

Многоцелевая нейтринная обсерватория

Многоцелевая распределенная национальная нейтринная обсерватория включает в себя комплекс уникальных установок, действующих по единой программе междисциплинарных исследований и позволяющих исследовать природные и искусственные потоки нейтрино в широком энергетическом диапазоне $\sim(10^5-10^{17})$ эВ.

Участники: ИЯИ РАН, НИЦ КИ, ОИЯИ, МИФИ, МГУ, МФТИ, КБГУ, зарубежные партнеры.

Мотивация

Развитие многих направлений в современной физике и смежных областях самым тесным образом связано с пониманием природы нейтрино. Физика элементарных частиц, космология ранней Вселенной, вопросы формирования структур во Вселенной, механизмы горения звёзд, внутреннего устройства Земли и других планет - все эти темы требуют тщательного исследования свойств нейтрино и создания нейтринных телескопов нового поколения. С нейтрино связываются надежды на понимание физики вне рамок Стандартной модели элементарных частиц, на поиск новых видов симметрии. В исследованиях нейтрино от различных источников – реакторных, солнечных, ускорительных, галактических, внегалактических, от высокоинтенсивных искусственных источников – включаются научные коллективы многих стран.

Вместе с тем бурное развитие нейтринной темы в мире значительно усиливает требования, предъявляемые к нейтринным телескопам нового поколения. В первую очередь это касается значительного увеличения массы мишени, используемой для наблюдения реакций, вызываемых нейтрино, и повышения качества получаемой информации. Современные установки должны обеспечивать получение информации в режиме реального времени с аппаратурой и мишенями больших объемов, расположенными глубоко под горными породами либо под большой толщей воды или льда, защищающими их от воздействия космических лучей.

Россия обладает значительным потенциалом в области нейтринных исследований. Советские и российские учёные внесли основополагающий вклад как в современное понимание свойств нейтрино (концепция осцилляций нейтрино – Б.М. Понтекорво, осцилляции в веществе – С.П.

Михеев, А.Ю. Смирнов), так и в развитие и реализацию концепций нейтринных экспериментов. Общеизвестный метод регистрации нейтрино высоких энергий в больших объемах природной воды или льда был предложен М.А. Марковым и И.М. Железных и впервые реализован в эксперименте на озере Байкал. Сегодня обновленный байкальский эксперимент активно развивается и является, по состоянию на 2017 г., крупнейшим в Северном полушарии (см. также Аналитическую справку по уникальной научной установке Байкальский глубоководный нейтринный телескоп ИЯИ РАН, <http://www.inr.ru/rus/dokum/buk-bgnt.pdf>). Пионерские работы по регистрации нейтрино более низких энергий на подземных установках связаны с именами Г.Т. Зацепина и А.И. Чудакова. В нашей стране была создана первая в мире подземная лаборатория глубокого заложения, построенная специально для проведения нейтринных экспериментов, - Баксанская нейтринная обсерватория (БНО). На Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) БНО впервые был измерен интегральный поток всех приходящих на Землю солнечных нейтрино и показан дефицит солнечных нейтрино во всем диапазоне энергетического спектра, что явилось важным вкладом в открытие осцилляций нейтрино, а также подтвердило, что источником энергии Солнца являются термоядерные реакции. С помощью Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа (БПСТ) – первого в истории многоцелевого детектора нейтрино – были получены основополагающие результаты в астрофизике частиц, в том числе зарегистрирован нейтринный сигнал от сверхновой 1987А, вспыхнувшей в Большом Магеллановом Облаке (см. также Аналитическую справку по уникальным научным установкам Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, <http://www.inr.ru/rus/dokum/buk-bno.pdf>, и статью в журнале CERN Courier, посвященную 50-летию БНО, <http://cerncourier.com/cws/article/cern/68795>).

Создание нейтринных телескопов нового поколения в России крайне востребовано необходимостью продолжения и развития традиций российской школы фундаментальных исследований, возрождения интереса к науке среди молодежи. Создание таких телескопов - детекторов требует проведения многочисленных исследований в сопутствующих областях знания, таких как химия, оптика, материаловедение, подземная и подводная инженерия и многое другое, что безусловно стимулирует развитие наукоемких производств мирового уровня в стране. **Отметим, что ряд задач в области исследований нейтрино в настоящий момент может быть решен только в России, что определяется географическими особенностями и наличием уникальной исследовательской и производственной инфраструктуры.**

Технология проведения масштабных экспериментов в физике нейтрино предъявляет разнообразные требования к географическим условиям, которые удовлетворяются в разных

регионах России. Исследование астрофизических нейтрино высоких энергий требует наличия больших объемов чистой воды (озеро Байкал), для меньших энергий нужны крупные подземные лаборатории глубокого залегания с развитой инфраструктурой (Баксанская нейтринная обсерватория). Для экспериментов, регистрирующих нейтрино низких и средних энергий астрофизического происхождения, ключевую роль играет удаленность от атомных электростанций (Кавказ, в том числе БНО). Всё это предопределяет с необходимостью географически распределенный характер многоцелевой нейтринной обсерватории. Предлагаемая обсерватория будет включать следующие основные инструменты:

- 1) Байкальский глубоководный нейтринный телескоп (БГНТ, Baikal-GVD - Gigaton Volume Detector) – один из крупнейших в мире инструментов для нейтринной астрофизики высоких энергий и комплексных исследований в смежных областях;
- 2) Новый баксанский нейтринный телескоп (НБНТ, NBNT, New Baksan Neutrino Telescope) – подземный сцинтилляционный детектор большого объема, крупнейший в мире инструмент для регистрации нейтрино средних энергий и решения задач на стыке физики частиц, астрофизики и геофизики.

Создание в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН подземного сцинтилляционного детектора большого объема - 10 кт (НБНТ) и увеличение эффективного объема свыше 1 км³ Байкальского глубинного нейтринного телескопа (БГНТ) Байкальской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН позволят создать первую в мире многоцелевую распределенную нейтринную обсерваторию для исследования по единой программе природных потоков нейтрино в широком энергетическом диапазоне – от $\sim 10^5$ эВ до $\sim 10^{17}$ эВ.

В состав Многоцелевой распределенной нейтринной обсерватории могут входить также другие уникальные нейтринные установки научных организаций России. При наличии существенного финансового вклада России в проект неизбежно войдут зарубежные участники, и будет создана международная коллаборация. Отметим, что создание предлагаемых установок соответствует приоритетам 2 («нейтрино высоких энергий») и 13 («уникальные инфраструктуры – глубокие подземные лаборатории») Европейской дорожной карты по астрофизике частиц на 2017-2026 годы, утвержденной APPEC (Astroparticle Physics European Consortium) – европейской организацией, координирующей финансирование крупных инфраструктурных проектов в астрофизике частиц, см. <http://www.appec.org/roadmap>).

Руководитель проекта: академик В.А. Рубаков

Заместитель руководителя: член-корреспондент РАН С.В. Троицкий

Ориентировочная стоимость проекта: **19.8** млрд рублей

Сроки исполнения проекта: БГНТ – рост набора данных по мере увеличения объема детектора, выход на 1 куб. км – 2024 г.; НБНТ - НИОКР/проектирование 2018-2020, строительство 2021-2025, начало сбора данных 2026 г.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD (БГНТ)

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 областях науки и техники: гидрологии, лимнологии, геофизике, экологии, долговременном непрерывном мониторинге состояния водной среды озера Байкал. Основу телескопа составляет объемная решетка из 5618 сверхчувствительных датчиков, регистрирующих импульсы черенковского свечения, вызываемого взаимодействием релятивистских частиц с водной средой, и распределенная система (локальная сеть) сбора данных. Решетка датчиков располагается на глубинах от 1350 до 700 м в южной котловине озера Байкал на расстоянии 4 км от берега. Геометрия расположения и количество датчиков оптимизированы для регистрации потоков астрофизических нейтрино с энергиями свыше 1 ТэВ. Ожидается, что после достижения эффективного объема телескопа для регистрации ливней в 1 км³, в результате процедур обработки больших массивов данных будут выделяться несколько десятков интересующих нас событий в год.

Проект выполняется с 2018 по 2025 годы коллаборацией из 9 научных и образовательных российских и зарубежных организаций: ИЯИ РАН, ОИЯИ, НИИПФ ИГУ, ННГТУ, СП ГМТУ, НИИЯФ МГУ, Evologics GmbH (Germany), Comenius University (Slovakia), Czech Technical University in Prague (Czech Republic).

Надзор за качеством выполнения проекта осуществляется Техническим комитетом из выдающихся российских и зарубежных специалистов в данной области.

Основные научные задачи Baikal-GVD:

- Исследование природного потока нейтрино в области энергий свыше 1 ТэВ.
- Поиск источников и исследование природы внеатмосферных нейтрино высоких энергий, зарегистрированных в 2013 г. на детекторе IceCube.

- Постановка и решение задач новой области исследований – нейтринной астрономии.
- Поиск сигналов от аннигиляции или распадов частиц темной материи.

Важнейшим преимуществом 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. Детекторы IceCube на Южном полюсе, Baikal-GVD и средиземноморские детекторы объединены в глобальную сеть GNO (Global Neutrino Observatory), что позволяет вести поиск источников нейтрино на всей небесной сфере.

По состоянию на 2017 год введены в эксплуатацию два кластера телескопа Baikal-GVD, что уже обеспечило нам лидирующие позиции в создании крупномасштабных нейтринных телескопов в Северном полушарии. В результате реализации проекта Baikal-GVD станет одним из мировых лидеров в области нейтринной астрономии.

Финансирование проекта Baikal-GVD

Общее бюджетное финансирование 2018-2025, включая эксплуатационные расходы - 1720000000 (миллиард семьсот двадцать миллионов рублей).

Вклад партнеров – внебюджетное финансирование - 2280000000 (два миллиарда двести восемьдесят миллионов рублей).

Общий объем финансирования - 4000000000 (четыре миллиарда рублей).

Проект выполняется в два этапа:

1 этап – 2018-2020 гг. - создание 1 очереди нейтринного телескопа из 8 кластеров с эффективным объемом $0,4 \text{ км}^3$, что позволит накопить базу данных для научных исследований с получением результатов мирового уровня в нескольких направлениях: поиске астрофизических нейтрино высоких энергий, поиска источников нейтрино высоких энергий, поиска гипотетических частиц (магнитных монополей, WIMP, решение проблем, связанных с темной материей, участие в программах международных исследований по принципам анализа астрофизических данных от многих независимых измерительных

комплексов, включая установки регистрации гравитационных волн, спутниковые данные в различных областях спектра, наземные измерительные комплексы космических частиц и т.д.). Бюджетное финансирование – 560 миллионов рублей; внебюджетное – 855 миллионов рублей.

2 этап – 2021-2025 гг. – расширение телескопа до 20 кластеров и эффективного объема более 1 км³, что превысит объем IceCube и позволит, благодаря более высокому пространственному разрешению, повысить эффективность ранее перечисленных исследований и проводить работы по определению положения локальных источников нейтрино высоких энергий и по построению нейтринной карты неба, т.е. решать задачи нейтринной астрономии. Бюджетное финансирование – 1160 миллионов рублей; внебюджетное – 1425 миллионов рублей.

В результате двух этапов российские ученые получают наиболее совершенную в мире исследовательскую установку и доступ к базе уникальных научных данных в наиболее актуальных направлениях фундаментальной науки: физики частиц, астрофизики и астрономии. Кроме того, планируется довести до практического использования результаты гидрологических измерений и мониторинга состояния водной среды озера Байкал новейшими методами, развитыми в процессе создания Байкальского глубоководного нейтринного телескопа.

К настоящему времени в выполнение проекта в период 2015-2017 гг. вложено 950 миллионов рублей бюджетных и внебюджетных средств. Введены в эксплуатацию 2 кластера по проекту Baikal-GVD, которые уже поставляют весь комплекс необходимых данных для проведения исследований по перечисленным выше направлениям.

Готовность к выполнению первого этапа при наличии финансирования, практически, полная. Для выполнения второго этапа необходимо расширить производство оптических и электронных управляющих модулей в 1,5 раза, завершить формирование производственной и эксплуатационной инфраструктуры телескопа, завершить разработку пакета программ и средств для обработки и хранения больших массивов данных, решить кадровые вопросы.

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Всего
Целевое бюджетное	150000	150000	260000	260000	260000	260000	260000	120000	1720000

финансирование (тыс.руб.)									
Вклад партнеров – внебюджетное финансирование (тыс.руб.)	285000	285000	285000	285000	285000	285000	285000	285000	2280000
Общий объем средств целевого финансирования по годам (тыс.руб.)	415000	415000	525000	525000	525000	525000	525000	405000	4000000
В том числе целевые бюджетные средства, необходимые для годового обслуживания после ввода в эксплуатацию (тыс.руб.)	19000	19000	21000	21000	29000	34000	34000	36000	213000

Новый баксанский нейтринный телескоп (НБНТ) - подземный сцинтилляционный детектор большого объема

Предлагается создать в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН (Кабардино-Балкарская Республика РФ) многоцелевой нейтринный детектор большого объема на основе жидкого сцинтиллятора с массой мишени 10 кт, предназначенный для регистрации нейтрино и антинейтрино от Солнца, Земли и астрофизических источников. Сцинтилляционный детектор большого объема будет расположен в подземной выработке на глубине 4760 м водного эквивалента. Являясь наиболее чувствительным в мире для решения "новой проблемы солнечных нейтрино", инструмент станет одним из ключевых участников всемирной сети многоцелевых нейтринных детекторов нового поколения, в которую войдут создаваемые в настоящее время установки HyperKamioKande (Япония), JinPing (Китай), JUNO (Китай), SNO+ (Канада). Из прикладных задач, которые можно будет решать с помощью сети больших сцинтилляционных детекторов, следует отметить важную для МАГАТЭ задачу контроля работы атомных реакторов.

Научные проблемы, на решение которых будет направлена работа полномасштабного сцинтилляционного детектора нейтрино нового поколения:

- регистрация нейтрино от Солнца, образующихся в реакциях захвата протонов ядрами С, N, O и F, а затем позитронного распада образовавшихся ядер (так называемый цикл CNO). Измерение потока этих нейтрино позволит получить важную информацию о химическом составе солнечных недр, что является особенно актуальным в контексте трудностей согласования наблюдений химического состава фотосферы с данными гелиосейсмологии;
- измерение потоков антинейтрино от бета-распадов изотопов естественных радиоактивных семейств ^{238}U и ^{232}Th , а также ^{40}K , содержащихся в земных недрах. Надежная регистрация этих частиц (геонейтрино) позволит установить вклад энерговыделения от радиоактивного распада указанных изотопов в общий тепловой поток Земли; проверить гипотезу о протекании в центре Земли цепной реакции деления путем поиска потока антинейтрино "геореактора"; определить соотношение Th/U внутри планеты, что даст новую информацию о внутреннем устройстве и происхождении Земли;
- регистрация изотропного потока антинейтрино, накопившихся во Вселенной в

результате гравитационных коллапсов ядер массивных звезд и образования нейтронных звезд и черных дыр;

- изучение динамики взрыва сверхновой путем регистрации интенсивности и спектра нейтринной вспышки в случае взрыва сверхновой с коллапсирующим ядром на расстоянии до 200 кпк;
- регистрация совокупного потока антинейтрино от всех имеющихся на Земле энергетических ядерных реакторов. Изучение осцилляций электронных антинейтрино.

В лаборатории подземного НБНТ собственно нейтринные исследования будут дополнены поиском редких процессов по ряду других актуальным физическим направлениям, в частности, поиском тёмной материи. Требования к условиям таких поисков во многом совпадают с обозначенными требованиями к нейтринным детекторам - телескопам.

Ссылка на подробное описание: <http://www.inr.ac.ru/~st/full.pdf>

Финансирование проекта НБНТ

Оценка полной стоимости проекта по созданию Баксанского подземного сцинтилляционного детектора с массой жидкого сцинтиллятора 10 кт сделана на основе стоимостей аналогичных установок меньшего объема SNO (Канада), DUSEL (США), KamLAND (Япония) и составляет 13530 млн.руб.

Создание уникального инструмента такого объема предполагает проведение большого количества исследований, направленных на оптимизацию конструкции и апробирование применяемых научных и технологических методов и подходов. К концу 2018 г. будет создан первый прототип установки с массой сцинтиллятора 100 кг, а к концу 2019 г. начнет работу прототип с массой 1 т. Создание этих прототипов финансируется грантом Российского научного фонда (6 млн. руб./год, 2017-2019 гг.). Это оборудование может быть размещено в зале ГГНТ.

Следующий этап – создание (к 2022 г.) крупномасштабного прототипа с массой сцинтиллятора порядка 30 т. Для размещения этого прототипа, как и для полномасштабного инструмента, потребуются создание новых лабораторных помещений в выработках, размещённых в конце штолен БНО. Частично будут задействованы не используемые сейчас выработки, в которых при первоначальном проектировании обсерватории предполагалось размещение хлор-аргонового нейтринного телескопа (в дальнейшем заменённого на более компактный и эффективный ГГНТ). Проект НБНТ будет включать системы очистки воды и жидкого сцинтиллятора, размещённые в специальных помещениях под землёй.

Финансирование проекта «Новый баксанский нейтринный телескоп» (НБНТ)

млн. рублей

№ п/п	Виды затрат	Распределение по годам								
		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Всего:
1	<p>- Разработка технических заданий на проведение инженерно-геологических изысканий, обследование конструкций штолен и их систем жизнеобеспечения, выполнение проектных работ.</p> <p>- Проведение изысканий, обследований. Разработка проектной документации, проведение Госэкспертизы (технологического и ценового аудита), разработка рабочей документации.</p> <p>- Выполнение строительно-монтажных работ (проходка штолен, монтаж технологического оборудования), модернизация существующих систем жизнеобеспечения, пусконаладочные работы</p>	0,5	200,0	235,5	250,0	300,0	350,0	400,0	244,0	1980,0
2	<p>Конструирование, изготовление и монтаж конструкций сцинтилляционного телескопа большого объема 10 килотонн. Выбор, наработка и чистка сцинтиллятора.</p>		535,0	900,0	900,0	900,0	900,0	900,0	815,0	5850,0
3	<p>Проектирование, изготовление и установка научного оборудования телескопа (электроника, ФЭУ и т.д.)</p>		450,0	800,0	800,0	800,0	800,0	1000,0	1050,0	5700,0
Всего:		0,5	1185,0	1935,5	1950,0	2000,0	2050,0	2300,0	2109,0	13530,0

**Сводная таблица требуемого финансирования
Многоцелевой нейтринной обсерватории по годам**

млн. рублей

	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Всего
Требуемое финансирование Байкальского глубоководного нейтринного телескопа (Baikal- GVD)	150,0	150,0	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0	120,0	1720,0
Требуемое финансирование Нового баксанского нейтринного телескопа (NBNT)	0,5	1185,0	1935,5	1950,0	2000,0	2050,0	2300,0	2109,0	13530,0
Всего	150,5	1335,0	2195,5	2210,0	2260,0	2310,0	2560,0	2229,0	15250,0