

СИБИРСКИЕ ЗМЕЙКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРОТОНОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA ОИЯИ

*Е. Д. Цыплаков^{а,1}, Ю. Н. Филатов^{а,2}, А. М. Кондратенко^{а,б},
М. А. Кондратенко^{а,б}, А. В. Бутенко^в, В. П. Ладыгин^в, В. А. Лебедев^в,
Е. М. Сыресин^в, Е. А. Бутенко^{а,в}*

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

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

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

Предложены сибирские змейки на спиральных и дипольных магнитах, позволяющие сохранять поляризацию протонов при ускорении в коллайдере NICA и осуществлять контроль направления поляризации во время проведения эксперимента во всем диапазоне энергий. В отличие от соленоидальной змейки, интеграл поля которой растет пропорционально импульсу, в змейке на поперечных полях интеграл поля практически не изменяется с ростом энергии. Достоинством предложенных змеек является их компактность и приемлемые отклонения замкнутой орбиты на низких энергиях. Приведены результаты численного моделирования спиновой динамики при ускорении протонов до 13,5 ГэВ в ускорительном комплексе NICA.

Siberian snakes based on helix and dipole magnets have been proposed to preserve proton polarization during acceleration in the NICA collider and to control the polarization direction throughout the entire energy range of the experiment. Unlike a solenoid snake, whose field integral increases proportionally to momentum, the field integral in transverse-field snakes remains practically unchanged as energy increases. The advantages of the proposed snakes include their compactness and acceptable closed-orbit deviations at low energies. The results of numerical simulations of spin dynamics during proton acceleration up to 13.5 GeV in the NICA accelerator complex are presented.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

СОХРАНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

Для выполнения программы спиновых исследований в комплексе NICA (ОИЯИ, Дубна) необходимо обеспечить в детекторах SPD и MPD поперечную и продольную поляризации высокоинтенсивных пучков протонов и дейтронов со светимостью $10^{30}–10^{32}$ см⁻² · с⁻¹ и степенью поляризации $\sim 80\%$, а также реализовать систему спин-флипа со временем переворота поляризации ~ 1 с [1–4].

¹E-mail: tsyplakov.ed@phystech.edu

²E-mail: filatov.iun@mipt.ru

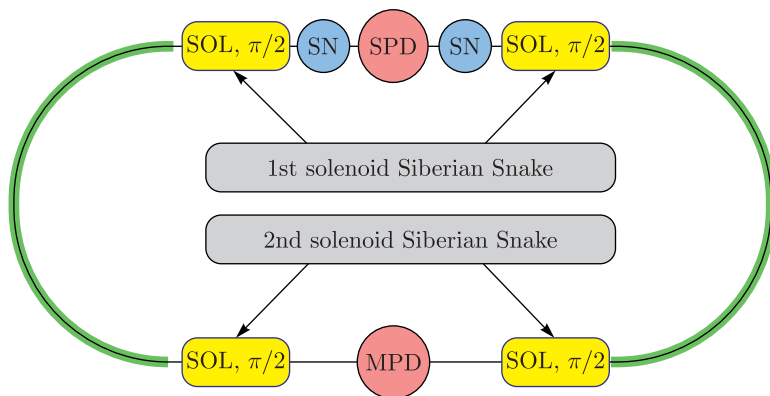


Рис. 1. Размещение соленоидальных змеек в режиме спиновой прозрачности

Таким образом, в коллайдере NICA помимо сохранения поляризации в процессе ускорения пучка до 13,5 ГэВ/с необходимо обеспечить управление ориентацией спинов. Для этого планируется использовать режим спиновой прозрачности, который обеспечивается двумя соленоидальными змейками, расположенными в противоположных промежутках коллайдера NICA (рис. 1) [5, 6]. Каждая змейка разбита на две 50%-е змейки, симметрично расположенные вокруг детекторов SPD и MPD.

Змейки компенсируют за оборот частицы действие на спин арочных диполей, и любое направление спина повторяется через оборот частицы. Становится возможным управлять поляризацией частиц с помощью спиновых навигаторов (SN) — специальных магнитных вставок на основе малых магнитных полей [7]. Змейки стабилизируют спиновую частоту, равную нулю для любой энергии, и исключают резонансную деполяризацию при ускорении пучка в коллайдере. Спиновый навигатор обеспечивает требуемое направление поляризации и постоянный сдвиг спиновой частоты от нулевого значения для того, чтобы подавить деполяризующее влияние несовершенства структуры, а также влияние бетатронных и синхротронных колебаний пучка. Спиновые навигаторы позволяют не только стабилизировать требуемое направление поляризации в любом месте орбиты, но и изменять направление спинов в процессе проведения эксперимента. В частности, можно обеспечивать многократные перевороты спинов (спин-флипы) для уменьшения систематических ошибок эксперимента [8, 9].

Соленоидальные змейки эффективны для использования на низких энергиях. Достоинством соленоидов является то, что они не искажают равновесную орбиту. Однако интеграл продольного поля растет пропорционально импульсу, что ограничивает их применение на больших энергиях. Требуемые интегралы поля для 50%-й змейки при максимальном импульсе 13,5 ГэВ/с составляют 25 Тл·м для протонов и 80 Тл·м для дейтронов. При использовании соленоидов с максимальным полем 5 Тл длина одной 50%-й змейки составит ≈ 5 м для протонов и ≈ 16 м для дейтронов.

Таким образом, основным ограничивающим фактором применения соленоидальных змеек на высоких энергиях является недостаток свободного места для размещения соленоидов в коллайдере. Если для дейтронов из-за малого значения G-фактора ST-режим на соленоидальных змейках является единственной альтернативой для контроля направления спинов, то для протонов разработка компактных змеек на попе-

речных полях является актуальной задачей для коллайдера NICA. Реальной альтернативой для управления поляризацией любого сорта частиц, в том числе и дейтронов, во всем диапазоне энергий коллайдера является конфигурация кольца формы цифры 8 вместо рейстрекка с двумя змейками [10, 11].

ЗМЕЙКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ ПОЛЯХ

В области высоких энергий для конструирования сибирских змеек предпочтительнее использовать поперечные поля, интеграл поля которых практически не зависит от энергии [11]. Ось змейки \mathbf{m} , вокруг которой спины частиц поворачиваются на 180° , должна лежать в плоскости ускорителя и будет определяться ее поперечными полями. Нижняя граница по энергии для змеек на поперечных полях связана с апертурными ограничениями из-за искажения замкнутой орбиты.

Для поворота спина протона на 180° диполем в релятивистском пределе требуется интеграл поля, равный

$$(B_{\perp}L)_{\text{proton}} = 5,5 \text{ Тл} \cdot \text{м}, \quad (1)$$

$$(B_{\perp}L)_{\text{deuteron}} = 140 \text{ Тл} \cdot \text{м}. \quad (2)$$

Отметим, что для дейтронов из-за малого значения G-фактора нереально использовать поперечные поля для змеек. Кроме воздействия на спин, поперечное поле отклоняет замкнутую орбиту, что ведет к увеличению общего интеграла поля змейки, величина которого может варьироваться для протонов в пределах от 16 до 30 Тл·м. Значение общего интеграла поля змейки зависит от максимального отклонения равновесной орбиты на энергии инжекции пучка и от направления оси змейки \mathbf{m} . С ростом энергии отклонение замкнутой орбиты уменьшается обратно пропорционально импульсу частиц. Условие восстановления замкнутой орбиты на выходе змейки требует использования поперечных полей с изменяющимся направлением.

В действующем коллайдере RHIC (BNL, США) [12] для сохранения поляризации протонов в диапазоне энергий до 250 ГэВ используются две змейки, вращающие спины вокруг осей, составляющих с направлением скорости пучка углы $\pm 45^\circ$ [13].

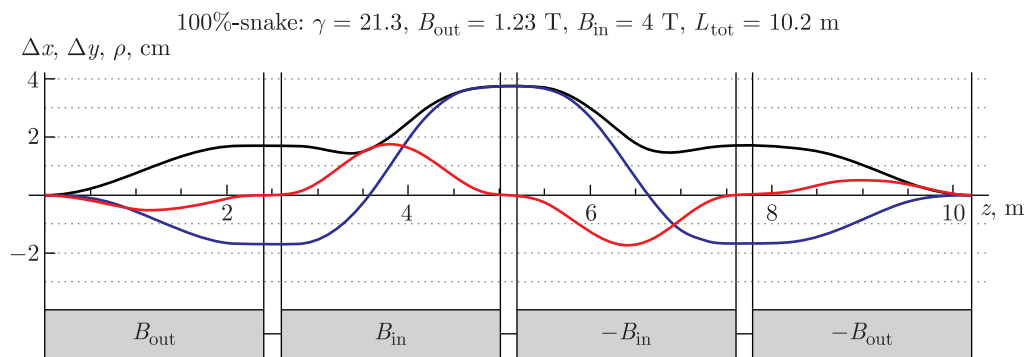


Рис. 2. Смещение орбиты внутри спиральной змейки в коллайдере RHIC: Δx , Δy — радиальное и вертикальное отклонения орбиты, $\rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$

Каждая змейка состоит из четырех спиральных магнитов, суммарный интеграл поля змейки равен ≈ 25 Тл·м, а искажение замкнутой орбиты составляет ≈ 3 см на 20 ГэВ (рис. 2).

Змейки на четырех спиральных магнитах, используемые в RHIC, не подходят для коллайдера NICA из-за апертурных ограничений, отклонение орбиты внутри змейки в котором составило бы ~ 20 см на энергии 3 ГэВ.

При конструировании змеек в коллайдерах в диапазоне энергий от 3 ГэВ и выше эффективно использовать многооборотное спиральное поле. При целом числе оборотов M в спиральном магните общий интеграл поперечного поля для змейки в релятивистском пределе равен [14, 15]:

$$(B_{\text{hlx}}L)_{\text{proton}} = 5,5\sqrt{1 + 4M} \text{ Тл} \cdot \text{м}, \quad (3)$$

а ось \mathbf{m} направлена практически вдоль скорости.

При целом числе оборотов поперечного поля в спиральном магните направление скорости восстанавливается автоматически, а смещение орбиты может быть скомпенсировано с помощью пары диполей, расположенных вокруг спирального магнита (рис. 3). Использование многооборотных спиральных магнитов позволяет значительно уменьшить максимальное отклонение орбиты внутри змейки, которое уменьшается с числом оборотов спирального поля M . Так, в работе [15] был предложен четырехоборотный спиральный магнит для уменьшения искажения замкнутой орбиты до уровня 1,5 см в змейке при ускорении протонов от 9 до 120 ГэВ в MI (Main Injector, Fermilab, США).

На рис. 4 представлена схема 50%-й змейки длиной 3,3 м на основе двухоборотного спирального магнита с величиной поля 4 Тл, которую можно использовать вместо соленоидальной 50%-й змейки во всем диапазоне импульсов коллайдера NICA. Максимальное отклонение на энергии 3,3 ГэВ составляет 3,7 см. Диполи с противоположным направлением вертикального поля, расположенные по краям спирального магнита, восстанавливают орбиту.

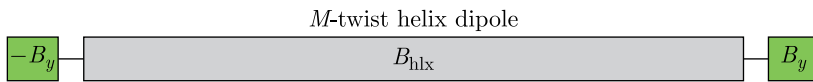


Рис. 3. Схема многооборотной спиральной змейки

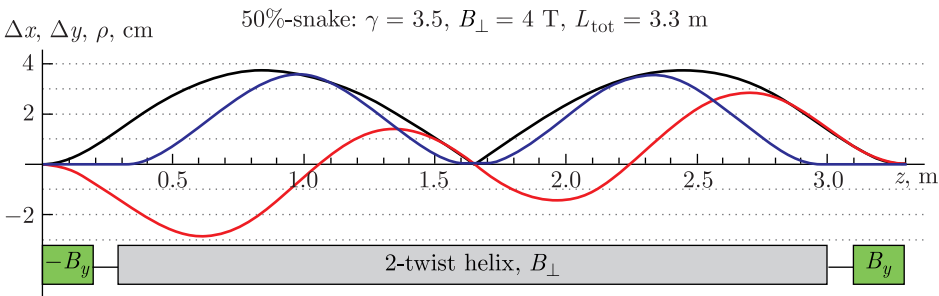


Рис. 4. Смещение орбиты внутри двухоборотной спиральной 50%-й змейки

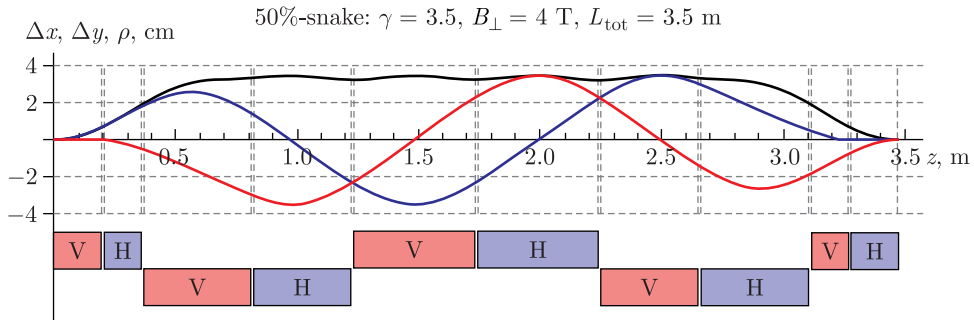


Рис. 5. Искажение орбиты в 50%-й змейке на дипольных магнитах

Вместо спиральных магнитов, которые представляют собой сложные высокотехнологичные устройства, для конструкции змеек можно использовать сверхпроводящие дипольные магниты.

На рис. 5 приведена схема дипольной 50%-й змейки, параметры которой аналогичны многооборотной спиральной змейке. В диполях, помеченных «V» и «H», поле направлено вдоль радиального и вертикального направлений соответственно. При использовании диполей с полем 4 Тл общая длина 50%-й змейки составит 3,5 м, а максимальное отклонение на энергии 3,3 ГэВ не превысит 3,7 см.

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСКОРЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПРОТОНОВ В ST-РЕЖИМЕ КОЛЛАЙДЕРА NICA

Приведем результаты численного моделирования спиновой динамики, выполненные с помощью спин-трекинг кода Zgoubi [16], при ускорении протонов в ST-режиме коллайдера NICA с включенными змейками на дипольных магнитах в диапазоне импульсов от 6,7 до 13,5 ГэВ/с, схема размещения которых представлена на рис. 6.

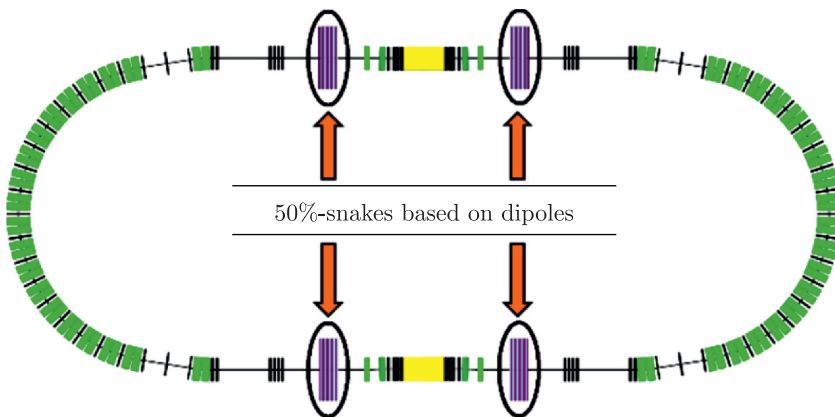


Рис. 6. Схема размещения 50%-х змеек на дипольных магнитах для ST-режима коллайдера NICA

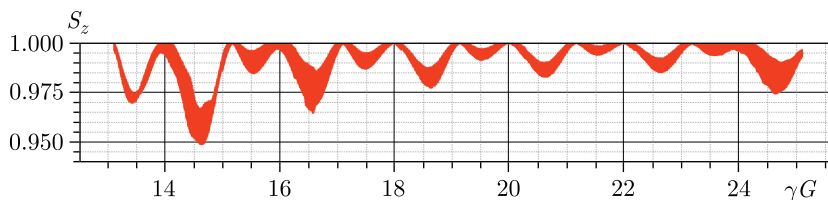


Рис. 7. Продольная компонента спина протона в процессе ускорения в коллайдере NICA с сибирскими змейками на базе дипольных магнитов

Диапазон импульсов выбран, чтобы избежать пересечение критической энергии в существующей структуре коллайдера NICA.

Проблема пересечения критической энергии в коллайдере NICA анализировалась в работах [17, 18].

На рис. 7 представлена динамика спина в процессе ускорения протона в ST-режиме коллайдера NICA. Ускорение производилось, начиная с критической энергии.

Продольное направление поляризации, вдоль которого изначально был направлен спин протона, стабилизировалось слабым соленоидом, размещенным в прямолинейном промежутке с детектором SPD. Сила навигатора ν_{nav} была выбрана $5 \cdot 10^{-2}$ (угол поворота поперечной компоненты спина навигаторным соленоидом равен $2\pi\nu_{\text{nav}}$). Горизонтальный и вертикальный нормализованные эмиттансы бетатронных колебаний, используемые в процессе моделирования, были равны $\varepsilon_{\text{norm}} = 4,5\pi$ мм · мрад. В процессе ускорения поле в дипольных магнитах было зафиксировано.

Результаты численного моделирования показывают, что дипольные змейки эффективно подавляют резонансную деполяризацию протонов во всем диапазоне энергий коллайдера NICA. Изменение продольной компоненты спина в процессе ускорения протонов не превосходит 5%.

Заметим, что в змейках с поперечными полями в процессе ускорения будет меняться отклонение орбиты и, как следствие, длина пути пучка в синхротроне. Поэтому при ускорении пучка необходимо предусмотреть согласование частоты обращения частиц и частоты ускоряющего ВЧ-поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные змейки на дипольных полях оптимальны для частиц с большим G -фактором (p , ${}^3\text{He}$ и др.). Змейка вращает спины вокруг оси, направленной вдоль скорости, как и в случае соленоидальной змейки. Такие компактные дипольные змейки с постоянным интегралом поля являются эффективной заменой соленоидальным змейкам на высоких энергиях. Они решают проблему сохранения поляризации в ускорителях нуклотрон (ОИЯИ, до 13,5 ГэВ) и У-70 (ИФВЭ, до 70 ГэВ). Применение нескольких пар дипольных змеек решает проблему ускорения и управления поляризацией протонов/гелий-3 на сверхвысоких энергиях в ЛНС (ЦЕРН).

Основные ограничения при использовании дипольных змеек на низких энергиях связаны с большими искажениями замкнутой орбиты и сдвигами бетатронных частот. Суммарный интеграл поперечного поля змейки практически не зависит от энергии при фиксированном угле поворота спинов в ней.

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. 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.
2. Abramov V., Aleshko A., Baskov V., Boos E., Bunichev V., Dalkarov O., El-Kholy R., Galoyan A., Guskov A., Kim V. Possible Studies at the First Stage of the NICA Collider Operation with Polarized and Unpolarized Proton and Deuteron Beams // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 6. P. 1044–1119.
3. Abazov V., Abramov V., Afanasyev L. et al. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // Natural Sci. Rev. 2024. V. 1. P. 1; <https://nsr-jinr.ru/index.php/nsr/article/view/35>.
4. Abraamyan K., Afanasiev S., Alfeev V., Anfimov N., Arkhipkin D., Aslanyan P., Babkin V., Baznat M., Bazylev S., Blaschke D., Bliznyuk D., Bogoslovsky D., Boguslavski I., Boos E., Borisov V., Borshchov V., Bugaev K., Butenko A., Chalyshev V., Zulkarneeva Yu. The MPD Detector at the NICA Heavy-Ion Collider at JINR // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 628. P. 99–102.
5. Kovalenko A., Butenko A., Mikhaylov V., Kondratenko M., Kondratenko A., Filatov Yu. 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., 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.
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. 986.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Derbenev Ya., Filatov Yu., Kondratenko A., Kondratenko M., Morozov V. Siberian Snakes, Figure-8 and Spin Transparency Techniques for High Precision Experiments with Polarized Hadron Beams in Colliders // Symmetry. 2021. V. 13. P. 398; 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>.
12. *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>.
 13. *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).
 14. *Derbenev Ya. S., Kondratenko A.* On the Possibilities to Obtain High Energy Polarized Particles in Accelerators and Storage Rings // *AIP Conf. Proc.* 1979. V. 51, No. 1. P. 292–306.
 15. *Antoulinakis F., Chen Y., Dutton A., Fuente E., Hauptert S., Ljungman E., Myers P., Thompson J., Tai A., Aidala C., Courant E., Krisch A., Leonova M., Lorenzon W., Raymond R., Sivers D., Wong V., Yang T., Derbenev Ya., Kondratenko A.* 4-Twist Helix Snake to Maintain Polarization in Multi-GeV Proton Rings // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2017. V. 20. 091003.
 16. *Méot F.* The Ray-Tracing Code Zgoubi // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1999. V. 427. P. 353–356; <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119781558>.
 17. *Senichev Yu.* A “Resonant” Lattice for a Synchrotron with a Low or Negative Momentum Compaction Factor // *JETP.* 2007. V. 105, No. 5. P. 988–997.
 18. *Kolokolchikov S., Aksentyev A., Melnikov A., Senichev Yu.* Transition Energy Crossing in NICA Collider of Polarized Proton Beam in Harmonic and Barrier RF // *Phys. At. Nucl.* 2025. V. 87. P. 1449–1454.

Получено 2 ноября 2025 г.