

12.1

Проект источников ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК со сверхтекучим гелием в качестве замедлителя

© А.П. Серебров, А.К. Фомин, М.С. Онегин, А.Г. Харитонов,
Д.В. Прудников, В.А. Лямкин, С.А. Иванов

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова (ПИЯФ),
Гатчина

E-mail: serebrov@npi.spb.ru

Поступило в Редакцию 15 августа 2013 г.

Представлен проект источников ультрахолодных нейтронов на реакторе ПИК со сверхтекучим гелием в качестве замедлителя. Скорость производства ультрахолодных нейтронов в сверхтекучем гелии составляет $100 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ при плотности потока нейтронов $\Phi(\lambda = 9 \text{ \AA}) = 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$. При температуре замедлителя 1 К в экспериментальном объеме 351 может быть достигнута плотность ультрахолодных нейтронов $1.3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$, что на 2 порядка величины превышает плотность существующих в мире источников ультрахолодных нейтронов.

В настоящее время в ФГБУ ПИЯФ завершается создание научно-исследовательского реакторного комплекса ПИК — одного из шести на территории России проектов, включенных Правительством РФ в программу создания собственных мегаустановок мирового класса. Реактор ПИК входит в число самых мощных в мире высокопоточных источников нейтронов. Горизонтальные каналы реактора ПИК ГЭК-3 и ГЭК-4 будут оснащены жидкодейтериевыми источниками холодных нейтронов для проведения фундаментальных исследований и изучения наноструктур. На этих пучках планируется установить источники для производства ультрахолодных нейтронов (УХН).

Источники УХН представляют собой камеры со сверхтекучим гелием, расположенные на выведенных пучках каналов ГЭК-3 и ГЭК-4 в условиях низкой тепловой нагрузки (рис. 1). Использование многоцелевых суперзеркальных отклонителей пучка позволит получить плотность

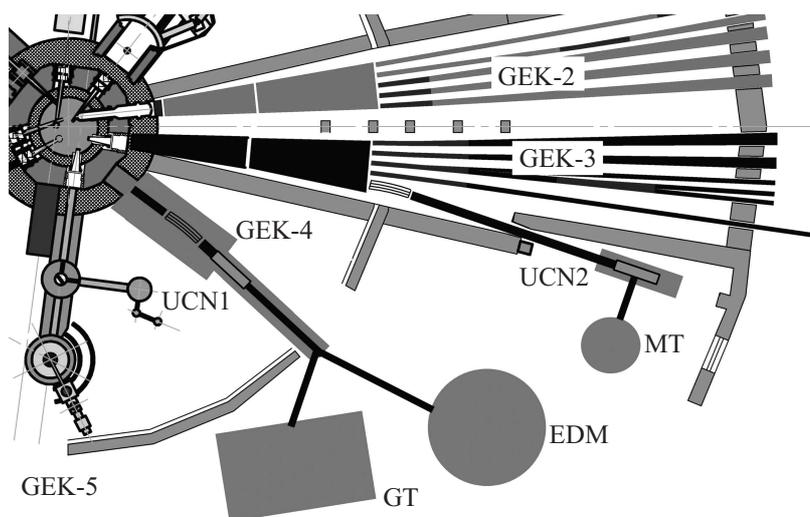


Рис. 1. План размещения источников УХН со сверхтекучим гелием и экспериментальных установок на каналах ГЭК-3 и ГЭК-4 реактора ПИК: UCN1 — источник УХН на канале ГЭК-4, UCN2 — источник УХН на канале ГЭК-3, EDM — установка для измерения ЭДМ-нейтрона, GT — установка для измерения времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой УХН, MT — установка для измерения времени жизни нейтрона с магнитной ловушкой УХН.

потока $\Phi(\lambda = 9 \text{ \AA}) = 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$ и избавиться от высокого тепловыделения, связанного с прямым пучком нейтронов и гамма-квантов. Так же можно получить такой поток и снизить тепловую нагрузку за счет использования бериллиевого фильтра толщиной 20 см при температуре 20 К. Сверхтекучий гелий будет играть роль конвертора холодных нейтронов в ультрахолодные. Благодаря своим квантовым особенностям сверхтекучий гелий обладает высокой прозрачностью для нейтронов низких энергий [1]. УХН могут находиться в нем десятки и сотни секунд. В свою очередь, УХН образуются в гелии из холодных нейтронов с длиной волны 9 Å. Холодные нейтроны проникают в ловушку через ее стенки, а ультрахолодные отражаются от стенок, поэтому возможно накопление УХН в ловушке до плотности, определяемой временем хранения УХН в гелии [2]. Метод получения ультрахолодных

нейтронов с использованием сверхтекучего гелия является очень перспективным. В настоящее время проведен ряд успешных экспериментов на пучках холодных нейтронов в Японии и Франции [3,4]. В данный момент создается ряд источников УХН со сверхтекучим гелием [5–7].

В нашем проекте камера со сверхтекучим гелием имеет форму цилиндра диаметром 300 mm. Объем камеры равен 100 l. Скорость производства УХН в сверхтекучем гелии составляет $100 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ при плотности потока нейтронов $\Phi(\lambda = 9 \text{ \AA}) = 10^9 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{\AA}^{-1}$.

Расчет плотности УХН в экспериментальной ловушке выполнен при помощи программы, которая разработана специально для расчетов с УХН [8]. С ее помощью может моделироваться траектория каждого нейтрона с учетом гравитации. Расчетная схема состоит из камеры источника и ловушки, соединенных цилиндрическим нейтроноводом. Расчет выполнен при диаметре нейтроновода 80 mm и длине 3 m. Камера, нейтроноводы и ловушка УХН имеют внутри напыление $^{58}\text{NiMo}$ с граничной скоростью 7.8 m/s и коэффициентом потерь при отражении от стенок $3 \cdot 10^{-4}$. При отражении нейтронов от стенок нейтроноводов 0.7% отражений являются диффузными, а при отражении от стенок камеры источника и ловушки УХН — 90%. Эти параметры соответствуют технологии изготовления экспериментальной установки. На выходе из камеры источника и перед входом в ловушку установлены разделительные мембраны из алюминия толщиной 100 μm с граничной скоростью 3.2 m/s.

В результате моделирования получена оценка плотности УХН для ловушек объемом 35 и 350 l. Выбранные размеры ловушек характерны для экспериментов по измерению электрического дипольного момента нейтрона (35 l) [9] и времени жизни нейтрона с гравитационной ловушкой (350 l) [10]. На рис. 2 показана плотность УХН в зависимости от температуры сверхтекучего гелия в закрытой камере источника и ловушках. Вдоль оси абсцисс дополнительно отложены значения времени хранения нейтронов в сверхтекучем гелии при данной температуре. Время хранения УХН в сверхтекучем гелии растет с понижением температуры. Понижение температуры жидкого гелия ниже 4.2 K и отвод тепловой нагрузки производится за счет откачки гелия. Для этого служит вакуумная установка, в состав которой входит несколько вакуумных насосов. Достижение низких температур связано с технической трудностью откачки больших количеств гелия при низком давлении. Принимая во внимание зависимость температуры и давления насыщенных паров

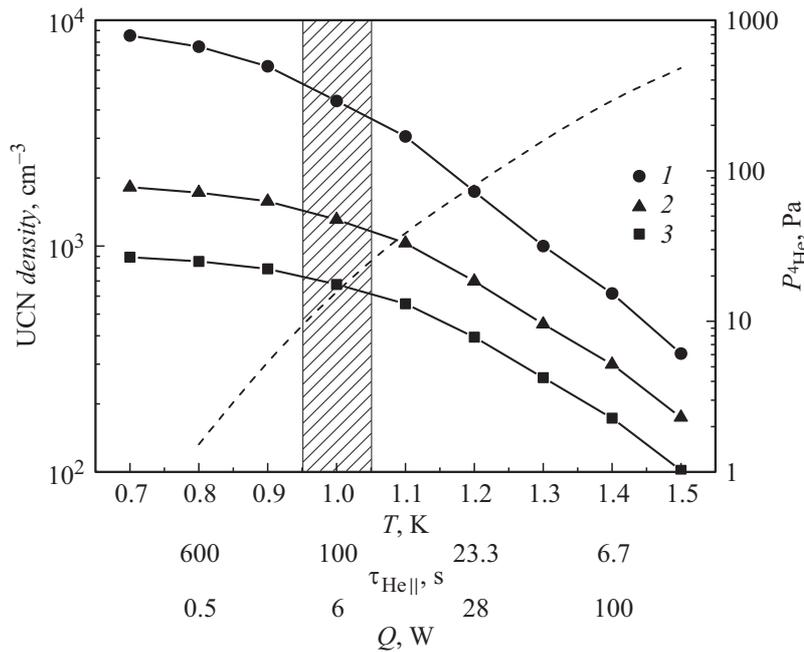


Рис. 2. Плотность УХН в ловушках в зависимости от температуры сверхтекучего гелия: 1 — в закрытой камере источника, 2 — в ловушке объемом 35 L, 3 — в ловушке объемом 350 L. Пунктирная линия — зависимость давления насыщенных паров гелия от температуры.

гелия, на рис. 2 отложены вдоль оси абсцисс значения тепловой нагрузки, которую можно снять при данной температуре, используя вакуумный насос с расходом $10 \text{ m}^3/\text{s}$, а по оси ординат плотность УХН в ловушках, а также давление при откачке гелия. По нашим оценкам тепловая нагрузка на выведенном пучке не будет превышать 6 W , т.е. работа источника возможна при температуре 1 K . При температуре 1 K плотность УХН в закрытой камере источника составляет $4.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$, а плотность УХН в ловушках составляет $\rho_{35l} = 1.3 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ (для ловушки объемом 35 l) и $\rho_{350l} = 0.7 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$ (для ловушки объемом 350 l). Для экспериментов, которые могут располагаться ближе к источнику, будут получены более высокие значения плотности УХН

(например, для эксперимента по измерению времени жизни нейтрона с магнитной ловушкой [11]). Полученное значение плотности УХН на 2 порядка величины превышает плотность существующих в мире источников УХН [12].

На новых источниках УХН запланирована программа исследований фундаментальных взаимодействий. Она включает в себя поиск ЭДМ нейтрона и прецизионное измерение времени жизни нейтрона. Обе задачи имеют принципиальное значение для физики элементарных частиц и космологии. Использование новых источников УХН позволит уменьшить статистическую погрешность этих экспериментов на порядок величины.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашения № 8252 и 8765, и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-02-12052-офи_м.

Список литературы

- [1] *Ахиезер А.И., Померанчук И.Я.* // ЖЭТФ. 1946. Т. 16. С. 391.
- [2] *Golub R., Pendlebury J.M.* // Phys. Lett. A. 1977. V. 62. P. 337.
- [3] *Golub R., Jewell C., Ageron P. et al.* // Z. Phys. B. Condensed Matter. 1983. V. 51. P. 187.
- [4] *Yoshiki H., Sakai K., Ogura M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1992. V. 68. P. 1323.
- [5] *Masuda Y., Kitagaki T., Hatanaka K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 284 801.
- [6] *Zimmer O., Baumann K., Fertl M. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 99. P. 104 801.
- [7] *Serebrov A.P., Mityukhlyev V.A., Zakharov A.A. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2009. V. 611. P. 276.
- [8] *Фомин А.К.* Моделирование экспериментов с ультрахолодными нейтронами: Дис. . . . канд. физ.-мат. наук. Гатчина, 2006. 106 с.
- [9] *Алтарев И.С., Борисов Ю.В., Боровикова Н.В. и др.* // Ядерная физика. 1996. Т. 59. С. 1204.
- [10] *Серебров А.П., Фомин А.К., Харитонов А.Г. и др.* // ЖТФ. 2013. Т. 83. В. 11. С. 136.
- [11] *Ежов В.Ф., Базаров Б.А., Гельтенборг П. и др.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 24. С. 64.
- [12] *Steyerl A., Nagel H., Schreiber F.-X. et al.* // Phys. Lett. A. 1986. V. 116. P. 347.