

Баргузин большой науки

[Ольга Рубан](#), автор [«Эксперт»](#), [«Эксперт Украина»](#)

Нейтринный телескоп, развернутый в глубине озера Байкал, не только позволяет разобраться с тем, что происходит в других галактиках, но и запускает новые технологические направления, находящие применение в самых разных сферах — от нефтянки до военки



Рисунок: Константин Батынков

Наш узик осваивает залитую солнцем белую целину — скованное льдом озеро Байкал. Пространство кажется бесконечным, только вдалеке виднеются бело-голубые гряды гор. Дымка скрывает их основания, и создается впечатление, что покрытые снегом вершины парят над Байкалом. Нанесенные ветром сугробы — как лежащие полицейские на нашем пути. В некоторых, слишком глубоких, колеса увязают. Приходится давать задний ход и пробовать еще раз, с разгона. Двигатель глухо ревет, железо истошно гремит, но машина ни разу не подводит — мы прорываемся и мчимся дальше.

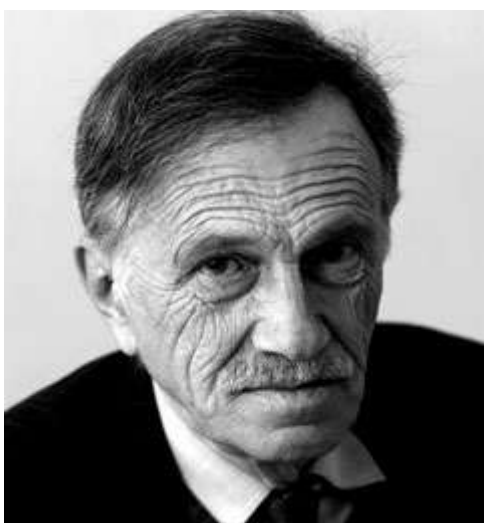
Цивилизация осталась далеко позади. Впереди — база экспедиции ученых, которые с конца 80-х годов развертывают здесь Байкальский нейтринный телескоп — уникальный подводный детектор для регистрации нейтрино высоких энергий, которые пришли из дальнего космоса. Сегодня в глубине Байкала работает полноценная исследовательская установка, которая прошла этап отладки технических подсистем, экспериментальной проверки научных гипотез, математических моделей, выживаемости аппаратуры под водой и стойкости команды, ведущей этот проект.

Пожалуй, в стране нет второго научного проекта такого масштаба, который бы подтвердил свой успех на мировом уровне и имел столь молодую команду, способную двигать эксперимент дальше. Подходит время делать следующий шаг в развитии проекта — строить на основе отработанного прототипа детектор на порядок большего размера, сохраняя за собой лидерские позиции в области нейтринной астрофизики.

Мы сделали это

Байкальский нейтринный детектор был задуман в 1979 году **Моисеем Марковым**, академиком-секретарем отделения ядерной физики Академии наук, как масштабный межведомственный проект, в котором помимо академических структур должны были участвовать прикладная и вузовская наука. Время показало, что благодаря такому подходу удалось задействовать потенциал наиболее сильных научных и инженерных коллективов страны, и проект в целом оказался вполне конкурентоспособным.

Первая очередь нейтринного детектора (NT-36) — три вертикальные гирлянды с 12 оптическими модулями на каждой (эти гирлянды называют стрингами) — заработала под водой в апреле 1993 года. Впервые в мире они зарегистрировали нейтрино высоких энергий (свыше 10^{10} электрон-вольт) в естественном водном бассейне. Мировое научное сообщество безоговорочно признало первенство российских астрофизиков.



Байкальский проект состоялся благодаря его руководителю — доктору физико-математических наук Григорию Домогацкому. Григорий Владимирович отвечает на Байкале за все: за уголь для кухни, за солянку для дизеля, за то, чтобы не упустить нейтрино и не уступить лидерские позиции американцам

Фото: Митя Алешковский

Этот успех обеспечили не столько правильные научные концепции, сколько упорство людей, которым пришлось выдержать серьезную проверку на прочность. Основной этап развертывания детектора пришелся на середину 90-х, когда все в стране только рушилось. У ученых, монтировавших установку на льду Байкала, не было ни спецодежды, ни инструментов, ни машин. Продукты, паяльники и маркеры присылали коллеги из германской DESY (DESY — второй после CERN по масштабу и по мощности научный центр Европы).

Этой уникальной подводной установке, которая создавалась по инициативе Института ядерных исследований РАН (ИЯИ РАН) для изучения отвлеченных вопросов большой науки, было суждено стать не только научным, но и инженерным проектом. Ничего готового для нее в стране тогда не было. И не имеющие аналогов глубоководные приборы, и специальную ледовую технику, и принципиально новые методы обработки больших массивов данных потребовалось создавать с нуля.

Например, фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) «Квазар», регистрирующий вспышки света, которыми сопровождаются редчайшие случаи столкновений нейтрино с ядрами атомов кислорода или водорода в воде, стал родоначальником нового поколения электровакуумных детекторов. Отличительные особенности «Квазара» — высокая чувствительность и очень высокое напряжение внутри колбы (25 кВ против 1,5–2 обычных), которое не дает магнитному полю Земли вносить помехи в работу ФЭУ. «Квазары» помещают в изготовленные по особой технологии сферы из низкорadioактивного стекла с добавками бора и кремния, которые выдерживают давление воды на глубине до 1400 м, и снабжают электронными мозгами. Получаются оптические модули — ключевые приборы детектора.

Сигналы от «Квазаров» поступают в два подводных компьютера, которые смонтированы в герметичных корпусах и висят на глубине 25 м. Они организуют передачу данных в Береговой центр — большую бревенчатую избу с русской печью. Информация передается на берег по специальным кабелям. Чтобы проложить их по дну Байкала, **Михаил Миленин** из Нижегородского политехнического университета, где сохранилась единственная на всю страну кафедра проектирования ледорезательного оборудования, разработал оригинальный агрегат: двигаясь по льду, он прорезает ровную щель и аккуратно опускает в нее кабель.

Работоспособность подводной установки обеспечила масса красивых инженерных решений. Взять хотя бы проблему герметичности разъемов под водой (они служат для соединения отдельных оптических и управляющих модулей в единую систему, всего разъемов в установке почти 2,5 тыс.). «Разъемы — слабое место всех подводных детекторов. Из-за этой проблемы в 1996 году был закрыт аналогичный байкальскому проект DUMAND на Гавайях (разработчики — США и Япония. — “Эксперт”) — первый и единственный стринг с двумя десятками оптических модулей проработал под водой всего полчаса и умер именно из-за протечки, — говорит **Кристиан Шпиринг**, руководитель группы нейтринной астрофизики DESY и председатель комитета по стратегиям Astroparticle Physics European Coordination (ApPEC). — Нашим российским коллегам на Байкале удалось решить эту проблему лучше всех — если что-то и выходит из строя, то не по причине протечек. Это фантастика!» Секрет фантастической герметичности байкальских разъемов прост и дешев, как и большинство наших ноу-хау. Обычные сухопутные разъемы переделали в глубоководные специалисты Акустического института имени академика Н. Н. Андреева: они рассчитали особую форму корпуса разъема в виде двух конусов, плотно входящих один в другой. Остаться герметичной такой конструкции помогает сама вода: на глубине давление водяного столба создает дополнительную силу, которая вжимает конуса друг в друга.

Были придуманы также специальные методы сбора, синхронизации и обработки гигантского количества сигналов, поступающих от приборов детектора: каждую секунду «Квазары» регистрируют до десяти вспышек, за сутки набирается почти 900 тыс. событий. Со всем этим научились разбираться и вычленять сигналы, соответствующие частицам, которые двигались в воде снизу вверх. А на такое способны только нейтрино — только эти частицы с ничтожно малой массой и нулевым зарядом могут беспрепятственно проходить сквозь земной шар.



Лопаты с дырками, похожие на дуршлаги, и клещи, которыми выдергивают гнилые железнодорожные шпалы, — незаменимый инструмент для чистки майн

Фото: Ольга Рубан

«За время работы на Байкале были испытаны и отработаны абсолютно новые техника и технологии для глубоководной регистрации элементарных частиц, было решено множество инженерных задач, была создана принципиально новая для астрофизики экспериментальная методика, — говорит руководитель проекта **Григорий Домогацкий**, заведующий Лабораторией нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН, доктор физико-математических наук. — Было проверено то, чего не просчитаешь ни на одной математической модели: поведение стекла, разъемов и электроники в условиях байкальской воды и сибирских морозов».

Эти работы идут на Байкале с 1988 года: каждую зиму, как только на озере окрепнет лед, на Байкал приезжает экспедиция ученых. На льду, в четырех километрах от берега разворачивается ледовый лагерь, прорубаются майны (квадратные проруби), лебедки поднимают из-под воды оптические и управляющие модули, опутанные паутиной проводов, и физики-теоретики из Москвы, Санкт-Петербурга, Дубны, Иркутска и Берлина приступают к самому привлекательному — постановке новых экспериментов. По команде «это нужно утопить» под воду опускают новые приборы, старые приборы с новыми электронными мозгами и так далее. Помешать этому занятию способна только природа: если вдобавок к морозу разгуляется еще и ветер баргузин, на открытом пространстве льда можно выдержать не более четверти часа.

Вообще, нам очень повезло и с озером Байкал, в котором нет солей, практически нет течений и вода достаточно прозрачная для эффективной работы ФЭУ; и с его прочным полутораметровым ледяным панцирем, который держится с середины января по начало апреля. Не будь у наших нищих ученых этой бесплатной базы для монтажа, обслуживания и достраивания подводной установки — не было бы и байкальского нейтринного детектора. Находчивые физики приспособили для нужд науки даже ледяные торосы — причудливые нагромождения ледяных глыб, образованные наехавшими друг на друга частями расколовшегося льда. Их используют в качестве испытательного полигона. «У нас такой подход: если ты собираешься опустить что-то под воду, сначала повози день-два на узике по торосам. Если останется в рабочем состоянии — смело устанавливай. Очень хороший прием», — делится опытом Григорий Домогацкий. Торосы на Байкале — что надо. Когда узик несется, подпрыгивая на краях ледяных плит, все его содержимое, включая пассажиров, болтается между полом и крышей, как шарик в погремушке. Выдерживают не все.

За шесть лет, прошедших после нашего первого визита на базу научной экспедиции (см. [«Нейтрончик из проруби»](#) [1], «Эксперт» № 28 за 2002 год), на берегу не изменилось ровным счетом ничего: те же бревенчатые избы, построенные у подножия горных утесов еще в начале прошлого века, когда здесь пробивали железную дорогу; те же металлические вагончики-кунги, наполовину забитые приборами, в которых «зимуют» ученые; и та же тишина. Кардинальные изменения произошли с подводной частью «айсберга», который носит неофициальное название Байкальский проект: в 2003 году, когда детектор уже давно функционировал, ученым пришла идея смонтировать три новых стринга с оптическими модулями и подвесить их по бокам основной установки, в стороне от нее. Эти стринги придали детектору новое качество — они позволили ученым определять не только направление движения нейтрино, но и их энергию. «Раньше мы могли лишь определять точку небесной сферы, из которой приходит нейтрино. Теперь мы можем получать информацию и о происходящих в этой точке процессах, которые стали причиной рождения нейтрино», — объясняет Григорий Домогацкий.

На сегодняшний день Байкальский нейтринный телескоп (NT-200+) представляет собой зонтикообразную конструкцию с 8 вертикальными гирляндами-стрингами, на которых нанизано 192 оптических модуля. Отдельно от нее висят три дополнительных стринга, на них — еще 36 оптических модулей. Эта конструкция не имеет аналогов. Идея самой конструкции и всех ее основных элементов — центральной рамы, штанг-плечей, консольных балок, тросовых растяжек, глубоководных буев и особых якорей-кошелоков, которые не засасывает в ил, — принадлежит «главному инженеру» проекта, физику-теоретику из ИЯИ РАН **Андрею Панфилову**. Размах подводного сооружения впечатляет: нижние элементы конструкции находятся на глубине 1400 м, верхние — в приповерхностном слое воды на глубине 15–20 м. Жаль, что целиком эту гордость российской науки могут лицезреть только флегматичные байкальские омули.

«Пожалуй, главное, что нам удалось за это время, — создать сплоченную команду проекта и доказать, что установка, смонтированная окоченевшими руками на морозе, может годами стабильно работать под водой, что ничего не разваливается и не сносится течением», — рассказывает Григорий Домогацкий. Все работы по проекту — разработка, монтаж и отладка установки — заняли более 20 лет. Тем временем у российских физиков появились последователи.

Обход с Южного полюса

В 1993 году к ловле нейтрино подключились американцы — свой детектор AMANDA они решили разворачивать в Антарктиде, аккуратно на Южном полюсе. К 2000 году американцы вырвались вперед: AMANDA имел в своем составе 19 стрингов с 677 оптическими модулями и превосходил байкальский детектор по объему чувствительного вещества — фрагмент среды, в котором регистрируются вспышки от нейтрино — примерно в 50 раз. Успеху американцев здорово поспособствовали партнеры по коллаборации из германской DESY — немцы подключились к проекту AMANDA, уже имея солидный опыт работы на Байкале.

Европа тоже решила не отставать: в середине 90-х в Средиземном море было начато строительство сразу трех аналогичных установок для регистрации нейтрино высоких энергий — ANTARES (Франция), NEMO (Италия) и NESTOR (Греция). Успешнее всего дела идут у французов: они опустили в море уже 750 оптических модулей, и в прошлом году ANTARES тоже обошел Байкальский телескоп по чувствительному объему.



Идет монтаж подводного «мозга» установки — системы управления, сбора и передачи данных. Эти компьютерные модули собирают всю информацию от фотоэлектронных умножителей детектора и транслируют ее по кабелям на берег

Фото: Ольга Рубан

Однако с точки зрения больших надежд, которые возлагает на нейтринные детекторы мировая наука (см. [«Зачем науке подводные нейтринные ловушки»](#) [2]), все созданные на сегодня подводные и подледные установки являются лишь маленькими прототипами. Гарантированно регистрировать особо интересующие науку нейтрино с энергиями свыше 10^{16} электрон-вольт подобные детекторы смогут, только если они будут иметь чувствительный объем не менее 1 км^3 (чувствительный объем самого большого детектора AMANDA составляет всего $0,015 \text{ км}^3$). Другими словами, оптических модулей должно быть столько, чтобы они могли отслеживать вспышки света от нейтрино в среде объемом 1 км^3 .

Первыми к планке в 1 км^3 устремились американцы: в 2002 году было решено создавать на базе AMANDA супердетектор из 80 стрингов по 60 оптических модулей на каждом. На этот проект, получивший название IceCube, Конгресс США выделил 242 млн долларов, еще 30 млн добавили партнеры — Германия, Швеция и Бельгия.

Средиземноморские проекты будут развиваться в том же направлении, но — с некоторой задержкой. Франция, Италия и Греция уже договорились объединиться и создать один детектор на всех, но где именно будет развернута общая установка, пока не решено — каждая страна хочет, чтобы место было выбрано около ее берегов. Не решен и вопрос с финансированием проекта — европейские ученые вынуждены ждать, пока американцы начнут получать со своего IceCube какие-нибудь действительно интересные данные. Это единственный веский аргумент, который сможет убедить чиновников Евросоюза и национальные правительства выделить 250 млн евро — в такую сумму оценена стоимость создания европейского аналога IceCube.

Американцы находятся уже на полпути к кубокилометровому супердетектору: на сегодняшний день в лед Антарктиды заморожена половина «мощностей». Полностью IceCube будет готов к 2011 году.

Дальнейшая судьба байкальского детектора — стоит ли создавать на базе прототипа кубокилометровую «ловушку» для нейтрино — до сих пор не определена. Цена «ловушки» сравнительно невелика. По оценкам Григория Домогацкого, на создание в Байкале детектора с чувствительным объемом 1 км^3 , который сможет регистрировать нейтрино с энергией свыше 10^{14} электрон-вольт, потребуется 25–30 млн долларов. Эта

сумма — на порядок меньше той, что запросили американцы и европейцы. И авторитетные эксперты подтвердили нам, что она вполне реалистична.

Жан Джилкибаев, ведущий научный сотрудник Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН, предложил методику, позволяющую рассчитать интересующие ученых характеристики тех нейтрино, которые «засветились» в воде далеко за пределами детектора — на расстоянии 100–120 м от оптических модулей. «Несмотря на то что по геометрическому объему наша установка в 100 раз меньше детектора AMANDA, благодаря новой методике получается, что по чувствительному объему они практически равны», — объясняет доктор физико-математических наук Джилкибаев, подцепляя клещами для железнодорожных шпал очередной увесистый кусок льда, плавающий в майне. Делает он это так ловко, будто всю жизнь только тем и занимался: для этой команды ученых почистить поутру три-четыре майны, которые за ночь затянуло свежим льдом, так же привычно, как почистить зубы.

Таким образом, чтобы охватить заветный кубокилометр, американцам придется нафаршировать антарктический лед 5 тыс. оптических модулей — нашим специалистам хватит 1,5 тыс. Если перевести это в деньги, получится, что американцы потратят на основные приборы своего детектора 80 млн долларов, а мы — всего 20 млн.

Но что можно получить на выходе за эти относительно небольшие деньги — 25–30 млн долларов? Ответы на извечные вопросы мироздания — о происхождении черных дыр, темной материи и проч., — какими бы захватывающими они ни были, в наш прагматичный век представляют ценность только для самих ученых да любознательных читателей научно-популярной литературы. Аргумент о престиже страны и необходимости внести свой вклад в мировую науку давно избит и особого драйва в наших краях не порождает. Однако это не полный перечень всех «за» и «против». Есть и другие факторы, которые следует принять во внимание при оценке значимости Байкальского проекта для науки и страны в целом.

Ускоритель для хайтека

Начнем с того, что «чисто научный» Байкальский проект дал начало развитию нескольких перспективных направлений отечественного хайтека. Чего стоят одни только «Квazarы», которые по ключевым параметрам превзошли общепризнанных мировых лидеров в области разработки и производства ФЭУ. По заказу ИЯИ РАН «Квazarы» создали инженеры новосибирского «Катода» — маленькой, но очень упорной и амбициозной компании. В 90-х «Катоду» удалось в одиночку ликвидировать двадцатилетнее отставание России от Запада в технологиях ночного видения — новосибирцы создали принципиально новую промышленную технологию производства электронно-оптических преобразователей второго и третьего поколений (сердца приборов ночного видения) и прорвались на мировой рынок этой техники (см. [«Из чистого упрямства»](#) [3], «Эксперт» № 8 за 2004 год). Сегодня «Катод» входит в пятерку ведущих фирм, способных разрабатывать и производить технику ночного видения, его приборы покупают, в частности, армии стран НАТО. А начиналась эта история успеха российского хайтека с «Квazarов»: в электронно-оптических преобразователях инженеры «Катода» использовали ряд прорывных технических решений, рожденных в процессе работы над фотоэлектронными умножителями для Байкальского проекта.

Другой пример высокотехнологичной продукции, созданной специально для байкальского детектора, — вертикально стоящие геофизические кабели, которые обеспечивают энергопитание глубоководной аппаратуры и передачу данных от регистрирующих

модулей к ретранслирующей аппаратуре. Условия работы в глубинах Байкала требовали, чтобы конструкция кабеля исключала электрохимическую коррозию и проникновение воды к токоведущим жилам при давлениях свыше 100 атмосфер. «Вода в Байкале пресная, но при работе аппаратуры возникают так называемые блуждающие токи, которые вызывают коррозию наружной, грузонесущей металлической брони кабеля, — объясняет **Андрей Робин**, генеральный директор компании «ПсковГеоКабель», которой ученые заказали разработку этого важнейшего компонента своей установки. — Чтобы исключить контакт металла с водной средой, мы разработали технологию, которая позволяет сделать суперпрочную полимерную оболочку кабеля, армированную стальной проволокой. Получается кабель с обшивкой из коррозионно-стойкого, прочнейшего сталеполимера».

Для российской промышленности это принципиально новый продукт, кроме «ПсковГеоКабеля», такого никто в стране делать не умеет. Модификации «байкальского» кабеля компания поставляет на нефтяные и газовые скважины, а также на рудники — оказалось, что ему нет альтернативы при добыче таких металлов, как уран, медь, молибден, где применяется метод выщелачивания с использованием агрессивных кислот.

Байкальский детектор востребовал и новые информационные технологии. «В последние пять лет была создана и отработана система удаленного управления подводной установкой на базе стандартных сетевых протоколов, по которым работает интернет. Стало возможно общаться с телескопом из Дубны, из Объединенного института ядерных исследований, — рассказывает **Владимир Айнутдинов**, старший научный сотрудник Лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий ИЯИ РАН. — А некоторыми экспериментами наши партнеры из DESY управляют непосредственно из Берлина».

Запуск перспективных хайтековских разработок и формирование на их базе новых направлений технологий (на Западе этот эффект называется spin-off — «отпочкование») — это то, о чем часто забывают при анализе «экономической отдачи» от фундаментальных исследований. «Фундаментальная наука ставит свои эксперименты, как правило, на грани возможного. Поэтому на основе технологий, которые разрабатываются для этих экспериментов, вполне могут быть созданы наукоемкие продукты, в том числе — с экспортным потенциалом», — утверждает **Борис Салтыков**, президент ассоциации «Российский дом международного научно-технического сотрудничества». Развитие Байкальского проекта будет означать, что он продолжит генерировать спрос на высокие технологии.

Ловушка для кадров

Второй аспект, который следует учесть, — кадровый. Байкальский нейтринный телескоп представляет собой крупный, успешный и очень амбициозный проект. То есть налицо все признаки, которыми оперировал японский физик, лауреат нобелевской премии **Масатоши Кошиба**, когда втолковывал своему правительству, что, пока в Японии не будет выдающихся научных проектов мирового уровня, японские ученые будут уезжать и продвигать науку других стран. Японское правительство своего ученого услышало: в стране появились крупнейшие в мире подземные детекторы Kamiokande и Super-Kamiokande для регистрации нейтрино средних энергий (10^6 — 10^{11} электрон-вольт).

Для России дефицит технократических кадров на глазах превращается из «просто проблемы» в тормоз развития науки и инновационной сферы. При этом речь идет именно о тех мозгах, которые являются носителями наших основных конкурентных преимуществ — креативности и инженерной смекалки. «В форсайте (долгосрочный прогноз научно-технологического развития страны. — “Эксперт”) острый дефицит талантливых

и квалифицированных научных и инженерных кадров стоит на одном из первых мест в числе вызовов, с которыми Россия столкнется в ближайшие пять-десять лет, — говорит Борис Салтыков. — А молодым ведь нужны не столько деньги, сколько уникальные проекты мирового уровня, такие как, например, Байкальский нейтринный телескоп».

Ловушка для нейтрино уже работает как ловушка для кадров: каждый год в команду приходят новые аспиранты, почти все они остаются и растут вместе с проектом. «В нашей лаборатории средний возраст сотрудников меньше 40 лет, многие специалисты отказываются от более выгодных предложений, предпочитают потерять в зарплате, чтобы иметь возможность работать в проекте. И каждый год ко мне просятся новые студенты», — эти слова доктора физико-математических наук **Николая Буднева**, заведующего Лабораторией физики лептонов Иркутского государственного университета, многие его коллеги по цеху прочитают с завистью.

У нас роль Кошибы, похоже, взял на себя академик **Евгений Велихов**, президент РНЦ «Курчатовский институт». С прошлого года он активно продвигает принципиально новый для российской науки подход к организации и финансированию фундаментальных исследований. Этот подход предполагает запуск нескольких крупных программ мирового уровня, которые выйдут за рамки Академии наук — будут носить межведомственный характер и реализовываться по проектному принципу. Чтобы подобные программы действительно могли удерживать мозги, необходимо выполнение еще двух условий. «В эти программы на конкурсной основе должны включаться самые сильные коллективы, вне зависимости от их ведомственной принадлежности, — объясняет Борис Салтыков. — Эти программы также должны становиться международными — молодым и талантливым ученым важно быть включенными в мировую науку».

В ноябре прошлого года новый подход обсуждался на заседании Совета по науке, технологиям и образованию при президенте РФ. По словам Евгения Велихова, несколько таких программ (их назвали мегапроектами) уже сформировано, в том числе — по направлению «Нейтринная космофизика». В последнюю включены две экспериментальные площадки, способные вести исследования на мировом уровне, — Байкальский нейтринный телескоп и Баксанская нейтринная обсерватория. На реализацию каждой программы предложено выделять 5–6 млрд рублей на 10–12 лет.

Может показаться, что США со своим IceCube уже обогнали наших ученых, однако Байкальский проект все же имеет шансы сохранить за собой лидерство. Дело в том, что Штаты с Южного полюса могут отслеживать нейтрино, пришедшие только из северной части небесной сферы, а мы — только из южной. Поэтому два детектора, американский и наш, не конкурируют, а дополняют друг друга. И здесь нам еще раз крупно повезло. «Из Северного полушария мы можем “видеть” центр нашей Галактики — активно живущее образование, где постоянно происходит масса интереснейших событий. Это наше большое преимущество, с Южного полюса этой области не видно», — объясняет Григорий Домогацкий. Нашими конкурентами являются только европейцы, но они, похоже, дают нам хорошую фору по времени: по мнению Кристиана Шпиринга, кубокилометровый детектор в Средиземном море будет смонтирован не ранее 2016 года.

Ссылки

- [1] [/printissues/expert/2002/28/28ex-nauka/](#)
- [2] [/printissues/expert/2008/17/zachem_nauke_neitrinnue_lovushki/](#)
- [3] [/printissues/expert/2004/08/08ex-katod12/](#)

