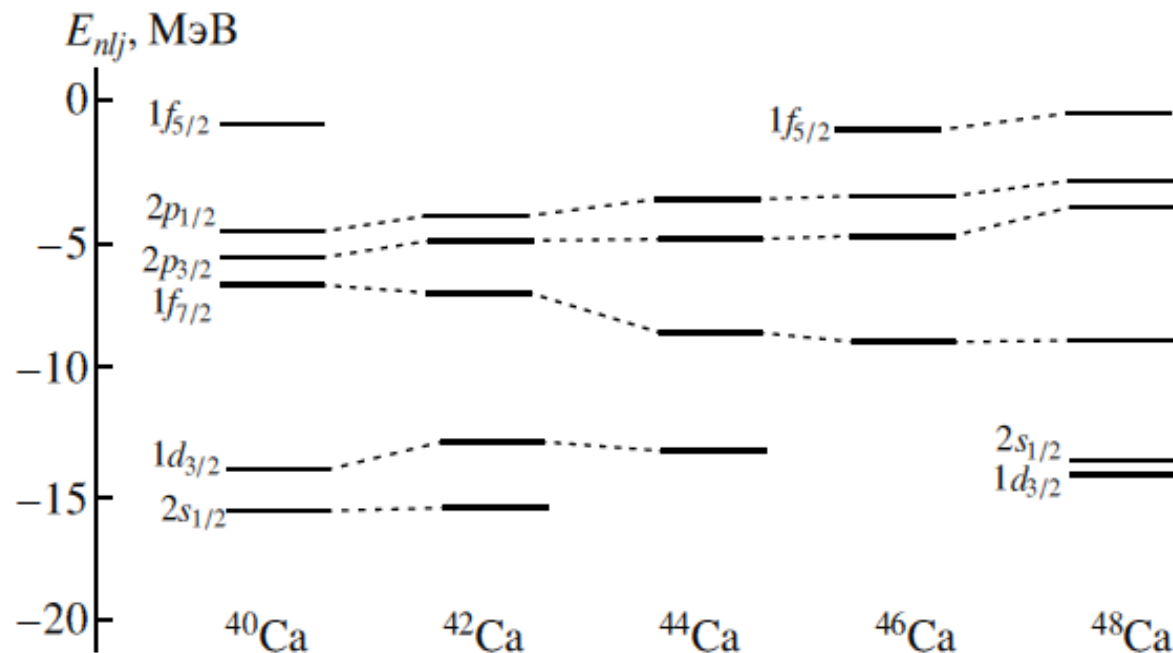

Эволюция
одночастичной структуры ядер
в направлении границ
нуклонной радиоактивности
в дисперсионной оптической модели

- Классические нейтроно-дефицитные и -избыточные ядра ($^{100,132}\text{Sn}$)
- Исчезновение классических магических чисел вблизи границ нуклонной стабильности (при малых Z : $8, 20 \rightarrow 6, 16$)
- Появление новых (пар) магических чисел ($Z=20, N=34$), ($Z=40, N=56$)

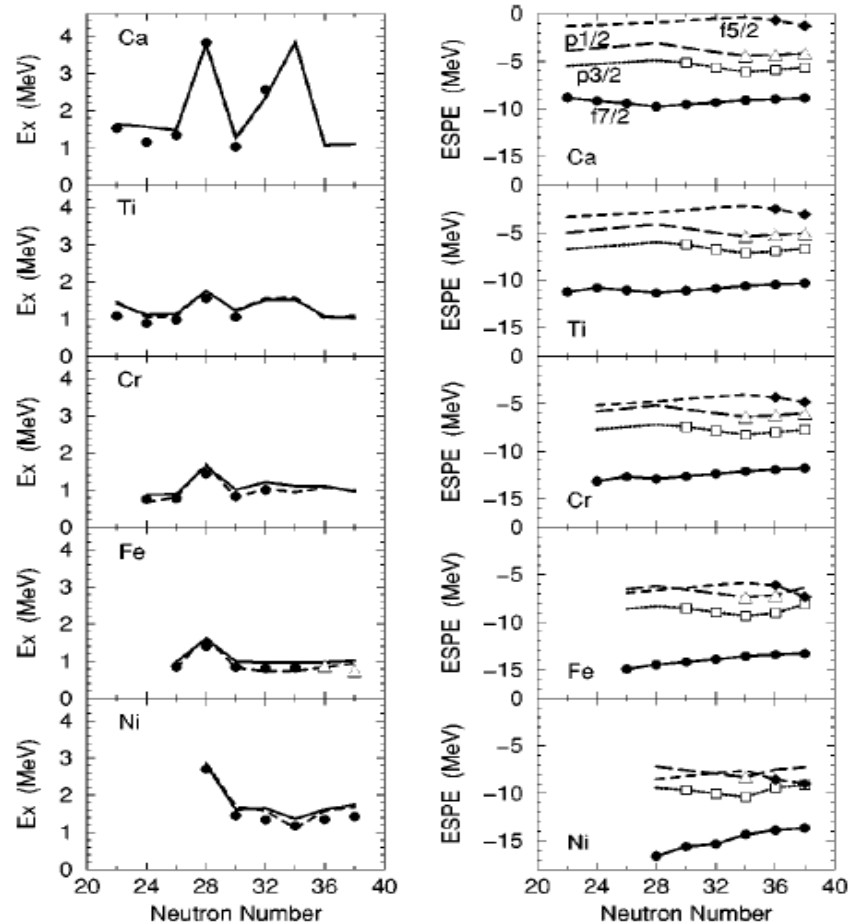
Эволюция оболочечной структуры

Метод согласования данных из реакций срыва и подхвата нуклона на одном и том же ядре



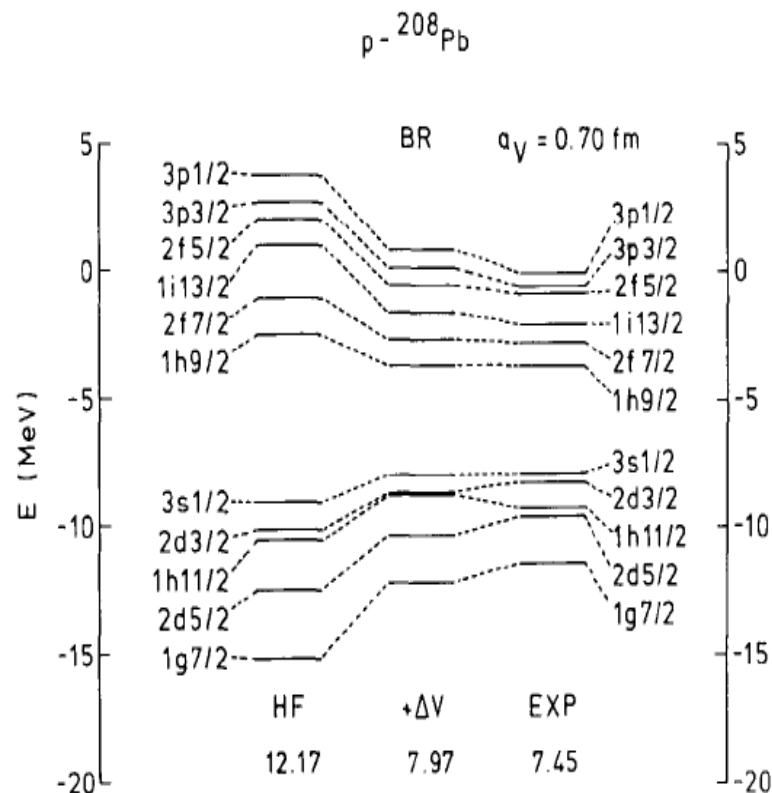
I.N. Boboshin, V. V. Varlamov, B. S. Ishkhanov, I. M. Kapitonov.
**SINGLE-PARTICLE PROPERTIES OF THE $1f2p$ SHELL NUCLEI
ON BASIS OF PROTON STRIPPING AND PICK-UP DATA**
Nucl. Phys. A **496**, 93 (1989)

Многочастичная модель оболочек



Модель среднего поля с дисперсионным оптическим потенциалом (ДОП)

учет корреляций



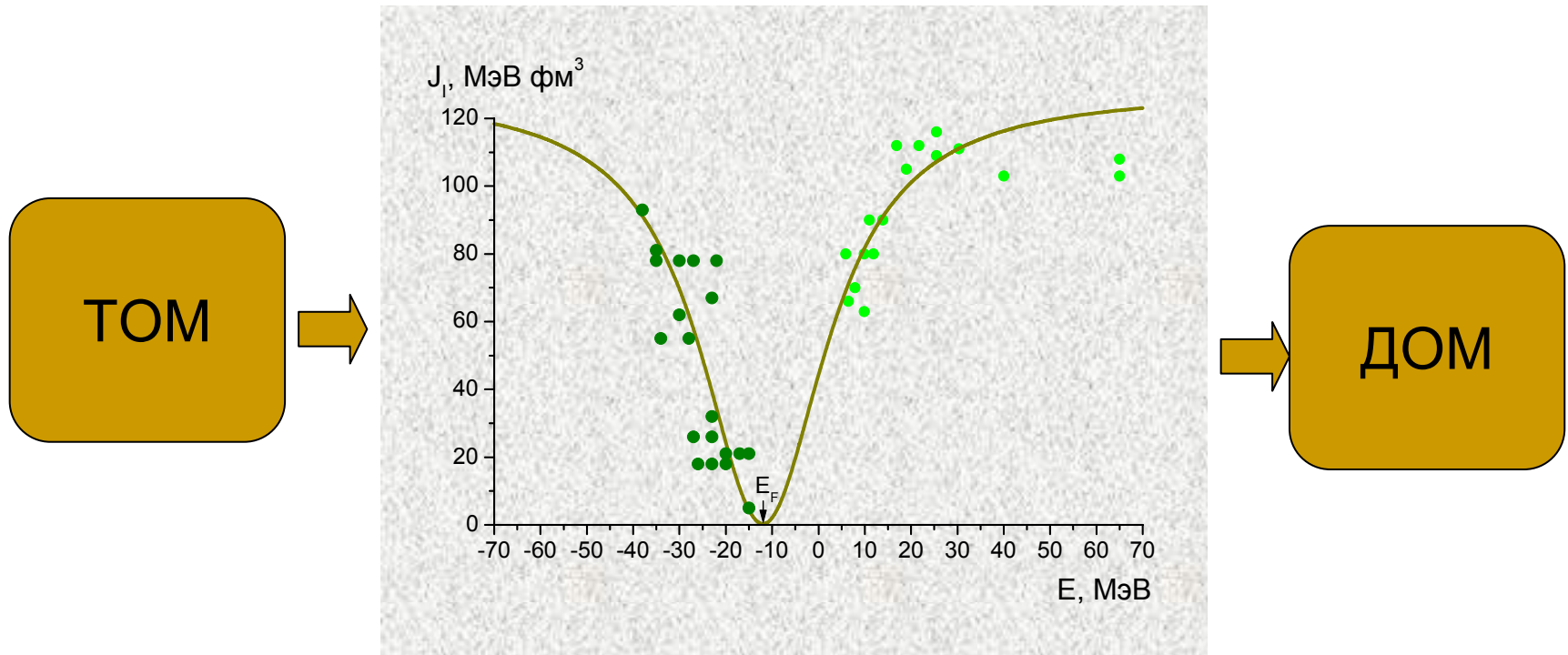
M. Honma, T. Otsuka, B. A. Brown, T. Mizusaki.
Effective interaction for pf -shell nuclei.
PHYS. REV. C, 2002. V. 65, 061301(R)

C. Mahaux, R. Sartor. **Single-Particle Motion in Nuclei.**
Advances in Nuclear Physics. 1991. V.20. P.1.

Задача

- Развитие дисперсионного подхода к конструированию среднего поля ядер с целью описания и предсказания эволюции одночастичных характеристик сферических и близких к ним ядер в направлении границ нуклонной радиоактивности

От традиционной к дисперсионной оптической модели



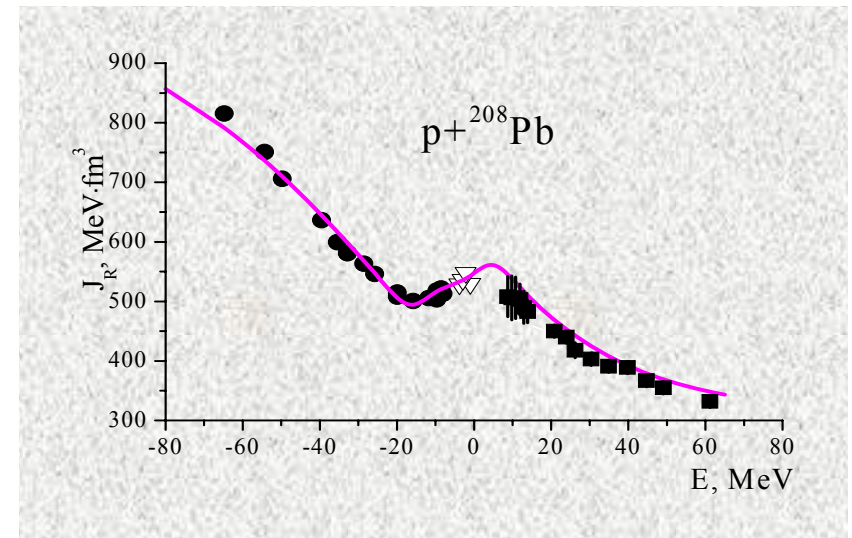
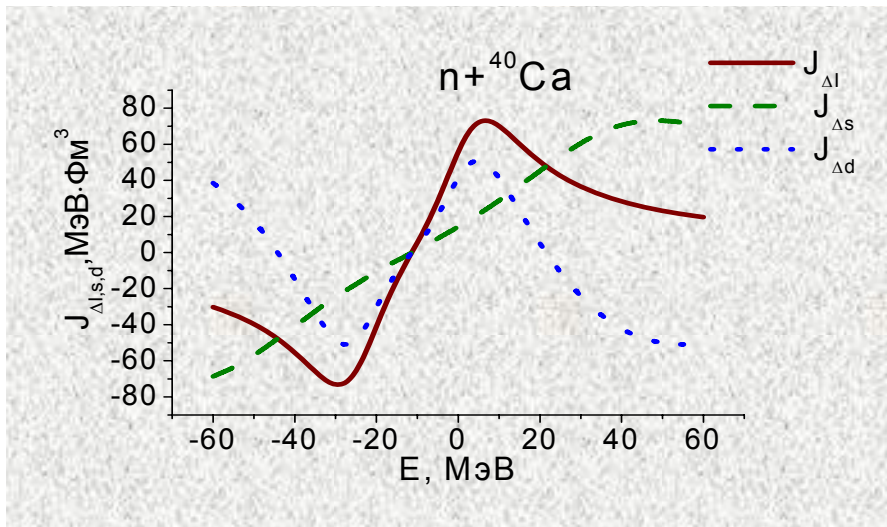
Дисперсионное соотношение

$$V(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E) = V(\mathbf{r}, \mathbf{r}') + P/\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E')}{E' - E} dE'$$

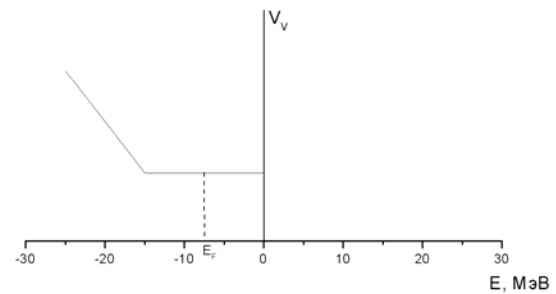
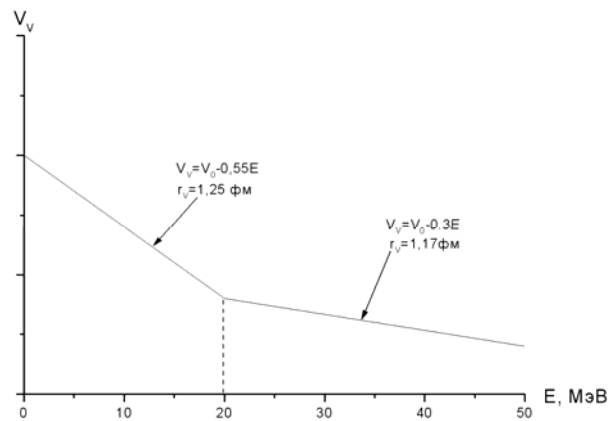
Дисперсионный подход

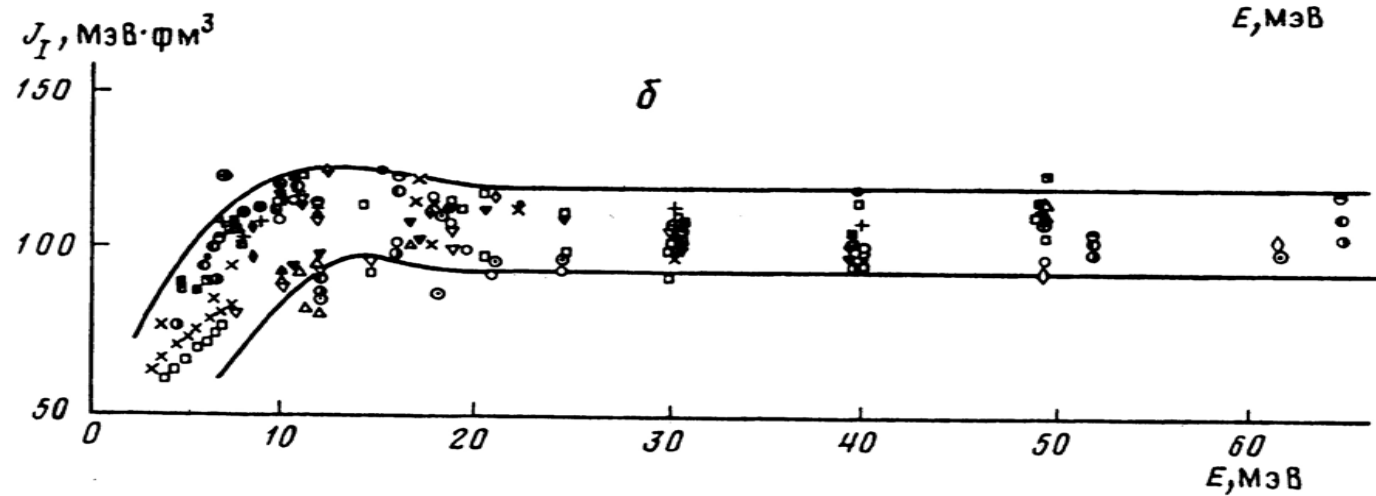
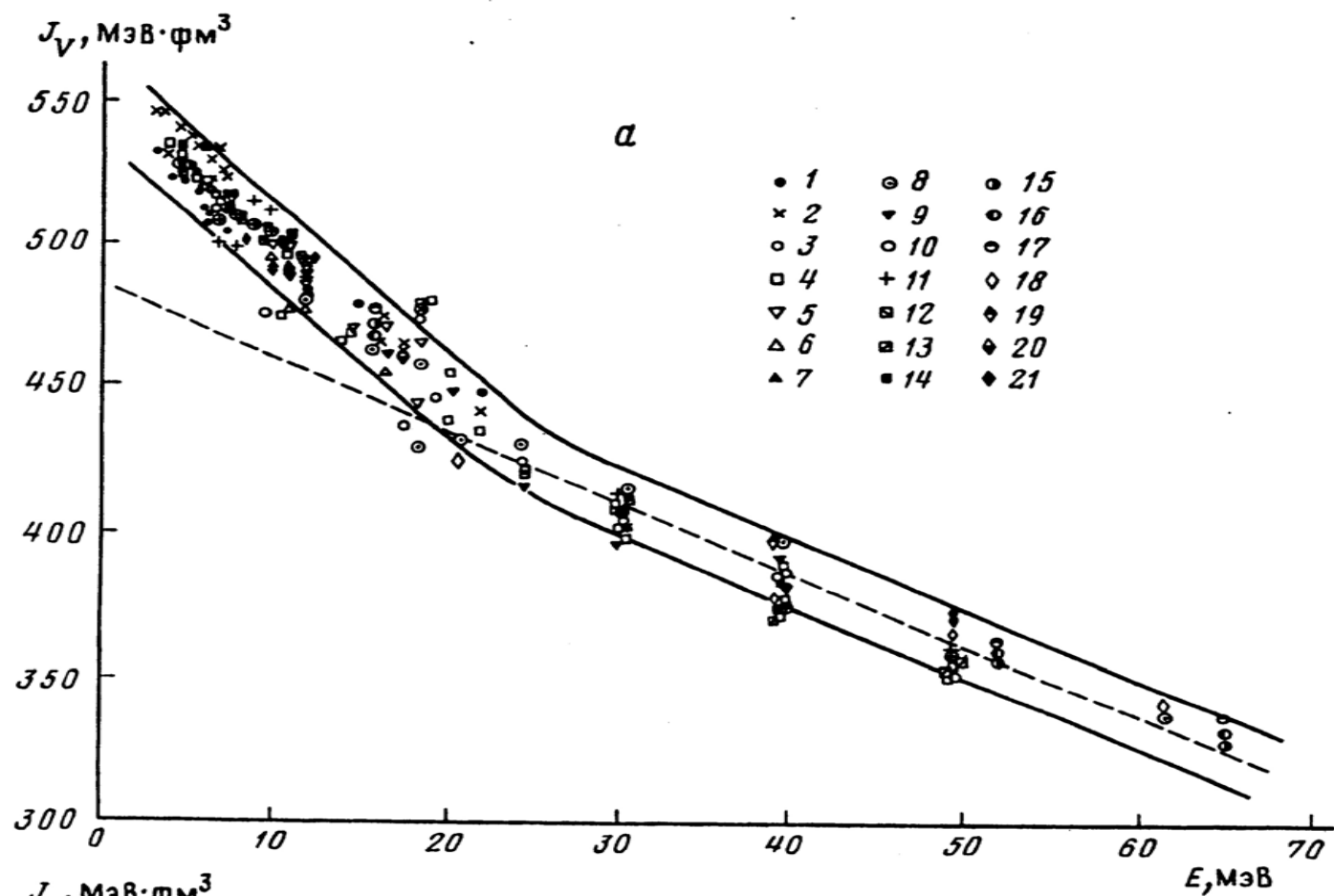
к определению феноменологического среднего поля ядра, единого для областей $E < 0$ и $E > 0$

$$V_R(r, E) = V_{HF}(E) f(r, r_{HF}, a_{HF}) + \Delta V_S(E) f(r, r_S, a_S) - 4a_d \Delta V_d(E) \frac{d}{dr} f(r, r_d, a_d)$$



Эмпирические закономерности параметров оптического и оболочечного потенциалов





Дисперсионный оптико-модельный анализ (ДОМА) данных по рассеянию нуклонов ядрами

- Определение параметров ДОП при анализе данных по рассеянию нуклонов ядром в широком диапазоне энергий:

Проблема: существенная ограниченность или полное отсутствие таких данных



- Определение параметров ДОП при $E < 0$ по имеющимся в литературе данным из реакций срыва **или** подхвата нуклона

Проблема: большие (20-30%) ошибки в определении



- Расчет одночастичных характеристик ядра

$n, p + {}^{40}\text{Ca}, {}^{90}\text{Zr}, {}^{208}\text{Pb}$

Систематики глобальных параметров нуклонного
потенциала традиционной оптической модели (ТОМ)
для ядер близких к сферическим

1. CH89

$$A = 40—209 \quad E = 10—65 \text{ MeV}$$

R.L. VARNER, W.J. THOMPSON, T.L. McABEE, E.J. LUDWIG
and T.B. CLEGG. **A GLOBAL NUCLEON OPTICAL MODEL
POTENTIAL**. PHYSICS REPORTS 201, No. 2 (1991) 57—119.

2. KD

$$A = 24—209 \quad E = 1 \text{ keV}—200 \text{ MeV}$$

A.J. Koning, J.P. Delaroche. **Local and global nucleon optical
models from 1 keV to 200 MeV**. Nuclear Physics A 713 (2003)
231–310

Global optical-model parametrization for CH86 and CH89. The values a_0 , a_w , V_{so} , and a_{so} are independent of A , Z , and $E = E_{\text{lab}}(\text{MeV})$

Real central potential:

$$V_r = V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + (E - E_c)V_c, \quad +: \text{protons, } -: \text{neutrons,}$$

$$R_0 = r_0 A^{1/3} + r_0^{(0)},$$

$$E_c = \begin{cases} \frac{6Ze^2}{5R_c} = \frac{1.73Z}{R_c} \text{ MeV,} & \text{for (p, p),} \\ 0, & \text{for (n, n).} \end{cases}$$

Coulomb potential radius:

$$R_c = r_c A^{1/3} + r_c^{(0)} = 1.238 A^{1/3} + 0.116 \text{ fm.}$$

Spin-orbit potential:

$$R_{so} = r_{so} A^{1/3} + r_{so}^{(0)}.$$

Imaginary central potential:

$$W_v = W_{v0} \left[1 + \exp\left(\frac{W_{vso} - (E - E_c)}{W_{vsw}}\right) \right]^{-1},$$

$$W_s = \left(W_{so} \pm W_{st} \frac{N-Z}{A} \right) \left[1 + \exp\left(\frac{(E - E_c) - W_{so}}{W_{sew}}\right) \right]^{-1},$$

$$R_w = r_w A^{1/3} + r_w^{(0)}.$$

Необходимость коррекции параметров CH89

«...the absorptive potential ...below 10 MeV probably does not behave as a simple extrapolation of the energy dependence found here. **This energy restriction also limits the usefulness of CH89 in studies of dispersion-relation constraints** on the relation between real and imaginary potentials.»

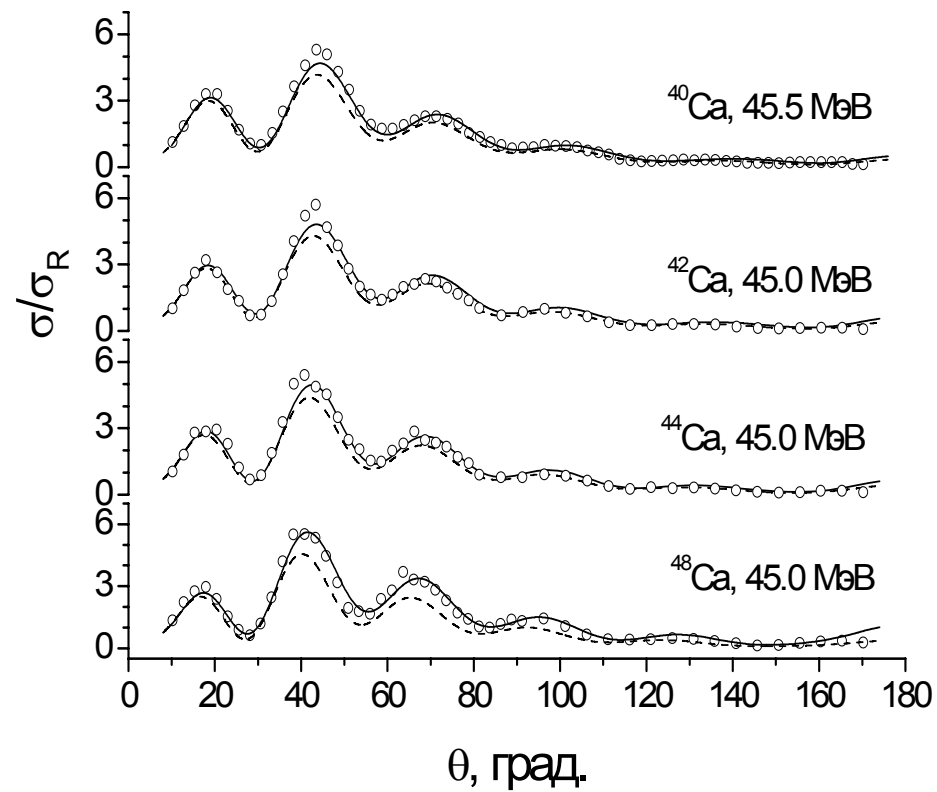
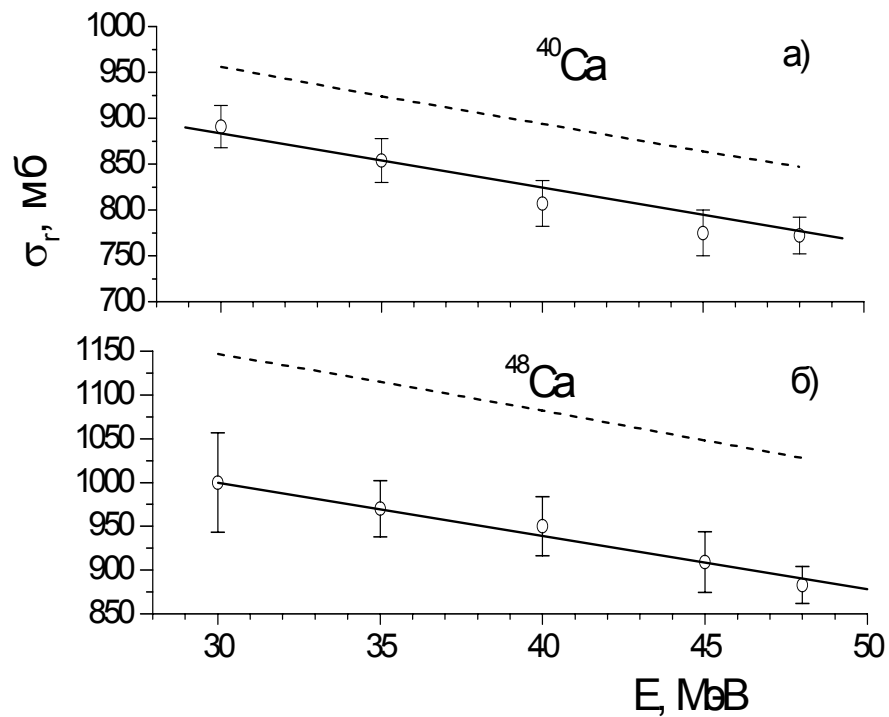
Прецизионные данные (<3%)
по полным сечениям реакций σ_r под действием протонов

Carlson R.F.

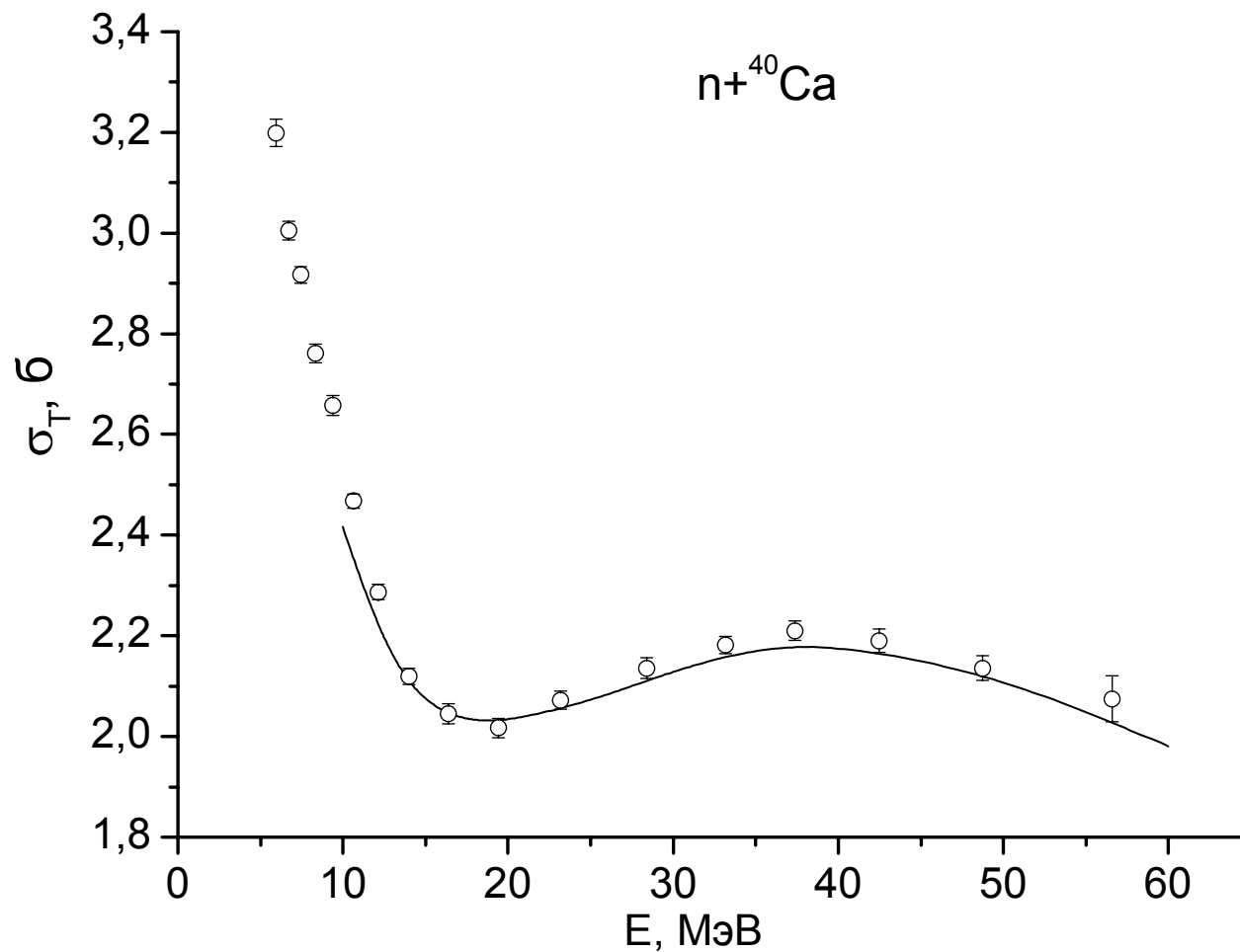
Proton-Nucleus Total Reaction Cross Sections and Total Cross Sections Up to 1 GeV
At. Data Nucl. Data Tables. 1996. V.63. P. 93.

Ожидаются данные по полным сечениям реакций σ_r при взаимодействии радиоактивных пучков с водородосодержащими мишенями

CH89*

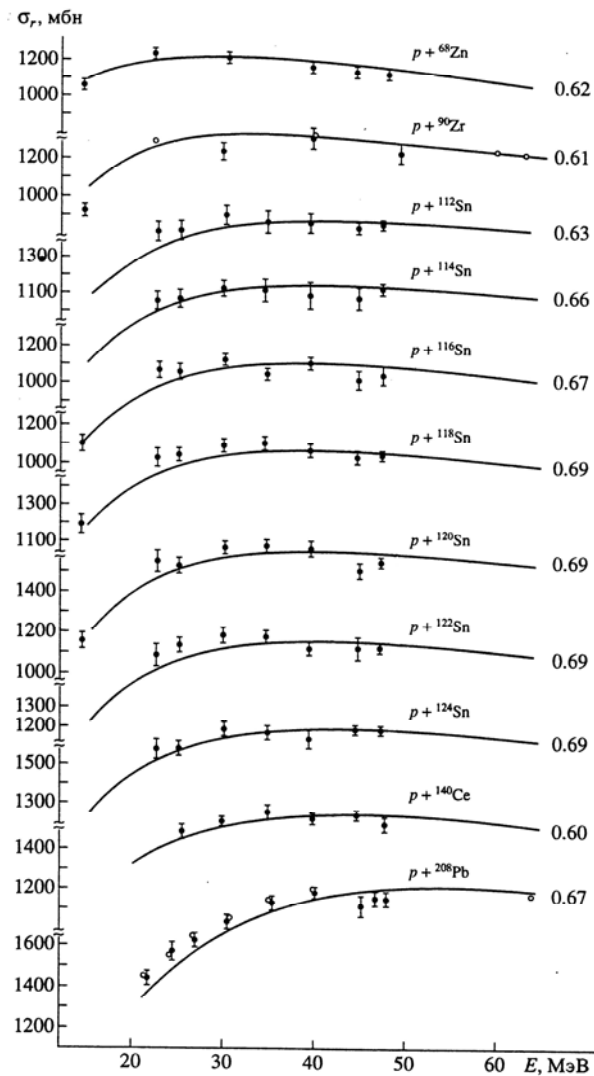
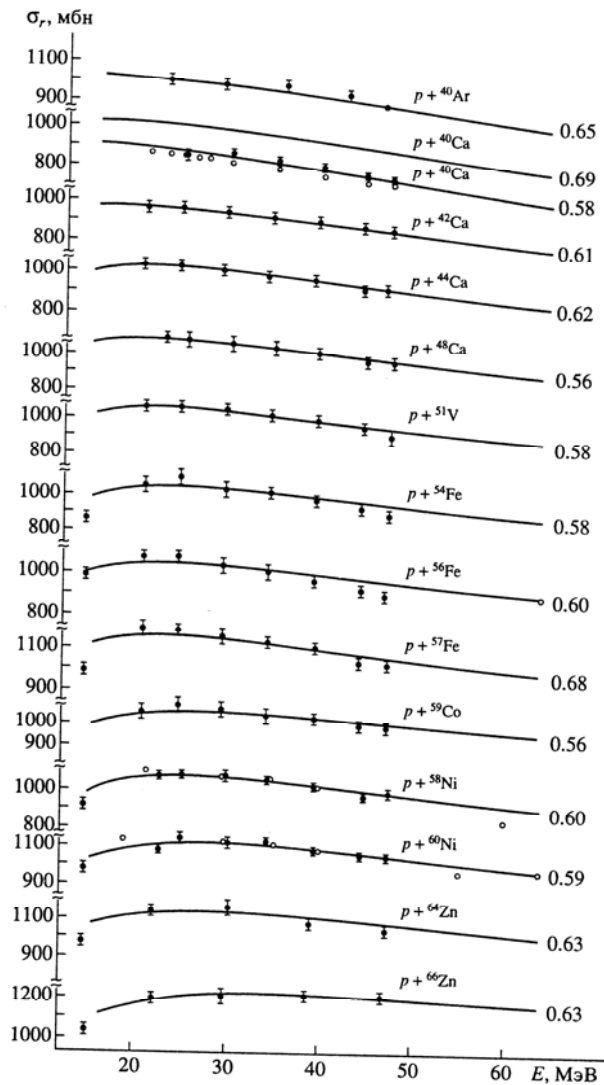


CH89*

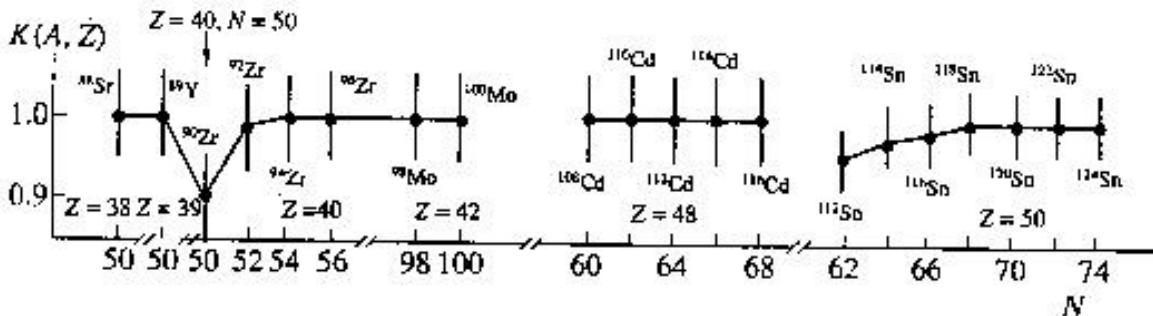
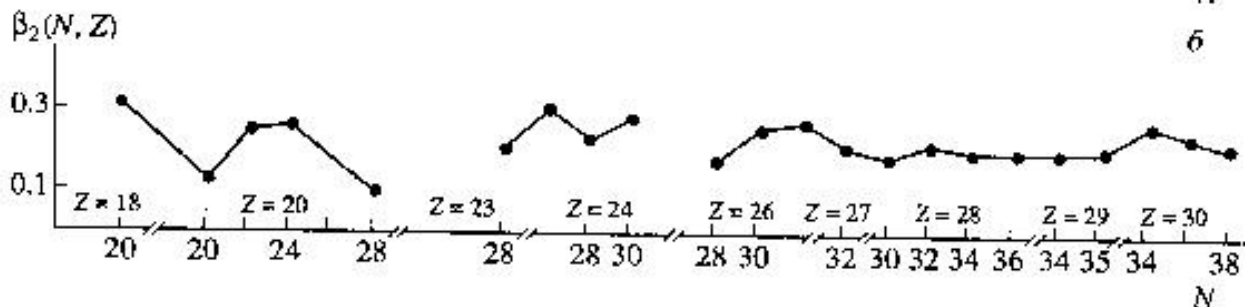
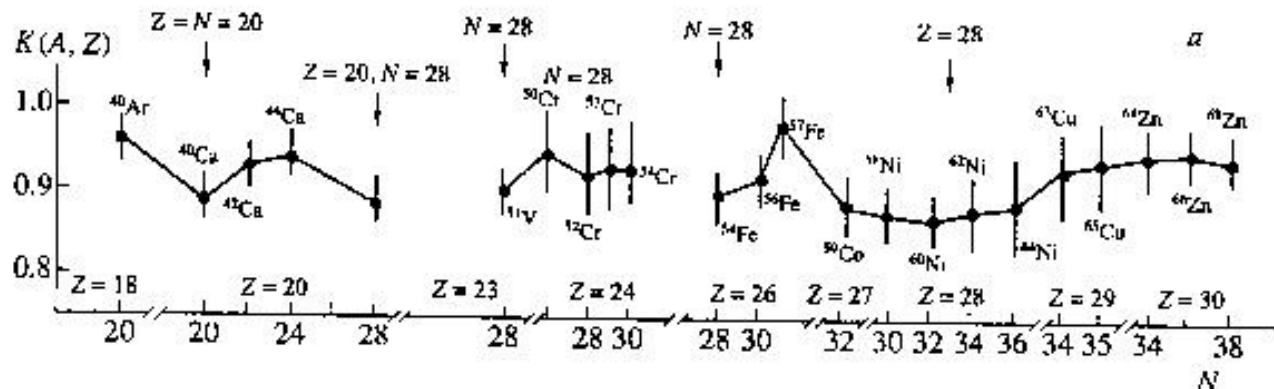


Полное сечение взаимодействия, вычисленное по CH89*

CH89*



Оболочечный эффект в полных сечениях реакций

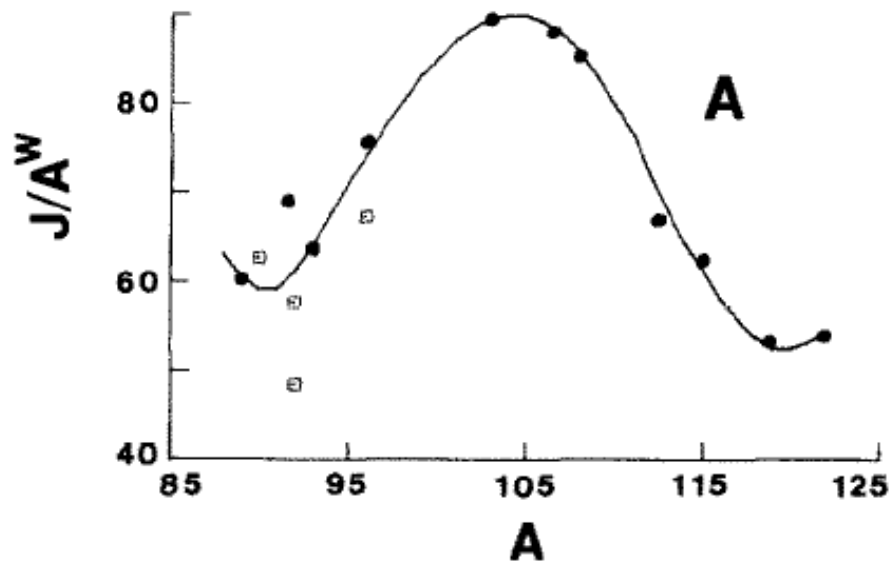


$$K(E_k) = \sigma_r^{CH89*}(E_k) / \sigma_r^{CH89}(E_k)$$

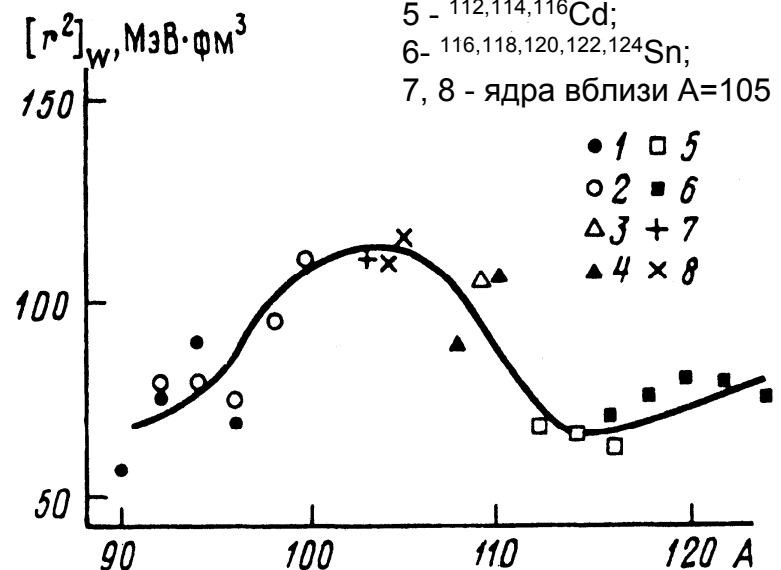
$$K = \langle K(E_k) \rangle_{\Delta E=20-60 \text{ МэВ}}$$

Е.А.Романовский,
О.В.Беспалова, Т.П.Кучнина,
Д.В.Плешков, Т.И.Спаская.
**Исследование эффектов
ядерной структуры в
полных протонных сечениях
реакций в диапазоне энергии
от 20 до 60 МэВ для ядер с
 $40 < A < 124$.** Ядерная физика,
1998, т.61, №1, с.37-50.

Оболочечный эффект в мнимой части ОП



Smith A.B., Guenter P.T., Whalen J.F. THE OPTICAL MODEL OF FEW-MeV NEUTRON ELASTIC SCATTERING FROM $Z = 39$ TO 51 TARGETS// Nucl. Phys. 1984. V.A415.P.1.



$J_1^{\text{KD}}(E_k=6 \text{ МэВ}) - 78 \div 83 \text{ МэВ} \cdot \text{фм}^3$

Е.А.Романовский, Анис Белал, О.В.Беспалова, Спасская Т.И., Луай Морзена Рафу, Сами Ботрос Ханна. “Анализ данных по рассеянию протонов ядрами $^{92,94,96,98,100}\text{Mo}$ при $E_p < 60$ МэВ”. Изв.АН, сер. физ., 1997, т.61, №4, с. 802-807.

Оболочечный эффект в мнимой части ОП

Eder G., Leeb H., Oberhummer H. J. Shell effects in the neutron-nucleus optical potential. J. Phys. G. 1977. V.3. N6. P.L127.

Abstract. A phenomenological neutron-nucleus optical potential is constructed for the energy range from 4 MeV to 100 MeV. The **surface absorption term demonstrates strong dependence on the shell structure...**

Table 1. Shell parameter Y for special nuclei.

	A	Y (MeV)		A	Y (MeV)		A	Y (MeV)
C	12.0	2.08	Mn	55.0	3.54	Nb	92.9	3.56
O	16.0	-0.67	Fe	55.9	5.56	Mo	95.9	4.02
Na	23.0	3.56	Co	59.0	4.91	Cd	112.4	6.02
Mg	24.3	3.71	Ni	58.7	6.72	In	114.8	4.14
Al	27.0	3.70	Cu	63.5	5.42	Sb	121.8	4.92
Si	28.1	5.58	Zn	65.4	5.95	Hf	178.5	3.17
P	31.0	7.78	As	75.0	5.02	Ta	181.0	6.98
S	32.1	6.89	Sr	87.6	4.73	Au	197.0	2.66
Ca	40.1	2.56	Y	89.0	3.79	Pb	207.2	2.83
V	50.9	2.52	Zr	91.2	3.29	Bi	209.0	2.59
Cr	52.0	4.52						

$$W_d = (Y + 30y)\exp(-2.66y) \text{ (МэВ)}, \text{ где } y = (E_{\text{lab}}/100 \text{ МэВ})$$

KD

$$V_V(E) = v_1[1 - v_2(E - E_f) + v_3(E - E_f)^2 - v_4(E - E_f)^3],$$

$$W_V(E) = w_1 \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + (w_2)^2},$$

$$r_V = \text{constant},$$

$$a_V = \text{constant},$$

$$W_D(E) = d_1 \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + (d_3)^2} \exp[-A_2(E - E_f)],$$

$$r_D = \text{constant},$$

$$a_D = \text{constant},$$

$$V_{SO}(E) = v_{so1} \exp[-v_{so2}(E - E_f)],$$

$$W_{SO}(E) = w_{so1} \frac{(E - E_f)^2}{(E - E_f)^2 + (w_{so2})^2},$$

$$r_{SO} = \text{constant},$$

$$a_{SO} = \text{constant},$$

$$r_C = \text{constant},$$

v_1^n	$= 59.30 - 21.0(N - Z)/A - 0.024 A$	MeV
v_2^n	$= 0.007228 - 1.48 \times 10^{-6} A$	MeV ⁻¹
v_3^n	$= 1.994 \times 10^{-5} - 2.0 \times 10^{-8} A$	MeV ⁻²
v_4^n	$= 7 \times 10^{-9}$	MeV ⁻³
w_1^n	$= 12.195 + 0.0167 A$	MeV
w_2^n	$= 73.55 + 0.0795 A$	MeV
d_1^n	$= 16.0 - 16.0(N - Z)/A$	MeV
d_2^n	$= 0.0180 + 0.003802/(1 + \exp[(A - 156)/8])$	MeV ⁻¹
d_3^n	$= 11.5$	MeV
v_{so1}^n	$= 5.922 + 0.0030 A$	MeV
v_{so2}^n	$= 0.0040$	MeV ⁻¹
w_{so1}^n	$= -3.1$	MeV
w_{so2}^n	$= 160$	MeV
E_f^n	$= -11.2814 + 0.02646 A$	MeV

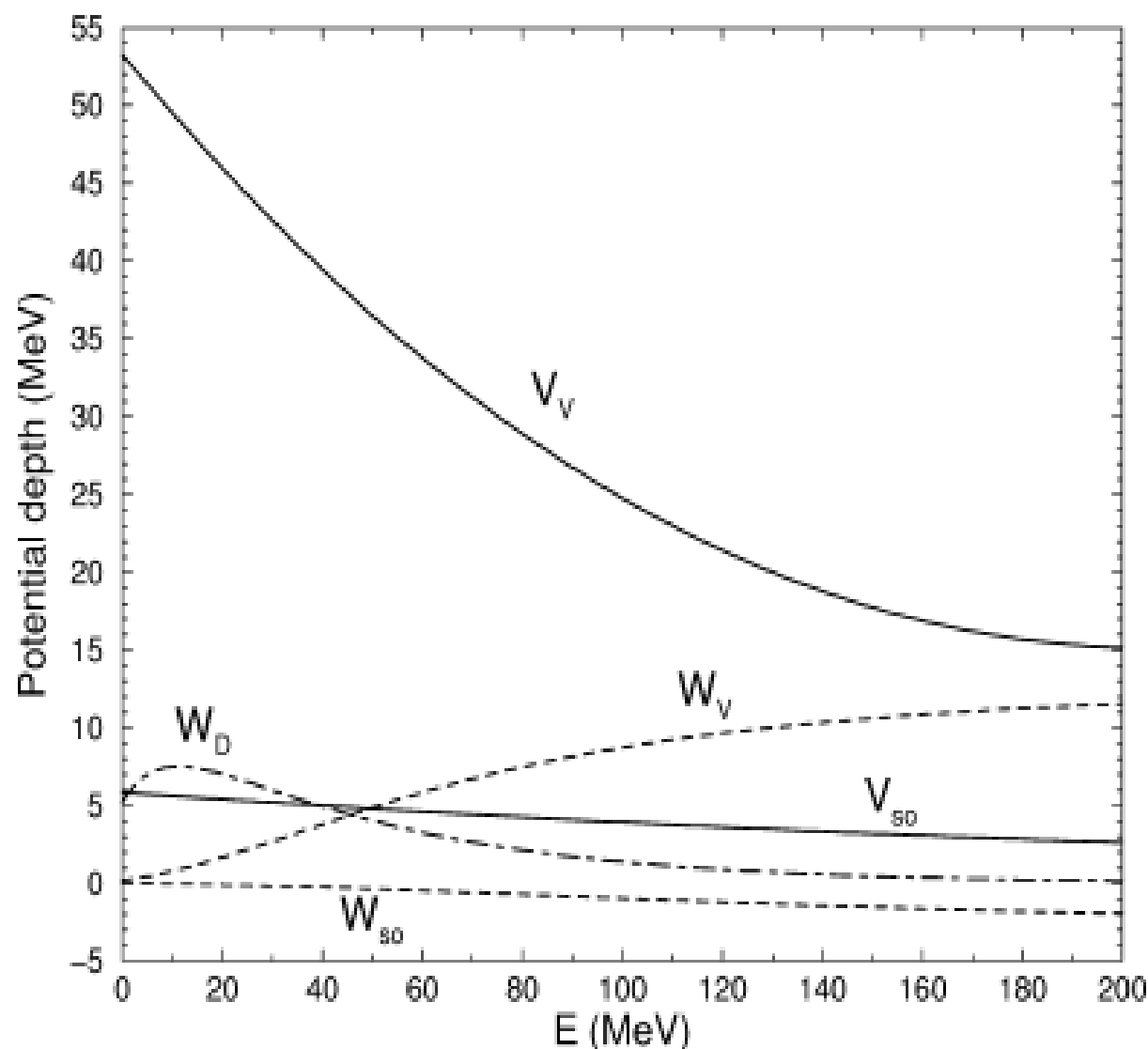


Fig. 1. The various potential well depths as a function of incident (laboratory) energy, see Eq. (7). As an example, the values for neutrons incident on ^{56}Fe are plotted.

Методика глобальных параметров (МГП)

Фиксирование ряда параметров мнимой части ДОП по предсказаниям систематик глобальных параметров традиционной оптической модели



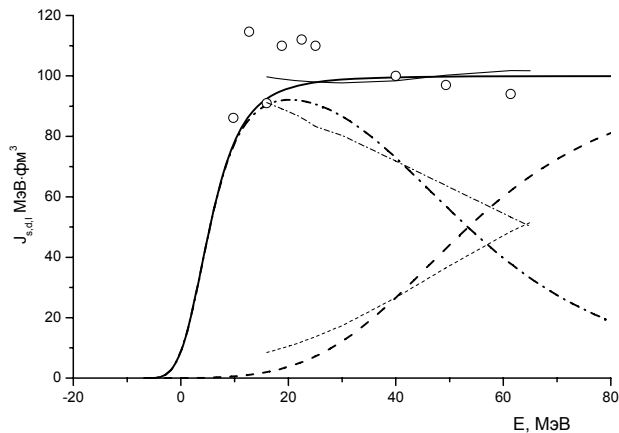
Определение остальных параметров ДОП при $E < 0$ по результатам **метода согласования** данных из реакций срыва и подхвата нуклона на одном и том же ядре.



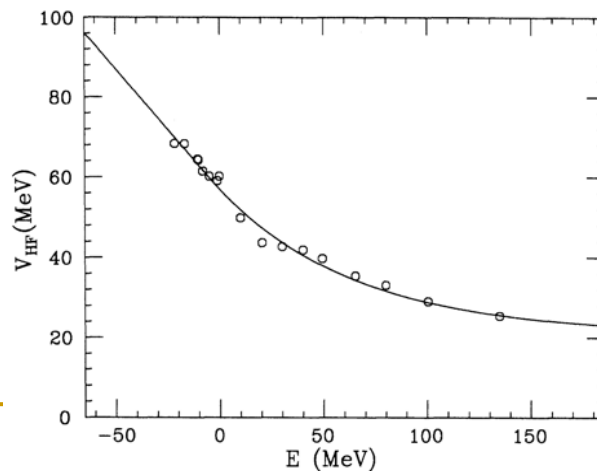
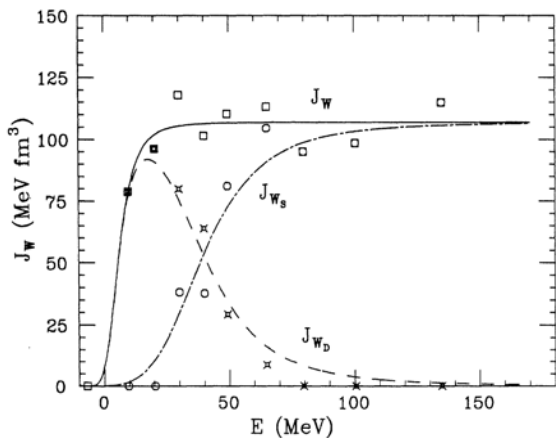
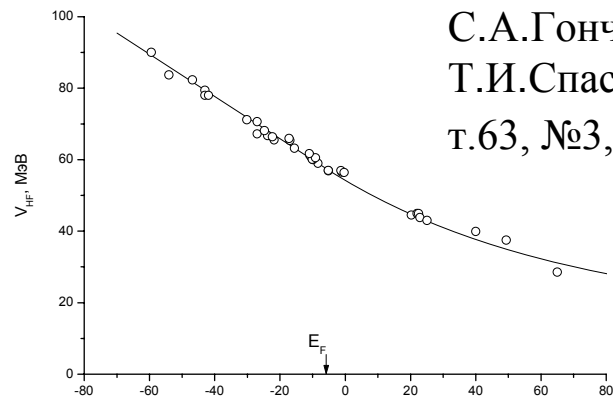
Расчет одночастичных характеристик ядра

Сравнительный анализ МГП и ДОМА

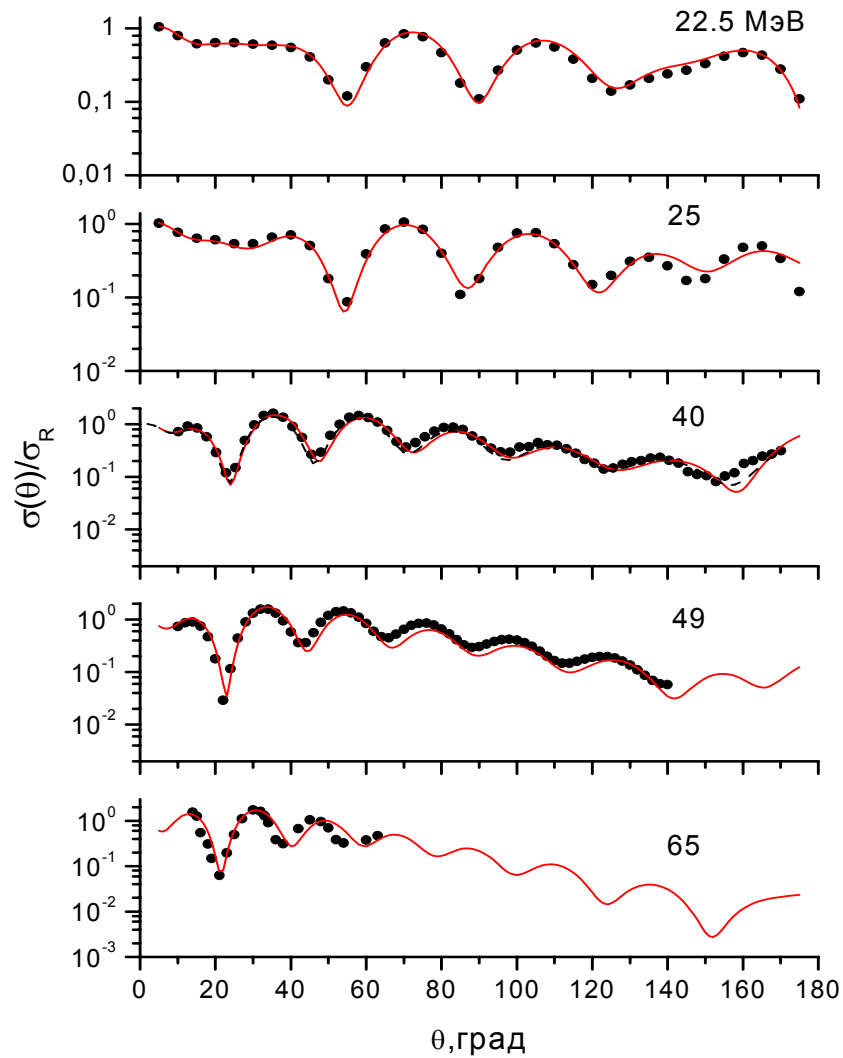
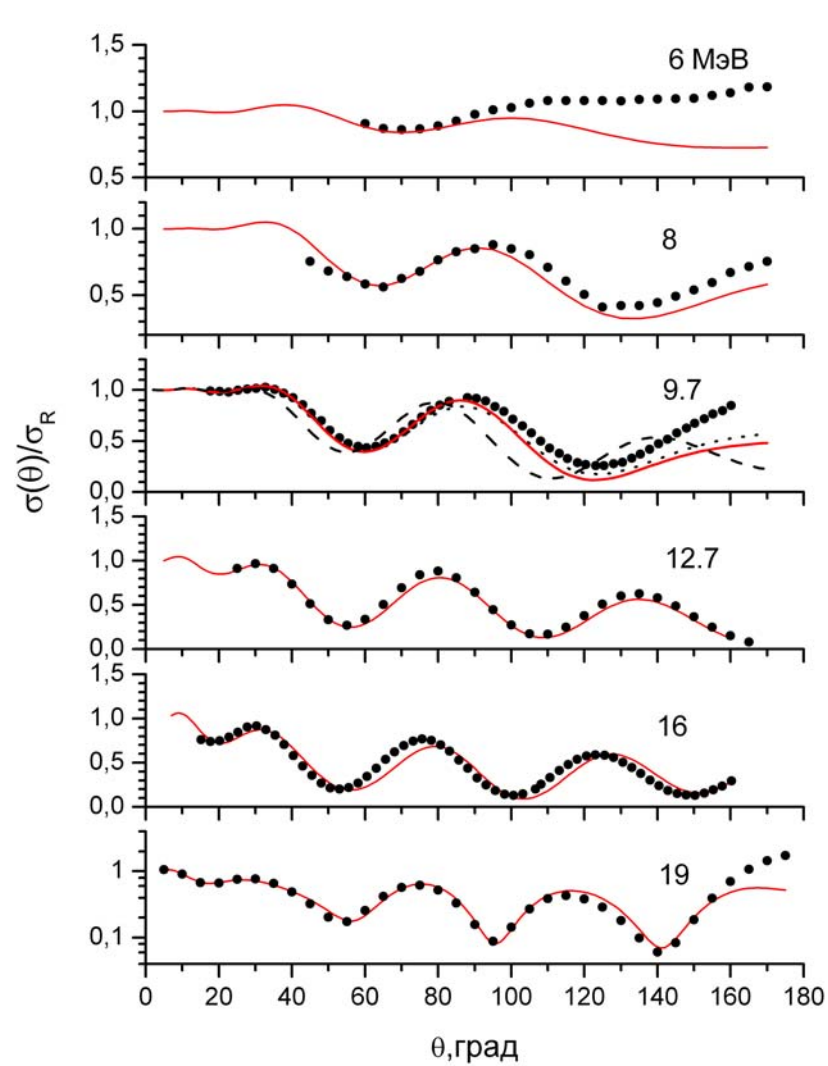
$p + {}^{90}\text{Zr}$



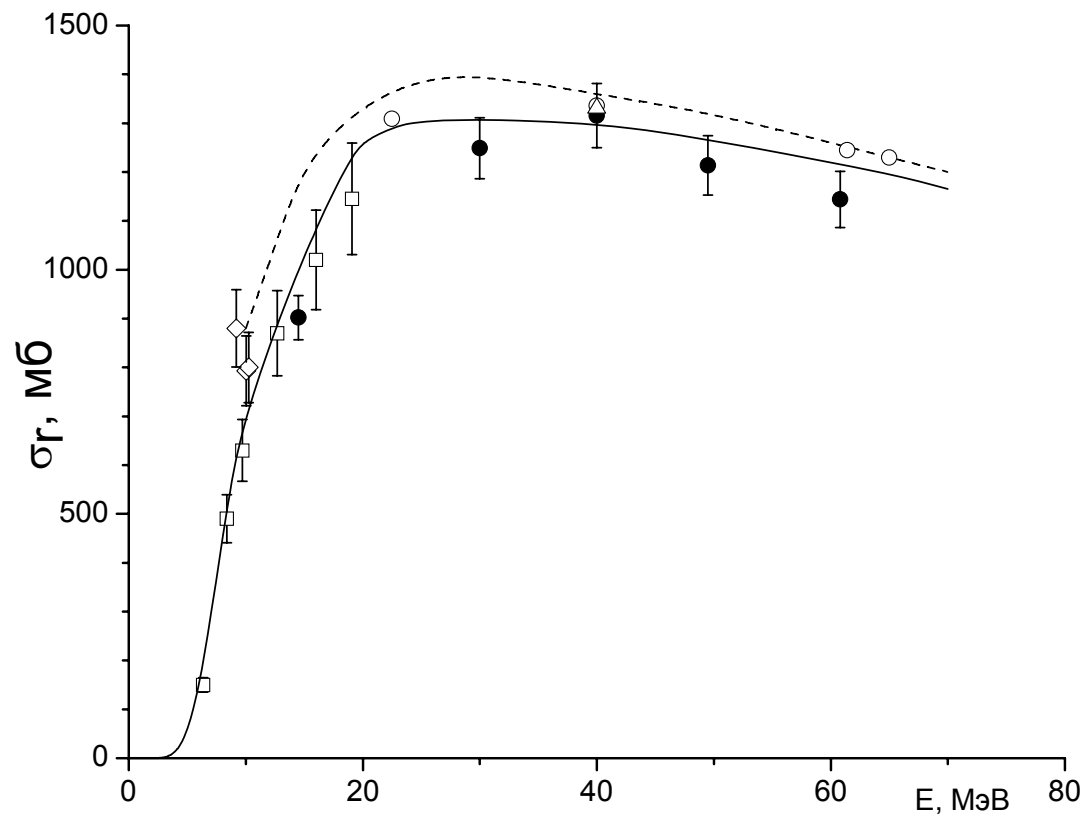
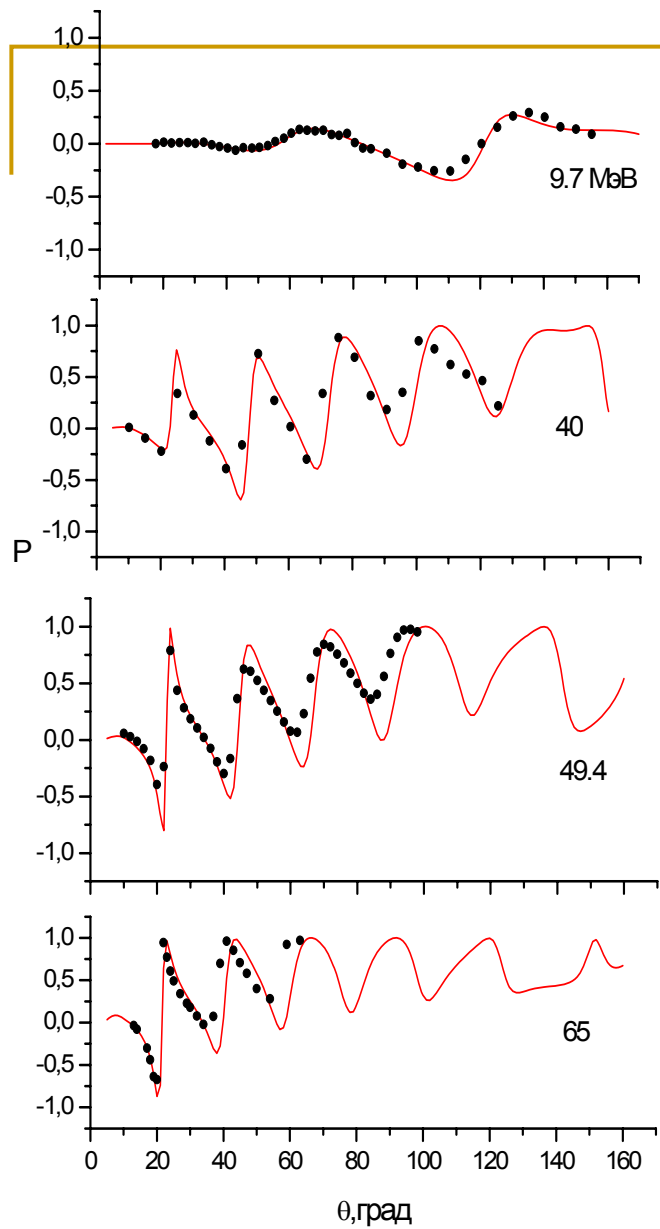
Е.А.Романовский, О.В.Беспалова,
С.А.Гончаров, Д.В.Плешков,
Т.И.Спасская. Ядерная физика, 2000,
т.63, №3, стр.468



Wang Y. Foster C.C, Polak R.D.
et al. Phys. Rev. 1993. V.C47.
P.2677-2689.



$p+^{90}\text{Zr}$



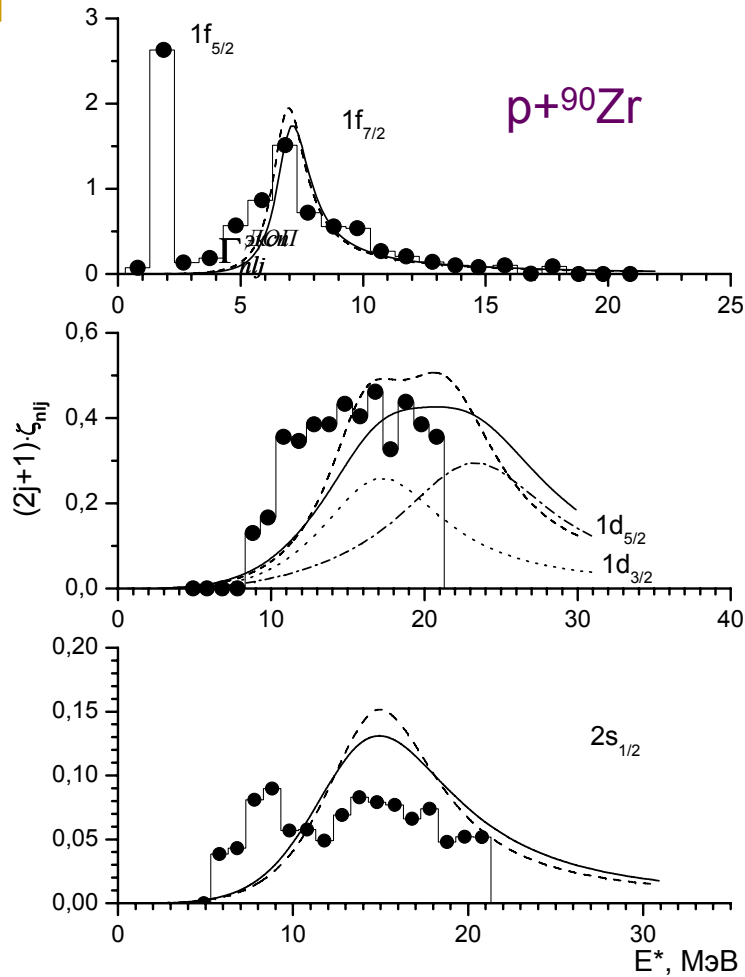
$p+^{90}\text{Zr}$

Одночастичные энергии протонных состояний для ^{90}Zr

под- оболочка	$-E_{nlj}^{\text{эксн}}$			$-E_{nlj}^{\text{ДОП}}$	
	(e,e'p)	(p,2p)	метод согласования,	МГП	ДОМА
$1g_{9/2}$			5.41(0.54)	5.32	4,87
$2p_{1/2}$	8,36	9,1 (0,4)	6.97(0.70)	7.88	8,60
$2p_{3/2}$	10,4 (0,2)		10.11(1.20)	9.35	10,30
$1f_{5/2}$	10,8 (0,2)	11,0 (0,4)	10.37(1.10)	9.40	9,68
$1f_{7/2}$	17,0 (0,5)	17,2 (0,5)	15.56(1.55)	14.57	15,69
$2s_{1/2}$	21,8 (0,4)	22,3 (0,5)		22.35	24,01
$1d_{3/2}$	23,8 ^{a)} (0,5)	24,8 (0,6)		24.05	25,19
$1d_{5/2}$		30,2 (0,8)		29.92	30,39
$1p_{1/2}$		41,9 (1,1)		40.82	41,81
$1p_{3/2}$		46,8 (1,5)		44.22	44,40
$1s_{1/2}$		59,4 (2,1)		60.30	59,88
χ^2				0.8	2.0

$$\chi_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{nlj} \frac{(E_{nlj}^{(i)} - E_{nlj}^{\text{эксн}})^2}{(\Delta_{nlj}^{\text{эксн}})^2}$$

Спектральные функции



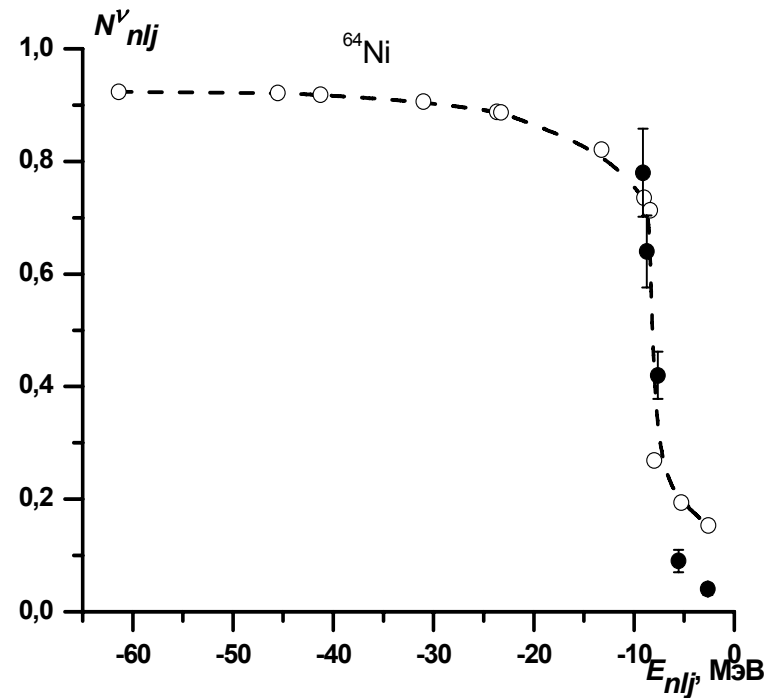
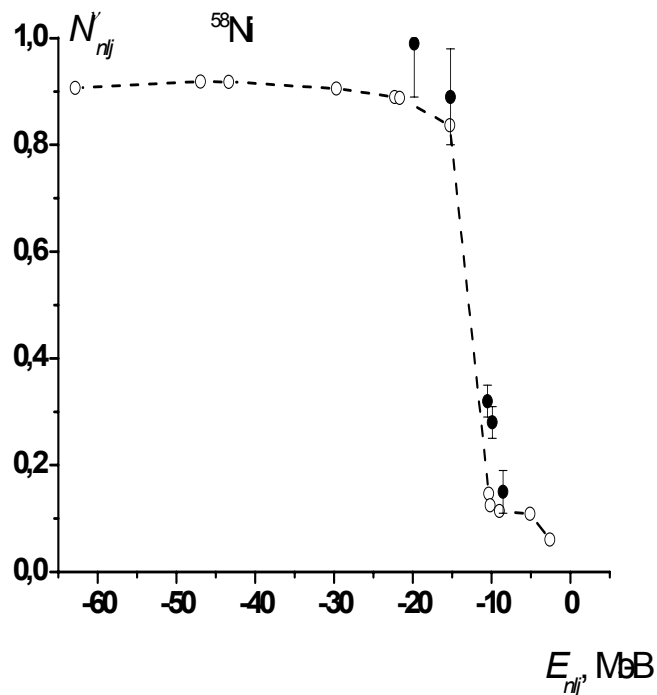
Значения фрагментационной ширины

Подоболо чка	Г, МэВ ДОП.	Г, МэВ, (p,2p) [L016]	Г, МэВ (e,e'p) [L177]
1f_{7/2}	1.91	2.03(0.89)	3.1(6);6.7(1)
2s_{1/2}	10.59	3.65(0.63)	8(2); 10(1)
1d_{3/2}	9.79	4.46(0.79)	7(2)
1d_{5/2}	12.18	7.57(0.76)	13
1p_{1/2}	10.65	9.18(0.88)	
1p_{3/2}	12.04	15.55(0.95)	
1s_{1/2}	17.94	18.78(1.0)	

$$\zeta_{nlj}(E) = -\pi^{-1} \frac{S_{nlj} \langle W_{nlj}(E) \rangle / \langle m^*_{nlj} / m \rangle}{(E - E_{nlj})^2 + [\langle W_{nlj}(E) \rangle / \langle m^*_{nlj} / m \rangle]^{-2}}$$

$$\Gamma_{nlj} = 2 \langle W_{nlj}(E_{nlj}) \rangle / \langle m^*_{nlj} / m \rangle$$

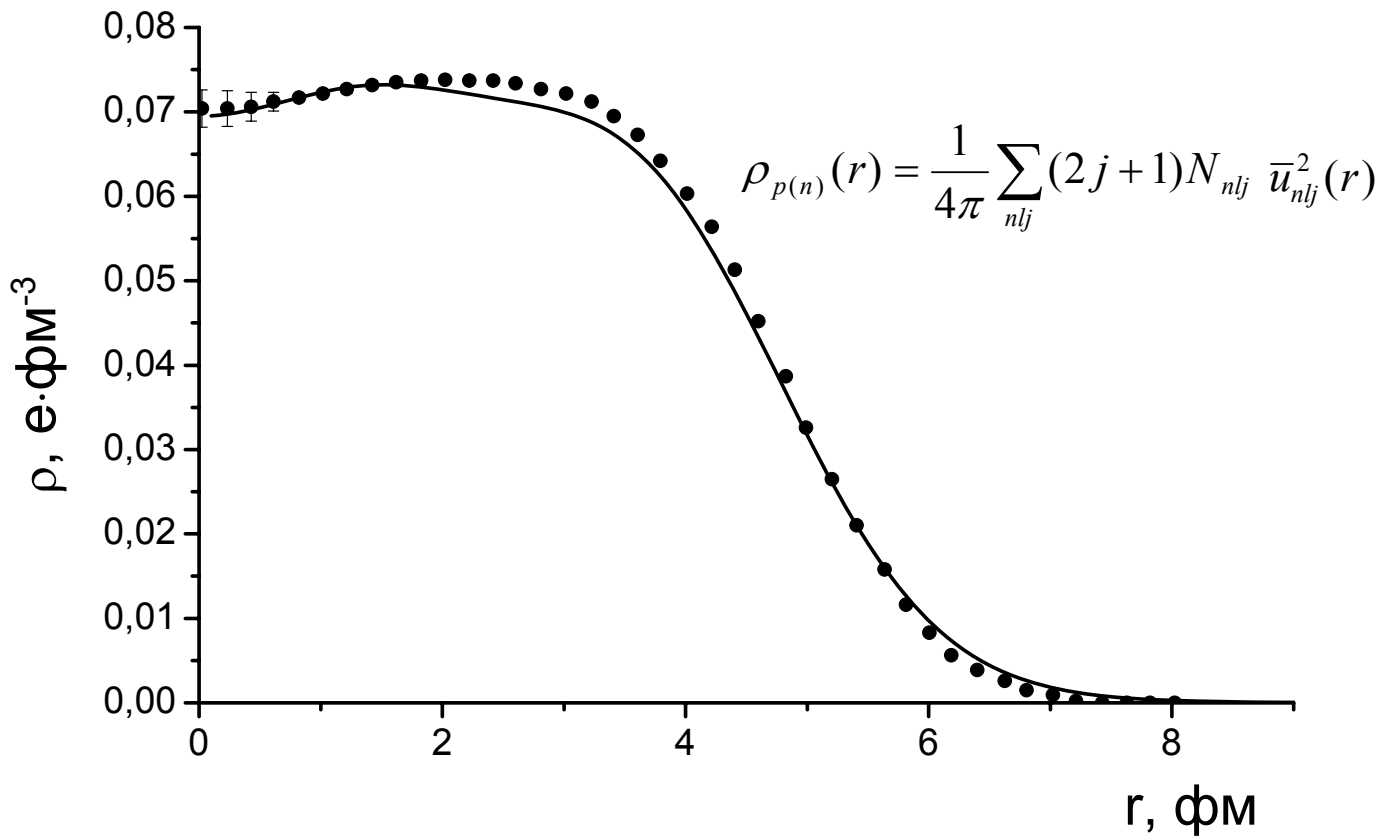
Вероятности заполнения



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

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

Плотность ядра



Зарядовое распределение ^{90}Zr

Первая систематика глобальных параметров ДОП

■ **БРС03.**

Bespalova O.V., Romanovsky E.A., Spasskaya T.I. **Nucleon-nucleus real potential of Woods-Saxon shape between -60 and $+60$ MeV for the nuclei.** Journal of Physics. 2003. V. G 29. N 6. P.1193

■ **БРС04.**

Беспалова О.В., Романовский Е.А., Спасская Т.И. **Дисперсионный оптический потенциал для расчета свойств связанных состояний нуклонов в ядрах с $40 < A < 208$.** Изв. РАН. Сер. физ. 2004. Т. 68, № 8. С.1214.

■ **БРС07.**

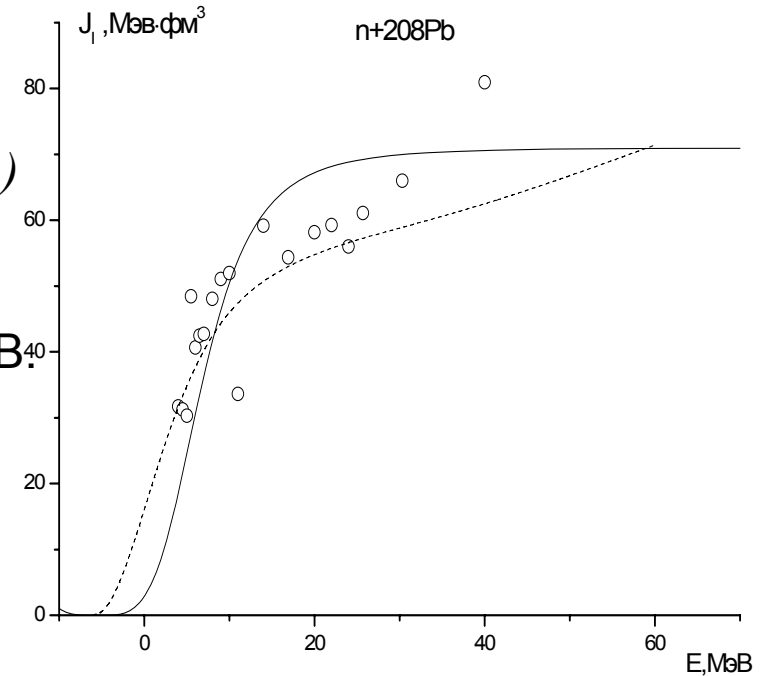
Беспалова О.В., Бобошин И.Н., Варламов В.В. и др. **Расчет одночастичных энергий связанных состояний нуклонов в ядрах с $40 \leq A \leq 208$ с глобальными параметрами дисперсионного оптического потенциала.** Изв. РАН. Сер. физ. 2007. Т. 71. № 3. С.438-442.

Глобальные параметры БРС мнимой части ДОП

■ БРС03,04

$$J_i(E) = \alpha \frac{(E - E_p)^n}{(E - E_p)^n + \beta_i^n} \quad J_d(E) = J_I(E) - J_s(E)$$

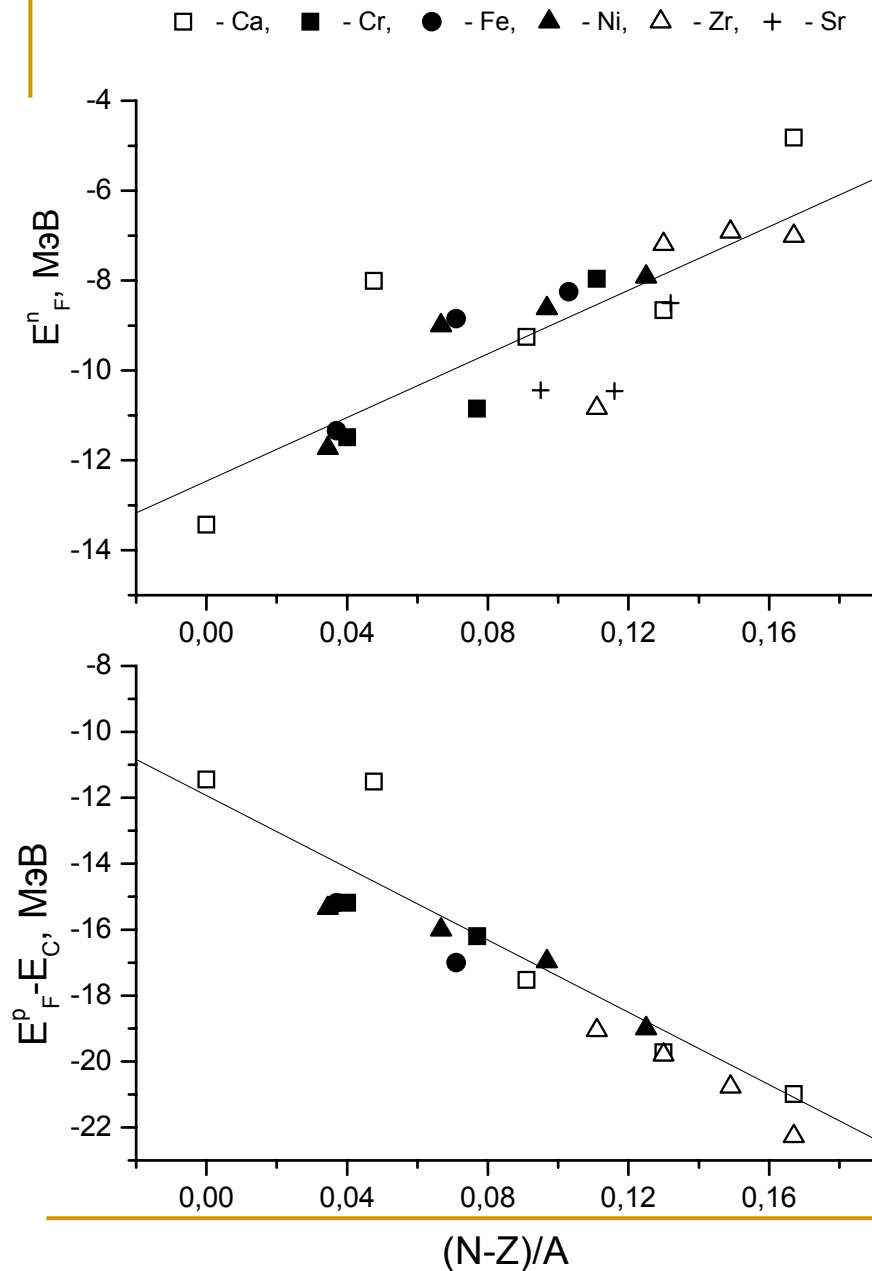
$$\alpha = \left| J_I^{CH89*} \right|_{30-65 \text{ МэВ}} \quad \beta_I = 12.5 \text{ МэВ}, \quad \beta_s = 60.0 \text{ МэВ}$$



■ БРС07

$$W_s(E) = w_1 \frac{(E - E_F)^2}{(E - E_F)^2 + w_2^2} \quad W_d(E) = d_1 \frac{(E - E_F)^2 \exp[-d_2(E - E_F)]}{(E - E_F)^2 + (d_3)^2}$$

Заимствованы из систематики KD, кроме E_F



$$N_{nlj} = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{(E - E_F^{BKIII})}{\sqrt{(E - E_F^{BKIII})^2 + \Delta_{BKIII}^2}} \right)$$

$$E_F^n = -12.46 + 35.36(N-Z)/A \text{ (MeV)},$$

$$E_F^p = -11.93 - 54.82(N-Z)/A + E_C \text{ (MeV)}.$$

Близки к результатам
Jeukenne J.-P., Mahaux C., Sartor R.
Phys. Rev. C. 1991. V. 43. P. 2211.

$$E_F^n = -12.52 + 31.3(N-Z)/A \text{ (MeV)},$$

$$E_F^p = -11.88 - 57.5(N-Z)/A + E_C \text{ (MeV)}$$

Глобальные параметры БРС действительной части ДОП

БРС03

Вудс-Саксоновская форма
$$V_R = V_0 + 0.299 E_C \pm V_t \frac{N-Z}{A} + V_e \exp[-aE]$$

Зависящий от энергии параметр радиуса

$$r_V(E) = r_V(E_F) + r_V^{(1)} \left\{ \frac{\beta_I (E - E_F) [(E - E_F)^2 + \beta_I^2]}{(E - E_F)^4 + \beta_I^4} - \frac{\beta_s (E - E_F) [(E - E_F)^2 + \beta_s^2]}{(E - E_F)^4 + \beta_s^4} \right\} - r_V^{(2)} (E - E_F)^2.$$

$$r_V(E_F) = 1.21 \text{ фм}, \quad r_V^{(1)} = 0.015 + 0.00047\alpha \text{ (фм)}, \quad r_V^{(2)} = 3.76 \cdot 10^{-6} \text{ (фм/МэВ}^2\text{)},$$

$E > 0$ - при подгонке модельных (CH89*) сечений упругого рассеяния нуклонов ядрами ^{40}Ca , ^{90}Zr , ^{208}Pb
 $E < 0$ - по экспериментальным данным об энергиях E_{nlj} для систем $n, p + ^{40}\text{Ca}$, ^{90}Zr , ^{208}Pb .

БРС04

$$V_{HF}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + E_C V_C \right) \exp \left[-\eta E \left(V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + E_C V_C \right)^{-1} \right] \quad \eta = \begin{cases} 0.439 - 0.000381A & (\text{для } n) \\ 0.469 - 0.000153A & (\text{для } p) \end{cases}$$

$$V_0 = 51.44 \text{ МэВ}, \quad V_t = 21 \text{ МэВ}, \quad V_C = 0.27,$$

БРС07

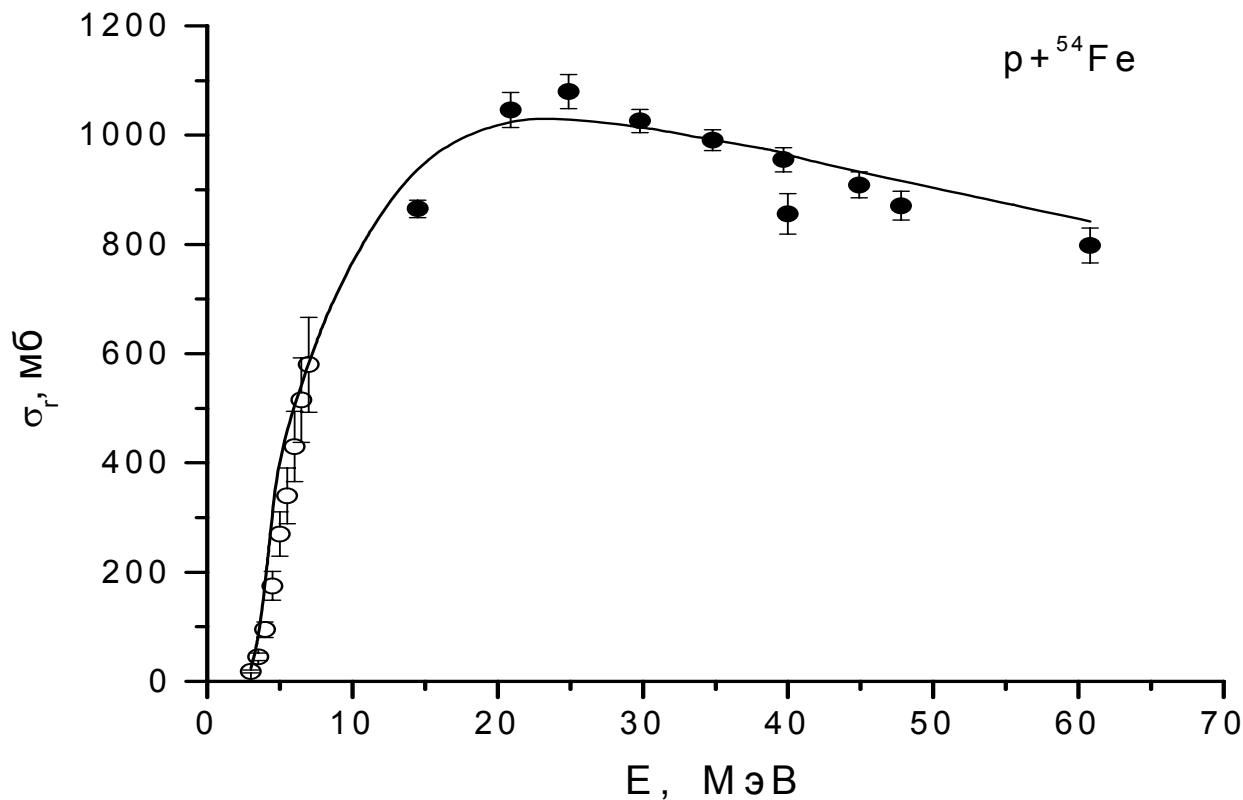
$$V_{HF}(E) = \left(V_0 \pm V_t \frac{N-Z}{A} + E_C V_C \right) \exp[-\kappa E] \quad \begin{cases} \kappa = 0.00808 - 0.00427(N-Z)/A & \text{для } p \\ \kappa = 0.00773 + 0.00382(N-Z)/A & \text{для } n \end{cases}$$

$$V_0 = 51.92 \text{ МэВ}, \quad V_t = 12.5 \text{ МэВ}, \quad V_C = 0.32 \text{ для } p \text{ и } V_0 = 51.04 \text{ МэВ}, \quad V_t = 22 \text{ МэВ для } n.$$

В анализ добавлены энергии $E_{\text{nlj}}^{\text{экс}}$ вблизи E_F для магических ядер ^{48}Ca , ^{52}Cr , ^{54}Fe , ^{56}Ni

$$r_d(E) = r_d^{(1)} - \frac{r_d^{(2)}(E - E_F)^4}{(E - E_F)^4 + (r_d^{(3)})^4} \quad a_d(E) = a_d^{(1)} + \frac{a_d^{(2)}(E - E_F)^4}{(E - E_F)^4 + (a_d^{(3)})^4}$$

$$r_d^{(1)} = 1.5 \phi_M \quad r_d^{(2)} = (1.52 - r_d^{CH89}) \phi_M \quad a_d^{(1)} = 0.1 \phi_M \quad a_d^{(2)} = (a_d^* - 0.05) \phi_M$$



$0 < (E - E_F) < 20 \text{ МэВ}$

Полные сечения реакций для системы $p + {}^{54}\text{Fe}$.

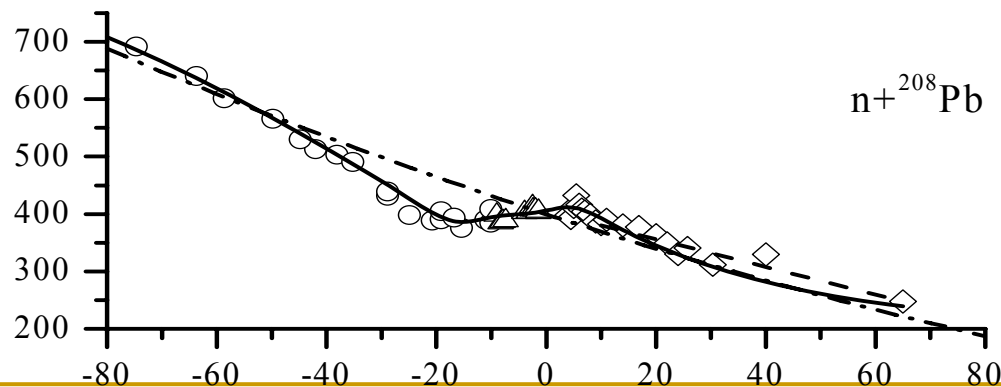
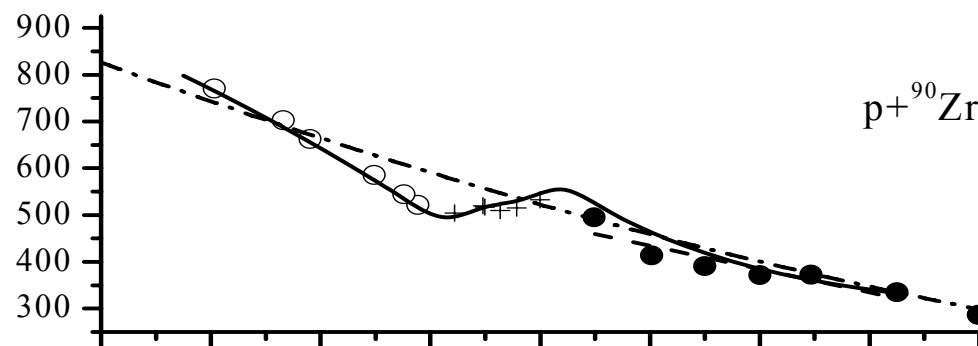
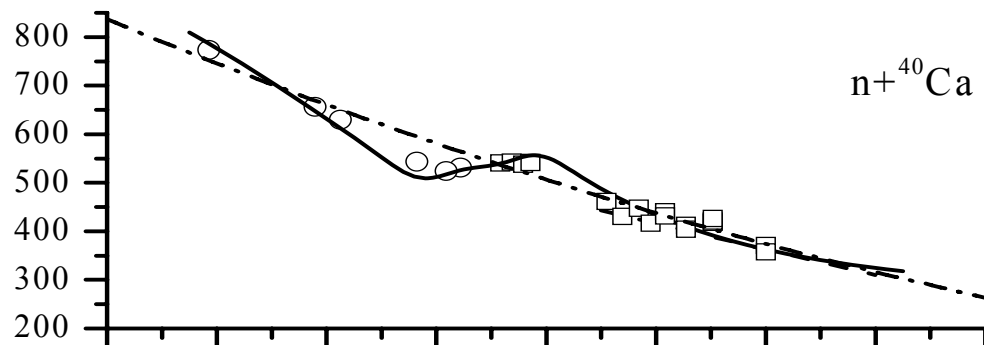
Сплошная линия – расчет с потенциалом БРС03, темные кружки – экспериментальные данные, светлые кружки – оценка

$J_V, \text{МэВ} \cdot \text{фм}^3$

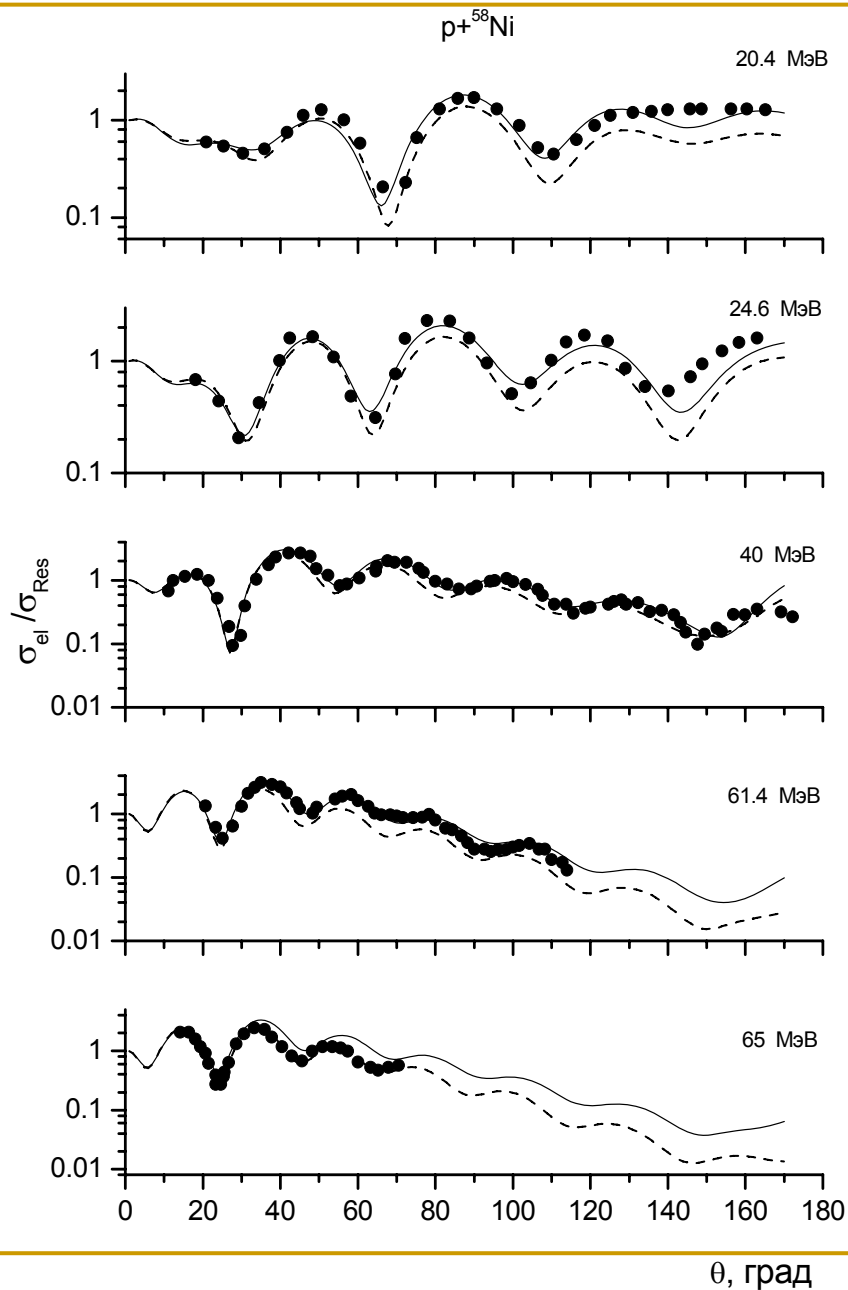
БРС03

Энергетическая зависимость
объемного интеграла от
центральной действительной
части ДОП

Сплошная линия – потенциал
БРС03, штриховая линия –
систематика СН89, штрих-
пунктирная – глобальный
потенциал работы M.Bauer,...
P.E.Hodgson ... A unified potential for
bound and scattering states. J.Phys.
G. 1982. V.8. P.525.



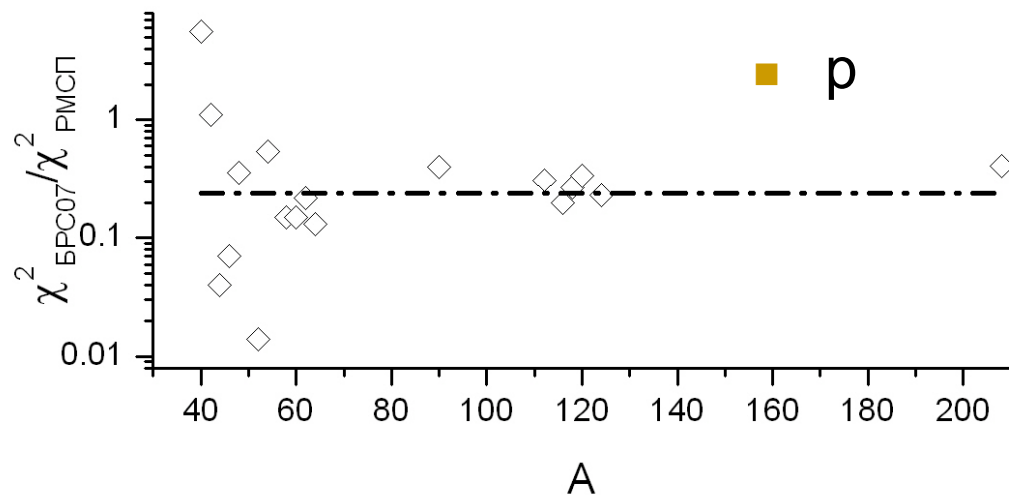
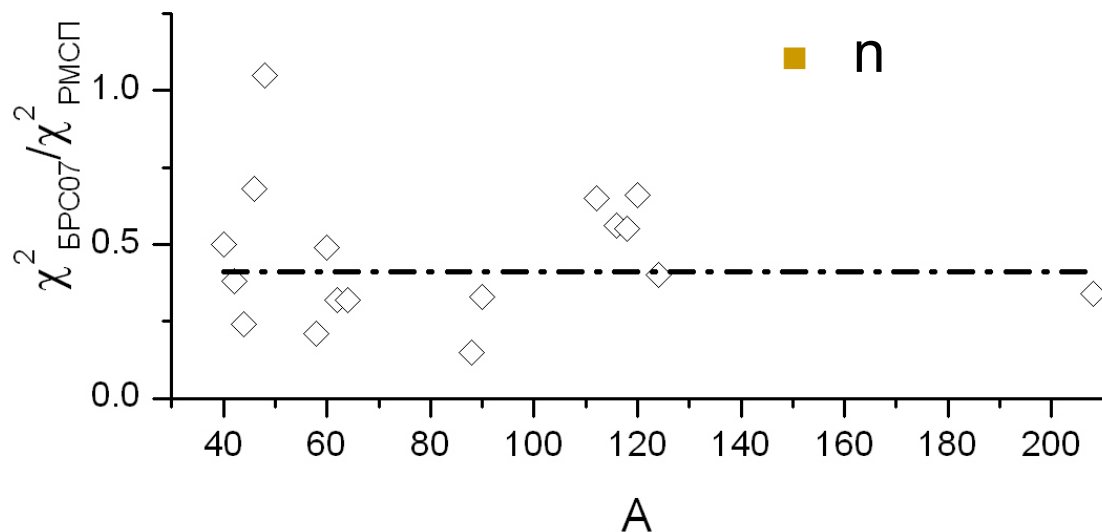
$E, \text{МэВ}$



Сечения упругого рассеяния $\sigma(\theta)/\sigma_{\text{Res}}(\theta)$ для системы $p+^{58}\text{Ni}$, вычисленные с потенциалом БРС03 в сравнении с экспериментальными данными и предсказаниями систематики СН89.

Сравнение предсказаний E_{nlj} : БРС и РМСП

$$\chi_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{nlj} \frac{(E_{nlj}^{(i)} - E_{nlj}^{\text{эксп}})^2}{(\Delta_{nlj}^{\text{эксп}})^2}$$



Typel S., Wolter H. H.
**Relativistic mean field
 calculations with density –
 dependent meson-nucleon
 coupling.**

Nucl. Phys. A. 1999. V. 656.
 P. 331

Глобальные параметры MR

Morillon B., Romain P. **Dispersive and global spherical optical model with a local energy approximation for the scattering of neutrons by nuclei from 1 keV to 200 MeV.** Phys. Rev. 2004. V. C70. P. 014601

Morillon B., Romain P. **Bound single-particle states from a global spherical optical model.** Phys. Rev. 2006. V. C74. P. 014601-1 – 014601-6.

Morillon B., Romain P. **Bound single-particle states and scattering of nucleons on spherical nuclei with a global optical model.** Phys. Rev. 2007. V. C76. P. 044601

^{nat}Mg , ^{27}Al , ^{nat}Si , ^{nat}S , ^{nat}Ca , ^{nat}Ti , ^{nat}Cr , ^{nat}Fe , ^{nat}Ni , ^{nat}Cu , ^{89}Y , ^{90}Zr , ^{93}Nb , ^{nat}Mo , ^{nat}Sn ,
 ^{nat}Ce , ^{197}Au , ^{nat}Hg , ^{208}Pb , ^{209}Bi

$$W_S^{n,p}(E) = \frac{A_S(E - E_F^{n,p})^2}{(E - E_F^{n,p})^2 + B_S^2} \exp[-C_S(E - E_F^{n,p})]$$

	neutron	proton
A_S	$-17.5 + 19 \frac{N-Z}{A}$	$-17.5 - 19 \frac{N-Z}{A}$
B_S	13	18.2
C_S	0.025	$0.027 - 7 \cdot 10^{-5} A$

$$W_V^{n,p}(E) = \frac{A_V(E - E_F^{n,p})^2}{(E - E_F^{n,p})^2 + B_V^2}$$

	neutron and proton
A_V	$-11.21 - 0.017 A$
B_V	$62 + 0.15 A$

$$W_{SO}^{n,p}(E) = \frac{-1.5(E - E_F^{n,p})^2}{(E - E_F^{n,p})^2 + 50^2}$$

neutron and proton

$$V_V(E) = V_{V.H.F.} \exp\{-\mu\beta^2/2\hbar^2 [E - V_V(E)]\} \\ \times \exp\{+4\mu^2\gamma^2/\hbar^4 [E - V_V(E)]^2\} + 1.15zZ/R$$

neutron and proton

$V_{V.H.F.}$	-82.8
β	1.114
γ	$0.1165 - 10^{-4} A$

$$V_{SO}(E) = V_{SO.H.F.} \exp\{-\mu\beta^2/2\hbar^2 [E - V_{H.F.}(E)]\} \\ \times \exp\{+4\mu^2\gamma^2/\hbar^4 [E - V_{H.F.}(E)]^2\}$$

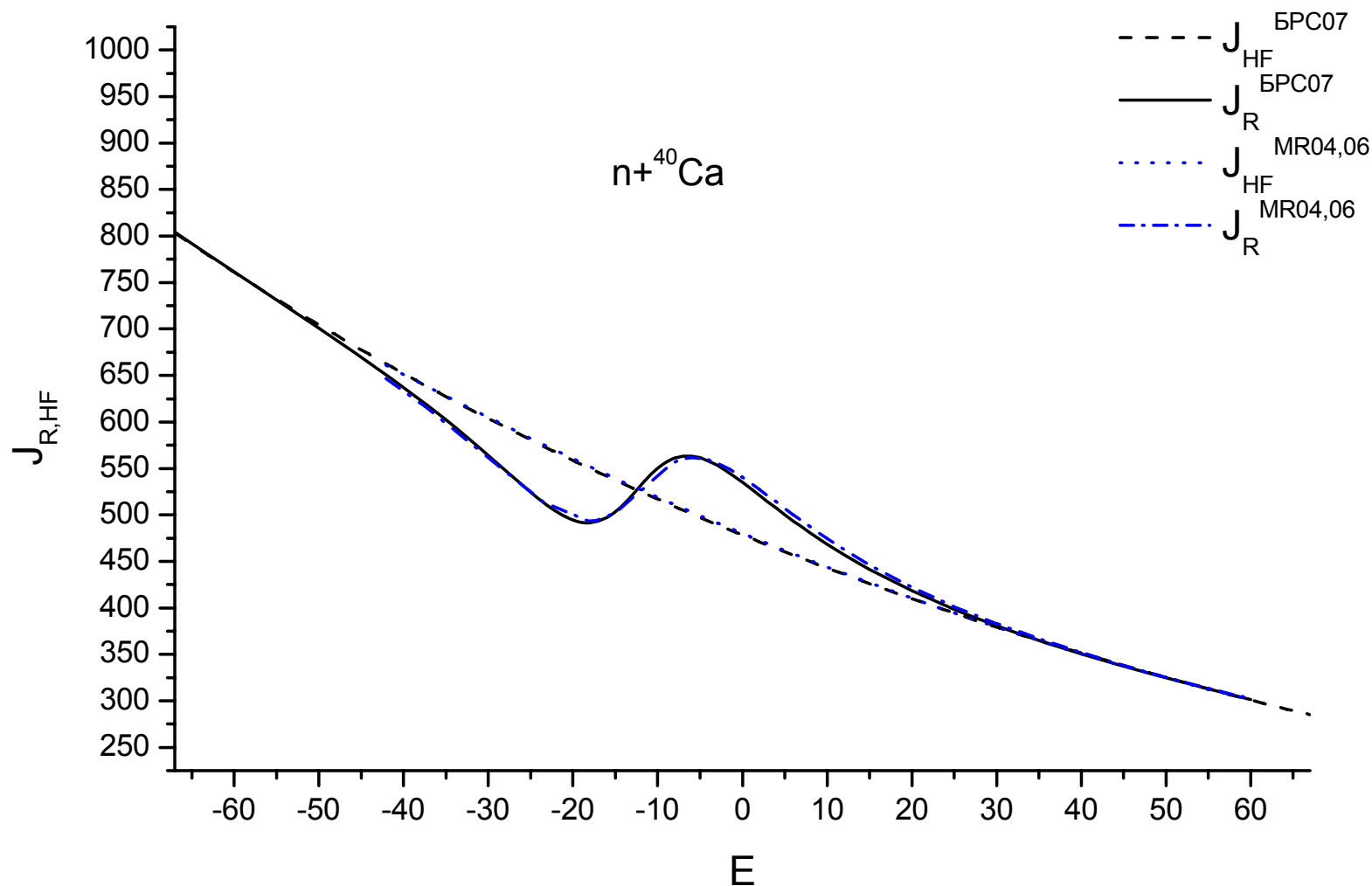
neutron and proton

$V_{SO.H.F.}$	-6.5
---------------	------

neutron and proton

r	$1.3 - 2.7 \cdot 10^{-4} A$
a	$0.566 + 5 \cdot 10^{-9} A^3$

Энергетическая зависимость объемного интеграла от действительной центральной части ДОП: БРС и MR

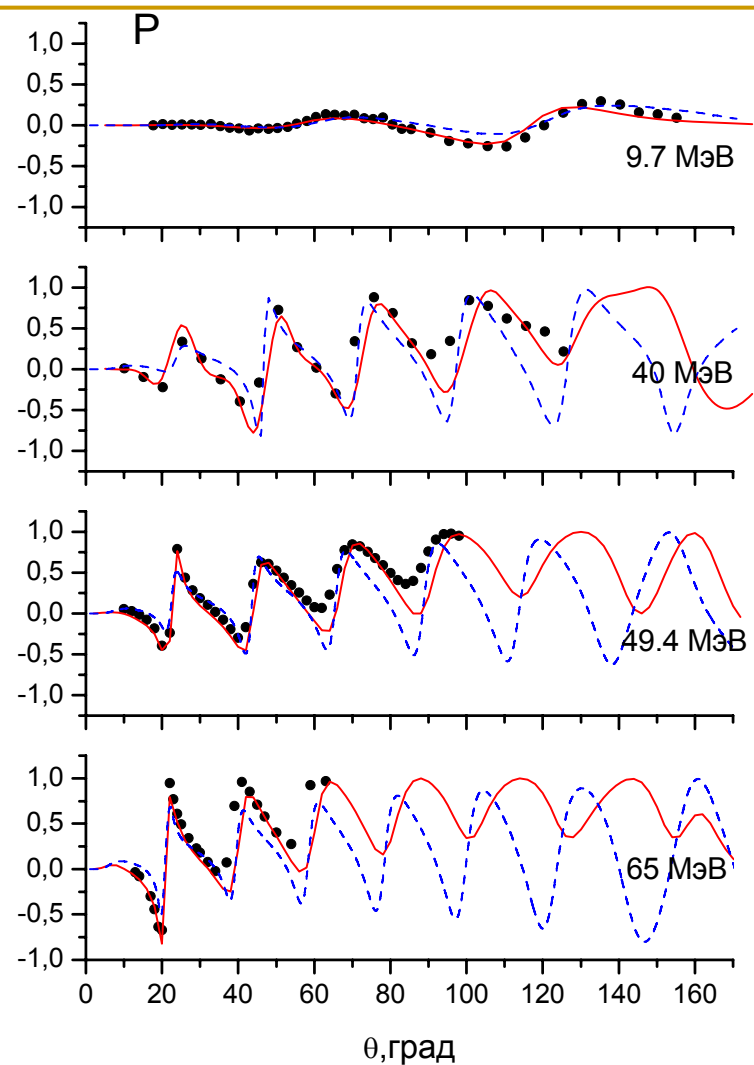
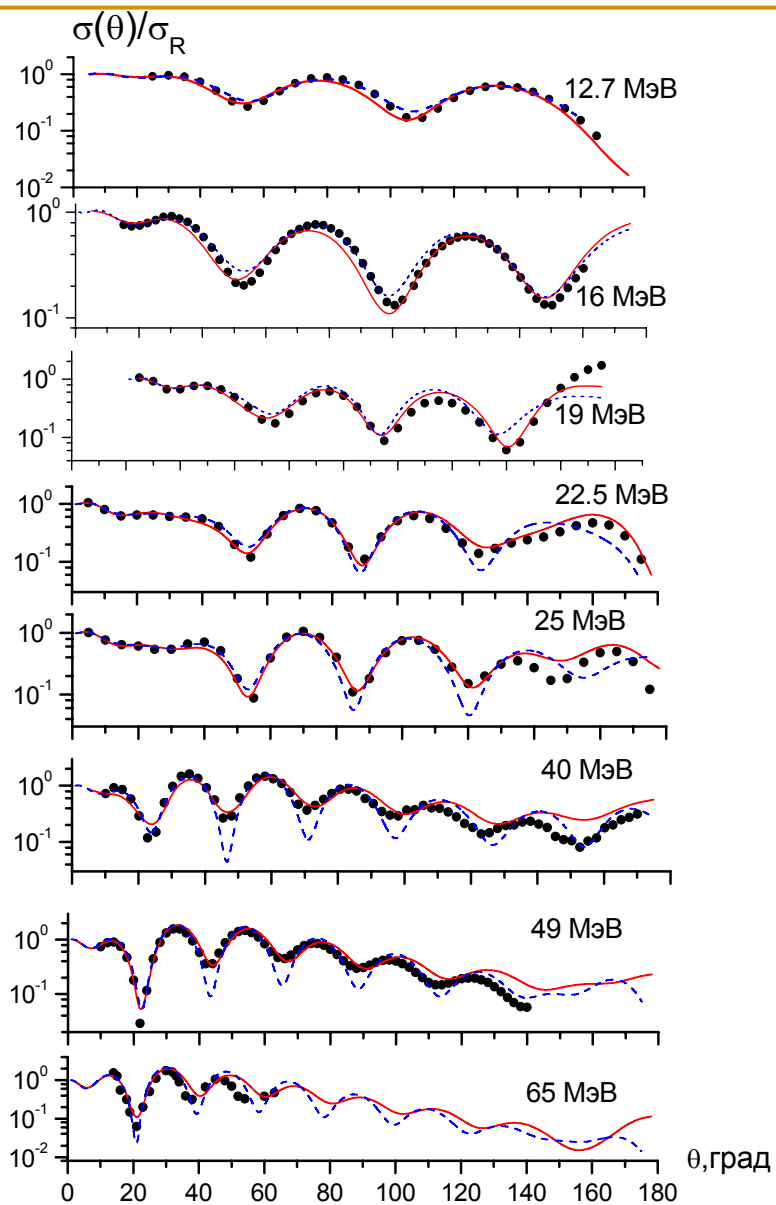


$$\chi_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{nlj} \frac{(E_{nlj}^{(i)} - E_{nlj}^{\text{эксн}})^2}{(\Delta_{nlj}^{\text{эксн}})^2}$$

Ядро	Нуклон	$\chi_{BPC07}^2 / \chi_{MR04,06}^2$	$\chi_{BPC07}^2 / \chi_{MR07}^2$
^{40}Ca	n	0.2	0.3
	p		0.12
^{90}Zr	n	0.36	0.53
	p	0.20	
^{208}Pb	n	0.48*	0.47*
	p	0.31	

*Значения $E_{n,1s_{1/2}}^{MR}$ не вычислены из-за проблемы сходимости

процесса итераций при нахождении V_{HF}^{MR}

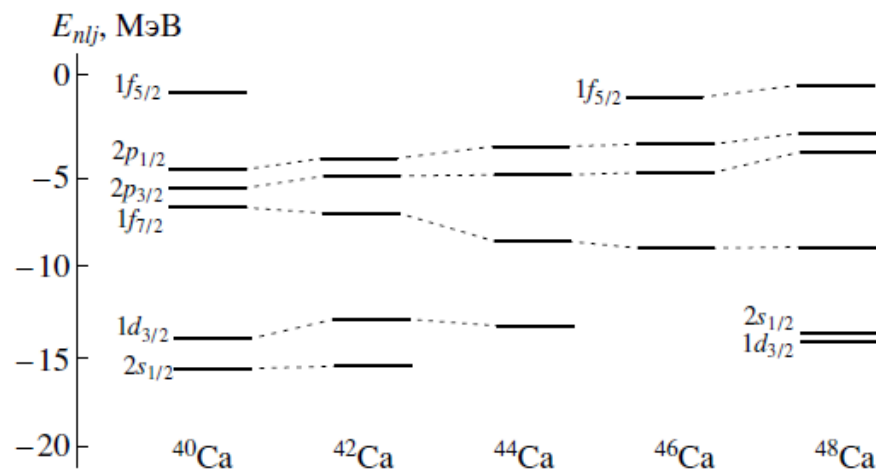


$p+^{90}\text{Zr}$

Сплошная линия – расчет с глобальными параметрами BPC07.
Пунктир – расчет с глобальными параметрами MR07.

Нейтронные состояния изотопов Ca

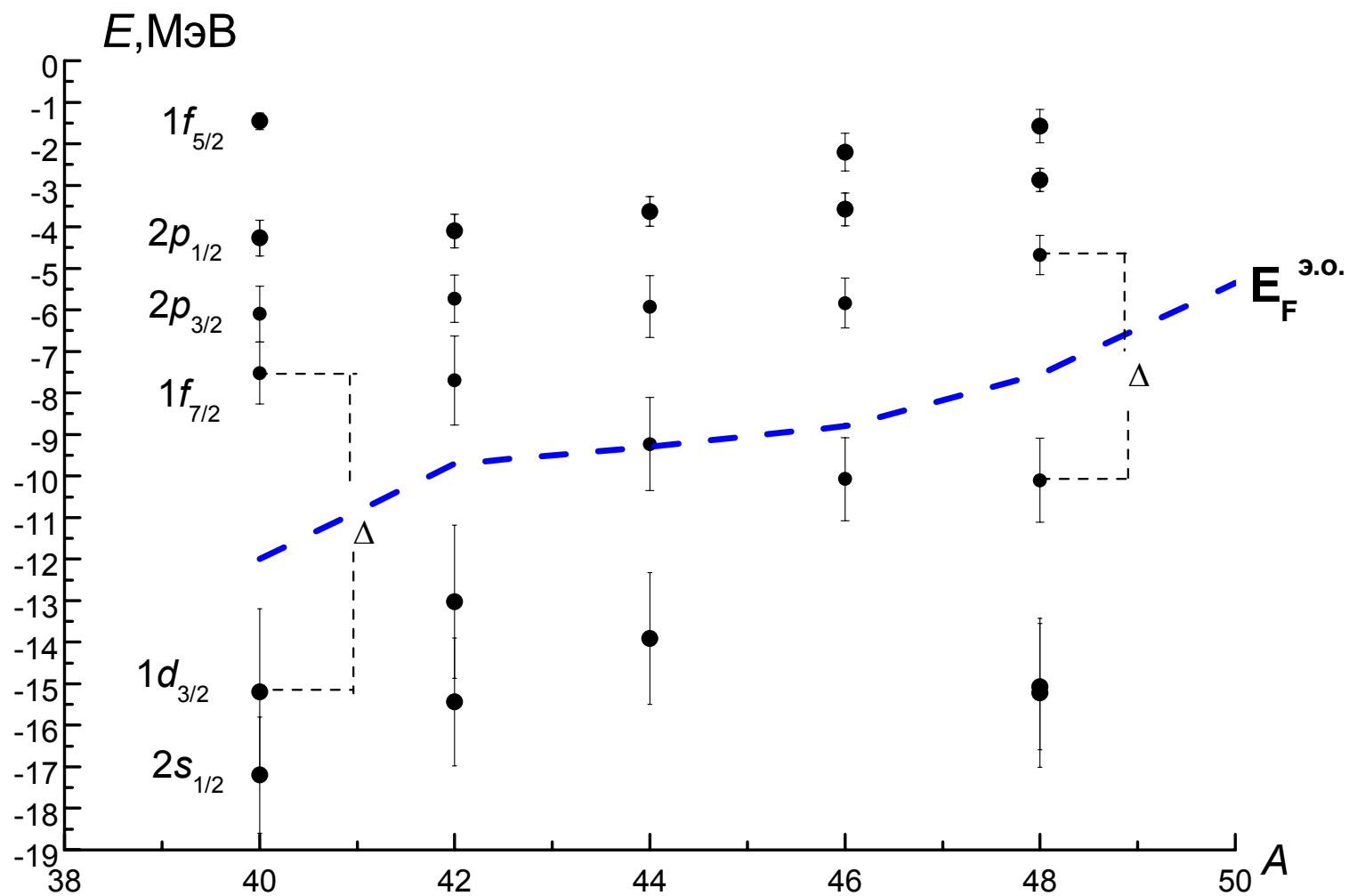
2 стабильных дважды магических изотопа ^{40}Ca и ^{48}Ca



Экспериментальные энергии нейтронных одночастичных состояний в $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$.

Под- оболочка	N_{nlj}	$-E_{nlj}$	N_{nlj}	$-E_{nlj}$	N_{nlj}	$-E_{nlj}$	N_{nlj}	$-E_{nlj}$	N_{nlj}	$-E_{nlj}$
	^{40}Ca		^{42}Ca		^{44}Ca		^{46}Ca		^{48}Ca	
$2s_{1/2}$	>0.92	17.2(14)	0.93(4)	15.44(154)					1.00(0)	15.07(152)
$1d_{3/2}$	0.83(3)	15.2(20)	0.91(4)	13.03(184)	0.94(6)	13.91(159)			0.99(1)	15.22(179)
$1f_{7/2}$	0.02(2)	7.52(75)	0.20(4)	7.70(107)	0.49(8)	9.23(112)	0.77(7)	10.07(100)	1.00(0)	10.10(101)
$2p_{3/2}$	0.02(2)	6.10(67)	0.01(0)	5.73(57)	0.07(3)	5.92(75)	0.10(5)	5.84(60)	0.01(1)	4.68(47)
$2p_{1/2}$	0.01(1)	4.27(43)	0.00(0)	4.10(41)	0.01(0)	3.63(36)	0.04(4)	3.58(39)	0.00(0)	2.87(28)
$1f_{5/2}$	0.02(2)	1.46(20)					0.06(5)	2.20(45)	0.03(3)	1.57(40)

n, Ca



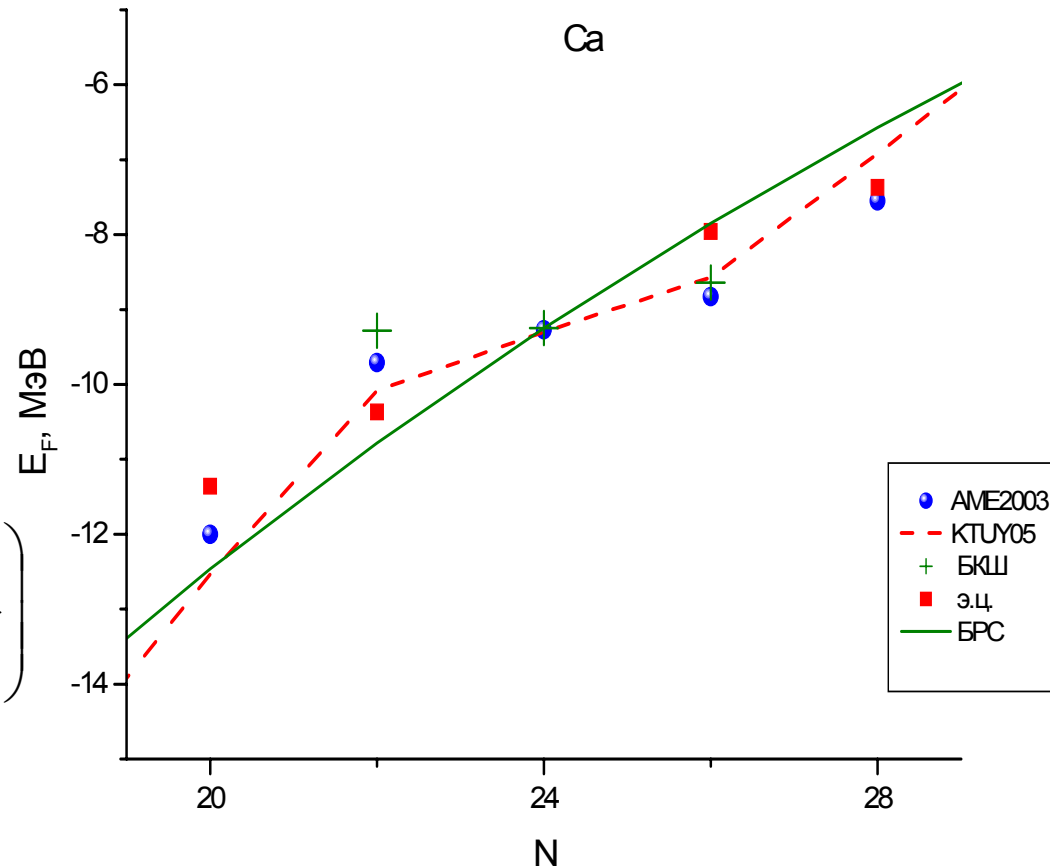
Энергия Ферми

$$1) E_F = 1/2 \cdot (E_+ + E_-)$$

$$E_+ = E_{nlj}^{своб}, \quad E_- = E_{nlj}^{зан}$$

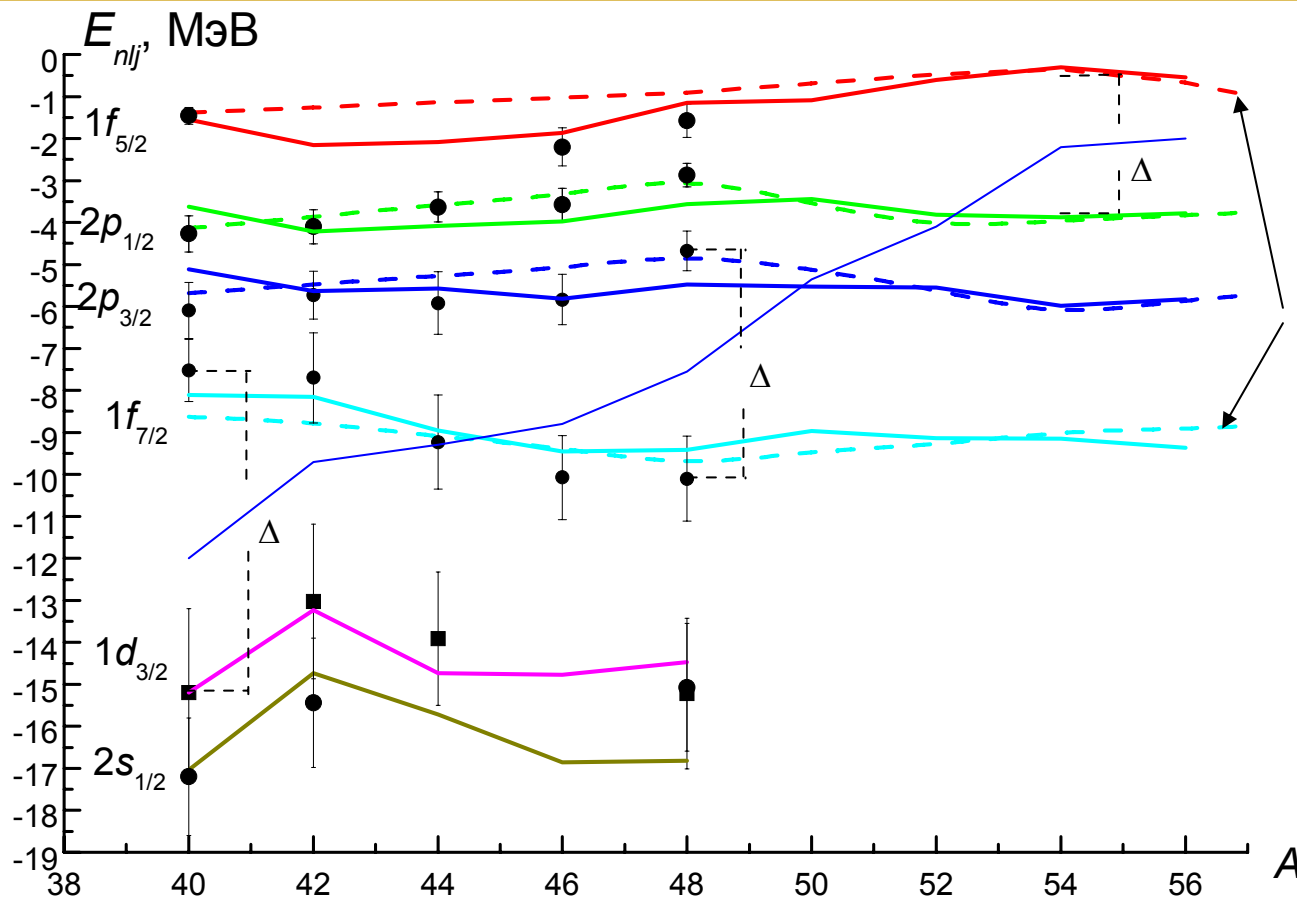
$$E_+ = E_{э.о.}^{A+1}, \quad E_- = E_{э.о.}^A$$

$$2) N_{nlj} = 1/2 \cdot \left(1 - \frac{(E_{nlj} - E_F)}{\sqrt{(E_{nlj} - E_F)^2 + \Delta_{БКШ}^2}} \right)$$



Энергия Ферми, найденная по энергиям отделения нуклона:

- 1) в магических ядрах лежит посередине между заполненной и свободной подоболочками;
- 2) в немагических ядрах - соответствует энергии Ферми, найденной по ф-ле теории БКШ, в частности, совпадает с энергией наполовину заполненной подоболочки



n, Ca

M. Honma, T. Otsuka, B. A. Brown, T. Mizusaki.
Effective interaction for pf -shell nuclei.
 PHYS. REV. C, 2002. V. 65, 061301(R)

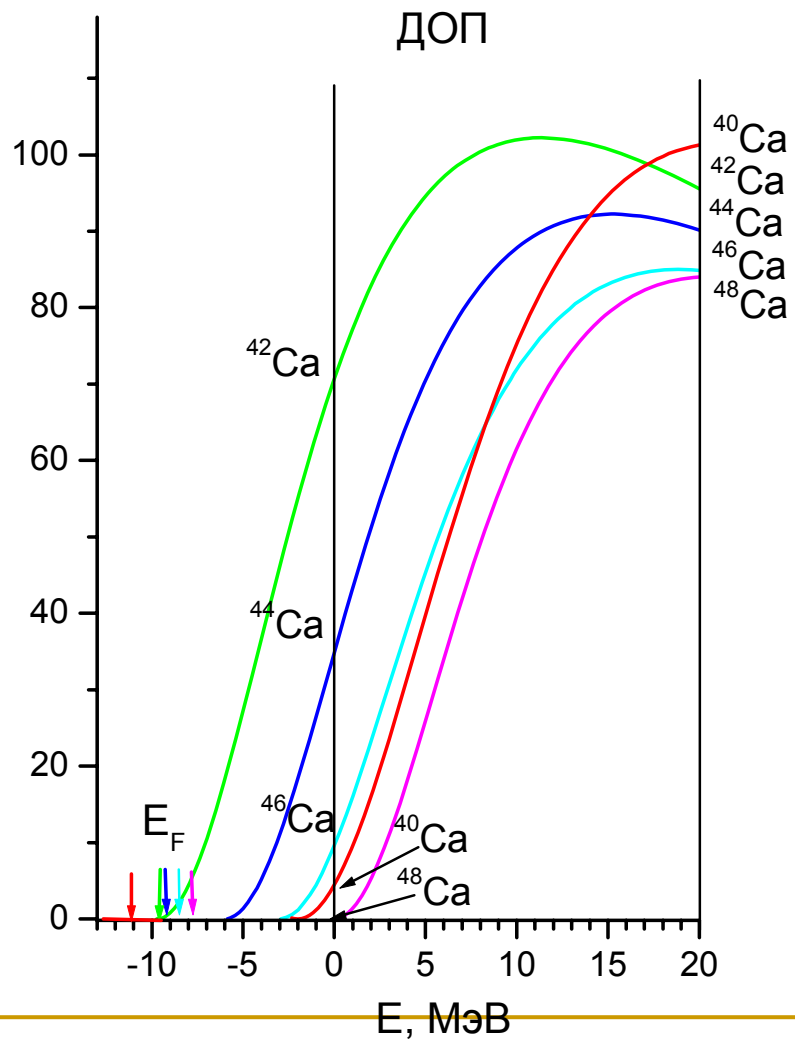
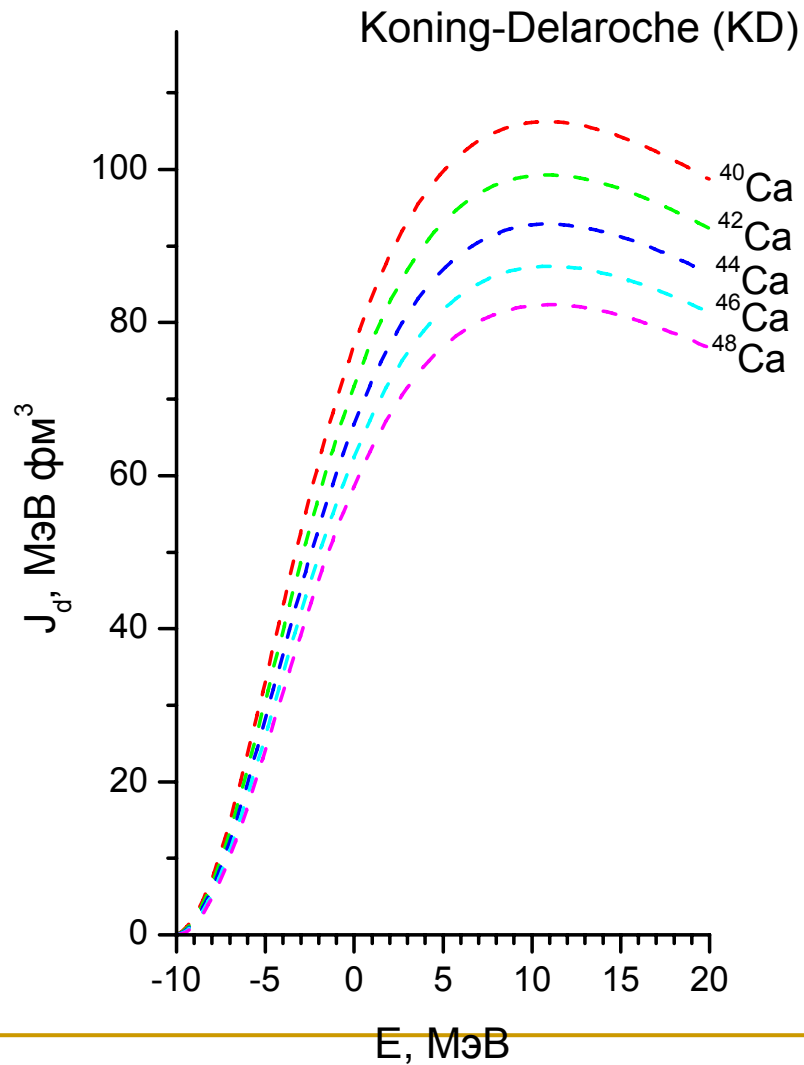
С ростом N :

1. a_{HF} увеличивается (от 0.67 фм для ^{40}Ca до 0.88 фм для ^{56}Ca)
2. V_{so} увеличивается (от 5.9 МэВ фм² для ^{40}Ca до 9.7 МэВ фм² для ^{56}Ca)

3. Оболочечный эффект в мнимом потенциале

Оболочечный эффект в мнимой части ДОП

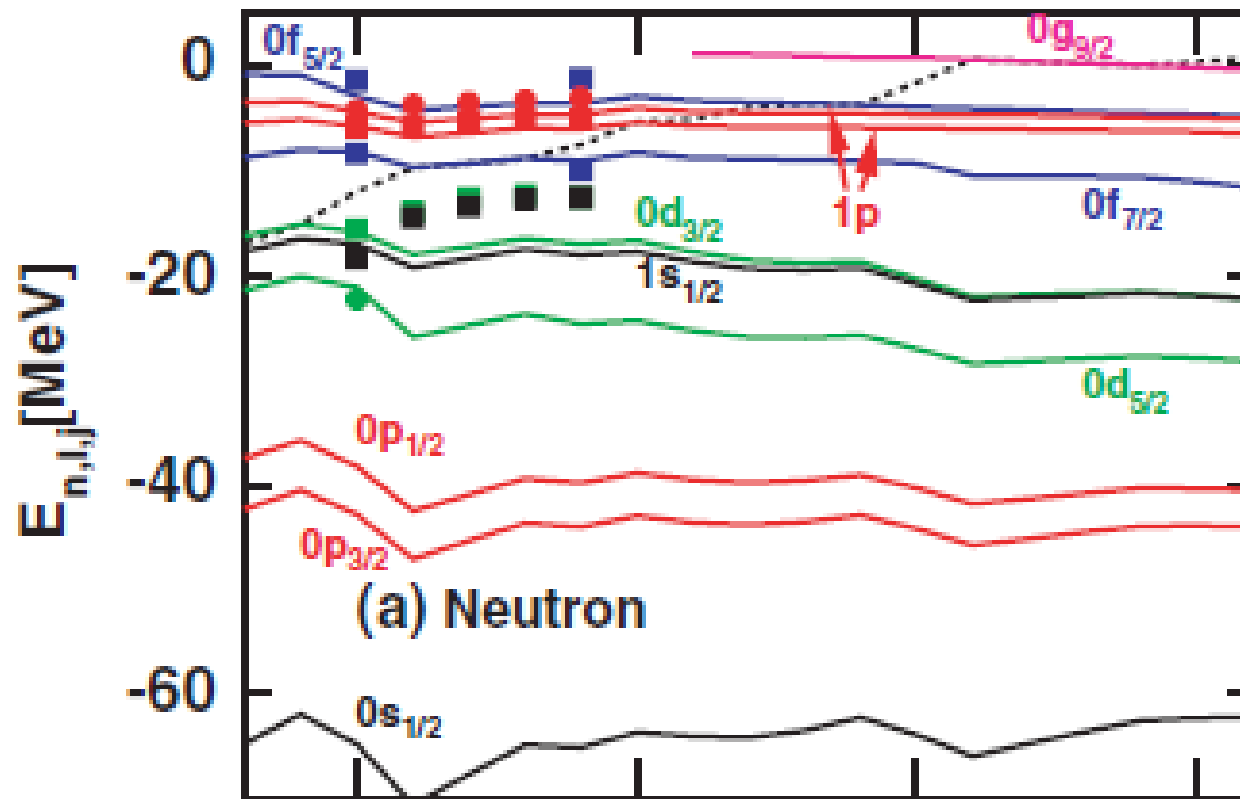
Поверхностная мнимая часть нейтронного ДОП изотопов Ca



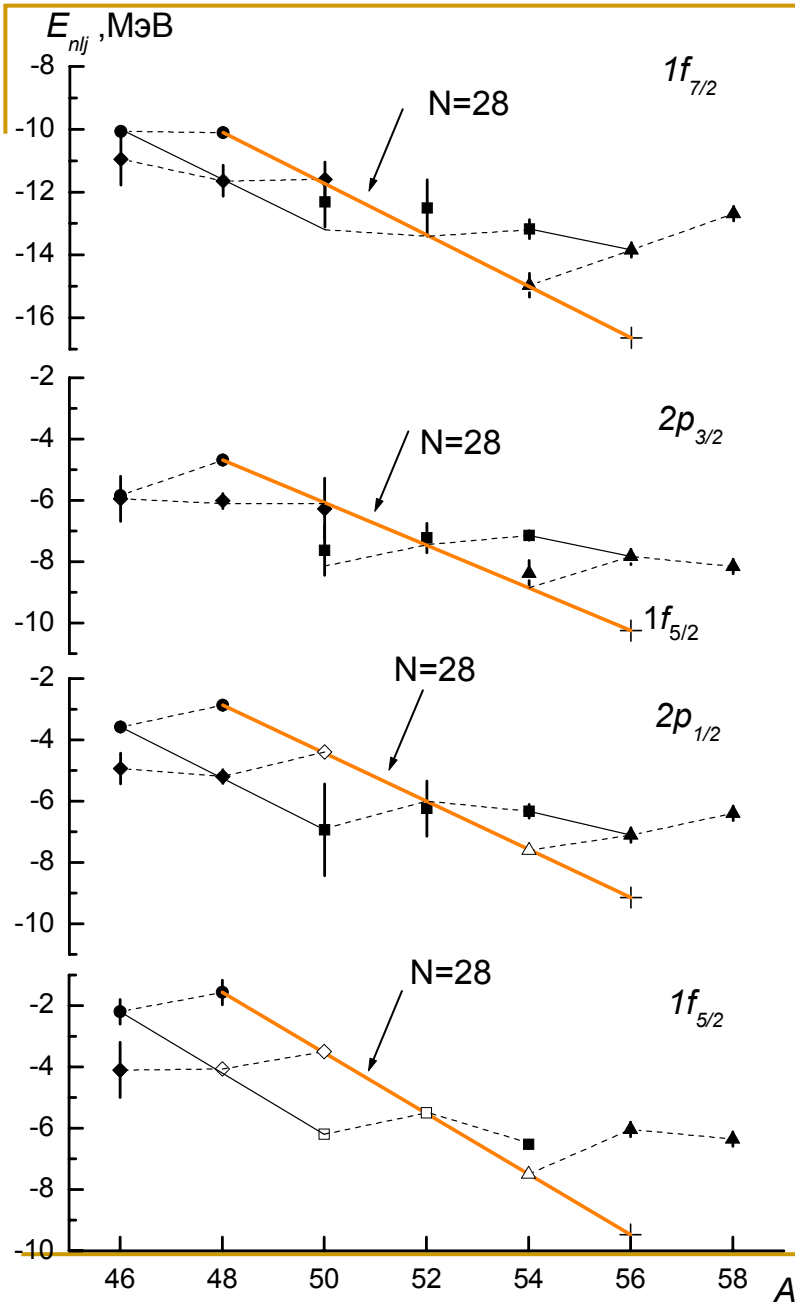
Беспалова О. В., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Т.А.Ермакова, Б.С.Ишханов,
Е.А.Романовский, Т.И.Спасская, Т.П.Тимохина.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ ОБОЛОЧЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ИЗОТОПОВ 40-56Ca
В РАМКАХ ДИСПЕРСИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ. Ядерная физика, 2005. Т. 68. №2. С. 216-232

R. J. Charity, J. M. Mueller, L. G. Sobotka, and W. H. Dickhoff. **Dispersive-optical-model analysis of the asymmetry dependence of correlations in Ca isotopes.** PHYSICAL REVIEW C 76, 044314 (2007)



“... there is an apparent discrepancy for the $0d_{3/2}$ and $1s_{1/2}$ levels... It is difficult to understand these experimental results...”



Ядра 1f2p-оболочки: Ti, Cr, Fe, Ni

$$E_{nlj}^n = E_{nlj}^{n, 48Ca} - k_{nlj}^n (Z - 20) \text{ МэВ}$$

$k_{nlj}^n = 0.82; 0.70$ и 0.78 для состояний $1f_{7/2}$, $2p_{3/2}$ и $2p_{1/2}$ соответственно

$k_{nlj}^n = 0.99$ для состояния $1f_{5/2}$

взаимодействие $j_>-j_<$

Otsuka et al. **Magic Numbers in Exotic Nuclei and Spin-Isospin Properties of the NN Interaction.** Phys. Rev. Lett. V. 87, 082502 (2001).

Одночастинные энергии (в МэВ)
 протонных состояний $1f_{7/2}$ и нейтронных состояний $1f_{5/2}$
 ядер 1f2p-оболочки

E_{nlj}	^{48}Ca	^{46}Ti	^{48}Ti	^{50}Ti	^{50}Cr	^{52}Cr	^{54}Fe	^{56}Fe	^{56}Ni
$-E_{1f_{7/2}}^p$	8.76(65)	5.37(35)	6.99(36)	8.3	6.29(40)	7.51(88)	7.88(22)	9.03(40)	7.16
$-E_{1f_{5/2}}^n$	1.57(37)	4.1	4.0	3.5	6.2	5.5	7.5	6.04(10)	9.48

Нейтронные одночастичные энергии – E_{nj} (в МэВ) для ^{48}Ca , ^{50}Ti , $^{50,52,54}\text{Cr}$, $^{54,56,58}\text{Fe}$ и ^{56}Ni

Под-оболочка	^{48}Ca				^{50}Ti		^{50}Cr		^{52}Cr		^{54}Cr	
	эксп.	ДОП	ДОП	ВС	эксп., оп.	ДОП	эксп., оп.	ДОП	эксп., оп.	ДОП	эксп., оп.	ДОП
$2s_{1/2}$	15.07(150)	16.04	15.92	12.59	16.4	16.55		17.75	16.92(180)	16.98		17.59
$1d_{3/2}$	15.27(180)	14.80	14.62	12.51	17.51(190)	15.48	16.78(194)	17.07	16.00(170)	16.46	15.98(164)	16.87
$1f_{7/2}$	10.10(100)	10.36	10.29	9.90	11.59(130)	11.54	12.31(147)	12.10	12.58(150)	12.49	12.51(150)	12.49
$2p_{3/2}$	4.68(47)	4.50	4.55	5.14	6.28(118)	6.34	7.63(100)	7.81	7.23(80)	7.27	7.15(71)	7.31
$2p_{1/2}$	2.87(28)	2.63	2.71	3.09	4.4	4.60	6.94(170)	6.26	6.24(110)	5.68	6.33(67)	5.56
$1f_{5/2}$	1.57(40)	1.91	2.03	1.15	3.5	3.97	6.2	5.65	5.5	5.55		5.27
χ^2		0.35	0.37	1.29		0.33		0.20		0.06		1.08

Под-оболочка	^{54}Fe		^{56}Fe		^{58}Fe		^{56}Ni			
	экспер.	ДОП	экспер.	ДОП	экспер.	ДОП	экспер., оцен.	ДОП	ДОП	ВС
$2s_{1/2}$	17.82(180)	19.12		18.70		18.00	20.4	22.33	22.30	22.79
$1d_{3/2}$	17.22(200)	18.71		18.06		17.01	19.84	21.92	21.70	21.33
$1f_{7/2}$	14.97(150)	14.90	13.84(138)	13.71	12.68(127)	12.68	16.64	16.84	16.71	16.83
$2p_{3/2}$	8.38(87)	8.47	7.83(82)	7.75	8.16(82)	8.18	10.25	10.46	10.57	10.69
$2p_{1/2}$	7.6	6.67	7.11(72)	5.90	6.40(64)	6.59	9.14	8.56	8.77	9.80
$1f_{5/2}$	7.5	7.01	6.04(62)	5.56	6.35(64)	5.77	9.48	8.80	9.02	10.04
χ^2		0.50		0.85		0.23		0.49	0.37	0.50

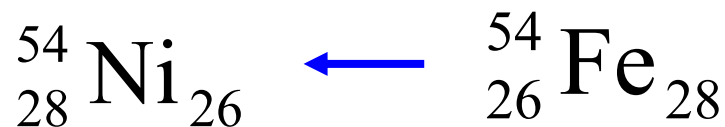
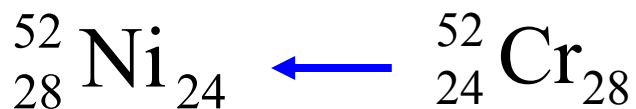
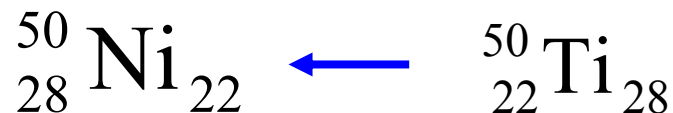
Протонные одночастичные энергии – E_{nj} (в МэВ) для $^{50,52}\text{Cr}$, ^{56}Fe и ^{56}Ni

Под-оболочка	^{50}Cr		^{52}Cr		^{56}Fe		^{56}Ni		
	экспер., оцен.	ДОП	экспер., оцен.	ДОП	экспер., оцен.	ДОП	экспер., оцен.	ДОП	ВС
$2s_{1/2}$	11.17(115)	12.51		14.17		13.80	10.72	10.96	15.98
$1d_{3/2}$	11.22(128)	11.73	13.16(136)	13.49	12.50(126)	13.63	10.08	10.34	14.73
$1f_{7/2}$	6.29(77)	5.85	7.51(116)	7.27	9.03(99)	8.94	7.16	7.01	7.92
$2p_{3/2}$	2.80	2.79	3.47(42)	3.65	3.88(40)	3.96	0.74	0.89	3.58
$2p_{1/2}$	1.7	1.89	2.3	2.60	2.62(37)	2.41	-0.37	-0.65	2.06
$1f_{5/2}$	1.5	1.35	1.8	2.20	2.9	3.00	-0.29	-0.40	1.08
χ^2		1.78		0.38		0.26		12.65	1344.1

Оценка $E_{nlj}^{\nu,\pi}$

для нестабильных изотопов Ni

Зеркальные ядра

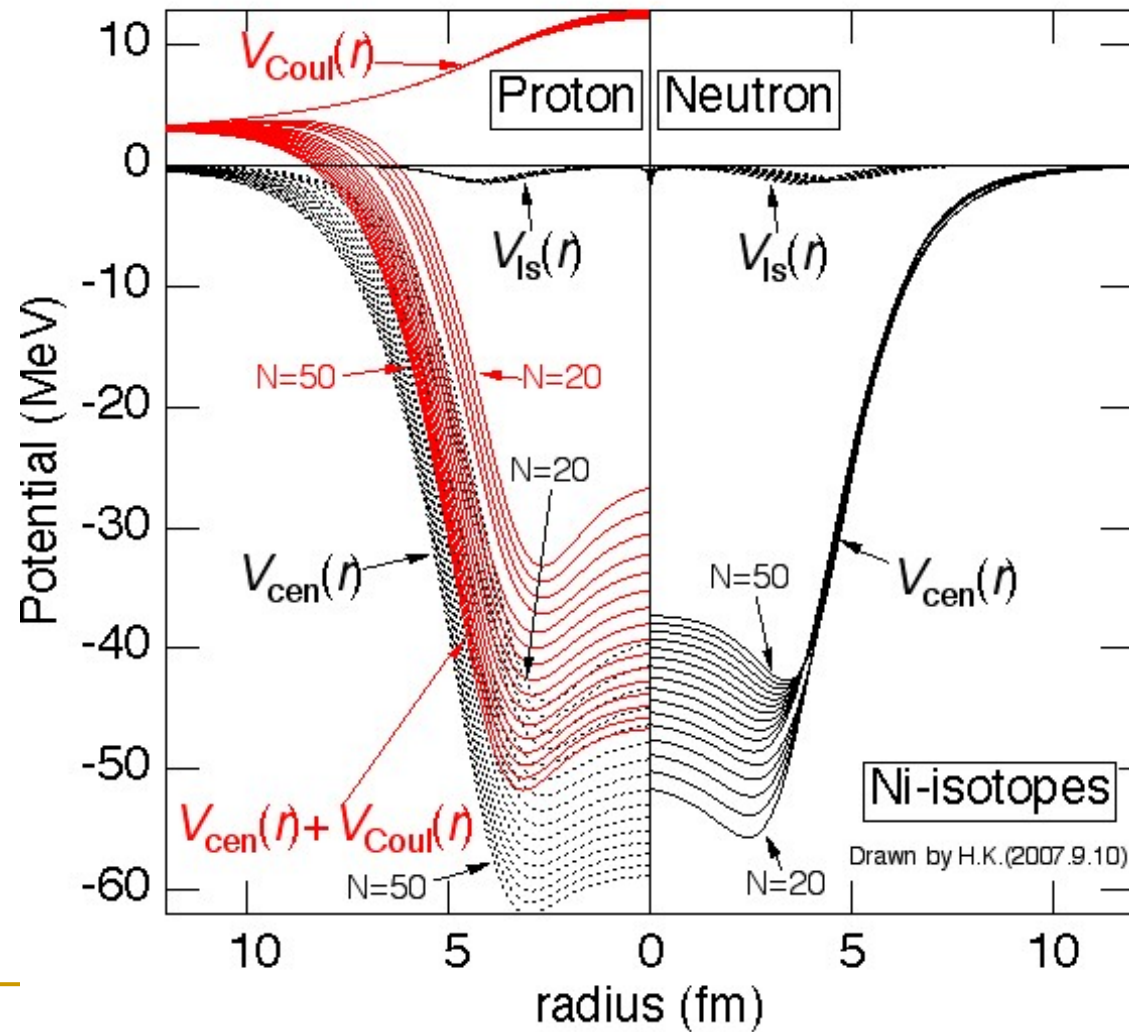


$$E_{nlj}^{\nu} = E_{nlj}^{\pi,3.\text{я.}} - \Delta_{nlj}^{\text{Coul}}$$

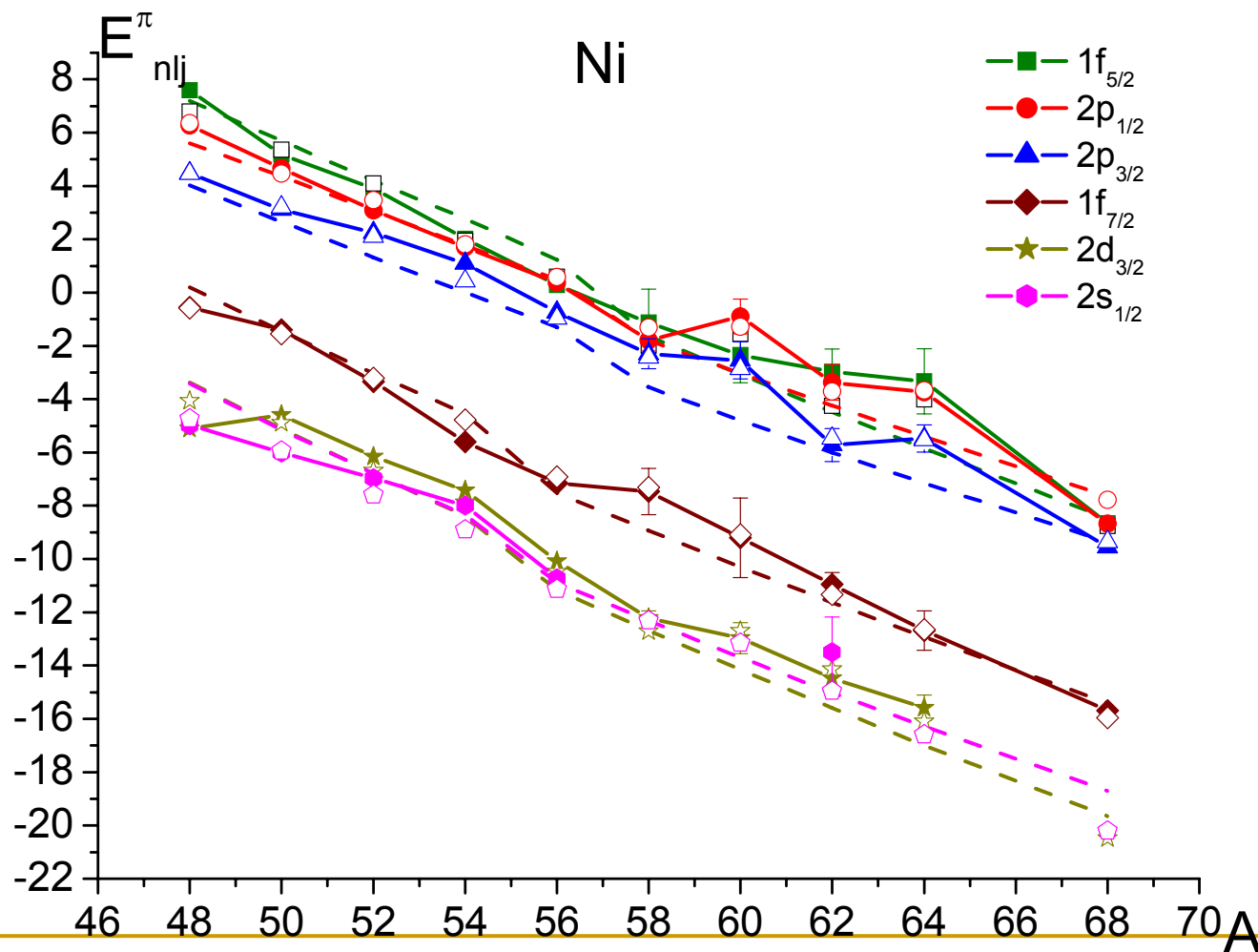
$$E_{nlj}^{\pi} = E_{nlj}^{\nu,3.\text{я.}} + \Delta_{nlj}^{\text{Coul}}$$

Потенциал КУ

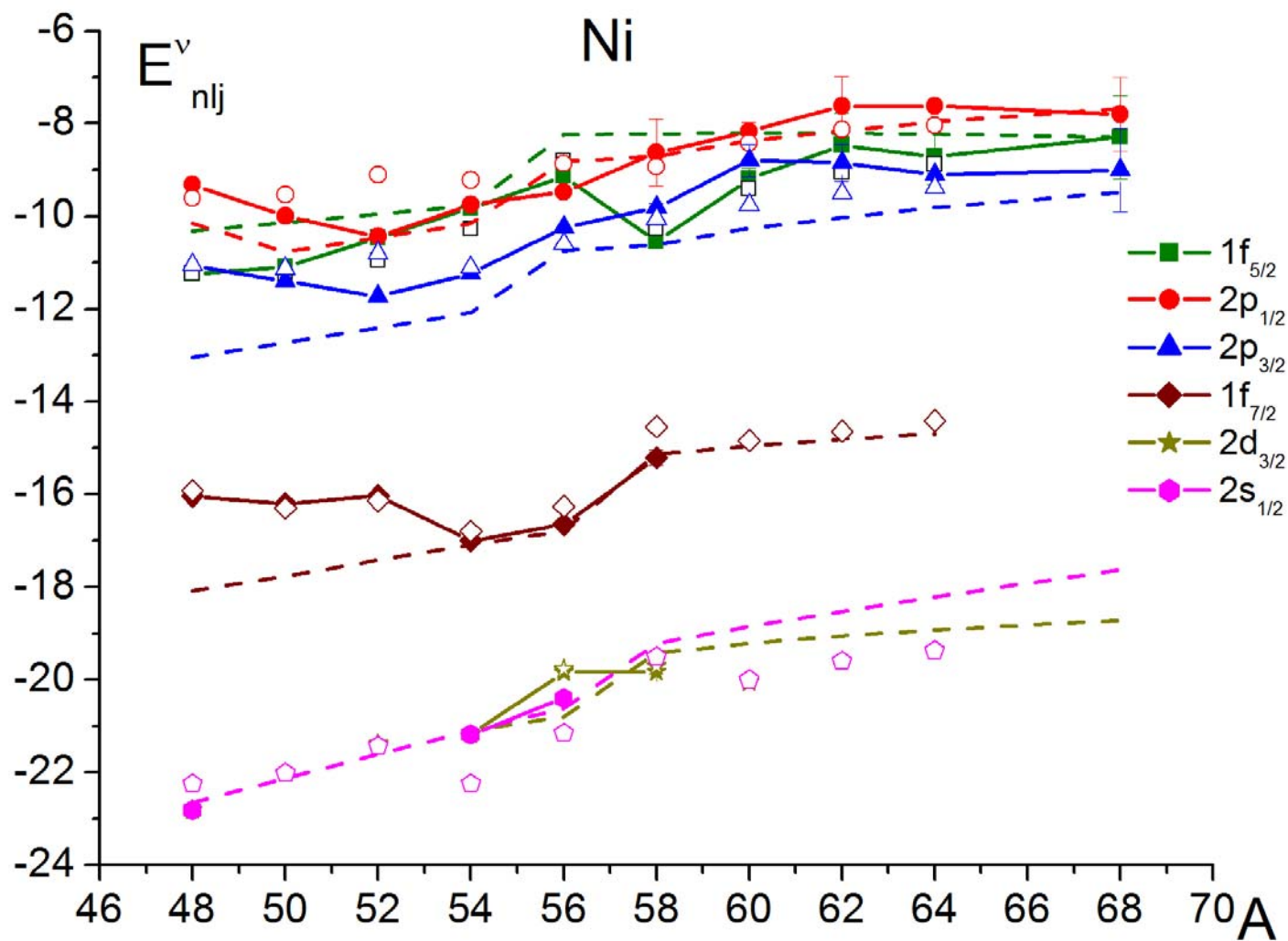
H.Koura, M.Yamada. Single-particle potentials for spherical nuclei. Nucl. Phys. A **671**, 96 (2000).



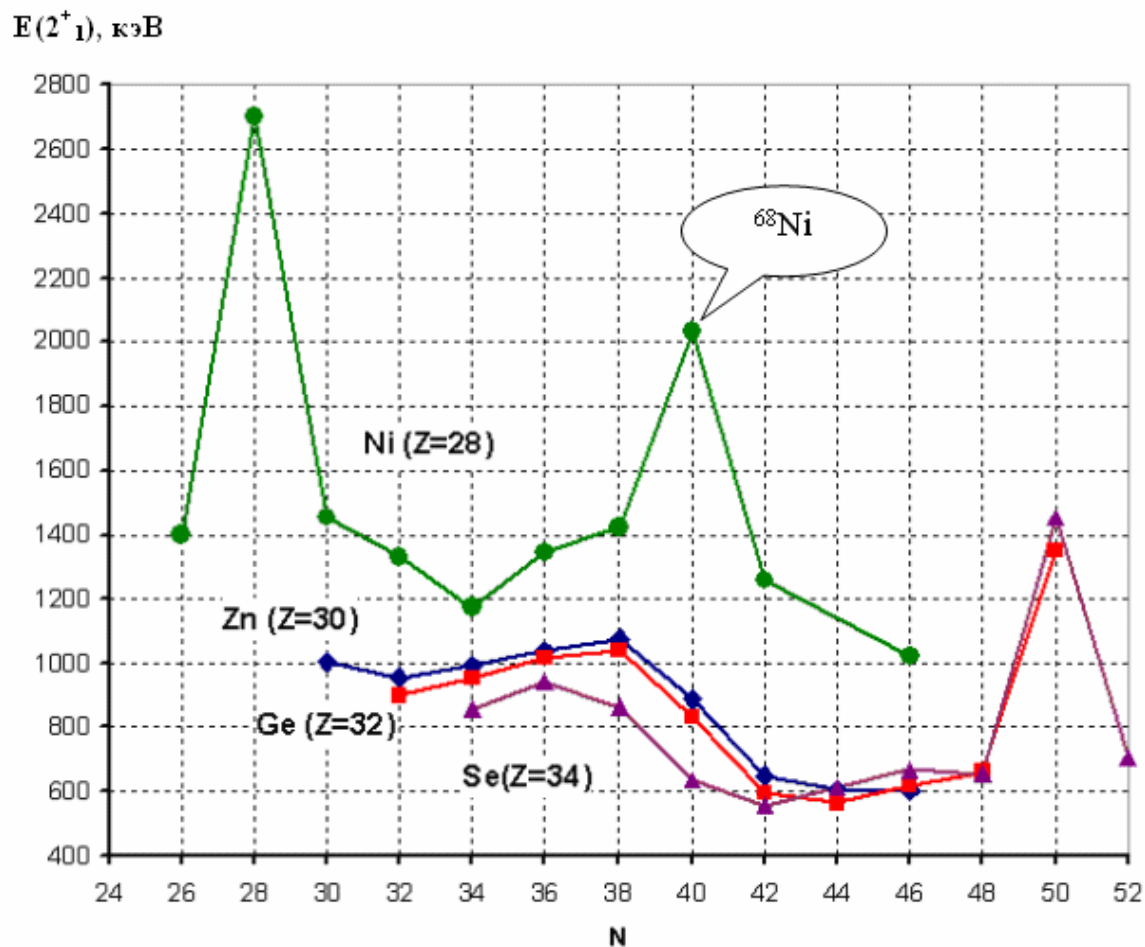
Протонные состояния изотопов Ni



Нейтронные состояния изотопов Ni



Ядро ^{68}Ni – кандидат в новые магические ядра



И.Н.Бобошин

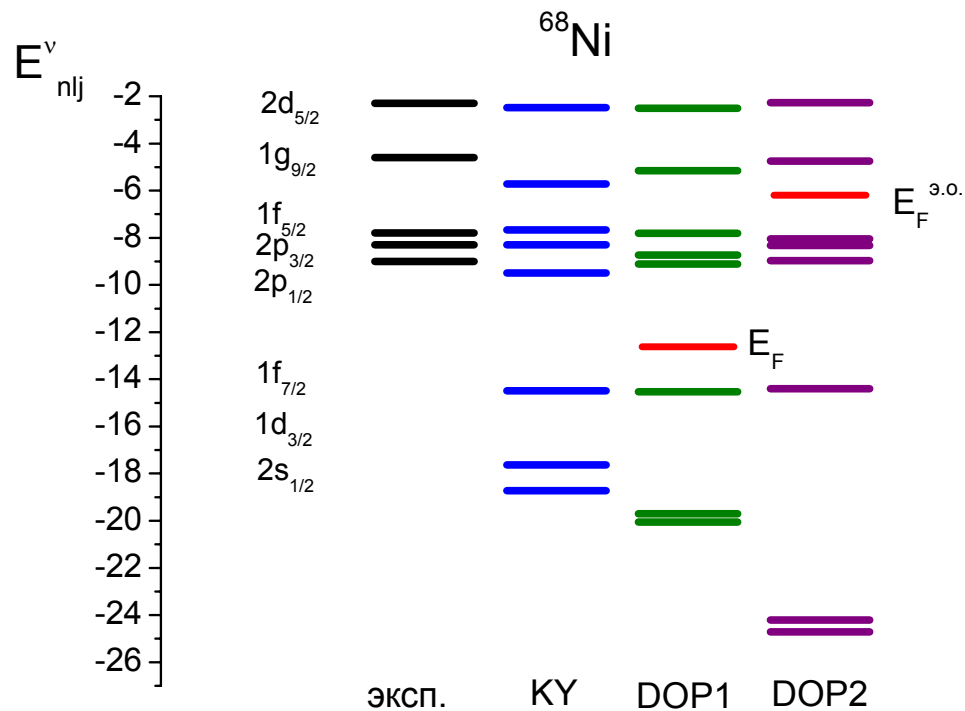
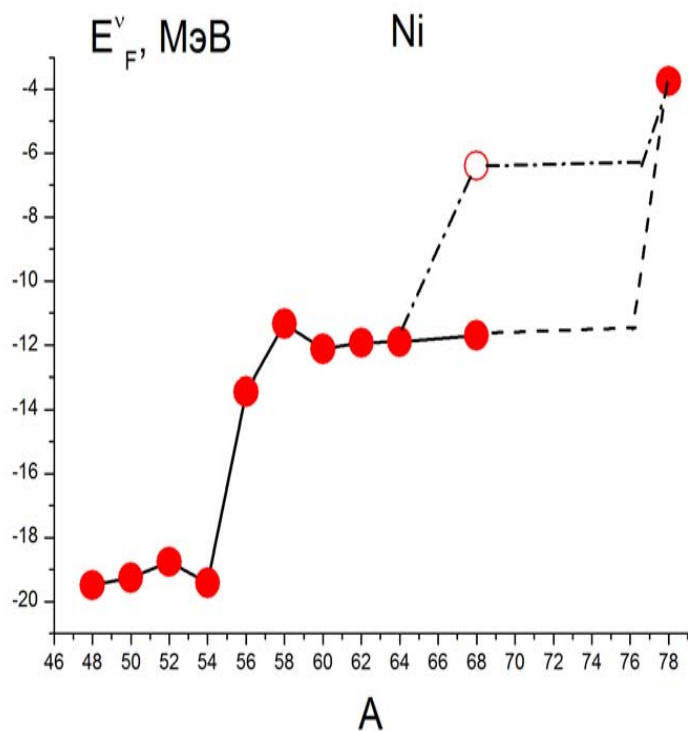
КЛАССИЧЕСКИЕ И НОВЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА

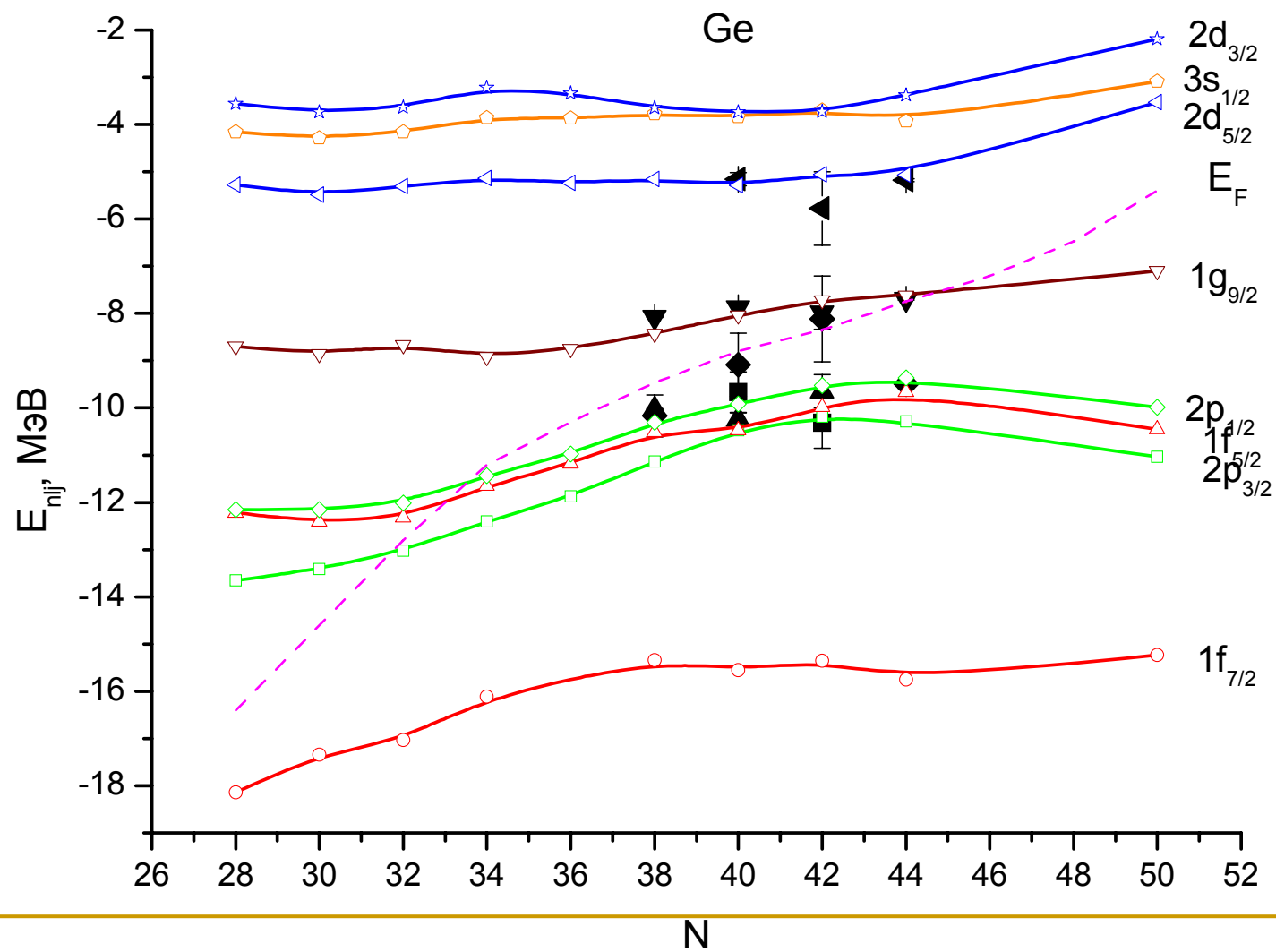
Препринт НИИЯФ МГУ № 2008–7/843

Энергии $-E_{nlj}$ (МэВ) нейтронных подоболочек в ядрах $^{56,58,60,62,64}\text{Ni}$ (экспериментальные),
 $^{68}_{28}\text{Ni}_{40}$ (оцененные и вычисленные с ДОП)

Под- оболочка	^{56}Ni	^{58}Ni	^{60}Ni	^{62}Ni	^{64}Ni	$^{68}_{28}\text{Ni}_{40}$ оцен.	ДОП
$2d_{5/2}$		2.7(5)	3.7(4)	3.2(3)	2.8(3)	2.3(2)	2.26
$1g_{9/2}$	6.55	5.8(6)	5.6(6)	5.4(5)	5.5(6)	4.6(5)	4.75
$2p_{1/2}$	9.14	9.4(9)	8.0(8)	7.9(8)	7.6(8)	7.8(8)	8.04
$1f_{5/2}$	9.48	10.7(10)	9.7(12)	9.1(9)	8.4(9)	8.3(9)	8.33
$2p_{3/2}$	10.25	9.9(10)	8.1(8)	8.9(9)	9.0(9)	9.0(9)	8.97
$1f_{7/2}$	16.65	15.3(15)	15.1(15)				14.40

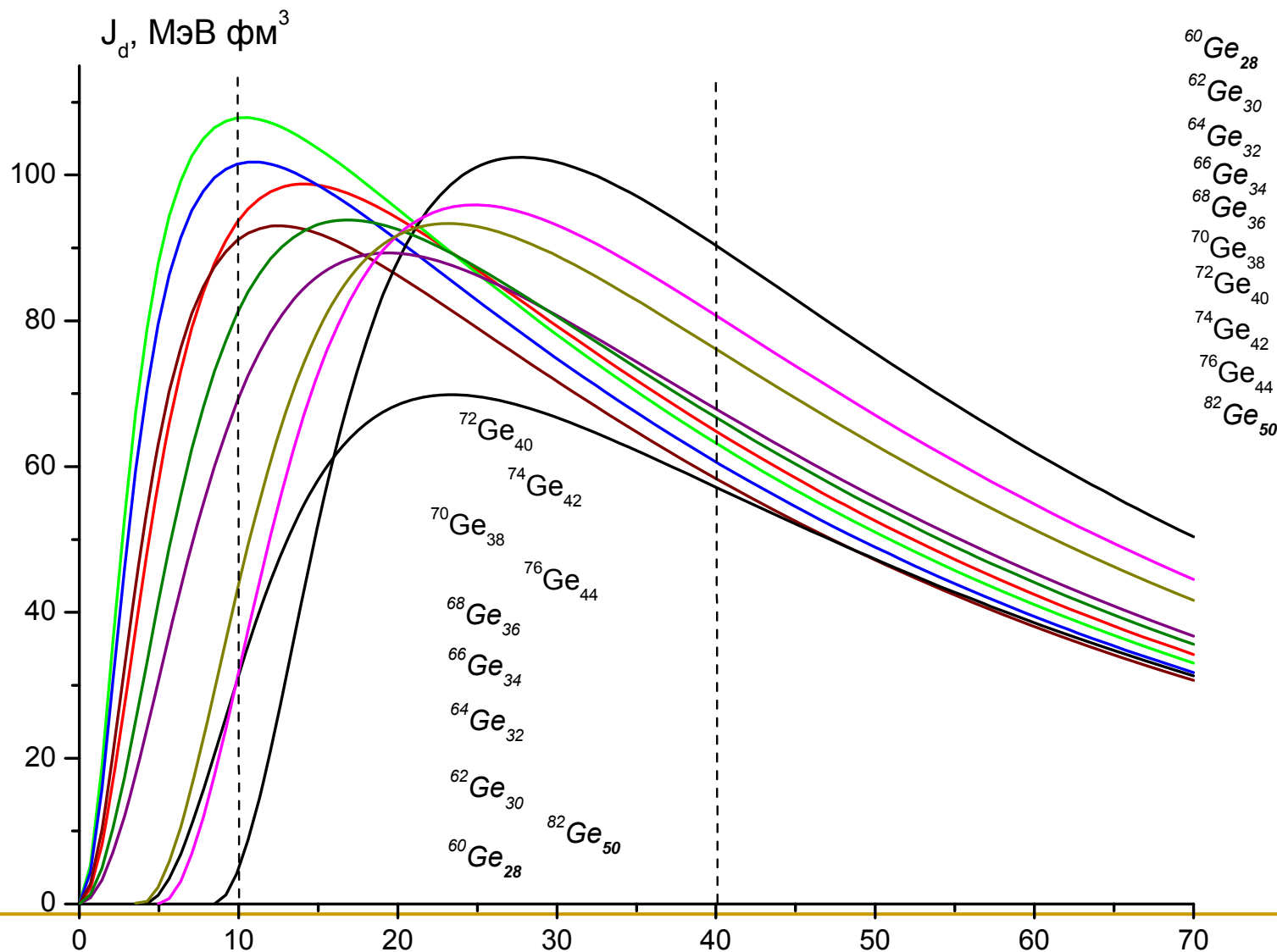
Ядро ^{68}Ni – кандидат в новые магические ядра



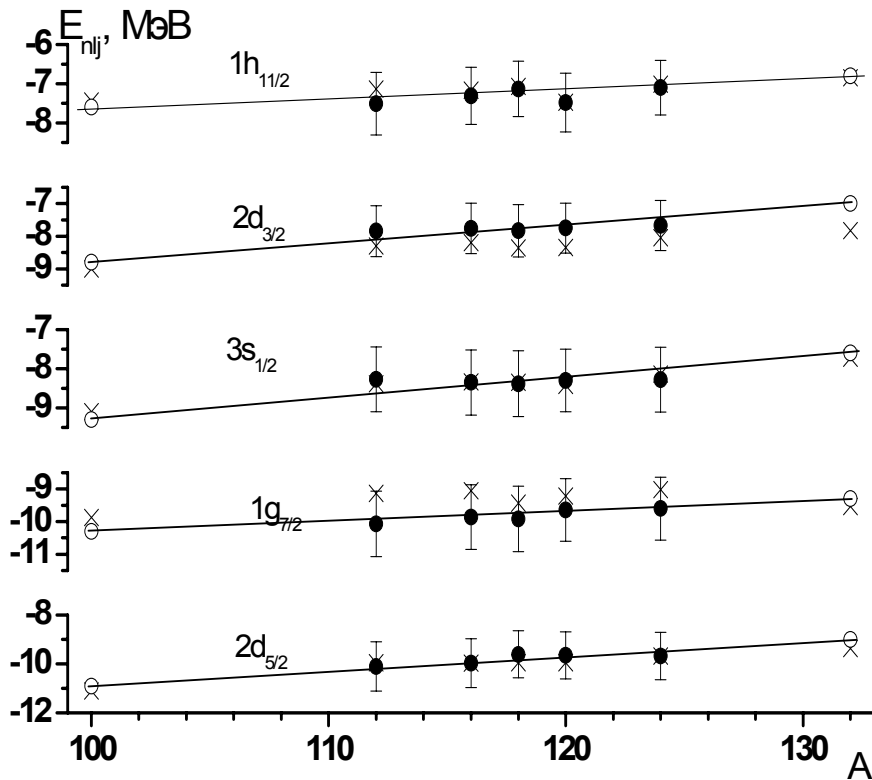


Оболочечный эффект в мнимой части ДОП

Поверхностная мнимая часть нейтронного ДОП изотопов Ge



Нейтронные состояния изотопов Sn



Нейтронные одночастичные энергии (в МэВ)
последнего занятого и первого свободного
состояний в ^{100}Sn

nlj	эмпир.	-э.о.	оценка, н.р.	ДОП
$2d_{5/2}$	-11.13	-10.87	-11.1	-11.43
$1g_{9/2}$	-17.93	-17.67		-17.58

Нейтронные одночастичные энергии (в МэВ)
последнего занятого и первого свободного
состояний в ^{132}Sn

nlj	эмпир.	-э.о.	оценка, н.р.	ДОП
$1f_{7/2}$	-2.58	-2.47		-2.31
$2d_{3/2}$	-7.31	-7.31	-7.0	-7.65

Публикации, в которых проведен расчет одночастичных характеристик ядер в модели среднего поля с ДОП

Ядро	Нуклон	Публикации	Ядро	Нуклон	Публикации
⁴⁰ Ca	n	■, □	⁷⁸ Ni	n	■
	p	■, □		p	■
^{42,44,46,48} Ca	n	■, □	^{64,66,68,70} Zn	n	■
	p	■, □		p	■
^{50,52,54,56} Ca	n	■, □	^{70,72,74,76} Ge	p	■
⁵⁰ Ti	n	■	⁸⁶ Kr	n	■
⁵⁰ Cr	n	■	^{84,86,88} Sr	n	■
	p	■			
⁵² Cr	n	■	⁹⁰ Zr	n	■, □
	p	■	⁹² Zr	p	■, □
⁵⁴ Cr	n	■		n	■
	p	■	^{94,96} Zr	p	■
⁵⁴ Fe	n	■		n	■
	p	■	¹⁰⁰ Sn	p	■
⁵⁶ Fe	n	■		n	■
	p	■	¹¹² Sn	n	■
⁵⁸ Fe	n	■		p	■
⁶⁰ Fe	n	■	¹²⁰ Sn	n	□
^{48,50,52,54} Ni	n	■	^{116,118,120,122} Sn	p	■
	p	■		n	■
⁵⁶ Ni	n	■	¹²⁴ Sn	p	■
	p	■		n	■, □
^{58,60,62,64} Ni	n	■	¹³² Sn	p	□
	p	■		n	□
⁶⁸ Ni	n	■	²⁰⁸ Pb	p	□
	p	■			

■ – публикации научной группы НИИЯФ
□ – публикации других научных групп

Основные результаты

- 1. Закономерности рассеяния протонов низких энергий ядрами с $40 < A < 124$
- 2. Первая систематика глобальных параметров нейтронного и протонного дисперсионного оптического потенциала (ДОП)
- 3. Метод конструирования ДОП с возможностью экстраполяции в направлении к границам нуклонной радиоактивности
- 4. Выделение оболочечного эффекта в мнимой части ДОП при $E < 0$
- 5. Результаты расчета эволюции одночастичных характеристик стабильных и β -радиоактивных ядер с $40 < A < 132$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ