

ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ И ПОЛЯ

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ АЗИМУТАЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ В РЕАКЦИЯХ МНОЖЕСТВЕННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

© 1994 г. В. В. Белага, Г. М. Чернов

Институт ядерной физики АН Республики Узбекистан

Поступила в редакцию 16.11.93 г.

С помощью новой техники анализа изучались многочастичные азимутальные корреляции между вторичными заряженными ливневыми частицами из адрон-нуклонных и адрон-ядерных соударений при энергиях 200 - 400 ГэВ. Такие корреляции обнаружены в hN -соударениях вплоть до максимальных множественностей. Корреляции в hA -соударениях слабее, чем в hN -соударениях, при одинаковых множественностях. Получены грубые оценки вероятностей рождения заряженных частиц через распады двухчастичных резонансов в изучаемых наборах соударений.

1. ВВЕДЕНИЕ

В большинстве теоретических построений, описывающих многочастичные реакции при высоких энергиях, даются близкие предсказания относительно чисел и композиций частиц, составляющих конечные состояния этих реакций, и их одночастичных распределений. Поэтому в последнее время прогресс в изучении внутренней динамики множественных процессов обычно связывается с изучением различного рода корреляционных и флуктуационных явлений (см., например, [1]).

Чаще всего в экспериментальных и теоретических работах, посвященных этой проблеме, рассматриваются корреляции между "продольными" характеристиками вторичных частиц (быстроходами, псевдобыстроходами и т.д.). В то же время изучение корреляций в поперечной плоскости столкновения, в частности между азимутальными углами, имеет то преимущество, что они слабо зависят или не зависят вовсе от сильных псевдокорреляционных эффектов, обусловленных не динамическими связями между частицами в одном акте взаимодействия, а неоднородностью событий, составляющих изучаемый инклюзивный или полуинклюзивный набор [2]. Отметим, однако, что в подавляющем большинстве работ, посвященных изучению азимутальных углов, речь идет о парных (двухчастичных) корреляциях, тогда как весьма актуальна проблема поиска корреляций в подсистемах из большего (≥ 3) числа вторичных частиц.

В настоящем сообщении изложены первые результаты применения двух общих методов [3, 4] изучения многочастичных азимутальных корреляций к реакциям множественного образования частиц при высоких энергиях. Апробация этой методологии показывает, что она может оказаться эффективным инструментом исследования многочастичных конечных состояний реакций

при больших множественностях, достигнутых на новых ускорителях-коллайдерах.

2. МЕТОДИКА

Рассмотрим вариационный ряд $\varphi_1 \leq \varphi_2 \leq \dots \leq \varphi_n$ ($0 \leq \varphi_i < 2\pi$) из n упорядоченных азимутальных углов φ_i частиц конечного состояния реакции $a + b \rightarrow 1 + 2 + \dots + n + \dots (n + n_0)$. Здесь n - число наблюдаемых (например, заряженных), а n_0 - число ненаблюдаемых (например, нейтральных) вторичных частиц в событии. Напомним, что в большинстве экспериментальных ситуаций азимутальный угол φ в отличие от, например, скорости не имеет физически определенного начала отсчета (неполяризованные первичные частицы, пренебрежение спиновыми эффектами при больших множественностях, особенности экспериментальной техники и т.д.) и значение $\varphi = 0$ определяет лишь некоторую плоскость измерительного прибора. В этой связи обычно изучаются парные азимутальные углы $\varepsilon_{ij} = \arccos(p_{Ti}p_{Tj}/p_{Ti}p_{Tj})$ между векторами поперечных импульсов p_T вторичных частиц i и j , представляющие собой разности углов φ ($\cos \varepsilon_{ij} = \cos(\varphi_i - \varphi_j)$).

Двумя "естественными" случайными величинами (статистиками), характеризующими азимутальные корреляции произвольного порядка, могут служить следующие простые функции углов φ_i [3, 4]:

а) минимальная длина дуги окружности единичного радиуса, содержащая произвольное число k ($2 \leq k \leq n$) упорядоченных азимутальных углов, т.е. разности $(k-1)$ -го порядка:

$$\Psi_{k-1,i}^{(n)} = \begin{cases} \varphi_{i+k-1} - \varphi_i & \text{при } 1 \leq i \leq n-k+1, \\ 2\pi + \varphi_{i+k-1-n} - \varphi_i & \text{при } n-k+1 < i \leq n; \end{cases} \quad (1)$$

б) дисперсия φ -распределения тех же (произвольных) подгрупп частиц:

$$(\sigma_{k,i}^{(n)})^2 = \begin{cases} \sum_{l=i}^{i+k-1} (\varphi_l - \bar{\varphi}_{k,i}^{(n)})^2 / (k-1) \\ \text{при } 1 \leq i \leq n-k+1, \\ \left[\sum_{l=i}^n (\varphi_l - \bar{\varphi}_{k,i}^{(n)})^2 + \sum_{l=1}^{i+k-1-n} (2\pi + \varphi_l - \bar{\varphi}_{k,i}^{(n)})^2 \right] / (k-1) \\ \text{при } n-k+1 \leq i \leq n, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$\bar{\varphi}_{k,i}^{(n)} = \begin{cases} \sum_{l=i}^{i+k-1} \varphi_l / k & \text{при } 1 \leq i \leq n-k+1, \\ \left[\sum_{l=i}^n \varphi_l + \sum_{l=1}^{i+k-1-n} (2\pi + \varphi_l) \right] / k & \text{при } n-k+1 < i \leq n. \end{cases}$$

В ситуациях, когда величина азимутального угла φ_i определяется лишь ориентацией события относительно измерительного прибора, законы распределения случайных величин (1) и (2) не зависят от i , поэтому далее этот индекс будет опущен.

Статистические характеристики предлагаемых величин $\Psi_{k-1}^{(n)}$ и $(\sigma_k^{(n)})^2$ для случая независимого испускания частиц (законы распределения, производящие функции, моменты) можно найти в [3, 4]. Приведем здесь лишь простейшие из них – математические ожидания и стандартные отклонения:

$$\langle \Psi_{k-1}^{(n)} \rangle = 2\pi(k-1)/n, \quad (3)$$

$$\sigma[\Psi_{k-1}^{(n)}] = (2\pi/n) \times \left[(k-1)(n-k+1)/(n+1) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$$\langle (\sigma_k^{(n)})^2 \rangle = \pi^2(k+1)(k+2)/(3n(n+1)), \quad (5)$$

$$\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2] = (\pi^2/3) \left[\frac{(k+1)(k+2)}{k(k-1)n(n+1)} \times \left(\frac{(k+3)(k+4)(5k^2-k+6)}{5(n+2)(n+3)} - \frac{(k-1)k(k+1)(k+2)}{n(n+1)} \right) \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Таблица

Тип соударения	p_0 , ГэВ/с	Число событий	Литература
pN	200	1293	[7]
πN	200	1397	[8]
pN	400	1061	[9]
hN	200 - 400	3751	[7 - 9]
pA	200	1626	[7]
πA	200	5116	[8]
pA	400	3484	[10]
hA	200 - 400	10226	[7, 8, 10]

Соотношение (3) тривиально, так как $\sum_1^n \Psi_{k-1}^{(n)} \equiv 2(k-1)\pi$. Что же касается (4) - (6), то в принципе любое отклонение от значений, даваемых этими формулами, означает нарушение статистической независимости углов φ , т.е. наличие корреляций между ними. Разумеется, любая предлагаемая для изучения корреляций характеристика может быть признана полезной лишь после доказательства ее чувствительности к нетривиальным, динамическим причинам их возникновения после соответствующей апробации. Такая апробация составляет одну из целей настоящей работы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Поиск многочастичных азимутальных корреляций мы провели в шести инклюзивных наборах адрон-нуклонных (hN) и адрон-ядерных (hA) соударений при первичных импульсах 200 и 400 ГэВ/с, полученных в единообразно выполненных эмульсионных экспериментах [5 - 8]. Сведения о статистике событий в этих наборах приведены в таблице; здесь указаны ссылки на работы, в которых можно найти подробную информацию о деталях экспериментов и различных общих характеристиках событий (множественности, одночастичные распределения и т.д.). Недавно [9] в этих событиях был проведен поиск многочастичных корреляций между псевдобыстроходами вторичных ливневых частиц с помощью инклюзивных корреляционных функций произвольной кратности.

Случаи, отнесенные к hN -соударениям, отбирались в соответствии со стандартными необходимыми и квазисвободными нуклонами ядерной эмульсии. Адрон-ядерные соударения были "очищены" от событий на свободном водороде и от когерентных столкновений с ядрами эмульсии

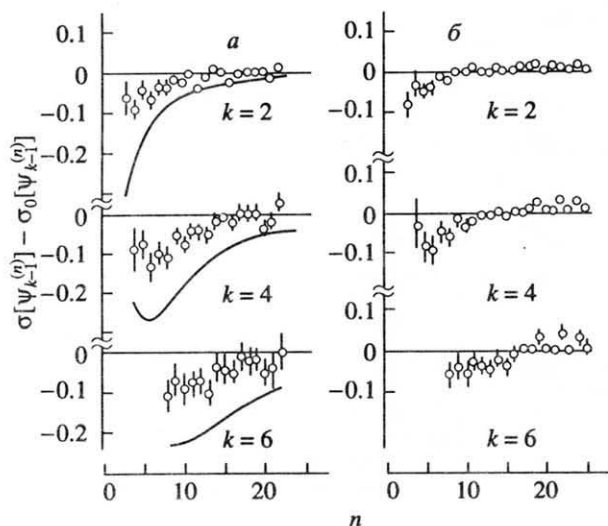


Рис. 1. Примеры зависимости разности стандартов $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}] - \sigma_0[\psi_{k-1}^{(n)}]$ от множественности n релятивистских заряженных частиц (s -частиц) из a - hN - и $б$ - hA -соударений при энергии 200 - 400 ГэВ. Кривые - результат расчета по фазовому объему (см. текст).

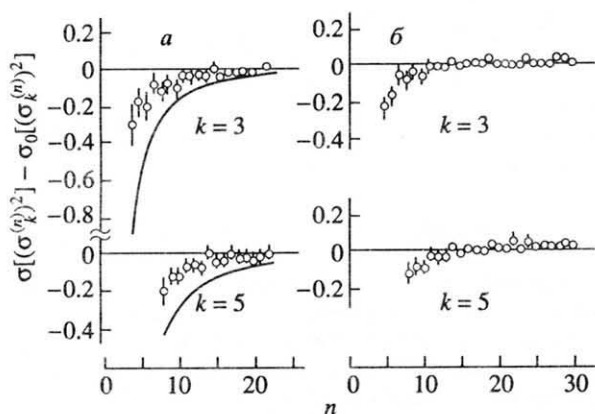


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для разности стандартов $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2] - \sigma_0[(\sigma_k^{(n)})^2]$.

с помощью известных (статистических) методов. Поиск многочастичных азимутальных корреляций проводился для релятивистских заряженных ("рожденных") вторичных частиц, число которых в событии равно n_s (ниже для простоты индекс s будет опущен: $n_s \equiv n$).

Формулы разд. 2 относятся к фиксированным n . Хотя методика, основанная на статистиках (1) и (2), допускает обобщение на ансамбли с произвольным распределением по n , ниже мы проведем анализ для простейшего случая полуинклюзивных ($n = \text{const}$) наборов событий. Поэтому, а также в связи с тем, что результаты анализа оказались апостериори не зависящими от типа

первичной частицы (p или π^-) и p_0 (200 или 400 ГэВ/с), мы объединили события с $n = \text{const}$ из ансамблей pN (200 ГэВ/с), π^-N и pN (400 ГэВ/с), а также pA (200 ГэВ/с), π^-A и pA (400 ГэВ/с), рассматривая, таким образом, объединенные hN - и hA -наборы при $p_0 = 200 - 400$ ГэВ/с. Это объединение оправданно и априори: n -распределения как в hN -, так и в hA -событиях изменяются при возрастании p_0 от 200 до 400 ГэВ/с достаточно слабо (за исключением "хвоста" при больших n) [5 - 8].

Отметим, наконец, что ядерная эмульсия обладает, пожалуй, наибольшей разрешающей способностью в ряду трековых приборов при проведении геометрических измерений. В наших событиях неудовлетворительные в отношении используемых методик погрешности в азимутальных углах ϕ (порядка нескольких десятков градусов или выше) имеют место лишь в области очень малых ($\theta \leq 1 - 2$ мрад) пространственных углов вылета частиц. Число s -частиц с такими θ при рассматриваемых энергиях не превышает 1 - 2%, что, по нашим оценкам, не влияет на результаты анализа.

4. АНАЛИЗ ДАННЫХ

На рис. 1 и 2 приведены соответственно значения стандартов $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$ -распределений по минимальной длине интервала, содержащего k соседних по азимуту вторичных релятивистских заряженных частиц из hN - и hA -соударений при энергии 200 - 400 ГэВ, и по дисперсии ϕ -распределения для этих же групп - в зависимости от множественности этих частиц в рассматриваемых полуинклюзивных наборах событий и при некоторых значениях $k \leq 6$. Для удобства эти стандарты "сдвинуты" на величину $\sigma_0[\psi_{k-1}^{(n)}]$ или $\sigma_0[(\sigma_k^{(n)})^2]$, соответствующую случаю некоррелированного испускания (эти величины определяются правыми частями формул (4) и (6)), так, чтобы любое отклонение от оси абсцисс служило сигналом о наличии соответствующих корреляций.

Как следует из этих рисунков, данные не противоречат предположению о независимости испускания лишь при больших множественностях; при этом, чем выше порядок корреляций k , тем больше значения множественности n , при которых проявляются эти корреляции. Заметно также, что при одинаковых n корреляции в hA -соударениях слабее, нежели в hN . Это - не тривиально, так как существует класс моделей hA -взаимодействия, в которых механизм рождения частиц коллективен (например, гидродинамическая теория, модель "коллективной" трубки и т.д.), и поэтому корреляции в событиях с одинаковым числом рожденных частиц должны быть в hN - и hA -случаях

одинаковы. Такие модели трудно соотносить с данными, представленными на рис. 1, 2.

Следующий необходимый шаг в проводимом анализе – количественный учет тривиальных кинематических корреляций, обусловленных действием законов сохранения. Для этой цели мы генерировали полуинклюзивные ансамбли случайных звезд по модели фазового объема с учетом наличия нейтральных вторичных частиц. Число последних (n_0) разыгрывалось при каждом $n = 2, 4, \dots$ в соответствии с имеющимися в литературе экспериментальными данными по рождению нейтральных (в том числе и странных) частиц в pp -соударениях при $E_0 = 200$ и 400 ГэВ, полученными в экспериментах на ускорителе FNAL (см. [10] и приведенные там ссылки). Результаты

расчета $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$ в модели фазового объема (PS) показаны для hN -соударений на рис. 1, 2 сплошными линиями.

Как можно видеть, учет законов сохранения энергии и импульса приводит к заметному уменьшению стандартов (т.е. разброса) как $\psi_{k-1}^{(n)}$, так и $(\sigma_k^{(n)})^2$. Это уменьшение, как и следовало ожидать, тем сильнее, чем меньше множественность.

Разности $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}] - \sigma_{PS}[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2] - \sigma_{PS}[(\sigma_k^{(n)})^2]$ между стандартами, рассчитанными исходя из эксперимента и согласно модели фазового объема, показаны для разных n и k на рис. 3 для рассматриваемых адрон-нуклонных соударений. Корреляции в реальных событиях отличаются от обусловленных кинематическими причинами при всех значениях n вплоть до максимальных. Отметим, что отступление наблюдаемых корреляций от кинематических при больших n проявляется лишь для корреляций высокого порядка и, по-видимому, ранее не наблюдалось (см., например, обзор [11]). В еще большей степени, чем для hN -соударений, экспериментальные значения $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$ отличаются от соответствующих в модели фазового объема при всех значениях n для hA -соударений, что позволяет уверенно заключить о неадекватности чисто коллективных моделей рождения частиц в ядерных взаимодействиях при рассматриваемых энергиях.

Один из интенсивно обсуждаемых физических механизмов, приводящих к появлению корреляционных связей между вторичными частицами, рождающимися в столкновениях при высоких энергиях, – образование нестабильных промежуточных объектов. Хорошо установлен факт рождения значительного числа резонансов, главным образом двухчастичных (ρ, f, K^*, Δ и т.д.); число вторичных частиц – продуктов распада таких резонансов – может достигать, по некоторым оценкам

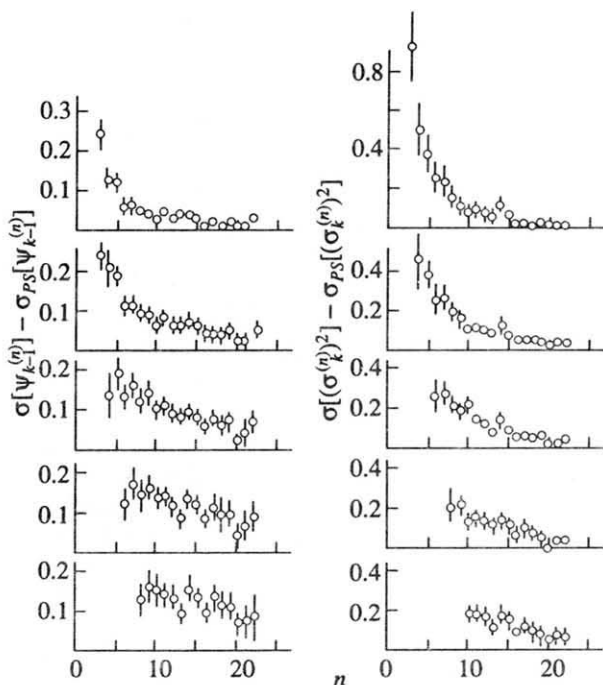


Рис. 3. Зависимости $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}] - \sigma_{PS}[\psi_{k-1}^{(n)}]$ (слева) и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2] - \sigma_{PS}[(\sigma_k^{(n)})^2]$ (справа) от n при $k = 2 - 6$ (сверху вниз) для hN -соударений при 200 - 400 ГэВ.

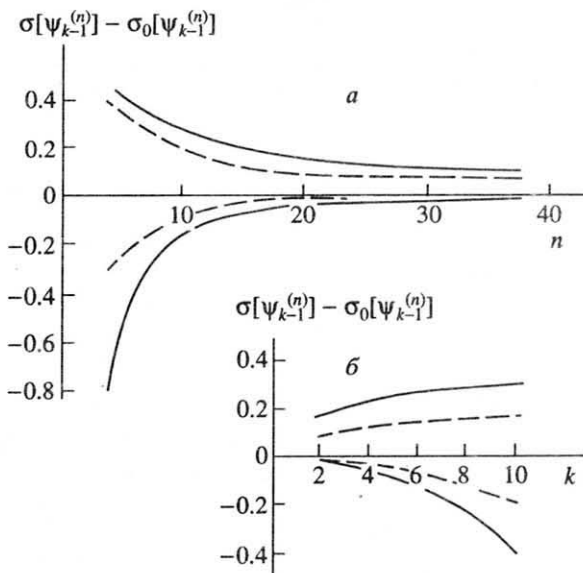


Рис. 4. Зависимости разности $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}] - \sigma_0[\psi_{k-1}^{(n)}]$ от множественности n при $k = 3$ (а) и от ранга корреляции k при $n = 20$ (б) для случаев $p_T^{rez} \geq p_T^{part}$ (верхние пары кривых) и $p_T^{rez} \leq p_T^{part}$ (нижние пары). Сплошные кривые соответствуют 100%-ному рождению частиц через двухчастичные резонансы, штриховые – 50%-ному.

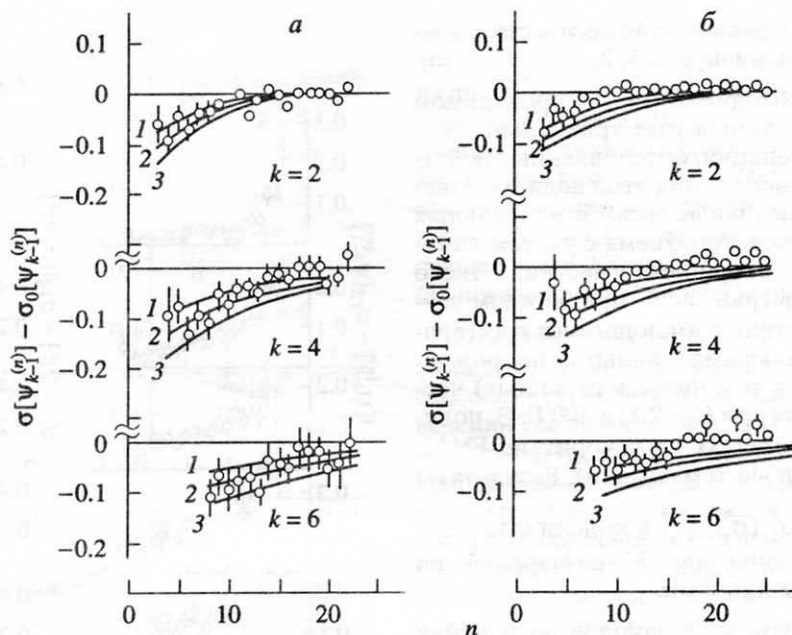


Рис. 5. Экспериментальные данные рис. 1 (точки) в сравнении с результатами расчета (кривые) согласно модели независимого испускания частиц и двухчастичных резонансов при доле вторичных частиц от распада последних, равной 50 (1), 75 (2) и 100% (3).

(см., например, [12]), 50 - 80% от полного числа генерированных частиц. Что же касается "тяжелых" (точнее, не сводимых к известным резонансам) промежуточных образований, то вопросы об их реальном существовании и физических свойствах следует, пожалуй, считать открытыми, несмотря на то, что они поставлены довольно давно. Разумно предположить, что изучение многочастичных корреляций - наиболее прямой путь к получению ответа на упомянутые вопросы.

Поведение корреляционных характеристик $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$ при рождении частиц через распада двухчастичных резонансов рассматривалось в [13]. Было показано, что эти характеристики чувствительны к образованию резонансов при всех k . При этом методика, основанная на использовании $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$, позволяет не только определять вероятность рождения частиц через двухчастичные промежуточные образования, но и оценивать поперечные импульсы последних. Некоторое представление об этом можно получить из данных рис. 4, на котором для примера представлены зависимости стандартов распределений по $\psi_{k-1}^{(n)}$ от n при фиксированном $k = 3$ и от k при фиксированном $n = 20$ для предельных ситуаций $p_T^{rez} \gg p_T^{part}$ и $p_T^{rez} \ll p_T^{part}$, рассчитанные в модели независимого испускания частиц и резонансов.

Как следует из рис. 4, статистика $\psi_{k-1}^{(n)}$ действительно может быть использована для одновре-

менных оценок упомянутых характеристик процесса рождения. Особо подчеркнем предпочтительность изучения корреляций высокого порядка (большие k).

Пример анализа экспериментального материала представлен на рис. 5. Вместе с опытными данными рис. 1 здесь приведены расчетные значения $\sigma[\psi_{k-1}^{(n)}]$ в модели независимого испускания частиц и двухчастичных резонансов. Доля частиц конечного состояния, обусловленная распадом последних, предполагалась равной 50; 75 и 100%. При моделировании парного азимутального угла между векторами поперечных импульсов частиц из одного резонанса использовались известные экспериментальные данные по p_T -распределению частиц разных масс из pp -соударений при 200 - 400 ГэВ/с, полученные в экспериментах в FNAL ([10, 12] и ссылки в них).

Можно констатировать качественное описание экспериментальных данных описанной грубой моделью при $n \leq 15 - 20$: в hN -соударениях при доле "резонансных" частиц 50 - 75%, в hA -соударениях - при $\leq 50\%$. При больших n в hA -соударениях описание данных моделью не столь удовлетворительное, несмотря на то что для этих событий предположение о независимости испускания, по-видимому, достаточно корректно.

Не следует, разумеется, придавать чрезмерно большое значение сделанным выводам, так как рассматриваемая модель является грубой. Однако мы и не преследовали такую цель, считая основной задачей настоящей работы иллюстрацию

возможностей новой техники многочастичного анализа азимутальных корреляций и получение качественных результатов. Надеемся, что нам удалось в определенной степени этого достигнуть.

В заключение хотелось бы сделать замечание, касающееся случаев с очень большими множественностями, реализующимися, в частности, в ядро-ядерных соударениях при E_0 , больших (или равных) нескольким десяткам или сотен ГэВ/нуклон. В таких случаях представляет интерес изучение многочастичных азимутальных корреляций в узких "окнах" по быстротам или псевдобыстротам; при этом кинематически исходные значения для $\sigma[\Psi_{k-1}^{(n)}]$ и $\sigma[(\sigma_k^{(n)})^2]$ близки к значениям, даваемым правыми частями формул (4) и (6).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко сформулируем результаты работы.

1. Впервые с помощью новой техники анализа проведены поиск и предварительное исследование многочастичных азимутальных корреляций между вторичными релятивистскими частицами из hN - и hA -соударений в области энергий 200 - 400 ГэВ.

2. Обнаружены необъяснимые кинематическими причинами азимутальные корреляции в hN -соударениях вплоть до максимальных множественностей рождающихся заряженных частиц.

3. Корреляции в hA -соударениях слабее, нежели в hN , при одинаковых множественностях ливневых частиц и противоречат предположению о чисто коллективных механизмах рождения частиц в соударениях с ядрами при рассматриваемых энергиях.

4. Используемые методы позволяют в принципе не только определять наличие промежуточных нестабильных образований (резонансов), но и де-

лать сравнительную оценку поперечных импульсов этих образований и распадных частиц. Грубая качественная оценка доли вторичных заряженных частиц, образующихся через распады двухчастичных резонансов, дает величины 50 - 75% для hN - и $\leq 50\%$ для hA -соударений, за исключением hA -событий большой множественности.

Мы благодарны коллегам по сотрудничеству [5 - 8], вместе с которыми был получен используемый экспериментальный материал; работа была частично поддержана Международным научным фондом Сороса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де Вольф Э.Ф., Дремин И.М., Куттель В. // УФН. 1993. Т. 163. С. 3.
2. Азимов С.А., Чернов Г.М. Статистические методы в физике высоких энергий. Ташкент, 1970.
3. Белага В.В., Чернов Г.М. // Докл. АН РУз. 1991. № 6. С. 20.
4. Белага В.В., Чернов Г.М. // Докл. АН РУз. 1992. № 1. С. 16.
5. АГМТ-сотруд. // ЯФ. 1975. Т. 22. С. 736; Изв. АН СССР. Сер. физ. 1974. Т. 38. С. 923.
6. АГМТ-collab. // Nucl. Phys. 1977. V. B129. P. 205.
7. АГМТ-сотруд. // ЯФ. 1979. Т. 30. С. 407.
8. АГМТ-collab. // Nucl. Phys. 1978. V. B143. P. 232.
9. Белага В.В., Чернов Г.М. // ЯФ. 1994. Т. 57. Вып. 8.
10. Мурзин В.С., Сарычева Л.И. Взаимодействия высокоэнергичных адронов. М.: Наука, 1983.
11. Гуламов К.Г., Гулямов У.Г., Чернов Г.М. // ЭЧАЯ. 1978. Т. 9. С. 354.
12. Гришин В.Г. Инклюзивные процессы в адронных взаимодействиях при высоких энергиях. М.: Энергоиздат, 1982.
13. Belaga V.V. Prepr. INP. Tashkent, 1993 (to be published).

MULTIPARTICLE AZIMUTHAL CORRELATIONS IN MULTIPLE PRODUCTION REACTIONS AT HIGH ENERGIES

V. V. Belaga, G. M. Chernov

The multiparticle azimuthal correlations among the secondary shower charged particles emitted from hadron-nucleon and hadron-nucleus collisions at energies of 200 - 400 GeV have been studied with help of the new technique. Such correlations were discovered in hN interactions up to the highest multiplicities. The correlations in hA collisions were found to be weaker than in the hN ones at the same multiplicities. We received the rough estimations of the probabilities of particle production via the decays of two-particle resonances in the collision sets under consideration.