

Ба 143322

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР

УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ОТДЕЛЕНИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

На правах рукописи

ХИЛЬМАНОВИЧ АНАТОЛИЙ МАРТЬНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА  
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ СФЕРИЧЕСКИМИ ЯДРАМИ

( 01.04.16 - Физика атомного ядра и  
космических лучей )

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-мате-  
матических наук

Бел. 2005

Минск - 1975

Ба 143322

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР

УЧЕНЫЙ СОВЕТ ПО ФИЗИКЕ ОТДЕЛЕНИЯ  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

На правах рукописи

ХИЛЬМАНОВИЧ АНАТОЛИЙ МАРТЫНОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАДИАЦИОННОГО ЗАХВАТА  
МЕДЛЕННЫХ НЕЙТРОНОВ СФЕРИЧЕСКИМИ ЯДРАМИ

( 01.04.16 - физика атомного ядра и  
космических лучей )

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой  
степени кандидата физико-мате-  
матических наук

Бел. 2005

МИНСК - 1975

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени  
Институте физики АН БССР.

Научный руководитель - кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
Э.А.РУДАК

Официальные оппоненты - доктор физико-математических наук,  
профессор Л.А.БОРИСОГЛЕБСКИЙ,  
кандидат физико-математических  
наук, старший научный сотрудник  
И.Ф.БАРЧУК

Оппонирующая организация - Научно-исследовательский физическо-  
ый институт ЛГУ им. А.А.Жданова

Защита диссертации состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1975 г.  
№ 14 часов на заседании Ученого Совета по физике Отделения  
физико-математических наук АН БССР в зале заседаний Инсти-  
тута физики АН БССР ( г. Минск, Ленинский проспект, 70 ).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной  
библиотеке им. Я.Коласа АН БССР.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1975 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
СОВЕТА

( канд. физ.-мат.  
наук  
В.В.ФИЛИПОВ )

Изучение структуры атомных ядер и ядерных реакций связано с той огромной ролью, которую они играют в природе. Атомное ядро является сложной системой сильно взаимодействующих частиц. Для изучения структуры ядра используются разнообразные экспериментальные и теоретические методы исследования. В частности, исследования спектров  $\gamma$ -лучей из реакции радиационного захвата медленных нейтронов, которые в настоящее время являются одним из важнейших и перспективных методов изучения структуры ядер. Такие исследования дают возможность получить сведения о возбужденных состояниях ядра вплоть до энергии связи нейтрона. Это особенно важно в связи с тем, что в последнее время одним из основных направлений ядерной физики является изучение характеристик высоко-возбужденных состояний атомных ядер.

Реакция радиационного захвата нейтронов отличается от ядерных реакций других типов тем обстоятельством, что вероятности  $\gamma$ -переходов могут быть оценены достаточно точно и экспериментально, и, что особенно важно, теоретически. Кроме того, информация, полученная при изучении распада составных ядер по открытым по отношению к испусканию нуклонов и более сложных частиц каналам, касается только наиболее простых конфигураций. Конфигурации, соответствующие закрытым по отношению к испусканию частиц каналам, с помощью известных спектроскопических реакций срыва и подхвата не могут быть исследованы.

В связи с широким использованием в исследованиях спектров  $\gamma$ -лучей из реакции ( $n, \gamma$ ) полупроводниковых детекторов с большим чувствительным объемом и высокой разрешающей способностью, автоматизацией накопления и обработки спектроскопической информации были получены качественно

новые экспериментальные данные для широкого круга ядер. Однако вследствие высокой плотности ядерных уровней к настоящему времени надежные данные имеются только для нижних уровней ядер с  $E_{\text{вх}} \text{ до } 2 + 3 \text{ Мэв}$ . Для более высоких уровней получены лишь сведения статистического характера. Соответственно этому и исследования реакции  $(n, \gamma)$  имеют два направления: изучение вероятностей  $\gamma$ -переходов ядра-продукта из захватного состояния на отдельные нижние уровни ядра и изучение спектра  $\gamma$ -лучей в целом для ядра в рамках статистического подхода. В настоящей работе рассматривается ряд аспектов указанных направлений.

В последнее время при описании процесса образования и распада соотавного ядра делаются попытки конкретизировать структуру волновой функции посредством введения так называемых входных состояний — состояний, образовавшихся после непосредственного взаимодействия налетающей частицы с ядром-мишенью. Входные состояния обладают сравнительно простой структурой и ответственны за наличие промежуточной структуры в описаниях ядерных реакций. Очевидно, входные состояния должны играть определенную роль и в высвечивании захватного состояния в реакции  $(n, \gamma)$ . Интерпретация спектра  $\gamma$ -лучей первого каскада может быть связана со структурой волновой функции захватного состояния.

Принципиальный интерес представляют экспериментальные и теоретические исследования потенциального захвата нейтрона, поскольку в этом случае возможно сделать корректные теоретические оценки сечения. В настоящей работе дается объяснение малым значениям сечения потенциального захвата нейтрона с точки зрения длительности пребывания нейтрона в районе ядра-мишени.

Одним из наиболее широко обсуждаемых в литературе эффектов является "аномальный" характер спектров  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на медленных нейтронах на сферических тяжелых ядрах с  $A \sim 170 + 200$ . Эффект заключается в аномально большой (с точки зрения статистической теории  $\gamma$ -распада составного ядра) интенсивности жестких  $\gamma$ -переходов, сопровождающих распад захватного состояния. В данной работе

объяснение проводится на основе конкретного вида фрагментации одночастичных  $p$ -уровней по энергетическому интервалу.

В настоящей диссертационной работе проводится экспериментальное исследование спектров  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах на ядрах с  $A < 80$ , делается оценка сечения потенциального захвата тепловых нейтронов и дается интерпретация уже известных экспериментальных значений сечения с точки зрения длительности пребывания налетающего нейтрона в районе ядра-мишени при потенциальном рассеянии, дается объяснение аномальному характеру спектров  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах на тяжелых ядрах с  $A \sim 170 + 200$ , исследуется роль входных состояний в  $\gamma$ -распаде захватного состояния в реакции  $(n, \gamma)$  на сферических четных ядрах с  $A < 80$ .

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов.

В первой главе дан обзор основных экспериментальных и теоретических исследований реакции  $(n, \gamma)$ . Показано, что наряду с успехами, достигнутыми в изучении реакции  $(n, \gamma)$ , целый ряд проблем остается нерешенным или требует более тщательного рассмотрения. Делается постановка и обоснование задачи настоящего исследования.

Вторая глава посвящена исследованию потенциального захвата нейтронов. Для этого процесса можно сделать корректные теоретические оценки сечения. Результаты предыдущих работ [1] по расчету сечения потенциального захвата нейтрона показали, что оно существенно зависит от формы и параметров потенциала. С целью нахождения общей закономерности изменения величины сечения потенциального захвата от формы и параметров потенциала в настоящей работе проведен расчет для ядер с  $40 \leq A \leq 80$  и  $140 \leq A \leq 240$ . Сечение потенциального захвата рассчитывалось по формуле

$$\sigma_{E_f}^{pot}(n, \gamma) = \frac{4Z^2}{9A^2} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{E_f^3}{c^2 \hbar^3} (2I_f + 1)(2j_f + 1) \left\{ \frac{d_f}{I_i I_f} \right\}^2 \left| \langle f | r | i \rangle \right|^2, \quad (I)$$

где  $I$  - спин ядра-мишени,  $j_i$  и  $j_f$  - моменты нейтрона в начальном и конечном состояниях,  $I_i$  и  $I_f$  - полный момент начального и конечного состояний. Волновые функции налетающих

5-нейтронов и связанных  $p$ -состояний рассчитывались численным методом в потенциале Саксона-Вудса

$$V(r) = -V_0' \left( 1 + \exp \frac{r-R_0}{a} \right)^{-1} \quad (2)$$

с учетом изоспиновой зависимости глубины ямы

$$V_0' = 53 \left( 1 - 0,63 \frac{N-Z}{A} \right), \text{ МэВ} \quad (3)$$

и в потенциале Саксона-Вудса плюс производная

$$V(r) = -V_0'' \left( 1 + \exp \frac{r-R_0}{a} \right)^{-1} - V_0''' \exp \frac{r-R_0}{a} \left( 1 + \exp \frac{r-R_0}{a} \right)^{-2} \quad (4)$$

Согласно полученным результатам сечение потенциального захвата нейтрона существенно зависит от формы и параметров потенциала только у ядер, находящихся вблизи максимумов 5-нейтронной силовой функции ( $A \sim 55$  и  $A \sim 160$ ). Сравнение с экспериментальными оценками показывает, что в ряде случаев теоретические значения  $\sigma^{pot}$  на порядок и более превышают экспериментальные. Данное противоречие связано, по-видимому, с отсутствием точных данных о параметрах потенциала, а также, возможно, с некоторой некорректностью формулы для расчета сечения потенциального захвата нейтрона.

При выводе формулы для  $\sigma^{pot}$  неявно предполагалось длительное существование системы по отношению к  $\xi$ -процессам в атомных ядрах. В связи с этим оценено время пребывания 5-нейтрона в районе ядра-мишени. В расчете использовались выражения для оценки времени [2], полученные в результате квантово-механического рассмотрения процесса упругого рассеяния нейтрона. Задача практически сводится к нахождению фазы рассеяния  $\delta$ . При вариации в разумных пределах параметров рассеивающего потенциала фаза рассеяния 5-нейтронов может достигать значений, соответствующих временам пребывания нейтрона в районе ядра-мишени  $\sim 10^{-18} + 10^{-17}$  сек и более только для ядер в районе максимумов 5-нейтронной силовой функции. Времена  $10^{-18} + 10^{-17}$  сек соответствуют одночастичным оценкам Вайскоффа периода полураспада захватного состояния ядер. Для остальных областей ядер время пребывания 5-нейтрона в районе ядра-мишени существенно меньше. Поэтому

му предположение возможности существенного вклада сечения потенциального захвата не имеет оснований.

В этой главе исследована также зависимость интегралов матричных элементов  $S$ -переходов типа  $E1$  от радиуса ядра. Показано, что существенный (в ряде случаев преобладающий) вклад в матричные элементы  $\gamma$ -переходов из исходного  $S$ -состояния в реакции  $(n, \gamma)$  на медленных нейтронах на конечные  $p$ -уровни дает поверхностная область ядра-продукта. Следствием этого является зависимость сечения прямого захвата (потенциальный и резонансный захват нейтрона в области каналов) медленных  $S$ -нейтронов от глубины залегания конечных  $p$ -уровней в потенциальной яме ядра-продукта и нарушение корреляции между приведенными вероятностями  $\gamma$ -переходов типа  $E1$  из захватного состояния  $B(E1) \sim I_{\gamma}/E_{\gamma}^3$  и приведенными нейтронными ширинами конечных  $p$ -уровней  $\theta_n^2(2j+1)$  в легких ядрах с  $A < 40$ . При прямом захвате должна иметь место корреляция между приведенными нейтронными ширинами конечных уровней, определяемыми в реакции  $(d, p)$ , и приведенными вероятностями  $\gamma$ -переходов из реакции  $(n, \gamma)$ . С целью выяснения роли прямого захвата нейтрона в реакции  $(n, \gamma)$  рассчитан корреляционный коэффициент для ядер с  $37 \leq A \leq 81$ . Значения корреляционного коэффициента, близкие к 1, свидетельствующие о существенной роли прямого захвата нейтрона, получены для ядер с  $A \sim 50$ . Для более тяжелых ядер ( $A \sim 70$ ) величина корреляционного коэффициента уменьшается и даже становится отрицательной. Это является качественным указанием на существенную роль более сложных, по сравнению с исходной, конфигураций.

Корреляционный коэффициент позволяет сделать только качественные выводы о роли прямого захвата нейтрона. В связи с этим предложен метод оценки верхнего предела вклада прямого захвата нейтронов, основанный на выделении в матричном элементе  $\gamma$ -перехода члена, ответственного за прямой захват, и использовании экспериментальных значений приведенных нейтронных ширин конечных уровней. Выражение для



верхнего предела вклада прямого захвата в сумму приведенных вероятностей  $\gamma$ -переходов имеет вид:

$$\gamma = \frac{\sum_i x_i \sum_i x_i y_i}{\sum_i y_i \sum_i x_i^2} \quad (5)$$

$x_i$  и  $y_i$  - приведенные ширины из реакций  $(d, p)$  и  $(n, \gamma)$  для  $i$ -го уровня. Проведены оценки верхнего предела вклада прямого захвата для ядер с  $A \sim 35 + 80$ .

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию спектров  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах на изотопах титана, германия и селена. Изотопы титана лежат в области максимума  $S$ -нейтронной силовой функции и исследование спектров их  $\gamma$ -лучей представляет интерес. В предыдущих исследованиях не были определены абсолютные интенсивности  $\gamma$ -лучей  $Tl^{47,50,51}$ . В настоящей работе с помощью  $Ge(Li)$ -спектрометра измерены спектры  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах на изотопах  $Tl^{46,47,48,49,50}$ . Нейтроны выводились из касательного канала реактора ИРТ-2000. Плотность потока тепловых нейтронов в месте расположения образца составляла  $1,5 \times 10^7$  нейт/см<sup>2</sup>·сек при кадмиевом отношении по марганцу  $\sim 50$ . Чувствительный объем  $Ge(Li)$ -детектора равнялся  $3 \text{ см}^3$ , разрешение составляло 10 кэВ для  $\gamma$ -лучей с энергией 1 МэВ и 30 кэВ для энергии 6 МэВ. Ошибка в определении абсолютной интенсивности для выделенных  $\gamma$ -линий не превышает 20%, относительные же интенсивности определялись с точностью до 10%. Ошибка в определении энергий не более 2 кэВ для  $\gamma$ -линий с энергией 1 МэВ и не более 5 кэВ для  $\gamma$ -лучей с энергией 6 МэВ. Располагая хорошими условиями эксперимента (поток нейтронов, вес и высокое обогащение образцов, низкий фон), было предпринято последовательное измерение спектров  $\gamma$ -лучей всех изотопов титана. Это позволило надежно идентифицировать почти все выделенные из спектра  $\gamma$ -линии и определить их энергии и абсолютные интенсивности.

Составлены схемы распада изотопов  $Tl^{47,48,49,50,51}$  из захватного состояния. Отмечены некоторые обнаруженные особенности схем распада. В частности, в случае  $Tl^{51}$ , находящегося вблизи максимума  $S$ -нейтронной силовой функции, об-

наружена антикорреляция выходов из реакций  $(d, p)$  и  $(n, \gamma)$ .

Изотопы германия и селена лежат вдали от максимума  $S$ -нейтронной силовой функции. В этой области массовых чисел ожидается проявление эффектов, связанных с входными состояниями, образующимися при захвате нейтронов. Спектры  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на разделенных изотопах  $Ge^{70,72,73}$  и  $Se^{74,76,77}$ , за некоторым исключением, ранее не исследовались. Значительные по величине сечения захвата тепловых нейтронов данными изотопами позволяют применять спектрометры с малой эффективностью.

Спектры  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  ядер  $Ge^{71,73,74}$  и  $Se^{75,77,78}$  измерялись с помощью магнитного комптоновского спектрометра [3], достоинством которого является простая и хорошо известная аппаратная форма линии. Данный спектрометр имеет постоянное разрешение в интервале энергий  $\gamma$ -лучей 1,5 + 9 Мэв. У спектрометров этого типа надежно рассчитывается кривая эффективности регистрации  $\gamma$ -лучей, что позволяет получить надежные оценки абсолютных интенсивностей  $\gamma$ -лучей. С помощью методики разложения сложных по изотопному составу спектров на составляющие получены спектры отдельных изотопов. Определены средние числа  $\gamma$ -квантов на один захваченный нейтрон изотопами германия и селена.

Экспериментальное исследование реакции  $(n, \gamma)$  на ядрах с  $A \sim 70$  показало, что наряду с появлением неразрешенной части спектра ("горба"), присущего спектрам тяжелых ядер, в жесткой части спектров  $\gamma$ -лучей имеются интенсивные линии. Однако их интенсивность, в среднем, значительно меньше по сравнению с ядрами с  $A \sim 50$ .

В четвертой главе методом суммирования ступеней каскадов в рамках статистической теории  $\gamma$ -распада составного ядра рассчитаны спектры  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  на тепловых нейтронах на ряде легких и средних ядер с  $A \sim 45 + 80$ . В расчете использовались формулы плотности уровней, учитывающие спиновую зависимость. Показано, что точный учет квантовых характеристик и приведенных нейтронных ширин

конечных уровней позволяет с успехом расширить область применения статистической теории  $\gamma$ -распада составного ядра на ядра с дискретной структурой спектров  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$ .

Удовлетворительное согласие рассчитанных спектров с экспериментальными позволило рассчитать фактор запрета  $\Phi$  для одночастичных  $\gamma$ -переходов из захватного состояния из выражения

$$\Gamma_{\text{жсп}} = \Phi \cdot \Gamma_{\text{ван}}. \quad (6)$$

Фактор запрета оказался равным  $\sim 10^{-2}$  для ядер с  $A \sim 50$  и уменьшается до  $\sim 10^{-4}$  для ядер с  $A \sim 80$ .

Спектры  $\gamma$ -лучей из реакции  $(n, \gamma)$  некоторых тяжелых ядер хорошо описываются обычной статистической теорией. Однако для ядер, лежащих в интервале массовых чисел  $A \sim 170 + 200$ , удовлетворительного согласия получить не удалось. Для них несоответствие между экспериментальными и теоретическими спектрами проявляется в том, что  $\gamma$ -лучи высокой энергии, соответствующие прямым переходам ядра-продукта из захватного состояния на нижние уровни, характеризуются аномально интенсивными линиями. В ряде работ для объяснения этого эффекта привлекался механизм гигантских  $E1$  и  $M1$  резонансов. В настоящей работе рассчитываются спектры  $\gamma$ -лучей ядер с  $A \sim 170 + 200$  в рамках статистической теории с учетом энергетической зависимости коэффициентов разложения  $A_{\rho}$  волновых функций уровней:

$$A_{\rho}^2(E) = \frac{A_{\rho}}{(E_{\rho} - E)^2 + \Gamma_{\rho}^2/4}. \quad (7)$$

Здесь  $E_{\rho}$  - энергия центра тяжести  $\rho$ -конфигурации,  $A_{\rho}$  - нормировочный множитель. Величина  $\Gamma_{\rho}$ , определенная из сравнения рассчитанных спектров с экспериментальными, равна  $1 + 2$  Мэв и соответствует значениям, полученным из других экспериментов.

Отмечается, что нет оснований привлекать для объяснения аномального характера спектров  $\gamma$ -лучей в указанных ядрах какие-либо специфические механизмы захвата нейтронов.

В пятой главе предпринят анализ интенсивностей  $\gamma$ -пере-

ходов нечетных изотопов никеля, цинка, германия и селена по методике, разработанной в работах [ 4, 5 ]. Для этого проведен расчет спектров и волновых функций нижних уровней изотопов  $M$  61,63,65,  $Zn$  65,67,69,  $Ge$  71,73,75,  $Se$  75,77,79,81. Расчеты проводились в рамках обобщенной модели в приближении промежуточной связи с учетом в гамма-тоннеле взаимодействия сил спаривания и дипольного члена. Волновые функции уровней представляются в виде:

$$\Psi_{IM} = \sum_{NR} a_{NR}^j |N, R, j; IM\rangle \quad (8)$$

Здесь  $N$  - число фононов,  $R$  - спин вибрационного состояния,  $j$  - момент одночастичного состояния нейтрона,  $I$  и  $M$  - результирующий момент уровня и его проекция соответственно. Получено удовлетворительное согласие теоретических расчетов спектров уровней с экспериментальными данными. Оценены спектроскопические факторы уровней.

Полученные волновые функции были использованы для оценки приведенных вероятностей  $\gamma$ -переходов типа  $E1$  ядер-продуктов из захватного состояния на конечные  $p$ -уровни. Искомые коэффициенты разложения волновых функций захватного состояния были найдены по методу наименьших квадратов. Для некоторых ядер ( $Zn^{69}$ ,  $Ge^{71}$ ,  $Se^{77}$ ) коэффициенты разложения волновой функции захватного состояния конфигураций  $|1,2^+, d_{3/2}; 1/2^+\rangle$  и  $|1,2^+, d_{5/2}; 1/2^+\rangle$  в несколько раз превышает коэффициент исходной конфигурации  $|0,0^+, s_{3/2}; 1/2^+\rangle$ .

Путем сравнения с экспериментальными величинами радиационных ширин определены абсолютные значения коэффициентов разложения волновой функции захватного состояния. Расчитана величина

$$P = \sum_{NR} |a_{NR}^j|^2, \quad (9)$$

которая характеризует вероятность нахождения ядра в исходном и однофононных состояниях и является качественным критерием сложности волновой функции захватного состояния. Вклад конфигураций  $|0,0^+, s_{3/2}; 1/2^+\rangle$ ,  $|1,2^+, d_{3/2}; 1/2^+\rangle$  и  $|1,2^+, d_{5/2}; 1/2^+\rangle$  в волновую функцию захватного состояния значительно меньше единицы и составляет  $10^{-4} + 10^{-2}$ . С возрастанием атомного веса вклад указанных конфигураций уменьшается в  $10 + 100$  раз по

сравнению с исследуемыми легкими ядрами. Данный результат согласуется с оценкой фактора запрета одночастичных переходов в этих же ядрах.

Исходя из формулы для плотности уровней, а также используя средние величины коэффициентов разложения волновой функции, сделана оценка числа конфигураций, дающих основной вклад в волновую функцию захватного состояния. Для исследуемых ядер число конфигураций варьируется в пределах от  $10^2$  в ядрах с  $A \sim 50$  до  $10^4$  в ядрах с  $A \sim 80$ .

Материалы диссертации докладывались на XVIII - XXIV -ом Всесоюзных совещаниях по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, представлены на международной конференции по фотоядерным реакциям ( США, Асиломар, 1973 г. ) и Втором симпозиуме по  $\gamma$ -спектроскопии от захвата нейтронов ( Нидерланды, Петтен, 1974 г. ) и опубликованы в работах [ 6 - 20 ]

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.И.Белоусова, Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов. Ядерная физика, 9, 100, 1969.
2. А.И.Базь. Ядерная физика, 4, 252, 1966.
3. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов. Атомная энергия, 18, 285, 1965.
4. В.А.Кнатько, Э.А.Рудак. Ядерная физика, 13, 521, 1971.
5. В.А.Кнатько, Э.А.Рудак, Ядерная физика, 15, 1132, 1972.
6. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Progr. и тез. докл. XVIII Ежегодн. совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, "Наука", Л., 1968, стр.35.
7. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 4, 116, 1969.
8. А.П.Богданов, А.В.Сорока, В.Н.Тадэуш, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 5, 130, 1969.
9. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Ядерная физика, 11, 1129, 1970.
10. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 1, 95, 1970.
11. Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 1, 125, 1970.

12. В.И.Нелаева, Э.А.Рудак, Е.И.Фирсов, А.М.Хильманович. "Прямой захват нейтрона в реакции ( $n, \gamma$ )". Препринт Института физики АН БССР. г. Минск, 1970.
13. В.И.Белюсова, Э.А.Рудак, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 2, 125, 1971.
14. В.А.Князько, С.А.Негрей, Э.А.Рудак, А.М.Хильманович, Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 3, 79, 1972.
15. Э.А.Рудак, А.М.Хильманович. Прогр. и тез. докл. XXII Ежегодн. совещ. по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, "Наука", Л., ч.2, 1972, стр.20.
16. В.В.Орлова, Э.А.Рудак, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 6, III, 1973.
17. E. A. Rudak, A. M. Khilmanovich. *Proc. of the Inter. Conf. on Photonuclear Reactions and Applications. Asilomar, USA, March 26-30, 1973, p. 1071.*
18. Э.А.Рудак, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 5, II3, 1974.
19. E. A. Rudak, A. M. Khilmanovich. *Proc. of the Second Symposium on Neutron Capture Gamma Ray Spectroscopy and Related Topics. Petten. Netherlands, September 2-6, 1974, N23, p21.*
20. Э.А.Рудак, А.М.Хильманович. Известия АН БССР, сер. физ.-мат. наук, 2, 69, 1975.

---

ЛТБ II955 Подписано к печати 20.II.75.

Формат 60x90 Печ.л.0,9

Заказ №461 Тираж 120

---

Ротапринт ИФ АН БССР

**Бел. 2005**



8000000 1439968