

Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского

Войтенков Дмитрий Александрович

Семинар НИИЯФ МГУ по материалам диссертация на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук

**Самосогласованные микроскопические расчеты характеристик
основного и низкоэнергетических возбужденных состояний
сферических ядер**

Специальность: 01.04.16 – «физика атомного ядра и элементарных частиц»

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, профессор Камерджиев С. П.

Москва 09.02.2016

Актуальность работы

- Самосогласованные расчеты квадрупольных моментов нечетных ядер в основном и возбужденном состоянии с учетом взаимодействия между квазичастицами весьма актуальны для стабильных ядер, где имеется большое количество экспериментальных данных.
- Расчет квадрупольных моментов в возбужденном состоянии – представляет большой самостоятельный интерес по двум причинам. Во-первых, в настоящее время имеется большое количество данных для статических моментов в возбужденном состоянии, которые требуют современного микроскопического описания. Во-вторых, эта задача содержит корреляции в основном состоянии, которые в отличие от обычных корреляций в QRPA специально не изучались. Задача расчета квадрупольных моментов в возбужденных состояниях, решаемая в данной работе, является простейшим и очень важным (диагональным) случаем для расчета переходов между возбужденными состояниями.
- Современная теория многих тел позволяет учесть эффекты фононного тэдпола для улучшения Обобщенной ТКФС.

Цель исследования

- микроскопическое самосогласованное описание с использованием современных методов теории многих тел квадрупольных моментов нечетных и нечетно-нечетных сферических ядер в основном состоянии, характеристик первых 2^+ уровней и их квадрупольных моментов в четно-четных сферических ядрах и улучшение ОТКФС путем включения эффектов фононного тэдпола.

Задачи исследования

- ✓ Рассчитать квадрупольные моменты нечетных и нечетно-нечетных ядер в основном состоянии в рамках самосогласованной ТКФС на базе ЭФП Фаянса в рамках одноквазичастичного приближения для нечетных ядер (Глава 2).
- ✓ Рассчитать статические квадрупольные моменты в 2^+ состоянии в магических и немагических ядрах (Глава 3).
- ✓ Исследовать эффекты фононного тэдпола, т.е. всех g^2 - поправок в ОТКФС. (Глава 4).
- ✓ Оценить вклад КФВ в расчетах квадрупольных моментов, чтобы проверить правильность используемого расчетного метода (Глава 4).

Основные положения, выносимые на защиту:

- ✓ Объяснены имеющиеся экспериментальные данные для многих нечетных магических и полумагических ядер и предсказаны неизвестные значения квадрупольных моментов нечетных ядер в основном и возбужденном состоянии.
- ✓ С использованием полученных значений квадрупольных моментов нечетных ядер объяснены измеренные квадрупольные моменты нечетно-нечетных околомагических ядер в основном состоянии.
- ✓ Объяснены и предсказаны квадрупольные моменты первых 2^+ состояний четно-четных изотопов свинца и олова.
- ✓ Исследован вклад корреляций в основном состоянии в задачу о расчетах квадрупольных моментов первых 2^+ состояний в четных изотопах олова и свинца.

Основные положения, выносимые на защиту:

- ✓ Исследована роль фононного тэдпола, т.е. предпринята попытка улучшения ОТКФС
- ✓ Подтверждена поверхностная природа ядерного спаривания в задаче об энергии первых 2^+ уровней в четно-четных полумагических ядрах.

Научная новизна:

- ✓ Впервые в рамках единого самосогласованного подхода и с использованием хорошо известных ранее параметров ЭФП рассчитаны и предсказаны значения квадрупольных моментов многих как нечетных, так и нечетно-нечетных сферических ядер в основном состоянии и квадрупольные моменты возбужденных первых 2^+ состояний в полумагических ядрах.
- ✓ Показано, что величина квадрупольного момента первого 2^+ -состояния в четно-четных ядрах определяется двумя, примерно одинаковыми по величине эффектами – корреляциями в основном состоянии нового вида и эффектами ядерной среды. Впервые изучены эти корреляции и показан их большой количественный вклад в рассмотренные величины.
- ✓ Получены результаты, обобщающие ОТКФС на случай учета эффектов фононного тедпола. Выполнены оценки возможного вклада КФВ в величину квадрупольного момента нечетного ядра в основном состоянии, которые подтвердили правильность наших расчетов без учета КФВ.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на:

1. Международная конференция "Nuclear Structure and Related Topics" (NSRT09), г. Дубна, 30 июня – 4 июля 2009 г.
2. XII Международный Семинар по электромагнитным взаимодействиям ядер, г. Москва, 17 – 20 сентября 2009 г.
3. LX Международная конференция по ядерной физике «Ядро 2010. Методы ядерной физики для фемто- и нанотехнологий», г. Санкт-Петербург, Петергоф, 6 – 9 июля 2010 г.
4. Международная конференция "Nuclear Structure and Related Topics" (NSRT12), г. Дубна, 2 – 7 июля 2012 г.

Список публикаций в журналах из перечня ВАК

1. Камерджи́ев С. П., Авдеенков А. В., Войтенков Д. А. Квазичастично-фононное взаимодействие в теории конечных ферми-систем // **ЯФ**. – 2011. – Т. 74 – С. 10.
2. Tolokonnikov S. V., Kamerdzhiev S., Voitenkov D., Krewald S., Saperstein E. E. Effects of density dependence of the effective pairing interaction on the first 2^+ excitations and quadrupole moments of odd nuclei // **Phys. Rev. C** – 2011 – Vol. 84 – p. 054319.
3. Voitenkov D., Kamerdzhiev S., Krewald S., Saperstein E. E., Tolokonnikov S. V. Self-consistent calculations of quadrupole moments of the first 2^+ states in Sn and Pb isotopes // **Phys. Rev. C** – 2012 – Vol. 85 – p. 054319.
4. Tolokonnikov S. V., Kamerdzhiev S., Krewald S., Saperstein E. E., Voitenkov D. Quadrupole moments of spherical semi-magic nuclei within the self-consistent Theory of Finite Fermi Systems // **Eur. Phys. J. A** – 2012 – Vol. 48 – p. 70.

Список публикаций в журналах из перечня ВАК

5. Камерджиев С. П., Ачаковский О. И., Войтенков Д. А., Толоконников С. В. Самосогласованные подходы в микроскопической теории ядра. Статические моменты нечетно-нечетных ядер // **ЯФ** – 2014 – Т. 77 – с. 70.
6. Kamerdzhiev S., Krewald S., Tolokonnikov S., Saperstein E. E., Voitenkov D. Self-consistent calculations of quadrupole moments of spherical nuclei // EPJ Web of Conferences – 2012 – Vol. 38 – p. 10002.
7. Tolokonnikov S. V., Kamerdzhiev S., Krewald S., Saperstein E. E., Voitenkov D. The first quadrupole excitations in spherical nuclei and nuclear pairing // EPJ Web of Conferences – 2012 – Vol. 38 – p. 04002.
8. Voitenkov D., Achakovskiy O., Kamerdzhiev S., Tolokonnikov S. Quadrupole moments of odd-odd near-magic nuclei // EPJ Web of Conferences – 2012 – Vol. 38 – p. 17012.

Содержание работы

Введение

Глава 1. Самосогласованная теория конечных ферми-систем с функционалом плотности и ее применение к анализу природы ядерного спаривания

Глава 2. Квадрупольная поляризуемость и квадрупольные моменты сферических ядер в основном и возбужденных состояниях

Глава 3. Квазичастично-фононное взаимодействие в самосогласованной теории конечных ферми-систем

Глава 4. Квазичастично-фононное взаимодействие в обобщенной и стандартной теории конечных ферми-систем

Заключение

Глава 1. Самосогласованная
теория конечных ферми-систем с
функционалом плотности и ее
применение к анализу природы
ядерного спаривания

Общие соотношения

- ✓ Энергия основного состояния рассматривается как функционал от нормальной и аномальной плотностей

$$E_0 = \int \mathcal{E}[\rho_n(\mathbf{r}), \rho_p(\mathbf{r}), \nu_n(\mathbf{r}), \nu_p(\mathbf{r})] d^3r.$$

- ✓ Эффективное спаривательное взаимодействие

$$F^\xi = C_0 f^\xi = C_0 (f_{ex}^\xi + h^\xi x^{2/3})$$

Объемное спаривание: $h^\xi = 0$

Поверхностное спаривание: f_{ex}^ξ и h^ξ – отличны от нуля

Общие соотношения

Уравнения для эффективного поля

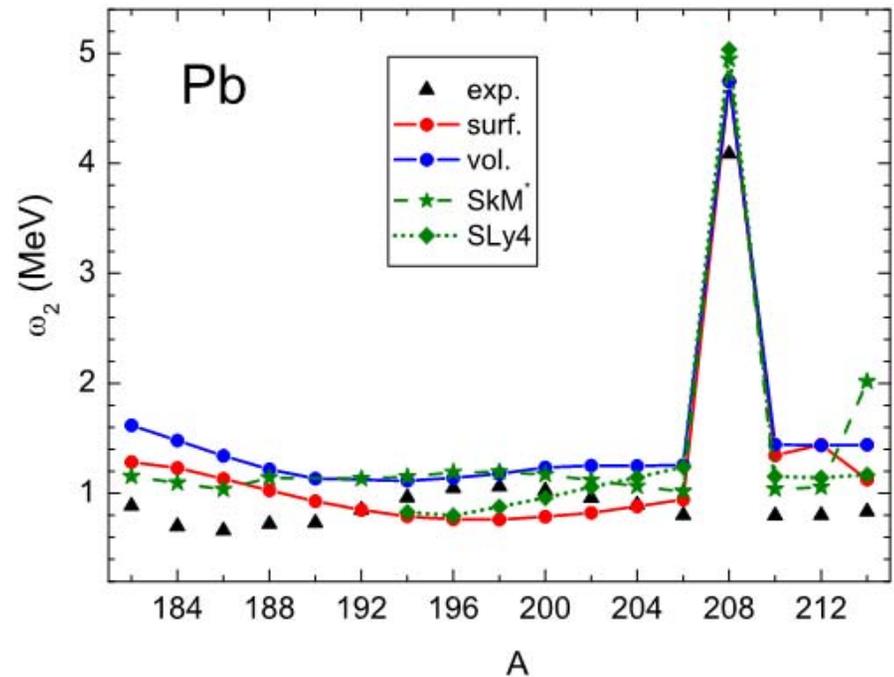
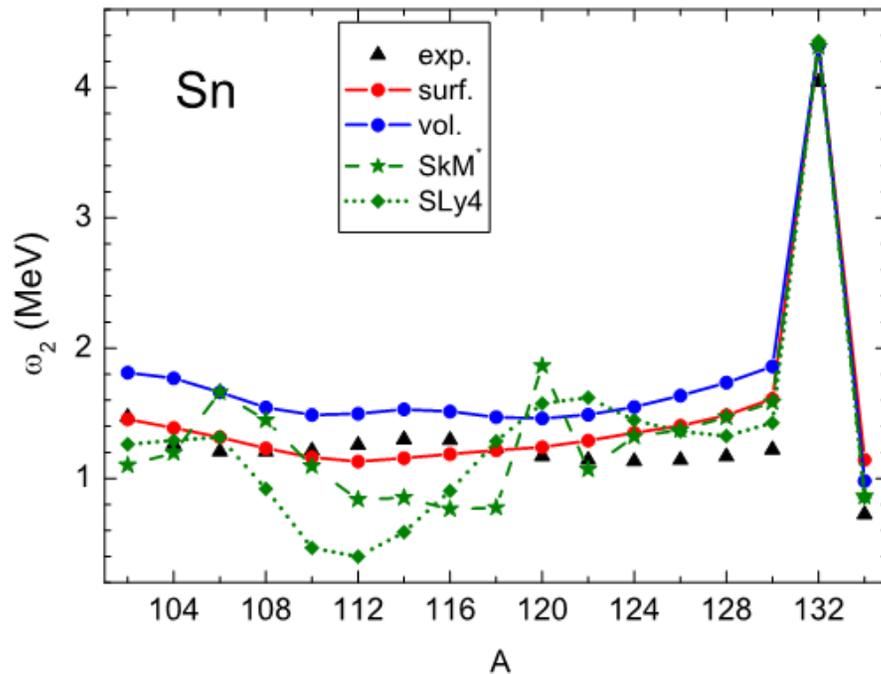
$$\hat{V}(\omega) = \hat{V}_0(\omega) + \hat{\mathcal{F}}\hat{A}(\omega)\hat{V}(\omega),$$

Самосогласование:

$$\mathcal{F} = \frac{\delta^2 \mathcal{E}}{\delta \rho^2}, \quad \mathcal{F}^\xi(\rho) = \frac{\delta^2 \mathcal{E}}{\delta \nu^2} \quad \mathcal{F}^{\omega\xi} = \frac{\delta^2 \mathcal{E}}{\delta \rho \delta \nu}.$$

Поверхностное и объемное спаривание

Энергия возбуждения первых 2^+ уровней изотопов Sn и Pb

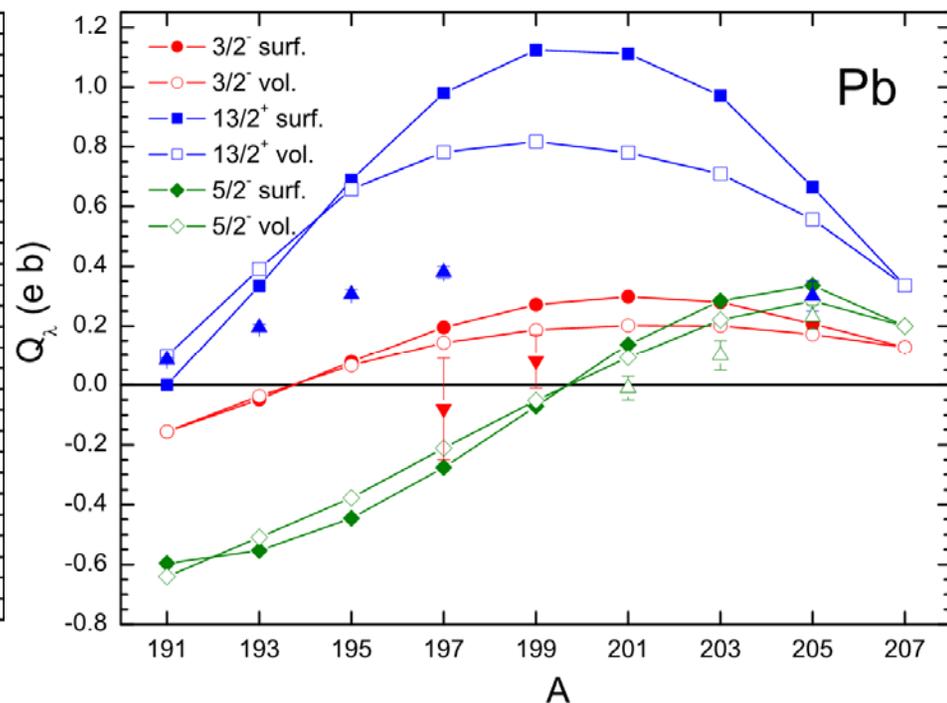
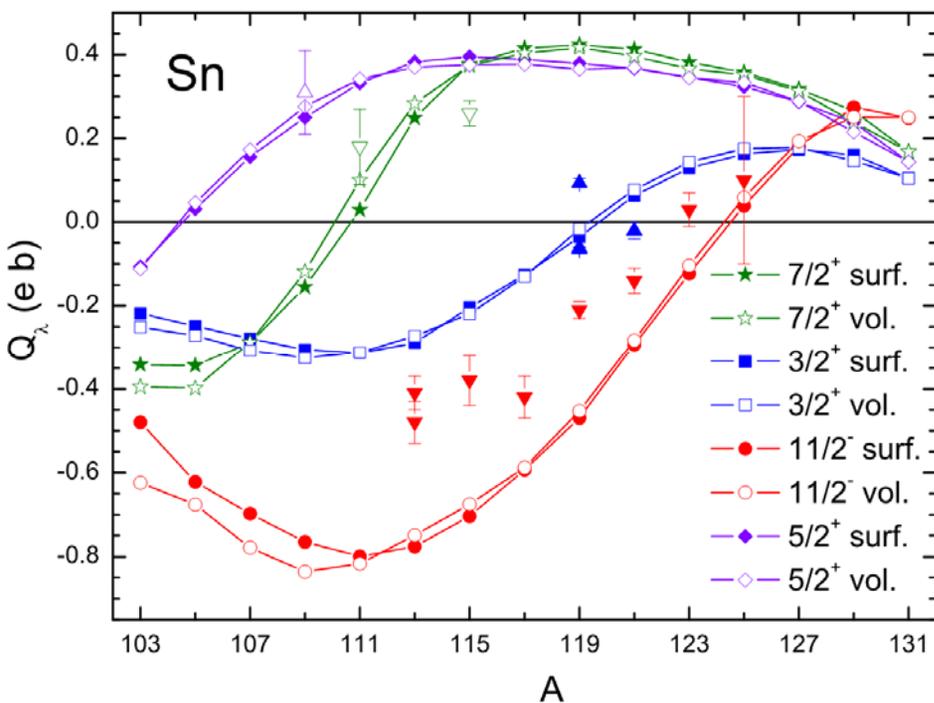


SkM* и SLy4 – J. Terasaki, J. Engel, and G. F. Bertsch. Phys. Rev. C 78, 044311

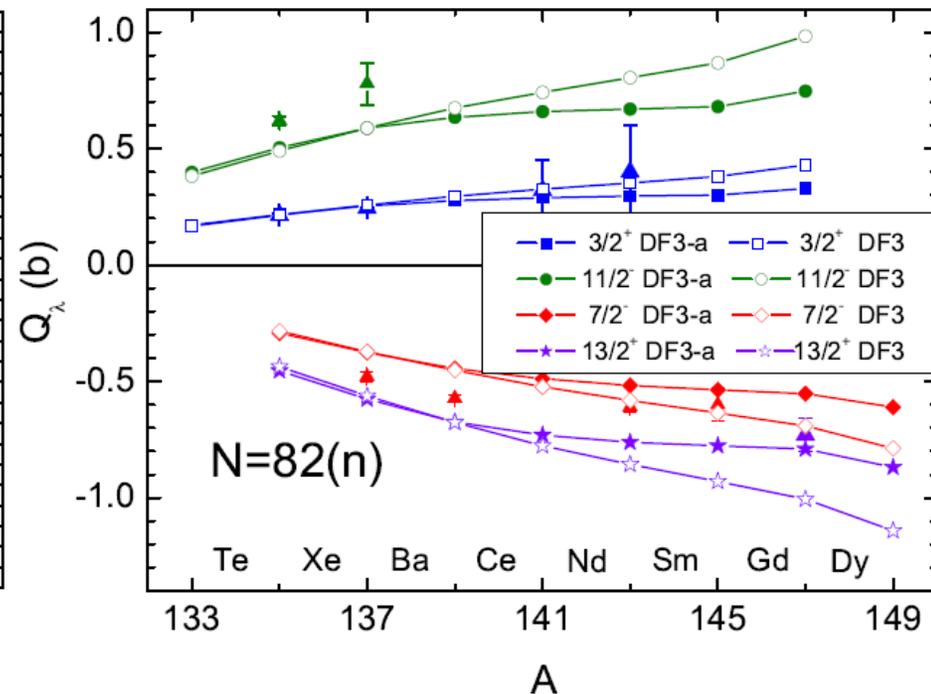
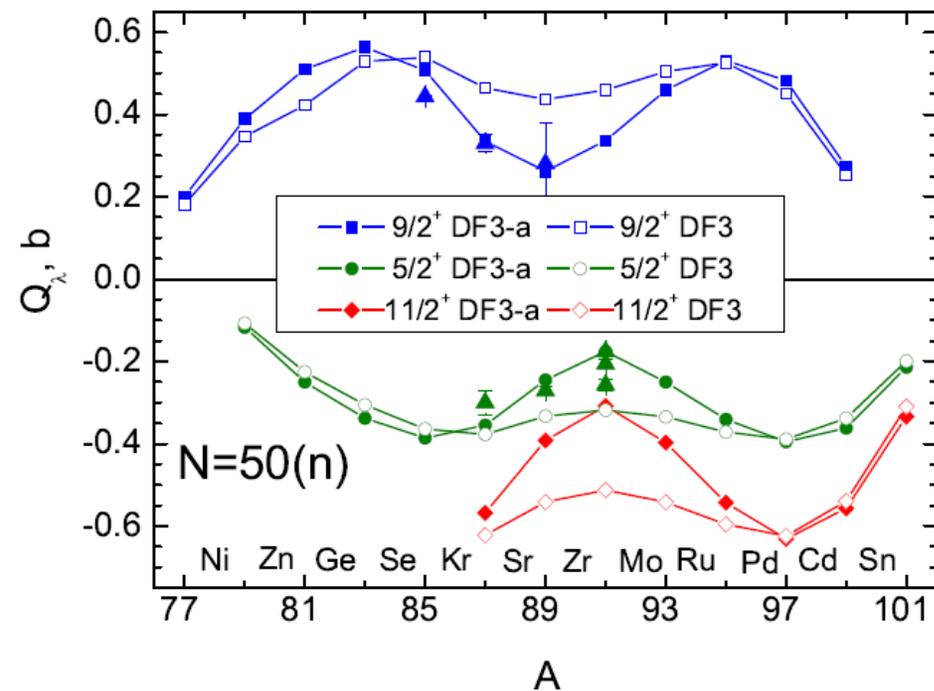
Глава 2. Квадрупольная поляризуемость и квадрупольные моменты сферических ядер в основном и возбужденных состояниях

Квадрупольные моменты нечетных ИЗОТОПОВ ОЛОВА И СВИНЦА

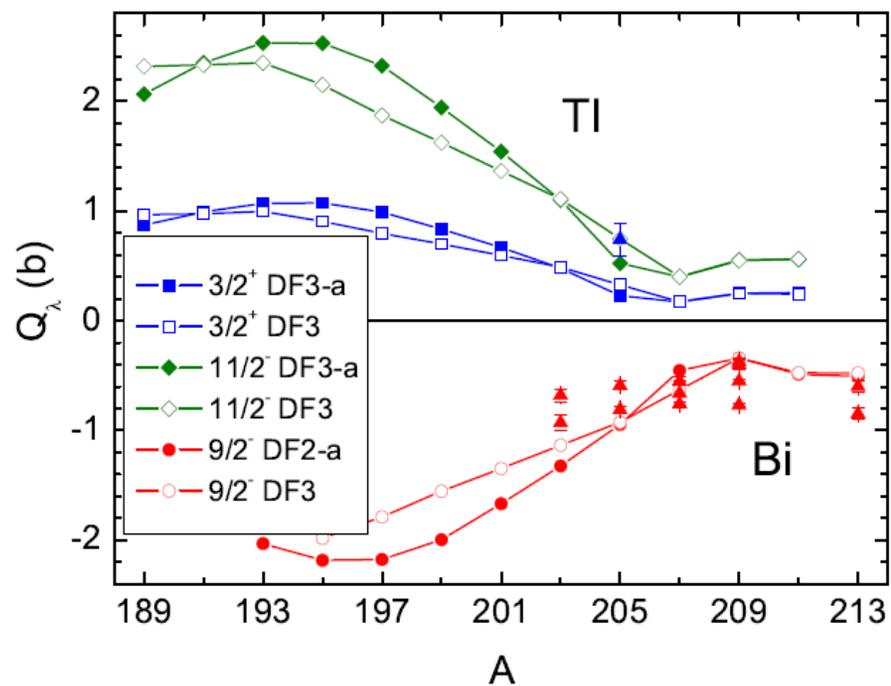
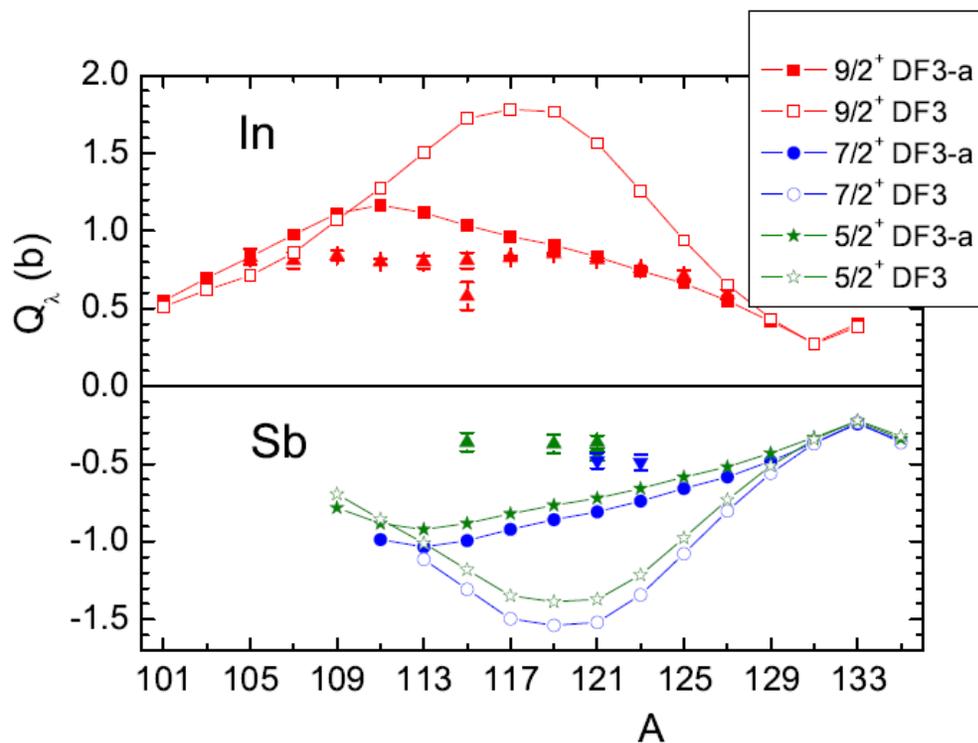
$$Q_{\lambda}^{p,n} = (u_{\lambda}^2 - v_{\lambda}^2)V_{\lambda}^{p,n}, \quad V_{\lambda} = -\frac{2j-1}{2j+2} \int V(r)R_{nlj}^2(r)r^2 dr.$$



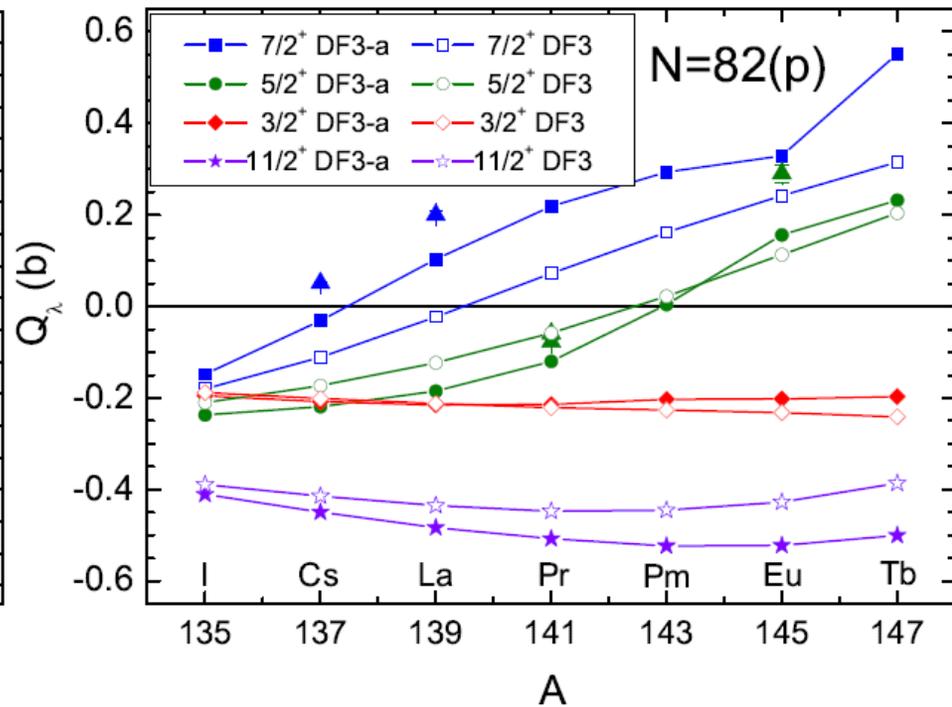
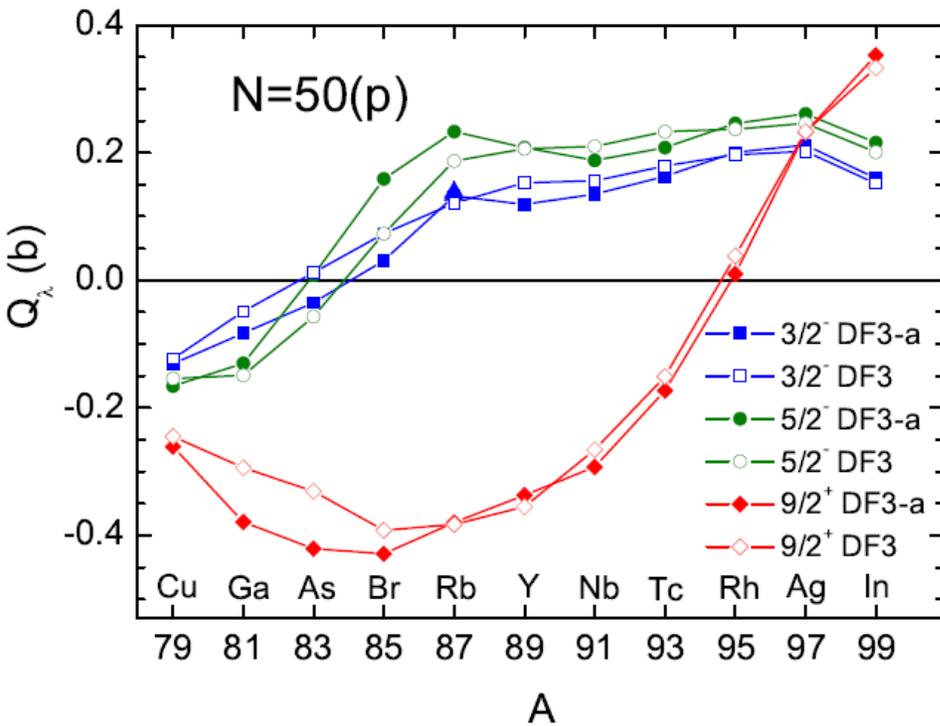
Квадрупольные моменты нечетных ядер соседей четных N=50 и N=82 изотонов



Квадрупольные моменты нечетно-протонных соседей четных изотопов олова и свинца



Квадрупольные моменты нечетно-протонных N=50 и N=82 изотонов



Квадрупольные моменты нечетно-нечетных околوماгических ядер в основном состоянии

$$Q_I = \langle II | V^p + V^n | II \rangle,$$

$$Q_I = (2I + 1) \begin{pmatrix} I & 2 & I \\ I & 0 & -I \end{pmatrix} (-1)^{j_p + j_n + I + 2} \times \\ \times \left[\begin{Bmatrix} j_p & I & j_n \\ I & j_p & 2 \end{Bmatrix} c_{j_p}^{-1} Q^p + \begin{Bmatrix} j_n & I & j_p \\ I & j_n & 2 \end{Bmatrix} c_{j_n}^{-1} Q^n \right],$$

$$Q_\lambda = \langle \lambda | V(\omega = 0) | \lambda \rangle = c_j \langle njl || V || njl \rangle,$$

$$c_j = 2j(2j - 1)^{1/2} [(2j + 3)(2j + 2)(2j + 1)2j]^{-1/2}$$

Феноменологический подход

Квадрупольные моменты нечетно-нечетных околomagических ядер

Ядро	J^π	$T_{1/2}$	Q_{phen}	Q_{exp}
${}^{40}_{19}\text{K}_{21}$	4^-	$1.248 \times 10^9 \text{ y}$	$-0.106(6)$	$-0.071(1)$
${}^{92}_{41}\text{Nb}_{51}$	7^+	$3.47 \times 10^7 \text{ y}$	$-0.43(7)$	$-0.35(3)$
${}^{210}_{83}\text{Bi}_{127}$	1^-	5.01 d	$+0.22(6)$	$+0.19(6)$

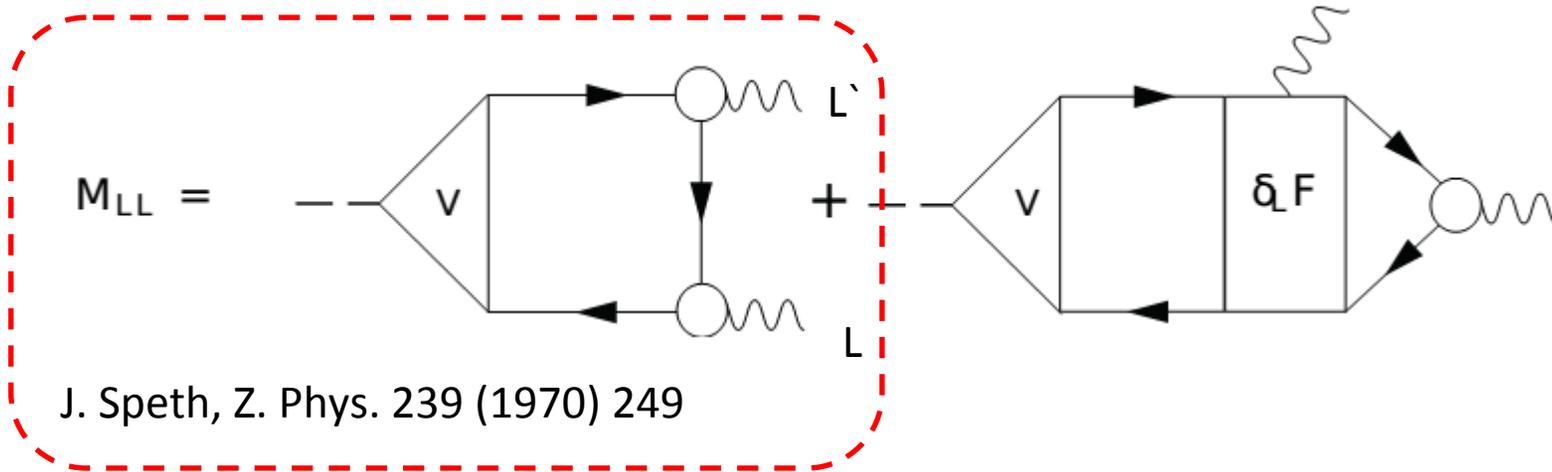
Значения квадрупольные моменты соответствующих нечетных ядер
взяты из эксперимента

Квадрупольные моменты нечетно-нечетных околомагических ядер

Ядро	J^π	$T_{1/2}$	Q_{eff}	Q_{theor}	Q_{exp}
$^{54}_{27}\text{Co}_{27}$	0^+	193.28 ms	–	–	–
$^{56}_{27}\text{Co}_{29}$	4^+	77.236 d	0.19	0.30	+0.25(9)
$^{56}_{29}\text{Cu}_{27}$	(4^+)	93 ms	0.14	0.28	–
$^{58}_{29}\text{Cu}_{29}$	1^+	3.204 s	0.09	0.15	–
$^{78}_{29}\text{Cu}_{49}$	(3^-)	637 s	-0.18	-0.21	–
	(4^-)		4×10^{-5}	-0.03	–
$^{100}_{49}\text{In}_{51}$	(6^+)	5.9 s	0.24	0.21	–
$^{130}_{49}\text{In}_{81}$	1^-	0.29 s	-0.08	-0.07	–
$^{132}_{49}\text{In}_{83}$	(7^-)	0.207 s	-0.40	-0.29	–
$^{132}_{51}\text{Sb}_{81}$	$(4)^+$	2.79 m	-0.30	-0.22	–
$^{134}_{51}\text{Sb}_{83}$	(0^-)	0.78 s	–	–	–
$^{206}_{81}\text{Tl}_{125}$	0^-	–	–	–	–
$^{208}_{81}\text{Tl}_{127}$	5^+	3.053 m	-0.30	-0.27	–
$^{208}_{83}\text{Bi}_{125}$	5^+	3.68E+5 y	-0.51	-0.35	-0.64(6)
$^{210}_{83}\text{Bi}_{127}$	1^-	5.012 d	0.21	0.16	+0.136(1)

Глава 3. Квазичастично-фононное взаимодействие в самосогласованной теории конечных ферми-систем

Квадрупольные моменты в возбужденном состоянии в магических ядрах



$$M_{LL'} = \int V^0(\mathbf{r}) \delta_{LL'}^{(2)} G(\mathbf{r}, \mathbf{r}, \varepsilon) d\mathbf{r} \frac{d\varepsilon}{2\pi i},$$

$$M_{LL'} = \sum_{123} V_{12} A_{123}^{(1)} g_{31}^L g_{23}^{L'} + \sum_{1234} V_{12} A_{12} \delta_L F_{1234} A_{34} g_{43}^{L'},$$

$$Q = \sqrt{\frac{16\pi}{5}} \langle II | M | II \rangle$$

$$A_{123}^{(1)}(\omega_L, \omega_{L'}) = \int G_1(\varepsilon) G_2(\varepsilon + \omega) G_3(\varepsilon + \omega_L) \frac{d\varepsilon}{2\pi i}$$

Обобщение на случай ядерного спаривания

$$\delta_L F, \delta_L F^\xi \neq 0$$

$$d^{(1)} = d^{(2)} = 0$$

$$M_{LL}^{(1)} = - \text{diagram}_1 + - \text{diagram}_2 + - \text{diagram}_3$$

$$M_{LL}^{(5)} = - \text{diagram}_4 + - \text{diagram}_5 + - \text{diagram}_6$$

$$M_{ddf} = C_{IL} \int \delta \rho_{st}(r) \frac{\partial \mathcal{F}}{\partial \rho}(r) (\rho_L^{tr}(r))^2 d^3 r,$$

$$\rho_L^{tr} = \mathcal{L}(\omega_L) g_L, \delta \rho_{st} = \mathcal{L}(0) V,$$

M_{ddf}

$$C_{IL} = \frac{1}{2} (-1)^L (2L+1) (2I+1) \begin{pmatrix} I & L & L \\ 0 & L & -L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I & L & L \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathcal{L} = \int (GG - F^{(1)} F^{(2)}) d\varepsilon / 2\pi i.$$

$$M_{LL} = \sum_{123} (-1)^{L+1} \begin{pmatrix} I & L & L \\ 0 & L & -L \end{pmatrix} \left\{ \begin{matrix} I & L & L \\ j_3 & j_2 & j_1 \end{matrix} \right\}$$

$$\times \langle 1 \| V \| 2 \rangle \langle 3 \| g_L \| 1 \rangle \langle 2 \| g_L \| 3 \rangle \sum_{i=1}^8 A_{123}^{(i)\text{pair}},$$

$$\sum_{i=1}^8 A_{123}^{(i)\text{pair}} =$$

$$= \left(\frac{1}{(\omega_L + E_{13})(\omega_L + E_{23})} + \frac{1}{(\omega_L - E_{13})(\omega_L - E_{23})} \right)$$

$$\times \left[u_1^2 u_2^2 v_3^2 - v_1^2 v_2^2 u_3^2 + \frac{\Delta_1 \Delta_2}{4E_1 E_2} (u_3^2 - v_3^2) \right.$$

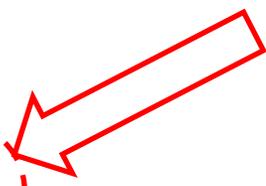
$$\left. + \frac{\Delta_1 \Delta_3}{4E_1 E_3} (u_2^2 - v_2^2) + \frac{\Delta_2 \Delta_3}{4E_2 E_3} (u_1^2 - v_1^2) \right] +$$

$$\frac{1}{E_{12}} \left[\frac{2E_{23}(u_1^2 u_3^2 v_2^2 - v_1^2 v_3^2 u_2^2)}{E_{23}^2 - \omega_L^2} + \frac{2E_{13}(u_2^2 u_3^2 v_1^2 - v_3^2 v_2^2 u_1^2)}{E_{13}^2 - \omega_L^2} \right.$$

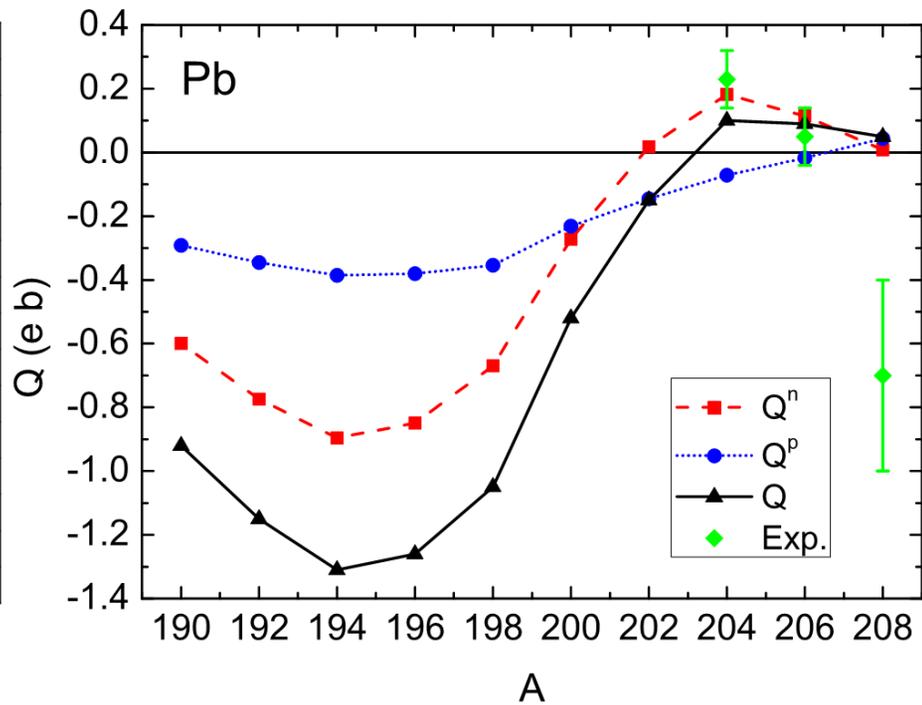
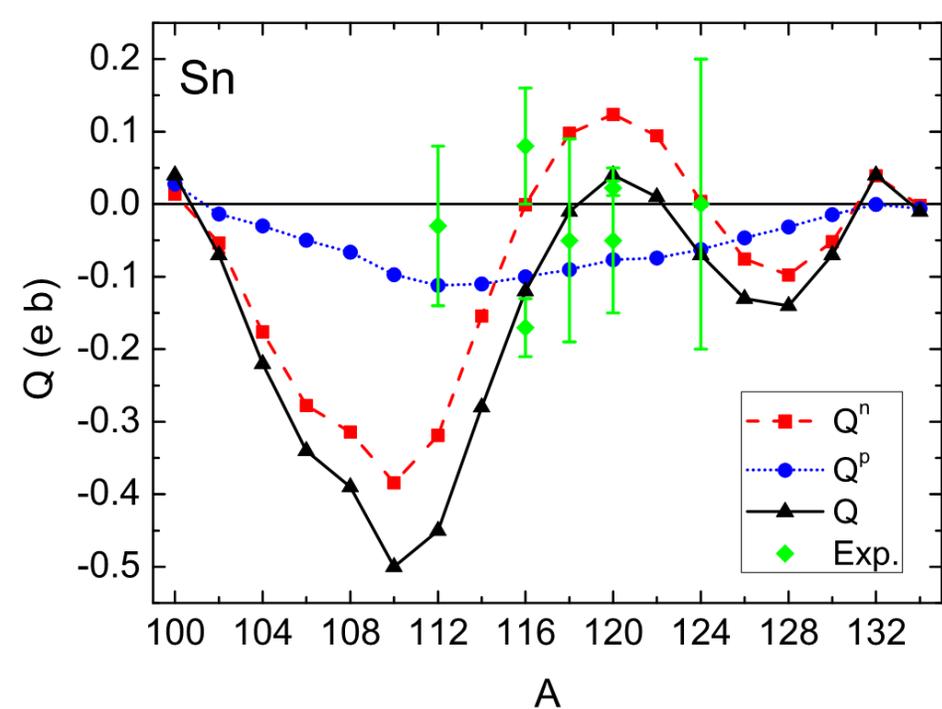
$$\left. - \left(\frac{\Delta_1 \Delta_2}{2E_1 E_2} (u_3^2 - v_3^2) + \frac{\Delta_1 \Delta_3}{2E_1 E_3} (u_2^2 - v_2^2) \right) \right.$$

$$\left. + \frac{\Delta_2 \Delta_3}{2E_2 E_3} (u_1^2 - v_1^2) \right) \left(\frac{E_{13}}{E_{13}^2 - \omega_L^2} + \frac{E_{23}}{E_{23}^2 - \omega_L^2} \right).$$

KOC



Квадрупольные моменты первых 2^+ возбужденных состояний в изотопах олова и свинца



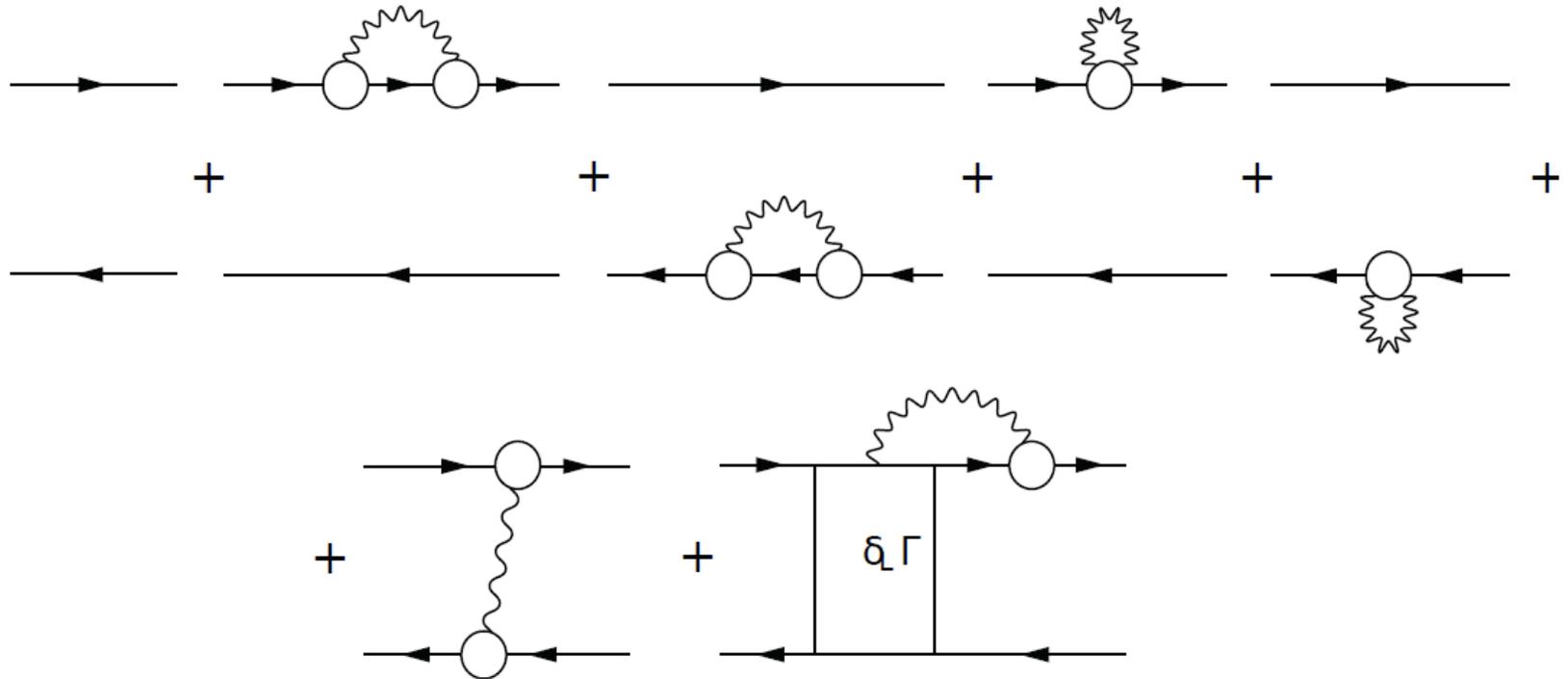
Вклад различных составляющих в квадрупольные моменты первых 2^+ состояний в изотопах Sn и Pb

Ядро	Q^n	Q^p	Q_{tot}	Q_{exp}	Q_{QRPA}	Q_{GSC}	Q_V
^{114}Sn	-0.15	-0.11	-0.28	0.32(3), 0.36(4)	-0.004	-0.19	-0.09
^{116}Sn	0.00	-0.10	-0.12	-0.17(4), +0.08(8)	-0.003	-0.09	-0.03
^{118}Sn	0.10	-0.09	-0.01	-0.05(14)	-0.003	-0.02	0.01
^{204}Pb	0.18	-0.07	0.10	+0.23(9)	-0.003	0.04	0.06
^{206}Pb	0.11	-0.02	0.09	+0.05(9)	-0.002	0.03	0.06
^{208}Pb	0.01	0.04	0.05	-0.7(3)	0.043	-0.02	0.03

QRPA(GSC=0, $V=V^0$)

Глава 4. Квазичастично-фононное взаимодействие в обобщенной и стандартной теории конечных ферми-систем

Учет КФВ в ОТКФС для магических ядер



Подынтегральное выражение пропагатора уравнения для эффективного поля улучшенной ОТКФС, которое соответствует обобщенной модели 1 на случай учета эффектов тэдпол.

Оценки вклада КФВ в квадрупольные моменты нечетных ядер

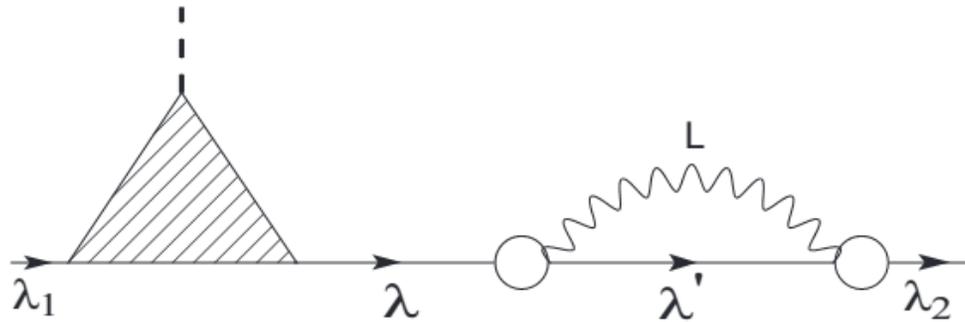
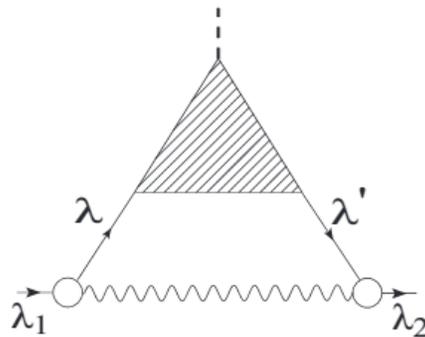


График со "вставкой". Волнистая линия фононная D -функция.

Кружок — амплитуда рождения $g_L(\mathbf{r})$ L -фонона.



$$\delta Q_{ph} \simeq 0,1 - 0,2 \text{ барн}$$

Поправка за счет индуцированного взаимодействия.

Основные результаты

- ✓ Впервые, в рамках единого самосогласованного подхода и с использованием известного ЭФП Фаянса объяснены имеющиеся экспериментальные данные и предсказаны неизвестные значения квадрупольных моментов нечетных ядер в основном состоянии.
- ✓ объяснены и предсказаны квадрупольные моменты нечетно-нечетных околوماгических ядер в основном состоянии
- ✓ Показано, что величина квадрупольного момента 2_1^+ состояния в четно-четных ядрах определяется двумя, примерно одинаковыми по величине, эффектами корреляции в основном состоянии и эффектами ядерной среды.
- ✓ Впервые изучены корреляции в основном состоянии ("графики идущие назад") происходящие от интегрирования трех (а не двух, как в обычном QRPA) функций Грина. Показан их большой количественный вклад в рассматриваемой задаче.

Основные результаты

- ✓ Исследована роль фононного тедпола в проблеме дальнейшего развития ОТКФС. Полученные результаты показывают, что численная реализация этого улучшения возможна, по крайней мере для статического случая (моменты ядер), хотя и является достаточно сложной.
- ✓ Выполнена оценка возможной роли КФВ в рассмотренной задаче о квадрупольных моментах в нечетных ядрах. Показано, что изучаемый эффект складывается из двух противоположных по знаку величин, но сокращение не является полным и следует ожидать величину соответствующей поправки не более $\delta Q = 0,1 - 0,2$ барн для ядер с $Q \geq 0,4 - 0,5$ барн. Этот результат подтверждает правильность используемого нами метода для расчета квадрупольных моментов нечетных магических и полумагических ядер.
- ✓ Подтверждена поверхностная природа ядерного спаривания в рассматриваемой нами задачи об энергии первых 2^+ уровней четно-четных полумагических ядер.

Спасибо за внимание!