

323.3

И-463

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

4 - 5552

А.С. Ильинов

**КАСКАДНАЯ МОДЕЛЬ  
НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ  
И ЯДЕР С ЯДРАМИ**

**Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей**

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1971

4 - 5552

А.С. Ильинов

КАСКАДНАЯ МОДЕЛЬ  
НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ  
И ЯДЕР С ЯДРАМИ

Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук

744767

Объединённый институт  
ядерных исследований  
БИБЛИОТЕКА

Изучение взаимодействий высокоэнергетических частиц с атомными ядрами позволяет исследовать широкий круг интересных физических проблем. Оно представляет самостоятельный интерес для теории ядерных реакций, а также имеет большое прикладное значение в связи с разработкой радиационной защиты ускорителей и космических кораблей, проектированием "мезонных фабрик" и мощных нейтронных генераторов, решением ряда геофизических задач <sup>/1-4/</sup>.

Для описания взаимодействий частиц высокой энергии с ядрами хорошо зарекомендовала себя модель внутриядерных каскадов, впервые предложенная Сербером более двадцати лет назад <sup>/5/</sup>. Уточнению и дальнейшему развитию этой модели и посвящена данная работа. Основной ее задачей являлось, во-первых, систематическое теоретическое исследование неупругих взаимодействий частиц с ядрами в области применимости общепринятой каскадной модели, во-вторых, усовершенствование этой модели путем учёта изменения плотности числа внутриядерных нуклонов в процессе развития каскада внутри ядра-мишени, что позволяет распространить модель на область энергий  $T \gg 1$  Гэв, и, наконец, применение модели внутриядерных каскадов к новым, ранее не исследованным с этой точки зрения процессам взаимодействия  $\gamma$ -квантов и легких ядер с ядрами.

Диссертация состоит из четырех глав. В первой главе проводится детальное, систематическое исследование характеристик неупругих столкновений нуклонов и пионов с ядрами в широкой области энергий падающих частиц от нескольких десятков Мэв до нескольких Гэв на основе каскадной модели, учитывающей диффузность границы ядра-мишени и выполнение закона сохранения энергии при столкновениях частиц с внутриядерными нуклонами<sup>/6/</sup>. В настоящее время такое исследование представляется тем более необходимым, что известные экспериментальные данные весьма бедны и разрознены, в то время как знание характеристик ядерных взаимодействий является совершенно необходимым для решения упоминавшихся выше практических задач. Поскольку сравнение с основными известными сейчас экспериментальными данными было уже выполнено<sup>/7/</sup>, здесь проводится сопоставление расчётных данных с результатами вычислений других авторов. При этом основное внимание уделяется энергетической области  $T \geq 0,4$  Гэв, где существенны процессы рождения  $\pi$ -мезонов. Область меньших энергий весьма подробно исследовалась ранее<sup>/8,9/</sup>.

В результате данных расчётов создан атлас характеристик неупругих ядерных взаимодействий, с помощью которого путем интерполяции можно получить соответствующие величины для промежуточных энергий и ядер. Сравнение с расчётами других авторов показало, что результаты вычислений весьма чувствительны к диффузности ядра и к тому, насколько корректно описываются элементарные взаимодействия частиц внутри ядра.

Сравнение расчётов с опытом показывает, что при энергии первичной частицы  $T \geq (3-5)$  Гэв появляется расхождение между обычной каскадной моделью и фотоэмульсионным

экспериментом, которое увеличивается с ростом энергии  $T$ <sup>/10/</sup>. Теоретические значения средней множественности  $g$ - и  $h$ -частиц в протон- и пион-ядерных столкновениях, хорошо согласующиеся с опытом при  $T < 5$  Гэв, не передают экспериментально наблюдаемого "насыщения" при больших энергиях. Еще более заметные расхождения появляются в корреляциях  $s$ - и  $h$ -частиц. Это расхождение отражает изменение механизма взаимодействия частица + ядро в области энергий  $T \approx 3-5$  Гэв, исследованию которого и посвящена вторая глава диссертации.

Можно предположить, что изменение механизма взаимодействия частиц с ядрами объясняется эффектом локального изменения плотности внутриядерных нуклонов в процессе развития каскада<sup>/10/</sup>. Образующиеся в первых  $N-N$ - и  $\pi-N$ -столкновениях быстрые частицы выбивают встречающиеся на их пути нуклоны ядра. Поскольку за время развития каскадной лавины нуклоны ядра не успевают заметным образом перераспределиться по его объему, медленные нуклоны отдачи, составляющие большую часть низкоэнергетической компоненты вторичных частиц, проходят через области ядра с меньшей плотностью ядерного вещества, испытывая меньшее число столкновений. Вследствие этого и возникает наблюдаемое на опыте "насыщение" средних чисел медленных  $g$ - и  $h$ -частиц.

Этот эффект никогда ранее не учитывался в каскадной модели, так как рассмотрение отдельных нуклонов вместо непрерывной среды представлялось чрезмерно сложным в математическом отношении. В §1 главы II излагается модель, где рассмотрено развитие каскада во времени и сделан переход от непрерывного распределения ядерного вещества к дискретному распределению внутриядерных нуклонов<sup>/11-13/</sup>. В свою очередь

это повлекло за собой необходимость учёта пространственной структуры сильного взаимодействия: считается, что с пролетающей через ядро частицей могут взаимодействовать лишь те нуклоны, которые попадают в область сильного взаимодействия<sup>х/</sup>.

Предложенный метод учёта уменьшения плотности ядерного вещества позволил расширить границы применимости каскадной модели ядерных реакций от нескольких Гэв до нескольких десятков Гэв. Новая модель правильно описывает наблюдаемое на опыте "насыщение" средних чисел  $h$ - и  $g$ -частиц, а также передает изменение вида корреляций  $\bar{n}_g$  ( $n_s$ ) и  $\bar{n}_h$  ( $n_s$ ), чувствительных к механизму взаимодействия, с увеличением  $T$  (см. рис. 1 и 2). Она предсказывает, что энергия, при которой наступает "насыщение", увеличивается с ростом атомного номера ядра-мишени.

Рассмотренный эффект оказывает еще большее влияние на характеристики реакции, когда с ядром-мишенью взаимодействуют ядра высокой энергии. На примере взаимодействия с атомными ядрами ядер дейтерия и трития показано, что с увеличением атомного номера налетающего ядра действие эффекта уменьшения плотности начинает проявляться при меньших энергиях<sup>/15/</sup>. Например, в столкновениях тритий + ядро этот эффект уже нужно учитывать при энергиях  $T \approx 1$  Гэв/нуклон. Таким

<sup>х/</sup> Следует заметить, что в области энергий  $T$  порядка десятков Гэв и выше в расчётах по каскадной модели приходится принимать во внимание не только пространственную, но и временную структуру области взаимодействия - вводить многочастичные взаимодействия, частным случаем которых являются взаимодействия образовавшихся в каскаде резонансов с нуклонами ядра. Этот вопрос подробно рассмотрен в работе<sup>/10/</sup>.

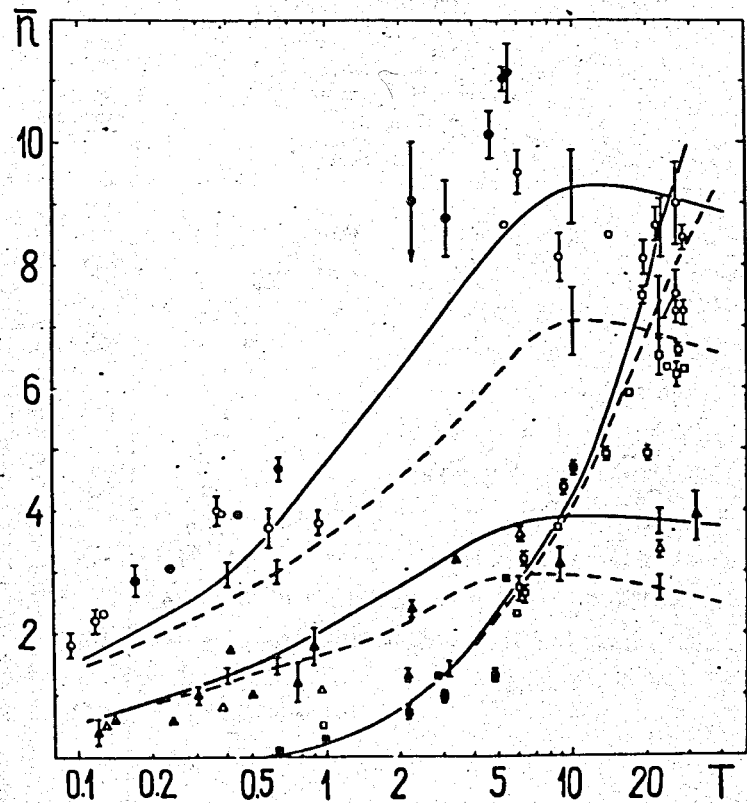


Рис. 1. Энергетическая зависимость средней множественности  $s$ -,  $g$ - и  $h$ -треков, образовавшихся при взаимодействии протонов с ядрами фотоэмульсии. Экспериментальные значения  $\bar{n}_s$ ,  $\bar{n}_g$  и  $\bar{n}_h$  нанесены соответственно квадратами, кружками и треугольниками, светлыми значками нанесены данные, полученные просмотром эмульсии "вдоль следа", заштрихованными - "по области". Сплошная и пунктирная кривые - результаты расчёта для ядра  $^{100}\text{Ru}$ , соответственно, при условии  $n_h > 1$  и  $n_h \geq 0$ .

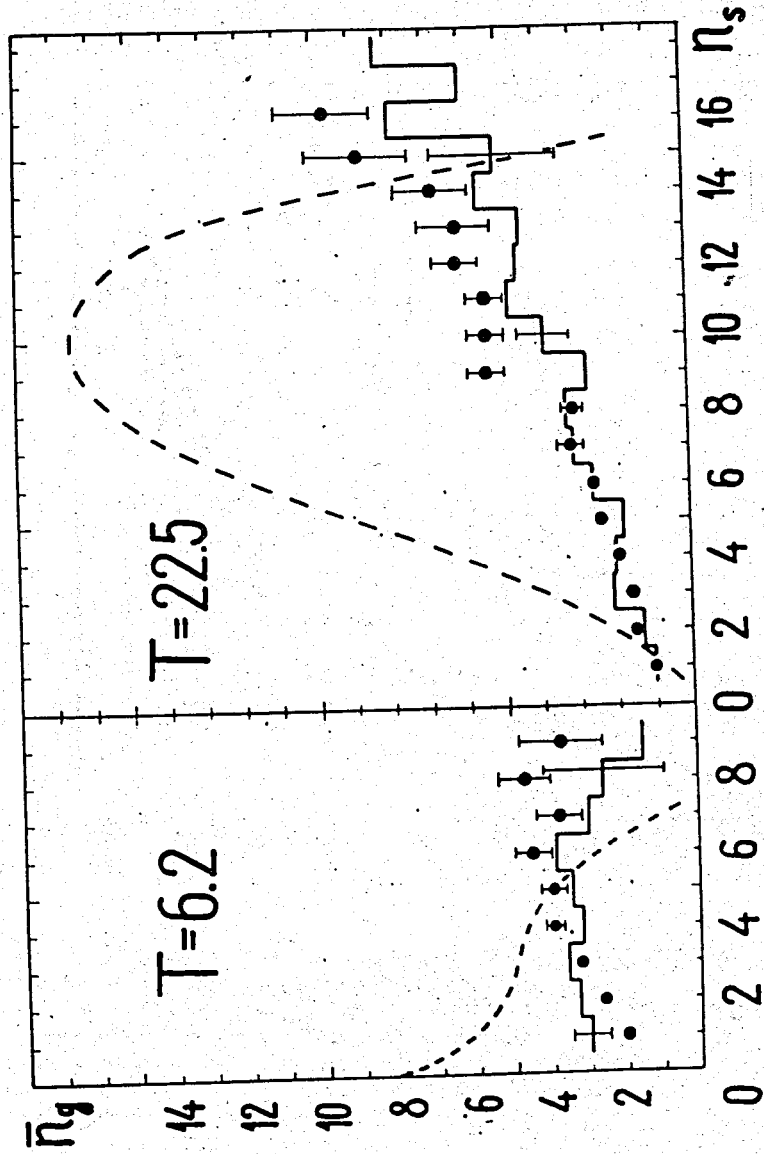


Рис. 2. Корреляция средней множественности в треках с числом ливневых частиц в звезде, образованной в фотомультипликаторе с энергией  $T$  Гэв. Экспериментальные значения взяты из работы Винзелера /14/. Сплошная гистограмма и пунктирная кривая - соответственно результаты расчета по усовершенствованной и по обычной каскадной модели.

образом, при рассмотрении общего случая взаимодействия ядро + ядро локальное изменение плотности ядерного вещества необходимо принимать во внимание во всей области энергий  $T$ , больших нескольких сотен Мэв на нуклон.

Предсказываемое новой моделью "насыщение" средней энергии возбуждения остаточного ядра и среднего числа выбитых нуклонов позволило качественно объяснить некоторые ранее неясные явления в процессах деления и фрагментации ядер, а также образования изотопов в ядерных реакциях под действием частиц высокой энергии.

Изменение плотности нуклонов ядра-мишени в процессе развития каскада не является единственно возможным объяснением расхождения между опытом и обычной каскадной моделью. К уменьшению числа медленных вторичных частиц ведет также учет образования резонансов в неупругих столкновениях каскадных частиц с внутриядерными нуклонами, поскольку это уменьшает число "частиц", образовавшихся в элементарном акте, и, следовательно, число последующих внутриядерных столкновений /10/. Результаты вычислений каскадов с образованием резонансов в элементарных столкновениях /16/ приведены во втором параграфе главы II. Показано, что даже при наиболее благоприятных предположениях учет образования резонансов во внутриядерном каскаде не оказывает существенного влияния на характеристики, в которых наблюдается изменение механизма взаимодействия, вплоть до энергий  $T \approx (20 - 30)$  Гэв.

Объяснение этого результата заключается в следующем. Чтобы сильно уменьшить в каскаде число столкновений, а, следовательно, и число медленных вторичных частиц, необходимо образование резонансов в неупругих столкновениях частиц

третьего и последующих поколений каскадной лавины. Но, даже в случае, когда на ядро падает частица с  $T = 20$  Гэв, средние энергии этих частиц будут слишком малы для того, чтобы эффективно реализовалась такая возможность.

Таким образом, выполненные во II главе расчёты показали, что в рассмотренной энергетической области эффект локального изменения плотности внутриядерных нуклонов в процессе развития каскада является определяющим при описании изменения механизма взаимодействия частица + ядро.

В отличие от случая пион- и нуклон-ядерных взаимодействий, где с помощью каскадной модели удалось успешно объяснить большой круг явлений<sup>/7/</sup>, систематического теоретического исследования фотоядерных реакций при энергиях  $T_\gamma > 100$  Мэв не проводилось, хотя к настоящему времени накопилось довольно большое количество экспериментальных данных<sup>x/</sup>. Изучению этих явлений посвящена третья глава диссертации.

В первом параграфе главы III описывается метод расчёта фотоядерных каскадов<sup>/17,19,20/</sup>. Взаимодействие  $\gamma$ -кванта с внутриядерными нуклонами приводит к образованию двух или трех быстрых частиц в результате процессов фоторождения мезонов или поглощения  $\gamma$ -кванта квазидейтонной парой нуклонов. В дальнейшем эти частицы могут или просто вылететь из ядра, или поглотиться им, или инициировать свой внутриядерный каскад. Проследивание "истории" первичных

<sup>x/</sup> Примерно в то же время, что и наша работа<sup>/17/</sup>, были опубликованы каскадные расчёты, выполненные Габриэлем и Алсвиллером<sup>/18/</sup> в узком диапазоне энергий  $T_\gamma < 350$  Мэв.

$\gamma$ -квантов и всех последующих частиц осуществлялось с помощью метода Монте-Карло. Так же как для  $\pi$ -N-и N-N-столкновений, при восстановлении элементарного акта взаимодействия  $\gamma$ -кванта с нуклоном ядра использовались полиномиальные аппроксимации экспериментальных распределений. Полученные путем весьма трудоемкого численного анализа большого количества экспериментального материала аппроксимации могут использоваться во всех расчётах такого типа. В вычислениях учтена диффузность плотности ядра и ядерного потенциала.

Во втором параграфе главы III показано, что результаты расчётов<sup>/17,19/</sup> находятся в хорошем согласии со всей совокупностью имеющихся экспериментальных данных в области энергий  $T_\gamma = 50-1200$  Мэв (см., например, рис. 3 и 4). Это оправдывает предположение об определяющей роли в рассматриваемой энергетической области квазидейтонного и мезонного механизмов поглощения  $\gamma$ -квантов.

Отличительной чертой экспериментов по фотоядерным реакциям высокой энергии является то, что они выполняются с частицами, энергии которых распределены по весьма широкому тормозному спектру. Хорошее согласие теоретических расчётов с экспериментом позволяет надеяться, что расчёты с моноэнергетическими  $\gamma$ -квантами, приведенные в §3 главы III, также будут достаточно точными. Результаты этих вычислений могут служить основой для дальнейших расчётов (например, когда  $\gamma$ -кванты имеют энергетический спектр произвольной формы), а также необходимы для обработки различных фотоядерных экспериментов.

Выполненные в главах I и III расчёты показали, что при взаимодействии частиц высокой энергии с ядрами в резуль-

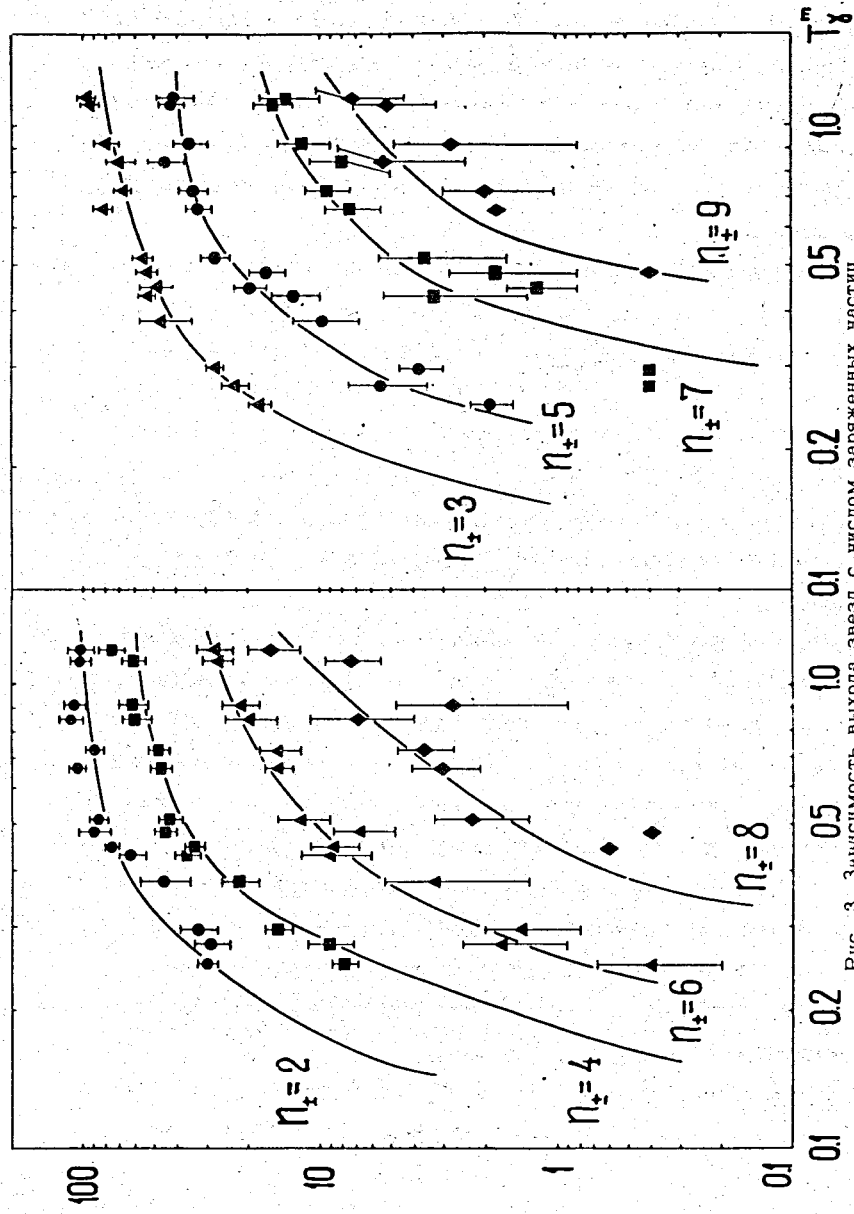


Рис. 3. Зависимость выхода звезд с числом заряженных частиц  $n_{\pm}$  в фотозмудьши, облученной тормозными  $\gamma$ -квантами с максимальной энергией  $T_{\pm}^E$  (в отн. ед.,  $T_{\pm}^E$  в Гэв). Кривые - результаты расчёта для 50 Гэ, точки - результаты эксперимента (см. работу/17/).

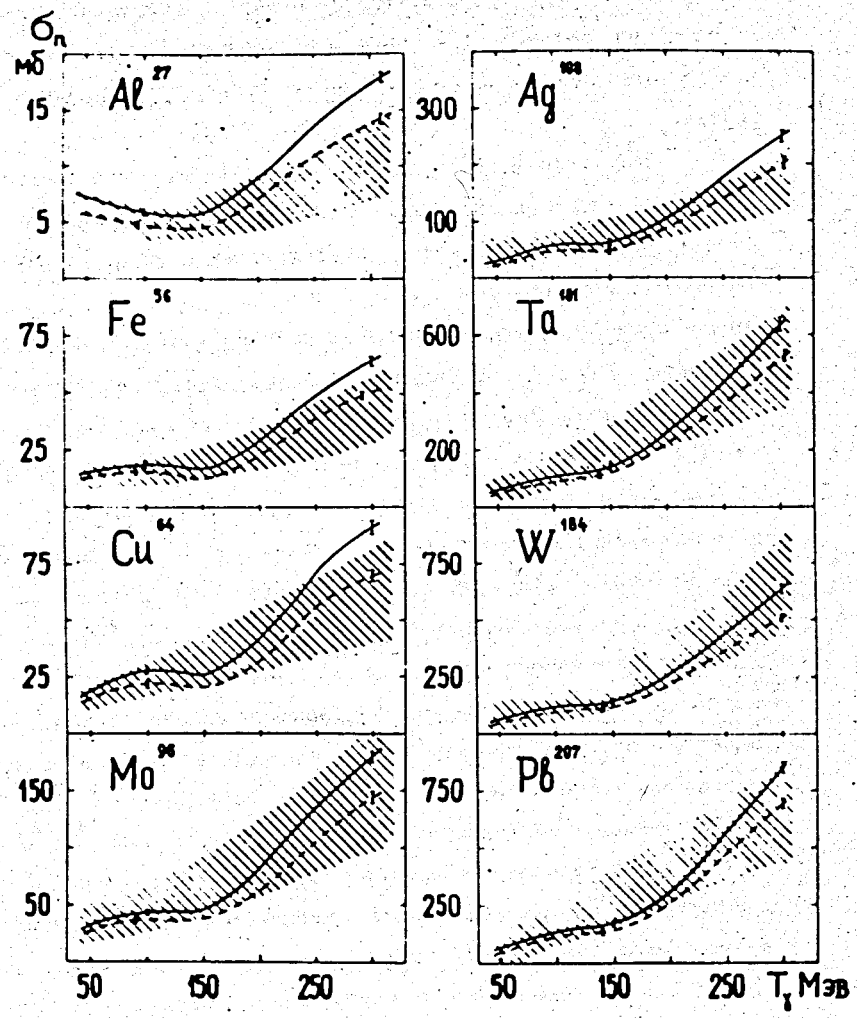


Рис. 4. Сечение фоторождения нейтронов с энергией  $T_n < 15$  Мэв на различных ядрах. Заштрихованные области указывают неопределенности эксперимента/21/. Сплошная и пунктирная кривые - расчёт со значениями параметра плотности уровней  $a = A/10$  и  $a = A/20$  Мэв соответственно.



тате реакции образуются остаточные ядра с большими значениями углового момента и энергии возбуждения. Процесс снятия возбуждения такими ядрами исследуется в четвертой главе диссертации.

Изучение этого процесса естественно начать со случая взаимодействия тяжелых ионов с ядрами, где значительная часть взаимодействий также идет с образованием составного ядра с большим возбуждением и высоким угловым моментом <sup>/22/</sup>. При этом в отличие от случая ядерных реакций высоких энергий нет дополнительных прямых процессов, сильно затрудняющих исследование явления. Снятие возбуждения у таких ядер происходит путем испускания нескольких частиц и последующей эмиссией  $\gamma$ -квантов. При этом следует помнить, что испускание частиц конкурирует с испусканием  $\gamma$ -квантов, и эта конкуренция особенно важна на конечной стадии снятия возбуждения <sup>x/</sup>.

Описание поведения высоковозбужденного ядра выполнено на основе статистической теории <sup>/23/</sup>. Большие угловые моменты ядер позволяют упростить это описание, используя классический подход, развитый в работах <sup>/23,24/</sup>. Однако теоретические расчеты относились, в основном, к однократному испусканию частиц <sup>/25/</sup>; последовательное "испарение" нескольких частиц или, иначе говоря, каскадный характер испарения учитывался, как правило, лишь приближенно <sup>/26/</sup>, что затрудняло непосредственное сравнение с опытом. Последовательный учет изменения характеристик возбужденного ядра в ходе процесса испарения выполнен в работах <sup>/27,28/</sup> для случая, когда можно пренебречь влиянием углового момента.

<sup>x/</sup> Здесь не рассматриваются ядерные реакции на тяжелых ядрах, где большую роль играет процесс деления ядра.

В данной работе удалось одновременно учесть и последовательный характер испускания частиц, и влияние большого углового момента, решая задачу с помощью метода Монте-Карло <sup>/29/</sup>. На примере взаимодействия тяжелых ионов с ядрами показано, что результаты расчетов находятся в хорошем согласии с опытом для таких характеристик, как угловые и энергетические распределения нейтронов и заряженных частиц, абсолютный выход частиц, величина орбитального момента, уносимого частицей (см., например, табл. 1). Предложенный метод расчета можно использовать для анализа влияния угловых моментов остаточных ядер на характеристики испарительных частиц, образующихся в ядерных реакциях под действием частиц высокой энергии.

Таблица 1

Среднее число частиц на акт взаимодействия  $^{59}\text{Ni} + ^{16}\text{O}$  ( $T = 160$  МэВ), идущего через образование составного ядра.

	$\bar{n}_n$	$\bar{n}_p$	$\bar{n}_\alpha$	$\sum_{\nu} \bar{n}_{\nu}$
Расчет	1,3±0,1	2,9±0,2	0,9±0,1	5,1±0,3
Эксперимент <sup>/30/</sup>	1,4±0,3	2,0±0,5	1,3±0,3	4,7±1,1

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в работах <sup>/6,10-13, 15-17,19,20,29/</sup> и были доложены на Всесоюзной конференции по физике космических лучей (Ленинград, 1969 г.), на Третьей международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Нью-Йорк, 1969 г.) и на Международной конференции в США (июнь 1970 г.).

Литература

1. S.J. Lindenbaum. *Ann.Rev.Nucl.Sci.*, 11, 213 (1963).
2. В.Г. Бобков, В.П. Демин, И.Б. Кеирим-Маркус, Е.Е. Ковалев, А.В. Ларичев, В.А. Сакович, Л.Н. Смиренский, М.А. Сычков. Радиационная безопасность при космических полетах. М., 1964.
3. The AECL Study for an Intence Neutron Generator, ed. by C.A. Bartholomev, P.R. Tunnichffe. AECL-2600, Chalk River, 1966.
4. В.П. Желепов, В.П. Дмитриевский, Б.Н. Замолодчиков, В.В. Кольга. УФН, 85, 650 (1965).
5. R. Serber. *Phys.Rev.*, 72, 1114 (1947).
6. В.С. Барашенков, К.К. Гудима, А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Сообщения ОИЯИ P2-5118, Дубна, 1970.
7. В.С. Барашенков, К.К. Гудима, В.Д. Тонеев. *Acta Phys.Polonica.*, 36, 457, 887 (1969).
8. В.Д. Тонеев. Депонированная публикация ОИЯИ, Б1-2245, Дубна, 1965.
9. H.W. Bertini. *Phys.Rev.*, 131, 1801 (1963); ORNL-3383, Oak Ridge, 1963; ORNL-3786, Oak Ridge, 1966.
10. V.S. Barashenkov, K.K. Gudima, S.M. Eliseev, A.S. Iljinov, V.D. Toneev. *High-Energy Physics and Nuclear Structure*, p. 382, ed. by S. Devons, New York-London, 1970; Preprint JINR, E2-4607, Dubna, 1969.
11. В.С. Барашенков, А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ P2-5280, Дубна, 1970.
12. V.S. Barashenkov, A.S. Iljinov, V.D. Toneev. *Comm. JINR*, E2-5282, Dubna, 1970.

13. А.С. Ильинов. Депонированная публикация ОИЯИ Б1-4-5477, Дубна, 1970.
14. H. Winzeler. *Nucl.Phys.*, 69, 661 (1965).
15. В.С. Барашенков, А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ P3-5548, Дубна, 1971.
16. А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Препринт ОИЯИ, P2-5546, Дубна, 1971.
17. К.К. Гудима, А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Сообщения ОИЯИ P2-4661, Дубна, 1969.
18. T.A. Gabriel, R.G. Alsmiller. *Phys.Rev.*, 182, 1035 (1969).
19. К.К. Гудима, А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. Сообщения ОИЯИ P2-4808, Дубна, 1969.
20. А.С. Ильинов. Депонированная публикация ОИЯИ. Б1-4-5478, Дубна, 1970.
21. L.M. Jones, K.M. Terwilliger. *Phys.Rev.*, 91, 699 (1953).
22. Г.Н. Флеров, В.А. Карнаухов. Препринт ОИЯИ Д-1798, Дубна, 1964.
23. T. Ericson. *Adv.Phys.*, 9, 425 (1960).
24. T. Ericson, V. Strutinsky. *Nucl.Phys.*, 8, 284 (1958).
25. D.C. Williams, T.D. Thomas. *Nucl.Phys.*, A92, 1 (1967).
26. D.V. Reams. *Phys.Rev.*, 137, B332 (1965).
27. I. Dostrovsky, Z. Frankel, G. Friedlander. *Phys. Rev.*, 116, 683 (1959).
28. В.Д. Тонеев. Депонированная публикация ОИЯИ Б1-2740, Дубна, 1966.
29. А.С. Ильинов, В.Д. Тонеев. ЯФ, 9, 48 (1969).
30. W.J. Knox, A.R. Quinton, C.E. Andersen. *Phys.Rev.*, 120, 2120 (1960).

Рукопись поступила в издательский отдел  
29 декабря 1970 года.