

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Создание лаборатории нейтрино ФИАН
и подземных лабораторий

О.Г. Рязская

Описывается история создания лаборатории нейтрино в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), когда были сформулированы и реализованы основные методики, с использованием которых позднее были построены подземные детекторы БПСТ (Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп), АСД (Артемьевский сцинтилляционный детектор), LSD (Liquid Scintillation Detector) и LVD (Large Volume Detector). Работы, начатые Г.Т. Зацепиным, имели большое значение для развития подземной физики и сделали Институт ядерных исследований РАН лидером в экспериментах по изучению нейтрино от звёздных коллапсов. Подземная физика обсуждается как эффективный метод изучения широкого класса редких процессов в физике космических лучей, физике нейтрино, нейтринной астрофизике и физике элементарных частиц. Представлены последние результаты экспериментов LVD и АСД по поиску нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд, исследованию характеристик мюонов космических лучей и продуктов их взаимодействия на разных глубинах под землёй.

Ключевые слова: подземная физика, сцинтилляционные методы, нейтрино, сверхновые

PACS numbers: 01.50.Pa, **01.60.+q**

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.05.038186>

Содержание

1. Введение (1010).
 2. Генерация нейтрино в атмосфере (1010).
 3. Нейтрино, излучаемые астрофизическими объектами (1011).
 4. Создание лаборатории нейтрино в ФИАНе и подземных лабораторий (1012).
 5. Заключение (1017).
- Список литературы (1018).

1. Введение

28 мая 2017 г. исполнилось 100 лет со дня рождения Георгия Тимофеевича Зацепина — замечательного учёного, специалиста в области физики космических лучей, физики нейтрино и нейтринной астрофизики. С юности свою жизнь в науке Георгий Тимофеевич связал с областью физики, называемой физикой космических лучей. Он был одним из любимых учеников Д.В. Скобелевича и, так же как и его учитель, считал, что "космические лучи — бесспорно, одно из интереснейших явлений современной физики, изучение которого дало весьма значительные результаты и представляет исклю-

чительный интерес". Научная школа Г.Т. Зацепина — школа экспериментаторов и теоретиков, продолжение школы Д.В. Скобелевича. Георгий Тимофеевич говорил: "В физике решающее слово принадлежит эксперименту, эксперимент — главный судья. Самое важное — правильное понимание результатов эксперимента". Но, кроме того, у Георгия Тимофеевича понимание решающего значения эксперимента сочеталось с глубоким знанием теории.

В начале 1960-х годов в физике космических лучей стало бурно развиваться новое направление: физика космических нейтрино. В данном случае под космическими нейтрино подразумеваются нейтрино естественного происхождения, в противоположность нейтрино, генерируемым в реакторах и на ускорителях. Можно выделить три основных компонента: 1) нейтрино, образующиеся при взаимодействиях космических лучей с атмосферой Земли (атмосферные нейтрино); 2) нейтрино, излучаемые астрофизическими объектами (Солнцем и другими звёздами, взрывающимися сверхновыми, радиогалактиками и т.д.); 3) реликтовые нейтрино, существовавшие ещё на дозвёздных стадиях эволюции Вселенной.

2. Генерация нейтрино в атмосфере

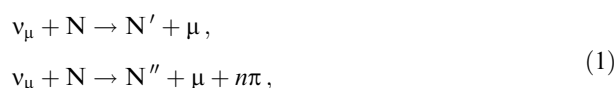
Впервые предложение использовать нейтрино космических лучей для изучения физики нейтрино высоких энергий было сделано М.А. Марковым на Международной конференции по физике высоких энергий в Рочестере (Annual International Conference on High Energy

О.Г. Рязская. Институт ядерных исследований РАН,
просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация
E-mail: ryazhskaia@lvd.ras.ru,
ryazhskaia@vaxmw.tower.ras.ru

Статья поступила 18 августа 2017 г.

Physics in Rochester) [1] в 1960 г. Спектр нейтрино, рождённых в атмосфере космическими лучами, простирается до энергий более 10^{12} эВ, что на полтора-два порядка больше максимальной энергии нейтрино, генерированных на ускорителях, работавших до середины 1960-х годов. Таким образом, эксперименты с атмосферными нейтрино дают возможность получить новые результаты, важные для физики элементарных частиц, в первую очередь в исследовании слабых взаимодействий при высоких энергиях и выяснении ряда принципиальных вопросов теории. С другой стороны, эксперименты с нейтрино в космических лучах позволяют по-новому подойти к выяснению ряда астрофизических вопросов.

Основным объектом исследований в подземных экспериментах с нейтрино космических лучей, предложенных в работах [2–7], является изучение реакций нейтрино с энергией более 1 ГэВ с нуклонами типа:



где N — барионы.

Атмосферные нейтрино удобны для экспериментов по изучению слабых взаимодействий при высоких энергиях, так как их энергетический спектр и угловое распределение могут быть вычислены довольно точно. Однако малая интенсивность потока нейтрино выдвигает серьёзные требования к условиям эксперимента.

Г.Т. Зацепиным, В.А. Кузьминым, а также М.А. Марковым и И.М. Железным были рассчитаны спектры нейтрино от распадов π -мезонов ($\pi \rightarrow \mu + \nu$), рождающихся в столкновении первичного излучения космических лучей с ядрами атомов воздуха, спектры нейтрино от распадов $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$ с учётом потерь энергии мюона и угловые распределения нейтринных потоков в атмосфере [5, 6].

Также было предложено для измерения мюонов, образованных в реакциях (1), создать установку, состоящую из нескольких мозаичных слоёв сцинтилляционных счётчиков, расположенных на достаточно большом расстоянии друг от друга, с помощью которых определяется траектория проходящего через установку мюона и измеряются относительные времена запаздывания импульсов в счётчиках, что даёт возможность выделить мюоны, идущие из нижней полусферы. Между сцинтилляторами располагается поглотитель, суммарная толщина которого определяет пороговую энергию регистрации мюона.

Большая проникающая способность нейтрино позволяет помещать установку под землёй и выделять в ней события, вызванные нейтрино, идущими из нижней полусферы Земли. Эксперимент надо проводить на достаточной глубине, чтобы можно было пренебречь "обратным током" космических мюонов, способных имитировать нейтринное событие.

Для получения приемлемой статистики размер установки должен быть порядка нескольких сотен квадратных метров.

3. Нейтрино, излучаемые астрофизическими объектами

Прогресс экспериментальной техники в начале 1960-х годов позволил осуществить первые наблюдения взаи-

модействия нейтрино с веществом, что открыло новые возможности в изучении свойств элементарных частиц и породило надежды на получение с помощью нейтрино информации о процессах, протекающих внутри звёзд.

Нейтрино — слабо взаимодействующая частица, обладающая большой проникающей способностью. Все тела, какими бы массивными они ни были, для потока нейтрино оказываются прозрачными. С этим свойством нейтрино связаны перспективы нейтринной астрономии.

Нейтрино, образуясь в недрах Солнца или другой звезды, без поглощения и рассеяния выходят наружу.

Энергия, излучаемая звёздами, выделяется в термоядерных реакциях синтеза, в которых из ядер лёгких элементов образуются ядра более тяжёлых элементов. Скорость этих реакций, определяемая температурой, плотностью и химическим составом вещества звезды, так быстро убывает с уменьшением плотности и особенно температуры, что реакции протекают лишь в небольшой центральной части звезды. Объём этой области составляет около одной миллионной доли объёма звезды. Считается, что температура центральных областей Солнца $(14-16) \times 10^6$ К. При этой температуре протекают реакции, приводящие к синтезу из ядер атомов водорода (протонов) ядер атомов гелия (α -частиц). При температуре более 15×10^6 К в реакциях образуются нейтрино с энергиями от 0,8 до 14 МэВ, а при низких температурах — нейтрино более низких энергий. Во всех термоядерных реакциях испускаются электронные нейтрино, которые выходят наружу и могут дать сведения о процессах в недрах Солнца и других звёзд.

В начале 1960-х годов для изучения нейтринной активности Солнца рассматривался радиохимический метод, предложенный в 1946 г. Б.М. Понтекорво [8] и разработанный Р. Дэвисом [9]. Этот метод основан на использовании хлор-аргоновой реакции для регистрации нейтрино:



В качестве вещества, содержащего хлор, Р. Дэвис применял четырёххлористый углерод (CCl_4) — жидкость, состоящую на 92 % по массе из хлора. Cl^{37} составляет около 25 % от общего количества хлора. Энергетический порог реакции (2) равен 0,8 МэВ.

Сущность метода Понтекорво–Дэвиса заключается в том, что из CCl_4 физико-химическим способом извлекается образовавшийся в нём в течение месяца Ar^{37} , а затем определяется его количество. Это позволяет резко снизить влияние фона от космических лучей. Используя хлор-аргоновый детектор, Дэвис наблюдал скорость образования аргона на уровне моря и в горах и обнаружил фон, создаваемый реакциями космических лучей с хлором. Основной реакцией фона является реакция захвата протона ядром хлора, сопровождающаяся выбросом нейтрона:



Опыты, проведённые Дэвисом, показали, что для измерения солнечных нейтрино необходимо проводить эксперименты под землёй на больших глубинах.

4. Создание лаборатории нейтрино в ФИАНе и подземных лабораторий

Результаты работ, проводимых Г.Т. Зацепиным, М.А. Марковым, Б. Понтекорво и их учениками, привели к выводу о том, что для изучения космических нейтрино и нейтринной астрономии необходимо создать лабораторию для разработки и сооружения экспериментальных установок, с помощью которых можно исследовать космические нейтрино, образуемые разными источниками, и получать информацию о жизни звёзд. Г.Т. Зацепин выдвигает проекты крупномасштабных подземных экспериментов, на много лет опережающие аналогичные предложения за рубежом.

В 1963 г. в ФИАНе была создана новая лаборатория — лаборатория нейтрино под руководством Г.Т. Зацепина. В состав этой лаборатории вошли сотрудники ФИАНА: А.Е. Чудаков, А.А. Поманский, В.А. Кузьмин, В.Л. Дадыкин, И.М. Железных, а также получила приглашение на работу Л.В. Волкова, делавшая под руководством Г.Т. Зацепина дипломную работу на тему "Энергетические спектры нейтрино в атмосфере". А.А. Поманский занимался комплектацией лаборатории молодыми специалистами, студентами 6-го курса физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Несколько студентов кафедры космических лучей и других кафедр, в том числе автор настоящей статьи, подали заявления о приёме на работу в лабораторию нейтрино ФИАНА. Георгий Тимофеевич познакомился с нами и пригласил нас на первое заседание семинара лаборатории нейтрино. На этом семинаре он рассказывал о Солнце, термоядерных реакциях, о нейтрино, о нейтринной спектроскопии Солнца, о будущей подземной лаборатории (нейтринной станции). После семинара Георгий Тимофеевич попросил меня выйти на работу сразу после защиты диплома и сдачи государственных экзаменов, с 1 февраля 1964 г.

Необходимо было сделать срочную работу — найти на карте наилучшее местоположение для подземной лаборатории. Надо было на Северном Кавказе, в долине реки Баксан, найти высокую гору с максимальной крутизной, чтобы длина будущей штольни, соединяющей вход в туннель с подземной лабораторией, защищённой слоем грунта более 4000 м водного эквивалента (м в.э.), была минимальной (рис. 1). После того как такая гора, а именно гора Андырчи, была найдена, в конце

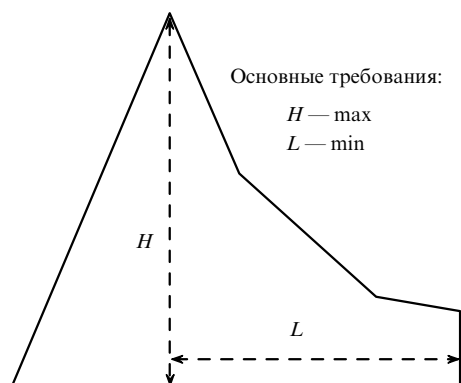


Рис. 1. Схема для поиска горы с характерным профилем.

февраля 1964 г. Георгий Тимофеевич вместе с группой учёных и строителей поехал в Приэльбрусье посмотреть, как всё выглядит в натуре и на месте определить положение входа в туннель.

Лаборатория нейтрино в то время состояла из трёх групп: группы солнечных нейтрино (А.А. Поманский), группы атмосферных мюонов и нейтрино (А.Е. Чудаков) и группы изучения энергетического спектров мюонов высокой энергии с помощью магнитного спектрометра (Б.В. Толкачёв). Последняя группа просуществовала недолго.

В начале 1964 г. в группе солнечных нейтрино стали интенсивно развиваться радиохимические методы детектирования этой частицы. Сначала рассматривались хлор-аргоновый и галлий-германиевый методы. Первый метод разрабатывался как в Брукхейвенской национальной лаборатории США Р. Дэвисом, так и в лаборатории нейтрино ФИАНА под руководством Г.Т. Зацепина и А.А. Поманского. Суть метода состоит в экспонировании большого объёма вещества, содержащего хлор (перхлорэтилен), в нейтринном потоке. Нейтрино, взаимодействуя с хлором, образует аргон (см. реакцию (2)), который накапливается в течение некоторого времени, а затем извлекается из резервуара. Это осуществляется продувкой перхлорэтилена гелием, поток которого выносит аргон, также являющийся инертным газом, из детектирующего объёма. Затем аргон адсорбируется активированным углем в ловушке. Далее радиоактивный аргон-37 вводится в маленький пропорциональный счётчик, способный регистрировать атомы газа. Даже из краткого описания этого метода следует, что радиохимические детекторы не защищены от фоновых реакций, которые в конечном состоянии дают искомые атомы, например от реакции $\text{Cl}^{37}(p, n)\text{Ar}^{37}$. Вероятности взаимодействия нейтрино с ядрами очень малы, поэтому нередко вопросы фона — это вопросы возможности проведения экспериментов.

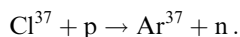
На одном из семинаров лаборатории нейтрино в начале 1964 г. состоялся доклад В.А. Кузьмина, в котором обсуждались предложения о создании сети радиохимических детекторов в основном с использованием хлор-аргонового и галлий-германиевого методов для измерения солнечных нейтрино [10–13]. Детектор $\text{Ga}^{71}(\nu, e^-)\text{Ge}^{71}$ — это низкопороговый детектор, $E_{\nu, \text{th}} = 231$ кэВ, имеющий довольно хорошую чувствительность к нейтрино от $\nu\nu$ -взаимодействия и Be^7 (основной части потока солнечных нейтрино). Энерговыделение при К-захвате в Ge^{71} весьма велико — 11 кэВ, что помогает легче дискриминировать фон в счётчиках. Период полураспада Ge^{71} достаточно удобен: 12,5 сут. Речь шла о том, на каких глубинах надо ставить детектор, чтобы избежать фона от космических лучей. И вдруг Георгий Тимофеевич предложил мне разобраться в механизмах генерации ядерно-активного компонента космических лучей под землёй.

До 1964 г. считалось, что ядерно-активный компонент создаётся в электромагнитных каскадах, генерируемых мюонами под землёй. Мюоны за счёт тормозного излучения рожают эти каскады, γ -кванты которых взаимодействуют с ядрами грунта: $\gamma A \rightarrow A' + (\pi^\pm, \pi^0, p, n, \alpha)$. В этих реакциях образуется небольшое количество низкоэнергетических ядерно-активных частиц. Процесс неупругого взаимодействия мюонов учитывался только как мюон-ядерное взаимодействие с рождением адронов

малой энергии. Георгий Тимофеевич обратил моё внимание на необходимость учёта также реакции глубоко-неупругого взаимодействия мюонов с ядрами грунта типа $\mu A \rightarrow \mu + m\pi + \chi$, где $m\pi$ — сумма π -мезонов, χ — фрагменты ядра, при которых рождаются π -мезоны высоких энергий, инициирующие ядерные каскады. В результате, как показали наши расчёты, именно в ядерных каскадах генерируется подавляющее большинство адронов, причём адроны высоких энергий образуются только благодаря развитию ядерных каскадов. Это связано с тем, что, несмотря на малость сечения глубоко-неупругого рассеяния мюонов, множественность частиц в ядерных каскадах велика. И этот факт играет решающую роль.

Фон на глубине, например, 4000 м в.э. увеличивается в 2,5 раза по сравнению с его оценками, учитывающими лишь электромагнитные взаимодействия мюонов с ядрами грунта. Причём фоновые события с энергиями более 100 МэВ обусловлены только глубоко-неупругими взаимодействиями мюонов.

В августе 1964 г. состоялась Всесоюзная конференция по космическим лучам в Апатитах, на которой я выступила со своим первым в жизни серьёзным докладом "Расчёт генерации нейтронов μ -мезонами для различных глубин в грунте" [14, 15]. Особое внимание на него обратил Б.М. Понтекорво. Его удивило, что даже на глубине 4500 м в.э. фон от ядерного компонента космических лучей в хлор-аргоновом детекторе составляет более 10 % от величины эффекта регистрации $\nu_e + \text{Cl}^{37} \rightarrow \text{Ar}^{37} + e^-$. А на меньших глубинах эксперимент проводить просто нецелесообразно. Ядерно-активный компонент космических лучей при взаимодействии с Cl^{37} может создавать Ar^{37} в результате реакции



Георгий Тимофеевич тогда сказал: "Для понимания вопросов фонов необходимо хорошо знать физику космических лучей".

В конце 1964 г. Георгий Тимофеевич вместе с Александром Евгеньевичем Чудаковым поехали в Америку, чтобы познакомиться с работами, проводимыми Р. Дэвисом в Брукхейвене. Георгий Тимофеевич передал Р. Дэвису график зависимости скорости генерации ядерных эффектов мюонами от глубины грунта [14, 15]. Как это было воспринято, описывает Р. Дэвис в воспоминаниях, опубликованных в книге Дж. Бакала *Нейтринная астрофизика* [16].

Но расчёт — расчётом, а окончательное слово за экспериментом. Было принято решение измерить кривую генерации ядерных эффектов мюонами в зависимости от глубины грунта. Для проведения этого эксперимента Г.Т. Зацепиным была организована группа электронных методов детектирования нейтрино (ЭМДН), создавшая установку, состоящую из трёх рядов жидкостных сцинтилляционных счётчиков на основе уайт-спирита [17]. Этот сцинтиллятор был разработан в лаборатории нейтрино ФИАНа [18]. Верхний и нижний ряды счётчиков регистрировали заряженные частицы, в среднем ряду располагался 300-литровый счётчик, чувствительный как к заряженным частицам, так и к нейтронам, благодаря тому что в сцинтилляторе счётчика была растворена соль гадолиния для регистрации нейтронов

по их захвату [19]. В то время это был один из самых крупных сцинтилляционных монодетекторов.

Возник вопрос о том, где проводить этот эксперимент, поскольку нейтринная подземная лаборатория на Баксане ещё только проектировалась. И опять появилась проблема фонов, на этот раз от естественной радиоактивности. Мы стали искать место, в котором имеются низкорadioактивные горные выработки достаточно большого объёма с горизонтальными штольнями на разных уровнях. Таким условиям отвечают соляные и гипсовые шахты. Поэтому было принято решение провести работы в Донбассе, вблизи г. Артёмовска. Эксперимент проводился на двух глубинах под землёй: на глубине 316 м в.э. от уровня моря (средняя энергия мюонов 86 ГэВ) в соляной шахте и на глубине 25 м в.э. от уровня моря в гипсовой шахте (средняя энергия мюонов 16,7 ГэВ). Было получено, что число нейтронов, образованных быстрыми мюонами, в расчёте на один мюон, возрастает с увеличением средней энергии мюона примерно как $\bar{E}_\mu^{0.7}$, что согласуется с теоретически рассчитанной кривой [17, 19, 20].

Из анализа экспериментальных данных стало совершенно ясно, что можно хорошо отделить ядерные каскады от электромагнитных по количеству зарегистрированных в них нейтронов и точнее измерить сечение глубоко-неупругого рассеяния мюонов.

Мы это обсуждали с Георгием Тимофеевичем несколько раз, и было решено разработать и создать подземную лабораторию в соляной шахте вблизи Артёмовска на глубине 570 м в.э. от уровня моря для размещения в ней 100-тонного жидкостного сцинтилляционного детектора для изучения проникающего компонента космических лучей под землёй.

В то же время в 1970 г. интенсивно шла работа по созданию комплекса подземных лабораторий Баксанской нейтринной обсерватории: Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа для измерения атмосферных нейтрино, идущих с обратной стороны Земли, и лаборатории радиохимических методов детектирования солнечных нейтрино.

В конце 1970 г. лаборатория нейтрино ФИАНа была преобразована в отдел лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики (ОЛВЭНА) уже во вновь созданном по инициативе М.А. Маркова Институте ядерных исследований АН СССР (ИЯИ). С тех пор Г.Т. Зацепин был бессменным заведующим этого отдела. Отдел ЛВЭНА состоит из четырёх лабораторий: лаборатории лептонов высокой энергии, лаборатории нейтринной астрофизики, лаборатории радиохимических методов регистрации нейтрино и лаборатории электронных методов детектирования нейтрино.

Поиски нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд. Создание подземных лабораторий. Регистрация солнечных нейтрино является фундаментальной проблемой, но не единственной возможностью заглянуть в недра звезды.

В 1965 г. в работе Я.Б. Зельдовича и О.Х. Гуссейнова "О нейтринном излучении во время коллапсов звёзд" [21] было представлено, что эволюция массивных звёзд главной последовательности может завершиться гравитационным коллапсом и мощным коротким импульсом (~ 10 мс) нейтринного излучения.

Сразу после этого Г.Т. Зацепин сделал доклад на 9-й международной конференции по физике космических

лучей в Лондоне в сентябре 1965 г.: Г.В. Домогацкий, Г.Т. Зацепин "Об экспериментальных возможностях наблюдения нейтрино от коллапсирующих звёзд" [22].

С 1966 г. начались работы по проектированию и созданию подземных детекторов для поиска нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд. Исследование этого излучения даёт возможность получить информацию о поведении и свойствах вещества в экстремальных условиях ядерной плотности, сверхвысоких температур и давлений, мощных гравитационных полей, образовании нейтронных звёзд и чёрных дыр — самых фундаментальных процессах во Вселенной, для которых результаты экспериментов имеют особую ценность.

В модели стандартного коллапса (МСК) (сферически-симметричная невращающаяся немагнитная звезда) излучаются нейтрино всех типов в равных энергетических долях [23–26]. В этом случае наиболее естественно попытаться зарегистрировать поток электронных анти-нейтрино по реакции с водородом, имеющей максимальное сечение. Для этого требуется хорошо защищённый от фона космических лучей подземный детектор со 100 т, а ещё лучше с 1000 т водородосодержащего вещества в качестве мишени для реакции обратного бета-распада:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n, \quad E_{e^+} = E_{\bar{\nu}_e} - 1,3 \text{ МэВ}, \quad (4)$$

$$\sigma(\bar{\nu}_e, p) = 9,3 E_{e^+}^2 \times 10^{-44} [\text{см}^2].$$

Следует отметить, что эта реакция сопровождается захватом нейтрона водородом с испусканием γ -кванта с энергией 2,2 МэВ:

$$n + p \rightarrow d + \gamma(2,2 \text{ МэВ}), \quad \tau \sim 170\text{--}200 \text{ мкс}, \quad (5)$$

где τ — время захвата нейтрона в сцинтилляторе. Импульс от γ -кванта может быть измерен сцинтилляционными счётчиками больших объёмов, что помогает идентифицировать $\bar{\nu}_e$. Это предложение впервые было сделано в работе [27].

Эффект от коллапса идентифицируется в течение 20 с статистически редким сгущением импульсов, регистрируемых детектором. Важным является совпадение такого эффекта по времени с оптическим наблюдением вспышки сверхновой. Существенно улучшить достоверность результатов позволяет параллельная работа нескольких детекторов, расположенных в разных местах Земного шара.

С конца 1970 г. в ИЯИ было построено несколько больших подземных сцинтилляционных детекторов, способных зарегистрировать нейтринное излучение от коллапсирующих звёзд.

Разработки больших подземных детекторов шли по нескольким направлениям. Вместо дорогостоящих пластических сцинтилляторов со сложной технологией производства было предложено использовать жидкостные сцинтилляторы (ЖС) с простой технологией, легко реализуемой в условиях неспециализированных лабораторий. Эти ЖС, основой которых служили дешёвые и доступные нефтепродукты, имели достаточно высокую сцинтилляционную эффективность, явились быстрыми, прозрачными для собственного излучения и в общем вполне безопасными и удобными в работе. Здесь прежде всего следует назвать Баксанский подземный сцинтилляционный телескоп (БПСТ) (рис. 2) с массой ЖС 330 т, построенный А.Е. Чудаковым с сотрудниками в 1978 г.

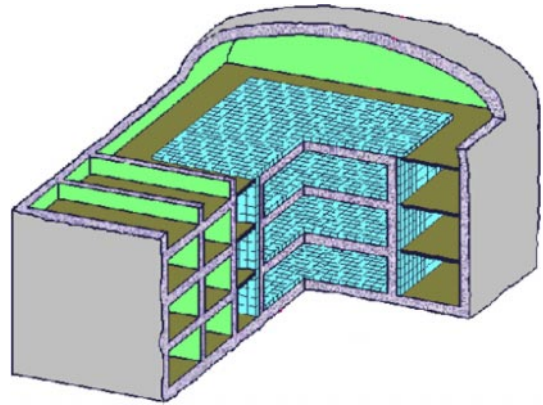


Рис. 2. Схема детектора БПСТ в подземном зале.

Жидкий сцинтиллятор для этого детектора был разработан сотрудниками ИЯИ А.В. Воеводским, В.Л. Дадыкиным, О.Г. Ряжской [18] в 1966 г. Именно в этот период нами были предложены и реализованы основные методики, с помощью которых позднее были сооружены все большие подземные детекторы ИЯИ. Об этом этапе работ, сыгравшем важную роль в развитии подземной физики в России, подробно и точно рассказано в препринте В.Л. Дадыкина *Истории сооружения БПСТ* [28]. Первые подземные детекторы с этим ЖС используются уже более 40 лет, и за это время сцинтиллятор ни в одном из них не потерял стартовых кондиций. Это позволяет эффективно использовать его в таких долговременных проектах, как программа поиска нейтринного излучения от коллапсов звёздных ядер.

Г.Т. Зацепин выступил инициатором создания программы международного сотрудничества для организации службы наблюдения за нейтринными вспышками. В лаборатории ЭМДН при активном участии Георгия Тимофеевича была начата разработка 105-тонного Артёмовского сцинтилляционного детектора (АСД) ("Коллапс") [29] в соляной шахте г. Артёмовска, что инициировало развёртывание мировой сети детекторов для поисков нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд (рис. 3).

В 1977 г. на установке "Коллапс" начались наблюдения, коррелированные с наблюдениями на подземных детекторах, расположенных в Италии и США. С помощью детектора "Коллапс" в 1980-е годы было измерено сечение генерации адронов во взаимодействии мюонов с ядрами и показано, что извлекаемое отсюда сечение фоторождения адронов на ядрах остаётся постоянным при энергиях вплоть до величины 3×10^{12} эВ. Спектр мюонов на этой установке был измерен при энергиях до 10^{13} эВ [30, 31].

В 1985 г. с активным участием Г.Т. Зацепина была закончена работа по созданию системы сцинтилляционных детекторов, завершившаяся запуском 90-тонного советско-итальянского телескопа LSD (Liquid Scintillation Detector) (рис. 4) под Монбланом [32] и в 2002 г. — двухкилотонного железно-сцинтилляционного калориметра LVD (Large Volume Detector) (рис. 5) под Гран-Сассо [33, 34] (совместно с Италией). Электроника для обоих детекторов была сделана таким образом, чтобы иметь возможность измерить обе частицы (e^+ и n) в реакции $\bar{\nu}p \rightarrow e^+n$ при регистрации $\bar{\nu}_e$ от коллапсирующих звёзд. Сигнал от энерговыделения в сцинтилляторе

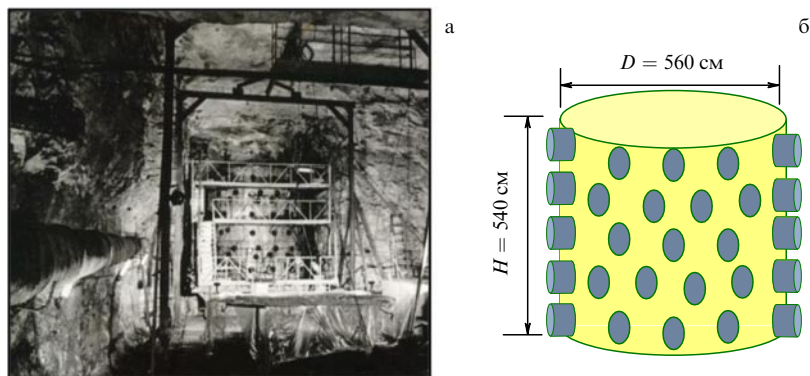


Рис. 3. Фотография (а) и схема (б) Артёмовского сцинтилляционного детектора.

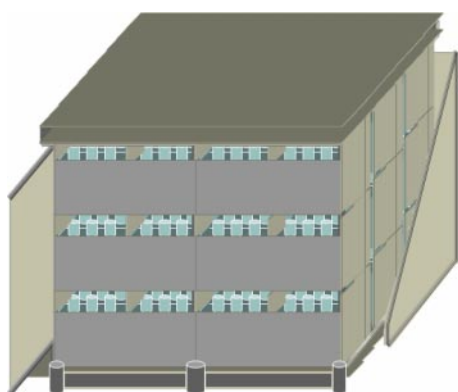


Рис. 4. Схема установки LSD под Монбланом. Советско-итальянский 72-модульный сцинтилляционный детектор LSD (90 т сцинтиллятора и 200 т железа).

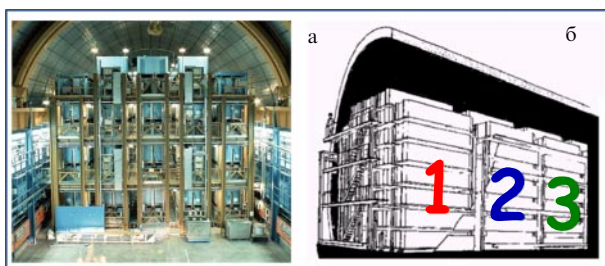


Рис. 5. Фотография (а) и схема (б) установки LVD под Гран-Сассо.

величиной > 5 МэВ является триггером и открывает ворота длительностью 600 мкс и порогом 0,8 МэВ для регистрации γ -кванта с энергией 2,2 МэВ от захвата нейтрона $pn \rightarrow d\gamma$.

На этих установках было исследовано неупругое взаимодействие мюонов с рождением адронов при высоких энергиях, изучена зависимость генерации ядерно-активного компонента космических лучей под землёй от глубины грунта (рис. 6). Было показано, что генерация нейтронов под землёй зависит не только от интенсивности мюонов $I_\mu(H)$, но и от их средней энергии на данной глубине как $E_\mu(H)^{0,75 \pm 0,05}$, а число нейтронов и π -мезонов, генерируемых в ядерных ливнях, примерно в 10 раз больше, чем в электромагнитных [35]. Были разработаны методы исследования нейтринного излучения, сопровож-

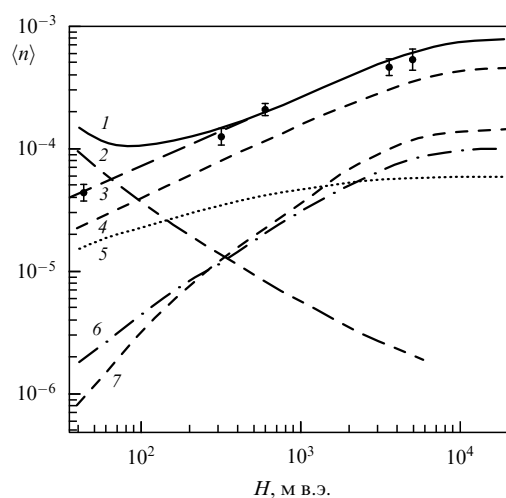


Рис. 6. Количество генерируемых медленных нейтронов в 1 г см^{-2} грунта в расчёте на один мюон в зависимости от глубины H от границы атмосферы. 1 — полное число нейтронов, рождённых во всех процессах; 2 — число нейтронов, образованных при захвате μ^- ; 3 — число нейтронов, рождённых во всех процессах, за исключением μ^- -захвата; 4 — число нейтронов, генерируемых виртуальными фотонами с учётом ядерных ливней; 5–7 — число нейтронов, генерируемых фотонами электромагнитных ливней, индуцированных δ -электронами, e^+e^- -парами и тормозным излучением соответственно. Тёмные кружки с отрезками ошибок — экспериментальные данные, измеренные сцинтилляционными детекторами АСД, LVD, LSD. Кривые нормированы на экспериментальные значения в точке 25 м.в.э.

дающего коллапсы звёзд, благодаря которым удалось наблюдать нейтринные сигналы от взрыва сверхновой SN 1987A на двух сцинтилляционных детекторах ИЯИ РАН: советско-итальянском детекторе LSD под Монбланом и БПСТ под горой Андырчи на Баксане.

23 февраля 1987 г. в галактике Большое Магелланово Облако на расстоянии почти 50 кпк от Земли вспыхнула сверхновая SN 1987A. Тогда четыре нейтринных детектора: сцинтилляционные (LSD и БПСТ) и черенковские (КП (Камиока, Япония) [36] и IMB (Irvine–Michigan–Brookhaven) (Кливленд, США) [37]) — впервые в истории зарегистрировали нейтринные сигналы от гравитационного коллапса звезды, но не в одно и то же время. Первая регистрация нейтринного сигнала детектором LSD в онлайн-режиме была осуществлена в 2 ч 52 мин всемирного времени (Universal Time, UT). Было измерено пять

23 февраля 1987 г.

1	3	5	7	9	11
Оптические наблюдения					час (UT)
 $m_v = 12^m$			$m_v = 6^m$ 		
Geograv		 2:52:35,4			
LSD	5	2:52:36,8  43,8		2	7:36:00 19 
KII	2 (4) 	2:52:34 44		12 	7:35:35 47
IMB				8 	7:35:41 47
БПСТ	1 	2:52:34		6 	7:36:06 21

Рис. 7. Временная последовательность событий, зарегистрированных различными детекторами [39] 23 февраля 1987 г. Для каждого нейтринного детектора по оси ординат условно показано число импульсов в пакке; рядом дано время прихода первого и последнего импульса. (m_v — видимая звёздная величина, 6^m и 12^m — 6-я и 12-я звёздные величины, Geograv — гравитационная антенна в Риме.)

импульсов в течение 7 с [38]. За время работы LSD с января 1985 г. подобного события зафиксировано не было. Вероятность имитации такого события фоном составляет 10^{-3} . Только через 5 ч нейтринные сигналы были зарегистрированы детекторами БПСТ, КП [36] и IMB [37] (рис. 7). Детектор "Коллапс" в этот день не работал в связи с заменой электроники.

Кроме того, были обнаружены в течение 1 с совпадения импульсов, зарегистрированных в детекторах LSD и БПСТ, а также в LSD и КП. Временная последовательность событий, зарегистрированных различными детекторами 23 февраля 1987 г., представлена на рис. 8 [39]. На временной шкале длинными вертикальными линиями отмечены положения нейтринных сигналов в 2:52 и 7:35 UT. Шкалы 1 и 2 относятся к детектору LSD, 3 — к БПСТ, 4 — к КП. Число совпадений в течение двух часов для LSD-КП около момента 2:52 UT оказалось равным 8, а для LSD-БПСТ — 13, из которых два и три совпадения соответственно могут быть случайными. В правой части

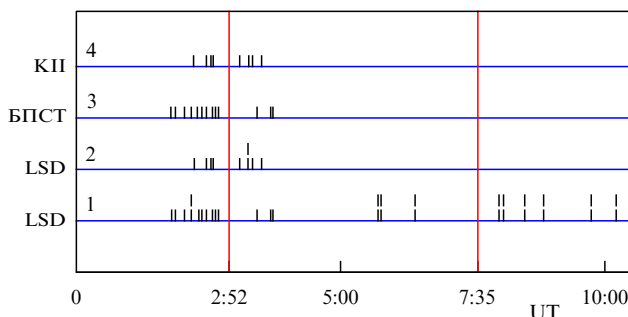


Рис. 8. Временная диаграмма импульсов в БПСТ (линия 3), совпадающих с импульсами в LSD (линия 1) во временном интервале 1 с, и аналогичные совпадения для КП (линия 4) и LSD (линия 2), а также двойные импульсы в LSD (линия 1, временной интервал от 5:42 до 10:13 UT) 23 февраля 1987 г. Средняя частота фоновых совпадений для обоих экспериментов, БПСТ-LSD и КП-LSD, по корреляциям, измеренная в интервале $23.02.1987 \pm 15$ сут, оказалась одинаковой, около 1 ч^{-1} [44]. Измеренная частота фоновых двойных импульсов за тот же период составила $0,275 \text{ ч}^{-1}$. На рисунке не показаны фон для совпадений вне интервала от 1:45 до 3:45 UT 23 и фон для двойных импульсов вне интервала 5:42–10:13 UT.

шкалы 1 показано время прихода двойных импульсов в LSD в интервале от 5:42:48 до 10:13:04 UT. Было зарегистрировано девять пар импульсов. Средняя частота фоновых двойных импульсов составляла $0,275 \text{ ч}^{-1}$. Таким образом, зарегистрированное число двойных импульсов превысило число фоновых пар в 7,3 раза. Случайно такое событие могло совпасть с моментом вспышки сверхновой один раз за 3×10^3 лет.

Стоит отметить, что серия из пяти импульсов, зарегистрированных в течение 7 с детектором LSD, очевидно, не была вызвана реакцией $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$, $n + p \rightarrow d + \gamma$ (2,2 МэВ), $\tau \sim 170$ мкс. Иначе в детекторе КП в это время был бы зарегистрирован сигнал из 50 импульсов. Помимо того, из пяти импульсов, измеренных в LSD, только один сопровождался малым импульсом с энергией 1,4 МэВ, отстоящим по времени от триггерного на 278 мкс. В среднем при условии регистрации антинейтрино три импульса должны были бы сопровождаться регистрацией γ -кванта с энергией 2,2 МэВ от захвата нейтрона. Вероятность того, что в этих условиях будет зарегистрирован только один нейтрон, составляет менее 5 %. Тот факт, что в 2:52 UT в трёх детекторах значимого сигнала не было, никак не компрометирует сигнал LSD. Последнее означает, что LSD измерил то, что не был способен зарегистрировать ни один из трёх других детекторов. Это связано с наличием в составе LSD 200 т железа и регистрации электронного нейтрино по реакции:



Большие сцинтилляционные счётчики эффективно регистрируют электроны и γ -кванты, выходящие из железа в сцинтиллятор. В работах [40, 41] показано, что нет никаких оснований считать эффект LSD в 2:52 UT игрой статистики или фоном.

Эффект, измеренный в 2:52 UT детектором LSD, совершенно необъясним в рамках МСК. Он получил интерпретацию в модели вращающегося коллапсара, которая была предложена Имшенником [42] в 1995 г., чтобы получить механизм сброса оболочки на заключительном этапе эволюции массивных звёзд главной последовательности, и названа им моделью вращающегося коллапсара (МВК). Эта модель даёт возможность по-другому взглянуть на финальную часть эволюции звезды. При вращении центральная часть звезды сильно деформируется, принимая форму, напоминающую блин. Температура в центре звезды на два порядка ниже, чем в сферически-симметричной модели, а энергия электронных нейтрино, рождаемых в процессе нейтронизации звезды, составляет не 100–200 МэВ, а лишь 25–55 МэВ. Так как сечение взаимодействия таких нейтрино с веществом в несколько раз меньше и количество вещества в широком конце вблизи полярных направлений значительно меньше, чем в сферически-симметричной модели, нейтрино выходят из центра на поверхность звезды практически без взаимодействий и сохраняют свою энергию около 25–55 МэВ.

Вращение приводит к неустойчивости центральной части звезды на стадии нейтронизации: происходит разрыв звезды, в простейшем случае на две звезды, образующие двойную систему нейтронных звёзд, вращающихся относительно друг друга. Происходит передача вещества от более лёгкой и менее плотной звезды к более

тяжёлой и более плотной. Когда масса лёгкой звезды уменьшается до 0,095 массы Солнца, силы гравитации не хватает, чтобы обеспечить её устойчивость, и она взрывается. Происходит вспышка сверхновой. После этого вторая, более массивная, звезда коллапсирует приблизительно согласно модели стандартного коллапса.

Таким образом, модель вращающегося коллапсара предсказывает возможность двухстадийного коллапса и как минимум две нейтринные вспышки, разделённые интервалом в несколько часов. На первой стадии излучаются в основном электронные нейтрино со средней энергией 30–40 МэВ, а во второй — нейтрино всех типов, как и в МСК со средними энергиями 10–15 МэВ.

Следует отметить, что недавние данные эксперимента NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope ARray), изучающего рентгеновское излучение неба [43], свидетельствуют о том, что коллапс SN 1987A был асимметричным.

Довольно подробный анализ ситуации, связанной со вспышкой SN 1987A, приведён в работах [44–46].

В течение 40 лет в ИЯИ РАН непрерывно ведётся поиск нейтринного излучения от коллапсирующих звёзд следующими детекторами:

1) АСД ("Коллапс"), Артёмовск, 105 т жидкого сцинтиллятора, > 1 кт NaCl, 1977 г.;

2) БПСТ, 200 т жидкого сцинтиллятора и 160 т железа, 1978 г.;

3) LSD, Монблан, 90 т сцинтиллятора и 200 т железа, 1984–1998 гг.;

4) LVD, Гран-Сассо, 350 т сцинтиллятора и 330 т железа с 1992 г., 1000 т сцинтиллятора и 1000 т железа с 2001 г.

За последние 30 лет наблюдений нейтринного излучения от гравитационных коллапсов звёзд в Галактике и Магеллановых Облаках, в том числе скрытых (без сброса оболочки), на этих детекторах обнаружено не было. LVD регистрирует данные в течение 99 % живого времени. С 2004 г. LVD включён в систему раннего оповещения о вспышках сверхновых (SuperNova Early Warning System — SNEWS) [47].

На LVD совместно с АСД и БПСТ проводится корреляционный анализ совпадений одиночных импульсов детекторов с целью изучения достоверности нейтринных сигналов и подтверждения экспериментальных результатов от вспышки SN 1987A [48].

Ещё одной из экспериментальных задач, решаемых на установке LVD, является изучение мюонного компонента космических лучей под землёй. Измерены кривая глубина–интенсивность мюонов вплоть до глубины 17 км в.э., сезонные вариации интенсивности мюонов и зарядовое отношение мюонов. Получены характеристики мюонных групп (кратность, декогерентная кривая) [49].

Точность реконструкции мюонных событий в LVD позволила установить предел скорости CNGS-нейтрино¹. Было получено, что на 99%-ном уровне достоверности скорость нейтрино соответствует скорости света [50].

Помимо того, на установке LVD исследуется поток нейтронов, генерируемых мюонами космических лучей под землей, как источник фона в низкофоновых подзем-

ных экспериментах. Измерены пространственное распределение и сезонные вариации нейтронов [51], выход нейтронов от мюонов с энергией 280 ГэВ в сцинтилляторе и железе. Получен энергетический спектр нейтронов, генерированных мюонами, в диапазоне от 10 до 500 МэВ [52].

Ввиду низкого энергетического порога и непрерывного режима работы установка LVD способна осуществлять контроль за концентрацией радона, что может быть использовано для исследования связи между сейсмической активностью и вариациями концентрации радона под землёй [53].

Основы этих работ были заложены Г.Т. Зацепиным в начале 1960-х годов.

5. Заключение

Георгий Тимофеевич Зацепин в течение семи лет был заведующим лабораторией нейтрино ФИАНа, а затем почти 40 лет руководил отделом ЛВЭНА ИЯИ РАН.

Долгие годы работы Георгия Тимофеевича Зацепина в области космических лучей и нейтринной астрофизики были в высокой степени плодотворными. Его работы получили заслуженное международное признание, а для ряда проблем определили развитие мировой физики.

Г.Т. Зацепиным создана большая научная школа теоретической и экспериментальной физики космических лучей, нейтринной физики и астрофизики, которая выходит далеко за пределы России и бывшего Советского Союза и играет большую роль в странах Европы, Америки и Азии. Г.Т. Зацепин воспитал большое число учеников, многие из которых стали известными учёными.

Георгий Тимофеевич награждён орденами Трудового Красного Знамени (1975 г., 1981 г.), Октябрьской Революции (1987 г.), "За заслуги перед Отечеством" IV степени (1997 г.), медалью "За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.". Он является лауреатом Государственной премии СССР (1951 г.) за открытие ядерно-каскадного процесса, Ленинской премии (1982 г.) за создание Якутской установки по исследованию космических лучей, Государственной премии РФ (1998 г.) за создание и проведение исследований на Баксанской нейтринной обсерватории, международной премии им. Б.М. Понтекорво (РАН, 2001 г.), премии МГУ им. М.В. Ломоносова (2002 г.), премии им. М.А. Маркова (ИЯИ РАН, 2002 г.), золотой медали РАН им. Д.В. Скобельцына (2005 г.).

Г.Т. Зацепин удостоен медали Лодзинского университета (Польша, 1986 г.), медали им. О'Келли (Международный союз теоретической и прикладной физики, 1999 г.), избран почётным доктором Института физики Туринского университета (Италия) (2007 г.). В 2008 г. награждён Орденом Почёта.

У Георгия Тимофеевича всегда было далёкое и безошибочное видение будущего развития науки, что особенно касается нейтринной астрофизики, одним из создателей которой он является. Творческая активность и энциклопедические познания в физике, медицине, истории, блестящая память всегда привлекали к Георгию Тимофеевичу многих людей — юных, молодых, пожилых. Ему были присущи научная проницательность, преданность науке вместе с прирождён-

¹ CNGS (CERN Neutrino to Gran Sasso) — поток нейтрино из ЦЕРНа в Гран-Сассо.

ной интеллигентностью и внимательным отношением к людям.

Автор выражает благодарность Наталье Агафоновой и Ирине Шакирьяновой за помощь при подготовке рукописи к публикации. Работа частично поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (№ 15-02-01056_a) и программой фундаментальных исследований Президиума РАН "Физика высоких энергий и нейтринная астрофизика".

Список литературы

- Markov M A, in *Proc. of the 1960 Annual Intern. Conf. on High Energy Physics at Rochester* (Eds E C G Sudarshan, J H Tinlot, A C Melissinos) (Rochester, N.Y.: Univ. of Rochester, 1960) p. 578
- Reines F *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **10** 1 (1960)
- Greisen K *Annu. Rev. Nucl. Sci.* **10** 63 (1960)
- Железных И М, Марков М А, Препринт (Дубна: ОИЯИ, 1960)
- Markov M A, Zheleznykh I M *Nucl. Phys.* **27** 385 (1961)
- Зацепин Г Т, Кузьмин В А *ЖЭТФ* **41** 1818 (1961); Zatsepin G T, Kuz'min V A *Sov. Phys. JETP* **14** 1294 (1962)
- Зацепин Г Т и др. *Изв. АН СССР Сер. физ.* **25** 738 (1962)
- Pontecorvo B, Report PD-205 (Chalk River: Chalk River Laboratory, 1946); воспроизведено в: Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989); Понтекорво Б *Избранные труды* Т. 1 (Под общ. ред. С М Биленького) (М.: Наука, 1997) с. 31
- Davis R (Jr.) *Phys. Rev. Lett.* **12** 303 (1964)
- Кузьмин В А, Препринт № 62 (М.: ФИАН, 1964)
- Кузьмин В А *Изв. АН СССР Сер. физ.* **29** 1743 (1965)
- Kuzmin V A *Phys. Lett.* **17** 27 (1965)
- Кузьмин В А *ЖЭТФ* **49** 1532 (1965); Kuz'min V A *Sov. Phys. JETP* **22** 1051 (1966)
- Ryazskaya O, Zatsepin G, in *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Cosmic Rays, London, UK, 1965* Vol. 2 (Ed. A C Stickland) (London: The Institute of Physics and The Physical Society, 1965) p. 987
- Ряжская О Г, Препринт № 18 (М.: ФИАН, 1966)
- Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989); Пер. на русск. яз.: Бакал Дж *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993)
- Безруков Л Б и др., Препринт № 98 (М.: ФИАН, 1971)
- Воеводский А В, Дадькин В Л, Ряжская О Г *ПТЭ* (1) 85 (1970)
- Ряжская О Г, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 1970)
- Безруков Л Б и др. *ЯФ* **17** 98 (1973); Bezrukov L B *Sov. J. Nucl. Phys.* **17** 51 (1973)
- Зельдович Я Б, Гусейнов О Х *ДАН СССР* **162** 791 (1965); Zel'dovich Ya B, Guseinov O Kh *Sov. Phys. Dokl.* **10** 524 (1965)
- Domogatsky G V, Zatsepin G T, in *Proc. of the 9th Intern. Conf. on Cosmic Rays, London, UK, 1965* Vol. 2 (Ed. A C Stickland) (London: The Institute of Physics and The Physical Society, 1965) p. 1030
- Arnett W D *Can. J. Phys.* **44** 2553 (1966)
- Иванова Л Н и др., в сб. *Тр. междунар. семинара по физике нейтрино и нейтринной астрофизике* Т. 2 (М.: Изд-во ФИАН СССР, 1969) с. 180
- Имшенник В С, Надежин Д К, в сб. *Итоги науки и техники* (Сер. Астрономия, Т. 21) (М.: ВИНТИ АН СССР, 1982) с. 63
- Имшенник В С, Надежин Д К *УФН* **156** 561 (1988); Imshennik V S, Nadyozhin D K *Sov. Sci. Rev. E* **7** 75 (1989)
- Chudakov A E, Ryazskaya O G, Zatsepin G T, in *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Cosmic Rays, Denver, USA, 17–30 August 1973* (Ed. R C Chasson) (Denver, CO: Univ. of Denver, Associated Univ. Press, 1973) p. 2007
- Дадькин В Л "К истории сооружения Баксанского подземного сцинтилляционного телескопа", Препринт № 1297/2011 (М.: ИЯИ РАН, 2011)
- Береснев В и др. *ПТЭ* (6) 48 (1981)
- Korchagin P V et al., in *Proc. of the 16th Intern. Cosmic Ray Conf., Kyoto, Japan, 1979* Vol. 10 (Ed. S Miyake) (Tokyo: Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo, 1979) p. 299
- Ряжская О Г, Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук (М.: ИЯИ РАН, 1986)
- Badino G et al. *Nuovo Cimento C* **7** 573 (1984)
- Aglietta M et al. (LVD Collab.) *Nuovo Cimento A* **105** 1793 (1992)
- Aglietta M et al. (LVD Collab.), in *Proc. of the 27th Cosmic Ray Conf. Hamburg, Germany* Vol. 3 (2001) p. 1093
- Еникеев Р И и др. *ЯФ* **46** 1492 (1987); Enikeev R I et al. *Sov. J. Nucl. Phys.* **46** 883 (1987)
- Hirata K et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1490 (1987)
- Bionta R M et al. *Phys. Rev. Lett.* **58** 1494 (1987)
- IAU Circular No. 4316 (1987); IAU Circular No. 4323 (1987)
- Дадькин В Л, Зацепин Г Т, Ряжская О Г *УФН* **158** 139 (1989); Dadykin V L, Zatsepin G T, Ryazhskaya O G *Sov. Phys. Usp.* **32** 459 (1989)
- Имшенник В С, Ряжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **30** 17 (2004); Imshennik, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **30** 14 (2004)
- Gaponov Yu V, Ryazhskaya O G, Semenov S V *ЯФ* **67** 1993 (2004); *Phys. Atom. Nucl.* **67** 1969 (2004)
- Imshennik V S *Space Sci. Rev.* **74** 325 (1995)
- Boggs S E et al. *Science* **348** 670 (2015)
- Ряжская О Г *УФН* **183** 315 (2013); Ryazhskaya O G *Phys. Usp.* **56** 296 (2013)
- Дадькин В Л, Ряжская О Г *Письма в Астрон. журн.* **35** 427 (2009); Dadykin V L, Ryazhskaya O G *Astron. Lett.* **35** 384 (2009)
- Ряжская О Г *ЯФ* **81** 98 (2018)
- Antonoli P et al. *New J. Phys.* **6** 114 (2004)
- Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **79** 442 (2015); Agafonova N Yu *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **79** 407 (2015)
- Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **75** 437 (2011); Agafonova N Yu *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **75** 408 (2011)
- Agafonova N Yu et al. (LVD Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **109** 070801 (2012)
- Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН. Сер. физ.* **81** 551 (2017); Agafonova N Yu *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **81** 512 (2017)
- Агафонова Н Ю и др. *Изв. РАН Сер. физ.* **73** 666 (2009); Agafonova N Yu *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **73** 628 (2009)
- Агафонова Н Ю и др. "Изучение вариаций концентрации радона под землей с помощью установки", Препринт (М.: ИЯИ РАН, 2001)

Creation of the FIAN Neutrino Laboratory and underground laboratories

O.G. Ryazhskaya

Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation
E-mail: ryazhskaya@lvd.ras.ru, ryazhskaya@vaxmw.tower.ras.ru

This paper describes the history of how the FIAN Neutrino Laboratory was created and how the key methods, later to underlie the construction of BUST (Baksan Underground Scintillation Telescope), ASD (Artemovsk Scintillation Detector), LSD (Liquid Scintillation Detector) and LVD (Large Volume Detector) underground facilities, were developed and first implemented. This work, initiated by G.T. Zatsepin, was crucial for the development of underground physics and gave the Institute of Nuclear Research, RAS, a leadership role in experiments to study stellar collapse neutrinos. The paper discusses underground physics as an effective method of studying a wide class of rare processes related to cosmic rays, neutrino physics, neutrino astrophysics, and elementary particles. The latest LVD and LSD results on the search for stellar collapse neutrinos are discussed, and research on cosmic ray muon characteristics and on muon interaction products at various depths underground is reviewed.

Keywords: underground physics, scintillation methods, neutrino, supernovae

PACS numbers: 01.50.Pa, **01.60.+q**

Bibliography — 53 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **188** (9) 1010–1018 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.05.038186>

Received 18 August 2017

Physica – Uspekhi **61** (9) (2018)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFN.2017.05.038186>