

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

РЕБИТЬКО Светлана Викторовна

УДК 539.163

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИЙ  
НА ЯДРАХ ПЕРЕХОДНОЙ И ДЕФОРМИРОВАННОЙ ОБЛАСТЕЙ  
В РЕАКЦИЯХ С ЛЕГКИМИ ЧАСТИЦАМИ И  $\gamma$ -КВАНТАМИ

(01.04.16 - Физика ядра и элементарных частиц)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев - 1992

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00814411 (J)

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень АН України

Наукові керівники: член-кореспондент АН України  
Вишневський М. Н.  
доктор фізико-математических наук  
Мелтоножський В. А.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук  
Токарєвський В.В.  
кандидат фізико-математических наук  
Сорокін А.А.

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований

Автореферат разослан \* 23 \* ноября 1992 г.

Защита состоится \* 24 \* декабря 1992 г.

в 14<sup>00</sup> час. на заседании Специализированного Совета Д 016.03.01  
Института ядерных исследований АН Украины  
по адресу: 252028, Киев-28, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

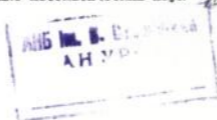
Института ядерных исследований АН Украины

Ученый секретарь

Специализированного Совета

кандидат физико-математических наук

*В. Д. Чеснокова*  
В.Д.Чеснокова



канала значительно улучшает согласие теории с экспериментом даже в области максимума функции возбуждения, особенно при большой разнице спинов изомерных состояний.

#### Практическая ценность работы.

Созданный

спектроскопический комплекс успешно применяется для изучения изомерных отношений и в различных  $\gamma$ -спектроскопических и активационных задачах.

Установленная корреляция между величинами изомерных отношений и средним угловым моментом компаунд-ядра в реакциях с легкими заряженными частицами в околороговой области открывает новые возможности для получения методом изомерных отношений информации о форме кулоновского барьера, влиянии приведенной массы на реакцию слияния, роль эффектов спаривания и т.д.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для дальнейшего развития теории ядерных реакций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 139 стр., в том числе 14 табл., 26 рисунков. Список цитированной литературы составляет 137 наименований.

Агробация работы и публикации. Основн. результаты диссертации изложены в 15 работах, докладывались на 39+42 Сессиях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, опубликованы в журналах Известия АН СССР, УЖ, Атомная энергия, Ядерная физика.

#### Содержание диссертации.

Во введении изложена цель работы, а также основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена краткому описанию комплекса, предназначенного для измерения изомерных отношений. Этот комплекс включает установку для быстрой доставки облученных образцов, полупроводниковые спектрометры, ПЭВМ и пакет программ для управления экспериментом, анализа спектров и расчета изомерных отношений. При измерениях, исходя из условий и задач эксперимента, применялись различные комбинации Ge- и Si(Li)-детекторов и

спектроскопических каналов совместно с анализаторами ICA-70, IP-4900, а также комплексы ADCAM-100 и ADCAM-300. Характеристики используемых детекторов приведены в табл.1. Описаны программы, применявшиеся для набора  $\gamma$ -спектров в память ПЭВМ и работы с файлами.

Получены формулы для расчета изомерных отношений в ядрах с двумя изомерными состояниями.

Изложен метод теоретического анализа изомерных отношений, основанный на испарительной модели распада составного ядра, предложенный Хоизенгой и Ванденбошем. Описаны модели предравновесного распада.

В данной работе расчеты выполнялись по модифицированной каскадно-испарительной модели (КИМ) и по программам, учитывающим предравновесные процессы, ALICA, GROGY, STAPRE.

Во второй главе описаны исследования изомерных отношений в  $(\gamma, n)$  и  $(n, \gamma)$ -реакциях, которые проводились с целью выяснения как природы  $\gamma$ -излучения между компаунд-состояниями, так и механизма  $(\gamma, n)$ -реакции. Фотоядерные реакции изучались на изотопах Se и  $^{186}\text{Re}$  (см.табл.2). На рис.2 приведены полученные данные об изомерных отношениях выходов  $d$  для  $^{186}\text{Re}$  и изотопов Se (точки).

Данные для Re были проанализированы в рамках КИМ. На рис.2 приведена расчетная кривая (сплошная линия), причем необходимые для расчетов значения параметров извлекались из данных о сечениях  $(p, n)$ -реакции. Как видно, энергетическая зависимость рассчитанных значений согласуется с экспериментальной кривой. Некоторое расхождение при  $E_{\gamma} \sim 18$  МэВ легко устраняется при варьировании величины момента инерции.

Однако, значение  $\sigma^m/\sigma^g = 0.47 \times 10^{-2}$ , померяное при  $E_{\gamma} = 10$  МэВ не согласуется с рассчитанным ( $\sigma^m/\sigma^g = 0.1 \times 10^{-2}$ ). Вероятно, для объяснения необходимо рассмотреть вклад полупрямых процессов. Эта гипотеза нами была более тщательно проверена на изотопах селена, которые относятся к переходной области. Кроме того, изотопы селена в широком диапазоне массового числа  $A$  имеют изомерные пары, что позволяет проводить систематическое сравнение. Эти же изотопы довольно тщательно изучались и в таких прямых реакциях, как сшив и

подхват нейтронов. Измеренные кривые изомерных отношений выходов  $d$  для  $^{74,82}\text{Se}$  представлены на рис.2.

При изучении изотопов селена измерялись также абсолютные значения сечений образования изомерных состояний. Полученные значения, аппроксимированные лоренцовыми кривыми, представлены на рис.3. Параметры аппроксимации приведены в таблице 2. Как видно, все представленные сечения имеют одностороннюю форму с максимумом в области  $\sim 16$  МэВ.

Полученные экспериментальные результаты об абсолютных сечениях  $(\gamma, n)^m$ -реакций позволили также определить изомерные отношения сечений  $R = \sigma_m / (\sigma_m + \sigma_g) = \sigma_m / \sigma_n$  и для ядер, у которых основные состояния стабильны. Изомерные отношения были определены при энергии 16 МэВ, используя данные о полных фотонейтронных сечениях (рис.4). Для ядер  $^{82}\text{Sr}$  и  $^{80}\text{Zr}$  получены совпадающие в пределах ошибок изомерные отношения сечений, поэтому они представлены на рис.4 одной точкой ( $^{80}\text{Zr}$ ).

Анализ измеренных сечений реакции  $(\gamma, n)^m$  показывает, что сечения для ядер с числом нейтронов, соответствующим почти заполненной  $1g_{7/2}$ -подоболочки, характеризуется  $\Gamma_0$  в  $\sim 1.5$  раза большим, чем  $\Gamma_0$  в нуклидах, где нейтроны отсутствуют в данной подоболочке (или их мало). В этом случае объяснение уширения  $\Gamma_0$  связано с наличием небольшой деформации в ядрах, относительно перегруженных нейтронами. Оценки показывают, что таким величинам  $\Gamma_0$  соответствует параметр деформации  $\beta = 0.1 + 0.3$ .

Изомерные отношения, измеренные для ядер  $^{74,82}\text{Se}$ , подтверждают влияние деформации, т.к. ее наличие приводит к увеличению числа высокоспиновых состояний. Зависимость величины  $R$  от числа нейтронов (см. рис.4) также соответствует этим выводам.

На рис.4. приведен кривая заселенности  $\theta_n = I(N)$  подоболочки  $1g_{7/2}$  в прямых реакциях и наши данные об изомерных отношениях. Видно, что наблюдается определенная корреляция между  $\theta_n$  и  $R$ . Подтверждение такой корреляции изомерных отношений  $R = I(N)$  с заполнением нейтронной подоболочки  $1g_{7/2}$ , как и данные о  $(\gamma, n)$ -реакциях в околороговой области, где наблюдается значительное расхождение со статистической теорией, указывает на

важную роль полупрямых процессов в  $(\gamma, n)^m$ -реакциях.

Изучение изомерных отношений позволяет исследовать не только плотность возбужденных состояний в области непрерывного спектра, но и природу  $\gamma$ -излучения между компаунд-состояниями. Наиболее удобно такие исследования проводить в  $(n, \gamma)$ -реакциях с тепловыми нейтронами. Это представляет определенный интерес и в связи с тем, что в последнее время получены данные, указывающие на то, что природа первичного  $\gamma$ -излучения с энергией  $\leq 2$  МэВ, испускаемого в  $(n, \gamma)$ -реакциях, не связана с гигантским дипольным резонансом (ГДР).

Для того, чтобы заметить разницу в природе  $\gamma$ -излучения низких энергий, необходимо исследовать изомерные пары, у которых  $\Delta I = (I_m - I_g) \geq 5$ . В этом случае средняя энергия  $\gamma$ -квантов, заселяющих высокоспиновое состояние будет  $\sim 1.5$  МэВ.

Исследования из  $^{182}\text{Bi}$ ,  $^{182}\text{Ta}$  и  $^{187}\text{Au}$  облучались потоком тепловых и резонансных нейтронов. Эти данные приведены в табл. 3,4. Отметим, что все результаты для  $^{187}\text{Au}$ , получены впервые, а для  $^{182}\text{Bi}$  было известно только изомерное отношение ( $\sigma^m/\sigma^g$ ) для тепловых нейтронов. Нами уточнены сечения захвата тепловых нейтронов, приводящих к образованию  $^{182m}\text{Bi}$   $\sigma = (3,7 \pm 0,3)$  барн,  $^{182m}\text{Ta}$   $\sigma = (15 \pm 2)$  мбарн и впервые измерено сечение захвата  $^{187m}\text{Au}$   $\sigma = (4 \pm 1)$  мбарн.

При анализе полученных данных необходимо сравнить расчетные значения  $\sigma^m/\sigma^g$  и экспериментальные. Для  $(n, \gamma)$ -реакции с тепловыми (т.е.  $s$ -нейтронами) нами было получено аналитическое выражение для  $\sigma^m/\sigma^g$  в виде:

$$\sigma^m/\sigma^g = (3^{-(I+1)} + \delta^2 3^{-(I+1)/2}) I^{2-\nu} \left[ \frac{E}{E_\gamma} \right]^{\nu+1} \left[ \frac{1}{\nu-2} - \frac{1}{\nu-1} \right].$$

где  $I = I^m - I_A - 1/2$ ,  $I^m$  - спин изомера,  $I_A$  - спин облучаемого ядра;

$E$  - энергия возбуждения компаунд-ядра;

$E_\gamma$  - средняя энергия  $\gamma$ -квантов, определяемая с помощью выражения  $E_\gamma = 4 \sqrt{E/a - 5/a^2}$ ;

$a$  - энергетический параметр извлекался из данных о  $(p, n)$ -сечениях или вычислялся по формуле  $a = 2\alpha (J_x + J_y + 1) A^{2/3}$ ,

где  $\alpha = 0.0380 - 0.0125 \ln \left\{ \frac{\pi}{20} \frac{A}{1 + \gamma(A-80)/2} \right\} \cos \left\{ \frac{\pi}{20} \frac{(1-40\gamma)(N-Z)}{1 + \gamma(A-80)/2} \right\}$

$\gamma = 6.7 \times 10^{-8}$   $J_p$  и  $J_n$  - средние моменты протонов и нейтронов, соответствующие реальной схеме заполнения оболочек.

$\nu$  - параметр, связанный с электромагнитной природой  $\gamma$ -излучения. Если природа  $\gamma$ -излучения обусловлена ГДР,  $\nu = 5$ . При квазичастичной природе  $\nu = 3$ . При выводе этого выражения были опущены члены, дающие поправку  $\leq 10\%$ . Поэтому в дальнейшем необходимо этот факт учитывать при сравнении с экспериментальными значениями.

Результаты расчетов  $R = \sigma^m / \sigma^g$  для тепловых нейтронов представлены в табл.4. Туда мы включили все имеющиеся в настоящее время данные о  $\sigma^m / \sigma^g$  для ядер с  $\Delta I > 5$ .

Как видно из этих результатов, при энергиях  $\gamma$ -квантов, меньших 0,8 МэВ, энергетическая зависимость  $\gamma$ -излучения  $E_\gamma^2$ , а при  $E_\gamma > 1$  МэВ она, вероятнее всего, смешанная, типа  $E_\gamma^2 + E_\gamma^3$ . Анализ соотношения  $\sigma^m / \sigma^g$  для ядер с  $A \sim 150$  и  $200$  показывает, что четность переходов, вероятнее всего, положительная, т.к. только вероятность М1-переходов не зависит от  $A$ .

Таким образом, из полученных данных можно сделать вывод о том, что в низкоэнергетической области природа  $\gamma$ -излучения в  $(n, \gamma)$ -реакциях не связана с ГДР.

Нами были измерены величины  $\sigma^m / \sigma^g$  для некоторых энергий резонансных нейтронов и нейтронов с энергией 14 МэВ.

Значения  $\sigma^m / \sigma^g$  для резонансных нейтронов в  $^{197}\text{Au}$  указывают на наличие интерференции между  $s$ - и  $p$ - состояниями. Отметим также, что значения изомерных отношений в  $^{197}\text{Au}$  коррелируют с экспериментальной кривой плотности уровней в области энергий 0-100 кэВ (рис.5).

Данные о  $\sigma^m / \sigma^g$  для нейтронов с энергией 14 МэВ также полностью согласуются с нашими выводами о природе  $\gamma$ -излучения в низкоэнергетической области. Это следует из того факта, что не смотря на то, что нейтроны с такими энергиями примерно равновероятно имеют  $s$ ,  $p$ ,  $d$ -компоненты, компаунд-ядро будет находиться в состоянии с квантовыми характеристиками близкими к тем, что имеет компаунд-ядро, образованное тепловыми нейтронами. Такой вывод следует из конкретных расчетов по программе Stapre.

Физически это связано с тем, что при  $E_{\gamma}=14$  МэВ доминирующим является предравновесный вылет нуклонов. При предравновесном вылете частиц уносится угловой момент, в среднем на  $(1+1,5)h$  больший, чем при статистическом испарении из компаунд-ядра, то есть, как бы обедняются высокоспиновые состояния компаунд-ядра и распределение плотности возбужденных состояний по угловому моменту становится подобным случаю с тепловыми нейтронами. В этом случае  $\sigma^m/\sigma^g = 2,7 \cdot 10^{-4}$  при  $\nu = 3$  и  $0,3 \cdot 10^{-4}$  при  $\nu = 5$ , а экспериментальное значение  $\sigma^m/\sigma^g = 2,7 \cdot 10^{-4}$ , т.е. хорошее совпадение с экспериментом именно для  $\nu=3$ .

Поэтому мы можем с большой долей уверенности сделать вывод о том, что природа  $\gamma$ -переходов в компаунд-ядрах сложна по структуре и в вероятность переходов в области 1+2 МэВ дает значительный вклад процессы, не связанные с ГДР.

Это, вероятнее всего, связано с тем, что  $\gamma$ -кванты с энергией  $\leq 2$  МэВ не могут перейти из одной оболочки в другую, т.е. они в основном происходят между состояниями, сформированными одной оболочкой. Возможна ситуация, когда волновые функции компаунд-состояния могут содержать компоненты, преимущественно сформированные одной оболочкой, так называемая фрагментация одного состояния, что, естественно, приводит к резкому увеличению вклада  $M1$ -мультипольности в  $\gamma$ -переходы с малой энергией.

Третья глава посвящена изучению изомерных отношений в реакциях с заряженными частицами.

В области ниже кулоновского барьера методом изомерных отношений нами исследовалось распределение среднего углового момента. Как известно, величина среднего углового момента  $l$  зависит от формы кулоновского барьера и от приведенной массы входного канала. Это позволяет при определенных условиях получать информацию о кулоновском барьере, силах спаривания и т.п.

Измерение зависимости  $\sigma^m/\sigma^g$  в припороговой области от энергии налетающих частиц проводилось на ядрах  $^{184}\text{Re}$ ,  $^{198}\text{Au}$  и  $^{199}\text{Au}$ , образующихся в реакциях  $^{181}\text{Ta}(\alpha, n)^{184m,g}\text{Re}$ ;  $^{196}\text{Ir}(\alpha, n)^{198m,g}\text{Au}$ ;  $^{194}\text{W}(p, n)^{194m,g}\text{Re}$ ;  $^{197}\text{Pt}(d, 2n)^{198m,g}\text{Au}$ ;  $^{197}\text{Au}(d, p)^{198m,g}\text{Au}$  (рис.1).

Облучение проводилось на циклотроне У-120 ИЯИ АН Украины.

Начальная энергия заряженных частиц составляла 6.7 МэВ, 13.6 МэВ и 27.3 МэВ для протонов, дейтронов и  $\alpha$ -частиц, соответственно. Энергия частиц изменялась с помощью алюминиевых фольг.

Измерения проводились на полупроводниковом спектрометре АПКМ-100, с Ge-детекторами объемом 5 см<sup>3</sup> и 100 см<sup>3</sup>. Измерялись  $\gamma$ - и  $K_{\alpha}$ -спектры из распада вышеуказанных радионуклидов. Полученные данные о величинах  $\sigma^m/\sigma^g$  приведены на рис.6,7.

Как видно из представленных результатов,  $\sigma^m/\sigma^g$  в припороговой области становится не зависимой от энергии величиной или, по крайней мере, при  $E_{p,d,\alpha} - E_{пор} \rightarrow 0$  эта величина стремится к величине не равной нулю. Особенно это отчетливо наблюдается в (d,p) и ( $\alpha$ ,n)-реакциях.

Физически это объясняется тем, что кулоновский вклад в полный барьер изменяется как  $1/r$  и он одинаков для всех парциальных волн, включая в-волну. Центробежный же потенциал изменяется как  $1/r^2$ . Если кулоновское отталкивание достаточно сильное, т.е. барьер высокий и широкий, и момент инерции системы достаточно велик, то вкладом центробежного потенциала в полный барьер можно пренебречь. В такой системе средний угловой момент  $\bar{l} + l_0$  и эта величина  $l_0$  может быть больше  $1\hbar$ . Это качественное объяснение полностью согласуется с нашими данными о  $\sigma^m/\sigma^g$  в припороговой области для реакций с легкими заряженными частицами.

Нами проведены также и расчеты  $\bar{l}$  в припороговой области в приближении параболического кулоновского барьера. Расчет  $\bar{l}$  проводился нами с парциальными сечениями, вклад которых в полное сечение составлял не менее 1%. На рис.6,7 представлены зависимости рассчитанных значений  $\bar{l}$  и экспериментальные значения  $\sigma^m/\sigma^g$  (R) от энергии налетающих частиц.

Можно отметить, что для реакции с  $\alpha$ -частицами и дейтронами кривые для R и  $\bar{l}$  близки по форме в подбарьерной области, что позволяет сделать вывод о существенной зависимости изомерного отношения в подбарьерной области от среднего углового момента  $\bar{l}$ . Зависимость изомерного отношения от энергии возбуждения

образовавшегося ядра значительно слабее. Для (p,n)-реакции этот эффект проявляется не столь явно, но и там мы видим, что в асимптотическом пределе  $E_p - E_{\text{пор}} \rightarrow 0$ ,  $\sigma^m/\sigma^g$  стремится к постоянному значению, отличному от нуля.

Возрастание величины R при  $(E - E_{\text{пор}}) \rightarrow 0$  для ( $\alpha, n$ )-реакций, вероятнее всего, связано с тем, что в этой области начинает доминировать реакция квазиупругого рассеяния  $\alpha$ -частиц. Она приводит к тому, что в компаунд-ядре происходит обеднение низкоспиновых состояний. А это будет приводить к увеличению величины  $\sigma^m/\sigma^g$ , что мы и наблюдаем в эксперименте.

На основании обсуждавшихся выше экспериментальных и теоретических данных сделано заключение, что в реакциях с легкими заряженными частицами в подпороговой (околопороговой) области средней угловой момент компаунд ядра не зависит (или слабо зависит) от энергии налетающих частиц. Это открывает новые возможности в изучении свойств ядер в реакциях при энергиях, близких к порогу.

В настоящей работе было проведено также исследование изомерных отношений на ядрах  $^{234}\text{Th}$  и  $^{200}\text{Au}$  в области больших энергий. При таких энергиях начинают доминировать предравновесные процессы, изучение которых в настоящее время является одной из актуальных задач.

Изомерные отношения для ядра  $^{200m}\text{Au}$  измерялись активационным методом. Исследовались реакции (d,2n) и (d,p). Выбор этих реакций связан и с тем, что (d,2n)-реакция имеет статистический характер, а (d,p) - это в основном прямая реакция.

В реакциях с дейтронами были выполнены измерения изомерных отношений от порога реакции (d,p) и (d,2n) до  $E_d = 50$  МэВ. Полученные данные представлены в табл.5,6. Все результаты получены впервые.

При облучении  $^{200}\text{Au}$  в реакции (d,2n) возбуждается изомерная пара  $^{200}\text{Tl}$  с  $I^\pi = 13/2^+$ ,  $T_{1/2} = 23.84$  и  $I^\pi = 1/2^-$ ,  $T_{1/2} = 64.14$ . Изомерные отношения в этой реакции до энергий 25 МэВ изучались раньше. Величина  $\sigma^m/\sigma^g$  была  $\approx 0.6$ . Полученные нами значения  $\sigma^m/\sigma^g$  для этого ядра приведены в табл.7.

Точность измерения  $\sigma^m/\sigma^g$ , если не оговорено, составила 10%.

Точность определения энергии дейтронов в области меньше 13,5 МэВ была 0,2 МэВ, а в области больше 20 МэВ - 0,5 МэВ.

При изучении  $(\alpha, n)$ -реакции на  $^{184}\text{Ta}$  измерялись изомерные отношения в  $^{184}\text{Re}$  (см. рис.1). На рис.8 приведены полученные результаты. Точность измерений в основном связана со статистической точностью.

Расчеты  $\sigma^m/\sigma^g$  для  $(d, p)$  и  $(d, 2n)$  выполнялись по программе STAPRE. Получены значения для  $(d, 2n)$ -реакции в области 10-14 МэВ  $\sigma^m/\sigma^g=3 \times 10^{-2}$ , т.е. в хорошем согласии с экспериментом. Для  $(d, p)$ -статистической реакции расчеты дают  $\sigma^m/\sigma^g \sim 0,1$  (см. табл.8). Для учета вклада прямого канала в таблице приведены абсолютные значения  $\sigma^m$  и  $\sigma^g$  для статистического канала  $(d, p)$ -реакции. Как известно,  $\sigma^{\text{прям.}} \sim 0,3$  барна. Кроме того, в прямой реакции заселяются в основном низкоспиновые состояния в остаточном ядре. В этом случае  $\sigma^m/\sigma^g$  должно быть меньше  $10^{-4}$ . Это и наблюдается в эксперименте. Некоторое расхождение при  $E_d=13,6$  мэВ объясняется большим вкладом статистического канала.

При больших энергиях уже после 20 МэВ для лучшего согласия теории с экспериментом необходимо учитывать предравновесный канал в  $(d, 2n)$ -реакции. Отметим, что максимум функции возбуждения при статистическом канале для этого ядра находится при 15 МэВ. Вклад предравновесного канала начинает доминировать в областях, удаленных более чем на 10 МэВ от максимума. При этом величина  $\sigma^m/\sigma^g$  слабо зависит от энергии налетающей частицы. Это находится в согласии с экспериментальным значением  $\sigma^m/\sigma^g$  в этой области.

Для  $(\alpha, n)$ -реакции были выполнены расчеты изомерных отношений по КИМ с плотностью уровней из модели ферми-газа с обратным смещением. При проведении расчетов особое внимание уделялось области, где равновесные процессы являются доминирующими, а также роли коэффициента  $f$ , который характеризует переход коллективного движения в одночастичное и наоборот. Ясно, что получение таких данных есть интересная задача сама по себе, кроме того величина  $f$  может указывать на наличие ирраст-ловушек с заданным спином.

На рис.8 и рис.11 представлены экспериментальные результаты и данные расчетов изомерных отношений  $^{184m}\text{Re}$  и  $^{199m}\text{Au}$  для

( $\alpha, n$ )-реакций по КИМ. Расчеты выполнялись без подгонки по параметрам модели. Все необходимые величины вычислялись или использовались экспериментальные данные из других реакций. Варьировалась только величина  $f$ . Как видно из рисунков, КИМ на участке 15+50 МэВ может успешно описать экспериментальные результаты не только качественно, но и количественно. Это указывает, что роль предравновесных процессов в области (30+50) МэВ все еще не является доминирующей и при получении оценок сечений процессов можно пользоваться такими довольно простыми моделями, как КИМ.

Кроме вышеизложенных выводов, из проведенных в настоящей работе расчетов с плотностью уровней из модели Ферми-газа с обратным смещением, можно сделать заключение, что момент инерции этого ядра в области энергии возбуждения 0+4 МэВ почти равен твердотельному. Из величины  $f$  (хорошее согласие теории с экспериментом при больших  $f$ ) можно сделать вывод и о наличии низкоспиновых ирраст-ловушек.

Учет предравновесного канала для ( $\alpha, n$ )-реакции нами выполнялся по программе STAPRE. На рис. 10 приведена зависимость  $\sigma^m/\sigma^g$  от энергии, рассчитанная с учетом предравновесия, но без учета коэффициента  $f$ . Из этого рисунка видно, что простой учет предравновесного процесса не может описать полученную экспериментально кривую. Ясно также, что и вклад прямых реакций не может объяснить наблюдаемого резкого увеличения  $\sigma^m/\sigma^g$  с ростом энергии  $\alpha$ -частиц, т.к. прямой канал только уменьшает средний угловой момент остаточного ядра.

К сожалению, других экспериментальных данных о сечениях ( $\alpha, n$ ) или ( $p, n$ )-реакции при таких энергиях возбуждения нет. Однако, для качественного анализа можно привлечь данные со изомерных отношениях в реакциях с  $\kappa$ -мезонами. Как известно, при взаимодействии  $\kappa$ -мезона с ядром последнему передается энергия 70 или 140 МэВ. Причем ядро практически не получает вращательной энергии. В таких условиях наблюдался аномальный выход высокоспиновых изомеров. Нами из данных о ( $\kappa, xn$ )-реакциях было получено распределение спинов остаточного ядра с учетом

дополнительного углового момента, образующегося за счет вращения (см. рис.9). Из этого распределения видно, что при энергиях  $> 70$  МэВ при таком механизме будет происходить заселение только высокоспинового изомера. Оценки величины  $\sigma^m/\sigma^g$  для  $(\alpha, n)$ -реакции в области энергий 50+100 МэВ приведены на рис.8. Видно, что в этом случае экспериментальная кривая может быть описана достаточно успешно.

На основании проведенных исследований сделан вывод о доминирующей роли предравновесных процессов в области энергий на 20+40 МэВ больших максимума сечения данной реакции.

В заключении перечислены основные результаты работы, которые состоят в следующем.

1. Создан измерительный комплекс с высокими спектроскопическими характеристиками, которые позволяют проводить длительные (в течении 1-2 месяца) измерения без существенного ухудшения энергетического разрешения. Высокие спектроскопические характеристики комплекса получены благодаря современным полупроводниковым детекторам из сверхчистого германия, персональным ЭВМ и специальным программам контроля измерений, накопления и обработки  $\gamma$ - и Кх-спектров. Разработана методика расчета изомерных отношений для ядер, у которых более 2 изомерных уровней, проанализирована возможность измерения в этих условиях  $T_{1/2}$  и КВК.

2. С помощью спектроскопического комплекса на циклотронах У-120 и У-240, реакторе ВВР-9М, микротроне М-30 ИГи АН УССР впервые измерены зависимости изомерных отношений от энергии налетающих частиц в  $(\gamma, n)$ -реакциях на изотопах Se и  $^{186}\text{Re}$  в области  $E_{\gamma}^{\text{max}}=(10-19)$  МэВ; в  $(n, \gamma)$ - на ядрах  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  и  $^{197}\text{Au}$  с тепловыми и резонансными нейтронами; впервые измерены изомерные отношения для  $(p, n)$ ,  $(d, 2n)$ ,  $(d, p)$  и  $(\alpha, n)$ -реакций, приводящих к образованию  $^{184m, g}\text{Re}$ ,  $^{180m, g}\text{Au}$ ,  $^{180m, g}\text{Au}$  в энергетическом диапазоне 0+100 МэВ;

а) установлено, что в области ниже кулоновского барьера зависимость изомерных отношений от энергии налетающих частиц коррелирует со средним угловым моментом компаунд-ядра в реакциях

слияния с легкими заряженными частицами и становится независимой от энергии налетающих частиц;

б) показано, что учет предравновесного механизма значительно улучшает согласие теоретических данных изомерных отношений с экспериментальными, особенно для ядер с большой разницей угловых моментов изомерных состояний; предравновесный механизм начинает доминировать при энергиях возбуждения налетающих частиц превышающих энергию максимума данной функции возбуждения на 20-50 МэВ;

в) установлено значительное влияние полупрямых процессов в  $(\gamma, n)$ -реакциях, показана корреляция между вероятностью  $(d, p)$ -реакции и величинами изомерных отношений в  $(\gamma, n)$ -реакции;

г) установлено влияние интерференционных процессов в области непрерывного спектра между компаунд-состояниями на величину изомерных отношений в  $(n, \gamma)$ -реакциях с резонансными нейтронами;

д) обнаружено, что первичный  $\gamma$ -спектр переходов между компаунд-состояниями в области энергий  $< 0.8$  МэВ описывается энергетической зависимостью в виде  $\sim E_{\gamma}^3$ , а при энергии  $\gamma$ -квантов  $E_{\gamma} \sim 1$  МэВ вклад компонент с энергетической зависимостью  $E_{\gamma}^3$  и  $E_{\gamma}^2$  соизмерим. Показано, что это явление может быть связано с фрагментацией компаунд-состояний внутри одной оболочки.

Следует отметить высокую точность выполненных экспериментов. Подобные по точности измерения изомерных отношений, особенно в припороговой области, выполнены впервые.

3. Полученные экспериментальные и теоретические данные будут использованы при создании современной теории ядерных реакций с легкими частицами.

Знание энергетических зависимостей изомерных отношений имеет важное прикладное значение при наработке различных радионуклидов, особенно при облучении мишеней естественного состава на установках с заряженными частицами, имеющими энергии 20-100 МэВ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Белявенко В.С., Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Мазный И.А., Патляк Ю.В., Ухин М.А., Решитько С.В., Шаповалова И.П. Распад  $^{94}\text{Y}$ . - Киев, 1987. - 21 с. (Препр. АН УССР. ИЯИ; 86-48). // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 37 совещания. - Л.: Наука, 1987. - С.66.
2. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Решитько С.В., Степаненко В.А. Изомерное отношение реакции  $^{187}\text{Ta}(\alpha, n)^{190}\text{Re}$  // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 38 совещания. - Л.: Наука, 1988. - С.357.
3. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Мазур В.М., Решитько С.В. Изомерные отношения  $^{184\text{m}}\text{Re}$  в реакциях  $(\alpha, n)$  и  $(\gamma, n)$ . // Известия АН СССР Сер. физ. - 1989. - Т.53, N1. - С.171-174.
4. Гарилж В.И., Желтоножский В.А., Решитько С.В., Харланов В.Б. Измерение изомерных отношений для ядер с  $A > 150$ . // Известия АН СССР Сер. физ. - 1989. - Т.54, N5. - С.1007-1010.
5. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Ломоносов Б.И., Мазур В.М., Решитько С.В., Соколик И.В. Изомерное отношение в реакциях  $^{187}\text{Re}(\gamma, n)^{188\text{m}}\text{Re}$ . // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 38 совещания. - Л.: Наука, 1988. - С.323.
6. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Решитько С.В., Харланов В.Б. Исследование выходов изомеров  $^{182\text{m1, m2}}\text{Eu}$  в  $(n, \gamma)$ -реакциях. // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 39 совещания. - Л.: Наука, 1989. - С.298.
7. Вишневский И.Н., Желтоножский В.А., Решитько С.В. Изомерные отношения в реакции  $^{186}\text{W}(p, n)^{186}\text{Re}$ . // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов 38 совещания. - Л.: Наука, 1989. - С.298.
8. Белявенко В.С., Желтоножский В.А., Зелинский А.Г., Решитько С.В., Ухин М.А. Распад  $^{244}\text{Am}$ . // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов международного совещания. - Л.: Наука, 1992. - С.431.
9. Желтоножский В.А., Лебедев Д.А., Решитько С.В., Ухин М.А. Исследование распада  $^{181}\text{Hf}$  // УДЖ. - 1992. - Т.37, N11. - С.2159-2164.

10. Желтоножский В.А., Майданж В.К., Решитько С.В., Тараканов В.К.  
Исследование распада  $^{199m_2, 199m_1}Au$ . // Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов международного совещания. - Л.: Наука, 1992. - С.108.
11. Желтоножский В.А., Решитько С.В.  
Изомерные отношения в реакциях с протонами и дейтронами.  
// Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов международного совещания. - Л.: Наука, 1992. - С.234.
12. Желтоножский В.А., Литвинский Л.Л., Майданж В.К., Мурзин А.В., Решитько С.В., Тараканов В.К. Зависимость изомерного отношения от энергии нейтронов в реакции  $^{197}Au(p, \gamma)^{198m, g}Au$ .  
// Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра. Тезисы докладов международного совещания. - Л.: Наука, 1992. - С.235.
13. Желтоножский В.А., Мазур В.М., Решитько С.В., Соколик И.В.  
Исследование  $(\gamma, n)^m$ -реакций для ядер  $74 \leq A \leq 90$  // УЗЖ. - 1992. - Т.37, N 11. - С.2150-2154.
14. Денисов В.Ю., Желтоножский В.А., Решитько С.В.  
Исследование изомерных отношений в околопороговой области в реакциях с легкими заряженными частицами // ЯФ. - 1992. - N12 С.568-571.
15. Желтоножский В.А., Решитько С.В.  
Сечение реакции  $^{181}Eu, ^{197}Au(p, \gamma)^{182m, g}Eu, ^{198m, g}Au$   
// Атомная энергия. - 1992. - N12 (в печати).

Таблица 1.

Основные характеристики применяемых детекторов

Детектор	V, см <sup>3</sup>	ПШПВ, кэВ		
		59,5 кэВ	122 кэВ	1333 кэВ
Ge (ORTEC)	5	0,5	0,7-0,8	2,0-2,2 1,8 1,78
Ge (ORTEC)	170			
Ge (ORTEC)	230			
CANBERRA	100	0,7		
Si(Li)	ПШПВ - 360 эВ на 5,9 кэВ			

Таблица 2.

Характеристики исследуемых изотопов и параметры лоренцовых кривых в (γ,n)-реакциях

ядро мишени	дочернее ядро		σ <sub>0</sub> (мбн)	E <sub>0</sub> (МэВ)	Γ <sub>0</sub> (МэВ)	
	I <sup>π</sup>	T <sub>1/2</sub>				
<sup>78</sup> Se	<sup>77</sup> Se	ε 1/2- π 7/2+	стаб. 17 с	43	16.2	3.6
<sup>80</sup> Se	<sup>79</sup> Se	ε 7/2+	6.5x10 <sup>4</sup> г	78	16.0	4.9
<sup>82</sup> Se	<sup>81</sup> Se	π 1/2-	3.9 м	51	16.0	4.8
		ε 1/2-	18.5 м			
<sup>88</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr	π 7/2+	57.3 м	132	16.5	3.4
		ε 9/2+	стаб.			
<sup>90</sup> Zn	<sup>89</sup> Zn	π 1/2-	2.8 ч	132	16.2	3.0
		ε 9/2+	78.4 ч			
		π 1/2-	4.18 м			

Таблица 3.

Энергии нейтронов и относительные выходы изомеров <sup>196</sup>Au и <sup>152</sup>Eu.

E	I <sup>π</sup> <sub>B</sub> /I <sup>π</sup> <sub>H</sub>	0.55эВ	2кэВ	59 кэВ	144кэВ	14 <sup>*</sup> МэВ
<sup>196</sup> Au σ <sup>B</sup> /σ <sup>H</sup> x10 <sup>4</sup>	12 <sup>-</sup> /2 <sup>-</sup>	0.4	-	14	9.1	2.7
<sup>152</sup> Eu σ <sup>B</sup> /σ <sup>H</sup> x10 <sup>3</sup>	8 <sup>-</sup> /0 <sup>-</sup>	1.05	1.1	-	-	-

\* Облучение выполнялось на нейтронном генераторе КГУ



Таблица 4.

Экспериментальные и рассчитанные значения  
изомерных отношений для реакции с тепловыми нейтронами

ядро	$\pi$ $I_m/I_g$	$\pi$ $R(\Delta R)$ ЭКСП	$R(\nu=3)$	$\alpha(\Delta\alpha), \%$	$E_0/I, \text{МэВ}$
$^{152}\text{Eu}$	$8^-/0^-$	$1.2(1)10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	24(6)	1.2
$^{182}\text{Ta}$	$10^-/3^-$	$7.1(2)10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$	50(5)	0.87
$^{186}\text{Re}$	$8^+/1^-$	$3(1)10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$	50(15)	1.1
$^{192}\text{Ir}$	$9^+/1^-$	$2(1)10^{-4}$	$4.6 \times 10^{-4}$	60(30)	0.87
$^{198}\text{Au}$	$12^-/2^-$	$4(1)10^{-5}$	$3.5 \times 10^{-5*}$	100	0.55

$E_0$  — энергия возбуждения компаунд-ядра,  $\alpha = W(E_0^*) / (W(E_0^*) + W(E_0^{**}))$

Таблица 5.

Изомерные отношения  $^{199m, g}\text{Au}$  в реакции  $^{199}\text{Pt}(d, 2n)^{199m, g}\text{Au}$ .

$E_d$	$\sigma^m/\sigma^g \times 10^2$	$E_d$	$\sigma^m/\sigma^g \times 10^2$
8.8	0.17	30.6	4.9
10.6	0.42	35.0	5.7
12.0	1.2	39.3	3.0(6)
13.6	2.0	44.9	2.0(6)
19.2	2.8	50.0	2.9(5)
25.0	3.2		

Таблица 6.

Изомерные отношения  $^{199m, g}\text{Au}$  в реакции  $^{197}\text{Au}(d, p)^{199m, g}\text{Au}$ .

$E_d$	$\sigma^m/\sigma^g \times 10^3$	$E_d$	$\sigma^m/\sigma^g \times 10^3$
8.4	0.12	25.0	2.5
9.1	0.19	30.6	3.6
9.3	0.19	35.0	4.9
10.6	0.23	39.3	3.3
12.0	0.4	44.9	2.3
13.5	1.1	50.0	5.9
15.7	1.5		

Таблица 7.

Измерные отношения  $^{197m}\text{Hg}$  в реакции  $^{197}\text{Au}(d,2n)^{197m}\text{Hg}$ .

$E_d$	$\sigma^m/\sigma^B$	$E_d$	$\sigma^m/\sigma^B$
8.0	0.40	35.0	1.61
13.0	0.60	39.3	1.59
15.7	0.74	44.9	0.85
25.0	0.43	50.0	0.73
30.6	1.06		

Таблица 8.

Сечения заселения основного и изомерного состояния и измерные отношения  $^{197m}\text{Au}$  в реакции  $^{197}\text{Au}(d,p)^{197m}\text{Au}$ , рассчитанные по программе STAPRE для различных энергий дейтронов.

$E_d$ (МэВ)	$\sigma^m$ (барн) $\times 10^3$	$\sigma^B$ (барн) $\times 10^4$
10.0	2.050	48.820
11.0	0.275	12.202
12.0	0.093	4.977
13.0	0.059	3.060
14.0	0.059	2.625
14.7	0.072	2.615
15.0	0.083	2.979
19.7	10.4	67.53
24.7	13.0	63.1
30.3	3.7	31.14



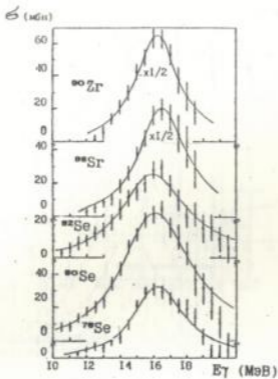


Рис.3. Сечения реакции  $(\gamma, n)^m$  на ядрах  $^{76,80,82}\text{Se}$ ,  $^{88}\text{Sr}$  и  $^{90}\text{Zr}$ .

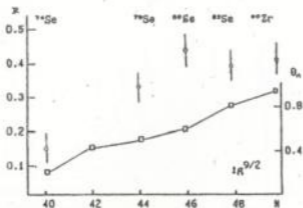


Рис.4. Зависимости заселенности  $1g_{7/2}$ -подоболочки  $\theta_n$  (○) и изомерных отношений  $R$  (△) от числа нейтронов.

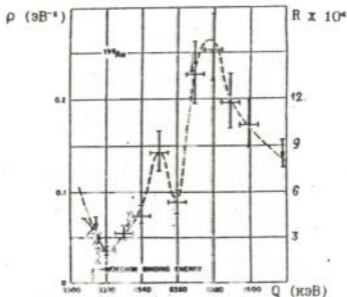


Рис.5. Экспериментально измеренная зависимость плотности уровней  $\rho$  и изомерных отношений  $R$  от энергии возбуждения в  $^{199}\text{Au}$  из  $(p, \gamma)$ -реакции.

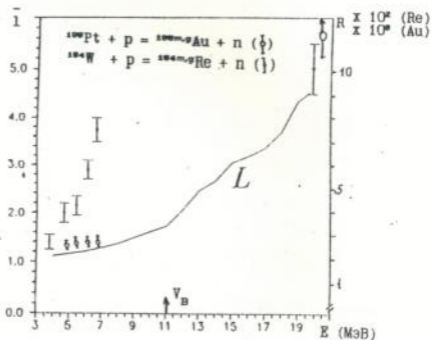


Рис.6. Зависимости от энергии столкновения в системе центра масс среднего углового момента  $l$  (сплошная линия) и изомерных отношений  $R$  для  $(p, n)$ -реакции.  $V_B$  - высота кулоновского барьера.

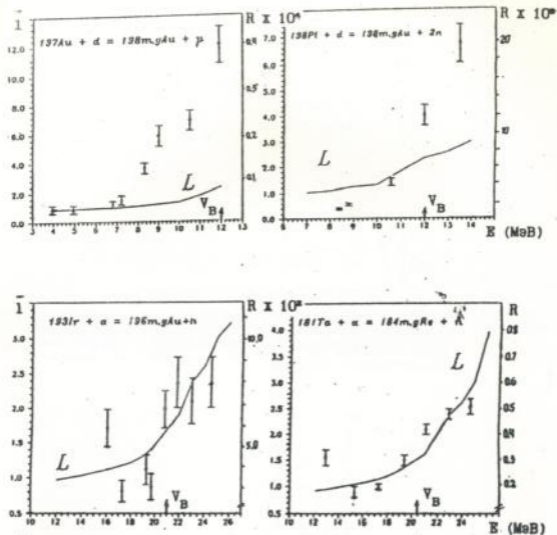


Рис. 7. Зависимости от энергии отщипывания в системе центра масс среднего углового момента  $l$  (сплошная линия) и изомерного отношения  $R$ .  $V_B$  - высота кулоновского барьера.

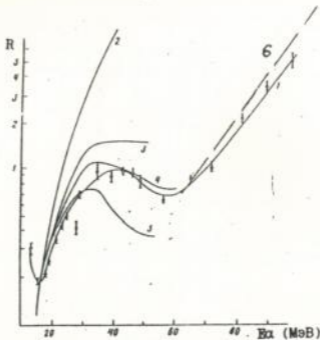


Рис.8. Энергетическая зависимость изомерных отношений для  $^{223}\text{Re}$  из  $(\alpha, n)$ -реакции. 1 - эксперимент; 2-5 - расчет по КИМ при  $f=0\%$ , 50%, 70% и 100%; 6 - расчет по модели внутриядерного каскада.

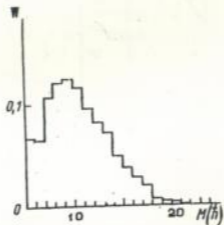


Рис.9. Распределение спинов остаточного ядра в модели внутриядерного каскада для ядер с  $A \approx 200$ .

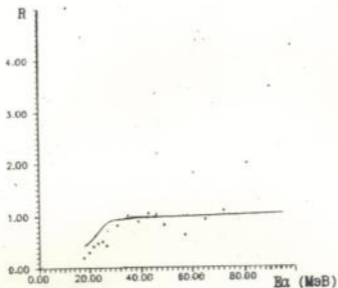


Рис.10. Энергетическая зависимость изомерных отношений для  $^{186}\text{Re}$  из  $(\alpha, n)$ -реакции. Точки - эксперимент; сплошная линия - расчет по STAPRE с учетом предравновесного распада.

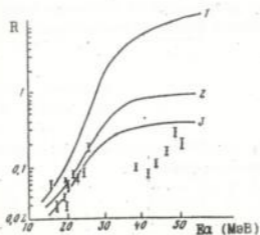


Рис.11. Энергетическая зависимость изомерных отношений для  $^{186}\text{Au}$  из  $(\alpha, n)$ -реакции. (I) - эксперимент; 1-3 - расчет по КИМ при  $\gamma=0\%$ ,  $50\%$  и  $100\%$ .

РЯБИТЬКО Светлана Викторовна

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОМЕРНЫХ ОТНОШЕНИИ  
НА ЯДРАХ ПЕРЕХОДНОЙ И ДЕФОРМИРОВАННОЙ ОБЛАСТЕЙ  
В РЕАКЦИЯХ С ЛЕГКИМИ ЧАСТИЦАМИ И  $\gamma$ -КВАНТАМИ

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата (Физико-математических наук)

Усл.-печ.л. 1,7

Подписано к печати 10.11.1992

Тип заказ: N 192 тираж 100

---

СКТЕ с ЭП Института ядерных исследований АН Украины  
252028, Киев-28, Проспект Науки, 47.



AB 26.451

**AB 26.451**