

55140

T-546

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

15-95-177

На правах рукописи

ТОНЧЕВ
Антон Пенев

**ВОЗБУЖДЕНИЕ ИЗОМЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ
В ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ
В ОБЛАСТИ ГИГАНТСКОГО ДИПОЛЬНОГО
РЕЗОНАНСА**

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1995

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова
Объединенного института ядерных исследований, Дубна

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ: доктор физико-математических наук,
профессор ГАНГРСКИЙ Ю.П.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор физико-математических наук,
профессор КАПИТОНОВ И.М.;

доктор физико-математических наук
МАЛОВ Л.А.

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ: Российская академия наук,
Институт ядерных исследований, Москва

Защита диссертации состоится “___” _____ 1995 года в
“___” час. на заседании специализированного совета Д 047.01.05 при
Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории ядерных реакций
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московская обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 1995 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук:

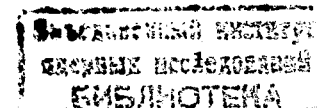
Попеко А.Г.

Актуальность проблемы.

Фотоядерные реакции (ФЯР) с образованием конечного ядра в изомерных состояниях становятся одним из перспективных методов получения новой информации как о механизме этих реакций, так и о структуре уровней, через которые происходит заселение изомерных состояний. Нередко такой источник сведений является единственным, т.к. эти уровни обычно не проявляются при β -распаде, а в ядерных реакциях их трудно выделить из массы остальных уровней. Эти сведения получают при измерении выходов ядер в изомерных состояниях, а также изомерных отношений (ИО). Из вероятности заселения изомера можно судить о свойствах состояний, через которые происходит заселение изомеров: о распределении их плотности по энергии и по спину, а также о вероятностях радиационных переходов между ними. ФЯР являются наиболее удобными для этого, т.к. из-за отсутствия кулоновского барьера и энергии связи для γ -квантов, можно получать возбужденные ядра как в области выше нуклонного порога, так и ниже его.

В настоящее время накоплен большой объем экспериментальных результатов по исследованию изомерных состояний в ФЯР. Однако большинство этих данных разрознены и не имеют целенаправленного характера. Поэтому детальное изучение процесса возбуждения изомерных состояний, а также зависимости его вероятности от различных ядерных параметров и характеристик ядерной реакции представляет важное значение.

Накопление более полной экспериментальной информации о структуре этих состояний является основой для проверки и развития различных теоретических моделей.



Цель работы:

1. Расчет спектров тормозного излучения при различных значениях энергий падающих электронов, угла наблюдения, толщины и материала мишени.
2. Разработка относительного метода измерения выходов изомерных состояний и их функций возбуждения в области гигантского дипольного резонанса.
3. Изучение механизма возбуждения и распада высокоспиновых изомеров ^{180m}Hf , ^{180m}Ta , ^{190m}Os и ^{204m}Pb в реакциях неупругого рассеяния γ -квантов.
4. Исследование особенностей возбуждения изомерных состояний $h_{11/2}$ ($50 \leq N \leq 82$) в ФЯР с вылетом одного нейтрона в области гигантского дипольного резонанса. Изучение зависимостей ИО от энергии возбуждения, массового числа нуклидов, разницы в спинах изомерного и основного состояний.
5. Изучение влияния оболочечной структуры осколков деления на формирование их углового момента.

Научная новизна:

1. Впервые измерены выходы и получены сечения неупругого рассеяния γ -квантов для высокоспиновых изомеров ^{180m}Hf , ^{190m}Os и ^{204m}Pb ниже нуклонного порога.
2. Впервые на высокоспиновой мишени ^{180m}Ta в области нуклонного порога наблюдалась реакция неупругого рассеяния электронов.
3. Впервые в области гигантского дипольного резонанса измерены функции возбуждения реакций (γ, n) на изотопах $^{130,132,134,136}\text{Ba}$ и ^{138}Ce .
4. Впервые измерены ИО для изотопов $^{118,124}\text{Sn}$, $^{122,124,130}\text{Te}$, $^{138,140}\text{Ce}$, в (γ, n) реакциях при максимальной энергии γ -квантов $E_\gamma = 25$ МэВ.

5. В реакции фотоделения ^{232}Th измерено ИО осколка деления ^{134}I и с помощью формализма Юзенги и Ванденбоша рассчитан его угловой момент.

Практическая ценность работы:

1. Разработанный метод расчета тормозного излучения может быть использован на любых электронных ускорителях в области энергии до 30 МэВ с целью проведения абсолютных измерений выходов ФЯР.
2. Некоторые исследования в области ниже нуклонного порога имеют важный астрофизический аспект.
3. Результаты исследований изомерных состояний могут быть использованы в гамма-активационном анализе.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Расчет спектра тормозного излучения γ -квантов в области энергии от 1 до 30 МэВ для различных углов наблюдения, толщин и материалов мишени.
2. Исследование реакций (γ, γ') в области энергий 5 - 9 МэВ, приводящих к образованию высокоспиновых изомеров, которые относятся к трем областям ядер - сильнодеформированным - ^{180m}Hf , переходным - ^{190m}Os и сферическим - ^{204m}Pb .
3. На высокоспиновой изомерной мишени ^{180m}Ta измерение сечения девозбуждения изомера при переходе с изомерного 9^- на 1^+ основное состояние.
4. Измерения ИО для реакции (γ, n) для широкого круга ядер ($46 \leq Z \leq 64$ и $50 \leq N \leq 82$) в области гигантского дипольного резонанса. Получение зависимости ИО от энергии возбуждения, массового числа и атомного номера нуклидов.

5. Измерение ИО в осколке деления ^{134}I с целью изучения влияния оболочечной структуры на формирование углового момента осколков деления.

Апробация работы:

Материалы, послужившие основой данной диссертации докладывались на международных конференциях и совещаниях:

1. International Workshop on "Dynamical Aspects of Nuclear Fission", Smolenice, CSFR (1991).
2. 41-е Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра", 1991, Минск, СССР.
3. The International Symposium on fundamental investigations with electron accelerators, Plovdiv (1992).
4. 44-е Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" 17-20 мая, 1994, Санкт-Петербург, Россия.
5. VI International Conference on Selected Topics in Nuclear Structure, July 5-9, 1994, Dubna, Russia.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 86 страниц машинописного текста, включая в себя 27 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 83 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются основные цели исследования и определяется круг решаемых задач.

Первая глава носит методический характер и касается вопросов, связанных с относительными измерениями выходов и сечений изомерных состояний в условиях работы на тормозном излучении.

Описана методика расчета спектра тормозного излучения из толстой мишени под различными углами. Максимум тормозного излучения вперед соответствует толщине мишени $\cong 0.3$ рад. длины. Спектр излучения из такой мишени нельзя считать эквивалентным обычно используемому Шиффовскому спектру для "тонких" мишеней и требует специальных расчетов. Поэтому нами был проведен теоретический расчет спектров из мишеней различной толщины и под различными углами наблюдения в интересующем нас диапазоне энергий электронов 5-30 МэВ [1].

Предполагая, что "элементарный" спектр излучения, т.е. спектр излучения электрона при одном акте рассеяния, известен, суммируются спектры тормозного излучения из всей мишени с учетом рассеяния электронов, поглощения излучения в материале мишени, вероятности испускания фотонов под заданным углом, а также потерь энергии электронами и их поглощения. Рассчитанные нами спектры хорошо совпадают с имеющимися экспериментальными данными в диапазоне энергий 1-30 МэВ.

Рассмотрен относительный метод определения выходов фотоядерных реакций, применение которого является наиболее эффективным, когда исследуемые и мониторные сечения измеряются одновременно. При определении выходов исследуемых реакций отпадает необходимость в мониторинговании пучка γ -квантов. Эффективность этого метода при исследовании ФЯР под действием γ -квантов тормозного излучения обуславливается тем, что при его применении извлекается информация одновременно о разных каналах взаимодействия.

Рассматривается и вопрос о математическом методе определения сечений реакции по результатам измерения интегральных выходов фотоядерных реакций. В задаче определения сечений фотоядерных реакций по данным о выходе появляется необходимость решать интегральное уравнение I рода. Для решения этого вопроса нами был использован модифицированный метод минимизации направленного расхождения, предложенный В.Е. Жучко. Одно из основных преимуществ этого метода - положительность решения во всем диапазоне энергий.

Во второй главе представлены экспериментальные результаты исследования реакций (γ, γ') , в области энергий 5-9 МэВ, приводящих к образованию высокоспиновых изомеров в четно-четных ядрах, которые относятся к трем областям - сильнодеформированным - ^{180m}Hf , переходным - ^{190m}Os и сферическим - ^{204m}Pb [2].

Большой интерес к исследованию изомерных состояний в (γ, γ') реакциях связан с тем фактом, что из-за отсутствия кулоновского барьера и энергии связи для γ -квантов, можно получать возбужденные ядра в области ниже энергии связи нейтрона. Такие особенности заселения высокоспиновых изомеров в реакциях (γ, γ') приводят к тому, что изомерные отношения оказываются очень чувствительными к параметрам плотности уровней и вероятностям радиационных переходов.

В деформированных ядрах причиной изомерии и запрета для γ -переходов может являться не только большая разница спинов изомерного и основного состояний, но и их проекций на ось симметрии ядра (квантовое число K). Яркими примерами K - изомера служат ^{180m}Hf и ^{190m}Os .

На рис.1 показаны полученные зависимости сечений и изомерных

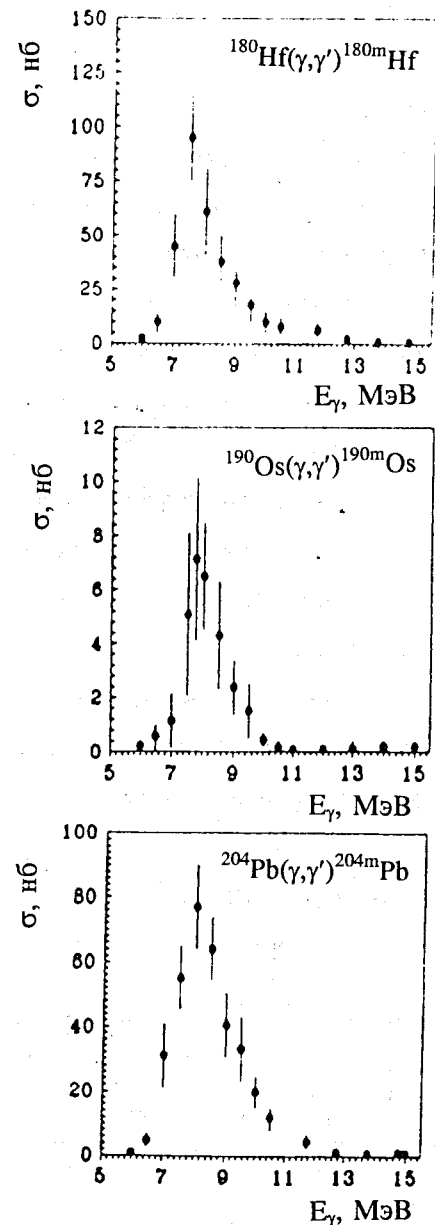


Рис.1. Функции возбуждения исследуемых реакций

отношений от энергии γ -квантов. Функции возбуждения исследуемых реакций имеют резонансную форму и их максимумы в пределах точности измерения совпадают с порогом V_n реакций (γ, n) [2].

Выходы этих трех высокоспиновых изомеров контрастируют с интегральным сечением, полученным на высокоспиновой изомерной мишени ^{180m}Ta при неупругом рассеянии γ -квантов вблизи нейтронного порога. Эксперименты по неупругому рассеянию γ -квантов и электронов на ^{180m}Ta [3] указали на его необычно большое интегральное сечение. Если сравнить это сечение с сечением возбуждения для ^{180}Hf , то оно оказывается на четыре порядка выше. В табл. 1 представлены интегральные сечения для ^{180}Hf и ^{180}Ta при двух энергиях γ -квантов. По-видимому, большая разница в спинах для ^{180}Ta не является препятствием для его девозбуждения. Это сечение имеет самое большое значение для (γ, γ') реакций, "связывающих" основное и изомерное состояния ниже порога вылета нейтрона.

Изомерное состояние ^{180}Hf распадается через одночастичные состояния основной вращательной полосы ($K^\pi = 0$). В случае ^{180}Ta , по-видимому, имеет место другая схема девозбуждения. При дипольном поглощении γ -квантов с

Таблица 1. Интегральные сечения ^{180m}Hf и ^{180m}Ta при двух энергиях γ -квантов

E_γ , МэВ	$\sigma(\gamma, \gamma')$, мбарн.кэВ	
	Hf($0^+ \Rightarrow 8^-$)	Ta($9^- \Rightarrow 1^+$)
6.5	0.015 (5)	380 (80)
7.0	0.055 (10)	450 (90)

изомерного состояния 9^- возбуждаются состояния со спином и четностью 8^+ , 9^+ и 10^+ . Эти состояния находятся при энергии возбуждения 6.5 - 7 МэВ. Прямой переход с этих состояний на основное 1^+ состояние маловероятен из-за большой разницы в спинах - $\Delta J > 7$. Поэтому более вероятны M1 и E2 переходы на основную ротационную полосу с $K^\pi = 1^+$. Однако, в этом случае возникает большой запрет по квантовому числу т.к. $\Delta K = 8$. Из экспериментальных данных известно, что в нечетных ядрах даже при довольно низких энергиях возбуждения плотность уровней большая и возможно смешивание по квантовому числу K. Таким образом снимается запрет по K и после этого возможен переход с состояний 8^+ , 9^+ и 10^+ ($K^\pi = 9^-$) на 7^+ , 8^+ и 9^+ ($K^\pi = 1^+$). Далее происходит обычный каскад на основную полосу, ведущий к основному состоянию 1^+ ($K^\pi = 1^+$). Такие переходы из возбуждаемых состояний 8^+ , 9^+ , 10^+ возможны и на другие полосы с $K^\pi = 1^-$, $K^\pi = 3^-$ и $K^\pi = 4^-$. В случае ^{180}Hf такие переходы на полосу, построенную на изомерном состоянии невозможны, из-за сильного различия по спину уровней ротационной полосы и возбуждаемых после захвата γ -квантов уровней.

В третьей главе представлены экспериментальные результаты по исследованиям изомерных состояний $h_{11/2}$ в ФЯР с вылетом одного нейтрона для широкого круга изотопов с $50 \leq N \leq 82$ и $46 \leq Z \leq 62$. Для всех исследуемых ядер выбрано изомерное состояние с одним и тем же спином и четностью $11/2^-$, а участвующие в реакции изотопы являются четно-четными, которые после поглощения γ -кванта имеют спин 1-. Таким образом, для возбуждения изомерных состояний во всех изучаемых изотопах выбраны идентичные условия - одинаковый тип реакции и энергия возбуждения, одни и те же спины начального и конечного состояний. Поэтому можно ожидать, что изменения измеряемых на опыте изомерных отношений при переходе от одного ядра к

другому, будут определяться тем, как в этих ядрах меняется структура уровней, через которые происходит заселение изомерного состояния. Полученные экспериментальные данные позволяют судить как о статистических свойствах этих уровней (о зависимости их плотности от энергии и спина), так и об их спектроскопических характеристиках - спинах, четностях, вероятностях переходов различной мультипольности в изомерное состояние.

В зависимости ИО от массового числа наблюдалось несколько изотопных зависимостей. На изотопах Ва получена зависимость ИО от энергии γ -квантов и массового числа изотопа [4]. На рис. 2 представлена зависимость ИО от энергии γ -излучения (для дифференциальных сечений) и от граничной энергии тормозного излучения (для интегральных сечений). В последнем случае ИО соответствуют отношениям изомеренных выходов реакций, приводящих к изомерному и основному состояниям, т.к. обе реакции имеют близкие по форме функции возбуждения. Это указывает на одинаковый механизм заселения изомерного и основного состояний - эмиссия нейтронов из состояний гигантского дипольного резонанса на уровни с энергией возбуждения несколько МэВ, а затем каскад γ -квантов. ИО в реакциях (γ, n) на изотопах Ва обнаруживают зависимость от энергии γ -квантов и массового числа изотопа. ИО растут с уменьшением числа нейтронов в ядре. Оно максимально для наиболее легкого изотопа ^{129}Ba .

Зависимость ИО для изотопов Те при максимальной энергии γ -квантов $E_\gamma = 25$ МэВ увеличивается с увеличением числа нейтронов в ядре, и самое большое ИО имеет ^{129}Te . Это ИО представляет и самое большое значение из всех исследуемых нами нейтронных состояний $h_{11/2}$.

Интересно посмотреть и на изотонную зависимость ИО (рис.3). В этом

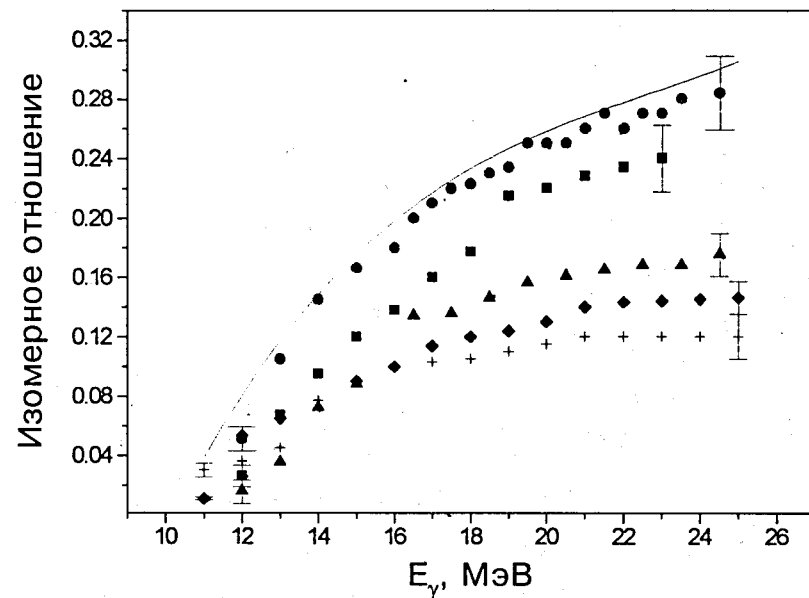


Рис.2. Зависимость изомерных отношении для различных изотопов бария от энергии γ -квантов. Значки (^{129m}Ba •, ^{131m}Ba ■, ^{133m}Ba ▲, ^{135m}Ba ◆ и ^{137m}Ba +) относятся к интегральным сечениям, сплошная кривая - отношения дифференциальных сечений для ^{129m}Ba и ^{129g}Ba .

отношении благоприятной группой ядер являются изотопы, имеющие замкнутые нейтронные оболочки ($N = 82$) как ^{138}Ba , ^{140}Ce , ^{142}Nd и ^{144}Sm . В (γ, n) реакциях на этих ядрах возбуждаются состояния, имеющие одинаковые спины и четности в изомерном и основном состояниях и приблизительно одинаковые коэффициенты квадрупольной деформации в основном состоянии.

ИО имеет максимум в районе ^{140}Ce и ^{138}Ba . Эта зависимость уменьшается с приближением к "замкнутой" протонной оболочке $Z = 64$. По-видимому аналогичная ситуация будет наблюдаться и с левой стороны этой зависимости при приближении к другой замкнутой протонной оболочке $Z=50$.

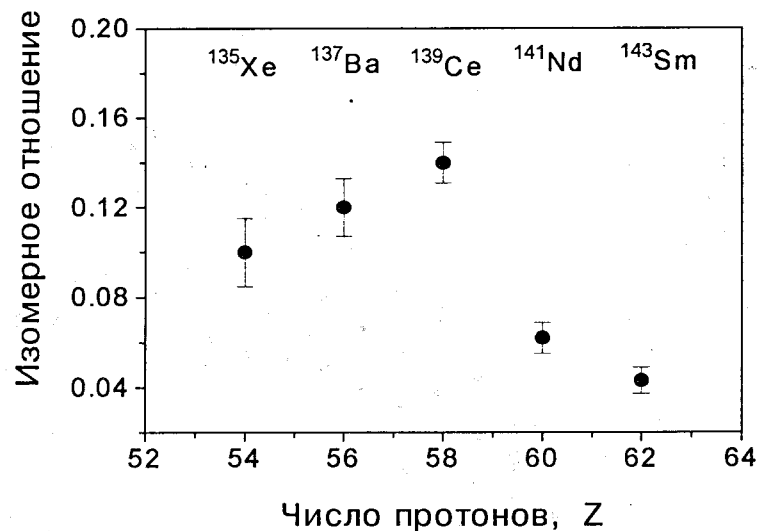


Рис. 3. Зависимость ИО от Z для изотопов с N=81.

Результаты измерений ИО для состояний $h_{11/2}$, образующихся в реакциях (γ, n) на 16 четных ядрах при максимальной энергии γ -квантов $E_\gamma = 25$ МэВ представлены на рис.4 [5,6]. Для самых легких и самых тяжелых ядер, которые соответствует началу и концу "острова" изомерии этих состояний, ИО, а вместе с ними и интегральные сечения наиболее низкие. Максимальные значения ИО имеют изотопы Sn и Te.

Таким образом, на ИО влияет целый ряд факторов: значения спинов изомерного и основного состояний, энергия связи нейтрона в начальном и конечном ядре, зависимость плотности уровней конечного ядра от энергии и спина, структура уровней выше изомерного состояния.

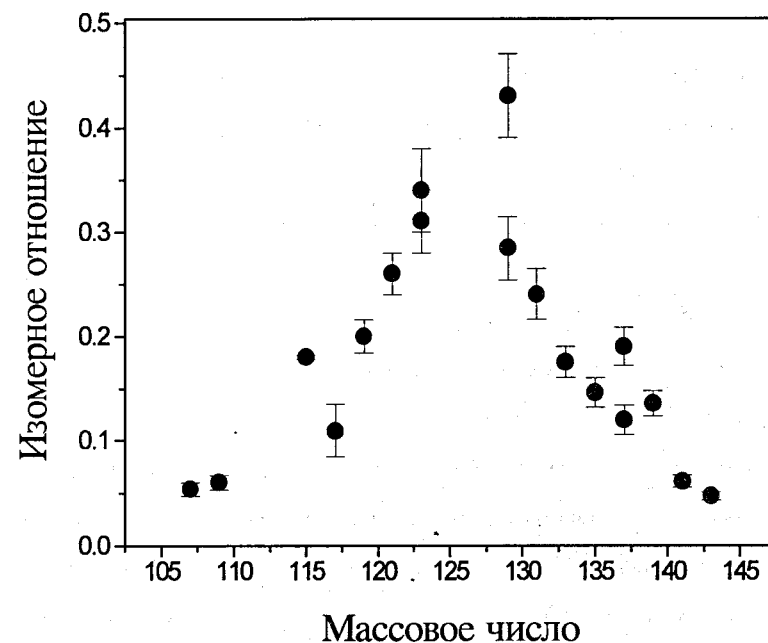


Рис.4. ИО для состояний $h_{11/2}$.

Энергия возбуждения ядра перед каскадом γ -квантов зависит от энергии связи нейтрона. Поэтому в области гигантского дипольного резонанса, энергия возбуждения ядра после вылета нейтрона будет меньше для легких изотопов. Это приводит к меньшему интервалу энергии для каскада γ -квантов и, следовательно, к уменьшению ИО. Однако при больших энергиях γ -квантов влияние этого фактора будет слабее.

Плотность уровней и распределение их по спину в конечном ядре оказывают существенное влияние на ИО. С увеличением параметров, определяющих зависимость плотности уровней от энергии возбуждения и спина ядра ИО растет.

Оба эти параметра растут с увеличением деформации ядра, что имеет место при уменьшении числа нейтронов в ядре.

И, наконец, спектр дискретных уровней над изомерным состоянием и вероятности переходов между ними определяют в конечном счете ИО. Однако данные о характеристиках этих уровней в исследованных изотопах далеко не полные.

В четвертой главе описаны измерения изомерного отношения для осколков деления и метод определения их угловых моментов. Относительное заселение основного и изомерных состояний с различными спинами зависит от первоначального распределения по спинам осколков. На рис. 5 показаны угловые моменты ^{134}I при делении ядер изотопов $^{232}\text{Th}(\gamma, f)$ и $^{238}\text{U}(\gamma, f)$ как функция числа нейтронов в дополнительном ему осколке N_c [7]. Предполагается что энергия возбуждения этих нуклидов почти одинакова и что среднее число мгновенных нейтронов, испущенных из осколка с массой 135, приблизительно равно 1, т.е. значения N_c для делящихся нуклидов ^{232}Th и ^{238}U $\cong 60$ и 65 соответственно.

Так как ^{134}I является ядром, близким к дважды "магическому" ($Z \approx 50$, $N \approx 82$), форма которого мало отличается от сферы, дополнительный к нему осколок (нейтроноизбыточные изотопы Rb и Y) обладает значительной деформацией. Энергия деформации в дальнейшем преобразуется в энергию возбуждения осколков. Угловой момент фрагмента уменьшается с увеличением N_c , приближаясь к деформированной оболочке с 66 нейтронами. Поэтому, дополнительный к ^{135}I фрагмент становится более деформированным, начиная от фотоделения ^{232}Th вплоть до ^{238}U .

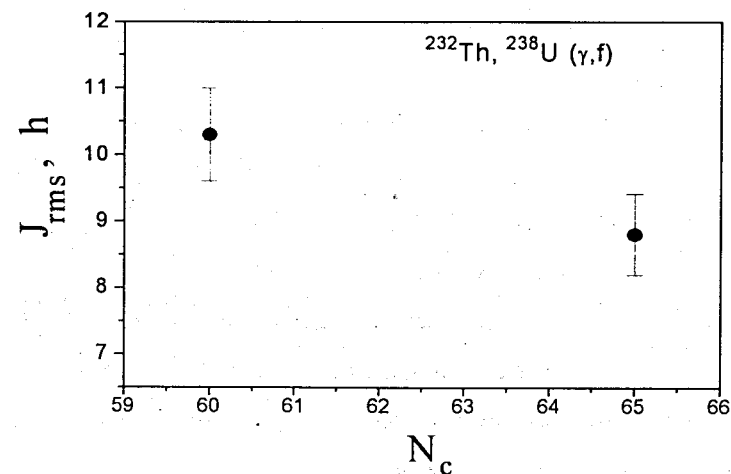


Рис.5. Зависимость углового момента ^{134}I от числа нейтронов в дополнительном ему осколке

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Расчитаны спектры тормозного излучения из толстых мишеней в области энергии от 1 до 30 МэВ для различных углов наблюдения и материала мишени.
2. Впервые измерены выходы и получены сечения неупругого рассеяния γ -квантов для высокоспиновых изомеров ^{180m}Hf , ^{190m}Os и ^{204m}Pb . Показан большой вклад квадрупольных переходов в каскаде γ -квантов при заселении изомерного состояния.
3. На высокоспиновой изомерной мишени ^{180m}Ta получен anomalно большой выход основного состояния при неупругом рассеянии γ -квантов и электронов.

Наблюдалось слабое влияние квантового числа K в механизме девозбуждения этого состояния.

4. Впервые в области Гигантского дипольного резонанса измерены функции возбуждения реакций (γ, n) на изотопах $^{130,132,134,136}\text{Ba}$ и ^{138}Ce . Впервые измерены ИО для изотопов $^{118,124}\text{Sn}$, $^{122,124,130}\text{Te}$, $^{138,140}\text{Ce}$, в (γ, n) реакциях при максимальной энергии γ -квантов $E_\gamma = 25$ МэВ.
5. Исследованы особенности возбуждения изомерных состояний $h_{11/2}$ ($46 \leq Z \leq 64$ и $50 \leq N \leq 82$) в (γ, n) реакциях области Гигантского дипольного резонанса. Получена зависимость ИО от энергии возбуждения, массового числа и атомного номера нуклидов.
6. Определены независимые выходы осколка деления ^{134}I в основном и изомерном состояниях и рассчитан его угловой момент при фотоделении ^{232}Th и ^{238}U γ -квантами с максимальной энергией 25 МэВ.

Основные результаты работы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Kondev Ph.G., Tonchev A.P., Khristov Kh.G. and Zhuchko V.E. Calculation of bremsstrahlung spectra from a thick tungsten radiator as a function of photon energy and angle. // Nucl. Instruments and Methods in Physics Research B. 1992. Vol.71. p.126-13
2. Balabanov N.P., Belov A.G., Gangrsky Yu.P., Kondev F.G., Tonchev A.P. Excitation of the high-spin isomers ^{180m}Hf , ^{190m}Os , ^{204m}Pb in (γ, γ') reactions: Preprint JINR E15-93-370, Dubna, 1993.
3. Белов А.Г., Гангрски Ю.П., Зузаан Н., Тончев А.П., Выход ^{180}Ta в (γ, γ') и (e, e') реакциях: 45-е Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" 1995, Санкт-Петербург, Россия.

4. Tonchev A.P., Gangrsky Yu.P., Belov A.G., Balabanov N.P., Hristov H.G. Measurement of the isomer ratio in (γ, n) reaction for the barium isotopes in the giant dipole resonance region: Preprint JINR E15-95-91, Dubna, 1995.; Ядерная Физика, 1996, т.60, N.2.
5. Тончев А.П., Гангрский Ю.П., Балабанов Н.П., Белов А.Г. Возбуждение изомерных состояний $h_{11/2}$ в фотоядерных реакциях.: 45-е Международное совещание "Ядерная спектроскопия и структура атомного ядра" 1995, Санкт-Петербург, Россия.
6. Belov A.G., Gangrsky Yu.P., Tonchev A.P., Balabanov N.P. Photoactivation of isomer ^{137m}Ce in the region of Giant Dipole Resonance. Workshop on application of microtrons in nuclear physics. Plovdiv, 22-24 September, 1992, p. 106-108.
7. Tonchev A.P., Kondev Ph.G., Gangrsky Yu.P., Balabanov N.P., Hristov H.G. Isomeric yield ratio of ^{134}I in photofission of ^{232}Th and ^{238}U , // J.Radioanal.Nucl.Chem., Letters 1991. Vol.155(5). p.299-309.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 апреля 1995 года.