

Новые оцененные данные по фотоядерным реакциям на ядрах ^{51}V , ^{59}Co и ^{90}Zr

(для международной электронной базы данных
по ядерным реакциям МАГАТЭ)

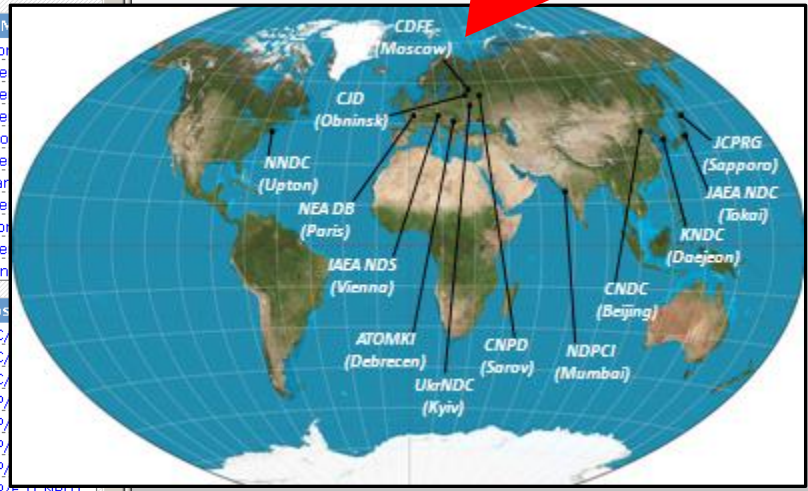
В.В. Варламов, А.И. Давыдов, И.А. Мостаков, В.Н. Орлин

НИИЯФ (ОЭПВАЯ, ЦДФЭ), Физический факультет МГУ

Международная сеть Центров данных по ядерным реакциям (NRDC) МАГАТЭ

В сеть входят 14 центров из 10 стран: Австрия, Венгрия, Индия, Китай, Корея, Россия, США, Украина, Франция, Япония.

ЦДФЭ НИИЯФ



Главная задача – сопровождение полной электронной базы данных по ядерным реакциям.

Данные (выходы, сечения (полные, парциальные, дифференциальные), спектры, угловые, зарядовые, массовые распределения, поляризации, анализирующие способности, ...) - система EXFOR

(> 300 тыс. работ, > 3 млн. наборов данных, > 700 Мб)

о ядерных реакциях под действием:

электронов

$[(e,e'), (e,n), (e,2n), (e,3n), (e,p), \dots, (e,f), \dots]$;

фотонов

$[(\gamma,\gamma'), (\gamma,1n), (\gamma,1n1p), (\gamma,2n), (\gamma,2n1p), \gamma,3n), (\gamma,p), (\gamma,d), (\gamma,t), (\gamma,\alpha), \dots, (\gamma,f), \dots (\gamma,2npd\alpha), \dots]$;

нейтронов

$[(n,n'), (n, \gamma), (n,p), (n,d), (n,t), (n, \alpha), \dots]$;

заряженных частиц

$[(p,p'), (p,n), (p,d), (p,t), (p, \alpha), \dots]$

$(d,d'), (d,n), (d,p), (d,t), (d, \alpha), \dots]$

$(t,t'), (t,n), (t,p), (t,d), (t,\alpha), \dots,$

$\dots (\alpha,^{117}\text{n}80\text{p}), \dots]$;

Ответственность ЦДФЭ

тяжелых ионов

$[(^6\text{Li},n), (^{10}\text{B},p), \dots (^{14}\text{N}, ^{11}\text{C}), \dots,$

$\dots (^{40}\text{Ar}, 5np \alpha), \dots]$

**Общая проблема –
точность, надежность, достоверность данных о сечениях фотоядерных
реакций, накопленных в международной электронной базе данных по
ядерным реакциям.**

Эксперименты на пучках разного типа:

- квазимоноэнергетические аннигиляционные фотоны;**
- тормозное излучение электронов.**

**Существенно разные способы получения информации о сечениях
реакций.**

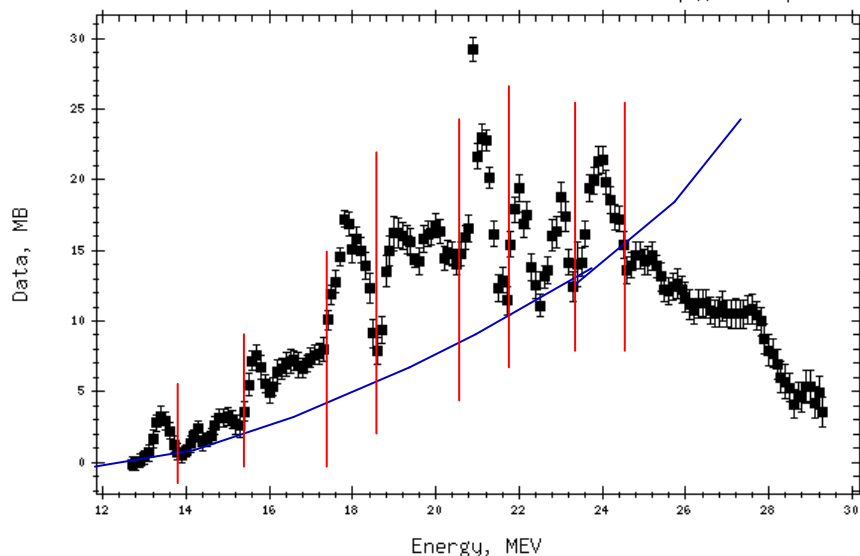
Абсолютное большинство данных получено в экспериментах двух типов :

(НИИЯФ, ИЯИ РАН, Саратов, Мельбурн,...)

на сплошных пучках тормозного γ -излучения – решение обратной задачи определения сечения выхода $\sigma(\gamma, 1n)+2\sigma(\gamma, 2n)+3\sigma(\gamma, 3n)$.

$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{E_{th}}^{E_{jm}} W(E_{jm}, k) \sigma(k) dk,$$

<http://cdfc.sinp.msu.ru>



Сечения парциальных реакций – поправки по статистической теории в сечение выхода.

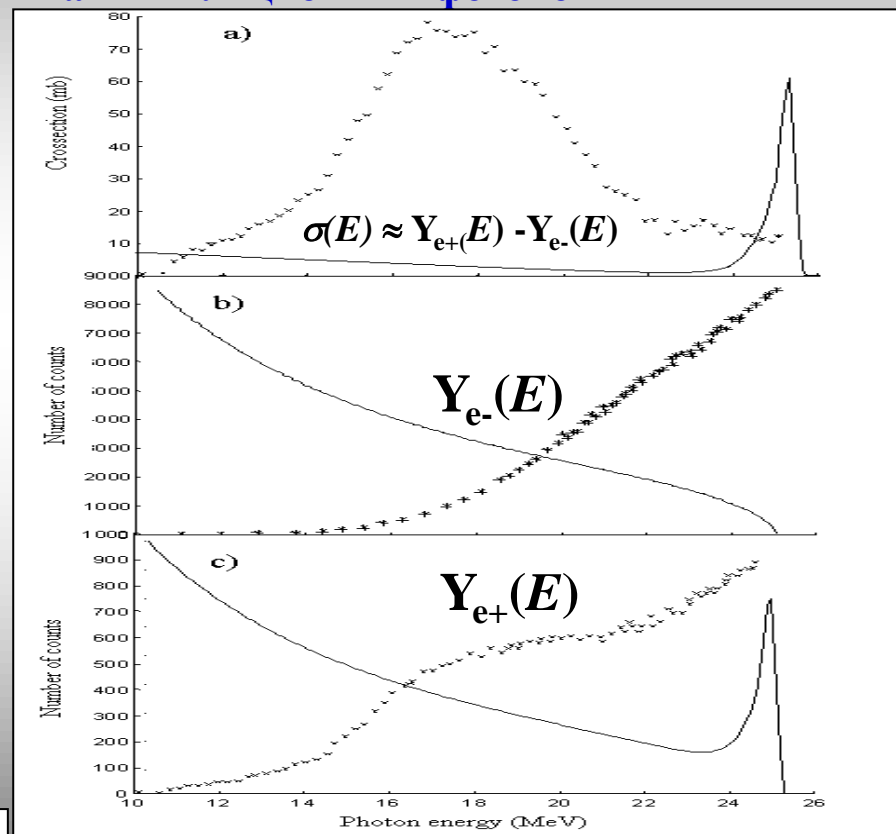
26.02.2024

Конференция по результатам 2023 года

26 февраля, НИИЯФ МГУ

(Ливермор (США), Саклэ (Франция,...))

разностная процедура на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов



Сечения парциальных реакций - прямо.

5
2 типа

Существенные (до 100 % величины) разнонаправленные систематические расхождения данных, полученных в разных экспериментах.

Вопросы:

- какие именно данные являются достоверными;**
- являются ли такие данные достоверными в целом;**
- имеются ли объективные критерии достоверности данных;**
- каковы причины наблюдающихся расхождений;**
- как должны выглядеть достоверные данные.**

2 жестких абсолютных критерия достоверности данных по сечениям парциальных реакций:

1) F_i – положительные (сечения имеют размерность площади) и:

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

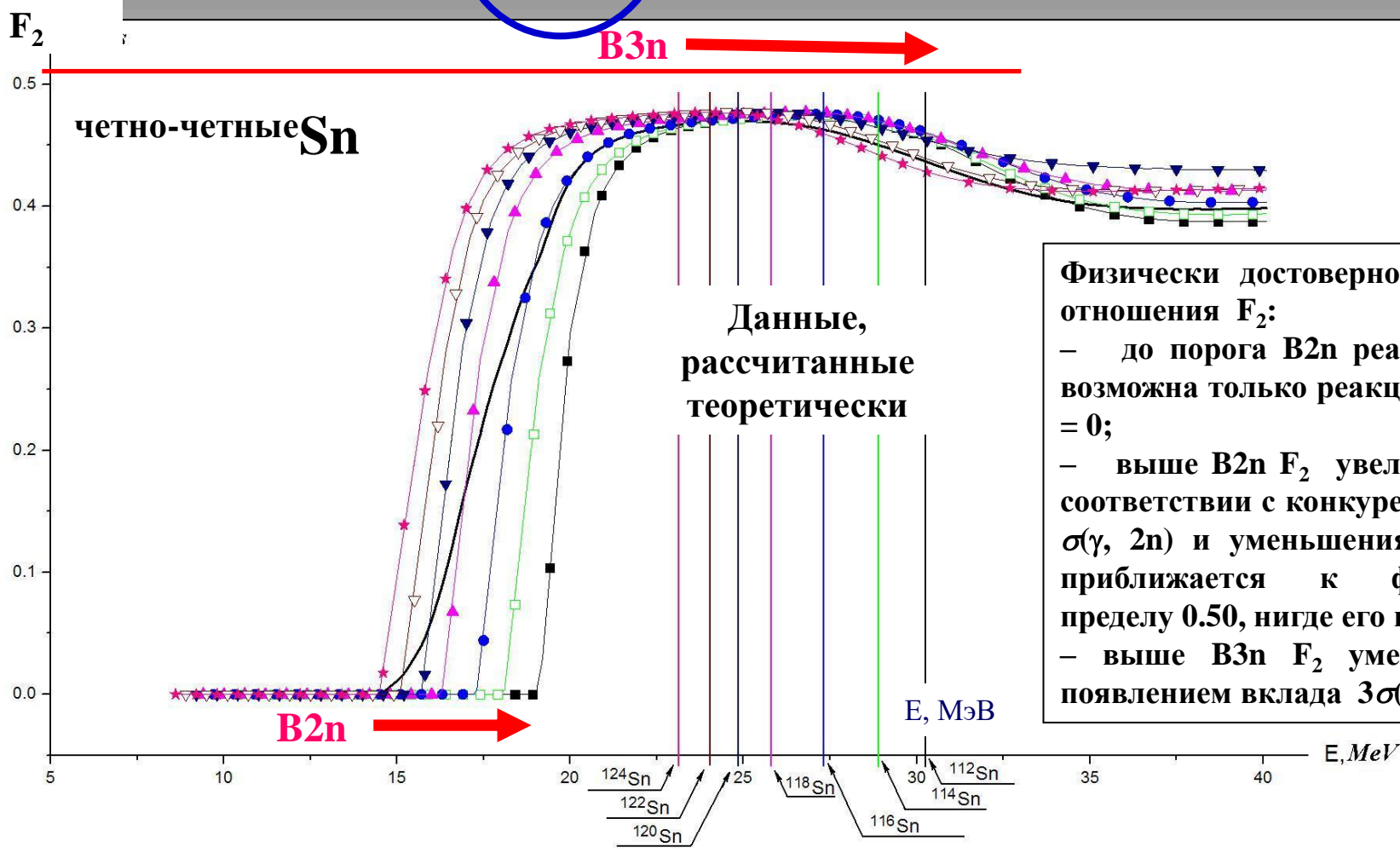
$$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.50$$

$$F_3 = \frac{\sigma(\gamma, 3n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.33$$

$$F_4 < 0.25, F_5 < 0.20, F_6 < 0.17, F_7 < 0.14, \dots$$

3) Третий (не жёсткий) критерий – близость отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$, обусловленный согласием оцененных данных с результатами активационных экспериментов, в которых разделение парциальных реакций осуществляется прямо и достоверно.

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



Физически достоверное поведение отношения F_2 :

- до порога $B2n$ реакции $(\gamma, 2n)$ возможна только реакция $(\gamma, 1n)$: $F_2 = 0$;
- выше $B2n$ F_2 увеличивается в соответствии с конкуренцией роста $\sigma(\gamma, 2n)$ и уменьшения $\sigma(\gamma, 1n)$ и приближается к физическому пределу 0.50, нигде его не достигая;
- выше $B3n$ F_2 уменьшается с появлением вклада $3\sigma(\gamma, 3n)$.

Для ~ 50 ядер,

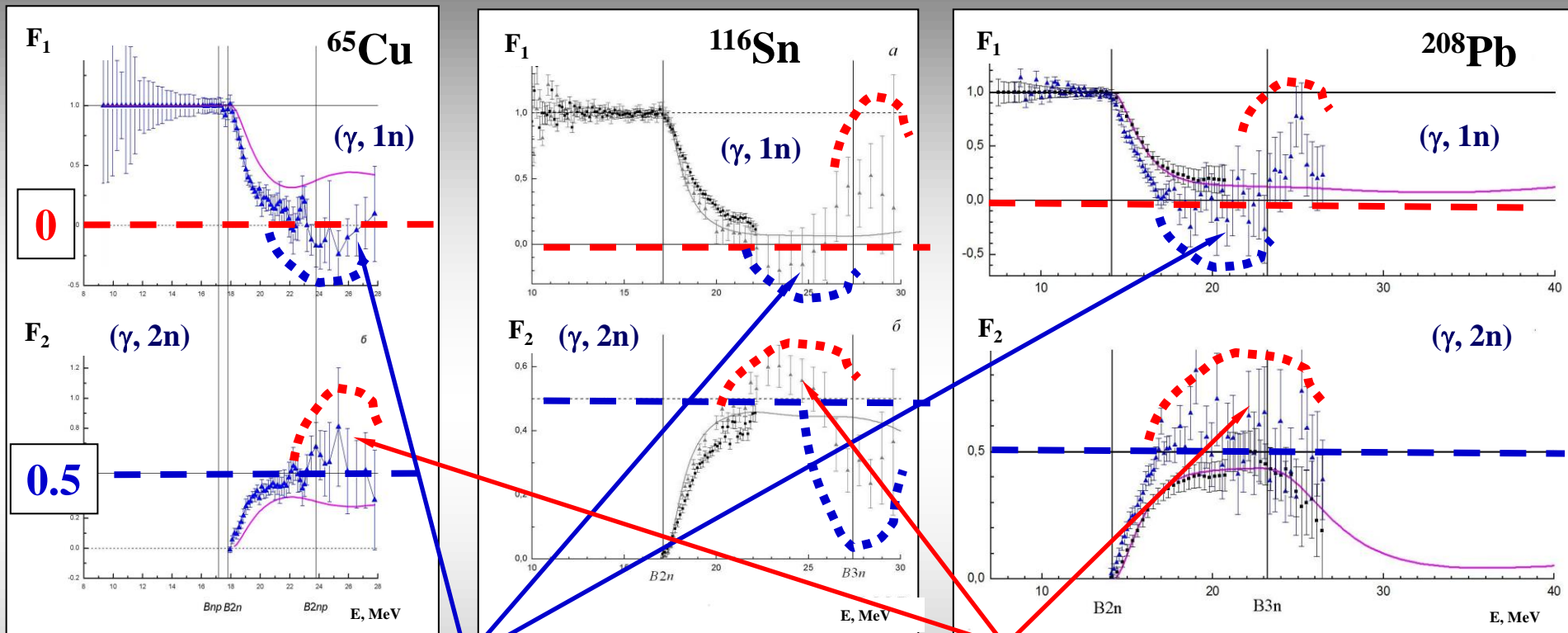
исследованных на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов

(^{51}V , $^{63,65}\text{Cu}$, ^{59}Co , ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{103}Rh , $^{116,117,118,119,120,124}\text{Sn}$, ^{115}In , ^{127}I , ^{129}Xe , ^{133}Cs , ^{138}Ba , ^{139}La , $^{140,142}\text{Ce}$, ^{141}Pr , $^{145,148}\text{Nd}$, ^{153}Eu , ^{159}Tb , ^{160}Gd , ^{165}Ho , ^{181}Ta , ^{186}W , $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$, ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi , ...)

установлено присутствие в сечениях парциальных реакций существенных систематических погрешностей, обусловленных определенными недостатками использованного метода определения множественности нейтронов по их кинетическим энергиям, которые делают экспериментальные сечения парциальных реакций недостоверными.

Основная причина недостоверности данных по сечениям парциальных реакций – неоднозначность процедуры распределения нейтронов между реакциями разной множественности (γ , 1n), (γ , 2n), (γ , 3n),....

Типичные примеры недостоверных данных.



Физически запрещенные отрицательные значения

Физически недостоверные значения $F_i > 0.5$

В широких областях энергий налетающих фотонов данные не удовлетворяют физическим критериям достоверности из-за погрешностей определения множественности нейтронов.

Новый экспериментально-теоретический метод оценки сечений парциальных фотонейтронных реакций для 50 ядер:

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n) = F_1^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn),$$

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n) = F_2^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn),$$

$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n) = F_3^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn), \dots$$

- используется только экспериментальное сечение реакции полного выхода нейтронов

$$\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn) = \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) + 2\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) + 3\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 3n),$$

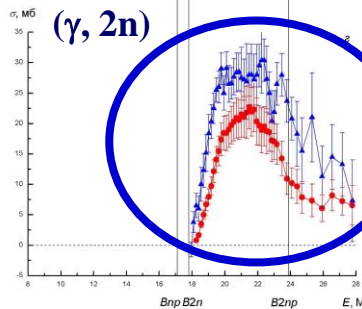
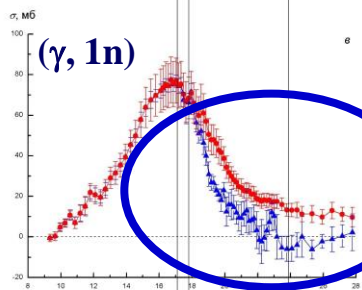
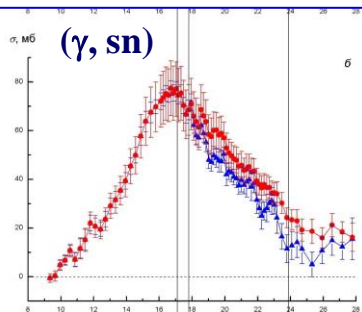
свободное от ограничений методов разделения нейтронов по множественности (включает в себя вклады от всех парциальных реакций), используется как исходное;

- для определения вкладов в сечение полной реакции $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ сечений парциальных реакций $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$, $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ 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 фотоядерных реакций.

Метод означает, что соотношение между оцененными сечениями парциальных реакций соответствует представлениям модели, а их соответствующая сумма $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, xn)$ равна сечению $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$, не зависящему от разделения нейтронов по множественности.

Все новые оцененные сечения для ~ 50 ядер, удовлетворяющие физическим критериям достоверности, внесены в БД EXFOR.

Большие расхождения оцененных (достоверных) и экспериментальных (недостоверных) сечений парциальных реакций ставят под сомнение оценки многих физических эффектов, сделанные ранее.



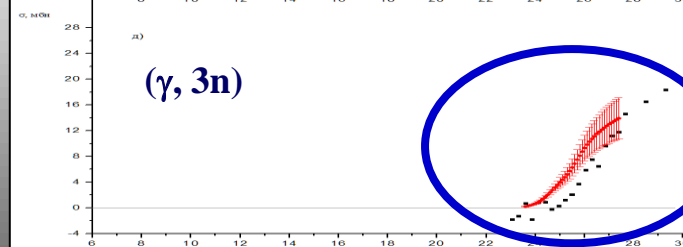
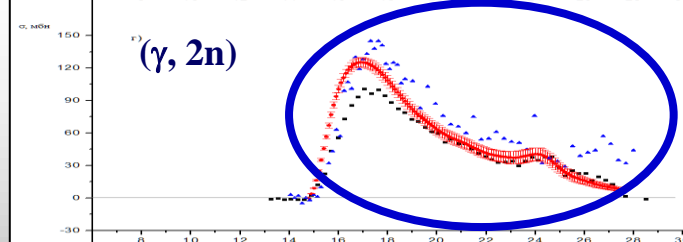
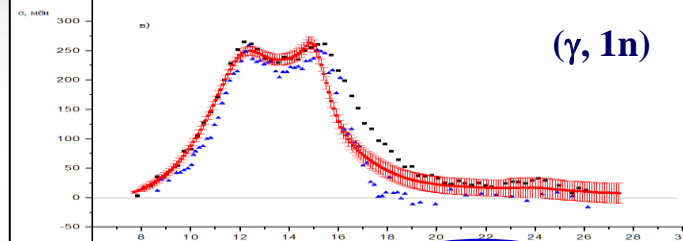
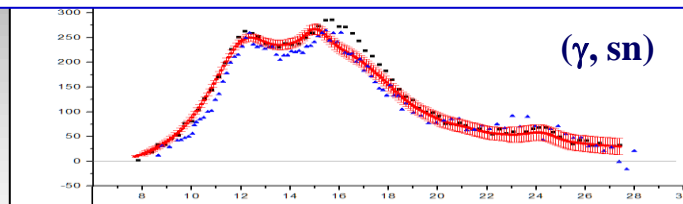
^{65}Cu

^{159}Tb

Сечения парциальных реакций были получены на пучках аннигиляционных фотонов «прямо»:

$$\sigma(E) \approx Y_{e^+}(E) - Y_{e^-}(E)$$

с помощью непрямого метода разделения фотонейтронов по множественности на основании данных об их энергиях.



Имеются результаты определения сечений парциальных реакций в альтернативных экспериментах с тормозным γ -излучением.

Вследствие сплошного спектра фотонов непосредственно измеряется выход нейтронов

$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{E_{th}}^{E_{jm}} W(E_{jm}, E) \sigma(E) dE,$$

из которого с помощью одного из специально разработанных методов развертки сечения реакции и ее выхода (Пенфолда-Лейсса, наименьшей структуры, регуляризации Тихонова, редукции и др.) определяется сечение выхода нейтронов

$$\sigma(E) = \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn) = \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 1n) + 2\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 2n) + 3\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, 3n).$$

Сечения парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ и т.д. определяются путем внесения в сечение выхода $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$ поправок, рассчитанных по статистической теории.

Поправки, рассчитанные по статистической теории (Блатт и Вайскопф)

Экспериментально определяется сечение выхода нейтронов

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

$\sigma(\gamma, 2n)$ определяется путем внесения в сечение $\sigma(\gamma, xn)$ рассчитанных поправок:

$$[\sigma_{2n}(E)]/[\sigma_{1n}(E) + \sigma_{2n}(E)] = \frac{\int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=E-B_{2n}} \varepsilon \rho(U) d\varepsilon}{\int_{\varepsilon=0}^{\varepsilon=E-B_{1n}-\delta} \varepsilon \rho(U) d\varepsilon},$$

U – эффективная энергия, ε – энергия нейтрона, δ – энергия спаривания, ρ – плотность уровней, θ – температура

$$[\sigma_{2n}(E)]/[\sigma_{1n}(E) + \sigma_{2n}(E)] = 1 - [1 + (E - B_{2n})/\theta] \exp[-(E - B_{2n})/\theta].$$

$\sigma(\gamma, 1n) = \sigma(\gamma, xn) - 2\sigma(\gamma, 2n)$:

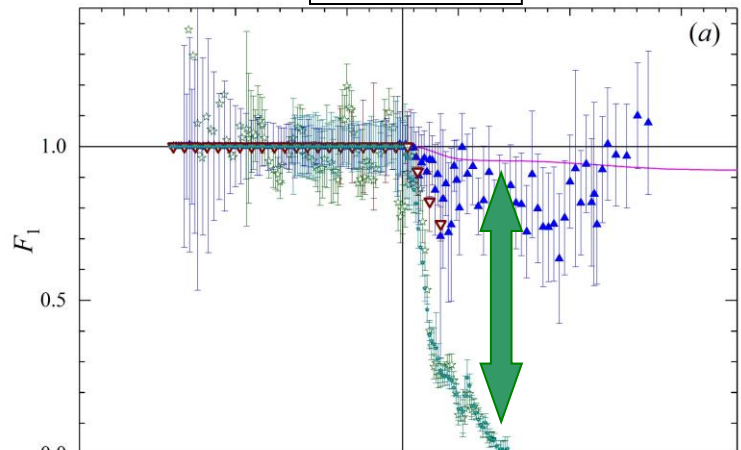
$$\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) = \sigma(\gamma, xn) - \sigma(\gamma, 2n).$$

**Результаты исследований достоверности данных по
фотонейтронным реакциям на ядрах ^{58}Ni и ^{60}Ni ,
полученных на пучках тормозного γ -излучения,
новые данные для ядер
 ^{51}V , ^{59}Co и ^{90}Zr .**

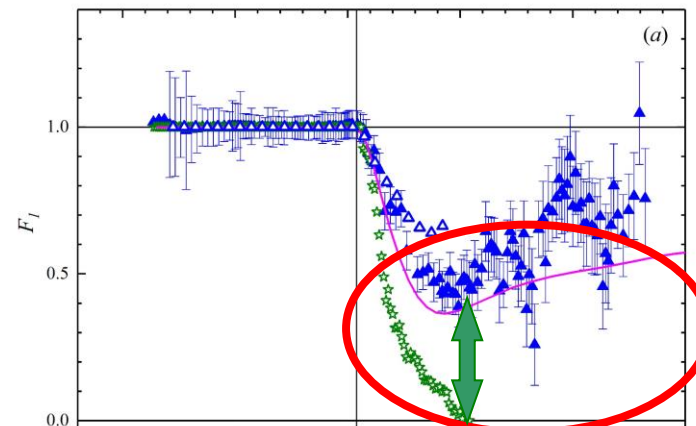
**Анализ достоверности экспериментальных данных и оценка
сечений, удовлетворяющих физическим критериям,
выполнены с помощью экспериментально-теоретического
метода.**

Очевидная недостоверность данных.

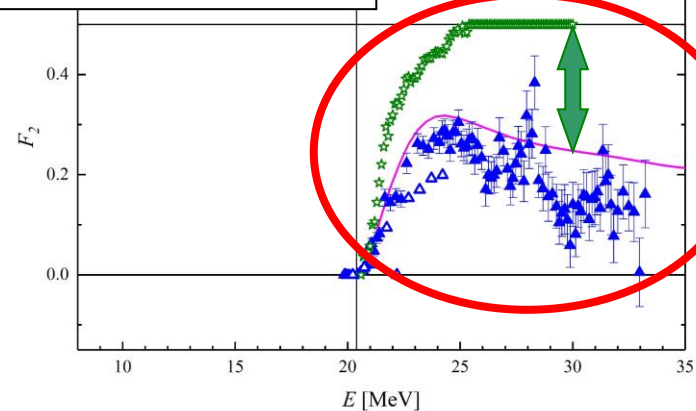
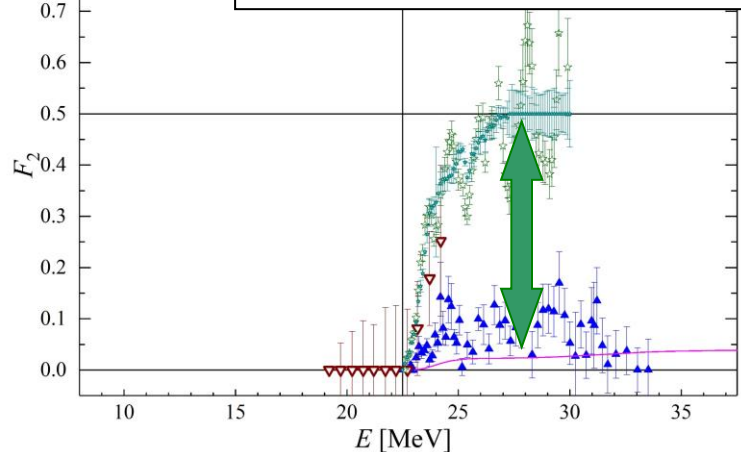
^{58}Ni



^{60}Ni



Огромные различия отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$



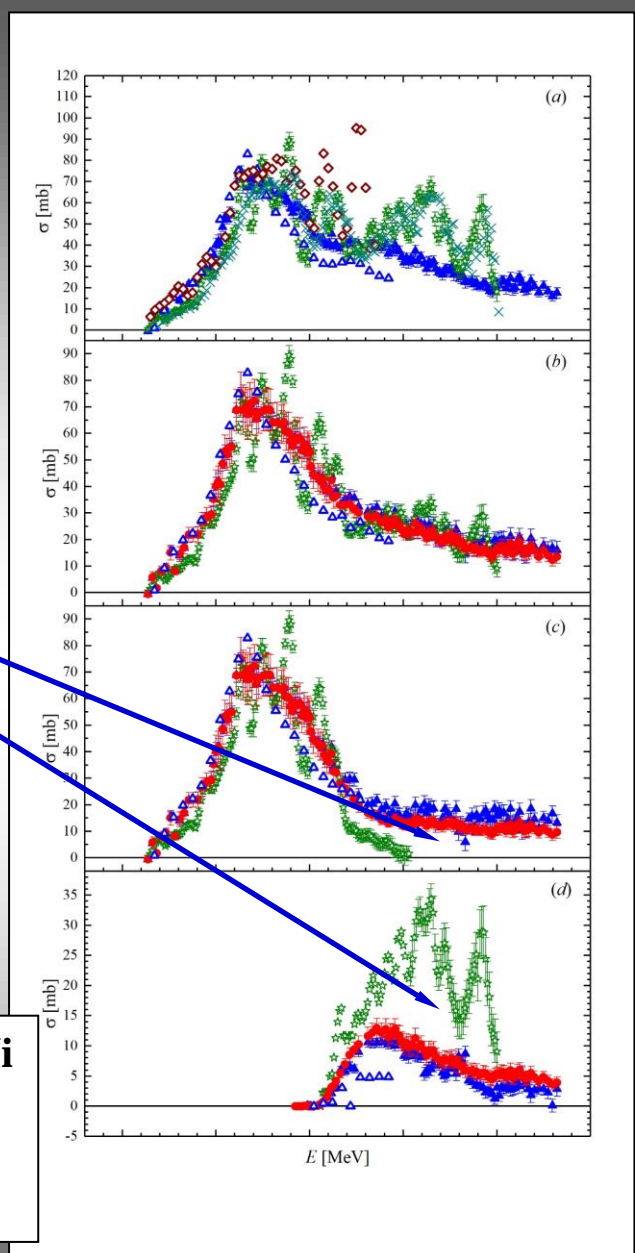
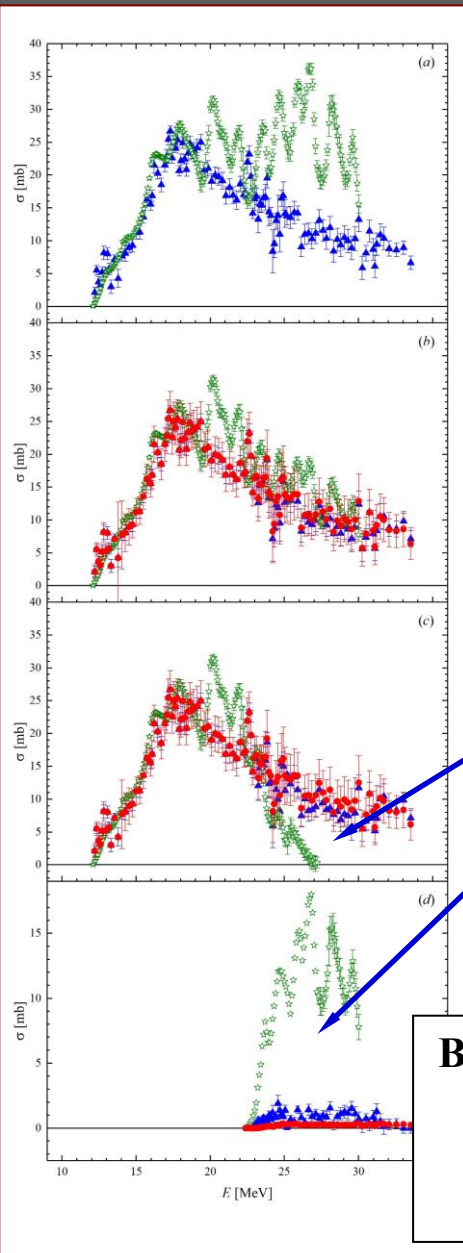
^{58}Ni

^{60}Ni

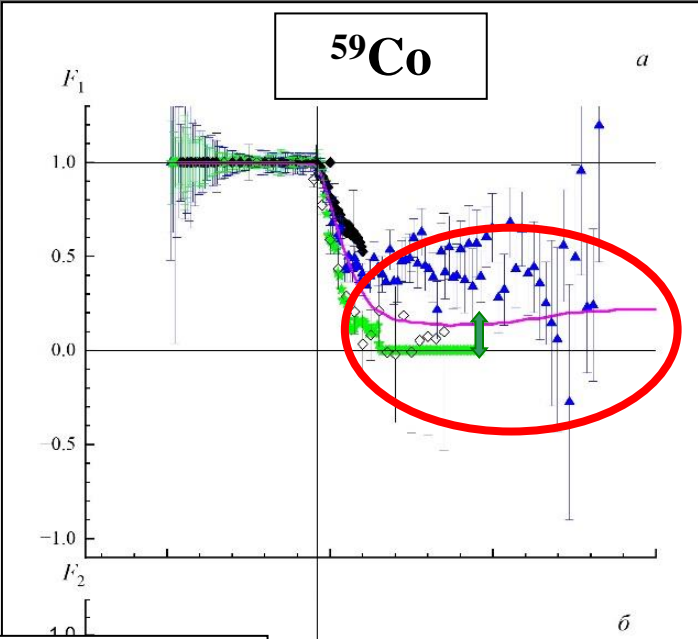
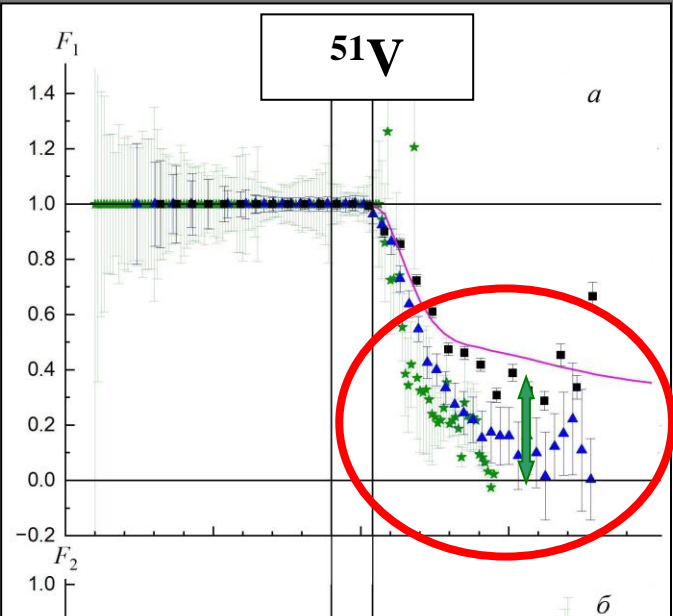
**Огромные расхождения
оцененных и
экспериментальных сечений
реакций.**

**Основная проблема - отсутствие
учета вклада от реакции $(\gamma, 1n1p)$:
по характеристикам она близка к
реакции $(\gamma, 2n)$, а множественность
у них разная.**

**В аннигиляционном эксперименте для ^{58}Ni
сечение реакции $(\gamma, 2n)$ практически
полностью представляет собой сечение
реакции $(\gamma, 1n1p)$.**

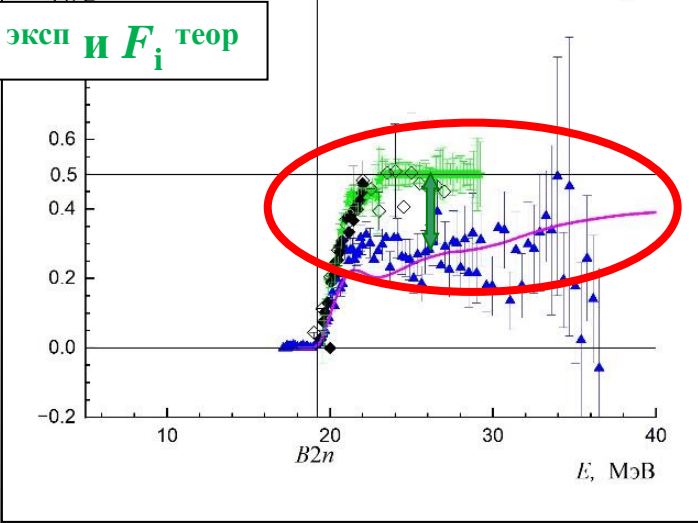
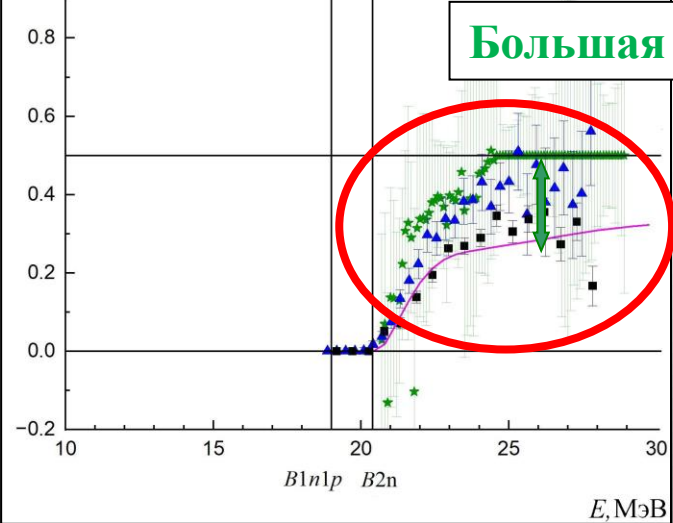


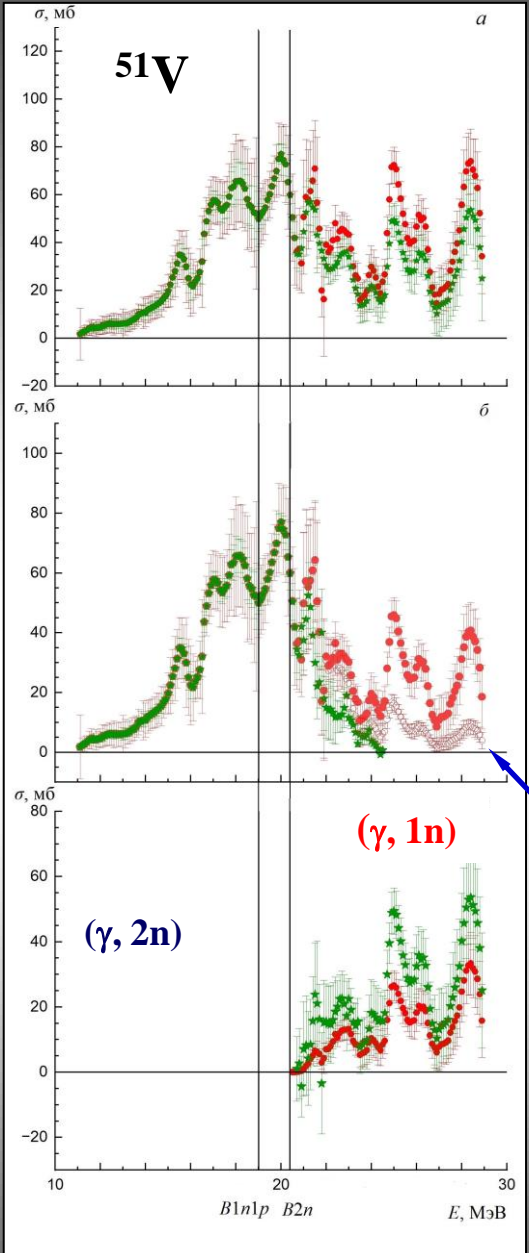
К достоверности данных имеются серьезные претензии.



В тормозных экспериментах вклад реакции $(\gamma, 1n1p)$ использованными поправками не описывается.

Большая разность отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$

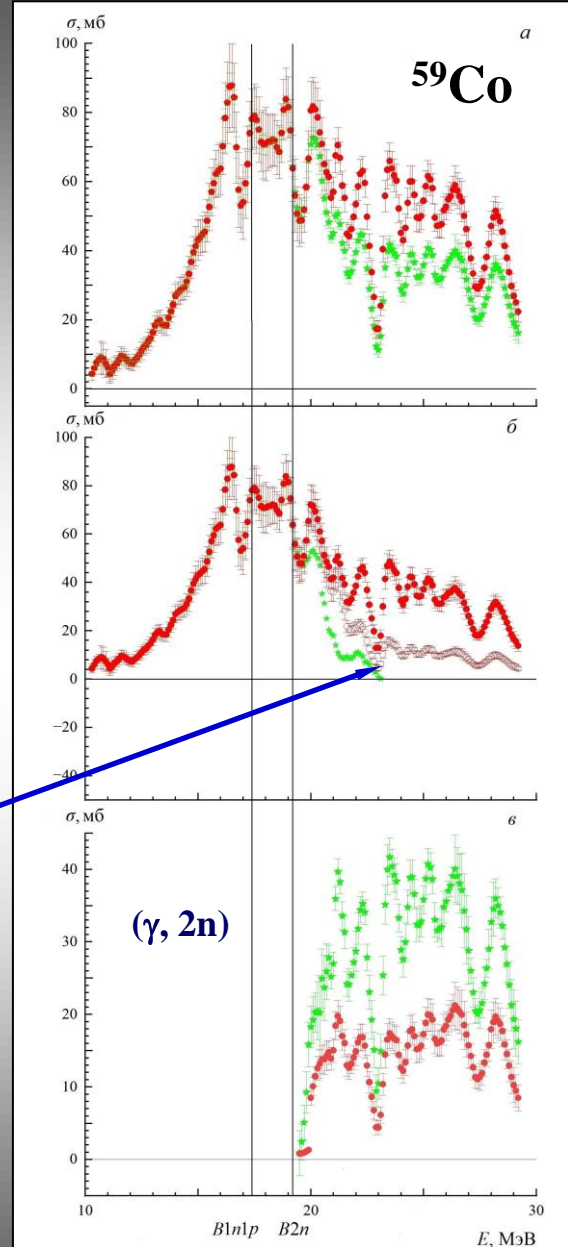




Оцененные сечения в сравнении с экспериментальными данными

$(\gamma, 1n) + (\gamma, 1n1p)$

Отсутствие учета вклада реакции $(\gamma, 1n1p)$ не позволяет описать сечение выхода нейтронов (γ, xn)



26.02.2024

Конференция по результатам 2023 года
26 февраля, НИИЯФ МГУ

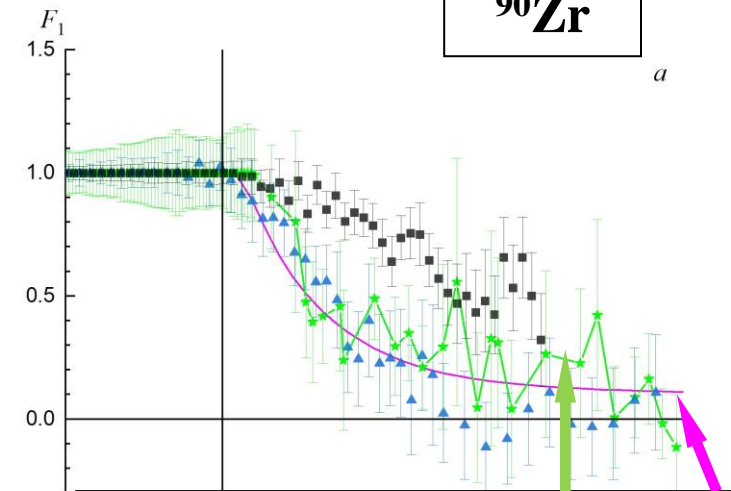
Реакция	Оцененные данные		Эксперимент
	Без учета реакции ($\gamma, 1n1p$)	С учетом реакции ($\gamma, 1n1p$)	
^{51}V			
(γ, xn)	670.6±11.5	770.9±11.4	771.3±11.1
(γ, sn)	560.4±10.9	660.7±10.8	578.1±6.8
$(\gamma, 1n)+(\gamma, 1n1p)$		550.3±10.2	384.9±4.2
$(\gamma, 1n)$	450.0±9.6		
$(\gamma, 2n)$	110.3±3.6	110.3±3.6	193.2±8.3
^{59}Co			
(γ, xn)	844.3 ± 3.4	1012.3 ± 5.7	1017.2 ± 3.4
(γ, sn)	704.6 ± 5.1	872.7 ± 5.6	737.6 ± 2.2
$(\gamma, 1n)+(\gamma, 1n1p)$		733.0 ± 5.5	457.9 ± 1.2
$(\gamma, 1n)$	564.9 ± 5.0		
$(\gamma, 2n)$	139.7 ± 1.4	139.7 ± 1.4	279.6 ± 2.5

Полная аналогия данных для ядер $^{58,60}\text{Ni}$, ^{51}V и ^{59}Co .

Без учета вклада реакции $(\gamma, 1n1p)$ не удастся описать величину сечения выхода $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn)$.

Реакция $(\gamma, 1n1p)$ не описывается в чисто статистическом подходе.

^{90}Zr

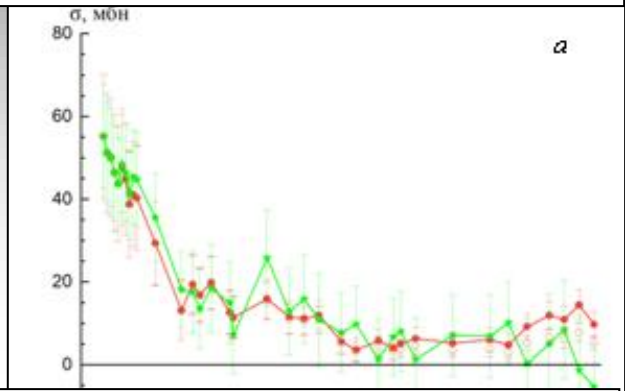
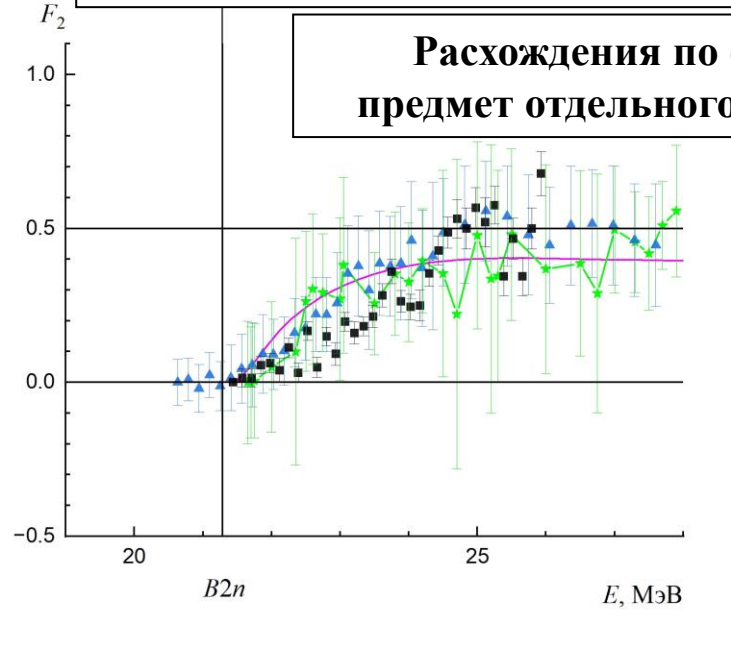


Претензии к достоверности данных отсутствуют.

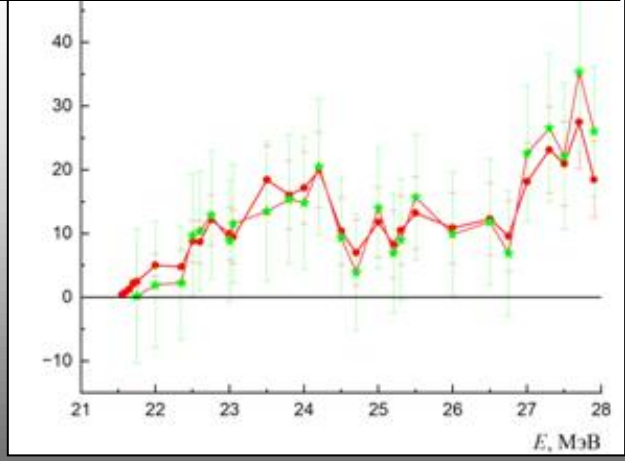
В отличие от ^{51}V и ^{59}Co , поправки, рассчитанные по статистической теории, приводят к достоверным сечениям парциальных реакций.

Близость отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$

Расхождения по форме – предмет отдельного разговора



Близость экспериментальных и оцененных сечений



^{90}Zr

Реакция	Оцененные данные	Эксперимент
$E_{\text{инт}} = 27.0 \text{ МэВ}$		
(γ, xn)	1021.26 (13.32)	\approx 1021.26 (10.26)
(γ, sn)	960.65 (12.53)	\approx 965.07 (13.16)
$(\gamma, 1n)$	900.03 (11.68)	\approx 908.87 (13.18)
$(\gamma, 2n)$	60.61 (4.54)	\approx 56.2 (11.96)

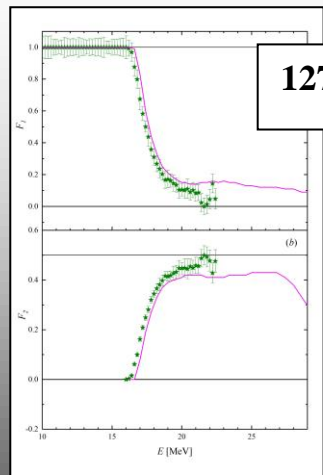
Данные свидетельствуют о малой роли реакции $(\gamma, 1n1p)$?

Реакция	$(\gamma, 1n1p)$		$(\gamma, 2n)$	
	$E_{\text{макс}}$	$\sigma_{\text{макс}}$	$E_{\text{макс}}$	$\sigma_{\text{макс}}$
^{51}V	24.4	12.6	23.6	11.9
^{59}Co	21.8	19.4	23.4	15.4
^{60}Ni	31.0	7.7	24.0	7.8
^{90}Zr	28.0 ^{*)}	2.4 ^{*)}	24.0	14.2
^{127}I	23.0	4.4	18.6	72.7
^{165}Ho	21.5	9.6	16.7	145.4
^{181}Ta	34.6	1.1	16.2	193.0

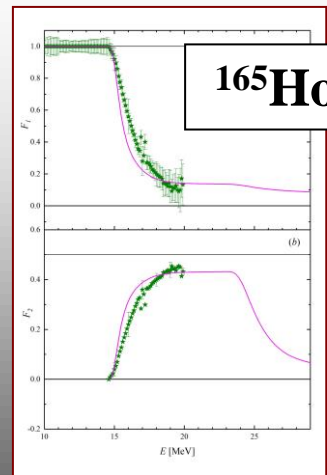
Характеристики сечений реакций $(\gamma, 1n1p)$ и $(\gamma, 2n)$ близки.

Сечением реакции $(\gamma, 1n1p)$ можно пренебречь (величины в разы меньше, пороги выше).

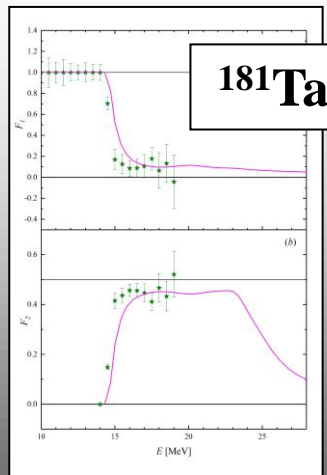
*) Данные, согласующиеся с результатами активационного эксперимента.



127I



165Ho



181Ta

Имеется согласие с предварительными результатами исследований достоверности экспериментальных данных для других относительно тяжелых ядер.

Выводы по результатам, полученным на пучках тормозного γ -излучения

Экспериментальные сечения парциальных фотонейтронных реакций, полученные с помощью внесения поправок, рассчитанных по статистической теории, в сечение выхода нейтронов, не удовлетворяют физическим критериям достоверности, в случаях относительно легких ядер, в процессах фоторасщепления которых играет заметную роль нейтронно-протонная реакция ($\gamma, 1n1p$).

Это может быть обусловлено тем, что:

- такая реакция не описывается в чисто статистическом подходе;**
- чисто статистический подход не учитывает такие нестатистические процессы как изоспиновое расщепление гигантского резонанса, в котором заметную роль играют фотопротонные реакции, к которым принадлежит и реакция ($\gamma, 1n1p$).**

Публикации по результатам 2023 года:

Physics of Atomic Nuclei, 85, N6 (2023) 361.

**Вестник Московского университета.
Серия 3. Физика. Астрономия. 78, № 3 (2023) 2330205**

**Вестник Московского университета.
Серия 3. Физика. Астрономия. 78, № 3 (2023) 2330206**

Ядерная физика, 86, N5 (2023) 532

Известия РАН, серия физическая, 87, №8 (2023) 1166

Известия РАН, серия физическая, 87, №8 (2023) 1176

**Несколько статей приняты для публикации:
Вестник Московского университета, Известия РАН,
European Physical Journal A.**

Спасибо за внимание!