



## НОВЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ <sup>52</sup>Cr И <sup>68</sup>Zn И3 ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Варламов В.В., Давыдов А.И., Мостаков И.А., Орлин В.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова, НИИЯФ имени Д.В. Скобельцына, Физический факультет





Большинство данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций получено в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения нейтронов по множественности и на пучках тормозного –излучения, с помощью метода использования специальных поправок, рассчитанных по статистической теории.



В первом методе непосредственно получаются сечения реакций (γ, 1n), (γ, 2n), для некоторых (γ, 3n), с помощью которых затем получаются сечения полной фотонейтронной реакции

 $(\gamma, Sn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + ...$ 

и сечение выхода нейтронов

 $(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + ...$ 

Во втором методе – непосредственно получается

 $(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + ...,$ 

Из которого с помощью поправок по статистической теории

(ү, 1n), (ү, 2n) и(ү, 3n),





## Систематические расхождения экспериментальных данных, полученных первым методом

Главная проблема – существенные систематические расхождения : для 19 ядер, исследованных в обеих лабораториях: в то время как сечения выхода нейтронов (ү, хn) = (ү, 1n) + 2(ү, 2n) + 3(ү, 3n) + ...) близки, сечения реакций (ү, 1n) имеют заметно большие величины в Сакле, тогда как (ү, 2n) – в Ливерморе.



частиц. Ядерно-физические технологии»





## Объективные физические критерии достоверности



7/5/2025

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных





## Признаки недостоверности данных



LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии» 1 - 6 июля, Санкт-Петербург





### Экспериментально-теоретический метод оценки

Предложен новый экспериментально-теоретический метод оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций, удовлетворяющих физическим критериям достоверности:

только экспериментальное сечение реакции полного выхода нейтронов σ<sup>эксп</sup>(γ, xn) = σ<sup>эксп</sup>(γ, 1n) + 2σ<sup>эксп</sup>(γ, 2n) + 3σ<sup>эксп</sup>(γ, 3n)
+ ... априори свободное от ограничений метода разделения нейтронов по множественности, поскольку включает в себя вклады нейтронов из всех парциальных реакций, используется как исходное;

для определения вкладов в сечение выхода нейтронов σ<sup>эксп</sup>(γ, xn) сечений парциальных реакций σ<sup>οцен</sup>(γ, 1n), σ<sup>οцен</sup>(γ, 2n), σ<sup>οцен</sup>(γ, 3n) используются переходные функции множественности - отношения F<sup>теор</sup>1,2,3,..., рассчитанные в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций.

Суть экспериментально-теоретического метода оценки сечений парциальных реакций: соотношение между ними соответствует представлениям модели, а соответствующая сумма сечений парциальных реакций б<sup>оцен</sup>(ү, xn) равна сечению выхода нейтронов б<sup>эксп</sup>(ү, xn), практически не зависящему от проблем экспериментального разделения нейтронов по множественности.





Оцененные (достоверные) и экспериментальные (недостоверные) сечения парциальных реакций существенно различаются.



LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии» 1 - 6 июля, Санкт-Петербург





Выполненные исследования свидетельствуют о том, что существенные (во многих случаях до 100% величины и большие) расхождения сечений парциальных реакций, определенных в разных экспериментах на пучках аннигиляционных фотонов, обусловлены разными систематическими погрешностями использованного непрямого метода разделения нейтронов по множественности.

Установлено, что причинами таких погрешностей являются:

- близость энергий нейтронов из разных парциальных реакций, затрудняющая идентификацию множественности нейтронов и их принадлежности реакциям (ү,1n) и (ү,2n);
- отсутствие учета вклада реакции (ү,1n1p), которая по своим параметрам конкурирует не с реакцией (ү,1n) с той же множественностью 1, а с реакцией (ү,2n) с множественностью 2, затрудняющее идентификацию принадлежности нейтрона реакциям (ү,1n1p) и (ү,2n);
- некоторые технические проблемы (ошибки в нормировке выходов Ye- на пучке электронов и Ye+ на пучке позитронов, потеря части нейтронов из реакции (γ,1n)).

В этой связи актуальной стала проблема достоверности данных, полученных кардинально иным способом в экспериментах на пучках тормозного ү–излучения.





LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии» 1 - 6 июля, Санкт-Петербург





10

## Новые (неопубликованные ранее) сечения фотонейтронных реакций, получены для нескольких ядер:

51V, 52Cr, 59Co, 58,60Ni:  $σ(\gamma,2n) = σ^{ony6n}(\gamma,sn) - σ^{ony6n}(\gamma,1n);$  $σ(\gamma,xn) = σ^{ony6n}(\gamma,sn) + σ(\gamma,2n);$ 

 $90Zr, ^{115}In:$   $σ(\gamma, 2n) = σ^{ony6n}(\gamma, xn) - σ^{ony6n}(\gamma, sn);$  $σ(\gamma, 1n) = σ^{ony6n}(\gamma, sn) - σ(\gamma, 2n);$ 

 $\sigma(\gamma,1n) = \sigma^{\text{опубл}}(\gamma,\text{sn}) - \sigma^{\text{опубл}}(\gamma,2n);$  $\sigma(\gamma,\text{xn}) = \sigma^{\text{опубл}}(\gamma,\text{sn}) + \sigma(\gamma,2n);$ 

#### <sup>165</sup>Ho: $\sigma(\gamma, sn) = \sigma^{ony6n}(\gamma, xn) - \sigma^{ony6n}(\gamma, 2n);$ $\sigma(\gamma, 1n) = \sigma^{ony6n}(\gamma, xn) - 2\sigma^{ony6n}(\gamma, 2n).$

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» 1 - 6 июля, Санкт-Петербург





## Способы получения новых неопубликованных ранее данных

Новые данные по сечениям реакций на основе комбинаций опубликованных сечений

 $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$  и  $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ или  $\sigma(\gamma, sn)$  и  $\sigma(\gamma, 1n)$  и/или  $\sigma(\gamma, sn)$  и  $\sigma(\gamma, 2n)$ 

Такие неопубликованные новые данные для реакций (ү, 1n), (ү, 2n) и/или (ү, sn) и (ү, xn) получены для ядер <sup>51</sup>V, <sup>52</sup>Cr, <sup>59</sup>Co, <sup>58,60</sup>Ni.

Достоверность применения обсуждаемых поправок исследована с применением отношений экспериментально-теоретического метода  $Fi = \sigma(\gamma, in) / \sigma(\gamma, xn),$ получены оцененные сечений реакций  $\sigma^{oueh}(\gamma, in) = F_i^{Teop} \cdot \sigma^{skcn}(\gamma, xn).$ 

Проведено сравнение оцененных таким образом данных с результатами экспериментов на пучках аннигиляционных фотонов для ядер <sup>51</sup>V, <sup>59</sup>Co, <sup>58,60</sup>Ni.

Для ядра <sup>52</sup>Cr впервые получены новые данные для реакций <sup>52</sup>Cr(γ, xn) и <sup>52</sup>Cr(γ, 2n)<sup>50</sup>Cr – в аннигиляционных экспериментах отсутствуют.

> LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»

1 - 6 июля, Санкт-Петербург





а

#### Новые данные,

о сечении парциальной реакции  $\sigma(\gamma, 2n)$  и сечении выхода нейтронов  $\sigma(\gamma, xn)$ , оценка с помощью экспериментально-теоретического метода.



LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии»

30





#### Новые данные,

о сечении парциальной реакции σ(γ, 2n) и сечении выхода нейтронов σ(γ, xn), оценка с помощью экспериментально-теоретического метода.



LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии»



#### Новые неопубликованные ранее данные



В тех случаях, когда единственным публикованным сечением является сечение выхода нейтронов

 $σ^{3\kappa cn}(\gamma, xn) = σ^{3\kappa cn}(\gamma, 1n) + 2σ^{3\kappa cn}(\gamma, 2n)$ 

новые сечения парциальных реакций могут быть получены с помощью экспериментально-теоретического метода

 $σ_{\text{oueh}}(\gamma, 2n) = F_2^{\text{teop}} \bullet \sigma_{\text{эксп}}(\gamma, xn).$ 

Получены новые неопубликованные (не исследованные и на пучках квазимоноэнергетических фотонов) сечения парциальных реакций, соответствующие физическим критериям достоверности.

<sup>68</sup>Zn(ү, 1n)<sup>67</sup>Zn и

 $^{68}$ Zn( $\gamma$ , 2n) $^{66}$ Zn, а также -  $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$ 

1755

2025



#### Новые неопубликованные ранее данные



2025

1755

частиц. Ядерно-физические технологии»





После определения естественных вкладов сечений реакций σ(γ,2n) = σ(γ,xn) - σ(γ,sn) и σ(γ,1n) = σ(γ,sn) - σ(γ,2n) с помощью экспериментально-теоретического метода (F<sub>i</sub><sup>эксп</sup> и F<sub>i</sub><sup>теор</sup>) было установлено, что к достоверности данных экспериментов этого типа также имеются серьезные претензии.



Существенные расхождения между  $F_i^{3KCT}$  и  $F_i^{Teop}$ :

как правило, F<sub>1</sub>эксп занижены, а F<sub>2</sub>эксп завышены.

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии»







LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных





Главная причина некорректности разделения выходов реакций (γ,1n) и (γ,2n) в рамках испарительной статистической модели обусловлена тем, что эта модель более-менее правильно описывает эмиссию нейтронов из составного ядра только при энергиях падающих фотонов до 10-15 МэВ.

При более высоких энергиях, т.е. в области, где собственно и происходит конкуренция парциальных реакций (ү,1n) и (ү,2n), статистические поправки на множественность становятся очень не точными, так как начинают играть большую роль процессы предравновесного распада составной системы с испусканием на равновесной стадии более чем одной быстрой частицы – двух нейтронов в реакции (ү,2n) и/или нейтрона и протона в реакции (ү,1n1p).

В полуклассических моделях фотоядерных реакций обычно не учитывается влияние изоспиновых эффектов на конкуренцию нейтронных и протонных каналов реакций, что приводит к заниженным оценкам парциальных сечений с вылетом протонов. В случаях ядер с протонными порогами ниже нейтронных, это может привести к искажению соотношения реакций (у,1n) и (у,2n).



Расхождения между экспериментальными и оцененными сечениями парциальных реакций обусловлены тем, что оба рассмотренных фактора не учитывались статистической моделью, но учтены в комбинированной модели фотоядерных реакций.

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных

частиц. Ядерно-физические технологии»





### Результаты расчетов в КМФЯР сечений реакций (ү, 1n1p) и (ү, 2n):

в относительно легких ядрах амплитуды сечений близки,

тогда как в средних и тяжелых ядрах существенно (на порядки величины) различаются.

Реакция	(γ <b>, 1n1p)</b>		(γ, 2n)	
Ядро	Емакс, МэВ	<b>О</b> <sup>макс</sup> , Мбн	<b>о</b> <sup>макс</sup> , Мбн	Е <sup>макс</sup> , МэВ
51 <b>V</b>	24.4	12.6	11.9	23.6
52 <b>Cr</b>	34.0	9.3	8.8	33.4
<sup>59</sup> Co	21.8	19.4	15.4	23.4
<sup>68</sup> Zn	25.0	6.1	19.6	43.0
<sup>80</sup> Se	26.2	2.6	45.6	19.6
90 <b>Zr</b>	28.0	2.4	14.2	24.0
<sup>181</sup> Ta	34.6	1.1	193.0	16.2

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных





#### Основные общие выводы по результатам экспериментов, в которых получено абсолютное большинство данных по сечениям фотонейтронных реакций

- установлено, что непрямой метод разделения реакций с различной множественности приводит к существенным систематическим погрешностям, делающим экспериментальные сечения реакций недостоверными;
- установлено, что сечения парциальных реакций (ү, 1n) и (ү, 2n) для ядер <sup>51</sup>V, <sup>52</sup>Cr, <sup>59</sup>Co, <sup>58,60</sup>Ni, <sup>90</sup>Zr, <sup>115</sup>In, <sup>127</sup>I, <sup>165</sup>Ho физическим критериям достоверности не удовлетворяют, в относительно легких ядрах это обусловлено отсутствием в экспериментах учета вклада двухнуклонной нейтрон-протонной реакции

(γ, 1n1p);

 большое количество данных о сечениях парциальных реакций содержатся в результатах экспериментов на пучках тормозного γ-излучения, но не опубликованы;

впервые получены сечения реакций

<sup>52</sup>Cr(γ, xn) и <sup>52</sup>Cr(γ, 2n)<sup>50</sup>Cr,

а также - <sup>68</sup>Zn(ү, 1n)<sup>67</sup>Zn, <sup>68</sup>Zn(ү, 2n)<sup>66</sup>Zn и <sup>68</sup>Zn(ү, sn).





# Спасибо за внимание!

LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025. Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ядерно-физические технологии» 1 - 6 июля, Санкт-Петербург