

И - 264



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4 - 11444

ИГНАТЮК
Анатолий Владимирович

**СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ВОЗБУЖДЕННЫХ ЯДЕР**

Специальность 01.04.16 -
физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой
степени доктора физико-математических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени физико-энергетическом институте.

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук И.Н.Михайлов,
доктор физико-математических наук, профессор Я.А.Сморodinский,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент АН УССР
В.М.Струтинский

Ведущее научно-исследовательское учреждение -
Ленинградский институт ядерной физики АН СССР им. Б.П.Константинова

Автореферат разослан " " _____ 1978 г.

Защита диссертации состоится " " _____ 1978 г.
на заседании Специализированного совета Д-56/1 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г.Дубна, Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного
института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

Р.А.Асанов

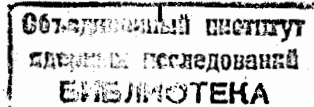
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Развитие современных представлений ядерной физики в значительной степени определяется успехами микроскопических методов описания структуры возбужденных состояний ядер. Микроскопический подход позволяет с единой точки зрения объяснить разнообразные одночастичные и коллективные свойства ядер и систематизировать огромную спектроскопическую информацию о низкоэнергетических уровнях ядер.

Обширная экспериментальная информация накоплена к настоящему времени также о различных ядерных процессах, характеризующих свойства сложных высоковозбужденных состояний ядер. Для анализа таких процессов обычно привлекается статистическое описание, и как показали результаты исследований, проводившихся во многих отечественных и зарубежных лабораториях, статистические характеристики возбужденных ядер во многом подобны соответствующим термодинамическим функциям идеального ферми-газа. Такое подобие позволяет использовать модель ферми-газа для феноменологического анализа и параметризации плотности уровней возбужденных ядер, величина которой играет определяющую роль во всех практических приложениях статистической теории ядерных реакций.

Однако традиционная модель ферми-газа не учитывает специфических особенностей ядер, обусловленных, с одной стороны, существованием ярко выраженных оболочечных неоднородностей в энергетическом спектре квазичастиц (элементарных возбуждений ядра) и, с другой стороны, эффективным взаимодействием квазичастиц, движущихся в самосогласованном ядерном потенциале. Чтобы получить единое и взаимосогласованное описание свойств атомных ядер в широком диапазоне энергий возбуждения, необходимо разработать методы рассмотрения статистических характеристик возбужденных ядер, эквивалентные методам, созданным для описания низколежащих состояний ядер. Такая задача важна как в общетеоретическом отношении, так и с точки зрения интерпретации широкого круга явлений, наблюдаемых в высоковозбужденных ядрах.

Основной целью работы являлось построение микроскопического описания статистических свойств возбужденных ядер, учитывающего оболочечную структуру спектра элементарных возбуждений ядер и когерентные коллективные эффекты, обусловленные взаимодействием квазичастиц.



Научная новизна. В диссертации представлены основные результаты работ, выполненных автором в 1969-1976 гг. В этих работах были развиты новые методы рассмотрения статистических характеристик возбужденных ядер, на основе которых установлена взаимосвязь свойств высоковозбужденных ядер со структурой низколежащих состояний, построена теория коллективных возбуждений нагретых ядер, получено описание имеющихся экспериментальных данных о статистических характеристиках ядер и дано объяснение особенностей поведения плотности уровней средних и тяжелых ядер, ранее не имевших удовлетворительной интерпретации.

Развитие теории стимулировало проведение ряда экспериментальных исследований, при анализе которых было получено значительное количество новой информации о свойствах высоковозбужденных ядер, подтвердившей основные представления рассмотренных теоретических моделей.

Научная и практическая ценность работы. Проведенные исследования существенно расширили наши знания о свойствах высоковозбужденных ядер. Разработанные методы расчета статистических характеристик ядер дают взаимосогласованное описание широкого круга ядерных процессов. Соотношения статистической теории ядерных реакций в настоящее время успешно используются как при анализе экспериментальных данных, так и для решения многих прикладных задач, связанных с оценкой нейтронных сечений различных конструкционных материалов. Потребность в таких оценках вызвана запросами современного этапа развития ядерной энергетики. Уточнение статистических свойств возбужденных ядер, достигнутое в результате проведенных исследований, позволяет существенно повысить надежность проводимых оценок, особенно в тех случаях, когда прямая экспериментальная информация о необходимых сечениях противоречива или отсутствует.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1. Выявленные в результате проведенных исследований общие закономерности влияния оболочечных эффектов на энергетическую зависимость плотности уровней, моментов инерции и средних гироманнитных отношений возбужденных ядер, а также на поведение статистических характеристик состояний ядер с фиксированным числом возбужденных квазичастиц.

2. Разработанные методы описания влияния парных корреляций

нуклонов сверхпроводящего типа на поведение статистических характеристик ядер и изучение специфических эффектов термодинамики возбужденных ядер, связанных с термоизолированностью ядерных ансамблей и малым числом возбужденных квазичастиц.

3. Развитая микроскопическая теория коллективных возбуждений нагретых ядер и ее применение для описания плотности уровней и спектральной интенсивности радиационных переходов в высоковозбужденных ядрах.

Объем диссертации. Диссертация написана на 295 страницах машинописного текста, включающих в себя 66 рисунков и список цитируемой литературы из 272 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Модель ферми-газа и ее применение при анализе экспериментальных данных

В первой главе диссертации кратко обсуждена имеющаяся экспериментальная информация о свойствах высоковозбужденных ядер и рассмотрены основные соотношения статистической теории ядерных реакций, необходимые для ее описания. Главное внимание при этом уделено анализу погрешностей извлекаемой информации, обусловленных приближениями привлекаемых теоретических моделей.

При статистическом описании вероятность различных процессов пропорциональна фазовому объему, занимаемому системой с заданными интегралами движения, и в ядерных реакциях этот объем определяется плотностью возбужденных состояний (или уровней). Простые соотношения, характеризующие зависимость плотности уровней ядра от энергии возбуждения и углового момента, были получены в модели ферми-газа (Г.Бете, 1936). В этой модели также простой вид имеют уравнения состояния, определяющие зависимость энергии возбуждения U , энтропии S , параметра спиновой зависимости σ^2 и других термодинамических функций, непосредственно связанных с плотностью уровней, от температуры t возбужденного (нагретого) ядра:

$$U = at^2, \quad S = 2at, \quad \sigma^2 = m_f^2 gt \quad (1)$$

Здесь $a = \pi^2 g / 6$ - параметр плотности уровней, пропорциональный плотности одночастичных состояний g вблизи энергии Ферми, m_f^2 - средняя величина квадрата проекции углового момента таких состояний. Величину $\mathcal{I}_0 = m_f^2 g$ принято называть моментом инерции ферми-газа.

Экспериментальная информация о плотности уровней ядер извлекается в основном из анализа усредненных сечений различных ядерных реакций, протекающих через стадии составного ядра. Изучению таких реакций посвящено большое число работ, результаты которых отчетливо демонстрируют две характерные особенности: существование ярко выраженных оболочечных эффектов в зависимости плотности уровней от массового числа и значительное различие плотности уровней ядер, имеющих одинаковую энергию возбуждения, но отличающихся четностью числа протонов или нейтронов (Т.Ньютон, 1956; А.В.Малышев, 1963). Для большинства немагических ядер модель ферми-газа вполне удовлетворительно описывает энергетическую зависимость плотности уровней при энергиях возбуждения, близких к энергии связи нейтрона. Однако в рамках этой модели не находят объяснения поведение плотности уровней ядер в области более низких энергий возбуждения (А.Гильберт, А.Камерон, 1965), а также особенности энергетической зависимости плотности уровней, наблюдаемые в спектрах неупругорассеянных нейтронов (Р.Оуэн, Дж.Тоул, 1968; М.Маруяма, 1969).

Несмотря на большой объем накопленных экспериментальных данных о сечениях различных реакций, протекающих в высоковозбужденных ядрах, извлекаемая из их анализа информация о плотности уровней оказывается не всегда однозначной и взаимосогласующейся. В диссертации показано, что для реакций, компаундный механизм которых хорошо установлен, разногласия в результатах анализа, как правило, устраняются при уточнении теоретических моделей, привлекаемых для описания наблюдаемых сечений. Примером таких данных могут служить сечения радиационного захвата быстрых нейтронов средними и тяжелыми ядрами, описание которых рассматривалось в работах /1, 2/, а также сечения деления доактинидных ядер протонами и α -частицами, анализировавшиеся в работе /3/. Результаты проведенного анализа существенно дополняют традиционную информацию о плотности уровней, извлекаемому из нейтронных спектров и данных по плотности нейтронных резонансов, а также демонстрируют значительные отклонения поведения статистических характеристик ядер от представлений модели ферми-газа.

Наряду с изучением свойств термодинамически равновесных состояний возбужденных ядер в последние годы интенсивно развивались также исследования статистических характеристик неравно-

весных конфигураций составного ядра. В значительной степени этому способствовала модель предравновесного испарения, предложенная Дж.Гриффином (1966) для объяснения жесткой части наблюдаемых спектров распада высоковозбужденных ядер. Основой этой модели является предположение, что высокоэнергетичные частицы испускаются не из термодинамически равновесного составного ядра, а на более раннем этапе - при переходе от первоначально образовавшейся неравновесной n -квaziчастичной конфигурации к равновесной стадии. Спектр частиц, испускаемых на n -квaziчастичной стадии, определяется плотностью $(n-1)$ -квaziчастичных конфигураций остаточного ядра.

Для описания плотности n -квaziчастичных возбуждений ядер в модели предравновесного испарения обычно используются соотношения, полученные на основе модели газа бoльцмановских частиц (В.М.Струтинский, 1958). Так как в ядерных реакциях существенную роль играют ограничения, накладываемые законом сохранения углового момента, то для более полного и строгого описания статистических характеристик неравновесных конфигураций возбужденных ядер необходимо включить в рассмотрение спиновую зависимость плотности n -квaziчастичных возбуждений. В диссертации получены соотношения, характеризующие такую зависимость как для модели газа бoльцмановских частиц, так и для модели ферми-газа /4/, а также соотношения модели предравновесного распада, в которых учтено влияние углового момента на вероятность образования и распада n -квaziчастичных конфигураций составной системы /5/.

Следует, однако, отметить, что хотя в теоретическом отношении предложенные методы описания статистических характеристик n -квaziчастичных конфигураций возбужденных ядер представляются достаточно полно разработанными, надежной экспериментальной информации для их проверки в настоящее время мы еще не имеем. Для взаимосогласованной интерпретации экспериментальных данных необходимо отделить вклад прямых процессов от вклада процессов, связанных с образованием равновесного или неравновесного составного ядра. Практические пути реализации такого подхода при описании сечений неупругого рассеяния протонов и нейтронов с энергией до 20 МэВ, основанные на методах теории прямых ядерных реакций, были предложены в работах /5,6/. Проведенный анализ спектров неупругого рассеяния нуклонов показал, что высокоэнергетическая часть наблюдаемых спектров в значительной мере определяется прямыми пере-

ходами, и имеющиеся погрешности экспериментальных данных о дифференциальных спектрах неупруго рассеянных нуклонов не позволяют однозначно определить роль предравновесного механизма испарения. Для уточнения представлений о неравновесном распаде составного ядра и проверки разработанных методов описания статистических характеристик неравновесных конфигураций необходимо иметь существенно более полные и систематические экспериментальные данные об угловых распределениях продуктов различных ядерных реакций, протекающих в высоковозбужденных ядрах.

Сечения нейтронных реакций представляют значительный интерес для практических задач ядерной энергетики. Соотношения статистической теории ядерных реакций могут быть успешно использованы для уточнения и оценки таких сечений в тех случаях, когда отсутствуют достаточно надежные прямые экспериментальные данные. Возможности применения различных теоретических моделей для решения задач оценки подробно анализировались в работах /7,8/. Использование теоретических моделей позволяет сопоставить результаты экспериментов, выполненных при разных энергиях и с различным разрешением, проверить взаимосогласованность разнородных экспериментальных данных и привлечь к анализу дополнительную информацию, извлекаемую из более широкого круга ядерных данных. Методы статистического описания сечений, разработанные в процессе анализа экспериментальных данных, и систематики поведения плотности уровней возбужденных ядер, полученные в результате представленных в диссертации исследований, в настоящее время широко используются при практической реализации оценок нейтронных сечений различных конструктивных материалов.

2. Влияние оболочечной структуры одночастичного спектра на статистические характеристики ядер

Микроскопическое рассмотрение статистических свойств возбужденных ядер, описанию которого посвящены последующие главы диссертации, позволило, с одной стороны, установить взаимосвязь эмпирических параметров модели ферми-газа с параметрами самосогласованного оболочечного потенциала и характеристиками низколежащих состояний атомных ядер, с другой — дать объяснение совокупности экспериментальных данных, не получивших интерпретации в рамках традиционных ферми-газовых представлений.

Глубокие провалы экспериментальных значений ферми-газового параметра плотности уровней α в области магических ядер являются прямой демонстрацией влияния оболочечных эффектов на статистические характеристики ядер. Чтобы получить последовательное теоретическое описание этих эффектов, необходимо при вычислении термодинамических функций возбужденных ядер учесть оболочечную структуру спектра элементарных возбуждений ядер. Такое описание впервые было реализовано в работах А.В.Игнатюка, В.Н.Шубина, 1968 г.; П.Дековского и др., 1968 г. Соотношения для термодинамических функций, эквивалентные (1), при учете дискретного характера спектра одночастичных состояний, имеют вид

$$S = \sum_j \{ \beta \varepsilon_j \bar{n}_j + \ln [1 + \exp(-\beta \varepsilon_j)] \}, \quad (2)$$

$$U = \sum_j \varepsilon_j [\bar{n}_j - \Theta(-\varepsilon_j)], \quad \sigma^2 = \sum_j m_j^2 \bar{n}_j (1 - \bar{n}_j),$$

где ε_j — энергия одночастичных состояний, \bar{n}_j — средние числа заполнения этих состояний при температуре $t = 1/\beta$ и сумма по j охватывает все одночастичные состояния с учетом их вырождения. Соотношения (2) позволяют для заданной схемы одночастичных уровней вычислить термодинамические функции, а затем и плотность возбужденных состояний ядра, не вводя каких-либо дополнительных параметров. Наиболее характерные примеры таких расчетов представлены в диссертации /9,10/.

Чтобы проследить отличие поведения термодинамических функций (2) от ферми-газовой зависимости (1) и более отчетливо показать влияние оболочечных эффектов, удобно определить величины, эквивалентные параметрам α и \mathcal{F}_0 (или m_j^2) модели ферми-газа,

$$\alpha' = S^2/4U, \quad \bar{\alpha} = \frac{\pi^2}{6} \beta \sum_j \bar{n}_j (1 - \bar{n}_j), \quad (3)$$

$$\bar{m}^2 = \frac{\pi^2}{6\bar{\alpha}} \beta \sum_j m_j^2 \bar{n}_j (1 - \bar{n}_j), \quad \mathcal{F}_{11} = \beta \sigma^2.$$

Проведенные вычисления показали, что все эти величины существенно зависят от энергии возбуждения и такая зависимость особенно сильна для околomagических ядер. В зависимости α' и $\bar{\alpha}$ от массового числа при энергиях возбуждения $U = 7$ МэВ проявляются те же оболочечные провалы, что и в поведении экспериментального параметра α . Аналогичным образом ведут себя моменты инерции \mathcal{F}_{11} и величины \bar{m}^2 . Однако при достаточно больших энергиях возбуждения ($U \geq 100$ МэВ) оболочечные неоднородности уже не оказывают заметного влияния на поведение термодинамических функций ядер,

и зависимость асимптотических значений величин (3) от массового числа и деформации самосогласованного ядерного потенциала хорошо аппроксимируется квазиклассическими оценками. Как показал анализ экспериментальных данных, рассмотренные особенности поведения параметра плотности уровней наиболее отчетливо проявляются в энергетической зависимости сечений деления доактинидных ядер заряженными частицами /10/. Отражением аналогичных эффектов являются также отмеченные выше аномалии поведения плотности уровней околomagических ядер, наблюдаемые в спектрах неупругорассеянных нейтронов.

В последние годы аналогичные методы вычисления статистических характеристик возбужденных ядер рассматривались многими авторами. В этих исследованиях было показано, что оболочечные эффекты в поведении термодинамических функций тесно взаимосвязаны с величиной оболочечной поправки, характеризующей нерегулярные вариации масс и энергии деформации ядер. Эта взаимосвязь была использована в работе /11/ для построения феноменологической систематики энергетической зависимости параметра плотности уровней

$$\alpha(U, z, A) = \tilde{\alpha}(A) \left[1 + f(U) \delta W(z, A) / U \right] \quad (4)$$

Структура этого соотношения, так же как вид функций $f = 1 - \exp(-\gamma U)$ и $\tilde{\alpha} = \alpha A + \beta A^{2/3}$, была получена на основе теоретического рассмотрения, но в качестве δW взяты экспериментальные значения оболочечных поправок формулы масс, и величина параметров α , β и γ найдена из анализа экспериментальных данных по плотности нейтронных резонансов. Такая систематика очень удобна для практических приложений, так как она позволяет проводить расчеты плотности уровней возбужденных ядер с помощью простых соотношений модели ферми-газа, и в то же время в ней достаточно корректно учтены наиболее важные аспекты влияния оболочечных эффектов на поведение статистических характеристик ядер.

Разработанная систематика успешно использовалась в работе /12/ для анализа сечений деления доактинидных ядер α -частицами. С ее помощью было получено описание нерегулярностей отношения делительных и нейтронных ширин, обусловленных влиянием оболочечных эффектов на нейтронный канал, и из наблюдаемого хода сечений деления извлечена весьма уникальная информация об энергетической зависимости плотности уровней сильнодеформированных переходных конфигураций делящихся ядер.

При определении асимптотических значений параметра плотности

уровней $\tilde{\alpha}$ и моментов инерции возбужденных ядер $\tilde{\mathcal{I}}$ важную роль играют компоненты, обусловленные градиентом распределения плотности нуклонов на краю ядра. В диссертации анализируются величины этих компонент и их влияние на зависимость $\tilde{\alpha}$ и $\tilde{\mathcal{I}}$ от деформации ядра /13/. На основе полученных результатов объяснено наблюдаемое систематическое превышение отношения параметров плотности уровней делительного и нейтронного каналов $\tilde{\alpha}_d / \tilde{\alpha}_n$ над единицей /12/, а также наблюдаемое для доактинидных ядер превышение эффективного момента инерции $\tilde{\mathcal{I}}_{\text{эфф}}$ над твердотельным значением /14/.

Оболочечные неоднородности одночастичного спектра отражаются также на распределении состояний возбужденного ядра по четности. На существование в ряде ядер значительных различий плотности уровней положительной и отрицательной четности впервые было обращено внимание в работах В.Г.Соловьева и др. (1974), и методы описания этих эффектов в рамках статистического подхода были предложены в работе /15/. Величины, характеризующие распределение состояний возбужденных ядер по четности (среднее число возбужденных квазичастиц \bar{n} и вероятность найти какую-либо из них в состоянии заданной четности p_{\pm}) определяются соотношениями

$$\bar{n} = \sum_i |\bar{n}_i - \theta(-\varepsilon_i)|, \quad p_{\pm} = \sum_i p_i^{(\pm)} |\bar{n}_i - \theta(-\varepsilon_i)| / \bar{n}, \quad (5)$$

где $p_i^{(\pm)}$ - четность соответствующих одночастичных уровней. Проведенные расчеты показали, что при энергиях возбуждения, близких к энергии связи нейтрона, для большинства средних и тяжелых ядер неоднородности в распределении четности одночастичных уровней протонной и нейтронной компонент взаимокompенсируются, и заметных отклонений от равновероятного распределения высоковозбужденных состояний по четности следует ожидать лишь в области ядер с $A = 50-70$, где в схеме протонных и нейтронных уровней вблизи энергии Ферми доминируют состояния отрицательной четности.

В последние годы начала накапливаться экспериментальная информация о магнитных моментах нейтронных резонансов. Статистический подход позволяет исследовать зависимость средних магнитных моментов от энергии возбуждения ядра и проследить влияние оболочечных эффектов на эту зависимость /16/. Соотношения, определяющие в рамках такого подхода величину проекций механического M_2 и магнитного μ_2 моментов, имеют вид

$$M_2 = \sum_j m_j \bar{n}_j, \quad \mu_2 = \sum_j \mu_j^{(2)} \bar{n}_j, \quad (6)$$

где m_j и μ_j — матричные элементы соответствующих одночастичных операторов. Связь величин (6) с энергией возбуждения ядра определяется уравнениями состояния (2). На основе соотношений (6) можно определить среднее гиромагнитное отношение для возбужденного ядра $g_2 = M_2 / \mu_2$, оценка асимптотической величины которого $\bar{g}_2 = Z/A$ ранее была получена в рамках модели ферми-газа (Р.Куллин, 1967). Как показали расчеты, выполненные в работе /16/, при энергиях возбуждения, близких энергии связи нейтрона, оболочечные эффекты приводят к значительному отклонению гиромагнитного отношения от ферми-газовой оценки для большинства сферических ядер. Результаты проведенных расчетов дают достаточно полную картину зависимости таких отклонений от массового числа.

Соотношения, аналогичные (2), были использованы также для изучения влияния оболочечных эффектов на статистические характеристики ядра с фиксированным числом возбужденных частиц и дырок /17/. Было показано, что при учете оболочечных неоднородностей энергетическая зависимость плотности уровней ядра с заданным числом возбужденных квазичастиц может существенно отличаться от зависимости, полученной в рамках традиционного ферми-газового описания. Свойства конфигураций ядра с определенным числом возбужденных квазичастиц представляет значительный интерес для изучения неравновесных процессов в составном ядре, и рассмотренные в диссертации соотношения дают достаточно корректную теоретическую модель для статистического анализа таких процессов.

3. Влияние парных корреляций на свойства высоковозбужденных ядер

Для рассмотрения корреляционных эффектов сверхпроводящего типа, возникающих в системах взаимодействующих ферми-частиц, в различных разделах физики успешно используются методы теории сверхпроводимости, развитые в 1957 г. в работах Н.Н.Боголюбова, Дж.Бардина, Л.Купера, Дж.Шриффера. Теория парных корреляций нуклонов сверхпроводящего типа в атомных ядрах была разработана в 1958–1959 гг. В.Г.Соловьевым и С.Т.Беляевым, на ее основе было получено описание обширного экспериментального материала о спектроскопических характеристиках низколежащих состояний ядер.

Соотношения теории сверхпроводимости привлекались также к анализу статистических характеристик ядер, прежде всего для объяс-

нения особенностей поведения угловой анизотропии продуктов вынужденного деления трансурановых ядер (Ю.Т.Гринь, 1962; Дж.Гриффин, 1963), а затем и для описания плотности уровней возбужденных ядер (Д.Лэнг, 1963; М.Сано, С.Иамасаки, 1963). При вычислении термодинамических функций ядер в этих работах использовалось приближение непрерывного спектра. Хотя такое приближение является весьма удобным для качественного анализа особенностей энергетической зависимости термодинамических функций, при количественном описании статистических характеристик ядер очень важно учесть наряду с парными корреляциями рассмотренные выше оболочечные эффекты. Уравнения состояния, аналогичные (2), при учете парных корреляций имеют вид

$$S = 2 \sum_k \{ \beta E_k \bar{n}_k + \ln [1 + \exp(-\beta E_k)] \}, \quad (7)$$

$$U = \sum_k \{ (\epsilon_k^2 + \Delta_0^2)^{1/2} - E_k (1 - 2\bar{n}_k) \} + (\Delta_0^2 - \Delta^2) / G,$$

где $\bar{n}_k = [1 + \exp(\beta E_k)]^{-1}$, $E_k = (\epsilon_k^2 + \Delta^2)^{1/2}$, G — константа парного взаимодействия и Δ — корреляционная функция системы, определяемая уравнением

$$\frac{\Delta}{G} = \sum_k \frac{1 - 2\bar{n}_k}{E_k}. \quad (8)$$

При нулевой температуре соотношения (7,8) определяют энергию U_0 и корреляционную функцию Δ_0 основного состояния системы. С ростом температуры корреляционная функция уменьшается, и при температуре t_{cp} она обращается в нуль; эта температура соответствует фазовому переходу из сверхпроводящего состояния в нормальное. Термодинамические функции (7) в этой точке имеют излом, характерный для фазовых переходов второго рода. Соотношения (7) и (8) написаны для однокомпонентных систем частиц, в реальных расчетах всегда учитывалось наличие протонной и нейтронной подсистем /9/.

Применение соотношений теории сверхпроводимости к описанию статистических характеристик возбужденных ядер имеет ряд особенностей, обусловленных микроканоническим характером ядерных ансамблей /18/. Так как модельный гамильтониан, полученный на основе вариационных преобразований теории сверхпроводимости, зависит от температуры и химпотенциала, то при использовании такого гамильтониана могут возникнуть различия динамического и термодинамического определения физических величин, привлекаемых при вычислении плотности уровней возбужденных ядер. В работе /18/ разработаны

методы, которые позволяют избежать этих различий и тем самым устранить соответствующие погрешности в результатах расчетов плотности уровней.

Микроканонический характер описания возбужденных ядер необходимо должным образом учитывать также при определении параметра спиновой зависимости плотности уровней и соответствующих моментов инерции. При наличии в системе парных корреляций сверхпроводящего типа отличие определения моментов инерции, выраженных через термодинамические переменные микроканонического ансамбля, от аналогичных величин, полученных для канонического ансамбля, обусловлено влиянием корреляционных эффектов на энергетическую зависимость плотности уровней. Эти отличия, так же как соответствующие расчеты моментов инерции возбужденных ядер, детально обсуждались в работе /18/. Энергетическая зависимость моментов инерции ниже точки фазового перехода является одним из наиболее ярких проявлений влияния парных корреляций на статистические характеристики возбужденных ядер. Проведенное в последние годы изучение эффективных моментов инерции переходных конфигураций доктинидных ядер продемонстрировало достаточно хорошее согласие экспериментальных данных с предсказываемой теорией зависимостью /14/.

Взаимосвязь особенностей энергетической зависимости плотности уровней с распределением возбужденных квазичастиц можно проследить, если рассмотреть термодинамические функции ядра с фиксированным числом возбужденных квазичастиц. Уравнения состояния, определяющие эти величины в сверхтекучей модели ядра, были получены в работе /19/. От уравнений (7) и (8) они отличаются наличием дополнительного уравнения

$$n = 2 \sum_k \bar{n}_k \quad (9)$$

и некоторым изменением соотношения для энтропии

$$S_n = 2 \sum_k \{ (\beta \epsilon_k - \gamma) \bar{n}_k + \ln [1 + \exp(\gamma - \beta \epsilon_k)] \} \quad (10)$$

Соотношения для энергии возбуждения (7) и корреляционной функции (8) при этом останутся прежними, но средние числа заполнения в них будут содержать дополнительный лагранжев множитель γ , обеспечивающий выполнение условия (9). Решение уравнений (7+10) анализировалось в работе /19/.

В диссертации представлены также соотношения, определяющие плотность возбужденных состояний ядра с заданным числом возбужденных квазичастиц. Как уже отмечалось, такая величина широко исполь-

зуется для анализа спектров частиц, испускаемых при предравновесном распаде составного ядра. Обычно такой анализ проводят на основе соотношений модели газа бoльцмановских частиц. Полученные в диссертации результаты демонстрируют основные погрешности этой модели и дают строгие соотношения для анализа соответствующих явлений.

Зная статистические характеристики ядра с заданным числом возбужденных квазичастиц, мы можем рассмотреть вклад соответствующих n -квазичастичных конфигураций в усредненные характеристики возбужденных ядер /20/. Если в рамках такого подхода вычислять полную плотность возбужденных состояний или среднее значение параметра спиновой зависимости плотности уровней, то вблизи критической энергии возбуждения $U_{кр} = 0,778 g \Delta_0^2$ никаких изломов в энергетической зависимости этих величин не возникает. Средняя корреляционная функция $\bar{\Delta}(U)$ с ростом энергии возбуждения убывает, но не обращается в нуль при $U = U_{кр}$. Этот результат показывает, что в возбужденных ядрах точку фазового перехода не следует воспринимать строго - как точку, разделяющую два различных фазовых состояния ядерного вещества. Следует говорить лишь о наличии двух областей различной энергетической зависимости статистических характеристик ядер, в которых влияние остаточных взаимодействий корреляционного типа на усредненные характеристики возбужденных состояний ядра проявляется различным образом.

Пороги n -квазичастичных возбуждений ядер могут проявляться в энергетической зависимости плотности уровней или других статистических характеристик ядер в виде ступенчатой структуры. Как показали расчеты, выполненные в работе /20/, такая структура должна быть отчетливо выражена лишь в тяжелых ядрах в области сравнительно низких энергий возбуждения $U \leq 4 \Delta_0$. Соответствующие вычисления достаточно хорошо воспроизводят ступенчатую структуру, наблюдаемую в энергетической зависимости параметра K_0^2 , полученного из анализа углового распределения продуктов вынужденного деления трансурановых элементов.

Использование соотношений, определяющих плотность состояний ядра с фиксированным числом возбужденных квазичастиц, для описания полной плотности уровней позволяет получить строгое решение задачи о четно-нечетных различиях плотности уровней ядер /20/. Анализ такого описания показал, что при энергиях возбуждения $U > 3 \Delta_0$ различия в плотности уровней ядер с четным и нечетным

числом нуклонов определяются, в основном, сдвигом в нечетной системе начала отсчета энергии возбуждения на величину, равную разности энергий конденсации четной и нечетной систем. Разность энергий конденсации примерно равна Δ_0 , что хорошо согласуется с величиной феноменологической поправки на четно-нечетные различия плотности уровней, полученной из анализа экспериментальных данных. Следует, однако, отметить, что описание плотности уровней, основанное на соотношениях сверхтекучей модели ядра, во многих аспектах существенно отличается от феноменологического описания, опирающегося на соотношения модели ферми-газа, и это необходимо иметь в виду при сопоставлении различных параметров, используемых в этих моделях /20,21/.

В последние годы для ряда ядер в области $50 < A < 70$ появились экспериментальные данные о плотности уровней при энергиях возбуждения до 20 МэВ, анализ которых совместно с данными по плотности нейтронных резонансов и имеющейся спектроскопической информацией о низколежащих уровнях ядер позволяет проследить поведение плотности уровней в широком диапазоне энергий возбуждения. Теоретические расчеты плотности уровней, основанные на разработанных в диссертации методах, в большинстве ядер хорошо воспроизводить как наблюдаемую энергетическую зависимость плотности уровней /21/, так и четно-нечетные различия в величине плотности уровней близлежащих ядер /20/.

Так как фазовый переход, отражающий существование двух областей различной энергетической зависимости термодинамических характеристик возбужденного ядра, является одной из наиболее важных особенностей сверхтекучей модели, то его экспериментальное наблюдение представляет значительный интерес как для проверки модели, так и для определения основных параметров, характеризующих статистические свойства ядер. Уникальные возможности в этом отношении представляет изучение вероятности процесса деления. В последние годы была получена богатая экспериментальная информация о дифференциальных и интегральных сечениях деления доактинидных ядер α -частицами. Для изотопов полония, ртути, иридия и астата, у которых поведение сечений было измерено в достаточно широком энергетическом интервале, в извлеченной из экспериментальных данных зависимости $\alpha_d(U)$ и $\Sigma_{\text{дел}}(U)$ отчетливо проявляется излом в области энергий возбуждения 8+10 МэВ над барьером /12,14/. Используя соотношения сверхтекучей модели ядра, из этих данных можно

получить величину корреляционной функции для переходных состояний делящихся ядер $\Delta_f = 0,95 \pm 0,15$ МэВ. Найденная величина Δ_f близка к среднему значению корреляционной функции основных состояний ядер $\Delta_0 \approx 12 A^{-1/2}$ МэВ, что указывает на сравнительно слабую зависимость корреляционной функции от деформации ядра. Этот вывод согласуется с результатами анализа четно-нечетных различий отношения делительных и нейтронных ширин для трансурановых элементов /22/. Совокупность данных о величине Δ_f , полученная при анализе вероятности деления доактинидных и трансурановых ядер, в значительной степени решает вопрос о корреляционной функции аномально деформированных состояний ядер, в течение многих лет дискутировавшийся в литературе.

4. Коллективные свойства высоковозбужденных ядер

Возбуждениям коллективной природы в ядрах уделяется много внимания при анализе спектроскопической информации о структуре низколежащих уровней. Для описания свойств таких возбуждений в настоящее время успешно используются различные модификации микроскопических подходов (С.Т.Беляев, 1960; А.Б.Мигдал, 1962; В.Г.Соловьев и др., 1963). Естественно, возникает вопрос о влиянии аналогичных коллективных возбуждений на плотность уровней и другие статистические характеристики высоковозбужденных ядер. В строгой формулировке такая задача оказывается чрезвычайно сложной, но ее вполне удовлетворительное приближенное решение можно получить при соответствующем обобщении методов, используемых для описания низколежащих состояний ядер. В четвертой главе диссертации рассмотрены разработанные автором методы решения этой задачи.

В работах /23+25/ было показано, что когерентные возбуждения коллективной природы, обусловленные взаимодействием квазичастиц в высоковозбужденном (нагретом) ядре, можно выделить на фоне некоррелированных многочастичных возбуждений, если провести анализ уравнений движений для соответствующих рассматриваемой системе двухвременных температурных функций Грина. Если эффективное взаимодействие квазичастиц в ядре представить в сепарабельном виде, то в приближении хаотических фаз спектр когерентных мод в нагретом ядре будет определяться секулярным уравнением

$$1 = 2\alpha_d \sum_{k,k'} |f_{kk'}^{(k)}|^2 \left\{ u_{kk'}^2 (1 - \bar{n}_k - \bar{n}_{k'}) \frac{E_k + E_{k'}}{(E_k + E_{k'})^2 - \omega^2} - v_{kk'}^2 (\bar{n}_k - \bar{n}_{k'}) \frac{E_k - E_{k'}}{(E_k - E_{k'})^2 - \omega^2} \right\} \quad (II)$$

где $f_{\alpha\alpha'}^{(\lambda)}$ - матричные элементы и χ_λ - силовая константа соответствующего эффективного взаимодействия, $u_{\alpha\alpha'}$ и $v_{\alpha\alpha'}$ - коэффициенты, характеризующие влияние корреляционных эффектов сверхпроводящего типа. Изменения уравнений состояния (8), связанные с учетом когерентных мод, можно представить в виде суммы корней и полюсов секулярного уравнения

$$\delta S = \pm \sum_i v_i \left\{ \frac{\omega_i}{2t} \operatorname{cth} \frac{\omega_i}{2t} - \ln \left(2 \operatorname{sh} \frac{\omega_i}{2t} \right) \right\} \quad (12)$$

$$\delta U = \pm \sum_i v_i \frac{\omega_i}{2} \left(\operatorname{cth} \frac{\omega_i}{2t} - 1 \right),$$

где верхний знак следует брать для корней и нижний - для полюсов уравнения (11), v_i - кратность вырождения соответствующих мод. Появление полюсов в соотношениях (12) отражает неадиабатический характер рассматриваемых коллективных эффектов. Влияние таких эффектов на плотность уровней возбужденных ядер можно представить в виде соответствующего коэффициента увеличения плотности уровней $k_{\alpha\alpha'} = \exp(\delta S - \delta U/t)$, и основной вклад в этот коэффициент вносят только когерентные моды, для которых энергия корней секулярного уравнения (11) заметно отличается от энергии близлежащих полюсов.

В диссертации показано, что соотношения (11,12) можно получить также с помощью квазибозонного приближения, обобщенного на нагретые системы. Такой подход более удобен для анализа вопросов, связанных с восстановлением ротационной или трансляционной инвариантности модельных гамильтонианов, используемых для описания коллективных свойств возбужденных ядер. Учет условий инвариантности при рассмотрении ротационных возбуждений нагретых ядер позволяет согласовать формфакторы эффективных сил, генерирующих эти возбуждения, с формой потенциала среднего поля и получить соотношения, определяющие вклад ротационных мод в плотность уровней высокоэнергетических ядер. Соответствующий коэффициент увеличения плотности уровней будет определяться произведением двух факторов $k_{\text{rot}} k_{\text{dis}}$, первый из которых характеризует влияние ротационных возбуждений в адиабатическом приближении (для деформированных аксиальносимметричных ядер $k_{\text{rot}} = 3_\lambda t$), тогда как второй - связь ротационных и вибрационных мод в нагретом ядре ($k_{\text{dis}} < 1$).

Энергетическая зависимость коэффициентов увеличения плотности уровней, обусловленных совместным влиянием вибрационных и ротационных возбуждений нагретых ядер, анализировалась в работах /26,27/. Учет коллективных эффектов позволил получить для всей области

средних и тяжелых ядер достаточно хорошее согласие теоретических вычислений плотности уровней с данными по плотности нейтронных резонансов.

При феноменологическом анализе экспериментальных данных по плотности уровней учет коллективных эффектов эквивалентен введению в соотношения модели ферми-газа достаточно большого по абсолютной величине предэкспоненциального множителя, который приводит к заметному уменьшению извлекаемого значения ферми-газового параметра плотности уровней α . Такое рассмотрение устраняет имевшиеся для деформированных ядер разногласия в результатах анализа плотности нейтронных резонансов и характеристик испарительных спектров, а также расхождения эмпирических и расчетных значений асимптотической величины параметра плотности уровней /2/.

В плотности уровней ядер влияние коллективных эффектов проявляется в интегральной форме. Более полное представление о свойствах вибрационных возбуждений нагретых ядер можно получить, рассмотрев спектральное распределение характеризующих их величин: среднеквадратичных амплитуд колебаний β_λ^2 , коэффициентов жесткости $C_\lambda(\omega)$ и эффективных массовых параметров $B_\lambda(\omega)$. Соотношения, определяющие эти величины, были получены в работе /28/ на основе обобщенного на нагретые ядра метода принудительных колебаний

$$B_\lambda(\omega) = 2\chi_\lambda^2 \sum_{\alpha,\alpha'} |f_{\alpha\alpha'}^{(\lambda)}|^2 \left\{ u_{\alpha\alpha'}^2 \frac{(1 - \bar{n}_\alpha - \bar{n}_{\alpha'}) (E_\alpha + E_{\alpha'})}{[(E_\alpha + E_{\alpha'})^2 - \omega^2]^2} - v_{\alpha\alpha'}^2 \frac{(\bar{n}_\alpha - \bar{n}_{\alpha'}) (E_\alpha - E_{\alpha'})}{[(E_\alpha - E_{\alpha'})^2 - \omega^2]^2} \right\} \quad (13)$$

$$C_\lambda(\omega) = \omega^2 B_\lambda(\omega), \quad \beta_\lambda^2(\omega) = \operatorname{cth} \frac{\omega}{2t} / 2\omega B_\lambda(\omega).$$

Спектр таких колебаний определяется секулярным уравнением (11). Как показали проведенные расчеты, характеристики высокоэнергетической ветви вибрационных возбуждений ядер (гигантских мультипольных резонансов) в нагретом ядре остаются почти такими же, как и в холодном, имеет место лишь некоторое дополнительное уширение гигантских резонансов, обусловленное температурной зависимостью затухания когерентных возбуждений. В то же время характеристики низкоэнергетической ветви вибрационных мод в нагретом ядре существенно отличаются от характеристик соответствующих одно-

фоонных возбуждений холодных ядер, непосредственно наблюдаемых в спектре низколежащих состояний ядер. В холодном ядре низкоэнергетичные когерентные возбуждения имеют пренебрежимо малую естественную ширину, тогда как в нагретом ядре коллективные низкоэнергетичные моды проявляются скорее как резонансы шириной $\sim 2-3$ МэВ в спектральном распределении амплитуд колебаний $\beta_2^2(\omega)$. Температурная зависимость характеристик низкоэнергетичных мод непосредственно определяет поведение соответствующих коэффициентов увеличения плотности уровней k_{vib} .

При микроскопическом описании коллективных возбуждений ядер широко используется аппроксимация остаточных взаимодействий нуклонов мультиполь-мультипольными силами. Для выбора функциональной зависимости формфакторов таких сил целесообразно привлечь условия согласования, различные формировки которых анализировались в последние годы многими авторами. В работе /29/ аналогичные условия согласования получены для эффективных сил, генерирующих осцилляции среднего поля в нагретых ядрах. Такие условия не только фиксируют формфакторы мультиполь-мультипольных сил, но также позволяют определить величину соответствующей силовой константы и рассмотреть ее температурную зависимость. Проведенные исследования показали, что спектральное распределение величин (I_3), полученное для модифицированных эффективных сил с теоретическим значением константы взаимодействия, существенно не отличается от распределения, вычисленного для традиционных мультиполь-мультипольных сил с эмпирически подобранной константой. Модификация эффективных сил также весьма слабо отражается на результатах расчетов соответствующих коэффициентов увеличения плотности уровней /29/, и это демонстрирует достаточно хорошую согласованность полученного описания вибрационных возбуждений нагретых ядер.

Рассмотренные вибрационные возбуждения нагретых ядер непосредственно должны проявляться в радиационных силовых функциях, характеризующих усредненную по большому числу состояний возбужденного ядра приведенную вероятность гамма-переходов. Соотношения, определяющие в рамках микроскопического подхода силовые функции электромагнитных переходов различной мультипольности, были получены в работах /23,30,31/. Проведенные расчеты показали, что в формировании спектральной интенсивности электрических и магнитных гамма-переходов основную роль играют высокоэнергетичские ветви когерентных возбуждений, характеристики которых отличаются от характеристик

гигантских резонансов, наблюдаемых в сечении фотопоглощения и в спектрах прямого неупругого рассеяния нуклонов, лишь дополнительным температурным уширением. В рамках разработанного подхода получена взаимосогласованная интерпретация имеющейся совокупности экспериментальных данных о спектральной интенсивности радиационных переходов в высоковозбужденных ядрах /31/.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработаны методы описания статистических характеристик возбужденных ядер, учитывающие оболочечную структуру спектра однонуклонных состояний в ядрах, и показано влияние оболочечных эффектов на энергетическую зависимость плотности уровней, моментов инерции и средних гиромагнитных отношений возбужденных ядер, на распределение состояний возбужденных ядер по четности. На основе проведенного рассмотрения объяснены характерные особенности поведения плотности уровней околomagических ядер, проявляющиеся во многих экспериментах.

2. Построено удобное для практических приложений феноменологическое описание энергетической зависимости параметра плотности уровней, хорошо воспроизводящее как данные по плотности нейтронных резонансов, так и наблюдаемые оболочечные нерегулярности в плотности уровней ядер при различных энергиях возбуждения. Рассмотрено влияние диффузного края ядра на асимптотическую величину параметров плотности уровней и моментов инерции ядер и показана важная роль соответствующих эффектов в описании статистических характеристик ядер при высоких энергиях возбуждения.

3. Разработаны новые методы рассмотрения парных корреляций нуклонов сверхпроводящего типа в возбужденных ядрах, учитывающие специфические стороны термодинамики ядерных ансамблей, обусловленные термоизолированностью ядер и сравнительно малым числом возбужденных квазичастиц. На основе этих методов получено микроскопическое описание наблюдаемых четно-нечетных различий плотности уровней ядер и особенностей поведения статистических характеристик ядер при энергиях возбуждения ниже критической энергии "фазового перехода" из сверхтекучего состояния в нормальное.

4. Предложены новые методы расчета статистических характеристик неравновесных конфигураций ядер с фиксированным числом возбужденных квазичастиц. Исследовано влияние оболочечных эффектов и парных корреляций нуклонов на энергетическую и спиновую зависимость

плотности уровней таких систем. Рассмотрено применение разработанных методов для анализа процессов предравновесного распада составного ядра.

5. Построена микроскопическая теория коллективных возбуждений нагретых ядер. В гармоническом приближении получены уравнения, определяющие спектральные характеристики таких возбуждений, и найдены условия согласования для эффективных сил, генерирующих коллективные движения нуклонов в нагретых ядрах.

6. Рассмотрено влияние коллективных эффектов на плотность уровней возбужденных ядер. Показано, что разработанные методы дают взаимосогласованное описание имеющейся экспериментальной информации.

7. Построено микроскопическое описание спектральной интенсивности радиационных переходов в высоковозбужденных ядрах, на основе которого дана единообразная интерпретация имеющихся экспериментальных данных о радиационных силовых функциях и радиационных ширинах распада высоковозбужденных ядер.

8. Показаны широкие возможности использования развитых методов как для анализа результатов экспериментальных исследований по нейтронной физике и физике деления ядер, так и для решения задач оценки ядерных данных, необходимых для ядерной энергетики.

Представленные в диссертации результаты исследований докладывались на 18+26 ежегодных всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре ядра (1968+1976 гг.), на 1, 2 и 3 всесоюзных конференциях по нейтронной физике (Киев, 1971; 1973; 1975), на Международной конференции по ядерным данным (Хельсинки, 1970), на международных совещаниях по взаимодействию быстрых нейтронов с ядрами (Дрезден, 1973), по методам исследования коллективных возбуждений ядер (Дубна, 1974), по использованию теоретических моделей для оценки ядерных данных (Триест, 1975).

Результаты, вошедшие в диссертацию, опубликованы в следующих работах:

1. А.Г.Довбенко, А.В.Игнатюк, В.А.Толстикова. Препринт ФЭИ-293, Обнинск, 1971; Материалы 2-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Сб. "Нейтронная физика". Обнинск, 1974, ч.2, с.3.
2. А.И.Блохин, А.В.Игнатюк, В.П.Платонов, В.А.Толстикова. Вопросы атомной науки и техники. ЦНИИАтоминформ, М., 1976, сер. "Ядерные константы", вып.21, стр.3; Препринт ФЭИ-655, Обнинск, 1976.

3. А.В.Игнатюк, М.Г.Иткис, В.Н.Околович, Г.Н.Смиренкин, А.С.Тишин. Письма в ЖЭТФ, 21, 164, 1975.
4. А.В.Игнатюк, Ю.В.Соколов. Препринт ФЭИ-327, Обнинск, 1972.
5. А.В.Игнатюк, В.П.Луцев, В.Г.Проняев. Изв. АН СССР, сер.физ., 39, 2144, 1975.
6. А.В.Игнатюк, В.П.Луцев, В.Г.Проняев. Препринт ФЭИ-689, Обнинск, 1976.
7. В.М.Бычков, А.В.Игнатюк, В.П.Луцев, В.Г.Проняев, В.С.Шорин. Материалы 2-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Сб. "Нейтронная физика", Обнинск, 1974, ч.2, стр.16.
8. В.М.Бычков, В.В.Возяков, А.Г.Довбенко, А.В.Игнатюк, В.П.Луцев, В.Г.Проняев, В.С.Шорин. Вопросы атомной науки и техники, Атомиздат, 1975, сер. "Ядерные константы", вып.19, стр.110.
9. A.V.Ignatyuk, V.S.Stavinsky, Yu.N.Shubin. Nuclear Data for Reactors. IAEA, Vienna, 1970, v.2, p. 885.
10. А.В.Игнатюк, Г.Н.Смиренкин, А.С.Тишин. ЯФ, 15, 1124, 1972.
11. А.В.Игнатюк, Г.Н.Смиренкин, А.С.Тишин. ЯФ, 21, 485, 1975; Препринт ФЭИ-447, Обнинск, 1973.
12. А.В.Игнатюк, М.Г.Иткис, В.Н.Околович, Г.Н.Смиренкин, А.С.Тишин. ЯФ, 21, 1185, 1975; Препринт ФЭИ-469, Обнинск, 1973.
13. А.И.Блохин, А.В.Игнатюк. Proc.Intern.Seminar on Interactions of Fast Neutrons with Nuclei. ZfK-271, Drezden, 1974, p.167.
14. А.В.Игнатюк, М.Г.Иткис, В.Н.Околович, Г.Я.Руськина, Г.Н.Смиренкин, А.С.Тишин. ЯФ, 25, 26, 1977; Препринт ИЯФ КазССР П-9, Алма-Ата, 1976.
15. А.И.Блохин, А.В.Игнатюк. ЯФ, 23, 61, 1976.
16. А.И.Блохин, А.В.Игнатюк. Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Сб. "Нейтронная физика", ЦНИИАтоминформ, М., 1976, ч.3, стр.13.
17. А.В.Игнатюк, Ю.В.Соколов. ЯФ, 16, 277, 1972.
18. А.В.Игнатюк. ЯФ, 17, 502, 1973; Препринт ФЭИ-358, Обнинск, 1972.
19. А.В.Игнатюк, Ю.В.Соколов. ЯФ, 17, 723, 1973.
20. А.В.Игнатюк, Ю.В.Соколов. ЯФ, 19, 1229, 1974.
21. А.В.Игнатюк, Ю.В.Соколов, Ю.Н.Шубин. ЯФ, 18, 989, 1973.
22. A.V.Ignatyuk, G.N.Smirrenkin. Phys.Lett., 29B, 159, 1969.
23. А.В.Игнатюк. Препринт ФЭИ-528, Обнинск, 1974.

24. А.В.Игнатьк. Изв. АН СССР, сер. физ., 38, 2612, 1974.
25. А.В.Игнатьк. ЯФ, 21, 20, 1975.
26. А.И.Блохин, А.В.Игнатьк, Ю.В.Соколов. Материалы 3-й Всесоюзной конференции по нейтронной физике. Сб. "Нейтронная физика", ЦНИИАтоминформ, М., 1976, Ч.3, стр.8.
27. А.В.Игнатьк. Nuclear Theory in Neutron Nuclear Data Evaluation. IAEA, Vienna, 1976, v.1, p.211.
28. А.И.Блохин, А.В.Игнатьк. ЯФ, 23, 293, 1976.
29. А.И.Блохин, А.В.Игнатьк. Материалы 26-го ежегодного совещания по ядерной спектроскопии (Баку, 1976). Сб. "Проблемы ядерной физики и космических лучей". Изд. "Вища школа", Харьков, 1977, вып.7, стр. III.
30. А.В.Игнатьк. Изв. АН СССР, сер. физ., 36, 202, 1972.
31. А.И.Блохин, А.В.Игнатьк. Материалы 26-го ежегодного совещания по ядерной спектроскопии (Баку, 1976). Сб. "Проблемы ядерной физики и космических лучей". Изд. "Вища школа", Харьков, 1977, вып.7, стр. I00.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 апреля 1978 года.