

Проект источника ультрахолодных и холодных нейтронов на реакторе ВВР-М со сверхтекучим гелием в качестве замедлителя

© А.П. Серебров, В.А. Митюхляев, А.А. Захаров, А.Н. Ерыкалов, М.С. Онегин, А.К. Фомин, В.А. Илатовский, С.П. Орлов, К.А. Коноплев, А.Г. Крившич, В.М. Самсонов, В.Ф. Ежов, В.В. Федоров, К.О. Кешишев*, С.Т. Болдарев*, В.И. Марченко*

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН,
Гатчина, Ленинградская обл., Россия

* Институт физических проблем им. С.П. Капицы РАН,
Москва, Россия

E-mail: serebrov@pnpi.spb.ru

На реакторе ВВР-М ПИЯФ имеется уникальная возможность для создания условий низкого радиационного тепловыделения (около $4 \cdot 10^{-3}$ W/g) при достаточно хорошем нейтронном потоке (около $3 \cdot 10^{12}$ n/(cm² · s)). Эта возможность может быть реализована в тепловой колонне реактора, которая представляет собой канал диаметром 1 м, примыкающий к активной зоне реактора. Такой диаметр канала позволяет разместить защиту от γ -квантов активной зоны из висмута (15 см толщиной), графитовый предзамедлитель (300 dm³) при температуре 20 К и конвертор со сверхтекучим гелием (35 dm³) при температуре 1.2 К. Расчеты показывают, что тепловыделение в источнике (20 W) может быть снято откачкой паров гелия, а плотность ультрахолодных нейтронов в экспериментальной ловушке составит $\sim 10^4$ n/cm³, что на два-три порядка величины выше, чем у существующих источников ультрахолодных нейтронов.

Ультрахолодные нейтроны (УХН) ($\lambda > 500 \text{ \AA}$) успешно используются в фундаментальных исследованиях: для поиска электрического дипольного момента нейтрона, для измерения времени жизни нейтрона, асимметрий распада нейтрона и т.д. Поскольку точность этих экспериментов ограничена статистикой, в настоящее время довольно активно разрабатываются новые высокоинтенсивные источники ультрахолодных нейтронов. После реализации способов получения УХН с помощью жидкого водорода [1] и жидкого дейтерия [2] дальнейшее увеличение плотности ультрахолодных нейтронов остановилось на величине 40 см⁻³, которая была получена в восьмидесятых годах прошлого столетия. Рис. 1 иллюстрирует прогресс в увеличении плотности УХН на созданных в разное время источниках и ожидаемые ее значения на вновь проектируемых источниках УХН. В настоящее время активно обсуждаются [3–14] альтернативные методы производства УХН с помощью низких температур: один из методов состоит в использовании импульсного режима облучения нейтронами твердого дейтерия при температуре 4 К [6], другой — в использовании сверхтекучего гелия [3] в режиме накопления в ловушке [11,12] или в режиме конвертора, т.е. в стационарном режиме [13,14].

В настоящей работе обсуждается проект источника УХН на реакторе ВВР-М ПИЯФ [14]. Предполагается использовать сверхтекучий гелий как конвертор холодных нейтронов в ультрахолодные в тепловой колонне реактора. Здесь могут быть созданы условия низкого тепловыделения ($\sim 4 \cdot 10^{-3}$ W/g) при нейтронном потоке $\sim 3 \cdot 10^{12}$ n/(cm² · s). Мы планируем переоборудовать тепловую колонну реактора, установив в ней источник холодных и ультрахолодных нейтронов на основе сверхтекучего гелия (рис. 2).

Чтобы снизить тепловую нагрузку от γ -квантов, вблизи зоны реактора устанавливается защита из висмута.

Внешний диаметр этой защиты 990 mm при толщине стенки 95 mm. Толщина дна цилиндра 150 mm. Висмутовая защита размещается в алюминиевом кожухе толщиной 5 mm и охлаждается водой. Внутри висмутовой защиты установлен графитовый предзамедлитель, который охлаждается до температуры 20 К газообразным гелием от рефрижератора. Графитовый предзамедлитель заключен в алюминиевую оболочку. Эта конструкция размещается в вакуумном чехле. Внутри графитового предзамедлителя размещается цилиндрический сосуд (камера) со сверхтекучим гелием при температуре 1.2 К. Диаметр камеры 300 mm, длина 500 mm. Толщина оболочки камеры 2 mm. Передняя стенка камеры находится на расстоянии 92 см от центра зоны реактора.

Внутренняя поверхность алюминиевой камеры покрыта сплавом ⁵⁸NiMo толщиной $(3-5) \cdot 10^3 \text{ \AA}$, который имеет критическую скорость отражения УХН 7.8 m/s. Ультрахолодные нейтроны могут быть выведены из источника по зеркальному нейтронному каналу, также покрытому сплавом ⁵⁸NiMo. Объемы источника и нейтронного канала отделены алюминиевой фольгой (100 μ m), находящейся на опорной решетке. Схема на рис. 2 показана в масштабе. Толщины висмутового экрана и графитового предзамедлителя были выбраны с таким расчетом, чтобы получить максимально возможный поток холодных нейтронов при условии, что максимальная тепловая нагрузка на источник не будет превышать 20 W.

Расчеты нейтронных потоков и тепловыделений проводились с использованием программы MCNP-4B. Суммарное тепловыделение при мощности реактора 16 MW составит: в висмутовой защите 16 kW, в графитовом предзамедлителе 750 W, в алюминиевой оболочке гелиевого источника 13 W и в сверхтекучем гелии 6 W. Суммарная тепловая нагрузка на источник при температуре 1.2 К будет 19 W.

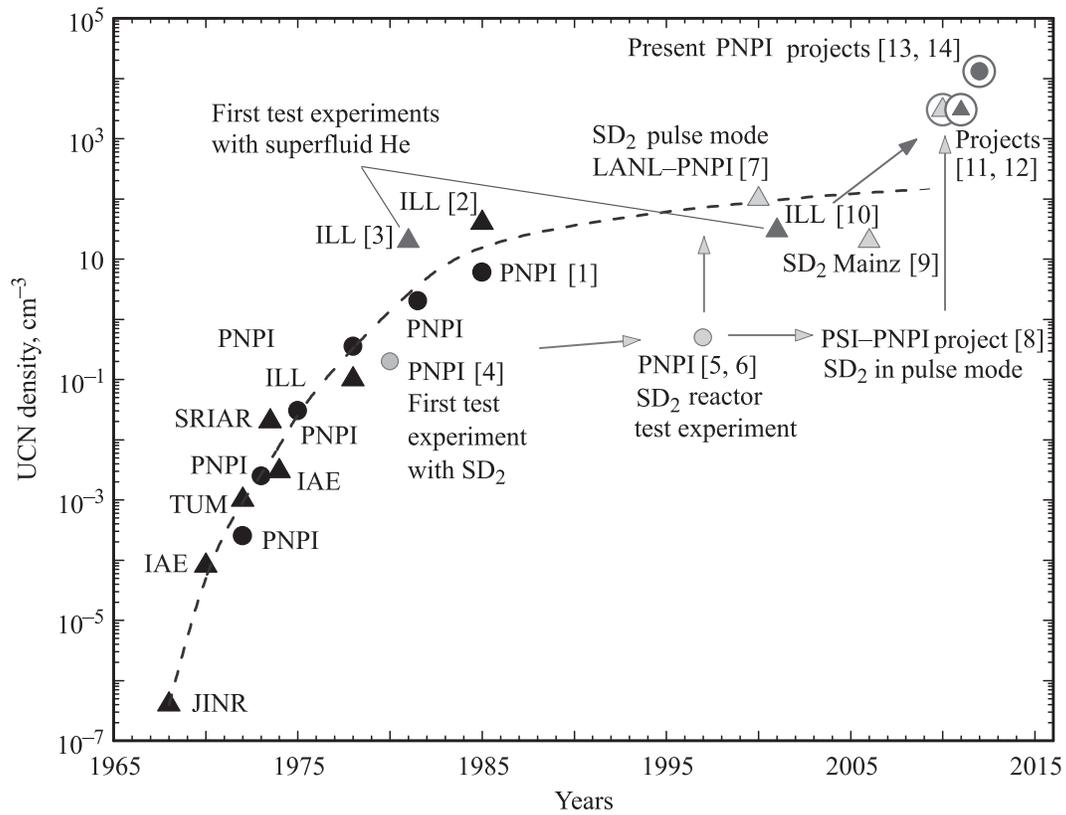


Рис. 1. История развития источников ультрахолодных нейтронов и проектируемые источники [1–14].

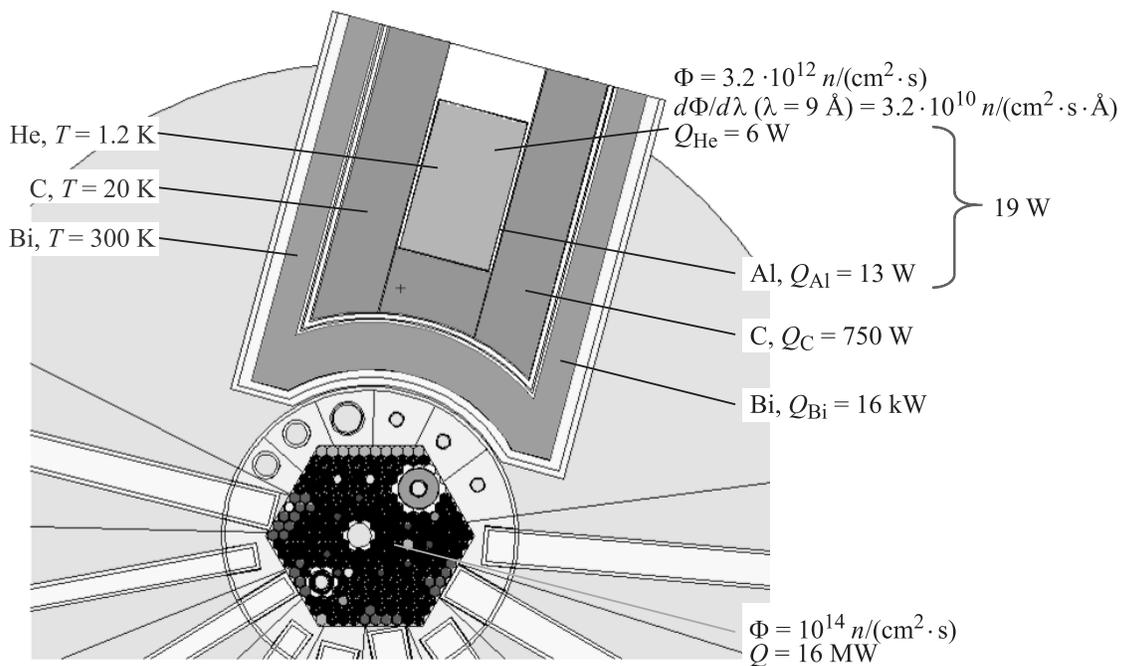


Рис. 2. Схема модификации тепловой колонны реактора ВВР-М.

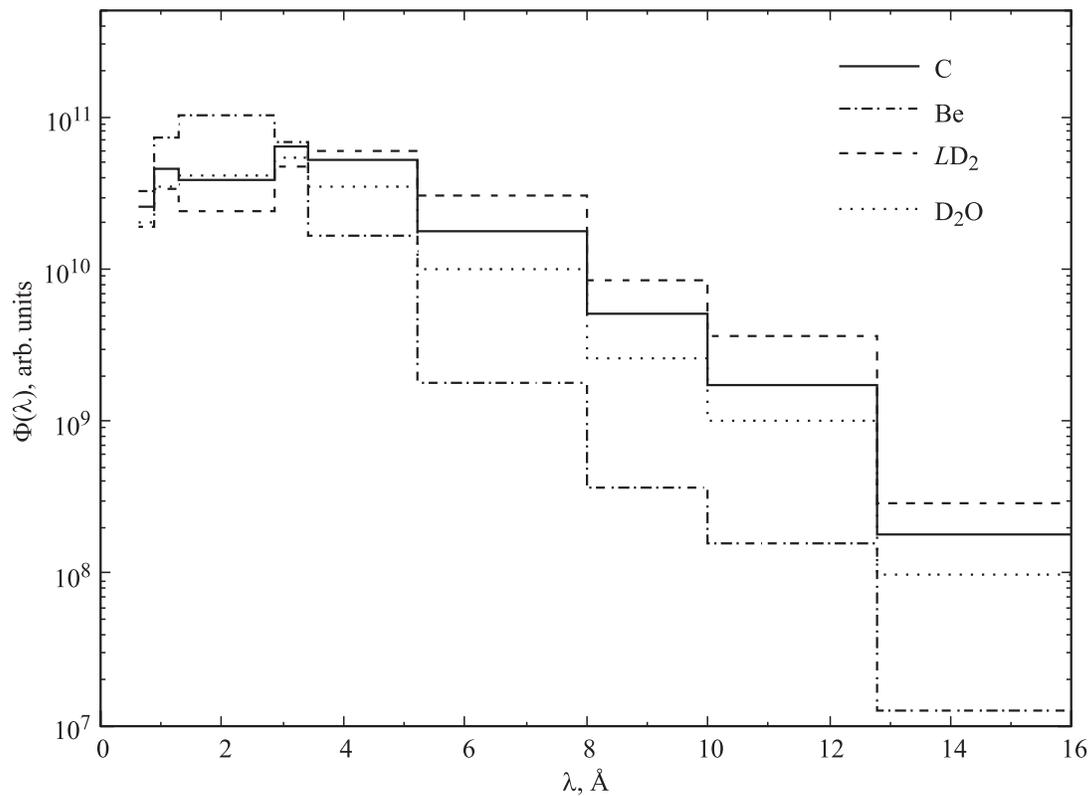


Рис. 3. Нейтронные спектры внутри гелиевого конвертора для различных предзамедлителей.

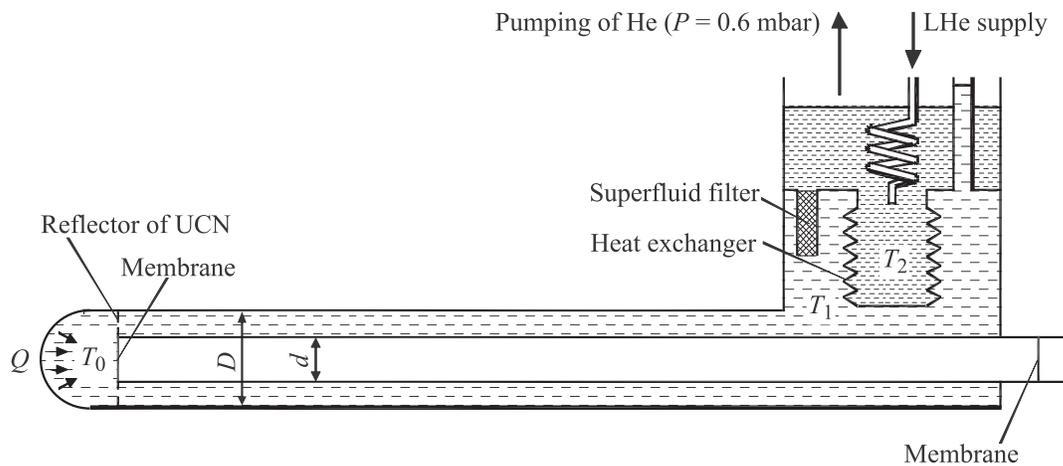


Рис. 4. Криогенная схема источника ультрахолодных нейтронов.

Выбор графита в качестве холодного замедлителя был произведен из условия получения максимального потока холодных нейтронов с длиной волны 9 Å. Эти нейтроны могут быть конвертированы в ультрахолодные посредством однофононного процесса. Вклад многофононного процесса в получение УХН может быть сравним с вкладом однофононного. На рис. 3 приведены результаты расчетов спектров холодных нейтронов для различных материалов: жидкого дейтерия, графита, льда тяжелой воды и бериллия. Во всех случаях температура замед-

лителя выбиралась равной 20 К. С практической точки зрения графитовый предзамедлитель предпочтительнее по сравнению с жидким дейтерием, хотя он и уступает в 2 раза в производстве нейтронов с длиной волны 9 Å.

Далее рассмотрим вопрос практической реализации криогенной схемы (рис. 4) отвода тепла от источника. Метод отвода тепла основан на очень высокой теплопроводности сверхтекучего гелия. Сверхтекучая компонента движется к источнику, а нормальная компонента — в обратную сторону, к теплообменнику, поэтому нет

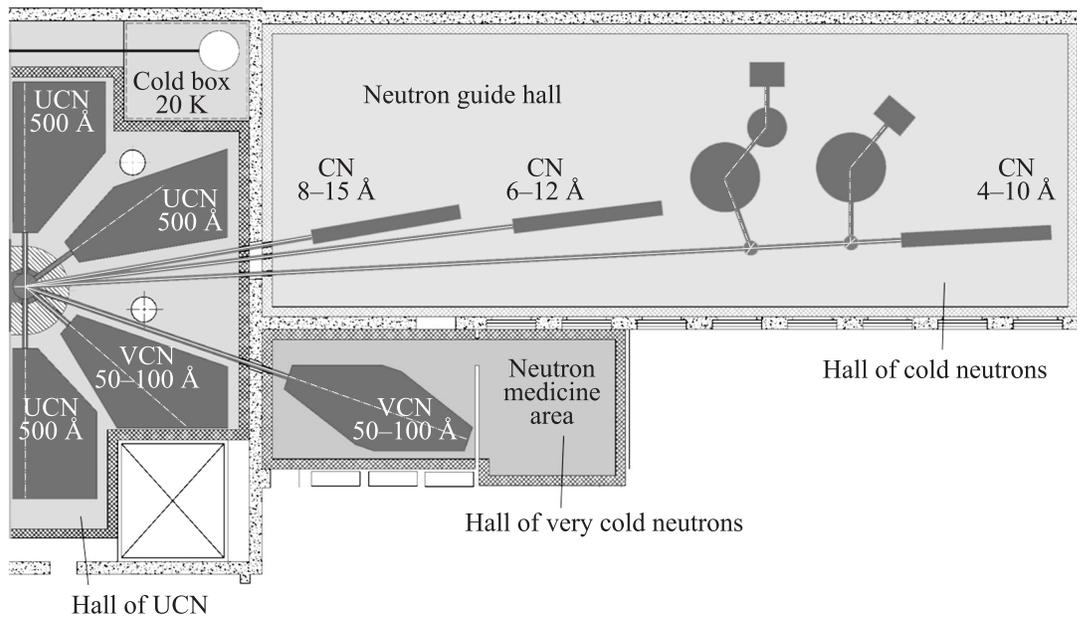


Рис. 5. Источник холодных и ультрахолодных нейтронов с нейтронными залами на реакторе ВВР-М.

необходимости в организации циркуляции жидкого гелия. Сверхтекучий гелий окружает нейтронный канал УХН и находится в кольцевом зазоре, по которому отводится тепло от источника. Поперечное сечение зазора 630 cm^2 , длина 3 m . Градиент температуры в сверхтекучем гелии вдоль канала $1.2 \cdot 10^{-2} \text{ K}$ при тепловой нагрузке в 20 W . Учитывая температурный скачок на поверхности теплообменника, можно рассчитать, что разница температур между гелием в источнике и гелием в ванне, находящейся под откачкой, составит $2 \cdot 10^{-2} \text{ K}$. Температура гелия в откачиваемой ванне будет на уровне 1.2 K при давлении 0.6 mbar . Расход гелия для поддержания температуры 1.2 K при тепловой нагрузке в 20 W составит 38 l/h . Для откачки газообразного гелия будут использоваться два вакуумных насоса с расходом $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Такая производительность соответствует расходу 7.5 l/s газообразного гелия при атмосферном давлении. Полученные оценки показывают возможность реализации предлагаемого проекта.

Расчет плотности ультрахолодных нейтронов в сверхкритическом гелии проводился с использованием программы MCNP-4B. Величина потока тепловых нейтронов составила $3.2 \cdot 10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, и поток нейтронов с длиной волны 9 Å равен $3.2 \cdot 10^{10} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Å})$ при мощности реактора 16 MW . Скорость производства УХН за счет однофоновонного процесса может быть рассчитана с использованием теоретической формулы [10] $R = 4.55 \cdot 10^{-8} d\Phi/d\lambda (9 \text{ Å}) \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$. При учете многофоновонного процесса и спектра холодных нейтронов в источнике [15] скорость производства УХН равна $1.8 \cdot 10^3 \text{ n}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$. Общее число УХН, произведенных в источнике в секунду, составит около $1.0 \cdot 10^8 \text{ n/s}$. Время жизни нейтрона в сверхтекучем гелии при температуре 1.2 K около 30 s , но с учетом потерь УХН в стенках

камеры оно составит 20 s . Таким образом, плотность УХН в закрытом объеме камеры со сверхтекучим гелием может достигнуть $5.8 \cdot 10^4 \text{ n}/\text{cm}^3$. Однако практический интерес представляет получение высокой плотности УХН в ловушке, размещенной в экспериментальном зале. С этой целью были проведены расчеты методом Монте-Карло для экспериментальной схемы, которая включает в себя конвертор со сверхтекучим гелием объемом 35 l , нейтронный канал УХН диаметром 140 mm и длиной 3 m и ловушку объемом 35 l . Кроме того, проводились расчеты той же экспериментальной схемы с ловушкой объемом 350 l . Объем со сверхтекучим гелием изолирован от нейтронного канала алюминиевой мембраной толщиной $100 \mu\text{m}$ на опорной решетке. Вакуумный объем нейтронного канала также изолирован от тепловой экспериментальной ловушки аналогичной мембраной. Проведенные расчеты учитывали потери УХН в стенках камеры источника, нейтронного канала и в ловушках, которые выбирались на уровне $3 \cdot 10^{-4}$ на одно соударение. Зеркальная отражательная способность нейтронного канала поверхности принималась равной 99.3% (оценка получена из измерений пропускной способности нейтронных каналов [16]), а поверхности ловушки — 10% . Критическая скорость для гелиевой ловушки и нейтронного канала УХН составляла 7.8 m/s ($^{58}\text{NiMo}$), но для экспериментальной ловушки она была выбрана 6.8 m/s (Be , BeO). Потери в алюминиевых мембранах в основном характеризовались сечением поглощения. Коэффициент отражения от алюминиевой мембраны рассчитывался с учетом критической скорости 3.2 m/s и коэффициента диффузного отражения, обусловленного неоднородностями плотности внутри фольг [17]. Как известно, отражение играет важную роль и может снизить коэффициент пропускания в несколько раз. С помощью расчетов было показано,

что плотность УХН в 351 в экспериментальной ловушке в 4.5 раза меньше по сравнению с гипотетической плотностью УХН в камере источника и составляет $\rho_{tr351} = 1.3 \cdot 10^4 \text{ n/cm}^3$. Для экспериментальной ловушки с объемом 3501 плотность УХН будет меньше в 7.5 раз и составит $\rho_{tr3501} = 7.7 \cdot 10^3 \text{ n/cm}^3$. В принципе плотность УХН может быть увеличена в 3 раза за счет изменения конфигурации загрузки активной зоны реактора. Безусловно, получение плотности УХН около 10^4 n/cm^3 является очень важным для фундаментальных экспериментов с УХН.

На сегодняшний день первый шаг в реализации данного проекта уже сделан: в мае 2008 г. введен в эксплуатацию рефрижератор с холодопроизводительностью 3 kW на температурном уровне 20 К для охлаждения графитового предзамедлителя. Принципиальная схема нейтроноводных залов представлена на рис. 5. Реализация данного проекта позволит создать источник с рекордной плотностью УХН для фундаментальных исследований. Что особенно важно, точность измерений электрического дипольного момента нейтрона может быть увеличена на порядок. Кроме того, холодные и очень холодные нейтроны могут быть использованы для изучения наноструктур и в других исследованиях в области конденсированных сред.

Список литературы

- [1] И.С. Алтарев, Н.В. Боровикова, А.П. Булкин, В.А. Весна, Е.А. Гарусов, Л.А. Григорьева, А.И. Егоров, Б.Г. Ерозолимский, А.Н. 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. Щебетов. Письма в ЖЭТФ **44**, 269 (1986).
- [2] A. Steyerl, H. Nagel, F.-X. Schreiber, K.-A. Steinhauser, R. Gähler, W. Gläser, P. Ageron, J.M. Astruc, W. Drexel, G. Gervais, W. Mampe. Phys. Lett. A **116**, 347 (1986).
- [3] R. Golub, C. Jewell, P. Ageron, W. Mampe, B. Heckel, I. Kilvington. Z. Phys. B: Cond. Matter **51**, 187 (1983).
- [4] I.S. Altarev, Yu.V. Borisov, A.B. Brandin, V.F. Ezhov, S.N. Ivanov, G.K. Kunstman, V.M. Lobashev, V.A. Nazarenko, V.L. Ryabov, A.P. Serebrov, R.R. Taldaev. Phys. Lett. A **80**, 413 (1980).
- [5] А.П. Серебров, В.А. Митюхляев, А.А. Захаров, А.Г. Харитонов, В.В. Несвижевский, М.С. Ласаков, Р.Р. Тальдаев, А.В. Алдущенко, В.Е. Варламов, А.В. Васильев, Г. Грин, Т. Боулс. Письма в ЖЭТФ **62**, 764 (1995).
- [6] А.П. Серебров, В.А. Митюхляев, А.А. Захаров, Т. Боулс, Д. Грин, Ю. Сромиский. Письма в ЖЭТФ **66**, 765 (1997).
- [7] A. Saunders, J.M. Anaya, T.J. Bowles, B.W. Filippone, P. Geltenbort, R.E. Hill, M. Hino, S. Noedl, G.E. Hogan, T.M. Ito, K.W. Jones, T. Kawai, K. Kirch, S.K. Lamoreaux, C.-Y. Liu, M. Makela, L.J. Marek, J.W. Martin, C.L. Morris, R.N. Mortensen, A. Pichlmaier, S.J. Seestrom, A. Serebrov, D. Smith, W. Teasdale, B. Tipton, R.B. Vogelaar, A.R. Young, J. Yuan. Phys. Lett. B **593**, 55 (2004).

- [8] A. Fomin, S. Kalcheva, A. Kharitonov, M. Lasakov, V. Mityukhlyayev, I. Potapov, M. Sazhin, A. Serebrov, G. Shmelev, V. Shustov, R. Taldaev, D. Tytz, V. Varlamov, A. Vasiliev, A. Zakharov, F. Atchison, B. Van den Brandt, M. Daum, W. Gloor, G. Heidenreich, R. Henneck, P. Hautle, St. Joray, K. Kirch, K. Kohlik, J.A. Konter, S. Mango, H. Obermeier, Ch. Perret, U. Rohrer, H.J. Temnitzer, K. Bodek, P. Geltenbort, S. Kistryn, A. Magiera, D. Pocianič, E. Frlēž. PSI Report TM-14-01-01 (2000).
- [9] K. Eberhardt, G. Hampel, W. Heil, J.V. Kratz, Th. Lauer, Yu. Sobolev, N. Trautmann, N. Wiehl, I. Altarev, P. Amos, A. Frei, E. Gutschiedl, R. Hackl, J. Hartmann, A.R. Müller, St. Paul, D. Tortorella, W. Schmid, L. Tassini, U. Trinks, A. Pirozhkov, Yu. Pokotilovski. Материалы 6-й конф. „Ультрахолодные и холодные нейтроны. Физика и источники“. СПб.–М. (2007); <http://cns.pnpi.spb.ru/6UCN/articles/Heill.pdf>.
- [10] C.A. Baker, S.N. Balashov, J. Butterworth, P. Geltenbort, K. Green, P.G. Harris, M.G.D. van der Grinten, P.S. Iaydjiev, S.N. Ivanov, J.M. Pendlebury, D.B. Shiers, M.A.H. Tucker, H. Yoshiki. Phys. Lett. A **308**, 67 (2003).
- [11] O. Zimmer, K. Baumann, M. Fertl, B. Franke, S. Mironov, C. Plonka, D. Rich, P. Schmidt-Wellenburg, H.-F. Wirth, B. van den Brandt. Phys. Rev. Lett. **99**, 104 801 (2007).
- [12] Y. Masuda, T. Kitagaki, K. Hatanaka, M. Higuchi, S. Ishimoto, Y. Kiyonagi, K. Morimoto, S. Muto, M. Yoshimura. Phys. Rev. Lett. **89**, 284 801 (2002).
- [13] A. Serebrov. Материалы 6-й конф. „Ультрахолодные и холодные нейтроны. Физика и источники“. СПб.–М. (2007); <http://cns.pnpi.spb.ru/6UCN/articles/Serebrov1.pdf>.
- [14] А.Н. Ерыкалов, М.С. Онегин, А.П. Серебров. Препринт ПИЯФ № 2776. Гагчина (2008). 22 с.
- [15] E. Korobkina, R. Golub, B.W. Wehring, A.R. Young. Phys. Lett. A **301**, 462 (2002).
- [16] A.P. Serebrov, P. Geltenbort, I.V. Shoka, G.E. Shmelev, A.G. Kharitonov, A.V. Vassiliev, I.A. Krasnosheikova, M.S. Lasakov, E.V. Siber, A.K. Fomin, O. Zimmer. Nucl. Instrum. Meth. A **611**, 263.
- [17] A.P. Serebrov, J. Butterworth, M. Daum, A.K. Fomin, P. Geltenbort, K. Kirch, I.A. Krasnosheikova, M.S. Lasakov, Yu.P. Rudnev, V.E. Varlamov, A.V. Vassiljev. Phys. Lett. A **309**, 218 (2003).