



Article

Возбуждение изомерных состояний 4^+ в фотонейтронной реакции типа (γ, n) на ядре ^{113}In

С.Р. Палванов

1 Национальный университет Узбекистана

Аннотация:

В данной работе представлены результаты исследования возбуждения изомерных состояний 4^+ в фотонейтронной реакции типа (γ, n) на ядре ^{113}In , а также анализ энергетических и вероятностных характеристик образования этих состояний. Методом наведённой активности определены энергетические зависимости изомерного отношения выходов и сечения реакции (γ, n) на ядре ^{113}In в области энергий 1435 МэВ с шагом 1 МэВ. Полученные экспериментальные данные сравниваются с теоретическими расчетами. Теоретические расчеты сечений ядерных реакций и изомерных отношений сечений выполнены с использованием программного пакета TALYS-1.6. Расчеты проведены в широком диапазоне энергий падающих частиц с учетом различных механизмов ядерных реакций, включая прямые, предположительно равновесные и предравновесные процессы. Для описания ядерной структуры и плотности уровневой использованы стандартные модели, реализованные в коде TALYS.

Ключевые слова: ядерные реакции, изомерные отношения, тормозное излучение, радиоактивность, сечение, активность, изомер, ядро, период полураспада, спин.

Excitation of isomeric 4^+ states in the photonuclear (γ, n) reaction on the ^{113}In nucleus

S. R. Palvanov

1 National University of Uzbekistan

Abstract:

This paper presents the results of a study of the excitation of 4^+ isomeric states in a (γ, n) photoneutron reaction on the ^{113}In nucleus, as well as an analysis of the energy and probability characteristics of the formation of these states. Using the induced activity method, the energy dependences of the isomeric yield ratio and the reaction cross section for the (γ, n) reaction on the ^{113}In nucleus were determined in the energy range of 1435 MeV with a step of 1 MeV. The obtained experimental data are compared with theoretical calculations. Theoretical calculations of the nuclear reaction cross sections and isomeric cross section ratios were performed using the TALYS-1.6 software package. The calculations were performed over a wide range of incident particle energies, taking into account various nuclear reaction mechanisms, including direct, presumably equilibrium, and pre-equilibrium processes. Standard models implemented in the TALYS code were used to describe the nuclear structure and level density.

Keywords: nuclear reactions, isomeric ratios, bremsstrahlung, radioactivity, cross-section, activity, isomer, nucleus, half-life, spin.

Введение

Изучение фотоядерных реакций является важным направлением современной ядерной физики, поскольку такие реакции позволяют получать информацию о структуре атомных ядер, механизмах возбуждения ядерных уровней и свойствах ядерных изомерных состояний.

Цитирование: Возбуждение изомерных состояний 4^+ в фотонейтронной реакции типа (γ, n) на ядре ^{113}In . 2025, 2, 2, 4. <https://doi.org/>

Полученный: 10.03.2025

Исправленный: 18.03.2025

Принято: 25.04.2025

Опубликованный: 30.04.2025

Copyright: © 2025 by the authors. Submitted to for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Воздействие γ -квантов высокой энергии на ядро приводит к возбуждению коллективных и одночастичных состояний, а также к протеканию различных каналов распада, включая реакции с испусканием нейтронов, протонов и -частиц [1–3]. Особый интерес представляют ядерные изомерные состояния — долгоживущие возбужденные состояния ядра, характеризующиеся значительными временами жизни и отличающиеся от основного состояния спином и/или парностью. Исследование процессов их образования в фотоядерных реакциях позволяет глубже понять структуру ядерных уровней, правила отбора электромагнитных переходов и роль углового момента в ядерных реакциях [4–6]. Ядро ^{113}In является удобным объектом для подобных исследований благодаря наличию метастабильных изомерных состояний, а также хорошо изученной схеме уровней. Фотоядерные реакции на этом ядре, в частности реакции типа (γ, γ) и (γ, n) , позволяют эффективно возбуждать изомерные состояния и исследовать зависимости их выхода от энергии возбуждающего γ -излучения. Анализ изомерных отношений дает ценную информацию о механизмах передачи углового момента и о конкуренции различных каналов распада [7–9]. Целью данной работы является исследование возбуждения изомерных состояний 4^+ в фотонейтронной реакции типа (γ, n) на ядре ^{113}In , а также анализ энергетических и вероятностных характеристик образования этих состояний. Полученные результаты могут быть использованы для уточнения моделей фотоядерных реакций и расширения экспериментальных данных по изомерии атомных ядер.

Материалы и методы

Экспериментальные данные получены из базы данных гамма-спектров, которая была получена в экспериментах, проведенных на сильноточном бетатроне. Эксперименты проводились на тормозном γ -пучке в области энергий 12–35 МэВ с шагом 1 МэВ. В качестве мишени использовались диски из химически чистого металлического индия диаметром 15 мм и массой 1–3 г. Время облучения мишеней в зависимости от максимальной энергии тормозного излучения составляет 0,5–3 ч. Наведенная γ -активность мишеней измерялась на гамма-спектрометре фирмы Canberra, состоящем из германиевого детектора HPGe. Гамма-спектры мишеней начинали измерять после паузы 2–50 мин и измерялись в течение 3–120 мин. Экспериментальные данные получены из базы данных гамма-спектров, которая была получена в экспериментах, проведенных на сильноточном бетатроне. Эксперименты проводились на тормозном γ -пучке в области энергий 12–35 МэВ с шагом 1 МэВ. В качестве мишени использовались диски из химически чистого металлического индия диаметром 15 мм и массой 1–3 г. Время облучения мишеней в зависимости от максимальной энергии тормозного излучения составляет 0,5–3 ч. Наведенная γ -активность мишеней измерялась на гамма-спектрометре, состоящем из германевого детектора HPGe. Гамма-спектры мишеней начинали измерять после паузы в 2–50 мин и измерялись в течение 3–120 мин. Для определения эффективности полупроводникового детектора использовались радиоактивные источники набора ОСГИ – ^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{137}Cs , ^{133}Ba , ^{152}Eu , ^{241}Am , ^{228}Th . Измерения проводились на расстояниях 0 см, 2 см и 5 см от источника до кристалла детектора. Под эффективностью здесь понимается отношение числа зарегистрированных импульсов в фотопиках к общему числу квантов, испущенных в телесный угол 4π .

Таблица 1. Спектроскопические характеристики ядер-продуктов реакций (γ, n) на ядре ^{113}In
Table 1. Spectroscopic characteristics of the nuclei produced in (γ, n) reactions on the ^{113}In nucleus

$I\pi$	Ядро-продукт	$T^{1/2}$	E^y , кэВ	$I_y, \%$	p
4^+	^{112m}In	20.7 мин	155,4	1,12	1
1^+	^{112g}In	14.4 мин	606,4 618,2	1,19 5,29	-

Заселение изомерного и основного уровней идентифицировали по γ -линиям. Спектроскопические характеристики ядер-продуктов реакций (γ, n) и $(n, 2n)$, необходимые для обработки результатов измерений, взяты из [10,11,13] и приведены в табл. 1, где I^π – спин и четность уровня, $T^{1/2}$ – период полураспада ядра, I_γ – интенсивность γ -квантов данной энергии на распад, p – коэффициент ветвления γ -перехода.

Результаты

Полученные экспериментальные результаты об изомерных отношениях выходов реакций (γ, n) на ядре ^{113}In приведены на рис. 1 и в табл. 2 и 3. На рис. 1 приведены зависимости изомерных отношений выходов $\eta(E_{\gamma \max}) = Y_m / (Y_m + Y_g)$ реакции $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,8}\text{In}$ от максимальной энергии тормозного излучения.

Погрешности экспериментальных значений $\eta(E_{\gamma \max})$ для каждой максимальной энергии тормозного излучения $E_{\gamma \max}$ обусловлены статистикой отсчётов в фотопиках и погрешностями в определении эффективности детектора. Учитывая значительное увеличение статистических погрешностей, измерение выходов реакции в непосредственной близости к порогу фотоядерных реакций не проводили.

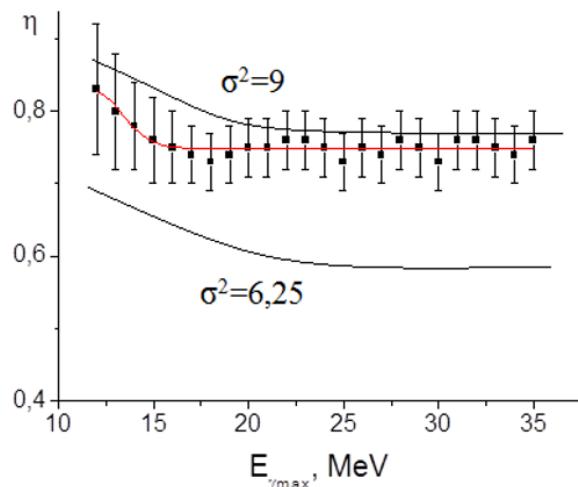


Рис. 1. Энергетическая зависимость экспериментальных (точки) и рассчитанных (сплошные линии) значений изомерного отношения выходов $\eta(E_{\gamma \max}) = Y_m / (Y_m + Y_g)$ реакции $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,8}\text{In}$

Fig. 1. Energy dependence of experimental (points) and calculated (solid lines) values of the isomeric yield ratio $\eta(E_{\gamma \max}) = Y_m / (Y_m + Y_g)$ for the reaction $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,8}\text{In}$.

Как видно из рисунка 1, с увеличением энергии значение $\eta(E_{\gamma \max})$ уменьшается и выходит на плато. Энергетическая зависимость изомерных отношений выходов $\eta(E_{\gamma \max})$ реакции $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,8}\text{In}$ в области энергий 26–35 МэВ получена впервые. Наши результаты для фотоядерной реакции $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m,8}\text{In}$ в области энергий 18–30 МэВ согласуются, в пределах погрешности измерений, с данными работ [14–17] (см. таблицу 2).

Таблица 2. Изомерные отношения выходов η реакции типа (γ, n) на ядре ^{113}In

Table 2. Isomeric yield ratios η of (γ, n) -type reactions on the ^{113}In nucleus

$E_{\gamma \max}$, MeV	η	Источник
18	$0,72 \pm 0,04$	[14]
20	$0,72 \pm 0,04$	Настоящая работа
30	$0,8 \pm 0,1$	[15]
30	$0,69 \pm 0,06$	[16]
35	$0,75 \pm 0,04$	Настоящая работа
43	$0,75 \pm 0,03$	[17]
50	$0,805 \pm 0,006$	[18]
60	$0,823 \pm 0,006$	[18]
70	$0,840 \pm 0,006$	[18]

Значения изомерных отношений выходов, полученных в работе [18] немного выше по сравнению с данными других работ. Возможно, при высоких энергиях изомерное отношение увеличивается. Один из возможных механизмов, приводящий к увеличению значений изомерных отношений для исследуемых ядер является вклад прямых процессов, доля которых в области выше гигантского резонанса увеличивается. Для получения абсолютных значений

сечений реакции использовали метод сравнения выходов и сечений исследуемой и мониторной реакции [20]. В качестве мониторной реакции использовалась реакция $^{115}\text{In}(\gamma, \text{n})^{114}\text{In}$ функция возбуждения которой хорошо изучена. Для мониторной реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \text{n})^{114}\text{In}$ использовали наиболее современные данные, полученные в измерениях на пучке квазимохроматических фотонов из работы [21]. Полученные значения изомерных отношений выходов η реакции $^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m, g}\text{In}$ пересчитаны на сечение соответствующих реакций методом разности фотонов. Экспериментальная зависимость сечений реакции $^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}$ от граничной энергии тормозных квантов аппроксимировалась функцией Лоренца. В таблице 3 приведены параметры аппроксимации и интегральные сечения реакции, погрешности которых оценены исходя из статистики зарегистрированных отчетов.

Таблица 3. Сечение реакции $^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}$

Table 3. Reaction cross section for $^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}$

Реакция	E_m , МэВ	Γ , МэВ	m , мб	$\sigma_{int}(25\text{ MeV})^*$ MeV · mb	Источник
$^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}$	$15,48 \pm 0,04$	$4,2 \pm 0,2$	203 ± 9	1315	Настоящая работа
$^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}^*$	$15,77 \pm 0,05$	$4,1 \pm 0,2$	205	1454	Настоящая работа
$^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112g}\text{In}^*$	$15,85 \pm 0,05$	$4,1 \pm 0,2$	59	454	Настоящая работа
$^{113}\text{In}(\gamma, \text{n})^{112m}\text{In}$	$15,67 \pm 0,05$	$4,7 \pm 0,3$	214 ± 10	1595	[19]
$^{115}\text{In}(\gamma, \text{n})^{114}\text{In}$	15,29	4,0	265	1470	[22]

Примечание. *Расчет сечений проводился по программы TALYS-1.6.

Для оценки и сравнения экспериментальных результатов нами проведен расчет сечения реакции с помощью программного пакета TALYS-1.6 [23]. Ввиду того, что толщина вольфрамовой мишени-конвертора была 2 мм, что существенно меньше радиационной длины для вольфрама, которая составляет около 4,3 мм, в качестве распределения γ -квантов по энергии – $W(E_\gamma, E_m)$ использовался спектр Шиффа [24,25]. В таблице 3 приведены результаты теоретических расчетов. Как видно из таблицы 3, значение сечения в максимуме m и ширина распределения на половине его высоты Γ во всех работах в пределах погрешности измерений согласуются между собой. Приведенные данные в табл. 3 по сечению реакций позволяют получить оценку изомерного отношения сечения $r = \sigma_m / \sigma_{tot}$ и интегральных сечений реакций, которое составляет при $E_\gamma=15$ МэВ соответственно: $r=0,77 \pm 0,02$ и $g=0,89 \pm 0,10$. Энергетическое положение максимума сечения реакции $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$ в пределах погрешности совпадает с энергией гигантского дипольного резонанса ^{113}In , определяемой по эмпирическому соотношению $E_m=75 \cdot A^{-1/3}$, которое равно 15,5 МэВ. Это значение в области ошибок совпадает с экспериментальными результатами, полученными в настоящей работе и с данными других работ, приведенных в таблице 3. Результаты по энергетической зависимости сечений реакций $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112}\text{In}$, полученные экспериментально, и результаты теоретических расчетов сечений возбуждения реакций $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112}\text{In}$, приведённые на рис. 2 и 3 показывают, что сечения реакций имеют одногорбую форму.

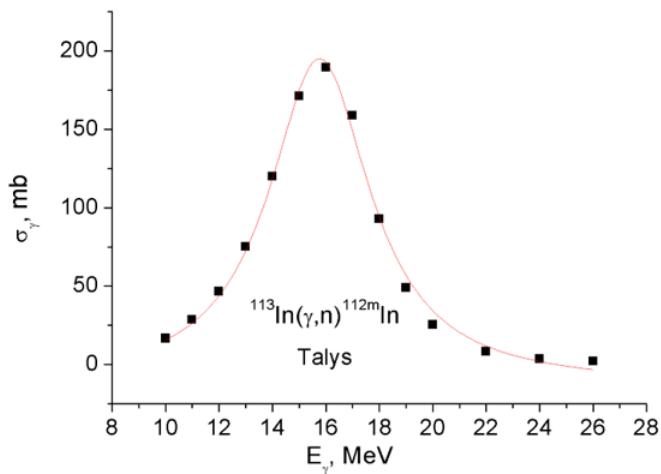


Рис. 2. Зависимость сечений реакций $^{113}\text{In}(\gamma,\text{n})^{112m}\text{In}$ от энергии гамма-квантов. Сечения реакций вычислены с помощью пакета программ TALYS-1.6

Fig. 2. Energy dependence of the cross sections for the reaction $^{113}\text{In}(\gamma,\text{n})^{112m}\text{In}$. The reaction cross sections were calculated using the TALYS-1.6 software package.

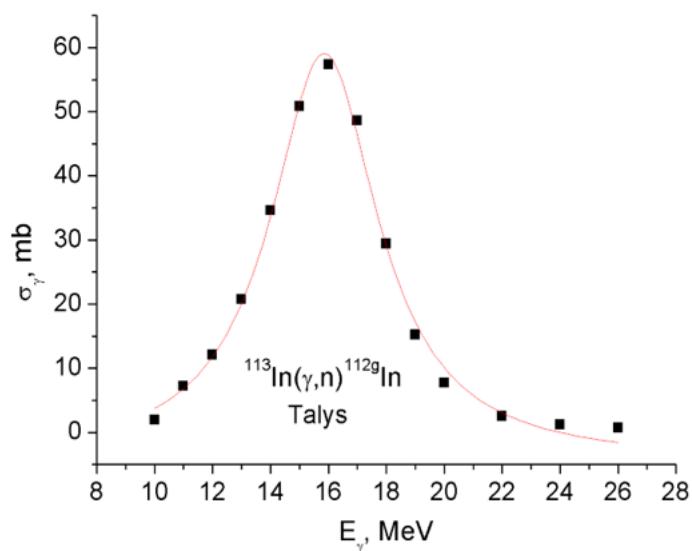


Рис. 3. Рис. 3. Зависимость сечений реакций $^{113}\text{In}(\gamma,\text{n})^{112g}\text{In}$ от энергии гамма-квантов. Сечения реакций вычислены с помощью пакета программ TALYS-1.6

Fig. 3. Energy dependence of the cross sections for the reaction $^{113}\text{In}(\gamma,\text{n})^{112g}\text{In}$. The reaction cross sections were calculated using the TALYS-1.6 software package.

Как известно, деформированные ядра имеют двугорбую форму [26]. Но в данном случае этот эффект не наблюдается. Это может быть связано с наличием небольшой деформации ядер. Параметр деформации для ^{113}In равен $\beta = +0.111 \pm 0.011$.

Полученные экспериментальные изомерные отношения выходов для реакции (γ,n) сравниваются с результатами расчетов, выполненных нами в рамках статистической теории ферми-газа [27]. Общая схема протекания реакции предполагается такой же, как в работе [27], а именно, вначале происходит поглощение дипольного γ -кванта на ядре с образованием составного ядра, затем происходит испарение нейтрона с образованием возбужденного состояния конечного ядра. Возбуждение дочернего ядра снимается каскадным испусканием γ -квантов с образованием в итоге основного или изомерного состояния конечного ядра. Плотность

ядерных уровней рассчитывалась по формуле Бета-Блоха [7], спиновая часть которой имеет вид

$$\rho(J) = (2J+1) \exp\left[-\frac{(J+\frac{1}{2})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

Улучшить количественное согласие расчетов с экспериментом удалось при фиксации параметра спинового ограничения δ . При этом удовлетворительное согласие достигается при $\sigma = 3,10 \hbar$

По правилам сумм для электрических дипольных переходов в атомных ядрах полная интегрального сечения фотопоглощения:

$$\sigma_0 = \int_{E_1}^{\sigma_{\text{abs}}} dE = 60 \frac{NZ}{A} \text{ MeV} \cdot \text{mb} \quad (2)$$

Отношение парциального интегрального сечения к общему интегральному сечению поглощений равно:

$$\frac{\sigma_{\text{int}}}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{\text{int}}}{\int \sigma_E^{\text{abs}} dE} = \frac{\sigma_{\text{int}}}{60 \frac{NZ}{A} \text{ MeV} \cdot \text{mb}} \quad (3)$$

В данном случае это отношение составляет 78%. Это значение наименьшее по двум причинам: во-первых, вклад в полное сечение фотопоглощения могут дать реакции типа (γ,p) ; (γ,np) ; $(\gamma,2n)$, которые составляют остальную долю вклада. Во-вторых, причина связана с использованием для сечения мониторной реакции данных, полученных в экспериментах на квазимонохроматических фотонах. Как показано в редукционной обработке выходов фотонейтронных реакций в работе [28], эти эксперименты дают значения сечений, заниженные на 10–20%.

Заключение

В работе экспериментально и теоретически исследовано возбуждение изомерных состояний с спином и четностью 4+ в фотонейтронной реакции (γ,n) на ядре ^{113}In . Методом наведённой активности получены энергетические зависимости сечения реакции и изомерного отношения выходов в диапазоне энергий 14–35 МэВ с шагом 1 МэВ. Экспериментальные данные и теоретические расчеты сечений возбуждения реакций $^{113}\text{In}(\gamma,n)^{112}\text{In}$ показали, что, несмотря на деформирование ядра, сечение реакций имеет одногорбую форму. Это может быть связано наличием небольшой деформации ядра ^{113}In , параметры деформации которого равны $\beta=+0.111 \pm 0.011$. Экспериментальные результаты сопоставлены с расчетами, выполненными с использованием программного пакета TALYS-1.6. Показано, что учет различных механизмов ядерных реакций — прямых, предравновесных и равновесных процессов — позволяет удовлетворительно описать наблюдаемые энергетические зависимости. Использование стандартных моделей ядерной структуры и плотности уровней в коде TALYS обеспечивает в целом хорошее согласие теоретических расчетов с экспериментальными данными. Полученные результаты расширяют представления о механизмах образования изомерных состояний в фотоядерных реакциях и могут быть использованы для уточнения параметров теоретических моделей ядерных реакций.

Вклад авторов.

Концептуализация, С.П.; методология, С.П.; программное обеспечение, С.П.; валидация, С.П.; формальный анализ, С.П.; исследование, С.П.; ресурсы, С.П.; кураторство данных, С.П.; написание оригинального текста, С.П.; написание и редактирование, С.П.; визуализация, С.П.; руководство, С.П.; администрирование проекта, С.П.; привлечение финансирования, С.П. Все авторы ознакомлены с опубликованной версией рукописи и согласны с ней.

Authors' contribution.

Conceptualization, S.P.; methodology, S.P.; software, S.P.; validation, S.P.; formal analysis, S.P.; investigation, S.P.; resources, S.P.; data curation, S.P.; writing—original draft preparation, S.P.; writing—review and editing, S.P.; visualization, S.P.; supervision, S.P.; project administration, S.P.; funding acquisition, S.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Источник финансирования.

Данное исследование не получало внешнего финансирования.

Funding source.

This study did not receive external funding.

Соответствие принципам этики.

Настоящее исследование не включало экспериментов с участием людей или животных и не требовало одобрения институционального этического комитета. Все экспериментальные работы выполнены в соответствии с общепринятыми нормами научной этики.

Ethics approval.

The present study did not include experiments involving humans or animals and did not require the approval of an institutional ethics committee. All experimental work was carried out in accordance with generally accepted standards of scientific ethics.

Информированное согласие на публикацию.

Настоящее исследование не включало участие людей, поэтому получение информированного согласия на публикацию не требовалось.

Consent for publication.

The present study did not include human participation, so obtaining informed consent for publication was not required.

Заявление о доступности данных

Данные, подтверждающие выводы данного исследования, доступны у автора по обоснованному запросу. Публично доступные наборы данных в ходе данного исследования не создавались.

Data Availability Statement

The data confirming the conclusions of this study are available from the author upon reasonable request. Publicly available datasets were not created during this study.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам экспериментальной установки за техническую поддержку при проведении измерений, а также коллегам за полезные обсуждения и консультации в ходе выполнения работы.

Acknowledgments

The author expresses his gratitude to the staff of the experimental facility for technical support during measurements, as well as to colleagues for useful discussions and consultations during the work.

Сокращения

GDR	гигантский дипольный резонанс
HPGe	германиевый детектор высокой чистоты
TALYS	программный пакет для расчёта ядерных реакций
MeV	мегаэлектрон-вольт
mb	миллибарн
GDR	гигантский дипольный резонанс

Литература

- [1] Mukhin K.N. Experimental nuclear physics. – Saint Petersburg: Lan Publishing House, 2009. – 383 p. In Russian: Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. - Санкт-Петербург: изд. «Лань», 2009. - 383 с.
- [2] Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Yudin N.P. Particles and atomic nuclei. – Moscow: Knizhny Dom “Librokom”, 2013. In Russian: Ишханов Б. С., Капитонов И. М., Юдин Н. П. Частицы и атомные ядра. – М.: Книжный дом «Либроком», 2013.
- [3] Photonuclear reactions. Introduction [Electronic resource] In Russian: Фотоядерные реакции. Введение [Electronic resource]. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/phnuc/phnuc0.html>.

- [4] Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M. Photonuclear reactions. Current status of experimental data. Textbook. – Moscow: Universitetskaya Kniga, 2008. – 304 p. In Russian: Варламов В.В., Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Фотоядерные реакции. Современный статус экспериментальных данных. Учебное пособие. - М.: Университетская книга, 2008. -304 c
- [5] Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M. Interaction of electromagnetic radiation with atomic nuclei. Textbook. – Moscow: Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 1976. – 189 p. In Russian: Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. Учебное пособие. – М.: НИИЯФ МГУ,1976. -189 c.
- [6] Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M. Giant dipole resonance in atomic nuclei. Textbook. – Moscow: Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 2008. In Russian: Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Гигантский дипольный резонанс в атомных ядрах. Учебное пособие. - М.: НИИЯФ МГУ,2008.
- [7] Mazur V.M. Excitation of nuclear isomeric states in photoneutron reactions in the giant dipole resonance region. Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, 2000, 31, No. 2, 1043–1429. In Russian: Мазур В.М. Возбуждение изомерных состояний ядер в фотонейтронных реакциях в области гигантского дипольного резонанса. ЭЧАЯ, 2000, 31, No. 2,1043–429.
- [8] Palvanov S.R., Razhabov O. Isomeric yield ratios of photonuclear reactions at $E\gamma\max$ 25 and 30 MeV. Atomic Energy. 1999, 87, No.1, 533-536.
- [9] Palvanov S.R. Excitation of Isomeric States in the (γ , n), (n, 2n), and (γ , 2n) Reactions on the ^{113}In Nucleus. Physics of Atomic Nuclei, 2014, 77, No. 1, 35-38.
- [10] Lederer C. S. V. Table of Isotopes. - New York: New York: Wiley Sons. Inc., 2000.
- [11] Firestone R.B., Shirley V.S. Table of Isotopes. 8-th ed. // New York: J. Wiley and Sons, 1996.
- [12] <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- [13] Vanska R., Rieppo R. The experimental isomeric cross-section in the nuclear activation technique. Nucl. Instrum. Meth., 1981,179, 525-532.
- [14] Zheltonozhsky V.A. et al. Cross section of metastable ground-state population in the photoneutron decay of the E1 giant resonance for ^{110}Pd , ^{112}Cd , and ^{113}In nuclei // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics. – 2008. – Vol. 72, No. 11. – p. 1634. In Russian: Желтоножский В.А. и др. Поперечное сечение метастабильной государственной популяции в распаде фотонетрона гигантского резонанса E1 для ^{110}Pd , ^{112}Cd и ^{113}In ядер. //Известия РАН. Сер. физ. – 2008. – vol.72, No.11. – pp.1634
- [15] Carver J.H., Coote G.E., Sherwood T.R. Isomeric (γ , n) cross section ratios and the spin dependence of the nuclear level density //Nucl. Phys. – 1962. -No.37. - pp.449-453.
- [16] Demekhina N.A., Danagulyan A.S., Karapetyan G.S. Analysis of isomeric ratios in (, n) and (, p) reactions in the giant resonance energy region // Physics of Atomic Nuclei. – 2002. – Vol. 65, No. 2. – pp. 390–395. In Russian: Демехина Н.А., Данагулян А.С., Карапетян Г.С. Анализ изомерных отношений в (γ , n) и (γ , p) реакциях в области энергий гигантского резонанса // Ядерная физика. - 2002. - Vol. 65, № 2. - pp. 390–395.
- [17] Kolev D., Dobreva E., Nenov N., Todorov V. A convenient method for the experimental determination of yields and isomeric ratios in photonuclear reactions measured by the activation method // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 1995. – No. 356. – pp. 390–396. In Russian: Колов Д., Добрева Е., Ненов Н., Тодоров В. Удобный метод экспериментального определения выходов и изомерных соотношений в фотоядерных реакциях, измеренных методом активации. //Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A. -1995. - No. 356. - pp. 390-396.
- [18] Rahman M.S. et al. Measurement of isomeric-yield ratios of ^{109m}gPd and ^{115m}gCd with 50-, 60-, and 70-MeV bremsstrahlung // Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms. - 2012. - Vol. 276. - pp. 44–50.
- [19] Mazur V.M., Bigan Z.M., Symochko D.M. Excitation of ^{109}Pd and ^{112}In nuclear isomers in (γ , n) reactions // Phys. Part. Nucl. Lett. - 2008. - Vol. 5, № 4. - pp. 374–378.
- [20] Gangrsky Yu.P., Tonchev A.P., Balabanov N.P. Excitation of isomeric states in photonuclear reactions // Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei. – Dubna: Joint Institute for Nuclear Research, 1996. – Vol. 27, No. 4. – pp. 1043–1098. In Russian: Гангрский Ю.П., Тончев А.П., Балабанов Н.П. Возбуждение изомерных состояний в фотоядерных реакциях // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – Дубна: ОИЯИ,1996. - Vol. 27, № 4.- С.1043-1098
- [21] Filatenkov A.A., Chuvaev S.V., Aksenov V.N., Jakovlev V.A. Systematic Measurement of Activation Cross Sections at Neutron Energies from 13.4 to 14.9 MeV. - IAEA Report INDC(CCP)-402. – Vienna: IAEA, 2000. - pp. 1-40.
- [22] Dietrich, S.S.; Berman, B.L. Atlas of photoneutron cross sections obtained with monoenergetic photons // Atomic Data and Nuclear Data Tables - 1988. – Vol.38, No. 2. - pp. 199-338.
- [23] www.talys.eu.

- [24] Sambell R.H., Spicer B.M. The photoneutron cross section of ^{45}Sc // Nucl.Phys. -1973. - Vol. A205. - pp.139-142.
- [25] Schiff L.I. Energy – Angle Distribution of Thin Target Bremsstrahlung // Phys. Rev. -1951. - Vol. 83, No 2. - pp. 252-253.
- [26] Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M. Giant dipole resonance in atomic nuclei. Textbook. – Moscow: Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 2008. In Russian: Ишханов Б.С., Капитонов И.М. Гигантский дипольный резонанс в атомных ядрах. Учебное пособие. - М.: НИИЯФ МГУ,2008
- [27] Bigan Z.M., Mazur V.M., Torich Z.Z. Isomeric ratios in (γ, n) reactions on heavy nuclei. Institute for Nuclear Research, Academy of Sciences, Preprint KINR – 84-10, Kyiv, 1984. – 16 p. In Russian: Биган З.М., Мазур В.М., Торич З.З. Изомерные отношения в реакциях (γ, n) на тяжелых ядрах.ИЯФ АН, Препринт КИЯИ – 84-10, - Киев, 1984. - 16 с.
- [28] Varlamov V.V., Davydov A.I. Photonuclear experiments: from bremsstrahlung radiation to inverse Compton scattering photons. Moscow University Physics Bulletin. Series 3. Physics. Astronomy. 79(2), 2420201(1-8) (2024). In Russian: Варламов В.В., Давыдов А.И. Фотоядерные эксперименты: от тормозного γ -излучения до фотонов обратного комптоновского рассеяния. ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 79(2), 2420201(1-8) (2024).

Отказ от ответственности/Примечание издателя: Заявления, мнения и данные, содержащиеся во всех публикациях, принадлежат исключительно отдельным лицам. Авторы и участники, а Журнал и редакторы. Журнал и редакторы не несут ответственности за любой ущерб, нанесенный людям или имущество, возникшее в результате любых идей, методов, инструкций или продуктов, упомянутых в контенте.

Disclaimer of liability/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications belong exclusively to individuals. The authors and participants, and the Journal and the editors. The journal and the editors are not responsible for any damage caused to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products mentioned in the content.