

О ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ СТРУЙ АДРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ SPD НА NICA

Д. В. Будковский^{1,2,3,*}, И. В. Лапушанский⁴, А. Тумасян⁵,
С. В. Шматов^{1,3}

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

² Научно-исследовательский институт ядерных проблем
Белорусского государственного университета, Минск

³ Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

⁴ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

⁵ Национальная научная лаборатория им. А. И. Алиханяна, Ереван

Изучалась возможность наблюдения струй адронов в протон-протонных столкновениях при энергии $\sqrt{s} = 27$ ГэВ в эксперименте SPD. Исследование выполнено на данных моделирования процесса $qg \rightarrow \gamma q$ с использованием алгоритмов реконструкции струй анти- k_T , k_T и Кембридж-Аахен. Результаты включают анализ кинематических характеристик струй и оценку ожидаемой статистики.

The possibility of observing jet of hadrons in proton-proton collisions at an energy of $\sqrt{s} = 27$ GeV in the SPD experiment was studied. The study was performed on the simulation of the $qg \rightarrow \gamma q$ process using the anti- k_T , k_T and Cambridge-Aachen jet reconstruction algorithms. The results include an analysis of the kinematic characteristics of the jets and an estimation of the expected statistics.

PACS: 44.25.+f; 44.90.+c

ВВЕДЕНИЕ

После открытия в середине 70-х гг. прошлого века струйного механизма образования адронов в экспериментах на позитрон-электронных коллайдерах SLAC и PETRA началось активное изучение образования струй при столкновениях на $p\bar{p}$ - и pp -коллайдерах. В первых экспериментах на ISR ввиду ограниченности энергии взаимодействия пучков ($\sqrt{s} \lesssim 62$ ГэВ) и, как следствие, малости энергии вторичных партонов ($\sqrt{s} \lesssim 10\text{--}15$ ГэВ) доказательство рождения адронов в струях осуществлялось по наличию избыточной адронной активности в событиях с помощью измерения полной поперечной энергии события и поперечных импульсов вторичных адронов в разных диапазонах угловых характеристик (полярного и азимутального углов) [1–3]. Таким образом, основным направлением исследований было изучение пространственной структуры событий в целом [1] и измерение сечений процессов с образованием

* E-mail: dzmitry.budkouski@cern.ch

струй [2–4]. Для сравнения результатов измерений с теоретическими предсказаниями использовался Монте-Карло генератор ISAJET [5], в котором процесс адронизации партонов описывался моделью Филда–Фейнмана [6].

Дальнейшее развитие ускорительной техники позволило достичь гораздо больших энергий столкновения частиц и, соответственно, большей энергии партона-инициатора струи. Большая энергия столкновения в совокупности с возросшей светимостью ускорителей привели к сильному увеличению множественности частиц в событии. Кроме того, в протон-протонных столкновениях, в отличие от условий e^+e^- -коллайдеров, частицы могут рождаться не только в интересующих нас первичных «жестких» процессах (с большими значениями переданного 4-импульса Q), но и от вторичных адронов. Источником вторичных адронов могут быть непровазаимодействовавшие цветные компоненты протонов пучков (beam remnants), множественные или сопутствующие взаимодействия в одном событии столкновения протонов (underlying events) и события от разных pp -взаимодействий — так называемый эффект наложения событий (pile-up), возникающий из-за короткого временного интервала между взаимодействиями сгустков пучка. Как правило, все эти взаимодействия относятся к мягким процессам с $Q \lesssim 1$ ГэВ. В этом случае применять подходы по анализу событий со струями по избыточной множественности частиц в событии и подход, применяемый в e^+e^- -столкновениях, когда все частицы в полусфере берутся как произошедшие от партона жесткого процесса, невозможно.

Это мотивировало разработку специальных алгоритмов реконструкции струй [7–9], которые восстанавливают струю в событии как некоторый объект со свойствами, зависящими от свойств партона-инициатора (глюона, легкого или тяжелого кварка), таких как множественность частиц в струе и в событии в целом, распределение импульса струи среди ее конститuentов, размер струи и т. д. Этот подход хорошо зарекомендовал себя при высоких энергиях (эксперименты на SPS, теватроне, LHC) и позволил провести детальное исследование процессов сильного взаимодействия и проверить работоспособность КХД в пертурбативном режиме. В то же время при более низких энергиях физики вынуждены работать с непертурбативной КХД или с эффективными моделями, созданными на основе КХД. Эта область энергий, как и переходная область между пертурбативным и непертурбативным режимами, исторически вызывает большой интерес.

Одним из планируемых экспериментов, способным пролить свет на закономерности рождения адронов в этой области, является Spin Physics Detector (SPD) [10] на ускорительном комплексе NICA [11], который, как ожидается, сможет обеспечить столкновения протонов при $\sqrt{s} = 27$ ГэВ. Для подобных исследований важным является определение порога образования струй (кластеров) адронов и изучения механизма адронизации партонов.

В представленной работе предпринята попытка проверки применимости современных алгоритмов реконструкции струй [7–9] в условиях эксперимента SPD. Работа выполнена с использованием данных моделирования генератором взаимодействий Pythia8 [12], в котором процесс адронизации осуществляется на основе LUND-модели [13].

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОТБОР СОБЫТИЙ

Для проверки возможности наблюдения струй в эксперименте SPD выбран наиболее удобный для поиска струй процесс рассеяния глюона на кварке $qg \rightarrow \gamma q$. В нем при энергии столкновения $\sqrt{s} = 27$ ГэВ ожидается только одна струя от партона жесткого процесса в ведущем порядке теории возмущений КХД. Так как при таких энергиях взаимодействий энергия вторичного кварка не столь велика, вероятность возникновения струй от излучения в конечном состоянии пренебрежимо мала. Наличие прямого фотона, противоположного струе, позволяет наложить дополнительные ограничения на отбор событий и провести коррекцию энергии струи.

Сечение процесса $qg \rightarrow \gamma q$ при энергии взаимодействия пучков протонов $\sqrt{s} = 27$ ГэВ довольно велико даже при значениях поперечного импульса партона жесткого процесса $p_T^{\text{parton}} \sim 3\text{--}5$ ГэВ (рис. 1), т. е. в интересующей нас области переданного 4-импульса. С учетом ожидаемой мгновенной светимости коллайдера NICA в точке пересечения пучков детектора SPD $L_{\text{inst}} \approx 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [10] ожидаемое число событий рассматриваемого процесса за стандартный ускорительный год (≈ 100 дней) достигает $\approx 10^6$ при $p_T^{\text{parton}} > 3$ ГэВ.

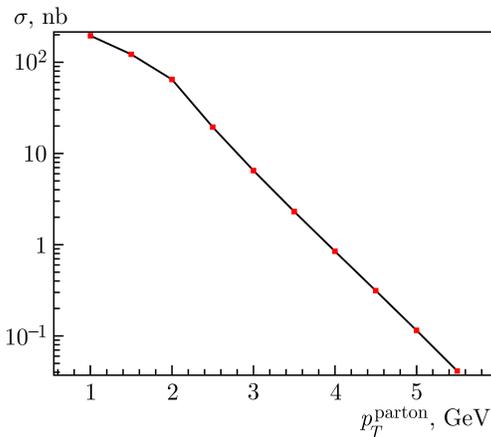


Рис. 1. Сечение процесса $qg \rightarrow \gamma q$ в зависимости от величины минимального p_T^{parton}

Отбор событий проводился на генераторном уровне, без полного моделирования детектора — все частицы в конечном состоянии должны иметь поперечный импульс $p_T^{\text{particle}} > 0,25$ ГэВ, а их псевдобыстрота лежать в диапазоне значений $|\eta| < 5$. Для реконструкции струй использовались три алгоритма из пакета FastJet [14]: анти- k_T , k_T и Кембридж–Аахен (СА) [7–9]. Частицы собирались в струю внутри конуса радиусом R в пространстве псевдобыстроты η и азимутального угла ϕ (использовались различные значения параметра $R = 0,4, 0,8, 1,2$).

Для дальнейшего анализа требовалось наличие в событии хотя бы одной струи с поперечным импульсом $p_T^{\text{jet}} > 0,5$ ГэВ, содержащей по крайней мере две частицы. Кроме того, было необходимо, чтобы в отобранных событиях находился лидирующий фотон (фотон с максимальным поперечным импульсом в событии) и лидирующая струя, не содержащая лидирующий фотон. Данное условие связано с тем, что алгоритмы реконструкции собирают струи вокруг любых объектов с большим импульсом, в том числе и вокруг лидирующего фотона в событии, который мы полагаем прямым фотоном. На фотон и на струю накладывались ограничения на поперечный импульс $p_T > 2, 3, 4, 5$ ГэВ и проверялось условие разнонаправленности струи и лидирующего фотона: $\Delta\phi > 2,7\pi$.

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ СТРУЙ

Сравнение кинематических характеристик отобранной струи и партон жесткого процесса показало их хорошую ассоциированность в пространстве псевдобыстроты η и азимутального угла ϕ (например, на рис. 2 и 3 приведены результаты для алгоритма анти- k_T) и небольшое различие значений поперечных импульсов p_T (рис. 4). При этом алгоритм анти- k_T реконструирует объекты, близкие по кинематическим свойствам к партону вне зависимости от значения параметра R , однако при увеличении R ухудшается согласие поперечного импульса реконструированной струи p_T^{jet} и импульса партона p_T^{parton} за счет попадания в конус R частиц, не относящихся к струе и имеющих другую природу происхождения. Важно отметить, что все три использованных в работе алгоритма (анти- k_T , k_T и Кембридж–Аахен) вне зависимости от значения параметра R реконструируют струи с близкими кинематическими характеристиками. Сравнение различных алгоритмов адронизации приведено в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе была проверена возможность наблюдения адронных струй, образующихся в процессе $q\bar{q} \rightarrow \gamma q$ при столкновении пучков протонов коллайдера NICA при энергии $\sqrt{s} = 27$ ГэВ (условия эксперимента SPD). Результаты получены на данных моделирования, выполненного с помощью генератора Pythia8, и с использованием трех алгоритмов поиска струй: анти- k_T , k_T и Кембридж–Аахен.

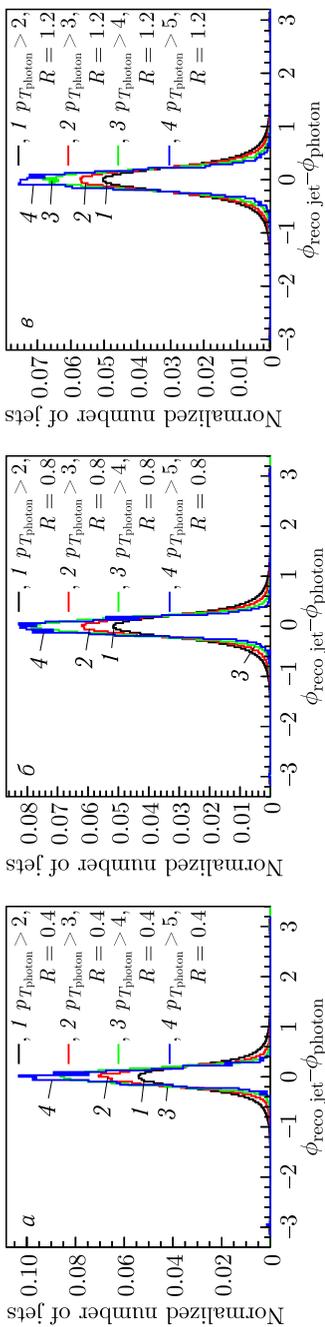


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Разность между азимутальным углом струи, реконструированной алгоритмом анти- k_T с параметром $R = 0.4$ (*a*), $R = 0.8$ (*б*), $R = 1.2$ (*в*), и азимутальным углом партона жесткого процесса с различными ограничениями на поперечный импульс струи и прямого фотона: $p_T > 2$ (черный, 1), 3 (красный, 2), 4 (зеленый, 3), 5 (синий, 4)

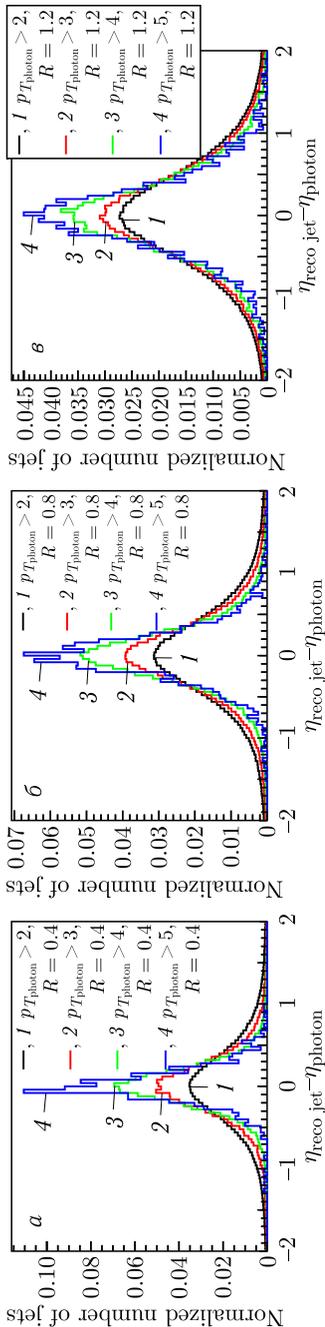


Рис. 3 (цветной в электронной версии). Разность между псевдобыстрой струи, реконструированной алгоритмом анти- k_T с параметром $R = 0.4$ (*a*), $R = 0.8$ (*б*), $R = 1.2$ (*в*), и псевдобыстрой партона жесткого процесса с различными ограничениями на поперечный импульс струи и прямого фотона: $p_T > 2$ (черный, 1), 3 (красный, 2), 4 (зеленый, 3), 5 (синий, 4)

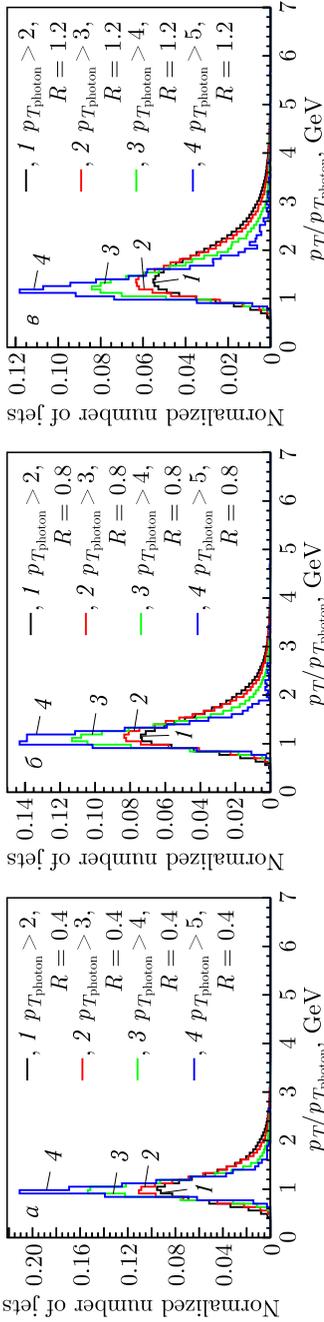


Рис. 4 (цветной в электронной версии). Отношение поперечного импульса струи, реконструированной алгоритмом анти- k_T с параметром $R = 0,4$ (а), $R = 0,8$ (б), $R = 1,2$ (е), к поперечному импульсу жесткого процесса с различными ограничениями на поперечный импульс струи и прямого фотона: $p_T > 2$ (черный, 1), 3 (красный, 2), 4 (зеленый, 3), 5 (синий, 4)

Сравнение алгоритмов реконструкции струй: анти- k_T , k_T и СА

Алгоритм	анти- k_T , $R = 0,4$	k_T , $R = 0,4$	СА, $R = 0,4$	анти- k_T , $R = 0,8$	k_T , $R = 0,8$	СА, $R = 0,8$
Среднее значение	1,168 0,001 0,001	1,173 0 0,001	1,168 0,001 0	1,429 0 0,001	1,427 0,001 0	1,415 0,001 0,001
Стандартное отклонение	0,39974 0,368162 0,576217	0,404334 0,370115 0,578854	0,401482 0,371208 0,578155	0,50885 0,375358 0,627012	0,513401 0,38164 0,63093	0,505117 0,379529 0,628252
Ширина на полувысоте	0,56 0,442 0,88	0,56 0,51 0,84	0,56 0,476 0,88	0,77 0,51 1	0,77 0,51 1	0,7 0,51 1

Продемонстрировано, что все алгоритмы находят струи, которые могут быть кинематически ассоциированы с партоном жесткого процесса, что позволяет восстановить свойства этого партона. Сравнение результатов работы алгоритмов показало, что они находят струи с близкими свойствами. Сделана оценка ожидаемого числа событий для процессов с относительно большим переданным 4-импульсом. Результаты требуют проверки на данных моделирования, выполненного с учетом детального воспроизведения условий эксперимента.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОНКС РА в рамках научного проекта 22г1-037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Akesson T. et al. (Axial Field Spectrometer Collab.).* Further Evidence for Jet Production from the Charged Particles Produced in pp Collisions at $\sqrt{s} = 63$ -GeV Triggered on Large Transverse Energy // *Phys. Lett. B.* 1982. V. 118. P. 193–198.
2. *Akesson T. et al. (Axial Field Spectrometer Collab.).* The Jet Cross-Section in pp Interactions at $\sqrt{s} = 45$ -GeV and Its \sqrt{s} Dependence // *Phys. Lett. B.* 1983. V. 123. P. 133–138.
3. *Akesson T. et al. (Axial Field Spectrometer Collab.).* Direct Evidence for the Emergence of Jets in Events Triggered on Large Transverse Energy in pp Collisions at $\sqrt{s} = 63$ -GeV // *Phys. Lett. B.* 1982. V. 118. P. 185–192.
4. *Ellis S.D., Jacob M., Landshoff P.V.* Jets and Correlations in Large $p(T)$ Reactions // *Nucl. Phys. B.* 1976. V. 108. P. 93.
5. *Paige F.E., Protopopescu S.D.* Isajet: A Monte Carlo Event Generator for pp and $\bar{p}p$ Interactions. Version 3 // *eConfC.* 1982. V. 8206282. P. 471–477.
6. *Field R.D., Feynman R.P.* A Parameterization of the Properties of Quark Jets // *Nucl. Phys. B.* 1978. V. 136. P. 1.
7. *Ellis S.D., Soper D.E.* Successive Combination Jet Algorithm for Hadron Collisions // *Phys. Rev. D.* 1993. V. 48. P. 3160–3166; arXiv:hep-ph/9305266.
8. *Wobisch M., Wengler T.* Hadronization Corrections to Jet Cross Sections in Deep Inelastic Scattering // *Workshop on Monte Carlo Generators for HERA Physics (Plenary Starting Meeting).* 1998. P. 270–279; arXiv:hep-ph/9907280.
9. *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* The Anti- k_t Jet Clustering Algorithm // *JHEP.* 2008. V. 04. P. 063; arXiv:0802.1189 [hep-ph].
10. *Abazov V. et al. (SPD Collab.).* Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. 2024. arXiv:2404.08317. 2024.
11. *Butenko A. V. et al.* Status of NICA Complex // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 3. P. 212–217.
12. *Bierlich C. et al.* A Comprehensive Guide to the Physics and Usage of PYTHIA 8.3 // *SciPost Phys. Codeb.* 2022. V. 2022. P. 8; arXiv:2203.11601.
13. *Andersson B., Gustafson G., Soderberg B.* A General Model for Jet Fragmentation // *Z. Phys. C.* 1983. V. 20. P. 317.
14. *Cacciari M., Salam G.P., Soyez G.* FastJet User Manual // *Eur. Phys. J. C.* 2012. V. 72. P. 1896; arXiv:1111.6097 [hep-ph].