

объединенный
институт
ядерных
исследований

дубна

A-674

14/2-79
P2 - 12154

В.В.Анисович, Ю.Нири

1761/2-79

РОЖДЕНИЕ АДРОНОВ

В КВАРКОВОЙ КОМБИНАТОРИКЕ

С ЦВЕТНЫМИ КВАРКАМИ

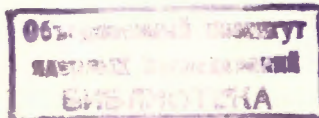
1979

P2 - 12154

В.В.Анисович,^{*} Ю.Нири

РОЖДЕНИЕ АДРОНОВ
В КВАРКОВОЙ КОМБИНАТОРИКЕ
С ЦВЕТНЫМИ КВАРКАМИ

Направлено в ЯФ



* Ленинградский институт ядерной физики
им. Б.П.Константинова.

Анисович В.В., Нири Ю.

P2 -12154

Рождение адронов в кварковой комбинаторике с цветными кварками

Рассматривается влияние цветовых корреляций кварков при образовании адронов на отношение выходов мезонов, барионов и антибарионов $M:B:\bar{B}$ в процессах множественного рождения. Показано, что в случае, когда барионное число кварка проявляет себя как вероятность рождения этим кварком барионного состояния, соотношение $M:B:\bar{B}$ в центральной области слабо зависит от цветовых корреляций и близко к значению, полученному ранее ^{/1/} без учета цветовых состояний кварков.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики ОЯИИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Anisovich V.V., Nyiri J.

P2 - 12154

Hadron Production in Quark Combination with Colours

The effect of the quark colour correlations on the ratio of mesons, baryons and antibaryons $M:B:\bar{B}$ is considered in the multiparticle production processes. It is shown that if the quark baryon number appears as the probability of the production of baryon states by this quark, then the ratio of $M:B:\bar{B}$ in the central region depends only slightly on the colour correlations and its value is near to that which was obtained in ^{/1/} without considering the colour.

The investigation has been performed at the Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

1. ВВЕДЕНИЕ

Кварковый комбинаторный счет, предложенный в работах ^{/1,2/}, определяет соотношения между выходами частиц в процессах множественного рождения. Предсказания кварковой комбинаторики качественно - а при больших энергиях, по-видимому, и количественно ^{/3/} - согласуются с экспериментальными данными. /Более подробно изложение экспериментальной ситуации можно найти в обзорах ^{/4,5/}/. Характерное свойство этого счета заключается в том, что он дает соотношения не только между различными мезонами или различными барионами, но и между мезонами и барионами. Отношение выходов мезонов и барионов - результат кваркового комбинаторного счета, который нельзя получить в рамках симметрий. Здесь имеется два основных положения, относящихся к центральной и фрагментационной областям процессов множественного рождения соответственно.

Для центральной области, где в адроны объединяются только кварки моря, комбинаторный счет ^{/1/} дает следующее отношение выходов мезонов M , барионов B и антибарионов \bar{B} :

$$M : B : \bar{B} = 6 : 1 : 1.$$

/1/

В фрагментационной области, когда кварк с выделенными квантовыми числами q' объединяется с морем кварк-антикварковых пар, барионное число этого кварка проявляется как вероятность рождения этим кварком барионного состояния ^{/6/}. Именно:

$q' + \text{море } q, \bar{q} \rightarrow$

$$\frac{1}{3} B' + \frac{2}{3} M' + \text{ море адронов,} \quad /2/$$

где $B' = q'qq$ и $M' = q'\bar{q}$.

Следует, однако, подчеркнуть, что результаты /1/ и /2/ получены без учета цветовых степеней свободы /7-9/ кварков. Если придерживаться точки зрения, что кварки цветные - а на это к настоящему времени имеется весьма много указаний, - то методика рассмотрения множественных рождений, приведенная в работах /1,3/, означает следующее. Фактически делается предположение о больших цветовых корреляциях между кварками в процессе объединения их в адроны и считается, что эти корреляции автоматически обеспечивают цветовую комбинацию, необходимую для рождения белых состояний. Поясним это предположение подробнее. Родившиеся в некотором процессе взаимодействия кварки будем характеризовать величиной их быстроты. В адроны объединяются кварки со сравнительно малыми относительными импульсами, т.е. соседи по оси быстрот. Море кварков состоит из кварков и антикварков с сопряженными квантовыми числами. В кварковой комбинаторике принимается, что кварки и антикварки с сопряженными квантовыми числами расходятся вдоль оси быстрот достаточно далеко, так что близкими соседями /которые, как говорилось выше, и объединяются в адроны/ оказываются "случайные" кварки, квантовые числа которых не скоррелированы. Гипотеза об объединении случайных кварков друг с другом с равной вероятностью, независимо от их квантовых чисел, и дает результаты кварковой комбинаторики. Если при этом не учитываются цветовые состояния кварков, то это означает на самом деле следующее дополнительное предположение: кварки-соседи, объединяющиеся в адроны, автоматически имеют подходящие цвета, так что вся эта группа кварков оказывается белой. Таким образом, согласно методике работ /1,2/ кварки внутри малых белых доменов, расположенных вдоль оси быстрот, как раз и есть отдельные адронные состояния. Остальные же квантовые числа кварков внутри этих доменов - случайны. Такое

предположение о сильных цветовых корреляциях между ближайшими соседями по оси быстрот может не являться, конечно, обязательным условием рождения адронных состояний. Представляет поэтому интерес понять, к чему приведет отсутствие цветовых корреляций. В настоящей работе мы рассмотрим именно такой случай, прямо противоположный предположению работ /1,2/. Мы исходим из гипотезы, что соседями по оси быстрот, имеющими возможность объединяться в адроны, являются кварки или антикварки с некоррелированными /"случайными"/ цветами. Оказывается, что в этом случае соотношение между числом барионов и мезонов не определяется однозначно ни в центральной, ни в фрагментационной областях, а является функцией некоторого параметра, характеризующего процесс диффундирования кварков вдоль оси быстрот и их слияния в адроны. В зависимости от этого параметра соотношения /1/ и /2/ могут меняться в весьма широких пределах. Однако если принять, что барионное число кварка и в этом случае проявляется в виде вероятности рождения барионных состояний, т.е. выполняется соотношение /2/, то выход мезонов и барионов в центральной области /аналог формулы /1// происходит в определенных пропорциях, а именно: $M : B : \bar{B} \approx 5,2 : 1 : 1$. Таким образом, если исходить из правила $q' \rightarrow \frac{1}{3} B' + \frac{2}{3} M'$, то отношения выходов мезонов и барионов в центральной области слабо зависят от того, учитываются ли сильные цветовые корреляции или нет.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ РОЖДЕНИЯ АДРОННЫХ СОСТОЯНИЙ В СЛУЧАЕ НЕКОРРЕЛИРОВАННЫХ ЦВЕТОВ КВАРКОВ

Основное свойство переходов кварков в адроны в случае некоррелированных цветов заключается в том, что на малом отрезке оси быстрот /внутри которого кварки и объединяются в адроны/ оказывается мало белых состояний. Действительно, в системе из девяти состояний белым является только одно: синглет по цвету $\frac{1}{\sqrt{3}} q_i \bar{q}_i$

/индекс $i=1,2,3$ означает цвет состояния/. В этой системе есть еще два состояния без цветного заряда, но они принадлежат цветному мультиплету и потому не истинно белые. В системе трех кварков qqq из 27 состояний белое - одно: полностью антисимметричное состояние по цветовым индексам $\frac{1}{\sqrt{6}} \epsilon_{ijk} q_i q_j q_k$. Малая относительная ве-

роятность перехода в белые состояния является причиной того, что образовавшиеся в процессе взаимодействия кварки могут перейти в адроны не сразу, а лишь в течение многих этапов. В адроны объединяются только белые состояния кварков, а кварки, не нашедшие себе подходящей пары внутри малых доменов, будут, взаимодействуя друг с другом, диффундировать вдоль оси быстрот. Только после многих "столкновений" друг с другом на оси быстрот эти кварки найдут себе партнеров для образования белых состояний.

Другая отличительная особенность комбинаторики в случае нескоррелированных цветов кварков - образование антисимметричных состояний по цвету кварков /дикварков/. В самом деле, два "столкнувшихся" кварка могут перейти в антисимметричное состояние $\frac{1}{\sqrt{2}} \epsilon_{ijk} q_j q_k$

/в дальнейшем такие состояния будем обозначать через $(\hat{q}\hat{q})_i$ /. Но затем это состояние может и не найти внутри малого домена подходящего себе кварка для перехода в барион. Конечно, такие антисимметричные состояния, являющиеся по существу частью реальных барионов, выделены среди других состояний пар кварков. Поэтому должны существовать некоторые силы, удерживающие дикварки в "связанном" состоянии, и эти дикварки также будут диффундировать вдоль оси быстрот.

Как говорилось выше, переход кварков в адроны в случае нескоррелированных цветов есть результат многих повторных "столкновений". Поэтому можно считать, что в процессе "столкновений" кварков и диффундирования их вдоль оси быстрот установится некоторое равновесие между числом кварков и дикварков. Поэтому при расчетах мы будем предполагать, что вероятности обнаружить в море кварк, антикварк, дикварк или антидикварк определяются некоторыми постоянными числами. Условия, оп-

ределяющие пропорции между числом кварков /антикварков/ и дикварков /антидикварков/ в море, можно найти следующим образом. Пусть после установления равновесия между числом кварков и дикварков в море вероятность обнаружить дикварк или антидикварк равна a , кварк или антикварк - $1-a$:

$$(1-a)\frac{1}{2}(q+\bar{q}) + a\frac{1}{2}(\hat{q}\hat{q} + \hat{\bar{q}}\hat{\bar{q}}). \quad /3/$$

Здесь для краткости мы опускаем цветовые индексы кварков. На самом деле следует иметь в виду, что

$$q = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 q_i \quad \text{и} \quad \hat{q}\hat{q} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 (\hat{q}\hat{q})_i.$$

Условие равновесия заключается в том, что при столкновении двух систем типа /3/ образуются адроны и состояния кварков и дикварков в той же пропорции, что и в /3/. Именно:

$$\left[\frac{1-a}{2}(q+\bar{q}) + \frac{a}{2}(\hat{q}\hat{q} + \hat{\bar{q}}\hat{\bar{q}}) \right] \left[\frac{1-a}{2}(q+\bar{q}) + \frac{a}{2}(\hat{q}\hat{q} + \hat{\bar{q}}\hat{\bar{q}}) \right] \rightarrow$$

$$\rightarrow \text{адроны} + a\frac{1}{2}(q+\bar{q}) + b\frac{1}{2}(\hat{q}\hat{q} + \hat{\bar{q}}\hat{\bar{q}}), \quad /4/$$

причем

$$\frac{b}{a} = \frac{a}{1-a}. \quad /5/$$

В дальнейшем мы будем считать, что в адроны объединяются только ближайшие соседи. Такое предположение не меняет, конечно, результат /поскольку является, скорее, определением понятия "сосед" / и сильно упрощает вычисления. Далее, предположим, что дикварки не образуют постоянно связанной системы, а будут с некоторой вероятностью χ диссоциировать на составные кварки.

Итак, если ближайшими соседями окажется пара кварков, то дикварк $\hat{q}\hat{q}$ образуется с вероятностью $\frac{1}{3}$:

$$qq \rightarrow \frac{1}{3} \hat{q}\hat{q} + \frac{2}{3} q \cdot q. \quad /6/$$

Здесь через $q \cdot \bar{q}$ мы обозначим состояния пары кварков, не образующей дикварка. Если ближайшие соседи - кварк и антикварк, то

$$q\bar{q} \rightarrow \frac{1}{9}M + \frac{8}{9}q \cdot \bar{q}, \quad /7/$$

где M - мезон /белое состояние $q\bar{q}$ /. При "столкновении" дикварка qq с кварком q барионное состояние B образуется с вероятностью $\frac{1}{9}$:

$$\hat{q}q \rightarrow \frac{1}{9}B + \frac{8}{9}\hat{q}q \cdot q. \quad /8/$$

Аналогично

$$\hat{q}q\bar{q} \rightarrow \frac{1}{9}M \cdot q + \frac{8}{9}\hat{q}q \cdot \bar{q}. \quad /9/$$

При столкновении двух дикварков или дикварка и антидикварка возникают следующие состояния:

$$\hat{q}q \hat{q}q \rightarrow \frac{2}{3}B \cdot q + \frac{7}{9}\hat{q}q \cdot \hat{q}q, \quad /10/$$

$$\hat{q}q \hat{q}\bar{q} \rightarrow \frac{1}{9}q \cdot M \cdot \bar{q} + \frac{8}{9}\hat{q}q \cdot \hat{q}\bar{q}. \quad /11/$$

При получении формул /10/ и /11/ было использовано то обстоятельство, что белые состояния согласно нашему предположению образуются только ближайшими соседями.

Соотношения /8/-/11/ приводят к следующему результату:

$$\begin{aligned} & \left[\frac{1-a}{2}(q+\bar{q}) + \frac{a}{2}(\hat{q}q + \hat{q}\bar{q}) \right] \left[\frac{1-a}{2}(q+\bar{q}) + \frac{a}{2}(\hat{q}q + \hat{q}\bar{q}) \right] \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{2}(q+\bar{q}) \frac{1}{9}(-a^2 - 11a + 14) + \frac{1}{2}(\hat{q}q + \hat{q}\bar{q}) \frac{1}{18}(a^2 + 26a + 3) + \\ & + \frac{1}{18}M + \frac{a}{18}B + \frac{a}{18}\bar{B}. \quad /12/ \end{aligned}$$

Поясним выкладку /12/ на примере одного из слагаемых. В левой части /12/ есть, например, выражение

$\frac{1}{4}(1-a)a(q\hat{q}\bar{q} + \hat{q}q\bar{q})$. Эта система порождает $\frac{1}{18}(1-a)a$ ба-

рионов. Вклад этой же системы в состояния q или \bar{q} равен $\frac{4}{9}(1-a)a$.

Итак, правая часть /12/ дает нам в результате одного "столкновения" кварков и дикварков вероятность рождения мезона $1/18$ и бариона - $1/18a$. Вероятности рождения кварков и дикварков не определяются коэффициентами $\frac{1}{18}(-a^2 - 11a + 14)$ и $\frac{1}{36}(a^2 + 26a + 3)$. Как уже говорилось выше, следует учитывать вероятность диссоциации дикварка на составные кварки. Таким образом, среднее число кварков и дикварков после однократного "столкновения" есть

$$\frac{1}{9}[14 - 11a - a^2 + X(3 + 26a + a^2)] = a \quad /13/$$

и

$$\frac{1}{18}(1-X)(3 + 26a + a^2) = b. \quad /14/$$

Если ввести коэффициент k так, чтобы $a = k(1-a)$ и $b = ka$ /как это требует условие /5//, то соотношения /13/ и /14/ определяют k и X через параметр a :

$$k = \frac{1}{9} \left(15 + \frac{2}{1+a} \right), \quad /15/$$

$$X = \frac{3 - 5a - 3a^2 + a^3}{3 + 29a + 27a^2 + a^3}. \quad /16/$$

Число барионов /антибарионов/ и мезонов в море /в центральной области/ определяется соотношением /12/:

$$\frac{B}{M} = a, \quad \frac{\bar{B}}{M} = a. \quad /17/$$

Это означает, что отношение барионов /антибарионов/ и мезонов равно вероятности обнаружить в море дикварк /или антидикварк/ и в зависимости от a может меняться от 0 до 1. Формулы /13/ и /14/ оставляют параметр

$0 < a < 1$ свободным. Он может быть фиксирован, если принять, что вероятность фрагментации кварка определяется соотношением /2/.

Рассмотрим теперь процесс образования некоторым выделенным кварком q' барионных и мезонных состояний. При "столкновении" этого кварка с цветными кварками и дикварками моря образуются белые состояния, содержащие этот кварк: $M' = q'q$ и $B' = q'q\bar{q}$. Вероятность образования мезонного состояния M' будем обозначать через c , барионного B' - через d . Эти вероятности зависят от соотношения числа кварков и дикварков моря, т.е. от a :

$$q' + \text{море } q, \bar{q}, q\bar{q}, \hat{q}\bar{q} \rightarrow c(a)M' + d(a)B' \quad /18/$$

$$c(a) + d(a) = 1.$$

Проведем вычисление вероятностей c и d . Однократное "столкновение" q' с кварками и дикварками моря приводит к следующему результату:

$$q' \left[\frac{1-a}{2} (q + \bar{q}) + \frac{a}{2} (\hat{q}\bar{q} + \hat{q}\bar{q}) \right] \rightarrow \quad /19/$$

$$\rightarrow \frac{1}{18} [2(7+a) + 3X(1-a)] q' + (1-X) \frac{1}{6} (1-a) \hat{q}\bar{q}' + \frac{1}{18} M' + \frac{a}{18} B'.$$

Коэффициентами перед состояниями M' , B' , q' и $\hat{q}\bar{q}'$, как и выше, обозначают вероятности перехода кварка q' в эти состояния. Здесь при вычислении этих вероятностей были использованы следующие соотношения:

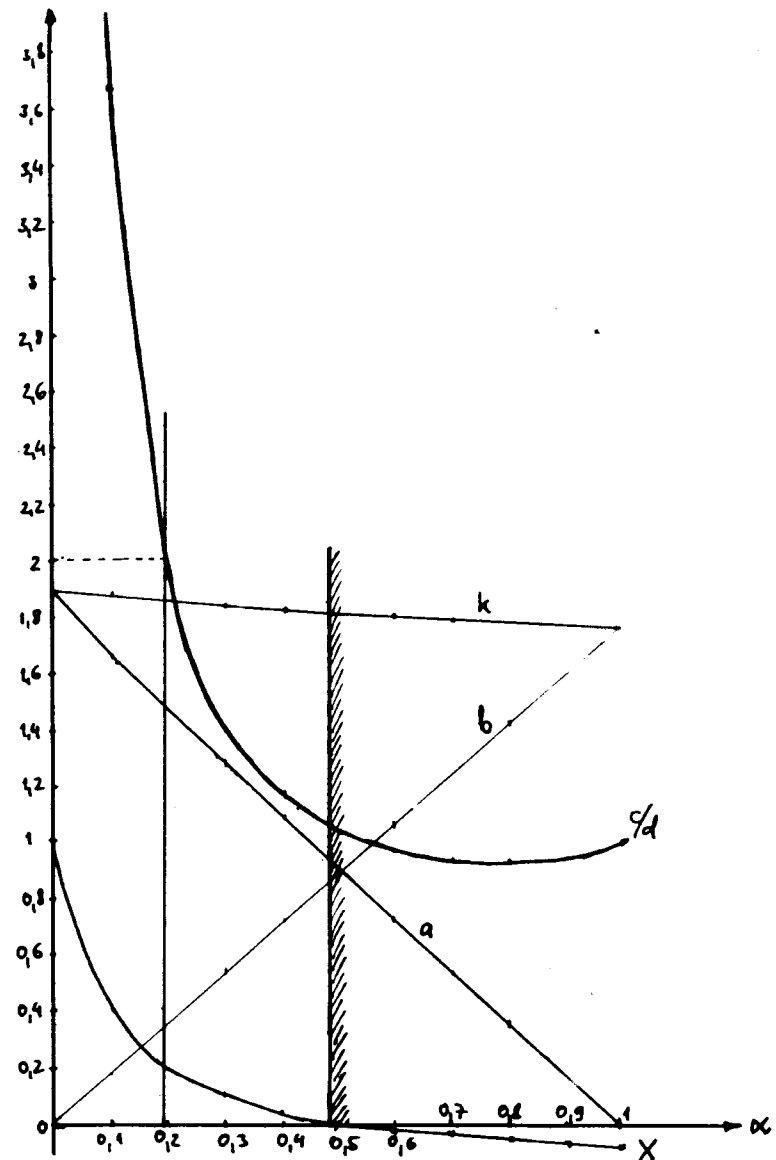
$$q'q \rightarrow \frac{1}{3} \hat{q}\bar{q}' + \frac{2}{3} q' \cdot q,$$

$$q'\bar{q} \rightarrow \frac{1}{9} M' + \frac{8}{9} q' \cdot \bar{q},$$

$$q'\hat{q}\bar{q} \rightarrow \frac{1}{9} B' + \frac{8}{9} \hat{q}\bar{q}' \cdot q',$$

$$q'\hat{q}\bar{q}' \rightarrow \frac{1}{9} M' \cdot \bar{q} + \frac{8}{9} \hat{q}\bar{q}' \cdot q'.$$

/20/



Отношение вероятностей c/d рождения мезонов и барионов, содержащих выделенный кварк q' при переходе

$q' + \text{море } q, \bar{q}, q\bar{q}, \hat{q}\bar{q}$. Приведена также зависимость параметров k , X , a и b от a . При $a > 0,48$ вероятность диссоциации X дикварка на составные кварки принимает отрицательное значение, т.е. область физична лишь при $0 \leq a \leq 0,48$.

Мы видим, что появляются состояния дикварков, содержащие начальный кварк q' . При "столкновении" этого дикварка $\hat{q}q'$ с кварками и дикварками моря осуществляется следующий переход:

$$\hat{q}q' \left[\frac{1-a}{2}(q + \bar{q}) + \frac{a}{2}(\hat{q}q + \hat{q}\bar{q}) \right] \rightarrow \frac{1}{36} [1+a+2(16-a)X]q' +$$

$$+ (1-X) \frac{1}{18} (16-a) \hat{q}q' + \frac{1}{36} M' + \frac{1}{36} (2+a)B'. \quad /21/$$

В /21/ были использованы значения переходов:

$$\hat{q}q'q \rightarrow \frac{1}{9} B' + \frac{8}{9} \hat{q}q' \cdot q,$$

$$\hat{q}q'\bar{q} \rightarrow \frac{1}{18} M' \cdot q + \frac{1}{18} M \cdot q' + \frac{8}{9} \hat{q}q' \cdot q,$$

$$\hat{q}q'q\hat{q} \rightarrow \frac{1}{18} B \cdot q' + \frac{1}{6} B' \cdot q + \frac{7}{9} \hat{q}q' \cdot \hat{q}q,$$

$$\hat{q}q'q\bar{q} \rightarrow \frac{1}{18} M' \cdot q \cdot \bar{q} + \frac{1}{18} M \cdot q' \cdot \bar{q} + \frac{8}{9} \hat{q}q' \cdot \hat{q}\bar{q}. \quad /22/$$

Вероятности c и d формулы /18/ возникают в результате последовательных "столкновений" кварков q' , сопровождающихся переходами типа /19/, и "столкновений" возникших дикварков с частицами моря, сопровождающихся переходами типа /21/. Рисунок показывает значения $c(a)$ и $d(a)$ в зависимости от a . При $a = 0,194$ отношение $c(a)$ и $d(a)$ равно 2, т.е. в этом случае вероятности рождения барионов B' и мезонов M' определяются соотношением /2/. Отношение числа мезонов и барионов моря /адронов центральной области/ при таком значении a равно /см. формулу /12//:

$$M : B : \bar{B} = 5,2 : 1 : 1. \quad /23/$$

Другие параметры, характеризующие кварки и дикварки моря, имеют при этом следующие значения:

$$X = 0,20, \quad k = 1,85, \quad a = 1,50, \quad b = 0,36. \quad /24/$$

Из рисунка видно, что и без предположения /2/ интервал, в котором следует рассматривать a , суживается. Действительно, при $0,48 < a \leq 1$ параметр X принимает отрицательное значение, т.е. область нефизична.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кварковая комбинаторика цветных состояний кварков допускает широкий произвол для соотношений числа барионов и мезонов как в центральной, так и во фрагментационной областях. Однако если принять, что барионное число кварка проявляет себя как вероятность рождения этим кварком барионного состояния, то соотношение чисел, родившихся в центральной области барионов и мезонов, фиксируется и оказывается весьма близким к случаю, когда при рождении адронов имеются очень сильные цветовые корреляции /случай, рассмотренный в работах /1, 2//.

Соотношение $q' : \frac{1}{3} B' : \frac{2}{3} M'$ является физическим требо-

ванием "локального" сохранения барионного заряда, которое, как нам представляется, может быть положено в основу при рассмотрении процессов множественного рождения. Тогда соотношение между числами мезонов, барионов и антибарионов, родившихся в центральной области, оказывается весьма устойчивым, слабо зависящим от того, имеются или отсутствуют цветовые корреляции кварков в процессах множественного рождения.

В заключение мы хотели бы поблагодарить В.М.Шехтера, Г.С.Данилова и Е.М.Левина за иницирующие обсуждения и М.Гмитро за проведение машинного счета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисович В.В., Шехтер В.М. Nucl. Phys., 1973, B55, p.455.
2. Bjorken J.B., Farrar G.R. Phys. Rev., 1974, D9, p.1449.
3. Jancso G. et al. Nucl. Phys., 1977, B124, p.1.

4. Гришин В.Г. *Материалы XVIII Международной конференции по физике высоких энергий, Тбилиси, 1976. ОИЯИ, Д1,2-10400, Дубна, 1977, с.А2-6.*
5. *Wöckmann K. Bonn preprint HE-76-25, 1976.*
6. *Анисович В.В. ЯФ, 1978, 28, с.761.*
7. *Боголюбов Н.Н., Струминский Б.В., Тавхелидзе А.Н. ОИЯИ, Д-1968, Дубна, 1965.*
8. *Han M.Y., Nambu Y. Phys. Rev., 1965, B139, p.1006.*
9. *Gell-Mann M. Acta Physica Austriaca, Suppl., 1972, IX, p.773.*

*Рукопись поступила в издательский отдел
2 января 1979 года.*