

**Поиск осцилляционных переходов $\nu_e \rightarrow \nu_x$
на очень коротких расстояниях с источником нейтрино ^{51}Cr
на двойной металлической Ga мишени
Баксанского галлий-германиевого нейтринного телескопа**

BEST

(Baksan Experiment on Sterile Transitions)

BEST collaboration

Е.П. Веретенкин, В.Н. Гаврин, В.В. Горбачев, Д.С. Горбунов, С.Н. Даньшин,
Т.В. Ибрагимова, А.В. Калихов, Т.В. Кнодель, Ю.П. Козлова, В.В. Кузьминов,
Ю.М. Малышкин, В.А. Матвеев¹,

И.Н. Мирмов, А.А. Шихин, В.Э. Янц

Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

¹*Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

B.T. Cleveland
SNOLAB, Canada

H. Ejiri,
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Japan

S.R. Elliott
Los Alamos National Laboratory, USA

D. Frekers
Institut für Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität, Münster, Germany

W. Haxton
*Lawrence Berkeley National Laboratory, USA
University of California, Berkeley, USA*

R. Henning, J.F. Wilkerson,
*University of North Carolina, Chapel Hill
Triangle Universities Nuclear Laboratory, Durham, NC, USA*

J.S. Nico
National Institute of Standards and Technology, USA

R.G.H. Robertson
*Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, USA
University of Washington, USA*

D. Sinclair
Carleton University, Canada

A. Suzuki
KEK, High Energy Accelerator Research Organization, Japan

Аннотация

Галлий-германиевый нейтринный телескоп Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН предоставляет уникальные возможности для исследований, направленных на решение наиболее острых проблем фундаментальной науки - отсутствие антивещества во Вселенной и природы темной материи. В поисках решения этих проблем внимание мирового научного сообщества сконцентрировано на гипотезе существования стерильных нейтрино - гипотетических частиц, взаимодействие которых с веществом осуществляется через небольшое смешивание с обычными (т.е. активными) нейтрино. В настоящее время в мире активно обсуждается более полусотни возможных вариантов ее экспериментального решения.

Мы предлагаем эксперимент по поиску стерильных нейтрино, основанный на исследовании взаимодействия нейтрино от мощного компактного искусственного источника с ядрами галлия на мишени Галлий-германиевого нейтринного телескопа. Уникальный сверхчувствительный Галлий-германиевый нейтринный телескоп с 50 тоннами металлического галлия расположен в низкофоновых условиях, глубоко под поверхностью Земли и успешно работает уже более 20 лет в солнечном нейтринном эксперименте SAGE. Высококвалифицированный научно-исследовательский коллектив лаборатории Галлий-германиевого нейтринного телескопа имеет опыт работы с мощными искусственными источниками нейтрино, и Россия имеет уникальный опыт и технические возможности их изготовления.

В эксперименте планируется поместить нейтринный источник ^{51}Cr активностью 3МКи в центр металлической Ga мишени телескопа, разделенной на две концентрические зоны, внутреннюю и внешнюю, с равными средними длинами пробега нейтрино, и измерить скорость захвата нейтрино на галлии в каждой зоне.

Статистически значимые различия между величинами скорости захвата нейтрино в зонах могут дать прямое доказательство реального физического эффекта исчезновения электронных нейтрино, возможных переходов активных нейтрино в стерильные состояния. Осцилляционная сигнатура, определяемая отношением числа событий во внутренней и внешней зонах, в значительной степени свободна от систематических неопределенностей, таких как сечение или мощность источника.

Этот проект, в сравнении с другими проектами, имеет ряд преимуществ: хорошо известный спектр нейтрино, большая величина отношения сигнала к фону, простота интерпретации результатов.

Предлагаемый эксперимент имеет чувствительность на уровне нескольких процентов к исчезновению электронных нейтрино и обладает потенциалом поиска переходов активных нейтрино в стерильные состояния с осцилляционными параметрами $\Delta m^2 > 0.5 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta > 0.1$.

Реализация предложенного эксперимента по поиску стерильных нейтрино будет не только существенным вкладом в проблему, находящуюся на переднем фронте фундаментальной науки, но и подтвердит наши сохраняющиеся до сих пор позиции одного из мировых лидеров в области физики нейтрино и нейтринной астрофизики.

I Введение

Открытие нейтринных осцилляций стало прямым вызовом полноте Стандартной модели физики частиц. Космология предоставляет два других экспериментальных доказательства отсутствия такой полноты: это загадка темной материи и барионная асимметрия Вселенной. Примечательно, что все эти явления можно объяснить модификацией лишь одного нейтринного сектора Стандартной модели [1]. Поэтому исследования нейтринного сектора важны не только для построения полной модели физики частиц, но и для понимания развития Вселенной, уточнения её современного состава [2].

В предлагаемом эксперименте мы планируем исследование гипотетических стерильных нейтрино с массами более 0.5 эВ и немалыми углами смешивания с активными нейтрино. Интерес к таким моделям заметно вырос за последние несколько лет благодаря появлению новых экспериментальных данных, не укладывающихся в стандартную схему с тремя лёгкими (активными) нейтрино.

В последнее время появились указания из космологии на возможное присутствие лёгких стерильных нейтрино в первичной плазме в ранней Вселенной. В ранней Вселенной лёгкие стерильные нейтрино с немалым смешиванием находятся в термальном равновесии с частицами Стандартной модели и после выхода из равновесия по-прежнему оказывают влияние на темп расширения Вселенной наряду с обычными нейтрино. Современные космологические данные лучше согласуются с теоретическими предсказаниями, если допустить присутствие одной дополнительной лёгкой фермионной компоненты (стерильное нейтрино) в эпоху первичного нуклеосинтеза [3] и в эпоху рекомбинации [4]. В ходе дальнейшего расширения Вселенной стерильные нейтрино с массой ~ 1 эВ становятся нерелятивистскими и в современную эпоху входят в компоненту тёмной материи.

На протяжении многих лет все прямые экспериментальные данные неплохо укладывались в схему с тремя активными нейтрино [5]: есть две ненулевые разницы квадратов масс нейтрино, два больших и один малый углы смешивания. Единственным исключением был эксперимент LSND, который заявил обнаружение осцилляций между мюонными и электронными антинейтрино, соответствующих разности квадратов масс около 1 эВ^2 [6]. Этот результат не вписывался в

стандартную схему трёх нейтрино, и требовал введения в теорию как минимум одного лёгкого стерильного нейтрино. Результаты проверки существования осцилляций с такими параметрами в различных экспериментах (NOMAD [7], KARMEN [8]) оказались противоречивыми, полностью всю область параметров, заявленную экспериментом LSND, исключить не удалось.

Вопрос о существовании и природе стерильных нейтрино с массой около 1 эВ получил новое развитие в последние несколько лет, и это связано как с появлением новых “аномальных” результатов в экспериментах по изучению нейтринных осцилляций, так и с некоторой корректировкой космологических данных. Во-первых, эксперимент MiniBooNE, исследуя осцилляции $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$, в первом цикле работы получил результат [9], согласующийся с результатом LSND. При этом осцилляции $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ согласуются со стандартной 3-х нейтринной картиной, а для низкоэнергетических событий (эксперимент MiniBooNE работает с довольно широкими пучками нейтрино и антинейтрино) наблюдается аномальное поведение в обоих каналах [10], вообще непохожее на сигнал от осцилляций. Во-вторых, были пересмотрены оценки потоков реакторных антинейтрино [11], так что результаты соответствующих экспериментов стали указывать на некоторый дефицит (к сожалению, неопределённость оценок довольно велика), что поддерживает гипотезу об осцилляциях $\bar{\nu}_e$ с параметром $\Delta m^2 \sim 1$ эВ [12]. Комбинированный анализ всей совокупности экспериментальных данных показывает, что есть возможность объяснить имеющиеся результаты, если добавить два стерильных нейтрино с массами ~ 0.5 эВ [13]. Та же физика, возможно, ответственна и за результаты калибровочных экспериментов SAGE и GALLEX с искусственными источниками нейтрино [14,15].

В свете вышеизложенного прямая проверка гипотезы об осцилляциях в стерильные нейтрино с $\Delta m^2 \sim 1$ эВ представляется крайне важной. Нейтринный сектор существенно отличается от сектора кваркового, и здесь, возможно, скрыто ещё много загадок, не только для физики частиц, но и для астрофизики, космологии. Нейтрино рождаются в термоядерных реакциях, и детали их взаимодействия влияют на звёздную эволюцию. Понимание физики лёгких нейтрино важно для построения надёжных систем мониторинга термоядерных процессов во внутренних частях Солнца и ядерных процессов в центре Земли [16],

использования нейтрино для исследования внутренней структуры Земли [17]. Определение полного набора легких нейтрино, масс и смешивания позволит уменьшить вырождение между космологическими параметрами [2], что важно для понимания природы тёмной энергии.

II SAGE и Ga эксперименты с источниками нейтрино

1. Краткий обзор эксперимента SAGE

Эксперимент SAGE (Soviet American Gallium Experiment) [18,19] был создан с целью получения информации для решения проблемы дефицита нейтрино, наблюдаемого в Cl эксперименте, в котором было зарегистрировано лишь около одной трети величины скорости захвата, предсказываемой Стандартной Солнечной Моделью.

Особенностью этого эксперимента, отличающей его от всех других экспериментов, является его чувствительность к низкоэнергетичной части солнечного нейтринного спектра и, что особенно важно, высокой чувствительностью к реакции протон-протонного синтеза $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$, в которой генерируется подавляющая часть солнечной энергии, и которая практически не зависит от параметров солнечных моделей. На сегодняшний день SAGE единственный эксперимент, обеспечивающий прямое измерение нынешней скорости этой реакции.

1.1. Лаборатория Галлий-германиевого нейтринного телескопа

Измерения в эксперименте SAGE выполняются на Галлий-германиевом нейтринном телескопе (ГГНТ), который размещен в специально построенной подземной лаборатории глубокого заложения Баксанской нейтринной обсерватории Института ядерных исследований Российской академии наук в горах Северного Кавказа в Приэльбрусье. Подземный комплекс лаборатории ГГНТ расположен на расстоянии 3.5 км от входа горизонтального тоннеля, ведущего внутрь горы Андырчи (Рис.1). Толща горных пород над лабораторией соответствует 4700 метрам водного эквивалента, поток мюонов в месте

размещения ГГНТ подавлен в миллионы раз. Лаборатория ГГНТ занимает второе место в мире по глубине заложения среди действующих подземных лабораторий.

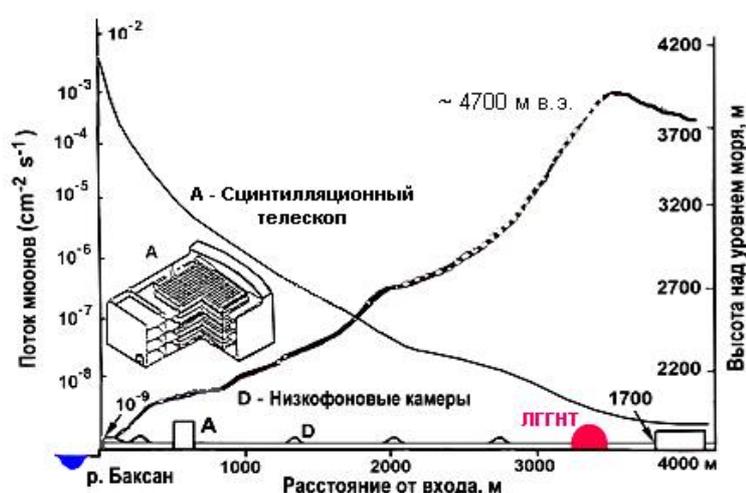


Рис. 1. Профиль горы, кривая потока мюонов и схема расположения подземных лабораторий БНО.

Главный экспериментальный зал лаборатории ГГНТ представляет собой камерную выработку цилиндрической формы длиной 60 м, диаметром 15 м, шириной в основании 12 м и высотой 10 м. Для снижения нейтронного и γ -фона от окружающих горных пород зал облицован низкорadioактивным бетоном толщиной 600мм и стальным листом толщиной 6 мм. Для устройств рабочих комнат, щитовых, площадок размещения технологического оборудования в лаборатории на разных уровнях смонтированы несущие металлоконструкции. В подземном комплексе расположены также помещения для аналитической химии, системы регистрации распадов ^{71}Ge , низкофонового полупроводникового Ge детектора. Вспомогательное оборудование инженерных систем размещается в отдельных горных выработках, смежных с лабораторией. Часть вспомогательных производственных помещений находятся в лабораторных зданиях, расположенных на поверхности.

1.2. Схема эксперимента

В эксперименте SAGE поток нейтрино определяется по результатам измерений скорости реакции захвата нейтрино на металлическом галлии $^{71}\text{Ga}(\nu_e, e^-)^{71}\text{Ge}$ в ГГНТ. Порог реакции составляет 233 кэВ и позволяет регистрировать нейтрино от всех нейтрино-образующих реакций, протекающих согласно Стандартной

Солнечной Модели (ССМ) в Солнце, в том числе нейтрино от pp -реакций, максимальная энергия которых 420 кэВ.

Галлиевая мишень телескопа состоит из примерно 50 тонн металлического галлия, размещенного в 7 химических реакторах (Рис.2). Галлий в реакторах содержится в виде жидкого металла при температуре около 31°C (температура плавления галлия составляет 29.8°C). Измерения носят циклический характер. Каждое измерение скорости захвата солнечных нейтрино (ран) в эксперименте SAGE начинается с добавления в галлиевую мишень носителя – стабильного германия в виде сплава Ga-Ge таблеток с известным количеством германия (около 250 мкг). Посредством тщательного перемешивания германий равномерно распределяется в реакторах по всей массе галлия.



Рис.2. Главный экспериментальный зал Галлий-германиевого нейтринного телескопа эксперимента SAGE.

По окончании экспозиции (примерно 4 недели) германиевый носитель вместе с атомами ^{71}Ge , образовавшимися от реакции захвата солнечных нейтрино, химически извлекается из галлия.

Извлеченный германий (носитель и атомы ^{71}Ge) переводится в газообразную форму GeH_4 (моногерман) помещается в пропорциональный счетчик.

Полная эффективность извлечения атомов ^{71}Ge равна эффективности извлечения стабильного германия, которая определяется как отношение массы германия в моногермане к внесенной массе германия-носителя и в среднем составляет $95 \pm 3\%$.

Счетчик с полученным в извлечении GeH_4 помещается в колодец детектора NaI , расположенного внутри большой пассивной защиты Рис. 3, где в течение 5 месяцев производится регистрация событий от распадов ^{71}Ge в счетчике. Процедуры извлечения и счета извлеченных атомов подробно описаны в [18,20-22].

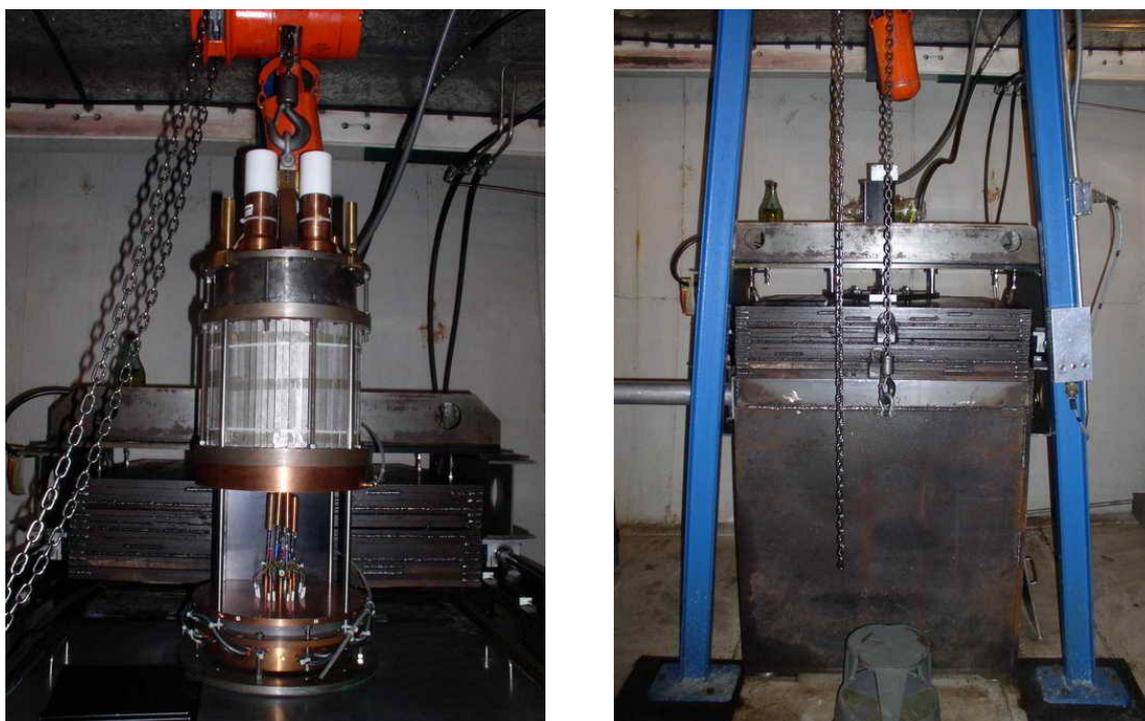


Рис.3. Слева счетчики в колодце детектора NaI ; справа большая пассивная защита.

2. Ga эксперименты с искусственными источниками нейтрино

Уже из первых результатов измерений, начатых в 1990-х годах, в SAGE [23] и в GALLEX [24] был получен низкий поток нейтрино, который не мог быть объяснен в рамках ССМ. В силу важности заключений, к которым приводили эти результаты, что нейтрино меняют аромат и имеют массу, требовались доказательства, подтверждающие, что мы правильно знаем эффективности всех процедур, используемых в эксперименте.

Для полной проверки всех экспериментальных процедур, используемых в солнечных галлиевых измерениях, включая сечение взаимодействия нейтрино,

химическое извлечение, счет ^{71}Ge и технику анализа, были проведены калибровочные эксперименты с интенсивными искусственными источниками нейтрино. На каждом из детекторов – SAGE и GALLEX – было выполнено по два независимых эксперимента.

В эксперименте SAGE около 25% мишени облучалось источниками на основе изотопов ^{51}Cr [25] и ^{37}Ar [26]. В эксперименте GALLEX дважды использовался источник на основе изотопа ^{51}Cr для облучения всей мишени [27,28]. Оба источника испускают практически моноэнергетические нейтрино с энергией, близкой к энергии солнечных ^7Be нейтрино: 0.75 МэВ для ^{51}Cr и 0.81 МэВ для ^{37}Ar . В Таблице 1 представлены результаты для каждого из этих экспериментов. В отличие от солнечных измерений скорость взаимодействия нейтрино от источников пропорциональна плотности мишени. В эксперименте SAGE мишень в форме металлического Ga, плотность которого значительно выше, чем в эксперименте GALLEX, у которого мишенью является раствор хлорида Ga в соляной кислоте. Поэтому, хотя активности источников отличались в 3-4 раза и масса мишени в 2.3 раза, статистические неопределенности экспериментов имеют близкие значения.

Таблица 1. Результаты четырех Ga экспериментов с искусственными источниками нейтрино. $p_{\text{изм}}$ – измеренная скорость образования ^{71}Ge от источников. R – отношение $p_{\text{изм}}$ к ожидаемой скорости образования в отсутствие осцилляций – $p_{\text{теор}}$.

	SAGE ^{51}Cr	SAGE ^{37}Ar	GALLEX Cr1	GALLEX Cr2
Активность, кКи	516.6±6.0	409±2	1714 ⁺³⁰ ₋₄₃	1868 ⁺⁸⁹ ₋₅₇
$p_{\text{изм}}$, атомов ^{71}Ge /сут	14.0±1.5±0.8	11.0 ^{+1.0} _{-0.9} ±0.6	11.9±1.1±0.7	10.7±1.2±0.7
Масса Ga (т)	13.1 (метал.)	13.1 (метал.)	30.4 (GaCl ₃ :HCl)	30.4 (GaCl ₃ :HCl)
$R=p_{\text{изм}}/p_{\text{теор}}$	0.95±0.12	0.79±0.10	0.953±0.11	0.812±0.11

Средневзвешенное значение результатов четырех экспериментов R , выраженное как отношение измеренной скорости образования ^{71}Ge к ожидаемой, полученной из измеренной активности источника и известного сечения захвата нейтрино на Ga [29], $R = 0.87±0.05$, более чем на два стандартных отклонения меньше единицы.

Возможные причины такого низкого результата детально рассмотрены в [20]. Одно из предположений о завышенном сечении захвата нейтрино на два нижних

возбужденных уровня ^{71}Ge [30] не получило подтверждения. Для понимания причины низкого результата в научно-исследовательском центре ядерной физики RCNP (Осака, Япония) по нашей инициативе были выполнены прецизионные измерения реакции перезарядки $^{71}\text{Ga}(^3\text{He},t)^{71}\text{Ge}$ для оценки вклада возбужденных уровней ^{71}Ge в сечение захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga [31]. Результаты измерений показали, что величина вклада этих уровней хорошо согласуется с величиной, вычисленной Дж. Бакалом [29]. Таким образом, причиной дефицита нейтрино в калибровочных Ga экспериментах может быть статистическая флуктуация, вероятность которой мала, около 5%, или реальный физический эффект, возможно, переход электронных нейтрино в стерильные состояния на очень коротких расстояниях с большими Δm^2 [15]. Область допустимых осцилляционных параметров, полученная из результатов четырех Ga экспериментов с источниками в предположении, что переходы в стерильные нейтрино имеют место, показана на Рис. 4.

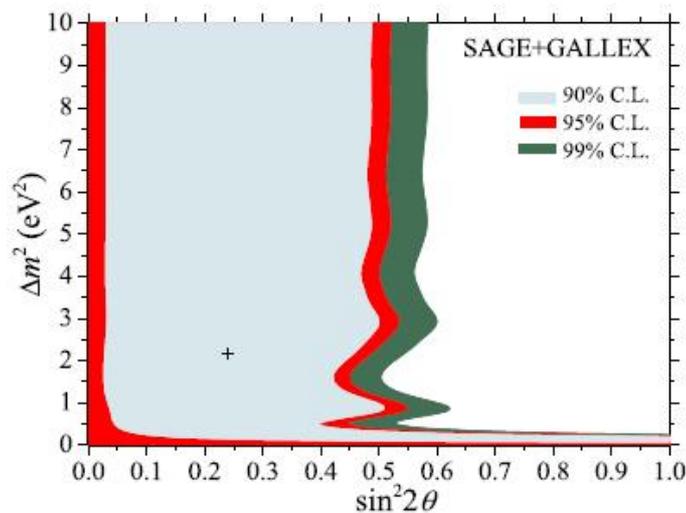


Рис.4. Пределы на параметры осцилляций, полученные в четырех экспериментах с нейтринными источниками в SAGE и GALLEX. Знак «+» при $\Delta m^2=2.15$ эВ² и $\sin^2 2\theta=0.24$ обозначает наиболее вероятное значение (best fit).

В предлагаемом новом Ga эксперименте с искусственным источником нейтрино ^{51}Cr активностью 3 МКи будет подтверждена или исключена гипотеза о существовании переходов электронных нейтрино в стерильные состояния с большими Δm^2 .

III Новый 2-зонный Ga эксперимент с источником

1. Основные характеристики предлагаемого эксперимента

Мы предлагаем эксперимент по исследованию исчезновений электронных нейтрино на коротких расстояниях от источника. Схема предлагаемого эксперимента по исследованию осцилляционных переходов активных нейтрино в стерильные состояния представлена на Рис. 5.

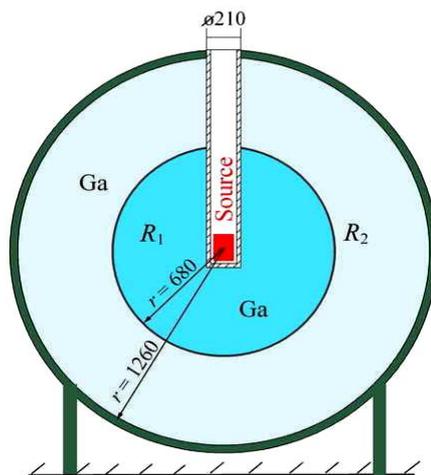


Рис. 5. Схема предлагаемого эксперимента. R_1 и R_2 – отношения измеренной скорости захвата к ожидаемой скорости во внутренней и внешней зонах, соответственно.

В центр металлической Ga мишени телескопа массой 50 тонн, разделенной на две независимые внутреннюю и внешнюю зоны с 7.5 и 42.5 тоннами Ga, обеспечивающими равные средние длины пробега нейтрино, помещается источник электронных нейтрино ^{51}Cr активностью 3 МКи и измеряются скорости захвата нейтрино одновременно в каждой зоне.

Источник ^{51}Cr испускает нейтрино с энергией 0.75 МэВ (90 %) и 0.43 МэВ (10 %). Поскольку 96% захватов на Ga происходит от нейтрино с энергией 0.75 МэВ, то с хорошим приближением источник можно рассматривать как монохроматический (поправка на немонохроматичность учитывается в численных оценках).

Если осцилляции в стерильные нейтрино происходят, то волновая функция нейтрино, описывающая чистое ν_e состояние в источнике, будет содержать амплитуду, которая осциллирует в зависимости от увеличения расстояния от

источника. Возникающий стерильный компонент не взаимодействует с галлием, и измеренная скорость захвата будет отличаться от величины, ожидаемой в отсутствие осцилляций. В модели с одним стерильным нейтрино вероятность выживания электронного нейтрино с энергией E после прохождения расстояния L от источника описывается выражением: $P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2(eV^2) \cdot L(m)}{E_\nu(MeV)})$, где Δm^2 — разница квадратов масс собственных состояний нейтрино и θ — их угол смешивания. Детектор, показанный на Рис. 5 чувствителен к этому типу осцилляций, поскольку две галлиевые мишени находятся на разных расстояниях от источника. Вероятности взаимодействия нейтрино в каждой мишени в зависимости от Δm^2 показаны на Рис. 6 вместе с отношением скоростей событий. Это отношение особенно чувствительно к осцилляциям, поскольку оно не зависит ни от мощности источника, ни от сечения, таким образом исключая эти основные систематические ошибки.

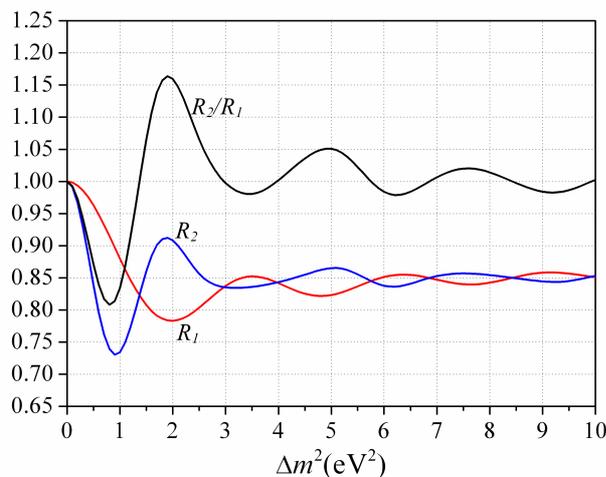


Рис. 6. Отношение измеренной скорости захвата к ожидаемой скорости во внутренней (R_1) зоне и внешней (R_2) зоне и их отношение R_2/R_1 в зависимости от Δm^2 для угла смешивания $\sin^2 2\theta = 0.3$.

Статистически значимое отклонение скоростей захвата нейтрино в зонах R_1 или R_2 обеспечит прямое указание на нестандартные свойства нейтрино. Полученное отношение скоростей захвата будет указывать на новые свойства нейтрино, которые могут быть дополнительно ограничены включением результатов предыдущих галлиевых экспериментов. Области чувствительности нового 2-

зонного Ga эксперимента с 3 МКи источником ^{51}Cr с результатами предыдущих Ga экспериментов представлены на Рис. 7.

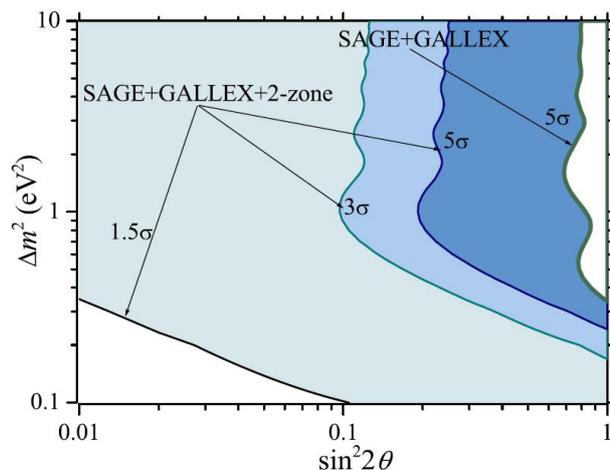


Рис.7. Области чувствительности нового Ga эксперимента с источником ^{51}Cr для разных уровней достоверности (5σ , 3σ и 1.5σ C.L.) с учетом результатов предыдущих экспериментов SAGE и GALLEX. Белая область справа исключена на уровне достоверности 5σ предыдущими экспериментами SAGE и GALLEX.

Предлагаемый эксперимент обладает значительными преимуществами по отношению к другим проектам. Эти преимущества обеспечиваются использованием компактного, почти монохроматического источника нейтрино хорошо известной активности; металлической Ga мишенью, имеющей плотность, обеспечивающую высокую скорость взаимодействия; специальной геометрией мишени, дающей возможность исследования зависимости скорости захвата нейтрино на двух расстояния, а также хорошо отработанной методикой измерения скорости захвата нейтрино на галлии в Галлий-германиевом нейтринном телескопе.

Очевидное преимущество этого эксперимента в значительной величине отношения сигнал/фон и простоте интерпретации результатов. Основной вклад в фон будут давать нейтрино от Солнца, поток которых хорошо известен по многолетним измерениям на телескопе, а активность источника должна обеспечить количество взаимодействий в детекторе в несколько десятков раз превышающее то, что можно ожидать от Солнца. Простота интерпретации результатов обеспечивается тем, что искусственный источник производит монохроматический поток нейтрино, поэтому нет систематических неопределенностей, связанных с неточным знанием спектра нейтрино.

Предлагаемый новый эксперимент на исчезновение электронных нейтрино с искусственным источником электронных нейтрино высокой интенсивности и оптимизированной геометрией Ga мишени дает возможность исследовать переходы активных нейтрино в стерильные нейтрино с $\Delta m^2 > 0.5 \text{ эВ}^2$ с чувствительностью к исчезновению электронных нейтрино в несколько процентов.

Наряду с подтверждением или исключением гипотезы о существовании стерильных нейтрино будет выполнена прямая проверка сечения захвата нейтрино на ядрах ^{71}Ga .

2. Этапы и методы подготовки эксперимента

Этапы подготовки:

1. Нарботка 3.5 кг ^{50}Cr с обогащением 97%.
2. Изготовление искусственного источника нейтрино
 - a) нейтронно-физические расчеты и расчеты трансмутации ядер, планирование и обработка результатов экспериментов, ведущие к выпуску технической документации;
 - b) разработка и изготовление облучательного устройства и реакторных мишеней из обогащенного хрома;
 - c) тестовое облучение реакторной мишени с обогащенным хромом для определения содержания примесных радионуклидов;
 - d) оптимизация конструкции и размеров биологической защиты источника;
 - e) полномасштабный эксперимент на физической модели реактора СМ для проверки результатов расчетов и оптимизации режима облучения;
 - f) расчетно-экспериментальное обоснование безопасности облучения реакторных мишеней с хромом;
 - g) разработка и изготовление комплектующих и внутрикамерных устройств, необходимых для сборки источника;
 - h) полномасштабное облучение обогащенного хрома в центральном канале реактора СМ;
 - i) сборка и предварительная аттестация источника нейтрино;
 - j) транспортировка источника нейтрино Заказчику
3. Изготовление защиты для источника.

4. Изготовление калориметра для измерения активности источника.
5. Разработка метода определения активности источника по измерению спектров внутреннего тормозного излучения (ВТИ).
6. Изготовление манипулятора для источника.
7. Изготовление концентрических емкостей для облучения 50 тонн Ga.
8. Модернизация системы извлечения.
9. Изготовление второй счетной системы.
10. Изготовление ~20 новых пропорциональных счетчиков УСТ-типа.

В следующих разделах мы обсуждаем наши подготовительные работы и методы для выполнения каждого из этих этапов.

2.1. Нарботка 3.5 кг ^{50}Cr

Природный хром состоит из 4 стабильных изотопов ^{50}Cr , ^{52}Cr , ^{53}Cr , ^{54}Cr . Интересующий нас изотоп ^{50}Cr составляет лишь 4.35% природного хрома. Нейтронная активация ^{52}Cr и ^{53}Cr образует стабильные изотопы, в то время как активация ^{54}Cr образует радиоактивный ^{55}Cr . Так как ^{55}Cr имеет период полураспада всего 3.5 мин, ^{51}Cr – будет единственным радиоактивным изотопом хрома, присутствующим в источнике.

Нарботка 3.5 кг изотопа хром-50 с обогащением не менее 97% в форме хромового ангидрида (CrO_3) будет выполнена методом центробежного разделения изотопов в ОАО «ПО «Электрохимический завод».

Газокинетические методы разделения изотопов, включая центрифугирование, могут быть использованы только в том случае, если рабочее вещество находится в газообразном состоянии. Кроме природных газообразных химических элементов, современной химии известны многие соединения, обладающие летучестью.

Основным условием для использования в центрифугировании химического соединения, содержащего подвергающийся изотопному разделению элемент, является величина давления насыщенных паров вещества при комнатной температуре более 5 - 10 мм рт. ст.. В противном случае не будет достигаться должное газонаполнение центрифуги и, как следствие, достаточные потоки, обеспечивающие приемлемую производительность.

Рабочее вещество не должно взаимодействовать с материалами, из которых изготовлены ротор центрифуги, газовые трассы и коммуникации центробежной разделительной установки. Химическая и температурная стойкость используемых соединений должна быть достаточной, т.е. чтобы оно не переходило в нелетучие формы (окислы, элементарную и др.).

Чтобы получить обогащенный хром-50, необходимо:

1. Произвести летучее химическое соединение хрома - хромилфторид (CrO_2F_2) в количестве многих десятков килограммов (специальная и непромышленная технология)

2. Провести разделение на каскаде центрифуг и собрать обогащенную до нужной концентрации легкую фракцию - $^{50}\text{CrO}_2\text{F}_2$

3. Гидролизовать обогащенный газ $^{50}\text{CrO}_2\text{F}_2$ и получить окись - $^{50}\text{CrO}_3$

На всех этапах важно обеспечить надлежащую химическую чистоту, чтобы конечный металл обладал достаточно низким уровнем примесей, позволяющим активирование хрома-51 в реакторе.

Первое крупномасштабное обогащение ^{50}Cr было выполнено в «Курчатовском институте» для эксперимента SAGE Баксанской нейтринной обсерватории [32, 33]. Было произведено 0,8 кг материала 90% обогащения. Затем в «Курчатовском институте» было произведено около 40 кг хрома-50 с обогащением более 38% для западноевропейской коллаборации GALLEX [34].

Накопленный опыт производства источников для экспериментов SAGE и GALLEX показал, что важно иметь оптимально необходимые сочетания возможностей реактора и характеристик облучаемой хромовой мишени. Основной характеристикой является количество содержащегося в мишени изотопа хром-50. Это может быть достигнуто при различном содержании хрома-50 и массе мишени. От значения комбинации «масса-обогащение» зависит большая часть физических и технических параметров получаемого источника нейтрино, а также его стоимость. Так, например, объем облучаемого хрома лимитирован геометрией активной зоны используемого реактора, где обеспечивается требуемый поток нейтронов.

Особенность настоящего проекта состоит в том, что необходимо получить 3,5 кг хрома-50 высокого обогащения - 97%, и это существенно отличает данную задачу от ранее выполненных. Требуемое обогащение хрома-50 не может быть

достигнуто при однократном проведении процесса обогащения на разделительном каскаде. На предварительной стадии необходимо провести расчеты разделительного режима, осуществить его оптимизацию по параметрам: время работы/расход исходного хромилфторида, учесть влияние «изотопной памяти» оборудования, оценить возможные потери работы разделения при получении хромового ангидрида. Это даст основания для выбора количества необходимых разделительных ступеней, параметров компоновки каскада, обеспечения необходимых уровней потоков питания исходным газом и отбора ценной фракции.

Выработанные решения будут технически реализованы для последующего осуществления технологического процесса обогащения хрома-50 в необходимом количестве, должного обогащения и химической чистоты.

2.2. Источник нейтрино

В качестве искусственных источников нейтрино в предыдущих экспериментах с источниками использовались изотопы ^{51}Cr и ^{37}Ar . Эксперимент SAGE с источником ^{37}Ar показал, что этот источник имеет преимущества по сравнению с источником ^{51}Cr : отсутствие радиоактивных примесей, возможность применения нескольких независимых методов измерений активности, более высокая энергия нейтрино, обеспечивающая более высокую скорость захвата, и т.д. К сожалению, в настоящее время изготовление источника ^{37}Ar с активностью 1 МКи или выше не представляется возможным. Поэтому в эксперименте будет использован источник ^{51}Cr , который будет наработан методом захвата тепловых нейтронов на стабильном изотопе ^{50}Cr , содержание которого в природном Cr составляет 4.35%.

^{51}Cr распадается посредством электронного захвата с периодом полураспада 27,7 суток, Рис.8. В схеме присутствуют две линии распада, одна линия, вероятность которой 90.12%, распадается в основное состояние ^{51}V , а вторая, 9.88%, распадается с переходом на первый возбужденный уровень ^{51}V , который, излучая γ -квант с энергией 320 кэВ, переходит в основное состояние.

Учитывая атомные уровни, на которые могут осуществляться переходы, источник будет излучать нейтрино с энергиями 752 кэВ (9 %), 747 кэВ (81 %), 432 кэВ (1 %), и 427 кэВ (9 %). Поскольку 96% захватов на Ga происходит от нейтрино

с энергией 0.75 МэВ, то с хорошим приближением источник можно рассматривать как монохроматический.

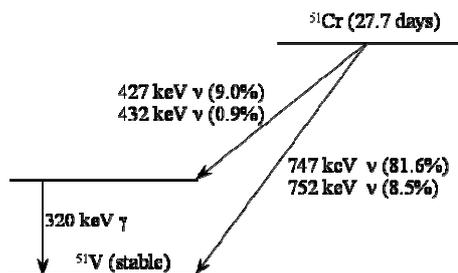


Рис. 8. Схема распада ^{51}Cr .

Скорость захвата нейтрино от источника ^{51}Cr активностью 3 МКи в 50 тонной галлиевой мишени в сутки будет в ~ 130 раз превышать скорость захвата солнечных нейтрино.

2.2.1. Изготовление источника

В ОАО «ПО «Электрохимический завод» будет изготовлено 3.5 кг хрома с обогащением по изотопу ^{50}Cr не менее 97% в форме оксида хрома сверхвысокой очистки. В ИЯИ РАН из оксида Cr с использованием электрохимической процедуры будет получен порошкообразный металлический хром высокой чистоты. Методом газостатического прессования в ОАО «Композит» будут изготовлены из порошка заготовки из компактного металлического хрома, из которых электроискровым способом будут получены мишени для облучения в виде шестигранных стержней с диаметром описанной окружности 9,3 мм и длиной 95 мм. Общее количество стержней – 81 шт., масса – 3015г.

^{51}Cr источник нейтрино будет изготавливаться в ОАО «ГНЦ НИИАР». Облучение ^{50}Cr будет выполнено в реакторе СМ-3. Хромовые стержни будут размещены в 27 ячейках центральной нейтронной ловушки реактора СМ, где плотность нейтронного потока составляет 5.0×10^{14} нейтронов/(см² с), и облучение будет продолжаться в течение 58.9 эффективных суток (69 календарных дней). По расчетам к концу облучения удельная активность мишени достигнет величины 1016 Ки/г, и ее полная активность должна составить 3.20 МКи. Облученные стержни размещаются в сепараторе, представляющем собой сотовую структуру,

изготовленную методом селективного лазерного плавления, находящемся в цилиндрической герметичной оболочке из нержавеющей стали $\varnothing 91 \times 101$ мм.

2.2.2. Предложения ОАО "ГНЦ НИИАР" по изготовлению источника нейтрино на основе ^{51}Cr активностью 3 МКи

Для облучения всей массы хрома планируется использовать высокопоточный исследовательский реактор СМ (см. рис.9). Облучение реакторных мишеней с обогащенным хромом предполагается произвести в наиболее высокопоточном канале реактора СМ - центральной нейтронной ловушке [35].

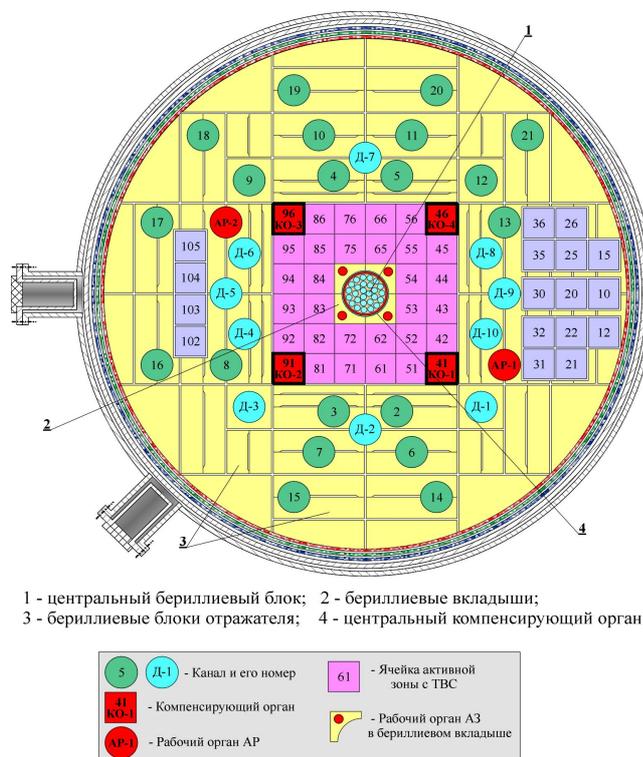


Рис.9. Картограмма реактора СМ.

Учитывая особенности реактора (прежде всего, энергонапряженность и высокое давление водяного теплоносителя) для облучения стартового материала используются устройства, представляющие собой сборки из цилиндрических мишеней. Прецизионные варианты нейтронно-физические расчеты проводились по программе MCNP [36], реализующей алгоритм определения пространственно-энергетического распределения нейтронов в трехмерной модели реактора методом Монте-Карло. Для расчетов по MCNP была использована модель реактора СМ, максимально приближенная к реальной геометрии реактора. Расчеты проводили для различных положений компенсирующих органов реактора.

Накопление ^{51}Cr вычислялось по программе ChainSolver реализующей алгоритм численного интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение концентрации нуклидов в процессе облучения. Скорости ядерных реакций вычислялись в трехгрупповом приближении. В качестве исходных данных использовались параметры нейтронного поля в объеме облучаемого материала, полученные по результатам нейтронно-физических расчетов.

Предварительно по программе MCNP определены эффективные сечения нейтронных реакций.

Исходные данные:

Масса хрома, обогащенного по ^{50}Cr до 97% - 3015 г;

Все 27 ячеек центрального канала заняты хромовыми мишенями;

Каждая хромовая мишень имеет диаметр $D=8.5\text{мм}$ и суммарную высоту $h=28.5\text{см}$.

Результат:

$$\sigma_{50} = 15.9 \text{ b}, RI_{50} = 6.38 \text{ b}$$

$$\sigma_{51} = 10.2 \text{ b}, RI_{51} = 4.1 \text{ b}$$

Параметры наиболее эффективного варианта облучения мишеней с хромом представлены ниже:

- Хром размещен в мишенях из циркония $\varnothing 10 \times 0,4 \text{ мм}$.
- Штатный сепаратор центрального канала (пучок 27-ми циркониевых направляющих труб) не устанавливается. Это позволяет повысить плотность потока тепловых нейтронов.

- Средняя по объему хрома плотность потока нейтронов составляет :

$$\text{тепловых} - 4.57 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

$$\text{резонансных} - 9.55 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1} \text{ (на интервал летаргии)}$$

$$\text{быстрых} - 9.46 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$$

температура нейтронного газа $T_{ng} = 674 \text{ К}$.

- Режим работы реактора СМ на мощности 95 МВт по следующему графику (сутки -мощность):

$$\underline{(10- 95)+(1- 0)+(10- 95)+(1- 0)+(11- 95)+(3- 0)+(10- 95)+(1- 0)+(10- 95)+(1- 0)+(11- 95)}.$$

Всего 69 календарных суток (58.9 эффективных суток).

На момент окончания облучения активность хрома-51 составит **3.2 МКи**.

Активность источника на момент начала экспозиции двухзонного детектора на

БНО составит **3.01 МКи**.

Суммарная длительность процедуры сборки источника в НИИАР, его транспортировки в БНО и загрузки в детектор составит не более 60 часов (2.5 сут.).

2.2.3. Этапы работы, выполняемые в ОАО «ГНЦ НИИАР»:

1. Нейтронно-физические расчеты и расчеты трансмутации ядер, планирование и обработка результатов экспериментов, выпуск технической документации.
2. Разработка и изготовление облучательного устройства и реакторных мишеней.
3. Облучение реакторной мишени с обогащенным хромом для определения содержания примесных радионуклидов.
4. Оптимизация конструкции и размеров биологической защиты источника.
5. Полномасштабный эксперимент на физической модели реактора СМ для проверки результатов расчетов и оптимизации режима облучения.
6. Расчетно-экспериментальное обоснование безопасности облучения реакторных мишеней с хромом.
7. Разработка и изготовление комплектующих и внутрикамерных устройств, необходимых для сборки источника.
8. Полномасштабное облучение обогащенного хрома в центральном канале реактора СМ.
9. Сборка и предварительная аттестация источника нейтрино.
10. Транспортировка источника нейтрино Заказчику

Примерный календарный план выполнения работ

Номер этапа	Календарный месяц												Ориентировочная стоимость этапа, тыс. руб	Ориентировочная стоимость этапа, тыс. \$*	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	■	■	■	■	■	■	■					■	■	4 000.0	114.3
2	■	■	■											2 000.0	57.1
3			■	■										4 000.0	114.3
4					■	■	■							4 000.0	114.3
5					■	■	■							5 000.0	142.9
6					■	■	■							3 000.0	85.7
7									■	■	■			32 000.0	914.3
8					■	■	■	■	■	■				7 000.0	200.0
9												■	■	10 000.0	285.7
10												■		4 000.0	114.3
Итого:													75 000.0	2 142.9	

* Расчет по курсу : 1USD = 35 руб

2.3. Изготовление защиты для источника

Источник будет снабжен собственной биологической защитой толщиной 30 мм, изготовленной из обрабатываемого вольфрамового сплава типа ВНМ. Размеры биологической защиты: $\varnothing 145 \times 151$ мм. Масса вольфрамовой защиты составит около 39 кг, масса источника в сборе около 45 кг.

Все операции с искусственным источником нейтрино ^{51}Cr будут выполняться в соответствии с требованиями Ростехнадзора, обеспечивающими безопасность работ с источником. Будет получена лицензия этого ведомства на работы с таким источником.

2.4. Изготовление калориметра для измерения активности источника.

Активность источника будет измерена калориметрическим и другими методами. С каждым распадом ^{51}Cr испускается в среднем 36 кэВ тепловой энергии, т.е. энергии, которая не уносится нейтрино. Таким образом, источник с интенсивностью 3 МКи будет выделять около 650 Вт тепла. Активность источника будет определяться после каждой экспозиции в калориметре и измерениями его гамма-спектра на германиевом ППД. По окончании всех экспозиций, величина активности будет дополнительно определяться измерением количества накопленного ^{51}V – продукта распада ^{51}Cr . В предыдущем эксперименте с источником ^{37}Ar была достигнута точность определения активности 0.5%. Наличие радиоактивных примесей, которые оказывают влияние на точность калориметрических измерений, будет оцениваться по измерениям гамма-спектра на Ge ППД, как это было в первом ^{51}Cr эксперименте.

2.5. Изготовление манипулятора для источника

Для обеспечения необходимых условий безопасности при работе с источником будет сконструирована и изготовлена на предприятии ЮНИМЕТ специальная подъемно-транспортная система - манипулятор. Это устройство будет использовано в предлагаемом эксперименте для выполнения следующих операций:

- 1) перемещение источника из свинцовой защиты через специальный переходник в центр реактора, содержащего 50 т Ga мишени;

- 2) установка и удаление защиты и переходника в момент размещения (извлечения) источника;
- 3) перемещение источника по окончании каждого облучения в калориметр для измерения активности источника;
- 4) перемещение источника по окончании эксперимента в коллиматор для измерения уровня примесей путем измерения полупроводниковым германиевым детектором гамма-излучения от источника.

2.6. Изготовление концентрических емкостей для облучения 50 тонн Ga

Внутренняя зона Ga будет представлять собой сферическую емкость радиусом 660 мм с цилиндрическим каналом $\varnothing 203$ мм и высотой - 1196 мм (на 100 мм ниже центра) для ввода источника в центр мишеней. Эта зона будет вмещать 7,5 тонн Ga.

С технической точки зрения, сооружение внешней емкости Ga мишени в форме сферы с большим диаметром значительно сложнее и дороже, чем изготовление этой емкости в форме цилиндра. Поэтому мы предполагаем изготовить внешнюю зону в форме цилиндра с выпуклым (эллиптическим) дном. Было показано, что результаты эксперимента при такой замене изменятся несильно: так в отсутствие осцилляций темп счёта во внешней зоне изменится лишь на 2% в случае замены формы внешней зоны мишени со сферической на цилиндрическую. Влияние изменения формы мишени незначимым образом сказывается на чувствительности эксперимента к осцилляциям. Все численные оценки и графики, приведённые в тексте работы, выполнены для внешней зоны в форме цилиндра с выпуклым дном.

Внешняя цилиндрическая емкость диаметром 2192 мм и высотой 2192 мм будет содержать 42,5 тонны галлия, Рис. 10.

Геометрические размеры обеих емкостей обеспечивают одинаковую среднюю длину пробега нейтрино в зонах Ga мишеней, $\langle L \rangle \sim 550$ мм.

Технологическая и электрическая схемы 2-зонной установки полностью разработаны, включая выбор вспомогательного оборудования.

Конструкция концентрических емкостей будет обеспечивать безопасные условия проведения эксперимента. Ввиду малых габаритов тоннеля (ворота: ширина 2.8 м, высота 2.94 м) ведущего к лаборатории, емкости будут выполнены из сборных элементов. Сборка 2-зонного реактора будет производиться на месте

монтажа без применения сварки. Конструкция соединений сборных элементов емкостей должна будет обеспечивать герметичность всей емкости.

Внутренняя поверхность емкостей будет футерована полипропиленом для исключения контакта галлия и соляной кислоты с материалом стенок и дна емкости. Во внешней емкости предусмотрена система для крепления и фиксации внутренней шарообразной емкости. В обеих емкостях предусмотрен патрубок для закачки/откачки жидкого галлия с необходимой запорной арматурой. Поверхности всех элементов емкостей, контактирующие с галлием, будут также выполнены с футеровкой полипропиленом.

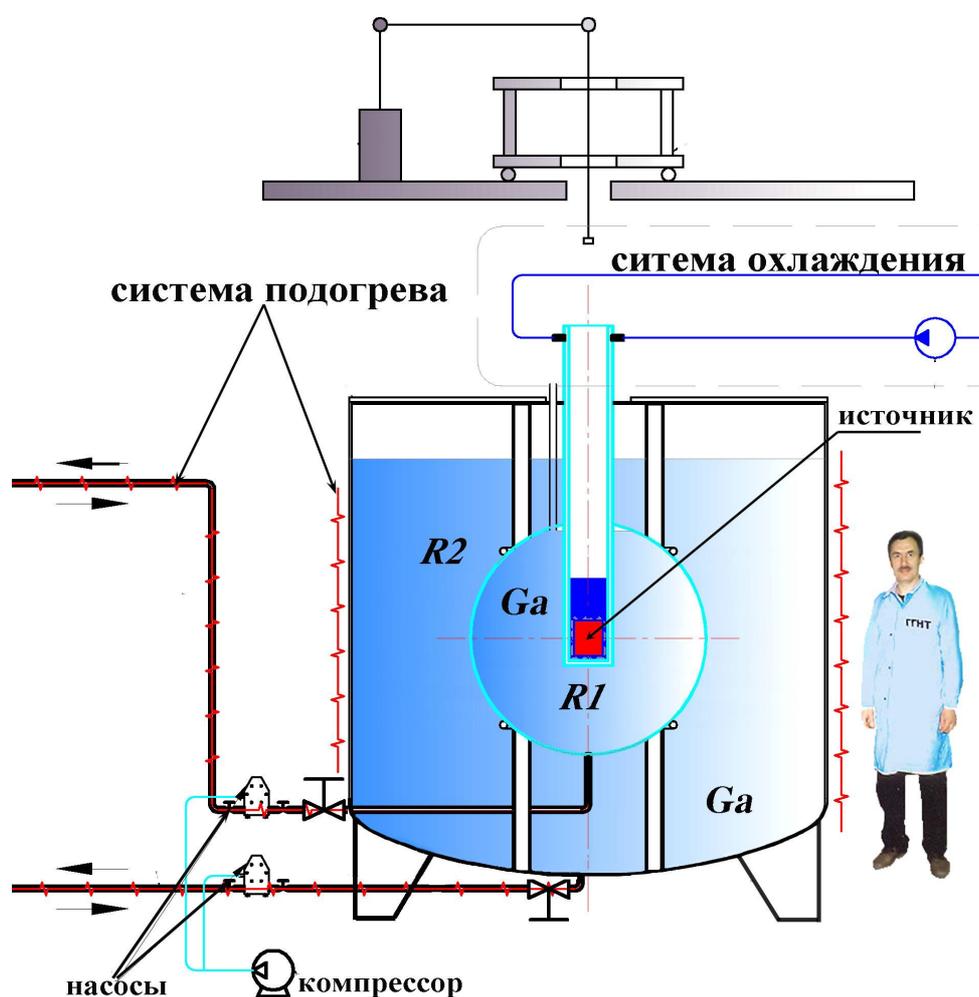


Рис.10. Схема 2-зонной установки.

Для поддержания температуры жидкого галлия не ниже 35°C предусмотрен электрический обогрев емкостей греющим кабелем.

Транспортировку галлия в/из проектируемую установку будет обеспечивать система трубопроводов и патрубков закачки/откачки жидкого галлия. При

наполнении внутренней сферической емкости уровень жидкого галлия должен будет повышаться параллельно с уровнем заполнения внешней цилиндрической емкости для предотвращения возникновения выталкивающей нагрузки на сферическую (цилиндрическую) емкость, что обеспечивается регулировкой подачи насосов и установленными в обеих емкостях уровнемерами.

2.7. Модернизация системы извлечения

Для данного эксперимента с искусственным источником нейтрино будет использована та же технологическая схема извлечения германия, которая применяется для извлечения германия в эксперименте по измерению потока солнечных нейтрино на ГГНТ. Эта схема включает в себя следующие стадии извлечения:

- 1) Извлечение германия из металлического галлия методом селективного выщелачивания германия раствором перекиси водорода и соляной кислоты.
- 2) Концентрирование германия в растворе путем вакуумной выпарки.
- 3) Отгонка германия из раствора в форме тетрахлорида германия газовым потоком с последующей абсорбцией германия в небольшом количестве воды.
- 4) Концентрирование германия экстракцией четыреххлористым углеродом.
- 5) Синтез летучего соединения германия GeH_4 (моногермана) и его очистка.

Технологический процесс обеспечивает независимое извлечение атомов ^{71}Ge из каждой зоны галлиевой мишени при максимальном использовании существующего технологического оборудования, используемого в ГГНТ SAGE.

На первой стадии извлечения германия, в результате которой германий извлекается из галлиевой мишени в форме расплава металлического галлия и переходит в водный раствор, будут использованы химические реакторы ГГНТ. Для реализации такой возможности была разработана и испытана система перекачки галлия, которая позволяет в короткое время переместить галлиевую мишень из каждой зоны установки для облучения галлия нейтринным источником в химические реакторы ГГНТ. Перекачка галлия осуществляется мембранными насосами, адаптированными для работы с жидким галлием.

Концентрирование германия в растворе путем вакуумной выпарки происходит в стеклянных вакуумных выпарных аппаратах. В основном будет использовано

оборудование ГГНТ. Для увеличения производительности выпарной системы были приобретены и установлены компоненты из боросиликатного стекла для дополнительной вакуумной выпарной системы.

Для реализации процесса отгонки тетрахлорида германия из раствора для галлиевой мишени из зоны, содержащей 42,5 тонны галлия, будет использована существующая система отдувки. Для галлиевой мишени массой 7,5 тонны разработана и приобретена независимая система отдувки. Основными элементами этой системы являются емкость из боросиликатного стекла объемом 150 л и вентиль-эжектор, диспергирующий газ в раствор.

Для концентрирования германия экстракцией и синтеза моногермана в основном будет использовано то же самое оборудование, которое применяется для этих целей в эксперименте SAGE.

2.8. Изготовление второй счетной системы и новых пропорциональных счетчиков

Для обеспечения одновременного счета экстракционных образцов из двух зон Ga мишени будет изготовлена вторая счетная система с 8-ю счетными каналами и будет изготовлено дополнительно 20 пропорциональных счетчиков YCT-типа (Yants-Carbon-Thin).

2.8.1 Счетная система

Счетная система эксперимента SAGE [18] имеет 8 счетных каналов, которые позволяют регистрировать распады ^{71}Ge одновременно в областях L и K пиков (0.4-15 кэВ) с общей эффективностью до 75%. Непрерывная эксплуатация в течение всего времени проведения эксперимента (более 20 лет) показала ее надежность. В новом эксперименте наряду с существующей системой будет использоваться новая счетная система с 8-ю счетными каналами, которая должна иметь основные характеристики не хуже, чем существующая, и иметь формат данных, совместимый с существующей стандартной процедурой обработки данных SAGE.

С учетом этих требований для изготовления второй счетной системы лучшим и наиболее простым способом будет максимальное воспроизведение счетной системы SAGE. Такой подход к созданию новой счетной системы повышает

степень унификации оборудования системы и ее надежность. В Таблице 2 представлены основные характеристики существующей счетной системы SAGE.

Таблица 2. Основные характеристики счетной системы SAGE

Число счетных каналов	8
Диапазон регистрируемых энергий, кэВ	0.37-15
Полоса пропускания, МГц	100
Время нарастания переходной характеристики, нс	3.5
Частота квантования, ГГц	1
Цифровое разрешение, бит	8 (два независимых канала)
Мертвое время (нормальный режим сбора), с	0.34
Мертвое время (режим калибровки), с	0.3
Диапазон регистрируемых энергий в канале NaI, кэВ	60-3000
Диапазон энергий в канале совпадений NaI, кэВ	190-3000
Интервал аппаратных совпадений, мкс	4
Интервал совпадений в канале ВЦП, нс	70
Энергетический эквивалент шума (2.35σ), кэВ	<0.324
Эффективность счета (счетчики типа YCT), %	≈75

2.8.2 Пропорциональные счетчики

В эксперименте используются миниатюрные низкофоновые пропорциональные счётчики объёмом ~0.5 см³, предназначенные для счёта импульсов от распадов атомов ⁷¹Ge, обладающие высокой объемной эффективностью и стабильностью газового усиления. От совершенства конструкции счётчика и его фона зависит конечный результат и эффективность работы всего эксперимента. По разработанной технологии будут изготовлены миниатюрные низкофоновые пропорциональные счетчики (Рис. 11), обладающие высокой стабильностью параметров газового усиления и энергетического разрешения.

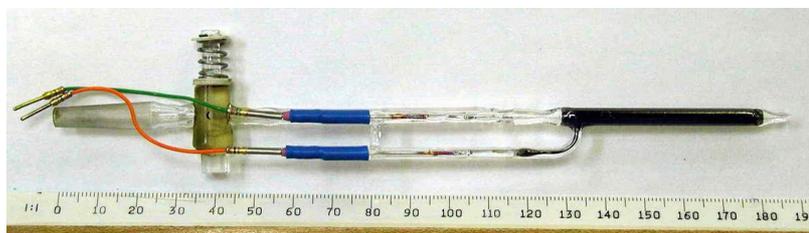


Рис.11. Низкофоновые пропорциональные счетчики.

В счетчиках данного типа катодом служит тонкий слой углеродной пленки, нанесенный на внутреннюю поверхность кварцевой колбы термическим разложением изобутана.

Контактные выводы катода и анода, реализованные с помощью молибденовой полосы, обеспечивают герметичность счетчика и гарантируют стабильность усиления. Объемная эффективность счетчиков данной конструкции составляет $96\% \pm 1\%$ с эффективностью регистрации в К-, L –пиках – $40\% \pm 1\%$ и $35\% \pm 1\%$ соответственно.

Для изготовления счетчиков используются материалы с низким содержанием радиоактивности. Колба счетчика изготавливается из синтетического кварца (супразил). Малая (до 200 мкм) толщина стенки колбы достигается методом травления в плавиковой кислоте. Вследствие малой толщины количество собственных фоновых отсчетов от распадов элементов естественных радиоактивных цепей в кварце достаточно мало, что дает возможность проведения низкофоновых измерений. Средний фон счетчиков составляет: для К-пика - 0.028 ± 0.037 и для L-пика - 0.057 ± 0.073 событий в сутки.

С 2001 года по настоящее время во всех солнечных измерениях эксперимента SAGE используются счетчики данной конструкции. В течение эксплуатации были выполнены различные тестовые измерения для исследования их счетных характеристик. Результаты этих измерений показали, что за счет такой конструкции счетчики обладают высокой объемной эффективностью и эффективностью регистрации сигналов в области энергий К-, L –пиков, а возможность облучения всего объема через тонкую стенку счетчика при калибровках не полимеризует анодную нить и значительно сокращает время калибровки. За время эксплуатации все используемые счетчики показали очень стабильные и примерно равные характеристики.

3. Расписание извлечений и статистическая неопределенность

В предлагаемом эксперименте с ^{51}Cr источником активностью 3 МКи на 2-зонной Ga мишени обе зоны будут облучаться одновременно, и в отсутствие осцилляций ожидаемое число атомов ^{71}Ge , образованных в зонах, будет одинаковым. В этом разделе рассматривается необходимое количество облучений и их продолжительность, для получения максимального числа зарегистрированных захватов нейтрино.

Число атомов ^{71}Ge , образованных в нейтринных взаимодействиях в мишени за

$$\text{время } t, N_{\text{Ge}}: \quad N_{\text{Ge}}(t) = \frac{n_{\text{Ge}}}{\lambda_1 - \lambda_0} \cdot (e^{-\lambda_0 t} - e^{-\lambda_1 t}) \quad (1)$$

где n_{Ge} скорость образования атомов ^{71}Ge в начале измерений. Если величина активности ^{51}Cr источника будет составлять 3 МКи, то $n_{\text{Ge}} = 65 \text{ сут}^{-1}$ для металлической Ga мишени со средней длиной пробега нейтрино 55 см. Значения λ_0 и λ_1 представляют собой постоянные величины распада ^{51}Cr и ^{71}Ge : $\lambda_0 = \ln(2)/27.7 \text{ сут}^{-1}$ и $\lambda_1 = \ln(2)/11.43 \text{ сут}^{-1}$. На Рис. 12 показана величина $N_{\text{Ge}}(t)$ для начальной активности источника 3 МКи.

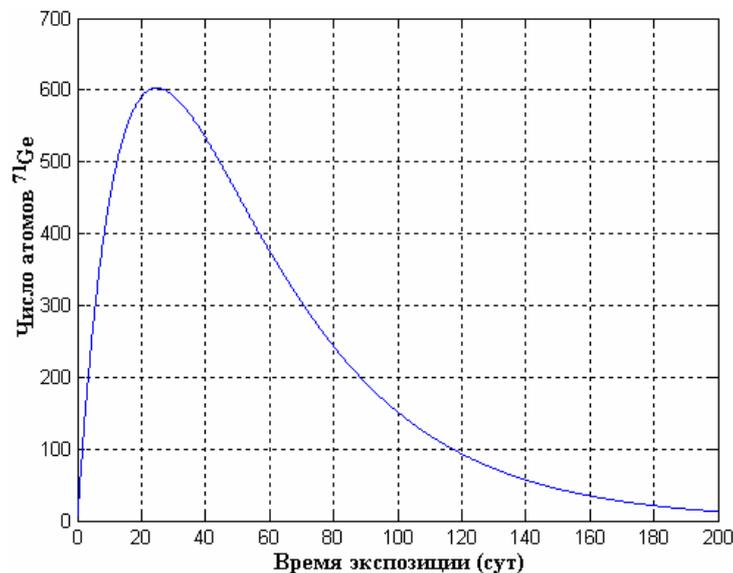


Рис. 12. Число атомов ^{71}Ge , образующихся в мишени со средней длиной пробега в металлическом Ga 55см при облучении источником ^{51}Cr активностью 3 МКи.

Суммарное число событий увеличивается при проведении нескольких извлечений с экспозициями короче 25 суток. Для получения максимального числа событий в измерениях при минимальном фоне от солнечных нейтрино, исходя из наших технических возможностей выбран следующий план извлечений, провести 10 облучений с одинаковой продолжительностью по 9 суток каждое с интервалом в одни сутки для извлечения из мишеней образовавшихся атомов ^{71}Ge . При таком расписании в каждой зоне мишени ожидается ~ 1647 атомов ^{71}Ge . С учетом величины полной эффективности извлечения и эффективности счета 53% [26], общее число импульсов, зарегистрированных в счетчиках от атомов ^{71}Ge , будет ~ 873 . Данные по ожидаемому числу событий представлены в Таблице 3.

Для источника 3 МКи величина статистической неопределенности серии облучений, полученная методом Монте-Карло на основе предлагаемой программы облучений, эффективностей извлечения и счёта, фоновой скорости и скорости образования от солнечных нейтрино, составляет $\pm 3.7\%$ в каждой зоне и $\pm 2.6\%$ для всей мишени.

Таблица 3. Ожидаемые скорости захвата нейтрино в каждой зоне мишени от 3 МКи хромового источника в отсутствие переходов в стерильные нейтрино. Вторая колонка - число захватов нейтрино в сутки в каждой зоне мишени в начале каждой экспозиции. Третья колонка - ожидаемое число атомов ^{71}Ge , накопленных в каждой зоне к концу экспозиции. Четвертая колонка - количество зарегистрированных импульсов в пропорциональном счетчике от распадов атомов ^{71}Ge , образованных от источника. Пятая и шестая колонки показывают отношение числа захватов в мишени от источника и от Солнца. Скорость захвата солнечных нейтрино принималась равной 66.1 SNU, т.е. 0.0197 взаимодействий/сут. в 1 тонне Ga.

№ экспозиции	Скорость образования ат. ^{71}Ge /д	Кол. ат. ^{71}Ge в конце экспоз.	Кол-во ат. ^{71}Ge в счетчике	ат. ^{71}Ge - ν_n /ат. ^{71}Ge - ν_C , внутр. зона	ат. ^{71}Ge - ν_n /ат. ^{71}Ge - ν_C , внеш. зона
1	64.6	397.2	210.5	336.6	64.1
2	50.3	309.3	164	262.1	49.9
3	39.1	240.9	127.6	204.1	38.8
4	30.5	187.5	99.4	158.8	30.3
5	23.7	146.0	77.4	124	23.5
6	18.5	113.6	60.2	96.3	18.4
7	14.5	88.5	46.9	75	14.3
8	11.2	68.9	36.5	58.4	11.1
9	8.7	53.6	28.5	45.4	8.7
10	6.8	41.8	22.1	35.4	6.8
Σ		1647.3	873.1	139.6	26.6

Примечание. От солнечных нейтрино за 10 суток образуется 1.18 атомов ^{71}Ge в 8 тоннах Ga и 6.20 атомов в 42 тоннах.

4. Систематические неопределенности

В предлагаемом 2-зонном эксперименте ожидается намного меньшая статистическая неопределенность, чем в предыдущих экспериментах с источниками. Для снижения полной систематической неопределенности, ожидаемой в эксперименте, нами было проведено подробное исследование возможных источников систематических неопределенностей.

Систематические неопределенности в Ga измерениях логически разделяются на несколько групп: 1 - неопределенности, относящиеся к процессу извлечения Ge из Ga мишени (δ_G), 2 - неопределенности, связанные со счетом распадов ^{71}Ge в пропорциональных счетчиках (δ_C), 3 - неопределенности, возникающие от фоновых

событий (δ_N), и 4 - другие неопределенности, к которым относятся неопределенности в анализе и измерениях активности источника. В Таблице 4 приводятся наши расчетные значения всех этих систематических неопределенностей для 2-зонного эксперимента и, для сравнения, систематические неопределенности солнечных измерений и измерений эксперимента SAGE с источником ^{37}Ar .

Таблица 4. Систематические неопределенности в % для 2-зонного эксперимента с источником 3 МКИ (5-я колонка). Систематические неопределенности для эксперимента с источником ^{37}Ar (3-я колонка) и для солнечных извлечений (4-я колонка).

Источник неопределенности	Обозначение	Ar-06 [19]	Solar-09 [13]	Cr-2 зонн.
1				
Эфф. химических извлечений				
Масса Ge носителя	δ_{G1}	± 2.1	± 2.1	± 2.1
Масса извлеченного Ge	δ_{G2}	± 3.5	± 2.5	± 0.8
Остаточный Ge носитель	δ_{G3}	± 0.5	± 0.8	± 0.3
Масса Ga	δ_{G4}	± 0.5	± 0.3	± 0.5
Всего (извлечение)		± 4.1	± 3.4	± 2.3
2				
Эффективность счета				
Объемная эффективность	δ_{C1}	± 0.5	± 1.0	± 0.4
Концевые эффекты	δ_{C2}		± 0.5	
Эффективность регистрации в пиках	δ_{C3}	± 2.5		± 0.4
Интерполяция М-С	δ_{C4}	± 1.7	± 0.3	0
Центрирование	δ_{C5}	± 0.1		
Разрешение	δ_{C6}	± 0.3	-0.5 +0.7	± 0.3
Обрезание по времени нарастания	δ_{C7}	± 0.6	± 1.0	± 0.6
Вариации усиления	δ_{C8}	+0.5	+1.1	0
Время экспозиции и извлечения	δ_{C9}		± 0.8	
Всего (счет)		+3.2 -3.1	+1.8 -2.1	± 0.9
3				
^{71}Ge несолнечного происхождения				
Быстрые нейтроны			$< -3 \cdot 10^{-2}$	
^{232}Th			$< -6 \cdot 10^{-2}$	
^{226}Ra			< -1.0	
Мюоны косм.лучей			< -1.0	
Всего (кроме Солнца)	δ_{N1}		< -1.5	< -0.07
Фон, имитирующий ^{71}Ge				
Внутр. ^{222}Rn	δ_{N2}	-1.7	< -0.3	< -0.01
Внеш. ^{222}Rn			0.0	
Внутр. ^{69}Ge	δ_{N3}		< -0.9	< -0.03
Фон солнечных нейтрино	δ_{N4}	± 0.4		± 0.16
Остаток ^{71}Ge после извлечения		0.0		
Всего (фон)		+0.4 -1.7	< -0.9	± 0.16
4				
Весовые факторы	δ_{W1}		± 0.15	± 0.15
Активность источника	δ_{W2}			± 0.5
Всего		+5.2 -5.4	-4.3 +4.0	± 2.6

В Таблице 4 со знаком “-” указаны величины систематических неопределенностей, связанных с процессами, приводящими к увеличению результата измеряемой величины, (например процессы, связанные с фоновыми источниками, образующими изотопы германия в галлиевой мишени, а также распады радона внутри и вблизи счетчика, имитирующие сигнал от распада германия в счетчике), поэтому это односторонние систематические неопределенности.

4.1. Неопределенность эффективности извлечения

Наибольший вклад в систематическую ошибку вносит эффективность извлечения, которая складывается из неопределенности внесенной массы Ge носителя, используемого для измерения эффективности извлечения, δ_{G1} , и неопределенности измерения его извлеченного количества δ_{G2} . В масс-спектрометрических измерениях состава извлеченного Ge для единичного измерения получена величина $\delta_{G2(1)} = \pm 2\%$. Для набора N независимых измерений полная относительная неопределенность уменьшается в соответствии с

$$\delta_{sum} = \frac{\sigma_{sum}}{N} = \frac{\sqrt{\sum_i \sigma_i^2}}{\sum_i N_i}. \text{ Можно ожидать, что в десяти облучениях будет}$$

зарегистрировано $N \approx N_0 \cdot \sum_{i=0}^9 e^{-\lambda t_i}$ событий. Здесь N_0 – число ожидаемых событий в первом измерении; λ – постоянная распада ^{51}Cr ; и $t_i = \Delta t \cdot i$ - начальное время i -го облучения. Выбирая временной интервал $\Delta t = 10$ суток для каждого облучения, мы получаем $\delta_{G2} = \delta_{G2(1)} \cdot 0.38 = 0.8\%$.

Любой Ge, остающийся после каждого извлечения, будет влиять на эффективность измерения последующего извлечения. Для определения количества этого остаточного Ge предполагается выполнение вторых извлечений после каждого из первых извлечений. С учетом средней эффективности каждого извлечения $\varepsilon = 95\%$, количество остаточного Ge не будет превышать $(1-\varepsilon)^2 \sim 0.3\% = \delta_{G3}$.

Неопределенность δ_{G4} массы Ga в мишенях ожидается такой же, как в измерениях с ^{37}Ar , т.е. 0.5% .

4.2. Неопределенность эффективности счета

Неопределенности второй группы δ_c , учитывают характеристики пропорциональных счетчиков.

Неопределенности, связанные с измерениями эффективности объема счетчиков ϵ_v и с количеством регистрируемых событий в ^{71}Ge пиках ϵ_p , были получены в результате прямых измерений характеристик всех счетчиков YCT-типа, использованных в солнечных измерениях, и составили $\epsilon_v = \pm 1.0\%$ и $\epsilon_p = \pm 1.1\%$. В связи с тем, что в каждом измерении будут использоваться разные счетчики, то вклады неопределенностей от каждого измерения будут независимыми, и суммарные по всем измерениям ошибки могут быть найдены описанным выше (для δ_{G2}) способом: $\delta_{\text{sum}} = \delta_1 \cdot 0.38$. Т.е. $\delta(\epsilon_v) = 0.4\%$ и $\delta(\epsilon_p) = 0.4\%$.

Значение δ_{C4} учитывает неопределенности, связанные с симуляциями Монте-Карло, используемыми для расчета эффективности счетчика при различных параметрах заполнения. Так как точные измерения эффективностей счетчиков будут проведены для всего ряда параметров заполнения, то можем принять величину $\delta_{C4} = 0$.

Для 75 солнечных ранов (начиная с апреля 2001) среднее изменение позиции окна счетчика в течение первого месяца счета составило лишь ± 2 канала, и не оказало значительного влияния на результат солнечных измерений. Поэтому мы устанавливаем $\delta_{C8} = 0$.

Можно ожидать, что с использованием в новом эксперименте счетчиков YCT-типа неопределенности в определении разрешения счетчиков (δ_{C6}), а также в выборе пределов времени нарастания импульса (δ_{C7}) будут такими же, как значения, которые мы использовали для эксперимента с Ag источником.

4.3. Фон

Фоновые события могут образовывать в счетчике импульсы, неотличимые от распада ^{71}Ge . Образцом этого типа фона является ^{222}Rn , который распадается внутри счетчиков (δ_{N2}). Если среднее число атомов Rn в счетчике не превышает этого числа в солнечных ранах, эта неопределенность должна иметь величину $\delta_{N2} = 0.3 \cdot \frac{3 \cdot 10}{917} \sim 0.01\%$, где 0.3% - неопределенность Rn в солнечных ранах. Таким же образом мы можем оценить влияние ^{69}Ge (δ_{N3}), и фоновое образование ^{71}Ge , не связанное с Солнцем (δ_{N1}).

Оценка неопределенности, связанной с солнечными нейтрино, была сделана в предположении, что скорость захвата нейтрино от Солнца постоянна и

соответствует значению, измеренному в Ga экспериментах, а именно 66.1 ± 3.1 SNU [2]. Ожидаемое число импульсов от солнечного фона будет вычтено из результата измерений каждого облучения. Относительная неопределенность вычитаемой

величины будет $\delta_{N4} = \frac{6.20 \cdot 0.53 \cdot \frac{3.1}{66.1} \cdot 10}{873} = 0.16\%$ для внешней зоны мишени (42.5 т) и

0.03% для внутренней зоны мишени (7.5 т). В этом выражении 6.20 – ожидаемое число атомов ^{71}Ge , образованных за 10-дневный период облучения солнечными нейтрино в Ga мишени массой 42 т, 0.53 – эффективность регистрации, 10 – число облучений, и 873 – ожидаемое число импульсов ^{71}Ge , образованных от источника в одной зоне мишени.

4.4. Другие неопределенности

Четвертая группа неопределенностей состоит из неопределенностей, которые получаются от использования весовых коэффициентов в анализе максимального правдоподобия и неопределенности измерения активности источника. Неопределенность весовых коэффициентов составляет по оценке солнечных данных величину $\delta_{w1} = 0.15\%$.

Как это было с предыдущими источниками, мы предполагаем использовать несколько методов для измерения активности источника ^{51}Cr . Активность нашего первого источника ^{51}Cr была измерена с неопределенностью $\pm 1.2\%$ и неопределенность нашего ^{37}Ar источника была $\pm 0.5\%$.

4.5. Полная систематическая неопределенность эксперимента

Квадратичная сумма всех систематических неопределенностей составляет величину $\pm 2.6\%$ как для каждой зоны, так и для полной мишени.

При объединении этой величины с ожидаемой статистической неопределенностью, составляющей $\pm 3.7\%$ для каждой зоны и $\pm 2.6\%$ для полной мишени, величина неопределенности составит $\pm 4.5\%$ для каждой зоны и $\pm 3.7\%$ для полной мишени.

С учетом теоретической неопределенности сечения захвата нейтрино от хромового источника в галлии $+3.6/-2.8\%$ [29] полная неопределенность эксперимента будет $\pm 5.5\%$ для каждой зоны и $\pm 4.8\%$ для полной мишени

IV Пределы на параметры осцилляций

Осцилляции уменьшают вероятность захвата нейтрино в мишени. Для точечного источника и мишени, размещенной на расстояниях от r_1 до r_2 от источника, скорость захвата будет пропорциональна значению $\int_{r_1}^{r_2} \frac{S(r)}{4\pi r^2} \cdot P_{ee} dr$, где $S(r)$ – площадь пересечения сферы радиусом r с Ga мишенью, и $P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(1.27 \frac{\Delta m^2 r}{E_\nu})$ - вероятность выживания, функция параметров осцилляций. Для сферической емкости, если пренебречь переходником, содержащим источник, мы имеем $S(R) = 4\pi R^2$ и ожидаемая скорость захвата просто пропорциональна среднему значению вероятности выживания P_{ee} .

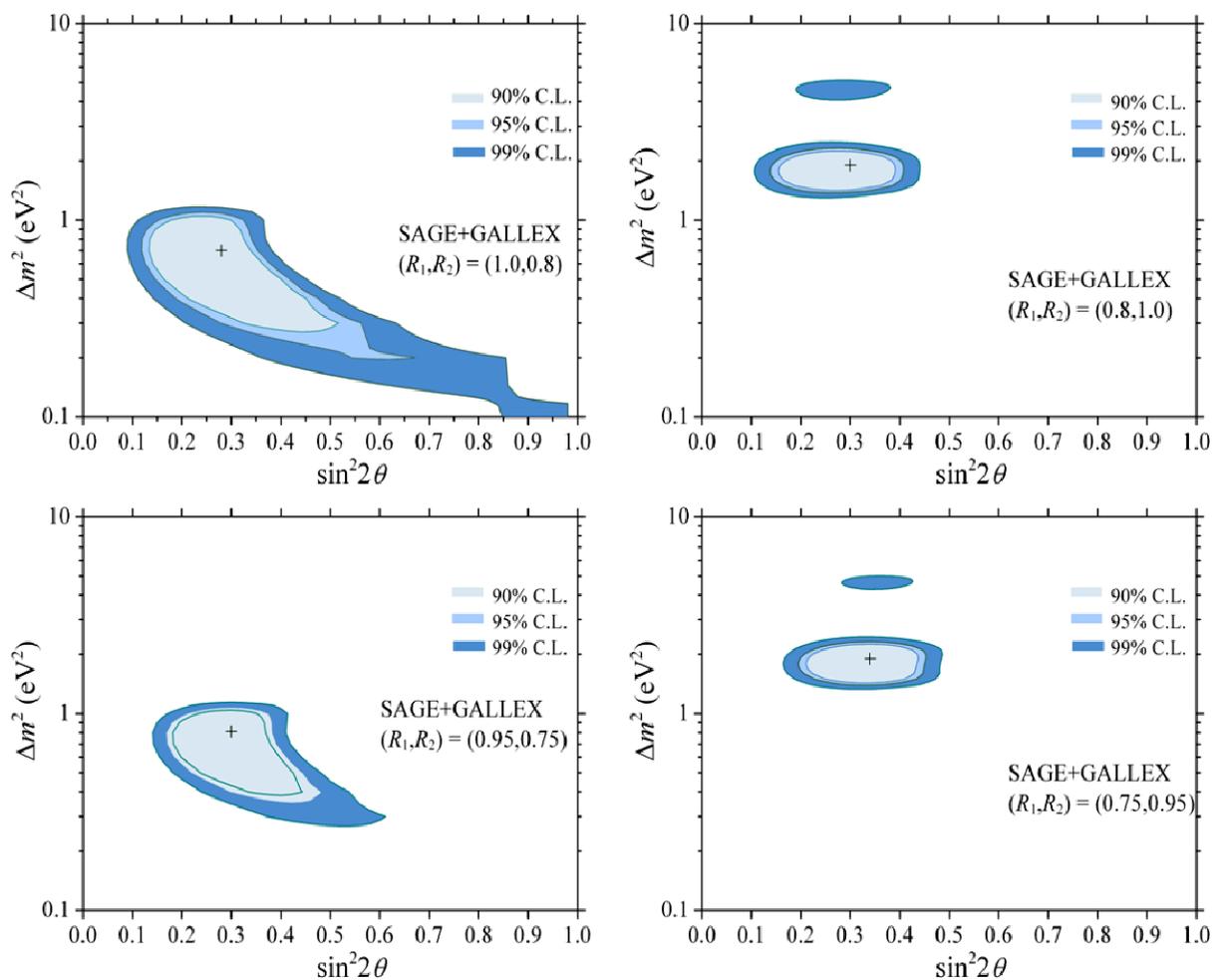


Рис.13. Области разрешенных параметров осцилляций для 4-х различных возможных результатов 2-зонного эксперимента, объединенных с результатами четырёх предыдущих экспериментов с источниками SAGE и GALLEX. “+” – указывает на точку наилучшей оценки (best fit point). R_1 и R_2 – отношения

VI Заключение

В эксперименте «на исчезновение» BEST мишень из металлического галлия облучается электронными нейтрино от компактного источника ^{51}Cr активностью 3 МКи с целью исследования нестандартных свойств нейтрино на короткой базе. В эксперименте будет получено доказательство существования стерильных нейтрино или значительно ограничено пространство параметров осцилляционных переходов электронных нейтрино в стерильные состояния.

В ходе реализации эксперимента будет разработана методика изготовления интенсивных источников нейтрино на основе нуклида ^{51}Cr , разработана технология безотходного изготовления стартовых мишеней для эффективной наработки изотопов в атомных реакторах, разработаны методики точного измерения активностей интенсивных гамма-излучений радиоактивных материалов.

Литература

1. A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, M. Shaposhnikov, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **59**, 191, 2009, arXiv:0901.0011v2 [hep-ph].
2. R.A. Burenin, A.A. Vikhlinin, *Astron. Lett.*, **38**, 1, 2012, arXiv:1202.2889v1 [astro-ph.CO].
3. Y.I. Izotov, T.X. Thuan, *Astrophys. J.* **710** (2010) L67, [arXiv:1001.4440 [astro-ph.CO]].
4. E. Komatsu et al. [WMAP Collaboration] *Astrophys. J. Suppl.* **192** (2011) 18, [arXiv:1001.4538 [astro-ph.CO]].
5. J. Beringer et al. (Particle Data Group), *Phys. Rev. D* **86**, 010001 (2012).
6. A. Aguilar et al. (LSND Collaboration), *Phys. Rev. D* **64** (2001) 112007, [hep-ex/0104049].
7. P. Astier et al., [NOMAD Collaboration], *Phys. Lett.*, **B570** (2003) 19 [hep-ex/0306037].
8. K. Eitel et al., [KARMEN Collaboration], *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **77** (1999) 212 [hep-ex/9809007]; B. Armbruster et al., [KARMEN Collaboration], *Phys. Rev. D* **65**, 112001, 2002 [hep-ex/0203021v1].
9. A.A. Aguilar-Arevalo, C.E. Anderson, S.J. Brice, et al., arXiv:1007.1150 [hep-ex]; A.A. Aguilar-Arevalo et al. [MiniBooNE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **103**, 111801 (2009); A.A. Aguilar-Arevalo et al. [MiniBooNE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **105**, 181801 (2010); Z. Djurcic [MiniBooNE Collaboration], arXiv:1201.1519.
10. A.A. Aguilar-Arevalo et al. [MiniBooNE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **98**, 231801 (2007); A.A. Aguilar-Arevalo et al. [MiniBooNE Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **102**, 101802 (2009).
11. T.A. Mueller et al., *Phys. Rev. C* **83**, 054615 (2011); arXiv:1101.2663, arXiv:1103.2452.
12. G. Mention et al., *Phys. Rev. D* **83**, 073006 (2011); [arXiv:1101.2755].
13. J. Kopp, M. Maltoni and T. Schwetz, *Phys. Rev. Lett.* **107** (2011) 091801 [arXiv:1103.4570 [hep-ph]].

14. M.A.Acero, C.Giunti, M.Laveder, Phys. Rev. **D78** (2008) 073009 [arXiv:0711.4222 [hep-ph]]; C.Giunti, M.Laveder, Phys. Rev. **D82** (2010) 053005 [arXiv:1005.4599 [hep-ph]].
15. B. T. Cleveland, H. Ejiri, S. R. Elliott, V. N. Gavrin, et al., arXiv:1204.5379v1 [hep-ph]; V.N.Gavrin, V.V.Gorbachev, E.P.Veretenkin, and B.T.Cleveland, arXiv:1006.2103 [nucl-ex].
16. G. Domogatski, V.Kopeikon, L.Mikaelyan, V.Sinev, Phys. Atom. Nucl. **68** (2005), 69 [hep-ph/0401221].
17. S. Razzaque and A. Yu. Smirnov, JHEP **1107** (2011) 084 [arXiv:1104.1390 [hep-ph]]; V. Barger, Y. Gao, D. Marfatia, Phys. Rev. **D85** (2012) 011302 [arXiv:1109.5748v1 [hep-ph]]; S. Razzaque and A. Yu. Smirnov, arXiv:1203.5406 [hep-ph].
18. J.N. Abdurashitov, V.N. Gavrin, (SAGE Collaboration) et al., Phys. Rev. C **60** (1999), 055801 [astro-ph/9907113];
19. В.Н. Гаврин, УФН. 2011, Т.181, №9.
20. J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin, V.V.Gorbachev, et al., Phys. Rev. C **80**, 015807 (2009)
21. J. N. Abdurashitov et al. (SAGE coll.), J. Exp. Theor. Phys. **95**, 181 (2002); Zh. Eksp. Teor. Fiz. 122, 211 (2002); Preprint No. 0204245, astro-ph (2002).
22. B. T. Cleveland, Nucl. Instr. Methods Phys. Res. **214**, 451 (1983).
23. Abazov A I et al. Phys. Rev. Lett. 67 N 64 3332 (1991)
24. Anselmann P et al. (Gallex Collaboration) Physics Letters B 285 376 (1992)
25. J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin, S.V.Girin, et al., Phys.Rev. C59, 2246 (1999)
26. J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin, S.V.Girin, Phys.Rev. C 73, 045805 (2006)
27. W.Hampel, G.Heusser, J.Kiko, et al. Phys. Lett. B **420**, 114 (1998).
28. F.Kaether, W.Hampel, G.Heusser, et al., Phys. Lett. B **685**, 47 (2010), arXiv:1001.2731 [hep-ex].
29. Bahcall J N Phys. Rev. C 56 3391 (1997); hep-ph/9710491
30. Naoya Hata, Wick Haxton, Physics Letters B **353**, 422 (1995).
31. D. Frekers *et al.*, Phys. Lett. B **706**, 134 (2011).

32. Popov G.E., Prusakov V.N., Rudnev A.I., Tikhomirov A.V., Voronin A.V., "Centrifugal enrichment of chromium-50 for experiments on detecting solar neutrinos", Nucl. Instr. and Meth., A **362** (1995), pp. 532-537.
33. Tikhomirov A.V., "Practice of centrifugal stable isotope separation for experiments in neutrino physics", Proceedings of the IV Int. Symp. on Weak and Electromagnetic Interactions in Nuclei, Osaka, Japan, June 12-16, 1995, World Scientific, pp. 208 - 211.
34. Cribier M., et al., "Production of a 62 PBq ^{51}Cr low energy neutrino source for GALLEX", Nucl. Instr. and Meth., A **378** (1996), pp. 233-250.
35. Вахетов Ф.З., Романов Е.Г., Тарасов В.А. Комплекс программ для расчета трансмутаций нуклидов, // Сб. трудов, Димитровград: ГНЦ НИИАР, 2003, Вып.3, С.53-57
36. MCNPTM-A General Monte Carlo N-Particle Code. Version 4B / Editor Judith F. Briesmeister. Report LA-12625-M. Los Alamos, 1997.