

ПРОЕКТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ AFTER С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ НА ПУЧКАХ КОЛЛАЙДЕРА LHC ДЛЯ ФИЗИКИ АДРОНОВ И СТОЛКНОВЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

А. Б. Курепин *, *Н. С. Топильская* **

Институт ядерных исследований РАН, Москва

Высокая интенсивность пучков протонов и ионов свинца, накопленных в коллайдере LHC, позволяет использовать гало пучка: помещать в гало твердую фиксированную мишень или изогнутый кристалл для вывода пучка. При этом энергия частиц достигает значений только в два раза меньше, чем на коллайдере RHIC, но светимость превышает светимость коллайдеров во много раз, а на выведенном пучке возможна установка поляризованной мишени. В рамках проекта планируется исследование редких процессов, изучение поляризационных явлений, определение параметров, необходимых для анализа космических лучей и нейтринной астрофизики, детальное изучение процессов рождения кваркониев и подавления их рождения в зависимости от фазового перехода материи в кварк-глюонную фазу.

High-intensity beams of protons and lead ions accumulated in the LHC collider allow the use of the beam halo by placing in the halo the fixed target or a curved crystal to extract the beam. The energy of the particles reaches values of only two times less than at the RHIC collider, but the luminosity exceeds the luminosity of colliders many times. Also, in the extracted beam it is possible to install a polarized target. The goal of AFTER project is to investigate rare processes and polarization phenomena, to measure the parameters needed to analyze the data of cosmic rays and neutrino astrophysics, and study in detail the processes of quarkonia production and suppression depending on the phase transition of matter to quark-gluon phase.

PACS: 25.40.-q; 25.75.-q; 29.25.Pj

ВВЕДЕНИЕ

Постановка экспериментов с фиксированной мишенью на пучках Большого адронного коллайдера (LHC) имеет ряд преимуществ по сравнению с экспериментами на коллайдерах. Высокая светимость пучков существенно

*E-mail: kurepin@inr.ru

**E-mail: topilska@inr.ru

повысит статистическую точность данных и расширит интервал кинематических параметров реакций. При использовании гало протонного и ионного пучков на LHC с фиксированной мишенью могут быть получены данные в интервале между энергией SPS и номинальной энергией RHIC для pA - и AA -столкновений. Для протонного пучка с энергией 7 ТэВ $\sqrt{s_{NN}} = 114,6$ ГэВ, а для ионов свинца с энергией 2,76 ТэВ на нуклон $\sqrt{s_{NN}} = 71,8$ ГэВ. Поскольку используется только гало пучка, процесс измерений на основных установках LHC не меняется.

1. ТРИ ПОДХОДА К ЭКСПЕРИМЕНТАМ С ФИКСИРОВАННОЙ МИШЕНЬЮ НА ПУЧКАХ КОЛЛАЙДЕРА LHC

Исследования показали три возможности использования пучков LHC высокой энергии для взаимодействия с фиксированной мишенью. Эксперимент с мишенью в виде тонкого кольца, помещенного в гало пучка, может быть проведен на существующих на LHC установках (например, ALICE или LHCb). Мишень может приводиться в рабочее положение с помощью специального устройства после выведения пучка. В эксперименте будет использоваться только гало пучка, а мишень будет являться еще и дополнительным коллиматором [1, 2]. Этот эксперимент с фиксированной мишенью в виде тонкого кольца можно считать первой стадией более сложного эксперимента AFTER [3], требующего создания новой установки.

Другой возможностью является использование изогнутого отклоняющего кристалла, помещенного в гало пучка. Эта методика выведения пучка эффективна и позволяет получать чистые и хорошо сфокусированные пучки. Она постоянно и успешно используется для улучшения существующей на LHC системы коллимации (UA9) [4].

Третья возможность связана с использованием внутренней газовой мишени, которая может быть поляризована. Газовая мишень низкой плотности даже в условиях высокой светимости не влияет на процесс измерений [5]. Такая внутренняя газовая мишень используется в настоящее время в эксперименте LHCb в качестве монитора светимости (SMOG). Она была первоначально предложена как монитор поперечного размера пучка. Устройство устойчиво работало в течение длительного времени без воздействия на другие эксперименты LHC. На LHCb были выполнены пробные эксперименты с протонными пучками и пучками свинца на неоновой мишени в 2012 и 2013 гг. Успех этих пробных экспериментов дал возможность проводить длительные сеансы измерений в 2015 г.: p на Ne (12 ч), Ne (8 ч) и Ar (3 сут) при энергии 110,4 ГэВ, а также Pb на Ar (1 неделя) и p на Ar (несколько часов) при энергии 68,6 ГэВ. Никакого влияния на работу ускорителя LHC не наблюдалось. Также возможно использование поляризованной газовой мишени [6, 7].

С помощью отклоняющего кристалла, помещенного в гало пучка, можно вывести в среднем 15 протонов каждые 25 нс. Эта величина определяется по известным потерям основного пучка LHC и соответствует потоку протонов $6 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ и для ионов свинца $2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Длительность годового сеанса составляет 10^7 с для p^+ и 10^6 с для пучка Pb. Интегральная светимость для жидководородной мишени длиной 1 м составляет 20 фб^{-1} , что сравнимо с интегральной светимостью, полученной на LHC при энергиях 7 и 8 ТэВ.

В условиях внутренней газовой мишени светимость пропорциональна давлению газа. На LHC давление «вакуума» составляет 10^{-12} бар. Однако в pp -столкновениях для получения светимости порядка 10 фб^{-1} в год в случае внутренней газовой мишени требуется давление газа 10^{-7} бар, что невозможно в существующей установке SMOG.

2. ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Эксперимент AFTER имеет обширную физическую программу с использованием различных пучков и мишеней большой толщины, в том числе поляризованных. Физическая программа включает исследование рождения кваркониев, процесса Дрелла–Яна, исследование рождения D -мезонов, измерение потоков, спиновую физику, энергетическое сканирование для поиска критической точки возможного перехода в кварк-глюонную плазму (КТП).

Кварконии являются важными объектами при изучении свойств деконфайнмента материи при ультрарелятивистских столкновениях тяжелых ионов. Но механизм рождения и подавления рождения кваркониев недостаточно изучен в некоторых кинематических областях. Данные по рождению кваркониев с высокой статистикой в этих областях дадут возможность понять механизм рождения, изучить вклад и понять важность процесса регенерации кваркониев, так как вероятность рекомбинации уменьшается с уменьшением энергии столкновения. Будет возможно не только изучение рождения мезонов J/ψ , $\psi(2S)$ и $\Upsilon(nS)$, но также соответствующих χ_c -состояний, измерение которых требует высокой статистики, большого акцептанса детектора и хорошего контроля эффективности. Недавние расчеты [3] подтвердили высокую эффективность исследования физики кваркония в эксперименте AFTER на пучках LHC.

В настоящее время коллайдер RHIC — единственный ускоритель поляризованных протонов, позволяющий изучать спиновую физику при ультрарелятивистских энергиях, выше масс основных адронных резонансов и при рождении бозонов. Такие измерения невозможны ни на тэватроне (Tevatron) в Фермилабе (Fermilab), ни на коллайдере LHC, так как их пучки не поляризованы. Однако в проекте AFTER на пучках LHC будет возможно использовать поляризованные мишени для проведения новых исследований одиночной поперечной спиновой асимметрии (STSA), A_N и эффекта Сиверса (Sivers) [8],

в котором наблюдалась корреляция поперечного момента партонов, k_T со спином нуклона. Этот эффект проявляется в распределениях частиц, зависящих от поперечного момента.

В случае эксперимента с фиксированной мишенью на пучках LHC (AFTER@LHC) из-за различия кинематических параметров лабораторной системы и нуклон-нуклонной системы центра масс измерения STSA в области быстроты экспериментов ALICE и LHCb дадут возможность исследовать область, где партоны уносят большую долю момента поляризованного адрона, x^\uparrow [3, 9]. Это именно та область, где асимметрия, как ожидается, будет иметь наибольшую величину, что недавно было показано при рождении пар лептонов процесса Дрелла–Яна (DY) [10, 11], изолированных фотонов [6, 7], одиночных пионов [11, 12] и рождения струй [12]. Значения STSA, которые определяются динамикой кварков внутри поляризованных нуклонов, таким образом прямо или косвенно (в зависимости от процесса) связаны с эффектом Сиверса для кварков. В случае Дрелла–Яна получаемая функция Сиверса для кварков будет иметь знак, противоположный знаку в случае глубоконеупругого рассеяния (DIS) [13]. Определение знака, предсказанного теоретически, являлось основной физической задачей в измерении Дрелла–Яна в эксперименте COMPASS [14] и в экспериментах E1039 [15] и E1027 [16] в Fermilab с поляризованной мишенью, исследующих асимметрию при более низких значениях x^\uparrow . Эксперимент AFTER@LHC является дополнительным по отношению к этим экспериментам с целью дальнейшего исследования кваркового эффекта Сиверса при измерении одиночной поперечной спиновой асимметрии (STSA) в процессе Дрелла–Яна в широкой области значений x^\uparrow на одной установке.

Практически ничего не известно относительно эффекта Сиверса для глюонов. Коллаборация PHENIX впервые измерила величину STSA при рождении J/ψ -мезонов, чувствительных к глюонам [17]. Получено значение величины A_N , совместимое с нулем, но также допускающее в пределах большой погрешности значение до 20%. Кроме того, измеренная величина A_N не прямо связано с глюонной функцией Сиверса, так как в ней она проинтегрирована по k_T . В условиях большой светимости в экспериментах с фиксированной мишенью на пучках LHC измерения STSA для боттомония, спиново-синглетных состояний, таких как, например, η_c , дадут возможность измерять глюонный эффект Сиверса и определят важность вклада глюонного орбитального момента в разрешение загадки спина нуклона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью эксперимента AFTER является исследование с высокой статистической точностью области материи высокой плотности и температуры на фазовой диаграмме в протон-ядерных и ядро-ядерных столкнове-

ниях, так как светимость экспериментов с фиксированной мишенью существенно выше светимости на коллайдерах. Поиск критической точки сильновзаимодействующей ядерной материи и детальное исследование перехода в кварк-глюонную фазу являются актуальной задачей релятивистской ядерной физики. Эта задача является основной целью эксперимента AFTER, в котором планируется участие ИЯИ РАН. Эксперимент AFTER позволит также исследовать нуклонные и ядерные функции распределения партонов, извлекаемые из адронных процессов. Планируется изучение спиновых процессов, в том числе спиновой асимметрии. Измерение функции STSA на установке с фиксированной мишенью с детектором в области быстроты от 2 до 5 соответствует области, где ожидается значительная величина асимметрии. Использование техники выведенного кристаллом пучка с поляризованной мишенью или газовой поляризованной мишени при исследовании таких столкновений светимость пучка и характеристики поляризации мишени будут достаточно высокими при детальном измерении характеристик кварков и глюонов. Это позволит расширить программу изучения спиновой физики.

Также планируется изучение дифракционной физики и ультрапериферических столкновений, исследование динамики и спектроскопии тяжелых кварков при высоких значениях фейнмановской переменной x_F . Будет проведено детальное изучение процессов рождения кваркониев и подавления их рождения в зависимости от фазового перехода материи в кварк-глюонную фазу. Возможности эксперимента AFTER в данной области энергии превысят возможности всех существующих и планируемых экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курепин А. Б., Топильская Н. С., Голубева М. Б. Рождение состояний чармония в экспериментах с фиксированной мишенью на пучках SPS и LHC в ЦЕРН // ЯФ. 2011. Т. 74, № 3. С. 467–473 (Kurepin A. B., Topilskaya N. S., Golubeva M. B. Charmonium Production in Fixed Target Experiment with SPS and LHC Beams at CERN // Phys. At. Nucl. 2011. V. 74, No. 3. P. 446–452).
2. Kurepin A. B., Topilskaya N. S. Quarkonium Production and Proposal of the New Experiments on Fixed Target at LHC // Adv. High Energy. Phys. 2015. V. 2015. ID 760840. 13 p.
3. Brodsky S. J. et al. Physics Opportunities of a Fixed-Target Experiment Using LHC Beams // Phys. Rep. 2013. V. 522, No. 4. P. 239–255.
4. LHC Committee, Minutes of the 107th Meeting. CERN/LHCC 2011-010. 2011.
5. Barschel C. et al. A Gas Target Internal to the LHC for the Study of pp Single-Spin Asymmetries for Heavy Ion Collisions // Adv. High Energy. Phys. 2015. V. 2015. ID 463141. 6 p.

6. *Airapetian A. et al. (HERMES Collab.)*. The HERMES Polarized Hydrogen and Deuterium Gas Target in the HERA Electron Storage Ring // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 540, No. 1. P. 68–101.
7. *Ehret K.* Commissioning of the HERA-B Internal Target Using the HERA Proton Ring as a B-Factory // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 446, No. 1–2. P. 190–198.
8. *Sivers D. W.* Single-Spin Production Asymmetries from the Hard Scattering of Point-like Constituents // Phys. Rev. D. 1990. V. 41. P. 83–87.
9. *Lansberg J. P. et al.* Physics Case for a Polarized Target for AFTER@LHC // Proc. of Science. 2015. P. 42.
10. *Lui T., Ma B. Q.* Azimuthal Asymmetries in Lepton-Pair Production at a Fixed-Target Experiment Using the LHC Beams (AFTER) // Eur. Phys. J. C. 2012. V. 72. P. 2037–2051.
11. *Anselmino M., D'Alesso U., Melis S.* Transverse Single-Spin Asymmetries in Proton–Proton Collisions at the AFTER@LHC Experiment in a TMD Factorization Scheme // Adv. High Energy. Phys. 2015. V. 2015. ID 475040. 12 p.
12. *Kanazawa K. et al.* Transverse Single-Spin Asymmetries in Proton–Proton Collisions at the AFTER@LHC Experiment // Ibid. ID 257934. 9 p.
13. *Collins J. C.* Leading-Twist Single-Transverse-Spin Asymmetries: Drell–Yan and Deep-Inelastic Scattering // Phys. Lett. B. 2002. V. 536. P. 43–48.
14. *Quintans C. et al. (COMPASS Collab.)*. Future Drell–Yan Measurements in COMPASS // J. Phys. Conf. Ser. 2011. V. 295. P. 012163.
15. *Klein A. et al.* Letter of Intent for a Drell–Yan Experiment with a Polarized Proton Target. FERMILAB-LOI-2013-01. 11 p.
16. *Isenhowe L. D. et al.* Polarized Drell–Yan Measurements with the Fermilab Main Injector. FERMILAB-PROPOSAL-1027. 29 p.
17. *Adare A. et al. (PHENIX Collab.)*. Measurement of Transverse Single-Spin Asymmetries for J/ψ Production in Polarized $p+p$ Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // Phys. Rev. D. 2010. V. 82. P. 112008; Erratum // Phys. Rev. D. 2012. V. 86. P. 099904.