

Новые данные по фоторасщеплению ядер ^{52}Cr и ^{68}Zn

В.В.Варламов, А.И.Давыдов, В.Н.Орлин
(ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ)

**Доклад посвящен результатам работ,
проводимых в ЦДФЭ НИИЯФ МГУ
по поддержанию
международной электронной базы данных по ядерным реакциям,
функционирующей под руководством МАГАТЭ.**

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

Международная сеть Центров данных по ядерным реакциям (NRDC) МАГАТЭ

International Network of Nuclear Reaction Data Centres - Microsoft Internet Explorer

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

Назад Адрес: <http://www.nds.iaea.org/nrdc/> Переход

International Atomic Energy Agency IAEA.org | NDS Mission | About Us | Mirrors: India | Brazil

Nuclear Data Services

Databases » EXFOR | ENDF | CINDA | IBANDL | Medical | PGAA | NGAtlas | RIPL | FENDL | IRDF-2002

Databases

- EXFOR
- Feedback on EXFOR
- CINDA

NRDC Centres

- NNDC (USA)
- NEADB (France)
- NDS (Austria)
- CJD (Russia)
- CNDC (China)
- ATOMKI (Hungary)
- JCPRG (Japan)
- JAEA (Japan)
- KAERI (Korea)
- CAJAD (Russia)
- CDFE (Russia)
- CNPD (Russia)
- UkrNDC (Ukraine)

Contacts

- A.Mengoni
- V.Zerkin
- S.Dunaeva
- N.Otsuka

Links

- NRDC
- NSDD
- Nuclear Data Services
- Nuclear Data Section

International Network of Nuclear Reaction Data Centres (NRDC)

(To previous [NRDC Home](#) / [NRDC Internal Archive](#))

What is NRDC?

The International Network of Nuclear Reaction Data Centres (NRDC) constitutes a worldwide cooperation of nuclear data centres under the auspices of the International Atomic Energy Agency. The Network was established to coordinate the world-wide collection, compilation and dissemination of nuclear reaction data.

Objectives and Tasks

The primary goal of the Network is the dissemination of nuclear reaction data and associated documentation to users. The following specific tasks must be carried out in order to accomplish this important aim:

- Compilation of relevant bibliographic information ([CINDA](#)),
- Compilation of experimental nuclear reaction data ([EXFOR](#)),
- Collection of evaluated nuclear reaction data ([ENDF/EVA](#)),
- Exchange of nuclear reaction data of all types,
- Promotion of the development of special purpose evaluated data files,
- Development of common formats for computerized exchange of nuclear data,
- Coordinated development of computer software for managing and disseminating nuclear data,
- Coordination of the development and dissemination of end user software for both on line and local access to nuclear data,
- Documentation of current and future data needs in order to be able to meet changing user demands.

Documents

- Network Document
- EXFOR Basics
- EXFOR Formats
- LEXFOR
- EXFOR/CINDA
- Dictionary
- CINDA2001 Manual
- ENDF-6 Formats
- More Documents

NRDC

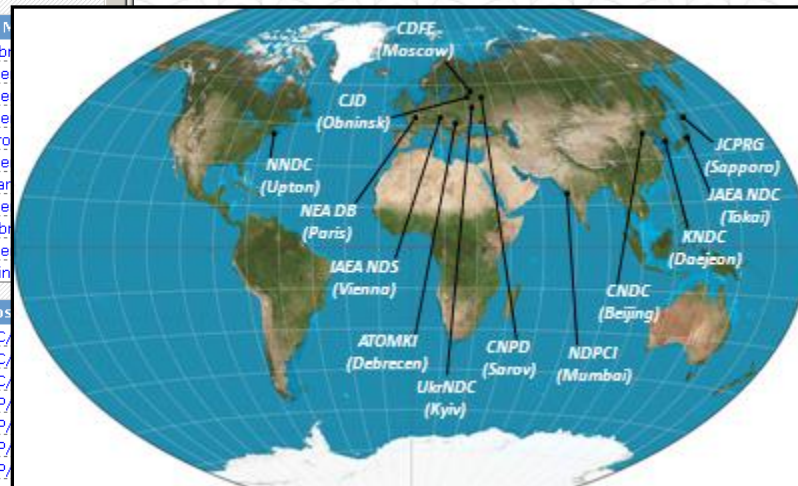
- 2008 (Obninsk)
- 2007 (Vienna)
- 2006 (Vienna)
- 2005 (Vienna)
- 2004 (Brookhaven)
- 2003 (Vienna)
- 2002 (Paris)
- 2001 (Vienna)
- 2000 (Obninsk)
- 1999 (Vienna)
- All meetings

Memos

- Memo 4C/...
- Memo 4C/...
- Memo 4C/...
- Memo CP/...
- Memo CP/...
- Memo CP/...
- Memo CP/...
- Memo CP/...

В сеть входят 15 центров из 12 стран:
Австрия, Венгрия, Индия, Казахстан,
Китай, Корея, Россия, Словакия, США,
Украина, Франция, Япония.

Россия:
ЦЯФД ВНИИЭФ, Саров;
ЦЯД ФЭИ, Обнинск;
ЦДФЭ НИИЯФ МГУ, Москва



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

Большинство данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций получено в 1962 – 1986 годах в Ливерморе (США) и Сакле (Франция), опубликовано в полном атласе (S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38. 199 (1988)) и включено в международную электронную базу данных.

Кроме данных, полученных в Ливерморе и Сакле на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов с помощью разделения нейтронов по множественности, имеется некоторое количество данных, полученных на пучках тормозного излучения с использованием специальных поправок по статистической теории ядерных реакций.

Ливермор - 100

Обе лаб. - 19 Сакле - 100

Данные, полученные с
тормозным излучением

Некоторое
количество
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

Для каждого ядра – сечения реакций:

$(\gamma, 3n)$

$(\gamma, 2n)$

$(\gamma, 1n)$

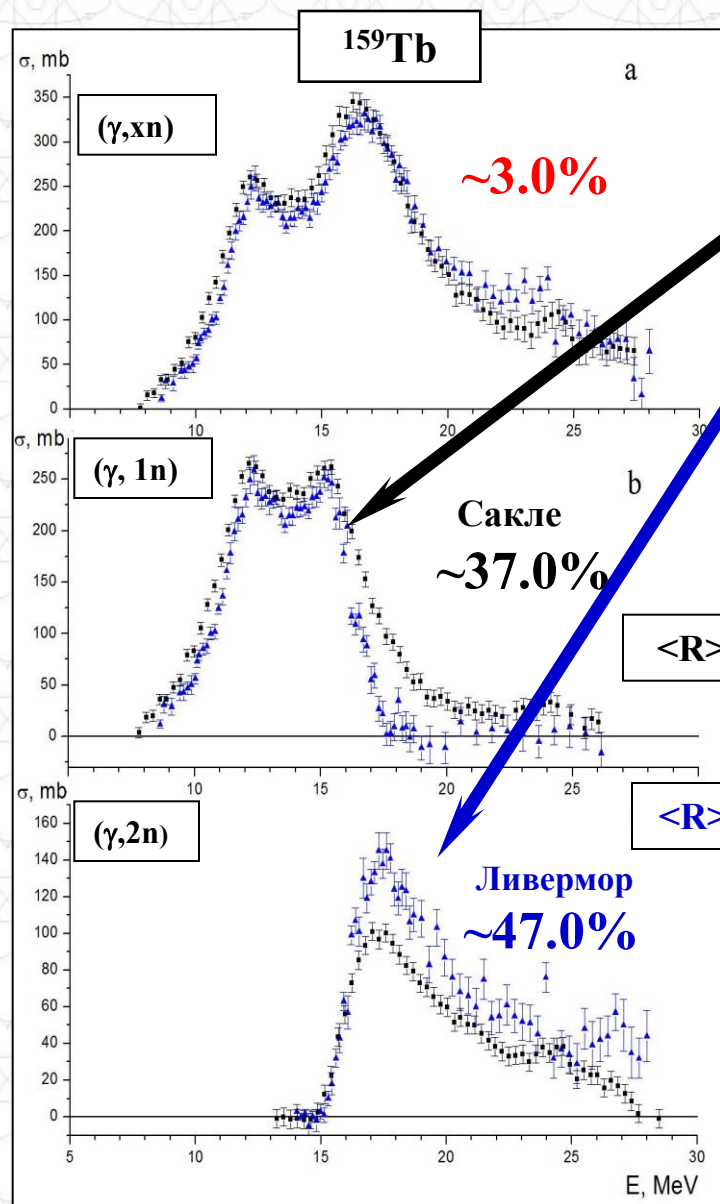
$(\gamma, sn) = + (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n) + \dots$

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

Основная проблема –
головная боль
пользователей!

Основная проблема:

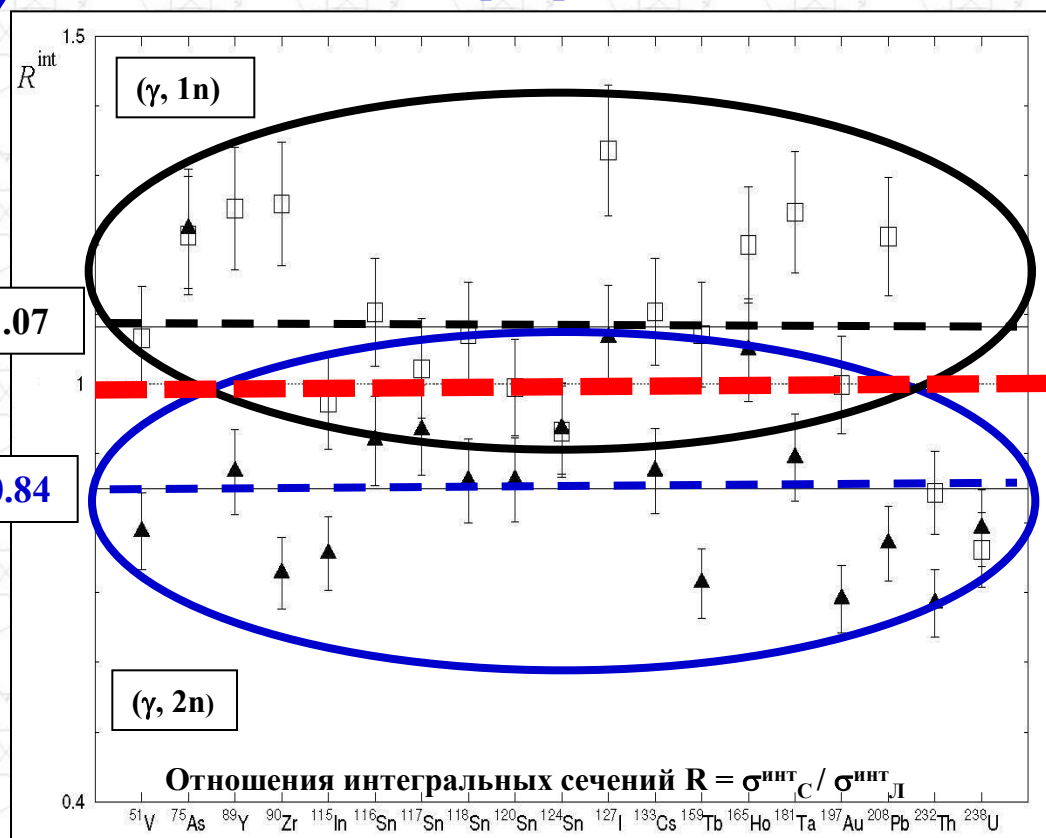
достоверность сечений реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, определенных с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности, основанного на данных об их энергиях.



Проблемы данных аннигиляционных экспериментов.

Сечения выхода (γ, xn) отличаются на $\sim 3.0\%$.

Сечение реакции $(\gamma, 1n)$ имеет на $\sim 37.0\%$ большую величину в Сакле, а реакции $(\gamma, 2n)$ – на $\sim 47\%$ в Ливерморе.



Предложены универсальные критерии достоверности данных, использующие объективные физические свойства сечений реакций, которые могут интерпретироваться как достоверные.

2 жестких абсолютных критерия достоверности данных:

1) F_i – положительные (сечения имеют размерность площади)

2)

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

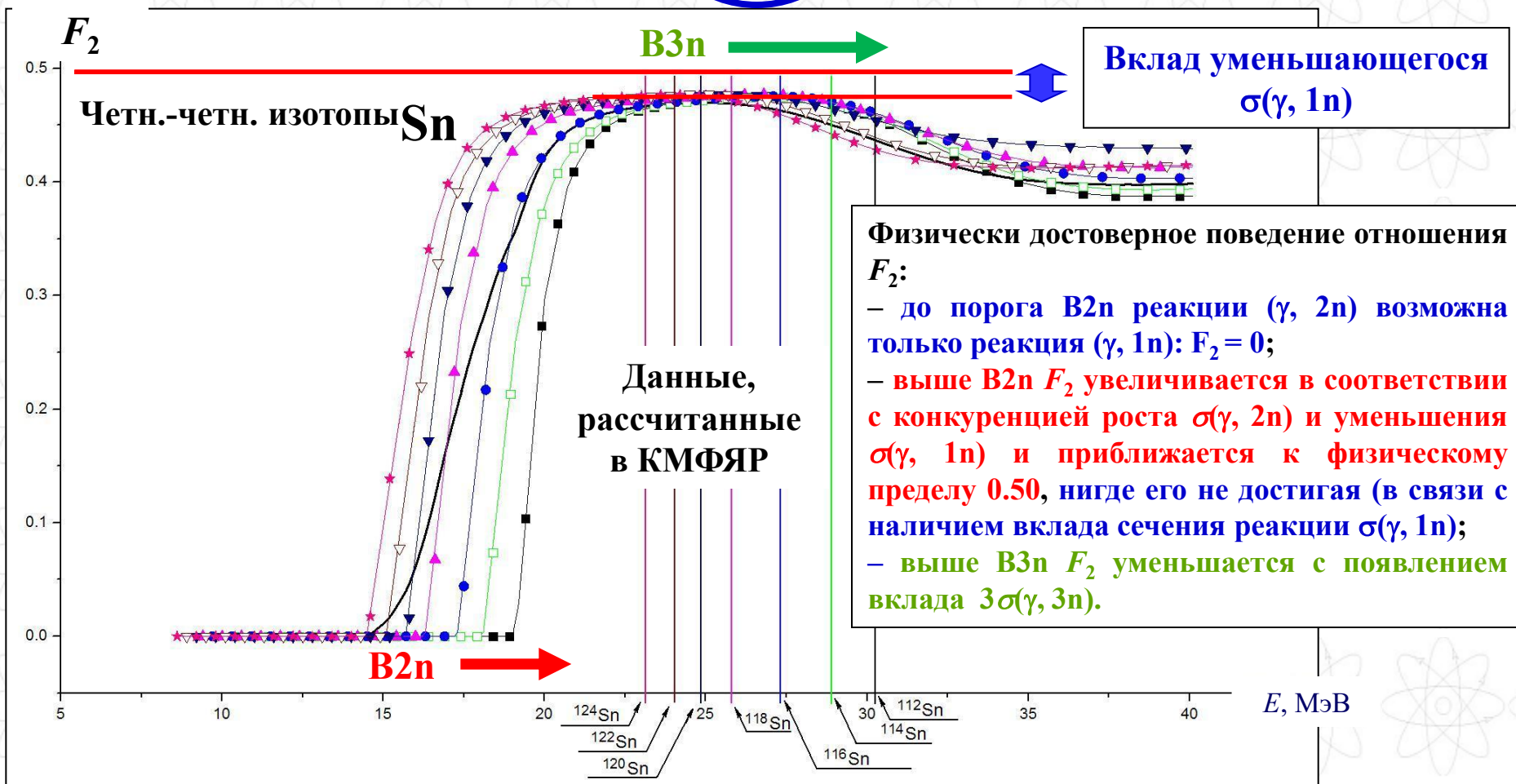
$$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.500$$

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

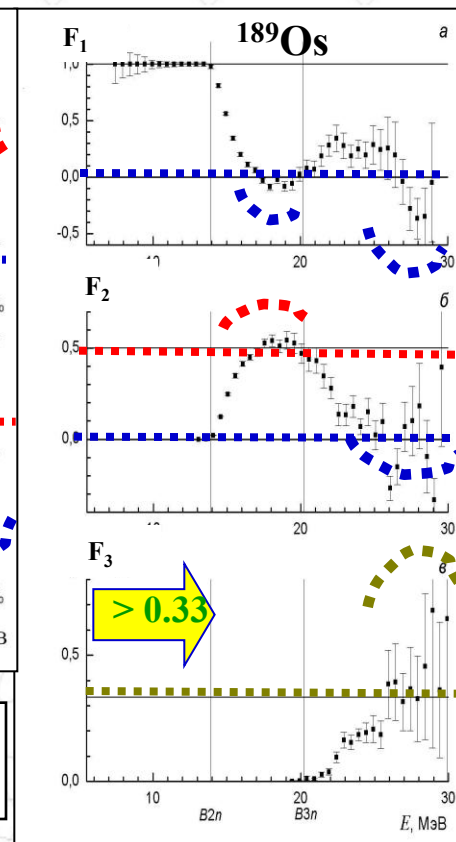
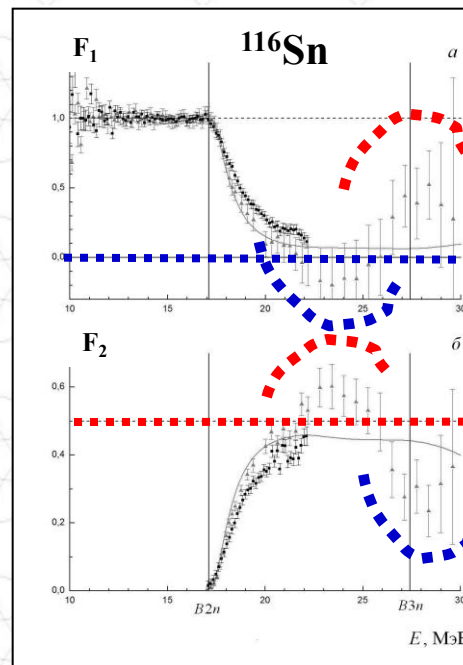
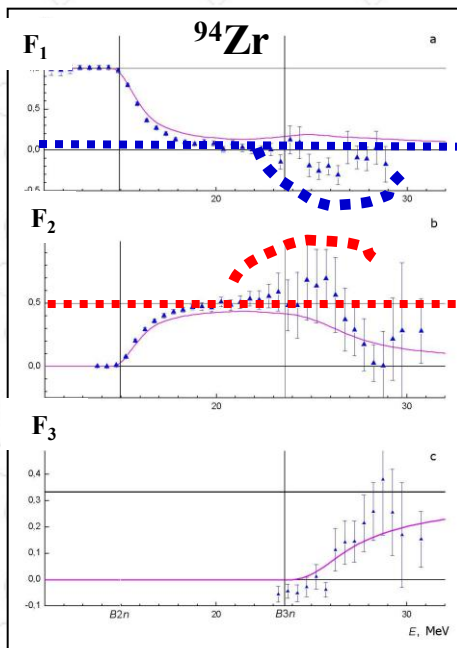
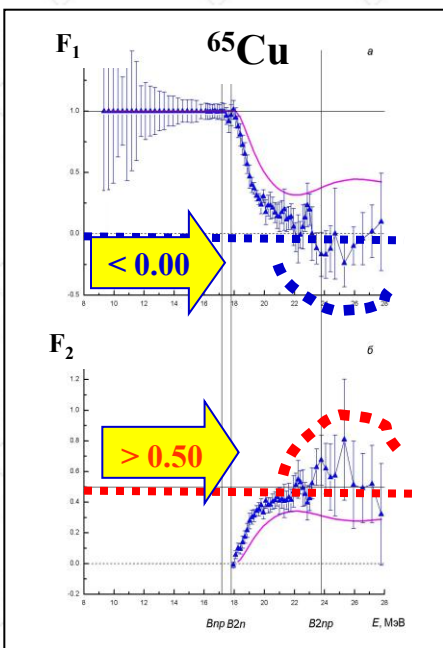
$$F_4 < 0.250, F_5 < 0.200, F_6 < 0.166, F_7 < 0.143, \dots$$

3) Третий 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.

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



Недостоверность сечений реакций.



Физически запрещенные отрицательные значения $F_1 < 0.00$, определенно коррелирующие с недостоверными значениями $F_2 > 0.50$ и $F_3 > 0.33$.

Для ~ 50 ядер (^{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 проявление в сечениях парциальных реакций **существенных систематических погрешностей**, которые делают экспериментальные сечения парциальных реакций **недостоверными**.

Поскольку значительное количество экспериментальных сечений реакций не удовлетворяют физически критерия достоверности, был предложен экспериментально-теоретический метод оценки сечений реакций, удовлетворяющих таким критериям:

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

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 $F_{1,2,3}^{\text{теор}}$, ..., 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.

Оценены данные для более 50 ядер
 $(^{51}\text{V}, ^{63,65}\text{Cu}, ^{59}\text{Co}, ^{75}\text{As}, ^{76,78,80,82}\text{Se}, ^{89}\text{Y}, ^{90,91,92,94}\text{Zr}, ^{103}\text{Rh}, ^{116,117,118,119,120,124}\text{Sn}, ^{115}\text{In}, ^{127}\text{I}, ^{129}\text{Xe},$
 $^{133}\text{Cs}, ^{138}\text{Ba}, ^{139}\text{La}, ^{140,142}\text{Ce}, ^{141}\text{Pr}, ^{145,148}\text{Nd}, ^{153}\text{Eu}, ^{159}\text{Tb}, ^{160}\text{Gd}, ^{165}\text{Ho}, ^{181}\text{Ta}, ^{186}\text{W},$
 $^{186,188,189,190,192}\text{Os}, ^{197}\text{Au}, ^{208}\text{Pb}, ^{209}\text{Bi})$, исследованных в обеих лабораториях.

**Установлены существенные расхождения оцененных сечений
 парциальных реакций с экспериментальными, обусловленные
 разными систематическими погрешностями**

непрямого метода

**разделения нейтронов по множественности, основанного на
 измерениях энергий нейтронов.**

**В этой связи актуальной стала проблема достоверности данных,
 полученных кардинально иным способом в экспериментах на пучках
 тормозного γ -излучения.**

Аппаратно эксперименты этих типов **абсолютно одинаковы** -

на пучках электронных ускорителей

непосредственно измеряются энергетические зависимости выхода реакции Y .

Они существенно различаются **разными математическими методами** определения сечения σ .

$$Y(E_m) = \alpha \int_{E_{th}}^{E_m} W(E_m, E) \sigma(E) dE,$$

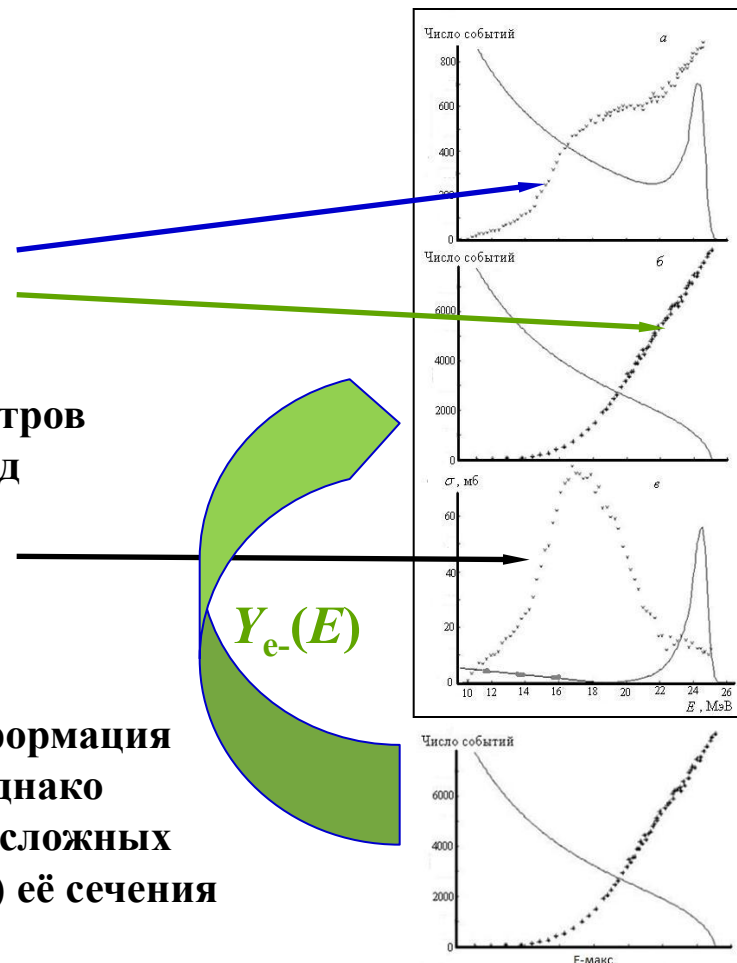
В экспериментах на пучках аннигиляционных фотонов выходы измеряются дважды – Y_{e^+} на пучке позитронов

и Y_{e^-} на пучке электронов

после чего информация о сечении реакции извлекается **математически**: в предположении об идентичности спектров тормозного излучения электронов и позитронов их вклад исключается простой **разностью**

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

В экспериментах на пучках тормозного γ -излучения информация о сечении реакции извлекается также **математически**, однако с использованием одного из специально разработанных сложных методов решения обратной задачи развертки (unfolding) её сечения $\sigma(E)$ из выхода $Y_{e^-}(E)$



Обсуждаемые эксперименты **существенно различаются** и по способам получения информации о сечениях парциальных реакций, которые фактически являются, по существу, **альтернативными**:

- на пучках аннигиляционных фотонов с помощью **непрямого** метода разделения фотонейтронов по множественности, основанного на измерении энергии нейтронов, сначала определяются сечения парциальных реакций

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

а затем с их помощью - полные сечения

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

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

- на пучках тормозного излучения сначала определяется сечение выхода нейтронов

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

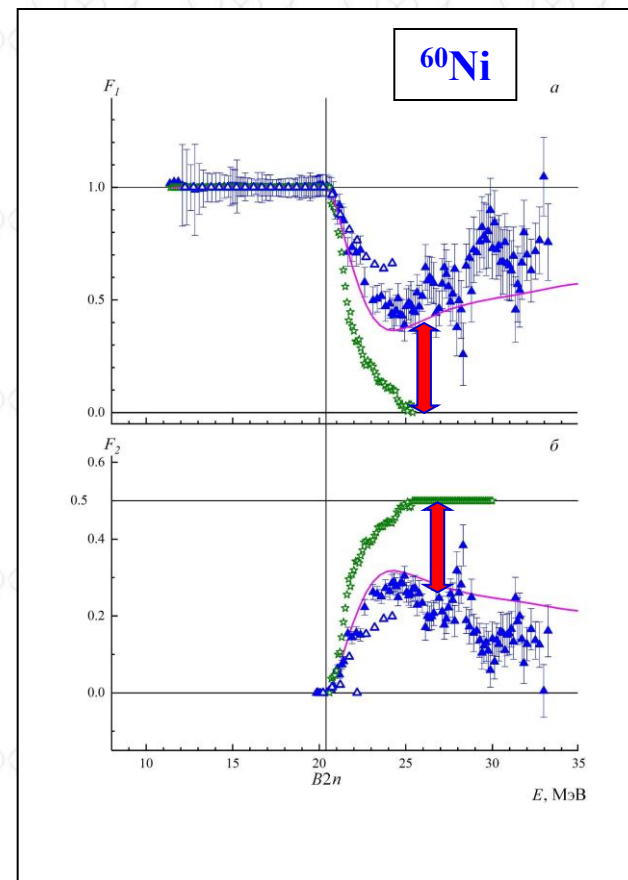
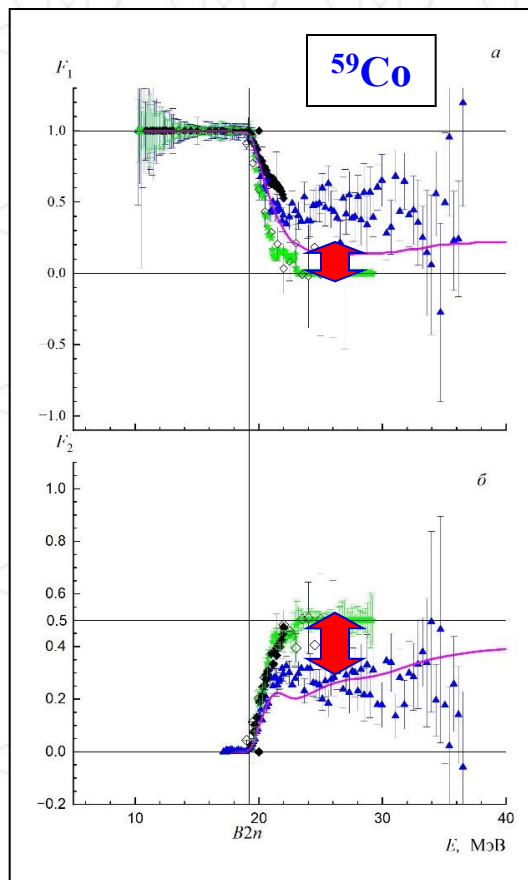
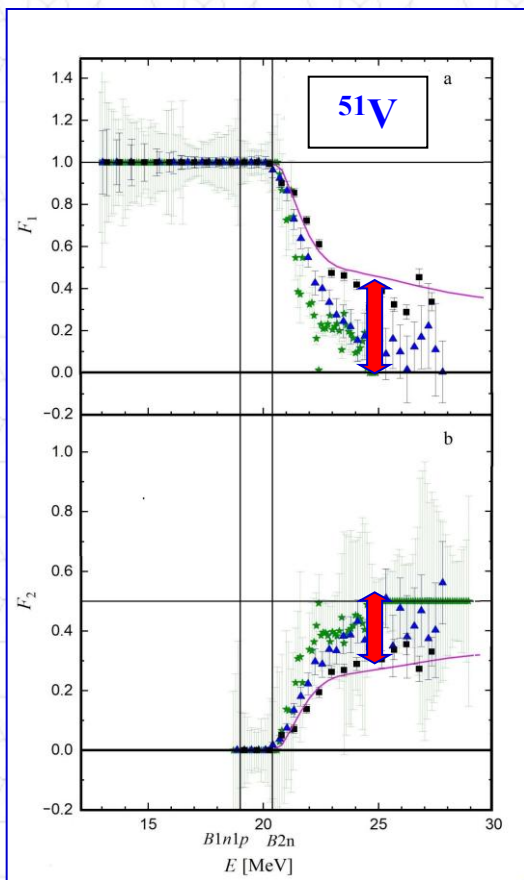
с помощью которого также **непрямым методом** внесения поправок по статистической теории определяются сечения парциальных реакций $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$,

а также полной фотонейтронной реакции

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

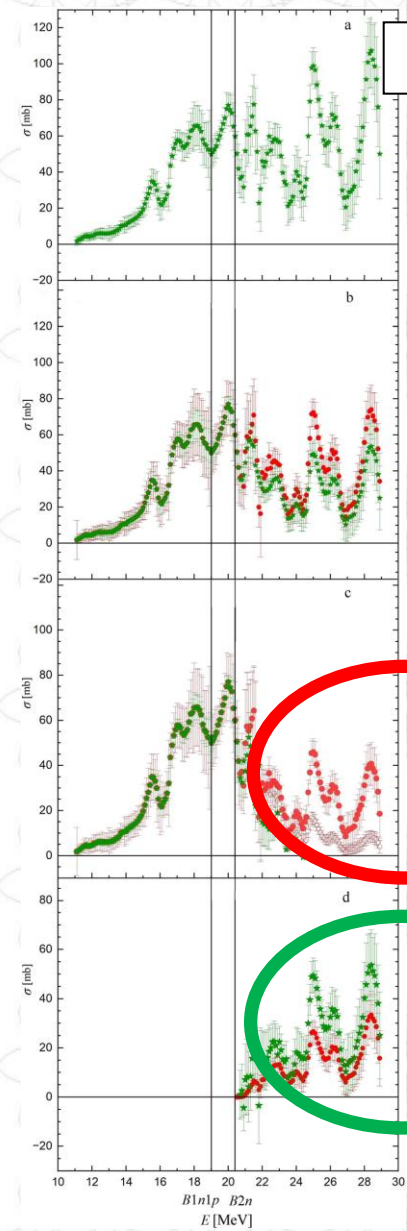
Непрямой метод идентификации множественности нейтронов основан на предположении о том, что поглощение дипольных $E1$ фотонов ядром перед испусканием им одного, двух или большего количества нейтронов приводит к формированию компаунд-ядра, которое и испускает быстрый нейтрон.

Проанализирована достоверность экспериментальных сечений парциальных реакций для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$, ^{90}Zr , полученных на пучках тормозного γ -излучения.

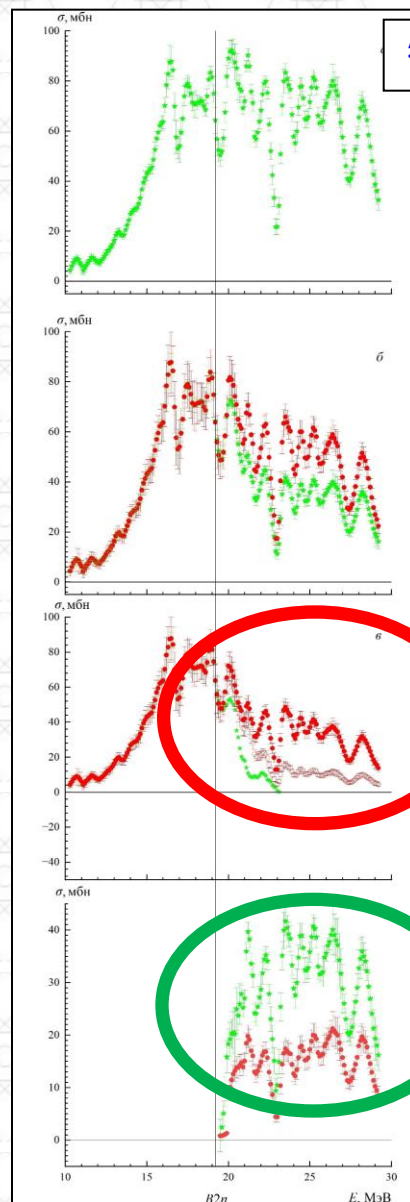


Установлено, что также имеются серьезные претензии к достоверности экспериментальных данных. Наблюдаются существенные расхождения между экспериментальными и теоретическими данными:

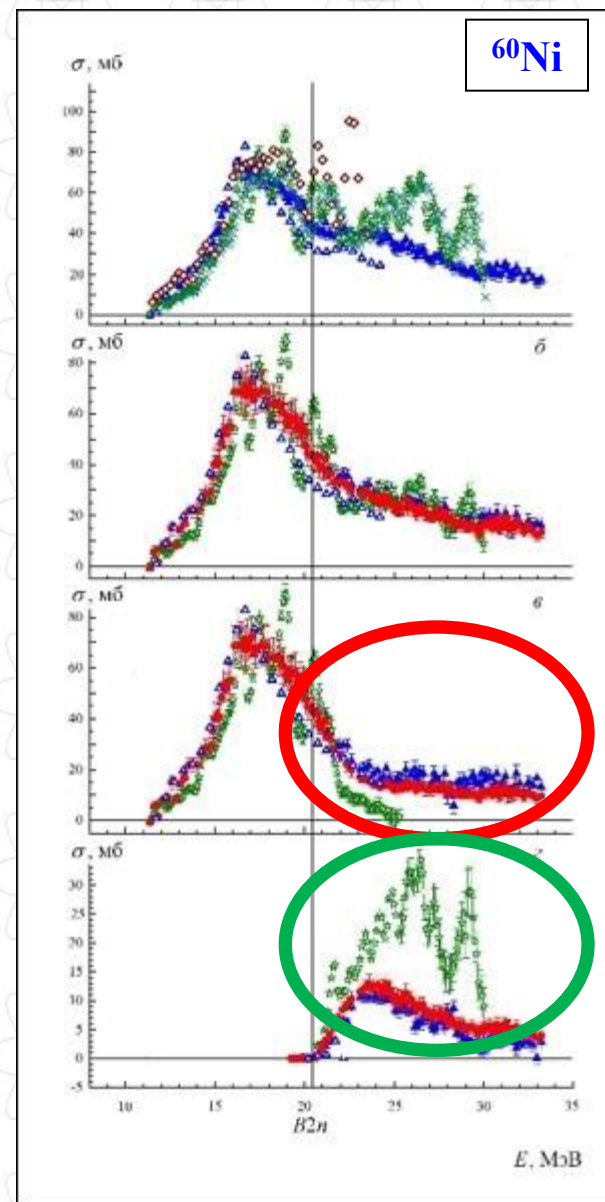
как правило, $F_1^{\text{эксп}}$ занижены, а $F_2^{\text{эксп}}$ завышены по отношению к $F_{1,2}^{\text{теор}}$.



^{51}V



^{59}Co



^{60}Ni

Для таких нескольких ядер (например, ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$) выполнена оценка сечений, удовлетворяющих физическим критериям достоверности.

Проведено сравнение новых оцененных данных с данными, оцененными ранее при использовании сечений, полученных на пучках квазимоноэнергетических фотонов.

Показано, что при соответствующей нормировке исходных для оценки сечений выхода $\sigma(\gamma, xn)$, результаты оценки с помощью экспериментально-теоретического метода близки.

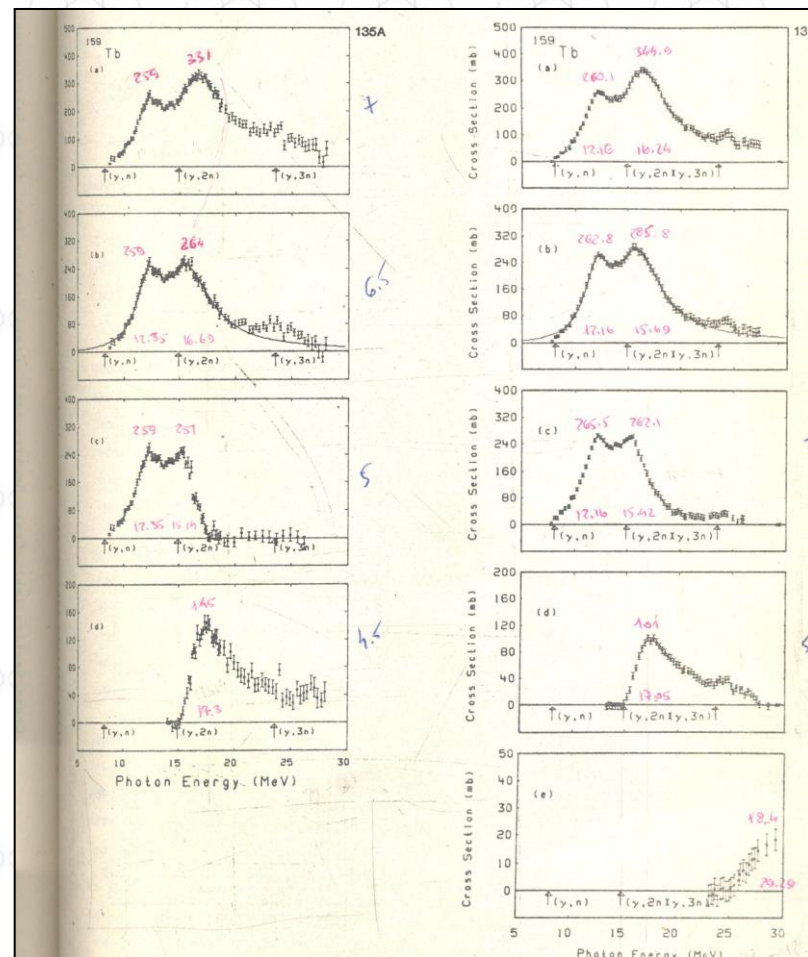
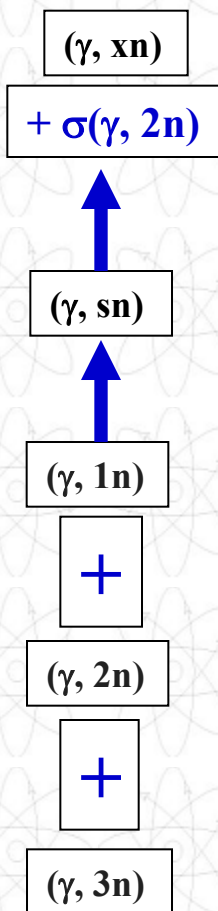
**Установлено (отмечено), что результаты экспериментов на пучках тормозного γ -излучения
не полны.**

Атлас (S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38 (1988) 199) и база данных EXFOR

^{159}Tb

По результатам экспериментов на пучках аннигиляционных фотонов, как правило, получены сечения всех энергетически возможных реакций – представлен **полный набор** данных для парциальных и полных реакций.

По результатам экспериментов на пучках тормозного излучения ситуация – иная, **данные не полны**: как правило (почему-то?) опубликованы комбинации сечений только 2 – 3 реакций.



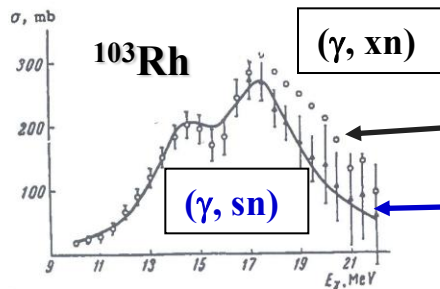


FIG. 3. Photoneutron production cross section of Rh^{103} . Here and in the other graphs we denote the experimental values of σ_n by circles, the computed values of σ_γ by triangles.

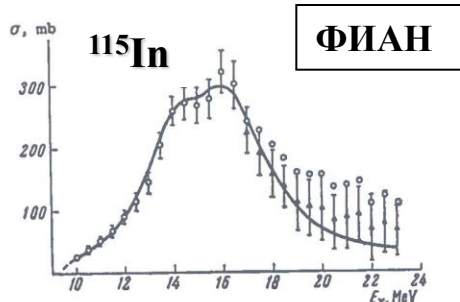


FIG. 4. Photoneutron production cross section of In^{115} .

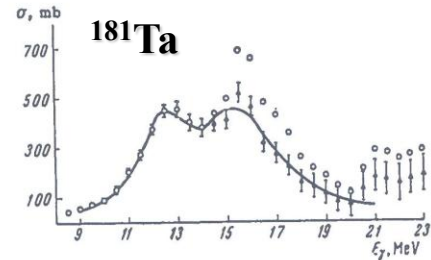
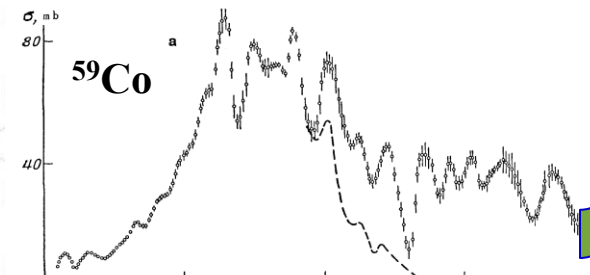
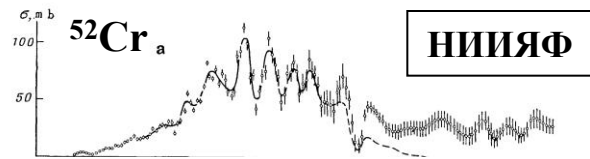
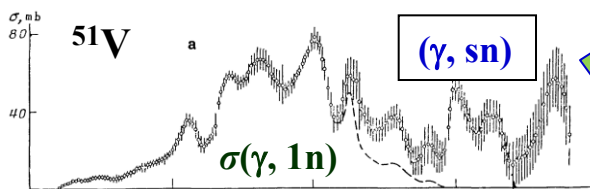


FIG. 5. Photoneutron production cross section of Ta^{181} .

Данные экспериментов не полны.

Комбинация сечений $\sigma(\gamma, xn) = \sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, sn) = \sigma(\gamma, 1n) + \sigma(\gamma, 2n)$.

Комбинации $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 1n)$.



Комбинации $\sigma(\gamma, sn)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$.

Университет Мельбурна

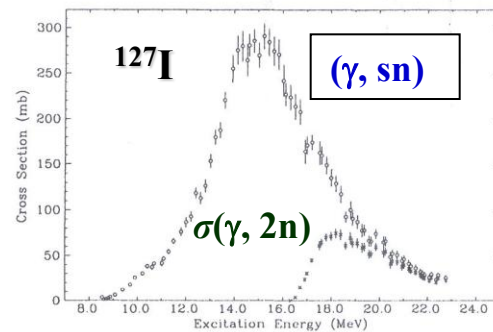


FIG. 1. $^{127}\text{I}(\gamma, sn)$ reaction cross section (\circ), together with the $^{127}\text{I}(\gamma, 2n)$ reaction cross section (\times) deduced as outlined in the text. The errors shown are statistical; there is a systematic uncertainty of 7% associated with the absolute scale.

Естественных следующих шагов: $\sigma(\gamma, 2n) = \sigma(\gamma, xn) - \sigma(\gamma, sn)$
и/или
 $\sigma(\gamma, 1n) = \sigma(\gamma, sn) - \sigma(\gamma, 2n)$
не делалось.

В тех случаях, когда соответствующие данные получены и в экспериментах на пучках аннигиляционных фотонов (например, для ядер ^{51}V , ^{59}Co , $^{58,60}\text{Ni}$), возможны сравнения, совместные анализ, оценка, обсуждения, ..., особой остроты нет.

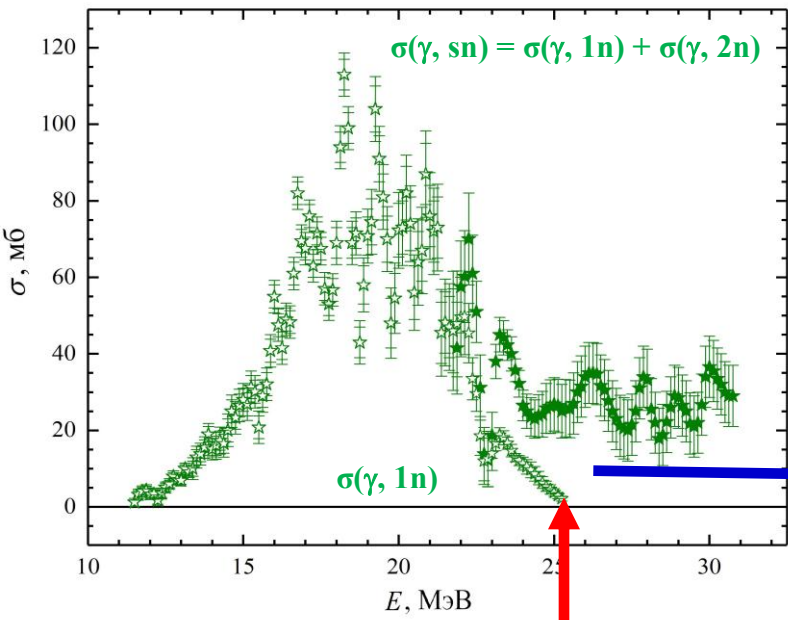
В тех случаях, когда эксперименты выполнены только на пучках тормозного излучения, проблема полноты стоит остро.

Данные по ядрам ^{52}Cr и ^{68}Zn – яркие примеры: результаты экспериментов на пучках аннигиляционных фотонов отсутствуют.

Имеются возможности для получения новых (неопубликованных ранее) данных.

Новые данные о сечениях $\sigma(\gamma, 2n)$ и $\sigma(\gamma, xn)$ на ядре ^{52}Cr .

Опубликованные сечения реакций

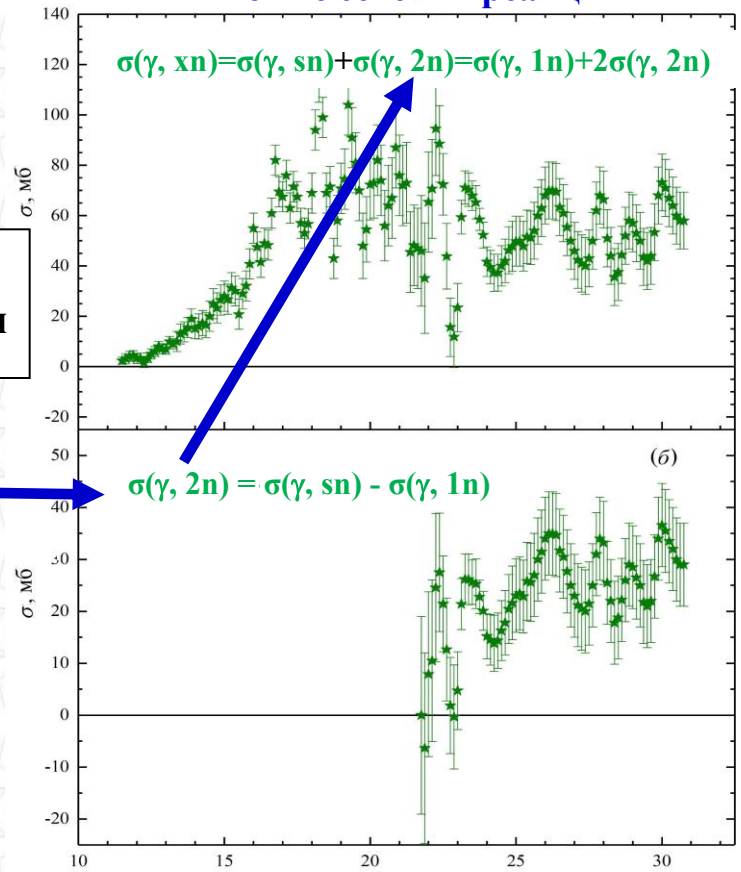


^{52}Cr

Простые
разности/суммы

Уменьшение до значения 0 сечения реакции $(\gamma, 1n)$ при энергии около 25 МэВ весьма сомнительно для ядра с $A = 52$.

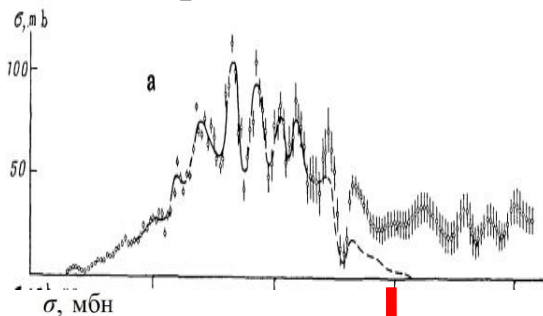
Новые сечения реакций



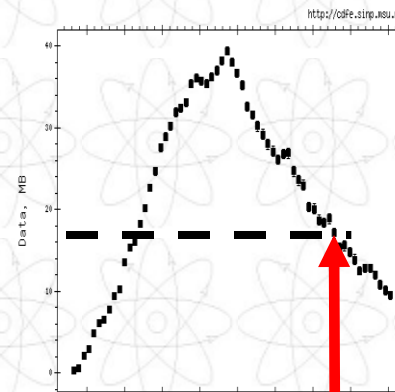
Сечение	Экспериментальные опубликованные данные	Новые неопубликованные ранее данные	Опубликованные и неопубликованные данные
$\sigma(\gamma, xn)$		942.8 ± 11.1	950
$\sigma(\gamma, sn)$	733.4 ± 6.8		740
$\sigma(\gamma, 1n)$	524.2 ± 5.6		530
$\sigma(\gamma, 2n)$		209.5 ± 8.8	210

Экспериментальные данные.

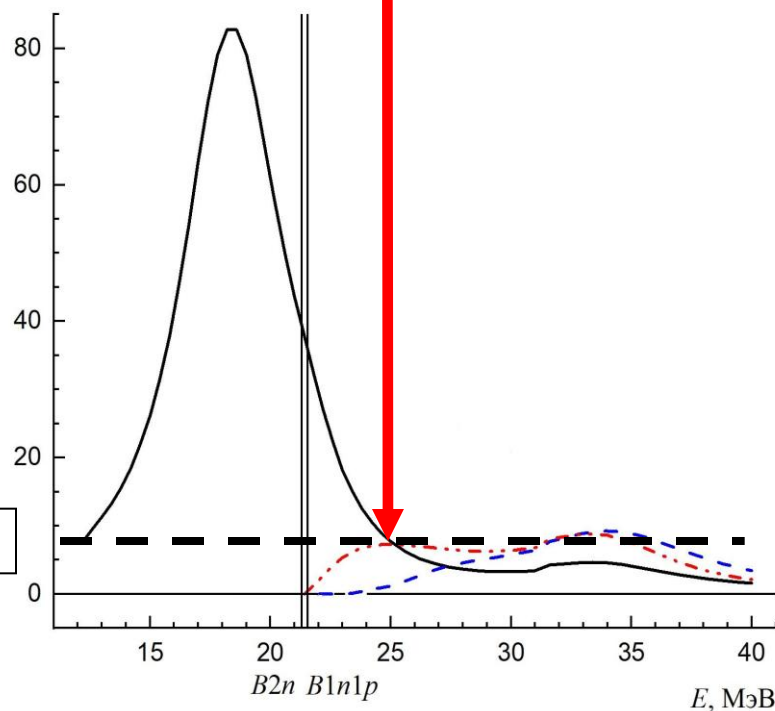
^{52}Cr



17 мб

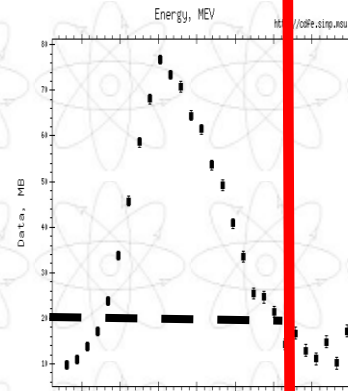


^{45}Sc



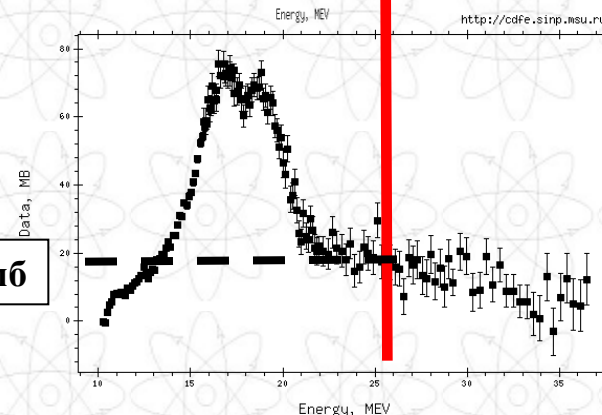
8 мб

20 мб



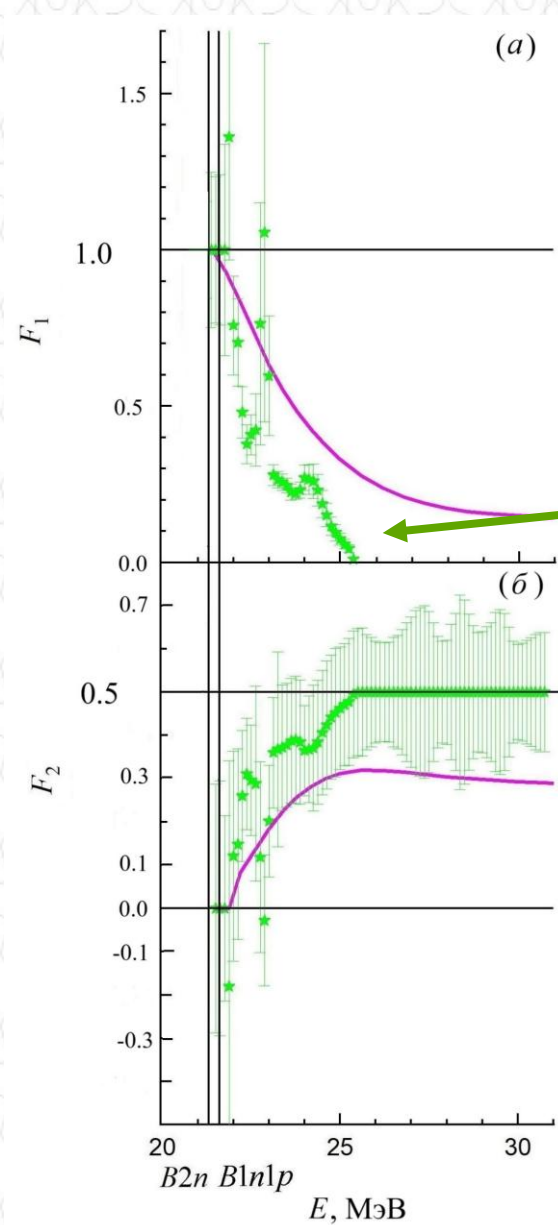
^{51}V

19 мб



^{59}Co

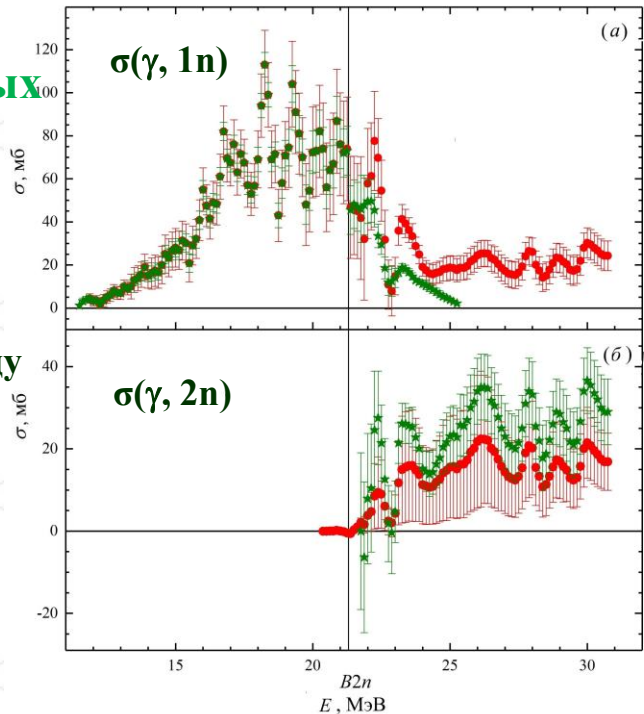
Данные, рассчитанные в КМФЯР.



^{52}Cr

Сравнение **экспериментальных**
и оцененных
сечений.

Существенные расхождения между
экспериментальным
 $\sigma(\gamma, 1n)$
и новым полученным впервые
 $\sigma(\gamma, 2n)$
и теоретическими сечениями.



Сечение	Оценка	Эксперимент
$\sigma(\gamma, xn)$	942.8±16.8	942.8±11.1
$\sigma(\gamma, sn)$	813.7 ±14.8	733.4±6.8
$\sigma(\gamma, 1n)$	684.4±12.9	524.2±3.6
$\sigma(\gamma, 2n)$	129.3±7.8	209.5±8.8

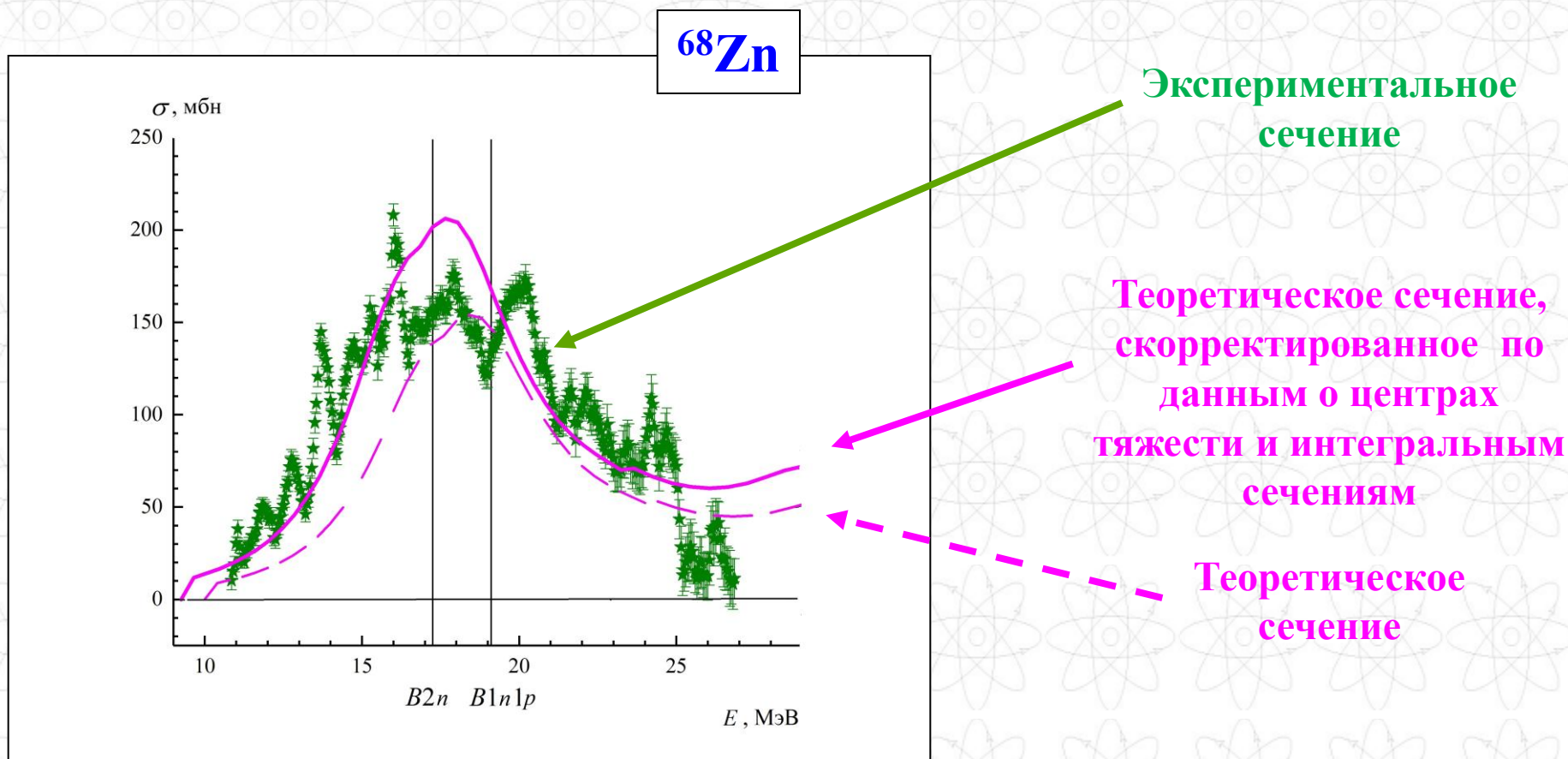
**В эксперименте недостоверно: $\sigma(\gamma, 1n)$ недоопределено,
 $\sigma(\gamma, 2n)$ переопределено.**

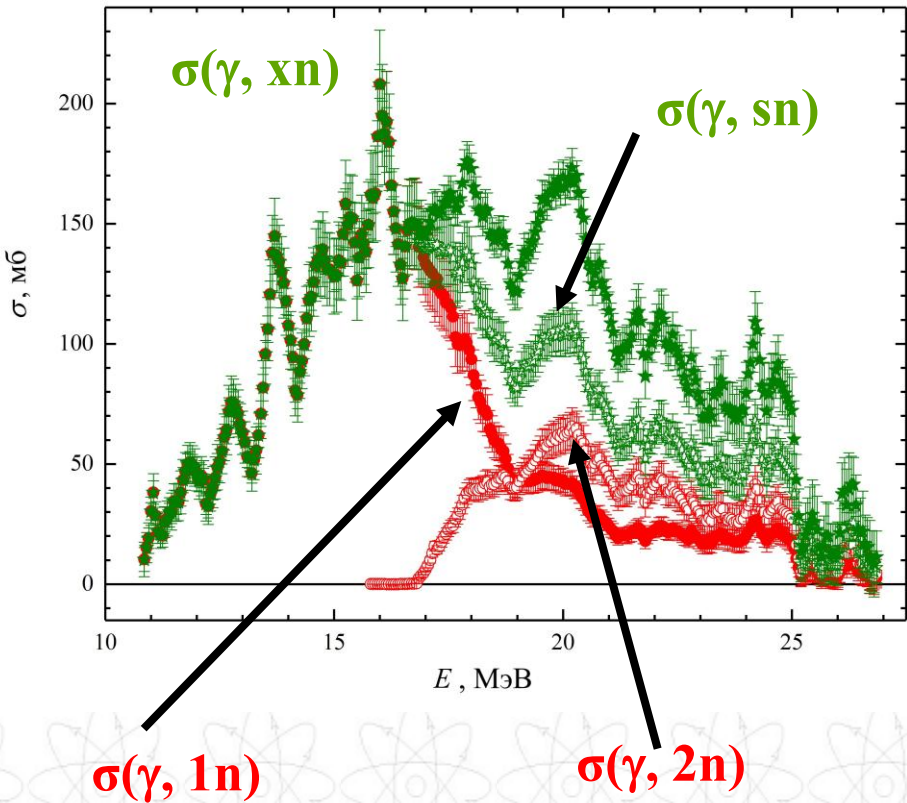
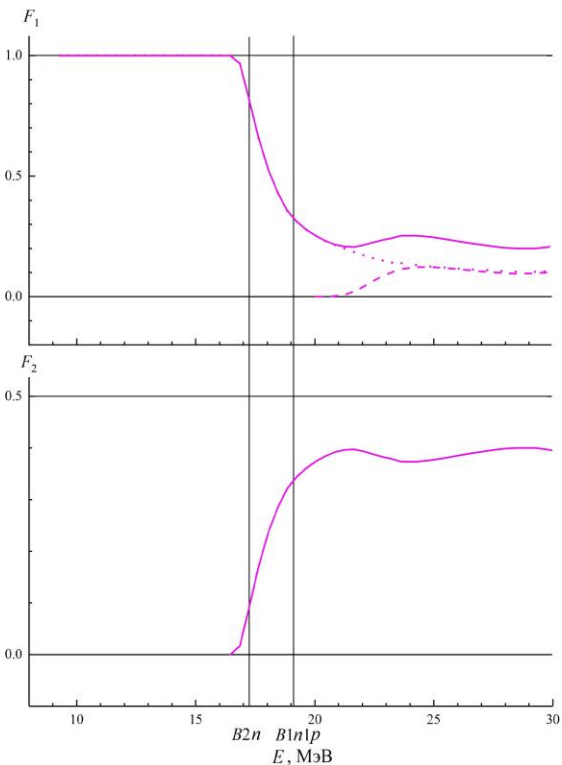
**Расхождения экспериментальных и оцененных данных
могут быть обусловлены тем, что поправки,
рассчитанные по статистической теории, не вполне
корректно учитывают возможные эффекты процессов
нестатистической природы:**

- деформация ядра;
- полупрямые и прямые процессы;
- процессы предравновесного распада;
- влияние на нейтронные каналы процессов с участием протонов (изоспиновое расщепление ГДР, присутствие «злосчастной» двухнуклонной нейтрон-протонной реакции $(\gamma, 1n1p)$,
-

Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, Е.В.Лазутин, И.М.Пискарев, О.П.Шевченко.
Фотонейтронные сечения для ^{64}Zn и ^{68}Zn в области гигантского дипольного резонанса.
ЯФ, 20, 433 (1974).

Опубликованы только сечения выхода нейтронов $\sigma(\gamma, xn)$.
Для ^{68}Zn других данных нет.





Реакция	(γ, xn)	(γ, sn)	$(\gamma, 1n)$	$(\gamma, 2n)$
Инт. сечен.	1610.89 ± 5.49	1281.46 ± 7.00	952.01 ± 6.23	329.45 ± 3.20

**Спасибо
за
внимание!**

Для поправок на множественность нейтронов применялись следующие соотношения:

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

полученное из соотношения для температуры ядра θ и параметра плотности уровней « α » соседнего ядра с $(N-1)$

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

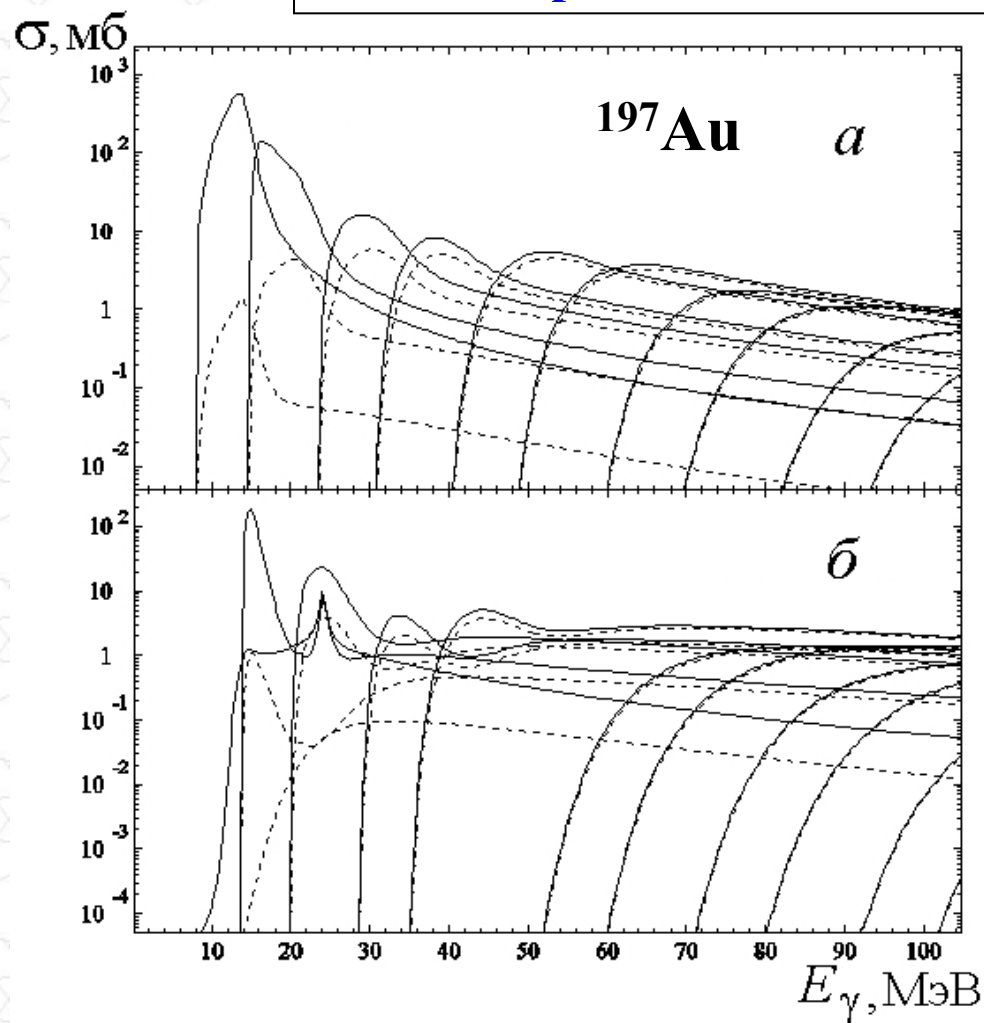
где $\rho(U) = CU^{-2}\exp(2\sqrt{\alpha}U)$ – плотность уровней ядра $(A-1)$ в модели Ферми-газа, $U = \mathbf{E}-B_n-\varepsilon-\delta$ – эффективная энергия возбуждения ядра $(A-1)$, ε – кинетическая энергия испущенного нейтрона, δ – энергия спаривания ядра $(A-1)$, B_{xn} – порог соответствующей xn -реакции

и / или

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

где разность энергий $k = \mathbf{E}-B_{2n}$, ядерная температура $\theta = [(\mathbf{E}-B_{1n})/a]^{1/2}$, константа $a = A/10$, оценка влияния прямого фотоэффекта $x = 0.4$.

Комбинированная модель фотоядерных реакций



Фотонейтронные реакции
 $\sigma(\gamma, 1n), \sigma(\gamma, 2n), \sigma(\gamma, 3n),$
 $\sigma(\gamma, 1n1p), \sigma(\gamma, 2n1p), \sigma(\gamma, 3n1p),$
 $\dots \sigma(\gamma, 15n5p)$

$\sigma(\gamma, 1nkp),$
 $l = 0 - 15, k = 0 - 5$

Фотопротонные реакции
 $\sigma(\gamma, 1p), \sigma(\gamma, 1p1n), \sigma(\gamma, 1p2n),$
 $\sigma(\gamma, 1p3n),$
 $\sigma(\gamma, 2p1n), \sigma(\gamma, 2p2n),$
 $\dots \sigma(\gamma, 15n5p)$

Рассчитанные сечения используются для получения отношений
 $\sigma(\gamma, in)/\sigma(\gamma, xn)$ для $i = 1, 2, 3$