

На правах рукописи

Лидер Евгения Олеговна

**ВРЕМЕНА ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ И СТРУКТУРА  
ВЫСОКОСПИНОВЫХ ПОЛОС В ОКОЛОМАГИЧЕСКИХ ЯДРАХ**

**$^{118}\text{Te}$ ,  $^{119}\text{I}$ ,  $^{141}\text{Eu}$ ,  $^{142, 144}\text{Gd}$**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт Петербург

2004г.

Работа выполнена в Физико-Техническом Институте им. А.Ф. Иоффе  
Российской Академии Наук

Научный руководитель: Александр Абрамович Пастернак,  
Доктор физико-математических наук, внс

Официальные оппоненты: Вадим Иванович Исаков,  
Доктор физико-математических наук, внс

Николай Николаевич Леонов,  
Кандидат физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: Радиевый Институт им. В. Г. Хлопина

Защита состоится 17 ноября 2004г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного Совета Д 212.229.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, ГОУ «СПбГПУ».

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнического университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ октября \_\_\_\_\_ 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
доктор физико-математических наук

Ю.Ф. Титовец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Исследования свойств и структуры атомных ядер в экстремальных условиях предельно высоких энергий возбуждения и скоростей вращения являются одной из основных и наиболее актуальных задач физики низких энергий. Современные эксперименты по изучению ядерной структуры проводятся на ускорителях тяжелых ионов, где для регистрации  $\gamma$ -квантов используются установки, состоящие из десятков и даже сотен антикомптоновских детекторов, изготовленных из сверхчистых монокристаллов германия, объемом до  $500 \text{ см}^3$  каждый и включающие в себя также системы регистрации заряженных частиц и нейтронов. Во всем мире существует всего несколько таких предельно сложных и дорогостоящих систем, поэтому, исследования обычно осуществляются многонациональными коллективами ученых. Наиболее тонкая и сложная область ядерной  $\gamma$ -спектроскопии это прецизионный анализ форм  $\gamma$ -линий, искаженных эффектом Доплера с целью определения времен жизни возбужденных ядерных уровней в субпикосекундном и пикосекундном диапазоне и получения на этой основе информации о приведенных вероятностях электромагнитных переходов в ядрах. Доплеровские методы  $\gamma$ -спектроскопии развивались в циклотронной лаборатории ФТИ им. А.Ф. Иоффе начиная с 1970 гг. и их традиционной областью приложения являлись исследования околomagических и переходных ядер, где сложным образом переплетаются как одночастичные движения в ядрах, так и коллективные колебания и вращения. Этот, во многом уникальный опыт, оказался востребованным и в современных условиях международной кооперации: работы, вошедшие в диссертацию, оказались на переднем фронте физики высокоспиновых состояний ядер, основываясь на экспериментах, выполненных на современных установках, включая крупнейшей в мире 239-кристальный комплекс EUROBALL IV.

**Целью** настоящей работы является выявление и объяснение новых закономерностей в структуре высокоспиновых состояний околomagических ядер, главным образом на основе исследований их времен жизни и вероятностей внутриволосных электромагнитных переходов.

### **Научная новизна диссертационной работы**

1. Впервые измерены значения времен жизни ( $\tau$ ) для  $\approx 120$  уровней в квадрупольных и дипольных высокоспиновых полосах  $^{118}\text{Te}$ ,  $^{119}\text{I}$ ,  $^{141}\text{Eu}$ ,  $^{142, 144}\text{Gd}$ . На основе этих измерений вычислены  $\approx 200$  значений приведенных вероятностей электрических квадрупольных  $B(E2)$  и магнитных дипольных  $B(M1)$  переходов.

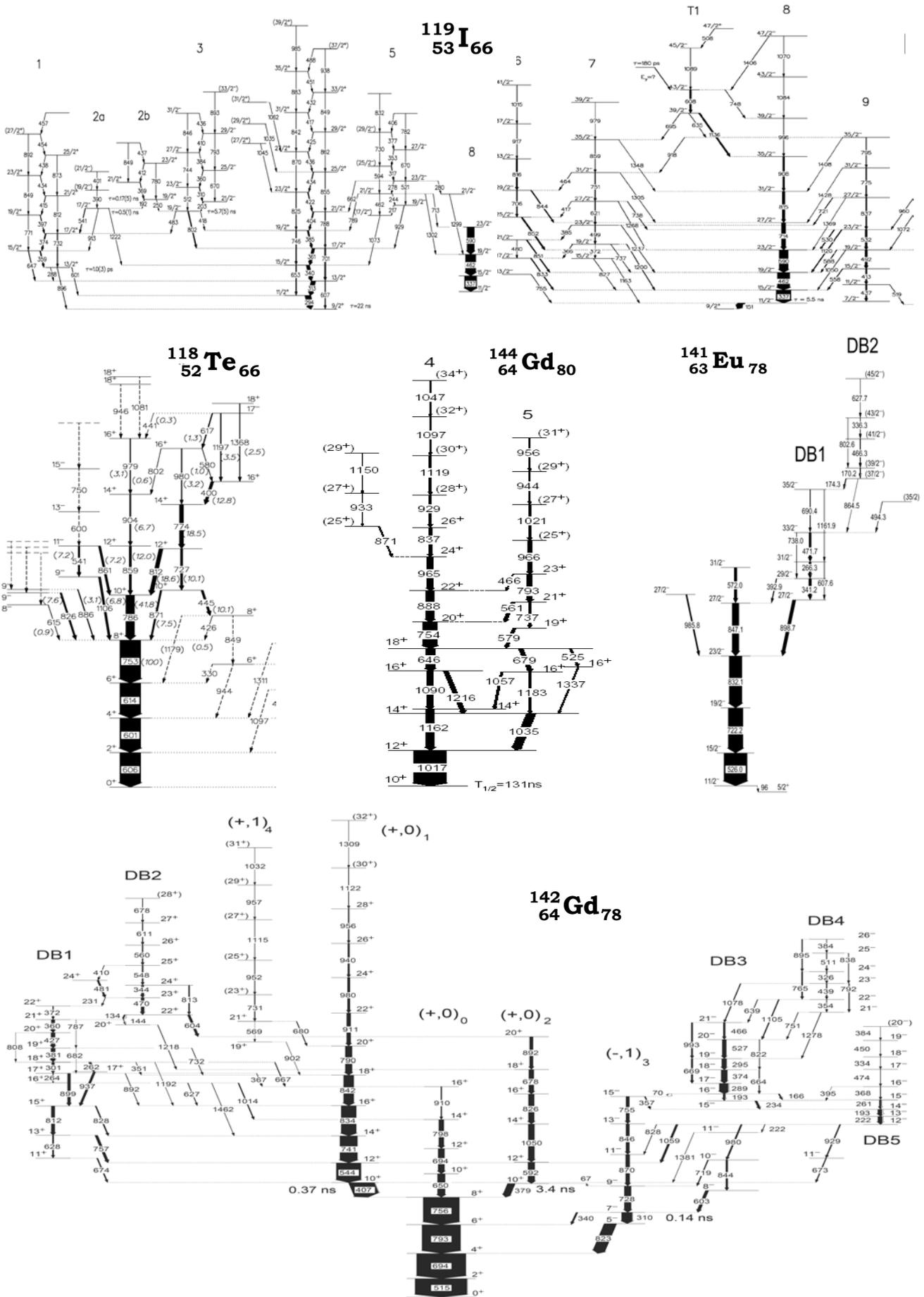


Рис.1. Фрагменты схем уровней исследованных ядер

2. Уточнены схемы распада ядер  $^{141}\text{Eu}$ ,  $^{142}\text{Gd}$  и  $^{144}\text{Gd}$  и определены значения  $\frac{B(M1)}{B(E2)} = 0.697 \frac{E_{\gamma E2}^5 I_{M1}}{E_{\gamma M1}^3 I_{E2}}$ , которые зависят не от  $\tau$ , а только от интенсивностей двух переходов:  $I_{M1}$  и  $I_{E2}$ .

3. На основе полученного экспериментального материала были разработаны новые и усовершенствованы существующие методы обработки доплеровских экспериментов, адаптированные к современным многодетекторным установкам и резко увеличивающие надежность, достоверность и количество извлекаемых значений времен жизни.

4. Полученные нами спиновые зависимости  $B(E2)$ ,  $B(M1)$  и энергетическая структура в околomagических ядрах послужили основой для разработки и апробации новых, как микроскопических, так и полуклассических теоретических моделей, которые позволили успешно описать свойства исследованных ядер.

**Практическая значимость работы** определяется в первую очередь тем, что:

1. Создан целый ряд методов и способов, позволяющих повысить точность и надежность измерения времен жизни возбужденных состояний ядер доплеровскими методами  $\gamma$ -спектроскопии и анализа сложных  $\gamma$ -спектров в целом. В частности, апробированы и применены новые методы анализа групп, содержащих доплеровские  $\gamma$ -линии и новое программное обеспечение, позволяющее анализировать формы  $\gamma$ -линий, искаженные паразитными (до 7 пиков в группе) пиками, форма каждого из которых может отличаться от гауссовой.

2. Разработаны и предложены новые физические модели, раздвигающие рамки наших познаний о свойствах атомных ядер. Это позволяет сейчас и в будущем планировать новые эксперименты и получать новую ядерно-спектроскопическую информацию.

3. Полученные нами данные по временам жизни  $\tau$  содержатся в справочных изданиях и международных базах данных, и послужат для дальнейшего развития теории атомного ядра.

**Публикации и апробация работы**

По теме диссертации опубликовано более 30 печатных работ, в том числе 10 в международных реферируемых изданиях. Основные работы приведены в конце автореферата. В них же содержатся все необходимые ссылки, относящиеся к его содержанию.

**Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:**

1-3 48-, 49- и 50-м Международных Совещаниях по Ядерной Спектроскопии и Структуре Атомного Ядра (Москва 1998, Дубна 1999 и С.-Петербург 2000)

4 International Conference 'High Spin State Nuclear Physics' (Warsaw, Poland) 2001

5 International Symposium 'Nuclear Spectroscopy' (Gettingen, Germany) 2001

6 Spring Meeting of the German Physical Society (Munster, Germany) 2002

- 7 International Conference ‘Nucl. Str. with Large Gamma Arrays’ (Legnaro, Spring Meeting)  
8 International Conference ‘The Labyrinth in Nuclear Structure’ (Crete, Greece) 2003  
9–12 Spring Meeting of the German Physical Society (Munster 2002, Tubingen 2003, Koln 2004)

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. и содержит 169 страницы, в том числе 8 таблиц и 60 рисунка. Список литературы включает 127 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, показаны ее новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту и список публикаций.

**Первая глава** «*Методы доплеровской спектроскопии*» посвящена общему обзору и особенностям применения к нашим исследованиям измерений  $\tau$  доплеровскими методами – метод ослабления доплеровского смещения энергии  $\gamma$ -лучей (ОДС) и плунжерному. В методе ОДС мерой времени является характеристическое время торможения ядра отдачи  $\tau_{тр}$  в тормозящей среде ( $10^{-13} \div 10^{-12}$ с), а мерой времени в плунжерном методе служит время пролета возбужденного ядра между мишенью и подвижной тормозящей средой – плунжером ( $10^{-12} \div 10^{-9}$ с). Доплеровский эффект в  $\gamma$ -спектрах, соответствующих испусканию  $\gamma$ -квантов ядрами отдачи, образующихся в ядерных реакциях, идущих через стадию составного ядра, определяется следующими факторами:

1. Распределением ядер отдачи по начальным скоростям и углам, определяемым кинематикой ядерной реакции, а также торможением бомбардирующей частицы в веществе мишени.
2. Зависимостью вероятности радиоактивного распада ядер отдачи  $P(t, \tau)$  от времени, имеющей простой экспоненциальный вид в случае мгновенного заселения изучаемого уровня в результате ядерной реакции  $P(t, \tau) = 1/\tau \cdot \exp(-t/\tau)$  и сложный характер в случае каскадного заселения с вышележащих уровней.
3. Параметрами, определяющими процесс торможения и многократного рассеяния ядер отдачи в веществе мишени и подложки, а также толщиной и структурой мишени, если происходит вылет в другую среду или в вакуум.
4. Углами расположения, геометрией и размерами детекторов, а также разрешающей способностью спектрометра  $\gamma$ -квантов.

К моменту настоящих исследований был разработан комплекс программного обеспечения анализа доплеровских экспериментов, учитывающий вышеприведенные факторы и предназначенный, главным образом, для исследований реакций вызываемыми  $\alpha$ -

частицами и тяжелыми ионами с относительно небольшим вносимым угловым моментом  $L_{\max}$ , причем производился анализ только прямых  $\gamma$ -спектров, регистрируемых 1-2 Ge детекторами. В нашей работе использовались ядерные реакции, характеризующиеся предельно большими значениями  $L_{\max}$ , и анализировались спектры многомерных  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  совпадений, регистрируемыми современными многодетекторными комплексами ( $20 \div 239$  Ge монокристаллов). По этой причине с учетом этих новых условий программное обеспечение было коренным образом усовершенствовано на основе полученных в настоящей работе экспериментальных материалов. В частности, показано, что:

1. В случае  $^{144}\text{Gd}$ , исследуемые состояния которого заселялись в реакции  $^{114}\text{Cd}(^{36}\text{S},6n)$  при  $E_c = 182$  MeV, и  $^{142}\text{Gd}, ^{141}\text{Eu}$ , заселяемых в реакциях  $^{114}\text{Sn}(^{32}\text{S},2p2n)$  и  $^{114}\text{Sn}(^{32}\text{S},3p2n)$  при  $E_c = 160$  MeV, соответственно, максимально возможный спин конечного ядра определяется конкуренцией между испусканием легких частиц и каналом деления составного ядра, то есть в этих случаях реализуется ситуация, когда дальнейшее увеличение энергии бомбардирующей частицы уже не приводит к заселению более высоких по спину состояний.

2. Форма доплеровских  $\gamma$ -линий, регистрируемых детекторами расположенными под углами близкими к  $90^\circ$ , чувствительна к кинематическому разбросу ядер отдачи по проекции скорости, многократному рассеянию ядер отдачи в процессе торможения и конечным размерам  $\gamma$ -детекторов. Поскольку многие детекторы в многодетекторных установках расположены как раз под такими углами оказалось необходимым корректно учесть эти факторы.

3. Заселение исследуемых уровней может происходить не только посредством известных переходов с верхних уровней (каскадное питание 'CF'), но так же посредством ненаблюдаемых переходов (боковая подпитка 'SF'). Не достаточно корректный учет CF и SF приводит к существенным систематическим ошибкам в измерениях времен жизни  $\tau$ . Были разработаны следующие методы, позволяющие либо полностью исключить, либо значительно уменьшить эти ошибки: а) установка ворот на переход, расположенный непосредственно *выше* исследуемого, например на смещенную (flight) компоненту питающего перехода –FGTU (Flight Gate Transition Up); б) установка ворот на *несмещенную* компоненту перехода с исследуемого уровня, при которой изучается форма линии  $\gamma$ -перехода, питающего исследуемый уровень – NB (Narrow Gate on Transition Below). Однако, наиболее распространенный метод исследования ОДС – это установка *широких* ворот на переходы или комбинацию переходов, расположенных *ниже* исследуемого уровня – WB (Wide Gate Transition Below). При этом статистика в таких спектрах во много раз превышает статистику, достижимую при применении описанных выше специальных методов, но метод

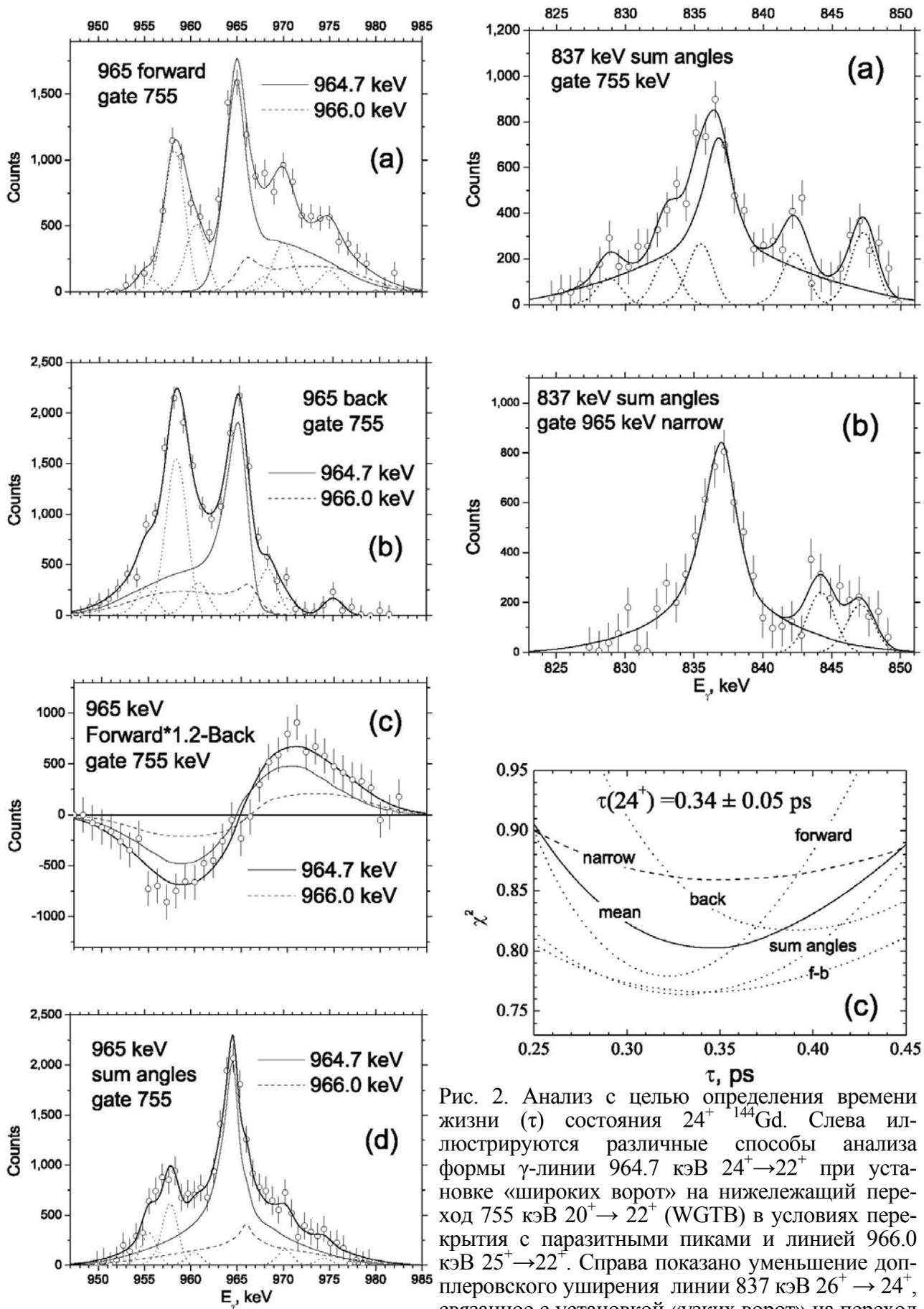


Рис. 2. Анализ с целью определения времени жизни ( $\tau$ ) состояния  $24^+$   $^{144}\text{Gd}$ . Слева иллюстрируются различные способы анализа формы  $\gamma$ -линии 964.7 кэВ  $24^+ \rightarrow 22^+$  при установке «широких ворот» на нижележащий переход 755 кэВ  $20^+ \rightarrow 22^+$  (WGTV) в условиях перекрытия с паразитными пиками и линией 966.0 кэВ  $25^+ \rightarrow 22^+$ . Справа показано уменьшение доплеровского уширения линии 837 кэВ  $26^+ \rightarrow 24^+$ , связанное с установкой «узких ворот» на переход 964.7 кэВ (NGTV) и анализ зависимостей  $\chi^2(\tau)$ .

WB требует детального учета CF и SF. Большая часть времен жизни исследуемых нами уровней была получена, используя метод WB. Однако в тех случаях, когда это оказывалось возможным, использование специальных методов существенно повышало надежность измерений времен жизни и, в частности, служило критерием правильности учета эффекта боковой подпитки.

4. Учет боковой подпитки  $\tau_{\text{бп}}$  является одной из главных проблем метода ОДС и наряду с неопределенностями параметров тормозных потерь является наиболее существенным источником систематических ошибок измерения  $\tau$ . Для реакций с тяжелыми ионами типичное значение  $\tau_{\text{бп}} > 0.2$  пс и анализ формы  $\gamma$ -линии ОДС методом зависит от используемой модели и расчетов временного заселения из континуума. С целью уточнения определяемых значений  $\tau$  в нашей работе используется новый метод учета боковой подпитки. Этот подход основан на вычислении областей заселения входных состояний, так же как и  $\gamma$ -каскадов из области континуума с помощью метода Монте-Карло, используя несколько параметров в процессе одновременной подгонки для двух типов экспериментальных данных: 1) полученных при анализе  $\gamma$ -линий ОДС методом, чувствительным к временному распределению заселения высокоспиновых уровней каскадами из континуума, 2) статистических распределений  $\gamma$ -каскадов, которые возможно измерить независимо. Так, для области околomagических ядер  $^{142-146}\text{Gd}$  анализировались одновременно экспериментальные данные о распределениях множественности  $\gamma$ -квантов и формы  $\gamma$ -линий.

**Вторая глава** «*Эксперимент и результаты эксперимента*» посвящена описанию экспериментальных многодетекторных установок NORDBALL, GASP, EUROBALL IV и методов обработки спектров многомерных  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  совпадений, а также все экспериментальные результаты. Она структурирована по принципу логических и временных этапов работы. Основные результаты измерений  $\tau$  приведены в таблицах. Столбцы комментариев содержат краткую информацию о методах получения данных. В то время как при исследовании  $^{141}\text{Eu}$ ,  $^{142, 144}\text{Gd}$  применялся только метод ОДС, в случае  $^{118}\text{Te}$ ,  $^{119}\text{I}$  применялись как метод ОДС (DSA), так и плунжерный (RD). Необходимые фрагменты схем распада приведены на Рис.1. Рис.2 иллюстрирует пример анализа форм  $\gamma$ -линий, проведенного различными методами, и определение  $\tau$  уровня  $24^+ ^{144}\text{Gd}$ . Основные выводы этой главы приведены в п.А **Заключения**.

**Третья глава** «*Обсуждение результатов*» целиком посвящена теоретической интерпретации результатов, но лишь в той мере, в которой автор, не будучи теоретиком, принимал в этом участие. Основные выводы этой главы приведены в п.В **Заключения**. Здесь приведены две иллюстрации, одна из которых относится к интерпретации квадрупольных

Таблица 1. Времена жизни уровней в $^{118}\text{Te}$							
Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com.	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com.
Q-B2	2 <sup>+</sup>	8.8±1.4	RD (FU)	Q-B2	12 <sup>+</sup>	0.40±0.08	DSA (WB)
Q-B2	4 <sup>+</sup>	4.4 ±0.8	RD (FU)	Q-B2	14 <sup>+</sup>	0.28 <sup>+0.06</sup> <sub>-0.04</sub>	DSA (WB)
Q-B2	6 <sup>+</sup>	3.4± 0.5	RD (FU)	Q-B2	16 <sup>+</sup>	0.28 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.08</sub>	DSA (WB)
Q-B2	8 <sup>+</sup>	1.2 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.3</sub>	DSA (WB),RD (FU)	Q-B3	16 <sup>+</sup>	0.35 <sup>+0.15</sup> <sub>-0.10</sub>	DSA (WB)
Q-B2	10 <sup>+</sup>	0.87 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.17</sub>	DSA (WB)	Q-B3	18 <sup>+</sup>	0.28 <sup>+0.14</sup> <sub>-0.10</sub>	DSA (WB)

Таблица 2. Времена жизни уровней в $^{119}\text{I}$											
Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com.	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com.	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com.
Q8	15/2 <sup>-</sup>	44.5±3.0	RD	Q 9	35/2 <sup>-</sup>	0.42±0.06	DSA	D3	25/2 <sup>-</sup>	4.5±1.3	RD
Q8	19/2 <sup>-</sup>	7.8±0.7	RD	Q11	25/2 <sup>-</sup>	9.5±2.5	RD	D3	29/2 <sup>-</sup>	2.9±0.5	RD
Q8	23/2 <sup>-</sup>	2.35±0.3	RD,DSA	Q7	23/2 <sup>-</sup>	4±1	RD	D4	11/2 <sup>+</sup>	3.6±0.4	RD
Q8	27/2 <sup>-</sup>	0.89±0.15	DSA	Q7	27/2 <sup>-</sup>	1.0±0.25	DSA	D4	13/2 <sup>+</sup>	2.4 <sup>+0.3</sup> <sub>-0.5</sub>	RD
Q8	31/2 <sup>-</sup>	0.44±0.08	DSA	Q7	31/2 <sup>-</sup>	0.50±0.15	DSA	D4	15/2 <sup>+</sup>	2.0±0.3	RD
Q8	35/2 <sup>-</sup>	0.29±0.04	DSA	Q7	35/2 <sup>-</sup>	0.55±0.14	DSA	D4	17/2 <sup>+</sup>	2.1±0.4	RD
Q8	39/2 <sup>-</sup>	0.21±0.04	DSA	QT1	43/2 <sup>-</sup>	4.7±1.5	RD	D4	19/2 <sup>+</sup>	1.6±0.4	RD,DSA
Q8	43/2 <sup>-</sup>	0.14±0.06	DSA	QT1	45/2 <sup>-</sup>	0.22 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.13</sub>	DSA	D4	21/2 <sup>+</sup>	1.25 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.25</sub>	RD,DSA
QT1	39/2 <sup>-</sup>	1.9±1.0	RD	D1	13/2 <sup>+</sup>	0.95 <sup>+0.35</sup> <sub>-0.25</sub>	RD,DSA	D4	23/2 <sup>+</sup>	1.20 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.25</sub>	RD,DSA
QT1	43/2 <sup>-</sup>	180± 40	RD	D1	15/2 <sup>+</sup>	0.45 <sup>+0.35</sup> <sub>-0.15</sub>	DSA	D4	25/2 <sup>+</sup>	1.2 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.3</sub>	DSA
Q6	21/2 <sup>-</sup>	0.5± 0.2	DSA	D1	17/2 <sup>+</sup>	0.60 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.15</sub>	DSA	D4	27/2 <sup>+</sup>	0.35±0.08	DSA
Q6	17/2 <sup>-</sup>	0.80 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.3</sub>	DSA	D1	19/2 <sup>+</sup>	0.65 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.12</sub>	DSA	D4	29/2 <sup>+</sup>	0.42± 0.12	DSA
Q6	25/2 <sup>-</sup>	0.48±0.15	DSA	D1	21/2 <sup>+</sup>	0.57 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.12</sub>	DSA	D4	31/2 <sup>+</sup>	0.48± 0.09	DSA
Q6	29/2 <sup>-</sup>	0.31±0.1	DSA	D2a	17/2 <sup>-</sup>	470 <sup>+160</sup> <sub>-100</sub>	RD	D4	33/2 <sup>+</sup>	0.34 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.10</sub>	DSA
Q6	33/2 <sup>-</sup>	0.39 <sup>+0.13</sup> <sub>-0.08</sub>	DSA	D2b	19/2 <sup>-</sup>	155 <sup>+55</sup> <sub>-45</sub>	RD	D4	35/2 <sup>+</sup>	0.35± 0.10	DSA
Q6	37/2 <sup>-</sup>	0.32 <sup>+0.16</sup> <sub>-0.12</sub>	DSA	D2a	19/2 <sup>-</sup>	0.54±0.16	DSA	D5	19/2 <sup>-</sup>	2.5± 0.9	RD
Q9	11/2 <sup>-</sup>	12.2±2.4	RD	D2b	21/2 <sup>-</sup>	6.0±0.7	RD	D5	21/2 <sup>-</sup>	2.8 <sup>+0.8</sup> <sub>-1.0</sub>	RD
Q9	15/2 <sup>-</sup>	14.6±1.8	RD	D2a	21/2 <sup>-</sup>	0.35± 0.12	DSA	D5	23/2 <sup>-</sup>	4.1± 0.8	RD
Q9	19/2 <sup>-</sup>	7.9±0.9	RD	D2b	23/2 <sup>-</sup>	0.39 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.07</sub>	DSA	D5	25/2 <sup>-</sup>	2.7± 1.4	RD,DSA
Q9	23/2 <sup>-</sup>	4.7±0.8	RD	D3	19/2 <sup>-</sup>	5700±500	RD	D5	27/2 <sup>-</sup>	0.53 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.15</sub>	DSA
Q9	27/2 <sup>-</sup>	0.49±0.11	DSA	D3	21/2 <sup>-</sup>	30 <sup>+4</sup> <sub>-3</sub>	RD	D5	29/2 <sup>-</sup>	0.55± 0.20	DSA
Q9	29/2 <sup>-</sup>	0.8 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.2</sub>	DSA	D3	23/2 <sup>-</sup>	5.6 <sup>+1.9</sup> <sub>-1.5</sub>					

полос  $^{144}\text{Gd}$ , а другая – к дипольным полосам  $^{142}\text{Gd}$ . Рис. 3 иллюстрирует зависимость от спина экспериментальных значений  $B(E2)$  для полос 4 и 5  $^{144}\text{Gd}$ , построенных на 4-квазичастичном состоянии, которая сравнивается с расчетами в рамках двух различных моделей. Пунктирная линия соответствует традиционной модели TRS (Total Roushian Surface), основанной на представлении о существовании трехосиальной деформации. Сплошная линия соответствует новому полумикроскопическому бозонному подходу (вариант модели МВБ1), описывающему экспериментальный факт падения значений  $B(E2)$  в начале полосы, начиная со спина  $20^+$ . Приведенный пример показывает, в частности, что высокоспиновые квадрупольные полосы в околomagических ядрах можно интерпретировать на основе подходов, явно не вводящих понятие трехосиальной деформации.

Рис. 4 иллюстрирует энергетическую структуру и зависимость от спина экспериментальных значений  $B(M1)$  для полос DB1 и DB2  $^{142}\text{Gd}$ . Эти данные были сопоставлены как с расчетами, выполненными на основе микроскопической модели, основанной на концепции так называемого магнитного однородного вращения в наклонной по отношению к оси симметрии системе координат (TAC–Tilted Axis Cranking), так и новой полуклассической модели (SPAC), в которой магнитное вращение с характерным эффектом ножниц (Shears) рассматривается в главной системе координат аксиально-симметричного ядерного эллипсоида. Описание TAC соответствует такому магнитному вращению, когда вектор коллективного вращения параллелен вектору полного спина, и как следствие этого, начальные значения  $B(M1)$  всегда велики и падают по мере выстраивания угловых моментов квазичастиц. В модели SPAC успешное описание DB1 достигнуто в предположении, что в начале угловой момент одной из квазичастиц  $\mathbf{j}_1$  направлен противоположно оси коллективного вращения  $\mathbf{R}$ , а потом быстро выстраивается вдоль оси вращения, пересекая при этом вектор углового момента другой частицы  $\mathbf{j}_2$ . В тот момент, когда оба вектора параллельны (см. вставку на Рис.4) значения  $B(M1)$  резко падают, что и наблюдается на эксперименте. В целом описание свойств исследованных дипольных полос  $^{141}\text{Eu}$  и  $^{142}\text{Gd}$  вводит к выводу о том, что дипольные полосы в околomagических ядрах можно интерпретировать, как магнитно-вращательные, но с выраженной примесью коллективного вращения остова.

В **Заключении** приводятся основные выводы, следующие из диссертационной работы:

**А. Экспериментальные результаты:**

1. В результате обработки спектров  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений, полученных на установке NORDBALL в реакции  $^{109}\text{Ag} + ^{13}\text{C}$  при  $E = 55 \text{ MeV}$ , впервые измерены значения времен жизни ( $\tau$ ) для  $\approx 70$  уровней в 5 квадрупольных и 5 дипольных полосах  $^{118}\text{Te}$  и  $^{119}\text{I}$ . Для  $\approx 40$  уровней значения  $\tau$

Таблица 3. Времена жизни уровней в $^{144}\text{Gd}$							
Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com
Q4	20 <sup>+</sup>	0.56±0.11	WB,NB	Q4	28 <sup>+</sup>	0.47±0.13	WB
Q4	22 <sup>+</sup>	0.48±0.09	WB,NB	Q5	23 <sup>+</sup>	0.68±0.11	WB
Q4	24 <sup>+</sup>	0.34±0.07	WB,NB	Q5	25 <sup>+</sup>	0.37±0.11	WB
Q4	26 <sup>+</sup>	0.42±0.09	WB				

Таблица 4. Времена жизни уровней в $^{141}\text{Eu}$							
Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com
DB1	29/2 <sup>-</sup>	1.10 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.30</sub>	WB	DB2	41/2 <sup>-</sup>	0.55 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.20</sub>	WB
DB1	31/2 <sup>-</sup>	2.5 <sup>+1.0</sup> <sub>-0.5</sub>	WB	DB2	43/2 <sup>-</sup>	0.8 ± 0.2	WB
DB1	31/2 <sup>-</sup>	1.10 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.30</sub>	WB	DB2	45/2 <sup>-</sup>	0.29 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.15</sub>	WB

Таблица 5. Времена жизни уровней в $^{142}\text{Gd}$							
Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com	Band	$I^\pi$	$\tau$ , ps	Com
DB1	17 <sup>+</sup>	2.2± <sup>+0.8</sup> <sub>-0.5</sub>	WB	DB4	22 <sup>-</sup>	0.44 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.18</sub>	WB
DB1	18 <sup>+</sup>	1.3 <sup>+0.4</sup> <sub>-0.3</sub>	WB	DB4	23 <sup>-</sup>	0.77 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.20</sub>	WB
DB1	19 <sup>+</sup>	0.54 <sup>+0.25</sup> <sub>-0.15</sub>	WB	DB4	24 <sup>-</sup>	1.18 <sup>+0.41</sup> <sub>-0.31</sub>	WB
DB1	20 <sup>+</sup>	0.52 <sup>+0.20</sup> <sub>-0.15</sub>	WB	Q(+,0) <sub>0</sub>	14 <sup>+</sup>	2.35 <sup>+0.57</sup> <sub>-0.49</sub>	WB
DB1	21 <sup>+</sup>	0.94 <sup>+0.21</sup> <sub>-0.16</sub>	WB	Q(+,0) <sub>0</sub>	16 <sup>+</sup>	0.80 <sup>+0.36</sup> <sub>-0.24</sub>	WB
DB1	22 <sup>+</sup>	0.98 <sup>+0.40</sup> <sub>-0.25</sub>	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	14 <sup>+</sup>	1.50 <sup>+0.23</sup> <sub>-0.18</sub>	FU
DB2	22 <sup>+</sup>	1.52 <sup>+0.38</sup> <sub>-0.32</sub>	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	16 <sup>+</sup>	0.50 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.07</sub>	FU
DB2	23 <sup>+</sup>	0.33±0.11	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	18 <sup>+</sup>	0.55±0.08	NB,FU
DB2	24 <sup>+</sup>	0.64±0.15	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	20 <sup>+</sup>	0.70 <sup>+0.10</sup> <sub>-0.07</sub>	WB,FU
DB2	24 <sup>+</sup>	0.28±0.10	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	22 <sup>+</sup>	0.37±0.07	WB
DB2	25 <sup>+</sup>	0.35±0.15	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	24 <sup>+</sup>	0.34±0.05	WB
DB2	26 <sup>+</sup>	0.27±0.15	WB	Q(+,0) <sub>1</sub>	26 <sup>+</sup>	0.45±0.10	WB
DB3	12 <sup>-</sup>	2.2 <sup>+1.5</sup> <sub>-0.7</sub>	WB	Q(+,0) <sub>2</sub>	14 <sup>+</sup>	1.15±0.30	WB
DB3	17 <sup>-</sup>	1.3±0.5	WB	Q(+,0) <sub>2</sub>	16 <sup>+</sup>	2.6 <sup>+1.0</sup> <sub>-0.7</sub>	WB
DB3	18 <sup>-</sup>	1.1±0.3	WB	Q(+,0) <sub>2</sub>	20 <sup>+</sup>	1.70±0.32	WB
DB3	19 <sup>-</sup>	1.6 <sup>+0.5</sup> <sub>-0.3</sub>	WB	Q(+,1) <sub>4</sub>	21 <sup>+</sup>	1.10 <sup>+0.30</sup> <sub>-0.25</sub>	WB
DB3	20 <sup>-</sup>	0.62±0.13	WB	Q(+,1) <sub>4</sub>	23 <sup>+</sup>	0.84±0.17	WB
DB3	21 <sup>-</sup>	0.71 <sup>+0.17</sup> <sub>-0.15</sub>	WB	Q(+,1) <sub>4</sub>	25 <sup>+</sup>	0.27±0.12	WB

получены с помощью метода ОДС и для  $\approx 30$  – плунжерным методом. На основе этих измерений вычислены  $\approx 120$  значений приведенных вероятностей электрических квадрупольных  $B(E2)$  и магнитных дипольных  $B(M1)$  переходов.

2. Впервые с помощью метода ОДС исследованы времена жизни 7 состояний в квадрупольных полосах  $^{144}\text{Gd}$ , построенных на 4-квазичастичной высокоспиновой конфигурации  $18^+$ . Для этой цели использовались спектры  $\gamma$ - $\gamma$  совпадений, полученные на установке GASP в реакции  $^{114}\text{Cd}(^{36}\text{S}, 6n)$  при  $E = 180 \text{ MeV}$ .
3. Подготовлен и проведен эксперимент на пучке тандем-генератора национального ядерного исследовательского центра Франции в г. Страсбурге с использованием 239 кристалльной установки EUROBALL IV с целью исследования времен жизни высокоспиновых состояний в 4-х дипольных и 4-х квадрупольных полосах  $^{142}\text{Gd}$  и 2-х дипольных полосах  $^{141}\text{Eu}$ , заселяемых в реакциях  $^{114}\text{Sn}(^{32}\text{S}, 2p2n)$  и  $^{114}\text{Sn}(^{32}\text{S}, p2n)$  при  $E = 160 \text{ MeV}$ . Проведена энергетическая калибровка  $E_\gamma(N)$  и калибровка эффективности  $\varepsilon(E_\gamma)$  всех детекторов, а также сортировка событий  $\gamma$ - $\gamma$ - $\gamma$  совпадений. В результате энергетической фильтрации (установки «ворот» на определенные  $\gamma$ -линии) получены более 200  $\gamma$ -спектров, соответствующих различным комбинациям «ворот» и групп детекторов, расположенных под различными углами по отношению к оси пучка.
4. В результате сравнительного исследования интенсивностей  $\gamma$ -линий в полученных спектрах уточнены схемы распада  $^{141}\text{Eu}$  и  $^{142}\text{Gd}$  и определены отношения приведенных вероятностей магнитных дипольных и электрических квадрупольных внутриволосных переходов.
5. Впервые с помощью метода ОДС исследованы времена жизни  $\approx 40$  состояний в дипольных и квадрупольных полосах в  $^{141}\text{Eu}$  и  $^{142}\text{Gd}$ . На основе этих измерений вычислены  $\approx 70$  значений приведенных вероятностей электрических квадрупольных  $B(E2)$  и магнитных дипольных  $B(M1)$  переходов.

#### Б. Методические результаты:

- 1 Обоснован и апробирован полуэмпирический метод оценки эффективного времени боковой подпитки в реакциях, характеризуемых небольшим вносимым угловым моментом на примере реакции  $^{109}\text{Ag} + ^{13}\text{C}$  при  $E = 54 \text{ MeV}$
- 2 На основе прецизионного анализа форм доплеровских  $\gamma$ -линий и сравнения результатов измерения времен жизни, полученных различными методами установки «ворот» на каскадные переходы, исследован эффект боковой подпитки в реакциях, характеризуемых большим вносимым угловым моментом на примере реакции  $^{114}\text{Cd} + ^{36}\text{S}$  ( $E = 180 \text{ MeV}$ ) и  $^{114}\text{Sn} + ^{32}\text{S}$  ( $E = 160 \text{ MeV}$ ).
- 3 Апробированы и применены новые методы анализа сложных групп, содержащих доплере-

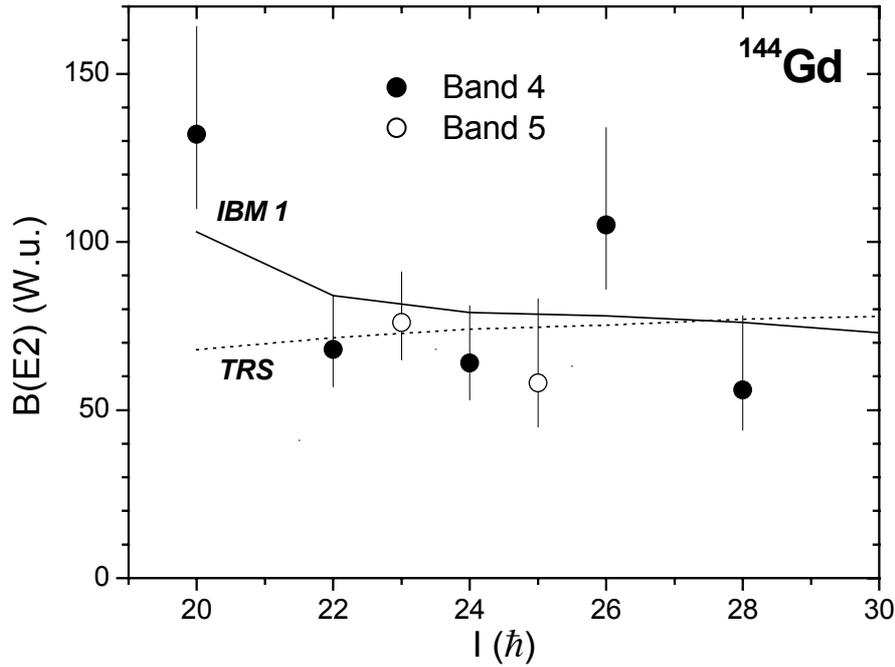


Рис.3. Экспериментальные значения  $B(E2)$  для полосы 4 и 5 в  $^{144}\text{Gd}$  в зависимости от спина. Пунктирная и сплошные линии соответствуют расчетам TRS и МББ1.

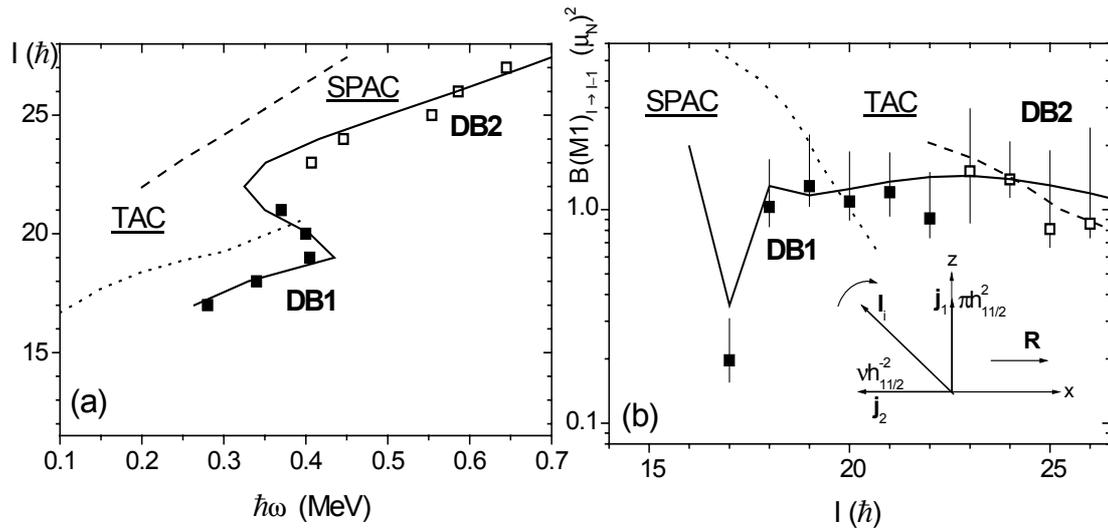


Рис.4. Сравнение экспериментальных результатов для дипольных полос DB1 и DB2 в  $^{142}\text{Gd}$  с вычислениями в рамках моделей TAC и SPAC: (a) угловой момент  $I$  в зависимости от частоты вращения  $\hbar\omega$ , (b) значения  $B(M1)$  в зависимости от  $I$ . Вычисления TAC показаны как пунктирные линии для DB1 ( $\epsilon=-0.10$ ) и как штрих-пунктирные линии для DB2 ( $\epsilon=-0.15$ ). На вставке проиллюстрирована одна из возможных начальных ориентаций векторов угловых моментов квазичастиц.

ровские  $\gamma$ -линии, в частности метод вычитания спектров, зарегистрированных под углами, симметричными по отношению к оси пучка (на примере  $^{144}\text{Gd}$ ). Впервые апробированы и использованы новые возможности программного обеспечения, позволяющие, в том числе, анализировать формы  $\gamma$ -линий, искаженные паразитными (до 7) пиками.

## В. Основные физические выводы:

1. В результате сравнения свойств квадрупольных полос в околomagических ядрах с  $Z = 52, 53, 54$  и  $N = 66$  ( $^{118}\text{Te}$ ,  $^{119}\text{I}$  и  $^{120}\text{Xe}$ ) между собой и расчетами на основе полумикроскопического варианта модели взаимодействующих бозонов МВБ1 выяснилось, в частности, что коллективные свойства протонной конфигурации  $\pi h_{11/2}^1$  в  $^{119}\text{I}$  гораздо ближе к  $^{120}\text{Xe}$ , чем к  $^{118}\text{Te}$  и наоборот, конфигурации  $\pi g_{9/2}^{-1}$  ближе к  $^{118}\text{Te}$ . В целом оказалось, что коллективные свойства ядер резко изменяются при малом изменении  $Z$  (от  $Z=52$ , до  $Z=54$ ) вблизи магического протонного числа  $Z = 50$ .
2. Квадрупольные полосы в околomagических ядре с  $Z = 64$  и  $N = 80$  ( $^{144}\text{Gd}$ ), построенные на 4-квазичастичных состояниях и традиционно рассматривавшиеся в рамках моделей, основанных на представлении о существовании трехосиальной деформации (TRS – Total Roushian Surface), могут быть успешно описаны на основе полумикроскопических бозонных подходов (МВБ1), не вводящих явно понятие статической деформации.
3. Приведенные вероятности М1 переходов  $B(M1)$  в дипольных полосах  $^{119}\text{I}$ , построенных как на 3-квазичастичных возбуждениях, так и на конфигурации  $\pi g_{9/2}^{-1}$ , хорошо описываются на основе полуклассических подходов, которым может быть придана простая геометрическая интерпретация для больших значений спинов.
4. Энергетическая структура и характеристики электромагнитных переходов (значения  $B(M1)$  и  $B(E2)$ ) в полосах околomagических ядер с  $N \approx 82$  ( $^{141}\text{Eu}_{63}^{78}$  и  $^{142}\text{Gd}_{64}^{78}$ ), построенных на 3- и 4-квазичастичных состояниях, были сопоставлены как с расчетами, выполненными на основе микроскопической модели ТАС и полуклассической модели SPAC, в которой магнитное вращение с характерным эффектом ножниц (Shears) рассматривается в главной системе координат ядерного эллипсоида. Исследованные дипольные полосы в этих в рамках микроскопической модели ТАС могут быть рассмотрены как магнитно-вращательные, а в полуклассической модели SPAC показывается, что магнитное вращение квазичастиц комбинирует со значительным вкладом коллективного вращения остова.

В целом, исследования, выполненные в настоящей работе современными средствами  $\gamma$ -спектроскопии, продемонстрировали сложное сочетание и взаимодействие как коллективных, так и квазичастичных степеней свободы в околomagических ядрах.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Экспериментальные результаты измерения  $\tau$  возбужденных состояний ядер: а)  $^{118}\text{Te}$  и  $^{119}\text{I}$ , проведенных методами ОДС и плунжерным на установке NORDBALL; б)  $^{144}\text{Gd}$ , проведенных методом ОДС на установке GASP.

2. Подготовка, проведение и обработка эксперимента, по исследованию ОДС на установке EUROBALL IV. Экспериментальные результаты измерений  $\tau$  возбужденных состояний и относительных интенсивностей переходов в  $^{141}\text{Eu}$  и  $^{142}\text{Gd}$ .

3 Выводы о том, что в исследованных ядрах:

- а) свойства квадрупольных полос успешно описываются в рамках полумикро-скопического варианта модели взаимодействующих бозонов;
- б) дипольные полосы могут рассматриваться как проявление магнитного вращения квазичастиц при существенном влиянии коллективного вращения остова.

### Основные результаты опубликованы в следующих работах:

(Е. О. Лидер в списке авторов фигурирует как Е.О. Podsvirova)

1. C. Droste, T. Morek, J. Srebrny, K. Starosta, A. Wasilewski, Yu.N. Lobach, M.J. Piiparinen, S. Tormanen, A. Virtanen, S. Juutinen, G.H. Hagemann, A.A. Pasternak, E.O. Podsvirova, *Lifetimes and  $B(E2)$ ,  $B(M1)$  Values in the  $\pi g_{9/2}$  Band of  $^{119}\text{I}$* , Прогр. и тез. **49 совещ. по яд. спектр. и структ. ат. ядра**. Дубна (1999) 61

2. A.A. Pasternak, J. Srebrny, Ch. Droste, S. Juutinen, G.H. Hagemann, Yu.N. Lobach, T. Morek, M. Piiparinen, E.O. Podsvirova, K. Starosta, S. Türmänen, A. Virtanen, A. Wasilewski, *Conflict coupling in the  $\pi(g_{9/2})^{-1}$  bands  $^{119}\text{I}$* , **Acta Phys. Pol. B** 31, (2000) 429

3. J. Srebrny, Ch. Droste, T. Morek, K. Starosta, A. Wasilewski, A.A. Pasternak, E.O. Podsvirova, Yu.N. Lobach, G.H. Hagemann, S. Juutinen, M. Piiparinen, S. Türmänen, A. Virtanen, *Transition probabilities in negative parity bands of  $^{119}\text{I}$* , **Nucl. Phys. A**683 (2001) 23

4. A.A. Pasternak, A.D. Efimov, E.O. Podsvirova, V.M. Mikhajlov, J. Srebrny, T. Morek, Ch. Droste, Y. Sasaki, M. Oshima, S. Juutinen, G.B. Hagemann, *Electromagnetic E2 transition probabilities in  $^{120}\text{Xe}$  and  $^{118}\text{Te} - N=66$  nuclei*, **Acta Phys. Pol. B**32, (2001) 2719

5. A.A. Pasternak, J. Srebrny, A.D. Efimov, V.M. Mikhajlov, E.O. Podsvirova, Ch. Droste, T. Morek, S. Juutinen, G.B. Hagemann, M. Piiparinen, S. Türmänen and A. Virtanen, *Lifetimes in the ground state band and the structure of  $^{118}\text{Te}$* , **Eur. Phys. J. A**13 (2002) 435

6. R.M. Lieder, A.A. Pasternak, E.O. Podsvirova, *Investigation of Dipole Bands in the  $^{142}\text{Gd}$  region with EUROBALL*, In book: **The Labyrinth in Nuclear Structure**, ed. A. Bracco and C.A. Kalfas, AIP, CP701 (2004) 238

7. R.M. Lieder, A.A. Pasternak, E.O. Podsvirova, W. Gast, H.M. Jäger, L. Mihailescu, D. Bazzacco, S. Lunardi, R. Menegazzo, C. Rossi Alvarez, G. de Angelis, D. Napoli, T. Rzaca-Urban, W. Urban, A. Dewald, *Investigation of the level scheme of  $^{144}\text{Gd}$  and lifetimes of the triaxial quadrupole band*, **Eur. Phys. J. A**21 (2004) 37

8. E.O. Podsvirova, R.M. Lieder, A.A. Pasternak, S. Chmel, W. Gast, Ts. Venkova, H.M. Jäger, L. Mihailescu, G. de Angelis, D. Napoli, A. Gadea, D. Bazzacco, R. Menegazzo, S. Lunardi, W. Urban, Ch. Droste, T. Morek, T. Rzaca-Urban, G. Duchene, *Investigation of lifetimes in dipole bands of  $^{141}\text{Eu}$* , **Eur. Phys. J. A**21 (2004) 1

9. A.A. Pasternak, E.O. Podsvirova, R.M. Lieder, S. Chmel, W. Gast, Ts. Venkova, H.M. Jäger, L. Mihailescu, G. de Angelis, D. Napoli, A. Gadea, D. Bazzacco, R. Menegazzo, S. Lunardi, W. Urban, Ch. Droste, T. Morek, T. Rzaca-Urban, G. Duchene, *Investigation of lifetimes in dipole bands of  $^{142}\text{Gd}$* , **Eur. Phys. J. A**23 (2004) 14