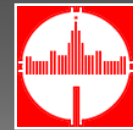


Особенности фоторасщепления изотопов $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$.

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 (γ, n) , $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$, широко востребованных как в фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследованиях, так и в разнообразных приложениях:

различные свойства электромагнитных взаимодействий;

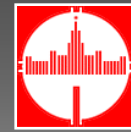
эффекты конфигурационного и изоспинового расщепления ГДР;

конкуренция прямых и статистических процессов;

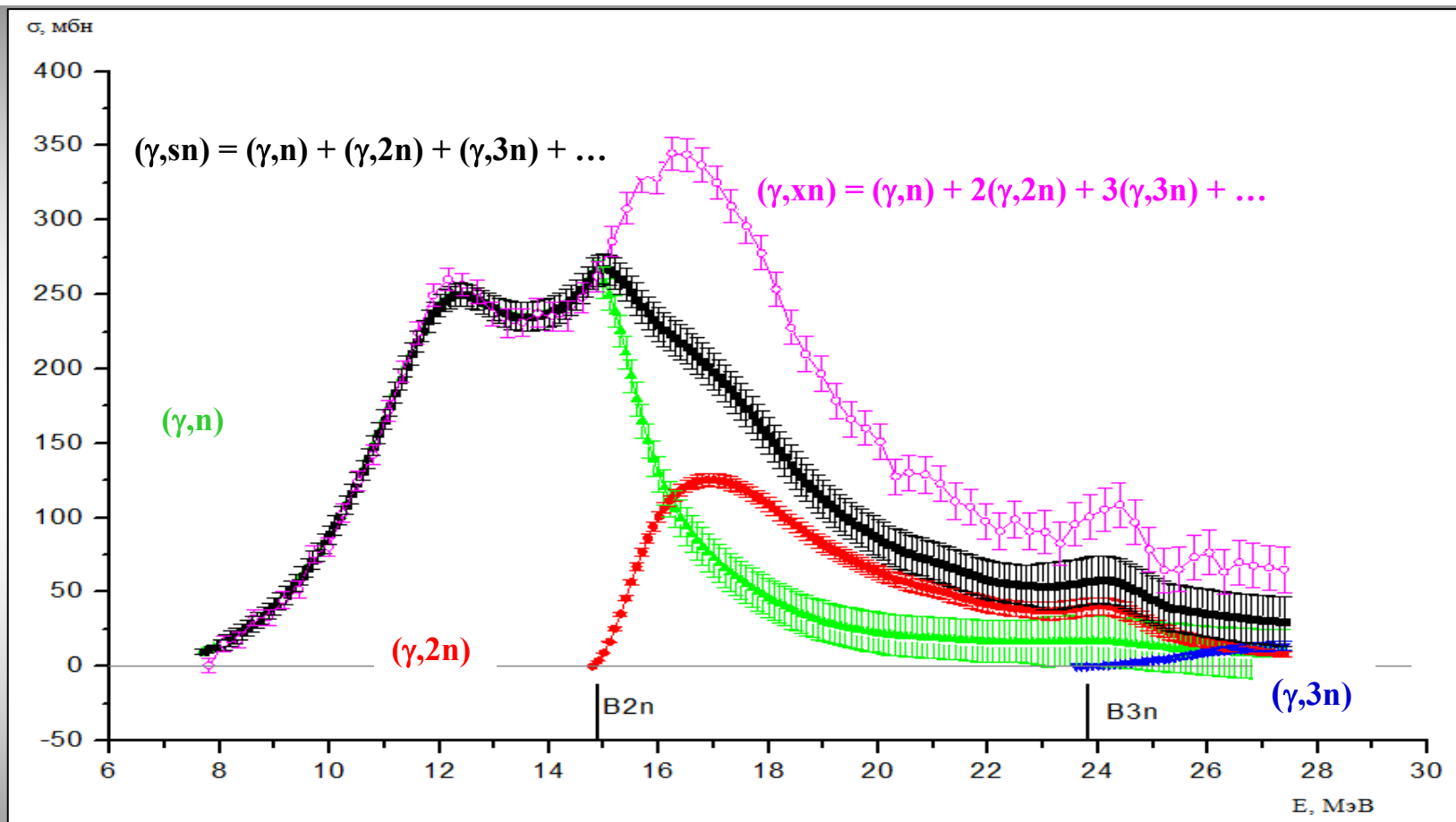
мониторинг светимости пучков ультрарелятивистских ядер современных коллайдеров на встречных пучках;

астрофизические проблемы (образование р-ядер)

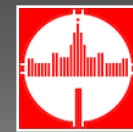
.... многие другие.



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 (γ, n) и $(\gamma, 2n)$, полученных в Сакле и Ливерморе:

19 ядер - ^{51}V , ^{75}As , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{115}In , $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$, ^{127}I , ^{133}Cs , ^{159}Tb , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U

$$R^{\text{int}} = \sigma^{\text{int}}_{\text{S}} / \sigma^{\text{int}}_{\text{L}} \text{ (arb. units)}$$

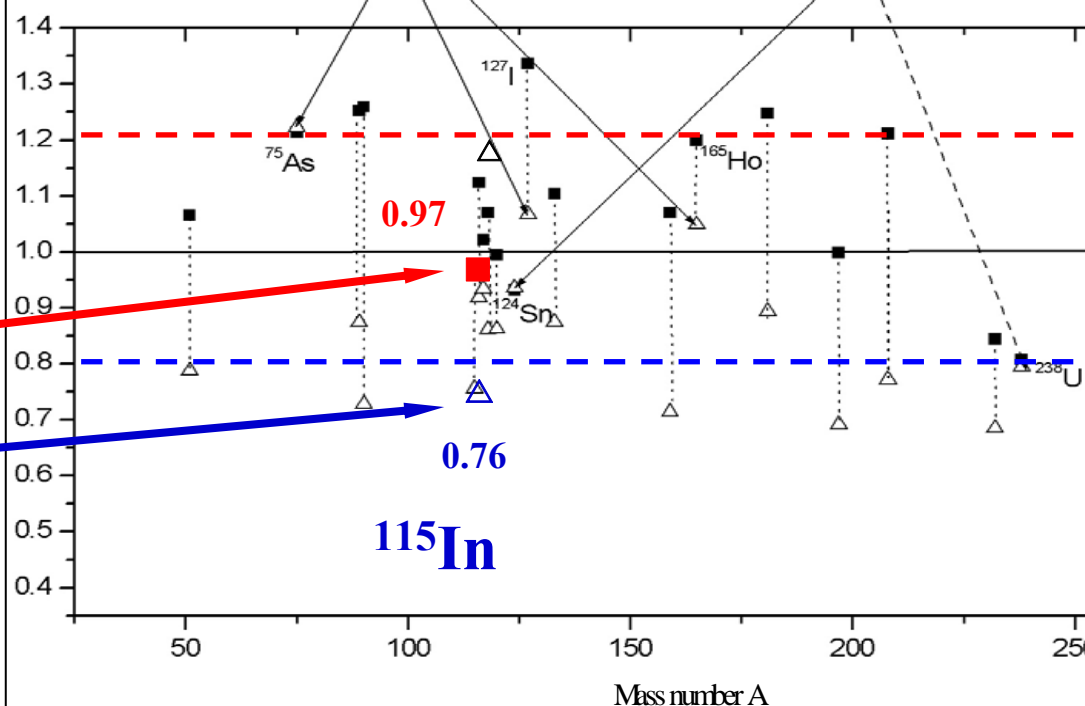
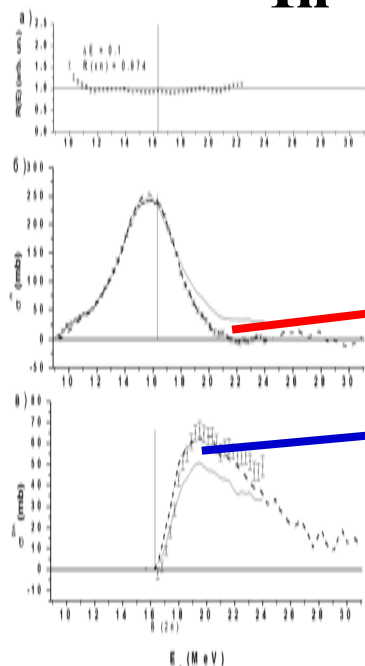
“Special cases”

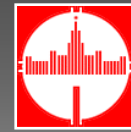
“Ideal cases”

Сечения реакций (γ, 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 △ - в области $R < 1$.

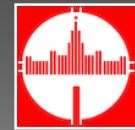
^{115}In





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.

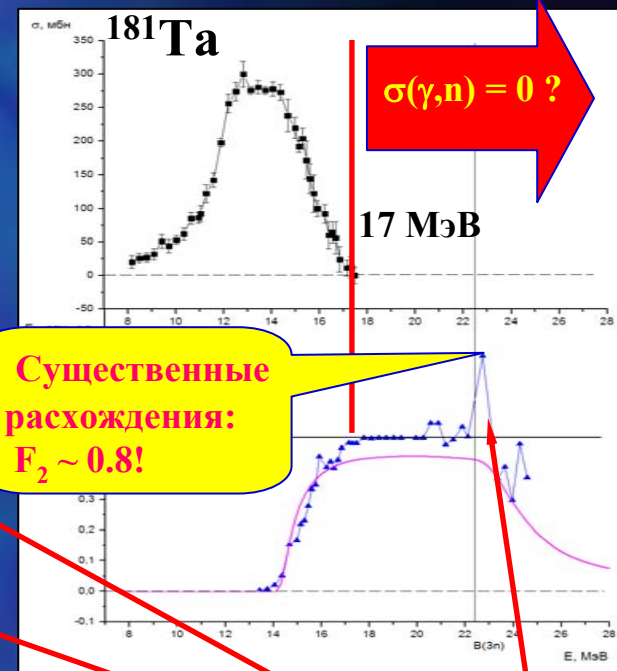
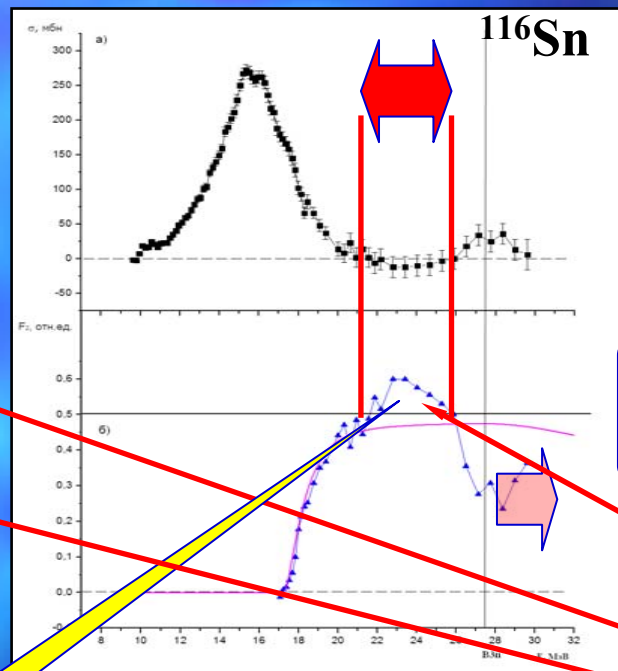
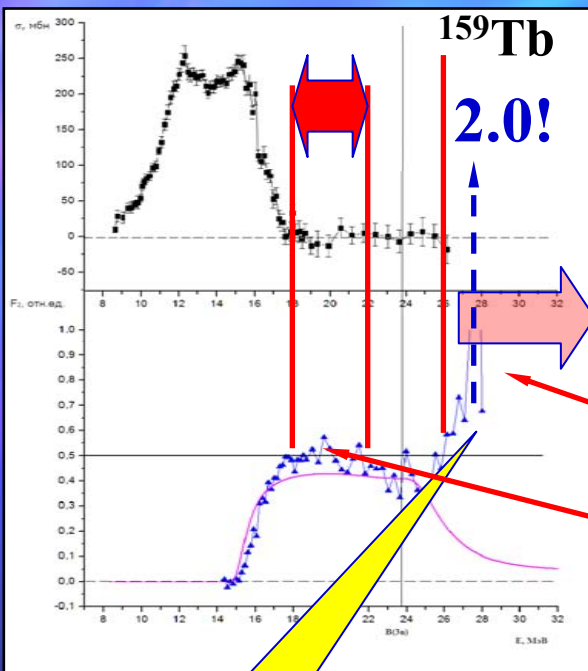
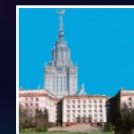
$$\text{Функция } F_2 = \sigma(\gamma, 2n) / \sigma(\gamma, xn) = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.5$$

- 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

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

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



$\sigma(\gamma, n) = 0 ?$

17 МэВ

Существенные расхождения: $F_2 \sim 0.8!$

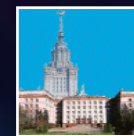
Драматические расхождения: $F_2 = 1.5 - 2.0!$

Существенные расхождения: $F_2 > 0.6!$

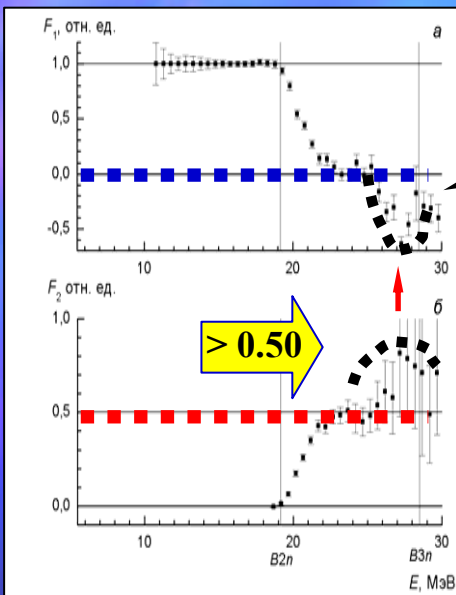
Физически недостоверные отрицательные значения сечений реакции (γ, n) коррелируют с $F_2 > 0.5!$

$$F_2 = \sigma(\gamma, 2n) / \sigma(\gamma, xn)$$

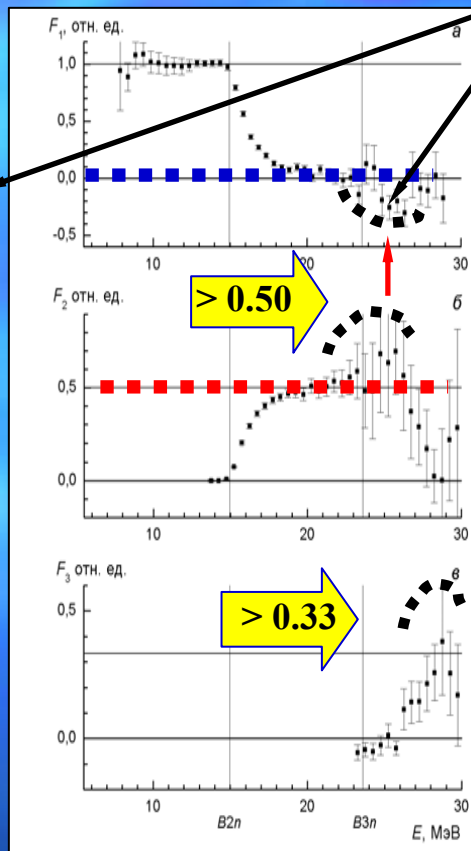
$$= \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.5$$



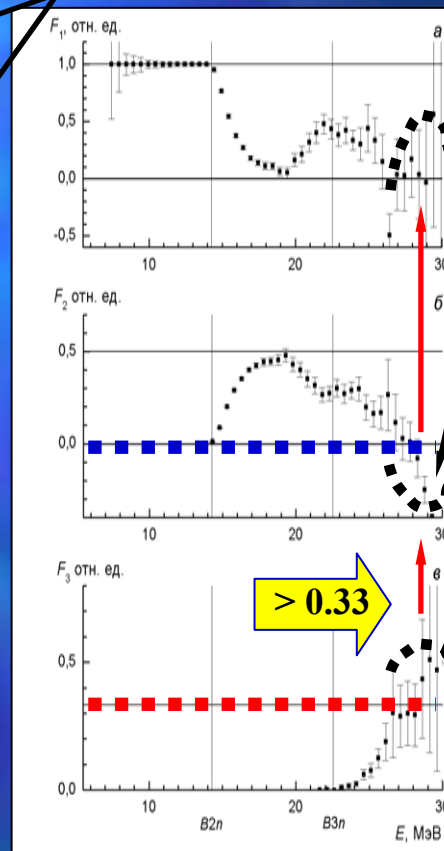
Физически запрещенные отрицательные сечения



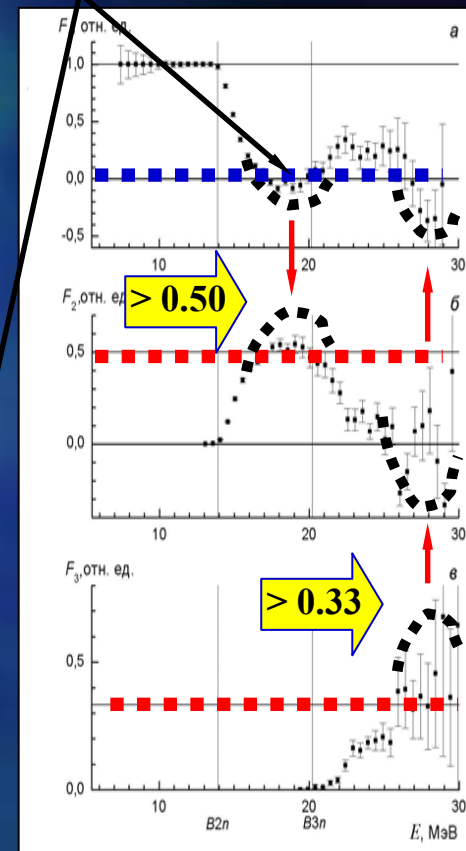
^{91}Zr



^{94}Zr

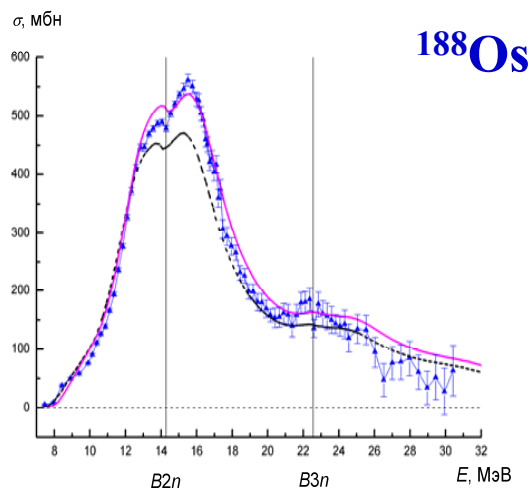
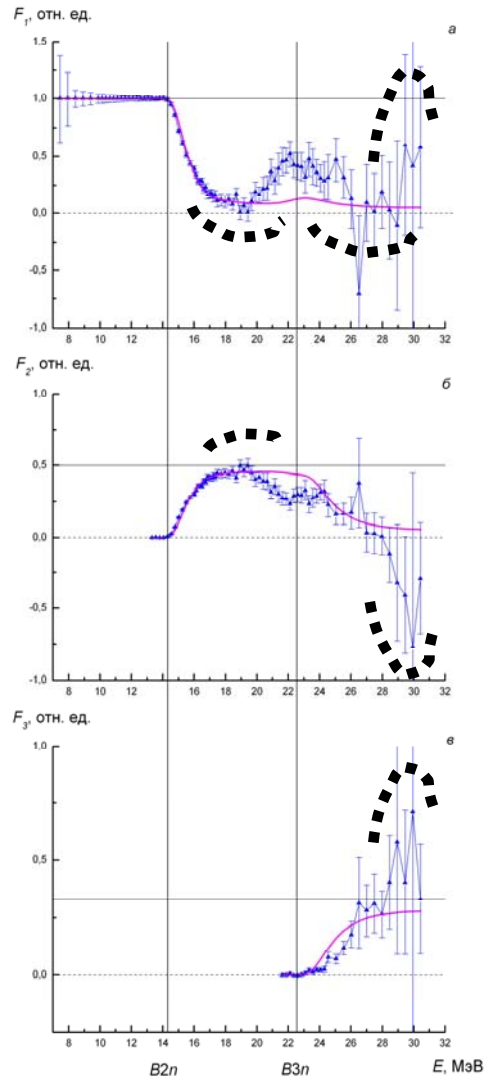
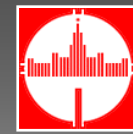


^{188}Os



^{189}Os

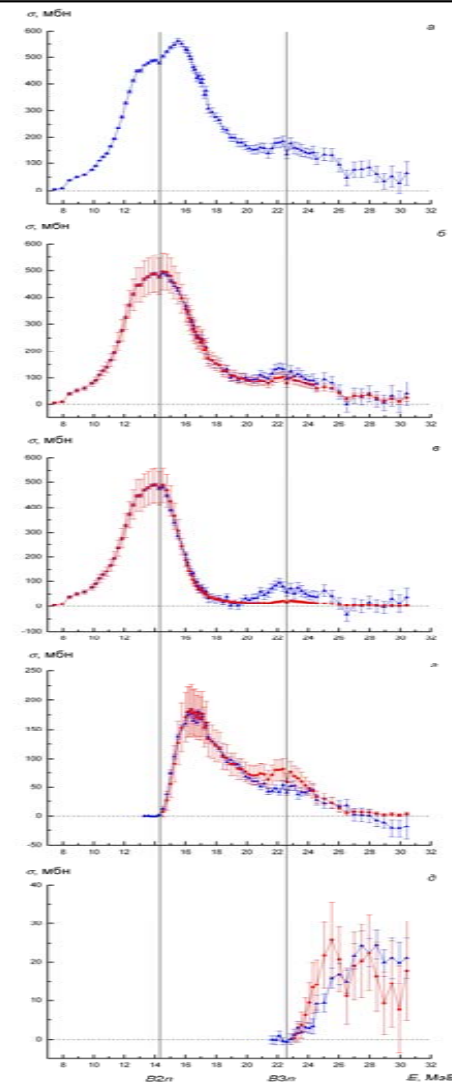
Данные получены только в Ливерморе и не удовлетворяют критериям достоверности

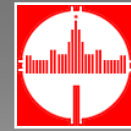


Сечения реакции выхода
нейтронов согласуются,
а сечения парциальных реакций
существенно различаются
вследствие некорректной
сортировки нейтронов по
множественности.

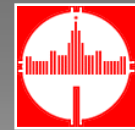
Новый метод оценки:

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





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



Теория

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

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

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

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

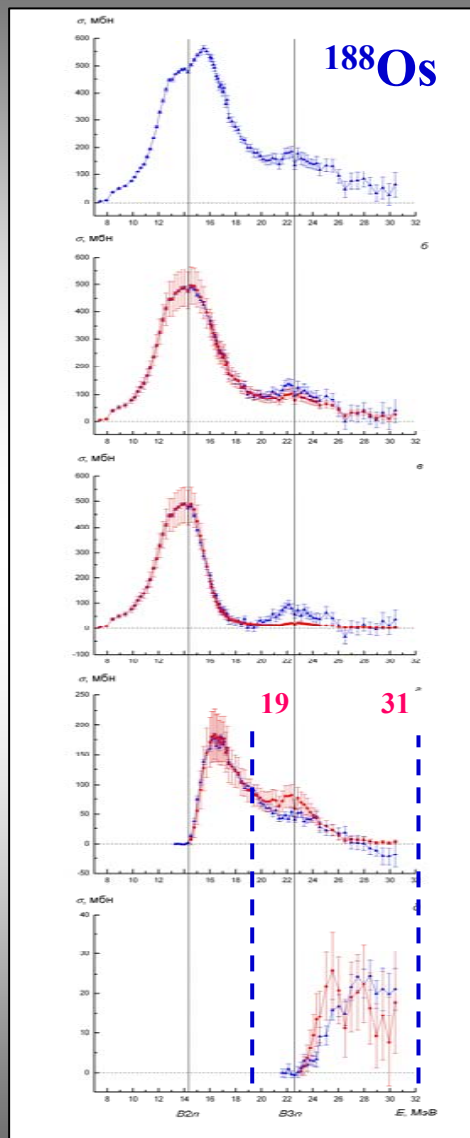
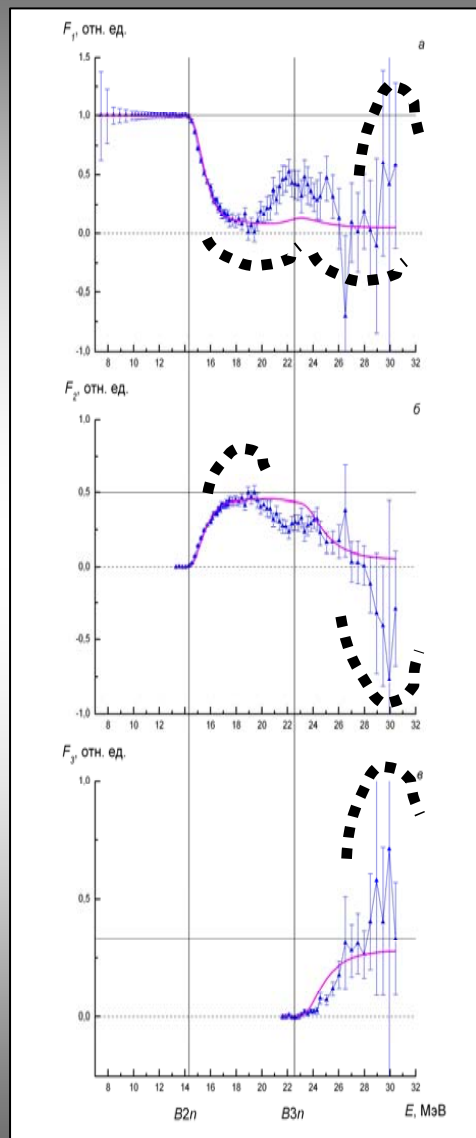
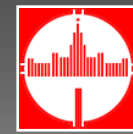
$$\Gamma_{\text{рез}}^\downarrow \approx GI(a_0/R_0)[E_{\text{рез}} - \Delta(Z, N)\delta_{TT_0}]^2,$$

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):

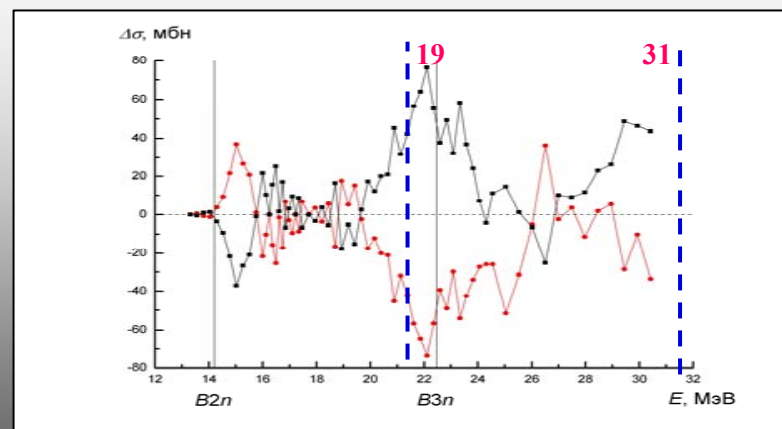
$$W(l, k, E; dp, dn, m) = \hbar \sum_{j=n,p} \sum_{\substack{m'=m \\ \Delta m'=2}}^{\bar{m}-2} \frac{D(m', E; dp, dn, m)}{\Gamma^\uparrow(E; dp, dn, m') + \Gamma^\downarrow(E; dp, dn, m')} \times \\ \times \int_0^{E-B_j} \lambda_j(\varepsilon_j, E; dp, dn, m') W(l_j, k_j, U_j; dp_j, dn_j, m') d\varepsilon_j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

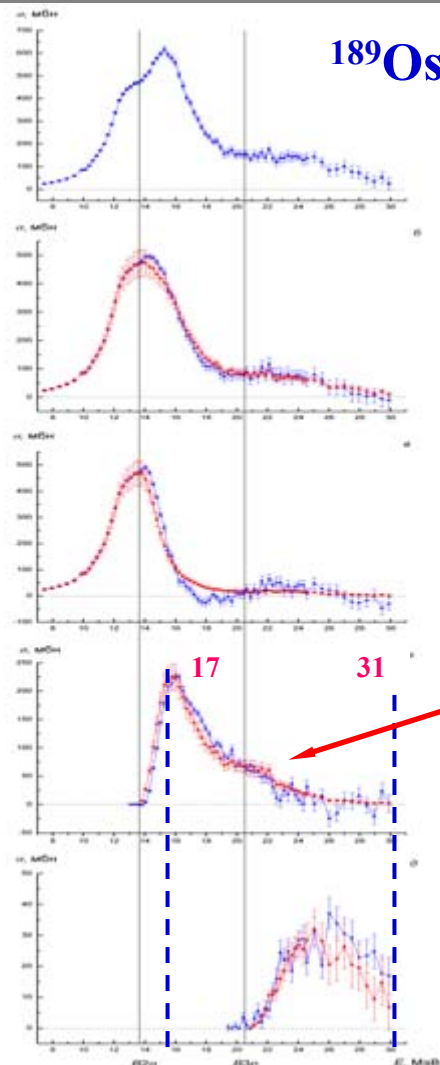
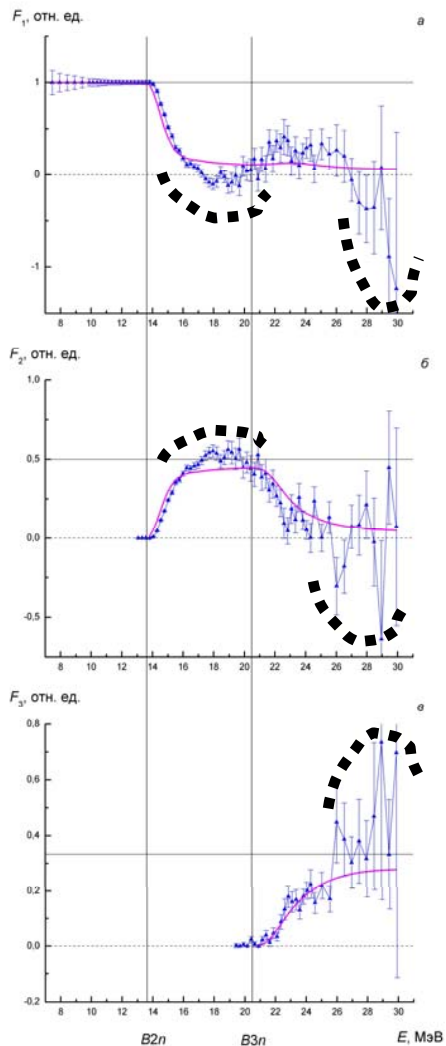
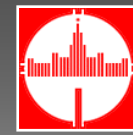


**Интегральные сечения $\sigma_{\text{инт}}$ ($E_{\text{инт}} = 19 - 31$ МэВ)
оцененных сечений парциальных реакций
($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$) на ядре ^{188}Os
в сравнении с экспериментальными данными**

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)

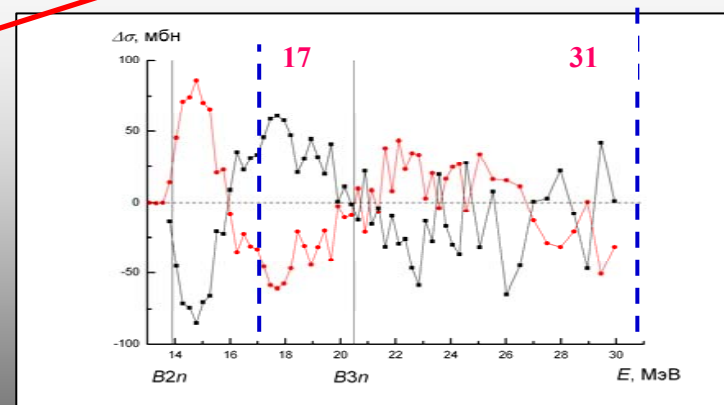
Сравнение разностей экспериментальных и оцененных сечений парциальных реакций на ядре ^{188}Os [$\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$] – кружки и [$\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$] – квадраты.

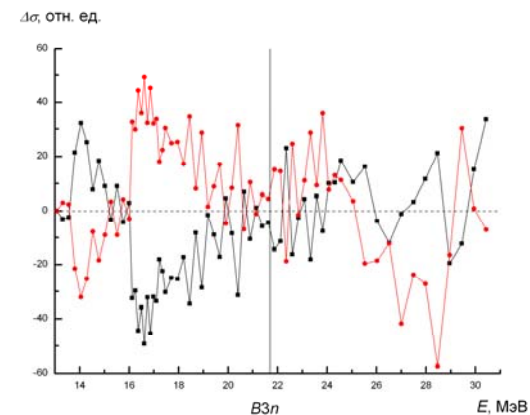
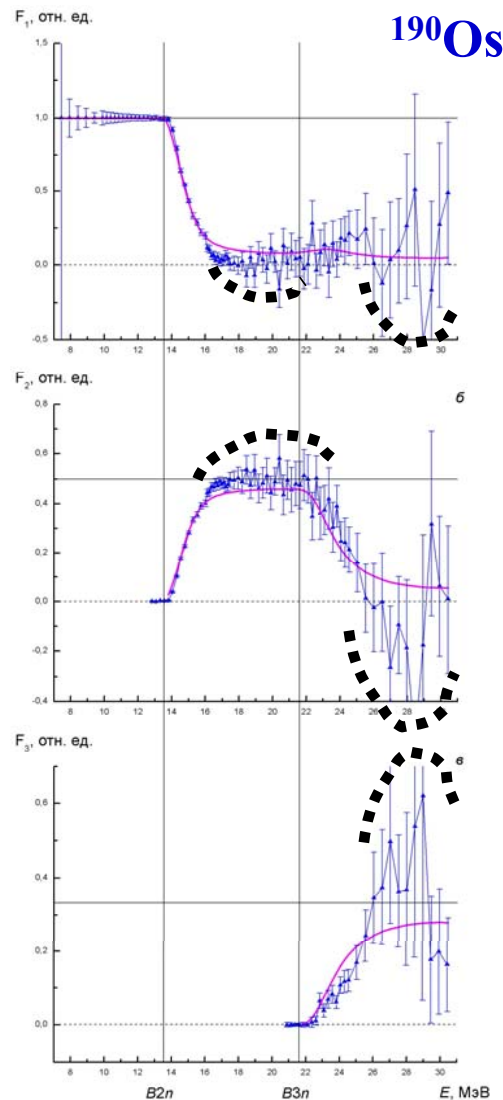
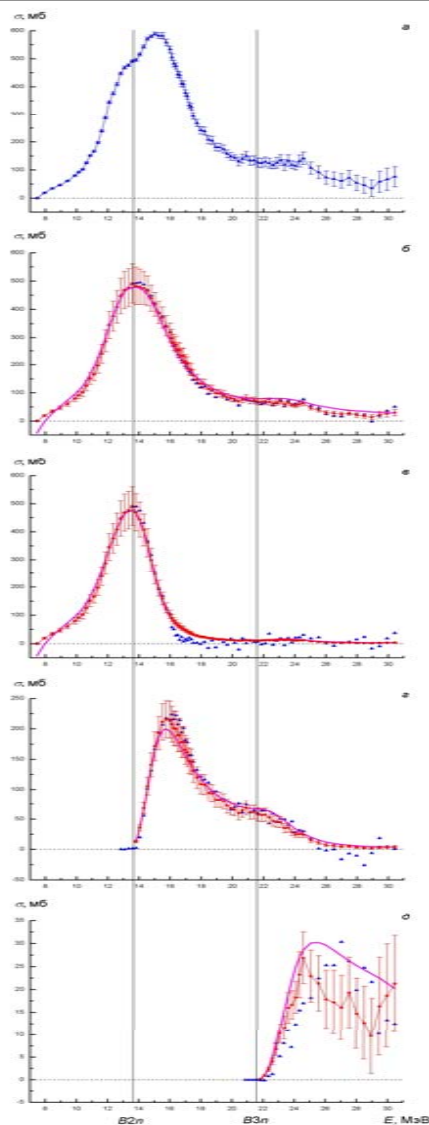
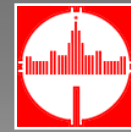




Интегральные сечения $\sigma^{\text{инт}}$ ($E^{\text{инт}} = 17 - 31$ МэВ) оцененных сечений парциальных реакций ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$) на ядре ^{189}Os в сравнении с экспериментальными данными

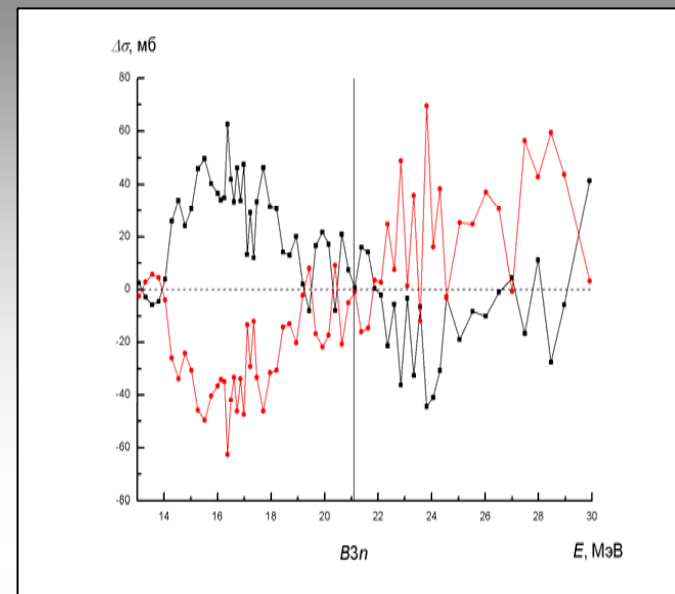
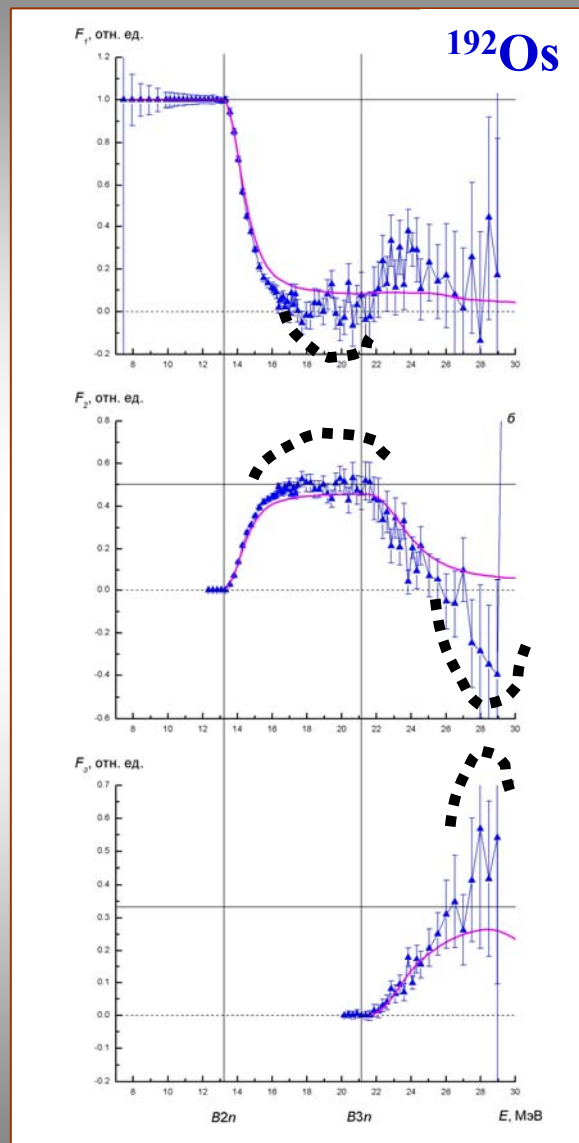
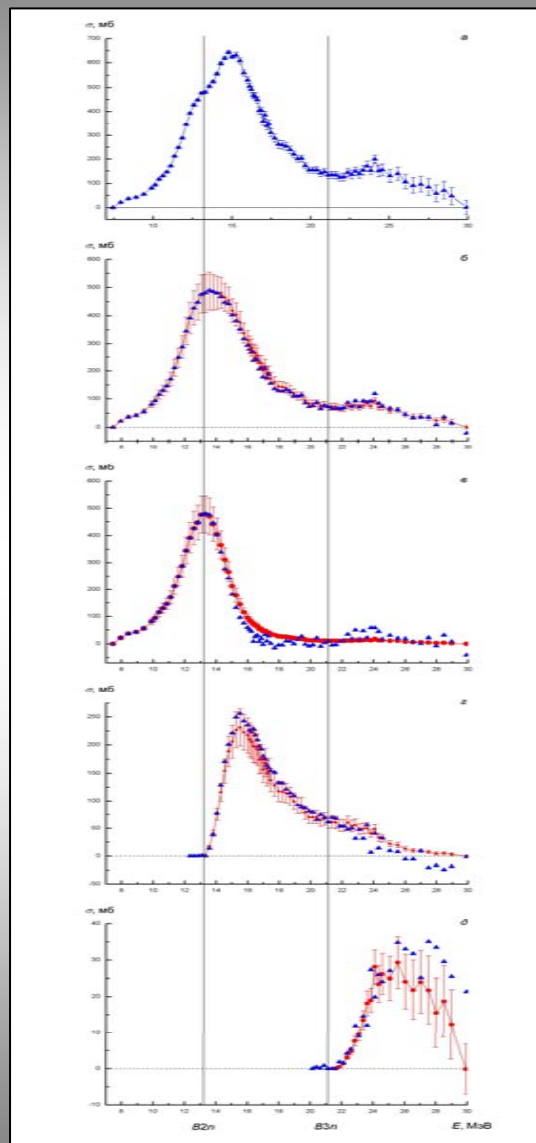
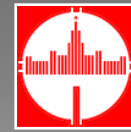
Реакция	$\sigma^{\text{инт}}$, МэВ мбн	
	Оцененные данные	Экспериментальные данные
$(\gamma, 1n)$	195.2 (5.4)	$>$ 89.4 (45.0)
$(\gamma, 2n)$	525.4 (13.6)	\approx 519.4 (25.5)



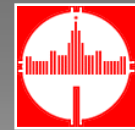


В случае данных для изотопа ^{190}Os наблюдаются все недостатки, обнаруженные для других изотопов:

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

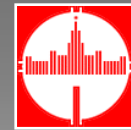


В случае данных для изотопа ^{192}Os наблюдаются все те же недостатки метода разделения нейтронов по множественности.



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.**



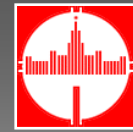
В рамках экспериментально–теоретического подхода, для обоих изотопов $^{188,189,190,192}\text{Os}$ оценены сечения, как парциальных (γ , 1n), (γ , 2n) и (γ , 3n) реакций, так и полной реакции (γ , sn).

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}In , ^{159}Tb , ^{181}Ta , $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$, ^{197}Au , ^{208}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.



Спасибо за внимание!