

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ ИМ. Г. И. БУДКЕРА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

УДК 621.384.63

СОГЛАСОВАНО
Научный руководитель

УТВЕРЖДАЮ
Начальник отдела аспирантуры
ИЯФ СО РАН

_____ И. А. Кооп

_____ С. В. Полосаткин

« _____ » _____ 2024 г.

« _____ » _____ 2024 г.

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННЫЕ ПУЧКИ В
ТАУ-ЧАРМ ФАБРИКЕ

(За IV семестр обучения в аспирантуре)

Специальность 1.3.18 Физика пучков заряженных частиц и
ускорительная техника

Аспирант _____ Е. В. Бедарев

НОВОСИБИРСК 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Эксперимент по изучению слабого угла Вайнберга	5
1.1 Бегущий слабый угол смешивания Вайнберга	5
1.2 Подавление систематических погрешностей	6
1.3 Схема эксперимента.....	7
2 Результаты моделирования	11
2.1 Переворот спина для энергии $\Upsilon(4S)$ на Super-KEKB	11
2.2 Сравнение качества переворота на Super-KEKB для различных схем	12
Заключение	13
Список использованных источников	14
Приложение	15

ВВЕДЕНИЕ

В Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера (ИЯФ) планируются создание ускорительного комплекса Супер Чарм-Тау Фабрика (СЧТФ), работающего в широком диапазоне энергий $2E = 2 - 5$ ГэВ в с.ц.м. и имеющего проектную светимость $L = 0.1 \text{ пб}^{-1}\text{с}^{-1}$. Заявленные параметры СЧТФ позволяют проводить исследование процессов электрон-позитронной аннигиляции с большой статистической точностью, что открывает возможности для изучения различных эффектов в данном диапазоне энергии с более лучшей статистикой, чем в имеющихся экспериментах: BESIII, Belle, BaBar и других. Это же обстоятельство позволяет производить поиск явлений, предсказываемых вне рамок Стандартной Модели (СМ) [1].

В рамках физической программы экспериментов с СЧТФ планируется изучать различные спин-зависимые эффекты. Одним из таких эффектов является бегущий слабый угол смешивания Вайнберга [2][3]. Для его изучения предлагается измерить продольную асимметрию сечения рождения J/ψ -мезона. Однако, для подавления систематических погрешностей со стороны пучка требуется специальная схема измерения сечений с разным знаком спиральности электронных сгустков в месте встречи [4].

Предлагаемый эксперимент основывается на схеме реализации фиксированной продольной поляризации в месте детектора СЧТФ с полужелой спиновой частотой при помощи трех Сибирских Змеек [5]. Для подавления систематической погрешности предлагается организовать случайный знак продольной поляризации каждого электронного сгустка при его инжекции в соответствующую сепаратрису и затем дальнейшая частая смена этого знака. Реализация частого изменения знака возможна с помощью спиновых ВЧ-ротаторов. Данные устройства будут осуществлять адиабатический переворот спина создаваемым на азимуте кольца малым спиновым возмущением.

Помимо СЧТФ, данный эксперимент также можно провести на планируемом модернизированном ускорительном комплексе Super-KEKB с вертикально поляризованными электронами. В рамках программы модернизации предлагается организация продольной поляризации при помощи изменения конфигурации места встречи. Рассмотрен случай антисимметричной конфигурации места встречи, подразумевающей две части с разными поляризациями, состоящими из спинового ротатора и поворотных магнитов. Основная функция спин ротаторов будет состоять в повороте вертикальной поляризации в плоскость кольца, а поворотных магнитов в сведении пучка в

место встречи и вращении спина на 90 градусов, создавая тем самым продольную поляризацию в месте встречи. Соответственно, антисимметричная часть будет восстанавливать вертикальное положение поляризации.

Для проверки возможности осуществления частой смены знака продольной поляризации, в рамках этапа НИР по изучению спиновой динамики накопительных колец, необходимо произвести моделирование адиабатического поворота спина ансамбля частиц с учетом синхротронных колебаний, радиационного затухания и энергетической диффузии, вызванной квантовыми флуктуациями синхротронного излучения. В рамках проделанной работы было выполнено: моделирование с учетом вышеперечисленных эффектов в случае ВЧ-ротаторов с продольным полем для схемы с модифицированным местом встречи на Super-KEKB для энергий $\Upsilon(1S)$ и $\Upsilon(4S)$, проведено сравнение качества переворота для трех схем: с вертикальной поляризацией, с одной Сибирской Змейкой и тремя. Полученные результаты позволяют сделать предварительные заключения о возможности проведения эксперимента с использованием соленоидального спинового ВЧ-ротатора для частого изменения знака продольной поляризации в месте встречи на Super-KEKB для $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(4S)$.

1 Эксперимент по изучению слабого угла Вайнберга

В данном разделе будет рассмотрен важный с точки зрения проверки СМ спин-зависимый эффект и предварительная схема эксперимента по его поиску на СЧТФ и Super-KEKB.

1.1 Бегущий слабый угол смешивания Вайнберга

Известно, что одним из важных свободных параметров Стандартной Модели (СМ) является слабый угол смешивания Вайнберга. Данный параметр, в рамках перенормируемой модели электрослабой теории Вайнберга-Салама-Глэшоу $SU(2) \times U(1)$, принимает участие в механизме спонтанного нарушения симметрии, а также определяет структуру так называемых нейтральных токов. Само же определение угла Вайнберга и его соответствующая связь с массами переносчиков слабого взаимодействия имеет вид:

$$\sin^2(\theta_W) = \frac{g'^2}{g^2 + g'^2} = 1 - \frac{m_W^2}{m_Z^2},$$

$m_{W/Z}$ – масса W/Z -бозона, g и g' – изотопический спин и слабый гиперзаряд, входящие в нейтральные слабые токи. Однако, учет радиационных поправок (в рассмотренном случае подразумевается вклады собственно-энергетических диаграмм СМ, идущих от γ - Z интерференции) приводит к зависимости данного параметра от энергии передачи Q . Для оценки значения квадрата угла Вайнберга использовался расчет, в котором эффективный физически корректно определенный “скользящий”/”бегущий” угол, в константно-процессо-независимой схеме расчета с применением “pinch-technique” (PT), имеет вид [6]:

$$\sin^2 \widehat{\theta}_W(Q^2) = \widehat{k}(Q^2, m_Z)^{PT} \sin^2 \widehat{\theta}_W(m_Z)_{\overline{MS}},$$

где $\widehat{k}(Q^2, m_Z)^{PT}$ – электрослабый форм-фактор рассчитанный в PT схеме, $\sin^2 \widehat{\theta}_W(m_Z)_{\overline{MS}}$ – расчет квадрата синуса в $\overline{MS}$ (Minimal subtraction) схеме на Z -пике. В случае СЧТФ ($J/\psi(1S)$): $\sin^2 \widehat{\theta}_W(3.1 \text{ ГэВ}) = 0.2362$. Для Super-KEKB: $\Upsilon(1S)$ и $\Upsilon(4S)$: 0.2349 (9.46 ГэВ) и 0.2343 (10.57 ГэВ), соответственно.

В свою очередь, изучение зависимости угла Вайнберга от энергии на уровне радиационных поправок в диапазоне энергий много меньше массы Z -бозона представляет интерес в связи с возможностью поиска косвенных следов не наблюдаемых ранее эффектов вне масштаба энергий ТэВ [2]. Также отметим, что расчетные значения данного параметра зависят от выбора схемы перенормировки и тем самым также представляют интерес для экспериментальной проверки имеющихся теоретических расчетов.

На экспериментах с СЧТФ [4] и Super-KEKB имеется возможность провести измерение продольной асимметрии A_{LR} (поляризованы только электронные сгустки):

$$A_{LR} = \frac{\sigma_+ - \sigma_-}{\sigma_+ + \sigma_-}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\pm}$ – полное сечение рождения $q\bar{q}$ резонанса, содержащее не исчезающий при ненулевой степени продольной поляризации вклад нейтрального тока (подразумевается интерференция диаграмм $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow q\bar{q}$ и $e^+e^- \rightarrow Z_0^* \rightarrow q\bar{q}$), с положительно и отрицательно направленной в месте встречи продольной поляризацией электронного сгустка, соответственно. В данной конфигурации продольной поляризации электронов зависимость асимметрии от эффективного угла Вайнберга имеет следующий вид [3]:

$$A_{LR} = \frac{\frac{3}{8} - \sin^2 \widehat{\theta}_W(Q^2)}{2 \sin^2 \widehat{\theta}_W(Q^2) (1 - \sin^2 \widehat{\theta}_W(Q^2))} \left(\frac{m_{q\bar{q}}}{m_Z} \right)^2 \zeta, \quad (2)$$

где $\sin^2 \widehat{\theta}_W(Q^2)$ – значение квадрата угла Вайнберга для данного Q , $m_{q\bar{q}}$ – масса $q\bar{q}$ -резонанса, m_Z – масса Z -бозона, ζ – средняя степень поляризации электронного сгустка. Численное значение асимметрий для средней степени поляризации $\zeta = 1$:

$$A_{LR}^{J/\psi(1S)} \approx 4.4 \cdot 10^{-4}, A_{LR}^{Y(1S)} \approx 1.5 \cdot 10^{-2} \text{ и } A_{LR}^{Y(4S)} \approx 1.9 \cdot 10^{-2} \quad (3)$$

1.2 Подавление систематических погрешностей

В силу малости предсказываемого эффекта необходимо уменьшение влияния различных систематических погрешностей измерения асимметрии, идущих со стороны пучка. Одними из таких опасных источников систематики являются энергетический разброс пучка из-за зависимости от энергии сечения рождения узких резонансов ($\Gamma_{J/\psi(1S)} \sim 93$ кэВ, $\Gamma_{Y(1S)} \sim 54$ кэВ, $\Gamma_{Y(4S)} \sim 20.5$ МэВ [7]). Другим источником систематики выступает не эквивалентность величины продольной поляризации с разными знаками ζ_+ и ζ_- в силу наличия радиационного эффекта самополяризации (эффект Соколова-Тернова) [8].

В связи с этим была предложена специальная схема эксперимента, в которой предлагается организовать случайный знак степени поляризации в сгустке, а также последующий частую смену этого знака во время проведения набора данных Рис. 1. Такая процедура позволяет уменьшить систематическую погрешность на следующий фактор:

$$A = \frac{1}{\sqrt{n_B T_{tot}/\hat{T}}} \frac{\Delta_t}{\hat{T}}, \quad (4)$$

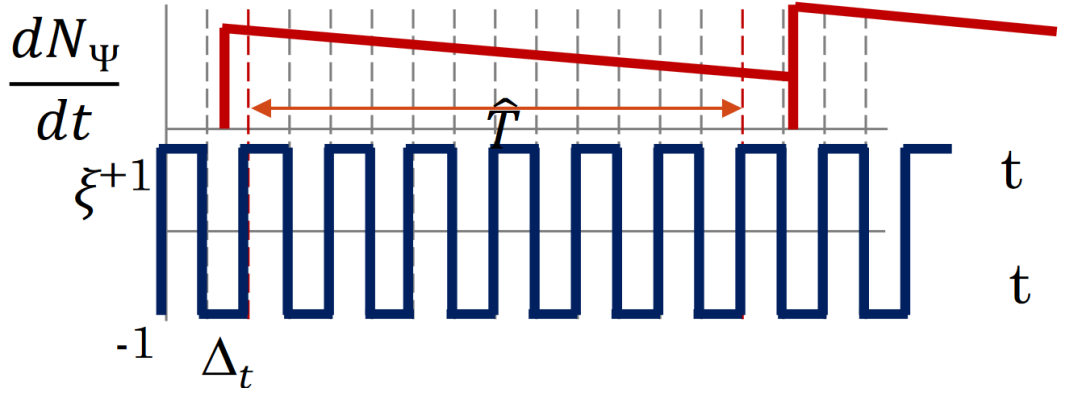


Рис. 1. — Схематичное изображение набора данных с использованием ВЧ-ротатора для переворота спина (“спиновая гимнастика”). Синим обозначен меандр демонстрирующий смену знака продольной степени поляризации в месте встречи.

где n_B – число сгустков, T_{tot} – время измерения, $\hat{T}$ – время набора данных для одного сгустка, Δ_t – время, занимаемое на переворот спина. Для $\Delta_t = 5$ с, $T_{tot} = 10^7$ с, $n_B = 300$ (2500), $\hat{T} = 300$ с фактор составляет: $5.3 \cdot 10^{-6}$ (СЧТФ) и $1.84 \cdot 10^{-6}$ (Super-KEKB).

1.3 Схема эксперимента

Предполагается, что данный эксперимент будет проводиться в рамках физической программы по изучению спин-зависимых эффектов на СЧТФ и Super-KEKB на энергиях $J/\psi(1S)$ резонанса 3.1 ГэВ, $\Upsilon(1S)$ 9.46 ГэВ и $\Upsilon(4S)$ 10.57 ГэВ. Сам эксперимент можно разделить на три основных этапа:

1. Получение сгустков электронов со случайным знаком продольной поляризации ($\zeta_+ \approx -\zeta_-$).
2. Организация продольной поляризации в месте встречи с отстройкой от полужелой частоты.
3. Частая смена знака продольной поляризации сгустков в месте встречи.
4. Набор данных детектором.

Рассмотрение первого этапа находится на стадии разработки и предполагается к рассмотрению в дальнейших этапах НИР. Четвертый этап будет рассматриваться в дальнейшем в работах, посвященных данному эксперименту и на текущий момент также находятся на стадии разработки. В рамках текущего этапа НИР рассматриваются 2 и 3 этап. Однако, предварительные оценки дают следующие требования на количество одновременно циркулирующих электронных сгустков $n_B = 300$ и частоту событий, которую необходимо обрабатывать детектором ≈ 300 кГц для светимости 10^{35} см $^{-2}$ с $^{-1}$.

пример “флиппера”, имеющего продольное (ВЧ-соленоид с косинусоидальным полем) ВЧ-поле. Ротатор с соленоидальным полем будет расположен в месте с квазирадиальной равновесной поляризацией (синяя стрелка Рис. 2) на расстоянии $\Delta\theta$ в терминах обобщенного азимута от второй Сибирской змейки. Контроль переворота будет осуществляться при помощи поляриметра на Обратном Комптоне и фазы ВЧ-ротатора. Параллельно с переворотами будет оставаться набор статистики детектором для каждого сгустка длительностью $\hat{T} = 300$ с. Оценочное суммарное время набора данных, для получения необходимой статистической точности A_{LR} , составляет $T_{tot} = 10^7$ с.

Рассмотрим теперь концептуально случай Super-KEKB (также 2 и 3 этап эксперимента). На Рис. 3 представлена схема электронного кольца High Energy Ring

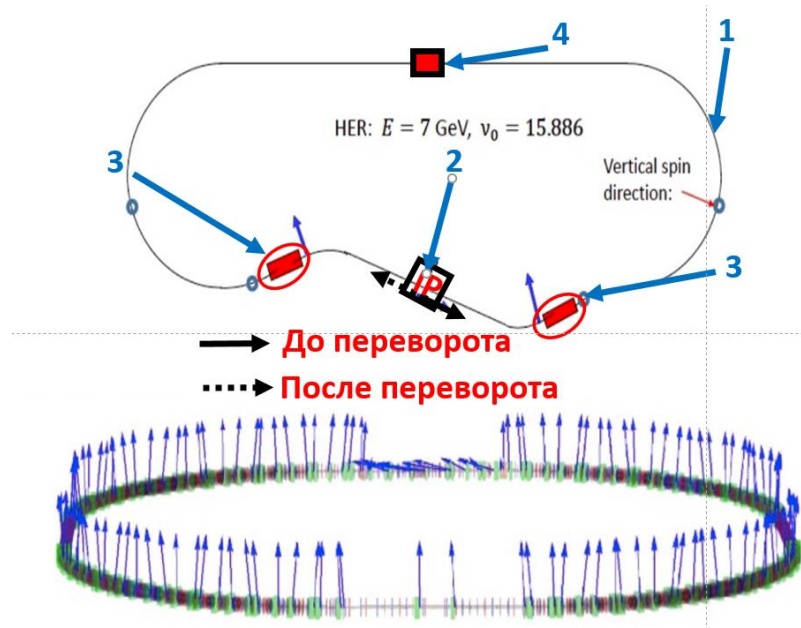


Рис. 3. — Схема предлагаемого эксперимента по изучению слабого угла Вайнберга на Super-KEKB ($E = 7$ ГэВ): 1 — Электронное кольцо HER, 2 — Место встречи (IP), 3 — Спиновые ротаторы с углом вращения $\pi/2$ вокруг продольного поля, 4 — Спиновый ВЧ-ротатор с продольным полем (в противоположном месте от IP; черные стрелки — равновесная степень поляризации до и после переворота спина; синие стрелки — равновесная степень поляризации в (HER). Данная конфигурация кольца подразумевает изначально вертикальную равновесную поляризацию (традиционный накопитель с вертикальным полем). Для организации же продольной поляризации предлагается модернизация места встречи. Оно будет выполнено в виде двух антисимметричных частей магнитных частей. Первая часть состоит из спинового ротатора и доворачивающих магнитов. Спиновый ротатор представляет из себя соленоид, поворачивающий спин на угол $\pi/2$ вокруг скорости, организуя тем самым конфигурацию спина в плоскости кольца. Доворачивающие

магниты, магниты с вертикальным полем, далее организуют поворот скорости частицы на угол, соответствующий повороту спина на 90° : $\alpha = \pi/2\nu_0$, где $\nu_0 = \gamma a_e$ – вертикальная спиновая частота, a_e – аномальный магнитный момент электрона, γ – гамма-фактор. Вторая часть аналогична превой только в обратной полярности, восстанавливая тем самым вертикальное направление поляризации. Далее, аналогично СЧТФ, частая смена знака будет выполняться при помощи “флиппера” с продольным полем, расположенным в зеркально противоположном месте от IP. Набор статистики будет осуществляться таким же образом, но количество одновременно циркулирующих сгустков будет уже 2500. Предполагается, что эксперимент будет проводиться для энергии электронного сгустка 5.59 ГэВ ($\nu_0 = 12.69$) $\Upsilon(1S)$ или 7.15 ГэВ ($\nu_0 = 16.23$) $\Upsilon(4S)$.

2 Результаты моделирования

2.1 Переворот спина для энергии $\Upsilon(4S)$ на Super-KEKB

В качестве примера использования “флиппера” на Super-KEKB, на Рис. 4

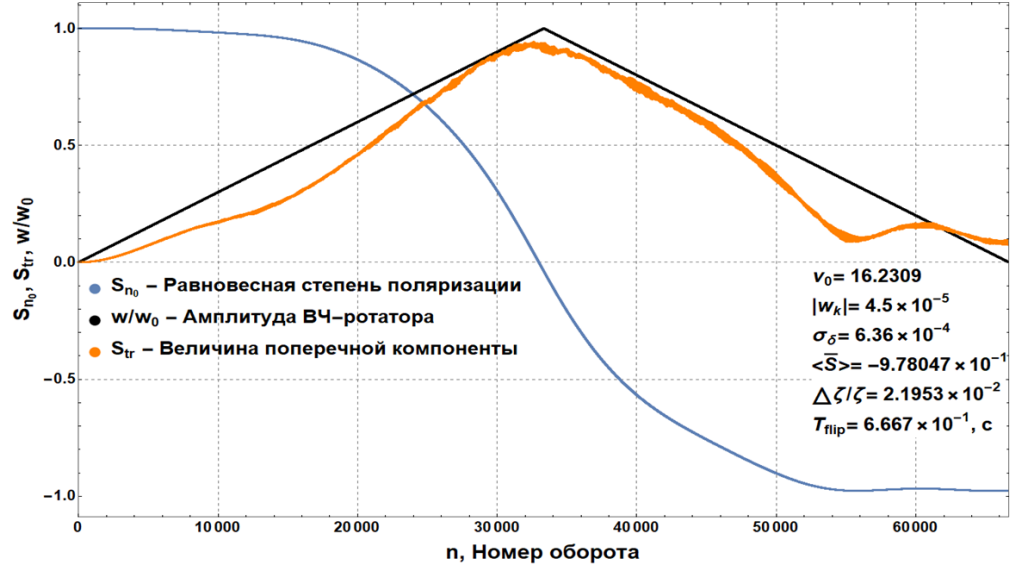


Рис. 4. — Адиабатический переворот спина ансамбля из $N_e = 100$ частиц в схеме с модифицированным местом встречи Super-KEKB, осуществленный при помощи ВЧ-ротатора с продольным полем. Параметры ВЧ-ротатора: $|w_k| = 4.5 \cdot 10^{-5}$, $|\varepsilon'| = 3 \cdot 10^{-9}$ и $\varepsilon_0 = 10^{-4}$. Параметры пучка: $E = 7.15$ ГэВ, $\sigma_\delta = 6.36 \cdot 10^{-4}$, $v_s = 2.8 \cdot 10^{-2}$, $N_\gamma = 2942$, $\sigma_{noise} = 2.34 \cdot 10^{-5}$. Синие точки – равновесная степень поляризации, оранжевые точки – поперечная степень поляризации и черные точки – величина амплитуды ВЧ-ротатора ($w_{max} = w_0 = 2|w_k|$).

представлен совместный график равновесной степени поляризации, величины поперечной к ней компоненты и амплитуды ВЧ-ротатора в зависимости от номера оборота. Из представленных зависимостей видно, что для параметров Super-KEKB в случае энергии $\Upsilon(4S)$ адиабатический переворот был осуществлен. Однако, ослабление степени поляризации после переворота, например по сравнению с СЧТФ (см. предыдущий отчет) с 3 СЗ $\Delta\zeta/\zeta = 3.3 \cdot 10^{-3}$, больше и составило $2.2 \cdot 10^{-2}$, что соответствует $\sim 10^2$ переворотов. При этом время одного переворота составляет: $T_{flip} = 2(\varepsilon_0/\varepsilon')T_0 = 6 \cdot 10^{-1}$ с, здесь величины $\varepsilon_0 = 10^{-4}$ и $|\varepsilon'| = 3 \cdot 10^{-9}$ – величина начальной отстройки и скорости пересечения резонанса соответственно, $T_0 \sim 10^{-5}$ с – время одного оборота пучка.

Подобная потеря поляризации предположительно связана с достаточно быстрым раскогеренированием ансамбля спинов в окрестности резонанса. Соответствующее время

раскогеренирования, как известно, пропорционально квадрату модуля вектора $\vec{d} = \gamma \frac{\partial \vec{n}}{\partial \gamma}$: $\sim \frac{|w_k|^2}{v_0^2} \sim \frac{1}{\gamma^2}$ откуда тем самым имеем при больших энергиях достаточно быстрое раскогеренирование ансамбля спинов. Отметим, что данная оценка не совсем корректна и для вычисления соответствующего времени требуется более детальное рассмотрение, что будет выполнено в дальнейших работах. Пока можно лишь заключить, что соответствующий переворот необходимо делать достаточно быстро и по результатам моделирования видно, что характерные времена “флипа” без потерь на спиновую энергетическую диффузию находятся на уровне $6 \cdot 10^4$ оборотов или 0.6 с.

2.2 Сравнение качества переворота на Super-KEKB для различных схем

На Рис. 5 представлена зависимость абсолютного значения величины равновесной степени поляризации после переворота в зависимости от скорости пересечения резонанса.

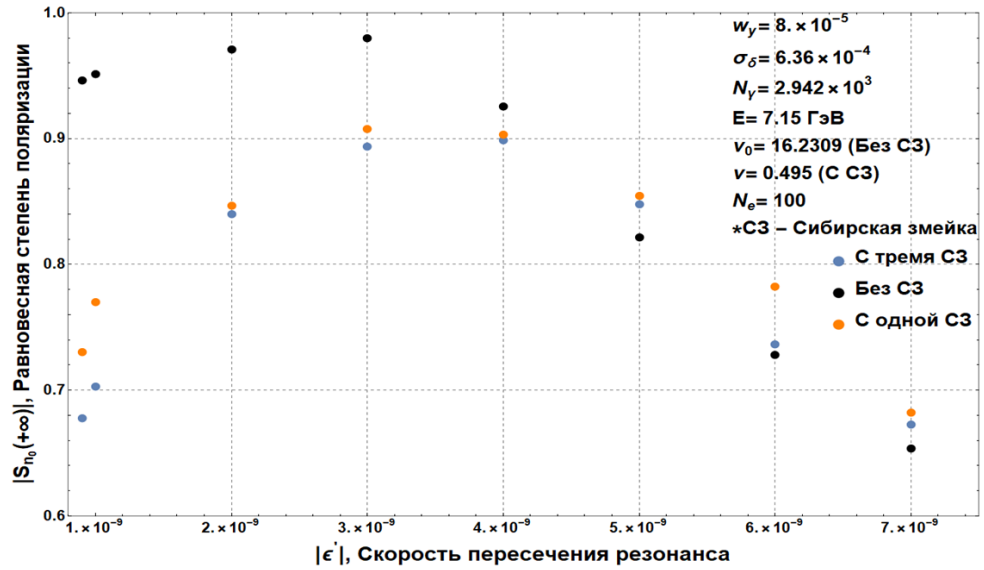


Рис. 5. — Зависимость конечного значения поляризации после пересечения спинового резонанса от скорости его пересечения. Черные точки – случай схемы с вертикальной поляризацией, оранжевые точки – случай одной СЗ и синие точки – случай трех СЗ.

Из полученной зависимости видно, что выигрышной для организации продольной поляризации является схема с вертикальной поляризацией в кольце. Данное различие аналогично связано с величиной вектора $\vec{d}$, который зависит от рассматриваемой схемы магнитной системы, определяющего характерное время раскогеренирования ансамбля спинов. В дальнейшем планируется соответствующее более детальное сравнение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках текущего этапа НИР было выполнено следующее:

- Рассмотрена схема предлагаемого эксперимента по измерению угла смешивания Вайнберга на энергиях $\Upsilon(1S)$ и $\Upsilon(4S)$ резонанса на ускорительном комплексе Super-KEKB, позволяющая уменьшить влияние систематических ошибок со стороны пучка.
- Моделирование переворота спина ансамбля частиц с учетом синхротронных колебаний, радиационного затухания и энергетической диффузии для эксперимента на энергии $\Upsilon(4S)$.
- Проведено сравнение качества переворота в трех различных схемах: с вертикальной поляризацией, с одной Сибирской Змейкой, с тремя Сибирскими Змейками. Итоги сравнения позволяют заключить об более качественном перевороте в схеме с рассмотренной модификацией места встречи (схема с вертикальной поляризацией) по сравнению со схемами с Сибирскими Змейками.

На основании результатов моделирования сделан вывод о том, что использование ВЧ-ротатора с продольным полем для организации частого изменения смены знака продольной поляризации, организованной модификацией IP, в месте встречи Super-KEKB возможно, однако требует достаточно быстрого переворота в силу достаточно быстрого раскогеренирования ансамбля спина из-за сильной энергетической диффузии.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] В.В. Анашин, и др. (2018), Супер – Чарм – Тау фабрика, концептуальный проект, часть первая (физическая программа, детектор). ИЯФ СО РАН, Новосибирск.
- [2] Kumar K.S., Sonny Mantry, Marciano W.J., and Souder P.A. (2013), Low-Energy Measurements of the Weak Mixing Angle. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 63:1, p. 237-267, doi: 10.1146/annurev-nucl-102212-170556.
- [3] Skovpen Yu.I., Khriplovich I.B. (1979), Weak neutral currents of quarks in e^+e^- annihilation. Yad. Phys. (Sov.J.Nucl.Phys) 30, preprint BINP 79-25, Novosibirsk
- [4] A.E. Bondar, E.V. Bedarev, I.A. Koop, A.V. Otboev, Yu.M. Shatunov (2024), Measurement of the weak mixing angle at a Super Charm-Tau factory with data-driven monitoring of the average electron beam polarization. The 2024 International Workshop on Future Tau Charm Facilities (FTCF2024), January 14-18, Hefei, China.
- [5] I.A. Koop, A.V. Bogomyagkov and A.V. Otboev (2019), Longitudinal Polarization in Novosibirsk c-tau factory. Joint Workshop on Super C-Tau Factory September 23-26, RAS, Moscow, Russia.
- [6] A. Ferroglia, G. Ossola and A. Sirlin (2004), The electroweak form factor $\hat{k}(q^2)$ and the running of $\sin^2\widehat{\theta}_W$, The European Physical Journal C, Vol. 34, pp. 165–171.
- [7] A. A. Sokolov and I. M. Ternov (1963), Polarization and spin effects in the synchrotron radiation theory, Dokl. Akad. Nauk SSSR, Vol. 153, N 5, pp. 1052–1054.
- [8] Particle Data Group et al. (2022), Review of Particle Physics, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2022, Issue 8, August 2022, 083C01.
- [9] Koop I., Shatunov Yu. (1995), Spin flip by RF-field at storage rings with siberian snakes. Proc. AIP Conference Proceedings 343, 317, USA.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список готовящихся к публикациям работ (в редакции журналов, текущий семестр):

1. Е.В. Бедарев, И.А. Кооп, А.В. Отбоев, Ю.М. Шатунов, Планирование эксперимента по определению бегущего угла Вайнберга на энергии J/ψ мезона на тау-чарм фабрике, Письма в ЭЧАЯ.
2. Е.В. Бедарев, И.А. Кооп, А.В. Отбоев, Ю.М. Шатунов, Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA, Сибирский Физический Журнал (СФЖ).

Список представленных на конференциях докладов:

1. Е.В. Бедарев, И.А. Кооп, А.В. Отбоев, Ю.М. Шатунов, Планирование эксперимента по определению бегущего угла Вайнберга на энергии J/ψ мезона на тау-чарм фабрике, XXVIII International Conference "Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23", September 11-15, BINP, Poster Session 1, Post. Num. 58, Novosibirsk, Russia, 2023.
2. Е.В. Бедарев, И.А. Кооп, А.В. Отбоев, Ю.М. Шатунов, Исследование возможности динамического управления спином поляризованных протонов и дейтронов на ускорительном комплексе NICA, XXVIII International Conference "Russian Particle Accelerators Conference RuPAC'23", September 11-15, BINP, Post. Num. 59, Novosibirsk, Russia, 2023.
3. A.E. Bondar (speaker), E.V. Bedarev, I.A. Koop, A.V. Otboev, Yu.M. Shatunov, Measurement of the weak mixing angle at a Super Charm-Tau factory with data-driven monitoring of the average electron beam polarization, The 2024 International Workshop on Future Tau Charm Facilities (FTCF2024), January 14-18, Hefei, China, 2024.