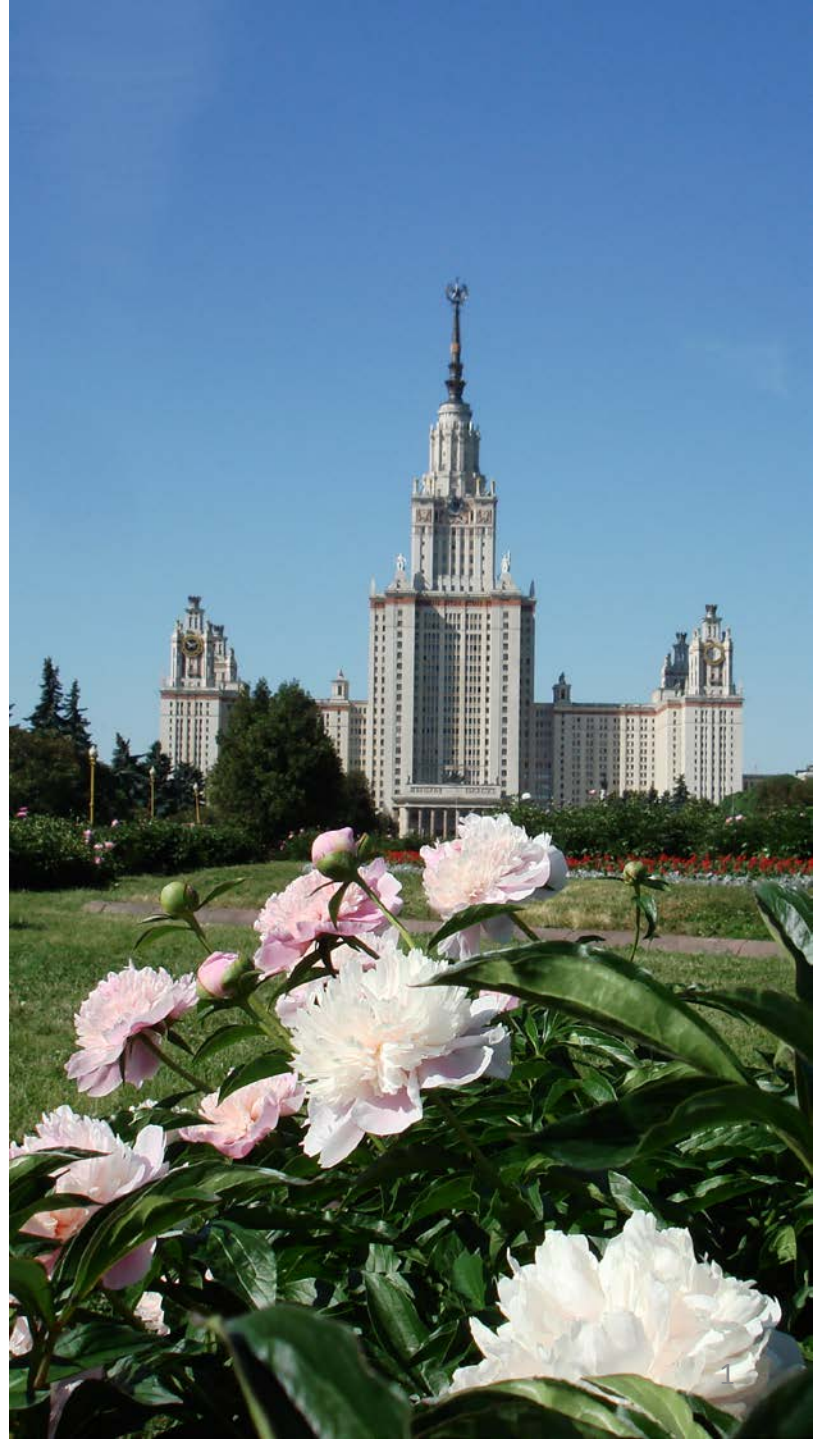


Парные корреляции нуклонов:

что мы можем узнать из
масс атомных ядер?

Т.Ю. Третьякова
НИИЯФ МГУ

18 мая 2023



Коллектив авторов:

проф. Б.С. Ишханов
доц. М.Е. Степанов
Т.Ю. Третьякова

Л. Имашева
Е. Владимирова

С. Сидоров
М. Симонов
Д. Жуляева
И. Мостаков
И. Дашков

К.А. Стопани
В. Негребецкий
А. Ивлева
Д. Байрамов

- **Парные корреляции нуклонов и массовые соотношения**

- Четно-нечетный эффект и спаривание тождественных нуклонов
- Нейтрон-протонные корреляции
- Аппроксимации

- **Предсказания масс неизвестных ядер**

- Метод локальных массовых соотношений
- Предсказания в области сверхтяжелых ядер

- **Спектры низколежащих состояний**

- Мультиплет основного состояния
- Спектры для $j = 9/2$

1935 г Формула Бете-Вайцзеккера

$$B(A, Z) = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \delta \frac{(A-2Z)^2}{A} + \zeta A^{-3/4}$$

$$\alpha = 15.56 \text{ MeV}$$

$$\beta = 17.23 \text{ MeV}$$

$$\gamma = 0.7 \text{ MeV}$$

$$\delta = 23.285 \text{ MeV}$$

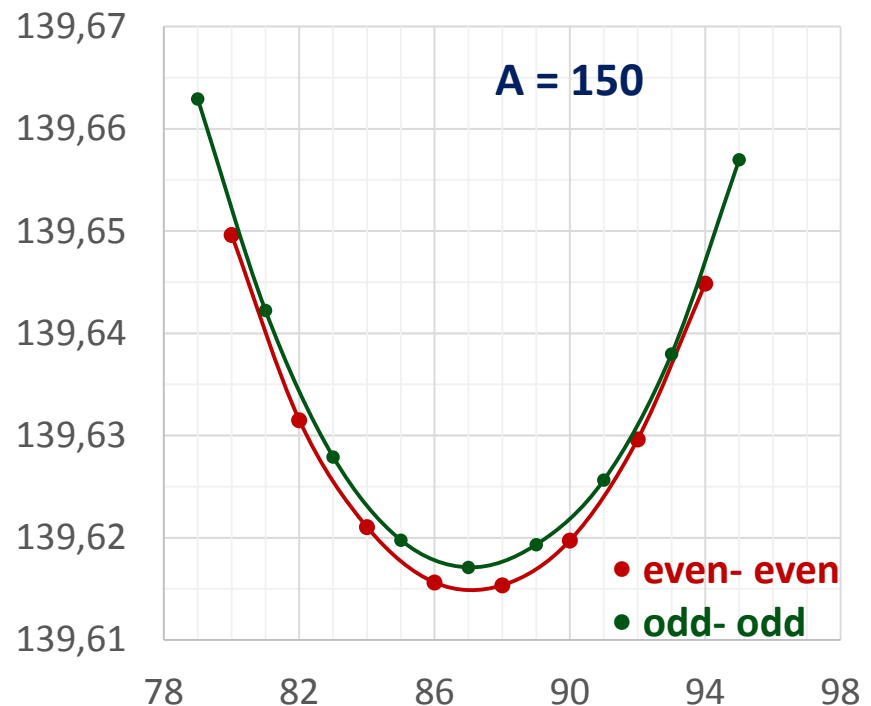
$$\zeta = \begin{cases} 34 \text{ MeV} \\ 0 \\ -34 \text{ MeV} \end{cases}$$

$\delta(A)$: A^{-1} (Блатт – Вайскопф, 1952),

$A^{-3/4}$ (Ферми),

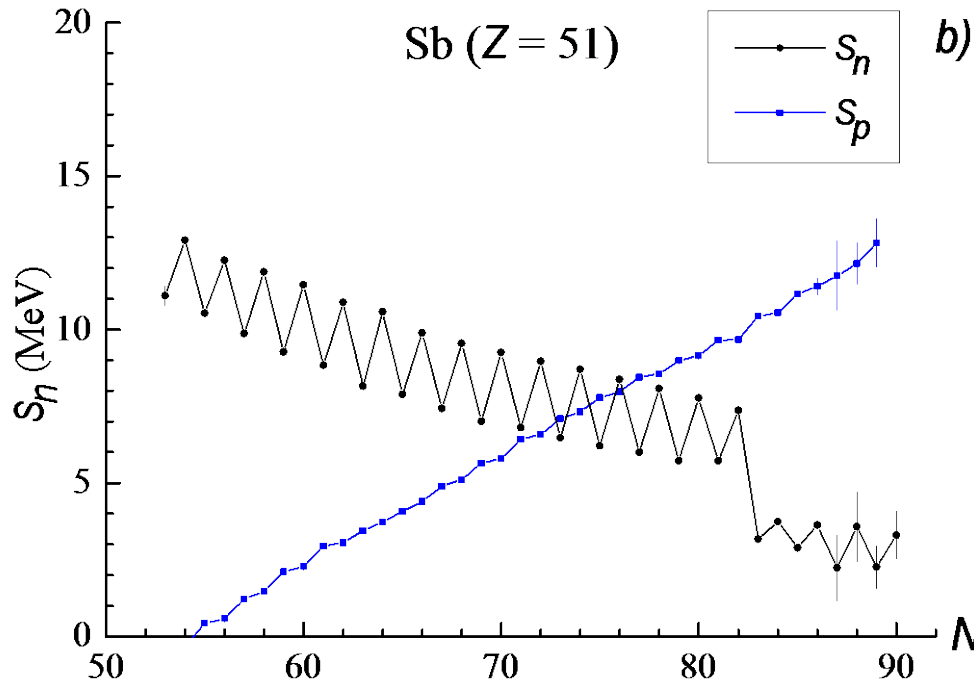
$A^{-1/2}$ (Грин, 1953)

Масса ядра (GeV)

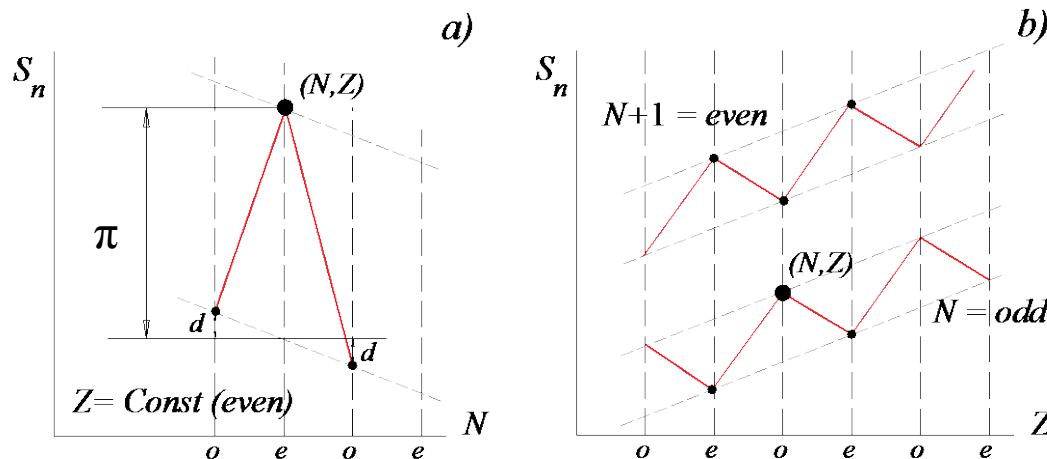


Четно-нечетный эффект и спаривание тождественных нуклонов

Ishkhanov et al. Chinese Phys C 2019



Энергии отделения нейтрона и протона в изотопах Sb



Проявление корреляций нуклонов в зависимостях энергий отделения нейтрона в изотопах ($Z = \text{const}$) и изотонах ($N = \text{const}$)

By definition:

$$\begin{aligned}\Delta_{nn} (N, Z) &= S_{nn} (N, Z) - 2S_n (N - 1, Z) = \\ &= B (N, Z) - 2B (N - 1, Z) + B (N - 2, Z) =\end{aligned}$$

$$= S_n (N, Z) - S_n (N - 1, Z) = 2\Delta_n^{(3)}(N - 1, Z)$$

Bohr, Mottelson 1969

$$\Delta_n^{(3)} (N, Z) = \frac{1}{2} [S_n (N + 1, Z) - S_n (N, Z)]$$

$$\Delta_n^{(4)} (N, Z) = \frac{1}{4} [2S_n (N, Z) - S_n (N - 1, Z) - S_n (N + 1, Z)]$$

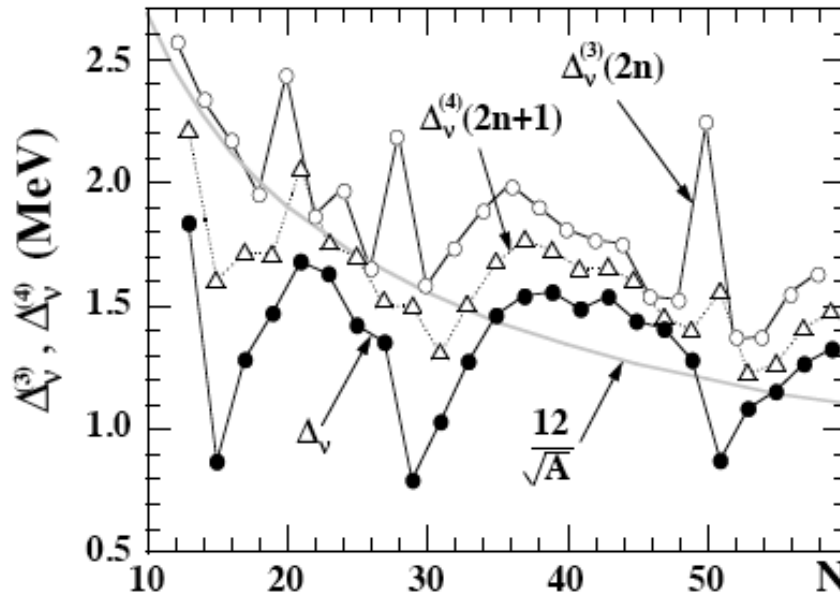
Madland, Nix 1988; Moller, Nix 1992

$$\Delta_n^{(5)} (N, Z) = \frac{1}{8} [S_n (N + 2) - 3S_n (N + 1) + 3S_n (N) - S_n (N - 1)]$$

$N, Z \neq 8, 20, 28, 50, 82\dots$

$N \neq Z$

Satula, Dobaczewski, Nazarewicz 1998



$$\Delta_n^{(3)}(N_{\text{odd}}, Z) < \Delta_n^{(4)}(N_{\text{odd}}, Z)$$

$$\Delta_n^{(3)}(N_{\text{odd}}, Z) < \Delta_n^{(3)}(N_{\text{even}}, Z)$$

Values of $\Delta_n^{(3)}(N)$ at odd values of N can be associated with the pairing effect

FIG. 3. Experimental values of $\Delta_\nu(N) = \Delta_\nu^{(3)}(N)$ for N -odd (filled circles), $\Delta_\nu^{(3)}$ for N -even (open circles), and $\Delta_\nu^{(4)}$ for N -odd (open triangles). The thick gray line indicates the average trend, $\bar{\Delta} = 12/\sqrt{A}$. Each point represents the arithmetic mean over several even- Z isotones.

$$\Delta^{(3)}(N) \equiv \frac{\pi N}{2} [B(N-1) + B(N+1) - 2B(N)]$$

Seniority model

Short-range attraction of two particles in j^2 -configuration which acts only in $J = 0$

$$H = -G \sum_{m, m' > 0} a_m^+ a_{\bar{m}}^+ a_{\bar{m}'} a_{m'}; (a_m^+ \equiv a_{jm}^+)$$

$$a_{\bar{m}} = (-1)^{j+m} a_{-m}$$

For two particles:

$$E_0 = -G\Omega$$

$$\Omega = \frac{2j+1}{2} \quad \text{- number of pair states}$$

For N particles:

$$E_\nu(N) = -\frac{G}{4}(N-\nu)(2\Omega - N - \nu + 2)$$

$$\nu = \begin{cases} 0, & N = 2n \\ 1, & N = 2n + 1 \end{cases} \quad \text{- seniority}$$

Seniority model

By definition:

$$\Delta_{nn}(N, Z) = S_n(N, Z) - S_n(N-1, Z):$$

$$\Delta_{nn}(N) = \begin{cases} G\Omega, & N = 2n \\ G\Omega + G, & N = 2n+1 \end{cases}$$

Bohr, Mottelson 1969

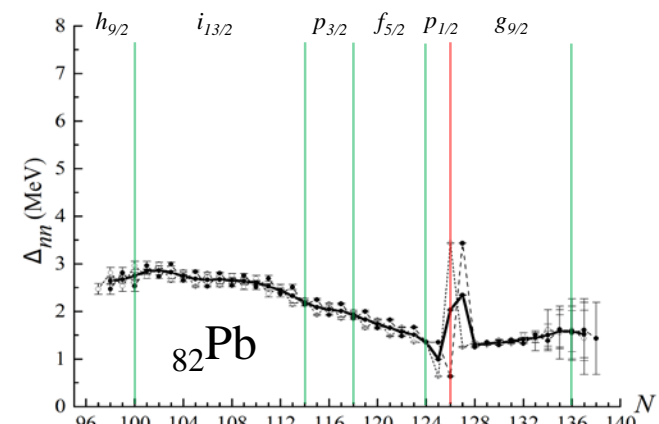
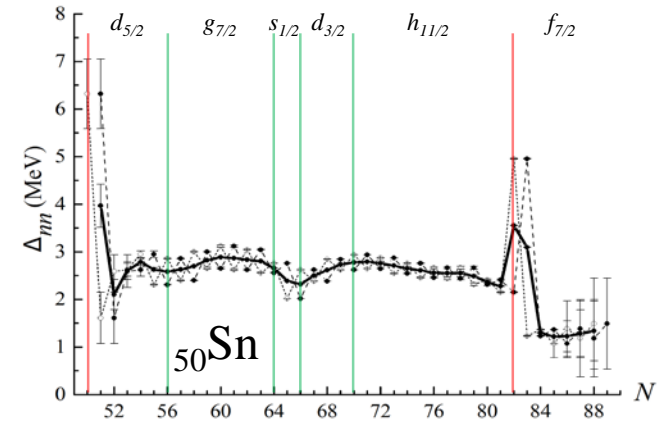
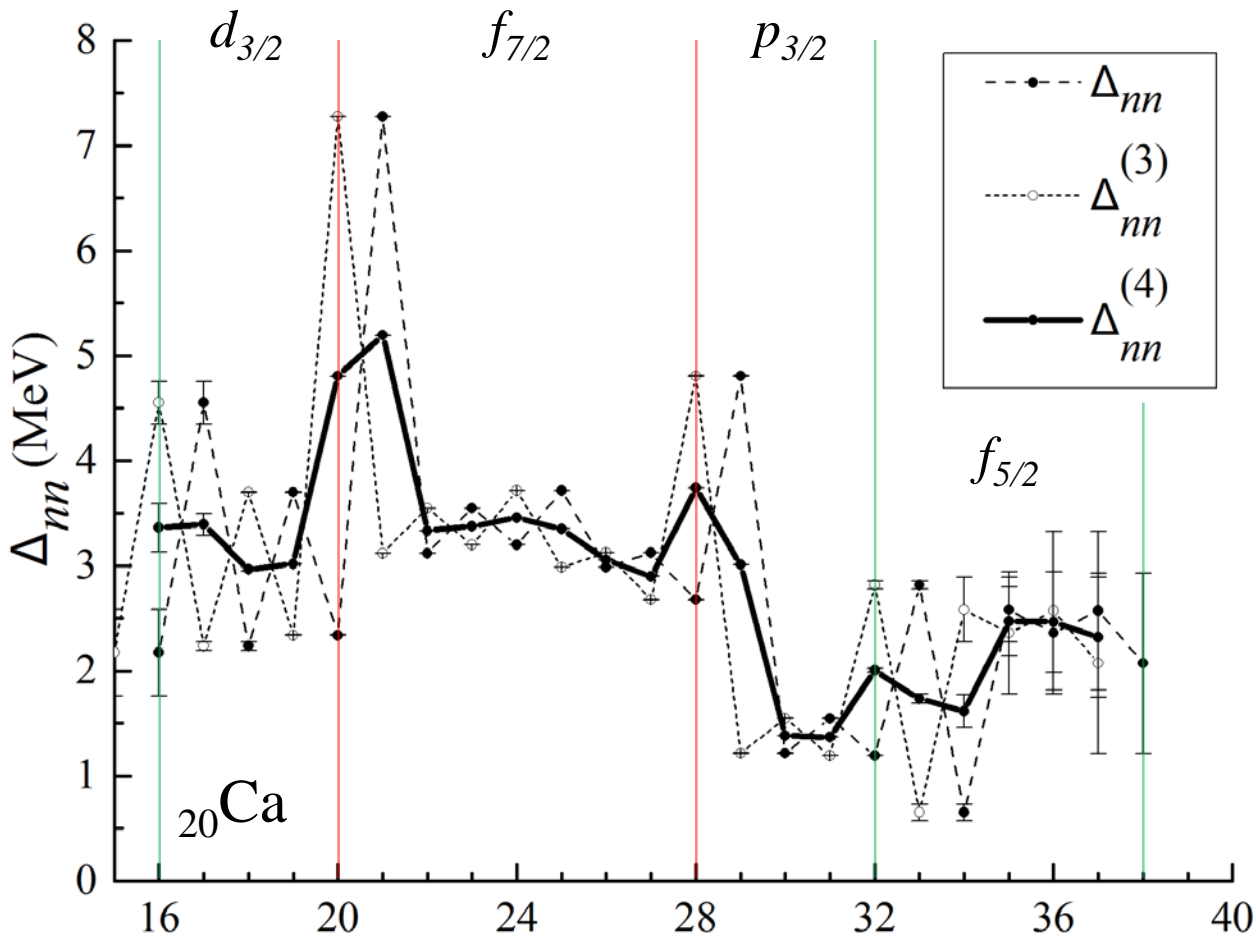
$$2\Delta_n^{(3)}(N, Z) = S_n(N, Z) - S_n(N+1, Z):$$

$$2\Delta_n^{(3)}(N) = \begin{cases} G\Omega + G, & N = 2n \\ G\Omega, & N = 2n+1 \end{cases}$$

$$2\Delta_n^{(4)}(N) = 2\Delta_n^{(5)}(N) = G\Omega + \frac{G}{2}$$

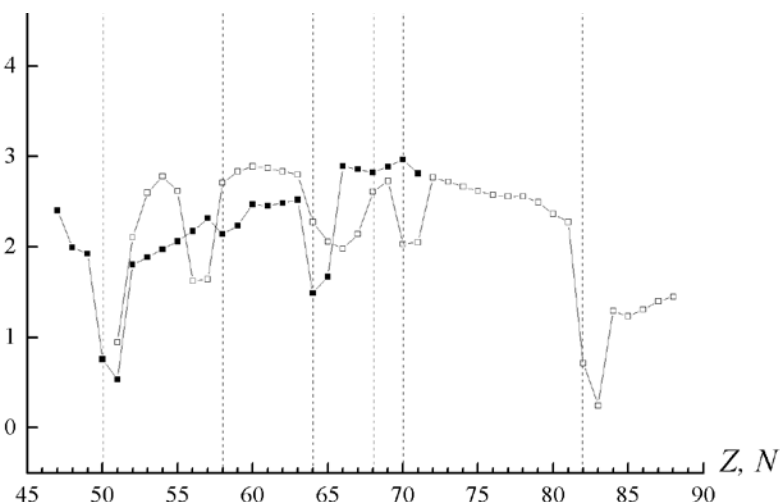
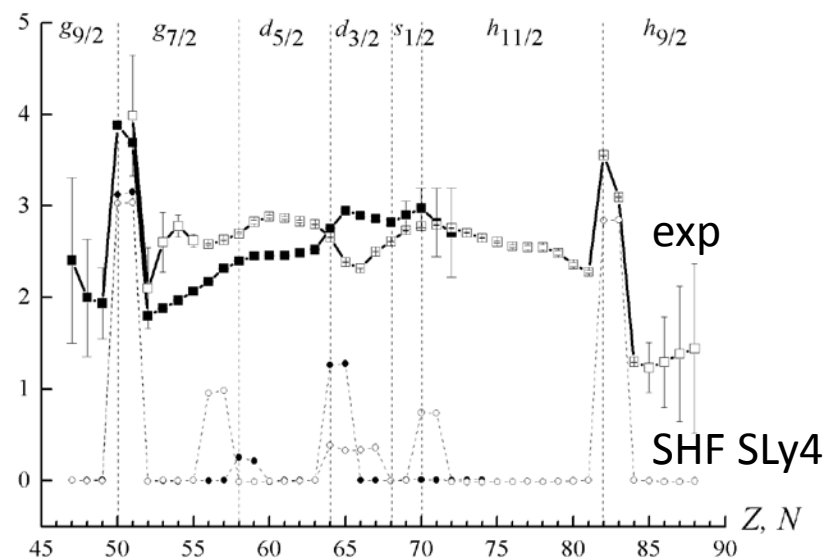
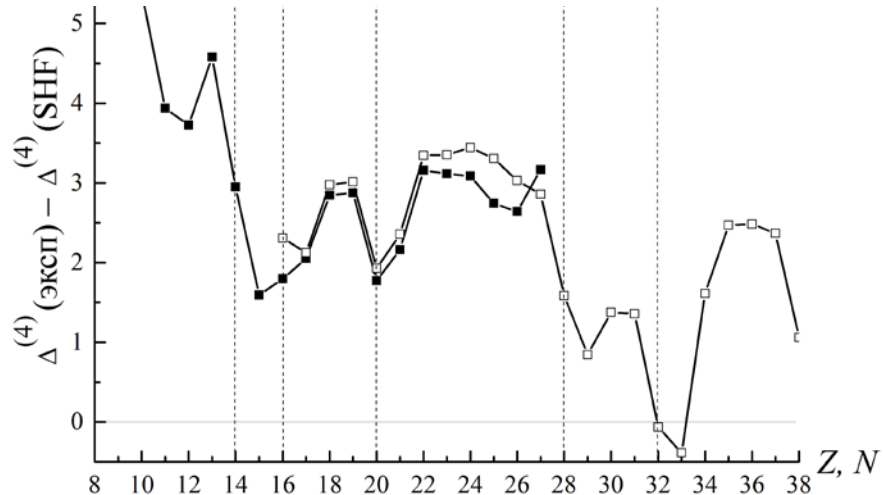
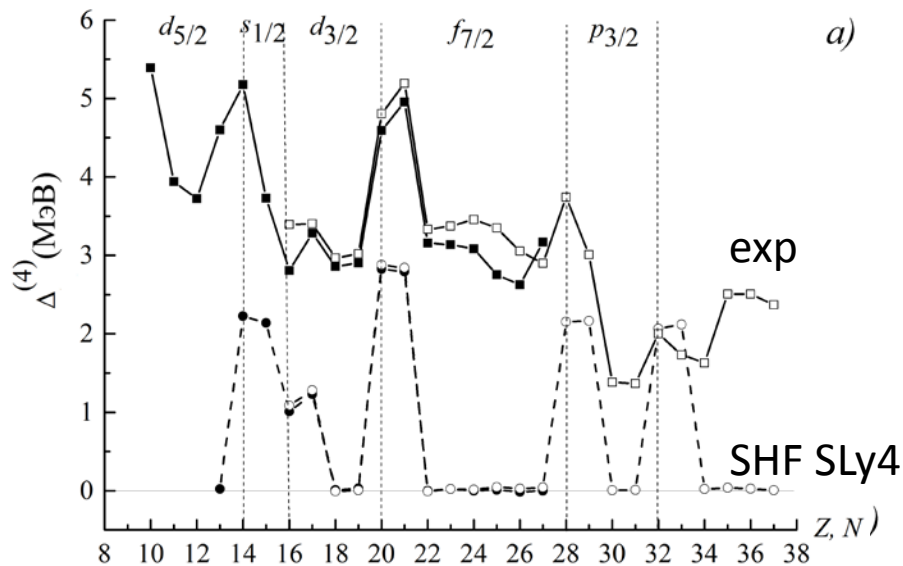
$$G = 2\Delta_n^{(3)}(N) - \Delta_{nn}(N)$$

Оценка эффекта спаривания: Δ_{nn} , $\Delta_{nn}^{(3)}$, $\Delta_{nn}^{(4)}$

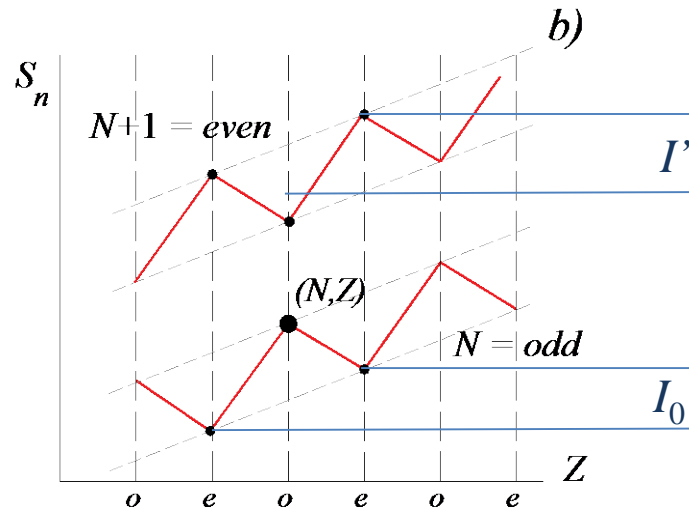
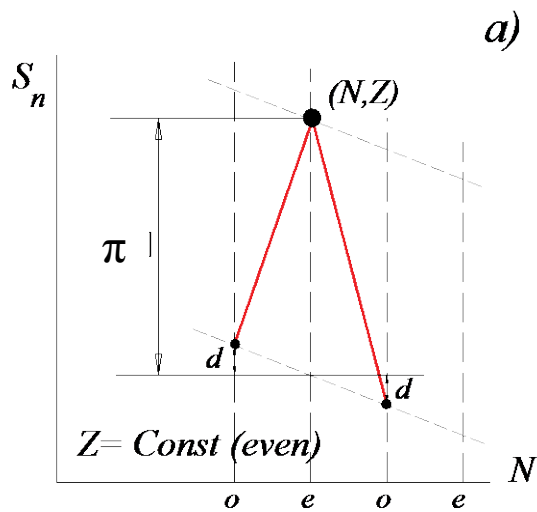
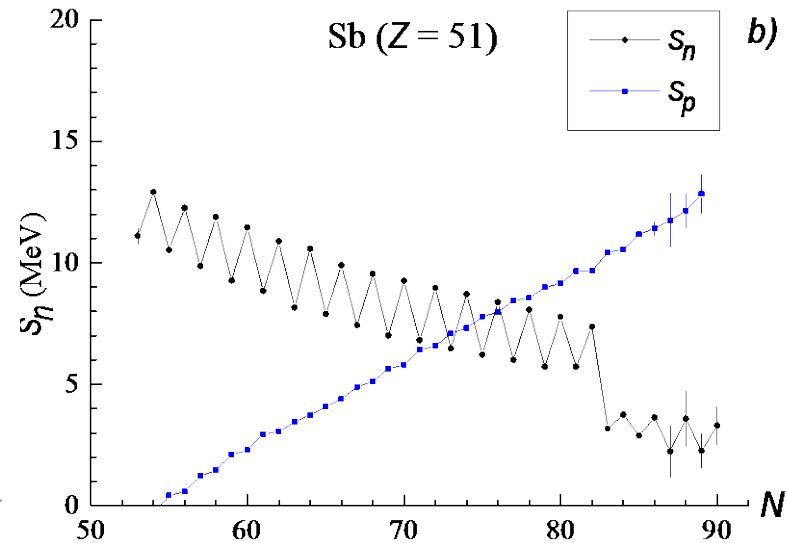
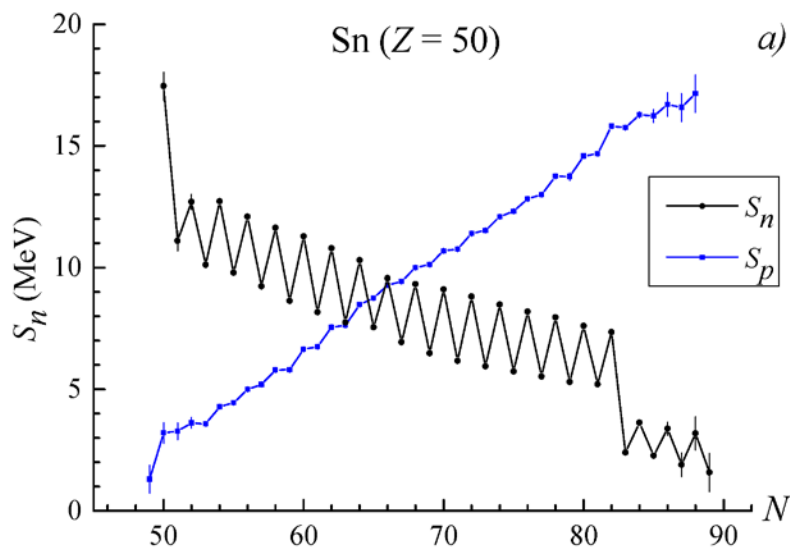


Четно-нечетный эффект и спаривание тождественных нуклонов

Оценка эффекта спаривания: $\Delta_{nn}^{(4)}$



Нейтрон-протонные корреляции



Shell model (Zeldes, Nucl. Phys. 1958)

$$B(N_0 + n, Z_0 + p) = B(N_0, Z_0) + n\varepsilon_n + p\varepsilon_p + W(j_1^n) + W(j_2^p) + I(j_1^n, j_2^p),$$

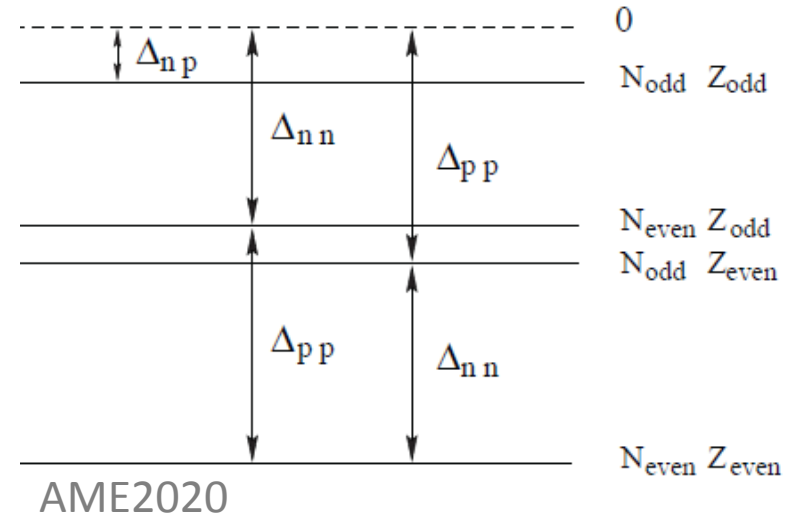
$$W(j^n) = \frac{1}{2} \left(n - \frac{1 - (-1)^n}{2} \right) \pi + \frac{n(n-1)}{2} d,$$

$$I(j_1^n, j_2^p) = npI^0 + \frac{(1 - (-1)^n)(1 - (-1)^p)}{4} I',$$

$$\begin{aligned} B(N_0 + n, Z_0 + p) &= \\ &= B(N_0, Z_0) + n\varepsilon_n + p\varepsilon_p + \frac{n}{2}\pi_n + \frac{p}{2}\pi_p + \\ &\quad + \frac{n(n-1)}{2}d_n + \frac{p(p-1)}{2}d_p + npI^0 - \delta, \end{aligned}$$

where the parity term δ is given by

$$\delta = \begin{cases} 0, & ee, \\ \frac{1}{2}\pi_p, & eo, \\ \frac{1}{2}\pi_n, & oe, \\ \frac{1}{2}\pi_n + \frac{1}{2}\pi_p - I', & oo. \end{cases}$$



$$\Delta_{nn} = \pi_n + d_n,$$

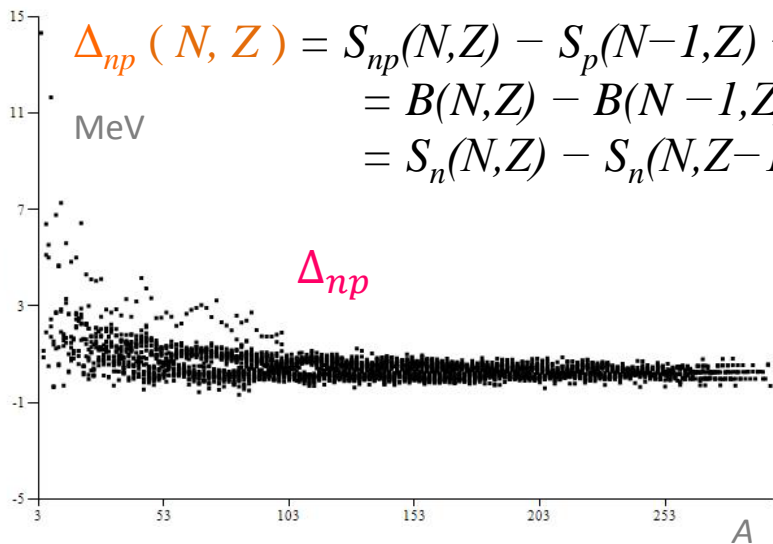
$$\Delta_{nn}^{(3)} = \pi_n - d_n,$$

$$\Delta_{nn}^{(5)} = 2\Delta_n^{(5)} = \pi_n.$$

Нейтрон-протонные корреляции

Ishkhanov et al. Chinese Phys C 2019

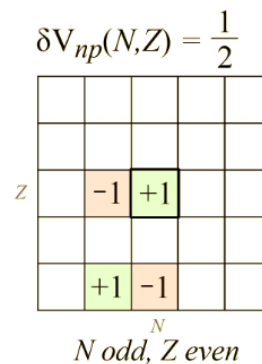
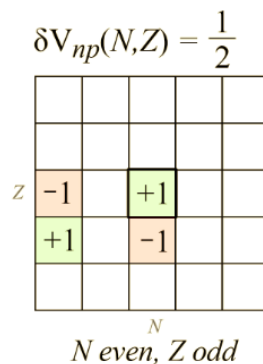
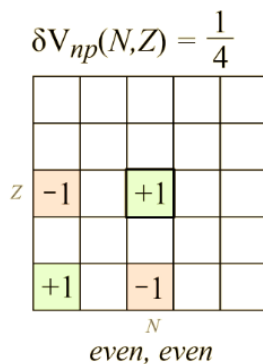
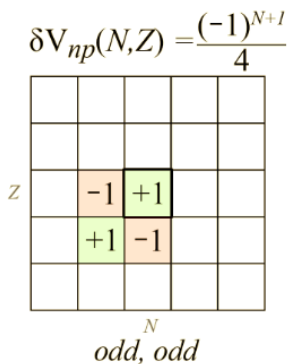
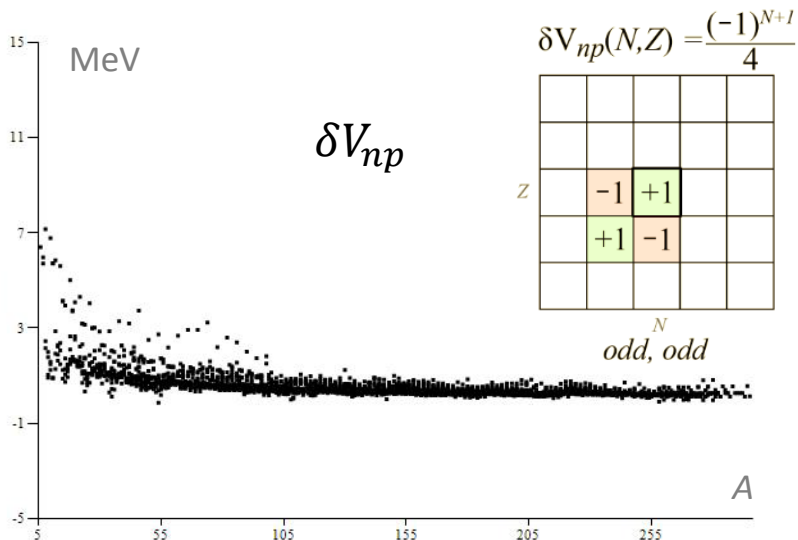
$$\begin{aligned} \Delta_{np}(N, Z) &= S_{np}(N, Z) - S_p(N-1, Z) - S_n(N, Z-1) = \\ &= B(N, Z) - B(N-1, Z) - B(N, Z-1) + B(N-1, Z-1) = \\ &= S_n(N, Z) - S_n(N, Z-1) = S_p(N, Z) - S_p(N-1, Z) = \end{aligned}$$



$$\Delta_{np} = (-1)^A$$

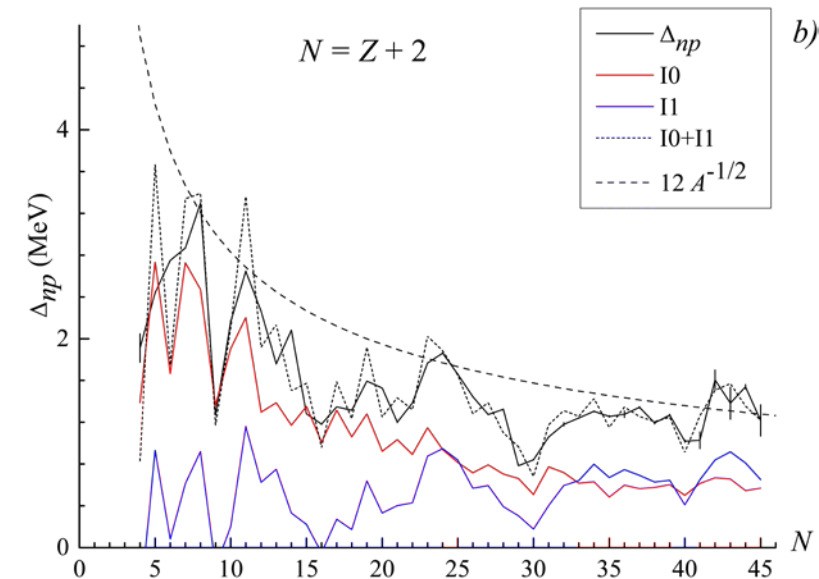
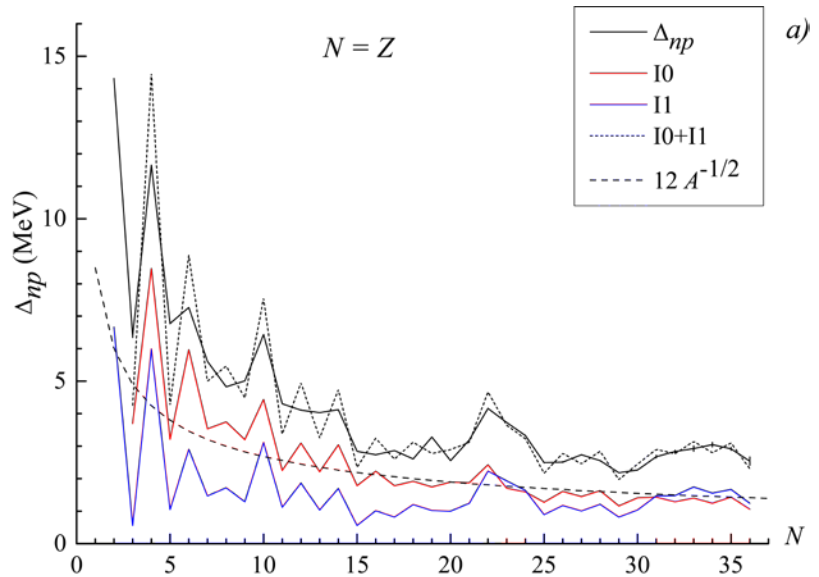
Z	-1	1
	1	-1
	N	

$$\begin{aligned} \Delta_{np} &= \Delta_{np}^{(7)} = I' + I^0(ee, oo), \\ \Delta_{np} &= \Delta_{np}^{(7)} = I' - I^0(oe, eo). \end{aligned}$$

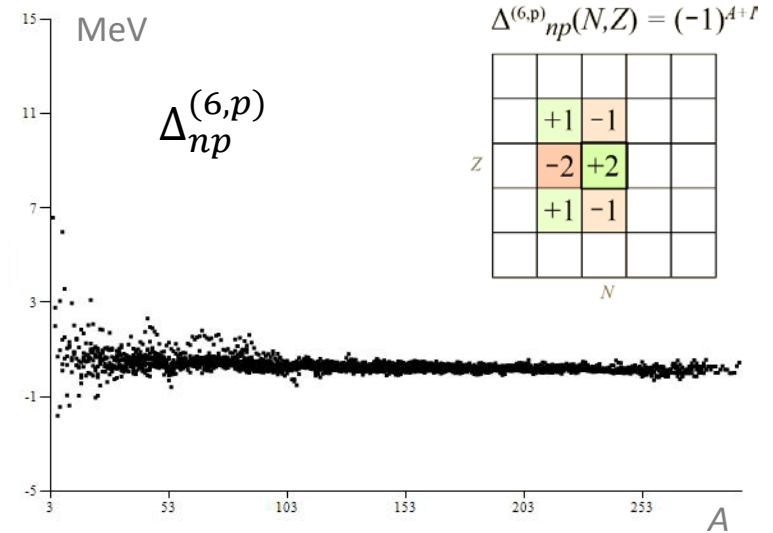


$$\delta V_{np} = \begin{cases} I' + I_0, & (oo) \\ I_0 & (ee, oe, eo) \end{cases}$$

Нейтрон-протонные корреляции



Ishkhanov et al. Chinese Phys C 2019



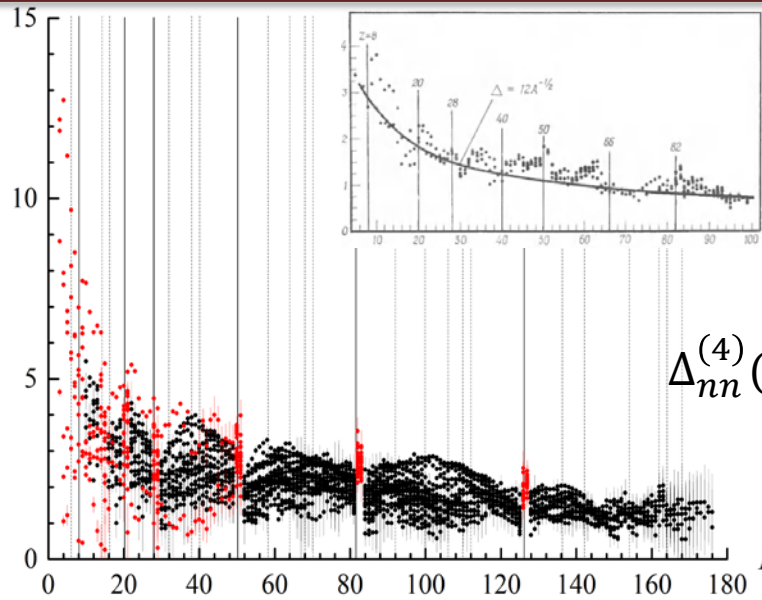
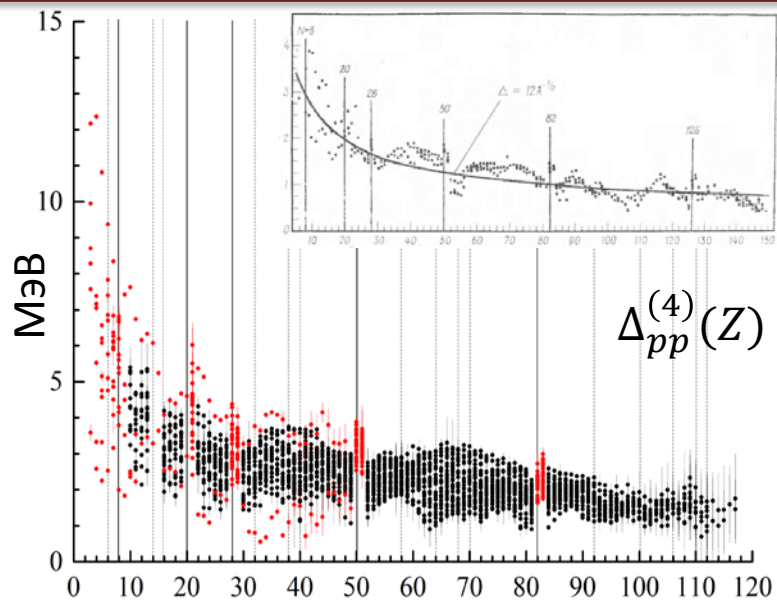
$$\Delta_{np}^{(6,n)} = \Delta_{np}^{(6,p)} = I'$$

Энергия Вигнера

$$E_W = W \left(\frac{|N - Z|}{A} + d \right), \quad W = 30 \text{ МэВ}$$

$$d = \begin{cases} \frac{1}{A}, & N = Z, oo \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Аппроксимации массовых соотношений



[Bohr A., Mottelson B.R. // Nuclear Structure, v. 1, Benjamin, N.Y., 1969.]

Для $\Delta_{pp}^{(4)}(Z)$
и $\delta_e(Z)$

выделены

точки:

$Z < 8, N < 8$

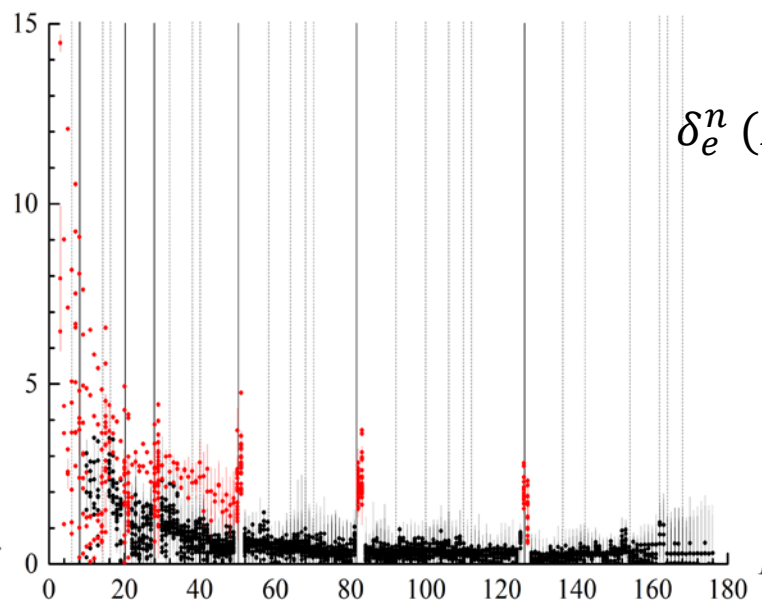
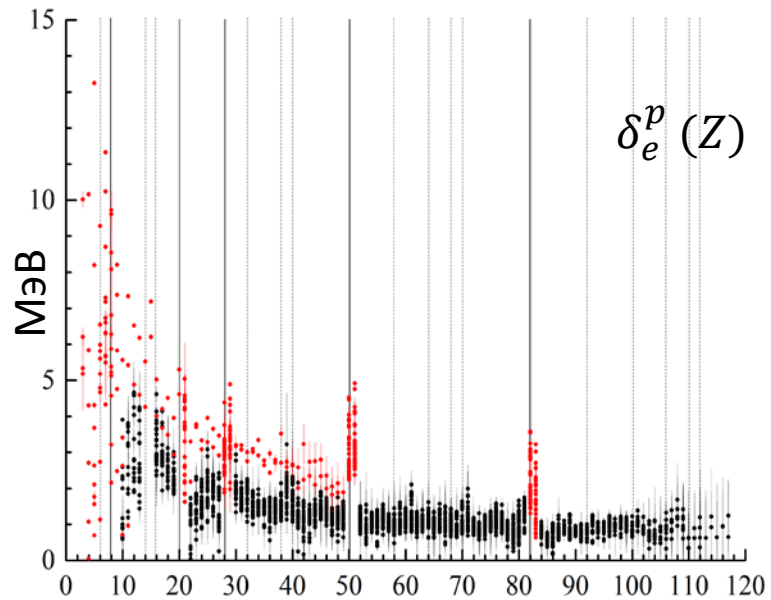
$Z = \text{маг.ч.}$

$Z+1 = \text{маг.ч.}$

$Z = N$

$Z+1 = N$

Аналогично
для
нейтронов



Аппроксимации массовых соотношений

$$\Delta_{nn}^{(4)}(A) \text{ \& } \Delta_{pp}^{(4)}(A) \approx (10,9 \pm 0,3) \cdot A^{-(0,34 \pm 0,01)}$$

$$\sigma = 0,52 \text{ MeV}$$

$$9,8 \cdot A^{-1/3} *$$

$$\sigma = 0,54 \text{ MeV}$$

$$24 \cdot A^{-1/2} **$$

$$\sigma = 0,59 \text{ MeV}$$

$$\delta_e^n(A) \approx (32,3 \pm 2,1) \cdot A^{-(0,90 \pm 0,02)}$$

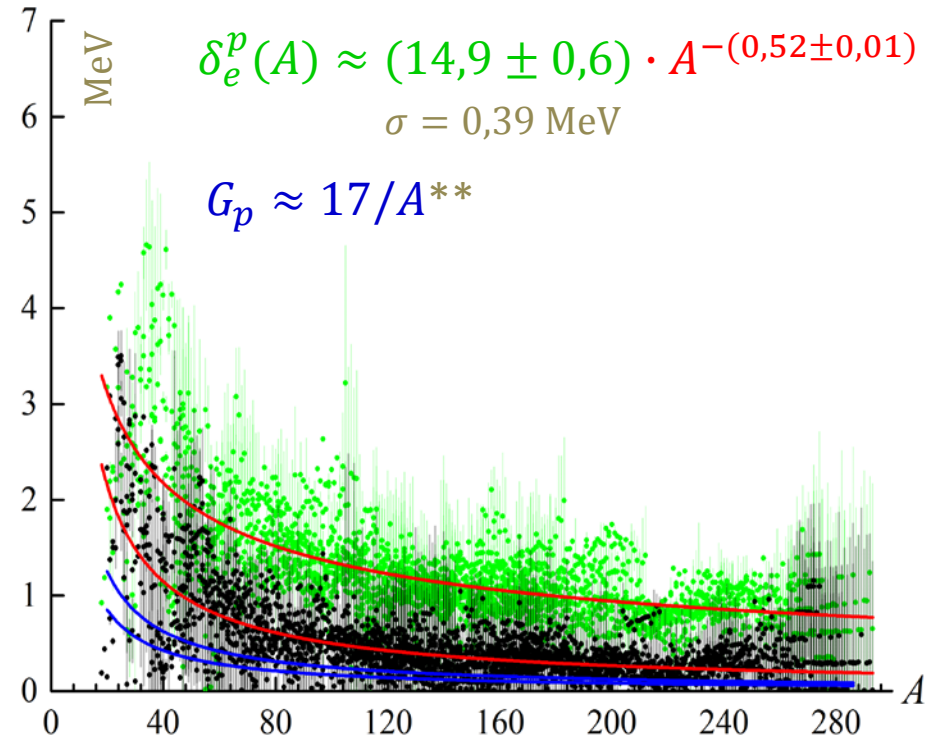
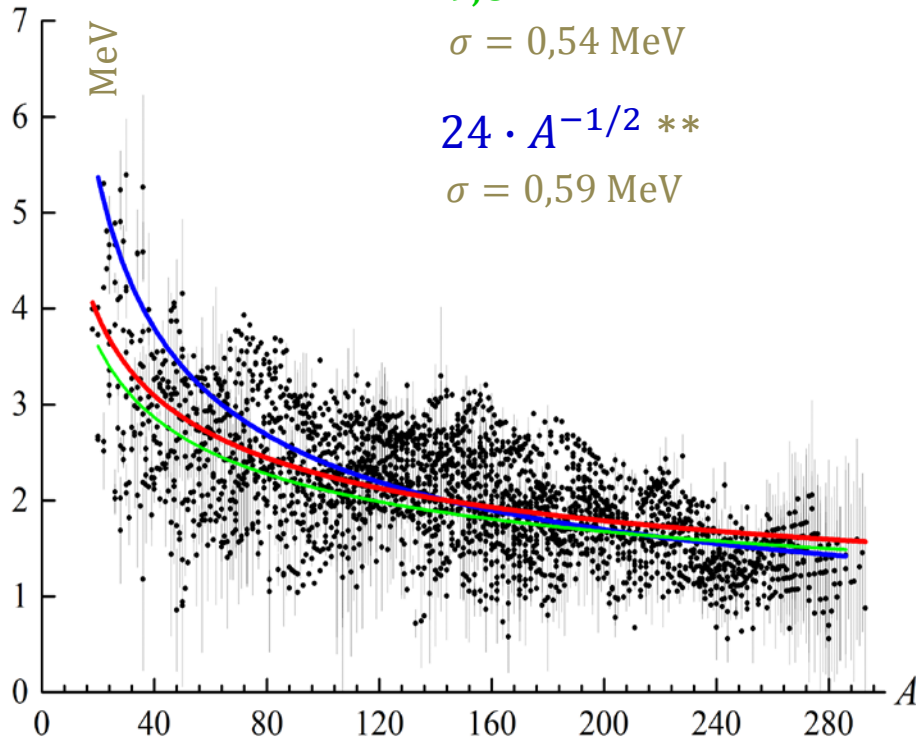
$$\sigma = 0,30 \text{ MeV}$$

$$G_n \approx 25/A^*$$

$$\delta_e^p(A) \approx (14,9 \pm 0,6) \cdot A^{-(0,52 \pm 0,01)}$$

$$\sigma = 0,39 \text{ MeV}$$

$$G_p \approx 17/A^{**}$$



*S. Hilaire 2002,

**Moller P., Nix J.R. 1992

* P. Vogel, B. Jonson, P.G. Hansen. 1984

** Bohr A., Mottelson B.R. Nuclear Structure, 1969.

Аппроксимации массовых соотношений

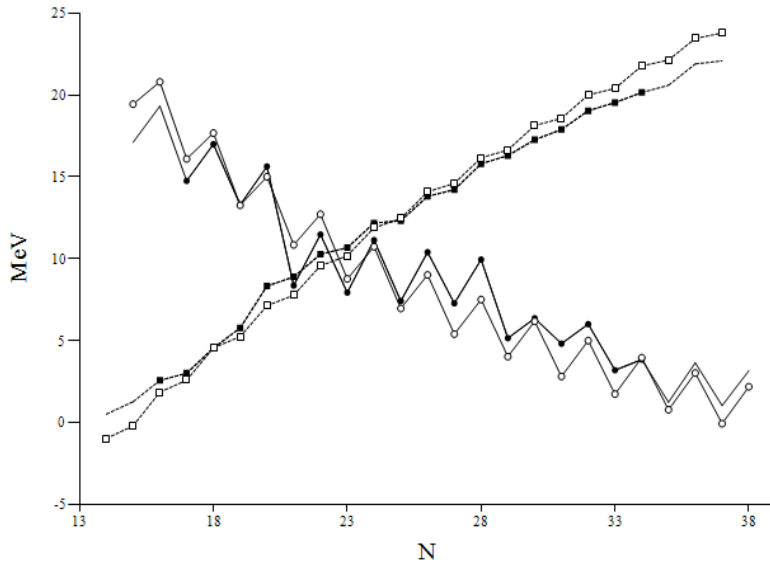
Аппроксимация $C \cdot A^{-b}$

	C	b
π_n	8,7(5)	-0,30(1)
π_p	11,6(5)	-0,34(1)
d_n	44(5)	-1,09(3)
d_p	18(1)	-0,70(2)
I'	8,0(8)	-0,70(2)
I^0	20(1)	-0,84(1)

Аппроксимации $C \cdot A^{-n/3}$

	нейтроны	протоны
$\pi(A) = C/A^{1/3}$	10,21(6)	11,52(6)
$d(A) = C/A$	-30,3(6)	-67,6(8)
	I'	I^0
C/A	29,6(4)	39,9(3)
$C/A^{2/3}$	6,72(8)	8,87(7)
$C/A^{1/3}$	1,38(2)	1,79(2)

Изотопы $Z = 20$ (Ca - Calcium)



Спаривание по
полученным аппрокс.:

$$\Delta_n = 5,11 \cdot A^{-1/3},$$

$$\Delta_p = 5,74 \cdot A^{-1/3},$$

$$\Delta_{np} = 7,04 \cdot A^{-2/3}$$

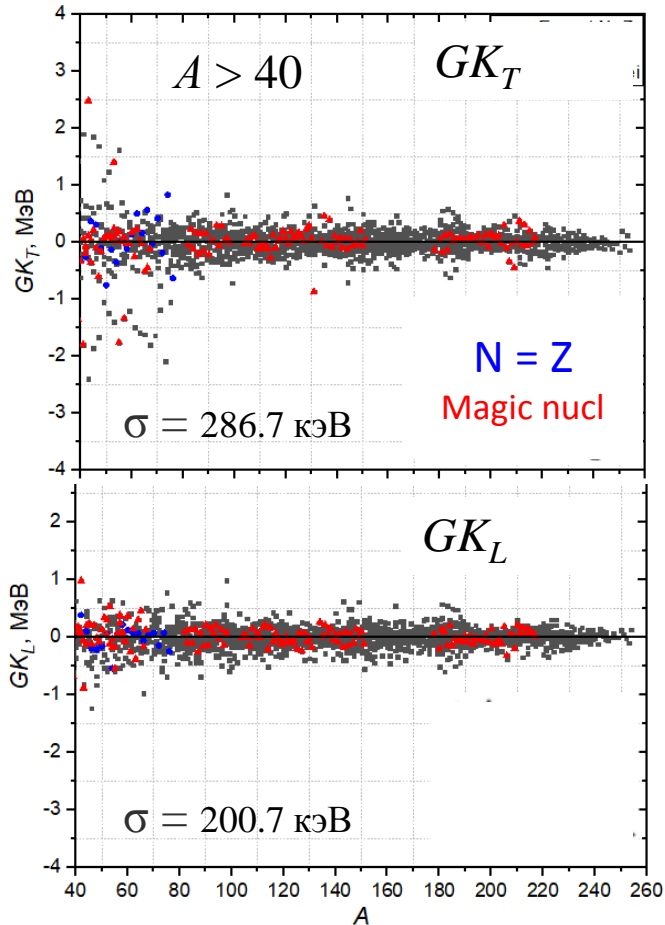
Ishkhanov et al. Chinese Phys C 2019

- Парные корреляции нуклонов и массовые соотношения
 - Четно-нечетный эффект и спаривание тождественных нуклонов
 - Нейтрон-протонные корреляции
 - Аппроксимации
- **Предсказания масс неизвестных ядер**
 - Метод локальных массовых соотношений
 - Предсказания в области сверхтяжелых ядер
- Спектры низколежащих состояний
 - Мультиплет основного состояния
 - Спектры для $j = 9/2$

Соотношения Гарви-Келсона (1966)

$$GK_T: -B(N+2, Z-2) + B(N, Z) - B(N, Z-1) + B(N+1, Z-2) - B(N+1, Z) + B(N+2, Z-1) = 0$$

$$GK_L: -B(N+2, Z) + B(N, Z-2) - B(N+1, Z-2) + B(N+2, Z-1) - B(N, Z-1) + B(N+1, Z) = 0$$



Z				a)
	1	-1		
	-1		1	
		1	-1	
				N

$$GK_T = \Delta_{np}(N + 2, Z - 1) - \Delta_{np}(N + 1, Z) = 0$$

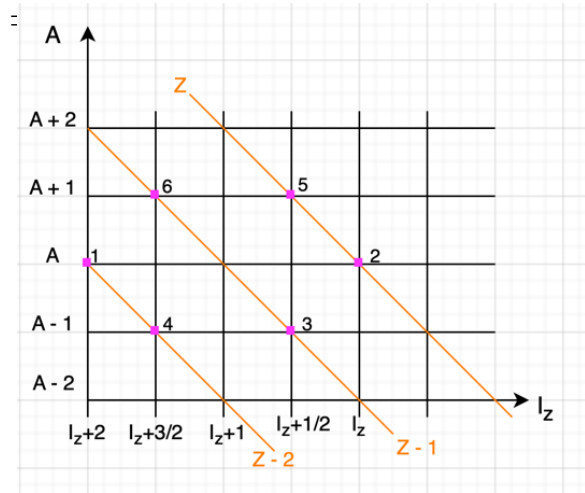
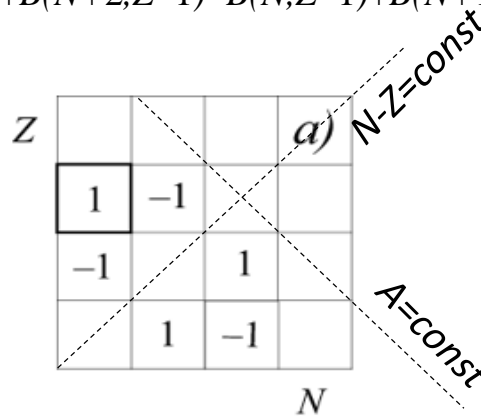
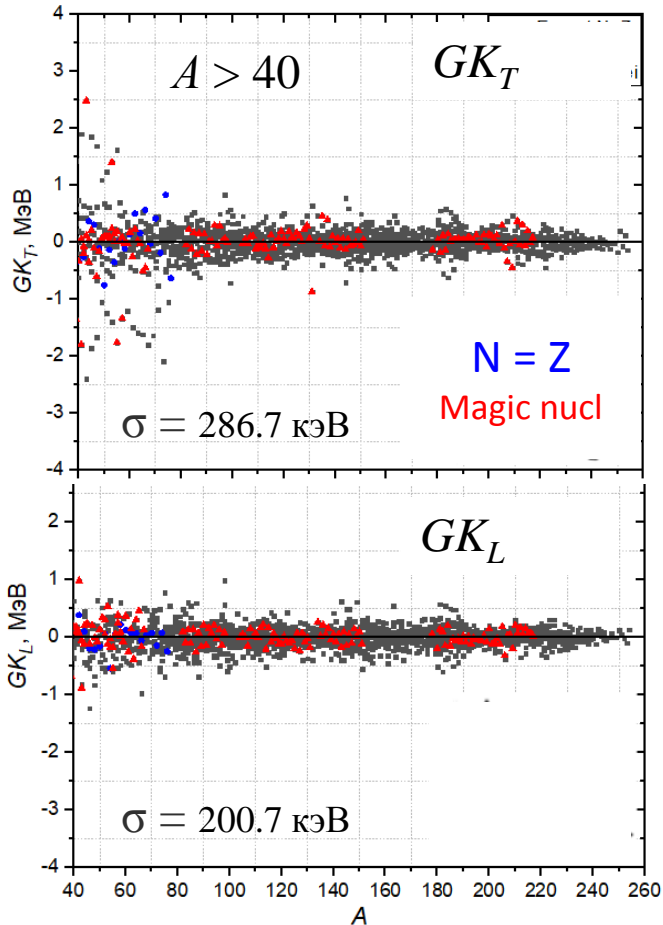
Z				b)
		1	-1	
	-1		1	
	1	-1		
				N

$$GK_L = \Delta_{np}(N + 1, Z - 1) - \Delta_{np}(N + 2, Z) = 0$$

Соотношения Гарви-Келсона (1966)

$$GK_T: -B(N+2, Z-2) + B(N, Z) - B(N, Z-1) + B(N+1, Z-2) - B(N+1, Z) + B(N+2, Z-1) = 0$$

$$GK_L: -B(N+2, Z) + B(N, Z-2) - B(N+1, Z-2) + B(N+2, Z-1) - B(N, Z-1) + B(N+1, Z) = 0$$



Формула Коулмана-Глэшоу (1961)

$$\Delta m_1 = \Delta m_4,$$

$$\Delta m_5 = \Delta m_2,$$

$$\Delta m_3 = \Delta m_6.$$

$$m_1 + m_5 + m_3 = m_4 + m_2 + m_6$$

Метод локальных массовых соотношений

E.V. Vladimirova, et al Int. Jour. of Modern Phys. E, 2021

Массовое соотношение, описывающее пр-корреляции:

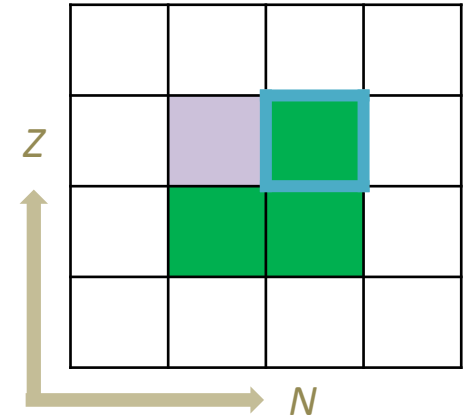
$$\Delta_{np}(Z, N) = [S_p(Z, N) - S_p(Z, N - 1)] = \\ = [B(Z, N) - B(Z, N - 1)] - [B(Z - 1, N) - B(Z - 1, N - 1)]$$

[Kravtsov V.A. Sov. Phys. JETP. 1959]

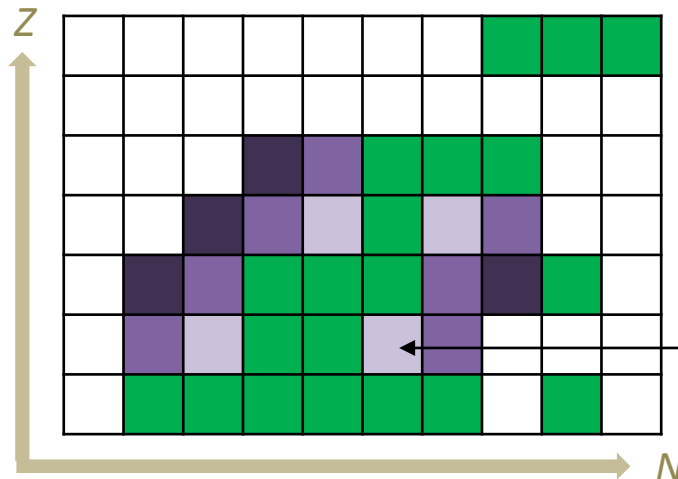
Предсказываемая энергия связи (1 из 4 возможных формул):

$$B_{pred}(Z, N - 1) = \\ = B(Z, N) - B(Z - 1, N) + B(Z - 1, N - 1) - \Delta_{np}^{cal}(Z, N)$$

[J. Janecke, H. Behrens // Phys. Rev. C 1974]



Итерационные вычисления:



Энергия связи такого ядра может быть выражена из двух различных Δ_{np} => используется усреднение

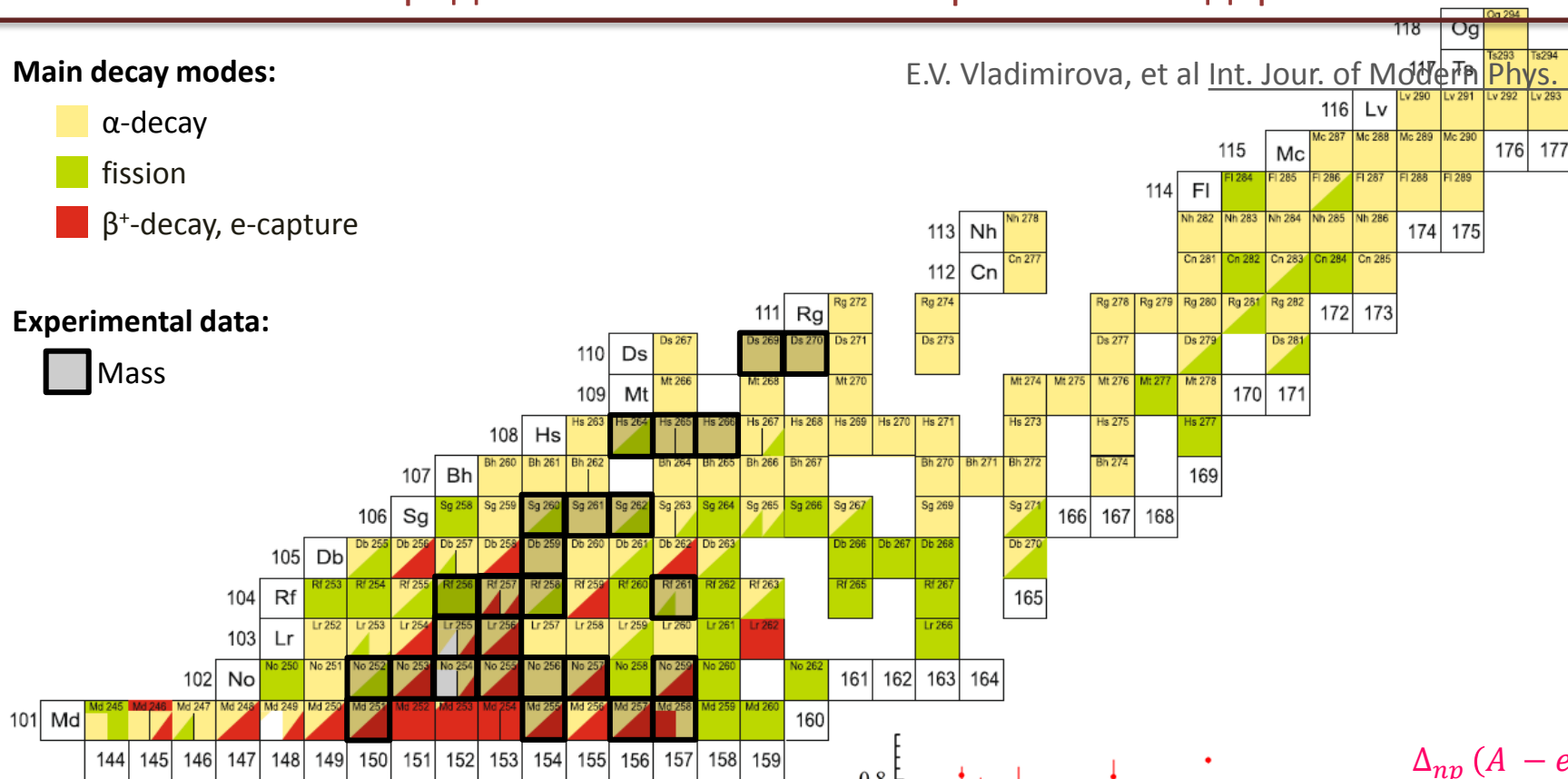
Предсказания в области сверхтяжелых ядер

Main decay modes:

- α -decay
- fission
- β^+ -decay, e-capture

Experimental data:

Mass



E.V. Vladimirova, et al Int. Jour. of Modern Phys. E, 2021

$$\Delta_{np}^{cal}(A) = C_1 + C_2 \cdot A^\gamma$$

A even

A odd

C_1 , MeV $-0,031 \pm 0,083$ $0,116 \pm 0,005$

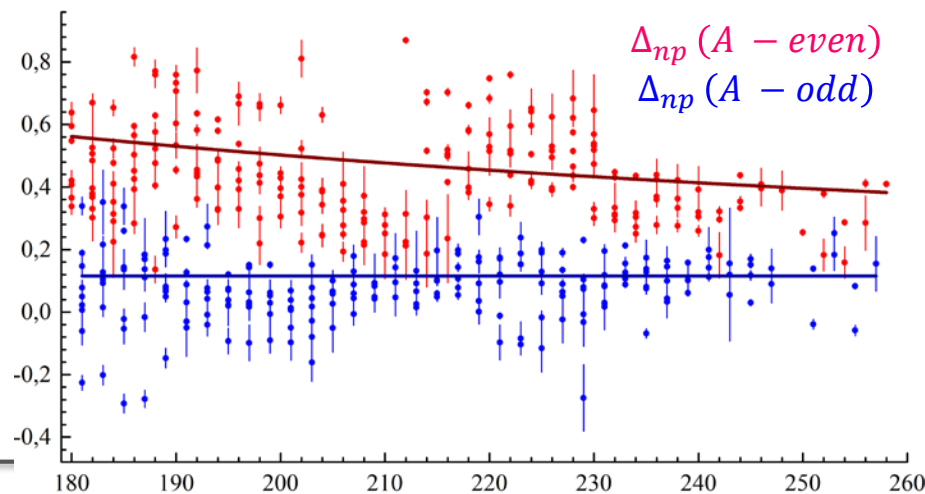
C_2 , MeV $106,599 \pm 16,646$ —

γ -1 —

RMSD, keV

153

111

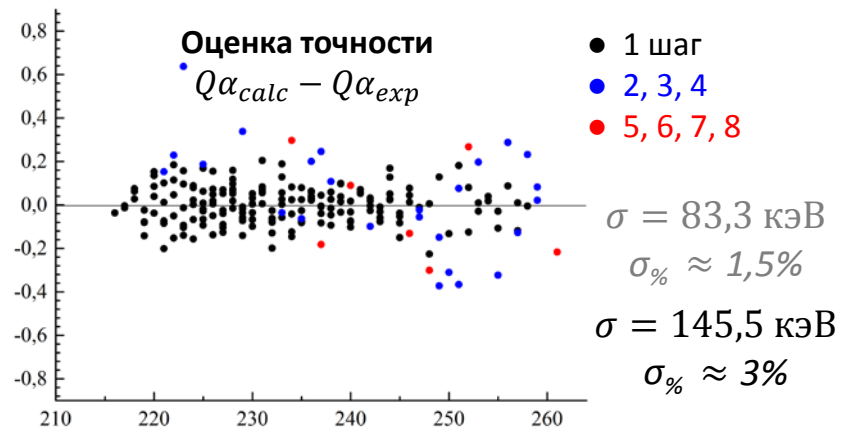
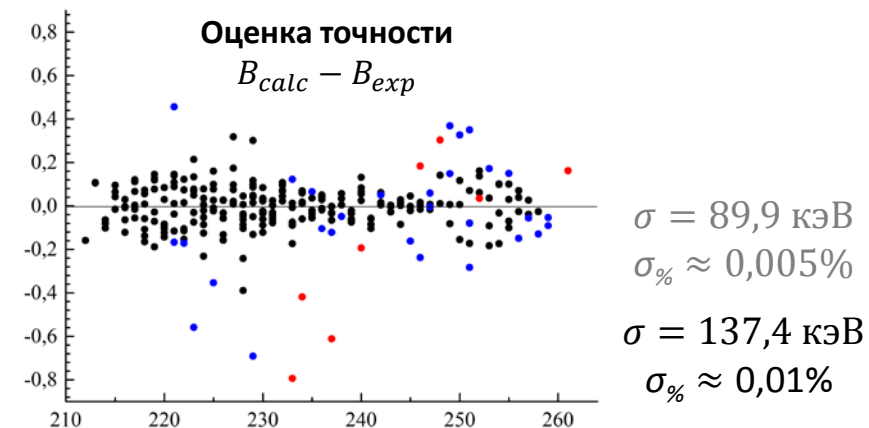
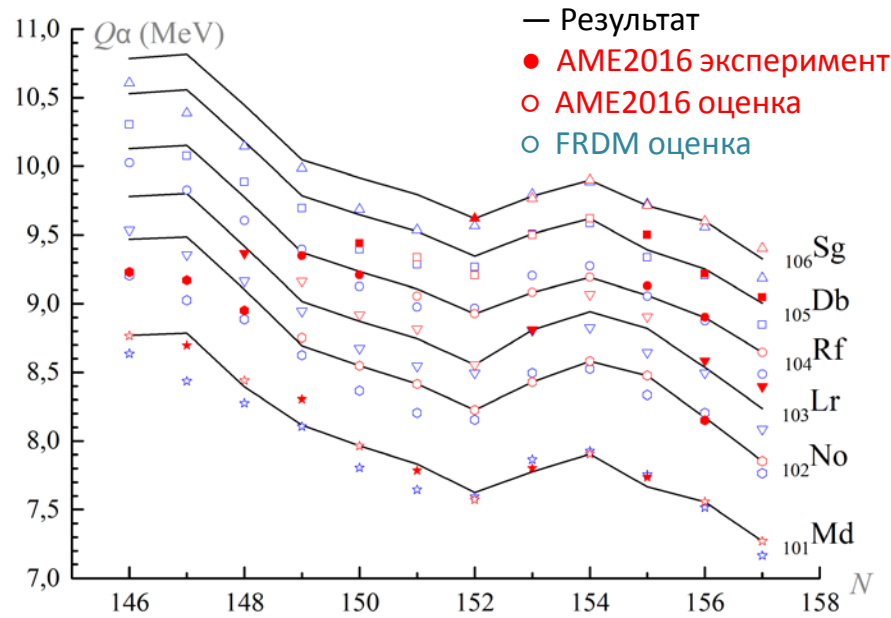
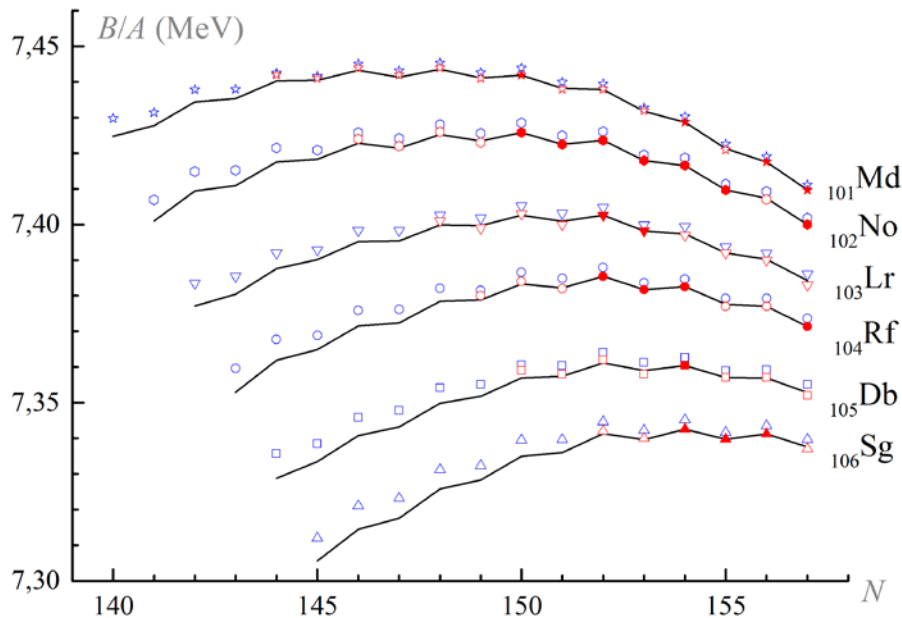


$\Delta_{np}(A - \text{even})$

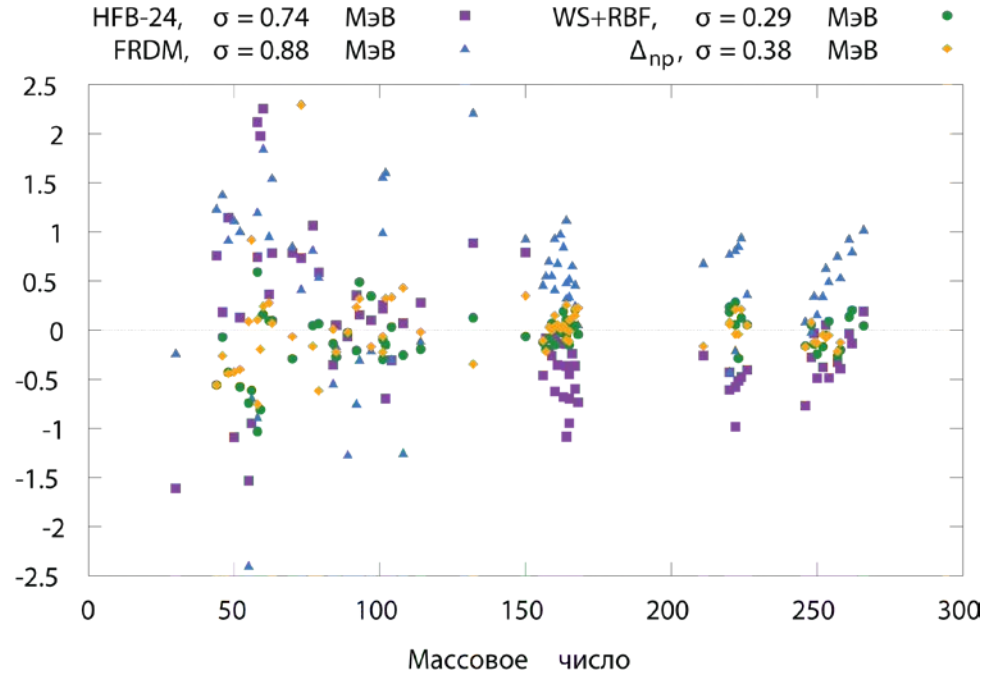
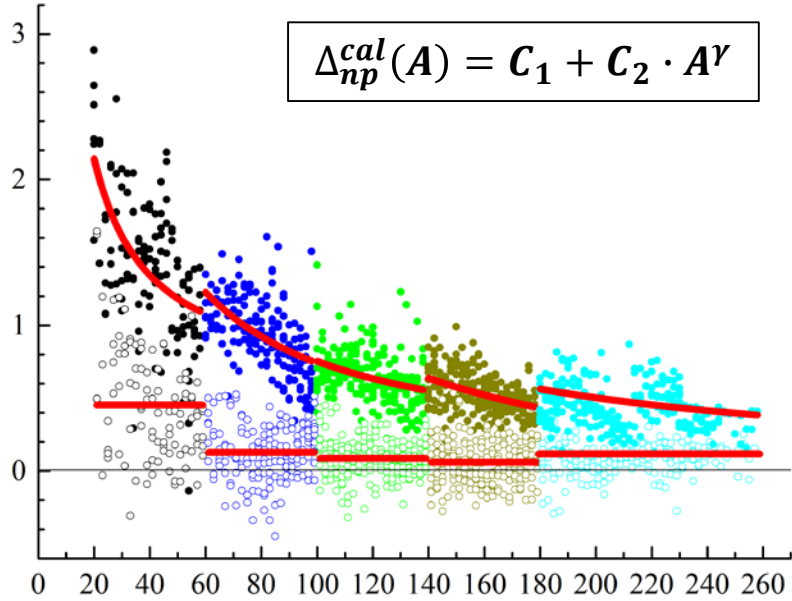
$\Delta_{np}(A - \text{odd})$

Предсказания в области сверхтяжелых ядер

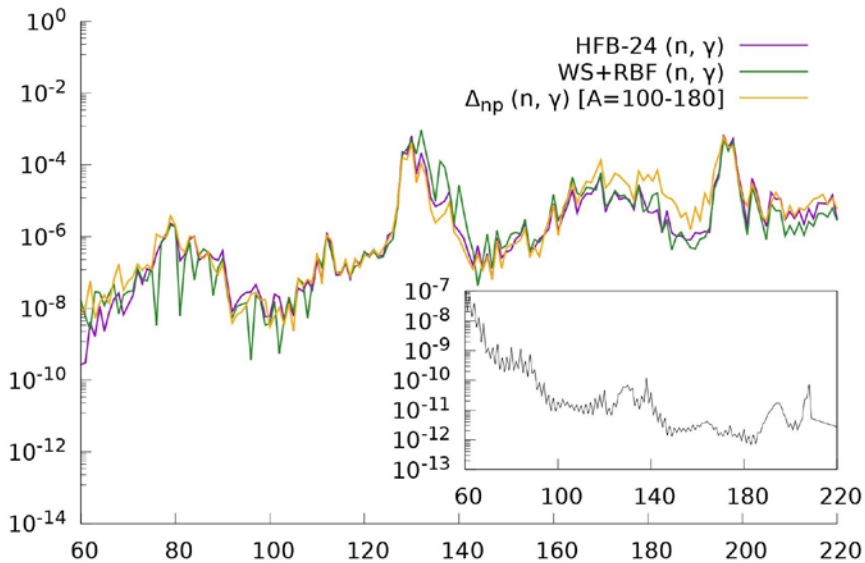
E.V. Vladimirova, et al Int. Jour. of Modern Phys. E, 2021



Предсказания границ существования ядер



Отклонение предсказаний энергий связи для новых ядер в АМЕ2020



Владиминова Е.В., и др
 Известия РАН. Серия физическая, 2022

Предсказания границ существования ядер

Vladimirova, Simonov, Tretyakova AIP Conference Proceedings 2021

Локализация области существования по S_p , S_{pp} , S_n , S_{nn}

Результат

■ На основе AME 2016

Экспериментальные данные

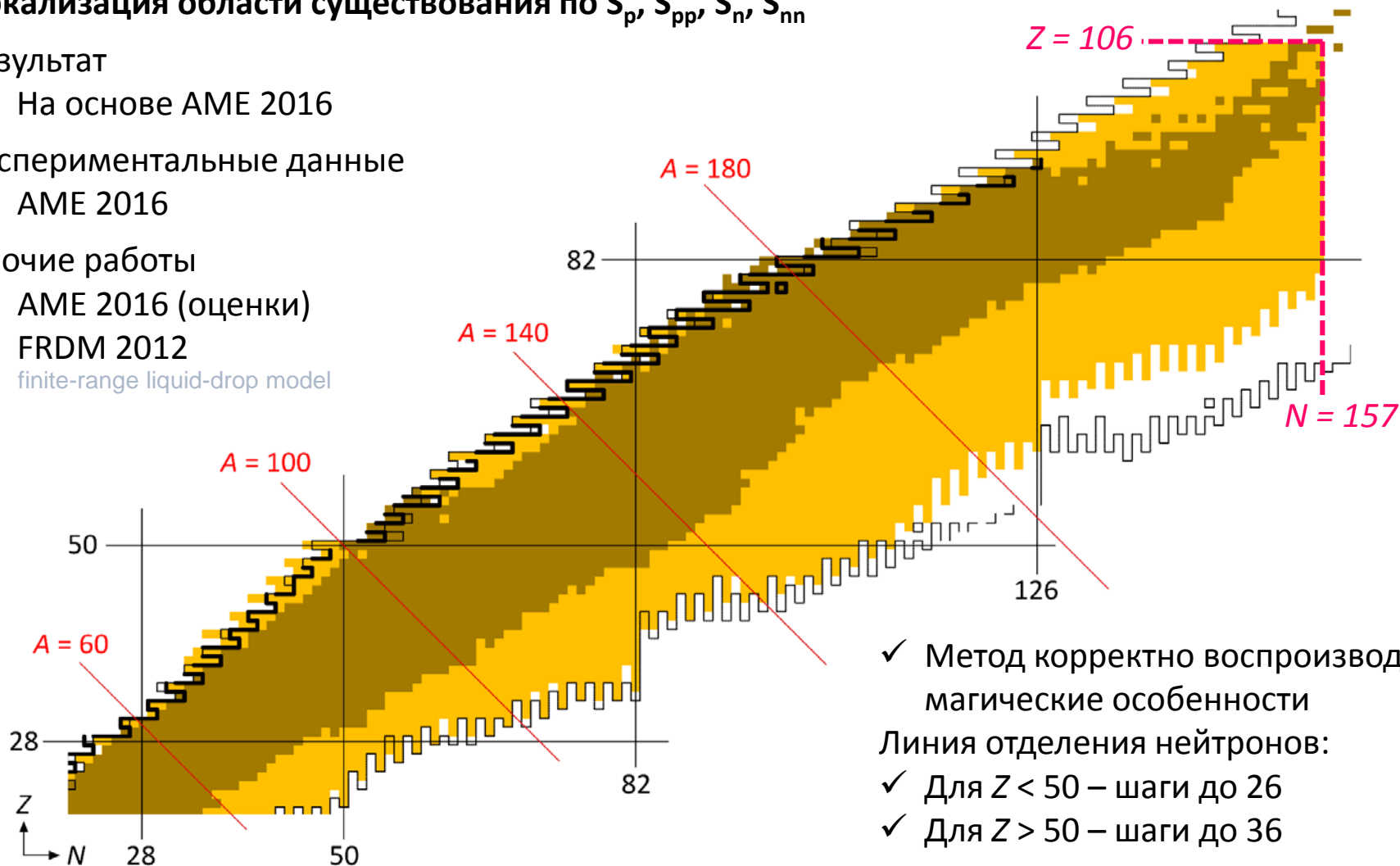
■ AME 2016

Прочие работы

— AME 2016 (оценки)

— FRDM 2012

finite-range liquid-drop model



✓ Метод корректно воспроизводит магические особенности

Линия отделения нейтронов:

✓ Для $Z < 50$ – шаги до 26

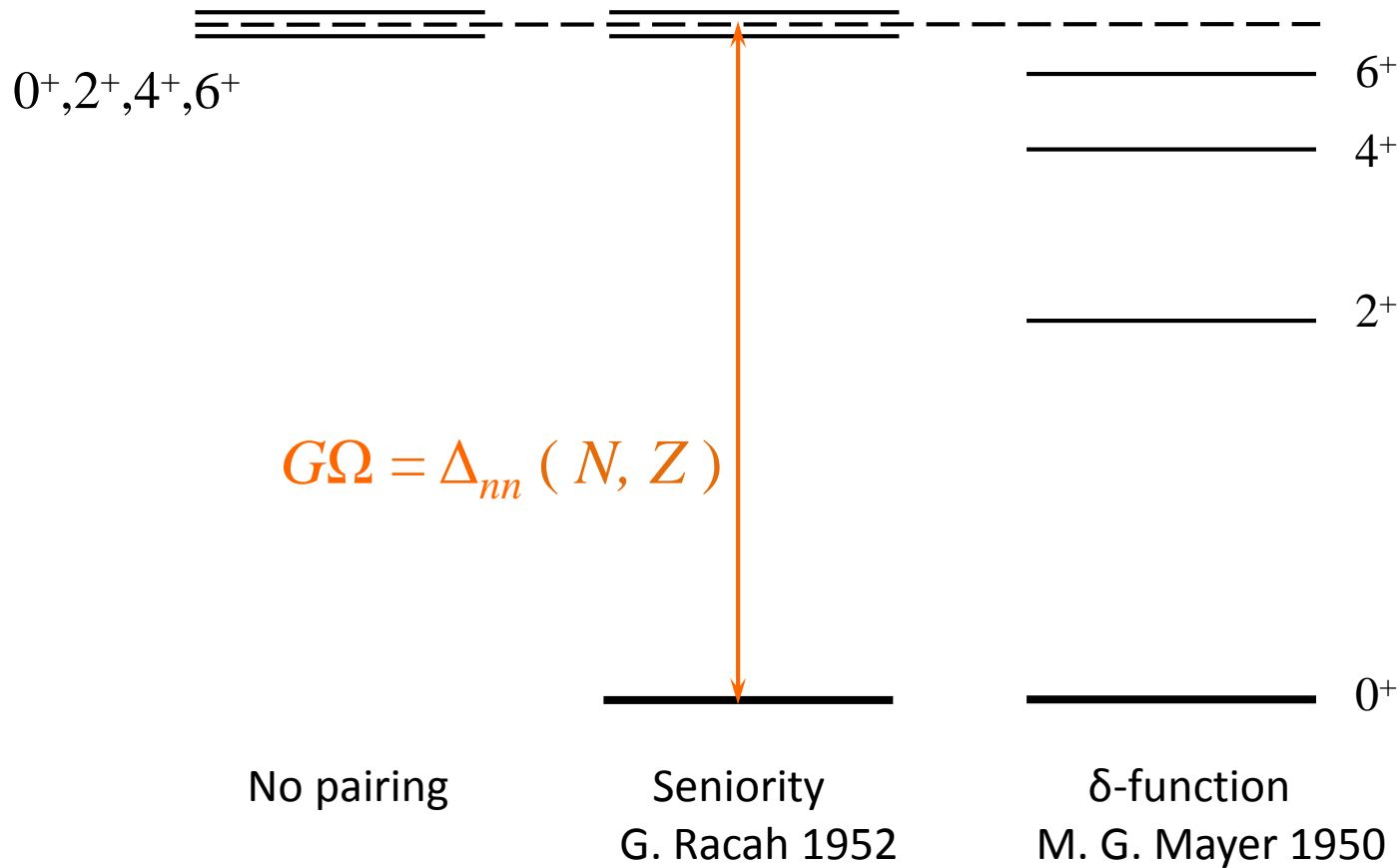
✓ Для $Z > 50$ – шаги до 36

- Парные корреляции нуклонов и массовые соотношения
 - Четно-нечетный эффект и спаривание тождественных нуклонов
 - Нейтрон-протонные корреляции
 - Аппроксимации
- Предсказания масс неизвестных ядер
 - Метод локальных массовых соотношений
 - Предсказания в области сверхтяжелых ядер
- **Спектры низколежащих возбужденных состояний**
 - Мультиплет основного состояния
 - Спектры для $j = 9/2$

Мультиплет основного состояния

Два тождественных нуклона сверх замкнутого остова в состоянии $j=7/2$:

$$J = j + j = \frac{7}{2} + \frac{7}{2} = 0, 2, 4, 6$$

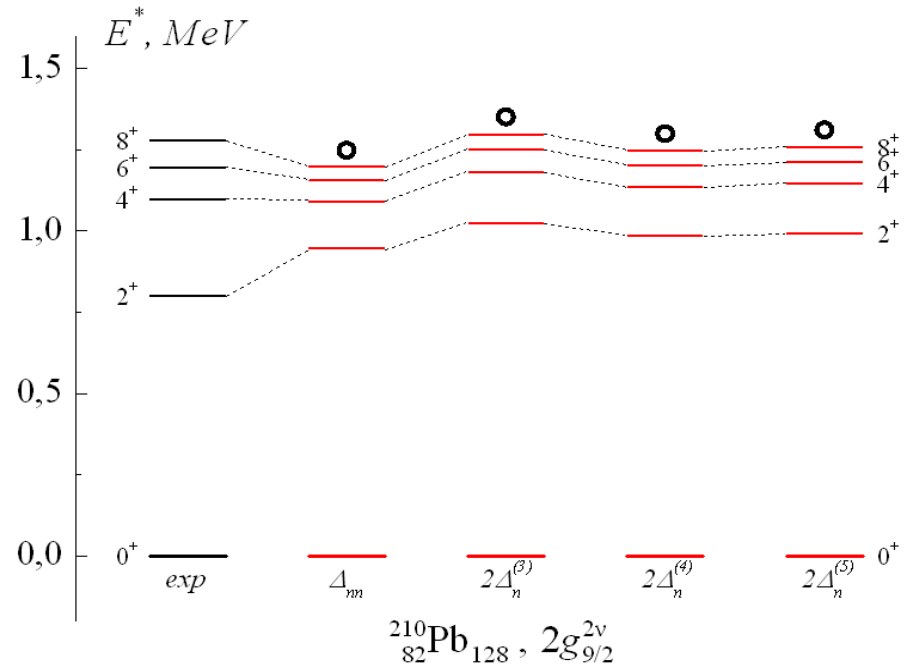
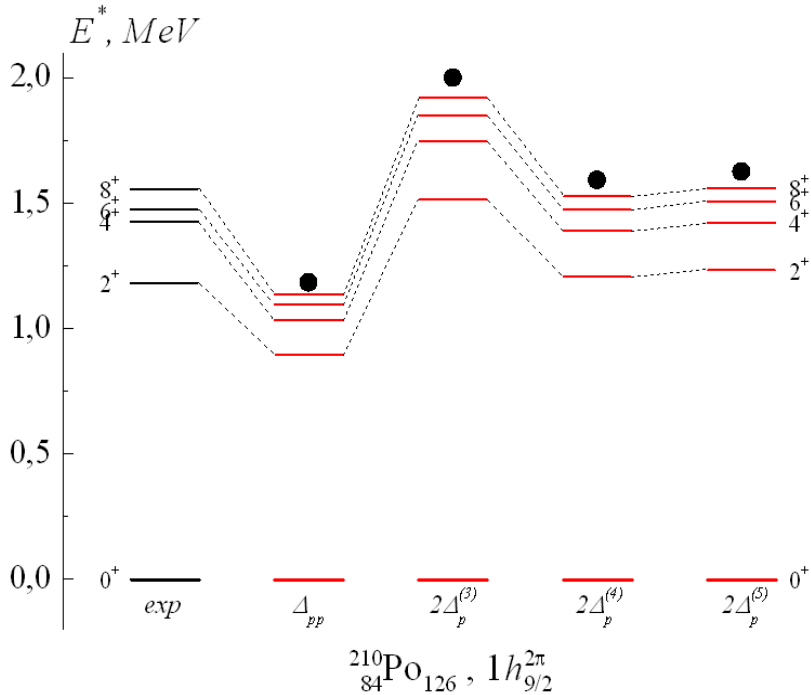


Мультиплет основного состояния

Приближение δ -потенциала

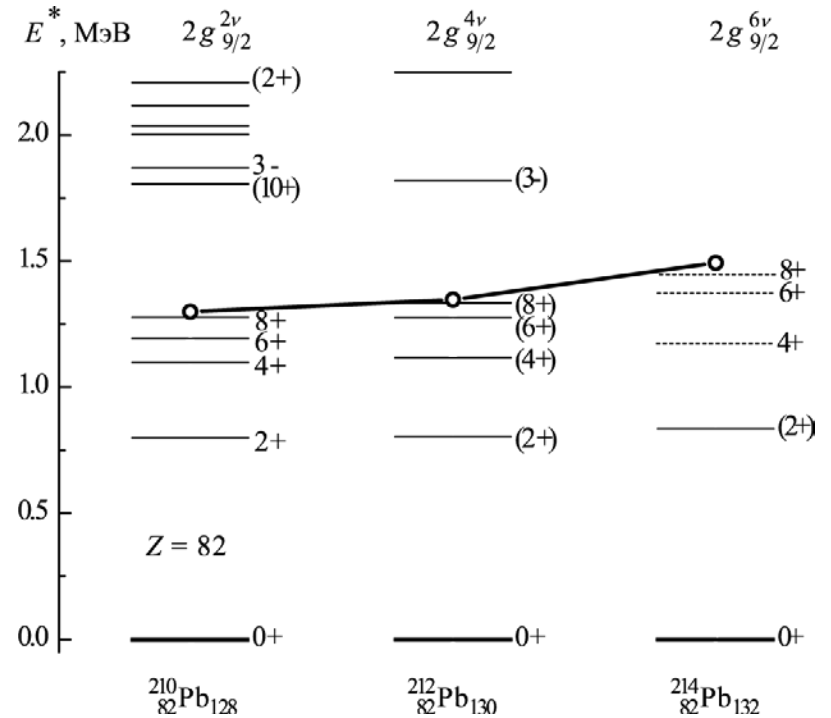
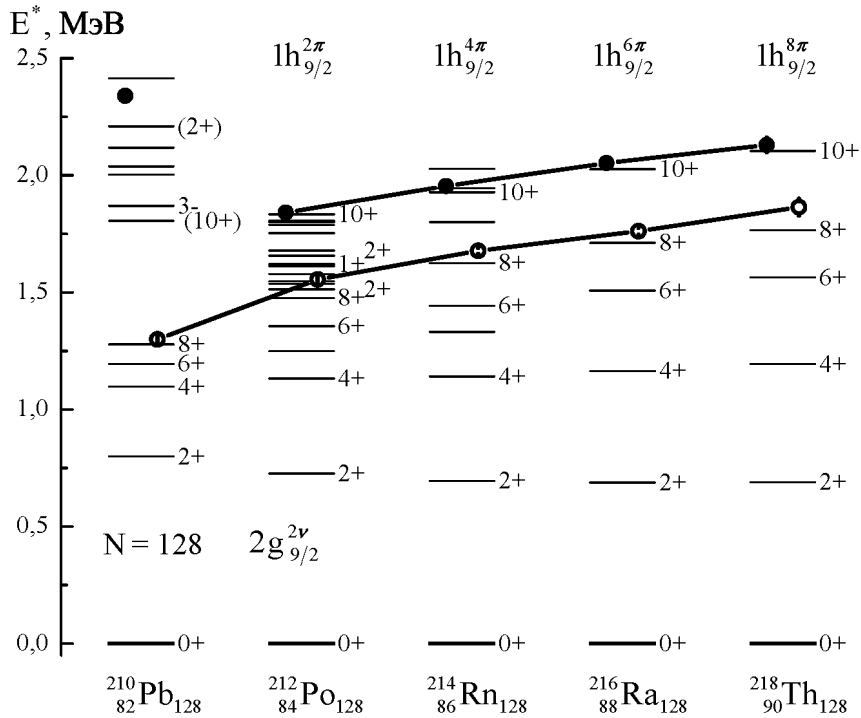
$$V(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = -V_0 \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2),$$

$$\frac{\Delta E_J}{\Delta E_0} = \begin{pmatrix} j & j & J \\ 1 & -1 & 0 \end{pmatrix}^2 (2j+1) \begin{cases} \left(1 + \frac{(2j+1)^2}{J(J+1)} \right), & \text{при } T=0, S=1, \text{ odd } J, \\ 1, & \text{при } T=1, S=0, \text{ even } J. \end{cases}$$

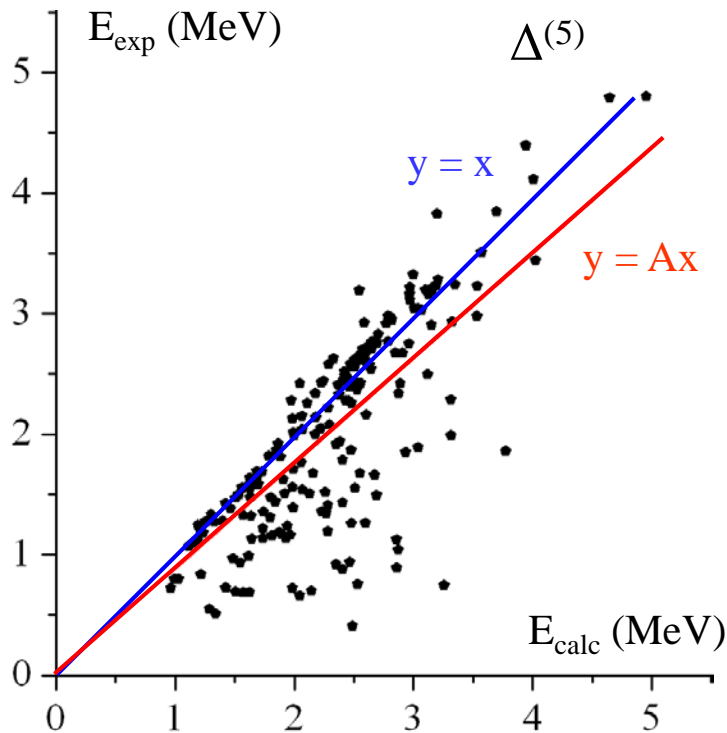


2014 Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю.
Вестник Московского университета

Мультиплет основного состояния



2014 Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю.
Вестник Московского университета



$j = 7/2$: $^{42-46}\text{Ca}$, $^{42-56}\text{Ti}$, $^{46-54}\text{Cr}$, ^{58}Cr , ^{50}Fe ,
 ^{54}Fe , ^{134}Sn , ^{134}Te

$j = 9/2$: ^{76}Ni , ^{82}Zr , ^{92}Mo , ^{98}Cd , $^{210-214}\text{Pb}$,
 $^{210-212}\text{Po}$, $^{216-218}\text{Po}$, $^{212-214}\text{Rn}$, $^{214-}$
 ^{216}Ra , $^{216-218}\text{Th}$

$j = 11/2$: $^{122-130}\text{Sn}$, ^{148}Dy

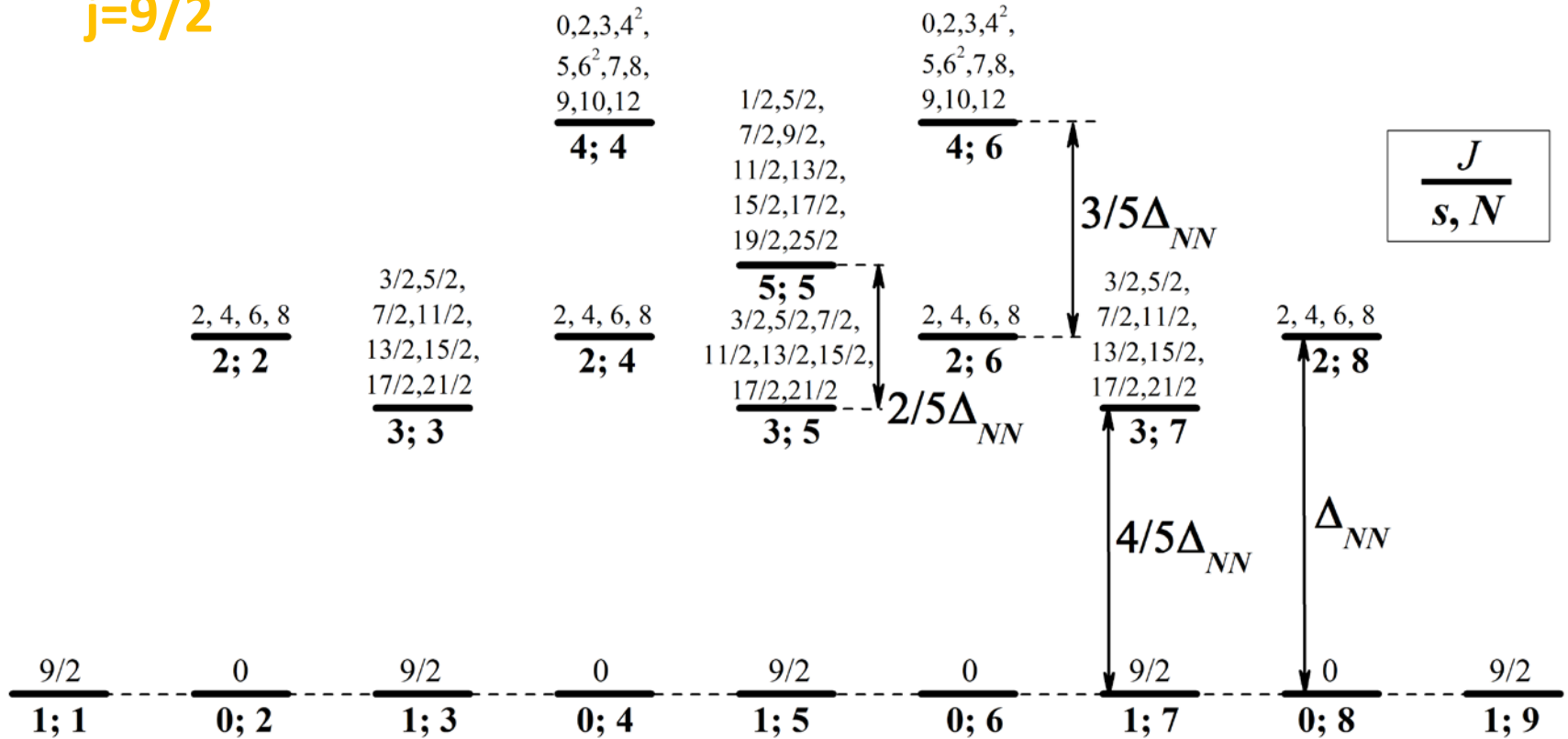
$j = 13/2$: $^{184-194}\text{Pb}$

L. Imasheva et al, PEPAN, 48 (2017)

Pairing	$J>0$		$J=\text{max}$	
	A	σ	A	σ
$_{nn}, \Delta_{pp}$	0.991	0.621	1.163	0.560
$2\Delta_n^{(3)}, 2\Delta_p^{(3)}$	0.751	0.902	0.849	0.608
$2\Delta_n^{(4)}, 2\Delta_p^{(4)}$	0.863	0.647	0.991	0.278
$2\Delta_n^{(5)}, 2\Delta_p^{(5)}$	0.871	0.634	1.004	0.246

Спектры для $j = 9/2$

$j=9/2$



Для сеньорити $s > 2$ расчет мультиплетов производится с использованием генеалогических коэффициентов (coefficients of fractional parentage, CFP) $\langle j^{N-1} s_1 J_1; j | j^N s J \rangle$

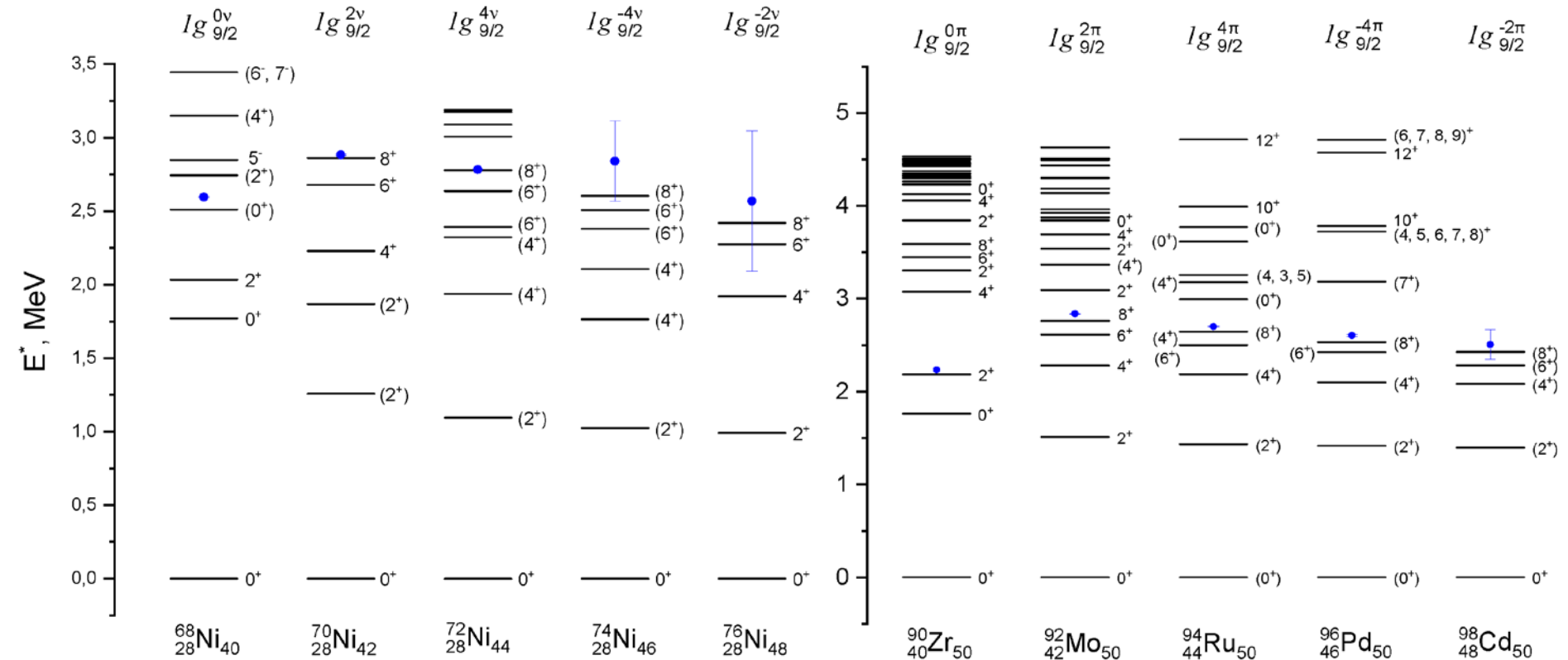
$$\Delta E_J = \sum_{J_1} \langle j^{N-1} s_1 J_1; j | j^N s J \rangle^2 \Delta E_{J_1},$$

Bayman, Lande. NP 77 (1966) 1

Спектры для $j = 9/2$

Изотопы никеля ($Z = 28$)

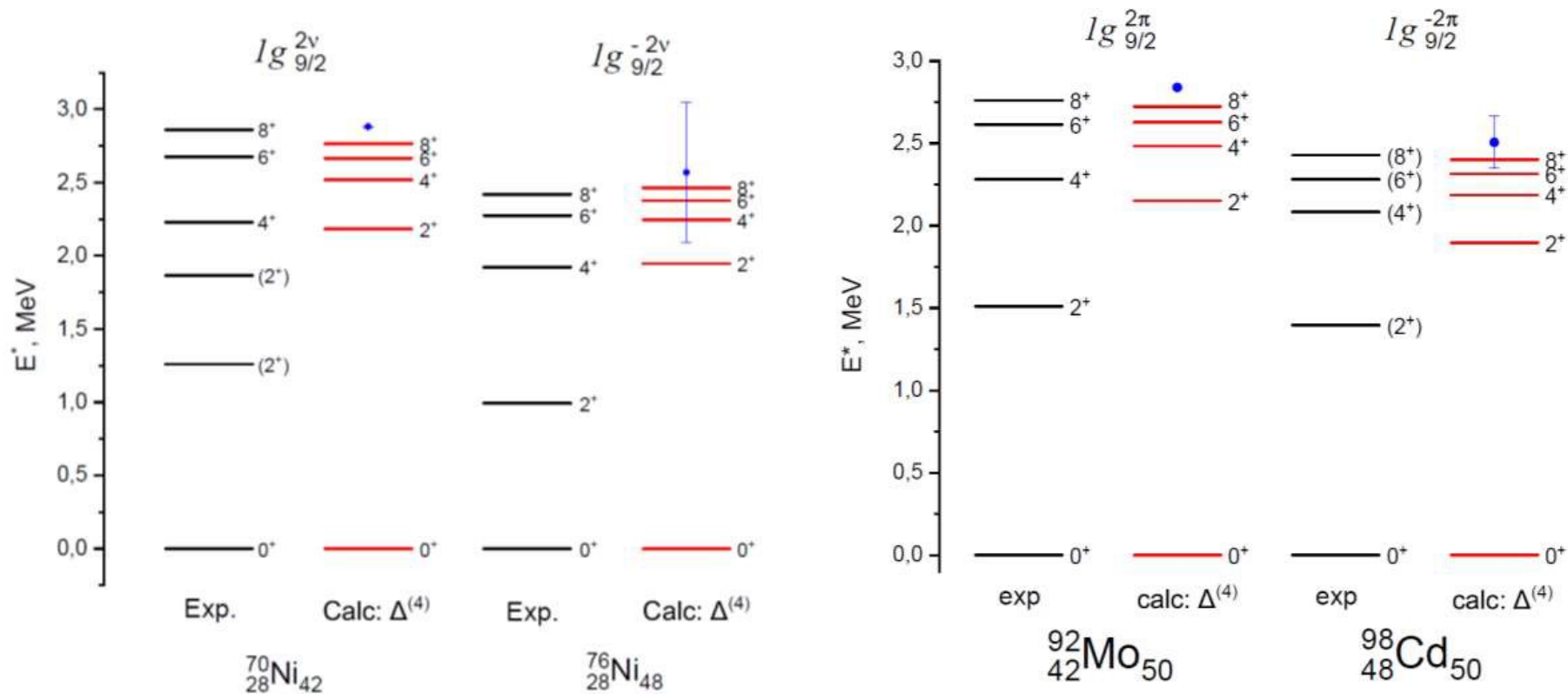
Изотопы N=50



Sidorov S., Zhulyaeva D., Tretyakova T.,
 Chinese Physics C 46 (2022) 074102

Спектры для $j = 9/2$

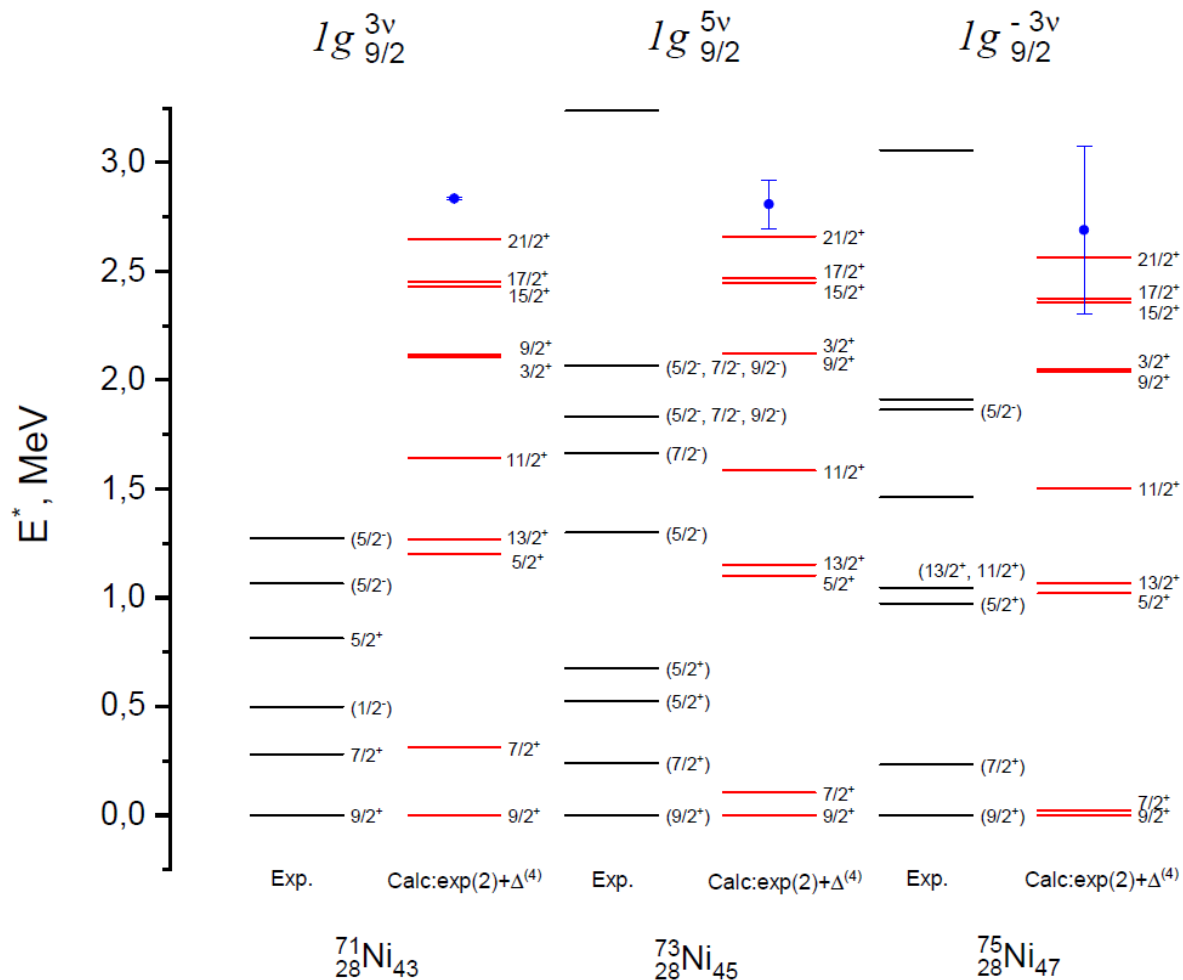
Сеньорити 2



Sidorov S., Zhulyaeva D., Tretyakova T.,
 Chinese Physics C 46 (2022) 074102

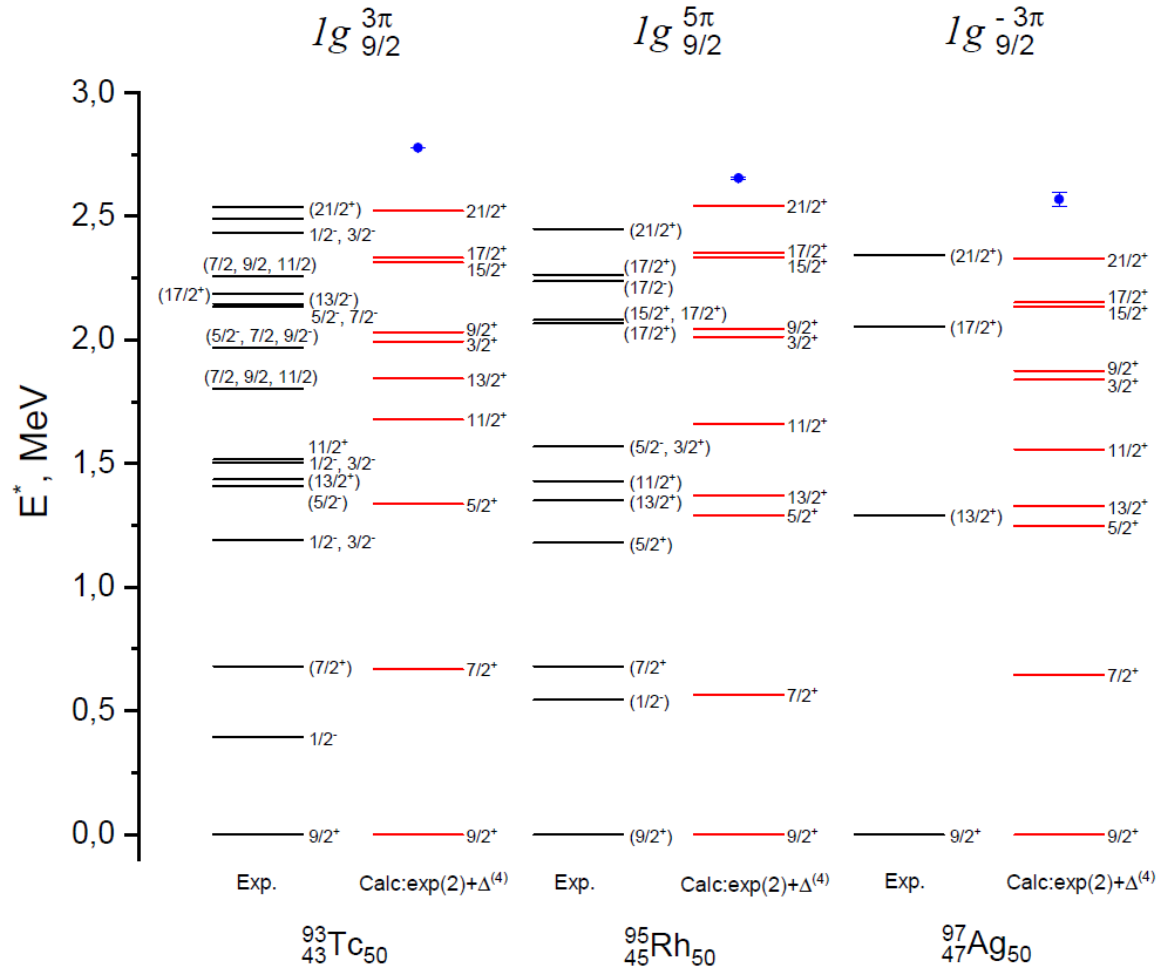
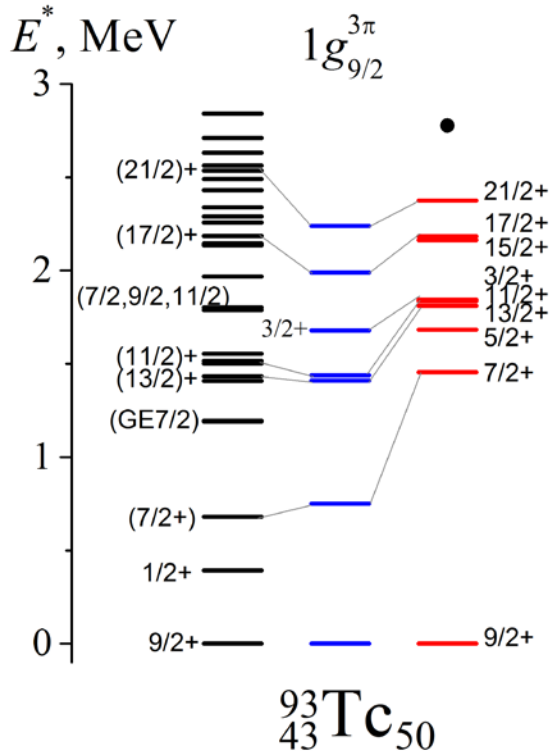
Спектры для $j = 9/2$

Сеньорити 3



Спектры для $j = 9/2$

Сеньорити 3



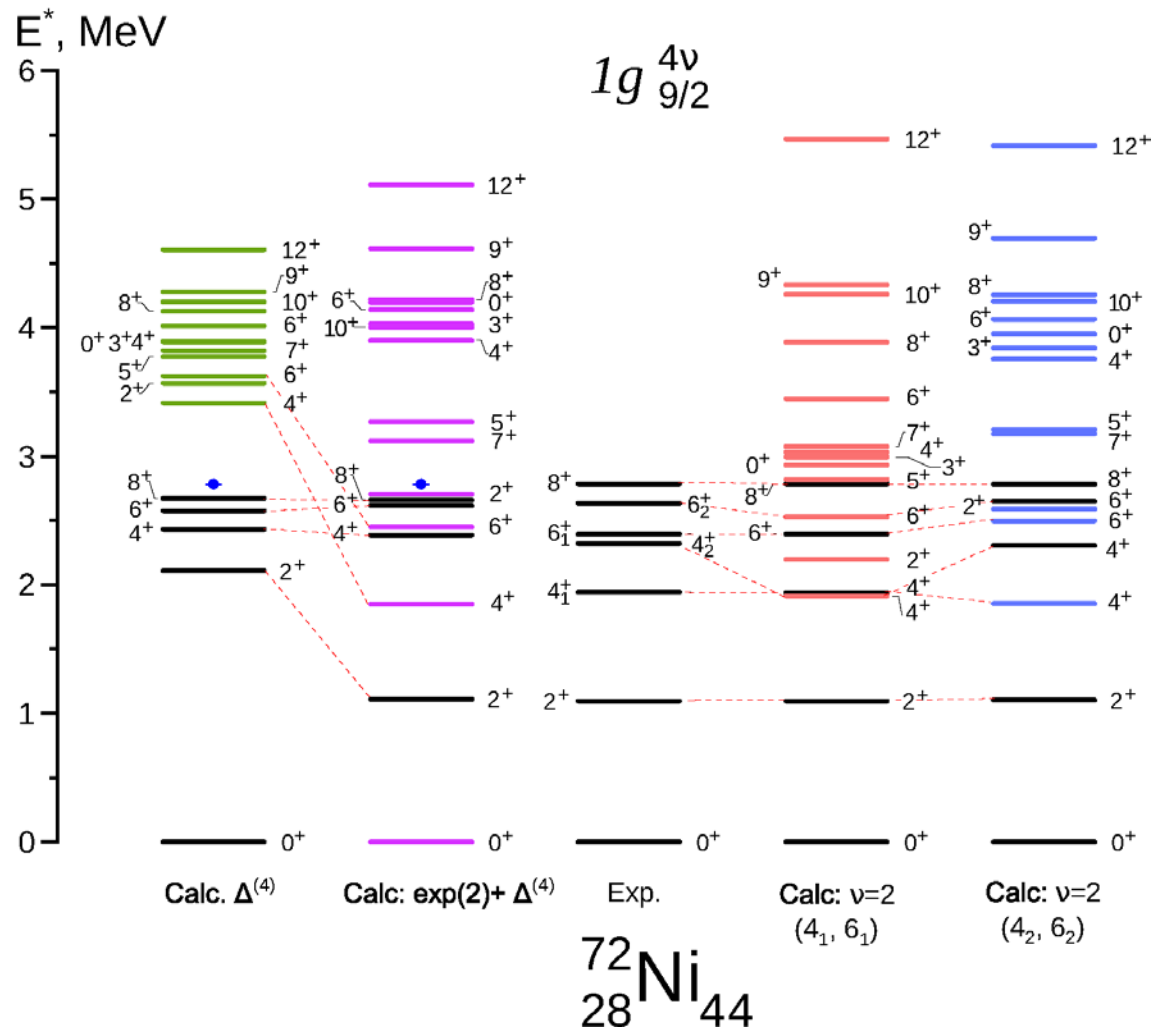
Escuderos, Zamick 2006

Степанов и др. 2018

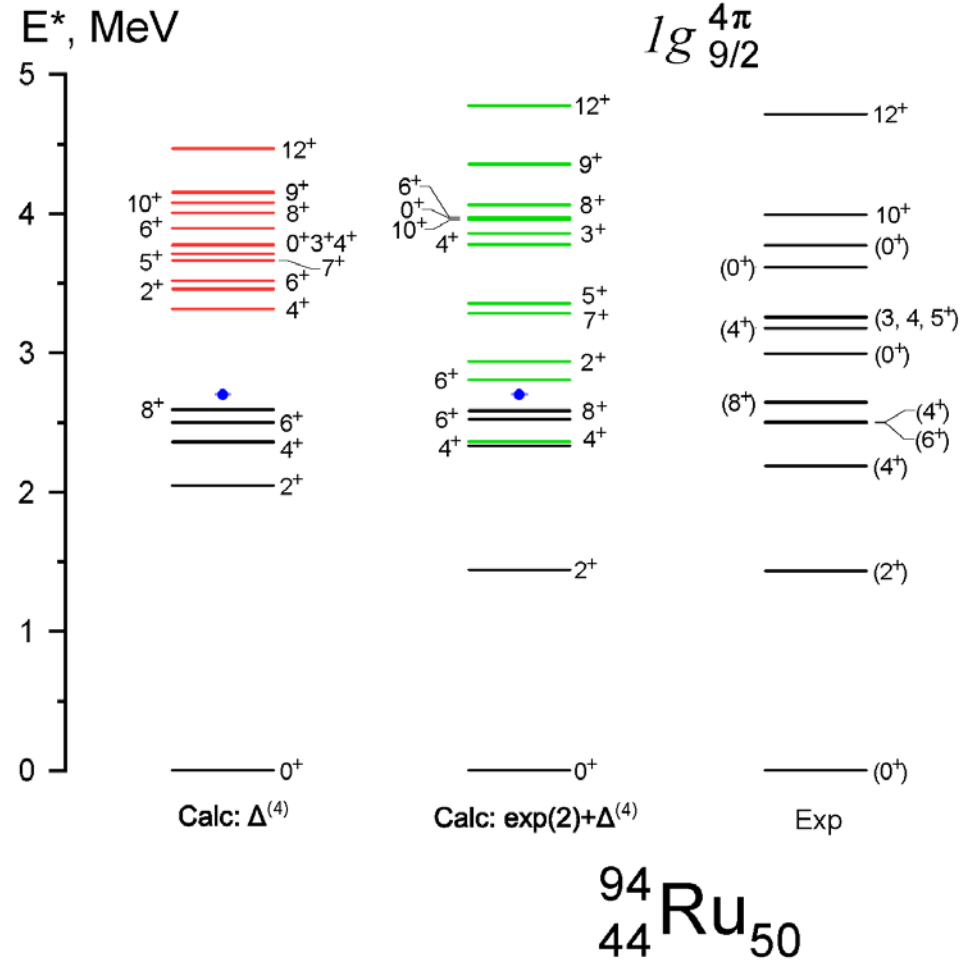
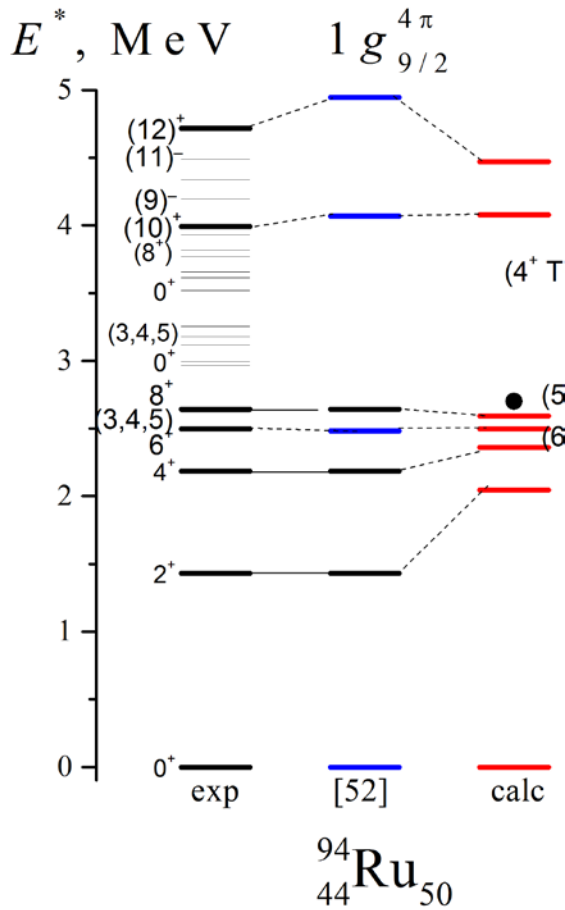
Sidorov et al Chinese Physics C 2022

Спектры для $j = 9/2$

Сеньорити 4



Спектры для $j = 9/2$

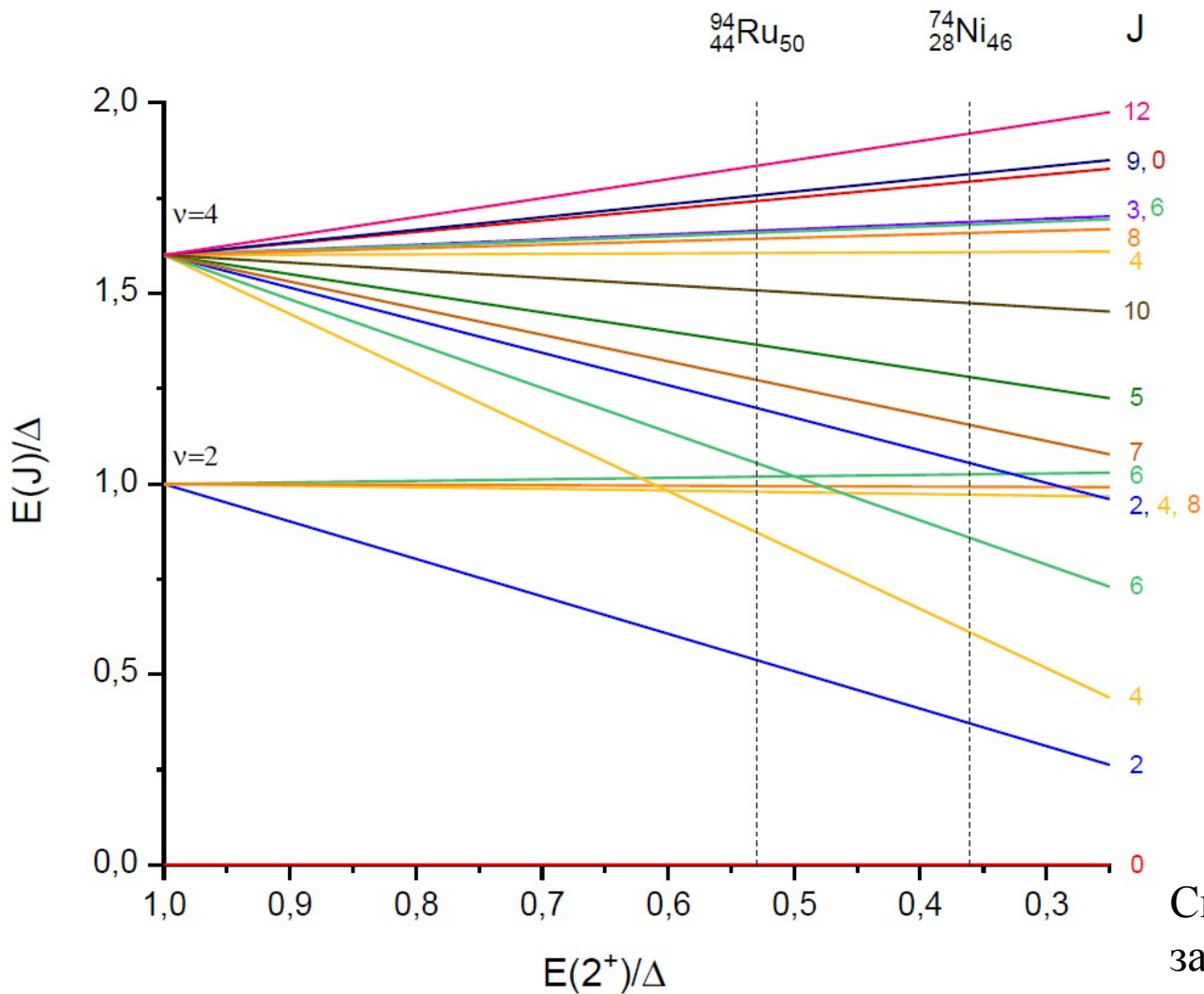


Rowe, Rosensteel 2001

Степанов и др. 2018

Sidorov et al Chinese Physics C 2022

Спектры для $j = 9/2$



Спектры сеньорити $\nu = 4$ в зависимости от энергии состояния 2^+ в спектре $\nu = 2$.

Результаты

1. Проведен анализ существующих в литературе и предложены новые массовые соотношения для описания парных корреляций нуклонов.
2. На основе современных экспериментальных данных получены новые аппроксимации оценок парной энергии тождественных нуклонов и нейтрон-протонных корреляций. Полученные аппроксимации позволяют эффективно описывать отдельные вклады в энергию спаривания.
3. С использованием массовых соотношений для пр-корреляций получены новые предсказания энергий связи неизвестных ядер в области нейтронизбыточных и сверхтяжелых элементов
4. Впервые показано, что расщепление мультиплета основного состояния с сеньорити 2 определяется величиной энергии спаривания нуклонов и может быть получено с использованием масс близлежащих ядер.
5. В приближении δ -сил проведен расчет спектров низколежащих состояний для нейтронизбыточных изотопов никеля и изотонов $N = 50$, в том числе для сеньорити 3. Показана зависимость нарушения порядка уровней в мультиплете с высокими значениями сеньорити от вклада дальнедействующих корреляций.

По результатам опубликовано 30 работ в рецензируемых журналах,
из них в WoS и Scopus:

1. **2022** Sidorov S., Zhulyaeva D., Tretyakova T., Chinese Physics C, 46, 074102
2. **2022** Владимирова Е.В., Симонов М.В., Негребецкий В.В., Стопани К.А., Третьякова Т.Ю. Известия РАН. Серия физическая, том 86, № 4, с. 571
3. **2022** Сидоров С.В., Жуляева Д.С., Третьякова Т.Ю. Известия РАН. Серия физическая, том 86, № 8, с. 1104
4. **2021** E.V. Vladimirova, B.S. Ishkhanov, M.V. Simonov, S.V. Sidorov, T.Yu. Tretyakova International Journal of Modern Physics E, 30, 2150025
5. **2021** М.В. Симонов, Владимирова Е.В., Ишханов Б.С., Т.Т. , Известия РАН. Сер. физическая, том 85, № 5, с. 676
6. **2021** E.V. Vladimirova, M.V. Simonov, T.Yu. Tretyakova AIP Conference Proceedings, 2377, 070003
7. **2019** Ishkhanov B.S., Sidorov S.V., Tretyakova T.Yu, Vladimirova E.V. Chinese Physics C, 43, 014104 **Q1**
8. **2019** Бельшев С.С., Ишханов Б.С., Ланской Д.Е., Т.Т. Вестник Московского университета. № 2, с. 11-23
9. **2019** Сидоров С.В., Владимирова Е.В., Ишханов Б.С., Т.Т.. Известия РАН. Серия физическая, т. 83, № 4, с. 559
10. **2018** Владимирова Е.В., Дашков И.Д., Ишханов Б.С., Т.Т., Известия РАН. Серия физическая, т. 82, № 6, с. 761
11. **2018** Степанов М.Е., Имашева Л.Т., Ишханов Б.С., Т.Т. Известия РАН. Серия физическая, том 82, № 6, с. 774
12. **2018** Stepanov M.E., Imasheva L.T., Ishkhanov B.S., T.Yu. Tretyakova EPJ Web of Conference, 177, 03004
13. **2018** Сидоров С.В., Ишханов Б.С., Третьякова Т.Ю. Известия РАН. Серия физическая, том 82, № 6, с. 680
14. **2017** Ishkhanov B.S., Sidorov S.V., Tretyakova T.Yu, Vladimirova E.V. Chinese Physics C, 41, 094101 **Q1**
15. **2017** Имашева Л.Т., Ишханов Б.С., Сидоров С.В., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю. Физика частиц и атомного ядра (ЭЧАЯ), 48, с. 828
16. **2016** Imasheva L.T., Ishkhanov B.S., Stepanov M.E., T.Yu. Tretyakova EPJ Web of Conference, 107, 03015
17. **2016** Имашева Л.Т., Ишханов Б.С., Сидоров С.В., Степанов М.Е., Т.Т. Известия РАН. Сер. Физ., т. 80, с. 347
18. **2015** Имашева Л.Т., Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Т.Т. Известия РАН. Сер. Физ., т. 79, с. 564
19. **2015** Imasheva L.T., Ishkhanov B.S., Stepanov M.E., T.Yu. Tretyakova Physics of Atomic Nuclei, v. 78, p. 1463
20. **2014** Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю. Известия РАН. Сер. Физ., т. 78, с. 591
21. **2014** Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю. Вестник Московского университета, т. № 1, с. 3-19
22. **2014** Ишханов Б.С., Степанов М.Е., Третьякова Т.Ю. Вестник Московского университета, т. № 6, с. 3-22



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ