

# NEW MAGIC NUCLEI SHELL STRUCTURE: SYSTEMATICS OF FEATURES

## СТРУКТУРА ОБОЛОЧЕК НОВЫХ МАГИЧЕСКИХ ЯДЕР: СИСТЕМАТИКА СВОЙСТВ

**И.Н.Бобошин, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский**  
**В.В.Варламов**

*Московский государственный университет*

*имени М.В.Ломоносова*

*Научно-исследовательский институт ядерной физики*  
*имени Д.В.Скобельцына*



$Z$	Протоны	Нейтроны	$N$
2		$1s_{1/2}$	2
6		$1p_{3/2}$	6
8		$1p_{1/2}$	8
14		$1d_{5/2}$	14
16		$2s_{1/2}$	16
20		$1d_{3/2}$	20
28		$1f_{7/2}$	28
32		$2p_{3/2}$	32
38		$1f_{5/2}$	38
40		$2p_{1/2}$	40
50		$1g_{9/2}$	50
58	$1g_{7/2}$	$2d_{5/2}$	56
64	$2d_{5/2}$	$1g_{7/2}$	64
76	$1h_{11/2}$	$3s_{1/2}$	66
80	$2d_{3/2}$	$2d_{3/2}$	70
82	$3s_{1/2}$	$1h_{11/2}$	82
92	$1h_{9/2}$	$1h_{9/2}$	92
100	$2f_{7/2}$	$2f_{7/2}$	100
114	$1i_{13/2}$	$1i_{13/2}$	114
120	$2f_{5/2}$	$3p_{3/2}$	118
124	$3p_{3/2}$	$2f_{5/2}$	124
126	$3p_{1/2}$	$3p_{1/2}$	126
142	$1j_{15/2}$	$2g_{9/2}$	136
152	$2g_{9/2}$	$1i_{11/2}$	148
164	$1i_{11/2}$	$1j_{15/2}$	164
170	$3d_{5/2}$	$3d_{5/2}$	170
178	$2g_{7/2}$	$4s_{1/2}$	172
180	$4s_{1/2}$	$2g_{7/2}$	180
184	$3d_{3/2}$	$3d_{3/2}$	184



~ 200 стабильных ядер -

классическая

одночастичная модель оболочек:

состояние  $(n, l, j, m_j)$  нуклона в ядре

с потенциалом в виде

бесконечной сферически-симметричной

ямы гармонического осциллятора

с учетом сильного спин-орбитального

взаимодействия

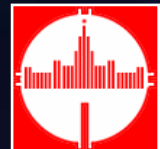


классические 7 магических чисел

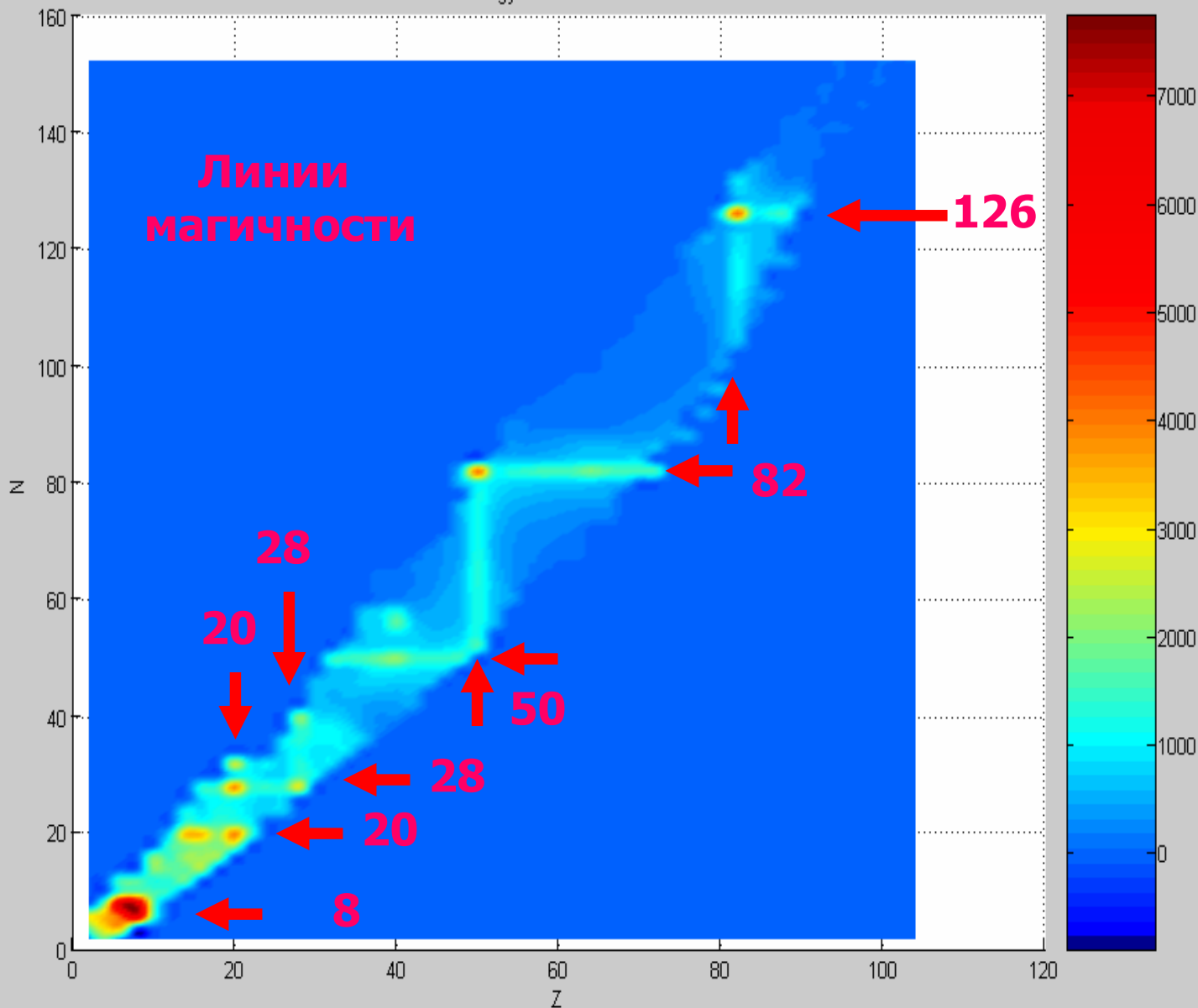


# Некоторые характерные признаки магических ядер (по сравнению с соседними):

- более сферическая форма (меньшая деформация - заметно меньший параметр квадрупольной деформации  $\beta_2$ );
- заметно большая энергия  $E(2_1^+)$  первого  $J^\pi = 2^+$  уровня;
- заметно меньшее отношение энергий первых  $J^\pi = 4^+$  и  $J^\pi = 2^+$   $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ ;
- заметные особенности в энергиях отделения нуклонов, например, в зависимостях  $B(n)$ ,  $B(2n)$  от  $N$ ,  $Z$  и/или  $A$ ;
- и некоторые др.



Energy value for 2+ level

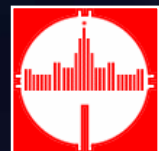


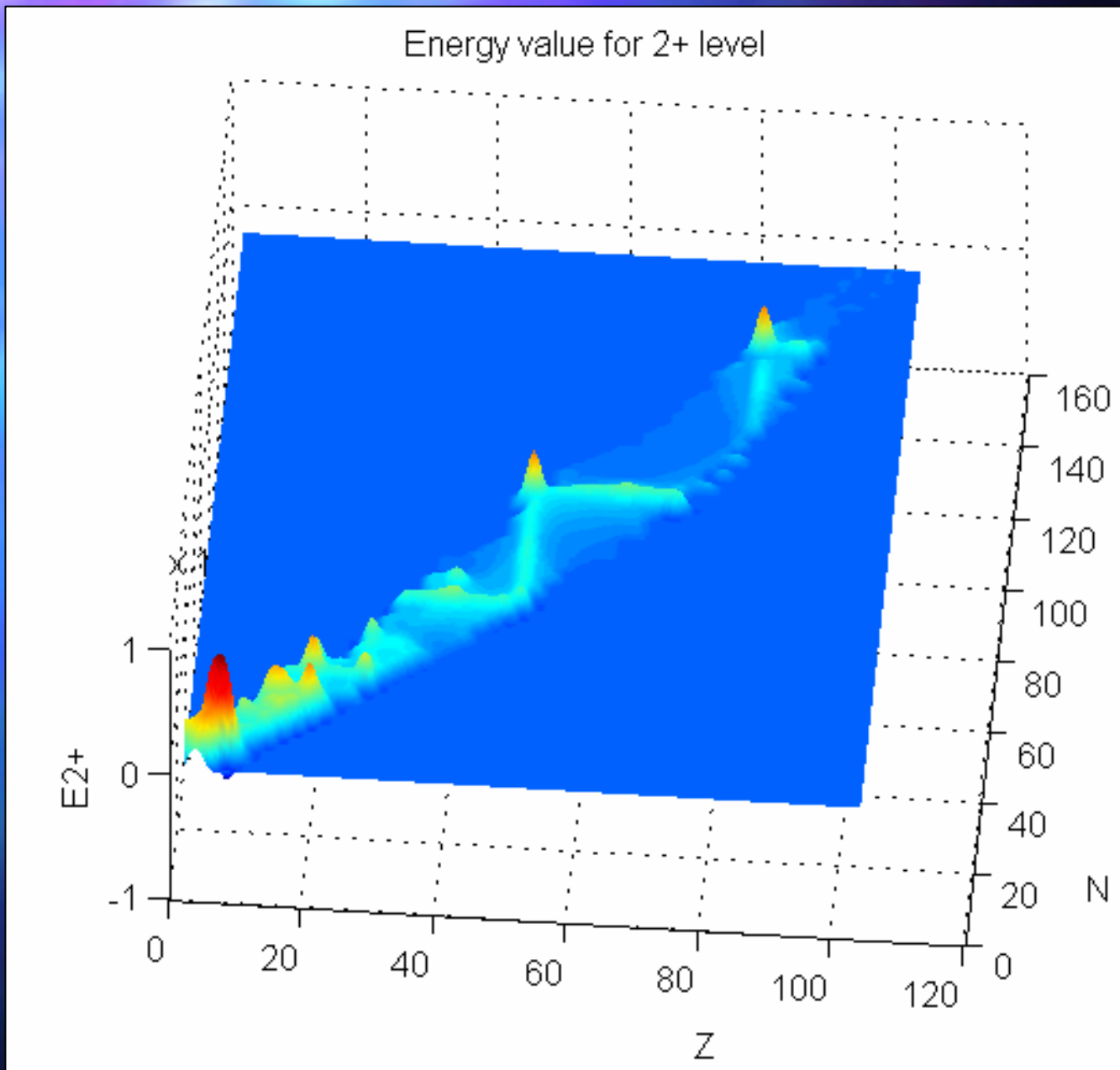
04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  
НИИ Ядерной Физики МГУ

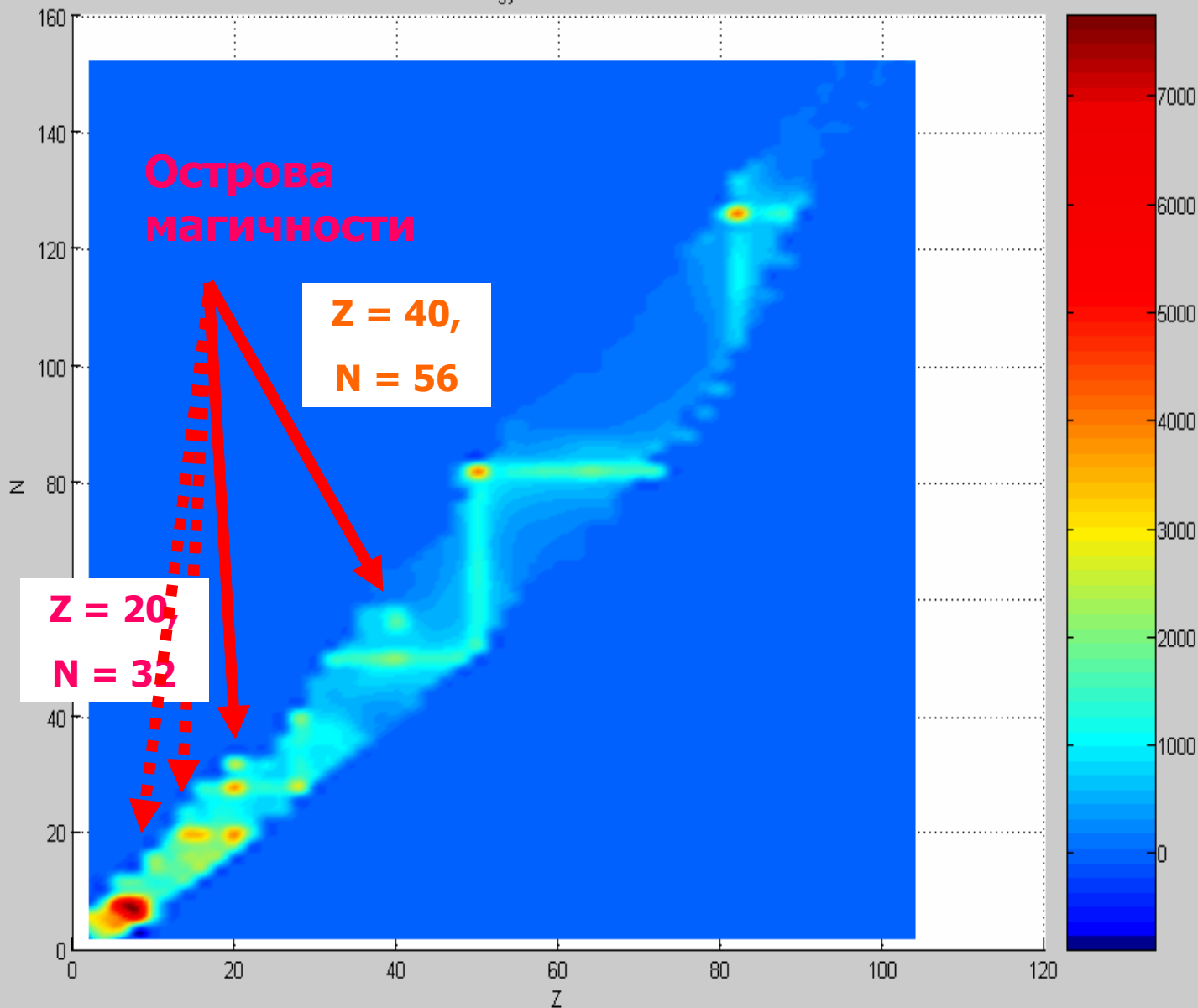
Линии  
магичности

4





Energy value for 2+ level

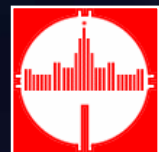


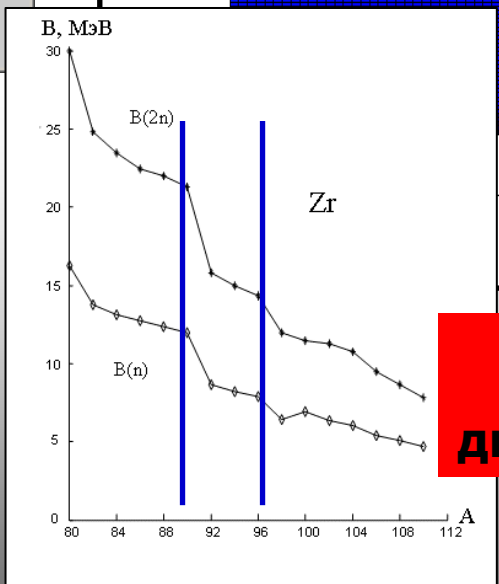
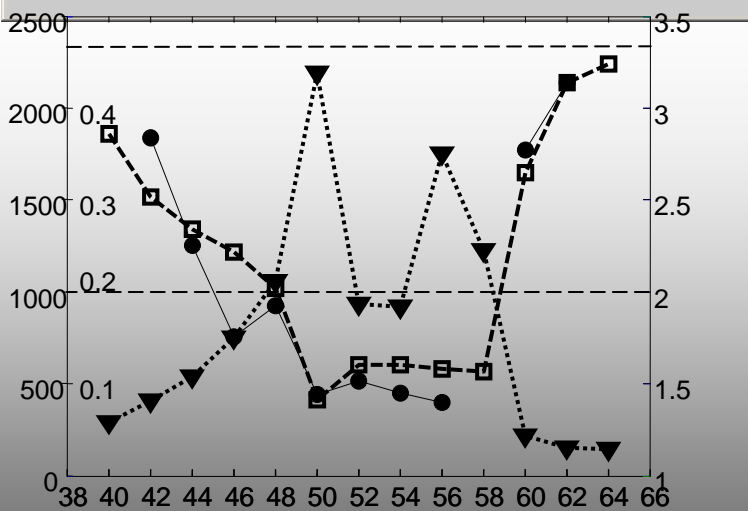
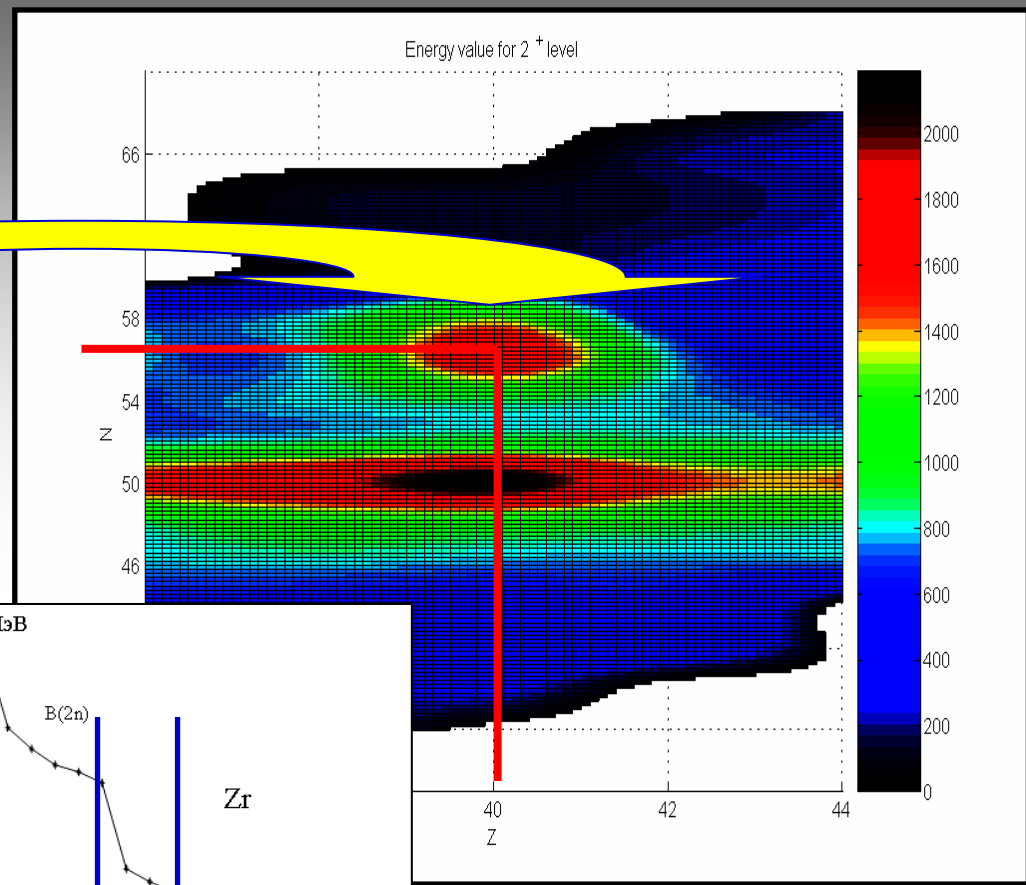
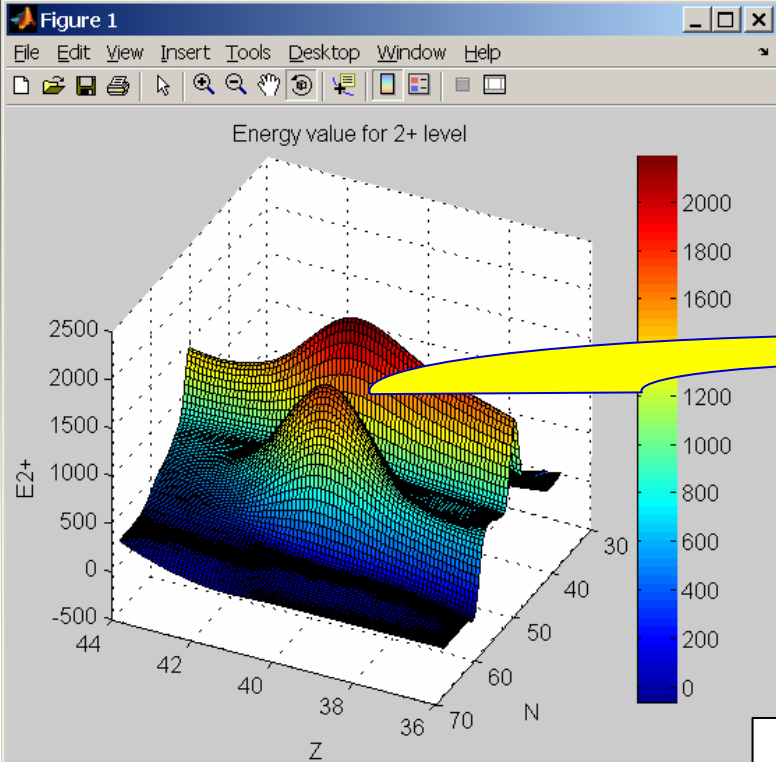
04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  
НИИ Ядерной Физики МГУ

Острова  
магичности

6





**$^{96}\text{Zr}$  - новое  
дважды магическое ядро**



04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  $Z = 40, N = 56$  7  
НИИ Ядерной Физики МГУ

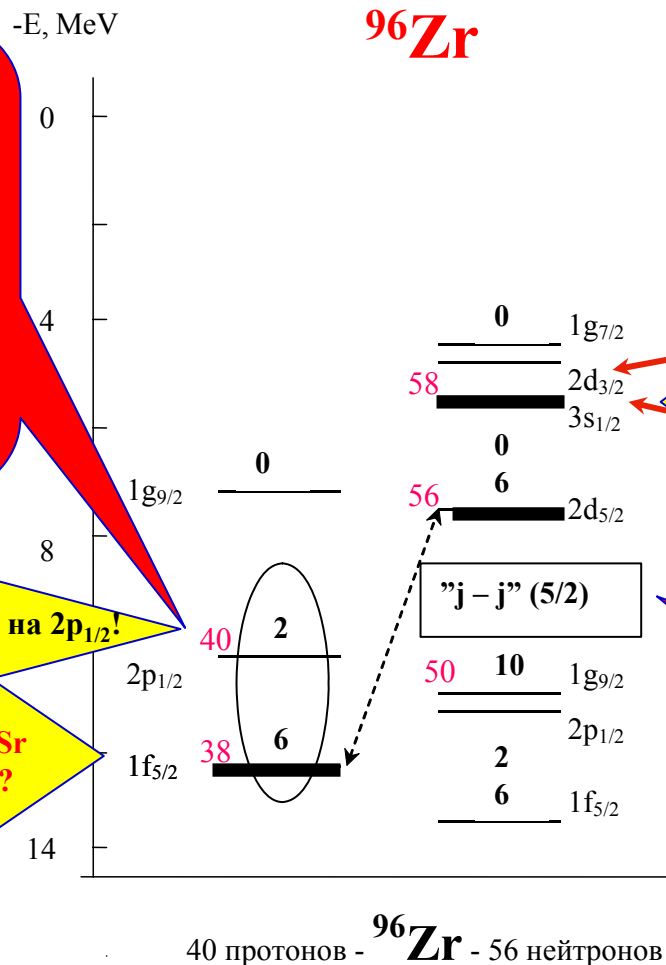




Пик новой магичности достигается, когда обе подоболочки замкнуты и дополнительно над одной из них ( $\pi 1f_{5/2}$ ) располагается и замкнутая подоболочка с  $j = 1/2$ , в данном случае -  $\pi 2p_{1/2}$  - очень сферическая волновая функция.

Магическое  $^{96}\text{Zr}$ : 2 протона на  $2p_{1/2}$ !

«Немного» магическое  $^{94}\text{Sr}$  (нет 2 протонов на  $2p_{1/2}$ )?



Магическое  $^{96}\text{Sr}$ : 2 нейтрона на  $3s_{1/2}$ !

$J^\pi(^{101}\text{Sr}) = 3/2^+$

$J^\pi(^{99}\text{Zr}) = (1/2^+)$

$J^\pi(^{97}\text{Zr}) = 1/2^+$

$J^\pi(^{95}\text{Zr}) = 5/2^+$

Вблизи энергии Ферми располагаются две замкнутые подоболочки с одинаковым значением момента  $j$ , то есть  $\pi 1f_{5/2}$  и  $\nu 2d_{5/2}$  - « $j = j$ » (5/2) СВЯЗЬ.

$^{96}\text{Zr}$  - pairs

8

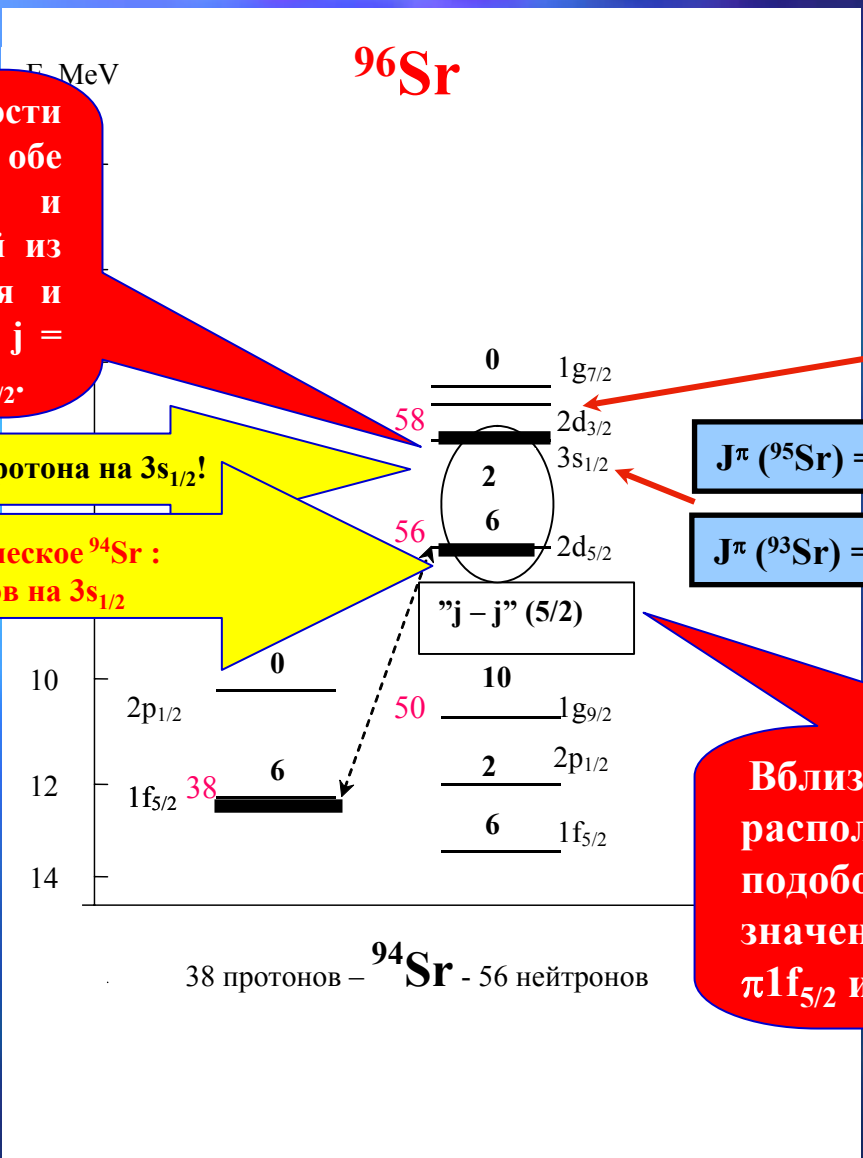




Пик магичности достигается, когда обе подболочки замкнуты и дополнительно над одной из них ( $\pi 1f_{5/2}$ ) располагается и замкнутая подболочка с  $j = 1/2$ , в данном случае -  $\pi 2p_{1/2}$ .

Магическое  $^{96}\text{Sr}$ : 2 протона на  $3s_{1/2}$ !

«Немного» магическое  $^{94}\text{Sr}$ : нет 2 нейтронов на  $3s_{1/2}$



$$J^\pi (^{99}\text{Sr}) = 3/2^+$$

$$J^\pi (^{97}\text{Sr}) = 1/2^+$$

$$J^\pi (^{95}\text{Sr}) = 1/2^+$$

$$J^\pi (^{93}\text{Sr}) = 5/2^+$$

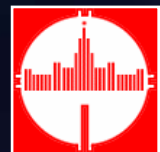
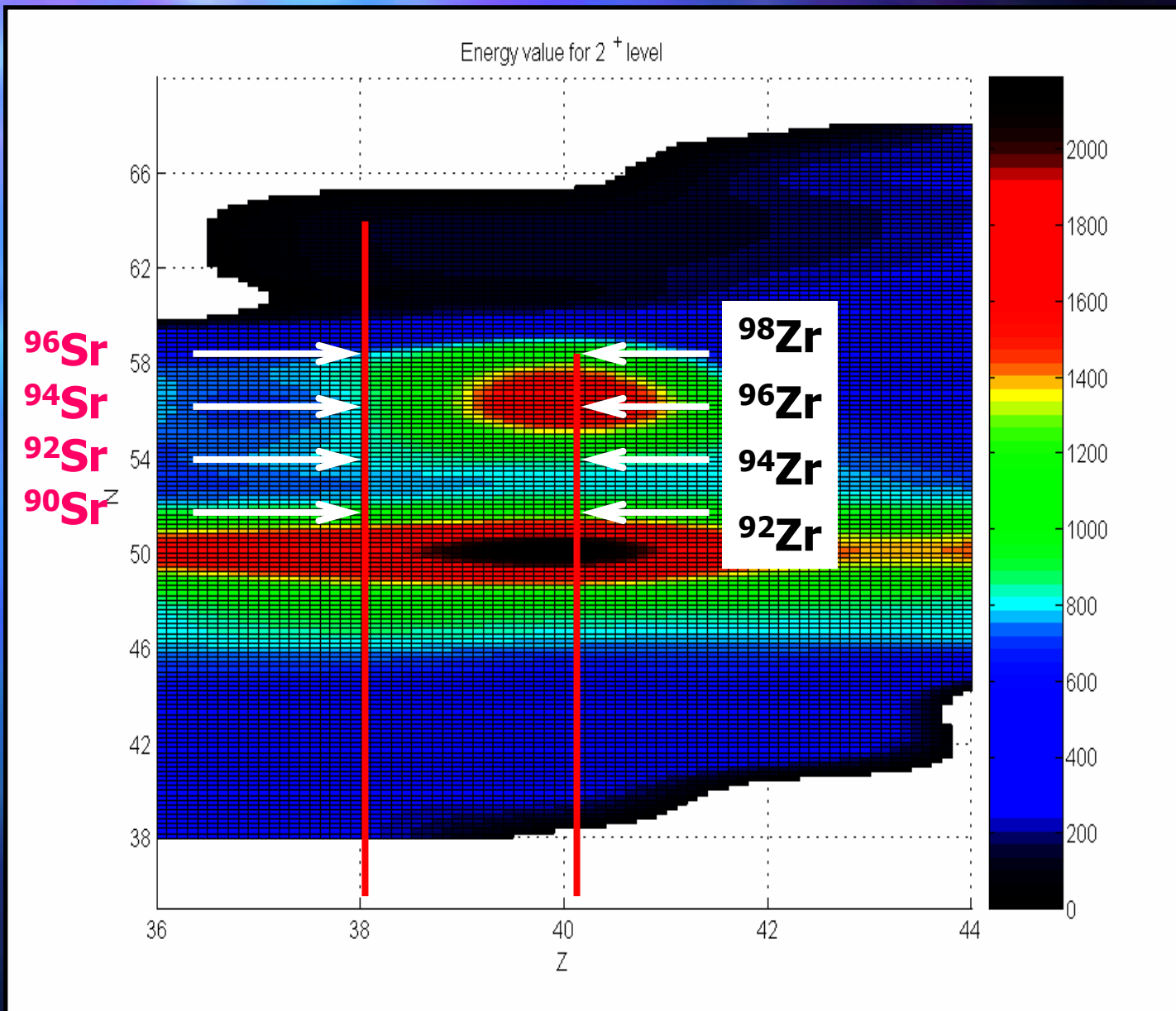
Вблизи энергии Ферми располагаются две замкнутые подболочки с одинаковым значением момента  $j$ , то есть  $\pi 1f_{5/2}$  и  $\nu 2d_{5/2}$  - « $j - j$ » (5/2) связь.

38 протонов -  $^{94}\text{Sr}$  - 56 нейтронов



04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  
НИИ Ядерной Физики МГУ



04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.

НИИ Ядерной Физики МГУ

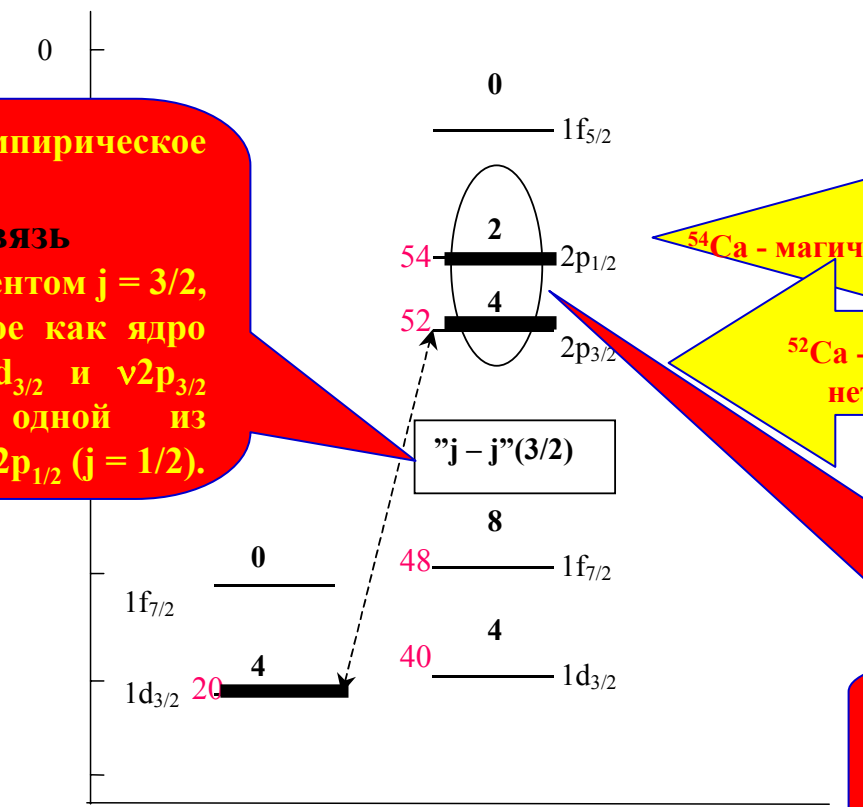
Zr - Sr

10



-E, MeV

<sup>54</sup>Ca



Если применить эмпирическое правило «j - j» (3/2) СВЯЗЬ к подболочкам с моментом j = 3/2, получится не что иное как ядро <sup>54</sup>Ca: замкнутые π1d<sub>3/2</sub> и ν2p<sub>3/2</sub> подболочки, над одной из которых - замкнутая ν2p<sub>1/2</sub> (j = 1/2).

<sup>54</sup>Ca - магическое: есть 2 нейтрона на 2p<sub>1/2</sub>

<sup>52</sup>Ca - «немного» магическое: нет 2 нейтронов на 2p<sub>1/2</sub>

Магичность пары (Z = 20, N = 34) активно обсуждается в печати с альтернативой (Z = 20, N = 32).

20 протонов - <sup>54</sup>Ca - 34 нейтрона

S.N.Liddick et.al. Development of Shell Closures at N = 32, 34.... Phys.Rev., C 70 (2004) 064303.  
 S.N.Liddick et.al. Lowest Excitations in <sup>56</sup>Ti and the Predicted N = 34 Shell Closure. Phys.Rev.Lett., 92 (2004) 072502.  
 D.E.Appelbe et.al. Detail -ray Spectroscopy of <sup>55</sup>Cr and <sup>56</sup>Cr: Confirmation of the Subshell Closure at N = 32. Phys.Rev.,C67 (2003) 034309.



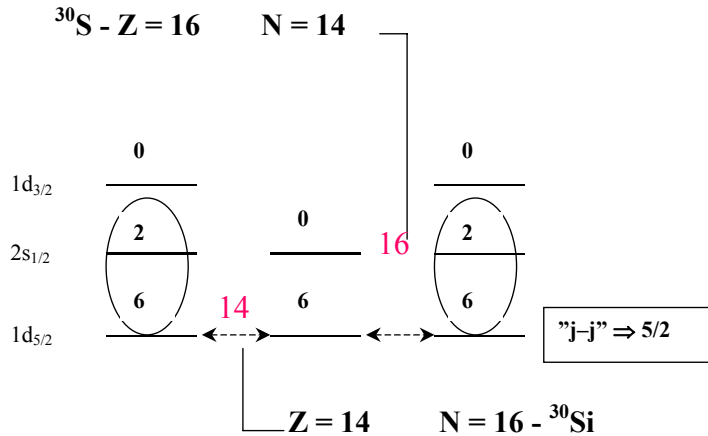
04.07.2007

«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  
 НИИ Ядерной Физики МГУ

<sup>54</sup>Ca - pairs 11



# $^{30}\text{S}-^{30}\text{Si}$



Если применить эмпирическое правило к подболочкам  $\pi 1d_{5/2}$  и  $\nu 1d_{5/2}$  «j - j» (5/2) СВЯЗЬ – и к выше расположенным  $(\pi/\nu)2s_{1/2}$ , получим магические числа  $N = 16$  для  $Z = 14$  и  $Z = 16$  для  $N = 14$ .

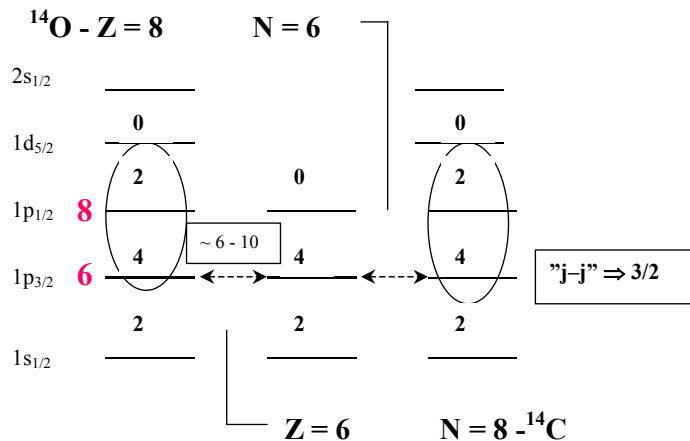
Обсуждаемые «параметры магичности» это подтверждают: хорошо видно, что соответствующие максимумы и минимумы в обоих случаях имеют место при  $Z/N = 16$ !

N = 14					Z = 14				
Nucl	Z	E(2 <sup>+</sup> ), keV	E(4 <sup>+</sup> )/E(2 <sup>+</sup> )	$\beta_2$	Nucl	N	E(2 <sup>+</sup> ), keV	E(4 <sup>+</sup> )/E(2 <sup>+</sup> )	$\beta_2$
$^{24}\text{Ne}$	10	1982		0.41	$^{26}\text{Si}$	12	1796	2.92	0.44
$^{26}\text{Mg}$	12	1809	2.39	0.48	$^{28}\text{Si}$	14	1779	2.6	0.42
$^{28}\text{Si}$	14	1780	2.6	0.41	$^{30}\text{Si}$	16	2235	2.36	0.32
$^{30}\text{S}$	16	2211		0.34	$^{32}\text{Si}$	18	1942	2.69	0.35
					<b><math>^{34}\text{Si}</math></b>	<b>20</b>	<b>3228</b>		<b>0.18</b>
					$^{36}\text{Si}$	22	1399		0.26
					$^{36}\text{Si}$	24	1084		0.25

Магическое число N = 20



# $^{14}\text{C}-^{14}\text{O}$



Аналогичное применение эмпирического правила к  $\pi 1p_{3/2}$  и  $\nu 1p_{3/2}$  - подболочкам - «j - j» (3/2) связь - и к выше расположенным  $(\pi/\nu)1p_{1/2}$  подболочкам приводит к еще одной паре - магическое число  $Z = 6$  для  $N = 8$  и магическое число  $N = 6$  для  $Z = 8$ : вновь систематика (Таблица) «параметров магичности» свидетельствует о наличии соответствующих максимумов и минимумов при  $Z/N = 6$ .

N = 8					Z = 8				
Ядро	Z	E(2 <sup>+</sup> <sub>1</sub> ), кэВ	E(4 <sup>+</sup> <sub>1</sub> )/E(2 <sup>+</sup> <sub>1</sub> )	$\beta_2$	Ядро	N	E(2 <sup>+</sup> <sub>1</sub> ), кэВ	E(4 <sup>+</sup> <sub>1</sub> )/E(2 <sup>+</sup> <sub>1</sub> )	$\beta_2$
$^{12}\text{Be}$	4	2102							
$^{14}\text{C}$	6	7012	1.53	0.36	$^{14}\text{O}$	6	6590	1.53	
$^{16}\text{O}$	8	6917	1.52	0.36	$^{16}\text{O}$	8	6917	1.52	0.36
$^{18}\text{Ne}$	10	1887	1.79	0.69	$^{18}\text{O}$	10	1982	1.8	0.36
					$^{20}\text{O}$	12	1674	2.13	

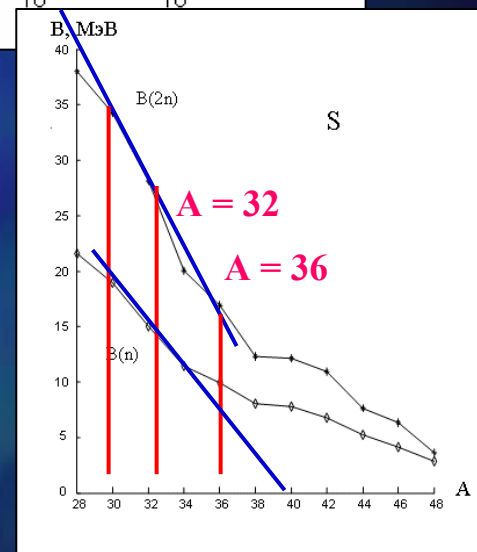
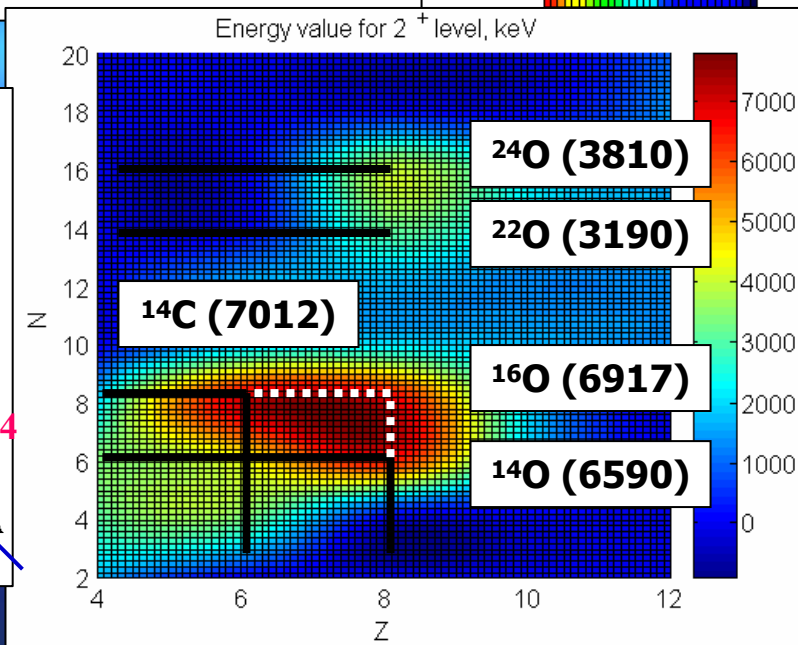
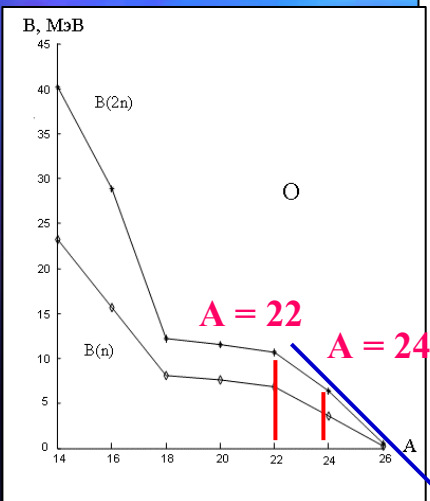
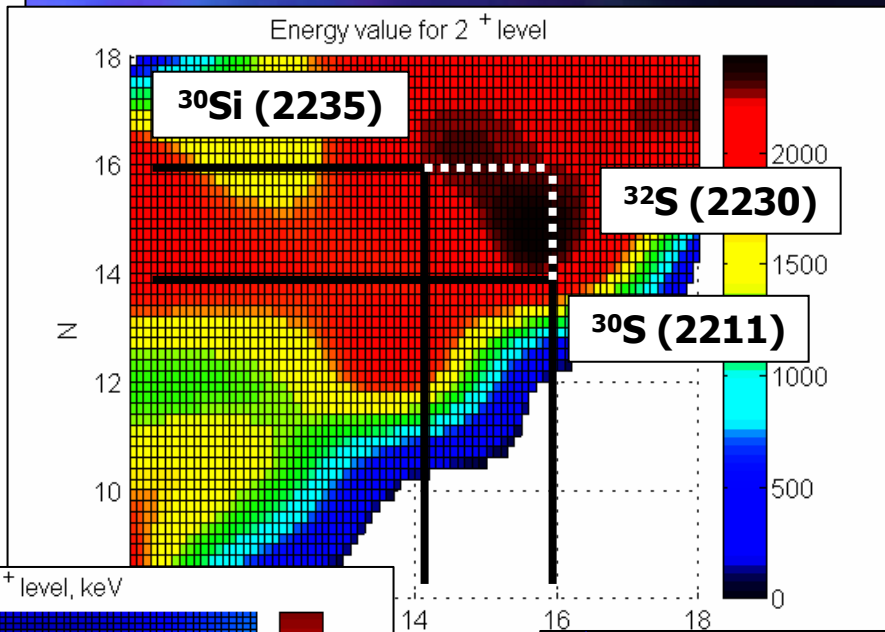
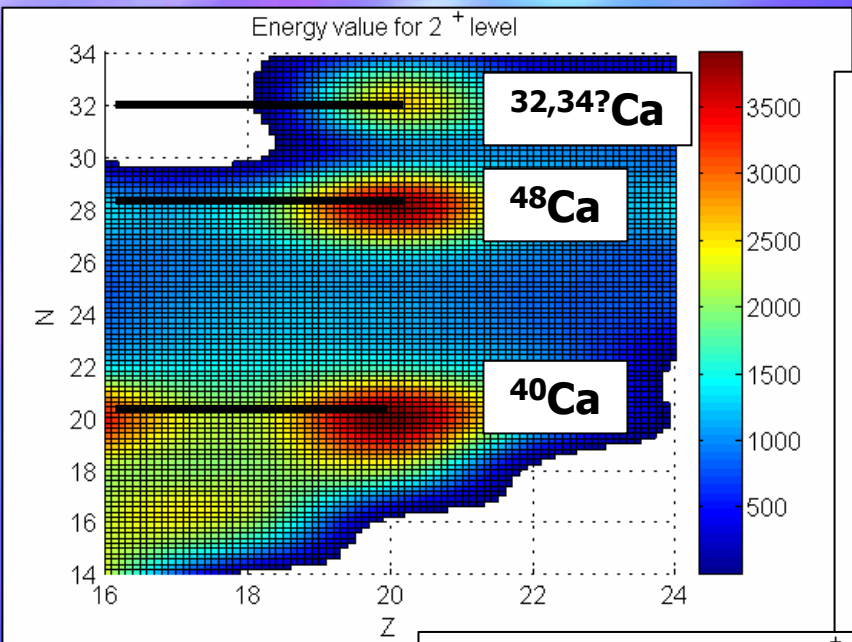
Z = 6				
Nucl	N	E(2 <sup>+</sup> ), keV	E(4 <sup>+</sup> )/E(2 <sup>+</sup> )	$\beta_2$
$^{10}\text{C}$	4	3354		0.82
$^{12}\text{C}$	6	4439	3.17	0.59
$^{14}\text{C}$	8	7012	1.53	0.36
$^{16}\text{C}$	10	1766	2.35	
$^{18}\text{C}$	12	1620		

Для  $N = 8$  «наиболее магическим» является  $Z = 6$  ( $^{14}\text{C}$ ), а не  $Z = 8$  (дважды магическое  $^{16}\text{O}$ ).

Для  $Z = 8$  «наиболее магическим» является  $N = 8$  (дважды магическое  $^{16}\text{O}$ ), но  $N = 6$  ( $^{14}\text{C}$ ) немногим ему уступает.







04.07.2007

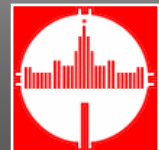
«ЯДРО 2007», 25 - 29 июня 2007 г.  
НИИ Ядерной Физики МГУ

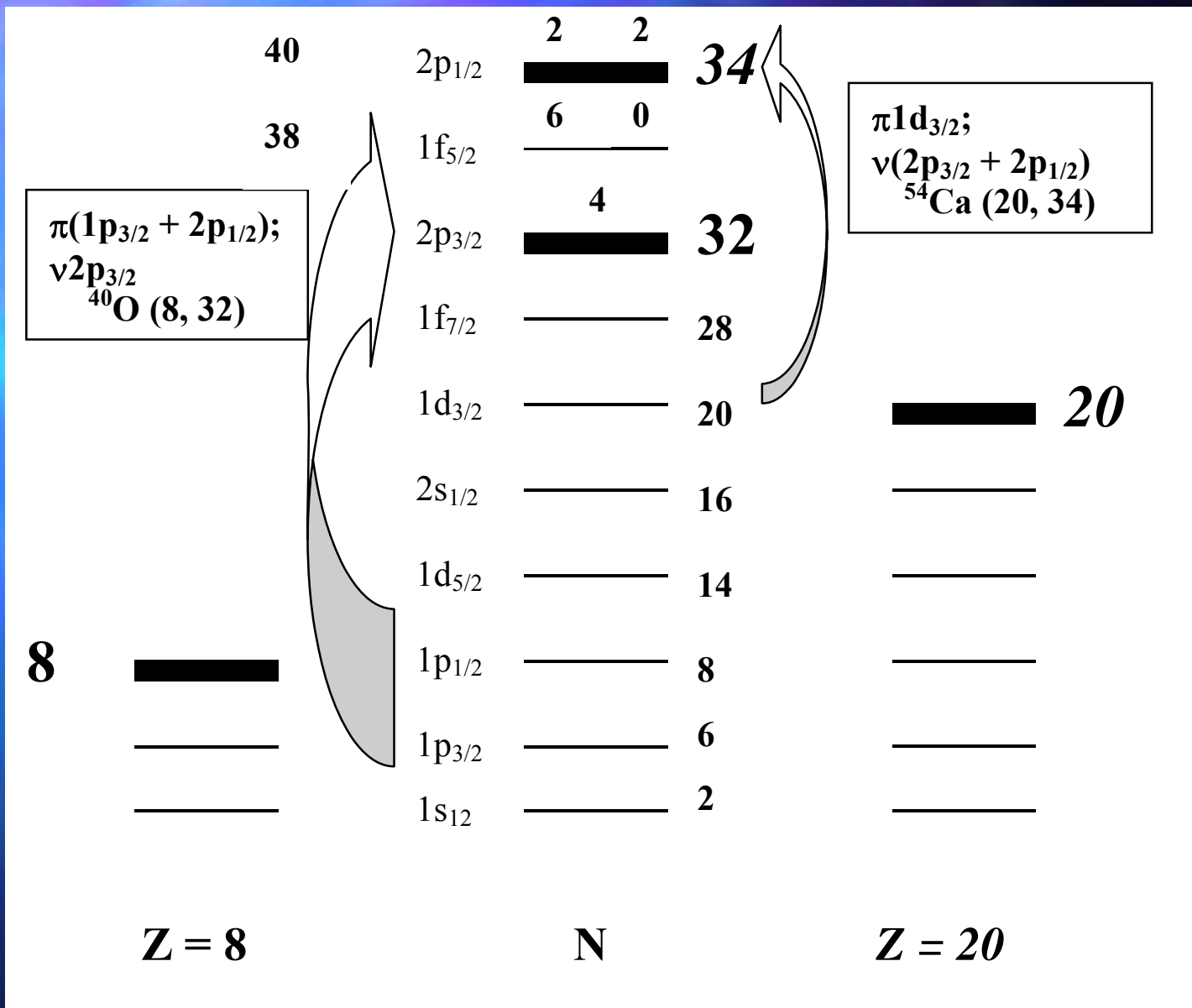
Ca, Si-S, C-O 14





Изотоп	Конфигурация	Закономерность	Признаки магичности
$^{14}\text{O}$	$\pi 1p_{3/2}$ (+ $\pi 1p_{1/2}$ ); $\nu 1p_{3/2}$	<b>+</b>	$E(2^+_1)$ – большая (6590 кэВ) [3], $E(4^+_1)/E(2^+_1)$ – маленькое (1.53) [3],
$^{16}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 1p_{1/2}$	<b>+</b>	$E(2^+_1)$ большая (6917 кэВ) [3], $E(4^+_1)/E(2^+_1)$ – маленькое (1.52) [3], $\beta_2$ – маленький (0.36) [3], классическое дважды магическое ядро
$^{18,20}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 1d_{5/2}$	-	-
$^{22}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 1d_{5/2}$	-	$E(2^+_1)$ – большая (3190 кэВ) [10]
$^{24}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 2s_{1/2}$	<b>+</b>	$E(2^+_1)$ – большая (3810 кэВ)[10, 14], последний связанный изотоп [10, 12]
$^{26}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 1d_{3/2}$	-	-
$^{28}\text{O}$	$\pi 1p_{3/2}$ (+ $\pi 1p_{1/2}$ ); $\nu 1d_{3/2}$	<b>+</b>	классическое дважды магическое ядро, последний связанный [12, 13] или несвязанный [10] изотоп?
$^{30-38}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 1f_{7/2}$	-	-
$^{40}\text{O}$	$\pi 1p_{3/2}$ (+ $\pi 1p_{1/2}$ ); $\nu 2p_{3/2}$	<b>+</b>	повышенная нейтронная стабильность [13]
$^{42-46}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 2f_{5/2}$	-	-
$^{48}\text{O}$	$\pi 1p_{1/2}; \nu 2p_{1/2}$	<b>+</b>	предсказание - данных нет





**Новые магические ядра  
со идентичными характеристиками структуры оболочек  
(«j = j» СВЯЗЬ)**

$^{14}\text{C}(6,8):$	$\pi 1p_{3/2}$	- $\nu 1p_{3/2} \nu 1p_{1/2}$	$(j = j \Rightarrow 3/2)$	
$^{14}\text{O}(8,6):$	$\pi 1p_{3/2} \pi 1p_{1/2}$	- $\nu 1p_{3/2}$	$(j = j \Rightarrow 3/2)$	
$^{16}\text{O}(8,8):$	$\pi 1p_{1/2}$	- $\nu 1p_{1/2}$	$(j = j \Rightarrow 1/2)$	
$^{24}\text{O}(8,16):$	$\pi 1p_{1/2}$	- $\nu 2s_{1/2}$	$(j = j \Rightarrow 1/2)$	
$^{28}\text{O}(8,20):$	$\pi 1p_{3/2} \pi 1p_{1/2}$	- $\nu 1d_{3/2}$	$(j = j \Rightarrow 3/2)$	$^{28}\text{O} ?$
$^{40}\text{O}(8,32):$	$\pi 1p_{3/2} \pi 1p_{1/2}$	- $\nu 2p_{3/2}$	$(j = j \Rightarrow 3/2)$	
$^{48}\text{O}(8,40):$	$\pi 1p_{1/2}$	- $\nu 2p_{1/2}$	$(j - j \Rightarrow 1/2)$	
$^{30}\text{Si}(14,16):$	$\pi 1d_{5/2}$	- $\nu 1d_{5/2} \nu 2s_{1/2}$	$(j - j \Rightarrow 5/2)$	$^{26,28}\text{Si}$
$^{30}\text{S}(16,14):$	$\pi 1d_{5/2} \pi 2s_{1/2}$	- $\nu 1d_{5/2}$	$(j - j \Rightarrow 5/2)$	$^{32}\text{S}$
$^{54}\text{Ca}(20,34):$	$\pi 1d_{3/2}$	- $\nu 2p_{3/2} \nu 2p_{1/2}$	$(j - j \Rightarrow 3/2)$	$^{52}\text{Ca}$
$^{96}\text{Sr}(38,58):$	$\pi 1f_{5/2}$	- $\nu 2d_{5/2} \nu 2p_{1/2}$	$(j - j \Rightarrow 5/2)$	$^{90,92,94}\text{Sr}$
$^{96}\text{Zr}(40,56):$	$\pi 1f_{5/2} \pi 2p_{1/2}$	- $\nu 2d_{5/2}$	$(j - j \Rightarrow 5/2)$	$^{92,94,98}\text{Zr}$



**Нетрадиционные “новые” магические ядра образуются, когда верхние заполненные нейтронная и протонная подболочки имеют одинаковое значение полного момента  $j$ .**

**Магические свойства ядер усиливаются, если сверху над одной из таких подболочек, нейтронной либо протонной, расположена заполненная подболочка с двумя нуклонами, т.е.  $s_{1/2}$  либо  $p_{1/2}$ . Роль такой заполненной подболочки с полным моментом  $j = 1/2$ , по-видимому, заключается в том, что она служит своеобразным “катализатором” проявляющегося дополнительного протон-нейтронного взаимодействия.**

**Когда верхними подболочками с одинаковым значением  $j$  оказываются подболочки с  $j = 1/2$ , магические свойства также проявляются, хотя и в несколько меньшей степени**

**(в этом случае вблизи границы Ферми имеет место еще более своеобразная конфигурация из четырех подболочек: две верхние с  $j = 1/2$ , ниже которых по энергии располагаются и подболочки с одинаковыми другими значениями  $j$ ).**



**Из всего сказанного выше следует, что в отличие от классических магических ядер, которые образуются тогда, когда заполняются нуклонами одного типа - протонами или нейтронами - (замыкаются, насыщаются) определенные оболочки, новые магические числа (и соответственно, новые магические ядра) образуются тогда, когда достигает определенного насыщения взаимодействие между определенными протонными и нейтронными подоболочками.**

**Предлагается механизм парного взаимодействия протонов и нейтронов с одинаковым полным моментом  $j$  с учетом эффектов протон-нейтронного спаривания.**

