

М. Дебуа<sup>1</sup>, Е. В. Лычагин, А. Ю. Музыка,  
А. Ю. Незванов, В. В. Несвижевский<sup>2\*</sup>, Г. В. Нехаев,  
А. В. Стрелков, С. М. Чернявский<sup>3</sup>

УСИЛЕННОЕ НАПРАВЛЕННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ  
ОЧЕНЬ ХОЛОДНЫХ НЕЙТРОНОВ  
ПРИ ПОМОЩИ ОТРАЖАТЕЛЯ  
ИЗ ПОРОШКА АЛМАЗНЫХ НАНОЧАСТИЦ

Направлено в журнал “Physics Letters B, Particle Physics, Nuclear  
Physics and Cosmology”

---

<sup>1</sup> Институт химии Клермон-Феррана, Обьер, Франция

<sup>2</sup> Институт Лауэ–Ланжевена, Гренобль, Франция

<sup>3</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва

\* E-mail: nesvizh@ill.eu

Дебуа М. и др.

P3-2022-13

Усиленное направленное извлечение очень холодных нейтронов при помощи отражателя из порошка алмазных наночастиц

Уже более десяти лет порошки ультрадисперсных алмазов (УДА) активно исследуются в качестве материала для эффективных отражателей очень холодных нейтронов (ОХН) и холодных нейтронов (ХН). За это время экспериментально продемонстрировано хранение ОХН в ловушках со стенками из порошка УДА и квазизеркальное отражение ХН от слоя порошка УДА. Улучшено качество порошка УДА за счет уменьшения доли примесей, ведущих к потерям нейтронов, а также выбора параметров порошка, соответствующих наиболее эффективному отражению нейтронов. Разработаны методы расчета транспорта нейтронов в реальных порошках. Экспериментально продемонстрирована возможность формирования пучка ОХН при помощи отражателя из порошка фторированных УДА (Ф-УДА). По отношению к потоку от изотропного источника, расположенного у дна полости отражателя, выигрыш в плотности потока ОХН вдоль оси пучка равен примерно 10 для 57 и 75 м/с. Выигрыш в полном потоке на выходе из полости отражателя равен 14 для самых быстрых ОХН из интервала 46–92 м/с и увеличивается с уменьшением скорости ОХН, достигая 33 для самых медленных ОХН.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2022

Dubois M. et al.

P3-2022-13

Enhanced Directional Extraction of Very Cold Neutrons Using a Diamond Nanoparticle Powder Reflector

For more than a decade, Detonation NanoDiamond (DND) powders have been actively studied as a material for efficient reflectors of Very Cold Neutrons (VCNs) and Cold Neutrons (CNs). During this time, the storage of VCNs in traps with walls made of DND powder and the quasi-specular reflection of CNs from layers of DND powder have been experimentally demonstrated. The quality of DND powder has been improved by reducing the fraction of impurities causing neutron losses, as well as by choosing the powder parameters that correspond to the most efficient reflection of neutrons. Methods for calculating the transport of neutrons in real powders have been developed. In this work, we experimentally demonstrate the possibility of shaping a VCN beam using a reflector made of fluorinated DND (F-DND) powder. With respect to the flux from an isotropic source located at the bottom of the reflector cavity, the gain in the VCN flux density along the beam axis is  $\sim 10$  for the neutron velocities of 57 m/s and 75 m/s. The gain in the total flux at the exit from the reflector cavity is  $\sim 14$  for the fastest VCNs from the interval 46–92 m/s and increases with decreasing VCN velocity, reaching  $\sim 33$  for the slowest VCNs.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2022

## ВВЕДЕНИЕ

Нейтронные отражатели важны в нейтронной физике и атомной промышленности. Они используются для уменьшения потерь нейтронов и направления нейтронных потоков. В частности, поток медленных нейтронов вдоль оси нейтронного канала усиливают за счет их отражения от стенок отражателя вблизи источника. Давно известно [1], что отражателем можно увеличить направленный поток тепловых нейтронов в несколько раз, что широко используется на практике при создании так называемых «дырчатых» замедлителей/отражателей. Практически все ультрахолодные нейтроны, выходящие из конвертора, могут быть направлены к детектору или в экспериментальную установку с вероятностью близкой к единице [2] за счет их многократных зеркальных упругих отражений от стенок выводящего канала.

До недавнего времени не было известно эффективных отражателей нейтронов со скоростями 40–500 м/с. В цикле работ [3–9] экспериментально показано, что порошок УДА может быть использован как эффективный диффузный отражатель ОХН со скоростями 40–150 м/с (за счет их многократного рассеяния в среде). Для холодных нейтронов (ХН) порошок УДА является квазизеркальным<sup>1</sup> отражателем при малых (до 3°) скользящих углах падения нейтронного пучка [7, 10]. Возможность создания отражателей на основе порошков УДА (Ф-УДА) исследуется различными группами как теоретически, так и экспериментально [11–20].

Использование таких отражателей ОХН и ХН нового типа позволит заметно увеличить потоки нейтронов в выведенных пучках нейтронных источников и расширить область применения нейтронов. Например, с помощью ОХН можно искать электрический дипольный момент (ЭДМ) нейтрона [21], осцилляции нейтрон–антинейтрон [22], дополнительные типы взаимодействий [23]. Можно повысить точность измерения времени жизни нейтрона [24], чувствительность таких известных методик нейтронного рассеяния, как спин-эхо [25, 26] (за счет увеличения времени наблюдения/взаимодействия), рефлектометрия (за счет расширения динамического диапазона установки) [27], а также повысить производительность установок с ОХН для томографии [28].

---

<sup>1</sup> Квазизеркальным мы называем такое отражение, при котором отраженный пучок имеет относительно узкое угловое распределение с максимумом в примерно зеркальном направлении [7].

Порошок УДА является хорошим отражателем ОХН в силу удачного сочетания ряда свойств нанодiamondов (близкий к оптимальному размер зерен УДА [29], большая ядерная концентрация в алмазной фазе, большая длина когерентного рассеяния, малое сечение захвата нейтронов на углероде). Измеренная вероятность отражения ОХН от алмазного порошка заметно меньше значений, предсказываемых в модели независимых наночастиц [4]. В работе [8] было показано, что основной причиной потерь ОХН при отражении являются примесные атомы водорода, химически связанные с поверхностью нанокристаллов алмаза. ОХН на них захватываются или в основном ускоряются в результате неупругого рассеяния. Нейтроны также захватываются примесными атомами азота и атомами других элементов, в том числе атомами различных металлов, являющимися неизбежными примесями при детонационной технологии производства нанодiamondов. Как следует из [30, 31], атомы азота распределены внутри алмазных кристаллов, в то время как другие примеси, по-видимому, встречаются в виде поверхностных включений или отдельных частиц [32]. Измеренное количество металлических примесей [33] не влияет существенно на потери ОХН при отражении, однако усложняет применение таких отражателей в интенсивных нейтронных и гамма-полях (около источников нейтронов) из-за активации этих примесей.

Улучшение параметров и возможность использования нанодiamondных отражателей связаны с очисткой имеющихся порошков от примесей, в первую очередь, от водорода и металлов, а также с оптимизацией размеров наночастиц и изменением структуры порошка (деагломерацией). За последние десять лет была разработана технология химической обработки порошка УДА замещением водорода фтором [33], в результате которой долю остаточного водорода удалось понизить более чем в 30 раз. В работе [34] показано, что процесс фторирования не изменил рассеивающие нейтроны свойства УДА. Деагломерация порошка Ф-УДА должна привести к увеличению вероятности диффузного отражения (альbedo) главным образом за счет увеличения плотности порошка [35], а изменяя средний размер кристаллов в порошке, можно получить максимальное альbedo для соответствующего диапазона скоростей ОХН [29]. Наиболее точный экспериментальный метод измерения альbedo, использованный в работе [4], требует большого количества (десятков килограммов) порошка и не может быть использован при исследовании различных образцов, синтезируемых в граммовых количествах.

В данной работе, имея в распоряжении около 300 г Ф-УДА, исследованного в работах [29, 34, 35], мы экспериментально продемонстрировали эффективность отражателя из Ф-УДА для направленного извлечения ОХН из источника. Заметим, что это наилучший с точки зрения потерь ОХН порошок, имеющийся на сегодняшний день в нашем распоряжении в достаточном количестве. В разд. 1 рассказано о постановке эксперимента, разд. 2 посвящен описанию результатов эксперимента, разд. 3 посвящен обсуждению результатов.

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основной частью установки является отражатель из порошка Ф-УДА. Отражатель имеет форму толстостенной цилиндрической трубы (1) (переменной толщины стенки), закрытой с одного конца толстым диском (2, 2'). Внутренняя поверхность трубы и поверхность диска изготовлены из тонкой (50 мкм) фольги из чистого магния. За фольгой находился слой порошка из Ф-УДА (указан на рисунке серым цветом). Таким образом, порошок наноалмазов образует цилиндрическую полость, открытую с одной стороны.

Коллимированный пучок ОХН, пройдя через селектор скоростей (3) и малое отверстие в боковой стенке трубы, падает на центр диска (2) под углом  $60^\circ$  к оси трубы. Упруго отразившись от слоя наноалмазов в диске ОХН распространяются вдоль оси трубы, отражаясь от слоя наночастиц, который формирует ее боковую поверхность. В результате многократных отражений от стенок цилиндрической полости ОХН могут приобрести направление скорости вдоль ее оси и вылететь через открытый конец полости. Такие нейтроны регистрируются позиционно-чувствитель-

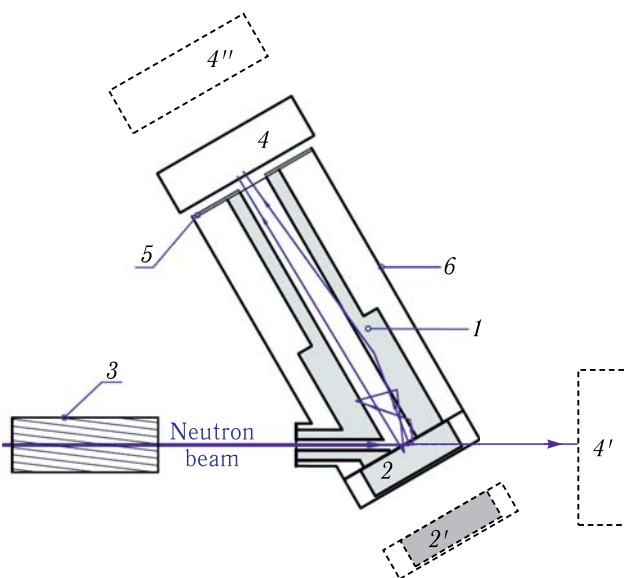


Рис. 1. Схема измерения. 1 — цилиндрическая труба из отражателя; 2 — отражатель в виде диска; 2' — положение диска при измерении потока нейтронов в падающем пучке; 3 — селектор скоростей в виде вращающегося барабана с винтовыми щелями; 4 — позиционно-чувствительный детектор (ПЧД) для измерения потока выходящих нейтронов; 4' — положение ПЧД при измерении потока нейтронов в падающем пучке; 4'' — положение ПЧД при измерении углового распределения выходящих нейтронов; 5 — Cd-диафрагма; 6 — вакуумируемый объем

ным детектором (4, 4', 4'') (ПЧД) с размером чувствительной области  $260 \times 260$  мм и входным алюминиевым окном толщиной 4 мм, установленным перпендикулярно оси полости. Детектор может перемещаться и устанавливаться на различных расстояниях от выхода из полости (4''). На торце трубы со стороны детектора установлена выходная диафрагма из кадмия (5), исключающая попадание ОХН в детектор мимо выходного отверстия полости (сквозь толщу порошка Ф-УДА).

Поток нейтронов, попадающих в полость сквозь боковое отверстие, измерялся при перемещении диска с порошком (2) в положение (2') тем же ПЧД, установленным перпендикулярно оси падающего пучка в положение (4'). Весь отражатель установлен в вакуумируемый объем (6), откачиваемый до уровня 0,1 мбар и имеющий в месте входа и выхода нейтронов окна из тонкой (100 мкм) алюминиевой фольги.

В эксперименте был использован тот же селектор скоростей с винтовыми щелями, что и в работах [3, 4]. Селектор имеет разрешение по скоростям нейтронов около 20%. Спектры скоростей нейтронов, пропускаемых селектором при различных частотах его вращения, были измерены методом времени пролета.

Геометрические параметры отражателя: внутренний диаметр полости — 30,0 мм, длина — 30,0 см, диаметр бокового входного отверстия — 10,0 мм, толщина слоя порошка — 30,0 мм в диске и нижних 45 мм цилиндрической части, 10 мм на оставшейся длине. Средняя засыпная плотность порошка на дне —  $0,34 \text{ г/см}^3$ , на боковой поверхности —  $0,35 \text{ г/см}^3$ .

Для различных скоростей нейтронов были измерены как потоки ОХН, падающие на дно полости отражателя, так и выходящие из полости (детектором, расположенным на минимально возможном расстоянии от выходной кадмиевой диафрагмы — 4 см), а также расходимость выходящего из полости пучка нейтронов детектором, отодвинутым от диафрагмы на 42 см.

Измерения проведены на пучке ОХН инструмента PF2 ILL [36] (Гренобль, Франция).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис.2 представлена зависимость распределения плотности потока ОХН  $P$  от расстояния  $R$  от оси цилиндрической полости, регистрируемой ПЧД, расположенным на расстоянии 42 см от выходной диафрагмы. Различные типы точек соответствуют скоростям нейтронов  $\sim 57$  и  $\sim 75$  м/с. Фон детектора вычтен. При построении зависимости были учтены потери ОХН в воздухе между выходной диафрагмой и детектором. Для учета потерь использовалось полное сечение взаимодействия ОХН с воздухом из [3]. Эти потери различны при различных  $R$  и скоростях ОХН. Средние потери в воздухе составляют  $\sim 35\%$  для ОХН со скоростью  $\sim 75$  м/с и  $\sim 43\%$  для ОХН со скоростью  $\sim 57$  м/с. При расчете потерь в воздухе не учитывалась возможность попадания нейтронов в детектор после рассеяния. Связанная с этим погрешность не превышает  $\sim 5\%$  от общих потерь в воздухе.

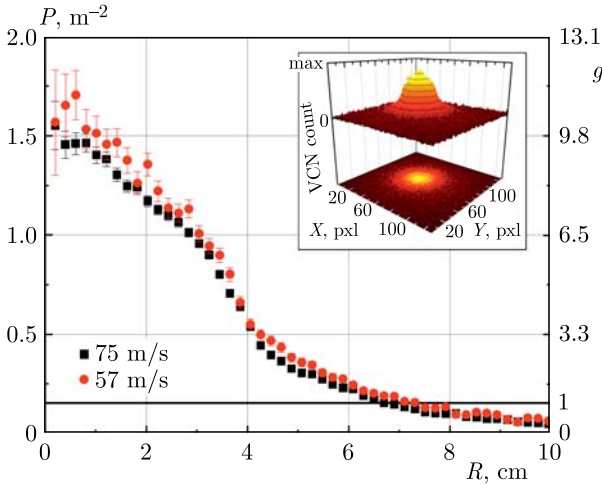


Рис. 2. Зависимость плотности потока ОХН  $P$ , регистрируемых ПЧД, расположенным на расстоянии 42 см от выходной диафрагмы, от расстояния до оси цилиндрической полости  $R$  (левая ось). Круглые точки соответствуют скорости нейтронов  $\sim 57$  м/с, квадратные —  $\sim 75$  м/с. Правая ось — фактор выигрыша  $g$  в плотности потока по отношению к плотности потока от однородного изотропного источника, расположенного на дне полости. На вставке — карта интенсивности счета ПЧД по пикселям в измерениях со скоростью  $\sim 75$  м/с

На вставке приведена карта интенсивности счета ПЧД по пикселям в измерениях со скоростью  $\sim 75$  м/с.

Правая ось на рис.2 соответствует фактору выигрыша  $g$  в плотности потока по отношению к плотности потока от однородного изотропного источника, расположенного на дне полости.

На рис.3 представлено отношение  $P_{\text{exit}}$  в процентах потока ОХН, регистрируемого ПЧД, к потоку, падающему на дно полости, в зависимости от скорости ОХН. ПЧД расположен на расстоянии 4 см от выходной кадмиевой (Cd) диафрагмы на выходе из полости. Оценка потерь в воздухе сделана с учетом сечений, измеренных в [3].

Систематические погрешности в этом измерении связаны с различными угловыми распределениями выходящих из полости нейтронов и угловым распределением входящего в полость пучка. При измерении интенсивности входящего пучка все нейтроны попадали в детектор нормально к поверхности его окна. На выходе из полости нейтроны могут попасть в детектор под достаточно большим углом к нормали, если перед этим они рассеялись на участке боковой стенки полости вблизи выхода. Расстояние, которое проходит нейтрон в 4-мм входном окне детектора, станет больше, чем при нормальном падении. Соответственно, эффективность регистрации меньше. Эта погрешность занижает результаты измерений тем больше, чем меньше скорость нейтронов. Точный учет этой погрешности возможен

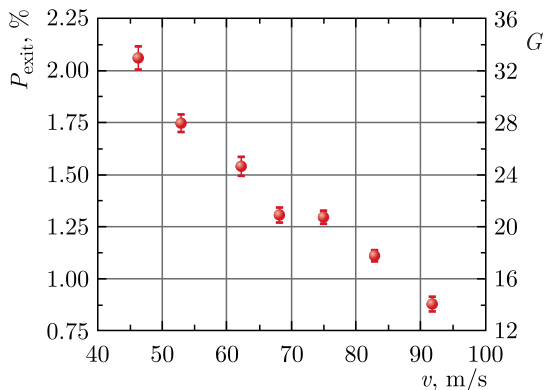


Рис. 3. Левая ось: доля  $P_{\text{exit}}$  в процентах потока ОХН, выходящих сквозь диафрагму, от потока ОХН, падающего в полость, в зависимости от скорости ОХН. Правая ось: фактор выигрыша  $G$  в выходящем потоке по отношению к потоку, который бы проходил сквозь диафрагму от однородного изотропного источника с интенсивностью падающего пучка, расположенного на дне полости

только при помощи полного расчета транспорта нейтронов в наноалмазном отражателе, но это тема следующей публикации. Оценка показывает, что она не превышает 10–15% для самых медленных нейтронов. На рис. 3 эта погрешность не учитывалась. Аналогичная поправка, связанная с потерями в воздухе, примерно в 10 раз меньше, чем поправка, связанная с окном детектора.

На этом же рисунке правая ось показывает зависимость от скорости нейтронов фактора выигрыша  $G$  в потоке, выходящем сквозь диафрагму, по отношению к потоку, который проходил бы сквозь диафрагму от однородного изотропного источника на дне полости с интенсивностью, равной падающему потоку.

Стоит обратить внимание, что определение фактора выигрыша  $G$  на этом рисунке отличается от фактора  $g$  на рис. 2. В расчете потока нейтронов на детектор от изотропного источника для фактора  $g$  отсутствовала выходная Cd-диафрагма, а при определении  $G$  она присутствует. Также нужно понимать, что в одну и ту же точку детектора, придвинутого на расстояние 4 см от выходной диафрагмы, попадают нейтроны под разными углами в широком угловом диапазоне, причем этот диапазон тем шире, чем больше альбеда нейтронов при отражении от боковых стенок отражателя. Для детектора, отодвинутого на 42 см, этот диапазон на порядок уже.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В нашем эксперименте источником нейтронов, извлекаемых вдоль оси цилиндрического отражателя, является доньшко полости. Падающий на доньшко пучок отражается неизотропно. Угловое распределение отражен-



ных нейтронов имеет максимум вблизи зеркального угла. Отличие от изотропного распределения тем больше, чем больше скорость нейтронов. Этот факт незначительно влияет на определение факторов выигрыша в нашем измерении, так как в результате многократных отражений поток нейтронов у дна полости быстро становится близким к изотропному. Более того, соответствующая поправка может только увеличить фактор выигрыша (первое отражение дало меньший выход нейтронов вдоль оси по сравнению с изотропным источником).

Выигрыш в направленном вдоль оси потоке достигается в основном за счет того, что нейтроны, многократно отражаясь от боковых стенок, имеют шанс вернуться к донышку. Издали дно полости — «самая видимая» (имеет максимальный телесный угол) поверхность отражателя, а за счет отражений плотность нейтронов около дна растет. Таким образом, для эффективного использования такого отражателя с реальным источником нейтронов (конвертором) необходимо, чтобы материал конвертора был прозрачным для ОХН (вероятности потерь нейтронов в конверторе должны быть меньше вероятности их выхода из полости или, по крайней мере, соизмеримы с ними). В качестве такого конвертора может служить твердый дейтерий, помещенный в поток холодных нейтронов. Порошок наночастиц практически прозрачен для ХН, и отражатель никак не повлияет на их плотность потока, за исключением фактора, связанного с удалением конвертора от замедлителя. Поэтому, очевидно, выгодно заглублять конвертор с отражателем внутрь замедлителя. Отражатель между конвертором и замедлителем может быть полезен еще и потому, что позволяет уменьшить примерно в два раза толщину конвертора без потери потока извлекаемых ОХН за счет возврата ОХН, выходящих из конвертора в противоположную сторону от нейтронного канала. Это позволит уменьшить тепловую нагрузку на конвертор и более эффективно использовать поток ХН, если он достаточно резко падает при удалении от замедлителя за счет размещения конвертора в области с большей плотностью потока ХН.

Более медленные нейтроны имеют больший коэффициент отражения, и поэтому рост их плотности существен и у выходного конца трубы. Отражение от боковой поверхности около выходного конца отражателя приводит к росту потока нейтронов на выходе под большими углами. Эти нейтроны дают большой вклад в увеличение полного потока на выходе (см. рис. 3), но не влияют на увеличение плотности потока вдоль оси.

Значение фактора выигрыша на рис. 2 меньше единицы обусловлено «затенением» больших углов боковыми стенками отражателя по сравнению со случаем изотропного источника, в котором предполагается, что отражатель отсутствует.

Мы продолжаем развивать математическую модель, позволяющую описывать транспорт ОХН в наноалмазном порошке. Полученные результаты можно использовать для проверки корректности описания транспорта нейтронов путем моделирования полной геометрии эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе впервые измерено усиленное направленное извлечение ОХН при помощи отражателя из порошка алмазных наночастиц (Ф-УДА). По отношению к потоку от изотропного источника, расположенного у дна полости отражателя, выигрыш в плотности потока ОХН вдоль оси пучка равен примерно 10 для 57 и 75 м/с. Выигрыш в полном потоке на выходе из полости отражателя равен 14 для самых быстрых ОХН из диапазона скоростей 46–92 м/с и увеличивается с уменьшением скорости ОХН, достигая 33 для самых медленных ОХН.

Использование такого отражателя в источниках ОХН существенно увеличит поток ОХН в экспериментальных установках и позволит расширить применение ОХН как в фундаментальных исследованиях (поиск ЭДМ нейтрона, осцилляций нейтрон–антинейтрон, новых типов взаимодействий, измерение времени жизни нейтрона), так и в нейтронном рассеянии (спин-эхо, рефлектометрия, томография).

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность сотрудникам ЛНФ ОИЯИ В. Ф. Семенову и В. А. Кокунову за помощь в изготовлении экспериментальной установки, ответственным за пучок PF2 ILL доктору П. Гельтенборту (P. Geltenbort) и доктору Т. Йенке (T. Jenke) за помощь в организации измерений, доктору Е. Коробкиной за полезные обсуждения при написании статьи. Это исследование выполнено при финансовой поддержке грантами РФФИ-18-29-19039, ERC INFRASUP P-2019-1/871072 и ANR-20-CE08-0034.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Fink G. A.* The Production and Absorption of the Thermal Energy Neutrons // *Phys. Rev.* 1936. V. 50. P. 738–747. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.50.738>.
2. *Лущиков В. И., Покотиловский Ю. Н., Стрелков А. В., Шаниро Ф. Л.* Наблюдение ультрахолодных нейтронов // *Письма ЖЭТФ.* 1969. Т. 9. С. 40–45. [http://jetpletters.ru/ps/679/article\\_10540.pdf](http://jetpletters.ru/ps/679/article_10540.pdf).
3. *Nesvizhevsky V. V., Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Strelkov A. V., Pignol G., Protasov K. V.* The Reflection of Very Cold Neutrons from Diamond Powder Nanoparticles // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2008. V. 595. P. 631–636. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.07.149>.
4. *Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nekhaev G. V., Nesvizhevsky V. V., Pignol G., Protasov K. V., Strelkov A. V.* Storage of Very Cold Neutrons in a Trap with Nano-Structured Walls // *Phys. Lett. B.* 2009. V. 679. P. 186–190. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.07.030>.
5. *Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V. V., Nekhaev G. V., Pignol G., Protasov K. V., Strelkov A. V.* Coherent Scattering of Slow Neutrons at Nanoparticles in Particle Physics Experiments // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2009. V. 611. P. 302–305. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.07.086>.
6. *Nesvizhevsky V., Cubitt R., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Pignol G., Protasov K., Strelkov A.* Application of Diamond Nanoparticles in Low-Energy Neutron Physics // *Materials.* 2010. V. 3. P. 1768–1781. <https://doi.org/10.3390/ma3031768>.

7. *Cubitt R., Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nekhaev G. V., Nesvizhevsky V. V., Pignol G., Protasov K. V., Strelkov A. V.* Quasi-Specular Reflection of Cold Neutrons from Nano-Dispersed Media at Above-Critical Angles // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2010. V. 622. P. 182–185. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.07.049>.
8. *Krylov A. R., Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V. V., Nekhaev G. V., Strelkov A. V., Ivanov A. S.* Study of Bound Hydrogen in Powders of Diamond Nanoparticles // *Crystallogr. Rep.* 2011. V. 56. P. 1186–1191. <https://doi.org/10.1134/S1063774511070169>.
9. *Lychagin E. V., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V. V.* Nano-Structured Reflectors for Slow Neutrons // *New Developments in Low-Energy Physics Research* / Eds. T. Zoeng, M. Ngai. N. Y.: NOVA Science Publishers, Inc., 2013. P. 1–12.
10. *Nesvizhevsky V. V., Dubois M., Gutfreund Ph., Lychagin E. V., Nezvanov A. Yu., Zhernenkov K. N.* Effect of Nanodiamond Fluorination on the Efficiency of Quasispecular Reflection of Cold Neutrons // *Phys. Rev. A.* 2018. V. 97. P. 023629. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.023629>.
11. *Арте́мьев В. А.* Оценка отражения нейтронов от нанодисперсных материалов // *Атомная энергия.* 2006. Т. 101. С. 445–448. <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1948/1928> (<https://doi.org/10.1007/s10512-006-0189-y>).
12. *Shabalin E., Verhoglyadov A.* A Conic Reflector for Increasing of the Flux of Very Cold Neutrons // *Proc. of the Intern. Collaboration on Advanced Neutron Sources “ICANS XX”, March 4–9, 2012, Bariloche, Rio Negro, Argentina, 2012.* <http://www.neutronresearch.com/proc/?c=201201;o=0>.
13. *Игнатович В. К., Несви́жевский В. В.* Отражение медленных нейтронов от порошка наностержней // *Атомная энергия.* 2014. Т. 116. С. 100–107. <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1020/1001> (<https://doi.org/10.1007/s10512-014-9830-3>).
14. *Artem'ev V. A., Nezvanov A. Yu., Nesvizhevsky V. V.* Precise Calculations in Simulations of the Interaction of Low Energy Neutrons with Nano-Dispersed Media // *Crystallogr. Rep.* 2016. V. 61. P. 84–88. <https://doi.org/10.1134/S1063774516010028>.
15. *Teshigawara M., Tsuchikawa Y., Ichikawa G., Takata S., Mishima K., Harada M., Ooi M., Kawamura Y., Kai T., Ohira-Kawamura S., Nakajima K., Ikeda Y., Kiyonagi Y.* Measurement of Neutron Scattering Cross Section of Nano-Diamond with Particle Diameter of Approximately 5 nm // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2019. V. 929. P. 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.038>.
16. *Ersez T., Osborn J. C., Lu W., Mata J. P.* Small Angle and Inelastic Scattering Investigations of Nanodiamonds // *Physica B. Condens. Matter.* 2018. V. 551. P. 278–282. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.04.027>.
17. *Granada J. R., Ignacio J. M. D., Helman C.* Studies on Reflector Materials for Cold Neutrons // *EPJ Web of Conf.* 2020. V. 231. P. 04002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023104002>.
18. *Jamalipour M., Zanini L., Gorini G.* Directional Reflection of Cold Neutrons Using Nanodiamond Particles for Compact Neutron Sources // *EPJ Web of Conferences.* 2020. V. 231. P. 04003. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023104003>.
19. *Grammar K. B., Gallmeier F. X.* The Small-Angle Neutron Scattering Extension in MCNPX and the SANS Cross Section for Nanodiamonds // *Nucl. Instr.*

- Meth. Phys. Res. A. 2020. V. 953. P. 163226. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.13226>.
20. *Jamalipour M., Zanini L., Gorini G.* Implementation of Neutron Reflection with Nano-Dispersed Media in Geant4 // *J. Synch. Investig.* 2020. V. 14. P. S75–S78. <https://doi.org/10.1134/S1027451020070174>.
  21. *Piegsa F.M.* New Concept for a Neutron Electric Dipole Moment Search Using a Pulsed Beam // *Phys. Rev. C.* 2013. V. 88. P. 045502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.88.045502>.
  22. *Nesvizhevsky V.V., Gudkov V., Protasov K.V., Snow M.W., Voronin A. Yu.* Experimental Approach to Search for Free Neutron-Antineutron Oscillations Based on Coherent Neutron and Antineutron Mirror Reflection // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122. P. 221802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.221802>.
  23. *Snow W.M., Haddock C., Heacock B.* Searches for Exotic Interactions Using Neutrons // *Symmetry.* 2022. V. 14. P. 10. <https://doi.org/10.3390/sym14010010>.
  24. *Nico J., Yue A., Dewey M., Gilliam D., Greene G., Laptev A., Snow W., Wieldt F.* Improved Determination of the Neutron Lifetime // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 111. P. 222501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.222501>.
  25. *Mezei F.* Neutron spin echo: A new concept in polarized thermal neutron techniques // *Zeitschrift für Physik.* 1972. V. 255. P. 146–160. <https://doi.org/10.1007/BF01394523>.
  26. *Hino M., Tasaki S., Kawabata Y., Ebisawa T., Geltenbort P., Brenner T., Butterworth J.S., Gähler R., Achiwa N., Utsuro M.* Development of a Very Cold Neutron Spin Interferometer at the ILL // *Physica B. Condens. Matter.* 2003. V. 335. P. 230–233. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(03\)00244-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(03)00244-8).
  27. *Baessler S., Gagarski A.M., Lychagin E.V., Mietke A., Muzychka A. Yu., Nesvizhevsky V.V., Pignol G., Strelkov A.V., Toperverg B.P., Zhernenkov K.* New Methodical Developments for GRANIT // *C. R. Phys.* 2011. V. 12. P. 729–754. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2011.04.014>.
  28. *Maruyama R.* Cold and Very Cold Neutron Radiography for High Contrast Neutron Imaging in Kyoto University Reactor // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2005. V. 264. P. 319–324. <https://doi.org/10.1007/s10967-005-0714-9>.
  29. *Aleksenskii A., Bleuel M., Bosak A., Chumakova A., Dideikin A., Dubois M., Korobkina E., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Nesvizhevsky V., Nezvanov A., Schweins R., Shvidchenko A., Strelkov A., Turlybekuly K., Vul' A., Zhernenkov K.* Effect of Particle Sizes on the Efficiency of Fluorinated Nanodiamond Neutron Reflectors // *Nanomaterials.* 2021. V. 11. P. 3067. <https://doi.org/10.3390/nano11113067>.
  30. *Turner S., Shenderova O., Da Pieve F., Lu Y.-g., Yücelen E., Verbeeck J., Lamoen D., Van Tendeloo G.* Aberration-Corrected Microscopy and Spectroscopy Analysis of Pristine, Nitrogen Containing Detonation Nanodiamond // *Phys. Stat. Solidi A.* 2013. V. 210. P. 1976–1984. <https://doi.org/10.1002/pssa.201300315>.
  31. *Kirmani A.R., Peng W., Mahfouz R., Amassian A., Losovyj Y., Idriss H., Katsiev K.* On the Relation between Chemical Composition and Optical Properties of Detonation Nanodiamonds // *Carbon.* 2015. V. 94. P. 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.06.038>.
  32. *Volkov D.S., Proskurnin M.A., Korobov M.V.* Elemental Analysis of Nanodiamonds by Inductively-Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy // *Carbon.* 2014. V. 74. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.072>.

33. *Nesvizhevsky V., Köster U., Dubois M., Batische N., Frezet L., Bosak A., Gines L., Williams O.* Fluorinated Nanodiamonds as Unique Neutron Reflector // *Carbon*. 2018. V. 130. P. 799–805. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.01.086>.
34. *Bosak A., Dideikin A., Dubois M., Ivankov O., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Nesvizhevsky V., Nezvanov A., Schweins R., Strelkov A., Vul' A., Zhernenkov K.* Fluorination of Diamond Nanoparticles in Slow Neutron Reflectors Does Not Destroy Their Crystalline Cores and Clustering While Decreasing Neutron Losses // *Materials*. 2020. V. 13. P. 3337. <https://doi.org/10.3390/ma13153337>.
35. *Aleksenskii A., Bleuel M., Bosak A., Chumakova A., Dideikin A., Dubois M., Korobkina E., Lychagin E., Muzychka A., Nekhaev G., Nesvizhevsky V., Nezvanov A., Schweins R., Shvidchenko A., Strelkov A., Turlybekuly K., Vul' A., Zhernenkov K.* Clustering of Diamond Nanoparticles, Fluorination and Efficiency of Slow Neutron Reflectors // *Nanomaterials*. 2021. V. 11. P. 1945. <https://doi.org/10.3390/nano11081945>.
36. PF2, Ultracold neutron facility. <https://www.ill.eu/users/instruments/instruments-list/pf2/description/instrument-layout>, 2022. (accessed 14 March 2022).

Получено 9 марта 2022 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 18.04.2022.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,60. Тираж 175 экз. Заказ № 60407.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)