МОДЕЛЬНО-НЕЗАВИСИМАЯ ОЦЕНКА ЭНЕРГИЙ ГЛУБОКОДЫРОЧНЫХ ЯДЕРНЫХ СОСТОЯНИЙ

И.А.Митропольский

Семинар ОФВЭ

26 сентября 2017

Аннотация

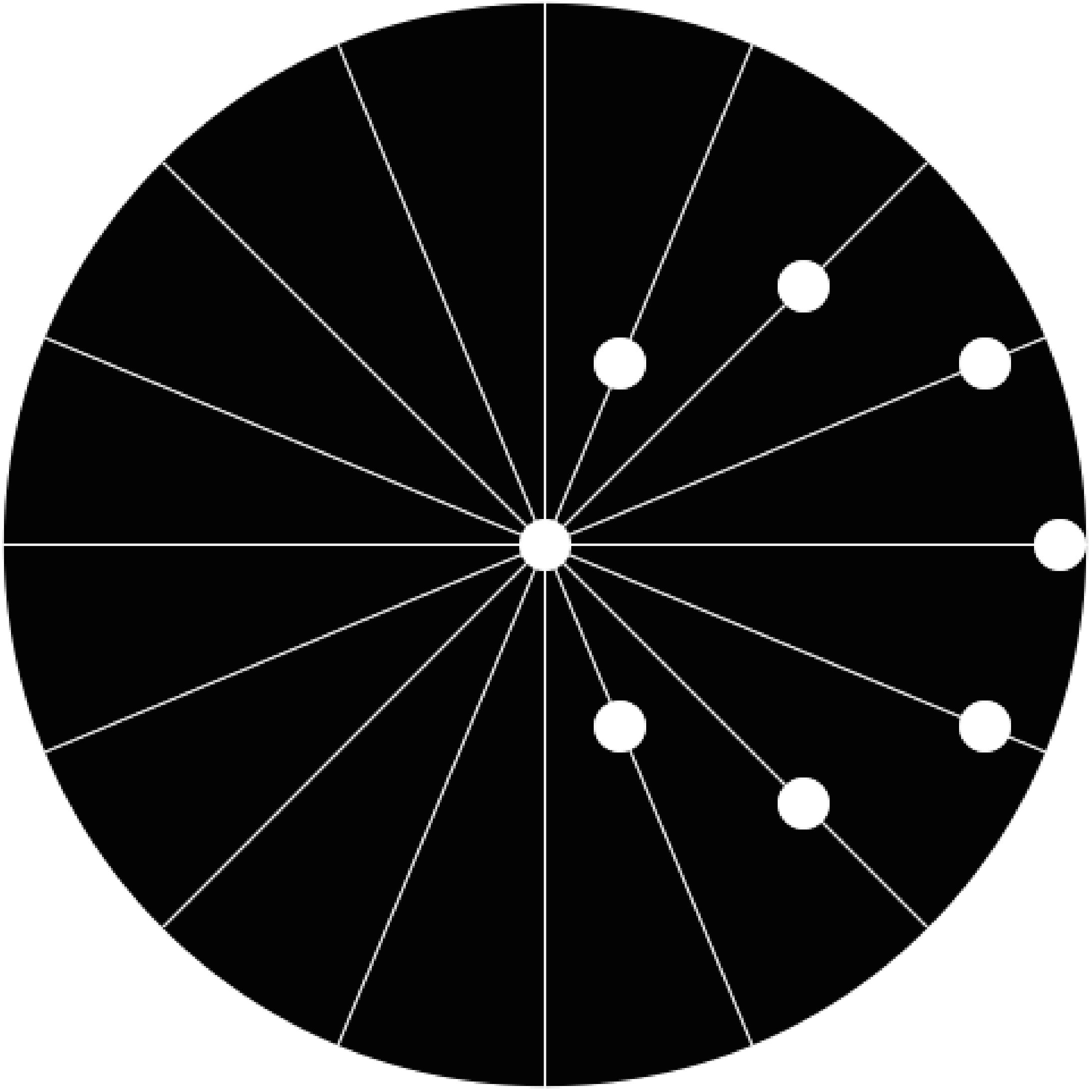
Предложен оригинальный метод вычисления энергий заполненных одночастичных состояний атомных ядер с A≤100, опирающийся на их энергии связи.

Метод не использует представлений о среднем поле ядра. Результаты согласуются с экспериментальными значениями энергий связи глубоких дырочных состояний, определенных в реакциях квазиупругого выбивания.

Мотивация

- Комментарий к семинару А.В.Добровольского.
- Ощущение недосказанности и незавершенности цикла работ Ю.В.Доценко и К° о структуре глубокодырочных состояний.
- Воспоминания о периоде бурного развития обратных методов.
- Информация о неортодоксальных подходах.
- Просто желание поговорить «за Науку».

Вместо эпиграфа



Теорема Купманса

$$H=\sum_i T(x_i)+\frac{1}{2}\sum_{i,j}V(x_i,x_j)=\sum_i\left(T(x_i)+U(x_i)\right)+\sum_{i,j}V'(x_i,x_j)$$

Энергия связи: $$E(A)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{A}n_i(t_i+e_i)$$

Теорема Купманса: $$e_m=E(A)-E_m(A-1)$$

^{4}He: $$e_{1s}^{(p)}=E\left({}^4\mathrm{He}\right)-E\left({}^3\mathrm{H}\right)=-19.814\ \mathrm{MeV}$$
$$e_{1s}^{(n)}=E\left({}^4\mathrm{He}\right)-E\left({}^3\mathrm{He}\right)=-20.578\ \mathrm{MeV}$$

Ядро	E (A)	Протони				Нейтрони			
		Ядро	i	$E_i(A-1)$	e_i	Ядро	i	$E_i(A-1)$	e_i
1) ^{4}He	28.296	^{3}H	$1/2^+$	8.482	19.814	^{3}He	$1/2^+$	7.718	20.578
5) ^{8}He	31.398					^{7}He		28.824	2.574
^{12}C	92.163	^{11}B	$3/2^-$	76.206	15.957	^{11}C	$3/2^-$	73.441	18.722
^{14}C	105.286	^{13}B	$3/2^-$	84.455	20.831	^{13}C	$1/2^-$	97.109	8.177
^{14}O	98.733	^{13}N	$1/2^-$	94.106	4.627	^{13}O		75.564	23.169
2) ^{16}O	127.621	^{15}N	$1/2^-$	115.493	12.128	^{15}O	$1/2^-$	111.957	15.664
6) ^{22}O	161.830	^{21}N		137.070	24.76	^{21}O		155.120	6.71
^{28}Si	236.538	^{27}Al	$5/2^+$	224.952	11.586	^{27}Si	$5/2^+$	219.360	17.178
^{30}Si	255.621	^{29}Al	$5/2^+$	242.113	13.508	^{29}Si	$1/2^+$	245.012	10.609
^{30}S	243.687	^{29}P	$1/2^+$	239.285	4.402	^{29}S	$5/2^+$	224.710	18.977
^{32}S	271.783	^{31}P	$1/2^+$	262.918	8.865	^{31}S	$1/2^+$	256.740	15.043
^{34}S	291.842	^{33}P	$1/2^+$	280.958	10.884	^{33}S	$3/2^+$	280.425	11.417
^{36}S	308.719	^{35}P		295.700	13.019	^{35}S	$3/2^+$	298.828	9.891
^{40}Ca	342.056	^{39}K	$3/2^+$	333.726	8.330	^{39}Ca	$3/2^+$	326.420	15.636
^{42}Ca	361.896	^{41}K	$3/2^+$	351.623	10.273	^{41}Ca	$7/2^-$	350.419	11.477
^{44}Ca	380.961	^{43}K	$3/2^+$	368.794	12.167	^{43}Ca	$7/2^-$	369.829	11.132
^{46}Ca	398.776	^{45}K	$3/2^+$	384.960	13.816	^{45}Ca	$7/2^-$	388.376	10.400
^{48}Ca	415.997	^{47}K	$3/2^+$	400.190	15.807	^{47}Ca	$7/2^-$	406.052	9.945
^{56}Ni	483.995	^{55}Co	$7/2^-$	476.828	7.167	^{55}Ni		467.355	16.640

Теорема вириала

Если $U(c \cdot x) = c^k U(x)$ - однородная функция, то

$$t_i = \frac{k}{k+2} e_i \ , \qquad t_i > 0, \quad e_i < 0 \ \Rightarrow \ -2 < k < 0$$

Энергия связи: $$E(A) = \frac{k+1}{k+2} \sum_i n_i e_i$$

$$e_i < 0, \quad E < 0 \ \Rightarrow \ -1 < k < 0$$

Нуклид	^{4}He	^{16}O	^{32}S	^{40}Ca	^{56}Ni
k	-0.461	-0.505	-0.468	-0.456	-0.426

$$k = -0.461 \qquad \frac{k+1}{k+2} = 0.350$$

Построение спектров

^{3}H: $e_n = E_B(^3H) - E_B(^2H) = -6.257$ MeV

$S = 2\cdot e_n + e_p = -24.218$ MeV

$e_p = -11.704$ MeV

^{5}He: $e_{p1} = -21.830$ MeV

$e_{n1} = +0.886$ MeV !

$S = 2e_{p1} + 2e_{n2} + e_{n1} = -78.263$ MeV

$e_{n2} = -16.859$ MeV

^{6}He: $e_{p1} = -23.477$ MeV

$e_{n1} = -1.857$ MeV

$S = 2e_{p1} + 2e_{n2} + 2e_{n1} = -83.565$ MeV

$e_{n2} = -16.476$ MeV

^{12}C: $e_{p1} = -15.957$ MeV

$e_{n1} = -18.722$ MeV

$S = 4e_{p1} + 2e_{p2} + 4e_{n1} + 2e_{n2} = -263.323$ MeV

$x_1 = 13.812$ MeV

^{3}He: $e_p = E_B(^3He) - E_B(^2H) = -5.494$ MeV

$S = 2\cdot e_p + e_n = -22.038$ MeV

$e_n = -11.050$ MeV

^{5}Li: $e_{n1} = +1.966$ MeV !

$e_{p1} = -21.520$ MeV

$S = 2e_{p1} + 2e_{p2} + e_{n1} = -75.180$ MeV

$e_{p2} = -17.053$ MeV

^{6}Be: $e_{p1} = -0.594$ MeV

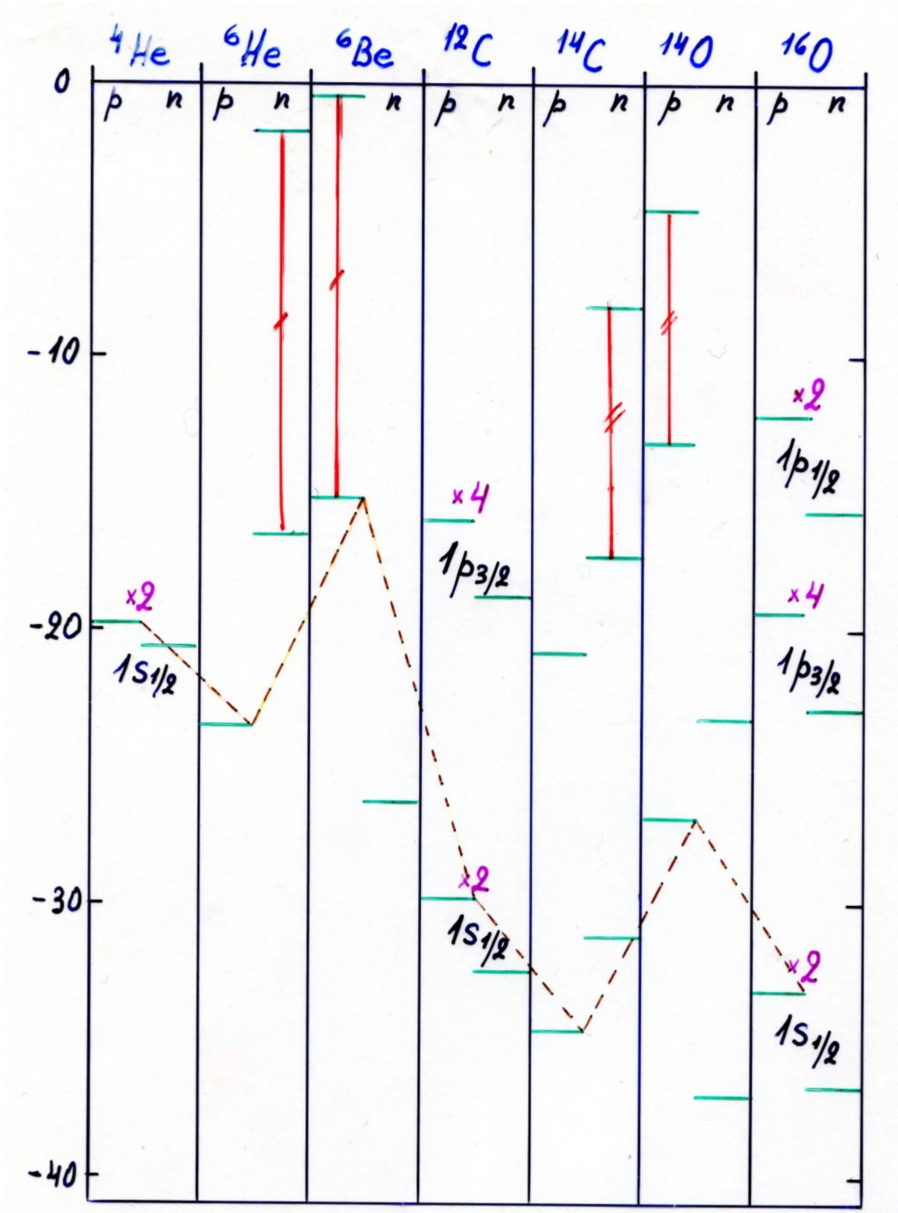
$e_{n1} = -26.330$ MeV

$S = 2e_{p1} + 2e_{p2} + 2e_{n1} = -78.263$ MeV

$e_{n2} = -15.199$ MeV

$$\left| e_2 - e_1 \right| = x_1$$

Оболочечные интервалы



Интервалы	Нуклид	x, MeV
$1s_{1/2} – 1p_{3/2}$	^{12}C	13.812
$1p_{3/2} – 1p_{1/2}$	^{16}O	7.254
$1p_{1/2} – 1d_{5/2}$	^{28}Si	8.177
$1d_{5/2} – 2s_{1/2}$	^{32}S	4.317
$2s_{1/2} – 1d_{3/2}$	^{40}Ca	3.249
$1d_{3/2} – 1f_{7/2}$	^{56}Ni	5.457

$$x_i^{(n)} = x_i^{(p)}$$

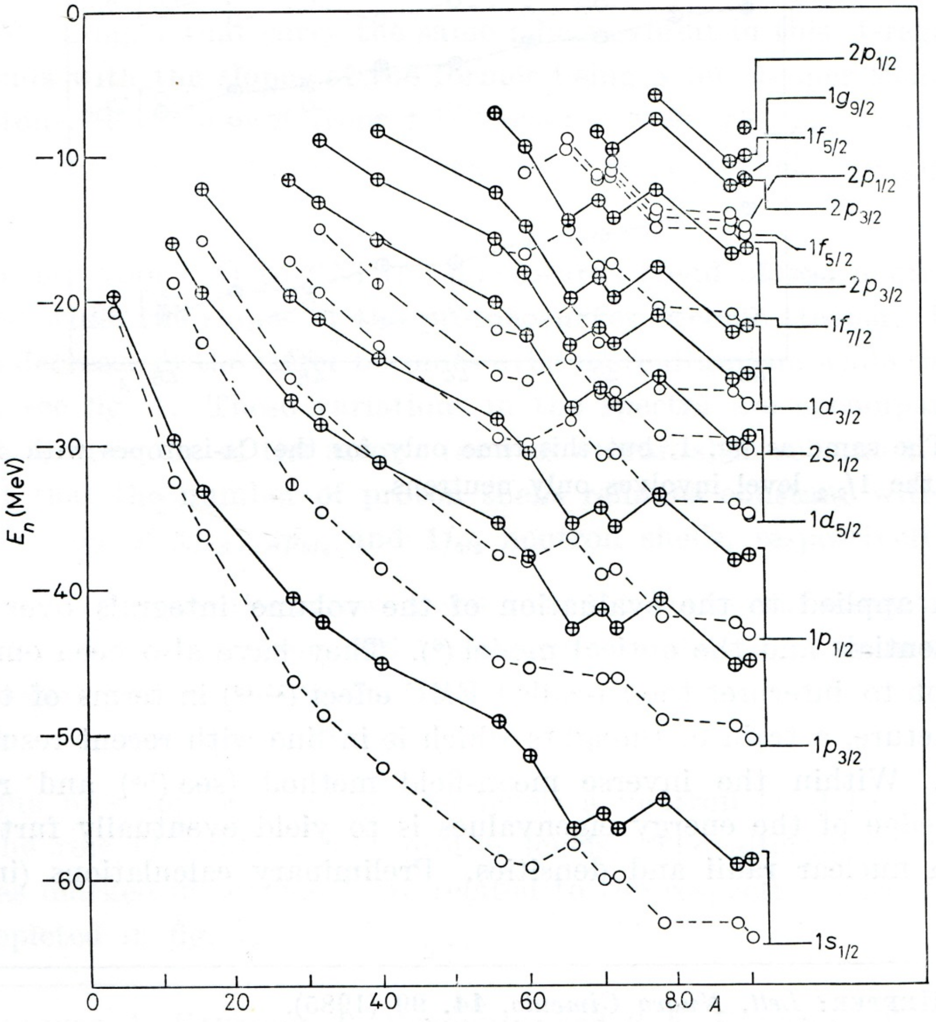
Маршрут построения спектров

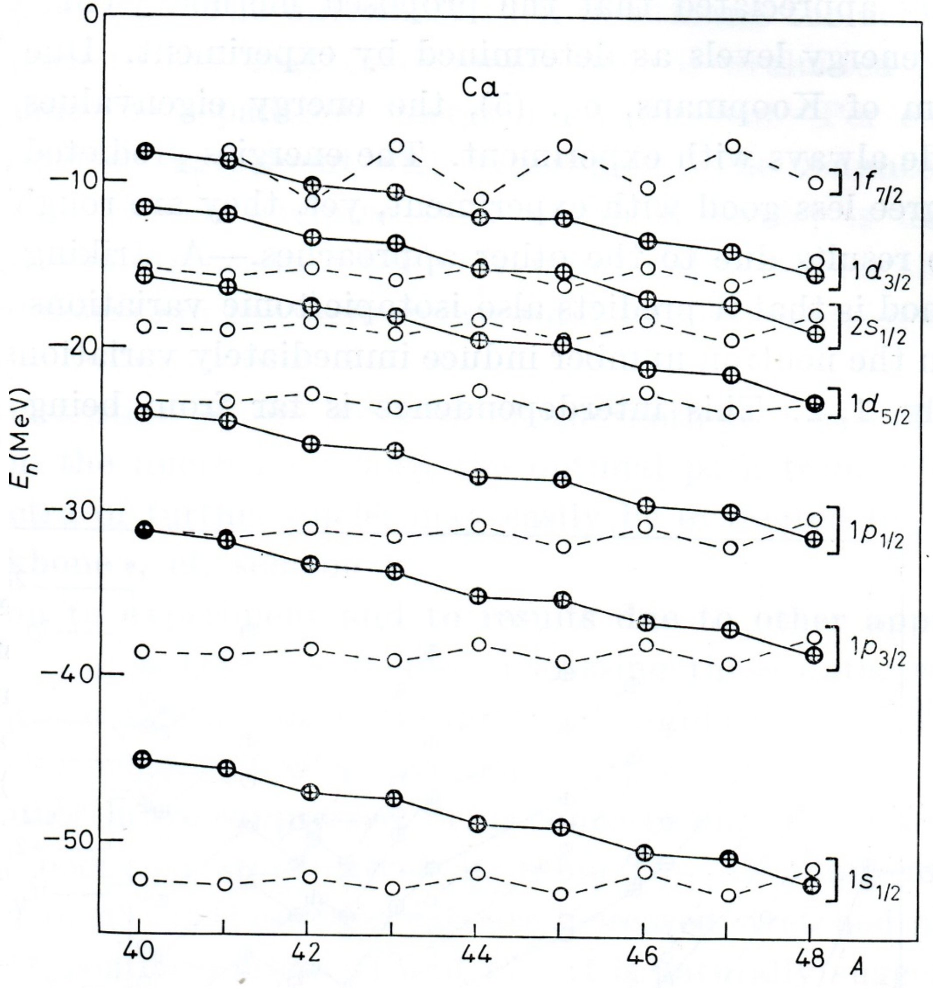
n \ p	1s1/2	1p3/2	1p1/2	1d5/2	2s1/2	1d3/2	1f7/2	2p3/2	1f5/2	2p1/2
1s1/2	4He	8C								
1p3/2	8He	12C	14O							
1p1/2		14C	16O							
1d5/2			22O	28Si	30S					
2s1/2				30Si	32S					
1d3/2					36S	40Ca				
1f7/2						48Ca	56Ni			
2p3/2							60Ni			
1f5/2							66Ni	70Ge		
2p1/2								72Ge	78Sr	
1g9/2									88Sr	90Zr
2d5/2									94Sr	96Zr

Результаты

^{36}S	^{40}Ca	^{42}Ca	^{44}Ca	^{46}Ca	^{48}Ca	^{56}Ni	^{58}Ni	^{60}Ni
46.579	51.804 45.139	47.082	48.976	50.625	62.006 52.616	49.433	61.404 50.437	51.799
48.571	40.4 49 ± 12 52.445 47.7 59.110	52.183	51.940	51.942	55 ± 9 51.554 59.384	58.906	57 ± 8 59.323 69.990	59.286
32.767	31.172 31.327	33.270	35.164	36.813	40.081 38.804	35.621	38.051 36.625	37.987
34.759	31.1 33 ± 6 38.633 38.4 38.478	38.377	38.128	38.130	36 ± 7 37.742 37.459	45.094	37.6 ± 8 45.511 46.637	45.474
25.513	21.955 24.073	26.016	27.910	29.559	30.285 31.550	28.367	27.618 29.371	30.733
27.505	25.5 31.379 32.8 29.261	31.123	30.874	30.876	30.488 27.663	37.840	38.257 36.204	38.220
17.336	14.801 15.896	17.839	19.733	21.382	22.682 23.373	20.190	19.520 21.134	22.556
19.328	16.9 14.9 ± 2.5 23.202 24.2 21.3 22.107	22.946	22.697	22.699	22.311 20.060	29.663	20.2 ± 9.8 30.080 28.106	30.043
13.019	10.629 11.579	13.522	15.416	17.065	18.249 19.056	15.873	14.798 16.877	18.239
15.011	10.86 12.5 18.885 19.8 18.06 17.935	18.629	18.380	18.382	17.994 15.627	25.346	12.6 ± 6.3 25.763 23.384	25.726
	8.330	10.273	12.167	13.816	15.807	12.624	12.197 13.628	14.950
9.891	8.3 15.636 15.6	15.380	15.131	15.133	15.8 14.744 12.52 13.185	22.097	11.72 22.514 20.783	22.477
						7.167	8.171	9.533
		11.477	11.132	10.400	9.945 9.94	16.640	8.2 17.057 16.757	17.020

Результаты





Nuovo Cim., 1986, v.95A, p.63.

Эмпирические формулы

$$e_{n,l,j}^{(n)}\left[\mathrm{MeV}\right]=-94.902+70.838\cdot lA^{-1/3}+17.951\cdot n+90.000\cdot nA^{-1/3}-$$

$$-18.038\cdot j(j+1)A^{-2/3}-2.572\cdot n^{2}+43.285\cdot l(l+1)/A$$

$$e_{n,l,j}^{(p)}\left[\mathrm{MeV}\right]=-95.020+82.382\cdot lA^{-1/3}+24.020\cdot n+76.284\cdot nA^{-1/3}-$$

$$-17.540\cdot j(j+1)A^{-2/3}-2.95472\cdot n^{2}$$

Эффективная масса

$$m^{*}=2m/\left[3+5E(A)/\varepsilon_{F}A\right]$$

$$\varepsilon_{F}:\qquad T=\sum_{i}n_{i}t_{i}=-\frac{3}{5}A\varepsilon_{F}$$

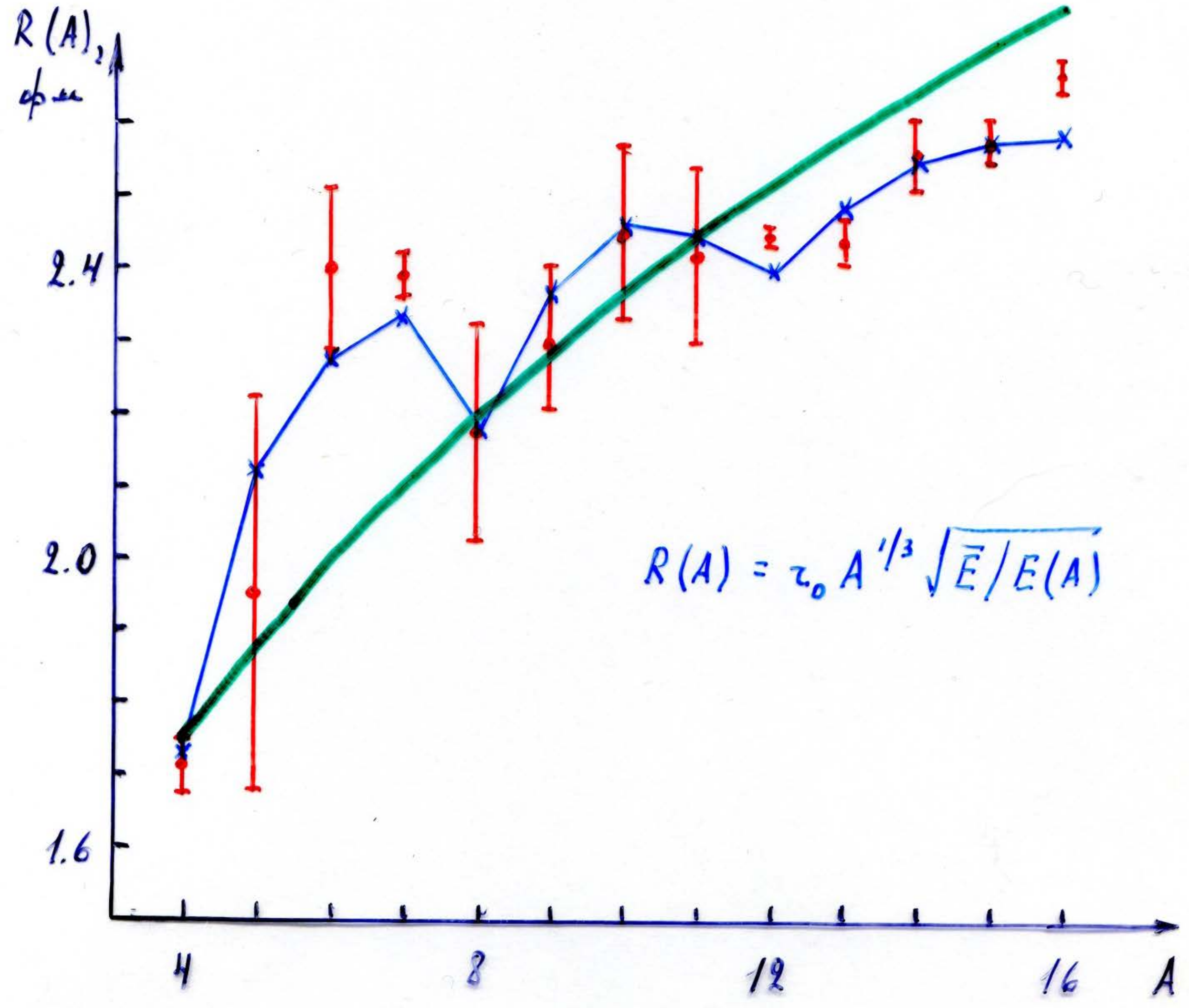
$$T=\frac{k}{k+1}E(A)\quad\Rightarrow\quad\varepsilon_{F}=-\frac{5}{3}\frac{k}{k+1}E(A)/A$$

$$m^{*}=-\frac{2}{3}k\cdot m\approx 0.31\cdot m$$

Сравнение результатов

		1s1/2	1p3/2	1p1/2	1d3/2	2s1/2	1d3/2
16O	p	33.2	19.4	12.1	present		
		45.8	21.3	13.1	empirical		
		38.0	18.3	13.0	self-consistent		
		40.5	18.4	12.1	experimental		
16O	n	36.7	22.9	15.7			
		45.9	20.9	12.4			
		42.2	22.2	16.8			
		~44	21.8	15.7			
40Ca	p	45.1	31.3	24.1	15.9	11.6	8.3
		52.8	33.2	28.7	16.6	15.3	9.1
		47.1	31.3	28.2	15.7	9.6	10.1
		49	32.1	24.5	14.9	10.9	8.3
40Ca	n	52.4	38.6	31.4	23.2	18.9	15.6
		54.4	36.1	31.4	18.8	17.8	11.1
		55.3	39.2	36.1	23.3	17.1	17.5
		-	39.1	31.5	21.9	18.1	15.6

Ядерные радиусы



Спасибо за внимание!

Mitropolsky_IA@pnpi.nrcki.ru