



Баксанская нейтринная обсерватория

В.В. КУЗЬМИНОВ,
заведующий Баксанской
нейтринной обсерваторией ИЯИ РАН,
кандидат физико-математических наук

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ОБСЕРВАТОРИИ

В конце 1950-х гг. появились идеи о создании специализированного подземного комплекса для проведения фундаментальных исследований в области нейтринной астрофизики и физики космических лучей. В нашей стране работы в этой области проводились под руководством академика М.А. Маркова. В 1960-е гг. М.А. Марков предложил исследовать слабые взаимодействия в подземных экспериментах с помощью нейтрино космических лучей. Предложенный им метод основан на регистрации мюонов, рожденных при взаимодействии нейтрино с нуклонами вещества в недрах Земли. Были выполнены теоретические расчеты, сделаны первые оценки интенсивности потока нейтрино

© Кузьминов В.В.

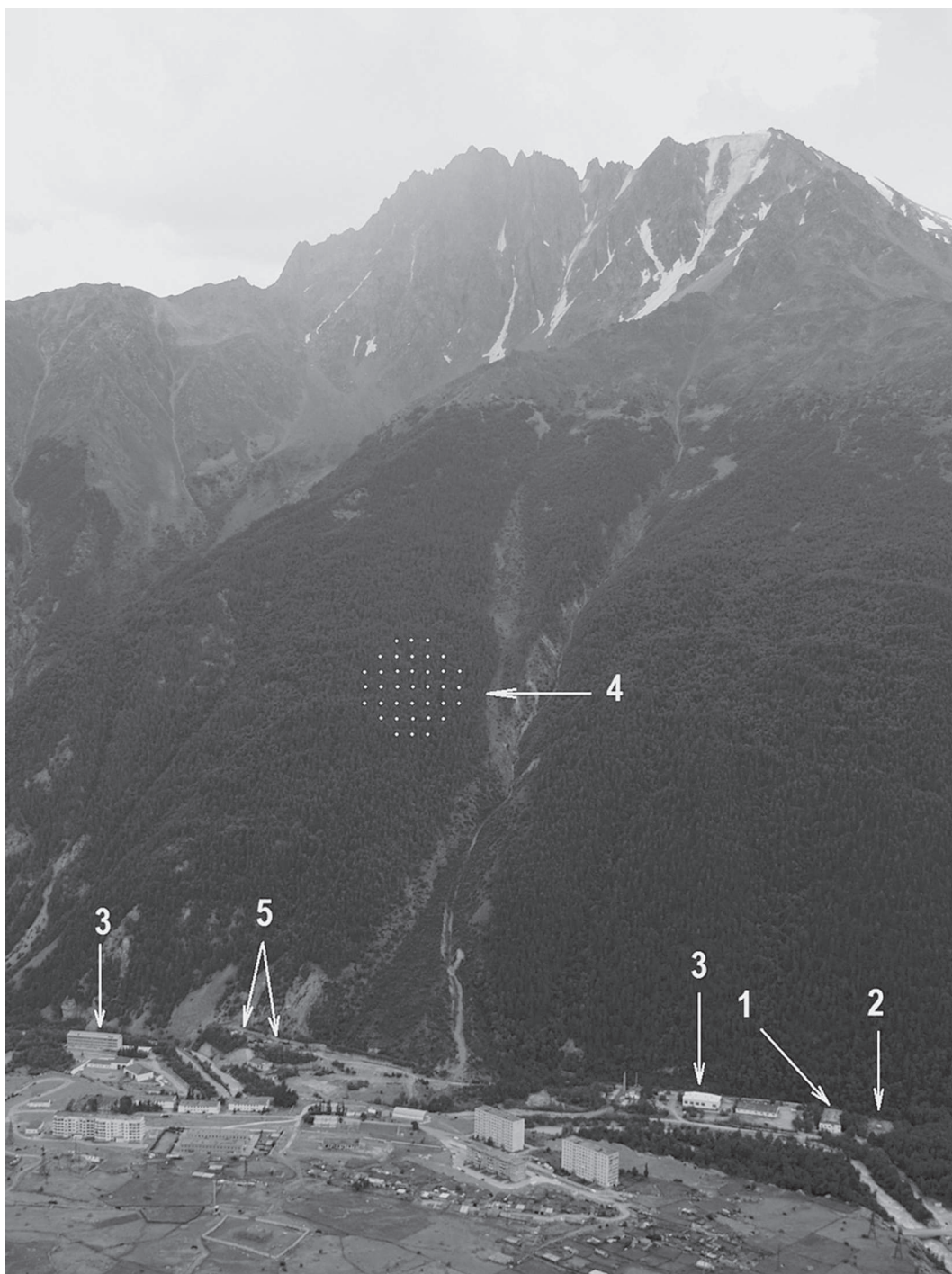
высоких энергий от возможных галактических источников.

Другое направление исследований, возможных только в подземных условиях, возникло как результат разработки методов регистрации и измерения потока нейтрино, идущих от Солнца. Необходимость подземного расположения установок вызвана тем обстоятельством, что на поверхности Земли фон, создаваемый в детекторах мюонами космических лучей, многократно превышает ожидаемый эффект и полностью его маскирует.

По инициативе М.А. Маркова начались поиски подходящих достаточно глубоких подземных выработок, пригодных для размещения экспериментальных установок. Готовых шахт с нужными условиями в стране не оказалось, по-

этому приняли решение построить специальный комплекс подземных лабораторий, расположенных в горизонтальной штольне под горой достаточной высоты.

19 июня 1963 г. вышло постановление Президиума АН СССР о строительстве подземной станции и создании в ФИАН лаборатории «Нейтрино», ее заведующим назначили доктора физико-математических наук, будущего академика АН СССР Г.Т. Зацепина, заведующим сектором – доктора физико-математических наук, будущего члена-корреспондента АН СССР А.Е. Чудакова. К 1967 г. было закончено научное обоснование и разработан проект нейтринной станции (первый заведующий – доктор физико-математических наук А.А. Поманский), в том же году начали строительство. Место



Баксанская нейтринная обсерватория и поселок Нейтрино. На фотографии, сделанной со склона Баксанского ущелья, обращенного к югу, цифрами отмечены наземные научные сооружения Обсерватории: 1 – здание “Эплинг” с установкой “Ковер”, 2 – заглубленный зал с установкой “Ковер-2”, 3 – лабораторные корпуса, 4 – нагорная установка “Андырчи”, 5 – входы в штольни “Главная” и “Вспомогательная”.



для будущей обсерватории выбрали недалеко от горы Эльбрус в Баксанском ущелье (Кабардино-Балкария). Проект предусматривал строительство двух параллельных горизонтальных штолен в горе Андырчи (высота горы – более 4 тыс. м), вдоль которых предполагалось разместить лаборатории с физическими установками. В конце штольни длиной около 4 тыс. м поток мюонов космических лучей почти на семь порядков ниже, чем на поверхности.

Первоначальный проект предусматривал строительство только двух подземных установок: **сцинтилляционного телескопа и хлор-аргонового нейтринного телескопа**, но в дальнейшем произошли существенные его изменения. Построены другие научные сооружения, станция приобрела статус обсерватории. Одновременно предусматривалось строительство необходимых инженерных и хозяйственных сооружений и жилого поселка для сотрудников. Реализация этих замыслов привела к созданию **Баксанской нейтринной обсерватории** Института ядерных исследований РАН и пос. Нейтрино. Это был первый в мире специально построенный научный комплекс подземных лабораторий для широкого круга исследова-

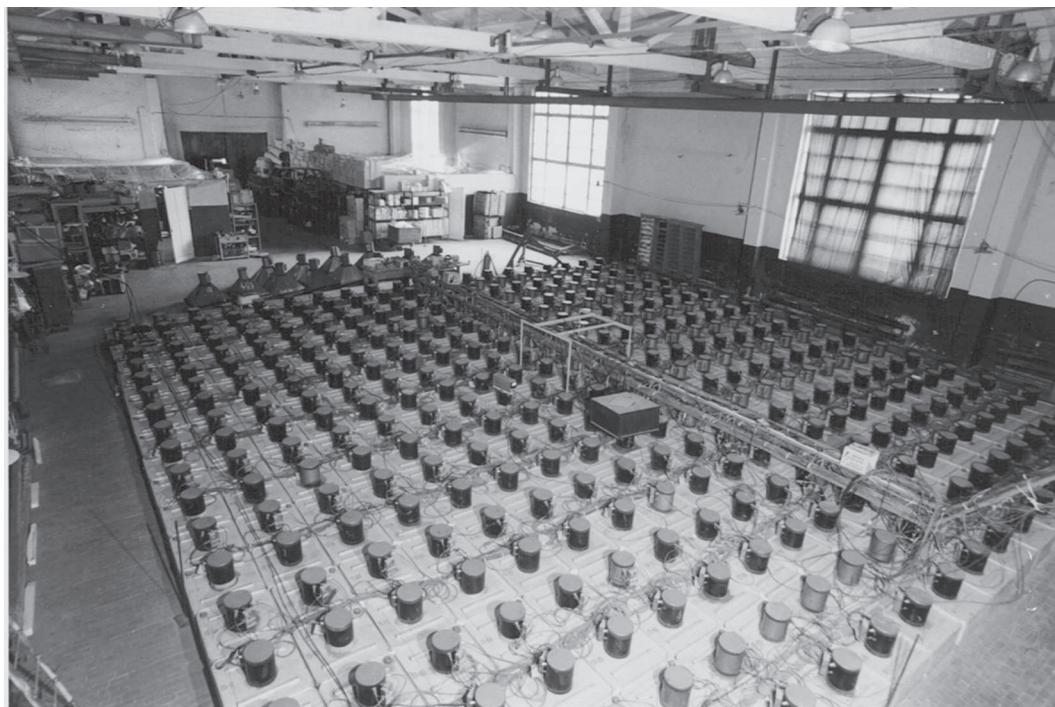
ний в области физики космических лучей, элементарных частиц и нейтринной астрофизики. В 1998 г. группе ученых, внесших основной вклад в создание Баксанской нейтринной обсерватории, – Е.Н. Алексееву, А.В. Воеводскому, В.Н. Гаврину, Г.Т. Зацепину, А.А. Поманскому, А.Н. Тавхелидзе и А.Е. Чудакову – была присуждена Государственная премия. Позже за создание галлий-германиевого нейтринного телескопа и выдающийся вклад в исследование солнечных нейтрино В.Н. Гаврину и Г.Т. Зацепину были присуждены премия имени Б.М. Понтекорво и Золотая медаль им. Д.В. Скобелевича.

НАЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС

В 1973 г. введен в эксплуатацию первый научный объект Обсерватории – наземный экспериментальный зал “Элинг” с установкой “Ковер” из 400 типовых сцинтилляционных детекторов. Каждый детектор представляет собой прямоугольный алюминиевый бак размерами 70 × 70 × 30 см, заполненный жидким сцинтиллятором на основе уайт-спирита – высокоочищенной керосиновой фракции нефти. Сцинтиллятор просматривается фотоэлектронным умножителем через ил-

ный в центральном круглом отверстии большой грани. Фотоумножитель накрыт цилиндрическим светонепроницаемым экранирующим металлическим кожухом с прикрепленным снаружи блоком первичной электроники. Информация снимается с анода, 5-го и 12-го динода фотоэлектронного умножителя. Прохождение заряженной релятивистской частицы сопровождается выделением энергии порядка 50 МэВ, что соответствует появлению на аноде фотоэлектронного умножителя сигнала амплитудой 70 мВ на нагрузке 75 Ом. Анодные сигналы типовых сцинтилляционных детекторов суммируются последовательно в группы по 20, 100 и 400 детекторов. С динодов импульсы поступают соответственно на преобразователь “амплитуда – время” и интегральный дискриминатор, расположенные на кожухе фотоэлектронного умножителя. Анализ амплитудного распределения сигналов с типовых сцинтилляционных детекторов и задержек поступления сигналов на регистрирующее устройство позволяет восстановить картину пространственного распределения частиц и направление их прихода в случае регистрации широкого атмосферного ливня (ШАЛ).

Эта установка представляет собой точную



копию одного из слоев Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа с непрерывной площадью регистрации около 200 м². На ней, в частности, решался ряд задач по отработке методики проведения экспериментов на телескопе. Однако основное назначение прибора состояло в исследовании первичных космических лучей (к.л.) в диапазоне $5,7 \times 10^9 - 10^{16}$ эВ, в изучении механизмов и характеристик их взаимодействия с веществом земной атмосферы путем регистрации одиночной вторичной компоненты и ШАЛ, образующихся в результате таких взаимодействий. Центральный секционированный де-

50

тектор дополнен шестью выносными пунктами, содержащими по девять типовых сцинтилляционных детекторов. Четыре пункта распределены симметрично на окружности радиусом 30 м относительно центра "Ковра", два – на окружности радиусом 40 м. В отдельном помещении "Эллинга" установлен нейтронный монитор – детектор нейтронов, рожденных космическими лучами.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Исследование структуры центральной части ШАЛ. Анализ событий позволил интерпретировать подстволы в многоствольных ливнях как следствие генерации

Установка "Ковер" лаборатории БПСТ. Она содержит 400 сцинтилляционных детекторов общей площадью 200 м².

струй частиц с большими поперечными импульсами и оценить сечение этого процесса в адрон-адронных взаимодействиях при энергии до 500 ГэВ. Результат этого эксперимента, впервые подтвердившего предсказания квантовой хромодинамики, был опубликован раньше, чем соответствующее сечение, измеренное на SPS-коллайдере в ЦЕРН (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire – Европейский совет по ядерным исследованиям, Швейцария).



2. *Исследование вариаций космических лучей.* Огромный темп счета одиночных мюонов к.л. ($\sim 4,3 \times 10^4 \text{ с}^{-1}$) позволяет иметь высокую статистическую точность даже за малые интервалы времени (0,03% за 4 мин). Благодаря этому на установке оказалось возможным наблюдение очень короткопериодических вариаций (микровариаций). Отсутствие таковых было продемонстрировано на установке “Ковер” на уровне достоверности 0,001%. Однако в ходе этой работы был обнаружен новый тип спорадических вариаций с малым характерным временем, связанных с метеорологическими эффектами. Сильная корреляция с величиной электрического поля в атмосфере (вариации такого типа наблюдаются только во время грозы) позволила не только объяснить это явление, но и описать его количественно. Самым интересным из спорадических изменений интенсивности к.л. является гигантское возрастание во время мощной солнечной вспышки 29 сентября 1989 г. Впервые в этом событии наблюдалось присутствие частиц солнечного происхождения с энергией, достигающей 10^{10} эВ. Наиболее яркие данные получены именно на установке “Ковер”.

3. *Исследование анизотропии космических лучей.* Регистрация ливней малой мощности, соответствующих пер-

вичным к.л. с энергией 10^{13} эВ, позволила измерить их анизотропию при этой энергии. В темпе счета таких ливней обнаружены первая и вторая гармоники в звездном времени. Полученное на основании этих данных значение анизотропии к.л. при 10^{13} эВ равно $0,05 \pm 0,005\%$.

4. *Гамма-астрономия сверхвысоких энергий.* По этой программе ведется непрерывная регистрация атмосферных ливней с энергией больше 10^{14} эВ. При анализе данных одновременно решаются несколько задач: поиск точечных источников γ -квантов таких энергий; поиск сигналов от протяженных источников γ -излучений (в первую очередь от галактической плоскости); измерение анизотропии к.л. при этих энергиях; поиск вспышечной активности известных рентгеновских и гамма-источников. Наиболее интересный результат, полученный к настоящему времени, – регистрация вспышки 23 февраля 1989 г. в Крабовидной туманности. Данные об этой вспышке впервые опубликованы группой, работающей на установке “Ковер”. Позже были получены подтверждения эффекта на установках “Коллар Голд Филдс” (Индия) и “EAS Тор” в Гран Сассо (Италия).

5. *Исследование вариаций потока атмосферных нейтронов.* По этой программе ведется

непрерывная регистрация темпа счета нейтронного монитора. Данные поставляются в мировую сеть. По результатам анализа параметров вариаций исследуются характеристики вспышек на Солнце и их влияние на межпланетное магнитное поле. Характеристики установки “Ковер” для программы “Гамма-астрономия сверхвысоких энергий” улучшились после ввода в строй в 1998 г. первой очереди мюонного детектора (“Ковер-2”), расположенного в средней секции трехсекционного подземного зала размерами $6 \times 48 \times 4$ м на расстоянии около 40 м от центра “Ковра” под слоем грунта толщиной 2 м (или 5 м водного эквивалента). Грунт служит поглотителем мягкой компоненты к.л.

Для создания новой установки – “Ковер-2” – использовано 175 сцинтилляционных детекторов площадью 1 м^2 каждый, изготовленных из пластмассового сцинтиллятора толщиной 5 см. Непрерывная площадь регистрации установки – 175 м^2 ($5 \times 35 \text{ м}$), пороговая энергия для регистрируемых мюонов равна 1 ГэВ, чувствительность установки – $0,004$ частицы/ м^2 . Благодаря ей стало возможным проведение исследований мюонной компоненты в составе ШАЛ. Получена зависимость среднего числа зарегистрированных на установке “Ковер-2” мюонов (N_μ)



с $E \geq 1$ ГэВ от полного числа ливневых частиц (N_e), регистрируемых установкой "Ковер", в виде $N_\mu \sim N_e^\alpha$, где $\alpha = 0,8$. Анализ информации с мюонного детектора (вместе с установкой "Ковер") позволил существенно увеличить чувствительность эксперимента по поиску локальных источников γ -квантов сверхвысоких энергий, начать исследования химического состава первичных к.л. с $E \geq 10^{14}$ эВ, изучать вариации мюонов с энергиями более 1 ГэВ.

Установка "**Андырчи**", предназначенная для регистрации ШАЛ с энергией больше 10^{14} эВ, начала работать в 1996 г. Она размещена на поло-

гом участке склона горы Андырчи и состоит из 37 стандартных детекторов площадью 1 м^2 каждый на основе пластмассовых сцинтилляторов. Детекторы расположены на площади 45 тыс. м^2 с шагом около 40 м. Центральный детектор установки расположен над Баксанским подземным сцинтилляционным телескопом на расстоянии по вертикали 350 м. Перепад высоты по площади размещения детекторов достигает 150 м. Для подобных установок чрезвычайно актуальной является проблема безопасной эксплуатации в периоды грозовой активности. Эта задача была успешно решена.

Стандартный сцинтилляционный детектор на установке "Андырчи".

Принцип действия защиты от молний основан на регистрации импульсных электромагнитных колебаний, возникающих в результате разрядов молний. При превышении заданного порога амплитуды колебаний, увеличивающихся по мере приближения грозы, единая сеть электрических проводов в пункте сбора информации автоматически размыкается на короткие сегменты, которые отключаются от регистратора и нагру-



жаются на разрядники. Рабочая конфигурация соединений проводов восстанавливается после окончания грозы.

На установке проводятся исследования в следующих областях: γ -астрономия сверхвысокой энергии; анизотропия первичных космических лучей в области энергий 10^{14} – 10^{17} эВ; γ -всплески с жестким спектром излучения (совместно с астрономической обсерваторией на пике Терскол).

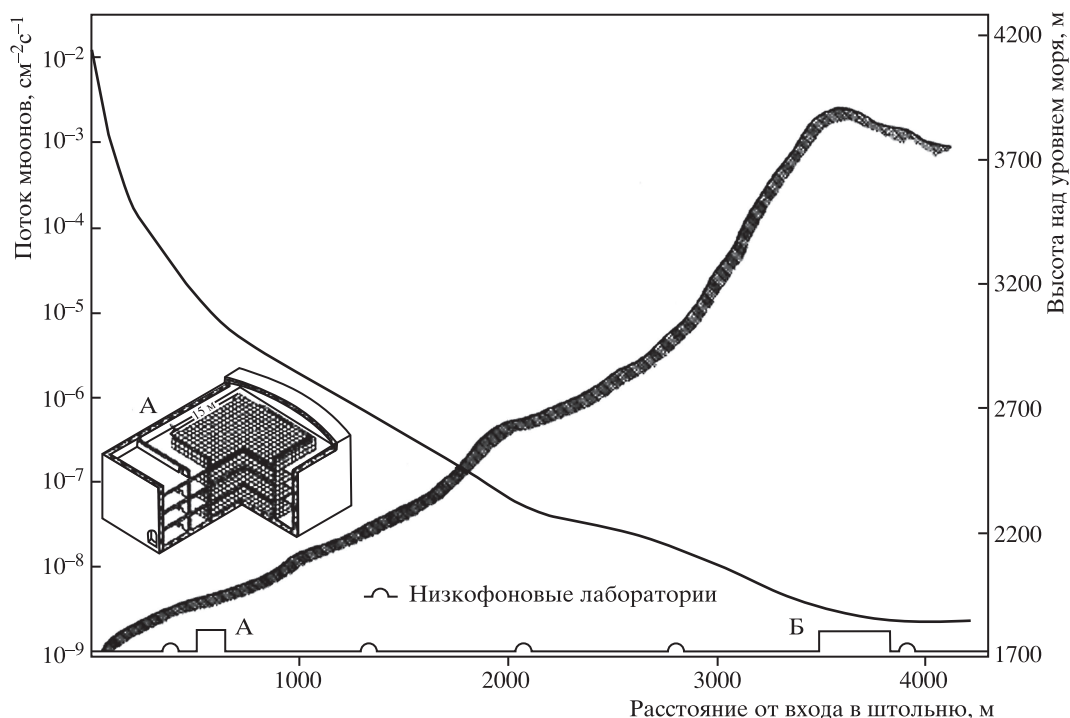
Комплекс “Андырчи” и Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп уникальны, в настоящее время у него

нет аналогов в мире. Основной целью его создания было исследование спектра и состава к.л. в области 7×10^{14} – 10^{17} эВ вокруг излома в спектре ШАЛ (резкое изменение формы энергетического спектра вблизи энергии 3×10^{15} эВ). Одним из экспериментов, проводимых на комплексе “Андырчи”, является проверка гипотезы об изменении характера взаимодействия первичных частиц с энергией около 3×10^{15} эВ с ядрами атомов воздуха. Эта гипотеза может объяснить наблюдаемый излом в спектре ШАЛ по N_e без привлечения предпо-

ложений об изменении спектра и/или состава первичных космических лучей.

ПОДЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС УСТАНОВОК ОБСЕРВАТОРИИ

В 1978 г. введен в строй **Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп** – многоцелевая подземная установка, предназначенная для решения большого круга задач астрофизики, физики элементарных частиц и к.л. Телескоп расположен в горной выработке объемом 12 тыс. м³ на расстоянии 550 м от начала горизонтального



Продольный разрез подземного комплекса лабораторий Обсерватории, размещенных в обустроенных горных выработках под горой Андырчи (жирная кривая): А – сцинтилляционный телескоп, Б – галлий-германиевый нейтринный телескоп. Величина потока мюонов в подземной лаборатории зависит от глубины расположения (тонкая кривая).



Сцинтилляционные детекторы на верхней горизонтальной плоскости Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа.

тоннеля. Эффективная толщина грунта над телескопом — 850 г/см^2 . Установка представляет собой четырехэтажное здание с основанием площадью 280 м^2 и высотой $11,1 \text{ м}$. Здание телескопа собрано из бетонных блоков, изготовленных из низкорadioактивного бетона и щебня. Межэтажные перекрытия толщиной $0,8 \text{ м}$ засыпаны мелкими фракциями дунитового щебня (150 г/см^2). Общая масса телескопа примерно 2500 т , количество детекторов — 3180 , полная масса сцинтиллятора в них — 330 т . Шесть внешних и два внутренних регистри-

рующих слоя (по четыре горизонтальных и вертикальных) изготовлены из типовых сцинтилляционных детекторов.

В телескопе сигналы с индивидуальных типовых сцинтилляционных детекторов снимаются и обрабатываются таким же образом, как и в установке «Ковер». Порог преобразователя «А — Т» соответствует прохождению через детектор десяти релятивистских частиц. Порог интегрального дискриминатора соответствует энергосигналу 10 МэВ . Сигналы с индивидуальных преобразователей «А — Т», интегральных дискримина-

торов и анодные сигналы от групп детекторов каждого слоя телескопа поступают на регистрирующие устройства, расположенные в аппаратном зале. Анализ характеристик совокупности сигналов позволяет определить координаты детекторов, через которые прошли частицы, и направления их прихода. Информация от регистрирующих устройств, а также от систем абсолютного и относительного времени поступает по каналу прямого доступа в ЭВМ. Каждые 15 мин вся накопленная и предварительно обработанная информация передается

по оптоволоконному кабелю на сервер. На телескопе одновременно работает около десятка диагностических программ, поставляющих информацию о работоспособности всех систем телескопа.

Относительно небольшая толщина горы над местом расположения телескопа снизила фон атмосферных к.л. в 3600 раз (темп счета одиночных мюонов с энергией больше 0,2 ТэВ составляет 12 с^{-1} [штук в секунду]). С одной стороны, этого оказывается достаточно для решения задачи регистрации редких процессов (измерение потока мюонов, рожденных нейтрино высоких энергий; поиск нейтринных всплесков, сопровождающих коллапс звезд в Галактике). С другой стороны, остаточная интенсивность к.л. позволяет с хорошей статистической обеспеченностью решать большой круг задач в области физики к.л. (анизотропия лучей с энергией больше 10^{12} эВ, химический состав первичных к.л. с энергией в диапазоне 10^{12} – 10^{16} эВ, взаимодействие с веществом мюонов с энергией больше 1 ТэВ).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА БПСТ

На подземном сцинтилляционном телескопе получены важные результаты:

- измерен поток мюонов, рожденных атмосферными нейтрино космических лучей в грунте под БПСТ: $[I_{\mu}^{\nu} = (2,60 \pm \pm 0,15) \times 10^{-13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}]$;
- получены одни из первых ограничений на параметры осцилляций атмосферных нейтрино типа $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ и $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$;
- получено ограничение на поток нейтрино высоких энергий от локальных источников из плоскости Галактики;
- получено наилучшее в мире ограничение на поток медленных тяжелых магнитных монополей – гипотетических частиц, являющихся носителями элементарного магнитного заряда одной полярности (полярность одного полюса магнита) $[P \leq 5,5 \times 10^{-16} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ ср}^{-1}]$;
- измерены амплитуда $[(12,3 \pm 2) \times 10^{-4}]$ и фаза $[1,6 \pm 0,8]$ первой гармоники анизотропии к.л. в звездном времени (относительное отклонение интенсивности к.л., приходящих из последовательно заданных участков небесной сферы, циклически просматриваемых БПСТ, от среднесуточного значения);
- в течение 29 лет ведется служба наблюдения за нейтринными всплесками от гравитационного коллапса звезд в Галактике. По данным наблюдений за весь период (25,6 года) получены ограничения на частоту вспышек f и средний интервал между

вспышками сверхновых T : $f < 0,09$ года, $T > 11,1$ года;

– зарегистрирован поток нейтрино от коллапса звезды SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке одновременно с установками США, Италии, Японии;

– проведено исследование стабильности протона в ядрах вещества; полученное ограничение на время жизни протона ($T \geq 0,9 \times 10^{31}$ лет) было в свое время лучшим в мире;

– измерен поток высокоэнергичных нейтронов, генерируемый мюонами в скальном грунте $[P_n = (3,8 \pm \pm 0,5) \times 10^{-8} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}]$;

– разработан и реализован в эксперименте метод разделения адронных и электромагнитных каскадов, основанный на регистрации π - μ - e -распадов, сопровождающих каскад;

– измерено полное сечение адронного фотопоглощения до энергий фотонов 10 ТэВ;

– данные по измерению химического состава первичных к.л. с энергиями 10^{12} – 10^{16} эВ хорошо согласуются с результатами прямых измерений при более низких (10^{12} эВ) энергиях;

– на основе измеренной доли ядерных каскадов получены экспериментальные данные по сечению γ -N взаимодействия в диапазоне энергий 40–130 ГэВ. Эти данные, объединенные с



Самая глубокая низкофоновая лаборатория НЛГЗ-4900 Баксанской нейтринной обсерватории.

данными, полученными в немецком физическом центре "DESY" (Гамбург) на коллайдере HERA, подтверждают эффект более быстрого роста фотон-адронного сечения по сравнению с ростом сечений адрон-адронных взаимодействий;

— предложены, разработаны и реализованы два новых метода изучения мюонной компоненты широких атмосферных

ливней; методы позволяют получить новую информацию об энергетическом спектре и массовом составе первичных к.л. в области энергий 10^{15} – 10^{17} эВ;

— развита и реализована методика пересчета от спектра кратностей мюонов к спектру ШАЛ по полному числу мюонов, который, в отличие от спектра кратностей, является объективной (не

зависящей от установки) характеристикой потока первичных к.л. Эта методика позволяет выполнять прямое сравнение данных, полученных в разных экспериментах с мюонными группами.

НИЗКОФОНОВЫЕ ЛАБОРАТОРИИ

Для проведения ряда исследований чрезвычайно редких реакций и распадов с энергосвободением, не превышающим 4 МэВ, требуются условия, в которых не только фон к.л. снижен до максимально возможного уровня, но одновременно до предела снижен фон ионизирующих излучений от распада естественных радиоактивных элементов в окружающей среде. Результат достигается экранированием экспериментальной подземной установки комбинированным слоем высокочистых защитных материалов, поглощающих эти излучения, и использованием высокочистых материалов в конструкции самой установки. К данному направлению исследований относятся задачи поиска различных мод двойного бета-распада ряда изотопов; поиск частиц, образующих темную материю Вселенной; проверка закона сохранения электрического заряда и др. В Обсерватории эти исследования проводятся в трех специально созданных под-



земных **низкофоновых лабораторных помещений** (камерах): 1) низкофоновая камера (НИКА) на расстоянии 385 м от входа (глубина – 660 м водного эквивалента; полезная площадь – 100 м²; введена в строй в 1974 г.); 2) камера прецизионных измерений (КАПРИЗ) на расстоянии 620 м от входа (1000 м водного эквивалента; полезная площадь – 20 м²; введена в строй в 1985 г.); 3) низкофоновая лаборатория глубокого заложения (НЛГЗ) на расстоянии 3670 м от входа (4900 м водного эквивалента; полезная площадь – 200 м²; введена в строй в 1993 г.; модернизирована в 2008 г.). Поток к.л. в помещениях снижен в 2×10^3 , 8×10^3 и 10^7 раз соответственно.

За годы существования и развития комплекса низкофоновых лабораторий выполнен ряд методических и исследовательских работ, в результате которых были созданы низкофоновые установки с полупроводниковыми, газовыми и сцинтилляционными детекторами.

С их помощью проводились исследования радиоактивности различных материалов, в том числе исследовано распределение космогенных радиоактивных изотопов в образцах лунного грунта, доставленных АМС “Луна-16, -20 и -24”; измерено содержание кос-

могенного изотопа ⁸¹Kr в атмосферном криптоне с целью проверки гипотезы о постоянстве интенсивности космических лучей на протяжении последних нескольких сот тысяч лет; определен набор серийно выпускаемых металлов, имеющих минимальное содержание естественных радиоактивных элементов, пригодных для создания сверхнизкофоновых установок.

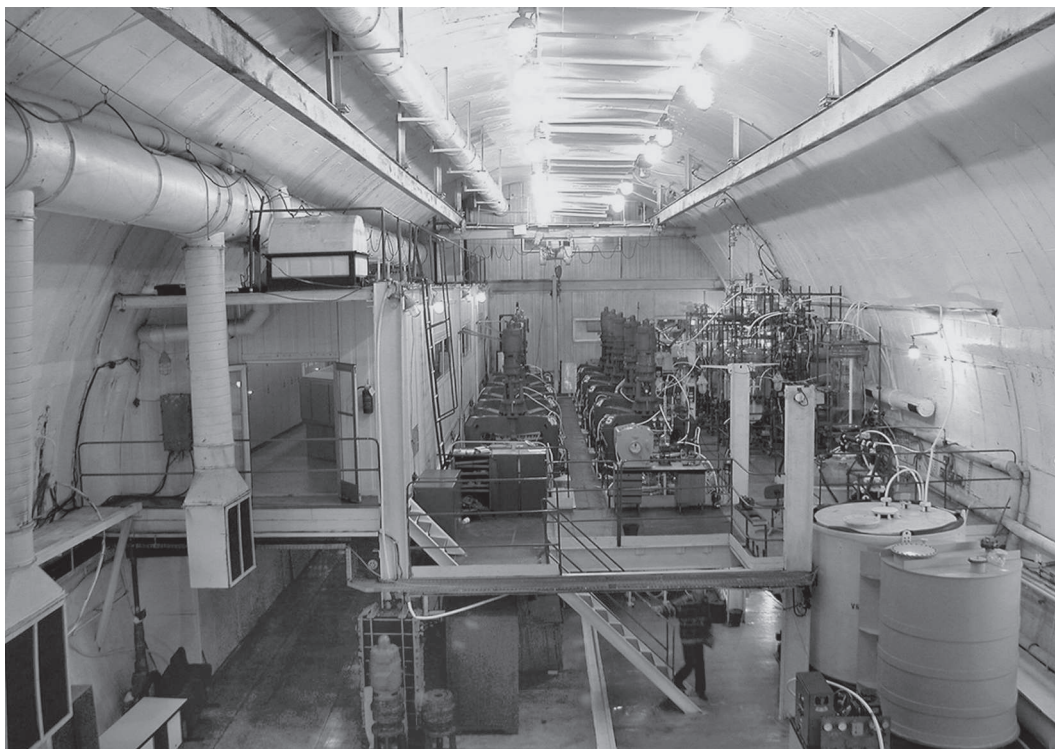
Выполнены эксперименты по поиску двухнейтринного и безнейтринного 2β-распада изотопов ⁷⁶Ge, ¹⁰⁰Mo, ¹⁵⁰Nd, ¹³⁶Xe, двойного К-захвата изотопов ⁷⁸Kr и ¹²⁴Xe, другие поисковые измерения.

ГАЛЛИЙ-ГЕРМАНИЕВЫЙ НЕЙТРИННЫЙ ТЕЛЕСКОП

Галлий-германиевый нейтринный телескоп (ГГНТ) предназначен для проведения измерений потока солнечных нейтрино. Данные о потоке содержат уникальную информацию о термоядерных реакциях в центральных областях Солнца и о свойствах нейтрино. Исследования на ГГНТ проводятся с 1986 г. в рамках российско-американского эксперимента SAGE (Soviet American Gallium Experiment). Принцип работы телескопа основан на реакции захвата нейтрино (ν_e) ядром ⁷¹Ga с образованием ядра ⁷¹Ge и электрона (e^-): ⁷¹Ga (ν_e ,

e^-) ⁷¹Ge. Достоинством данного метода детектирования, предложенного в 1965 г. советским ученым (ныне членом-корреспондентом РАН) В.А. Кузьминым, является низкий энергетический порог реакции, который составляет 0,233 МэВ, что существенно ниже максимальной энергии 0,423 МэВ нейтрино от pp-цепи. Благодаря этому галлиевый нейтринный телескоп позволяет регистрировать pp-нейтрино, дающие наибольший вклад в полный поток солнечных нейтрино. Радиоактивный изотоп ⁷¹Ge распадается путем электронного захвата с периодом полураспада $T_{1/2} = 11,4$ дня. Распады атомов ⁷¹Ge могут быть зарегистрированы, и таким образом будет определено число произошедших реакций и рассчитан поток нейтрино.

Подземный комплекс лаборатории ГГНТ расположен на расстоянии 3,5 км от входа в штольню. Основное помещение лаборатории представляет собой экспериментальный зал длиной 60 м, шириной 10 м и высотой 12 м. Горные породы над лабораторией создают защиту от мюонов к.л., соответствующую 4700 м водного эквивалента, и дают ослабление потока мюонов в 10^7 раз. Измеренный поток мюонов составляет $(3,03 \pm 0,10) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Для снижения нейтронного и γ-фона



Реакторный зал галлий-германиевого нейтринного телескопа Обсерватории.

от окружающих горных пород зал облицован низкорадиоактивным бетоном толщиной 600 мм и стальным листом толщиной 6 мм. Поток нейтронов с энергией 1,0–11 МэВ в лаборатории не превышает $2,3 \times 10^{-7} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. В состав подземного комплекса входят помещения для аналитической химии, системы регистрации распадов ^{71}Ge , низкофонового полупроводникового Ge детектора и ряда других вспомогательных подразделений.

58

В телескопе в качестве мишени используется около 50 т расплавленного металлического галлия, находящегося в семи химических реакторах. Естественная распространенность изотопа ^{71}Ga в галлии равна 39,6%. При ожидаемом потоке нейтрино от Солнца $6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ (60 млрд нейтрино на квадратный сантиметр в секунду) в 50 т металлического галлия в течение месяца образуется около 25 атомов ^{71}Ge . Для извлечения единичных атомов ^{71}Ge из мишени была разработана уникальная технология, которая является одним из основных технологических процессов телескопа.

Полная эффективность извлечения атомов ^{71}Ge из галлиевой мишени, содержащей 5×10^{29} атомов ^{71}Ga , составляет примерно 90%. Периодичность извлечения – 30 сут. Из извлеченного ^{71}Ge синтезируется газ GeH_4 (моногерман) – основная компонента рабочей газовой смеси. Смесь помещается в пропорциональный счетчик, с его помощью осуществляется регистрация распадов атомов ^{71}Ge в системе регистрации ГГНТ.

Регистрация редких распадов атомов ^{71}Ge в пропорциональном счетчике продолжается в течение четырех месяцев (≥ 10 периодов полураспада ^{71}Ge), затем не менее



двух месяцев измеряется фон. Информация о событиях в пропорциональном счетчике в режиме on-line по оптоволоконному каналу передается на сервер локальной вычислительной сети лаборатории ГГНТ (ЛГГНТ) в наземную лабораторию. Полный цикл операций облучения мишени, извлечения продуктов и счета распадов атомов ^{71}Ge называется *ран*.

РЕЗУЛЬТАТЫ КАЛИБРОВОЧНОГО И ОСНОВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Убедительным подтверждением достоверности результатов, получаемых в эксперименте SAGE, прямой проверкой методики извлечения продуктов реакции и расчетов выхода реакции стал эксперимент с использованием искусственного источника нейтрино ^{51}Cr интенсивностью $19,1 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$, испускающего нейтрино с энергией 750 кэВ (90%) и 430 кэВ (10%). Результат данного эксперимента, выраженный как отношение измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой скорости от источника известной мощности, составил $0,95 \pm 0,12\%$. Это можно рассматривать как прямое доказательство надежности измерений потока солнечных нейтрино, проводимых в эксперименте SAGE.

С января 1990 г. по декабрь 2007 г. обработаны результаты эксперимента SAGE, в которые вошли данные 168 завершенных солнечных ранов. Объединенный результат этих данных составляет $65,4 \pm 4 \text{ SNU}$ ($1 \text{ SNU} = 1$ взаимодействие в секунду в мишени, содержащей 10^{36} атомов активного изотопа). Полученное значение составляет 51% от величины $127,9 \pm 8,1 \text{ SNU}$, предсказанной по Стандартной Солнечной Модели (CCM) BPS08 без учета осцилляций. Совместное рассмотрение этого результата SAGE с результатами других экспериментов по регистрации солнечных нейтрино, а именно SNO (подземная установка в Канаде), Homestake (подземная установка в США) и KamLAND (подземная установка в Японии), позволило сделать дополнительные выводы. Были получены оценки, во-первых, величины потока pp -нейтрино, достигающих Земли в виде электронных нейтрино (электронный аромат) – $[(3,4 \pm 0,47) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}]$, во-вторых, полного потока нейтрино от pp -реакций в Солнце, достигающих Земли в виде различных ароматных состояний (электронные, мюонные и тау-нейтрино), возникающих как результат осцилляций исходно электронных нейтрино – $[(6,0 \pm 0,8) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}]$.

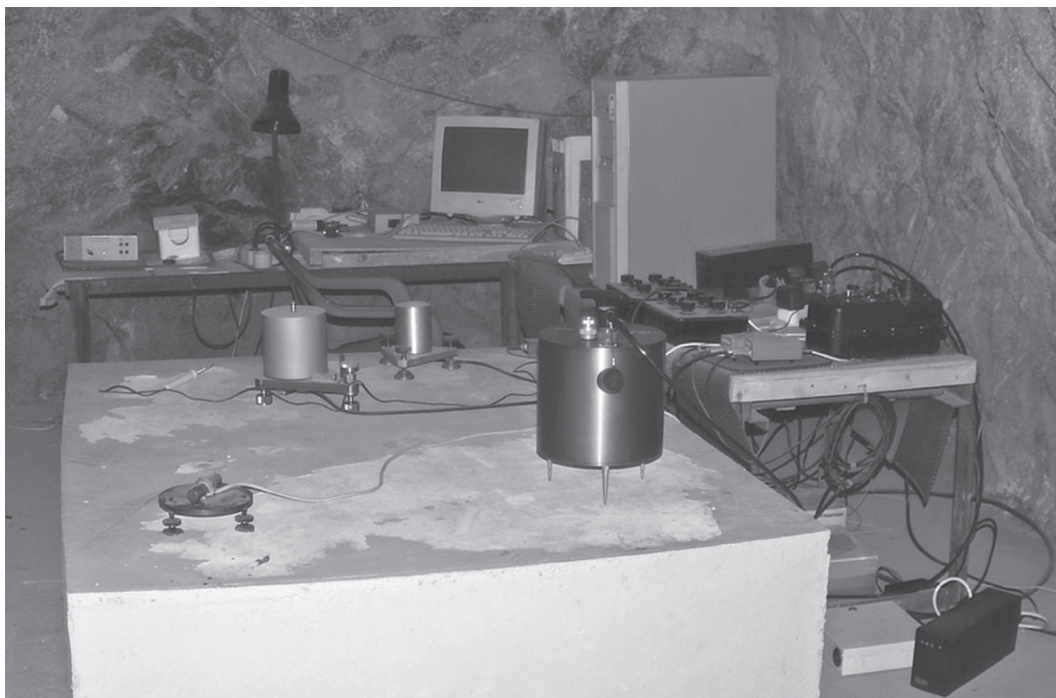
Экспериментально полученная величина полного потока нейтрино хорошо согласуется с величиной потока, предсказываемой CCM – $(5,95 \pm 0,06) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

УСТАНОВКА ОГРАН

В штольне “Главная” на расстоянии 1350 м от входа завершается создание подземного зала для **Оптоакустической гравитационной антенны (ОГРАН)**. В конструкцию ОГРАН заложены принципы, позволяющие без охлаждения вакуумированного акустического детектора массой около 1 т достичь чувствительности 10^{-18} по относительной деформации, достаточной для регистрации гравитационно-волнового излучения, порождаемого в моменты катастроф релятивистских астрофизических объектов в нашей Галактике и ее окрестностях (до 100 кпк). Работы ведутся совместно ИЯИ РАН и ГАИШ МГУ, их окончание запланировано на 2011 г.

ПОДЗЕМНЫЙ КОМПЛЕКС ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Параметры окружающей среды в подземном комплексе помещений отличаются высокой стабильностью. Уровни вибрационных и акустических шумов многократно снижены по сравнению с поверхностью. Это



Комплекс геофизических приборов, размещенных в геофизической лаборатории № 1.

создает чрезвычайно удобные условия для проведения различного рода геофизических измерений и обеспечивает их высокую чувствительность. Ценность таких исследований не только в фундаментальной составляющей. Получаемые данные позволяют отслеживать обстановку в глубинных слоях Земли в окрестностях спящего вулкана Эльбрус и прогнозировать возможные изменения его состояния.

В настоящее время в штольнях находятся **геофизические установки:**

60

– высокочувствительный деформограф ГАИШ МГУ на основе большебазового лазерного интерферометра размещен на расстоянии 530–610 м от входа в штольню “Главная”;

– ближний геофизический комплекс ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН (наклонометры, магнитные вариометры, сейсмостанция) установлен на расстоянии 1520 м от входа в штольню “Главная” в геофизической лаборатории № 1;

– дальний геофизический комплекс ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН (наклонометры, магнитометры, гравиметр, термометры) и сейсмостанции Геофизической службы РАН расположен

на расстоянии 4 тыс. м от входа в штольню “Вспомогательная” в геофизической лаборатории № 2.

В целом работы на всех установках Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН проводятся в тесном сотрудничестве с рядом отечественных и зарубежных научных организаций: Кабардино-Балкарский государственный университет, Южный Федеральный университет, Харьковский национальный университет, МИФИ, НИИЯФ МГУ, ГАИШ МГУ, ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, ИЗМИРАН, Полярный геофизический институт РАН (Апатиты), Геофизическая служба РАН, Институт астрономии РАН, ОИЯИ, междуна-



родная коллаборация “GERDA”, международная коллаборация “EMMA”, Польский Институт ядерных проблем (лаборатория космических лучей, г. Лодзь). Это значительно повышает

эффективность использования уникального для нашей страны специализированного низкофонового подземного комплекса установок Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН и

подтверждает его высокий научный потенциал для проведения исследований при решении широкого круга различных задач современной науки.

Информация

Академик Р.А. Сюняев – профессор Принстона

Принстонский институт высших исследований (США), основанный в 1930 г., 17 августа 2010 г. избрал профессором Отделения естественных наук главного научного сотрудника ИКИ РАН и директора Института астрофизики Общества им. Макса Планка (Германия) академика Р.А. Сюняева. Рашид Алиевич работает в области космологии и релятивистской астрофизики. Достигнутые им результаты исследований получили признание специалистов во многих странах. В частности, Р.А. Сюняев совместно с доктором физико-математических наук Н.И. Шакурой создали модель аккреционных дис-



ков, описывающую падение вещества на черные дыры и нейтронные звезды. Работы академика Я.Б. Зельдовича и Р.А. Сюняева имеют важное значение для понимания эволюции и структуры Вселенной.

Рашид Алиевич уделяет большое внимание развитию исследовательских способностей наиболее многообещающих молодых астрофизиков из разных стран. Известно, что Р.А. Сюняев подготовил немало моло-

дых российских ученых к научной работе в различных областях астрофизики. Эта сторона деятельности Рашида Алиевича близка к научно-педагогической программе Института.

Принстонский институт высших исследований по праву считается одним из наиболее престижных научных учреждений мира. Здесь работали величайшие физики и математики XX в. Альберт Эйнштейн, Курт Гедель, Джон фон Нейман, Роберт Оппенгеймер, Юджин Вигнер. Сейчас в Институте работают 28 профессоров, известных своими результатами во многих областях науки от математики до молекулярной биологии и от истории до экономики. Быть профессором Института – большая честь для современного ученого.

Пресс-релизы Роскосмос
и ИКИ РАН,
18 августа 2010 г.