

Учёными института получены результаты фундаментального значения в области физики частиц, атомного ядра, нейтринной астрофизики, теоретической физики и космологии.

40-летие — это возраст зрелости. Институт, коллектив его сотрудников имеют большие планы развития в соответствии с новыми вызовами фундаментальной науки и потребностями инновационного развития экономики страны — экономики знаний.

Хочется пожелать всему коллективу института новых больших свершений, новых научных открытий.

PACS numbers: 26.65.+t, 95.55.Vj, 96.60.Vg  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201109g.0975

## Российско-американский галлиевый эксперимент SAGE

В.Н. Гаврин

### 1. Введение

С тех пор как Паули в 1933 г. постулировал существование нейтрино, оно остаётся одной из наиболее интересных частиц ядерной физики. Представление о нейтрино в теории  $\beta$ -распада, годом позднее развитой Ферми, оказалось настолько плодотворным, что нейтрино было уверенно внесено в число элементарных частиц задолго до его открытия [1].

К 1956 г., когда К. Коуэну и Ф. Райнесу с сотрудниками впервые удалось зарегистрировать свободное нейтрино, характеристики этой частицы в основном уже были получены из косвенных данных большого числа предшествовавших экспериментов с естественными и искусственными  $\beta$ -распадными и К-захватными изотопами, а также на ускорителях в исследованиях мезонно-нейтринных реакций.

Представление о нейтрино, сложившееся на основе этих исследований, несмотря на то что оставались открытыми вопросы о существовании массы нейтрино и его природе (дираковское или майорановское нейтрино), находилось в хорошем согласии со всеми экспериментальными наблюдениями до 1970-х – 1980-х годов. В этот период были получены результаты первых солнечных нейтринных экспериментов, которые привели к изменению представлений о нейтрино и тем самым о ряде явлений в современной физической картине мира.

### 2. Проблема солнечных нейтрино

Первый солнечный нейтринный эксперимент, начавшийся в конце 1960-х годов, имел своей целью проверку теории строения и эволюции звёзд, которая является основой Стандартной солнечной модели (ССМ) [2].

Предполагалось, что энергия в Солнце вырабатывается в результате термоядерного превращения четырёх протонов в  $\alpha$ -частицу по цепочкам реакций, в

которых происходит рождение двух позитронов и двух нейтрино. Считалось, что слабо взаимодействующие низкоэнергетичные нейтрино проходят сквозь Солнце и достигают Земли, не претерпевая изменений.

Таким образом, измерение энергетического спектра нейтрино должно было дать информацию об условиях, при которых протекают термоядерные реакции в Солнце. М.А. Марков в 1964 г. подчёркивал: "Широко распространено мнение, что энергетический баланс звёзд типа Солнца поддерживается ядерными реакциями, протекающими в глубинах небесного тела. Хотя гипотеза выглядит очень правдоподобной, всё же существование подобных процессов на Солнце пока не подтверждено экспериментом, и в принципе здесь возможны сюрпризы с далеко идущими последствиями" [3].

И действительно, в первом солнечном нейтринном эксперименте в США с хлорным детектором, имевшим 610-тонную хлорсодержащую мишень, наблюдалось значительно меньшее количество нейтрино, чем предсказывалось детальными моделями физических процессов в Солнце [4]. Эксперимент был начат в конце 1960-х годов и продолжался до середины 1980-х. В этом эксперименте была реализована замечательная идея Б. Понтекорво о возможности регистрации солнечных нейтрино радиохимическим методом посредством измерения скорости образования  $^{37}\text{Ag}$  в реакции захвата нейтрино на ядрах  $^{37}\text{Cl}$  в хлорной мишени [5]. Хотя различные ССМ предсказывали несколько разные скорости для хлорного эксперимента, скорости захвата во всех этих моделях значительно превышали наблюдаемую. Это разногласие стало широко известной "проблемой солнечных нейтрино", которая существовала более 30 лет.

В течение 20 лет хлорный эксперимент оставался единственным экспериментом по регистрации солнечных нейтрино. Хлорная мишень, использовавшаяся в этом эксперименте, чувствительна исключительно к наиболее высокоэнергетичным в нейтринном спектре Солнца нейтрино от распада  $^8\text{B}$  и к части нейтрино от распада  $^7\text{Be}$ . Реакции, в которых рождаются эти нейтрино, вносят незначительный вклад в вырабатываемую в Солнце энергию, и величины потоков данных нейтрино сильно зависят от температуры в центре Солнца. В рамках ССМ невозможно получить столь низкую величину потока этих нейтрино.

В результате возникло большое число так называемых нестандартных моделей, в которые для согласования с результатом хлорного эксперимента вводились некоторые механизмы понижения температуры в центре Солнца. Однако большинство из этих моделей сталкивалось с трудностями в описании других измеряемых параметров Солнца.

Альтернативным объяснением расхождения результатов хлорного эксперимента с предсказаниями ССМ могло быть существование нейтринных осцилляций. В хлорном эксперименте детектирование нейтрино происходит по реакции обратного  $\beta$ -распада, и поэтому хлорный детектор чувствителен только к электронным нейтрино. Если нейтрино при своём движении из центральных областей Солнца к Земле осциллируют (а значит, меняют аромат), то хлорный детектор может регистрировать только часть их потока.

Идея о том, что нейтрино, возможно, осциллируют, была высказана Б. Понтекорво [6] ещё в начале 1960-х, но она не получила общего признания, так как приводила к

В.Н. Гаврин. Институт ядерных исследований РАН, РФ  
E-mail: gavrin@inr.ru

большому смешиванию нейтрино, что противоречило существовавшим тогда представлениям.

В середине 1980-х годов начались измерения солнечного нейтринного потока на большом водном черенковском детекторе в Японии (эксперимент Камиоканде), чувствительном к электронам отдачи, рождаемым в упругих взаимодействиях солнечных  $^8\text{B}$ -нейтрино с электронами мишени. Так же как и в хлорном эксперименте, измеренный поток оказался меньше, чем предсказания ССМ, таким образом, существование дефицита нейтрино в высокоэнергетичной части солнечного нейтринного спектра получило второе экспериментальное подтверждение.

Для того чтобы понять, с чем связан этот дефицит, с физикой Солнца или физикой нейтрино, потребовался галлиевый солнечный нейтринный эксперимент. Его отличие от всех других солнечных нейтринных экспериментов состоит в его высокой чувствительности к протон-протонной (pp) реакции  $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$ , в которой генерируется подавляющее большинство солнечной энергии.

Скорость pp-реакции непосредственно связана с солнечной светимостью, поэтому она практически не зависит от модельных представлений, и скорость захвата pp-нейтрино на Ga может быть предсказана с большой точностью. Таким образом, галлиевый эксперимент является единственным экспериментом, который обеспечивает прямое измерение скорости генерации энергии в Солнце.

### 3. Галлиевые эксперименты

Использовать в радиохимическом солнечном нейтринном эксперименте галлий было предложено В.А. Кузьминым [7] в 1963 г., ещё до проведения первых солнечных нейтринных экспериментов. Однако высокая цена галлия, его незначительное производство в мире, а также отсутствие ясной технологии извлечения и подсчёта единичных атомов изотопа германия  $^{71}\text{Ge}$ , образующихся при захвате нейтрино многотонной галлиевой мишенью, представляли собой значительное препятствие для постановки галлиевого эксперимента в то время.

Лабораторные исследования по проектированию галлиевого эксперимента в СССР в Институте ядерных исследований Академии наук (ИЯИ) и в США в Брукхейвенской национальной лаборатории (БНЛ) начались почти одновременно в 1975 г. Разрабатывались методики извлечения германия из жидкого металлического галлия и из раствора хлорида галлия в соляной кислоте. За несколько лет были достигнуты значительные успехи в разработке обоих этих методов. Были разработаны методы счёта единичных атомов  $^{71}\text{Ge}$ , а также рассчитаны и измерены скорости образования  $^{71}\text{Ge}$  в различных фоновых процессах, вызываемых мюонами космических лучей,  $\alpha$ -частицами от внутренних радиоактивных примесей и быстрыми нейтронами от внешних источников.

Американская группа остановила свой выбор на методе с использованием раствора хлорида галлия как более простом в реализации, и ею была изготовлена пилотная установка, содержащая 1,3 т галлия в растворе хлорида галлия в соляной кислоте. В 1981 г. предложение

о проведении полномасштабного 50-тонного галлиевого эксперимента было направлено в Министерство энергетики США. Предложение было рассмотрено на высоком уровне и рекомендовано к реализации, но финансирование не было выделено. Спустя 15 лет директор Лос-Аламосской мезонной фабрики Дж.Т. Гарви прокомментировал казус с финансированием следующим образом: "Это случилось в основном из-за того, что, как выяснилось, не существует федерального агентства с правами финансирования такого рода исследований — подлинный изъян в системе США".

В ИЯИ, в отделе, руководимом Г.Т. Зацепиным, лабораторные исследования по разработке галлиевого эксперимента были начаты также с использованием раствора хлорида галлия. Но когда стало ясно, что наша промышленность не может обеспечить необходимую чистоту 50 т такого раствора, было принято решение перейти к разработке метода извлечения германия непосредственно из металлического галлия, ввиду того что металлический галлий значительно менее чувствителен к радиоактивным примесям.

Возможность извлечения ничтожно малых количеств германия из металлического галлия впервые была показана Р. Дэвисом. Мы взяли за основу идею Р. Дэвиса и развили технологию извлечения единичных атомов  $^{71}\text{Ge}$  из многих тонн металлического Ga. Первая работа, в которой использовалась методика извлечения единичных атомов  $^{71}\text{Ge}$  из 300 кг металлического Ga [8], была опубликована нами в 1980 г.

В 1984 г. Дж. Т. Гарви направил письмо в ИЯИ АН СССР с предложением объединить усилия Лос-Аламосской национальной лаборатории США (ЛАНЛ) и ИЯИ в исследованиях солнечных нейтрино, в частности в проведении галлиевого эксперимента. Соглашение о проведении в Баксанской нейтринной обсерватории на Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ) совместного Советско-американского галлиевого эксперимента в 1986 г. было подписано В.А. Матвеевым. Эксперимент получил название SAGE (от англ. Soviet-American Gallium Experiment). Участниками эксперимента с американской стороны стали ЛАНЛ и Пенсильванский университет. Позднее в эксперимент были вовлечены Университет им. Дж. Вашингтона и Национальный институт стандартов и технологий США.

В 1986 г. в ИЯИ в городе Троицке была создана пилотная установка, содержащая 7,5 т металлического Ga, на которой отработывалась методика извлечения единичных атомов  $^{71}\text{Ge}$ . На американскую группу была возложена задача разработки и изготовления системы регистрации распадов извлечённых атомов  $^{71}\text{Ge}$ .

В 1984 г. немецкая группа из Института им. Макса Планка под руководством Т. Кирстена представила проект галлиевого эксперимента с использованием раствора хлорида галлия в подземной лаборатории Гран-Сассо в Италии и начала создавать с участием БНЛ Западно-Европейскую коллаборацию, которая получила название GALLEX (GALLium EXperiment).

Таким образом, практически одновременно возникло два независимых галлиевых эксперимента: GALLEX — на основе раствора хлорида Ga — в подземной лаборатории Гран-Сассо и эксперимент SAGE — на основе металлического Ga — в подземной лаборатории Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ.

#### 4. Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований РАН

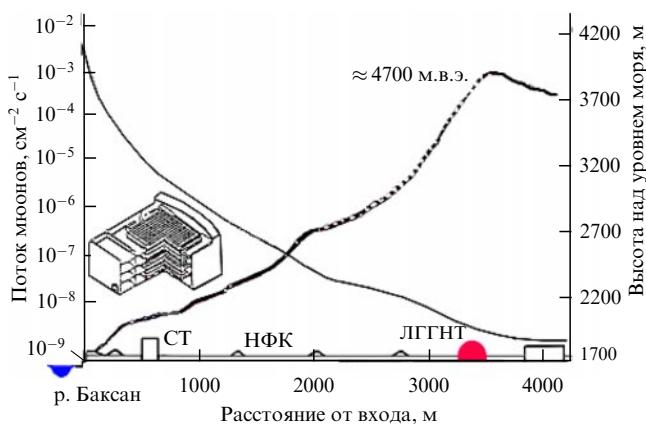
Солнечные нейтринные эксперименты явились одними из первых экспериментов, положивших начало новому направлению исследований в астрофизике и физике элементарных частиц. Эти исследования потребовали создания подземных лабораторий, обеспечивающих существенное снижение (в несколько миллионов раз) уровня фона мюонов космических лучей, и специальных низкофонных материалов для защиты детекторов от радиационного излучения окружающей среды. Для развития этих исследований в СССР была создана Баксанская нейтринная обсерватория.

Баксанская нейтринная обсерватория ИЯИ расположена на Северном Кавказе в верховьях реки Баксан на высоте 1700 м над уровнем моря. Подземные объекты обсерватории размещены в толще горного массива горы Андырчи (высота 3937 м), являющегося частью бокового ответвления Большого Кавказского хребта. Строительство обсерватории было начато в 1967 г.

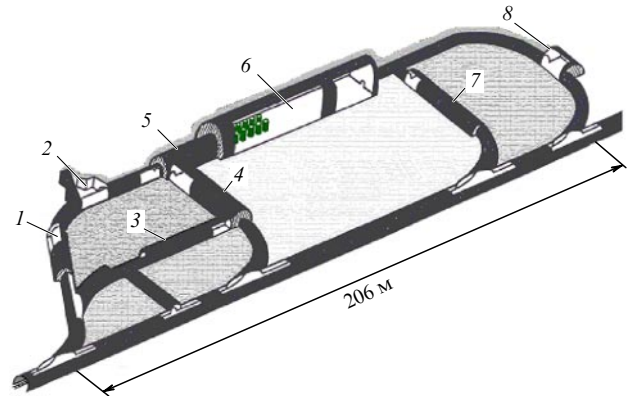
В первоначальном проекте Баксанской нейтринной обсерватории планировалось создать лабораторию глубокого заложения с размещением в ней, согласно предложенной Г.Т. Зацепиным программе нейтринной спектроскопии Солнца, единого комплекса из трёх радиохимических нейтринных телескопов на основе  $Cl$ ,  $Li$  и  $Ga$ , имеющих различные чувствительности к нейтринно, рождённых в разных реакциях, протекающих в Солнце.

Комплекс предполагалось расположить на расстоянии 4200 м от устья горизонтальной штольни, где в толщине горного массива интенсивность мюонов космических лучей практически достигает минимума.

В связи с возросшей актуальностью получения экспериментальных данных в низкоэнергетической области спектра солнечных нейтрино в 1977 г. было принято решение в первую очередь приступить к строительству отдельной лаборатории Галлий-германиевого нейтрин-



**Рис. 1.** Профиль горы, кривая зависимости потока мюонов от длины штольни и схема расположения подземных лабораторий Баксанской нейтринной обсерватории; СТ — сцинтилляционный телескоп, НФК — низкофонные камеры, ЛГГНТ — лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа. На вставке в левой части рисунка приведено схематическое изображение сцинтилляционного телескопа.



**Рис. 2.** Схема подземных выработок лаборатории ГГНТ: 1, 2, 5, 7, 8 — вспомогательные помещения; 3 — помещение электроподстанции; 4 — помещение кондиционера; 6 — реакторный зал ГГНТ.

ного телескопа, не дожидаясь окончания строительства штольни на всю проектную длину.

Поскольку галлиевый нейтринный эксперимент можно выполнять на меньших, по сравнению с требуемыми для хлорного эксперимента, глубинах [9, 10], это обстоятельство позволило разместить комплекс лаборатории ГГНТ на расстоянии 3600 м от устья штольни (рис. 1). Мощность покровных пород над лабораторией 2100 м, что соответствует 4700 м водного эквивалента. По глубине заложения лаборатория ГГНТ сейчас занимает второе место в мире.

Лаборатория ГГНТ представляет собой камерную выработку цилиндрической формы длиной 60 м, диаметром 15 м, шириной в основании 12 м и высотой 10 м. Для устройств рабочих комнат, щитовых, площадок размещения технологического оборудования в лаборатории смонтированы на разных уровнях несущие металлоконструкции. Вспомогательное оборудование инженерных систем (электроподстанция, система кондиционирования, вытяжной вентиляционный агрегат и пр.) размещается в отдельных горных выработках, смежных с лабораторией (рис. 2); температура окружающей породы 38,3 °С.

В лаборатории имеется приточная вентиляционная установка, забирающая свежий воздух из штольни, и вытяжная установка, отправляющая отработанный воздух в свой воздуховод. Для охлаждения помещений лаборатории в комплексе установлен кондиционер. Очистка поступающего воздуха производится в два этапа: в первой камере фильтров (фильтрующий материал ФЛ-1,8) воздух очищается от пыли, во второй камере с помощью фильтров Петрянова (тип ФПП-1,5) — от содержащихся в воздухе аэрозолей (в том числе, продуктов распада  $^{232}Th$  и  $^{238}U$ ). Воздух подводится в каждую комнату по отдельным воздуховодам. Вентилятор приточной системы создаёт в помещениях лаборатории избыточное давление. Отработанный воздух поступает к главному вентилятору, установленному на устье вспомогательной штольни.

Для доставки персонала, материалов и оборудования используется рельсовый транспорт: аккумуляторные электровозы, пассажирские вагоны и специальные платформы.

Поток мюонов в лаборатории ГГНТ был измерен с помощью небольшого телескопа сцинтилляционных

детекторов на основе полистирола площадью  $4 \text{ м}^2$  [11]. Согласно измерениям, глобальная интенсивность мюонов в месте расположения ГГНТ составляет [11]

$$N_{\text{measured}} = (3,03 \pm 0,10) \times 10^{-9} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}.$$

Результаты расчёта скоростей образования изотопов германия в Ga при этом потоке мюонов [9] показали, что скорость образования  $^{71}\text{Ge}$  на глубине расположения лаборатории составляет менее 0,01 атома в сутки, т.е. менее чем 1 % от величины, предсказываемой ССМ (при отсутствии ослабления потока электронных нейтрино в результате, например, осцилляций или других эффектов).

Металлический Ga значительно менее чувствителен, по сравнению с солянокислым раствором его хлорида, к быстрым нейтронам. Согласно оценке [12], вклад быстрых нейтронов от окружающих горных пород в скорость образования  $^{71}\text{Ge}$ , даже без применения защиты, составляет в эксперименте с металлическим Ga менее 1 % от вклада, ожидаемого от солнечных нейтрино без учёта осцилляций.

Однако, чтобы максимально использовать возможности этого уникального сооружения для проведения экспериментов, требующих ультранизкого радиационного фона, было принято решение значительно снизить поток нейтронов в галлиевой лаборатории, используя при её строительстве специальные низкофонные бетоны, которые, помимо выполнения своей прямой функции — крепления горных пород, могут служить радиационными экранами. Кроме того, мы принимали во внимание, что поток нейтрино низких энергий от Солнца, к которым в основном чувствителен галлиевый эксперимент, может быть подавленным и оказаться значительно ниже ожидаемого потока, как это было обнаружено в хлорном эксперименте для нейтрино высоких энергий.

Содержание радиоактивных элементов в окружающих лабораторию горных породах ( $\text{г г}^{-1}$ ) составляют:  $^{238}\text{U}$  —  $(1,5-3,8) \times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}$  —  $(1,9-2,5) \times 10^{-5}$ ,  $^{40}\text{K}$  —  $3,4 \times 10^{-6}$ .

При бетонировании лаборатории ГГНТ был использован бетон на основе дунита, кварцевого песка и порландцемента, разработанный в Центральной научно-исследовательской лаборатории Оргпроект совместно с ИЯИ АН СССР [13]. Усреднённые величины содержания примесей урана и тория в основных компонентах бетона составляют соответственно  $1,58 \times 10^{-7}$  и  $6,73 \times 10^{-7} \text{ г г}^{-1}$ .

В декабре 1987 г. лаборатория была сдана в эксплуатацию, и начались работы по наладке ГГНТ. Первые измерения солнечного нейтринного потока в SAGE были начаты в декабре 1989 г.

## 5. Эксперимент SAGE

В эксперименте SAGE поток нейтрино определяется по результатам измерений скорости реакции захвата нейтрино на металлическом галлии  $^{71}\text{Ga}(v_e, e)^{71}\text{Ge}$  в ГГНТ. Порог реакции, который составляет 233 кэВ, позволяет регистрировать нейтрино от всех нейтринообразующих реакций, протекающих в Солнце, согласно ССМ, в том числе нейтрино от pp-реакций (pp-нейтрино). Максимальная энергия pp-нейтрино 420 кэВ. Количество pp-нейтрино с энергией, превышающей порог реакции захвата на  $^{71}\text{Ga}$ , составляет больше половины от общего

количества pp-нейтрино, и их вклад в ожидаемую скорость захвата в эксперименте составляет около 54 %.

Мишень телескопа состоит примерно из 50 т металлического галлия, равномерно размещённого в семи химических реакторах. Галлий в реакторах содержится в виде жидкого металла при температуре около  $31^\circ\text{C}$  (температура плавления галлия  $29,8^\circ\text{C}$ ). Измерения носят циклический характер.

Каждое измерение скорости захвата солнечных нейтрино в эксперименте начинается с добавления в галлиевую мишень носителя — стабильного германия ( $\approx 250 \text{ мкг}$ ) в виде таблеток, представляющих собой сплав галлия с известным количеством германия (около  $2 \times 10^{-4}$  массовых процентов). Германий равномерно распределяется в реакторах по всей массе галлия.

В радиохимических экспериментах скорость захвата выражают в единицах SNU (Solar Neutrino Units); 1 SNU соответствует одному захвату нейтрино в 1 с в мишени, содержащей  $10^{36}$  атомов изотопа (в нашем случае —  $^{71}\text{Ga}$ ), захватывающего нейтрино. Ожидаемая скорость захвата солнечных нейтрино ядрами галлия 128 SNU [14]. При содержании в природном галлии 39,9 % изотопа  $^{71}\text{Ga}$  скорость захвата в 128 SNU соответствует скорости образования атомов  $^{71}\text{Ge}$  в 50 т мишени около 1,9 атома в сутки. То есть при большом времени экспозиции (период полураспада  $^{71}\text{Ge}$   $T_{1/2} = 11,43 \text{ сут}$ ) среднее число атомов  $^{71}\text{Ge}$  в мишени может составлять около 32.

Экспозиция в эксперименте длится 4–6 недель, после чего образовавшиеся атомы  $^{71}\text{Ge}$  вместе с германием-носителем химически извлекаются из галлия с помощью процедур, описанных в [15]. Извлечённый из галлия германий (носитель и атомы  $^{71}\text{Ge}$ ) переводится в газообразную форму  $\text{GeH}_4$  (моногерман) и после измерения объёма помещается в пропорциональный счётчик.

Химические свойства изотопов германия одинаковы, поэтому полная эффективность извлечения атомов  $^{71}\text{Ge}$  равна эффективности извлечения стабильного германия, которая определяется как отношение массы германия в моногермане к внесённой массе германия-носителя. В качестве носителя используется германий, обогащённый изотопами либо  $^{72}\text{Ge}$ , либо  $^{76}\text{Ge}$ . По окончании каждого извлечения берётся образец заключительного экстракционного раствора для анализа на масс-спектрометре с целью определения фракционного состава различных изотопов Ge.

Молекулы моногермана обладают большой симметрией и не поляризуются, поэтому его можно использовать в качестве гасящей добавки в пропорциональных счётчиках. Основным счётным газом в счётчиках служит ксенон, который имеет большой атомный номер ( $Z = 54$ ) и, следовательно, достаточно большое сечение взаимодействия с фотонами мягкого рентгеновского излучения, возникающими при восстановлении атомных оболочек при распаде  $^{71}\text{Ge}$ .

Счёт распадов  $^{71}\text{Ge}$  продолжается в течение 5–6 месяцев, что связано с методом отбора импульсов от распада  $^{71}\text{Ge}$  из всех импульсов, зарегистрированных в счётчике, значительная часть которых являются фоновыми. Анализ импульсов происходит по окончании счёта с использованием развитой техники отбора событий и временного анализа.

По числу зарегистрированных распадов  $^{71}\text{Ge}$  определяется, с учётом эффективностей извлечения и счёта, скорость захвата солнечных нейтрино на галлии.

### 5.1. Химические реакторы ГГНТ

В состав ГГНТ входят десять химических реакторов (рис. 3, 4), соединённых между собой обогреваемым фторопластовым трубопроводом с фторопластовым жидкостным насосом, который позволяет перекачивать металлический галлий между реакторами. Реактор (рис. 5) представляет собой двухкубовую фторопластовую ёмкость с толщиной стенок около 40 мм, обогрев которой обеспечивается ленточными нагревателями. Фторопластовая ёмкость помещена в ёмкость из нержавеющей стали. Перемешивание галлия осуществляется с помощью специальной мешалки, имеющей максимальную скорость вращения 80 оборотов в 1 мин. Для обеспечения эффективного перемешивания растворов реагентов (плотность  $\approx 1 \text{ кг л}^{-1}$ ) с металлическим галлием (плотность  $6,1 \text{ кг л}^{-1}$ ) реактор оснащён специальными отсекателями, закреплёнными на внутренней стороне крышки реактора. Отсекатели изготовлены из фторопласта, мешалка и внутренняя сторона крышки также покрыты слоем фторопласта.

Подача реактивов в реакторы обеспечивается с помощью системы управляемых клапанов и насосов (используемые материалы — фторопласт и боросиликатное стекло). Система позволяет вводить отмеренное



Рис. 3. Химические реакторы ГГНТ.



Рис. 4. Общий вид реакторного зала ГГНТ.

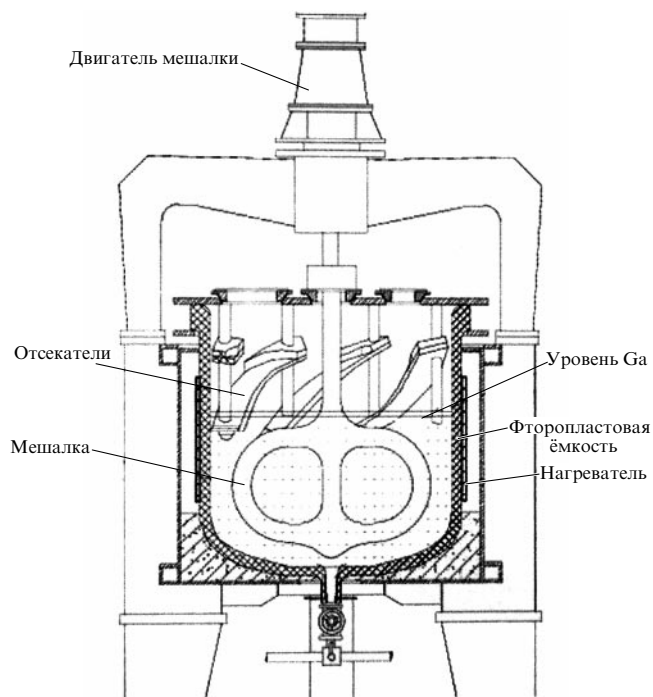


Рис. 5. Химический реактор для извлечения германия из галлия.

количество реактивов в любой из реакторов. Декантация раствора, полученного после проведения извлечения (экстракционного раствора), производится с помощью вакуумной системы, компоненты которой изготовлены из стекла, фторопласта и циркония. Процессы дозирования реагентов и перемешивания полностью автоматизированы.

Эффективность извлечения германия зависит от большого числа параметров. Эффективность возрастает с увеличением количества добавляемого окислителя (раствора перекиси водорода), в то же время с увеличением количества добавляемой перекиси водорода пропорционально возрастает количество галлия, растворяемого при реакции окисления. Эффективность процесса также зависит от объёма водной фазы, которая определяет продолжительность последующего концентрирования германия — самого длительного этапа всего процесса извлечения.

Разработана учитывающая перечисленные выше факторы методика, в которой полная эффективность извлечения составляет  $(95 \pm 3) \%$  при растворении менее  $0,1 \%$  галлия.

### 5.2. Счёт атомов $^{71}\text{Ge}$

$^{71}\text{Ge}$  распадается обратно в  $^{71}\text{Ga}$  в результате чисто электронного захвата с периодом полураспада 11,4 сут. В пропорциональном счётчике наблюдаются два пика: К-пик при энергии 10,4 кэВ и L-пик при энергии 1,2 кэВ.

Начиная с апреля 2001 г. в эксперименте используются полностью реконструированные пропорциональные счётчики [16] типа YCT (Yants–Carbon–Thin), разработанные и изготовленные В.Э. Янцем в лаборатории радиохимических методов детектирования нейтрино ИЯИ РАН. В отличие от твёрдого катода, используемого в счётчиках ранее, катод в новых счётчиках представляет собой тонкий углеродный слой на внутренней поверхности кварцевой колбы, образующийся при термическом

разложении паров гексана или ацетона. Это дало возможность исключить "мёртвый" объём за катодом. Уменьшение "мёртвого" объёма было также достигнуто в результате устранения, благодаря особенностям конструкции таких счётчиков, краевых эффектов.

Контакты катода и анода выводятся из счётчика с помощью молибденовой ленты, что обеспечивает герметичность и высокую стабильность счётчика. Катод настолько тонок, что стенки счётчика прозрачны, и это позволяет визуально наблюдать его внутреннее устройство. Измеренная объёмная эффективность всех новых счётчиков составила 96 % с разбросом всего лишь в 1 %. Увеличение объёмной эффективности привело к значительному повышению эффективности счётчиков — приблизительно на 25 % в К-пике и на 10 % в L-пике.

Импульсы с пропорционального счётчика посылаются на цифровой осциллограф, где они в интервале 800 нс после начала импульса оцифровываются с двумя различными усилениями, одно — для L-пика, другое — для К-пика. Цифровой осциллограф служит для отделения быстро нарастающих  $^{71}\text{Ge}$ -импульсов от фоновых импульсов, нарастающих в основном медленно.

Пропорциональные счётчики, заполненные газовой смесью, устанавливаются в систему регистрации ГГНТ, которая организована таким образом, чтобы с максимальной эффективностью регистрировать распады  $^{71}\text{Ge}$  в счётчиках. Для этого предпринят ряд мер по подавлению шумов и фоновых импульсов. Система регистрации расположена в специально оборудованной комнате подземной лаборатории. Внешние стены комнаты изготовлены из листовой стали толщиной 10 мм и слоя низкорadioактивного бетона толщиной 70 см для защиты от потока быстрых нейтронов и  $\gamma$ -излучения окружающих

горных пород. Внутренние стены облицованы листовым оцинкованным железом толщиной 1 мм с целью экранирования от радиопомех.

Счётчик, содержащий полученный в извлечении  $\text{GeH}_4$ , помещается в колодец NaI-детектора (рис. 6), расположенного внутри большой пассивной защиты, и в течение 5–6 месяцев производится регистрация импульсов от распадов  $^{71}\text{Ge}$  в счётчике. Одновременно в колодце NaI-детектора может быть размещено до восьми счётчиков.

Для уменьшения воздействия  $^{222}\text{Ra}$  объём внутри защиты вокруг счётчиков продувается испаряющимся из дьюара жидким азотом. Защита состоит из последовательных слоёв железа, свинца, меди и вольфрама. Все компоненты защиты выполнены из низкорadioактивных, заранее отобранных с помощью низкофонового германиевого полупроводникового детектора материалов.

### 5.3. Анализ данных и результаты SAGE

На основе критериев отбора, описанных в [15], из счётных данных каждого извлечения отбираются события-кандидаты от распадов  $^{71}\text{Ge}$ . Временное распределение этих отобранных событий аппроксимируется функцией максимального правдоподобия [17] в предположении, что они происходят от неизвестного постоянного во времени фона и от распадов атомов  $^{71}\text{Ge}$ , число которых экспоненциально убывает.

SAGE начал измерение скорости захвата солнечных нейтрино на металлической галлиевой мишени в декабре 1989 г. С тех пор измерения продолжают в основном ежемесячно, лишь с несколькими короткими перерывами. Результаты 200 индивидуальных измерений, выполненных за период с января 1990 г. по август 2010 г., представлены на рис. 7. Поскольку в каждом извлечении регистрируются только несколько событий распада  $^{71}\text{Ge}$ , результаты одиночных измерений имеют большую статистическую неопределённость и, следовательно, малую значимость. Результаты анализа данных SAGE, объединённых по годам, за этот же период показаны на рис. 8.

Скорость захвата, полученная на основе анализа данных 200 измерений, составила  $(65,4 \pm 2,7)$  SNU. Если анализировать данные L-пика и К-пика по отдельности, то результаты будут  $(66,9 \pm 4,1)$  SNU и  $(64,2 \pm 3,6)$  SNU соответственно (здесь и выше указаны только статистические неопределённости). Согласие между результатами независимого анализа данных в двух пиках служит хорошим подтверждением надёжности критериев отбора событий. В качестве ещё одного доказательства того, что мы считаем именно атомы  $^{71}\text{Ge}$ , в функцию правдоподобия мы вводим, наряду с объединённой скоростью образования  $^{71}\text{Ge}$  и всеми фоновыми скоростями счёта, в качестве свободной переменной постоянную распада. Найденный таким образом период полураспада для всех отобранных в L- и К-пиках событий составляет  $(11,5 \pm 0,9)$  сут. (стат.) сут, что хорошо согласуется с измеренным в [18] значением периода полураспада  $^{71}\text{Ge}$   $(11,43 \pm 0,03)$  сут.

Результат объединённого анализа данных SAGE за весь период измерений с учётом статистической и систематической неопределённости даёт величину скорости захвата солнечных нейтрино на Ga  $(65,4 \pm 2,7)$  (стат.)  $\pm 2,7$  (сист.) SNU, или  $(65,4 \pm 3,8)$  SNU, где статистиче-

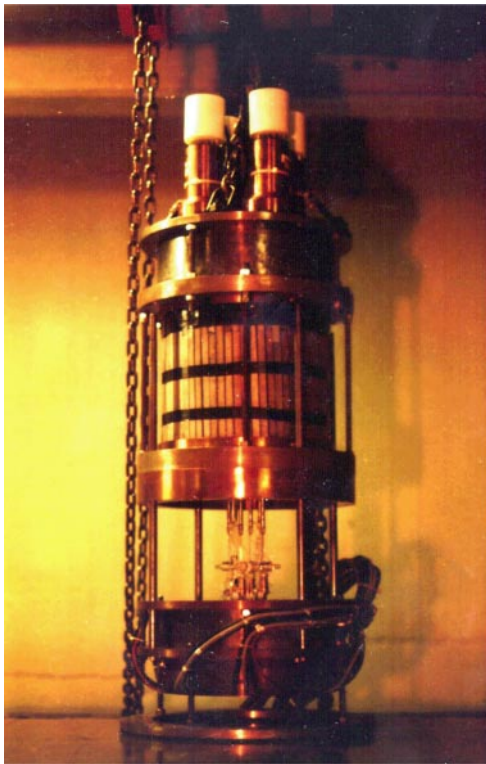
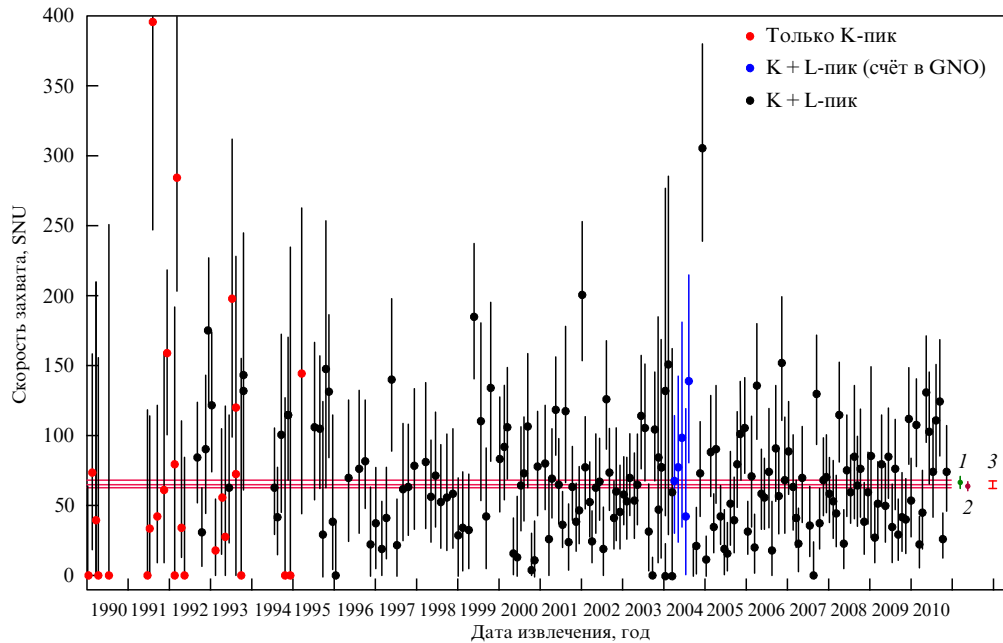
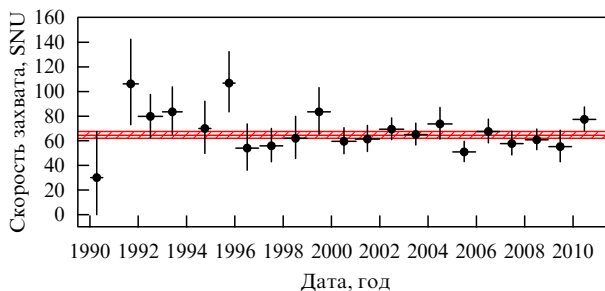


Рис. 6. Фрагмент активной защиты системы регистрации с NaI-детектором и пропорциональными счётчиками внутри него.



**Рис. 7.** Скорость захвата по всем извлечениям SAGE как функция времени. Вертикальные отрезки у каждой точки соответствуют статистической ошибке 68 %. 1–3 — результаты обработки: 1 — по L-пику, 2 — по K-пику, 3 — объединённый результат для всех данных. Горизонтальные отрезки соответствуют объединённому результату SAGE ( $65,4 \pm 2,7$  (стат.)) SNU.



**Рис. 8.** Результаты измерений, объединённых по годам. Заштрихованная область соответствует объединённому результату SAGE ( $65,4 \pm 2,7$  (стат.)) SNU. Вертикальные отрезки у каждой точки соответствуют статистической ошибке 68 %, горизонтальные — временному интервалу объединённого анализа измерений.

ская и систематическая ошибки объединены квадратично. Систематические неопределённости эксперимента детально рассматриваются в работах [15, 19, 20].

#### 5.4. Результаты галлиевых экспериментов

В подземной лаборатории Гран-Сассо в эксперименте GALLEX [21] измерения солнечных нейтрино выполнялись на 103-тонной мишени, состоящей из раствора  $\text{GaCl}_3$  в соляной кислоте, содержащем 30 т Ga. В течение 5,4 лет, с мая 1991 г. по январь 1997 г., было выполнено 65 измерений, окончательный анализ которых дал величину скорости захвата ( $73,1 \pm 7,2$ ) SNU.

После некоторого перерыва эксперимент был продолжен под новым названием GNO (Gallium Neutrino Observatory), и с мая 1998 г. по апрель 2003 г. было выполнено 58 измерений, в результате анализа которых была получена скорость захвата ( $62,9 \pm 5,1$ ) SNU.

Объединённый результат измерений солнечных нейтрино двух экспериментов в Гран-Сассо даёт величину скорости захвата нейтрино на Ga ( $67,6 \pm 5,1$ ) SNU, которая прекрасно согласуется с результатом SAGE

( $65,4 \pm 3,8$ ) SNU. Согласие между результатами двух независимых галлиевых экспериментов, использующих, кроме того, различные формы Ga-мишени, значительно повышает их надёжность.

Средневзвешенная величина результатов галлиевых экспериментов SAGE и GALLEX/GNO равняется ( $66,1 \pm 3,1$ ) SNU, что составляет около 50 % от величины, предсказываемой ССМ. Галлиевые эксперименты, таким образом, показали значительное подавление потока солнечных нейтрино во всём энергетическом диапазоне, что исключило возможность решения проблемы солнечных нейтрино в рамках только физики Солнца, и дали доказательство изменения ароматов нейтрино на их пути из центра Солнца к Земле.

## 6. Поток $\nu\nu$ -нейтрино от Солнца

Как ранее отмечалось, радиохимический галлиевый эксперимент со своим низким порогом (233 кэВ) чувствителен ко всем компонентам солнечного нейтринного спектра — от низкоэнергетичных  $\nu\nu$ -нейтрино до высокоэнергетичных нейтрино, образующихся при распаде  $^8\text{B}$ . Таким образом, измеренная скорость захвата в галлиевых экспериментах, которая является суммой скоростей захватов от всех компонентов потока солнечных нейтрино, может быть выражена следующей формулой:

$$[\nu\nu + ^7\text{Be} + \text{CNO} + \text{pep} + ^8\text{B}][\text{Ga}] = 66,1(1 \pm 0,047) \text{ SNU},$$

где в левой части представлены скорости захвата на галлии от компонентов потока солнечных нейтрино. Мы здесь пренебрегли незначительным вкладом  $\nu$ -нейтрино и объединили потоки нейтрино от распадов  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$  и  $^{17}\text{F}$  в один компонент солнечного нейтринного потока, обозначив его как CNO.

Используя результаты измерений нейтрино в экспериментах Borexino [21] и SNO (Sudbury Neutrino

Observatory) [23] и скорости захвата, полученные в хлорном эксперименте [24], мы определили вклад каждого компонента потока солнечных нейтрино в скорость захвата, измеренную на Ga [20]:

$$[{}^7\text{Be}|Ga] = 19,1(1 \pm 0,12) \text{ SNU},$$

$$[{}^8\text{B}|Ga] = 3,6(1_{-0,16}^{+0,32}) \text{ SNU},$$

$$[(\text{CNO} + \text{pep})|Ga] = 3,68(1 \pm 1,0) \text{ SNU},$$

$$[\text{pp}|Ga] = 39,7(1 \pm 0,14) \text{ SNU}.$$

Скорости захвата pp-нейтрино на Ga  $39,7(1 \pm 0,14) \text{ SNU}$  соответствует величина приходящего на Землю потока pp-нейтрино  $\Phi_{\text{pp}} = 3,38(1 \pm 0,14) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Это часть потока pp-нейтрино, пришедших на Землю с электронным ароматом.

Впервые полученная из экспериментальных данных величина потока pp-нейтрино является прямым доказательством существования протон-протонной цепочки в реакциях термоядерного синтеза в Солнце.

С учётом фактора выживания  $\langle P^{ee} \rangle = 0,561(1_{-0,042}^{+0,030})$  для нейтринных осцилляций с большим углом смешивания (Large Mixing Angle) (LMA-решение) полный поток образующихся в Солнце pp-нейтрино, которые достигают Земли,  $\Phi_{\text{pp}} = 6,01(1 \pm 0,14) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [20]. Эта величина хорошо согласуется с предсказываемыми величинами потоков pp-нейтрино двух существующих сейчас солнечных моделей, различающихся концентрациями тяжёлых элементов в Солнце:  $\Phi_{\text{pp}}(5,97 \pm 0,04) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и  $\Phi_{\text{pp}} = (6,04 \pm 0,03) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  [14].

## 7. Эксперименты с искусственными источниками нейтрино

Уже в первых результатах измерений, полученных в 1990 г., в SAGE [25] и GALLEX [26], был обнаружен низкий поток нейтрино, который не мог быть объяснён в рамках CSM. Ввиду важности заключений, к которым приводили эти результаты, свидетельствующие о том, что нейтрино меняют аромат и имеют массу, требовались доказательства, подтверждающие, что мы правильно оцениваем эффективности всех процедур, используемых в эксперименте.

Полная проверка всего эксперимента в целом (т.е. эффективностей химического извлечения, счёта атомов  ${}^{71}\text{Ge}$  и техники анализа) была проведена в обоих экспериментах, SAGE и GALLEX, с использованием искусственных источников нейтрино. Галлиевые мишени облучались искусственными источниками нейтрино на основе изотопов, полученных в атомных реакторах, с активностью, близкой к 1 МКи. В эксперименте SAGE примерно 25% мишени облучались источниками  ${}^{51}\text{Cr}$  [27] и  ${}^{37}\text{Ar}$  [28]. GALLEX дважды использовал источник  ${}^{51}\text{Cr}$  для облучения всей мишени [29]. Средневзвешенное значение  $R$  — отношение измеренной скорости образования  ${}^{71}\text{Ge}$  к ожидаемой, вычисленной на основе мощности источника, для всех четырёх экспериментов оказалось неожиданно низким,  $R = 0,87 \pm 0,05$ , более чем на два стандартных отклонения меньшим единицы.

Во время проведения экспериментов как в SAGE, так и в GALLEX были выполнены многочисленные исследования с целью получить доказательства правильности значений эффективностей всех используемых в экспери-

ментах процедур [15]. Эффективность извлечения определялась разнообразными химическими и объёмными измерениями, основанными на внесении и последующем извлечении известного количества носителя стабильного Ge. Также была выполнена проверка, при которой в Ga-мишень добавлялся Ge-носитель в смеси с известным числом атомов  ${}^{71}\text{Ge}$  в SAGE и  ${}^{71}\text{As}$  в GALLEX, в результате чего было продемонстрировано, что эффективности извлечения стабильного носителя и  ${}^{71}\text{Ge}$  очень близки.

Результаты всех вспомогательных проверок, особенно результат эксперимента с  ${}^{71}\text{As}$ , выполненного в GALLEX [16], показали, что с высокой вероятностью все эффективности определены правильно, и привели к заключению, что обнаруженная низкая скорость захвата нейтрино в галлиевых экспериментах с источниками не является следствием ошибки экспериментов.

Возможные причины такой низкой скорости детально рассмотрены в [20]. Одно из предположений состоит в том, что завышены сечения захвата нейтрино на двух самых нижних возбуждённых уровнях в  ${}^{71}\text{Ge}$ , которые могут быть достигнуты при использовании в качестве источника либо  ${}^{51}\text{Cr}$ , либо  ${}^{37}\text{Ar}$  [31]. Другими возможными причинами могут быть статистическая флуктуация, вероятность которой мала (около 5%), или реальный физический эффект неизвестной природы, такой как гипотетический переход активных нейтрино в стерильное состояние.

## 8. Возможности SAGE в исследовании осцилляционных переходов активных нейтрино в стерильные состояния

В физике нейтрино в настоящее время к наиболее актуальным вопросам относятся следующие: существуют ли стерильные нейтрино и имеются ли  $CP$ - и  $CPT$ -нарушения в нейтринном секторе? Проблема существования стерильных нейтрино с  $\Delta m^2 \sim 1 \text{ эВ}^2$  возникла при анализе результатов, полученных в ускорительных экспериментах LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) и MiniBooNE (BooNE — аббревиатура от англ. Booster Neutrino Experiment), в ряде реакторных экспериментов и в галлиевых экспериментах с искусственными источниками нейтрино [32].

Интерес к вопросу о существовании стерильных нейтрино значительно возрос в последние несколько лет. Это связано как с некоторым уточнением космологических данных, так и с появлением новых "аномальных" результатов в экспериментах по изучению нейтринных осцилляций. Пересмотр оценки потоков реакторных антинейтрино привёл к поддержке гипотезы об осцилляциях нейтрино с массой  $\sim 1 \text{ эВ}$ . С другой стороны, отсутствие особенностей в спектре атмосферных нейтрино с энергиями около 1 ТэВ в первых данных нейтринного телескопа IceCube говорит об отсутствии переходов с большими  $\Delta m^2$ .

Для исследования осцилляционных переходов активных нейтрино в стерильные состояния в настоящее время рассматриваются, наряду с действующими, новые эксперименты с использованием как существующих, так и специально проектируемых атомных реакторов и ускорителей.

Мы предлагаем для исследования осцилляционных переходов активных нейтрино в стерильные состояния



использовать уникальные возможности ГГНТ. В центр металлической Ga-мишени телескопа массой 50 т, разделённой на две независимые, внутреннюю и внешнюю, зоны с 8 и 42 т Ga соответственно (рис. 9) с равными средними длинами пробегов нейтрино, поместить источник  $^{51}\text{Cr}$  активностью 3 МКи и измерять скорости захвата нейтрино одновременно в каждой зоне. При переходах в стерильные состояния с осцилляционным параметром  $\Delta m^2 > 0,5 \text{ эВ}^2$  (именно такие переходы сейчас представляют особый интерес) скорость захвата в одной из зон или в обеих зонах мишени должна быть подавлена (рис. 10). В случае статистически обеспеченного различия между величинами скорости захвата нейтрино в каждой зоне или статистически обеспеченного различия между средней скоростью захвата в обеих зонах и ожидаемой величиной мы получим прямое указание на наличие нестандартных свойств нейтрино. Найденные отношения измеренных в зонах скоростей к

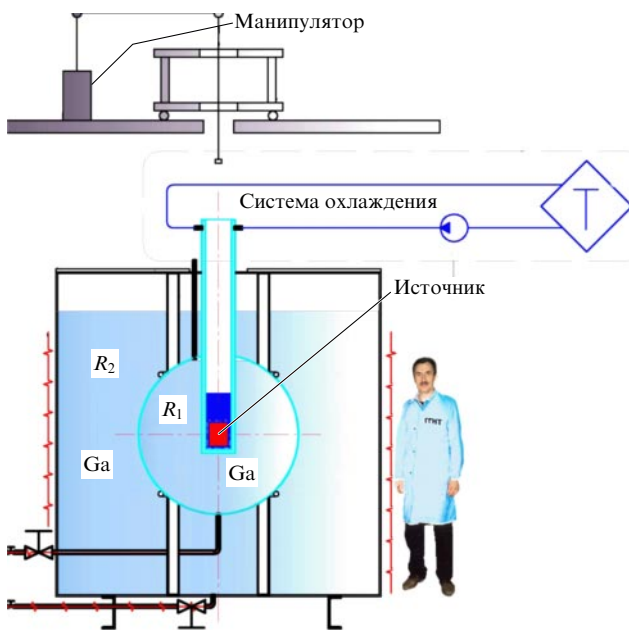


Рис. 9. Схема предлагаемого эксперимента с искусственным источником нейтрино.  $R_1$  и  $R_2$  — отношения измеренной скорости захвата соответственно во внутренней и внешней зонах к ожидаемой.

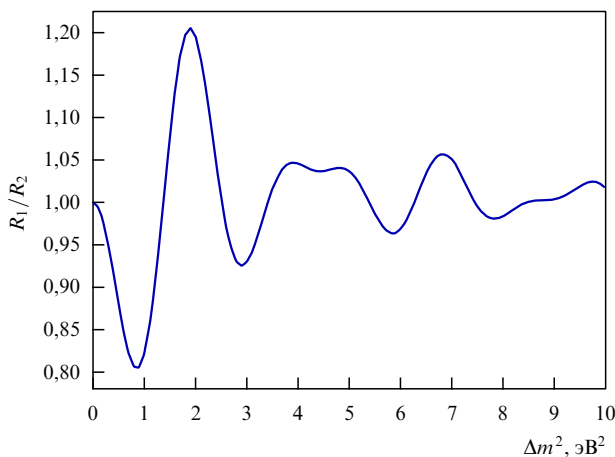


Рис. 10. Отношение скоростей во внешней и внутренней зонах в зависимости от  $\Delta m^2$  для  $\sin^2 2\theta = 0,3$ .

ожидаемым позволят определить разрешённые области параметров наблюдаемых осцилляций.

Эксперимент на Ga с искусственным источником электронных нейтрино имеет значительные преимущества перед другими проектами. Эти преимущества обеспечиваются благодаря использованию: компактного, почти монохроматического источника нейтрино с хорошо известной активностью; металлической Ga-мишени, имеющей плотность, обеспечивающую высокую скорость взаимодействия; специальной геометрии мишени, позволяющей исследовать зависимость скорости захвата нейтрино от расстояния до источника; хорошо отработанной методики измерения скорости захвата нейтрино на галлии в ГГНТ.

Очевидными преимуществами такого эксперимента являются также большое отношение сигнал/фон и простота интерпретации результатов. Дело в том, что основной вклад в фон будут давать солнечные нейтрино, поток которых хорошо известен по многолетним измерениям на ГГНТ, а активность источника должна обеспечить количество взаимодействий в детекторе, в несколько десятков раз превышающее то, которое может быть обусловлено Солнцем. Простота интерпретации результатов обусловлена тем, что искусственный источник производит монохроматический поток нейтрино, поэтому отсутствуют систематические неопределённости, связанные с неточным знанием спектра нейтрино.

С учётом сечения захвата нейтрино на Ga, рассчитанного Дж. Бакалом [33], в отсутствие осцилляций в стерильные нейтрино скорость образования от источника в начале первого облучения составит  $\sim 65$  атомов  $^{71}\text{Ge}$  в сутки в каждой зоне. Предполагается провести 10 облучений Ga, длительностью по 9 сут каждое, с перерывом 1 сут между облучениями. Будет использоваться хорошо отработанная в солнечных измерениях стандартная процедура извлечения и счёта атомов  $^{71}\text{Ge}$ . Извлечение будет проводиться отдельно из каждой зоны, и регистрация распадов  $^{71}\text{Ge}$  из каждой зоны будет выполняться в индивидуальных счётчиках. Скорость образования  $^{71}\text{Ge}$  в начале первого облучения от источника будет выше, чем от солнечных нейтрино, для внешней зоны примерно в 64 раза, а для внутренней — почти в 340 раз.

Величина статистической неопределённости серии облучений, полученная методом Монте-Карло на основе предлагаемой программы облучений, эффективностей извлечения и счёта, фоновой скорости и скорости образования от солнечных нейтрино, составляет 3,7 % в каждой зоне и  $\pm 2,6$  % для всей мишени.

Таким образом, при такой схеме проведения эксперимента ожидаемое суммарное количество накопленных в десяти экспозициях атомов  $^{71}\text{Ge}$  составит  $\sim 840 (\pm 4,5 \%)$  в каждой зоне и  $\sim 1680 (\pm 3,7 \%)$  во всей мишени (статистическая и систематическая неопределённости объединены квадратично).

## 9. Заключение

В эксперименте SAGE получено значение скорости захвата солнечных нейтрино на Ga ( $65,4 \pm 3,8$ ) SNU. Средневзвешенная скорость захвата нейтрино на Ga в трёх галлиевых экспериментах — SAGE, GALLEX и GNO — ( $66,1 \pm 3,1$ ) SNU, где статистическая и систематическая неопределённости объединены квадратично.

С использованием результатов других солнечных нейтринных экспериментов и теории нейтринных осцилляций с большим углом смешивания (LMA) в SAGE впервые получены значения потока  $\nu$ -нейтрино, имеющих при достижении ими Земли электронный аромат,  $(3,40 \pm 0,46) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и полного потока  $\nu$ -нейтрино  $(6,0 \pm 0,8) \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Галлиевые солнечные нейтринные эксперименты впервые показали, что подавляющее большинство солнечных нейтрино, приходящих на Землю, — это низкоэнергетичные нейтрино, рождённые в протон-протонной реакции, и дали прямое доказательство правильности Стандартной солнечной модели и LMA-решения для солнечных нейтринных осцилляций.

Для выяснения причин неожиданно низкой скорости захвата нейтрино на Ga в экспериментах с искусственными источниками нами разработана концепция нового эксперимента с источником нейтрино высокой интенсивности и оптимизированной геометрией Ga-мишени [34].

Эксперимент SAGE до сих пор остаётся единственным экспериментом, в котором измеряется поток  $\nu$ -нейтрино. Мы планируем продолжать мониторинг потока солнечных нейтрино и вести подготовку к новому эксперименту с высокоинтенсивным нейтринным источником и оптимизированной геометрией Ga-мишени.

**Благодарности.** Считаю своим приятным долгом выразить благодарность от SAGE M. Baldo-Ceolin, G.T. Garvey, W. Haxton, H. Ejiri, R. G. H. Robertson, А.Ю. Смирнову, А. Suzuki и нашим коллегам из коллабораций GALLEX и GNO за постоянный интерес, проявляемый ими к нашей работе, и плодотворные и стимулирующие дискуссии. Мы особенно благодарны В.А. Матвееву и В.А. Рубакову за активную поддержку в течение всего времени проведения эксперимента и внимание ко многим важным аспектам наших исследований. Мы также признательны Российскому фонду фундаментальных исследований за многолетнюю поддержку нашего эксперимента.

## Список литературы

1. Allen J S *The Neutrino* (Princeton, N.J.: Princeton, Univ. Press, 1958)
2. Bahcall J N *Neutrino Astrophysics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) [Бакал Дж *Нейтринная астрофизика* (М.: Мир, 1993)]
3. Марков М А *Нейтрино* (М.: Наука, 1964)
4. Davis R (Jr.), Harmer D S, Hoffman K C *Phys. Rev. Lett.* **20** 1205 (1968)
5. Pontecorvo V, Report PD-205 (Chalk River: National Research Council of Canada, Division of Atomic Energy, 1946)
6. Понтекорво Б М *ЖЭТФ* **53** 1717 (1967) [Pontecorvo В М *Sov. Phys. JETP* **26** 984 (1968)]
7. Кузьмин В А *ЖЭТФ* **49** 1532 (1965) [Kuz'min V A *Sov. Phys. JETP* **22** 1051 (1966)]
8. Барабанов И Р и др. *Письма в ЖЭТФ* **32** 384 (1980) [Barabanov I R et al. *JETP Lett.* **32** 359 (1980)]
9. Гаврин В Н, Захаров Ю И, Препринт П-560 (М.: ИЯИ АН СССР, 1987)
10. Захаров Ю И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ИЯИ АН СССР, 1987)
11. Гаврин В Н и др., Препринт П-698 (М.: ИЯИ АН СССР, 1991)
12. Глотов В И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ИЯИ АН СССР, 1979)
13. Панченко В П и др. *Вопросы атомной науки и техники* **21** (3(21)) (1989)
14. Peña-Garay C, Serenelli A M, arXiv:0811.2424

15. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **60** 055801 (1999); astro-ph/9907113
16. Danshin S, Kopylov A, Yants V *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **349** 466 (1994)
17. Cleveland B T *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **214** 451 (1983)
18. Hampel W, Rensberg L P *Phys. Rev. C* **31** 666 (1985)
19. Абдурашитов Д Н и др. (SAGE Collab.) *ЖЭТФ* **122** 211 (2002) [Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *JETP* **95** 181 (2002)]
20. Abdurashitov J N (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **80** 015807 (2009); arXiv:0901.2200
21. Kaether F et al. *Phys. Lett. B* **685** 47 (2010); arXiv:1001.2731
22. Arpesella C et al. (Borexino Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 091302 (2008)
23. Aharmim B et al. (SNO Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **101** 111301 (2008)
24. Cleveland B T et al. *Astrophys. J.* **496** 505 (1998)
25. Abazov A I et al. *Phys. Rev. Lett.* **67** 3332 (1991)
26. Anselmann P et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **285** 376 (1992)
27. Abdurashitov J N et al. (SAGE Collab.) *Phys. Rev. C* **59** 2246 (1999)
28. Abdurashitov J N et al. *Phys. Rev. C* **73** 045805 (2006)
29. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **420** 114 (1998)
30. Hampel W et al. (GALLEX Collab.) *Phys. Lett. B* **436** 158 (1998)
31. Haxton W C *Phys. Lett. B* **431** 110 (1998)
32. Giunti C, Laveder M *Phys. Rev. D* **82** 053005 (2010); arXiv:1005.4599
33. Bahcall J N *Phys. Rev. C* **56** 3391 (1997); hep-ph/9710491
34. Gavrin V N et al., arXiv:1006.2103

PACS numbers: 29.40.Ka, 95.55.Vj  
DOI: 10.3367/UFNr.0181.201109h.0984

## Байкальский нейтринный эксперимент

Г.В. Домогацкий

### 1. Введение

Байкальский нейтринный эксперимент уходит своими корнями в 1959–1960 гг., когда М.А. Марков [1] высказал идею постановки крупномасштабных подземных и глубоководных экспериментов для изучения свойств нейтрино и природных источников их происхождения. Идея оказалась чрезвычайно плодотворной. Проведение исследований при резко сниженном уровне фона проникающего космического излучения в условиях, когда огромные объёмы окружающего грунта или воды сами служат мишенями для нейтрино высоких энергий, позволило достичь принципиально нового уровня чувствительности экспериментов, сделало доступным для изучения редкие процессы, поиск которых в наземных лабораториях практически невозможен. Подземное направление развивалось быстро, и оно уже имеет в своём активе такие выдающиеся результаты, как регистрация всплеска нейтринного излучения, сопутствовавшего взрыву сверхновой 1987а в Большом Магеллановом Облаке; установление ограничения на время жизни протона; проведение исследования нейтринного излучения Солнца и обнаружение эффекта нейтринных осцилляций; уверенное выделение первых событий от нейтрино, образующихся при распаде радиоактивных элементов уранового и ториевого ряда в недрах Земли.

Развитие глубоководного направления началось примерно на 15 лет позднее и набирало темпы достаточно

Г.В. Домогацкий. Институт ядерных исследований РАН,  
Москва, РФ  
E-mail: domogats@pcba10.inr.ruhep.ru