

УДК 539.172

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РЕКОНСТРУКЦИИ АДРОННЫХ СТРУЙ В π^-p - И π^-C -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ ПРИ 40 ГэВ/с

Н.Н.Бадалян, Р.Г.Бадалян, Е.Богданович, А.А.Кузнецов*

Рассмотрены различные алгоритмы для выделения адронных струй в адрон-адронных и адрон-ядерных взаимодействиях. На основе анализа экспериментальных данных по π^-p - и π^-C -взаимодействиям при импульсе мезона 40 ГэВ/с показано, что в мягких процессах процедура выделения адронных струй существенно зависит от метрики алгоритма. Исследована зависимость процедуры формирования прекластеров от параметра обрезания алгоритма и предложены критерии для определения оптимального значения этого параметра. Показано, что предложенный в настоящей работе новый *B*-алгоритм предъявляет более жесткие по сравнению с алгоритмом *JADE* требования к адронам, входящим в состав струи, а следовательно и к процедуре реконструкции адронных струй. Вследствие этого выделяемые на основе *B*-алгоритма струи разделены как в пространстве скоростей, так и в фазовом пространстве как самих струй, так и частиц (π^\pm -мезонов), входящих в состав этих струй.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий ОИЯИ.

Study of the Hadronic Jet Reconstruction Algorithms in π^-p and π^-C Interactions at 40 GeV/c

N.N.Badalian et al.

Different types of algorithms for reconstruction of the hadronic jets produced in π^-p and π^-C interactions at 40 GeV/c have been studied. It has been found that the jet reconstruction procedure crucially depends on the metric of the algorithm. The dependence of the precluster formation mechanism on the cut parameter of the algorithm was investigated and the criteria for the determination of the optimal value of the cut parameter have been proposed. It was shown that the *B*-algorithm we proposed, claims much more rigorous requests, as compared to the *JADE* algorithm, to the hadrons from jets and so to the jet reconstruction procedure. As a result, extracted jets are separated both in the velocity space and in the phase space of the jets as well as of the hadrons (π^\pm mesons) from jets.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

*Постоянный адрес: Soltan Institute for Nuclear Studies, Warsaw, Poland

1. Различные метрики для алгоритмов реконструкции адронных струй

Работа посвящена анализу различных алгоритмов по выделению адронных струй в процессах взаимодействия между частицами и ядрами. При большой множественности частиц в конечном состоянии работа алгоритмов, основанных на всевозможных разбиениях множества частиц в конечном состоянии на две или три группы частиц, становится малоэффективной в связи с большим количеством всевозможных разбиений. По этой причине были предложены и получили большое распространение быстродействующие, или локальные, алгоритмы для реконструкции адронных струй, которые работают на основе сравнительного анализа характеристик всех пар частиц в конечном состоянии. Существуют также алгоритмы, использующие характеристики всех троек частиц в конечном состоянии.

В данной статье мы будем рассматривать работу алгоритмов, которые при анализе события используют только характеристики пар частиц, или так называемые бинарные алгоритмы. Одним из характерных примеров такого бинарного алгоритма является алгоритм сотрудничества *JADE* [1,2,3], который использовался для выделения адронных струй в e^+e^- -взаимодействиях.

Логика алгоритма *JADE* организована следующим образом:

1. Для каждого события с N -частицами в конечном состоянии (далее в тексте как одну частицу, так и группу частиц будем называть *прекластером*) определяются $N(N-1)/2$ парных, или бинарных, характеристик m_{ik}^2 , которые являются эффективной массой системы из двух прекластеров с 4-импульсами P_i и P_k :

$$m_{ik}^2 = (P_i + P_k)^2. \quad (1)$$

При этом, естественно, предполагается, что $N \geq 2$.

2. Определяется минимальное значение $m_{i_{\min} k_{\min}}^2 = \min \{m_{ik}^2\}$ из $N(N-1)/2$ величин m_{ik}^2 , т.е. определяется пара прекластеров i_{\min} и k_{\min} с минимальным значением эффективной массы.

3. Полученное минимальное значение $m_{i_{\min} k_{\min}}^2$ сравнивается с некоторой наперед заданной величиной m_{cut}^2 , которая является параметром обрезания алгоритма.

4. Если $m_{i_{\min} k_{\min}}^2 > m_{\text{cut}}^2$, то процедура реконструкции адронных струй завершается.

5. Если $m_{i_{\min} k_{\min}}^2 < m_{\text{cut}}^2$, то два прекластера i_{\min} и k_{\min} объединяются в один прекластер с массой $m_{i_{\min} k_{\min}}^2$ и 4-импульсом $P_{i_{\min} k_{\min}} = P_{i_{\min}} + P_{k_{\min}}$, т.е. число прекластеров уменьшается на единицу: $N \rightarrow (N-1)$.

6. При $(N-1) \geq 2$ процедура повторяется для $(N-1)$ прекластеров, если же $(N-1) = 1$, процедура реконструкции адронных струй завершается.

7. Все прекластеры, число частиц в которых больше или равно 2, рассматриваются как адронные струи в данном событии.

Из сказанного выше следует, что любой бинарный алгоритм по реконструкции адронных струй имеет три основных элемента: а — логика алгоритма, b — метрика алгоритма и с — параметр обрезания алгоритма. В частности, логика алгоритма *JADE* основана на сравнительном анализе эффективных масс всех прекластеров. Она изложена в перечисленных выше пп.1—7. Метрика алгоритма *JADE* определяется выражением (1), т.е. эффективной массой пары прекластеров, а параметром обрезания является величина m_{cut}^2 .

Ниже будут рассмотрены несколько алгоритмов, логика которых совпадает с логикой алгоритма *JADE*, однако метрика существенно отличается от метрики алгоритма *JADE*.

В качестве метрики, определяющей близость пар прекластеров, рассмотрим лоренц-инвариантные величины b_{ik} [4], которые определяются как квадрат разности 4-скоростей прекластеров i и k :

$$b_{ik} = - \left(\frac{p_i}{m_i} - \frac{p_k}{m_k} \right)^2 = \frac{m_{ik}^2 - (m_i + m_k)^2}{m_i m_k}. \quad (2)$$

Отметим, что для системы из трех прекластеров i, j и k имеет место следующее утверждение. Если в пространстве скоростей расстояние между прекластерами i, j и k, j меньше величины b_0 , т.е. $b_{ij} < b_0$ и $b_{kj} < b_0$, то расстояние между объединенным прекластером (ik) и прекластером j не может быть больше величины b_0 , т.к.

$$b_{(ik)j} = - \left(\frac{p_i + p_k}{m_{ik}} - \frac{p_j}{m_j} \right)^2 = \frac{m_i}{m_{ik}} b_{ij} + \frac{m_k}{m_{ik}} b_{kj} + 2 \left(\frac{m_i + m_k}{m_{ik}} - 1 \right) < b_0. \quad (3)$$

Если в логической схеме алгоритма *JADE* сделать замену $m_{ik}^2 \rightarrow b_{ik}$ и $m_{\text{cut}}^2 \rightarrow b_{\text{cut}}$, то мы получим новый *B*-алгоритм. Такая незначительная, на первый взгляд, замена приводит к существенно другой, по сравнению с алгоритмом *JADE*, схеме рекомбинации прекластеров. Более того, полученный таким образом *B*-алгоритм обладает некоторыми замечательными свойствами, которыми не обладает алгоритм *JADE*. Детально эти отличия будут продемонстрированы на примере реконструкции спектральных (или мягких) струй в π^-p -взаимодействиях при 40 ГэВ/с.

Другой величиной, которая может быть использована для определения близости двух прекластеров, является величина b'_{ik} , которая связана с величиной b_{ik} простым соотношением [5]:

$$b'_{ik} = \frac{m_i m_k}{m_0^2} b_{ik} = \frac{m_{ik}^2 - (m_i + m_k)^2}{m_0^2}, \quad (4)$$

где параметр $m_0 \simeq 1$ ГэВ, однако конкретное значение этого параметра несущественно для нашего дальнейшего рассмотрения.

2. Зависимость формирования прекластеров от метрики алгоритма

После того как мы определили различные метрики для алгоритмов по реконструкции адронных струй, перейдем к рассмотрению процедуры образования прекластеров и кинематики рекомбинации двух прекластеров в один прекластер в рамках каждой из приведенных выше метрик.

Даже в случае равенства масс всех частиц в конечном состоянии (например, в случае, когда для реконструкции струи используются только заряженные π^\pm -мезоны) начиная со второго шага итерационной схемы появляются прекластеры с массами, существенно отличными от масс начальных частиц, так как в ходе работы алгоритма массы прекластеров не уменьшаются, однако могут расти. В связи с этим становится очень важным исследовать, каким образом происходит объединение или рекомбинация прекластеров с различными массами в новый прекластер в зависимости от выбранной метрики алгоритма реконструкции адронной струи. Дальнейшее рассмотрение мы проведем в переменных Δy и P_T^2 , которые определяются для пары прекластеров i и k следующими соотношениями:

$$\Delta y = y_i - y_k, \quad (5)$$

$$P_T^2 = \mathbf{P}_i^2 - P_{iL}^2 = \mathbf{P}_k^2 - P_{kL}^2, \quad (6)$$

$$y_{i(k)} = \frac{1}{2} \ln \frac{E_{i(k)} + P_{i(k)L}}{E_{i(k)} - P_{i(k)L}}, \quad (7)$$

$$P_{i(k)L} = \mathbf{P}_{i(k)} \cdot \mathbf{n}_{ik}, \quad (8)$$

$$\mathbf{n}_{ik} = \frac{\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_k}{|\mathbf{P}_i + \mathbf{P}_k|} = \frac{\mathbf{P}_{ik}}{P_{ik}}. \quad (9)$$

Здесь P_T — поперечный импульс как прекластера i , так и прекластера k по отношению к направлению \mathbf{n}_{ik} суммарного трехмерного импульса $\mathbf{P}_{ik} = \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_k$ двух прекластеров i и k , а Δy — разность быстрот прекластеров i и k в направлении \mathbf{n}_{ik} суммарного трехмерного импульса \mathbf{P}_{ik} . Отметим, что при $P_T = 0$ величина Δy переходит в радиальную быстроту для системы из двух прекластеров i и k , а при $\Delta y = 0$, P_T становится импульсом каждого из прекластеров i и k в системе их центра масс.

Все рассмотренные нами метрики (1), (2) и (4) в переменных Δy и P_T^2 выражаются простыми соотношениями:

$$\frac{b_{ik}}{2} = -1 + \sqrt{\left(1 + \frac{P_T^2}{m_i^2}\right)\left(1 + \frac{P_T^2}{m_k^2}\right)} \operatorname{ch}(\Delta y) + \frac{P_T^2}{m_i m_k}, \quad (10)$$

$$m_{ik}^2 = (m_i + m_k)^2 + m_i m_k b_{ik}, \quad (11)$$

$$b'_{ik} = \frac{m_i m_k}{m_0^2} b_{ik}. \quad (12)$$

Рассмотрим механизм рекомбинации двух прекластеров с массами m_i и m_k в один прекластер в рамках различных алгоритмов. Чтобы не усложнять дальнейшие рассуждения несущественными деталями, рассмотрим объединение двух пионов ($m_i = m_k = m_\pi$) и двух прекластеров i и k , массы которых равны массе, например, нуклона ($m_i = m_k = m_N$, далее в тексте такие прекластеры будем называть «нуклонами») в один прекластер в рамках рассматриваемых алгоритмов. Тогда для алгоритма JADE с параметром обрезания m_{cut}^2 имеем условие рекомбинации двух пионов или двух прекластеров — «нуклонов» — в один прекластер:

$$\operatorname{ch}(\Delta y) = \frac{m_{\text{cut}}^2}{2m_{\pi(N)}^2} - 1, \quad \text{при } P_T^2 = 0, \quad (13)$$

$$P_T^2 = \frac{m_{\text{cut}}^2 - 4m_{\pi(N)}^2}{4}, \quad \text{при } \Delta y = 0. \quad (14)$$

Следовательно, если два пиона i и k или два прекластера — «нуклона» i и k , по отношению к метрике m_{ik}^2 находятся на одинаковом расстоянии m_{cut}^2 друг от друга и могут объединяться в один прекластер, то для радиальных быстрот таких пар выполняются соотношения Δy (для π) $>$ Δy (для прекластеров — «нуклонов», N), а величины P_T^2 для этих пар должны удовлетворять соотношению P_T^2 (для π) $>$ P_T^2 (для прекластеров N),

При использовании B -алгоритма с метрикой b_{ik} и с параметром обрезания b_{cut} условие рекомбинации двух пионов и двух прекластеров — «нуклонов» — имеет вид:

$$\text{ch}(\Delta y) = 1 + \frac{b_{\text{cut}}}{2}, \quad \text{при } P_T^2 = 0, \quad (15)$$

$$P_T^2 = \frac{m_{\pi(N)}^2}{4} b_{\text{cut}}, \quad \text{при } \Delta y = 0. \quad (16)$$

Следовательно, в рамках B -алгоритма на одинаковом расстоянии находятся такие пары пионов и такие пары прекластеров — «нуклонов», радиальные быстроты которых равны: Δy (для π) = Δy (для прекластеров N), а величины P_T^2 удовлетворяют соотношению P_T^2 (для N) = $(m_p/m_\pi)^2 P_T^2$ (для π) > P_T^2 (для π).

Для алгоритма с метрикой b'_{ik} и параметром обрезания b'_{cut} для условия рекомбинации двух прекластеров в один можно получить следующие выражения:

$$\text{ch}(\Delta y) = 1 + \frac{m_0^2}{2m_{\pi(N)}^2} b'_{\text{cut}} \quad \text{при } P_T^2 = 0, \quad (17)$$

$$P_T^2 = \frac{m_0^2}{4} b'_{\text{cut}} \quad \text{при } \Delta y = 0, \quad (18)$$

следовательно, для алгоритма с метрикой b'_{ik} имеем случай, обратный случаю для B -алгоритма с метрикой b_{ik} , а именно: P_T^2 (для N) = P_T^2 (для π) и Δy (для π) > Δy (для N). При этом условии, которому удовлетворяют радиальные быстроты пар пионов и пар прекластеров — «нуклонов», для этого алгоритма совпадает с таким же условием для алгоритма *JADE*. Вследствие этого результаты, полученные на основе алгоритма с метрикой b'_{ik} , не сильно отличаются от результатов, полученных на основе *JADE*-алгоритма. С другой стороны, эти результаты существенно отличаются от тех, которые получаются на основе B -алгоритма.

Таким образом, принцип рекомбинации двух прекластеров в один прекластер существенно зависит от выбора метрики алгоритма даже в рамках одинаковой логики этих алгоритмов. При этом выбор метрики зависит от конкретных физических задач, которые должны быть решены после процедуры выделения адронных струй.

3. Анализ экспериментальных данных по π^-p - и π^-C -взаимодействиям при 40 ГэВ/с

Настоящий раздел посвящен анализу многопионных конечных состояний, образованных в процессе взаимодействия π^- -мезонов с протонами и ядром углерода. Экспериментальные данные получены с помощью 2 м ПК ОИЯИ, облученной пучком

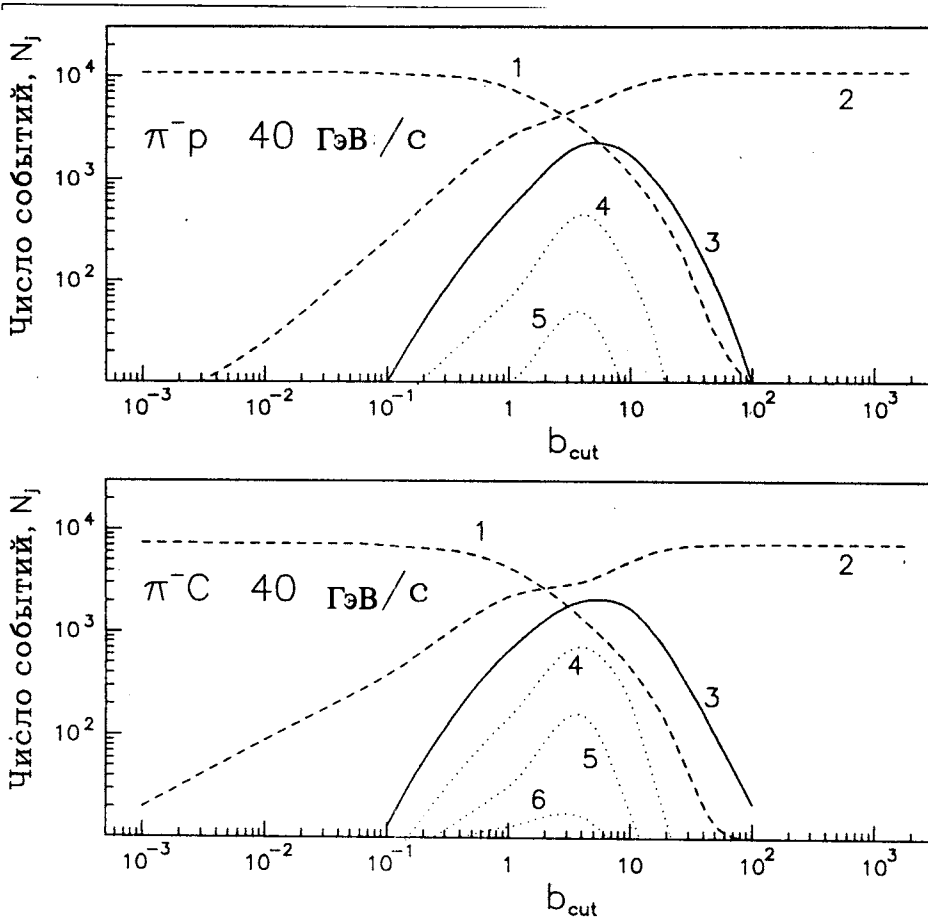


Рис.1. Зависимость числа j -струйных событий от величины параметра обрезания b_{cut} для $\pi^- p$ - и $\pi^- C$ -взаимодействий. Кривая 1 — число бесструйных событий, 2 — число 1-струйных событий, 3 — число 2-струйных событий, 4 — число 3-струйных событий, 5 — число 4-струйных событий, 6 — число событий с пятью пионными струями в конечном состоянии

π^- -мезонов с импульсом 40 ГэВ/с на ускорителе ИФВЭ. Эти данные использовались для исследования процесса формирования прекластеров в рамках различных алгоритмов.

На рис.1—3 показано поведение числа 0, 1, 2, 3 и т.д. струйных событий (далее в тексте j -струйные события) во взаимодействиях $\pi^- p$ и $\pi^- C$, реконструированных с помощью трех упомянутых выше алгоритмов, в зависимости от параметра обрезания алгоритма (далее в тексте — x_{cut}). Как можно видеть, общим свойством приведенных на рисунках кривых является то, что при небольших значениях параметра обрезания

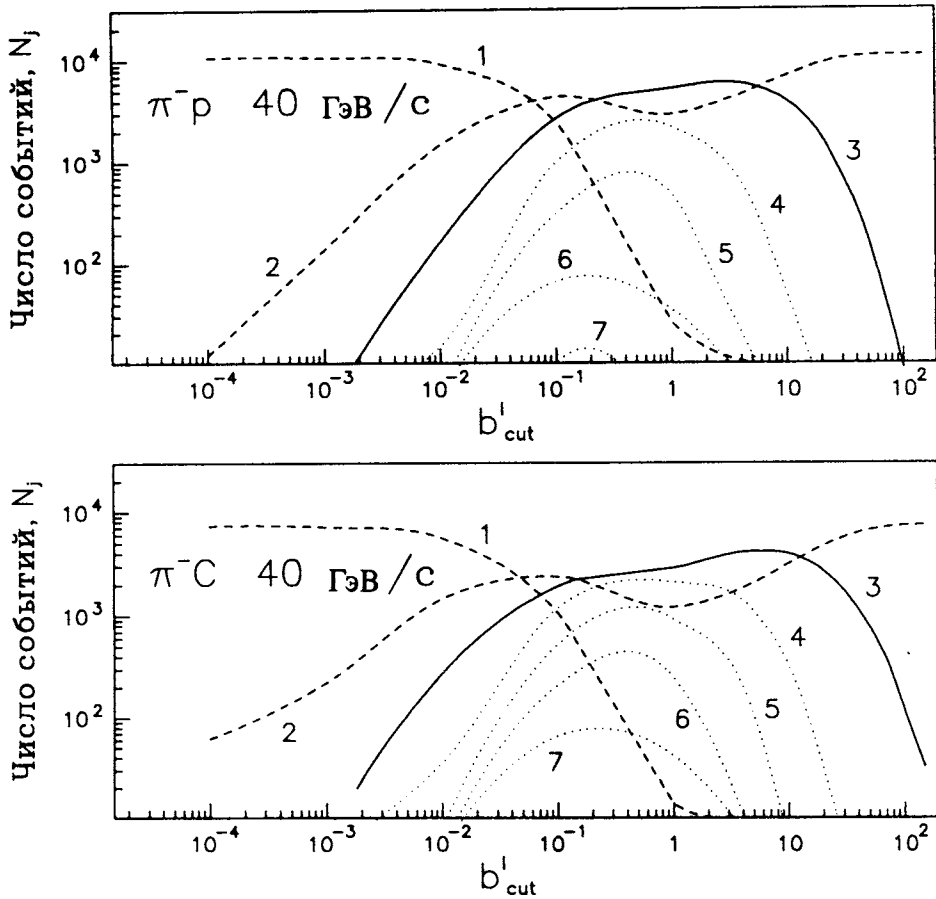


Рис.2. Зависимость числа j -струйных событий от величины параметра обрезания b'_{cut} для $\pi^- p$ - и $\pi^- C$ -взаимодействий. Кривая 1 — число бесструйных событий, 2 — число 1-струйных событий, 3 — число 2-струйных событий, 4 — число 3-струйных событий, 5 — число 4-струйных событий, 6 — число 5-струйных событий и 7 — число событий с шестью пионными струями в конечном состоянии

все события интерпретируются алгоритмом как бесструйные события. Это имеет место, когда значения параметра обрезания x_{cut} меньше, по отношению к рассматриваемой метрике, минимального по всем событиям расстояния между парами частиц из каждого события x_{min} . Когда параметр обрезания становится больше, чем значение x_{min} (т.е. $x_{cut} \geq x_{min}$), появляются первые одноструйные события с двумя частицами в струе. При дальнейшем увеличении параметра обрезания алгоритма x_{cut} число 1-струйных со-

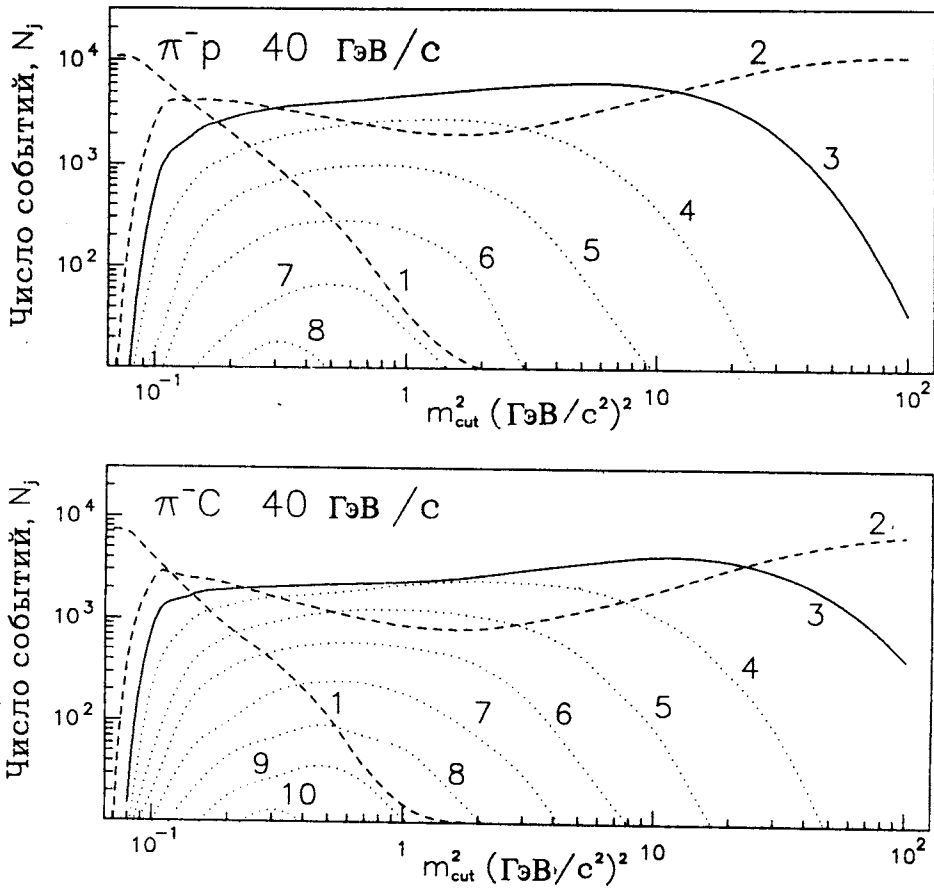


Рис.3. Зависимость числа j -струйных событий от величины параметра обрезания m_{cut}^2 для $\pi^- p$ - и $\pi^- C$ -взаимодействий. Кривая 1 — число бесструйных событий, 2 — число 1-струйных событий, 3 — число 2-струйных событий, 4 — число 3-струйных событий, 5 — число 4-струйных событий, 6 — число 5-струйных событий, 7 — число 6-струйных событий, 8 — число 7-струйных событий, 9 — число 8-струйных событий и 10 — число событий с девятью пионными струями в конечном состоянии

бытий увеличивается, появляются 2-струйные, 3-струйные и т.д. события и одновременно происходит уменьшение числа бесструйных событий. Все j -струйные распределения, кроме 0- и 1-струйных достигают своего максимума при определенных значениях параметра обрезания x_{cut} . При значении $x_{cut}^{(2)}$ последним своего максимума достигает число 2-струйных событий. При дальнейшем увеличении значения параметра

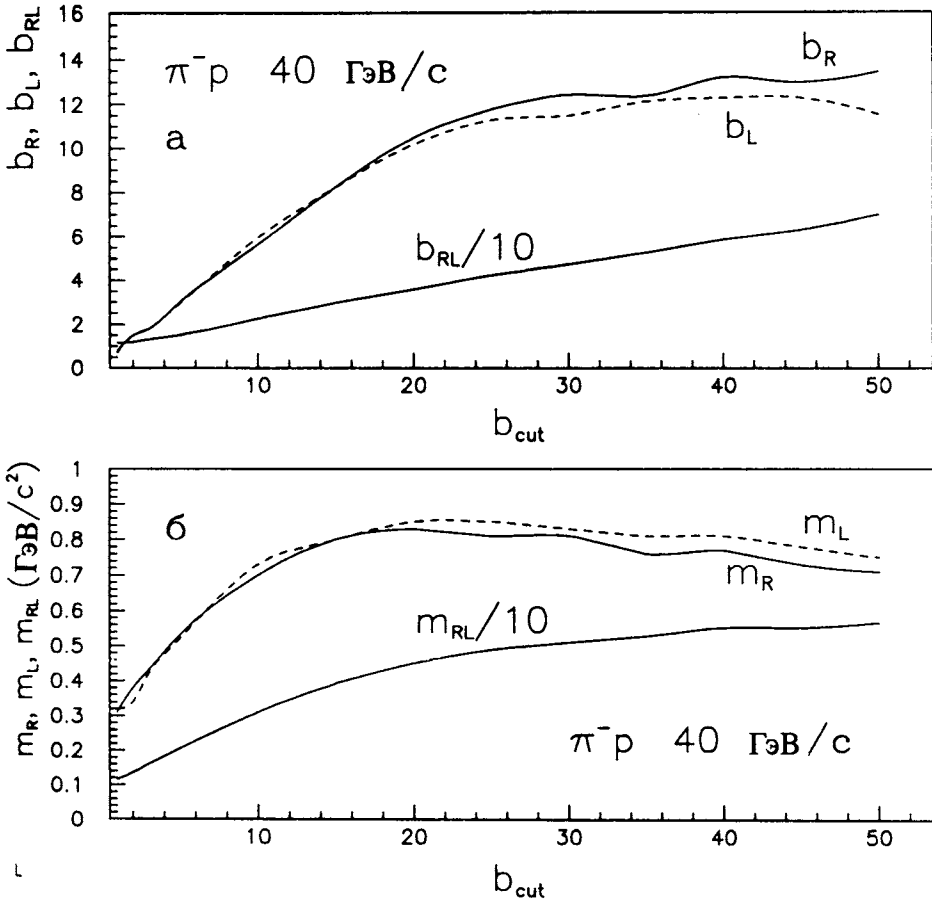


Рис.4. Зависимость характеристик правой (R) и левой (L) струй в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом, от параметра обрезания b_{cut} : а — размеры правой (R) и левой (L) струй b_R и b_L и расстояние между R - и L -струями b_{RL} в пространстве скоростей (значения b_{RL} уменьшены в 10 раз); б — массы правой (R) и левой (L) струй m_R и m_L и эффективная масса m_{RL} 2-струйной системы (значения m_{RL} уменьшены в 10 раз)

x_{cut} две струи в 2-струйных событиях начинают рекомбинировать в одну струю и, при очень больших значениях параметра обрезания, все события интерпретируются алгоритмом как 1-струйные события. Таким образом, имеем: $N_0 \rightarrow N_{tot}$ при $x_{cut} \rightarrow 0$ и $N_1 \rightarrow N_{tot}$ при $x_{cut} \rightarrow \infty$, где N_0 , N_1 и N_{tot} — число бесструйных, 1-струйных событий и число всех событий соответственно.

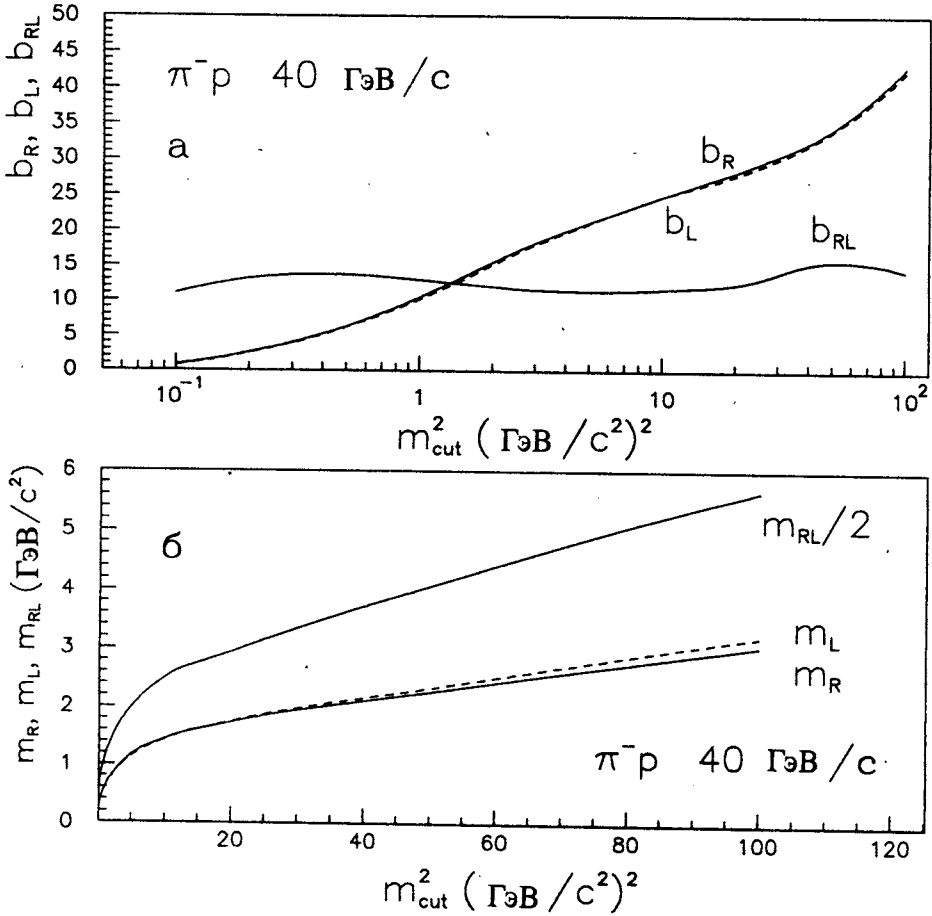


Рис.5. Зависимость характеристик правой (R) и левой (L) струй в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом JADE, в зависимости от параметра обрезания m_{cut}^2 : а — размеры правой (R) и левой (L) струй b_R и b_L и расстояние между R - и L - струями b_{RL} в пространстве скоростей; б — массы правой (R) и левой (L) струй m_R и m_L и эффективная масса m_{RL} 2-струйной системы (значения m_{RL} уменьшены в 2 раза)

Такое «сканирование» глобальной топологической структуры конечного многоадронного (многопионного) состояния по параметру обрезания алгоритма позволяет определить характерную топологию конечного адронного состояния. Например, представленные на рис.1—3 зависимости числа j -струйных событий (N_j) от значения параметра обрезания характерны для мягких адрон-адронных, адрон-ядерных и ядро-ядерных взаимодействий без образования жестких струй (только два потока частиц или две спектаторные, мягкие струи), а также для e^+e^- -аннигиляций в две струи адронов. Топо-

логия всех перечисленных процессов относится к типу, где имеются два потока частиц, летящих вперед — назад в системе центра взаимодействия.

Несмотря на общий характер поведения числа событий с j -струями в зависимости от параметра обрезания x_{cut} для различных алгоритмов, эти зависимости существенно различны как для рассмотренных нами алгоритмов, так и для π^-p - и π^-C -взаимодействий. Ниже мы остановимся на тех различиях, которые связаны с работой JADE- и B-алгоритмов и которые имеют место при анализе экспериментальных данных по π^-p -взаимодействиям при 40 ГэВ/с.

Рассмотрим свойства спекторных струй в событиях с двумя струями, выделенных B-алгоритмом и алгоритмом JADE. На рис. 4а и 5а представлены зависимости средних размеров правой (R) и левой (L) струй, реконструированных с помощью B- и JADE-алгоритмов, а также показано изменение расстояния между этими струями b_{RL} в пространстве скоростей от параметра обрезания b_{cut} и m_{cut}^2 , соответственно. Зависимость масс правой (R) и левой (L) струй и эффективной массы m_{RL} 2-струйной системы от параметров b_{cut} и m_{cut}^2 представлена, соответственно для B-алгоритма и алгоритма JADE, на рис. 4б и 5б.

Характерной особенностью результатов, представленных на этих рисунках, является то, что начиная со значения $b_{\text{cut}} \simeq 20 + 30$ величины b_R , b_L и m_R , m_L выходят на некоторые постоянные значения, т.е. не зависят от значения параметра b_{cut} при $b_{\text{cut}} > 20 + 30$. При этом имеем: b_R , $b_L \simeq 10 + 12$ единиц, а m_R , $m_L \simeq (0,7 + 0,8)$ ГэВ/с². Заметим, что в этом случае расстояние между R- и L-струями в пространстве скоростей будет $b_{RL} \geq 30 + 40$, т.е. $b_{RL} \gg b_R \simeq b_L$ и, следовательно, в рамках B-алгоритма, в пространстве скоростей имеем две хорошо разделенные спекторные (или мягкие) струи. В противоположность этому две струи R и L, выделенные в рамках алгоритма JADE, довольно сильно перекрыты в пространстве скоростей, так как расстояние между струями $b_{RL} \simeq 10 + 15$ практически не зависит от значения параметра обрезания m_{cut}^2 и, начиная с $m_{\text{cut}}^2 > (1,5 + 2)$ ГэВ²/с⁴, становится меньше размеров самих струй $b_R \simeq b_L > b_{RL}$ (см. рис.5). При значениях $m_{\text{cut}}^2 < 1,0$ ГэВ²/с⁴ имеем $b_{RL} > b_R \simeq b_L$, и можно было бы ожидать две хорошо разделенные струи при этих значениях параметра обрезания в рамках алгоритма JADE. Однако, как будет показано далее, условие $b_{RL} > b_R \simeq b_L$ является необходимым, но недостаточным для разделения двух струй R и L в фазовом пространстве. Другими словами, струи, полностью разделенные в пространстве скоростей, могут быть неразделенными в фазовом пространстве частиц, из которых состоят эти струи.

Введем следующие критерии для определения параметра обрезания x_{cut} бинарного алгоритма, при котором имеет место разделяемость струй как в пространстве скоростей, так и в обычном фазовом пространстве. При анализе экспериментальных данных

с двумя спектаторными струями критерии для определения параметра обрезания x_{cut} алгоритма имеют следующий вид:

$$\text{Критерий А: } \frac{N_3}{N_2} < 0,01—0,03, \quad (19)$$

где N_2 и N_3 — число событий с двумя и тремя струями, соответственно. Критерий А является простым отражением того факта, что во взаимодействиях, где не ожидается третья жесткая струя число N_3 3-струйных событий не должно быть больше статистически ожидаемого фона, что для нашего случая, π^-p -взаимодействия при 40 ГэВ/с, составляет 1 + 3 %.

$$\text{Критерий Б: } \frac{b_{RL}}{b_R + b_L} > 1. \quad (20)$$

Критерий Б требует, чтобы расстояние между струями R и L было больше суммы размеров обеих струй, что означает разделенность двух струй в пространстве скоростей.

В рамках *JADE*-алгоритма критерий А удовлетворяется при значениях параметра обрезания $m_{\text{cut}}^2 \geq 20 \text{ ГэВ}^2/c^4$ (рис.3), а для *B*-алгоритма критерий А удовлетворяется при $b_{\text{cut}} \geq 20$. Критерий Б может быть удовлетворен в рамках *JADE*-алгоритма при $m_{\text{cut}}^2 \leq 0,4 \text{ ГэВ}^2/c^4$, а для *B*-алгоритма практически при всех значениях параметра b_{cut} имеем: $b_{RL} > b_R + b_L$. Требование одновременного выполнения обоих критериев А и Б дает следующие результаты: для алгоритма *JADE* ни при каких значениях параметра m_{cut}^2 не может быть одновременного удовлетворения критерием А и Б, а для *B*-алгоритма находим: $b_{\text{cut}} \geq 20 \div 30$.

Таким образом, в рамках алгоритма *JADE* не могут быть получены струи, разделенные как в пространстве скоростей, так и в фазовом пространстве. В отличие от этого, новый *B*-алгоритм при значениях параметра $b_{\text{cut}} \geq 20 + 30$ позволяет выделить две спектаторные струи, которые хорошо разделены как в пространстве скоростей, так и в фазовом пространстве π^\pm -мезонов, образующих эти струи. Необходимо отметить, что при $b_{\text{cut}} \geq 20 + 30$ происходит стабилизация размеров самих струй в пространстве скоростей $b_R \simeq b_L \simeq 10 + 12$, а их массы $m_R \simeq m_L \simeq 0,7 + 0,8 \text{ ГэВ}/c^2$ становятся независимыми от значения параметра обрезания b_{cut} (см.рис.4).

Совпадение массы m_R правой и m_L левой струй $m_R \simeq m_L \simeq 0,7 + 0,8 \text{ ГэВ}/c^2$ с массой ρ -мезона $m_\rho = 0,77 \text{ ГэВ}/c^2$ не означает, что эти струи состоят из двух противополо-

π^-p , 40 ГэВ/с ($N_2 = 689$ соб., $b_{\text{cut}} = 20$)

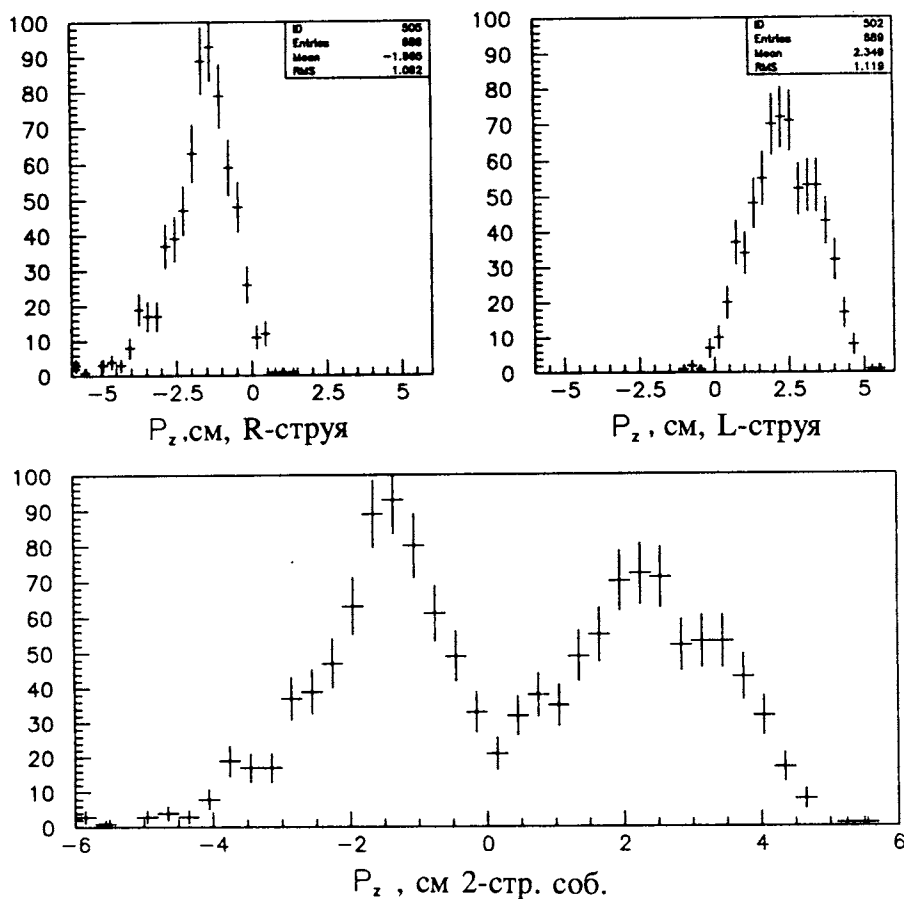


Рис.6. Распределения по продольным импульсам P_z правой (R) и левой (L) струй, в системе центра масс π^-p -взаимодействий, в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом при значении параметра обрезания $b_{\text{cut}} = 20$

ложно заряженных π -мезонов, так как π^+ - и π^- -мезоны от распада ρ^0 -мезона находятся на расстоянии $b_\rho = (m_\rho/m_\pi)^2 - 4 = 26,3$ в пространстве скоростей, что более чем в два раза больше величин $b_R \approx 10 + 12$ и $b_L \approx 10 + 12$. Можно, однако, ожидать, что заметное число R - и L -струй будут представлять собой ρ^0 -мезоны. В этом случае предложенный здесь B -алгоритм может быть также рассмотрен как инструмент для поиска резонансных состояний в системах из двух адронов.

π^-p , 40 ГэВ / с ($N_2 = 3623$ соб., $m_{cut}^2 = 20$ ГэВ²/с⁴)

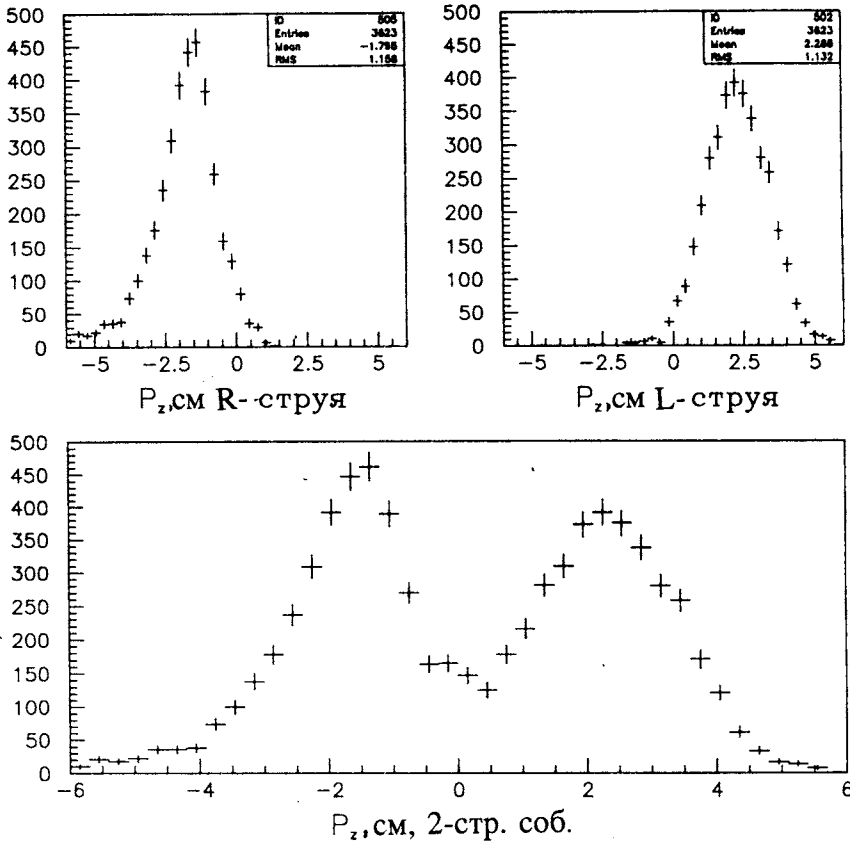


Рис.7. Распределения по продольным импульсам P_z правой (R) и левой (L) струй, в системе центра масс π^-p -взаимодействий, в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом JADE при значении параметра обрезания $m_{cut}^2 = 20$ (ГэВ/с²)²

Заметим, что размеры R- и L-струй в пространстве скоростей, полученные B-алгоритмом $b_R \approx b_L \approx 10 + 12$, связаны с величиной b_k [6], которая определяется как среднее расстояние в пространстве скоростей между центром струи и частицами, которые входят в состав струи. Можно показать, что в системе из N-частиц величины b_R , b_L и b_k связаны между собой соотношением

$$b_k = -2 + 2 \sqrt{1 + \left(1 - \frac{1}{N}\right) \frac{b_{R(L)}}{2}}. \quad (21)$$

π^-p , 40 ГэВ/с ($N_2 = 1724$ соб., $b_{\text{cut}} = 10$)

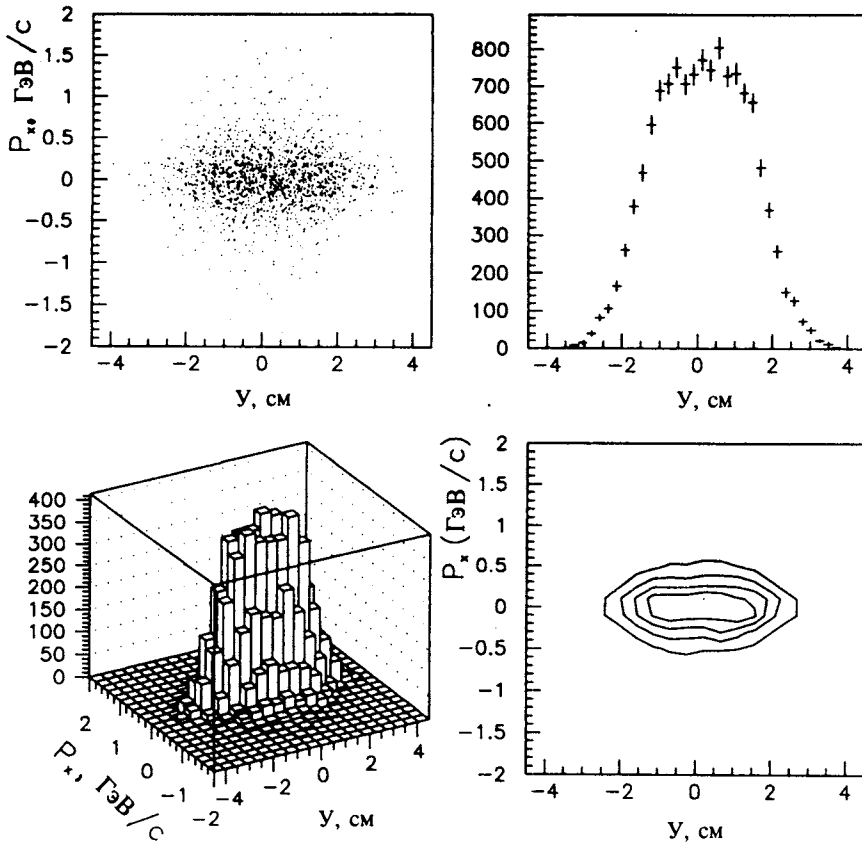


Рис.8. Распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом при значении параметра обрезания $b_{\text{cut}} = 10$, в системе центра масс π^-p -взаимодействия

При $b_{R(L)} \simeq 10-12$, для $N=2,3$ и $N \rightarrow \infty$ имеем: $b_k^{(2)} \simeq 1,7 + 2,0$, $b_k^{(3)} \simeq 2,2 + 2,5$ и $b_k^{(\infty)} \simeq 2,9 + 3,3$, соответственно. Эти значения для $b_k^{(N)}$ согласуются со значением $b_k = 3,68 \pm 0,03$, полученным ранее в [6], на основе другой методики выделения струй.

Перейдем теперь к рассмотрению распределения импульсов самих R - и L - струй в их фазовом пространстве, а также распределения импульсов π^\pm -мезонов, входящих в состав R - и L -струй, в фазовом пространстве π^\pm -мезонов.

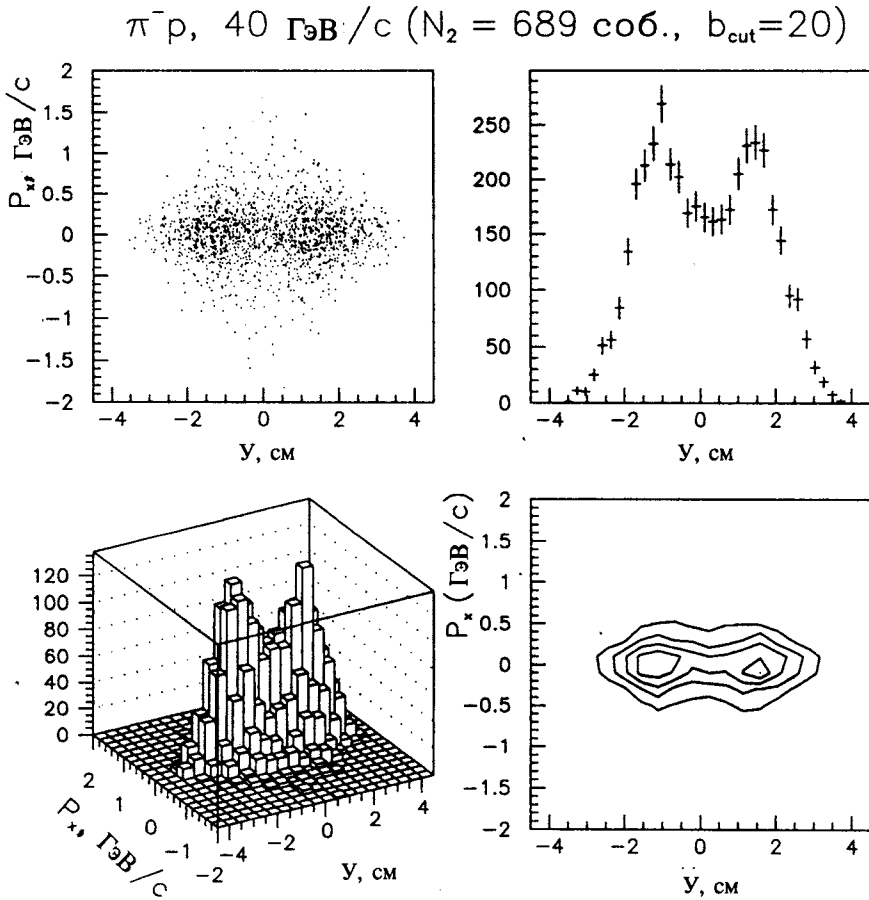


Рис.9. Распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом при значении параметра обрезания $b_{\text{cut}} = 20$, в системе центра масс π^-p -взаимодействия

На рис.6 и 7 представлены распределения продольных импульсов правой (R) и левой (L) струй в 2-струйных событиях из π^-p -взаимодействий, выделенных B - и $JADE$ -алгоритмами, соответственно. Можно видеть, что оба алгоритма выделяют две достаточно хорошо разделенные струи в фазовом пространстве самих струй только при выполнении критерия A , т.е. для B -алгоритма при $b_{\text{cut}} > 20$, а для алгоритма $JADE$ при $m_{\text{cut}}^2 > 20$ (ГэВ/с²)².

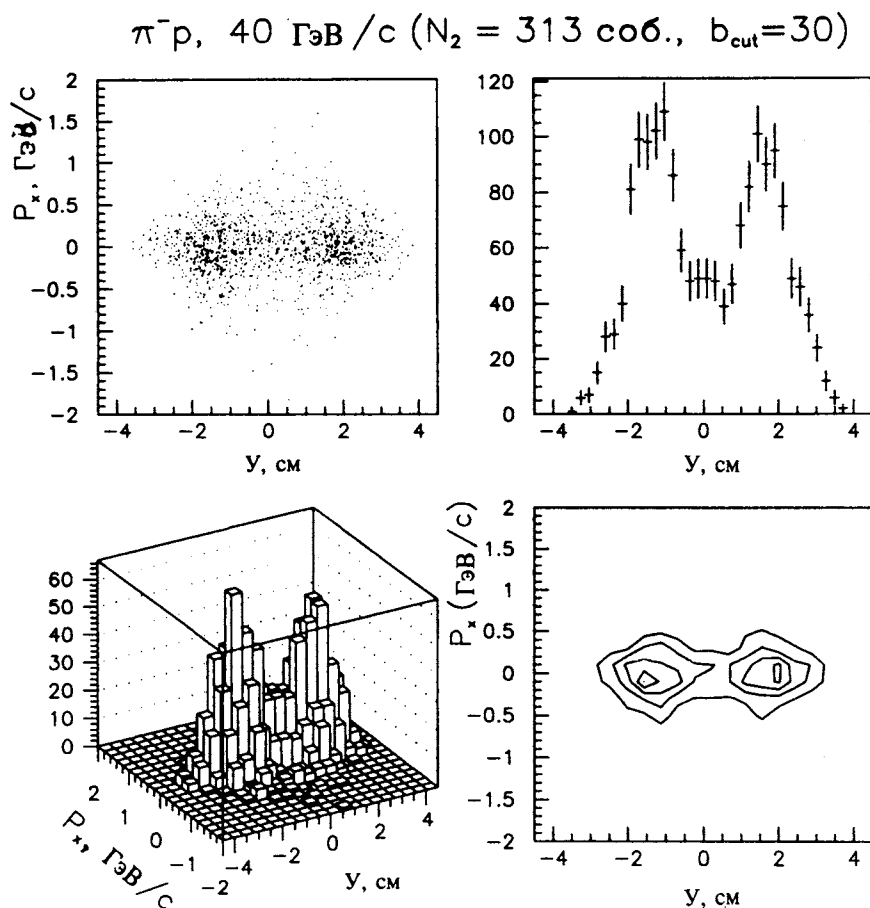


Рис.10. Распределения π^\pm -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом при значении параметра обрезания $b_{\text{cut}} = 30$, в системе центра масс π^-p -взаимодействия

Из полного числа 10743 событий с числом π^\pm -мезонов $N_{\pi^\pm} \geq 4$ с помощью B -алгоритма при значении параметра $b_{\text{cut}} = 20$ выделено 689 2-струйных событий. Остальные события распределены следующим образом: 348 бесструйных событий, 9698 1-струйных событий и 8 событий с тремя струями. На основе $JADE$ -алгоритма при значении параметра $m_{\text{cut}}^2 = 20$ (ГэВ/c²)² выделены 3623 2-струйных события (7090 — 1-струйные события и 30 событий с тремя струями). Результаты, представленные на рис.6—7, показывают, что при указанных значениях параметров обрезания имеет мес-

π^-p , 40 ГэВ/с ($N_2 \cong 91$ соб., $b_{cut}=50$)

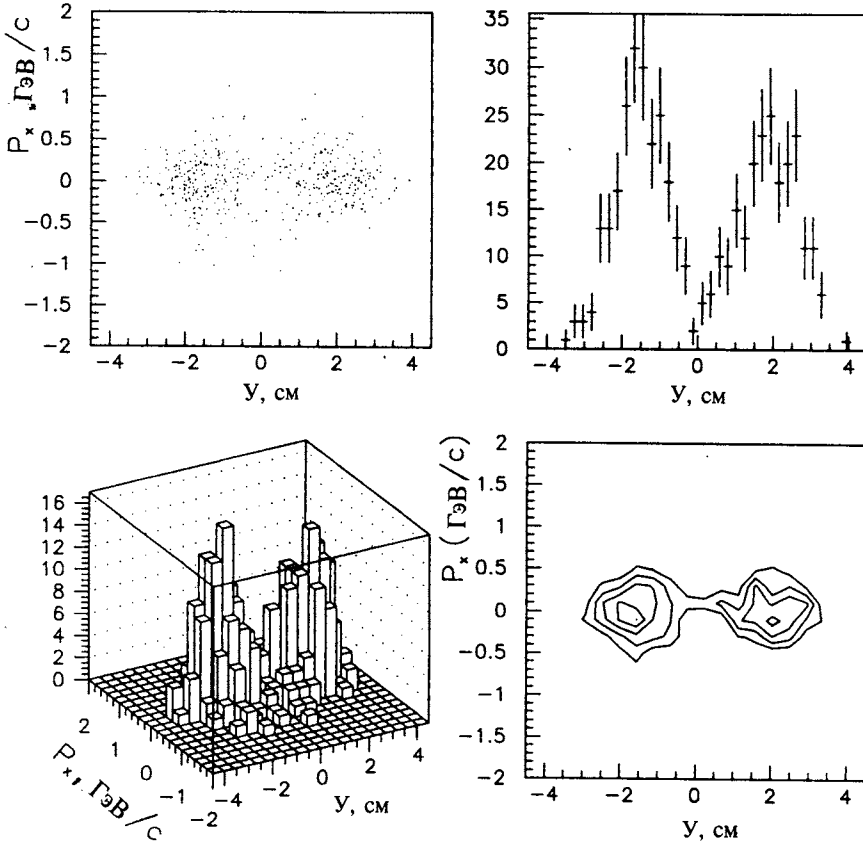


Рис.11. Распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных *B*-алгоритмом при значении параметра обрезания $b_{cut} = 50$, в системе центра масс π^-p -взаимодействия

то достаточно хорошее разделение правой и левой струй. Однако, как было отмечено выше, в рамках алгоритма *JADE* размеры обеих струй в пространстве скоростей больше расстояния между этими же струями в том же пространстве скоростей, т.е. выделенные на основе *JADE*-алгоритма струи сильно перекрываются в пространстве скоростей. Данное характерное различие между алгоритмом *JADE* и предложенным нами *B*-алгоритмом иллюстрируется рисунками 8—14, где представлены распределения π^\pm -мезонов, входящих в выделенные 2-струйные события.

π^-p , 40 ГэВ /с ($N_2 = 3841$ соб., $m_{\text{cut}}^2 = 0.4 \text{ ГэВ}^2/\text{с}^4$)

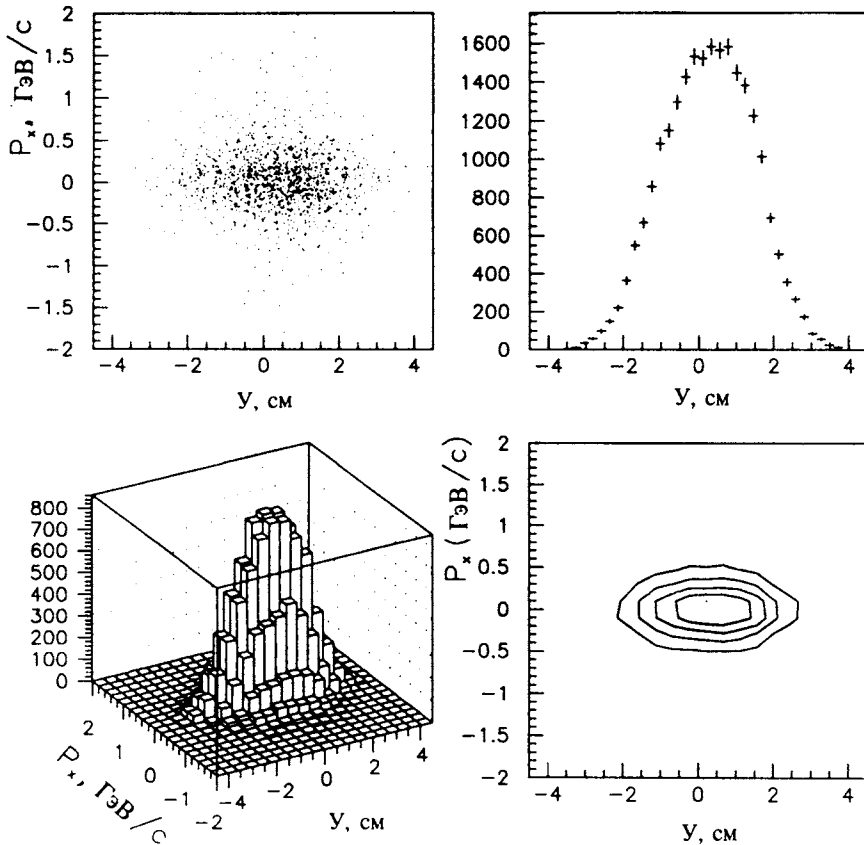


Рис.12. Распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом $JADE$ при значении параметра обрезания $m_{\text{cut}}^2 = 0,4 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$, в системе центра масс π^-p -взаимодействия

На рис. 8—11 показаны распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) и левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных B -алгоритмом при $b_{\text{cut}} = 10, 20, 30$ и 50 соответственно. При значениях $b_{\text{cut}} > 20$ наблюдаются две хорошо разделенные в фазовом пространстве π^+ -мезонов струи. Такое разделение имеет место при одновременном выполнении критериев A и B .

Распределения π^+ -мезонов, входящие в состав R - или L -струи в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом $JADE$ при значениях параметра $m_{\text{cut}}^2 = 0,4 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$,

π^-p , 40 ГэВ/с ($N_2 = 3623$ соб., $m_{cut}^2 = 20$ ГэВ²/с⁴)

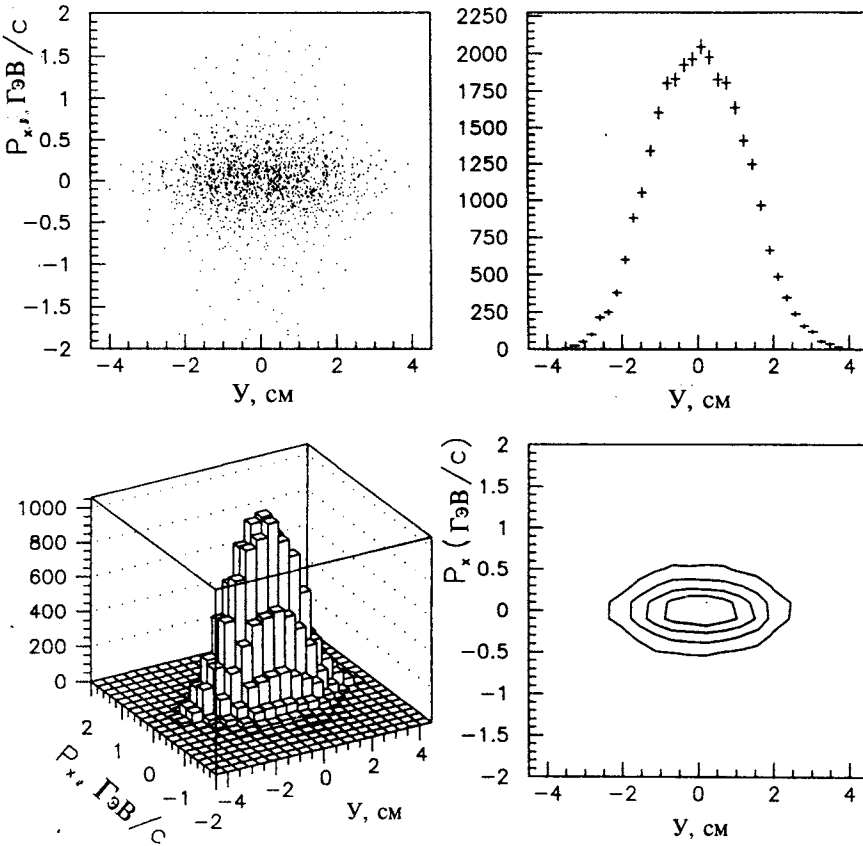


Рис.13. Распределения π^\pm -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом JADE при значении параметра обрезания $m_{cut}^2 = 20$ (ГэВ/с²)², в системе центра масс π^-p -взаимодействия

20 (ГэВ/с²)² и 50 (ГэВ/с²)² представлены на рис.12—14, соответственно. При значении $m_{cut}^2 = 0,4$ (ГэВ/с²)² имеем $N_2 = 3841$ 2-струйных событий ($N_0 = 499$, $N_1 = 3109$, $N_3 = 2114$, $N_4 = 837$, $N_5 = 263$, $N_6 = 65$, $N_7 = 14$ и $N_8 = 1$) и $b_{RL} > b_R + b_L$ (см.рис.5), т.е. выполняется критерий B, но критерий A не выполняется. С другой стороны, при $m_{cut}^2 = 20$ (ГэВ/с²)² и 50 (ГэВ/с²)² имеем $N_3/N_2 < 0,01—0,03$, т.е. условие A выполняется (при $m_{cut}^2 = 50$ (ГэВ/с²)² имеем $N_1 = 10168$, $N_2 = 574$ и $N_3 = 1$), а выполнение критерия B

$\pi^- p$, 40 ГэВ /с ($N_2 = 574$ соб., $m_{\text{cut}}^2 = 50 \text{ ГэВ}^2 / \text{с}^4$)

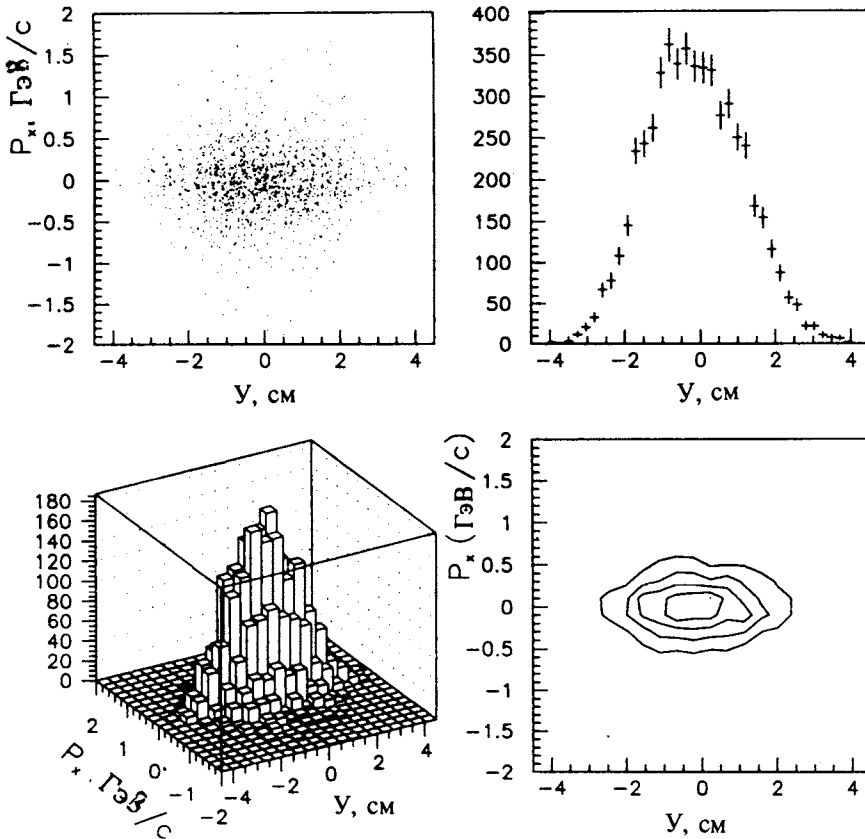


Рис.14. Распределения π^+ -мезонов, входящих в правую (R) или левую (L) струи в 2-струйных событиях, выделенных алгоритмом $JADE$ при значении параметра обрезания $m_{\text{cut}}^2 = 50 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$, в системе центра масс $\pi^- p$ -взаимодействия

не имеет места. Из результатов, представленных на рис.12—14, следует, что ни при значении $m_{\text{cut}}^2 = 0,4 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$, ни при значениях $m_{\text{cut}}^2 = 20 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$ и $50 \text{ (ГэВ/с}^2\text{)}^2$ две струи из π^+ -мезонов не могут быть разделены в фазовом пространстве π^+ -мезонов. Следовательно, две R - и L -струи, выделенные алгоритмом $JADE$ и хорошо разделенные в фазовом пространстве самих струй, оказываются сильно перекрытыми в фазовом пространстве π^+ -мезонов, из которых состоят эти струи.

Таким образом, мы наблюдаем существенную разницу между алгоритмом *JADE* и предложенным нами новым *B*-алгоритмом. Эти различия, как нам представляется, являются следствием того, что величины b_{ik} более правильно отражают структуру матричного элемента в мягких процессах множественного рождения частиц. Другими словами, близкие в пространстве скоростей частицы i и k будут «близки» друг к другу или связаны друг с другом вследствие динамики множественного рождения, т.к. радиальная быстрота между частицами i и k небольшая. В отличие от этого близкие по отношению к метрике m_{ik}^2 частицы i и k могут быть совершенно не связаны друг с другом или «далеки» друг от друга по динамике их образования. Таким образом, частицы i и k , будучи совершенно не связанными по динамике их рождения, могут оказаться в одной струе, если пользоваться алгоритмом *JADE*.

4. Заключение

Перечислим основные результаты, полученные в настоящей работе на основе анализа экспериментальных данных по π^-p - и π^-C -взаимодействиям при 40 ГэВ/с.

1. Предложен новый *B*-алгоритм для реконструкции адронных струй, в котором используются переменные b_{ik} как мера расстояния между частицами — прекластерами i и k в пространстве скоростей.

2. Сформулированы критерии *A* и *B* для определения параметра обрезания *B*-алгоритма b_{cut} , одновременное выполнение которых гарантирует разделяемость струй как в пространстве скоростей, так и в фазовом пространстве частиц, образующих струи.

3. Выделены две спектаторные, или мягкие, *R*- и *L*-струи в π^-p -взаимодействиях при 40 ГэВ/с и определены размеры этих струй $b_R \simeq b_L \simeq 10 + 12$ и их массы $m_R, m_L \simeq 0,7 + 0,8$ ГэВ/с².

4. Показано, что в отличие от известного *JADE*-алгоритма, правая (*R*) и левая (*L*) струи, выделяемые на основе *B*-алгоритма, хорошо разделены как в пространстве скоростей, так и в фазовом пространстве π^\pm -мезонов, образующих эти струи.

Нам приятно поблагодарить интеранциональный коллектив 2 м пропановой камеры за предоставление экспериментального материала и полезные обсуждения.

Литература

1. Bartel W. et al. — Z.Phys., 1986, C33, p.23.
2. Bethke S. et al. — Phys.Lett., 1988, 213B, p.235.
3. Sjostrand T. — LU TP 95—20, 1995; CERN — TH. 7112/93, 1993.

4. Baldin A.M. — Nucl.Phys., 1985, A434, p.695.
5. Ангелов Н., Любимов В.Б., Тогоо Р. — Ядерная физика, 1991, т.54, вып.5(11), с.1316.
6. Балдин А.М. и др. — Ядерная физика, 1988, т.48, вып.4(10), с.995.