

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

БОГИЛА ЕВГЕНИИ АНАТОЛЬЕВИЧ

УДК 539.17

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЯДРА И МЕХАНИЗМА ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ
С ПОМОЩЬЮ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ

01.04.16. Физика ядра и элементарных частиц

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

КИЕВ - 1993



00814713 (O)

Робота виконана в Інституті

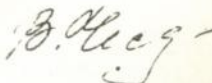
Научний керівник:

доктор фізико-математических наук, професор
Коломиєць Володимир Михайлович

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математических наук
Щубин Дрій Николаевич
кандидат фізико-математических наук, доцент
Ежов Станіслав Николаевич

Ведущая організація: ЛТФ ОІЯІ (г. Дубна)

Захита состоится "27" мая 1993г. в 16⁰⁰ на
засіданні Спеціалізованого Совета Д ОІ6.О3.ОІ при Інституті
ядерних досліджень АН України по адресу:
252028, г. Київ, пр. Науки, 47С дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці
Інститута ядерних дослідженьАвтореферат розослан "26" апреля 1993г.Учений секретарь
Спеціалізованого Совета
кандидат фіз.-мат. наук Чеснокова В. Д.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена развитию простых и эффективных методов получения информации о структуре ядра и механизме ядерных реакций, основанных на сравнительном анализе теоретических и экспериментальных изомерных отношений.

Актуальность темы диссертации определяется как практическим значением развития отмеченных методов, так и необходимостью совершенствования каскадно-испарительной модели (КИМ) расчета изомерных отношений с учетом структуры ядра и проведения критического анализа границ применимости КИМ в целом и отдельных приближений в этой модели. Указанные модификации КИМ играют важную роль для интерпретации экспериментальных данных.

Величина изомерного отношения η , определяемая обычно как отношение сечений возбуждения метастабильного $\sigma_m(E_\alpha)$ и основного $\sigma_g(E_\alpha)$ состояний $\eta(E_\alpha) = \sigma_m(E_\alpha) / \sigma_g(E_\alpha)$ (E_α — энергия частицы во входном канале), содержит информацию о механизме протекания ядерной реакции, о свойствах и структуре ядра и зависит, таким образом, от влияния многих факторов. Это обстоятельство является одновременно достоинством и недостатком изомерного отношения как объекта исследований: с одной стороны чувствительность η к влиянию множества факторов позволяет рассматривать широкий круг ядернофизических задач, а с другой — затрудняет получение надежной информации о проявлении в η каждого фактора в отдельности. В связи с этим, разработка методов получения однозначной информации о механизме ядерной реакции, свойствах и структуре ядра с помощью изомерных отношений, является актуальной задачей.

Изомерное отношение существенно зависит от индивидуальных особенностей ядра: природы дискретных уровней; структуры ираст-линии ядра-продукта (присутствие высокоспинового состояния с малой энергией возбуждения) и ядер-продуктов распада в каналы с вылетом частиц; природы γ -девозбуждения в окрестности ираст-линии. Влияние структуры ядра на изомерное отношение наиболее ярко проявляется в поведении η из реакций в околороговой области и из реакций, идущих с возбуждением высокоспиновых состояний в окрестности ираст-линии. Большинство экспериментальных данных в этих случаях не описываются в рамках КИМ, в которой непосредственное заселение изомерной пары происходит модельным приемом, без учета индивидуальных

особенностей ядра. Более того, использование в КИМ таких модельных приемов и приближений, касающихся соотношения ширины распада ядра в каналы с вылетом частиц и γ -квантов, зачастую является причиной ошибочных выводов о соотношении различных механизмов ядерной реакции и значениях плотности одночастичных состояний и момента инерции ядра, извлекаемых с помощью изомерных отношений.

В связи с этим, значительный интерес представляет модификация КИМ с учетом структуры ядра, определение границ применимости приближений, используемых в КИМ, а также всестороннее изучение влияния индивидуальных особенностей ядра на изомерное отношение, в частности, поиск характерных последствий влияния на η тех или иных структурных особенностей.

Целью настоящей работы является: развитие, обоснование и апробация методов получения информации о структуре ядра и механизме ядерных реакций с помощью изомерных отношений на основе каскадно-испарительной модели, модифицированной с учетом экспериментального дискретного спектра уровней.

Научная новизна работы. В рамках каскадно-испарительной модели, модифицированной с учетом спектра дискретных уровней, всесторонне изучено влияние структуры ядра на изомерное отношение. Показано, что в околопороговой области величина и ход $\eta(E_\alpha)$ существенно зависят от факторов, определяемых структурой ядра, таких как природа дискретных уровней, аномальное поведение ираст-линии ядра-продукта реакции и ядер-продуктов распада в каналы с вылетом частиц, аномальное положение метастабильного состояния, природа γ -девозбуждения.

Дано теоретическое объяснение скачкообразному поведению $\eta(E_\alpha)$ в околопороговой области, имеющем место в некоторых экспериментальных данных.

Рассмотрен вопрос об обоснованности вариации параметров плотности уровней в КИМ и МКИМ с целью описания изомерных отношений. Определен критерий, в соответствии с которым вариация этих параметров оправдана.

На основе численных расчетов и простых аналитических оценок ширины распада ядра в каналы с вылетом частиц и в γ -канал из состояний в окрестности ираст-линии, найдена граница оправданного использования приближения, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ираст-линии.

Найдена альтернативная влиянию нестатистических механизмов причина немонотонного поведения изомерного отношения. Этот результат имеет важное значение для исследования механизма ядерных реакций с помощью сравнительного анализа теоретических и экспериментальных изомерных отношений.

Показано, что в некоторых случаях КИМ может быть успешно использована для описания изомерных отношений из реакций, в которых статистический механизм не является доминирующим, например, из реакций с многонуклонным выходным каналом на легких ядрах ($A \sim 40$).

Научная и практическая ценность работы. В диссертации предложены простые, но достаточно эффективные методы получения информации о структуре ядра с помощью изомерных отношений. Эти методы обоснованы теоретически в рамках каскадно-испарительной модели, модифицированной с учетом спектра дискретных уровней, апробированы на конкретных примерах и могут быть использованы для получения предварительных оценок η при планировании условий экспериментов.

Предложенная в диссертации формулировка модифицированной каскадно-испарительной модели реализована программно на ЕС ЭВМ и может быть использована для изучения других измеряемых в опыте величин, например, функций возбуждения, испарительных спектров частиц и γ -квантов и т.п.

В диссертации определен критерий обоснованности вариации параметров плотности уровней в КИМ и МКИМ, что позволит избежать ошибочных выводов о значениях этих параметров, когда для достижения согласия теоретических и экспериментальных значений η необходима вариация этих параметров.

Результаты теоретического анализа границ применимости приближения, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ираст-линии, будут полезны в решении задач, касающихся изучения γ -девозбуждения холодного быстровращающегося ядра. Простые оценки ширины распада ядра из состояний в окрестности ираст-линии могут быть также использованы при планировании условий экспериментов.

Установленный факт возможного немонотонного поведения теоретической зависимости $\eta(E_{\alpha})$ без привлечения нестатистических механизмов реакции в дальнейшем будет полезен при изучении механизма протекания ядерных реакций.

Основные положения, выносимые на защиту.

- 1) На величину изомерного отношения и ход энергетической зависимости η в околороговой области существенное влияние оказывают природа дискретных уровней, структура ирраст-линии и структура изомера. Каскадно-испарительная модель, модифицированная с учетом схемы дискретных уровней, в большинстве случаев удовлетворительно описывает экспериментальные данные со стандартными наборами параметров.
- 2) Скачкообразные изменения изомерного отношения в околороговой области обусловлены влиянием каналов с вылетом частиц на γ -девозбуждение ядра-продукта и немоготонным ходом ирраст-линии в дочерних ядрах. Наличие такой связи дает возможность определять характеристики аномальных состояний ирраст-линии с помощью изомерных отношений.
- 3) Приближение, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ирраст-линии, справедливо, когда величина скорости роста энергии вращения холодного ядра не превышает значения $2 \text{ МэВ/}\hbar$. Необоснованное использование упомянутого приближения может привести к ошибочным выводам при исследовании спектров γ -квантов, множественности γ -каскада, изомерных отношений.
- 4) Причиной немоготонного хода изомерного отношения может быть статистический механизм эмиссии частиц из холодного быстровращающегося ядра, конкурирующий с γ -девозбуждением в окрестности ирраст-линии. В связи с этим, немоготонный ход $\eta(E_\alpha)$ не может быть однозначным указанием на присутствие нестатистических механизмов реакции, по крайней мере, в реакциях, идущих с возбуждением высокоспиновых состояний в окрестности ирраст-линии.
- 5) Благодаря тому, что изомерное отношение является относительной величиной, в некоторых случаях возможно удовлетворительное описание η в рамках каскадно-испарительной модели, когда статистический механизм не является доминирующим, - например, в реакциях с многонуклонным выходящим каналом на легких ядрах ($A \sim 40$).

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXXVII Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Урмала, 1987), на XXXIX

Совещании по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра (Ташкент, 1989), на Семинаре "Ядерные реакции при низких и промежуточных энергиях" (Дубна, 1989), 6-й Международной школе по нейтронной физике (Алушта, 1990), на ежегодных научных конференциях ИЯИ АН Украины (1988, 1989 гг.), а также на научных семинарах в ИЯИ АН Украины, ЛФ ОИЯИ, КУ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации 143 страницы, включая 27 рисунков, 4 таблицы и список литературы, содержащий 93 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованиям структуры ядра и механизма ядерных реакций с помощью изомерных отношений, показана актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, кратко изложено содержание диссертации и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложена каскадно-испарительная модель расчета изомерных отношений в ядерных реакциях. Показано, что существенными в этой модели являются выбор механизма протекания ядерной реакции и предположения о непосредственном заселении изомерной пары.

В § 1 приведены основные физические предположения, лежащие в основе каскадно-испарительной модели, дана схематическая формулировка КИМ.

В § 2, исходя из критического анализа модельного приема, разделяющего цепочки γ -распада в основное и метастабильное состояния, обоснована необходимость включения в эту модель экспериментального дискретного спектра уровней и схемы γ -разрядки этих уровней, сформулирована модель расчета изомерных отношений с использованием дискретного спектра уровней - модифицированная каскадно-испарительная модель (МКИМ).

В § 3 изложена схема расчета сечений возбуждения дискретных уровней из реакций типа $A(a,xb\gamma)B$, идущих с образованием компаунд ядра, а также даны определения некоторых величин, традиционно изучаемых с помощью ядерных реакций.

В §§ 4-6 приведены методы вычисления основных физических

величин, входящих в КИМ: коэффициентов трансмиссии частиц (§4); плотности уровней возбужденного ядра (§5); приведенных радиационных силовых функций (§6).

Во второй главе на примере реакций (n, γ) , $(n, 2n)$, (α, n) изучено влияние структуры ядра на величину и ход энергетической зависимости изомерного отношения $\eta(E_n)$. На основе этих исследований развиты простые методы получения информации о структурных особенностях ядра с помощью изомерных отношений как только из анализа экспериментальных данных, так и из сравнения теории с экспериментом. Значительное внимание уделено выявлению и анализу причин неудовлетворительной интерпретации отдельных экспериментальных данных в рамках КИМ, а также проверке обоснованности вариации свободных параметров этой модели в широких пределах.

В § 1 продемонстрирована связь индивидуальных отличий между соседними изотопами с отличиями значений изомерного отношения из реакции радиационного захвата нейтронов на соседних изотопах ^{113}In , ^{115}In в околороговой области. Из анализа схем дискретных уровней изотопов ^{114}In , ^{116}In показано, почему интерпретация результатов опыта в рамках КИМ, то есть без учета природы дискретных уровней, приводит в этом случае к необоснованной вариации параметров плотности уровней.

В § 2 рассмотрено влияние конкурирующих с γ -девозбуждением каналов с вылетом частиц и аномальной структуры ираст-линии ядер-продуктов распада в каналы с вылетом частиц на величину и ход $\eta(E_n)$. Показано, что присутствие аномалий в структуре ираст-линии дочерних ядер является причиной скачкообразных изменений $\eta(E_n)$ в околороговой области. Этот вывод подтвержден на примере реакций $^{113}\text{In}(n, \gamma)^{114}\text{In}$, $^{76}\text{Br}(n, \gamma)^{76}\text{Br}$, когда включение в расчеты экспериментальной ираст-линии, имеющей немонокотное поведение, принципиально изменяет ход теоретической зависимости $\eta(E_n)$ и приводит к хорошему качественному и количественному согласию с данными опыта.

В § 3 исследована роль структуры ираст-линии ядра-продукта и аномального положения изомера для адекватного описания изомерных отношений в околороговой области в зависимости от типов входного и выходного каналов. Проведен анализ функций возбуждения основного и метастабильного состояний и энергетической зависимости изомерного отношения из реакций

$^{46}\text{Sc}(n, 2n)^{44}\text{Sc}$, $^{44}\text{Sc}(\alpha, n)^{44}\text{Sc}$ с использованием расчётной (жёсткий ротатор) и экспериментальной ираст-линии. Показано, что неудовлетворительное описание ираст-линии энергией жёсткого ротатора (систематическое превышение) в области массовых чисел $A \sim 40$ является причиной несоответствия расчётного порога возбуждения изомера и систематического занижения теоретической зависимости $\eta(E_\alpha)$ в околороговой области.

В § 4 проведено сравнение результатов расчётов η в рамках каскадно-испарительной модели с и без учёта дискретного спектра уровней в том случае, когда оба подхода дают драматическое расхождение с результатами измерений. Выбран типичный пример для такой ситуации - реакция, в которой возбуждается изомерная пара с большой разницей по спину. Обсуждается вопрос о правомерности вариации параметров плотности уровней с целью описания изомерных отношений, когда использование стандартного набора таких параметров приводит к сильному расхождению теории с экспериментом. Вывод этого параграфа состоит в том, что такая вариация оправдана только тогда, когда адекватно описаны детали γ -девозбуждения в нижней части спектра возбуждений.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с изучением механизма ядерных реакций с помощью изомерных отношений. В связи с тем, что информация о вкладе нестатистических процессов, извлекаемая из сравнительного анализа экспериментальной и вычисленной в рамках КИМ зависимостей $\eta(E_\alpha)$, состоит в утверждении "да - нет", основное внимание в этой главе уделено поиску и объяснению иных возможных причин несоответствия теории с экспериментом, в частности, критическому анализу приближений, используемых в КИМ.

В § 1 проведён качественный анализ влияния нестатистических процессов на энергетическую зависимость изомерного отношения $\eta(E_\alpha)$. Такой анализ даёт возможность установить характерные проявления нестатистических механизмов в η и сформулировать, таким образом, метод получения информации о вкладе того или иного механизма.

В § 2 рассмотрено влияние каналов с вылетом частиц на девозбуждение ядра статистическим γ -каскадом в окрестности ираст-линии в разных областях массовых чисел и угловых моментов. Найлены границы применимости широко используемого в статистической модели приближения, согласно которому порог

эмиссии частиц отсчитывается от ираст-линии. Получены простые выражения для ширины распада холодного быстрообращающегося ядра в каналы с вылетом нейтрона и в γ -канал, из которых следует, что граница применимости упомянутого приближения может быть определена в универсальном виде, как ограничение на скорость роста энергии вращения холодного ядра (ираст-линии). Проведен анализ изменений распределения заселенности состояний в окрестности ираст-линии, формы спектров γ -квантов и множественности γ -каскада, когда влияние каналов с вылетом частиц на γ -девозбуждение ядра в окрестности ираст-линии становится существенным.

В § 3 определены последствия некорректного использования приближения, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ираст-лучни, при изучении вклада нестатистических процессов с помощью изомерных отношений. Показано, что корректный учет конкуренции частичных каналов при разрядке ядра в окрестности ираст-линии в тех случаях, когда такая конкуренция заметно влияет на γ -девозбуждение ядра-продукта, может существенно изменить ход зависимости $\eta(E_\alpha)$, в том числе - привести к немонотонному ходу $\eta(E_\alpha)$. Этот результат подтвержден расчетом изомерных отношений из реакций $^{44}\text{K}(\alpha, n)^{44}\text{Sc}$ и $^{220}\text{St}({}^{18}\text{O}, p2n)^{44}\text{Sc}$, в которых теоретические зависимости $\eta(E_\alpha)$ имеют максимум, положение которого соответствует экспериментальным данным. Таким образом, найдена альтернативная влиянию нестатистических механизмов причина немонотонного поведения изомерного отношения.

В § 4 рассмотрен один из случаев, когда КИМ может быть использована для описания изомерного отношения из реакции, в которой статистический механизм не является доминирующим. Исходя из определения изомерного отношения, обоснована возможность применения КИМ для описания η из реакций с многонуклонным выходным каналом, найден диапазон энергий налетающих частиц, в котором вклад нестатистических механизмов реакции практически не влияет на величину изомерного отношения. Выводы этого параграфа подтверждены расчетом зависимости $\eta(E_\alpha)$ из реакции $^{44}\text{Ca}(\alpha, p3n)^{44}\text{Sc}$.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1) Каскадно-испарительная модель расчета изомерных отношений модифицирована с учетом структурных особенностей ядра, путем включения экспериментальных дискретных уровней. Такая модификация КИМ позволяет использовать эту модель для исследования структуры ядра с помощью изомерных отношений.

2) Результаты расчетов η в рамках МКИМ показали, что в околопороговой области величина изомерного отношения существенно зависит от природы дискретных уровней, структуры ираст-линии и структуры изомера. Учет этих факторов позволил описать экспериментальные данные со стандартными наборами параметров оптических потенциалов и плотности уровней, чего не удавалось достичь в традиционной КИМ. Из сравнения результатов расчетов изомерных отношений с помощью КИМ и МКИМ продемонстрирована необоснованность вариации параметров плотности уровней в широких пределах.

3) Найдено объяснение появлению скачкообразных изменений в $\eta(E_\alpha)$ в околопороговой области. Установлено, что решающим фактором здесь является конкуренция с γ -девозбуждением каналов с вылетом частиц и наличие скачкообразных изменений доступного фазового объема при распаде в каналы с вылетом частиц.

4) Предложены методы получения информации о характеристиках отдельных дискретных уровней, наличии аномалий в структуре ираст-линии и характеристиках аномальных состояний ираст-линии как из сравнения теоретических и экспериментальных изомерных отношений, так и из анализа хода экспериментальной зависимости $\eta(E_\alpha)$. Работоспособность этих методов продемонстрирована на примере реакций радиационного захвата нейтронов в околопороговой области.

5) Показано, что использование в КИМ приближения, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ираст-линии, оправдано не во всем диапазоне u -ловых моментов, а граница этого диапазона зависит от массы ядра и энергии связи вылетающих частиц. Получены простые выражения для ширины распада холодного быстровращающегося ядра в каналы с вылетом нейтрона и в γ -канал, из которых следует, что граница применимости упомянутого приближения может быть определена в универсальном виде, как ограничение на скорость роста энергии вращения холодного ядра (ираст-линии).

6) Результаты расчетов $\eta(E_a)$ из реакций на легких ядрах ($A=40$), в которых возбуждаются высокоспиновые состояния, полученные без приближения, согласно которому порог эмиссии частиц отсчитывается от ираст-линии, указывают на то, что для исследования вклада нестатистических процессов с помощью изомерных отношений недостаточно качественного рассмотрения влияния этих процессов на η . Такой вывод вытекает из того, что учет влияния каналов с вылетом частиц на γ -девозбуждение ядра-продукта в окрестности ираст-линии может приводить к принципиальному изменению хода теоретического изомерного отношения, в частности, возможен немонотонный ход $\eta(E_a)$.

7) Установлены границы применимости КИМ для описания изомерных отношений в реакциях с многонуклонным выходным каналом. Эти границы отличны от области оправданного использования статистической теории для описания функций возбуждения и определяются не абсолютной величиной энергии возбуждения составной системы, а порогом открытия следующего по множественности частичного канала, конкурирующего с γ -разрядкой ядра-продукта.

8) Создан комплекс программ, позволяющий проводить вычисления в рамках модифицированной каскадно-испарительной модели. Программы написаны на языке ФОРТРАН, адаптированы на ЕС ЭВМ.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Богила Е.А., Коломиец В.М. Заселение высокоспиновых метастабильных состояний в реакциях с нейтронами// Тезисы докладов XXXVII Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра., Л.: Наука, 1987, С.435.
2. Богила Е.А., Коломиец В.М., Санжур А.И. Модифицированная каскадно-испарительная модель расчета изомерных отношений// Киев, 1988, 49с. (Препринт/Институт ядерных исследований АН УССР: КИЯИ-88-28).
3. Богила Е.А., Коломиец В.М. Изомерные отношения в модифицированной каскадно-испарительной модели// УФЖ, 1989, т.34, С.7-14.
4. Богила Е.А., Коломиец В.М. Влияние структуры ираст-линии на изомерные отношения// Тезисы докладов XXXIX Сессии по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра., Л.: Наука, 1989, С.449.

Богила Е.А., Коломиец В.М. Влияние структуры и г-а-линии на
изомерное отношение//

Изв. АН СССР, сер. физ., 1990, Т.54, С.33-39.

5. Богила Е.А., Коломиец В.М. Изомерные отношения в реакциях с
многоуклонным выходным каналом//

Тезисы докладов XXXX Сессии по ядерной спектроскопии и
структуре атомного ядра., Л.: Наука, 1990, С.430.

6. Богила Е.А., Коломиец В.М. Влияние каналов с вылетом частиц
на девозбуждение ядра статистическим γ -каскадом//
ЯФ, 1991, Т.53, С.120-131.

7. Богила Е.А., Гаврилик В.И., Харланов В.Б. и др. Исследование
выходов изомерных пар в (p,n) и $(\alpha,p3n)$ реакциях//

Изв. АН СССР, сер. физ., 1991, Т.55, С.921-923.

8. Богила Е.А., Коломиец В.М., Санжур А.И. Плотность уровней
ядра с фиксированным числом возбужденных квазичастиц//

Киев, 1990, 26с. (Препринт/Институт ядерных исследований АН
УССР: КИЯИ-90-44).

Bogila Ye.A., Kolomietz V.M., Sanzhur A.I. Nuclear level
density with fixed exciton number//

Z.Phys. A, 1992, V.341, P.373-381.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Відомості про авторів та опубліковані роботи

Відомості про редакцію та видавця

Відомості про редакцію та видавця

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

Відомості про редакцію та видавця

465258

AB 27.235

AB 27.235