

Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

Институт
ядерных
исследований
Российской
академии
наук

ИЯИ
РАН

Уникальная
научная установка

БАКСАНСКАЯ НЕЙТРИННАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ИЯИ РАН

аналитическая
справка
2015

Федеральное
государственное
бюджетное
учреждение
науки

Институт
ядерных
исследований
Российской
академии
наук



Уникальная
научная установка

БАКСАНСКАЯ НЕЙТРИННАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ИЯИ РАН

аналитическая
справка

2015



Статус и место в мире

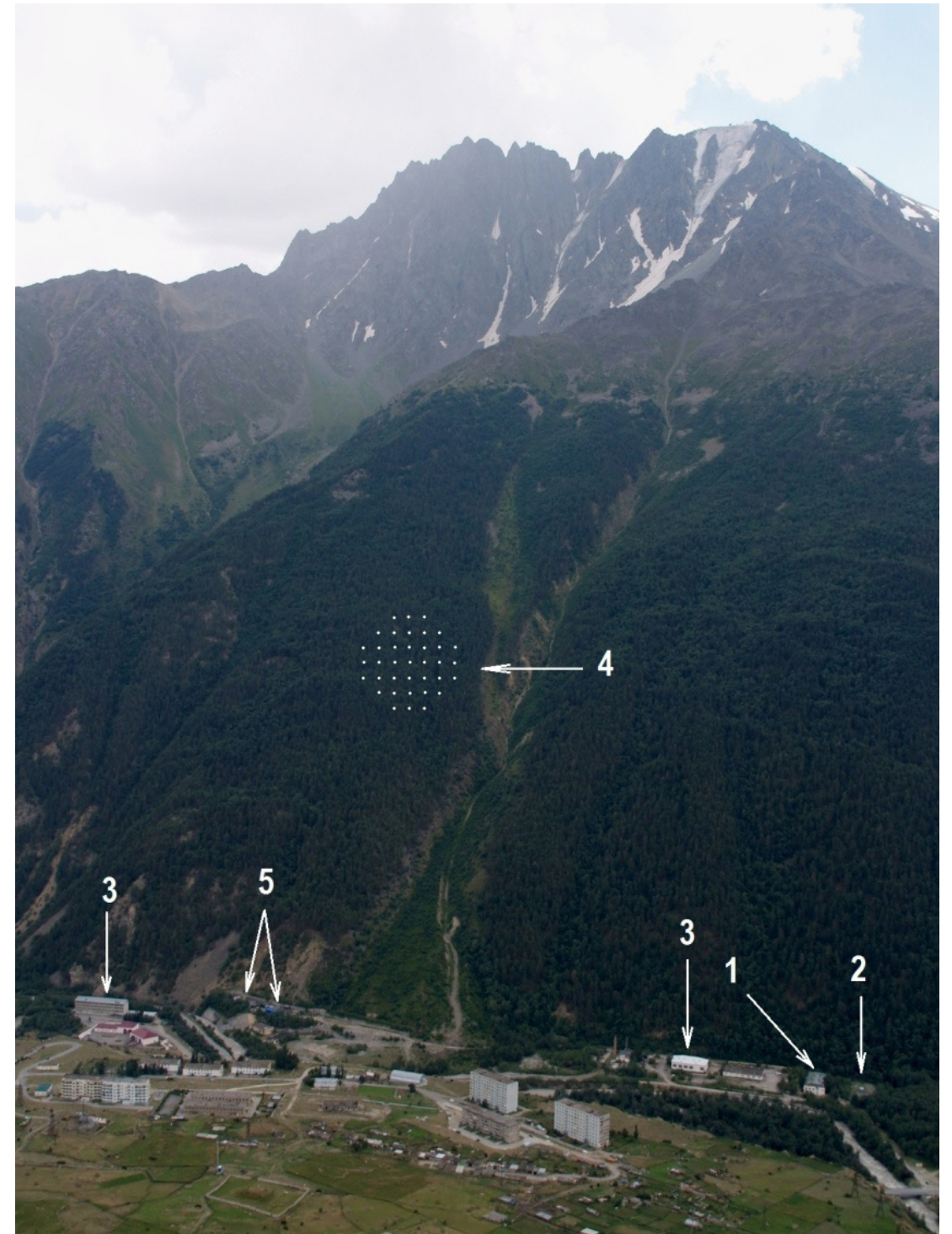
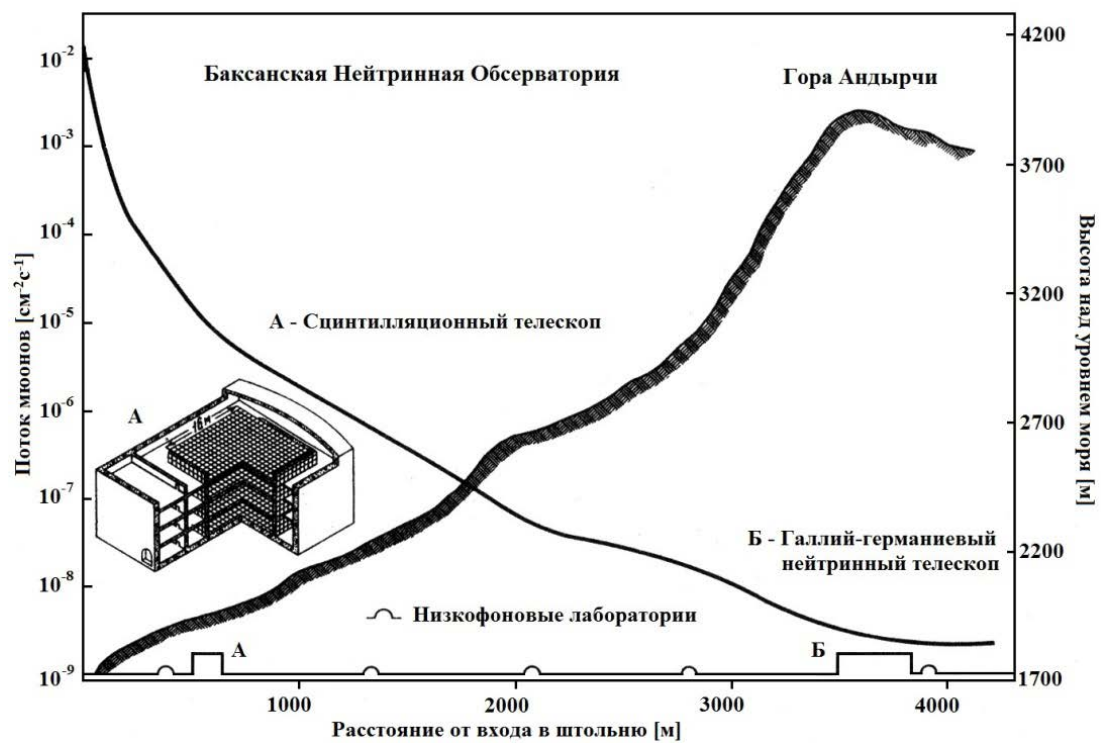
Баксанская нейтринная обсерватория (БНО) ИЯИ РАН — первая (работает с 1973) и одна из двух функционирующих сегодня в мире крупномасштабных подземных лабораторий, включающих комплекс дополняющих друг друга уникальных установок для междисциплинарных исследований на стыке фундаментальной физики, астрофизики и геофизики. Вторая подобная обсерватория с комплексом подземных установок расположена в Гран-Сассо (Италия; с 1989); остальные подземные лаборатории в мире решают более частные задачи. Только в лабораториях, расположенных глубоко под землей, может быть достигнут чрезвычайно низкий уровень радиационного фона, необходимый для большинства ключевых исследований в области нейтринной физики и экспериментов, направленных на поиск редких событий в физике элементарных частиц. Только подземные лаборатории могут обеспечить условия для создания ультранизкофоновых гамма-спектрометров для определения следовых количеств радиоактивных примесей в материалах, используемых в низкофоновых экспериментах. В последние несколько десятилетий подземная физика получила интенсивное развитие во всем мире. Практически все развитые страны имеют и в настоящее время интенсивно создают новые или расширяют существующие подземные лаборатории.

Баксанская нейтринная обсерватория (Приэльбрусье, Кабардино-Балкария) состоит из комплекса подземных сооружений, расположенных вдоль двух параллельных горизонтальных штолен в толще горы Андырчи (высота горы свыше 4 км; длина штолен около 4 км), и комплекса наземных лабораторий. БНО является градообразующим предприятием: комплекс инженерно-хозяйственных сооружений и жилья для сотрудников составил новый населенный пункт — пос. Нейтрино. Общая схема подземной части обсерватории приведена на рис.1, общий вид наземных сооружений — на рис.2.

Установки комплекса экспериментальных лабораторий БНО

- ◆ Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) — установка с 60-тонной металлической галлиевой мишенью для исследования нейтринного излучения Солнца и свойств нейтрино. Размещен в низкофоновой лаборатории в подземной горной выработке объемом 7 тыс. куб. м на глубине 4700 м водного эквивалента (3500 м от устья штольни);

- ◆ Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) — установка с 330 т жидкого органического сцинтиллятора для широкого круга исследований в области физики космических лучей и астрофизики. Размещена в горной выработке объемом 12 тыс. куб. м, минимальная глубина 850 м водного эквивалента (500 м от устья штольни);
- ◆ установка «Андырчи» — установка для регистрации широких атмосферных ливней космических лучей полной площадью 50 тыс. кв. м, расположенная на поверхности горы непосредственно над БПСТ (расстояние по вертикали 350 м);
- ◆ установка «Ковер» для изучения космических лучей и гамма-астрономии, в составе которой 400 сцинтилляционных детекторов площадью 200 кв. м с шестью выносными пунктами общей площадью 54 кв. м, мюонный детектор площадью 410 кв. м и нейтронный супермонитор;
- ◆ низкофоновая лаборатория с несколькими камерами на разных глубинах (до 4900 м водного эквивалента) и набором детекторов для измерения микроколичеств радиоактивных примесей в ультрачистых веществах, для поиска сверхредких процессов.



←
Рис. 1.
Продольный разрез подземного комплекса лабораторий БНО

↑
Рис. 2.
Вид на пос. Нейтрино и гору Андырчи.
Наземные сооружения БНО:
1 - установка «Ковер»,
2 - мюонный детектор,
3 - лабораторные корпуса,
4 - установка «Андырчи»,
5 - входы в штольни

Научные результаты и программа исследований

На БНО получены **всемирно известные результаты**, определившие развитие современной физики частиц и астрофизики и процитированные в сотнях статей. На Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) впервые был измерен интегральный поток приходящих на Землю солнечных нейтрино и показан дефицит нейтрино во всем диапазоне энергетического спектра, что явилось важнейшим вкладом в открытие нейтринных осцилляций. На основе измеренного интегрального потока впервые была получена скорость pp-реакции, изначальной реакции водородной цепочки термоядерного синтеза в Солнце, в которой выделяется более 99% генерируемой в Солнце энергии. На Баксанском подземном сцинтилляционном телескопе (БПСТ) был зарегистрирован нейтринный сигнал от сверхновой 1987A, вспыхнувшей в Большом Магеллановом Облаке. В экспериментах по калибровке ГГНТ искусственными источниками нейтрино с активностью ~ 0.5 МКи обнаружено разногласие измеренной величины с ожидаемой, получившее название «галлиевой аномалии». С помощью БПСТ — первого в истории универсального многоцелевого нейтринного детектора — были получены основополагающие результаты в астрофизике частиц: измерены потоки мюонов и нейтрино, получены ограничения на существование магнитных монополей и на распад протона, оставшиеся в течение долгого времени лучшими в мире.

Сегодня БНО продолжает проводить эксперименты мирового уровня. **За последние пять лет:**

- ◆ По данным работы БПСТ и российско-итальянской установки LVD (Гран Сассо, Италия) в течение 37 лет (1977–2014) получено самое строгое в мире экспериментальное ограничение на полную частоту нейтринных всплесков от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике, в том числе в областях сильного поглощения, недоступных для наблюдения обычными методами.
- ◆ Проведен поиск в данных БПСТ избытка энергичных нейтрино, приходящих в направлении от Солнца, и получено одно из лучших в мире ограничений на величину эффекта, ожидаемого от аннигиляции массивных частиц темной материи, аккумулированных в центре Солнца.
- ◆ На установке «Ковер-2» установлен и в 2015 году вводится в эксплуатацию уникальный мюонный детектор площадью 410 кв. м. Через год работы детектора (конец 2016–2017 г.) должна быть

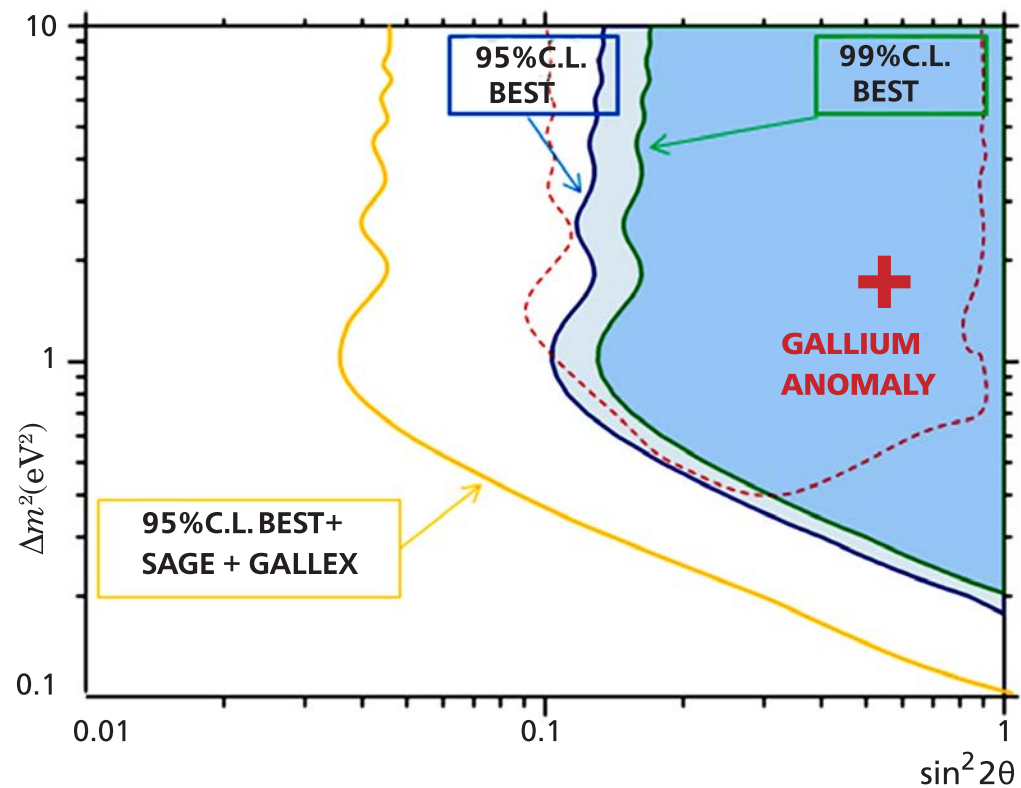
достигнута лучшая в мире чувствительность к астрофизическим фотонам с энергиями порядка 100 ТэВ (как для точечных источников, так и для диффузного фона). Этой точности будет достаточно для проверки нескольких основных сценариев галактического происхождения астрофизических нейтрино высоких энергий, зарегистрированных в 2013 г. экспериментом IceCube.

- ◆ В низкофоновой лаборатории глубокого заложения БНО в эксперименте по поиску солнечных аксионов, взаимодействующих с ядрами криптона, было получено лучшее в мире ограничение на массу адронного аксиона.
- ◆ На установке «Ковер» открыты и исследованы спорадические вариации интенсивности вторичных космических лучей во время гроз. Показано, что в некоторых случаях высота генерации дополнительных частиц в этих событиях лежит высоко в стратосфере. Для этих случаев наблюдение с помощью удаленных (до 75 км) видеокамер позволило получить прямое доказательство существования нового типа медленного высотного разряда на убегающих электронах в атмосфере (аналог тлеющего разряда). Обнаружены корреляции таких событий с геомагнитными пульсациями.

На БНО планируется проведение ряда новых крупномасштабных экспериментов мирового уровня, в частности, перечисленных ниже.

Эксперимент BEST

В поисках объяснения галлиевой аномалии, как и аномалий, наблюдаемых в ускорительных и реакторных нейтринных экспериментах, внимание мирового научного сообщества сконцентрировано на гипотезе существования стерильных нейтрино — гипотетических частиц, взаимодействие которых с веществом осуществляется через смешивание с обычными (т.е. активными) нейтрино. Задача поиска стерильных нейтрино настолько актуальна, что в последние годы в мире предложено и активно обсуждается множество возможных подходов к ее экспериментальному решению. Обнаружение стерильных нейтрино не только приведет к расширению Стандартной модели, но будет иметь многочисленные следствия для астрофизики и космологии. В эксперименте BEST предполагается провести исследование осцилляционных переходов электронных нейтрино от компактного высокоинтенсивного искусственного источника в стерильные нейтрино на очень коротких расстояниях, недоступных для других проектов. Для этого планируется поместить нейтринный источник ^{51}Cr активностью ~ 3 МКи в центр



↑
Рис. 3. Оценка чувствительности эксперимента BEST для проверки галлиевой аномалии в терминах параметров осцилляций электронного нейтрино в стерильное.

Красным цветом показан наилучший фит (крест) и 95% CL допустимая область (штриховая линия) по результатам SAGE и GALLEX, зеленая и синяя кривые — 99% CL и 95% CL чувствительность BEST, оранжевая кривая — чувствительность совместного анализа BEST и предыдущих экспериментов. Аналогичная аномалия, называемая реакторной, существует в секторе антинейтрино и соответствует несколько меньшим углам смешивания; она будет проверяться в реакторных экспериментах

металлической Ga мишени телескопа, разделенной на две концентрические зоны, внутреннюю и внешнюю, обеспечивающие в среднем одинаковые длины пробега нейтрино в мишенях. Статистически значимое отличие в скорости захвата нейтрино в двух зонах может дать прямое доказательство реального физического эффекта исчезновения электронных нейтрино, обусловленного возможным переходом активных нейтрино в стерильные состояния (рис. 3). Реализация эксперимента BEST не только приведет к решению актуальной проблемы, находящейся на переднем фронте фундаментальной науки, но и подтвердит позиции России как одного из мировых лидеров в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики. В настоящее время эксперимент готов к установке нейтринного источника.

→
Вход в штольню БНО



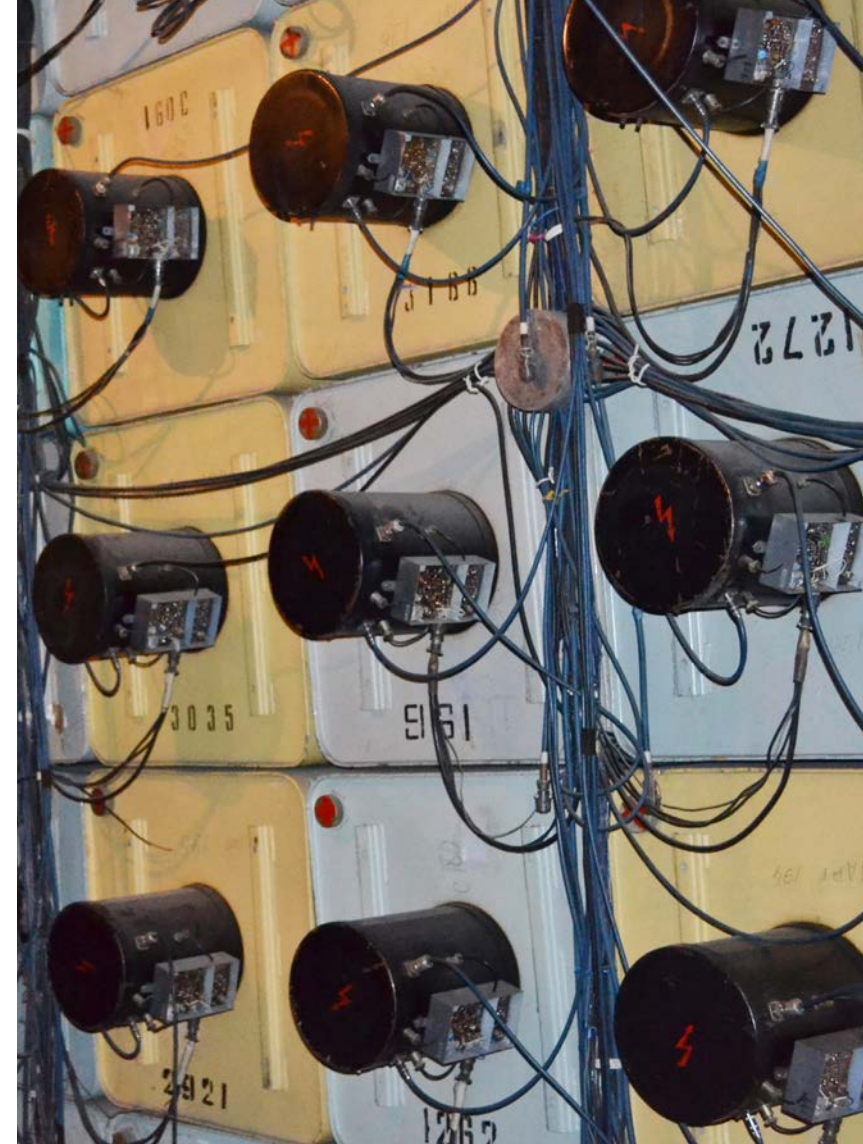


←
Зал ГГНТ.
Установка
для эксперимента BEST

↙
Зал ГГНТ.
Эксперимент SAGE

→
Вертикальные модули БПСТ

↓
Один из ярусов БПСТ



Большой сцинтилляционный детектор нейтрино

В настоящее время в мировом сообществе активно исследуется проблема регистрации геонейтрино — нейтрино, образующихся в ядерных реакциях в недрах Земли. Измерения потоков геонейтрино могут дать информацию о процессах, протекающих в недрах, о распределении источников радиогенного тепла, подтвердить или уточнить 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. Планируется проведение комплекса научных исследований и разработок, направленных на создание детектора нового поколения на основе сверхчистого сцинтиллятора массой 10–20 кт, в том числе введение в эксплуатацию прототипа установки массой около 1 т, создание ультранизкофоновый гамма-спектрометра для контроля очистки материалов от радиационных примесей до следовых количеств, исследование геологических условий для разработки проектов новых подземных выработок БНО ИЯИ РАН. Создание большого сцинтилляционного детектора позволит Баксанской нейтринной обсерватории занять одно из лидирующих положений в проектируемой мировой сети геонейтринных детекторов, решать целый ряд вопросов физики и астрофизики нейтрино, в том числе изучать внутреннее строение Земли, анализируя проходящий через нее поток атмос-

ферных нейтрино, и зарегистрировать диффузный нейтринный фон от совокупности коллапсирующих звезд.

Гамма-астрономия

С помощью наземных инструментов БНО будут решаться задачи астрофизики частиц и гамма-астрономии высоких энергий на новом уровне чувствительности. Эксплуатация нового мюонного детектора установки «Ковер» в течение нескольких лет должна позволить получить прорывные результаты в области гамма-астрономии в диапазоне энергий от 100 ТэВ и выше. Разрабатывается масштабный комплексный проект «ЭГО» (Эльбрусская гамма-обсерватория), нацеленный на диапазон энергий от 5 ГэВ до 100 ТэВ. Проектная чувствительность этой установки, сочетающей низкопороговый наземный черенковский детектор (5 ГэВ–1 ТэВ) и сцинтилляционный детектор большой площади (0.1–100 ТэВ), сравнима с самыми амбициозными мировыми проектами, СТА и LHAASO, а в области 5–50 ГэВ останется лучшей в мире даже после их запуска (рис. 4).

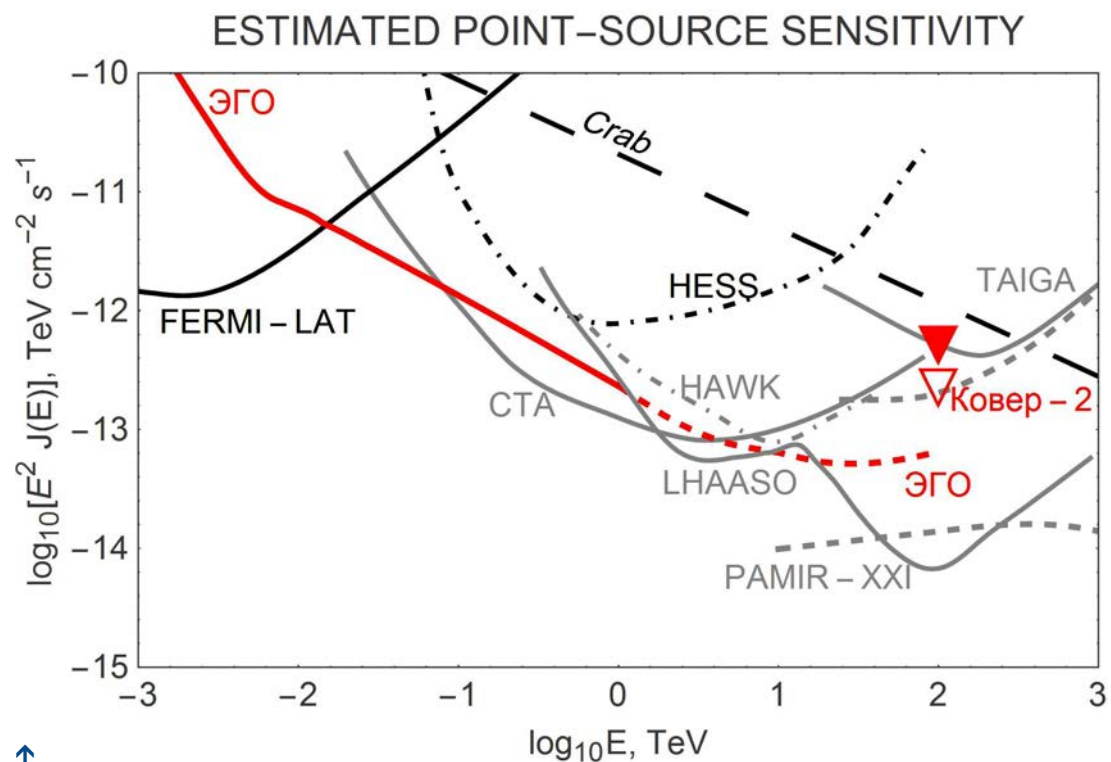


Аксионный эксперимент в низкофоновой камере
2014



Мюонный детектор установки «Ковер-2»
2014





↑
Рис. 4.

Оценка чувствительности инструментов БНО (Ковер-2 с мюонным детектором 410 кв.м, 1 год и 5 лет работы; проектируемая гамма-обсерватория ЭГО) к гамма-излучению от точечного источника в сравнении с чувствительностью действующих инструментов FERMI-LAT и HESS и рядом проектируемых установок. Показана также экстраполяция спектра Крабовидной туманности. Реальная чувствительность зависит от положения источника на небесной сфере

Другие проекты

Помимо упомянутых крупных проектов, на БНО будет развиваться целый ряд других важных для мировой науки экспериментов (поиск аксионов, изучение стратосферных разрядов, прецизионные гравитационные измерения и др.).

Организации-участники

БНО функционирует как междисциплинарная лаборатория, предоставляющая уникальные условия для проведения экспериментов в физике частиц, астрофизике частиц и геофизике. Эти условия используют ученые из различных научных организаций. В экспериментах SAGE и BEST участвуют исследователи из США; в работе установки «Ковер» принимали участие коллеги из Польши и Финляндии, а также из МИФИ и НИИЯФ МГУ. БНО является участником международной сети разработанных в ИЯИ детекторов

нейтронов. Данные нейтронного супермонитора БНО включены в мировую сеть нейтронных мониторов и выставляются в режиме реального времени на сайте ИЗМИРАН. Специалисты из БНО участвуют в международных коллаборациях AMORE и GERDA по поиску двойного безнейтринного бета-распада. Основные установки этих экспериментов расположены в Корее и в Германии, но ряд ключевых работ выполняется на БНО. Проект «ЭГО» разрабатывается совместно с ФТИ им. Иоффе РАН при участии астрофизиков из Армении и Германии. Коллективом с участием исследователей из ГАИШ МГУ и ИЛФ СО РАН создана и готовится к вводу в эксплуатацию оптоакустическая гравитационная антенна ОГРАН, предназначенная для регистрации гравитационно-волнового излучения от коллапсирующих звезд в Галактике и ее окрестностях; разрабатывается проект многоцелевого кольцевого лазерного интерферометра. В штольнях БНО расположены три геофизические лаборатории (ГАИШ МГУ, ИФЗ им. О.Ю.Шмидта РАН, Геофизическая служба РАН), позволяющие, наряду с проведением фундаментальных исследований, отслеживать обстановку в глубинных слоях Земли в окрестностях спящего вулкана Эльбрус и прогнозировать возможные изменения его состояния.

Публикации

По результатам исследований, проведенных на Баксанской нейтринной обсерватории, за последние 5 лет опубликовано 70 работ, в том числе 35 в рецензируемых журналах; за всю историю функционирования обсерватории — 355 работ, в том числе 168 в рецензируемых журналах. Эти публикации широко известны мировому научному сообществу, некоторые из них имеют по несколько сотен цитирований, и значительная часть — по несколько десятков.

Наиболее значительные статьи в рецензируемых журналах по результатам, полученным на Баксанской нейтринной обсерватории, за последние 5 лет

Общее краткое описание установки:

The Baksan Neutrino Observatory. V.V. Kuzminov. Eur.Phys.J.Plus 127 (2012) 113.

Низкофонные лаборатории и редкие процессы:

Working characteristics of the New Low-Background Laboratory (DULB-4900, Baksan Neutrino Observatory). Ju.M. Gavriljuk et al. Nucl. Instrum.Meth. A729 (2013) 576.

Experimental test of the time stability of the half-life of alpha-decay Po-214 nuclei. E.N. Alexeyev et al., *Astropart.Phys.* 46 (2013) 23.

Indications of $2\nu 2K$ capture in ^{78}Kr . Yu.M. Gavrilyuk et al. *Phys.Rev.* C87 (2013) 3, 035501

High voltage capacitors for low background experiments. C. O'Shaughnessy et al. *Eur.Phys.J.* C73 (2013) 2445.

Results of experiments devoted to searches for $2K$ capture on ^{78}Kr and for the double-beta decay of ^{136}Xe with the aid of proportional counters. Yu.M. Gavrilyuk et al. *Ядерная физика* 76 (2013) 9, 1123.

Новый эксперимент по поиску резонансного поглощения солнечных аксионов, излучаемых в $M1$ -переходе ядер ^{83}Kr . Ю. М. Гаврилюк и др. *Письма ЖЭТФ* 101 (2015) 739.

Космические лучи, установки ШАЛ:

Изучение адронной компоненты ШАЛ на установке Ковёр-2. Д. Д. Джаппуев и др. *Письма ЖЭТФ* 97 (2013) 651.

Energy spectrum of cosmic ray muons in ~ 100 TeV energy region reconstructed from the BUST data. A.G. Bogdanov et al. *Astropart.Phys.* 36 (2012) 224-236.

Strong variations of cosmic ray intensity during thunderstorms and associated pulsations of the geomagnetic field. K.K. Kanonidi et al. *Astrophys. Space Sci.Trans.* 7 (2011) 279-282.

Поиск сверхкоротких всплесков гамма-излучения от испаряющихся первичных черных дыр. Г.М. Верешков, В.Б. Петков. *Письма в ЖЭТФ* 101 (2015) 160.

Космические мюоны и нейтрино, БПСТ:

Search for muon signal from dark matter annihilations in the Sun with the Baksan Underground Scintillator Telescope for 24.12 years. M.M. Boliev, S.V. Demidov, S.P. Mikheyev, O.V. Suvorova. *JCAP* 1309 (2013) 019.

Energy spectrum of cosmic ray muons in ~ 100 TeV energy region reconstructed from the BUST data. A.G. Bogdanov, R.P. Kokoulin, Yu.F. Novoseltsev, R.V. Novoseltseva, V.B. Petkov, A.A. Petrukhin. *Astroparticle Physics* 36 (2012) 224 – 236.

Upper limit on the cross section for elastic neutralino-nucleon scattering in a neutrino experiment at the Baksan Underground Scintillator Telescope. O.V. Suvorova, M.M. Boliev, S.V. Demidov, S.P. Mikheyev. *Ядерная физика* 76 (2013) 1433-1442.

Joint analysis of experimental data to search for neutrinos from collapsing stars using the LVD and BUST apparatus. N.Yu. Agafonova et al. *Известия РАН. Сер. физ.* 79 (2015) 3, 442–445.

A statistical threshold meter of shaper-discriminators of scintillation detectors. A.F. Yanin, I.M. Dzaparova, M.M. Boliev, R.V. Novoseltseva. *Приборы и техника эксперимента* (2015) 2, 67-71.

The search for high energy muon neutrinos from southern hemisphere gamma-ray bursts with BUST. V.B. Petkov et al. *ЭЧАЯ* 46 (2015) 2, 201-204.

Галлий-германиевый эксперимент:

Российско-американский галлиевый эксперимент SAGE. В.Н. Гаврин. *УФН* 181 (2011) 975-984.

Searches for short-baseline electron-neutrino oscillations in the SAGE and BOREXINO experiments involving artificial neutrino sources. V.V. Gorbachev et al. *Ядерная физика* 76 (2013) 1591-1596.

Current status of new SAGE project with ^{51}Cr neutrino source. V. Gavrin et al. *ЭЧАЯ* 46 (2015) 2, 131-137.

Precision evaluation of the $^{71}\text{Ga}(e, e^-)$ solar neutrino capture rate from the $(^3\text{He}, t)$ charge-exchange reaction. D. Frekers et al. *Phys.Rev.* C91 (2015) 3, 034608.

Наиболее известные публикации за все время работы БНО (указана цитируемость по базе inSPIRE-HEP):

Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. SAGE Collaboration (J.N. Abdurashitov et al. *Phys.Rev.* C60 (1999) 055801. Cited by **755** records.

Solar neutrino flux measurements by the Soviet-American Gallium Experiment (SAGE) for half the 22 year solar cycle. SAGE Collaboration (J.N. Abdurashitov et al.). *ЖЭТФ* 122 (2002) 211-226. Cited by **610** records.

Results from SAGE. Dzh.N. Abdurashitov et al. *Phys.Lett.* B328 (1994) 234-248. Cited by **538** records.

Search for neutrinos from sun using the reaction Ga-71 (electron-neutrino e^-) Ge-71 . A.I. Abazov et al. *Phys.Rev.Lett.* 67 (1991) 3332-3335. Cited by **415** records.

The Russian-American gallium experiment (SAGE) Cr neutrino source measurement. Dzh.N. Abdurashitov et al. *Phys.Rev.Lett.* 77 (1996) 4708-4711. Cited by **381** records.

Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III: Results for the 2002--2007 data-taking period. SAGE Collaboration (J.N. Abdurashitov et al.). *Phys.Rev.* C80 (2009) 015807. Cited by **257** records.

Detection of the Neutrino Signal From SN1987A in the LMC Using the INR Baksan Underground Scintillation Telescope. E.N. Alekseev, L.N. Alekseeva, I.V. Krivosheina, V.I. Volchenko. Phys.Lett. B205 (1988) 209-214. Cited by **141** records.

Detection of a Neutrino Signal on 23 February 1987 at the Baksan Underground Scintillation Telescope of the Institute of Nuclear Research. E.N. Alekseev, L.N. Alekseeva, V.I. Volchenko, I.V. Krivosheina. Письма ЖЭТФ 45 (1987) 461-464. Cited by **133** records.

Search for supersymmetric dark matter with Baksan underground telescope. M.M. Boliev et al. Nucl.Phys.Proc.Suppl. 48 (1996) 83-86. Cited by **84** records.

Экономика

- ◆ **Балансовая стоимость** БНО – 1 088 067 510 рублей.
- ◆ **Средства, потраченные и планируемые на создание научной инфраструктуры (имеющиеся средства):**

Потраченные к 2014 году включительно (тыс.руб.)	Средства на создание инфраструктуры, заложенные в принятых и действующих планах — госзадания и договоры о совместной деятельности (тыс.руб.),					
	2015		2016		2017	
	Бюджет	Внебюджет	Бюджет	Внебюджет	Бюджет	Внебюджет
1 088 067	52036	1500	55678,5	1500	59000	1500

- ◆ **Средства на содержание инфраструктуры (имеющиеся средства):**

Запланированные средства на содержание инфраструктуры – госзадания и договоры о совместной деятельности (тыс.руб.)					
2015		2016		2017	
Бюджет	Внебюджет	Бюджет	Внебюджет	Бюджет	Внебюджет
24900	1000	26640	1000	28500	1000

- ◆ **Дополнительные средства, необходимые для развития и поддержания установки, позволяющие занять лидирующие позиции в мировой науке:**

Для создания инфраструктуры новых экспериментов Баксанской нейтринной обсерватории необходимы срок 6 лет и **4 миллиарда** рублей. Для содержания — дополнительно **40 миллионов рублей в год.**

Составитель: д.ф.-м.н. *С.В. Троицкий*, дизайн *Н.Л. Нольде*
 Все фото (кроме стр.7) к.ф.-м.н. *С.В. Демидова*, ноябрь 2014 г.
 Фото на стр. 7 *Е.Ю. Еремина*, ноябрь 2007 г.
 На 4-й странице обложки (снизу вверх) — зал ГГНТ, Андырчи, БПСТ



