

УДК 539.125.5

КРИСТАЛЛ-ДИФРАКЦИОННЫЙ МЕТОД УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННОЙ НЕЙТРОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ

© 2020 г. Ю. П. Брагинец^{a, b, *}, Ю. В. Борисов^a, В. В. Воронин^{a, b, c}, М. В. Ласица^{a, b}, С. Ю. Семенихин^{a, b, **}, В. В. Федоров^{a, b, c}

^aПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,
Гатчина, 188300 Россия

^bСанкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, 195251 Россия

^cСанкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: braginets_up@pnpi.nrcki.ru

**e-mail: semenikhin_sy@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 20.05.2019 г.

После доработки 28.06.2019 г.

Принята к публикации 30.06.2019 г.

Описана тестовая установка для измерения электрического заряда нейтрона с использованием метода спиновой интерферометрии и эффекта двухкристалльной фокусировки нейтронов при дифракции по Лауэ. Показано, что для увеличения точности измерения заряда нейтрона необходимо разнести кристаллы на значительное расстояние друг от друга (~1 м). Это является сложной задачей, поскольку установка становится чувствительной к малейшим внешним воздействиям (температура, вибрация и др.). Для определения степени влияния этих воздействий проведены температурные испытания с комбинированной (активной и пассивной) тепловой защитой. Показано, что в условиях реакторного зала с колебаниями температуры в несколько градусов, экспериментальная установка обеспечивает стабильность температуры на кристаллах не хуже 0.01 К, а стабильность разностей температур на кристаллах и между ними на уровне ~0.005 К. Измерение уровня вибрации в секторе пучка холодных нейтронов PF1b реактора ИЛЛ (Гренобль, Франция) позволило оценить величину скорости смещения кристаллов относительно друг друга на уровне ~10⁻³ см/с. Из полученных данных следует, что угловое разрешение установки, без учета влияния совершенства реальных образцов кристалла, может находиться на уровне 10⁻³ от брэгговской ширины отражения, что составляет ~0.001 угловой секунды.

Ключевые слова: нейтрон, нейтронная спектрометрия, электрический заряд нейтрона, двухкристалльная фокусировка, дифракция по Лауэ.

DOI: 10.31857/S1028096020020077

ВВЕДЕНИЕ

Нейтрон, участвуя во всех известных на сегодняшний день типах взаимодействий, является очень удобным объектом исследований. Изучение его свойств дает ключ к пониманию как структуры “элементарных” частиц и механизма их взаимодействий, так и процессов, происходящих в масштабах Вселенной. Например, поиск электрического заряда нейтрона может быть проверкой некоторых теоретических концепций за пределами Стандартной Модели. В частности, моделей, предполагающих наличие нарушения барионной и лептонной (B–L) симметрий [1] или моделей, основанных на предположении о суще-

ствовании дополнительных пространственных измерений [2].

Современное экспериментальное ограничение на величину заряда нейтрона лежит на уровне ~10⁻²¹ заряда электрона [3, 4]. Нами предложен эксперимент, позволяющий улучшить это ограничение, по крайней мере, на порядок [5].

ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА НЕЙТРОНА

Для реализации эксперимента по измерению электрического заряда нейтрона предлагается метод, основанный на использовании спиновой ин-

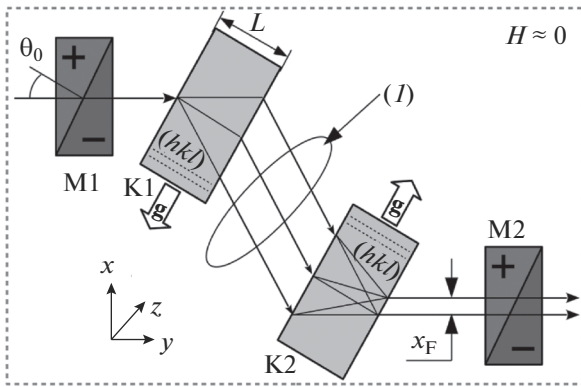


Рис. 1. Схема эксперимента с использованием дифракции нейтронов по Лауэ: M1, M2 – области магнитного поля величиной B ; знаки “+”, “–” соответствуют направлениям магнитного поля; K1 и K2 – первый и второй кристалл, соответственно; L – толщина кристалла; (hkl) – индексы Миллера; \mathbf{g} – вектор обратной решетки; θ_0 – угол между направлением скорости нейтрона и нормалью к границе катушки; (I) – рабочая область; x_F – возможное смещение пучка при воздействии на нейтроны в рабочей области (I) .

терферометрии и эффекта двухкристалльной фокусировки при дифракции нейтронов по Лауэ [5–7]. Схема эксперимента показана на рис. 1.

Пучок нейтронов, поляризованных вдоль оси x , проходит через катушку с током M1 и попадает на первый кристалл. Затем дифрагировавший отраженный пучок от первого кристалла падает на второй кристалл, плоскости отражения которого должны быть параллельны плоскостям первого с точностью в пределах брэгговской ширины. На выходе из второго кристалла отраженный нейтронный пучок, после прохождения через катушку M2, попадает в детектирующую систему. Между кристаллами находится рабочая область (I) . Нейтронный пучок на всем пути от катушки M1 до M2 должен находиться в магнитном поле $H \sim 0$ (т.е. в магнитном экране). На рис. 1 область экранирования ограничена пунктирными линиями.

В такой геометрии часть интенсивности дважды дифрагировавшего пучка фокусируется на выходной поверхности второго кристалла [8] и распределение интенсивности (или поляризации) нейтронов по входной поверхности первого кристалла воспроизводится на выходной поверхности второго кристалла. В такой геометрии для каждой траектории нейтрона угол поворота спина нейтрона в катушке M1 равен по величине, но противоположен по знаку углу поворота в катушке M2, т.е. суммарный угол поворота спина (в отсутствие внешнего воздействия на нейтрон в области между кристаллами) равен нулю. Расчет таких катушек применительно к рассматриваемой геометрии выполнен в работе [9].

Наличие внешней силы между кристаллами в рабочей области (I) приведет к отклонению на-

правления движения нейтрона на некоторый угол и, соответственно, к смещению фокуса по выходной поверхности второго кристалла [8]. Это приведет к тому, что угол поворота спина нейтрона в катушке M2 не будет равен углу поворота в катушке M1. Этот сигнал рассогласования при смещении фокуса на величину x составляет:

$$\phi_x = \frac{2\mu B 2xtg\theta_0}{\hbar v},$$

где v – скорость нейтрона, B – величина магнитного поля в катушках M1 и M2.

Действие внешней силы F_n на расстоянии l приводит к изменению направления движения нейтрона на угол $\alpha = F_n l / (2E)$, и смещение пучка нейтронов по выходной поверхности второго кристалла в этом случае составит:

$$x_F = \frac{F_n l}{v_g} L \sin \theta_B,$$

где v_g – амплитуда g -гармоники потенциала взаимодействия нейтрона с кристаллом.

Как показано в работе [10] величина угла поворота спина нейтрона за счет наличия у него электрического заряда при угле дифракции $\theta_B = 70^\circ$ для плоскости (220) кремния может составить:

$$\phi_e = 1 \times 10^{18} e_n,$$

при величине электрического поля $E_0 = 100$ кВ/см в рабочей области (I) протяженностью $l = 1$ м. Таким образом, чувствительность к заряду нейтрона может составить $\sim 10^{-23}$ от заряда электрона при вполне реальной чувствительности к углу поворота спина нейтрона $\sigma(\phi_e) \sim 10^{-5}$ [10].

ТЕСТОВАЯ УСТАНОВКА

Для увеличения точности измерения заряда нейтрона необходимо разнести кристаллы на значительное расстояние друг от друга. Тестовая модель установки с общей опорной базой и расстоянием между кристаллами около 600 мм изображена на рис. 2. Установка содержит общее основание (опорную плиту) на котором смонтированы водяные радиаторы для системы термостабилизации и две поворотные платформы, на которых расположены рабочие кристаллы в кристаллодержателях. Вся установка находится в теплоизолирующем кожухе.

В качестве опорной плиты используется стеклокерамика СО-115М (астроситалл с размерами $1000 \times 300 \times 70$ мм и коэффициентом теплового расширения $< 2 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$), которая позволяет значительно уменьшить смещения кристаллов относительно друг друга, вызванные возможными вариациями температуры во время измерений.

В качестве теплоносителя в системе термостабилизации используется деминерализованная вода, протекающая через систему алюминиевых и

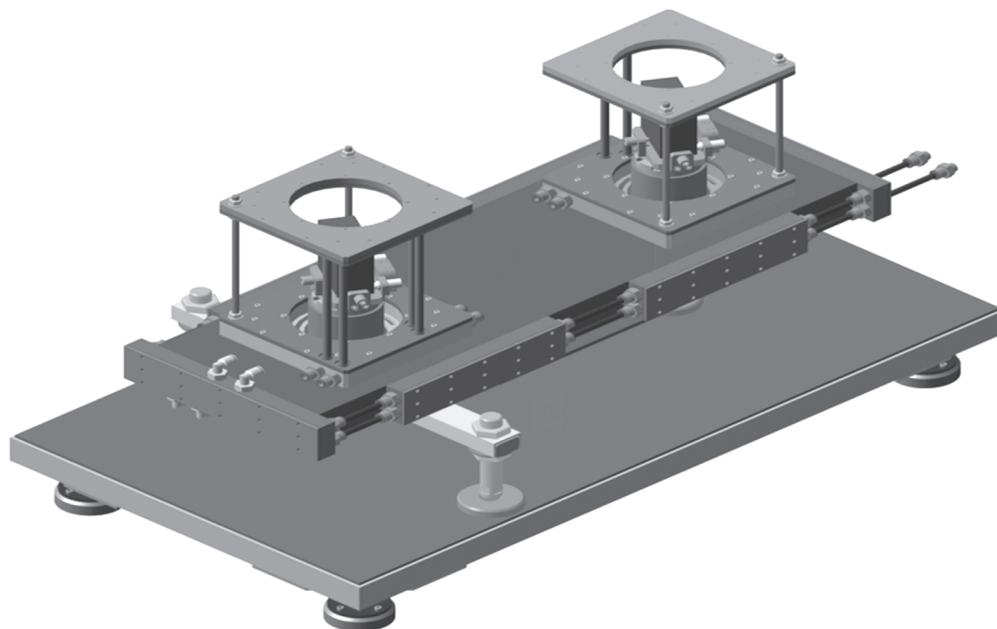


Рис. 2. 3D-модель установки с активной жидкостной термостабилизацией.

медных радиаторов, соединенных друг с другом посредством гибких трубок. Алюминиевые радиаторы прикреплены к опорной плите по периметру на ее нижней поверхности, а медные – вокруг кристаллов. Для обеспечения лучшего теплового контакта между радиаторами и опорной плитой нанесена термопаста (КПТ-8). Организовано встречно-параллельное прохождение теплоносителя через всю систему радиаторов, чтобы уменьшить градиенты температур по экспериментальной установке.

Для прокачки теплоносителя через замкнутую систему радиаторов и поддержания в установке заданной стабильной температуры используется циркуляционный термостат Julabo F32-HE (объем бани 8 литров), точность стабилизации температуры составляет 0.01 К.

Для реализации двухкристалльной схемы эксперимента были отобраны два совершенных монокристалла кварца размерами $100 \times 100 \times 30$ мм с рабочей плоскостью (100) и межплоскостным расстоянием $d = 4.25 \text{ \AA}$. Разброс межплоскостного расстояния по всему объему кристаллов, характеризующий степень их совершенства, составляет $\Delta d/d < 10^{-6}$, что на порядок меньше брэгговской ширины отражения.

В настоящее время установка собрана и смонтирована на испытательном стенде. Проведено подключение установки к циркуляционному термостату Julabo F32-HE, и выполнены гидравлические испытания в рабочем режиме. Собрана пассивная тепловая защита из пенополистирола, полученного экструзией (пеноплекса) с внешним

слоем из вспененного полиэтилена с отражающей алюминиевой фольгой.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Для контроля температуры и температурных градиентов на астроситалловой плите и кварцевых кристаллах были установлены датчики Pt-100. Температурные показания с датчиков снимались при помощи цифрового мультиметра Keithley 2700 с возможностью последовательного сканирования всех датчиков, при этом использовалась многоканальная плата (реле Keithley 7700). Для определения градиента температуры на кристаллах на каждом из них было установлено по два датчика. Дополнительно на одном из кристаллов был установлен опорный датчик циркуляционного термостата Julabo, посредством которого устанавливалась и стабилизировалась рабочая температура в установке. Положение датчиков изображено на рис. 3.

Тепловая защита предназначалась для поддержания постоянной температуры внутри установки независимо от изменений внешних температурных условий. В дополнение к первому контуру пассивной защиты был установлен второй контур с конструкцией в виде деревянного каркаса, обшитого внутри полиэтиленовой пленкой, а снаружи – слоем из вспененного полиэтилена с отражающей алюминиевой фольгой.

Отрицательное влияние на теплозащиту оказывал поток горячего воздуха от системы охлаждения Julabo, который создавал локальный гра-

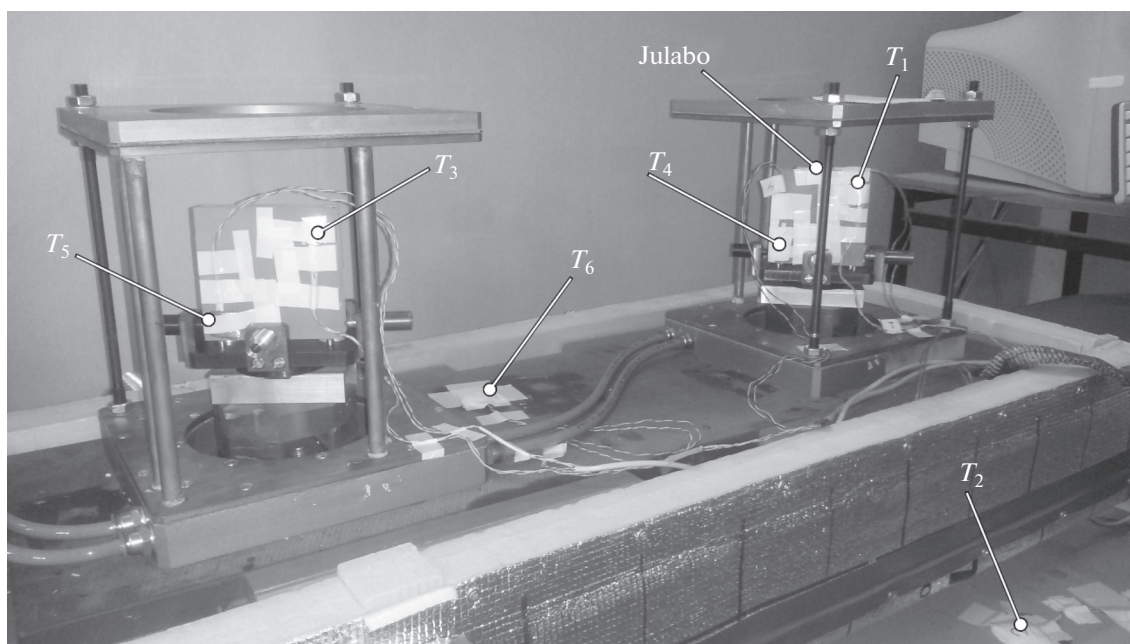


Рис. 3. Расположение датчиков температуры в установке. Датчики T_1 , T_3 , T_4 , T_5 — показывают температуру на кристаллах; T_6 — температура опорной астроситалловой плиты, T_2 — температура окружающей среды.

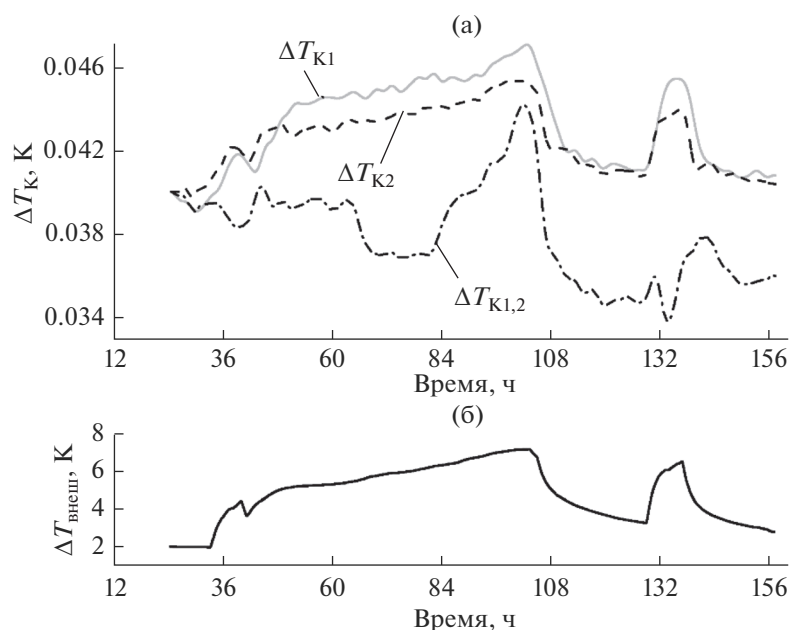


Рис. 4. Измерения изменений температуры внутри (а) и снаружи (б) установки.

диент температуры. Для уменьшения этого влияния был смонтирован воздуховод для сброса этого воздуха в ствол вентиляционного канала помещения.

При тестовых испытаниях искусственно создавались температурные колебания вокруг установки в несколько градусов.

На рис. 4 приведены разности показаний датчиков. На рис. 4а представлены ΔT_{K1} , ΔT_{K2} — раз-

ности температур на самих кристаллах К1 и К2 (верхний и нижний датчики), $\Delta T_{K1,2}$ — разница температур между верхними датчиками двух разных кристаллов. На рис. 4б показана $\Delta T_{\text{внеш}}$ — разница между температурой окружающей среды T_2 и температурой внутри установки T_6 в зависимости от времени. Коэффициент подавления вариаций внешней температуры составил около 700.

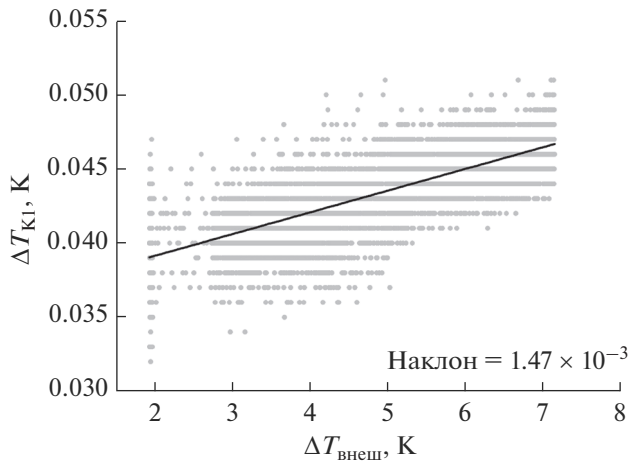


Рис. 5. Зависимость разности температур на датчиках одного из кристаллов K1 от разности температуры между окружающей средой и температурой внутри установки.

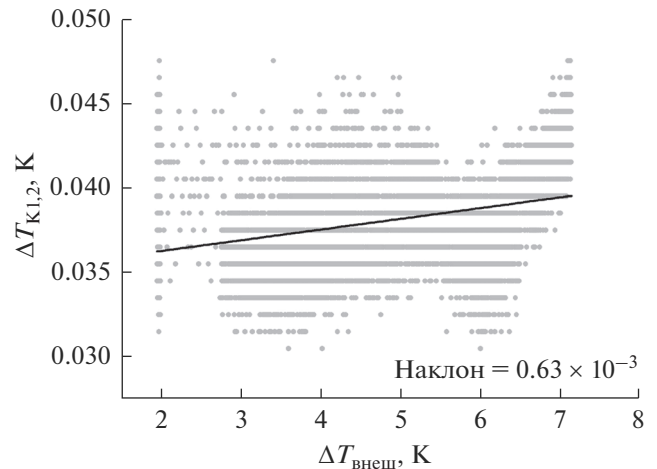


Рис. 6. Зависимость разности температур между двумя кристаллами K1 и K2 от разности температуры между окружающей средой и температурой внутри установки.

На рис. 5, 6 показаны зависимости разности температур на датчиках одного из кристаллов K1 и разности температур между двумя кристаллами K1 и K2 от разности температуры $\Delta T_{\text{внеш}}$. Точками указаны экспериментальные данные. Сплошной линией — результат усреднения.

Из рис. 5, 6 следует, что при изменении температуры в помещении до 6 К в установке удалось достичь стабильности температуры на кристаллах не хуже 0.01 К, а стабильность разностей температур на кристаллах и между ними составила ~ 0.005 К.

ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ

В 2017 году на пучке PF1b реактора ILL (Гренобль, Франция) были произведены предварительные измерения уровня вибраций при помощи прибора VA-2 с рабочим диапазоном измерений частот 0.7–1000 Гц. Данный прибор позволяет измерять вибрацию отдельно по трем осям: $H1$ и $H2$ — горизонтальные ортогональные оси, V — вертикальная ось. Основные измерения проводились в режиме измерения скорости. При помощи цифрового осциллографа с прибора VA-2 снимался аналоговый сигнал.

Результаты измерений представлены на рис. 7. Видно, что основной вклад в общий вибрационный фон происходит на частоте 25 Гц и скорости смещения кристалла $\sim 6.2 \times 10^{-4}$ см/с, что дает величину скорости смещения кристаллов относительно друг друга на уровне $\sim 10^{-3}$ см/с. При этом брэгговская ширина в единицах скорости нейтрона относительно кристалла $\Delta v_B \approx 1$ см/с. Дополнительным источником вибрации является работающий насос циркуляционного термостата Julabo. Из рис. 7 видно, что при включении насо-

са термостата уровень вибрации в областях 35, 50 и 100 Гц незначительно увеличивается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая работа посвящена техническому описанию и тестовым испытаниям создаваемой в НИЦ “Курчатовский институт”-ПИЯФ экспериментальной установки для измерения электрического заряда нейтрона кристалл-дифракционным методом с использованием разнесенных на большое расстояние кристаллов. Реализация данного проекта позволит улучшить современную точность измерения электронейтральности нейтрона,

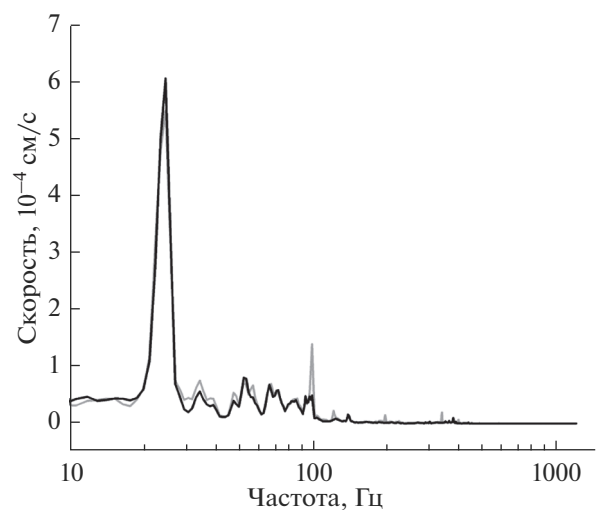


Рис. 7. Спектр уровня вибраций в реакторном зале в секторе пучка PF1b (ИЛЛ). Черная кривая — насос циркуляционного термостата Julabo выключен, серая — насос включен.

которая сейчас находится на уровне $\sim 10^{-21}$ от элементарного заряда, по крайней мере, на порядок.

Проведены температурные испытания установки с комбинированной активной и пассивной тепловой защитой для выяснения влияния вариации внешней температуры на величину разброса разностей температур внутри установки, а так же на рабочих кристаллах. Показано, что в условиях реакторного зала с возможными изменениями температуры на несколько градусов наша установка обеспечит стабильность температуры на кристаллах не хуже 0.01 К, а стабильность разностей температур на кристаллах и между ними ~ 0.005 К. Относительные смещения кристаллов от таких разбросов температур приводят к относительным отклонениям направления нейтронного пучка на несколько порядков меньше брэгговской дифракционной ширины.

Приведены данные по измерению уровня вибрации в секторе пучка холодных нейтронов PF1b (ILL, Франция), на котором предполагается проводить эксперимент по измерению заряда нейтрона. Также измерен уровень собственных вибраций от насоса термостата установки. Величина скорости смещения кристаллов относительно друг друга находится на уровне $\sim 10^{-3}$ см/с, что приблизительно на три порядка меньше соответствующей брэгговской ширины отражения кристаллов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 3.3838.2017/4.6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foot R., Lew H., Volkas R.R. // J. Phys. G. 1993. V. 19. P. 361.
2. Рубаков В.А. // УФН. 2001. Т. 171. С. 913.
3. Baumann J., Gähler R., Kalus J., Mampe W. // Phys. Rev. 1988. V. 37. P. 3107.
4. Baumann J., Gähler R., Ioffe A.I., Kalus J., Mampe W. // Nucl. Instrum. and Methods. 1989. V. A284. P. 130.
5. Voronin V.V., Akselrod L.A., Zabenkin V.N., Kuznetsov I.A. // Physics Procedia. 2013. V. 42. P. 25.
6. Воронин В.В., Кузнецов И.А., Лапин Е.Г., Семенихин С.Ю., Федоров В.В. // Ядерная физика. 2009. Т. 72. № 3. С. 505.
7. Инденбом В.Л., Слободецкий И.Ш., Труни К.Г. // ЖЭТФ. 1974. Т. 66. С. 1111.
8. Arthur J., Shull C.G., Zeilinger A. // Phys. Rev. 1985. V. 32. № 9. P. 5753.
9. Борисов Ю.В., Бердников А.Я., Бердников Я.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 18. С. 1.
10. Воронин В.В., Бердников Я.А., Бердников А.Я. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. № 7. С. 471.

Crystal Diffraction Method of Ultra-Precision Neutron Spectrometry. Analysis of the Influence of Temperature Stability and Vibration Level

Yu. P. Braginet^{1, 2, *}, Yu. V. Borisov¹, V. V. Voronin^{1, 2, 3}, M. V. Lasitsa^{1, 2}, S. Yu. Semnikhin^{1, 2, **}, V. V. Fedorov^{1, 2, 3}

¹Petersburg Nuclear Physics Institute named by Konstantinov of National Research Center "Kurchatov Institute", Gatchina, 18830 Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

³St. Petersburg State University, St. Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: braginet_yp@pnpi.nrcki.ru

**e-mail: semnikhin_sy@pnpi.nrcki.ru

The variant of setup to measure the neutron electric charge is described. It is based on the spin interferometry method and the effect of two-crystal neutron focusing at Laue diffraction. It is shown that to improve the sensitivity of the method, it is necessary to increase the distance between crystals up to 1 m. In this case the installation becomes sensitive to slight external influences (temperature, vibration, etc.). So temperature tests were carried out with a combined (active and passive) thermal protection to estimate the degree of such influence. It is shown that in the conditions of the reactor hall with temperature fluctuations of several degrees, the experimental setup provides the temperature stability on crystals not worse than 0.01 K, and the stability of temperature variations upon the crystals and between them at level ~ 0.005 K. As well the measurements of the vibration level in the area of the PF1b cold neutron beam at the reactor ILL (Grenoble, France) was carried out. That allowed to estimate the value of the corresponding relative crystal velocity, which turned out to be at the level of $\sim 10^{-3}$ cm/s. It follows from the obtained data that the angular resolution of the installation, not taking into account the perfection of real crystals, can be at the level 10^{-3} of the Bragg reflection width, i. e. ~ 0.001 arc-second.

Keywords: neutron, neutron spectrometry, the neutron electric charge, two-crystal focusing, Laue diffraction.