

## ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ БЕГУЩЕГО УГЛА ВАЙНБЕРГА НА ЭНЕРГИИ $J/\psi$ -МЕЗОНА НА ЧАРМ-ТАУ ФАБРИКЕ

*Е. В. Бедарев<sup>а,б,1</sup>, И. А. Кооп<sup>а,б,в</sup>, А. В. Отбоев<sup>а</sup>, Ю. М. Шатунов<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>б</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>в</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

В ИЯФ СО РАН планируется создание ускорительного комплекса Супер чарм-тау фабрика, работающего в широком диапазоне значений энергии  $2E = 2-5$  ГэВ в с.ц.м. и имеющего проектную светимость  $L = 1 \cdot 10^{35} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . В рамках физической программы предлагается провести эксперимент по измерению бегущего слабого угла Вайнберга на энергии  $J/\psi$ -мезона. Из-за малости предсказываемого эффекта необходимо исключить влияние систематической погрешности со стороны непредсказуемых изменений оптики кольца и пучкового фона. Для этого необходимо организовать частую смену знака продольной поляризации пучка электронов в месте встречи. В данной работе проведено исследование возможности переворота спина с помощью спинового ВЧ-ротатора в конфигурации накопительного кольца электронов с тремя «сибирскими змейками». На основании результатов моделирования сделаны выводы о возможности использования данного подхода.

The BINP SB RAS plans to create the Super Charm-Tau Factory accelerator complex, operating in a wide energy range  $2E = 2-5$  GeV in c.m. and having the design luminosity  $L = 1 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . As the part of the physical programme, it is proposed to carry out the experiment by measuring the Weinberg running weak mixing angle for the  $J/\psi$ -meson energy. Due to the smallness of the predicted effect, excluding the influence of systematic errors from unpredictable changes in the magnet lattice and the beam background is necessary. To do this, we have to organize frequent changes of the sign of the electron beam longitudinal polarization at the interaction point. In this paper, we have investigated the possibility of the spin-flip, using the spin RF-rotator, in colliding electron ring with three Siberian Snakes. Based on the simulation results, conclusions about the possibility of using this approach have been made.

PACS: 29.20.–с

### ВВЕДЕНИЕ

В рамках физической программы планируемого ускорительного комплекса Супер чарм-тау фабрика (СЧТФ), разрабатывающегося в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ), предлагается провести исследование спинзависимых эффек-

---

<sup>1</sup>E-mail: E.V.Bedarev@inp.nsk.su

тов в процессах электрон-позитронной аннигиляции в диапазоне значений энергии  $2E = 2-5$  ГэВ в с. ц. м. и проектной светимостью  $L = 0,1 \text{ пб}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  [1, 2].

Одним из таких эффектов является бегущий слабый угол смешивания Вайнберга. Для реализации предложенного эксперимента по изучению угла Вайнберга достаточно организовать продольно-поляризованный пучок электронов в месте встречи. Однако в силу малости предсказываемого эффекта дополнительно необходима непрерывная смена знака поляризации<sup>1</sup> для уменьшения влияния систематической погрешности, идущей от непредсказуемых флуктуаций оптики кольца и пучкового фона. Реализация продольной поляризации в месте детектора будет организована с помощью трех «сибирских змеек» [3]. Сама смена знака продольной степени поляризации будет осуществляться при помощи спинового ВЧ-ротатора. Данное устройство позволяет осуществить адиабатический переворот поляризации при помощи внешнего спинового резонанса, создаваемого на азимуте кольца малым продольным или поперечным ВЧ-полем [4].

Далее будет рассмотрена схема эксперимента и представлены результаты исследования возможности использования спинового ВЧ-ротатора с продольным полем с учетом синхротронных колебаний, начального энергетического разброса в пучке, радиационного затухания, энергетической спиновой диффузии, связанной с квантовой раскачкой синхротронных колебаний, и адиабатического включения самого ротатора.

### БЕГУЩИЙ УГОЛ ВАЙНБЕРГА

Изучение поведения зависимости угла Вайнберга от энергии на уровне петлевых поправок в диапазоне  $4E^2 = Q^2 \ll M_Z^2$  представляет интерес в связи с возможностью поиска не прямых следов не наблюдаемых ранее эффектов вне масштаба энергий тераэлектронвольт [5]. В свою очередь, в экспериментах с СЧТФ имеется возможность провести измерение двойной продольной асимметрии  $A_{LL}(\zeta_-, \zeta_+)$  [6]:

$$A_{LL}(\zeta_-, \zeta_+) = \frac{\sigma(\zeta_-, \zeta_+) - \sigma(-\zeta_-, -\zeta_+)}{\sigma(\zeta_-, \zeta_+) + \sigma(-\zeta_-, -\zeta_+)}, \quad (1)$$

где  $\sigma(\zeta_-, \zeta_+)$  — полное сечение адронного рождения, соответствующее  $J/\psi$ -резонансу ( $2E = 3,1$  ГэВ в с. ц. м.), содержащее вклад нейтрального тока, не исчезающего при ненулевой степени продольной поляризации;  $\zeta_{\pm}$  — степень продольной поляризации электрон-позитронных пучков. В случае только продольно поляризованного электронного пучка зависимость  $A_{LL}(\zeta_-, 0)$  от  $\sin^2 \theta_W(Q^2)$  позволит использовать ее как пробу для проверки предсказаний расчета Стандартной модели для угла Вайнберга при данной энергии.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для измерения двойной продольной асимметрии будет использована следующая схема эксперимента рис. 1. Повторяющаяся продольная степень поляризации в месте встречи, в котором расположен универсальный магнитный детектор СЧТФ, электронного кольца СЧТФ ( $I$ ) будет организована при помощи трех «сибирских змеек» (2).

<sup>1</sup>Идея Бондаря А. Е., ИЯФ СО РАН.

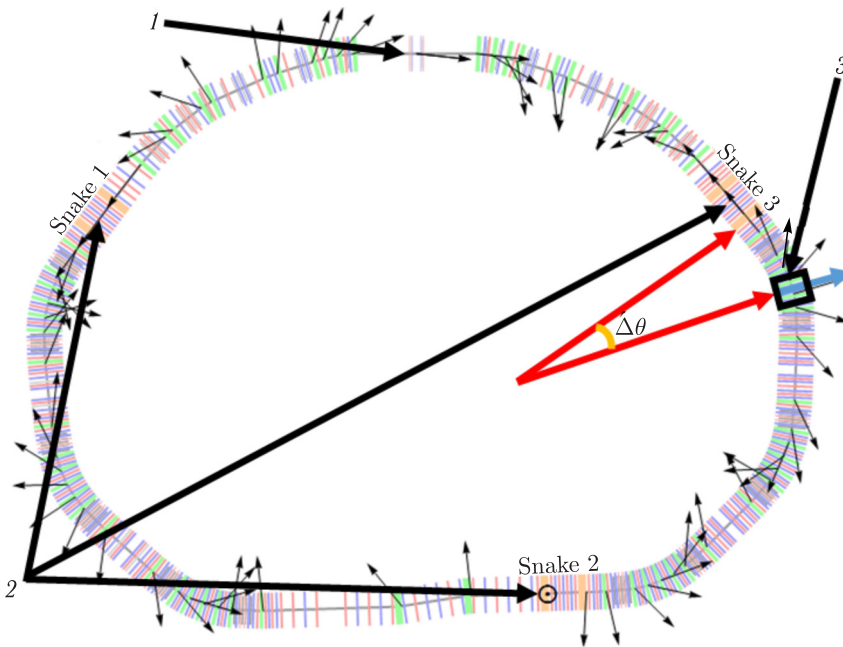


Рис. 1 (цветной в электронной версии). Схема предлагаемого эксперимента по изучению слабого угла Вайнберга: 1 — место встречи (IP); 2 — «сибирские змейки» (первая змейка отстроена от поворота на  $\pi$ :  $\varphi = \pi + \Delta\varphi$ , нумерацию змеек см. на рисунке); 3 — спиновый ВЧ-ротатор с продольным полем (сдвинут на расстояние  $\Delta\theta$  от третьей змейки; синяя стрелка — равновесная степень поляризации в месте ВЧ-ротатора). Черными тонкими стрелками обозначена эволюция равновесной степени поляризации вдоль кольца в отсутствие ВЧ-ротатора

При этом во избежание действия «зеркальной гармоники» ВЧ-ротатора, нарушающей единственность резонанса при полуцелой спиновой частоте [4], у одной из змеек угол поворота отстраивается от  $\pi$  на  $\Delta\varphi = -0,147$  (в рассмотренном случае первая), что соответствует спиновой частоте  $\nu = 0,48$ . Для частой смены знака поляризации предлагается использовать ВЧ-ротатор с продольным косинусоидальным магнитным полем (3) приблизительно в 79,47 м ( $\Delta\theta = 1,49$ ) от третьей «сибирской змейки». Положение ротатора определяется условием ортогональности равновесной степени поляризации (синяя стрелка на рис. 1) и ВЧ-поля. Сам спиновый ротатор будет осуществлять адиабатический переворот равновесной поляризации, изменяя тем самым знак продольной поляризации в месте встречи. Набор данных для  $\sigma (\pm\zeta, 0)$  будет выполняться детектором поочередно после каждого полного переворота спина пучка, который будет контролироваться при помощи фазы ВЧ-ротатора (начало и конец переворота) и поляриметра на обратном комптоне (величина продольной поляризации). Для поддержания необходимого уровня степени продольной поляризации будет осуществляться инжекция дополнительных сгустков поляризованных электронов. Схема и параметры ВЧ-ротатора и поляриметра, как и оценки поддерживаемого уровня поляризации, будут обсуждаться в дальнейшем. Они находятся на стадии разработки.

## АДИАБАТИЧЕСКИЙ ПЕРЕВОРОТ СПИНА ВНЕШНИМ ВОЗМУЩЕНИЕМ

Явление адиабатического переворота спина основано на так называемом адиабатическом пересечении  $|w_k|^2 \gg |\varepsilon'|$ , описываемом в рамках формулы Фруассара–Стора (ФС) [7], с постоянной скоростью изменения отстройки за оборот  $|\varepsilon'|$  уединенного резонанса  $|\nu - \nu_k| \lesssim |w_k|$  с амплитудой гармоники  $w_k$  и резонансной спиновой частотой  $\nu_k$ . При таком пересечении формула ФС предсказывает смену знака равновесной степени поляризации. Организация резонансной гармоники будет осуществляться при помощи введения на азимуте спинового ВЧ-ротатора («флиппера») с гармоническим полем с частотой  $\nu_f$ . Резонансные частоты при наличии такого «флиппера» задаются условием  $\nu - \nu_f = k$ , где  $k$  — целое число. Сам переворот будет выполняться на резонансе с  $k = 0$ , величина резонансной гармоники  $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$  и  $|\varepsilon'| = 10^{-8}$ .

## ВЛИЯНИЕ СИНХРОТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СПИН В РЕЗОНАНСНОЙ ОБЛАСТИ

Рассмотрим влияние синхротронных колебаний на поведение спина в резонансной области. Влияние бетатронного движения предполагается усредненным, а частота находится вдали от спин-бетатронных резонансов. Общая теория спиновой динамики, на которой основаны дальнейшие вычисления, может быть найдена в [8].

Наличие синхротронных колебаний приводит к появлению резонансов спутников, отстающих друг от друга на синхротронную частоту  $\nu_s$  ( $\nu_{km} = k + m\nu_s$ ,  $m$  — целое число), и перераспределению между ними мощности резонанса  $w_{km} = w_k J_m(\sigma/\nu_s)$ , где  $\sigma = \gamma(\partial\nu/\partial\gamma)\delta_0$  — амплитуда модуляции,  $\delta_0$  — амплитуда синхротронных колебаний. В случае параметров СЧТФ  $\nu_s = 1,17 \cdot 10^{-2}$ ,  $\delta_0 = 1,56 \cdot 10^{-3}$  для схемы коллайдера с тремя «сибирскими змейками» и  $\nu = 0,48$  имеем  $\gamma(\partial\nu/\partial\gamma) = -1,22$ ,  $\sigma = -1,9 \cdot 10^{-3}$ ,  $|w_{k0}| = 9,93 \cdot 10^{-5}$  (основной резонанс  $m = 0$ ). Полученное значение гармоники основного резонанса и выбор первоначальной отстройки  $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-3}$  позволяют осуществить адиабатический переворот спина на основном резонансе в силу сохранения его уединенности (удаленность боковых резонансов за счет величины  $\nu_s$ ) и его малой подавленности (малость амплитуды модуляции).

## 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 для ансамбля из  $N_e = 10^4$  частиц, имеющего стационарное нормальное распределение энергетического разброса с  $\sigma_\delta = 1,1 \cdot 10^{-3}$  и начальную среднюю по ансамблю  $\langle S \rangle = 1$  радиальную степень поляризации. Эволюция синхротронных колебаний отслеживалась путем вращения вектора  $\psi = (\phi, \delta)$ , где  $\phi$  — нормализованный сдвиг фазы от синхронной частицы и  $\delta$  — энергетический разброс. Радиационное затухание вводилось с помощью экспоненциального затухания  $\psi$  с декрементом продольного движения, соответствующим времени затухания

$\tau_E = 15 \cdot 10^{-3}$  с. Энергетическая диффузия реализована при помощи однооборотных флуктуаций  $\delta$ , имеющих нормальное распределение с дисперсией  $\sigma_{\text{noise}}$ , соответствующей квантовой раскачке синхротронных колебаний  $\sigma_{\text{noise}} = 2\sigma_\delta / \sqrt{N_\gamma} = 2,84 \cdot 10^{-5}$ , здесь  $N_\gamma = 6 \cdot 10^3$  — характерное время затухания в оборотах.

Проверка корректности моделирования равновесного энергетического распределения осуществлялась при помощи контроля зависимости среднеквадратичного энергетического разброса пучка от номера оборота (рис. 2). Из зависимости видно, что

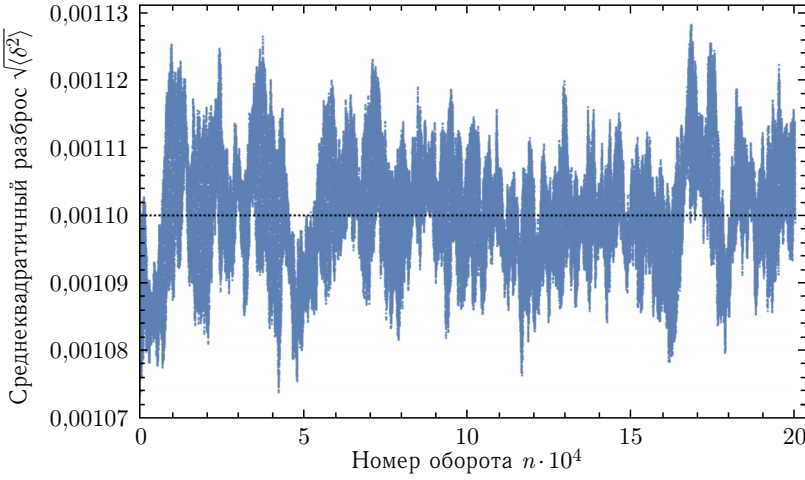


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного энергетического разброса пучка от номера оборота  $n$ . Черная пунктирная линия соответствует равновесному энергетическому разбросу  $\sigma_\delta = 1,1 \cdot 10^{-3}$

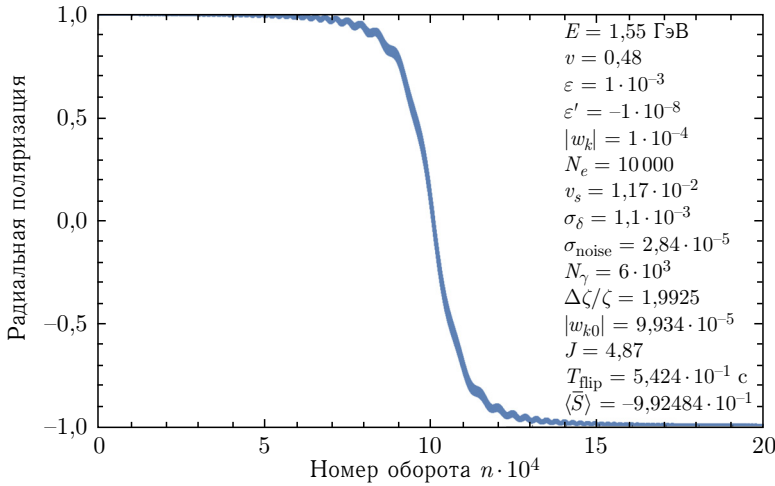


Рис. 3. Зависимость радиальной степени поляризации ансамбля электронов от номера оборота  $n$ . Параметры пучка соответствуют проектным для СЧТФ на энергии  $J/\psi$ -мезона, параметры «флиппера»  $|w_k| = 1 \cdot 10^{-4}$  и  $|\varepsilon'| = 1 \cdot 10^{-8}$

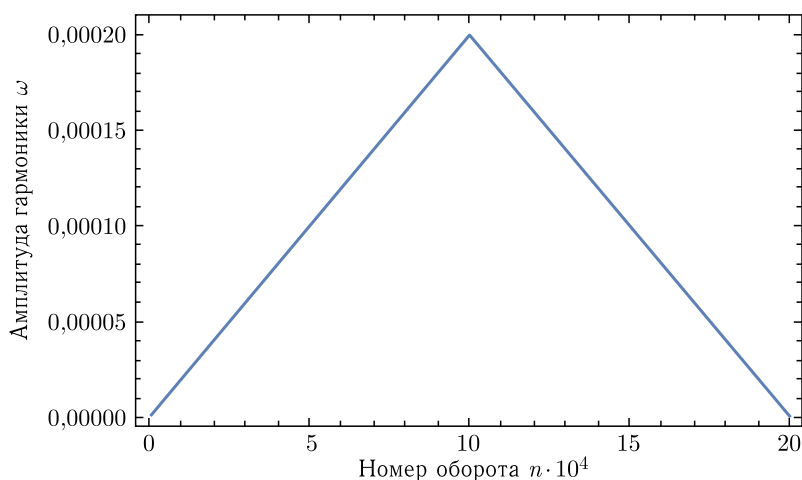


Рис. 4. Зависимость амплитуды ВЧ-ротатора  $\omega = 2|w_k|$  от номера оборота  $n$

среднеквадратичный разброс колеблется вокруг равновесного значения  $\sigma_\delta$  (черная пунктирная линия), а флуктуации соответствуют конечному набору частиц и составляют  $\sim 1,1 \cdot 10^{-5}$  ( $\sigma_\delta / \sqrt{N_e}$ ) в соответствии с используемой моделью.

Далее на рис. 3 представлен график радиальной проекции степени поляризации в зависимости от номера оборота. Из представленной зависимости видно, что для параметров СЧФТ адиабатический переворот был осуществлен. Ослабление степени поляризации после переворота составило  $\Delta\zeta/\zeta = 1,9925$ , что соответствует  $\sim 10^3$  переворотов. При этом время одного переворота составляет:  $T_{\text{пир}} = 2(\varepsilon_0/|\varepsilon'|)T_0 = 5,42 \cdot 10^{-1}$  с,  $T_0 = 2,7 \cdot 10^{-6}$  с — время обращения пучка.

Отметим, что для уменьшения амплитуды прецессии в процессе переворота использовалось адиабатическое включение ВЧ-ротатора (рис. 4). Условие адиабатичности при таком включении ротатора не нарушается в течение всего переворота.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было выполнено:

- изучение влияния синхротронных колебаний на адиабатический переворот; показано, что переворот на основном резонансе с выбранными параметрами ВЧ-ротатора может быть использован в силу его малой подавленности и удаленности от боковых резонансов;
- моделирование адиабатического переворота спина при помощи спинового ВЧ-ротатора с продольным полем в схеме коллайдера с тремя «сибирскими змейками».

На основании полученных результатов моделирования и расчетов показано, что использование динамического управления спином при помощи ВЧ-ротатора с продольным полем для реализации быстрой смены знака продольной поляризации на энергии  $J/\psi$ -мезона в месте встречи возможно.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анашин В. В. и др. Супер чарм-тау фабрика, концептуальный проект. Часть первая (физическая программа, детектор). ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2018.
2. Анашин В. В. и др. Супер чарм-тау фабрика, концептуальный проект. Часть вторая (коллайдер, инжектор). ИЯФ СО РАН. Новосибирск, 2018.
3. Кооп I. A., Bogomyagkov A. V., Otboev A. V. Longitudinal Polarization in Novosibirsk C-Tau Factory // Joint Workshop on Super C-Tau Factory, Moscow, Sept. 23–26, 2019.
4. Кооп I., Shatunov Yu. Spin Flip by RF-Field at Storage Rings with Siberian Snakes // Proc. of the 11th Intern. Symp. on High Energy Spin Physics, Bloomington, Indiana, USA, Sept. 15–22, 1994. AIP Conf. Proc. 1995. V. 343, Iss. 1. P. 317–320.
5. Kumar K. S., Sonny Mantry, Marciano W. J., Souder P. A. Low-Energy Measurements of the Weak Mixing Angle // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2013. V. 63, No. 1. P. 237–267.
6. Скоурен Ю. И., Хриплович И. В. Weak Neutral Currents of New Quarks in  $e^+e^-$  Annihilation // Yad. Phys. 1979. V. 30; Preprint BINP 79-25. Novosibirsk, 1979.
7. Froissart M., Stora R. Depolarisation d'un Faisceau de Protons Polarises dans un Synchrotron // Nucl. Instr. Meth. 1960. V. 7, No. 3. P. 297–305.
8. Кондратенко А. М. Поляризованные пучки в накопителях и циклических ускорителях. Дис. . . . д-ра физ.-мат. наук. 01.04.02 — теоретическая и математическая физика. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1982.

Получено 15 сентября 2023 г.