

# Большая охота на нейтрино

04 июля 2023

Беседовал Андрей Соколов

В России разрабатывается федеральная программа исследований в области физики нейтрино и астрофизики частиц на 2023–2030 годы. Над проектом работают НИЯУ МИФИ, Институт ядерных исследований РАН и НИЦ «Курчатовский институт». «Новый атомный эксперт» попросил ученых из этих институтов объяснить, зачем нужна такая программа и найдут ли результаты исследований «большой науки» практическое применение.

## **Александр Болоздыня**

*Заведующий лабораторией экспериментальной ядерной физики МИФИ*

Эта программа особенно актуальна в сегодняшних непростых условиях. Тем более что у нас есть серьезный задел по данным направлениям. В Баксанскую нейтринную обсерваторию, Байкальский нейтринный телескоп вложено очень много труда и средств, и они нуждаются в особой поддержке. Серия экспериментов завершена, и необходимо обновить оборудование, чтобы сделать следующий шаг. В последние годы мы вели фундаментальные исследования в основном благодаря международному сотрудничеству. Молодые ученые предпочитали работать на больших международных установках, общаться там с коллегами со всего мира. Сейчас масштабы международного сотрудничества резко сократились. Значит, настало время вспомнить о возможностях, имеющихся в стране.

В России создана превосходная база для реакторных экспериментов, например, на Калининской АЭС, в Дубне, Курчатовском институте, а с недавних пор и в МИФИ, где поставлен эксперимент Red 100. Если он будет удачным и мы научимся регистрировать нейтрино сквозь когерентное рассеивание, откроется перспектива создания компактных, даже мобильных приборов для мониторинга реакторных установок АЭС, состояния активной зоны реактора, причем на расстоянии. Для этой установки мы используем эффект, открытый в 2017 году международной коллаборацией, в которой мы тоже участвовали. Свою технологию мы развиваем при поддержке Российского научного фонда (РНФ). Сейчас готовим второй раунд экспериментов на Калининской АЭС. Поддержка таких разработок через федеральную программу очень своевременна и важна.

Как известно, изучать нейтрино можно тремя способами: регистрировать космические нейтрино; регистрировать нейтрино от специальных источников, которые мы в России умеем производить; или проводить эксперименты по двойному бета-распаду, подобные проводившимся в Баксанской лаборатории. Зарубежные коллеги уже ушли вперед по направлению изучения свойств нейтрино. Например, в Южной Корее работает лаборатория Yemi Lab, в которой проводится эксперимент по поиску нейтрино AMoRE. 300-килограммовый кристалл, содержащий изотоп молибдена и лежащий в основе эксперимента, был

произведен в России, но российских ученых из этого эксперимента настойчиво выдавливают. А ведь мы могли бы вести такую работу на Баксане. Все необходимые технологии у нас есть, нужны только средства. Однако необходимо отдавать себе отчет: есть крупные международные эксперименты, превзойти результаты которых объективно невозможно. Например, Большой подземный ксеноновый эксперимент (Large Underground Xenon experiment -LUX), в котором участвует МИФИ,— создание глобального ксенонового детектора для поисков темной материи. В нем участвуют более тысячи специалистов со всего мира! И за каждым стоят возможности институтов, технологических компаний.

Так что нужно очень осторожно выбирать приоритеты и финансировать именно те разработки, в которых у нас есть шанс получить прорывные результаты. На мой взгляд, это прежде всего Баксан и эксперименты с реакторными нейтрино. В этих направлениях мы можем стать лидерами даже в условиях ограниченного финансирования.

### **Глубоко под землей**

Южнокорейская лаборатория Yemi Lab расположена под горой Йеми, на глубине 1100 метров. Такое расположение позволяет исключить любые мешающие исследованиям фоновые шумы. Площадь лаборатории — 3 тыс. м<sup>2</sup>. Работа лаборатории рассчитана по крайней мере на 30 лет. Два основных эксперимента: AMoRE-II и COSINE- 200.

Цель эксперимента AMoRE-II (Advanced Mo-based Rare process Experiment) — изучение физических свойств нейтрино с использованием принципа двойного бета-распада, в основе — молибденовый датчик.

COSINE- 200 ставит целью обнаружить темную материю: по мнению ученых, ее следы можно зарегистрировать при столкновении ее частиц с кристаллом йодида натрия внутри детектора.

### **Сергей Троицкий**

*Главный научный -сотрудник Института ядерных исследований РАН, профессор МГУ им. М. В. Ломоносова*

Актуальность российской программы в области нейтрино и астрофизики частиц определяется двумя основными факторами.

Во-первых, в мире эта область науки сейчас интенсивно, пожалуй, даже революционно развивается, обгоняя как астрономию, так и коллайдерную физику частиц по темпу получения новых знаний об устройстве макро- и микромира.

Во-вторых, для России это направление — одно из немногих в фундаментальной физике, в котором наша страна сохраняет лидерство с самого зарождения этой области, прежде всего благодаря существенным вложениям в инфраструктуру; в результате были созданы удивительные крупномасштабные научные установки.

Чтобы удержать лидирующие позиции, чтобы больше была отдача от вложенных миллиардов, требуется, конечно, обновление инфраструктуры и проведение на ее базе новых экспериментов. Два года назад по инициативе ИЯИ РАН и ОИЯИ была

создана небольшая рабочая группа, определившая основные концепции будущей нейтринной программы; я участвовал в ее работе.

Институт ядерных исследований РАН — пионер и один из лидеров исследований в области нейтрино. Выдающегося ученого, академика АН СССР Моисея Александровича Маркова можно без преувеличения назвать отцом--основателем ИЯИ РАН. Его идеи комплексного подхода к изучению физики микро- и макромира легли в основу научной программы института. М. А. Марков неоднократно обосновывал необходимость создания экспериментальных установок для проведения исследований в области нейтринной физики и астрофизики. Одна из задач, поставленных ИЯИ РАН при его образовании в 1970 году, — создание в Баксанском ущелье в Приэльбрусье комплекса подземных низкофоновых лабораторий с нейтринными телескопами.

Институт уделяет большое внимание подготовке высококвалифицированных научных кадров, обучая студентов на базовых кафедрах «Фундаментальные взаимодействия и космология» МФТИ и «Физика частиц и космология» МГУ, на других кафедрах МГУ, МИФИ, КБГУ, Южного федерального университета; он имеет собственную аспирантуру.

В 2020 году ИЯИ РАН совместно с ОИЯИ выступили инициаторами разработки Федеральной программы исследований в области нейтрино.

Пример, иллюстрирующий лидирующее положение нашей страны в нейтринной астрофизике, — глубоководный нейтринный телескоп на Байкале. М. А. Марков и И. М. Железных предложили метод регистрации нейтрино, используемый во всех нейтринных телескопах высоких энергий. На Байкале впервые удалось его реализовать — зарегистрировать нейтринное событие. С 1980 года на этом телескопе ведутся работы по глубоководному детектированию мюонов и нейтрино.

Нейтринные телескопы строятся долгие годы, а затем долгие годы набирают статистику. В 2013 году эксперимент IceCube (на Южном полюсе) объявил об открытии астрофизических нейтрино высоких энергий, и до 2021 года все данные о таких нейтрино шли с этой установки. В 2022 году эксперимент Baikal--GVD дал первое независимое подтверждение существования таких нейтрино — это ключевой момент нейтринной астрономии! В науке принято доверять, но проверять. Байкальский телескоп сейчас находится в стадии наращивания рабочего объема. Для одного из каналов регистрации нейтрино он уже догнал IceCube, для других должен догнать в течение нескольких лет. Его важное преимущество — жидкая вода: по сравнению с ледовым экспериментом на Южном полюсе водный эксперимент позволяет определять направление прихода нейтрино примерно в четыре раза точнее. Это значит, что в четыре раза быстрее ученые будут получать информацию о пока неизвестных, несмотря на 10 лет работы IceCube, экстремальных астрофизических источниках, способных родить нейтрино столь высоких энергий.

Вместе с нейтрино должны рождаться фотоны столь же высоких энергий, и развитие нейтринной астрономии в последние годы повлекло развитие гамма-астрономии очень высоких энергий. Тут нужны не обычные телескопы, а

огромные установки, регистрирующие результаты взаимодействия гамма--квантов в атмосфере Земли. В России таких установок две: TAIGA в Тункинской долине и «Ковер- 2» в Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН в Приэльбрусье. Они дополняют друг друга, потому что работают разными методами и, частично, в разных энергетических диапазонах. Основной наш конкурент здесь — огромная китайская установка LHAASO, в работе на которой, кстати, участвуют ученые из ИЯИ РАН.

Нужны ли нам в этих условиях небольшие российские установки? Ответ неожиданный, уже проиллюстрированный примером. 9 октября 2022 года произошел уникальный космический гамма--всплеск, такие бывают раз в десятки тысяч лет. В этот момент LHAASO зарегистрировала фотоны с энергиями до 18 ТэВ. Затем Земля повернулась, источник ушел из поля зрения китайской установки, и «Ковер- 2» зарегистрировал фотон с энергией 250 ТэВ. А пока «очередь» дошла до похожей мексиканской установки HAWC, вспышка закончилась, и они вообще ничего не увидели. Вывод: для гамма--астрономии очень высоких энергий обязательно нужны установки, разнесенные по географической широте, они дополняют друг друга. Китай, Бурятия, Кабардино-Балкария и Мексика — не полное покрытие, но уже кое-что.

С точки зрения научных запросов гамма--астрономии Тянь--Шаньская научная станция ФИАН интересна локацией высоко в горах и развитой инфраструктурой. Но там нужны радикально новые инструменты. Тут должна эксплуатироваться именно высота над уровнем моря. Один из вариантов — разрабатываемый в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН высокогорный низкопороговый гамма--телескоп ALEGRO, работающий с фотонами от нескольких ГэВ, сигналы от которых можно регистрировать или со спутника, или высоко в горах — ниже они просто не долетают из-за атмосферы. Это проект следующего поколения, важность его обусловлена тем, что телескоп будет иметь чувствительность большую, чем у спутникового телескопа Fermi LAT. Да и вообще тот летает уже с 2008 года, а замены ему нет и не предвидится.

Третья составляющая современной многоканальной астрономии, вдобавок к нейтринно и гамма--квантам, — космические лучи. Они регистрируются на Якутской комплексной установке ШАЛ и в эксперименте НЕВОД в МИФИ, но также и на «Ковре- 2», и на комплексе установок в Тунке, работающем вместе с TAIGA. Основное, что объединяет эти установки и что будет востребовано для физики частиц, — это возможность одновременного изучения разных составляющих создаваемого космическими лучами в атмосфере каскадного процесса — широкого атмосферного ливня (ШАЛ). Совместные усилия дополняющих друг друга по технике и энергетическим диапазонам экспериментов помогут понять причины загадочных расхождений между теорией и наблюдениями в развитии ШАЛ. Это позволит «пощупать» взаимодействия элементарных частиц в режимах, недоступных даже Большому адронному коллайдеру.

Задачам изучения свойств нейтрино как частицы в программе тоже отведено достойное место. Одна из наиболее интересных нерешенных проблем здесь — поиск новой элементарной частицы — нейтрино четвертого типа, так называемого

стерильного. Ученые, работающие над решением этих задач, активно сотрудничают с предприятиями Росатома. В частности, на Калининской АЭС проводится ряд экспериментов, один из которых — DANSS — уже получил лучшие в мире ограничения на параметры этой необычной частицы. При этом остается открытой область параметров, мотивированная результатами экспериментов «Нейтрино-4» (на реакторе в Димитровграде) и BEST (БНО ИЯИ РАН, для него там же, в Димитровграде, изготавливался источник нейтрино). Еще хотелось бы упомянуть самый масштабный проект программы, нацеленный на самый долгий срок, — Большой баксанский нейтринный телескоп (ББНТ). Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ РАН — исторически первая в мире и до сих пор одна из немногих подземная лаборатория глубокого залегания (четырёхкилометровый тоннель под горой Андырчи), построенная специально для нужд нейтринной физики (а не расположенная в заброшенной шахте, автомобильном тоннеле и т. п.). Глубина залегания и удаленность от ядерных реакторов обеспечивают один из самых низких в мире уровень фона. Благодаря этому здесь уже получены уникальные результаты, например, с помощью наблюдений нейтрино от Солнца экспериментально доказано, что источник солнечной энергии — термоядерные реакции. Новый многоцелевой нейтринный детектор будет использоваться для решения целого ряда задач физики частиц, астрофизики, космологии, а также для изучения внутреннего строения Земли. Фундаментальная наука, расширение границ наших знаний об окружающем мире всегда требуют исследований на пределе возможностей человечества — ведь то, что легко было открыть, уже открыто! В особенности это заметно, когда речь идет о сложнейших, огромных и притом прецизионных установках, подобных упомянутым выше. Каждый следующий шаг на переднем крае науки требует разработки новых технологий, необходимых для производства и работы уникального экспериментального оборудования. К ним относятся и информационные технологии, необходимые для обработки данных. Часто обделенная бюджетом, фундаментальная наука вынуждена экономить, а значит, эти новые технологии будут вдобавок не слишком дорогими. Кто мог подумать, что изобретенная в ЦЕРНе для анализа результатов исследований электрослабого взаимодействия гипертекстовая компьютерная сеть вырастет во всемирную паутину Интернета, в значительной степени определяющую сегодня жизнь всего человечества? Или что разработка и производство сверхпроводящих магнитов для Большого адронного коллайдера приведут к радикальному снижению цен на магниторезонансную томографию, для которой нужны аналогичные, только небольшие, магниты? У нейтринных экспериментов уже есть интересные практические приложения, связанные с контролем ядерных реакторов, исследованиями Байкала и т. д., но самые интересные и неожиданные — еще впереди.

### **Широкий атмосферный ливень**

Это поток лептонов (электронов, мюонов) и адронов, возникающий в атмосфере в результате взаимодействия первичных космических частиц сверхвысокой энергии

с ядрами атомов воздуха. Поперечные размеры ШАЛ достигают нескольких километров. ШАЛ обнаруживаются и изучаются с помощью систем детекторов частиц, расположенных в горизонтальной плоскости и включенных в схему совпадений.

Источники ШАЛ — электронно-ядерные ливни, порождаемые космическими протонами и более тяжелыми ядрами с последующим развитием электронно-фотонного и ядерного каскадов в атмосфере. Каскад развивается по направлению движения первичной частицы, ШАЛ имеет осевую симметрию относительно этого направления (небольшие отклонения от нее могут возникать под влиянием магнитного поля Земли).

Плотность частиц максимальна около оси и уменьшается с расстоянием. С расстоянием от оси меняется и состав частиц в ливне. Вблизи оси 98% всех частиц составляют электроны (и фотоны) с небольшой примесью адронов высокой энергии. На расстояниях ~200 метров электроны составляют лишь 80% потока, а остальные 20% — мюоны, появляющиеся в ливне из-за распада заряженных пионов и каонов.

Источник: Физическая энциклопедия. М.: Советская Энциклопедия, 1984.

### **Анатолий Петрухин**

*Главный научный сотрудник научно-образовательного центра НЕВОД НИЯУ МИФИ*

Проект программы «Нейтрино» предусматривает развитие исследований в двух областях: физика нейтрино и астрофизика частиц. Такое объединение обусловлено тем, что регистрация нейтрино ПэВных энергий остро поставила вопрос об их происхождении.

Известно, что основной источник нейтрино — распады других частиц (нейтронов, пионов, каонов и т. п.) по каналам слабого взаимодействия. Поэтому для образования ПэВных нейтрино необходимы частицы с энергиями, превышающими энергии нейтрино. Таким образом, физика нейтрино сверхвысоких энергий (10<sup>15</sup> эВ) тесно связана с космическими лучами, в которых регистрируются частицы с энергиями, намного превышающими энергию ПэВных нейтрино.

Для исследования космических лучей сверхвысоких энергий в России созданы и успешно работают несколько крупных установок: ЯкуШАЛ, TAIGA, НЕВОД, Ковер-Мюон, ТШВНС. Расширение и обновление этих установок включены в проект программы «Нейтрино».

Естественно, в отличие от нейтрино, сохраняющих направление на источник их образования, заряженные частицы взаимодействуют с галактическими и внегалактическими магнитными полями, и их траектории могут изменяться. Эти изменения зависят от энергии и вида частицы, поэтому большой набор экспериментальных данных с перечисленных выше установок открывает возможность решения такой задачи.

Совместно эти установки обеспечивают исследования первичных космических лучей в диапазоне энергий 10<sup>15</sup>-10<sup>19</sup> эВ. До последнего времени они работали по

собственным программам, практически независимо друг от друга. Их включение в единую программу значительно улучшит координацию проводимых исследований и позволит выработать комплексный подход к изучению проблемы происхождения космических лучей с учетом возможностей каждой установки.

На энергоблоке № 4 Калининской АЭС успешно опробовали работу не имеющего аналогов в мире детектора для регистрации потока нейтрино РЭД- 100.

Уникальный прибор разработали российские специалисты из НИЯУ МИФИ

### **Михаил Скорохватов**

*Директор отделения физики частиц НИЦ «Курчатовский институт»,  
заведующий кафедрой «Физика элементарных частиц» НИЯУ МИФИ*

В ближайшие годы физика нейтрино войдет в число основных направлений физики элементарных частиц. Именно в этой области идет поиск решения таких фундаментальных проблем естествознания, как строение и свойства материи на элементарном уровне, барионная асимметрия и природа скрытой массы Вселенной. Именно в этой области разрабатываются и создаются новые, мощные средства изучения внутреннего строения Земли, Солнца и звезд, инструменты контроля для атомной отрасли, новые средства коммуникаций, развиваются новые технологии.

Исследования в области физики нейтрино в СССР начались в середине прошлого века. Экспериментальная база обеспечивала мировой уровень реакторных, ускорительных и низкофоновых экспериментов. Сегодня исследований мирового уровня на российских установках проводится недостаточно, а экспериментальная база требует глубокой модернизации.

НИЦ «Курчатовский институт» имеет богатый опыт исследований в этой области. В 1964 году была принята первая программа исследований физики нейтрино, а в начале 1980-х годов при поддержке академиков А. П. Александрова, М. А. Маркова и Б. М. Понтекорво были созданы уникальные нейтринные лаборатории вблизи реакторов на Ровенской АЭС и в Красноярске. Специалисты Курчатовского института провели рекордные по точности исследования свойств и взаимодействий реакторных антинейтрино, был впервые предложен метод практического использования нейтрино для контроля атомных реакторов. В основополагающих работах школы И. К. Кикоина были развиты методы изотопного обогащения элементов и впервые получены большие количества изотопов германия, хрома, ксенона для экспериментов по поиску безнейтринного двойного бета-распада. На ускорительном комплексе НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ в 1970-х годах был создан нейтринный канал, обладавший лучшей в мире эффективностью благодаря внедрению оригинальной фокусирующей системы адронного пучка. С использованием нескольких поколений детекторов на нейтринном пучке были проведены исследования мирового уровня по изучению взаимодействия нейтрино и антинейтрино с нуклонами по каналам заряженных и нейтральных токов, получены ограничения на параметры нейтринных осцилляций и образование новых нейтральных лептонов.

В современных условиях развитие экспериментальной базы физики нейтрино будет играть решающую роль в реализации отечественных фундаментальных и прикладных проектов. Продолжая традицию Курчатовского института — используя научные достижения для решения практических задач, — при поддержке Росатома и в рамках соглашения НИЦ «Курчатовский институт» и АО «Росэнергоатом» на Калининской АЭС у атомных реакторов, являющихся мощными источниками антинейтрино, создается новая научная инфраструктура. Ее цель — не только исследование свойств нейтрино, но и практическое внедрение технологий детектирования нейтринного излучения для дистанционного контроля атомных реакторов, выгорания и накопления делящихся изотопов, обеспечения режимов гарантий нераспространения делящихся материалов. Другие долгосрочные работы в интересах атомной отрасли — разработка системы контроля плавучих атомных энергоблоков для обеспечения гарантий МАГАТЭ о нераспространении делящихся материалов, методов инвентаризации и контроля ОЯТ в хранилищах, разработка инструментов для анализа и предотвращения аварийных и поставарийных инцидентов. На исследовательских реакторах проводятся и планируются работы по измерению кумулятивных спектров антинейтрино от процессов деления изотопов урана и плутония. Спектры необходимы как для интерпретации реакторных экспериментов, так и для расширения базы данных о внутриреакторных процессах, способствующих лучшему пониманию и моделированию реакторов. Также на реакторе во ВНИИАРе (г. Димитровград) ведутся поиски переходов реакторных антинейтрино в гипотетическое «стерильное» состояние. Другое новое направление отечественных исследований, которое может быть развито, связано с возможностью создания на предприятиях РФ мощных искусственных бета-источников нейтринного излучения, таких как  $Tl$ ,  $^{51}Cr$ ,  $^{144}Ce$ . Использование источников с хорошо известным бета-спектром поможет увеличить объемы данных, полученных в ходе экспериментов, направленных на изучение электромагнитных свойств нейтрино и фиксацию их переходов в «стерильное состояние». Широко обсуждается возможность восстановления нейтринного канала на базе ускорительного комплекса в НИЦ КИ-ИФВЭ (г. Протвино), от которого нейтринный пучок будет направлен на детектор частиц для пучковых нейтринных экспериментов с короткой (сотни метров) и длинной (тысячи километров) базой в различных направлениях: Байкал, Баксан (БНО), Средиземное море.

С 2018 года активно обсуждается идея эксперимента, в котором нейтринный пучок из Протвино будет направлен на глубоководный черенковский детектор частиц KM3NeT/ORCA, строительство которого ведется сейчас в Средиземном море, в 40 км от берега в районе г. Тулон (Франция). Этот эксперимент получил сокращенное название P2O (Protvino-to--ORCA). Благодаря большой базе (2595 км) и огромному объему глубоководного детектора ( $\approx 8$  млн м<sup>3</sup>) последний будет чрезвычайно чувствителен к типу иерархии нейтринных масс (так называемый нормальный —  $m_1 < m_2 < m_3$  или инверсный —  $m_3 < m_1 < m_2$  порядок следования).

Другая задача эксперимента — поиск нарушения CP-инвариантности у лептонов; ее решение позволит ответить на один из центральных вопросов естествознания — о причине барионной асимметрии Вселенной.

Детекторы нейтрино обладают потенциальными возможностями и перспективами использования для решения широкого круга задач, в частности, для регистрации слабых ядерных излучений. Высокая чувствительность детекторов к нейтронному излучению оказалась полезной для военных целей, мониторинга окружающей среды, разведки в условиях техногенных аварий.

Источник: журнал Новый атомный эксперт № 04, июль 2023 г. стр.42-47

[https://atomicexpertnew.ru/the\\_great\\_neutrino\\_hunt](https://atomicexpertnew.ru/the_great_neutrino_hunt)