

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРОТОНОВ И ДЕЙТРОНОВ В РЕЖИМЕ СПИНОВОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA ОИЯИ

*Ю. Н. Филатов^{а, 1}, А. М. Кондратенко^{а, б}, М. А. Кондратенко^{а, б},
Е. Д. Цыплаков^а, А. В. Бутенко^б, В. П. Ладыгин^б, В. А. Лебедев^б,
Е. М. Сыресин^б, Е. А. Бутенко^{а, б}, А. И. Чернышов^а*

^а Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141701, Россия

^б Научно-техническая лаборатория «Заряд», Новосибирск, 630090, Россия

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Анализируется новый метод контроля направления поляризации легких ядер в ускорительном комплексе NICA. Рассматривается режим спиновой прозрачности (ST-режим) для коллайдера NICA в непрерывном диапазоне энергий с двумя соленоидальными змейками и на дискретных энергиях, соответствующих целым спиновым резонансам. Обсуждается возможность экспериментальной проверки спиновых навигаторов в ST-режиме нуклотрона, который является инжектором поляризованных протонов и дейтронов в коллайдер NICA. Предложенные спиновые навигаторы могут использоваться для управления ориентацией спинов протонов на выведенных из нуклотрона пучках. Обсуждается вариант кольца нового инжектора формы восьмерки для управления поляризацией любого сорта частиц во всем диапазоне энергий пучка в комплексе NICA.

A new method for the polarization direction control of light nuclei in the NICA accelerator complex is being analyzed. The spin transparency (ST-mode) for the NICA collider is considered across a continuous energy range using two solenoid snakes and at discrete energies corresponding to integer spin resonances. The possibility of experimental verification of spin navigators in the ST-mode of the Nuclotron, which serves as an injector of polarized protons and deuterons into the NICA collider, is discussed. The proposed spin navigators can be used to control the spin orientation of protons in beams extracted from the Nuclotron. An option for a new figure-8 injector ring for the polarization control of any particle type across the entire beam energy range of the NICA complex is discussed.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

РЕЖИМ СПИНОВОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ

В коллайдерах периодическое движение спинов при движении частицы по замкнутой орбите (**n**-ось) имеет особое значение — из-за разброса спиновой частоты поляризация только вдоль **n**-оси будет устойчивой [1].

¹E-mail: filatov.iun@mipt.ru

В коллайдере RHIC (BNL, США) [2] с двумя спиральными змейками [3], расположенными в противоположащих промежутках, магнитная структура выделяет единственную \mathbf{n} -ось. Змейки переворачивают спины вокруг осей, лежащих в плоскости коллайдера, которые составляют углы $\pm 45^\circ$ с направлением скорости. Значение спиновой частоты $\nu = 1/2$, а направление устойчивой поляризации вертикально в арках RHIC и меняет знак после каждого прохождения змейки. Изменение направления \mathbf{n} -оси в месте расположения детектора осуществляется с помощью пары спиновых ротаторов, расположенных непосредственно до и после детектора. Первый ротатор обеспечивает продольную поляризацию в детекторе, а второй возвращает ее в исходное вертикальное направление. Интеграл спирального поля составляет примерно 25 Тл·м для каждой змейки и каждого спинового ротатора. Из-за малого G-фактора схема управления со змейками и ротаторами непригодна для дейтронов.

Управление поляризацией протонов и дейтронов, требуемое для реализации программы спиновых исследований в ускорительном комплексе NICA [4], будет осуществляться в режиме спиновой прозрачности (ST-режиме) [5]. В основе метода лежит выбор магнитных структур, в которых действие на спин за оборот частицы «сильных» магнитных полей элементов структуры скомпенсировано: любое направление спина повторяется через оборот [6]. В ST-режиме нет выделенной \mathbf{n} -оси и спиновая частота $\nu = 0$. Из-за этого вырождения спиновое движение становится неустойчивым — любые малые возмущения магнитных полей сильно изменяют направление \mathbf{n} -оси. Стабилизация требуемого направления поляризации (\mathbf{n} -оси) осуществляется с помощью спиновых навигаторов (SN) — специальных магнитных вставок на базе «слабых» магнитных полей [7]. Действие навигатора на спины (сила навигатора) должно значительно превосходить деполяризующее влияние, связанное с ошибками выставки и изготовления магнитных элементов коллайдера, а также влиянием бетатронных и синхротронных колебаний пучка. Интеграл поля спиновых навигаторов, требуемый для контроля направления спинов, на несколько порядков меньше интеграла спиновых ротаторов. «Слабые» навигаторные поля «указывают» направление поляризации в детекторе. Дальнейшая кинематика поляризации вдоль кольца коллайдера определяется «сильными» магнитными полями структурных элементов.

Спиновые навигаторы при оперировании с поляризованными протонами и дейтронами позволяют:

- получить любое направление поляризации в любом месте орбиты;
- компенсировать ошибки установки и изготовления магнитных элементов коллайдера [8];
- обеспечить многократные перевороты поляризации (спин-флипы) во время проведения эксперимента для подавления систематических ошибок [9].

Таким образом, в ST-режиме открываются уникальные возможности по проведению высокоточных экспериментов с поляризованными пучками.

ST-РЕЖИМ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

В коллайдере NICA для компенсации действия арочных диполей в непрерывном диапазоне импульсов вводятся две соленоидальные змейки в противоположных промежутках коллайдера (рис. 1) [10]. Каждая змейка разбита на две части

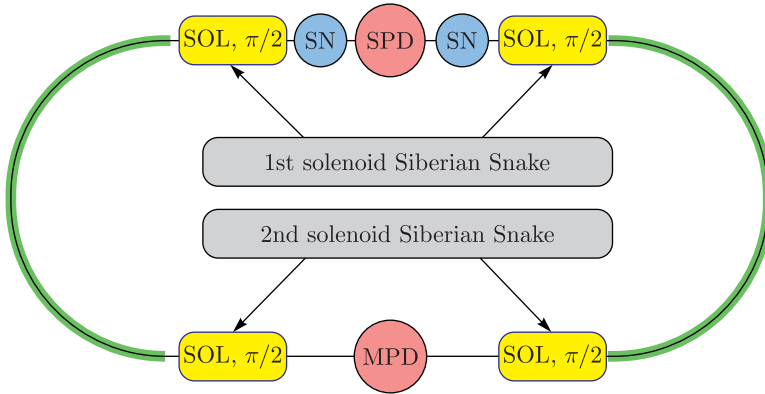


Рис. 1. Размещение соленоидальных змеек для ST-режима в коллайдере NICA

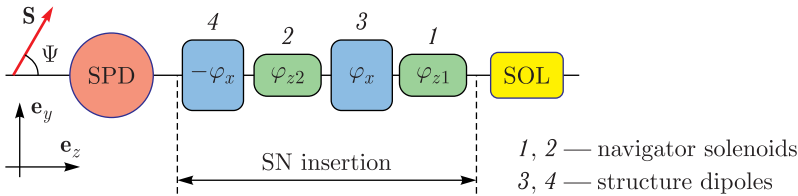


Рис. 2. Размещение слабых соленоидов в спиновом навигаторе

(50%-е змейки), симметрично расположенные вокруг детекторов MPD и SPD. Детализация SN приведена на рис. 2. Он состоит из двух «слабых» соленоидов, разделенных диполем с радиальным полем, обеспечивающим сведение пучков в месте встречи в детекторе. SN позволяет получать любое направление спинов в вертикальной плоскости детектора либо любое направление спинов в плоскости коллайдера в его арках. Интеграл продольного поля на одну 50%-ю змейку для работы во всем диапазоне импульсов до 13,5 ГэВ/с составляет 25 Тл·м для протонов и 80 Тл·м для дейтронов.

На первом этапе планируется установить четыре однометровых 6-Тл соленоидов, которые позволят оперировать с протонами до 3,5 ГэВ/с и с дейтронами до 1 ГэВ/с. В остальном диапазоне планируется работать на дискретных энергиях, соответствующих целым спиновым резонансам (ST-режим на целых резонансах) [11], которые идут с шагом 523 МэВ для протонов. Для дейтронов в NICA существует единственный целый резонанс на импульсе 13 ГэВ/с. В этом случае соленоидальные змейки не требуются, так как спины совершают целое число оборотов в арках коллайдера за оборот частицы.

На следующих этапах необходимо расширять непрерывный диапазон импульсов для ST-режима за счет увеличения интеграла продольного поля вводимых соленоидов. Актуальной является задача разработки змеек для протонов на поперечных полях, интеграл поля которых в отличие от соленоидальных змеек практически не зависит от энергии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ST-РЕЖИМА В НУКЛОТРОНЕ

Пилотный эксперимент по верификации ST-режима на целых резонансах может быть выполнен для пучка протонов на действующем синхротроне нуклотрон, который является инжектором поляризованных протонов и дейтронов в коллайдер NICA.

Предложенные SN на базе слабых соленоидов [12] и на базе штатных корректирующих диполей [13] позволят получать любое направление поляризации протонов на мишени в экспериментах на целых спиновых резонансах с выведенными из нуклотрона пучками.

В работе [14] показано, что поляризация при ускорении протонов в диапазоне импульсов до 3,5 ГэВ/с, в котором отсутствуют внутренние спиновые резонансы, может быть сохранена с помощью слабого соленоида с интегралом поля около 25 мТл·м и штатных корректирующих диполей.

SN на базе слабых соленоидов не искажают замкнутую орбиту, а требуемый интеграл продольного поля растет пропорционально импульсу при стабилизации силы навигатора. Напротив, SN на базе корректоров работает за счет искажения замкнутой орбиты, а интеграл поперечного поля, особенно с ростом энергии, значительно меньше интеграла продольного поля. Таким образом, в диапазоне импульсов до 3,5 ГэВ/с для целых резонансов $\gamma G = 2$ и $\gamma G = 3$ лучше использовать SN на слабых соленоидах. SN на корректирующих диполях лучше подойдут для резонансов $\gamma G = 6$ и $\gamma G = 7$. Возможность экспериментальной проверки системы спин-флипа протонов в нуклотроне на резонансе $\gamma G = 7$ была проанализирована в работе [9].

Вертикальную поляризацию можно измерять с помощью поляриметров на внутренней мишени [15,16] и на выведенном пучке [17]. Для экспериментальной проверки ST-режима требуется модернизация поляриметров, чтобы они могли измерять также и радиальную поляризацию протонов. Отсутствие вертикальной поляризации в поляриметре на внутренней мишени служит индикатором, что пучок попал в область ST-резонанса. Верификация работы SN или системы спин-флипа на базе SN может осуществляться по измерениям радиальной поляризации на выведенном пучке.

ИНЖЕКТОР В ФОРМЕ ЦИФРЫ 8

В настоящее время в ОИЯИ рассматриваются варианты модернизации или полной замены нуклотрона. Исполнение кольца нового инжектора в форме цифры 8 является элегантным решением для управления поляризацией любого сорта частиц [18]. В такой конфигурации ST-режим выполняется автоматически для любой энергии и не требует дополнительного размещения змеек. На рис. 3 приведена одна из возможных схем инжектора формы 8, арки которого расположены над арками коллайдера NICA [21]. В представленной схеме используются штатные 2-Тл магниты с темпом подъема поля порядка 1 Тл/с, разработанные в ОИЯИ [19]. Такие диполи позволяют создать быстроциклирующий инжектор поляризованных протонов, что является ключевым фактором при формировании высокоинтенсивных пучков в коллайдерных кольцах [20].

Проектирование инжектора в виде кольца формы 8 вместо традиционной конфигурации кольца формы «рэйстрек» дает уникальные возможности оперирования с поляризованными пучками [18]. Управление поляризацией осуществляется с помощью

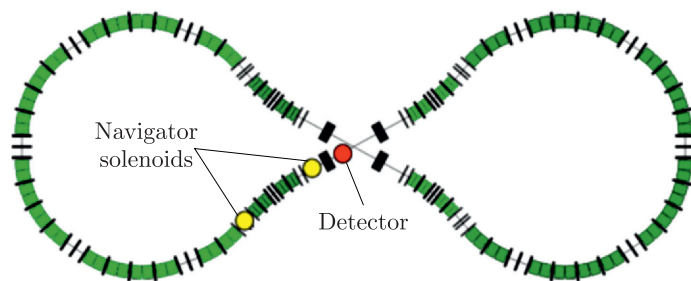


Рис. 3. Инжектор формы цифры 8 для коллайдера NICA

универсального SN на основе двух навигаторных соленоидов, которые позволяют получать в любом месте орбиты любое направление спинов любого сорта частиц, в том числе и дейтронов, во всем диапазоне энергий. Появляется возможность инжектировать частицы непосредственно на энергии эксперимента — отпадает необходимость доускорения поляризованных пучков в коллайдерных кольцах. Разработанная схема управления поляризацией протонов и дейтронов на основе слабых соленоидов позволит осуществлять согласование направлений поляризации при перепусках пучка в коллайдерные кольца, а также позволит проводить эксперименты с поляризованными пучками в накопительной моде инжектора.

ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В ST-РЕЖИМЕ

ST-режим открывает уникальные возможности для проведения прецизионных экспериментов с поляризованными пучками в комплексе NICA. Навигаторы, помимо стабилизации любого направления поляризации в детекторе, позволяют организовать систему спин-флипа [9], обеспечивающую многократные перевороты спинов в процессе проведения эксперимента, которая значительно уменьшает систематические ошибки. В процессе адиабатического изменения направления поляризации навигаторы позволяют стабилизировать значение спиновой частоты, избегая тем самым резонансной деполяризации пучка. Кроме того, с помощью навигаторов можно скомпенсировать деполяризирующее влияние ошибок выставки и изготовления магнитных элементов структуры [8]. В результате реальный синхротрон с несовершенством структуры становится эквивалентным синхротрону с идеально отъюстированной магнитной структурой. Системы спин-флипа и компенсации деполяризирующего влияния несовершенства структуры позволяют проводить эксперименты с поляризованными пучками на более высоком уровне точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Режим спиновой прозрачности в коллайдере NICA с двумя соленоидальными змейками и на целых спиновых резонансах позволяет выполнить все необходимые требования для осуществления программы спиновых исследований в детекторе SPD, а именно: получать поперечную и продольную поляризации высокоинтенсивных пучков протонов и дейтронов со степенью поляризации $\sim 80\%$, а также реализовать систему спин-флипа с временем переворота поляризации ~ 1 с.

Возможность проведения пилотного эксперимента по проверке ST-режима для протонов на целых резонансах в нуклотроне в конечном итоге позволит выполнять эксперименты с выведенным пучком протонов с поперечной и продольной поляризацией на дискретных энергиях, идущих с шагом около 0,5 ГэВ.

Исполнение нового инжектора в форме цифры 8 в комплексе NICA позволит ускорять частицы любого сорта (p , d , He-3 и др.) без потери поляризации пучка. Кроме того, в восьмерке автоматически осуществляется ST-режим на любых энергиях без использования соленоидальных змеек, в том числе и для дейтронов, что позволит расширить программу спиновых исследований вне рамок SPD-детектора.

Разрабатываемые в ОИЯИ спиновые навигаторы для управления поляризацией в ST-режиме, которые лежат в основе систем спин-флипа и компенсации ошибок установки и изготовления магнитных элементов коллайдера, в итоге сделают комплекс NICA уникальной площадкой для проведения высокоточных экспериментов с поляризованными пучками.

Финансирование. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 25-72-30005, <https://rscf.ru/project/25-72-30005/>.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Derbenev Ya. S., Kondratenko A. M., Skrinkii A. N.* Dynamics of the Polarization of Particles near Spin Resonances // *Sov. Phys. JETP*. 1971. V. 33. P. 658–664.
2. *Harrison M., Peggs S., Roser T.* The RHIC Accelerator // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2002. V. 52. P. 425–469; <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.nucl.52.050102.090650>.
3. *Ptitsin V., Shatunov Yu. M.* Helical Spin Rotators and Snakes // *Nucl. Instr. Meth. A*. 1997. V. 398, No. 2–3. P. 126–130; [https://doi.org/10.1016/s0168-9002\(97\)00683-9](https://doi.org/10.1016/s0168-9002(97)00683-9).
4. *Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., Kovalenko A., Teryaev O., Shevchenko O., Nagajcev A., Guskov A., Kukhtin V., Topilin N.* Spin Physics Experiments at NICA-SPD with Polarized Proton and Deuteron Beams // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2015. V. 85. P. 02039.
5. *Kovalenko A., Butenko A., Mikhaylov V., Kondratenko M., Kondratenko A., Filatov Y.* Spin Transparency Mode in the NICA Collider with Solenoid Siberian Snakes for Proton and Deuteron Beam // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. V. 938. P. 012025.
6. *Filatov Yu. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Derbenev Ya. S., Morozov V. S.* Transparent Spin Method for Spin Control of Hadron Beams in Colliders // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124. P. 194801; <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.124.194801>.
7. *Filatov Yu., Kondratenko A., Kondratenko M., Derbenev Ya., Morozov V., Butenko A., Syresin E., Tsyplakov E.* Polarization Control in Spin-Transparent Hadron Colliders by Weak-Field Navigators Involving Lattice Enhancement Effect // *Eur. Phys. J. C*. 2021. V. 81.
8. *Filatov Yu., Kondratenko A., Nikolaev N., Senichev Yu., Kondratenko M., Vinogradov S., Tsyplakov E., Chernyshov A., Butenko A., Kostromin S., Ladygin V., Syresin E., Butenko E., Guryleva I., Melnikov A., Aksentyev A.* Compensation of the Effect of the Imperfection of the Nuclotron/JINR Lattice on the Proton Polarization near an Integer Spin Resonance (Brief Review) // *JETP Lett.* 2025. V. 120. P. 779–787.
9. *Filatov Yu., Kondratenko A., Nikolaev N., Senichev Yu., Kondratenko M., Vinogradov S., Tsyplakov E., Butenko A., Kostromin S., Ladygin V., Syresin E., Guryleva I., Melnikov A., Aksentyev A.* Proton-Spin-Flipping System Based on Orbit-Steerer Dipoles in the Nuclotron/JINR Operating at the $\gamma G = 7$ Spin Resonance // *JETP Lett.* 2023. V. 118. P. 387–394.

10. *Filatov Yu., Kovalenko A., Butenko A., Syresin E., Mikhailov V., Shimanskiy S., Kondratenko A., Kondratenko M.* Spin Transparency Mode in the NICA Collider // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. P. 10014.
11. *Filatov Yu., Kondratenko A., Kondratenko M., Vorobyov V., Vinogradov S., Tsyplakov E., Kovalenko A., Butenko A., Derbenev Ya., Morozov V.* Hadron Polarization Control at Integer Spin Resonances in Synchrotrons Using a Spin Navigator // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2021. V. 24. 061001.
12. *Filatov Yu., Kondratenko A., Kondratenko M., Vorobyov V., Vinogradov S., Tsyplakov E., Butenko A., Syresin E., Kostromin S., Derbenev Ya., Morozov V.* Numerical Modeling of a Proton Spin-Flipping System in the Spin Transparency Mode at an Integer Spin Resonance in JINR's Nuclotron // *J. Instrum.* 2021. V. 16. P. P12039.
13. *Filatov Yu., Kondratenko A., Kondratenko M., Tsyplakov E., Butenko A., Kostromin S., Ladygin V., Syresin E., Guryleva I., Melnikov A., Aksentyev A.* Spin Navigator Based on Correcting Dipoles of the JINR Nuclotron // *JETP Lett.* 2022. V. 116. P. 413–419.
14. *Filatov Yu. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Vinogradov S. V., Tsyplakov E. D., Butenko A. V., Kostromin S. A., Ladygin V. P., Syresin E. M., Butenko E. A.* Conserving Polarization of Protons in the Nuclotron/JINR up to 3.5 GeV/c Using Correction Dipoles and a Weak Solenoid // *Phys. Part. Nucl.* 2024. V. 55, No. 4. P. 731–735; <https://doi.org/10.1134/S1063779624700084>.
15. *Kurilkin P., Ladygin V., Uesaka T., Suda K., Gurchin Yu., Isupov A., Itoh K., Janek M., Karachuk J. T., Kawabata T., Khrenov A., Kiselev A., Kizka V., Kliman J., Krasnov V., Livanov A., Maeda Y., Malakhov A., Matousek V., Morhach M., Reznikov S., Sakaguchi S., Sakai H., Sasamoto Y., Sekiguchi K., Turzo I., Vasiliev T.* The 270 MeV Deuteron Beam Polarimeter at the Nuclotron Internal Target Station // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2011. V. 642, No. 1. P. 45–51; <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900211006966>.
16. *Terekhin A. A., Volkov I. S., Gurchin Yu. V., Isupov A. Yu., Ladygin V. P., Reznikov S. G., Tishevsky A. V., Khrenov A. N., Janek M.* Proton Polarimeter at the Internal Target Station of the Nuclotron at the Joint Institute for Nuclear Research // *Phys. Part. Nucl.* 2023. V. 54, No. 4. P. 634–639; <https://doi.org/10.1134/S1063779623040317>.
17. *Azhgirey L., Ladygin V., Lehar F., Prokofiev A., Stoletov G., Zhdanov A., Zhmyrov V.* Intermediate-Energy Polarimeter for the Measurement of the Deuteron and Proton Beam Polarization at the JINR Synchrotron // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 497. P. 340–349.
18. *Derbenev Ya., Lin F., Morozov V., Zhang Y., Kondratenko A., Kondratenko M.* Baseline Scheme for Polarization Preservation and Control in the MEIC Ion Complex // *Proc. IPAC'15.* 2015. P. 2301–2303.
19. *Khodzhbagiyani H. G., Akishin P. G., Butenko A. V., Bychkov A. V., Kuznetsov G. L., Novikov M. S., Sergeeva E. V., Trubnikov G. V., Fischer E. S., Shemchuk A. V.* Development of Superconducting Accelerator Magnets at JINR // *Natural Sci. Rev.* 2024. V. 1, No. 1; <https://nsr-jinr.ru/article/view/33>; doi: 10.54546/NaturalSciRev.100106.
20. *Syresin E., Butenko A., Zenkevich P., Kozlov O., Kolokolchikov S., Kostromin S., Meshkov I., Mityanina N., Senichev Yu., Sidorin A., Trubnikov G.* Formation of Polarized Proton Beams in the NICA Collider-Accelerator Complex // *Phys. Part. Nucl.* 2021. V. 52. P. 997–1017.
21. *Filatov Yu. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Tsyplakov E. D., Butenko A. V., Ladygin V. P., Lebedev V. A., Syresin E. M., Butenko E. A.* Figure-8 Synchrotron for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Accelerator Complex // *Natural Sci. Rev.* 2025. V. 2. 100502; <https://doi.org/10.54546/NaturalSciRev.100502>.