

8557

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



8557

Эна. чит. 8557

P2 - 8557

В.Г.Гришин, С.М.Елисеев, Т.Я.Иногамова

МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ  
В ИНКЛЮЗИВНЫХ АДРОН-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

1975

P2 - 8557

В.Г.Гришин, С.М.Елисеев, Т.Я.Иногамова

**МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ВТОРИЧНЫХ ЧАСТИЦ  
В ИНКЛЮЗИВНЫХ АДРОН-ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ**

Направлено в ЯФ

**Научно-техническая  
библиотека  
ОИЯИ**

Гришин В.Г., Елисеев С.М., Иногамова Т.Я.

P2 - 8557

Множественность вторичных частиц в инклюзивных  
адрон-ядерных реакциях

Приведены расчёты средних множественностей вторичных частиц, образованных во взаимодействиях адронов с ядрами при высоких энергиях. Показано, что простая каскадная модель не объясняет имеющиеся экспериментальные данные уже при  $E \geq 30$  ГэВ. Рассмотрены два возможных усовершенствования модели: введение многочастичных взаимодействий и учёт эффекта уменьшения сечения взаимодействия лидирующих частиц в ядре. Эти изменения дают возможность описать экспериментальные данные.

Препринт Объединенного института ядерных исследований  
Дубна 1975

Grishin V.G., Eliseev S.M., Inogamova T.Ia. P2 - 8557

Multiplicity of Secondary Particles in  
Inclusive Hadron-Nucleus Reactions

In this paper we present the mean multiplicities of secondary particles produced in the interactions of hadrons with nuclei at high energies. It is shown that a simple cascade model does not explain available experimental data already at  $E \geq 30$  GeV. Two possible improvements of the model are considered: the introduction of many-body interactions and taking into account the effect of decreasing the cross section of the interaction of leading particles inside the nucleus. These changes permit one to describe the experimental data.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research  
Dubna 1975

## §1. Введение

В последние годы все больший интерес приобретают исследования, связанные с адрон-ядерными взаимодействиями, и изучение столкновений релятивистских ядер. Экспериментальные исследования этих процессов проводятся на ускорителях Дубны, Серпухова, Беркли, Брукхавена, ЦЕРНа и Батавии<sup>/1-10/</sup>. Широко изучаются когерентные процессы и общие характеристики столкновений адронов и ядер с ядрами. Однако наибольший интерес приобретают вопросы, связанные с физикой элементарных частиц и сверхплотных состояний ядер. К ним в первую очередь относятся опыты по изучению взаимодействия нестабильных частиц с нуклонами и наблюдение новых эффектов, возникающих при столкновении релятивистских ядер<sup>/11, 12/</sup>. Кроме того, адрон-ядерные взаимодействия в принципе могут дать уникальную информацию о механизме образования частиц в адрон-нуклонных взаимодействиях.

Действительно, ядра представляют собой своеобразную мишень, состоящую из нуклонов с расстоянием между ними  $r \approx 10^{-13}$  см. В случае образования, например, клас-теров /файрболов/ в первом акте столкновения адрона с нуклоном ядра, вторичные взаимодействия дают информацию о времени жизни и других характеристиках клас-теров. Однако для извлечения этих данных необходимо хорошо знать структуру ядер и характеристики адрон-нуклонных взаимодействий при  $t \rightarrow \infty$ . В связи с этим встает вопрос об описании адрон-ядерных взаимодействий с использованием данных по адрон-нуклонному взаимодействию.

Естественно предположить, что характерной чертой адрон-ядерных взаимодействий является ветвящийся про-

цесс, поэтому число частиц в последующих поколениях зависит от числа частиц в предыдущих\*. Примером такого рассмотрения является каскадная модель, которая удовлетворительно описывает экспериментальные данные при  $E \leq 10$  ГэВ. В ней используются характеристики адрон-нуклонных взаимодействий, полученные в соответствующих экспериментах, при  $t \rightarrow \infty$ . Все вторичные частицы считаются "свободными" сразу же после образования в любом акте столкновения адронов с нуклонами ядра. Отклонения опытных данных от расчетов по такой простейшей модели может служить указанием о появлении новых явлений в адрон-нуклонных взаимодействиях /например, фэйрболов/, характеристики которых можно получить, вводя их в модель и описывая экспериментальные данные.

Основные предположения модели, программы расчетов при высоких энергиях с учетом эффекта лидирующей частицы описаны ранее /13-15/. Здесь мы рассмотрим только некоторые особенности расчетов при высоких энергиях, связанные с наблюдением новых экспериментальных закономерностей в физике множественного рождения частиц в опытах на ускорителях Серпухова и Батавии. Далее будет проведено сопоставление результатов вычислений с имеющимися данными, главным образом по средним множественностям вторичных частиц, образованных в адрон-ядерных взаимодействиях /§2/. В третьем параграфе рассматриваются возможные изменения модели для описания экспериментальных данных.

## §2. Средняя множественность вторичных частиц в адрон-ядерных взаимодействиях

Для моделирования неупругих адрон-адронных взаимодействий использовалось свойство масштабной инвариантности по множественности вторичных частиц, образован-

\* Аналогичные подходы в настоящее время широко используются и в описании процессов столкновения элементарных частиц, которые рассматриваются как системы, состоящие, например, из партонов или кварков.

ных в адрон-нуклонных взаимодействиях /KNO-скейлинг /16/ /.

$$\bar{n}_{\pm} \frac{\sigma_{n_{\pm}}}{\sigma_{in}} = \psi \left( \frac{n_{\pm}}{\bar{n}_{\pm}} \right), \quad /1/$$

где  $\bar{n}_{\pm}$  - среднее число вторичных заряженных частиц,  $\sigma_{n_{\pm}}$  - топологические сечения образования  $n_{\pm}$ -частиц и  $\sigma_{in}$  - полное неупругое сечение взаимодействия адронов. Энергетическая зависимость  $\bar{n}_{\pm}(E)$  бралась в виде:

$$\bar{n}_{\pm}(E) = a + b \ln s, \quad /2/$$

где  $s$  - квадрат полной энергии сталкивающихся частиц в с.ц. инерции,  $a = -4,02$  и  $b = 1,99/17$ . По формуле

$$\delta = \frac{\int_0^{x_m} \psi(x) dx}{\int_0^{x_m} \psi(x) dx} \quad /3/$$

вычислялось значение  $x = n_{\pm} / \bar{n}_{\pm}$ , где  $\delta$  - случайное число, равномерно распределенное на отрезке  $[0, 1]$ ,  $x_m$  - максимальное значение  $n_{\pm} / \bar{n}_{\pm}$ , наблюдаемое на опыте. Если число частиц оказывалось дробным  $n_{\pm} = x \bar{n}_{\pm}(E) = n_{цел} + \Delta$ , то с вероятностью  $\Delta$  принималось  $n = n_{цел} + 1$  и с вероятностью  $1 - \Delta$  -  $n = n_{цел}$ . Считалось, что каждый нуклон в конечном состоянии с вероятностью 0,5 является протоном, а каждый  $\pi$ -мезон с вероятностью 1/3 -  $\pi^0, \pi^+$  или  $\pi^-$ .

Использование распределений по множественности, явно не зависящих от первичной энергии, является существенным пунктом расчета, так как внутри ядра могут рождаться частицы с самыми различными энергиями.

Угловое распределение упруго рассеянных частиц рассчитывалось по формуле

$$\frac{d\sigma(s, t)}{d|t|} = \frac{d\sigma(s, t=0)}{d|t|} e^{-\beta(s)|t|},$$

$$\beta(s) = \beta_0 + 2a \ln s,$$

/4/

где  $-t = 2p_c^2(1 - \cos \theta_c)$  - квадрат переданного импульса в  $\text{ГэВ}/c^2$ ,  $\beta_0 = 8,3 \pm 1,3$ ,  $a = 0,28 \pm 0,13$  /18/.

Остальные особенности расчета /учет эффекта лидирующей частицы, розыгрыш углов и энергий частиц и т.д./ были такими же, как в работах /13-15/.

На рис. 1 показаны энергетические зависимости среднего числа релятивистских ( $s$ ) и нерелятивистских  $g$  и  $h$  / частиц / стандартное определение  $s, g$  и  $h$  - частиц дано в работе /19/ /. Видно, что модель не описывает наблюдаемую на опыте зависимость множественности релятивистских частиц уже при энергиях  $E$  порядка нескольких десятков  $\text{ГэВ}$ . Аналогичный вывод был получен в других работах /20-22/, где рассматривались упрощенные варианты каскадной модели, а также в /14/ для  $\pi^- + ^{12}\text{C}$  взаимодействий /рис. 2/. В последнем случае отклонения расчета от опыта были особенно существенны при больших множественностях вторичных частиц  $n_{\pm} \geq \bar{n}_{\pm}$ , т.е. тогда, когда каскад внутри ядра сильно развит. Что касается величин  $p_{\perp}$ ,  $\theta_{1/2s}$ ,  $N_g$ ,  $N_h$  /рис. 3,4/, то, как будет показано далее, их значения слабо зависят от рассмотренных предположений о деталях механизма адрон-ядерного взаимодействия.

Важно подчеркнуть, что вариацией входных данных в пределах экспериментальных ошибок не удаётся существенно приблизить рассчитанные величины к опытным.

### §3. Возможные усовершенствования модели

Как известно, частицы в элементарных взаимодействиях при высоких энергиях, как правило, в лабораторной системе координат вылетают под малыми углами. Уже отмечалось /см., напр. /23-25//, что в этом случае возможны такие процессы, когда несколько частиц, образующихся на предыдущей стадии каскада, поглощаются одним нуклоном ядра. Учет многочастичных взаимодействий /МВ/, очевидно, уменьшает число внутриядерных. Так как

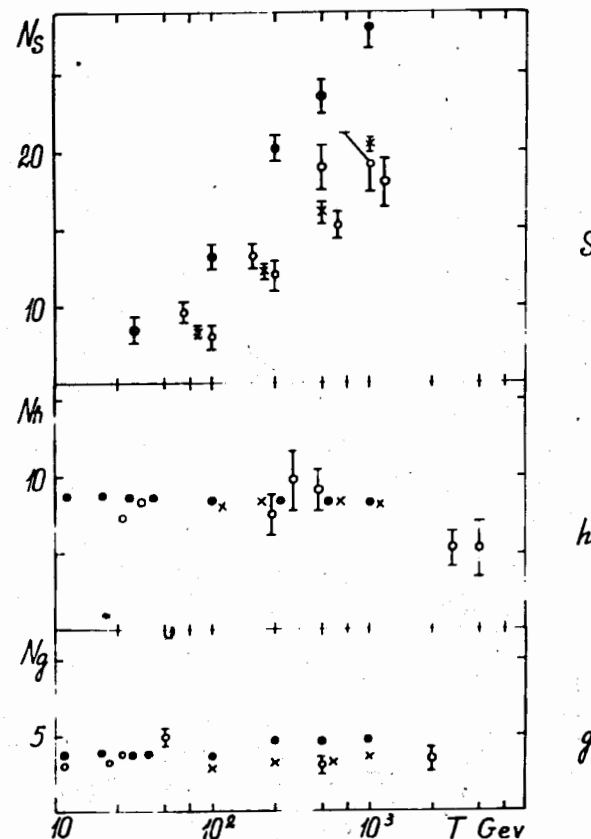


Рис. 1. Энергетическая зависимость среднего числа  $s$ ,  $g$  и  $h$  - частиц, образованных во взаимодействиях нуклонов с ядрами эмульсии.  $\circ$  - экспериментальные величины /6-10,13/.  $\bullet$  и  $\times$  - соответственно расчетные значения, полученные по обычной каскадной модели и с учетом многочастичных взаимодействий.

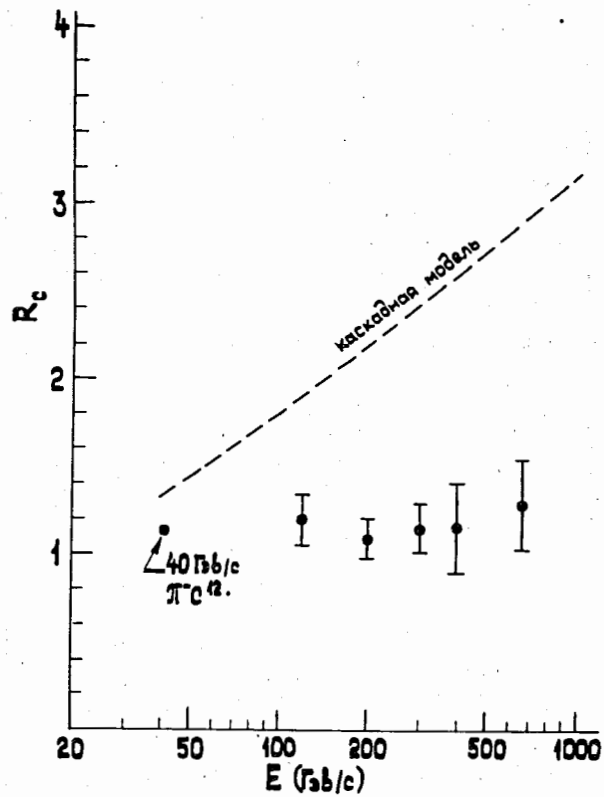


Рис. 2. Энергетическая зависимость отношения ( $R_c$ ) среднего числа частиц, рожденных во взаимодействиях адронов с ядром  $^{12}\text{C}$ , к числу частиц, рожденных в элементарных адрон-адронных взаимодействиях  $^{21/2}$ .

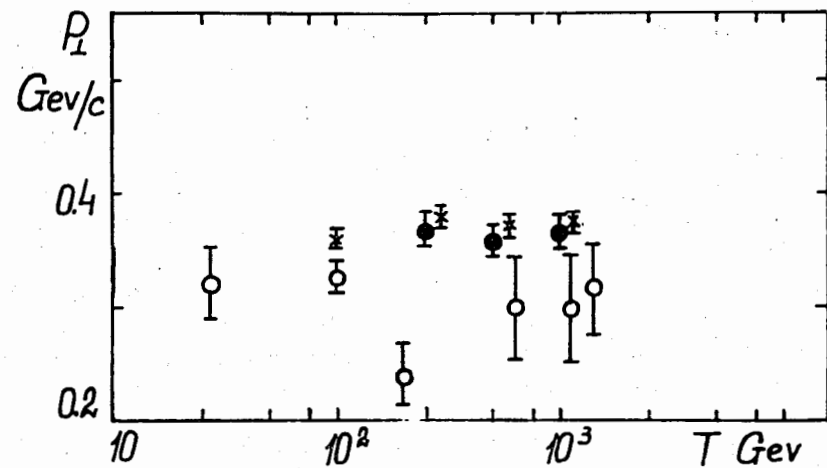


Рис. 3. Зависимость средних поперечных импульсов  $s$ -частиц от энергии. Обозначения те же, что и на рис. 1.

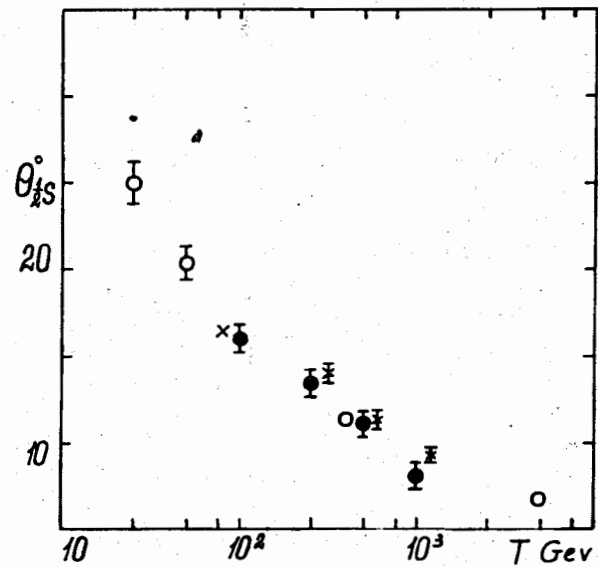


Рис. 4. Зависимость половинных углов для  $s$ -частиц от энергии. Обозначения те же, что и на рис. 1.

среди вторичных частиц большую часть составляют пионы, то характеристики частиц из МВ должны быть близки к  $\pi$ -N - взаимодействиям /при равных энергиях в системе центра масс/ \* .

В рассматриваемой модели с учетом многочастичных взаимодействий вычислялась длина пробега частиц, рожденных на предыдущей стадии каскада. Частицы, попавшие в один и тот же нуклон ядра, образовывали МВ<sup>24</sup>. Процентный состав двух-, трех- и т.д.-частичных взаимодействий слабо зависит от энергии и для  $E=200$  ГэВ и ядра с  $A=70$  составляет 70%, 13,5%, 7%, 4% соответственно. Взаимодействия в ядре с числом частиц в начальном состоянии больше четырех составляют 5,5%.

Характеристики вторичных частиц из многочастичных взаимодействий /угловые и энергетические/ вначале полагались такими же, как и в  $\pi$ -N - взаимодействии, затем варьировались для согласования расчетной множественности с экспериментом.

Как видно из рис. 1, таким путем удается согласовать расчетную зависимость с опытом. Однако при этом приходится предположить свойства МВ, несколько отличные от того, что имеет место для  $\pi$ -N - взаимодействий при соответствующих равных энергиях в системе центра масс /см. рис. 5,6/. Это, возможно, свидетельствует в пользу того, что вторичные частицы из области фрагментации налетающего адрона взаимодействуют с нуклонами ядра с меньшим сечением, чем "свободные" /27/ .

Уменьшение числа вторичных релятивистских частиц в адрон-ядерных взаимодействиях можно также получить, если предположить, что ядро обладает большой прозрачностью для "быстрых" частиц, рожденных в первом адрон-нуклонном взаимодействии /28/. В пользу такого предположения, в частности, свидетельствует тот факт, что распределения по быстротам  $y$  или  $\lambda = \ln \operatorname{tg} \theta$  частиц из адрон-адронных и адрон-ядерных реакций совпадают в

\* Можно отметить, что каскадная модель с учетом многочастичных взаимодействий сближается с моделью "трубки" /26/, где предполагается, что первичный адрон взаимодействует с "трубкой" ядерного вещества, расположенного на пути его движения.

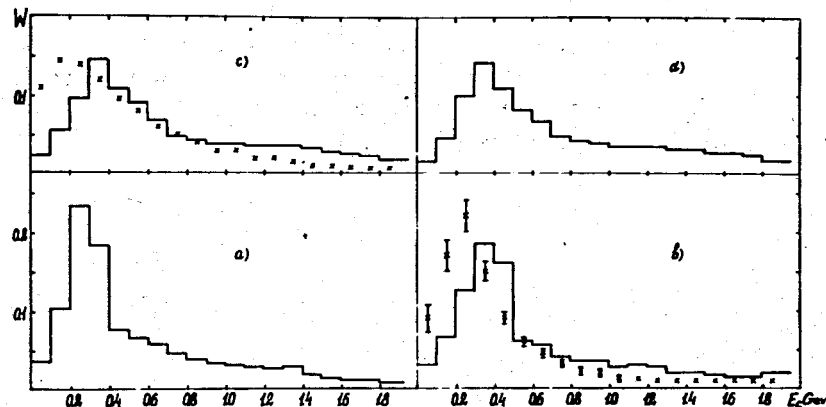


Рис. 5. Распределения кинетических энергий частиц из внутриядерных многочастичных взаимодействий. Случаи а/, б/, с/, д/ относятся к энергиям в системе ц.м.  $\leq 3$ , 3-7, 7-10,  $>10$  ГэВ соответственно. Значками "x" обозначены экспериментальные данные для  $\pi$ -N-взаимодействий при энергиях 7 ГэВ /29/ (б) и 40 ГэВ /30/ (с).

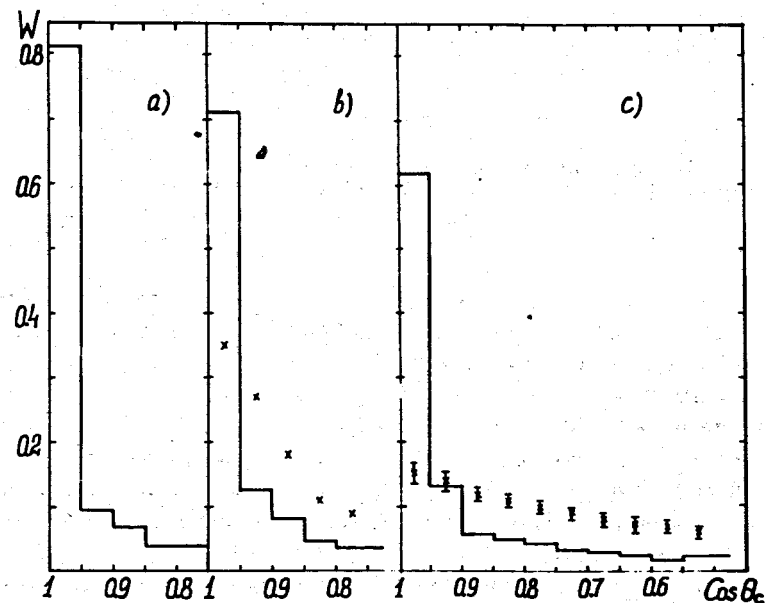


Рис. 6. Угловые распределения частиц из МВ. Обозначения те же, что и на рис. 5.

области фрагментации налетающего адрона  $\lambda < \lambda_0$ . Данные по  $\pi^-^{12}\text{C}$  и  $\pi^-p$ -взаимодействиям с энергией 40 ГэВ приведены на рис. 7. Значение  $\lambda_0$  в случае взаимодействия протонов с энергией 200 ГэВ с ядрами эмульсии, полученное в опыте на ускорителе в Батавии, равно  $\lambda_0 = -2^{10/}$ .

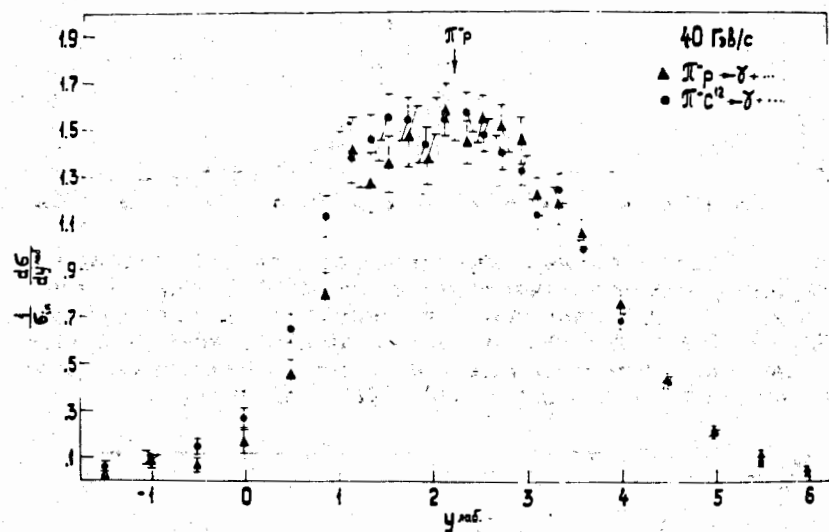


Рис. 7. Экспериментальные распределения  $\gamma$ -квантов по быстротам в  $\pi^-p$  и  $\pi^-^{12}\text{C}$ -взаимодействиях. /31/.

По каскадной модели были рассчитаны средние множественности релятивистских частиц  $\bar{N}_s^\pm$  в случае столкновений протонов с энергией 200 ГэВ с ядрами эмульсии при различных значениях  $\lambda_0 \leq -2$  и нулевых сечениях взаимодействия частиц, рожденных с  $\lambda < \lambda_0$ . Оказалось, что для  $\lambda_0 = -2$  расчетные значения  $\bar{N}_s^\pm$  меньше экспериментальных на 50%. Например, во взаимодействии протонов с ядрами эмульсии при энергии 200 ГэВ среднее число релятивистских частиц  $\bar{N}_s^\pm = 12,9 \pm 0,2^{10/}$ , а в расчете  $\bar{N}_s^\pm = 8$ . Согласовать экспериментальную среднюю множественность с расчетной удастся тогда, когда предполагается, что из ядра без взаимодействия вылетают

только лидирующие частицы\*. В этом случае рассмотренная модель внутриядерного каскада приводит, в частности, к малому различию коэффициентов неупругости для адрон-адронных и адрон-ядерных столкновений и к слабой зависимости их от атомного номера ядра мишени.

В заключение приведем результаты, полученные в данной работе.

1. Средняя множественность релятивистских частиц в адрон-ядерных столкновениях в простейшей каскадной модели, рассмотренной в настоящей работе, превышает экспериментальное значение уже при энергиях  $E \geq >30$  ГэВ. Например, для взаимодействий протонов с энергией  $E = 200$  ГэВ с ядрами эмульсии расчет даёт  $\bar{N}_s^\pm = 21 \pm 1$ , эксперимент -  $\bar{N}_s^\pm = 12,9 \pm 0,2$  /рис. 1/.

2. Учет многочастичных взаимодействий внутри ядра, когда несколько вторичных частиц одновременно сталкиваются с одним из нуклонов ядра, позволяет описать экспериментальные данные /рис. 1/. Однако характеристики частиц из неупругих многочастичных взаимодействий оказались отличными от характеристик элементарных взаимодействий /рис. 5,6/ при одинаковых энергиях в системе центра масс.

3. Другой возможностью, приводящей к уменьшению средней множественности вторичных частиц, вычисленных по каскадной модели, может быть предположение о слабом взаимодействии быстрых частиц внутри ядра. Результаты расчета совпадают с экспериментом в случае, когда только лидирующие частицы вылетают из ядра без взаимодействия.

Таким образом, результаты данной работы показывают, что каскадная модель с учетом многочастичных взаимодействий или "слабого" взаимодействия лидирующих частиц с нуклонами ядра может описать данные по  $N_s^\pm$  в широком интервале энергий.

Мы благодарны В.С.Мурзину и Л.И.Сарычевой за полезные обсуждения.

\*Лидирующая частица в этой модели является самой энергичной среди вторичных частиц.



Литература

1. А.М.Балдин, Н.Гиордэнеску, В.Н.Зубарев и др. Препринт ОИЯИ, P1-5819, Дубна, 1971.
2. А.М.Балдин, Н.Гиордэнеску и др. Препринт ОИЯИ, E1-8054, Дубна, 1974, Препринт ОИЯИ, 1-8246, Дубна, 1974.
3. Ю.Д.Баяков, Л.С.Воробьев, Г.А.Лексин и др. Препринт ОИЯИ, Д1,2-7411, Дубна, 1973.
4. N.Dalkhazhav, G.S.Shabratova, K.D.Tolstov. Nucl.Phys., B40, 190 (1972).
5. И.Я.Часников, Ж.С.Такибаев, З.В.Анзон, Э.К.Каныгина. Вопросы атомной науки и техники, выпуск 2/4/, Харьков. 1974.
6. J.I.Cohen, E.M.Friedlander, M.Marcu, A.Martin, R.Nitu. Lett. Nuovo Cim., 9, 337 (1974).
7. E.M.Friedlander, M.Marcu, R.Nitu. Lett. Nuovo Cimento, 9, 341 (1974).
8. E.M.Friedlander, A.A.Marin. Lett. Nuovo Cimento, 9, 346 (1974).
9. E.M.Friedlander. Lett. Nuovo Cimento, 9, 349 (1974).
10. Barcelona - Batavia - Belgrade - Bucharest - Lund - Lyons - Montreal - Nanc - Attawa - Paris - Rome - Strasburg Collaboration. Phys.Lett., B48, 467 (1974).
11. А.М.Балдин. Препринт ОИЯИ, Д1,2-7411, Дубна, 1973.
12. L. Van Hove. TH-1746, CERN (1973).
13. V.S.Barashenkov, S.M.Eliseev. Acta Physica Polonica, B4, 601 (1973).
14. В.Г.Гришин, С.М.Елисеев, Ш.В.Иногамов, Дж.Кохли. ЯФ, 17, 1017 /1973/.
15. S.M.Eliseev, J.M.Kohli. Nucl.Phys., B59, 128 (1973).
16. Z.Koba, N.B.Nielsen, P.Olesen. Nucl.Phys., B40, 317 (1972).
17. S.N.Ganguli, P.K.Malhotra. Phys.Lett., B42, 83 (1972).
18. V.Bartenev, A.A.Kuznetsov, B.Morozov, V.Nikitin et al. Phys.Rev.Lett., 29, 1755 (1972).
19. С.Пауэлл, П.Фаулер, Д.Перкинс. Исследование элементарных частиц фотографическим методом, ИЛ, 1962.
20. K.Gottfried. CERN preprint, TH-1545 (1972).
21. K.Gottfried. CERN preprint, TH-1735 (1973).
22. A.Dar, J.Vary. Phys.Rev., D6, 2412 (1972).
23. W.D.Walker. Phys.Rev.Lett., 24, 1143 (1970).
24. I.Z.Artykov, V.S.Barashenkov, S.M.Eliseev. Nucl.Phys., B6, 11 (1968).
25. И.З.Артыков, В.С.Барашенков, С.А.Дубровина, С.М.Елисеев, С.А.Славатинский. Изв. АН СССР, сер.физ., 30, 1581 /1966/.
26. Г.А.Милехин. Труды ФИАН СССР, т. 16, 50 /1951/.
27. Е.Л.Фейнберг. Препринт ОИЯИ, P2-6867, Дубна, 1972.
28. З.В.Анзон, Ж.С.Такибаев, И.Я.Часников. Препринт ИФВЭ АН Каз.ССР, ЭВЭ-8, Алма-Ата /1973/.
29. В.А.Беляков, Ван Шу-фень, В.В.Глаголев и др. ЖЭТФ, 39, 937 /1960/.
30. Сотрудничество Будапешт-Бухарест-Варшава-Дубна-Краков-Москва-София-Ташкент-Тбилиси-Улан-Батор-Ханой-Алма-Ата, Препринт ОИЯИ, 1-8064, Дубна, 1974.
31. Сотрудничество Будапешт-Бухарест-Варшава-Дубна-Краков-Москва-София-Ташкент-Тбилиси-Улан-Батор-Ханой. Препринт ОИЯИ, P1-7668, Дубна, 1974.
32. R.Holynski, S.Krzywdzinski, M.Miesowicz. Acta Physica Polonica, 30, 73 (1966).

Рукопись поступила в издательский отдел  
27 января 1975 года.