

ВОЗМОЖНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ЧЕТНОСТИ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ЯДЕР НА УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

*И. А. Кооп^{а, б, в, 1}, А. И. Мильштейн^{а, б, 2}, Н. Н. Николаев^с,
А. С. Попов^{а, б}, С. Г. Сальников^{а, б}, П. Ю. Шатунов^{а, б},
Ю. М. Шатунов^{а, б}*

^а Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

^б Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

^в Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

^с Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау РАН, Черноголовка, Россия

Обсуждается возможная постановка эксперимента по измерению эффекта нарушения P -четности при взаимодействии поляризованных протонных или дейтронных пучков с неполяризованной мишенью. В первом случае предлагается проводить эксперимент по рассеянию поляризованного пучка протонов или дейтронов на толстой внутренней мишени в одном из колец коллайдера NICA. В этой постановке спин циркулирующего пучка частиц переводится в прецессирующую в горизонтальной плоскости моду с помощью ВЧ-флиппера. Эффект нарушения четности будет изучаться с помощью измерения корреляции сечения взаимодействия частиц и направления их спинов. В альтернативном подходе флиппер переводит спины частиц в горизонтальную плоскость и производится выпуск пучка в канал в определенной фазе прецессии. В этой более традиционной постановке эксперимента производится измерение полного сечения прохождения частиц сквозь плотную мишень в зависимости от знака спиральности поляризации пучка.

A possible experimental setup for measuring the effect of parity violation in the interaction of the polarized proton or deuteron beams with an unpolarized target is discussed. One possibility is the investigation of scattering of the proton or deuteron polarized beams on a thick internal target in one of the rings of the NICA collider. In this case, the spin of circulating particles is transformed into a mode precessing in the horizontal plane using an RF flipper. The effect of parity violation will be studied by measuring the correlation of the interaction cross section of particles and the direction of their spins. In an alternative approach, the flipper transforms the spins of particles into a horizontal plane and the beam is released into the channel in a certain phase of the precession. In this more traditional experimental setup, the total cross section of the passage of particles through a dense target is measured, depending on the sign of the helicity of the beam polarization.

PACS: 34.80.Nz

¹E-mail: I.A.Koop@inp.nsk.su

²E-mail: A.I.Milstein@inp.nsk.su

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время количественные предсказания Стандартной модели для электрослабых процессов, полученные на языке кварков и лептонов, хорошо согласуются с экспериментальными данными при очень больших передачах импульсов (на малых расстояниях). Однако анализ довольно обширного экспериментального материала по нарушению четности в процессах взаимодействия адронов, которое связано со слабыми взаимодействиями, требует использования феноменологии при небольших передачах импульсов (на сравнительно больших расстояниях), т. е. использования языка мезонов и барионов (см. обзор [1]). В процессе упругого или неупругого рассеяния протонов или дейтронов на ядрах эффект нарушения четности будет проявляться в зависимости полного или дифференциального упругого сечения рассеяния от продольной поляризации пучка. Возникает эта зависимость из-за интерференции амплитуды сильного взаимодействия и P -нечетной амплитуды слабого взаимодействия, которая может быть оценена достаточно надежно.

В самом точном эксперименте по протон-протонному рассеянию при энергии 45 МэВ для P -нечетной асимметрии получен результат $A_L = -(1,5 \pm 0,22) \cdot 10^{-7}$ при наборе экспериментальных данных в течение нескольких лет [2]. Единственный эксперимент при высокой энергии, в котором наблюдалась ненулевая асимметрия $A_L = -(26,5 \pm 6,0 \pm 3,6) \cdot 10^{-7}$, был проведен при энергии протонов 5,1 ГэВ, взаимодействующих с водяной мишенью [3]. Эта аномально большая асимметрия не получила удовлетворительного теоретического объяснения. В Лаборатории им. Э. Ферми пучок поляризованных протонов и антипротонов с энергией 200 ГэВ, который создавался в результате распадов гиперонов, имел невысокую интенсивность и достигнутая чувствительность к P -нечетной асимметрии была только на уровне 10^{-5} [4].

В нашей работе мы обсуждаем несколько возможностей проведения экспериментов по наблюдению эффекта нарушения четности в рассеянии поляризованных протонов и легких ядер на неполяризованной ядерной мишени с использованием уникальных возможностей ускорительного комплекса NICA [5,6], создаваемого в настоящее время в ОИЯИ.

1. МЕТОД ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО СПИНА

В этом методе поляризованный пучок в накопительном кольце приходит во взаимодействие с твердотельной внутренней мишенью с помощью динамического искажения орбиты. При этом продукты реакции регистрируются сцинтилляционными счетчиками, расположенными снаружи вакуумной камеры на небольшом удалении от мишени. Исходной поляризацией является равновесная вертикальная поляризация. Перед началом взаимодействия с мишенью спин частиц в пучке адиабатически поворачивается из вертикального в горизонтальное положение с помощью радиочастотного флиппера, после чего флиппер выключается и начинается свободная прецессия спина в горизонтальной плоскости накопительного кольца. Наблюдаемым сигналом будет осциллирующая компонента в скорости счета, пропорциональная продольной компоненте прецессирующей поляризации, ориентация которой отслеживается временной меткой событий. Скорость сброса пучка на мишень ограничивается только

скоростью счета детекторов и условиями работы мишени, т. е. может составлять доли секунды. За это время спин успевает совершить сотни тысяч оборотов в горизонтальной плоскости, что позволит провести качественный фурье-анализ событий.

Аналогичная схема была использована в экспериментах JEDI по исследованию времени когерентности свободной прецессии спина векторно-поляризованных дейтронов в накопительном кольце COSY в Юлихе [7]. В эксперименте [7] дейтроны искажением орбиты выводились на внутреннюю углеродную мишень поляриметра EDDA толщиной 17 мм. Сигналом в этом эксперименте была асимметрия вверх–вниз в упругом рассеянии, пропорциональная осциллирующей радиальной компоненте поляризации, и была доказана эффективность временной метки событий. В последующем эксперименте [8] было показано, что время когерентности горизонтальных спинов пучка дейтронов можно довести до тысячи и более секунд. Заметим, что ускорение пучков с прецессирующей горизонтальной поляризацией ранее обсуждалось в работе [9]. Впервые исследование проблемы увеличения времени когерентности свободной прецессии ансамбля горизонтальных спинов было проведено в эксперименте [10], в котором сравнивались аномальные магнитные моменты электрона и позитрона. Было показано [11], что время когерентности свободной прецессии можно значительно увеличить с помощью секступольных линз. Однако в предлагаемом эксперименте для NICA такое большое время когерентности не требуется.

Азимутально проинтегрированное сечение упругого рассеяния не зависит от поперечной поляризации протонов. Однако при неполной азимутальной симметрии детектора возможна остаточная зависимость сечения от поперечной поляризации. В нашем случае это будет компонента скорости счета, пропорциональная осциллирующей компоненте горизонтального спина, перпендикулярная оси столкновения. Так как добиться полной азимутальной симметрии детектора будет затруднительно, то мы предлагаем метод подавления этого эффекта. А именно, указанный фоновый эффект можно устранить с помощью фурье-анализа скорости счета, используя тот факт, что фазовая модуляция эффектов, связанных с продольной и поперечной поляризацией, сдвинута на 90° . Кроме того, непрерывное выделение азимутальной асимметрии является способом контроля величины горизонтальной поляризации.

Сигнал в верхнем счетчике U_1 и нижнем счетчике U_2 можно условно представить в виде

$$\begin{aligned} U_1 &= \langle U_1 \rangle [1 + A \cos(\psi + \mu n) + B \sin(\psi + \mu n)], \\ U_2 &= \langle U_2 \rangle [1 - A \cos(\psi + \mu n) + B \sin(\psi + \mu n)]. \end{aligned}$$

Слагаемые, пропорциональные A , связаны со спин-орбитальным взаимодействием и существуют без эффектов слабого взаимодействия. Слагаемые, пропорциональные B , связаны со слабым взаимодействием; ψ — начальная фаза прецессии спина в горизонтальной плоскости; μ — набег фазы за один оборот частицы в ускорителе; n — номер оборота. Отличие средних по фазе прецессии сигналов $\langle U_1 \rangle$ и $\langle U_2 \rangle$ связано с возможной асимметрией эффективности регистрации. Поэтому параметры A , ψ и μ можно извлечь с хорошей точностью из измерения величины

$$R = \frac{U_1}{\langle U_1 \rangle} - \frac{U_2}{\langle U_2 \rangle} = 2A \cos(\psi + \mu n)$$

в течение многих тысяч оборотов. После этого коэффициент B , который связан с эффектом нарушения четности, может быть определен из измерения суммы

$$S = \frac{U_1}{\langle U_1 \rangle} + \frac{U_2}{\langle U_2 \rangle} = 2B \sin(\psi + \mu n).$$

Заметим, что относительная эффективность счетчиков может быть откалибрована в неполяризованном пучке, и такой коррекцией можно добиться существенного подавления зависимости полной скорости счета от перпендикулярной к оси столкновения поляризации. Степень подавления можно оценить экспериментально по зависимости скорости счета от знака вертикальной поляризации до и после коррекции на эффективность (в эксперименте [12] решалась аналогичная задача исключения систематических эффектов для измерения векторной поляризации дейтронов с точностью до 10^{-6}).

Заметим также, что сигнал от продольной компоненты спина содержится и в двух боковых счетчиках. Используя ту же привязку к фазе прецессии спина, мы можем выделить сигнал от продольной компоненты спина из суммы сигналов и в этих счетчиках.

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЛИППЕРА

Обсудим подробнее постановку эксперимента с вращающимся в горизонтальной плоскости ансамблем спинов частиц, циркулирующих в накопительном кольце. Наша цель состоит в измерении эффекта нарушения четности на уровне 10^{-6} – 10^{-7} . Для этого минимальное требуемое число событий должно быть равно $N = 10^{12}$ – 10^{14} . Согласно [6], нуклотрон способен ускорять за один цикл до $1,6 \cdot 10^{11}$ поляризованных протонов. Мы предполагаем, что на очень плотной внутренней мишени не менее 10^9 рассеянных частиц дадут элементарные вспышки в сцинтилляторах, окружающих вакуумную камеру в районе мишени. Полная необходимая для эксперимента статистика $N = 10^{12}$ – 10^{14} записанных событий будет набрана за 10^3 – 10^5 циклов ускорительного комплекса NICA, что является вполне разумным временем работы (меньше 1 года).

Динамическое искажение орбиты, приводящее к взаимодействию частиц с внутренней мишенью, предполагается производить в течение долей секунды, что составляет примерно 10^5 оборотов. Следовательно, на каждом обороте будет в среднем регистрироваться 10^4 событий, что позволит увидеть азимутальную асимметрию распределения сигнала со счетчиков на уровне 1%. Поскольку при не очень больших энергиях и 100%-й поперечной поляризации пучков азимутальная асимметрия составляет десятки процентов, мы сможем контролировать величину горизонтальной поляризации частиц в течение вывода на мишень с достаточной точностью.

Для обеспечения приемлемых параметров циркулирующего в NICA пучка протонов или дейтронов их надо охладить с помощью создаваемой для этих целей установки электронного охлаждения [13]. Оценочное время охлаждения составляет 30 с. Наиболее критичным параметром является энергетический разброс, особенно для частиц с большой величиной аномального магнитного момента. Для протонов желательно иметь разброс меньший, чем $\sigma_\delta = 0,001$, чтобы воздействие высокочастотного магнитного поля флиппера было более или менее одинаковым по силе для частиц,

имеющих разную амплитуду синхротронных колебаний. Действительно, величина резонансной гармоники w флиппера, представляющего собой короткий ВЧ-соленоид, пропорциональна значению функции Бесселя нулевого порядка $J_0(\xi)$, в которой аргумент $\xi = \nu_0 a_\delta / \nu_s$, где ν_0 — спиновая частота, a_δ — амплитуда синхротронных колебаний, ν_s — частота синхротронных колебаний. Для когерентного адиабатического поворота спинов в пучке необходимо, чтобы индекс модуляции ξ был меньше единицы для всех частиц в пучке. Например, для протонов с гамма-фактором $\gamma = 3,3$ имеем: $\nu_0 = 6$ и $\xi = 1$ при $\nu_s = 0,006$ и $a_\delta = 0,001$. Как следует из работы [13], получение этих параметров является вполне реалистичной задачей. Заметим, что ограничения на энергетический разброс дейтронов получаются на порядок более слабыми в связи с малостью абсолютной величины их аномального магнитного момента: $G = -0,143$. В этом случае, по-видимому, специального предварительного охлаждения не требуется.

3. ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ СИСТЕМАТИКИ

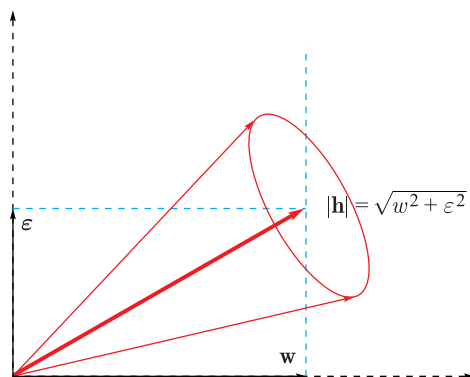
Если ось флиппера не совпадает с осью пучка, что является типичной ситуацией, то возможно покачивание орбиты полем флиппера. Это покачивание происходит синхронно с частотой прецессии, задаваемой флиппером, и приводит к возникновению опасной систематики. С данным эффектом можно бороться разными методами. Например, можно изучить эту фоновую модуляцию на неполяризованном пучке, измерив амплитуду и фазу модуляции скорости счета. Более радикальным способом является полное выключение флиппера после перевода спинов в горизонтальную плоскость и начала сдвига орбиты в сторону мишени. При этом фаза свободной прецессии спинов измеряется только по счетчикам без привязки к фазе флиппера.

Хотя предлагаемый эксперимент можно осуществить и на нуклотроне, проведение эксперимента в одном из колец коллайдера NICA имеет ряд преимуществ. Во-первых, в нуклотроне нет длинных свободных промежутков для размещения в них различной регистрирующей аппаратуры, а в кольцах NICA такие очень удобные промежутки имеются, например, промежуток будущего детектора SPD. Во-вторых, в коллайдерах энергия пучков гораздо более стабильна — в них не производится никакого ускорения, в отличие от нуклотрона. Стабильность энергии очень важна, так как знание резонансной частоты спиновой прецессии необходимо на уровне $\Delta f/f = 10^{-4} - 10^{-5}$, если величину гармоники флиппера мы желаем ограничить уровнем $w \leq 10^{-4}$. Для протонов также очень важно обеспечить как можно более высокую частоту синхротронных колебаний, чтобы максимально снизить индексы соответствующей модуляции для различных частиц в пучке.

4. ПАРАМЕТРЫ И ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЧ-ФЛИППЕРА

На рис. 1 показана векторная диаграмма, объясняющая принцип адиабатического поворота в горизонтальную плоскость спинов частиц, имеющих вертикальное направление в начальном состоянии. Поворот начинается включением флиппера с большой начальной расстройкой $\varepsilon = |\nu - \nu_0| \gg w$ по частоте флиппера ν относительно резонансной частоты ν_0 и заканчивается на частоте, близкой к точному резонансу.

Рис. 1. Прецессия спинов в системе координат, вращающейся вокруг вертикальной оси (вектор расстройки ϵ направлен вдоль этой оси) с частотой флиппера ν . В этой системе отсчета, вращающейся синхронно с вектором \mathbf{w} , спин произвольной частицы вращается вокруг вектора \mathbf{h} , представляющего собой сумму векторов \mathbf{w} и ϵ ; $w = |\mathbf{w}|$ равен амплитуде создаваемой флиппером круговой гармонике



При адиабатическом изменении частоты флиппера проекция спина на направление оси прецессии $\mathbf{h} = \mathbf{w} + \epsilon$ сохраняется, являясь интегралом движения. В этой формуле вектор \mathbf{w} лежит в плоскости орбиты и вращается вокруг вертикальной оси с частотой ν , а вектор ϵ направлен перпендикулярно плоскости орбиты.

Поэтому при начальной большой расстройке, когда ось прецессии почти точно совпадает с равновесным вертикальным направлением всех спинов в пучке, весь спиновый ансамбль следует за осью прецессии. В результате спины вынужденно приходят в горизонтальное прецессирующее состояние к моменту наступления точного резонанса.

Если конечная расстройка окажется отличной от нуля, то спины в лабораторной системе отсчета будут вращаться по конусу с углом раствора большим или меньшим 180° , т. е. с ненулевой вертикальной компонентой поляризации. Контролируя ее величину с помощью поляриметра (по асимметрии рассеяния влево–вправо), мы можем очень точно настраивать флиппер на резонанс с частотой свободной прецессии. Ширина резонанса определяется величиной гармонике флиппера w , потому что при $\epsilon = w$ вектор оси прецессии \mathbf{h} оказывается, очевидно, наклоненным под углом 45° к горизонту (см. рис. 1).

Деполяризация пучка, обусловленная рассеянием частиц на электронах остаточного газа, и связанная с этим диффузия по энергии, не может, по нашим оценкам, оказать значительного влияния на время жизни поляризации в обсуждаемом здесь сценарии из-за быстрого процесса сдвига орбиты в сторону мишени. Время деполяризации пучка при гармонике флиппера $w = 10^{-4}$, как показывают наши расчеты, составляет часы. Поэтому для дейтронов достаточно обеспечить величину гармонике в диапазоне $w = (3-5) \cdot 10^{-5}$, а для протонов на уровне $w = (1-2) \cdot 10^{-4}$.

Перейдем теперь к обсуждению технических проблем реализации ВЧ-флиппера. На рис. 2 изображен эскиз 3D-модели флиппера. Главным его элементом является охлаждаемая водой медная спиральная обмотка ВЧ-соленоида. Ее концы снаружи вакуумного объема заземлены на корпус через конденсаторы нужного номинала и образуют так последовательный резонансный контур. Возбуждение этого контура ВЧ-генератором производится как обычно, петлей связи. Она на этом рисунке не показана.

Другим важным элементом флиппера является наличие проводящего медного лайнера с продольными щелями, расположенного внутри соленоида. Этот экран обеспе-

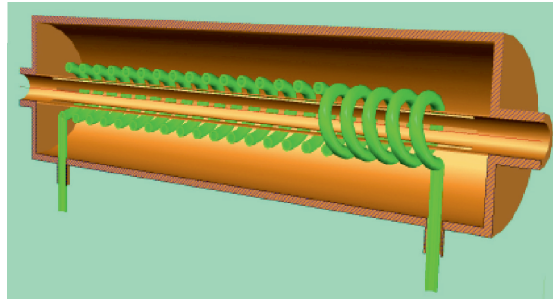


Рис. 2. Принципиальные детали устройства высокочастотного флиппера: спираль ВЧ-соленоида, цилиндрический вакуумный корпус и медный лайнер с несколькими продольными щелями-разрезами, обеспечивающими низкий импеданс заполненного спиралью объема сложной формы

Основные параметры флиппера для импульса дейтронов 6,75 ГэВ/с в предположении величины круговой гармоники $w = 10^{-4}$ ($B\ell = 0,033$)

Параметр	Значение
Длина соленоида, м	2,5
Диаметр спиральной обмотки, мм	100
Апертура лайнера, мм	80
Диаметр корпуса, мм	300
Число витков соленоида	100
Индуктивность обмотки, мкГн	40
Волновое сопротивление контура, Ом	75
Сопротивление активных потерь, Ом	0,28
Добротность колебательного контура	270
Амплитуда магнитного поля, Тл	0,013
Ток обмотки, А	262
Индуктивное напряжение, кВ	1,5
Мощность активных потерь, кВт	10

чивает беспрепятственное распространение продольных токов изображения пучка на всех частотах, не экранируя в то же время магнитное поле соленоида на оси системы.

В таблице приведены примерные радиотехнические параметры флиппера при его работе на частоте, равной половине частоты обращения пучка $f_0 = 0,6$ МГц.

5. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО СЕЧЕНИЯ

Этим методом измеряются полные сечения взаимодействия продольно-поляризованных пучков протонов или дейтронов с неполяризованной внешней мишенью при противоположных знаках спиральностей частиц. Этот подход использовался в эксперименте [3], в котором измерялась интенсивность пучка до и после мишени, которая представляла собой 81 см воды. В эксперименте [3] стационарная поляризация протонного пучка в кольце была вертикальной и преобразовывалась в продольную пово-

ротом вектора скорости на требуемый угол в канале выпуска. Поэтому эксперимент проводился при фиксированной энергии 5,1 ГэВ, на которую и был настроен поворот спина на 90° .

Обсудим теперь преимущества и недостатки постановки эксперимента с выпуском пучка из накопительного кольца NICA в специальный канал, где он взаимодействует с плотной мишенью, а регистрирующая аппаратура измеряет коэффициент прохождения пучка сквозь мишень. Во-первых, существует большая свобода в выборе геометрии расположения и типа мишени. Главным преимуществом такой более традиционной постановки является то, что здесь измеряется полное сечение, а не некоторая его часть, как в варианте с внутренней мишенью. Коэффициент прохождения измеряется двумя интегральными счетчиками, основанными, например, на регистрации вторичной эмиссии электронов из материала десятков мембран, прослоенных собирающими электродами. Такой счетчик находится у нас в стадии разработки.

В отличие от постановки эксперимента, примененной в [3], мы предлагаем, так же как и в предыдущем нашем подходе, использовать флиппер для управления направлением вектора поляризации в кольце NICA перед выпуском его в канал. Для этого есть несколько соображений. Во-первых, повернуть спин дейтронов из вертикального направления в горизонтальное с помощью поворота вектора скорости, как это делалось в [3] с протонами, практически невозможно из-за малости магнитного момента дейтронов. Во-вторых, необходимо сохранить, как нам представляется, полную свободу в управлении ориентацией спина в месте расположения мишени. Это важно с точки зрения борьбы с систематикой при определении зависимости коэффициента прохождения пучка частиц сквозь мишень от продольной компоненты спина. Дело в том, что, как было объяснено выше, наличие даже небольшой по величине поперечной компоненты спина может приводить к изменению этого коэффициента из-за ошибок выставки счетчиков относительно оси пучка. Единственным, как нам кажется, способом увидеть эту зависимость является прямое измерение величины модуляции прохождения пучка сквозь мишень при противоположных знаках поперечно ориентированных спинов пучка. Флиппер позволит это сделать в специальных контрольных выпусках сгустков пучка с любой желаемой ориентацией спинов, в отличие от статичного подхода, примененного во всех предыдущих экспериментах.

Заметим, что очень важными для подавления систематики являются заходы с поперечно-поляризованным пучком, поскольку они позволят учесть асимметрию, связанную не с продольной поляризацией (со слабым взаимодействием), а с неточностью выставки аппаратуры. Эта информация может быть учтена при офлайн-обработке результатов измерений.

К сожалению, у обсуждаемой схемы эксперимента, кроме указанных выше достоинств, существуют некоторые недостатки. Во-первых, сравнение коэффициентов прохождения с разными знаками продольной компоненты спинов производится с использованием данных, полученных в разных чередующихся по знаку спиральности заходах, а не внутри одного, как это происходит в схеме с прецессирующей поляризацией и внутренней мишенью. На самом деле, при хорошей повторяемости параметров орбиты выпущенного в канал пучка указанный эффект не должен существенно увеличить флуктуацию результатов. Во-вторых, в проекте коллайдера NICA не предусмотрен выпускной канал, хотя его создание, по-видимому, не является слишком сложной задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы обсудили два подхода к проведению экспериментов по измерению эффекта нарушения P -четности при взаимодействии поляризованных протонных или дейтронных пучков с неполяризованной мишенью.

В одном из этих подходов предлагается проводить эксперимент по рассеянию поляризованного пучка протонов или дейтронов на толстой внутренней мишени. В этой постановке спин циркулирующего пучка частиц в одном из колец NICA переводится в прецессирующую в горизонтальной плоскости моду с помощью ВЧ-флиппера. Эффект нарушения четности будет изучаться с помощью измерения корреляции сечения взаимодействия частиц и направления их спинов.

В альтернативном подходе флиппер переводит спины частиц в горизонтальную плоскость и производится выпуск пучка в канал в определенной фазе прецессии. В этой более традиционной постановке эксперимента производится измерение полного сечения прохождения частиц сквозь плотную мишень в зависимости от знака спиральности поляризации пучка.

Обе постановки имеют свои плюсы и минусы, и окончательный выбор между ними еще предстоит сделать в ходе детального моделирования эксперимента.

Также требует специального рассмотрения вопрос о фонах. Например, важным является исследование фона, возникающего от вклада в измеряемое сечение распадов рожденных на мишени продольно-поляризованных гиперонов. Высокая P -нечетная асимметрия вылета продуктов их распадов может значительно повлиять на величину измеряемого эффекта нарушения четности [3].

Мы выражаем благодарность Ю. М. Жаринову и А. В. Отбоеву за техническую помощь. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-02-40092 МEGA).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gardner S., Haxton W. C., Holstein B. R. A New Paradigm for Hadronic Parity Nonconservation and Its Experimental Implications // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2017. V. 67. P. 69–95; arXiv:1704.02617.
2. Kistryn S., Lang J., Liechti J., Maier T., Muller R., Nessi-Tedaldi F., Simonius M., Smyrski J., Jaccard S., Haeblerli W., Sromicki J. Precision Measurement of Parity Violation in Proton-Proton Scattering at 45 MeV // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. P. 1616.
3. Lockyer N. A., Romanowski T. A., Bowman J. D., Hoffman C. M., Mischke R. E., Nagle D. E., Potter J. M., Talaga R. L., Swallow E. C., Alde D. M., Moffett D. R., Zyskind J. Parity Nonconservation in Proton-Nucleus Scattering at 6 GeV/c // *Phys. Rev. D.* 1984. V. 30. P. 860–871.
4. Grosnick D. P. et al. (E581/704 Collab.). 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. V. 55. P. 1159–1187.
5. Kekelidze V. D., Lednický R., Matveev V. A., Meshkov I. N., Sorin A. S., Trubnikov G. V. Three Stages of the NICA Accelerator Complex Nuclotron-Based Ion Collider Facility // *Proc. of the 3rd Large Hadron Collider Physics Conf. (LHCP 2015)*, St. Petersburg, Russia, Aug. 31 – Sept. 5, 2015. Gatchina: Kurchatov Inst., 2016. P. 565–569.

6. 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. Spin Physics Experiments at NICA-SPD with Polarized Proton and Deuteron Beams // Proc. of the 4th Intern. Workshop on Transverse Polarization Phenomena in Hard Processes (Transversity 2014), Cagliari, Italy, June 9–13, 2014. Eur. Phys. J. Web. Conf. 2015. V. 85. P. 02039 (Letter of Intent Presented at the Meeting of the JINR Program Advisory Committee (PAC) for Particle Physics on June 25–26, 2014); arXiv:1408.3959 [hep-ex].
7. Stephenson E. et al. (JEDI Collab.). Deuteron Polarimeter Developments for a Storage Ring Electric Dipole Moment Search // Proc. of the 16th Intern. Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry (PSTP 2015), Bochum, Germany, Sept. 14–18, 2015. PoS(PSTP2015). 034.
8. Bagdasarjan Z. et al. (JEDI Collab.). Measuring the Polarization of a Rapidly Precessing Deuteron Beam // Phys. Rev. ST Accel. Beams. 2014. V. 17, No. 5. P. 052803; arXiv:1405.6235 [physics.acc-ph].
9. Sitnik I. M., Volkov V. I., Kirillov D. A., Piskunov N. M., Plis Y. A. Precessing Deuteron Polarization // Phys. Part. Nucl. Lett. 2002. V. 2. P. 22–27.
10. Vasserman I. B., Vorobyov P. V., Gluskin E. S., Ivanov P. M., Kezerashvili G. Ya., Koop I. A., Lysenko A. P., Mikhailichenko A. A., Nesterenko I. N., Perevedentsev E. A., Polunin A. A., Serednyakov S. I., Skrinsky A. N., Shatunov Yu. M. Comparison of the Electron and Positron Anomalous Magnetic Moments: Experiment 1987 // Proc. of the 8th Intern. Symp. on High-Energy Spin Physics, Minneapolis, Minnesota, USA, Sept. 12–17, 1988. AIP Conf. Proc. 1989. V. 187. P. 305–318 (Phys. Lett. B. 1987. V. 198. P. 302).
11. Koop I. A., Shatunov Yu. M. The Spin Precession Tune Spread in the Storage Ring // Proc. of the 1st EPAC Conf., Rome, June 7–11, 1988. Proc. Conf. C. 1988. 880607. P. 738–740.
12. Brantjes N. P. M., Dzhordzhadze V., Gebel R., Gonnella F., Gray F. E., van der Hoek D. J., Imig A., Kruithof W. L., Lazarus D. M., Lehrach A., Lorentz B., Messi R., Moricciani D., Morse W. M., Noid G. A., Onderwater C. J. G., Ozben C. S., Prasuhn D., Levi Sandri P., Semertzidis Y. K., da Silva e Silva M., Stephenson E. J., Stockhorst H., Venanzoni G., Versolato O. O. Correcting Systematic Errors in High-Sensitivity Deuteron Polarization Measurements // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 664. P. 49–64.
13. Parkhomchuk V. V., Bryzgunov M. I., Bublej A. V., Goncharov A. D., Denisov A. P., Kremnev N. S., Polukhin V. A., Putmakov A. A., Reva V. B., Skorobogatov D. N. Design of the 2.5 MV Electron Cooling System and the Potential for Increasing NICA Collider Luminosity // Proc. of the 12th Intern. Scientific Workshop in Memory of Prof. V. P. Sarantsev: Problems of Colliders and Charged Particle Accelerators, Alushta, Russia, Sept. 3–8, 2017; Phys. Part. Nucl. Lett. 2018. V. 15. P. 793–797.

Получено 21 ноября 2019 г.