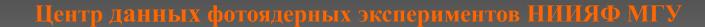




В.В.Варламов СТАТУС РЕЗУЛЬТАТОВ ФОТОЯДЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Вспоминая Бориса Саркисовича Ишханова

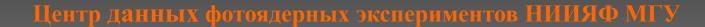






Б.С.Ишханов – «главный фотоядерщик страны»: к концу прошлого века были широко известны результаты исследований, выполненных в НИИЯФ МГУ при его участии и под его руководством:

□ новые детекторы фотонейтронов и фотопротонов;
□ новые методы экспериментальных исследований;
□ новые методы обработки экспериментальных данных;
□ большое количество данных, полученных впервые;
□ новые особенности гигантских резонансов ядер:
гросс-, промежуточная и тонкая структура гигантского резонанса;
новые параметры изоспинового расщепления гигантского резонанса;
параметры конфигурационное расщепление гигантского резонанса (открытие).







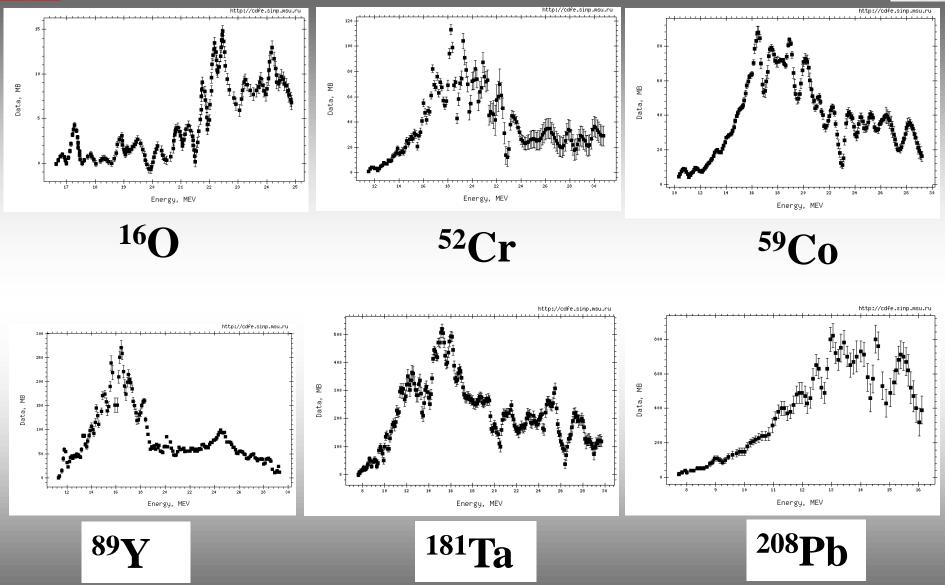
Среди всех этих результатов особое место занимает обнаружение в сечениях фотоядерных реакций структурных особенностей гигантских резонансов.

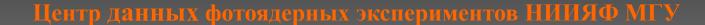
Именно факты обнаружения надежно проявляющихся структурных особенностей с различной шириной (гросс-структура с характерной шириной резонансов ~1.0 МэВ, промежуточная структура с шириной резонансов ~200-400 кэВ и тонкая структура с шириной ~ 50-100 кэВ) стимулировали прогресс в теоретическом описании процессов фоторасщепления ядер, развитие новых подходов к такому описанию, новых моделей фотоядерных реакций.

Детальное исследование характеристик обнаруженных структурных особенностей в сечениях реакций послужило 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).







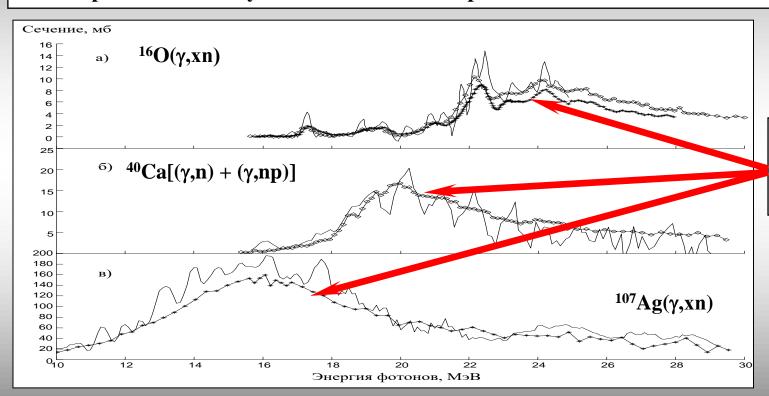






Структура ГДР – и новый результат и особая проблема:

в экспериментах на пучках тормозного γ-излучения обнаружена отчетливо выраженная богатая структура резонанса, которая не наблюдается в экспериментах на пучках квазимоноэнергетических аннигиляционных фотонов.



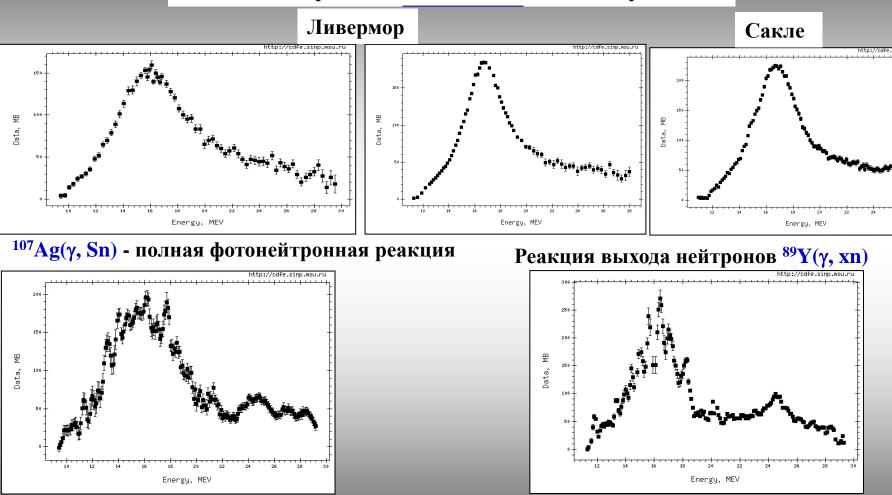
Сечения без структурных особенностей





Типичные расхождения данных разных экспериментов по форме

Квазимоноэнергетические аннигиляционные фотоны



Тормозное ү-излучение, НИИЯФ МГУ



Cross Section (mb

Cross Section (mb)

Cross Section (mb)

Cross Section (mb)

60

20

120

100

40

20

120

100

20

58_M;

58_{Ni}

<u> Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ</u>

X: T=T+1

 $\sigma(\gamma,Sn)+\sigma(\gamma,Xp)$

 $\sigma(\gamma,Sn)+\sigma(\gamma,Xp)$

22 24 26 28 30 32 34

Photon Energy (MeV)

LLL + Tohoku LLL + Mescow

Theory: Tanaka

Theory: Rowe

o:T=T_o Theory: |<u>y,n)#-(y,n)</u> Tanaka



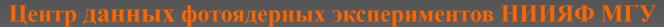


Сечения из экспериментов с тормозным γ -излучением.

Сечение из эксперимента с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами.

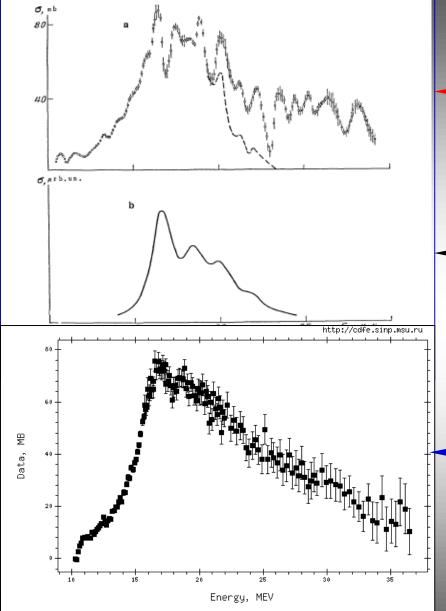
Проблема еще и в том, что во многих теоретических расчетах в разных моделях гигантского резонанса (Ф.Е.Живописцев, Н.П.Юдин, М.Г.Урин, С.П.Камерджиев, Ү.Тапака, С. Ngo-Trong, J.B.Seaborn и другие) различные особенности структуры предсказывались и описывались.











⁵⁹Co

Сечения из эксперимента с тормозным *γ*–излучением.

Особенности структуры описываются даже в коллективной динамической модели

M.G.Huber, M.Danos, H.J.Weber, W.Creiner, Phys. Rev. 155, l073 (1967).

Сечение из эксперимента с квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами.







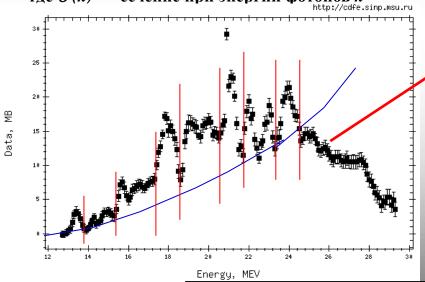
Структура гигантского дипольного резонанса

Абсолютное большинство данных получено в экспериментах двух типов :

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

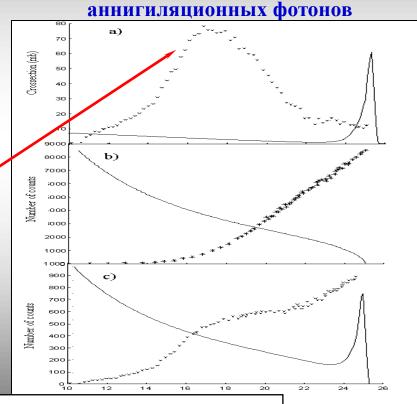
$$Y(E_{jm}) = \frac{N(E_{jm})}{\varepsilon D(E_{jm})} = \alpha \int_{Eth}^{Ejm} W(E_{jm}, k) \sigma(k) dk,$$

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

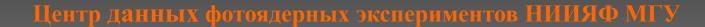


(Ливермор (США), Саклэ (Франция,...)

на получаемых в разностной процедуре пучках квазимоноэнергетических



Вопрос: почему так различаются сечения (63Cu)?







В экспериментах с тормозным γ -излучением с очень высокой статистической точностью (в верхних каналах статистика достигает миллионов частиц) непосредственно измеряется кривая выхода реакции

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

которая не является плавной кривой, а содержит отчетливо выраженные изломы, свидетельствующие о наличии структурных особенностей.

Обработка кривых выхода с помощью одного из специально разработанных методов развертки сечения (Пенфолда-Лейсса, наименьшей структуры, регуляризации Тихонова, редукции и др.) приводит к выявлению в сечениях структурных особенностей именно при тех энергиях фотонов, при которых в кривых выхода наблюдаются изломы.

При этом величины и формы наблюдаемых структурных особенностей оказываются зависимыми от метода обработки и обеспеченного (достигнутого) энергетического разрешения.

Первоначальная идея объяснения расхождения результатов – простое различие достигаемого энергетического разрешения.

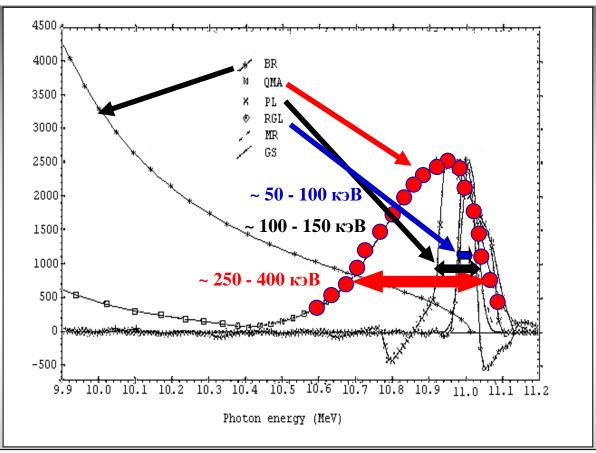
10

Развертка





Структура гигантского дипольного резонанса



Декларируемого в аннигиляционных экспериментах по ширине аннигиляционной линии энергетического разрешения (250 - 400 кэВ) должно заведомо хватать для выявления структурных особенностей если не тонкой и промежуточной, то гросс- структуры ГДР. Но они не наблюдаются!



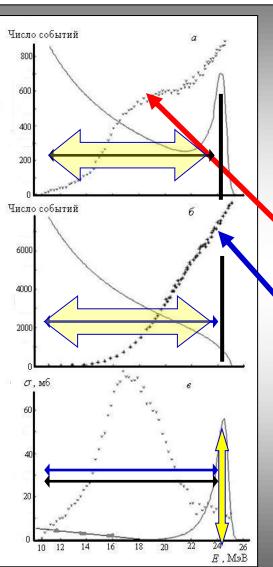


Реальное энергетическое разрешение аннигиляционного эксперимента не может быть высоким по простой причине:

Разрешение плохое.

Разрешение очень плохое.

Разрешение разности не может стать лучше разрешения уменьшаемого и вычитаемого.



Простая разностная схема КМАэксперимента позволяет убрать фон тормозного излучения, но не позволяет получить высокое энергетическое разрешение —

Вычитание из результата с плохим разрешением

результата

с очень плохим разрешением

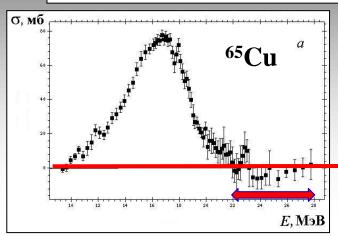
не может приводить к результату с хорошим разрешением

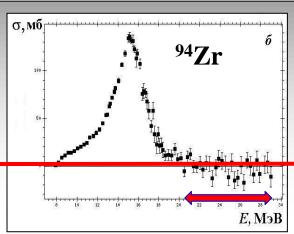
(своеобразный «вечный двигатель»)!

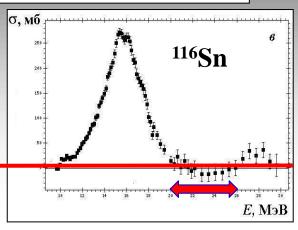




Дополнительное обстоятельство, приводящее к ухудшению энергетического разрешения: проблема с «хвостом» тормозного излучения от позитронов, который не удается убрать полностью.



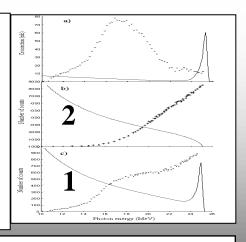




Физически запрещенные отрицательные значения в сечениях: проблема избавления от «хвоста» тормозного излучения позитронов решена не полностью.

Число нейтронов на этапе «2» эксперимента может превышать число нейтронов на этапе «1» только в случае ошибочной нормировки обоих результатов по количеству фотонов в «хвосте».

Присутствие «остаточного хвоста» естественно дополнительно ухудшает энергетическое разрешение



Разность двух выходов - только выход: нужна дополнительная обработка...





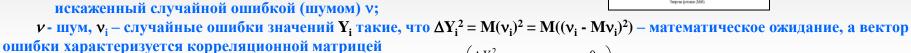
Способы учета формы аппаратной функции фотоядерного эксперимента Метод редукции

$$y = A\sigma + \nu$$

А"переводит" о в у

- где у экспериментальный выход эксперимента любого типа,
 - σ сечение реакции,
 - А оператор аппаратной функции прибора, дает на выходе сигнал у,

который при поступлении на его вход сигнала о искаженный случайной ошибкой (шумом) у;



$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Delta Y_1^2 & \dots & 0 \\ & \Delta Y_2^2 & \dots & \\ & & \dots & \\ 0 & & \dots & \Delta Y_n^2 \end{pmatrix}$$

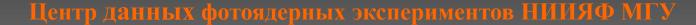
При выполнении условия
$$M\|Ry-U\sigma\|=\min$$
 существуют вектора решения

$$R = U(\Sigma^{-1/2}A)^{-}\Sigma^{-1/2} = U(A^{*}\Sigma^{-1}A)^{-}A^{*}\Sigma^{-1}$$

$$\sigma = Ry = RA\sigma + Rv = U\sigma + Rv$$

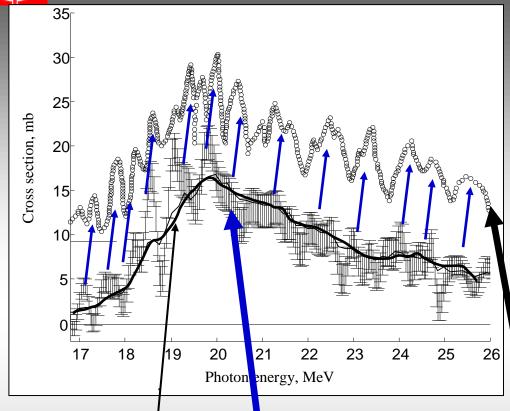
$$G = R\Sigma R^{*} = U(A^{*}\Sigma^{-1}A)^{-}U^{*},$$

 σ интерпретируется как искаженный шумом R_{ν} результат измерения сечения σ с помощью прибора U_{ν} , которому соответствует аппаратная функция заданного качества (например, гауссиан с определенной шириной), G – матрица погрешностей.









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

Дополнительная обработка результата КМА-эксперимента (аннигиляционная линия с шириной 300 кэВ с тормозным хвостом (10% от реального)) выявляет структурные особенности, весьма близкие к особенностям результата тормозного эксперимента

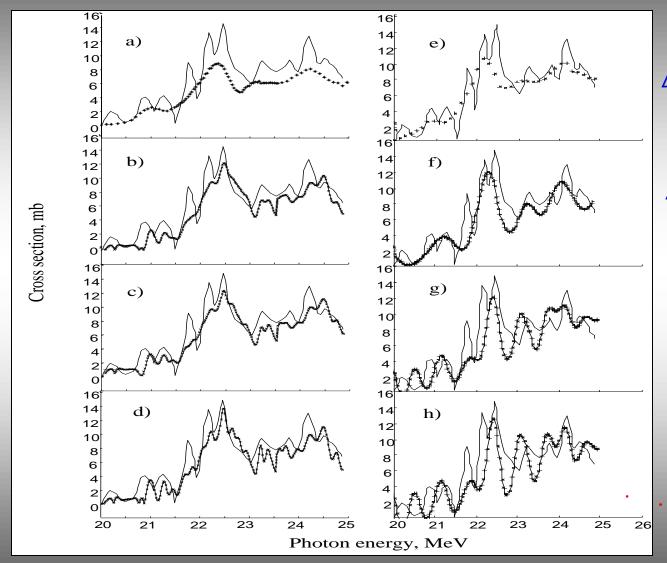
Сечение реакции, восстановленное из результата КМА-эксперимента

Результат эксперимента на пучке тормозного γ-излучения





КМА (Сакле) и ТИ (Москва) - - линия -> ТИ (Москва) и КМА (Ливермор)



 $\Delta E = 300$ кэB

 $\Delta E = 250$ кэB

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

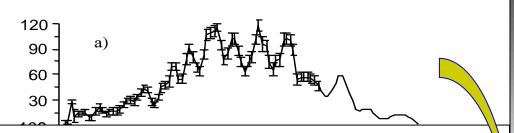
 $\Delta E = 200$ кэВ

 $\Delta E = 150$ кэВ

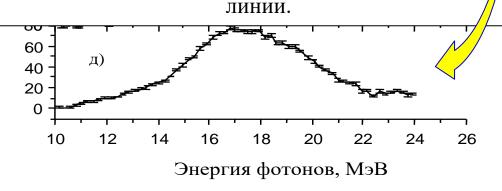








Сглаживание сечения из тормозного эксперимента гауссианами разной ширины привело к согласию (χ^2 (0.03 – 0.05) с данными аннигиляционного эксперимента при ширине гауссиана $\Delta E = 1.6$ МэВ, которая и определяет реальное энергетическое разрешение аннигиляционного эксперимента. Оно приблизительно в 4 раза превосходит его оценку (0.2 – 0.4 МэВ), сделанную авторами на основе расчетной ширины аннигиляционной



63 Cu(γ ,n) 62 Cu

Результат тормозного эксперимента

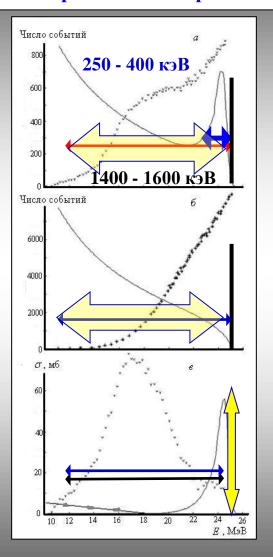
Очевидно, что при таком реальном разрешении структурные особенности сечения выделены быть не могут.

Результат аннигиляционного эксперимента





Реальное энергетическое разрешение оказывается в 4 - 6 раз хуже, чем его оценка по расчетной ширине аннигиляционной линии в спектре фотонов.



Декларируемое разрешение (ширина аннигиляционной линии) –

250 – 400 кэВ.

Реально достигаемое энергетическое разрешение —

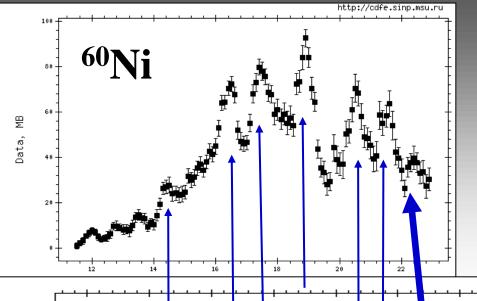
1400 – 1600 кэВ.

Достигаемое энергетическое разрешение эксперимента не определяется декларируемой шириной аннигиляционной линии — оно оказывается в несколько раз большим: ~ 1.6 МэВ.

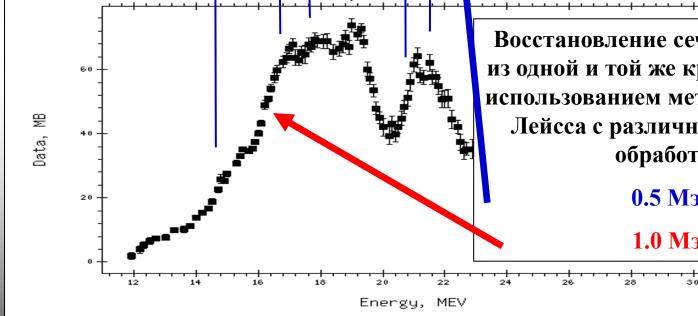
При таком энергетическом разрешении структурные особенности не только тонкой и промежуточной, но и гросс- структуры ГДР оказываются заглаженными, а форма сечения - недостоверной.







Достоверность формы сечения также под сомнением: амплитуды и формы структурных особенностей зависят от метода обработки и достигаемого энергетического разрешения.



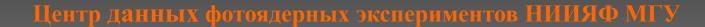
Восстановление сечения реакции из одной и той же кривой выхода с использованием метода Пенфолда-Лейсса с различными шагами обработки:

http://cdfe.sinp.msu.ru

0.5 M₃B

И

1.0 M₃B







Статус результатов фотоядерных экспериментов в области энергий гигантского дипольного резонанса

- в экспериментах с тормозным у–излучением и квазимоноэнергетическими аннигиляционными фотонами получены сечения парциальных и полных фотонейтронных реакций практически для всех стабильных ядер;
- сечения реакций, полученных в таких экспериментах, существенно различаются по форме;
- результаты экспериментов с аннигиляционными фотонами сильно переглажены (реальное энергетическое разрешение ~ 1.4 1.6 МэВ), информация о структуре «потеряна»;
- результаты экспериментов с аннигиляционными фотонами представляют собой не сечения, а лишь выходы реакций, структурные особенности «потеряны» в связи с плохим энергетическим разрешением;
- характеристики «потерянной» структуры могут быть «восстановлены» после дополнительной обработки, учитывающей реальную форму эффективного спектра фотонов;
- после такой дополнительной обработки результатов КМА-экспериментов в них проявляются структурные особенности, весьма близкие по форме к тем, которые наблюдаются в ТИ-экспериментах.

Для надежного и достоверного решения проблемы структурных особенностей гигантских резонансов необходимы эксперименты, результаты которых не зависят (зависят минимально) от метода обработки.







В процессе детальных исследований возможных причин расхождений сечений реакций из разных экспериментов по форме были выявлены ещё более серьезные существенные расхождения этих сечений по абсолютной величине.

Эти расхождения оказываются более серьезными значимыми поскольку

имеют своим следствием существенные расхождения величин интегральных сечений, которые осложняют использование расходящихся данных как в ядерно-физических исследованиях, например, при сравнении с экспериментальными данными результатов расчетов в рамках разных моделей, использовании определенных данных в качестве стандартов при проведении относительных измерений и т. п.

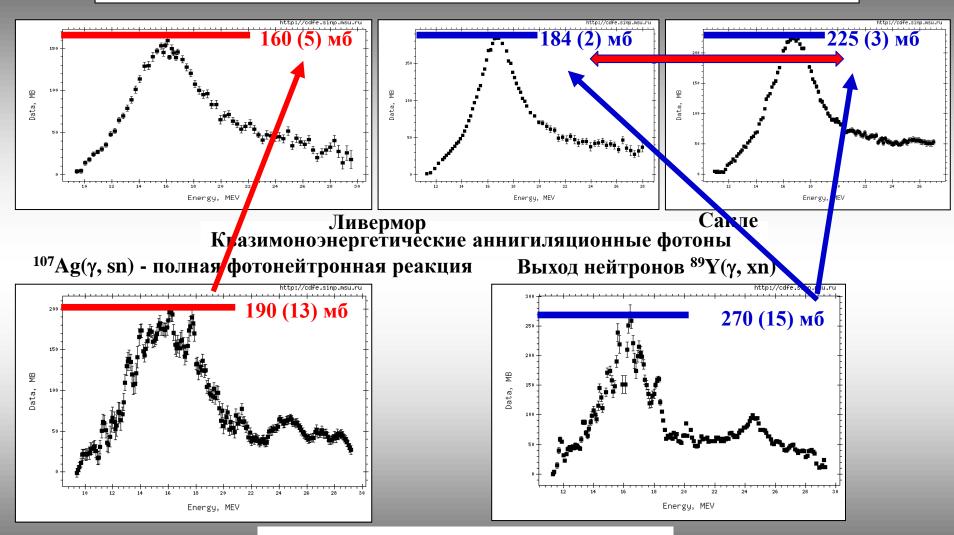
Следует отметить, что существенные расхождения такого типа наблюдаются между результатами экспериментов одного типа, выполненных в разных лабораториях. Прежде всего подобные расхождения наблюдаются между сечениями парциальных реакций (ү, 1n), (ү, 2n) и (ү, 3n).







Типичные расхождения данных разных экспериментов по величине



Тормозное у-излучение, НИИЯФ МГУ

22

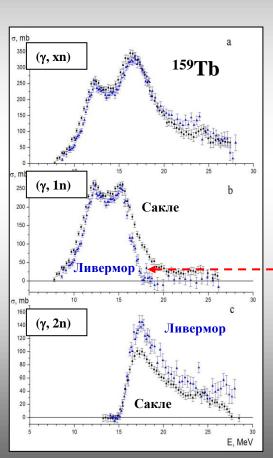




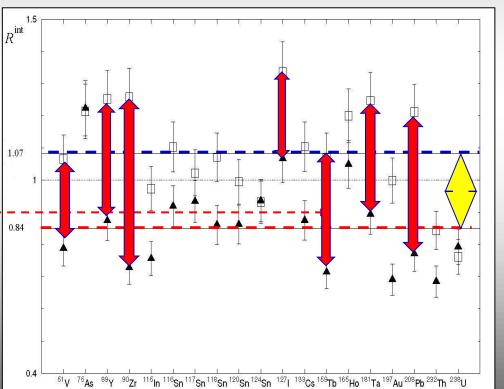


Главная проблема: для 19 ядер, исследованных в обеих лабораториях: сечения реакций (γ, 1n) имеют большие величины в Сакле, (γ, 2n) – в Ливерморе.

Расхождения определенно являются систематическими.

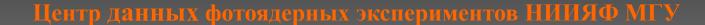


Отношения интегральных сечений $R^{\text{инт}} = \sigma^{\text{инт}}_{C} / \sigma^{\text{инт}}_{J}$



Среднее отношение для реакций (у, 1n) – <R> ~ 1.07.

Среднее отношение для реакции (γ, 2n) – <R> ~ 0.84.

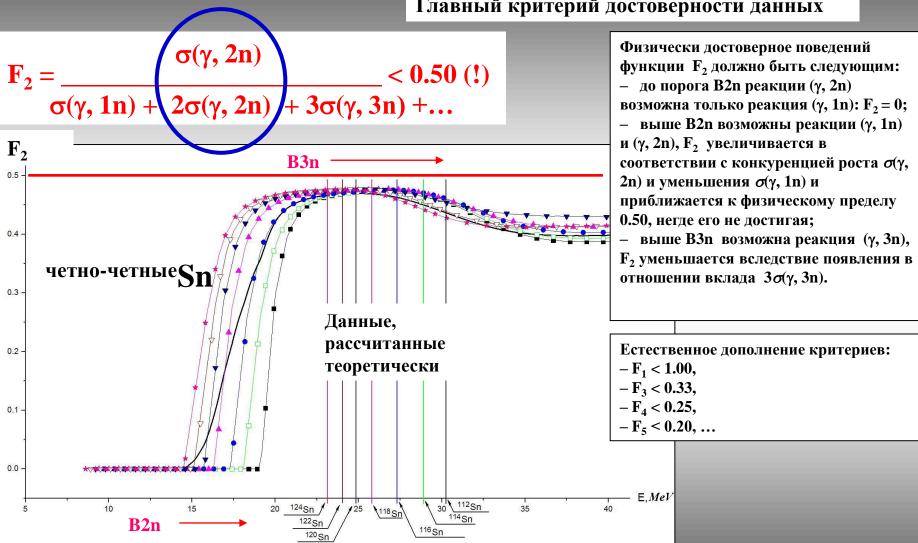




25.10.2022



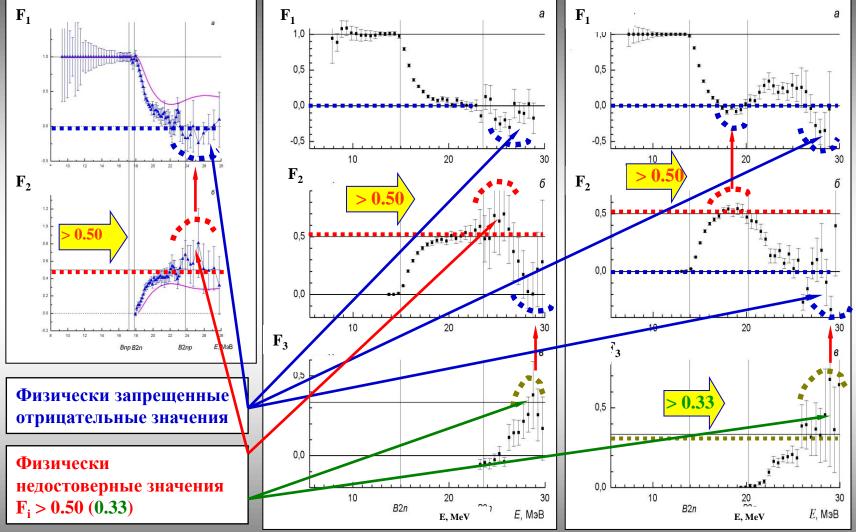
Главный критерий достоверности данных

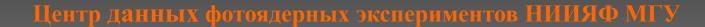














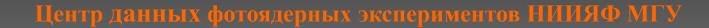


Новый экспериментально-теоретический подход к оценке сечений парциальных фотонейтронных реакций:

$$σοιμεн(γ, 1n) = F1τεορ • σэκсп(γ, xn),$$
 $σοιμεн(γ, 2n) = F2τεορ • σэκсп(γ, xn),$
 $σοιμεн(γ, 3n) = F3τεορ • σэκсп(γ, xn),....$

- только экспериментальное сечение реакции полного выхода нейтронов $\sigma^{\text{эксп}}(\gamma, \mathbf{xn})$, априори свободное от ограничений методов разделения нейтронов по множественности, используется как исходное;
- для определения вкладов в сечение полной реакции $\sigma^{\mathfrak{skcn}}(\gamma, \mathbf{xn})$ сечений парциальных реакций $\sigma^{\mathfrak{oueh}}(\gamma, \mathbf{2n})$ и $\sigma^{\mathfrak{oueh}}(\gamma, \mathbf{2n})$ описания конкуренции каналов распада ГДР используются переходные функции множественности $F_{1,2,3}, \ldots$, рассчитанные в рамках комбинированной модели фотоядерных реакций.

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







Для приблизительно 50 ядер

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

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

С помощью экспериментально теоретического метода оценки для указанных ядер получены новые данные по сечениям реакций, удовлетворяющие объективным физическим критериям достоверности

(позже будет сделан соответствующий доклад).

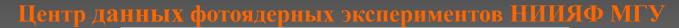






Статус (продолжение)

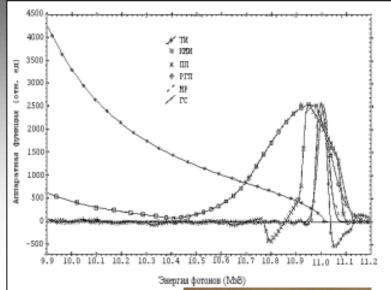
- большое количество сечений парциальных реакций (γ, 1n), (γ, 2n) и (γ, 3n), полученных в разных, в том числе и однотипных экспериментах, существенно различаются по абсолютной величине;
- расхождения обусловлены определенными недостатками метода разделения нейтронов по множественности, основанного на измерении кинетической энергии нейтронов или на использовании поправок, рассчитанных по статистической теории;
- сечения парциальных реакций, оцененные с помощью экспериментально-теоретического метода и удовлетворяющие объективным физическим критериям достоверности данных, существенно расходятся с экспериментальными данными, что ставит на повестку дня достоверность оценок многих физических эффектов, выполненных с использованием экспериментальных данных.







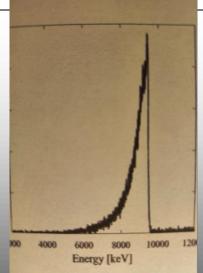
Заключение



Представленный статус результатов фотоядерных экспериментов ставит на повестку дня задачу его проверки в современных альтернативных экспериментах, свободных от недостатков экспериментов, выполненных ранее.

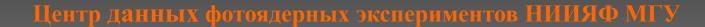
Определенные надежды связываются с пучками фотонов обратного комптоновского рассеяния (ОКР) излучения мощного лазера на пучке релятивистских электронов.

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



Спектр ОКР-фотонов характеризуется резким обрезанием при максимальной энергии, малым «хвостом» и весьма малой шириной, что дает основания для достижения высокого разрешения по энергии.

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







Заключение (продолжение)

В настоящее время имеются несколько (⁵⁹Co, ⁸⁹Y, ¹⁰³Rh, ¹³⁹La, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁹Tm, ¹⁸¹Ta, ¹⁹⁷Au) предварительных результатов экспериментов, выполненных на пучке ОКР-фотонов установки NewSUBARU (Япония) с использованием специального детектора, эффективность которого слабо зависит от энергии нейтронов, которые соответствуют объективным критериям достоверности данных.

Эксперименты выполнены при относительно большом шаге по энергии, что пока не позволило рассмотреть вопрос о структурных особенностях сечений реакций.

НИИЯФ МГУ участвует в разработке проекта источника ОКР-фотонов с энергией и интенсивностью, достаточными для исследования гигантских резонансов с возможностью измерений с малым шагом по энергии (позже будет сделан соответствующий доклад).

Соответствующая программа исследований должна позволить получить новые данные со статусом достоверных.





Спасибо за внимание!