



В.В.Варламов

СТАТУС И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОЯДЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ



СТАТУС И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОЯДЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В.В.Варламов

Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной
физики имени Д.В.Скобельцына
Центр данных фотоядерных экспериментов
(ЦДФЭ НИИЯФ МГУ)

18.04.2018

XI Черенковские чтения,
17 апреля 2018 года, ФИАН, Москва

1

Титул



Доклад

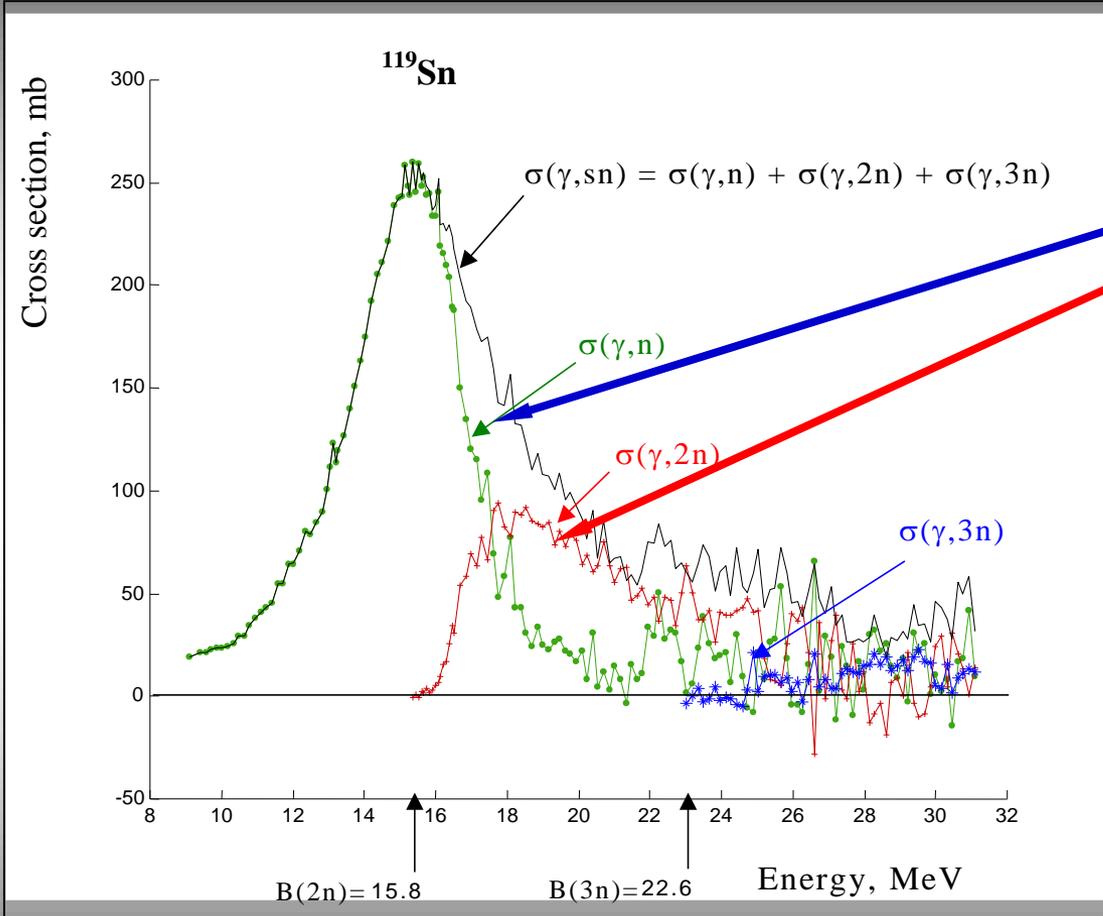
посвящен проблеме, сколь старой и широко известной, столь же новой, вызывающей большой интерес –

проблеме достоверности экспериментальных данных о сечениях фотонейтронных реакций, в большинстве своем полученных с помощью метода разделения образующихся фотонейтронов по множественности.

Современный статус фотоядерных данных рассматривается с использованием объективных физических критериев достоверности.



Каналы распада ГДР (на примере ядра ^{119}Sn)



Баланс сечений реакций с образованием (прежде всего, 1 и 2) нейтронов –

очень важная характеристика процесса фоторасщепления ядра:

- конкуренция каналов распада;
- конкуренция прямых и статистических процессов;
- эффекты конфигурационного расщепления ГДР;
- эффекты изоспинового расщепления ГДР;
- многие другие.

$$(\gamma, \text{abs}) = (\gamma, 1\text{n}) + (\gamma, 2\text{n}) + (\gamma, 3\text{n}) + \dots + (\gamma, \text{p}) + \dots + (\gamma, \text{f}) = (\gamma, \text{sn}) + (\gamma, \text{p}) + \dots + \dots + (\gamma, \text{f})$$

$$(\gamma, \text{xn}) = (\gamma, 1\text{n}) + 2(\gamma, 2\text{n}) + 3(\gamma, 3\text{n}) + \dots + \nu(\gamma, \text{f})$$



Данные о фотоядерных реакциях широко используются в фундаментальных и прикладных исследованиях.

- **Собственно ядерная физика (параметры и свойства гигантского резонанса (ГДР)):**
 - **величина и структура сечений реакций с возбуждением ГДР;**
 - **механизмы реакций под действием гамма-квантов;**
 - **конкуренция прямых и статистических процессов при распаде ядерных состояний;**
 - **эффекты конфигурационного и изоспинового расщепления ГДР;**
 - **.... многие другие традиционные;**
- **Смежные области:**
 - **ядерная энергетика (подкритичные реакторы, переработка радиоактивных отходов);**
 - **материаловедение;**
 - **элементный анализ;**
 - **неразрушающий контроль;**
 - **мониторинг светимости пучков ультрарелятивистских ядер современных коллайдеров на встречных пучках**
 - **радиационные разделы медицины, биологии, химии, геологии и многих других наук...**



Абсолютное большинство данных получено в экспериментах двух типов :

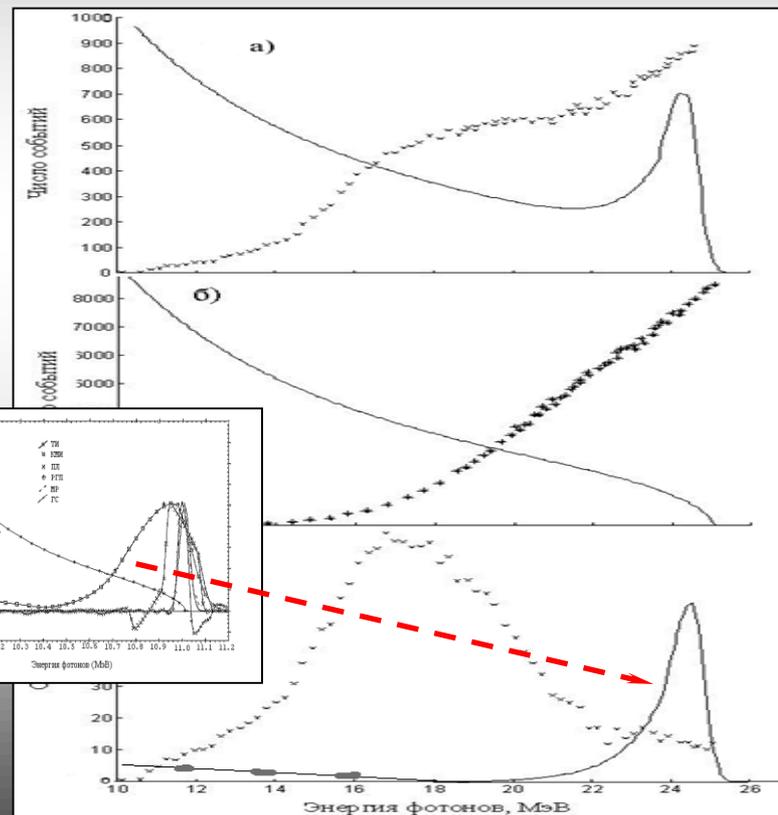
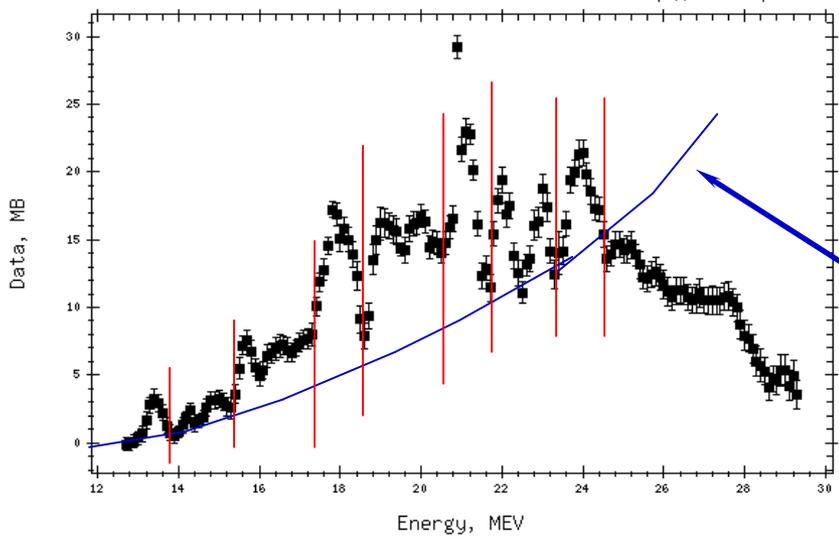
(НИИЯФ, ИЯИ РАН, Саратов, Мельбурн,...)
на сплошных пучках тормозного γ -излучения – решение неустойчивой обратной задачи

(Ливермор (США), Саклэ (Франция,...))
на получаемых в разностной процедуре пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов

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

где $\sigma(k)$ - сечение при энергии фотонов k

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

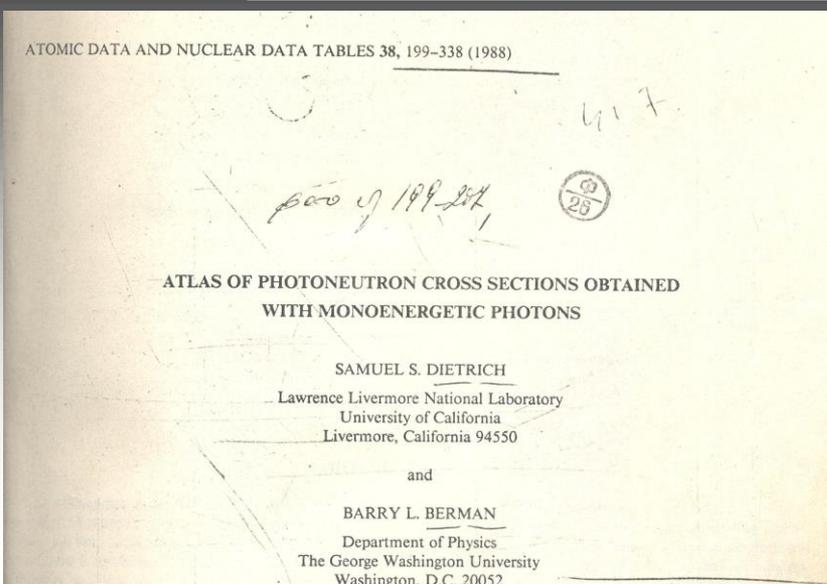




Определение сечений парциальных реакций

Квазимоноэнергетические аннигиляционные фотоны – прямое измерение сечений реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ с использованием множественности нейтронов, определяемой по их кинетическим энергиям, получение затем сечений реакций $(\gamma, Sn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n)$ и $(\gamma, Sn) = (\gamma, 1n) + 2(\gamma, 2n)$.

Тормозное излучение – определение сечения реакции $(\gamma, 2n)$ путем внесения в сечение реакции выхода нейтронов (γ, xn) поправок, рассчитанных по статистической теории ядерных реакций, получение информации о сечении реакции (γ, Sn) и использование далее разностей типа $(\gamma, 2n) = (\gamma, xn) - (\gamma, Sn)$ в области энергий до порога реакции $(\gamma, 3n)$.

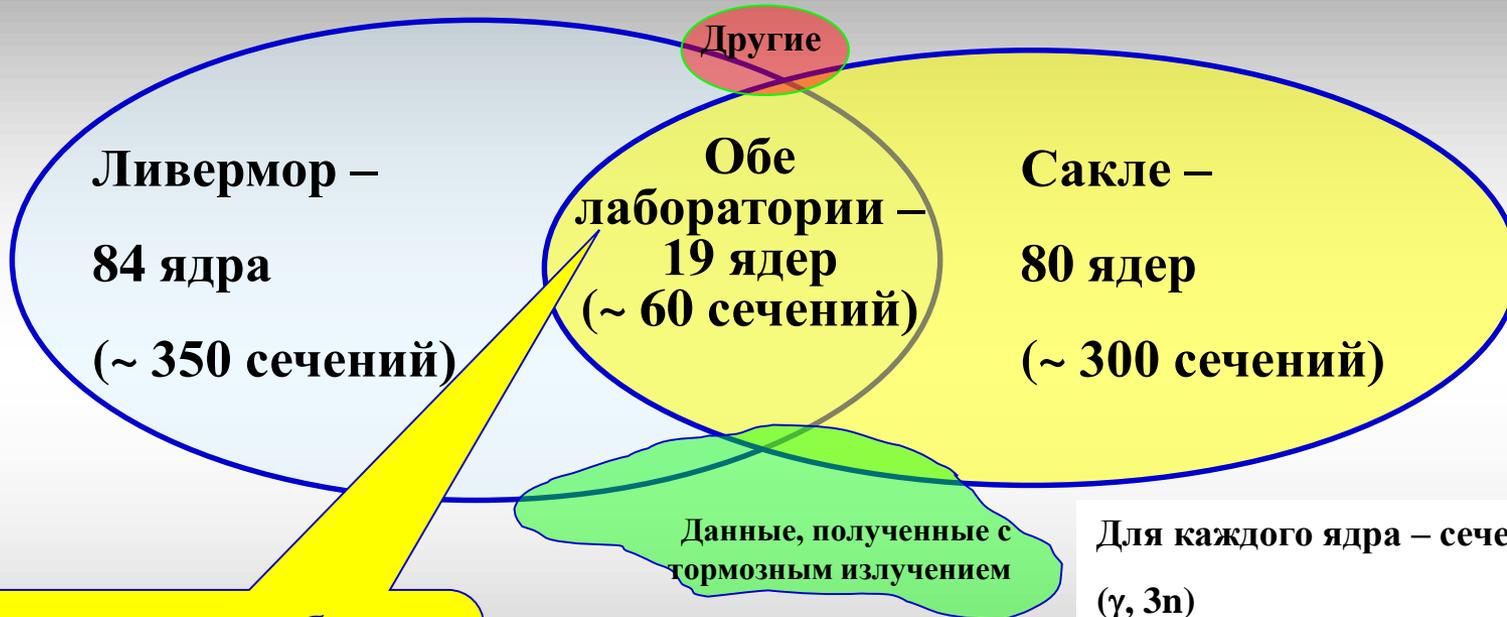


Абсолютное юольшинство данных о сечениях парциальных и полных фотонейтронных реакций получено в 1962 – 1986 годах в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) и опубликовано в полном атласе – S.S.Dietrich, B.L.Berman. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 38 (1988) 199



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.

A.V.Varlamov, V.V.Varlamov, D.S.Rudenko, M.E.Stepanov. Atlas of Giant Dipole Resonances. Parameters and Graphs of Photonuclear Reaction Cross Sections. INDC(NDS)-394, IAEA NDS, Vienna, Austria, 1999



**Основная проблема –
головная боль
пользователей**

Для каждого ядра – сечения реакций:

$(\gamma, 3n)$

$(\gamma, 2n)$

$(\gamma, 1n)$

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

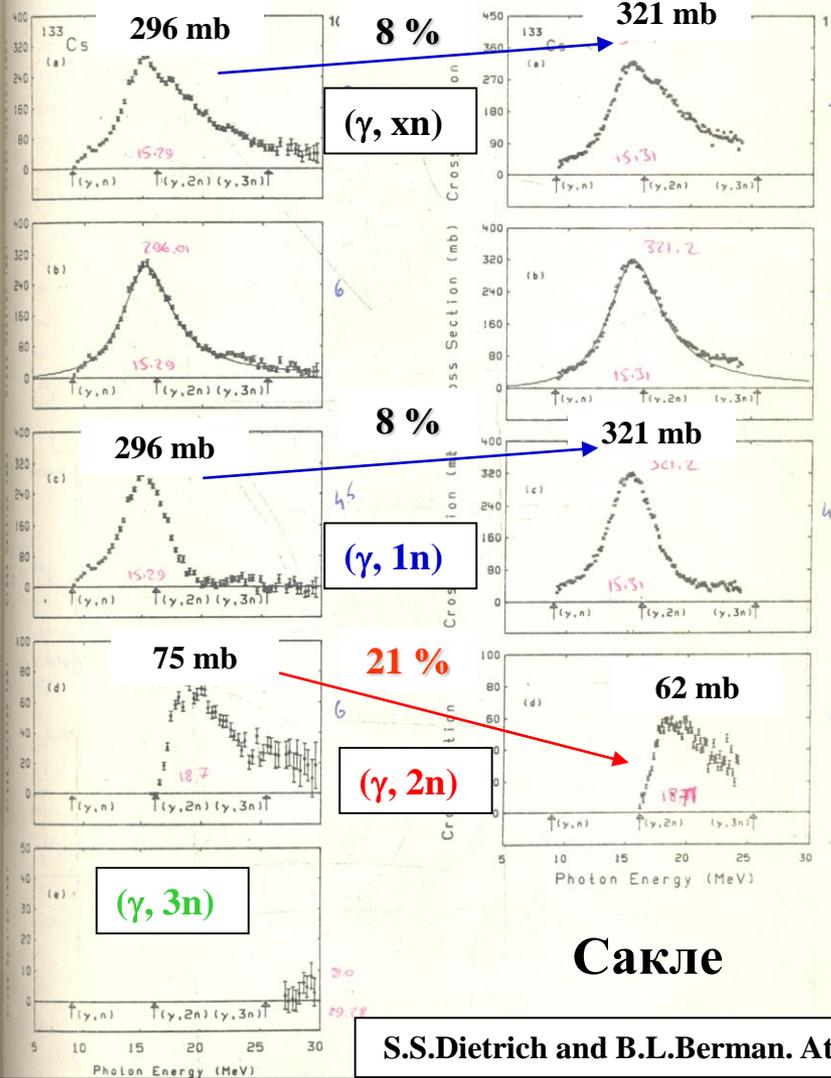
$(\gamma, xn) = (\gamma, 1n) + 2(\gamma, 2n) + 3(\gamma, 3n) + \dots$



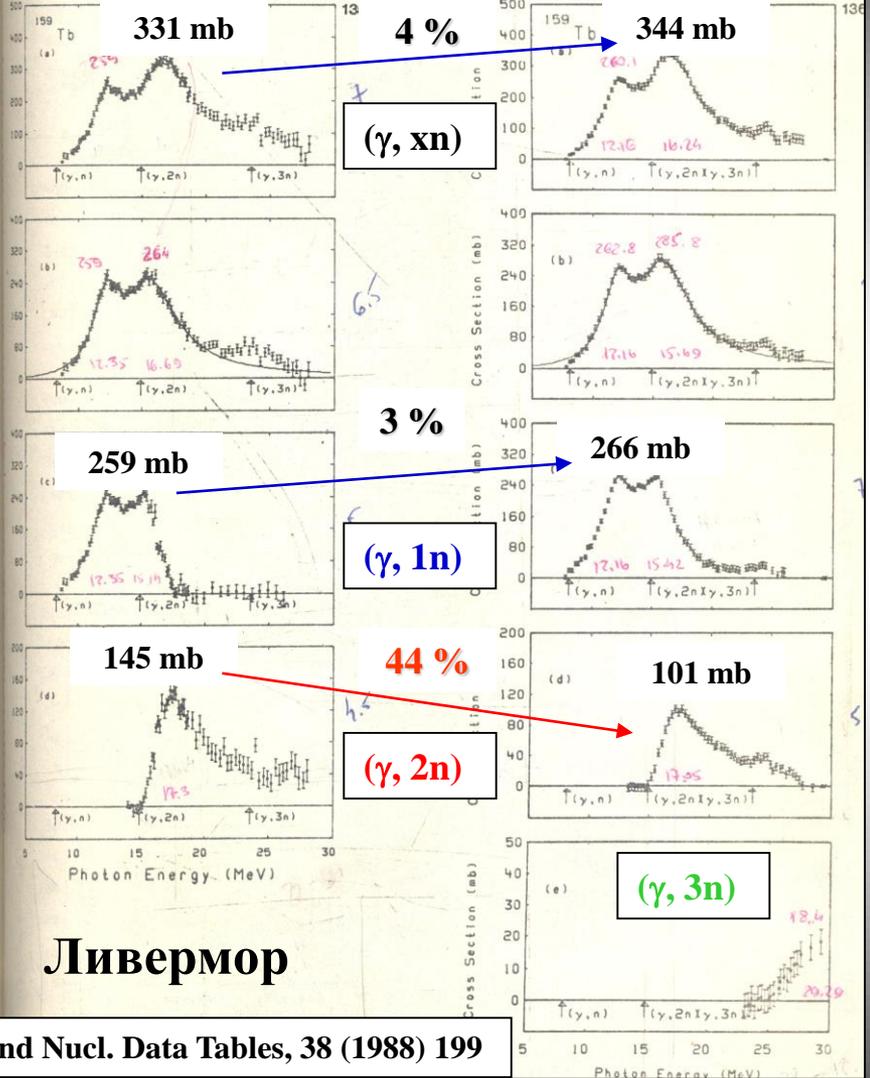
¹³³Cs

Расхождения амплитуд сечений

¹⁵⁹Tb



Сакле



Ливермор

S.S.Dietrich and B.L.Berman. Atom. Data and Nucl. Data Tables, 38 (1988) 199



File Edit View History Bookmarks Tools Help

ЦДФЭ - Центр Данных Фот... x +

cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ, ОЭПВАЯ

ЦЕНТР ДАННЫХ ФОТОЯДЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
CENTRE FOR PHOTONUCLEAR EXPERIMENTS DATA

ЦДФЭ: домашняя страница

Добро пожаловать на сайт ЦДФЭ.

Сервисы, доступные в ЦДФЭ:

Объект поиска	База данных
<p>Все об атомных ядрах и ядерных реакциях. Числовые данные, графическая информация и библиография</p> 	<p>Универсальная электронная система информации по атомным ядрам и ядерным реакциям [описание] Последнее обновление: 6 мая 2014</p>
<p>Распространенность, изотоп, атомная масса, избыток массы, энергия связи, спин, четность, момент, деформация, мода распада: основное и метастабильное состояния.</p> 	<p>Параметры основных и изомерных состояний атомных ядер [описание] Последнее обновление: 15 июня 2011</p>
<p>Ядерные реакции. Различные характеристики (международный фонд данных EXFOR). Налетающая частица: фотон, нейтрон, любая заряженная частица, тяжелый ион.</p> 	<p>База данных по ядерным реакциям (EXFOR) [описание] Последнее обновление: 25 октября 2017</p>
<p>Параметры ядерных уровней: Параметры ядерных уровней: Энергия, спин, четность, время жизни, мода, распад, метастабильное состояние, изоспин, момент количества движения, спектроскопический фактор и т.д. Параметры α-, β-, γ-распадов: Энергия, интенсивность, мультипольность, коэффициент ветвления, коэффициент смешивания и т.д.</p> 	<p>Полная реляционная база ядерно-спектроскопических данных "Relational ENSDF" [описание] Последнее обновление: 6 мая 2014</p>
<p>Параметры квадрупольной деформации; квадрупольные моменты, зарядовые радиусы ядер</p> 	<p>Карта параметров формы и размеров ядер [описание] Последнее обновление: 4 апреля 2015</p>
<p>Физика атомных ядер и ядерных реакций. Эксперимент и теория. Справочно-библиографическая информация: ядро, реакция, распад, автор, название, публикация, аннотация, библиографическая ссылка и т.д. Справочно-библиографическая информация о работах по физике атомных ядер и ядерных реакций: авторы, названия работ, библиографические ссылки и т.д.</p> 	<p>Публикации по ядерной физике (База данных "NSR") [описание] Последнее обновление: 15 сентября 2017</p>

Базы данных
Партнеры
Банк программ (служба программного обеспечения) OECD NEA DB
Ссылки
Контакты
О нас
Сотрудники
Публикации
English Pages

File Edit View History Bookmarks Tools Help

ЦДФЭ - Центр Данных Фот... x +

cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html

Гигантский дипольный резонанс (ГДР): энергия, амплитуда, ширина, сечение, интегральное сечение, момент.



Карта основных параметров гигантского дипольного резонанса
[\[описание\]](#)
[\[путеводитель\]](#)
Последнее обновление: 27 сентября 2011

Электромагнитные взаимодействия. Справочно-библиографическая информация: ядро, реакция, автор, название, публикация, аннотация, библиографическая ссылка, и т.д.



Индекс фотоядерных данных с 1955 г.
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 10 июля 2017

Энергии реакций, энергии связи, энергии радиоактивных распадов



Калькулятор и графическая система для параметров атомных ядер и характеристик ядерных реакций и радиоактивных распадов
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 19.03.2013

Периоды полураспада, моды распада



Карта атомных ядер
Последнее обновление: 19 марта 2015
Атомные ядра. Основные характеристики

Вероятности внутренней конверсии: изомерный переход, конверсия, вероятность.



Вероятности внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 15 мая 2002

cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/select.cgi?base=...

База данных по ядерным реакциям (EXFOR)



База данных по ядерным реакциям (EXFOR).



Пример:
поиск
реакции
 $^{10}\text{B}(\gamma, xn)$.

CDFE search engine. - File Edit View Go B

Back Forward Rel

Home Bookmarks

Recordings from File Edit

Варла

Subent

L00440
L00440
M00590
M03620
M03620
M04980
M04980

SUBENT
BIB
TITLE
AUTHOR
REFERENCE
INSTITUTE
FACILITY
INC-SOURCE
SAMPLE
METHOD
DETECTOR
PART-DET
ANALYSIS

Нах
(налет
энергии
и дете
Дан

SUBENT	M0498002	20130627	M0498	2	1
BIB	3	6	M0498	2	2
REACTION	(5-B-10(G,X)0-NN-1,,SIG,,BRS)		M0498	2	3
	The sum of the cross sections for the reactions		M0498	2	4
	(G,N), (G,N+P), AND 2(G,2N).		M0498	2	5
	(CURVE) Data from Fig. 1.		M0498	2	6
HISTORY	(20130627A) Corrected by V.Varlamov: BRA -> BRS, STATUS.		M0498	2	7
			M0498	2	8
ENDBIB	6	0	M0498	2	9
NOCOMMON	0	0	M0498	2	10
DATA	3	190	M0498	2	11
EN			M0498	2	12
MEV			M0498	2	13
			M0498	2	14
			M0498	2	15
			M0498	2	16
			M0498	2	17
			M0498	2	18
			M0498	2	19
			M0498	2	20
			M0498	2	21
			M0498	2	22
			M0498	2	23
			M0498	2	24
			M0498	2	25
			M0498	2	26
			M0498	2	27
			M0498	2	28
			M0498	2	29
			M0498	2	30
			M0498	2	31
			M0498	2	32
			M0498	2	33
			M0498	2	34
			M0498	2	35
			M0498	2	36
			M0498	2	37
			M0498	2	38
			M0498	2	39
			M0498	2	40
			M0498	2	41
			M0498	2	42
			M0498	2	43
			M0498	2	44
			M0498	2	45
			M0498	2	46
			M0498	2	47
			M0498	2	48
			M0498	2	49
			M0498	2	50
			M0498	2	51
			M0498	2	52
			M0498	2	53
			M0498	2	54
			M0498	2	55
			M0498	2	56
			M0498	2	57
			M0498	2	58

CDFE search engine. - View History Bookmarks Tools Help

EXFOR M0498002 Data/...

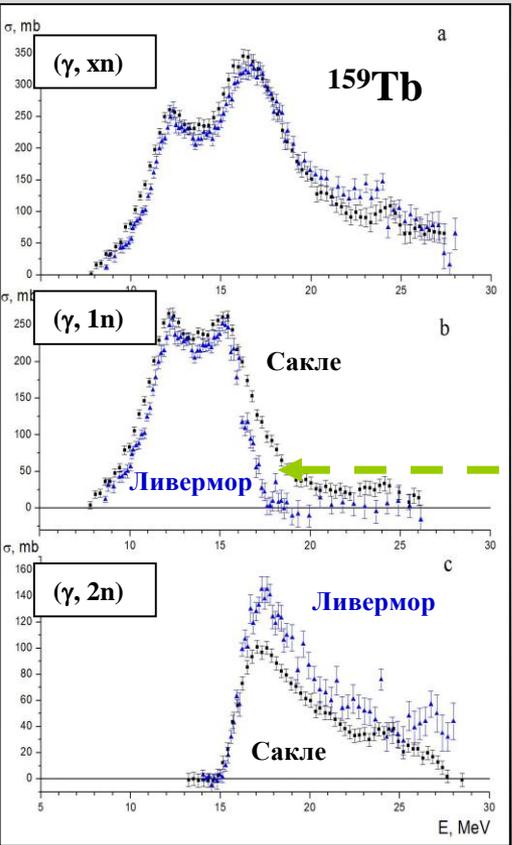
cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/text

M0498002 20130627
(R. J. Hughes, E. G. Muirhead)
The photoneutron cross sections of B-10 and B-11.
(J, NP/A, 215, 147, 1973)
#doi: 10.1016/0375-9474(73)90107-3
(3AULAML)
(BRST)
(BETAT, 3AULAML)
(5-B-10(G,X)0-NN-1,,SIG,,BRS)
The sum of the cross sections for the reactions
(G,N), (G,N+P), AND 2(G,2N).

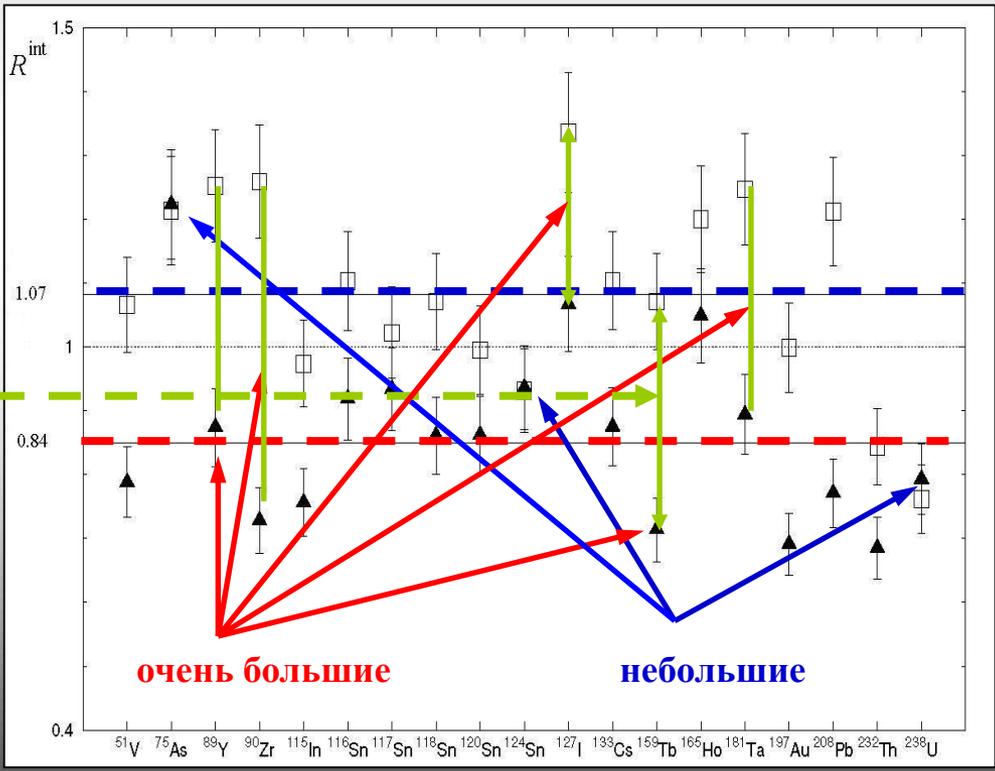
http://cdfe.sinp.msu.ru



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



Отношения интегральных сечений $R^{int} = \sigma^{int}_C / \sigma^{int}_Л$



Среднее отношение для реакций $(\gamma, 1n)$ – квадраты \square
 $\langle R \rangle \sim 1.07$.

Среднее отношение для реакции $(\gamma, 2n)$ – треугольники \blacktriangle
 $\langle R \rangle \sim 0.84$.

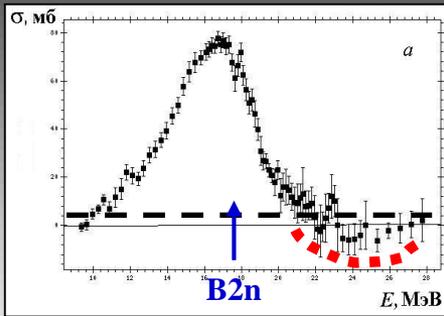


Возможные причины очевидных систематических расхождений

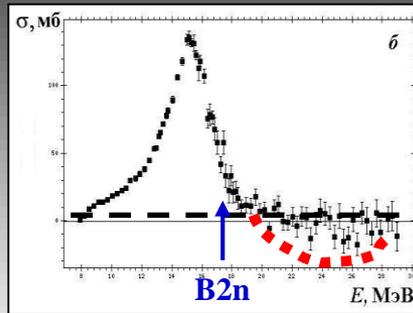
В обеих лабораториях использовался один и тот же метод разделения фотонейтронов по множественности, основанный на предположении о том, что единственный нейтрон из реакции $(\gamma, 1n)$ имеет энергию, большую по сравнению с энергиями обоих нейтронов из реакции $(\gamma, 2n)$, **однако методы измерения энергии нейтронов различались:**

– в Сакле в качестве детектора использовался обогащенный Gd жидкий сцинтиллятор, для которого были возможны необоснованные завышения количества $1n$ -случаев (**“suffered from a high background rate, made up largely of $1n$ -events, which introduced larger uncertainties in the background subtraction and pile-up corrections”** – цитата из V.L.Berman and S.C.Fultz, Rev.Mod.Phys., 47, 713 (1975));

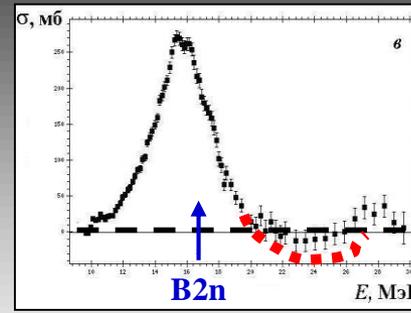
– в Ливерморе использовался «метод кольцевых отношений» (расположение счетчиков нейтронов концентрическими кольцами в парафиновом замедлителе: низкоэнергетичные нейтроны (из реакции $(\gamma, 2n)$) должны иметь достаточное время для замедления на пути к внутреннему кольцу, тогда как высокоэнергетичный нейтрон (из реакции $(\gamma, 1n)$) должен, минуя внутреннее кольцо, достигнуть внешнего кольца (**вследствие многократного рассеяния имеется вероятность возвращения некоторой части высокоэнергетичных нейтронов к внутреннему кольцу**).



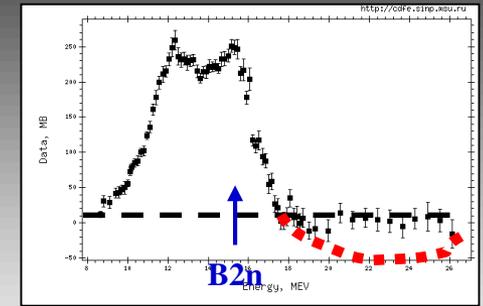
^{65}Cu



^{94}Zr



^{116}Sn



^{159}Tb

Физически запрещенные отрицательные значения в сечениях реакции ($\gamma, 1n$), полученных в Ливерморе, свидетельствуют о физически недостоверной идентификации нейтронов с множественностью 1 (а, следовательно и с множественностью 2).

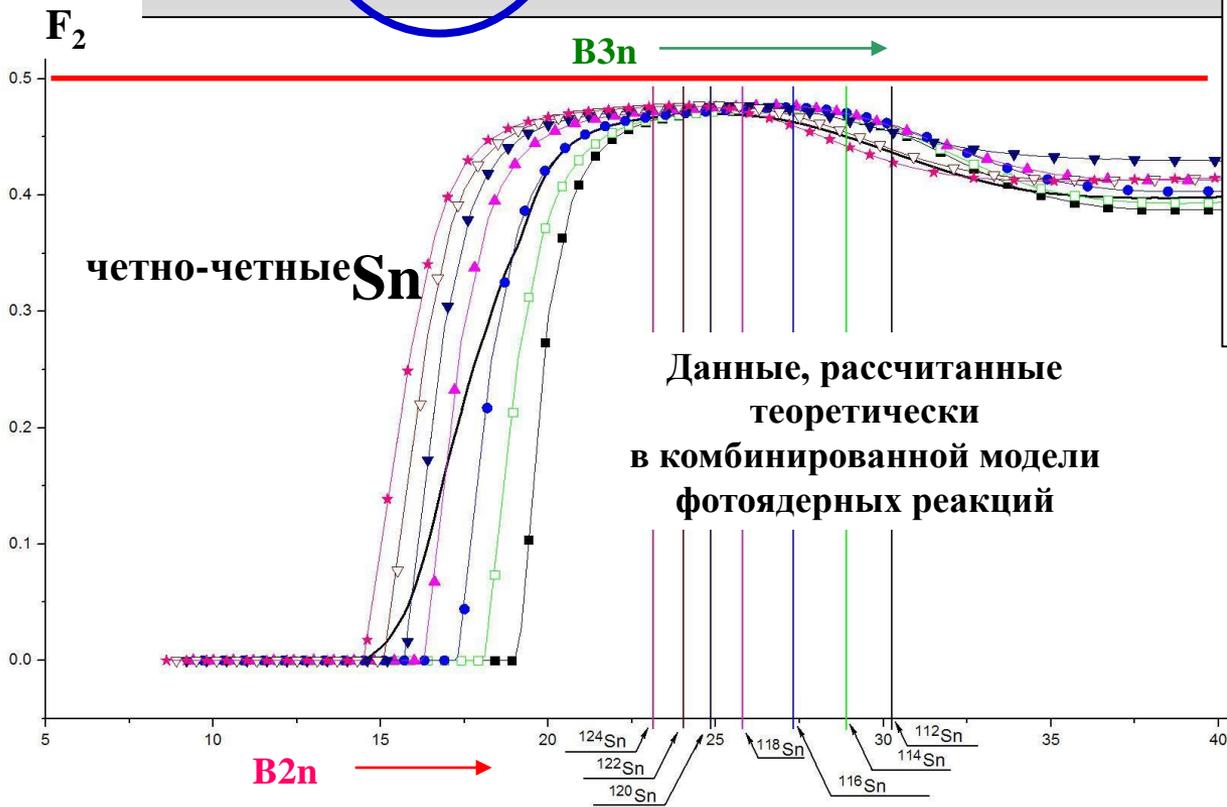
Существенные расхождения данных, намного превышающие статистические погрешности, наличие физически запрещенных отрицательных значений сечений реакций свидетельствуют о присутствии значительных систематических погрешностей.

Необходимы объективные физические критерии достоверности данных!



Главный критерий достоверности данных

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



Физически достоверное поведение функции F_2 должно быть следующим:

- до порога B_{2n} реакции $(\gamma, 2n)$ возможна только реакция $(\gamma, 1n)$: $F_2 = 0$;
- выше B_{2n} возможны реакции $(\gamma, 1n)$ и $(\gamma, 2n)$, F_2 увеличивается в соответствии с конкуренцией роста $\sigma(\gamma, 2n)$ и уменьшения $\sigma(\gamma, 1n)$ и приближается к физическому пределу 0.50, негде его не достигая;
- выше B_{3n} возможна реакция $(\gamma, 3n)$, F_2 уменьшается вследствие появления в отношении вклада $3\sigma(\gamma, 3n)$.

Естественное дополнение критериев:

- $F_1 < 1.00$,
- $F_3 < 0.33$,
- $F_4 < 0.25$,
- $F_5 < 0.20$,
- $F_6 < 0.17, \dots$



Модель

**В.С.Ишханов, В.Н.Орлин, ЭЧАЯ, 38 (2007) 460 ,
ЯФ, 71 (2008) 517 :**

полуклассическая экситонная предравновесная модель фотоядерных реакций, основанная на использовании плотностей уровней ядра, рассчитанных в модели Ферми-газа, и учитывающая эффекты деформации ядра и конфигурационного и изоспинового расщепления его ГДР

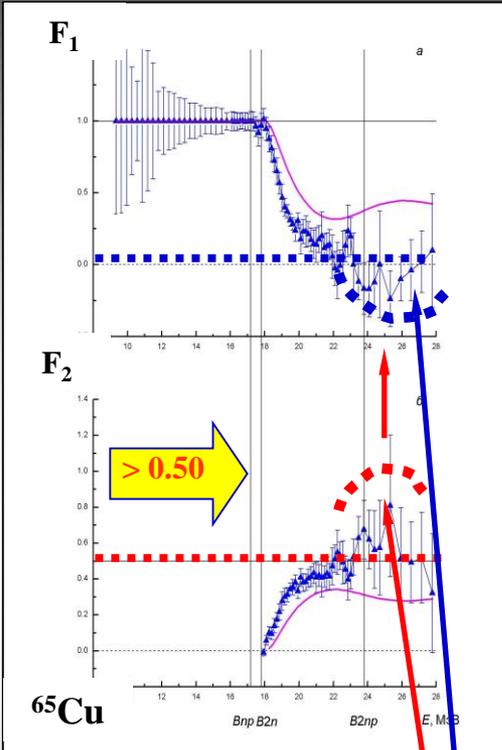


Объективные физические критерии достоверности данных о сечениях парциальных фотонейтронных реакций означают, что по их определению соответствующие отношения сечений реакций:

- 1. должны иметь положительные значения;**
- 2. ни при каких условиях не могут превышать указанных верхних пределов: $F_1 < 1.00$, $F_2 < 0.50$, $F_3 < 0.33$, $F_4 < 0.25$, $F_5 < 0.20$, $F_6 < 0.17$...**

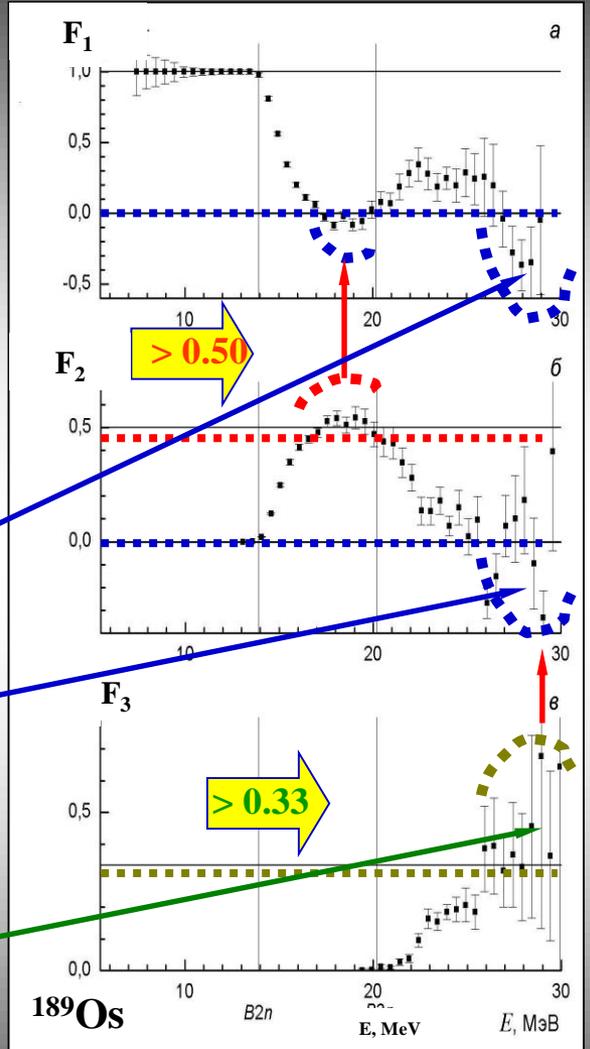
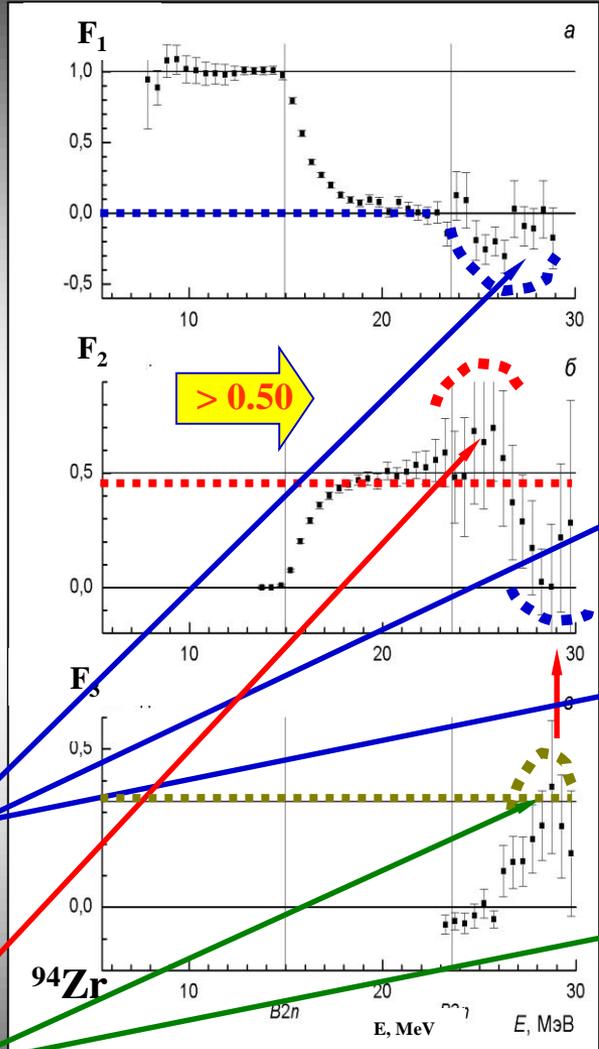
Большие положительные значения (как и отрицательные) означают, что в эксперименте разделение нейтронов по множественности было выполнено с большими систематическими погрешностями и, следовательно,

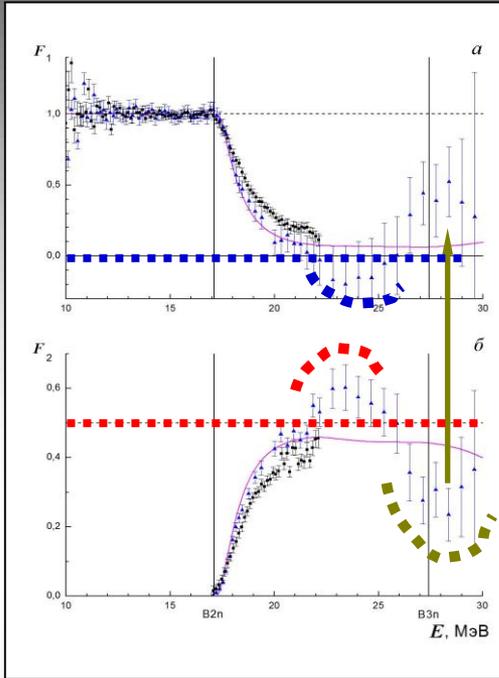
полученные данные не являются достоверными.



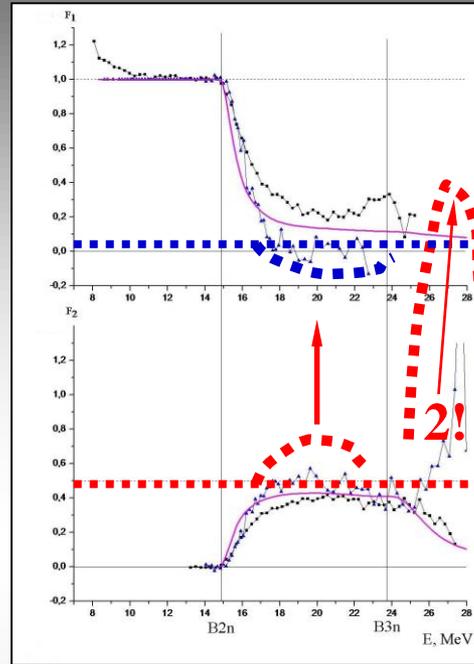
Физически запрещенные отрицательные значения

Физически недостоверные значения
 $(F_2 > 0.50)$
 $(F_3 > 0.33)$

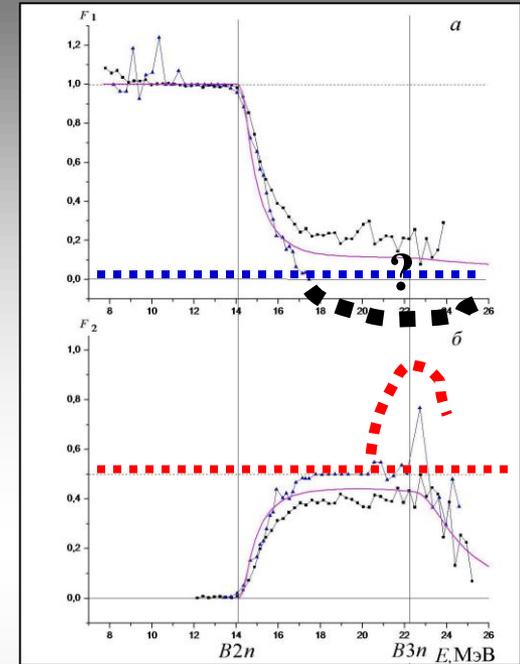




^{116}Sn



^{159}Tb



^{181}Ta

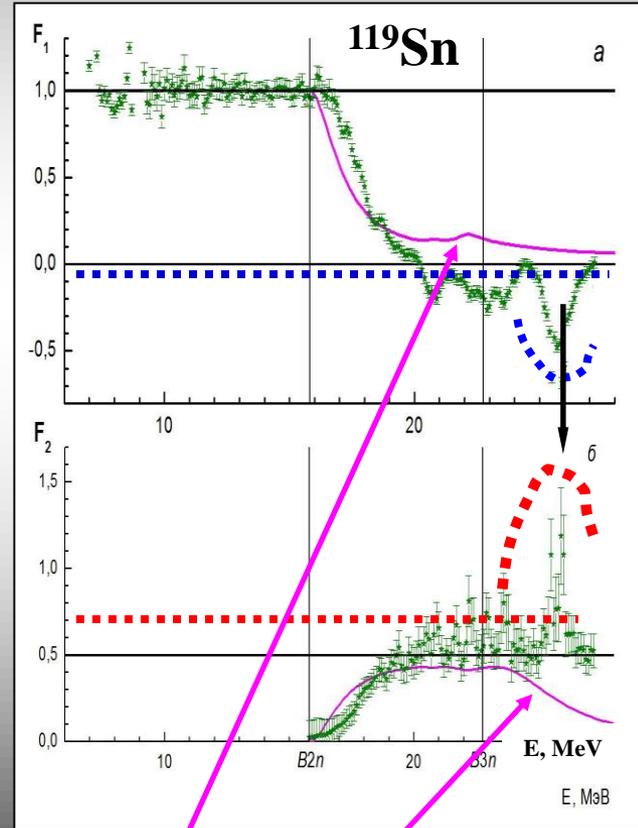
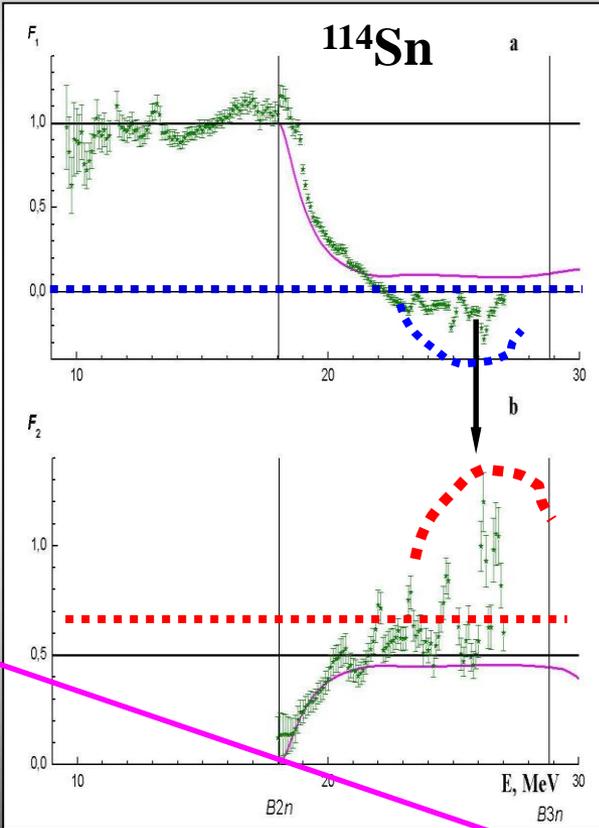
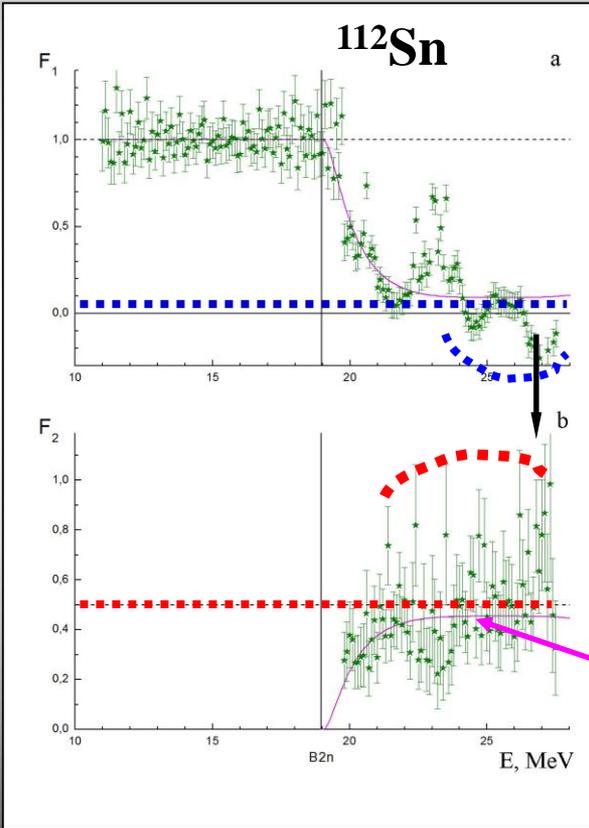
Сравнение отношений $F_i^{\text{эксп}}$, полученных для результатов экспериментов (треугольники (Ливермор) и квадраты (Сакле) с отношениями $F_i^{\text{теор}}$, рассчитанными в комбинированной модели (линии).

Достоверность многих данных сомнительна.

Многие данные должны быть проанализированы и оценены заново!



Недостовверное распределение нейтронов между каналами с множественностями «1» - «2» и «1» - «3» в экспериментах, выполненных на пучках тормозного γ -излучения с использованием коррекций по статистической теории ядерных реакций (Yu.I.Sorokin, B.A.Yur'ev. Sov. J. Nucl. Phys. 20, 123 (1975). Bull.Acad.Sci.USSR, Phys.Ser. 39, 98 (1975)).



Линии - модель



Новый экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций:

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

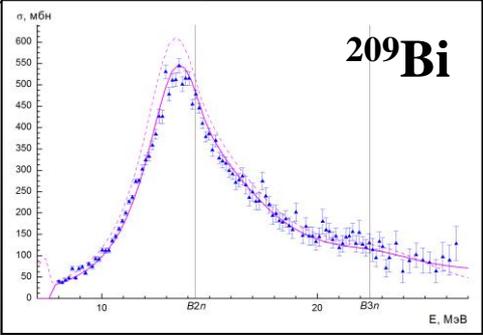
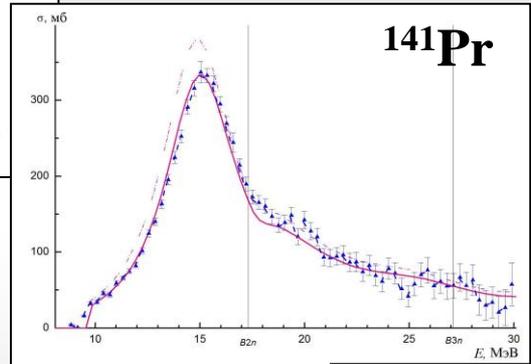
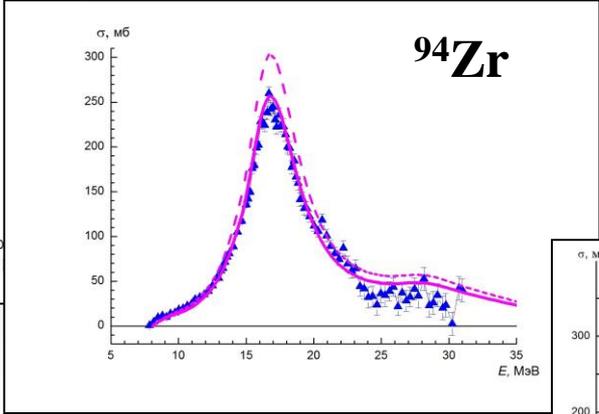
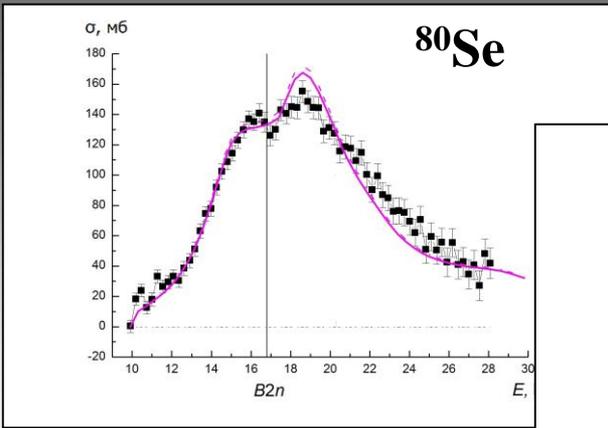
$$\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n) = F_2^{\text{теор}} \bullet \sigma^{\text{эксп}}(\gamma, xn),$$

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

.....

- 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 $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 1n)$, $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 2n)$, $\sigma^{\text{оцен}}(\gamma, 3n)$, - описания конкуренции каналов распада ГДР – используются переходные функции множественности $F_{1,2,3}, \dots$, рассчитанные в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций.

Экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных реакций: соотношение между ними соответствует представлениям модели, а соответствующая сумма сечений парциальных реакций равна сечению выхода нейтронов, не зависящему от экспериментального разделения нейтронов по множественности.

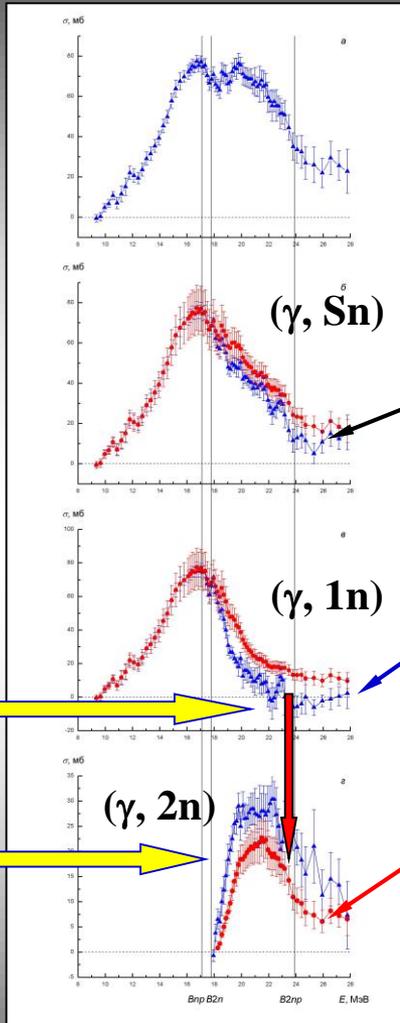


**Комбинированная модель фотоядерных реакций,
на которой основывается экспериментально-
теоретический метод оценки сечений парциальных
реакций,
хорошо описывает экспериментальные сечения
реакции выхода нейтронов**

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



^{65}Cu
(Ливермор)

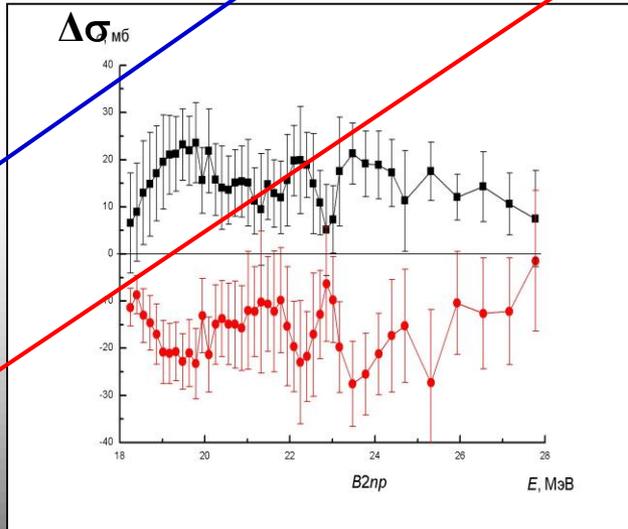
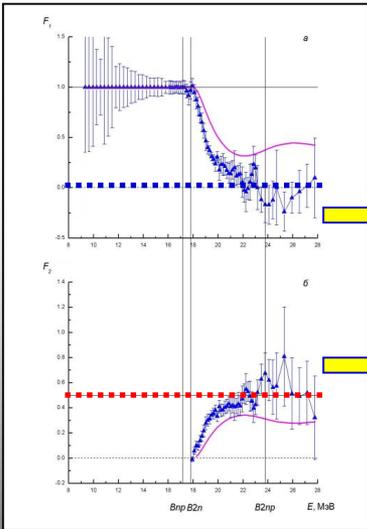


Реакция	$E^{\text{int}} = 17.8 \text{ МэВ}$		$E^{\text{int}} = 28.0 \text{ МэВ}$	
	Эксперимент	Оценка	Эксперимент	Оценка
(γ, Sn)	334.7(2.8)	344.7(11.1)	624.8(11.6)	702.9(14.3)
$(\gamma, 1n)$	334.7(5.0)	370.3(11.1)	432.5(13.0)	581.0(13.4)
$(\gamma, 2n)$			200.0(9.5)	121.9(4.9)

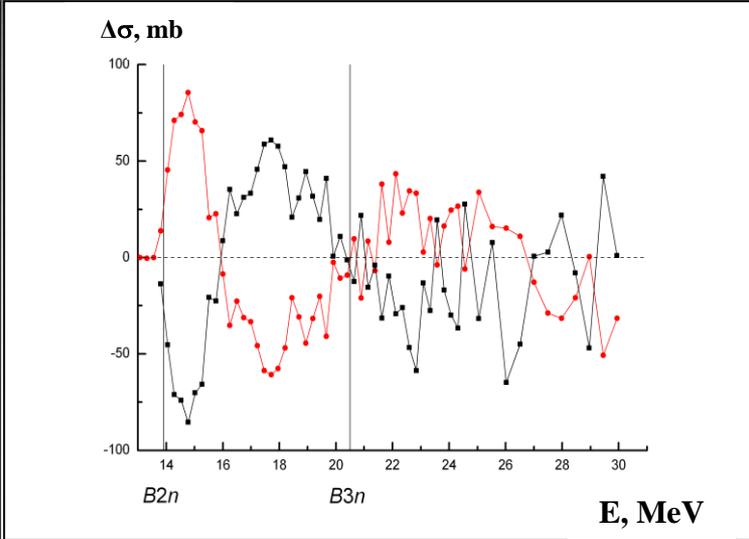
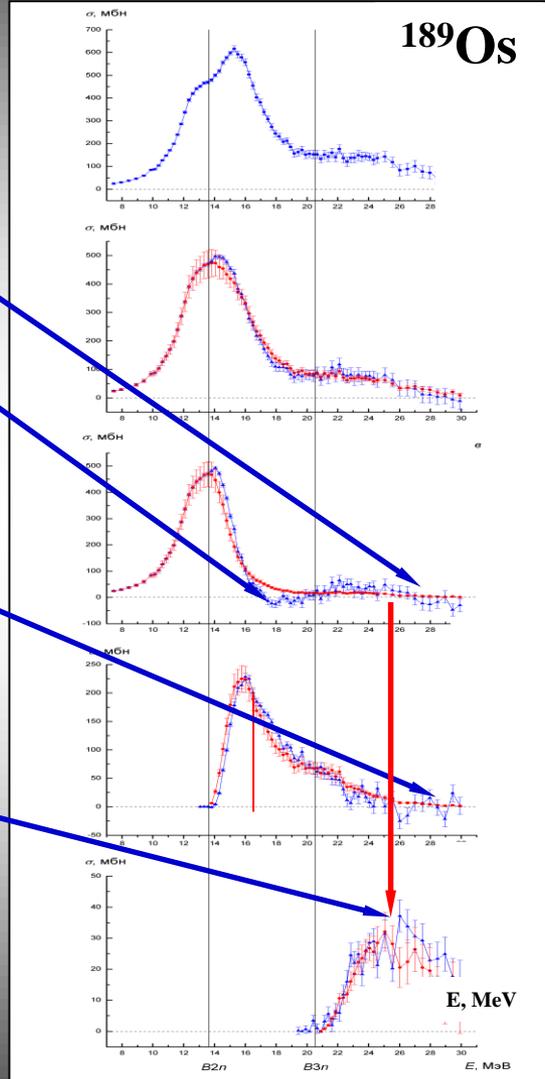
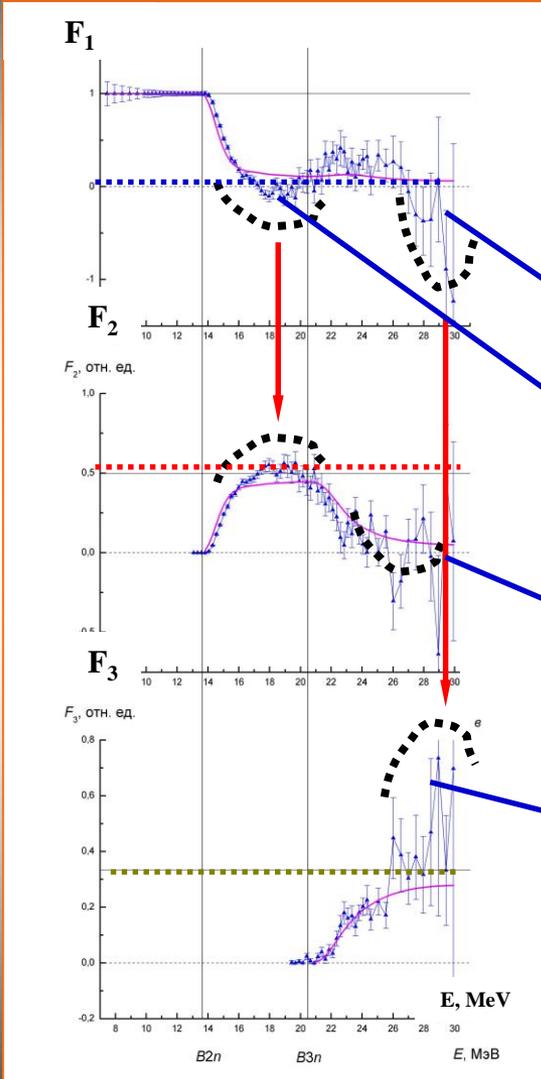
+23%

+35%

-65%



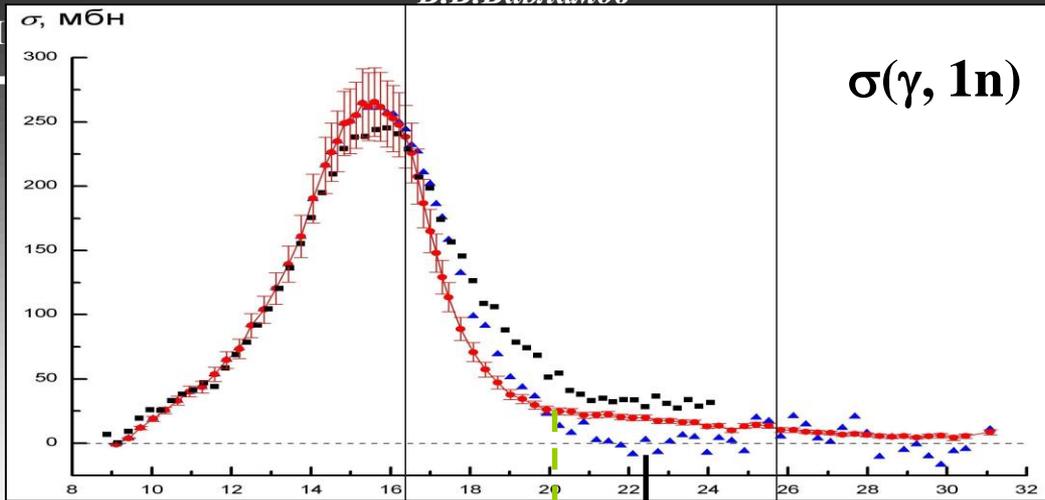
Извлечение
большого
количества
нейтронов из
канала
"1n"
соответствует
добавлению
нейтронов в канал
"2n"



Аналогичные необоснованные перемещения нейтронов между каналами с различными множественностями.

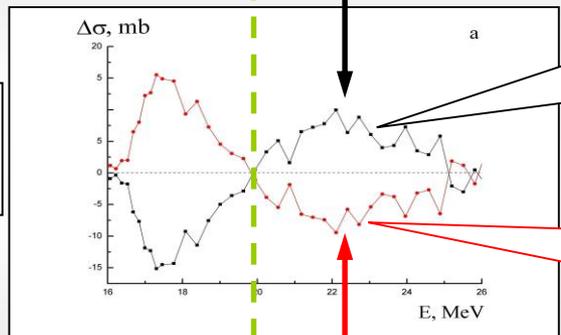


^{115}In

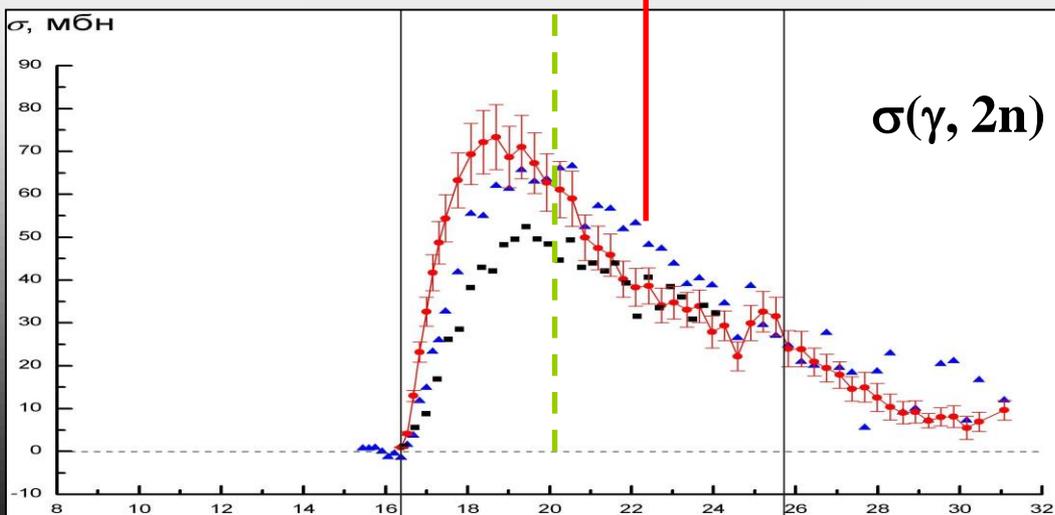


Нейтроны,
физически
недостаточно
(отрицательные
значения)
изъяты из
 $\sigma(\gamma, 1n)$.

Квадраты - [$\sigma_{\text{оцен}}(\gamma, 1n) - \sigma_{\text{экс}}(\gamma, 1n)$]
Кружки - [$\sigma_{\text{оцен}}(\gamma, 2n) - \sigma_{\text{экс}}(\gamma, 2n)$]



Нейтроны,
физически
недостаточно
($F2 > 0.5$)
внесенные в
 $\sigma(\gamma, 2n)$.





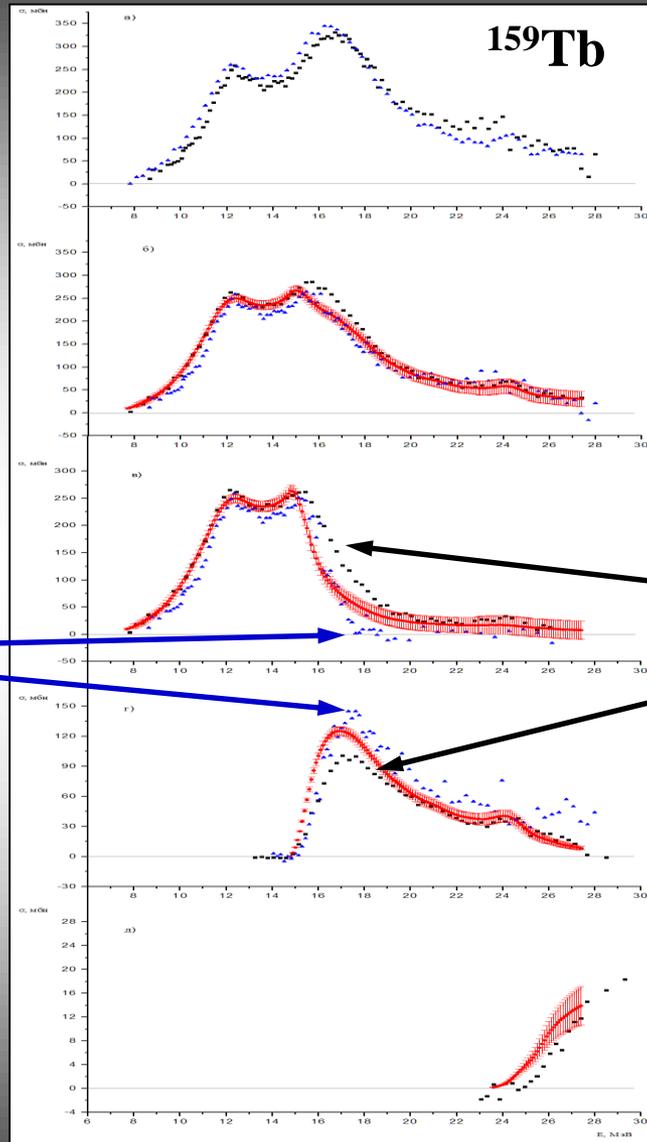
$\sigma(\gamma, xn)$

$\sigma(\gamma, sn)$

$\sigma(\gamma, 1n)$

$\sigma(\gamma, 2n)$

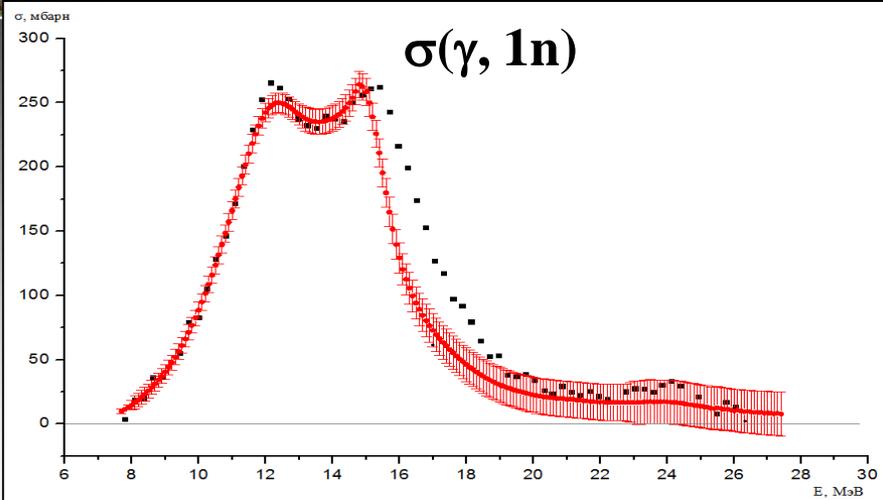
$\sigma(\gamma, 3n)$



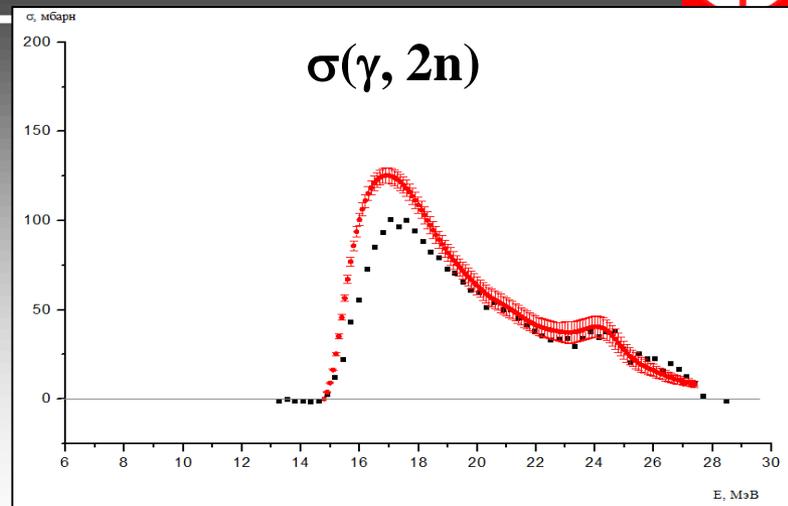
63,65Cu, 76,78,80,82Se, 90,91,92,94Zr, 98Mo,
 115In, 116,117,118,119,120,122,124Sn, 139La,
 141Pr, 159Tb, 186,188,189,190,192Os, 181Ta,
 186W, 197Au, 208Pb, 209Bi

Данные Ливермора

Данные Сакле



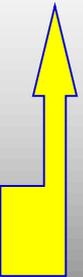
^{159}Tb



Реакция	Центр тяжести Ец.т., МэВ	Интегральное сечение $\sigma^{\text{инт}}$, МэВ•мбн	Интегральное сечение $\sigma^{\text{инт}}$, МэВ•мбн	Центр тяжести Ец.т., МэВ
	Оцененные данные		Данные Сакле	
(γ, xn)	16.84	3200	3200	16.84
(γ, sn)	15.78	2383	2557	
$(\gamma, 1n)$	14.04	1642 <	1950	14.6
$(\gamma, 2n)$	19.04	714 >	610	19.9
$(\gamma, 3n)$	26.29	26	16	26.8

$\sigma^{\text{инт}}(\gamma, 2n)/\sigma^{\text{инт}}(\gamma, 1n)$
уменьшилось на 30 %.

Уменьшение на 20 %!
Рост на 17 %!



 ^{181}Ta

Распады конечных ядер реакций $^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)$ and $^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)$ значительно различаются:

$$^{181}\text{Ta}(\gamma, 1n)^{180}\text{Ta}, T_{1/2} = 8.154 \text{ час}, E = 93.326, 103.557 \text{ кэВ}$$

$$^{181}\text{Ta}(\gamma, 2n)^{179}\text{Ta}, T_{1/2} = 1.82 \text{ год}, E = 63.0, 65.0 \text{ кэВ}$$

$$(62.985 - 63.243 - 63.662; 64.942 - 65.132)$$

Сравнение отношений выходов Y и интегральных сечений σ^{int} реакций, полученных по экспериментальным и оцененным данным для ^{181}Ta и $E^{\text{int}} = 65 \text{ МэВ}$.

Отношения	Эксперименты			Оценка
	Сакле	Ливермор	Активность	$F_{1,2,3}$
сечений $\sigma^{\text{int}}(\gamma, 2n)/\sigma^{\text{int}}(\gamma, 1n)$	0.36 (797/2190)	0.67 (887/1316)		0.49 (958/1956)
выходов $Y(\gamma, 2n)/Y(\gamma, 1n)$	0.24	0.42	0.34 ± 0.07	0.33
сечений $\sigma^{\text{int}}(\gamma, 3n)/\sigma^{\text{int}}(\gamma, 1n)$	0.062 (137/2190)			0.056 (107/1956)

Аналогичное согласие было получено для ^{209}Bi при $E^{\text{int}} = 55 \text{ МэВ}$ и для ^{197}Au при $E^{\text{int}} = 50, 60, 70 \text{ МэВ}$.

Это позволяет добавить к объективным физическим критериям достоверности данных отсутствие существенных расхождений экспериментальных и теоретических результатов.



Статус результатов фотоядерных экспериментов в области энергий ГДР (до ~ 40 MeV):

- большинство сечений парциальных $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$,... и полных (γ, xn) и (γ, Sn) реакций получено в Ливерморе (США) и Сакле (Франция) с помощью метода разделения фотонейтронов по множественности в 60 – 80 гг., новых данных очень немного;
- в среднем расхождения сечений реакции выхода (γ, xn) составляют ~ 10 %, тогда как расхождения сечений парциальных реакций достигают ~ 100 %;
- расхождения сечений парциальных реакций имеют очевидно систематический характер: как правило, сечения реакции $(\gamma, 1n)$ имеют большие величины в Сакле, тогда как реакции $(\gamma, 2n)$, напротив, в Ливерморе;
- данные в Сакле и Ливерморе расходятся с новыми данными, полученными с помощью альтернативного активационного метода, а также с немногими современными данными, полученными с помощью фотонов от обратного комптоновского рассеяния электронов на пучке мощного лазера.



Достоверность результатов фотоядерных экспериментов с точки зрения оценок сечений парциальных реакций на основе объективных физических критериев достоверности F_i^{exp}

Для многих ядер (^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$, $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{89}Y , $^{90,91,92,94}\text{Zr}$, ^{115}In , $^{112,114,116,117,118,119,120,122,124}\text{Sn}$, ^{159}Tb , $^{186,188,189,190,192}\text{Os}$, ^{181}Ta , ^{186}W , ^{197}Au , ^{208}Pb , ^{209}Bi , ...) установлено:

- экспериментальные данные Сакле и Ливермора по сечениям парциальных $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$, $(\gamma, 3n)$ реакций для многих ядер не удовлетворяют объективным физическим критериям достоверности данных, в отличие от данных, оцененных с использованием экспериментально-теоретического метода;
- во многих случаях новые оцененные сечения значительно расходятся с экспериментальными данными, причиной чего является проявление в экспериментах существенных систематических погрешностей метода определения множественности нейтронов по их измеряемой энергии.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Большое количество экспериментальных фотоядерных данных, содержащихся в соответствующих атласах и базах данных вызывают серьезные сомнения с точки зрения их достоверности.

Необходимо проведение современных экспериментов с помощью методов, альтернативных использованному ранее методу разделения фотонейтронов по множественности:

- метод наведенной активности, реализуемый на пучках тормозного излучения;**
- метод регистрации фотонейтронов в режиме совпадений;**
- метод, использующий современные детекторы, эффективность которых слабо зависит от энергии нейтронов, на пучках фотонов от обратного комптоновского рассеяния электронов на пучке лазера.**

До проведения экспериментов по получению достоверных данных можно рекомендовать использование данных оцененных с помощью описанного экспериментально-теоретического метода или других аналогичных методов.



Во многих случаях новые оцененные данные значительно отличаются от данных, оцененных ранее (1996 – 1999, IAEA-TECDOC-1178, 2000) в рамках специального Координационного исследовательского проекта МАГАТЭ.

Новый (2016 – 2019) Координационный исследовательский проект МАГАТЭ № F41032 (Австрия, Бельгия, Китай, Корея, Россия, Румыния, Словакия, США, Украина, Япония).

“Обновление библиотеки фотоядерных данных и создание реферированной базы данных по силовым функциям фотонов”:

Исследовательский контракт № 20501

“Оценка сечений парциальных и полных сечений фотонейтронных реакций с использованием новых объективных физических критериев достоверности данных”:

- оценки сечений парциальных реакций $(\gamma, 1n)$, $(\gamma, 2n)$ и $(\gamma, 3n)$, а также полной фотонейтронной реакции $(\gamma, Sn) = (\gamma, 1n) + (\gamma, 2n) + (\gamma, 3n)$ с использованием объективных физических критериев достоверности данных и экспериментально-теоретического метода для многих ядер (^{45}Sc , ^{75}As , $^{76,78,80,82}\text{Se}$, ^{103}Rh , ^{133}Cs , ^{139}La , $^{140,142}\text{Ce}$, ^{141}Pr , $^{145,148}\text{Nd}$, ^{153}Eu , ^{160}Gd , ...);
- сравнение оцененных данных с результатами новых экспериментов, выполненных разными методами на современных установках в НИИЯФ МГУ (Россия, разрезной микротрон) и в Конан университете (Japan – «NewSUBARU», фотоны обратного комптоновского рассеяния электронов на пучке лазера).



Спасибо за внимание!



Очень простой и прозрачный (**по определению**) смысл объективного абсолютного критерия надежности и достоверности данных.

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

- ни при каких условиях F_2 не может иметь значений, **больших 0.50**; превышение означает, что разделение нейтронов между сечениями реакций $\sigma(\gamma, 1n)$ и $\sigma(\gamma, 2n)$ выполнено **неправильно (недостоверно)**;
- F_2 отклоняется от $\text{const} = 0.50$ при малых энергиях в связи с наличием вклада сечения реакции $\sigma(\gamma, 1n)$;
- F_2 отклоняется от $\text{const} = 0.50$ при больших энергиях ($E > V3n$) в связи с появлением вклада $3\sigma(\gamma, 3n)$.



Теория

Боровское описание сечения $\sigma(\gamma, l p k n)$:

$$\sigma(\gamma, l p k n; E_\gamma) = \sum_i \sigma_{\text{ГДР}}^{(i)}(E_\gamma) W_{\text{ГДР}}^{(i)}(l, k, E_\gamma) + \sigma_{\text{КД}}(E_\gamma) W_{\text{КД}}(l, k, E_\gamma),$$

σ^i – одна из 4-х компонент (2 изоспиновые - T_0 and $T_0 + 1$ и 2 направления колебаний),

$\sigma_{\text{ГДР}}$ - Лоренцовские линии с

$$\Gamma_{\text{рез}}^\downarrow \approx GI(a_0/R_0)[E_{\text{рез}} - \Delta(Z, N)\delta_{TT>}]^2,$$

где

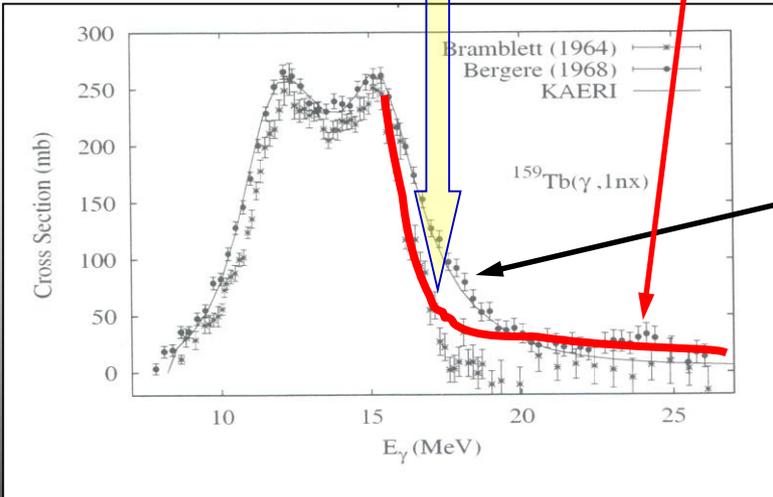
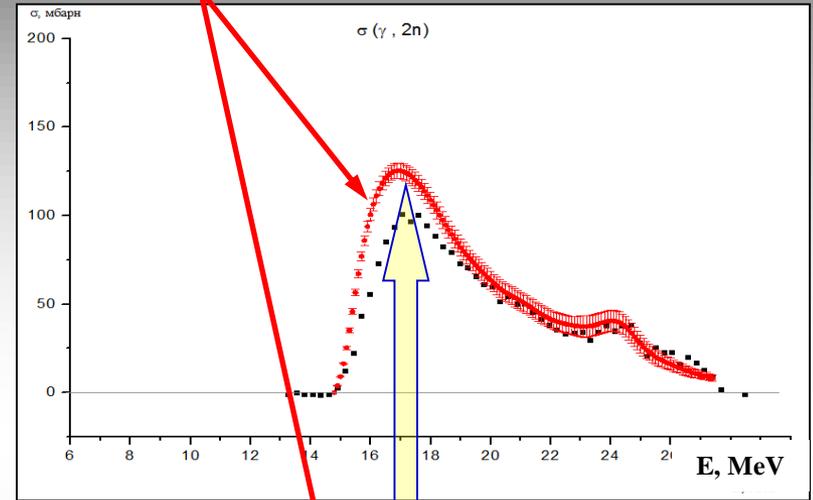
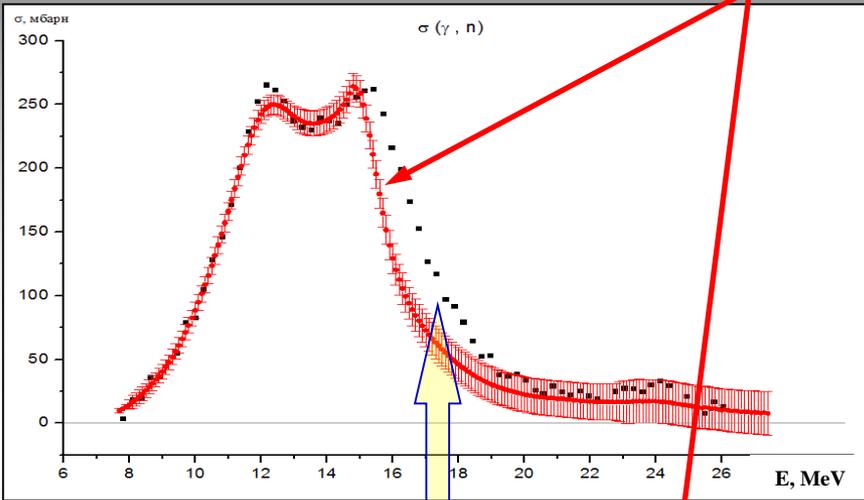
$$I(\xi) = [1 - 3\xi(1 + \pi^2\xi^2/3)/(1 + \pi^2\xi^2)] / (1 + \pi^2\xi^2)$$

W – вероятности распада (рекуррентные формулы):

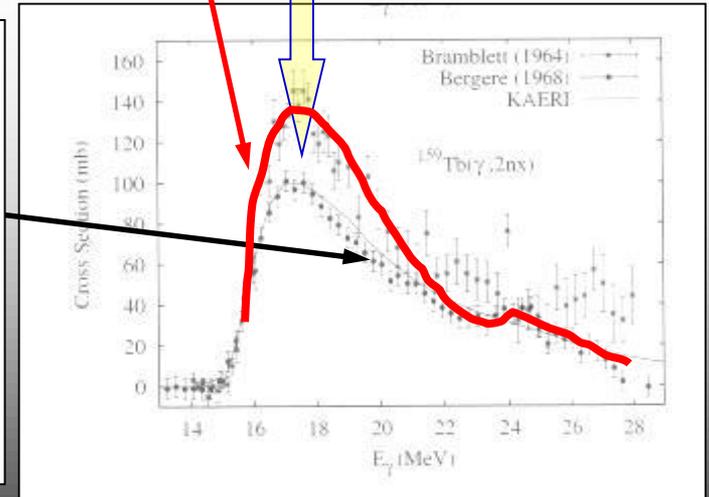
$$W(l, k, E; dp, dn, m) = \hbar \sum_{j=n,p} \sum_{\substack{m'=m \\ \Delta m'=2}}^{\bar{m}-2} \frac{D(m', E; dp, dn, m)}{\Gamma^\uparrow(E; dp, dn, m') + \Gamma^\downarrow(E; dp, dn, m')} \times \\ \times \int_0^{E-B_j} \lambda_j(\varepsilon_j, E; dp, dn, m') W(l_j, k_j, U_j; dp_j, dn_j, m') d\varepsilon_j + \\ + D(\bar{m}, E; dp, dn, m) P(l, k, E; dp, dn),$$



Новые оценки на основе критериев достоверности F
существенно отличаются от прежних оценок МАГАТЭ (1996 – 1999, IAEA-TECDOC-1178, 2000)



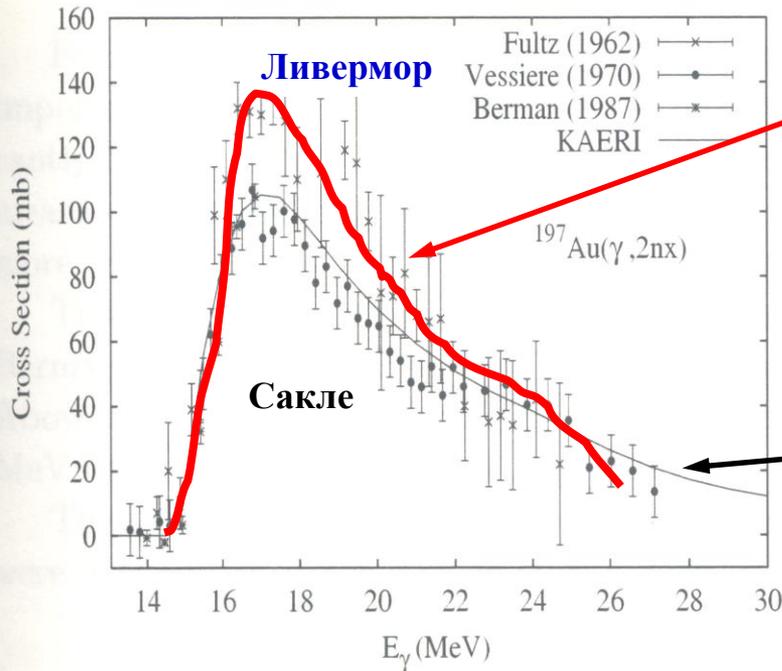
Оценки МАГАТЭ
использовали
коды GUNF и
GNASH (не
физические
критерии
достоверности) с
целью описания
 (γ, Sn) данных
Сакле.





$^{197}\text{Au} (\gamma, 2n)$

Данные Ливермора являются более достоверными.

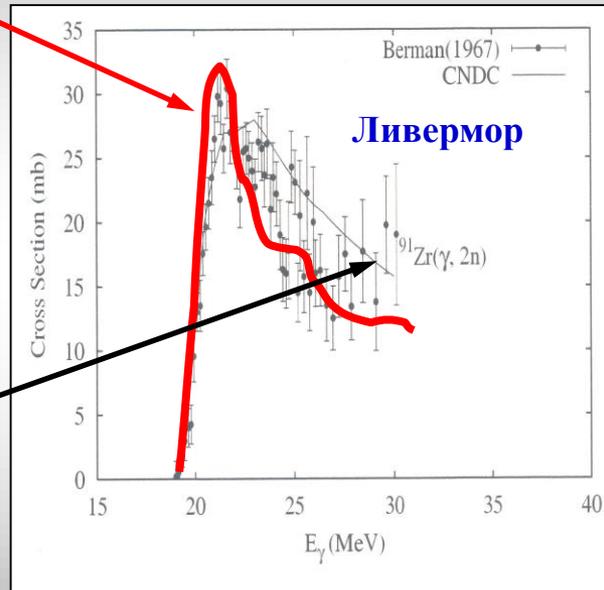


Новые оценки на основе критериев достоверности F:

Оценки МАГАТЭ использовали коды GUNF и GNASH (не физические критерии достоверности) с целью описания (γ, Sn) данных Сакле.

$^{91}\text{Zr} (\gamma, 2n)$

Данные Ливермора не являются достоверными.



Новые оценки на основе критериев достоверности F

существенно отличаются от прежних оценок МАГАТЭ (1996 – 1999, IAEA-TECDOC-1178, 2000)



Сравнение оцененных данных с результатами старых и современных экспериментов

фотоны обратного комптоновского рассеяния

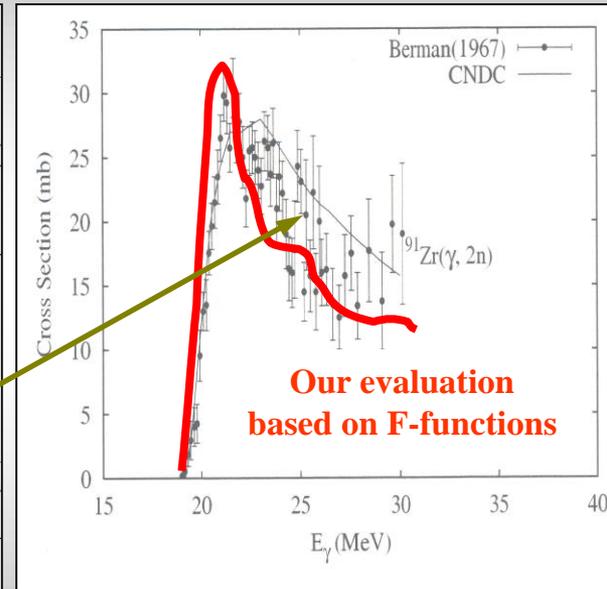
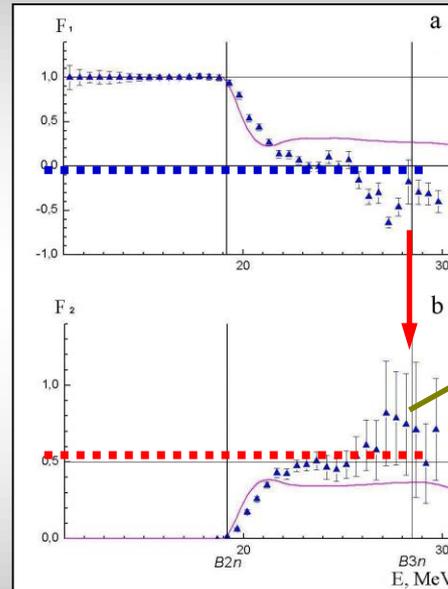
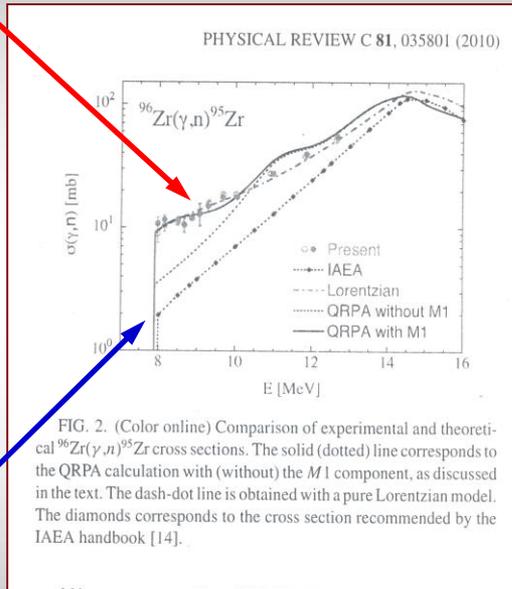
квазимоноэнергетические аннигиляционные фотоны

⁹⁶Zr

⁹¹Zr

ОКР
эксперимент

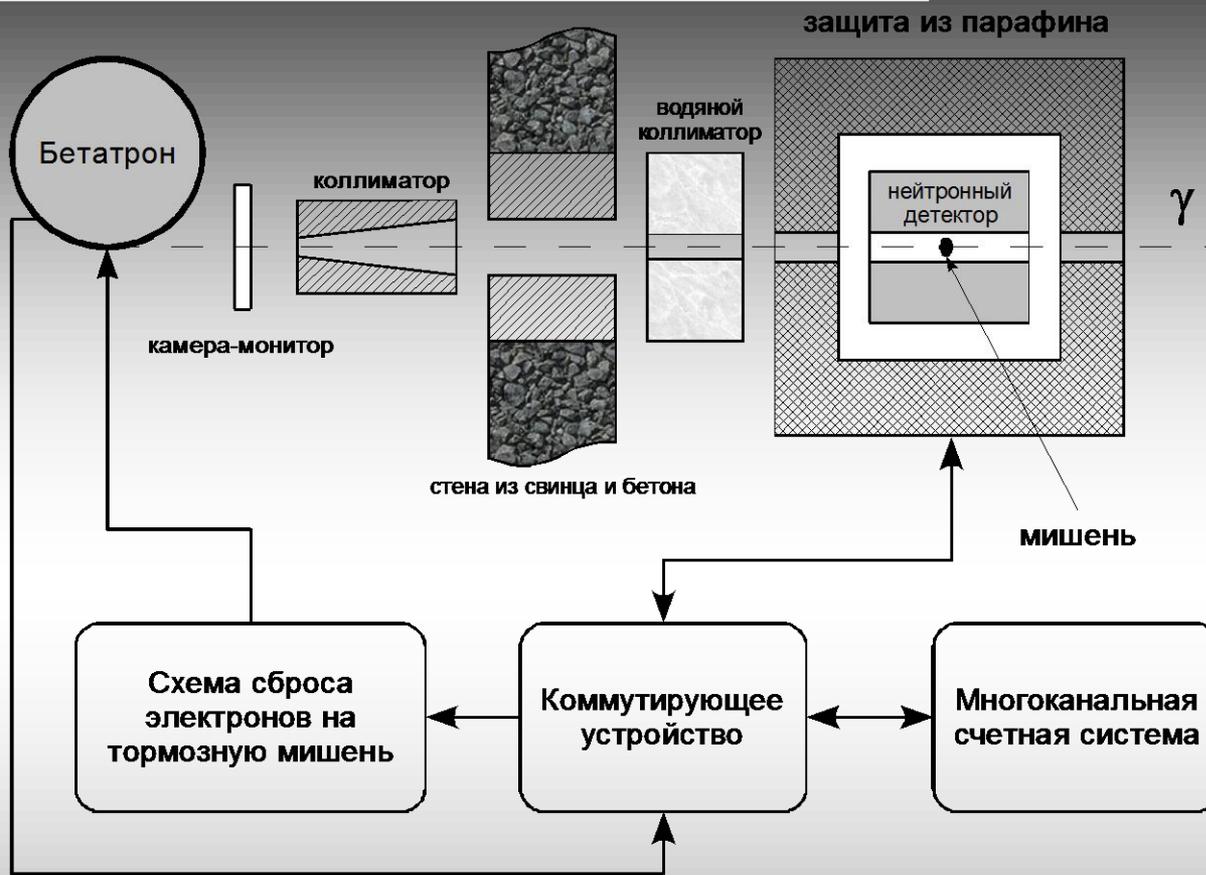
Оценки МАГАТЭ использовали коды GUNF и GNASH (не физические критерии достоверности) с целью описания (γ, n) данных Сакле.



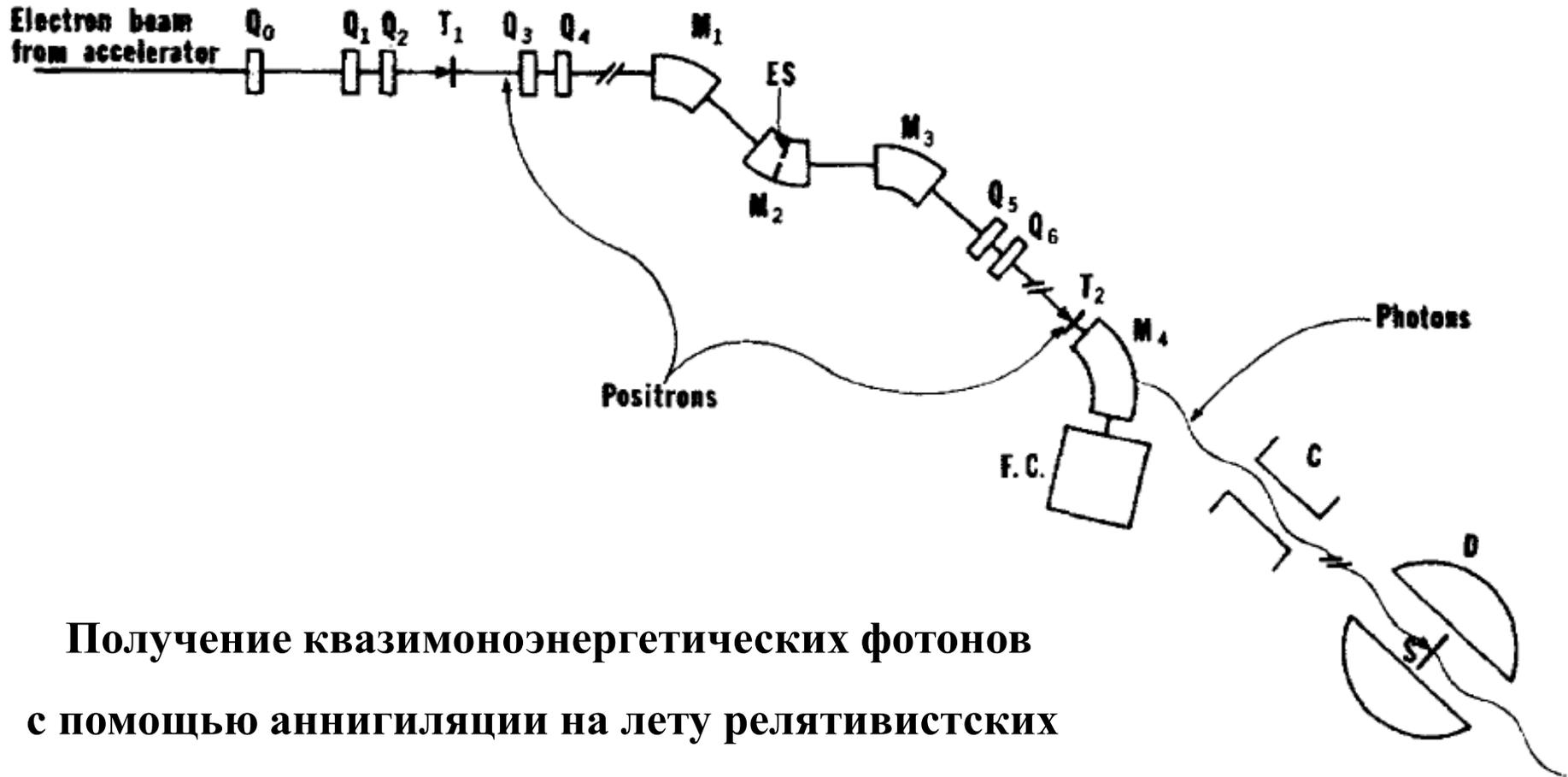
Нет старых экспериментальных данных для ⁹⁶Zr

Расхождения экспериментальных (Ливермор) сечений для ⁹¹Zr (треугольники) с данными модели (линия)

Существенные расхождения



Исследования на пучках тормозного γ -излучения



**Получение квазимоноэнергетических фотонов
с помощью аннигиляции на лету релятивистских
позитронов**

