

PACS 25.75.-q

## РОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ПРИ ЭНЕРГИИ УСКОРИТЕЛЯ SPS

**В.С. Трубников**

*ННЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины*

*ул. Академическая 1, 61108 Харьков, Украина*

*e-mail: [vstrubnikov@yahoo.com](mailto:vstrubnikov@yahoo.com)*

Received 1 November 2012, accepted 16 November 2012

В данной статье представлены экспериментальные результаты по инклюзивному рождению заряженных пионов в периферических столкновениях ионов свинца  $^{208}\text{Pb}$  при энергии взаимодействия  $\sqrt{S} = 17,3$  ГэВ. Инвариантные сечения представлены в зависимости от поперечного импульса пионов и фейнмановской переменной  $x_F$ . Полученные экспериментально 288 значений плотно заполняют область фазового пространства в интервале поперечных импульсов  $0 < p_T < 2$  ГэВ и фейнмановской переменной  $0 \leq x_F \leq 0,4$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** физика высоких энергий, столкновения тяжелых ионов, инклюзивное рождение частиц

### CHARGED PIONS PRODUCTION IN HEAVY-ION COLLISIONS AT SPS ENERGY

**V.S. Trubnikov**

*NSC Kharkov Institute of Physics and Technology NAS Ukraine*

*Akademicheskaya 1 st. 61108 Kharkov, Ukraine*

We present experimental results on inclusive charged pions production in peripheral collisions of  $^{208}\text{Pb}$  ions at top SPS energy  $\sqrt{S} = 17.3$  GeV. Invariant cross sections are presented as functions of  $p_T$  and  $x_F$ . Experimentally obtained 288 values fill the phase space restricted to  $0 < p_T < 2$  GeV and  $0 \leq x_F \leq 0.4$ .

**KEY WORDS:** high-energy physics, heavy ion collisions, inclusive particle production

### УТВОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ПІОНІВ У ЗІТКНЕННЯХ ВАЖКИХ ІОНІВ ПРИ ЕНЕРГІЯХ ПРИСКОРЮВАЧА SPS

**В.С. Трубніков**

*ННЦ Харківський фізико-технічний інститут НАН України*

*вул. Академічна 1, 61108 Харків, Україна*

У статті представлені експериментальні результати з інклюзивного народження заряджених піонів в периферійних зіткненнях іонів свинцю  $^{208}\text{Pb}$  при енергії взаємодії  $\sqrt{S} = 17,3$  ГэВ. Інваріантні перерізи реакції представлені в залежності від поперечного імпульсу  $p_T$  і фейнманівської змінної  $x_F$ . Отримані експериментально 288 значень щільно заповнюють область фазового простору в інтервалі поперечних імпульсів  $0 < p_T < 2$  ГэВ і фейнманівської змінної  $0 \leq x_F \leq 0,4$ .

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** фізика великих енергій, зіткнення важких іонів, інклюзивне утворення частинок

В отсутствие строгих теоретических моделей, экспериментальные данные по рождению адронов в кинематической области непertурбативной квантовой хромодинамики (КХД) представляют большой интерес. Несмотря на то, что с запуском Большого Адронного Коллайдера (БАК), в физике взаимодействий тяжелых ионов стали доступны очень большие энергии столкновения, эксперименты при относительно низких энергиях, порядка  $\sqrt{S} \sim 20$  ГэВ, остаются одним из центральных направлений исследований (в данной работе исследуются взаимодействия ионов при энергии  $\sqrt{S}=17,3$  ГэВ, имея в виду энергию на пару сталкивающихся нуклонов в системе центра масс). Существенные экспериментальные усилия предприняты в предыдущие десятилетия в этом направлении. Исследования, проводимые в экспериментах ISR (ЦЕРН, Швейцария) и лаборатории Fermilab (Чикаго, США), были продолжены на ускорителе SPS (ЦЕРН, Швейцария). В последнее время программа "сканирование при низких энергиях" (Low Energy Scan Program), проводимая на ускорителе RHIC (США), предоставляет огромный массив новых экспериментальных данных для исследования. БАК, который в настоящее время является самой крупной экспериментальной установкой для изучения физики высоких энергий, пока ещё не вышел на максимальные значения светимости и энергии, но уже расширил границы нашего понимания Стандартной модели в физике частиц. Можно надеяться, что будущая работа БАК ещё больше углубит наши знания в этой области.

Сравнение рождения адронов (так называемые «soft hadronic interactions») в столкновениях различных систем, протон-протон (p+p), протон-ядро (p+A), ядро-ядро (A+A), позволяет исследовать ряд интересных эффектов, таких как усиление рождения странных частиц, подавление рождения частиц с большим поперечным импульсом и некоторых других (см., например, [1,2]). Изучение рождения заряженных адронов в столкновениях ионов в зависимости от центральности столкновений является ещё одним источником важной информации.

Одной из основных целей данной работы является исследование образования заряженных пионов в столкновениях ионов свинца на ускорителе SPS при помощи детектора NA49. В частности, работа содержит

полученные нами экспериментальные данные по инвариантным сечениям образования заряженных пионов в периферических столкновениях ионов свинца  $^{208}\text{Pb}$  при энергии столкновений в системе центра масс  $\sqrt{S}=17,3$  ГэВ, которая является максимальной энергией ускорителя SPS. Автор статьи непосредственно участвовал в наборе этих экспериментальных данных на ускорителе SPS при помощи детектора коллаборации NA49. Так называемые "сырые" данные были преобразованы в массивы данных micro-dst при помощи процедуры реконструкции, оптимизированной для малой плотности треков в детекторах. Представляемые результаты получены автором в процессе обработки micro-dst специализированным программным обеспечением, используемым коллаборацией NA49. Кроме того, в данной работе учтены разнообразные поправки, которые детально обсуждаются ниже. Результирующие сечения представлены в зависимости от поперечного импульса пионов  $p_T$  и фейнмановской переменной  $x_F$ . Полученные экспериментальные данные могут быть полезными для развития теоретических представлений о механизмах образования мезонов в столкновениях тяжелых ионов.

Целью данной работы является исследование образования заряженных пионов как функцию центральности столкновений ионов. Дальнейшие исследования при различных центральностях, вместе с данными образования заряженных пионов в столкновениях  $p+p$  позволят проследить эволюцию фактора ядерной модификации для данной энергии взаимодействия.

### РОЖДЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ПИОНОВ

Большинство частиц, рождаемых в результате взаимодействия ионов при рассматриваемой нами энергии являются пи-мезонами. Детальное изучение процесса рождения пионов в зависимости от различных наблюдаемых величин и кинематических характеристик может дать много информации о динамике взаимодействия, и может помочь в выделении и изучении различных эффектов. В частности, сравнение сечений рождения адронов в периферических, полуженитальных и центральных столкновениях ионов представляет большой интерес с точки зрения нахождения флуктуаций как функций центральности.

Анализируемые в нашей работе данные представляют собой часть данных (minimum bias) столкновений ионов свинца  $^{208}\text{Pb}$ , набранных при помощи детектора NA49, при энергии  $\sqrt{S} = 17,3$  ГэВ на ускорителе SPS. При этом отбирались события по множественности регистрируемых заряженных частиц  $M$  в пределах  $150 \leq M \leq 300$ . Подобная, сравнительно низкая (для столкновений тяжелых ионов) множественность, позволяет утверждать, что в этих пределах находятся события столкновений с большим прицельным параметром, то есть, периферические столкновения. Для нахождения основных параметров взаимодействия для рассматриваемой множественности нами были проведены вычисления с помощью модели Глаубера [3]. Результаты приведены в таблице.

Таблица.

Средние значения основных параметров столкновений ионов свинца, вычисленные для рассматриваемой энергии взаимодействия и множественности

Множественность, $M$	Прицельный параметр, $b$	Количество нуклонов участников столкновения, $N_p$	Количество бинарных взаимодействий $N_{\text{binary}}$
$150 < M < 300$	$\langle b \rangle \approx 10,4$ Фм	$\langle N_p \rangle \approx 68$	$\langle N_{\text{binary}} \rangle \approx 74,4$

Идентификация частиц производится статистическим методом, основанным на измерении экспериментально наблюдаемой величины — потери энергии на ионизацию вдоль трека заряженной частицы в среде. При движении в чувствительном объеме детекторов, так называемых камер временной проекции (КВП, детально они описаны в работе [4]), заряженные частицы, сталкиваясь с молекулами газа, теряют часть своей энергии на ионизацию. Эти потери могут быть экспериментально измерены. Данная информация, вместе с информацией об импульсе, определяемом по кривизне отклонения заряженной частицы в магнитном поле, используется для идентификации частиц с помощью теории Бете-Блоха [5]. Метод идентификации частиц подробно описан в [6].

Полученные результаты для инвариантных сечений образования положительно и отрицательно заряженных пионов представлены на рис. 1 и рис. 2 в зависимости от поперечного импульса  $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$

(поперечная характеристика импульса пионов), и фейнмановской переменной  $x_F = \frac{p_L}{\sqrt{S}/2} = \frac{p_L}{p_{L\_MAX}}$  (продольная

характеристика импульса пионов), где  $p_{L\_max} = \sqrt{S}/2$  - максимально возможное значение продольного импульса.

На рисунках приведена только статистическая погрешность, которая в нашем случае, как правило, меньше размера точки на графике. Высокая точность результатов является следствием большой набранной статистики событий и точности методов обработки.

В процессе получения конечных результатов, нами были учтены следующие поправки: 1) поправка на поглощение частиц неактивными частями детектора, 2) поправка на слабые распады заряженных пионов, 3) учёт образования заряженных пионов в слабых распадах странных частиц. Рассмотрим эти поправки более подробно.

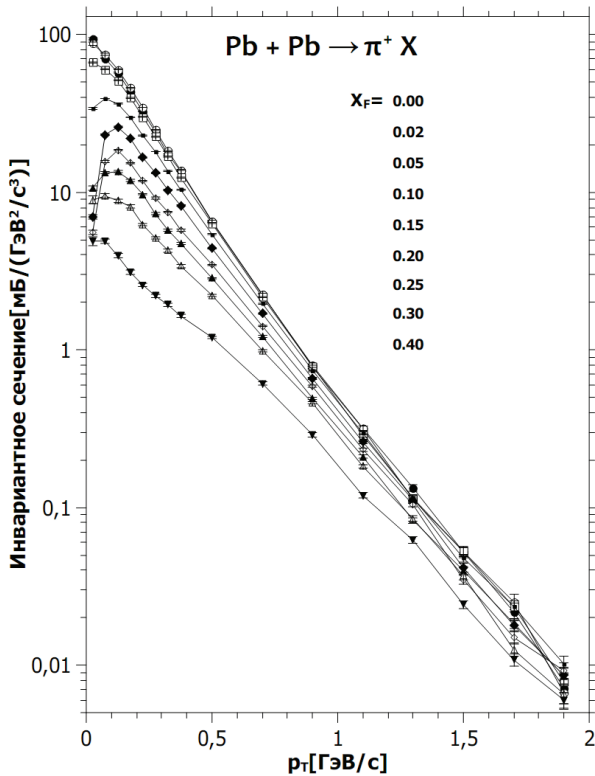


Рис. 1. Инвариантное сечение образования положительно заряженных пионов, как функция поперечного импульса, для различных значений  $X_F$ . Кривые сверху вниз соответствуют изменению  $X_F$  от минимальных значений к максимальным.

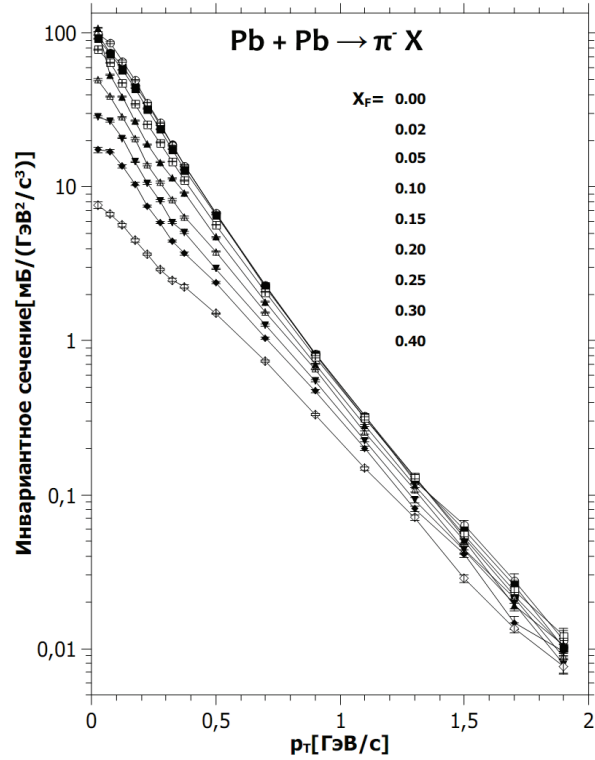


Рис. 2. Инвариантное сечение образования отрицательно заряженных пионов, как функция поперечного импульса, для различных значений  $X_F$ . Кривые сверху вниз соответствуют изменению  $X_F$  от минимальных значений к максимальным.

Процесс поглощения рождённых частиц материалами детектора ведет к неизбежным потерям акцептации, т.е. к ухудшению способности детектора регистрировать частицы в доступной области фазового пространства. Детектор NA49 был изначально спроектирован для минимизации этих потерь. Вследствие успешной реализации этого требования, всего 2% общего числа рожденных пионов поглощаются материалами детектора и теряются. Максимальное поглощение осуществляется керамическими трубами, которые являются составными частями КВП. Величина поправки на поглощение определялась нами при помощи моделирования детектора программным обеспечением GEANT.

Слабые распады пионов являются ещё одним источником потерь при регистрации пионов, образованных в первичном взаимодействии. Заряженные пионы, в основном, распадаются на мюоны,  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$  и  $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$ , в то время как распады  $\pi^- \rightarrow e^+ \nu_e$  и  $\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$ , являются подавленными. Заряженные пионы имеют довольно большое время жизни,  $2,6 \times 10^{-8}$  с, и, принимая во внимание размеры экспериментальной установки NA49 (13 метров), можно убедиться, что только незначительная часть образованных пионов распадется в детекторе. В соответствии с вычислениями, даже в предельном случае, когда рождённые пи-мезоны находятся в покое в СЦМ, всего 3,6% от их общего количества распадутся. Однако, в том случае, если пион перед распадом пролетает достаточно длинный путь в чувствительном объёме детектора, оставляя при этом более 30 ионизационных кластеров, он будет реконструирован в соответствии со стандартной процедурой. Таким образом, только пи-мезоны, распавшиеся вблизи мишени, будут утеряны и, в соответствии с моделированием Монте-Карло, величина этих потерь очень низка - всего 0,4% от общего числа рожденных пионов.

Рождение странных частиц ( $K_S^0$ ,  $\Lambda$ ,  $\bar{\Lambda}$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ) и их последующий распад на заряженные пионы довольно существенно модифицирует количество регистрируемых пионов в конечном состоянии. Образованию странных частиц в соударениях тяжелых ионов при энергиях порядка  $\sqrt{s} = 17,3$  ГэВ уделялось много внимания (см., например, работу [7]). Для учёта влияния слабых распадов странных частиц на регистрацию заряженных пионов, нами было проведено детальное моделирование с использованием программного обеспечения GEANT, в котором были учтены особенности геометрии и акцептации детектора NA49.

Исходя из кинематики задачи, мы нашли, что заряженные пионы, которые образуются в результате слабых распадов странных частиц, а не в первичном взаимодействии кварков и глюонов, имеют достаточно малый импульс в СЦМ (а именно,  $p_T$  порядка 100-200 МэВ,  $x_F$  вблизи нуля) и, следовательно, мы ожидаем, что

наибольший вклад эта поправка вносит при малых значениях  $p_T$  и  $x_F$ . В то же время, величина этой поправки значительна, она достигает 15% при малых импульсах, и уменьшается до 4-5% с ростом  $p_T$  и  $x_F$ .

Как видно из конечных результатов, инвариантные сечения уменьшаются на четыре порядка с ростом  $p_T$  до двух ГэВ. Если обратить внимание на зависимость продольной характеристики  $x_F$ , видим, что значения сечений уменьшаются более чем на порядок при увеличении  $x_F$  от  $x_F=0$  до  $x_F=0,4$ .

Из сравнения рис. 1 и рис. 2 можно видеть, что в области малых поперечных импульсов наблюдается асимметрия между сечениями рождения положительно и отрицательно заряженных пионов, наиболее ярко выраженная при  $x_F=0,15$ . Предлагаемое нами объяснение подобной асимметрии заключается в наличии кулоновского взаимодействия в конечном состоянии между образованными заряженными пионами и локализованным положительным зарядом - фрагментом иона после периферического столкновения. Аргументом в пользу этого объяснения служит кинематика взаимодействия. В соответствии с расчетами, пионы, имеющие  $x_F \approx 0,15$  и малый поперечный импульс, находятся практически в покое (имеют малую скорость) относительно спектаторов. Таким образом, образованные пионы испытывают влияние положительного кулоновского поля и пребывают в нём время, достаточно длительное для изменения своего импульса. Вследствие этого взаимодействия, положительно заряженные пионы выталкиваются из рассматриваемой области фазового пространства, а отрицательно заряженные - притягиваются, что и приводит к наблюдаемой асимметрии. Если наше предположение является верным, то стоит ожидать уменьшения зарядовой асимметрии с увеличением центральности столкновений (с уменьшением прицельного параметра).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами представлены экспериментальные результаты по инвариантным сечениям рождения заряженных пионов в периферических столкновениях (с прицельным параметром  $b \approx 10,4$  Фм) ионов свинца  $^{208}\text{Pb}$  при энергии взаимодействия  $\sqrt{S} = 17,3$  ГэВ в СЦМ. Проанализированные данные были получены с использованием специализированной схемы реконструкции событий, оптимизированной для малых плотностей треков в детекторах КВП.

Предложено объяснение наблюдаемой асимметрии между положительными и отрицательными пионами, как следствие кулоновского взаимодействия в конечном состоянии между образованными заряженными пионами и положительно-заряженным остаточным фрагментом иона.

Продолжение исследований рождения заряженных пионов в полуженеральных и центральных столкновениях ионов, и сравнение результатов с полученными данными для периферических столкновений, поможет уточнению и развитию теоретических моделей и лучшему пониманию наблюдаемых эффектов.

Учитывая то, что процедуры реконструкции и обработки данных непрерывно совершенствуются, конечные результаты могут быть модифицированы в процессе дальнейших исследований, однако, по нашему мнению, возможные модификации будут незначительными.

Автор выражает благодарность коллегам за производство массивов micro-dst и помощь в вычислении поправок. Также автор хотел бы выразить свою признательность А.Ю. Корчину за плодотворное сотрудничество.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kliemant M., Raghunath Sahoo, Schuster T., Stock R. Global Properties of Nucleus-Nucleus Collisions // Lect. Notes Phys. – 2010. - Vol.785. – P.23-103; e-Print: arXiv:0809.2482 [nucl-ex].
2. Trubnikov V. Issledovaniya kvark-glyuonnoy plazmy pri nizkikh energiyakh // The Journal of Kharkiv National University, physical series "Nuclei, Particles, Fields". – 2011. - №969– Iss.3(51). - S.89.
3. Miller M.L., Reyers K., Sanders S.J., Steiberg P. // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. – 2007. Vol.57. – P.205-243.
4. Afanasiev S. et al. The NA49 large acceptance hadron detector // Nucl. Instr. and Meth. – 1999. – Vol.A430. – P.210.
5. Bethe H., Ashkins J. Passage of Radiation Through Matter", in Experimental Nuclear Physics, E. Segre, ed (Wiley, New York, 1953), Vol. I, p.166].
6. Alt C. et. al. (the NA49 Collaboration) Inclusive production of charged pions in p+p collisions at 158 GeV/c beam momentum // Eur. Phys. J. – 2006. – Vol.C45. – P.343-381; arXiv:hep-ex/0510009v1
7. Presented by R.A. Fini et al. Strange baryon production in Pb–Pb collisions at 158 A GeV/c // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. – 2001. – Vol.27. – P.375–381.