

На правах рукописи

Петухов Валерий Вячеславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА РЕГИСТРАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ
НЕЙТРИНО С ПОМОЩЬЮ ЛИТИЕВОГО ДЕТЕКТОРА**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук -
Институте ядерных исследований РАН, Москва

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук *А.В.Копылов* (ИЯИ РАН)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук *Ю.Г.Куденко* (ИЯИ РАН)

доктор физико-математических наук *А.В.Дербин* (ПИЯФ РАН)

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие
«Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-
энергетический институт имени А.И.Лейпунского»

Защита состоится « 24 » июня 2010 года

в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 002.119.01

Учреждения Российской академии наук - Института ядерных исследований
РАН (117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯИ РАН.

Автореферат разослан _____.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.119.01

кандидат физико-математических наук

Б.А.Тулупов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Результаты экспериментов с солнечными нейтрино - хлорного в США, галлиевых в России (*SAGE*) и Италии (*GALLEX*, *GNO*), электронных экспериментов *KAMIOKANDE* и *SuperKAMIOKANDE* в Японии, *SNO* в Канаде и *BOREXINO* в Италии, экспериментов с ускорительными нейтрино (*K2K*, *MINOS* и др.), а также эксперимента *KamLAND* с антинейтрино от реакторов - убедительно свидетельствуют о том, что нейтрино осциллируют. В ходе этих экспериментов были измерены параметры нейтринных осцилляций Δm_{21}^2 , Δm_{31}^2 (предел), θ_{12} , θ_{13} и θ_{23} . Помимо этого, наблюдение эффекта Михеева-Смирнова-Вольфенштейна (*MSW*) на солнечных нейтрино показало, что $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 > 0$, т.е. масса состояния с бóльшим весом электронного нейтрино имеет меньшую массу. При этом измерен с высокой точностью энергетический спектр и поток борных нейтрино (*SNO*), измерены интегральный эффект от *pp*- и *pep*-нейтрино (галлиевые эксперименты) и поток бериллиевых нейтрино (эксперимент *BOREXINO*). Полученные результаты хорошо согласуются с величинами, вычисленными по стандартной солнечной модели с учетом осцилляций нейтрино, параметры которых лежат в области больших углов смешивания (*LMA*).

Тем не менее, существует ряд вопросов, ответ на которые может быть получен только из совокупности данных как уже действующих, так и будущих экспериментов. Так, например, необходимо детальное исследование формы энергетического спектра *pp*-нейтрино. Кроме того, недостаточно изучен вопрос о содержании тяжелых элементов в веществе Солнца и, как следствие, не решен вопрос об имеющемся противоречии результатов гелиосейсмологии и наблюдательных данных о содержании тяжелых элементов в веществе Солнца. Вопрос о величине вклада *CNO*-цикла в энергетику Солнца также еще остается открытым, и более точное измерение потоков *CNO*-нейтрино позволило бы существенно продвинуться в этом направлении, важном для исследования

эволюции не только Солнца, но и всех звезд, находящихся на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела.

Нами показано, что данные, полученные с помощью литиевого детектора, в совокупности с результатами других экспериментов, позволят:

1. Определить вклад CNO-цикла в солнечную энергетику и тем самым проверить правильность нашего представления о звездной эволюции.
2. Используя уравнение баланса солнечной светимости, снизить величину погрешности в определении потока pp -нейтрино до уровня $< 0.5\%$.
3. Измерить содержание металлов (элементов с атомным весом $A > 5$) непосредственно в ядре, что определит выбор между моделями с высокой или низкой металлизацией.
4. Исследовать возможность существования процесса перемешивания вещества между внешними и внутренними областями Солнца
5. Изучить вопрос о наличии скрытых источников солнечной энергии.
6. В совокупности с данными экспериментов по прецизионному измерению полного потока pp -нейтрино (например, XMASS, LENA, LENS и др.), с применением уравнения баланса солнечной светимости исследовать возможность перехода электронного нейтрино в стерильное.

Цель работы.

Целью работы являлось:

1. Обосновать роль литиевого эксперимента в исследовании солнечных нейтрино и процессов, связанных с генерацией солнечной энергии, в том числе: содержание тяжелых элементов, возможный перенос вещества в недрах Солнца.
2. Исследовать возможные каналы фона в литий-бериллиевом эксперименте по регистрации солнечных нейтрино.
3. Отработать методику извлечения микроколичеств бериллия из металлического лития, включая нахождение оптимальных условий этого процесса.

4. Провести сравнительный анализ перспективности различных методов счета единичных атомов ${}^7\text{Be}$, включающий измерение характеристик и расчет эффективности регистрации распадов этого изотопа в различных типах детекторов.

Научная новизна.

Разработана методика литий-берилливого эксперимента по регистрации солнечных нейтрино, которая была проверена на лабораторных установках. Найдены оптимальные условия извлечения бериллия из металлического лития. Установлено, что для извлечения следует использовать термостатический режим, а сам детектор должен иметь проточную конструкцию и модульную структуру. Получен коэффициент извлечения бериллия 96%, при этом потери лития за одно извлечение составляли менее 1%.

Проведен расчет каналов фона литиевого детектора методом Монте-Карло. Данные о сечениях и угловых распределениях реакций, используемых в программах, были взяты из баз *EXFOR*, *ENDF* и *BROND*. Остальные необходимые для вычислений величины взяты из опубликованных экспериментальных данных.

Проанализированы различные методы счета микроколичеств ${}^7\text{Be}$. Совместно с группой С.Витале (*INFN*, Генуя) нами была впервые показана принципиальная возможность регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ с высокой эффективностью с помощью микрокалориметра на основе *NTD*-германия. Были детально исследованы летучие соединения бериллия, которые можно использовать в газонаполненных детекторах и показано, что наиболее подходящими для этих целей являются ацетилацетонат и трифторацетилацетонат бериллия; измерен фон и эффективность счета ${}^7\text{Be}$ в пропорциональном счетчике в режимах дискриминации фона по форме импульса и антисовпадений с внешним детектором *NaI(Tl)*. Моделированием по методу Монте-Карло с использованием данных о фоновых характеристиках

современных детекторов из сверхчистого германия определена продолжительность эксперимента, необходимая для измерения потока *CNO*-нейтрино с заданной точностью.

Показано, что если происходит перемешивание между внутренними и внешними слоями Солнца, то это может существенно увеличить поток ^{13}N -нейтрино, в то время как другие потоки солнечных нейтрино останутся фактически неизменными. При этом параметры процесса перемешивания могут быть такими, что основные наблюдаемые переменные - содержание изотопов в фотосфере и средний молекулярный вес в ядре Солнца - не выйдут за существующие на настоящий момент пределы погрешности измерений. Данные о потоках *CNO*-нейтрино можно получить с помощью электронных детекторов, но ввиду малости сигнала от этих нейтрино относительно эффекта, производимого бериллиевыми нейтрино, для получения высокой точности необходимо иметь результаты независимых измерений этих величин. Литиевый детектор представляется весьма перспективным в этом отношении, поскольку он имеет более высокую, по сравнению с другими радиохимическими детекторами, чувствительность к *CNO*-нейтрино. Проблемы же фона для него менее критичны, чем для электронного, поскольку, как и во всех радиохимических детекторах, в нем регистрируются не отдельные события от прохождения нейтрино через рабочий объем, а измеряется активность изотопа, накопленного за длительный период экспозиции. Технология литиевого эксперимента к настоящему моменту разработана достаточно хорошо для того, чтобы приступить к созданию пилотной установки.

Научная и практическая ценность.

Содержащийся в диссертации материал является основой для написания предложения по созданию пилотной установки, на которой может быть отработана технология полномасштабного литиевого эксперимента по регистрации солнечных нейтрино.

Исследования на металлическом литии, проведенные в рамках данной работы, имеют также важное прикладное значение. Нами в целом отработан технологический процесс, определены условия эффективной очистки лития от бериллия. Это может быть использовано, в частности, при создании интенсивных источников нейтронов на основе литиевой мишени.

Основные положения, выносимые на защиту.

- Обоснование необходимости постановки литий-бериллиевого эксперимента и его места в программе исследования солнечных нейтрино.
- Разработка методики извлечения микроколичеств бериллия на установке, имеющей проточную конструкцию и работающую в термостатическом режиме. Экспериментальное подтверждение эффективности такой методики с помощью изотопов ^7Be и ^{22}Na в образце сверхчистого алюминия в качестве носителя.
- Расчет фона в литий-бериллиевом детекторе солнечных нейтрино для различных каналов его генерации.
- Измерение энергетического спектра и расчет эффективности регистрации распадов ^7Be в различных типах детекторов – пропорциональном счетчике, микрокалориметре и полупроводниковом детекторе с кристаллом из сверхчистого германия. Выбор наиболее подходящего соединения бериллия для измерения активности ^7Be в пропорциональном счетчике или другом газонаполненном детекторе.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертации докладывались на международных конференциях «*Solar Neutrinos: News About SNUs*» (1997, Санта-Барбара, США), «*Non-Accelerator New Physics*» (2003, 2005, Дубна, Россия), «*4th International Workshop on Low Energy and Solar Neutrinos*» (2003, Париж, Франция), «*Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics*» (2006, Париж, Франция) и «*Physics of Massive Neutrinos*» (2008, Милос, Греция),

международной школе «*Neutrinos in Cosmology, in Astro-, Particle- and Nuclear Physics*» (2009, Эриче, Италия), а также на школе и семинарах ИЯИ РАН.

Основные результаты диссертации опубликованы в [1-17].

Личный вклад автора.

Все приведенные результаты получены либо самим автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 158 страницах, включая 70 рисунков, 20 таблиц и список литературы, который включает 267 наименований.

Работа была выполнена в Отделе лептонов высоких энергий и нейтринной астрофизики ИЯИ РАН.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **Введении** дан краткий обзор современного состояния дел в области исследования солнечных нейтрино. Изложена история возникновения т.н. «проблемы солнечных нейтрино», приведены некоторые теоретические сведения, касающиеся формализма описания нейтринных осцилляций (матрица смешивания *Понтекорво-Маки-Накагавы-Саката*, эффект *Михеева-Смирнова-Вольфенштейна* и т.д.). Также перечислены эксперименты, ведущиеся в этой области физики нейтрино. Имеющиеся к середине 2009 г. результаты измерения параметров осцилляций (Табл. 1), а также экспериментальные данные о потоках солнечных нейтрино (Рис.1) показывают хорошее согласие теории и эксперимента.

Таблица 1. Параметры нейтринных осцилляций, определенных по совокупности данных к середине 2009 года [1, 2].

Параметр	Величина наилучшего согласия $\pm 1\sigma$	Интервал 3σ
$\delta m^2 [10^{-5} \text{ эВ}^2]$	$+7.59^{+0.19}_{-0.21}$	$7.05 - 8.34$
$\Delta m^2 [10^{-3} \text{ эВ}^2]$	$\pm 2.40^{+0.12}_{-0.11}$	$\pm (2.07 - 2.75)$
$\text{Sin}^2\theta_{12}$	$0.319^{+0.021}_{-0.016}$	$0.25 - 0.37$
$\text{Sin}^2\theta_{23}$	$0.50^{+0.07}_{-0.06}$	$0.36 - 0.67$
$\text{Sin}^2\theta_{13}$	$0.01^{+0.016}_{-0.011}$	≤ 0.056

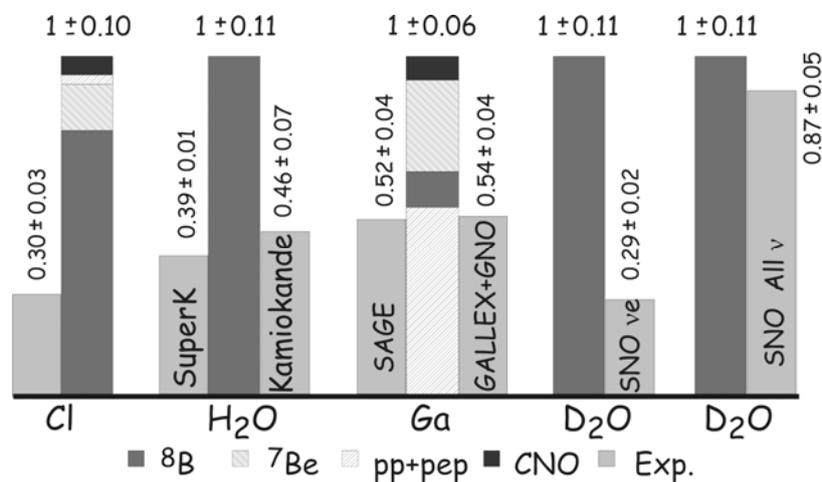


Рис.1. Сравнение результатов экспериментов с расчетами по CCM BPS08(GS) без учета осцилляций.

Помимо этого, во Введении отмечены некоторые нерешенные вопросы, а именно: определение формы энергетического спектра pp -нейтрино и измерение потока pep - и CNO -нейтрино. В заключение даны характеристики литиевого детектора и его сравнение с другими радиохимическими детекторами солнечных нейтрино (Табл. 2).

Таблица 2. Поток солнечных нейтрино и скорости захвата в различных детекторах по предсказаниям ССМ BPS08(GS) и BPS08(AGS) [3] с квадратичной ошибкой на уровне 1σ (без учета осцилляций). Для потоков ^{13}N - и ^{15}O -нейтрино учтены новые значения сечений [4]. Ожидаемая скорость счета для литиевого детектора вычислена по данным из [5]. Экспериментальные данные для хлорного детектора – из [6], для трех галлиевых – из [7]

Источ.	Поток ($10^{10}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)		Cl (SNU)		Ga (SNU)		Li (SNU)	
	BPS08(GS)	BPS08(AGS)	GS	AGS	GS	AGS	GS	AGS
pp	5.97(1.00±0.006)	6.04(1.00±0.005)	0.00	0.00	70.2	70.9	0.0	0.0
pep	$1.41\cdot 10^{-2}$ (1.00±0.011)	$1.45\cdot 10^{-2}$ (1.00±0.010)	0.22	0.22	2.8	2.9	9.3	9.5
hep	$7.90\cdot 10^{-7}$ (1.00±0.15)	$8.22\cdot 10^{-7}$ (1.00±0.15)	0.04	0.04	0.1	0.1	0.1	0.1
^7Be	$5.07\cdot 10^{-1}$ (1.00±0.06)	$4.55\cdot 10^{-1}$ (1.00±0.06)	1.23	1.10	36.3	32.6	9.7	8.7
^8B	$5.94\cdot 10^{-4}$ (1.00±0.11)	$4.72\cdot 10^{-4}$ (1.00±0.11)	6.78	5.38	14.2	11.3	23.2	18.4
^{13}N	$2.88\cdot 10^{-2}$ (1.00±0.15)	$1.89\cdot 10^{-2}$ (1.00 ^{+0.14} _{-0.13})	0.05	0.03	1.8	1.2	1.2	0.8
^{15}O	$2.15\cdot 10^{-2}$ (1.00 ^{+0.17} _{-0.16})	$1.34\cdot 10^{-2}$ (1.00 ^{+0.16} _{-0.15})	0.15	0.09	2.4	1.5	5.3	3.3
^{17}F	$5.82\cdot 10^{-4}$ (1.00 ^{+0.19} _{-0.17})	$3.25\cdot 10^{-4}$ (1.00 ^{+0.16} _{-0.15})	0.00	0.00	0.1	0.1	0.1	0.1
Полная скорость захвата без учета осцилляций, теор.			8.46 _{+0.87}	6.87 _{+0.69}	127.9 _{+8.1}	120.5 _{+6.9}	47.0 _{±2.8}	40.9 _{±1.2}
Полная скорость захвата, эксп.			2.56±0.23		66.1±3.1			

С учетом осцилляций скорость счета в литиевом детекторе составит 22.23 ± 1.12 SNU для модели с высокой и 18.74 ± 0.80 SNU для модели с низкой металлизацией.

В Главе 1 приводится физическая мотивация необходимости постановки литиевого эксперимента и приведены его основные задачи. Кроме того, в этой главе приведен краткий обзор стандартных солнечных моделей (ССМ). На настоящий момент остается открытым вопрос о выборе между моделями с высокой (GS08) и низкой (AGS08) металлизацией. Первая хорошо согласуется с данными гелиосейсмологии, но получаемая с ее помощью распространенность тяжелых элементов в фотосфере недостаточно точно совпадает со спектрометрическими наблюдениями. Со второй - ситуация обратная. Она лучше описывает интенсивность наблюдаемых спектральных линий тяжелых элементов, а их содержание в солнечной фотосфере совпадает с наблюдаемой распространенностью таких элементов в звездах В-типа из ближайшего окружения Солнца. Однако результаты расчетов по этой модели вступают в противоречие с данными гелиосейсмологии.

Далее нами показано, что, если допустить существование некоторого процесса перемешивания между внутренними и внешними областями Солнца (скорость которого задается коэффициентом перемешивания k , показывающим, какая часть массы Солнца участвует в перемешивании, а длительность - временем перемешивания T_{mix}), то это приведет к увеличению потока ^{13}N -нейтрино по сравнению с величиной, рассчитанной по обеим моделям. Продемонстрировано, что существуют такие области на плоскости $k - T_{mix}$, где наблюдаемые переменные (средний молекулярный вес в ядре Солнца, содержание изотопов в фотосфере), а также поток бериллиевых нейтрино не выходят за границы экспериментальных ошибок, но в то же время поток ^{13}N -нейтрино может существенно превышать рассчитанный по модели без перемешивания (Рис.2, Рис.3).

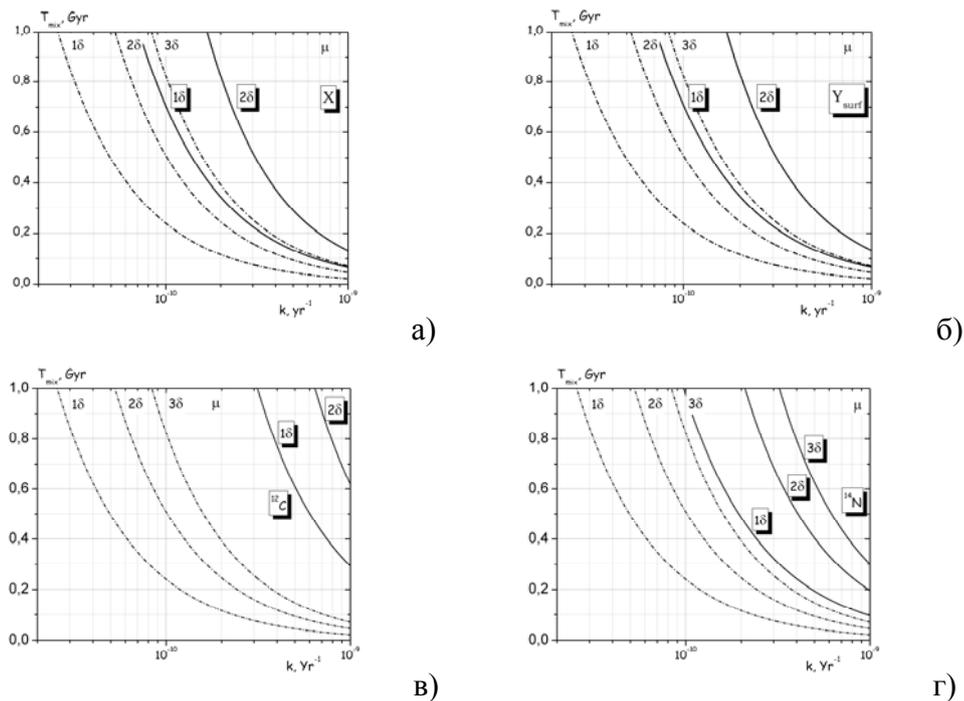


Рис.2. Изолинии отклонений наблюдаемых величин, рассчитанные для случая перемешивания с заданными T_{mix} (вертикальная ось) и k (горизонтальная), от значений без перемешивания на настоящий момент времени: а) – содержания водорода, б) – гелия, в) – углерода, г) – азота в фотосфере в единицах стандартной ошибки измерения (взяты из [8, 9]). Пунктиром изображены контурные линии отклонения среднего молекулярного веса в аналогичных единицах.

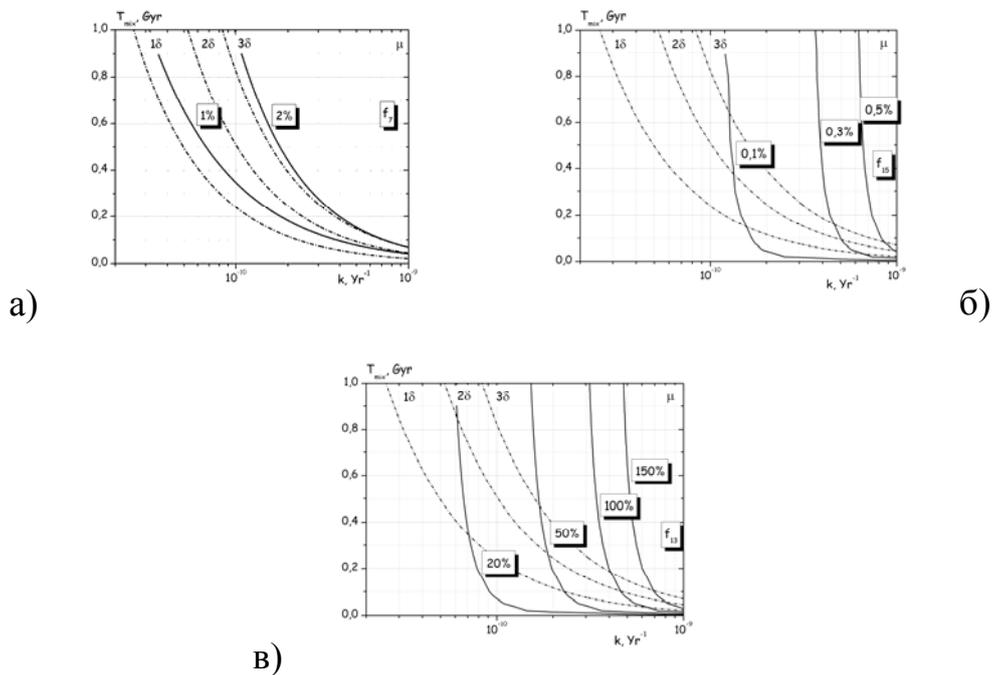


Рис.3. Изолинии отклонений величин потоков солнечных нейтрино, рассчитанные для случая перемешивания с заданными T_{mix} (вертикальная ось) и k (горизонтальная), от значений без перемешивания на настоящий момент времени: а) – потока ${}^7\text{Be}$ -нейтрино, б) – потока ${}^{15}\text{O}$ -нейтрино, в) – потока ${}^{13}\text{N}$ -нейтрино в процентах. Пунктиром изображены контурные линии отклонения среднего молекулярного веса в аналогичных единицах.

При этом поток нейтрино от распадов ${}^{15}\text{O}$ изменяется незначительно. Таким образом, увеличенный поток ${}^{13}\text{N}$ -нейтрино при практически неизменных потоках нейтрино от других источников является характерным и весьма чувствительным признаком перемешивания внутри Солнца.

В электронных детекторах эффект от увеличенного потока этих нейтрино приводит к увеличению числа событий в области сигнала от бериллиевых нейтрино, в связи с чем невозможно разрешить модель с низкой металлизацией при существовании перемешивания от модели с высокой металлизацией без перемешивания. Результаты, полученные в литиевом эксперименте совместно с данными других детекторов дадут возможность сделать выбор между такими моделями.

Глава 2 посвящена вопросам фона в литиевом детекторе. Как и во всех радиохимических детекторах, расположенных глубоко под землей, можно выделить три основных канала фона:

1). Фон от радиоактивных примесей в литии и в конструкционных материалах, из которых изготовлен детектор. Он обусловлен ядерными реакциями от нейтронов деления ^{238}U , а также от α -частиц, излучаемых изотопами уранового и ториевого рядов.

2). Фон от горных пород и отделочных материалов подземной камеры, где располагается детектор. Его причиной являются:

- реакции от нейтронов деления ^{238}U ;
- реакции от нейтронов из (α, n) -реакций от α -частиц из распадов элементов уранового и ториевого рядов на легких ядрах, входящих в состав материалов пород (поскольку для тяжелых ядер сечение таких реакций мало из-за кулоновского барьера).

3). Фон от мюонов космических лучей. В инициированных ими каскадах образуется значительное количество ядерно-активных частиц, способных привести к образованию ядер ^7Be в литии.

Радиационная чистота лития была определена в результате измерений 30 кг металлического лития на сцинтилляционном детекторе $\text{NaI}(\text{Tl})$. Статистическая обработка результатов измерения позволила установить предел на содержание урана и тория на уровне $4 \cdot 10^{-10}$ г/г. При такой концентрации урана и тория величина фона от этих примесей составляет менее 1 % от ожидаемого эффекта от солнечных нейтрино.

Остальные составляющие фона рассчитывались по методу Монте-Карло с использованием библиотечных данных о сечениях и угловых распределениях реакций. В качестве входных параметров программ расчета использовались опубликованные экспериментальные данные. В результате мы получили, что фон от горных пород и отделочных материалов подземной камеры, где планируется поместить детектор, составит 0.03 SNU , а от мюонов – около 0.07

SNU. Таким образом, фон литиевого детектора не превысит уровень 1.5 % от ожидаемого эффекта.

В Главе 3 рассматривается методика извлечения бериллия из металлического лития. Для детальной отработки этой методики нами была изготовлена лабораторная (тестовая) установка (Рис.4).

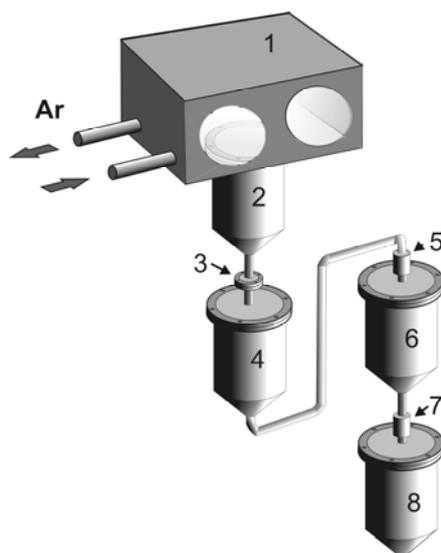


Рис.4. Схема установки: 1 – аргоновый бокс, 2 – бак №1 (загрузочный), 3 – устройство для введения образца алюминия в качестве носителя изотопов ${}^7\text{Be}$ и ${}^{22}\text{Na}$, 4 – бак №2 (сливной), 5 – фильтр №1, 6 - бак №3, 7 – фильтр №2, 8 - бак №4. В процессе работы все части установки прогревались при помощи нагревательных элементов (на рисунке не указаны).

В качестве «маркеров» мы использовали изотопы ${}^7\text{Be}$ и ${}^{22}\text{Na}$ в носителе из сверхчистого алюминия, образованные при облучении алюминиевой полосы протонами на сильноточном ускорителе ИЯИ РАН. Образец с предварительно измеренной активностью помещался в устройство для введения образца и далее при переливании жидкого лития из загрузочного бака №1 вводился в установку.

Было установлено, что во время перемешивания при переливании лития бериллий сорбируется в окисной пленке на поверхности лития и при перекачивании лития из сливного бака №2 в бак №3 практически полностью (более 96%) остается на внутренней поверхности сливного бака.

В результате исследований было показано, что:

- При извлечении бериллия из лития необходимо использовать термостатический режим.
- Следует использовать проточную конструкцию баков модуля. Каждый модуль состоит из двух баков, теплоизолированных в общем корпусе, как изображено на Рис.5.

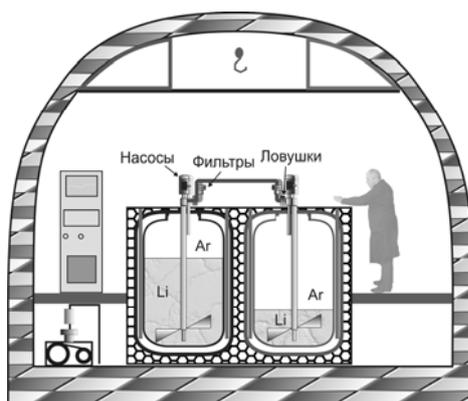


Рис.5. Схема модуля литий-бериллиевого детектора.

Дальнейшая процедура извлечения выглядит следующим образом:

- После перекачки лития бериллий извлекается со стенки бака орошением смесью дистиллированной воды и спирта.
- Извлечение ${}^7\text{Be}$ из раствора.
- Очистка от примесей.
- Приготовление ацетилацетоната бериллия или твердого образца, содержащего ${}^7\text{Be}$ в зависимости от метода измерения.

Таким образом, была получена доказательная база в обоснование разработанной методики. Коэффициент извлечения при такой методике оказался равен 96%, потери лития в процессе извлечения не превышают нескольких процентов. При такой технологии извлечения оптимальной является модульная структура детектора (20 модулей по 500 кг лития каждый).

В **Главе 4** рассмотрены методы счета единичных атомов ${}^7\text{Be}$. Нами были исследованы термодинамические свойства летучих соединений бериллия, которые можно использовать в газонаполненных детекторах. Также

проанализированы вопросы оптимизации параметров и режима работы пропорционального счетчика в одноэлектронной области, выбора рабочего газа и т.д. Был измерен фон таких счетчиков, помещенных в колодец детектора *NaI* в одноэлектронной области при комнатной температуре при различных давлениях газа в режиме антисовпадений с сигналом внешнего сцинтилляционного детектора, антисовпадений и отбора по форме импульса, а также в режиме совпадений с γ -квантами с энергией 478 кэВ (Табл.3).

Таблица 3. Фон пропорциональных счетчиков в области одноэлектронных импульсов при комнатной температуре.

Счетч.	Матер. катода	Напряж., В	Время измер., сут.	Давл., Торр	Скор. счета антисовп. NaI, сут ⁻¹	Скор. счета антисовп. NaI +ADP, сут ⁻¹	Совпад. с NaI, имп. за все время изм.
Ynl	C	1700	5.2	350	12.3 ± 1.5	9.8 ± 1.3	0
		1530	2.0	200	98.2 ± 7.0	75.6 ± 6.1	1
Fe41	FeCr	1700	8.8	350	43.8 ± 2.2	38.3 ± 2.0	0
		1500	3.0	200	68.6 ± 4.8	54.1 ± 4.2	0
		1400	0.7	100	177.7 ± 15.5	149.0 ± 14.2	1
Fe5	Fe	1500	2.8	200	94.0 ± 5.7	70.3 ± 5.0	0

Измерена также эффективность регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ в пропорциональном счетчике при высокой температуре (использовался кварцевый счетчик с катодом из углеродной пленки, изготовленный В.Э.Янцем). Для счётчика, содержащего 10 мкг ацетилацетоната бериллия* в качестве носителя, при давлении изобутана 200 Торр и температуре 200°C эффективность достигает ~ 60% в одноэлектронной области (в режиме e^- - γ совпадений ~ 6%). Эту величину можно улучшить, понизив уровень шумов предусилителя и увеличив отношение рабочего объема счетчика к его полному объему.

Применение низкотемпературных детекторов для регистрации ядерного излучения позволяет достичь эффективности счета, близкой к 100%. Совместно с группой С.Витале (*INFN*, Генуя) нами была исследована возможность регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ на микрокалориметре в криогенной лаборатории

* Синтез ацетилацетоната бериллия был осуществлен Г.Я.Новиковой по методике, описанной в [10]

INFN. Абсорбером микрокалориметра служила окись бериллия и металлический бериллий, облученные интенсивным пучком протонов на протонном ускорителе Института ядерных исследований РАН. На Рис.6 приведен спектр от распадов ${}^7\text{Be}$ в металлическом и оксидном абсорбере.

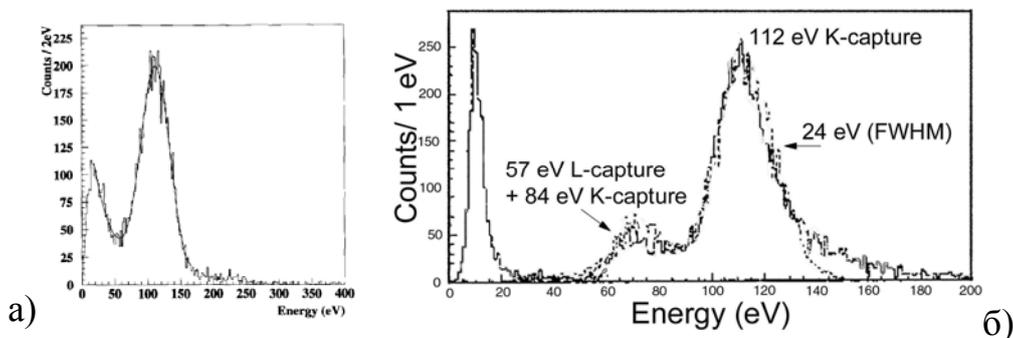


Рис.6. Энергетический спектр импульсов от распадов ${}^7\text{Be}$ в а) – металлическом и б) – оксидном абсорбере без дискриминации по форме импульса

Из формы спектра видно, что фон в области ниже 50 и выше 200 эВ можно легко дискриминировать от спектра полезных сигналов. Измерения с обоими абсорберами через 41 день (металл) и 60 дней (оксид) показали уменьшение скорости счета в соответствии с периодом полураспада 55 ± 3 суток, что хорошо согласуется с соответствующей величиной для ${}^7\text{Be}$ (53.3 суток), при этом форма энергетического спектра оставалась неизменной. В этих исследованиях впервые была реализована идея регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ с помощью криогенного детектора.

Способ регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ с помощью полупроводникового детектора методически является наиболее простым. Однако максимально возможное число полезных событий в таком детекторе приблизительно на порядок меньше, поскольку только 10.8% распадов ${}^7\text{Be}$ сопровождается излучением γ -квантов). Это предъявляет высокие требования к фону, тем не менее, достигнутый за последнее время прогресс в создании низкофоновых полупроводниковых детекторов на основе кристаллов сверхчистого германия (*HPGe*) позволяет рассчитывать на достижение фона, достаточного для

измерений эффекта от солнечных нейтрино в литиевой мишени с необходимой точностью. Используя известные литературные данные о фоновых характеристиках существующих и разрабатываемых германиевых детекторов, мы рассчитали, какова будет ошибка измерений активности в зависимости от времени проведения эксперимента в *HPGe* детекторе, фон которого в области энергий 478 кэВ равен $\sim 1.5 \text{ кэВ}^{-1} \text{ кг}^{-1} \text{ год}^{-1}$ (Табл.4).

Таблица 4. Расчетная ошибка при регистрации распадов ${}^7\text{Be}$ в *HPGe* весом 1 кг в пересчете на одно измерение.

Количество измерений в серии	10	20	40
Среднее стандартное отклонение, σ	0,82	0,58	0,41
Относительная ошибка, %	30	20	15

Если для счета распадов ${}^7\text{Be}$ использовать детектор массой 4 кг с фоновыми характеристиками, аналогичными тем, которые предполагается достичь в проекте *GERDA* [11], то относительную ошибку, приведенную в последней строке Табл.4, можно уменьшить приблизительно в 2 раза.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Проведены расчеты, показывающие принципиальную возможность увеличенного по сравнению с ССМ потока нейтрино от реакции ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$, обусловленную перемешиванием между центральной и внешними областями Солнца.
2. Показано, что литий-бериллиевый эксперимент по регистрации солнечных нейтрино позволит, совместно с данными других экспериментов, сделать выбор между солнечными моделями с различным содержанием металлов, включая модели с перемешиванием.
3. Проведен расчет каналов фона в литий-бериллиевом детекторе солнечных нейтрино. Показано, что вклад от внешних источников фона ($\sim 0.15 \text{ SNU}$) пренебрежимо мал по сравнению с эффектом от солнечных нейтрино ($\sim 22 \text{ SNU}$ с учетом осцилляций).
4. Измерена радиационная загрязненность образцов лития, который планируется использовать в качестве мишени. Установлено, что содержание

5. На лабораторных установках отработана процедура извлечения бериллия из металлического лития с эффективностью извлечения более 95%, при этом потери лития в результате процедуры извлечения не превышают 1%. Установлено, что извлечение бериллия из металлического лития должно проводиться в термостатическом режиме, т.е. нет необходимости манипулировать температурой во время процедуры извлечения с целью получения большей эффективности этого процесса. Это позволит не только упростить технологический процесс, но и существенно уменьшить потребление энергии.
6. Изучены термодинамические свойства соединений бериллия, которые можно использовать для измерения активности ${}^7\text{Be}$ в пропорциональном счетчике или другом газонаполненном детекторе.
7. Измерена эффективность счета ${}^7\text{Be}$ в пропорциональном счетчике при температуре 200°C (60%). Показана принципиальная возможность измерения активности извлеченного бериллия с высокой эффективностью в криогенном детекторе. Кроме того, с помощью моделирования по методу Монте-Карло показано, что возможна регистрация распадов ${}^7\text{Be}$ в полупроводниковом детекторе из сверхчистого германия с удовлетворительной точностью (погрешность измерения скорости образования ${}^7\text{Be}$ в литиевом детекторе от солнечных нейтрино может составить 10% за пять лет при регистрации распадов с помощью HPGe детектора массой 4 кг).

Публикации автора по материалам диссертации.

1. A.Kopylov, V.Petukhov *On The Mass Eigenstate Composition Of The 8B Neutrinos From The Sun* // JCAP, 2007. v.04, p.002

2. A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov, A.Solomatin *A Lithium experiment in the program of solar neutrino research* // Phys.Atom.Nucl. 2006. v.69, pp.1829-1832.
3. A.Kopylov, V.Petukhov *Seasonal variations of solar neutrino rates in lithium detector* // Phys. Lett. B, 2002. v.544, p.11
4. С.Н.Даньшин, Г.Т.Зацепин, А.В.Копылов, В.В.Петухов, Е.А.Янович *Проблема солнечных нейтрино и радиохимический литиевый детектор* // ЭЧАЯ, 1997. т.28, №1, стр.5
5. M.Galeazzi, G.Gallinaro, F.Gatti, P.Meunier, S.Vitale, A.V.Kopylov, V.V.Petukhov, E.A.Yanovich, G.T.Zatsepin *Lithium versus chlorine: for the solution of the solar neutrino problem* // Phys.Lett. B, 1998. v.398, p.187
6. A.Kopylov, V.Petukhov *Neutrinos from CNO cycle at the present epoch of the solar neutrino research* // Progress in Particle and Nuclear Physics, v.64 (2010) pp. 423-425
7. А.В.Копылов, И.В.Орехов, В.В.Петухов, А.Е.Соломатин *Физическое обоснование литиевого эксперимента* // Письма в ЭЧАЯ, 2007. т.4, №4, стр.552
8. A.Kopylov, V.Petukhov *Prospects for studying the solar CNO cycle by means of a lithium neutrino detector* // JCAP, 2008. v.10, p.007
9. A.Kopylov, V.Petukhov *Neutrino fluxes from CNO cycle in the Sun in the non stationary case with mixing* // JCAP, 2009. v.8, p.006
10. A.V.Kopylov, I.V.Orekhov, V.V.Petukhov, A.E.Solomatin, M.N.Arnoldov *Lithium Experiment on Solar Neutrinos to Weight the CNO Cycle* // Physics of Atomic Nuclei, 2004. V.67, N6, pp.1182–1187
11. А.В.Копылов, И.В.Орехов, В.В.Петухов, А.Е.Соломатин *Исследование метода регистрации солнечных нейтрино с помощью литиевого детектора* // ЖТФ, 2009. т.79, вып.7, с.133
12. Г.Я.Новикова, В.В.Петухов *Извлечение микроколичеств бериллия из водных растворов лития* // Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1999. №3

13. Я.Х.Гринберг, В.В.Петухов, Г.Я.Новикова и др. *Термодинамические свойства β -дикетонатов бериллия* // Журн. физ. химии, 1987. т.LXI, №11, с.2894
14. Я.Х.Гринберг, В.Б.Лазарев, В.В.Петухов, Г.Я.Новикова и др. *Термодинамические свойства фторзамещенных β -дикетонатов Be и Al* // Доклады АН СССР, 1987. т.297, №3, с.633
15. М.Н.Арнольдov, А.В.Копылов, И.В.Орехов, В.В.Петухов, Е.А.Янович *Литий в проблеме солнечных нейтрино* // Изв. вузов. Ядерная энергетика, 1999. №3, с.95
16. Г.Я.Новикова, В.В.Петухов, Е.А.Янович, В.Э.Янц *Разработка высокоэффективного метода регистрации низкой активности ^7Be в литиевом детекторе солнечных нейтрино* // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 1999. №3, сс.109-113
17. A.Kopylov, I.Orekhov, V.Petukhov, A.Solomatin, G.Zatsepin, M.Arnoldov *Development of the Technology of Radiochemical Lithium Detector of Solar Neutrinos* // XII-th Int.School "Particles and Cosmology", Baksan Valley, 2003, p.252

Литература.

1. M.Maltoni, T.Schwetz *Three-flavour neutrino oscillation update and comments on possible hints for a non-zero θ_{13}* // 7th Int. Workshop Ident. of Dark Matter 2008, arXiv:hep-ph/0812.3162
2. R.Martin for the SNO Collaboration *Results from the Neutral Current Detector phase of the Sudbury Neutrino Observatory* // arXiv:hep-ph/0905.4907
3. C.Peña-Garay, A.M.Serenelli *Solar neutrinos and the solar composition problem* // arXiv:0811.2424v1 [astro-ph]
4. LUNA collaboration *First measurement of the $^{14}\text{N}(p, \gamma)^{15}\text{O}$ cross section down to 70 keV* // Phys. Lett. B, 2006. v.634, p.483

5. J.N.Bahcall, M.H.Pinsonneault, S.Basu *Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos, and helioseismological properties* // *Astrophys. J.* 2001. v.555, p.990
6. Р.Дэвис *Полвека с солнечными нейтрино* // *УФН*, 2004. т.174, №4, с.408
7. J.N.Abdurashitov, V.N.Gavrin, V.V.Gorbachev et al. (SAGE Collaboration) *Measurement Of The Solar Neutrino Capture Rate With Gallium Metal. Iii: Results For The 2002--2007 Data-Taking Period* // *Phys.Rev.C*, 2009. v.80, p.015807
8. M.Asplund, M., N.Grevesse, A.J.Sauval *The solar chemical composition* // *Nucl.Phys.*, 2006. A777, p.1-4
9. F.Delahaye, M.H.Pinsonneault, *The solar heavy-element abundances. I. Constraints from stellar interiors* // *Astrophys. J.*, 2006. v.649, p.529
10. Г.Я.Новикова *Исследование возможностей извлечения микроколичеств бериллия из лития с целью создания радиохимического Li-Be детектора солнечных нейтрино* // Диссертация на соискание ученой степени к.х.н., Москва, 2001
11. A.Smolnikov for the GERDA collaboration *Status of the GERDA experiment aimed to search for neutrinoless double beta decay of ^{76}Ge* // arXiv:0812.4194v1 [nucl-ex], 2008