



**«ОСОБЕННОСТИ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ  $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ »**

**В.В.Варламов, М.А.Макаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов  
ЦДФЭ НИИЯФ МГУ**



**Особенности фоторасщепления изотопов  $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ .**

***В.В.Варламов, М.А.Макаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов***

***Центр данных фотоядерных экспериментов  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына  
МГУ имени М.В.Ломоносова***



## **В Центре данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ**

**в течение ряда лет реализуется программа оценки достоверности данных о сечениях полных и парциальных фотонейтронных реакций, прежде всего, таких как  $(\gamma, n)$ ,  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, 3n)$ , широко востребованных как в фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследованиях, так и в разнообразных приложениях:**

**различные свойства электромагнитных взаимодействий;**

**эффекты конфигурационного и изоспинового расщепления ГДР;**

**конкуренция прямых и статистических процессов;**

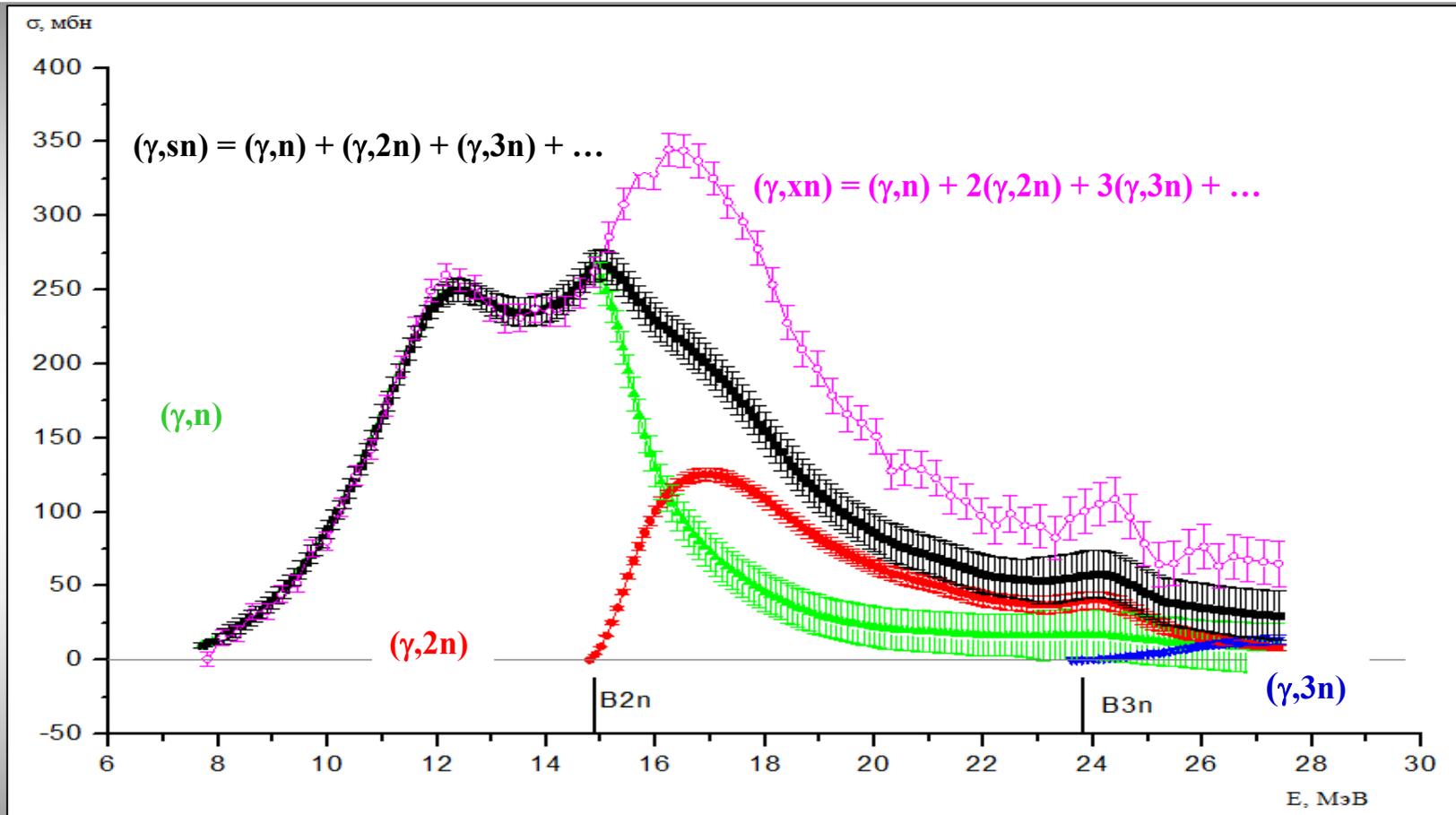
**мониторинг светимости пучков ультрарелятивистских ядер современных коллайдеров на встречных пучках;**

**астрофизические проблемы (образование р-ядер)**

**.... многие другие.**



## Основная проблема - разделение реакций с испусканием различных чисел нейтронов



Получено большое количество сечений различных реакций в экспериментах разного типа – имеются существенные (до 60 – 100 %) расхождения



# Систематика расхождений величин сечений парциальных фотонейтронных реакций ( $\gamma, n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ), полученных в Сакле и Ливерморе:

19 ядер - <sup>51</sup>V, <sup>75</sup>As, <sup>89</sup>Y, <sup>90</sup>Zr, <sup>115</sup>In, <sup>116,117,118,120,124</sup>Sn, <sup>127</sup>I, <sup>133</sup>Cs, <sup>159</sup>Tb, <sup>165</sup>Ho, <sup>181</sup>Ta, <sup>197</sup>Au, <sup>208</sup>Pb, <sup>232</sup>Th, <sup>238</sup>U

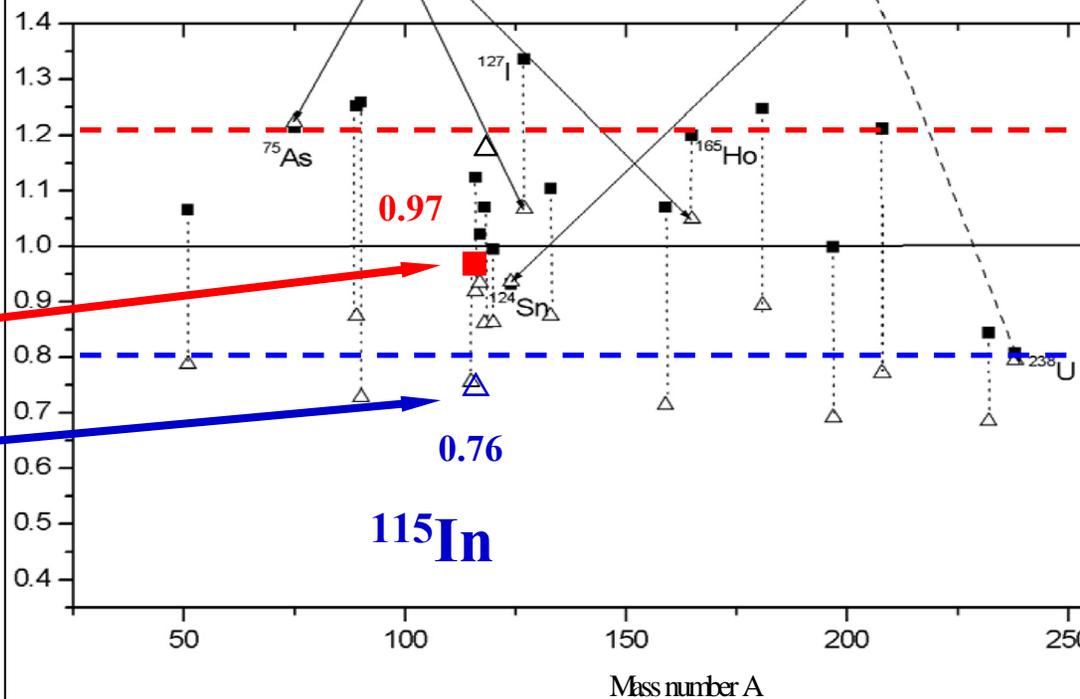
$$R^{int} = \sigma_S^{int} / \sigma_L^{int} \text{ (arb. units)}$$

“Special cases”

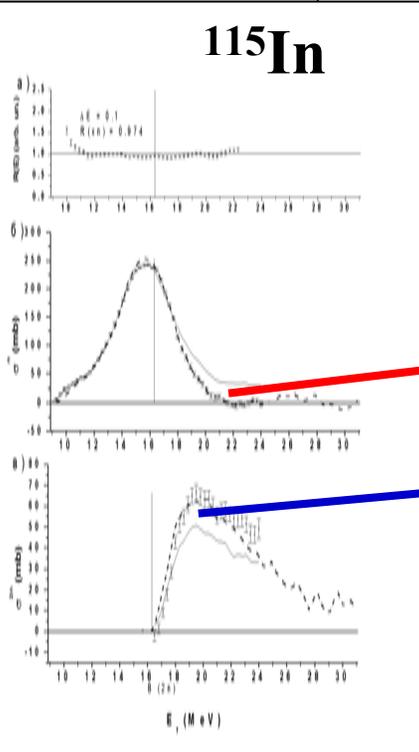
“Ideal cases”

Сечения реакций ( $\gamma, n$ ) заметно (на 20 - 30 %) больше в Сакле: квадраты ■ - в области  $R > 1$ .

Сечения реакций ( $\gamma, 2n$ ) заметно (на 15 - 30 %) больше в Ливерморе: треугольники  $\Delta$  - в области  $R < 1$ .



<sup>115</sup>In





**Столь существенные и явно систематические расхождения результатов разных экспериментов сделали весьма актуальной поиск объективных критериев достоверности данных, не зависящих от способа их получения.**

**После многочисленных поисков различных разностей, сумм, отношений и более сложных комбинаций сечений различных парциальных и полных реакций простые и наглядные критерии присутствия систематических погрешностей были найдены.**



Очень простой и прозрачный (**по определению**) смысл объективного абсолютного критерия надежности и достоверности данных.

$$\text{Функция } F_2 = \sigma(\gamma, 2n) / \sigma(\gamma, xn) = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.5$$

- ни при каких условиях  $F_2$  не может иметь значений, **больших 0.5**; превышение означает, что разделение нейтронов между сечениями реакций  $\sigma(\gamma, n)$  и  $\sigma(\gamma, 2n)$  выполнено **некорректно (недостоверно)**;
- $F_2$  отклоняется от  $\text{const} = 0.5$  при малых энергиях в связи с наличием вклада сечения реакции  $\sigma(\gamma, n)$ ;
- $F_2$  отклоняется от  $\text{const} = 0.5$  при больших энергиях ( $E > V3n$ ) в связи с появлением вклада  $3\sigma(\gamma, 3n)$ .

Дополнительными критериями достоверности данных могут служить функции

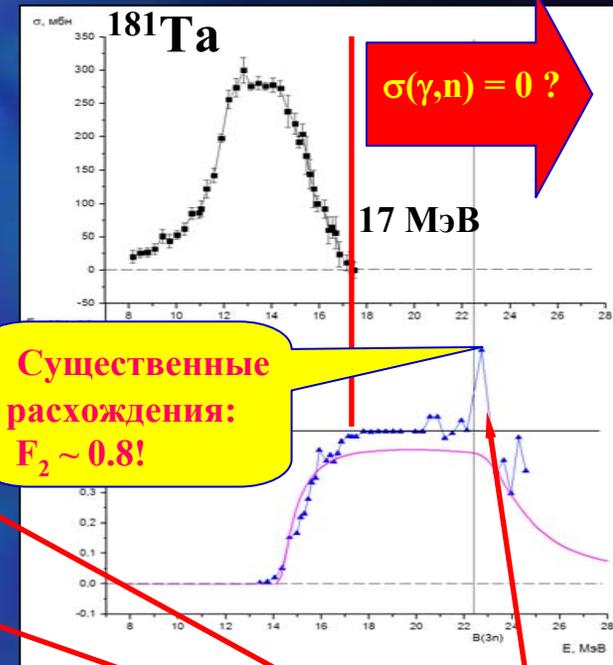
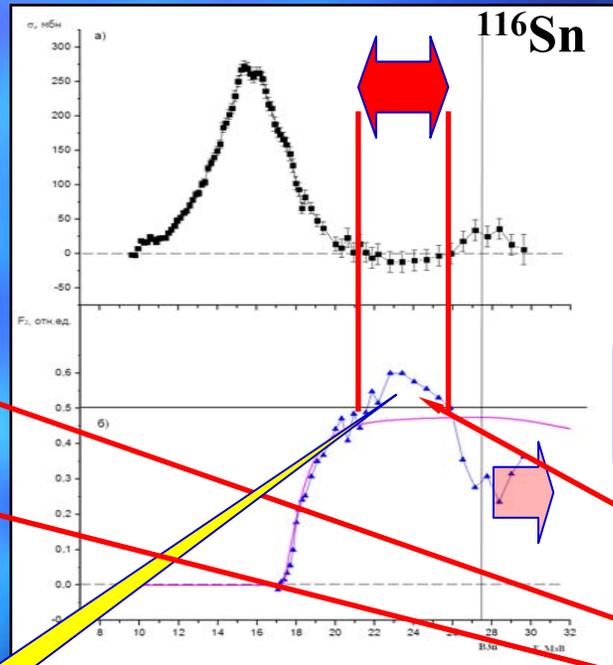
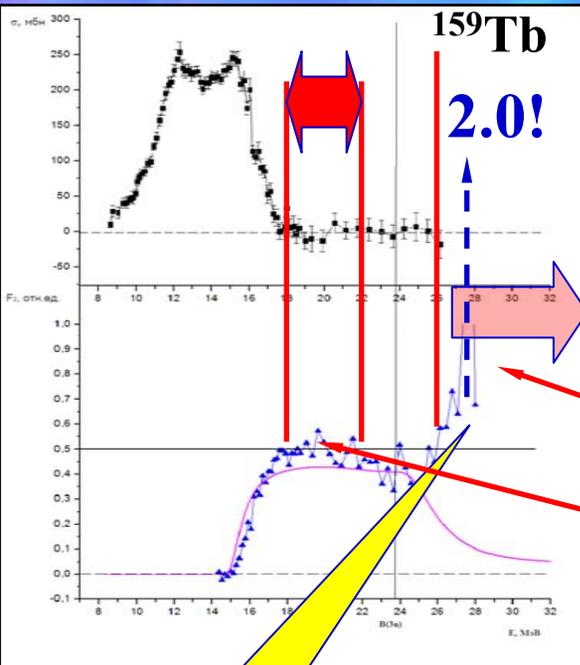
$$F_1 = \sigma(\gamma, n) / \sigma(\gamma, xn) < 1.00$$

$$F_3 = \sigma(\gamma, 3n) / \sigma(\gamma, xn) < 0.33 \text{ и т.д. и т.п.}$$



«ОСОБЕННОСТИ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ  $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ »

В.В.Варламов, М.А.Макаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов  
ЦДФЭ НИИЯФ МГУ



**Драматические расхождения:**  
 $F_2 = 1.5 - 2.0!$

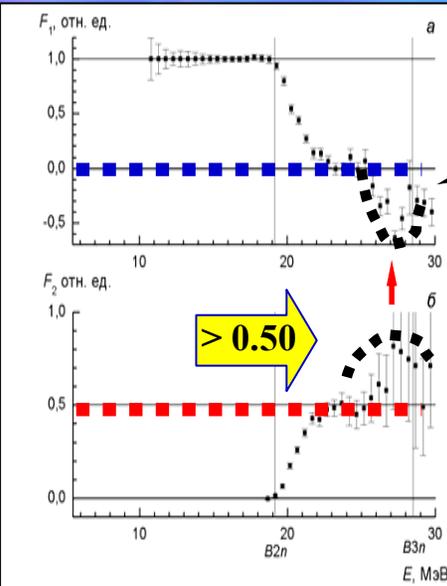
**Существенные расхождения:**  
 $F_2 > 0.6!$

Физически недостоверные отрицательные значения сечений реакции  $(\gamma, n)$  коррелируют с  $F_2 > 0.5!$

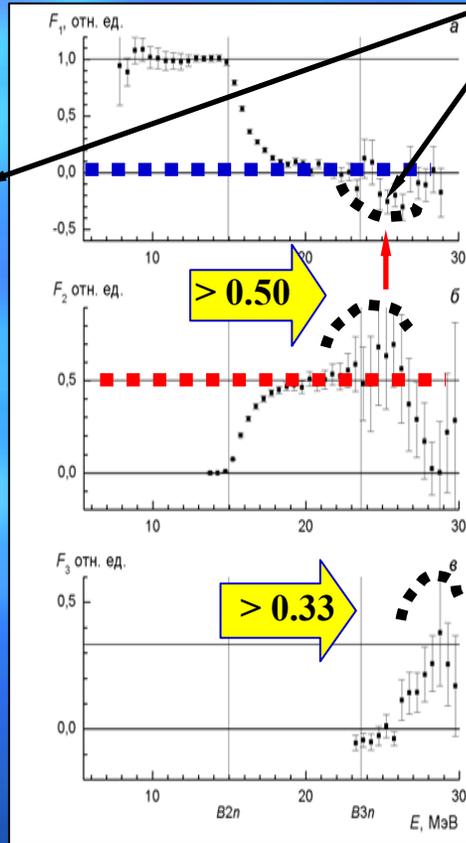
$$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, xn)} = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.5$$



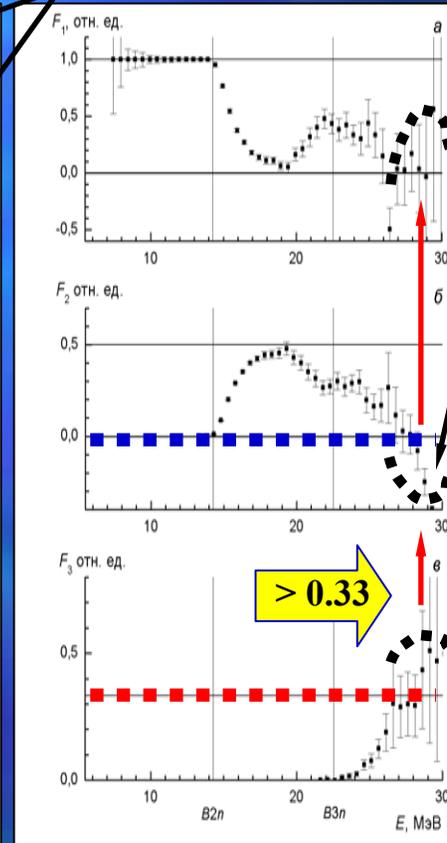
Физически запрещенные отрицательные сечения



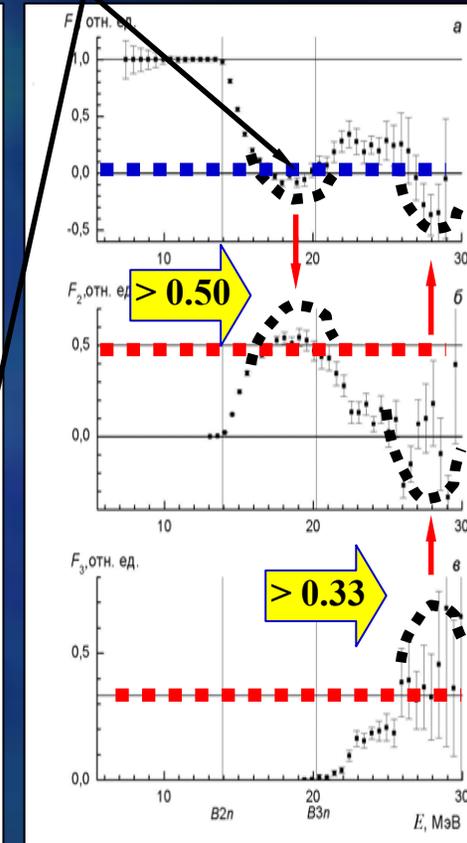
$^{91}\text{Zr}$



$^{94}\text{Zr}$

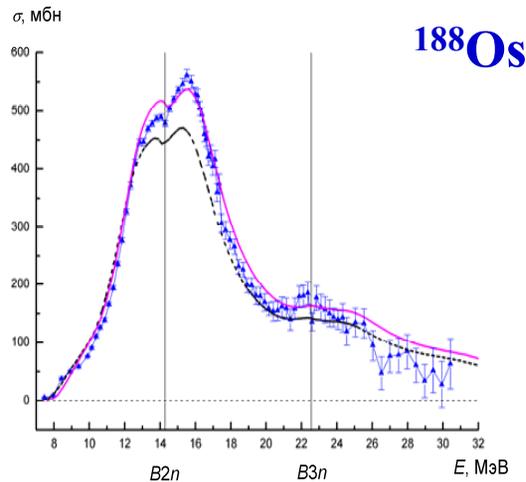
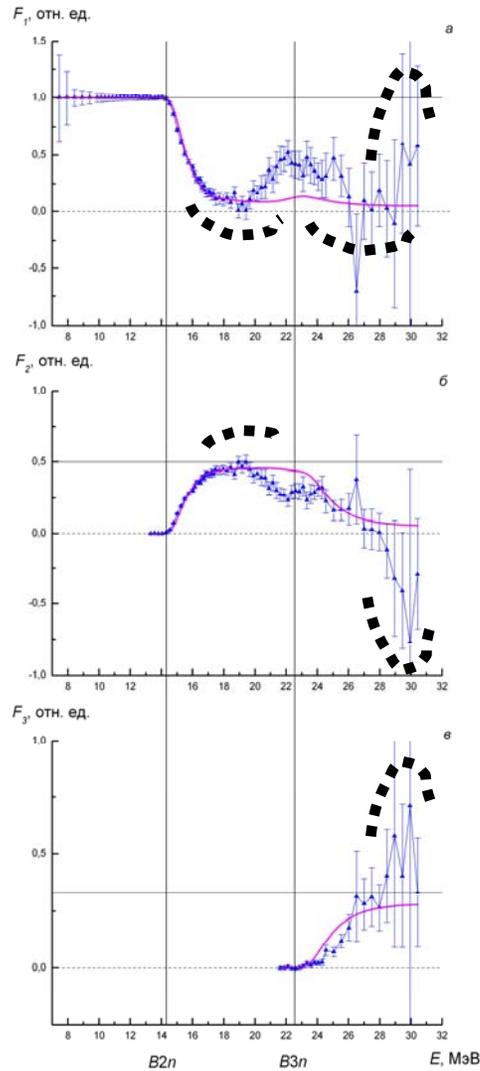


$^{188}\text{Os}$



$^{189}\text{Os}$

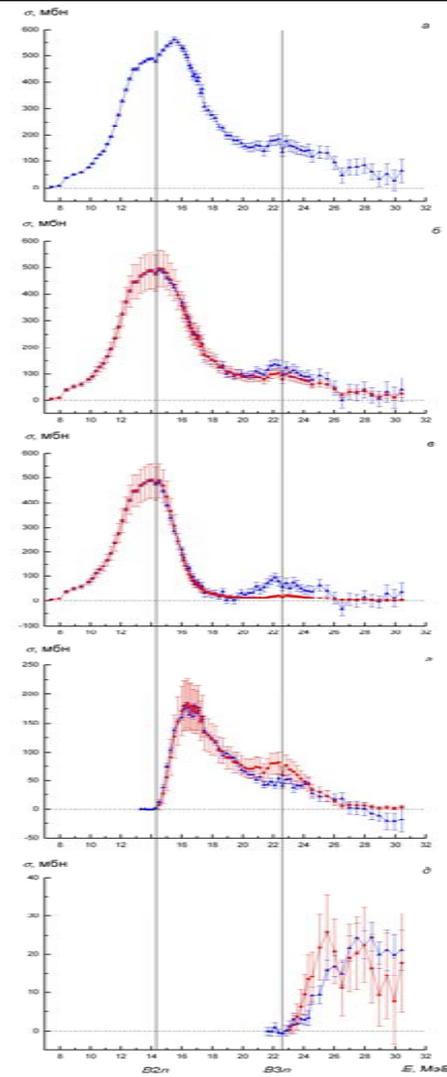
Данные получены только в Ливерморе и не удовлетворяют критериям достоверности



**Сечения реакции выхода нейтронов согласуются, а сечения парциальных реакций существенно различаются вследствие некорректной сортировки нейтронов по множественности.**

**Новый метод оценки:**

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{оцен}}(\gamma, n) &= F_1^{\text{теор}} \sigma_{\text{эксп}}(\gamma, xn), \\ \sigma_{\text{оцен}}(\gamma, 2n) &= F_2^{\text{теор}} \sigma_{\text{эксп}}(\gamma, xn), \\ \sigma_{\text{оцен}}(\gamma, 3n) &= F_3^{\text{теор}} \sigma_{\text{эксп}}(\gamma, xn), \dots \end{aligned}$$





**Такой экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных реакций означает, что соотношение между ними соответствует представлениям использованной модели фотоядерных реакций о конкуренции каналов распада ГДР, а сумма сечений парциальных реакций равна сечению выхода нейтронов, не зависящему от разделения нейтронов по множественности, данные о котором в разных экспериментах расходятся в среднем лишь на 12 %.**



## Модель

Полуклассическая комбинированная экситонная предравновесная модель фотоядерных реакций, базирующаяся плотностях ядерных уровней, рассчитанных в модели Ферми-газа, и учитывающая эффекты деформации ядра и конфигурационного и изоспинового расщепления ГДР ядра.

Модель проверена на описании сечений реакций выхода нейтронов для большого числа средних и тяжелых ядер.

В.С.Ишханов, В.Н.Орлин, ЭЧАЯ, 38 (2007) 460 ,  
ЯФ, 71 (2008) 517 .

M.V. Chadwick *et al.*, Phys. Rev. C 44, 814 (1991).



## Теория

Боровское описание сечения  $\sigma(\gamma, l p k n)$ :

$$\sigma(\gamma, l p k n; E_\gamma) = \sum_i \sigma_{\text{ГДР}}^{(i)}(E_\gamma) W_{\text{ГДР}}^{(i)}(l, k, E_\gamma) + \sigma_{\text{КД}}(E_\gamma) W_{\text{КД}}(l, k, E_\gamma),$$

$\sigma^i$  – одна из 4-х компонент (2 изоспиновые -  $T_0$  and  $T_0 + 1$  и 2 направления колебаний),

$\sigma_{\text{GDR}}$  - Лоренцовские линии с

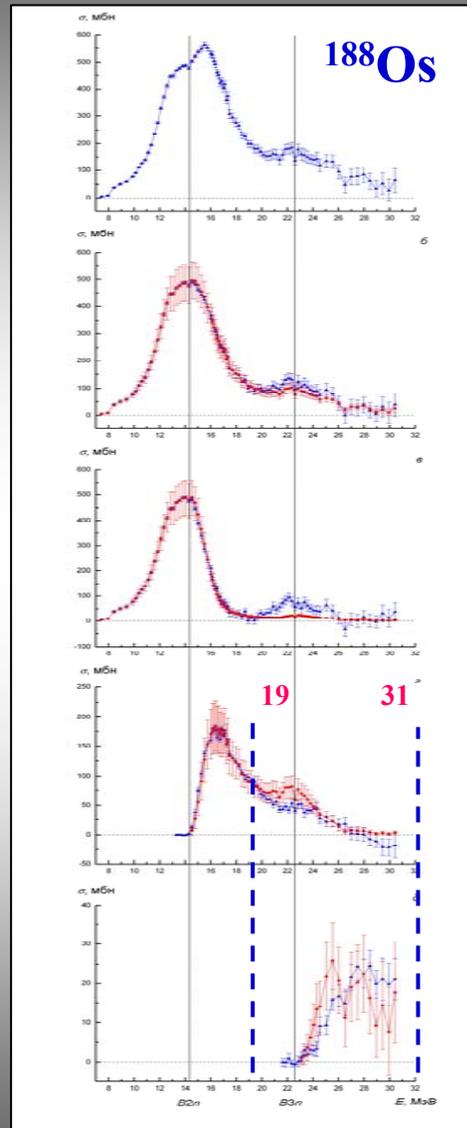
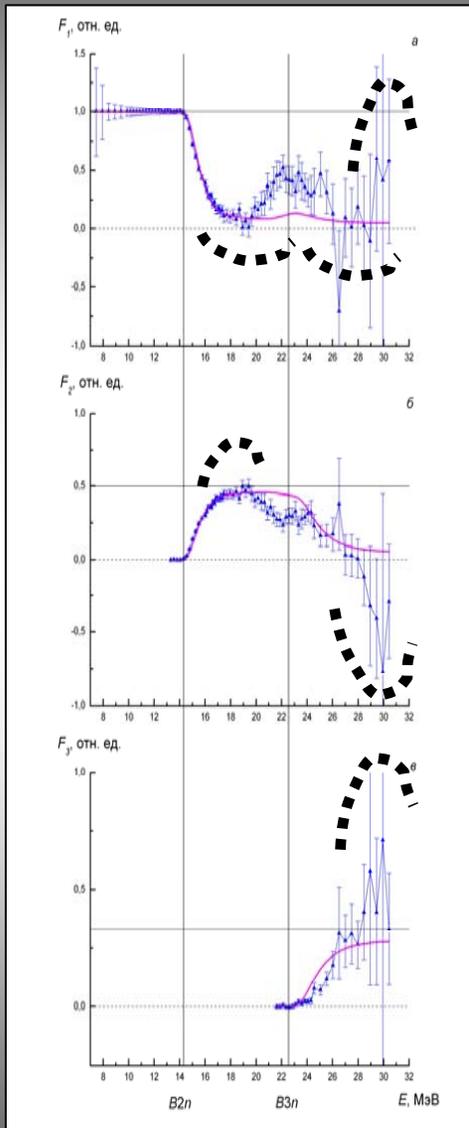
$$\Gamma_{\text{рез}}^\downarrow \approx GI(a_0/R_0)[E_{\text{рез}} - \Delta(Z, N)\delta_{TT}]^2,$$

где

$$I(\xi) = [1 - 3\xi(1 + \pi^2\xi^2/3)/(1 + \pi^2\xi^2)] / (1 + \pi^2\xi^2)$$

$W$  – вероятности распада (рекуррентные формулы):

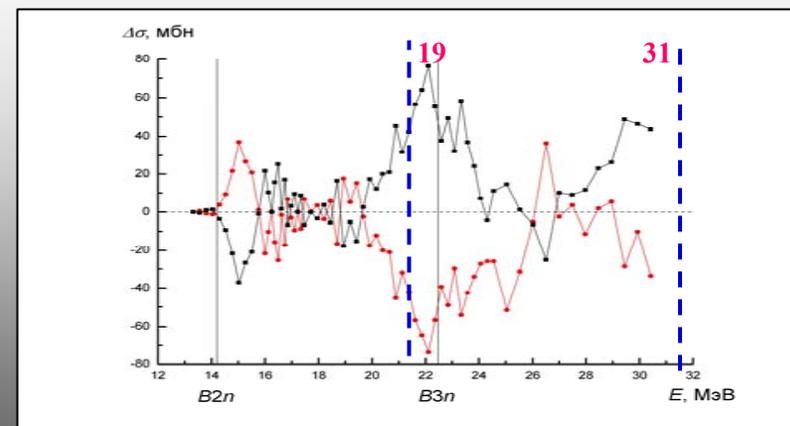
$$W(l, k, E; dp, dn, m) = \hbar \sum_{j=n,p} \sum_{\substack{m'=m \\ \Delta m'=2}}^{\bar{m}-2} \frac{D(m', E; dp, dn, m)}{\Gamma^\uparrow(E; dp, dn, m') + \Gamma^\downarrow(E; dp, dn, m')} \times \\ \times \int_0^{E-B_j} \lambda_j(\varepsilon_j, E; dp, dn, m') W(l_j, k_j, U_j; dp_j, dn_j, m') d\varepsilon_j + \\ + D(\bar{m}, E; dp, dn, m) P(l, k, E; dp, dn),$$

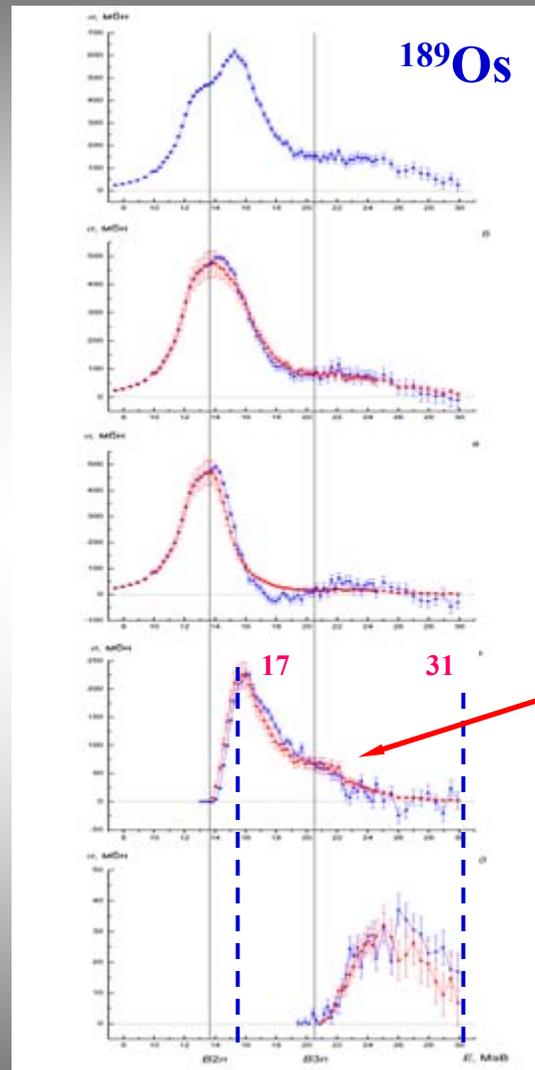
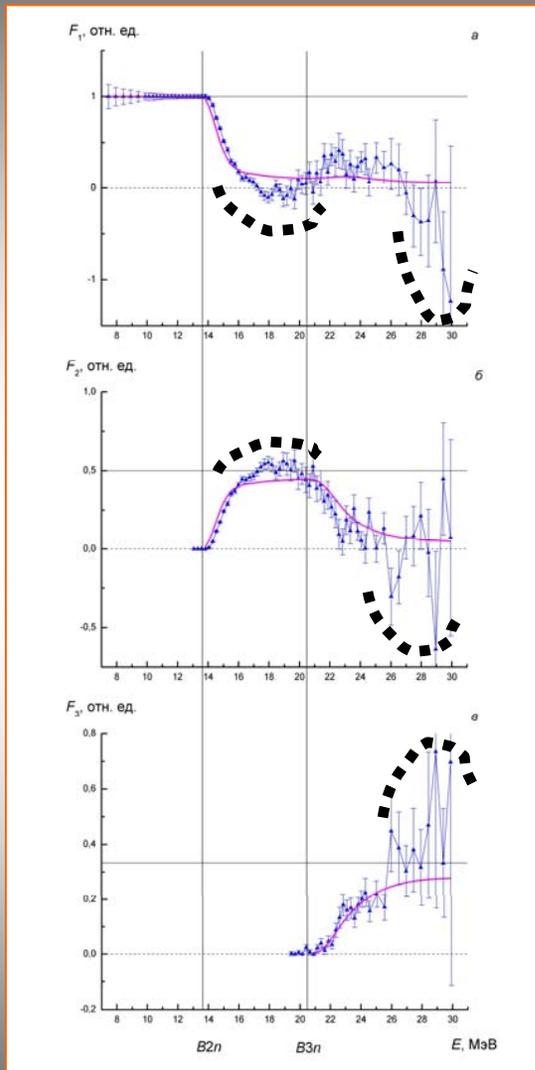


**Интегральные сечения  $\sigma_{\text{инт}}$  ( $E_{\text{инт}} = 19 - 31$  МэВ)  
оцененных сечений парциальных реакций  
( $\gamma, 1n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ) на ядре  $^{188}\text{Os}$   
в сравнении с экспериментальными данными**

Реакция	$\sigma_{\text{инт}}$ , МэВ мб	
	Оцененные данные	Экспериментальные данные
( $\gamma, 1n$ )	123.0 (4.9)	< 372.6 (8.0)
( $\gamma, 2n$ )	439.7 (21.8)	> 306.8 (22.4)

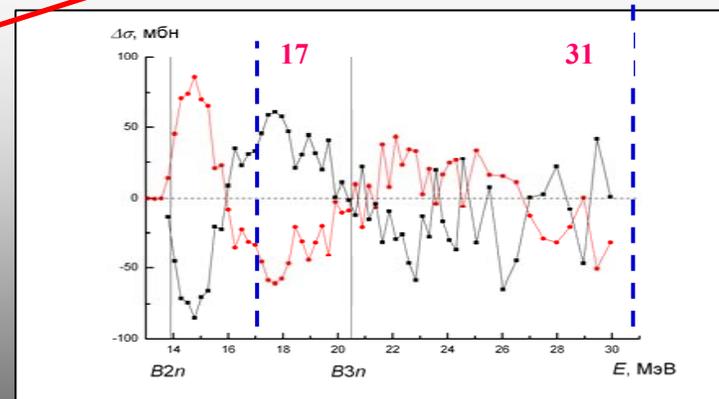
**Сравнение разностей экспериментальных и оцененных сечений парциальных реакций на ядре  $^{188}\text{Os}$  [  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$  ] – кружки и [  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$  ] – квадраты.**

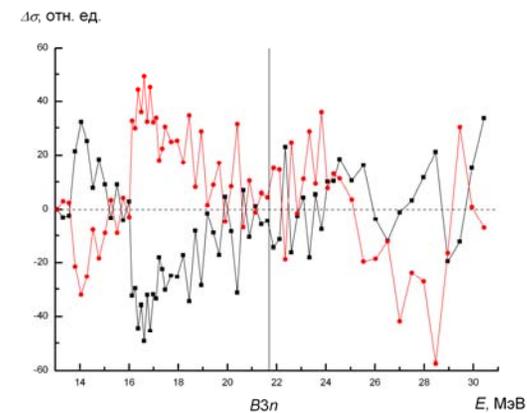
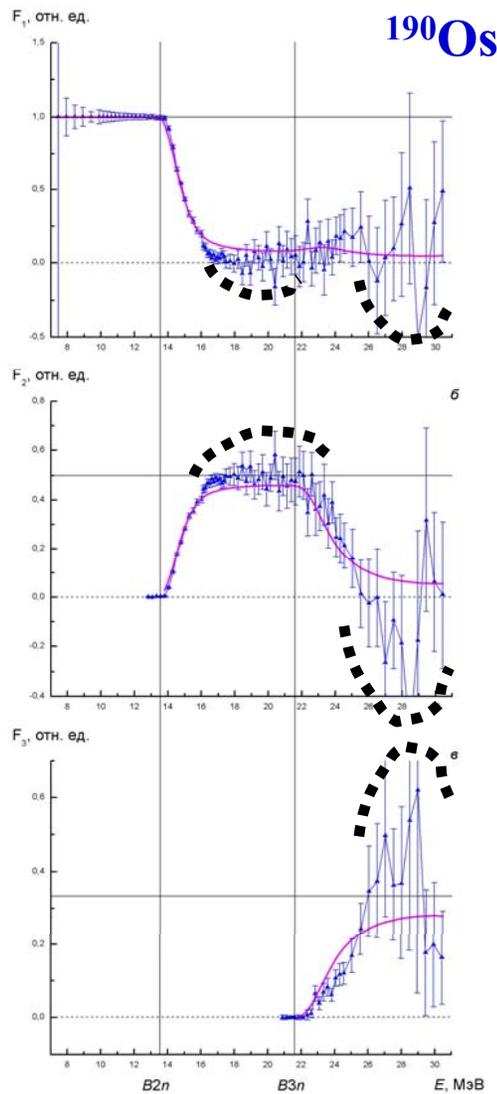
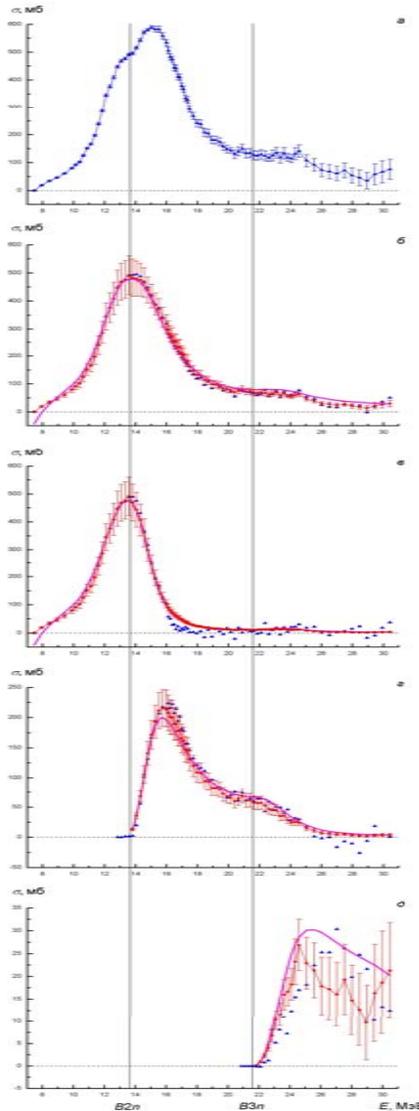




Интегральные сечения  $\sigma^{\text{инт}}$  ( $E^{\text{инт}} = 17 - 31$  МэВ) оцененных сечений парциальных реакций ( $\gamma, 1n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ) на ядре  $^{189}\text{Os}$  в сравнении с экспериментальными данными

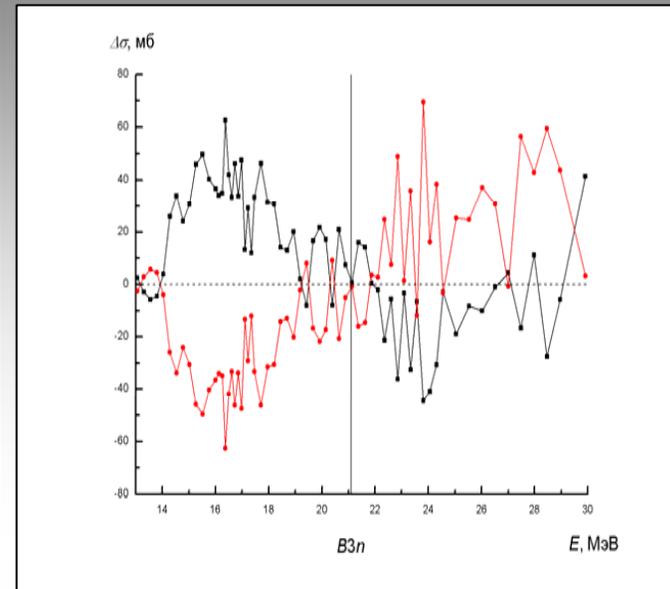
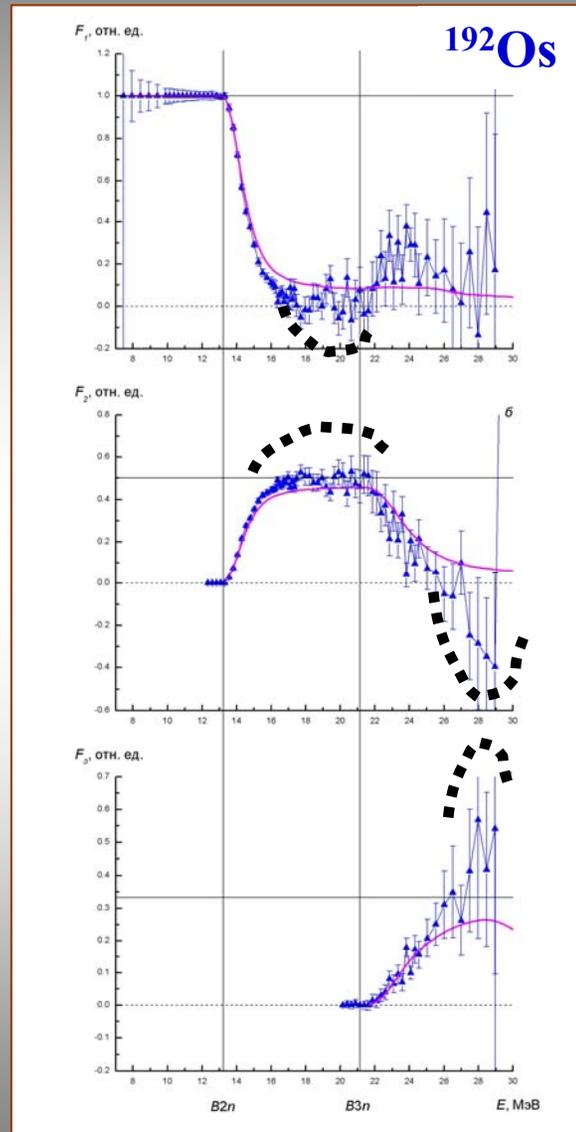
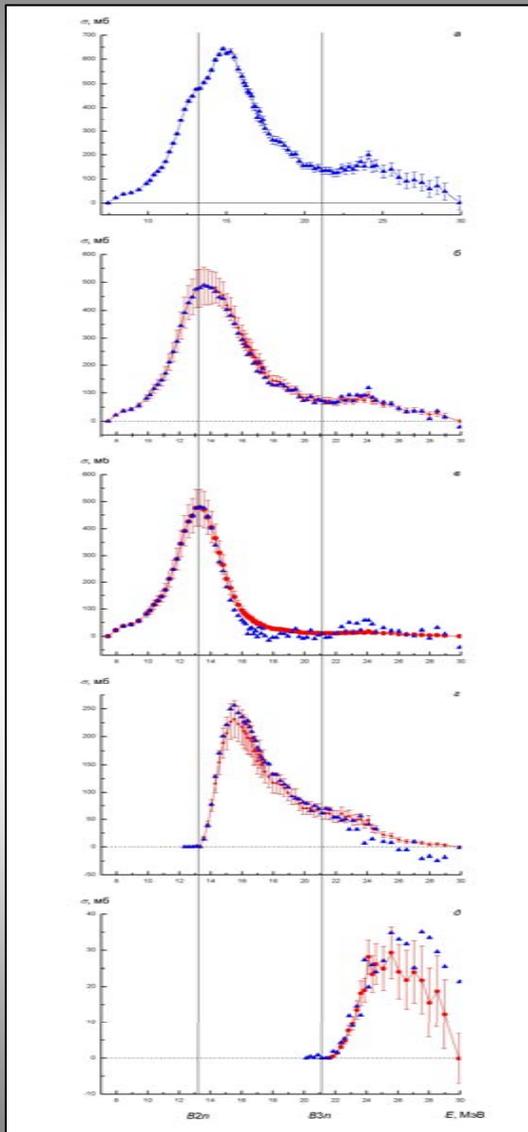
Реакция	$\sigma^{\text{инт}}$ , МэВ мбн	
	Оцененные данные	Экспериментальные данные
$(\gamma, 1n)$	195.2 (5.4)	$>$ 89.4 (45.0)
$(\gamma, 2n)$	525.4 (13.6)	$\approx$ 519.4 (25.5)





В случае данных для изотопа  $^{190}\text{Os}$  наблюдаются все недостатки, обнаруженные для других изотопов:

- отрицательные значения сечений реакций;
- превышение функциями  $F$  допустимых предельных значений;
- перемещение части нейтронов из одного канала распада в другой.



**В случае данных для изотопа  $^{192}\text{Os}$  наблюдаются все те же недостатки метода разделения нейтронов по множественности.**



## **Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:**

- экспериментальные данные по сечениям парциальных фотонейтронных реакций  $(\gamma, 1n)$ ,  $(\gamma, 2n)$  и  $(\gamma, 3n)$  для ядер  $^{188,189,190,192}\text{Os}$ , полученные с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности, содержат значительные систематические погрешности и не соответствуют предложенным критериям достоверности;**
- области отмеченных систематических погрешностей в различных  $F_i^{\text{эксп}}$  и сечениях реакций коррелируют: необоснованное изъятие части нейтронов из канала «1n» приводит к недостоверному уменьшению (вплоть до физически запрещенных отрицательных значений) сечения реакции  $(\gamma, 1n)$ , а соответствующее необоснованное добавление части нейтронов в канал «2n» приводит к недостоверному увеличению сечения реакции  $(\gamma, 2n)$  и превышению функцией  $F_2^{\text{эксп}}$  предельно допустимого физически значения 0.5;**
- имеет место аналогичная недостоверность распределения нейтронов между каналами «2n» и «3n»;**
- систематические погрешности процессов разделения нейтронов с различными множественностями между каналами “1n”, “2n” и “3n” обусловлены близостью кинетических энергий нейтронов из разных парциальных реакций, которая делает использованную процедуру разделения нейтронов по множественности не вполне оправданной.**



**В рамках экспериментально–теоретического подхода, для обоих изотопов  $^{188,189,190,192}\text{Os}$  оценены сечения, как парциальных ( $\gamma, 1n$ ), ( $\gamma, 2n$ ) и ( $\gamma, 3n$ ) реакций, так и полной реакции ( $\gamma, sn$ ).**

**Исследования достоверности сечений парциальных фотонейтронных реакций на изотопах  $^{188,189,190,192}\text{Os}$  дополняют выполненные ранее аналогичные исследования для ядер  $^{90,91,94}\text{Zr}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ .**

**Эти исследования свидетельствуют о том, что в целом экспериментальные данные, полученные с помощью метода разделения нейтронов по множественности, не соответствуют предложенным критериям достоверности данных.**

**Для получения достоверных данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций необходимо проведение новых измерений, использующих альтернативные методы, такие, например, как, метод наведенной активности или регистрация образующихся в разных реакциях нейтронов в режиме совпадений.**

**До проведения новых экспериментов целесообразно использовать данные, оцененные в рамках предложенного экспериментально-теоретического подхода или каких-то других аналогичных подходов, не использующих разделение нейтронов по множественности.**



*«ОСОБЕННОСТИ ФОТОРАСЩЕПЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ  $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$ »*

В.В.Варламов, М.А.Макаров, Н.Н.Песков, М.Е.Степанов  
ЦДФЭ НИИЯФ МГУ



**Спасибо за внимание!**