

С 34.3

Г-935

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ЛАБОРАТОРИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

2 - 4506

К.К.Гудима

МЕХАНИЗМ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ  
С ЯДРАМИ В ОБЛАСТИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук

Дубна 1969

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.Н.Калинкин

доктор физико-математических наук К.Д.Толстов

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт  
ядерной физики Каз. ССР, г. Алма-Ата.

Автореферат разослан 12 . VI . 1969 г.

Защита диссертации состоится 21 . VII . 1969 г. на засе-  
дании Ученого совета Лаборатории теоретической физики Объ-  
единенного института ядерных исследований, г.Дубна, Москов-  
ской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Учёный секретарь Совета

Р.А.Асанов

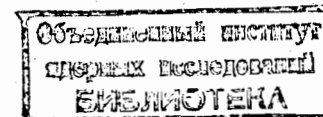
2 - 4506

К.К.Гудима

6171 89  
МЕХАНИЗМ НЕУПРУГИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ ЧАСТИЦ  
С ЯДРАМИ В ОБЛАСТИ УСКОРИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Специальность 055 - физика атомного ядра  
и космических лучей

Автореферат диссертации на соискание учёной  
степени кандидата физико-математических наук



Накопленная к настоящему времени экспериментальная информация о неупругих взаимодействиях частиц с атомными ядрами позволяет получить достаточно согласованную картину таких взаимодействий при высоких энергиях, которая, по-видимому, сохранится вплоть до энергий порядка нескольких сотен Гэв.

Важная роль в теоретическом исследовании механизма этих реакций принадлежит каскадной модели, согласно которой процесс столкновения быстрой частицы с ядром рассматривается как серия ее одиночных столкновений с внутриядерными нуклонами и последующим испарением <sup>/1-7/</sup>, а в случае тяжелых ядер, — и делением ядра-остатка. Однако достаточно подробное и разностороннее сравнение каскадной теории с опытом сделано лишь для относительно низких энергий, когда можно пренебречь процессами мезообразования <sup>/1-3/</sup>. При больших энергиях с экспериментом, в основном, сравнивались только средние характеристики взаимодействия, и лишь в отдельных случаях рассмотрены угловые и импульсные распределения.

Такой подход позволяет получить правильное общее представление о характере процесса взаимодействия частицы с ядром, однако некоторые важные детали при этом могут быть пропущены, тем более, что расчеты различных авторов относятся к различным областям энергии, а использование для описа-

ния  $N-N$  и  $\pi-N$  взаимодействий внутри ядра экспериментальных данных, усредненных по широким и меняющимся от работы к работе энергетическим интервалам может замаскировать аномалии в поведении расчётных величин. Кроме того, причиной неточности расчётов служит пренебрежение законами сохранения энергии и импульса (в работах <sup>/4-7/</sup> эти законы учтены лишь в среднем, что оправдано для расчёта средних характеристик, однако может существенно сказаться на дифференциальных распределениях), использование грубой модели ядра без учёта диффузности его границы, пренебрежение потенциалом, действующим на мезоны внутри ядра.

За исключением области очень высоких космических энергий, где эксперименты весьма трудны, и области энергий  $T \leq 200$  Мэв, где вычисления упрощаются благодаря тому, что не нужно учитывать мезообразование, точность каскадных расчётов оказывается ниже экспериментальной.

Диссертация посвящена изучению механизма внутриядерных каскадов в рамках модели, существенно более точной по сравнению с ранее использованной. Предлагаемая модель учитывает диффузность ядерной границы, процессы мезообразования, непрерывную зависимость элементарных взаимодействий от энергии и точное выполнение законов сохранения энергии и импульса.

Схема вычислений основана на эффективном способе моделирования неупругих  $N-N$  и  $\pi-N$  взаимодействий внутри ядра с помощью аппроксимации экспериментальных данных специальными полиномиальными выражениями с зависящими от энергии коэффициентами, статистический розыгрыш по которым выполняется таким образом, чтобы в каждом отдельном акте  $N-N$  или  $\pi-N$  взаимодействия были выполнены законы сохранения.

На основе этой схемы рассчитаны внутриядерные каскады, инициируемые  $\pi$ -мезонами и протонами с энергией от нескольких десятков Мэв до 20-30 Гэв.

В связи с конструированием сильноточных генераторов нейтронов, а также в связи с радиационной защитой космических кораблей<sup>x/</sup>, в настоящее время актуальной стала задача научиться рассчитывать неупругие взаимодействия ядер с ядрами при энергиях, больших нескольких сотен Мэв на нуклон.

Изучение взаимодействий ядер естественно начать с наиболее простого случая дейтрон+ядро, тем более, что для этого случая сейчас имеется наибольшее число экспериментальных данных.

Диссертация состоит из четырех глав. В начале первой главы приводится метод расчёта неупругих взаимодействий частиц с внутриядерными нуклонами с учётом точного выполнения законов сохранения энергии импульса<sup>/10/</sup>. Показано, каким образом с помощью метода Монте-Карло для каждой из вторичных частиц, рождающихся в неупругом столкновении, можно определить углы разлета и энергию, удовлетворяющие законам сохранения и в то же время образующие распределения заданного вида. При этом автоматически определяется также множественность рождающихся частиц. Обсуждается корреляция угловых и импульсных распределений. Для области энергий  $T \leq 30$  Гэв получены полиномиальные аппроксимации взятых из опыта интегральных угловых и импульсных распределений вторичных частиц для упругих и неупругих  $N-N$  и  $\pi-N$  столкновений. Использование этих аппроксимаций значительно облегчает расчёты внутриядерных каскадов.

В последнем разделе первой главы дано описание схемы расчета каскадных взаимодействий частиц с ядрами в области энергий от нескольких десятков Мэв до 30 Гэв. Учтена диффузность ядерной границы и потенциала ядра; при вычислениях точно

<sup>x/</sup> См., например, работы <sup>/8,9/</sup>, где можно найти дальнейшую библиографию. Хотя по отношению к протонам ядерная компонента космических лучей составляет всего лишь несколько процентов, радиационный эффект при длительных полетах определяется в основном ( $\sim 80\%$ ) именно этой компонентой.

выполняются законы сохранения энергии-импульса<sup>/11/</sup>. Принята во внимание возможность поглощения медленного мезона группой спаренных нуклонов.

Во второй главе излагаются результаты подробных расчётов неупругих пион-ядерных взаимодействий, теоретическому рассмотрению которых до сих пор было посвящено лишь несколько работ<sup>/5,7,12/</sup>.

Для сравнения выбраны фотоэмульсионные данные, так как они являются в настоящее время наиболее подробными и позволяют проследить поведение характеристик пион-ядерного взаимодействия вплоть до энергий  $T \approx 20$  Гэв.

Подробное и разностороннее сравнение результатов более точных расчётов<sup>/13/</sup> с известными сейчас экспериментальными данными подтверждают вывод о том, что во всей области энергий от нескольких десятков Мэв до  $T = 5$  Гэв неупругие взаимодействия  $\pi^-$ -мезонов с ядрами происходят в соответствии с общепринятой моделью внутриядерных каскадов, сопровождающихся испарением возбужденного ядра-остатка. Расхождения с экспериментом становятся существенными лишь при больших энергиях. Эти расхождения относятся к тем характеристикам пион-ядерного взаимодействия, которые связаны с рождением низкоэнергетической компоненты рождающихся частиц.

Подробный анализ экспериментальных данных показывает<sup>/14/</sup>, что энергетическая зависимость таких характеристик, если судить по наиболее точным измерениям, изменяется в области  $T \geq 5$  Гэв: Изменение носит характер "насыщения", и для его объяснения требуется существенная модификация общепринятой модели внутриядерных каскадов (см., например, рис. 1). Теоретические значения величин, связанных с рождением быстрых релятивистских частиц, согласуются с опытом во всей области энергий (см., например,  $\bar{p}_s$  на рис. 1). В то же время значения  $\bar{p}_q$  и  $\bar{p}_h$  оказываются при этом заметно больше экспериментальных и продолжают возрастать с увеличением энергии, тогда как экспериментальная множественность серых

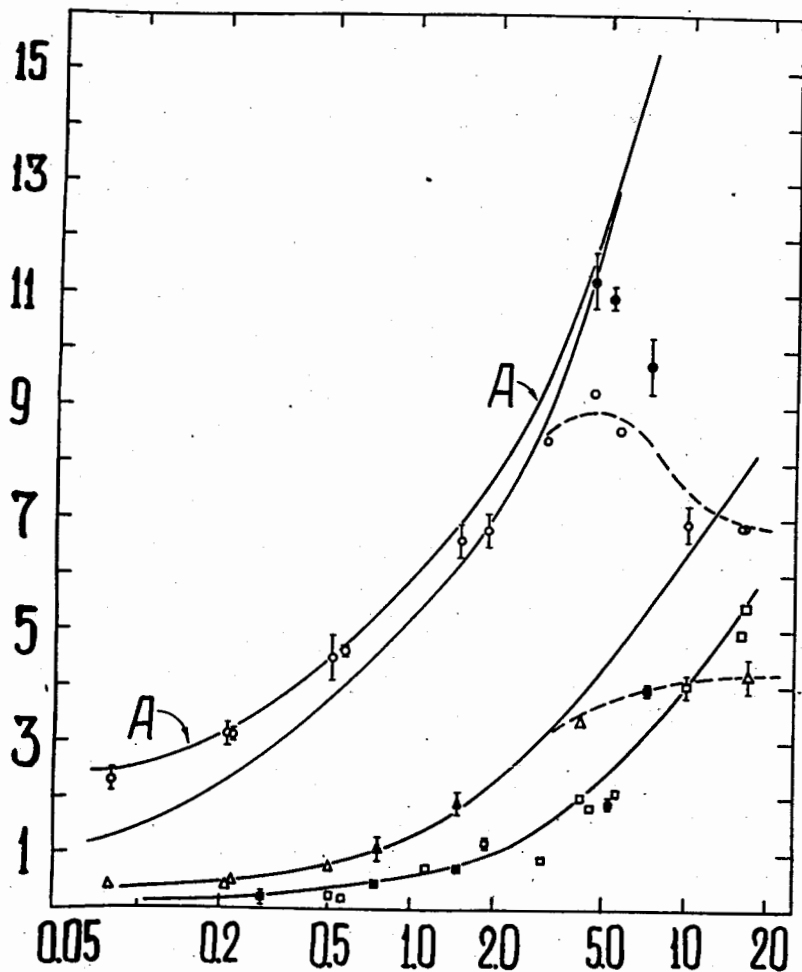


Рис. 1. Зависимость средней множественности  $s$ - $g$  и  $h$ -следов в фотоэмульсии от кинетической энергии первичного  $\pi^-$ -мезона. Квадратами, треугольниками и кружками нанесены экспериментальные значения  $\bar{p}_s$ ,  $\bar{p}_q$  и  $\bar{p}_h$ . Светлые значки относятся к данным, полученным методом просмотра эмульсии вдоль следа, заштрихованные значки - данные, полученные при просмотре по площади. Сплошные кривые - результаты расчёта для среднего ядра фотоэмульсии  $Ga^{70}$ . Кривая А для  $\bar{p}_h(T)$  - среднее число  $h$ -следов для звезд с  $p > 1$ . Пунктиром показано изменение величин  $\bar{p}_h(T)$  и  $\bar{p}_q(T)$ , соответствующее наиболее достоверным экспериментальным данным.

следов  $\bar{n}_g(T)$  достигает при  $T \geq 5$  Гэв насыщения, а экспериментальное значение  $\bar{n}_h$  даже обнаруживает тенденцию к уменьшению.

Значение "критической" энергии  $T \approx 5$  Гэв относится к среднему ядру фотоэмульсии и, по-видимому, может изменяться от ядра к ядру, однако в рассмотренной нами общепринятой схеме внутриядерных каскадов нет механизма, который приводил бы к насыщению или к уменьшению множественности серых и черных следов в области высоких энергий.

Примечательно то, что совершенно аналогичная картина наблюдается и в случае протон-ядерных взаимодействий, рассмотренном нами в третьей главе.

При расчёте протон-ядерных взаимодействий /15/ были использованы в точности те же предположения и значения параметров, что и для пион-ядерных взаимодействий. Вместе с тем, в данном случае взаимодействия протонов изучены более обстоятельно, теоретические величины сравнивались как с фотоэмульсионными данными, так и с данными по конкретным ядрам, особенно при энергиях протонов, меньших или порядка нескольких сотен Мэв.

Показано, что каскадно-испарительная модель хорошо передает все основные качественные и количественные черты неупругих протон-ядерных взаимодействий. Расхождения с опытом проявляются лишь для характеристик, связанных с рождением медленных каскадных и испарительных частиц в области  $T \geq 5$  Гэв (см. рис. 2).

Детальный анализ результатов расчётов различных характеристик пион- и протон-ядерных взаимодействий, связанных с компонентой медленных частиц, показывает, что наблюдаемый на опыте эффект "насыщения" числа таких частиц в области  $T \approx 5$  Гэв связан с изменением механизма ядерных взаимодействий. Отметим, что в этой области энергий в поведении характеристик, связанных с рождением ливневых частиц, и в по-

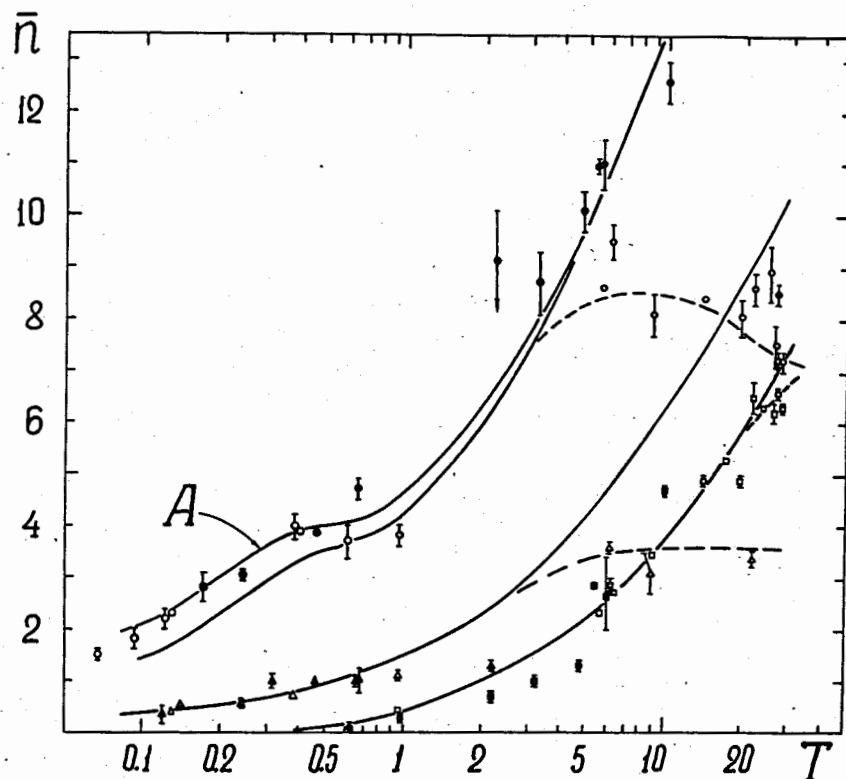


Рис. 2. Зависимость средней множественности s-g и h-следов в фотоэмульсии от кинетической энергии первичного протона. Все обозначения те же, что и на рис. 1.

ведении средних величин, характеризующих элементарные  $N-N$  и  $\pi-N$  взаимодействия, никаких особенностей не проявляется.

Наблюдаемые на опыте энергетические зависимости можно объяснить изменением плотности ядерных нуклонов по мере развития внутриядерного каскада. Большое число ливневых частиц, образующихся уже в первом неупругом  $N-N$  или  $\pi-N$  столкновении внутри ядра, выбивает следующие нуклоны на пути развития каскада, а так как за время прохождения каскадной лавины ядерная плотность не успевает сколько-нибудь значительно перераспределиться, то нуклоны отдачи, которые в основном и составляют  $g$ -частицы, встречают уже меньшее число внутриядерных нуклонов; соответственно меньшей оказывается энергия возбуждения и, следовательно, число испарительных частиц.

Учёт "насыщения" каскадных нуклонов и энергии возбуждения ядра остатка позволяет качественно понять некоторые важные факты, касающиеся явлений фрагментации и деления.

Прежде всего - это зависимость выхода фрагментов от энергии. Если допустить, как это часто делается в современных моделях, что тяжелые фрагменты в основном представляют собой нуклонные ассоциации, выбитые из ядра каскадными нуклонами или образовавшиеся в результате испарения возбужденного ядра-остатка, то рост сечений их образования должен резко замедлиться при  $T \approx 5$  Гэв, что согласуется с экспериментом (см., например, /16/).

Насыщение энергии возбуждения, достигаемое при энергиях порядка нескольких Гэв (напомним, что значение  $T \approx 5$  Гэв относится лишь к среднему ядру фотоэмульсии) приводит к тому, что возрастание барьера деления, обусловленное более глубоким расщеплением при высоких энергиях, не может быть скомпенсировано ростом энергии первичной частицы. Именно такой эффект был обнаружен недавно для ядер плутония и урана авторами работы /17/.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению механизма взаимодействия быстрых дейтронов с ядрами /18-21/.

Дейтрон рассматривался как слабо связанная система, "гантель" из протона и нейтрона, расстояние между которыми фиксировано и равно среднему диаметру дейтрона  $D \approx 4,3 \cdot 10^{-13}$  см. Направление оси такой гантели изотропно распределено в пространстве, а поскольку орбитальный момент дейтрона равен нулю, то ее ориентация не изменяется при движении. Закрепленные нуклоны имеют относительный импульс  $p$ , для оценки распределения которого использовалась функция:

$$W(p) d^3 p = \frac{\hbar}{\pi d} \frac{d^3 p}{(p^2 + \hbar^2/D^2)^2},$$

представляющая квадрат фурье-компоненты приближенной волновой функции дейтрона.

Учтены стриппинговые процессы, кулоновское и дифракционное расщепления дейтрона на периферии ядра.

Расчёты, выполненные в приближении резкой границы ядра (§1), показали, что, в отличие от пион- и нуклон-ядерных взаимодействий, в этом случае весьма существенной оказывается диффузность ядерной плотности. Если эту диффузность не учитывать, то с опытом согласуются лишь средние характеристики; все величины, относящиеся к области малых углов, оказываются существенно заниженными.

Во второй части четвертой главы приведены результаты расчётов и их сравнение с опытом, выполненных в уточненной модели ядра с учётом процессов мезообразования.

Учёт процессов мезообразования и более точный метод расчёта каскадных процессов позволяют получить удовлетворительное согласие со всеми известными сейчас эксперимен-

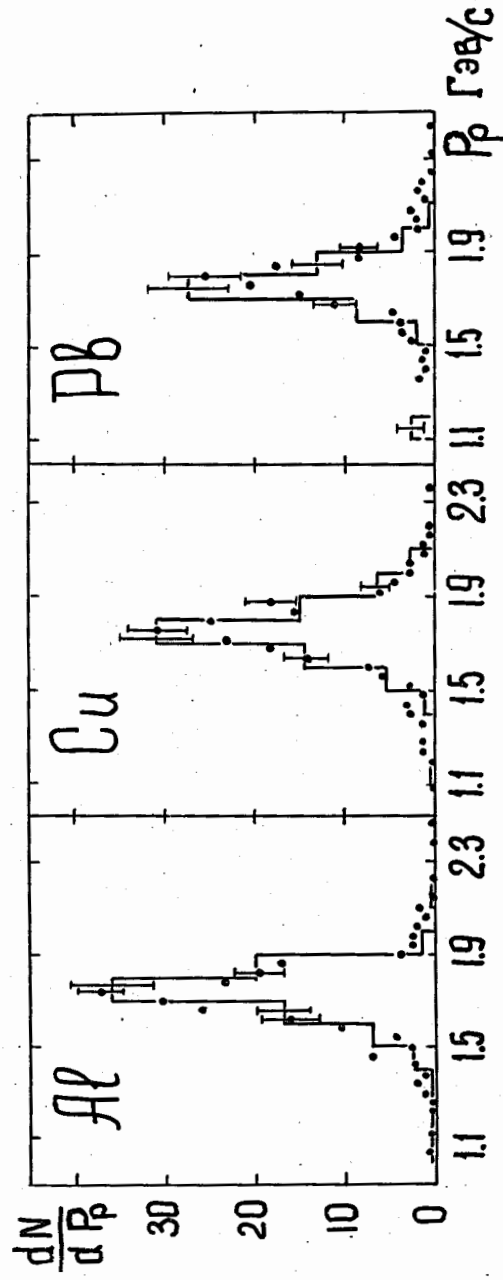


Рис. 3. Импульсные распределения протонов, образовавшихся при неупругом взаимодействии дейтрона с ядрами Al, Cu и Pb при  $T = 2,1$  Гэв. Гистограммы - расчёт. Точками указаны экспериментальные данные из работы /22/.

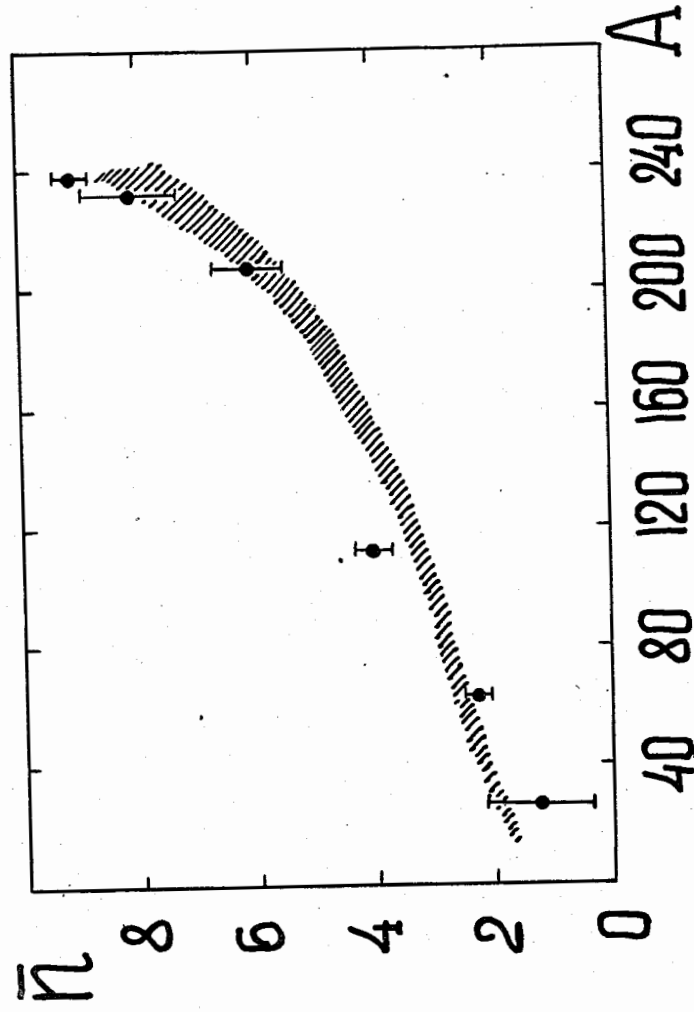


Рис. 4. Среднее число нейтронов, образовавшихся в неупругом дейтрон-ядерном взаимодействии при  $T = 160$  Мэв. Заштрихованная область соответствует неопределённости при расчёте "испарительных" нейтронов. Экспериментальные точки взяты из работы /23/.



тальными данными по высокоэнергетическим неупругим дейтрон-ядерным взаимодействиям (см., например, рис. 3,4).

Такие взаимодействия происходят путем наложения каскадов, инициируемых нуклонами ядра дейтерия. Поправки на дифракционное и кулоновское расщепления оказываются неважными.

Следует ожидать, что, подобно тому, как это имеет место в случае пион- и нуклон-ядерных столкновений, механизм неупругих взаимодействий дейтронов с ядрами должен претерпевать изменения при энергиях  $T < 2T_{\text{нукл}} \leq 10$  Гэв.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах /10,11,13-15,18-21/ и докладывались на Всесоюзной конференции по космическим лучам 1967 года /18/.

#### Л и т е р а т у р а

1. H.W.Bertini. Report ORNL-3383, Oak Ridge, 1963; Phys. Rev., 131, 1801 (1963).
2. В.С.Барашенков, В.М.Мальцев, В.Д.Тонеев. Изв. АН СССР, сер. физ., 30, 322 (1966).
3. N.Metropolis, R.Bivins, M.Storm, A.Turkevich, G.M.Miller, G.Friedlander. Phys. Rev., 110, 185, 204 (1958).
4. И.З.Артыков, В.С.Барашенков, С.М.Елисеев. ЯФ, 3, 987 (1966).
5. I.Z.Artykov, V.S.Barashenkov, S.M.Eliseev. Nucl. Phys., 87, 83 (1966).
6. I.Z.Artykov, V.S.Barashenkov, S.M.Eliseev. Nucl. Phys., 86, 11 (1968).
7. I.Z.Artykov, V.S.Barashenkov. Nucl. Phys., 86, 628 (1968).
8. The AECL Study for an Intense Neutron Generator; Report AECL-2600, Chale River, Ontario, 1966.
9. В.Г.Бобков, В.П.Демин, И.Б.Кеирим-Маркус, Е.Е.Ковалев, А.В.Ларичев, В.А.Сакович, М.Н.Смиранный, М.А.Сычков. Радиационная безопасность при космических полетах. Атомиздат, Москва, 1964.

10. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Acta Phys. Polon. (в печати); Препринт ОИЯИ Р2-4066, 1968.
11. В.С.Барашенков, Т.Добровольский, И.А.Ивановская, В.М.Мальцев, Г.И.Пенев, А.Филиппковский ЯФ, 3, 73 (1966).
12. Е.Богданович, Т.Добровольский, И.А.Ивановская, В.М.Мальцев, Г.И.Пенев, А.Филиппковский. ЯФ, 3, 73 (1966).
13. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Acta Phys. Polon. (в печати). Препринт ОИЯИ Р2-4313, Дубна, 1969.
14. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Препринт ОИЯИ Р2-4302, Дубна, 1969.
15. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Acta phys. Polon. (в печати). Препринт ОИЯИ Р2-4402, Дубна, 1968.
16. О.В.Ложкин, Н.А.Перфилов. В сб. "Ядерная химия", Изд. "Наука", М., 1965.
17. Е.С.Матусевич, В.И.Регушевский. ЯФ, 7, 1187 (1968).
18. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Материалы Всесоюзной конференции по физике космич. лучей. Новосибирск, 1967. Изв. АН СССР сер. физ., 32, 352 (1968).
19. К.К.Гудима. В сб. "Исследования по квантовой теории систем многих частиц". Изд. АН МССР, Кишинев, 1969.
20. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. ЯФ, 9, 528 (1969). Препринт ОИЯИ Р2-3356, Дубна, 1967.
21. В.С.Барашенков, К.К.Гудима, В.Д.Тонеев. Препринт ОИЯИ Р2-4346, Дубна, 1969.
22. R.L.Lander, O.Piccioni, Nguyen - Hun Xuong, P.Yager. Phys. Rev., B137, 1228 (1965).
23. W.E.Grandall, G.P.Millburn. Journ. Appl. Phys., 29, 698 (1958).

Рукопись поступила в издательский отдел  
26 мая 1969 года.