

15

Система преломляющих магнитных полей для эксперимента по проверке электронейтральности нейтрона методом спиновой интерферометрии

© Ю.В. Борисов¹, А.Я. Бердников², Я.А. Бердников²,
Ю.П. Брагинец^{1,2}, В.В. Воронин^{1,2,3}, И.А. Кузнецов¹,
М.В. Ласица^{1,2}, С.Ю. Семенихин¹, В.В. Федоров^{1,2,3}

¹ НИЦ „Курчатовский институт“ ПИЯФ, Гатчина

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

³ Санкт-Петербургский государственный университет

E-mail: yborisov@pnpi.spb.ru

Поступило в Редакцию 8 апреля 2015 г.

Дается описание, конструкция, результаты расчетов и испытаний магнитных нейтронных преломляющих призм для установки с использованием эффекта спинового эха. Данная установка, оснащенная совершенными монокристаллами для дифракционного усиления интерференционных спиновых эффектов, будет обладать беспрецедентной чувствительностью к малым внешним воздействиям на нейтрон и использоваться для проверки электронейтральности нейтрона.

Методика спин-эхо малоуглового рассеяния нейтронов (СЭМУРН), предложенная в [1], является перспективным инструментом для изучения структурных характеристик материалов. Нами предлагается использовать данную методику в эксперименте по проверке электронейтральности нейтрона [2,3]. Ожидаемая чувствительность такого метода с использованием дифракционного усиления малых угловых отклонений при динамической дифракции нейтрона в совершенном

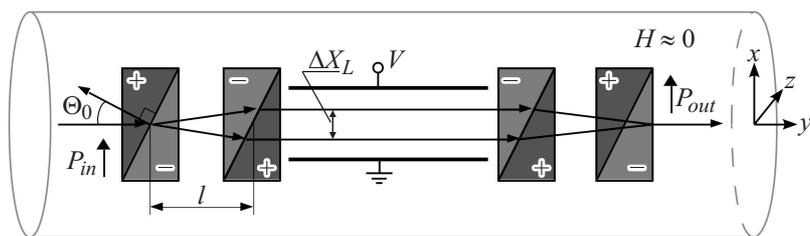


Рис. 1. Возможная комбинация магнитных призм для измерения заряда нейтрона.

кристалле (см., например, [4,5]) позволит по крайней мере на порядок улучшить современную точность измерения электрического заряда нейтрона [6].

Основным элементом СЭМУРН является устройство для пространственного расщепления нейтронного пучка на два с противоположными поляризациями. Подобное устройство [7] может, например, состоять из двух смежных соленоидов с треугольными сечениями, в которых токи текут в противоположных направлениях и создают одинаковые по величине, но противоположно направленные магнитные поля. Такая магнитная призма производит небольшое угловое (и соответственно пространственное) разделение нейтронов с противоположными проекциями спина на ось Z , вдоль которой направлены поля в катушках.

Задачей данной работы является создание экспериментальной установки для измерения заряда нейтрона. Один из возможных вариантов схемы установки с использованием техники СЭМУРН, похожей на представленную в работе [7], изображен на рис. 1.

Поляризованный по оси X перпендикулярно магнитному полю в катушках (оси Z) нейтронный пучок (первоначально направленный по оси Y) проходит через границу, на которой направление магнитного поля резко изменяется на противоположное. Для одной спиновой компоненты нейтронной волны коэффициент преломления (потенциал взаимодействия нейтрона с магнитным полем) скачком возрастает, для другой — падает. При прохождении наклонной границы между треугольными областями компоненты нейтронной волны со спинами по полю и против поля преломляются в различных направлениях, что расщепляет пучок на два с противоположными спинами. Противополож-

но ориентированная вторая магнитная призма формирует параллельные нейтронные пучки, пространственно разделенные на величину

$$\Delta X_l = \frac{2\mu_n B}{E_n} l \tan \theta_0,$$

где ΔX_l — величина расщепления, μ_n — магнитный момент нейтрона, B — магнитное поле внутри призмы, E_n — энергия нейтрона, θ_0 — угол падения нейтрона, l — расстояние между призмами (рис. 1).

К примеру, при $B = 10^{-2}$ Т, $l = 0.2$ м, для энергии нейтрона $E_n = 5 \cdot 10^{-3}$ эВ (длина волны $\lambda = 4$ Å, скорость $v = 1000$ м/с) с учетом того, что магнитный момент нейтрона $\mu_n = 6.02 \cdot 10^{-8}$ эВ/Т, величина ΔX_l при $\tan \theta_0 \sim 1$ будет равна $\Delta X_L \approx 0.5$ мкм.

Если приложить электрическое поле \mathbf{E} , разделенные пучки нейтронов в различных спиновых состояниях будут двигаться в разных электрических потенциалах, следовательно, с разными волновыми векторами, после чего они сводятся во втором плече, зеркальном первому. Наличие электрического заряда приведет к фазовому сдвигу $\Delta\phi$ между этими состояниями, равному:

$$\Delta\phi = \Delta k L = \frac{q_n(\mathbf{E}\Delta\mathbf{X}_l)}{\hbar} \frac{L}{v},$$

где Δk — разность волновых векторов, обусловленная разностью кинетических энергий нейтронов, движущихся в разных потенциалах; q_n — заряд нейтрона; L — расстояние, которое проходит нейтрон в электрическом поле; $\Delta\mathbf{X}_l$ — вектор расщепления пучка, направленный в нашем случае по оси X и равный по величине ΔX_l .

В результате спин-нейтрон после установки (поляризация P_{out} на рис. 1) окажется повернутым на угол $\varphi = \Delta\phi$ вокруг направления оси квантования Z по отношению к первоначальному направлению (\mathbf{P}_{in}). Этот угол поворота спина φ и является величиной, измеряемой в эксперименте. Как и в любом другом интерферометре, эффект определяется площадью $L\Delta X_l$, охватываемой интерферирующими лучами.

Заметим, что гравитационное поле также приводит к дополнительному сдвигу фаз и повороту спина нейтрона $\varphi_G = m_n(\mathbf{g}\Delta\mathbf{X}_l)L/\hbar v$, где m_n — масса нейтрона, \mathbf{g} — ускорение силы тяжести. Это обстоятельство, с одной стороны, можно использовать для изучения гравитационного взаимодействия нейтрона, с другой стороны, необхо-

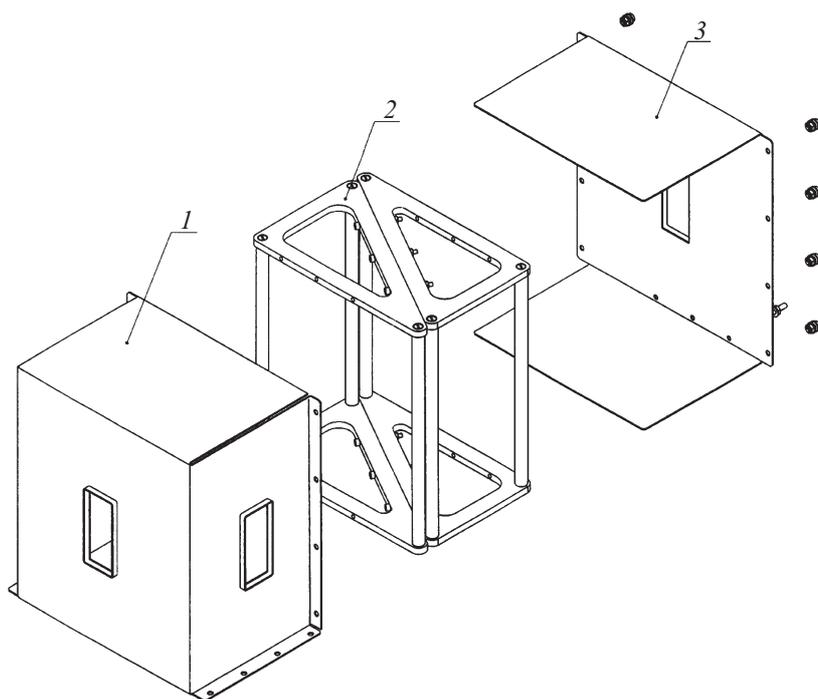


Рис. 2. Каркас треугольных катушек 2 и магнитный экран 1, 3.

димо учитывать в экспериментах по проверке электронейтральности нейтрона.

Если поместить между магнитными призмами в обоих плечах интерферометра совершенные кристаллы так, чтобы нейтроны падали на них приблизительно под брэгговскими углами к отражающим плоскостям, можно увеличить величину ΔX_i на несколько порядков и настолько же улучшить чувствительность установки к воздействию внешних полей [3].

Нами были проведены расчеты магнитной призмы с оценкой рассеянных полей снаружи. С учетом этих расчетов были изготовлены каркасы и проведена намотка катушек алюминиевым проводом с диаметром 1 mm в лаковой изоляции виток к витку (10 витков на 1 cm). Размеры призмы: высота 200 mm, боковые стенки — 185 и 110 mm.

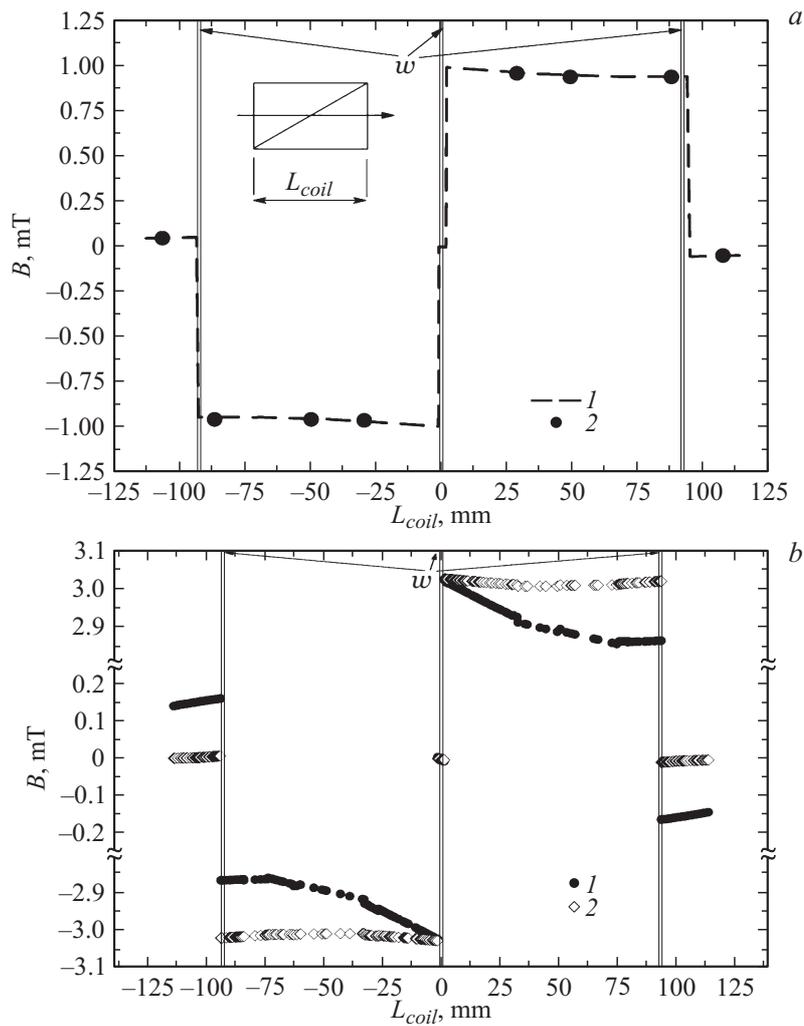


Рис. 3. *a* — сравнение результатов расчетов и измерений магнитного поля катушек без экранов (1 — расчет, 2 — измерения), ток в катушках 0.8 А; *b* — сравнительные расчеты магнитного поля катушек без экрана (1) и с магнитным экраном (2), относительная магнитная проницаемость $\mu = 15000$. Для создания среднего поля внутри катушек ~ 3 мТ ток в катушках составил 2.43 А. w — положение витков катушек.

Для уменьшения рассеянных полей призмы помещены в отожженные в вакууме магнитные экраны (рис. 2, *a*) из пермаллоя марки 79НМ толщиной 1 мм. В экранах сделаны окна и имеется возможность пропускания нейтронов под углом 30 либо 60° к диагональной стенке призмы. На рис. 2 приведены эскизы экрана и каркаса призмы. Измеренный коэффициент экранирования составил ~ 20 . Максимальное рабочее магнитное поле ограничивается нагревом катушек. При пропускании тока 3 А катушки нагреваются до 70°С. Ток возможно увеличить в несколько раз, используя принудительное воздушное или водяное охлаждение.

Были созданы компьютерные 3D-модели и проведены расчеты распределения магнитных полей, создаваемых треугольными катушками внутри экранов. На рис. 3, *a* приведены результаты расчетов и измерений магнитного поля, создаваемого катушками без экранов при питании их током 0.8 А. Контрольные измерения проводились магнитометром Г74М и хорошо согласуются с расчетами.

Помещение призмы в магнитный экран приводит к тому, что однородность распределения поля в треугольных катушках возрастает примерно в 15 раз, а остаточные поля снаружи катушек уменьшаются примерно в 30 раз (рис. 3, *b*). В результате максимальная величина рассеянных магнитных полей снаружи магнитных экранов вдоль оси пучка нейтронов составила $< 0.3\%$ от рабочего магнитного поля внутри катушек.

По расчетам, для рабочей длины волны $\lambda = 3.96 \text{ \AA}$ максимальный угол поворота спина нейтрона на рассеянных полях снаружи экрана будет $< 2 \cdot 10^{-2}$, а с учетом противоположных знаков остаточных полей на входе и выходе из экрана (относительная разница полей катушек не превышает $5 \cdot 10^{-3}$) угол поворота составит $< 10^{-4}$, т. е. этим эффектом можно пренебречь.

Проводимые нами исследования позволят создать принципиально новую методику изучения взаимодействия нейтрона с электрическим полем, основанную не на измерении изменения интенсивности нейтронного потока, а на определении изменения фазы, т. е. поляризации нейтронов. Такой подход может дать существенный выигрыш в точности измерений. Кроме этого, описанная выше установка может быть использована для исследования структуры и свойств различных материалов.

Данная работа поддержана Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках задания 3.329.2014/К.

Список литературы

- [1] *Rekveldt M.Th.* // Nucl. Instr. Meth. B. 1996. V. 114. P. 366.
- [2] *Kuznetsov I.A., Voronin V.V.* // Proc. XX International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei. Dubna, JINR, 2013. P. 44.
- [3] *Voronin V.V., Akselrod L.A., Zabenkin V.N., Kuznetsov I.A.* // Physics Procedia. 2013. V. 42. P. 25.
- [4] *Kato N.* // J. Phys. Soc. Jpn. 1964. V. 19. P. 971.
- [5] *Fedorov V.V., Kuznetsov I.A., Lapin E.G., Semenikhin S.Yu., Voronin V.V.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 593. P. 505.
- [6] *Baumann J., Gähler R., Kalus J., Mampe W.* // Phys. Rev. D. 1988. V. 37. P. 3107.
- [7] *Pynn R., Fitzsimmons M.R., Lee W.T. et al.* // Physica. B. 2009. V. 404. P. 2582.