Письма в ЖЭТФ, том 124, вып. 8, с. 655 – 662 © 2026 г. 25 октября

# Изучение магнитной связи между ядрами $^3$He и $^{141}$Pr в наночастицах $PrF_3$[1)]

*А. Гараева*[+], *Е. Болтенкова*[+ 2)], *А. Макарченко*[+], *Б. Мухамадуллин*[+], *М. Тагиров*[*], *Е. Алакшин*[+]

[+]*Казанский федеральный университет, Институт физики, 420008 Казань, Россия*

[*]*Академия наук Республики Татарстан, 420013 Казань, Россия*

Поступила в редакцию 5 августа 2026 г.
После переработки 17 сентября 2026 г.
Принята к публикации 22 сентября 2026 г.

Исследована магнитная связь ядер $^{141}$Pr в наночастицах $PrF_3$ с ядрами $^3$He в поровом пространстве между наночастицами методом импульсного ядерного магнитного резонанса на частоте 6.63 МГц при температуре 1.5 K. Наночастицы $PrF_3$ были синтезированы методом осаждения из коллоидного раствора с последующей гидротермальной обработкой в классическом автоклаве при температуре 120 °C в течение 24 ч. Структурная характеристика образцов выполнена методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии. Показано, что в присутствии адсорбированного $^3$He на поверхности наночастиц или жидкого $^3$He в поровом пространстве между ними при резонансном магнитном поле 205 мТл наблюдается существенное увеличение времени продольной релаксации $T_1$ ядер $^{141}$Pr, тогда как при 190 мТл заметных изменений не обнаружено. На основе экспериментальных данных определены время кросс-релаксации между ядрами $^3$He и $^{141}$Pr (около 3.3 мс) и характерное время корреляции (46 нс). Полученные результаты демонстрируют, что высокая кристалличность и большая поверхность наночастиц $PrF_3$, полученных гидротермальной обработкой, способствуют эффективной магнитной связи между ядрами $^{141}$Pr и $^3$He.

DOI: 10.7868/S3034576626100211

**1. Введение.** Гелий-3 используется в широком спектре направлений – от фундаментальной и прикладной физики до медицины и энергетики. В медицине гиперполяризованный $^3$He используется для МРТ-визуализации легких, позволяя не только видеть воздушные пути, но и визуализировать функцию легких [1–4]. Будучи самым легким инертным газом, гелий-3 демонстрирует рекордную способность к диффузии и практически нулевую растворимость в биологических тканях, что позволяет ему мгновенно и безопасно заполнять полости сложной формы, не вступая в химические реакции. Гелий-3 можно использовать в качестве высокочувствительного зонда для изучения пористых сред [5, 6], активной среды в нейтронных детекторах [7], основы для сверхнизкотемпературных холодильников и для квантовых исследований в сверхтекучей фазе [8–11]. А в долгосрочной перспективе именно гелий-3 рассматривается как топливо для термоядерного синтеза, что поспособствует экологически чистой энергетике будущего [12].

Получение гиперполяризованного состояния ядер $^3$He представляет фундаментальный и практический интерес для медицины (гиперполяризованная МРТ легких) и физики [13]. Существующие методы поляризации – “грубой силы” (требующий температур в мК и полей $\sim 15$ Тл) [14] и оптической накачки [15] – имеют ограничения по сложности или производительности. Альтернативой является метод динамической ядерной поляризации (ДПЯ), в частности, “солид-эффект”, основанный на передаче поляризации от парамагнитных центров в твердом теле к ядрам $^3$He [16].

Прогресс в этом направлении был достигнут в гетерогенных системах, где поляризация создается на ядрах твердой подложки (например, $^{19}$F во фторуглеродах) и передается адсорбированному слою $^3$He, а затем – в объем жидкости за счет быстрого обмена [17]. Как показано в работах по $^3$He, в аэрогелях и нанопорошках $PrF_3$, поверхностные взаимодействия и адсорбция существенно влияют на спиновую динамику и диффузию: в первом случае адсорбция подавляет газовую диффузию в нанопорах [18], а во втором — время релаксации $^3$He коррелирует с размером частиц $PrF_3$ [19]. Недавно открытый метод

[1)]См. дополнительный материал к данной статье на сайте нашего журнала www.jetpletters.ru.

[2)]e-mail: katarina.kondratyeva@gmail.com

PAMP (поляризация атомов в магнитизированной плазме), в котором значительная поляризация $^3$He наблюдается в отсутствие лазерного излучения и создается исключительно высокочастотным разрядом в сильном магнитном поле, демонстрирует перспективность для получения поляризации до 8 % [20, 21].

Парамагнетики Ван Флека, такие как $PrF_3$, где ионы $Pr^{3+}$ имеют синглетные основные состояния. Их ядра ($^{141}$Pr, $I = 5/2$) сильно связаны с электронной оболочкой через сверхтонкое взаимодействие. Ключевая особенность – сильная анизотропия эффективного гиромагнитного отношения ядер $^{141}$Pr, что позволяет при определенной ориентации магнитного поля достичь резонансного совпадения их ларморовских частот с частотами ядер $^3$He. Это открывает канал для кросс-релаксации и переноса поляризации.

Первые наблюдения такой кросс-релаксации были сделаны для кристаллогидрата TmES, но невоспроизводимость из-за разрушения поверхности при вакуумировании затруднила исследования. Последующие работы с безводным $LiTmF_4$ показали, что качество поверхности является критическим фактором. Измельчение в порошок для увеличения площади контакта приводило к образованию дефектных парамагнитных центров в нанополостях, чьи неоднородные поля нарушали резонансные условия и подавляли перенос намагниченности [22].

Теоретические расчеты предсказывают, что резонансная магнитная связь ядер $^{141}$Pr и $^3$He должна быть максимальна в поле $\sim 2$ кЭ (частота ядерного магнитного резонанса (ЯМР) $^3$He $\sim 6.5$ МГц). Экспериментально резонансное замедление релаксации $T_1$ ядер $^{141}$Pr в микропорошке $PrF_3$ в присутствии жидкого $^3$He было обнаружено именно в этом поле на частоте 6.63 МГц, что подтвердило наличие кросс-релаксационного канала [23].

Согласно проведенным ранее теоретическим оценкам, в магнитной связи участвуют ядра $^{141}$Pr, расположенные на поверхности частиц не глубже 30 нм [23].

Для усиления эффекта необходим переход к наноразмерным частицам $PrF_3$, что увеличивает площадь эффективного контакта. Однако синтез качественных наночастиц – сложная задача. Исследования показали, что на свойства частиц критически влияют метод синтеза (нитратный/хлоридный), pH среды, тип и длительность гидротермальной обработки (микроволновая или автоклав) [24–26]. Например, увеличение времени микроволновой обработки может приводить к увеличению размера частиц, сужению линий ЯМР $^{141}$Pr, но также к разрушению структуры и появлению кластеров воды [27–29]. Синтез в автоклаве под высоким давлением часто дает более кристаллические, но и более крупные частицы [24, 25].

Изучение спиновой кинетики $^3$He в контакте с наночастицами $PrF_3$ (20–30 нм) выявило увеличение скорости релаксации $^3$He с ростом магнитного поля, в отличие от диамагнитного аналога $LaF_3$ [30]. Полевая зависимость релаксации указывает на два механизма: низкополевой (через адсорбированный слой) и высокополевой (связанный с движением $^3$He в неоднородных магнитных полях) [19].

Таким образом, хотя магнитная связь $^3$He–$^{141}$Pr через кросс-релаксацию экспериментально доказана, ее эффективность для поляризации $^3$He напрямую зависит от морфологии, кристалличности и чистоты поверхности наночастиц $PrF_3$. Ожидается, что переход к наноразмерному образцу $PrF_3$ высокой кристалличности позволит избежать разрушения частиц при низкой температуре и приведет к более эффективной магнитной связи ядер гелия-3 с частицами $PrF_3$.

В этой работе синтезированы наночастицы $PrF_3$ с гидротермальной обработкой в автоклаве при температуре 120 °C в течение 24 ч, а также зафиксировано изменение времени магнитной релаксации ядер $^{141}$Pr в нанопорошке $PrF_3$ в контакте с гелием-3.

**2. Экспериментальные методы.** Образец наноразмерного порошка $PrF_3$ был синтезирован методом осаждения из коллоидного раствора. Для синтеза наночастиц $PrF_3$ было подготовлено два раствора. Первый раствор был получен путем растворения 4.396 г $Pr(NO_3)_3{\cdot}6H_2O$ в 150 мл деионизированной воды Milli-Q. Второй раствор был получен путем растворения 2.854 г. $KF \cdot 2H_2O$ в 150 мл деионизированной воды Milli-Q. Раствор нитрата празеодима интенсивно перемешивался на магнитной мешалке, далее раствор фторида калия покапельно добавлялся в раствор нитрата празеодима. Кислотность конечного раствора была доведена до pH = 4 с помощью добавления 70 % азотной кислоты. Полученный раствор подвергался гидротермальной обработке в классическом автоклаве лабораторного изготовления в течение 24 ч при температуре 120 °C. Данная температура была выбрана для получения частиц с минимальным размером и максимальной площадью поверхности.

Далее производилось центрифугирование раствора и промывка деионизированной водой Milli-Q (13 циклов промывки, центрифугирование 12000 об/мин для удаления водорастворимого соединения $KNO_3$, модель центрифуги Janetski K24).

Конечный раствор был высушен на плоской поверхности в атмосфере воздуха при комнатной температуре.

Образцы были охарактеризованы с помощью рентгенофазового анализа (РФА) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Рентгенофазовый анализ проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance в геометрии Брэгга–Брентано с использованием излучения Cu K$\alpha$ ($\lambda = 1.5418$ Å). Диапазон сканирования углов $2\theta$ составил от 20° до 60° со скоростью 1.15° в мин. Для характеризации методом ПЭМ был использован просвечивающий электронный микроскоп Hitachi HT7700 Exalens (Япония) с ускоряющим напряжением 100 кВ. Суспензия была нанесена на медную сетку диаметром 3 мм со сплошной подложкой из формвара/углерода.

ЯМР эксперименты проводились при температуре 1.5 K в магнитных полях до 400 мТл на частоте 6.63 МГц на импульсном ЯМР-спектрометре лабораторного изготовления [31]. Температура 1.5 K обеспечивалась откачкой паров $^4$He из криостата LH-311-1.5K-MRI. Образец помещался в ячейку из пирекса с внутренним диаметром 6 мм, соединенную с системой подачи газа $^3$He. Содержание примеси $^4$He в $^3$He не превышало 0.018 %. Перед каждым экспериментом поверхность образца очищалась многократными циклическими промывками газообразным $^4$He при 370 K откачкой до давления $\sim 1$ мбар.

Время спин-решеточной релаксации $T_1$ измерялось, используя последовательность насыщение-восстановление, а время спин-спиновой релаксации $T_2$ – используя эхо Хана, твердотельное эхо или последовательность CPMG с 500 накоплений.

Эксперименты проводились в системе, где наноразмерный образец $PrF_3$ находился в контакте с гелием-3 в жидком или адсорбированном состоянии, а также с жидким гелием-3 с адсорбированным слоем гелия-4 и с жидким гелием-4.

**3. Результаты и обсуждение.** Рентгеновские дифрактограммы для синтезированного образца $PrF_3$ представлены на рис. S1. Наблюдаются узкие пики, полученная дифрактограмма хорошо согласуется с симуляцией, построенной для кристаллической решетки $PrF_3$.

Размер области когерентного рассеяния (ОКР) оценивался, используя формулу Шеррера:

$$D = \frac{K\lambda}{\mathrm{FWHM}\cos\theta}, \qquad (1)$$

где $K = 0.8$ – форм-фактор, $\lambda$ – длина волны рентгеновского излучения, $\theta$ – положение пика и FWHM – полная ширина пика на полувысоте.

Оцененные размеры ОКР представлены в табл. S1. Наблюдаются большие размеры ОКР, что говорит о хорошей кристалличности синтезированного образца. Размер ОКР максимален для плоскостей (113) и (221) – 54.1 и 55.1 нм соответственно, и минимален для плоскостей (002) и (111) – 34.4 и 35.8 нм соответственно.

ПЭМ изображения образца $PrF_3$ и гистограмма распределения по размерам представлены на рис. S2. Из рисунка S2 видно, что наночастицы $PrF_3$ эллипсоидальной формы. Средний размер частиц составляет $56 \pm 16$ нм $\times$ $34 \pm 11$ нм, что лишь немного больше размеров ОКР, что говорит о высокой кристалличности синтезированного наноразмерного образца.

ЯМР спектр ядер $^{141}$Pr в синтезированном наноразмерном порошке $PrF_3$ регистрировался на частоте 6.63 МГц в магнитных полях 0–400 мТл. Спектр регистрировался по сигналу спинового эха $^{141}$Pr, ширина которого составляла порядка 1.5 мкс. Для удобства сравнения данных на рис. 1 приведены спектры ядер $^{141}$Pr микроразмерного [23] и наноразмерного порошков $PrF_3$.

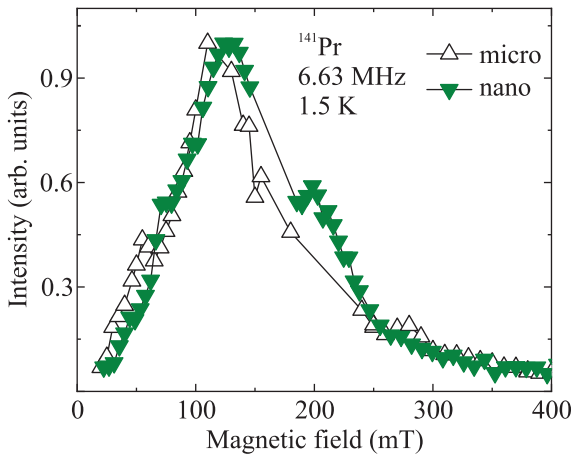


Рис. 1. (Цветной онлайн) Спектр ядер $^{141}$Pr в микро- и наноразмерном порошках $PrF_3$ на частоте 6.63 МГц в магнитных полях 0–400 мТл при температуре 1.5 K

Как видно из рис. 1, спектры микро- и наноразмерных порошков схожи. Ранее, в работе [30], для образца, подвергавшегося микроволновому облучению в течение 20 мин, измеренная ширина спектра была больше, чем для автоклавного образца.

Как видно из рис. 1, спектр $^{141}$Pr достаточно широкий и включает в себя резонансное поле 205 мТл для ядер гелия-3 на частоте 6.63 МГц. Ранее в работе [23] сигналы $^{141}$Pr и $^3$He разделялись, используя аппроксимацию, схематично представленную на рис. 2а. Эффект резонансной магнитной связи меж-

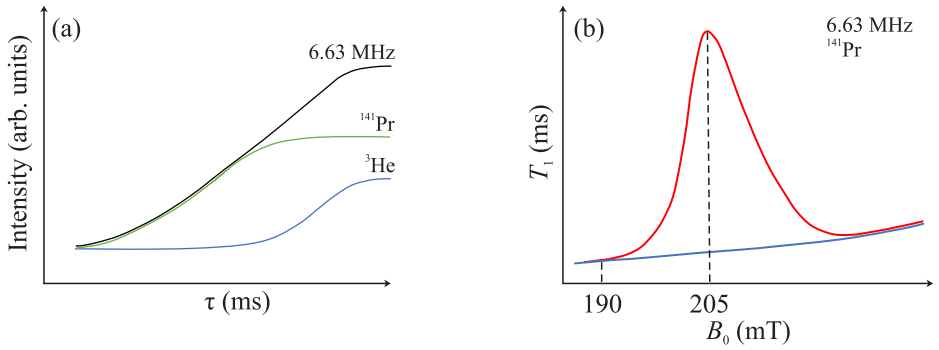


Рис. 2. (Цветной онлайн) Разделение вкладов ядер $^{141}$Pr и $^{3}$He в восстановление продольной намагниченности, использованное в статье [23] (a) и резонансное изменение времен $T_1$ релаксации $^{141}$Pr в магнитных полях 190–220 мТл (b)

ду $^{141}$Pr и $^{3}$He был продемонстрирован на полевой зависимости $T_1$ $^{141}$Pr. В районе 205 мТл магнитная связь между $^{141}$Pr и $^{3}$He была максимальной, и время $T_1$ релаксации $^{141}$Pr для микроразмерного образца менялось с 7.2 мс при 190 мТл на 12.9 мс при 205 мТл.

Для измерения времени релаксации ядер $^{141}$Pr в системе наноразмерный порошок $PrF_3$ + $^{3}$He и минимизации влияния математической обработки из смеси сигналов вычитался вклад спада сигнала свободной индукции $^{3}$He, и далее использовался сигнал спинового эха $^{141}$Pr. На рисунке 3 представлен сигнал

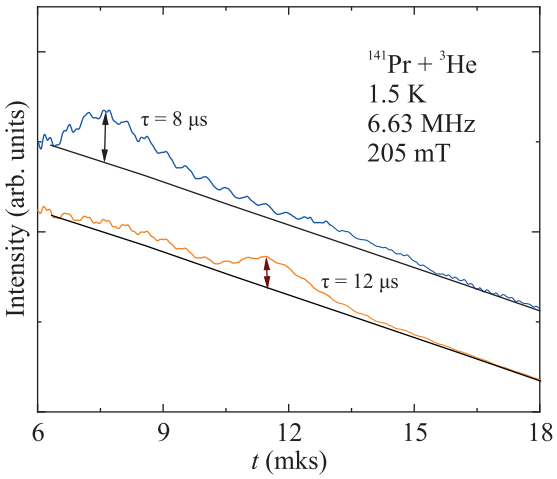


Рис. 3. (Цветной онлайн) Сигнал спинового эха ядер $^{141}$Pr в контакте с жидким гелием-3

спинового эха $^{141}$Pr на фоне спада сигнала свободной индукции $^{3}$He. Варьируя задержку между $\pi/2$ импульсами в последовательности для твердотельного эха и измеряя амплитуду сигнала эха, определялось время восстановления поперечной намагниченности ядер $^{141}$Pr. Варьируя задержку между насыщающим и зондирующим импульсами, измерялось время продольной релаксации ядер $^{141}$Pr. Характерное время задержки между импульсами для $^{141}$Pr составляло порядка 10 мкс, в то время как $T_2^*$ для $^{3}$He составляло $\sim 50$ мкс. Таким образом, данная импульсная последовательность, формирующая эхо $^{141}$Pr, воспринимается спиновой системой $^{3}$He как единый импульс.

Времена релаксации ядер празеодима в контакте с жидким гелием-3 и жидким гелием-4 были измерены на частоте 6.63 МГц в магнитных полях 190 мТл и 205 мТл. Кривые восстановления продольной намагниченности и спада поперечной намагниченности ядер $^{141}$Pr в $PrF_3$ в контакте с жидким гелием-3 представлены на рис. 4.

Кривые восстановления продольной намагниченности ядер $^{141}$Pr аппроксимировались растянутой экспонентой со степенью 0.5, откуда определялось время продольной релаксации. Степень 0.5 указывает на наличие распределения ядер $^{141}$Pr по скоростям релаксации, что естественно для рассматриваемой неупорядоченной системы и наблюдалось ранее в работе [23]. Для нахождения времени поперечной релаксации кривые спада аппроксимировались классической экспоненциальной функцией.

Значения времен релаксации $T_1$ и $T_2$ ядер $^{141}$Pr для микроразмерного и наноразмерного порошков в контакте с жидким $^{3}$He и $^{4}$He в магнитных полях 190 и 205 мТл приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, как и в случае микроразмерного порошка, время продольной релаксации ядер $^{141}$Pr в наноразмерном порошке увеличивается при контакте с ядрами гелия-3 в магнитном поле 205 мТл, тогда как в случае 190 мТл никаких изменений не наблюдается. Возможным объяснением наблюдаемого замедления релаксации ядер $^{141}$Pr служит большая разница в магнитной теплоемкости ядерных подсистем и затрудненная передача энергии в решетку. Со-

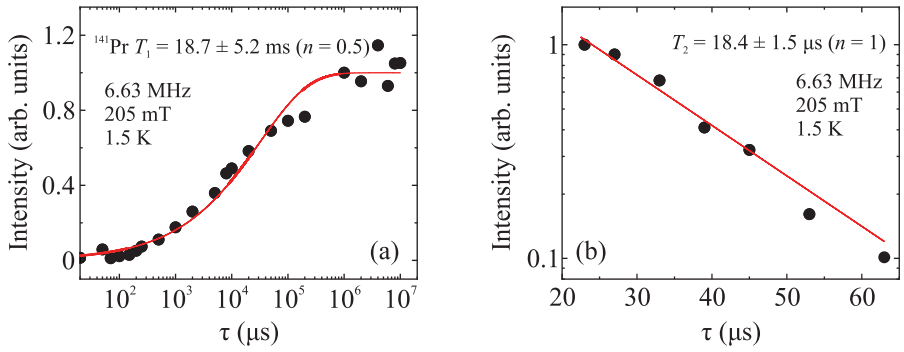


Рис. 4. (Цветной онлайн) Кривые восстановления продольной (a) и спада поперечной (b) намагниченности ядер $^{141}$Pr в наноразмерном порошке $PrF_3$ на частоте 6.63 МГц в магнитном поле 205 мТл в контакте с жидким гелием-3

**Таблица 1.** Значения времен релаксации $T_1$ и $T_2$ ядер $^{141}$Pr для микроразмерного [23] и наноразмерного порошков $PrF_3$ в контакте с жидким $^3$He и $^4$He в магнитных полях 190 и 205 мТл

| | $T_1$ (ms) | | | | $T_2$ ($\mu$s) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 190 mT | | 205 mT | | 190 mT | 205 mT |
| | micro | nano | micro | nano | nano | nano |
| Liquid $^4$He | 7.2 ± 0.1 | 5.8 ± 0.7 | 7.4 ± 0.1 | 6.3 ± 0.7 | 25.7 ± 6.2 | 24.6 ± 6.4 |
| Liquid $^3$He | 7.2 ± 0.1 | 5.8 ± 0.7 | 12.9 ± 0.5 | 18.7 ± 5.2 | 22.9 ± 5.4 | 18.4 ± 1.5 |
| Adsorbed $^3$He | | 5.6 ± 0.4 | | 17.9 ± 4.6 | 25.8 ± 2.1 | 21.7 ± 3.1 |
| Adsorbed $^4$He + liquid $^3$He | | 3.8 ± 0.2 | | 9.7 ± 2.3 | 21.8 ± 0.4 | 19.6 ± 0.6 |

гласно оценкам для наших экспериментальных условий, магнитная теплоемкость ядер $^{141}$Pr превышает магнитную теплоемкость ядер жидкого $^3$He на два порядка. В связи с этим ванфлековская подсистема $^{141}$Pr выступает большим резервуаром энергии. В момент кросс-релаксации ядерная спиновая система $^3$He передает часть своей энергии ядерной спиновой системе $^{141}$Pr. При релаксации решетка кристалла $PrF_3$ не успевает поглотить эту дополнительную энергию, что приводит к образованию узкого горла и, как следствие, к замедлению скорости релаксации ядер $^{141}$Pr.

В системе наноразмерный порошок $PrF_3$ и слой адсорбированного гелия-3 продольная релаксация ядер $^{141}$Pr сильно медленнее, чем в системе наноразмерный порошок $PrF_3$ и жидкий гелий-4 (или адсорбированный $^4$He), что говорит о том, что кросс релаксация происходит преимущественно через адсорбированный слой. Также в пользу этого аргумента говорит схожесть времен релаксации в системах с адсорбированным гелием-3 и жидким гелием-3. Изменения во времени поперечной релаксации $^{141}$Pr в связи с кросс-релаксацией не наблюдаются. Далее были измерены кривые спада продольной и поперечной намагниченности ядер адсорбированного гелия-3 на частоте 6.63 МГц и при температуре 1.5 K. Значения времен релаксации составили $T_1 = 0.96 \pm 0.01$ мс и $T_2 = 62.3 \pm 2.9$ мкс.

Скорость кросс-релаксации $\sigma$ между ядрами $^3$He и $^{141}$Pr можно определить из системы уравнений Соломона [32]:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\langle I_z\rangle\\ \langle S_z\rangle\end{pmatrix} = -\begin{pmatrix}\rho_I & \sigma\\ \sigma & \rho_S\end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix}\langle I_z\rangle - I_0\\ \langle S_z\rangle - S_0\end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $\rho_I$ и $\rho_S$ – скорости релаксации ядер $^{141}$Pr и $^3$He в изолированном случае, $\langle I_z\rangle$, $\langle S_z\rangle$, $I_0$, $S_0$ – среднее и равновесное значение проекции магнитного момента на ось $z$ ядер $^{141}$Pr и $^3$He.

Решая систему дифференциальных уравнений, находим скорость кросс-релаксации:

$$|\sigma| = \sqrt{\left(R_1^{\text{cross}} - \frac{R_{1\text{Pr}} + R_{1\text{He}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{R_{1\text{Pr}} - R_{1\text{He}}}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

где $R_{1\,\text{Pr}}$ и $R_{1\text{He}}$ – скорости релаксации ядер $^{141}$Pr и $^3$He в отсутствии кросс-релаксации, $R_{1\text{Pr}}^{\text{cross}}$ и $R_{1\text{He}}^{\text{cross}}$ – скорости релаксации ядер $^{141}$Pr и $^3$He в присутствии кросс-релаксации.

Таким образом, скорость кросс-релаксации $|\sigma| = 305\ \text{с}^{-1}$ или время кросс-релаксации 3.3 мс.

Зная скорость кросс-релаксации, можно оценить время корреляции $\tau_c$, используя следующее соотношение [33]:

$$\sigma = -\hbar^2\gamma_I^2\gamma_S^2\left[\frac{9}{16}\frac{\mathrm{Tr}\{[I_z, I_+S_+][I_z, I_-S_-]\}}{\mathrm{Tr}\{I_z^2\}} \times \right.$$
$$\times \frac{\int_0^\pi (\sin^2\theta)^2 \sin\theta\, d\theta}{\int_0^\pi \sin\theta\, d\theta} \frac{2\tau_c}{1+(\omega_I+\omega_S)^2\tau_c^2} -$$
$$- \frac{1}{16}\frac{\mathrm{Tr}\{[I_z, I_+S_-][I_z, I_-S_+]\}}{\mathrm{Tr}\{I_z^2\}} \times$$
$$\left. \times \frac{\int_0^\pi (1-3\cos^2\theta)^2 \sin\theta\, d\theta}{\int_0^\pi \sin\theta\, d\theta} \frac{2\tau_c}{1+(\omega_I-\omega_S)^2\tau_c^2}\right] \sum_r \frac{1}{r^6}, \quad (4)$$

где $I_z$ и $S_z$ – операторы продольной компоненты магнитного момента для ядер $^3$He и $^{141}$Pr, $\hbar$ – редуцированная постоянная Планка, $\gamma_\mathrm{I}$ и $\gamma_\mathrm{S}$ – гиромагнитные отношения ядер $^3$He и $^{141}$Pr, $\tau_c$ – время корреляции, $r$ – расстояние между ядрами $^3$He и $^{141}$Pr.

Оценочное значение $\tau_c$ получилось равным 46 нс. В качестве $\tau_c$ может выступать характерное время движения адсорбированного гелия-3 на поверхности наночастиц. Максимальное значение скорости релаксации будет наблюдаться при условии $\omega_0\tau_\mathrm{c} = 1$, т.е. совпадении $\tau_c$ с периодом ларморовской прецессии, который в нашем случае около 24 нс. Оцененное $\tau_c = 46$ нс соответствует режиму медленного диффузионного движения $\omega_0\tau_\mathrm{c} > 1$, что соотносится с $\sigma < 0$ и приводит к замедлению продольной релаксации ядер $^{141}$Pr в условиях кросс-релаксации. Такое поведение типично для заторможенных слоев адсорбированной жидкости на границе раздела фаз [34–36].

Таким образом, для наноразмерного порошка $PrF_3$ с обработкой в классическом автоклаве продемонстрирована магнитная связь между ядрами празеодима и гелия-3.

**4. Заключение.** В работе синтезированы наночастицы $PrF_3$ методом осаждения из коллоидного раствора с последующей гидротермальной обработкой в автоклаве при температуре 120 °C в течение 24 ч. Проведены рентгенофазовый анализ и просвечивающая электронная микроскопия. Полученные наночастицы обладают высокой кристалличностью и средними размерами порядка $56 \times 34$ нм, при этом размеры областей когерентного рассеяния близки к геометрическим размерам частиц.

Методом импульсного ЯМР на частоте 6.63 МГц при температуре 1.5 K исследована магнитная связь между ядрами $^{141}$Pr в наночастицах $PrF_3$ и ядрами $^3$He. Установлено, что в резонансном магнитном поле 205 мТл при контакте наночастиц с жидким или адсорбированным $^3$He наблюдается существенное увеличение времени продольной релаксации $T_1$ ядер $^{141}$Pr по сравнению с измерениями в поле 190 мТл. В экспериментах с жидким $^4$He скорость продольной релаксации $T_1{}^{-1}$ ядер $^{141}$Pr медленнее, чем в системах с $^3$He. Показано, что основной вклад в магнитную связь вносит адсорбированный слой $^3$He на поверхности наночастиц $PrF_3$. На основании экспериментальных данных определены характерное время кросс-релаксации между ядрами $^3$He и $^{141}$Pr (около 3 мс) и время корреляции, равное приблизительно 46 нс, что согласуется с представлениями о замедленном диффузионном движении адсорбированного гелия-3 вдоль поверхности наночастиц.

Полученные результаты подтверждают, что использование высококристалличных наночастиц $PrF_3$, синтезированных с применением гидротермальной обработки, обеспечивает эффективную магнитную связь между ядрами $^{141}$Pr и $^3$He. Это делает подобные наноструктуры перспективными объектами для дальнейших исследований механизмов переноса ядерной поляризации и разработки новых методов динамической поляризации гелия-3, представляющих интерес для низкотемпературной физики, ЯМР-спектроскопии и технологий получения гиперполяризованного $^3$He.

**Финансирование работы.** Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект # 26-22-20044).

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

1. J. M. Wild, N. J. Stewart, and H.-F. Chan, *Hyperpolarised Helium-3 ($^3$He) MRI: Physical Methods for Imaging Human Lung Function*, in *MRI of the Lung*, 2nd ed., ed. by H.-U. Kauczor and M. O. Wielpütz (Springer, Cham, 2018), p. 69.
2. P. Komlosi, T. A. Altes, K. Qing, K. E. Mooney, G. W. Miller, J. F. Mata, E. E. de Lange, W. A. Tobias, G. D. Cates Jr., and J. P. Mugler III, "Signal-to-noise ratio, $T_2$, and $T_2^*$ for hyperpolarized helium-3 MRI of the human lung at three magnetic field strengths", Magn. Reson. Med. **78**, 1458 (2017).
3. W. G. Teague, J. Mata, K. Qing, N. J. Tustison, J. P. Mugler, C. H. Meyer, E. E. de Lange, Y. M. Shim, K. Wavell, and T. A. Altes, " Measures of ventilation heterogeneity mapped with hyperpolarized helium-3 MRI demonstrate a T2-high phenotype in asthma", Pediatr. Pulmonol. **56**, 1440 (2021).
4. R. Kordulasiński, M. Królewska, B. Głowacz, L. Mikowska, Z. Olejniczak, T. Pałasz, M. Suchanek, W. Filipow, and T. Dohnalik, "A Novel System for Patient Ventilation and Dosing of Hyperpolarized $^3$He

for Magnetic Resonance Imaging of Human Lungs", Appl. Sci. **10**, 3163 (2020).

5. A. Bogaychuk, K. Safiullin, V. Kuzmin, E. Boltenkova, A. Rodionov, E. Korolev, M. Gafurov, and A. Klochkov, "Helium-3 NMR as a valid probe to study pore distribution of clay-based rocks", J. Appl. Geophys. **241**, 105828 (2025).
6. G. Tastevin and P.-J. Nacher, "NMR measurements of hyperpolarized $^3$He gas diffusion in high porosity silica aerogels", J. Chem. Phys. **123**, 064506 (2005).
7. Е. В. Рябева, В. В. Кадилин, В. А. Идалов, "Применение сцинтилляционных детекторов нейтронов в радиационных мониторах при замене гелиевых счетчиков", Атомная энергия **127**, 43 (2019) [E. V. Ryabeva, V. V. Kadilin, and V. A. Idalov, "Use of Neutron Scintillation Detectors as a Substitute for Helium-3 Counters in Radiation Monitors", At. Energy **127**, 51 (2019)].
8. L. Lu, K. Ying, S. Liu, and Y. Wu, "Experimental Investigation of a Helium Sorption Cooler Operating below 1 K", IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. **1327**, 012035 (2025).
9. D. Jin, "Quantum electronics and optics at the interface of solid neon and superfluid helium", Quantum Sci. Technol. **5**, 035003 (2020).
10. J. T. Mäkinen, V. V. Dmitriev, J. Nissinen, J. Rysti, G. E. Volovik, A. N. Yudin, K. Zhang, and V. B. Eltsov, "Half-quantum vortices and walls bounded by strings in the polar- distorted phases of topological superfluid $^3$He", Nat. Commun. **10**, 237 (2019).
11. В. В. Дмитриев, Д. В. Петрова, А. А. Солдатов, А. Н. Юдин, "Влияние давления на расщепление сверхтекучего перехода в $^3$He в нематическом аэрогеле", Письма в ЖЭТФ **124**, 216 (2026) [V. V. Dmitriev, D. V. Petrova, A. A. Soldatov, and A. N. Yudin, "Effect of the Pressure on the Splitting of the Superfluid Transition in $^3$He in Nematic Aerogel", JETP Lett. **124**, 197 (2026)].
12. S. V. Ryzhkov, "Helium-3 as a Perspective Fuel for Power Generation through Aneutronic Thermonuclear Fusion", Phys. At. Nucl. **83**, 1434 (2020).
13. N. J. Stewart, L. J. Smith, H.-F. Chan, J. A. Eaden, S. Rajaram, A. J. Swift, N. D. Weatherley, A. Biancardi, G. J. Collier, D. Hughes, G. Klafkowski, C. S. Johns, N. West, K. Ugonna, S. M. Bianchi, R. Lawson, I. Sabroe, H. Marshall, and J. M. Wild, "Lung MRI with hyperpolarised gases: current & future clinical perspectives", Br. J. Radiol. **95**, 20210207 (2022).
14. M. Tanaka, T. Kunimatsu, M. Fujiwara, H. Kohri, T. Ohta, M. Utsuro, M. Yosoi, S. Ono, K. Fukuda, K. Takamatsu, K. Ueda, J.-P. Didelez, G. Frossati, and A. de Waard, "Nuclear spin imaging with hyperpolarized nuclei created by brute force method", J. Phys.: Conf. Ser. **295**, 012167 (2011).
15. T. R. Gentile, P. J. Nacher, B. Saam, and T. G. Walker, "Optically polarized $^3$He", Rev. Mod. Phys. **89**, 045004 (2017).
16. A. Abragam and M. Goldman, "Principles of dynamic nuclear polarisation", Rep. Prog. Phys. **41**, 395 (1978).
17. A. Schuhl, S. Maegawa, M. W. Meisel, and M. Chapellier, "Surface transfer of polarization: a new method of polarization of liquid $^3$He", Jpn. J. Appl. Phys. **26** (Suppl. 3-1), 333 (1987).
18. V. Kuzmin, K. Safiullin, A. Stanislavovas, and M. Tagirov, "Helium-3 gas self-diffusion in a nematically ordered aerogel at low temperatures: enhanced role of adsorption", Phys. Chem. Chem. Phys. **19**, 23146 (2017).
19. Е. М. Алакшин, Р. Р. Газизулин, А. В. Клочков, С. Л. Кораблева, В. В. Кузьмин, А. М. Сабитова, Т. Р. Сафин, К. Р. Сафиуллин, М. С. Тагиров, "Размерный эффект в системе наночастицы $PrF_3$–$^3$He", Письма в ЖЭТФ **97**, 665 (2013) [E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Klochkov, S. L. Korableva, V. V. Kuzmin, A. M. Sabitova, T. R. Safin, K. R. Safiullin, and M. S. Tagirov, "Size effect in the ($PrF_3$ nanoparticles–$^3$He) system", JETP Lett. **97**, 579 (2013)].
20. A. Maul, P. Blümler, P.-J. Nacher, E. Otten, G. Tastevin, and W. Heil, "Nuclear hyperpolarization of $^3$He by magnetized plasmas", Phys. Rev. A **98**, 063405 (2018).
21. A. Makarchenko, V. Kuzmin, K. Safiullin, and M. Tagirov, "Temperature-related effects in the polarization of atoms in a magnetized plasma as a promising feature towards high $^3$He nuclear polarization", Phys. Rev. A **106**, 023101 (2022).
22. A. V. Klochkov, S. P. Kurzin, I. R. Mukhamedshin, D. R. Nabiullin, V. V. Naletov, H. Suzuki, I. Kh. Salikhov, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, and R. Sh. Zhdanov, "Magnetic resonant and non-resonant investigations of $LiLnF_4$ (Ln = Y, Tm) powders", Appl. Magn. Reson. **14**, 525 (1998).
23. А. В. Егоров, Д. С. Ирисов, А. В. Клочков, А. В. Савинков, К. Р. Сафиуллин, М. С. Тагиров, Д. А. Таюрский, А. Н. Юдин, "Обнаружение магнитной связи ядер жидкого $^3$He с ядрами кристаллического порошка $PrF_3$", Письма в ЖЭТФ **86**, 475 (2007) [A. V. Egorov, D. S. Irisov, A. V. Klochkov, A. V. Savinkov, K. R. Safiullin, M. S. Tagirov, D. A. Tayurskii, and A. N. Yudin, "Observation of magnetic coupling between the nuclei of liquid $^3$He and the $^{141}$Pr nuclei of $PrF_3$ crystalline powder", JETP Lett. **86**, 416 (2007)].
24. E. M. Alakshin, E. I. Kondratyeva, A. M. Garaeva, A. Sakhatskii, M. Likholetova, I. V. Romanova, and M. S. Tagirov, "Size effect of $DyF_3$ nanoparticles on Curie temperature", Nanoscale **14**, 11353 (2022).
25. A. M. Garaeva, F. F. Murzakhanov, E. I. Boltenkova, B. M. Mukhamadullin, A. E. Klimovitskii, G. V. Mamin,

and E. M. Alakshin, "Study of Paramagnetic Centers in a Series of $LaF_3$ Nanoparticles with Different Hydrothermal Treatment Temperatures", J. Phys. Chem. C **129**, 3076 (2025).

26. E. M. Alakshin, E. I. Kondratyeva, D. S. Nuzhina, M. F. Iakovleva, V. V. Kuzmin, K. R. Safiullin, A. T. Gubaidullin, T. Kikitsu, K. Kono, A. V. Klochkov, and M. S. Tagirov, "The self-assembly of $DyF_3$ nanoparticles synthesized by chloride-based route", J. Nanoparticle Res. **20**, 332 (2018).
27. E. M. Alakshin, B. M. Gabidullin, A. T. Gubaidullin, A. V. Klochkov, S. L. Korableva, M. A. Neklyudova, A. M. Sabitova, and M. S. Tagirov, "Development of various methods for $PrF_3$ nanoparticles synthesis", arXiv:1104.0208.
28. Е. М. Алакшин, Р. Р. Газизулин, А. В. Клочков, С. Л. Кораблева, Т. Р. Сафин, К. Р. Сафиуллин, М. С. Тагиров, "Отжиг наночастиц $PrF_3$ микроволновым облучением", Оптика и спектроскопия **116**, 781 (2014) [E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Klochkov, S. L. Korableva, T. R. Safin, K. R. Safiullin, and M. S. Tagirov, "Annealing of $PrF_3$ nanoparticles by microwave irradiation", Opt. Spectrosc. **116**, 721 (2014)].
29. Е. М. Алакшин, Д. С. Блохин, А. М. Сабитова, А. В. Клочков, В. В. Клочков, К. Коно, С. Л. Кораблева, М. С. Тагиров, "Экспериментальное доказательство существования кластеров воды в фуллереноподобных наночастицах $PrF_3$", Письма в ЖЭТФ **96**, 194 (2012) [E. M. Alakshin, D. S. Blokhin, A. M. Sabitova, A. V. Klochkov, V. V. Klochkov, K. Kono, S. L. Korableva, and M. S. Tagirov, "Experimental proof of the existence of water clusters in fullerene-like $PrF_3$ nanoparticles", JETP Lett. **96**, 181 (2012)].
30. M. S. Tagirov, E. M. Alakshin, R. R. Gazizulin, A. V. Egorov, A. V. Klochkov, S. L. Korableva, V. V. Kuzmin, A. S. Nizamutdinov, K. Kono, A. Nakao, and A. T. Gubaidullin, "Spin Kinetics of $^3$He in Contact with Synthesized $PrF_3$ Nanoparticles", J. Low Temp. Phys. **162**, 645 (2011).
31. G. A. Dolgorukov, V. V. Kuzmin, A. V. Bogaychuk, E. M. Alakshin, K. R. Safiullin, A. V. Klochkov, and M. S. Tagirov, "The home-built pulse NMR spectrometer with CPMG sequence for $^3$He research at low temperatures", Magn. Reson. Solids **20**, 18206 (2018).
32. I. Solomon, "Relaxation Processes in a System of Two Spins", Phys. Rev. **99**, 559 (1955).
33. T. I. Igumenova, K. K. Frederick, and A. J. Wand, "Characterization of the Fast Dynamics of Protein Amino Acid Side Chains Using NMR Relaxation in Solution", Chem. Rev. **106**, 1672 (2006).
34. J. R. Zimmerman and W. E. Brittin, "Nuclear Magnetic Resonance Studies in Multiple Phase Systems: Lifetime of a Water Molecule in an Adsorbing Phase on Silica Gel", J. Phys. Chem. **61**, 1328 (1957).
35. Y. Xue, Y.-R. Du, C.-H. Ye, and Y.-H. Kong, "The Measurements of Correlation Times of Molecules Adsorbed on Silica Gel, Alumina and Charcoal Using NOESY and MAS NMR", Appl. Magn. Reson. **1**, 413 (1990).
36. J.-P. Korb, "Multiscale nuclear magnetic relaxation dispersion of complex liquids in bulk and confinement", Prog. Nucl. Magn. Reson. Spectrosc. **104**, 12 (2018).