

## Исследование метода регистрации солнечных нейтрино с помощью литиевого детектора

© А.В. Копылов, И.В. Орехов, В.В. Петухов, А.Е. Соломатин

Институт ядерных исследований РАН,  
117312 Москва, Россия  
e-mail: kopylov@al20.inr.troitsk.ru

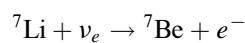
(Поступило в Редакцию 14 мая 2008 г.)

На лабораторной стендовой установке разработан метод регистрации солнечных нейтрино с помощью литиевого детектора. Получен коэффициент извлечения бериллия из лития 96.4% и показано, что потери лития за время процедуры извлечения составляют менее 1%. Полученные результаты полномасштабного эксперимента массой 10t, состоящего из 20 модулей по 500 kg лития каждый. Технические решения, сформулированные по результатам этой работы, позволяют приступить к созданию пилотной установки на 500 kg лития.

PACS: 26.65.+t, 95.55.Vj

### Введение

Изотоп  ${}^7\text{Li}$  как перспективная мишень для захвата солнечных нейтрино был впервые предложен Г.Т. Зацепиным и В.А. Кузьминым [1], также независимо Дж. Бакаллом [2] много лет назад. Ядра  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^7\text{Be}$  являются зеркальными, а переходы между этими ядрами — сверхразрешенными. Поэтому поперечное сечение реакции захвата нейтрино литием



относительно велико и рассчитывается с высокой точностью. Ввиду теплового уширения в веществе Солнца детектор способен также регистрировать бериллиевые нейтрино, как это впервые было показано Г.В. Домогацким [3], а затем более точно рассчитано Дж. Бакаллом [4]. Другими факторами, делающими детектор весьма привлекательным, является малый атомный вес мишени и высокое (92.5%) содержание в литии изотопа  ${}^7\text{Li}$ . В совокупности это определяет малую массу детектора при сравнительно высокой эффективности регистрации. Для постановки полномасштабного литиевого детектора солнечных нейтрино достаточно 10t лития. Отдельные вопросы по реализации литиевого проекта были рассмотрены в ряде работ [5–11].

### Теоретический анализ

Разрабатывается методика радиохимического литиевого детектора с использованием металлического лития в качестве мишени. Главным достоинством литиевого детектора является его высокая чувствительность к нейтрино, генерируемым в CNO-цикле. Выбор радиохимической методики обусловлен тем, что для электронных детекторов задача регистрации нейтрино от CNO-цикла представляется трудно реализуемой ввиду малых потоков и сравнительно низких энергий этих

нейтрино. Использование металлического лития имеет то преимущество, что для этой мишени некоторые каналы фона (фрагментация мишени ядерно-активной компонентой от космических лучей и фон — от внутренней радиоактивности) либо отсутствуют, либо намного слабее, чем для соединений лития [12].

Для реализации литиевого проекта необходимо решить в основном две проблемы: разработать методику извлечения бериллия из металлического лития и метод счета извлеченных атомов  ${}^7\text{Be}$ . Изотоп  ${}^7\text{Be}$  достаточно сложно регистрировать, поскольку при его распаде выделяется всего 55 eV в виде кинетической энергии оже-электронов.

Поскольку система счета должна обладать низким фоном, возникают большие сложности по ее созданию. Однако можно обойти эту проблему, если использовать канал распада  ${}^7\text{Be}$  на возбужденный уровень  ${}^7\text{Li}$ . Интенсивность этого канала невелика (всего лишь 10%), однако, как нами было показано расчетным путем [13], она достаточна для получения точности примерно 10% и позволит существенно повысить точность измерения параметров нейтринных осцилляций, в особенности — угла смешивания. Поскольку в этом случае испускается гамма-квант с энергией 478 keV, система счета вполне реализуема на современном техническом уровне.

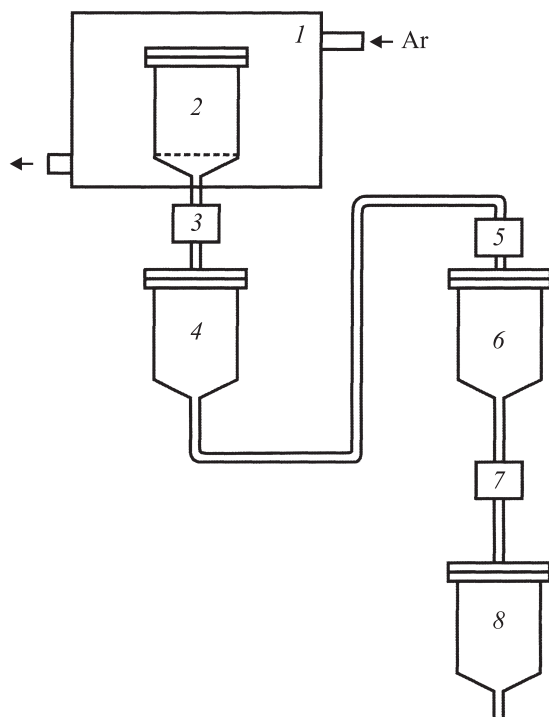
Если использовать сборку из сверхчистых германиевых (HPGe) детекторов с 4л-геометрией, можно достичь эффективности регистрации  ${}^7\text{Be}$  примерно 8% при достаточно высокой дискриминации фона. Такой метод регистрации удобен также тем, что можно использовать твердый образец, содержащий извлеченные атомы  ${}^7\text{Be}$  массой до нескольких грамм. Важно, чтобы самопоглощение гамма-линии 478 keV не приводило к существенному снижению эффективности счета. Использование твердого образца значительно снижает требования к технологии извлечения бериллия из лития.

Металлический литий используется в ряде технических приложений как хороший теплоноситель. По этой

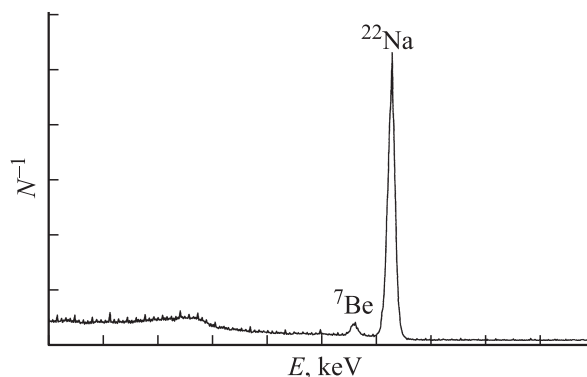
теме существует достаточно обширная литература, которая представлена в трудах отраслевых конференций. Для данной работы существенны следующие моменты. Технология замкнутых жидкометаллических литиевых контуров, используемая в настоящее время, мало пригодна для реализации литиевого проекта ввиду их конструктивной сложности. Литиевый детектор должен работать достаточно продолжительное время (5 лет), при этом система должна работать без перебоев, чтобы минимизировать мертвое время детектора. Конструкция установки должна быть максимально простой и надежной. Коэффициент извлечения бериллия из лития должен быть не ниже 90%, иначе это приводит к снижению эффективности. После каждой процедуры извлечения бериллия система должна вернуться в начальное состояние, т.е. характеристики детектора не должны изменяться со временем. Необходимо минимизировать потери лития в результате процедуры извлечения. Таковы основные требования к разрабатываемому детектору.

## Экспериментальная часть

Отработка технологии проводилась на лабораторных установках различной конструкции. На начальном этапе работы нами был получен важный результат — извлечения бериллия из лития может проводиться в термостатическом режиме, т.е. нет необходимости манипулировать температурой во время процедуры извлечения. Это существенно упрощает конструкцию установки и



**Рис. 1.** 1 — аргоновый бокс, 2 — загрузочный бак № 1, 3 — устройство для введения образца алюминия, 4 — сливной бак № 2, 5 — фильтр № 1, 6 — бак № 3, 7 — фильтр № 2, 8 — бак № 4.



**Рис. 2.** Энергетический спектр гамма-излучения облученного образца.

снижает энергопотребление. Следующей задачей было получение доказательной базы в обоснование выбранной технологии. Для этого была изготовлена специальная установка, изображенная на рис. 1.

Загрузочный бак помещен в герметичный бокс 1, через который пускается аргон. Литий высокой чистоты (99,9%) в количестве 3,21 (1,6 kg) помещается в загрузочный бак в атмосфере аргона через верхнюю крышку с фланцевым соединением. На дне бака имеется сетка из нержавеющей стали для очистки лития от пленки окислов. Расплавленный литий через трубку в дне бака поступает в устройство 3 ввода образца алюминия высокой чистоты массой 50 mg, облученного интенсивным пучком протонов с энергией примерно 100 MeV на сильноточном протонном ускорителе Института ядерных исследований РАН (Троицк). В результате облучения в алюминии нарабатываются активные  ${}^7\text{Be}$  и  ${}^{22}\text{Na}$ . Эта пара изотопов очень удобна для изучения процесса извлечения бериллия из лития.

На рис. 2 показан энергетический спектр гамма-излучения облученного образца, измеренный с помощью германиевого детектора.

Видно, что активность натрия намного выше активности бериллия. При дальнейших измерениях это может создать проблему, поскольку спектр натрия может маскировать спектр бериллия. Поэтому была проведена очистка образца алюминия от натрия до примерно равной интенсивности этих изотопов путем отгонки  ${}^{22}\text{Na}$  в графитовом тигле при температуре  $800^\circ\text{C}$  в вакууме.

На рис. 3 показан измеренный гамма-спектр образца после отгонки натрия. Важным был вопрос, происходит осаждение бериллия на оксидной пленке алюминия во время его расплава или нет. Если это необходимо, то после введения образца алюминия в расплавленный литий не получали бы однородного распределения бериллия по объему лития. С этой целью оксидная пленка алюминия стравливалась плавиковой кислотой, и измерения активности образца после травления показали, что бериллий не осаждается на оксидной пленке. Это доказывает, что при таком способе введения бериллия действительно получается однородная система литий–бериллий. Алюминий и натрий также были распределены равномерно

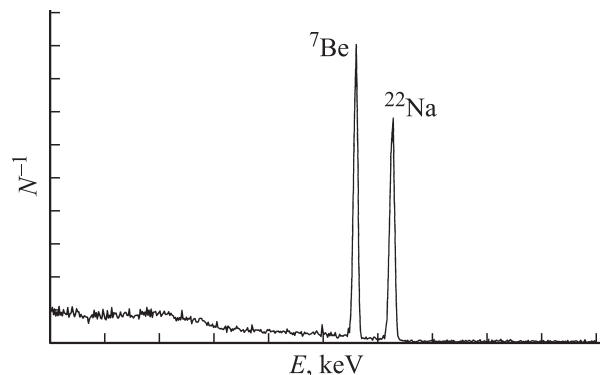


Рис. 3. Энергетический спектр гамма-излучения облученного образца после отгонки  $^{22}\text{Na}$ .

по объему лития ввиду их высокой растворимости в нем. Далее литий вместе с содержащимися в нем активными  $^7\text{Be}$  и  $^{22}\text{Na}$  поступал в сливной бак. Из этого бака литий под давлением аргона поступал в бак № 3 через фильтр № 1 с тремя сетками плотной навивки. И далее — через фильтр № 2 в бак № 4. Все элементы установки поддерживались при температуре  $210^\circ\text{C}$  во время процедуры извлечения, после чего система охлаждалась до комнатной температуры. Затем установка разрезалась на отдельные части и активность каждого узла измерялась с помощью гамма-спектрометра. В результате проведенных измерений было установлено следующее.

1. Изотоп  $^{22}\text{Na}$  практически полностью находился в литии в баке № 4. Потери этого изотопа за счет высаживания на стенках или фильтрах составили менее 1%.

2. Никаких следов активного  $^7\text{Be}$  в литии в баке № 4 не наблюдалось, т. е. бериллий полностью извлекался из лития.

3. Никаких следов активного  $^7\text{Be}$  на стенках бака № 3 и на фильтрах № 1 и № 2 не наблюдалось, проскок бериллия через сливной бак составил менее 1%.

4. Практически весь активный  $^7\text{Be}$  высадился на окисной пленке, удержанной стенками бака № 2 (сливной бак). Это было обеспечено малым диаметром сливной трубки на выходе бака № 2.

Тот факт, что активный  $^7\text{Be}$  осел на поверхности, облегчает дальнейшую процедуру извлечения, поскольку задача сбора активного  $^7\text{Be}$  с поверхности значительно проще, чем из объемного фильтра и, кроме того, приводит к минимальной потере лития в результате процедуры извлечения. Активный  $^7\text{Be}$  собирался с поверхности путем последовательного орошения поверхности бака № 2 мерными порциями дистиллированной воды. Каждая порция воды после смыва пропусклась через бумажный фильтр, и на выходе получали часть активного  $^7\text{Be}$  в нерастворимом осадке на фильтре и часть — в растворе после фильтра.

Всего было проведено 5 орошений по 100 ml каждое. Измерение уровня активности после каждого орошения показало, что за первые 4 орошения было смыто 96.4%

исходного активного  $^7\text{Be}$ . Из них 61.4% содержится в нерастворимой фазе и остальные 35% — в растворимой фазе. Значение 96.4% является вполне приемлемым для постановки литиевого эксперимента. Далее путем сжигания беззольных фильтров и измерения активности до и после сжигания было доказано, что активный  $^7\text{Be}$  при этом не теряется. Это объясняется тем, что литий не имеет летучих соединений. Таким образом, была показана эффективность использования этого метода концентрирования бериллия. Высаживание бериллия из раствора и перевод его в твердую фазу проводились с использованием методики, разработанной ранее [14]. При этом практически не наблюдалась потеря активного  $^7\text{Be}$ . Анализ содержания лития в растворе показал, что во время извлечения бериллия потери лития составили менее 1%, что вполне приемлемо для постановки эксперимента.

## Результаты и их обсуждение

По результатам этой работы получены следующие технические решения.

1. При извлечения бериллия из лития необходимо использовать термостатический режим.

2. Оптимальной является модульная структура детектора (20 модулей по 500 kg лития каждый).

3. Использование проточной конструкции баков модуля. Каждый модуль состоит из двух баков, теплоизолированных в общем корпусе, как изображено на рис. 4. Литий из одного бака модуля перекачивается в другой бак, и наоборот.

4. После перекачки лития бериллий извлекается со стенки бака орошением дистиллированной водой.

5. Фильтрация раствора со взвесью через бумажные или лавсановые фильтры с получением нерастворимого осадка и раствора.

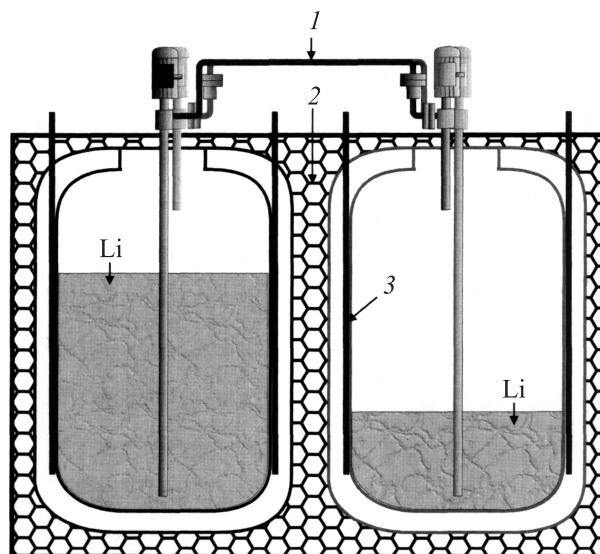


Рис. 4. Схема модуля на 500 kg лития. 1 — жидкометаллический контур, 2 — теплоизоляция, 3 — нагреватели.

б. Концентрирование раствора до получения твердого осадка.

Эти технические решения являются основой для проектирования и разработки пилотной установки литиевого детектора на базе одного литиевого модуля.

При создании литиевого детектора важно учесть зависимость фона от внутренней радиоактивности, обусловленную присутствием изотопов урана и тория в литии. Были проведены измерения концентрации урана и тория (в равновесии с дочерними продуктами) в литии с помощью низкофонового детектора NaI(Tl), окруженного слоем лития массой 30 kg. Измерения проводились в течение 40 дней с образцом лития, расположенного вокруг детектора, и далее в течение 60 дней измерялся фон без образца лития. Статистическая обработка данных позволила установить предел на содержание урана —  $4 \cdot 10^{-10}$  g/g и тория —  $2.2 \cdot 10^{-10}$  g/g. Учет систематической погрешности позволяет с высокой точностью установить предельное содержание урана и тория на уровне  $10^{-9}$  g/g. При таком уровне фон от примесей урана и тория составляет менее 1% от ожидаемого эффекта от солнечных нейтрино, что удовлетворяет требованиям эксперимента. При оценке фона были использованы результаты расчета, приведенные в работе [12].

Разработка литиевого детектора солнечных нейтрино на лабораторных установках в принципиальных вопросах завершена.

Найдены оптимальные условия и получен коэффициент извлечения бериллия из лития — 96%. Для реализации полномасштабного литиевого детектора с 10 t лития необходимо сконструировать и изготовить пилотную установку на базе одного литиевого модуля. На этой установке необходимо продемонстрировать надежную работу методики в масштабе реального эксперимента. Необходимо продолжить исследования в части концентрирования бериллия, имея в виду перспективу регистрации ультранизких активностей с помощью сборки германиевых детекторов.

## Заключение

Литиевый эксперимент потенциально может дать важную информацию о характере термоядерных реакций на Солнце и о новых свойствах нейтрино. В настоящее время у литиевого эксперимента нет конкурентов, так как чувствительность разрабатываемых электронных детекторов пока недостаточна для надежной регистрации нейтрино от CNO-цикла. Полученные результаты по разработке методики литиевого эксперимента показывают возможность реализации полномасштабного литиевого эксперимента с 10 t металлического лития на установке, состоящей из 20 литиевых модулей. Такая установка может быть расположена на сбойке двух туннелей на глубине порядка  $4000 \text{ hg/cm}^2$  и не требует выемки отдельной камеры, что существенно удешевляет и упрощает проект. Дальнейшая работа должна быть сконцентрирована на создании пилотной установки на

основе одного литиевого модуля с 500 kg лития и на разработке системы счета на основе сборки из свехчистых германиевых детекторов.

Исследования на металлическом литии, проведенные в рамках данной работы, имеют также важное прикладное значение. Нами определены технологический процесс, условия и геометрия по эффективной очистке лития от бериллия. Это может быть использовано, в частности, при создании интенсивных источников нейтронов на основе литиевой мишени (например, проект IFMIF [15]).

Авторы выражают благодарность за плодотворные обсуждения Г.Т. Зацепину, В.А. Кузьмину, Л.Б. Безрукову, а также Б.Л. Жуйкову за помощь при облучении образца алюминия на пучке протонов Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН и Г.Я. Новиковой — за проведение анализа на содержание лития в водных растворах.

Работа выполнена при поддержке гранта ведущих научных школ LSS-1786.2003.2, программы фундаментальных исследований президиума РАН „Нейтринная физика“ и гранта РФФИ № 04-02-16678.

## Список литературы

- [1] Kuzmin V.A. and Zatsepin G.T. // Proc. 9<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf. London, 1965. P. 1024.
- [2] Bahcall J.N. // Phys. Lett. 1964. Vol. 13. P. 332; Phys. Rev. Lett. 1969. Vol. 23. P. 251.
- [3] Domogatsky G.V. Preprint of Lebedev Physical Institute (FIAN, Moscow). 1969. N 153.
- [4] Bahcall J.N. // Rev. Mod. Phys. V. 1978. Vol. 50. P. 881.
- [5] Rowly J.K. // Proc. Conf. on Status and Future of Solar Neutrino Research. 1978. Brookhaven National Laboratory (BNL), USA. P. 265.
- [6] Veretenkin E., Gavrin V., Yanovich E. // Russian J. Atomic Energy. 1985. V. 88. N 1. P. 65.
- [7] Kopylov A.V., Likhovid A.N., Yanovich E.A., Zatsepin G.T. // Proc. Int. School „Particles and Cosmology“. Russia / Ed. by E.N. Alekseev et al. Singapore-New Jersey-London-HongKong: World Scientific, 1993. P. 63.
- [8] Danshin S., Zatsepin G., Kopylov A. et al. // Part. Nucl. 1997. Vol. 28. P. 5.
- [9] Galeazzi M., Gallinaro G., Gatti F. et al. // Phys. Lett. B. 1997. Vol. 398. P. 187.
- [10] Galeazzi M., Gallinaro G., Gatti F., Meunier P., Vitale S., Kopylov A., Yanovich E. // NIM A401. 1997. Vol. 2–3. P. 317.
- [11] Копылов А.В., Орехов И.В., Петухов В.В., Соломатин А.Е. // Письма в ЭЧАЯ. 2007. Т. 4. № 4. С. 552–558.
- [12] Zakharov Yu.I. // Proc. Int. Conf. „Neutrino Physics and Neutrino Astrophysics“ (Neutrino-77). М.: Nauka, 1978. Vol. 1. P. 64.
- [13] Kopylov A. and Petukhov V. <arXiv:hep-ph/0301016, arXiv:hep-ph/0306148>.
- [14] Новикова Г.Я. Исследование возможностей извлечения микроколичеств бериллия из лития с целью создания радиохимического Li–Be детектора солнечных нейтрино. Дисс. канд. хим. н. 2001.
- [15] IFMIF-KEP. Int. Fusion Materials Irradiation Facility—Key Element Technology Phase Rep. Jpn Atomic Energy Res. Inst. 2003.