

"Пигми- и гигантские мультипольные резонансы ядер - результаты, возможности и перспективы теории"

С.П. Камерджиев, Н.А. Люторович, В.И.Целяев, М.И. Шитов
НИЦ "Курчатовский Институт", Санк-Петербургский Государственный Университет

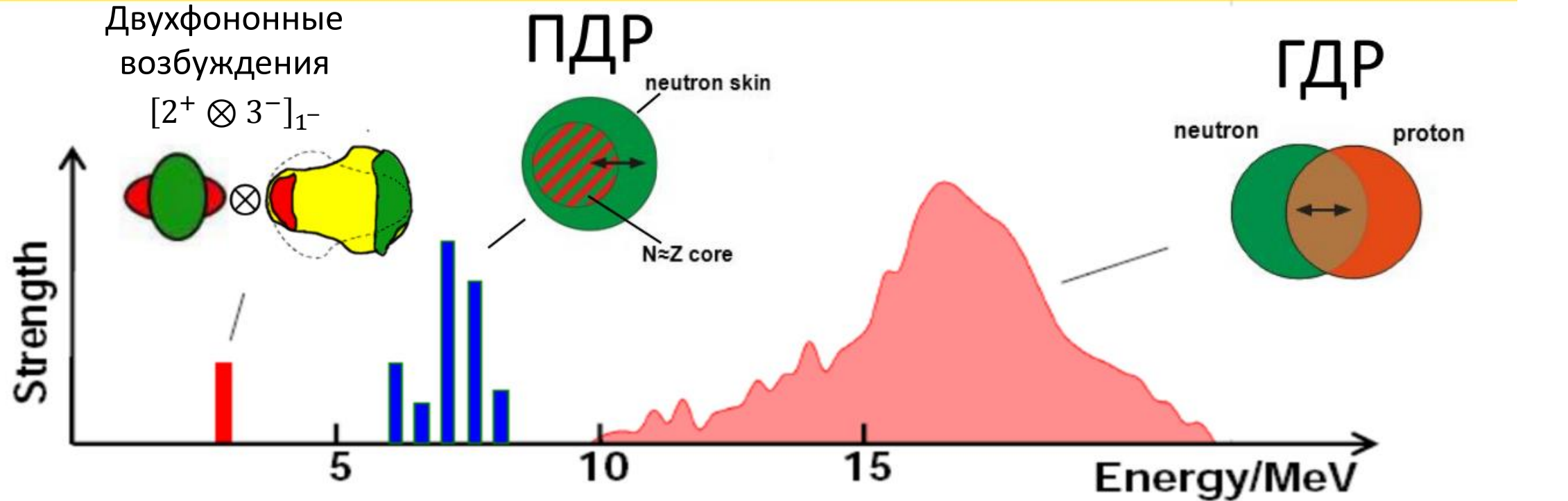
Новосибирск, 20-21.03.2023

План

1. Общее состояние: «Вызовы» и «Ответы» теории
2. Рез-ты совр. микроскоп. расчетов ПДР и ГМР в магических ядрах
 - интегральные характеристики
 - тонкая структура
3. Расчеты переходов между возбужденными состояниями
4. Что делать ?!

Расчеты E1 резонансов

Electric Dipole Strength in Nuclei



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

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

Наиболее интересное:

современная ядерная спектроскопия (1-5МэВ),

пигми- и гигантские мультипольные резонансы (ПДР, ГМР),

астрофизика, где требуются данные о **8000** нуклидов.

«Ренессанс физики ПДР и ГМР» в 80-х - 90-х г.:

M. N. Harakeh and A. van der Woude, *Giant Resonances:*

Fundamental High-Frequency Modes of Nuclear Excitation (Oxford University Press, Oxford, 2001).

Зачем это нужно?: «Вызовы»

-- эксперименты по тонкой структуре ПДР (и ГМР?),

----«сосуществование форм» ядра (сплюснутая, вытянутая в области (1-5МэВ) !),

-----характеристики ПДР, ГМР

-- **предсказательность теории**

-- «ядерные данные» в реакторах и астрофизике

«детальность» теории, напр., для тонкой структуры ПДР и ГМР

«Ответ» теории:

-- самосогласование :

1) среднее поле (основное состояние) определяется первой производной энергетического функционала плотности,

2) эффективное pp - и pn -взаимодействие определяется второй производной функционала .

Это обеспечивает применение ко всем ядрам и описание ядерных характеристик с минимальным числом параметров

-- учет квазичастично-фононного взаимодействия , т.е. выход за рамки стандартного «метода хаотических фаз»

В рамках самосогласованного метода функций Грина в последние годы активно развивались **микроскопические методы**, основанные на **приближении временной блокировки (ПВБ = TBA = time blocking approximation)**, которое является обобщением стандартного метода хаотических фаз, включающим взаимодействие (квази)частиц с фононами, **т.е. включающим конфигурации типа $1p1h + 1p1h \times \text{phonon}$** как для магических ядер, так и для ядер со спариванием:

CTBA = TBA + single-particle continuum: учет эффектов континуума важен в случае легких и экзотических ядер;

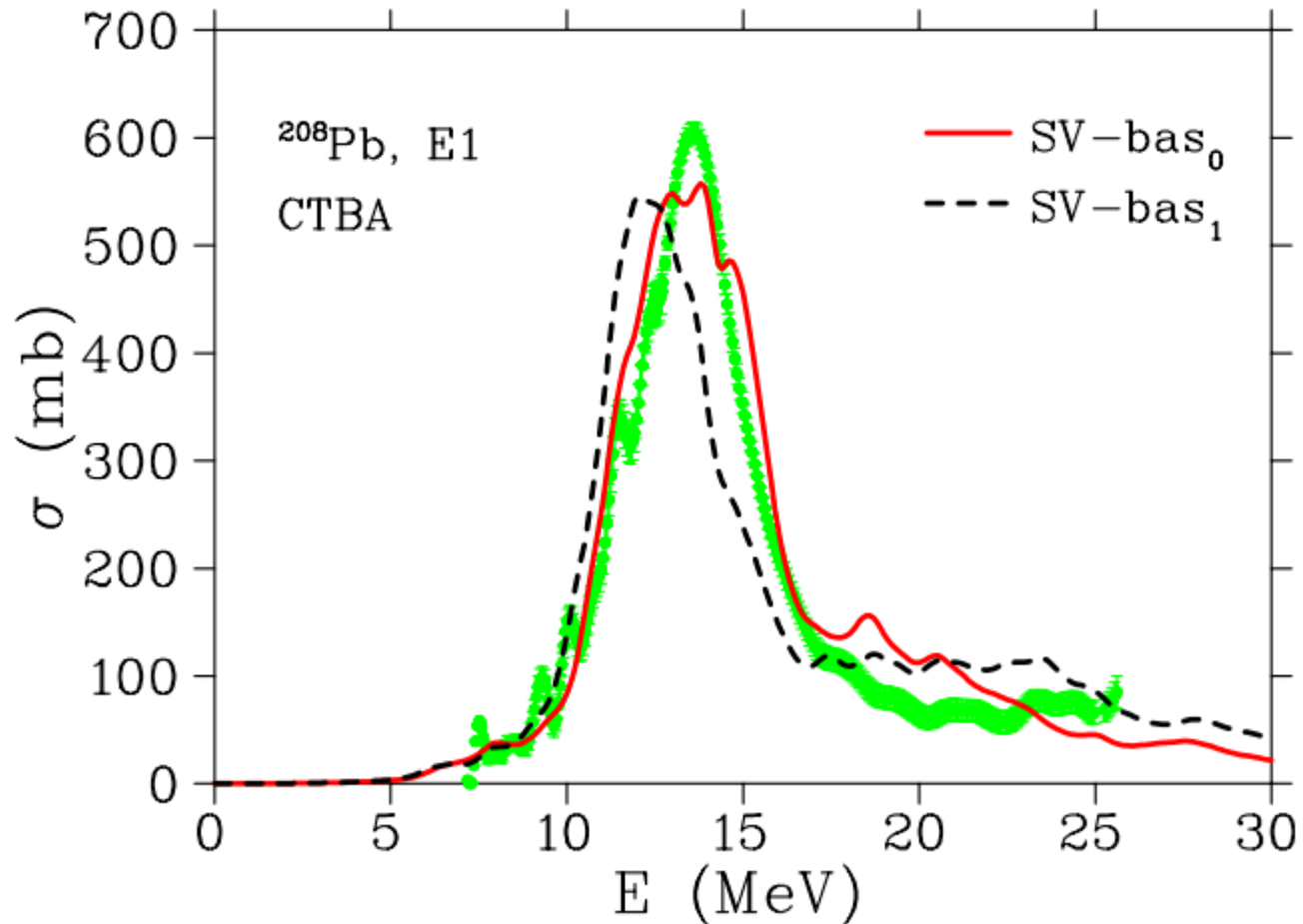
Self-consistent (C)TBA (основанное на энергетическом функционале плотности Скирма);

RenTBA (renormalized (C)TBA): нелинейное расширение ПВБ, в котором фононы определяются системой нелинейных уравнений;

QTBA (quasiparticle TBA): ПВБ для ядер со спариванием;

RQTBA (relativistic QTBA): self-consistent QTBA, основанное на релятивистском энергетическом функционале плотности.

Гигантский дипольный резонанс в ^{208}Pb в самосогласованной модели



Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 11, с. 699 – 704 с 2018 г.

Н.А.Люторович, В.И.Целяев, О.И.Ачаковский,
С.П.Камерджиев

Рис. 2. Сечение фотопоглощения в ^{208}Pb , рассчитанное в рамках СТВА с силами Скирма SV-bas0 (сплошная красная линия) и SV-bas1 (штрихо-вая черная линия). Параметр энергетического усреднения = 400 кэВ.

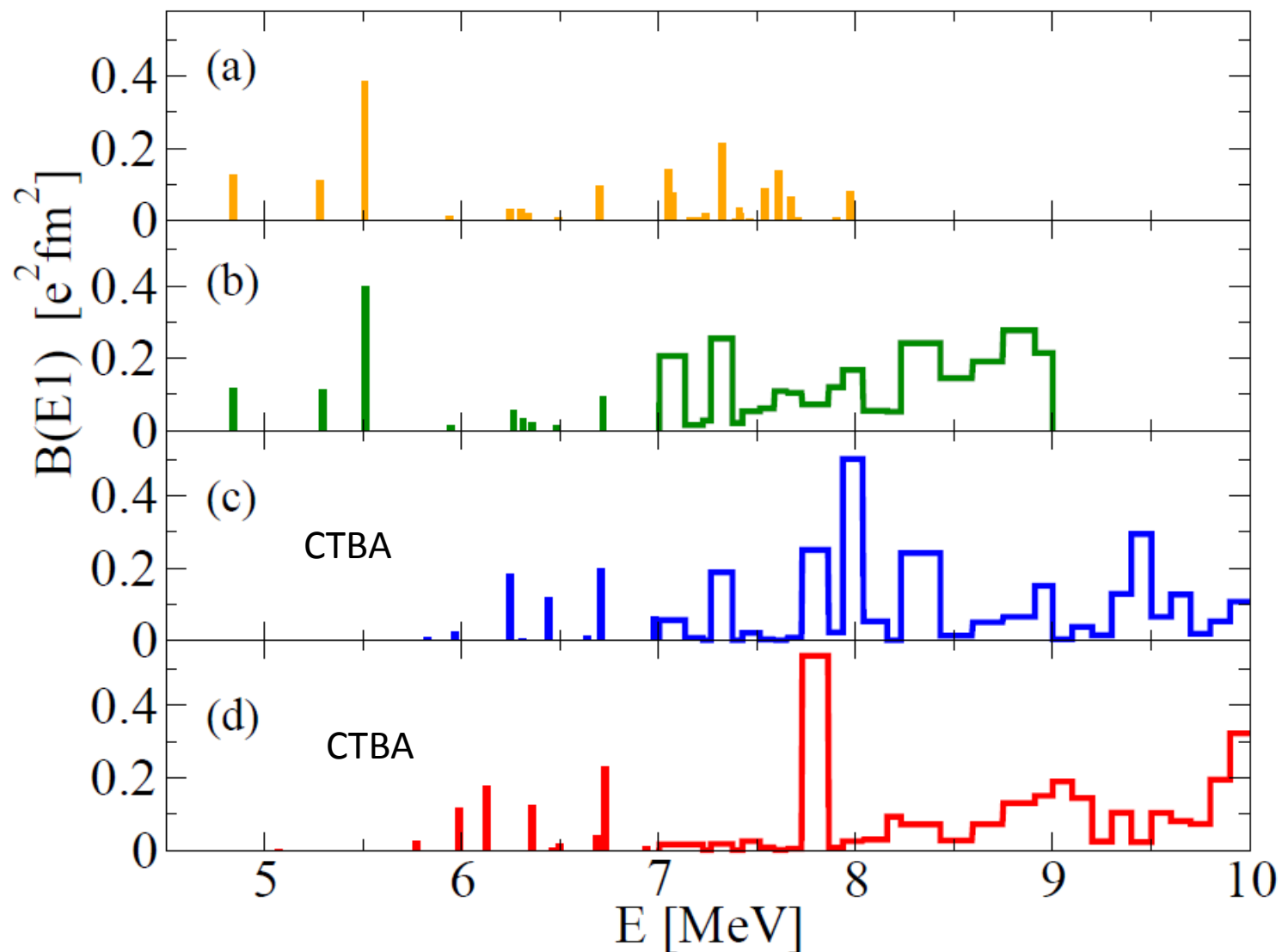
Экспериментальные данные из работы показаны зелеными точками :

S.N. Belyaev, O.V. Vasiliev, V.V. Voronov, A.A. Nechkin, V.Y. Ponomarev, and V.A. Semenov, Phys. At. Nucl. 58, 1833 (1995).

Тонкая структура пигми-дипольного резонанса в ^{208}Pb

Н.А.Люторович, В.И.Целяев,
О.И.Ачаковский, С.П.Камерджиев
Письма в ЖЭТФ, том 107, вып. 11,
с. 699 – 704 с 2018 г.

Тонкая структура и
коллективность уровней
пигми-дипольного резонанса
в ^{208}Pb в самосогласованной
модели



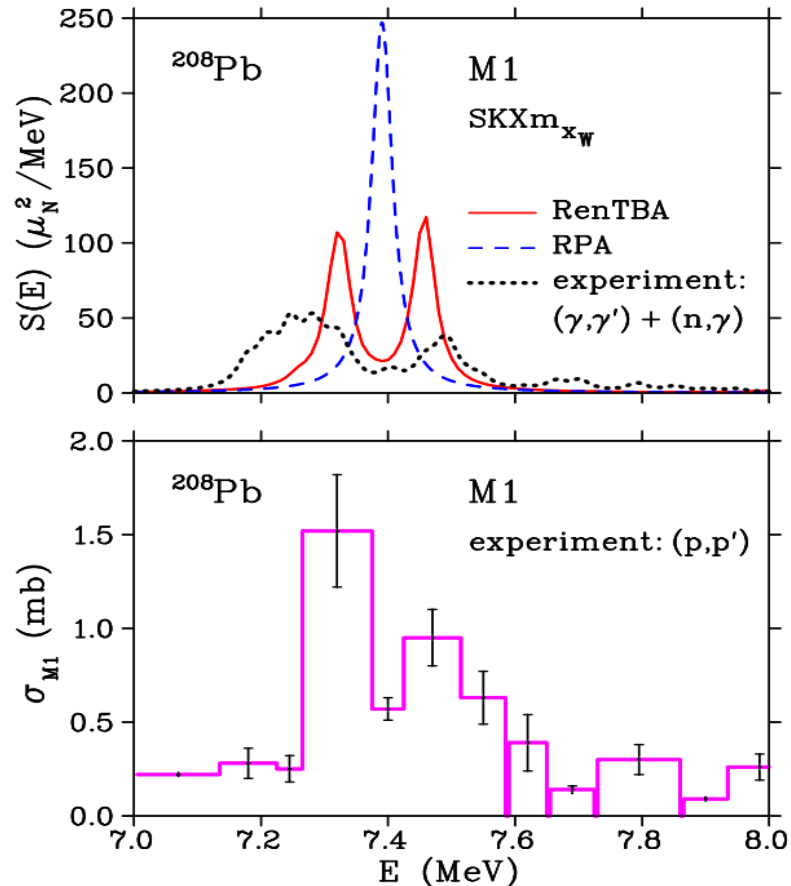
Эксперимент (b): PP^{\prime} (2012)

Эксперимент (a): γ, γ^{\prime} (2002)

Современные расчеты изовекторного M1 резонанса в ^{208}Pb , сравнение с экспериментом

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

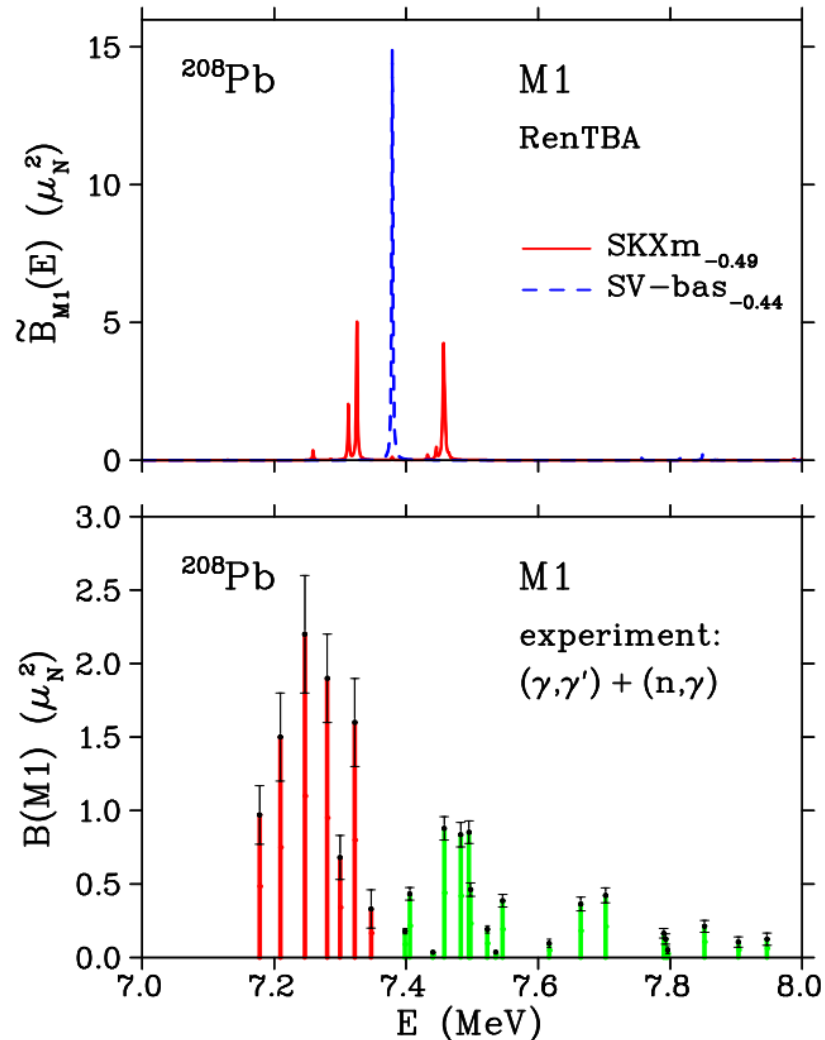
V. Tselyaev, N. Lyutorovich, J. Speth, P.-G. Reinhard



Upper panel: strength distributions of the $M1$ excitations in ^{208}Pb calculated within the RenTBA with parametrization SKXm-0.49 (red solid line) and within the RPA with parametrization SKXm-0.54 (blue dashed line). The black dotted line represents the strength function obtained from the experimental data. The smearing parameter = 20 keV was used.

Lower panel: the partial $M1$ cross section σ_{M1} of the ^{208}Pb (p, p') reaction from Ref. [Poltoratska et al., 2012].

Тонкая структура изовекторного M1 резонанса в ^{208}Pb



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

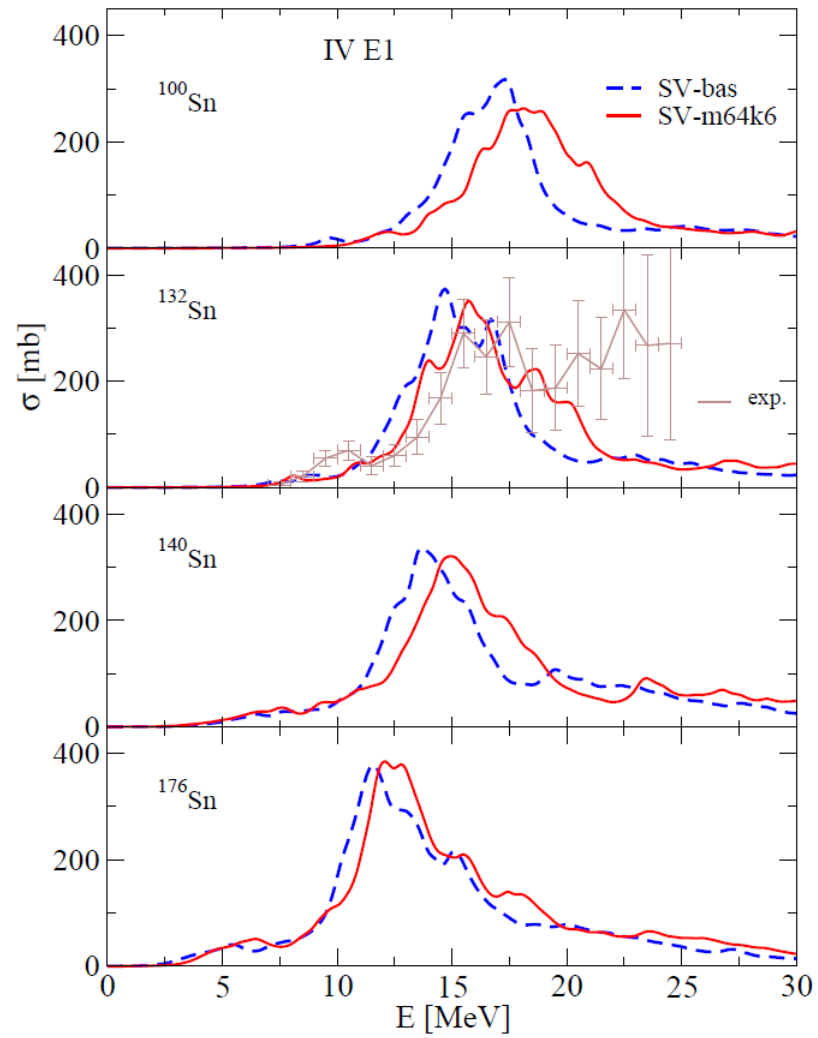
V. Tselyaev, N. Lyutorovich, J. Speth, P.-G. Reinhard

Upper panel: strength distributions of the $M1$ excitations in ^{208}Pb calculated within the RenTBA with parametrizations SKXm-0.49 (red solid line) and SV-bas-0.44 (blue dashed line). The smearing parameter = 1 keV was used.

Lower panel: experimental distribution of the excitation probabilities $B(M1)$ in ^{208}Pb in the interval 7–8 MeV from $^{208}\text{Pb}(\gamma, \gamma')$ reaction, red vertical lines, and $^{207}\text{Pb}(n, \gamma)$ reaction, green vertical lines.

The error bars are indicated by the black lines.

Самосогласованные расчеты ГДР в экзотических ядрах



PHYSICAL REVIEW C **98**, 054304 (2018)

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

Эксперимент в Sn:

P. Adrich, A. Klimkiewicz, M. Fallot, K. Boretzky,

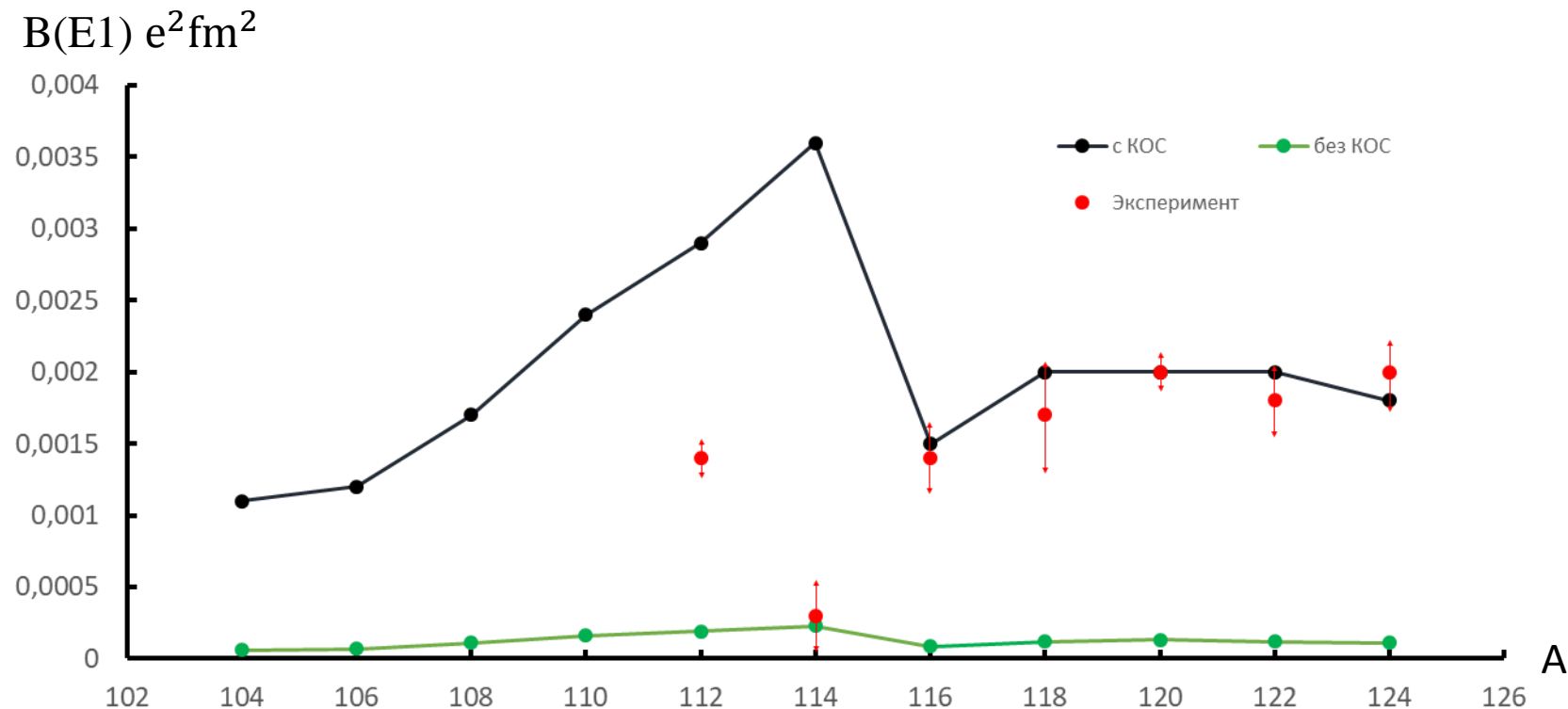
T. Aumann et al.,

Rev. Lett. **95**, 132501 (2005).

[59] M. N. Harakeh and A. van der Woude, *Giant Resonances: Fundamental High-Frequency Modes of Nuclear Excitation* (Oxford University Press, Oxford, 2001).

Вероятности переходов между низколежащими однофононными состояниями:

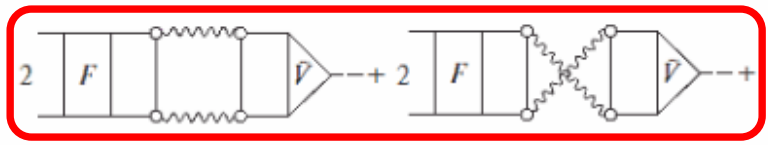
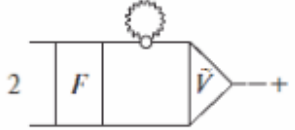
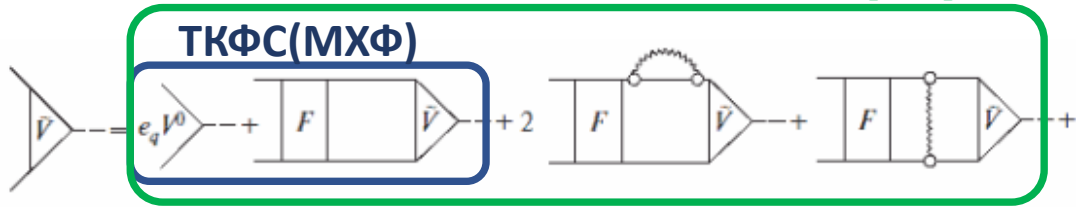
- Приведенные вероятности переходов $B(E1) (3_1^- \rightarrow 2_1^+) e^2 fm^2$ в изотопах Sn



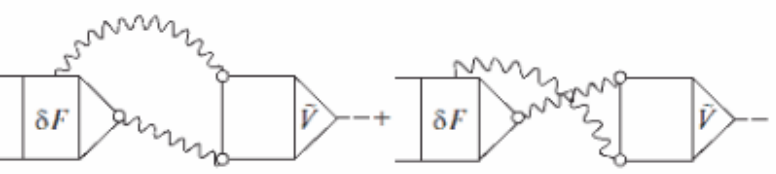
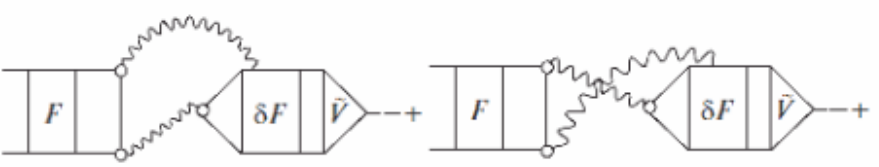
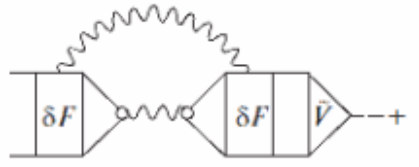
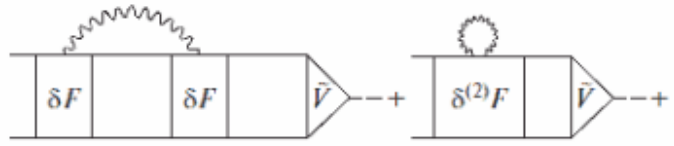
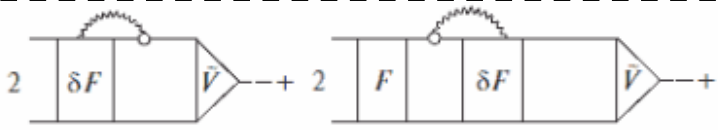
М. I. Shitov et al. Physics of Atomic Nuclei **85**, 42 (2022).

М.И. Шитов, С.П.Камерджиев, «Письма в ЖЭТФ», **117**, 1 (2023)

ТКФС(МХФ)



Двухфононные конфигурации



1
2
3
4
5
6
7
8

Уравнение для новой вершины- обобщение ТКФС А.Б. Мигдала:

[Камерджиев, Шитов EPJA,56(2020);
ЯФ84№5(2021);ЯФ84№6(2021); ЯФ85№5(2021)]

Полученные результаты включают в себя предыдущие подходы, и дополняют их рядом новых эффектов:

- **Динамический эффект тэдпола** в строке 2
- Графики отвечающие **новым двухфононным конфигурациям**, строка 3
- Многочисленные и новые эффекты **корреляций в основном состоянии**
- Все графики в линиях 4-8 представляют собой новые члены по сравнению с Приближением Временной Блокировки(ПВБ).
- Графики в линиях 4 и 5 содержат поправки порядка g^2 , обеспечивая появление **новых 1р1h-фонон-конфигураций**.
- Графики в линиях 6-8 содержат двухфононные конфигурации, и пропорциональны g^4 .
- Все графики в строках 4-8 содержат члены, пропорциональные δF , $(\delta F)^2$ или $\delta^{(2)}F$. Которое может быть выражено в терминах амплитуды **трехквазичастичного эффективного взаимодействия W**:
$$\delta_s F = W G g_s G$$
- Как известно роль этого взаимодействия невелика, так что мы можем полагать что количественная роль слагаемых в строках 4-8 невелика.

Мигдал А. Б. Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер. (1965).

1. Kamerdzhev S. P., Tkachev V. N. , Physics Letters B **142**, 225 (1984)
2. Tselyaev V. I. , Physical Review C **75** P. 024306 (2007)—QTBA (ПВБ)

Заключение

Выводы

Современные самосогласованные подходы:

- Хорошо предсказывают и объясняют интегральные характеристики ПДР и ГМР
- Плохо объясняют детали и многообразие физических явлений в области ПДР, изученное в ядерной гидродинамике

Видимо, плохо или кустарно объясняют «shape coexistence» в области энергий возбуждения 2-4 МэВ

- Несмотря на их быстрое развитие, не могут удовлетворительно объяснить тонкую структуру ПДР и ГМР

Что делать ?

-----Изучение тонкой структуры ПДР и МГР —это только начало !
Нужны эксперименты по тонкой структуре в области энергий как ПДР, так и (пока? для «Wavelet analysis») ГДР, т. е. эксперименты с хорошим (или очень хорошим) разрешением

-----Важно изучение низко-энергетических переходов между возбужденными состояниями

-----Развитие теории ПДР и МГР важно прежде всего для астрофизики и также для уточнения ядерных данных в ядерно-физических установках

----Теория есть («в принципе» !), но расчетов мало ! Нужны студенты

- **Не надо экономить на теоретиках ! Они «окупятся» !**