

ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРЫ НУКЛОНОВ НА У-70 С ПОМОЩЬЮ НЕЙТРАЛЬНЫХ МЕЗОНОВ

Д. Пересунко^{1,}, Д. Аверьянов¹, Д. Блау¹*

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва, Россия

Обсуждаются физические результаты, которые можно будет получить с использованием прецизионного электромагнитного калориметра на основе кристаллов PbWO_4 на пучке ускорителя У-70 в рамках эксперимента СПАСЧАРМ. Получены оценки доступных фазовых объемов и возможности измерения спектров и односпиновых асимметрий нейтральных мезонов в различных конфигурациях экспериментальной установки.

Possible physical results that can be obtained with a precise electromagnetic calorimeter based on PbWO_4 crystals on the U-70 accelerator beam within the SPASCHARM experiment are discussed. The available phase space and the possibility of measuring spectra and single-spin asymmetries of neutral mesons in various experimental configurations are explored.

PACS: 14.20.Dh; 13.85.Ni; 13.75.Cs

ВВЕДЕНИЕ

Понимание партонной структуры нуклонов, а также механизма фрагментации партонов в адроны является важнейшей задачей физики адронов и КХД в целом. Односпиновые асимметрии (SSA) играют ключевую роль в этом понимании, так как они предлагают качественно новое представление о динамике кварков и глюонов внутри протона, в частности, благодаря их чувствительности к спин-орбитальным взаимодействиям и корреляциям между партонами. Односпиновая асимметрия определяется как отношение разности сечений рождения адронов с разными направлениями поляризации протона к их сумме:

$$A_N = \frac{d\sigma^\uparrow - d\sigma^\downarrow}{d\sigma^\uparrow + d\sigma^\downarrow}. \quad (1)$$

История измерения SSA в адронных столкновениях представляет собой череду сюрпризов, начиная с наблюдения коллаборацией E704 очень больших асимметрий в инклюзивном рождении пионов при высоких

* E-mail: peresunko_dy@rckci.ru

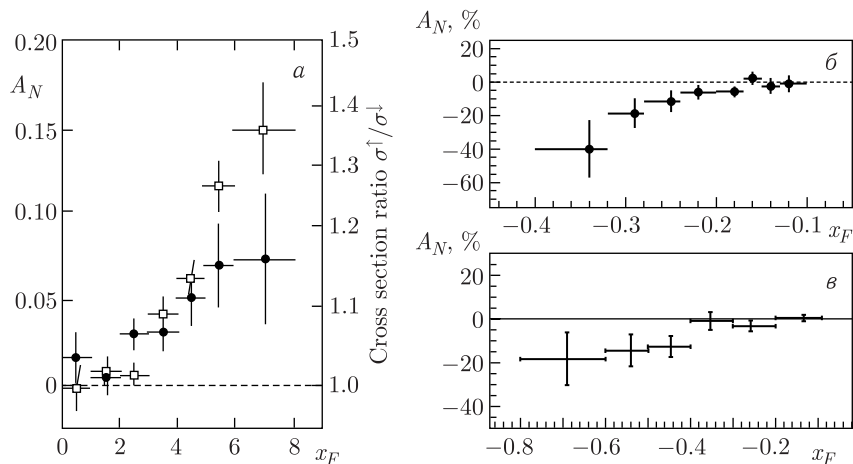


Рис. 1. Асимметрия (A_N) нейтральных пионов в различных столкновениях: а) в $p^+ + p \rightarrow \pi^0 + X$ и $\bar{p}^+ + p \rightarrow \pi^0 + X$ при энергии $p_{lab} = 200$ ГэВ [1]; б) в $p + p^+ \rightarrow \pi^0 + X$ при $p_{lab} = 70$ ГэВ; в) в $\pi^- + p^+ \rightarrow \pi^0 + X$ при $p_{lab} = 40$ ГэВ [2]

значениях x_F и при $\sqrt{s} = 19,4$ ГэВ в столкновениях поперечно-поляризованных $p^\uparrow p$ [1] в Фермилабе и заканчивая подтверждением этого наблюдения коллаборацией RPOZA на ускорителе У-70 [2] (рис. 1). В рамках пертурбативной КХД можно было бы ожидать, что эти асимметрии будут подавлены как $A_N \sim \alpha_S m_q/p_T$ [4] и будут подавляться еще сильнее при более высоких энергиях столкновения.

Однако большие асимметрии были измерены и при энергиях коллайдера RHIC сначала коллаборацией STAR [5], а затем BRAHMS [6]. Было обнаружено, что односпиновая асимметрия в рождении π^0 растет в области фрагментации поляризованного снаряда или мишени, достигая десятков процентов, и исчезает в области центральных значений x_F . Очередной неожиданностью оказалась независимость величины асимметрии от p_T (рис. 2). Наконец, было обнаружено, что величина асимметрии не зависит от типа мишени и одинакова в столкновениях $p^\uparrow p$, $p^\uparrow + \text{Al}$ и $p^\uparrow + \text{Au}$ при энергиях RHIC [9] (см. рис. 2).

Односпиновые асимметрии указывают на существование новой непертурбативной структурной функции, зависящей от спина нуклона (эффект Сиверса [7]), возможно, в сочетании со спин-зависимой функцией фрагментации (эффект Коллинза [8]). Особый интерес представляет то, что эти эффекты возникают в режиме, когда расчеты пертурбативной КХД правильно предсказывают неполяризованные сечения. Дальнейший прогресс в теоретическом понимании требует большего количества дифференциальных измерений, таких как зависимость асимметрии от p_T и x_F , и измерения асимметрии в рождении прямых фотонов, что позво-

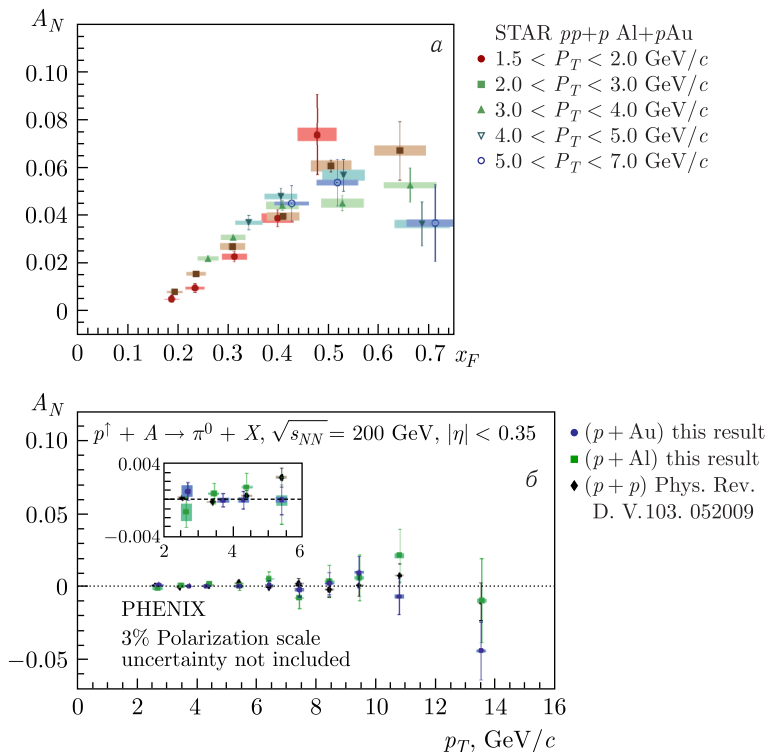


Рис. 2. Асимметрия рождения π^0 в столкновениях поперечно-поляризованных протонов с протонами и ядрами в зависимости от x_F в разных диапазонах p_T [3] (a) и в зависимости от p_T в области центральных быстрот [9] (б)

лит различить вклады кварков и глюонов. В этой работе мы рассмотрим нейтральные мезоны, которые могут быть однозначно идентифицированы по двухфотонному распаду в широком диапазоне импульсов.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для регистрации нейтральных пионов в столкновениях адронов с поляризованной мишенью предлагается добавить прецизионный электромагнитный калориметр в схему эксперимента СПАСЧАРМ [10] на ускорителе У-70. Схема эксперимента показана на рис.3. Прецизионный калориметр предлагается установить сразу после магнита мишени, как показано красным прямоугольником на рис.3, б (вид сверху). Благодаря зазору в мишенном магните калориметр может быть установлен под разными углами по отношению к пучку (пунктирный красный квадрат) для исследования таким образом различных диапазонов (x_F , p_T).

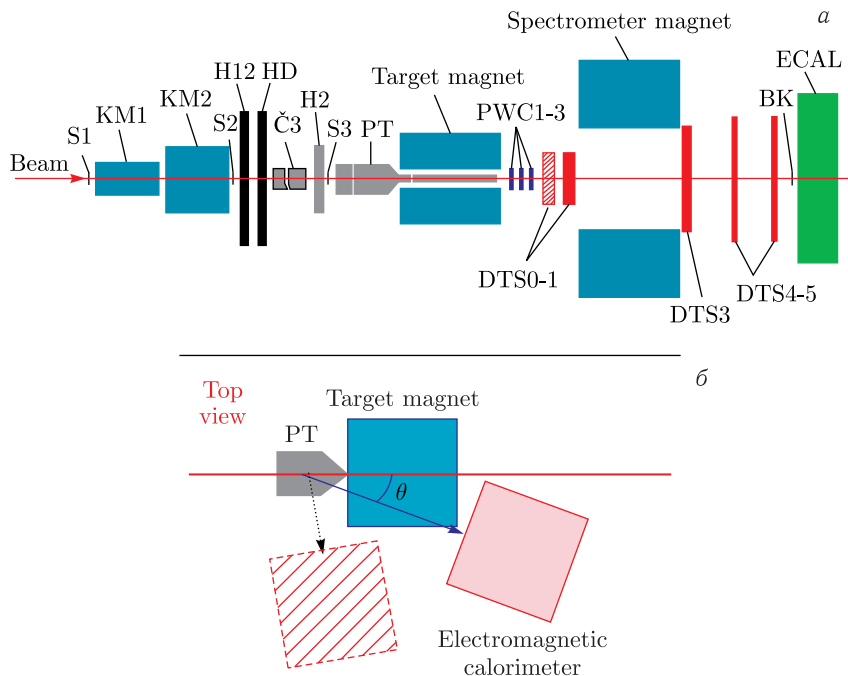


Рис. 3 (цветной в электронной версии). а) Схема установки СПАСЧАРМ (вид сбоку) [10]. б) Возможные положения прецизионного электромагнитного калориметра

Прецизионный электромагнитный калориметр состоит из 256 кристаллов PbWO_4 , расположенных квадратом со стороной 16. Кристаллы имеют размер $2,2 \times 2,2 \times 18$ см. Поперечный размер определяется мольеровским радиусом $R_M = 2,2$ см, продольный размер составляет примерно 20 радиационных длин $X_0 = 0,9$ см. Светосбор осуществляется с помощью лавинного фотодиода, приклеенного к торцу кристалла. Световыход кристаллов PbWO_4 увеличивается при понижении температуры примерно как $-2\%/^{\circ}\text{C}$ [12], поэтому кристаллы помещаются в термоизоляцию, и рабочая температура кристаллов стабилизируется при $+1^{\circ}\text{C}$ с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$. Сигнал лавинного фотодиода усиливается малошумящим предусилителем, проходит шейпер и разделяется на два канала с различными коэффициентами усиления (отличие в 16 раз) и оцифровывается двухканальным 10-битным АЦП. Карты считывающей электроники находятся в специальном теплом объеме в задней части модуля, теплоизолированном от холодного объема, содержащего кристаллы, лавинные фотодиоды и предусилители. Модуль оборудован мониторинговой системой, содержащей светодиоды, расположенные у переднего торца

кристаллов, и позволяющей контролировать работоспособность каждого канала. Внешний размер модуля составляет $70 \times 70 \times 85$ см.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки характеристик прецизионного электромагнитного калориметра в пакете Geant4 [13] была создана его модель, содержащая достаточно детальное описание материалов — поддерживающих структур, термоизоляции, мониторинной системы, кристаллов, теплого объема. Отклик детектора был параметризован так, чтобы воспроизвести энергетическое и позиционное разрешение, полученное в пучковых испытаниях прототипа калориметра [11].

Для оценки фазового объема, доступного при расположении калориметра под разными углами к оси пучка, был использован генератор событий RUTHIA 8.311 [14]. Результаты моделирования, полученные в случае установки калориметра под разными углами на минимально

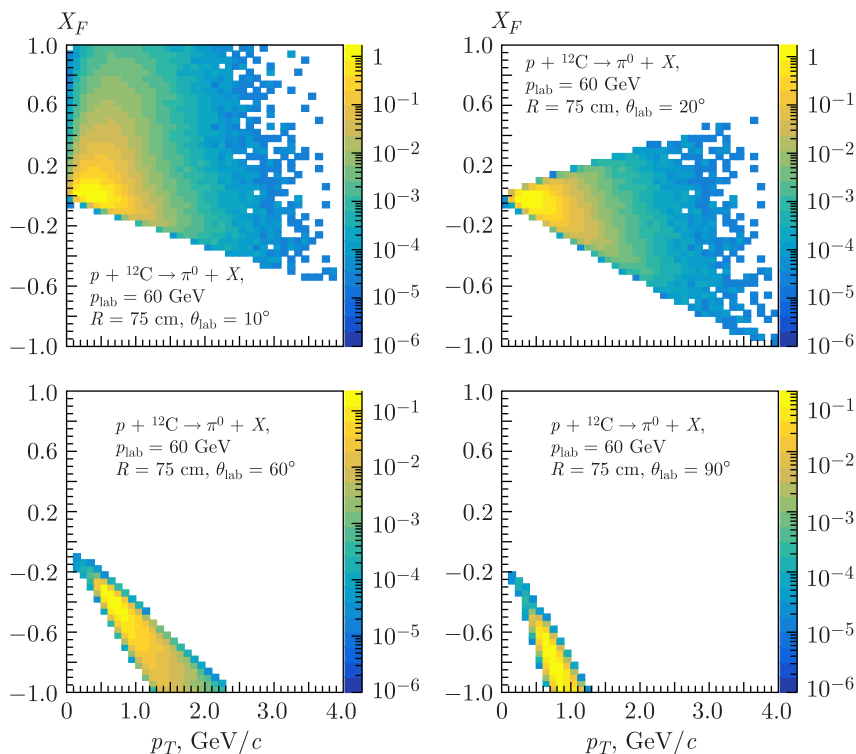


Рис. 4. Фазовый объем, доступный для измерения при установке калориметра под различными углами к направлению пучка на расстоянии от мишени до поверхности кристаллов $R = 75$ см

возможном расстоянии для всех углов от мишени до поверхности кристаллов $R = 75$ см, показаны на рис.4. В этом моделировании было сгенерировано 10^7 событий $p + C$ при энергии $p_{\text{lab}} = 40$ ГэВ/с и не учитывалась эффективность реконструкции π^0 . При изменении углов от 10° в лабораторной системе, когда калориметр почти касается пучка, до 90° , удастся исследовать практически всю область x_F .

Для полноценного моделирования отклика калориметра в реальных данных была адаптирована программа реконструкции, использованная для анализа данных в калориметре PHOS эксперимента ALICE [12]. Она включает в себя вычисление энерговыделения в каждом кристалле на основе моделирования в пакете Geant4, учет шума электроники и влияния оцифровки сигнала, поиск кластеров (ячеек энерговыделением выше порогового, имеющих общую сторону или вершину), а также вычисление параметров фотонов, долетевших до калориметра.

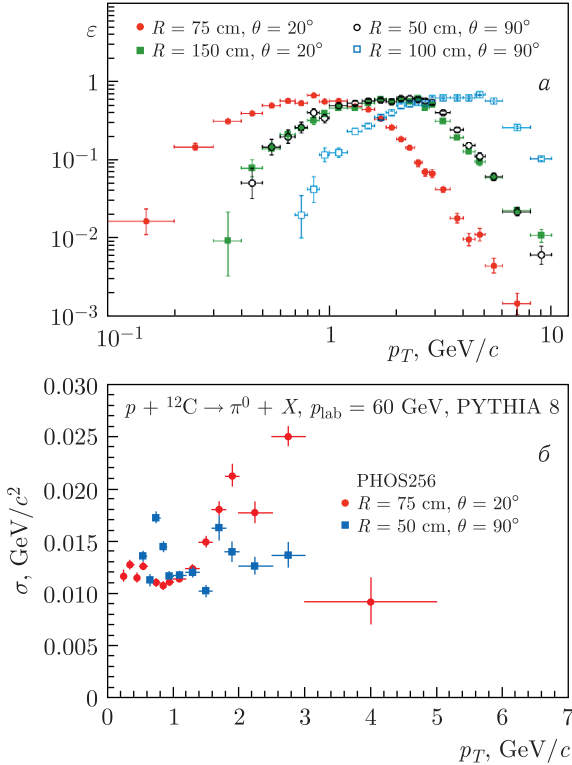


Рис. 5. а) Эффективность реконструкции одиночных π^0 в случае расположения калориметра на различных расстояниях до мишени и под различными углами к направлению пучка. б) Ширина пионного пика в спектре инвариантных масс пар фотонов в различных конфигурациях детектора

С помощью этой программы было проведено моделирование реконструкции одиночных нейтральных пионов. Для нескольких углов установки калориметра и расстояний до мишени была оценена эффективность реконструкции, положение и ширина пионного пика в спектре инвариантных масс пар фотонов (см. рис. 5). Диапазон доступных поперечных импульсов пионов определяется с нижней стороны акцептансом калориметра, а сверху — углом между распадными фотонами. При увеличении импульса π^0 -мезона средний угол между распадными фотонами уменьшается, и, когда он становится настолько мал, что фотоны попадают в соседние ячейки калориметра, программа реконструкции не может разделить кластеры отдельных фотонов, такие пионы не реконструируются. Малые размеры калориметра приводят к сравнительно небольшому диапазону поперечных импульсов, доступных для измерения спектров и односпиновой асимметрии. Так как при изучении односпино-

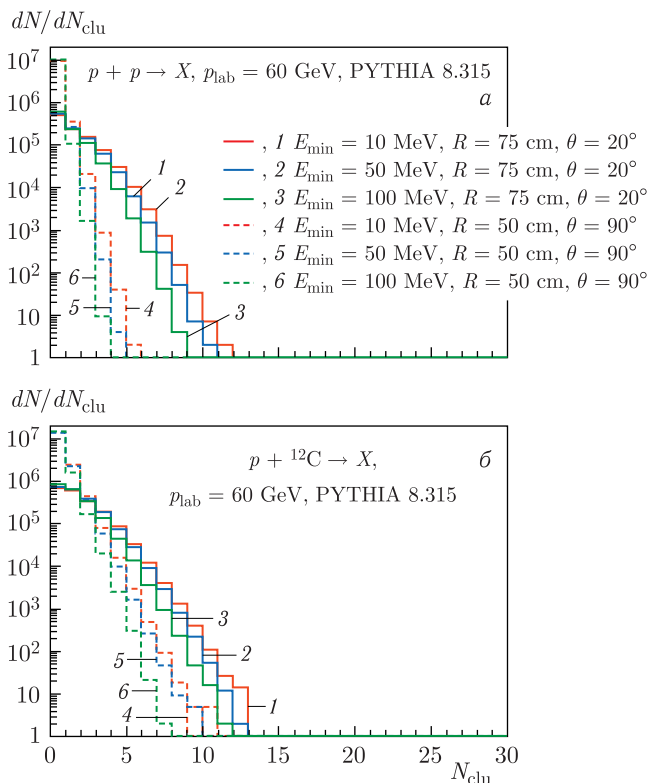


Рис. 6. Число кластеров с энергией выше пороговой E_{min} , реконструированных в столкновениях pp (а) и $p+C$ (б) при энергии $p_{lab} = 60$ ГэВ/с для двух положений калориметра

вой асимметрии в рождении пионов наиболее интересна область высоких значений p_T , окончательное решение о расстоянии от калориметра до мишени будет зависеть от доступной в течение сеанса статистики.

Ширина пика π^0 в спектре инвариантных масс пар фотонов показана на рис. 5, б. Ширина вычислена в различных конфигурациях детектора в столкновениях $p + C$ при энергии $p_{\text{lab}} = 40$ ГэВ/с. Она оказывается сравнительно небольшой для такого типа калориметров и показывает рост с увеличением p_T . Это означает, что основной вклад в ширину дает позиционное разрешение, величина которого растет с увеличением p_T , а не энергетическое разрешение, убывающее с ростом E .

Одним из критически важных параметров является загрузка детектора. С помощью программы реконструкции было оценено число кластеров с энергией выше пороговой в столкновениях pp и $p + C$ для несколь-

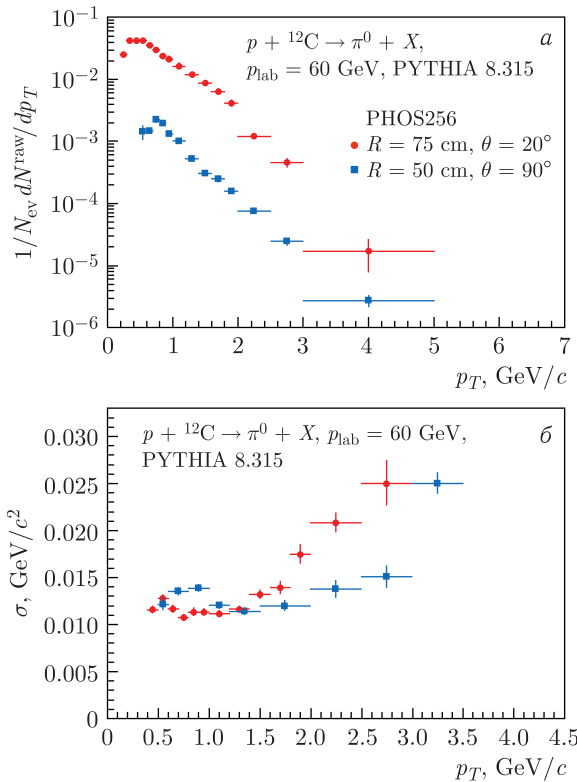


Рис. 7. а) Нескорректированный спектр нейтральных пионов, реконструированный по спектру инвариантных масс пар фотонов в столкновениях $p + C$ при энергии $p_{\text{lab}} = 60$ ГэВ/с для двух конфигураций калориметра. б) Ширина пика нейтральных пионов в тех же столкновениях

ких положений калориметра и нескольких значений минимальной энергии кластеров (рис. 6). Даже в случае минимальной энергии кластера (10 МэВ), что составляет примерно два стандартных отклонения шума пьедестала электроники, загрузка будет составлять 10–15%. Это примерно совпадает с загрузкой аналогичного калориметра PHOS детектора ALICE в центральных Pb–Pb-столкновениях при энергии LHC, где он вполне успешно работал.

Возможная реконструкция спектра нейтральных пионов в столкновениях $p + C$ для двух положений калориметра показана на рис. 7. В этом моделировании использовалось минимально возможное из-за мишенного магнита расстояние до мишени. Было промоделировано 10^6 событий. Как для ориентации вперед ($\theta = 20^\circ$), так и поперек пучка ($\theta = 90^\circ$) спектр нейтральных пионов может быть измерен вплоть до $p_T = 3\text{--}4$ ГэВ/с. В случае $\theta = 20^\circ$ верхний предел определяется в основном слиянием кластеров из-за малого угла открытия между распадными фотонами из-за лоренцевского буста пионов. В случае $\theta = 90^\circ$ верхняя граница спектра π^0 будет определяться статистикой. Ширина пионного пика в спектре инвариантных масс пар фотонов для двух конфигураций примерно совпадает, но в случае $\theta = 10^\circ$ ширина увеличивается быстрее, что связано с влиянием лоренцевского буста пионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматривается расширение физической программы эксперимента СПАСЧАРМ при добавлении прецизионного электромагнитного калориметра на основе кристаллов $PbWO_4$. Проведено моделирование методом Монте-Карло с помощью пакета Geant4, генератора событий PYTHIA 8.311 и программы моделирования и реконструкции калориметра. Несмотря на ограниченные размеры, калориметр на основе 256 кристаллов будет способен реконструировать спектр и однопионовую асимметрию в рождении нейтральных пионов в диапазоне примерно $0,5 < p_T < 4$ ГэВ/с при установке калориметра на расстоянии $R = 75$ см от мишени. Диапазон может быть смещен в область больших значений p_T при выборе больших расстояний до вершины и наборе большей статистики.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. Н. Васильеву и В. В. Мочалову из НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ и М. С. Ипполитову из НИЦ «Курчатовский институт» за полезные обсуждения.

Финансирование. Работа поддержана Российским научным фондом в рамках гранта 25-22-00170.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Adams D. L. et al. (E581, E704 Collabs.)*. Comparison of Spin Asymmetries and Cross Sections in π^0 Production by 200 GeV Polarized Antiprotons and Protons // *Phys. Lett. B*. 1991. V. 261. P. 201–206.
2. *Mochalov V. V. et al.* Spin Physics with Light and Heavy Neutral Mesons at Protvino // *Czech. J. Phys.* 2006. V. 56. P. F151–F168.
3. *Adam J. et al. (STAR Collab.)*. Comparison of Transverse Single-Spin Asymmetries for Forward π^0 Production in Polarized pp , $p\text{Al}$ and $p\text{Au}$ Collisions at Nucleon Pair c.m. Energy $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. D*. 2021. V. 103, No. 7. P. 072005.
4. *Kane G. L., Pumplin J., Repko W.* Transverse Quark Polarization in Large $p(T)$ Reactions, e^+e^- Jets, and Leptoproduction: A Test of QCD // *Phys. Rev. Lett.* 1978. V. 41. P. 1689.
5. *Adams J. et al. (STAR Collab.)*. Cross Sections and Transverse Single-Spin Asymmetries in Forward Neutral-Pion Production from Proton Collisions at $\sqrt{s} = 200$ GeV // *Phys. Rev. Lett.* 2004. V. 92. P. 171801.
6. *Videbaek F. (BRAHMS Collab.)*. Single Spin Asymmetries in the BRAHMS Experiment // *AIP Conf. Proc.* 2005. V. 792, No. 1. P. 993–996.
7. *Sivers D. W.* Single Spin Production Asymmetries from the Hard Scattering of Point-Like Constituents // *Phys. Rev. D*. 1990. V. 41. P. 83.
8. *Collins J. C.* Fragmentation of Transversely Polarized Quarks Probed in Transverse Momentum Distributions // *Nucl. Phys. B*. 1993. V. 396. P. 161–182.
9. *Abdulameer N. J. et al. (PHENIX Collab.)*. Transverse Single-Spin Asymmetry of Midrapidity π^0 and η Mesons in $p + \text{Au}$ and $p + \text{Al}$ Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV // *Phys. Rev. D*. 2023. V. 107, No. 11. P. 112004.
10. *Abramov V. V. et al. (SPASCHARM Collab.)*. Conceptual Design of the SPASCHARM Experiment // *Phys. Part. Nucl.* 2023. V. 54, No. 1. P. 69–184.
11. *Akindinov A. V. et al.* Time and Energy Resolutions of Electromagnetic Calorimeter Prototypes Based on Lead Tungstate Crystals // *Instrum. Exp. Tech.* 2023. V. 66, No. 2. P. 207–217.
12. *Dellacasa G. et al. (ALICE Collab.)*. ALICE Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS). CERN, 1999. Report No. CERN-LHCC-99-004.
13. *Apostolakis J., Wright D. H. (Geant4 Collab.)*. An Overview of the Geant4 Toolkit // *AIP Conf. Proc.* 2007. V. 896, No. 1. P. 1–10.
14. *Bierlich C. et al.* A Comprehensive Guide to the Physics and Usage of PYTHIA 8.3 // *SciPost Phys. Codeb.* 2022. V. 2022. P. 8.