

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

М - 383

4-81-284

МАШНИК

Степан Георгиевич

**МЕХАНИЗМЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ ЭМИССИИ ЧАСТИЦ
В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1981

ОБЪЕМ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

В. Д. ТОНЕЕВ

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Г. М. ЗИНОВЬЕВ

В. И. ФУРМАН

Ведущее научно-исследовательское учреждение —
Физико-энергетический институт, г. Обнинск

Защита диссертации состоится "___" _____ 1981 года
на заседании специализированного Совета К 047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследова-
ний, г. Дубна, Московской области.

Автореферат разослан "___" _____ 1981 года
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

В. И. ЖУРАВЛЕВ

Актуальность проблемы. В последние годы большой интерес вызыва-
ют исследования ядерных реакций при промежуточных энергиях

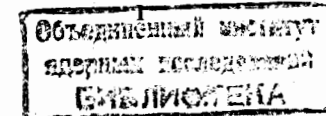
$T_0 \approx (0.05-1)$ ГэВ. Актуальность физики промежуточных энергий обу-
словлена несколькими причинами. Во-первых, исследуя взаимодействия
частиц и ядер с ядрами при промежуточных и высоких энергиях, можно
получить новую информацию о строении атомного ядра и свойствах ядер-
ного вещества. Так, изучение ядерных реакций с большой передачей им-
пульса по-новому поставило вопрос о существовании и роли короткодей-
ствующих корреляций внутриядерных нуклонов. Несомненный интерес
представляют исследования, направленные на выявление новых форм кол-
лективного движения ядерной материи (например, ударные волны), выяс-
нение возможностей существования сверхплотных ядер, поиск эффектов,
связанных с пионной конденсацией. Во-вторых, такие исследования дают
ценную информацию о взаимодействиях элементарных частиц. Ядро-мишень
в этом случае играет роль селектора, отбирающего необходимые ампли-
туды взаимодействия. Далее, самостоятельный интерес представляет изу-
чение механизмов протекания реакции, которые в этой "переходной" об-
ласти энергий многочисленны и разнообразны.

Исследования реакций, протекающих при промежуточных энергиях,
стимулированы также необходимостью решения таких важных прикладных
задач, как радиационная защита ускорителей и космических аппаратов,
ряда биофизических, геофизических и космофизических задач.

Для решения отмеченного круга проблем необходимо иметь хорошо
разработанные методы описания ядерных реакций при промежуточных энер-
гиях. Точно решить задачу на основе нестационарного уравнения Шредин-
гера для многих тел в настоящее время невозможно, поэтому для практи-
ческого описания ядерных реакций используются различные феноменологи-
ческие модели.

На быстрой стадии реакции испускание высокоэнергетических частиц
в микроскопическом подходе рассматривается в рамках традиционных ме-
тодов прямых ядерных реакций ($DWBA$, $PWBA$, метод связанных кана-
лов) на основе одно- или многоступенчатых возбуждений прямого типа.
В кинетическом подходе для этой цели используются различные версии
феноменологической модели внутриядерного каскада. Для описания полно-
го выхода частиц все эти модели обычно дополняются испарительной мо-
делью, которая используется для расчета испускания низкоэнергетиче-
ских частиц на медленной стадии реакции.

С увеличением энергии возбуждения системы, образующейся в ядер-
ной реакции, ее время жизни уменьшается, и она может развалиться, не



успев прийти в состояние статистического равновесия. С другой стороны, время жизни такой системы может быть достаточно большим по сравнению с характерными временами прямых реакций. Для описания установления статистического равновесия в такой системе и испускания частиц на этой стадии реакции используются различные модели предравновесного распада.

Цель работы. В рамках единого кинетического подхода развить феноменологическую модель для описания нуклон-ядерных взаимодействий, объединяющей в себе черты всех трех отмеченных выше стадий ядерных реакций — быстрой (каскадной), предравновесной и равновесной, и анализировать на основе этой модели разнообразные характеристики ядерных реакций с целью выявления вклада различных механизмов образования вторичных частиц и поиска наиболее чувствительных к ним характеристик.

Научная новизна и практическая ценность. В диссертации в рамках кинетического подхода впервые развита феноменологическая модель адрон-ядерных взаимодействий, объединяющая черты трех механизмов ядерных реакций: прямого (каскадного), предравновесного и равновесного (компаунд-ядро), учитывающая анизотропное предравновесное испускание как нуклонов, так и сложных частиц ($d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$). В рамках этой модели исследованы разнообразные характеристики адрон-ядерных взаимодействий в области энергий от ~ 20 МэВ до ~ 3 ГэВ и при одном и том же наборе фиксированных параметров достигнуто хорошее согласие с экспериментом как по абсолютной величине, так и по форме распределений. Впервые показано, что для средних и тяжелых ядер предравновесная эмиссия играет существенную роль при энергиях $T_0 > 100$ МэВ. Проанализирована относительная роль различных механизмов реакции в зависимости от T_0 и A . Выяснено, что на каскадной стадии реакции в образовании кинематически запрещенных частиц (КЗЧ) эффективно участвует небольшое число (3–5) внутриядерных нуклонов даже для тяжелого ядра-мишени. Показано, что механизм квазисвободного упругого перерасеяния не может описать выход КЗЧ даже при $T_0 \sim 100$ МэВ. Впервые продемонстрирована важность двухступенчатого механизма образования КЗЧ за счет рождения пиона и его последующим поглощением в ядре двухнуклонной ассоциацией. Оценен вклад предравновесных процессов в образование КЗЧ.

Предложенная модель была использована для исследования реакции захвата остановившихся пионов средними и тяжелыми ядрами. Впервые удалось описать выход сложных частиц в таких процессах. Получено удовлетворительное согласие с экспериментом теоретических спектров

частиц ($n, p, d, t, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}$), двух нейтронных корреляций, средних множественностей, выходов изотопов, распределений остаточных ядер по импульсу и угловому моменту.

Полученные результаты могут быть использованы при планировании новых экспериментов на мезонных фабриках. Развита модель также может быть обобщена для описания фотоядерных реакций, поглощения ядром медленных μ^- и K^- -мезонов и служить основой для исследования ядро-ядерных взаимодействий.

Апробация работы. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на семинарах ЛТФ, ЛИН и ЛЭЗ ОИЯИ, в ИИИ АН СССР, в Центральном институте ядерной физики (Россендорф, ГДР), на IУ конференции молодых ученых ЛТФ (Дубна, 1980), на УШ и IX зимних школах ЛИЯФ (Усть-Нарва, 1978, 1979), на УШ Международном Симпозиуме по взаимодействию медленных нейтронов с ядрами (Гэуссиг, 1978, ГДР), на II Международном Симпозиуме по реакциям, инициируемым нейтронами (Смоленце, 1979, СССР), на УШ Международной конференции по физике высоких энергий и структуре ядра (Ванкувер, 1979, Канада).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано одиннадцать работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения; она содержит 147 страниц машинописного текста, 39 рисунков, 3 таблицы и библиографический список из 148 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные вопросы, рассмотренные в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации и дано обоснование актуальности и важности поставленных задач.

В первой главе диссертации обсуждается предравновесный распад возбужденных ядер. Развита версия модифицированной экситонной модели, анализируются ее достоинства и недостатки, намечаются пути дальнейшего усовершенствования модели.

В § I обсуждаются основные положения экситонных моделей ядерных реакций, которые рассматривают взаимодействие нуклонов с ядром как процесс последовательного усложнения состояния ядра за счет остаточных двухчастичных взаимодействий. Исследуются обобщенные кинетические уравнения (*master* – уравнения), используемые в экситонных моделях для описания установления статистического равновесия в ядре. Рассмотрена связь *master*-уравнений со случайными марковскими процессами и реализована монте-карловская схема их решений.

В § 2 коротко изложена предложенная в ЛТФ ОИЯИ модифицированная экситонная модель (МЭМ) ядерных реакций, в которой по сравнению с другими подходами учтены такие существенные черты явления, как переходы в системе без изменения числа экситонов n и возможность последовательного испускания нескольких частиц на предравновесной стадии реакции. Далее делается уточнение МЭМ на учет принципа Паули и неразличимость одинаковых экситонов и дается полная формулировка модели.

В § 3 анализируются параметры МЭМ, исследуется влияние принципа Паули и эффекты оболочечной структуры ядра на предсказания модели. В рамках единой параметризации получено неплохое согласие с экспериментом по энергетическим спектрам нуклонов и функциям возбуждения в нуклон-ядерных реакциях в области умеренных ($T_0 \leq 30$ МэВ) энергий. В конце главы анализируются достоинства, недостатки и пути дальнейшего усовершенствования модифицированной экситонной модели.

Во второй главе эта модель обобщается на учет эмиссии сложных частиц и асимметрии углового распределения предравновесной компоненты и с целью расширения области применимости на большие энергии и учета прямых процессов объединяется с каскадной моделью. Далее, уже в рамках каскадно-экситонной модели выполнен систематический анализ разнообразных характеристик нуклон-ядерных взаимодействий при энергиях $T_0 \leq 150$ МэВ.

В § 1 коротко излагаются основные положения каскадной модели, которая в кинетическом подходе рассматривает взаимодействие быстрой частицы с ядром как последовательность двухчастичных квазисвободных (упругих и неупругих) столкновений частиц с нуклонами ядра. Обсуждается взаимосвязь модели внутриядерного каскада с экситонной моделью и обосновывается объединение этих двух моделей в единую каскадно-экситонную модель (КЭМ) ядерных реакций.

В § 2 дана полная формулировка КЭМ, в рамках которой ядерная реакция рассматривается как происходящая в три последовательные стадии - каскадной, предравновесной и равновесной. В соответствии с этим каждая экспериментально-измеряемая величина в КЭМ будет в общем случае содержать три компонента. В конце параграфа анализируется чувствительность предсказаний КЭМ к входным параметрам задачи.

В § 3 модифицированная экситонная модель обобщена на учет эмиссии сложных частиц на предравновесной стадии реакции. Предполагается, что в ходе реакции p_j возбужденных частиц (экситонов) могут с вероятностью δ_j "сконденсироваться", образовав сложную частицу, которая может быть испущена на предравновесной стадии реакции. Учтена возможность испускания предравновесных и равновесных дейтронов, ядер

t , ${}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$. в КЭМ пренебрегается вкладом прямых процессов образования сложных частиц на быстрой (каскадной) стадии реакции. На основе учета законов сохранения энергии и импульса на каждом шаге усложнения состояния ядра предложены два способа описания анизотропии частиц, испущенных на предравновесной стадии реакции. Дан систематический анализ энергетических спектров, угловых распределений и двойных дифференциальных сечений нуклонов и сложных частиц, испущенных в нуклон-ядерных реакциях в области энергии T_0 от ~ 15 МэВ до ~ 150 МэВ и для ядер-мишеней от ${}^{27}\text{Al}$ до ${}^{209}\text{Bi}$. Получено хорошее согласие с экспериментом. Расчеты показали, что $d\sigma/dT$ и $d\sigma/d\Omega$ являются нечувствительными характеристиками для определения относительного вклада различных механизмов реакции. Например, из рис. 1 видно, что относительная роль каскадного предравновесного и равновесного механизмов меняется с T_0 и массовыми числами ядра-мишени и нельзя выбрать какую-то область углов, где бы вклад давал только один механизм взаимодействия. Выяснено, что в образовании вторичных частиц (n, p и особенно $d, t, {}^3\text{He}$ и ${}^4\text{He}$) существенную роль играет предравновесный механизм.

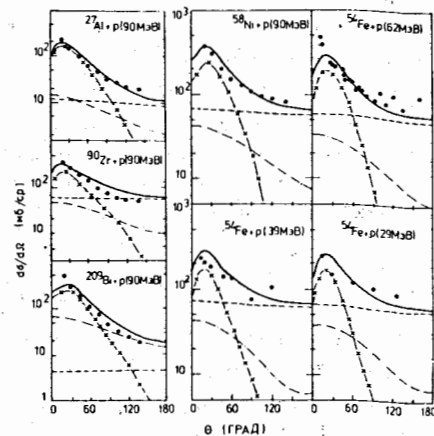


Рис. 1. Угловые распределения протонов. Кривая, помеченная крестиками, показывает вклад каскадных частиц, штрих-пунктирная - предравновесная компонента, пунктирная - испарительные протоны. Непрерывная кривая - сумма всех трех компонент. Экспериментальные точки - из работ: Bertrand F.E., Peelle R. Phys. Rev., 1973, C8, p. 1045; Wu J.R. et al. Phys. Rev., 1979, C19, p. 698.

В § 4 резюмируются основные результаты, полученные во второй главе.

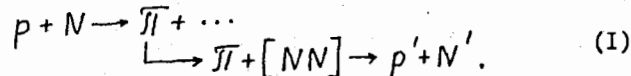
В третьей главе развитая модель применена для исследования относительной роли различных ядерных механизмов в образовании частиц в кинематической области, запрещенной для свободного рассеяния (КЗЧ). При этом рассмотрены взаимодействия протонов и π^- -мезонов с ядрами от углерода до свинца и в области начальных энергий от ~ 20 МэВ до ~ 3 ГэВ.

В § 1 дан краткий обзор теоретических моделей, применяемых для описания образования КЗЧ в рассматриваемой области энергий и ядер-мишеней. Формулируется постановка задачи и приводятся некоторые необходимые предварительные сведения.

В § 2 исследованы реакции, инициируемые протонами при энергиях T_0 ниже порога пинообразования. Показано, что в этой области энергий основной вклад в образование быстрых нуклонов и сложных частиц назад дают предравновесные процессы. Выяснено, что только упругим перерассеянием нельзя описать образование КЗЧ даже при $T_0 \sim 100$ МэВ.

§ 3 посвящен исследованию механизмов образования кинематически запрещенных нуклонов, пионов и сложных частиц в области промежуточных энергий (от порога пинообразования до $T_0 \sim 1$ ГэВ).

В пункте 3.1 показано, что в рассматриваемой области энергий КЭМ может вполне удовлетворительно описать выход КЗЧ. При этом основным механизмом, приводящим к образованию быстрых нуклонов назад, является двухступенчатый механизм рождения пиона с его последующим поглощением в ядре кваздейтронной парой



Продемонстрирована также важность предравновесной эмиссии нуклонов и сложных частиц. Выяснено, что инклюзивные спектры являются характеристикой, слабо чувствительной к механизму реакции.

В пункте 3.2 показана эффективность анализа корреляционных измерений $p + A \rightarrow p_1 + p_2 + \dots$ для идентификации механизмов взаимодействия, связанных с эффективной массой $m_{эфф} = 2m_N$.

В § 4 рассмотрена область энергий $T_0 > 1$ ГэВ. Как видно из рис. 2, и здесь основным механизмом образования быстрых нуклонов назад является захват π^- -мезонов кваздейтронной парой (I). Для средних и тяжелых ядер существенную роль играет предравновесная эмиссия частиц.

В § 5 подводится итог результатов, полученных в главе III.

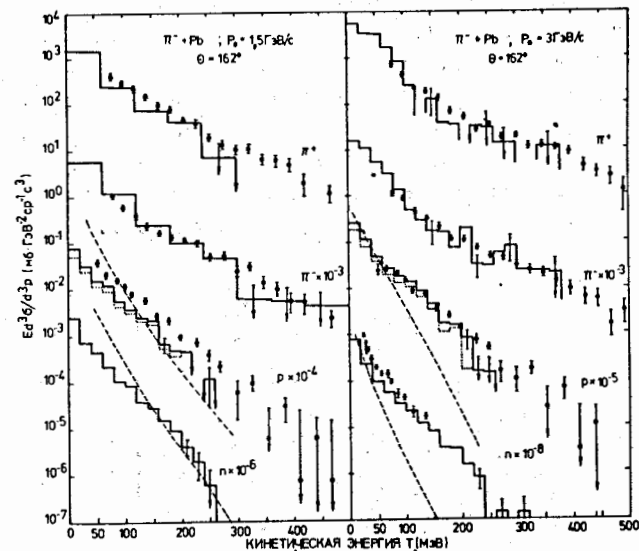


Рис. 2. Инклюзивные спектры частиц, испущенные при взаимодействии π^- -мезонов с ядрами свинца. Пунктирные линии показывают вклад предравновесной компоненты; пунктирная гистограмма - вклад от двухступенчатого механизма (I); сплошные гистограммы - все каскадные частицы; точки - экспериментальные данные, полученные группой Г.А.Лексина в ИТЭФ: Препринты ИТЭФ - 58 (1979); - 85 (1977); - 19 (1980).

В четвертой главе каскадно-экситонная модель применена для исследования реакции захвата остановившихся пионов ядрами-мишенями от ^{31}P до ^{209}Bi .

В § 1 кратко обсуждаются модели, применяемые ранее для описания реакции захвата остановившихся пионов средними и тяжелыми ядрами, и дается постановка задачи.

В § 2 изложена модель, используемая для расчета координат и механизма поглощения остановившихся π^- -мезонов в поверхностном слое ядра. Поведение ядра после поглощения пиона рассматривается в рамках изложенной выше КЭМ.

§ 3 посвящен анализу характеристик нуклонов и сложных частиц, испущенных ядром после поглощения пиона. С использованием набора параметров КЭМ, фиксированного во второй и третьей главах при опи-

сании адрон-ядерных реакций, получено хорошее согласие с экспериментом для энергетических спектров и средних множественностей вторичных нуклонов и сложных частиц. Из рис. 3 видно, что основной вклад в образование сложных частиц дают предравновесные процессы, а испарительная компонента лежит на один-четыре порядка ниже эксперимента.

В § 4 исследуются разнообразные характеристики остаточных ядер. Показано, что предравновесные процессы играют существенную роль в образовании высокоспиновых и высокоимпульсных состояний остаточных ядер.

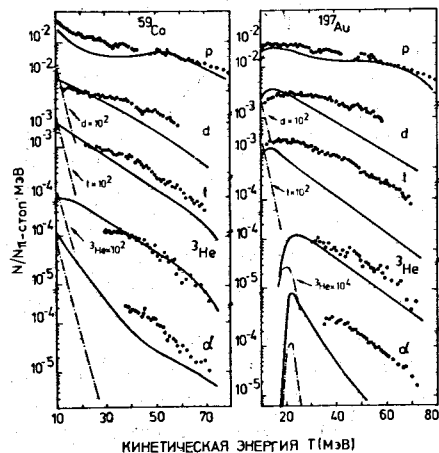


Рис. 3. Энергетические спектры частиц, испущенных при поглощении остановившихся пионов ядрами ^{59}Co и ^{197}Au . Сплошные кривые - расчет в рамках КЭМ; пунктиром показан вклад от испарения; экспериментальные точки - из работы

Pruys H.S. et al. In: Proc. of the Int. Conf. on Nuclear Reaction Mechanisms. Varenna, Italia, 1977, p.219.

В § 5 анализируется роль различных механизмов поглощения пионов ядрами. Расчеты показывают, что для средних и тяжелых ядер основной механизм поглощения π^- -мезонов - двухнуклонный.

В конце главы приведены краткие выводы.

В Заключении диссертации перечисляются основные выводы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫДВИГАЕМЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

I. В рамках кинетического подхода развита феноменологическая модель нуклон-ядерных взаимодействий, объединяющая черты трех механиз-

мов ядерных реакций: прямого (каскадного), предравновесного и равновесного (компаунд-ядро).

2. На основе развитой модели проанализирована большая совокупность характеристик (двойные дифференциальные сечения, энергетические и угловые распределения, средние множественности нуклонов и сложных частиц, двухпротонные корреляции, функции возбуждения) адрон-ядерных взаимодействий в области энергий от ~ 20 МэВ до 3 ГэВ и получено хорошее согласие с экспериментом в абсолютной шкале при одном и том же наборе фиксированных параметров.

3. Показано, что в образовании вторичных частиц (n , p и особенно d , t , ^3He и ^4He) большую роль играет предравновесный механизм и его вклад меняется с начальной энергией T_0 , массового числа A ядра-мишени и кинематической области вторичных частиц. Выяснено, что энергетические спектры и угловые распределения являются нечувствительными характеристиками для определения вклада различных механизмов реакций. Показано, что при энергиях T_0 ниже порога пинообразования для определения вклада предравновесной эмиссии необходимо исследовать $d^2\sigma/dT d\Omega$ ($\theta > 90^\circ$).

4. Исследована роль различных ядерных механизмов в образовании КЗЧ в случае взаимодействия протонов и π^- -мезонов с ядрами для начальных энергий $T_0 \leq 3$ ГэВ и энергий вторичных частиц $T \leq 300$ МэВ. Показано, что выход КЗЧ обусловлен несколькими механизмами, а их относительная роль меняется с T_0 , A и "кинематическим окном" вторичных частиц. Впервые показано, что на быстрой (каскадной) стадии реакции в образовании КЗЧ эффективно участвует небольшое число (3-5) нуклонов, даже для тяжелого ядра, типа свинца. Выход быстрых нуклонов под большими углами назад не может быть объяснен только упругим перерассеянием даже при $T \sim 100$ МэВ, но для $\theta < 90^\circ$ перерассеяние может играть определяющую роль.

5. Впервые показано, что в образовании быстрых нуклонов назад существенную роль играет двухступенчатый механизм, связанный с образованием и последующим поглощением пиона двухнуклонной ядерной ассоциацией. Для средних и тяжелых ядер существенный вклад в образование КЗЧ (как нуклонов, так и сложных частиц) дают процессы предравновесной эмиссии. Оба эти механизма не вымирают с ростом T_0 .

6. Показано, что инклюзивные характеристики КЗЧ слабо чувствительны к механизму взаимодействия. Продемонстрирована эффективность анализа корреляционных распределений для экспериментальной идентификации механизма взаимодействия.

7. Развитая модель была применена для описания целого ряда характеристик процесса поглощения остановившихся пионов ядрами. Ис-

пользуя эту модель, впервые удалось описать выход сложных частиц и установить, что определяющий вклад дают предравновесные процессы. Показано, что предравновесные процессы также играют большую роль в образовании высокоспиновых и высокоимпульсных состояний остаточных ядер. Систематический анализ экспериментальных данных в рамках модели подтвердил вывод о том, что для средних и тяжелых ядер основной механизм поглощения π^- -мезонов - двухнуклонный.

Результаты диссертации опубликованы в работах:

Гудима К.К., Машник С.Г., Тонеев В.Д. Каскадно-экситонная модель ядерных реакций. Формулировка модели. - Сообщение ОИЯИ Р2-80-774, Дубна, 1980, 10 с.

Гудима К.К., Машник С.Г., Тонеев В.Д. Каскадно-экситонная модель ядерных реакций. Сравнение с экспериментом. - Сообщение ОИЯИ Р2-80-777, Дубна, 1980, 14 с.

Komarov V.I., Kosarev G.E., Müller H., Netzband D., Toneev V.D., Stiehler T., Tesch S., Gudima K.K., Mashnik S. Proton-nucleus interactions at 640 MeV accompanied by backward emission of energetic protons.- ZfK-383, Rossendorf, 1979, 27 p.; - Nucl. Phys., 1979, v. A326, No. 2/3, p. 297-324.

Ильинов А.С., Машник С.Г., Назарук В.И., Чигринов С.Е. Об испускании заряженных частиц при поглощении остановившихся π^- -мезонов. - Кратк. сообщ. по физике, 1979 г., № 1, с. 19-18.

Машник С.Г. О расщеплении ядер при захвате остановившихся π^- -мезонов. - В сб. статей "Микроскопические расчеты структуры ядра и ядерных реакций". Изд. Штиинца, Кишинев, 1980, с. 76-84.

Машник С.Г., Тонеев В.Д. MØDEX - программа для расчета энергетических спектров частиц, испущенных в реакциях предравновесного и равновесного статистического распада. - Сообщение ОИЯИ Р4-8417, Дубна, 1974, 25 с.

Гудима К.К., Машник С.Г., Тонеев В.Д. О функциях возбуждения в моделях предравновесного распада. - В сб. статей "Образование и распад возбужденных ядер". Изд. Штиинца, Кишинев, 1976, с. 31-36.

Гудима К.К., Машник С.Г., Тонеев В.Д. О предравновесном испускании сложных частиц. - В сб. статей "Расчеты структуры ядра и ядерных реакций". Изд. Штиинца, Кишинев, 1977, с. 12-19.

Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. Pre-equilibrium complex particle emission within the cascade-exiton model.- In: Abstracts of contributed papers 8-th International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure (Vancouver, Canada, 1979), Vancouver, 1979, 4A20, p. 79.

Komarov V.I., Kosarev G.E., Netzband D., Toneev V.D., Müller H., Stiehler T., Tesch S., Gudima K.K., Mashnik S.G. Investigation of proton-nucleus interactions at 640 MeV accompanied by backward emission of energetic protons.- In: Proceedings of the VIII-th International Symposium on the Interaction of Fast Neutrons with Nuclei (Gaussig, GDR, 1978), ZfK-382, Rossendorf, 1979, p. 90-94.

Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. On mechanism of proton emission in kinematic region forbidden for free particle scattering.- Communication JINR E2-11307, Dubna, 1978, 11 p.; Gudima K.K., Mashnik S.G., Toneev V.D. The role of nuclear effects in proton emission in the kinematic region forbidden for free particle scattering.- In: Abstracts of contributed papers 8-th International Conference on High Energy Physics and Nuclear Structure (Vancouver, Canada, 1979), Vancouver, 1979, 4A19, p. 78.

Iljinov A.S., Cherepanov E.A., Chigrinov S.E., Mashnik S.G., Stopped Pion Absorption by Complex Nuclei.- Preprint INR AS USSR P-0156, Moscow, 1980, 40 p.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1981 года.