

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 53.083

ИССЛЕДОВАНИЕ СПИН-ФЛИППИНГА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ
К РЕЗОНАНСНОЙ ЭНЕРГИИ В ВОЗМУЩЕННОЙ
СТРУКТУРЕ NICA С БАЙПАСАМИ

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

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

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

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

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

*E-mail: a.aksentyev@inr.ru

Поступила в редакцию 03.05.2024 г.

После доработки 03.05.2024 г.

Принята к публикации 15.05.2024 г.

Предметом представленного исследования является процесс изменения ориентации оси поляризации пучка, которое проводится в рамках разработки техники обнаружения электрического дипольного момента дейтрана на существующем ускорителе, в частности на ускорителе NICA (ОИЯИ, Дубна), при его функционировании в режиме накопительного кольца. Исследование входит в состав разработки процедуры калибровки так называемого эффективного фактора Лоренца пучка; как таковое, оно сопряжено с другими задачами по ориентировке оси поляризации в ускорителе. Процесс исследуется по двум вопросам: (1) определение скорости переориентации оси, требуемой для выполнения условий эксперимента, (2) влияние на поляризационную когерентность пучка. По результатам исследования даны предварительные ответы на поставленные вопросы.

Ключевые слова: поляризованные пучки, управление спином, адиабатичность, накопительное кольцо, электрический дипольный момент

DOI: 10.56304/S2079562925010014

1. ВВЕДЕНИЕ

Идея использования ускорителя заряженных частиц как средства обнаружения электрического дипольного момента впервые была предложена коллаборацией srEDM (Storage Ring EDM) в Брукхейвенской Национальной Лаборатории (США) в 2004 г. [1–3] Значащим явлением в этом предложении выступает прецессия Томаса-Баргмана-Мишеля-Телегди (Т-БМТ). Предполагая ненулевое значение ЭДМ, эта прецессия состоит из двух компонент, движимых воздействием поля на соответственно магнитный и электрический дипольный моменты частиц. Предложение коллаборации srEDM состояло в том, чтобы занулить ту часть прецессии, которая связана с магнитным дипольным моментом (МДМ). Наблюдение прецессии как таковой в этих условиях, называемых условиями “замороженного спина,” означало бы действительность ЭДМ, а ее скорость (оцениваемая по углу отклонения поляризации, положенной изначально в плоскость накопительного кольца) служила бы оценке его величины.

Реализация исходной идеи “замороженного спина” потребовала бы выполнения весьма жестких требований на юстировку оптических элементов ускорителя. Любые несовершенства кольца в данном случае череваты возникновением МДМ-связанной прецессии в плоскости наблюдения действия ЭДМ. Помимо этого, для реализации этой идеи потребовалось бы построить соответствующее новое накопительное кольцо. Для того, чтобы было возможно провести эксперимент на существующем ускорителе, были предложены “метод частотной области” и модель “квази-замороженного кольца.” [4, 5]

В предложенной схеме эксперимента МДМ-связанную спин-прецессию в плоскости измерения ЭДМ не стремятся подавить. Вместо этого, ЭДМ вычисляется не прямым измерением, а путем сравнения Т-БМТ явления в двух случаях: при движении пучка по часовой стрелке и в обратном направлении. В обоих случаях определяется совокупная частота Т-БМТ-прецессии. Поскольку речь идет о сравнении явления, субстрат этого явления (пучок) должен быть идентичным. Поскольку в тео-

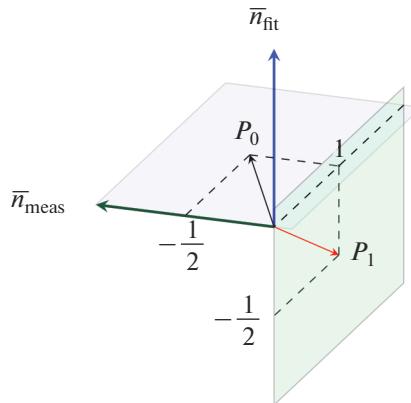


Рис. 1. Оптимальные соотношения между осью и поляризацией при измерении и при калибровке эффективного фактора Лоренца пучка.

рии спин-прецессии предполагают (см. ниже), что пучок субстративен Т-БМТ-явлению только в виде энергии, выражаемой Лоренц-фактором, два пучка считаются идентичными при равенстве их эффективных факторов Лоренца. Таким образом задача по приведению экспериментального субстрата (пучков) к одному знаменателю показывает себя задачей по калибровке эффективных Лоренц-факторов пучков.

Также следует отметить, что эксперименты по измерению ЭДМ на базе Т-БМТ-явлений используют пучки, в которых когерентный ансамбль спиновых векторов перпендикулярен направлению оси стабильного спина (оси поляризации). Такие пучки мы обозначаем как “пучки с вырожденной стационарной поляризацией.” Мгновенная поляризация (подверженная процессу спин-декогеренции) в таких пучках выступает в роли поляризации.

2. КАЛИБРОВКА ПУЧКА ПО ЭФФЕКТИВНОМУ ФАКТОРУ ЛОРЕНЦА

2.1. Эффективный фактор Лоренца

Эффективный фактор Лоренца отражает равновесное значение энергии частицы, учитывая ее бетатронное удлинение орбиты и вторые порядки коэффициента сжатия орбиты. Изначально, это понятие было введено в ходе борьбы с деполяризацией пучка за счет спиновой декогеренции [6]. Оно объясняет способность сектупольных магнитов подавлять спиновую декогеренцию, и тем самым позволяет вычислить требуемые для этого значения их градиентов.

Используемая теория спин-декогеренции предполагает однозначную зависимость частоты спин-прецессии частицы от энергии последней, выраженной эффективным Лоренц-фактором. Сектупольные поля, действуя как фокусирующие призмы и выравнивая длины равновесных орбит

различных частиц пучка, заставляют спин-векторы всех его частиц претендовать когерентно: с одинаковой угловой скоростью. Успешность использования сектупольных полей в практике подавления спиновой декогеренции пучка (с результатом достигающим удержание поляризации на уровне 1000 с [7–9]) позволяет говорить об обоснованности теории.

Сложность измерения ЭДМ частицы на основании Т-БМТ-явлений состоит в том, что ЭДМ действует в нем таким же образом, как и МДМ. В принятых обстоятельствах (безразличия природы для наличия целевого явления), свойственных “методу частотной области,” эксперимент может отвечать только на вопрос о величине электрического дипольного момента, гипотезируемого в составе явления; а суждение о величине, в свою очередь, делается на основании дифференциала величины образа сопоставленных случаев. Однако для этого нужно, чтобы связанное с МДМ базовое количество явления оставалось идентичным. Имеет место утверждение, что сравнив частоты Т-БМТ-прецессии двух пучков в плоскости исключительного действия МДМ, количество его действия в смешанной плоскости также будет равным. Ключевым в этой логике выступает понятие эффективного Лоренц-фактора.

2.2. Спин-флиппинг

Спин-флиппингом мы называем процесс изменения направления оси поляризации пучка. В частности, в ходе эксперимента предполагается переориентировать ось поляризации из вертикального положения в радиальное и обратно.

Существование переходного процесса в проекте измерительного цикла обусловлено двумя необходимостями. Во-первых, необходимостью сохранения поляризации пучка в течении времени накопления (иначе говоря, требованием невырожденности

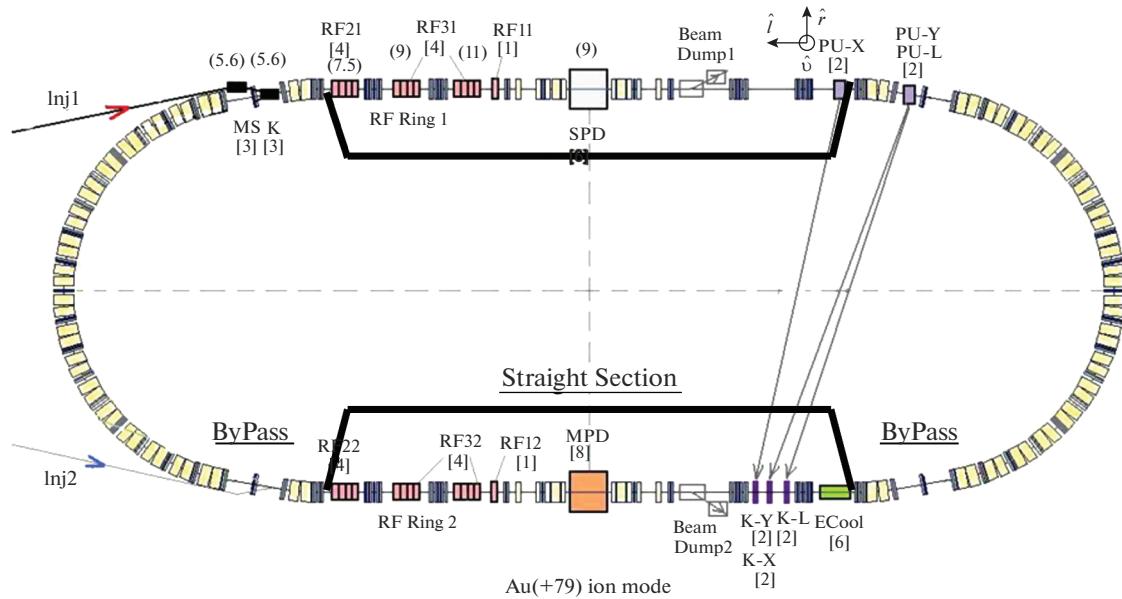


Рис. 2. Оптическая структура использованная при моделировании.

сти стационарной поляризации при инжекции). Во-вторых, зависимостью значения рабочей энергии от фактических определяющих инжекции пучка. Как в случае измерения, так и в случае калибровки пучка, оптимальным между осью \bar{n} и поляризацией P является перпендикулярное отношение (см. рис. 1). В случае инжекции – сонаправленность $P \parallel \bar{n}$.

2.3. Условие адиабатичности

Условие адиабатичности здесь означает условие сохранения со-ориентации поляризации пучка и ее оси прецессии. Со-ориентация сохраняется в том случае, когда скорость обращения поляризации вокруг оси много превышает скорость изменения ориентации оси: $\omega_{cyc} v_s \bar{n} \gg \dot{\bar{n}}$ (где ω_{cyc} – это циклотронная частота пучка, а v_s – нормализованная частота спин-прецессии). Поскольку со-ориентация в течении всего цикла измерения меняется, очевидно, что в какие-то моменты времени условие адиабатичности спин-прецессии суждено нарушить. Хронология цикла выглядит следующим образом:

1. Инжекция ($P \parallel \bar{n}$);
2. Подготовка к калибровке:
 - (а) медленное опускание оси в плоскость кольца ($P \parallel \bar{n}$),
 - (б) резкий возврат оси в вертикальное положение (после чего $P \perp \bar{n}$);
3. Калибровка (в ходе которой получено “квази-замороженное” состояние поляризации);

4. Подготовка к измерению (медленное опускание \bar{n} в плоскость кольца, при этом $P \perp \bar{n}$ разворачивается в вертикальную плоскость);

5. Измерение.

Из представленной хронологии событий видно, что нарушение адиабатичности происходит один раз, и дважды ось следует переустанавливать адиабатически.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Спин-динамика моделировалась в структуре коллиайдера NICA (ОИЯИ, Дубна) с включением каналов транспортировки (байпасов) для обхода существующих прямых секций [10]. В байпас-каналах располагается оборудование для осуществления квази-замороженного режима работы в виде фильтров Вина.

Оптическая структура модели кольца содержит возмущения в виде наклонов поворотных магнитов вокруг оптической оси и вертикальных сдвигов квадрупольей; оба вида несовершенств кольца в ходе работы пучка порождают радиальное магнитное поле, создающее МДМ-связанную прецессию поляризации в плоскости наблюдения ЭДМ. Несовершенства структуры также отражаются на ширине энергетического спектра пучка, за пределы которого должна быть вынесена энергия инжекции; так называемой “силе резонанса.” Сила резонанса также влияет на соблюдение условий адиабатичности.

Моделирование проводилось, во-первых, с целью определить скорость переориентации оси поляризации, требуемую для удовлетворения условий

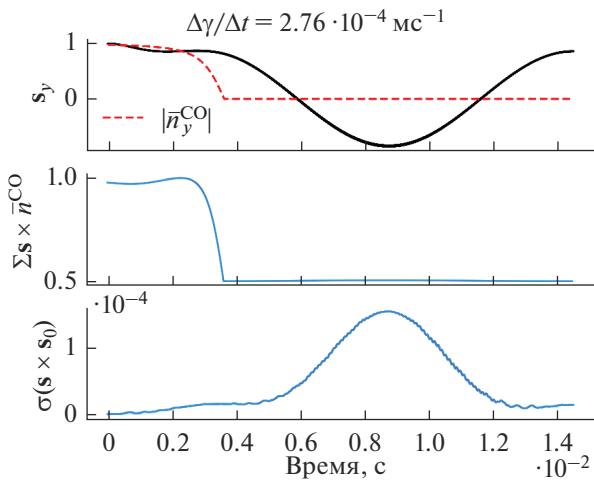


Рис. 3. Медленный случай приближения пучка к рабочей энергии.

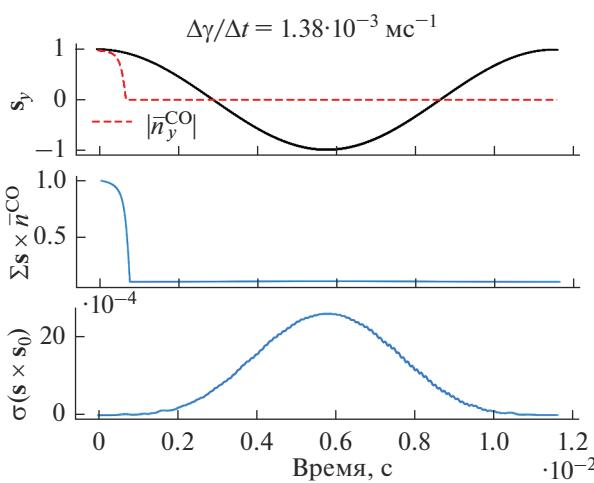


Рис. 4. Быстрый случай приближения пучка к рабочей энергии.

эксперимента, изложенных в хронологии выше, и во-вторых для исследования когерентности пучка при изменениях в его динамике в данной структуре. Аналогичное исследование проводилось ранее [11] для другой модификации NICA.

Моделирование проводилось в среде COSY Infinity [12].

4. ВЫВОДЫ

На рис. 3 и 4 представлены два случая на границе области адиабатичности, соответствующей несовершенствам кольца исследуемой модели.¹

¹ См. комментарий о силе резонанса в предыдущем разделе.

По полученным результатам можно сделать вывод о сохранении спиновой когерентности пучка при работе в квази-замороженном кольце с несовершенствами. Что касается вопроса о требуемой скорости переориентирования, обратим внимание, что в при измерении ЭДМ на базе Т-БМТ-явления используются спин-когерентные пучки с вырожденной стационарной поляризацией. Это означает, что при осуществлении подготовки к калибровке (раздел 2.3) пучок должен быть спин-когерентно деполяризован. При медленном приближении к рабочей энергии (≈ 2 кэВ/оборот), рис. 3, остается 50% поляризации; это значит, что пучок потерял 50% своей эффективности для измерений. В случае рис. 4 (≈ 9.5 кэВ/оборот) остается 11% поляризации; это значит пучок стал 89%-эффективным для измерения. Стало быть, в данном ускорителе приближение к энергии должно быть быстрее 10 кэВ/оборот.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность за поддержку данной работы Российским научным фондом (РНФ) по гранту 22-42-04419.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Farley F.J.M. et al. // Phys. Rev. Lett. 2004. V. 93 (5). P. 052001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.052001>
2. Anastassopoulos D. et al. (srEDM Collab.) “AGS Proposal: Search for a Permanent Electric Dipole Moment of the Deuteron Nucleus at the $10^{-29} e \cdot \text{cm}$ Level,” Proposal as Submitted to the BNL PAC. 2008. https://www.bnl.gov/edm/files/pdf/deuteron_proposal_080423_final.pdf.
3. Abusaif F. et al. (CPEDM Collab.) Storage Ring to Search for Electric Dipole Moments of Charged Particles: Feasibility Study. CERN Yellow Reports: Monographs. CERN-2021-003. 2021. Geneva: CERN. <https://doi.org/10.23731/CYRM-2021-003>
4. Senichev Y., Aksentyev A., Melnikov A. // Proc. RuPAC’21. Alushta, Russia. 2021. Geneva: JACoW Publ. P. P. 44–47. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUB03>
5. Aksentev A.E., Senichev Y.V. // J. Phys.: Conf. Ser., 2020. V. 1435 (1). P. 012026. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1435/1/012026>
6. Aksentyev A.E., Senichev Y.V. // Proc. IPAC’19. Melbourne, Australia. 2019. Geneva: JACoW Publ. P. 864–866. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2019-MOPTS012>
7. Guidoboni G. // Proc. IPAC’15. Richmond, VA, USA. 2015. Geneva: JACoW Publ. P. 4066–4069. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2015-THPF146>
8. Guidoboni G. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117 (5). P. 054801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.054801>

9. Guidoboni G. et al. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2018. V. 21. P. 024201. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.21.024201>
10. Колокольчиков С.Д., Аксентьев А.Е., Мельников А.А., Сеничев Ю.В., Ладыгин В.П., Сыресин Е.М. // Ядерн. физ. инжинир. 2024. Т. 15 (5). С. 464. <https://doi.org/10.56304/S2079562924050257> [Kolokolchikov S., Aksentyev A., Melnikov A., Senichev Yu., Ladygin V., Syresin E. // Phys. At. Nucl. 2023. V. 86 (11). P. 2423–2428. [https://doi.org/10.1134/S1063778823110248\].](https://doi.org/10.1134/S1063778823110248)
11. Аксентьев А.Е., Мельников А.А., Сеничев Ю.В. // Ядерн. физ. инжинир. 2023. Т. 14 (5). С. 465. <https://doi.org/10.56304/S2079562922050025> [Aksentyev A.E., Melnikov A.A., Senichev Yu.V. // Phys. At. Nucl. 2022. V. 85 (10). P. 1675–1678. [https://doi.org/10.1134/S1063778822100027\].](https://doi.org/10.1134/S1063778822100027)
12. Berz M., Makino K., Shamseddine K., Hoffstatter G.H., Wan W. “COSY INFINITY and Its Applications in Nonlinear Dynamics.” Computational Differentiation: Techniques, Applications, and Tools. Berz M., Bischof C., Corliss G., Griewank A. (Eds.). 1996. SIAM. P. 363.

Investigation of Spin-Flipping when Approaching the Resonant Energy in an Imperfect NICA-Bypass Lattice

A. E. Aksentyev^{1, 2, 3, *}, A. A. Melnikov^{1, 3, 4}, Y. V. Senichev^{1, 3}, and S. D. Kolokolchikov^{1, 3}

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

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

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

⁴*Landau Institute for Theoretical Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Moscow oblast, 142432 Russia*

**e-mail: a.aksentyev@inr.ru*

Received May 3, 2024; revised May 3, 2024; accepted May 15, 2024

Abstract—The present investigation studies the process of change of the beam polarization axis. It is carried out in view of developing a measurement technique to discover the electric dipole moment of the deuteron using an existing particle accelerator, in particular the NICA collider facility (JINR, Dubna), when the latter operates in a storage ring regime. The investigation is part of the effort to devise a procedure to calibrate the so-called effective Lorentz-factor of the beam and is connected with other tasks concerning the re-orientation of the beam’s polarization axis. The process is studies with respect to two questions: (1) to determine the speed of the re-orientation required to fulfill the experimental conditions, (2) the effects it might have on the beam’s spin-coherence. The investigation results provide preliminary answers to these questions.

Keywords: polarized beams, spin manipulation, adiabaticity, storage ring, electric dipole moment