

## УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.665

### УПРАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ В НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ, РАБОТАЮЩЕМ В СПИН-ПРОЗРАЧНОМ РЕЖИМЕ

© 2022 г. А. Е. Аксентьев<sup>а</sup>, \*, А. А. Мельников<sup>а</sup>, Ю. В. Сеничев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

\*E-mail: alexaksentyev@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 09.07.2021 г.

Принята к публикации 19.07.2021 г.

Исследована принципиальная возможность управления ориентацией оси поляризации пучка в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме, посредством использования спин-навигаторных соленоидов. В частности, рассмотрена спин-динамика пучка дейтронов в данной структуре и исследованы свойства структуры с точки зрения деполяризации пучка по механизму спин-декогеренции.

**Ключевые слова:** накопительное кольцо, спин-прозрачный режим, поляризованный пучок, спин-декогеренция, спин-навигаторы

**DOI:** 10.56304/S2079562922010018

#### ВВЕДЕНИЕ

В предполагаемом методе управления поляризацией пучка в спин-прозрачном (“Spin Transparency,” далее ST-) режиме частота прецессии спина пучка устанавливается близкой к нулю (в системе центра масс) за счет использования “сибирских змеек.” Поскольку в ST-режиме частицы находятся вблизи целочисленного резонанса, для стабилизации требуемого направления поляризации в детекторе используются соленоиды-“навигаторы” со слабыми полями (рис. 1), вращающие спин-векторы частиц пучка на малые углы. [1] Для того, чтобы задать частоту спин-прецессии и направление оси поляризации пучка в точке MPD-детектора используются две пары ( $K_{z1}$ ,  $K_{z2}$ ) соленоидов-навигаторов, поворачивающие спин-вектор референсной частицы вокруг оптической оси ( $z$ ) на углы, соответственно:  $\varphi_{z1} = \pi v \cos \Psi_{\text{MPD}}$  и  $\varphi_{z2} = \pi v \sin \Psi_{\text{MPD}} / \sin \varphi_x$ , где  $v$  — задаваемая (нормализованная) частота спин-прецессии,  $\Psi_{\text{MPD}}$  — зада-

ваемый угол наклона оси поляризации в детекторе в плоскости  $y-z$  (ось  $y$  коллинеарна ведущему полю),  $\varphi_x$  — угол поворота импульса референсной частицы в магнитном диполе  $K_x$  (не является существенно необходимой частью системы управления; особенность данного кольца).

Необходимо отметить, что одновременное выполнение условия нулевой частоты спин-прецессии для всех частиц в сгустке возможно лишь с некоторой точностью, в виду конечности величины фазового объема сгустка. В результате различий в спин-орбитальном движении частиц сгустка может возникнуть дисперсия направлений их спин-векторов (спин-декогеренция), и как следствие — деполяризация пучка.

Для сохранения поляризации пучка необходимо создать условия, при которых распределение направления оси спин-прецессии частицы в фазовом объеме будет максимально однородным. Целью данной работы было изучение спин-орбиталь-

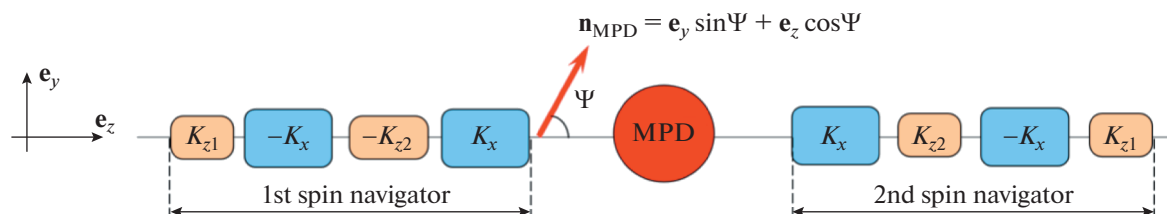
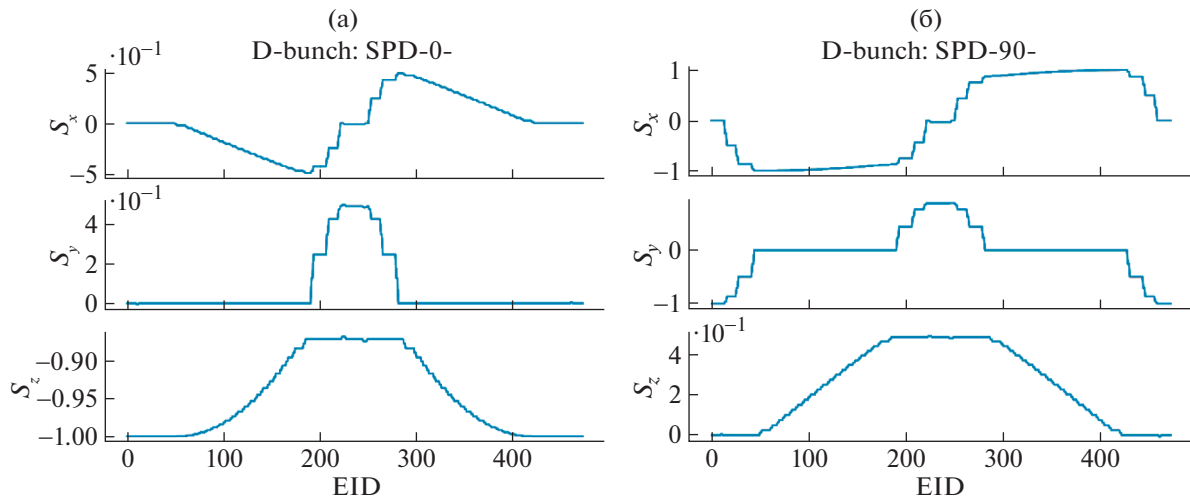


Рис. 1. Схема расположения “навигаторных” соленоидов в промежутке MPD-детектора.



**Рис. 2.** Изменение ориентации спин-вектора референсной частицы. (а) Случай продольно-ориентированной оси поляризации в точке инжекции. (б) Случай вертикально-ориентированной оси поляризации в точке инжекции.

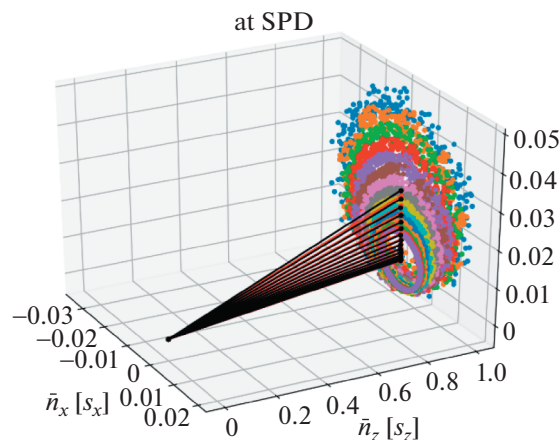
ного движения частиц в сгустке вблизи нулевого спинового резонанса и определение возможности управления направлением оси поляризации пучка в заданной точке ускорителя посредством спин-навигаторных соленоидов.

### ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ОРБИТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ

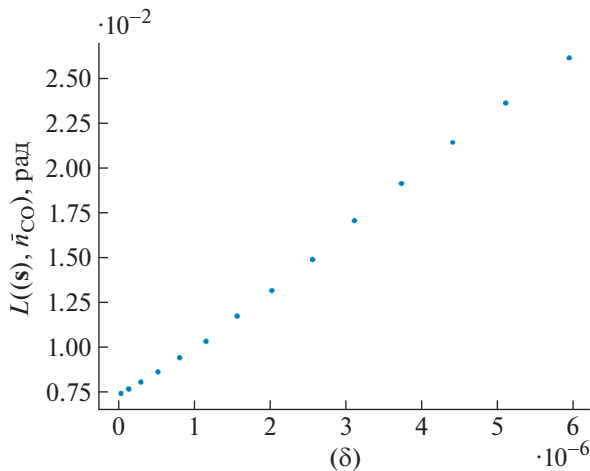
Исследование спин-орбитальной динамики пучка проводилось посредством численного моделирования в среде COSY INFINITY. [2] Был проведен трекинг трех сгустков (обозначаемых  $X$ ,  $Y$ ,  $D$ ) по 300 частиц через модель оптической структуры кольца в четырех основных случаях: (1) направление оси поляризации в точке инжекции (SPD-детектор) вертикально вверх (SPD-90+), (2) вертикально вниз (SPD-90-), (3) вдоль дви-

жения пучка (SPD-0+), (4) против движения пучка (SPD-0-). Все частицы сгустка при инжекции имели одинаковое начальное направление спин-вектора, сонаправленное с осью поляризации (таким образом, начальная поляризация сгустка равна 1). Сгустки  $X$ ,  $Y$ ,  $D$  различаются начальным распределением частиц в фазовом пространстве:  $\pm 2$  мм по координате  $x$ ,  $y$ , и  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  по приведенной кинетической энергии. (Все три распределения Гауссовские.) Изменение ориентации оси поляризации осуществляется посредством создания асимметрии в распределении магнитного поля, вводимой спин-навигаторными соленоидными, чем и обусловлено отдельное рассмотрение случаев (1) и (2) (соответственно, (3), (4)).

Трекинг проводился на протяжении  $3 \cdot 10^6$  оборотов, что соответствует приблизительно 10.5 с



**Рис. 3.** Равновесные значения осей конусов спин-прецессии для разных частиц сгустка. Цветом обозначены описываемые спин-векторами частиц окружности.

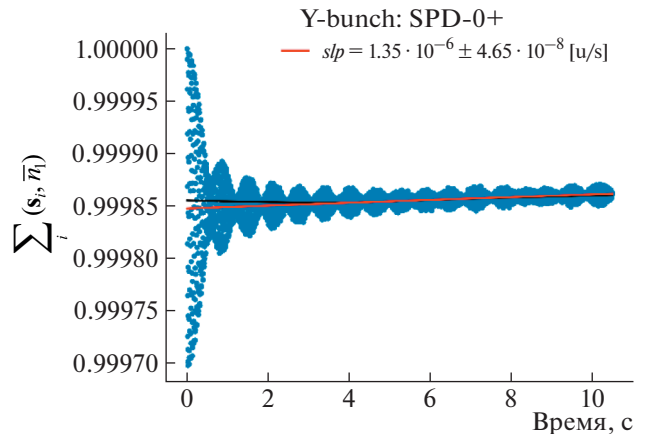


**Рис. 4.** Угол отклонения оси конуса прецессии спин-вектора частицы от референсного значения в зависимости от равновесной энергии частицы.

реального времени нахождения пучка в ускорителе. Также был проведен поэлементный трекинг пучка за один оборот, с целью наблюдения функционирования спин-транспарентного режима (примеры результатов представлены на рис. 2).

В отношении спин-динамики пучка в структуре был сделан следующий основной вывод: прецессия спин-вектора каждой из частиц пучка происходит по поверхности конуса (рис. 3), угол раствора которого (равно как и направление его оси) зависит от эффективного значения кинетической энергии частицы (рис. 4).

Как раскрытие угла раствора конуса, по поверхности которого происходит прецессия спин-вектора частицы, так и отклонение оси этого конуса от оси конуса, соответствующего референсной частице, оказывают негативное влияние на поляризо-

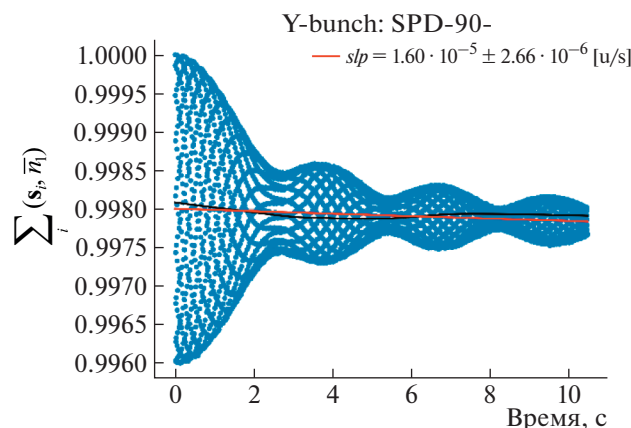


**Рис. 5.** Зависимость поляризации пучка от времени для случая продольной ориентации оси поляризации в точке инжекции. На легенде указана скорость спада поляризации, полученная путем линейной регрессии методом наименьших квадратов.

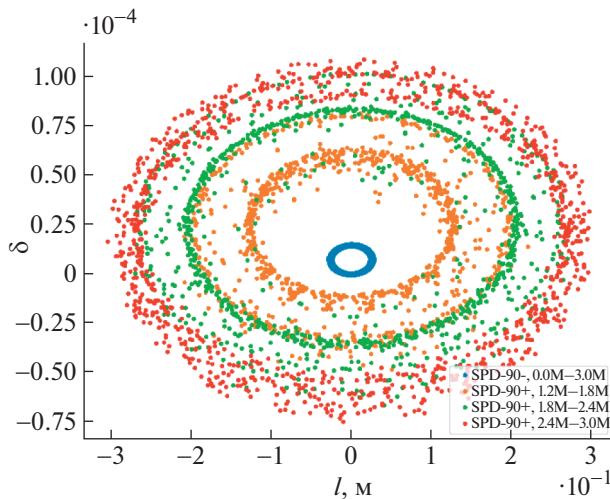
ванность пучка; таким образом, энергетическая дисперсия сгустка, являясь причиной обоих феноменов, является также причиной деполаризации пучка по механизму спин-декогеренции. Помимо этой причины, обусловленной спиновой динамикой частиц, рассмотренному методу управления поляризацией присущи причины деполаризации, связанные с орбитальной динамикой пучка.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ДЕКОГЕРЕНЦИИ

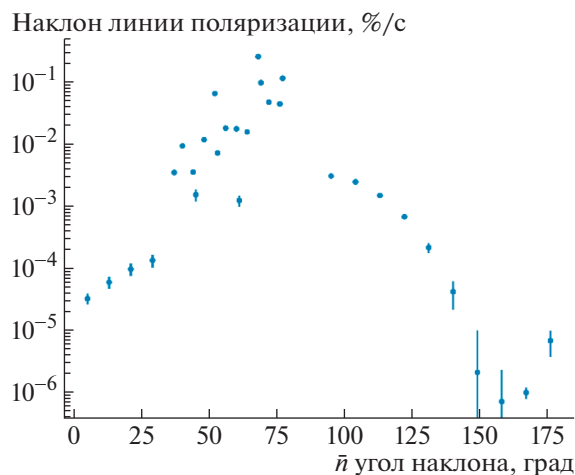
Под спин-декогеренцией понимается систематический рост дисперсии направлений спин-векторов частиц пучка. Следствием спин-декогеренции является деполаризация пучка, и уменьшение полезной длительности измерительного цикла.



**Рис. 6.** То же самое для случая вертикального направления (созданного “спин-навигаторами”) оси поляризации в точке инжекции. Представленные данные получены для сгустка, совершающего бетатронные колебания в вертикальной плоскости (“Y-bunch”); для “X-bunch” зависимости аналогичны.

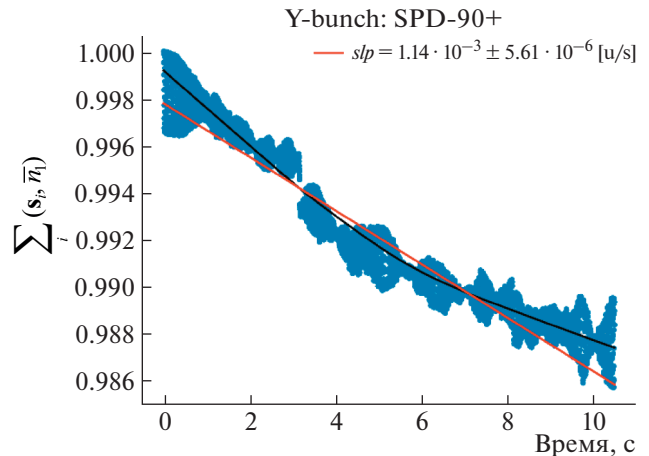


**Рис. 7.** Сравнение продольных фазовых эллипсов двух рассмотренных случаев: SPD-90- (эллипс синего цвета) и SPD-90+. В случае SPD-90+ данные были разделены на три диапазона, что позволяет видеть систематическое разрастание фазового объема пучка.

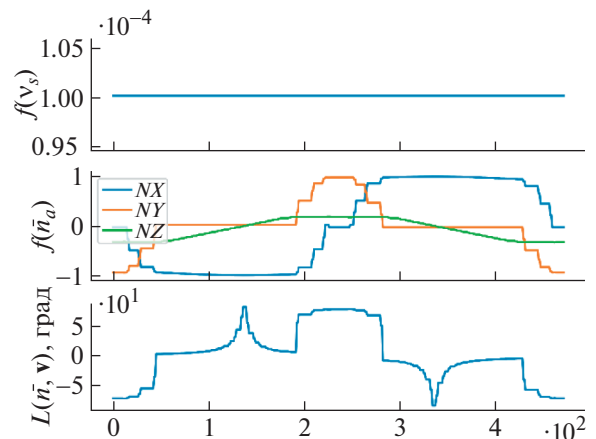


**Рис. 9.** Зависимость скорости деполяризации (полученной посредством линейной регрессии методом наименьших квадратов), от установленного в точке инжекции (посредством “спин-навигаторов”) направления оси поляризации пучка.

В исследовании, поляризация определялась как сумма проекций на ось поляризации спин-векторов частиц, нормированная на их число в сгустке:  $\mathbf{P} = N^{-1} \sum_j (\mathbf{s}_j, \mathbf{n})$ . Нужно отметить, что в зависимости от требований эксперимента, под поляризацией пучка можно понимать сумму проекций на ось, отличную от оси поляризации; в случае, когда эта ось ортогональна оси поляризации, мы имеем эксперимент с нулевым математическим



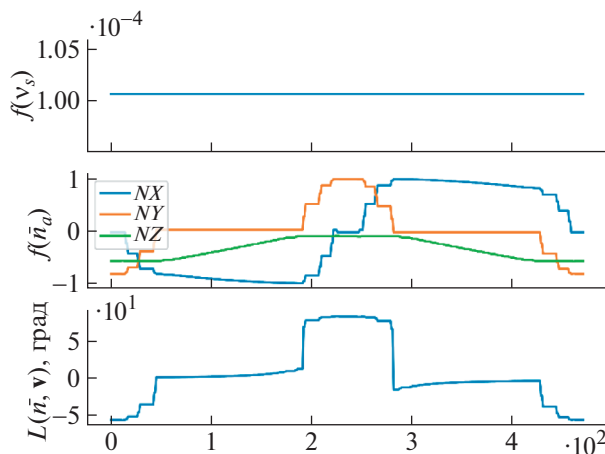
**Рис. 8.** Зависимость поляризации пучка от времени в нестабильном случае. Линейная экстраполяция данных мотивирует ожидание полной деполяризации пучка в течение 1000 с.



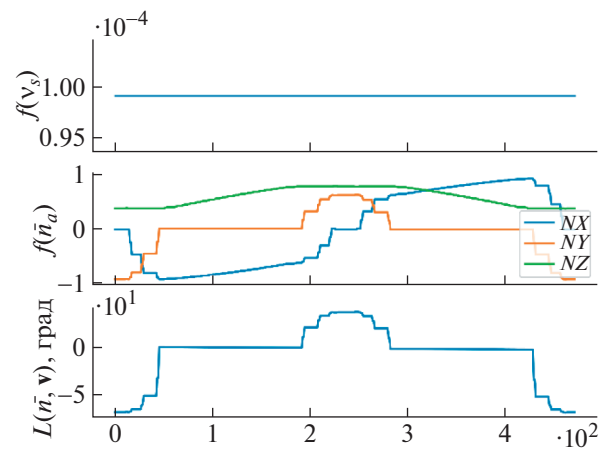
**Рис. 10.** Случай наибольшей скорости деполяризации (соответствует углу наклона оси поляризации в точке инжекции 72°). На нижней панели изображено распределение угла наклона оси поляризации вдоль оптической оси ускорителя (по горизонтальной оси отложен порядковый номер элемента в кольце). Как можно видеть, распределение крайне асимметрично относительно середины ускорителя (MPD-детектор).

ожиданием поляризации, и соответственно — наибольшую скорость деполяризации.

Поскольку в рассматриваемом эксперименте участвовали пучки с математическим ожиданием поляризации близким к единице, значительной деполяризации пучка не ожидалось. Тем не менее, в связи с тем, что метод управления направлением оси поляризации основан на создании асимметрии в распределении магнитного поля в



**Рис. 11.** В представленном случае асимметрия распределения угла наклона оси поляризации меньше (в точке инжекции он составляет  $56^\circ$ ); также меньше и скорость деполяризации.



**Рис. 12.** Случай стабильного фазового движения. Распределение угла наклона симметрично (в точке инжекции —  $113^\circ$ ).

ускорителе, имела место возможность дестабилизации орбитального движения частиц, которая действительно была обнаружена.

Примеры полученных результатов представлены на рис. 5 и 6. В большинстве рассмотренных случаев, обнаруженная деполяризация не имела практически-значимых величин; однако, в процессе исследования найден случай неустойчивого фазового движения пучка (рис. 7), при котором скорость деполяризации принимает значимую величину (рис. 8).

### НЕСТАБИЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ

Предположительно, наблюдаемая на рис. 7 неустойчивость фазового движения обусловлена асимметричностью распределения магнитного поля в кольце, созданной соответствующими настройками спин-навигаторных соленоидов. В пользу этого предположения говорят результаты исследования, представленные на рис. 9–12.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждена принципиальная возможность управления направлением оси поляризации пучка в накопительном кольце, работающем в спин-прозрачном режиме, посредством использования спин-навигаторных соленоидов. Рассмотрены механизмы деполяризации пучка, в том числе — специфические исследуемому методу управления поляризацией.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Кондратенко А.М., Кондратенко М.А., Филатов Ю.Н., Коваленко А.Д., Бутенко А.В., Михайлов В.А., Сыресин Е.М., Шиманский С.С. Поляризованные ионы в комплексе NICA. Обоснование проекта. 2018. Дубна: ОИЯИ.
2. Berz M. // in “Nonlinear Problems in Future Particle Accelerators”. 1991. Singapore: World Scientific. P. 288–296. <https://www.bmtdynamics.org/cgi-bin/display.pl?name=caprimap>.

## Manipulation of Beam Polarization Orientation in a Spin-Transparent Storage Ring

A. E. Aksentev<sup>1</sup>\*, A. A. Melnikov<sup>1</sup>, and Y. V. Senichev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Nuclear Research of Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia

\*e-mail: alexaksentyev@gmail.com

Received June 28, 2021; revised July 9, 2021; accepted July 19, 2021

**Abstract**—The feasibility of manipulating the beam polarization axis in a spin-transparent storage ring by means of spin-navigating solenoids has been investigated. In particular, deuteron beam spin dynamics in the given lattice and the lattice's properties with respect to beam depolarization via spin decoherence have been considered.

**Keywords:** storage ring, spin-transparent mode, polarized beam, spin-decoherence, spin-navigators