

## Источник ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия для реактора ПИК

© А.П. Серебров, В.А. Лямкин, А.К. Фомин, М.С. Онегин

НИЦ „Курчатовский институт“ – ПИЯФ,  
188300 Гатчина, Россия  
e-mail: serebrov\_ar@pnpri.nrcki.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2022 г.  
В окончательной редакции 15 марта 2022 г.  
Принято к публикации 29 марта 2022 г.

В НИЦ „Курчатовский институт“ – ПИЯФ на базе реакторного комплекса ПИК создается высокоинтенсивный источник ультрахолодных нейтронов (УХН) для научных исследований в области фундаментальной физики. В источнике УХН будет использоваться сверхтекучий гелий, и это впервые в мире позволит достичь плотности УХН  $2.2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Источник УХН будет установлен на выведенном пучке ГЭК-4, что позволит получить низкое значение теплопритоков к криогенным конструкциям от реакторного излучения. Отвод теплопритоков от камеры источника УХН будет реализован при помощи теплообменника. Рассчитанная плотность УХН в камере спектрометра электрического дипольного момента (ЭДМ) на реакторе ПИК составляет  $200 \text{ см}^{-3}$ , что в 20 раз выше существующих плотностей УХН в мире. Для нового источника УХН на основе сверхтекучего гелия разработана обширная программа исследований по физике фундаментальных взаимодействий, включающая в себя поиск ненулевого ЭДМ нейтрона, прецизионное измерение времени жизни нейтрона и поиск зеркальной темной материи.

**Ключевые слова:** ультрахолодные нейтроны, нейтронные источники, сверхтекучий гелий, ЭДМ нейтрона, распад нейтрона.

DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52522.21-22

### Введение

Для экспериментов по изучению свойств самого нейтрона необходимы как можно более медленные нейтроны. Когда энергия нейтрона меньше граничной энергии вещества, нейтрон не может проникнуть внутрь вещества, и происходит его отражение от поверхности, что увеличивает время пребывания нейтрона внутри экспериментальной установки. Способность ультрахолодных нейтронов (УХН) к отражению от поверхности позволяет хранить их в замкнутом материальном объеме. Удержание УХН возможно также и в магнитных ловушках сложной мультипольной формы за счет взаимодействия магнитного момента нейтрона с магнитным полем [1].

В области фундаментальной физики УХН используются для измерения электрического дипольного момента и времени жизни самого нейтрона. Эти работы были начаты в 70-х годах в ПИЯФ на реакторе ВВР-М, продолжены на реакторе ИЛЛ и являлись наиболее точными в мире [2] вплоть до появления новых результатов по поиску электрического дипольного момента (ЭДМ) нейтрона в PSI [3] и измерению времени жизни нейтрона в LANL [4]. Эти эксперименты и планируемые прецизионные корреляционные исследования  $\beta$ -распада нейтрона имеют решающее значение для физики фундаментальных взаимодействий: они связаны с решением проблем Стандартной Модели (СМ) при описании СР-нарушения и объяснении наблюдаемых космологических фактов (барионная асимметрия Вселенной). В насто-

ящее время интерес к измерениям времени жизни нейтрона велик также в связи с тем, что существует расхождение в результатах экспериментов с хранением УХН и пучковых экспериментов [5,6]. Именно поэтому данное научное направление — использование УХН для изучения фундаментальных взаимодействий — активно развивается в последнее время.

Увеличить число холодных нейтронов можно, пропустив реакторные нейтроны через холодный замедлитель. В среде с низкой температурой доля УХН в спектре может быть увеличена в десятки и сотни раз. Этот метод используется для получения УХН уже на протяжении 50 лет. Однако, несмотря на активное развитие технологий, в течение последних 30 лет не наблюдается существенного прогресса в увеличении плотности УХН. Дело в том, что уже освоены прямые и достаточно эффективные методы с использованием жидкого водорода и дейтерия при температуре 20 К. В 1986 г. были получены плотности на уровне нескольких десятков УХН в кубическом сантиметре на универсальном источнике канала реактора ВВР-М в Гатчине [7] и на ИЛЛ в Гренобле [8]. В ПИЯФ были также исследованы методы получения высоких плотностей УХН с использованием твердого дейтерия. Этот метод получения УХН с использованием твердого дейтерия при температуре 4 К был внедрен в PSI [9] и LANL [10].

Для дальнейшего прогресса необходимы альтернативные методы получения УХН, например, с использованием сверхтекучего гелия при температуре 1 К. Метод

основан на эффекте накопления УХН в сверхтекучем гелии из-за особенностей этой квантовой жидкости [11].

## 1. Проект источника УХН на реакторном комплексе ПИК

Идея создания источника УХН на реакторном комплексе ПИК не нова. По сути, именно ее реализация была начата на реакторе ВВР-М еще в начале 80-х годов. В связи с этим, на реакторе ВВР-М был установлен универсальный канал поляризованных холодных и ультрахолодных нейтронов. Ставилась задача получить опыт в разработке источников холодных и ультрахолодных нейтронов и расширить программу научных исследований. На канале был размещен комплекс установок для исследований распада нейтрона и измерения электрического дипольного момента нейтрона. По существу, это был прототип экспериментального комплекса, который сейчас планируется реализовать на канале ГЭК-3 реакторного комплекса ПИК. Хотя в исследованиях на реакторе ВВР-М были достигнуты важнейшие результаты, актуальность поставленных физических задач в последнее время только возросла. Новые исследования на реакторе ПИК открывают возможности для увеличения точности измерений благодаря увеличению нейтронной интенсивности и разработке более совершенных установок.

Проект источника УХН на основе сверхтекучего гелия для реактора ВВР-М был разработан еще в 2005–2010-х гг. На реакторе были созданы идеальные условия для получения максимальной производительности УХН. С одной стороны, имеем примыкающую к активной зоне тепловую колонну реактора ВВР-М с диаметром канала 1 м, в которую можно установить мощную свинцовую защиту от гамма-излучения, графитовый замедлитель, жидкодейтериевый предзамедлитель и, наконец, конвертор из сверхтекучего гелия объемом 35 л. С другой стороны, под реализацию проекта было закуплено и введено в эксплуатацию современное криогенное и вакуумное оборудование: гелиевый ожижитель L-280 производительностью 80 л/ч, гелиевый рефрижератор производительностью 3000 W @ 20 K, система вакуумной откачки паров гелия производительностью 3 g/s @ 50 Pa. Расчеты плотности УХН методом Монте-Карло для этого источника показывают, что в ловушке ЭДМ-спектрометра возможно достичь плотности УХН  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  [12], в то время как на имеющихся источниках УХН это плотность достигает величины порядка  $10 \text{ cm}^{-3}$ . Таким образом, можно получить фактор выигрыша 1000 раз.

В течение последующих десяти лет на базе реактора ВВР-М была полностью отработана технология получения и удержания гелия в сверхтекучем состоянии при постоянно поступающей тепловой нагрузке. Для этих целей на криогенном корпусе реактора ВВР-М была создана и запущена полномасштабная модель источника УХН. В результате экспериментов на полномасштаб-

**Таблица 1.** Основные характеристики источников УХН на реакторах ВВР-М и ПИК

Параметр	ВВР-М	ПИК
Мощность реактора, MW	16	100
Усредненный поток холодных нейтронов в HeII, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$	$3 \cdot 10^{10}$	$1.1 \cdot 10^9$
Плотность УХН в HeII, $\text{cm}^{-3}$	$10^4$	$2.1 \cdot 10^3$
Параметры свинцового экрана: температура, K тепловыделение, W	300 15 000	300 267
Параметры предзамедлителя (LD2): температура, K тепловыделение, W	20 287	20 10.7
Параметры конвертора (HeII): температура, K тепловыделение, W	1.2 37	1 3.85

ной модели источника УХН были получены реальные температуры сверхтекучего гелия при тепловой нагрузке вплоть до 60 W [13], в то время как расчетное значение тепловой нагрузки на реакторе ВВР-М оценивается в 30 W. Работа на полномасштабной модели позволила получить реальный опыт работы со сверхтекучим гелием и, что самое главное, экспериментально обосновала возможность удержания гелия в сверхтекучей фазе при постоянном теплопритоке от реактора.

В 2020 г. был дан старт реализации программы по созданию приборной экспериментальной базы для реакторного комплекса ПИК. Одним из главных приборных комплексов в этой программе стал новый источник УХН для проведения исследований в области физики фундаментальных взаимодействий.

Разница между источниками для реактора ПИК и ВВР-М (продемонстрирована на рис. 1 и в табл. 1) и состоит в том, что на реакторе ПИК источник УХН на основе сверхтекучего гелия может располагаться только на выведенном нейтронном пучке, в то время как на реакторе ВВР-М есть возможность установки камеры со сверхтекучим гелием непосредственно в тепловую колонну на расстоянии 40 см от активной зоны. При этом переход от тепловой колонны к выведенному пучку сразу приводит к потере исходной плотности нейтронного потока пропорционально телесному углу пучка по отношению к 4л.

На расстоянии 3 м от источника нейтронов этот фактор телесного угла составляет величину порядка  $10^{-4}$ . Скомпенсировать такой фактор исключительно трудно. Тепловой нейтронный поток реактора ВВР-М составляет  $10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , а соответствующий тепловой нейтронный поток для реактора ПИК —  $7 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . Таким образом, при переходе на реакторе ПИК на схему источника УХН на выведенном пучке теряется

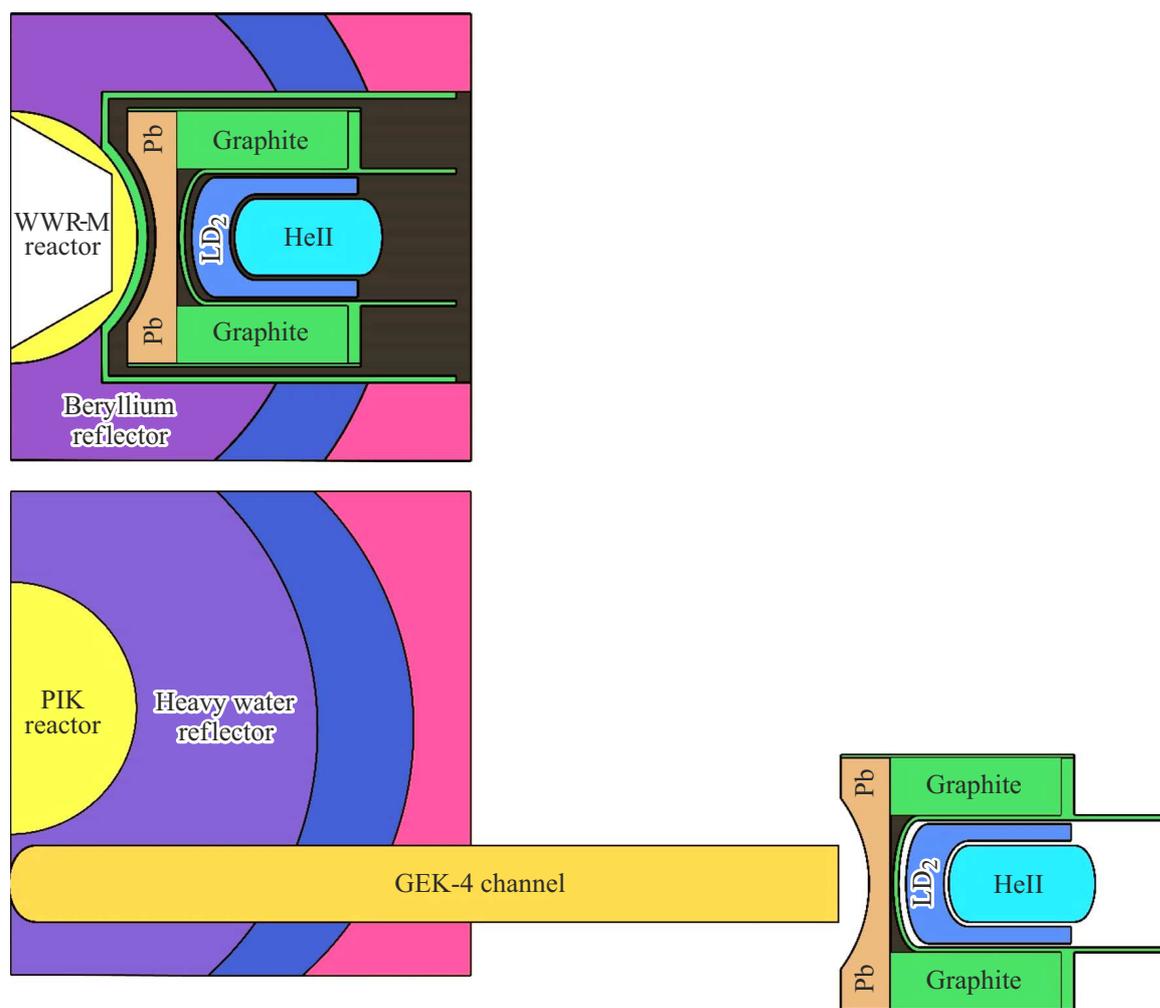


Рис. 1. Сравнительные схемы источников УХН на реакторах ВВР-М и ПИК.

четыре порядка величины из-за телесного угла пучка, но скомпенсировать удастся только два порядка величины за счет высокого нейтронного потока в реакторе ПИК.

Еще выход УХН в источнике можно увеличить, уменьшив температуру сверхтекучего гелия, тем самым увеличив время жизни нейтронов в камере источника УХН. Ввиду того что итоговый нейтронный поток на камеру источника УХН будет ниже, суммарное тепловыделение в проекте на ПИК будет на порядок ниже, чем в проекте на реакторе ВВР-М. Уменьшение теплопритоков дает возможность использовать схему охлаждения камеры источника УХН посредством теплообменника и тем самым убирается возможность перемешивания изотопно-чистого гелия с природным. Более того, меньший нейтронный поток по сравнению с потоком на реакторе ВВР-М дает возможность использовать в качестве материала для камеры источника УХН нержавеющую сталь, что существенно облегчит изготовление и добавит надежности сварным конструкциям.

Источник УХН будет установлен на самый большой из имеющихся экспериментальных каналов реакторного

комплекса ПИК — горизонтальный экспериментальный канал ГЭК-4 диаметром 220 mm. Оптимальное расположение доньшка канала ГЭК-4 — на вертикальной оси, проходящей через центр активной зоны, как показано на рис. 1. В нише разборной биологической защиты необходимо сделать канал диаметром 1000 mm, повторяющий геометрию вакуумного модуля источника УХН. Плотность потока тепловых нейтронов на выходе из канала ожидается на уровне  $6.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Носовая часть источника УХН, как и в проекте для реактора ВВР-М, вплотную прилегает к фланцу канала ГЭК-4 длиной 3 m. В носовой части необходимо разместить графитовый замедлитель, низкотемпературный предзамедлитель и конвертор нейтронов из сверхтекучего гелия.

В качестве материалов предзамедлителя рассматривались жидкий дейтерий и твердый метан. Предварительные расчеты показали, что предзамедлитель из жидкого водорода дает существенно меньшую плотность потока 9 Å нейтронов в источнике при таких же значениях теплопритоков, и в дальнейшем не рассматривается.

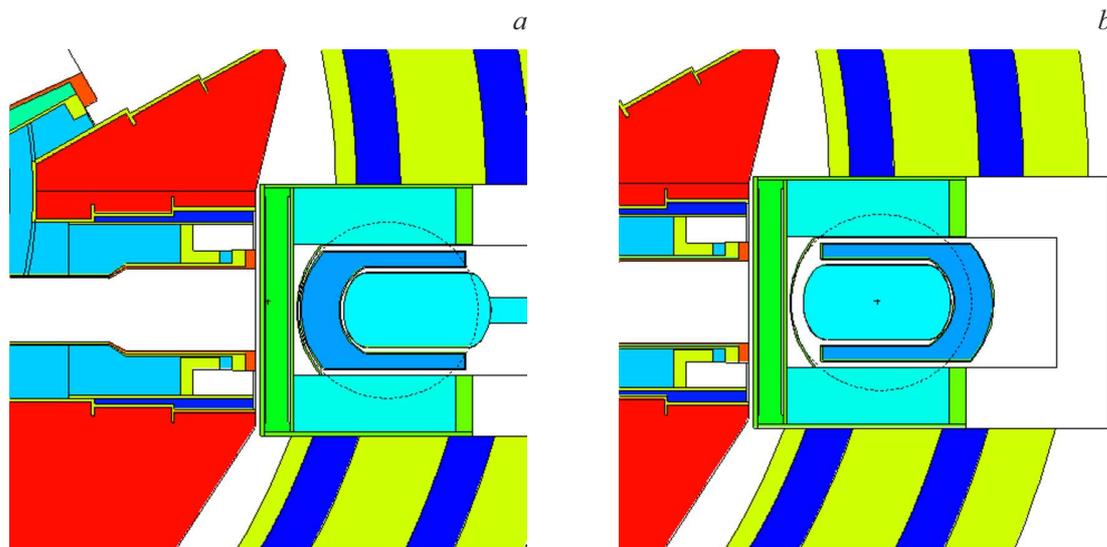


Рис. 2. Прямая (а) и инверсная (b) схемы источника УХН.

Таблица 2. Расчеты по оптимизации источника УХН для реактора ПИК

Предзамедлитель	Плотность потока тепловых нейтронов, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	Плотность потока 9 Å нейтронов, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$	Энерговыведение в гелиевой камере, W	Энерговыведение в камере предзамедлителя, W	Энерговыведение в свинцовом экране, W
LD <sub>2</sub> , орто (прямая схема)	$6.6 \cdot 10^{10} (\pm 2.7\%)$	$1.1 \cdot 10^9 (\pm 5\%)$	3.85 ( $\pm 7\%$ )	10.7 ( $\pm 4\%$ )	267 ( $\pm 3\%$ )
LD <sub>2</sub> , орто (инверсная схема)	$1.31 \cdot 10^{11} (\pm 2\%)$	$8.7 \cdot 10^8 (\pm 5\%)$	4.64 ( $\pm 4\%$ )	9.3 ( $\pm 4\%$ )	251 ( $\pm 2\%$ )
sCH <sub>4</sub> (прямая схема)	$3.1 \cdot 10^8 (\pm 18\%)$	$6.0 \cdot 10^6 (\pm 20\%)$	1.83 ( $\pm 15\%$ )	11.1 ( $\pm 10\%$ )	260 ( $\pm 6\%$ )
sCH <sub>4</sub> (инверсная схема)	$1.1 \cdot 10^{11} (\pm 2.4\%)$	$1.5 \cdot 10^9 (\pm 3\%)$	5.53 ( $\pm 5\%$ )	13.7 ( $\pm 4\%$ )	262 ( $\pm 3\%$ )

В работу по оптимизации источника УХН была включена так называемая инверсная схема предзамедлителя, изображенная на рис. 2, b. В этой схеме низкотемпературный предзамедлитель выступает в роли отражателя, возвращающего замедленные холодные нейтроны в камеру со сверхтекучим гелием.

В результате расчетов были получены усредненные плотности потоков нейтронов в гелиевом объеме и теплопритоки к основным элементам источника УХН. Результаты расчетов по оптимизации и выбору материала предзамедлителя сведены в табл. 2. Использование твердого метана в инверсной схеме предзамедлителя дает на 65% большую плотность потока 9 Å нейтронов по сравнению с жидкодейтериевым предзамедлителем в прямой схеме, однако использование твердого метана нежелательно с точки зрения безопасности. Закупоривание полостей твердым метаном может привести к разрыву конструкций элементов предзамедлителя.

Низкие значения энерговыведения в свинцовом экране позволяют использовать отличные от воды хладагенты для охлаждения конструкции. Было рассчитано, что использование газообразного гелия в качестве хладагента увеличивает плотность потока 9 Å нейтронов в источнике в 1.5 раза.

Оптимальная схема носовой части источника УХН для реактора ПИК представлена на рис. 3. Основными элементами носовой части являются:

1. Конвертор — сосуд со сверхтекучим гелием при температуре 1 К. Камера конвертора изготовлена из нержавеющей стали толщиной 1 mm.
2. Теплообменник — сосуд с хладагентом (жидким природным гелием при температуре 1.1 К) для отвода тепла от конвертора.
3. Предзамедлитель — в качестве предзамедлителя выбран жидкий дейтерий, который существенно увеличивает количество 9 Å нейтронов в сверхтекучем гелии.
4. Отражатель — в качестве отражателя используется графит, который позволит вернуть некоторое количество тепловых нейтронов обратно, в сторону гелиевой камеры.
5. Защитный экран — свинец, толщиной 10 см для защиты конструкций источника УХН от гамма-квантов.
6. Биологическая защита — блоки из алюминия для защиты от прямого прострела со стороны РК ПИК. Алюминий был выбран вместо железа для уменьшения активации конструкции, что существенно увеличивает степень ремонтпригодности.
7. Биологическая защита реактора ПИК.

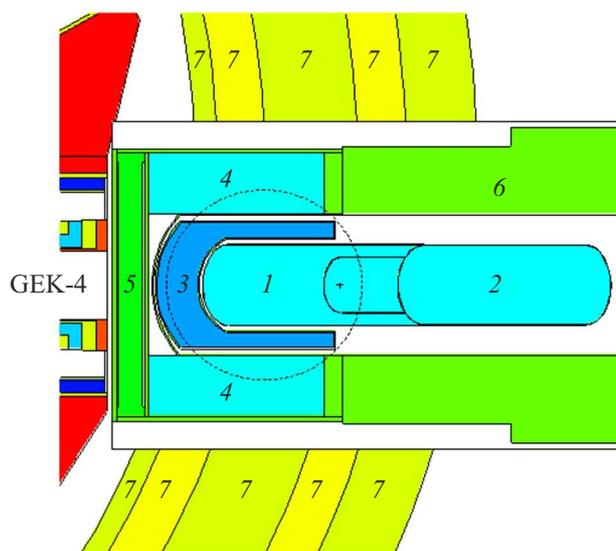


Рис. 3. Схема оптимизированного источника УХН. Пояснения в тексте.

## 2. Научная программа исследований на новом источнике УХН

УХН играют ключевую роль в научных исследованиях по физике фундаментальных взаимодействий, конкурируя с дорогостоящими исследованиями на ускорителях частиц. На источниках УХН может быть реализована обширная программа исследований по физике фундаментальных взаимодействий. Сейчас в мире насчитывается 9 научных центров, где планируется создание экспериментальных установок на базе УХН [8–10,12,14–18]. Точность этих экспериментов определяется плотностью УХН в экспериментальных ловушках, поэтому создание высокоинтенсивных источников является первоочередной задачей. Тем не менее на протяжении последних десятилетий исследования с УХН столкнулись с проблемой низкой плотности существующих источников УХН. В настоящий момент плотность УХН, используемая в экспериментах, составляет порядка  $2\text{--}22\text{ cm}^{-3}$ . На рис. 4 приведена экспериментально замеренная плотность УХН, которую выдают ведущие источники УХН в мире [19].

В НИЦ „Курчатовский институт“–ПИЯФ создается высокоинтенсивный источник УХН для научных исследований в области фундаментальной физики. В источнике на базе реактора ПИК будет использоваться сверхтекучий гелий, который позволит достичь плотности УХН  $2.2 \cdot 10^3\text{ cm}^{-3}$ , которая еще нигде в мире не достигнута. Нейтронная система источника УХН сможет поддерживать проведение исследований сразу на пяти экспериментальных станциях.

На начальном этапе эксплуатации источник УХН планируется оснастить имеющимися в ПИЯФ экспериментальными установками по поиску ЭДМ нейтрона

и измерению времени жизни в гравитационной и магнитных ловушках [20]. На рис. 5 эти научные станции обозначены как UCN1, UCN2 и UCN3 соответственно. Была проделана работа по моделированию этих экспериментов при установке на источник УХН на основе сверхтекучего гелия на реакторе ПИК.

Гравитационный спектрометр для измерения времени жизни нейтрона (UCN2) представляет собой емкость-ловушку для хранения нейтронов из медного полуцилиндра

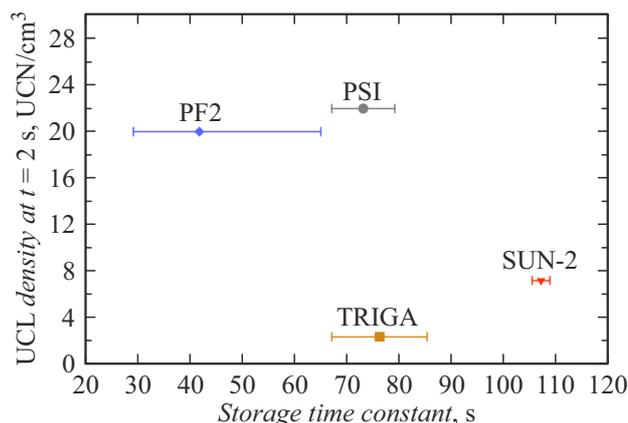


Рис. 4. Сравнение плотности потоков УХН на различных реакторах: PF2 — Institut Laue-Langevin (Франция), PSI — Paul Scherrer Institute (Германия), TRIGA — Institute of Nuclear Chemistry (Германия), SUN2 — Institut Laue-Langevin (Франция).

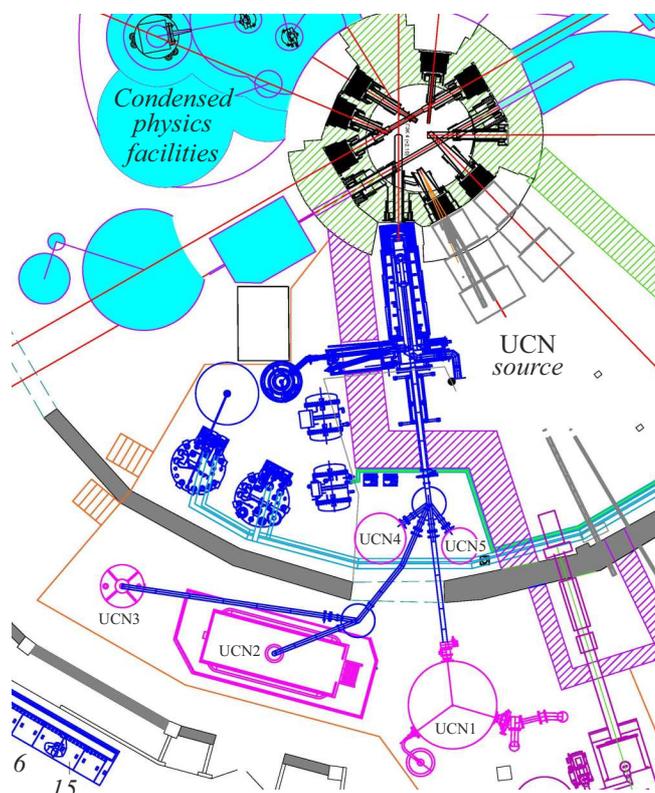


Рис. 5. Научная программа на источнике УХН.

дра радиусом 0.7 м и длиной 2 м, разрезанного вдоль. Для измерения вклада эффективной частоты соударений с поверхностью в спектрометре используется модификация геометрии ловушки — так называемая вставка. Низкий коэффициент поглощения нейтронов стенками ловушки и вставки обеспечивается при помощи покрытия поверхностей безводородным фтор-полимером (fomblin grease UT-18), имеющим низкое сечение захвата нейтронов. Внутренний диаметр нейтронотода, идущего к установке UCN2, равен 140 мм. На пути к UCN2 установлены две алюминиевые мембраны с толщиной 100 мкм и граничной скоростью 3.2 м/с. Одна мембрана отделяет камеру источника УХН с изотопно-чистым гелием от нейтронотодной системы, а вторая разделяет вакуум в нейтронотодной системе и измерительном объеме спектрометра. Камеры и нейтронотоды имеют внутри напыление  $^{58}\text{NiMo}$  с граничной скоростью 7.8 м/с и коэффициентом потерь  $3 \cdot 10^{-4}$ .

Моделирование произведено для конструкции установки с титановым поглотителем. В разработанной модели задана реальная геометрия установки и описана вся экспериментальная процедура. Поверхности ловушки, вставки и вакуумного объема покрыты полимером fomblin grease UT-18 с граничной скоростью 4.85 м/с и коэффициентом потерь  $8 \cdot 10^{-6}$ . Отражения нейтронов от стенок нейтронотодов являются в основном зеркальными, вероятность диффузного отражения составляет 0.7%. При отражении УХН от стенок ловушки, вставки и вакуумного объема вероятность диффузного отражения составляет 10%. Расчеты показали фактор выигрыша в счете детектора установки по измерению времени жизни в гравитационной ловушке для реактора ПИК не менее 16 раз по отношению к эксперименту на реакторе ИЛЛ.

Установка для поиска ЭДМ нейтрона (UCN1) представляет собой двухкамерный магниторезонансный спектрометр с реверсируемым электрическим полем. Особенностью спектрометра является наличие двух камер для хранения УХН с общей системой магнитных полей и с равными по величине, но противоположно направленными электрическими полями.

Нейтронотод для ЭДМ спектрометра внутренним диаметром 140 мм идет напрямую от источника и непосредственно перед входом в установку поднимается на 700 мм. В ЭДМ спектрометре этот нейтронотод разделяется на два нейтронотода, ведущие к двум камерам для хранения УХН. Камера источника и нейтронотоды имеют внутри напыление  $^{58}\text{NiMo}$  с граничной скоростью 7.8 м/с и коэффициентом потерь  $3 \cdot 10^{-4}$ . Ловушки спектрометра имеют радиус 263 мм и высоту 76 мм. Граничная скорость покрытия из оксида бериллия в 6.8 м/с и коэффициент потерь  $1.2 \cdot 10^{-4}$  обеспечивают время хранения нейтронов на уровне 100 с. На пути к UCN1 установлены две алюминиевые мембраны с толщиной 100 мкм и граничной скоростью 3.2 м/с. Одна мембрана отделяет камеру источнику УХН с изотопно-чистым гелием от нейтронотодной системы, а

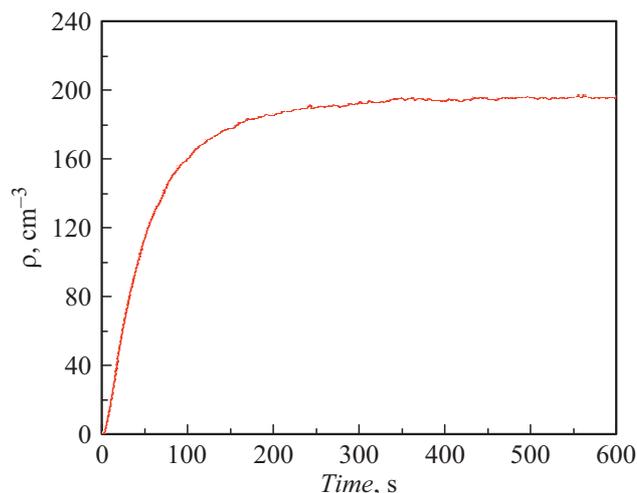


Рис. 6. Плотность в верхней камере ЭДМ спектрометра.

вторая разделяет вакуум в нейтронотодной системе и камерах спектрометра. Обсуждается вариант, при котором устанавливается только одна мембрана на выходе из источника УХН. В этом случае необходима крайне аккуратная эксплуатация нейтронотодной системы, так как напуск атмосферы в нейтронотодную систему со стороны любой экспериментальной установки будет означать напуск атмосферы в рабочий объем ЭДМ спектрометра.

На данный момент в приоритет ставится безопасность источника УХН в целом, а значит, камера источника УХН отделена от спектрометра двумя фольгами. Результаты расчета, приведенные на рис. 6, показывают, что при наличии двух алюминиевых фольг плотность УХН в ЭДМ спектрометре составит  $200 \text{ cm}^{-3}$ . Фактор выигрыша составляет 20 раз по отношению к эксперименту на реакторе ИЛЛ.

## Заключение

Необходимость развития новой технологии для производства УХН обусловлена текущим отсутствием прогресса в увеличении плотности УХН в экспериментах по физике фундаментальных взаимодействий. Дело в том, что на данный момент освоены прямые и достаточно эффективные методы с использованием низкотемпературных конверторов, таких, как жидкий водород или твердый дейтерий, и для дальнейшего прогресса необходимы альтернативные методы получения УХН. Наиболее перспективным из них является метод с использованием сверхтекучего гелия в качестве конвертора холодных нейтронов в ультрахолодные.

Новое поколение пучковых технологий с высокой плотностью УХН позволит значительно продвинуться в вопросах фундаментальных исследований. С их использованием предполагается улучшить точность измерений ЭДМ нейтрона на два порядка и проверить предсказания

суперсимметричных теорий, которые являются одним из вариантов расширения СМ. В рамках этих теорий ЭДМ нейтрона предсказывается на уровне, доступном для планируемых экспериментов. В то же время суперсимметричные теории предсказывают барионную асимметрию Вселенной на наблюдаемом уровне, что указывает на возможную справедливость предложенных вариантов теории.

Новый источник УХН на реакторе ПИК может быть установлен на канале ГЭК-4, в зоне малых теплопритоков к низкотемпературным конструкциям источника УХН. В результате оптимизации была выбрана схема отвода тепла от камеры источника УХН при помощи теплообменника. Рассчитанная плотность УХН в камере спектрометра ЭДМ на реакторе ПИК составляет  $200 \text{ см}^{-3}$ , при плотности УХН в закрытой камере источника, равной  $2.1 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ . Фактор выигрыша по плотности УХН в камере ЭДМ спектрометра по сравнению с другими, существующими на данный момент, источниками, составит 20 раз.

Помимо эксперимента по поиску ЭДМ нейтрона на источнике появится возможность установить вплоть до пяти научных станций для исследований с использованием УХН. На данный момент разработана обширная программа исследований по физике фундаментальных взаимодействий, включающая в себя поиск ненулевого ЭДМ нейтрона и прецизионное измерение времени жизни нейтрона.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] В.К. Игнатович. *Физика ультрахолодных нейтронов* (Наука, М., 1986)
- [2] А.П. Серебров. УФН, **185** (11), 1179 (2015). DOI: 10.3367/UFNr.0185.201511c.1179 [A.P. Serebrov. Phys.-Usp. **58** (11), 1074 (2015). DOI: 10.3367/UFNr.0185.201511c.1179]
- [3] C. Abel, S. Afach, N.J. Ayres, C.A. Baker, G. Ban, G. Bison, K. Bodek, V. Bondar, M. Burghoff, E. Chanel, Z. Chowdhuri, P.-J. Chiu, B. Clement, C.B. Crawford, M. Daum, S. Emmenegger, L. Ferraris-Bouchez, M. Fertl, P. Flaux, B. Franke, A. Fratangelo, P. Geltenbort, K. Green, W.C. Griffith, M. van der Grinten, Z.D. Grujić, P.G. Harris, L. Hayen, W. Heil, R. Henneck, V. Hélaine, N. Hild, Z. Hodge, M. Horras, P. Iaydjiev, S.N. Ivanov, M. Kasprzak, Y. Kermaidic, K. Kirch, A. Knecht, P. Knowles, H.-C. Koch, P.A. Koss, S. Komposch, A. Kozela, A. Kraft, J. Krempel, M. Kuźniak, B. Lauss, T. Lefort, Y. Lemiére, A. Leredde, P. Mohanmurthy, A. Mtchedlishvili, M. Musgrave, O. Naviliat-Cuncic, D. Pais, F.M. Piegsa, E. Pierre, G. Pignol, C. Plonka-Spehr, P.N. Prashanth, G. Quémener, M. Rawlik, D. Rebreyend, I. Rienäcker, D. Ries, S. Rocchia, G. Rogel, D. Rozpedzik, A. Schnabel, P. Schmidt-Wellenburg, N. Severijns, D. Shiers, R. Tavakoli Dinani, J.A. Thorne, R. Viro, J. Voigt, A. Weis, E. Wursten, G. Wyszynski, J. Zejma, J. Zenner, G. Zsigmond. Phys. Rev. Lett., **124** (8), 081803 (2020). DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.081803
- [4] F.M. Gonzalez, E.M. Fries, C. Cude-Woods, T. Bailey, M. Blatnik, L.J. Broussard, N.B. Callahan, J.H. Choi, S.M. Clayton, S.A. Currie, M. Dawid, E.B. Dees, B.W. Filippone, W. Fox, P. Geltenbort, E. George, L. Hayen, K.P. Hickerson, M.A. Hoffbauer, K. Hoffman, A.T. Holley, T.M. Ito, A. Komives, C.-Y. Liu, M. Makela, C.L. Morris, R. Musedinovic, C. O'Shaughnessy, R.W. Pattie, Jr., J. Ramsey, D.J. Salvat, A. Saunders, E.I. Sharapov, S. Slutsky, V. Su, X. Sun, C. Swank, Z. Tang, W. Urich, J. Vanderwerp, P. Walstrom, Z. Wang, W. Wei, A.R. Young. Phys. Rev. Lett., **127** (16), 162501 (2021). DOI: 10.1103/PhysRevLett.127.162501
- [5] G. L. Green, P. Geltenbort. Sci. Am., **314** (4), 36 (2016). DOI: 10.1038/scientificamerican0416-36. PMID: 27082189
- [6] A.P. Serebrov, A.K. Fomin. Phys. Procedia., **17**, 199 (2011). DOI: 10.1016/j.phpro.2011.06.037
- [7] И.С. Алтарев, Н.В. Боровикина, А.П. Булкин, В.А. Весна, Е.А. Гарусов, Л.А. Григорьева, А.И. Егоров, Б.Г. Ерозолимский, А.И. Ерыкалов, А.А. Захаров, С.Н. Иванов, В.Я. Кезерашвили, С.Г. Кирсанов, Э.А. Коломенский, К.А. Коноплев, И.А. Кузнецов, В.М. Лобашев, Н.Ф. Маслов, В.А. Митюхляев, И.С. Окунев, Б.Г. Песков, Ю.В. Петров, Р.Г. Пикулик, А.Н. Пирожков, Г.Д. Порсев, А.П. Серебров, Ю.В. Соболев, Р.Р. Тальдаев, В.А. Шустов, А.Ф. Щebetов. Письма в ЖЭТФ, **44** (6), 269 (1986). [I.S. Altarev, N.V. Borovikova, A.P. Bulkin, V.A. Vesna, E.A. Garusov, L.A. Grigor'eva, A.I. Egorov, B.G. Erozolimskii, A.N. Erykalov, A.A. Zakharov, S.N. Ivanov, V.Ya. Kezerashvili, S.G. Kirsanov, E.A. Kolomenskii, K.A. Konoplev, I.A. Kuznetsov, V.M. Lobashev, N.F. Maslov, V.A. Mityukhlyayev, I.S. Okunev, B.G. Peskov, Yu.V. Petrov, P.G. Pikulik, N.A. Pirozhkov, G.D. Porsev, A.P. Serebrov, Yu.V. Sobolev, R.R. Tal'daev, V.A. Shustov, A.F. Shchevetov. JETP Lett., **44** (6), 269 (1986).]
- [8] A. Steyerl, H. Nagel, F.X. Schreiber, K.A. Steinhauser, R. Gähler, W. Gläser, P. Ageron, J.M. Astruc, W. Drexler, G. Gervais, W. Mampe. Phys. Lett. A, **116** (7), 347 (1986). DOI: 10.1016/0375-9601(86)90587-6
- [9] B. Lauss, B. Blau. Sci. Post Phys. Proc., **5**, 4 (2021). DOI: 10.21468/SciPostPhysProc.5.004
- [10] T.M. Ito, E.R. Adamek, N.B. Callahan, J.H. Choi, S.M. Clayton, C. Cude-Woods, S. Currie, X. Ding, D.E. Fellers, P. Geltenbort, S.K. Lamoreaux, C.-Y. Liu, S. MacDonald, M. Makela, C.L. Morris, R.W. Pattie, J.C. Ramsey, D.J. Salvat, A. Saunders, E.I. Sharapov, S. Sjue, A.P. Spro, Z. Tang, H.L. Weaver, W. Wei, A.R. Young. Phys. Rev. C, **97** (1), 012501 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevC.97.012501
- [11] R. Golub, J.M. Pendlebury. Phys. Lett. A, **62** (5), 337 (1977). DOI: 10.1016/0375-9601(77)90434-0
- [12] А.П. Серебров. Вестник РАН, **79** (1), 23 (2009). [A.P. Serebrov. Herald Rus. Academy Sci., **79** (1), 14 (2009).]
- [13] А.П. Серебров, В.А. Лямкин, Д.В. Прудников, К.О. Кешишев, С.Т. Болдарев, А.В. Васильев. ЖТФ, **87** (2), 301 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.02.44142.1941 [A.P. Serebrov, V.A. Lyamkin, D.V. Prudnikov, A.V. Vasil'ev, K.O. Keshishev, S.T. Boldarev. Tech. Phys., **62** (2), 329 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217020256]
- [14] J. Martin, B. Franke, K. Hatanaka, S. Kawasaki, R. Picker. Nucl. Phys. News, **31** (2), 19 (2021). DOI: 10.1080/10619127.2021.1881367

- [15] J. Kahlenberg, D. Ries, K.U. Ross, C. Siemenssen, M. Beck, C. Geppert, W. Heil, N. Hild, J. Karch, S. Karpuk, F. Kories, M. Kretschmer, B. Lauss, T. Reich, Y. Sobolev, N. Trautmann. *Eur. Phys. J. A*, **53**, 226 (2017).  
DOI: 10.1140/epja/i2017-12428-9
- [16] U. Trinks, F.J. Hartmann, S. Paul, W. Schott. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **440** (3), 666 (2000).  
DOI: 10.1016/S0168-9002(99)01059-1
- [17] K.K.H. Leung, G. Muhrer, T. Hügler, T.M. Ito, E.M. Lutz, M. Makela, C.L. Morris, R.W. Pattie Jr., A. Saunders, A.R. Young. *J. Appl. Phys.*, **126**, 224901 (2019).  
DOI: 10.1063/1.5109879
- [18] S. Kavish Imam. *Proceed. Sci. PSTP2019*, 022 (2020).  
DOI:10.22323/1.379.0022
- [19] G. Bison, F. Burri, M. Daum, K. Kirch, J. Krempel, B. Lauss, M. Meier, D. Ries, P. Schmidt-Wellenburg, G. Zsigmond. *Res. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **830**, 449 (2016).  
DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.025
- [20] М.В. Ковальчук, В.В. Воронин, С.В. Григорьев, А.П. Серебров. *Кристаллография*, **66** (2), 191 (2021).  
DOI: 10.31857/S0023476121020065 [M.V. Kovalchuk, V.V. Voronin, S.V. Grigoriev, A.P. Serebrov. *Crystallography Reports*, **66** (2), 195 (2021).  
DOI: 10.1134/S1063774521020061]