

Научная статья

УДК 539.1

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA*

Егор Вадимович Бедарев¹, Иван Александрович Кооп²
Алексей Валерьевич Отбоев³, Юрий Михайлович Шатунов⁴

¹⁻⁴Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
Новосибирск, Россия

^{1,2}Новосибирский государственный университет
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет
Новосибирск, Россия

¹E.V.Bedarev@inp.nsk.su

Аннотация

В Объединенном институте ядерных исследований совместно с Институтом ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН планируется проведение экспериментов с ускорительным комплексом NICA, посвященных изучению спиновых эффектов в столкновениях поляризованных протонов и дейтронов. Как дополнение к программе физики спина предполагается провести эксперимент по проверке нарушения P -четности в pd -рассеянии на мишени. Для его осуществления необходимо изучить возможности получения пучка p или d с динамически устойчивой продольной поляризацией разного знака. В статье исследуется организация такой конфигурации спина с помощью ВЧ-ротаторов в кольце Nuclotron, моделируется процесс переворота спина пучка дейтронов и протонов с учетом синхротронных колебаний и энергетической диффузии. В результате делаются выводы о возможности получения динамически устойчивой продольной поляризации данным способом.

Ключевые слова

NICA, Nuclotron, динамическое управление спином, несохранение адронной четности

Для цитирования

Бедарев Е. В., Кооп И. А., Отбоев А. В., Шатунов Ю. М. Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 1. С. 5–15. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

* Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Studying the Possibility of Dynamic Spin Handling for Polarized Protons and Deuterons at the NICA Accelerator Complex

Egor V. Bedarev¹, Ivan A. Koop²
Alexey V. Otboev³, Yuri M. Shatunov⁴

^{1,4}Budker Institute of Nuclear Physics of SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

^{1,2}Novosibirsk State University
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State Technical University
Novosibirsk, Russian Federation

¹E.V.Bedarev@inp.nsk.su

Abstract

At the Joint Institute for Nuclear Research together with the Institute of Nuclear Physics named after G. I. Budker SB RAS plans to carry out experiments with NICA accelerator complex dedicated to spin effects studying in polarized protons and deuterons collisions. As addendum to the spin physics program, it is being planned experiment by testing P -parity violation in pd -scattering at target. To carry out this experiment, it has to study the possibility of obtaining a p or d beam with dynamically stable longitudinal polarization with different signs. In this paper, we consider investigation of the organization for such configuration of spin using RF rotators in the Nuclotron ring. The spin flip process for deuterons and protons beam has simulated taking into account synchrotron oscillations and energy diffusion. Based on the obtained results, conclusions about opportunity of gaining dynamically stable longitudinal polarization for this way have done.

Keywords

NICA, Nuclotron, dynamic spin handling, hadronic parity nonconservation

For citation

Bedarev E. V., Koop I. A., Otboev A. V., Shatunov Yu. M.. Studying the possibility of dynamic spin handling for polarized protons and deuterons at the NICA accelerator complex. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 1, pp. 5–15 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-1-5-15

Введение

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ) совместно с Институтом ядерной физики СО РАН (ИЯФ) проходит подготовка к проведению экспериментов с ускорительным комплексом Nuclotron based Ion Collider fAcility (NICA), посвященных изучению Parton Distribution Functions (PDF), Transverse Momentum Dependent PDF, а также спин-зависимых эффектов в столкновениях pp и dd в диапазоне энергий 12–27 ГэВ и 4–13,8 ГэВ в с.ц.м. соответственно [1].

В рамках данной физической программы планируется эксперимент по проверке нарушения P -четности в рассеянии pd на жидкой мишени из водорода (LH) или воды (H₂O) [2]. Предлагаемый эксперимент представляет интерес в силу того, что в физике адронов феномен нарушения пространственной четности был мало изучен из-за сложности теоретических расчетов сильных взаимодействий и их экспериментальной проверки [3–6]. Изучение проявления несохранения адронной пространственной четности будет осуществлено путем измерения продольной асимметрии A_L , ожидаемой на уровне 10^{-7} [5]. Полученные экспериментальные данные дадут возможность проверить предсказания имеющихся теоретических моделей [7], что позволит осуществить проверку Стандартной модели (СМ).

Одной из основных задач, требующих решения для осуществления данного эксперимента, является получение пучка p или d с устойчивой продольной поляризацией с возможностью обеспечения режимов с ее противоположными направлениями, что накладывает требование на повторяемость эксперимента. Получение продольной поляризации, с учетом диктуемых требований, можно осуществить при помощи так называемых спиновых ВЧ-ротаторов с продольным или поперечным полем, осуществляющих динамическое управление поляризацией [8]. Таким образом, целью данной работы является проверка возможности получения продольной динамически устойчивой поляризации пучков p и d .

Помимо важности результатов данной работы в планировании предложенного эксперимента, актуальность данной работы обусловлена проведением экспериментов по изучению упомянутых спин-зависимых эффектов и PDF в столкновениях поляризованных пучков в коллайдерном кольце NICA, где требуется управление поляризацией. Например, одной из возможностей изучения распределений глюонов в нуклонах являются процессы с излучением прямого фотона. Одним из таких процессов является глюонное комтоновское рассеяние. Измерение двойной продольной асимметрии прямого фотона этого процесса A_{LL}^{γ} в столкновении двух продольно поляризованных пучков протонов позволяет определить поляризацию глюонов Δg , что важно для проведения исследований в рамках проблемы спинового кризиса нуклонов [1; 9].

Нарушение пространственной четности

Из-за наличия интерференции амплитуды сильного взаимодействия и P -нечетной амплитуды слабого взаимодействия возникает зависимость сечения от продольной степени поляризации пучка $p(d)$, что приводит к наличию ненулевой продольной асимметрии A_L :

$$A_L = \frac{\sigma_{\rightarrow} - \sigma_{\leftarrow}}{\sigma_{\rightarrow} + \sigma_{\leftarrow}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\rightarrow/\leftarrow}$ – полное сечение pd -рассеяния с продольной поляризацией пучка, направленной на мишень и в противоположном направлении. Измерение сечения pd -рассеяния с разной конфигурацией поляризации пучка d (p) на неполяризованной мишени из LH (H_2O) позволит определить величину A_L и сравнить с предсказаниями теоретических расчетов.

Схема эксперимента

Схема эксперимента по измерению продольной асимметрии предполагает использование кольца Nuclotron (рис. 1) и подразумевает следующие основные этапы.

1. Получение (1) и ускорение (2) поляризованных протонов и дейтронов в кольце.
2. Поворот спина в плоскость кольца (3, 4).
3. Однооборотная инжекция пучка в транспортный канал с внешней мишенью с заданной фазой прецессии спина.
4. Измерение коэффициента прохождения пучка через внешнюю мишень (5, 6).

Первый этап эксперимента является одной из отлаженных и рутинных процедур, проводимых в рамках работы ускорительного комплекса NICA, его подробное описание можно найти в [1]. После ускорения поляризованных пучков протонов или дейтронов начинается этап поворота поперечной поляризации в плоскость кольца («полуфлип»). Для осуществления «полуфлипа» будут использоваться спиновые ВЧ-ротаторы. В случае дейтронов (протонов) поворот будет осуществляться ВЧ-катушкой (ВЧ-полосковый промежутки), создающей продольное (поперечное) косинусоидальное поле с частотой ν_f . Контроль над амплитудой продольной поляризации будет реализован с помощью поляриметра с аналогичной концепцией, использу-

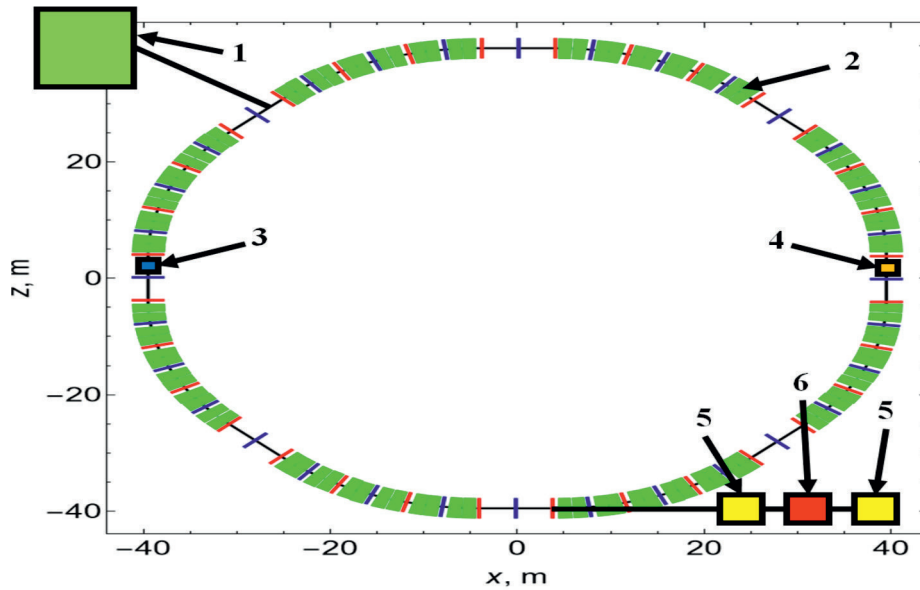


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 – источник поляризованных p и d ; 2 – ускорительное кольцо Nuclotron; 3 – спиновый ВЧ-ротатор (ВЧ-соленоид/полосковый ВЧ-ромежуток); 4 – поляриметр; 5 – детекторы для измерения коэффициента прохождения (вторично-эмиссионный детектор, или пояс Роговского); 6 – мишень (LH или H_2O)

Fig. 1. Experiment scheme:

1 – source of polarized p and d ; 2 – nuclotron accelerator ring; 3 – Spin RF-rotator (RF-solenoid/RF-strip gap); 4 – polarimeter; 5 – detectors for measuring passing coefficient (secondary emission detector or Rogowski coil); 6 – target (LH or H_2O)

ющейся на синхротроне Cosy [10]. После осуществления «полуфлипа» ВЧ-ротатор при этом не отключается, будет произведена однооборотная инжекция пучка в нужной фазе прецессии спина в транспортный канал с внешней мишенью из H_2O (LH). Контроль фазы прецессии будет производиться с помощью измерения фазы ВЧ-устройства соответственно. Заключительным этапом эксперимента является измерение коэффициента прохождения пучка через мишень с помощью вторично-эмиссионных детекторов или поясов Роговского, расположенных перед мишенью и после нее.

Адиабатический переворот спина внешним возмущением

Явление адиабатического переворота спина основано на так называемом адиабатическом пересечении ($|w_k|^2 \gg |\epsilon'|$) с постоянной скоростью изменения отстройки за оборот $|\epsilon'|$ уединенного резонанса ($|\nu - \nu_k| \lesssim |w_k|$) с амплитудой гармоники w_k и резонансной спиновой частотой ν_k . Поведение равновесной степени поляризации при таком пересечении описывается в рамках формулы Фруассара – Стора [11]. Данный закон предсказывает смену знака равновесной степени поляризации при соблюдении упомянутых выше условий.

Организация резонансной гармоники будет осуществляться при помощи введения на азимуте спинового ВЧ-ротатора («флиппер») с гармоническим полем, ортогональным к равновесной степени поляризации с частотой ν_f . Резонансные частоты при наличии такого «флиппера» задаются условием: $\nu - \nu_f = k$, где k – целое число. Само адиабатическое пересечение будет выполняться на резонансе с $k = 0$. Для соблюдения условия адиабатического пересечения подбираются соответствующие величины резонансных гармоник и скоростей изменения отстроек, которые в дальнейшем определяют параметры самих устройств. В случае дейтронов

(ВЧ-катушка) $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\varepsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$, и в случае протонов (ВЧ-полосковый промежуток) $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$ и $|\varepsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$.

Возмущения спина в резонансной области

Рассмотрим влияние синхротронных колебаний и энергетической спиновой диффузии на поведение спина в резонансной области. Влияние же бетатронного движения предполагается усредненным, а частоты – вдали от спин-бетатронных резонансов. Теория спиновой динамики, на которой основаны приведенные вычисления, содержится в [12].

Наличие синхротронных колебаний приводит к появлению резонансов спутников, отстоящих друг от друга на синхротронную частоту ν_s ($\nu_{km} = k + m\nu_s$, m – целое число), и перераспределению между ними мощности резонанса $w_{km} = w_k J_m(\sigma / \nu_s)$, где $\sigma = \gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} \delta_0$ – амплитуда модуляции, δ_0 – амплитуда синхротронных колебаний, J_m – функция Бесселя m -порядка. Для кольца Nuclotron амплитуда модуляций определяется как $\sigma = \nu_0 \delta_0$, где $\nu_0 = \gamma G$, G – G -фактор частицы.

В случае дейтронов $G = -0,143$, $E = 2,111$ ГэВ, $\nu_s = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $\delta_0 = 10^{-3}$ имеем: $\gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} = -0,161$, $\sigma = -1,61 \cdot 10^{-4}$, $|w_{k0}| = 9,971 \cdot 10^{-5}$ (основной резонанс $m = 0$). Из полученных расчетов видно, что полученная малая амплитуда модуляции позволяет осуществить переворот при данных параметрах пучка на основной резонансной гармонике и требует лишь выбора первоначальной отстройки для удаленности от спутниковых резонансов: $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^{-4}$. Наоборот обстоит ситуация с протонами. Из-за большого G -фактора ($G = 1,8$) амплитуда модуляции принимает большое значение $E = 2,51$ ГэВ, $\nu_s = 3,2 \cdot 10^{-3}$, $\delta_0 = 10^{-3}$: $\gamma \frac{\partial \nu}{\partial \gamma} = 4,82$, $\sigma = 4,82 \cdot 10^{-3}$, $|w_{k0}| = 1,53 \cdot 10^{-4}$, что означает ослабление в 1,97 раза и приводит к нарушению адиабатич-

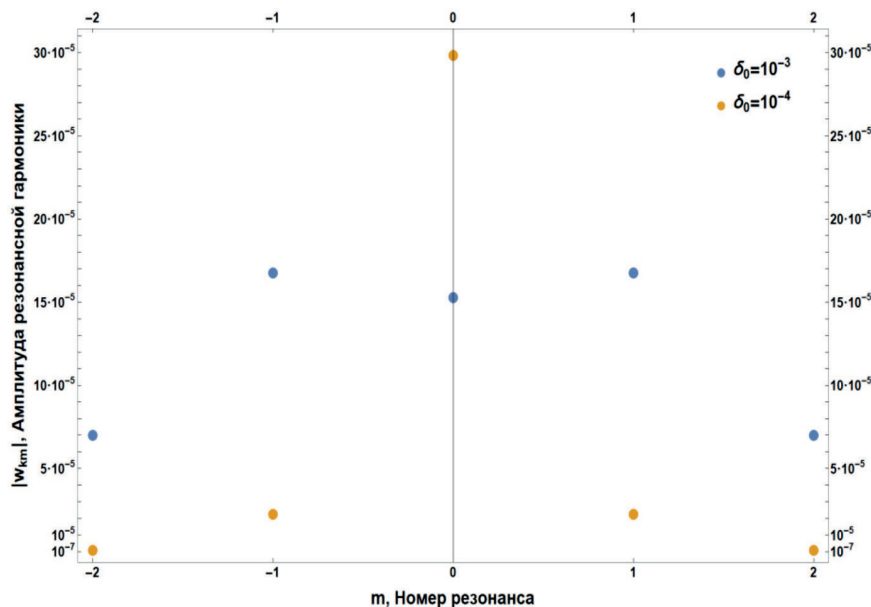


Рис. 2. Зависимость мощности резонанса от номера спутника m для случая протонов.

Синие точки соответствуют случаю $\delta_0 = 10^{-3}$, а оранжевые – $\delta_0 = 10^{-4}$

Fig. 2. Dependence of resonance power versus satellite number m for proton case.

Blue points correspond to the case $\delta_0 = 10^{-3}$, and orange points $\delta_0 = 10^{-4}$ respectively

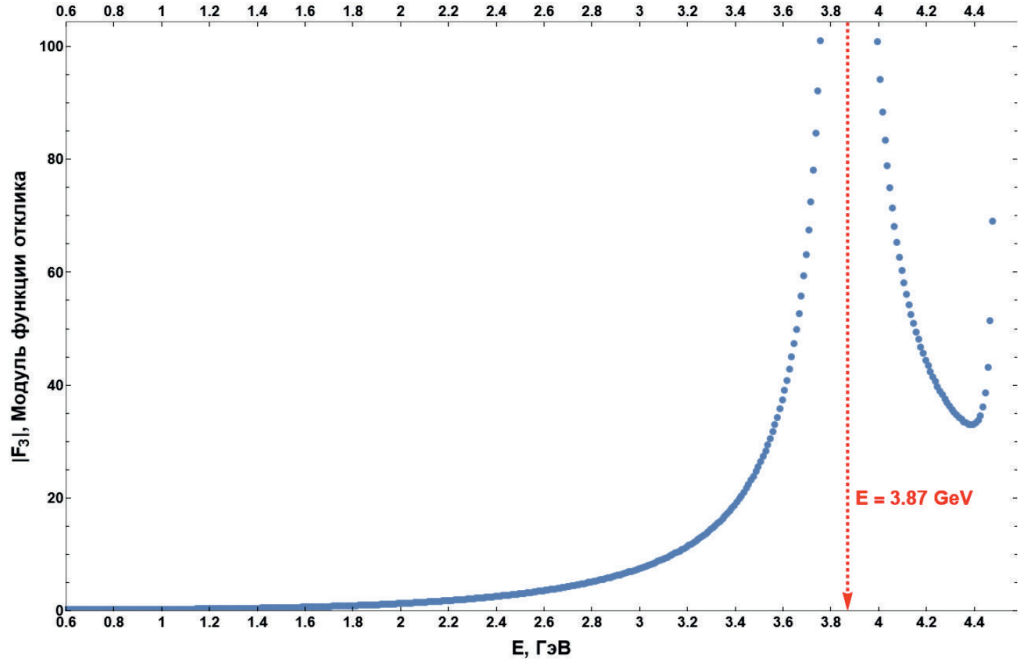


Рис. 3. Зависимость модуля спиновой функции отклика F_3 от энергии E (ГэВ) для оптики кольца Nuclotron с $Q_x = 7,45$, $Q_z = 7,4$, рассчитанной при помощи программы ASPIRIN [13].

Красная пунктирная линия соответствует спин-бетатронному резонансу $Q_z = 7,4$
 Fig. 3. Dependence of module for spin response function F_3 versus energy E (GeV) for Nuclotron optics with $Q_x = 7.45$, $Q_z = 7.4$ calculated by program ASPIRIN [13]

ности (уменьшение параметра адиабатичности практически в 4 раза, $\sim |w_k|^2 / |\epsilon'|$). Переворот на резонансах сателлитах тоже не представляется возможным в силу их малости (рис. 2). Использование более медленного пересечения ограничено сильным влиянием процесса энергетической спиновой диффузии со стороны внутрипучкового рассеяния, что требует быстрого переворота (обсуждается ниже). В силу данных обстоятельств требуется охлаждение пучка до $\delta_0 = 10^{-4}$: $|w_{k0}| = 2,98 \cdot 10^{-4}$ и $\epsilon_0 = 3 \cdot 10^{-3}$.

Помимо требования малого энергетического разброса, необходимо следить за влиянием поперечных спин-бетатронных резонансов. Данная проблема возникает в силу наличия резонансных множителей, отвечающих за так называемые intrinsic-резонансы, в спиновой функции отклика F_3 (рис. 3) (отклик на создаваемую раскачку поперечных бетатронных колебаний радиальным возмущением), определяющей мощность резонансной гармоники: $w_k = \theta_r |F_3|$, где θ_r – угол раскачки вертикальных колебаний полосковым промежутком. В случае оптики кольца Nuclotron ($Q_x = 7,45$, $Q_z = 7,4$) F_3 содержит резонансный множитель, соответствующий спин-бетатронному резонансу $Q_z = 7,4$ ($E = 3,87$ ГэВ). Далее перейдем к рассмотрению энергетической диффузии.

Наличие энергетической диффузии вследствие внутрипучкового рассеяния приводит к конечному времени когерентности спинов в ансамбле частиц (спиновая энергетическая диффузия). Для расчета характерного времени когерентности были использованы результаты теоретических расчетов энергетического разброса [14] из-за многократного рассеяния. В случае пучка с гауссовым распределением, в приближении малости продольной температуры по сравнению с поперечной, получается следующее время когерентности:

$$\tau_d = \frac{8\gamma^3 \sigma_z \sqrt{\beta_x \epsilon_x^3} |w_{k0}|^2}{L_c N r_{p/d}^2 \beta_c v_0^2}, \quad (2)$$

где N – число частиц в пучке, β_x , ε_x , σ_z – радиальный эмиттанс, бета-функция и продольный размер пучка, β , γ – бета- и гамма-факторы, L_c – кулоновский логарифм, $r_{p/d}$ – классический радиус протона или дейтрона. Для характерных параметров пучка протонов и дейтронов $\varepsilon_x = 1 \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, $\beta_x = 800 \text{ см}$, $\sigma_z = 60 \text{ см}$, $N = 2,07 \cdot 10^{10}$, $L_c \sim 20$, $E_1 = 2,111 \text{ ГэВ}$, $E_2 = 2,51 \text{ ГэВ}$ оценка времени когерентности составила: $\tau_1 = 222,12 \text{ с}$ (дейтроны) и $\tau_2 = 3,71 \text{ с}$ (протоны). Полученные времена показывают, что в случае протонов необходимо осуществлять переворот в 20 раз быстрее, чем в случае дейтронов: $|\varepsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, из полученных расчетов видно, что основным ограничением на использование данного метода получения динамически устойчивой продольной поляризации является энергетическая спиновая диффузия из-за многократного внутрипучкового рассеяния, которое ограничивает время работы с включенным флиппером при осуществлении «полуфлипа» и достижения нужной фазы прецессии спина при однооборотной инжекции. Как следствие, этот же эффект будет выступать ограничением и в применении данного метода динамического управления спином ансамбля частиц в коллайдерном кольце NICA для реализации экспериментов по изучению спин-зависимых эффектов.

Моделирование переворота спина

Моделирование движения спина производилось при помощи многооборотного «спин-трекинга» в $O(3)$ представлении реализованного при помощи системы Wolfram Mathematica. Сам расчет производился ($i = 1$ дейтроны и $i = 2$ протоны) для ансамблей из $N_1 = N_2 = 10^2$ частиц, имеющих стационарное нормальное распределение с энергетическим разбросом $\sigma_{\delta_1} = 0,71 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_{\delta_2} = 0,71 \cdot 10^{-5}$ и начальной средней по ансамблю $\langle \vec{S} \rangle_1 = \langle \vec{S} \rangle_2 = 1$ вертикальной степенью поляризации. Эволюция синхротронных колебаний отслеживалась путем вращения вектора $\vec{\psi} = (\varphi, \delta)$, где φ – нормализованный сдвиг фазы от синхронной частицы и δ – энергетический разброс. Энергетическая диффузия реализована при помощи однооборотных флуктуаций δ , имеющих нормальное распределение с дисперсией σ_{noise} , соответствующей среднеквадратичному разбросу энергетических флуктуаций за n оборотов $\sigma_{noise} = \sigma_{\delta} / \sqrt{n}$ и $\sigma_{noise_1} = 10^{-5}$ ($n_1 = 10^5$), $\sigma_{noise_2} = 10^{-6}$ ($n_2 = 10^6$).

На рис. 4 приведен график вертикальной проекции степени поляризации в зависимости от оборота для ансамбля дейтронов. Из представленной зависимости видно, что для выбранных параметров кольца Nuclotron адиабатический переворот был реализован, что означает возможность осуществления «полуфлипа» в плоскость ускорительного кольца, при этом процесс энергетической диффузии не успел сработать: $T_{flip} = 2(\varepsilon_0 / |\varepsilon'|) T_0 = 1,83 \cdot 10^{-1} \text{ с} < \tau_1$, где T_0 – время обращения пучка. Далее, на рис. 5 представлена аналогичная зависимость только для протонов. В данном случае также возможен переворот, однако при увеличенной синхротронной частоте (в 2,13 раза) и скорости пересечения (в 20 раз, $T_{flip} = 2,71 \cdot 10^{-2} \text{ с} < \tau_2$), к тому же требуется снижение амплитуды энергетического разброса в 10 раз по сравнению с параметрами дейтронов.

Отметим, что для уменьшения амплитуды прецессии в процессе переворота в обоих случаях использовалось адиабатическое включение ВЧ-ротатора (рис. 6) (пример дейтронов). При этом условие адиабатичности при таком включении ротатора не нарушается в течение всего переворота.

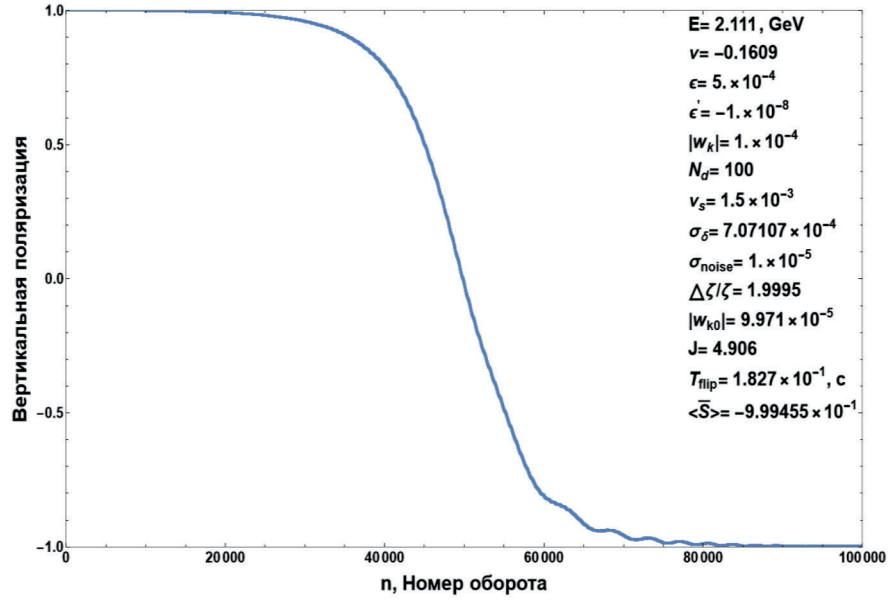


Рис. 4. График зависимости вертикальной степени поляризации ансамбля дейтронов от номера оборота n .

Параметры флиппера: $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$

Fig. 4. Dependence graph for vertical polarization degree of deuterons ensemble versus turn number n .

“Flipper” parameters $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$

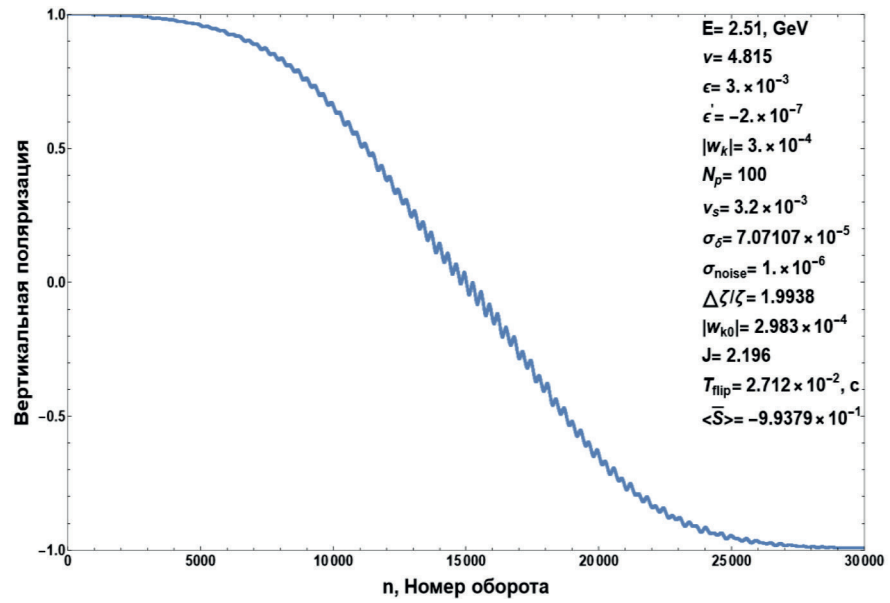


Рис. 5. График зависимости вертикальной степени поляризации ансамбля протонов от номера оборота n .

Параметры флиппера: $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$

Fig. 5. Dependence graph for vertical polarization degree of protons ensemble versus turn number n .

“Flipper” parameters $|w_k| = 3 \cdot 10^{-4}$, $|\epsilon'| = 2 \cdot 10^{-7}$

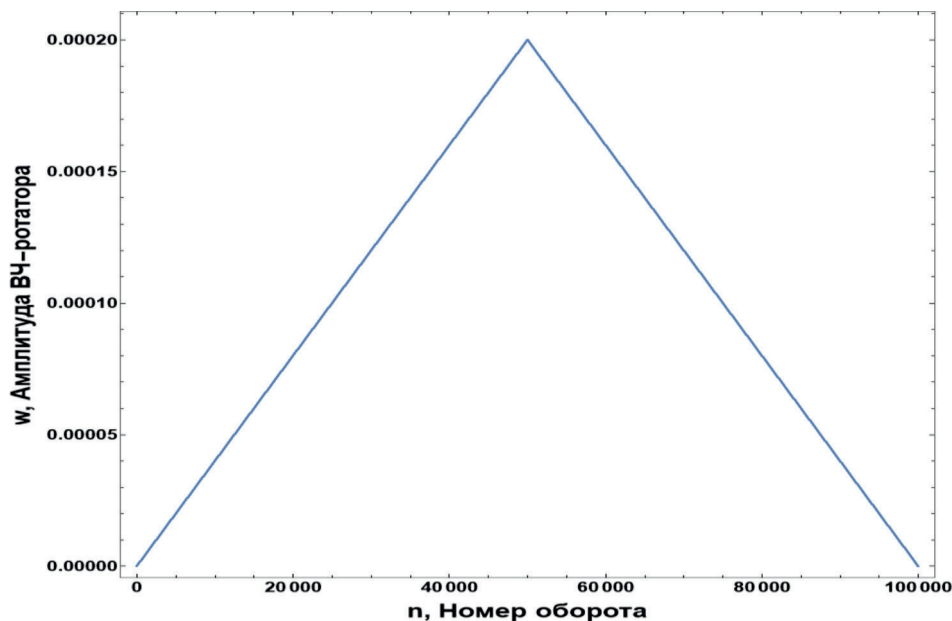


Рис. 6. Зависимости амплитуды ВЧ-ротатора с продольным полем $w = 2|w_k|$ от номера оборота n

Fig. 6. Dependence for amplitude of RF-rotator with longitudinal field $w = 2|w_k|$ versus turn number n

Заключение

В рамках данной работы было выполнено следующее.

- Изучено влияние синхротронных колебаний и энергетической диффузии из-за внутрипучкового рассеяния на адиабатический переворот. Показано, что «полуфлип» на основном резонансе с выбранными параметрами пучка в случае дейтронов (ВЧ-ротатора с продольным полем) с учетом синхротронных колебаний и энергетической диффузии может быть выполнен в силу малой подавленности основной гармоники и малого времени переворота по сравнению с временем когерентности в резонансной области $T_{flip} \ll 222,12$ с. В случае протонов (ВЧ-ротатор с поперечным полем) необходимо производить быстрый переворот из-за сильного влияния внутрипучкового рассеяния $T_{flip} \ll 3,71$ с, имея охлажденный пучок с $\delta_0 \sim 10^{-4}$ и увеличенную в 2 раза синхротронную частоту.
- Рассчитано время когерентности спина в резонансной области. Получено, что основным процессом деполяризации спина ансамбля пучка является внутрипучковое рассеяние, определяющее полное возможное время работы с ВЧ-ротатором при проведении предложенного эксперимента, а также время на осуществление полного переворота в экспериментах с коллайдером NICA. Также получено, что спин ансамбля протонов более подвержен влиянию данного эффекта по сравнению со спином ансамбля дейтронов.
- Проведено моделирование адиабатического переворота спина при помощи спинового ВЧ-ротатора с продольным и поперечным полем для ансамбля дейтронов и протонов в кольце Nuclotron.

На основании полученных результатов моделирования и расчетов было показано, что использование динамического управления спином при помощи ВЧ-ротатора с продольным и поперечным полем в кольце Nuclotron возможно. Однако из-за влияния многократного внутрипучкового рассеяния появляются ограничения на возможность использования данного метода и при работе с пучками протонов выдвигаются более высокие требования к их параметрам.

Список литературы/References

1. **Savin I. A., Efremov A. V., Peshekhonov D. V., Kovalenko A. D., Teryaev O. V., Shevchenko O. Yu., Nagajcev A. P., Guskov A. V., Kukhtin V. V., Topilin N. D. et al.** Spin Physics Experiments at NICASPD with polarized proton and deuteron beams. *EPJ Web of Conferences: 4th International Workshop on Transverse Polarisation Phenomena in Hard Processes (TRANSVERSITY 2014)*, 2015, vol. 85, id. 02039.
2. **Koop I. A., Milstein A. I., Nikolaev N. N. et al.** Tests of Fundamental Discrete Symmetries at the NICA Facility: Addendum to the Spin Physics Programme. *Physics of Particles and Nuclei*, 2021, vol. 52, pp. 549–554.
3. **Gardner S., Haxton W. C., and Holstein Barry R.** A New Paradigm for Hadronic Parity Nonconservation and Its Experimental Implications. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2017, vol. 67, pp. 69–95.
4. **Kistryn S., et al.** Precision Measurement of Parity Nonconservation in Proton-Proton Scattering at 45 MeV. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, vol. 58, pp. 1616–1619.
5. **Lockyer N. A. et al.** Parity nonconservation in protonnucleus scattering at 6 GeV/c. *Phys. Rev. D*, 1984, vol. 30, pp. 860–871.
6. **Grosnick D. P. et al.** Measurement of the differences in the total cross section for antiparallel and parallel longitudinal spins and a measurement of parity nonconservation with incident polarized protons and antiprotons at 200 GeV/c. *Phys. Rev. D*, 1997, vol. 55, pp. 1159–1187.
7. **Milstein A. I., Nikolaev N. N., Salnikov S. G.** Parity Violation in Proton-Deuteron Scattering. *JETP Letters*, 2020, vol. 112, no. 6, pp. 332–336.
8. **Koop I., Shatunov Yu.** Spin flip by RF-field at storage rings with siberian snakes. *AIP Conf. Proc. 1 September 1995, USA*, 1995, vol. 343, pp. 317–320.
9. **Cheng H. Y., Lai S. N.** Spin asymmetry in protonproton collisions as a probe of sea and gluon polarization in a proton. *Phys. Rev. D*, 1990, vol. 41, pp. 91–102.
10. **Bagdasarian Z. et al.** Measuring the polarization of a rapidly precessing deuteron beam. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2014, vol. 17, pp. 052803.
11. **Froissart M., Stora R.** Depolarisation d'un faisceau de protons polarises dans un synchrotron. *Nuclear Instruments and Methods*, 1960, vol. 7, iss. 3, pp. 297–305.
12. **Кондратенко А. М.** Поляризованные пучки в накопителях и циклических ускорителях. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, 01.04.02 – теоретическая и математическая физика, ИЯФ СО АН СССР. 1982.
13. **Perevedentsev E. A., Shatunov Yu. M., Ptitsyn V. I.** Spin orbital function formalism and ASPIRRIN code. *Proc. of 15th Int. spin physics symp. (SPIN 2002)*, Long Island, New York, USA, 2002, pp. 761–765.
14. **Chao A. W., Tigner M. et al.** Handbook of Accelerator Physics and Engineering. Second Ed. World Scientific Co. Pte. Ltd., Singapore, 2013, p. 155.

Сведения об авторах

Бедарев Егор Вадимович, инженер-исследователь

Кооп Иван Александрович, доктор физико-математических наук

Отбоев Алексей Валерьевич, научный сотрудник

Шатунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук

Information about the Authors

Egor V. Bedarev, Research Engineer

Ivan A. Koop, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Alexey V. Otboev, Researcher

Yuri M. Shatunov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

*Статья поступила в редакцию 19.09.2023;
одобрена после рецензирования 09.11.2023; принята к публикации 09.01.2024*

*The article was submitted 19.09.2023;
approved after reviewing 09.11.2023; accepted for publication 09.01.2024*