

Фотоядерные эксперименты: от тормозного излучения до фотонов обратного комптоновского рассеяния

В.В.Варламов

**Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына,
Центр данных фотоядерных экспериментов**

**Б.С.Ишханов –
«главный фотоядерщик страны»
(Георгий Николаевич Флеров и др.):**

- ❑ новые детекторы фотонейтронов, фотопротонов, фрагментов фотоделения;
- ❑ новые методы экспериментальных исследований;
- ❑ новые методы обработки экспериментальных данных;
- ❑ большое количество данных, полученных впервые;
- ❑ новые особенности гигантского резонанса:
----- **гросс-, промежуточная и тонкая структура гигантского резонанса;**
----- новые параметры изоспинового расщепления гигантского резонанса;
----- параметры конфигурационное расщепление гигантского резонанса (открытие);
- ❑ электронные ускорители нового поколения;
- ❑ Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ.



1968

Среди всех этих результатов особое место занимает обнаружение в сечениях фотоядерных реакций структурных особенностей гигантских резонансов.

Факты обнаружения надежно проявляющихся структурных особенностей с различной шириной (гросс-структура с характерной шириной резонансов ~1.0 МэВ, промежуточная структура с шириной резонансов ~200-400 кэВ и тонкая структура с шириной ~ 50-100 кэВ) стимулировали прогресс в теоретическом описании процессов фоторасщепления ядер, развитие новых подходов к такому описанию, новых моделей фотоядерных реакций, стали основой для открытия явления конфигурационного расщепления гигантского дипольного резонанса (1987 г., открытие № 342, авторы – Б.С.Ишханов, И.М.Капитонов, В.Г.Неудачин, В.Г.Шевченко, П.Н.Юдин).

Структура гигантского дипольного резонанса

(НИИЯФ, ИЯИ РАН, СГУ, РГУ, УжГуМельбурн, ...)

На сплошных пучках тормозного γ -излучения измерение выхода Y реакции и решение обратной задачи относительно сечения σ

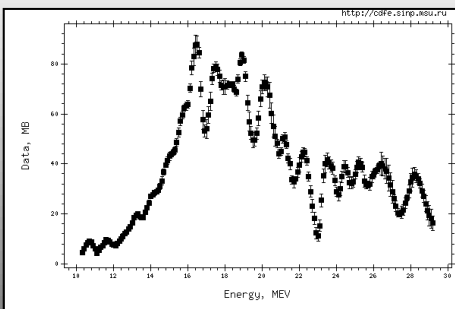
$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{E_{th}}^{E_{jm}} W(E_{jm}, k) \sigma(k) dk,$$

где $\sigma(k)$ - сечение при энергии фотонов k реакции с порогом E_{th} ; $W(E_{jm}, k)$ - спектр фотонов тормозного γ -излучения; $N(E_{jm})$ - число событий реакции, $D(E_{jm})$ - γ -доза, ε - эффективность детектора.

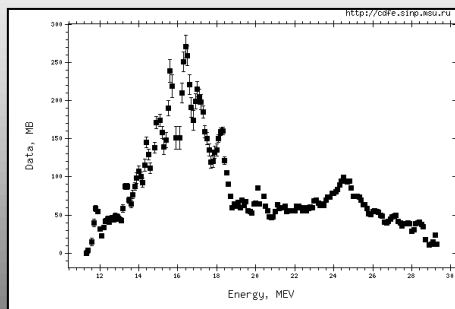
Для решения обратной задачи восстановления (развертки – **unfolding**) сечения реакции σ из ее выхода Y использовались специально разработанные методы:

- метод Пенфолда-Лейсса;
- метод наименьшей структуры Кука;
- метод регуляризации Тихонова;
- метод редукции;
- некоторые другие.

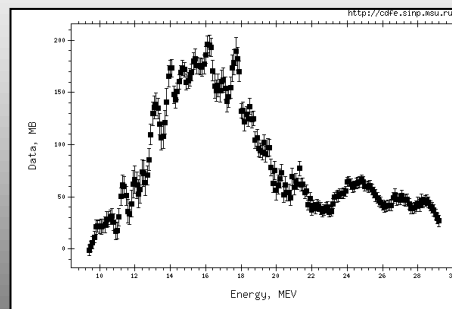
$^{59}\text{Co}(\gamma, xn)$



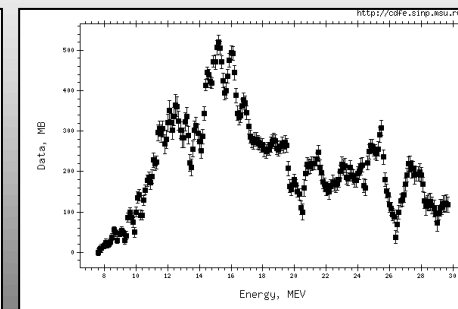
$^{89}\text{Y}(\gamma, xn)$



$^{107}\text{Ag}(\gamma, Sn)$

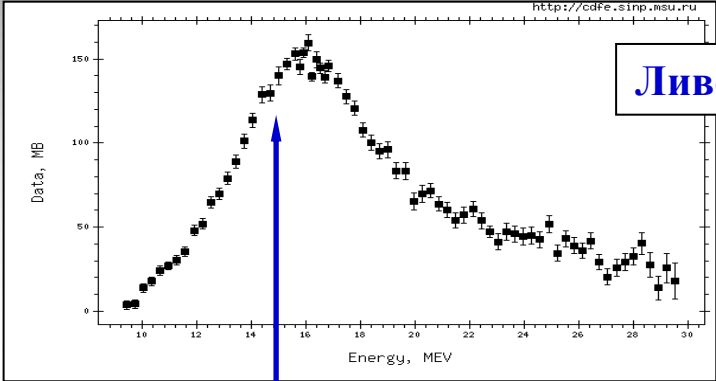


$^{181}\text{Ta}(\gamma, xn)$

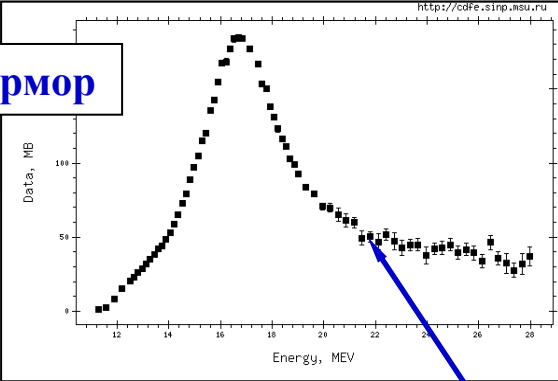


Серьезная проблема: существенные расхождения по форме с данными экспериментов на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов.

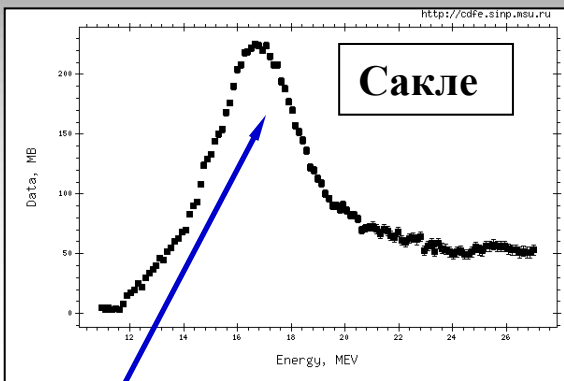
Аннигиляционные фотоны



Ливермор

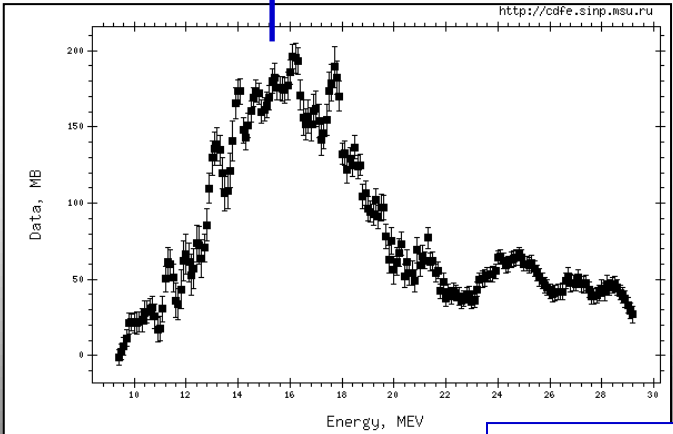


Сакле

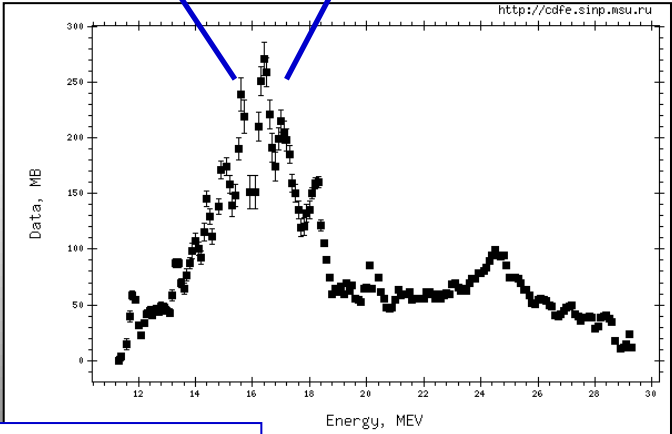


$^{107}\text{Ag}(\gamma, \text{Sn})$ - полная фотонейтронная реакция

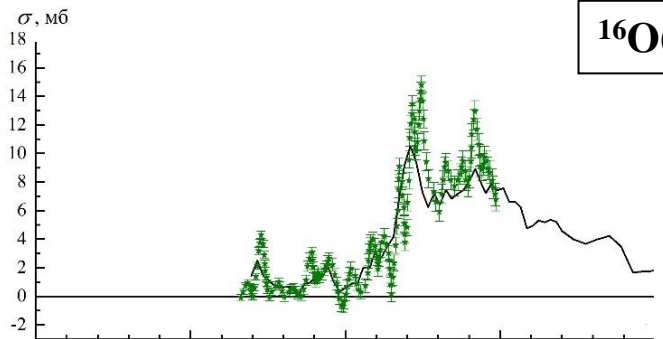
Реакция выхода нейтронов $^{89}\text{Y}(\gamma, xn)$



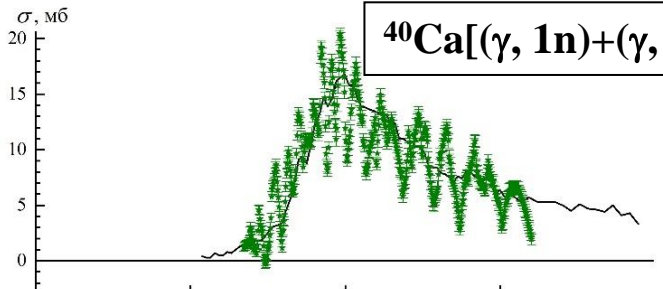
Тормозное γ -излучение, НИИЯФ МГУ



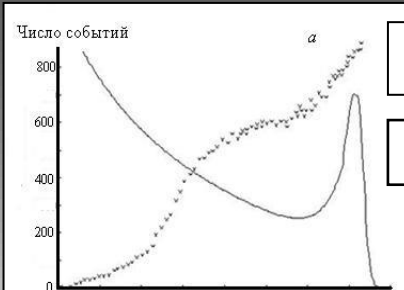
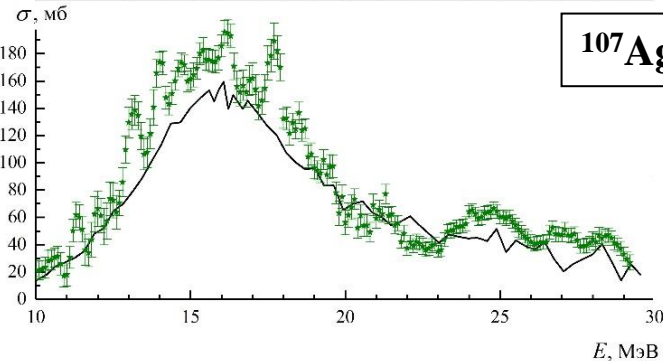
$^{16}\text{O}(\gamma, xn)$



$^{40}\text{Ca}[(\gamma, 1n)+(\gamma, 1n1p)]$

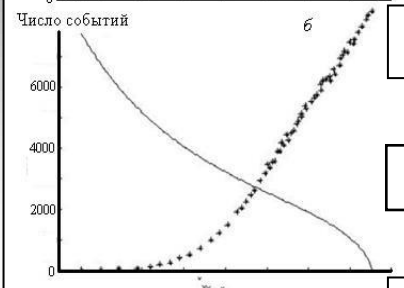


$^{107}\text{Ag}(\gamma, xn)$



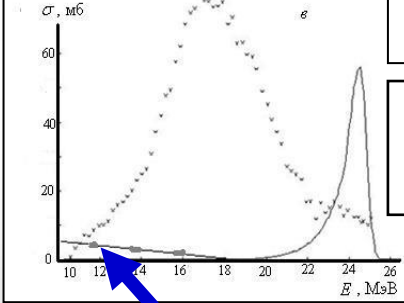
Y_{e^+}

Спектр фотонов от позитронов



Y_{e^-}

Спектр фотонов от электронов



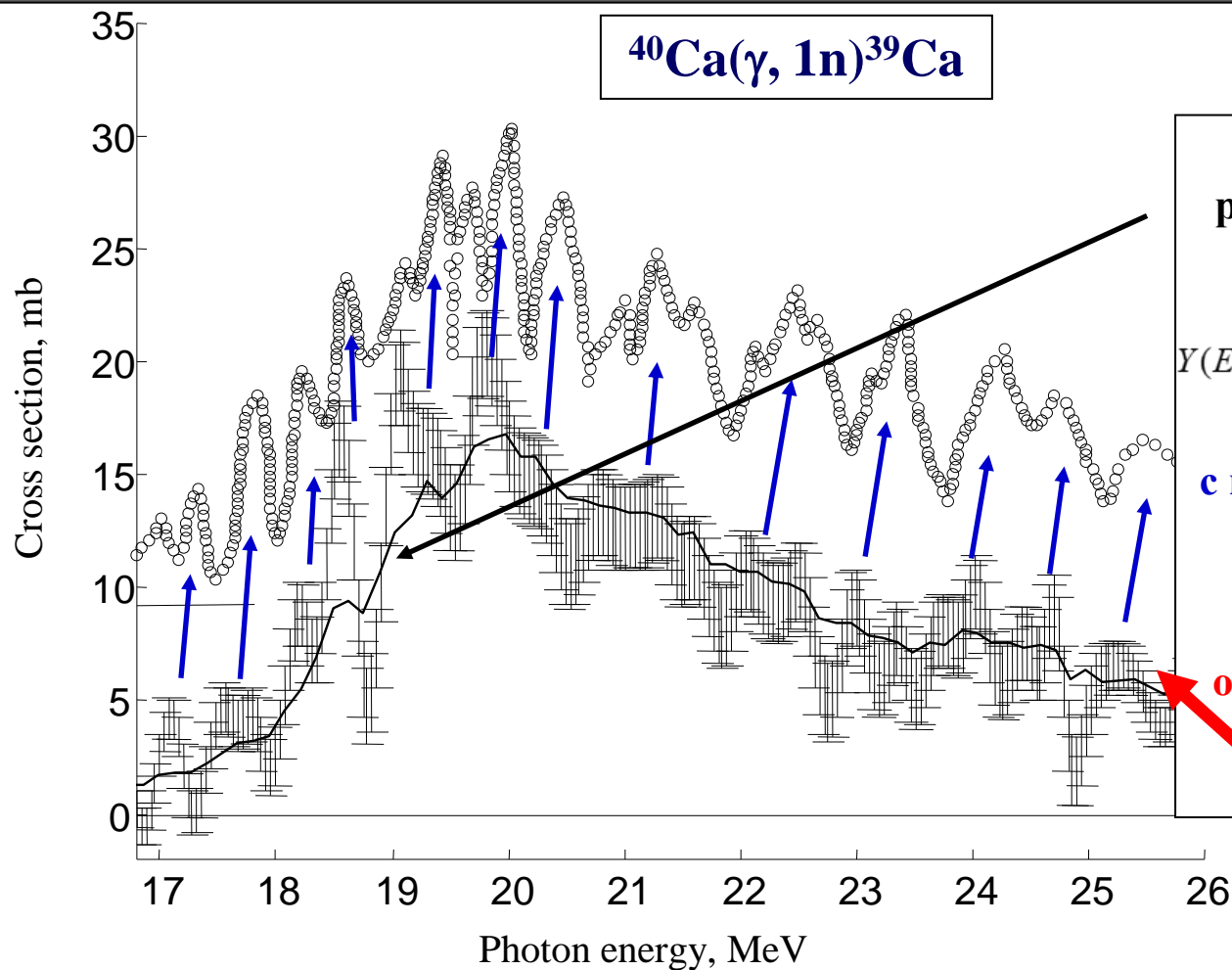
$Y_{e^+} - Y_{e^-}$

«Прямое» измерение сечения:

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

Предположение:
«хвост» тормозного излучения позитронов убирается не полностью: расхождения обусловлены проблемами с энергетическим разрешением.

$^{40}\text{Ca}(\gamma, 1n)^{39}\text{Ca}$



**Дополнительная обработка
результата аннигиляционного
эксперимента**

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

**с моделированием W как линии
с шириной 300 кэВ и
небольшим (10%) «хвостом»
выявляет структурные
особенности, весьма близкие к
особенностям результата
тормозного эксперимента.**

Предположение было воспринято как «игра ума».

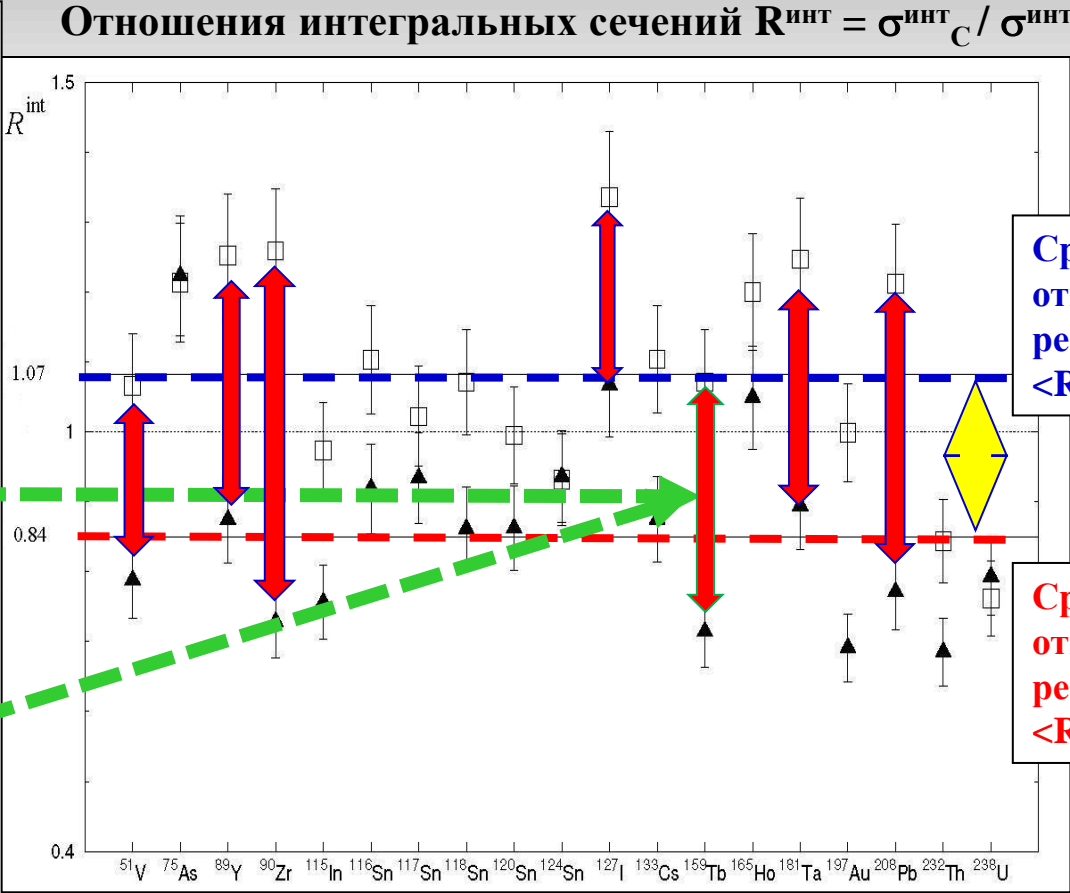
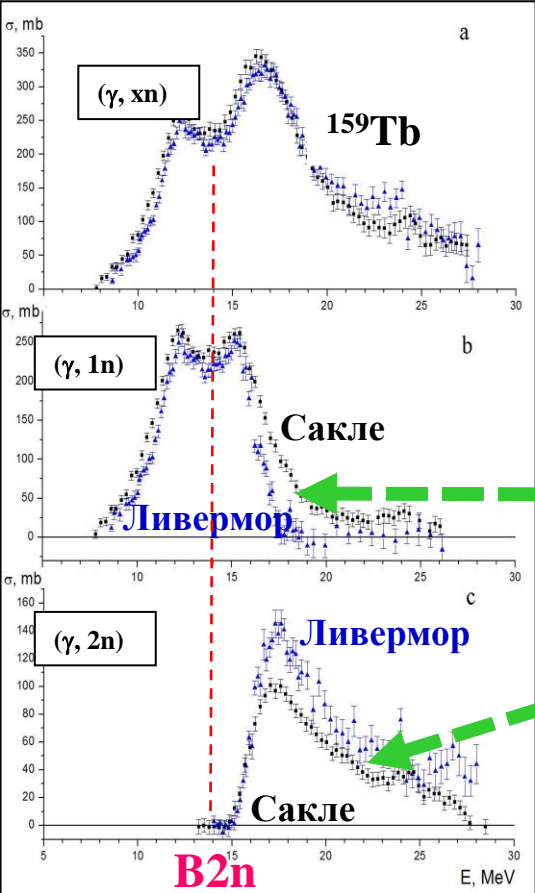
Распространенное в 60 - 80-е годы представление:

- в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов сечение реакции измеряется «прямо», влияние «хвоста» тормозного излучения исключается с помощью соответствующей разностной процедуры, сечение определяется с энергетическим разрешением, равным ширине аннигиляционной линии (~ 350 кэВ), **структура в сечениях отсутствует – истина в последней инстанции;**
- в экспериментах на пучках тормозного излучения сечение реакции получается в результате решения неустойчивой обратной задачи развертки его из выхода с помощью одного из математических методов, которые приводят к различающимся результатам, **наблюдаемая структура – ложная;**
- **структура, восстанавливаемая из аннигиляционных сечений в результате решения той же обратной задачи - тоже ложная.**

Предположение было надолго забыто!

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

Расхождения определенно являются систематическими.



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

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

2 жестких абсолютных критерия достоверности данных:**1) F_i – положительные (сечения имеют размерность площади) и:**

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

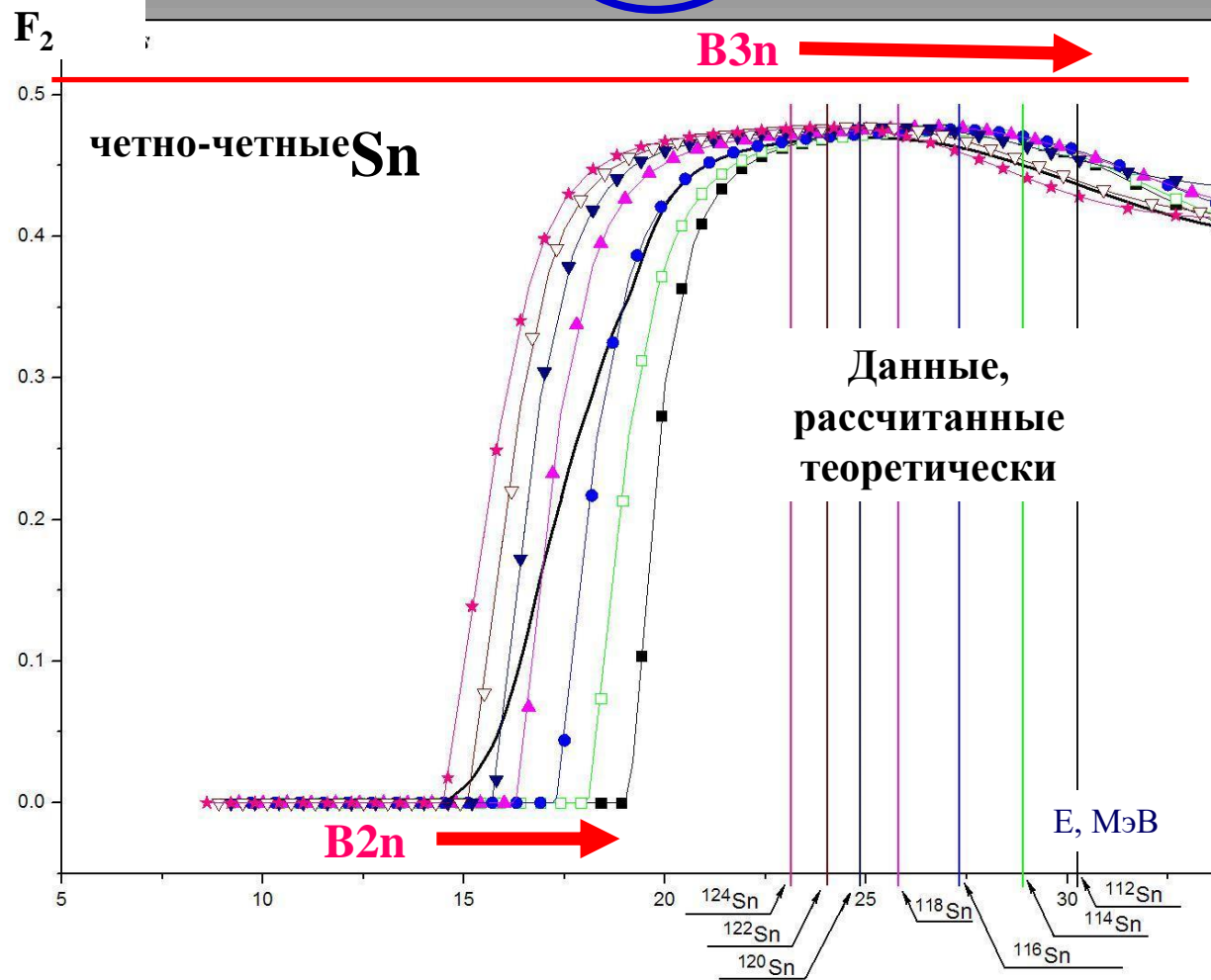
$F_2 = \frac{\sigma(\gamma, 2n)}{\sigma(\gamma, 1n) + 2\sigma(\gamma, 2n) + 3\sigma(\gamma, 3n) + \dots} < 0.50$

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

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

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

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



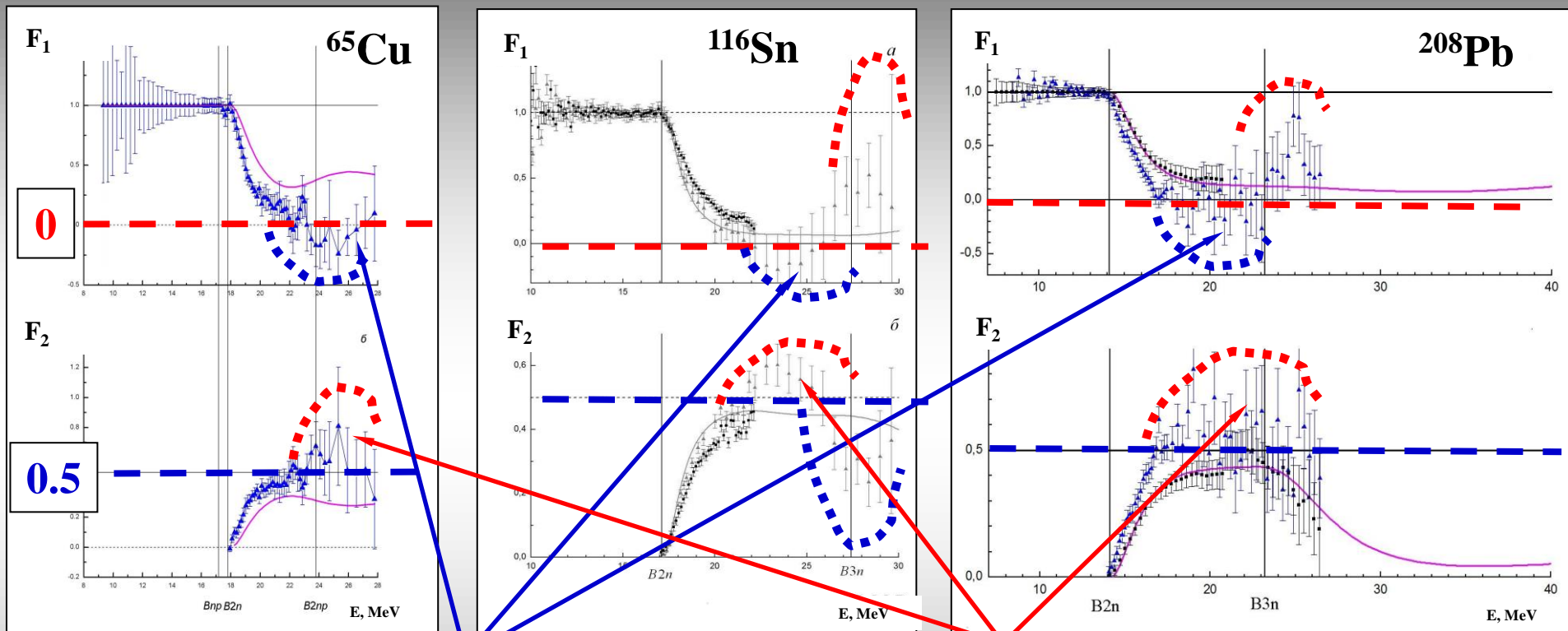
Физически достоверное поведение отношения F_2 :

- до порога B_{2n} реакции $(\gamma, 2n)$ возможна только реакция $(\gamma, 1n)$: $F_2 = 0$;
- выше B_{2n} 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 B_{3n} F_2 уменьшается с появлением вклада $3\sigma(\gamma, 3n)$.

Установлено:

в большинстве случаев экспериментальные данные этого типа объективным физическим критериям достоверности не удовлетворяют.

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.

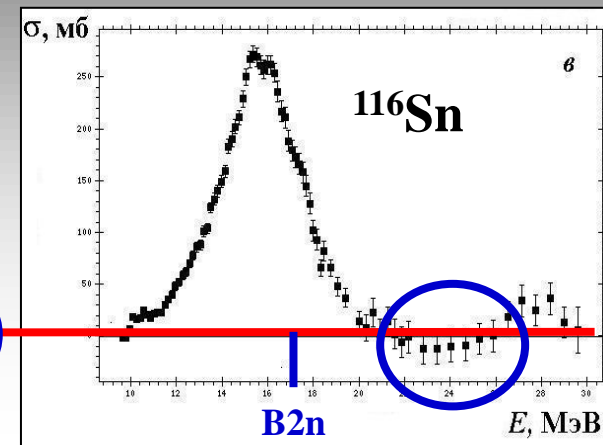
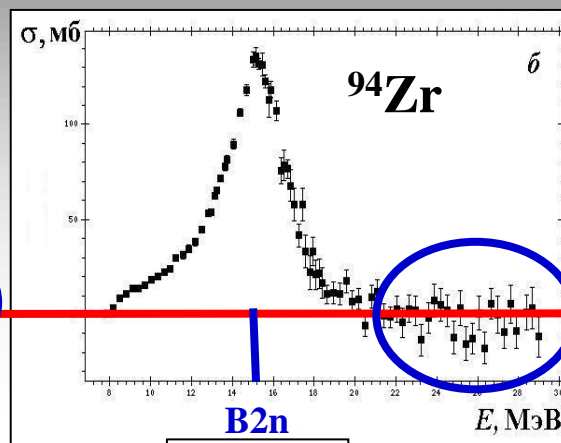
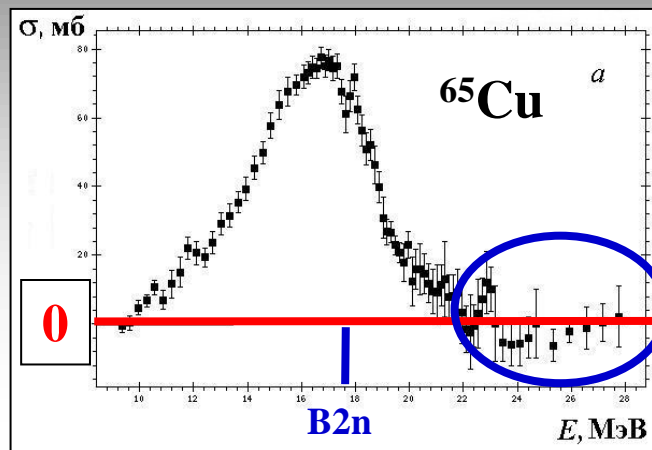
Для ~ 50 ядер

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

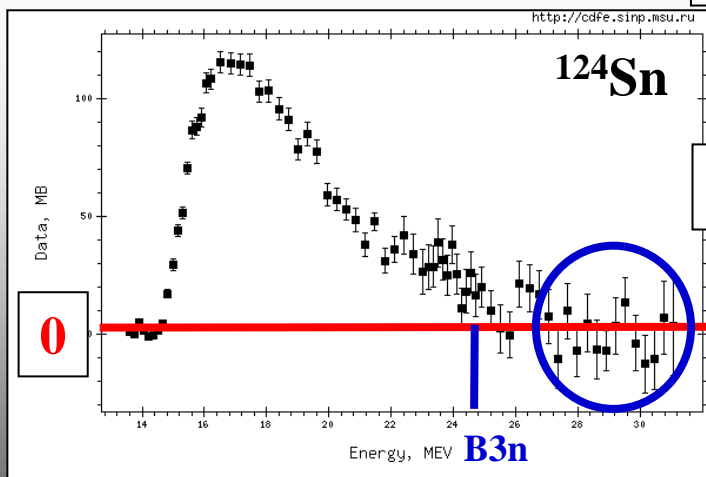
установлено присутствие в сечениях парциальных реакций существенных систематических погрешностей, обусловленных определенными недостатками использованного метода определения множественности нейтронов по их кинетическим энергиям, которые делают экспериментальные сечения парциальных реакций недостоверными.

Для проблем структуры сечений очень важное обстоятельство – присутствие в них большого количества физически запрещенных отрицательных значений.

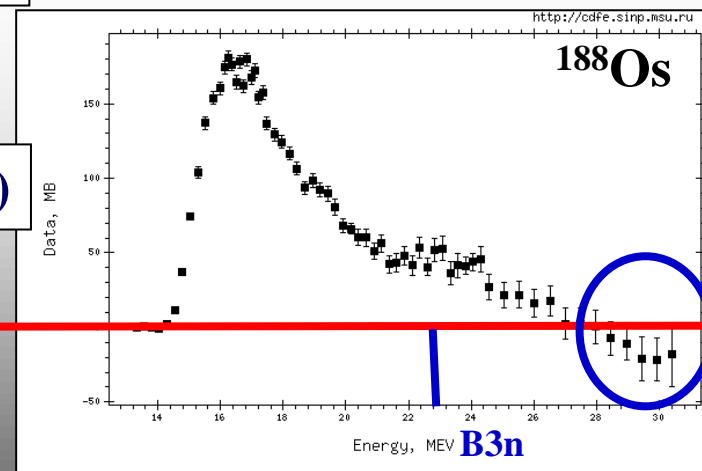
Для многих ядер (^{65}Cu , ^{80}Se , $^{91,94}\text{Zr}$, $^{116,119,124}\text{Sn}$, $^{188,189,190,192}\text{Os}$, ^{208}Pb и некоторые другие) в сечениях реакции $(\gamma, 1n)$ и/или $(\gamma, 2n)$ имеются физически запрещенные отрицательные значения (новый взгляд на данные в целом)!



$(\gamma, 1n)$



$(\gamma, 2n)$

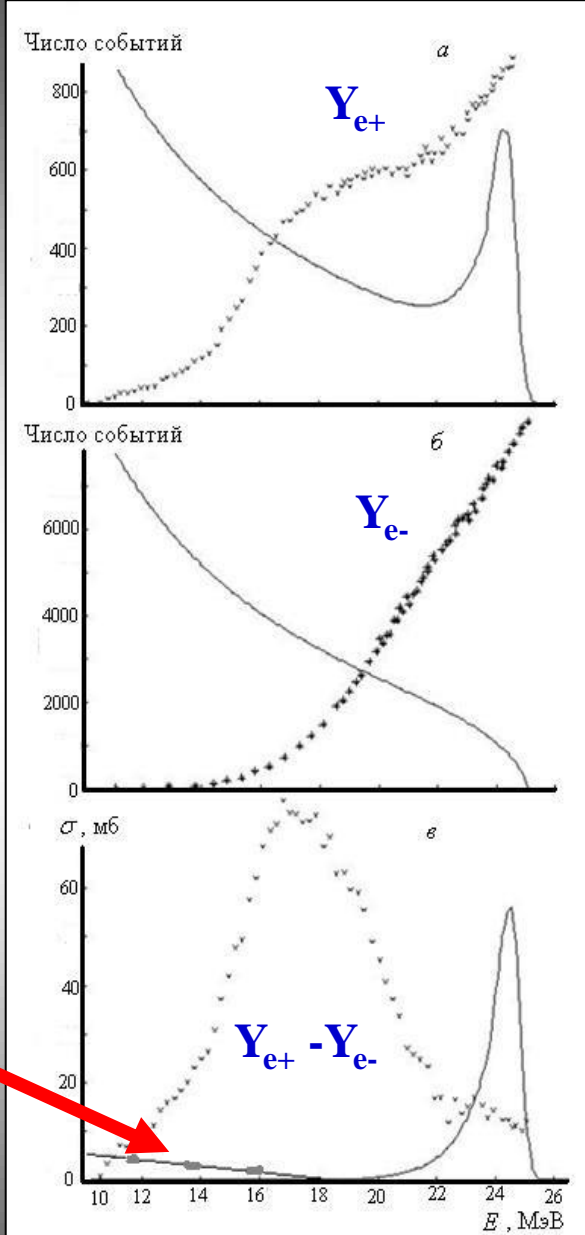


Отрицательные значения сечения (размерность – площадь) физически невозможны!

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

В разностном эксперименте $\sigma(E) \approx Y_{e+}(E) - Y_{e-}(E)$ число нейтронов на этапе « Y_{e-} » может превышать число нейтронов на этапе « Y_{e+} » только в случае ошибочной нормировки обоих результатов по количеству фотонов!

Ошибочная нормировка двух выходов по числу фотонов означает:
«хвост» вычитается не полностью!
«Аннигиляционные» сечения – не истина в последней инстанции!



Сечения реакций, полученные на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов, по существу, не являются сечениями, они – лишь выходы реакций: $Y_{e^+}(E) - Y_{e^-}(E) = Y(E) \neq \sigma(E)$.

Отсутствие структурных особенностей в результатах аннигиляционных экспериментов обусловлено плохим энергетическим разрешением

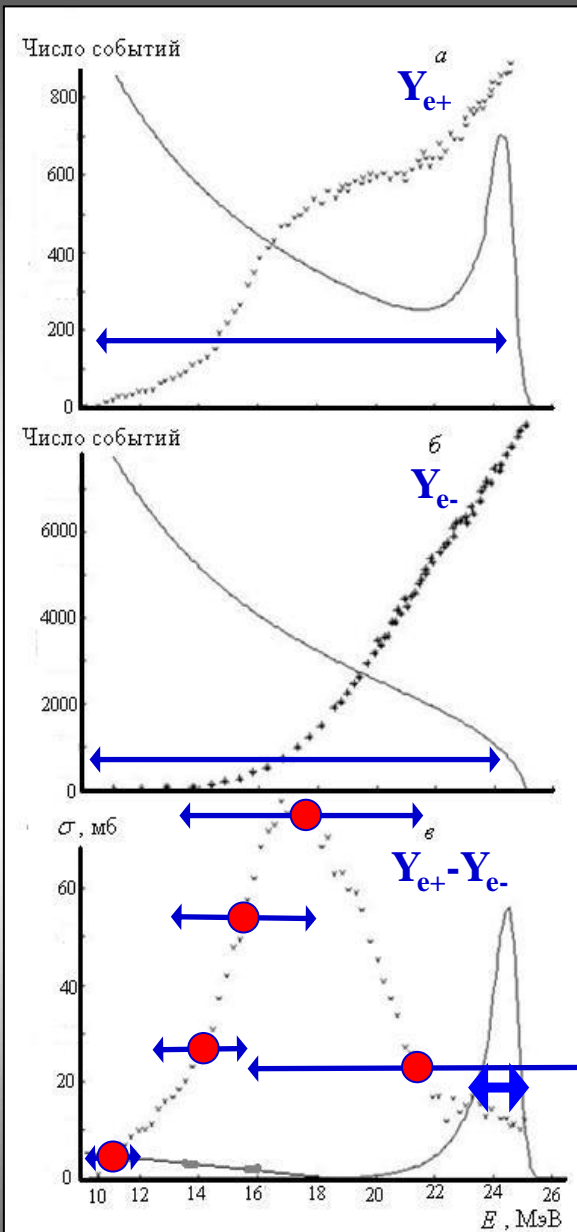
Декларируемое разрешение (ширина аннигиляционной линии) –
250 – 400 кэВ.

Реально достигаемое энергетическое разрешение –
1400 – 1600 кэВ.

Y_{e^+} , разрешение – плохое: фотоны с энергией от порога до энергии позитронов

Y_{e^-} , разрешение – очень плохое: фотоны с энергией от порога до максимальной энергии электронов

Разрешение разности не может быть меньше разрешения уменьшаемого и вычитаемого: иначе – информационный «вечный двигатель»!



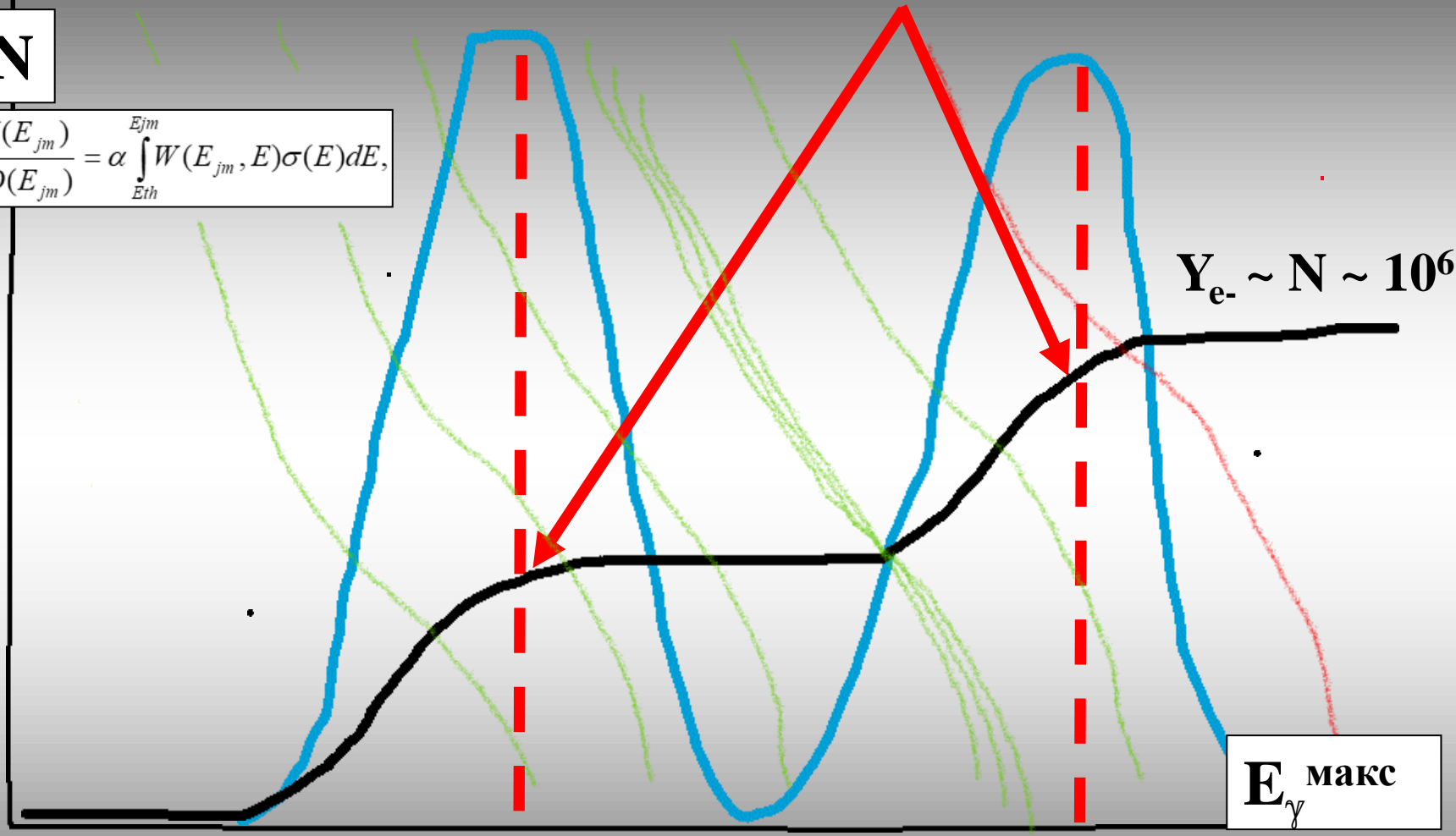
Результаты исследований с использованием объективных физических критериев достоверности данных:

- в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов фактически определяется не сечение реакции, а лишь выход $Y_{e^+}(E) - Y_{e^-}(E) = Y(E) \neq \sigma(E)$;
-
- разность двух выходов $Y(E)$ может быть интерпретирована как сечение лишь с очень плохим энергетическим разрешением;
- причины очень плохого разрешения:
 - плохие разрешения уменьшаемого $Y_{e^+}(E)$ и вычитаемого $Y_{e^-}(E)$;
 - большие погрешности нормировки $Y_{e^+}(E)$ и $Y_{e^-}(E)$ на число фотонов: «хвост» тормозного излучения позитронов не убирается полностью;
- реальное разрешение в несколько раз превосходит декларируемое по ширине аннигиляционной линии ~ 350 кэВ, структура в «сечении» сильно заглажена;
- **результаты – не истина в последней инстанции!**

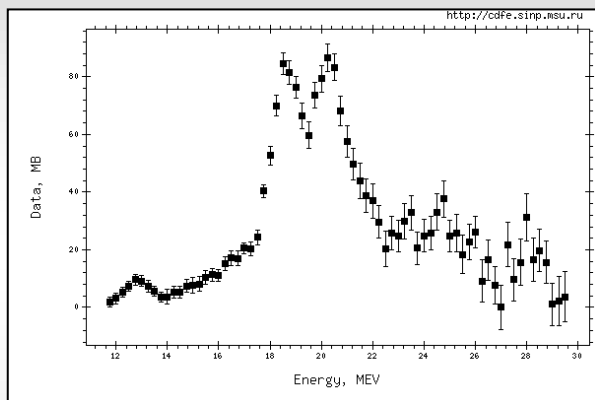
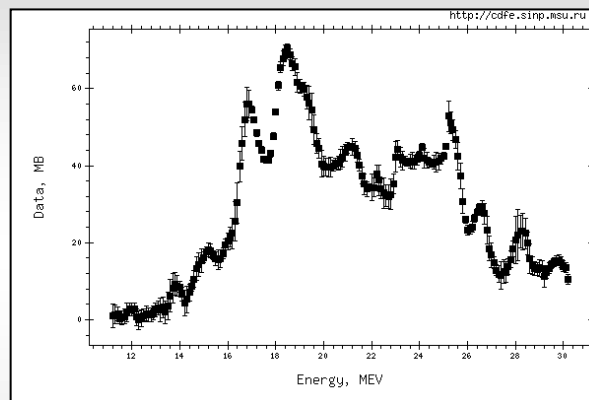
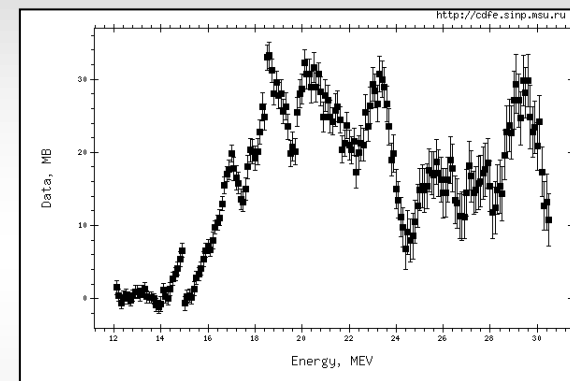
Характерные изломы в кривой выхода, отчетливо наблюдаемые при очень высокой статистике измерений числа нейтронов $N \sim 10^6$, **свидетельствуют, что резонансы есть.**

N

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



**Отчетливо проявляющаяся структура
наблюдается и в сечениях фотопротонных реакций,
полученных как в результате решения обратной задачи
развертки,**

 $^{40}\text{Ca}(\gamma, p)$  $^{58}\text{Ni}(\gamma, p)$  $^{60}\text{Ni}(\gamma, p)$ 

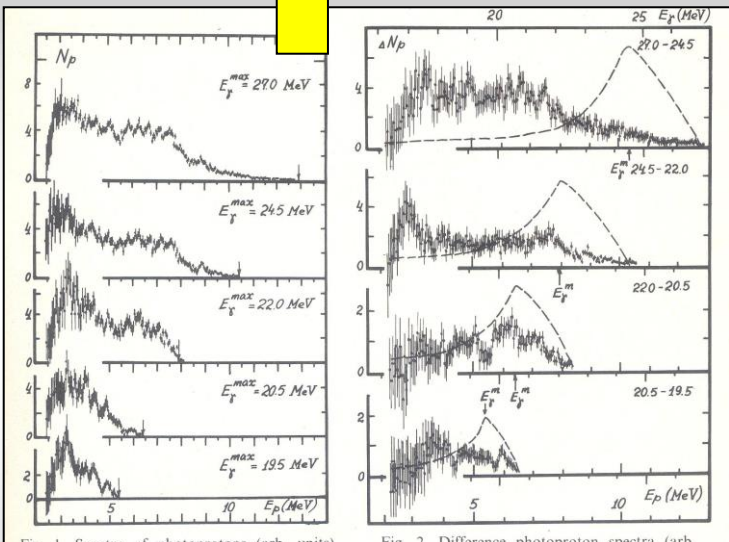
**так и в сечениях реакций, полученных без решения этой
обратной задачи.**

Отчетливо проявляющаяся **структура фотопротонного сечения** в эксперименте на пучке тормозного излучения без решения обратной задачи развертки.

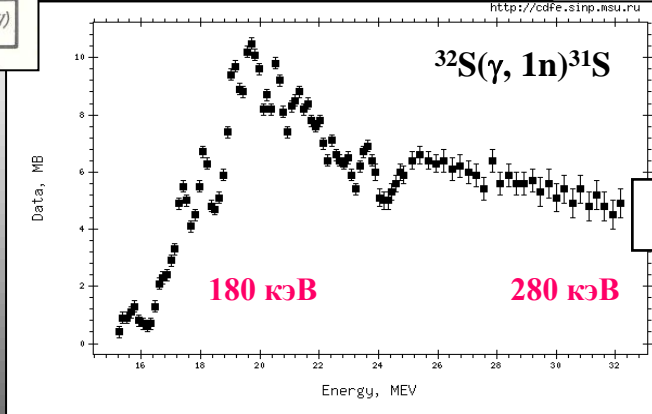
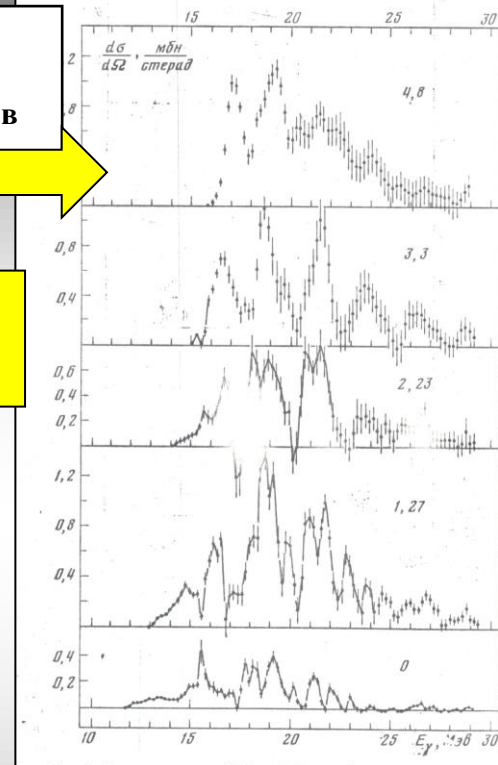
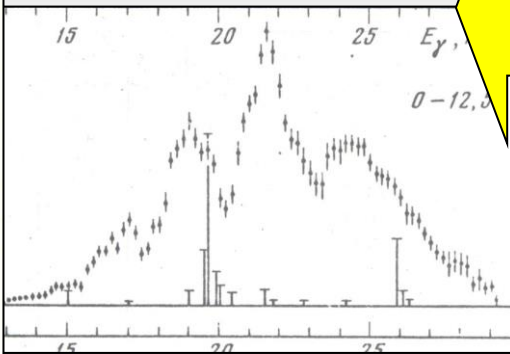
^{32}S

Разностные спектры фотопротонов пересчитываются

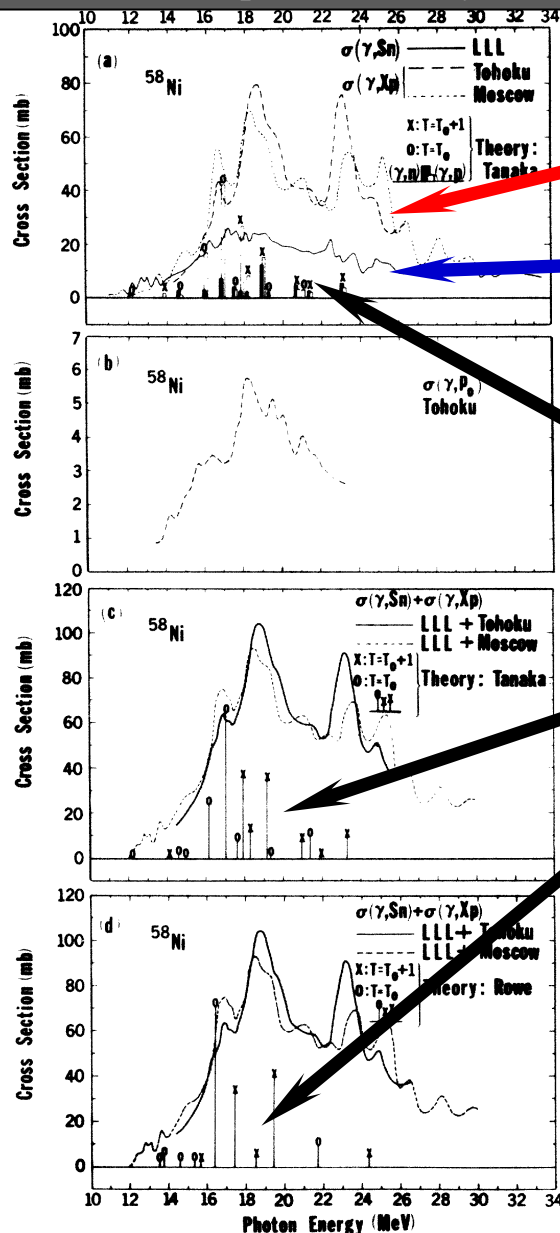
$$E_{\text{кон.ядр.}}^* = E_{\text{разн.}}^m - V_p - E_p A/(A-1)$$
 в сечения реакции $(\gamma, 1p)$ с образованием конечного ядра ^{31}P в основном и возбужденных состояниях.



Сумма дает полное сечение реакции $^{32}\text{S}(\gamma, 1p)^{31}\text{P}$.



Структура заглажена.



^{58}Ni

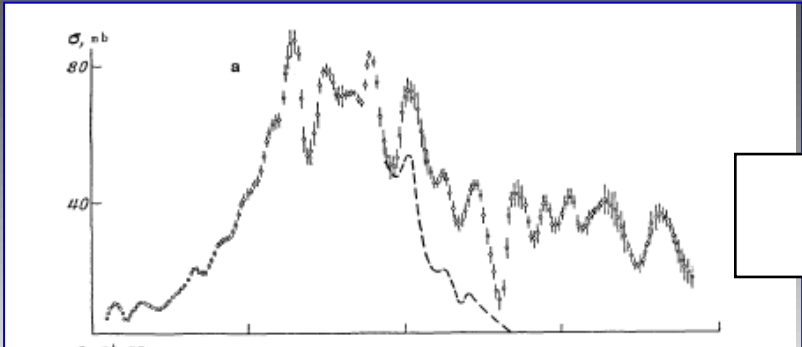
Сечения из экспериментов с тормозным γ -излучением.

Сечение из эксперимента с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами.

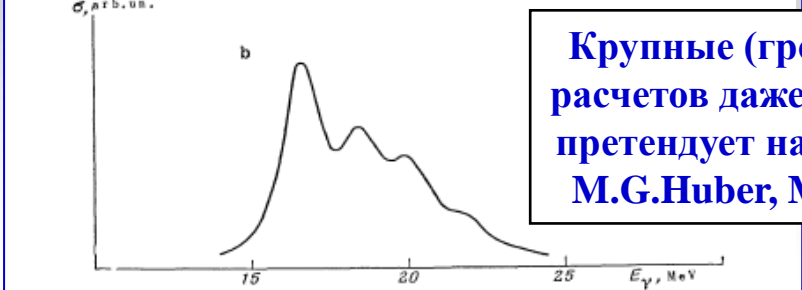
Во многих теоретических расчетах (Ф.Е. Живописцев, Н.П. Юдин, М.Г. Урин, С.П. Камерджиев, Е.Л. Ядровский, Y. Tanaka, C. Ngo-Trong, J.B. Seaborn, M. Danos и многие другие) в разных моделях гигантского резонанса различные особенности структуры предсказывались и описывались.

Основное колебание всех протонов относительно всех нейтронов сопровождается колебаниями разной природы (объемными, поверхностными, колебаниями формы, ...) в связи с расположением и нейтронов и протонов на оболочках с разными характеристиками.

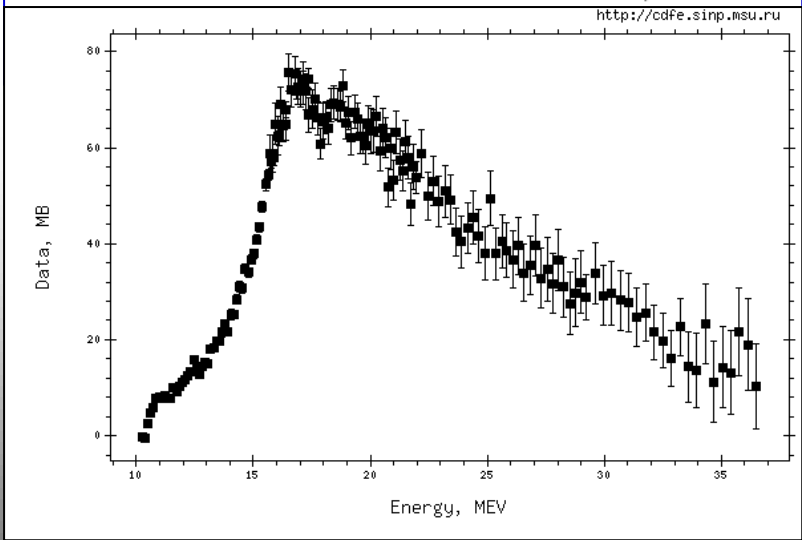
^{59}Co



Отчетливо проявляющаяся структура сечения в эксперименте на пучке тормозного излучения

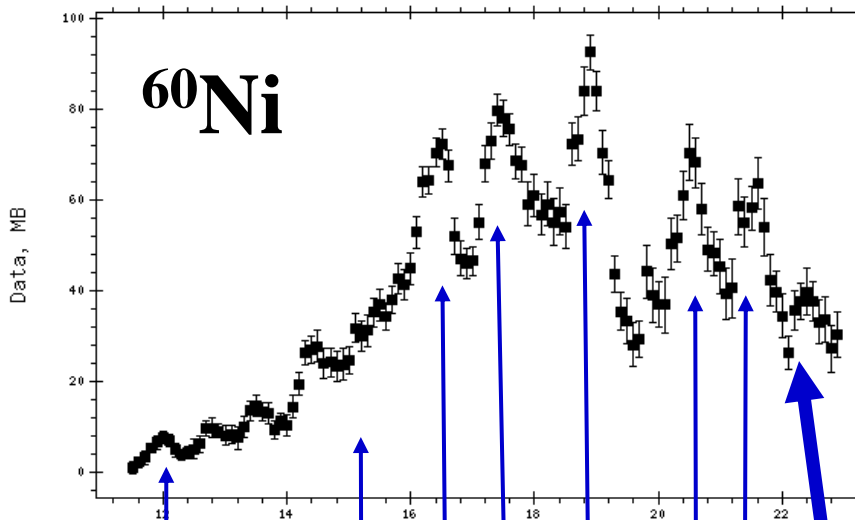


Крупные (гросс-) особенности структуры наблюдаются в результатах расчетов даже в коллективной динамической модели, которая не очень претендует на описание промежуточной и тем более тонкой структуры M.G.Huber, M.Danos, H.J.Weber, W.Creiner, Phys. Rev. 155, 1073 (1967).



Однако в эксперименте на пучке аннигиляционных γ -квантов структура сечения не проявляется.

Разрешение, достигаемое в экспериментах на пучках аннигиляционных фотонов, прямо связано с проблемой нормировки результатов измерения Υ_{e+} и Υ_{e-} : структурные особенности сильно заглажены.

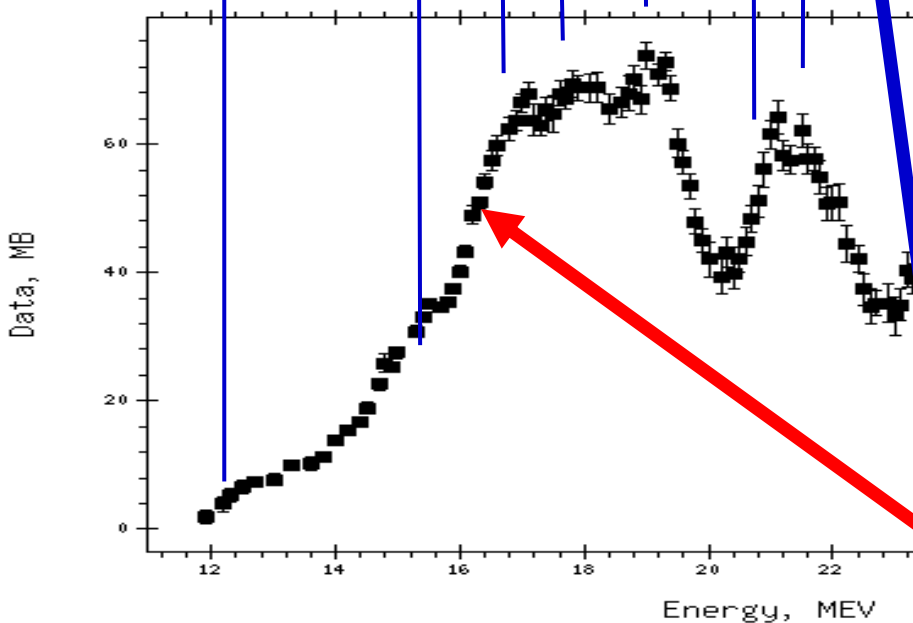
<http://cdfc.sinp.msu.ru>

«Тормозные» эксперименты – тоже не панацея (!):
методы (Пенфолда-Лейсса, наименьшей структуры, регуляризации Тихонова, редукции и др.) развертки сечения из выхода выявляют в сечениях структурные особенности при тех энергиях фотонов, при которых в кривых выхода наблюдаются

изломы.

ОДНАКО:

амплитуды и формы существующих структурных особенностей зависят от особенностей методов решения обратной задачи.



Восстановление сечения реакции из одной и той же кривой выхода с использованием метода Пенфолда-Лейсса с различными шагами обработки:

0.5 МэВ

и

1.0 МэВ.

Основные общие выводы

Экспериментальные данные по сечениям фотонейтронных реакций, полученные на пучках аннигиляционных фотонов и тормозного γ -излучения, в большинстве своём **не удовлетворяют физическим критериям достоверности и вызывают большие сомнения в отношении абсолютной величины и/или формы**, поскольку содержат систематические погрешности разных типов, обусловленные, прежде всего, недостатками непрямых методов определения сечений реакций.

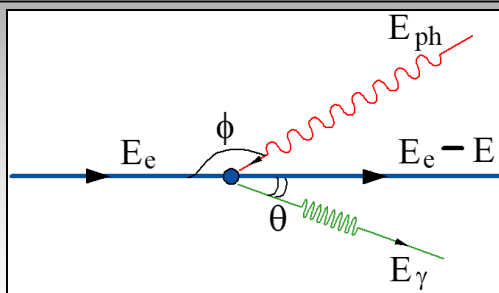
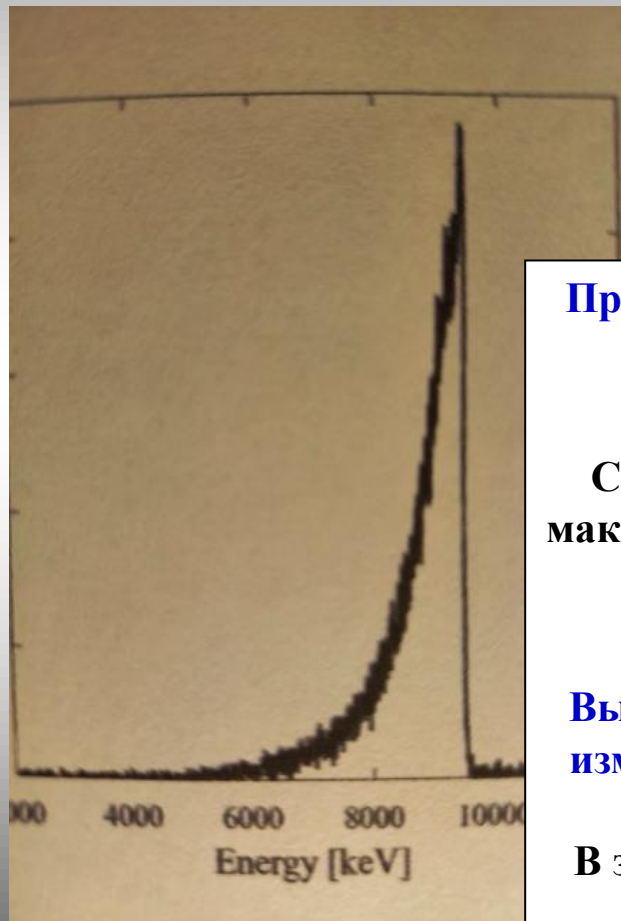
Для получения достоверных данных о величине и форме сечений фотоядерных (фотонейтронных, фотопротонных и др.) реакций необходимо использование **методов прямого измерения полных сечений и методов разделения** парциальных реакций.

Надежды на достоверное исследование парциальных реакций как по величине, так и по форме, **связаны** с созданием источника моноэнергетических фотонов **с параметрами**, обеспечивающими:

- **высокую интенсивность** (статистическая точность результатов $\sim 0.1-0.3\%$);
- **высокое энергетическое разрешение** (~ 10 кэВ);
- **достаточную энергию** (до ~ 40 МэВ);
- **возможность изменения энергии с малым шагом** (~ 100 кэВ).

На повестке дня - современные альтернативные эксперименты, свободные от недостатков экспериментов, выполненных ранее.

Определенные надежды связываются с пучками фотонов обратного комптоновского рассеяния (ОКР) излучения мощного лазера на пучке релятивистских электронов.

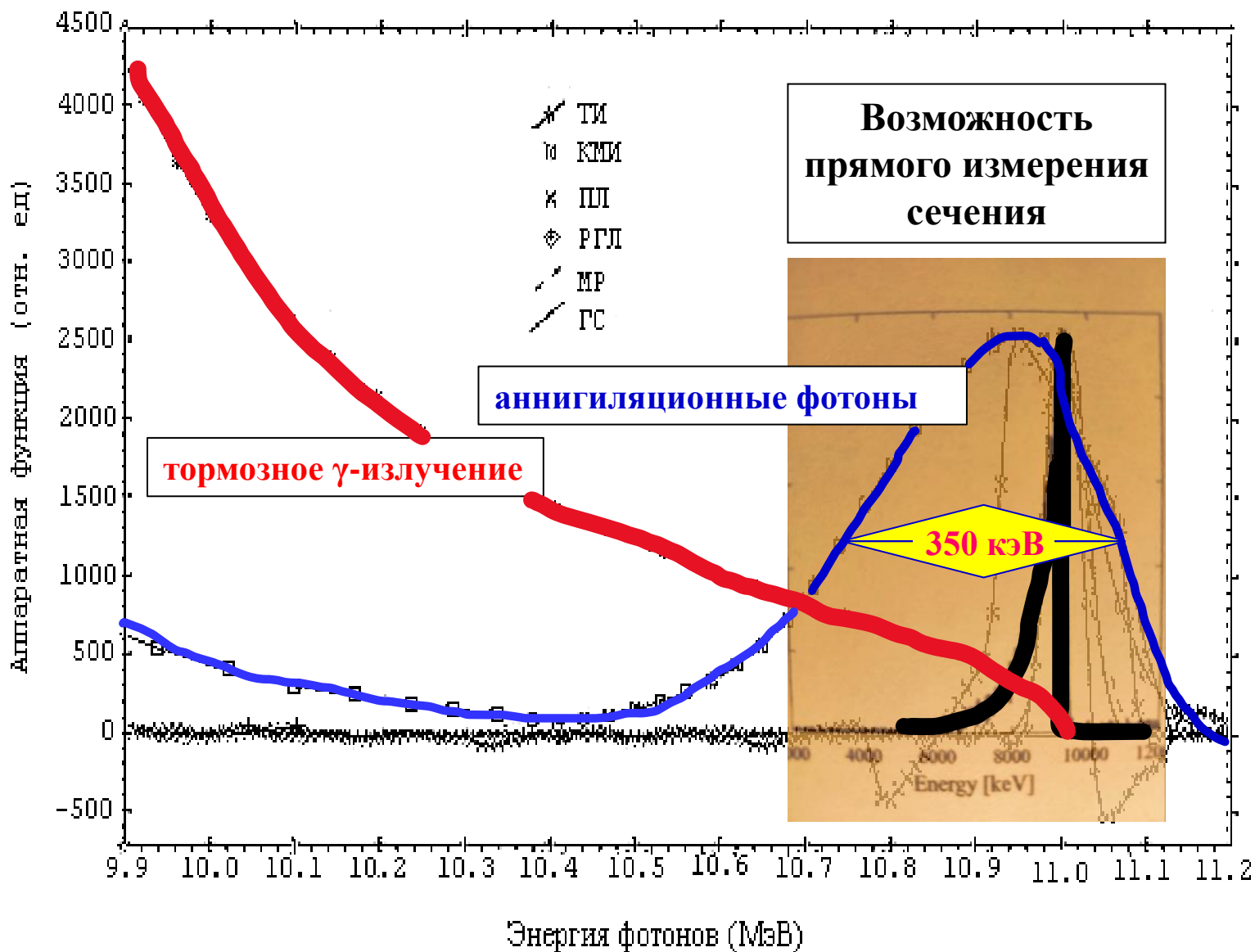


Преимущества таких пучков обусловлены, прежде всего, формой энергетического спектра ОКР-фотонов и высокой интенсивностью.

Спектр ОКР-фотонов характеризуется резким обрезанием при максимальной энергии, весьма малой шириной, малым «хвостом», обусловленным не физическими причинами, а условиями коллимации пучка.

Высокая интенсивность пучка ОКР-фотонов дает основания для измерения сечений реакций с малым шагом с возможностью для исследований структурных особенностей.

В зависимости от схемы КИ средний выход рассеянных фотонов может изменяться от 10^9 до 10^{14} сек $^{-1}$.



Национальный центр физики и математики (НЦФМ, ВНИИЭФ (Саров):

Проект 6: «Ядерная и радиационная физика

Направление 6.5.1 «Разработка источника комптоновского излучения для исследований в области биологии, медицины, материаловедения, быстротекающих процессов, ядерной физики».

Условное название «5 - 50 – 500»

(по конечной энергии ускоренного пучка электронов.)

Масштабная научная установка НЦФМ (Саров) – комплекс

ИНОК (ИНтенсивный ОБратный КОМПТОН) –

источник (квази)монохроматических γ -квантов, основанный на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах.

Основные научные задачи – задачи ядерной фотоники: фотоядерные реакции, фотоделение, физика изомеров, ядерная спектроскопия, высокоточное изучение областей гигантского дипольного и пигми-дипольного резонансов и т.д.

При энергии электронов $E_e \sim 1$ ГэВ может покрываться область ГДР $E < 25$ МэВ .

При увеличении энергии до $E_e \sim 2$ ГэВ возникают дополнительные научные возможности в области адронной фотоники и ядерной физики высоких энергий.

Спасибо за внимание!