

Тонкая структура пигми- и гигантских мультипольных резонансов

С. П. Камерджиев, М.И.Шитов
НИЦ «Курчатовский Институт»

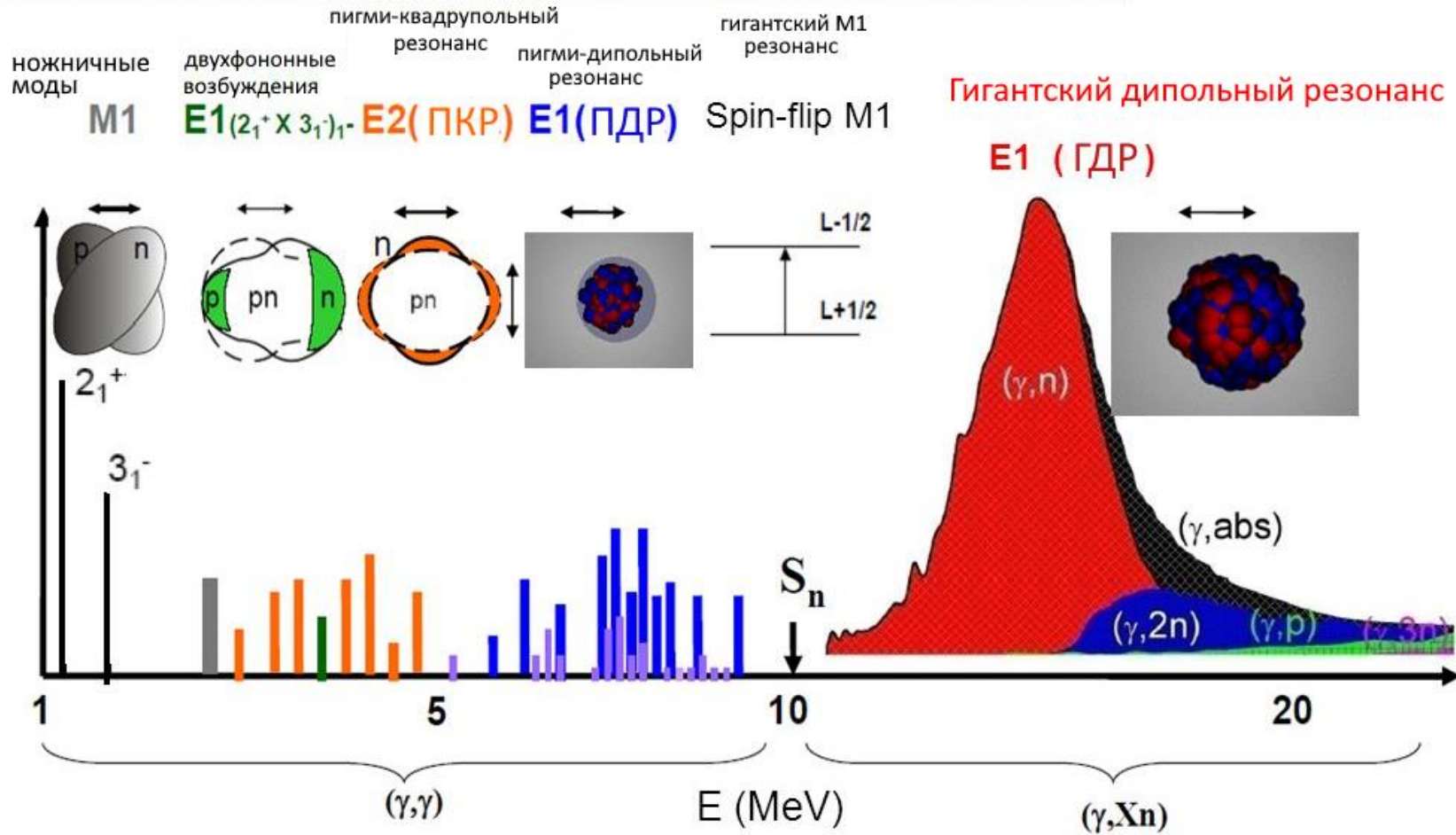
НИИЯФ МГУ 26.10.23

План

- 1. «Вызовы» эксперимента и «Ответы» теории
- 2. Тонкая структура ПДР и ГМР
- 3. Радиационные силовые функции (РСФ) и ядерные данные
- 4. Вейвлет анализ

Реакция ядра на электромагнитное излучение

Theoretical prediction of Pygmy Quadrupole Resonance: N. Tsoneva, H. Lenske, Phys. Lett. B 695 (2011) 174.



- Двухфонные возбуждения: $E_x \sim 3 \text{ MeV}, B(E1) \sim 10^{-2} \text{ W.u.}$
- Пигми Дипольный Резонанс: $E_x \sim 7 \text{ MeV}, B(E1) \sim 10^{-1} - 1 \text{ W.u.}$
- Гигантский Дипольный Резонанс: $E_x \sim 18 \text{ MeV}, B(E1) \sim 10 \text{ W.u.}$

Тонкая структура

Область энергий возбуждения (0- 35 МэВ) - «Вызов»:

Наиболее интересное:

- Современная ядерная спектроскопия (1-5 МэВ),
- Пигми- и гигантские мультипольные резонансы (ПДР, ГМР), астрофизика, где требуются данные о ~8000 нуклидов.

Зачем это нужно: «Вызовы»

- Эксперименты по тонкой структуре ПДР и ГМР,
- «Существование форм» ядра (сплюснутая, вытянутая в области 1-5 МэВ),
- Характеристики ПДР, ГМР
- «Ядерные данные» в реакторах и астрофизике «детальность» теории, например, для тонкой структуры ПДР и ГМР

«Ответ теории»:

- ✓ самосогласование и учет связи с фонами

Особенности расчетов в самосогласованном подходе

- Индивидуальный подход к каждому ядру благодаря одночастичному и фононному спектру. Поэтому должны существовать структуры в радиационной силовой функции (РСФ)
- Параметры сил Скирма или функционала универсальны для всех ядер, за исключением самых легких)
- Большая предсказательная сила

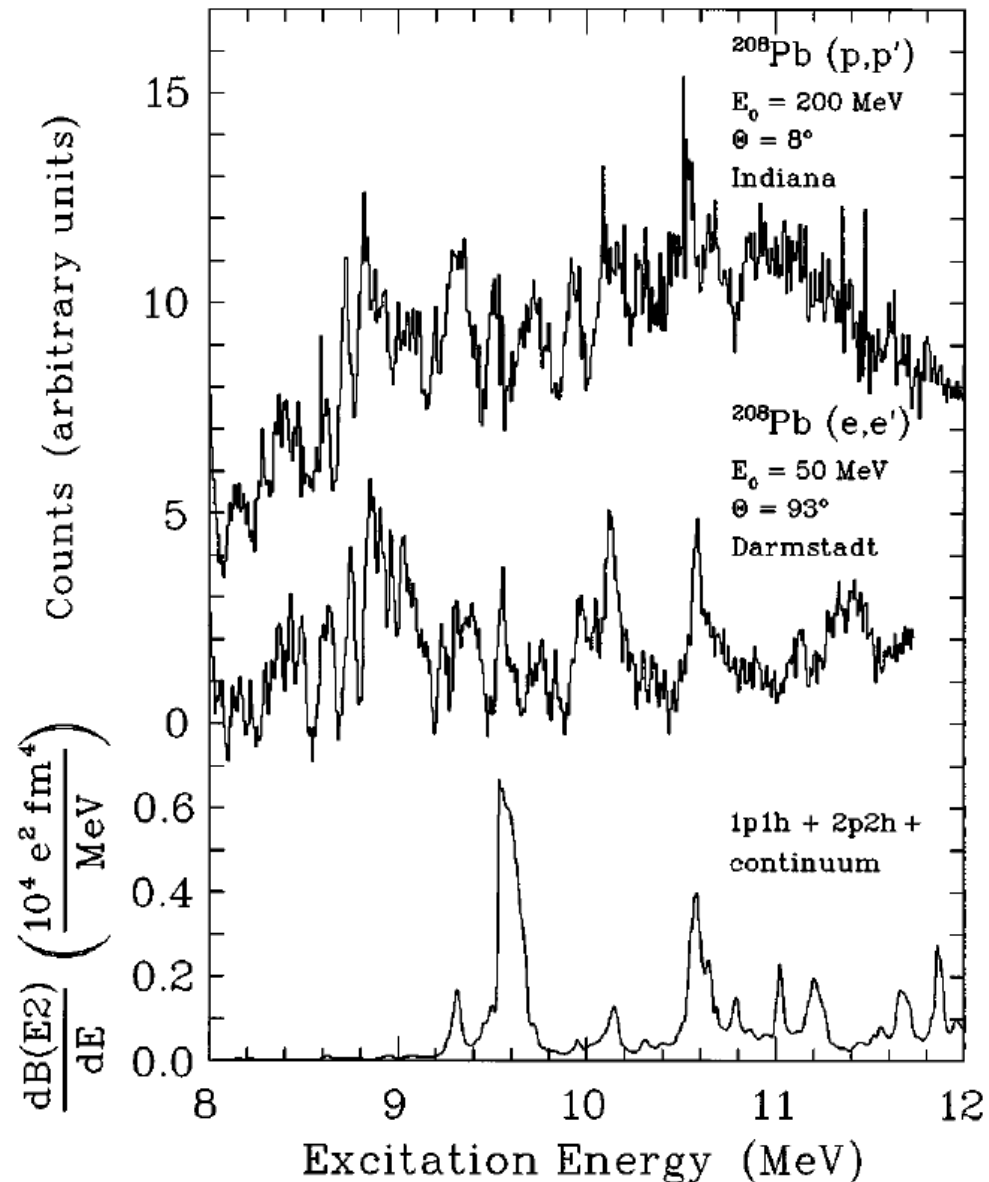
Расчетами мы называем расчеты тонкой структуры с **различными** значениями параметров усреднения («размазки») (от 1 кэВ до 100 кэВ). Этот параметр имитирует экспериментальное разрешение.

Такие расчеты показывают разнообразные структуры сечений.

История : тонкая структура в ^{16}O

- Метод поглощения (пропускания) гамма – излучения синхротрона
 - Н.А. Бургов, Г.В. Данилян, Б.С. Долбилкин, Л.Е. Лазарева, Ф.А. Николаев Сечение поглощения гамма-квантов ядрами ^{16}O в области гигантского резонанса. ЖЭТФ, **1962**, Т. 43, № 1, Сс. 70-77.
 - Б.С. Долбилкин, В.И. Корин, Л.Е. Лазарева, Ф.А. Николаев Сечение поглощения гамма-квантов ядрами кислорода в интервале энергий 13, 5-22 МэВ. Письма в ЖЭТФ, **1965**. Т. 1, № 5. Сс. 47-53.
- Метод – тормозное излучение электронов
Ишханов и др. 1970

Тонкая структура ПДР в Pb208.

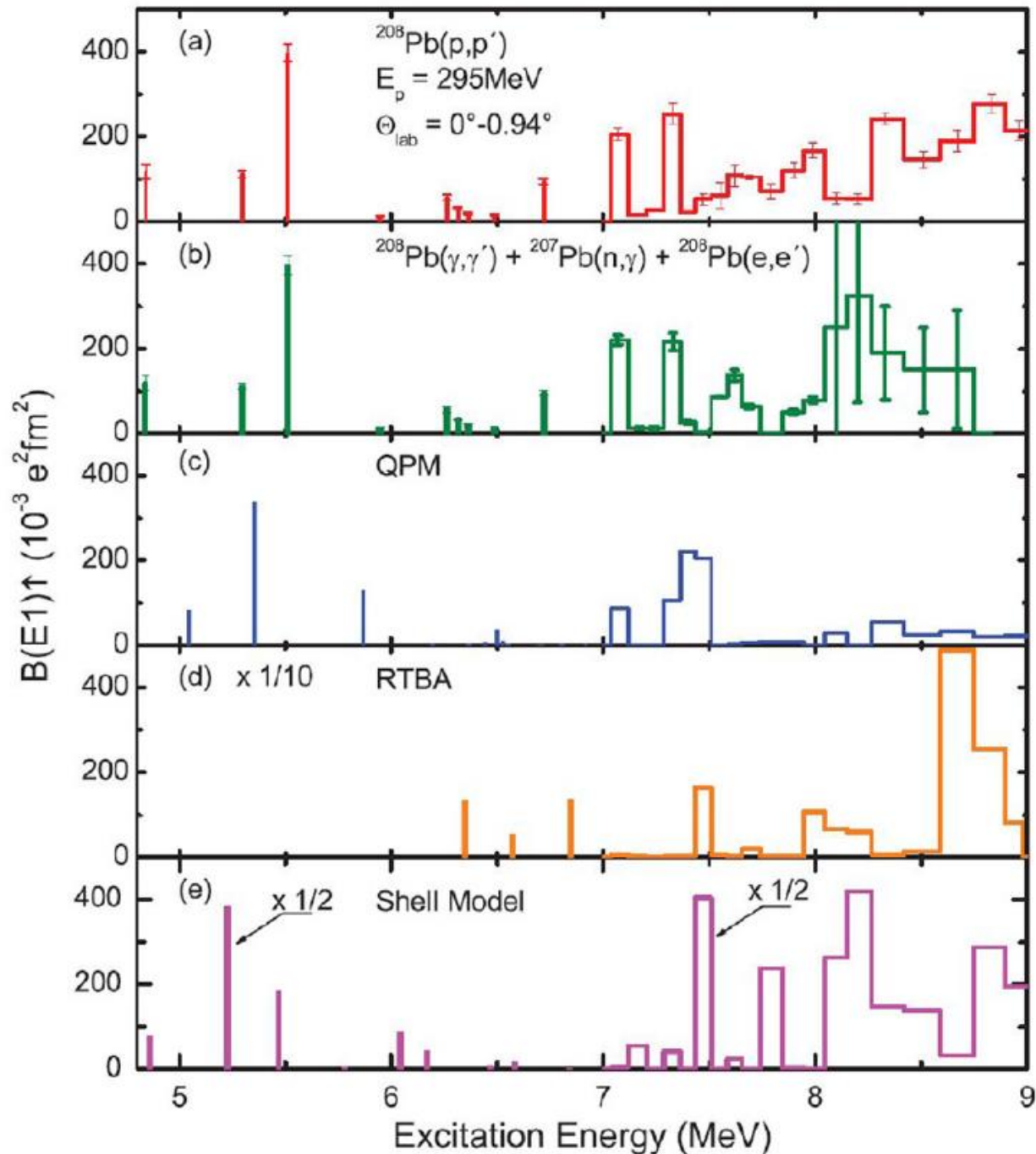


[S. Kamezdzhiev et. al. Phys. Rev. C55, 2101 (1997)]

Вверху: спектр реакции $^{208}\text{Pb}(p,p')$ в высоком разрешении ($\Delta E = 40 \text{ КэВ}$) при $E_p = 200 \text{ МэВ}$ и $Q_p = 8^\circ$ в области возбуждения GQ_0R . Передача импульса выбрана таким образом, чтобы усиливались **переходы E2**.

Середина: то же самое для реакции $^{208}\text{Pb}(e,e')$ при $E_e = 50 \text{ МэВ}$ и $Q_e = 93^\circ$.

Внизу: расчет силовой функции **B(E2)** с использованием обобщенной Теории Конечных Ферми –Систем



[P. von Neumann-Cosel and A. Tamii, Eur. Phys. J. A **55**, 110 (2019)]

Распределение силы $B(E1)$ в ^{208}Pb между 4-8 МэВ и 9 МэВ из экспериментов: (a) (p, p') , (b) (γ, γ') и (n, γ) в сравнении с теоретическими расчетами (c) QPM [1]. (d) RTBA [2] и (e) многочастичная модель [3].

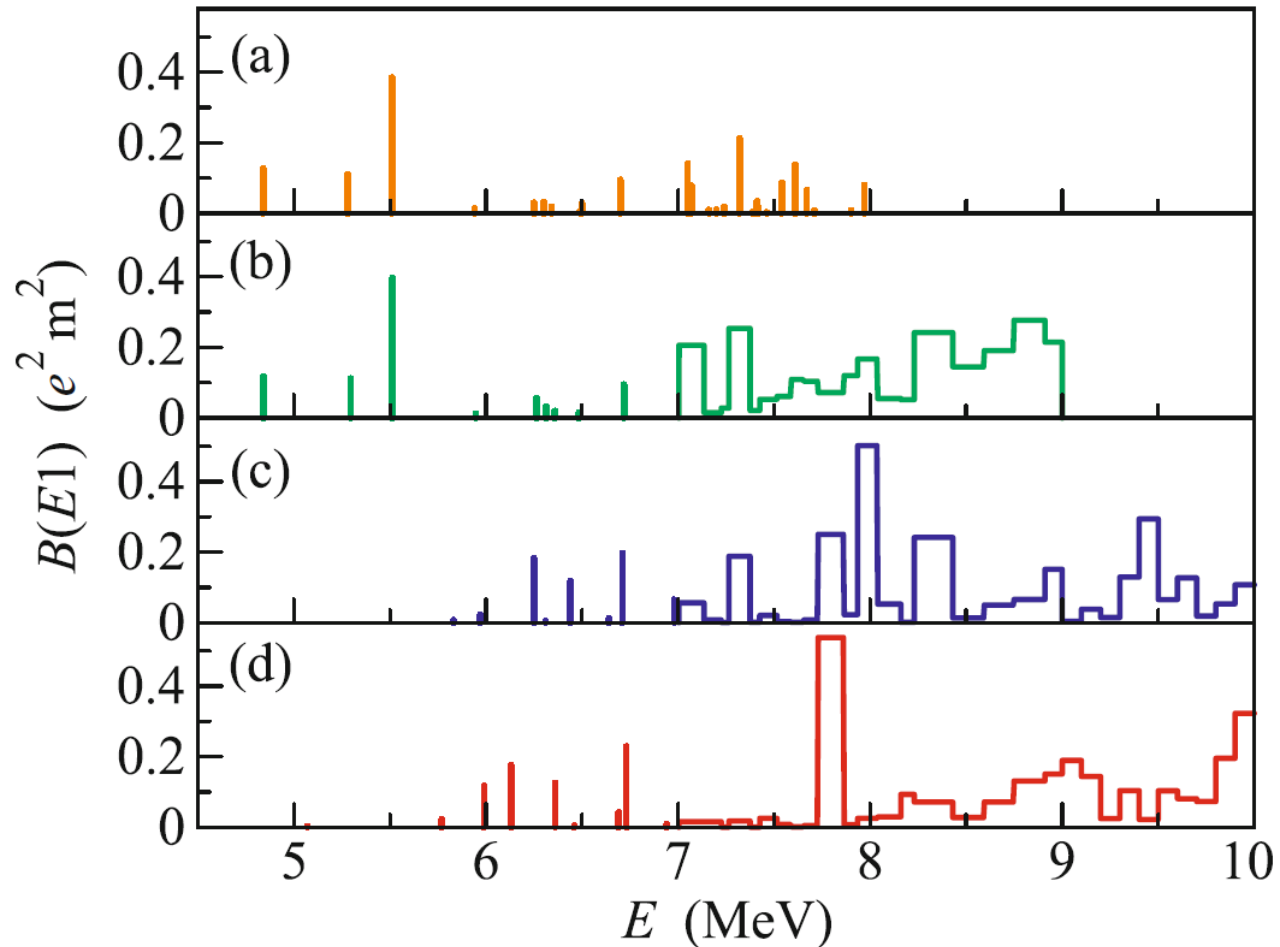
[1]. N. Ryezayeva et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 272502 (2002).

[2]. E. Litvinova, P. Ring, V.I. Tselyaev, Phys. Rev. C **75**, 064308 (2007).

[3]. R. Schwengner et al., Phys. Rev. C **81**, 054315 (2010).

Измеренные и рассчитанные спектры E1 возбуждений в ^{208}Pb в области ПДР-провал теории

Измеренные и рассчитанные спектры E1 возбуждений в ^{208}Pb в области ПДР- **провал теории**

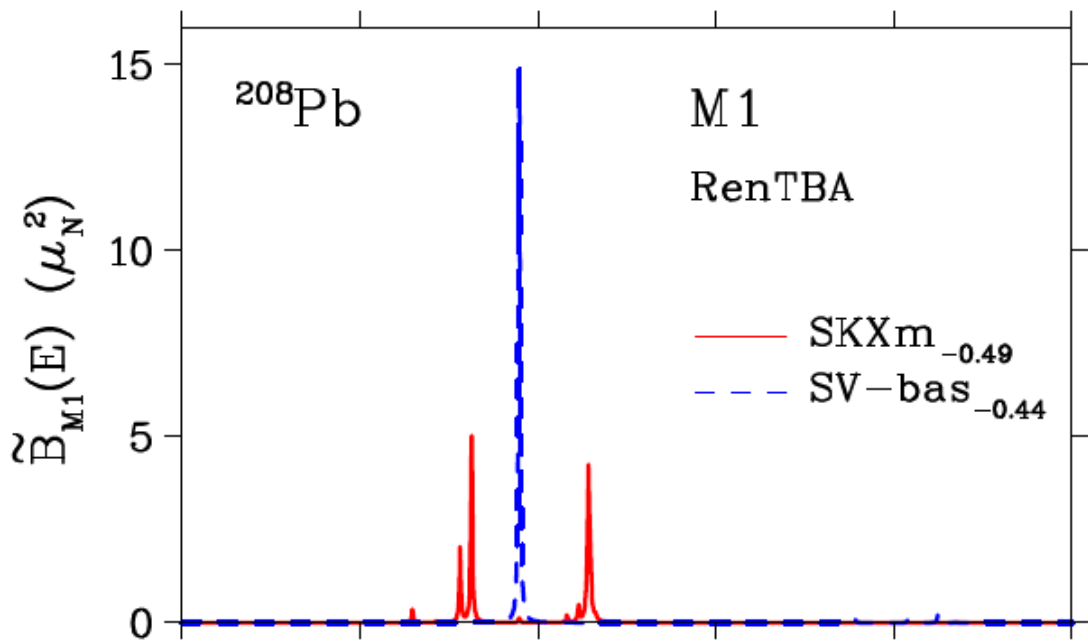


[N. A. Lyutorovich, V. I. Tselyaev, O. I. Achakovskiy, and S. P. Kamerdzhev, *JETP Letters*, 2018, Vol. 107, No. 11, pp. 659–664.] }

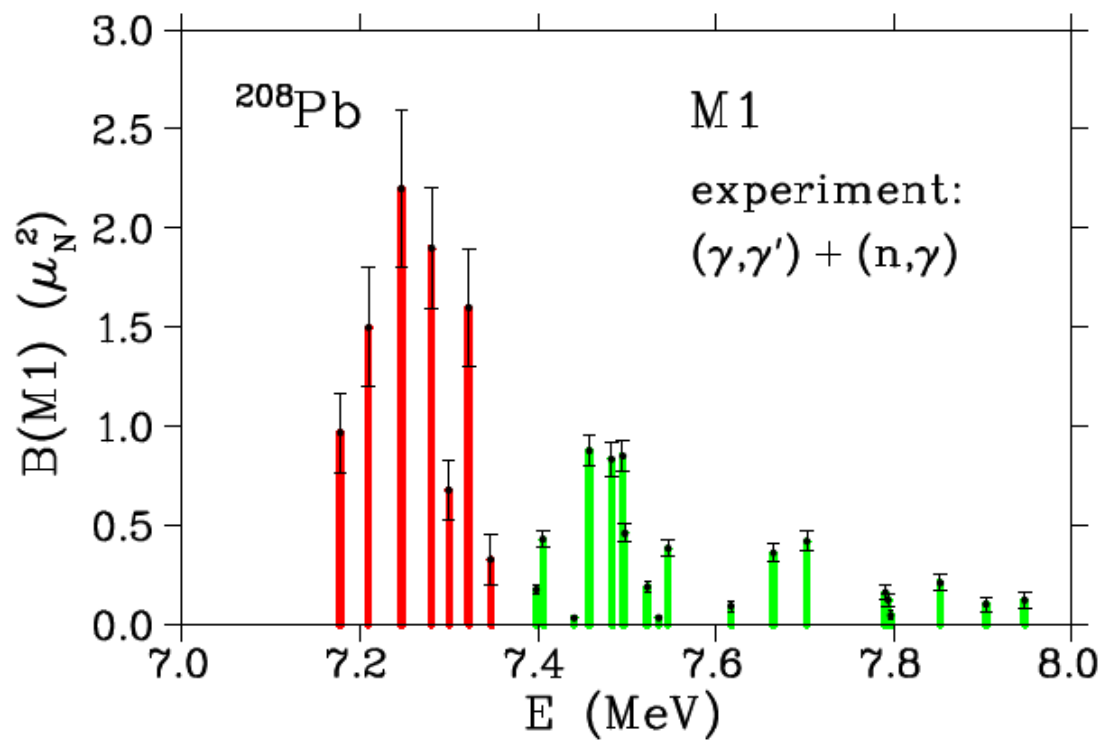
Эксперимент

(a)[N. Ryezayeva et al., *Phys. Rev. Lett.* 89, 272502 (2002)],
(b)[I. Poltoratska et al., *Phys. Rev. C* 85, 041304(R) (2012)].
(см. Обзор [Savran, Aumann, Zilges (2013)])

Расчет (c), (d) -два варианта новейшего самосогласованного метода временного блокирования с разными функционалами Скирма



Верхняя панель: распределения интенсивности возбуждений M1в ^{208}Pb , рассчитанные в рамках RenTBA с параметризациями SKXm $_{-0.49}$ (красная сплошная линия) и SV-bas $_{-0.44}$ (синяя пунктирная линия).Использовался параметр размазывания = 1 кэВ.



Нижняя панель: экспериментальное распределение вероятностей возбуждения B(M1) в ^{208}Pb в интервале 7-8 МэВ. [1][$^{208}\text{Pb}(\gamma, \gamma)$ реакция, красные вертикальные линии] и [2] [реакция $^{207}\text{Pb}(n, \gamma)$,зеленые вертикальные линии]. Полосы ошибок обозначены черными линиями.

1. [T. Shizuma et. al. Phys. Rev. C 78, 061303(R) (2008).]

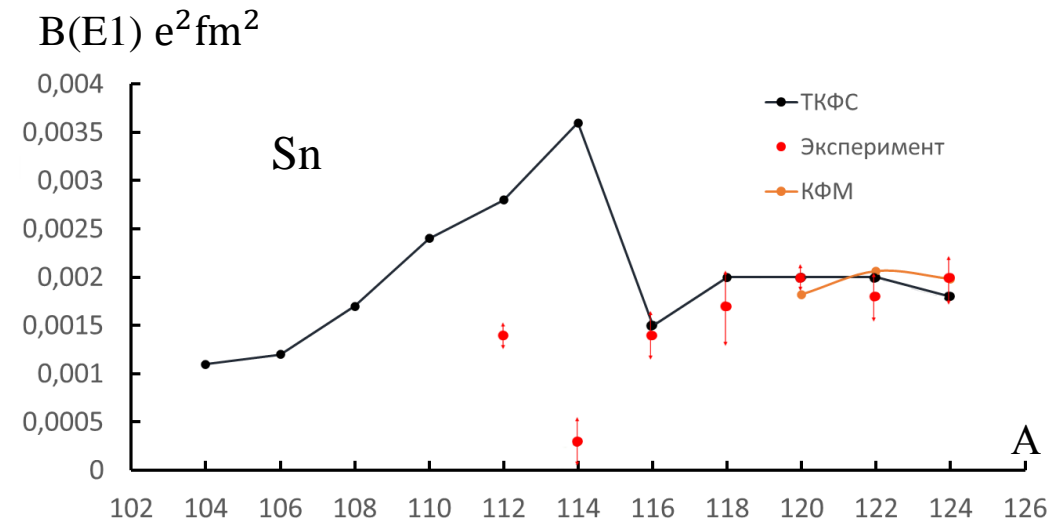
2. [R. Köhler et. al. , Phys. Rev. C **35**, 1646 (1987).]

PHYSICAL REVIEW C **102**, 064319 (2020)

M1 resonance in ^{208}Pb within the self-consistent phonon-coupling model

V. Tselyaev * and N. Lyutorovich, J. Speth, P.-G. Reinhard

Самосогласованные расчеты характеристик фононов и вероятностей E1- переходов в обобщенной ТКФС

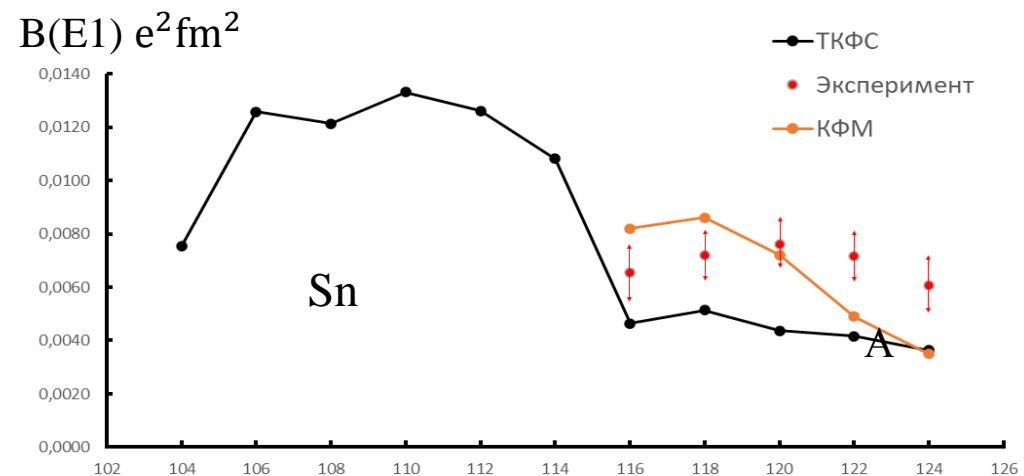


Приведенные вероятности переходов $B(E1)(3_1^- \rightarrow 2_1^+)e^2 fm^2$

Теория ТКФС: М.И. Шитов, С.П Камерджиев, С.В. Толоконников, Письма в ЖЭТФ **117**, 3 (2023).

Теория КФМ: N. Tsoneva, H. Lenske, and Ch. Stoyanov, Phys. Lett. B **586**, 213 (2004).

Эксперимент для $^{124-116}Sn$: L.I. Govor et. al, Sov. J. Nucl. Phys. **54**, 196 (1991). Для $^{112,114}Sn$: R. Wirowski et. al., Nucl. Phys. A **586**, 427 (1995).



Приведенные вероятности двухфононных переходов $B(E1)([3_1^- \times 2_1^+]_{1^-} \rightarrow 0^+)e^2 fm^2$

ТКФС - Готовится к публикации.

Экспериментальные данные и расчеты в КФМ: J. Bryssinck, et al., Phys. Rev. C **59**, 1930 (1999).

Самосогласованные микроскопические расчеты радиационных силовых функций

Радиационная силовая функция (РСФ)

- РСФ описывает среднюю силу электромагнитных переходов – в частности, переход в квазиконтинуум при высоких энергиях возбуждения и включает переходы между возбужденными состояниями.

$$f_{E1}^{\uparrow}(E_{\gamma}) = \frac{\langle \Gamma_{i \rightarrow g.s.} \rangle \rho(E_i)}{E_{\gamma}^3}$$

- **Фотопоглощение** $f_{E1}^{\downarrow}(E_{\gamma}) = \frac{\sigma_{abs}(E_i)}{3(\pi\hbar c)^2 E_{\gamma}}$

- Гипотеза Бринка-Акселя:
силовая функция не зависит от энергии возбуждения.

- Принцип детального баланса:
силовая функция для возбуждения равна силовой функции для снятия возбуждения.

$$f_{E1}^{\uparrow}(E_{\gamma}) = f_{E1}^{\downarrow}(E_{\gamma}) = \frac{\sigma_{abs}(E_{\gamma})}{3(\pi\hbar c)^2 E_{\gamma}}$$

Программные комплексы EMPIRE и TALYS позволяют считать ВСЕ характеристики ядерных реакций, если известны РСФ! Оказалось, что учет связи с фонами в РСФ необходим для объяснения экспериментальных данных

Самосогласованная Обобщенная теория конечных ферми систем в приближении КПВБ (квазичастичное приближение временного блокирования)

ОТКФС(КПВБ) включает:

1. (К)МХФ
2. Связь с фононами
3. Одночастичный континуум

и использует хорошо известные силы Скирма
(например, с параметрами $SLy4$)

Нет новых параметров!

Kamerdzhiev *et al.*, Phys. Rep. 393, 1, (2004)

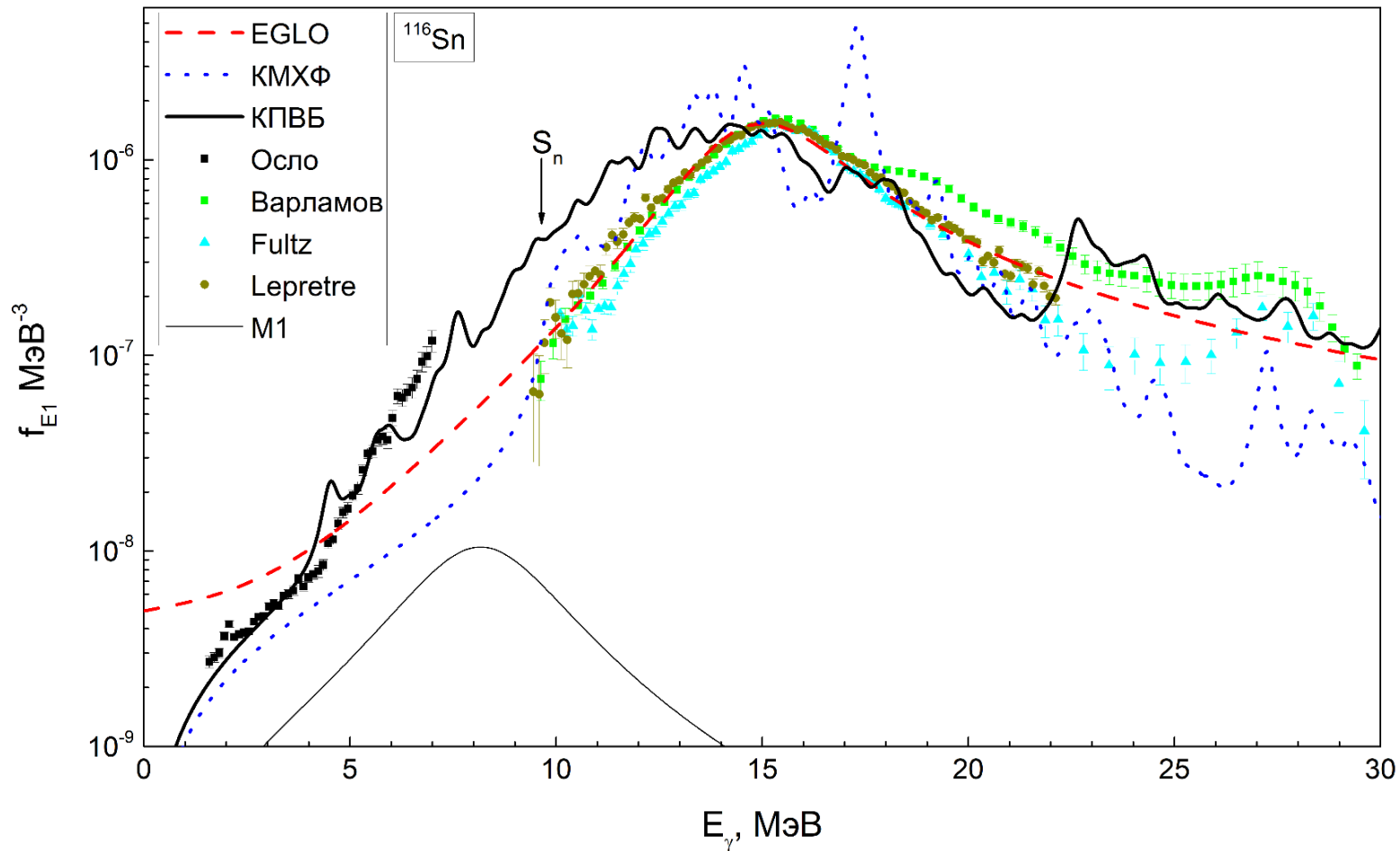
Tselyaev, Rhys. Rev. C 75, 024306 (2007)

Avdeenkov *et al.*, Phys. Rev. C 83, 064316 (2011)

Achakovskiy *et al.*, Phys. Rev. C **91**, 034620 (2015)

Kamerdzhiev *et al.*, JETP Lett., **101**, 725 (2015)

Самосогласованные расчеты РСФ (^{116}Sn)



Параметр усреднения -
200 кэВ

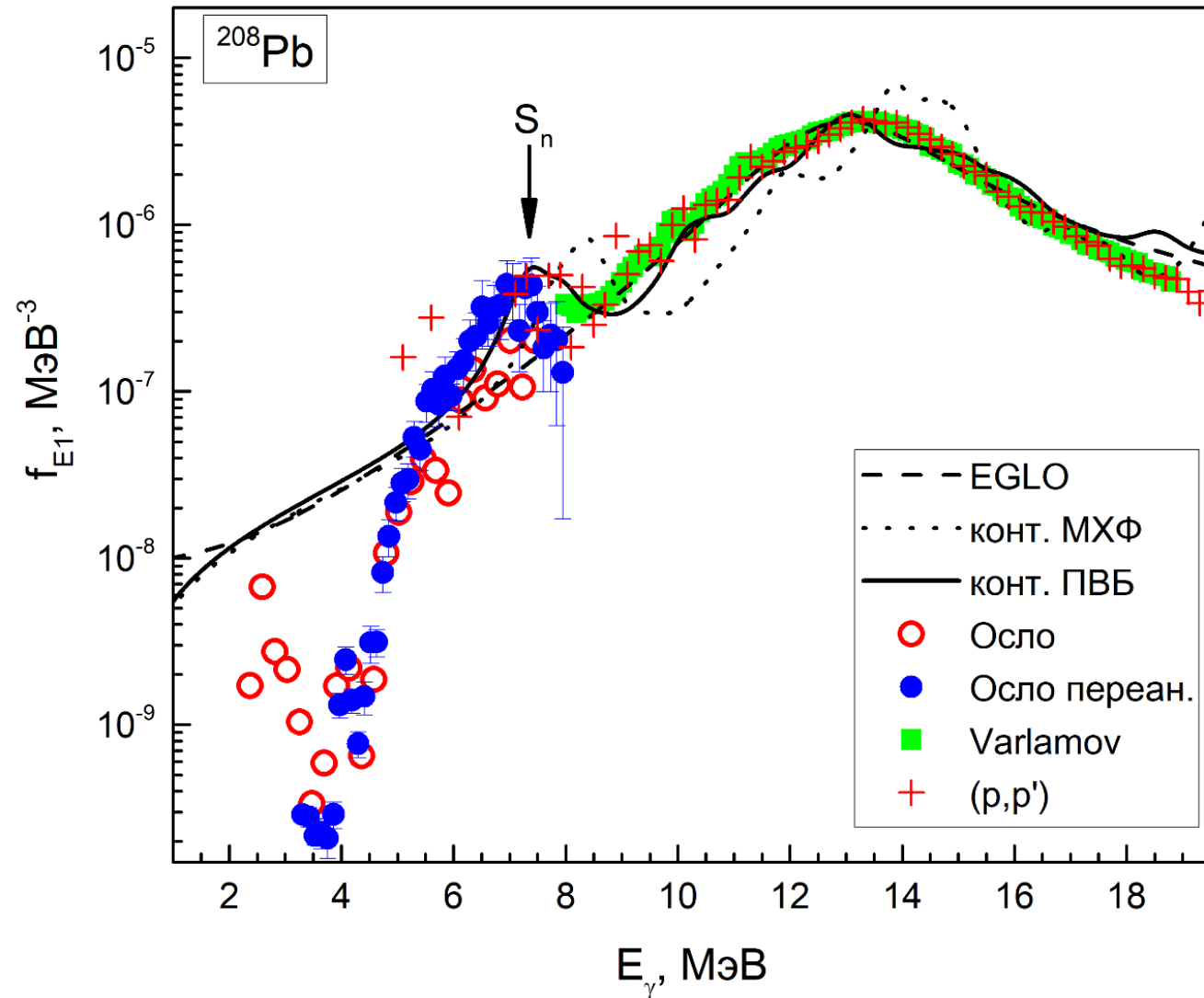
Экспериментальные данные:

H. K. Toft *et al.*, PRC **81**, 064311 (2010);

Varlamov *et al.*, Vop. At. Nauki i Tekhn., Ser. Yad. Kons. 1-2 (2003);

Fultz *et al.*, Phys. Rev. **186**, 1255 (1969); Lepretre *et al.*, Nucl. Phys. A**219**, 39 (1974);

РСФ для ^{208}Pb



Новый (по сравнению с КПВБ)
микроскопический метод для дважды
магических ядер – континуумное ПVB:
N. Lyutorovich, V. Tselyaev *et al.*, Phys. Lett
B **749**, 292 (2015)

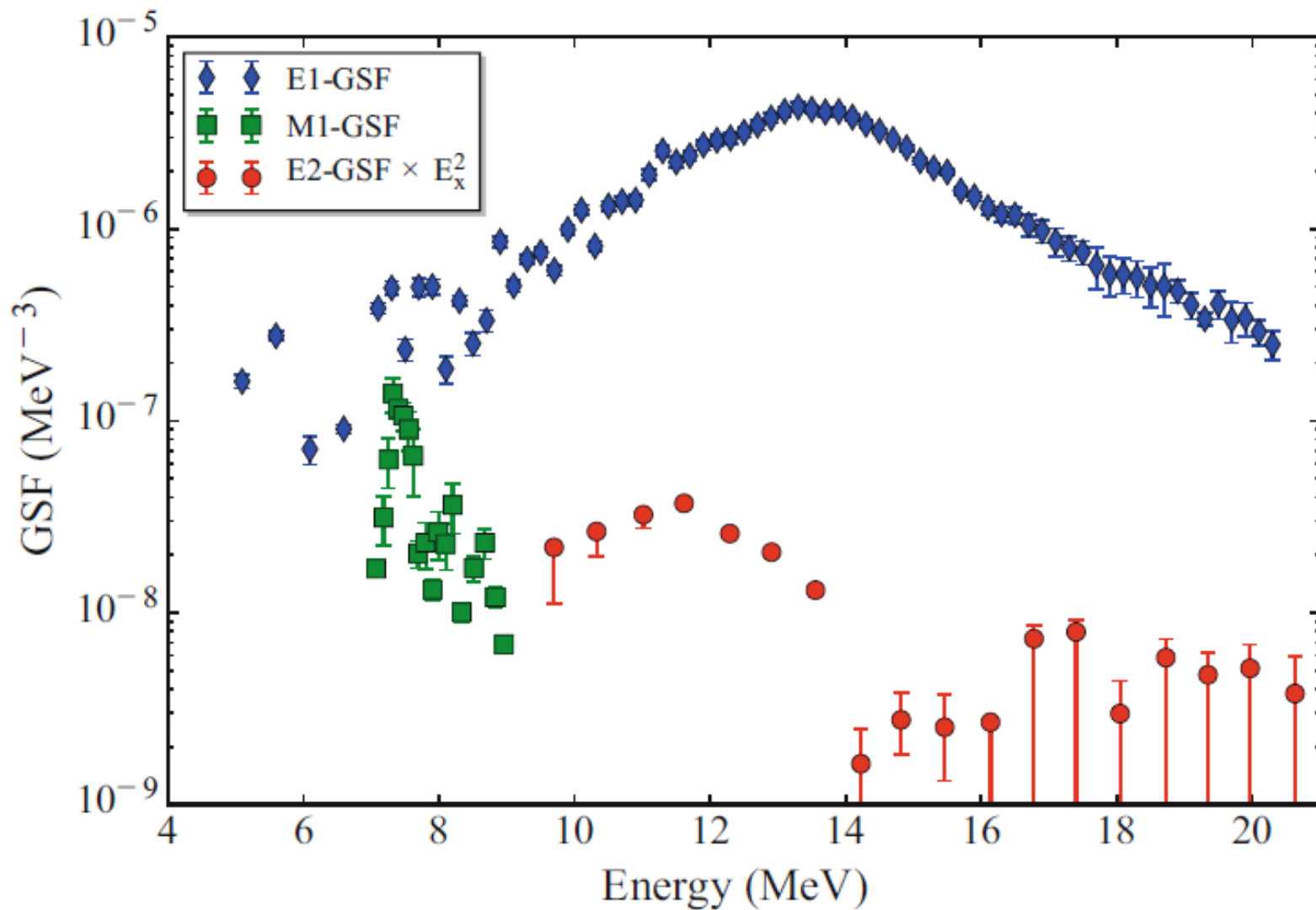
$$S_n = 7.37 \text{ MeV} \quad \Delta = 400 \text{ keV}$$

Улучшенный подход описывает
переанализированные данные
лучше при $E > 5 \text{ MeV}$

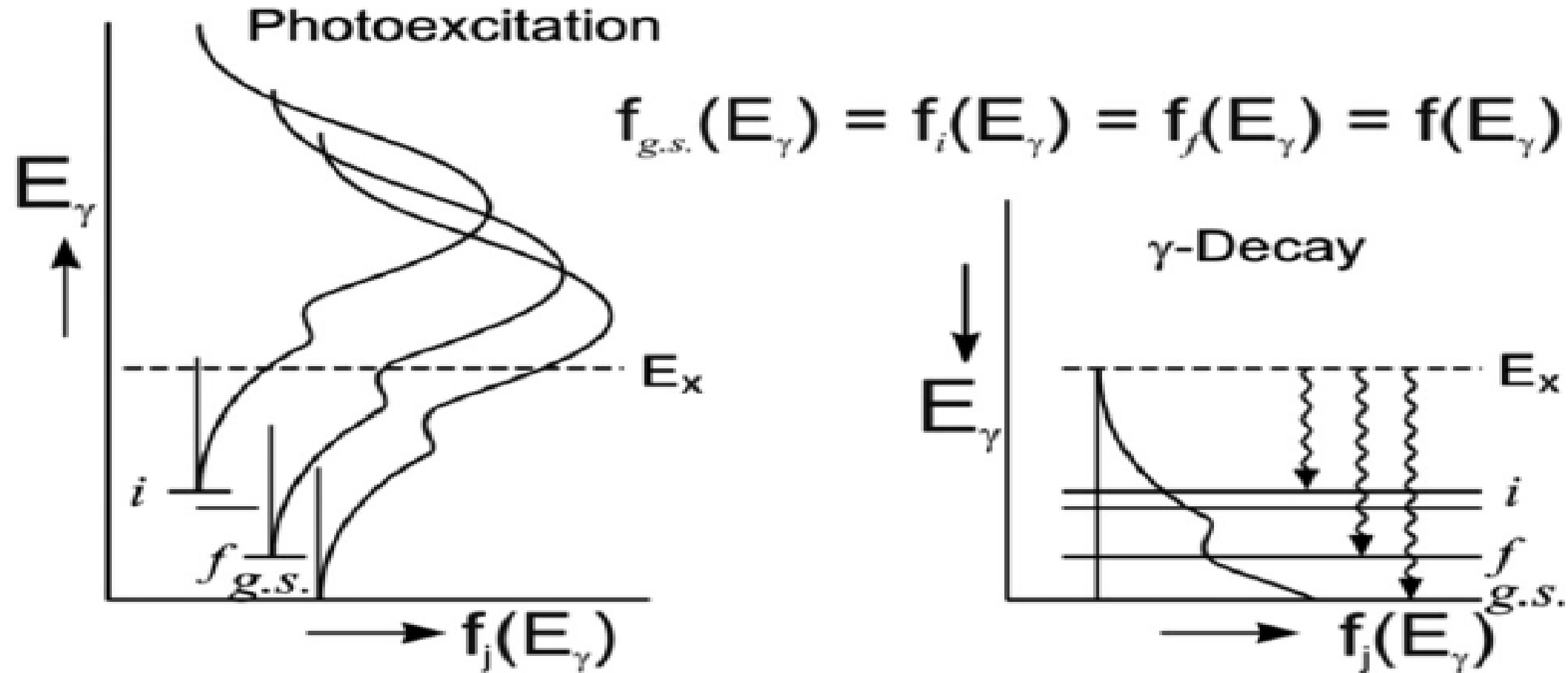
Экспериментальные данные:

Группа Осло - N.U.H.Syed *et al.*, PRC **79**, 024316
(2009), private communication (reanalyzed data)
V. V. Varlamov, *et al.*, Vop. At. Nauki i Tekhn., Ser.
Yadernye Konstanty 1-2 (2003)

Сравнение вклада E1, M1 и E2 в радиационную силовую функцию ^{208}Pb .



Гипотеза Бринка-Акселя (иллюстрация)



Что касается силы низколежащих E1 в области ПДР, то справедливость гипотезы Бринка-Акселя далеко не очевидна при сравнении результатов метода Осло с данными фотопоглощения.

[P. von Neumann-Cosel and A. Tamii, Eur. Phys. J. A **55**, 110 (2019)]

Спасибо за внимание !