

Вид на звёзды изнутри Андырчи

✍ Виталий Лейбин
 📷 Виталий Лейбин

Баксанская нейтринная обсерватория Института ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН) находится в сердце Кавказа недалеко от горы Эльбрус и врезается внутрь скалы на четыре километра. Это первая и одна из двух ныне существующих больших подземных обсерваторий. Вот уже почти полвека в ней добывают удивительные знания о Вселенной и физике частиц.

Установка «Ковёр», что под горой Андырчи в Баксанском ущелье, недавно зарегистрировала след, вероятно, очень энергичного космического фотона (гамма-кванта) и наделала тем самым много шума в научном мире. При установке живёт молодой кот Адрон. Иногда он не прочь оторваться от игр с электроникой, на которую поступают данные с детекторов, чтобы помурлыкать на руках младшего научного сотрудника Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН Виктора Романенко. Адрон — так называются большие частицы, из которых состоят ядра атомов: протоны и нейтроны, отсюда же второе слово в «Большом адронном коллайдере». Раньше на «Ковре» жил ещё кот Мюон, но он ушёл работать в магазин в соседнем городке Тырнаузе. Мюон — тоже не простое кошачье имя. Как и фотон с адроном, это название элементарной частицы, которая играет большую роль в нашей истории. Причём она играет свою роль и когда она есть, и когда её нет.

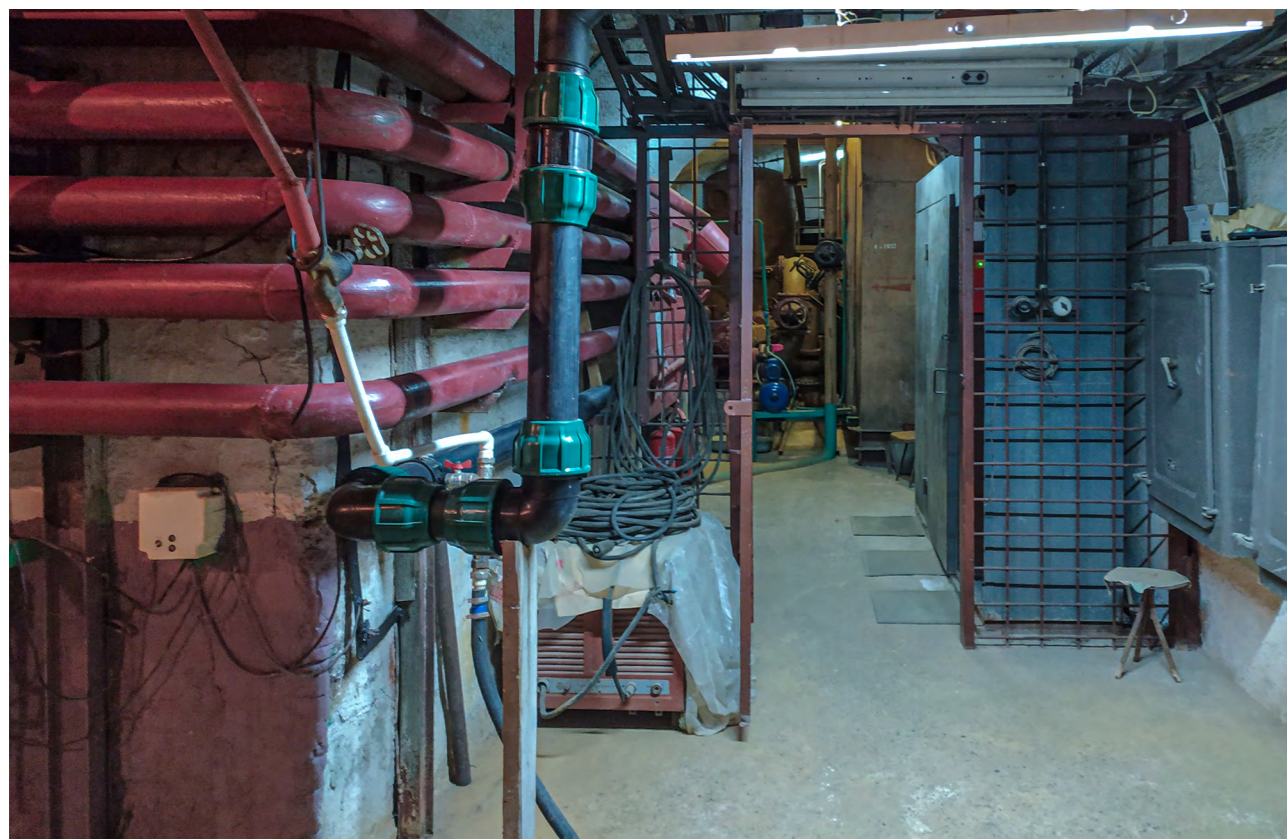
Культ качества данных

Вечером 9 октября Сергей Троицкий, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник ИЯИ РАН, написал коллегам-

экспериментаторам в Баксанскую нейтринную обсерваторию ИЯИ РАН, что в небе происходят интересные события и надо бы внимательно посмотреть данные. Интересным событием оказался мощный гамма-всплеск в созвездии Стрела, который первым обнаружил орбитальный телескоп Fermi (для него это было самое высокоэнергетическое событие за всё время наблюдений).

Таким образом, точное время и примерное направление в небе были известны. Виктор Романенко с коллегами задали область поиска и обнаружили, что сюда, в Баксанскую нейтринную обсерваторию, в течение трёх часов после первой регистрации на орбите пришёл ливень из частиц, который мог вызвать фотон фантастической энергии — на порядок больше, чем частицы, зарегистрированные коллегами. Предположительный фотон мог иметь энергию 251 тераэлектронвольт (ТэВ) — источников фотонов таких энергий на Земле не существует. Даже рекордные энергии частиц в самом мощном ускорителе, построенном людьми, Большом адронном коллайдере, не достигали 7 ТэВ. Но в космосе есть ускорители и посильнее. Гамма-всплески — результат грандиозных космических катастроф с участием нейтронных

Баксанская нейтринная обсерватория представляет собой серию лабораторий и инженерных помещений, расположенных в штольне, уходящей внутрь горы Андырчи



ГАММА-ВСПЛЕСКИ — РЕЗУЛЬТАТ ГРАНДИОЗНЫХ КОСМИЧЕСКИХ КАТАСТРОФ С УЧАСТИЕМ НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД, ЧЁРНЫХ ДЫР ИЛИ ТОГО И ДРУГОГО СРАЗУ

звёзд, чёрных дыр или того и другого сразу. Наблюдать предельно сильный космический взрыв с жёсткой радиацией очень интересно, но лучше издалека. К счастью, такое происходит несколько раз в миллион лет в расчёте на одну галактику.

Нынешний кандидат в фотоны задал учёным загадку. Если столь мощную частицу породила катастрофа в далёкой галактике, непонятно, как она могла пронести свою энергию, не растеряв по пути. Это невозможно, расстояния огромные. А если из нашей галактики, непонятно, что за чудо стало причиной этого явления. Теоретики принялись строить гипотезы — от обнаружения магнетара, бешено вращающейся нейтронной звезды, до нарушения базовых уравнений физики. А экспериментаторы начали перепроверять данные. — Открытие надо перепроверить, чтобы потом не делать великое закрытие. Бывает, что экспериментаторы поспешили, теоретики написали десятки статей, придумали новую частицу. А потом оказалось, что исходные данные были просто ошибкой наблюдения, — говорит Виктор Романенко. — Если долго и кропотливо работать со своим прибором, то можно понять, когда детектор что-то увидел, а когда чудит. В этот раз данные на компьютере выглядели достоверно. Но это только начало проверки.

Удивительно, но лейтмотив разговоров с учёными, которые здесь работают, — точность данных. Успех для физика-экспериментатора не в том, чтобы произвести сенсацию (хотя с точки зрения журналиста, что же здесь плохого?), а в том, чтобы скрупулёзно проверить данные. Это спорт не на скорость, а на точность. Вернее, не спорт, а культ истины. — Мы не можем утверждать, что зарегистрировали именно фотон. Мы лишь можем сказать, что с такой-то вероятностью это был фотон, — говорит заведующий обсерваторией, доктор физико-математических наук Валерий Петков. — Вы понимаете, что такое вероятность?

Конечно, на каком-то начальном уровне мы все понимаем: орёл или решка — пять-десять процентов. Но в данном случае вероятность — это вопрос строгого расчёта, основанного в том числе на теоретической модели. Потому что на самом деле установка не видит никаких фотонов — на элементарных частицах, как ни странно, вообще не написано, как их зовут. Тогда откуда мы знаем, что прилетело с неба? Теоретики приезжают сюда, в Баксанскую нейтринную обсерваторию, чтобы понять, что такое физическая реальность, какая слаженная, кропотливая работа множества людей — учёных, инженеров, лаборантов, рабочих — стоит за цифрами, которые могут подтвердить или разрушить самые красивые гипотезы. — Я тут младший, поэтому с меня рассказы и демонстрация данных, — говорит Виктор и ведёт нас показывать установку «Ковёр». Здесь все скромничают, никто не склонен рисоваться перед прессой. На таких больших и уникальных установках работают только в команде, а команда компактная и живёт высоко в горах — здесь, как на межпланетном корабле, не должно быть первых и последних.

А были ли мюоны

Обычно, когда говорят «обсерватория», в голове возникает образ оптического телескопа. Ничего такого здесь нет. Баксанская нейтринная обсерватория — многоцелевая подземная установка, которая состоит из различных детекторов. Например, «Ковёр-2» — это сцинтилляционные детекторы. Они выглядят как чёрные цилиндрические или пирамидальные ведра с проводами, выставленные рядами под горой. Действительно напоминает ковёр. В бочках уайт-спирит (если это советское поколение детекторов) или пластиковый сцинтиллятор — чувствительное вещество, которое в ответ на попадание частицы испускает квант света соответствующей энергии. Квант снимают с помощью фотоэлектронного умножителя (выглядит как вакуумная



Младший научный сотрудник Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН Виктор Романенко знает всё, что происходит на «Ковре»



лампа и небольшой кинескоп — кстати, придумали эту штуку в Советском Союзе в 1930-е годы), размножают, а итоговый сигнал уже измеряют приборами, определяя энергию даже единичной частицы. Но какой? Частица из космоса, если она взаимодействует с веществом и имеет большую энергию, при столкновении с атмосферой рождает ливень, каскад других частиц.

— Эти новые частицы сохраняют направление движения, — рассказывает Виктор Романенко. — Ливень представляет собой плоский компактный диск с распределением частиц от центра к краю.

Если повезло и диск падает на установку, приборы его регистрируют. На компьютере можно увидеть момент прилёта октябрьского ливня частиц. В некоторые бочки-детекторы попало много частиц, здесь был центр, в соседние поменьше, по краям вообще ничего. Но нормально ли сработали детекторы? Сначала сотрудники обсерватории проверили их осциллографом на электрический сигнал — всё хорошо. Но есть вероятность, что у них мог сбиться коэффициент усиления: каждый фотоумножитель настраивают так, чтобы он измерял точно и одинаково. В качестве эталона используется радиоактивный источник с малой дозой облучения, неопасной для человека. Сотрудник обсерватории буквально

руками измеряет отклик. Раз в неделю на установке проводится ремонт — вне зависимости от того, прилетела научная сенсация или нет. Основные 175 детекторов «Ковра» измеряют энергию ливня частиц.

— Ливни бывают двух типов: электромагнитные и адронные, — поясняет Виктор Романенко. — Каждому типу ливня соответствуют свои процессы.

Адронные (привет, Адрон! Кот как раз вышел на воздух проинспектировать детекторы) ливни порождаются протонами или ядрами атомов, они взаимодействуют с ядрами атомов атмосферы, и в результате появляется много мюонов — тех самых, что дали имя другому здешнему котику. Мюон — заряженная частица, похожая на электрон или позитрон, но толще и массивнее. Нужно ударить по ядру атома чем-то тяжёлым, например протоном, чтобы высечь мюон.

Электромагнитные ливни вызывают фотоны. При столкновении с атмосферой они порождают очень мало мюонов и много электронов с позитронами. Удачно получается: ливни можно различить. Дело в том, что ни одна заряженная частица, кроме мощного мюона, не может преодолеть и двух метров толщи горных пород. Поэтому на установке «Ковёр» есть мюонные детекторы. Они похожи на те, что мы уже видели, но над ними насыпано два

Посёлок Нейтрино, в котором живут многие сотрудники обсерватории

Поймать солнечные нейтрино

X

В трёх с половиной километрах от входа в штольню внутри горы Андырчи в подземной лаборатории глубокого заложения находится огромный зал галлий-германиевого нейтринного телескопа. Солнечные нейтрино здесь ловят пятьдесят тонн расплавленного металлического галлия в семи химических реакторах. В результате захвата галлий превращается в другой элемент — германий, который уже можно химически выделить и понять, сколько и каких нейтрино прилетело от Солнца.

За годы наблюдений накопилось много неясностей, прежде всего это нехватка нейтрино по сравнению с теорией, «галлиевая аномалия». Частично она объясняется наличием у нейтрино массы (Стандартная модель предполагает, что её нет), но не исключается и возможность существования нового типа нейтрино, так называемого стерильного. По результатам эксперимента BEST (Баксанский эксперимент по стерильным нейтрино) может быть объявлено об открытии новой частицы, но пока учёные осторожничают: надо провести дополнительную серию экспериментов.

Удивительно, но в горном подземелье мы услышали больше о новой, невиданной физике, чем в Москве. Что для теоретиков крушение или рождение красивой гипотезы, для экспериментаторов — реальность, данная в информации с детекторов.

с половиной метра грунта, который извлекли из горы, когда делали штольни обсерватории. В момент регистрации интересующего нас ливня на установке «Ковёр-2» не было ни одного мюона. Всё-таки сенсация?

— В одной статье так и написали: «Не было ни одного мюона». Но это... не совсем точно, — говорит Валерий Петков. — Дело в том, что пока работает установка второго поколения, «Ковёр-2», но совсем скоро мы окончательно перейдём на более продвинутый «Ковёр-3». Кроме прочего, в нём заметно больше мюонных детекторов: 410 вместо 175. Раз есть новые детекторы, надо посмотреть, что они показали. А они в те самые наносекунды октябрьского события засекли мюоны — всего пару штук, и тем не менее. Скорее всего, это не делает удивительное фотонное событие существенно менее вероятным, но вероятность надо подсчитать. Для «Ковра-3» ещё не отработана математическая модель.



Заведующий Баксанской нейтринной обсерваторией ИЯИ РАН Валерий Петков

Гамма-вспышке 9 октября 2022 года, возможно, посвятят целый номер крупного международного физического журнала. Там опубликуют данные с установок, которые её наблюдали, возможно, там будет и первая работа, использующая данные с «Ковра-3». Не исключено, что выйдут статьи о новой физике. Какая тут связь? В связи с баксанским гамма-квантом заговорили об аксионе — гипотетической частице, одной из возможных составляющих тёмной материи, про которую мы пока не знаем ничего, кроме того, что она преобладает во Вселенной. Название — в честь марки стирального порошка — частице дали весёлые физики: она должна была «отмыть» несоответствие теории с наблюдаемыми данными. Нейтральный аксион большой энергии мог прилететь издалека, ни с чем не столкнувшись, и распастся на два фотона, след одного из которых и поймали в горах Кавказа.

Нейтрино с той стороны Земли

Баксанская нейтринная обсерватория дала начало всей мировой подземной астрофизике. — В то время никто в мире не мог себе позволить такие грандиозные проекты во имя науки. Только Советский Союз, — рассказывает Валерий Петков. — Даже подземная обсерватория «Гран Сассо» в Италии — это не специально построенная штольня в горе, а ответвление от транспортного тоннеля. В современном мире подобное создают в Китае.

Парадокс. Чтобы увидеть события в небе, люди спустились глубоко под землю. Только там может быть достигнут чрезвычайно низкий уровень радиации, необходимый для ключевых исследований в области нейтринной физики и экспериментов, направленных на поиск редких событий в физике элементарных частиц. Иными словами, в здешних подземельях не может быть никаких частиц, кроме чего-то совсем уж особенного.

Младший научный сотрудник Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН Махти Кочкаров — ключевая фигура в лаборатории подземного скинтилляционного телескопа (ПСТ). Он своими руками проверяет все 384 скинтилляционных детектора. Махти показывает нам вход в астрофизическое сердце горы, вернее, два входа — в основную и вспомогательную штольни протяжённостью более 4000 метров. Над входом в основную



красуется буква «М» — подарок бакинских метростроителей, проложивших эти туннели. До самой ближайшей лаборатории ПСТ идти недалеко, так что добираемся пешком, а не в вагончике электропоезда. В штольне сухо и свежий воздух благодаря вентиляции. Во вспомогательной штольне даже недалеко от входа уже значительно теплее и часто стоит туман. Ну а в центре горы вообще под сорок — с глубиной температура горных пород и связанных с ними жидких и газообразных субстанций растёт, горняки это хорошо знают: в глубоких шахтах всегда жарко. На глубине один километр тридцатиградусная жара — нормальное явление, глубже температура ещё выше. Подземный сцинтилляционный телескоп представляет собой четырёхэтажное здание высотой больше 11 метров и основанием площадью 16,7 на 16,7 метра. Блоки, из которых собрано здание, выполнены из низкоактивного бетона на основе магматических горных пород (дунитов) и имеют толщину 80 сантиметров. Внутри — детекторы частиц. Ловят они, как следует из названия обсерватории, нейтрино. Дело это очень непростое, поскольку нейтрино практически ни с чем не взаимодействуют.

Через каждый квадратный сантиметр нашего тела каждую секунду пролетает шестьдесят миллиардов этих частиц, а мы ничего не замечаем! Чуть менее века назад их существование робко («Лучше об этом не думать, как о новых налогах») предположил физик Вольфганг Паули, чтобы спасти закон сохранения энергии при ядерной реакции бета-распада. Он решил, что должна существовать нейтральная частица с нулевой массой, способная уносить избыток энергии. Реакция обратная той, что удивила Паули, — обратный бета-распад — явление редкое, но благодаря ему нейтрино всё же можно иногда поймать. В ПСТ ловят высокоэнергетические мюонные нейтрино из далёкого космоса, а не электронные, которые рождаются в солнечных ядерных реакциях. — Мюонные нейтрино движутся снизу вверх, пролетают сквозь Землю и с какой-то вероятностью при столкновении с веществом порождают мюоны. Их-то и регистрируют наши детекторы, — объясняет Махти Кочкаров. — А что мешает им лететь сверху? — Нет, они, конечно, отовсюду летят, — улыбается Махти. — Просто снизу они прилетают

Кот Адрон — добровольный помощник сотрудников Баксанской нейтринной обсерватории

В СВЯЗИ С БАКСАНСКИМ ГАММА-КВАНТОМ ЗАГОВОРИЛИ ОБ АКЦИОНЕ — ГИПОТЕТИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕ, ОДНОЙ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ, ПРО КОТОРУЮ МЫ ПОКА НЕ ЗНАЕМ НИЧЕГО, КРОМЕ ТОГО, ЧТО ОНА ПРЕОБЛАДАЕТ ВО ВСЕЛЕННОЙ

примерно раз в неделю, а сверху — 17 раз в секунду. Сверху большой шум, мы не можем отличить мюонное нейтрино от мюонов космических лучей.

— А как отличить частицы, которые летят снизу вверх, от шума — нейтрино, которые движутся сверху вниз?

— По порядку срабатывания детекторов. Если летят снизу, сначала срабатывают нижние. Потом Махти ведёт нас в святая святых — зал, где стоят внутренние детекторы. Они спроектированы так, чтобы не регистрировать ничего, кроме нейтрино, возникающих в результате коллапса сверхновой звезды. — И как часто вы ловите коллапсные нейтрино?

— Пока такое было один раз, в 1987 году. 23 февраля 1987 года взрыв звезды в Большом Магеллановом Облаке, совсем недалеко от нашей галактики, зарегистрировали четыре обсерватории: советско-итальянская LSD под горой Монблан (построенная с учётом опыта работы Баксанской нейтринной обсерватории), собственно Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН, японская «Камиоканде» и IMB.

— До сих пор публикуются работы, посвящённые этому событию, — рассказывает Валерий Петков. — И наша обсерватория задаёт планку в вопросе качества данных. Недавно вышла статья, где анализировались данные с «Камиоканде», которая зарегистрировала меньший приход нейтрино, чем мы. Так вот, на измерения в Японии повлиял технический сбой в сборе данных, так что достоверность наших данных оказалась ещё более высокой, чем мы думали. В 2019 году здесь готовились к взрыву звезды Бетельгейзе, которая вдруг начала резко тускнеть. От неё ожидается большой поток высокоэнергетических нейтрино, и взор-

Махти Кочкаров — ключевая фигура в лаборатории подземного сцинтилляционного телескопа



ваться она может в любой момент — в любой момент в ближайшие 10 000 лет. Подготовка показала, что ПСТ справится.

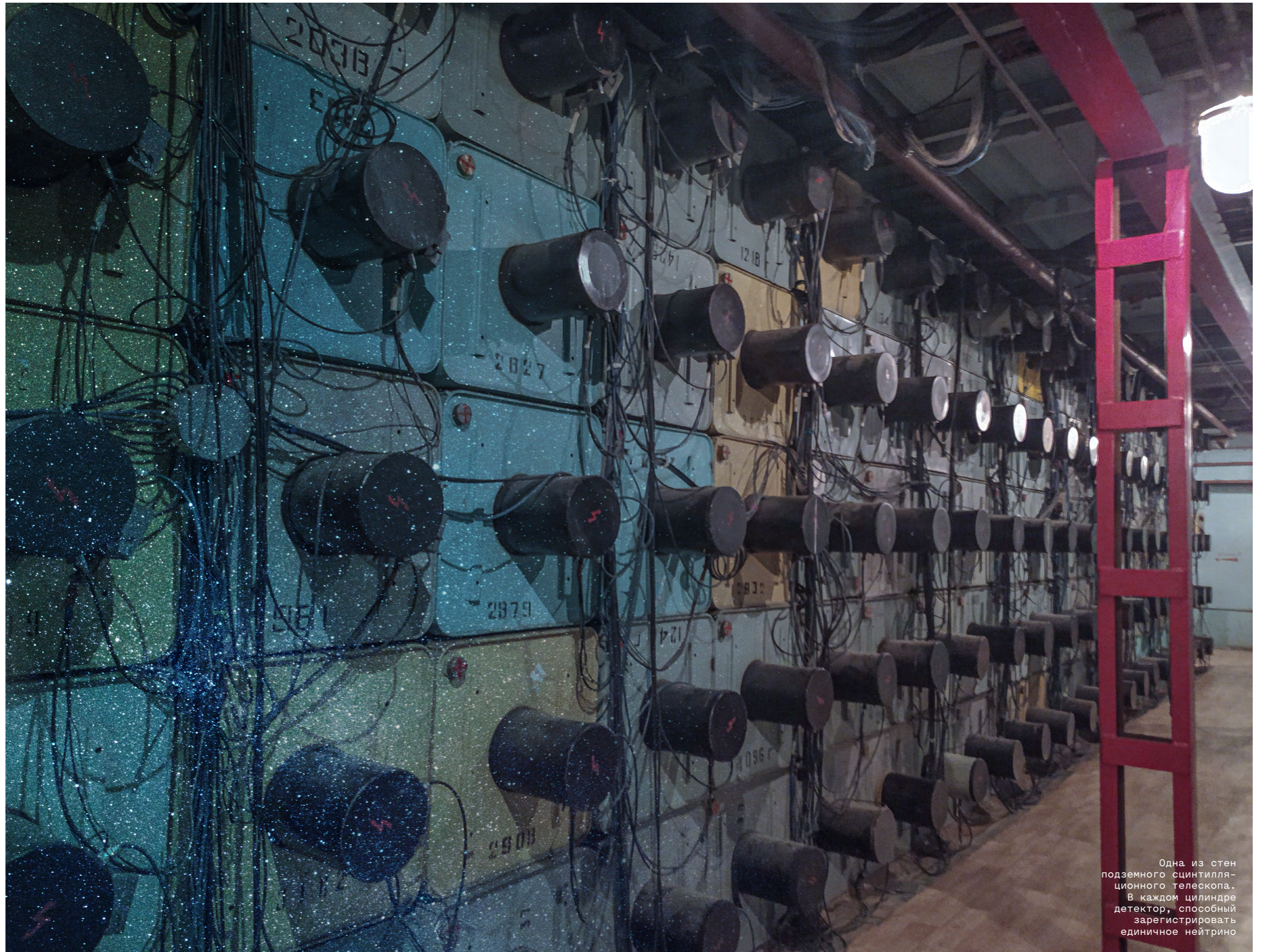
Лучше гор могут быть только горы с телескопом

В поселке Нейтрино, где живут сотрудники обсерватории, немногочисленно. Когда-то здесь работало пятьсот человек, сейчас двести пятьдесят. В девяностые случилось чудо: несмотря на то, костяк учёных сохранился, все многолетние эксперименты продолжились, и в 1995 году на горе развернули новую установку «Андырчи», чтобы регистрировать частицы одновременно с подземным телескопом.

— В 1996-м на конференции во французском Перпиньяне я докладывал о первых данных, полученных на «Андырчи», в сравнении с данными из подземной обсерватории. Это приятно — не просить денег или искать работу, а рассказывать о данных со своей установки, — вспоминает Валерий Петков. Хорошие публикации многим здесь позволяли найти работу в любой точке мира, но удивительным образом люди привязаны к этому месту. Что здесь так зачаровывает, кроме собственно науки, грандиозного сооружения в горе, к которому относятся как дому, и техники, которую любят как живую?

Один из ответов — горы. Пятнадцать минут на машине до горнолыжного склона, вокруг красивейшие маршруты. За обедом на «Ковре», который происходит тут же, чтобы не отрываться от работы, и который не мог, конечно же, пропустить кот Адрон, речь зашла о горнолыжных склонах. Старожилы вспоминали советские альп-клубы, а Виктор Романенко рассказал, что здесь у него исполнились сразу две мечты: работать в науке и научиться кататься на сноуборде. В общем, если кто любит одновременно науку, технику, горы и уединение, это идеальное место. Скоро, вероятно, здесь понадобятся минимум десятки учёных на месте и сотни в коллаборации, потому что современная обсерватория жива, пока развивается. Обсуждается в том числе создание сцинтилляционного телескопа нового поколения и масштаба, а также криогенные подземные детекторы, которые помогут найти проявления новой физики: частицы тёмной материи можно искать в том числе по мельчайшим изменениям в поведении сверхпроводника при низких температурах. В любом случае нас ждёт много данных и много открытий.

Минобрнауки России по разным каналам выделяет большие ресурсы на поддержку проектов и развитие установок Баксанской нейтринной обсерватории (БНО). В частности, в этом году министерство запустило ряд научных проектов по нейтринной тематике. В одном из них участвуют Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова и БНО ИЯИ РАН. В рамках этого проекта разрабатывается прототип детектора на основе Nd-содержащего жидкого органического сцинтиллятора для исследования безнейтринного двойного бета-распада. В рамках другого проекта, в котором также участвует БНО ИЯИ РАН, разрабатывается прототип крупномасштабного сцинтилляционного телескопа нового поколения. ^_^



Одна из стен подземного сцинтилляционного телескопа. В каждом цилиндре детектор, способный зарегистрировать единичное нейтрино