

С 323

A-866

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

2 - 4204

И.З.Артыков

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВО ВНУТРИЯДЕРНЫХ КАСКАДАХ  
ПРИ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1968

2 - 4204

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.С. Барашенков

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Б.М. Головин ,

кандидат физико-математических наук В.Б. Беляев

Ведущее предприятие:

Радиовый институт АН СССР.

Автореферат разослан

"15" *января* 1969 г.

Защита диссертации состоится

" " " 1969 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории теоретической физики  
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета

Р.А. Асанов

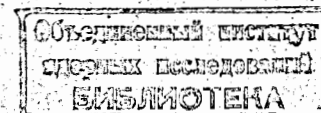
И.З.Артыков

МНОГОЧАСТИЧНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ  
ВО ВНУТРИЯДЕРНЫХ КАСКАДАХ  
ПРИ ВЫСОКИХ И СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЯХ

Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-математических наук

*5722-99*



Изучение неупругих взаимодействий частиц высоких энергий с атомными ядрами позволяет получить сведения о механизме такого процесса, о структуре ядерной материи, о свойствах взаимодействий элементарных частиц. Особый интерес представляет рассмотрение столкновений частиц с ядрами при энергиях, которые в настоящее время не могут быть достигнуты на ускорителях. В этой области энергий исследование взаимодействий частиц с ядрами остается, в сущности, единственным источником получения сведений об элементарном акте взаимодействия частиц, дает сведения о новых типах элементарных взаимодействий. Наряду с этим рассмотрение такой задачи имеет большое практическое значение также для оценок "высокоэнергетического хвоста" в радиационной защите. Отсутствие достаточно полной теории взаимодействия элементарных частиц и сложность самого процесса столкновения быстрых частиц с атомными ядрами обуславливают применение различных моделей при теоретическом рассмотрении неупругих взаимодействий частиц с ядрами. До сих пор в литературе широко обсуждались две модели: модель трубки <sup>1,2/</sup> и модель внутриядерного каскада - когда процесс столкновения налетающей частицы с ядром рассматривается как серия независимых последовательных попарных взаимодействий частиц с отдельными внутриядерными нуклонами с последующим испарением медленных нуклонов, дейтронов и более сложных комплексов <sup>3-11/</sup>.

Настоящая работа посвящена изучению механизма внутриядерных каскадов с учетом многочастичных взаимодействий при столкновении очень быстрых нуклонов и  $\pi$ -мезонов с различ-



ными ядрами и получению сведений о свойствах многочастичных взаимодействий элементарных частиц при больших энергиях.

Диссертация состоит из четырех глав и приложения. В начале первой главы дается краткий обзор работ по модели трубки. Подробный анализ предсказаний модели трубки и их сравнение с опытом как в области ускорительных энергий, так и в области нескольких сотен Гэв, показывает, что при интерпретации эксперимента следует отказаться от этой модели и ввести представление о серии последовательных (каскадных) двухчастичных взаимодействий. Во второй части первой главы обсуждается общепринятая модель внутриядерных каскадов. Показано, что расчеты по каскадно-испарительной модели находятся в хорошем согласии с опытом в области энергий (6 + 30) Гэв как по средним характеристикам взаимодействия частиц с ядрами фотоэмульсии, так и по средним дифференциальным величинам /6,7/, однако предсказания каскадной модели противостоят известным экспериментальным данным при  $T > 100$  Гэв /8-11/. Наиболее наглядно это проявляется для средней множественности рождающихся частиц, которая в опытах оказывается в несколько раз меньше, чем это следует из теории. Подбор величины параметров модели и варьирование с учетом ошибок измерений используемых при расчетах экспериментальных данных по элементарным  $\pi$ -N и N-N взаимодействиям внутри ядра не устраняют столь сильного расхождения. Такое расхождение теории с экспериментом обусловлено тем, что при высоких энергиях вследствие релятивистского сжатия углов вторичные частицы, родившиеся в предыдущем акте взаимодействия, вылетают в очень узкий конус и поэтому значительная их часть будет взаимодействовать далее лишь с каким-то одним внутриядерным нуклоном. До настоящего времени при расчетах внутриядерных каскадов эффект таких многочастичных взаимодействий нигде не рассматривался.

Развитию и обсуждению каскадно-испарительной модели столкновения очень быстрых нуклонов с атомными ядрами с учетом многочастичных взаимодействий элементарных частиц /12-14/ посвящена вторая глава диссертации. Принципиальная трудность, связанная с учетом многочастичных взаимодействий, заключается в том, что сейчас мы практически совершенно ничего не знаем о свойствах таких взаимодействий, не говоря уже о численном значении их характеристик, необходимых для расчета каскадов. В настоящее время более разумной представляется обратная постановка задачи: получить сведения о свойствах многочастичных взаимодействий путем сравнения результатов каскадных расчетов с известными экспериментальными данными о взаимодействиях нуклонов и пионов с различными атомными ядрами в широком диапазоне энергий налетающей частицы. Расчет проводился таким образом, что сначала делались максимально простые и наиболее общие предположения о характере таких взаимодействий и детализировались лишь по мере того, как это становилось совершенно необходимым для согласования результатов с опытом. При вычислениях мы старались как можно ближе придерживаться метода расчета и экспериментальных данных об элементарных  $\pi$ -N и N-N взаимодействиях внутри ядра, использованных нами ранее в работах /6-10/, с тем, чтобы более четко выделить эффекты, обусловленные многочастичными взаимодействиями.

Все вычисления были выполнены с помощью электронной машины методом Монте-Карло с учетом релятивистской трехмерной кинематики.

В качестве модели ядра была принята модель ферми-газа с параметром  $r_0 = 1,4$ . В общепринятой каскадной теории ядро рассматривается как некоторая непрерывная среда, каждая точка которой может стать независимым центром испускания новых частиц. Однако, если с внутриядерным нуклоном сталкивается частица очень высокой энергии, то пробеги образо-

вавшихся при этом вторичных частиц часто оканчиваются в точках, отстоящих друг от друга на расстояниях, меньших диаметра нуклона. В этом случае уже необходимо принимать во внимание размеры внутриядерных нуклонов. Предполагалось, что нуклоны приблизительно равномерно распределены в сферических слоях толщиной  $\Delta R = (\sqrt{3}/2)l$ , где  $l \approx 2,26 \cdot 10^{-13}$  см — среднее расстояние между нуклонами в ядре; если в некотором слое нуклоны нельзя было расположить друг от друга точно на расстоянии  $l$ , то какие-то два из них располагались несколько ближе или дальше. Чтобы обеспечить более равномерное распределение, положения центров нуклонов в двух соседних слоях были сдвинуты относительно друг друга. Подробно излагается схема расчета, приводится программа расчета, составленная на универсальном алгоритмическом языке АЛГОЛ (часто повторяющиеся этапы вычислений оформлены в виде процедур и вынесены в приложение).

Учет многочастичных взаимодействий при вполне разумных предположениях об их свойствах позволяет согласовать всю совокупность известных экспериментальных данных по взаимодействию высокоэнергетических нуклонов с атомными ядрами в области энергий вплоть до нескольких тысяч Гэв [12-14]. Все расчеты выполнены для среднелегкого, среднего и средне-тяжелого ядер фотоэмульсии (для этих ядер  $A=14,70$  и  $94$ ), а также для  $^{27}\text{Al}$  и  $^{56}\text{Fe}$ . Хотя для последних ядер сейчас почти нет экспериментальных данных, которые можно было бы сравнить с теоретическими, в целом результаты вычислений позволяют с помощью простой интерполяции получить соответствующие оценки для промежуточных ядер, что важно для расчета мишени в ускорительных и космических экспериментах.

Множественность ливневых частиц возрастает заметно быстрее, чем  $T^{1/4}$ , особенно в тяжелых ядрах, в то время как число каскадных и испарительных частиц изменяется весьма медленно.

При переходе от легких ядер к тяжелым число ливневых частиц возрастает приблизительно пропорционально атомному весу, а число каскадных и испарительных частиц увеличивается заметно быстрее.

Импульсные и энергетические распределения ливневых частиц, вычисленные с учетом многочастичных взаимодействий, при  $T \lesssim 100$  Гэв оказываются довольно близкими к распределениям, полученным в рамках обычной каскадной теории, при больших энергиях  $T$  спектры ливневых частиц при учете многочастичных взаимодействий получаются значительно более жесткими. Энергии каскадных и испарительных частиц остаются практически постоянными, не зависящими ни от  $T$ , ни от  $A$ .

Значения среднего поперечного импульса ливневых и каскадных частиц оказываются не зависящими от типа ядра и очень медленно возрастают с увеличением  $T$ . Половинный угол  $s$ -частиц приблизительно пропорционален величине  $A$  и быстро убывает с ростом энергии  $T$ ; угол  $\theta_{1/2}$  очень слабо зависит от  $A$  и не чувствителен к величине энергии  $T$ .

Относительный вклад многочастичных взаимодействий во внутриядерном каскаде (по отношению к полному числу упругих и неупругих внутриядерных столкновений) уже при  $T=10$  Гэв составляет около 20% (см. рис. 1) всех взаимодействий, однако характеристики рождающихся при этом частиц сравнительно мало отличаются от того, что имеет место в обычном столкновении двух частиц. Заметные различия начинают проявляться лишь при энергиях, больших нескольких десятков Гэв. Вклад многочастичных взаимодействий более отчетливо проявляется в легких ядрах, в тяжелых ядрах он несколько затухает под влиянием двухчастичных взаимодействий, вероятность которых возрастает по мере того, как ливневые частицы растрачивают свою энергию в последовательности внутриядерных столкновений.

В третьей главе диссертации рассматриваются мезон-ядерные взаимодействия при высоких энергиях. При расчете мезон-ядерных столкновений /15-16/ были использованы в точности те же самые приближения и те же предположения о свойствах многочастичных взаимодействий внутри ядра, как и в случае нуклон-ядерных столкновений. Никаких изменений в программе расчетов не делалось. Особый интерес представляет рассмотрение мезон-ядерных столкновений при средней энергии около 200 Гэв, при которой в настоящее время имеются наиболее обстоятельные экспериментальные данные /17,18/.

Приведено сравнение расчетных и экспериментальных как средних характеристик, так и угловых распределений ливневых частиц для различных групп ядер фотоэмульсии. Расчет и опыт хорошо согласуются друг с другом <sup>x)</sup>. Если не учитывать многочастичных взаимодействий внутри ядра, то различие между расчетной и экспериментальной множественностью ливневых частиц оказывается не столь разительным, как в случае нуклон-ядерных взаимодействий <sup>xx)</sup>, так как в случае мезон-ядерного взаимодействия внутри ядра происходит, грубо говоря, вдвое меньше столкновений, чем в случае взаимодействия нуклон + ядро. В то же время учет многочастичных взаимодействий оказывается весьма существенным для объяснения угловых распределений ливневых частиц. Как и в случае нуклон-ядерных столкновений, многочастичные взаимодействия составляют большой процент в легких ядрах.

В настоящее время известно еще очень мало экспериментальных данных по взаимодействию  $\pi$ -мезонов с ядрами, тем не менее представляет интерес сравнить характеристики не-

<sup>x)</sup> Если энергию первичных пионов разыгрывать непосредственно по распределению пион-ядерных взаимодействий, наблюдавшихся в работе /17/, по величине кинетической энергии первичных  $\pi$ -мезонов, то результаты расчетов изменяются очень мало.

<sup>xx)</sup> Это обстоятельство уже подчеркивалось в работе /17/.

упругих взаимодействий пионов с ядрами с соответствующими характеристиками нуклон-ядерных взаимодействий в широком диапазоне энергии. Результаты вычислений показывают, что средние характеристики взаимодействия  $\pi$ -мезонов и нуклонов с ядрами слабо зависят от природы первичной частицы. Этот факт не противоречит имеющимся экспериментальным данным. Для более детальных заключений о степени согласия теории и опыта необходимо дальнейшее экспериментальное изучение взаимодействия  $\pi$ -мезонов с ядрами при различных энергиях.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению свойств многочастичных взаимодействий элементарных частиц в области высоких и сверхвысоких энергий. В первом параграфе главы приведены сведения, полученные из анализа внутриядерных каскадов. Хотя современные экспериментальные данные о ядерных взаимодействиях при энергии  $T \geq 30$  Гэв весьма неточны и для каждого фиксированного значения  $T$  эксперимент и теорию можно согласовать в широком диапазоне предположений о свойствах многочастичных взаимодействий, однако привлечение всей совокупности известных сейчас опытных данных позволяет получить ряд достаточно определенных заключений /12-14/. Показано, что хорошее согласие со всеми известными фотоэмульсионными данными в интервале от нескольких Гэв до нескольких тысяч Гэв удается получить лишь предполагая, что при неупругих многочастичных взаимодействиях, как и в элементарных  $\pi$ -N и N-N взаимодействиях, энергии и углы вылета  $\pi$ -мезонов и более тяжелых частиц являются различными; в области космических энергий при многочастичных взаимодействиях образуется лидирующая частица, уносящая существенную часть всей первоначальной энергии. В этой области энергий варьирование коэффициента неупругости в интервале 0,5-0,7 изменяет средние результаты расчетов на 10-20%. Эти изменения не выходят за пределы точности известных сейчас экспериментальных данных. В области ус-

корительных энергий специальный учет лидирующей частицы мало изменяет результаты расчетов, так как ее параметры еще сравнительно мало отличаются от параметров остальных частиц.

Получены угловые и энергетические распределения  $\pi$ -мезонов и тяжелых частиц из неупругих многочастичных взаимодействий для нескольких интервалов полной энергии в системе центра масс сталкивающейся системы (см. рис. 2-3) /19/. Эти распределения весьма близки к средним распределениям частиц из неупругих  $\pi$ -N взаимодействий и сравнительно медленно изменяются с ростом энергии сталкивающихся частиц. Для объяснения числа каскадных частиц необходимо учесть вклад упругого дифракционного рассеяния многочастичной системы. При этом мы предполагали, что  $\sigma_{el} \approx \sigma_{dif} = \frac{1}{4} \sigma_t$  и угол рассеяния в среднем  $\approx \frac{\lambda}{r}$ , где  $\lambda$  - дебройлевская длина волны рассеиваемой частицы, а  $r$  - средний радиус многочастичной системы, равный по порядку величины радиусу сильных взаимодействий. Для более детальных заключений необходимо уточнение экспериментальных данных, особенно величины энергии ливневых частиц. С этой точки зрения весьма интересными представляются эксперименты на Серпуховском ускорителе, где энергия достаточно велика и в то же время могут быть достигнуты значительно лучшие точности, чем в экспериментах с космическими лучами.

Во втором параграфе последней главы на примере неупругого взаимодействия, происходящего при столкновении трех нуклонов, изучается, в рамках полюсной периферической модели, энергетическая зависимость вероятности многочастичных взаимодействий /20,21/. Показано, что эта зависимость определяется, в основном, величиной полной энергии в системе центра масс и при фиксированном значении этой энергии сравнительно слабо зависит от изменения энергии сталкивающихся частиц. Полученные в этом параграфе результаты качественно

подтверждают сделанное нами при расчетах внутриядерных каскадов допущение о том, что при многочастичных взаимодействиях процесс столкновения определяется, в основном, полной энергией в системе центра масс начальных частиц.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /12-16,19-21/ и докладывались на всесоюзных конференциях по космическим лучам 1966, 1967, 1968 годов /13,16,19/.

#### Л и т е р а т у р а

1. F.C. Roesler and C.V.A. Mc Cusker, Nuovo Cim., 10, 127 (1953).
2. Г.А. Милехин, Труды ФИАН, 16, 50 (1961).
3. R. Serber, Phys.Rev., 72, 1114 (1947).
4. А.М. Лебедев, С.А. Славатинский, Б.В. Толкачев. ЖЭТФ, 46, 2151 (1964).
5. В.В. Гусева, А.М. Лебедев, С.А. Славатинский, В.В. Соколовский. Изв. АН СССР, сер. физ., 29, 1935 (1965).
6. И.З. Артыков, В.С. Барашенков, С.М. Елисеев. Ядерная физика, 4, 156 (1966).
7. I.Z. Artykov, V.S. Barashenkov, S.M. Eliseev. Nucl. Physics, 87, 83 (1966).
8. И.З. Артыков, В.С. Барашенков, С.А. Дубровина, С.М. Елисеев, С.А. Славатинский. Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 1581 (1966).
9. И.З. Артыков, В.С. Барашенков, С.М. Елисеев. Ядерная физика, 3, 978 (1966).
10. I.Z. Artykov, V.S. Barashenkov, S.M. Eliseev. Nucl. Physics, 87, 241 (1966).
11. С.М. Елисеев. Кандидатская диссертация, Дубна, 1967.
12. И.З. Артыков, В.С. Барашенков, С.М. Елисеев. Препринт ОИЯИ, P2-3005, Дубна, 1966.
13. И.З. Артыков, В.С. Барашенков, С.М. Елисеев. Изв. АН СССР, сер. физ., 31, 1448 (1967).

14. I. Z. Artykov, V. S. Barashenkov, S. M. Eliseev. Nucl. Phys., B6, 11 (1968).
15. I. Z. Artykov, V. S. Barashenkov. Nucl. Phys., B6, 628 (1968).
16. И. З. Артыков, В. С. Барашенков. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по физике космических лучей в г. Ташкенте. Москва, 1968.
17. Z. Czachowska, J. Gierula, S. Kvyzdziński, M. Miesowics, R. Rybicki, W. Wolter. Institut Badar Jadernowoch, Report P. No 826 (1V) PH, Warszawa, 1967.
18. J. Gierula, S. Krzywdziński. Nuovo Cim., 55A, 370 (1968).
19. И. З. Артыков, В. С. Барашенков, С. М. Елисеев. Изв. АН СССР, сер. физ., 32, 350 (1968).
20. И. З. Артыков. Препринт ОИЯИ, P2-4176, 1968.
21. И. З. Артыков. Препринт ОИЯИ, Б5-2-4198. Дубна, 1968г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 декабря 1968 года.

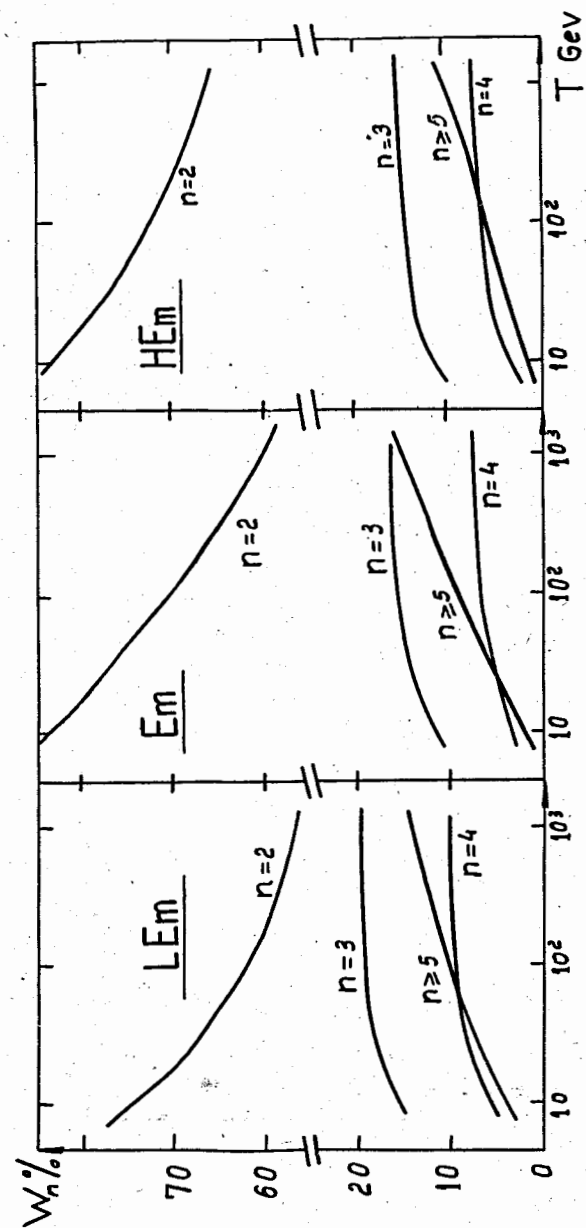


Рис. 1. Относительное число вторичных частиц с  $n$  - частицами в начальном состоянии ( $n$  - частицных столкновений).



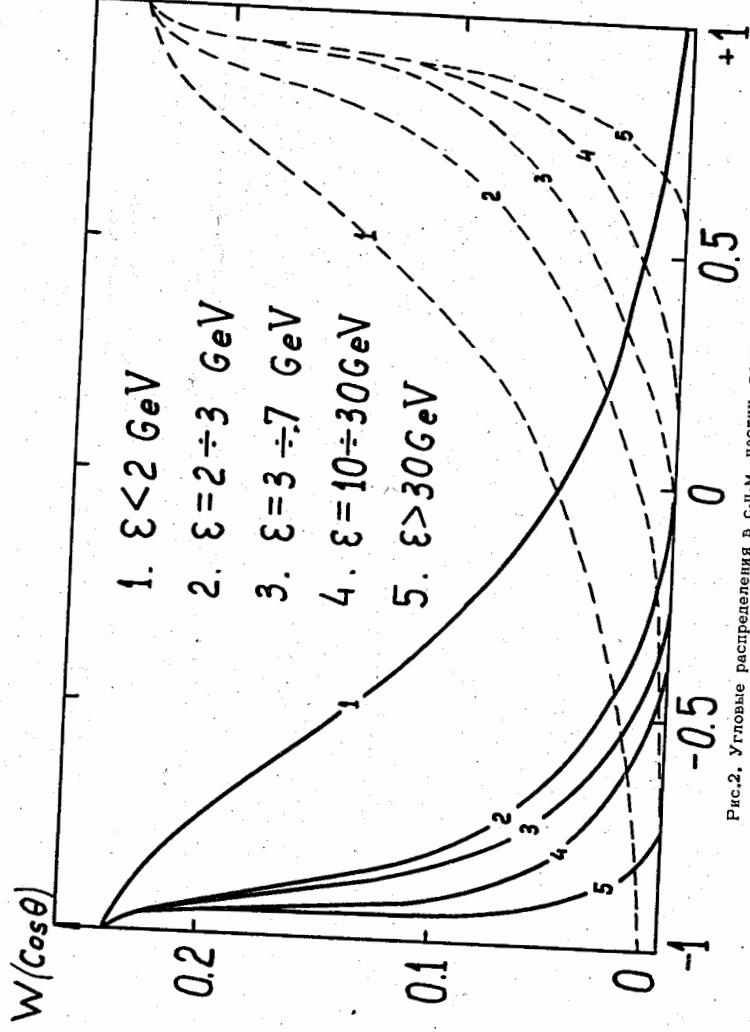


Рис.2. Угловые распределения в с.л.м. части, рождающихся в неупругом многочастичном взаимодействии.  $\epsilon$  - полная энергия многочастичной системы, которая может быть затрачена на образование новых частиц. Сплошные кривые - нуклоны, пунктир -  $\pi$ -мезоны.

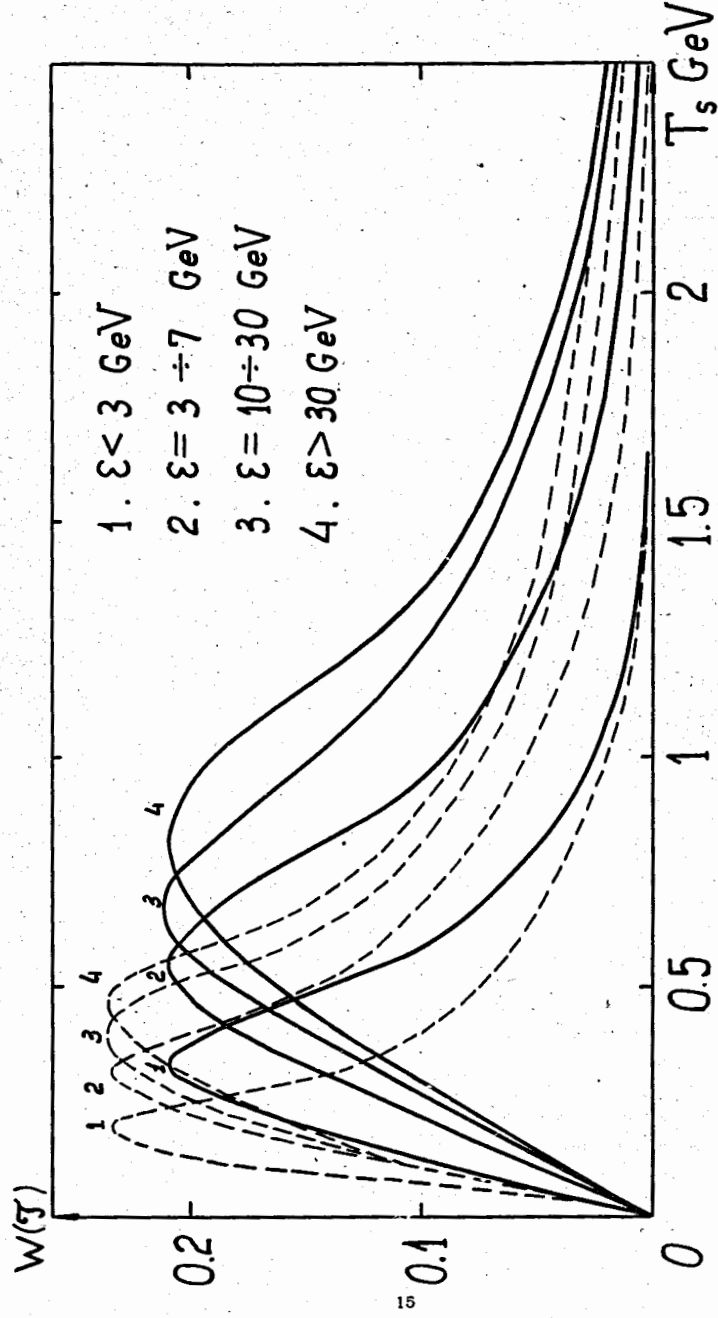


Рис.3. Энергетические распределения в с.л.м. частиц, рождающихся в неупругом многочастичном взаимодействии. Обозначения те же, что и на рис. 2.