

Features of Carbon-Carbon Interactions at a Momentum of 4.2 GeV/c per Nucleon that are Accompanied by the Production of Λ Hyperons and K_S^0 Mesons Versus the Degree of Nuclei Collision Centrality

V.V. Uzhinsky

Laboratory of Information Technologies, JINR

A.S. Galoyan

Laboratory of Particle Physics, JINR

E.N. Kladnitskaya

Laboratory of High Energies, JINR

B. Baatar

Institute of Physics and Technology, Ulan Bator, Mongolia

Lj. Simic

Institute of Physics, Belgrade, Serbia, Yugoslavia

Abstract

Experimental data obtained by using the 2-m propane bubble chamber of the Joint Institute for Nuclear Research (JINR, Dubna) are used to study the effect of collision centrality on the spectra of Λ hyperons and K_S^0 mesons produced in carbon-carbon interactions at 4.2 AGeV/c. The multiplicity of participant protons having momenta in excess of 300 MeV/c is taken as a measure of collision centrality. The features of pions and protons accompanying strange particle production are presented. The experimental data are compared with the prediction of a modified version of the FRITIOF model. It is shown that strange particles are predominantly produced in central and semi-central collisions. The average kinematical features of K_S^0 mesons are found to be independent of collision centrality. At the same time, the average transverse momentum of Λ hyperons and the average value of their emission angle increase slowly with increasing degree of collision centrality. The anisotropy of the angular distributions of both Λ hyperons and K_S^0 mesons in the c.m. frame of nucleon-nucleon collisions decreases with increasing collision centrality. The average transverse momentum of K_S^0 mesons is approximately 1.6 times higher than the average transverse momentum of π^- mesons.

Для детальной проработки обширных программ исследования гипер-ядер и гипер-атомов, предусмотренных в ОИЯИ (проект СФЕРА [1]) и в GSI (проекты PANDA и CBM, см. [2]), необходима информация о характеристиках Λ -гиперонов, образующихся в адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействиях в диапазоне энергий от 2 до 40 ГэВ/нуклон. Цель работы, с одной стороны, представить такие данные для углерод-углеродных соударений при импульсе 4.2 ГэВ/с/нуклон (далее СС-взаимодействия), а с другой – исследовать зависимость характеристик Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов, а также сопровождающих их протонов и π^- -мезонов, от степени центральности соударений ядер углерода. При нашей энергии, ненамного превосходящей порог образования Λ -гиперонов в NN-соударениях, Λ -частицы и K_s^0 -мезоны имеют малые импульсы в системе центра масс NN-взаимодействий и, можно полагать, что они могут быть захвачены горячей барионной системой, формируемой

в центральной области быстрот в ядро-ядерных соударениях. Поэтому существует потенциальная возможность создания горячей барионной системы с ненулевой странностью, свойства которой представляют большой интерес. Очевидно, что образование системы зависит от прицельного параметра соударений или от числа нуклонов, участвующих во взаимодействии. При ее возникновении можно ожидать близких значений поперечных импульсов протонов-участников и Λ -гиперонов. Однако, ограниченность энергии в процессах рождения Λ -гиперонов проявляется в подавленном выходе π -мезонов в NN -соударениях. Если в СС-взаимодействиях доминируют первичные NN -соударения, можно ожидать пониженный выход мезонов в событиях с рождением странных частиц. Это, в свою очередь, должно отразиться на интенсивности каскадных, вторичных взаимодействий, и возможен меньший выход медленных протонов, и меньшее разрушение ядер-остатков.

Исходя из вышесказанного, мы основное внимание уделили изучению зависимости кинематических характеристик и множественностей вторичных частиц в выделенных взаимодействиях от степени центральности соударений, а также выявлению особенностей СС-событий с рождением Λ - и K_s^0 -частиц по сравнению с неупругими взаимодействиями тех же ядер. Экспериментальные данные сравниваются с расчетами по варианту модели FRITIOF, использованному в [3]-[5].

Экспериментальный материал получен на основе обработки стереофотографий с двухметровой пропановой пузырьковой камеры ЛВЭ ОИЯИ, помещенной в магнитное поле напряженностью 1.5 Т и облученной ядрами углерода с импульсом 4.2 ГэВ/с на нуклон на синхрофазатроне ОИЯИ. Методические вопросы эксперимента изложены в [6]. В настоящей работе использовались результаты идентификации V^0 -частиц и определения поправок на потери Λ - и K_s^0 -частиц в выделенных взаимодействиях.

В анализируемом ансамбле СС-взаимодействий с рождением Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов были определены характеристики всех вторичных заряженных частиц. Среди них выделялись π^- -мезоны, испарительные протоны с импульсом $0.15 < p \leq 0.3$ ГэВ/с, стриппинговые фрагменты ядра-снаряда ($p_{стр} > 3$ ГэВ/с, $\Theta_{стр} < 4^\circ$) и протоны-участники с импульсом p больше 0.3 ГэВ/с без стриппинговых частиц. Протоны с $p < 0.15$ ГэВ/с в пропановой пузырьковой камере не регистрируются из-за малой длины пробега ($L < 2$ мм). π^+ -мезоны надежно идентифицировались по ионизации на треке только до 0.5 ГэВ/с [6]. Их множественность в этом интервале импульсов совпадает с множественностью π^- -мезонов и в дальнейшем для нахождения средней множественности неидентифицированных протонов с $p > 0.5$ ГэВ/с предполагалось, что $\langle n_{\pi^+} \rangle = \langle n_{\pi^-} \rangle$ ($\langle n_p \rangle = \langle n_+ \rangle - \langle n_{\pi^+} \rangle - \langle n_{K^+} \rangle$, где n_+ - множественность положительно заряженных частиц). Продукты распадов Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов исключались из множественностей положительно и отрицательно заряженных частиц.

Число протонов-участников ($n_p^{yч}$) в событии было выбрано за меру центральности СС-соударений. Все СС-события с рождением и Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов были разделены на 3 группы по числу протонов-участников. События с $n_p^{yч} \leq 4$ мы относим к периферическим взаимодействиям. Для них средний параметр соударения, $\langle b \rangle$, больше 4 фм. Среди всех событий с Λ -гиперонами периферические составляют 30.2%. Ко второй группе взаимодействий отнесены события с $4 < n_p^{yч} \leq 8$. Это наиболее многочисленная группа, в ее составе 43.3% от всех событий с Λ -гиперонами. В третью группу вошли события с $n_p^{yч} > 8$, включающие 26.5% от всех событий. Эти события мы называем центральными, для них $\langle b \rangle$ меньше 2.2 фм [7]. В таком же

процентном соотношении распределились и Λ -гипероны. Распределение K_s^0 -мезонов по группам практически совпадает с соответствующим распределением Λ -гиперонов. Этот факт может служить доказательством того, что в СС-взаимодействиях при импульсе 4.2 ГэВ/с на нуклон K_s^0 -мезоны рождаются в основном в паре с Λ -гиперонами.

Согласно исследованию, с уменьшением параметра соударения сталкивающихся ядер в событиях с рождением Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов возрастает средняя множественность заряженных частиц ($\langle n_{зар} \rangle$) и множественность π^- -мезонов. При этом доля пионов среди всех заряженных частиц возрастает с 27% до 33%. Для всех неупругих СС-взаимодействий эта доля увеличивается с 23.4% до 34%. С увеличением степени центральности СС-взаимодействий средняя множественность протонов-участников, естественно, возрастает, а множественности стриппинговых фрагментов ядра-снаряда и испарительных протонов ядра-мишени уменьшаются. Особенно резко уменьшаются среднее число фрагментов с $Z \geq 2$ и число испарительных протонов с $p < 0.15$ ГэВ/с. Сравнение средних множественностей вторичных частиц в СС-взаимодействиях с Λ -гиперонами и K_s^0 -мезонами показывает их совпадение в пределах ошибок во всех группах. Этот факт подтверждает сделанный выше вывод о рождении зарегистрированных нами K_s^0 -мезонов совместно с Λ -гиперонами в большинстве событий.

Средние импульсные и угловые характеристики K_s^0 -мезонов не зависят от величины параметра соударения сталкивающихся ядер углерода. Аналогичный результат получен для π^- -мезонов во всех неупругих СС-взаимодействиях при 4.2 ГэВ/с [5]. Не зависит от степени центральности и средний импульс Λ -гиперонов. В то же время, их средний поперечный импульс и угол вылета в лаб. системе, Θ , обнаруживают слабый рост при переходе от периферических взаимодействий к центральным.

По мере увеличения степени центральности СС-взаимодействий анизотропия угловых распределений Λ - и K_s^0 -частиц уменьшается. Угловые распределения Λ -гиперонов более анизотропны по сравнению с соответствующими распределениями K_s^0 -мезонов. В центральных взаимодействиях ($n_p^{yч} > 8$) угловое распределение K_s^0 -мезонов в с.д.м. NN взаимодействий в пределах ошибок изотропно.

Исследованы распределения Λ -гиперонов по поперечному импульсу и скорости. Показано, что при переходе от периферических СС-взаимодействий к более центральным увеличивается доля Λ -гиперонов с $p_t > 0.5$ ГэВ/с, что приводит к увеличению среднего поперечного импульса Λ -гиперонов в событиях с $n_p^{yч} > 4$. Быстротные распределения Λ -гиперонов показывают, что Λ -частицы рождаются преимущественно в центральной области. Эта особенность наблюдается и для периферических взаимодействий в отличие от быстротных распределений протонов-участников в СС-взаимодействиях, где видны четкие максимумы в областях фрагментации ядер углерода [5].

В работах [8] – [11] было показано, что множественности π -мезонов и протонов-участников в ядро-ядерных взаимодействиях с образованием странных частиц превышают соответствующие множественности для тех же взаимодействий без рождения странных частиц. Мы хотим отметить, что имеется существенное различие распределений событий с Λ - и K_s^0 -частицами и без них по числу протонов-участников. Так, доля периферических взаимодействий ($n_p^{yч} \leq 4$) в группе событий с Λ -гиперонами, как и событий с K_s^0 -мезонами, почти в два раза меньше соответствующей доли во всех неупругих взаимодействиях. Подавляющее большинство событий с Λ - и K_s^0 -частицами (70%) имеют число протонов-участников больше 4, т.е. принадле-

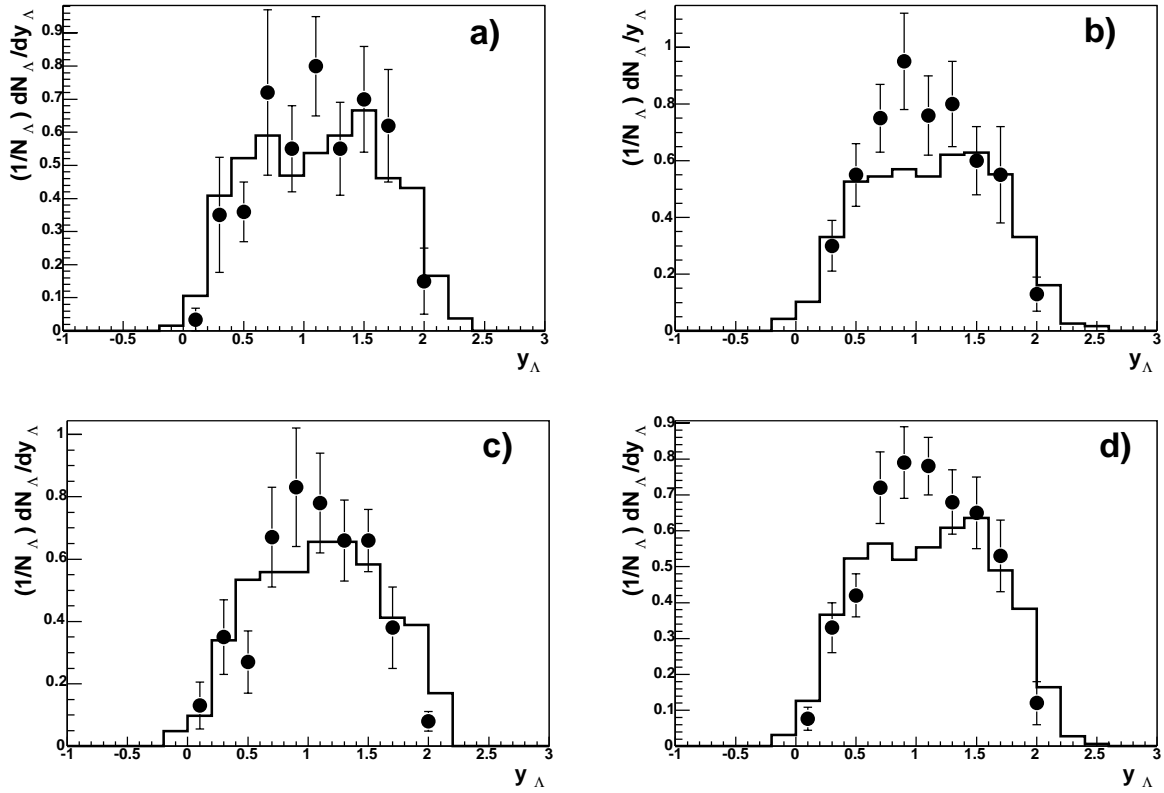


Рис. 1: Распределения Λ -гиперонов по быстротам в группах событий: а) $n_p^{y^{\text{ch}}} \leq 4$, б) $4 < n_p^{y^{\text{ch}}} \leq 8$, в) $n_p^{y^{\text{ch}}} > 8$, г) во всех событиях. Точки – экспериментальные данные, гистограммы – расчеты по модели FRITIOF

жат к центральным и полуцентральному взаимодействиям. Этот факт и определяет, в основном, 30% превышение множественности π^- -мезонов и протонов-участников в событиях со странными частицами по сравнению со всеми неупругими CC -взаимодействиями.

В периферических CC^Λ и $CC^{K_s^0}$ взаимодействиях множественности π^- -мезонов значительно (в ~ 1.5) выше чем в неупругих периферических CC -соударениях. Во всех остальных группах имеет место обратное соотношение (уменьшенное рождение мезонов в CC^Λ и $CC^{K_s^0}$ взаимодействиях).

Множественности протонов-участников в группах CC^{in} взаимодействий с $n_p^{y^{\text{ch}}} > 4$ ненамного превышают соответствующие множественности в CC^Λ и $CC^{K_s^0}$ взаимодействиях.

Отличие множественностей частиц во всех рассматриваемых взаимодействиях в значительной мере обусловлено отличием распределений по числу протонов-участников, в частности малой долей периферических событий в CC^Λ и $CC^{K_s^0}$ взаимодействиях.

Образование Λ - и K_s^0 -частиц практически не влияет на средние кинематические характеристики π^- -мезонов. Что касается протонов-участников, то средние значения их импульсов слабо зависят от типа рассматриваемых CC -взаимодействий; их средний поперечный импульс немного увеличивается при переходе от событий CC^{in} к CC^{V^0} , а средний угол испускания Θ уменьшается.

Сравнение средних импульсных характеристик Λ -гиперонов, протонов-участников из неупругих CC -взаимодействий и протонов-участников из событий с Λ -гиперонами позволяет сделать вывод о совпадении $\langle p_{\text{лаб}} \rangle$ для всех трех категорий

частиц и всех типов взаимодействий. Следует отметить, что Λ -гипероны вылетают в среднем под меньшими углами и имеют средний поперечный импульс на 10% меньше, чем протоны-участники из CC^{in} -взаимодействий. Сближения средних поперечных импульсов Λ -гиперонов и протонов-участников с ростом центральности соударений не наблюдается.

Распределение протонов-участников по $\cos\Theta^*$ более анизотропное, чем соответствующее распределение Λ -гиперонов, причем наибольшая анизотропия наблюдается для протонов-участников из CC^{in} -взаимодействий.

Наиболее интересно распределение Λ -гиперонов по продольной скорости y в сравнении с соответствующим распределением протонов-участников из CC^{in} -взаимодействий. В распределении Λ -гиперонов нет характерных для протонов максимумов в областях фрагментаций ядра-снаряда и ядра-мишени. Λ -гипероны сосредоточены преимущественно в центральной области быстрот. Это результат большей центральности CC -взаимодействий с рождением Λ -гиперонов.

K_s^0 -мезоны, как и π^- -мезоны (см. рис. 9), преимущественно рождаются в центральной области быстрот. Однако, K_s^0 -мезоны в отличие от π^- -мезонов имеют в среднем бóльшие полный и поперечный импульсы, и, соответственно, значительно различаются распределения этих частиц по $p_{\text{лаб}}$ и p_t .

Представленные данные за исключением группы периферических взаимодействий согласуются с картиной, изложенной выше: наблюдается несколько подавленный выход π^- -мезонов, Λ -гипероны преимущественно рождаются в центральной области быстрот, каскадные процессы во взаимодействиях с рождением странных частиц несколько больше, чем в средних CC -соударениях. Мы полагаем, что все это связано с ограниченным фазовым объемом в NN -взаимодействиях с образованием Λ - и K_s^0 -частиц.

Для интерпретации данных мы используем вариант модели FRITIOF [12, 13] адаптированный для низких энергий [14, 15]. В нем каскадные взаимодействия учитываются в рамках реджеонной модели разрушения ядер [16]. Ранее этот вариант модели применялся для описания данных о pC - и CC -взаимодействиях при импульсе 4.2 ГэВ/с на нуклон [3]-[5].

События CC -взаимодействий, сгенерированные с помощью модифицированной модели FRITIOF [14, 15], также как и экспериментальные, были разделены на три группы по числу протонов-участников. Во всех рассматриваемых группах событий были определены характеристики вторичных частиц. При сравнении экспериментальных и расчетных данных выявились некоторые различия. Среди искусственных событий CC^{V^0} -соударений доля событий с $n_p^{y^q} \leq 4$ в 1.5 раза больше, чем в экспериментальных. Доли событий с $4 < n_p^{y^q} \leq 8$ близки для экспериментальных и искусственных взаимодействий. Для центральных соударений ($n_p^{y^q} > 8$) наблюдается превышение экспериментальных значений над расчетными. Заметим, что аналогичные экспериментальные и расчетные распределения всех неупругих CC -взаимодействий хорошо согласуются друг с другом.

Сравнение экспериментальных данных о множественностях вторичных частиц с соответствующими расчетами по модели FRITIOF для CC -взаимодействий с рождением Λ -гиперонов и K_s^0 -мезонов показывает, что модель удовлетворительно (расхождение, в основном, меньше 10%) воспроизводит средние множественности всех заряженных частиц, π^- -мезонов и протонов-участников во всех анализируемых группах. Наибольшее расхождение между экспериментом и моделью наблюдается при срав-

нении множественностей испарительных протонов ($0.15 < p \leq 0.3 \text{ ГэВ/с}$) и стриппинговых фрагментов ядра-снаряда. Как указывалось в [3], это расхождение связано с использованием испарительной модели, которая, как правило, переоценивает рождение однозарядных фрагментов и недооценивает множественности многозарядных. В результате, использованная нами модифицированная модель FRITIOF переоценивает множественность стриппинговых частиц с $Z = 1$.

Согласно модели, при переходе от CC^{in} к CC^{V^0} взаимодействиям во всех выделенных группах должно происходить увеличение выхода π^- -мезонов, незначительное увеличение множественности протонов-участников и множественности однозарядных стриппинговых фрагментов, а множественности испарительных протонов и многозарядных фрагментов должны уменьшаться. Это противоречит наблюдаемым экспериментальным закономерностям (см. выше). Наиболее существенные расхождения наблюдаются в распределениях взаимодействий по числу протонов-участников. Расчетные и экспериментальные распределения по числу протонов-участников согласуются между собой для CC^{in} -взаимодействий и отличаются для CC^{V^0} -соударений. В последнем случае модель переоценивает вероятность событий с малым числом протонов-участников ($n_p^{yч} \leq 2$) и недооценивает вероятность событий с $n_p^{yч} \geq 8$. Выход протонов-участников тесно связан с предполагаемым механизмом разрушения ядер, который, мы полагаем, нуждается в уточнении. Непосредственно проверить механизм множественного рождения адронов позволяют данные о распределениях событий по множественностям π^- -мезонов. Согласно расчетам, модель хорошо воспроизводит распределение для CC^{V^0} -взаимодействий. Соответствующее распределение для CC^{in} -взаимодействий воспроизводится моделью хуже. Меньшая вероятность многомезонных событий в модели сказалась на уменьшении средней множественности π^- -мезонов в центральных и полуцентральных CC^{in} -взаимодействиях.

Изучение кинематических характеристик частиц показывает, что модель удовлетворительно воспроизводит средние значения $\langle p_{\text{лаб}} \rangle$, $\langle p_t \rangle$, $\langle \Theta \rangle$ для Λ -гиперонов во всех группах CC^{V^0} -взаимодействий и их распределения по поперечному импульсу. В то же время, расчетные угловые распределения Λ -гиперонов в с.ц.м. более анизотропны по сравнению с экспериментальными во всех группах. Эксперимент показывает, что Λ -гипероны с большей вероятностью рождаются в центральной области, чем предсказывает модель.

Для K_s^0 -мезонов ситуация иная: расчетные значения $\langle p_{\text{лаб}} \rangle$ и $\langle p_t \rangle$ систематически меньше экспериментальных, а $\langle \theta \rangle$ - больше.

Распределения Λ -гиперонов и протонов-участников по p_t из всех неупругих CC -взаимодействий близки между собой и удовлетворительно воспроизводятся моделью FRITIOF. Что касается распределений K_s^0 - и π^- -мезонов по поперечным импульсам, то модель правильно передает общую зависимость числа частиц от поперечного импульса, однако занижает число K_s^0 -мезонов в интервале $p_t > 0.6 \text{ ГэВ/с}$, а π^- -мезонов – в интервале $p_t > 0.7 \text{ ГэВ/с}$. Модель систематически недооценивает значения средних поперечных импульсов K_s^0 -мезонов.

Согласно рис. 2, экспериментальные и расчетные распределения π^- -мезонов по быстротам близки друг к другу. Распределения K_s^0 -мезонов несколько отличаются – экспериментальное распределение имеет колокообразную форму, а расчетное распределение достаточно плоское. То же можно сказать о распределениях протонов и Λ -гиперонов. Мы полагаем, что, механизм рождения K_s^0 -мезонов и Λ -гиперонов нуждается в дальнейшем уточнении.

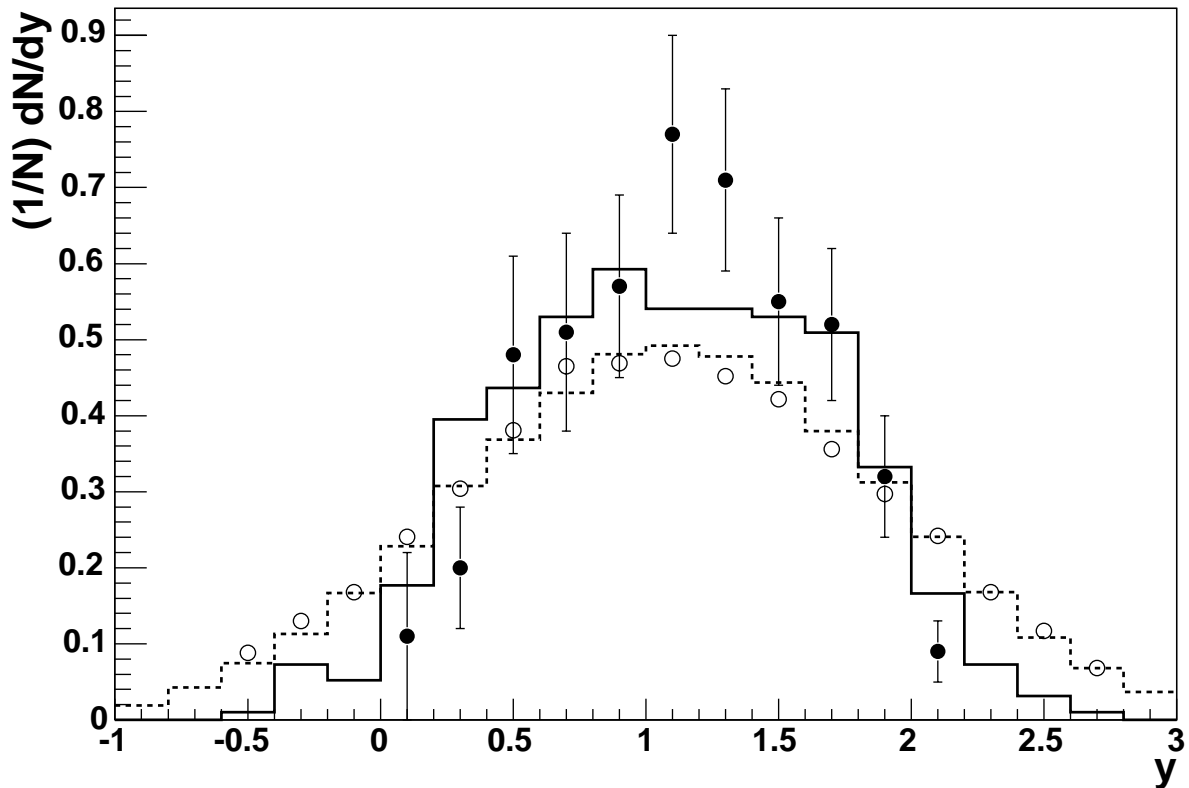


Рис. 2: Распределения K_s^0 – и π^- –мезонов во всех неупругих СС-взаимодействиях по быстротам. Темные точки – распределения K_s^0 –мезонов, светлые точки – распределения π^- –мезонов. Сплошная и пунктирная гистограммы – соответствующие расчетные распределения

Более детально результаты работы см. в [17].

Список литературы

- [1] S.A. Avramenko et al., JINR. Rapid Comm. 5[68], 14 (1994).
S.A. Avramenko et al., Nucl. Phys. **A585**, 91c (1995).
J. Lukstins, Nucl. Phys. **A691**, 491 (2001).
- [2] http://www.gsi.de/zukunftspjunkt/index_e.html
- [3] А.С. Галоян и др., ЯФ **66**, 868 (2003).
- [4] А.С. Галоян и др., ЯФ **67**, 273 (2004).
- [5] А.И. Бондаренко и др., ЯФ **65**, 95 (2002).
- [6] А.И. Бондаренко и др., Сообщ. ОИЯИ P1-98-292 (Дубна, 1998).
- [7] Lj. Simic et al., Phys. Rev. **C37**, 2064 (1988).
- [8] M. Anikina et al., Phys. Rev. Lett. **50**, 1971 (1983).
- [9] M. Anikina et al., Z. Phys. C **25**, 1 (1984).
- [10] К.Й. Йовчев и др., ЯФ **42**, 194 (1985).
- [11] Д.А. Армутлийский и др., ЯФ **43**, 366 (1986).
- [12] B. Andersson et al., Nucl. Phys. **B281**, 289 (1987).
- [13] B. Nilsson-Almqvist, E. Stenlund, Comp. Phys. Commun. **43**, 387 (1987).
- [14] V.V. Uzhinskii, Preprint JINR E2-96-192. Dubna (1996).
- [15] Б. Ганхуяг, В.В. Ужинский, Сообщ. ОИЯИ, P1-97-315, Дубна (1997); Сообщ. ОИЯИ, P2-97-397, Дубна, (1997).
- [16] Kh. El-Waged, V.V. Uzhinskii, ЯФ **60**, 925 (1997).
- [17] Б. Баатор и др., ЯФ **69**, 985 (2006).