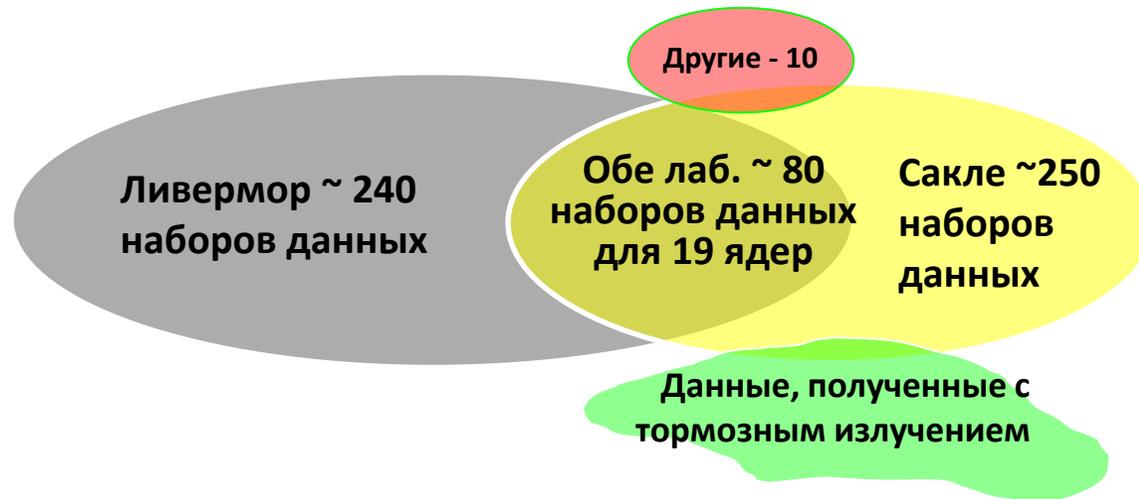


# Парциальные фотонейтронные реакции: проблемы с достоверностью и новые данные

А.И. Давыдов, В.В. Варламов

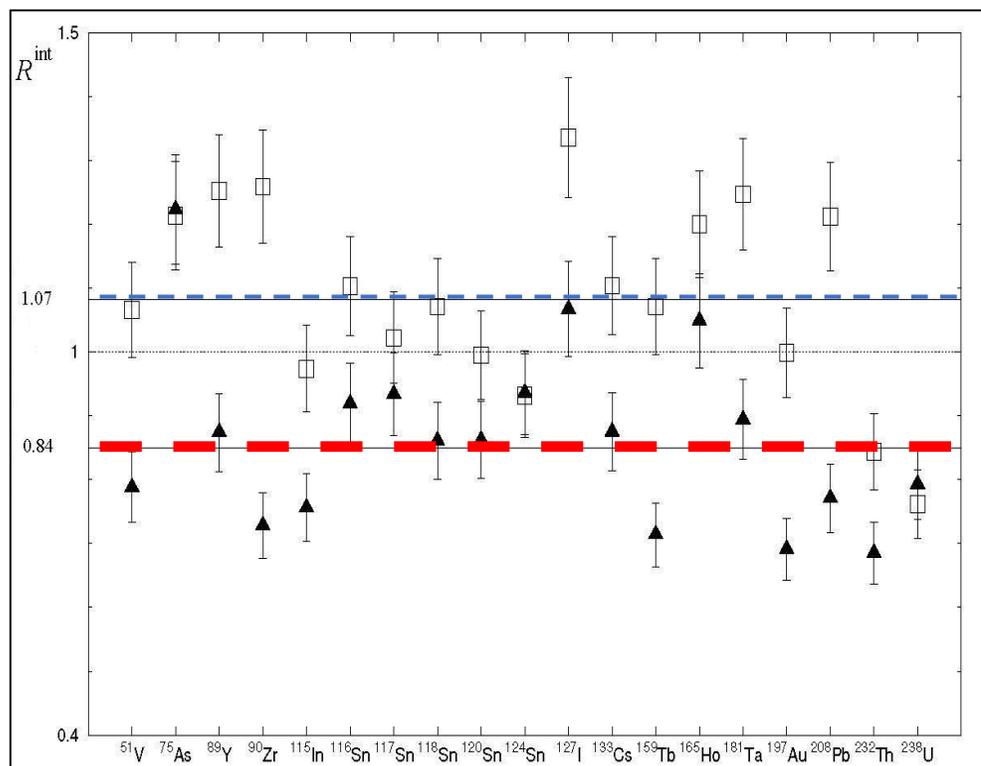
**Большинство данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций получено в 1962 – 1986 годах в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью метода разделения нейтронов по множественности и опубликовано в полном атласе –  
S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38 (1988) 199**

**Кроме таких данных имеется некоторое количество данных, полученных на пучках тормозного излучения, в том числе и в НИИЯФ.**



**Главная проблема: для 19 ядер, исследованных в обеих лабораториях:  
сечения реакций ( $\gamma, 1n$ ) имеют большие величины в Сакле, ( $\gamma, 2n$ ) – в  
Ливерморе.**

**Отношения интегральных сечений  $R^{\text{инт}} = \sigma^{\text{инт}}_{\text{С}} / \sigma^{\text{инт}}_{\text{Л}}$**



**Среднее отношение  
для реакций ( $\gamma, 1n$ ) –  
 $\langle R \rangle = 1.07$ .**

**Среднее отношение  
для реакции ( $\gamma, 2n$ ) –  
 $\langle R \rangle = 0.84$ .**

**Такое соотношение сечений реакций  
означает присутствие в результатах  
значительных систематических  
погрешностей, обусловленных  
особенностями экспериментальных методов  
разделения нейтронов по множественности.**

**Это ставит вопросы о том, являются ли такие  
данные достоверными и, если нет, то  
почему.**

**Необходимы объективные критерии  
достоверности данных, не зависящие от  
способа их получения.**

Главный критерий достоверности данных

$$F_i = \frac{\sigma(\gamma, in)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots}$$

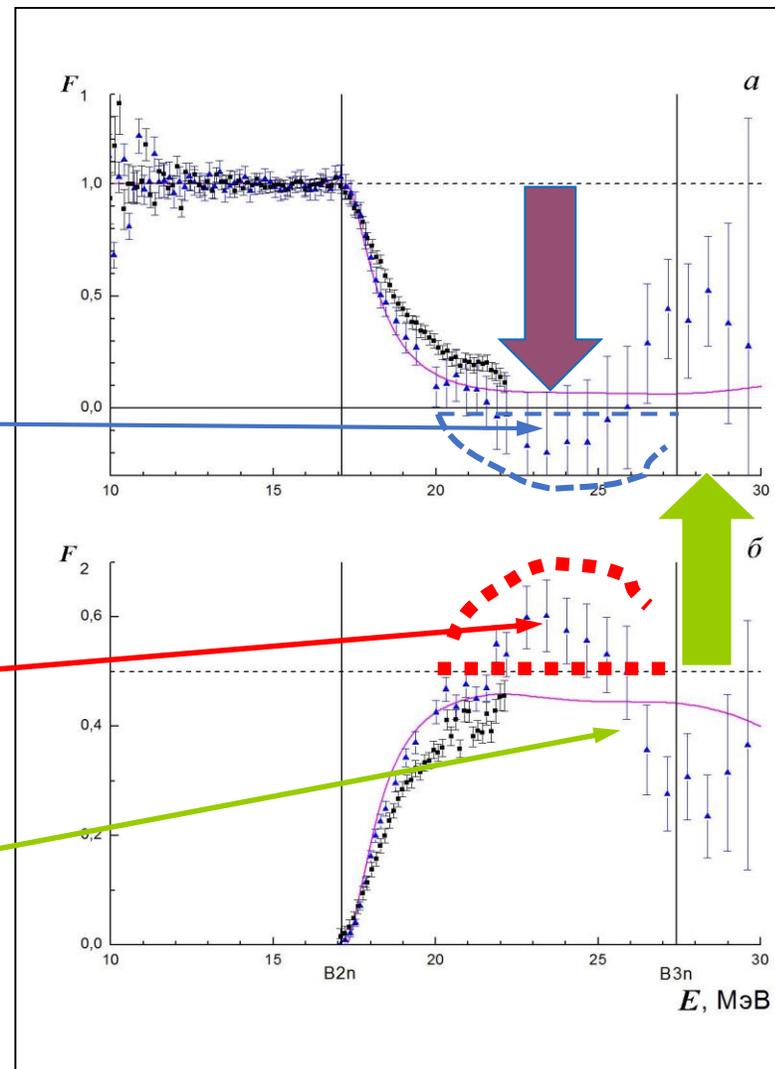
Физически  
запрещенные  
отрицательные  
значения  $F_1$

Значения, превышающие достоверные

$$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.50 (!)$$

Уменьшение  $F_2$  при  
энергиях на 2.5 МэВ  
меньших  $B_{3n}$

$^{116}\text{Sn}$



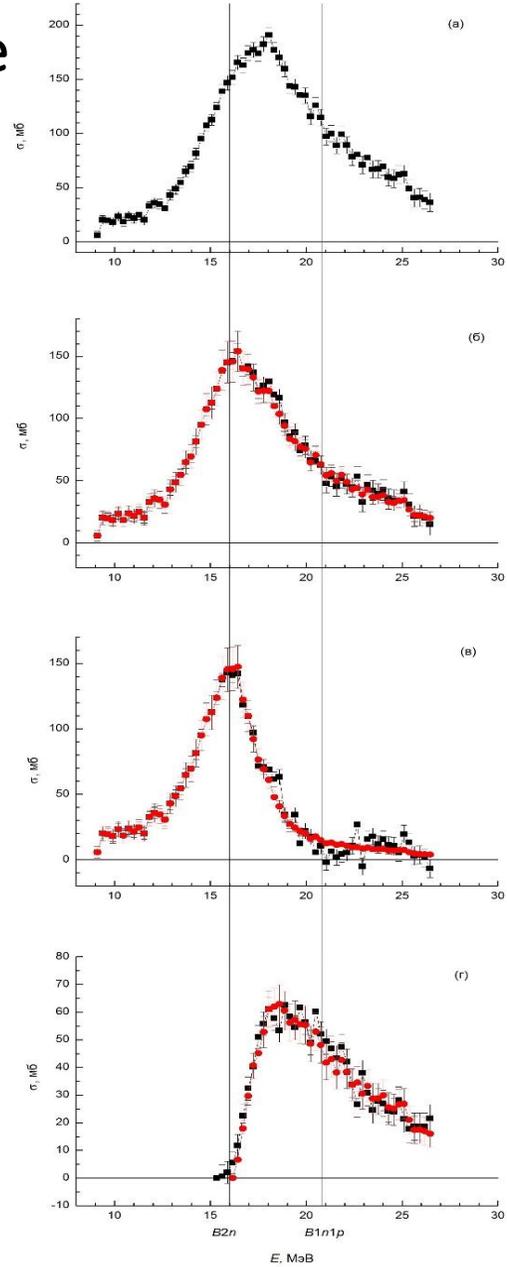
## Новый экспериментально-теоретический метод оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций:

$$\begin{aligned}\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n) &= F_1^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \\ \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n) &= F_2^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \\ \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n) &= F_3^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \dots\end{aligned}$$

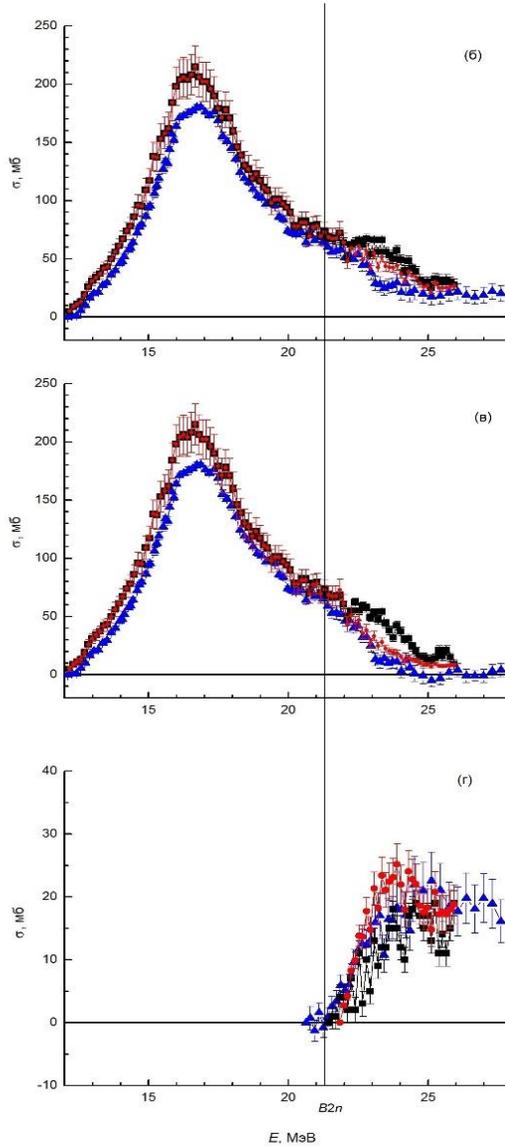
- только экспериментальное сечение реакции полного выхода нейтронов  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ , априори свободное от ограничений методов разделения нейтронов по множественности, используется как исходное;
- для определения вкладов в сечение полной реакции  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$  сечений парциальных реакций  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$  и  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n)$  - описания конкуренции каналов распада ГДР – используются переходные функции множественности - отношения  $F_{1,2,3}, \dots$ , рассчитанные в рамках комбинированной модели фотонуклонных реакций.

Экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных реакций означает, что соотношение между ними соответствует представлениям модели, а соответствующая сумма сечений парциальных реакций  $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, xn)$  равна сечению выхода нейтронов  $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ , не зависящему от разделения нейтронов по множественности.

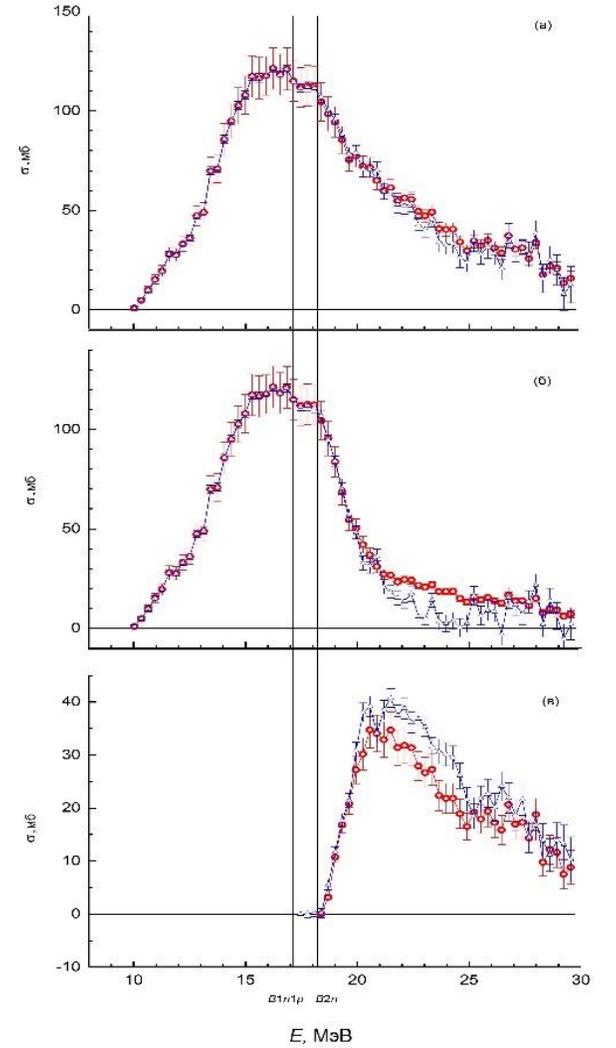
$^{82}\text{Se}$



$^{90}\text{Zr}$



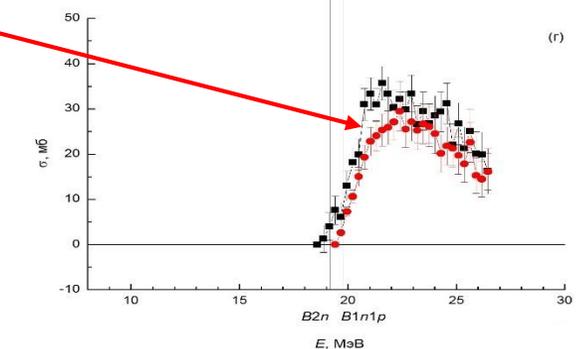
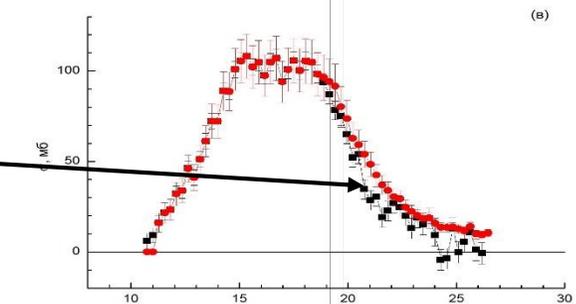
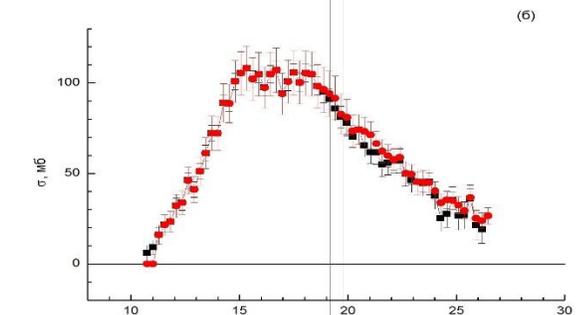
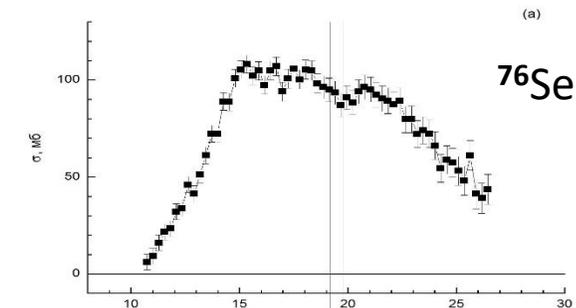
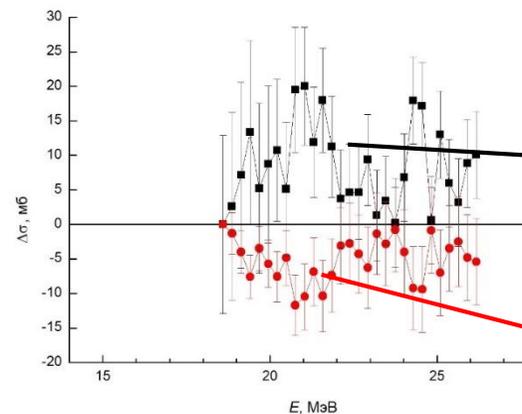
$^{75}\text{As}$

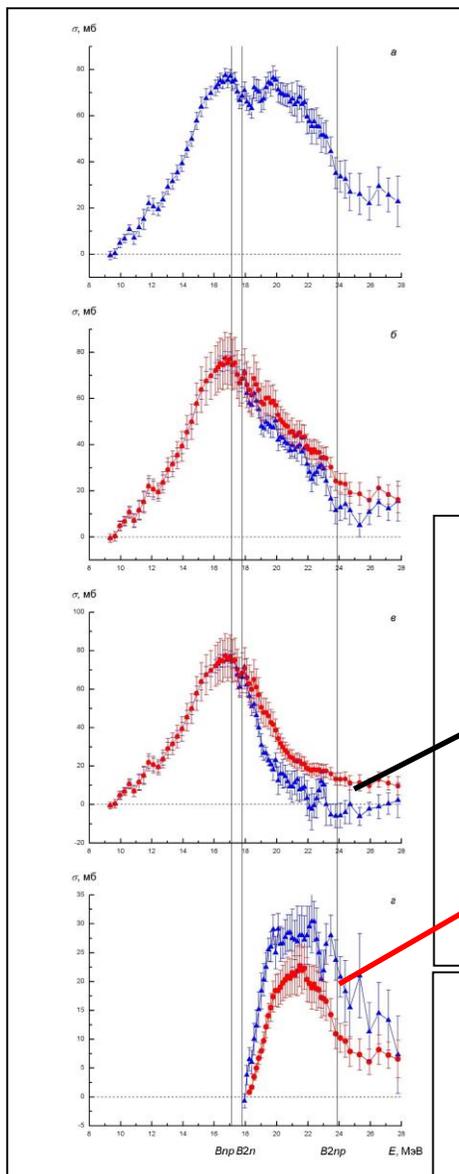


Новые оцененные сечения парциальных реакций, свободные от проблем экспериментального разделения нейтронов по множественности, получены с помощью экспериментально-теоретического метода. В качестве примера на рисунке оцененные данные для одного из ядер, исследованных в настоящей работе ( $^{76}\text{Se}$ ), сравниваются с экспериментальными сечениями парциальных реакций ( $\gamma, 1n$ ) и ( $\gamma, 2n$ ) и сечением полной фотонейтронной реакции.

Видно, что значительное число нейтронов оказалось недостоверно перемещено из канала  $1n$  в канал  $2n$ .

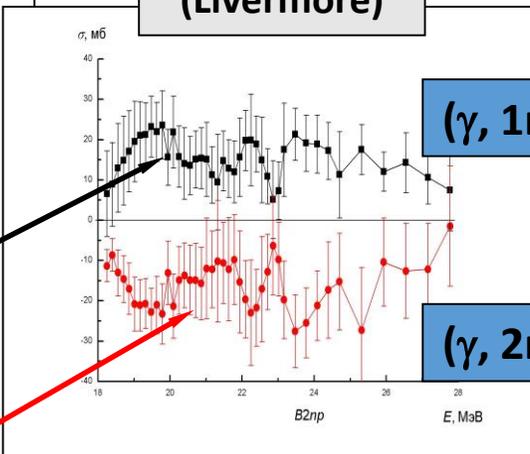
Разности между оцененными и экспериментальными сечениями реакций





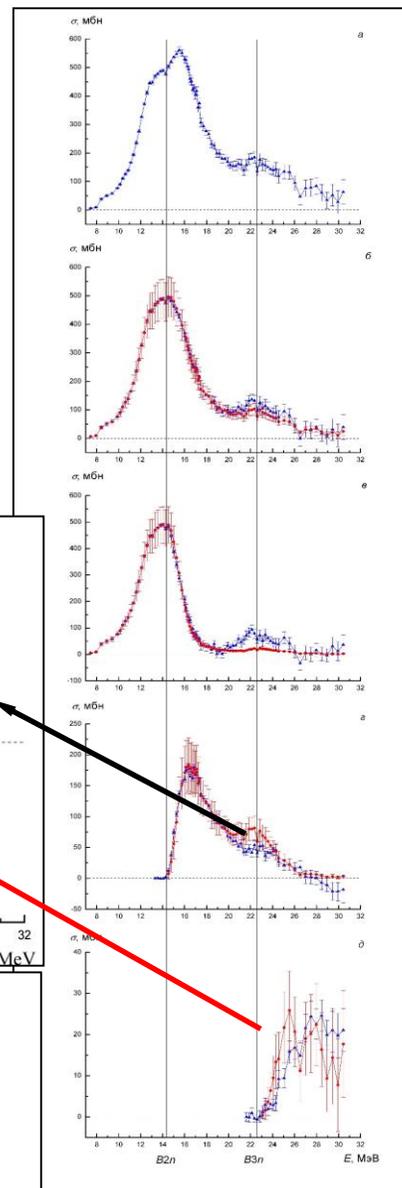
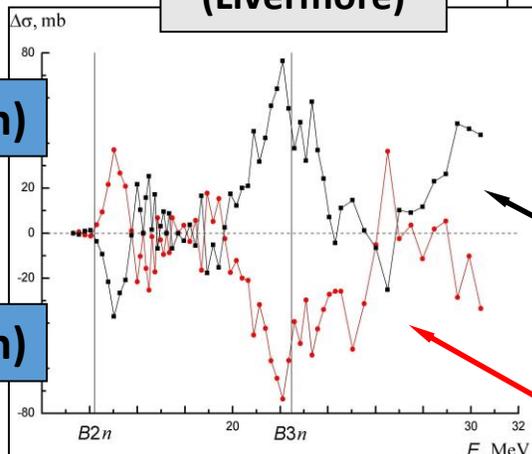
**$^{65}\text{Cu}$**   
 (Livermore)

**$^{188}\text{Os}$**   
 (Livermore)



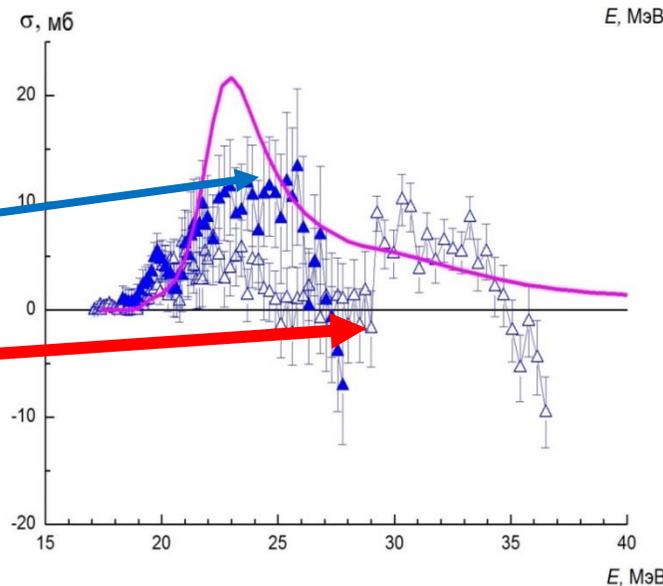
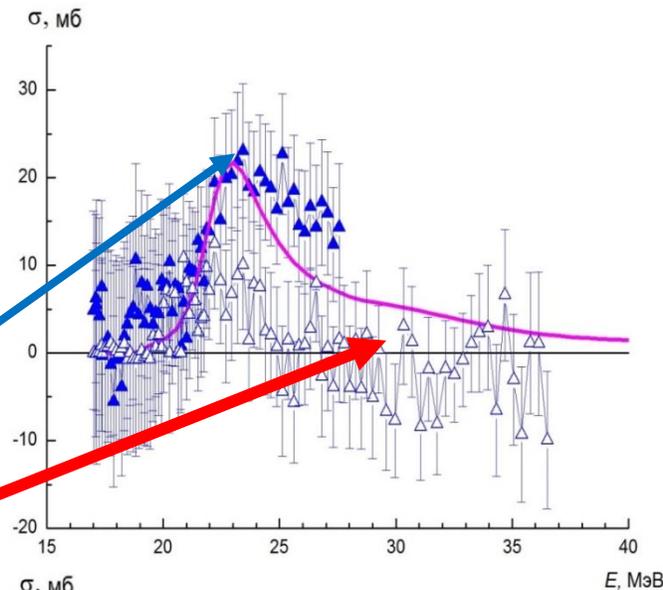
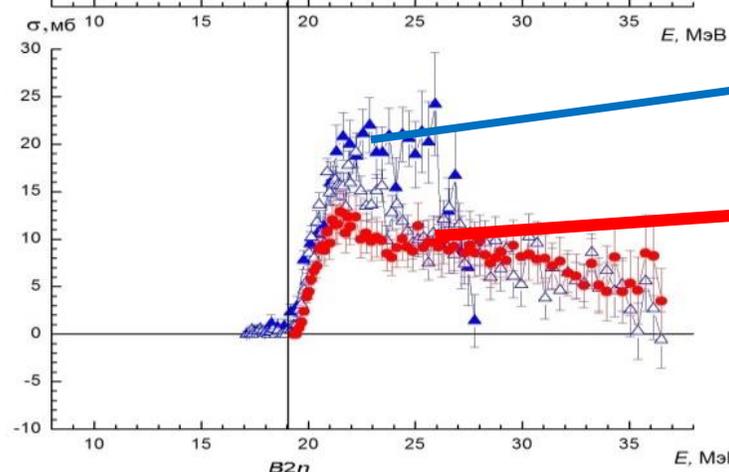
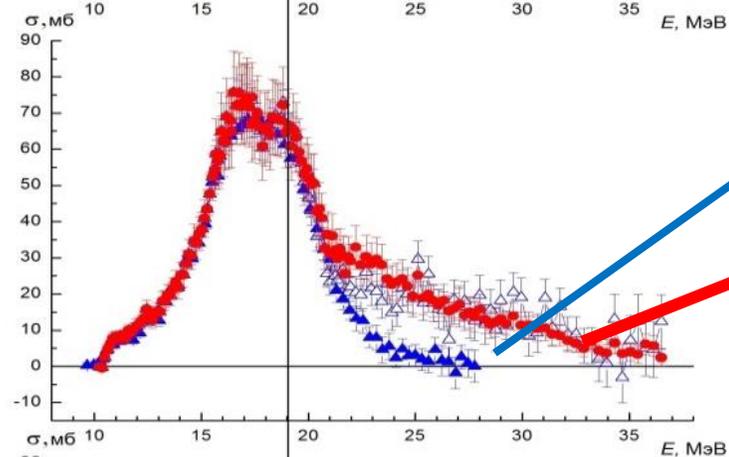
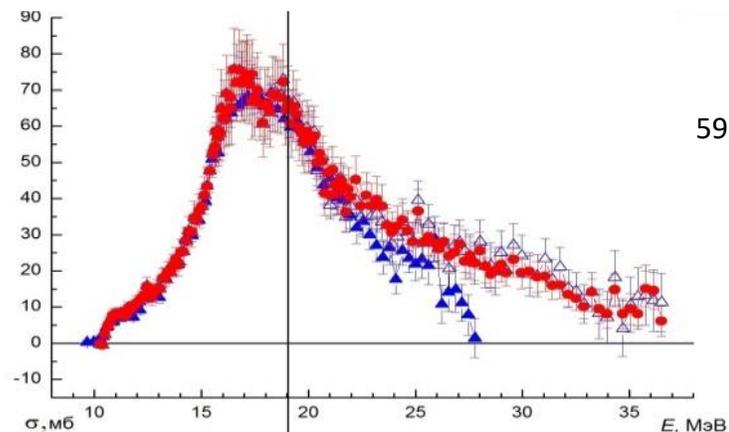
**$(\gamma, 1n)$**

**$(\gamma, 2n)$**



Основной причиной разногласий является  
 недостоверное (ошибочное) разделение  
 нейтронов по их энергии, так как спектры  
 нейтронов близки.

$^{59}\text{Co}$



Второй тип систематических погрешностей – отсутствие учета вклада реакции ( $\gamma$ , 1n1p), двухнуклонной, как и реакция ( $\gamma$ , 2n), но с множественностью не 2, а 1.

Такой тип погрешностей наиболее характерен для относительно легких ядер:

$^{59}\text{Co}$ ,  $^{58,60}\text{Ni}$ ,  $^{75}\text{As}$

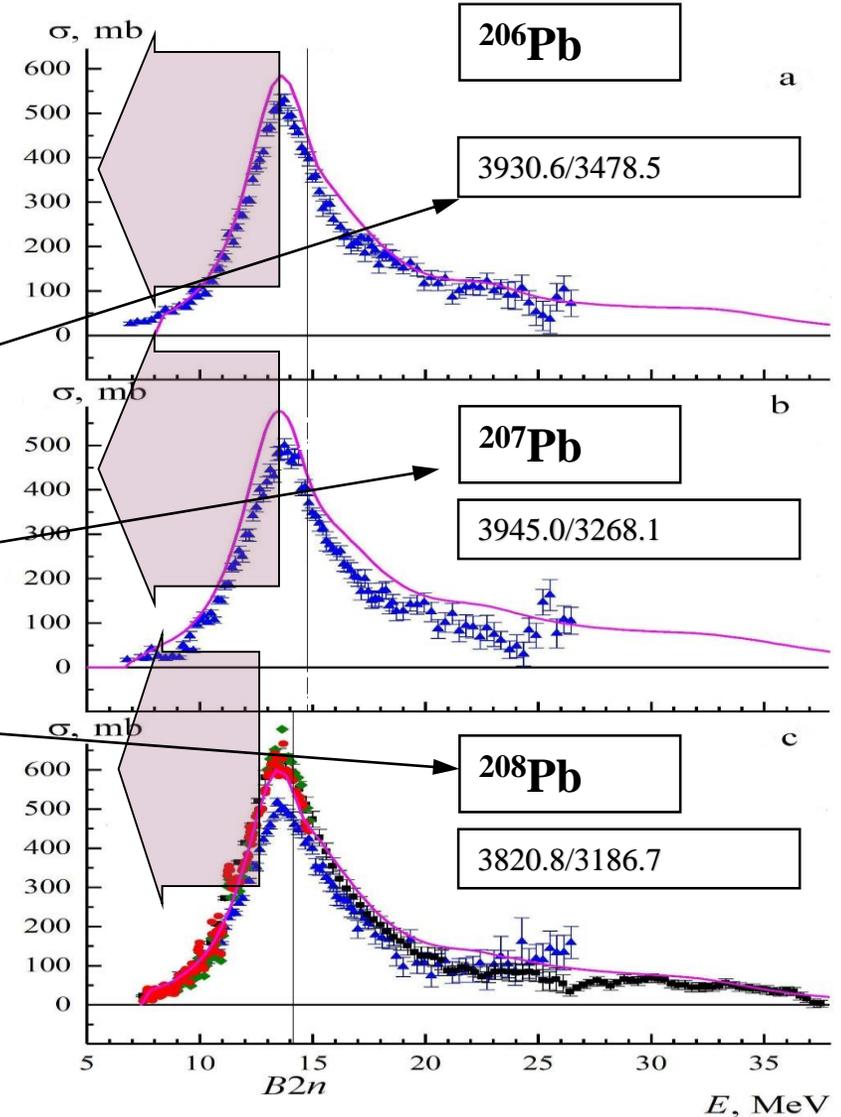
### Соотношения сечений разных реакций для изотопов Pb

При энергиях ниже порогов B2n реакции  $(\gamma, 2n)$  сечения реакций  $(\gamma, xn)$ ,  $(\gamma, sn)$  и  $(\gamma, 1n)$  должны быть идентичны, но в данном случае это не так.

Причина в том, что многие нейтроны из  $(\gamma, 1n)$  были потеряны – **третий тип систематических погрешностей.**

Реакция	$\sigma_{eval}^{int}/\sigma_L^{int}$		
	$^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}$
$(\gamma, xn)$	1.13	1.21	1.20
$(\gamma, sn)$	1.15	1.24	1.30
$(\gamma, 1n)$	1.19	1.30	1.40
$(\gamma, 2n)$	1.02	1.02	0.85

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



	$\sigma_{eval}^{int} / \sigma_L^{int}$					
	<sup>75</sup> As	<sup>127</sup> I	<sup>181</sup> Ta	<sup>208</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb	<sup>206</sup> Pb
( $\gamma$ , xn)	1.27	1.20	1.24	1.28	1.21	1.13
( $\gamma$ , sn)	1.30	1.25	1.30	1.37	1.24	1.15
( $\gamma$ , 1n)	1.34	1.33	1.46	1.42	1.30	1.19
( $\gamma$ , 2n)	1.14	0.98	1.05	0.83	1.02	1.02

Чем больше доля простой  $\sigma(\gamma, 1n)$  реакции в сечении сложной реакции – тем больше оцененное сечение превышает экспериментальное.

$$(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + [2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + \dots]$$

$$(\gamma, sn) = (\gamma, 1n) + [(\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots]$$

$$(\gamma, 1n) = (\gamma, 1n) + [0]$$

$$(\gamma, 2n) = [0]$$

Отношения  $\sigma_{eval}^{int} / \sigma_L^{int}$  для ( $\gamma$ , 2n) реакции близки к 1, для ( $\gamma$ , 1n) реакции значительно выше 1. Это значит что значительное занижение сечения ( $\gamma$ , 1n) реакции приводит к такому же занижению сечения ( $\gamma$ , xn) реакции. Это приводит к выводу о том, что в соответствующих экспериментах значительная часть нейтронов из ( $\gamma$ , 1n) реакции была потеряна.

Это может быть результатом каких-то технических проблем в экспериментах.

Основные результаты настоящей работы заключаются в следующем.

- 1) С использованием объективных физических критериев достоверности проанализированы сечения реакций  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$ , полученные в экспериментах, выполненных с помощью метода разделения нейтронов по множественности.
- 2) Установлено, что в широких областях энергии налетающих фотонов экспериментальные данные критериям достоверности не удовлетворяют в связи с присутствием значительных систематических погрешностей разных типов.
- 3) С помощью экспериментально-теоретического метода оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций получены новые сечения реакций  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$  для большого числа ядер ( $^{51}\text{V}$ ,  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{63,65}\text{Cu}$ ,  $^{75}\text{As}$ ,  $^{76,78,80,82}\text{Se}$ ,  $^{89}\text{Y}$ ,  $^{90,91,92,94}\text{Zr}$ ,  $^{103}\text{Rh}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{116,117,118,120,124}\text{Sn}$ ,  $^{127}\text{I}$ ,  $^{129}\text{Xe}$ ,  $^{133}\text{Cs}$ ,  $^{138}\text{Ba}$ ,  $^{139}\text{La}$ ,  $^{140,142}\text{Ce}$ ,  $^{141}\text{Pr}$ ,  $^{145,148}\text{Nd}$ ,  $^{153}\text{Eu}$ ,  $^{160}\text{Gd}$ ,  $^{159}\text{Tb}$ ,  $^{165}\text{Ho}$ ,  $^{181}\text{Ta}$ ,  $^{186}\text{W}$ ,  $^{186,188,190,192}\text{Os}$ ,  $^{197}\text{Au}$ ,  $^{206,207,208}\text{Pb}$ ,  $^{209}\text{Bi}$ ), удовлетворяющие физическим критериям достоверности данных.
- 4) Новые данные включены в международную электронную базу данных по ядерным реакциям МАГАТЭ.

5) В результате детального сравнительного анализа оцененных и экспериментальных данных установлены погрешности различных типов, определяющие недостоверность экспериментальных данных в широких областях энергии фотонов:

- Погрешности обусловлены близостью кинетических энергий нейтронов из реакций  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 2n)$ ; особенности нейтронных детекторов, использованных в Сакле и Ливерморе, способствуют завышению сечений реакции  $(\gamma, 1n)$  в Сакле и сечений реакции  $(\gamma, 2n)$  в Ливерморе
- Дополнительные систематические погрешности сечений реакций, полученных в Ливерморе, обусловлены отсутствием в экспериментах разделения реакций  $(\gamma, 1n)$  и  $(\gamma, 1n1p)$ ;
- Погрешности третьего типа обусловлены потерей в эксперименте, выполненном в Ливерморе, большого количества нейтронов из реакции  $(\gamma, 1n)$ ;

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова  
Физический факультет. Кафедра общей ядерной физики  
НИИЯФ МГУ, ОЭПВАЯ

**Спасибо за внимание!**