

**Новые данные
по фоторасщеплению изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$**

В.В.Варламов, А.И.Давыдов, В.Н.Орлин

ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ

Международная электронная база данных по ядерным реакциям, функционирующая под руководством МАГАТЭ.

**ЦДФЭ НИИЯФ МГУ -
проведение исследований относительно данных по фотоядерным реакциям.**

Основные проблемы – **достоверность данных и их **полнота**.**

Абсолютное большинство наиболее востребованных данных по сечениям фотонейтронных реакций получено **в экспериментах двух типов, в которых методы получения информации о сечениях кардинально различаются:**

- 1) квазимоноэнергетические аннигиляционные фотоны,**
- 2) фотоны тормозного γ -излучения.**

**Эксперименты существенно различаются
по способам получения
информации о сечении исследуемой реакции**

**На пучках аннигиляционных фотонов реализуется
метод «от парциальных реакций к полным» -
одновременно «прямо» определяются сечения**

$$\sigma(\gamma, 1n), \sigma(\gamma, 2n) \text{ и } \sigma(\gamma, 3n),$$

а затем с их помощью –

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

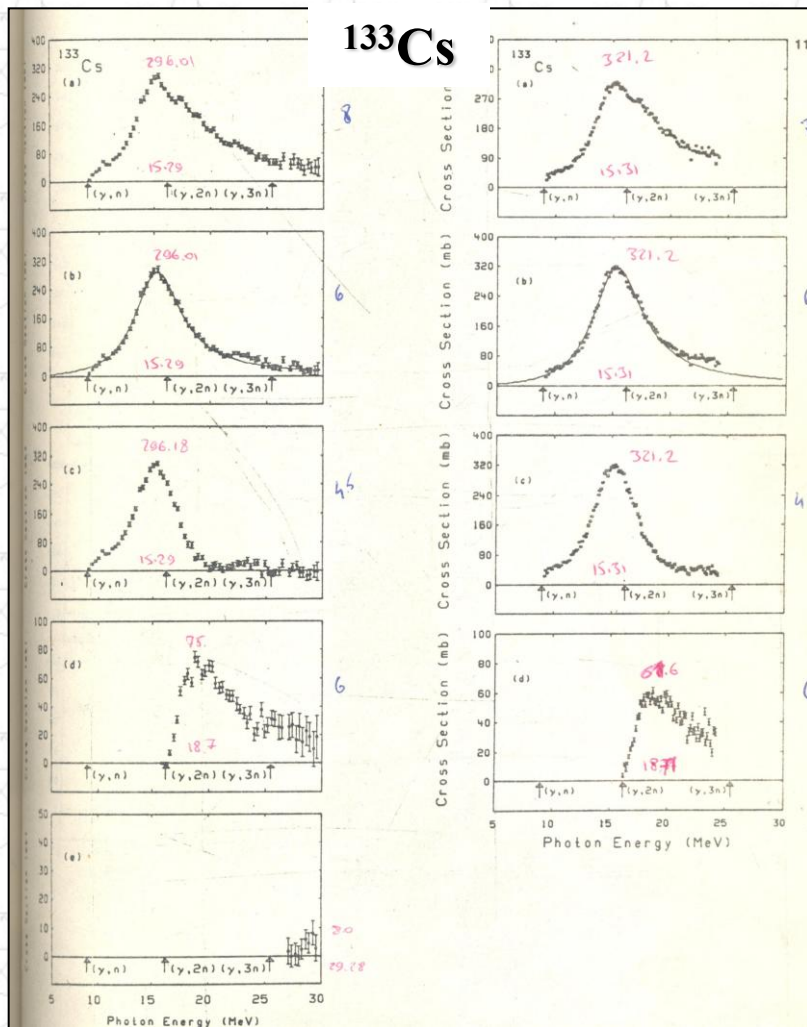
и

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

**Как правило,
публикуется **полный набор**
всех энергетически возможных реакций.**

Атлас – наборы данных для всех реакций.

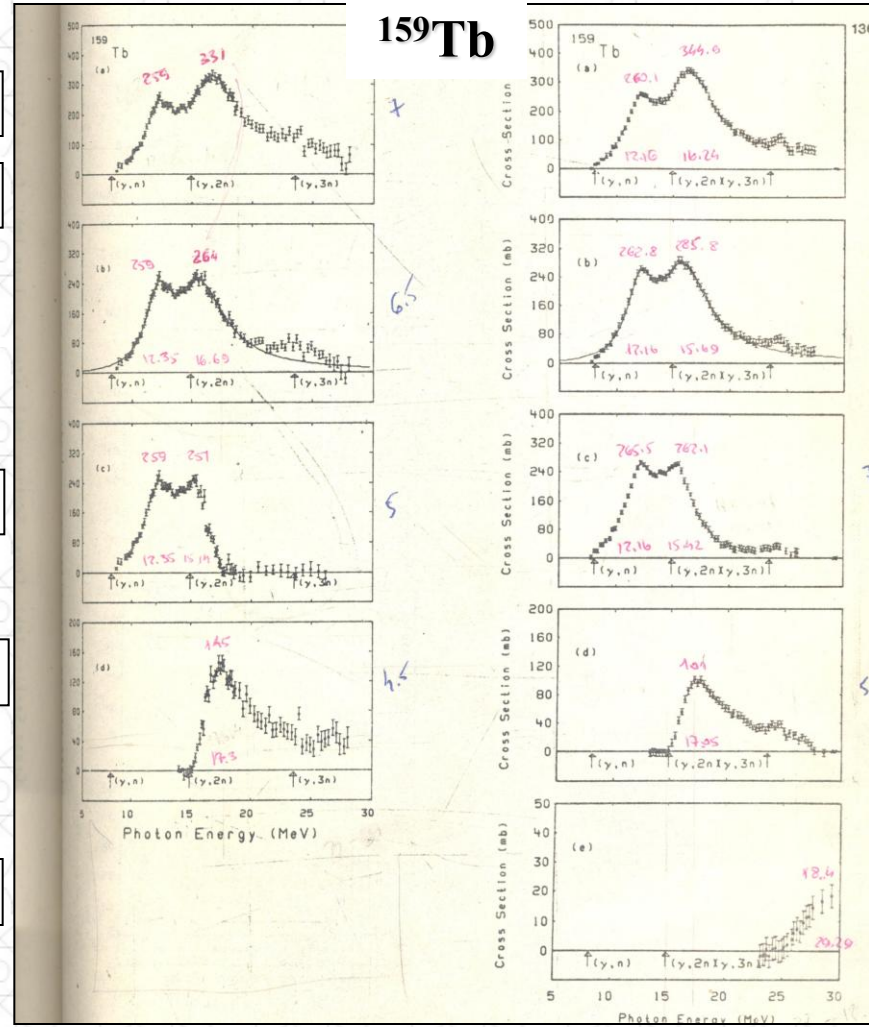
S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38 (1988) 199.



Ливермор

Сакле

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



Ливермор

Сакле

Сечения для полных реакций – суммы сечений парциальных реакций.

На пучках фотонов тормозного γ -излучения реализуется **обратный** метод

«от полной реакции к парциальным» -
прямо определяется сечение выхода нейтронов

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

в которое вносятся поправки на множественность нейтронов,
рассчитанные по статистической теории

$$\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n) = \sigma(\gamma, xn) / \{1 + (1 - X)[1 - (1 + k/\theta)\exp[-k/\theta]]\},$$

где разность энергий $k = E - B2n$, ядерная температура $\theta = [(E - B1n)/a]^{1/2}$,
оценка влияния прямого фотоэффекта $X = 0.4$, параметр плотности уровней
 $a = A/10$, и определяется сечение полной фотонейтронной реакции

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

На пучках фотонов тормозного γ -излучения:

с помощью определенных сечений выхода нейтронов

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

и полной фотонейтронной реакции

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

при использовании естественных операций вычитания/суммирования
возможно определение сечений парциальных реакций

$$\sigma(\gamma, 1n), \sigma(\gamma, 2n) \text{ и } \sigma(\gamma, 3n).$$

Однако, как правило, **вместо полного набора** всех энергетически возможных реакций публикуются **лишь комбинации некоторых** из них.

Сечения многих не только парциальных, но и полных реакций остаются неопубликованными.

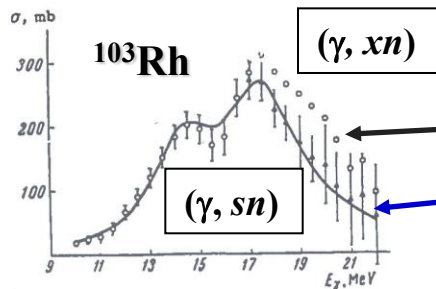


FIG. 3. Photoneutron production cross section of Rh^{103} . Here and in the other graphs we denote the experimental values of σ_n by circles, the computed values of σ_γ by triangles.

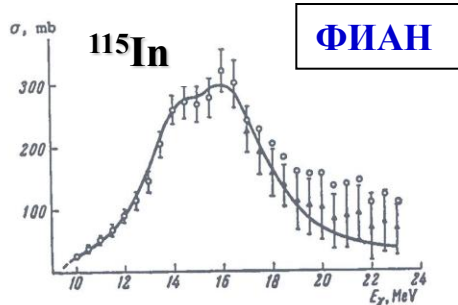


FIG. 4. Photoneutron production cross section of In^{115} .

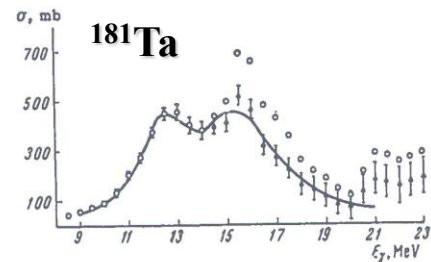


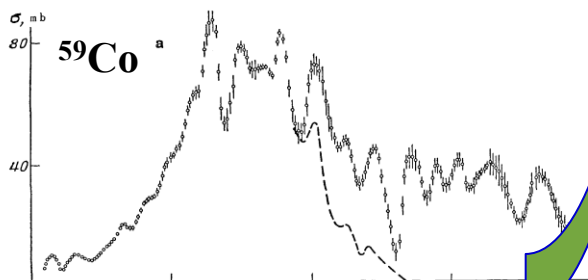
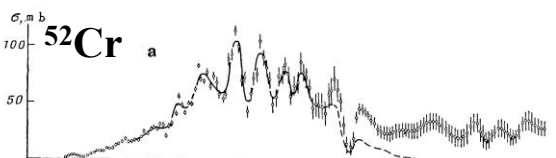
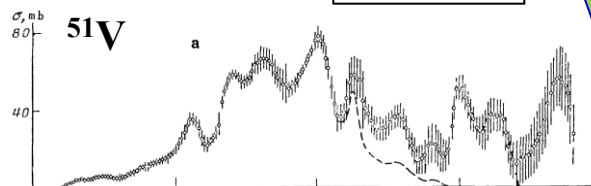
FIG. 5. Photoneutron production cross section of Ta^{181} .

Во многих экспериментах:
комбинация сечений $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ и

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

Иногда – комбинации
 $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 1n)$

НИИЯФ



Иногда – комбинации
 $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$

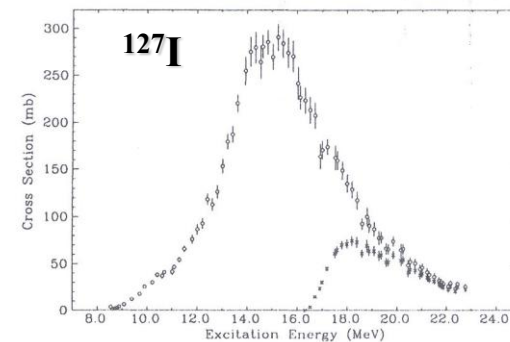


FIG. 1. $^{127}\text{I}(\gamma, sn)$ reaction cross section (\circ), together with the $^{127}\text{I}(\gamma, 2n)$ reaction cross section (\times) deduced as outlined in the text. The errors shown are statistical; there is a systematic uncertainty of 7% associated with the absolute scale.

Университет Мельбурна

Возможности для получения новых неопубликованных неизвестных ранее данных.

Экспериментальные данные для изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$ – типичный случай:

- эксперименты выполнены **только на пучке фотонов тормозного γ -излучения**, эксперименты на пучках аннигиляционных фотонов не проводились;
- опубликованы лишь сечение выхода нейтронов

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

и

сечение полной фотонейтронной реакции

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

**Непосредственно связанные с экспериментальными сечениями
сечения парциальных реакций**

$$\sigma(\gamma, 1n) \text{ и } \sigma(\gamma, 2n)$$

не опубликованы.

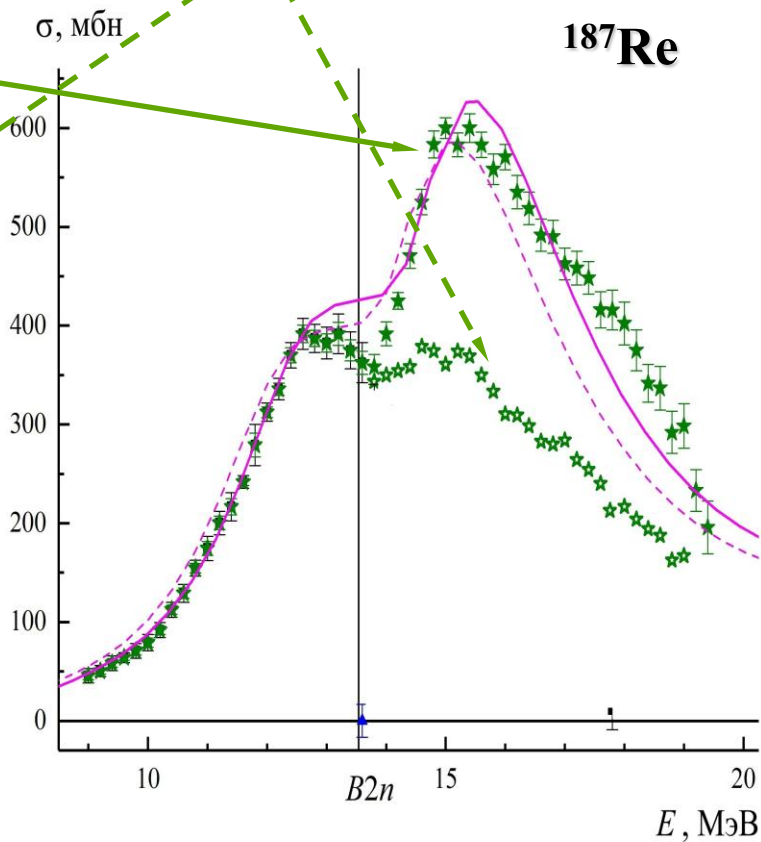
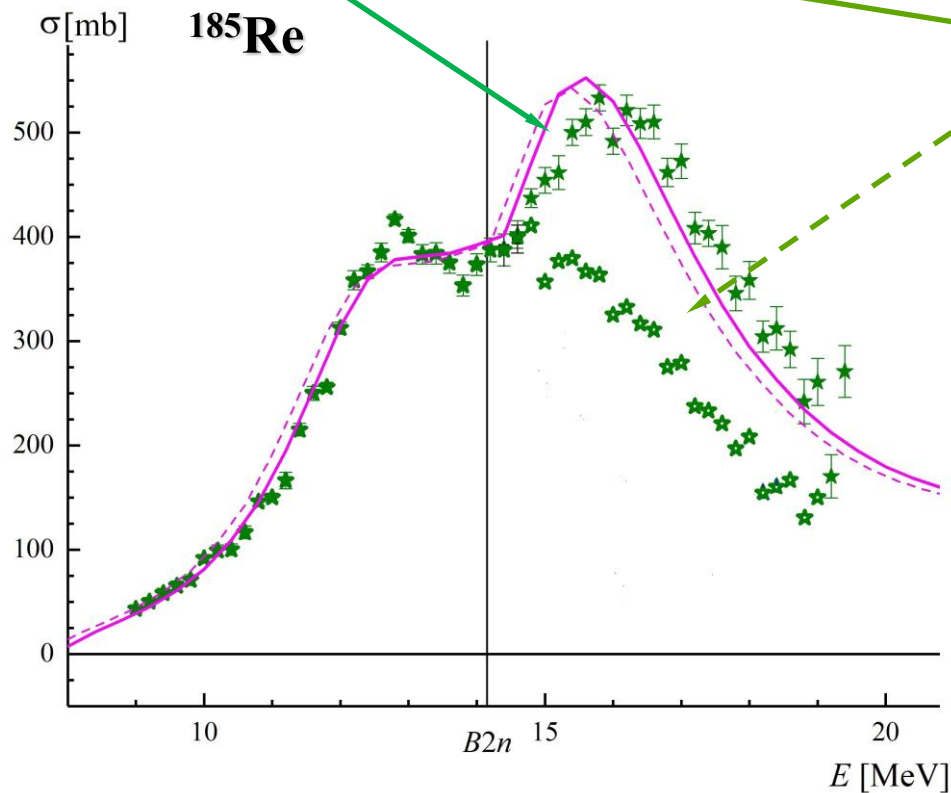
Экспериментальные данные

для изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$ (А. М. Горячев и др., ЯФ 17, 463 (1973)) –

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

и

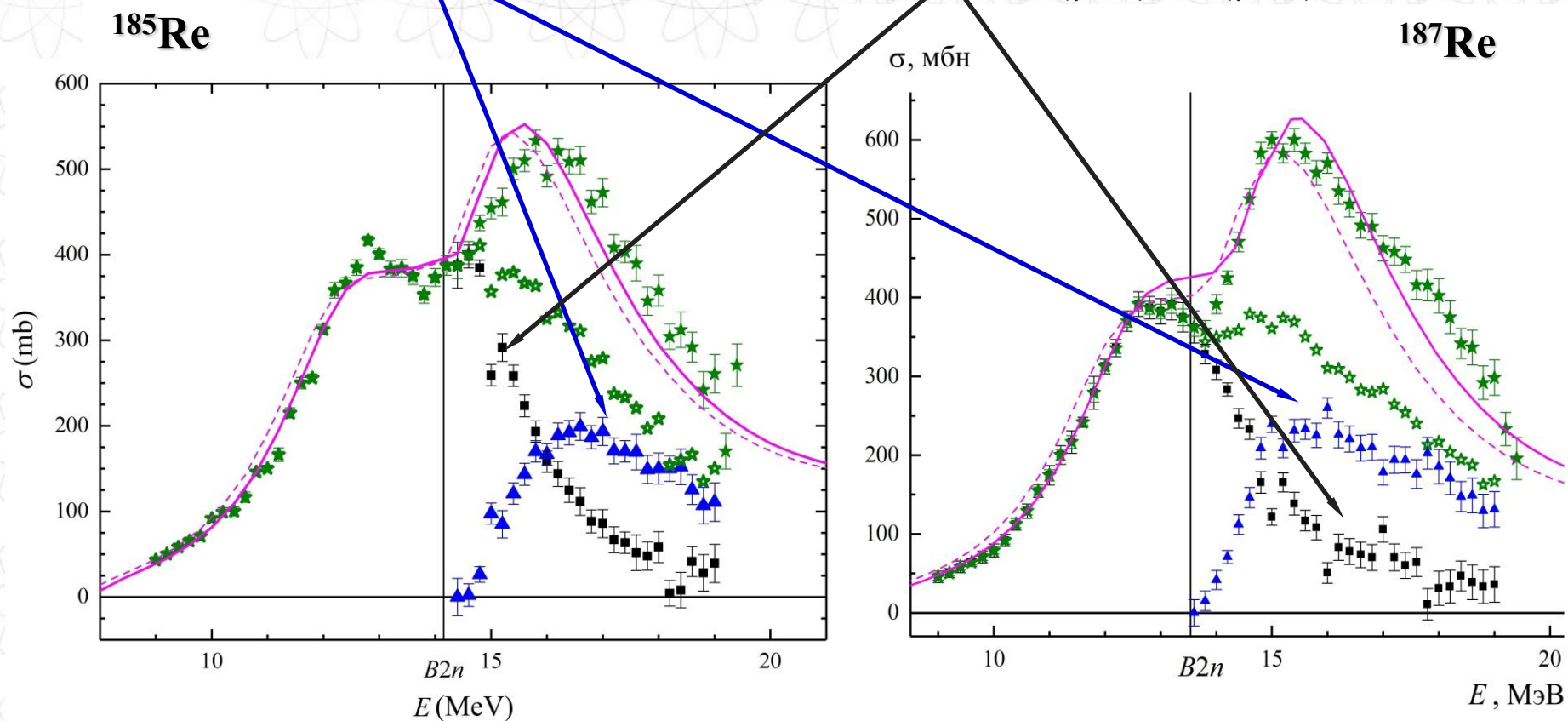
$$\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$$



Новые данные для изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$

Для обоих изотопов измерения выполнены в области энергий налетающих фотонов до порогов $B3n(185) = 22.6$ МэВ и $B3n(187) = 21.2$ МэВ реакции $(\gamma, 3n)$, а следовательно:

$$\sigma(\gamma, 2n) = \sigma(\gamma, xn) - \sigma(\gamma, sn) \quad \text{и} \quad \sigma(\gamma, 1n) = \sigma(\gamma, xn) - 2\sigma(\gamma, 2n) = \sigma(\gamma, sn) - \sigma(\gamma, 2n)$$



Предложены универсальные критерии, использующие объективные физические свойства сечений реакций, с помощью которых данные могут интерпретироваться как достоверные.

2 жестких абсолютных критерия достоверности данных:

1) F_i – положительные (сечения имеют размерность площади)

2)

$$F_1 = \frac{\sigma(\gamma, 1n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 1.000$$

$$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.500$$

$$F_3 = \frac{\sigma(\gamma, 3n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.333$$

$$F_4 < 0.250, F_5 < 0.200, F_6 < 0.166, F_7 < 0.143, \dots$$

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.

Недостоверность новых данных для изотопа рения ^{185}Re

Превышений физических пределов достоверности нет, но в широкой области энергий ($\sim 14.5 - 18.0$ МэВ) $F_i^{\text{эксп}}$ существенно (заметно) разнонаправленно отличаются от

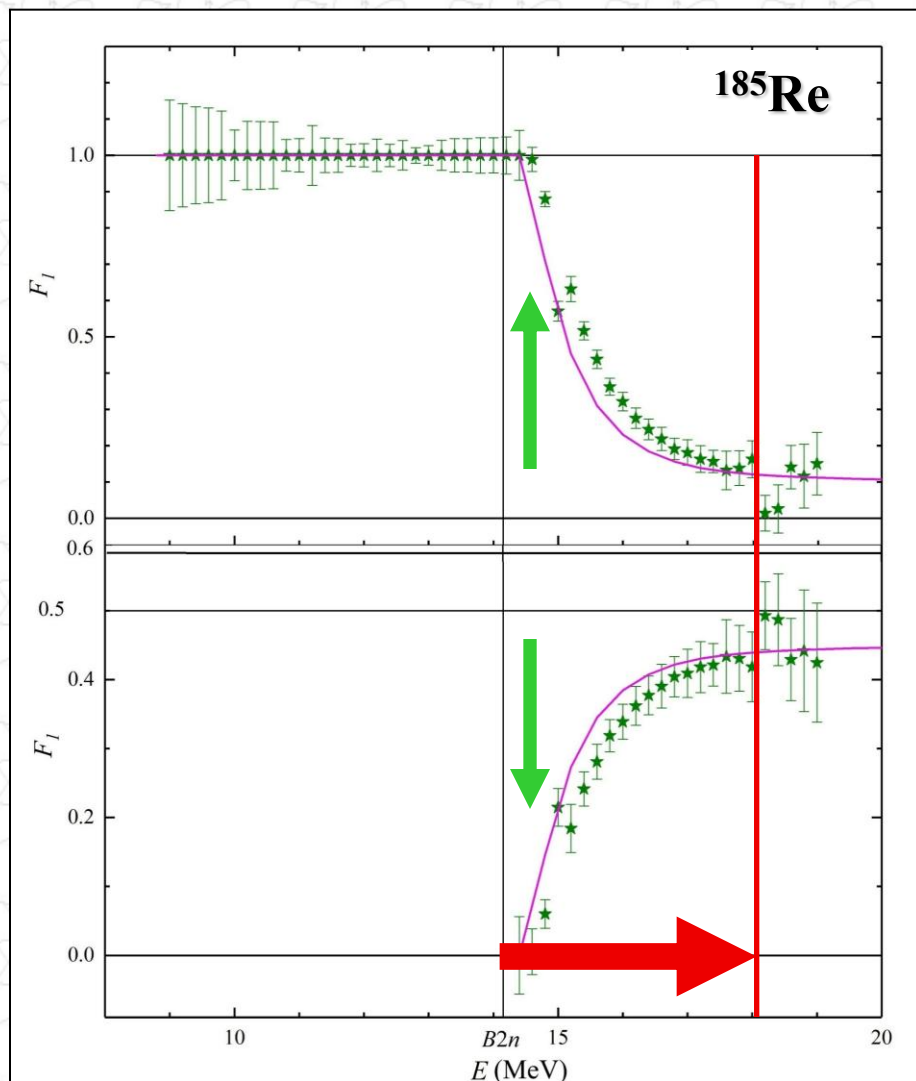
$F_i^{\text{теор}}$:

$$F_1^{\text{эксп}} > F_1^{\text{теор}},$$

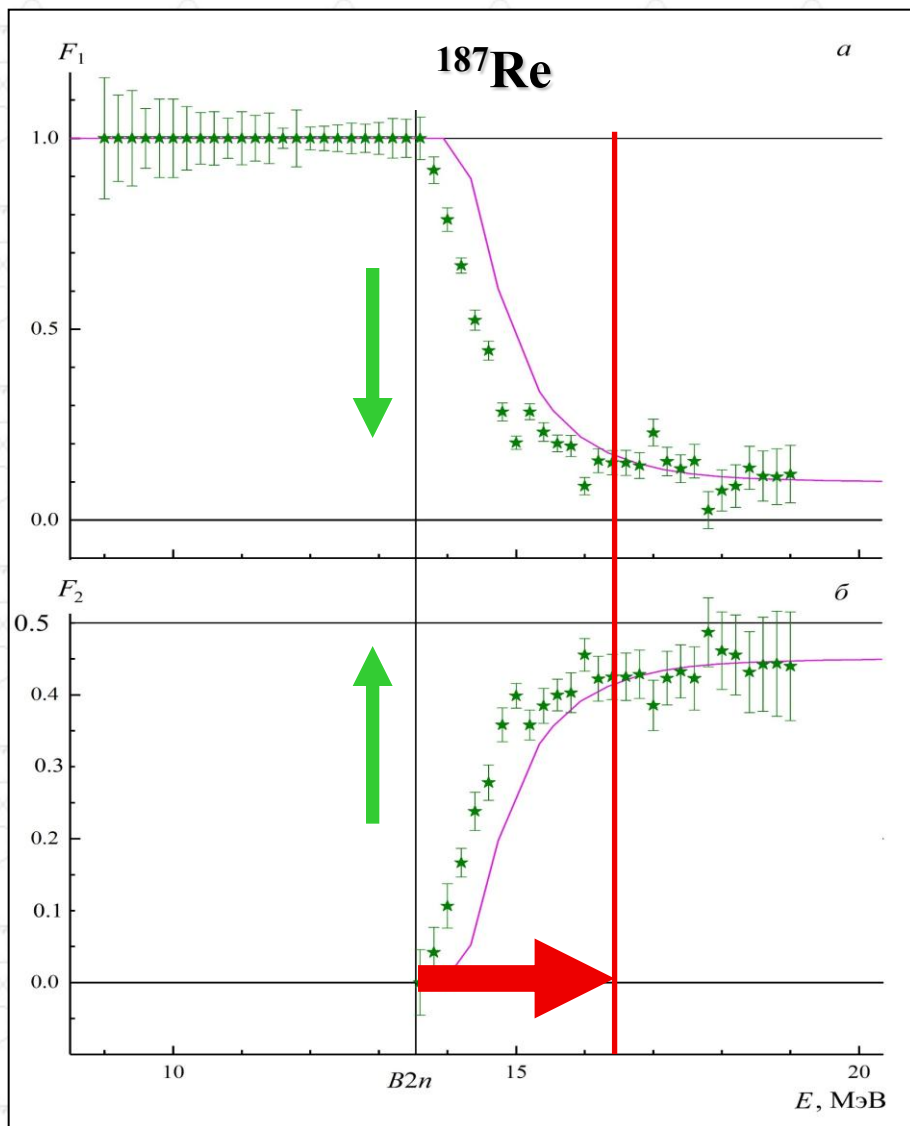
а

$$F_2^{\text{эксп}} < F_2^{\text{теор}}.$$

Это означает, что (недостоверно) экспериментальное сечение реакции $(\gamma, 1n)$ завышено, а сечение реакции $(\gamma, 2n)$ занижено по сравнению с теоретическими сечениями.



Недостоверность новых данных для изотопа рения ^{187}Re



Превышений физических пределов достоверности нет, но в широкой области энергий ($\sim 13.5 - 16.5$ МэВ) $F_i^{\text{эксп}}$ существенно (заметно) разнонаправленно отличаются от $F_i^{\text{теор}}$:

$$F_1^{\text{эксп}} < F_1^{\text{теор}},$$

a

$$F_2^{\text{эксп}} > F_2^{\text{теор}}.$$

Это означает, что (недостоверно) экспериментальное сечение реакции $(\gamma, 1n)$ занижено, а сечение реакции $(\gamma, 2n)$ завышено по сравнению с теоретическими сечениями **в отличие от того, что наблюдается в случае ^{185}Re .**

**Экспериментально-теоретический метод оценки сечений реакций,
удовлетворяющих физическим критериям:**

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

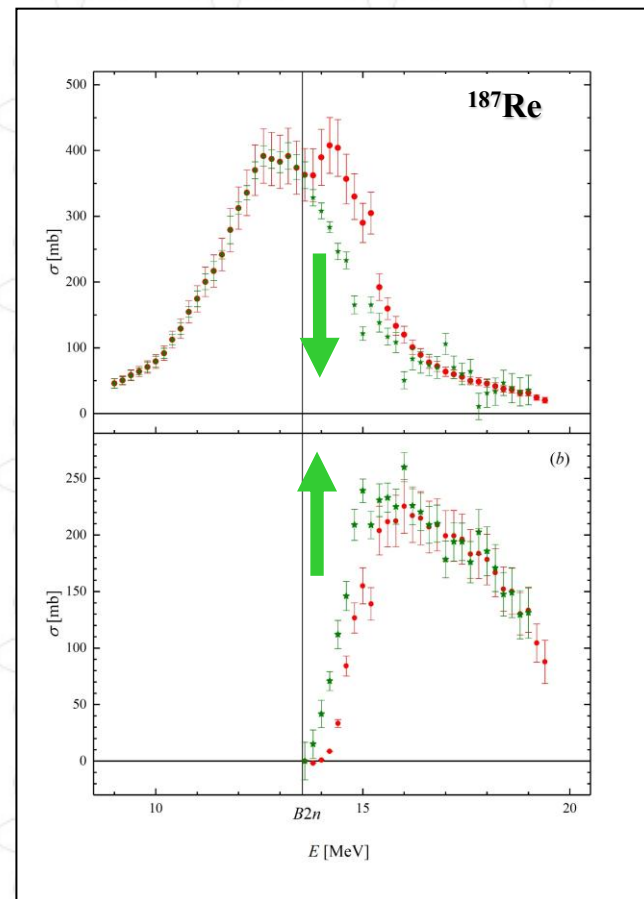
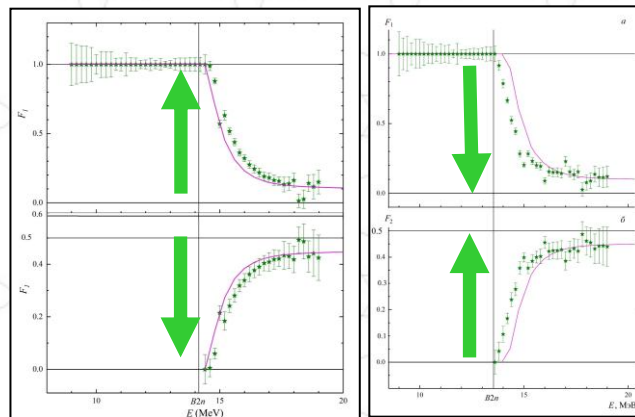
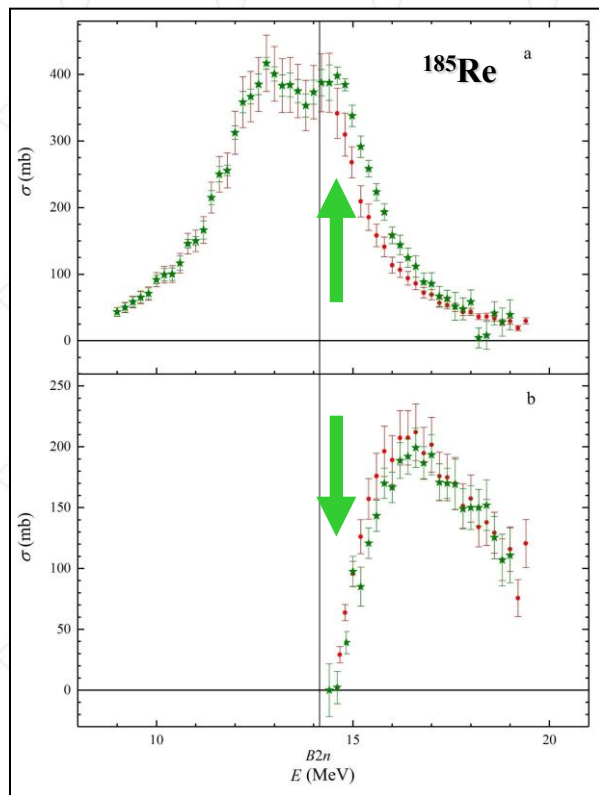
$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n) = F_2^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn),$$

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

Вклады в сечение 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 экспериментального разделения нейтронов по множественности (включает в себя вклады всех парциальных реакций), сечений реакций $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$, $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$ и $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n)$ определяются отношениями $F_{1,2,3}^{\text{теор}}, \dots$, рассчитанными в комбинированной модели фотоядерных реакций - предравновесной модели, основанной на плотностях ядерных уровней, рассчитанных в модели Ферми-газа, и учитывающей эффекты деформации ядра и изоспинового расщепления ГДР исследуемого ядра.

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

Сравнение оцененных данных для изотопов рения $^{185,187}\text{Re}$



В соответствии с расхождением отношений $F_i^{\text{эксп}}$ и $F_i^{\text{теор}}$ экспериментальные сечения отличаются от оцененных сечений в разные стороны.

Вопрос:
Почему поправки по стат. теории работали по-разному?



Реакция	Эксперимент	Оценка
$(\gamma, 1n)$	1970.0 ± 14.3	1856.9 ± 24.6
$(\gamma, 2n)$	634.1 ± 10.7	690.6 ± 12.3

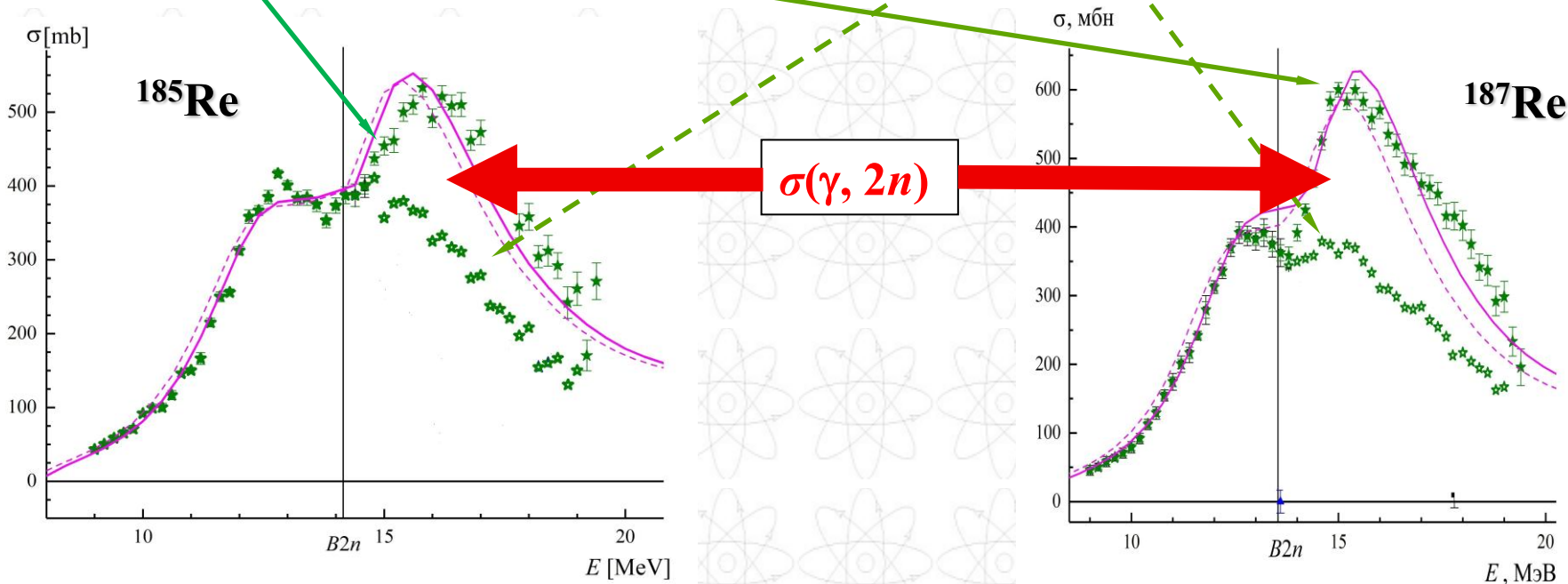
Реакция	Эксперимент	Оценка
$(\gamma, 1n)$	1667.7 ± 14.7	1906.0 ± 25.1
$(\gamma, 2n)$	929.9 ± 12.0	811.5 ± 13.9

Странности экспериментальных данных –

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

и

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



«Метод пристального взгляда»:

разность $[\sigma(\gamma, xn) - \sigma(\gamma, sn)] = \sigma(\gamma, 2n)$ заметно больше для ^{187}Re .

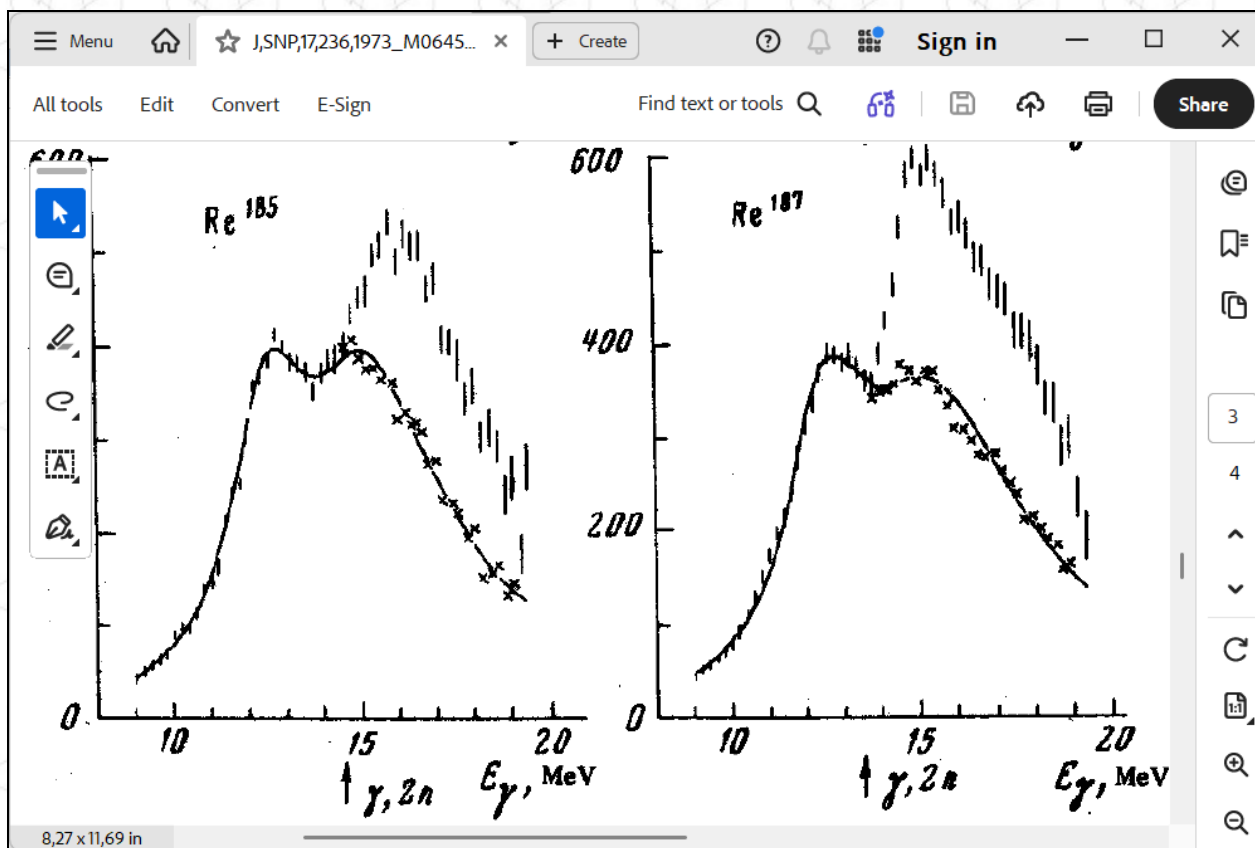
Соотношение интегральных сечений полной фотонейтронной реакции $\sigma^{\text{ИПТ}}(\gamma, sn)$ для ^{185}Re (2604.1 МэВ·мб) и ^{187}Re (2597.6 МэВ·мб)

противоречит оценке дипольного правила сумм (**60NZ/A**).

**Известные широко обсуждаемые и используемые
преимущества Комбинированной модели
по отношению к чисто статистической модели:
учет некоторых эффектов нестатистической природы,
прежде всего —
эффектов деформации ядра
и
изоспинового расщепления его ГДР.**

**По отношению к обоим таким эффектам
изотопы $^{185,187}\text{Re}$
существенно различаются.**

Различия деформации изотопов рения ^{185}Re и ^{187}Re



Сечения полной фотонейтронной реакции $\sigma(\gamma, sn)$ описываются суммой двух кривых Лоренца, параметры которых заметно различаются для обоих изотопов –

($\sigma_1 = 262$ мбн, $E_1 = 12.7$ МэВ, $\Gamma_1 = 2.51$ МэВ) и ($\sigma_2 = 315$ мбн, $E_2 = 15.4$ МэВ, $\Gamma_2 = 5.20$ МэВ) в случае изотопа ^{185}Re и

($\sigma_1 = 250$ мбн, $E_1 = 12.6$ МэВ, $\Gamma_1 = 2.83$ МэВ) и ($\sigma_2 = 296$ мбн, $E_2 = 15.6$ МэВ, $\Gamma_2 = 5.30$ МэВ) в случае изотопа ^{187}Re .

Различия параметров деформации изотопов рения ^{185}Re и ^{187}Re

1) Различия параметров квадрупольной деформации

^{185}Re : $\beta_2 = 0.221 \pm 0.015$
 ^{187}Re : $\beta_2 = 0.205 \pm 0.010$ ↑ 10%

2) Систематика значений β_2 для изотопов рения

B.S.Ishkhanov, V.N.Orlin. Employing Spheroidal Global Potential to Estimate the Quadrupole Deformation of Nuclei. PAN, 68, 1332 (2005), ЯФ, 68, 1407 (2005)

A	183	184	185	186	187	188
β_2	0.303	0.203	0.196	0.189	0.184	0.174

3) Количество нуклонов: $N_{185} = 110$, а $N_{187} = 112$.

Заполненная оболочка $1i_{13/2} - N = 114$

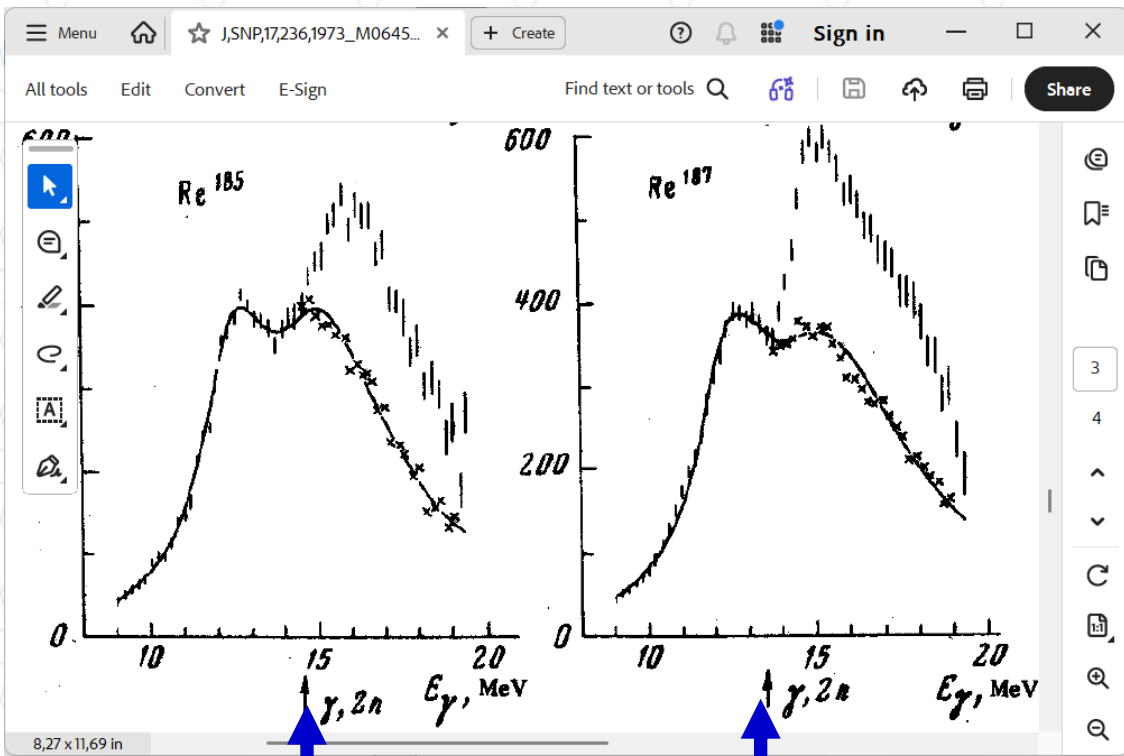
Z	Протоны	Нейтроны	N
2		$1s_{1/2}$	2
6		$1p_{3/2}$	6
8		$1p_{1/2}$	8
14		$1d_{5/2}$	14
16		$2s_{1/2}$	16
20		$1d_{3/2}$	20
28		$1f_{7/2}$	28
32		$2p_{3/2}$	32
38		$1f_{5/2}$	38
40		$2p_{1/2}$	40
50		$1g_{9/2}$	50
58	$1g_{7/2}$	$2d_{5/2}$	56
64	$2d_{3/2}$	$1g_{7/2}$	64
76	$1h_{11/2}$	$3s_{1/2}$	66
80	$2d_{3/2}$	$2d_{3/2}$	70
82	$3s_{1/2}$	$1h_{11/2}$	82
92	$1h_{9/2}$	$1h_{9/2}$	92
100	$2f_{7/2}$	$2f_{7/2}$	100
114	$1i_{13/2}$	$1i_{13/2}$	114
120	$2f_{5/2}$	$3p_{3/2}$	118
124	$3p_{3/2}$	$2f_{7/2}$	124
126	$3p_{1/2}$	$3p_{1/2}$	126
142	$1i_{15/2}$	$2g_{9/2}$	136
152	$2g_{9/2}$	$1i_{11/2}$	148
164	$1i_{11/2}$	$1j_{15/2}$	164
170	$3d_{5/2}$	$3d_{5/2}$	170
178	$2g_{7/2}$	$4s_{1/2}$	172
180	$4s_{1/2}$	$2g_{7/2}$	180
184	$3d_{3/2}$	$3d_{3/2}$	184

По всем признакам:

деформации изотопов ^{185}Re и ^{187}Re заметно **различаются**, причем деформация ядра ^{185}Re **больше**, чем ядра ^{187}Re .

Единый подход к расчету поправок по статистической теории некорректен.

Различия изоспинового расщепления ГДР изотопов рения ^{185}Re и ^{187}Re



Реакция	^{185}Re	^{187}Re
$(\gamma, 1n)$	7.8	7.4
$(\gamma, 1n1p)$	12.8	13.2
$(\gamma, 2n)$	14.1	13.6
$(\gamma, 1p)$	5.4	6.0
$(\gamma, 2p)$	13.1	14.4
$(\gamma, 3n)$	22.6	21.2

- пороги реакции $(\gamma, 1p)$ для обоих ядер меньше порогов реакций $(\gamma, 1n)$, причем в случае ^{185}Re на 2.4 (7.8 - 5.4) МэВ, а в случае ^{187}Re на 1.4 (7.4 - 6.0) МэВ;
- пороги реакции $(\gamma, 1n1p)$ для обоих ядер меньше порогов реакций $(\gamma, 2n)$, причем в случае ^{185}Re на 1.3 (14.1 - 12.8) МэВ, а в случае ^{187}Re на 0.4 (13.6 - 13.2) МэВ;
- порог реакции $(\gamma, 2p)$ в случае ^{185}Re меньше порога реакции $(\gamma, 2n)$ на 1.0 (14.1 - 13.1) МэВ, но в случае ^{187}Re больше на 0.8 (14.4 - 13.6) МэВ.

$B_{1n} = 7.8 \text{ МэВ}$ $B_{1n} = 7.4 \text{ МэВ}$
 14.1 МэВ 13.6 МэВ

Пороги нейтронных реакций имеют большие величины для ^{185}Re .

Очевидно:
чисто статистический подход не работает.

Дополнительное подтверждение недостоверности «статистических данных» и достоверности оценок с использованием Комбинированной модели

Оценка с использованием результатов расчетов в КМФЯР, в которой учитываются обсуждаемые нестатистические эффекты, приводит к соотношению интегральных сечений $\sigma^{\text{шт}}(\gamma, sn)$, соответствующему оценке

$60NZ/A$ (большее значение для более тяжелого ядра):

2547.5 (вместо **2604.1**) МэВ·мб для ^{185}Re



и

2716.7 (вместо **2597.6**) МэВ·мб для ^{187}Re .

Заключение.

Впервые получены новые неизвестные ранее сечения реакций



оценены сечения, соответствующие физическим критериям достоверности.

Установлено, что для ядер ^{185}Re и ^{187}Re **непрямой метод поправок, рассчитанных по статистической теории, **не работает** в присутствии определенных нестатистических процессов фоторасщепления обоих ядер.**

Полученные для ^{185}Re и ^{187}Re данные (а также аналогичные - для ядер ^{51}V , ^{52}Cr , $^{58,60}\text{Ni}$, ^{59}Co , ^{68}Zn и некоторых других) подтверждают **необходимость использования **прямых** (активационных) методов определения множественности нейтронов.**

Перспективы реализации таких методов связаны с созданием источника фотонов от обратного комптоновского рассеяния, работы по которому в настоящее время ведутся при участии НИИЯФ.

**Спасибо
за
внимание!**