

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 621.384.6

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СПИНОВОЙ ДЕКОГЕРЕНТНОСТИ ПРОТОНОВ НА УСКОРИТЕЛЕ COSY

© 2023 г. А. А. Мельников^{а, *}, А. Е. Аксентьев^{а, b}, Ю. В. Сеничев^а

^аИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bНациональный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409 Россия

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

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 31.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

Исследовалась спин-орбитальная динамика в ускорителе COSY. В численном эксперименте было подтверждено, что спиновая декогерентность пучка определяется нелинейной частью решения уравнения принципа автофазировки. Было показано, что эффекты спиновой декогерентности определяются тремя параметрами структуры ускорителя: горизонтальной и вертикальной хроматичностью, а также нелинейным коэффициентом сжатия орбит.

Ключевые слова: спин-орбитальная динамика, спин-декогерентность, спиновые резонансы, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562922050323

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 сгустке составит один радиан. 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. 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.

1. МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ SCT

Для изучения эффектов спиновой декогерентности необходимо рассмотреть прецессию проекции спин-вектора, ортогональной к инвариантной оси. Прецессия спин-вектора в плоскости кольца описывается уравнением Т-БМТ, и в накопителе с ведущим магнитным полем спин-тюн $\nu_s = \gamma G$, где G — аномальный магнитный момент. Для нерезонансных частиц в сгустке спин-тюн определяется амплитудами колебаний в фазовом

пространстве и параметрами структуры, такими как хроматичность.

Первый этап в оптимизации SCT — включение ВЧ резонатора для подавления спиновой декогерентности в первом порядке [1]. Данный метод позволяет увеличить SCT на три порядка.

Продольное движение частиц в ВЧ поле в общем случае является нелинейным. Из решения нелинейных уравнений для принципа синхронного ускорения следует, что смещается средний (равновесный) уровень энергии ($\Delta\delta_{eq}$) [1]:

$$\Delta\delta_{eq} = \frac{\gamma_s^2}{\gamma_s^2\alpha_0 - 1} \left[\frac{\delta_m^2}{2} \left(\alpha_1 + \frac{3\beta_s^2}{2\gamma_s^2} - \frac{\alpha_0}{\gamma_s^2} + \frac{1}{\gamma_s^4} \right) + \left(\frac{\Delta L}{L} \right)_\beta \right], \quad (1)$$

где фактор бетатронного удлинения орбит имеет вид:

$$\left(\frac{\Delta L}{L} \right)_\beta = -\frac{\pi}{L_0} [\epsilon_x \xi_x + \epsilon_y \xi_y]. \quad (2)$$

Здесь α_0 и α_1 — коэффициенты сжатия орбит первого и второго порядка, γ_s и β_s — Лоренц-фактор и релятивистский бета-фактор для синхронной частицы, δ_m — амплитуда синхротронных колебаний в единицах $\Delta p/p$, $\xi_{x,y}$ — хроматичности структуры, $\epsilon_{x,y}$ — инварианты Куранта–Шнайдера. Сдвиг равновесного уровня энергии для различных значений α_1 изображен на рис. 1, где представлен случай синхротронного движения без бетатронных колебаний.

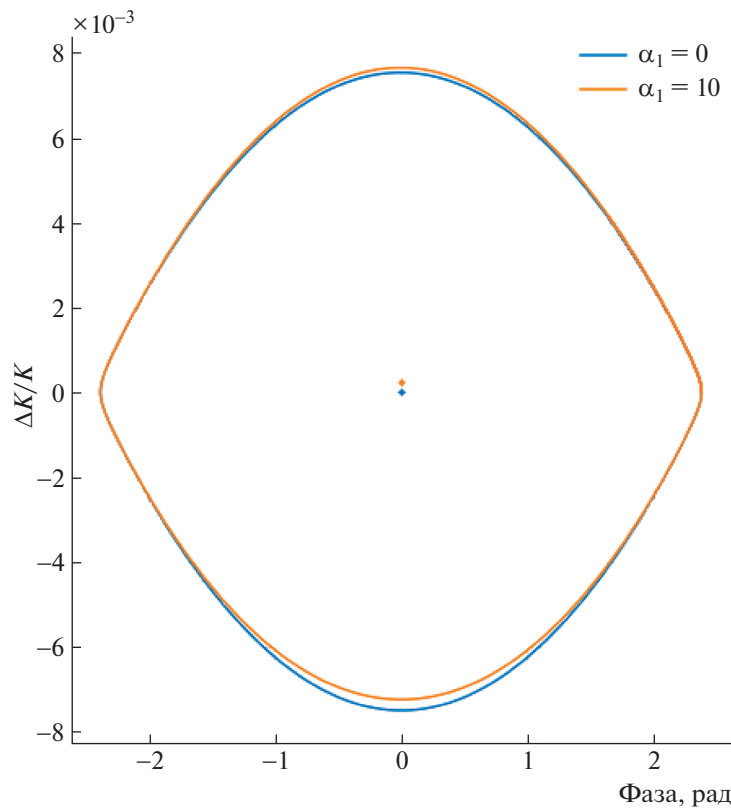


Рис. 1. Фазовые траектории в продольной плоскости для различных значений α_1 ; $\xi_{x,y} = 0$. $\Delta K/K$ — относительное изменение кинетической энергии частицы.

Из (1) и (2) можно заключить, что ξ_x , ξ_y , α_1 определяют нелинейную продольную и спиновую динамику. Три семейства секступолей, расположенные в точках с различными оптическими функциями, необходимы для оптимизации данных трех параметров. Обозначим выражение при δ_m^2 как κ . При этом секступоли должны быть настроены так, чтобы в оптимуме ξ_x , ξ_y , κ были равны нулю, что обеспечит наибольшее SCT. Это следует из того, что отклонение в частоте прецессии спина определяется сдвигом равновесного уровня энергии:

$$\Delta v_s = G\Delta\gamma. \quad (3)$$

Ниже приведено исследование данной концепции.

2. ОПТИМИЗАЦИЯ SCT НА COSY

COSY — синхротрон с двумя магнитными арками и двумя прямыми промежутками. На ускорителе ведется работа с пучками как неполяризованных, так и поляризованных протонов и дейтронов в диапазоне импульсов от 300 МэВ/с до 3.7 ГэВ/с. Типичная настройка оптики с нулевой дисперсией в прямых промежутках представлена на рис. 2.

Поляризация инжектированного пучка переводится в плоскость кольца с помощью ВЧ-соленоида. При этом SCT определяется как время спада сигнала поляризации ансамбля частиц. Три семейства секступолей: MXS, MXL, MXG используются для оптимизации SCT [2].

Ниже представлены результаты численного моделирования спин-орбитальной динамики в среде COSY Infinity [3] для верификации оптимальных значений ξ_x , ξ_y , κ , предсказанных теоретически из (3).

На первом шаге была исследована зависимость спин-тюна от ξ_x , κ для нерезеренсных частиц. При этом спин-тюн, зависящий от положения частицы в фазовом пространстве, был рассчитан с помощью нормальных форм. Результаты на рис. 3 и 4 подтверждают, что оптимальные ξ_x , $\kappa = 0$.

Известно, что вертикальное бетатронное движение возбуждает спиновые резонансы в ускорителях с вертикальным ведущим полем, что не было учтено в формуле (3). Следовательно, оптимальная $\xi_y \neq 0$ для наибольшего SCT [4]. Для протонов во всем диапазоне энергий представлены несколько внутренних резонансов (рис. 5). Самый сильный из них — $\gamma G = 8 - Q_y$. Рабочая точка для наибольшего

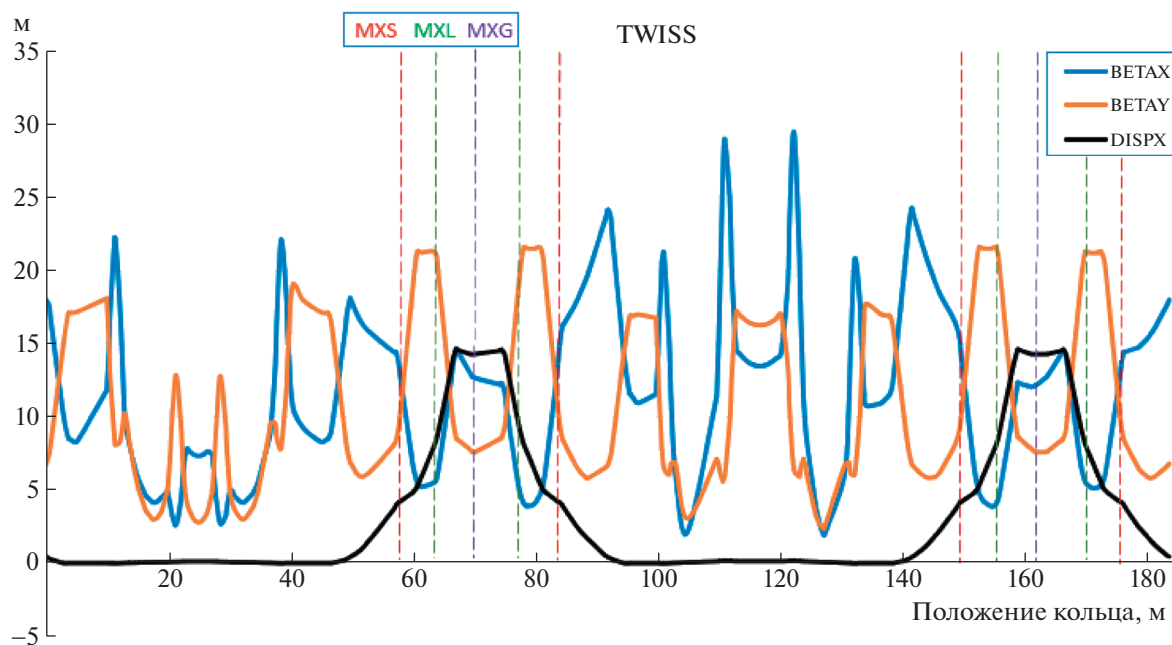


Рис. 2. Функции Твисса для ускорителя COSY. Штриховые линии обозначают позиции трех семейств секступолей в арках.

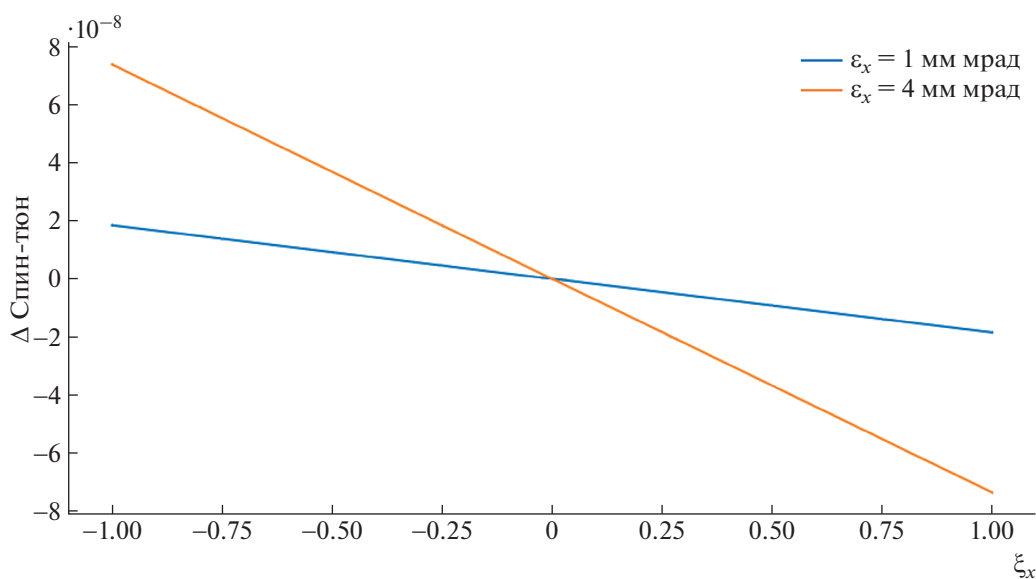


Рис. 3. Отклонение спин-тюна частицы относительно референсной для различных горизонтальных бетатронных амплитуд.

SCT соответствует условию $\Delta v_s = 0$ для любых бетатронных амплитуд. Рабочую точку можно настроить для различных энергий эксперимента путем варьирования ξ_y (рис. 6). По результатам на рис. 6 можно заключить, что положительная вертикальная хроматичность сдвигает рабочую точку в область меньших энергий.

Следует отметить, что алгоритмы, использующие нормальные формы для расчета спин-тюна расходятся в области спиновых резонансов. Поэтому спин-тюн для результатов на рис. 5 и 6 был посчитан с помощью трекинга частиц и усреднения набегу спиновой фазы за несколько ВЧ периодов. Влияние целых спиновых резонансов не было рассмотрено в данной работе.

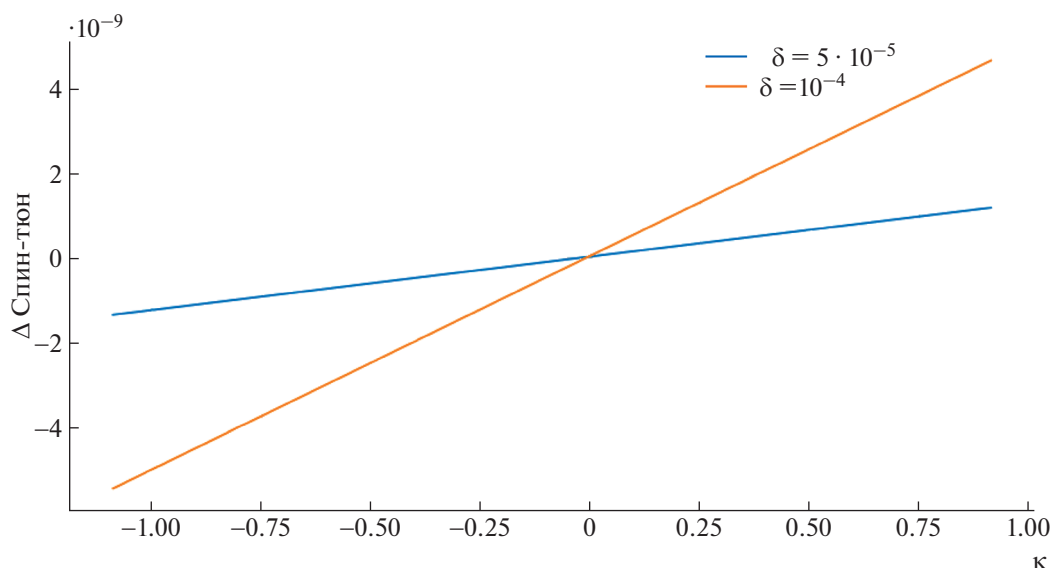


Рис. 4. Отклонение спин-тюна частицы относительно референсной для различных амплитуд синхротронных колебаний.

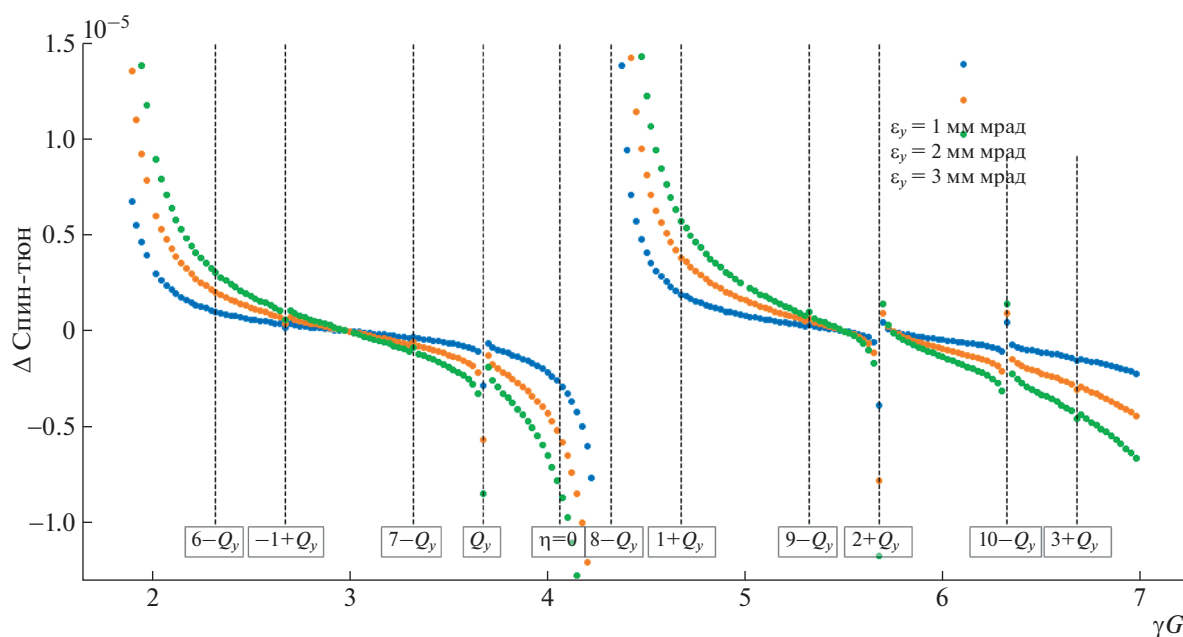


Рис. 5. Отклонение спин-тюна частицы относительно референсной для различных амплитуд вертикальных бетатронных колебаний; $\xi_y = 0$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью численных расчетов была подтверждена гипотеза, что SCT определяется тремя параметрами: ξ_x , ξ_y , κ . Для вариации последних необходимы три семейства секступолей. Оптимальные значения ξ_x , $\kappa = 0$, что подтверждает теоретические предсказания. Тем не менее, для протонов оптимальная $\xi_y \neq 0$ из-за влияния спиновых ре-

зонансов. Настроить рабочую точку для энергии эксперимента можно путем варьирования ξ_y .

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за поддержку данного исследования (грант 22-42-04419).

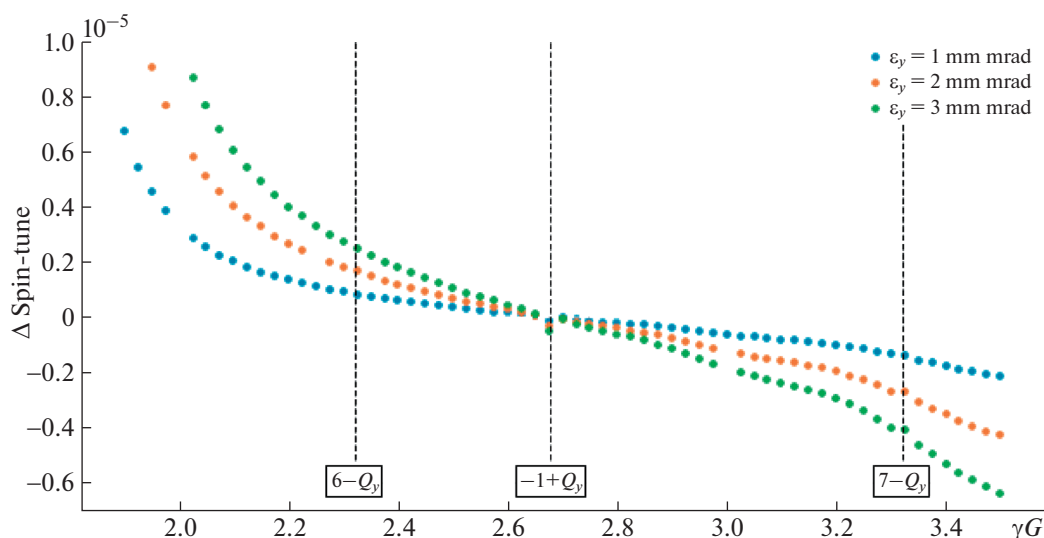


Рис. 6. Отклонение спин-тюна частицы относительно референсной для различных амплитуд вертикальных бетатронных колебаний; $\xi_y = 6.5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Senichev Y. et al.* // Proc. Int. Particle Accelerator Conf. (IPAC'13). 2013. P. 2579–2581.
2. *Guidoboni G. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117 (5). P. 054801.
3. System COSY INFINITY. <https://www.bmtdynamics.org/cosy/>.
4. *Rosenthal M.* // Experimental Benchmarking of Spin Tracking Algorithms for Electric Dipole Moment Searches at the Cooler Synchrotron COSY. 2016. Ph.D. Thesis: RWTH Aachen Univ.

Investigation of Proton Spin Decoherence Mechanisms at COSY

A. A. Melnikov^{1, *}, A. E. Aksentev^{1, 2}, and Y. V. Senichev¹

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

²*National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia*

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

Received July 19, 2022; revised July 31, 2022; accepted July 31, 2022

Abstract—Spin-orbital dynamics at COSY accelerator has been investigated. It has been shown in the numerical experiment that spin-decoherence of the beam is determined by the nonlinear part of the solution of the equation of synchronous acceleration principle. It has been shown that the effects of spin-decoherence are defined by the three parameters of the lattice: horizontal and vertical chromaticity, as well as nonlinear momentum compaction factor.

Keywords: spin-orbital dynamics, spin-decoherence, spin resonances, electric dipole moment