

# Тензорные силы в нейтрон-избыточных изотопах кремния и никеля

С.В. СИДОРОВ<sup>1</sup>, А.С. КОРНИЛОВА<sup>2</sup>, Т.Ю. ТРЕТЬЯКОВА<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *НИИЯФ им. Скобелева, МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия*

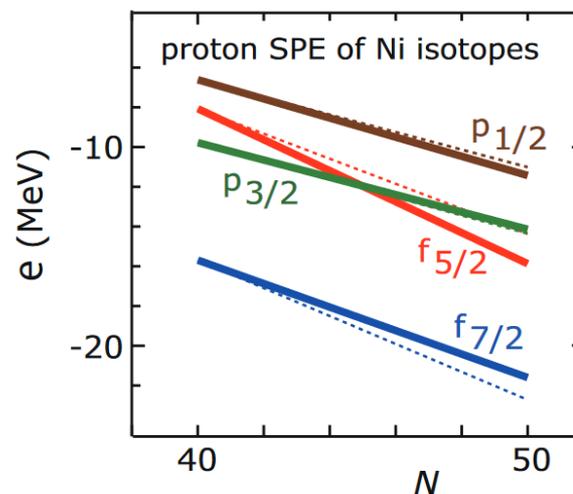
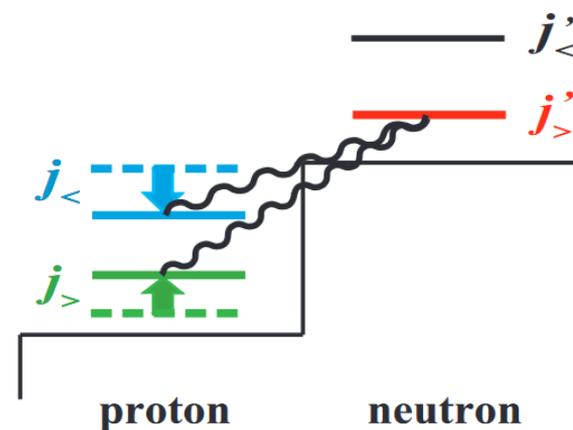
<sup>2</sup> *Физический факультет, МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия*

# Актуальность

Накопленные экспериментальные данные по ядрам вдали от линии стабильности указывают на новые явления, такие как:

- возникновение новых локальных магических чисел,
- острова инверсии,
- пузырьковая структура ядер,
- гало

и другие. Попытки объяснить данные проявления повлекли за собой внимание к тем особенностям нуклон-нуклонных взаимодействий, которые ранее считались мало-важными. Предполагается, что существенную роль в эволюции одночастичной структуры ядер вдали от линии стабильности может играть тензорное взаимодействие.



# Методы исследования

- Потенциал Скирма [Vautherin, Brink 1972]:

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = t_0(1 + x_0 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}_{12}) + \frac{1}{2} t_1(1 + x_1 P_\sigma) (\mathbf{k}^2 \delta(\mathbf{r}) + \delta(\mathbf{r}) \mathbf{k}'^2) \\ + t_2(1 + x_2 P_\sigma) \mathbf{k}' \delta(\mathbf{r}) \mathbf{k} + \frac{1}{6} t_3 \rho^\alpha(\mathbf{R})(1 + x_3 P_\sigma) \delta(\mathbf{r}) \\ + iW(\sigma_1 + \sigma_2) [\mathbf{k}' \times \delta(\mathbf{r}) \mathbf{k}]$$

- Плотность энергетического функционала:

$$E = \langle g.s. | T + V_{12} | g.s. \rangle = \int H(\rho, \tau, J) dr, \quad |g.s.\rangle = \frac{1}{\sqrt{A!}} \det |\phi_i(\mathbf{r}_j)|$$

- Уравнения Хартри-Фока:

$$\frac{\delta}{\delta \phi_i} (E - \sum_i e_i \int |\phi_i(\mathbf{r})|^2 dr) = 0$$

# Тензорное взаимодействие Скирма

Потенциал тензорных сил Скирма [Skyrme, 1956]:

$$V_{tens} = \frac{1}{2} t_e \left\{ \left[ 3(\sigma_1 \cdot \vec{k}')(\sigma_2 \cdot \vec{k}') - (\sigma_1 \cdot \sigma_2) \vec{k}'^2 \right] \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \right. \\ \left. + \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \left[ 3(\sigma_1 \cdot \vec{k})(\sigma_2 \cdot \vec{k}) - (\sigma_1 \cdot \sigma_2) \vec{k}^2 \right] \right\} \\ + t_o \left[ 3(\sigma_1 \cdot \vec{k}') \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) (\sigma_2 \cdot \vec{k}) - (\sigma_1 \cdot \sigma_2) \vec{k}' \delta(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \vec{k} \right]$$

Вклад тензорных сил в плотность энергии:

$$\mathcal{E}_{tens} = \frac{5}{8} t_o (J_n^2 + J_p^2) + \frac{5}{8} (t_e + t_o) J_n \cdot J_p,$$

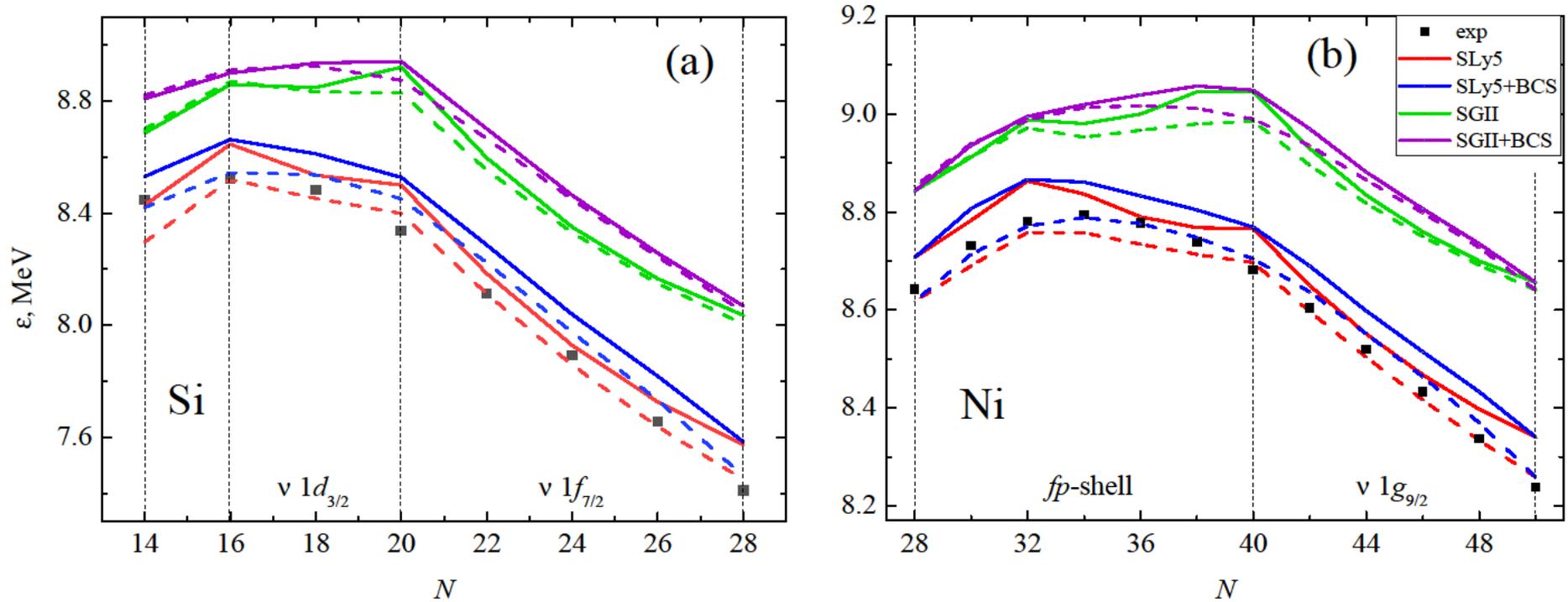
где

$$J_q = (-i) \sum_{\alpha} \varphi_{\alpha}^* [\nabla \times \sigma] \varphi_{\alpha}$$

Использованные параметризации: [SLy5](#), [SLy5+T](#)  
[SGII](#), [SGII+T](#)  
[SAMi](#), [SAMi+T](#)

Chin. Phys. C, 2024

# Удельная энергия связи изотопов кремния и никеля



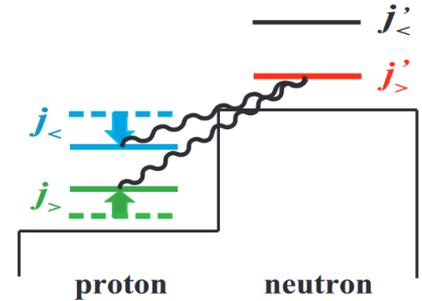
Тензорное взаимодействие и парные корреляции приводят к увеличению энергии связи ядер. Для их корректного учета необходимо одновременное фитирование центральной и тензорной части NN-взаимодействия

# Одночастичная структура изотопов кремния

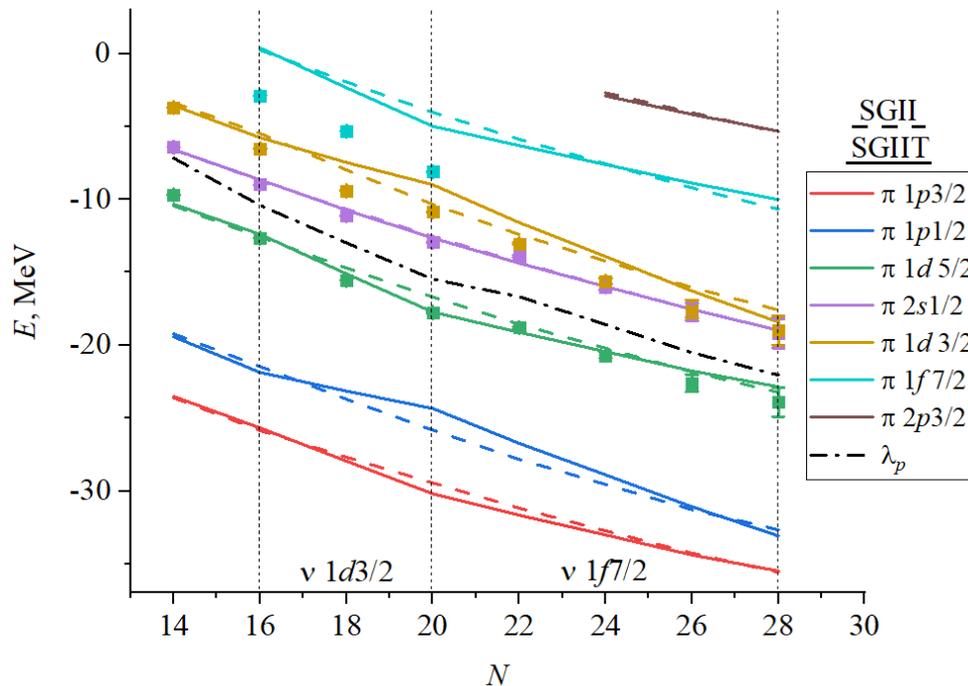
## Правило Оцуки

При заполнении состояний  $j_{>}^n = l' + \frac{1}{2}$ :

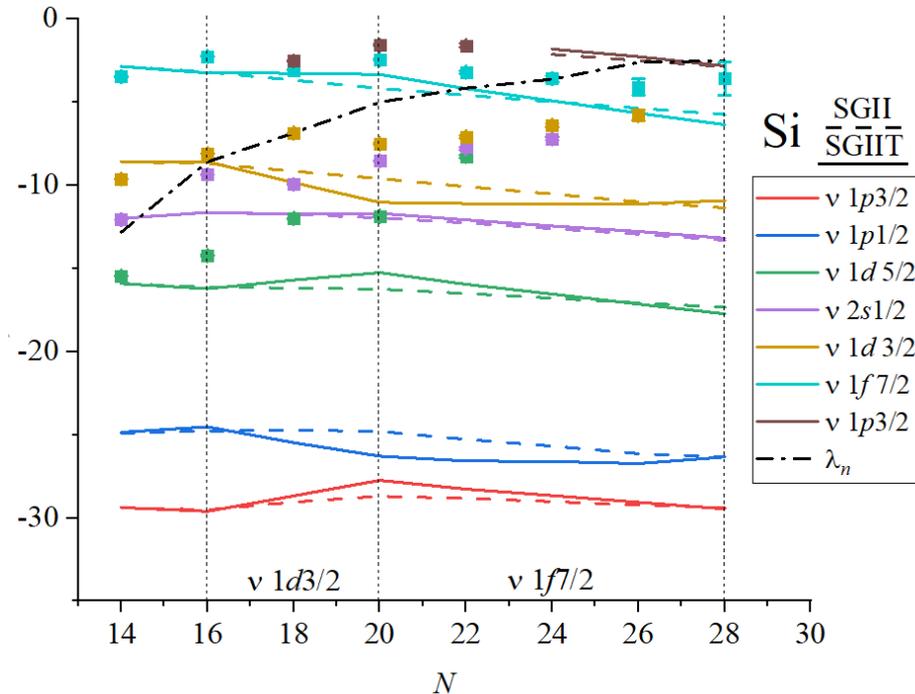
$j_{>}^p = l + \frac{1}{2}$  отталкиваются,  $j_{<}^p = l - \frac{1}{2}$  притягиваются.



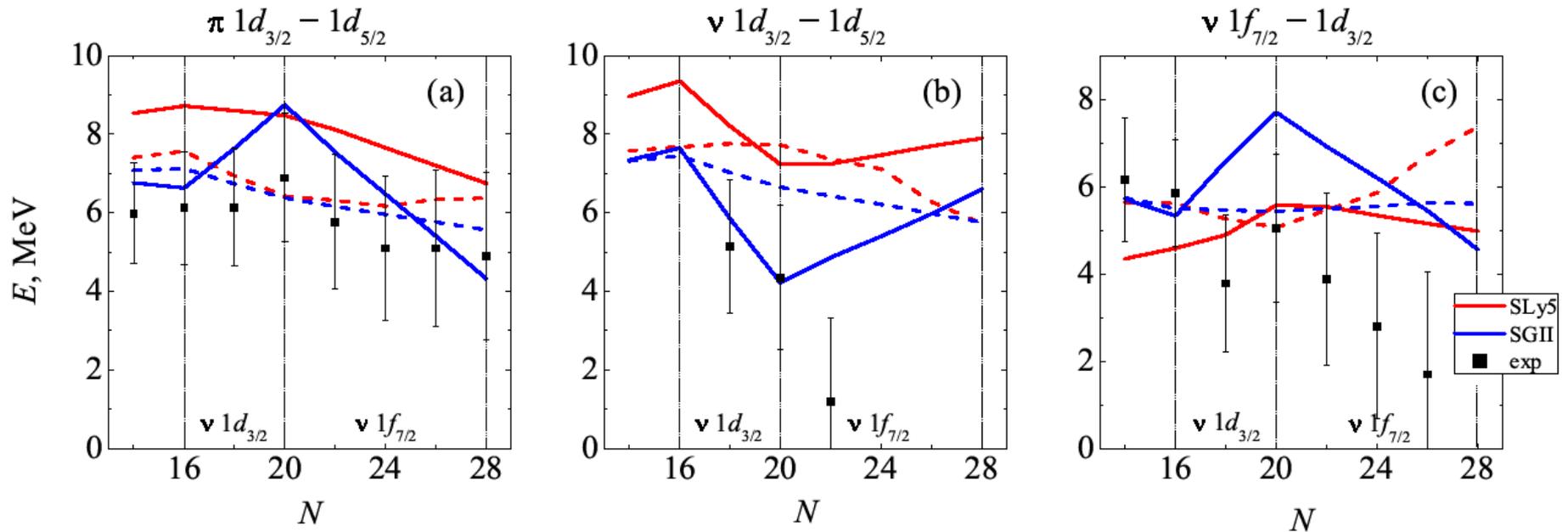
## Протонные уровни



## Нейтронные уровни



# Расщепление между одночастичными состояниями в Si



Эксп: Bepalova *et al.* // EPJA 2018

- Вклады от изовекторного и  $np$  тензорного взаимодействия в расщепление между одночастичными состояниями сопоставимы по абсолютной величине и противоположны по знаку
- Сильная зависимость от выбора центральной части взаимодействия

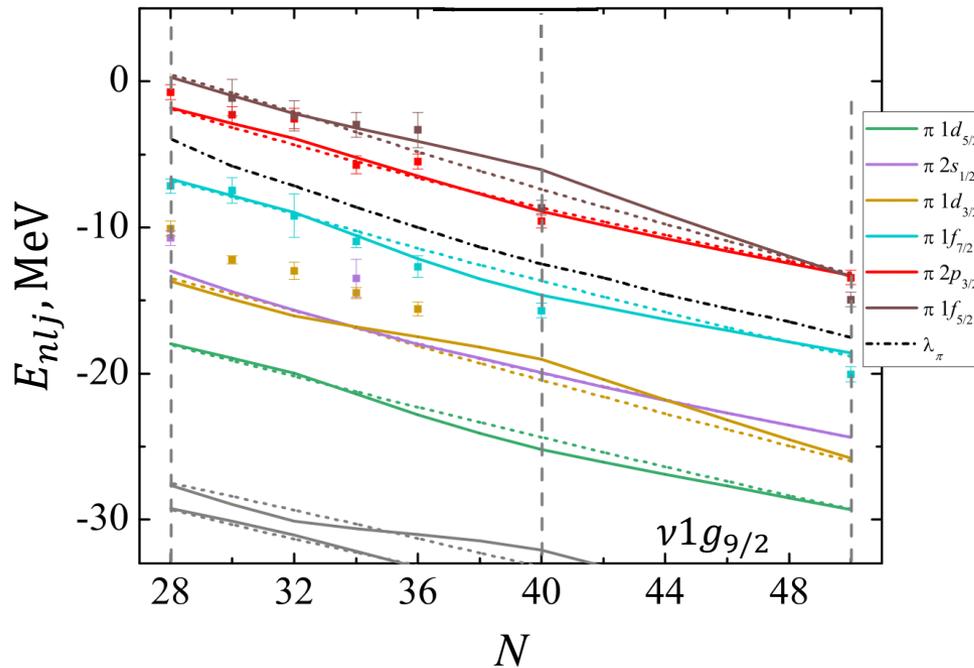
# Одночастичная структура изотопов никеля

## Правило Оцуки

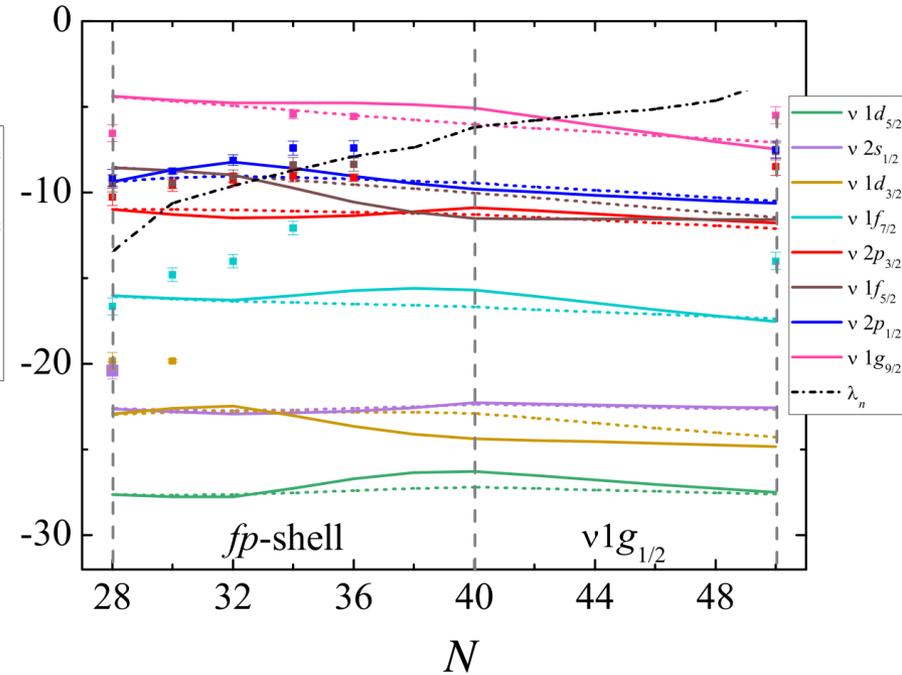
При заполнении нейтронами состояний  $j'_> = l' + \frac{1}{2}$ :

протонные состояния  $j_> = l + \frac{1}{2}$  отталкиваются,  $j_< = l - \frac{1}{2}$  притягиваются.

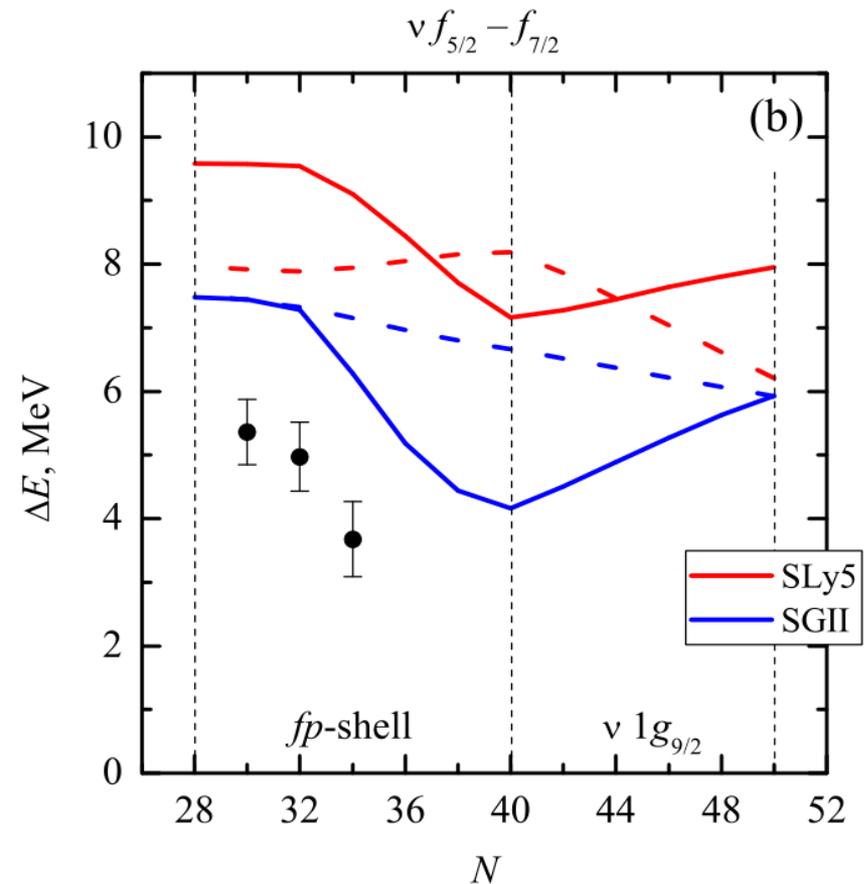
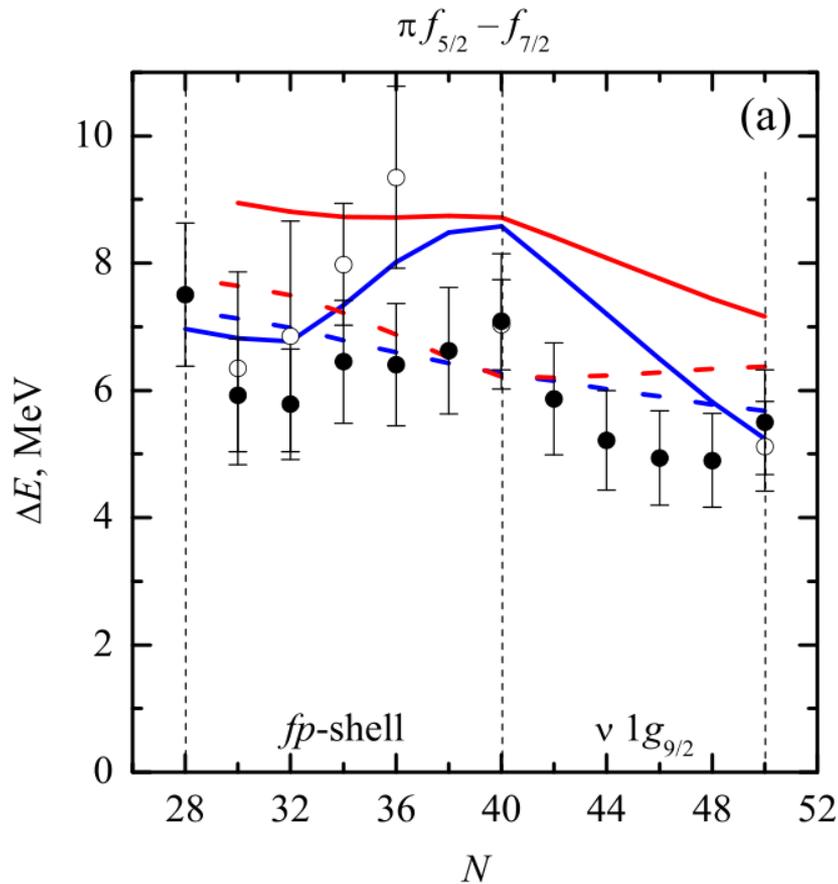
Протонные уровни



Нейтронные уровни

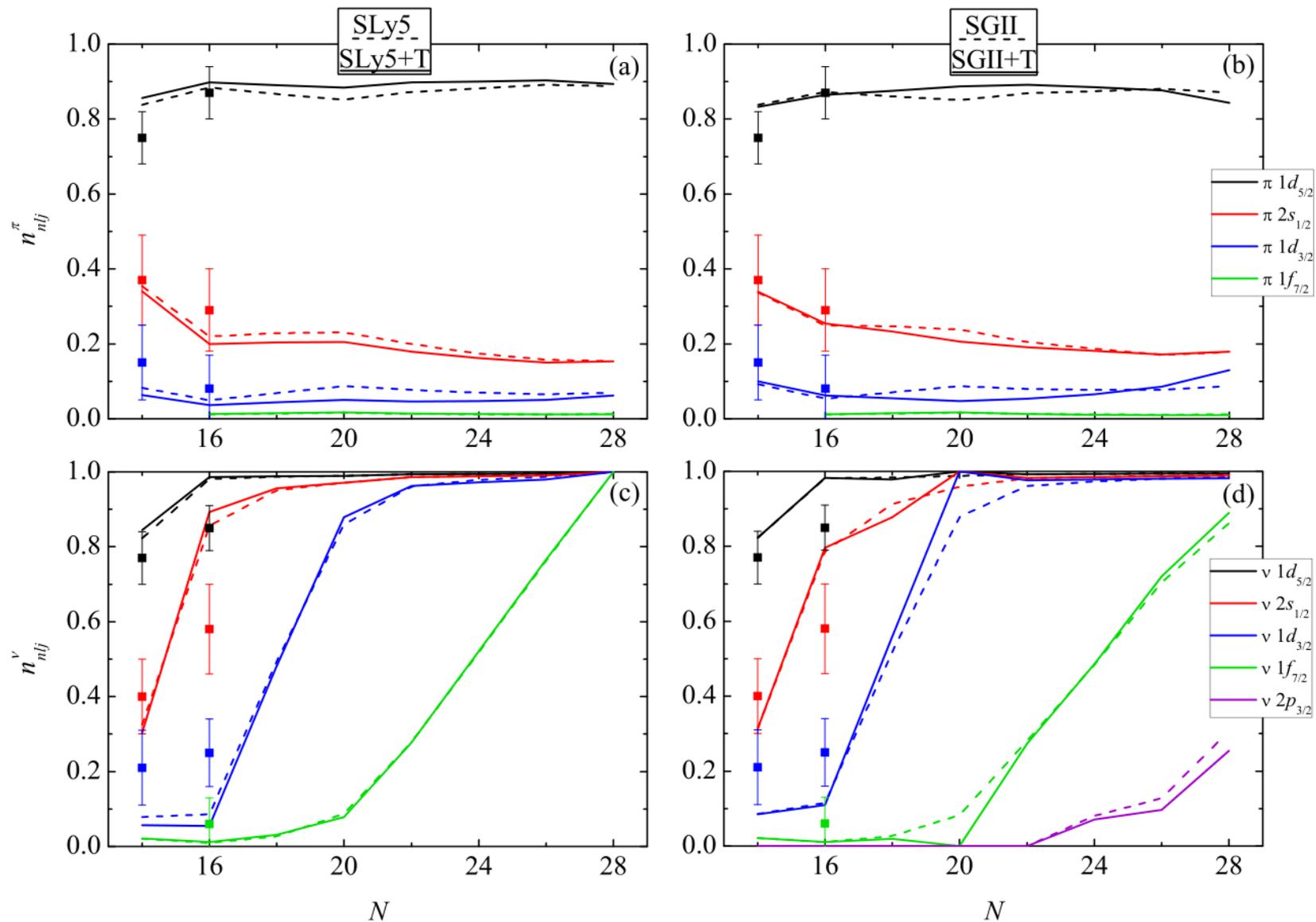


# Спин-орбитальное расщепление $1f$ -состояния в Ni

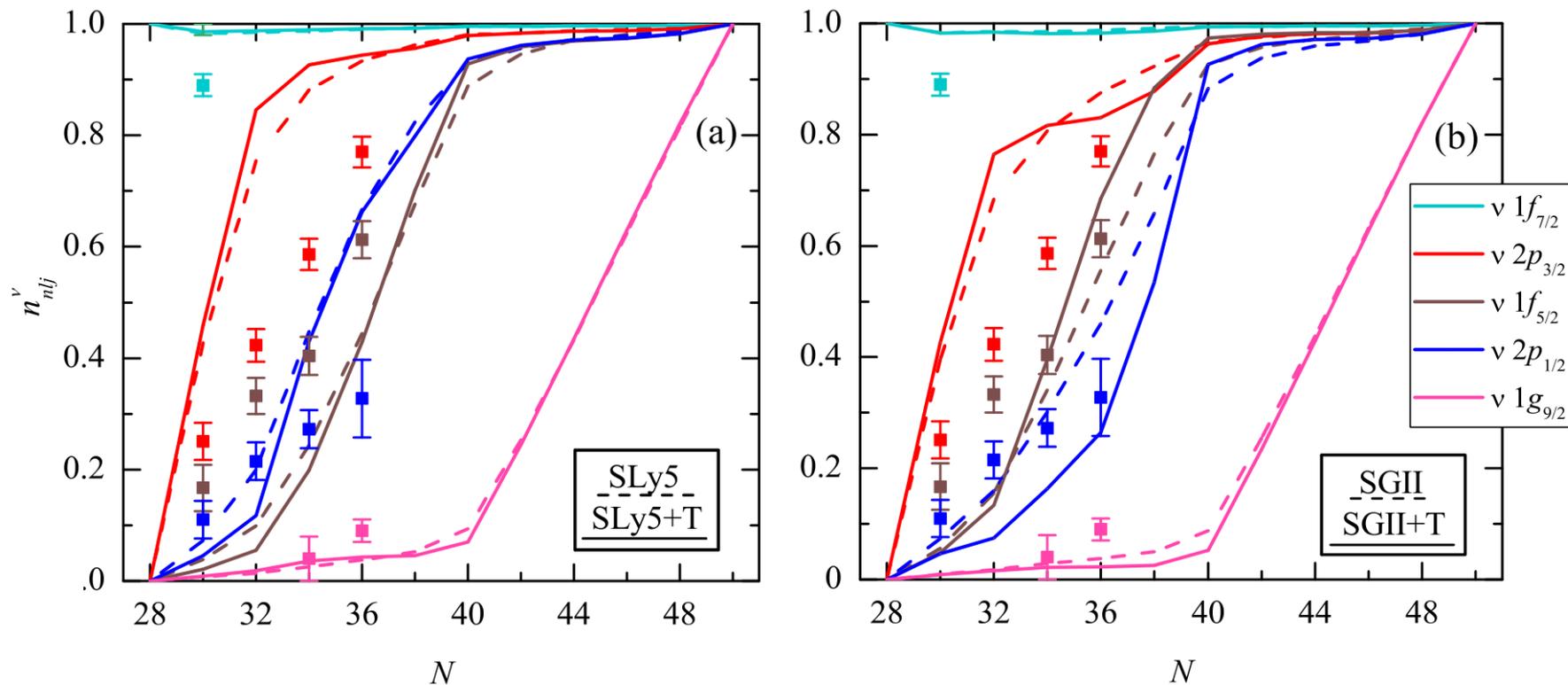


Эксп: Bessalova *et al.* // Nucl. Phys. 2011  
 Graue *et al.* // Rep. Prog. Phys. 2007  
 Schiffer *et al.* // Phys. Rev. C 2013

# Заселенность одночастичных состояний в Si



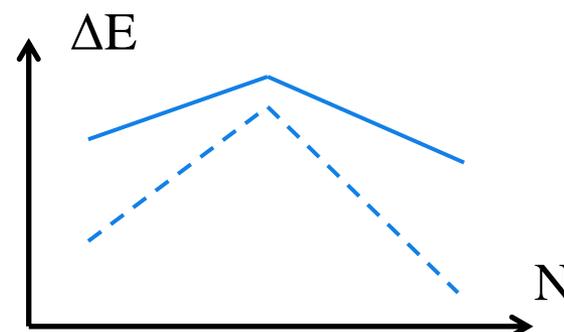
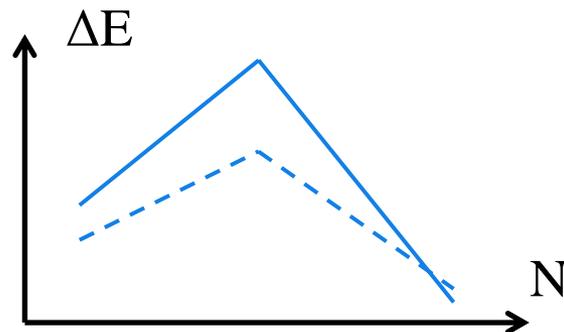
# Заселенность одночастичных состояний в Ni



Тензорные силы приводят к ослаблению парных корреляций в нейтрон-избыточных ядрах кремния и никеля

# Расщепление между уровнями с другими взаимодействиями

Parametrization	$\pi 1d_{3/2} - 1d_{5/2}$			$\nu 1d_{3/2} - 1d_{5/2}$		
	$^{28}\text{Si}$	$^{34}\text{Si}$	$^{42}\text{Si}$	$^{28}\text{Si}$	$^{34}\text{Si}$	$^{42}\text{Si}$
SGII	7.08	6.38	5.60	7.31	6.65	5.98
SGII+T	6.77	8.74	4.32	7.34	4.22	6.59
SLy5	7.41	6.42	6.37	7.58	7.73	5.73
SLy5+T	8.54	8.48	6.75	8.96	7.23	7.90
SAMi	4.86	4.84	3.91	4.94	5.56	3.55
SAMi+T	5.24	5.83	3.87	5.42	5.79	4.36
exp	$6.0 \pm 1.5$	$6.9 \pm 1.6$	$4.9 \pm 2.0$	$4.2 \pm 1.9$		



# Результаты

Исследование влияния тензорных сил на характеристики нейтрон-избыточных ядер кремния и никеля показало, что:

1. Нейтрон-протонная и изовекторная компоненты тензорных сил сопоставимы по абсолютной величине и противоположны по знаку. Учёт изовекторных тензорных сил важен при описании эволюции нейтронных уровней в изотопах кремния и никеля.
2. Тензорные силы и парные корреляции вносят сопоставимые вклады в энергию связи ядер, причем оба эффекта приводят к дополнительному связыванию изотопов. Более точное воспроизведение энергий связи требует одновременного фитирования параметров как центральной, так и тензорной частей NN-взаимодействия.
3. Тензорные силы приводят к уменьшению (увеличению) заселенности уровней выше (ниже) поверхности Ферми, эффективно ослабляя парные корреляции сверхпроводящего типа в нейтрон-избыточных изотопах кремния и никеля. По-видимому, данный эффект может отличаться в иных цепочках ядер.

Спасибо за внимание

# Мотивация исследования

В литературе влияние тензорных сил на ядерные характеристики часто рассматривается на примере эволюции одночастичной структуры ядер в цепочках изотопов или изотонов. При этом чаще всего рассматривается нейтрон-протонное тензорное взаимодействие. Открытым остается вопрос о величине и характере изовекторной тензорной составляющей.

**Целью** настоящей работы было:

- Расчет одночастичной структуры и основных характеристик нейтрон-избыточных изотопов кремния и никеля в рамках подхода Хартри-Фока со взаимодействием Скирма и теории Бардина-Купера-Шриффера с учетом тензорных сил.
- Проверка правила Оцуки для изменения расщепления между протонными, а также нейтронными уровнями по мере увеличения числа нейтронов в изотопах Si и Ni.
- Сопоставление величины нейтрон-протонных изовекторных тензорных сил, а также изучение совместного действия тензорного взаимодействия и парных корреляций на структуру нейтрон-избыточных ядер кремния и никеля.

---

Back-up

# Тензорное взаимодействие

---

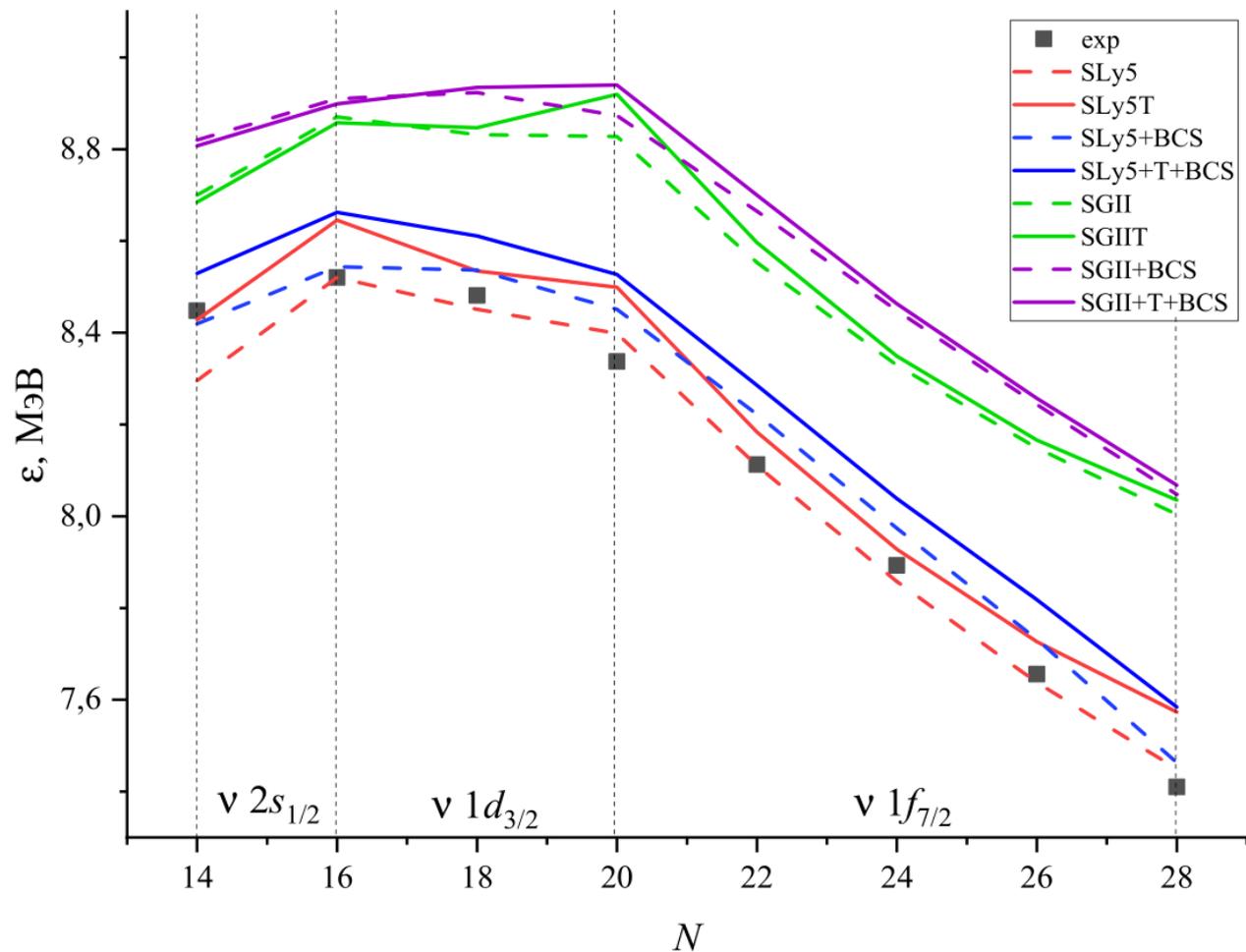
Проявления тензорных сил:

Квадрупольный момент дейтрона

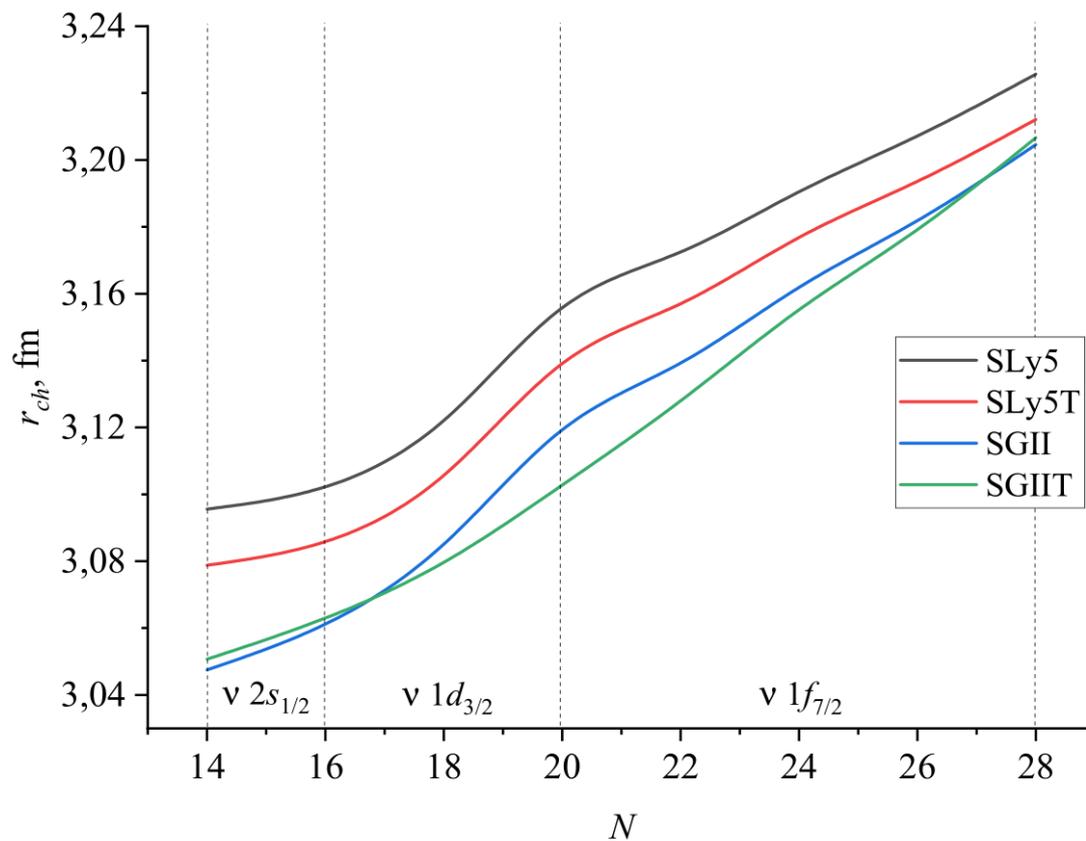
Возникновение новых магических чисел в ядрах вдали от линии стабильности

Количественное описание возбужденных состояний нечетных ядер

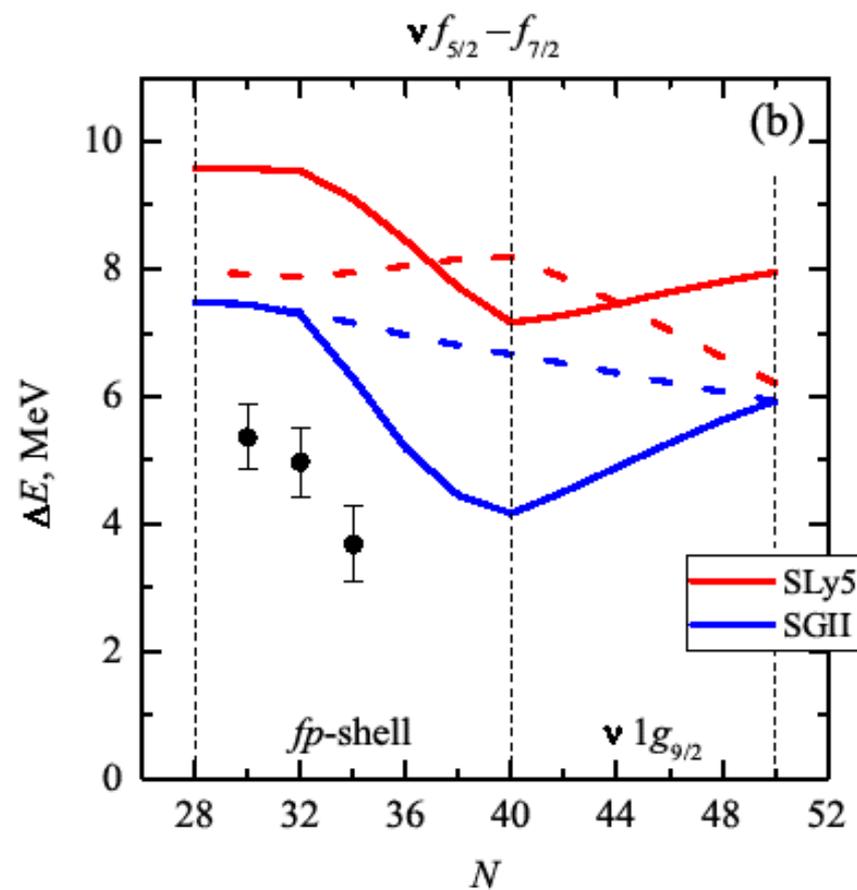
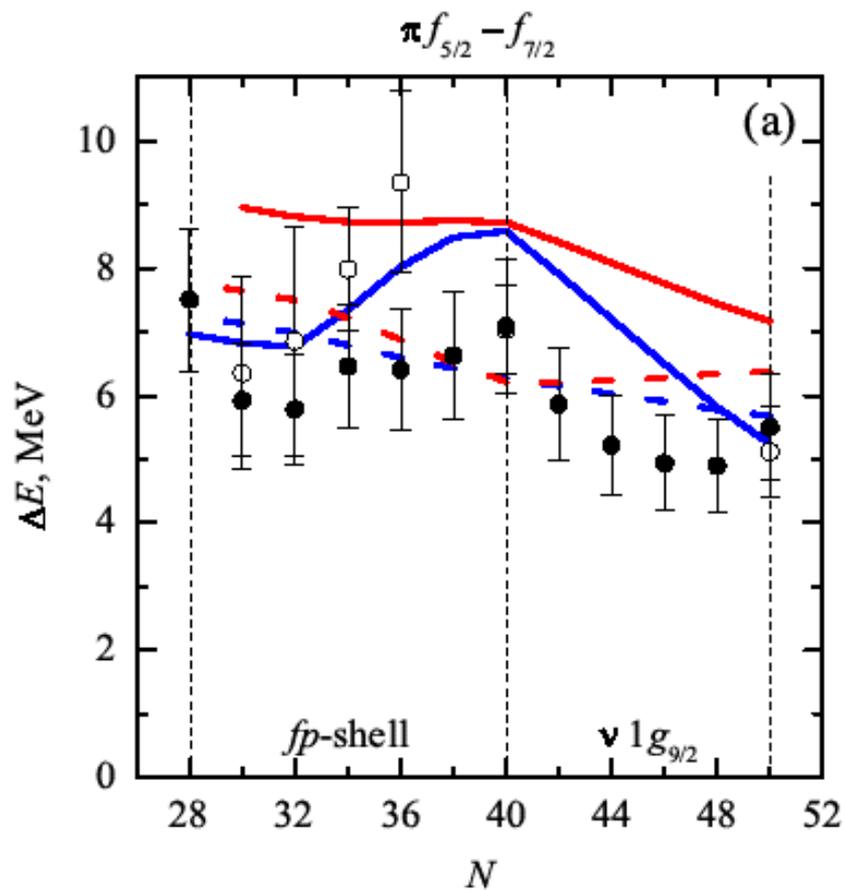
# Удельная энергия связи изотопов кремния



# Зарядовые радиусы изотопов кремния



# Расщепление между одночастичными состояниями в Ni



# Заполнение одночастичных уровней

