

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УМЕНЬШЕНИЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ ПУЧКА ПРОТОНОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЧ СПИН-РОТАТОРА

© 2025 г. А. А. Мельников^{a, b, *}, Н. Н. Николаев^{b, c},
А. Е. Аксентьев^{a, c}, Ю. В. Сеничев^{a, c}, С. Д. Колокольчиков^{a, c}

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bИнститут теоретической физики им. Л.Д. Ландау, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^cМосковский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*E-mail: alexei.a.melnikov@gmail.com

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 22.06.2023 г.

Принята к публикации 26.06.2023 г.

Исследовалась спин-орбитальная динамика в ускорителе COSY. В численном эксперименте были исследованы основные механизмы спин-декогеренции в области ВЧ спинового резонанса. Была подтверждена аналитическая модель декогеренции спинов в зависимости от номера гармоники поля ВЧ спин-ротатора и среднеквадратичного разброса частиц по импульсам. Также рассматривается вопрос влияния внутренних спиновых резонансов и отстройки от ВЧ резонанса по частоте на эффективность управления поляризацией с помощью ВЧ соленоида.

Ключевые слова: спин-орбитальная динамика, управление поляризацией, ВЧ спиновый резонанс, спин-декогерентность, спиновые резонансы, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562924050312

ВВЕДЕНИЕ

Идея измерения электрического дипольного момента (ЭДМ) частиц на накопительном кольце предполагает большое время спиновой когерентности (SCT) поляризованного пучка. Это время, за которое среднеквадратичный разброс ориентаций спинов частиц в густке составит один радиан. При этом прецессия спин-векторов частиц происходит в плоскости накопителя. Большое SCT необходимо для наблюдения когерентного воздействия на поляризацию, обусловленного ЭДМ. Возможность получения SCT порядка 1000 с для дейтронов была продемонстрирована экспериментально на ускорителе COoler SYnchrotron (COSY) в исследовательском центре г. Юлих в Германии [1]. Для протонов сложнее достичь большого SCT из-за большей величины аномального магнитного момента. Получение SCT протонов порядка 1000 с является ключевым шагом для экспериментов по поиску ЭДМ на COSY и кольце-прототипе для поиска и измерения ЭДМ.

Так как вектор поляризации пучка при инжекции направлен вертикально, а для эксперимента по поиску ЭДМ необходимо исследовать прецессию спина в плоскости накопителя, то необходимо рассмотреть особенности управления поляризацией и перевода ее в плоскость кольца без потерь.

В данной работе представлен анализ различных механизмов спиновой декогеренции в области ВЧ спинового резонанса и предложены методы уменьшения степени деполяризации пучка.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕКОГЕРЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ВЧ СПИНОВОГО РЕЗОНАНСА

Одним из методов управления поляризацией пучка частиц в накопителе является использование ВЧ спин-ротатора. Это устройство с электромагнитным полем, меняющимся по гармоническому закону. Оно настроено на такую частоту, при которой происходит резонансное воздействие на поляризацию пучка.

В частности, на ускорителе COSY в исследовательском центре г. Юлих, Германия, для этого используется ВЧ соленоид. Основной опыт работы на COSY составляет проведение экспериментов с дейтронами, магнитная аномалия последних в 13 раз меньше, чем у протонов: $G_d/G_p \sim 1/13$. Что характеризует эксперименты с протонами как более сложные с точки зрения эффектов декогеренции.

Основные аналитические соотношения для эффектов спин-декогеренции при использова-

нии ВЧ спин-ротатора были получены в [2]. Приведем здесь основополагающие результаты.

В случае статического спин-ротатора величина поляризации в плоскости $S_{\perp}$, полученная из вертикальной поляризации S_y за один оборот, представляется в виде: $S_{\perp} = S_y \cdot \alpha$, где $\alpha = \text{const}$. Принимая во внимание фазу ВЧ поля соленоида и фазу спинового движения, получим для n оборотов:

$$\begin{aligned} S_{\perp}(n) &= S_y \cdot \alpha \sum_{l=1}^n \cos(l\theta_s) \cos(l\theta_f) = \\ &= \frac{1}{2} S_y \cdot \alpha \sum_{l=1}^n \cos(l(\theta_s - \theta_f)) \cos(l(\theta_s + \theta_f)), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\theta_s = 2\pi\gamma G$ — угол поворота спин-вектора частицы с энергией γ за один оборот в накопителе, $\theta_f = 2\pi f_{\text{RF}}/f_{\text{rev}}$ — набег фазы ВЧ поля соленоида с частотой f_{RF} за время оборота по кольцу $T_{\text{rev}} = 1/f_{\text{rev}}$. Резонансное воздействие на поляризацию происходит, когда $\theta_s \pm \theta_f = 2\pi K$, $K \in \mathbb{Z}$ или для значения частоты ВЧ поля спин-ротатора

$$f_{\text{RF}} = (K \pm \gamma G) f_{\text{rev}}, \quad (2)$$

где K — номер гармоники поля.

При наличии ВЧ поля ускоряющего резонатора присутствует осциллирующая часть спин-тьюна $2\pi G\delta\gamma$. Следовательно, для частиц с отклонением по энергии от референсной спиновое движение характеризуется суммарным отклонением по фазе $\Delta(n)$. Тогда (1) запишется в виде:

$$\begin{aligned} S_{\perp}(n) &= S_y \cdot \alpha \sum_{l=1}^n \cos(l\theta_s + \Delta(l)) \cos \times \\ &\times \left(l\theta_f + \frac{f_{\text{RF}}}{\gamma G f_{\text{rev}}} \frac{\eta}{\beta^2} \Delta(l) \right) = \\ &= \frac{1}{2} S_y \cdot \alpha \sum_{l=1}^n \cos(C_{\text{SD}} \Delta(l)). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\eta = \alpha_0 - \gamma^{-2}$ — слип-фактор, α_0 — коэффициент расширения орбит, $\beta = v/c$ — релятивистский бета-фактор. C_{SD} есть фактор спин-декогеренции:

$$C_{\text{SD}} = 1 - \frac{\eta}{\beta^2} \left(1 + \frac{K}{G\gamma} \right). \quad (4)$$

Из соотношения (3) очевидно, что сигнал поляризации в плоскости максимален, когда $C_{\text{SD}} \rightarrow 0$. В этом случае компенсируются эффекты отклонения по фазе при спин-прецессии и движении в ВЧ

поле соленоида. При этом уменьшается влияние декогеренции во время переворота поляризации.

Также можно показать, что SCT в данном процессе можно представить в виде [2]:

$$\tau_{\text{SC}} = (C_{\text{SD}} G \delta)^{-2}, \quad (5)$$

где δ — среднеквадратичный относительный разброс по импульсам в пучке.

2. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Математическое моделирование спин-орбитальной динамики осуществлялось в среде COSY Infinity [3]. При этом проводилась трассировка частиц с помощью однооборотного симплектического отображения, задаваемого структурой ускорителя COSY. Дифференциально-алгебраическое построение отображения позволяет исследовать нелинейную динамику частиц до произвольного порядка отклонения в шестимерном фазовом пространстве.

Действие ВЧ соленоида на каждом обороте с номером n моделировалось как поворот спин-векторов частиц в пучке вокруг продольной оси на угол φ_{rot} :

$$\varphi_{\text{rot}} = \frac{(G+1)BL}{\chi_m} \cos[2\pi f_{\text{RF}}(nT_{\text{rev}} + \Delta t(n)) + \varphi_0]. \quad (6)$$

Здесь BL — интеграл поля в соленоиде, χ_m — магнитная жесткость накопителя, Δt — отклонение по времени прилета в ВЧ соленоид для каждой частицы, φ_0 — начальный сдвиг по фазе.

При этом использовались следующие параметры моделирования, соответствующие эксперименту на COSY: кинетическая энергия $T = 140$ МэВ, частота синхротронных колебаний $f_{\text{syn}} = 330$ Гц, $BL = 0.12$ Тл мм, $K = -1$. Настройки секступолей накопителя соответствуют случаю нулевой вертикальной и горизонтальной хроматичности, а также фактора сжатия орбит: $\xi_{x,y}, \kappa = 0$. В данной конфигурации достигается подавление эффектов декогеренции, связанных с изменением равновесного уровня энергии частицы [4]. При моделировании также использовался преохлажденный пучок, характеризуемый вертикальным эмиттансом $\epsilon_y = 2$ мм · мрад и $\delta = 3 \cdot 10^{-4}$. Для охлажденного пучка $\epsilon_y = 0.5$ мм · мрад и $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$. Считается, что система электронного охлаждения отключается за 10 с до начала переворота поляризации. Это нужно для того, чтобы настроить замкнутую орбиту, не возмущенную магнитами системы охлаждения. Поэтому в начальных данных для моделирования предполагается преохлажденный пучок.

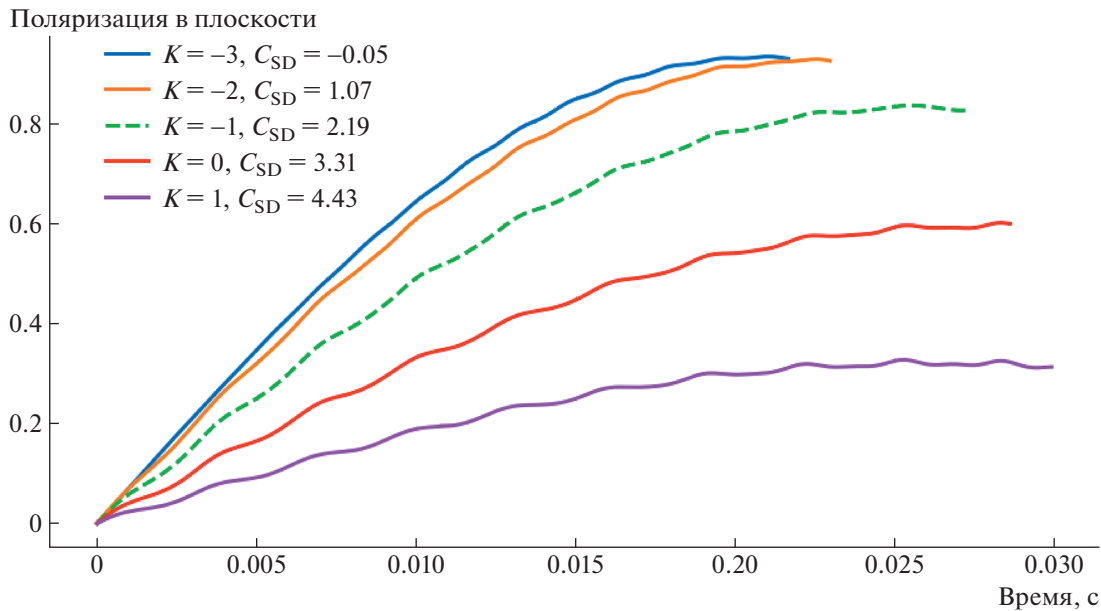


Рис. 1. Эволюция сигнала поляризации в плоскости накопителя от времени при включенном ВЧ соленоиде для различных гармоник поля соленоида K .

Выбор величины кинетической энергии обусловлен тем, что в этом энергетическом диапазоне возможно использование системы электронного охлаждения.

Выбор гармоники поля соленоида

Из уравнения (4) очевидно, что спин-декогеренция определяется выбором гармоники поля ВЧ соленоида K . Данный факт был подтвержден в ходе численного моделирования для преохлажденного пучка (рис. 1). Результаты моделирования соответствуют аналитическим предсказаниям. Значение гармоники $K = -3$ является наилучшим выбором с точки зрения спин-декогеренции, при котором фактор C_{SD} минимален.

Влияние охлаждения на декогеренцию

Из уравнения (5) очевидно, что спин-декогеренция при использовании ВЧ спин-ротатора сильно зависит от относительного разброса в пучке по импульсам δ . Данный факт также следует из того, что Δt в уравнении (6) в основном определяется δ . Эти соображения подтверждаются в ходе численного эксперимента (рис. 2), по результатам которого можно заключить о необходимости уменьшения δ с использованием непрерывного охлаждения во время переворота поляризации.

Влияние отстройки от резонанса по частоте на декогеренцию

Для оценки влияния отстройки по частоте на эффективность управления поляризацией сначала была получена характеристика резонанса (рис. 3). Так как точность выставки частоты ВЧ системы соленоида на COSY составляет 0.3 Гц, а FWHM резонанса составляет порядка 25 Гц, то не ожидается существенного влияния отстройки на декогеренцию при данном характерном времени переворота поляризации.

Влияние спиновых резонансов на декогеренцию

Еще одним фактором, влияющим на разброс частот спин-прецессии частиц, является наличие множественных внутренних спиновых резонансов в рабочем диапазоне накопителя. При этом возникает воздействие на спин частиц, зависящее от их положения в фазовом пространстве. Данный эффект особенно выражен для протонов с относительно большим значением магнитной аномалии G , в чем можно убедиться из условия на наличие внутреннего резонанса: $\gamma G = KP \pm Q_y$, $K \in \mathbb{Z}$. Здесь P — суперпериодичность структуры, Q_y — приведенная частота вертикальных бетатронных колебаний.

По результатам работы [4] можно заключить, что даже в накопителе с настройками секступолей, соответствующим $\xi_{x,y}$, $\kappa = 0$, имеется ненулевой разброс частот спин-прецессии $\Delta\nu_s$ в вер-

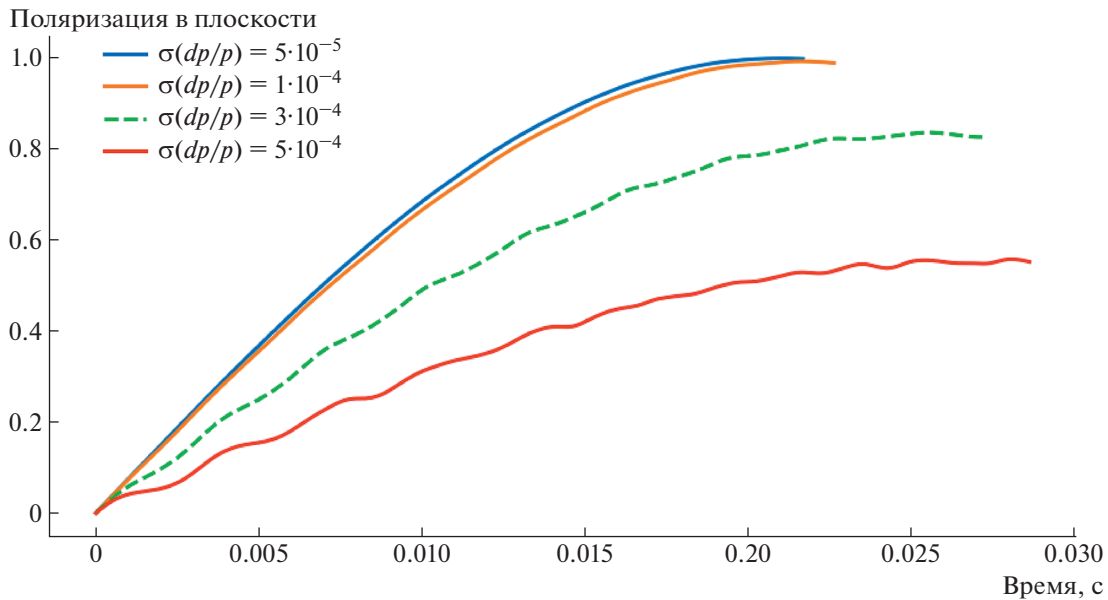


Рис. 2. Эволюция сигнала поляризации в плоскости накопителя от времени при включенном ВЧ соленоиде для различных значениях относительного среднеквадратичного разброса частиц по импульсам в пучке δ .

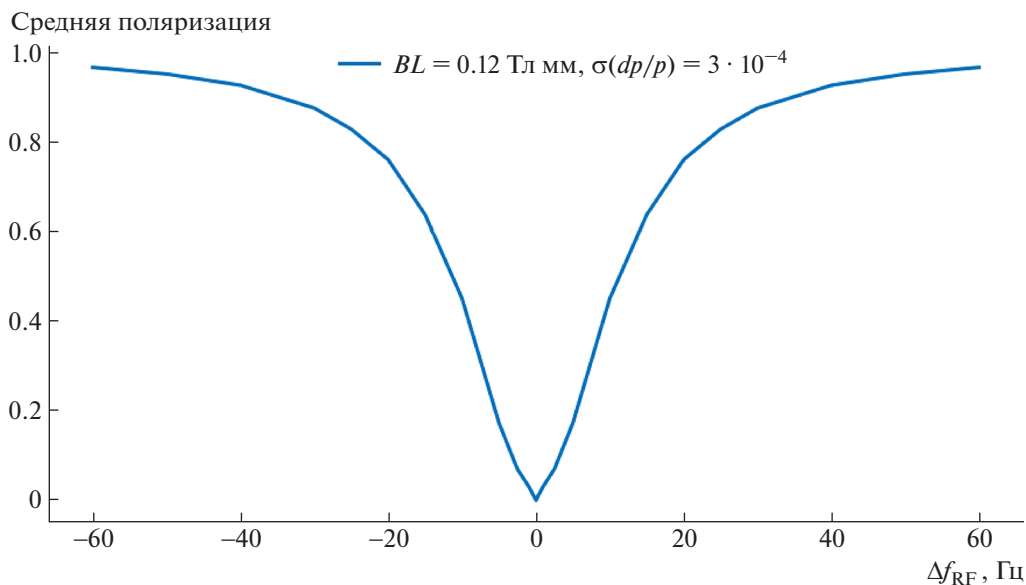


Рис. 3. Средняя вертикальная поляризация пучка в зависимости от отстройки ВЧ поля соленоида по частоте от резонанса $K = -1$.

тикальной плоскости, вызванный влиянием спиновых резонансов. Резонансная диаграмма для ускорителя COSY представлена на рис. 4. Данные результаты были получены путем трассировки частиц в накопителе и усреднения фазы спиновых колебаний в плоскости кольца за несколько ВЧ периодов. Так как энергия эксперимента $T = 140$ МэВ соответствует $\gamma G = 2.06$, то по данным на рис. 4 можно определить влияние резонансов на разброс частот спин-прецессии на уровне $\Delta\nu_s \sim 10^{-5}$,

что также является дополнительным источником спин-декогеренции (рис. 5).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование методов уменьшения деполяризации протонного пучка при использовании ВЧ спин-ротатора привело к двум ключевым выводам: (1) необходимо выбирать гармонику поля ВЧ соленоида K для уменьшения фактора C_{SD} и минимизации эффектов декогеренции; (2) вид зави-

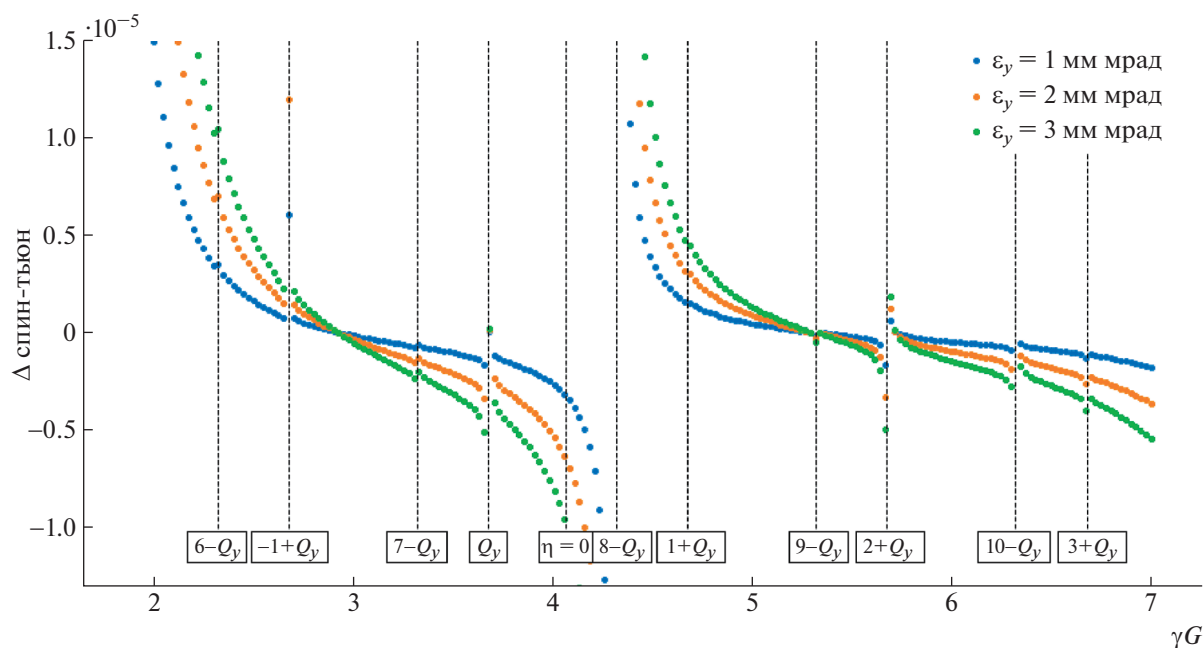


Рис. 4. Эволюция сигнала поляризации в плоскости накопителя от времени при включенном ВЧ солениоде для различных гармоник поля солениоида K . Зависимость отклонения частот спин-прецессии от референсной величины для различных значений энергии референсной частицы, соответствующей спин-твону γG ; $\xi_{x,y}, \kappa = 0$. Частицы имеют различные вертикальные бетатронные амплитуды, соответствующие ε_y при инжекции.

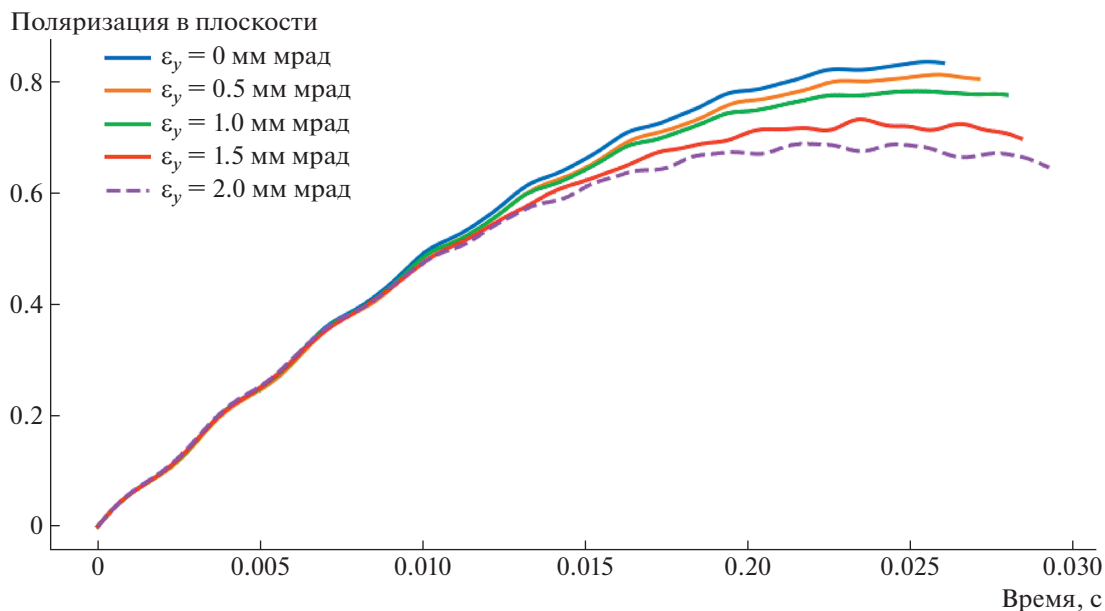


Рис. 5. Эволюция сигнала поляризации в плоскости накопителя от времени при включенном ВЧ солениоде для различных значений ε_y при инжекции.

симости τ_{SC} от δ демонстрирует необходимость охлаждения пучка. Данные соображения следуют как из аналитических оценок, так и из результатов численного моделирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 22-42-04419.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Guidoboni G et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. P. 054801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.054801>
2. *Lehrach A., Lorentz B., Morse W., Nikolaev N., Rathmann F.* “ // arXiv:1201.5773. 2012. <https://doi.org/10.48500/arXiv:1201.5773>
3. COSY Infinity. <http://cosyinfinity.org>
4. *Melnikov A., Aksentyev A., Senichev Y., Syresin E.* Proc. IPAC'22. June 2022. Bangkok, Thailand. 2022. P. 1832–1834. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2022-WEPOPT005>

Investigation of Methods to Decrease Proton Beam Depolarization while Using an RF Spin-Rotator

**A. A. Melnikov^{1, 2, *}, N. N. Nikolaev^{2, 3},
A. E. Aksentyev^{1, 3}, Yu. V. Senichev^{1, 3}, and S. D. Kolokolchikov^{1, 3}**

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*Landau Institute for Theoretical Physics, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia*

³*Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny, Moscow oblast, 141701 Russia*

*e-mail: alexei.a.melnikov@gmail.com

Received June 19, 2023; revised June 22, 2023; accepted June 26, 2023

Abstract—Spin-orbital dynamics was investigated at COSY accelerator. The key mechanisms of spin-decoherence in the vicinity of the RF spin resonance are covered. The analytical model of spin-decoherence depending on the harmonic number of the RF spin-rotator and the RMS momentum spread was verified. Also the efficiency of spin manipulation with an RF spin-rotator depending on the influence of intrinsic spin resonances and frequency detuning is investigated.

Keywords: spin-orbital dynamics, polarization manipulation, RF spin resonance, spin-decoherence, spin resonances, electric dipole moment