

Распределение нуклонной плотности четно-четных изотопов $^{48-64}Ni$ в дисперсионной оптической модели

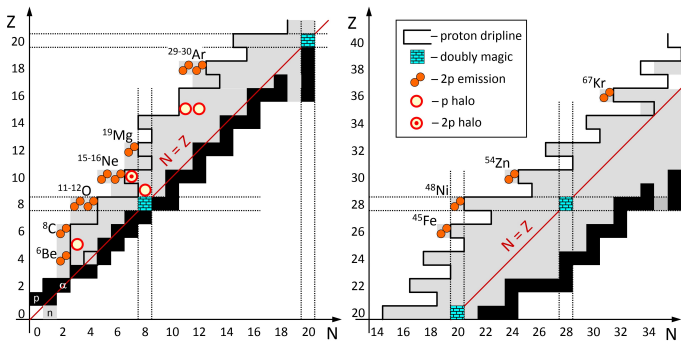
Докладчик: Талибджанов Джамшитдин
Научный руководитель: Климочкина А. А.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова
Физический факультет
Кафедра физики элементарных частиц

НИИЯФ МГУ, 02 июня 2023 г.

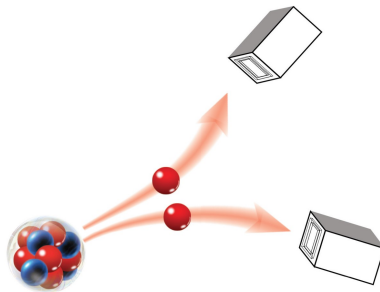
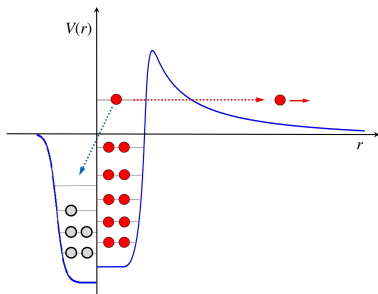
Актуальность работы

Исследование структуры ядер, расположенных вблизи границы протонной стабильности, является актуальной задачей современной науки. В таких ядрах наблюдаются протонная, двухпротонная радиоактивность и более экзотические моды распадов. Протонно-избыточные ядра играют важную роль в нуклеосинтезе. Кроме того, у таких ядер наблюдаются экзотические формы распределения плотности: протонное гало и протонная «шуба».



Актуальность работы

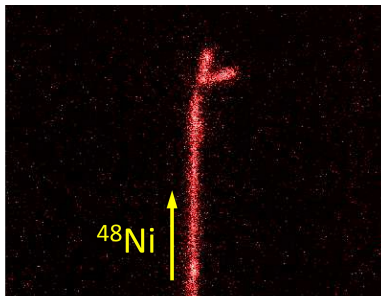
Исследование структуры ядер, расположенных вблизи границы протонной стабильности, является актуальной задачей современной науки. В таких ядрах наблюдаются протонная, двухпротонная радиоактивность и более экзотические моды распадов. Протонно-избыточные ядра играют важную роль в нуклеосинтезе. Кроме того, у таких ядер наблюдаются экзотические формы распределения плотности: протонное гало и протонная «шуба».



Актуальность работы

Исследование структуры ядер, расположенных вблизи границы протонной стабильности, является актуальной задачей современной науки. В таких ядрах наблюдаются протонная, двухпротонная радиоактивность и более экзотические моды распадов.

Протонно-избыточные ядра играют важную роль в нуклеосинтезе. Кроме того, у таких ядер наблюдаются экзотические формы распределения плотности: протонное гало и протонная «шуба».



Расчет распределения нуклонной плотности вблизи границы протонной стабильности четно-четных изотопов ${}_{28}^{48-64}\text{Ni}$ в дисперсионной оптической модели.

- Для стабильных изотопов ${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$ добиться хорошего описания экспериментальных данных E_{nlj} , $\rho_{ch}(r)$, $\langle r_{ch} \rangle$, $d\sigma_{el}(\theta)/d\Omega$, $\sigma_R(E)$;

Расчет распределения нуклонной плотности вблизи границы протонной стабильности четно-четных изотопов ${}_{28}^{48-64}\text{Ni}$ в дисперсионной оптической модели.

- Для стабильных изотопов ${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$ добиться хорошего описания экспериментальных данных E_{nlj} , $\rho_{ch}(r)$, $\langle r_{ch} \rangle$, $d\sigma_{el}(\theta)/d\Omega$, $\sigma_R(E)$;
- Физически обоснованно экстраполировать дисперсионный оптический потенциал (ДОП) в область нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$. Провести оценку одночастичных протонных энергий E_{nlj}^p изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$ по экспериментальным данным об нейтронных одночастичных энергиях $E_{nlj}^{n,(mirror)}$ «зеркальных» ядер;

Расчет распределения нуклонной плотности вблизи границы протонной стабильности четно-четных изотопов ${}_{28}^{48-64}\text{Ni}$ в дисперсионной оптической модели.

- Для стабильных изотопов ${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$ добиться хорошего описания экспериментальных данных E_{nlj} , $\rho_{ch}(r)$, $\langle r_{ch} \rangle$, $d\sigma_{el}(\theta)/d\Omega$, $\sigma_R(E)$;
- Физически обоснованно экстраполировать дисперсионный оптический потенциал (ДОП) в область нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$. Провести оценку одночастичных протонных энергий E_{nlj}^p изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$ по экспериментальным данным об нейтронных одночастичных энергиях $E_{nlj}^{n,(mirror)}$ «зеркальных» ядер;
- Исследовать распределения плотности нестабильных изотопов Ni вплоть до границы протонной стабильности.

Дисперсионная оптическая модель

Среднее поле ДОМ комплексное:

$$U(r, E) = V(r, E) + iW_i(r, E) \quad (1)$$

Действительная центральная часть ДОП $V(r, E)$:

$$V(r, E) = V_{HF}(r, E) + \Delta V(r, E) \quad (2)$$

Дисперсионная составляющая:

$$\Delta V(r, E) = \frac{P}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\mathbf{r}, E') \left(\frac{1}{E' - E} - \frac{1}{E' - E_F} \right) dE' \quad (3)$$

Радиальная зависимость потенциала:

$$f(r, r_i, a_i) = \frac{1}{1 + \exp(r - R_i/a_i)} \quad (4)$$

Параметризация мнимой части $W_I(r, E)$ ДОП:

$$J_s(E) = W_1 \frac{(E - E_p)^2}{(E - E_p)^2 + w_2^2}$$
$$J_d(E) = D_1 \frac{(E - E_p)^2 \exp(-d_2 (E - E_p))}{(E - E_p)^2 + d_3^2}$$
(5)

Параметризация мнимой части $W_I(r, E)$ ДОП:

$$J_{I(s)}(E) = \alpha_I \frac{(E - E_p)^4}{(E - E_p)^4 + \beta_{I(s)}^4}$$
$$J_d(E) = J_I(E) - J_s(E)$$
(6)

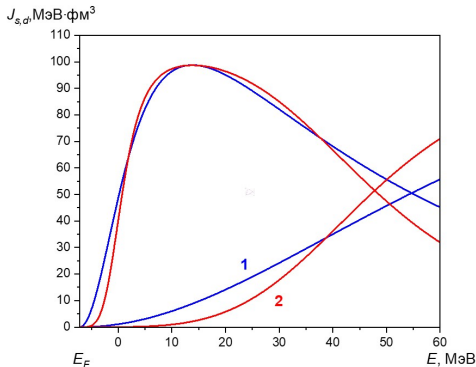
Мнимая часть дисперсионной оптической модели

Энергия Ферми:

$$E_F = -\frac{1}{2} (S_i(A) + S_i(A + 1)) \quad (7)$$

Массовые модели:

$$AME20, HFB24, KTUY05 \quad (8)$$



Глобальные параметры

Глобальные параметры [Koning, J. P. Delaroche, Nucl. Phys. A 713: 231 (2003)] традиционной оптической модели (KD).

Действительная часть ДОП хартри-фоковского типа (для $E - E_F$):

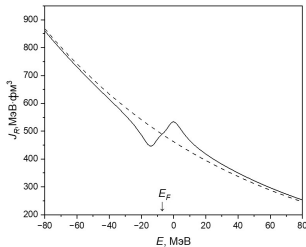
$$V_{HF}(E) = V_{HF}(E_F) \exp \left[\frac{-\gamma(E - E_F)}{V_{HF}(E_F)} \right] \quad (9)$$

Контроль числа нуклонов:

$$N_{n,p} = \sum (2j + 1) N_{nlj}^{n,p} \quad (10)$$

Уравнение Шредингера:

$$\left[-\frac{\nabla^2}{2m} + V(r, E_{nlj}) \right] \Phi_{nlj}(\mathbf{r}) = E_{nlj} \Phi_{nlj}(\mathbf{r}) \quad (11)$$



Вероятности заполнения:

Зависимость по формуле теории Бардина-Купера-Шриффера:

$$N_{nlj}^{n,p}(E_{nlj}^{DOP}) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{E_{nlj}^{DOP} - E_F}{\sqrt{(E_{nlj}^{DOP} - E_F)^2 + (\Delta)^2}} \right) \quad (12)$$

Параметр щели спаривания:

$$\Delta = -\frac{1}{4} (S_i(A+1) - 2S_i(A) + S_i(A-1)) \quad (13)$$

Вероятности заполнения:

Зависимость по ДОМ для $E_{nlj} < E_F$:

$$N_{nlj} = 1 - \int_0^\infty \bar{u}_{nlj}^2 \left[\left(\frac{m_{HF}^*}{m(r, E_{nlj})} \right)^{-1} \pi^{-1} \int_{E_F}^\infty \frac{W(r, E')}{(E' - E_{nlj})^2} dE' \right] dr \quad (14)$$

Вероятности заполнения:

Зависимость по ДОМ для $E_{nlj} > E_F$:

$$N_{nlj} = \int_0^\infty \bar{u}_{nlj}^2 \left[\left(\frac{m_{HF}^*}{m(r, E_{nlj})} \right)^{-1} \pi^{-1} \int_{-\infty}^{E_F} \frac{W(r, E')}{(E' - E_{nlj})^2} dE' \right] dr \quad (15)$$

Распределения плотности и среднеквадратичные радиусы ядра

Плотность рассчитана в одночастичном подходе:

$$\rho_{p(n)}(r) = \frac{1}{4\pi} \sum_{nlj} (2j+1) N_{nlj} \bar{u}_{nlj}^2(r) \quad (16)$$

Переход от протонных плотностей к зарядовым:

$$\rho_{ch}(r) = (\pi a^2)^{-3/2} \int \rho_p(r') \exp\left[\frac{-(r-r')^2}{a^2}\right] dr' \quad (17)$$

Среднеквадратичный радиус $\langle r_{ch,p,n} \rangle$:

$$\langle r_{ch,p,n} \rangle = \frac{\int_0^\infty r^4 \rho_{ch,p,n}(r) dr}{\int_0^\infty r^2 \rho_{ch,p,n}(r) dr} \quad (18)$$

Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов на ядре ${}^{64}_{28}\text{Ni}$

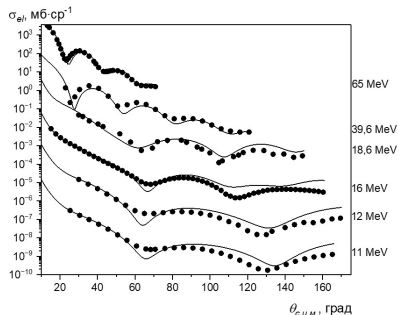


Рис.: Дифференциальные сечения упругого рассеяния $\frac{d\sigma_{el}(\theta)}{d\Omega}$ $p + {}^{64}_{28}\text{Ni}$.

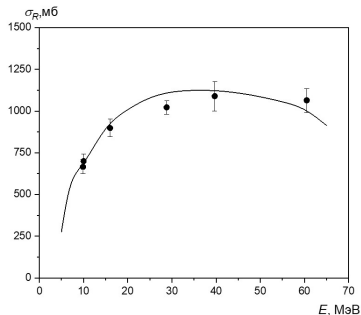
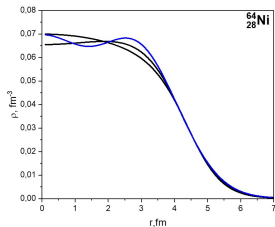
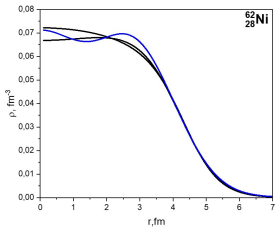
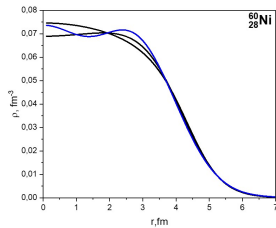
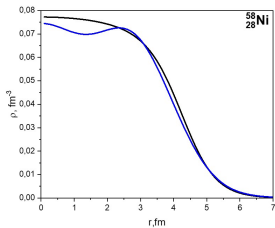


Рис.: Полные сечения реакций σ_R системы $p + {}^{64}_{28}\text{Ni}$.

Распределения плотности стабильных ядер $^{58-64}_{28}\text{Ni}$



Распределения зарядовых плотностей ρ_{ch} ядер $^{58-64}_{28}\text{Ni}$.

Среднеквадратичные зарядовые радиусы для ядер

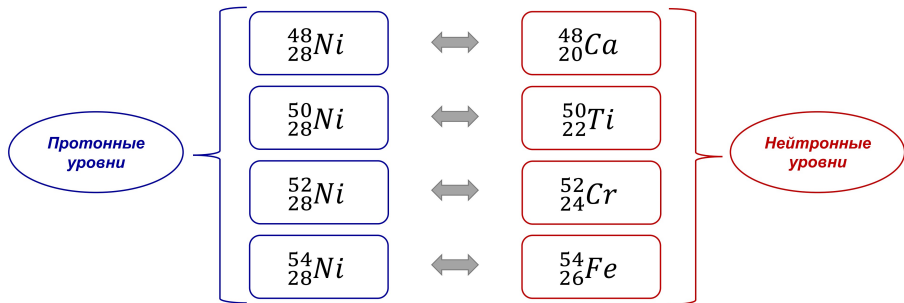
${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$

| Ядро | Эксперимент | ДОМ |
|-------------------------|---------------------|------|
| ${}_{28}^{58}\text{Ni}$ | $3,7757 \pm 0,0013$ | 3,80 |
| ${}_{28}^{60}\text{Ni}$ | $3,8110 \pm 0,0013$ | 3,81 |
| ${}_{28}^{62}\text{Ni}$ | $3,8386 \pm 0,0014$ | 3,86 |
| ${}_{28}^{64}\text{Ni}$ | $3,8553 \pm 0,0014$ | 3,89 |

Оценка протонных одночастичных энергий нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-54}\text{Ni}$

$$\Delta_{nlj}^C = E_{nlj}^{\pi} - E_{nlj}^{\nu, mirror} \quad (19)$$

$$E_{nlj}^{\pi, \text{оц}} = E_{nlj}^{\nu, mirror(\text{exp})} + \Delta_{nlj}^C \quad (20)$$



Протонные одночастичные энергии E_{nlj} четно-четных изотопов ${}_{28}^{48-64}\text{Ni}$

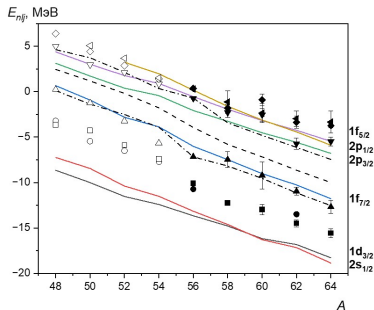


Рис.: Протонные одночастичные энергии изотопов Ni с $48 < A < 64$.

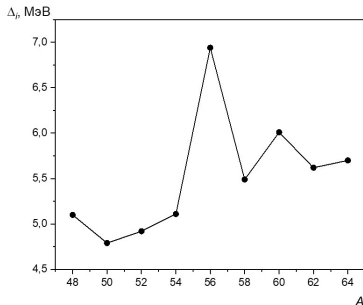
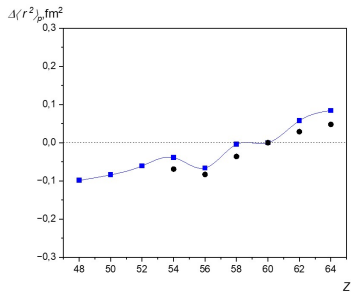


Рис.: Частично-дырочная щель для изотопов Ni с $48 < A < 64$.

Изотопические сдвиги среднеквадратичных зарядовых радиусов ядер ${}_{28}^{48-64}\text{Ni}$

$$\Delta\langle r^2 \rangle_{ch}({}_{28}^A\text{Ni}) = \langle r^2 \rangle_{ch}({}_{28}^A\text{Ni}) - \langle r^2 \rangle_{ch}({}_{28}^{60}\text{Ni}) \quad (21)$$



$$r_{HF} = 1,16 + 0,22 \left(\frac{N-Z}{A} \right) \quad (22)$$

$$a_{HF} = 0,69 - 0,55 \left(\frac{N-Z}{A} \right) \quad (23)$$

KD:

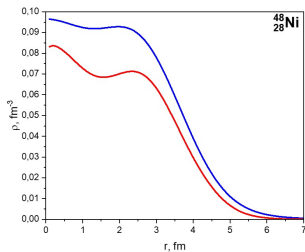
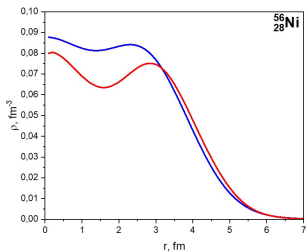
$$r_{HF} = 1,3039 - 0,4054A^{-1/3} \quad (24)$$

$$a_{HF} = 0,6778 - 1,487 \cdot 10^{-4} A \quad (25)$$

Литература

C. D. Pruitt Phys. Rev. C 107, 014602.(2023)

Протонная и нейтронная плотности для ядер $^{56}_{28}\text{Ni}$ и $^{48}_{28}\text{Ni}$



Толщина «скины» ядра:

$$\Delta r_{pn} = \langle r_p \rangle - \langle r_n \rangle \quad (26)$$

$$\Delta r_{pn}(^{48}_{28}\text{Ni}) = 0,257 \text{ фм}$$

Литература

J. Piekarewicz Phys. Rev. C 104, 024329.(2021)

В данной работе были получены следующие результаты:

- Сконструированы протонные ДОП для стабильных изотопов ${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$. Описаны следующие экспериментальные данные:
 - Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов $d\sigma_{el}(\theta)/d\Omega$, полные сечения реакции $\sigma_R(E)$ для системы $p + {}_{28}^{64}\text{Ni}$;
 - Зарядовая плотность $\rho_{ch}(r)$;
 - Зарядовые среднеквадратичные радиусы $\langle r_{ch} \rangle$;
 - Одночастичные энергии E_{nlj} .

В данной работе были получены следующие результаты:

- Сконструированы протонные ДОП для стабильных изотопов ${}_{28}^{58-64}\text{Ni}$. Описаны следующие экспериментальные данные:
 - Дифференциальные сечения упругого рассеяния протонов $d\sigma_{el}(\theta)/d\Omega$, полные сечения реакции $\sigma_R(E)$ для системы $p + {}_{28}^{64}\text{Ni}$;
 - Зарядовая плотность $\rho_{ch}(r)$;
 - Зарядовые среднеквадратичные радиусы $\langle r_{ch} \rangle$;
 - Одночастичные энергии E_{nlj} ..
- Проведена оценка протонных одночастичных энергий E_{nlj}^p для нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-54}\text{Ni}$. Для этого вычислены кулоновские сдвиги одночастичных энергий изотопов Ni и соответствующих «зеркальных» ядер;

- Проведена экстраполяция ДОП на область нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$ вплоть до границы протонной стабильности. Для корректного описания экспериментальных данных необходимо введение зависимости параметра хартри-фоковского радиуса r_{HF} и диффузности a_{HF} от относительного нейтронного избытка $\frac{N-Z}{A}$;

- Проведена экстраполяция ДОП на область нестабильных изотопов ${}_{28}^{48-56}\text{Ni}$ вплоть до границы протонной стабильности. Для корректного описания экспериментальных данных необходимо введение зависимости параметра хартри-фоковского радиуса r_{HF} и диффузности a_{HF} от относительного нейтронного избытка $\frac{N-Z}{A}$;
- Проанализированы протонные и нейтронные плотности дважды магических ядер ${}_{28}^{56}\text{Ni}$ и ${}_{28}^{48}\text{Ni}$. Качественно получено, что протонное распределение плотности ядра ${}_{28}^{48}\text{Ni}$ образует протонную «шубу», что согласуется с другими теоретическими подходами.

В дальнейшем планируются следующие дополнения:

- Продлить область расчетов вплоть до границы нейтронной стабильности ($A = 78$);

В дальнейшем планируются следующие дополнения:

- Продлить область расчетов вплоть до границы нейтронной стабильности ($A = 78$);
- Массовые зависимости параметра радиуса спин-орбитального взаимодействия r_{SO} необходимо изменить относительно систематики традиционной оптической модели KD . Для изотопов Ni также нужно проверить это положение;

В дальнейшем планируются следующие дополнения:

- Продлить область расчетов вплоть до границы нейтронной стабильности ($A = 78$);
- Массовые зависимости параметра радиуса спин-орбитального взаимодействия r_{so} необходимо изменить относительно систематики традиционной оптической модели KD . Для изотопов Ni также нужно проверить это положение;
- Толщина протонного слоя - «шубы» в протонно-избыточных изотопах Ni соотносится с толщиной нейтронного слоя в соответствующих зеркальных ядрах. В эксперименте $CREX$ измерена толщина нейтронного слоя ядра ${}_{20}^{48}Ca$. Кроме того, толщина нейтронного скин-слоя ядер линейно коррелирует в уравнении состояния с наклоном энергии симметрии при плотности насыщения для нейтронно-перегруженной материи.

Спасибо за внимание!