

КОНЦЕПЦИЯ СПИНОВОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ NICA

*Ю. Н. Филатов**

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Для выполнения программы поляризационных исследований на ускорительном комплексе NICA (ОИЯИ) будет использована уникальная система управления поляризацией протонов и дейтронов в режиме спиновой прозрачности. Управление поляризацией в этом режиме осуществляется с помощью спиновых навигаторов, разработанных на базе слабых магнитных полей. Обсуждаются особенности работы в режиме спиновой прозрачности, а также возможность проведения его экспериментальной проверки в нуклотроне.

A unique system of proton and deuteron polarization control in the spin transparency mode will be used to carry out the polarization research program at the NICA accelerator complex (JINR). Polarization control in this mode is provided by spin navigators based on weak magnetic fields. The features of operation in the spin transparency mode are discussed, as well as the possibility of its experimental verification in the Nuclotron.

PACS: 29.27.Hj; 29.27.Ac

ВВЕДЕНИЕ

Разработка высокоэффективных источников поляризованных ионов, интенсивность которых сравнима с источниками неполяризованных частиц, открыла возможность проведения экспериментов с поляризованными пучками не только на внешних мишенях, но и в коллайдерах. Помимо традиционных задач сохранения поляризации пучка в процессе ускорения, актуальными стали задачи удержания поляризации на больших временах (до нескольких часов), а также управления ориентацией спинов в детекторе. Для проведения высокоточных экспериментов с поляризованными пучками необходимы системы спин-флипа, позволяющие осуществлять многократные перевороты поляризации в процессе проведения эксперимента, что даст возможность значительно уменьшить систематические ошибки в измерениях спиновых асимметрий.

На сегодня существует единственный действующий коллайдер RHIC (BNL, США), позволяющий проводить эксперименты с поляризованными

* E-mail: yuriiifilatoff@mail.ru

протонами при энергиях до 255 ГэВ [1]. Стабилизация спинов на больших временах в RHIC осуществляется двумя спиральными змейками [2]. Из-за малой части гиромангнитного отношения дейтронов схема, используемая в RHIC, не пригодна для стабилизации и управления поляризацией дейтронов.

Для проведения экспериментов с поляризованными пучками в коллайдере NICA, который в настоящее время сооружается в ОИЯИ (Дубна), предложен новый режим управления поляризацией адронов [3] — режим спиновой прозрачности (ST-режим), который позволяет получать любую ориентацию спинов в детекторах MPD (Multi-Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector) как для протонов, так и для дейтронов в диапазоне импульсов до 13,5 ГэВ/с [4–6]. Для выполнения прецизионных экспериментов в ST-режиме возможно реализовать систему спин-флипа со временем переворота спинов меньше 1 с. ST-режим в коллайдере NICA во всем диапазоне импульсов осуществляется с помощью двух соленоидальных змеек [7].

Несмотря на то, что в обоих коллайдерах используется по паре змеек, режимы управления ориентацией спинов в них кардинально отличаются: в RHIC изменение направления поляризации в детекторе осуществляется сильными магнитными полями (спиновыми ротаторами) [2], интеграл магнитного поля которых составляет несколько десятков Тл·м, а в NICA — с помощью слабых магнитных полей, интеграл магнитного поля которых на 2–3 порядка меньше, чем в спиновых ротаторах [8, 9].

Прежде чем продемонстрировать особенности управления поляризацией в режиме спиновой прозрачности коллайдера NICA, рассмотрим динамику спинов в коллайдерах с двумя произвольными змейками.

ДИНАМИКА СПИНА В КОЛЛАЙДЕРЕ С ДВУМЯ ЗМЕЙКАМИ

В стационарных магнитных полях изменение спина в заданном месте орбиты, совершаемое за один оборот частицы вдоль дизайн-орбиты коллайдера, сводится к повороту вокруг n -оси: спин, направленный вдоль n -оси, через оборот частицы будет повторять свое исходное направление [10]. Поперечно направленный к n -оси спин через оборот частицы повернется на угол $2\pi\nu$, где ν — спиновая частота, которая имеет смысл числа оборотов спина, совершаемых за один оборот частицы.

Выделенность n -оси связана с устойчивостью поляризации пучка. При малом отклонении частицы от дизайн-орбиты будут происходить малые отклонения как оси прецессии, так и спиновой частоты. Устойчивая поляризация будет осуществляться только вдоль n -оси, так как из-за разброса спиновых частот $\Delta\nu$ спины частиц, направленные поперечно к n -оси, окажутся полностью размешанными через $1/\Delta\nu$ оборотов, что на практике составляет порядка 1 млн оборотов.

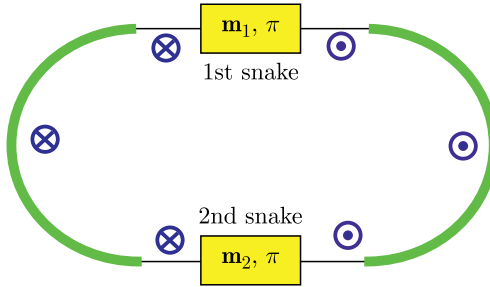


Рис. 1. Динамика спина в коллайдере с двумя змейками

Рассмотрим коллайдер с двумя сибирскими змейками, размещенными в противоположных прямолинейных промежутках (рис. 1). Змейки представляют собой спиновые ротаторы, вращающие спины на 180° соответственно вокруг осей \mathbf{m}_1 и \mathbf{m}_2 , лежащих в плоскости коллайдера. Нетрудно убедиться, что n -ось направлена в арках коллайдера по вертикали и меняет знак после переворота спинов на каждой из змеек. Для спинов, лежащих в плоскости коллайдера в арках, угол поворота спина Ψ через оборот частицы вокруг вертикали будет определяться углом между осями змеек φ_{12} , задавая спиновую частоту $\nu = \varphi_{12}/\pi$.

Отметим, что в коллайдере с двумя змейками спиновая частота не зависит от энергии, что исключает резонансную деполяризацию в процессе ускорения пучка, а также стабилизирует устойчивое направление поляризации вдоль n -оси на больших временах. В коллайдере RHIC поляризованный пучок протонов успешно ускорен до максимальной энергии, а время удержания поляризации составляет десятки часов.

На дизайн-орбите существует единственная n -ось, если спиновая частота отлична от целого значения $\nu \neq k$. И наоборот, существует бесконечное число n -осей для целых спиновых резонансов $\nu = k$. В этом случае происходит вырождение спинового движения — любое спиновое движение становится периодическим на дизайн-орбите. Таким образом, работа с поляризованными пучками в коллайдерах может осуществляться в двух различных режимах: в режиме «выделенного спина» (Distinct Spin (DS) mode), когда структура коллайдера навязывает единственное периодическое движение спина вдоль дизайн-орбиты, и в режиме «спиновой прозрачности» (Spin Transparency (ST) mode), когда любое направление спина повторяется от оборота к обороту частицы (частицы находятся в области ST-резонанса).

В коллайдере RHIC оси змеек составляют углы $\pm 45^\circ$ с направлением скорости, поэтому спиновая частота равна половине, и структура RHIC относится к коллайдерам с «выделенным спином». В коллайдере NICA используются две идентичные соленоидальные змейки, что обеспечивает

нулевое значение спиновой частоты, и структура NICA относится к коллайдерам со «спиновой прозрачностью».

Отметим, что режим «выделенного спина» в RHIC относится к штатному режиму работы с поляризованными протонами, когда оси змеек коллайдера перпендикулярны друг другу. Коллайдер RHIC можно перевести в режим «спиновой прозрачности», перестроив оси змеек таким образом, чтобы они стали параллельными [11].

Далее рассмотрим особенности управления поляризацией в коллайдерах RHIC и NICA, которые работают соответственно в DS- и ST-режимах.

УПРАВЛЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПРОТОНОВ В КОЛЛАЙДЕРЕ RHIC

Схема управления поляризацией протонов в RHIC в диапазоне энергий до 255 ГэВ приведена на рис. 2 [1]. Для стабилизации спиновой частоты $\nu = 1/2$ используются две спиральные змейки, общий интеграл поля которых не зависит от энергии и составляет примерно 25 Тл·м на каждую змейку. Отклонение замкнутой орбиты внутри змейки в поперечном направлении составляет около 3 см при энергии 25 ГэВ[2].

В коллайдере с выделенным спином направление поляризации вдоль n -оси устойчиво к малым вариациям полей магнитной структуры. Таким образом, в RHIC устойчивая поляризация ориентирована вдоль вертикали в арках коллайдера. Для обеспечения продольной поляризации в каждом месте встречи требуется пара спиновых ротаторов, первый из которых переводит поляризацию из вертикали в продольное направление, а второй возвращает ее в исходное вертикальное направление. Интеграл поля спинового ротатора сравним с интегралом поля змейки и составляет примерно 25 Тл·м. Соударения банчей с вертикальной и продольной поляризацией происходят при различных орбитальных характеристиках пучка, так как при включении «сильных» спиновых ротаторов проис-

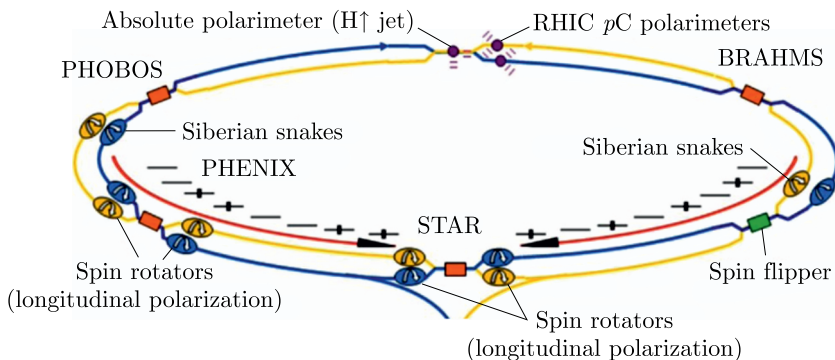


Рис. 2. Схема управления поляризацией протонов в RHIC в DS-режиме

ходит изменение замкнутой орбиты внутри ротаторов и фокусирующих свойств структуры.

Ввиду выделенности направления спина в DS-режиме, в детекторе всегда будут сталкиваться одни и те же пары банчей с фиксированным направлением поляризации. Об асимметрии процесса по отношению к направлениям поляризации можно судить, лишь сравнивая результаты соударений с другими парами банчей. Для этого в RHIC используют последовательность банчей, которая формируется непосредственно из источника поляризованных протонов, с различными знаками поляризации.

В RHIC система спин-флипа основана на пересечении спинового резонанса, индуцированного ВЧ-полем. Пересечение резонанса осуществляется за большое число оборотов путем адиабатического изменения частоты ВЧ-поля. Указанным методом была продемонстрирована эффективность спин-флипа протонов около 97% в диапазоне энергий до 255 ГэВ [12]. Принципиально, что при каждом пересечении индуцированного резонанса происходит заметная деполяризация пучка на уровне нескольких процентов, что ограничивает максимальное число переворотов поляризации за время проведения эксперимента.

Для дейтронов характерный интеграл поля для спиральной змейки или ротатора составляет порядка 600 Тл·м, поэтому схема управления поляризованными протонами в RHIC не пригодна для дейтронов.

РЕЖИМ СПИНОВОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

Схема управления поляризацией протонов и дейтронов в диапазоне импульсов от 2 до 13,5 ГэВ/с в режиме спиновой прозрачности коллайдера NICA приведена на рис. 3 [7]. Использование спиральных змеек даже для протонов становится нереальным для NICA из-за больших искажений замкнутой орбиты на низких энергиях. В указанном диапа-

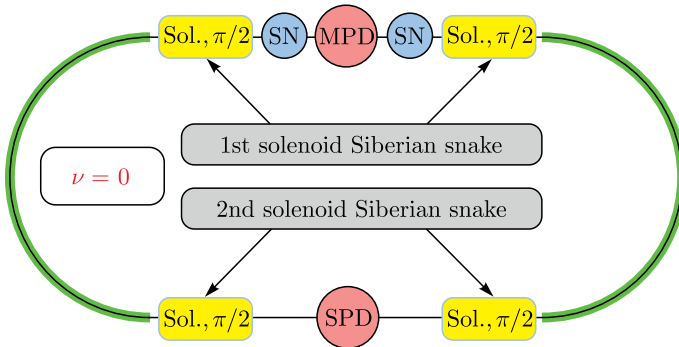


Рис. 3. Схема управления поляризацией в коллайдере NICA в ST-режиме

зоне импульсов целесообразно использовать продольные поля, которые не искажают замкнутую орбиту коллайдера. Для стабилизации спиновой частоты $\nu = 0$ используются две соленоидальные змейки в противоположных промежутках NICA, каждая из которых симметрично размещена вокруг детекторов MPD [6] и SPD [13]. Требуемый интеграл продольного поля в змейках растет пропорционально импульсу пучка и при максимальном импульсе достигает значения примерно 25 Тл·м для протонов и 80 Тл·м для дейтронов на каждую половину змейки.

В коллайдерах со спиновой прозрачностью нет выделенных направлений поляризации — частицы находятся в области нулевого спинового резонанса (ST-резонанс). Динамика спинов (направление n -оси) крайне чувствительна к малым вариациям полей магнитной структуры, что можно использовать для организации эффективного управления поляризацией пучка за счет введения в структуру коллайдера дополнительных слабых магнитных полей — спиновых навигаторов (SN на рис. 3).

Продемонстрируем идею спинового навигатора на основе двух слабых соленоидов, которые не возмущают дизайн-орбиту. При введении слабого соленоида в коллайдер снимается спиновое вырождение — индуцируется единственная периодическая n -ось, направленная вдоль скорости в месте расположения этого соленоида. Эволюция n -оси вдоль орбиты будет определяться сильными полями арочных диполей и змеечных соленоидов, которые через оборот частицы вернут n -ось в продольное направление. Индуцированная спиновая частота определяется углом поворота спина в слабом соленоиде φ_{zi} и равна $\nu_i = \varphi_{zi}/2\pi$. Действие одиночного навигаторного соленоида на спин в детекторе можно описать с помощью парциального навигаторного поля $\omega_i = \nu_i \mathbf{n}_i$, направление которого совпадает с направлением индуцированной n -оси в детекторе \mathbf{n}_i , а величина равна парциальной частоте ν_i .

В качестве примера рассмотрим навигатор на основе двух слабых соленоидов, расположенных рядом с детектором, вращающих спины на углы φ_{z1} и φ_{z2} и разделенных между собой диполем с вертикальным полем (рис. 4, а) [3, 14]. Парциальное поле от первого соленоида ω_1 направлено вдоль скорости в детекторе. Парциальное поле от второго соленоида ω_2 , направленное вдоль скорости в месте его расположения, в детекторе поворачивается на угол φ_y диполем. Итоговая навигаторная

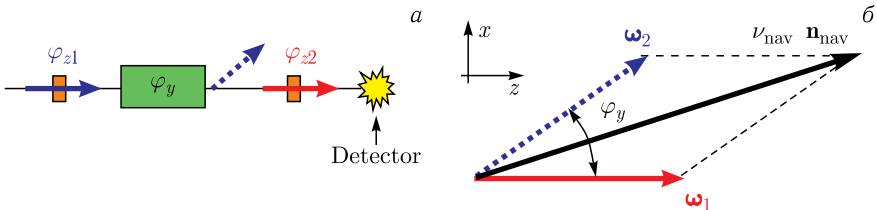


Рис. 4. Спиновый навигатор на основе двух слабых соленоидов

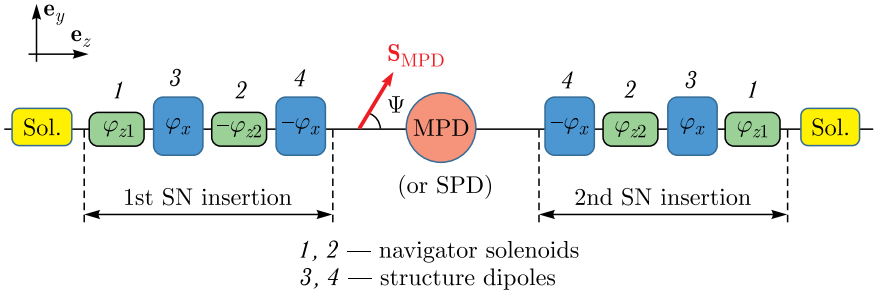


Рис. 5. Спиновый навигатор на основе слабых соленоидов в NICA

частота ν_{nav} и индуцированное направление \mathbf{n}_{nav} будут определяться векторной суммой парциальных полей (см. диаграмму на рис. 4, б).

Таким образом, рассмотренный навигатор позволяет одновременно осуществлять контроль за спиновой частотой и направлением поляризации в плоскости коллайдера (zx). При замене диполя с вертикальным полем на диполь с радиальным полем навигатор позволит управлять поляризацией в вертикальной плоскости (zy) детектора.

На рис. 5 приведена рабочая схема навигатора для управления поляризацией протонов и дейтронов в вертикальной плоскости (zy) детектора MPD (SPD) на основе четырех слабых соленоидов, симметрично расположенных среди диполей с радиальными полями (помечены цифрами 3 и 4), которые обеспечивают встречу пучков в детекторе [13]. Пара навигаторных соленоидов, поворачивающих спины на угол φ_{z1} (помечены цифрой 1), осуществляет продольную поляризацию в MPD, а пара навигаторных соленоидов, поворачивающих спины на угол φ_{z2} (помечены цифрой 2), обеспечивает вертикальную поляризацию в MPD. Навигаторная частота ν_{nav} и индуцированное направление \mathbf{n}_{nav} в детекторе MPD будут определяться значениями полей (углами поворота спинов φ_{z1} , φ_{z2}) навигаторных соленоидов:

$$\nu_{\text{nav}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\varphi_{z1}^2 + \varphi_{z2}^2 \sin^2 \varphi_x}, \quad \mathbf{n}_{\text{nav}} = \frac{\varphi_{z1} \mathbf{e}_z - \sin \varphi_x \varphi_{z2} \mathbf{e}_y}{\sqrt{\varphi_{z1}^2 + \varphi_{z2}^2 \sin^2 \varphi_x}}, \quad (1)$$

где φ_x — угол поворота диполем с радиальным полем.

Углы Ψ_{MPD} и Ψ_{SPD} между поляризацией и скоростью частицы в детекторах MPD и SPD отличаются на угол, набираемый спином в арке между детекторами [8].

Минимальное значение поля в навигаторных соленоидах ограничено условием устойчивости поляризации: необходимо, чтобы спиновая частота, индуцированная соленоидами, значительно превышала мощность нулевого спинового резонанса, которая определяется орбитальными эмиттантами пучка и ошибками изготовления и выставки магнитных элементов коллайдера. Для устойчивости поляризации пучка во всем диапазоне

энергий коллайдера NICA достаточно, чтобы интеграл поля в каждом из четырех навигаторных соленоидов не превышал значение $0,6 \text{ Тл} \cdot \text{м}$. При использовании соленоидов с максимальным продольным полем $1,5 \text{ Тл}$ длина каждого соленоида составит примерно 40 см .

Спиновый навигатор позволяет контролировать одновременно как направление поляризации в вертикальной плоскости детектора, так и значение спиновой частоты, благодаря чему можно организовать устойчивый спин-флиппер на больших временах для любого направления поляризации со временем переворота спина менее 1 с [15]. Устойчивость на больших временах достигается тем, что во время адиабатической перестройки спинового движения навигаторная частота поддерживается неизменной и поэтому не происходит пересечения ни ST-резонанса, ни резонансов высоких порядков во время манипуляций со спином. В ST-режиме происходит одновременный переворот спинов во всех банчах одного кольца. В результате в детекторе будут сталкиваться одни и те же пары банчей, направление поляризации которых можно попеременно менять. При таком подходе достаточно инжектировать в коллайдер «одинаковые» банчи с одним и тем же направлением поляризации. Отпадают необходимости измерения побанчевой светимости и создания системы отслеживания банчей. Появляется возможность сравнения соударений банчей не только с перевернутыми поляризациями, но и с любыми желаемыми направлениями: вертикальная–продольная, вертикальная–радиальная, радиальная–продольная и т. д.

В режиме спиновой прозрачности появляется уникальная возможность онлайн-мониторинга поляризации. Так как время изменения поля в навигаторных соленоидах ($\tau \sim 1 \text{ с}$) значительно превосходит время оборота спина вокруг индуцированного спинового поля ($T_{\text{rev}} \sim 10^{-4} \text{ с}$), любые манипуляции с направлением спинов при фиксированном значении спиновой частоты будут осуществляться адиабатически, и степень поляризации будет сохраняться с экспоненциальной точностью во время проведения эксперимента. Направление поляризации пучка будет функцией полей навигаторных соленоидов (1) и может контролироваться посредством их измерения.

Спиновые навигаторы помимо управления поляризацией могут выполнять также роль «спиновых компенсаторов», которые скомпенсируют когерентное действие несовершенств магнитной структуры коллайдера [9]. Такая компенсация приведет к тому, что реальная структура коллайдера станет эквивалентна идеальной, в которой спиновые возмущения связаны лишь с орбитальными эмиттантами пучков.

ST-РЕЖИМ НА ЦЕЛЫХ РЕЗОНАНСАХ В КОЛЛАЙДЕРЕ NICA

ST-режим в NICA можно организовать и без использования змеек. В коллайдере без змеек спиновая частота изменяется пропорционально энергии $\nu = \gamma G$, и он работает в режиме выделенного спина практически

во всем диапазоне энергий. Исключение составляют дискретные значения энергий, соответствующие целым спиновым резонансам $\gamma G = k$, когда коллайдер работает в ST-режиме на целых резонансах [16]. В этом случае синхротронная модуляция энергии может оказывать существенное воздействие на поляризацию пучка [17]. Для подавления деполаризующего влияния синхротронных колебаний при манипуляциях направлением поляризацией необходимо выполнить дополнительные ограничения на навигаторные поля. Для обеспечения адиабатического захвата поляризации навигатором в области целого резонанса навигаторная частота должна значительно превосходить разброс спиновой частоты из-за синхротронной модуляции энергии, что приводит к ограничению на допустимый импульсный разброс пучка, особенно при больших энергиях.

В диапазоне коллайдера NICA существует 24 целых резонанса для протонов, которые начинаются с кинетической энергии 108 МэВ и идут с шагом 523 МэВ. Для дейтронов в NICA существует единственный целый резонанс $\gamma G = -1$ при импульсе, примерно равном 13 ГэВ/с.

При работе с протонами в ST-режиме на целых резонансах в NICA проблема сохранения поляризации до энергии эксперимента переносится на нуклотрон, который является инжектором поляризованных протонов в коллайдер. При инжекции пучка в NICA необходимо обеспечить согласование направления поляризации с направлением навигаторного поля в месте инжекции. Другая возможность — инжектировать вертикально поляризованный пучок вдали от целого резонанса (вне области резонанса) и далее обеспечить адиабатический захват поляризации навигатором при медленном приближении пучка в область резонанса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ST-РЕЖИМА В НУКЛОТРОНЕ

Существует возможность экспериментальной проверки ST-режима в нуклотроне, который обладает для этого всем необходимым оборудованием: двумя поляриметрами на внутренней и выведенной мишенях [18–21]. В работе [16] предложен спиновый навигатор для управления поляризацией протонов в плоскости нуклотрона на основе двух слабых соленоидов, схема которого для резонанса $\gamma G = 2$ приведена на рис. 6. Интеграл поля навигаторных соленоидов 50 мТл·м достаточен для управления ориентацией спинов протонов. При проверке ST-режима на резонансе $\gamma G = 2$, который соответствует кинетической энергии протонов 108 МэВ, не возникает проблем с сохранением поляризации.

Экспериментальную проверку ST-режима можно осуществить без введения в структуру нуклотрона дополнительных слабых соленоидов. В работе [9] был предложен навигатор на основе корректирующих диполей нуклотрона. Управление поляризацией осуществляется за счет контролируемого изменения замкнутой орбиты нуклотрона корректирую-

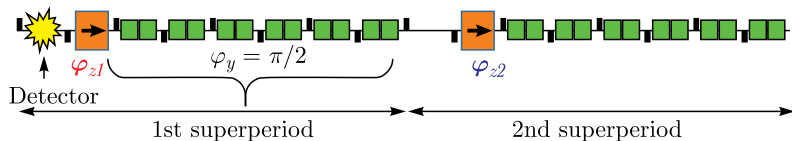


Рис. 6. Спиновый навигатор на основе слабых соленоидов в нуклотроне

щими диполями, в результате чего спины испытывают действие «дополнительных» полей, возникающих на замкнутой орбите в квадруполях, которые усиливают прямое действие на спин корректирующего диполя. Коэффициент усиления навигаторной частоты за счет искажения орбиты растет с энергией. Корректирующие диполи позволяют решить проблему сохранения поляризации до импульса 3,5 ГэВ/с. Для навигатора на корректирующих диполях целесообразно использовать резонанс $\gamma G = 7$, когда для управления поляризацией протонов достаточно использовать дипольный корректор с интегралом поля 20 мТл·м, который отклоняет замкнутую орбиту не более чем на 1 см [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена концепция спиновой прозрачности в коллайдере NICA, основная идея которой заключается в сведении к нулю итогового действия на спин сильных магнитных полей структурных элементов коллайдера за оборот частицы. Спиновая прозрачность легла в основу системы управления поляризацией протонов и дейтронов для реализации программы по спиновым исследованиям в ОИЯИ. На первом этапе планируется использовать две соленоидальные змейки в каждом кольце коллайдера с интегралом поля 12 Тл·м на змейку, которые обеспечивают ST-режим в непрерывном диапазоне импульсов до 3,5 ГэВ/с для протонов и до 1 ГэВ/с для дейтронов. В оставшемся диапазоне импульсов доступна работа в ST-режиме на целых резонансах в коллайдере без змеек при дискретных значениях энергий, которые идут с шагом примерно 0,5 ГэВ для протонов. Для дейтронов ST-режим на целом резонансе осуществляется при единственном значении импульса, равном 13 ГэВ/с.

В отличие от коллайдера RHIC, работающего в режиме «выделенного спина», в котором управление поляризацией осуществляется с помощью спиновых ротаторов на сильных полях, управление поляризацией пучка в коллайдере NICA, работающем в ST-режиме, осуществляется с помощью спиновых навигаторов на основе слабых квазистационарных магнитных полей. Спиновые навигаторы позволяют решать следующие задачи при работе с поляризованными пучками протонов и дейтронов в коллайдере NICA:

- получать любое направление поляризации в любом месте орбиты;
- стабилизировать направления спинов в процессе проведения эксперимента на временах порядка нескольких часов;

- организовывать систему спин-флипа, обеспечивающую многократные когерентные перевороты спинов одновременно для всех частиц пучка со временем переворота спинов менее 1 с;
- осуществлять компенсацию когерентного действия на спин несовершенств магнитной структуры коллайдера;
- организовать онлайн-мониторинг поляризации во время проведения эксперимента.

Таким образом, концепция спиновой прозрачности дает широкие возможности экспериментаторам для проведения исследований с поляризованными пучками. В обозримом будущем ускорительный комплекс NICA станет уникальной площадкой для проведения прецизионных экспериментов с такими пучками.

В настоящее время существует возможность экспериментальной проверки концепции спиновой прозрачности на синхротроне нуклотрон в ОИЯИ [18]. Реализация ST-режима расширит возможности проведения экспериментов с поляризованными протонами в RHIC с двумя идентичными змейками [11] и с поляризованными дейтронами на целых спиновых резонансах в коллайдере RHIC без змеек [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Harrison M., Peggs S., Roser T.* // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2002. V. 52. P. 425.
2. *Ptitsin V., Shatunov Yu.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 398. P. 126.
3. *Filatov Y.N., Kondratenko A.M., Kondratenko M.A., Derbenev Y.S., Morozov V.S.* // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 124. P. 194801.
4. *Savin I., Efremov A., Peshekhonov D., Kovalenko A., Teryaev O., Shevchenko O., Nagajcev A., Guskov A., Kukhtin V., Toplilin N.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2015. V. 85. P. 02039.
5. *Abramov V.V., Aleshko A., Baskov V.A., Boos E., Bunichev V., Dalkarov O.D., El-Kholy R., Galoyan A., Guskov A.V., Kim V.T. et al.* // Phys. Part. Nucl. 2021. V. 52, No. 6. P. 1044–1119.
6. *Kekelidze V.D., Kovalenko A.D., Meshkov I.N., Sorin A.S., Trubnikov G.V.* // Phys. At. Nucl. 2012. V. 75. P. 542.
7. *Filatov Yu.N., Kovalenko A.D., Butenko A.V., Syresin E.M., Mikhailov V.A., Shimanskiy S.S., Kondratenko A.M., Kondratenko M.A.* // Eur. Phys. J. Web Conf. 2019. V. 204. P. 10014.
8. *Kovalenko A.D., Butenko A.V., Kekelidze V.D., Mikhaylov V.A., Filatov Y., Kondratenko A.M., Kondratenko M.A.* // Proc. of IPAC'15, Richmond, VA, USA, 2015. P. 2031.
9. *Filatov Yu.N., Kondratenko A.M., Kondratenko M.A., Tsyplakov E.D., Butenko A.V., Kostromin S.A., Ladygin V.P., Syresin E.M., Guryleva I.L., Melnikov A.A., Aksentyev A.E.* // JETP Lett. 2022. V. 116, No. 7. P. 413–419.
10. *Дербенёв Я.С., Кондратенко А.М., Скринский А.Н.* // ДАН СССР. 1970. Т. 192, № 6. С. 1255–1258.

11. Morozov V. S., Adams P., Derbenev Y. S., Filatov Y., Huang H., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Lin F., Meot F., Ptitsyn V., Schmidke W. B., Zhang Y. // Proc. of IPAC'19, Melbourne, Australia, 2019. P. 2783–2786.
12. Huang H., Kewisch J., Liu C., Marusic A., Meng W., Méot F., Oddo P., Ptitsyn V., Ranjbar V., Roser T. // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 264804.
13. Abazov V. M., Abramov V., Añanasyev L. G. et al. <https://arxiv.org/abs/2102.00442>. 2022.
14. Filatov Y. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Derbenev Ya. S., Morozov V. S., Butenko A. V., Syresin E. M., Tsyplakov E. D. // Eur. Phys. J. C. 2021. V. 81, No. 11. P. 986.
15. Filatov Y., Kondratenko A., Nikolaev N., Senichev Y., Kondratenko M., Vinogradov S., Tsyplakov E., Butenko A., Kostromin S., Ladygin V., Syresin E., Guryleva I., Melnikov A., Aksentyev A. // JETP Lett. 2023. V. 118, No. 6. P. 387–394.
16. Filatov Y. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Vorobyov V., Vinogradov S., Tsyplakov E., Morozov V. // Phys. Rev. Accel. Beams. 2021. V. 24, No. 6. P. 061001.
17. Derbenev Y. S., Kondratenko A. M., Skrinskii A. N. // Sov. Phys. JETP. 1971. V. 33. P. 658.
18. Filatov Y. N., Kondratenko A. M., Kondratenko M. A., Vorobyov V., Vinogradov S., Tsyplakov E., Butenko A., Syresin E., Kostromin S., Derbenev Y., Morozov V. // J. Instrum. 2021. V. 16, No. 12. P. 12039.
19. Kurilkin P. K., Ladygin V. P., Uesaka T. et al. // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 642. P. 45.
20. Terekhin A. A., Volkov I. S., Gurchin Y. V., Isupov A. Y., Ladygin V. P., Reznikov S. G., Tishevsky A. V., Khrenov A. N., Janek M. // Phys. Part. Nucl. 2023. V. 54, No. 4. P. 634.
21. Azhgirey L. S., Ladygin V. P., Lehar F., Prokofiev A. N., Stoletov G. D., Zhdanov A. A., Zhmyrov V. N. // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 497. P. 340.