

## ПОЛЯРИМЕТРИЯ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ КОЛЛАЙДЕРА NICA

*А. Н. Зеленский<sup>а,1</sup>, В. П. Ладыгин<sup>б</sup>, В. В. Фимушкин<sup>б</sup>, Н. В. Дунин<sup>б</sup>,  
К. А. Ившин<sup>б</sup>, А. Н. Соловьёв<sup>б</sup>, Р. А. Шиндин<sup>б</sup>, С. Н. Жабин<sup>а</sup>,  
Ю. Н. Филатов<sup>а</sup>, А. А. Черникова<sup>а</sup>, А. С. Белов<sup>в</sup>*

<sup>а</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
Долгопрудный, 141701, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

<sup>в</sup> Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312, Россия

В коллайдере NICA планируются эксперименты с пучками поляризованных протонов, дейтронов (и рассматривается возможность получения пучков ядер  ${}^3\text{He}^{++}$ ) в диапазоне энергий до 13 ГэВ. Представлены разработки поляриметров во всем диапазоне энергий пучка от источника до максимальной энергии пучков в нуклотроне и коллайдере. Полная реализация системы поляриметров позволит выполнить настройку, оптимизацию и мониторинг параметров поляризованных пучков, полученных в источнике и в процессах транспортировки и ускорения, измерять поляризацию протонного и дейтронного пучков в нуклотроне и коллайдере с необходимой для экспериментов абсолютной точностью.

Experiments with accelerated beams of polarized protons and deuterons (possibly beams of  ${}^3\text{He}^{++}$  nuclei) are planned in the NICA collider. This paper presents the developments of polarimeters for the entire range of beam energies from the source to the maximum beam energy in the Nuclotron and the collider. The implementation of the polarimeter system will allow adjustment, optimization and monitoring of polarized beams parameters out of the source, during the transportation and acceleration processes, and measuring the polarization of proton and deuteron beams in the Nuclotron and the collider with the absolute accuracy required for experiments.

PACS: 29.27.Hj; 07.60.Fs; 29.20.—c

### ВВЕДЕНИЕ

Для исследования спиновой структуры протонов и дейтронов в коллайдере NICA (ОИЯИ) планируется использовать уникальную возможность получения пучков поляризованных протонов и дейтронов с энергией столкновения до  $\sqrt{S} = 27$  ГэВ и светимостью до  $10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [1]. Основными задачами поляризационных экспериментов являются детальные исследования глюонной компоненты спина протонов и дейтронов и реализация программы исследований фундаментальных симметрий [2, 3]. Сохранение поляризации и контроль направления спинов будет осуществляться с помощью

---

<sup>1</sup>E-mail: zelenskii.an@mipt.ru

частичных соленоидальных сибирских змеек в режиме спиновой прозрачности [4]. Также планируется комплекс исследований по поиску EDM (Electric Dipole Moment) протонов и дейтронов [5] и разработке прецизионной поляриметрии для этих экспериментов.

Моделирование эволюции распределения спинов при ускорении пучков в циклических ускорителях (бустер, нуклотрон, коллайдер NICA) показывает, что возникающая резонансная деполяризация приводит, главным образом, к потерям поляризации на периферии пучков и появлению профилей поляризации. При этом поляризация центральной части пучка при ускорении не теряется и равна поляризации первичного пучка из линейного ускорителя. Поэтому разработка поляриметров для измерений профилей поляризации в коллайдере и поляриметров для измерений абсолютной поляризации пучка при инжекции в нуклотрон после линейного ускорителя является одной из приоритетных задач. Для этих целей разрабатывается система поляриметрии на выходе линейного ускорителя при энергии пучков 5 МэВ/нуклон, основанная на реакциях рассеяния:  ${}^4\text{He}(d, d){}^4\text{He}$ ,  ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$  и  ${}^4\text{He}(p, p){}^4\text{He}$  с хорошо изученными анализирующими способностями. Эти поляриметры также будут использоваться для настройки спин-ротатора в канале транспортировки для получения заданного направления спина при инжекции в нуклотрон.

Необходимым инструментом для настройки систем контроля и мониторинга поляризации в нуклотроне и коллайдере NICA являются быстродействующие поляриметры с временем измерений порядка 1 мин. Для этой цели в дополнение к действующему поляриметру с внутренней мишенью в нуклотроне разрабатываются поляриметры, основанные на упругом протон-протонном или протон-углеродном рассеянии при малых переданных импульсах в области кулон-ядерной интерференции (CNI, Coulomb

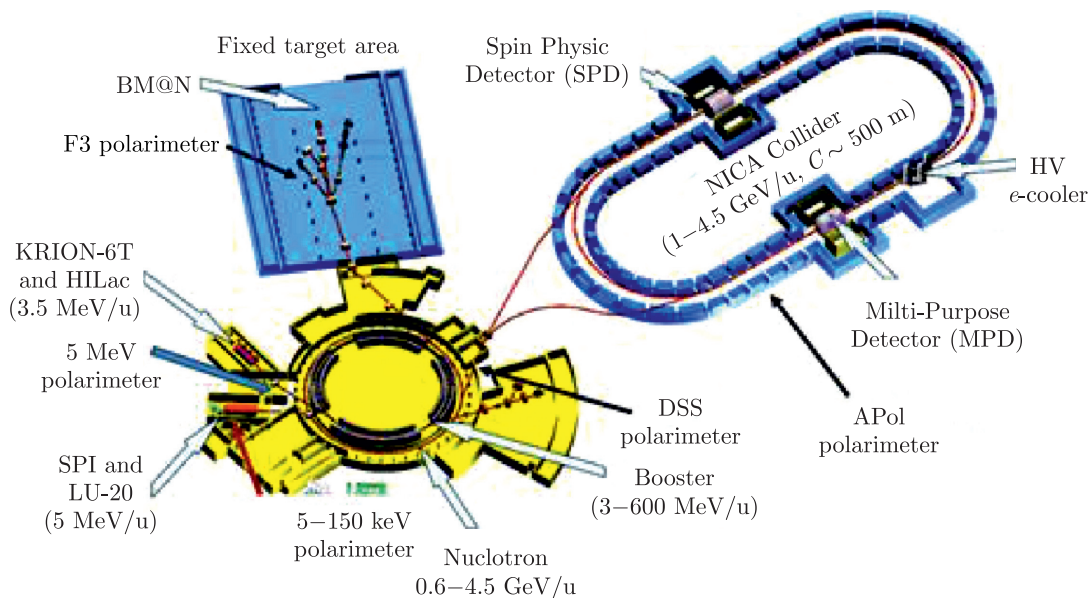


Рис. 1. Система поляриметров в комплексе NICA для всего диапазона энергий пучков протонов и дейтронов

Nuclear Interference) [6]. Полная реализация системы поляриметров, представленная на рис. 1, позволит выполнить настройку, оптимизацию и мониторинг параметров SPI (Source of Polarized Ions) и измерять абсолютную поляризацию протонного и дейтронного пучков на входе в нуклотрон с требуемой абсолютной точностью.

Для измерений абсолютной поляризации пучка протонов в коллайдере NICA создается поляриметр на основе протон-протонных столкновений в струе поляризованных атомов водорода при малых переданных импульсах в СНИ-области. Идентичность частиц при рассеянии поляризованных протонов в коллайдере на поляризованных протонах в составе атомов водорода в поляризованной струе позволяет определить поляризацию протонов в коллайдере —  $P_{\text{beam}}$  через поляризацию протонов в мишени —  $P_{\text{target}}$ , которая для атомарного пучка водорода может быть измерена с точностью лучше 0,1 % с помощью поляриметра Брейта–Раби [7].

### СИСТЕМА ПОЛЯРИМЕТРОВ ВО ВСЕМ ДИАПАЗОНЕ ЭНЕРГИЙ ПУЧКА ОТ ИСТОЧНИКА ДО КОЛЛАЙДЕРА

#### Лэмбовский поляриметр при энергии пучка из источника SPI 5–25 кэВ.

Для измерения поляризации пучка на выходе из SPI при энергии пучка 5–25 кэВ (ниже порога ядерных реакций) можно использовать метод лэмбовского поляриметра Lamb-shift (LSP). В LSP поляризованные протоны (дейтроны) превращаются в метастабильные атомы водорода  $H(2S)$  или  $D(2S)$  в процессе перезарядных столкновений в ячейке с парами натрия. При этом заселенности подуровней сверхтонкой структуры атомов зависят от поляризации пучка, и величина поляризации может быть определена на основе измерений этих заселенностей. Эти измерения можно проводить с помощью спинового фильтра (системы магнитного, электрического и микроволнового полей). В системе регистрации интенсивности пучка метастабильных атомов, прошедших через спиновый фильтр, сильное электрическое поле полностью переводит (quench — гасит) метастабильные состояния в основные состояния и образующиеся лаймана-альфа фотоны (121,6 нм) регистрируются с помощью детектора на основе микроканальных пластин. Серия измерений скорости счета при перевероте направления поляризации в источнике позволяет определить степень поляризации пучка. На основе этого метода реализован высокоэффективный поляриметр (Lamb-shift polarimeter, LSP) для измерений поляризации в источнике с оптической накачкой в ИЯИ РАН [8]. Впоследствии были созданы LSP для ускорителей в TRIUMF (Канада), КЕК (Япония), BNL (США). На основе этого опыта разрабатывается поляриметр для измерений поляризации протонного и дейтронного пучков при энергии 5–25 кэВ на выходе источника SPI. В поляриметре ИЯИ РАН скорость счета метастабильных атомов достигала нескольких МГц, что позволило выполнить измерение поляризации с высокой точностью в импульсном режиме с малой скважностью. В непрерывном источнике TRIUMF типичная скорость счета составляла  $\sim 100$  кГц и статистическая точность измерений  $\sim 0,2\%$  достигалась за 10 с измерений, что позволило выполнить детальную оптимизацию всех параметров источника. Для источника SPI с малой скважностью 0,2 Гц, 100 мкс, высокая скорость счета необходима для эффективной работы по настройке параметров источника.

Существуют дополнительные факторы деполяризации, которые систематически занижают измерение поляризации в LS-поляриметре. Обычно поляризация, измеренная

в LS-поляриметре, на 5–10% ниже величины поляризации в абсолютных  $p$ -Carbon,  $p$ - $^4\text{He}$ -поляриметрах на основе ядерных реакций. Факторы «разбавления» поляризации известны, и можно ввести поправки, однако надежнее было использовать лэмбовский поляриметр для относительных измерений и калиброванные ядерные поляриметры при высоких энергиях для абсолютных измерений поляризации.

**Измерения поляризации протонов и дейтронов при энергиях пучков 25–150 кэВ.** Для этих целей создается система поляриметров на выходе из SPI, которая включает поляриметр для измерений поляризации пучка дейтронов с энергией 25–50 кэВ в реакции на дейтериевой мишени —  $D(d, p)\text{T}$  [9, 10] (рис. 2). В этом поляриметре детектируются протоны с энергией 2,8 МэВ, вылетающие под углом  $120^\circ$  (назад). В камере поляриметра устанавливается мишенная станция (несколько сменных мишеней) и система из восьми кремниевых детекторов толщиной 300 мкм.

Пучки из SPI имеют высокую интенсивность, но малую скважность 0,2 Гц, 100 мкс, поэтому разработаны быстрые детекторы и электроника для получения высокой ( $\sim 1000$  событий/цикл) скорости счета событий. Это должно позволить использовать поляриметр для настройки и оптимизации параметров SPI. В поляриметре могут измеряться как векторная, так и тензорная поляризация и мониторироваться направление спина пучка дейтронов.

Для измерения поляризации протонного пучка с энергией 100–150 кэВ может быть использована реакция расщепления лития-6:  $^6\text{Li}(p, ^3\text{He})^4\text{He}$ , которая была детально изучена в области низких энергий в работе [11]. Поляриметр, основанный на этой реакции, был разработан для измерения поляризации при энергии 300 кэВ в канале транспортировки из источника поляризованных ионов с оптической накачкой в циклотрон TRIUMF [10]. На основе опыта использования поляриметра в TRIUMF предложено создать  $p$ - $^6\text{Li}$ -поляриметр для источника SPI. В этом поляриметре измеряется право-левая асимметрия вылета ядер  $^3\text{He}$  при столкновениях протонов с ядрами  $^6\text{Li}$  под углами  $110$  и  $130^\circ$  в лабораторной системе, т.е. рассеяние назад. Мишень

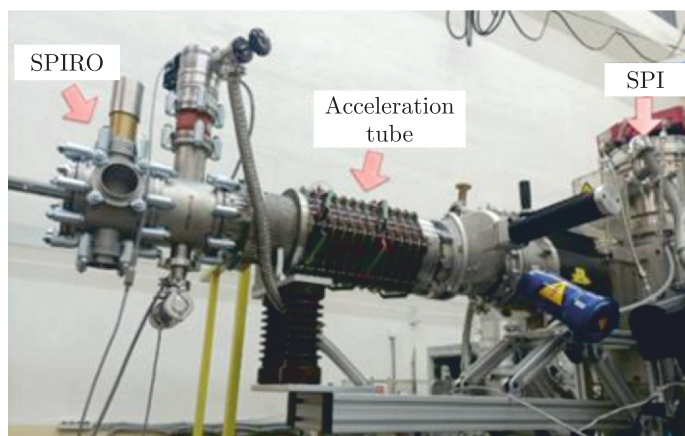


Рис. 2. Поляриметр на основе столкновений  $D(d, p)\text{T}$  и  $^6\text{Li}(p, ^3\text{He})^4\text{He}$  при энергиях пучков протонов и дейтронов 25–50 кэВ. Пучок из SPI 25 кэВ ускоряется к камере поляриметра под потенциалом земли

из  ${}^6\text{Li}$  толщиной  $\sim 10\text{--}20$  мкг/см<sup>2</sup> получена осаждением паров лития на подложку из тантала. Для детектирования ядер  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  под углами  $110\text{--}120^\circ$  будут использоваться те же самые кремниевые детекторы, что и для реакции  $\text{D}(d, p)\text{T}$ .

**Измерения поляризации протонов и дейтронов на выходе ЛУ-20 при энергиях пучков 5 МэВ/нуклон.** Поляриметры для измерения векторной поляризации дейтронов в реакции  ${}^4\text{He}(p, p){}^4\text{He}$  и тензорной поляризации дейтронов в реакции  ${}^3\text{He}(d, p){}^4\text{He}$  использовались с источником POLARIS [12, 13]. Главной проблемой была низкая скорость счета. Применение современных кремниевых детекторов, электроники и системы сбора данных в новом поляриметре позволит увеличить скорость набора данных до 200–300 событий в одном цикле источника и ЛУ-20. Также эти поляриметры могут работать в режиме одновременного измерения векторной и тензорной поляризации дейтронов. Для очистки пучка дейтронов из SPI от примеси молекулярных ионов  $\text{H}_2^+$  в канале транспортировки установлена обдирочная фольга и дипольный магнит для разделения образующегося (неполяризованного) пучка протонов от дейтронов.

Особенно важны измерения абсолютной поляризации протонного пучка до инжекции в нуклотрон (где в отличие от дейтронного пучка возможны значительные потери поляризации) при прохождении сильных деполяризующих резонансов при ускорении пучка. Эти данные необходимы в качестве отсчета при настройке элементов системы контроля спина для подавления деполяризации. Для измерений абсолютной поляризации протонного пучка может быть использовано уникальное свойство упругих столкновений частиц со спином  $S = 1/2$  на частицах со спином 0, где при определенной кинематике столкновений анализирующая способность достигает  $\sim 100\%$  [14]. Для столкновений  ${}^4\text{He}(p, p){}^4\text{He}$  эти кинематические условия:  $E_p = 6,35$  МэВ,  $\theta_{\text{cm}} = 129^\circ$  и  $E_p = 12,30$  МэВ,  $\theta_{\text{cm}} = 126^\circ$  находятся в области работы ЛУ-20. Все эти поляриметры также будут использоваться для настройки спин-ротаторов в канале транспортировки для получения заданного направления спина при инжекции в нуклотрон.

**Измерения поляризации протонов и дейтронов в нуклотроне при энергиях пучков 13,6 ГэВ.** При ускорении дейтронного пучка (вследствие малого аномального магнитного момента дейтрона) до энергий  $\leq 13$  ГэВ в нуклотроне и коллайдере NICA отсутствует резонансная деполяризация и поляризация должна сохраняться (направление вектора поляризации может изменяться и измеряться в СНИ-поляриметрах). В этом случае измерения поляризации в области низких энергий, где величина анализирующей способности известна с высокой точностью ( $\leq 2\%$ ), могут уверенно экстраполироваться для более высоких энергий. Возможна также прямая проверка, что поляризация действительно сохраняется, если выполнить цикл измерений, в котором поляризация измеряется при энергии с хорошо известной анализирующей способностью (например, 3,0 ГэВ), затем пучок ускоряется до полной энергии и снова замедляется до 3,0 ГэВ, и поляризация еще раз измеряется в тех же условиях. Эти измерения уже были выполнены ранее в нуклотроне с поляриметром на выведенном пучке и подтвердили сохранение поляризации до энергии 9 ГэВ [15].

В существующем (DSS — Deuteron Spin Structure) поляриметре с внутренней мишенью в нуклотроне используется реакция упругого дейтрон-протонного рассеяния при энергии 270 МэВ, где анализирующая способность известна с высокой точностью 2% [16]. Полиэтиленовая мишень в этом поляриметре может быть использована при интенсивности пучка протонов/дейтронов до  $\sim 5 \cdot 10^9$  частиц в кольце. Запланирован-

ная модернизация поляриметра позволит также измерять поляризацию протонов до энергии 1 ГэВ. При более высокой интенсивности могут быть использованы углеродные мишени, как в CNI-поляриметре. В SPD-детекторе дополнительно также могут быть измерены асимметрии в рассеянии, коррелированные с направлением спина для мониторинга величины и направления поляризации.

Векторная поляризация выведенных пучков дейтронов и протонов измеряется поляриметром, расположенным в фокусе F3 канала транспортировки пучка в экспериментальный зал 205. Поляриметр основан на использовании реакции квазиупругого рассеяния протонов на полиэтиленовой мишени при углах рассеяния протонов  $14^\circ$  и  $8^\circ$  при энергиях до 2,2 и 3,7 ГэВ соответственно [17]. Модернизация поляриметра F3 позволит измерять векторную поляризацию дейтронов и протонов до максимальной энергии нуклотрона.

**Протон-углеродный CNI-поляриметр в нуклотроне и коллайдере NICA.** Необходимыми инструментами для настройки систем контроля и мониторинга поляризации являются быстродействующие поляриметры, позволяющие получить статистическую точность измерений 2–3% за  $\sim 100$  циклов ускорителя и за 100 с в коллайдере. Для этой цели в дополнение к действующему поляриметру с внутренней мишенью в нуклотроне могут быть использованы поляриметры, основанные на упругом протон-протонном или протон-углеродном рассеянии при малых переданных импульсах в области кулон-ядерной интерференции. Анализирующая способность этого поляриметра достигает величин около 4% для рассеяния протонов на углероде и слабо зависит от энергии протонного пучка.

Большое сечение упругого рассеяния при малых  $|t| \sim 0,002-0,01$  (ГэВ/с)<sup>2</sup> позволяет получить высокую скорость счета при использовании очень тонких мишеней ( $\sim 10$  атомных слоев  $5$  мкг/см<sup>2</sup>, толщиной 25–50 нм и шириной  $\sim 10-100$  мкм) — углеродных пленочных мишеней. Применение этих мишеней позволяет использовать многократное прохождение банчей пучка через мишень, что увеличивает эффективность работы поляриметра. Поляриметры с такими мишенями разработаны и используются в BNL (Brookhaven National Laboratory) в диапазоне энергий 2,3–24 ГэВ в AGS (Alternating Gradient Synchrotron) и до 255 ГэВ полной энергии в RHIC [17]. Такие мишени изготавливаются методом напыления (через маску) паров углерода, испаряемых электронным лучом на стеклянную подложку. Энергия регистрируемых ядер отдачи углерода мала  $400-900$  кэВ ( $0,09 < -t < 0,23$  (ГэВ/с)<sup>2</sup>), поэтому использование тонких мишеней также необходимо для уменьшения поглощения в мишени. В качестве детекторов ядер отдачи углерода используются стриповые кремниевые детекторы. Ядра отдачи углерода идентифицируются по времени пролета и амплитуде (которая измеряется при помощи быстрого анализатора формы сигнала, WFD — wave-form digitizer).

При типичной интенсивности поляризованных протонов в банче —  $2,5 \cdot 10^{11}$  протонов/банч и времени измерения на  $\sim 1000$  мс число зарегистрированных событий во всех параллельно включенных детекторах составляет 1 млн/цикл ускорения AGS. При этом ширина мишени всего 50 мкм, чтобы не превысить порог ограничений на скорость счета системы сбора данных. При меньшей интенсивности пучка (как это может быть на начальном этапе работы в нуклотроне) возможно компенсировать уменьшение скорости счета увеличением ширины мишени в 10–100 раз, причем надежность работы мишеней только возрастет. Для измерения с 2%-й статистической

точностью необходимо набрать 40 млн событий, что требует 40 циклов ускорителя AGS по 4 с, т. е. примерно 160 с.

Такой поляриметр с тонкой углеродной мишенью может быть также использован для измерения поляризации, а также для профилей поляризации в нуклотроне и коллайдере NICA.

Поскольку ядра углерода в CNI-поляриметре детектируются под углами, близкими к  $90^\circ$ , поляриметр может быть достаточно компактным, что упрощает установку в кольца коллайдера. Применение системы измерений из 6 детекторов позволяет измерить направление поляризации. Возможно также совмещение в одном приборе (в одной вакуумной камере и одной мишенной станции) наличия CNI-поляриметра и детектирования рассеянных протонов (дейтронов) с большими передачами импульса и оптимизацией конфигурации измерений для разных энергий и интенсивности пучков, а также измерений с дейтронами. Анализирующая способность для упругого  $p$ - $p$ -рассеяния уменьшается при увеличении энергии. При максимальной энергии NICA 13,0 ГэВ и  $t = 0,3$  (ГэВ/ $c$ )<sup>2</sup> анализирующая способность была измерена с высокой точностью и еще достаточно велика ( $4,66 \pm 0,26$ ) % для достаточно эффективной поляриметрии [18]. Полиэтиленовые мишени могут быть использованы только при низкой интенсивности пучка  $\leq 5 \cdot 10^9$  частиц/банч и малом числе банчей. Для измерений при полной проектной интенсивности предложено использовать кластерную струйную мишень толщиной  $\sim 10^{15}$  атомов/см<sup>2</sup>, которая позволит получить высокую скорость счета и при нормировке измерений на данные с поляриметра на поляризованной струе водорода абсолютную ошибку измерений  $\leq 5$  % [19].

В этих поляриметрах также измеряется направление вектора поляризации, его изменение во времени и поляризация каждого банча. В комплексе с измерениями поляризации на выходе линейного ускорителя и APol применение CNI  $p$ -C позволит восстановить полную картину эволюции поляризации в процессе ускорения и мониторировать величину поляризации протонов в процессе экспериментов в коллайдере NICA.

**Измерения поляризации дейтронов в нуклотроне и коллайдере при энергиях пучков до 13 ГэВ.** Анализирующая способность для рассеяния в области кулон-ядерной интерференции (CNI) пропорциональна аномальному магнитному моменту частицы и для дейтронов будет существенно меньше, чем для протонов. Поэтому для измерений абсолютной величины поляризации применение CNI-поляриметра с поляризованной по спине ядра струей атомов дейтерия будет малоэффективно. При ускорении дейтронного пучка (вследствие малого аномального магнитного момента дейтрона) до энергий  $\leq 13$  ГэВ/ $c$  в нуклотроне и коллайдере NICA отсутствует резонансная деполяризация и поляризация должна сохраняться (направление вектора поляризации может измеряться в CNI-поляриметрах). В этом случае измерения поляризации в области низких энергий, где величина анализирующей способности известна с высокой ( $\leq 2$  %) точностью, могут уверенно экстраполироваться для более высоких энергий.

В SPD-детекторе дополнительно также могут быть измерены асимметрии в рассеянии, коррелированные с направлением спина для мониторирования величины поляризации.

**Абсолютный поляриметр с поляризованной струей атомов водорода APol.** Абсолютная поляризация пучка в коллайдере NICA может быть измерена в протон-



Рис. 3. Стенд поляриметра APol для измерений абсолютной поляризации протонного пучка в коллайдере NICA

протонных столкновениях в струе поляризованных атомов водорода. Анализирующая способность реакции в области кулон-ядерной интерференции с переданными импульсами  $|t| = 0,002-0,01$  (ГэВ/ $c$ )<sup>2</sup> составляет  $A_{\text{CNI}} \sim 4\%$ .

Создание такого поляриметра — APol — уже начато для NICA (рис. 3). В APol пучок атомарного водорода образуется при помощи индуцированного RF-разряда. Скорость атомов в пучке  $\sim 2 \cdot 10^5$  см/с при охлаждении сопла диссоциатора до 80 К. Атомарный пучок разделяется в системе секступольных магнитов по электронному спину (система магнитов работает как спиновый фильтр, атомы с  $m_j = +1/2$  фокусируются в область мишени, атомы с  $m_j = -1/2$  дефокусируются и убираются из пучка). Система радиочастотных переходов трансформирует электронную поляризацию в поляризацию протонов. Применение современных магнитных материалов для секступольных магнитов и детальные расчеты фокусирующей разделительной системы позволяют получить высокую плотность пучка атомов водорода в области мишени  $\sim 5 \cdot 10^{12}$  атомов/см<sup>3</sup> и толщину мишени  $\sim 1,5 \cdot 10^{12}$  атомов/см<sup>2</sup> [7].

В аналогичном поляриметре в RHIC, при интенсивности пучка  $\sim 2,5 \cdot 10^{13}$  протонов в 112 банчах, скорость счета в детекторах составила  $\sim 200$  протонов отдачи/с. Это позволило измерить поляризацию протонов в пучке со статистической точностью  $\sim 2\%$  за 8 ч измерений. Проектная интенсивность пучков в коллайдере NICA (для 22 банчей) сравнима с интенсивностью RHIC, поэтому статистическая точность измерений также не должна превышать 2% в одном ускорительно-накопительном цикле. Измеренная в поляриметре APol анализирующая способность может быть использована для нормировки измерений с кластерной водородной мишенью. При этом скорость набора статистики будет увеличена более чем на три порядка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены методы измерений протонов и дейтронов во всем диапазоне энергий пучков в ускорительно-накопительном комплексе NICA. Полная реализация системы поляриметров позволит выполнить настройку, оптимизацию и мониторинг параметров пучков поляризованных протонов и дейтронов от источника до столкновений в коллайдере. Комплексный анализ спиновых характеристик пучков частиц при транспортировке, ускорении и накоплении в коллайдере должен обеспечить необходимый набор данных для настройки параметров ускорительного комплекса (диагностика параметров пучков) и нормировки результатов физических измерений для столкновений встречных пучков.

**Финансирование.** Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-72-30005, <https://rscf.ru/project/25-72-30005/>.

**Конфликт интересов.** Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V.D.* Three Stages of the NICA Accelerator Complex // *Eur. Phys. J. A.* 2016. V. 52. P. 211.
2. *Abazov V. et al.* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA // *Natural Sci. Rev.* 2024. V. 1. P. 1.
3. *Nikolaev N.N.* Spin of Protons in NICA and PTR Storage Rings as an Axion Antenna // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2022. V. 115, No. 11. P. 683–684.
4. *Filatov Yu.N., Kovalenko A.D., Butenko A.V., Syresin E.M., Mikhailov V.A., Shiman-skiy S.S., Kondratenko A.M., Kondratenko M.A.* Spin Transparency Mode in the NICA Collider // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2019. V. 204. P. 10014.
5. *Senichev Yu.V. et al.* Quasi-Frozen Spin Structures at the NICA Collider as an Option to Search for the Electric Dipole Moment of Deuterons and Axion Dark Matter // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 3. P. 261–265.
6. *Kopeliovich B.Z., Lapidus L.I.* // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1974. V. 19. P. 114.
7. *Zelenski A. et al.* Absolute Polarized H-Jet Polarimeter for RHIC // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2005. V. 536. P. 248.
8. *Zelenski A., Kokhanovski S., Lobashev V.* A Laser Source of Polarized Protons and H<sup>-</sup> Ions // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1986. V. 245. P. 223.
9. *Fimushkin V.V. et al.* The Source of Polarized Ions and Low Energy Polarimeters for the Nuclotron Facility // *PoS (SPIN2018).* 2018. P. 114.
10. *Tagishi Y. et al.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1998. V. 402. P. 436.
11. *Buchmann L.* // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1991. V. 301. P. 383.
12. *Авдейчиков В.В. и др.* Измерение векторной поляризации дейтронов на выходе ЛУ-20. Препринт ОИЯИ 13-84-20. Дубна, 1984.
13. *Авдейчиков В.В. и др.* Измерение тензорной поляризации дейтронов на выходе ЛУ-20. Препринт ОИЯИ P10-90-106. Дубна, 1990.
14. *Plattner G.R., Bacher D.D.* Absolute Calibration of Spin-1/2 Polarization // *Phys. Lett. B.* 1971. V. 36. P. 211.
15. *Ableev V.G. et al.* A Deuteron Polarimeter for Polarized Beams of Relativistic Energies // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1991. V. 306. P. 73.

16. Kurilkin P.K., Ladygin V.P., Uesaka T., Suda K. *et al.* The 270 MeV Deuteron Beam Polarimeter at the Nuclotron Internal Target Station // Nucl. Instr. Meth. A. 2011. V. 642. P. 45.
17. Nakagawa I. *et al.* RHIC Polarimetry // Eur. Phys. J. Spec. Topics. 2008. V. 162. P. 259–265.
18. Khairy F.Z. *et al.* Acceleration of Polarized Protons to 22 GeV/c and the Measurement of Spin–Spin Effects in  $p$ – $p$  Scattering // Phys. Rev. D. 1989. V. 39. P. 45.
19. Piskunov N.M. Beam Polarimetry in the NICA Collider Using a Proton Cluster Target // XIX Workshop on High Energy Spin Physics. Dubna: JINR, 2023.

Получено 4 ноября 2025 г.