

ОРДЕНА ЛЕНИНА АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 539.163

ШАПОВАЛОВА Ирина Павловна

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ  
ЯДЕР В  $(n, \gamma)$ -РЕАКЦИИ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Специальность 01.04.16 - физика ядра и  
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев - 1993



00825840 (R)

*В. Д. Чесноков*

Робота виконана в Інституті ядерних досліджень  
АН України

Научний керівник: кандидат фізико-математических наук  
КУПРЯШКІН Володимир Тихонович

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук  
ЛЕВОН А. И.  
кандидат фізико-математических наук  
КУЗНИЧЕНКО А. В.

Ведущая организация: Киевский университет

автореферат розослан "24" февраля 1993г.

Защита состоится "25" марта 1993г.

в 14<sup>15</sup> часов на заседании Специализированного совета  
Д 016.03.01 Института ядерных исследований АН Украины  
по адресу: 252028, г. Киев, пр. Науки, 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института ядерных исследований Украины

Ученый секретарь

Специализированного Совета

кандидат физико-математических наук

*В. Д. Чесноков*

В. Д. Чесноков

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

Актуальность темы. Для развития представлений о структуре атомного ядра необходимо наличие достаточно полной и достоверной информации о свойствах возбужденных состояний ядер различного атомного веса. Разрядка возбужденных состояний ядер происходит, главным образом, путем испускания  $\gamma$ -квантов, поэтому одним из основных методов изучения структуры ядра является ядерная  $\gamma$ -спектроскопия. Изучение  $\gamma$ -спектров, возникающих при разрядке возбужденных состояний ядер, дает возможность, наряду с информацией об энергиях уровней и их квантовых характеристиках, получать сведения о вероятностях электромагнитных переходов между ядерными уровнями. Ядерно-спектроскопические исследования, проведенные в последние годы, характеризуются увеличением области изучаемых ядер в результате открытия новых изотопов, расширением и углублением информации о свойствах уже известных ядер за счет совершенствования экспериментальной техники и появления новых методик. На современном этапе развития физики систематическое измерение времен жизни ядерных уровней приобретает решающее значение, поскольку они связаны с вероятностями электромагнитных переходов, которые чрезвычайно чувствительны к выбору той или иной теоретической модели, претендующей на адекватное описание ядерной структуры. Задача измерения времен жизни ядерных состояний, лежащих в интервале  $10^{-16}$  -  $10^{-12}$  с является трудной и требует применения специальных методов и современных средств эксперимента. Наиболее перспективным методом измерений в этой области является метод ослабления доплеровского смещения ОДС. По этой причине дальнейшее совершенствование и разработка новых доплеровских методов измерений времен жизни ядерных состояний является актуальной задачей.

Цель работы. Разработать метод определения времен жизни возбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах, основанный на измерении доплеровского смещения энергии  $\gamma$ -лучей.

Создать экспериментальную установку на горизонтальном канале реактора ИЯИ АН Украины, позволяющую измерять времена жизни возбужденных состояний ядер по предложенному методу.

Измерить времена жизни ядер  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{58}\text{Fe}$ ; рассчитать вероятности  $\gamma$ -переходов исследованных уровней в единицах Вайскопфа; провести сравнение полученной экспериментальной информации с имеющимися теоретическими расчетами.

Провести исследование процессов торможения ядер отдачи  $^{33}\text{S}$  в веществах сложного химического состава:  $35\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $98\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{PbS}$  при малых скоростях ядер с дачи.

Разработать пакеты программ теоретического расчета ослаблений доплеровского смещения в зависимости от времени жизни  $\tau_{\text{я}}$  в веществах простого и сложного химического состава.

Научная новизна работы:

разработан метод определения времен жизни возбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах, основанный на измерении ослабления доплеровского смещения энергии  $\gamma$ -лучей;

создана экспериментальная установка на горизонтальном канале реактора ИЯИ АН Украины, позволяющая измерять времена жизни возбужденных состояний ядер по предложенному методу;

впервые измерены времена жизни:

трех уровней 5711, 5889 и 6425 кэВ  $^{33}\text{S}$

пяти уровней 4036, 4663, 4878, 5350 и 5780 кэВ  $^{32}\text{P}$

четырёх уровней 3285, 4495, 4708 и 5119 кэВ  $^{56}\text{Fe}$

семи 3244, 4298, 4323, 4444, 4551, 5001 и 5295 кэВ  $^{58}\text{Fe}$ ;

впервые даны оценки времен жизни:

уровня 6200 кэВ  $^{26}\text{Al}$

трех уровней 3552, 3790 и 3907 кэВ  $^{56}\text{Fe}$

двух уровней 5221 и 5414 кэВ  $^{58}\text{Fe}$ ;

уточнены времена жизни уровней, для которых ранее существовали только оценки:

двух уровней 3414 и 4277 кэВ  $^{26}\text{Mg}$

двух уровней 3882 и 4139 кэВ  $^{58}\text{Fe}$ ;

впервые получено убедительное подтверждение теории торможения Линдхарда и др. и теории рассеяния Блаугрунда в веществах сложного химического состава при малых скоростях ядер отдачи  $V/c \sim 10^{-4}$ .

#### Научная и практическая ценность работы.

Разработанный метод измерения времен жизни возбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах и созданная установка на горизонтальном канале реактора ИЯИ АН Украины позволяют измерять времена жизни высоковозбужденных состояний атомных ядер в диапазоне  $10^{-15}$ – $10^{-14}$  с и исследовать процессы торможения при малых скоростях ядер отдачи, что расширяет наши сведения о структуре и свойствах ядерных уровней, о процессах торможения ядер в веществе. Установка также может быть использована для исследования угловых  $\gamma\gamma$ -корреляций. Поскольку  $(n, \gamma)$ -реакция на тепловых нейтронах является одной из самых распространенных в реакторном цикле, поэтому правильное описание процессов торможения и рассеяния ядер отдачи может представлять определенный интерес для атомной энергетики.

Полученная экспериментальная информация о временах жизни исследованных ядер и рассчитанные вероятности  $\gamma$ -переходов могут быть полезны для дальнейших теоретических расчетов.

#### Апробация работы и публикации.

Изложенные в диссертации результаты работ докладывались на 39 [Ташкент, 1989 г.], 40 [Ленинград, 1990 г.] и 41 [Минск, 1991 г.] Совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, 8 Семинаре по точным измерениям в ядерной спектроскопии [Ужгород, 1990г.] и на Семинаре по применению  $\gamma$ -спектроскопии высокого разрешения в изучении атомных столкновений и времен жизни возбужденных состояний ядер [Гренобль, Франция, 1992г.].

#### Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 119 страниц машинописного текста, в том числе 9 таблиц, 29 рисунков. Список литературы содержит 82 наименования.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность измерения времен жизни возбужденных состояний ядер, а также дан краткий обзор существующих методов их измерения. Показано, что предлагаемый метод измерения возбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах, является одним из методов ОДС, однако скорости ядер отдачи и наблюдаемые доплеровские смещения малы, что требует более высокой точности измерений. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится описание измерений времен жизни возбужденных состояний ядер методом ОДС по типам реакций: 1)  $(p, \gamma)$ ,  $(p, n\gamma)$ ,  $(n, p'\gamma)$ ; 2)  $(\alpha, n\gamma)$ ,  $(\alpha, p\gamma)$ ; 3)  $(\alpha; xn, up, \gamma)$ ,  $E_\alpha \geq 20$  МэВ; 4) (Т.И.;  $xn, up, \alpha, \gamma$ ); 5) кулоновское возбуждение тяжелыми ионами; 6)  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах. Они характеризуются кинематикой, величиной  $V/c$ , сложностью  $\gamma$ -спектров, величиной доплеровского смещения, областью исследуемых ядер по массовому числу  $A$ . Отмечено преимущество  $(n, \gamma)$ -реакция на тепловых нейтронах

по сравнению с реакциями на заряженных частицах при определении времен жизни низкоспиновых состояний: кинематика реакции проста (угловые распределения продуктов реакции и рассеяния изотропны в системе координат центра масс), малые значения  $V/c$  позволяет учитывать только ядерную составляющую тормозных потерь, заселение уровней из захватного состояния происходит практически мгновенно. Для всех типов реакций приведены описания существующих установок и проведен анализ получаемой экспериментальной информации.

Во второй главе описана методика измерения времен жизни высоковозбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции из тепловых нейтронах.

На рис. 1 приведено схематическое изображение установки, созданной на горизонтальном канале реактора ИЯИ АН Украины. В состав установки входят:

- 1) коллиматор пучка тепловых нейтронов, состоящий из пяти монокристаллов кремния, размещенных в секциях шибера;
- 2) защита детекторов от фоновых  $\gamma$ - и нейтронных излучений, в состав которой входит свинец, парафиновые блоки в смеси с борной кислотой, нейтроностопы марки  $C_3$ , кадмий;
- 3) мишень, которая помещалась в цилиндр, наполненный солью лития, и служащий для защиты Ge-детектора от рассеянных на мишени нейтронов;
- 4) три детектора: два NaJ(Tl) и один Ge(Li)- или HPGe-детектор, которые располагались в плоскости, перпендикулярной пучку нейтронов, как это показано на рис. 2. Ge-детектор служил для измерения вторичных  $\gamma$ -квантов, а два детектора NaJ(Tl), расположенные под углами  $90^\circ$  и  $180^\circ$  к нему, предназначались для регистрации первичных  $\gamma$ -квантов, находящихся с ним в совпадениях.

В  $(n, \gamma)$ -реакции происходит захват теплового нейтрона ядром,

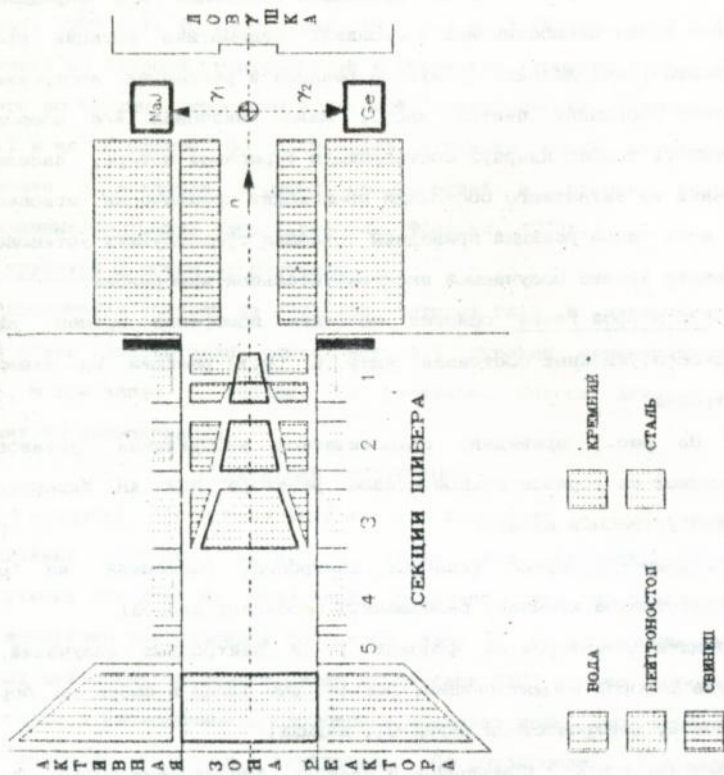


Рис. 1 Схематическое изображение экспериментальной установки на горизонтальном канале реактора

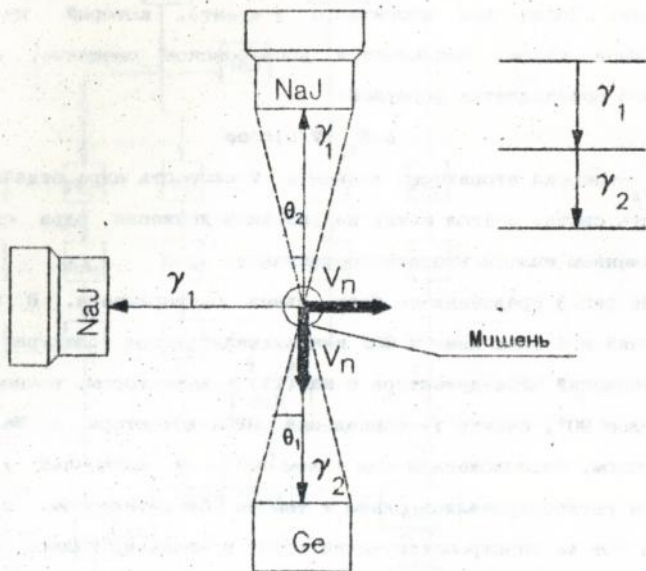


Рис.2 Геометрия эксперимента при измерении

$\gamma$ -совпадений

которое практически не получает импульса отдачи. В результате испускания первичного  $\gamma$ -кванта ядро получает импульс и приходит в движение. Тогда для вторичного  $\gamma$ -кванта, который излучается движущимся ядром, наблюдается доплеровское смещение, величина которого определяется формулой:

$$\Delta = E_{\gamma 2} (V/c) \cos \varphi$$

где  $E_{\gamma 2}$  — энергия вторичного  $\gamma$ -кванта,  $V$  — скорость ядра отдачи,  $c$  — скорость света,  $\varphi$  — угол между направлением движения ядра отдачи и направлением вылета вторичного  $\gamma$ -кванта.

На рис. 3 представлена блок-схема эксперимента. В процессе измерений в блоках памяти ОБУ накапливались три спектра: спектр  $\gamma\gamma$ -совпадений ЧРGe-детектора с NaJ(Tl) — детектором, расположенным под углом  $90^\circ$ ; спектр  $\gamma\gamma$ -совпадений НРGe-детектора с NaJ(Tl) — детектором, расположенным под углом  $180^\circ$ , и одиночный  $\gamma$ -спектр. Спектры регистрировались одним и тем же Ge-детектором, проходили один и тот же спектрометрический тракт и анализировались одним и тем же АЦП. Величина доплеровского смещения определялась из сравнения спектров  $\gamma\gamma$ -совпадений под углами  $180^\circ$  (смещение максимально) и  $90^\circ$  (смещение отсутствует). Отсутствие смещений  $\gamma$ -линий в спектрах  $\gamma\gamma$ -совпадений под углом  $90^\circ$  свидетельствовало об отсутствии систематических ошибок при определении смещения.

Наблюдаемая величина доплеровского смещения рассчитывалась с учетом теории торможения Линдхарда и др. и теории рассеяния Блаугрунда на основании формулы:

$$\Delta = \Delta_{max} \overline{\cos(\vartheta_1 + \vartheta_2)} \int_0^{\infty} \frac{V(t) \overline{\cos \varphi}}{V_0} \frac{1}{\tau_{\gamma}} \exp(-t/\tau_{\gamma}) dt$$

где  $\tau_{\gamma}$  — время жизни возбужденного состояния ядра,  $V_0$  и  $V(t)$  — скорости отдачи ядра в начальный момент и в момент времени  $t$ ,  $\overline{\cos \varphi}$  — среднее значение косинуса угла между направлением скорости

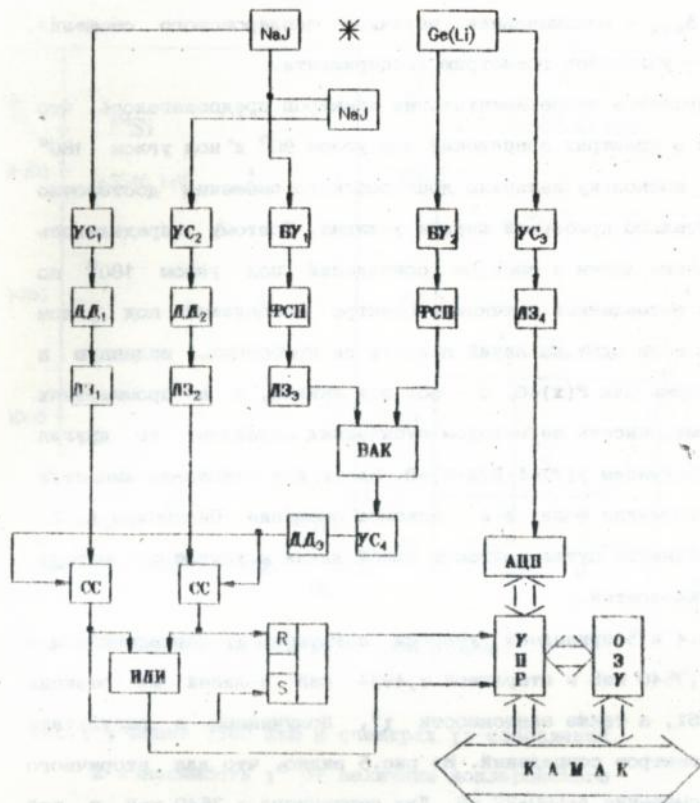


Рис. 3 Блок-схема эксперимента

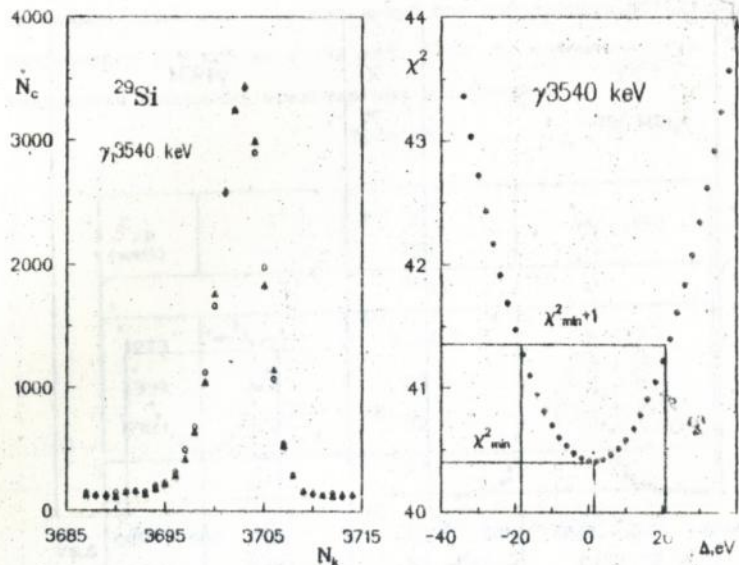
ядра отдачи и направлением вылета вторичного  $\gamma$ -кванта в момент времени  $t$ ,  $\Delta_{max}$  - максимальная величина доплеровского смещения,  $\overline{\cos(\theta_1+\theta_2)}$  - учитывает геометрию эксперимента.

При обработке экспериментальных спектров предполагалось, что формы линий в спектрах совпадений под углом  $90^\circ$  и под углом  $180^\circ$  одинаковые, поскольку величины доплеровского смещения достаточно малы относительно приборной ширины  $\gamma$ -линии. Поэтому определялось только смещение линии в спектре совпадений под углом  $180^\circ$  по отношению к несмещенной  $\gamma$ -линии в спектре совпадений под углом  $90^\circ$ . Тогда, если одну из линий принять за приборную, заданную в табличной форме как  $F(x)+C$ ,  $C$  - фон под линией, а в промежутках между точками описать ее методом кубических сплайнов, то другая опишется выражением  $y(x)=A \cdot F(x+\Delta)+D$ . Здесь  $A$  - отношение амплитуд линий,  $D$  - величина фона, а  $\Delta$  - искомое смещение. Параметры  $A$ ,  $C$ ,  $D$  и  $\Delta$  определяются путем подгонки одной линии к другой по методу наименьших квадратов.

На рис.4 и 5 приведены участки спектров  $\gamma\gamma$ -совпадений для первичной  $\gamma_{1,3540}$  кэВ и вторичной  $\gamma_{2,4934}$  кэВ  $\gamma$ -линий из реакции  $^{28}\text{Si}(n,\gamma)^{28}\text{Si}$ , а также зависимости  $\chi^2$ , полученные в результате обработки спектров совпадений. Из рис.5 видно, что для вторичного  $\gamma_{2,4934}$  кэВ смещение  $\Delta=580\pm 22$  эВ. Для первичного  $\gamma_{1,3540}$  кэВ в той же серии измерений получено  $\Delta=2\pm 18$  эВ, т.е. первичный  $\gamma$ -квант не испытывает доплеровского смещения.

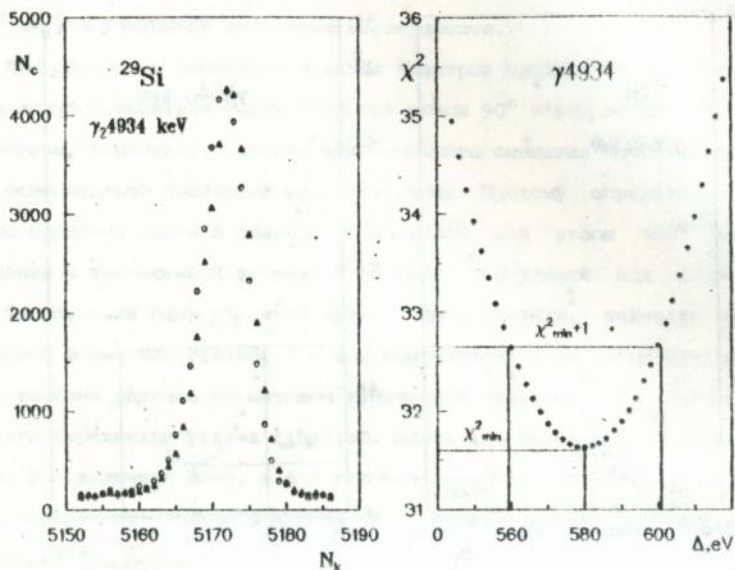
В третьей главе описан эксперимент и приведены результаты измерений времен жизни высоковозбужденных состояний изученных ядер в  $(n,\gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах.

С целью проверки правильности работы установки, а также установления оптимального района для измеряемых времен жизни  $\tau$  данным методом, были проведены измерения  $\tau$  для двух ядер  $^{28}\text{Si}$  и



$\Delta$ -СПЕКТР СОВПАДЕНИЙ ПОД УГЛОМ  $180^\circ$ ,  $\circ$ -ПОД УГЛОМ  $90^\circ$

Рис. 4  $\gamma$ -линия 3540 кэВ в спектрах  $\gamma\gamma$ -совпадений  
и зависимость  $\chi^2$  от величины доплеровского  
смещения



$\Delta$ -СПЕКТР СОВПАДЕНИЙ ПОД УГЛОМ  $180^\circ$ ,  $\circ$  - ПОД УГЛОМ  $90^\circ$

Рис.5  $\gamma$ -линия 4934 кэВ в спектрах  $\gamma\gamma$ -совпадений  $^{29}\text{Si}$   
и зависимость  $\chi^2$  от величины доплеровского  
смещения

$^{33}\text{S}$ , схемы распада которых удобны в экспериментальном плане и времена жизни которых измерены с хорошей точностью в широком временном диапазоне. Для измерений был использован  $\text{Ge(Li)}$ -детектор разрешением 2.5 кэВ на  $\gamma$ 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$  и эффективностью  $\sim 15\%$ . Результаты измерений представлены в таблице 1.

Таблица 1.

$E_{\text{ур}}$ (кэВ)	$I^{\text{н}}$	F (%)	$\tau$ (фс)
$^{29}\text{Si}$			
1273	$3/2^+$	$5.8 \pm 7.3$	$> 273$
4934	$3/2^-$	$89 \pm 2$	$3.0 + 0.7$ $- 0.5$
6381	$1/2^-$	$95 \pm 9$	$1.03 + 2.97$ $- 1.03$
$^{33}\text{S}$			
3221	$3/2^-$	$44 \pm 4$	$43 \pm 7$
4211	$3/2^-$	$59 \pm 12$	$24 \pm 12$
5711	$1/2^-$	$84 \pm 9$	$2 + 4$ $- 2$
5889	$3/2^-$	$72 \pm 22$	$7 + 15$ $- 7$
6425	$(1/2, 3/2)^-$	$67 \pm 25$	$9 + 21$ $- 9$

Измеренные по данной методике времена жизни возбужденных состояний хорошо совпадают с временами жизни, ранее известными из других работ, что подтверждает правильность разработанной методики. Оптимальным рабочим районом для измерения времен жизни на нашей установке по предложенной методике есть диапазон  $1\text{к} < \tau < 150\text{ фс}$ .

При измерении времен жизни высоковозбужденных состояний  $^{26}\text{Mg}$  и  $^{32}\text{P}$  использовался  $\text{HPGe}$ -детектор с эффективностью 50% и разрешением 2 кэВ на  $\gamma$ 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . При исследовании реакции  $^{24}\text{Mg}(n, \gamma)^{26}\text{Mg}$  использовалась металлическая мишень с природной

смесью изотопов весом 4.6 г. Мишень  $^{31}\text{P}$  представляла собой модификацию красного фосфора весом 9.8 г. Для каждого ядра было проведено по два измерения. Время каждого измерения составляло 90 часов. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Изотоп	$E_{\gamma}$ (кэВ)	$I^{\pi}$	F (%)	$\tau$ (фс)
$^{25}\text{Mg}$	4277	$1/2^{-}$	$99 \pm 14$	$< 5$
	3414	$3/2^{-}$	$89 \pm 4$	$4 \pm 2$
$^{32}\text{P}$	5780	$1^{-}$	$83 \pm 22$	$6 \begin{matrix} + 12 \\ - 6 \end{matrix}$
	5350	$2^{-}$	$68 \pm 36$	$16 \begin{matrix} + 51 \\ - 16 \end{matrix}$
	4878	$1^{-}$	$107 \pm 14$	$< 3$
	4663	$(0,2)^{-}$	$65 \pm 54$	$20 \begin{matrix} + 250 \\ - 20 \end{matrix}$
	4036	$1^{-}$	$90 \pm 5$	$4.1 \pm 2.4$
	3264	$2^{-}$	$17 \pm 5$	$180 \pm 70$

Для уровней 4277 и 3414 кэВ ядра  $^{25}\text{Mg}$  ранее существовали только оценки времен жизни, которые не противоречат нашим данным. Время жизни уровня 3414 кэВ,  $3/2^{-}$ ,  $\tau=4\pm 2$  фс, хорошо согласуется со значением  $\tau=6\pm 1$  фс для аналогичного уровня 3062 кэВ,  $3/2^{-}$  изотопического ядра  $^{28}\text{Al}$ .

Для ядра  $^{31}\text{P}$  все данные новые. Ранее было измерено только время жизни уровня 3264 кэВ,  $\tau=130\pm 30$  фс, которое хорошо согласуется с полученным значением  $\tau=180\pm 70$  фс.

Измерение времен жизни возбужденных состояний  $^{28}\text{Al}$  проводилось с использованием HPGe-детектора с эффективностью 50%. В экспериментах использовалась мишень  $^{27}\text{Al}$  с чистотой 99.99%. Полученные значения времен жизни возбужденных уровней ядра  $^{28}\text{Al}$  представлены в таблице 3. Они согласуются с имеющейся компиляцией

Таблица 3.

$E_{\text{ур}}$ (кэВ)	$I^{\circ}$	F (%)	$\tau$ (фо)
6200	(2 <sup>+</sup> -4 <sup>+</sup> )	105 ± 47	< 12
5443	2 <sup>-</sup>	79 ± 15	7 ± 5
5135	3 <sup>-</sup>	99 ± 11	< 3
4766	2 <sup>-</sup>	84 ± 6	4 ± 2
4691	3 <sup>-</sup>	88 ± 5	3.0 ± 1.5
3876	2 <sup>-</sup>	65 ± 9	12 ± 4
3591	3 <sup>-</sup>	39 ± 5	36 ± 7
3465	4 <sup>-</sup>	17 ± 5	108 <sup>+</sup> 52 - 29
2138	2 <sup>+</sup>	84 ± 11	4 ± 3
1622	2 <sup>+</sup>	25 ± 6	83 ± 23

данных по временам жизни для этого ядра, однако противоречат данным работы Эл-Акада и др.

В экспериментах по определению времен жизни  $^{56}\text{Fe}$  использовалась мишень из обогащенного до 99.9%  $^{54}\text{Fe}$  в виде порошка весом 6 г. Разрешение HPGe-детектора составляло 2 кэВ при  $E_{\text{ур}} = 1332$  кэВ  $^{60}\text{Co}$ , его эффективность 50%. Было проведено 2 измерения длительностью по 90 часов каждое. Результаты измерений представлены в таблице 4. Для уровней 1919, 2050 и 2470 кэВ проведено сравнение полученных времен жизни  $\tau$  с рассчитанными по оболочечной модели с потенциалами Куо-Брауна и  $\delta$ -поверхностного взаимодействия. Показано, что расчеты с потенциалом Куо-Брауна дают лучшее согласие, чем с потенциалом  $\delta$ -поверхностного взаимодействия.

При измерениях времен жизни  $^{56}\text{Fe}$  использовалась мишень, состоящая из кусочков фольгированного железа массой 4 г, обогащенного до 95% изотопом  $^{57}\text{Fe}$ . Было проведено два измерения длительностью по 85 часов каждое. Результаты измерений

Таблица 4.

$E_{\gamma}$ (кэВ)	$I^{\pi}$	F (%)	$\tau$ (фс)
5119		$63 \pm 15$	$8 \pm 5$
4708	(1/2, 3/2)	$71 \pm 17$	$6 \pm 4$
4495	1/2 <sup>-</sup>	$73 \pm 11$	$5 \pm 3$
3907	(1/2, 3/2)	$94 \pm 20$	$< 5$
3790	1/2 <sup>-</sup>	$78 \pm 35$	$< 16$
3552	(3/2 <sup>-</sup> )	$87 \pm 15$	$< 5$
3285		$68 \pm 30$	$11 \pm 10$
3029	3/2 <sup>-</sup>	$44 \pm 16$	$21 \pm 12$
2470	3/2 <sup>-</sup>	$40 \pm 5$	$21 \pm 4$
2050	3/2 <sup>-</sup>	$59 \pm 8$	$11 \pm 3$
1918	1/2 <sup>-</sup>	$44 \pm 10$	$17 \pm 6$

представлены в таблице 5. Время жизни возбужденных состояний 3630, 3537, 3244, 3084, 2876 и 2782 кэВ достаточно хорошо согласуются с временами жизни аналогичных состояний в соседнем четно-четном ядре  $^{66}\text{Fe}$ .

На основании полученных данных о временах жизни проведен расчет вероятностей  $\gamma$ -переходов в единицах Вайскопфа для всех исследованных возбужденных состояний ядер  $^{26}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{26}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{66}\text{Fe}$  и  $^{68}\text{Fe}$ . Результаты приведены в диссертации в виде таблиц.

В четвертой главе описано проведенное исследование процессов торможения ядер отдачи в веществах сложного химического состава с целью проверки правильности теорий Линдхарда и др. и Блаугрунда.

Чтобы проверить правильно ли эти теории описывают торможение и рассеяние, измерялось ослабление доплеровского смещения энергии вторичных  $\gamma$ -лучей, разряжающих возбужденное состояние с известным временем жизни в мишенях разного химического состава и полученные результаты сопоставлялись с теоретическими расчетами. Была выбрана

Таблица 5.

$E_{ур}$ (кэВ)	$I^{\pi}$	F (%)	$\tau$ (фс)
5414		$124 \pm 28$	$< 1$
5295		$73 \pm 17$	$5 \pm 4$
5221	$1^{(+)}$	$115 \pm 37$	$< 3.5$
5001	$1^+$	$74 \pm 6$	$4.3 \pm 1.4$
4551	$1^+$	$30 \pm 7$	$30 \pm 10$
4444	$1^+$	$59 \pm 39$	$8^+_{-8}$
4323	$1^+$	$49 \pm 17$	$16 \pm 10$
4298	$2^+$	$80 \pm 17$	$4 \pm 3$
4139	$1^+$	$80 \pm 13$	$4 \pm 3$
3882	$1^+$	$93 \pm 8$	$1 \pm 1$
3630	$2^+$	$26 \pm 12$	$37^+_{-16}$
3537	$1^+$	$48 \pm 6$	$15 \pm 4$
3244	$0^+$	$21 \pm 13$	$45^+_{-20}$
3084	$2^+$	$20 \pm 4$	$58 \pm 13$
2876	$2^+$	$19 \pm 5$	$43^+_{-11}$
2782	$1^+$	$11 \pm 3$	$90 \pm 25$

реакция  $^{32}\text{S}(n, \gamma)^{33}\text{S}$  на тепловых нейтронах, в которой хорошо возбуждается уровень 3220 кэВ,  $3/2^-$ , время жизни которого  $\tau=40$  12 фс неоднократно измерялось во многих работах. В качестве мишеней были выбраны природная сера, концентрированная 98% и разбавленная 35% серная кислота, а также поликристаллы свинцового блеска PbS. В измерениях использовался HPGe-детектор с эффективностью 50% и разрешением 2 кэВ на  $\gamma$ 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . Результаты экспериментальных данных ослабления доплеровских смещений F по отношению к ослаблению доплеровского смещения для природной серы  $F_0$  приводятся в таблице 6, где они сравниваются с теоретически рассчитанными отношениями  $F/F_0$ .

Таблица 6.

Мишень	F / F <sub>0</sub>	
	наши измерения	теория
98XN <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.02 ± 0.07	1.0
35XN <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.31 ± 0.16	1.2
PbS	0.67 ± 0.11	0.78

Полученные экспериментальные результаты в пределах ошибок согласуются с расчетами, выполненными по формулам Блаугрунда. Это позволяет сделать вывод о том, что теория Блаугрунда правильно описывает процессы торможения и рассеяния ядер отдачи в веществе сложного химического состава, при малых скоростях ядер отдачи  $v/c \sim 2 \cdot 10^{-4}$  и ею можно пользоваться для анализа доплеровских смещений  $\gamma$ -лучей в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах.

В заключении приведем основные результаты, полученные в настоящей работе. Их можно сформулировать следующим образом:

1. Разработан новый метод определения времен жизни возбужденных состояний ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах, основанный на измерении доплеровского смещения  $\gamma$ -лучей.
2. Создана экспериментальная установка на горизонтальном канале реактора ИЯИ АН Украины, позволяющая измерять времена жизни возбужденных уровней ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах.
3. Впервые измерены времена жизни:

трех уровней 5711, 5889 и 6425 кэВ <sup>33</sup>S;

пяти уровней 4036, 4663, 4878, 5350 и 5780 кэВ <sup>32</sup>P;

четырёх уровней 3285, 4495, 4708 и 5119 кэВ <sup>56</sup>Fe;

семи 3244, 4298, 4323, 4444, 4551, 5001 и 5295 кэВ <sup>58</sup>Fe.

Впервые даны оценки времен жизни:

уровня 6200 кэВ <sup>28</sup>Al;

трех уровней 3552, 3790 и 3907 кэВ <sup>56</sup>Fe;

двух уровней 5221 и 5414 кэВ  $^{56}\text{Fe}$ .

Уточнены времена жизни уровней, для которых ранее существовали только оценки:

двух уровней 3414 и 4277 кэВ  $^{25}\text{Mg}$ ;

двух уровней 3882 и 4139 кэВ  $^{56}\text{Fe}$ .

В целом измерены времена жизни 53 состояний изученных ядер, из них 2<sup>5</sup> - впервые.

4. Рассчитаны в единицах Вайскопфа вероятности  $\gamma$ -переходов исследованных уровней для ядер  $^{25}\text{Mg}$ ,  $^{28}\text{Al}$ ,  $^{29}\text{Si}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и  $^{58}\text{Fe}$ .

5. Проведена экспериментальная проверка теории торможения Линдхарда и др. и теории рассеяния Блаугрунда в веществах сложного химического состава:  $35\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $98\% \text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{PbS}$  при малых скоростях ядер отдачи  $V/c \sim 10^{-4}$ . Показано, что эти теории правильно описывают рассеяние и торможение ядер отдачи и могут быть использованы для определения времен жизни возбужденных ядерных состояний.

6. Созданы программы теоретического расчета ослаблений доплеровского смещения в зависимости от времени жизни возбужденного состояния ядра  $\tau_j$  в веществах простого и сложного химического состава, в основу которых положены теория торможения Линдхарда и др. и теория рассеяния Блаугрунда.

7. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных для исследованных ядер с имеющимися теоретическими расчетами. Из сравнения экспериментальных данных для ядра  $^{56}\text{Fe}$  с расчетами по оболочечной модели с потенциалом Куо-Брауна и с потенциалом  $\delta$ -поверхностного взаимодействия показано, что возбужденные состояния  $^{56}\text{Fe}$  более точно описываются потенциалом Куо-Брауна. Полученные экспериментальные данные о временах жизни могут

способствовать дальнейшему развитию теории.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Комутский Ю.Е., Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Измерение времен жизни ядер в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах //Изв. АН СССР Сер.физ.- 1989- Т.53- С.2125-2129.
2. Комутский Ю.Е., Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Новые данные о временах жизни высоковозбужденных состояний  $^{26}\text{Mg}$  и  $^{32}\text{P}$  //Изв. АН СССР Сер.физ.- 1990- Т.54- С.844-845.
3. Олейник В.С., Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Измерение времен жизни высоковозбужденных состояний  $^{28}\text{Al}$  //Изв. АН СССР Сер.физ.- 1990- Т.54- С.7846-7847.
4. Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Времена жизни уровней  $^{56}\text{Fe}$ , возбуждаемые в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах //Изв. АН СССР Сер.физ.- 1990- Т.54- С.2145-2148.
5. Кравец Н.С., Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Измерение времен жизни возбужденных состояний  $^{66}\text{Fe}$  в  $(n, \gamma)$ -реакции на тепловых нейтронах //Изв. АН СССР Сер.физ.- 1990- Т.54- С.2126-2130.
6. Комутский Ю.Е., Купряшкин В.Т., Стрильчук Н.В., Феоктистов А.И., Шаповалова И.П. Исследование процессов торможения ядер отдачи  $^{33}\text{S}$  в веществах сложного химического состава//Изв. Российской АН Сер.физ.- 1992-Т.56-75-С.46-49.

ШАПОВАЛОВА Ирина Павловна

ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕН ЖИЗНИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ  
ЯДЕР В (n,  $\gamma$ )-РЕАКЦИИ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

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

Подписано к печати 27.01

Усл.-печ. л. 1.31

Тип.заказ 19 Тираж 100

---

ОКТЕ с ЭП Института ядерных исследований АН Украины

252028, Киев-28, Проспект Науки, 47.

471442

AB 26.889