

РЕГИСТРАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ НЕЙТРИНО СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ С ПОМОЩЬЮ РЕАКЦИИ ЗАХВАТА НЕЙТРИНО НА ЯДРЕ ^{115}In © 2022 г. И. Р. Барабанов¹⁾, Л. Б. Безруков¹⁾, В. И. Гуренцов¹⁾,
Г. Я. Новикова¹⁾, В. В. Синев^{1)*}, Е. А. Янович¹⁾

Поступила в редакцию 07.02.2022 г.; после доработки 21.03.2022 г.; принята к публикации 24.03.2022 г.

Рассматривается модификация проекта LENS (Low Energy Neutrino Spectroscopy) для спектроскопии солнечных нейтрино с энергией больше ~ 715 кэВ на базе новых технологий и решений. Такой детектор использует ядра ^{115}In как мишень для нейтрино. Создание детектора с массой сцинтиллятора около 200 т, нагруженного 10 т индия, позволит в течение пяти лет измерить энергетические спектры солнечных нейтрино от ^7Be , CNO-цикла и *pp*-нейтрино с малыми систематическими ошибками. Проведено моделирование детектора в виде набора ячеек с жидким сцинтиллятором, нагруженным индием ($\sim 10\%$ по весу). Сформулированы необходимые технические условия для ячейки детектора и даны оценки возможной скорости счета событий от внутреннего и внешнего фона с энерговыделением 600–1600 кэВ. Показана принципиальная возможность реализации такого детектора.

Посвящается Р. С. Рагавану

DOI: 10.31857/S0044002722040055

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование потоков солнечных нейтрино остается одной из наиболее актуальных задач нейтринной астрофизики, поскольку оно связано как с фундаментальными свойствами нейтрино, так и с проблемой внутреннего строения и эволюции звезд. В настоящей статье мы хотим обратить внимание на возможность более детального исследования области энергий, содержащей ^7Be , *pp*- и CNO-нейтрино. В этой области нейтринного спектра происходит переход от резонансных нейтринных осцилляций в веществе к вакуумным осцилляциям, с другой стороны, значение потока CNO дает детальную информацию о температуре в солнечном ядре и позволит решить возникшую в последние годы проблему “металличности” (содержание элементов тяжелее гелия) Солнца. Последние спектроскопические исследования Солнца дают меньшее значение для содержания “металлов” [1] (на $\sim 30\%$) по сравнению с использованным для построения Стандартной солнечной модели [2]. Фундаментальные результаты в этой области получены в эксперименте Борексина [3]. В этом эксперименте измерены потоки нейтрино от ^7Be (с точностью лучше 3%), *pp* (точность 7.5%) и CNO (точность $\sim 35\%$). Поток от *pp*-нейтрино

непосредственно в этой работе не измерялся. Он был измерен с точностью $\sim 20\%$, в зависимости от модели Солнца с высокой и низкой металличностью [4]. В работе [5] отмечается, что принятая в эксперименте Борексина процедура извлечения событий от CNO-цикла приводит к систематическому смещению наиболее вероятного значения на 30% в сторону увеличения. Это смещение возникает от того, что события от разных источников приходится выделять из суммарного энергетического спектра.

В связи с этим интересно рассмотреть возможность сцинтилляционного детектора на основе ^{115}In (95.7% в естественной смеси) для регистрации солнечных нейтрино средних энергий. Сцинтилляционный детектор с добавкой ^{115}In был предложен Р.С. Рагаваном [6] для регистрации солнечных нейтрино *pp*-цикла. Спектры солнечных нейтрино показаны на рис. 1. Важным преимуществом в этом случае является то, что нейтрино от ^7Be и *pp* регистрируется в реакции (ν_e, e) -захвата со спектром возникающих электронов в виде пика с энергией $T_e = E_\nu - \Delta$, где Δ — порог регистрации нейтрино. Измерение формы пика от ^7Be нейтрино теоретически могло бы позволить получить дополнительные сведения о распределении температуры в центре Солнца [7].

В результате реакции захвата нейтрино ядром ^{115}In в основном состоянии происходит переход

¹⁾Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия.

*E-mail: vsinev@inr.ru

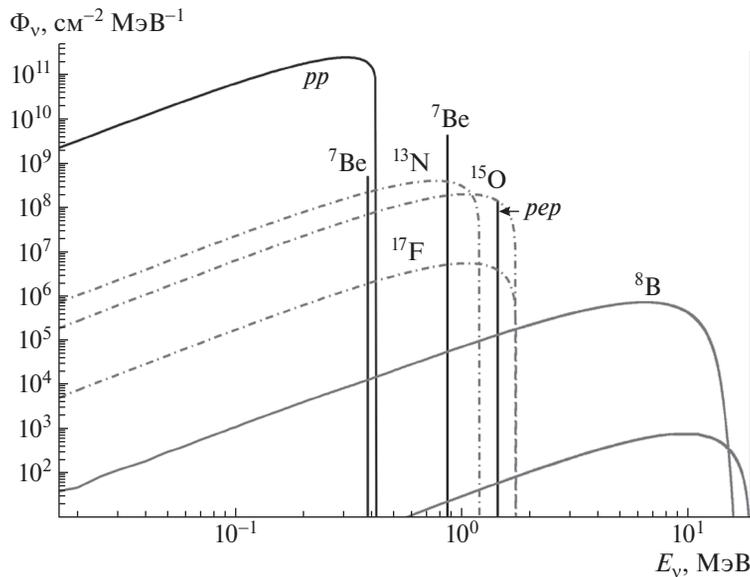


Рис. 1. Энергетические спектры солнечных нейтрино в стандартной солнечной модели. Штриховая кривая — спектры CNO-цикла.

в изомерное состояние ^{115}Sn ($\tau = 4.7$ мкс) на уровень с энергией 612.81 кэВ. Порог реакции составляет 115.2 кэВ.

В результате длительной работы над проектом LENS (Low Energy Neutrino Spectroscopy) был сделан вывод, что практическая реализация этой идеи связана с принципиальными проблемами [8]. ^{115}In является радиоактивным элементом с энергией бета-распада $E_{\text{макс}} = 497.49$ кэВ, совпадающей с областью энергий pp -нейтрино ($E < 420$ кэВ). В результате случайные совпадения между событиями от распада ^{115}In с учетом конечного энергетического разрешения создают трудно преодолимый фон (количество бета-распадов ^{115}In в 10 т составляет $\sim 2.6 \times 10^6$ соб./с). В случае CNO, ^7Be и pep -нейтрино энергия возникающего лептона существенно выше энергии распада ^{115}In , и эта проблема отсутствует, если использовать порог регистрации вблизи максимальной энергии бета-распада ^{115}In , чтобы уменьшить число срабатываний детектора (триггеров). С другой стороны, в течение прошедшего времени были созданы новые эффективные фотоприемники, позволяющие создавать компактные сцинтилляционные ячейки для реализации установки типа LENS.

Предлагается в качестве первого этапа создать детектор с общей массой ~ 200 т на основе небольших ячеек, расположенных в виде трехмерной матрицы. Импульсы в детекторе возникают от появляющегося в одной из ячеек в результате захвата нейтрино ядром ^{115}In электрона и последующего перехода ^{115}Sn в основное состояние с испусканием двух последовательных гамма-квантов с

энергиями 115.48 и 497.33 кэВ, которые с большой вероятностью регистрируются в соседних ячейках. Это дает возможность использовать задержанные совпадения, являющиеся уникальным сигналом нейтринного события.

Порог регистрации каждой ячейки по первому событию должен составлять ~ 600 кэВ, чтобы отрезать события собственной радиоактивности ^{115}In . Однако события от бета-электронов распада ^{115}In могут имитировать переход ^{115}Sn в основное состояние за счет конечного энергетического разрешения сцинтилляционного детектора. Ниже мы рассмотрим, сколько света необходимо зарегистрировать, чтобы эта имитация не вносила заметный вклад в события от солнечных нейтрино. Мы оценили скорость счета распадов ^{115}In , которые имитируют переход ^{115}Sn в основное состояние в детекторе, содержащем 1028 ячеек с 10 т индия.

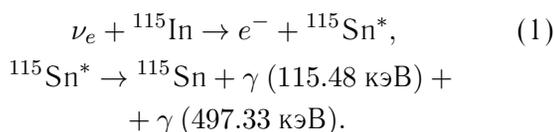
Реализация индийского детектора в новом технологическом исполнении дает возможность мониторинга солнечной активности по нейтринному излучению и изучения временных характеристик температур внутри Солнца во время его активных и спокойных фаз.

В работе [9] отмечается важность ^{115}In детектора в связи с тем, что ^{115}In захватывает солнечные нейтрино, а геоантинейтрино от распада ^{40}K не захватывает. Сцинтилляционные детекторы, использующие реакцию рассеяния на электронах, не различают нейтрино и антинейтрино, поэтому сравнение результатов индийского и такого сцинтилляционного детекторов позволит получить более точную информацию о потоке геоантинейтрино

от распада ^{40}K . В работе [10] регистрация геоантинейтрино от распада ^{40}K сцинтилляционным детектором рассматривается как важная задача.

2. РЕАКЦИЯ ЗАХВАТА НЕЙТРИНО НА ЯДРЕ ^{115}In

В результате реакции захвата нейтрино ядром ^{115}In , находящимся в основном состоянии, образуется изомерное состояние ^{115}Sn в возбужденном состоянии. Ядро ^{115}Sn оказывается на уровне 612.81 кэВ, период полураспада которого 3.26 мкс:



На рис. 2 показана схема распада ^{115}In по [11] и показаны возбужденные уровни ^{115}Sn , на одном из которых происходит захват нейтрино (612.81 кэВ) и с которого происходит излучение гамма-квантов.

Ожидаемый спектр электронов от взаимодействия нейтрино средних энергий с ^{115}In в детекторе представлен на рис. 3. Спектры от ^8B и $^{\text{hep}}$ оказываются не видны в этом диапазоне (см. табл. 1), как и спектр от ^{17}F , который здесь показан условно, как компонента CNO-цикла.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРИННЫХ СОБЫТИЙ В СЕКЦИОНИРОВАННОМ ДЕТЕКТОРЕ

Для моделирования мы использовали матрицу детекторов с размерами $80 \times 80 \times 10$ см (64 л). Всего 1028 ячеек. При плотности жидкого сцинтиллятора на основе ЛАБа 0.85 г/л получается 56 т. Масса индия при 10% по весу составляет 5.6 т, но мы рассчитывали статистику для 10 т, считая эту массу минимальной для детектора.

Основным вопросом при проектировании установки является выбор формы и размера ячейки. Эти параметры зависят от свойств жидкого органического индиевого сцинтиллятора (InЖС) — его светового выхода, прозрачности и допустимой концентрации индия. С другой стороны, с точки зрения уменьшения возможной имитации нейтринных событий выгодно использовать минимальные размеры ячейки, но при этом увеличивается их число. Возможности индиевого детектора рассмотрим на примере использования InЖС с концентрацией индия 10% по массе с общим количеством индия 10 т.

Событие считается нейтринным, если выполнены следующие условия:

Таблица 1. Число событий в сцинтилляционном детекторе от различных источников солнечных нейтрино за 5 лет измерения с мишенью, содержащей 10 т индия (осцилляции MSW учтены)

Источник нейтрино	Число событий в сцинтилляционном детекторе за 5 лет в 10 т индия (без учета эффективности), в скобках интеграл до 2 МэВ для жестких спектров
pp	2162
pep	34
^7Be	560
^{13}N	27
^{15}O	31
^{17}F	0.8
^8B	11 (0.05)
$^{\text{hep}}$	0.03 (2.4×10^{-5})

1) В одной из ячеек возникает импульс с энергией $E > 600$ кэВ. Это первое событие, обозначим его как $e1$. Это может быть электрон от захвата нейтрино или фоновое событие.

2) После этого срабатывает компактная группа из двух и более ячеек, окружающих первую ячейку во временном окне 15 мкс ($\sim 3\tau$ времени жизни ^{115}Sn). Суммарная выделяемая энергия в окружающих ячейках и первой $613 \pm 2\sigma$ кэВ за время ~ 10 нс. Назовем это событие $\gamma1 + \gamma2$. Размер компактной группы определяется условием поглощения 98% гамма-квантов $\gamma2$ с энергией 497.5 кэВ. Порог регистрации каждой ячейки при этом должен составлять $\sim 60-70$ кэВ, чтобы зарегистрировать два гамма-кванта, испускаемые ядром ^{115}Sn , образовавшимся в результате захвата нейтрино ^{115}In .

С учетом выше сформулированных критериев регистрации нейтринного события рассчитана скорость регистрации нейтринных потоков от ^7Be , CNO и pep . Результаты без учета эффективности регистрации представлены в табл. 1. На рис. 4 показан процесс регистрации, который использовался в моделировании.

4. ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НА ФОН ДЕТЕКТОРА

Энергия бета-распада ^{115}In (497 кэВ) меньше энергии, определяемой критериями регистрации нейтринного события в энергетическом окне 600–1600 кэВ, и непосредственно распад ^{115}In не имитирует нейтринные события. Однако такая

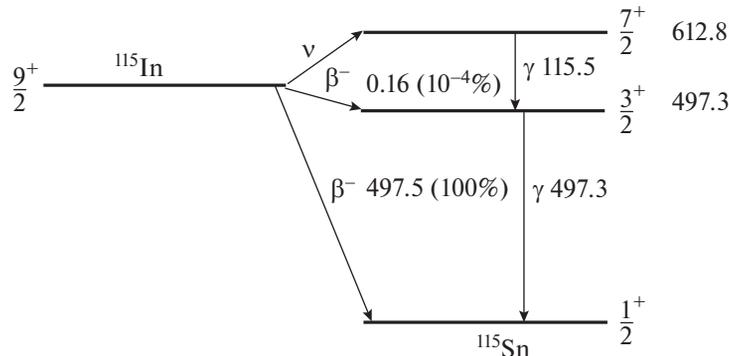


Рис. 2. Схема взаимодействия ν_e с ядром ^{115}In и последующего распада $^{115}\text{Sn}^*$. Энергии бета-переходов и гамма-квантов приведены в кэВ.

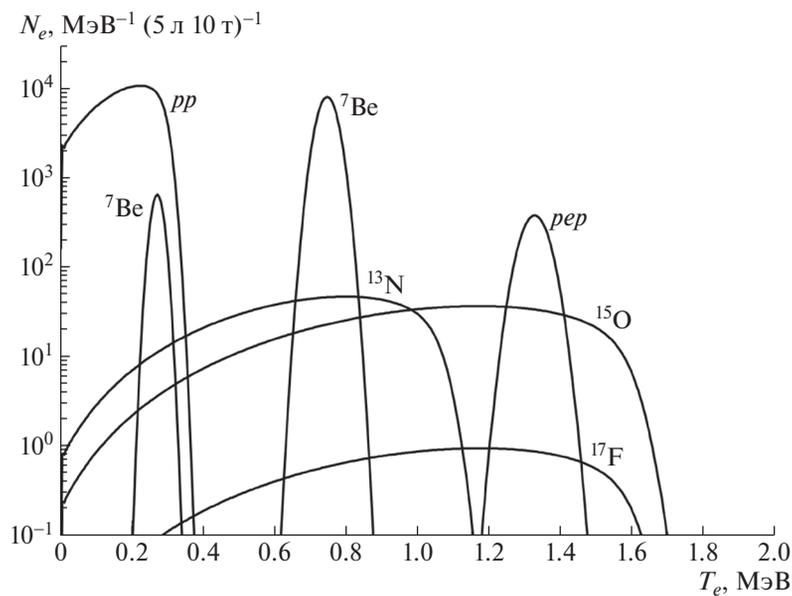


Рис. 3. Энергетические спектры электронов, рассчитанные для массы индия 10 т и времени измерения 5 лет. Здесь $T_e = E_\nu - \Delta$ — энергия электрона; энергетическое разрешение — из расчета 1 ф.э./кэВ.

имитация может возникать в результате конечного энергетического разрешения детектора при совпадении фонового импульса от естественной радиоактивности с распадом индия в соседних ячейках. Бета-электрон от распада индия может испустить тормозной гамма-квант, который может выйти из своей ячейки и зарегистрироваться в одной или нескольких соседних. Такое событие топологически будет имитировать переход в основное состояние ^{115}Sn .

Распределение по энергии с учетом энергетического разрешения от сигнала бета-электрона и его тормозного гамма-кванта в компактной группе сработавших ячеек представлено на рис. 5 вместе с аналогичным распределением для двух гамма-квантов, сопровождающих задержанный распад ^{115}Sn . Оба распределения получены методом

Монте-Карло при одинаковых критериях отбора этих событий. Доля событий от распада ^{115}In , попадающих в интервал энергии $613 \pm 2\sigma$ кэВ, хотя и мала, но составляет конечную величину. Если в ячейке возникло событие от какого-либо фонового процесса с энергосвободением 600–1600 кэВ, предшествующее бета-распаду в интервале 3τ , то с малой вероятностью может возникнуть полная имитация взаимодействия нейтрино. Под фоновыми процессами мы понимаем здесь процессы распада радиоактивных изотопов в скintилляторе, взаимодействие гамма-квантов и нейтронов из конструктивных материалов и окружающей породы, приводящие к энергосвободению в скintилляторе. Поскольку вероятность имитации распада ^{115}Sn критически зависит от энергетического разрешения, то и допустимая

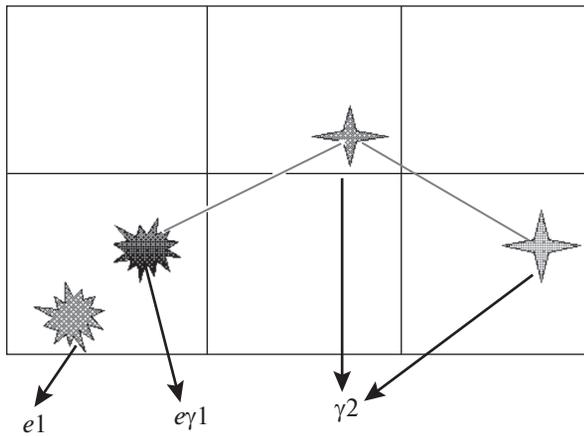


Рис. 4. Схема детектирования нейтринного события. $e1$ — электронный сигнал, $e/\gamma1$ — сигнал от гамма-кванта или конверсионного электрона с энергией 116 кэВ в ячейке, $\gamma2$ — гамма-квант с энергией 497 кэВ создает сигналы в окружающих ячейках. Сигналы $e1$ и $e/\gamma1$ совпадают в пределах 1.5×10^{-5} с. Сигналы $e/\gamma1$ и $\gamma2$ совпадают в пределах 10^{-8} с.

скорость фоновых событий в одной ячейке N_{Φ} будет следовать той же зависимости.

На рис. 6 представлена зависимость допустимой интенсивности фоновых событий от естественных внешних или внутренних источников в области (600–1600) кэВ в ячейке от ее энергетического разрешения, выраженного в количестве зарегистрированных фотоэлектронов. Полученная методом статистических испытаний допустимая интенсивность фоновых событий увеличивает погрешность регистрации нейтринных потоков от Солнца примерно на 10% (за 5 лет в 10 т индия). Сделанная оценка показывает, что имитация нейтринных событий критически зависит от энергетического разрешения и, таким образом, от конструкции сцинтилляционной ячейки.

5. СЦИНТИЛЛЯТОРЫ С ДОБАВКОЙ ИНДИЯ

Предложения по использованию индия (изотопа ^{115}In) в качестве мишени для регистрации солнечных нейтрино в области низких (pp -нейтрино) и средних энергий (^7Be , pep и CNO) имеют довольно длинную историю. Начиная с 1976 г. [6] на уровне лабораторных экспериментов было рассмотрено несколько способов детектирования нейтрино с помощью изотопа ^{115}In . В основном все предложения были связаны с использованием жидкого органического сцинтиллятора с растворенным в нем соединением индия (InЖС), хотя варианты детекторов с пластиковым сцинтиллятором и

индиевой фольгой (“сэндвич”) и полупроводниками на основе InP и InSb [12] также рассматривались. Поскольку скорость счета бета-распадов ^{115}In на много порядков (~ 11) превышает скорость захвата солнечных нейтрино, то рассматривается сегментированная конструкция сцинтилляционного детектора. Из табл. 1 видно, что для уверенной регистрации нейтрино средних энергий полный объем сцинтилляционного детектора должен быть достаточно большим, более нескольких сотен тонн. Выбор размеров ячейки определяется условиями эффективной регистрации нейтринных событий в присутствии собственного распада ядра ^{115}In . Схема регистрации нейтринных событий по реакции с ^{115}In определяет конструкцию детектора и необходимые свойства жидкого органического сцинтиллятора. Основные характеристики индийсодержащего сцинтиллятора должны быть следующими:

1) Концентрация индия в сцинтилляторе 5–10%. Уменьшение концентрации влечет увеличение объема детектора, а увеличение приводит к ухудшению сцинтилляционных характеристик (световыход и прозрачность).

2) Световыход сцинтиллятора должен превышать или быть на уровне 8000 фотонов/МэВ. Высокий световыход сцинтиллятора и хороший светосбор детектора должны обеспечить хорошее энергетическое разрешение для дискриминации событий от распада индия.

3) Длина ослабления света не менее 1.5 м. В конечном итоге светосбор, световыход и характеристики фотоприемника (размер и квантовая чувствительность) определяют параметр энергетического разрешения.

4) Время высвечивания сцинтиллятора меньше 3 нс. Время высвечивания определяется выбором сцинтилляционных добавок (смесителей спектра) и их концентрацией. Короткое время высвечивания и быстрые ФЭУ уменьшат наложения импульсов.

5) Стабильность сцинтиллятора. Регистрация нейтринных событий от Солнца — это редкие события. Для набора достаточной статистики нужны долговременные измерения (по крайней мере, более 5 лет). Поэтому стабильность характеристик In-сцинтиллятора является важным требованием при создании детектора. Хотя надо отметить, что ячеистая конструкция детектора позволяет замену отдельных сцинтилляционных ячеек при ухудшении параметров сцинтиллятора.

6) Совместимость с конструкционными материалами. Помимо кварца только акрил (или оргстекло), по-видимому, может рассматриваться в качестве материала для изготовления сцинтилляционного модуля. Акрил уже использовался в больших сцинтилляционных детекторах (Daya-Bay [13], RENO [14], Double Chooz [15]) и планируется

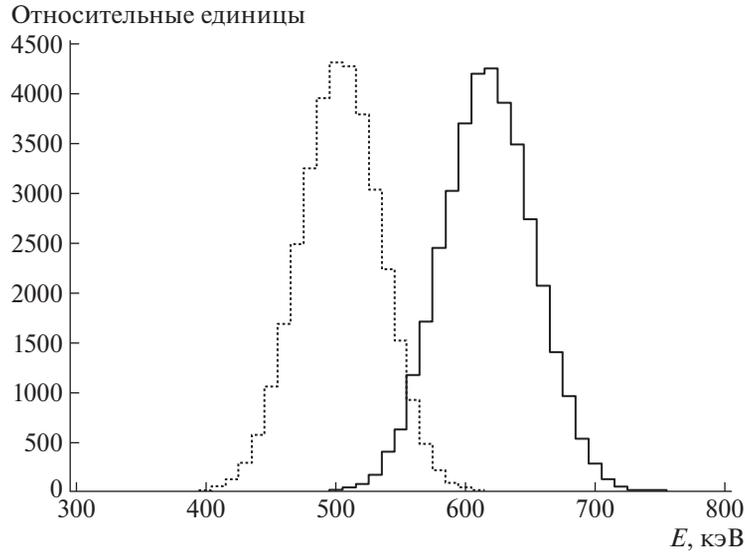


Рис. 5. Энергетическое распределение сигнала $e/\gamma_1 + \gamma_2$ в компактной группе ячеек, гистограммы: сплошная — от распада $^{115}\text{Sn}^*$ после захвата ν_e ; штриховая — от событий распада ^{115}In (от бета-электрона и его тормозного гамма-кванта в соседнем модуле), которые могут топологически имитировать распад $^{115}\text{Sn}^*$. Энергетическое разрешение принималось из расчета 1 ф.э./кэВ.

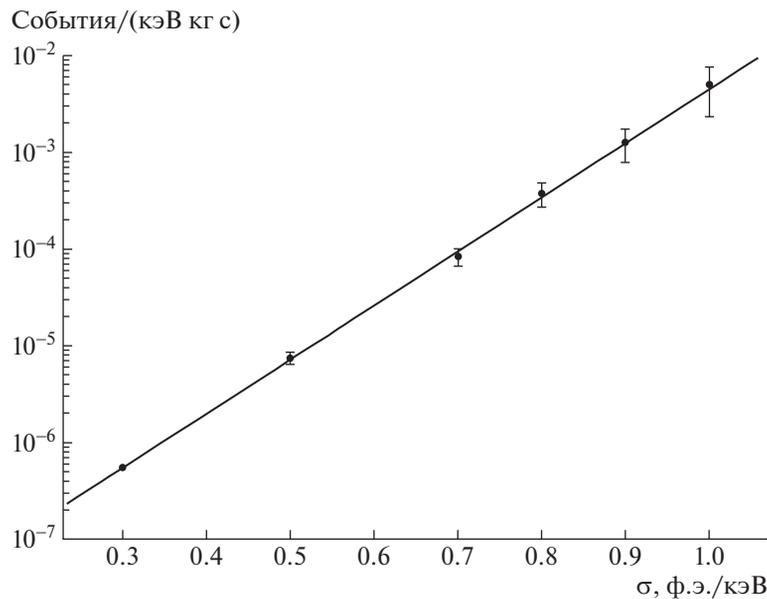


Рис. 6. Зависимость допустимой скорости счета фоновых событий в ячейке в области (0.6–1.6) МэВ от энергетического разрешения σ , выраженного в ф.э./кэВ, в предположении 10% систематической ошибки в регистрации нейтринного потока от Солнца за счет имитации снятия возбуждения $^{115}\text{Sn}^*$ распадом ^{115}In .

в новых (JUNO [16], SNO+ [17]). Сцинтиллятор на основе ЛАБа доказал свою совместимость с акрилом. Таким образом, индиевый сцинтиллятор на основе ЛАБа является наиболее перспективным при создании детектора.

7) Безопасность. Сцинтилляционная установка для детектирования редких нейтринных событий от Солнца и защиты от фона космических лу-

чей должна размещаться в подземном помещении на достаточно большой глубине. В этих условиях предъявляются высокие требования к пожарной и токсической безопасности жидкого сцинтиллятора. Индиевый сцинтиллятор на основе ЛАБа (высокая температура вспышки $>100^\circ\text{C}$ и без запаха) удовлетворяет этим требованиям.

Первые экспериментальные результаты о раз-

работке In-содержащего детектора были представлены в [18]. В статье рассматривается жидкий органический сцинтиллятор на основе фенилэтилового спирта с растворенным трифторацетатом индия. Выбранный растворитель позволял получить раствор с высокими концентрациями индия (до 200 г/л). Однако сцинтиллятор на основе фенилэтилового спирта имел низкий световыход, который приблизительно экспоненциально уменьшался при увеличении концентрации In до ~ 80 г/л, а также низкую прозрачность. При концентрации In в сцинтилляторе 51.2 г/л энергетическое разрешение составило 23.6% при энергии 477 кэВ. В статье рассматривалась возможность детектирования pp -нейтрино от Солнца. После этой публикации была серия работ, посвященных разработке In-содержащего сцинтилляционного детектора. В статье [19] приводятся результаты, полученные с In-содержащим жидким органическим сцинтиллятором на основе ксилола. Сцинтиллятор содержал индий в виде соли хлорида, $\text{InCl}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Для растворения хлорида индия использовалась поверхностно-активная добавка ($\sim 30\%$). Сцинтилляторы на основе ксилола имеют более высокий световыход по сравнению с фенилэтиловым спиртом, примерно в 1.5 раза. На сцинтилляторе в цилиндрической ячейке длиной 1 м и диаметром 5 см были достигнуты энергетическое разрешение 11.7% (при энергии 477 кэВ), пространственное разрешение ± 4.5 см и длина ослабления ≥ 1.5 м для концентрации In $\sim 5\%$. Если в [18] для приготовления сцинтиллятора использовался растворитель фенилэтиловый спирт, позволяющий хорошо растворять полярные соединения типа трифторацетата индия, то в [19] для растворения хлорида индия в ксилоле были использованы поверхностно-активные добавки, у которых присутствуют гидрофильные и гидрофобные группы, позволяющие смешивать полярное соединение хлорида индия с неполярным растворителем — ксилолом. Максимальная концентрация In в сцинтилляторе составила $\sim 7.5\%$ [19]. Дальнейшее увеличение концентрации приводило к образованию коллоидного состояния. Исследования по улучшению характеристик индиевого жидкого сцинтиллятора были продолжены в работе [19]. Здесь были использованы положительные свойства методик приготовления сцинтилляторов, примененные в работах [20, 21], т.е. растворитель ксилол с добавкой фенилэтилового спирта для растворения трифторацетата индия. Достигнута максимальная концентрация In $\sim 10\%$ по весу. По результатам тестовых измерений с помощью кварцевой ячейки длиной 1 м, диаметром 6 см, заполненной сцинтиллятором (5% In), получено энергетическое разрешение, удовлетворяющее требованиям регистрации ${}^7\text{Be}$ ней-

трино (22% при 477 кэВ), но с малой величиной длины поглощения света (54 см).

Большой интерес к измерению потока солнечных нейтрино от pp -реакции способствовал продолжению работ по разработке In-детектора. Значительным продвижением в этом направлении была публикация [20], где были приведены новые результаты исследований с In-содержащим жидким органическим сцинтиллятором. Представленные характеристики сцинтиллятора должны были уменьшить фон от бета-распада ${}^{115}\text{In}$ в 100 раз и позволить иметь скорость счета pp -нейтрино для массы In 8 т, после всех критериев отбора (эффективность регистрации 0.65), ~ 400 событий в год (ожидаемая скорость — 365 событий в год для массы индия 4 т). Новая технология приготовления сцинтиллятора включала в себя использование новых органических растворителей, таких как псевдокумол и 1-метилнафталин, а также соединений индия с карбоновыми кислотами (карбоксилаты индия). Новая методика позволила увеличить световыход сцинтиллятора примерно в 2 раза и достичь более высоких концентраций растворенного индия. Увеличение величины световыхода является важным достижением, поскольку позволяет улучшить энергетическое разрешение, что делает более эффективной идентификацию нейтринных событий от фона, 616 кэВ (нейтрино) от 495 кэВ (бета-распад ${}^{115}\text{In}$).

Дальнейшая работа по разработке In-содержащего жидкого органического сцинтиллятора проводилась в рамках проекта LENS [20]. Были исследованы новые растворители (PXE) и соединения индия (β -дикетонаты) [23–25], а также продолжено более глубокое изучение методик синтеза карбоксилатов индия. Целью было улучшить характеристики сцинтиллятора, опубликованные в работе [20]. В качестве эталона был выбран сцинтиллятор BC505 фирмы VICRON. В работе [22] отмечается высокая стабильность и хорошая летучесть соединений индия с β -дикетонами.

Стабильность сцинтиллятора является важной характеристикой при проведении крупномасштабных и долговременных экспериментов. Хорошая летучесть β -дикетонатов индия может быть использована для глубокой очистки (методом возгонки) соединения от примесей радиоактивных элементов, что требуют условия низкого внутреннего радиоактивного фона. Однако молекула β -дикетоната индия имеет довольно сильные гасящие свойства, и поэтому для их компенсации требуются необычно высокие концентрации сцинтилляционных добавок, PPO ~ 200 г/л, bis-MSB ~ 500 мг/л [23]. В работе [24] опубликованы результаты, полученные на трех ячейках ($5 \times 5 \times 100$ см) прототипа детектора, заполненных сцинтиллятором на

основе β -дикетоната индия (ацетилацетонат индия, $\text{In} \sim 44$ г/л) в РХЕ (Phenyl Xylyl Ethan). Для сравнения на том же детекторе были измерены оптические ячейки, заполненные чистым (без индия) сцинтиллятором на основе РХЕ, которые служил в качестве стандарта. Для стандарта длина поглощения составила ~ 4.2 м, световой выход ~ 730 фотоэлектронов/МэВ. Для In -содержащего сцинтиллятора (44 г/л) — длина поглощения ~ 1.2 метра, световой выход ~ 200 фотоэлектронов/МэВ (энергетическое и пространственное разрешение соответственно $\sim 11.6\%$ и 7 см для энергии 477 кэВ). Однако полученные экспериментальные результаты по энергетическому разрешению отличались в худшую сторону более чем в 2 раза по сравнению с предсказаниями Монте-Карло-анализа как для стандарта, так и In -содержащих сцинтилляторов. Как отмечают авторы, возможным объяснением такого расхождения является несоответствие реальных характеристик фотокатода фотоумножителя их спецификации.

Другое направление в рамках проекта LENS было связано с разработкой In -содержащего жидкого органического сцинтиллятора на основе соединения карбоксилата индия. В работе [25] представлены характеристики (световой выход, длина поглощения и стабильность) для композиции на основе индиевой соли карбоновой кислоты (2-метилвалериановой кислоты) в псевдокумоле, концентрация $\text{In} \sim 50$ г/л. Измерения были проведены на оптическом модуле с размерами $5 \times 5 \times 100$ см, который может рассматриваться в качестве отдельной ячейки детектора. В этой работе продемонстрирована возможность увеличения светового выхода In -сцинтиллятора за счет замещения отдельных функциональных групп (COO) в молекуле карбоксилата на группы гидроксила [OH], т.е. формула имела состав $[\text{In}(2\text{MVA})_x(\text{OH})_{3-x}]_n$, где $x \sim 0.8$, $n \sim 10$ (степень полимеризации). Такая частичная замена позволила увеличить световой выход примерно в 2 раза. Так, для состава сцинтиллятора ($\text{In} = 50$ г/л, ВРО = 4 г/л) световой выход был равен ~ 9000 фотонов/МэВ. Измерения на кварцевой оптической ячейке длиной 1 м с ФЭУ ХР3462РВ диаметром 3" дали энергетическое разрешение 5.5% при 477 кэВ. Измеренные на модуле в составе прототипа детектора энергетическое и пространственное разрешения составили соответственно $\sim 6.4\%$ (477 кэВ) и 4 см (477 кэВ). В измерениях были использованы ФЭУ ETL9954В и электроника, описанные в [25].

Последний вариант обладает наилучшей совокупностью параметров, удовлетворяет сформулированным выше требованиям и позволяет создать детектор солнечных нейтрино средних энергий. Работа по улучшению параметров In ЖС и поиску

оптимальной конструкции детектора в настоящее время продолжается.

6. ДИСКУССИЯ

Полученные ограничения для скорости счета фоновых импульсов, показанные на рис. 6, можно сравнить с параметрами существующих сцинтилляционных установок. Наиболее подходящей для этой цели является установка, разработанная в качестве макета детектора LENS [26]. Установка располагалась в подземной лаборатории Гран-Сассо и состояла из девяти сцинтилляционных ячеек размером $200 \times 5 \times 5$ см из кварца толщиной 1 мм. Каждая ячейка просматривалась двумя ФЭУ с противоположных торцов. В защите из меди и свинца скорость счета фоновых импульсов в области 600–1600 кэВ составила $\sim 1.2 \times 10^{-6}$ /(кэВ кг с). В случае достижения такой же скорости счета фоновых импульсов в планируемом детекторе число зарегистрированных фотоэлектронов (рис. 6) должно составлять ~ 0.4 ф.э./кэВ. Для консервативной оценки примем световой выход сцинтиллятора 6000 фотонов/МэВ, светосбор 33% и конверсионную эффективность фотокатода 0.2. Окончательно получаем для ожидаемого числа зарегистрированных фотоэлектронов ~ 0.4 ф.э./кэВ. Таким образом, в детекторе с такими ячейками скорость счета событий от солнечных нейтрино будет значительно превосходить скорость счета их имитаций.

Достигнутое значение скорости счета фоновых импульсов в установке LENS [26] не является рекордно достижимым. Так, например, в эксперименте Борексино был достигнут более низкий фон ($\sim 8 \times 10^{-11}$ /кэВ кг с) в том же диапазоне энергосвободелений. Конечно, в секционированном детекторе трудно достигнуть такой же радиационной чистоты, как в Борексино, из-за большого количества конструкционных материалов.

В работе [27] предложены новые сцинтилляционные добавки, при которых световой выход сцинтиллятора оказался примерно в 2 раза выше по сравнению с традиционными добавками. Применение новых сцинтилляционных добавок позволит значительно оптимизировать параметры ячейки, в частности, позволит применять ячейки со светосбором в $\sim 16\%$ и сделать проект реализуемым.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрена возможность создания детектора для спектроскопии солнечных нейтрино от ${}^7\text{Be}$, CNO-цикла и *реp*-нейтрино. Для этого предлагается вернуться к идее детектора LENS. В качестве мишени предлагается использовать ${}^{115}\text{In}$, введенный в жидкий сцинтиллятор в

качестве наполнителя. Детектор должен обладать секционированной структурой для выделения нейтринного события.

Для исключения событий от собственной бета-радиоактивности ^{115}In предлагается использовать более высокий порог регистрации энерговыделения в сцинтилляторе (~ 600 кэВ), который отрезет и pp -нейтрино. Ключевым условием для реализации такого детектора является большое количество света, регистрируемое фотодетекторами.

Было проведено моделирование секционированного детектора, содержащего 10 т индия. Учитывалась топология нейтринного события. Получена зависимость допустимой скорости счета событий внутреннего и внешнего фона от энергетического разрешения детектора.

Проведенное моделирование показало, что использование больших ячеек (~ 60 л) не позволяет создать детектор для регистрации солнечных нейтрино CNO-цикла. Трудности возникают со сбором света в необходимом количестве. Необходимо переходить на новые технологии создания модульного детектора. Ячейка детектора должна быть небольшого размера ($\sim 1-2$ л). На небольшой ячейке есть возможность зарегистрировать достаточное количество света, разместив на торцах модуля полупроводниковые пластины для регистрации света. Отсутствие ФЭУ позволит разместить ячейки на минимальном расстоянии друг от друга и позволит использовать эффективную регистрацию событий от вылетевших в реакции взаимодействия солнечных нейтрино с индием гамма-квантов в соседних ячейках. Это обеспечит возможность использования многократных совпадений для выделения событий от солнечных нейтрино.

Возникает трудность в оперировании с большим количеством ячеек, но современные технологии позволяют работать с большим количеством каналов. Мы считаем реалистичным создание детектора для спектроскопии солнечных нейтрино с массой индия 10 т и более.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, and P. Scott, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **47**, 481 (2009).
2. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Space Sci. Rev.* **85**, 161 (1998).
3. Borexino Collab. (M. Agostini *et al.*), *Nature* **587**, 577 (2020); arXiv: 2006.15115 [hep-ex].
4. M. Agostini *et al.* (Borexino Collab.), *Phys. Rev. D* **100**, 082004 (2019).
5. L. Bezrukov, A. Gromtseva, I. Karpikov, A. Kurlovich, A. Mezhokh, P. Naumov, Ya. Nikitenko, S. Silaeva, V. Sinev, and V. Zavarzina, arXiv: 2202.08531 [physics.ins-det].
6. R. S. Raghavan, *Phys. Rev. Lett.* **37**, 259 (1976).
7. J. Rapaport, P. Welch, J. Bahcall, E. Sugarbaker, T. N. Tادdeucci, C. D. Goodman, C. F. Foster, D. Horen, C. Gaarde, J. Larsen, and T. Masterson, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 2325 (1985).
8. C. Grieb and R. S. Raghavan, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 141102 (2007); C. Grieb, J. M. Link, M. L. Pitt, R. S. Raghavan, D. Rountree, and R. B. Vogelaar, in *Proceedings of the XII International Workshop on Neutrino Telescopes, March 6–9, 2007, Venice*; arXiv: 0705.2769 [hep-ex].
9. V. Sinev, L. Bezrukov, I. Karpikov, A. Kurlovich, A. Mezhokh, S. Silaeva, and V. Zavarzina, *J. Phys.: Conf. Ser.* **1690**, 012170 (2020).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1690/1/012170>
10. И. П. Барабанов, Л. Б. Безруков, А. В. Вересникова, Ю. М. Гаврилюк, А. М. Гангапшев, В. Ю. Гришина, В. И. Гуренцов, В. П. Заварзина, В. В. Казалов, С. Д. Крохалева, В. В. Кузьминов, А. С. Курлович, Б. К. Лубсандоржиев, С. Б. Лубсандоржиев, А. К. Межох, В. П. Моргалюк и др., *ЯФ* **80**, 230 (2017) [*Phys. At. Nucl.* **80**, 446 (2017)].
11. <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html>.
12. A. G. D. Payne and N. E. Booth, *Nucl. Instrum. Methods A* **288**, 632 (1990).
13. Day Bay Collab. (F. P. An *et al.*), *Nucl. Instrum. Methods A* **685**, 78 (2012);
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.05.030>; arXiv: 1202.6181 [physics.ins-det].
14. J. K. Ahn *et al.* (RENO Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **108**, 191802 (2012); arXiv: 1204.0626 [hep-ex].
15. Y. Abe *et al.* (Double Chooz Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **108**, 131801 (2012); arXiv: 1112.6353 [hep-ex].
16. Cong Guo (on behalf of the JUNO Collab.), arXiv: 1910.10343 [physics.ins-det].
17. S. Andringa, E. Arushanova, S. Asahi, M. Askins, D. J. Auty, A. R. Back, Z. Barnard, N. Barros, E. W. Beier, A. Bialek, S. D. Biller, E. Blucher, R. Bonventre, D. Braid, E. Caden, E. Callaghan, *et al.* (SNO+ Collab.), *Adv. High Energy Phys.* **2016**, 6194250 (2016); arXiv: 1508.05759 [physics.ins-det].
18. L. Pfeiffer, A. P. Mills, Jr., R. S. Raghavan, and E. A. Chandross, *Phys. Rev. Lett.* **41**, 63 (1978).
19. Y. Suzuki, K. Inoue, Y. Nagashima, S. Hashimoto, and T. Inagaki, *Nucl. Instrum. Methods A* **293**, 615 (1990).
20. R. S. Raghavan, hep-ex/0106054.
21. C. M. Cattadori *et al.*, LENS internal communication (2003).
22. C. Buck, F. X. Hartmann, S. Schönert, and U. Schwan, *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **258**, 255 (2003).
23. C. Buck, F. X. Hartmann, Th. Lasserre, D. Motta, S. Schönert, and U. Schwan, *J. Lumin.* **106**, 57 (2004).
24. F. X. Hartmann, Th. Lasserre, D. Motta, S. Schönert, C. Buck, and U. Schwan, *Nucl. Instrum. Methods A* **547**, 368 (2005).

25. И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, В. И. Гуренцов, Н. А. Данилов, А. di Vacri, С. Cattadori, Ю. С. Крылов, Г. Я. Новикова, N. Ferrari, Е. А. Янович, ПТЭ, № 4, 50 (2010).
26. С. Buck, О. Besida, С. М. Cattadori, F. X. Hartmann, Th. Lasserre, D. Motta, А. di Vacri, L. Pandola, S. Schoenert, U. Schwan, И. Р. Барабанов, Л. Б. Безруков, Н. А. Данилов, Е. А. Янович, ПТЭ, № 1, 40 (2012).
27. S. Lubsandorzhev, А. Sidorenkov, В. Lubsandorzhev, S. Ponomarenko, N. Surin, O. Borshev, N. Ushakov, N. Lubsandorzhev, D. Voronin, А. Lukanov, and А. Fazliakhmetov, in *Proceedings of 36th International Cosmic Ray Conference, 24 Aug.–1 July, 2019, Madison, USA*, PoS (ICRC2019) 946.

MIDDLE ENERGY SOLAR NEUTRINO DETECTION BY MEANS OF NEUTRINO CAPTURE REACTION ON ^{115}In NUCLEUS

I. R. Barabanov¹⁾, L. B. Bezrukov¹⁾, V. I. Gurentsov¹⁾, G. Ya. Novikova¹⁾,
V. V. Sinev¹⁾, E. A. Yanovich¹⁾

¹⁾*Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

A modification of the LENS project for spectroscopy of solar neutrinos with an energy greater than ~ 715 keV based on new technologies and solutions is being considered. Such a detector uses ^{115}In nuclei as a target for neutrinos. The creation of a detector with a scintillator mass of about 200 tons loaded with 10 tons of indium will allow measuring the energy spectra of solar neutrinos from ^7Be , CNO cycle and *pep* neutrinos with small systematic errors within five years. The simulation of the detector in the form of a set of sections with a liquid scintillator doped with indium ($\sim 10\%$ by weight) has been carried out. The necessary technical requirements for the detector cell are formulated and estimates of the possible rate of counting events from the internal and external background with an energy release of 600–1600 keV are given. The principal possibility of implementing such a detector is shown.