

**Анализ достоверности сечений парциальных
фотонейтронных реакций для изотопов
 $^{58,60}\text{Ni}$**

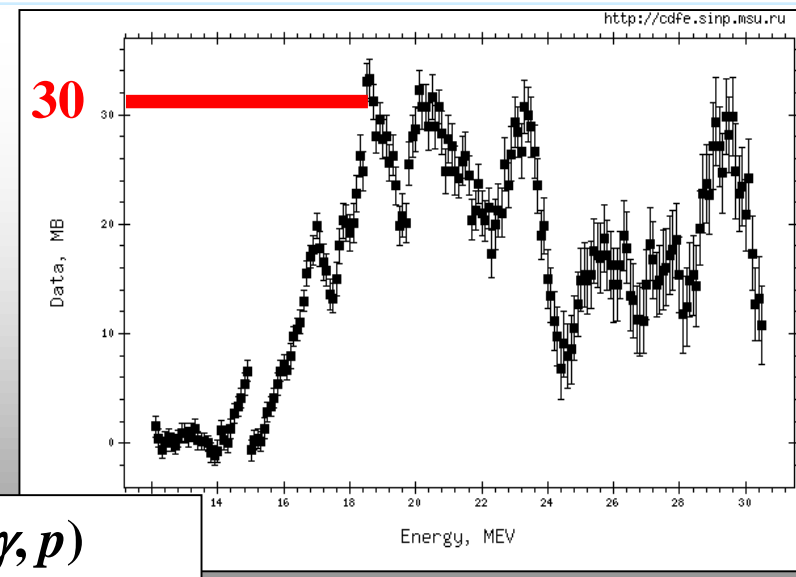
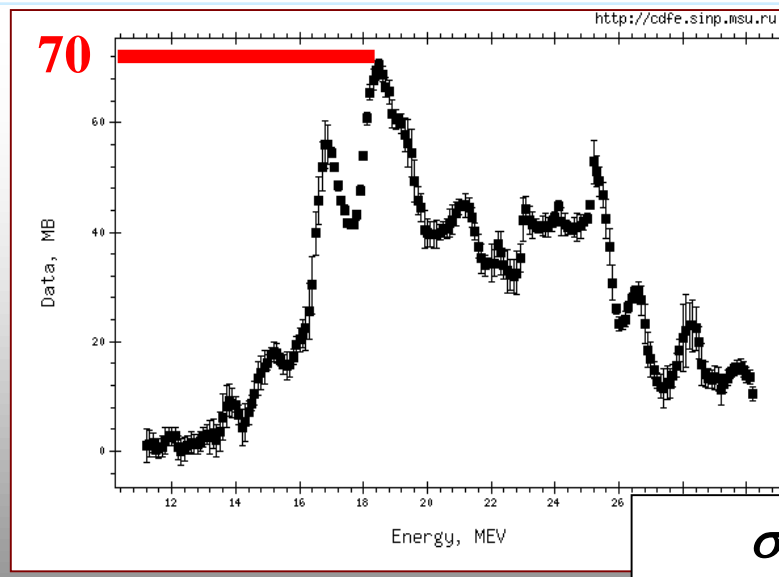
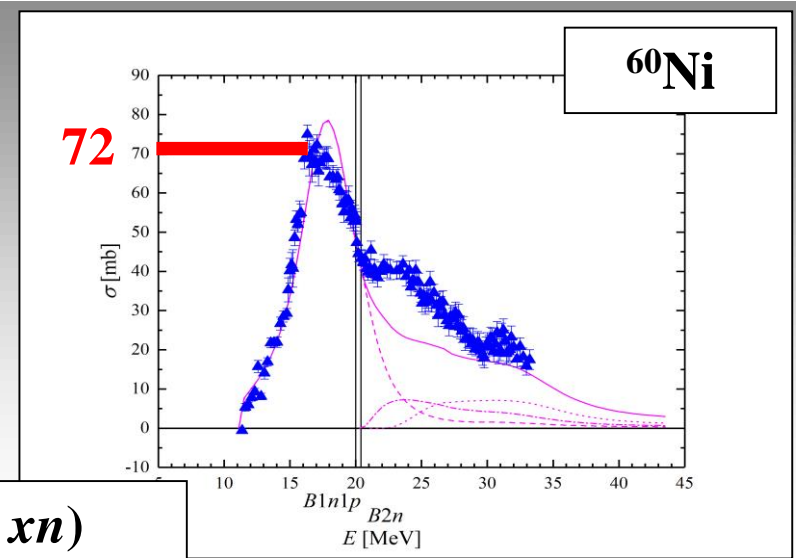
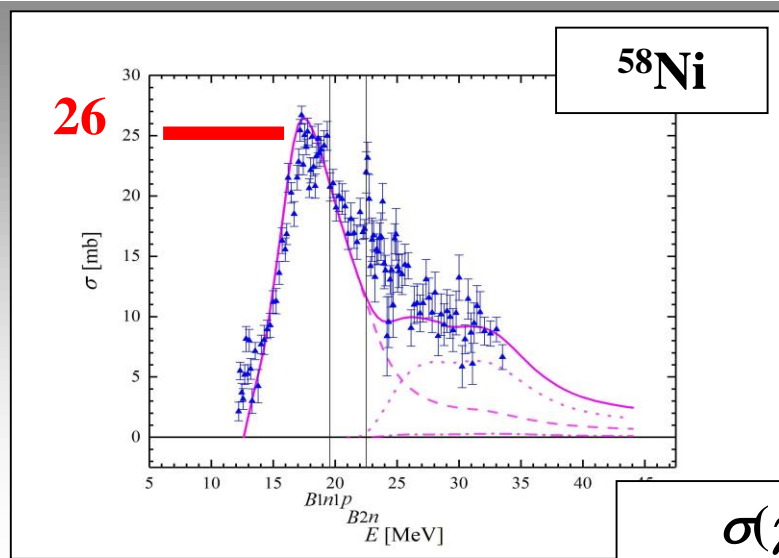
А.И.Давыдов, В.В.Варламов, В.Н.Орлин

Доклад
посвящен проблеме, сколь старой и широко известной, столь же новой, вызывающей большой интерес –
проблеме достоверности экспериментальных сечений парциальных фотонейтронных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$, ..., полученных в разных экспериментах.

Достоверность данных для изотопов $^{58,60}\text{Ni}$ рассматривается с использованием объективных физических критериев достоверности.

Очень **необычное** соотношение

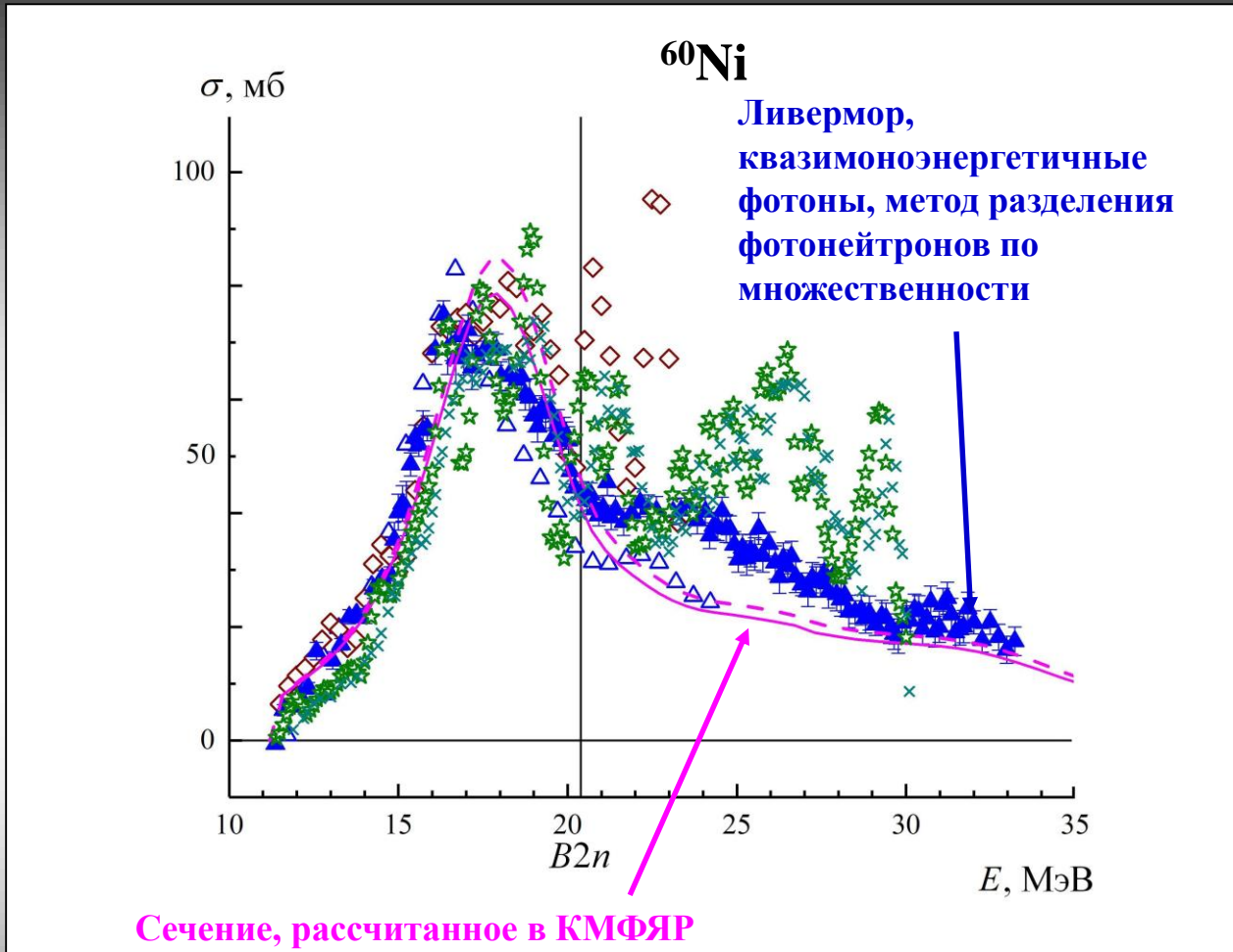
Достаточно **обычное** соотношение



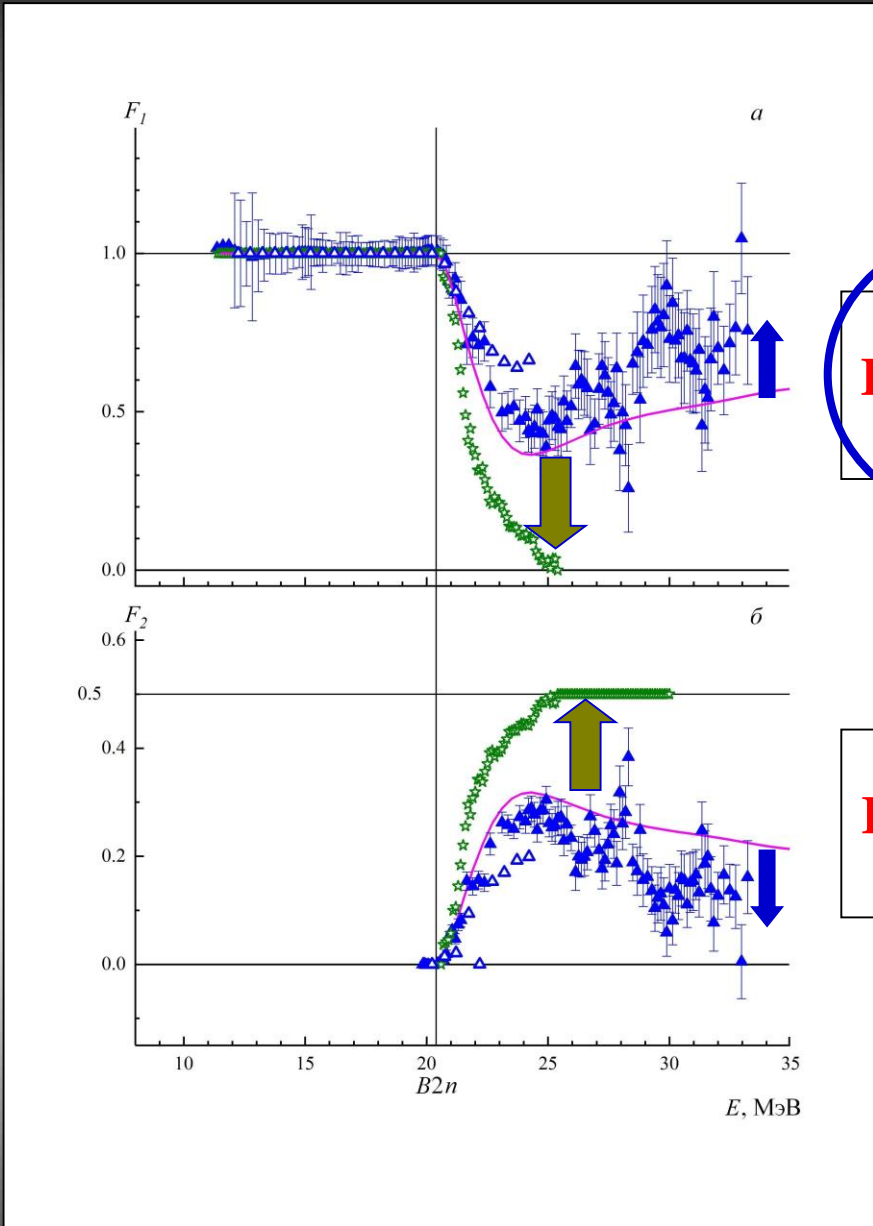
В случаях ядер $^{58,60}\text{Ni}$ сечения полных и парциальных фотонейтронных реакций были получены в экспериментах и с тормозным γ -излучением и с квазимоноэнергетическими фотонами.

Достоверность экспериментальных данных по сечениям парциальных реакций на ядрах $^{58,60}\text{Ni}$ вызывает большой интерес, поскольку:

- сечения выхода нейтронов были получены в нескольких экспериментах, выполненных на пучках тормозного γ -излучения;
- сечения выхода нейтронов, полученные в этих экспериментах, существенно расходятся;
- сечения парциальных реакций ($\gamma, 1n$) и ($\gamma, 2n$) также были получены в нескольких экспериментах с использованием тормозного γ -излучения;
- эксперименты по определению сечения выхода нейтронов и сечений парциальных реакций на пучке квазимоноэнергетических фотонов были выполнены только в Ливерморе, вследствие чего возможность сравнения их результатов с результатами аналогичных экспериментов, выполненных в Сакле, отсутствует;
- результаты, полученные с использованием тормозного γ -излучения и квазимоноэнергетических фотонов, существенно различаются;
- эти результаты существенно различаются для соседних изотопов Ni (сечения фотонейтронных реакций в случае изотопа ^{60}Ni в несколько раз превышают соответствующие сечения реакций в случае изотопа ^{58}Ni , тогда как между сечениями фотопротонных реакций, определенных в других экспериментах, наблюдаются обратные соотношения).



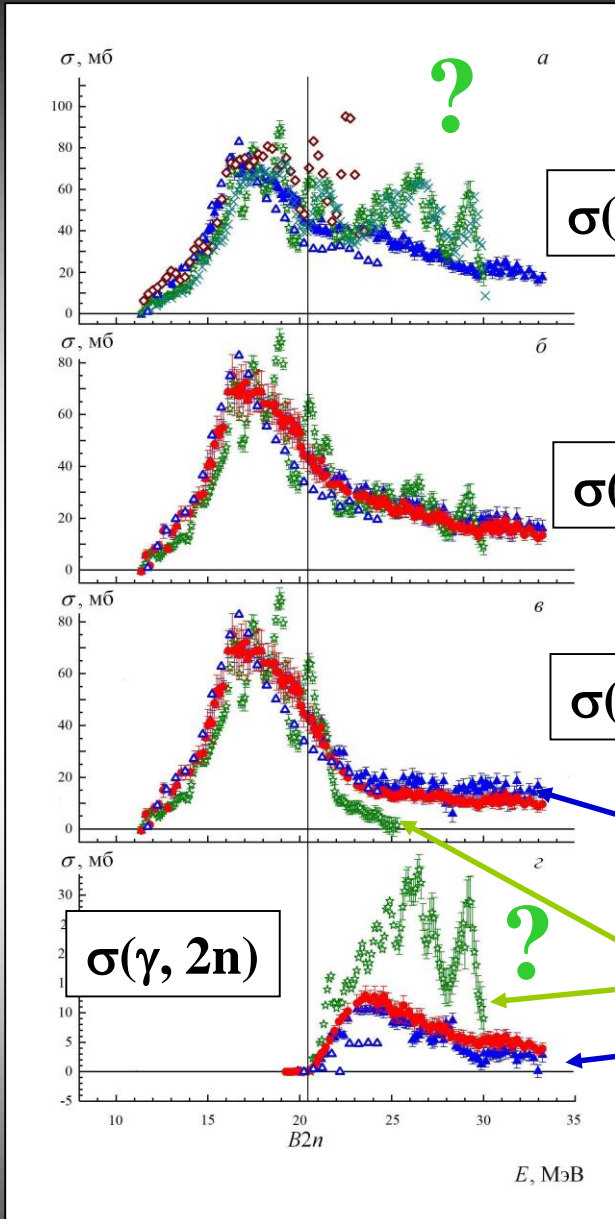
$$\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots$$



^{60}Ni

$$F_1 = \frac{\sigma(\gamma, 1n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 1.00$$

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



^{60}Ni

$\sigma(\gamma, xn)$

$\sigma(\gamma, sn)$

$\sigma(\gamma, 1n)$

$\sigma(\gamma, 2n)$

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, in) = F_i^{\text{теор}} \sigma^{\text{экс}}(\gamma, xn) = [\sigma^{\text{теор}}(\gamma, in) / \sigma^{\text{теор}}(\gamma, xn)] \sigma^{\text{экс}}(\gamma, xn).$$

Москва,
Тормозное γ -излучение,
метод коррекции на
основе стат. теории

Ливермор,
квазимоноэнергетичные фотоны,
метод разделения фотонейтронов
по множественности

ДОСТОВЕРНОСТЬ СЕЧЕНИЙ ПАРЦИАЛЬНЫХ ФОТОНЕЙТРОННЫХ РЕАКЦИЙ ДЛЯ $^{58,60}\text{Ni}$

^{60}Ni

Реакция	(γ, xn)	(γ, sn)	$(\gamma, 1n)$	$(\gamma, 2n)$
	$E_{\text{инт}} = B2n = 20.4 \text{ МэВ}$			
[1]	380.25 (1.72)	380.16 (2.96)	380.16 (1.73)	0.01 (2.42)
[2]	426.24 (4.83)			
[4]	352.36 (1.35)	352.36 (1.35)	352.36 (1.35)	
[5]	388.62 (1.96)	388.8 (1.96)	388.81 (1.96)	-0.01 (0.05)
Оценка	387.68 (4.98)	387.69 (4.98)	387.69 (4.98)	
	$E_{\text{инт}} = 30.0 \text{ МэВ}$			
[1] ¹⁾	494.36 (2.64)	479.45 (3.53)	469.06 (1.74)	10.5 (3.08)
[2] ²⁾	630.88 (6.92)			
[4] ³⁾	806.41 (2.80)	621.74 (2.36)	437.03 (1.81)	184.67 (1.51)
[5]	705.83 (2.99)	646.71 (3.22)	583.97 (3.12) ↑	62.74 (0.79) ↓
Оценка	704.89 (5.77)	628.37 (5.64)	551.85 (5.51) ↑	76.52 (1.21) ↓

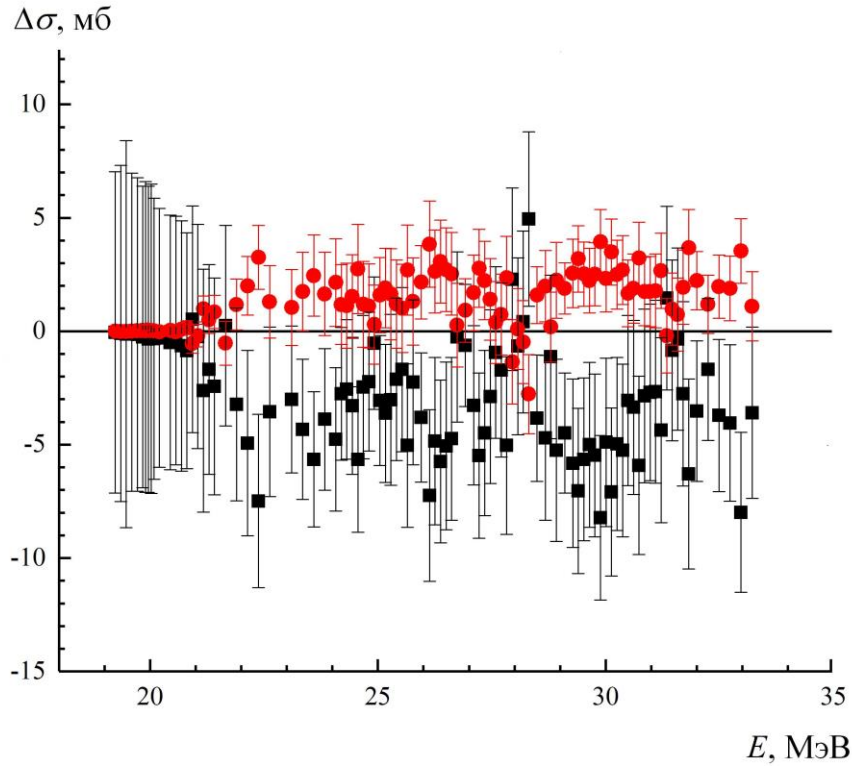
**Определенные расхождения:
($\gamma, 2n$) -> ($\gamma, 1n$)**

¹⁾ Экспериментальные сечения реакций [1], рассчитанные до энергии $E_{\text{инт}} = 24.3 \text{ МэВ}$.

²⁾ Экспериментальные сечения реакций [2], рассчитанные до энергии $E_{\text{инт}} = 23.5 \text{ МэВ}$.

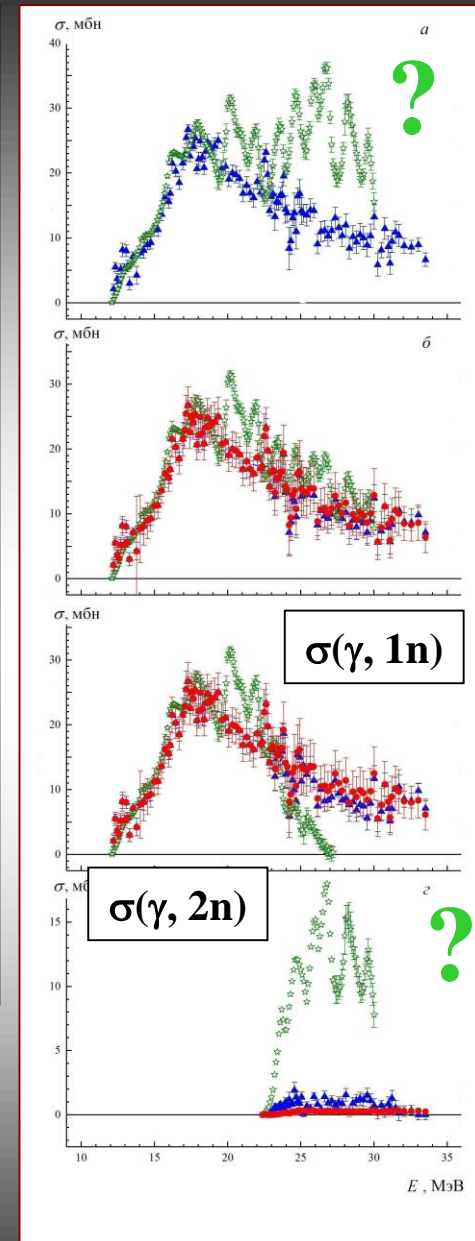
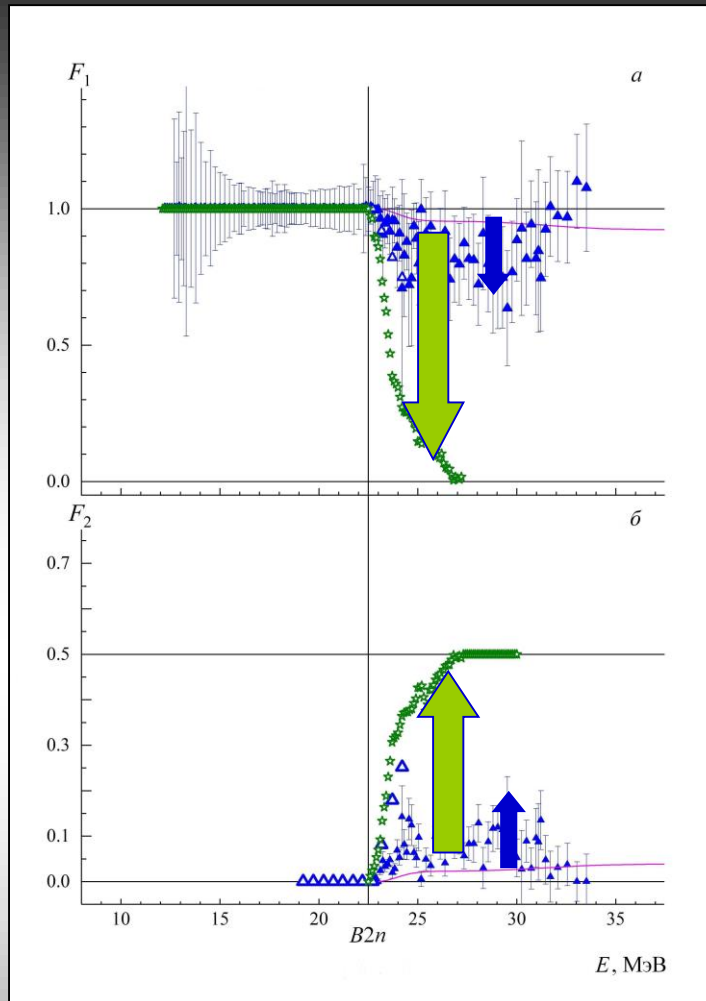
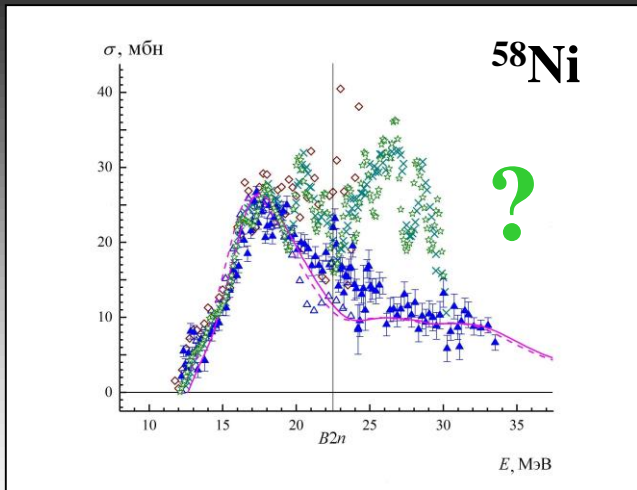
³⁾ Экспериментальные сечения реакций [4], рассчитанные до энергии $E_{\text{инт}} = 25.3 \text{ МэВ}$.

^{60}Ni



$$\Delta\sigma(\gamma, 1n) = \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$$

$$\Delta\sigma(\gamma, 2n) = \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) - \sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$$



Аналогичная оценка достоверных данных для ядра ^{58}Ni : результаты существенно иные по сравнению с результатами для ^{60}Ni

^{58}Ni

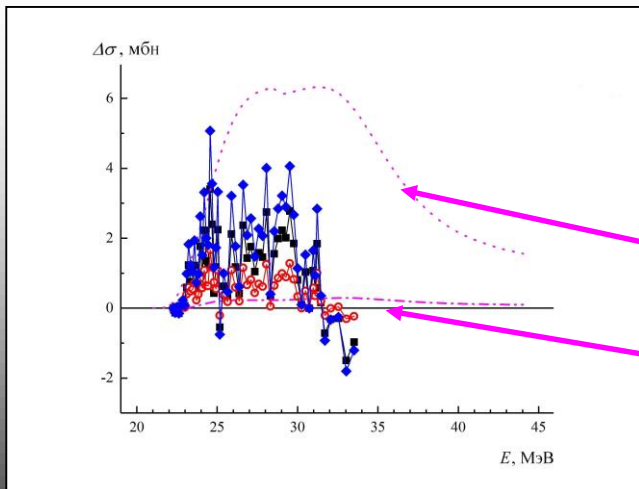
Реакция	[36]	[37]	Оценка	[36]	[37]	Оценка
	$E_{\text{инт}} = B2n = 22.5 \text{ МэВ}$			$E_{\text{инт}} = 33.5 \text{ МэВ}$		
(γ, xn)	191.80 ± 0.55	167.40 ± 1.10	167.41 ± 14.33	$382.19 \pm 0.85^3)$	293.39 ± 2.10	293.39 ± 14.81
(γ, sn)	191.80 ± 0.55	167.40 ± 1.10	167.41 ± 14.33	$304.05 \pm 0.78^3)$	286.41 ± 2.23	290.82 ± 14.81
$(\gamma, 1n)$	191.80 ± 0.55	167.40 ± 1.10	167.41 ± 14.33	$225.86 \pm 0.71^4)$	278.75 ± 2.18	288.25 ± 14.81
$(\gamma, 2n)$				78.14 ± 0.32	7.65 ± 0.49	2.57 ± 0.10

Расхождение в 3.5%
Расхождение в 300%

³⁾ Экспериментальные сечения реакций [36], рассчитанные до энергии $E_{\text{инт}} = 30.0 \text{ МэВ}$.

⁴⁾ Экспериментальные сечения реакций [36], рассчитанные до энергии $E_{\text{инт}} = 27.2 \text{ МэВ}$.

Единственный источник нейтронов для такого увеличения – реакция $(\gamma, 1n1p)$



Разности между экспериментальными и оцененными сечениями реакций ($\Delta\sigma(\gamma, 1n)$ – кружки; $\Delta\sigma(\gamma, 2n)$ – квадраты, $\Delta\sigma(\gamma, 1n) + \Delta\sigma(\gamma, 2n)$ – ромбы); сечения реакций, рассчитанные в КМФЯР

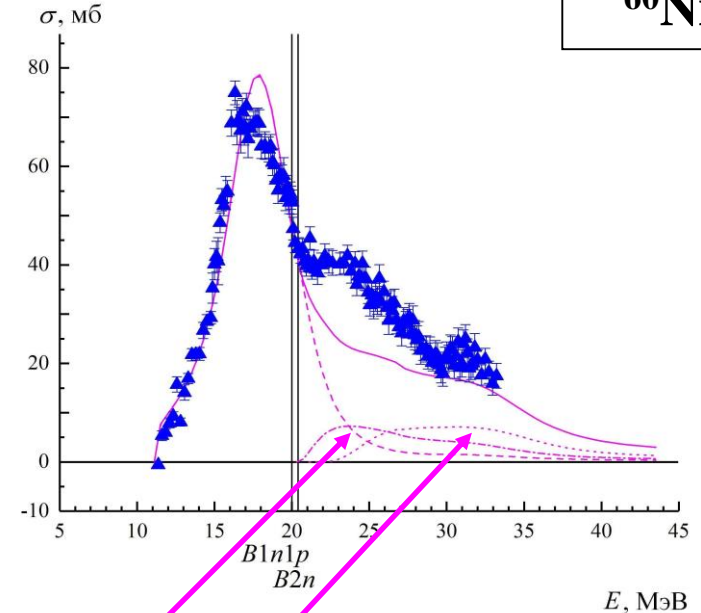
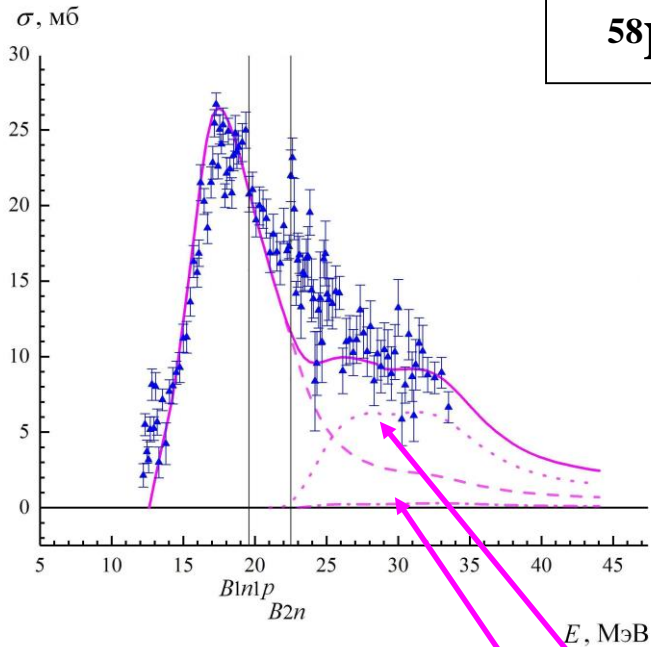
$(\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 1n1p))$ и

$\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 2n)$.

^{58}Ni

^{60}Ni

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



$\sigma(\gamma, 2n)$ пренебрежимо мало по сравнению с $\sigma(\gamma, 1n1p)$

$\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 1n1p)$

$\sigma^{\text{теор}}(\gamma, 2n)$

Сравнимы по положению и величине

Энергетические пороги (B), положения максимумов ($E^{\text{макс}}$) и абсолютные величины ($\sigma^{\text{макс}}$) сечений основных фотонейтронных и фотопротонных реакций в области энергий ГДР ядер $^{58,60}\text{Ni}$.

Реакция	^{58}Ni			^{60}Ni		
	B , МэВ	$E^{\text{макс}}$, МэВ	$\sigma^{\text{макс}}$, мб	B , МэВ	$E^{\text{макс}}$, МэВ	$\sigma^{\text{макс}}$, мб
$(\gamma, 1n)$	12.2	17.0	26.5	11.4	18.0	85.0
$(\gamma, 1n1p)$	19.6	31.0	6.3	20.0	31.	7.7
$(\gamma, 2n)$	22.5	32.2	0.3	20.4	24.4	7.8
$(\gamma, 1p)$	8.2	18.6	81.6	9.5	20.8	51.8
$(\gamma, 2p)$	14.2	23.0	13.7	16.9	24.4	2.2

**Пороги и величины
существенно различаются**

**Пороги и величины
практически совпадают**

Значительные различия в конкуренции реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 1n1p)$ для ядер $^{58,60}\text{Ni}$ могут быть объяснены влиянием эффектов протонно-нейтронной симметрии на массу ядра.

Дифференцируя по Z при постоянном A выражение полуэмпирической массовой формулы Вайцзеккера

$$M = Zm_p + (A - Z)m_n - [\alpha_1 A - \alpha_2 A^{2/3} - \alpha_3 Z^2/A^{1/3} - \alpha_4 (A/2 - Z)^2/A + \alpha_5 A^{-3/4}],$$

и приравнявая производную нулю

$$(\partial M/\partial Z)A = m_p - m_n + 2[\alpha_3 Z/A^{1/3} - \alpha_4 (A/2 - Z)/A] = 0$$

и учитывая $\alpha_3 = 0.71$ МэВ и $\alpha_4 = 94.8$ МэВ, получаем для стабильного изомера

$$Z = A/(1.98 + 0.015A^{2/3}),$$

что означает $Z = 26$ для $A = 58$ и $Z = 27$ для $A = 60$.

Ядро ^{58}Ni по сравнению с ядром ^{60}Ni является протонно-избыточным.

Для ^{58}Ni разницы порогов реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 1p)$ и реакций $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 1n1p)$ составляют, соответственно, 4.0 и 2.9 МэВ, тогда как для ^{60}Ni - 1.9 и 0.4 МэВ: следовательно, **в ^{58}Ni , пока не испущен нейтрон, несмотря на действие кулоновского барьера, преобладают протонные каналы распада.**

Это объясняет, почему сечение реакции $(\gamma, 2n)$ пренебрежимо мало по сравнению с сечением реакции $(\gamma, 1n1p)$.

Расчет одночастичных протонных и нейтронных уровней для обоих ядер в потенциале Вудса-Саксона, базирующемся на экспериментальных данных, использованных при построении оптического потенциала
(A.J. Koning , J.P. Delaroche, Nucl. Phys. A 713 (2003) 231).

Последние заполненные протонные и нейтронные орбитали (уровни Ферми):

^{58}Ni		^{60}Ni	
$E_F(p)$	$E_F(n)$	$E_F(p)$	$E_F(n)$
-10.59	\ll -12.64	-11.91	\approx -11.88,
2.05 МэВ		0.03 МэВ	

что согласуется с выводами следующими из полуэмпирической формулы Вайцзеккера.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

- с помощью экспериментально-теоретического метода оценки получены новые данные по сечениям реакций $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$ на изотопах $^{58,60}\text{Ni}$, удовлетворяющие физическим критериям достоверности;
- установлено, что расхождения между оцененными и экспериментальными сечениями реакций для изотопов ^{58}Ni и ^{60}Ni имеют совершенно разную природу;
- в эксперименте на ядре ^{60}Ni имело место недостоверное перемещение некоторого количества нейтронов из реакции $(\gamma, 2n)$ в реакцию $(\gamma, 1n)$;
- в эксперименте на ядре ^{58}Ni определенное сечение реакции $(\gamma, 2n)$ практически полностью представляет собой сечение реакции $(\gamma, 1n1p)$;
- на основании результатов теоретических расчетов в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций показано, что обнаруженные расхождения данных по сечениям разных реакций для изотопов ^{58}Ni и ^{60}Ni обусловлены особенностями (различиями) их структуры.