

Детектор ультрахолодных нейтронов для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона

© В.А. Андреев,¹ А.В. Васильев,¹ Е.А. Иванов,¹ Д.С. Ильин,^{1,2} А.Г. Крившич,¹ А.П. Серебров¹

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,

188300 Гатчина, Ленинградская область, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, 198504 Санкт-Петербург, Россия

email: digatchi@list.ru

(Поступило в Редакцию 20 июля 2015 г.)

Для спектрометра по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в большой гравитационной ловушке был разработан и построен газоразрядный детектор. Прибор предназначен для счета числа УХН в циклах измерений на спектрометре на реакторе в ILL (Grenoble, France).

Детектор успешно прошел испытания на Pu–Be-источнике нейтронов в лабораторных условиях, а также в составе спектрометра на пучке УХН.

Введение

Проблема уточнения времени жизни нейтрона затрагивает важные вопросы физики элементарных частиц и космологии: проверка Стандартной модели, модели нуклеосинтеза на ранней стадии формирования Вселенной и др. [1].

На сегодняшний день лучшая точность измерения времени жизни нейтрона достигнута группой ПИЯФ [2]: $t_n = 878.5 \pm 0.8$ s. Целью нового эксперимента является улучшение точности до уровня 0.2 s.

Для решения экспериментальной задачи был разработан и построен новый спектрометр по измерению времени жизни нейтрона методом хранения ультрахолодных нейтронов (УХН) в большой гравитационной ловушке (источник УХН PF2/MAM, ILL, Grenoble, France). Методика вычисления времени жизни нейтрона по времени хранения в ловушке подробно описана в [1].

Для достижения указанной точности были оптимизированы основные узлы установки: увеличен более чем в 5 раз объем ловушки, снижены потери нейтронов на стенках ловушки за счет нового безводородного покрытия и использования более низких температур $T = 80–100$ K. Ожидается снижение потерь УХН в нейтронной системе и криостате, а также улучшения вакуума до уровня 10^{-7} mBar.

Важным узлом экспериментальной установки является детектор УХН, который предназначен для счета нейтронов в циклах измерений на установке. Детектор разработан и построен специалистами Отдела трековых детекторов (ОФВЭ ПИЯФ) совместно с Отделом нейтронной физики (ОНИ ПИЯФ).

1. Детекторная система

Детектор УХН является ключевым узлом установки, стабильность работы которого определяет точность из-

мерения числа нейтронов в экспериментальных циклах и в итоге точность нахождения времени жизни нейтрона. На основании этого к детектору предъявлялся ряд требований.

1. Высокая эффективность регистрации УХН, которая затрагивала вопросы оптимизации состава рабочей газовой смеси, снижения потерь заряда первичной ионизации вблизи катода внутри газового объема детектора, минимизации потерь нейтронов на входном окне.

2. Низкий уровень собственного шума и чувствительности к фону.

3. Стабильность и надежность — организация счета нейтронов по двум независимым каналам, минимизация утечек рабочего газа, долговременное сохранение чистоты рабочего газа — выбор малогазящих материалов для конструкции детектора.

В качестве базовой конструкции детектора выбран газоразрядный детектор на основе пропорциональных счетчиков, находящихся в едином газовом объеме. Такая конструкция хорошо себя зарекомендовала в предыдущих экспериментах, показав высокую стабильность и надежность. Кроме этого, единый газовый объем гарантирует одинаковый состав газовой смеси в каждом пропорциональном счетчике.

1.1. Принцип регистрации нейтронов

Регистрация нейтронов осуществляется в соответствии с ядерной реакцией



В реакции (1) образуется составное ядро, которое почти мгновенно разваливается с образованием двух частиц: протона и тритона. В соответствии с законом сохранения импульса частицы приобретают энергию: $E(p) = 573 \text{ keV}$, $E(T) = 191 \text{ keV}$. Они разлетаются в противоположные стороны из точки взаимодействия, произ-

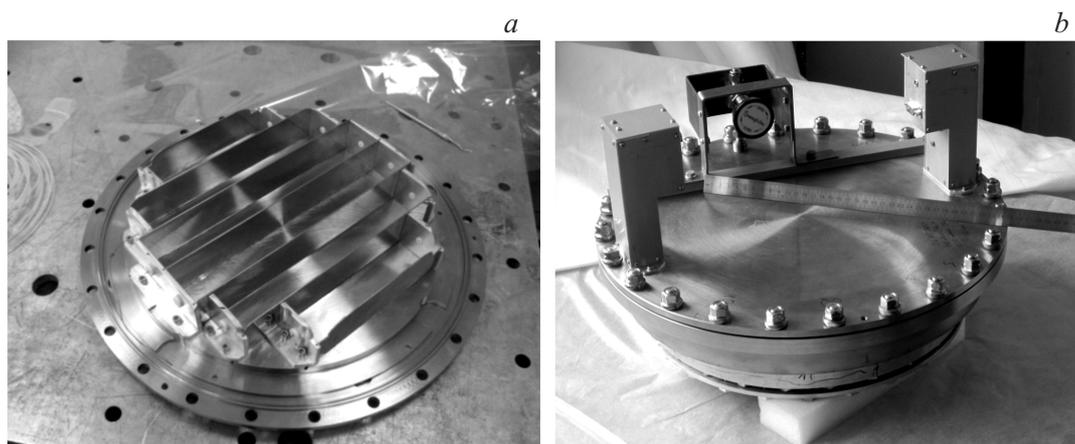


Рис. 1. Конструкция детектора УХН: *a* — внутренняя часть детектора с шестью пропорциональными счетчиками. *b* — детектор в сборе.

вода первичную ионизацию газа в детекторе. В пропорциональном счетчике первичная ионизация усиливается за счет ударной ионизации электронов вблизи анода, с которого регистрируется импульс тока.

Так как сечение реакции обратно пропорционально скорости нейтрона $\sigma \propto 1/v$, сечение для УХН можно вычислить по формуле

$$\begin{aligned} \sigma(\text{UCN}) &= \sigma(1.8 \text{ \AA}) * v(1.8 \text{ \AA}) / v(\text{UCN}), \\ \sigma(1.8 \text{ \AA}) &= 5333 \text{ b}, \quad v(1.8 \text{ \AA}) = 2200 \text{ m/s}, \\ v(\text{UCN}) &= 8 \text{ m/s} \\ \Rightarrow \sigma(\text{UCN}) &\approx 1.46 \cdot 10^6 \text{ b}. \end{aligned} \quad (2)$$

Эффективность ϵ захвата нейтронов ядрами He-3 и функция плотности вероятности поглощения $f(x)$ имеют вид

$$\begin{aligned} \epsilon(L) &= \int_0^L f(x) dx, \\ f(x) &= n\sigma \exp(-n\sigma x), \end{aligned} \quad (3)$$

где L — толщина детектора, $n = PN_a/RT$ — концентрация атомов He-3, P — давление, N_a — число Авогадро, R — газовая постоянная, T — абсолютная температура, σ — сечение реакции $^3\text{He}(n,p)\text{T}$.

1.2. Описание конструкции

Исходя из конструкции нейтроновода на установке заданный диаметр входного окна детектора равен 290 mm. Геометрия детектора выбрана таким образом, чтобы обеспечить наибольшее перекрытие площади нейтроновода, поэтому чувствительная область детектора разделена на 6 пропорциональных счетчиков разной длины (рис. 1, *a*).

Входным окном детектора служит алюминиевая фольга толщиной 100 μm , которая должна решать три задачи: во-первых, обеспечивать достаточную трансмиссию

нейтронов из нейтроновода в рабочий объем детектора; во-вторых, иметь достаточную механическую прочность (суммарная нагрузка на мембрану в рабочем режиме составляет $\sim 660 \text{ kg}$). Поэтому для обеспечения механической прочности узла входного окна со стороны вакуума установлена решетка с ребрами жесткости специального профиля, которые поддерживают фольгу. Сечение ребер по пучку предельно снижено, чтобы минимизировать потери нейтронов на решетке. Первый детектор УХН подобного типа был разработан А.В. Стрелковым (ОИЯИ, Дубна).

В-третьих, фольга является катодом для пропорциональных счетчиков и поэтому прямо влияет на формирование электрического поля внутри рабочего объема каждого счетчика и, соответственно, на рабочие характеристики детектора. Таким образом, обеспечение оптимальной конфигурации электрического поля было одной из задач, решенной при проектировании прибора.

1.3. Характеристики детектора

- шесть пропорциональных счетчиков прямоугольного сечения $46 \times 48 \text{ mm}$,
- длина счетчиков 165 mm, 252 mm, 287 mm (от края к центру),
- диаметр анодной проволоки 25 μm (золоченый вольфрам),
- число счетных каналов — 2 (пропорциональные счетчики объединены в группы по три: 1/3/5 и 2/4/6),
- состав тестовой газовой смеси 30 mBar ^3He + 1030 mBar CF_4 ;
- общее давление рабочего газа 1 Atm. abs.,
- расчетная эффективность регистрации УХН $\epsilon \approx 90\%$ ($v(\text{UCN}) = 8 \text{ m/s}$, без учета поглощения во входном окне),
- состав рабочей газовой смеси определялся и оптимизировался пользователями на установке.

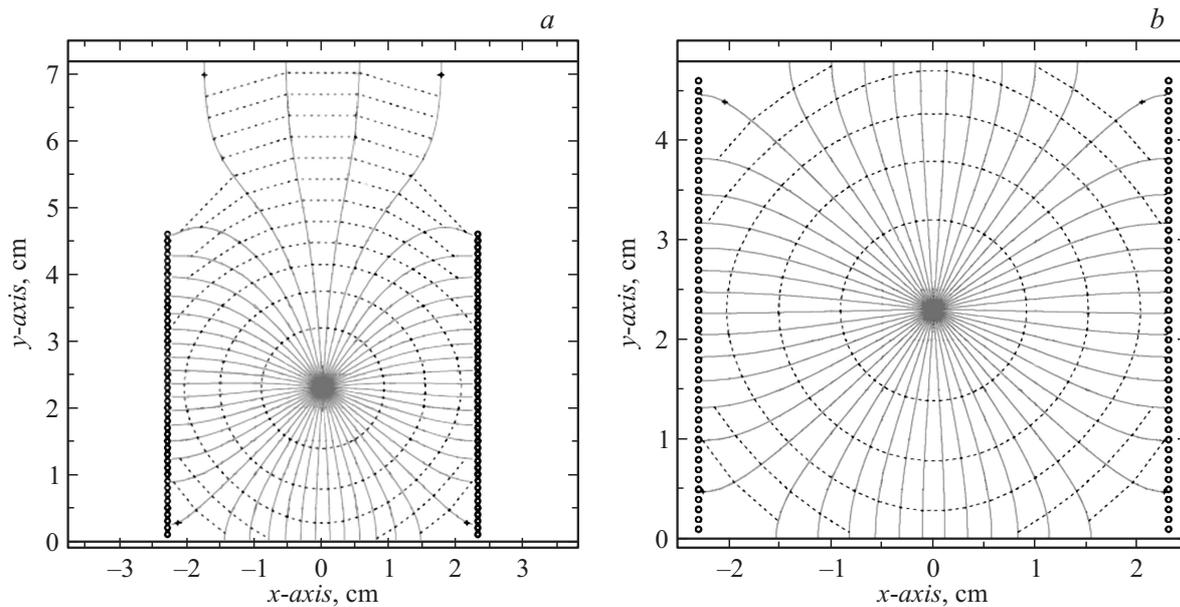


Рис. 2. Структура электрического поля и временные диаграммы в детекторе, вычисленные в GARFIELD. Газовая смесь: 30 mBar ^3He + 970 mBar CF_4 . Напряжение на аноде 2000 V. Сплошные линии — линии дрейфа электронов, пунктирные линии — временные контуры с шагом $0.1 \mu\text{s}$. *a* — исходная геометрия ячейки — G0. *b* — финальная геометрия ячейки — G2. В программе Garfield вертикальные стенки катодов имитировались набором проволочек.

В основе детектора лежит диск (нижняя стенка счетчиков) из нержавеющей стали с пазами, в которые вставлены пластины толщиной 1 mm, образующие боковые стенки счетчиков. Высота диска выбрана таким образом, чтобы максимально приблизить ячейки к входному окну (фольга) детектора и сформировать близкую к оптимальной геометрию (для данной конструкции — квадратного сечения) пропорциональных счетчиков. В результате гарантированный зазор между боковыми стенками счетчиков и поверхностью входного окна был минимизирован до 2 mm. Таким образом, поперечное сечение счетчиков составило $46 \times 48 \text{ mm}$ (ширина \times высота).

Торцевые стенки счетчиков сделаны из сплава АМг5. В них вставлены керамические втулки (Masor), в центре которых расположены анодные проволочки из золоченого вольфрама диаметром $25 \mu\text{m}$ с натяжением 60 g.

В конструкции используются стандартные высоковольтные вводы (фирмы CeramTec), которые уплотняются витоновыми кольцами с внутренним диаметром 6 mm.

2. Расчет характеристик детектора, выбор рабочих параметров

2.1. Электрическое поле и коэффициент газового усиления (КГУ)

Для расчета рабочих характеристик детектора применялся программный пакет Garfield [3]. Были рассмотрены три различные геометрии ячеек детектора, рис. 2, характеристики которых представлены в таблице.

1) G0 — ячейка детекторов взята из предыдущего прототипа детектора. Величина зазора между входным окном и боковыми стенками счетчиков составляет 27 mm, диаметр анода — $50 \mu\text{m}$.

2) G1 — ячейка с минимизированным зазором между входным окном и боковыми стенками счетчиков, который составляет 2 mm, диаметр анода — $50 \mu\text{m}$;

3) G2 — ячейка с минимизированным зазором 2 mm, диаметр анода — $25 \mu\text{m}$.

Из сравнения данных, представленных в таблице, была выбрана конфигурация геометрии ячейки — G2 по следующим причинам:

Характеристики ячеек детектора

Геометрия	G0	G1	G2
Диаметр анода, μm	50	50	25
Конфигурация электрического поля ячейки	Поле сильно вытянуто к входному окну	Поле симметричное	Поле симметричное
Время дрейфа электронов (мин–макс), μs	0.4–1.3	0.4–0.5	0.4–0.5
Время дрейфа ионов (мин–макс), μs	10–80	10	10
Газовая смесь	30 mBar ^3He + 970 mBar CF_4		
КГУ при напряжении на аноде 2000 V	5.3	5.8	75.4

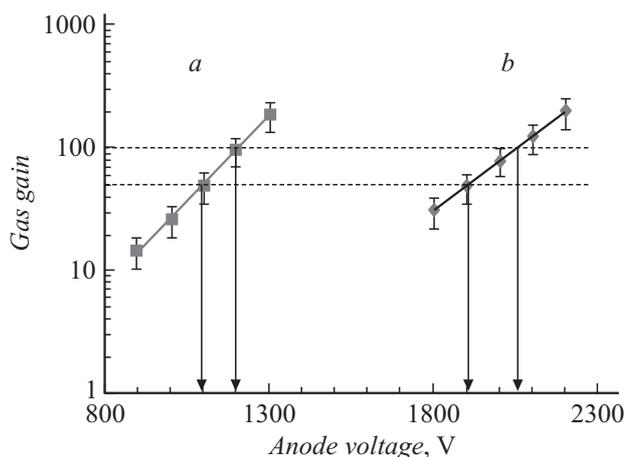


Рис. 3. Коэффициент газового усиления (Gas Gain) в ячейке геометрии G2 в газовых смесях при 1 Atm.abs. (штриховыми линиями отмечен диапазон Gas Gain = 50–100 и соответствующие напряжения в тестовой и рабочей газовых смесях): *a* — с рабочей газовой смесью 13 mBar ³He + 20 mBar CO₂ + 1060 mBar Ar, *b* — с тестовой газовой смесью 30 mBar ³He + 970 mBar CF₄.

- получена практически симметричная структура электрического поля, обеспечивающая симметричный характер линий дрейфа зарядов (электроны и ионы), и, как следствие, минимизирован разброс времен их сбора на электродах,

- за счет кардинального уменьшения величины газового зазора (с 27 до 2 mm) между входным окном и плоскостью ячеек было практически исключено одновременное срабатывание соседних ячеек от одного протон-тритонного трека,

- более чем в 10 раз увеличена величина КГУ за счет использования анодной проволоочки с меньшим диаметром (25 μm),

- улучшены временные характеристики счетчика — максимальное время сбора ионов уменьшено в 8 раз и составляет 10 ms.

2.2. Зависимость величины КГУ от напряжения

Из рис. 3 видно, что для величины газового усиления Gas Gain = 50–100 (типичный рабочий диапазон КГУ для He-3 пропорциональных счетчиков, например типа СНМ-50) диапазон рабочих напряжений для тестовой газовой смеси составляет $U = 1930–2080$ V.

2.3. Эффективность регистрации и „стеночный“ эффект

При прохождении продуктов реакции (1) через газ в детекторе образуется облако зарядов, центр тяжести которого смещен относительно точки взаимодействия на величину $R_{sph} = 0.35R_p$, где R_p — пробег протона. Для вычислений пробега частиц применялась

компьютерная программа SRIM [4]. Из расчетов получено для газов CF₄ и Ar: $R_{sph} \approx 1.5/P$ [mm/Atm] и $R_{sph} \approx 3.8/P$ [mm/Atm] соответственно, где P — абсолютное значение давления газа в Atm.

Состав газовой смеси выбирался исходя из требования обеспечения максимальной эффективности регистрации УХН, при этом учитывалась величина неэффективности, вызванной поглощением нейтронов вблизи стенки детектора.

Исходная функция плотности вероятности поглощения нейтрона ядром He-3 вычислялась по формуле (3). Для оценки влияния „стеночного“ эффекта на величину эффективности детектора [5] вводился поправочный коэффициент $k(x)$, который вычислялся по формуле (рис. 4, a):

$$k(x) = 1 - \frac{S_{wall}}{S_{sph}}, \quad (4)$$

где S_{wall} — площадь сегмента круга, усеченного стенкой, S_{sph} — площадь круга радиуса R_{sph} , x — координата детектора вдоль пучка (в направлении от окна к задней крышке).

Коэффициент $k(x)$ принимает значения в диапазоне 0.5–1: 1) $k(x) = 1$ соответствует полным $p-T$ -трекам, и вероятность поглощения нейтрона определяется функцией плотности вероятности $f(x)$ (3); 2) $0.5 < k(x) = 1$: случаи нейтрализации части заряда $p-T$ -трека в стенке (входном окне), точка поглощения находится вблизи стенки (катода); 3) при $k(x) = 0.5$ точка поглощения нейтрона ядром He-3 (центр сфероида) совпадает с поверхностью стенки. В данной модели принято как граничное условие, т.е. события с $k(x) < 0.5$ не берутся в рассмотрение.

Таким образом, функция плотности вероятности поглощения нейтрона ядром гелия при учете стенки (функция плотности „регистрации“ нейтронов), (рис. 4, b)

$$f'(x) = f(x) * k(x). \quad (5)$$

Эффективность регистрации нейтронов вычислялась по формуле

$$\varepsilon(x) = \int_0^1 f'(x) dx. \quad (6)$$

Неэффективность детектора (величина „стеночного“ эффекта) при учете всех стенок, оценивалась из выражения

$$L = (1 - S/S_0), \quad (7)$$

где $S_0 = \int_{y_{min}}^{y_{max}} dy \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) dx$ — „эффективная“ площадь ячейки без учета вклада „стеночного“ эффекта ($x_{min} = y_{min} = 0$ mm, $x_{max} = 48$ mm, $y_{max} = 46$ mm), $S = \int_{y_{min}}^{y_{max}} k(y) dy \int_{x_{min}}^{x_{max}} f'(x) dx$ — „эффективная“ площадь ячейки с поправкой на „стеночный“ эффект на передней, задней и боковых стенках ячейки.

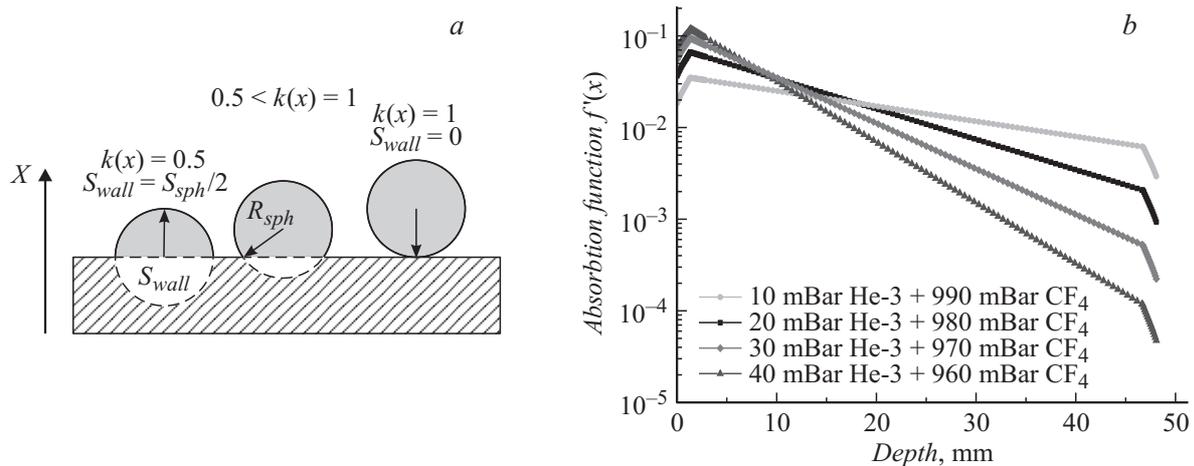


Рис. 4. Влияние „стеночного“ эффекта на расчетную эффективность детектора. *a* — иллюстрация к пояснению „стеночного“ эффекта, *b* — функция $f'(x)$ для различного состава газовой смеси ${}^3\text{He}/\text{CF}_4$.

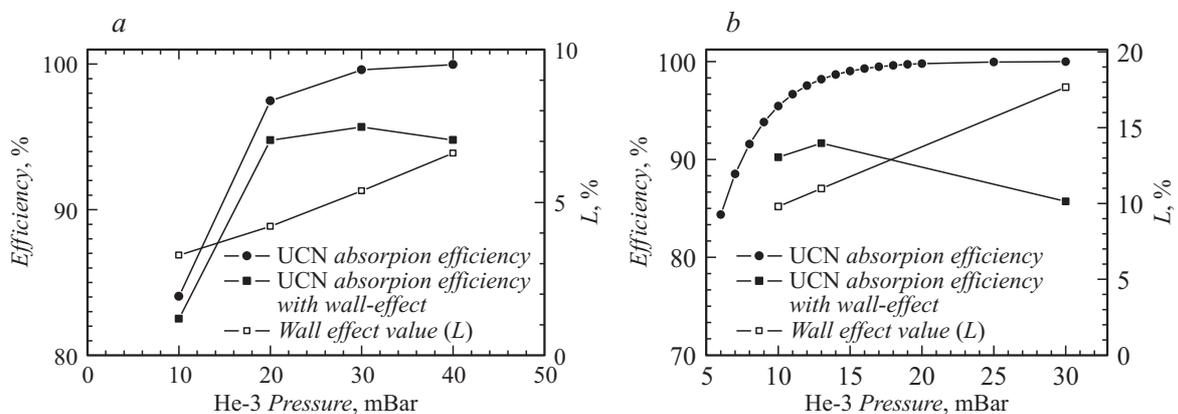


Рис. 5. Расчетная зависимость эффективности поглощения нейтронов и эффективности регистрации нейтронов от давления ${}^3\text{He}$ в газовых смесях при н.у. (на правой оси Y каждого графика приведена величина „стеночного“ эффекта L): *a* — в тестовой газовой смеси ${}^3\text{He}/\text{CF}_4$ для „стандартной“ скорости УХН $v = 8$ м/с, *b* — в рабочей газовой смеси ${}^3\text{He}/\text{Ar}$ для средней скорости УХН на экспериментальной установке в ИЛЛ $\langle v \rangle = 4.5$ м/с.

Результаты расчетов эффективности детектора с учетом „стеночного“ эффекта приведены на рис. 5.

Проведенные расчеты для тестовой газовой смеси показали, что:

1. Для выбранной геометрии детектора (G2) рекомендуется выбирать парциальное давление газа ${}^3\text{He}$ в диапазоне 20–40 мБар. При этом максимум эффективности для УХН ($v = 8$ м/с) достигается при давлении 30 мБар.
2. Включение в состав газовой смеси газа CF_4 позволило минимизировать величину „стеночного“ эффекта, так как газ имеет высокие удельные потери энергии частиц.
3. Число „пристеночных“ событий составляет не менее 5%. В результате наблюдаемые в детекторе амплитудные спектры будут искажаться. Влияние „стеночного“ эффекта на характер амплитудных спектров при регистрации УХН проявляется в появлении сплошного, имеющего свой амплитудный спектр, „пьедестала“ в области амплитуд событий с энергиями, меньшими полной энергии (ниже основного пика). Негативное влияние

данного эффекта заключается в затруднении режекции фона/шума от „полезных“ событий, так как заметное число „нейтронных“ событий имеет неполные треки ионизации и, как следствие, находится в области малых амплитуд.

Таким образом, для тестовых испытаний была выбрана газовая смесь: 30 мБар ${}^3\text{He}$ + 970 мБар CF_4 . В целях снижения возможного влияния флуктуаций атмосферного давления на форму мембраны при наполнении детектора парциальное давление газовой смеси в детекторе было выбрано несколько выше расчетного — 1030 мБар.

3. Тестирование детектора в лабораторных условиях ПИЯФ

3.1. Первичные испытания детекторной части

Первичные испытания детектора включали в себя исследование вольт-амперных и счетных характеристик

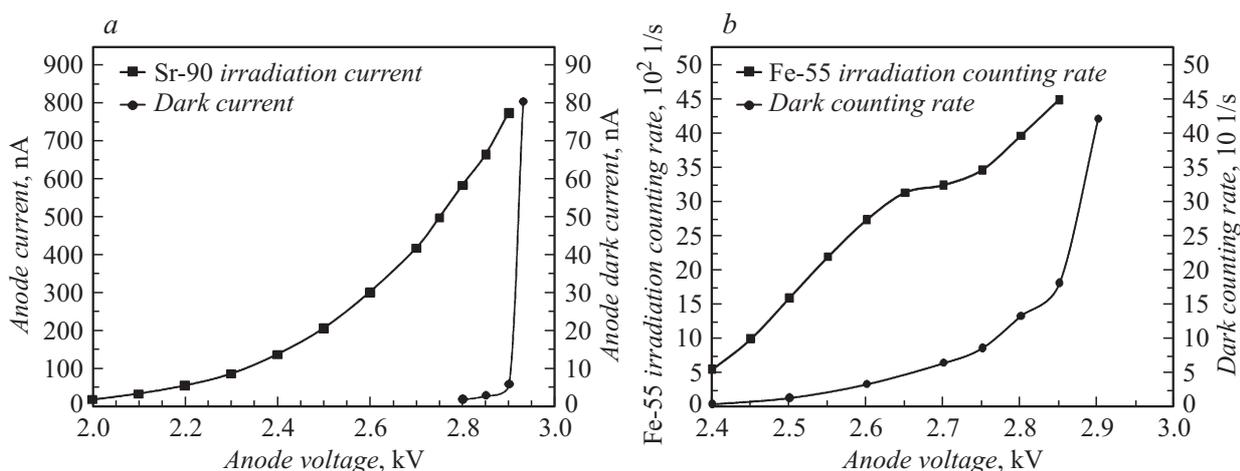


Рис. 6. Характеристики ячейки № 3, измеренные при облучении: *a* — ВАХ-источник Sr-90, *b* — счетная характеристика — источник Fe-55.

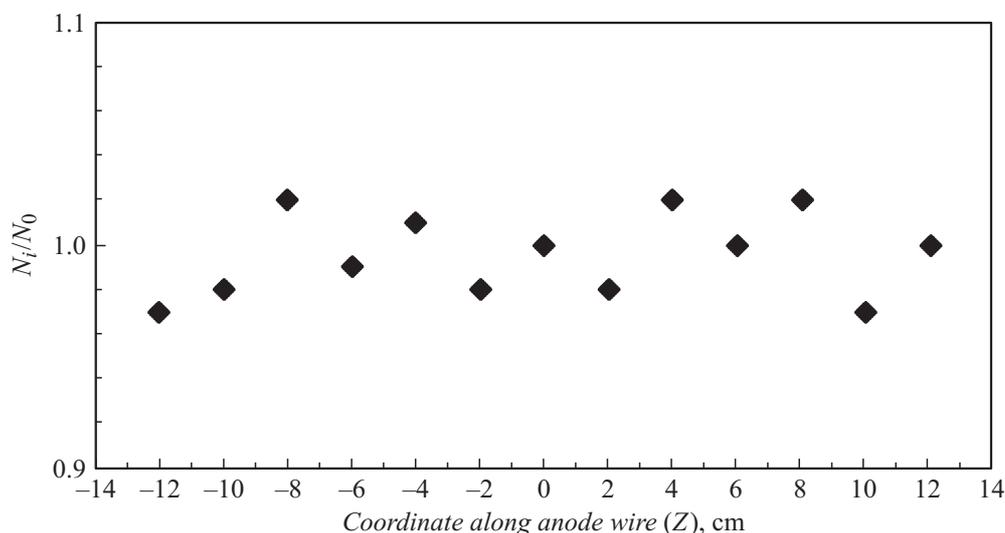


Рис. 7. Однородность счета вдоль проволоки анода ячейки № 3, измеренная при облучении Fe-55.

детектора, которые иллюстрируют качество работы прибора в целом. Детектор помещался в замкнутый газовый объем с майларовым окном, которое „прозрачно“ для фотонов низких энергий. В качестве верхнего полеформирующего катода использовалась специально изготовленная проволочная сетка из нержавеющей проволоки (диаметр 55 μm , шаг 1 mm). Детектор продувался различными газовыми смесями: азот и „стандартная смесь“ 60%Ar + 30%CO₂ + 10%CF₄. В испытаниях применялись стандартные источники электронов (Sr-90) и фотонов (Fe-55).

3.2. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ячеек детектора, наполненного азотом

Физический смысл этих измерений состоит в том, что на детектор подается такое высокое напряжение, чтобы создать в нем коронный разряд. Азот имеет

много колебательных и вращательных уровней, которые высвечиваются свет в видимом диапазоне длин волн. Исследуя возникающее в детекторе свечение, можно обнаружить различные неоднородности свечения, связанные с краевыми эффектами, с наличием микрочастиц пыли и т.д. Все подобные эффекты были найдены и устранены.

3.3. Испытания на „стандартной“ газовой смеси 60%Ar + 30%CO₂ + 10%CF₄

1. Темновой ток и вольтамперные характеристики при облучении электронами (Sr-90)

Для определения максимальной верхней границы рабочего диапазона (в данной газовой смеси) в каждой ячейке был измерен темновой ток (ток без радиоактивного источника). Для всех ячеек получены схожие результаты (рис. 6, *a*): темновой ток не превышает несколько

ких пА при напряжениях $U = 2.7\text{--}2.8\text{ kV}$, а затем резко увеличивается, начиная с 2.9 kV . Таким образом, это напряжение (2.9 kV) являлось предельным для данной газовой смеси.

Далее измерялись вольт-амперные характеристики при облучении электронами (Sr-90), (рис. 6, а). Из рисунка видно, что ячейки предсказуемо реагируют на облучение: протекающий ток с увеличением напряжения растает по экспоненциальному закону. Это поведение сохраняется вплоть до 2.9 kV .

Результаты проведенных измерений свидетельствуют о том, что электроды детектора не имеют дефектов, поскольку при наличии дефектов при облучении на анодной проволочке может загореться коронный разряд, и ток не исчезает после удаления источника.

2. Счетные характеристики при облучении фотонами (Fe-55)

Счетные характеристики, полученные при работе с источником Fe-55, приведены на рис. 6, б. Результаты измерений для всех ячеек имеют одинаковый характер: счетная характеристика, начиная с напряжения 2.65 kV , имеет перегиб и выходит на счетное плато. Это означает, что выше указанного напряжения регистрируются все фотоны, попадающие в детектирующую ячейку, и детектор работает в штатном режиме.

3. Однородность счета вдоль проволочки

Эта характеристика пропорциональных счетчиков измерялась по отношению счета от источника Fe-55 в точках вдоль проволочки анода Ni к счету в середине анодной проволочки N_0 ($Z = 0$). Результаты измерения однородности счета для счетчика № 3 представлены на рис. 7. Для всех ячеек максимальная величина неоднородности счета не превысила $\pm 4\%$.

Таким образом, первичные испытания детектора показали, что все шесть счетчиков работают в нормальном режиме, получены достаточный диапазон высокого напряжения и однородность счета вдоль анодных проволочек счетных каналов.

3.4. Испытания газового объема

Для откачки и наполнения детектора была смонтирована газовая система. Для предотвращения прогиба мембраны внутрь детектора сначала откачивался вакуумный объем (технологический объем с внешней стороны входного окна), а затем рабочий объем детектора, в котором находятся счетчики. Проверка газовой системы детектора включала в себя следующие этапы.

Проверка герметичности обоих объемов с помощью течеискателя (порог чувствительности по гелию $10^{-12}\text{ mBar} \cdot \text{l/s}$). Течей по гелию обнаружено не было.

Измерение динамики натекания атмосферного воздуха в объем детектора. Оба объема детектора откачивались 150 h до вакуума $\sim 2.8 \cdot 10^{-3}\text{ torr}$. За 96 h вакуум упал до вполне приемлемых величин: в детекторной части с $3 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-2} torr , а в вакуумном объеме до $2.3 \cdot 10^{-3}\text{ torr}$.

Для изучения возможного вытекания гелия из внутреннего объема детектор был наполнен газом ^4He до давления 950 mBar abs . Результаты испытаний показали, что за месяц измерений плотность гелия в детекторе не уменьшилась, и детектор был принят к наполнению тестовой газовой смесью.

3.5. Испытания детектора в собранном состоянии в лабораторных условиях

В измерениях использовался Pu–Be-источник нейтронов. Детектор был наполнен тестовой газовой смесью $^3\text{He}/\text{CF}_4$. Результаты измерений показали, (рис. 8, а), что оба счетных канала работают в нормальном режиме:

- наблюдаются характерные для газовой смеси с He-3 амплитудные спектры с пиком полной энергии 764 keV ,
- получена одинаковая амплитуда сигнала (КГУ) по обоим каналам,
- получено амплитудное разрешение (FWHM — Full Width at Half Maximum): $\Delta E/E \approx 6\%$ (1.8 kV).

4. Тестирование детектора в Grenoble

4.1. Адаптация газовой смеси к условиям работы в Гренобле

На экспериментальной установке в Гренобле использовались УХН-нейтроны со скоростями $v = 3.5\text{--}5.5\text{ m/s}$. Это вызвало необходимость оптимизации состава газовой смеси по сравнению с той, которая использовалась для тестирования детектора в ПИЯФ. Для расчета эффективности детектора была взята средняя скорость УХН ($\langle v \rangle = 4.5\text{ m/s}$).

С учетом предыдущего опыта работы в условиях реальных фоновых условий экспериментального зала в Гренобле для обеспечения оптимального соотношения „сигнал/фон“, для наполнения детектора была выбрана рабочая газовая смесь: $13\text{ mBar } ^3\text{He} + 20\text{ mBar CO}_2 + 1060\text{ mBar Ar}$.

График зависимости эффективности поглощения нейтронов от давления He-3 приведен на рис. 5, б. Видно, что при давлении He-3 выше, чем $10\text{--}15\text{ mBar}$, величина эффективности выходит в насыщение. С другой стороны, при выборе давления газа-конвертора нейтронов необходимо учитывать рост вклада „стеночного“ эффекта в неэффективность детектора с повышением парциального давления He-3. В частности, при увеличении давления He-3 с 10 до 30 mBar величина „стеночного“ эффекта L будет возрастать с 10 до 18% .

Расчетная зависимость КГУ от напряжения для рабочей газовой смеси представлена на рис. 3, а. Видно, что рабочему диапазону $\text{Gas Gain} = 50\text{--}100$ соответствует диапазон напряжений $U = 1.10\text{--}1.21\text{ kV}$.

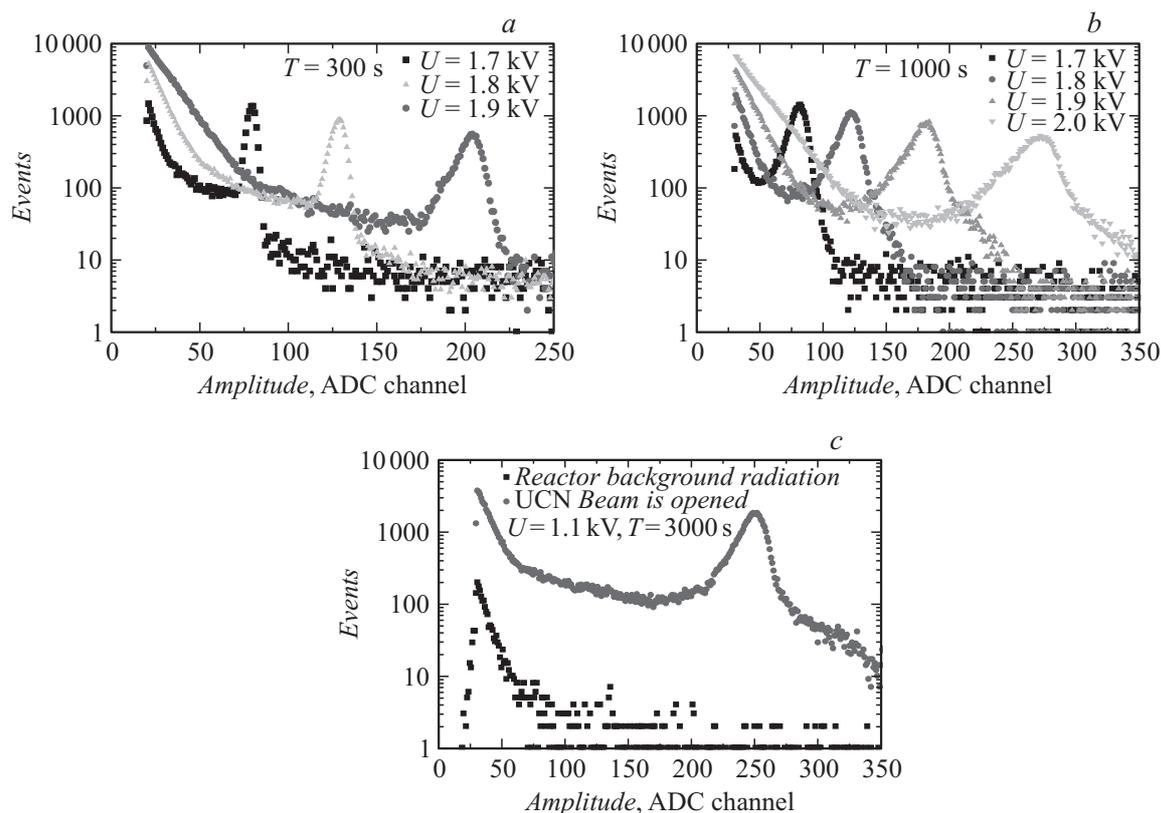


Рис. 8. Амплитудные спектры с детектора, счетный канал № 2, измеренные *a* — с тестовой газовой смесью в лабораторных условиях в ПИЯФ на Pu–Be источнике нейтронов, *b* — с тестовой газовой смесью на экспериментальной установке (тепловая мощность 30 MW, реактор FRM, ILL) при облучении УХН $\langle v \rangle = 4.5$ m/s. *c* — с рабочей газовой смесью на экспериментальной установке в условиях реакторного фона и при облучении УХН.

4.2. Измерение амплитудных спектров на источнике УХН

На рис. 8, *b, c* приведены амплитудные спектры с детектора, измеренные на источнике УХН, которые были получены при использовании тестовой газовой смеси и адаптированной рабочей газовой смеси (рабочее напряжение 1.1 kV). Из сравнения амплитудных спектров при одинаковых величинах $Gas\ Gain = 50$, видно, что форма амплитудного спектра стала несколько лучше при использовании в детекторе новой газовой смеси.

Заключение

1. Разработан и создан детектор УХН, который успешно прошел испытания на пучке УХН в ILL, Grenoble (France) и включен в состав нового спектрометра по измерению времени жизни нейтрона. Детектор имеет рабочую апертуру диаметром 290 mm и состоит из шести прямоугольных пропорциональных счетчиков объединенных по схеме „через одного“ в два счетных канала, что позволяет не только детектировать УХН с высокой эффективностью, но и оперативно контролировать профиль их распределения внутри вакуумного тракта.

2. Структура электрического поля внутри каждого пропорционального счетчика была оптимизирована следующим образом:

- мы отказались от наличия дрейфового промежутка с неоднородным электрическим полем со стороны входного окна, который был в предыдущем прототипе детектора,

- структура электрического поля в поперечном направлении каждого счетчика стала симметричной и сохранена практически постоянной в продольном направлении (вдоль анодной проволоочки). В результате:

- все пропорциональные счетчики стали работать независимо друг от друга и иметь практически одинаковые рабочие характеристики,
- была достигнута высокая однородность величины коэффициента газового усиления вдоль анодных проволок: максимальные флуктуации величин КГУ не превышали $\pm 4\%$,
- было практически исключено перекрестное срабатывание соседних ячеек (счетчиков), вызванное попаданием в них частей протон-тритонных треков,
- максимальное время сбора ионов, образовавшихся в газовой лавине, было сокращено более чем в 8 раз и не превышало 10 ms. Это позволило минимизировать влияние пространственного заряда ионов на

величину и структуру электрического поля детектора и соответственно увеличить интенсивность нейтронных пучков, с которыми детектор может работать без потери эффективности.

3. В качестве тестовой газовой смеси выбрана газовая смесь $30 \text{ mBar } ^3\text{He} + 1030 \text{ mBar } \text{CF}_4$, так как оптимум для парциального давления He-3 с точки зрения расчетной эффективности регистрации и минимизации „стеночного“ эффекта находится в диапазоне 20–40 mBar. Максимум эффективности достигается при давлении 30 mBar. При этом собственная эффективность детектора составляет 95.5%, а суммарная величина „стеночного“ эффекта не превышает 5.5%.

4. Было показано, что при обработке энергетических спектров УХН необходимо учитывать „стеночный“ эффект, приводящий к тому, что часть полезных событий попадает в область малых амплитуд. В результате наблюдаемые в детекторе амплитудные спектры искажаются. Влияние „стеночного“ эффекта на характер амплитудных спектров при регистрации УХН проявляется в появлении сплошного, имеющего свой амплитудный спектр, „пьедестала“ в области амплитуд событий с энергиями меньшими полной энергии (ниже основного пика). Негативное влияние данного эффекта заключается в затруднении режекции фона/шума от полезных событий, так как заметное число „нейтронных“ событий имеют неполные треки ионизации и, как следствие, находятся в области малых амплитуд.

5. Детектор успешно прошел полный цикл испытаний в лабораторных условиях, который включал в себя:

- Испытания газового объема, как на вакуумную герметичность, так и на утечки He-4 при нормальном давлении.

- Проверка всех шести счетчиков на стандартной газовой смеси (без He-3) показала, что все счетчики имеют одинаковые вольт-амперные (токовые) характеристики. Счетные характеристики, измеренные с помощью источника Fe-55, показали, что все счетчики имеют широкое плато эффективности (около 250 V), начинающиеся в точке 2.60 kV, что гарантирует стабильную и надежную работу детектора.

- Детектор был наполнен $30 \text{ mBar } ^3\text{He} + 1030 \text{ mBar } \text{CF}_4$ газовой смесью и прошел успешные испытания на источнике нейтронов Pu–Be. Наблюдаются характерные для газовой смеси с He-3 амплитудные спектры; получено амплитудное разрешение $\Delta E/E < 15\%$ (FWHM) в рабочем диапазоне напряжений $U = 1.7–1.9 \text{ kV}$. Получены практически одинаковые величины КГУ по обоим каналам.

6. При испытаниях детектора в составе спектрометра УХН в условиях реального эксперимента на реакторе в ILL, Grenoble (France) была выбрана следующая рабочая газовая смесь: $13 \text{ mBar } ^3\text{He} + 20 \text{ mBar } \text{CO}_2 + 1060 \text{ mBar } \text{Ar}$, состав которой оптимизировался исходя из используемого диапазона спектра УХН.

7. В настоящее время завершается создание нового усовершенствованного детектора УХН: усовершенство-

вана механика опорной решетки, заложена возможность быстрой замены мембраны и т.д.

Исследование выполнено в ФГБУ „ПИЯФ“ НИЦ „Курчатовский институт“ за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00105).

Авторы выражают свою искреннюю признательность Г.Д. Шабанову, Н.Н. Филимоновой, И.Н. Парченко, Ю.К. Огурцову и А.Г. Харитонову за помощь в создании и проведении тестовых испытаний детектора.

Список литературы

- [1] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г., Варламов В.Е., Чечкин А.В.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. Вып. 11. С. 136–141.
- [2] *Serebrov A.P. et al.* // Phys. Rev. C. 2008. Vol. 78. P. 035 505-1–035 505-15.
- [3] *Veenhof R.* Garfield — simulation of gaseous detectors. Режим доступа: <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>.
- [4] *Ziegler J.F.* SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter. Режим доступа: <http://www.srim.org/>.
- [5] *Batchelor R., Aves R., Skyrme T.H.R.* // Rev. Sci. Instrum. 1955. Vol. 26. P. 1037.