

УСТАНОВКА «БЕТА-РАСПАД НЕЙТРОНА» ДЛЯ РК ПИК

*А. П. Серебров^{a,1}, А. К. Фомин^a, О. М. Жеребцов^a, Г. Н. Ключников^a,
А. О. Коптюхов^a, В. А. Лямкин^a, А. Н. Мурашкин^a, Д. В. Прудников^a*

^a Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Гатчина, 188300, Россия

Нейтронный приборный комплекс «Бета-распад нейтрона» входит в состав приборной базы РК ПИК. Установка предназначена для измерения электронной, нейтринной и электрон-нейтринной асимметрий бета-распада нейтрона с точностью 0,1%. Необходимость эксперимента обусловлена тем, что результаты последних экспериментальных данных бета-распада нейтрона не могут быть описаны в рамках Стандартной модели.

The neutron instrument complex “Neutron Beta Decay” is a part of the instrument base of the РК RC. The installation is designed to measure the electron, neutrino and electron–neutrino asymmetries of neutron beta decay with an accuracy of 0.1%. The experiment is necessary because the results of the latest experimental data on neutron beta decay cannot be described within the Standard Model.

PACS: 13.30.Ce

ВВЕДЕНИЕ

Мотивацией для проведения эксперимента является расхождение последних результатов измерений параметров β -распада нейтрона [1]. Проведен анализ последних наиболее точных экспериментальных данных распада нейтрона на возможность существования правого векторного бозона W_R . В результате анализа в рамках лево-правой модели обнаружено, что имеется указание на существование правого векторного бозона W_R с массой $M_{W_R} = 304_{-20}^{+24}$ ГэВ и углом смешивания с W_L : $\zeta = -0,039 \pm 0,014$.

Установка «Бета-распад нейтрона» входит в состав приборной базы РК ПИК [2] и будет расположена на пучке поляризованных холодных нейтронов на канале ГЭК-3 НО. Основу установки составляет сверхпроводящий соленоид с длинной протонной базой, через который проходит пучок нейтронов. Свободный нейтрон со временем распадается на протон, электрон и антинейтрино. Электроны и протоны, образовавшиеся при распаде нейтрона при прохождении через соленоид, движутся в магнитном поле вдоль силовых магнитных линий. Это не дает им возможности разлетаться в радиальном направлении. Для регистрации заряженных частиц используются детекторы, расположенные на входе и выходе соленоида. Развитие проекта

¹E-mail: serebrov_ap@pnpi.nrcki.ru

с холодными и ультрахолодными нейтронами отражено в публикациях [3–7]. Недостатком эксперимента с ультрахолодными нейтронами является их деполяризация при хранении [8].

СОСТАВ УСТАНОВКИ

Расположение установки в главном зале РК ПИК и ее основные системы показаны на рис. 1. Соленоид представляет собой магнитную сверхпроводящую систему с криогенным обеспечением по типу магниторезонансного томографа с длительным удержанием жидкого гелия объемом 1000 л. Соленоид имеет два вакуумных объема: «холодный» вакуум криостата и «теплый» вакуум, в котором проходит нейтронный пучок и располагаются детекторы заряженных частиц. Соленоид располагается на юстировочной платформе.

На входе в соленоид находятся устройства формирования пучка, расположенные в защите. Для поляризации нейтронов будет использован многослойный поляризатор на суперзеркалах [9]. Поляризация необходима, так как направления вылета продуктов распада зависят от того, как ориентирован спин нейтрона, по направлению магнитного поля в соленоиде или противоположном. Коллимация пучка производится при помощи двух диафрагм. С целью изменения направления спина нейтронов устанавливается два радиочастотных спин-флиппера [10]. Измерения будут проводиться на непрерывном пучке нейтронов, но для калибровки детекторов заряженных частиц будет необходим прерывистый пучок в виде отдельных нейтронных банчей. Для этого будет использован двухдисковый прерыватель [11]. На выходе из соленоида распо-

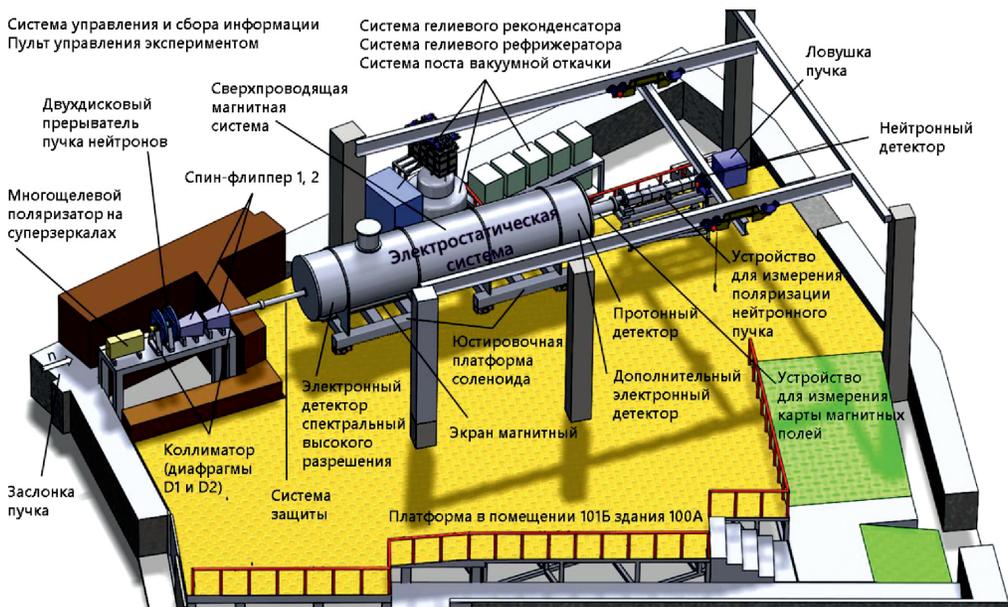


Рис. 1. Состав установки «Бета-распад нейтрона»

лагаются: устройство для измерения поляризации пучка [12], нейтронный детектор и ловушка пучка.

НЕЙТРОННЫЙ ПУЧОК

Произведено моделирование методом Монте-Карло нейтронного пучка нейтроновода ГЭК-3 НО. Нейтроновод собран из секций сечением $30(\text{ш}) \times 100(\text{в})$ мм. При изготовлении использованы суперзеркала с коэффициентом $m = 2,5$. Спектр нейтронов

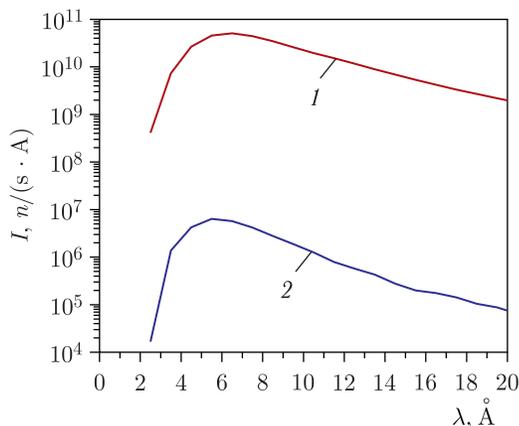


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Спектр нейтронного пучка на выходе из нейтроновода ГЭК-3 НО (красная линия, 1) и на входе в распадную область (синяя линия, 2)

в зависимости от длины волны показан на рис. 2 для пучка на выходе из нейтроновода и в распадную область. Расчетный поток нейтронов на выходе из нейтроновода составляет $3,3 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. Поляризация производится при помощи суперзеркального поляризатора. Длина зеркал поляризатора составляет 400 мм. Зеркала расположены вертикально. Радиус закругления зеркал — 10,5 м. Толщина зеркал составляет 0,4 мм. Коллимация пучка производится при помощи двух диафрагм сечением $7,7(\text{ш}) \times 12,3(\text{в})$ мм. Расстояние между диафрагмами составляет 2 м. Расчетный поток нейтронов на входе в распадную область — $3,1 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Количество нейтронных распадов в этой области — 132 с^{-1} .

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Сверхпроводящий соленоид создает магнитное поле в однородной области 0,35 Тл. Для выбора заданного угла вылета электронов используется эффект магнитного зеркала за счет создания области с более сильным магнитным полем с величиной индукции 0,88 Тл. Электроны, вылетевшие под углом, большим угла магнитной коллимации $\theta_c = \arcsin \sqrt{B_0/B_1}$, где B_0 — величина индукции магнитного поля в области распада, а B_1 — в области магнитной пробки, отражаются от области сильного магнитного поля и не достигают детектора.

Для детектирования электронов магнитное поле, создаваемое соленоидом, отклоняется вниз с тем, чтобы вывести электроны из области пучка. С этой целью будет использован магнитопровод (железное ярмо), который монтируется под соленоидом. Выполнено вычисление магнитных полей и сил, возникающих в системе [13]. Результат расчета показан на рис. 3.

Произведены испытания сверхпроводящего соленоида с заливкой жидкого гелия и последовательным заведением тока 1 кА. В результате испытаний выполнены измерения магнитных полей в областях магнитной пробки и однородного поля, которые совпали с расчетными (рис. 4).

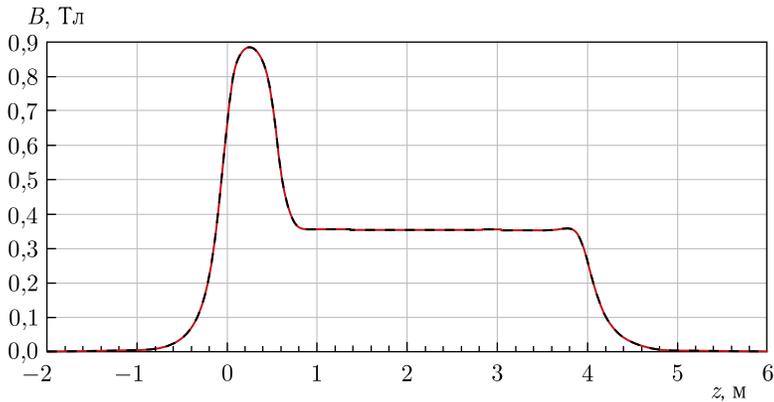


Рис. 3. Зависимость модуля магнитного поля от координаты вдоль оси соленоида

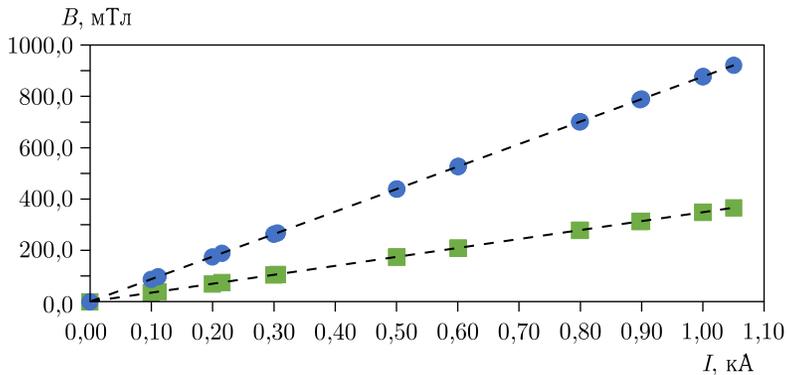


Рис. 4. Зависимость магнитной индукции от силы тока, полученная в результате испытаний сверхпроводящего соленоида: квадраты — однородная область; кружки — область пробки. Штриховыми линиями показано фитирование линейной зависимостью

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Область, в которой регистрируются распады нейтронов, — область с высокой однородностью поля длиной 2,4 м внутри соленоида (рис. 5). Эта область выделяется по протонам, которые ускоряются при помощи электростатической системы. В области распада располагаются высоковольтные электроды, соединенные сопротивлениями так, что при подаче высокого напряжения на крайние электроды создается равномерно изменяющийся вдоль оси соленоида потенциал. Напряжение, подаваемое на крайние электроды относительно земли, должно регулироваться в диапазоне от 25 до 30 кВ с целью изменения направления вывода протонов из области распада и использования детекторов на входе или на выходе нейтронного пучка. Основное ускорение протонов осуществляет электрическое поле между высоковольтными и заземленными диафрагмами.

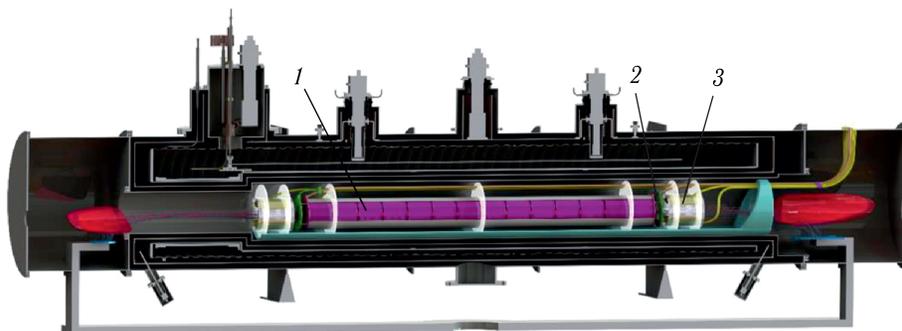


Рис. 5 (цветной в электронной версии). Сверхпроводящий соленоид в разрезе. Показаны траектории электронов (синий цвет) и протонов (красный цвет), а также области детекторов. Элементы электростатической системы: 1 — высоковольтные электроды; 2 — заземленная диафрагма; 3 — конденсатор

Для выведения протонов из пучка и разделения их с электронами используется эффект дрейфа в перекрестных электрических и магнитных полях. Поперечные электрические поля формируются двумя конденсаторами, устанавливаемыми на входе и выходе потока нейтронов в электростатическую систему. Конденсатор представляет собой две полуцилиндрические обкладки. На верхний полуцилиндр подается потенциал -10 кВ, на нижний полуцилиндр подается потенциал $+10$ кВ. Полярность может меняться для изменения направления отклонения частиц без изменения направления тока в соленоиде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Траекторные расчеты и математическое моделирование показали возможность измерения электронной, нейтринной и электрон-нейтринной асимметрий β -распада нейтрона с точностью $0,1\%$. Проведены тестовые испытания соленоида с заведением тока 1 кА. Проведены тепловые расчеты, подобрано криогенное оборудование с целью создания магнитной сверхпроводящей системы с криогенным обеспечением по типу магниторезонансного томографа с длительным удержанием гелия.

На РК ПИК также запланированы эксперименты по измерению времени жизни нейтрона. Эксперименты с большой гравитационной ловушкой [14] и магнитной ловушкой [15] до этого проводились в Институте Лауэ-Ланжевена (ИЛЛ, Франция). Расчеты показывают, что в эксперименте по измерению времени жизни нейтрона с большой гравитационной ловушкой счет детектора на реакторе ПИК получается в 50 раз больше, чем на реакторе ИЛЛ, что говорит о возможности достичь статистической точности результата измерения $0,1$ с при одинаковой длительности измерений [16]. Также предложен проект эксперимента с поворотной магнитной ловушкой [17].

Таким образом, эксперимент по измерению корреляционных коэффициентов вместе с экспериментами по измерению времени жизни нейтрона позволит получить полную картину β -распада нейтрона на РК ПИК.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. Part. Nucl. Lett. 2025. V. 22. P. 229.
2. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. At. Nucl. 2016. V. 79. P. 293.
3. *Беломицев О. Б., Васильев А. В., Руднев Ю. П., Серебров А. П.* Препринт ЛИЯФ 1391. Гатчина, 1988. 10 с.
4. *Serebrov A., Rudnev Yu., Murashkin A. et al.* // J. Res. Natl. Inst. Stan. 2005. V. 110. P. 383.
5. *Serebrov A. P., Rudnev Yu. P., Murashkin A. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 545. P. 344.
6. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. At. Nucl. 2019. V. 82. P. 98.
7. *Serebrov A. P. et al.* // J. Surf. Invest. 2023. V. 17. P. 116.
8. *Serebrov A. P. et al.* // Phys. Lett. A. 2003. V. 313. P. 373.
9. *Gilev A. G. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 833. P. 233.
10. *Bazhenov A. N. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1993. V. 332. P. 534.
11. *van Well A. A.* // Physica B. 1992. V. 180 & 181. P. 959.
12. *Serebrov A. P. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 357. P. 503.
13. *Амосков В. М. и др.* // Вестн. СПбГУ. 2024. Т. 20. С. 520.
14. *Serebrov A. P. et al.* // JETP Lett. 2017. V. 106. P. 623.
15. *Ezhov V. F.* // JETP Lett. 2018. V. 107. P. 671.
16. *Fomin A. K., Serebrov A. P.* // Phys. Part. Nucl. 2025. V. 56. P. 928.
17. *Serebrov A. P. et al.* // J. Surf. Invest. 2024. V. 18. P. 913.

Получено 9 июля 2025 г.