

1934 - 1948 :





M. Goeppert-Mayer, Phys. Rev. 1949 v. 75 p.1969 O. Haxel, J.H.D. Jensen, H.E. Suess, Phys. Rev. 1949 v. 75 p. 1766



T. Otsuka, T. Suzuki, and Yu. Utsuno Nuclear Physics A 2008 v. 805 p.127cO. Sorlin, M.-G. Porquet. Progr. Part. Nucl. Phys. 2008 v.61 p. 602

## настоящая работа



Глава 1. Получение параметров оболочечной структуры из данных реакций срыва и подхвата Спектроскопические факторы, получаемые из реакций срыва и подхвата, позволяют определить параметры подоболочек:

заселенности

 $N(nlj) = (S^{-}(nlj)+2j+1-S^{+}(nlj))/2(2j+1),$ 

энергии

 $-E(nlj) = (1 - N(nlj)) (B^{N+1} - e^{+}(nlj) + N(nlj) (B^{N} + e^{-}(nlj)).$ 

Основные источники систематических ошибок при получении и интерпретации данных реакций срыва и подхвата:

1. Модельная зависимость абсолютной нормировки спектроскопических факторов;

2. Неоднозначности в определении полного момента ј переданного нуклона.



Дополнительно:

- Ошибки в определении орбитального момента *l;* 

- Неоднозначности параметров используемых в *DWBA* потенциалов;

- Неприменимость DWBA;
- Вклад других механизмов реакции;
- и т.д.



### Метод совместного анализа данных реакций срыва и подхвата

$$n^{-}S^{-}(nlj) + n^{+}S^{+}(nlj) = 2j+1$$
 (1)

$$n^{-}S^{-}(nlj) + n^{+}S^{+}(nlj) \leq 2j+1$$
 (2)

для остальных подоболочек

$$\begin{aligned} |Sum (n^{-}S^{-}(nlj)) - Sum (n^{+}S^{+}(nlj)) - N(nlj = val)| \rightarrow 0 \quad (3) \\ e \ge e_{F} \qquad e \le e_{F} \end{aligned}$$



#### Метод совместного анализа: до применения и после

Значения C<sup>2</sup>S уровней <sup>59</sup>Co из реакций <sup>60</sup>Ni(d,<sup>3</sup>He), <sup>60</sup>Ni(t,α) (n<sup>-</sup> = 0.93 - 1.04)

Энергия	$J^{\pi}$	l	$C^2S$		
уровня, кэВ			до	после	
0	7/2-	3	3.81 - 6.61 (27%)	3.55 - 3.96 (5%)	
1087	3/2-	1	0.15 - 0.29 (32%)	0.14 - 0.16 (2%)	
1291	3/2-	1	0.07	0.07	
1493	1/2-	1	0.03	0.03	
1493	5/2-	3	0.22	0.20 - 0.23	
1749	7/2-	3	0.60 - 1.01 (25%)	0.56 - 0.62 (5%)	
2048	7/2-	3	0.48 - 0.80 (25%)	0.45 - 0.50 (6%)	

Разработанный метод совместного анализа данных срыва и подхвата позволяет согласовать между собой данные реакций срыва и подхвата, снизив их систематические ошибки и модельную зависимость. Точность получаемых результатов равна ~ 10%.

Метод совместного анализа был использован для получения параметров ядерной структуры. Результаты представлены в последующих главах настоящей работы.

#### Глава 2. Нейтронная структура ядер с Z = 20 - 50

Получены параметры нейтронных подоболочек ядер <sup>40,42,44,46,48</sup>Ca, <sup>46,48,50</sup>Ti, <sup>50,52,54</sup>Cr, <sup>54,56,58</sup>Fe, <sup>58,60,62,64</sup>Ni, <sup>64,66,68,70</sup>Zn, <sup>84,86,88</sup>Sr, <sup>90,92,94,96</sup>Zr, <sup>112,116,118,120</sup>Sn. Исследование проводилось с применением метода совместного анализа.

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

Таблица 2. Заселенности  $N_{nlj}$  и энергии - $E_{nlj}$  (в МэВ) нейтронных подоболочек изотопов  ${}^{40,42,44,46,48}$ Са.



Рис. 7. Заселенности нейтронных подоболочек ядер <sup>40,42,44,46,48</sup>Са.



Рис. 6. Энергии нейтронных подоболочек ядер <sup>40,42,44,46,48</sup>Са.

Щель между нейтронными подоболочками  $1f_{7/2}$  и  $2p_{3/2}$  в изотопах <sup>40-48</sup>Ca увеличивается на 4 МэВ.

Матр. элемент.	Наст. работа	Sorlin, Porquet 2008
n1f <sub>7/2</sub> - n1f <sub>7/2</sub>	- 0.32	- 0.23
$n1f_{7/2} - n2p_{3/2}$	+ 0.18	+ 0.16
$n1f_{7/2} - n2p_{1/2}$	+ 0.17	+ 0.17
n1f <sub>7/2</sub> - n1f <sub>5/2</sub>	+ 0.01	+ 0.02
n1f <sub>7/2</sub> - n1d <sub>3/2</sub>	0	
$n1f_{7/2} - n2s_{1/2}$	>+0.26	

Двухчастичные матричные элементы (эффективные нуклон-нуклонные силы), МэВ

Разница для первого элемента возникает из-за разницы энергии нейтронной подоболочки  $1f_{7/2}$  для <sup>40</sup>Ca в настоящей работе и в [Sorlin, Porquet 2008]. В [Sorlin, Porquet 2008] используется значение -E<sub>nlj</sub> ( $1f_{7/2}$ ), близкое энергии отделения нейтрона в <sup>41</sup>Ca 8.36 МэВ. Фактически это означает, что предполагается отсутствие фрагментации спектроскопического фактора  $1f_{7/2}$ .



[Sorlin, Porquet 2008]



Экстраполяция на область нестабильных изотопов



Ca

Рис. 8. Одночастичные энергии нейтронных состояний ядер  ${}^{40,42,44,46,48,50,52,54,56}$ Са: сплошные кривые - $E^{MOM}$ [Honma и др. 2005], темные точки -Е [наст. раб.], светлые квадраты -  $E^{ДOM}$ , полученные с привлечением данных наст. раб. [Беспалова и др. 2009].



**Ti** Z = 22, N = 24, 26, 28

Рис. 9. Энергии нейтронных подоболочек ядер <sup>46,48,50</sup>Ti.



Рис. 10. Заселенности нейтронных подоболочек ядер <sup>46,48,50</sup>Ti.



**Cr** Z = 24, N = 26, 28, 30

Рис. 13. Числа заполнения нейтронных подоболочек ядер <sup>50,52,54</sup>Cr.



Рис. 12. Энергии нейтронных подоболочек ядер <sup>50,52,54</sup>Cr.



**Fe** z = 26, N = 28, 30, 32



Нейтронные подоболочки изотопов <sup>54,56,58</sup>Fe. На графике энергий горизонтальные отрезки – данные настоящей работы, квадраты – данные расчетов по модели оболочек Монте-Карло [Honma и др. 2002], кружки - данные расчетов по дисперсионно-оптической модели [Беспалова и др. 2005].



Рис. 16. Заселенности нейтронных подоболочек изотопов Ni.



**Рис.** 17. Энергии нейтронных подоболочек изотопов Ni. Над или под изображениями подоболочек указаны числа нейтронов на них.







Рис.23. Одночастичные энергии нейтронных подоболочек  $1g_{9/2}$  и  $2p_{1/2}$  ядер  $^{64,66,68,70}$ Zn и  $^{58,60,62,64,68}$ Ni. Темные точки – экспериментальные данные, светлые точки – экстраполяция, штриховая линия – линейная аппроксимация по 4-м точкам, штрих-пунктирная – по 3-м точкам.

Средние значения щели  $\Delta = 2.47$  (60) и 1.46 (80) МэВ для изотопов Ni и Zn соответственно.







Энергетические положения и заселенности нейтронных подоболочек изотопов Sr (МэВ).



#### аналогия эволюций нейтронных структур Са и Zr



Увеличение нейтронных подоболочечных промежутков  $\Delta$  между  $2d_{5/2}$  и  $3s_{1/2}$  при увеличении числа нейтронов N в изотопах <sup>90,92,94,96</sup> Zr в линейном приближении подчиняется зависимости

$$\Delta (Zr^{N}) = \Delta E (Zr^{50}) + (N - 50) \times \delta, \qquad (19)$$

где δ≈0.18 МэВ.

... Сформированная в точке (Z = 40, N = 56) магическая структура нейтронных подоболочек при удалении от этой точки в любую сторону разрушается.

	<sup>97</sup> Zr	<sup>99</sup> Zr	$^{101}$ Zr	<sup>95</sup> Sr	<sup>99</sup> Mo
1/2 +	0	0	нет	0	0
5/2+	1400	575	98	(556), (681)	98





Как и в случае изотопов Ni, происходит вырождение состояний, образующих псевдоспиновый дублет. В отличие от Ni, в данном случае имеется не одна, а две пары таких состояний:  $2d_{5/2}$ -1g<sub>7/2</sub> и 3s<sub>1/2</sub>-2d<sub>3/2</sub>.









# Свойства нейтронных подоболочек изотопов с Z = 20 - 50

Два типа заселения подоболочек. -последовательный. Изотопы Ca, Zr, Ti, (Cr);



- параллельный. Изотопы (Cr), Fe, Ni, Zn, Sr, Sn.

Образование групп подоболочек внутри оболочек. Изотопы Ni, Sn.



Матр. элемент.	Значение
$p1f_{7/2}$ - $n1f_{7/2}$	- 0.81
$p1f_{7/2}$ - $n2p_{3/2}$	- 0.66
$p1f_{7/2}$ - $n2p_{1/2}$	- 0.79
$p1f_{7/2}$ - $n1d_{3/2}$	- 0.44
$p1f_{7/2}$ - $n2s_{1/2}$	- 0.60

Двухчастичные матричные элементы, МэВ

Вклад тензорных сил в полное монопольное взаимодействие (двухчастичные матричные элементы)  $V(p1f_{7/2} - n2p_{1/2})$  равен – 0.09, вклад во взаимодействие  $V(p1f_{7/2} - n2p_{3/2})$  равен + 0.04.

#### Глава 3. Протонная структура ядер с Z = 20 - 50.

Получены и исследованы параметры протонных подоболочек ядер <sup>40,42,44,46,48</sup>Ca, <sup>46,48,50</sup>Ti, <sup>50,52</sup>Cr, <sup>54,56</sup>Fe, <sup>58,60,62,64</sup>Ni, <sup>64,66,68</sup>Zn, <sup>84,86,88</sup>Sr, <sup>90,92,94,96</sup>Zr, <sup>112,116,118,120,124</sup>Sn. Изучение проводилось с применением метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата.




Са протонные подоболочки

Матр. элемент.	Значение
n1f <sub>7/2</sub> - p1f <sub>7/2</sub>	- 0.87
n1f <sub>7/2</sub> - p2p <sub>3/2</sub>	- 0.40
n1f <sub>7/2</sub> - p2p <sub>1/2</sub>	- 0.59
n1f <sub>7/2</sub> - p1d <sub>3/2</sub>	- 0.95
$n1f_{7/2} - p2s_{1/2}$	- 0.43

Двухчастичные матричные элементы, МэВ

Вклад тензорных сил в полное монопольное взаимодействие  $V(n1f_{7/2} - p2p_{1/2})$  равен – 0.13, вклад во взаимодействие  $V(n1f_{7/2} - p2p_{3/2})$  равен + 0.06.

Миграция p-подоболочек при заполнении n-подоболочки  $1f_{7/2}$  дает: V(n1f<sub>7/2</sub> - p1f<sub>7/2</sub>) = - **0.87 МэВ** 

Миграция n-подоболочек при заполнении p-подоболочки  $1f_{7/2}$  дает: V(n1f<sub>7/2</sub> - p1f<sub>7/2</sub>) = - 0.81 МэВ



# синхронность изменений протонной и нейтронной структур в изотопах Zr







Ядро <sup>96</sup>Zr представляет собой особый объект. В нем формируются протонная структура с магическим числом Z = 40 и нейтронная структура с магическим числом N = 56, которые разрушаются при удалении от этого ядра по линии изотопов или изотонов.

Глава 4. Динамика магических чисел

Свойства магических ядер.

По сравнению с соседними:

- увеличение энергий связи;
- увеличение энергий отделения нуклонов B(n), B(2n);
- увеличение энергии первого  $J^{\pi} = 2^+$  уровня  $E(2_1^+)$ ;

• сферическая форма - меньший параметр квадрупольной деформации β<sub>2</sub>;

• меньшее отношение энергий первых  $J^{\pi} = 4^+$  и  $J^{\pi} = 2^+$  состояний  $E(4_1^+)/E(2_1^+);$ 

• увеличенное число бета-стабильных ядер с м.ч.;

• меньшая величина сечений захвата низкоэнергетичных нейтронов;

• и некоторые другие.



#### Энергии первых возбужденных 2+ состояний



Энергии первых возбужденных 2+ состояний. «Горные хребты» - магические числа Z = 50, N = 50, 82.



Энергии первых возбужденных 2+ состояний. Светлые линии - классические магические числа.

#### Острова магичности



## метод анализа

экстремумы функций магичности (энергий 2+, энергий связи и т.д.) --->

неклассическое "уединенное" магическое ядро (Z, N)



остров магичности

Неклассические магические числа:

N,  $Z \neq 2, 8, 20, 28 \dots$ 

# Анализ данных



<sup>96</sup>Zr: магическая пара Z=40, N=56.



Энергии первых возбужденных состояний 2<sup>+</sup> четно- четных изотопов Ni, Zn, Ge, Se.

Параметры деформации.



(Z, N) = (14,16), (16,16), (16,14): уединенные магические ядра <sup>30</sup>Si, <sup>32</sup>S, <sup>30</sup>S.



(Z, N) =(6,8), (8,8) и (8,6) : неклассические (уединенные) магические ядра <sup>14</sup>С, <sup>14</sup>О и классическое дважды магическое ядро <sup>16</sup>О





Энергии первых возбужденных состояний 2+ четно-четных изотопов и энергии отделения нейтрона кислорода с N > 8. [В. Alex Brown and W. A. Richter Pys Rev C 72, 057301 (2005) ] Поверхности потенциальной энергии изотонов с N = 16[A.Obertelli,S.Peru,J.P.Delaroche et. al. Phys Rev C 71, 024304 (2005)].

<sup>24</sup>О: магическая пара (Z = 8, N = 16).

E (M<sub>3</sub>B)



«26» : магические пары (Z=14, N=26), (Z=16, N=26).

Итог : магические пары (Z, N)

(2,6), (6,8), (8,6), (8,16), (14,16), (16,14), (16,16), (14,20), (16,20), (14,26), (16,26), (20,34), (28, 40), (40,56), (50,64)

Эмпирический список, наст. раб.

(2,6), (6,8), (8,6), (8,16), (14,16), (16,14), (16,16), (14,20), (16,20), (14,26), (16,26), (20,34), (28, 40), (40,56), (50,64)

Список Брауна - Рихтера

B. Alex Brown and W. A. Richter PHYSICAL REVIEW C 72, 057301 (2005)

(2,2), (2,6), (6,8), (8,6), (8,8), (8,14), (8,16), (14,20), (16,20), (20,20), (20,28), (20,32), (20,34)

### If the oscillator rule is valid, is it an accident or is there some underlying reason ... ?

**B.** Alex Brown and W. A. Richter

Глава 5. Структура неклассических магических ядер



... аналогично <sup>68</sup>Ni и <sup>114</sup>Sn ...



Тензорные силы притяженеия между протонами j> и нейтронами j< [Otsuka и др. 2005, 2008].



#### Нейтрон - протонное ј-ј спаривание и эволюция подоболочек

\* связывание нейтронных и протонных структур с определенной конфигурацией (10 пар из эмпирического списка)



### Нейтрон - протонное ј-ј спаривание и эволюция подоболочек

\* объяснение магичности 26



### Нейтрон - протонное j-j спаривание. \*предсказание спинов - четностей Правило спаривания

Два нуклона с полными моментами  $j_1$  и  $j_2$ , причем  $|j_1| = |j_2|$ , четностями  $\pi_1$  и  $\pi_2$ , изотопическими спинами  $\tau_1$  и  $\tau_2$  взаимно ориентируются так, что энергетически выгодным является выполнение соотношения



п-п или p-р с одной подоболочки:

Антипаралллельно

n-p

согласуется с данными по спинам-четностям при

 $(\boldsymbol{\tau_1}\cdot\boldsymbol{\tau_2}) < 0$ 

р - n подоболочки	Z	N	Ядро	Предсказание	Эксперимент
1s1/2 - 1s1/2	1	1	<b>2</b> H	1+	1+
1p3/2 – 1p3/2	5	5	10B	3+	3+
1p1/2 – 1p1/2	7	7	14N	1+	1+
1p1/2 - 2s1/2	7	15	22N	0-	Нет данных
1d5/2 - 1d5/2	13	13	26Al	5+	5+
2s1/2 - 2s1/2	15	15	30P	1+	1+
1d3/2 - 1d3/2	19	19	38K	3+	3+
1d3/2 - 2p3/2	19	31	50K	0-	(0-,1,2-)
1f7/2 – 1f7/2	27	27	54Co	7+	g.s.0+(193ms) изомер (7)+ (1.48 min)
2p3/2 - 2p3/2	31	31	62Ga	3+	0+
2p1/2 - 2p1/2	33	33	66As	1+	Нет данных
1f5/2 – 1f5/2	39	39	78Y	5+	g.s.(0+)(50ms) изомер (5+) (5.7 s)
1f5/2 - 2d5/2	37	55	92Rb	0-	0-
1g9/2 - 1g9/2	49	49	98In	9+	Нет данных

Таблица 34. Сравнение предсказаний правила спаривания и экспериментальных данных.

Факторы эволюции подоболочек



#### Предсказания

# Значения спинов и четностей основных или низколежащих долгоживущих состояний

<sup>98</sup> In	9+
<sup>66</sup> As	1+
<sup>22</sup> N	0-

Ядра с повышенной стабильностью

нейтронное гало в <sup>29,31</sup>F

Основные результаты, полученные в работе

- Создан метод совместного анализа данных реакций срыва и подхвата нуклонов. Метод дает возможность учесть одновременно данные реакций срыва и подхвата на одном начальном ядре, информацию о спинах и четностях состояний конечных ядер и согласовать эти данные между собой. Метод позволяет снизить модельную зависимость величин, получаемых из имеющихся экспериментальных данных, уменьшить погрешности в указанных величинах с 20 – 50% до 10%. Результатом применения метода являются значения параметров оболочечной структуры – чисел заполнения и энергетических положений ядерных подоболочек.
- 2. Получены параметры оболочечной структуры числа заполнения и энергии протонных и нейтронных подоболочек ядер <sup>40,42,44,46,48</sup>Ca, <sup>46,48,50</sup>Ti, <sup>50,52,54</sup>Cr, <sup>54,56,58</sup>Fe, <sup>58,60,62,64</sup>Ni, <sup>64,66,68,70</sup>Zn, <sup>84,86,88</sup>Sr, <sup>90,92,94,96</sup>Zr, <sup>112,116,118,120,124</sup>Sn. Результаты получены впервые на основе информации о спектроскопических факторах срыва, подхвата и данных о спинах-четностях ядерных состояний.

3. На основе полученных данных исследована оболочечная структура в указанных выше ядрах. Показано, что параметры структуры изменяются с изменением чисел нуклонов в ядрах, выявлены основные закономерности эволюции оболочечной структуры. В полученных параметрах структуры во всех случаях отчетливо проявляют себя традиционные магические числа 20, 28, 50. Наряду с этим, в определенных случаях обнаружено образование нейтронных и протонных структур, соответсвующих неклассическим магическим числам 40, 56, 64. Обнаружены два типа заполнения подоболочек – параллельный (заполнение по типу Ni, Sn) и последовательный (заполнение по типу Ca, Zr). Заполнение подоболочек по второму типу сопровождается образованием значительной подоболочечной щели и приводит к формированию магических структур подоболочек в ядрах <sup>48</sup>Са и <sup>96</sup>Zr. Обнаружено формирование групп подоболочек в нейтронных оболочках Ni и Sn, приводящее к образованию магических чисел N = 40 и N = 64 в указанных изотопах. Обнаружено явление вырождения нейтронных подоболочек в ядрах Ni, Sn. Установлена роль различных эффективных нуклон-нуклоных сил в эволюции оболочечной структуры исследованных ядер. Определены двухчастичные матричные элементы эффективных нуклон-нуклонных взаимодействий. Найдены вклады тензорных сил в матричные элементы.

- 4. Обнаружено новое явление неклассические (уединенные) магические ядра на основе анализа имеющихся экспериментальных данных об энергиях возбужденных состояний со спинами-четностями 2+ и 4+, параметров деформации, энергий отделения нуклонов и других данных о наблюдаемых свойствах ядер. Определены свойства, получен список уединенных ядер в области Z ≤ 50. Свойства таких ядер аналогичны свойствам традиционных магических ядер, однако не связаны с проявлением чисел 2, 8, 20, 28 и т.д. Указанные ядра проявляют себя в виде магических пар нуклонных чисел. Уединенные ядра не образуют изотопических или изотонических рядов; вокруг них образуются замкнутые области (острова) магичности. Уединенные ядра располагаются как внутри области β-стабильности, так и вне этой области.
- 5. Показана связь между наблюдаемыми свойствами уединенных магических ядер и их оболочечной структурой. Найдено, что экстремумам энергий первых состояний 2+, отношений энергий уровней со спинами-четностями 4+ и 2+, параметров деформации, энергий отделения нуклонов, достигаемым в уединенном магическом ядре <sup>96</sup>Zr, соответствует формирование магической структуры энергий и заселенностей нейтронных и протонных подоболочек этого ядра. При удалении от ядра <sup>96</sup>Zr магические свойства соседних изотопов и изотонов исчезают, а магические структуры подоболочек разрушаются. Аналогичная связь имеет место для уединенных ядер <sup>68</sup>Ni, <sup>114</sup>Sn.

- 6. Предложена гипотеза нейтрон-протонного спаривания. Гипотеза объясняет образование определенных неклассических (уединенных) магических ядер внутри и вне области стабильности, хорошо описывает экспериментальные значения спинов-четностей определенного класса нечетно-нечетных ядер. Согласно гипотезе, нейтрон и протон с одинаковыми значениями полного момента *j* при определенных условиях образуют пару, ориентируясь параллельно или антипараллельно друг другу. Выигрыш в энергии приводит к образованию более связанного состояния уединенного ядра. В рамках гипотезы предложено универсальное правило взаимного ориентирования спаренных нуклонов любого вида.
- 7. Показано, что основными факторами образования неклассических магических ядер являются притягивающее тензорное взаимодействие протонов и нейтронов с одинаковыми *l*, протон-нейтронное *j-j* спаривание, образование групп тесно расположенных подоболочек внутри оболочек.

