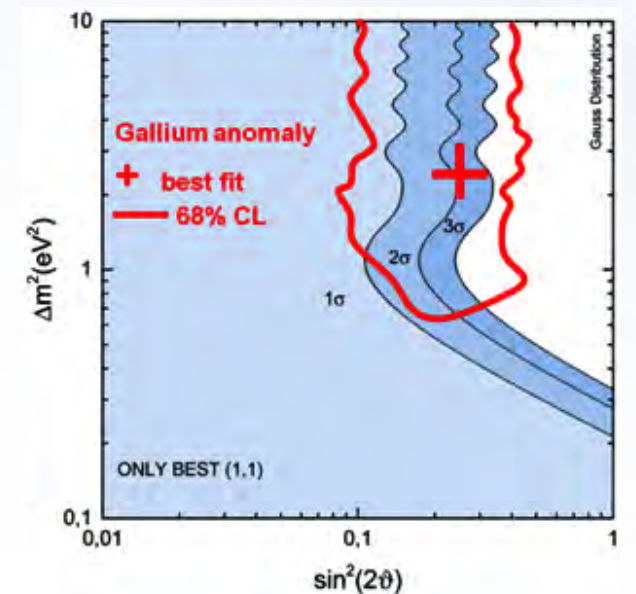
♦ приоритет
сегодняшнего
дня

Физическая
задача

Поиск стерильных нейтрино в осцилляциях электронных нейтрино с короткой базой (порядка 1 метра). Источник нейтрино — искусственно созданный Cr-51 мощностью около 3 MCi. Проверка гипотезы объяснения аномальных результатов галлиевых экспериментов (SAGE, GALLEX), а также, вообще говоря, аналогичных аномалий с реакторными антинейтрино как осцилляции электронных (анти)нейтрино в стерильные.

Обнаружение сигнала стерильных нейтрино — потенциально «нобелевский» результат. Потребуется пересмотра трёхнейтринной осцилляционной модели, планов новых экспериментальных установок, перспектив использования атмосферных нейтрино и геонейтрино для исследования состава Земли, перспектив солнечных нейтрино для изучения состава Солнца.

Необнаружение сигнала (чувствительность к исключению галлиевой аномалии показана на рис.) снимет вопрос аномалии и существенно ограничит пространство параметров стерильного нейтрино, а также позволит несколько уменьшить систематическую ошибку в результатах SAGE и GALLEX, тем самым уточнив поток солнечных нейтрино. Для параметров нейтринного сектора это несущественно, поскольку точности тут определяются результатами других экспериментов. Важность потенциального отрицательного результата для физики Солнца, как и для физики взаимодействия нейтрино с ядрами, пока не исследовалась.



▲ Ожидаемая чувствительность эксперимента BEST на плоскости параметров смешивания гипотетического стерильного нейтрино с электронным нейтрино: независимая проверка галлиевой аномалии

Отметим, что в литературе обсуждается ряд гипотетических сценариев, предсказывающих разные вероятности перехода в стерильные нейтрино для электронных нейтрино и антинейтрино, позволяя тем самым рассматривать галлиевую и реакторную аномалии как независимые. Такое возможно, в частности, при сильном CP-нарушении во взаимодействии стерильного нейтрино с активным (это требует заметного смешивания стерильного нейтрино с мюонным или тау-нейтрино) или при наличии более сложного сектора стерильных нейтрино.

Статус
проекта

На основе личных договорённостей с ведущими учёными (25 человек) из РФ (ИЯИ и ОИЯИ), Японии (2 института), Канады (2 института) и США (10 институтов) сформирована инициативная группа, коллаборация BEST. Формальное превращение в коллаборацию не вызывает сомнений в случае получения основного необходимого финансирования, которое по многим причинам возможно ожидать только со стороны РФ или частного спонсора (финансовые вклады остальных сторон, если и будут, то во вторую очередь, и небольшого размера). Все необходимые технологии для завершения строительства установки известны или почти разработаны. Для завершения проекта (постройка, запуск, последующая обработка данных) достаточно имеющегося коллектива, основа которого — проверенные участники коллаборации SAGE.

Проект представлен на русском языке на сайте ИЯИ, <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, есть английская версия, http://www.inr.ru/rus/bno/best_eng.pdf.

Место, установка,
инфраструктура

Баксанская нейтринная обсерватория, зал ГГНТ. Мотивировка: наличие требуемого количества сверхчистого галлия, люди и опыт SAGE, низкий и хорошо известный фон естественных нейтрино. Создан корпус установки (внешняя и внутренняя камеры), система подачи галлия, система регистрации распадов германия. Требуется завершить создание систем измерения мощности источника (два метода: калориметрический и спектрометрический) и приобрести, обогатить и доставить на установку искусственный источник.

В ИЯИ работу ведут и продолжают участники коллаборации SAGE. Изготовление источника осуществляется сторон-

ними организациями (Росатом). Для выполнения проекта других сотрудников ИЯИ, иных российских или зарубежных институтов, помимо участвующих в коллаборации, не требуется. При этом предполагается, что на участие в других проектах БНО эти сотрудники не отвлекаются.

Более половины участников (хоть пока и формальной) коллаборации — зарубежные учёные из Америки и Японии. В данном случае нет практической необходимости в расширении коллаборации (технология понятна, для реализации проекта, представляется, нужны только финансы).

От момента получения средств на искусственный источник — 2 года на создание и обогащение, потом доставка в зал ГГНТ, загрузка, набор статистики суммарно около 1 года. Поскольку требуется несколько извлечений, то обработка данных идёт фактически параллельно, и окончательный результат может быть получен через 1–2 месяца после завершения набора статистики.

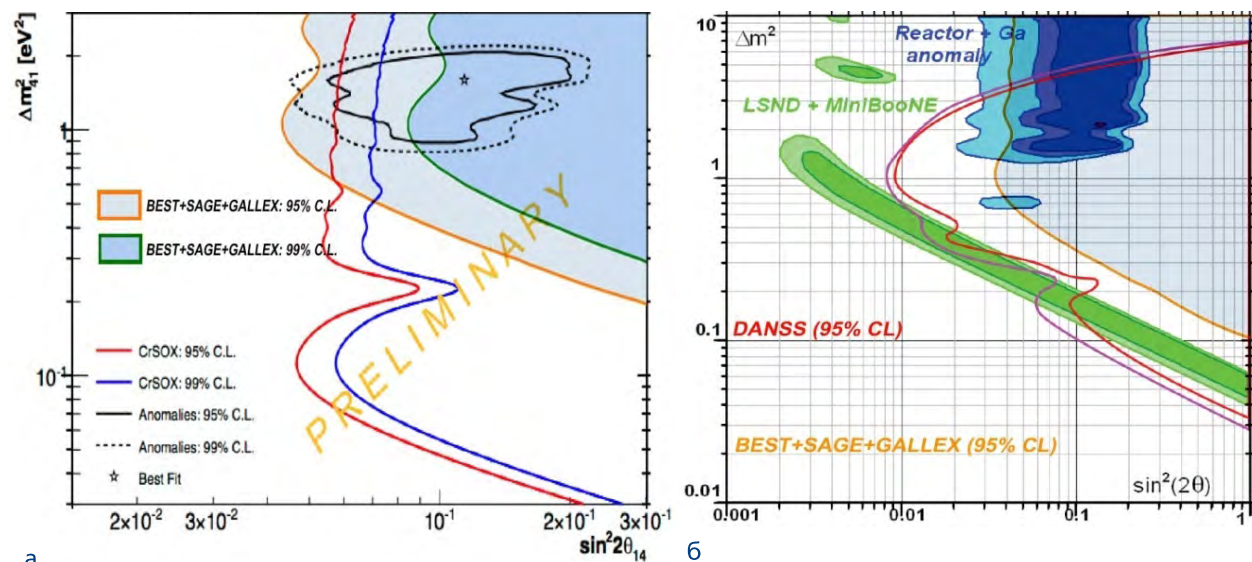
Конкурентами следует считать:

1. Проект CrSOX в GranSasso на базе установки BOREXINO (см. например arXiv:1405.7919) планирует использовать 10 MCi источник Cr-51 (реализация отложена) и 100 kCi смешанного источника Ce-144–Pr-144 (2016 год). Второй вариант не позволяет полностью исследовать всю интересную область параметров. В первом варианте может быть закрыта (почти полностью) область аномального сигнала на уровне достоверности 95%. В интересной области полномасштабный CrSOX и BEST имеют похожие чувствительности, см. рис. на стр. 22 (а), и задача по проверки аномалии может быть решена любым из двух экспериментов с равным успехом. Дополнительно, полномасштабный CrSOX имел бы значительное преимущество в области малых разностей квадратов масс ($< 0.1 \text{ eV}^2$). Однако, на сегодняшний день перспективы реализации полномасштабного (10 MCi) проекта CrSOX неясны.

2. Проект DANSS — измерение потока реакторных антинейтрино под энергоблоком Калининской АЭС на двух разных расстояниях (arXiv:1412.0812) — может начать ра-

Кадры

Время реализации
и конкуренты



а

б

▲ Ожидаемая чувствительность эксперимента BEST к открытию стерильного нейтрино в сравнении с другими экспериментами (а — нейтрино, б — антинейтрино; предполагаются одинаковые параметры смешивания электронных нейтрино и антинейтрино со стерильным)

боту уже в 2016 году и позволит за год перекрыть наиболее интересную область, см. рис. на стр.22 (б). Хотя формально останется неисследованной область больших масс, сверху она закрыта прямыми поисками, например

на установке Троицк-ню-масс, и находится в противоречии с космологией (данные по анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуре Вселенной запрещают дополнительное лёгкое нейтрино с массой выше ~ 1 эВ). Этот эксперимент проверяет реакторную аномалию (антинейтрино) и в этом смысле является комплементарным к BEST, нацеленному на проверку галлиевой аномалии (нейтрино).

3. Проект «Нейтрино-4» в нейтринной лаборатории ПИЯФ при реакторе СМ-3 (см., напр., arXiv:1501.04740) на данной стадии своего развития не составляет конкуренции на ближайшее будущее.

Оценка стоимости

В ценах 2013 года: 180 млн.руб, из которых 154 млн. составляет стоимость источника.

В процессе реализации +600 тыс./год к SAGE на хим.реактивы, +500 тыс.руб./год за услуги по регенерации галлия.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Обнаружение сигнала стерильных нейтрино — потенциально нобелевский результат. Потребуется пересмотра 3-х нейтринной осцилляционной модели, перспектив использования геонейтрино для исследования состава Земли.

Необнаружение сигнала снимет вопрос аномалии, позволит несколько уменьшить систематическую ошибку в результатах SAGE и красиво завершить этот многолетний эпохальный эксперимент. Позволит определить сечение нейтрино на галлии с точностью 3.5-4% .

Возможно участие и параллельное обучение небольшого количества студентов и аспирантов, в особенности на этапе обработки данных, что можно делать удалённо.

Для целей эксперимента уже были разработаны (даже имеются публикации) и будут отлажены новые технологии прецизионного определения интенсивности высокоинтенсивного (более 1 MCi) протяжённого компактного радиоактивного источника.

Описание проекта на сайте ИЯИ РАН: <http://www.inr.ru/rus/bno/best.pdf>, http://www.inr.ru/rus/bno/best_eng.pdf

- [1] V.N. Gavrin, V.V. Gorbachev, E.P. Veretenkin, B.T. Cleveland. Gallium experiments with artificial neutrino sources as a tool for investigation of transition to sterile states. e-Print: arXiv:1006.2103 [nucl-ex]
- [2] K.N. Abazajian et al.. Light Sterile Neutrinos: A White Paper. e-Print: arXiv:1204.5379 [hep-ph]
- [3] V. Gavrin et al. Current status of new SAGE project with ^{51}Cr neutrino source. Phys.Part.Nucl. 46 (2015) 2, 131-137
- [4] V. Barinov, V. Gavrin, D. Gorbunov, T. Ibragimova. BEST sensitivity to $O(1)$ eV sterile neutrino. Phys.Rev. D93 (2016) no.7, 073002.

Из-за серьёзной конкуренции имеет смысл быстрая реализация, для которой есть всё, кроме финансов. От открытия финансирования до получения результата в проекте BEST пройдёт около 3 лет. Конкурирующий эксперимент, работающий с антинейтрино, — DANSS — может начать работу раньше. В предположении одинаковости эффекта для нейтрино и антинейтрино чувствительность DANSS превышает чувствительность BEST. Возможность различия эффектов для нейтрино и антинейтрино требует изучения.



▲ Установка BEST в зале Галлий-германиевого нейтринного телескопа БНО готова к началу работы с источником нейтрино

Источники информации

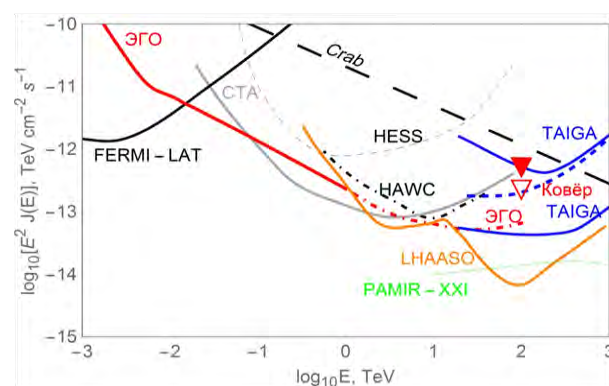
Заключение

Эксперимент Ковер-2 и планируемый эксперимент Ковер-3

♦ приоритет
сегодняшнего
дня

Физические задачи

Эксперимент по регистрации ШАЛ, вызванных первичными частицами в диапазоне энергий $\sim(100 \text{ ТэВ} - 100 \text{ ПэВ})$. Основные задачи — изучение структуры атмосферных ливней и гамма-астрономия выше 100 ТэВ. Ковер работает около 40 лет, представляет собой сплошную решетку сцинтилляторов площадью 200 кв.м. Ковер-2 работает 10 лет, дополнен мюонным детектором 175 кв.м (порог 1 ГэВ для вертикального мюона) на расстоянии 47 м от центра, 6 выносными детекторами и детекторами нейтронов. Мюонный детектор также позволяет выделять и регистрировать адронную компоненту ливня. Для анализа используются ливни с осями, лоцируемыми в центральном Ковре (точность определения оси 0.2 м). Для исследования анизотропии (в т.ч. для поиска точечных источников гамма-излучения) отбираются ливни с осями в круге радиусом 50 м (триггер «Cygnus»). Установлена и отлаживается вторая очередь мюонного детектора. В 2016 г. должен начаться набор данных в промежуточной конфигурации общей



▲ Ожидаемая чувствительность различных инструментов к интегральным потокам гамма-излучения от точечного источника. Реальная чувствительность существенно зависит от положения конкретного источника на небесной сфере

площадью (вместе с первой очередью) 354 кв.м, еще через год площадь будет доведена до 410 кв.м. Оценка показывает, что инструмент в этой конфигурации (Ковер-2+) будет иметь практически нулевой фон для выделения гамма-квантов в ливнях, отобранных по критерию «Cygnus». Планируемый Ковер-3 должен иметь мюонный детектор площадью 615 кв.м и дополнительные выносные детекторы, которые увеличат площадь отбора ливней $> \text{ПэВ}$ до 6000 кв.м. На установке ре-

гистрируются 7 различных параметров ШАЛ, относящихся к различным компонентам ливня.

Результаты Ковра опубликованы, Ковра-2 обрабатываются (частично опубликованы). Запуск Ковра-2+ финансово и кадрово обеспечен. Проект Ковра-3 с оценкой чувствительности в вопросе исследования структуры ливня опубликован.

Баксанская нейтринная обсерватория.

Группа, работающая на БНО (Джаппуев Д.Д., Петков В.Б.). В составе авторов Ковра-3: А.С. Лидванский, В.И. Волченко, Г.В. Волченко, Е.А. Горбачева, И.М. Джапарова, А.У. Куджаев, Н.Ф. Клименко, А.Н. Куреня, О.И. Михайлова, К.В. Птицына, М.М. Хаджиев, А.Ф. Янин. Московская группа (ОТФ и др.) готова помочь в части компьютерного моделирования и анализа данных.

Результаты обработки данных Ковра-2 (175 кв.м) будут опубликованы в 2016 г. Мюонный детектор 354 кв.м установлен и должен начать сбор данных в 2016 г., 410 кв.м — еще через год. Чувствительность установки к фотонам (100-1000 ТэВ) к середине 2017 года должна быть лучшей в мире. С некоторым отставанием похожей чувствительности будет достигать установка TAIGA. Установки LHAASO и Памир будут заметно более чувствительны, но их ввод в эксплуатацию ожидается не ранее 2020 года (рис. на стр. 24).

Обработка данных не требует вложений, но требует доступа к кластеру.

Мюонный детектор 354 кв.м — ресурсы есть.

Мюонный детектор 410 кв.м — 1 млн. руб.

Мюонный детектор 615 кв.м — 30 млн. руб., из которых 20 млн. руб. — стоимость сцинтиллятора (разрабатывается способ обойтись имеющимся в наличии жидким сцинтиллятором).

Выносные пункты — 10 млн. руб.

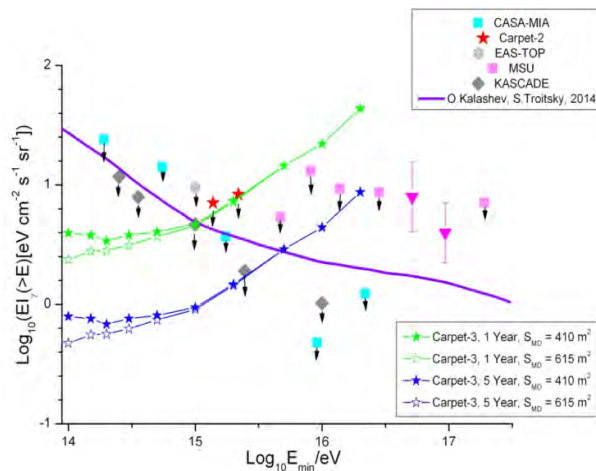
Статус
проекта

Место, установка,
инфраструктура

Кадры

Время реализации
и конкуренты

Оценка
стоимости



Слева: ожидаемая чувствительность эксперимента Ковер к потокам диффузного космического гамма-излучения в конфигурациях с мюонным детектором 410 кв.м и 615 кв.м (зеленые линии — 1 год, светло-синие — 5 лет работы) и предварительные результаты обработки данных с мюонным детектором 175 кв.м (красные звезды) в сравнении с ограничениями из других экспериментов и с предсказаниями одной из моделей галактического происхождения нейтрино IceCube (темно-синия линия)

Вторая очередь мюонного детектора площадью 354 кв.м начнет работу в 2016 г.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Одна из немногих установок ИЯИ, которая способна дать лучшие в мире точности в интересной области через год-два без существенных дополнительных вложений. Ожидаемый результат по фотонам может дать ответ на вопрос о происхождении нейтрино IceCube (во всяком случае, галактические или внегалактические). Установка задействована в междисциплинарных исследованиях на стыке с геофизикой (влияние космических лучей на атмосферные процессы).

Источники информации

J. Szabelski, for the Carpet-3 collaboration. Carpet-3 – a new experiment to study primary composition around the knee. e-Print: arXiv:0902.0252.

D.D. Dzhappuev et al. Search for cosmic gamma rays with the Carpet-2 extensive air shower array. e-Print: arXiv:1511.09397 [astro-ph.HE]

Доклады на летних конференциях 2016 г., например, <https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=72&resId=0&materialId=slides&confId=14253>.

Заключение

Рекомендуется вложить максимальные усилия в скорейший запуск мюонного детектора 410 кв.м и в Монте-Карло моделирование обновленной установки для целей гамма-астрономии. Необходимо с самого начала работы в этой конфигу-

рации сохранять мюонные данные для ливней, отобранных по триггеру Sugnus или аналогичному, а не только с осями в центральном Ковре. Даже один год работы в этом случае может дать лучшие в мире результаты для гамма-астрономии выше 100 ТэВ. После 2017 года можно заниматься мюонным детектором 615 кв.м, который для гамма-астрономии мало что добавит к 410 кв.м, но может быть полезен для изучения структуры ШАЛ и проверки адронных моделей. Затем эксперимент может работать в составе комплексной установки с Андырчи и БПСТ. После запуска LHAASO потребуется существенный пересмотр задач эксперимента.

Изучение связи между вариациями космических лучей и электрическим полем Земли, в том числе во время гроз

♦ приоритет
сегодняшнего
дня

Физическая задача

Наличие измерителей приземного электростатического поля атмосферы и электрического тока дождя позволяет проводить эксперименты по изучению корреляций интенсивности разных компонент космических лучей с величиной возмущенного электрического поля во время гроз. Такого рода данные на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН с использованием установки Ковер накоплены уже в течение многих летних сезонов, и тонкие эффекты влияния электрического поля на космические лучи зарегистрированы впервые. Важным фактором является огромная площадь детекторов, позволяющая с хорошей статистической точностью измерять кратковременные вариации потоков частиц. Кроме этого, обнаружены гораздо более значительные возмущения мягкой компоненты перед некоторыми разрядами молний. Это свидетельствует об ускорении электронов грозовыми облаками и фактически является первым подтвержде-



▲ Атмосферный электрический разряд нового типа, зарегистрированный удаленной камерой над Баксанским ущельем. Такие разряды сопровождаются изменением потоков частиц, регистрируемых установками БНО

нием т.н. теории пробоя на убегающих электронах. В последнее время показано, что возмущения интенсивности вторичных космических лучей во время гроз иногда сопровождаются геомагнитными пульсациями. Анализ этих событий позволил выдвинуть гипотезу о существовании нового типа медленного пробоя между верхом грозового облака и ионосферой. Для проверки этой гипотезы в настоящее время создан удаленный (75 км) пункт наблюдения за областью грозы над Баксанским ущельем, оснащенный видеокамерами. Эти данные пока уникальны, а само

это направление исследований является многообещающим. Мониторирование электрического поля атмосферы само по себе достаточно важно, а взаимное влияние этого поля и космических лучей позволяет изучать фундаментальные геофизические процессы в атмосфере.

В работе.

В ближайшие 3–5 лет планируется:

1. Организация непрерывных измерений фонового приземного электрического поля и видеорегистрации области атмосферы над БНО в удаленных пунктах на больших расстояниях (до ~100 км).
2. Организация прецизионных измерений вариаций магнитного и электрического полей в подземных условиях, на глубине порядка 1 км от поверхности земли.
3. Разработка теории медленно текущего пробоя атмосферы, во время гроз, убегающими электронами. Анализ следствий, их количественная оценка и экспериментальная проверка.
4. Развитие теории определения электрической напряженности в глубине атмосферы по измерениям вариаций вторичных частиц космических лучей на уровне земли и вариаций приземного поля. Организация, на базе экспериментальных данных, непрерывного анализа электрического состояния стратосферы. Исследование корреляций возмущения электрического поля в стратосфере с другими природными явлениями.

Баксанская нейтринная обсерватория, имеется удаленный (75 км) наблюдательный пункт. Используются также данные установки «Ковер», позволяющей детектировать как мюонную компоненту космических лучей (при нескольких энергетических порогах), так и мягкую компоненту (электроны, позитроны и гамма-кванты).

Проект реализуется на базе БНО, лаборатории подземного скинтилляционного телескопа БНО и лаборатории лептонов высоких энергий ИЯИ РАН. Ведется сотрудничество с Институтом физики Земли и ИЗМИРАН.

Статус проекта

Место, установка
и инфраструктура

Кадры

Время реализации и конкуренты	Центр Исследования Космической Погоды (Арагац, Армения) и Ереванский физический институт. В частности, ими недавно изучались корреляции фотонов, электронов [5] и мюонов [6] от космических лучей с грозовыми явлениями.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Данный проект является по сути мультидисциплинарным и, возможно, требует сотрудничества и объединения усилий с другими научными учреждениями, специализирующимися на изучении атмосферного электрического поля.
Источники информация	[1] Отчет Н.С.Хаердинова на отчетной конференции БНО ИЯИ РАН, 2015 г. [2] Канониди К.Х., Куреня А.Н., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. Комплексное исследование энергичных процессов в грозовых облаках, Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 730. [3] Канониди К.Х., Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. Вариации космических лучей во время гроз и новые геофизические эффекты, Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 733. [4] Лидванский А.С., Хаердинов М.Н., Хаердинов Н.С. Характерное электрическое состояние грозовой атмосферы из данных по вариациям космических лучей. Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 5. С. 736. [5] Chilingarian A., Hovsepyan G., Kozliner L. Thunderstorm ground enhancements: gamma ray differential energy spectra. Physical Review D – Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. 2013. Т. 88. № 7. С. 073001. [6] Karapetyan G.G. Variations of muon flux in the atmosphere during thunderstorms. Physical Review D – Particles, Fields, Gravitation and Cosmology. 2014. Т. 89. № 9. С. 093005.
Заключение	Необходимо продолжать исследования и активнее публиковать их результаты в международных журналах.

Поиск солнечных адронных аксионов в БНО



Поиск резонансного поглощения солнечных адронных аксионов ядрами Kr-83, рассматривается возможность использования Fe-57.

Аксион—гипотетическая частица, предложенная для решения сильной CP-проблемы квантовой хромодинамики. Экспериментальные ограничения сверху на электрический дипольный момент нейтрона на 10 порядков величины меньше ожидаемого аномального вклада сильных взаимодействий в эту величину. Масса аксиона по порядку величины равна отношению квадрата масштаба сильных взаимодействий и физического масштаба модели. Взаимодействия аксиона с остальными частицами Стандартной модели (СМ) обратно пропорциональны этому масштабу, при этом есть некоторая модельная свобода в константах взаимодействия с электронами и фотонами (1–2 порядка величины). В результате при фиксированной массе аксиона существует интервал (1–2 порядка величины) эффективной константы связи аксиона с данной частицей СМ, исследование которого позволит открыть/закрыть аксион с данной массой.

Аксионы могут рождаться в Солнце при переходе возбуждённых ядер Kr-83 в основное состояние, при этом излучение будет происходить из всего объёма звезды. На Земле поиск таких аксионов осуществляется в обратном (резонансном) процессе. Имеется неопределённость в предсказании концентрации криптона солнечной моделью.

Новая область деятельности для БНО ИЯИ РАН, хотя ИЯИ участвует в эксперименте CAST (ЦЕРН) по поиску солнечных аксионов. Международный проект, собраны участники из 6 институтов (ИЯИ, ПИЯФ, 2 из Украины, 2 из Кореи).

Физические задачи

Статус проекта

Получено лучшее в мире ограничение на массу адронного аксиона $m < 100$ eV (предыдущий предел на аксион подобного типа $m < 145$ eV принадлежал участникам группы из ПИЯФ). Результат опубликован в реферируемом журнале. Ведётся исследование вопроса об усовершенствовании установки (два варианта).

Набор статистики происходит автоматически, в этом режиме не требуется присутствие людей на установке. Обработку также можно осуществлять в удалённом режиме, однако пока не налажена передача данных из лаборатории «наружу», перенос данных осуществляется через жёсткий носитель.

Место, установка, инфраструктура

Баксанская нейтринная обсерватория, зал низкофоновых исследований, что очень существенно для данного типа поисков.

Исследование нового обогащённого образца позволит за год набора статистики усилить предел до $m < 75$ eV. Результат ожидается через 1–1.5 лет. Увеличение образца в два раза позволит за это же время получить чувствительность на уровне $m < 50$ eV.

Дальнейшее продвижение предполагает переход к Fe-57, 108 г которого даст возможность дойти до действительно интересной для аксиона Печчеи—Куин и ещё не исследованной области и поставить предел $m < 5.6$ eV (на основе оценок, предоставленных группой). С учётом зависимости интенсивности сигнала от массы как $1/m^4$ это предполагает увеличение чувствительности в 10^4 раз. Чтобы это сделать, потребуется модифицировать установку и купить обогащённый образец.

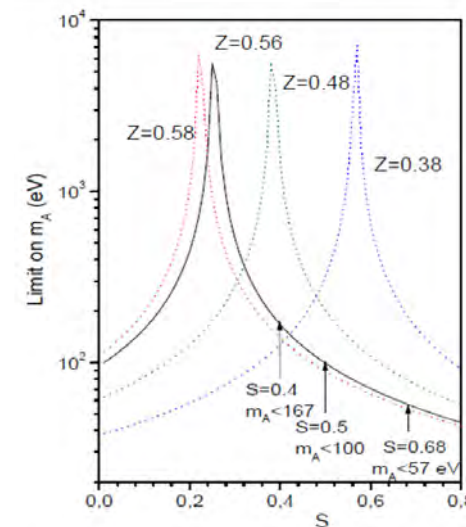
Кадры

От ИЯИ участвует группа Лаборатории низкофоновых исследований (конкретно 7 человек). Реально на эксперимент уходит $\sim 1/8$ часть всего времени. Также существенно участие имеющей богатый опыт поиска аксиона группы сотрудников ПИЯФ.

Время реализации и конкуренты

Первая стадия требует набора статистики 1–1.5 года.

Вторая стадия — технология пока не подтверждена.



Полученные в эксперименте БНО ограничения сверху на массу адронного аксиона в зависимости от параметров модели



Экспериментальная установка по поиску аксионов в низкофоновой лаборатории БНО

Прямыми конкурентами можно считать:

1. IAXO, если его одобрят, сможет существенно ограничить аксион-фотонную константу, связанную с адронной модельно-зависимым образом. Однако даже этот эксперимент (в продолжительной перспективе) не закроет полностью область масс адронного аксиона порядка 5 эВ.

2. Другие эксперименты по ограничению аксион-адронной константы: группа ПИЯФ (Дербин и др.), эксперимент с тулием, перспективы пока не чёткие.

В ценах 2014 года: стоимость эксперимента с обогащённым образцом ~ 3 млн.руб.

Сейчас 1л (3,7 г) обогащенного криптона (99.9% Kr-83) стоит ~ 35 т.р.

Второй вариант — технология не отлажена, получен грант РФФИ на R&D.

Годовой бюджет ЛНФИ 26 млн.руб. (все расходы: от зарплаты до воды), на аксионы примерно 3 млн. (очень условно — по оценке человеко-часов).

Уже полученные результаты, хотя и являются лучшими в мире в части ограничения аксион-адронной константы, для стандартного аксиона не очень интересны, так как эта область масс закрыта из изучения других взаимодействий

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи

аксиона. Только второй вариант эксперимента будет интересен для этой модели, однако вся область до 1 эВ закрыта из космологии. Замечательно, что пока претендентов заглянуть в эту область напрямую нет (IAХО не закроет её полностью), однако область очень узкая, <10 eV (большие массы исключены из астрофизики). В других моделях аксиона соотношение между константами может быть другим, и ограничение адронной константы представляет независимый интерес.

Международный эксперимент, налаживание внутрirosсийских и международных связей. Повышение уровня работы и представления результатов.

Для второго варианта эксперимента нужен пирит как рабочая среда полупроводникового детектора или криогенного детектора. ППД на основе пирита — принципиально новый детектор, и в этом случае масса рабочего вещества может быть существенно увеличена (как в случае с GERDA). На данный момент не найдено работ, где бы пирит был исследован в качестве среды для ППД.

Источники информации

A.V. Derbin et al. New limit on the mass of 9.4-keV solar axions emitted in an M1 transition in 83Kr nuclei. e-Print: arXiv:1501.02944 [hep-ex]
Yu.M. Gavriluk et al. New experiment on search for the resonance absorption of solar axion emitted in the M1 transition of 83Kr nuclei, JETP Letters 101 (2015) 664.

Заключение

Реализовать первую стадию и изучить перспективы второй стадии с выходом в интересную область масс. Подумать над возможными смежными задачами.

Проект ЭГО –
Эльбрусская гамма-обсерватория

◆ среднесрочный
приоритет

Рассматривается возможность устройства высокогорной гамма-обсерватории в отрогах горы Эльбрус. Предлагается объединить в рамках обсерватории два инструмента: систему черенковских телескопов ALEGRO (проект ФТИ им. Иоффе) с порогом 5 ГэВ и пластиковый сцинтиллятор (100 м на 100 м, 2 слоя по 5 см с поглотителем, проект БНО). Цель — гамма-астрономия от 5 ГэВ до 100 ТэВ. Станет возможна кросс-калибровка спутниковых, черенковских и ШАЛ-наблюдений гамма-источников, что позволит построить с большой экспозицией спектры от 0.1 ГэВ до 100 ТэВ. Это нужно для решения целого ряда задач (например, выбор между моделями излучения пульсаров; механизмы ускорения космических частиц; состав джетов активных галактик — лептонный, адронный или смешанный; происхождение диффузного гамма-фона — вклад слабых точечных источников; оценка диффузного гамма-фона в области (1–100) ТэВ; построение кривой блеска длинных гамма-всплесков в ГэВ-диапазоне для определения механизмов излучения и проверки Лоренц-инвариантности; оценка межгалактических магнитных полей; поиск аксионоподобных частиц).

Детали проекта не опубликованы. Проект ALEGRO проработан (в контексте расположения инструмента в Аргентине), имеется моделирование чувствительности, готовятся публикации. Проект сцинтилляционной установки детально не проработан.

Пик Терскол — 17 км от Баксанской нейтринной обсерватории. Там расположена оптическая обсерватория ИНАСАН, астроклимат лучший в Европе. Один из малых телескопов обсерватории принадлежит ИЯИ. Дорога летняя, электри-

Физические задачи

Статус проекта

Место, установка,
инфраструктура



Предполагаемая площадка для размещения Эльбрусской гамма-обсерватории (Ледовая база, 3700 м над уровнем моря). Слева: спутниковый снимок, на котором видна также подъездная дорога; красным отмечен треугольник со стороной около 500 м, в вершинах которого предполагается разместить низкопороговые черенковские телескопы ALEGRO (минимальная конфигурация с 3 телескопами).

Справа: общий вид площадки

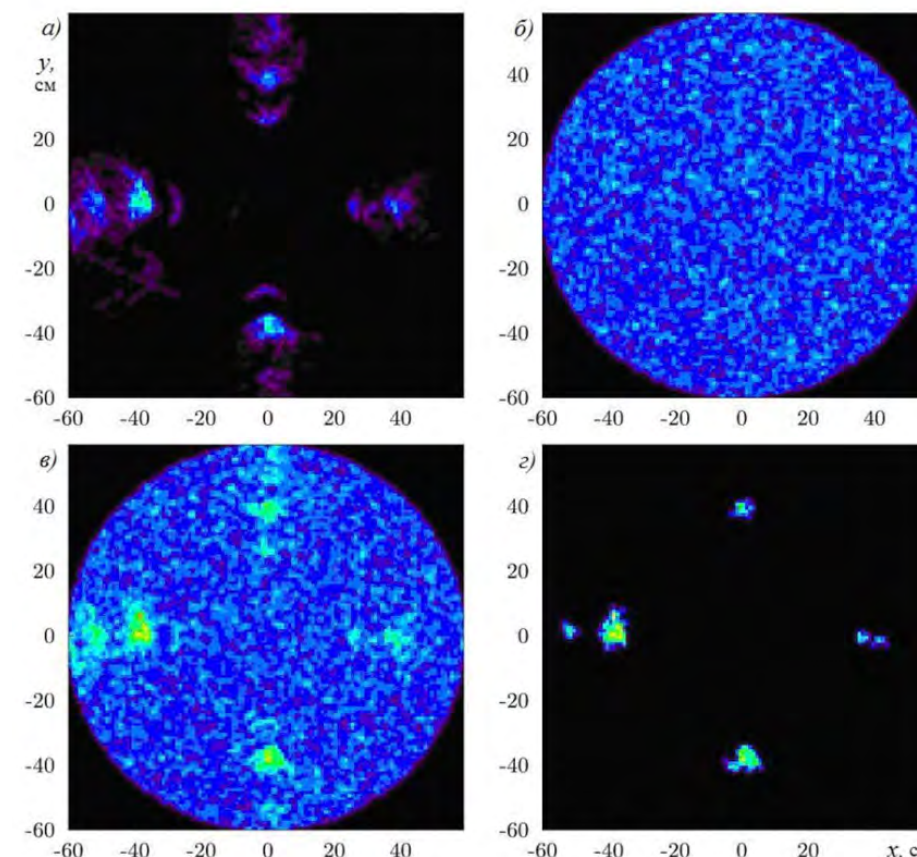
чество есть. Для черенковского низкопорогового проекта существенна высота, поэтому наиболее подходящее место — Ледовая база (3700 м). Туда дорога есть, но требует восстановления.

Кадры

В ИЯИ — В.Б.Петков, С.Троицкий (мотивация). Кроме ИЯИ — А.М.Быков (ФТИ им. Иоффе) и команда проекта ALEGRO, имеющая предварительные договоренности по участию Германии и Армении в случае реализации проекта.

Время реализации и конкуренты

Создание установки займет около 4 лет от начала финансирования, если проект будет к этому времени детально разработан. Конкуренты: для сцинтилляционного детектора — HAWC (чувствительность его будет несколько хуже, но зато он уже запускается), LHAASO (чувствительность лучше выше энергий ~ 20 ТэВ), Памир-XXI (чувствительность лучше выше энергий ~ 10 ТэВ); СТА (чувствительность лучше в диапазоне энергий $\sim (100 \text{ ГэВ} - 20 \text{ ТэВ})$). В области энергий $\sim (5-50) \text{ ГэВ}$ система (ЭГО) — вне конкуренции (см. рис. на стр. 24).



Результаты компьютерного моделирования события, вызванного фотоном с энергией 5 ГэВ, для ALEGRO в конфигурации с 4 телескопами

ALEGRO — 2 млрд. руб. Оценка стоимости сцинтилляционного детектора — 3 млрд. руб. Финансирование RnD проекта ALEGRO рекомендовано Межведомственной рабочей группой экспертов по приоритетам развития наземных астрономических инфраструктурных проектов Российской Федерации на период 2016–2025 гг.

Оценка стоимости

Создание такой гамма-обсерватории в Баксанском ущелье было бы очень полезно для привлечения кадров. Может быть использована в совокупности с набором малых телескопов с широким полем зрения для оперативного поиска транзиентов. Круг научных задач включает задачи на стыке астрофизики и физики частиц.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Презентации проекта на конференциях 2015-2016 гг., например

<https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=73&resId=0&materialId=slides&confId=14253>

Источники информации

Создание гамма-обсерватории мирового уровня в Приэльбрусье можно рассматривать как одну из основных перспективных задач ИЯИ. Этот проект поможет привлечь новые кадры на БНО, развить новое направление междисциплинарных исследований на стыке физики частиц и астрофизики и применить накопленный опыт и квалификацию сотрудников после того, как проекты Ковер и Андырчи потеряют конкурентоспособность. Требуется разработка детального проекта и публикация предполагаемой чувствительности установки в рецензируемых журналах, с целью дальнейшего поиска финансирования.

Эксперимент по измерению безнейтринного двойного бета-распада Mo-100 в БНО

◆ среднесрочный приоритет

Определение природы массы нейтрино (дираковская или майорановская) и ее абсолютной величины является одной из приоритетных задач современной физики частиц. В случае майорановской массы нейтрино имеет место нарушение лептонного числа и возможен процесс двойного безнейтринного бета-распада.

Физические задачи

Пока только идея, основанная на результатах, полученных коллаборацией AMoRE с использованием кристаллов $^{40}\text{Ca-}^{100}\text{MoO}_4$, изготовленных российской компанией ОАО «Фомос-Материалс».

Статус проекта

В работе [1] было аргументировано, что используя сцинтилляционные детекторы на (необогащенных) кристаллах CaMoO_4 с общей массой 54 кг, при рабочих температурах порядка 120 К, можно достичь чувствительности к безнейтринному двойному бета-распаду Mo-100 уровня 10^{24} лет всего за 1 год работы. Если же использовать в этих кристаллах кальций, обедненный по изотопу Са-48 (изотопно-обогащенный изотоп Са-40), то можно добиться чувствительности к этому распаду на уровне 10^{25} лет всего за 1 год работы. Эта группа итальянских исследователей готовится в ближайшее время экспериментально проверить свои аргументы.

Объем, занимаемый сборкой кристаллов CaMoO_4 общей массой 54 кг, заключенных в криостат, составляет всего лишь примерно $D\ 50\text{ см} \times 50\text{ см}$ (Н). Для защиты от внешнего гамма-излучения необходимо использовать свинец толщиной не менее 20 см. Такая детекторная сборка с пассивной защитой легко может быть размещена в одной из существующих низкофоновых камер БНО. Указанная рабочая температура детектора (120 К) обеспечивается применением жидкого азота, который может быть произведен в достаточных количествах

на азотной станции БНО ИЯИ РАН. Т.е. такой эксперимент может быть реализован на БНО.

В России на предприятии ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор» госкорпорации РосАтом (<http://www.ehp-atom.ru/> [2]) имеются запасы кальция, обогащенного по изотопу Са-40 и обедненному по изотопу Са-48 (в количестве примерно 25 кг), которые можно использовать для изготовления кристаллов. Единственное в мире производство изотопа Мо-100 в промышленном масштабе налажено на предприятии ОАО «ПО «Электрохимический завод» госкорпорации РосАтом [<http://www.ecp.ru/>] (существующая производительность примерно 30 кг в год).

Эффективный сбор сцинтилляционного света с кристаллов возможно реализовать с помощью твердотельных детекторов. У сотрудников ряда экспериментальных отделов ИЯИ РАН имеется опыт по использованию таких детекторов.

Место, установка
и инфраструктура

Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН.
Эксперимент не требует большого помещения и поэтому не требует проведения капитального строительства на БНО.

Кадры

Идеология — Корноухов В.Н. Возможна реализация проекта на базе лаборатории низкофоновых исследований ИЯИ РАН. Рост кристаллов можно осуществлять на базе российских организаций – ОАО «Фомос-Материалс» (г. Москва), или ИНХ СО РАН им. А.В. Николаева (Новосибирск).

Время реализации
и конкуренты

Эксперимент АМоRE с планируемой чувствительностью порядка 3×10^{25} лет за 3 года, стартуя с конца 2016 года (АмоRE-10). Другой конкурент — французский проект LUMINEU. Пилотный проект LUMINEU с массой 0.7 кг изотопа Мо-100 запланирован на 2016 г. с чувствительностью 5×10^{24} лет. Пишут о десятикратном увеличении чувствительности при увеличении массы кристаллов, а в далеких планах — дойти до 10^{27} лет.

Оценка стоимости

Основные статьи бюджета эксперимента — закупка изотопа Са-40, обедненного по Са-48, и рост монокристаллов $^{40}\text{СаМоО}_4$. Необходимо примерно 10 кг изотопа Са-40, обедненного по

Са-48. Примерная стоимость 1 г в пересчете на элемент — $40 \div 50$ дол. США, т.е. всего необходимо примерно до 500 тыс. дол. США. Рост монокристаллов СаМоО_4 (включая очистку исходных компонент и синтез шихты $^{40}\text{СаМоО}_4$) — примерно 10 дол. США/г, т.е. всего необходимо до 540 тыс. дол. США. Возможно привлечение финансирования Минобрнауки (выращивание монокристаллов СаМоО_4). Возможны скидки от госкорпорации «РосАтом» на изотоп Са-40 (фактически это «отвалы» при производстве востребованных и очень дорогих изотопов Са-48 и других, требующие только затрат на их выделение из приемников установки разделения СУ-20 и последующей глубокой химической очистки).

Помимо всего прочего — реализация идеи импортозамещения — весь эксперимент можно сделать на основе аппаратуры и материалов, произведенных в России. Загрузка мощностей двух предприятий РосАтома (производство Са-40 и Мо-100, если будет принято решение по использованию обогащенного Мо-100). Загрузка предприятия по очистке кальция и молибдена и синтезу шихты и предприятия по росту монокристаллов СаМоО_4 .

[1] A flexible scintillation light apparatus for rare event searches, Valter Bonvicini, Silvia Capelli, Oliviero Cremonesi, Giacomo Cucciati, Luca Gironi, Maura Pavan, Ezio Previtali, Monica Sisti. **Eur.Phys.J. C74 (2014) 11, 3151**

[2] ФГУП «Комбинат «Электрохимприбор» госкорпорации РосАтом (<http://www.ehp-atom.ru/>).

[3] ОАО «ПО «Электрохимический завод» госкорпорации РосАтом [<http://www.ecp.ru/>]

На первом этапе (помимо того, чтобы убедиться, что идея [1] действительно реализуема) — создание инициативной группы активных сотрудников, заинтересованных в данном проекте.

Значение для ИЯИ
и смежные задачи

Источники
информации

Заключение

Крупномасштабный сцинтилляционный детектор нового поколения массой 10–20 килотонн



Физические задачи

В настоящее время в мировом сообществе активно исследуется проблема регистрации геонейтрино — нейтрино, образующихся в ядерных реакциях в недрах Земли, в частности, от распадов U-238, Th-232 и K-40. Измерения потоков геонейтрино могут дать информацию о внутренней структуре Земли (уточнение основной модели [9] или получение указаний на справедливость альтернативной модели, напр. [10]), процессах, протекающих в ее недрах, о распределении источников радиогенного тепла в глубоких слоях земной коры, мантии и центральных областях Земли и подтвердить или уточнить различные гипотезы о формировании планет. Для регистрации геонейтрино необходимы крупномасштабные сцинтилляционные детекторы нового поколения, размещенные на большой глубине в районах с низким уровнем фона от атомных реакторов. Именно такое географическое положение занимает Баксанская нейтринная обсерватория. Основные задачи: поиск потока геонейтрино — антинейтрино от продуктов распада радиоактивных элементов уранового и ториевого рядов, находящихся во внутренних слоях Земли, проверка гипотезы существования естественного ядерного реактора в центре Земли. Детектирование нейтрино от взрывов сверхновых в нашей и ближайших галактиках и изучение их спектра, а также регистрация потока нейтрино от сверхновых за всю историю существования Вселенной. Сеть таких детекторов позволит установить направление на сверхновую в отсутствие видимого сигнала (см., например, [11–13]). Изучение потока и спектра солнечных нейтрино (в частности, нейтрино от CNO-цикла, недоступных для исследования сегодня из-за недостаточной чувствительности действующих инструментов), проводить поиск осцилляций с короткой базой. Проект предусматривает проведение комплекса научных исследований и разработок,

направленных на создание детектора нейтрино нового поколения на основе сверхчистого сцинтиллятора массой 10–20 килотонн, в том числе введение в эксплуатацию прототипа установки массой около 5–10 т, создание ультранизкофонного гамма-спектрометра для контроля очистки материалов от радиационных примесей до следовых количеств, исследование геологических условий для разработки проектов новых подземных выработок БНО ИЯИ РАН. Данный проект должен обеспечить вхождение Баксанской нейтринной обсерватории в международную сеть геонейтринных детекторов.

Имеется готовый к реализации проект прототипа установки и предварительный проект полномасштабной установки. Ведутся работы по исследованию источников фона в предполагаемом сцинтилляционном детекторе и методам его устранения. В ИЯИ РАН имеется инициативная группа, в которой проводится регулярное обсуждение текущей деятельности. Текущая работа поддержана двумя грантами РФФИ (офи-м).

Статус проекта

Предварительный план по разработке проекта:

- ◆ Проведение всесторонних исследований для выбора оптимальных параметров крупномасштабного низкоронового сцинтилляционного детектора и детектирующей среды, обеспечивающих возможность долгосрочных многоцелевых исследований. Создание для этих целей тестовой установки прототипа детектора массой около 5–10 т в существующих подземных выработках Баксанской нейтринной обсерватории.
- ◆ Измерение концентрации в сцинтилляторе радиоактивных элементов (U-238, Th-232, Ra-226, K, Kr-85).
- ◆ Исследование эффективности очистки сцинтиллятора до требуемого уровня (10^{-16} г/г для U и Th, 10^{-14} г/г для K, <10 мкБ для Kr-85).
- ◆ Измерение потока гамма- и нейтронного излучения в подземной лаборатории БНО и оценка создаваемого этими потоками фона крупномасштабного сцинтилляционного детектора.
- ◆ Расчет необходимой защиты для снижения фона крупномасштабного сцинтилляционного детектора до требуемого уровня.

- ◆ Разработка и создание прототипа системы сбора данных (имеется грант РФФИ офи-м).
- ◆ Исследование возможности создания сцинтилляционного детектора массой несколько десятков тонн с максимально возможным светосбором.
- ◆ Разработка и создание системы хроматографической очистки жидкого сцинтиллятора на базе химического цеха БНО ИЯИ РАН.
- ◆ Разработка и создание система очистки воды до ультранизкого содержания естественных радиоактивных изотопов (урана, тория, калия и др.).
- ◆ Создание ультранизкофоновой гамма-спектрометра.
- ◆ Создание прототипа крупномасштабного сцинтилляционного детектора (5–10 т) для проведения тестовых измерений. Это уже позволит решать такие научные задачи, как исследование содержания радиоуглерода ^{14}C в составе различных сцинтилляторов, и как следствие поиск сцинтиллятора с минимальным его содержанием, а также получение информации о возрасте и происхождении различных месторождений углеводородов.

Место, установка и инфраструктура

Баксанская нейтринная обсерватория, новый комплекс специализированных подземных помещений на месте начатого строительства помещений под Cl-Ar детектор солнечных нейтрино. В изначально предполагаемой конфигурации детектор состоит из трех концентрических зон. Центральная сферическая зона, имеющая диаметр 22.5 м, будет заполнена мишенью — очищенным органическим сцинтиллятором. Следующий сферический слой, толщиной 2 м будет заполнен не-сцинтиллирующей жидкостью (минеральным маслом) для защиты мишени от радиоактивности фотоумножителей. На его поверхности планируется установка фотоумножителей. Последний слой, заполненный водой или таким же маслом, будет просматриваться своими фотоумножителями и использоваться в качестве вето. Расчеты показывают, что ожидаемый сигнал от геонейтрино в предполагаемом месте расположения детектора геонейтрино составляет 55 событий на 10^{32} протонов мишени в год. В то же время фон от действующих атомных реакторов составляет 8.7 событий.

Проектная конфигурация, возможно, будет модифицирована с учетом возможностей выделения сцинтилляционного сигнала.

Необходимо проведение следующих мероприятий:

- ◆ проведение исследования геологических условий с целью создания подземных выработок в БНО для размещения крупномасштабного сцинтилляционного детектора и подготовка на основе результатов этих исследований рекомендации для строительства новых подземных выработок;
- ◆ проведение капитального строительства на месте помещений под Cl-Ar детектор солнечных нейтрино.

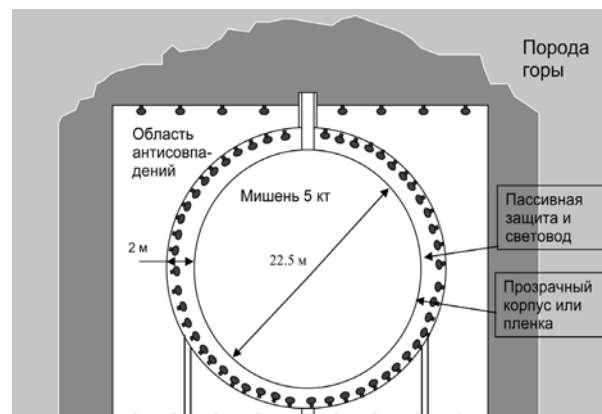
Прототип детектора может быть установлен в имеющейся неиспользуемой полости на расстоянии 2620 м от входа в штольню; рассматриваются и другие варианты.

В случае развития проекта вероятно вовлечение в него значительной части коллектива БНО ИЯИ РАН, а также ряда сотрудников других отделов ИЯИ РАН: Барабанов И.Р., Новикова Г.Я., Синев В.В., Янович Е.А., Гаврин В.Н., Кузьминов В.В., Гангапшев А.М., Петков В.Б., Безруков Л.Б., Домогацкий Г.В. Поскольку проект долгосрочный, для него особенно остро встает кадровая проблема БНО, связанная с недостаточным притоком молодых специалистов, — требуется привлечение новых кадров.

Кадры

В настоящее время измерения потоков геонейтрино ведутся в экспериментах KamLAND и Borexino. Возможности работающих детекторов далеко не исчерпаны, требуется дальнейший набор данных для повышения точности полученных результатов. В то же время, необходимы новые эксперименты с крупномасштабными (~10–20 кт) низкопороговыми детекторами нового поколения, обладающими высокой чувствительностью к природным потокам антинейтрино и расположенными в различных точках Земли. Особый интерес представляют места вдалеке от ядерных реакторов. Так, например, отношение скорости счета геонейтрино к реакторным антинейтрино в диапазоне энергий геонейтрино для эксперимента KamLand составляет

Время реализации
и конкуренты



▲
Один из вариантов модуля полномасштабного детектора

~0.15 [2], для Borexino ~1.1 [3], а для эксперимента в Баксанской нейтринной обсерватории ~5 [4]. Из-за сильной зависимости потока геонейтрино от географического расположения точки наблюдения, изучение радиогенных источников тепла требует измерения потока геонейтрино в разных точках поверхности Земли. Детекторы по регистрации геонейтрино не являются прямыми конкурентами друг другу, поскольку наиболее полное представление о модели и структуре Земли можно получить только с помощью сети континентальных обсерваторий и поскольку сопоставление данных разных детекторов позволит лучше понять глобальное распределение источников радиогенного тепла внутри планеты. Создание сцинтилляционного детектора нового поколения массой 10–20 килотонн в Баксанской нейтринной обсерватории, расположенной вдалеке от ядерных реакторов, обеспечит вхождение России в международную сеть геонейтринных детекторов, в которую могут войти также эксперименты Kamland, Borexino, SNO+, LENA, HANOHANO и другие. Также детектор будет включен в сети SNEWS (SuperNova Early Warning System) и AMON (Astrophysical Multimessenger Observatory Network).



▲
Неиспользуемые выработки в конце штольни БНО, в которых предлагается установка полномасштабного детектора

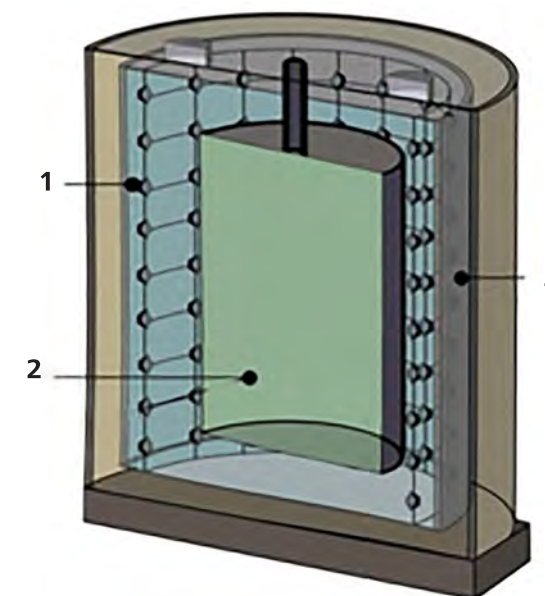


▲
Неиспользуемая полость на расстоянии 2620 м от входа в штольню, где может быть размещен прототип

Сеть геодетекторов позволит дополнительно искать распад протона. В эксперименте Borexino солнечные нейтрино CNO-цикла выделить пока не удастся из-за большого фона, а в БНО фон ожидается на порядок меньше.

Предварительно, 12–30 млрд руб. Сумма будет уточнена в процессе R&D (3 года), необходимого для решения следующих вопросов: 1) создания детектора в виде одного устройства или набора модулей; 2) создание производства жидкого сцинтиллятора в БНО; 3) выбор жидкого сцинтиллятора с низким содержанием ^{14}C ($<10^{-20}$) (подана заявка на грант РФФИ), 4) разработка и создание прототипа системы сбора данных (имеется грант РФФИ офи-м); 5) создание тестового детектора STF_GEO-v; 6) изучение геологии горного массива; 7) создание системы подготовки воды и т.д. Стоимость создания прототипа около 40 млн. руб.

Создание детектора позволит Баксанской нейтринной обсерватории занять одно из лидирующих положений в проектируемой мировой сети нейтринных детекторов нового поколения. Если будут решены отмеченные выше кадровые, организационные и производственные вопросы, это поможет закрепить лидирующие позиции научного коллектива ИЯИ РАН в исследованиях свойств нейтрино и в нейтринной геофизике. Развитие подземных исследований станет важнейшим стимулом для развития инноваций в различных областях науки и техники. Новая подземная лаборатория послужит базой для экспериментов не только астрофизических (исследование нейтринных потоков и поиск частиц темной материи), но также геологии, гидрогеологии, биологии, геоинженерии и в других областях. Из прикладных задач, которые можно будет решать с помощью сети детекторов, следует



▲
Проект прототипа сцинтилляционного детектора
1 — 60 ФЭУ (~20% покрытия);
2 — мишень. В=80 см, Д=60 см (жидкий сцинтиллятор);
3 — водяной бак, В=3 м, Д=3 м

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи

отметить важную для МАГАТЭ задачу контроля работы атомных реакторов.

Источники информации

[1] Проекты прототипа и полномасштабного детектора, доступные на сайте <http://www.inr.ac.ru/~st/geo.html>.

[2] G. Fiorentini, M. Lissia, and F. Mantovani, Phys. Rep., 2007, 453, 117.

[3] G. Fiorentini, A Roadmap for Geoneutrinos, in Workshop on Neutrino Geoscience 2008, SNOlab, Sudbery, Ontario, Canada, Sept. 17–19, 2008 [<http://geonu.snolab.ca/>]; M. Balata, et al., Eur. Phys. J., 2006, C 47, 21.

[4] G. V. Domogatsky, V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, and V. V. Sinev, ЯФ, 2005, 68, 70; V. I. Kopeikin, L. A. Mikaelyan, ЯФ, 2006, 69, 1927.

[5] I. R. Barabanov, G. Ya. Novikova, V. V. Sinev, E. A. Yanovich, arXiv:0908.1466

[6] G. Bellini et al., [Borexino collaboration] Phys. Lett., B722, 295

[7] G. Bellini et al., [Borexino collaboration] Phys. Rev., D89, 112007

[8] M. Wurm et al., [LENA Collaboration], Astropart. Phys., 35, 685, arXiv:1104.5620

[9] A. M. Dziewonski and D. L. Anderson, Phys. Earth Planet. Interiors 25, 297 (1981).

[10] Larin, V. N., ed. C. Warren Hunt. 1993. Hydridic Earth: the New Geology of Our Primordially Hydrogen-Rich Planet. Polar Publishing, Calgary, Alberta, Canada., 247p.

[11] Can a supernova be located by its neutrinos? John F. Beacom, P. Vogel (Caltech). Nov 1998. 10 pp. Published in Phys. Rev. D60 (1999) 03300

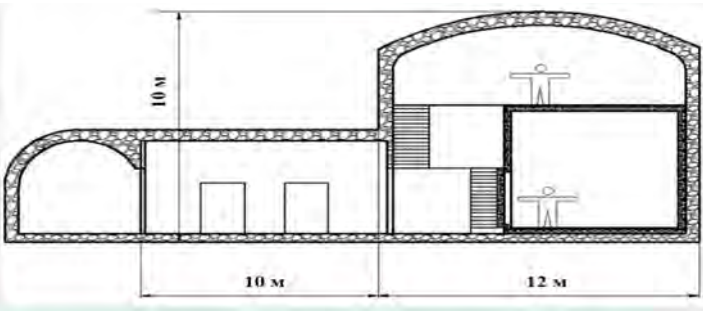
[12] Supernova pointing with low-energy and high-energy neutrino detectors R. Tomas, D. Semikoz, G. G. Raffelt, M. Kachelriess, A. S. Dighe, Published in Phys. Rev. D68 (2003) 093013

[13] Obtaining supernova directional information using the neutrino matter oscillation pattern Kate Scholberg, Armin Burgmeier, Roger Wendell, Published in Phys. Rev. D81 (2010) 043007

Заключение

Реализация проекта очень желательна, поскольку это позволило бы вернуть Баксанской нейтринной обсерватории статус од-

ной из ведущих подземных низкофоновых лабораторий мира. В первую очередь требуется создание группы заинтересованных и активных сотрудников для написания Expression of Interest и Letter of Intent — в процессе (LoI ожидается до конца этого года), а также заняться геологическими вопросами.



▲ Проект лаборатории для размещения прототипа сцинтилляционного детектора

Soviet-American Gallium Experiment (SAGE)

Регистрация pp -нейтрино от Солнца в реакции $\nu + \text{Ga-71} \rightarrow \text{Ge-71} + e$ посредством подсчёта последующих распадов атомов германия. На современном этапе главное — это мониторинг Солнца: из совпадения потока нейтрино с предсказаниями (поправленной на нейтринные осцилляции) солнечной модели, нормированной на современное электромагнитное излучение Солнца, можно заключить, что в пределах ошибки в 15% за последние 50–100 тыс. лет физика Солнца, ответственная за pp -нейтрино, не изменилась.

Известнейший проект ИЯИ РАН, международный проект в области нейтринной физики. Работает около 25 лет (с 1990 г.), усреднённый по 12 месяцам темп захвата определяется с ошибкой 15% (используется для мониторинга солнечного цикла), усреднённый по годам темп известен с точностью 5%, систематическая ошибка несколько (на 20%) больше статистической.

Баксанская нейтринная обсерватория, зал ГГНТ.

В ИЯИ работу ведут и продолжают участники коллаборации SAGE. Участники проекта могут привлекаться к работе по построению новых установок, одновременно продолжая набор статистики и анализ данных SAGE.

Текущий эксперимент.

Конкуренты:

1. Эксперимент GALLEX прекратил свою работу.
2. Эксперимент BOREXINO измерил поток pp -нейтрино с точностью в 4 раза хуже, чем SAGE. На текущей стадии работы BOREXINO ожидается увеличить точность определе-

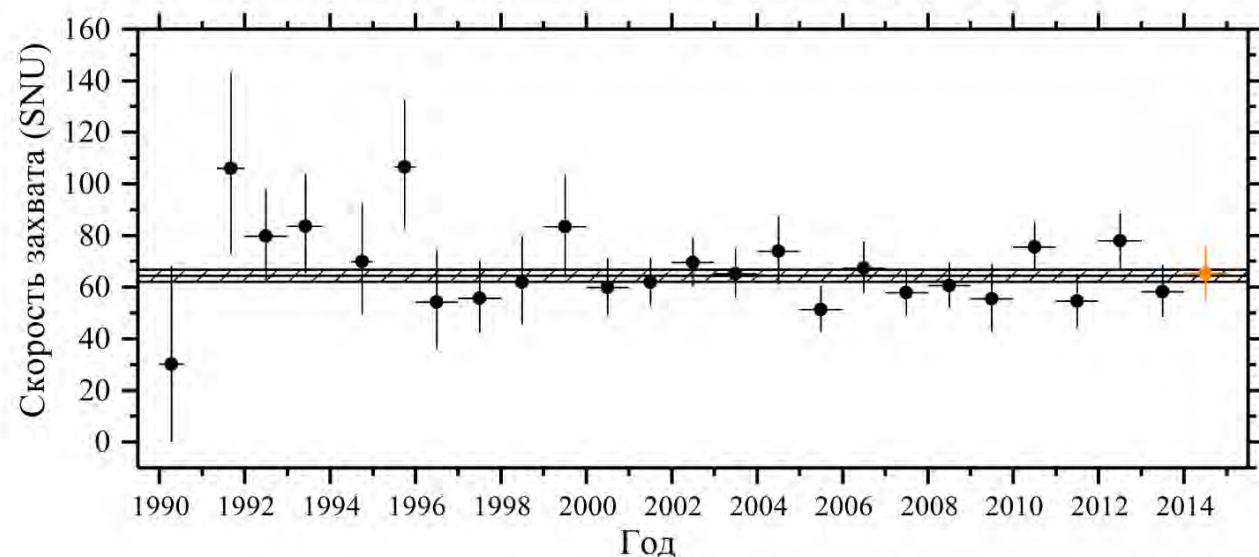
Физические задачи

Статус проекта

Место, установка, инфраструктура

Кадры

Время реализации и конкуренты



▲
Усреднённый по годам поток солнечных нейтрино
по данным SAGE за 25 лет наблюдений

ния нейтрино от всех основных реакций, включая pp , однако даже здесь статистическая точность будет ниже достигнутого SAGE.

3. SNO+ собирается измерять нейтрино pep/CNO циклов. Сейчас никто не мониторит Солнце, кроме SAGE и Borexino.

Оценка стоимости

Электричество примерно 2.5 млн. руб./год.

В ЛГГНТ 51 человек (22 подземные условия работы, 25 наземные условия работы), 103 тыс чел-часов/год, зарплата 12.7 млн.руб./год. Ещё 19 человек в Троицке – итого зарплата 17.6 млн.руб./год. Химреактивы 1.3 млн.руб./год., услуги сторонних организаций по регенерации галлиевой мишени 1 млн.руб./год.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Непосредственно для физики частиц (определения параметров нейтринного сектора) дальнейшее уточнение результатов эксперимента SAGE не представляет интереса, с точностью до прояснения физики аномалии, возникшей при калибровке детектора искусственным источником. Не обнаружение сигнала в эксперименте BEST снимет вопрос аномалии, позволит несколько уменьшить систематическую ошибку в результатах SAGE и красиво завершить этот многолетний эпохальный эксперимент. В то же время, утверждается, что проводимые с 2006 года масс-спектрометрические



▲
Галлий-германиевый нейтринный телескоп (установка SAGE)

измерения изотопного состава извлечений позволят снизить систематическую ошибку с 4.2% до чуть менее 3%

Проект представлен на сайте ИЯИ, <http://www.inr.ru/rus/bno/lggnt.html>

- [1] SAGE Collaboration (J.N. Abdurashitov et al.). Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III: Results for the 2002--2007 data-taking period. Phys.Rev. C80 (2009) 015807.
- [2] В.Н. Гаврин «Российско-американский галлиевый эксперимент SAGE» УФН 181 (2011) 975.

Источники информации

Продолжить эксперимент до получения результатов BEST, после чего принять решение о завершении работы или смене научных задач с учетом результатов BEST и запросов со стороны физики Солнца.

Заключение

Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ)

Физические задачи

Подземный сцинтилляционный детектор нейтрино и мюонов. Основные задачи на сегодня – поиск нейтрино от коллапсирующих звезд (напр., сверхновых II типа) в режиме ожидания; поиск временных совпадений превышения темпа счета с другими детекторами, решающими ту же задачу, например LVD, а также с детекторами гравитационных волн; поиск отклонений от изотропии направлений прихода нейтринных событий, которые указывали бы на астрофизические источники нейтрино (в отличие от фона атмосферных нейтрино). В составе комплекса Андырчи-БПСТ или Андырчи-Ковер-БПСТ (см. «Андырчи») может использоваться для изучения высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ.



Один из ярусов БПСТ

лапсирующих звезд (напр., сверхновых II типа) в режиме ожидания; поиск временных совпадений превышения темпа счета с другими детекторами, решающими ту же задачу, например LVD, а также с детекторами гравитационных волн; поиск отклонений от изотропии направлений прихода нейтринных событий, которые указывали бы на астрофизические источники нейтрино (в отличие от фона атмосферных нейтрино). В составе комплекса Андырчи-БПСТ или Андырчи-Ковер-БПСТ (см. «Андырчи») может использоваться для изучения высокоэнергичной мюонной компоненты ШАЛ.

Статус проекта

Основные результаты опубликованы.

Место, установка, инфраструктура

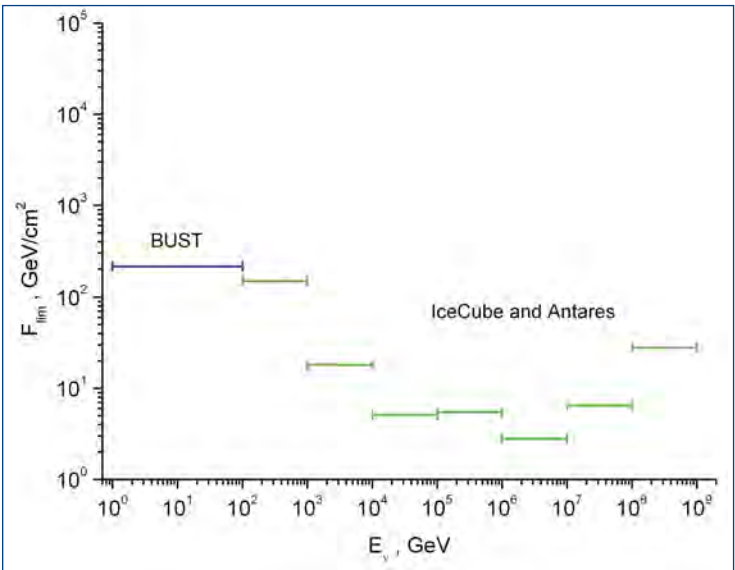
Баксанская нейтринная обсерватория.

Кадры

Группа сотрудников отдела ПСТ; М. Болиев. Есть задачи по интерпретации данных, в которых могут помочь С. Демидов, О. Суворова.

Время реализации и конкуренты

В режиме ожидания сигнала от коллапсирующих звезд работает целый ряд нейтринных детекторов, как специально созданных (LVD), так и многоцелевых (Super-Kamiokande, Borexino и др.). Однако, учитывая уникальный характер



Ограничения сверху на поток нейтрино от слияния черных дыр GW150914, гравитационные волны от которого были открыты в эксперименте LIGO. БПСТ (синяя линия BUST) закрывает область энергий, не исследованную на других установках

возможного наблюдения (вспышки сверхновой), важна информация от каждого дополнительного инструмента.

Проект модернизации БПСТ с добавлением восьми дополнительных плоскостей, заменой всех фотоумножителей на более быстрые и малошумящие, заменой системы регистрации установки и регистрирующей электроники детекторов оценивается в 1 050 млн. руб. Для поддержания работоспособности установки без модернизации вскоре потребуется замена системы регистрации.

Функционирование БПСТ требует значительных трудозатрат и может конкурировать с новыми проектами БНО за кадры. Междисциплинарные задачи — поиск экзотических событий, например, магнитных монополей.

V.B. Petkov. Prospects of the search for neutrino bursts from Supernovae with Baksan Large Volume Scintillation Detector. e-Print: arXiv:1508.01389 [astro-ph.IM]

Доклады на летних конференциях 2016 г., например:

<https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=63&resId=0&materialId=slides&confId=14253>

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Источники информации

Существенная модернизация БПСТ не представляется целесообразной. Функционирование установки в режиме ожидания сигнала от коллапсирующих звезд представляется возможным, если не отвлечет ресурсы и кадры от новых перспективных проектов. БПСТ может стать важным элементом комплексной установки по изучению ШАЛ вместе с Андырчи и Ковром. Выработать наиболее эффективную стратегию мониторингирования вспышек сверхновых с коллапсирующим ядром, которая позволила бы избежать дублирования задач.



Установка Андырчи и проектируемая комплексная установка Андырчи-БПСТ-Ковер

Установка Андырчи — комплекс сцинтилляционных детекторов ШАЛ, расположенный на склоне горы над БПСТ. Основная задача — совместная работа с БПСТ, который используется в данном случае как высокочувствительный детектор мюонов из ШАЛ с пороговой энергией 220 ГэВ. Цель — изучение структуры ШАЛ, вызванных первичными частицами 100 ТэВ–100 ПэВ; проверка моделей взаимодействия. Предлагаемое объединение с установкой Ковер-2, в том числе с установкой дополнительных сцинтилляционных детекторов в зоне между установками (до 1 кв. км), позволит проверять модели адронных взаимодействий и изучать состав первичных частиц в области (10^{16} – 10^{17}) эВ, в том числе с целью ответа на вопрос о максимальной энергии космических частиц, ускоряемых в нашей Галактике. Информация о высокоэнергичных мюонах от БПСТ существенно дополняет характеристики ШАЛ, измеряемые обычными установками. Предлагается также совместная работа с оптическими широкоугольными телескопами на пике Терскол с целью поиска вспышек астрономических объектов в видимом диапазоне, совпадающих по времени с регистрацией высокоэнергичных гамма-квантов.

Физические задачи



▲ Детекторная станция установки Андырчи на склоне одноименной горы

Основные результаты установки опубликованы. Проект комплексной установки не опубликован, ее научный потенциал не моделирован.

Статус проекта

Место, установка, инфраструктура	Баксанская нейтринная обсерватория
Кадры	Примерно та же группа, что и Ковер. Руководитель – В.Б. Петков.
Время реализации и конкуренты	Основной конкурент — IceCube/IceTop. У них порог мюонов 500 ГэВ. Преимущество данного проекта — в наличии разнообразных детекторов в составе Ковра.
Оценка стоимости	Расширение установки — ориентировочно 200 000 руб. за каждый сцинтилляционный детектор площадью 1 кв.м с солнечной батареей. Разумное количество дополнительных детекторов — не менее 30–40 штук.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Работа в составе комплексной установки – одна из немногих интересных задач для БПСТ. Поиск аномальных ливней – новая физика.
Источники информации	[1] A.E. Chudakov, V.B. Petkov, V.Ya. Poddubny, A.V. Voevodsky. Around the knee: Simultaneous surface and underground measurements at Baksan. e-Print: astro-ph/9912192. [2] V.B. Petkov, J. Szabelski. Study of the primary spectrum and composition around the knee at the Andyrchy-BUST experiment. Astrophys. Space Sci.Trans. 7 (2011) 111.
Заключение	Основные задачи, изначально ставившиеся перед установкой Андырчи, решены. Работа в составе комплексной установки потребует около 40 новых детекторных станций, расположенных на территориях ИЯИ у подножья горы (10 станций) и на склонах горы ниже установки Андырчи (10 станций) и выше установки Ковер (20 станций) на расстояниях порядка 100 м друг от друга. Станции (1 кв.м сцинтиллятора, солнечная батарея, беспроводная связь) на склоне горы могут устанавливаться с вертолета. Основная проблема этого проекта – кадровая, потребуется привлечение и обучение новых специалистов (студентов и аспирантов), прежде всего для формулировки физических задач и оценки конкурентоспособности проекта.

Установка ОГРАН (Опτικο-акустическая гравитационная антенна)

Поиск гравитационных волн от коллапсирующих звезд в Галактике и ее ближайших окрестностях. **Физические задачи**

Установка собрана, но не запущена. Имеются публикации. **Статус проекта**

Баксанская нейтринная обсерватория **Место, установка, инфраструктура**

В ИЯИ — формально — Л.Б. Безруков, В.Н. Руденко, ГАИШ МГУ и их команда **Кадры**

Установка смонтирована в 2015 г., однако для достижения требуемой чувствительности нужна дополнительная работа (1–2 года в зависимости от доступности средств). Аналогичные установки **Время реализации и конкуренты**

Nautilus (Frascati) и Auriga (Leguaro) работают в режиме ожидания сверхновой; будут закрыты после запуска Advanced VIRGO. Уровень чувствительности установки существенно уступает LIGO, однако она предоставит дополнительную физическую информацию в случае взрыва галактической сверхновой.



▲ Установка ОГРАН в готовой к работе конфигурации

Существенных вложений со стороны ИЯИ сегодня не требуется. **Оценка стоимости**

Может работать на совпадение с БПСТ. **Значение для ИЯИ и смежные задачи**

Желателен выход на проектную чувствительность до того, как БПСТ перестанет работать. Было бы обидно пропустить взрыв сверхновой. **Заключение**

Проектируемая установка Кольцо

Физические задачи	Большой кольцевой лазерный интерферометр (гироскоп Саньяка). Инерциальный датчик вращательного ускорения лабораторной системы отсчета. Может быть использован как прецизионный инструмент в физике частиц, гравитации, астрометрии и геофизике. Поиск аксионоподобных частиц, нарушений Лоренц-инвариантности и других эффектов, приводящих к двойному лучепреломлению в вакууме.
Статус проекта	Проект не опубликован. Ведется работа над статьей.
Место, установка, инфраструктура	Баксанская нейтринная обсерватория. Требуется заглубление не менее 1 км для подавления фонов. Сотрудничество в рамках ОГРАН. Диаметр кольца 3 метра.
Кадры	В ИЯИ — В.В. Кузьминов, Л.Б. Безруков. Кроме ИЯИ — В.Н. Руденко, ГАИШ МГУ, ИЛФ СО РАН.
Время реализации и конкуренты	7 лет. Существует проект аналогичного эксперимента в Гран-Сассо; ведутся исследования в Германии и в Новой Зеландии.
Оценка стоимости	100 млн. руб.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Мультидисциплинарность налицо. Продолжение сотрудничества после запуска ОГРАН.
Источники информации	Заявки на гранты, предоставленные авторами.
Заключение	Проект реалистичный и интересный, но требуется детальная проработка физической мотивации (в особенности по задачам физики частиц).

Измерение двойного К-захвата

Измерение двойного К-захвата Хе-124. Теоретические предсказания для скорости этого процесса дают большие неопределенности, поэтому данный вопрос необходимо прояснить экспериментально. Это поможет уточнить соответствующие теоретические ядерные модели, используемые в расчетах (см. теоретические работы [3]-[5]).	Физические задачи
В работе.	Статус проекта
Баксанская нейтринная обсерватория. В 2014-2015 гг. были проведены измерения за 1800 часов образца ксенона общим объемом 52 л с обогащением по Хе-124 около 7.5%. Полученное ограничение на период полураспада $5 \cdot 10^{21}$ лет является на настоящее время лучшим в мире. Предсказываемые теоретические значения находятся в диапазоне от 0.4 до 155 на 10^{21} лет. В настоящий момент запланированы двухлетние измерения на имеющемся материале. В принципе, можно купить образец с большим обогащением до 80-90% (цена одного литра с обогащением 80% — около 1000 долларов).	Место, установка и инфраструктура
Проект реализуется на базе лаборатории низкофоновых исследований ИЯИ РАН.	Кадры
Эксперимент XENON — там больше масса природного ксенона (1 т), в котором несколько килограмм Хе-124. Но в отличие от эксперимента на Баксане, в нем не регистрируются характеристические фотоны от двойного К-захвата и оже-электроны. Поэтому, несмотря на большую массу, чувствительность к двойному К-захвату хуже, чем на Баксане.	Оценка стоимости

Время реализации и конкуренты с таким же методом:	Годовой бюджет ЛНФИ 26 млн.руб. (все расходы: от зарплаты до воды), на Хе-124 примерно 3 млн. (очень условно — по оценке человеко-часов). Без стоимости образцов газа.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Измерение скорости двойного К-захвата Хе-124, вероятно, позволит уточнить ядерные модели, используемые при его расчете (см. теоретические работы [3]-[5]).
Источники информации	[1] Отчет ИЯИ РАН о НИР за 2014 год http://www.inr.ac.ru/a/pr/r/r14/r14.pdf [2] Доклад В. Казалова на отчетной конференции БНО ИЯИ РАН. [3] M. Aunola, J. Suchonen "Systematic Study of Beta and Double Beta Decay to Excited Final States" Nucl. Phys. A602, 133 (1996). [4] M. Hirsch, K. Muto, T. Oda, H.V. Klapdor-Kleingrothaus " Nuclear Structure Calculation of $\beta+\beta+$, $\beta+EC$ and EC/EC Decay Matrix Elements" Z. Phys. A347, 151 (1994). [5] O. Romyantsev, M. Urin "The Strength of the Analog and Gamow-Teller Giant Resonances and Hindrance of the $2\nu\beta\beta$-Decay Rate" Phys. Lett. B443, 51 (1998)
Заключение	Проект рекомендуется продолжать.

Северо-Кавказская геофизическая обсерватория

Изучение уровня вулканической и сейсмической опасности Эльбурского вулканического центра. Исследования по поиску надежных предвестников геофизических катастроф для использования их при прогнозе землетрясений и горных ударов.

Физические задачи

В работе.

Статус проекта

В процессе комплексных геолого-геофизических исследований удалось получить ряд важных научных результатов (см., например, [1–4]):

1. В долине реки Баксан в 55 и 72 км к северу от Эльбруса обнаружены отложения 4-х катастрофических лахаров и доказан их голоценовый возраст. В долине реки Малки в 70 км к северу от Эльбруса пока обнаружены следы только одного лахара.

2. Установлены следы катастрофических эксплозивных извержений Эльбруса, сопровождавшихся аэральным переносом пирокластического материала на значительные расстояния. Так, линзовидные горизонты пеплов были обнаружены в позднечетвертичных отложениях в 250 км (Отказненское водохранилище), 420 км (станция Темижбекская) и более 700 км (низовья реки Волга) от Эльбруса. В истоках реки Бийтик-Тюбе (приток реки Кубани) были обнаружены следы землетрясения и по углеродной датировке определено время его проявления.

3. Доказана правомерность использования метода ЭПР датирования по пороодообразующему кварцу и широкая область его применения.

4. Установлены следующие временные этапы (в тыс. лет) активности (включая и эксплозивные) вулкана Эльбрус: 72, 56, 46–47, 39, 28, 23, 17–18, 7.2–7.3, 5.8–5.6, 5.2–5.3, 2.9, 2.6 и в I–II веках н.э.

5. Впервые выделено пять туфовых горизонтов, имеющих площадное распространение и маркирующих эксплозивные извержения, что дает основание для выделения в истории развития вулкана Эльбрус пяти циклов вулканической активности.

6. Результаты проведенных анализов химических составов излившихся последовательных лавовых потоков, вместе с полученными данными об эволюции вулкана за период от верхнего звена неоплейстоцена (~ 72 тыс. лет) и до голоцена включительно, позволяют предполагать, что возможное извержение Эльбруса может начаться с кислых лав и, скорее всего, будет иметь взрывной катастрофический характер.

7. Анализ геологической, геоморфологической и гляциологической обстановок на вулканической постройке позволяет предполагать, что независимо от нахождения эруптивного центра, силы, типа будущих извержений Эльбруса и состава излившихся лав, активность вулкана, несомненно, может сопровождаться образованием катастрофических лаваров и наводнений.

8. При исследовании магматических структур вулкана Эльбрус впервые удалось установить, что магматическая камера и магматический очаг, расположенные в слоистом полупространстве, каким представляется вулканическая постройка, порождают локальные резонансные эффекты.

Место, установка
и инфраструктура

Северо-Кавказская геофизическая обсерватория включает 6 разнесенных геофизических лабораторий, из которых четыре размещены в районе Эльбрусской вулканической активности, в частности в Баксанской нейтринной обсерватории.

Под горой Андырчи в главной штольне БНО ИЯИ РАН на отметках 1500 м и 4000 м от главного входа расположены две лаборатории, в которых приборы работают в условиях пониженного фона. В лабораториях функционируют сейсмические, наклономерные, магнитовариационные, тепловые и геоакустические станции, магнитометры индукционные, стационарные гравиметры и вспомогательное научное оборудование, обеспечивающие контроль необходимых параметров (температура, давление, время и т. д.). Все информационно-измерительные аппаратурные ком-

плексы, установленные в полномасштабных геофизических лабораториях, относятся к уникальным прецизионным приборам.

Планы на будущее.

В настоящее время Кавказский регион сильно отстает в степени изученности от других сегментов Альпийско-Гималайского пояса. Поэтому создание специализированного центра международного класса по изучению и мониторингу современных тектоно-магматических процессов в регионе позволит вывести и утвердить российскую науку в числе лидеров по изучению континентальных зон коллизии. В практическом плане создание такого центра позволит максимально учесть влияние опасных геологических процессов и связанных с ними природных рисков на окружающую среду, которые могут повлиять на уровень устойчивого развития региона. В настоящее время подобные организации на Северном Кавказе отсутствуют, что негативно влияет на перспективы развития региона.

Реструктуризация действующих наблюдательных центров и создание единой обсерватории с целью проведения комплексного исследования процессов геодинамики, новейшего вулканизма и сейсмичности на Северном Кавказе, а также проведение работ по оценке и мониторингу опасных природных и природно-техногенных явлений (оползней, селей, эрозионных и эндогенных процессов) позволит: разработать новую, отвечающую мировому уровню научных исследований в данной области, методологию изучения строения сейсмоактивных структур, позволяющей определить уровень сейсмической опасности и выполнить оценку возможных последствий природных катастроф; развернуть новое поколение системы сбора, хранения, оперативного анализа геофизической научной информации с организацией международного доступа к результа-



▲
Геофизическая лаборатория в штольне БНО
в 4 км от входа

там исследований, что позволит выполнить паспортизацию рекреационных территорий Северного Кавказа; создать интерактивную базу данных по результатам непрерывного инструментального мониторинга геофизических процессов, представляющую интерес для специалистов по чрезвычайным ситуациям, в том числе МЧС России; разработать методику и методические материалы с выходом на технологию геологоразведки геофизическими методами; создать технологию комплексного мониторинга геолого-геофизических процессов на территории Северного Кавказа.

Результаты проведенных исследований будут использованы в задачах прогнозирования условий формирования и протекания геолого-геофизических процессов. Полученные материалы будут использованы соответствующими государственными органами, учебными заведениями и научными учреждениями для решения задач современной геофизики.

Кадры

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова».
2. Федеральное государственное учреждение науки Институт физик Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.
3. Федеральное государственное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии.
4. Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований Российской академии наук.
5. Федеральное государственное учреждение науки Институт географии Российской академии наук.
6. Федеральное государственное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук.
7. Геофизическая служба Российской академии наук.
8. Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета.
9. ООО «Космические и энергоэффективные технологии».

Непрерывный мониторинг, конкурентов нет

**Время реализации
и конкуренты**

Финансирование со стороны ИЯИ РАН не требуется.

Оценка стоимости

Возможность предсказывать землетрясения и состояния вулканической активности является одной из наиболее важных составляющих обеспечения безопасности граждан РФ.

**Значение для ИЯИ
и смежные задачи**

[1] Маловичко Д. А., Шулаков Д. Ю., Туснин А.Н. Результаты микросейсмических наблюдений в штольне Баксанской нейтринной обсерватории // Проблемы мониторинга природных процессов на территории Северного Кавказа. М. : РООУППГ, 2007. С.55–66.

[2] Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Каширгова Р.Р., Долов С.М. Современное состояние сейсмического мониторинга в Кабардино-Балкарии // Сейсмические приборы. 2011а . Т. 47, №4. С.5–22.

[3] Маловичко А.А., Бутырин П.Г., Верховланцева Т.В., Верховланцев Ф.Г. Шулаков Д.Ю. Результаты микросейсмических наблюдений на территории Баксанской нейтринной лаборатории // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы . Обнинск: ГСРАН, 2012. С.169–174.

[4] А.А. Маловичко, И.П. Габсатарова, Д.В. Лиходеев, А.С. Заклюковская, Д.А. Преснов, Развитие системы разномасштабного сейсмического мониторинга в районе вулкана Эльбрус, Сейсмические приборы 50 (2014) 47–57

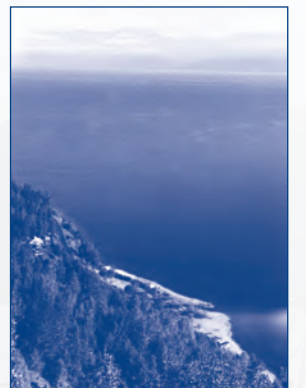
**Источники
информации**

Рекомендуется продолжать; от ИЯИ ничего не требуется, кроме предоставления места.

Заключение

Эксперименты на базе Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН

Байкал-GVD
НЕРПА



Байкальский Глубоководный Нейтринный Детектор (Baikal-GVD)

◆ среднесрочный приоритет

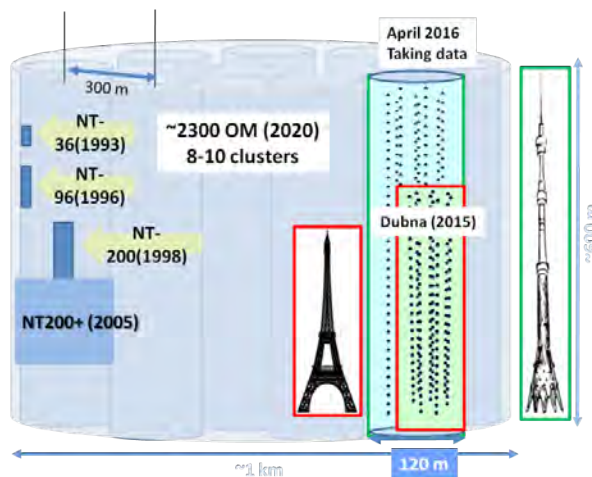
◆ долгосрочный приоритет

Нейтринная астрономия высоких энергий, поиск нейтринно астрофизического происхождения, поиск локальных источников нейтрино высоких энергий, поиск источников нейтрино внегалактического происхождения, измерение или получение ограничений на нейтринные потоки от потенциальных источников космических лучей сверхвысоких энергий. Потребность в телескопах, расположенных как в Южном, так и в Северном полушариях, обусловлена зависимостью их угловой апертуры от энергии нейтрино. В области энергий ниже ПэВ, в силу высокого уровня фоновых событий от атмосферных мюонов, выделение нейтринных событий возможно лишь для нейтрино из-под горизонта. В области энергий выше ПэВ фон от атмосферных мюонов становится приемлемым для регистрации нейтрино сверху, однако, для нейтрино таких энергий Земля является непрозрачной, и апертура телескопа оказывается ограниченной для событий снизу. Детекторы, расположенные в Северном полушарии, обладают важным преимуществом — они способны вести практически непрерывное наблюдение области вокруг в районе центра Галактики (Baikal-GVD — 18 часов в течение суток для нейтрино из под горизонта), наиболее густо заселенной потенциальными источниками галактических космических лучей высоких энергий (пульсары, остатки сверхновых, тесные двойные системы и т.д.), включая сверхмассивную черную дыру в центре Галактики.

Техническая сторона: Во время зимней экспедиции 2015 года был полностью развернут и запущен в эксплуатацию в режиме долговременного набора данных глубоководный нейтринный телескоп “Дубна” — демонстрационный кластер нейтринного телескопа Baikal-GVD, — содержащий

Физические задачи

Статус проекта



▲ Сравнительные размеры Байкальского нейтринного телескопа в прошлых, действующей и будущей конфигурациях

192 фотодетектора, смонтированных на 8-ми гирляндах, расположенных на глубине 900–1250 м. В 2016 г. кластер доведен до проектной конфигурации, содержащей 288 фотодетекторов на глубине 750–1250 м в оз. Байкал. В последующем планируется создание еще одного кластера в 2017 г. и двух кластеров в 2018 г., — всего 4 кластера с суммарным эффективным объемом 0,24 км³. К концу 2020 г. планируется установить еще 4 кластера, в результате чего объем Baikal-GVD достигнет 0,4 км³ и сравняется с эффективным объемом IceCube в задаче регистрации астрофизических нейтрино по ливневой моде. В планах — дальнейшее ежегодное наращивание объема телескопа на 0.2 км³ после 2018 г. с целью создания нейтринного телескопа объемом до 2 км³ на оз. Байкал к 2025 году.

Обработка данных: В настоящее время основные усилия в работе, связанной с обработкой данных, сосредоточены на разработке и реализации эффективных процедур мониторинга и калибровки измерительных систем телескопа, а также в реализации автоматизированной процедуры первичного анализа данных и подготовки банка качественных событий для последующего анализа по программам научных исследований. Наблюдаемая задержка в реализации этих задач связана как с последовательной доводкой электроники измерительной системы телескопа, влекущей за собой изменения процедур калибровки и первичного анализа данных, так и с явной недостаточностью числа научных сотрудников, участвующих в этих работах. К настоящему моменту написаны программы реконструкции событий.

Место, установка и инфраструктура

Нейтринный телескоп Baikal-GVD устанавливается рядом с действовавшим с 1998 г. по 2003 г. телескопом NT200/NT-200+ в Южной котловине озера Байкал в районе 106 км Кругобайкальского участка Восточно-Сибирской железной дороги (КБУ ВСЖД) в 4 километрах от берега на

глубине 750–1250 м. Телескоп будет состоять из независимых кластеров, каждый кластер состоит из 8 вертикальных подводных станций с гирляндами из 36 оптических модулей (ОМ), подсоединенными к несущему кабель-тросу. Расстояние между ОМ по вертикали — 15 м, между гирляндами — 60 м. Гирлянда состоит из 3 секций по 12 ОМ, в каждой секции размещаются центральный и служебный модули с электронными системами электропитания, управления, сбора и передачи данных. В состав кластера также включена гидроакустическая система определения координат ОМ, системы калибровки и синхронизации регистрирующей системы, отдельная станция с оборудованием для непрерывного, длительного мониторинга оптических и гидрологических характеристик водной среды озера Байкал.

Уникальной характеристикой телескопа Baikal-GVD при сравнении с нейтринным телескопом IceCube является его высокое угловое разрешение при определении направления движения нейтрино. Нейтринные телескопы, планируемые к разворачиванию в Средиземном море, и телескоп Baikal-GVD будут обладать сравнимыми характеристиками при решении задач нейтринной астрономии и астрофизики. Детекторы IceCube, Baikal-GVD и средиземноморские детекторы объединены в глобальную сеть GNO (Global Neutrino Observatory), соглашение о создании которой подписано в 2013 году всеми этими коллаборациями.

Крайне необходимо развитие инфраструктуры Байкальской нейтринной обсерватории с целью формирования условий для ежегодного наращивания объема телескопа на 0.2 км³ после 2018 г. и создания нейтринного телескопа объемом до 2 км³ на оз. Байкал к 2025 году. Необходимо создание в Москве и в Дубне расширенного производства оптических и электронных модулей (с мощностью примерно 650 модулей в год), модернизация берегового центра и технического стационара Байкальской нейтринной обсерватории.



▲ Сборка детектора во время зимней экспедиции 2016 г.

Уже имеется сформировавшаяся коллаборация составом около 70 человек в основном из ИЯИ (Домогацкий Г.В., Джилкибаев Ж.М. Айнутдинов В.М. и др.), ОИЯИ (Белоплатников И.А., Бруданин В.Б. и др.), НИИЯФ, Иркутского ГУ, Нижегородского ГТУ. В 2015 г. в состав коллаборации вошли Comenius University (Словакия) и Чешский технический университет (Чехия).

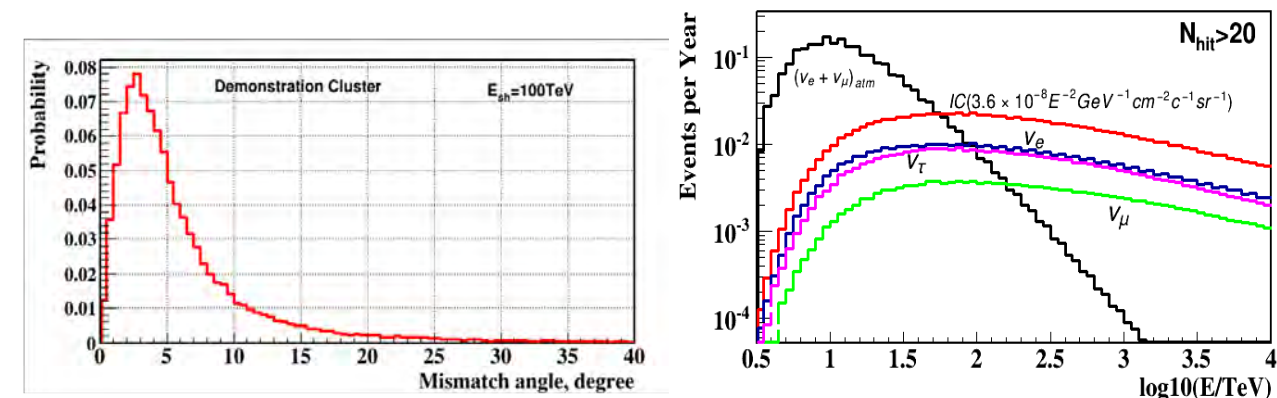
Возможные проблемы — нехватка людей для обработки данных (Суворова О.В.): физических задач много, а реальных обработчиков — мало.

Время реализации и конкуренты

Зарубежными аналогами предлагаемого в данном проекте нейтринного телескопа Baikal-GVD являются, в первую очередь, действующая на Южном полюсе установка IceCube, с размером порядка 1 км^3 (имеются планы десятикратного увеличения эффективного объема установки, однако их реализация возможна только после 2020 года). Также в настоящее время планируется к поэтапному развертыванию к 2025 году в Средиземном море (во Франции, Италии и Греции) комплекс из трех нейтринных телескопов, идентичных по своей конфигурации и техническим характеристикам, KM3NeT. Планируемый объем KM3NeT — 6 кластеров по 115 гирлянд оптических модулей — 3 км^3 . Общая цена 200–250 МЕ, из них выделено 31 МЕ на 2013–2016 годы (будет телескоп размеров в 3 раза больше ANTARESa), еще планируется (пока под вопросом) 50–60 МЕ в 2017–2020 годы на 2 кластера (установка ARCA в Италии) общим объемом порядка объема IceCube.

В результате анализа данных IceCube за четыре года его эксплуатации было установлено существование нейтринного потока астрофизической природы. В связи с этим приоритетной задачей экспериментов на нейтринных телескопах становится исследование характеристик этого потока, а также выявление природы источников таких нейтрино. В контексте данной задачи предлагаемый проект существенно дополняет, а по ряду параметров и улучшает действующий эксперимент IceCube:

1. Открытие астрофизических нейтрино высоких энергий должно быть подтверждено независимыми эксперимен-



Результаты компьютерного моделирования углового разрешения Байкальского нейтринного телескопа

Ожидаемое число событий в год в объеме демонстрационного кластера для различных предположений о спектре астрофизических нейтрино

тальными данными, полученными другим коллективом на другой установке с иными систематическими неопределенностями;

2. Область небесной сферы, доступная для наблюдения с помощью установки, зависит от географической широты места проведения эксперимента. Наличие масштабного эксперимента в Северном полушарии позволит детально изучить части неба, недоступные или плохо доступные для расположенного на Южном полюсе IceCube;

3. Предлагаемый эксперимент будет обладать принципиально лучшим, по сравнению с IceCube, угловым разрешением, — точностью определения направления прихода нейтрино. Действительно, уникальной характеристикой телескопа Baikal-GVD при сравнении с нейтринным телескопом IceCube является его высокое угловое разрешение при определении направления движения нейтрино, что обусловлено различием оптических свойств пресной воды и льда. В частности, для моды регистрации нейтрино, основанной на детектировании вторичных ливней, точность определения направления нейтрино в нейтринном телескопе Baikal-GVD составит 3–4 градуса, в сравнении с 10–15 градусами в IceCube. Это соответствует увеличению точности позиционирования локальных источников нейтрино более чем на порядок величины по сравнению с IceCube и открывает возможность для постановки и решения задач нейтринной астрономии с использованием ливневой моды детектирования нейтрино.

Нейтринные телескопы, планируемые к развертыванию в Средиземном море, и телескоп Baikal-GVD будут обладать сравнимыми характеристиками при решении задач нейтринной астрономии и астрофизики. Планируемые сроки полного ввода в эксплуатацию как Байкальской, так и Средиземноморских установок примерно совпадают, однако в настоящее время проект создания Байкальской установки находится на заметно более продвинутой стадии реализации – функционирует в режиме набора данных первый кластер телескопа Baikal-GVD.

На рис. (стр.73, справа) приводится распределение по энергии ожидаемого числа событий от астрофизических нейтрино, подобных зарегистрированным IceCube, а также фоновых событий атмосферного происхождения. Из этого рисунка следует, что уже на демонстрационном кластере ожидается примерно одно сигнальное событие от астрофизических нейтрино в год. Действительно, в 2015 году было зарегистрировано событие с энергией выше 100 ТэВ, являющееся хорошим кандидатом на первое астрофизическое нейтрино высокой энергии в истории эксперимента Байкал-GVD.

В случае Средиземноморских детекторов к настоящему времени проведены натурные испытания первых оптических модулей будущих установок (1 модуль во Франции и 3 модуля в Италии). К концу 2015 г. планируется установка первой гирлянды телескопа KM3NeT, содержащей 18 фотодетекторов, во Франции. Если в ближайшие годы не произойдет кардинальной интенсификации реализации Средиземноморских проектов, то Байкальская установка будет обладать преимуществом в 2–3 года, с точки зрения, как наращивания ее размеров, так и проведения научных исследований. Отметим, что в случае успешной реализации проекта Байкальский телескоп войдет в сеть из трех гигантских установок, совместными комплементарными усилиями осуществляющих наблюдение астрофизических нейтрино со всей небесной сферы. Меморандум об учреждении международного научного консорциума «Глобальная нейтринная сеть», включающего IceCube, KM3NeT и Baikal-GVD, был подписан в 2013 году (<http://www.globalneutrino.org>).

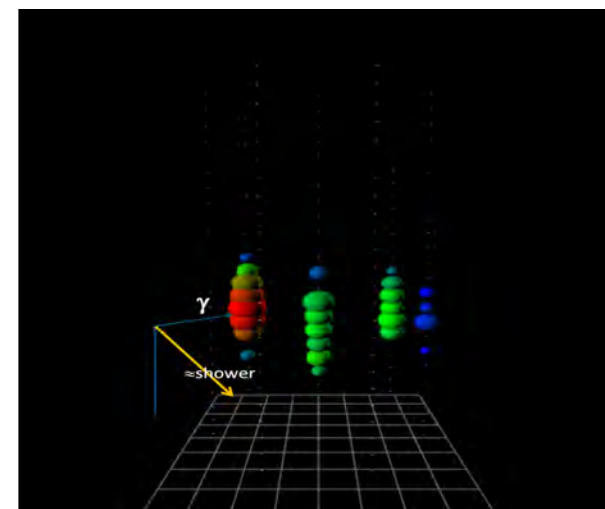
Сумма на 10–12 кластеров — до 23–27 М\$ = 5М\$*5 лет.

В том числе 5М\$ на год от ОИЯИ одобрено на 3 года. Представляется чрезвычайно существенным решение задачи получения стабильного целевого финансирования ИЯИ РАН на создание и эксплуатацию УНУ БГНТ на уровне 150 млн руб в год. Финансирование проекта Baikal-GVD рекомендовано Межведомственной рабочей группой экспертов по приоритетам развития наземных астрономических инфраструктурных проектов Российской Федерации на период 2016–2025 гг.

Создание в Северном полушарии нейтринного телескопа объемом 2 км³ явится одним из определяющих вкладов России в становление нового научного направления — экспериментальной нейтринной астрономии высоких энергий. Нейтринный телескоп Baikal-GVD создается как комплексная лаборатория, включающая специально созданную оптическую, гидрологическую и гидроакустическую аппаратуру, которая не только обеспечивает получение данных для решения задач нейтринной астрономии, но и позволяет вести исследования в смежных направлениях науки и техники: гидрологии, гидроакустики, лимнологии, геофизике, экологии, долговременном непрерывном мониторинге состояния водной среды озера Байкал. Доступ к новейшей аппаратуре для проведения исследований заинтересованными пользователями будет осуществляться в рамках действующего центра коллективного пользования «Байкальская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН». Планируется ввод в эксплуатацию режима удаленного доступа для управления системами телескопа и к базам экспериментальных данных, что существенно облегчит возможность проведения исследований заинтересованным ученым и организациям по собственным программам. В процессе создания телескопа будут разработаны образцы измерительной аппаратуры и оборудования

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи



▲ Событие с энергией 158 ТэВ — первый кандидат на астрофизическое нейтрино высокой энергии, зарегистрированное Baikal-GVD

для проведения глубоководных работ, которые найдут применение в различных отраслях науки и техники. Возможно и необходимо участие и параллельное обучение студентов и аспирантов, в особенности на этапе обработки данных и выделения физических результатов. Возможно проведение исследований в смежных областях науки и техники (гидрология, гидроакустика, геофизика, лимнология).

Источники информации

[1] A.D. Avrorin et al. Baikal-GVD: first cluster Dubna. PoS EPS-HEP2015 (2015) 418. e-Print: arXiv:1511.02324 [physics.ins-det].
[2] A.D. Avrorin et al. Sensitivity of the Baikal-GVD neutrino telescope to neutrino emission toward the center of the galactic dark matter halo. JETP Lett. 101 (2015) 289. e-Print: arXiv:1412.3672 [astro-ph.HE].
[3] A.D. Avrorin et al. Baikal-GVD: Results, status and plans. EPJ Web Conf. 116 (2016) 11005.

Доклады на летних конференциях 2016 г., например:
<https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=52&resId=0&materialId=slides&confId=14253>

Заключение

Проект уже в активной работе и будет реализован. Возможны финансовые проблемы из-за увеличения стоимости, зависящей от курса валют. Данный проект необходимо сделать до 2020 года, иначе обгонят — уже будет ARCA. Кроме того, IceCube продолжает набирать статистику.

НЕРПА

◆ среднесрочный приоритет

Одним из наиболее важных вопросов в современной нейтринной физике остается точное определение характеристик нейтринного сектора и, в частности, иерархии масс нейтрино. Теоретические исследования показывают, что к этой иерархии оказываются чувствительными осцилляции нейтрино с энергиями в диапазоне 4–8 ГэВ в веществе Земли (см., например, [1,2]). При этом исходные нейтрино могут быть как естественного (атмосферные), так и искусственного (ускорительные) происхождения. Были предложения [2] воспользоваться ускорительным пучком в CERNе для получения рукотворного потока нейтрино для Байкала, поскольку в данном случае расстояние (порядка 6900 км) является оптимальным для изучения иерархии масс нейтрино, но этот вариант пока детально не прорабатывался. В этом случае также возможно уточнение значений параметров нейтринных осцилляций. Кроме того, осцилляции нейтрино ГэВных энергий в веществе Земли оказываются чувствительными как к ее плотности, так и к составу (точнее, к отношению Z/A). Поэтому детальное изучение соответствующих осциллограмм позволит дополнить имеющиеся знания о внутренней структуре Земли, см. например, [5]. К другим задачам, которые можно выполнять в рамках данного проекта, относится поиск нейтринного сигнала от аннигиляции частиц темной материи в Галактике, Солнце, Земле, поиск нестандартных нейтринных взаимодействий и другой экзотики. При пороге ~1 ГэВ и эффективном объеме в несколько мегатонн проект будет чувствителен к CP-нарушающей фазе в матрице смешивания нейтрино.

Физические задачи

В настоящий момент отсутствует Letter of Intent. Данный проект представляет собой нейтринный телескоп на оз. Байкал, как часть детектора Baikal-GVD, но с более плотной

Статус проекта

расстановкой оптических модулей и гирлянд. Целью такой конфигурации является достижение энергетического порога регистрации около 1 ГэВ. Решение поставленных задач потребует хорошего углового восстановления направления прихода мюонов от нейтрино, а также каскадных событий.

Место, установка и инфраструктура

Проект планируется к размещению внутри строящегося в настоящее время телескопа Baikal-GVD в Южной котловине озера Байкал в районе 106 км Кругобайкальского участка Восточно-Сибирской железной дороги (КБУ ВСЖД) в 4 километрах от берега на глубине 750–1250 м. Оптимальная конфигурация детектора является предметом дополнительных исследований (R&D), однако в качестве ориентиров отметим, что расстояние между оптическими моделями по вертикали должно быть около 3 м, по горизонтали — около 7–10 м, а полное требуемое число оптических модулей — 1500–3000 штук [3].

Пока нет ничего, кроме инфраструктуры, которая имеется у Baikal-GVD. Проект надо начинать с Letter of Intent и R&D по выработке оптимальной конфигурации. Данная установка будет создана на базе универсальной измерительной системы, разработанной и реализованной для Baikal-GVD.

Кадры

Поскольку данный проект может быть реализован только на основе новой измерительной системы Baikal-GVD, разработанной и внедренной в практику в течение последних пяти лет, основным исполнителем проекта будет являться коллаборация Baikal: ИЯИ РАН (Г.В.Домогацкий, Ж.-А.М.Джилкибаев, В.М.Айнутдинов и др.), ОИЯИ (И.А.Белолаптиков, В.Б.Бруданин и др.), ИГУ, НИИЯФ МГУ, Нижегородский ГТУ и другие институты и организации, входящие в коллаборацию Байкал. Кроме того, в развитии проекта заинтересован ряд других сотрудников ИЯИ РАН: Безруков Л.Б., Лубсандоржиев Б.К.

Время реализации и конкуренты

Основными прямыми конкурентами данному проекту являются проект KM3NeT/ORCA в Средиземном море, PINGU на Южном полюсе, а также Hyper-Kamiokande

в Японии. Помимо этого, можно отметить проект ICAL (Iron CALorimeter) в лаборатории INO в Индии, в котором предполагается получить информацию об иерархии масс нейтрино, добиваясь различения нейтринных и антинейтринных событий. Статус этих проектов — пока на проекты ORCA, PINGU и Hyper-K поданы Letters of Intent, об окончательной их поддержке пока не известно. В случае поддержки, ORCA (и, наверное, PINGU) может быть развернута к 2020 году [3].

Ориентировочная сумма оценивается из сравнения со стоимостью Baikal-GVD — 20-40 М\$. Цена, возможно, может быть сокращена, если увеличить порог до 3 ГэВ. Это оставит хорошую возможность изучать вопрос о иерархии масс нейтрино и строении/составе Земли, но немного сократит чувствительность к нейтринному сигналу от легкой темной материи. Данный вопрос является предметом отдельных исследований на этапе написания R&D.

Определение иерархии масс нейтрино является в настоящее время одним из наиболее актуальных и фундаментальных вопросов в нейтринной физике. Кроме того, нейтринный метод изучения внутренней структуры Земли позволит существенно расширить существующие представления о ее строении. На базе данного проекта возможно обучение значительного количества студентов/аспирантов. Мультидисциплинарность — такая же, как для Baikal-GVD.

- [1] Mass hierarchy, 2-3 mixing and CP-phase with Huge Atmospheric Neutrino Detectors. E.Kh. Akhmedov, Soebur Razzaque, A.Yu. Smirnov, JHEP 02 (2013) 082
- [2] Counting muons to probe the neutrino mass spectrum, Carolina Lujan-Peschard, Giulia Pagliaroli, Francesco Vissani, Eur.Phys.J. C73 (2013) 2439
- [3] Слайд из доклада.
- [4] E. DeWolf, KM3NeT and status of phase-1 in Italy and France, Talk at the International Workshop on Prospects of Particle Physics «Neutrino physics and astrophysics», 1-8 February, Valday, Russia.
- [5] Spectrometry of the Earth using neutrino oscillations, C.Rott, A.Taketa, D.Bose, arXiv:1502.04930.
- [6] M.C. Gonzalez-Garcia, F.Halzen, M.Maltoni and K.M.Tanaka, «Radiography of the earth's core and mantle with atmospheric neutrinos», Phys.Rev.Lett, 100, 061802, arXiv:hep-ph/0711.0745

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ

Источники информации

[7] T.Ohlsson et al, Phys. Rev. D 88 (2013) 013001, Gonzales-Garcia et al., Phys.Rev. D71 (2005) 093010)

[8] S. Razzaque, A. Smirnov, Super-PINGU for measurement of the leptonic CP-phase with atmospheric neutrinos, arXiv:1406.1407

Закключение

Конечно, такой проект был бы весьма желателен. Но, если делать, то начинать надо прямо сейчас, потому что, если проект не сделать до 2020 года, то дальше будет неактуально, поскольку могут уже заработать другие (ORCA и PINGU).





Эксперименты на площадке ИЯИ РАН в Троицке

Троицк-ню-масс
НІРЕХ





Поиск стерильных нейтрино на установке Троицк-ню-масс

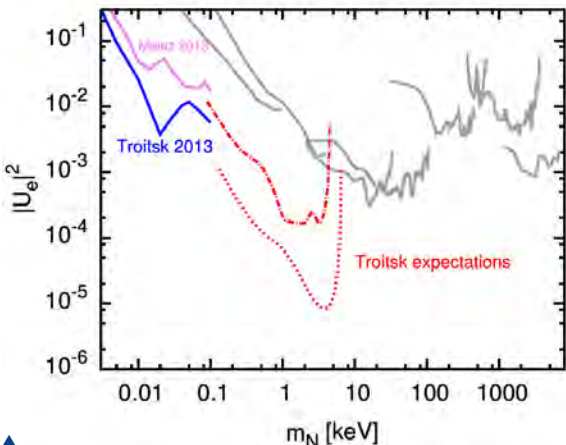
◆ среднесрочный приоритет

Поиск стерильных нейтрино (нейтральных массивных лептонов) с массами 100 эВ–10 кэВ, возможно, ответственных за появление масс у активных нейтрино, проявляющихся как нейтринные осцилляции. Потенциально нобелевский эксперимент. Доступный для данного эксперимента интервал масс интересен для космологии, где стерильные нейтрино могут составлять тёмную материю (в этом случае они, правда, дают пренебрежимо малый вклад в массы активных нейтрино). Однако детальные исследования этой области требуют заметно более высокой чувствительности.

Физические задачи

Естественное продолжение физической программы установки Троицк-ню-масс по изучению спектра электронов из распада трития. Оригинальная задача была нацелена на активные нейтрино и позволила получить самое строгое в мире ограничение сверху на массу электронного антинейтрино. В дальнейшем была проведена повторная обработка данных с использованием другой физической модели, позволившая поставить наиболее строгий верхний предел на угол смешивания гипотетического нейтрино с массами менее 100 эВ. Продолжение физической программы связано с усовершенствованием системы регистрации, что позволит поставить наиболее сильное ограничение на угол смешивания стерильного нейтрино с массами 100 эВ–3.5 кэВ. Дальнейшее повышение чувствительности в этой области масс (массы больше нескольких кэВ потенциально интересны для космологии

Статус проекта



▲ Экспериментальные ограничения на параметры смешивания стерильного нейтрино



▲
Установка Троицк-ню-масс

в сценарии стерильных нейтрино как тёмной материи) требует существенной модификации установки. Стартовая модификация не предполагает исследования действительно интересной для космологии области.

Помимо непосредственно исследования бета-спектра трития предполагается возможность изучения процесса электронного захвата на легких ядрах (бериллий?) при помощи твердого источника (графен, полиэтилен). В этом случае диапазон исследуемых масс стерильных нейтрино сдвигается к 20–300 кэВ, но при этом можно получить пределы по параметру смешивания порядка 10^{-6} – 10^{-8} . Реализация этой программы требует довольно обширных исследований как по способам создания твердого источника, так и по другим вопросам.

Место, установка,
инфраструктура

Установка расположена в 101 корпусе ИЯИ РАН в Троицке.

Для второго этапа требуется существенная модификация установки, включая систему сбора данных, систему высокого напряжения, проведение специальных калибровочных измерений.

Кадры

Исключительно коллектив ИЯИ (19 человек включая весь обслуживающий персонал), основа которого раньше участвовала в получении ограничений на массу электронного антинейтрино. Наполнение источника будет выполняться в других институтах.

Время реализации
и конкуренты

Первый этап, по-видимому, будет пройден в любом случае, так как работы по подготовке установки почти завершены,

это займёт 2–3 года. Второй этап требует значительных денежных средств и людских ресурсов, тоже займёт несколько лет.

Конкурентом является эксперимент KATRIN, который имеет в качестве дополнительной задачи поиск стерильных нейтрино, и на эту тему есть статья, опубликованная в JCAP, где обещают ограничение на три порядка сильнее, чем первая стадия обсуждаемого эксперимента. По-видимому, однако, решение данной задачи возможно лишь при серьёзной переделке детектора KATRIN.

Некоторые участники группы входят в коллаборацию KATRIN, что открывает перспективы дальнейшего использования отработанной методики поиска. Обсуждаемая пока модификация не предполагает исследования действительно интересной для космологии области.

Значение для ИЯИ
и смежные задачи

[1] Troitsk Collaboration (V.N. Aseev et al.). An upper limit on electron antineutrino mass from Troitsk experiment. Phys.Rev. D84 (2011) 112003. e-Print: arXiv:1108.5034 [hep-ex]
[2] A.I. Belesev et al. The search for an additional neutrino mass eigenstate in the 2–100 eV region from ‘Troitsk nu-mass’ data: a detailed analysis. J.Phys. G41 (2014) 015001. e-Print: arXiv:1307.5687 [hep-ex]
[3] D.N. Abdurashitov et al. The current status of ‘Troitsk nu-mass’ experiment in search for sterile neutrino. JINST 10 (2015) no.10, T10005. e-Print: arXiv:1504.00544 [physics.ins-det]

Источники
информации

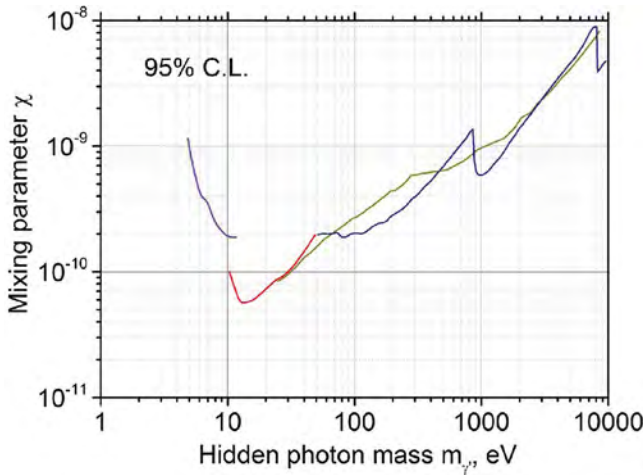
Эксперимент надо выполнять с перспективой получения физических результатов заведомо раньше KATRIN. Изучить идеи, как исследовать интересную для космологии область пространства параметров (масса, смешивание) – именно она задаёт здесь ориентиры. В группе обсуждается возможность перейти на тяжёлые ядра, но тут нет даже конструкции радиоактивного источника. Требуются идеи и люди пока в большей степени, чем финансы.

Закключение

**HIPEX: эксперимент по поиску фотонов
скрытого сектора с использованием
многокатодного счетчика**

Физические задачи

Поиск гипотетических массивных векторных частиц (скрытых фотонов) в интервале масс 5 эВ–10 кэВ, образующих тёмную материю в Галактике. Тем самым при анализе данных для каждой массы концентрация этих частиц считается известной. Это позволяет ставить пределы на смешивание между фотоном и скрытым фотоном, благодаря которому в установке возможно появление индуцированного тока из-за пролёта частиц тёмной материи. Доступная для существующей установки область закрыта из астрофизических исследований в рамках рассматриваемых теоретических моделей, разрешённая этими моделями область лежит на 2–3 порядка ниже



▲ Ограничения на параметры фотонов скрытого сектора, полученные на первом этапе работы установки

по величине константы смешивания при исследуемых массах. Отметим, что механизм производства таких частиц тёмной материи не конкретизирован. (С экспериментальной точки зрения здесь постулируется смешивание частиц тёмной материи с фотоном, и задача заключается в экспериментальной проверке этого свойства тёмной материи. Следует отметить, что проводимый эксперимент чувствителен к конверсии HP-photon и не чувствителен к конверсии photon-HP, что, с экспериментальной точки

зрения, не одно и то же и требует отдельной проверки. Приводимые астрофизические ограничения, напротив, поставлены в предположении, что это одно и то же. Теоретических моделей, где бы это было не так, пока не предложено).

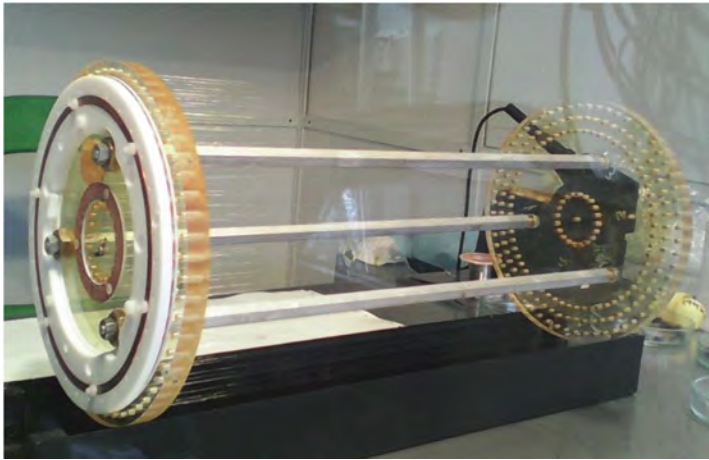
Статус проекта

Оригинальная реализация предложенного ранее в литературе (см. arXiv:1212.2970) способа поиска гипотетических

лёгких векторных частиц, очень слабо взаимодействующих через векторный портал с частицами Стандартной модели.

Установка построена в 2015 году, и первые результаты уже опубликованы.

В электронном архиве arXiv.org представлено три препринта с описанием установки, изложением методики обработки данных и результатами первого этапа работы.



▲ Многокатодный калориметр

Установка находится в 115 корпусе ИЯИ РАН в Троицке.

Для второго этапа требуется изготовить новый детектор усовершенствованной конструкции, провести его отладку и калибровку в лаборатории в Троицке, приобрести и наладить работу электроники для работы в подземной лаборатории и совместно с заинтересованным в этой работе персоналом подземной лаборатории (В.В. Кузьминов и др., БНО ИЯИ РАН?) приступить к набору данных и их последующей обработке. Предположительно это позволит продвинуться на порядок по чувствительности к величине смешивания.

В настоящий момент исключительно коллектив ИЯИ: три научных сотрудника и ведущий инженер.

Первый этап уже реализован. Дальнейшая работа запланирована пока на 2016-2017 г.г.

WISP Dark Matter experiment и WISPDPMX. Однако, в обоих случаях изучается другой интервал масс.

2016 г. 1950 т.р.
2017 г. 2240 т.р.

Результат проведенных исследований может оказаться в ряду самых интересных и важных результатов, полученных в ИЯИ РАН.

**Место и установка,
инфраструктура**

Кадры

**Время реализации
и конкуренты**

Оценка стоимости

**Значение для ИЯИ
и смежные задачи**

Источники информации

[1] A.V. Kopylov, I.V. Orekhov, V.V. Petukhov. Using a Multi-Cathode Counter (MCC) in the Search for Hidden Photon CDM. e-Print: arXiv:1509.03033 [physics.ins-det].

[2] A. Kopylov, I. Orekhov, V. Petukhov. A Search for Hidden Photon CDM in a Multi-Cathode Counter (MCC) data. e-Print: arXiv:1601.02199 [physics.ins-det].

[3] A.V. Kopylov, I.V. Orekhovand, V.V. Petukhov. On a Search for Hidden Photon CDM by a Multicathode Counter. Adv.High Energy Phys. 2016 (2016) 2058372

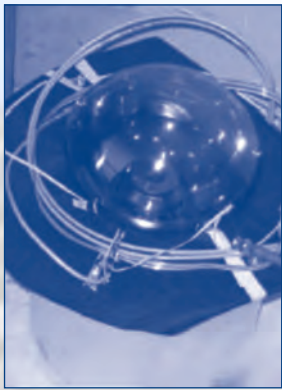
Рекомендация

Продолжать проект и исследовать возможности применения метода для других диапазонов масс скрытых фотонов.



**Участие в межинститутских проектах
на других площадках
на территории России**

TAIGA
LunaSKA
ОЛВЭ





Участие в планируемом эксперименте TAIGA
(Tunka Advanced Instrument for cosmic-ray physics and
Gamma-ray Astronomy)

Комплексная установка для изучения ШАЛ с энергиями первичных частиц (10^{14} – $10^{17.5}$) эВ и гамма-квантов (10^{13} – 10^{16}) эВ. Задачи: гамма-астрономия выше 20 ТэВ, изучение структуры ШАЛ.

Физические задачи

Публикации и проект имеются. Идет реализация.

Статус проекта

Тункинская долина, Республика Бурятия.

**Место, установка,
инфраструктура**

В ИЯИ — Б.К. Лубсандоржиев, Г.И. Рубцов, Б.А. Шайбонов, Л.Б. Безруков, П. Сатунин.

Кадры

Коллаборация, Иркутский государственный университет, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ИЯИ РАН, ОИЯИ, ИЗМИРАН, MPI for Physics (Munich), DEZY (Zeuten), Univ. Hamburg, ISS (Bucharest), KIT (Karlsruhe).

Часть установки работает. Решетка площадью 1 кв.км с несколькими мюонными детекторами может быть запущена в 2016, а 9 штук IACT — в 2017. Дальнейшее развитие под вопросом, поэтому не обсуждаем. Конкуренты: в отдаленной перспективе — LHAASO и Памир-XXI, которые будут существенно более чувствительны; на масштабе 1–2 лет аналогичная чувствительность ожидается от «Ковра».

**Время реализации
и конкуренты**

Оценка стоимости существенно варьируется в зависимости от конфигурации.

Оценка стоимости

Эксперимент многозадачный. На сегодняшний день экспериментальная часть проекта укомплектована кадрами, в том числе молодыми квалифицированными специалистами из ИГУ. Нужны специалисты по Монте-Карло моделиро-

**Значение для ИЯИ
и смежные задачи**

ванию и обработке данных, но в ИЯИ они не менее востребованы другими проектами.

Источники информации

The TAIGA experiment: from cosmic ray to gamma-ray astronomy in the Tunka valley N. Budnev (Irkutsk State U.) et al.. 2016. 5 pp. Published in J.Phys.Conf.Ser. 718 (2016) no.5, 052006

Measurement of cosmic-ray air showers with the Tunka Radio Extension (Tunka-Rex) P.A. Bezyazeev (Irkutsk State U.) et al.. Sep 29, 2015. 8 pp. Published in Nucl.Instrum.Meth. A802 (2015) 89-96

Доклады на летних конференциях 2016 г., например: <https://indico.desy.de/getFile.py/access?contribId=24&resId=0&materialId=slides&confId=14253>

Заключение

Проект в стадии выполнения, поэтому реалистичность вопросов не вызывает. Вклад ИЯИ в основном кадрами. Чувствительность в минимальной конфигурации порядка «Ковра», в максимальной уступает LHAASO. После запуска LHAASO эксперимент в предлагаемой конфигурации не очень интересен.

LunaSKA

Изучение естественных потоков космических лучей сверхвысоких энергий. При высоких энергиях нейтрино одним из наиболее перспективных методов его детектирования является радиометод, основанный на эффекте Аскарьяна и состоящий в регистрации радиочастотного черенковского излучения от каскадов. Идея радиоастрономического метода детектирования космических нейтрино и протонов (ядер), «бомбардирующих» Луну, с применением радиотелескопов на Земле и даже на лунных спутниках была предложена в ИЯИ РАН и ПРАО АКЦ ФИАН еще в конце 80-х годов. Проект нацелен на использование гигантского радиотелескопа SKA с общей площадью антенн 1 квадратный километр, сооружаемого в Австралии и Южной Африке, для детектирования космических лучей сверхвысоких и экстремально высоких энергий, которые взаимодействуют с поверхностными слоями Луны.

Физические задачи

Предложение принять участие в разработке такой программы для SKA было получено сотрудниками ПРАО АКЦ ФИАН и ИЯИ РАН в марте 2014 г., и в настоящее время эта идея активно обсуждается [2]. В России предлагается разработать и создать на базе Пушинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО АКЦ ФИАН) с участием ИЯИ РАН (электроника, проведение расчетов) пилотную установку – систему антенн, способных регистрировать импульсы в метровом диапазоне волн, то есть расширить частотный диапазон регистрируемых радиоимпульсов вплоть до нескольких десятков МГц. Предполагается, что эффективная площадь пилотной установки составит около 1000 кв. м., а время мониторинга радиоимпульсов от Луны составит 4–5 часов в сутки. Технические и экспериментальные результаты проекта могут

Статус проекта

	иметь большое значение для развития радиоастрономического метода детектирования космических частиц экстремально высоких энергий, в частности, с использованием радиотелескопа SKA.
Место, установка, инфраструктура	Предлагается создание пилотного проекта на базе Пушинской радиоастрономической обсерватории.
Кадры	Данный проект (LunaSKA) является международным. С российской стороны участие принимает ПРАО АКЦ ФИАН и ИЯИ РАН (Железных И.М.).
Время реализации и конкуренты	GMRT и Ooty радиотелескопы в Индии. Сравнения чувствительности проекта SKA с другими пока нет.
Оценка стоимости	Первый этап пилотного проекта – 3 млн. руб.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	При финансировании проекта планируется уже в 2017 году проведение мониторинга черенковских всплесков радиоизлучения от Луны с помощью пилотной установки с эффективным площадью 1000 кв.м. и с помощью радиотелескопа БСА ФИАН. Планируется достигнуть рекордной в мире чувствительности в метровом диапазоне.
Источники информации	[1] Отчет ИЯИ РАН о НИР за 2014 год [2] Lunar detection of ultra-high-energy cosmic rays and neutrinos with the Square Kilometre Array, arXiv:1408.6069 [3] R.D.Dagkesamanskii, V.A.Matveev, I.M. Zheleznykh, Prospects of radio detection of extremely high energy neutrinos bombarding the Moon, Nuclear Instruments and Methods in Particle Research, A626-627, S44-S47
Заключение	Рекомендуется более активное участие ученых из ИЯИ РАН в проекте LunaSKA. Необходима количественная мотивировка использования именно метрового диапазона.

Участие в проекте орбитального эксперимента ОЛВЭ	
Долговременный (~10 лет) тяжелый (10 тонн) спутник, который впервые в мире позволит изучать ядерный состав и спектр космических лучей вплоть до энергий 10^{16} эВ на частицу прямым детектированием. Верификация результатов ШАЛ-установок по спектру и составу первичного космического излучения в области «колена», тестирование моделей взаимодействий адронов и поиск новых явлений во взаимодействиях адронов. Проект проработан, но окончательный вариант не зафиксирован и все время меняется. Публикации в трудах конференций. Спутниковый эксперимент В ИЯИ — Р.А. Мухамедшин и М. Зеленый, специализирующийся на обработке данных спутникового эксперимента «Нуклон». ИЯИ вполне может занять там достойное место, т.к. имеет специалистов в таких направлениях как моделирование (в частности, регистрации нейтронной компоненты), разработка аппаратуры съема информации со сцинтилляторов с использованием фотодетекторов, обработки экспериментальной информации. Кроме ИЯИ — МИФИ, НИИЯФ, ОИЯИ, ФИАН. Конкурирующего проекта нет Оценка стоимости: научный прибор ~ 1 000 млн. руб., коммерческая стоимость запуска тяжелого носителя типа «Протон-М» или «Ангара-5» ~ 10 000 млн.руб. Небольшое финансирование проекта в рамках ФЦП имеется.	Физические задачи Статус проекта Место, установка, инфраструктура Кадры Время реализации и конкуренты Оценка стоимости

**Значение для ИЯИ
и смежные задачи**

Информация может быть использована для решения астрофизических проблем (генерация первичного космического излучения; возникновение «колена», структура магнитных полей в Галактике). Технологическая проблема запуска тяжелого спутника. Верификация моделей взаимодействия адронов и развития ядерных каскадов в атмосфере, используемых для наземных астрофизических исследований

**Источники
информации**

1. Ammosov V.V., Britvich G.I., Chubenko A.P., ... Mukhamedshin R.A. *et al.* High-energy cosmic-ray physics study by multipurpose astrophysical orbital observatory, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 175-176 (2008) 190–193; DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2007.10.033
2. Atkin E.V., Burylov L.S., Chubenko A.P., Kuznetsov N.V., Merkin M.M., Mukhamedshin R.A., Pavlov A.Yu., Podorozhny D.M., Romanov A.V., Sveshnikova L.G., Tkachev L.G., Turundaevsky A.N., Voronin A.G. New High-Energy Cosmic-Ray Observatory (HERO) project for studying the high-energy primary cosmic-ray radiation. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) (2009) 196C, pp. 450-453 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2009.10.004

Заключение

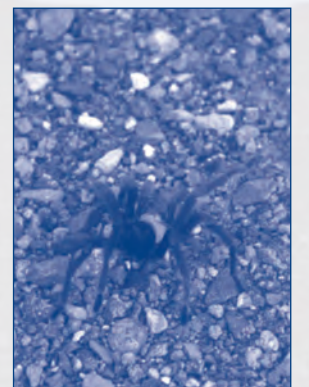
В случае реализации проекта ИЯИ мог бы участвовать, однако специалисты требуемого профиля активно востребованы другими экспериментами.



Участие в крупных международных проектах на зарубежных площадках



GERDA
LHAASO
Telescope Array
CAST, IAXO
LVD
ASD
KATRIN
Нестор-Садко
AMoRE
Памир-XXI
Тянь-Шань



GERDA

◆ среднесрочный приоритет

Физические задачи

Определение природы массы нейтрино (дираковская или майорановская) и ее абсолютной величины является одной из приоритетных задач современной физики частиц. В случае майорановской массы нейтрино имеет место нарушение лептонного числа и возможен процесс двойного безнейтринного бета-распада. Поиски таких процессов для различных типов ядер ведутся в настоящее время во многих низкофоновых лабораториях мира. Обнаружение безнейтринного двойного бета-распада подтвердит майорановскую природу массы нейтрино и даст возможность определить ее значение.

Статус проекта

Результатом первой фазы работы проекта стало получение ограничения на период полураспада $2.1 \cdot 10^{25}$ лет (90% У.Д.). В настоящее время идет подготовка к набору данных второй фазы, в которой масса германия увеличена примерно в 2 раза (несколько десятков килограмм) и существенно снижен уровень фона. Ожидаемая чувствительность второй фазы $2.1 \cdot 10^{26}$ лет (примерно 5 лет работы). На третьем этапе (примерно с 2019–2020 гг.) массу германия планируется довести до 200 кг.

Место, установка, инфраструктура

Подземная (глубина 3500 м в.э.) лаборатория Гран-Сассо, Италия. В проекте кристаллы германия, обогащенные Ge-76, помещены в сосуд с очищенным жидким аргоном, который в свою очередь помещается в бак с очищенной водой.

Кадры

Проект является международным экспериментом (5 стран и 13 институтов), в котором ИЯИ РАН представлена группой в составе: И.Р.Барабанов, Л.Б.Безруков, В.И.Гуренцов, А.В.Вересникова, Б.К.Лубсандоржиев, Е.А.Янович, Е.А.До-



▲ Криогенная установка GERDA в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия

рошкевич, а также коллеги из БНО ИЯИ РАН: Казалов В.В., Кузьминов В.В.

Прямым конкурентом, использующим тот же изотоп германия-76, является эксперимент Majorana, однако, в настоящее время активно обсуждается возможность объединения усилий по созданию нового детектора с массой германия-76 1 тонна [1]. На сегодняшний день в эксперименте GERDA удалось достичь рекордно низкого уровня фона, что открывает дорогу для экспериментов следующего поколения (GERDA-III, GERDA+Majorana). Есть множество других экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада, однако они используют другие изотопы.

На 1 и 2 фазы эксперимента от ИЯИ РАН никаких финансовых вложений не требовалось. Для участия в 3-ей фазе эксперимента очень желательны вложения порядка 150-200 млн. рублей на закупку обогащенного германия.

Участие в таком крупном международном проекте как GERDA представляется очень важным в особенности для молодых исследователей из ИЯИ РАН: получение опыта проведения подобных экспериментов может оказаться полезным для будущего развития БНО ИЯИ РАН. В связи с этим было бы желательно более активное (чем сейчас) участие моло-

Время реализации и конкуренты

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ РАН



дых ученых в этом эксперименте, а также в его возможном продолжении — Gerda-Majonara. В качестве прикладных аспектов можно отметить возможное внедрение улучшенных методов очистки изотопов.

Источники информации

- [1] А.С.Барабаш, УФН 184, №5.
- [2] Доклад В.Казалова на отчетной конференции на Баксане.
- [3] Отчет ИЯИ РАН за 2014 год.

- [4] Neutrinoless Double-Beta Decay: a Probe of Physics Beyond the Standard Model S.M. Bilenky, C. Giunti, Published in Int.J.Mod.Phys. A30 (2015) 04n05, 1530001

Продолжение участия, более активное вовлечение молодых исследователей.

Заключение

Участие в проектируемой установке LHAASO

◆ среднесрочный приоритет

Физические задачи	Проект комплексной установки по детектированию ШАЛ в Тибете на высоте 4.3 км, в коллаборацию входит небольшая группа из ИЯИ. Задачи установки: детектирование различных компонент ШАЛ, гамма-астрономия выше 100 ТэВ. Установка будет наиболее чувствительным инструментом в мире в области первичных энергий (10^{14} – 10^{17}) эВ. Зона ответственности ИЯИ: ковёр из 441 эн-детекторов ($100\times100\text{ м}^{*2}$) разработки Стенькина. Цель — решение проблемы «излома» в спектре к. л. путем регистрации адронной компоненты ШАЛ по всей площади установки и измерения спектра ШАЛ по числу адронов (тепловых нейтронов). В обновленном проекте LHAASO — это единственная часть установки для изучения осей ШАЛ, т.к. центральная плотная часть основной установки из проекта исключена.
Статус проекта	Много коллаборационных публикаций, в том числе публично доступный проект. В 2016 году начинается развертывание прототипа PRISMA-LHAASO, пока из 16 детекторов в Тибете (Янгбаджинг), не дожидаясь строительства и подготовки места в Сычуане (нашли на это дополнительные средства).
Место, установка, инфраструктура	Китай, провинция Сычуань. Инфраструктуры нет, но место согласовано.
Кадры	В ИЯИ — Ю. Стенькин; О. Щеголев, В.И. Степанов (электронщик) и Алексеенко с БНО. Желательна помощь других специалистов. Кроме ИЯИ — в основном коллеги из Китая.
Время реализации и конкуренты	Начало развертывания — 2015 год. Срок 5-6 лет. Научный конкурент — только проект «Памир-XXI», но он находится на заметно менее разработанном уровне. Конку-

рируют различные проекты (TAIGA, TA, Памир-XXI) за кадры. Полноценный прототип на уровне моря – проект УРАН (МИФИ). Оценка чувствительности LHAASO к гамма-излучению приведена на рис. на стр.24.

По договоренности с китайской стороной, вся инфраструктура и вообще почти все будет делаться за счет фондов LHAASO. От России требуется только поставка сцинтиллятора, разработка регистрирующей аппаратуры и идеологии эксперимента. Командировка 1 чел. в Тибет будет стоить сейчас типа 150 т. р. Найден производитель дешевого сцинтиллятора; на всю установку потребуется сцинтиллятора на 3-4 млн. руб. Плюс немного на разработку и изготовление опытных образцов электроники. Итого, порядка 5-6 млн. руб. всего.

Единственная возможность участия России в эксперименте, который будет мировым лидером в области детектирования и исследования ШАЛ от первичных частиц с энергиями (10^{14} – 10^{17}) эВ.

LHAASO Collaboration. A future project at Tibet: The large high altitude air shower observatory (LHAASO). Published in Chin.Phys. C34 (2010) 249-252.

ARGO-YBJ and PRISMA Collaborations. Detection of thermal neutrons with the PRISMA-YBJ array in Extensive Air Showers selected by the ARGO-YBJ experiment. Astropart.Phys. 81 (2016) 49-60.

Один из наиболее перспективных проектов с научной точки зрения, притом с хорошо определенной областью ответственности ИЯИ и достаточно малозатратный для нашей группы. Высокая вероятность реализации.

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Источники информации

Заключение

Участие в экспериментах Telescope Array, TALE, TAx4

◆ среднесрочный приоритет

Физические задачи

Регистрация ШАЛ от космических частиц с энергиями выше 10^{18} эВ (ТА), $(10^{16}-10^{19})$ эВ (TALE) с помощью гибридного инструмента (наземная решетка сцинтилляторов ~ 700 кв. км плюс флуоресцентные телескопы). Предусмотрено увеличение площади сцинтилляционной решетки в 4 раза (ТАх4). Основные задачи: определение происхождения космических лучей сверхвысоких энергий с помощью изучения спектра, состава и анизотропии направлений прихода первичных частиц; выявление причин разницы в определении энергии первичных частиц различными методами, в том числе калибровка флуоресцентных телескопов на поток электронов от входящего в состав установки ускорителя; поиск новых и неучтенных эффектов в развитии ШАЛ.

Статус проекта

Установка ТА собирает данные с мая 2008 года. Флуоресцентный детектор TALE работает с декабря 2013, наземная решетка TALE разворачивается в настоящее время. Проект TAx4 имеется на японском языке; финансирование для наземной решетки TAx4 получено (Япония), для сопровождающих флуоресцентных телескопов – пока нет (США). Результаты ТА регулярно публикуются в журналах. Первые результаты флуоресцентного детектора TALE также опубликованы.

Место, установка, инфраструктура

США, штат Юта. Все необходимое имеется.

Кадры

В ИЯИ — И.И. Ткачев (руководитель), Г.И. Рубцов, О.Е. Калашев, М.С. Пширков, С.В. Троицкий, Б. Лубсандоржиев, Я. Жежер и М. Кузнецов. Международная коллаборация (США, Япония, Корея, Россия, Бельгия).



▲
Зеркала одного из флуоресцентных детекторов ТА. Каждое зеркало направлено на свой участок ночного неба



▲
Флуоресцентные телескопы во время работы. На небе — Млечный Путь

Основной конкурент в области сверхвысоких энергий – обсерватория им. Пьера Оже, площадь которой (3000 кв. км) больше, чем площадь TAx4. Telescope Array — крупнейший инструмент в Северном полушарии. Некоторую конкуренцию представляет Якутская установка ШАЛ, в которой есть мюонные детекторы. Время создания TAx4 – несколько лет, время пошло в 2015.

Время реализации и конкуренты

Вклад ИЯИ требует поездок на дежурства (средства рабочей группы Россия-США). Участие в создании новых детекторов для TAx4 может варьироваться в зависимости от финансирования.

Оценка стоимости

Задачи на стыке физики частиц и астрофизики. Независимая верификация/фальсификация результатов Pierre Auger. Единственные теоретики в коллаборации. Возможно развитие новых фотодетекторов.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

[1] Telescope Array Collaboration. The Cosmic Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment. *Astrophys.J.* 768 (2013) L1

Источники информации

[2] Telescope Array Collaboration. Indications of Intermediate-Scale Anisotropy of Cosmic Rays with Energy Greater Than 57 EeV in the Northern Sky Measured with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment. *Astrophys.J.* 790 (2014) L21.

[3] Telescope Array Collaboration. Results from the Telescope Array Experiment. *Nucl.Part.Phys.Proc.* 273-275 (2016) 440-445.

[4] Hiroyuki Sagawa. Telescope Array extension: TAx4. *PoS ICRC2015* (2016) 657.

Заклучение

Участие в действующем и развивающемся эксперименте высокого уровня без особых затрат со стороны ИЯИ, кроме трудозатрат теоретиков. Разработка опытных образцов детекторов с тестированием их на БНО может быть интересной и для других проектов, но требует дополнительного финансирования.

Участие в эксперименте CAST
(CERN Axion Solar Telescope),
планируемом эксперименте IAXO
(International AXion Observatory)

♦ долгосрочный
приоритет

Поиск солнечных аксионов и аксионоподобных частиц. Ограничивается аксион-фотонная константа. IAXO – максимальная чувствительность для аксионоподобных частиц из всех имеющихся и проектируемых экспериментов (кроме ADMX в узкой области масс). CAST — на сегодняшний день самые сильные ограничения (лучше астрофизических; кроме ADMX).

Физическая задача

CAST — многочисленные публикации. Завершение аксионной программы в 2015, другие задачи (поиск хамелеонов и т.д.) — продолжение исследований.

Статус проекта

IAXO — опубликован conceptual design report. Получено финансирование от ЦЕРН на проработку TDR. Продолжается формирование коллаборации.

CAST расположен в ЦЕРН. В качестве основного варианта для IAXO тоже предлагается ЦЕРН, однако позиция нового руководства ЦЕРН по этому вопросу неочевидна. В качестве запасного варианта предлагается размещение на площадке ИЯИ в Троицке (отдельное новое здание).

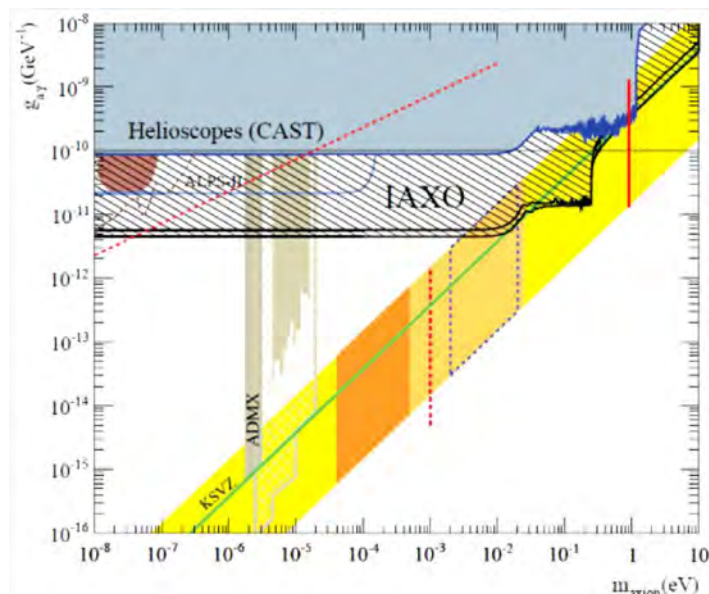
Место, установка,
инфраструктура

Международные коллаборации. Из ИЯИ в CAST — Гниненко, Дерменев. Группа ИЯИ стояла у истоков проекта, вместе с Зютасом. IAXO — на сегодняшний день два автора пре-коллаборационных статей, Гниненко и Троицкий. В ИЯИ есть несколько экспериментаторов, заинтересованных в участии в проекте.

Кадры

Для IAXO, 6 лет разработка и создание (время пошло в 2015), затем 4–12 лет набора данных. Наиболее сильный конкурент IAXO, ALPS-II, будет иметь чувствительность заметно хуже,

Время реализации
и конкуренты



▲
Ограничения на аксион-фотонную константу взаимодействия для разных масс аксионоподобной частицы, в том числе современные ограничения CAST и ожидаемая чувствительность IAXO

но будет чисто лабораторным экспериментом (если будет, т.е. если удастся реализовать концепцию синхронизации резонаторов).

Оценка стоимости

CAST — 7000 USD в год на дежурства (2 автора, реально дежурит 1) рабочая группа ЦЕРН-Россия.

IAXO — вклад в конструкцию (50-100) тысяч Евро; ежегодные взносы (3-5) тыс. CHF за каждого автора (4 автора) — рабочая группа (?); 28000 USD в год на дежурства (4 автора) — рабочая группа (?).

Общая стоимость проекта зависит от результата работы по TDR магнита, оценка 20 млн. USD.

Значение для ИЯИ и смежные задачи

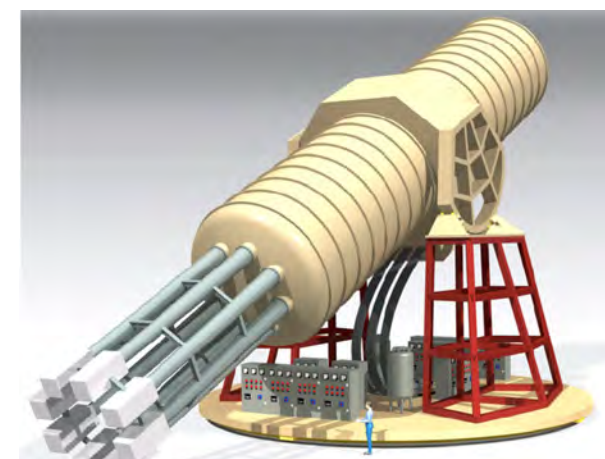
Мультидисциплинарность (астрофизика частиц, строение Солнца). Другие частицы: парафотоны, хамелеоны (темная энергия). Возможность использования IAXO как детектора реликтовых аксионов, т.е. прямого поиска аксионной темной материи (отдельный проект в рамках большого). Технологический вызов — сверхпроводящий соленоид очень большого объема, детекторы рентгеновских фотонов.

Источники информации

- [1] <http://cast.web.cern.ch/CAST/CAST.php>
[2] <http://iaxo.web.cern.ch/>



▲
Установка CAST



▲
Общий вид IAXO (проект)

- [3] I.G. Irastorza et al. Towards a new generation axion helioscope. JCAP 1106 (2011) 013.
[4] E. Armengaud et al. Conceptual Design of the International Axion Observatory (IAXO). JINST 9 (2014) T05002
[5] T. Dafni et al. An update on the Axion Helioscopes front: current activities at CAST and the IAXO project. Nucl.Part.Phys.Proc. 273-275 (2016) 244-249

Реалистичность велика, степень проработки проекта позволяет надеяться на его реализацию в случае финансирования. Насколько реально участие нашей группы в смысле денег, неясно. Рекомендуется обсуждение вопроса на уровне рабочей группы Россия-ЦЕРН и подачи грантов на участие в TDR.

Заключение

Large Volume Detector (LVD)

Физические задачи

Детектор состоит из 1 килотонны жидкого сцинтиллятора +1 килотонны железа на глубине 3600 м водного эквивалента.

Основная задача — поиск нейтрино от взрывов звездных ядер (взрывы сверхновых звёзд) в нашей Галактике (собрана статистика с 1992 года). Особенность установки — мощный железный каркас, работающий как мишень, что позволяет разделять типы нейтрино (электронное антинейтрино и другие), благодаря наличию железа на границе установки и водорода (электронное антинейтрино) и углерода в сцинтилляторе.

Другие задачи — изучение мюонов космических лучей (пространственные и энергетические характеристики); изучение нейтронов, генерированных мюонами в различных веществах под землей (проект M-INYDM); сезонные вариации нейтронов под землей; мониторинг радонового фона под землей; анализ экспериментальных мюонных данных (атмосферные мюоны в горизонтальном направлении); в 2006–2014 гг. проводился мониторинг нейтринного пучка эксперимента CNGS, как результат измерение скорости нейтрино, определение временного сдвига в установке OPERA.

Статус проекта

Работающая установка. Проект представлен на сайте ИЯИ, <http://lvd.ras.ru/exper/lvd.html>, на сайте Gran Sasso, <http://www.lngs.infn.it/en/lvd-eng>.

Основная задача — мониторинг взрывов сверхновых (собрана статистика с 1992 года), в 2006–2014 гг. использовался для мониторингирования нейтринного пучка эксперимента CNGS.

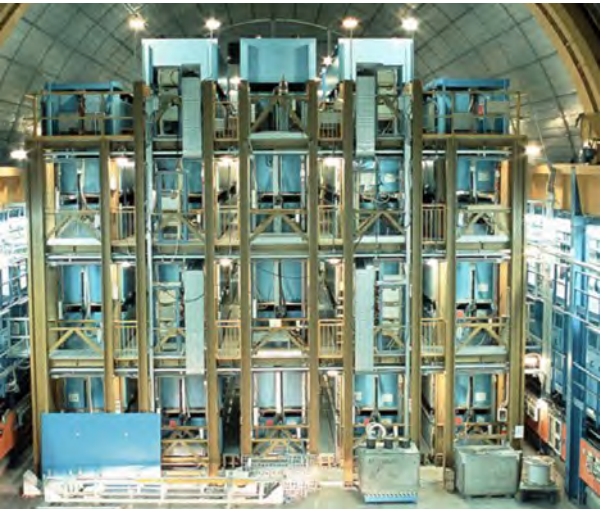
Место, установка, инфраструктура

Лаборатория Gran Sasso, Италия. Установка работает в штатном режиме (с 2002 года в окончательном сборе — 3

башни). Проводятся плановые работы по замене вышедших из строя ФЭУ и блоков электроники.

За инфраструктуру (помещения, инструменты, энергообеспечение) отвечает итальянская сторона.

Необходимо купить новые ФЭУ (была договоренность с ИФВЭ — пока не реализована).



▲ Сцинтилляционный детектор LVD в подземной лаборатории Гран-Сассо, Италия

Кадры

В ИЯИ работу ведут сотрудники лаборатории ЭМДН. В LVD коллаборацию на 2015 г. входят 10 человек: Агафонова Н.Ю., Ашихмин В.В., Дадыкин В.Л., Добрынина Е.А., Еникеев Р.И., Мальгин А.С., Ряжская О.Г., Рясный В.Г., Шакирьянова И.Р., Якушев В.Ф. Остальные сотрудники Лаборатории ЭМДН, включая коллектив Артемовской научной станции, также принимают участие в работе и дежурствах на установке LVD.

Текущий эксперимент.

Конкуренты:

- 1. БПСТ.
- 2. SuperK (в перспективе HyperK): утверждается, хуже различают нейтрино/антинейтрино, однако статистика (определяемая объемом детектора) значительно выше.
- 3. Артёмовская установка мала (105 т сцинтиллятора, NaCl окружающий детектор, являющийся мишенью для $\nu_e A$ взаимодействия).
- 4. Borexino, Kamland, SNO (работают недолго).
- 5. DUNA (в перспективе).

Время реализации и конкуренты

Элементы детектора, такие как сцинтилляционные счетчики и железо (сталь, сцинтиллятор), ФЭУ, это вклад российской группы. Общая стоимость российской части оборудования на текущий момент составляет 100 млн. руб.

Оценка стоимости

Ежегодная стоимость участия составляет 10 млн. руб., которая заключается в обеспечении пребывания российских специалистов на территории Италии согласно Межправительственному Соглашению о научно-техническом сотрудничестве между Италией и Россией от 01.12.1995 г. и с Исполнительной программой третьей сессии смешанной Российско-Итальянской комиссии по научному и техническому сотрудничеству (Рим, 16–17 октября 2002 года). Финансирование осуществляет Министерство образования и науки РФ. Из денег программы Президиума РАН оплачивается доставка сотрудников из места проживания к Лаборатории Гран-Сассо (аренда автомобиля).

Национальная лаборатория Гран-Сассо — лаборатория мирового уровня, подземные и наземные помещения которой содержатся на высоком уровне. Содержание инфраструктуры (помещения, инструменты, энергообеспечение, вычислительные мощности) оплачивает итальянская сторона. Имеющейся инфраструктуры достаточно для успешного проведения эксперимента.

Международный эксперимент, один из нескольких с участием ИЯИ, состоящих в ожидании сигнала от взрыва сверхновой. Преимущество состоит в регистрации как электронных нейтрино, так и антинейтрино, с возможностью эффективного разделения.

Мюоны космических лучей изучались и изучаются во многих экспериментах. Сезонные вариации — задача на несколько лет, радоновый фон — мониторинг, включая возможную связь с предсказанием землетрясений. Тут не видно особых преимуществ LVD.

Задача о генерации нейтронов космическими мюонами, возможно, пересекается с исследованиями на установке COMPASS в CERN. Тем не менее, проект M-INYDM уже одобрен, ведутся измерения для железа и свинца.

Сейчас установка включена в группу из 7 детекторов (проект SNEWS: HALO, DayaBay, ICECUBE, Borexino, KamLand, SuperK, LVD) для работы на совпадение, при этом данные просто передаются в США. Есть предложение аналогичного объединения EuroSNEWS (Borexino, LVD, БПСТ,

Артёмовск), с перспективой собственного анализа всего набора данных.

- [1] <http://lvd.ras.ru/exper/lvd.html>
- [2] О.Г. Рязжская, УФН, 2006, том. 76, №10, 1039–1050.
- [3] N.Yu. Agafonova et al. Joint analysis of experimental data to search for neutrinos from collapsing stars using the LVD and BUST apparatus. Bull.Russ.Acad.Sci.Phys. 79 (2015) 3, 407-409
- [4] LVD Collaboration. Implication for the Core-collapse Supernova Rate From 21 Years of Data of the Large Volume Detector. Astrophys.J. 802 (2015) 1, 47
- [5] LVD Collaboration. Measurement of cosmic muon charge ratio with the Large Volume Detector
- [6] e-Print: arXiv:1311.6995 [hep-ex] |
- [7] LVD Collaboration. Measurement of the velocity of neutrinos from the CNGS beam with the Large Volume Detector. Phys.Rev.Lett. 109 (2012) 070801

Выработать наиболее эффективную стратегию мониторингирования вспышек сверхновых с коллапсирующим ядром, которая позволила бы избежать дублирования задач.

Источники информации

Заключение

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Артемовский сцинтилляционный детектор (ASD)	
Физические задачи	100 тонн жидкого сцинтиллятора на глубине 600 м водного эквивалента. Утверждается, что может детектировать все типы нейтрино. Основная задача — мониторинг взрывов сверхновых (собрана статистика с 1977 года), были задачи по космическим лучам, атмосферным нейтрино.
Статус проекта	Работающая с 1977 года установка. Принадлежит ИЯИ. Проект представлен на русском языке на сайте ИЯИ.
Место, установка, инфраструктура	Соляная шахта в г. Артёмовск, Донбасс. Про необходимость усовершенствования установки информации нет.
Кадры	В ИЯИ работу ведут сотрудники лаборатории ЭМДН (судя по авторам в статьях— 4 человека).
Время реализации и конкуренты	Текущий эксперимент. Конкуренты: 1. БПСТ. 2. SuperK (в перспективе HyperK): утверждается, хуже различают нейтрино/антинейтрино, однако статистика (определяемая объемом детектора) значительно выше. 3. LVD. 4. Borexino, Kamland, SNO (работают недолго).
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Есть предложение объединения EuroSNEWS (Borexino, LVD, БПСТ, Артёмовск), с перспективой собственного анализа всего набора данных.
Источники информации	[1] http://lvd.ras.ru/exper/art.html [2] V.V. Ashikhmin, R.I. Enikeev, A.V. Pokropivny, O.G. Ryazhskaya, V.G. Ryasny. Search for neutrino radiation from collapsing stars with the

Выработать наиболее эффективную стратегию мониторингирования вспышек сверхновых с коллапсирующим ядром, которая позволила бы избежать дублирования задач.

Заключение

Участие в международном проекте KATRIN

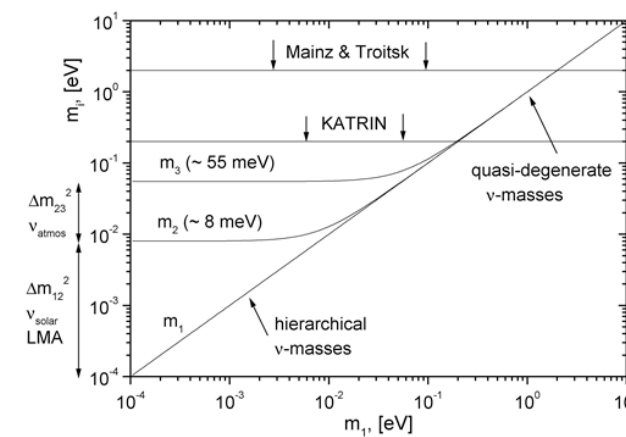
Физические задачи

KATRIN — сокращенное название эксперимента **K**Arlsruhe **T**Ritium Neutrino, который находится в завершающей стадии подготовки.

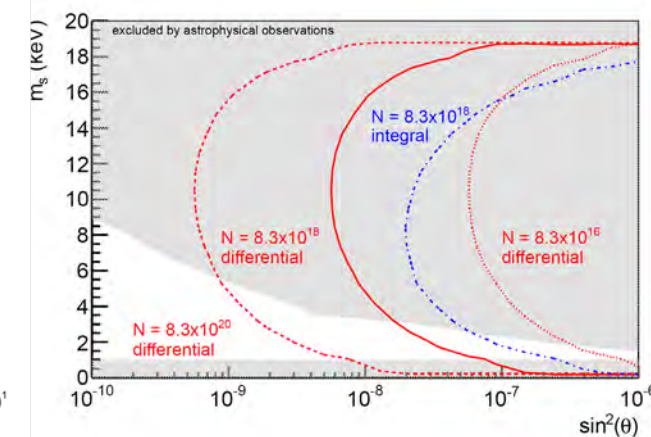
Проект, запущенный в 2001 году, предназначен для определения абсолютной шкалы масс нейтрино, одного из наиболее важных открытых вопросов в физике нейтрино. Экспериментальное наблюдение осцилляций нейтрино позволило определить разности квадратов масс нейтринных состояний, но оставило открытой проблему их общего сдвига. (см. рис. слева).

Массивность нейтрино является прямым указанием на физику за рамками Стандартной модели элементарных частиц и определение абсолютной шкалы массы позволит выбрать направления ее расширения. С точки зрения космологии, наряду с темной материей нейтрино участвуют в формировании видимой структуры вселенной на самых больших масштабах, влияя на формирование и распределение галактик. Проект KATRIN позволит ограничить эффективную массу электронного антинейтрино на уровне 0,2 эВ (на 90% уровне достоверности) или измерить её величину, если она окажется больше чем 0,35 эВ.

По мере подготовки основного эксперимента появились предложения по использованию данных с установки для исследования других процессов. Рассматривались возможности поиска правых токов и легкого ~ 1 эВ стерильного нейтрино. Было показано, что для этого планируемую статистику надо увеличить в несколько раз. Возможность значительного увеличения статистики появилась в 2014 году после разработки для проекта Project8 специального резонатора, позволяющего регистрировать отдельные электроны без изменения их энергии более, чем на 100 мэВ. Установка такого резо-



▲ Массовые состояния нейтрино из данных по осцилляциям как функция легкой массы (случай прямой иерархии)



▲ Ожидаемые ограничения на параметры стерильных нейтрино после 3-х лет работы KATRIN (для разных мощностей источника)

натора должна позволить перевести измерения в режим «по времени пролета» с использованием основного спектрометра в качестве пролетной базы. Таким образом, вместо измерения спектра поточечно можно измерять его одновременно целиком. Следующее расширение программы исследований связано с поиском тяжелых стерильных нейтрино в широком диапазоне масс (до 10–12 кэВ). Высокая интенсивность газового источника KATRIN позволяет исследовать примесь стерильных нейтрино в распаде трития в космологически значимом интервале значений, рис. справа.

Экспериментальный метод основан на работе В.М.Лобашева и П.Е.Спивака, которые в 1983 году предложили новый тип электростатического спектрометра, использующий эффект магнитной адиабатической коллимации. Установка, включающая такой спектрометр и безоконный газовый источник трития, была создана в ИЯИ; её первые результаты опубликованы в 1994 году. Аналогичный спектрометр, но использующий источник замороженного трития, был создан в Университете Майнца, Германия. Развитый подход допускал возможность улучшения чувствительности за счет дополнительного увеличения светимости источника. Для реализации соответствующего эксперимента создан проект KATRIN, в который вошли упомянутые группы из Троицка и Майнца, Лос-Аламоса (нейтринный эксперимент LANL), Исследовательский центр Карлсруэ с крупнейшей в Европе граждан-

Статус проекта

ской тритиевой лабораторией и группа ядерной спектроскопии из Института ядерной физики Чешской академии наук. В дальнейшем состав участников проекта расширялся.

В настоящее время для эксперимента поставлены все основные элементы, происходит их монтаж и запуск по отдельности. Обсуждается возможность использовать момент работы газового источника с пониженной интенсивностью для проведения демонстрационных экспериментов протяженностью примерно неделю. В качестве таких экспериментов рассматривается измерение массы электронного антинейтрино на уровне 1 эВ и поиск тяжелых стерильных нейтрино в широком диапазоне масс. Хотя такие измерения носят «пристрелочный», по сравнению с конечными планами KATRIN, характер, они полностью перекрывают экспериментальные возможности установок в Майнце и Троицке в старых конфигурациях.

В 2015 году работы по проекту KATRIN и ИЯИ РАН включали следующие темы:

- ♦ расчет поправки к потерям энергии электронами в упругих столкновениях в газовом источнике КАТРИН с учетом внутреннего движения атомов в молекуле;
- ♦ разработку оптимальных критериев выделения сигнала стерильного нейтрино в спектре бета-распада трития;
- ♦ исследование быстрых детекторов электронов в области энергий 10...20 кэВ для использования в эксперименте по поиску тяжелых стерильных нейтрино.

Место установки,
инфраструктура

Технологическом институте Карлсруэ, Германия (<http://www.katrin.kit.edu/>).

Время реализации
и конкуренты

Запуск установки планировался на середину 2016 года, начало измерений — конец 2016 (в действительности всё сместилось). Чистое время набора данных — три года, что соответствует 4-5 календарным годам. Таким образом, на ближайшие 5-6 лет ожидается много работы по набору и анализу данных. Конкурентом является установка Троицк-ню-масс, однако рассматриваются возможности объединения усилий этих двух экспериментальных групп. Объем необхо-

димых исследований превышает количество задействованных физиков.

Есть широкий выбор тем для дипломных работ и кандидатских диссертаций. Развитием проекта должен стать поиск стерильных нейтрино в области масс до 10 кэВ на космологически важном уровне смешивания. Подготовка нового проекта, помимо расчетных задач, включает поиск решения большого числа экспериментальных проблем. Проект KATRIN является полигоном для применения самых передовых технологий в вакуумной, криогенной технике, технике высоких напряжений, количественном анализе изотопных смесей, системах сбора данных и т.д. Следует отметить также применение последних достижений в области программного обеспечения, как сбора, так и обработки экспериментальных данных. Участие молодых сотрудников ИЯИ РАН в эксперименте КАТРИН позволяет им быть в курсе последних достижений экспериментальной техники и тем компенсировать проблемы, связанные со старением имеющейся в ИЯИ экспериментальной базы.

Значение для ИЯИ
и смежные задачи

Физические задачи	Конечной целью исследований является создание нейтринного телескопа для изучения естественных потоков нейтрино, однако настоящий проект на данном этапе, как предполагается, будет решать задачи разнонаправленных исследований окружающей акватории, которые необходимы для понимания, в частности, фонов будущего нейтринного эксперимента. Для решения задачи акустической регистрации космических нейтрино сверхвысоких энергий будет разрабатываться гидроакустическая антенна. Гидроакустическая антенна в автономном варианте исполнения — идеальное средство для исследования акустических характеристик акватории: уровня шума, сезонности уровня, характеристик направленности фоновых шумов моря. Данные параметры необходимы для оценки пороговых значений регистрации редких или даже уникальных событий (взаимодействие высокоэнергичного нейтрино или другой частицы высокой энергии со средой) за счет термо-акустического эффекта. Основой приемной системы для акустического нейтринного телескопа может стать система из вертикальных антенн с длительным временем накопления сигнала и предварительной обработкой сигналов, устраняющей ложные срабатывания.
Статус проекта	Идея проекта НЕСТОР-САДКО изложена в [3], план проекта — в [1,2]. Программа фундаментальных научных исследований подробно не разработана.
Место, установка и инфраструктура	Разработка проекта планируется на базе проекта НЕСТОР в Средиземном море, побережье Греции. В ходе проекта предполагается разработка следующего оборудования: ◆ глубоководный альфа-бета-гамма спектрометр (ИЯИ РАН и ОКБ океанологической техники РАН),

- ◆ компактный погружной фотометр на основе лавинных фотодиодов нового поколения для измерения оптических свойств воды (ИЯИ РАН и ОКБ ОТ РАН),
- ◆ глубоководная аппаратура для нейтринного телескопа НЕСТОР (ИЯИ РАН и ОКБ ОТ РАН совместно с Институтом ядерной физики и физики элементарных частиц национального научно-исследовательского центра «ДЕМОКРИТОС», Афины, Греция),
- ◆ гидроакустическая антенна с цифровыми гидрофонами (Институт прикладной физики РАН),
- ◆ бескабельные зонды и автоматические пробоотборники (Атлантическое отделение Института океанологии РАН).

К настоящему времени проведены испытания лабораторного образца автономного глубоководного измерителя термоупругих свойств воды, что является важным шагом для проектирования гидроакустических детекторов нейтрино с большим объемом детектирования.

Данный проект является международным: планируется сотрудничество следующих институтов: ИЯИ РАН (головная организация), Атлантическое отделение Института океанологии РАН (г. Калининград), Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) и Институт ядерной физики и физики элементарных частиц национального научно-исследовательского центра «ДЕМОКРИТОС», Афины, Греция. Участники от ИЯИ РАН: Железных И.М., Жуков В.А. и др. (всего около 5 человек).

Сам по себе НЕСТОР-САДКО не является частью КМЗNeT, хотя и позиционируется в помощь. Поэтому конкуренты по нейтринной программе — остальные нейтринные телескопы. Отметим, что свойства воды и дна в месте предполагаемого проекта очень хорошо исследованы.

Был подан проект на грант РНФ с заявленными суммами 8.5 млн руб, 12 млн руб и 14 млн. руб на 2014-2016 гг. Проект получил высокие оценки, но поддержан не был. При получении финансирования с Российской стороны, Греция обещала выделить на проект аналогичные суммы.

Кадры

Время реализации и конкуренты

Оценка стоимости

В результате выполнения проекта будут расширены перспективы сотрудничества российских институтов с европейскими институтами в создании в Средиземном море нейтринного телескопа с детектирующим объемом 1 куб. км (проект НЕ-СТОР и проект Евросоюза КМЗ NeT) и в проведении совместных океанологических исследований. Проект имеет широкую мультидисциплинарную направленность: целью проекта является разработатка прототипа мобильной лаборатории (с применением, например, парусно-моторного катамарана в качестве носителя универсального аппаратурно-методического комплекса) для решения исследовательских и прикладных задач на глубоководных акваториях, шельфе и мелководьях, включая изучение фоновых характеристик водной толщи и загрязненности донных отложений в районах постановки нейтринных телескопов, обследование экологического состояния морских нефтепромыслов, подспутниковые наблюдения, мониторинг захоронений ОБ в зонах интенсивного природопользования и др. (Может служить полигоном для шельфовых исследований.) Для российских ученых кооперация с Грецией открывает возможность доступа к приборам, поставка которых в Россию затруднена или невозможна. В частности, ограничения на поставку распространяются на ADCP (Acoustical Doppler Current Profiler – акустический доплеровский профилограф течения) и AUV (Autonomous Underwater Vehicle — Автономный подводный аппарат).

Другое направление прикладных исследований связано с разработанными группой сотрудников из ОИЯИ и ИЯИ РАН (Садыгов З.Я.) лавинных фотодиодов нового поколения. С их помощью можно разрабатывать полупроводниковые фотоприемники нового поколения, такие как мультипиксельные лавинные фотодиоды для многоканальных детекторов элементарных частиц, ПЗС-матрицы с внутренним усилением и приборы на их основе, медицинские диагностические приборы (гамма и ПЭТ-томографы), а также системы обнаружения и распознавания удаленных объектов (предложение по включению в программу ФОТОНИКА).

[1] Отчет ИЯИ РАН о НИР за 2014 год

[2] Планы НИР на 2014-2016 гг.

[3] V.A.Matveev, I.M.Zheleznuh, P.I.Korotin, V.T.Paka, N.M.Surin, Alternative techniques of deep-water monitoring, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 626-627, S106-108

Рекомендуется более тщательная проработка фундаментально-научной программы исследований данного проекта. Проект интересен своей возможной прикладной направленностью.

Физические задачи

Определение природы массы нейтрино (дираковская или майорановская) и ее абсолютной величины является одной из приоритетных задач современной физики частиц. В случае майорановской массы нейтрино имеет место нарушение лептонного числа и возможен процесс двойного безнейтринного бета-распада. Поиски таких процессов для различных типов ядер ведутся в настоящее время во многих низкофоновых лабораториях мира. Обнаружение безнейтринного двойного бета-распада подтвердит майорановскую природу массы нейтрино и даст возможность определить ее значение.

Статус проекта

На конец 2016 года запланирован запуск AMoRE-10 с чувствительностью $3 \cdot 10^{25}$ лет за 3 года. В планах на 2019 год — 20-кратное увеличение массы и улучшение чувствительности на период полураспада до 10^{27} лет.

Место, установка, инфраструктура

Подземная лаборатория в Южной Корее. В проекте кристаллы CaMoO_4 , обогащенные молибденом-100, используются в качестве криогенного сцинтиллятора. Кристаллы должны быть достаточно чистые, и поэтому материалы, из которых они производятся, должны проходить тщательную проверку на их собственный фон. Данная проверка — измерение собственной радиоактивности материалов, используемых для выращивания кристаллов CaMoO_4 , выполняется в низкофоновой лаборатории НИКА на Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН.

Имеется два низкофоновых спектрометра, НИКА и СНЕГ. На них планируется измерять чистоту сырья для производства кристаллов. Может потребоваться новая электроника. Сами кристаллы CaMoO_4 будут измеряться на предмет чистоты в активной моде, т. е. будут включаться как

сцинтилляционный детектор с активной защитой из сцинтилляционных детекторов на основе NaI(Tl) . Таким образом, если каждый кристалл будет измеряться в течение месяца, то можно будет набрать статистику и поставить предел на $0\nu\beta\beta$ -распад на суммарной статистике. Для этого понадобится создать новую низкофоновую установку.

Проект является международным экспериментом (8 стран и 18 институтов), в котором ИЯИ РАН представлен группой в составе: Казалов В.В., Кузьминов В.В., Гаврилюк Ю.М., Гежаев А.М., С.П.Якименко. В настоящее время участие ИЯИ РАН сводится к измерению фона материалов (заключен договор с ОАО "Фомос-Материалс", которое занимается выращиванием кристаллов для этого эксперимента). При этом по времени это занимает до 30% времени у некоторых сотрудников лаборатории. Если они будут заниматься еще и сертификацией фона будущих кристаллов, то это может занять до 50% времени у некоторых сотрудников.

Конкурент — французский проект LUMINEU. В этом проекте планируется использовать кристаллы ZnMoO_4 . Преимущества этого проекта: более хорошее энергетическое разрешение из-за низкотемпературных условий, отсутствие проблем с фоном от радия (который присутствует в кристаллах CaMoO_4). Недостатки: сложнее процесс выращивания кристаллов, плохой светосбор. По срокам, пилотный проект LUMINEU с массов 0.7 кг Мо предвидится в 2016 году [3] с чувствительностью 5×10^{24} . Пишут о десятикратном увеличении чувствительности, а в далеких планах — достичь до 10^{27} .

От ИЯИ капиталовложений пока не требуется.

Участие в таком крупном международном проекте как AMoRE представляется очень важным, в особенности для молодых исследователей из БНО ИЯИ РАН. Однако, оно пока ограничено лишь технической стороной. Занимались созданием проектной документации для новой низкофоновой установки для измерения фона кристаллов.

Кадры

Время реализации и конкуренты

Оценка стоимости

Значение для ИЯИ и смежные задачи

Источники информации

[1] А.С.Барабаш, УФН 184, №5.
[2] Доклад В.Казалова на отчетной конференции на Баксане.
[3] LUMINEU: A Pilot Scintillating Bolometer Experiment for Neutrinoless Double Beta Decay Search, M. Tenconi, for the LUMINEU collaboration, Physics Procedia, Volume 61, 2015, Pages 782–786
[4] Neutrinoless Double-Beta Decay: a Probe of Physics Beyond the Standard Model. S.M. Bilenky, C. Giunti, Published in Int.J.Mod.Phys. A30 (2015) 04n05, 1530001

Заклучение

Более активное вовлечение в собственно эксперимент. Занимает значительное время у ряда сотрудников — это может мешать участию в других проектах.

Участие в проектируемой установке
Памир-XXI

Проект комплексной установки «Памир-XXI» для многокомпонентного изучения широких атмосферных ливней (ШАЛ) и первичного космического излучения (ПКЛ) сверхвысоких энергий в рамках МНИЦ «Памир-Чакалтая». Планируется изучать электронную, мюонную, оптическую и адронную компоненты ШАЛ, а также гамма-адронные семейства (частицы в стволе ШАЛ с $E > 1$ ТэВ), представляющие «тонкую» структуру стволов ШАЛ, на высоте Памира, соответствующей максимуму развития ШАЛ для энергии 1-го излома спектра ПКЛ, где флуктуации в развитии ШАЛ минимальны, а точность определения энергии по числу частиц в ливне максимальна.

Концептуально проект проработан, есть публикации по отдельным аспектам, но опубликованного детального проекта нет.

Восточный Памир. Современное жилье, утепленный ангар 1000 кв.м, источники энергии (ветряки, солнечные батареи, дизель). База ФИАН в г. Ош (Кыргызстан).

В ИЯИ — Р.А. Мухамедшин, М. Зеленый. Потребуется помощь экспериментаторов и расчетчиков. Коллаборация из ФИАН, НИИЯФ.

От начала работ до получения первых физических результатов 4–5 лет.

Основной конкурент — LHAASO. Масштаб и финансирование у LHAASO больше, однако чувствительность того же порядка. Преимущества «Памир-XXI»:

- ♦ изучение гамма-адронных семейств;
- ♦ более детальное изучение пространственной структуры

Физические задачи

Статус проекта

Место, установка, инфраструктура

	черенковского излучения, что, как показывают расчеты, существенно повышает информативность экспериментальных данных, в частности, позволяет намного лучше подавлять фон ядерных ливней при регистрации гамма-событий в диапазоне $3 \cdot 10^{13}$–10^{15} эВ и разделять ядерные ливни по массе на три-пять групп в диапазоне 10^{14}–10^{17} эВ. ♦ астроклимат на Памире — один из лучших в мире, в Китае ситуация с погодой гораздо хуже.
Оценка стоимости	Стоимость всего проекта 500 млн. руб. Есть финансирование от Минобрнауки, которое может быть увеличено в случае реального развития проекта.
Значение для ИЯИ и смежные задачи	Независимая проверка LHAASO. Не пропадет инфраструктура на Памире.
Источники информации	[1] A.S. Borisov, V.I. Galkin, M.I. Ilolov, R.A. Mukhamedshin, H.H. Muminov, V.S. Puchkov, O. Saavedra. Modern status of the PAMIR-XXI Project. Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro (2013) [2] Managadze A. and Mukhamedshin R. What can we know on hadron superhigh-energy interaction fragmentation range by XREC data? J. Phys.: Conf. Ser. 409 (2013) 012079; DOI:10.1088/1742-6596/409/1/012079 [3] Borisov A.S., Galkin V.I. Design of a Cherenkov telescope for the measurement of PCR composition above 1 PeV J. Phys.: Conf. Ser., 409 (2013) 012089
Заключение	Создание альтернативного эксперимента, способного конкурировать с LHAASO и верифицировать их результаты, представляется важным. Участие ИЯИ на данном этапе — моделирование развития высокоэнергичных стволов ШАЛ и разработка новой модели взаимодействия адронов. Крайне желательна доработка проекта эксперимента и публикация проекта, с оценкой чувствительности.

Тянь-Шань: участие в реализуемом проекте по изучению сечения генерации очарованных частиц («forward» physics) при энергиях ~ 50–100 ТэВ на ядрах с помощью двухэтажной РЭК	
Изучение сечения генерации чармированных частиц в переднем кинематическом конусе («forward» physics) адронами космических лучей с энергиями ~ 50–100 ТэВ на ядрах свинца в высокогорных экспериментах с двухэтажной рентгено-эмульсионной камерой (РЭК) с большим воздушным зазором (~ 2,2 м). Аналогичная ускорительная информация отсутствует и не может быть получена в коллайдерных экспериментах, работающих в кинематической центральной области псевдобыстрот. Исследования нужны для разработки теоретических моделей взаимодействия адронов и моделей развития ядерных каскадов в атмосфере, используемых для наземных астрофизических исследований, и лучшего понимания явлений, наблюдаемых в ШАЛ. Концептуально проект проработан, есть предварительные результаты данных одно-годовой экспозиции, проводившейся на ТШВНС (3340 м н.у.м), свидетельствующие в пользу весьма высокого сечения генерации чармированных D-мезонов во фрагментационной области на свинце при этих энергиях. Аналогичная установка также уже имеется на Памире (4400 м н.у.м.), где скорость набора статистики должна быть в ~3 раза выше. Тянь-Шань. Современное жилье, утепленный ангар, централизованное электроснабжение. База ФИАН в г. Алматы (Казахстан). В ИЯИ — Р.А. Мухамедшин. Готов помочь М. Зеленый. Потребуется помощь экспериментаторов и расчетчиков. Кроме ИЯИ — ФИАН, НИИЯФ	Физические задачи Статус проекта Место, установка, инфраструктура Кадры

Эксперимент может проводиться постоянно при условии возможности закупки специализированной рентгеновской пленки. Конкурентов нет.

Оценка стоимости Стоимость проекта ~5 млн.руб. (в основном, стоимость пленки).

Значение для ИЯИ и смежные задачи Проверка теоретических моделей взаимодействия адронов и моделей развития ядерных каскадов в атмосфере, используемых для наземных астрофизических ШАЛ-исследований.

Источники информации A.S.Borisov, V.G.Denisova, Z.M.Guseva, E.A.Kanevskaya, M.G.Kogan, A.E.Morozov, V.S.Puchkov, S.E.Pyatovsky, G.P.Shoziyoev, M.D.Smirnova, A.V.Vargasov, V.I.Galkin, S.I.Nazarov, R.A.Mukhamedshin. Estimation of charm production cross section in the forward kinematic cone at energies $E_{Lab} \sim 75$ TeV according to the high mountain experiment with two-storey XREC. Proc. 34th ICRC, 30 July – 6 August, 2015 (Hague) (to be published)

Заключение Установка готова к эксплуатации, получены предварительные результаты, финансовые затраты умеренные.

Нейтрино
и астрофизика частиц
Программа развития
Института ядерных исследований
Российской академии наук

Составители
Д.С. Горбунов, С.В. Демидов, С.В. Троицкий

Дизайн
Н.Л. Нольде

Подписано в печать 28.09.2016

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 5.0 Зак. 22397 Тираж экз. Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных
исследований Российской академии наук
117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

