

ПРОБЛЕМЫ *ЯДЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ*

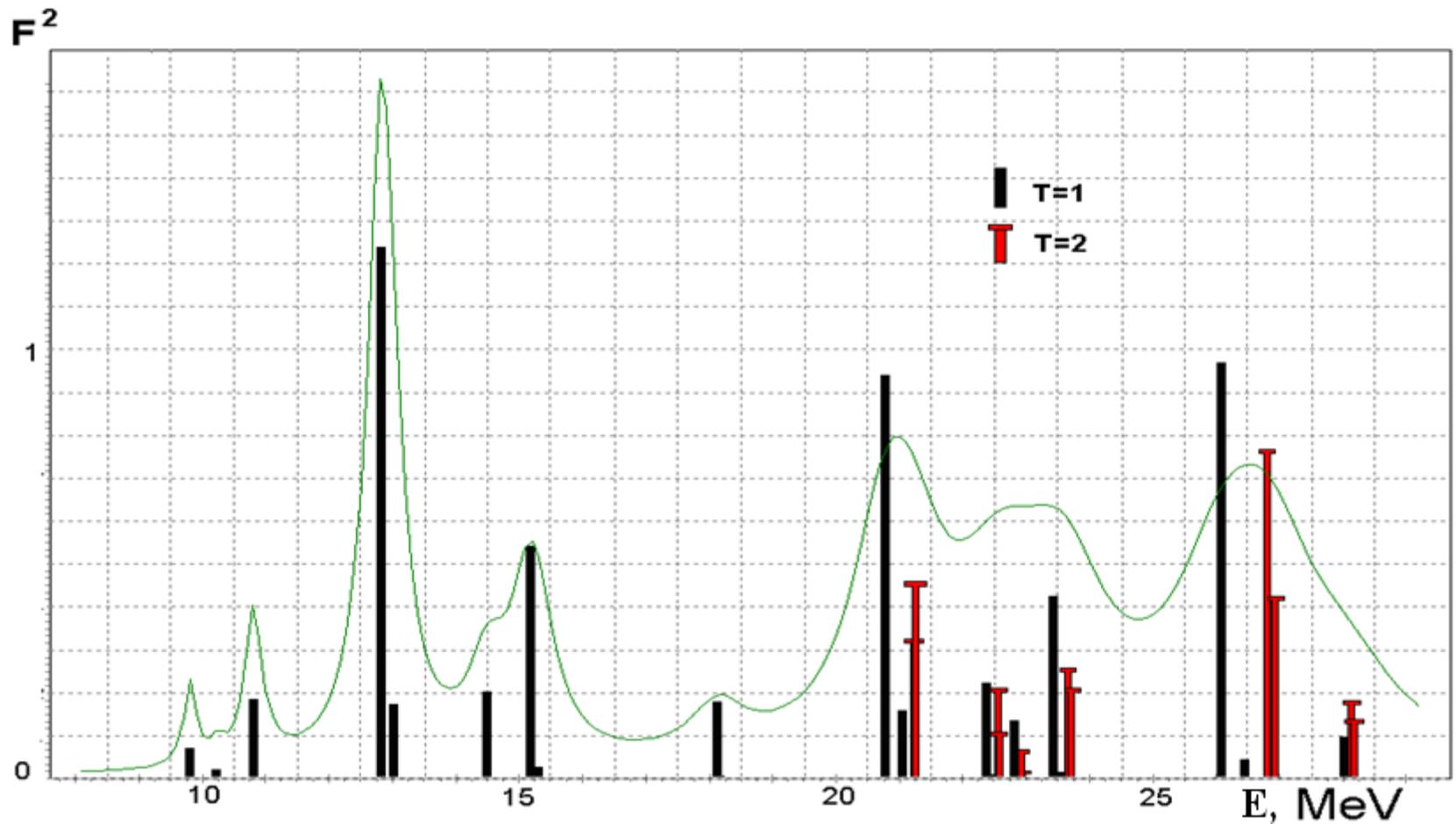
И

*источники фрагментации
гигантских резонансов*

Успехи в интерпретации структуры резонансов

- 1. Конфигурационное и изоспиновое расщепление резонансов.
- 2. “Ground state correlations” -спаривание и т.д.
- 3. Многочастичная модель оболочек (ММО)

$E1$ резонанс в ядре ^{18}O (фототочка)



$$1d_{5/2} \rightarrow 1f_{7/2}$$

$$1d_{5/2} \rightarrow 2p_{3/2}$$

$$1d_{5/2} \rightarrow 1f_{5/2}$$

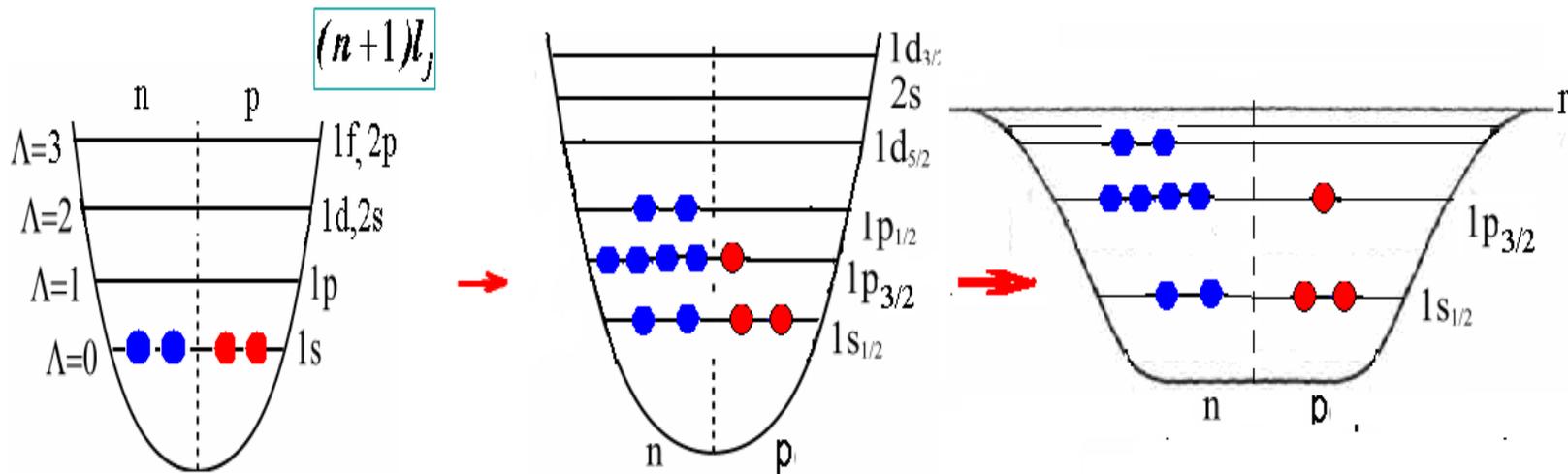
$$1p_{3/2} \rightarrow 2s_{1/2}$$

$$1p_{3/2} \rightarrow 1d_{3/2}$$

$$1p_{3/2} \rightarrow 1d_{5/2}$$

Проблемы модели ядерных оболочек

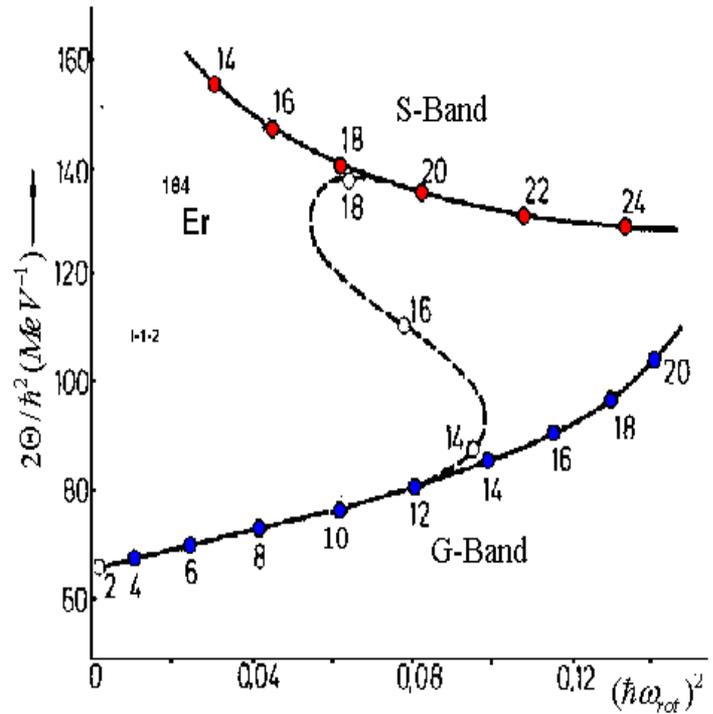
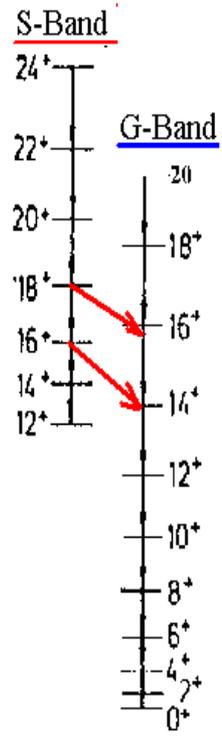
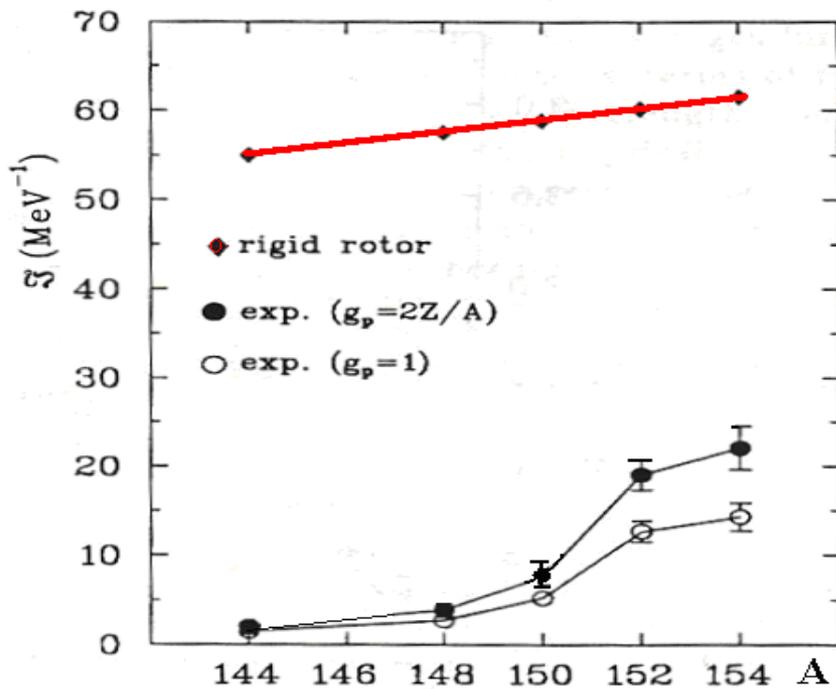
- 1. Вид и форма потенциальной ямы ядра ?



- 2. Существование орбитальных квантовых чисел движения нуклона в ядре?
- (См. Э.Ферми. *Лекции о пи-мезонах и нуклонах.* - М.: ИЛ, 1956)

2. Существование орбитальных квантовых чисел движения нуклона в ядре?

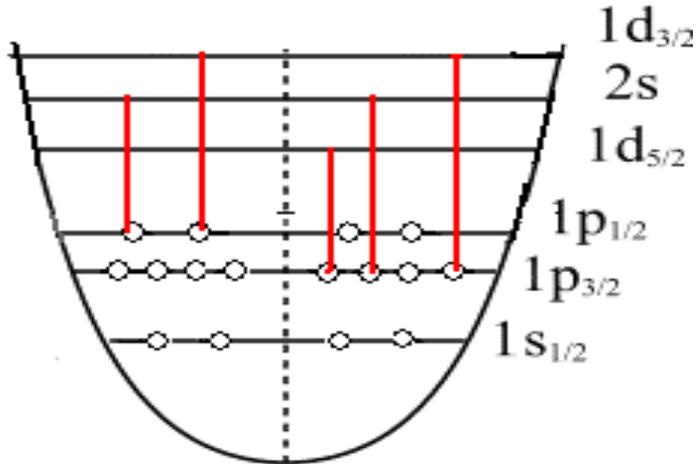
СВЕРХТЕКУЧЕСТЬ!



Возбужденные состояния системы нуклонов и ММО

G. Brown, M. Bolsterli // Phys. Rev. Lett. 3 (1959) 472

E1 возбуждения ядра O-16



1p1h \Rightarrow

$$1p_{3/2} \rightarrow 1d_{5/2}, E_{ph} = 17.7 \text{ MeV}$$

$$1p_{3/2} \rightarrow 2s_{1/2}, E_{ph} = 18.3 \text{ MeV}$$

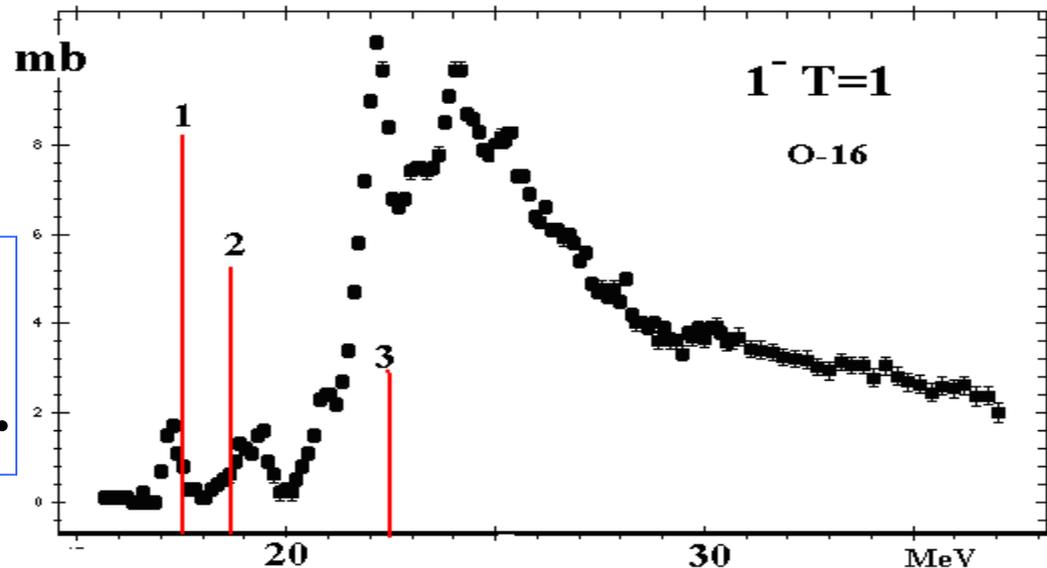
$$1p_{3/2} \rightarrow 1d_{3/2}, E_{ph} = 22.7 \text{ MeV}$$

$$1p_{1/2} \rightarrow 2s_{1/2}, E_{ph} = 10.4 \text{ MeV}$$

$$1p_{1/2} \rightarrow 1d_{3/2}, E_{ph} = 14.8 \text{ MeV}$$

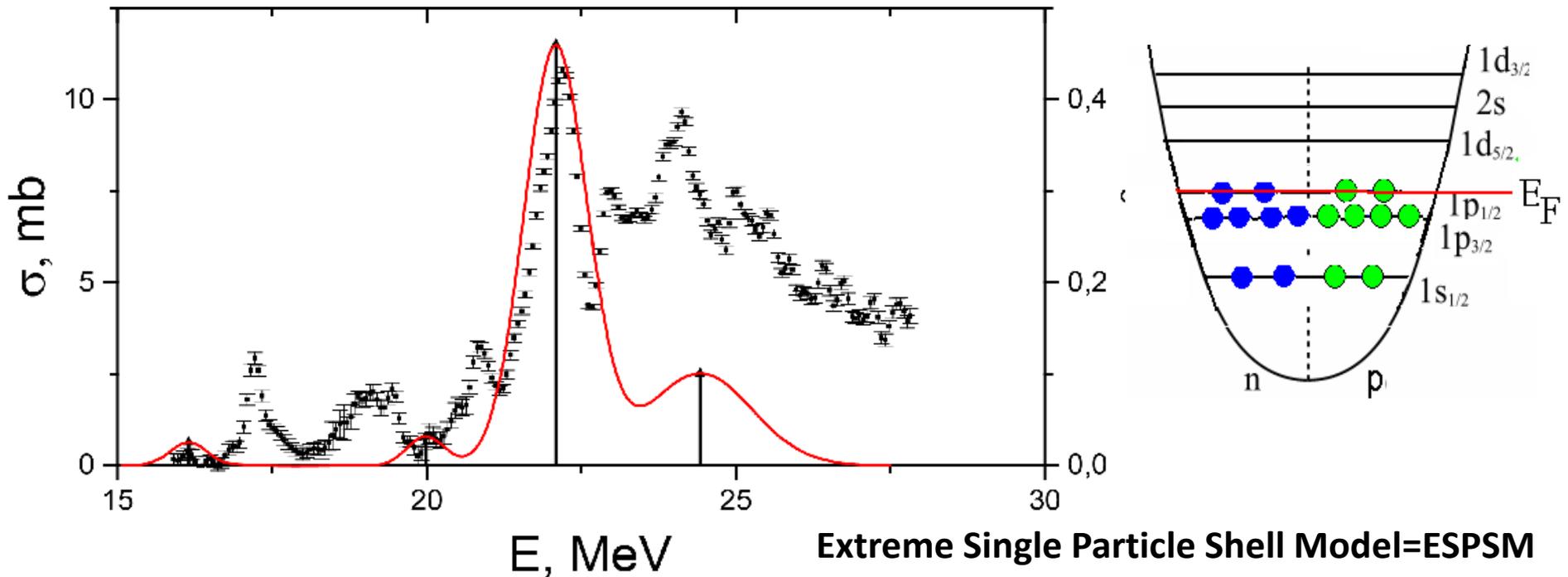
$$\gamma + {}^{16}\text{O} \Rightarrow {}^{16}\text{O}^*_{ph}; \dots$$

$$\Psi({}^{16}\text{O}_{gr.state}) = |0^+\rangle \equiv \text{Phys.vac.}$$



E1 резонанс в ядре O-16- Создание многочастичной модели оболочек=ММО-

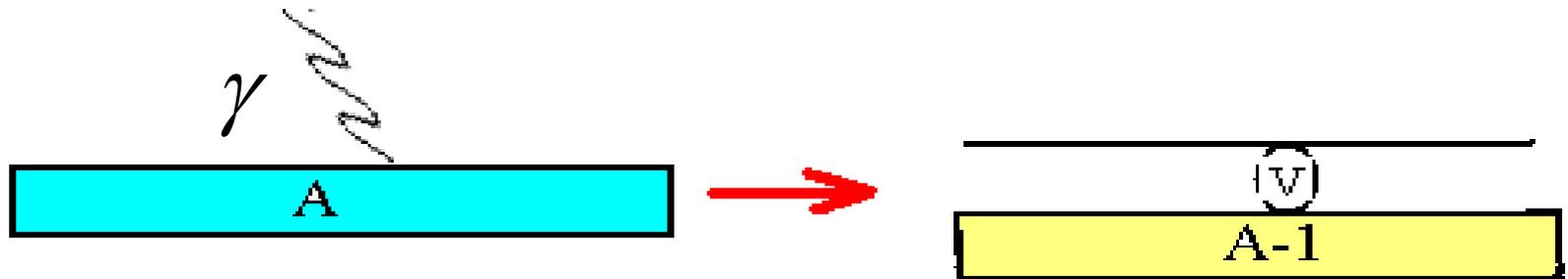
G. Brown, M.Bolsterli // Phys.Rev.Lett. 3 (1959)472



Частица-Состояние Конечного Ядра (ЧСКЯ) Particle Core Coupling Shell Model=PCCSM

$$\left| J_f, T_f \right\rangle = \sum_{(J'), j'} \alpha_f^{(J'), j'} \left| (J' E' T')_{A-1} \times (n' l' j') : J_f, T_f \right\rangle$$

$$\left| J_i, T_i \right\rangle = \sum_{(J'), j} C_i^{(J'), j} \left| (J' E' T')_{A-1} \times (n l j) : J_i, T_i \right\rangle$$



Структура основных состояний ?

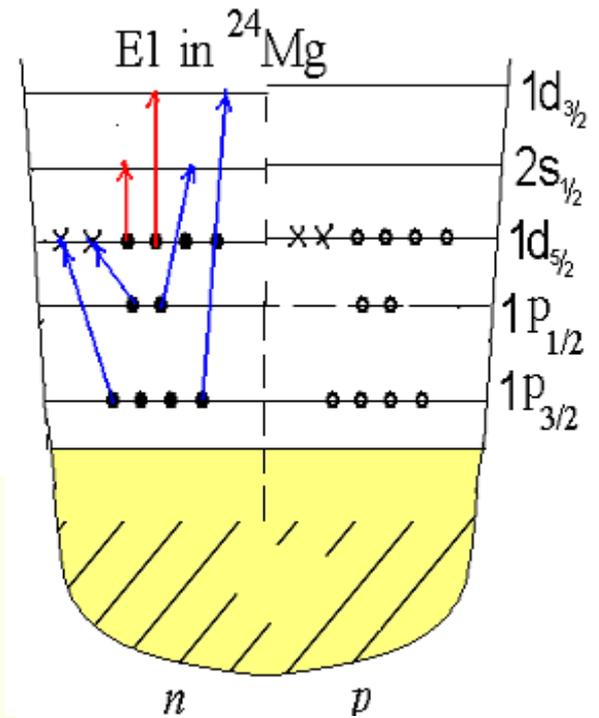
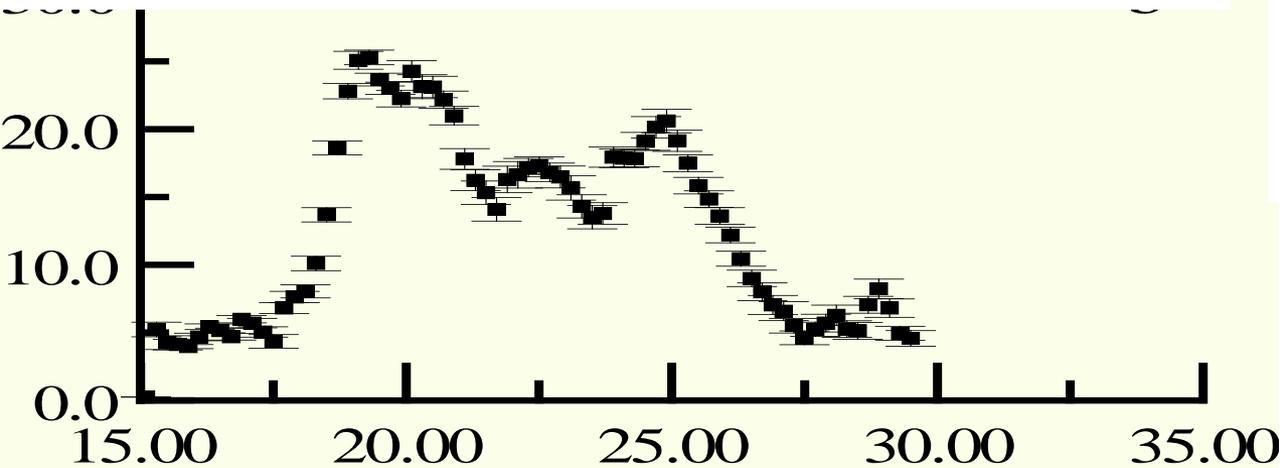
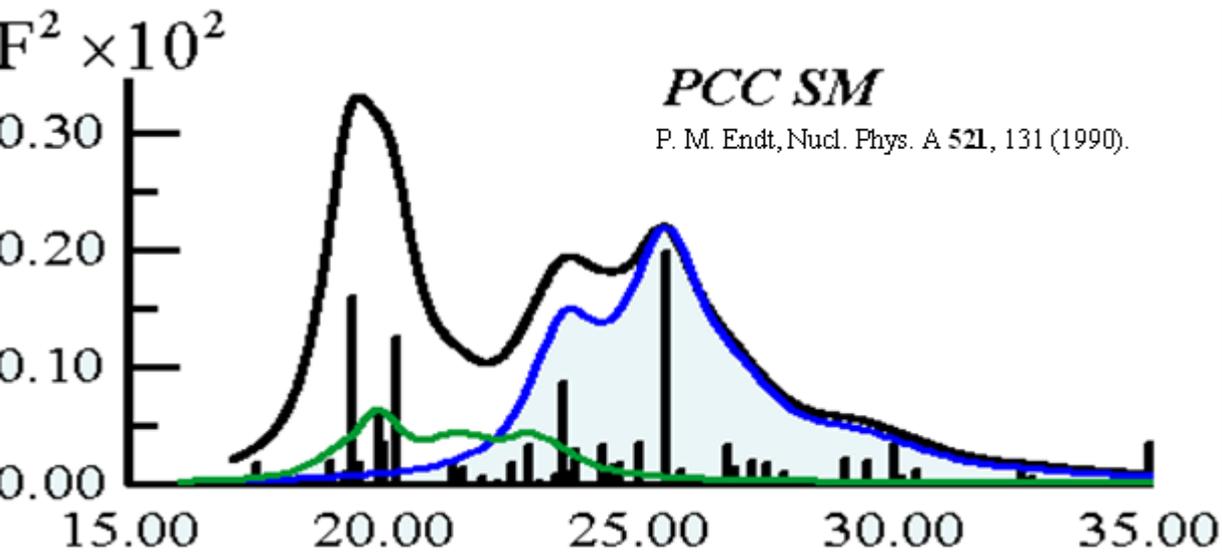
$$|J_i, T_i\rangle = \sum_{(J'), j} C_i^{(J'), j} |(J' E' T')_{A-1} \times (nlj) : J_i, T_i\rangle;$$

$$C_i^{(J'), j} = ? \Rightarrow C_i \approx \sqrt{\frac{S_i}{\sum S_i}}$$

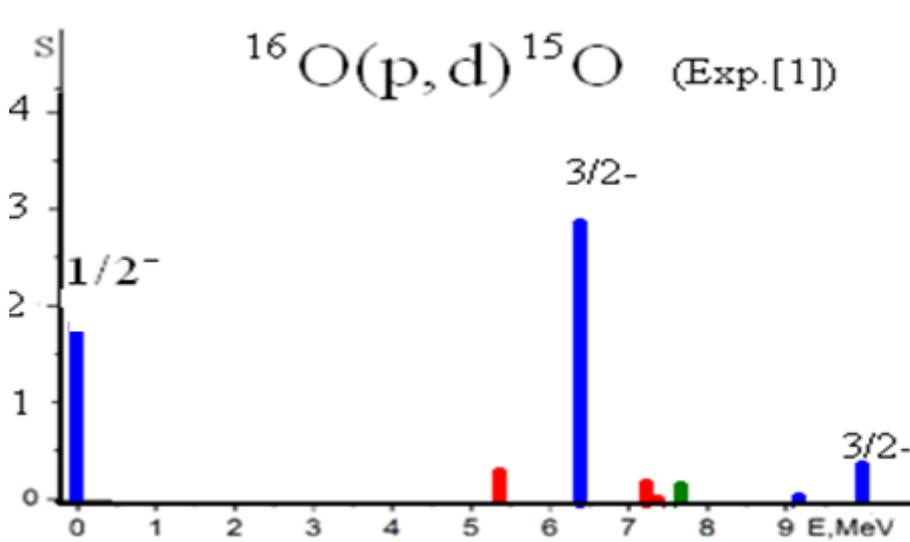
S_i —

Спектроскопический фактор прямой реакции
подхвата нуклона

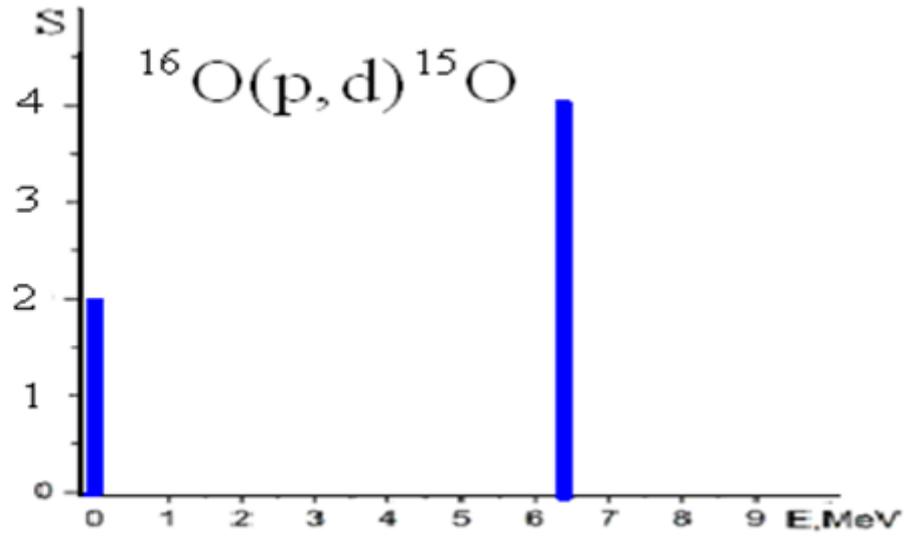
$E1$ in ^{24}Mg at photopoint



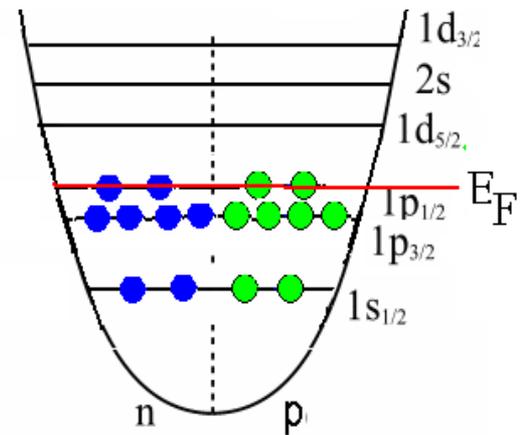
O-16



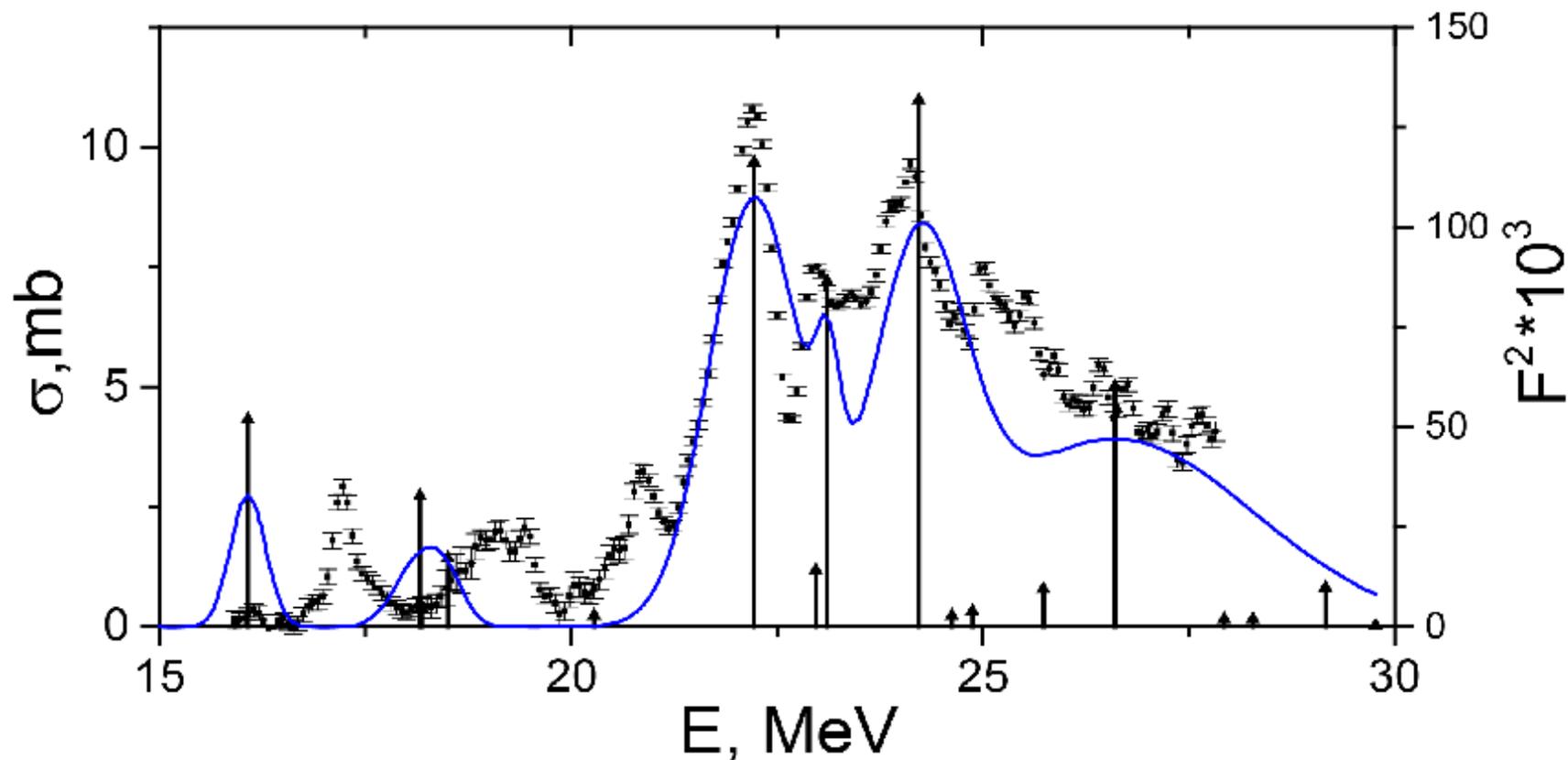
Firestone M.A. *et al.*, Nucl.Phys. A258 (1976)317



E(^{15}N)	J ^P	S(p,d) (Exp.)	S(p,d) (ESPSM)
0	1/2-	1.8	2
5.271	5/2+	0.11	
5.299	1/2+	0.02	
6.324	3/2-	2.6	4
7.155	5/2+	0.02	
7.301	3/2+	0.02	
7.566	7/2+	0.03	
9.152	3/2-	0.04	
9.929	3/2-	0.18	
		$\sum S_n = 4.82$	

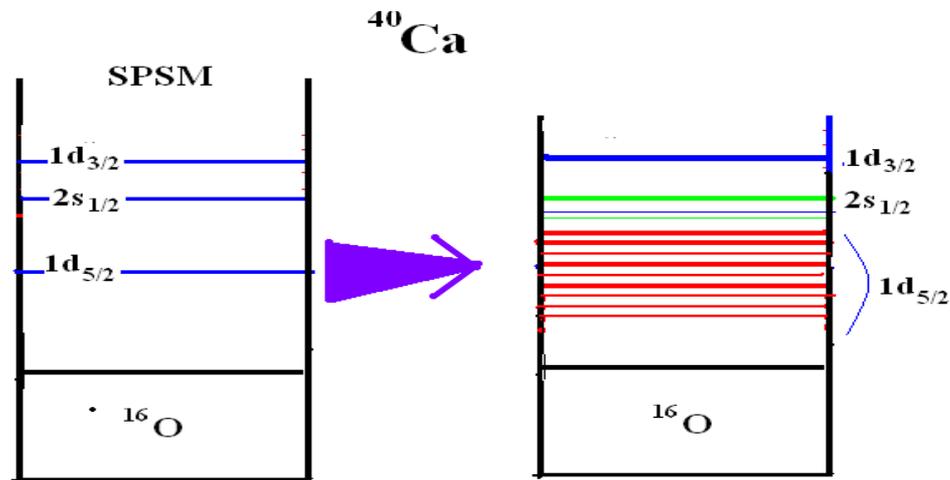
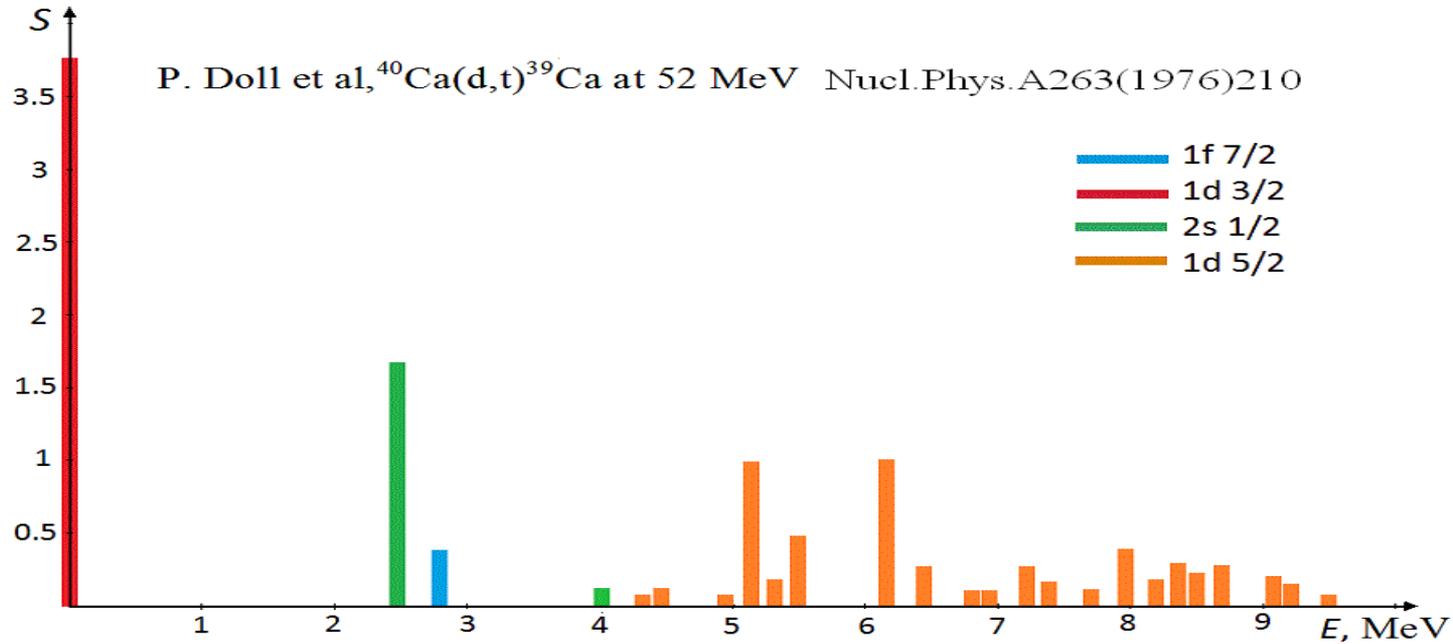


$E1$ резонанс в ядре O-16 (в модели ЧСКЯ)

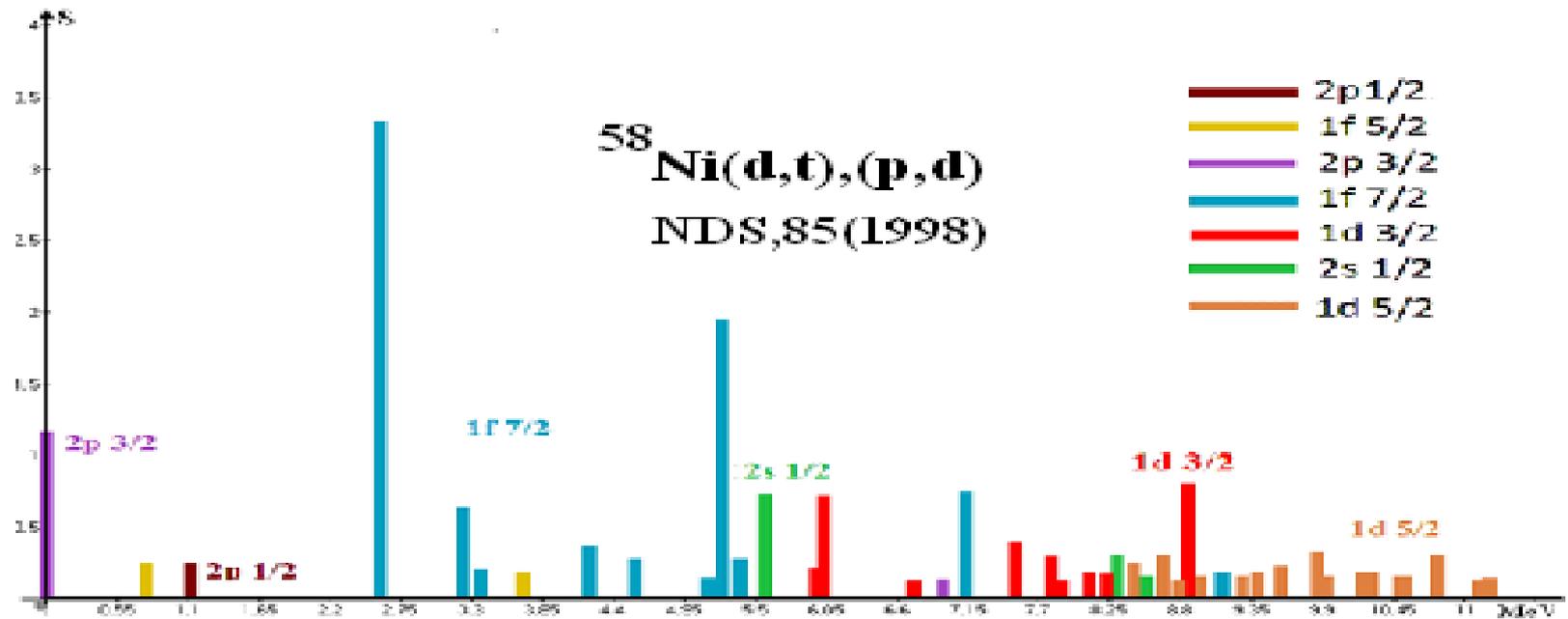


- $^{16}\text{O}(p,d)$ from *Firestone M.A. et al // Nucl.Phys. (1976) A258 ,P.317*
- $^{16}\text{O}(\gamma ,n)$ *V.L.Berman et al // Phys.Rev.C,1983,V.27*
- *В.В.Варламов, Б.С.Ишханов et al ,ЯФ 67, 2131(2004)*

Расщепление глубоких подболочек сферических ядер



Расщепление оболочек



ГДР

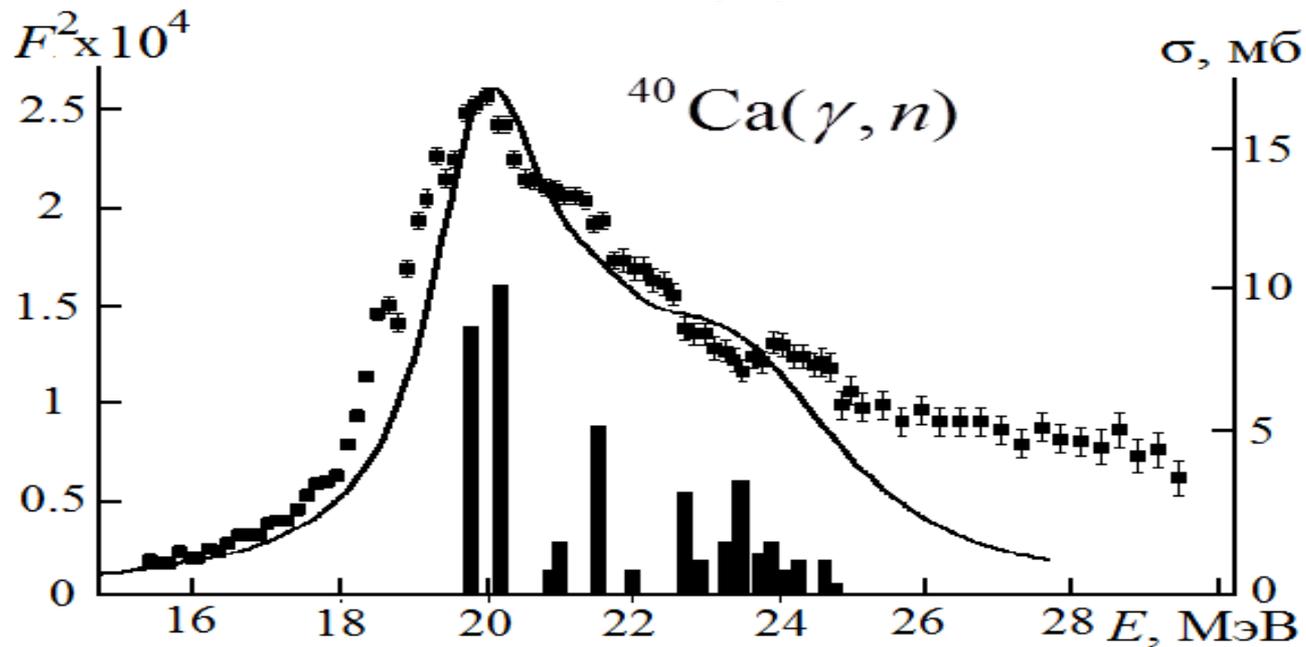


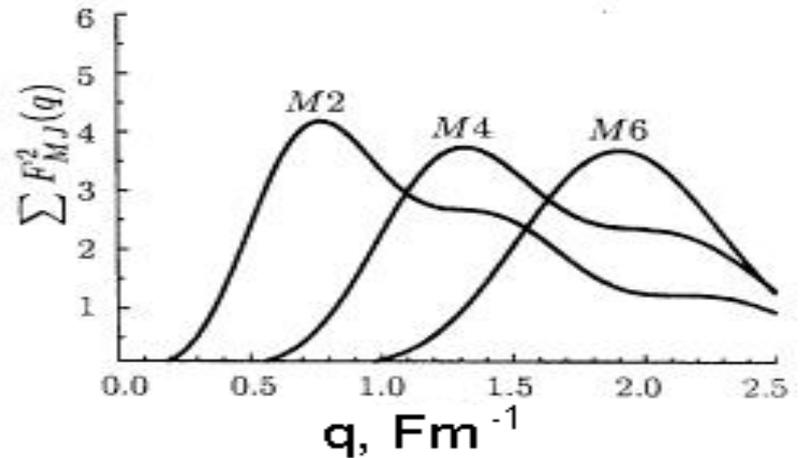
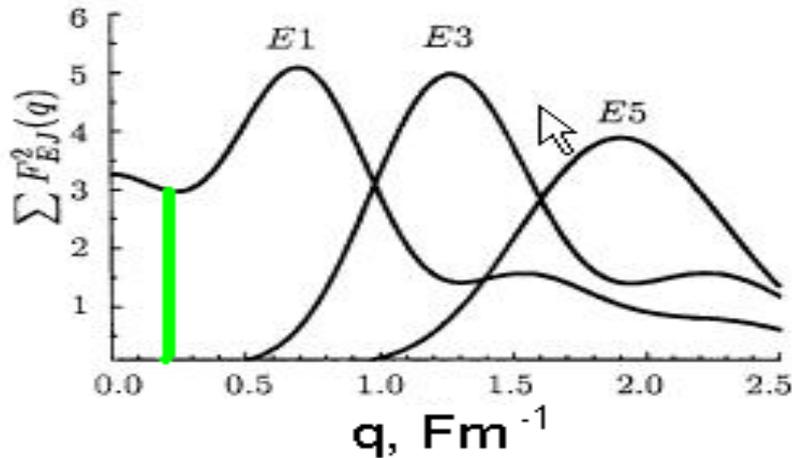
Таблица 1. Числа заполнения нейтронных подоболочек в ядрах ^{40}Ca и ^{48}Ca .

N		$2p_{3/2}$	$1f_{7/2}$	$1d_{3/2}$	$2s_{1/2}$	$1d_{5/2}$
^{40}Ca , (d,t)		0	0.36	3.74	1.74	5.41
^{48}Ca , [1]		0.02	6.8	3.78	1.9	0.95
N , согласно МО		0	0 (^{40}Ca) 8 (^{48}Ca)	4	2	6

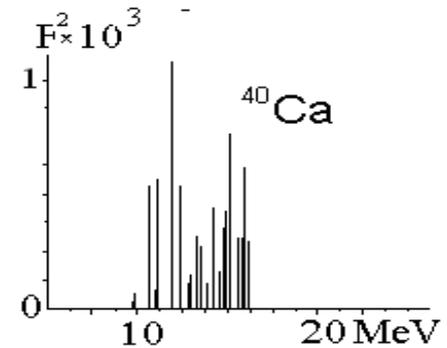
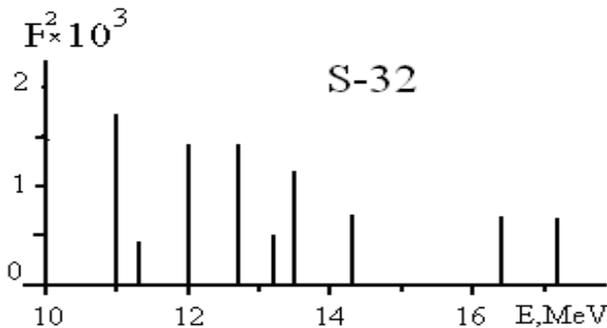
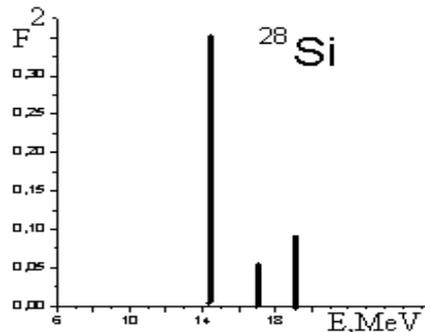
[1] P. Martin, M. Buenerd, Y. Dupont, M. Chabre, Nucl. Phys A, V.185, I 2, 465, 1972

M6 in sd-nuclei:

$$6^-, T = 1; q \approx 2 \text{Fm}^{-1}$$

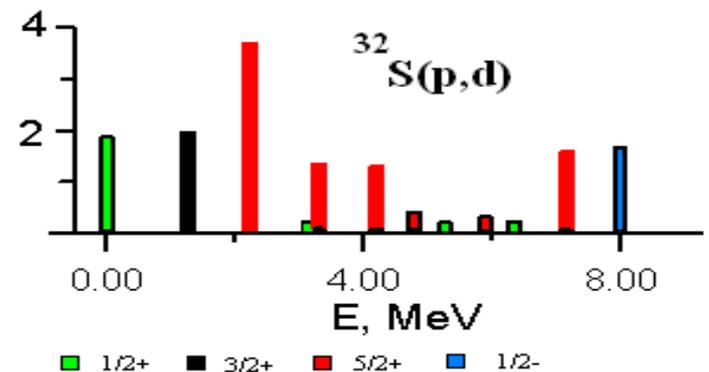
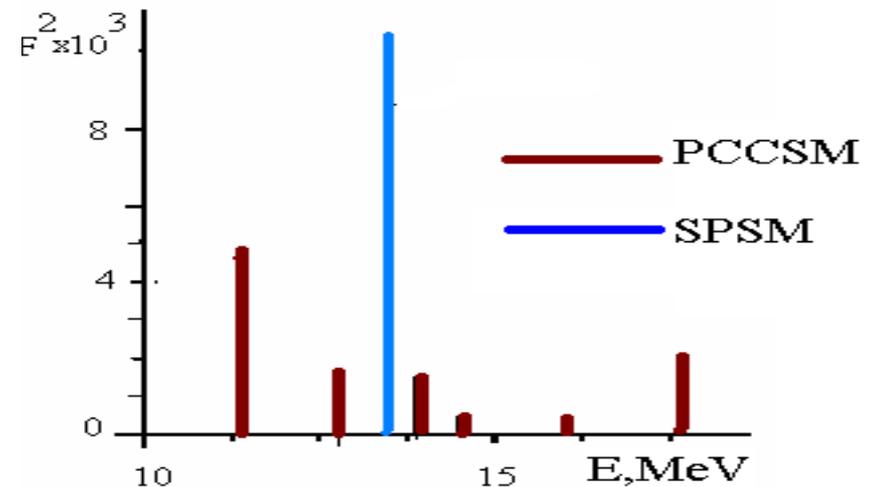
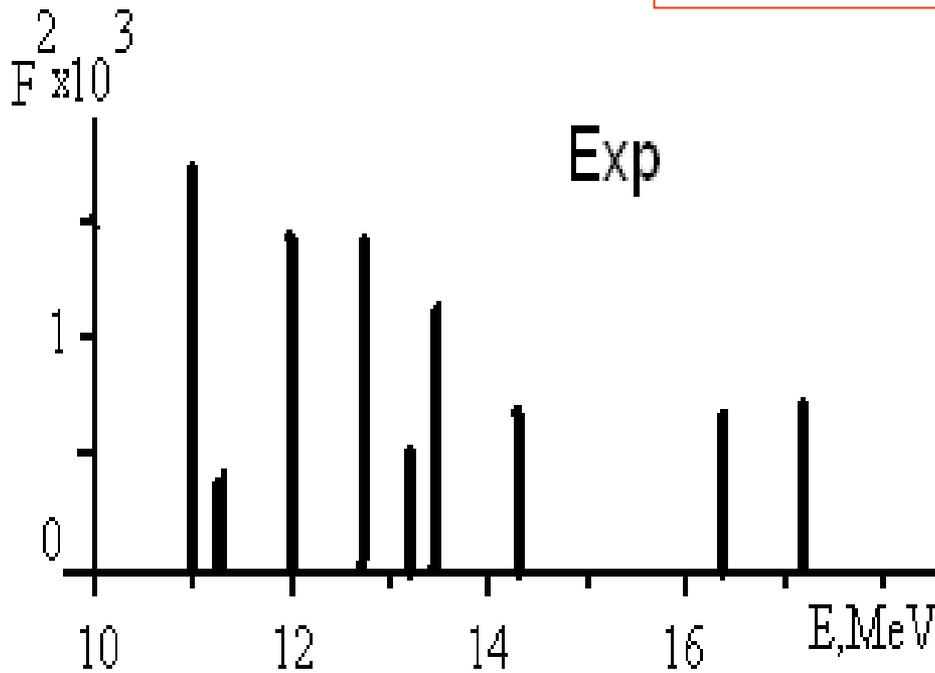


$$|1d_{5/2} \Rightarrow 1f_{7/2}|$$



M6 in sd-shell nuclei : ^{32}S

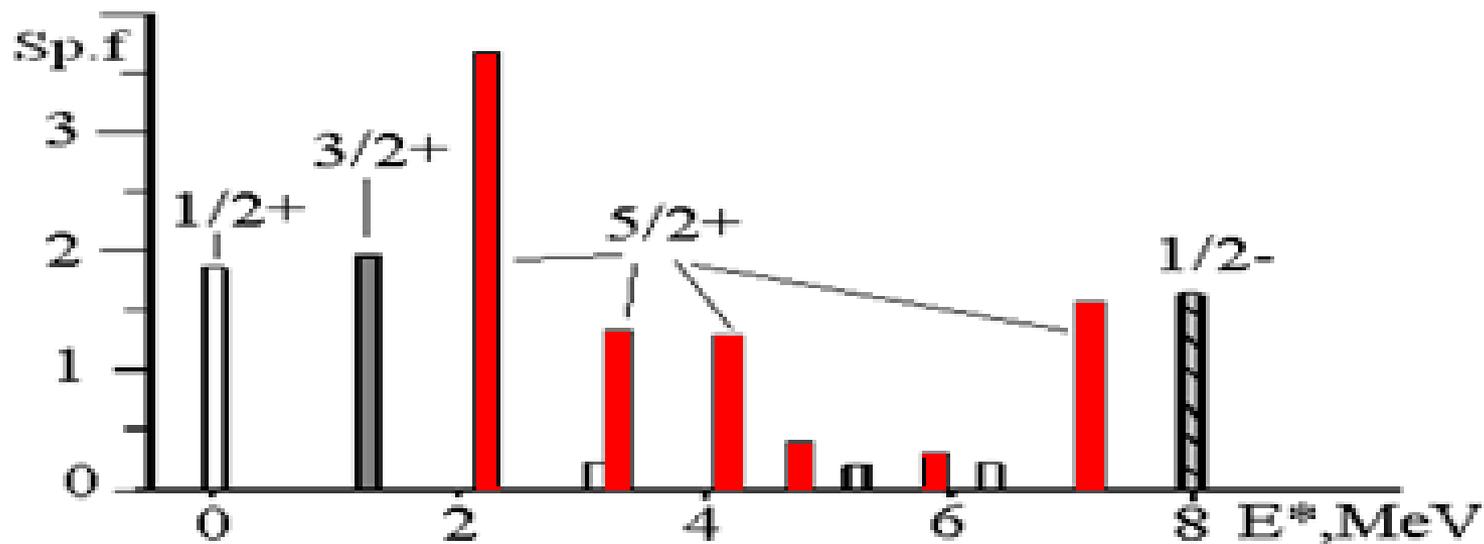
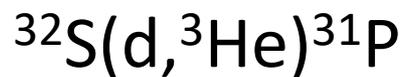
$$1d_{5/2} \Rightarrow 1f_{7/2}$$



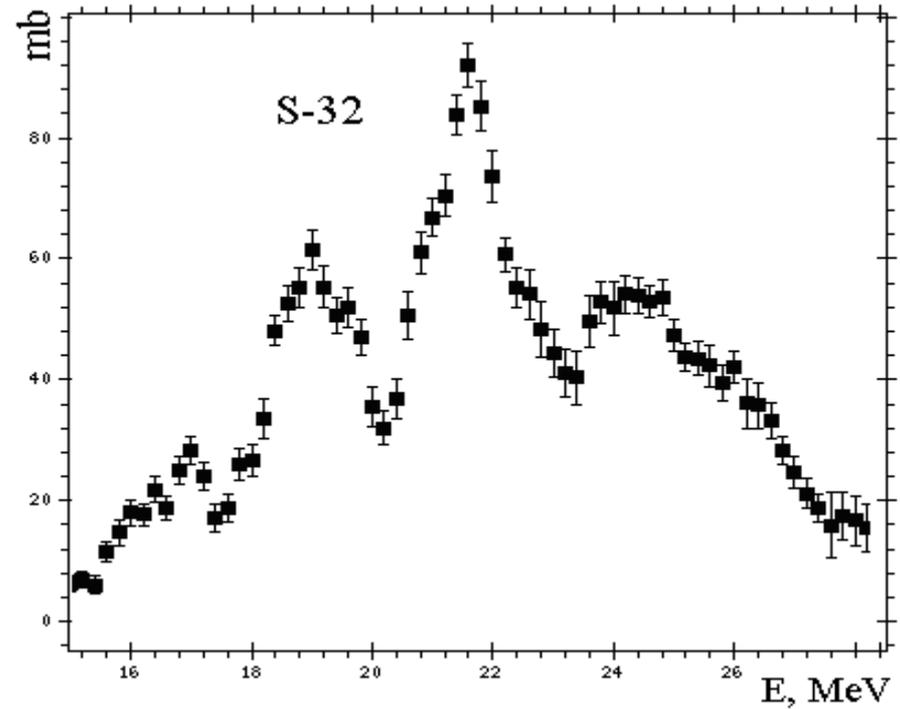
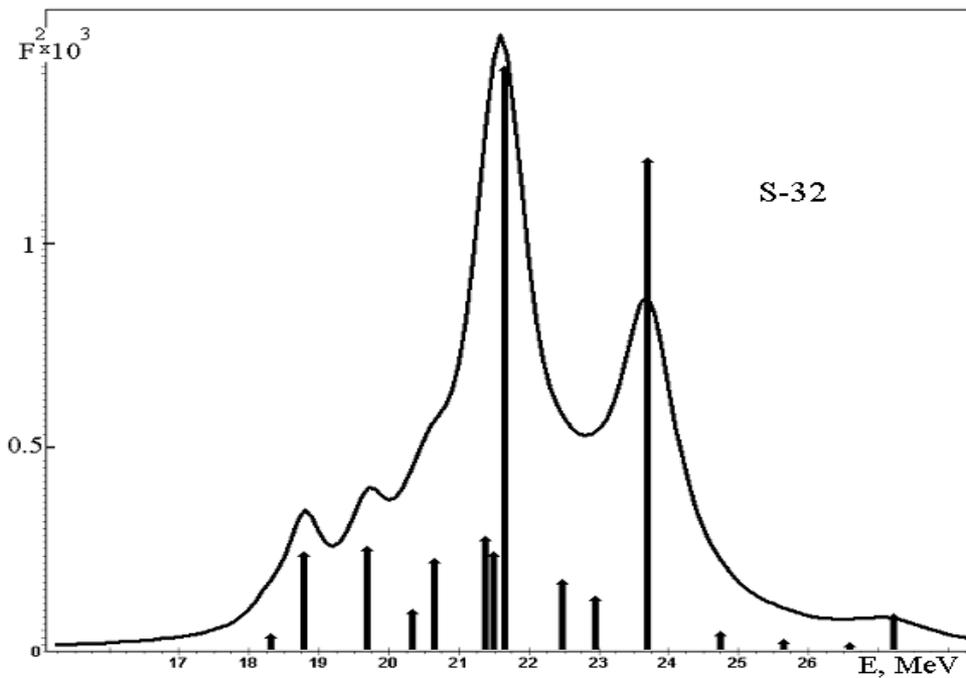
Exp.: Clausen B.L *et al*, Phys.Rev.C48, 1632 (1993)

Расщепление глубоких подболочек сферических ядер

- J.Vernotte *et al*, Nucl.Phys.**A655**(1999)415



E1 excitations ^{32}S

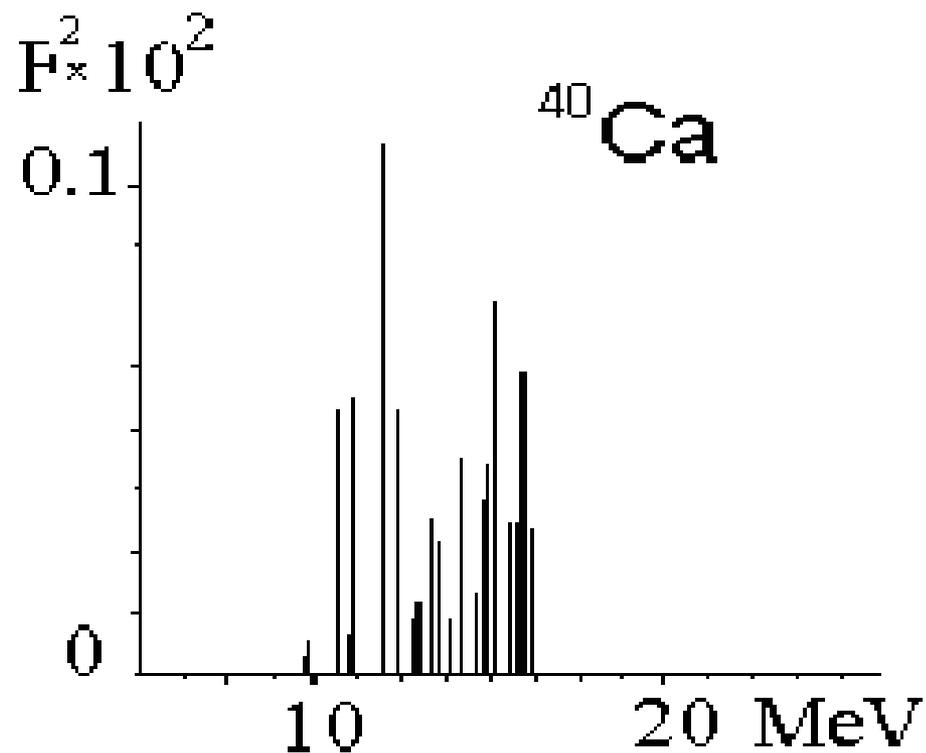
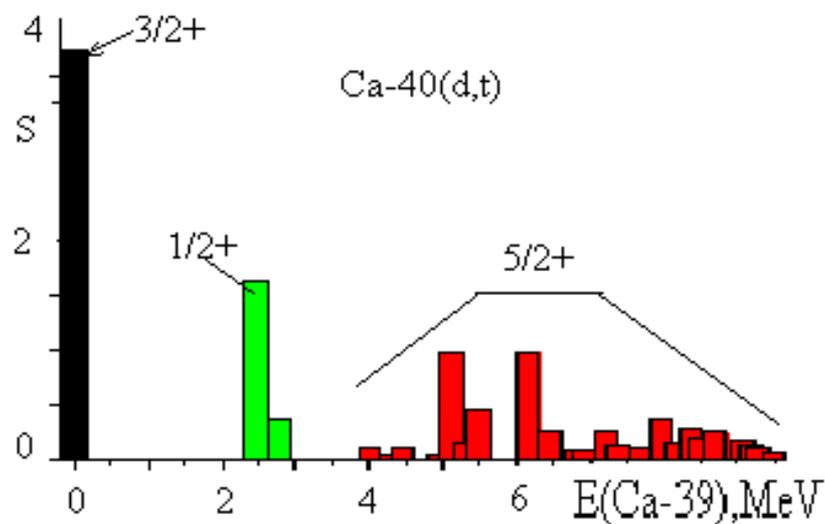


НГ+Н.Машутиков//ВМУ,сер.3 (2011)84

Exp: B.S.ISHKHANOV *et al*,2002.

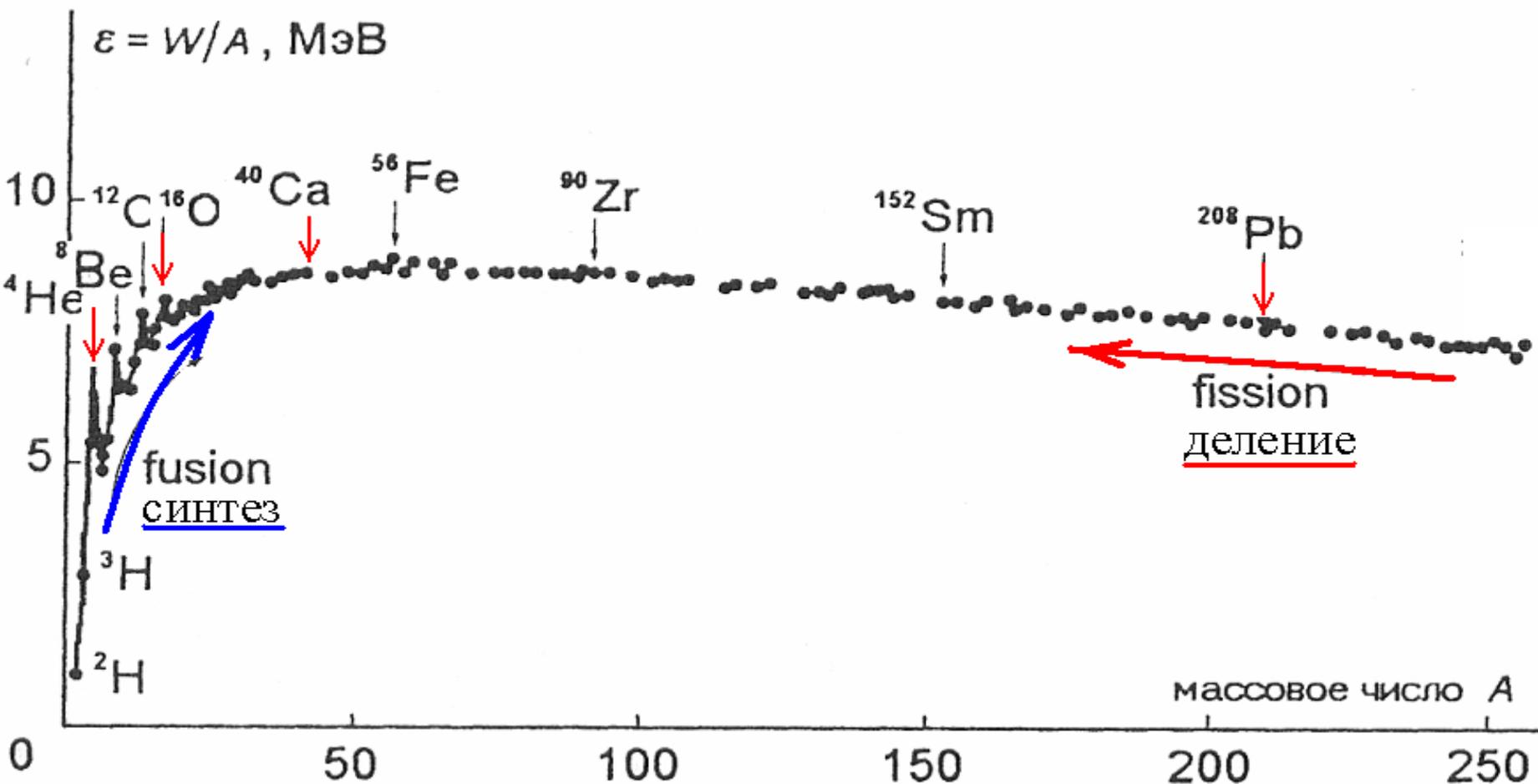
$M6$ in sd-shell nuclei : ^{40}Ca

Splitting of Deep Nuclear Shells



$$E_{bind} \approx a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + \dots; a_2 \cong \sigma$$

v.Weizsäcker C.F. //Zs.f.Phys. (1935)96,431



Оценка коэффициентов поверхностного натяжения

1. Жесткость ядер = C (Rigidity)

$$\hat{H}_{\text{coll.vib.}} = \frac{1}{2D} \sum_{\lambda,m} |\hat{b}_{\lambda,m}|^2 + \frac{C}{2} \sum_{\lambda,m} |\hat{a}_{\lambda,m}|^2$$

($\lambda = 2$)

$$C = \frac{5\hbar\omega}{2\beta^2} = \frac{5E(2^+)}{2\beta^2}$$

Estimation of σ

$$\hat{H}_{\text{coll.vib.}} = \frac{1}{2D} \sum_{\lambda,m} |\hat{b}_{\lambda,m}|^2 + \frac{C}{2} \sum_{\lambda,m} |\hat{a}_{\lambda,m}|^2; (\lambda = 2).$$

$$C = \frac{5E(2^+)}{2\beta^2}$$

$$\beta^2 = \langle J = 2 | \sum_m |\hat{a}_m|^2 | J = 2 \rangle$$

$$\beta = ???$$

$$W(E2, 2^+ \Rightarrow 0^+)_{\text{coll.vib}} = W_{sp} \cdot \frac{5Z^2}{4\pi} \beta^2.$$

• Raman S., Nestor Jr. C.W., et al.// *At.Data & Nucl.Data Tables*. 2001.78, 1

• Pritychenko B., et al.// *At.Data & Nucl.Data Tables*. 2016.107,1

Оценка коэффициентов σ

$$C = \left\{ 4R_0^2 \sigma - \frac{3}{10\pi} \frac{e^2 Z^2}{R_0} \right\}$$

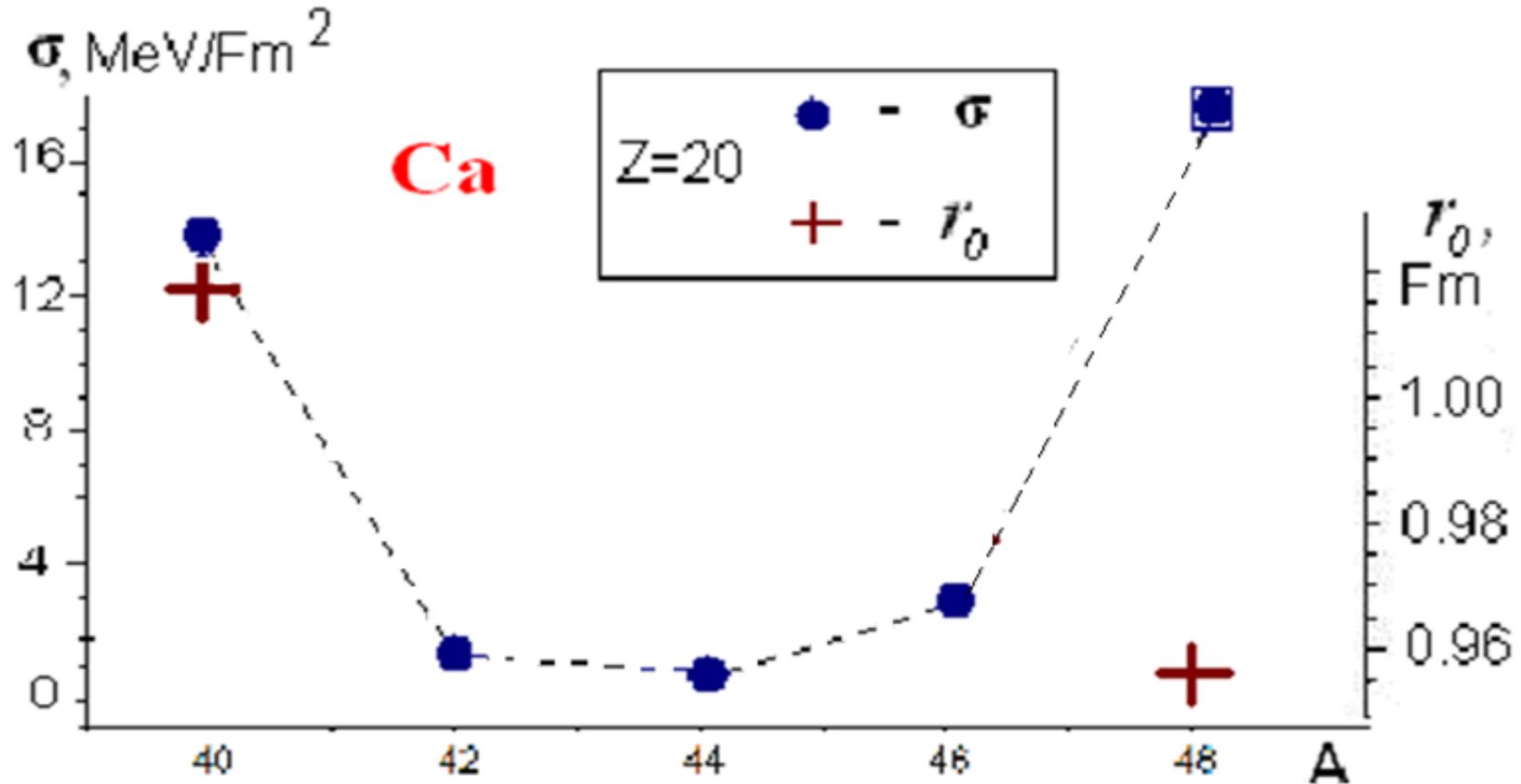
Bohr A.//Dan.Mat.Fys.Medd.**22**#14 (1952);

$$\sigma = \frac{C + \frac{3Z^2 (e^2 / \hbar c) \hbar c}{10\pi R}}{4R^2}$$

Phys. Part. Nucl.,2019, **50**, #5, P.532;БМУ,2020,№5,58

Изотопы Ca

$$(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^n$$



$$r_0 = R_{\text{charge}} \cdot A^{-1/3}$$

$$p = \frac{2\sigma}{R}; \quad p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

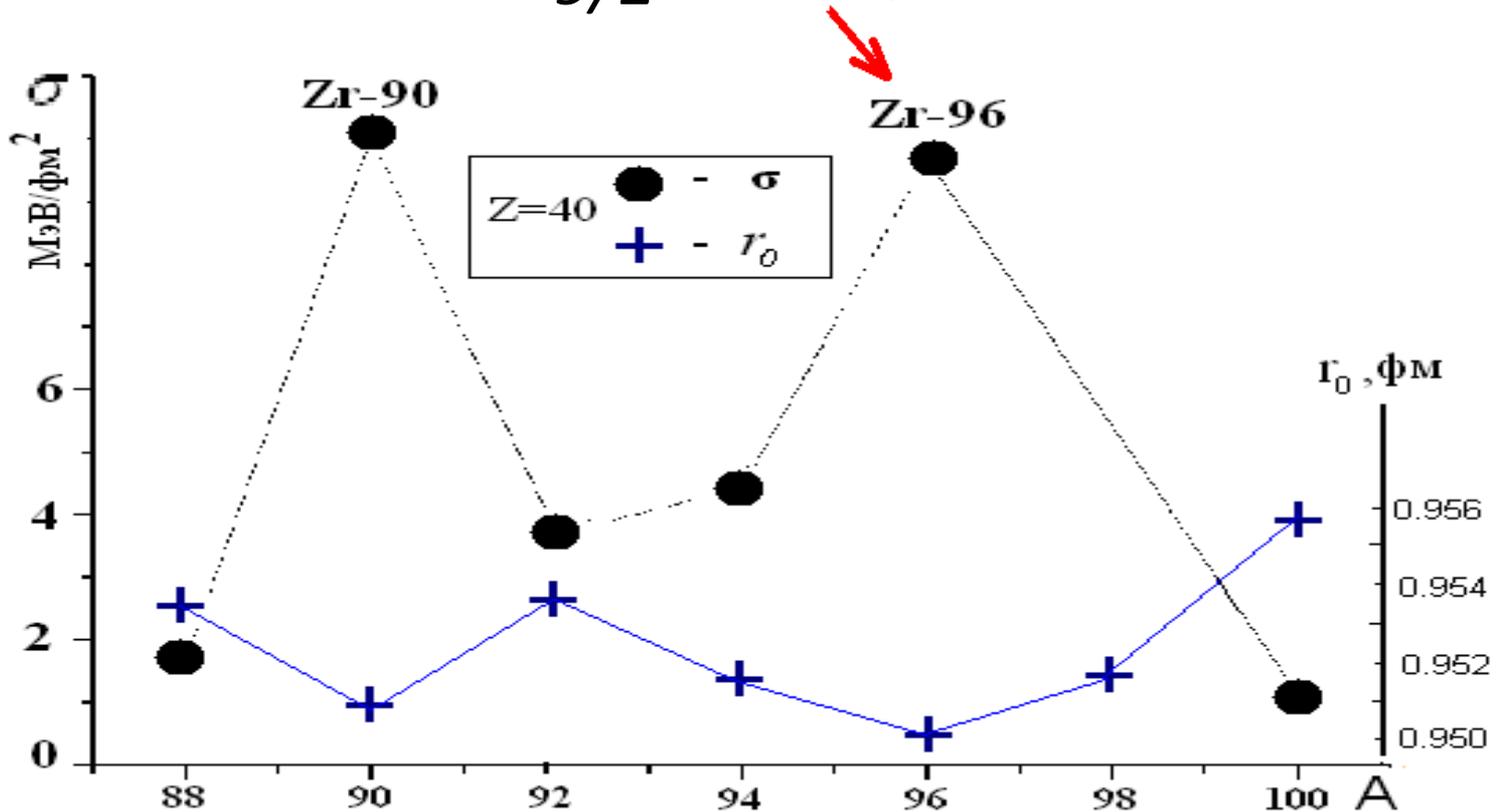
Neutron skin?

(e, e) и (p, p)

Ядро	R_n	R_p	ΔR_{np}
^{16}O	2,74	2,73	0,01
^{28}Si	3,15	3,14	0,01
^{40}Ca	3,48	3,49	-0,01
^{48}Ca	3,64	3,48	0,16
^{208}Pb	5,56	5,50	0,06

σ в изотопах Zr

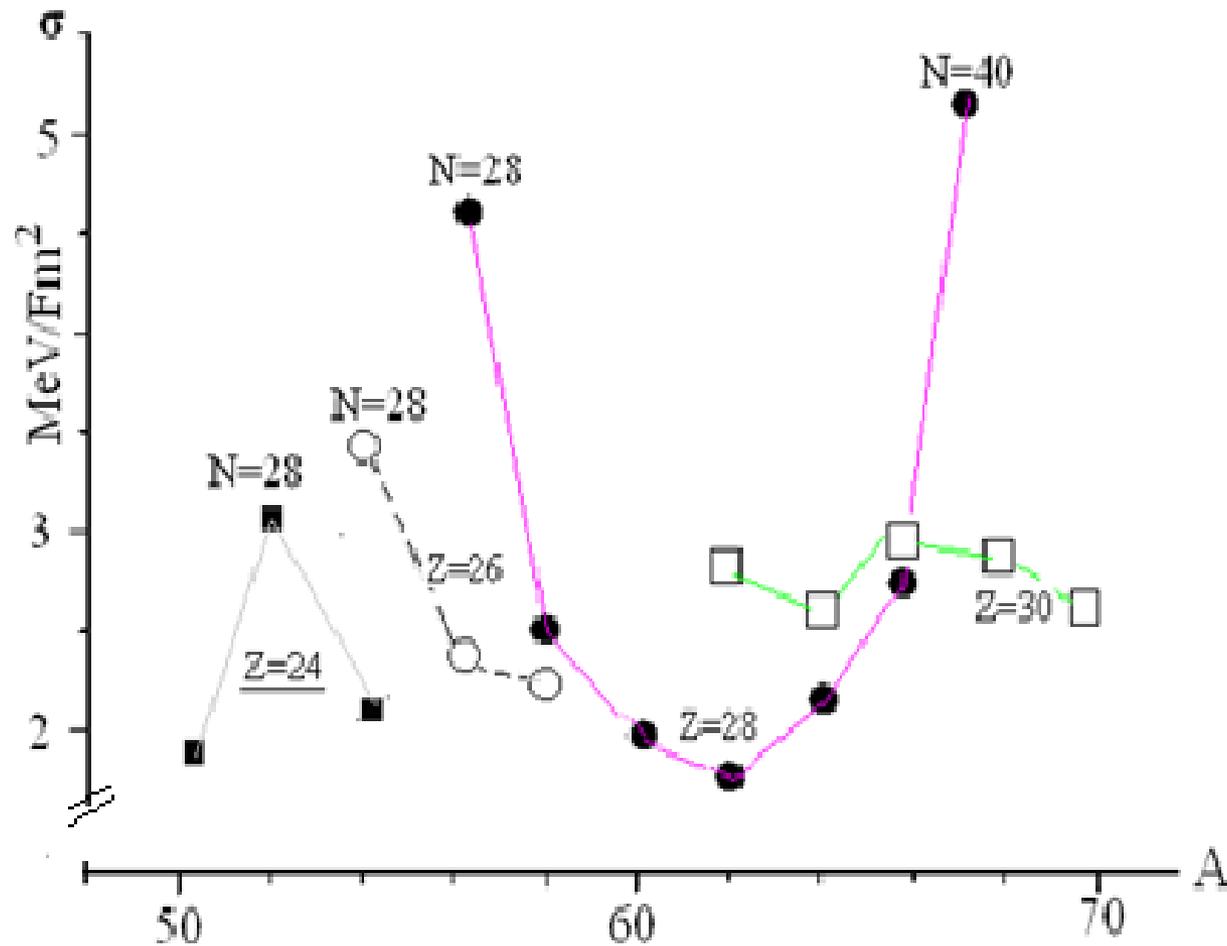
$$(1g_{9/2})^{10}(2d_{5/2})^6$$



$$r_0 = R_{\text{charge}} \cdot A^{-1/3}$$

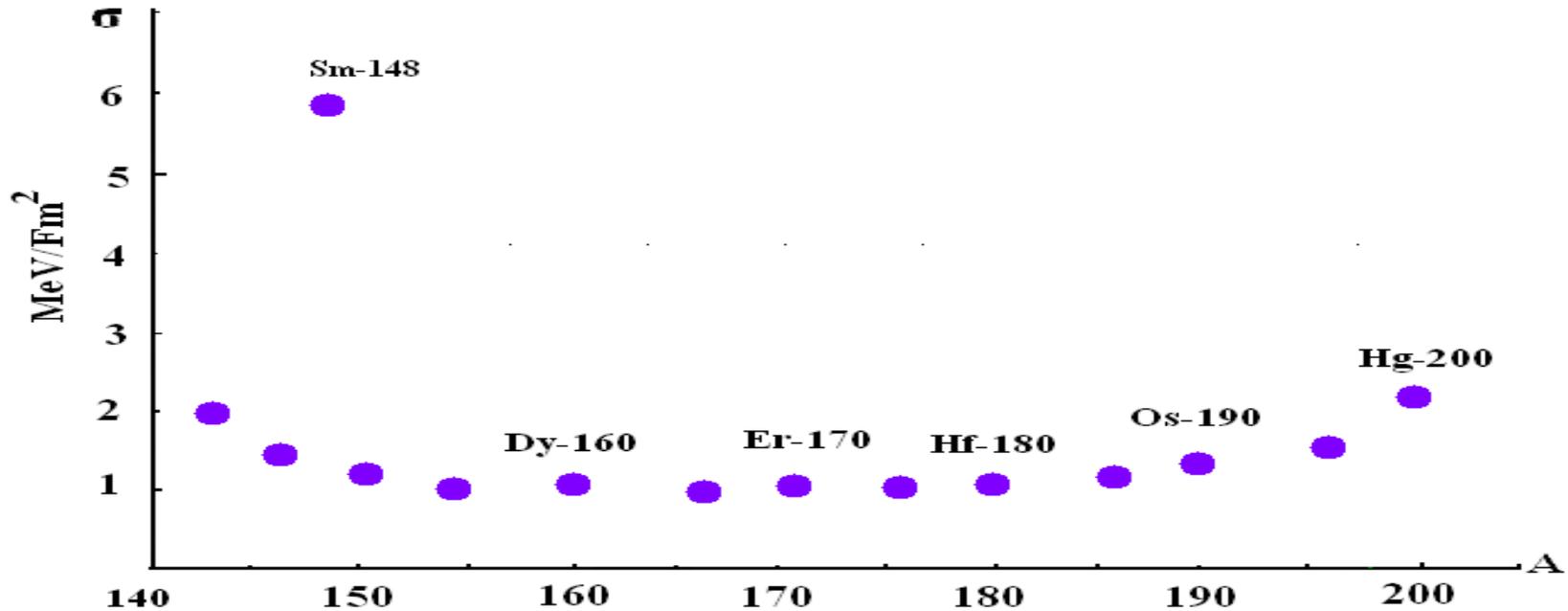
$$p = \frac{2\sigma}{R}; \quad p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

σ в изотопах Cr, Fe, Ni, Zn

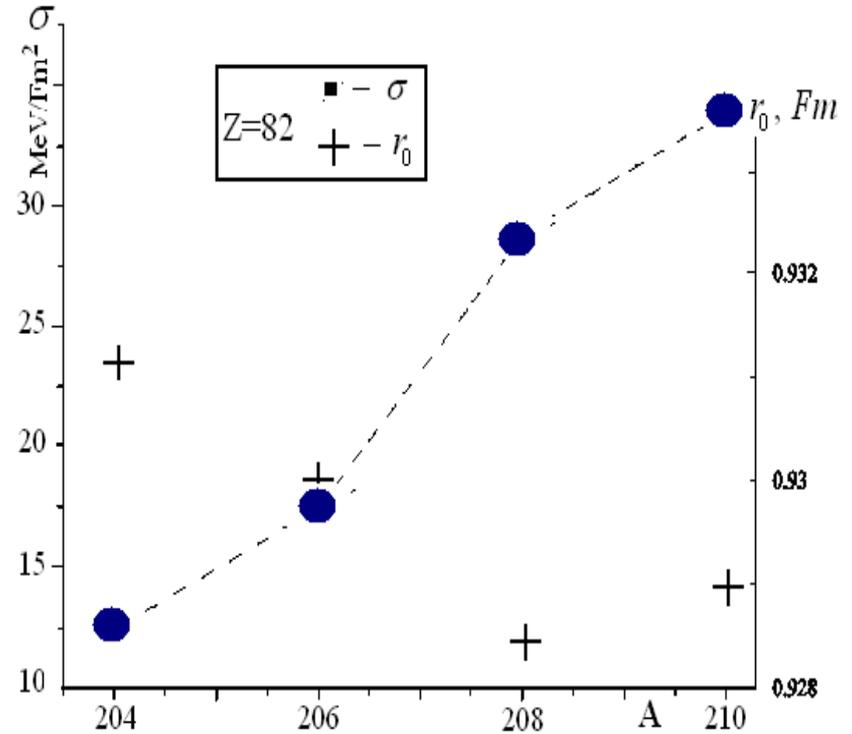
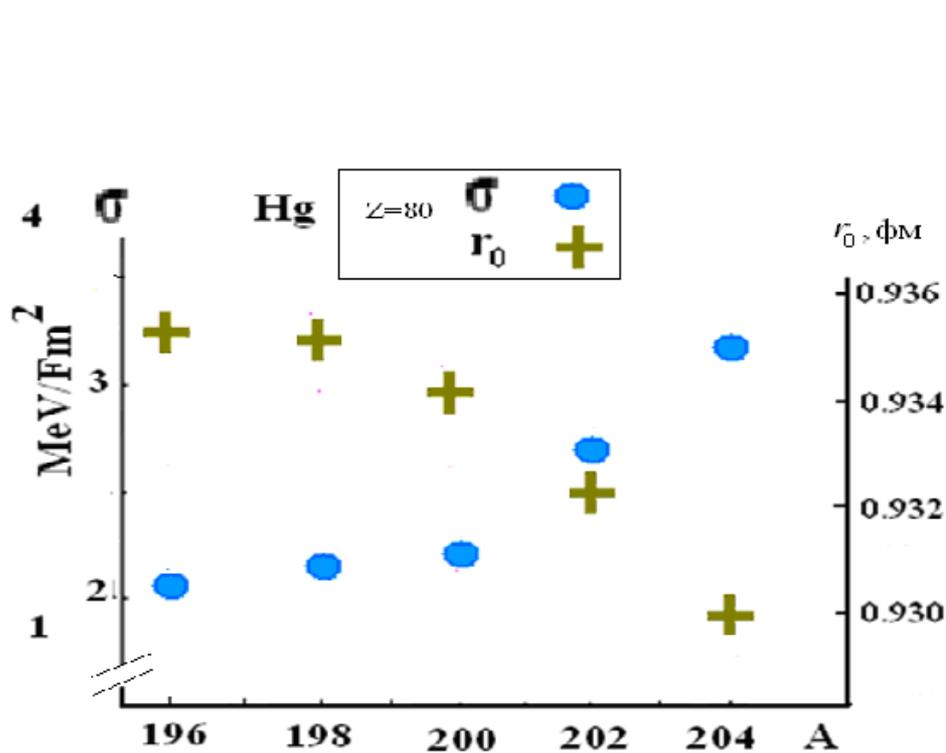


For all nuclei with A from 152 up to 196

$$\sigma < 1.8 \text{ MeV} / \text{Fm}^2$$

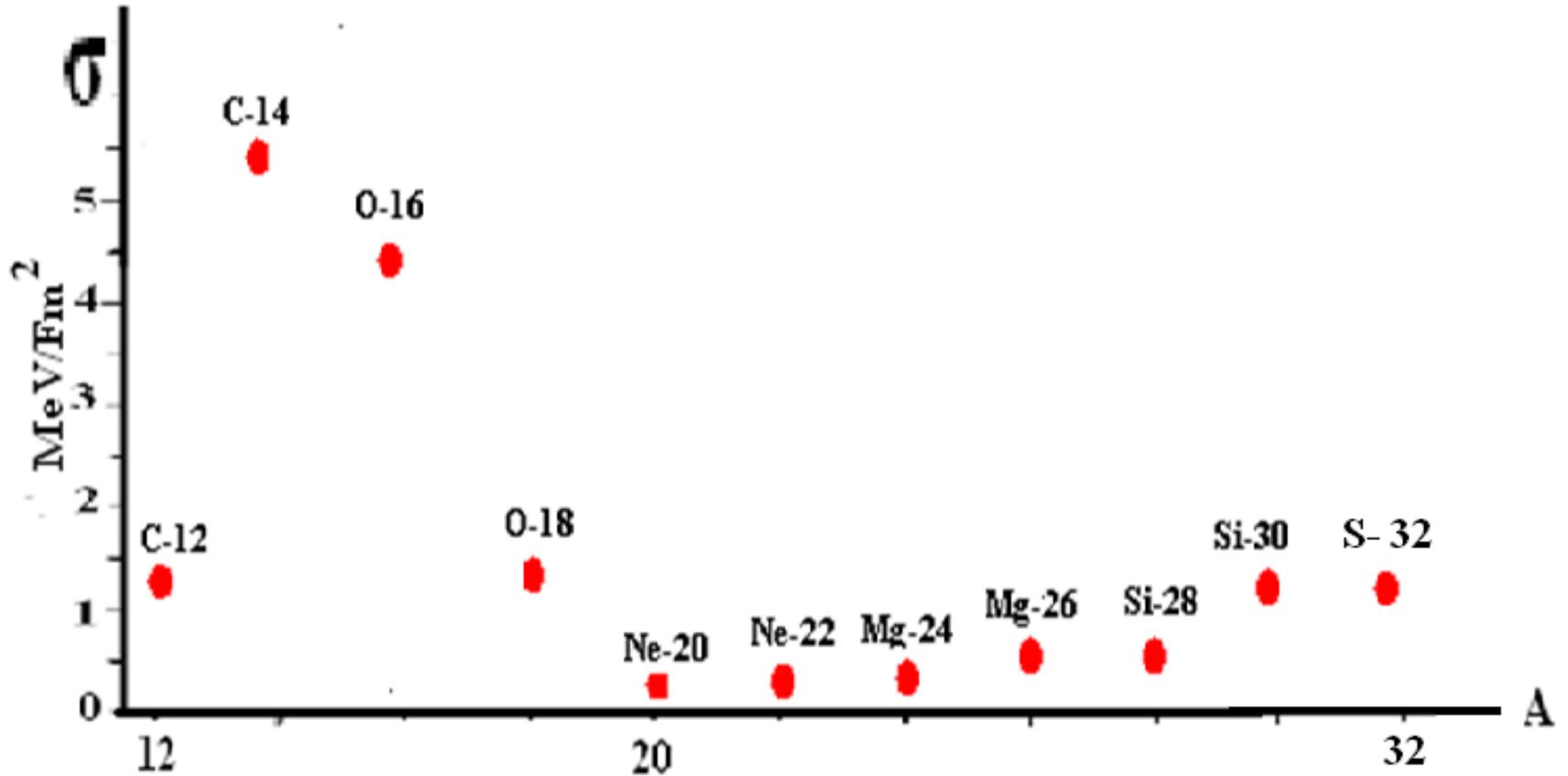


σ в изотопах Hg, Pb



Особенно резкое возрастание σ при добавлении пары протонов к четно-четному ядру имеет место для ядер ^{204}Hg - ^{210}Pb – более чем в 5 раз!

Поверхностное натяжение в легких ядрах



- Если при добавлении к ядру пары протонов создается замкнутая по протонам подоболочка, коэффициент σ испытывает, **как правило**, заметный рост: $\sigma(^{54}\text{Fe}) < \sigma(^{56}\text{Ni})$. Если в результате добавления пары протонов создается «дважды магическое» ядро, рост поверхностного натяжения особенно значителен. К таким выводам приводит сравнение коэффициентов поверхностного натяжения в ядрах ^{38}Ar - ^{40}Ca , ^{88}Sr - ^{90}Zr . **Особенно резкое возрастание σ при добавлении пары протонов к четно-четному ядру имеет место для ядер ^{204}Hg - ^{206}Pb – более чем в 5 раз!**

Добавление пары нейтронов к замкнутой по нейтронам подоболочке приводит, как правило, к уменьшению коэффициента σ . Примерами таких случаев являются пары $^{16}\text{O}_8$ - $^{18}\text{O}_{10}$, $^{38}\text{Ar}_{20}$ - $^{40}\text{Ar}_{22}$, $^{40}\text{Ca}_{20}$ - $^{42}\text{Ca}_{22}$, $^{90}\text{Zr}_{50}$ - $^{92}\text{Zr}_{52}$, $^{140}\text{Ce}_{82}$ - $^{142}\text{Ce}_{84}$.

Добавление пары протонов к ядру с «магическим» числом протонов также приводит к уменьшению поверхностного натяжения. (^{18}O - ^{20}Ne , ^{48}Ca - ^{50}Ti , ^{90}Zr - ^{92}Mo , ^{96}Zr - ^{98}Mo .)

Но

$$\sigma(^{70}\text{Ge}_{38}) > \sigma(^{72}\text{Ge}_{40}) \quad (N=40)$$

и

$$\sigma(^{16}\text{O}) < \sigma(^{14}\text{C}) \quad (?!)$$