



В.В.Варламов

НОВЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА: СИСТЕМАТИКА СВОЙСТВ

*И.Н.Бобошин
Б.С.Ишханов
Е.А.Романовский*

Титул



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

Магические
числа 1

2



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

- они имеют более сферическую форму (менее деформированы) - заметно меньший параметр квадрупольной деформации β_2 ;
- у них энергия первого $J^\pi = 2^+$ уровня $E(2_1^+)$ заметно больше;
- у них отношение энергий первых $J^\pi = 4^+$ и $J^\pi = 2^+$ $E(4_1^+)/E(2_1^+)$ заметно меньше;
- для них имеются заметные особенности в энергиях отделения нуклонов, например, в зависимостях $B(n)$, $B(2n)$ от N , Z и/или A ;
- и некоторые др.

Обзоры:

В.А.Морозов. Влияние замыкания оболочек на свойства возбужденных состояний.

ЭЧАЯ, т. 22, вып. 4 (1991) 765 - 800

Ю.Э.Пенионжкевич, С.М.Лукиянов. Ядра вблизи замкнутых оболочек $N = 20$ и $N = 28$.

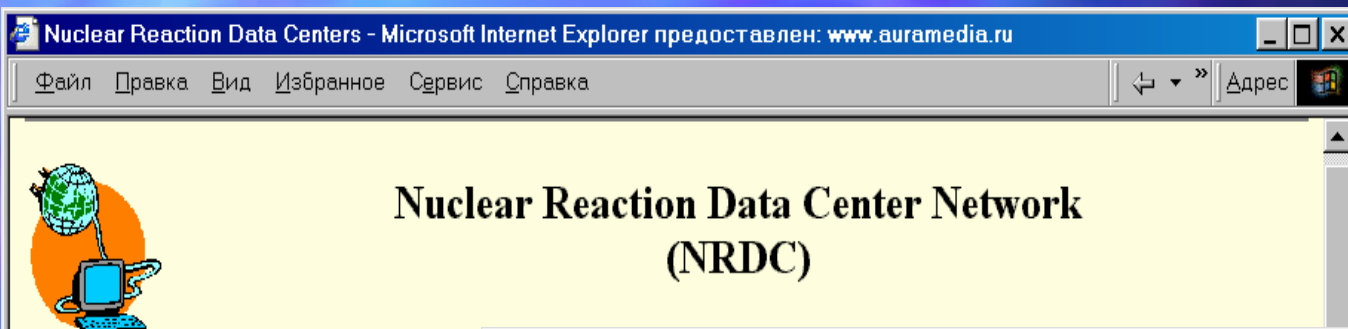
ЭЧАЯ, т. 37, вып. 2 (2006) 439 - 492

**Магические
числа 2**



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

**13 Центров
из 9 стран:
Австрия, Венгрия,
Китай, Корея, Россия,
США, Украина,
Франция, Япония .**



Specialized Nuclear Data Centres

The specialized centres provide an essential complement to the core centres by assuming responsibility for the collection and dissemination of data of a specialised type or application. These centres do not normally provide the entire range of services offered by the Core Centres.

Country	Centre Name and Location	Scope of Reaction Data
China	Chinese Nuclear Data Centre (CNDC), China Institute of Atomic Energy , Beijing	Neutron & Charged Particle
Hungary	Nuclear Data Group, ATOMKI Institute (ATOMKI), Debrecen	Charged Particle
Japan	Japan Charged-Particle Nuclear Reaction Data Group (JCPRG), Hokkaido University, Kita-ku, Sapporo	Charged Particle
	Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki	Evaluated
Korea	Korea Atomic Energy Institute (KAERI), Yusong, Taejeon	Evaluated
Russia	Nuclear Structure and Nuclear Reaction Data Centre (CAJAd), Kurchatov Institute, Moscow	Charged Particle
	Centre for Experimental Photonuclear Data (CDFE), Moscow State University, Moscow	Photonuclear
	Nuclear Physics Data Center (NPDC), All Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics (VNIIEF), Sarov	Neutron & Charged Particle
Ukraine	Ukrainian Nuclear Data Center (UkrNDC), Institute for Nuclear Research, Kyiv (Kiev)	Neutron

ЦДФЭ

Сеть
Центров

11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

4



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

ЦДФЭ Web-сайт

**On-line Services:
12 баз данных**

ЦДФЭ - Центр Данных Фотоядерных Экспериментов - Microsoft Internet Explorer

Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/>

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, НИИ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ЦЕНТР ДАННЫХ ФОТОЯДЕРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ
CENTRE FOR PHOTONUCLEAR EXPERIMENTS DATA

ЦДФЭ: домашняя страница

Добро пожаловать на сайт ЦДФЭ.

Сервисы, доступные в ЦДФЭ:

Объект поиска	База данных
Все об атомных ядрах и ядерных реакциях. Числовые данные, графическая информация и библиография	Универсальная электронная система информации по атомным ядрам и ядерным реакциям [описание] Последнее обновление: 1 ноября 2005
Распространенность, изотоп, атомная масса, избыток массы, энергия связи, спин, четность, момент, деформация, мода распада: основное и метастабильное состояния.	Параметры основных состояний атомных ядер [описание] Последнее обновление: 15 марта 2002
Ядерные реакции. Различные характеристики (международный фонд данных EXFOR). Налетающая частица: фотон, нейтрон, любая заряженная частица, тяжелый ион.	База данных по ядерным реакциям (EXFOR) [описание] Последнее обновление: 10 января 2006
Параметры ядерных уровней: Параметры ядерных уровней: Энергия, спин, четность, время жизни, мода распада, метастабильное состояние, изотоп, момент количества движения, спектроскопический фактор и т.д. Параметры α-, β-, γ-распадов: Энергия, интенсивность, мультипольность, коэффициент ветвления, коэффициент смешивания и т.д.	Полная реляционная база ядерно-спектроскопических данных "Relational ENSDF" [описание] Последнее обновление: 10 января 2006
Параметры квадрупольной деформации; квадрупольные моменты	Карта квадрупольных ядерных деформаций [описание] Последнее обновление: 4 апреля 2006
Физика атомных ядер и ядерных реакций. Эксперимент и теория. Справочно-библиографическая информация: ядро, реакция, распад, автор, название, публикация, аннотация, библиографическая ссылка и т.д. Справочно-библиографическая информация о работах по физике атомных ядер и ядерных реакций: авторы, названия работ, библиографические ссылки и т.д.	Публикации по ядерной физике (База данных "NSR") [описание] Последнее обновление: 15 февраля 2006

Интернет

ЦДФЭ - Центр Данных Фотоядерных Экспериментов - Microsoft Internet Explorer

Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/>

Гигантский дипольный резонанс (ГДР): энергия, амплитуда, ширина, сечение, интегральное сечение, момент.

Электромагнитные взаимодействия. Справочно-библиографическая информация: ядро, реакция, автор, название, публикация, аннотация, библиографическая ссылка, и т.д.

Фотоядерная реакция: (γ, n) , (γ, p) , (γ, α) , $(\gamma, ^2\text{He})$, (γ, d) , $(\gamma, ^3\text{He})$, $(\gamma, ^4\text{He})$, (γ, pr) , (γ, zp) . Порог.

Пороги и энергии ядерных реакций для любых известных ядер и множества налетающих/вылетающих частиц

Волновые функции атомов и ионов, He-подобные, Li-подобные ионы, возбужденные состояния, сечения, вариационный метод, матричные элементы, однократная и двухкратная ионизация, перезарядка, два связанных электрона, водородоподобные волновые функции, минимум энергии, Хиллерас, Сталер, Хартри-Фок

Ядерная реакция, налетающая частица: p -, d -, t -, ^3He -, α и тяжелый ион. Выход, сечение.

Внутренняя конверсия: изомерный переход, малая энергия, вероятность.

Параметры ядерных уровней: Энергия, спин, четность, время жизни, мода распада, метастабильное состояние, изотоп, момент количества движения, спектроскопический фактор и т.д. Альфа-, бета-, гамма-распад. Параметры: энергия, интенсивность, мультипольность, коэффициент ветвления, коэффициент смешивания, и т.д.

Параметры Гигантского Дипольного Резонанса, Сечения фотоядерных реакций
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 7 мая 2002

Индекс фотоядерных данных с 1955 г.
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 2 июня 2005

Пороги фотоядерных реакций
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 15 февраля 2003

Калькулятор порогов и энергий ядерных реакций
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 15 мая 2002

База данных значений волновых функций
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 6 апреля 2006

Каталог реакций под действием заряженных частиц ЦИАЯ РНИИ "Курчатовский институт"
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 28 декабря 2000

Вероятности внутренней конверсии изомерных переходов малой энергии
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 15 мая 2002

NESSY (New ENSDF Search System): Реляционная база данных по ядерной спектроскопии
[\[описание\]](#)
Последнее обновление: 30 января 2003
(устарело, рекомендуется использовать Relational ENSDF)

Интернет

**ВСЕ об атомных ядрах
ПОЧТИ ВСЕ о ядерных реакциях**

Web-сайт

11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

5



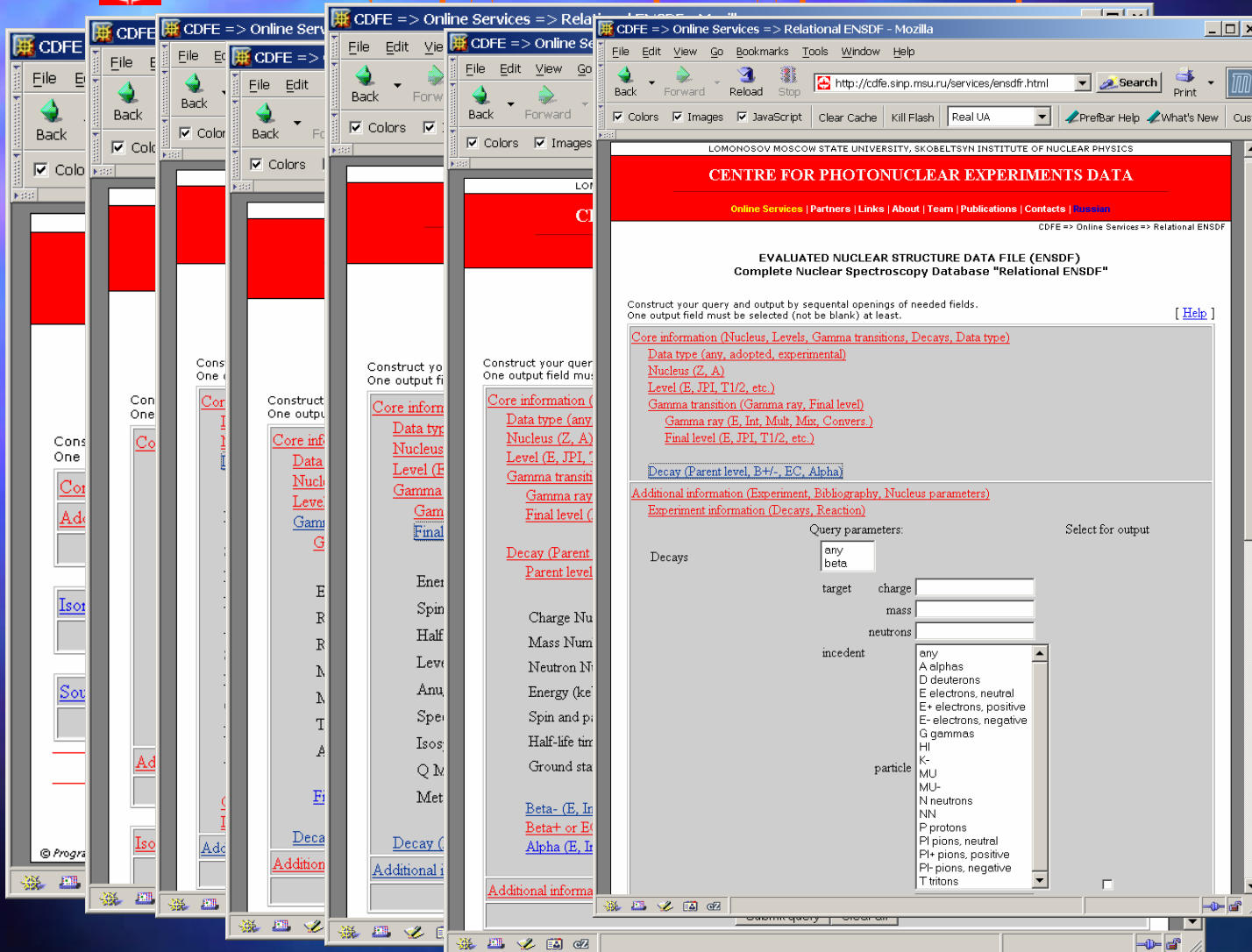
Ядерно-спектроскопические данные
(~ 3200 нуклидов, ~ 200 Мбт информации)
Система ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File)

Все данные обо всех известных атомных ядрах!

- **Параметры ядерных состояний:**
энергия уровня;
спин;
четность;
время жизни;
изоспин;
(период полураспада, ширина);
спектроскопический фактор;
метастабильность;...
 - **Параметры ядерных переходов:**
энергия перехода;
интенсивность;
мультипольность;
момент;
коэффициент конверсии;
коэффициент смешивания;
коэффициент ветвления;
уникальность распада;...
- и многие др.**



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



Информационная «матрешка»:

**ВОЗМОЖНО
раскрытие любой
части поисковой
системы сверху-
вниз и обратно**

- ядро
- уровень
- гамма-переход
- конечное ядро
- распад
- эксперимент
- реакция
- ...

Не имеющая аналогов по возможностям поисковой системы БД «Relational ENSDF». Все опубликованные данные для стабильных и радиоактивных нуклидов (~ 3200).

ENSDF Relational

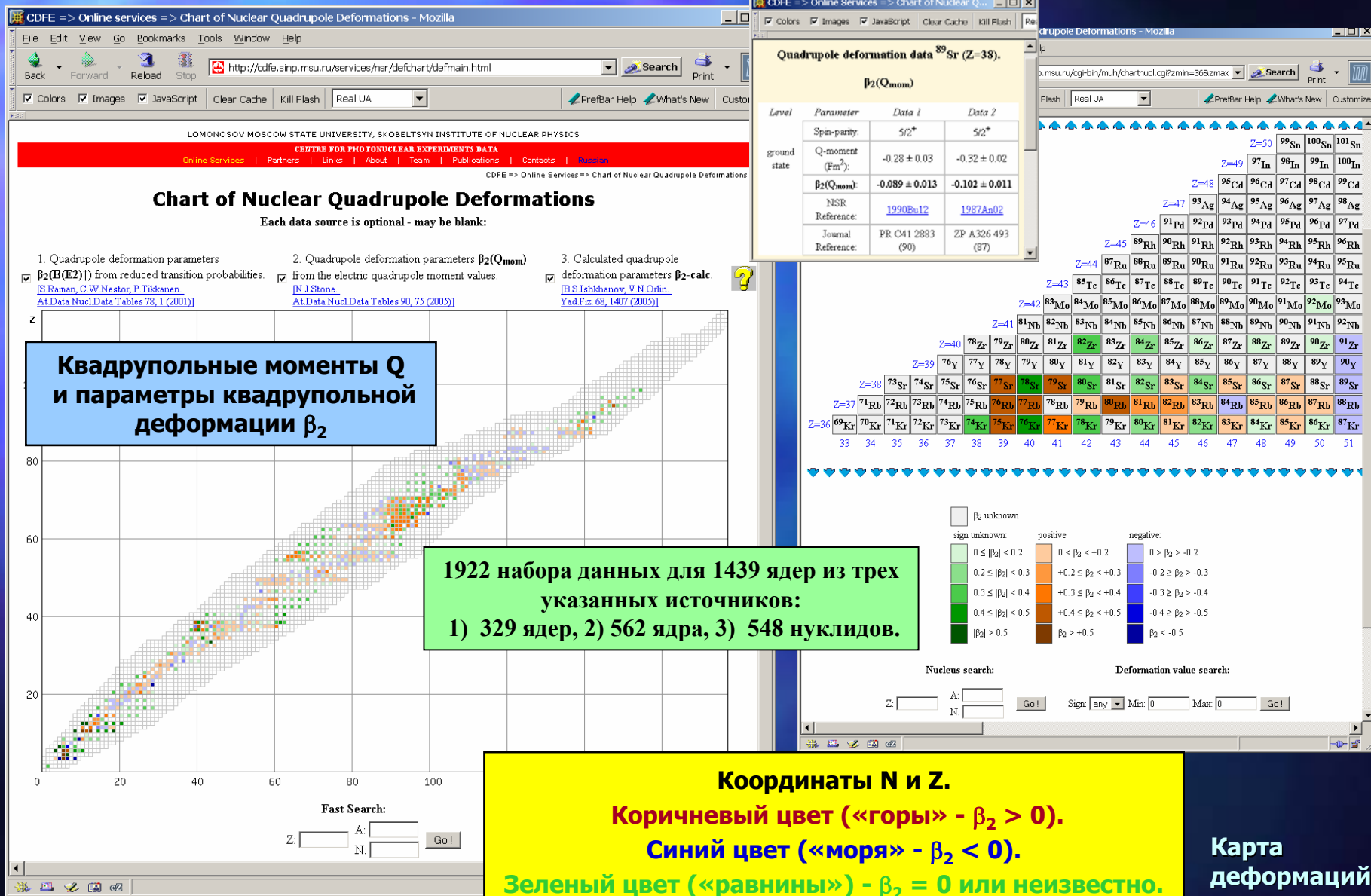
11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

7



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

8



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

CDFE => Online Services => Relational ENSDF - Microsoft

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

Назад Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru>

Level (E, J^π, T_{1/2}, etc.)

Query parameters:

Energy (keV) 4000-6000
Spin and parity 3/2-, 5/2
Half-life
Angular momentum transfer
Spectroscopic strength
Metastable state label any
Isospin 3/2
Q Moment
Additional remark any

Gamma transition (Gamma ray, Final level)
Gamma ray (E, Int, Mult, Mix, Convers.)

Query parameters:

Energy of the γ-ray (keV) 2000-3000
Relative photon intensity
Relative total transition intensity
Multipolarity of transition any any
Mixing ratio
Total conversion coefficient
Additional remark any

Final level (E, J^π, T_{1/2}, etc.)

CDFE search engine. - Microsoft Internet Explorer

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

Назад Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/nessy/v.9/nessy.cgi>

Get all data

ENSDF Source	Nucleus	Level energy	Spin-parity	Half-life	Isospin	Photon energy	Spin-parity (fin.)	Half-life (fin.)
51.78	25-MN-51	5129	1/2-, 3/2-		3/2	2145	5/2+	
51.78	25-MN-51	5129	1/2-, 3/2-		3/2	2819	5/2(-)	0.9 PS (6)
51.78	25-MN-51	5129	1/2-, 3/2-		3/2	2873	(5/2-)	79 FS (+33-26)
55.80	27-CO-55	4748.13 (10)	3/2-	21 FS (7)	3/2	2088.6 (3)	5/2-	21 FS (3)
59.70	29-CU-59	4301.3 (15)	5/2(-)		3/2	2902	7/2-	0.40 PS (17)
59.70	29-CU-59	4770.2 (5)	3/2-	3.5 FS (3)	3/2	2053	7/2(-)	
59.70	29-CU-59	4770.2 (5)	3/2-	3.5 FS (3)	3/2	2060	5/2(-)	
59.70	29-CU-59	4770.2 (5)	3/2-	3.5 FS (3)	3/2	2452.0 (10)	1/2(-), 5/2(-)	
59.70	29-CU-59	4770.2 (5)	3/2-	3.5 FS (3)	3/2	2782.0 (10)	5/2(+)	
59.70	29-CU-59	4770.2 (5)	3/2-	3.5 FS (3)	3/2	2904	7/2-	
59.70	29-CU-59	4817.8 (4)	3/2-	50 EV (50)	3/2	2829.3 (10)	5/2(+)	
59.70	29-CU-59	5053.7 (10)	(5/2)		3/2	2335	7/2(-)	
59.70	29-CU-59	5053.7 (10)	(5/2)-		3/2	2342	7/2(-)	
59.70	29-CU-59	5522.3 (4)	5/2		3/2	2805	7/2(-)	
59.70	29-CU-59	5550.0 (6)	5/2		3/2	2116	5/2	
59.70	29-CU-59	5550.0 (6)	5/2		3/2	2435	5/2-	14 FS (8)
59.70	29-CU-59	5550.0 (6)	5/2		3/2	2622	5/2(-)	
59.70	29-CU-59	5645.0 (8)	(3/2)-		3/2	2649	(7/2-)	

Get all data

Абсолютно уникальный запрос:

«Найти уровни ядер с $J^{\pi} = 3/2^{-}$ или $5/2^{-}$ и изоспином $T = 3/2$ в диапазоне энергий $E = 4 - 6$ МэВ, распадающиеся с испусканием γ -квантов с энергиями $E_{\gamma} = 2000 - 3000$ кэВ на уровни конечного ядра с $J = 5/2$ или $7/2$ (должна быть выдана также информация об энергиях и значениях J^{π} конечных состояний)».

4000-6000

11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

9



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

CDFE search engine. - Microsoft Internet Explorer

Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/nessy/v.14/nessy.cgi>

Get all data **2⁺**

ENSDF Source	Nucleus	Level energy	Spin-parity	Half-life	Jpi number
38.36	20-CA-38	2206 (5)	2+		2+ - 1th
40.61	20-CA-40	3904.38 (3)	2+	34 FS (2)	2+ - 1th
42.30	20-CA-42	1524.70 (3)	2+	0.82 PS (2)	2+ - 1th
44.18	20-CA-44	1167.030 (15)	2+	2.61 PS (14)	2+ - 1th
46.17	20-CA-46	1348.0 (3)	2+	3.6 PS (3)	2+ - 1th
48.10	20-CA-48	3831.72 (6)	2+	41.8 FS (26)	2+ - 1th
50.7	20-CA-50	1026 (1)	2+		2+ - 1th
52.5	20-CA-52	2663.1 (10)	(2+)		2+ - 1th (the last)

CDFE search engine. - Microsoft Internet Explorer

Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/nessy/v.14/nessy.cgi>

Get all data **4⁺**

ENSDF Source	Nucleus	Level energy	Spin-parity	Half-life	Jpi number
138.69	64-GD-138	605.2 (3)	4+	2.5 PS (14)	4+ - 1th
140.66	64-GD-140	936.2	4+		4+ - 1th
142.63	64-GD-142	1209.07 (13)	4+		4+ - 1th (the last)
144.65	64-GD-144	1744.52 (24)	(4+)		4+ - 1th (the last)
146.57	64-GD-146	2611.39 (14)	4+		4+ - 1th
148.61	64-GD-148	1416.374 (20)	4+		4+ - 1th
150.45	64-GD-150	1288.42 (3)	4+		4+ - 1th
152.48	64-GD-152	755.3958 (17)	4+	7.3 PS (4)	4+ - 1th
154.28	64-GD-154	370.995 (3)	4+	46.2 PS (15)	4+ - 1th
156.16	64-GD-156	288.187 (1)	4+	111.9 PS (17)	4+ - 1th
158.11	64-GD-158	261.4668 (16)	4+	0.148 NS (2)	4+ - 1th
160.7	64-GD-160	248.52 (6)	4+		4+ - 1th

Базы данных позволяют легко подобрать информацию определенного сорта для любой группы ядер, например, данные о первых уровнях с определенными спином и четностью, например,

$J^\pi = 2^+$,

$J^\pi = 4^+$,

$J^\pi = 3^-$,

например, для изотопов Ca Gd или Sn.

Search parameters:

Z=50, Spin=3, order=1, Parity=- **3⁻**

Level Information

Nucleus	E _{level} (keV)	J?	T _{1/2}
110SN	2459	(3-)	
112SN	2354.53 14	3-	
114SN	2274.990 11	3-	1.7 ps +10-7
116SN	2266.159 19	3-	0.34 ps 4
118SN	2324.846 22	3-	0.19 ps +4-3
120SN	2400.30 5	3-	0.116 ps 8
122SN	2492.72 5	3-	0.079 ps +5-6
124SN	2602.495 25	3-	0.068 ps 6
126SN	2720 5	3-	
132SN	4351.94 14	(3-)	< 5.0 ps

2⁺, 4⁺, 3⁻

11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

10



Базы данных позволяют легко подобрать информацию о ядерных уровнях из экспериментов определенного типа, например, из реакций срыва и подхвата нуклона, позволяющую детально анализировать характеристики нейтронных оболочек (например, ядра ^{60}Ni)

Подхват нейтрона ($^{60}\text{Ni} \rightarrow ^{59}\text{Ni}$):

$^{60}\text{Ni}(p,d)^{59}\text{Ni}$, (pol-p,d), 10 работ, 17 уровней;

$^{60}\text{Ni}(d,t)^{59}\text{Ni}$, (pol-d,t), 4 работы, 7 уровней;

$^{60}\text{Ni}(^3\text{He},\alpha)^{59}\text{Ni}$, 10 работ, 31 уровень;

«Adopted Levels» для ^{59}Ni , 18 экспериментов, 268 уровней.

Срыв нейтрона ($^{60}\text{Ni} \leftarrow ^{61}\text{Ni}$):

$^{60}\text{Ni}(d,p)^{61}\text{Ni}$, 7 работ, 82 уровня;

$^{60}\text{Ni}(t,d)^{61}\text{Ni}$, 1 работа, данных нет;

$^{60}\text{Ni}(\alpha,^3\text{He})^{61}\text{Ni}$, 1 работа, 3 уровня;

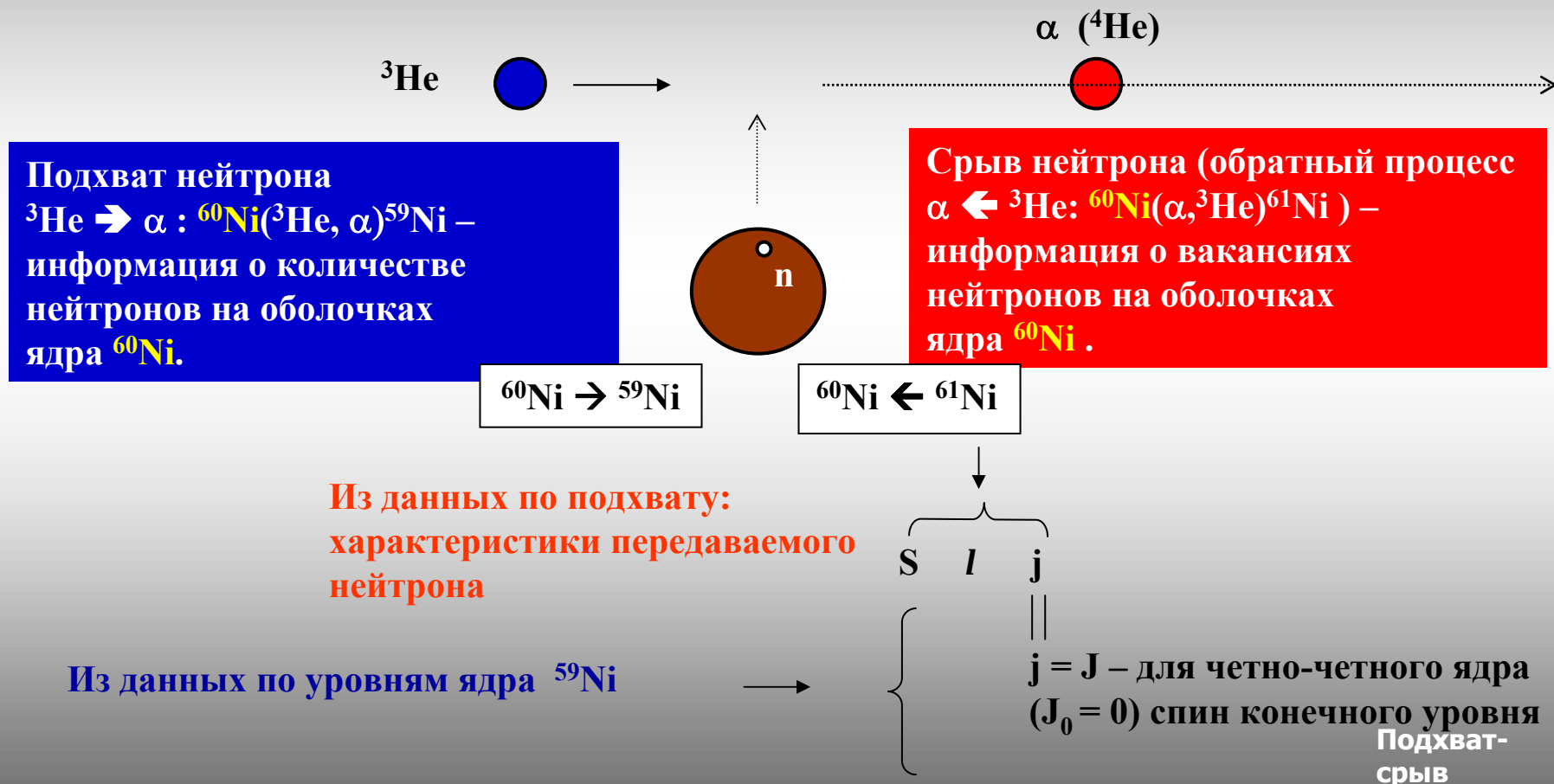
$^{60}\text{Ni}(^{14}\text{C},^{13}\text{C})^{61}\text{Ni}$, ($^{13}\text{C},^{12}\text{C}$) ^{61}Ni , 2 работы, 8 уровней;

«Adopted levels» для ^{61}Ni , 24 эксперимента, 264 уровня.

Схема

Исследование одночастичной структуры ядер: совместный анализ данных по реакциям нуклонного срыва и подхвата

Реакция подхвата ($\rightarrow$) $^{60}\text{Ni}(^3\text{He}, \alpha)^{59}\text{Ni}$ нейтрона на ядре ^{60}Ni





Метод совместной оценки данных по реакциям нуклонного срыва и подхвата

Основная идея: перенормировка (n^+ и n^-) данных таким образом, чтобы соотношение

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

выполнялось для трех одночастичных орбит, ближайших к поверхности Ферми $((n, l, j) = (n_1, l_1, j_1), (n_2, l_2, j_2), (n_3, l_3, j_3))$.

Совместное решение трех уравнений – определение n^+ и n^- и оценка спектроскопических сил и значений j для различных переходов.

Определение (R.K.Bansal, etc, Phys.Lett., 19 (1965) 223)
заселенностей

$$N_{nlj} = \frac{[n^- S_{nlj}^- + (2j + 1 - n^+ S_{nlj}^+)]}{2(2j + 1)}$$

и энергий

$$-E_{nlj} = (1 - N_{nlj})[B(A + 1) - e_{nlj}^+] + N_{nlj}[B(A) + e_{nlj}^-]$$

одночастичных орбит ($\epsilon_{n,l,j}^+$, $\epsilon_{n,l,j}^-$ – центры тяжести распределений сил реакций срыва и подхвата по состояниям конечных ядер, $B(A)$ и $B(A + 1)$ – энергии отделения нуклона).



Работа метода совместной оценки:

Согласование ($n = 0.93 - 1.04$) значений C^2S для уровней ядра ^{59}Co по реакциям $(^{60}\text{Ni}(d, ^3\text{He})^{59}\text{Co}$ и $^{60}\text{Ni}(^3\text{H}, \alpha)^{59}\text{Co}$).

Энергия уровня, кэВ	J^π	L	C^2S	
			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	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%)



Энергии и заселенности различных подболочек
были определены для большого числа ядер

42,44,46,48,50,52,54Ca,

50,52,54,56,58,60,62Cr,

54,56,58Fe,

58,60,62,64Ni,

84,86,88Sr,

90,92,94,**96Zr**,

112,114,116,118,120,122,124Sn,

среди которых -
и ядра вблизи области β -стабильности
и ядра с заметным избытком нейтронов.



Нейтронные подболочки

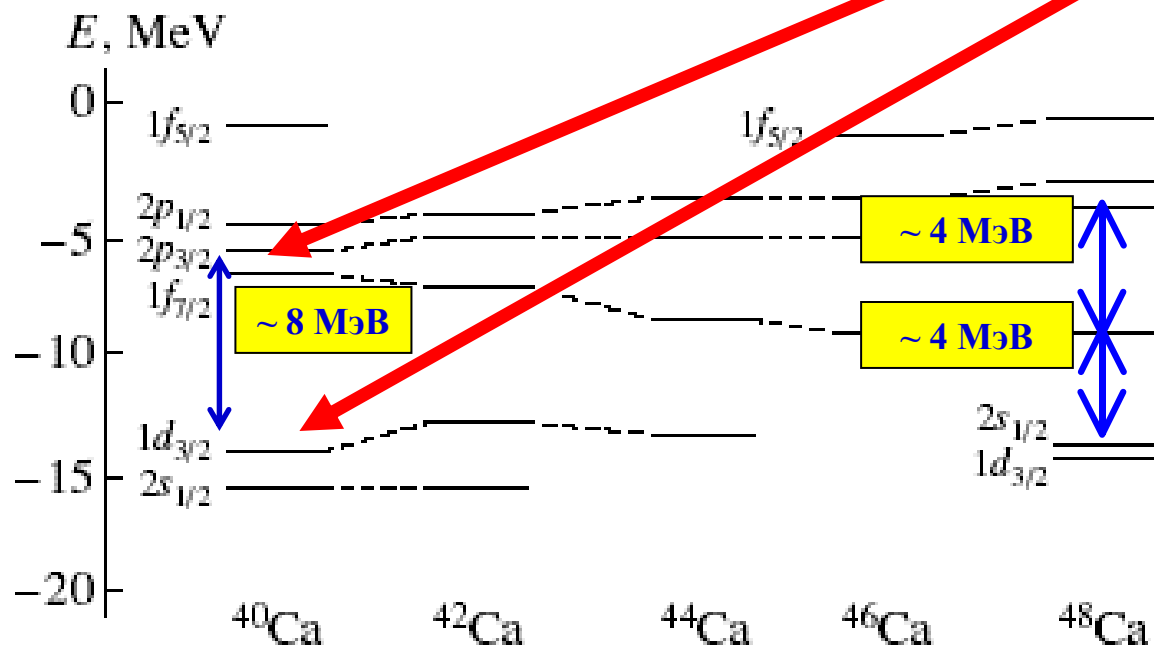
ядер $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$

	^{40}Ca	^{42}Ca	^{44}Ca	^{46}Ca	^{48}Ca
$1f_{5/2}$	-	-	-	-	0.00
	-	-	-	-	3817 (128)
$2p_{1/2}$	0.00	-	-	-	0.01 (1)
	-2378 (28)	-	-	-	2353 (645)
$2p_{3/2}$	0.09 (0.02)	0.02 (0.01)	0.05 (2)	-	0.01 (1)
	732 (289)	1300 (132)	4989 (129)	-	3954 (368)
$1f_{7/2}$	0.06 (2)	0.08 (3)	0.13 (3)	0.02 (2)	0.02 (2)
	1669 (152)	4092 (190)	7681 (174)	7892 (596)	8626 (514)
$1d_{3/2}$	0.97 (3)	0.76 (3)	0.72 (1)	0.94 (3)	0.94 (5)
	9523 (1195)	10027 (1122)	10813 (8)	13533 (306)	15960 (600)
$2s_{1/2}$	1.00	0.90	0.77	0.93 (1)	0.84 (5)
	10942	> 11286	11395	13937 (58)	14415 (655)
$1d_{5/2}$	0.96	-	-	-	-
	14321.37	-	-	-	-



Нейтронные подоболочки

ядер $^{40,42,44,46,48}\text{Ca}$



В ядре ^{40}Ca подоболочка $1f_{7/2}$ - пустая, а $1d_{3/2}$ - заполненная (N = 20), между ним большая «энергетическая щель» ~ 8 МэВ.

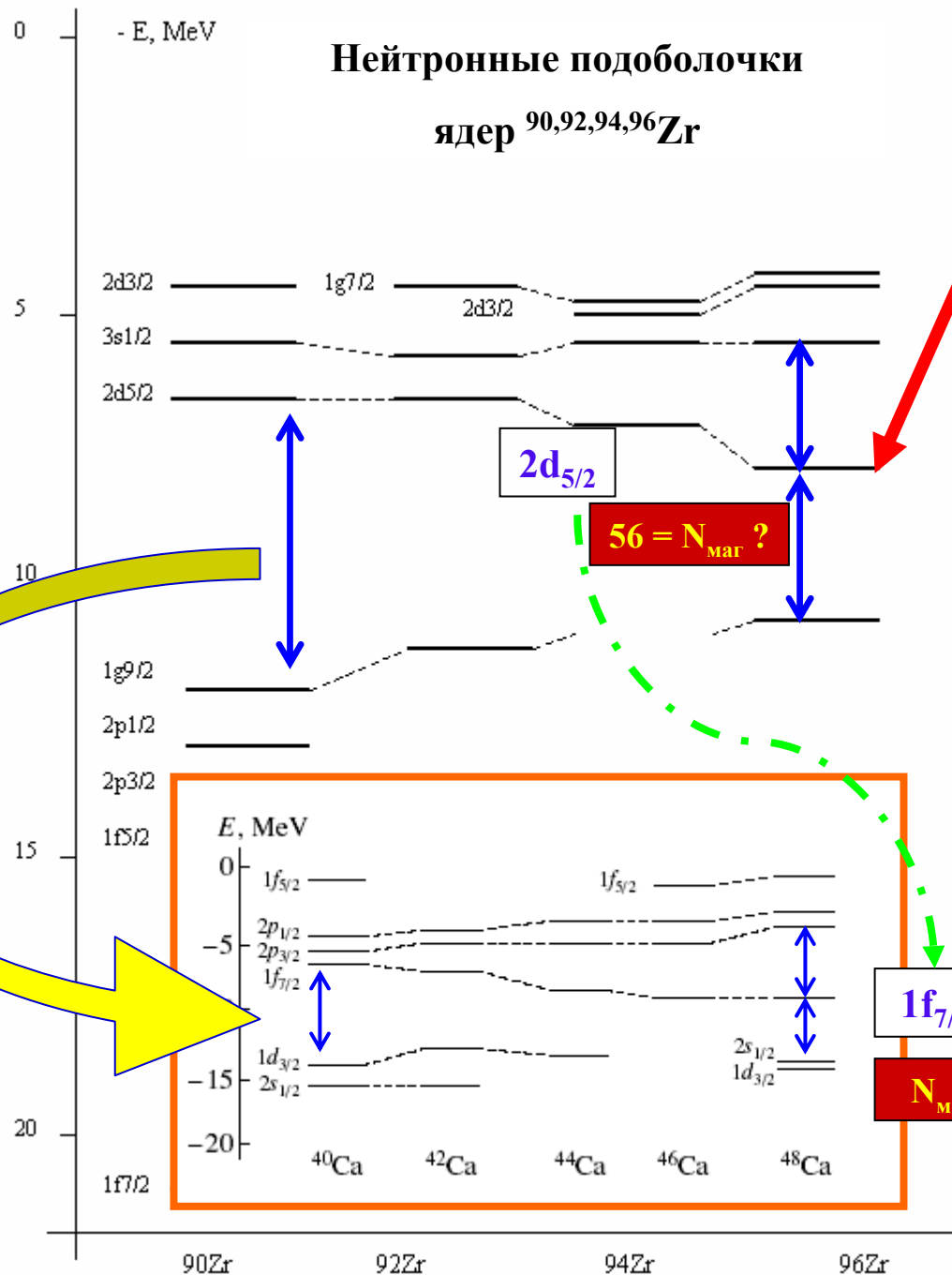
Добавление нейтронов на подоболочку $1f_{7/2}$ приводит к ее понижению.

В ядре ^{48}Ca заполненная подоболочка $1f_{7/2}$ (N = 28) располагается посередине между заполненной $2s_{1/2}$ и пустой $2p_{3/2}$ - «отдельная оболочка».

^{40}Ca (20,20) - дважды магические ядра - ^{48}Ca (20,28)

$^{40-48}\text{Ca}$

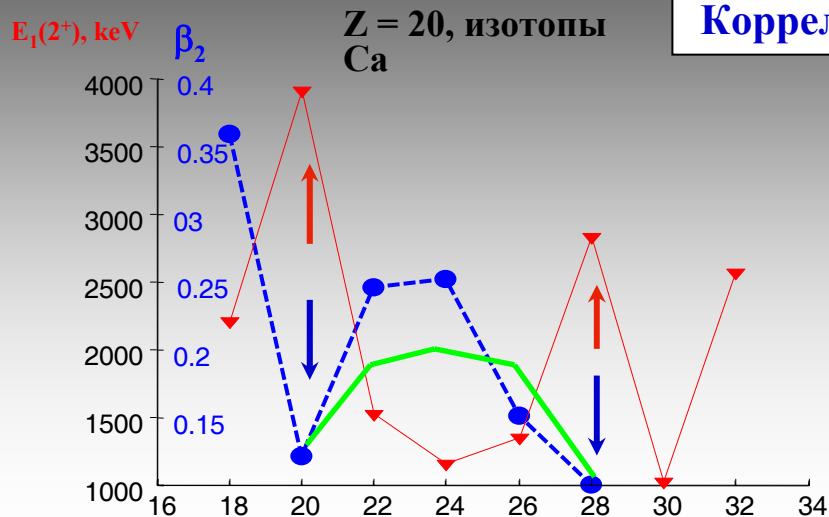
Проблема:
не является
ли ядро ^{96}Zr
магическим?



В ядре ^{96}Zr
подоболочка
 $2d_{5/2}$ ($N = 56$)
занимает
промежуточное
равноудаленное
положение между
подоболочками
 $1g_{9/2}$ и $3s_{1/2}$ и
приобретает все
свойства
«отдельной
оболочки» (не
является ли число N
 $= 56$ магическим?).



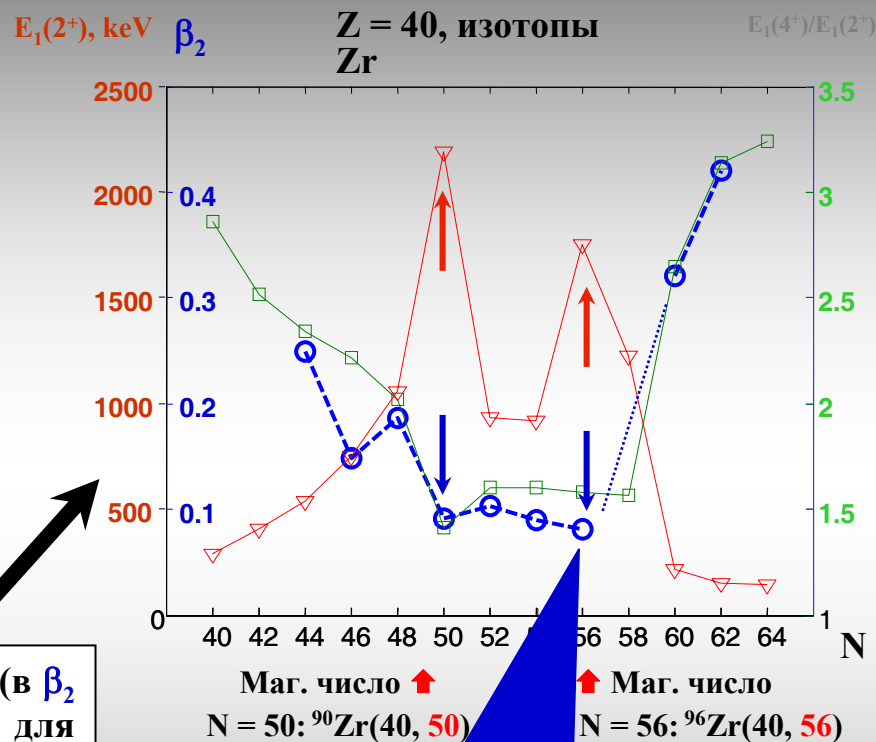
Корреляция поведения «параметров магичности» Zr - Ca



Два максимума в $E_1(2^+)$ и минимума в β_2 для дважды магических ядер $^{40}\text{Ca}(20,20)$ $^{48}\text{Ca}(20,28)$.

Два максимума в $E_1(2^+)$ и минимума (в β_2 и в отношении $E_1(4^+)/E_1(2^+)$) для магического ядра $^{90}\text{Zr}(40,50)$ и ядра $^{96}\text{Zr}(40,56)$ – тоже магического?

^{96}Zr – магическое ядро ($N = 56$).



Маг. число $\uparrow$
 $N = 50: ^{90}\text{Zr}(40, 50)$

Маг. число $\uparrow$
 $N = 56: ^{96}\text{Zr}(40, 56)$

Квадрупольная деформация ($\beta_2 = 0.08$) ядра ^{96}Zr меньше, чем не только у соседних изотопов циркония, но и у дважды магических ядер ^{40}Ca ($\beta_2 = 0.123$) и ^{48}Ca ($\beta_2 = 0.106$).

Zr - Ca



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Является ли число $N = 56$ магическим (только для $Z = 40$)?

$E(2^+)$, keV

β_2

2^+

$N = 50$

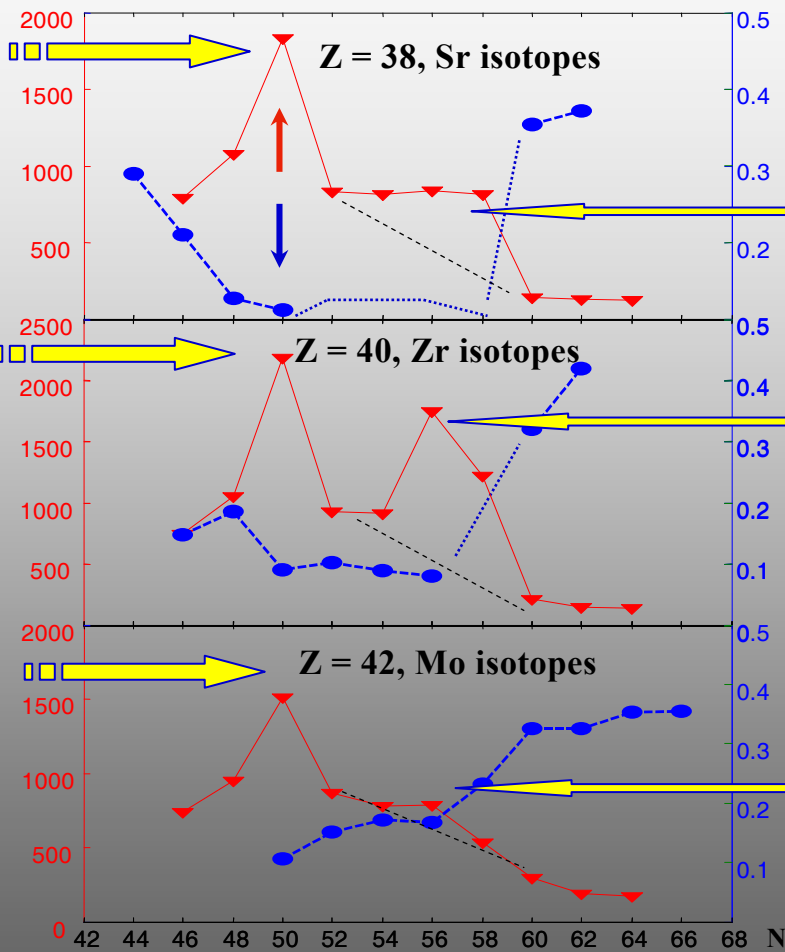
является
магическим для
 $Z = \dots, 36, 38$

$N = 50$

является
магическим для
 $Z = 40$

$N = 50$

является
магическим для
 $Z = \dots 42, 44, \dots$



Search parameters:

$Z=36$, Spin=2, order=1, Parity=+

Nucleus	$E_{level}(keV)$	J^π	$T_{1/2}$
72KR	709.1 3	(2+)	
74KR	455.80 10	2+	16.3 ps 14
76KR	423.96 7	2+	24.9 ps 7
78KR	455.04 3	2+	23.9 ps 13
80KR	616.60 10	2+	8.3 ps 5
82KR	776.520 3	2+	4.45 ps 14
84KR	881.615 3	2+	4.35 ps 18
86KR	1564.75 10	2+	0.308 ps 17
88KR	775.31 4		
90KR	707.13 5		
92KR	769.1 5		
94KR	665.5		

$Z = 36$

Не является ли $N = 56$
«немного» магическим
и для
 $Z = 38$?

$N = 56$

является
магическим для
 $Z = 40$!

$N = 56$

не является магическим
для
 $Z = 42$.

Search parameters:

$Z=44$, Spin=2, order=1,

Nucleus	$E_{level}(keV)$	J^π	$T_{1/2}$
88RU	616.2 5		
90RU	738.00 10		
92RU	864.6 10		
94RU	1430.51 22	2+	
96RU	832.57 5	2+	2.81 ps 11
98RU	652.44 4	2+	5.5 ps 8
100RU	539.506 5	2+	12.53 ps 15
102RU	475.079 24	2+	18.3 ps 2
104RU	358.03 7	2+	56.4 ps 10
106RU	270.07 4	2+	
108RU	242.24 7	2+	0.36 ns 3

$Z = 44$

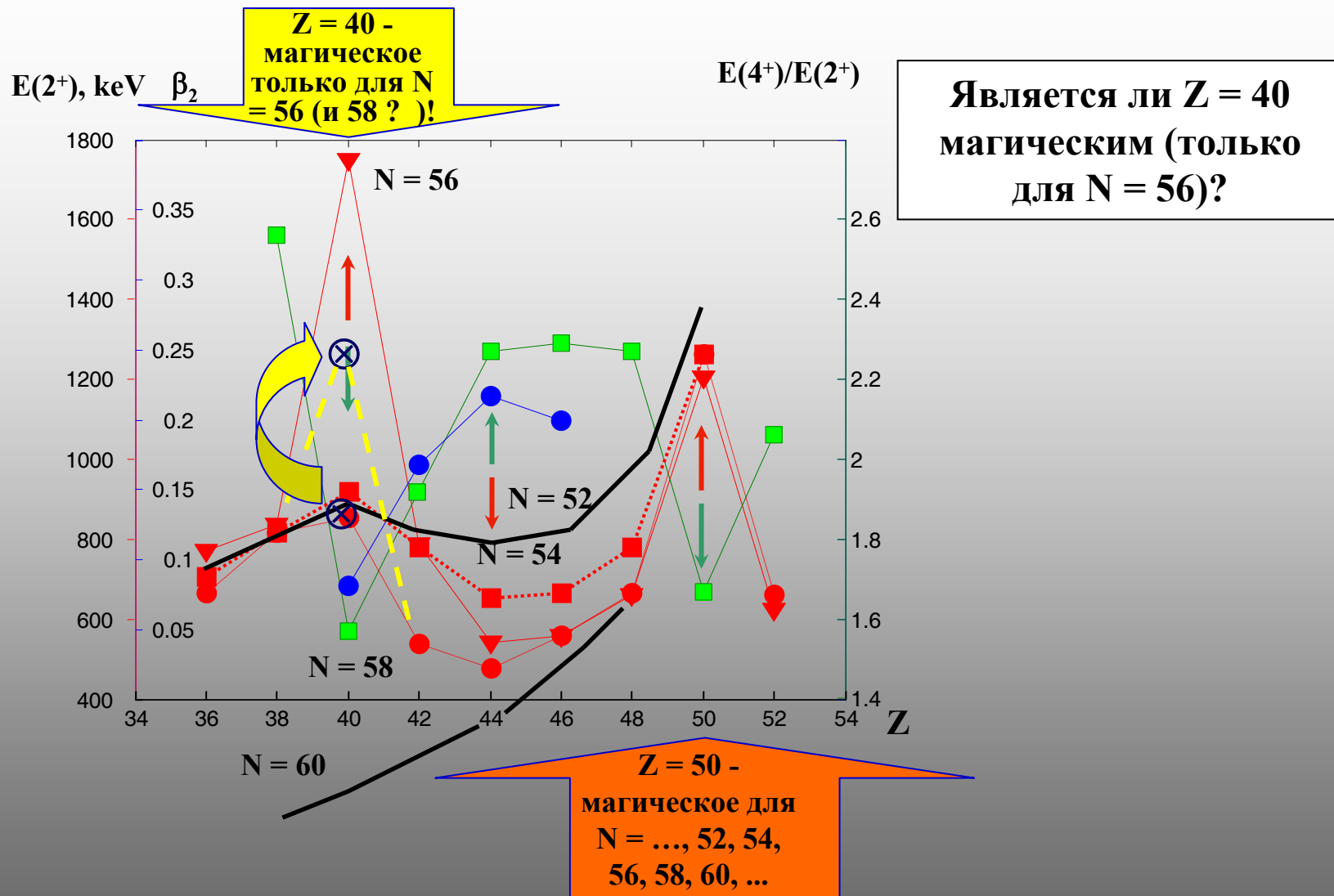
2^+

$N = 56, Z = 40$

20



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



$N = 54-56-58$



$Z = 40$ – магическое число (для $N = 56$):
возрастание N ведет к увеличению энергетической щели ΔE
между заполненной $2p_{1/2}$ и пустой $1g_{9/2}$ подболочками
в 2 раза - от **1.56 МэВ для ^{90}Zr до **3.11** МэВ для ^{96}Zr**

ΔE, MeV		1.56	2.68	2.63	3.11
Nlj	Occupation probability energy	^{90}Zr	^{92}Zr	^{94}Zr	^{96}Zr
1g _{9/2}	N_{nlj}	0.06(5)	0.08(5)	0.09(5)	0.00(0)
	$-E_{nlj}$	5.41(54)	4.98(142)	6.74(80)	7.48(75)
2p _{1/2}	N_{nlj}	0.58(5)	0.49(3)	0.75(5)	0.81(5)
	$-E_{nlj}$	6.97(70)	7.66(77)	9.37(94)	10.59(106)
1f _{5/2}	N_{nlj}	1.00(2)	1.00(2)	1.00(2)	0.94(5)
	$-E_{nlj}$	10.37(110)	10.93(110)	11.490(115)	12.17(122)
2p _{3/2}	N_{nlj}	-	-	0.87(5)	-
	$-E_{nlj}$	-	-	11.11(112)	-

Заселенности N_{nlj} и одночастичные энергии $-E_{nlj}$ (МэВ)
протонных орбит в ядрах $^{90,92,94,96}\text{Zr}$



**Таким образом,
систематический анализ хорошо известных данных
свидетельствует о следующем:
ядра вблизи $Z = 40$ и $N = 56$ имеют уникальные свойства –
изотопы с $Z = 40$ ведут себя так, как будто пересекают
магическую линию $N = 56$, а изотоны с $N = 56$ - так,
как будто пересекают магическую линию $Z = 40$.**

**В центре этого пересечения находится ядро ^{96}Zr , которое
имеет набор многих свойств и параметров, сходных с
теми, которые характерны для типичных магических ядер.**

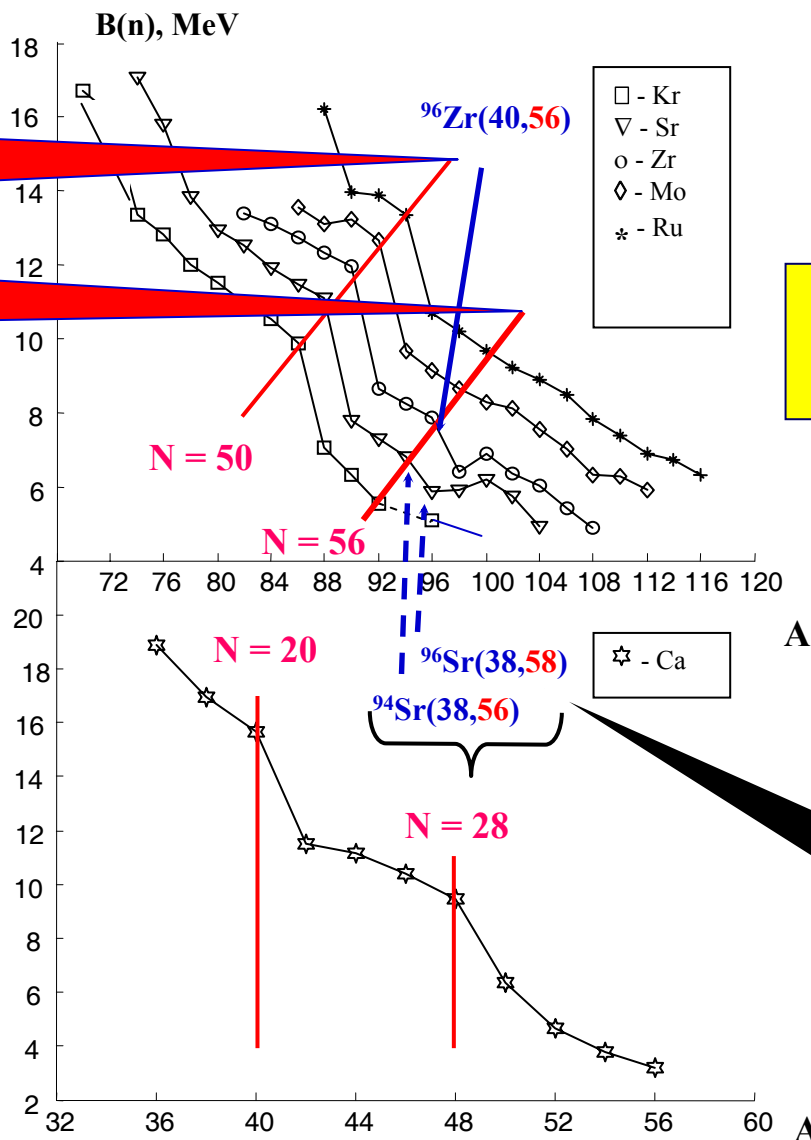
**Следовательно, ядро ^{96}Zr может быть идентифицировано
как новое дважды магическое ядро.**



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Заполнение
оболочки $1g_{7/2}$

Заполнение
оболочки $2d_{5/2}$

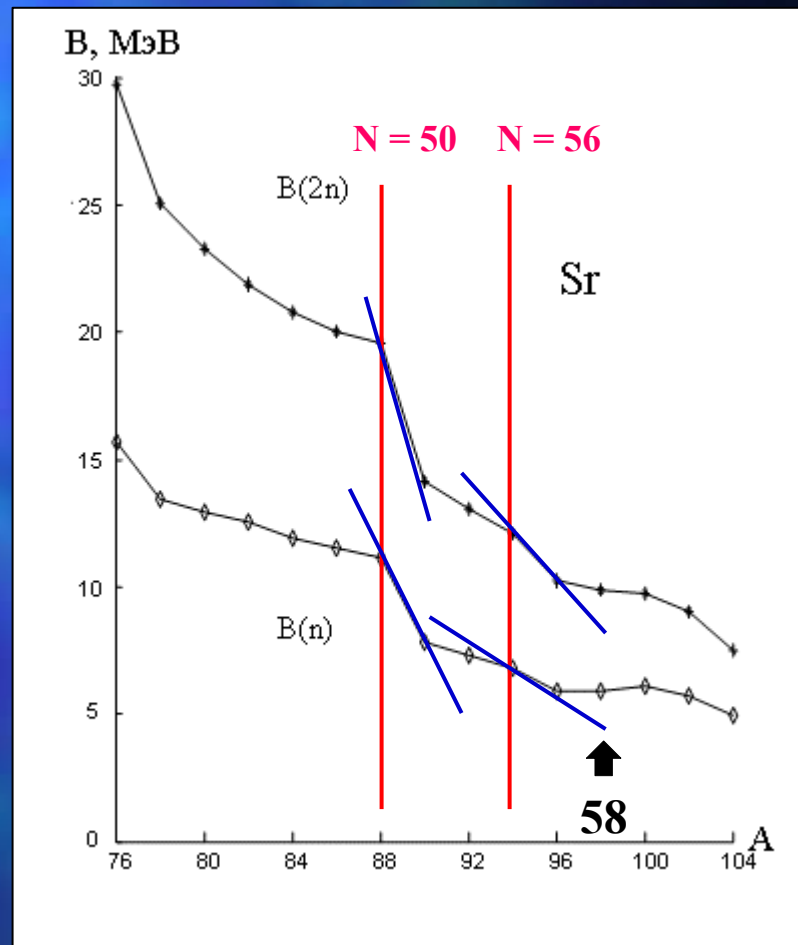
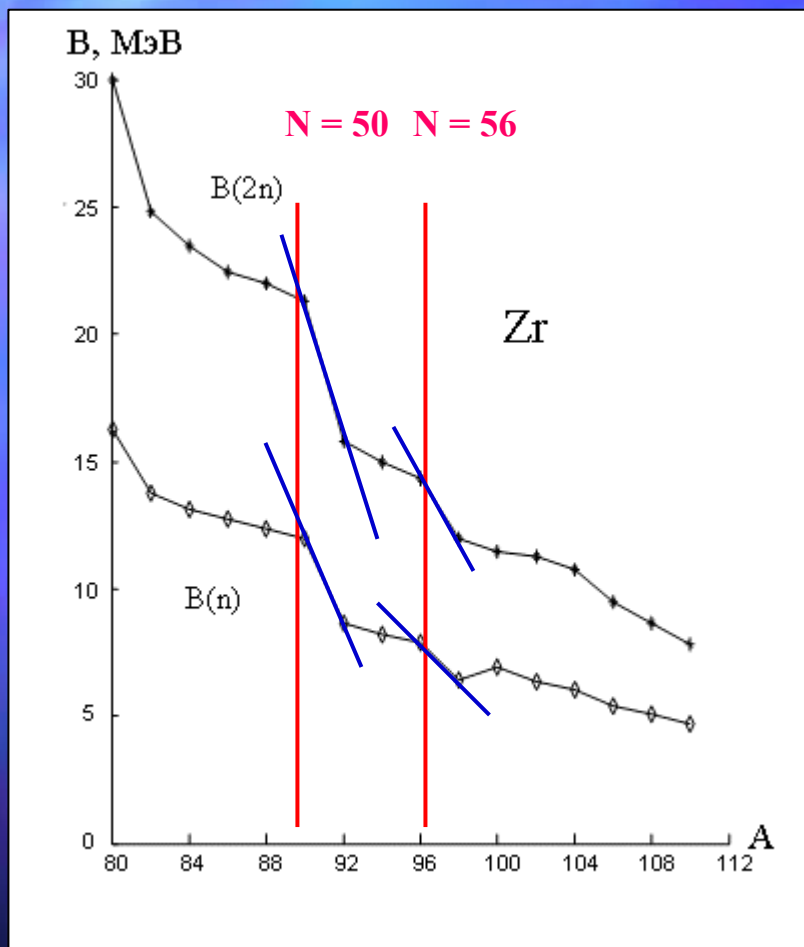


Характерные нерегулярности в
 A -зависимости энергии
отделения нейтрона $B(n)$

Магическое $N = 56$
и «немного» магическое
 $N = 58$?



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

Zr - Sr -
 $B(n)$, $B(2n)$
25

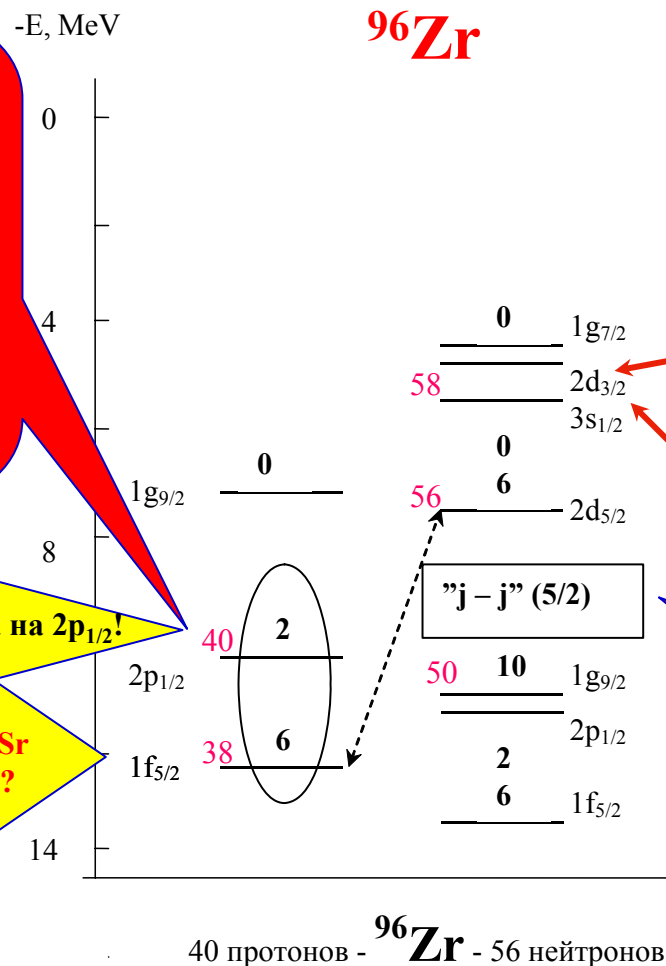


Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

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}Zr : 2 протона на $2p_{1/2}$!

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



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

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

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

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

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}Zr - pairs

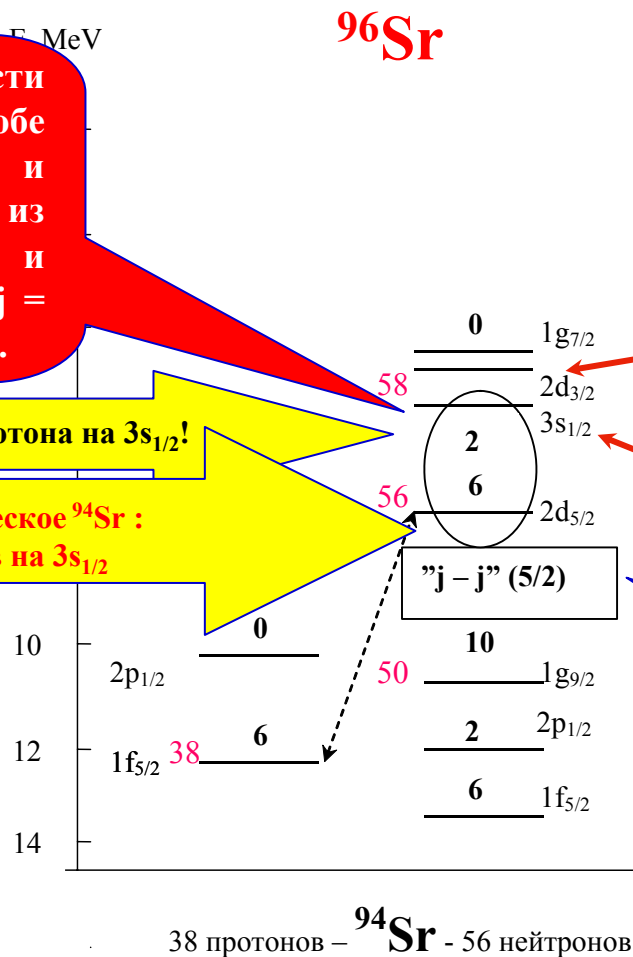


Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Пик 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 - $\pi 2p_{1/2}$.

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

«Немного» магическое ^{94}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 подоболочки с одинаковым значением момента j , то есть $\pi 1f_{5/2}$ и $\nu 2d_{5/2}$ - « $j - j$ » (5/2) связь.



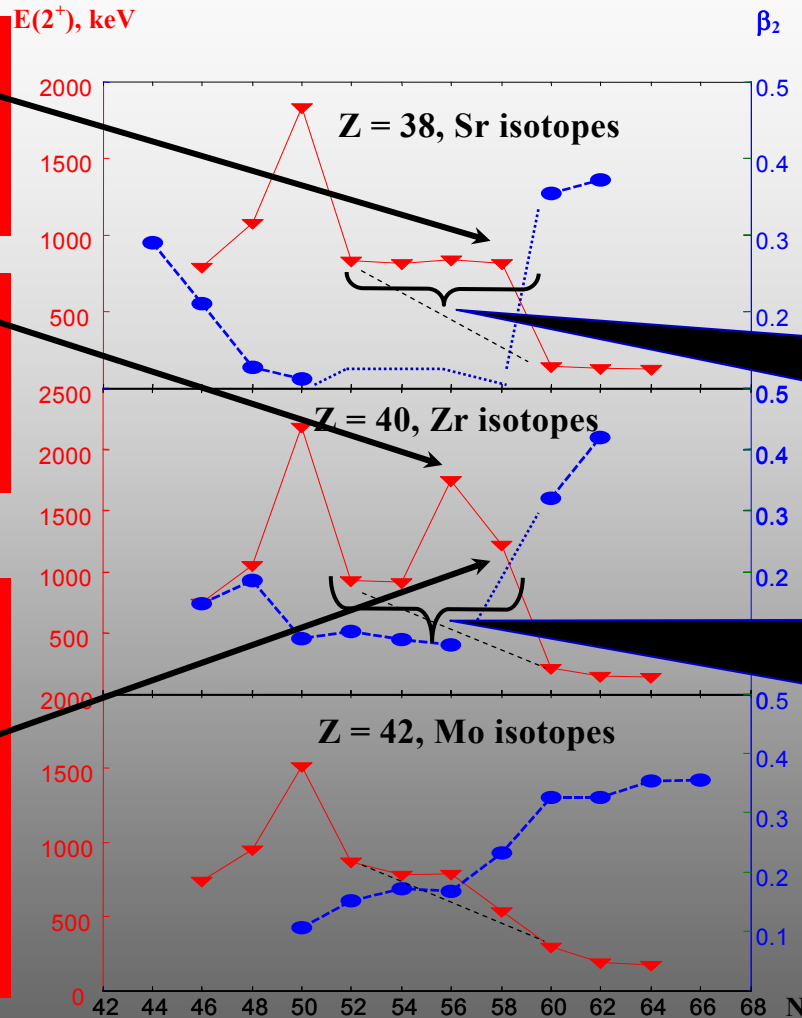
Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Является ли число $N = 56$ магическим (только для $Z = 40$)?

«2 нейтрона
на $3s_{1/2}$ »
в ^{96}Sr ($N = 58$)

«2 протона на
 $2p_{1/2}$ »
в ^{96}Zr ($N = 56$)

«2 протона
на $2p_{1/2}$ »
+
2 нейтрона
на $3s_{1/2}$
в ^{98}Zr ($N = 58$)



Протоны - заполненная $f_{5/2}$ оболочка

52, 54, 56 нейтронов -
заполнение подоболочки $2d_{5/2}$,
 $E(2^+)$ остается ~ 0.9 МэВ,
58 нейтронов -
заполнение подоболочки $3s_{1/2}$

52, 54, 56 нейтронов -
заполнение подоболочки $2d_{5/2}$,
 $E(2^+)$ остается ~ 0.9 МэВ,
58 нейтронов -
заполнение подоболочки $3s_{1/2}$,
 $E(2^+)$ имеет большую
величину ~ 1.2 МэВ

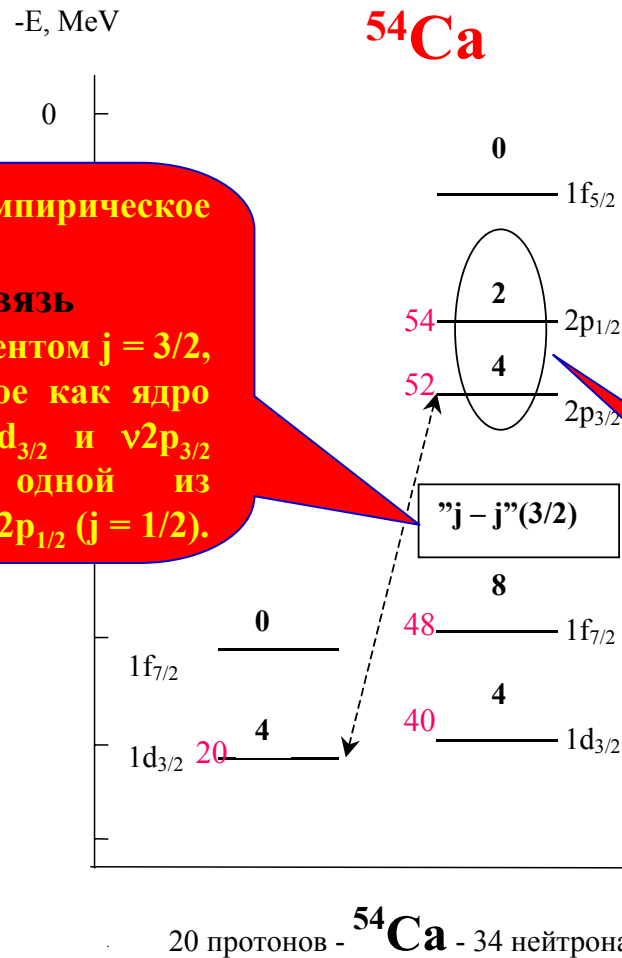


Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Если применить эмпирическое правило

« $j - j$ » (3/2) связь

к подоболочкам с моментом $j = 3/2$, получится не что иное как ядро ^{54}Ca : замкнутые $\pi 1d_{3/2}$ и $\nu 2p_{3/2}$ подоболочки, над одной из которых - замкнутая $\nu 2p_{1/2}$ ($j = 1/2$).



^{54}Ca - магическое: есть 2 нейтрона на $2p_{1/2}$

^{52}Ca - «немного» магическое: нет 2 нейтронов на $2p_{1/2}$

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

S.N.Liddick et.al. Development of Shell Closures at $N = 32, 34, \dots$ Phys.Rev., C 70 (2004) 064303.

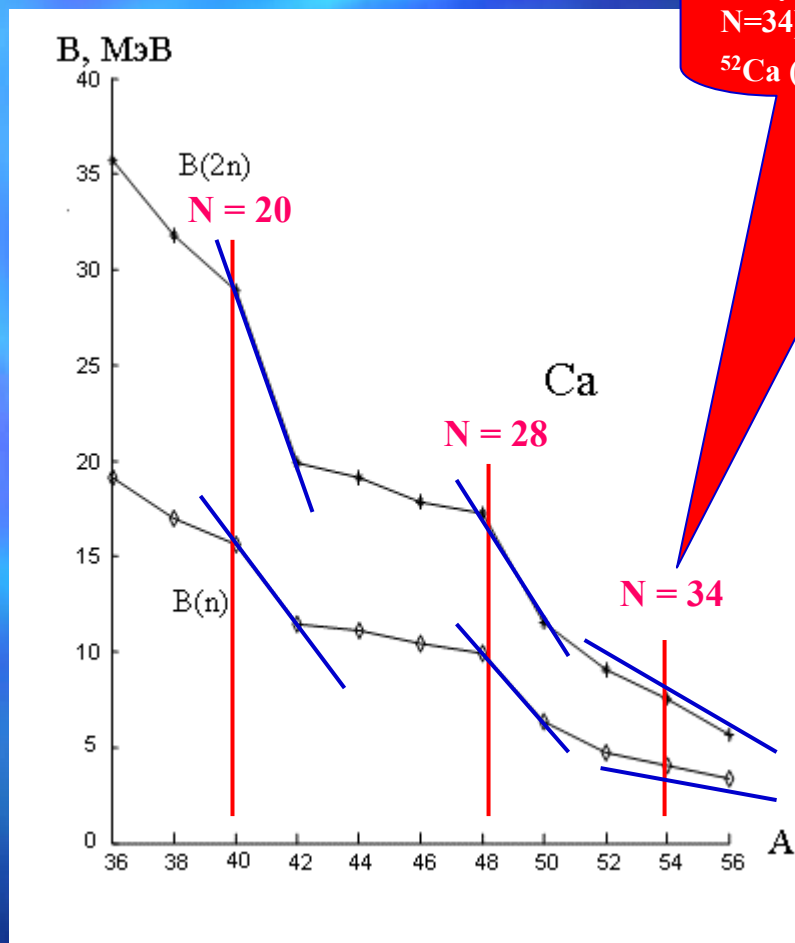
S.N.Liddick et.al. Lowest Excitations in ^{56}Ti and the Predicted $N = 34$ Shell Closure. Phys.Rev.Lett., 92 (2004) 072502.

D.E.Appelbe et.al. Detail -ray Spectroscopy of ^{55}Cr and ^{56}Cr : Confirmation of the Subshell Closure at $N = 32$. Phys.Rev.,C67 (2003) 034309.

^{54}Ca - pairs



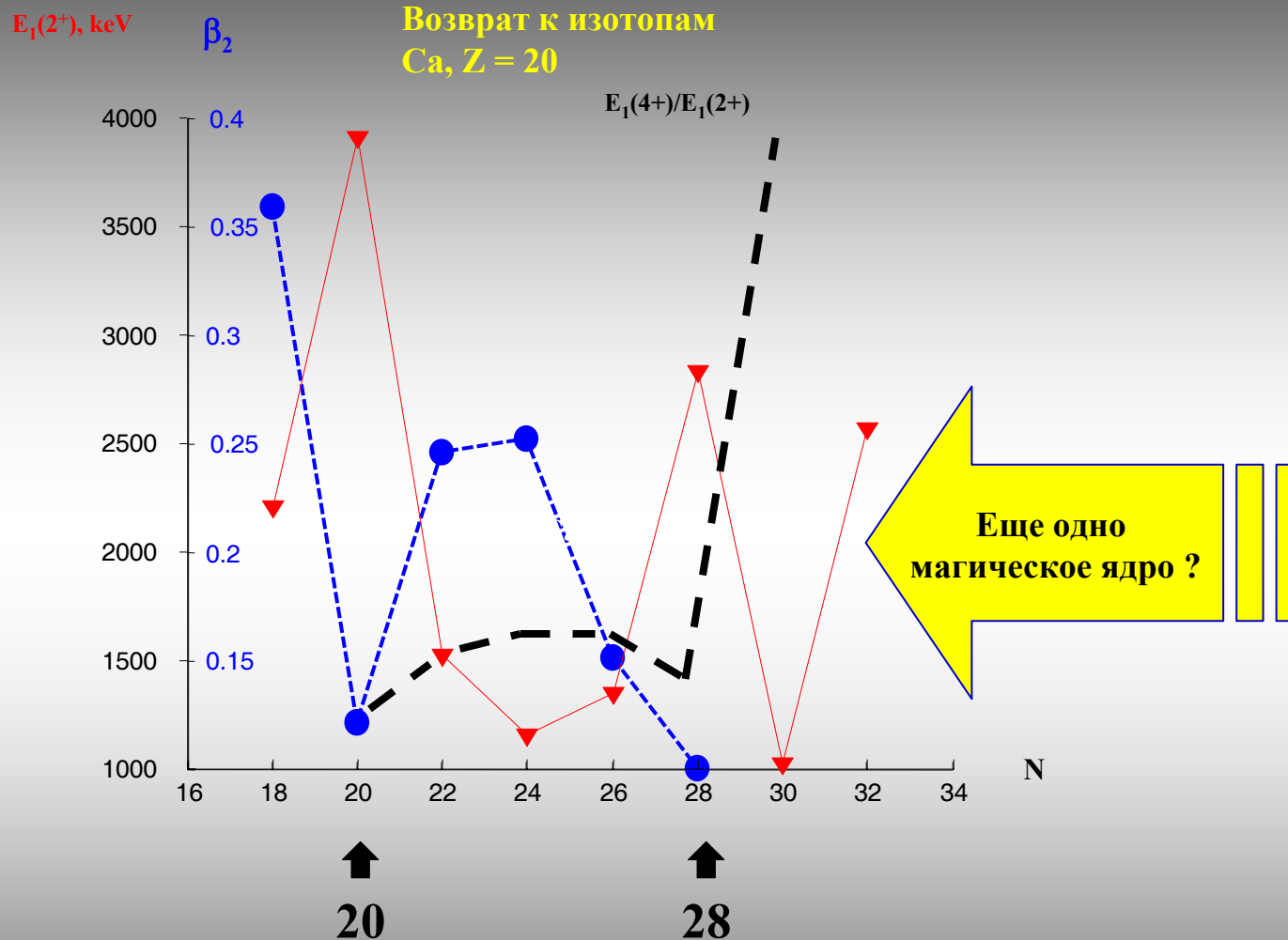
Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



При желании можно заметить, что углы наклона для ^{54}Ca ($Z=20$, $N=34$) больше, чем для соседнего ^{52}Ca ($Z=20$, $N=32$).



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



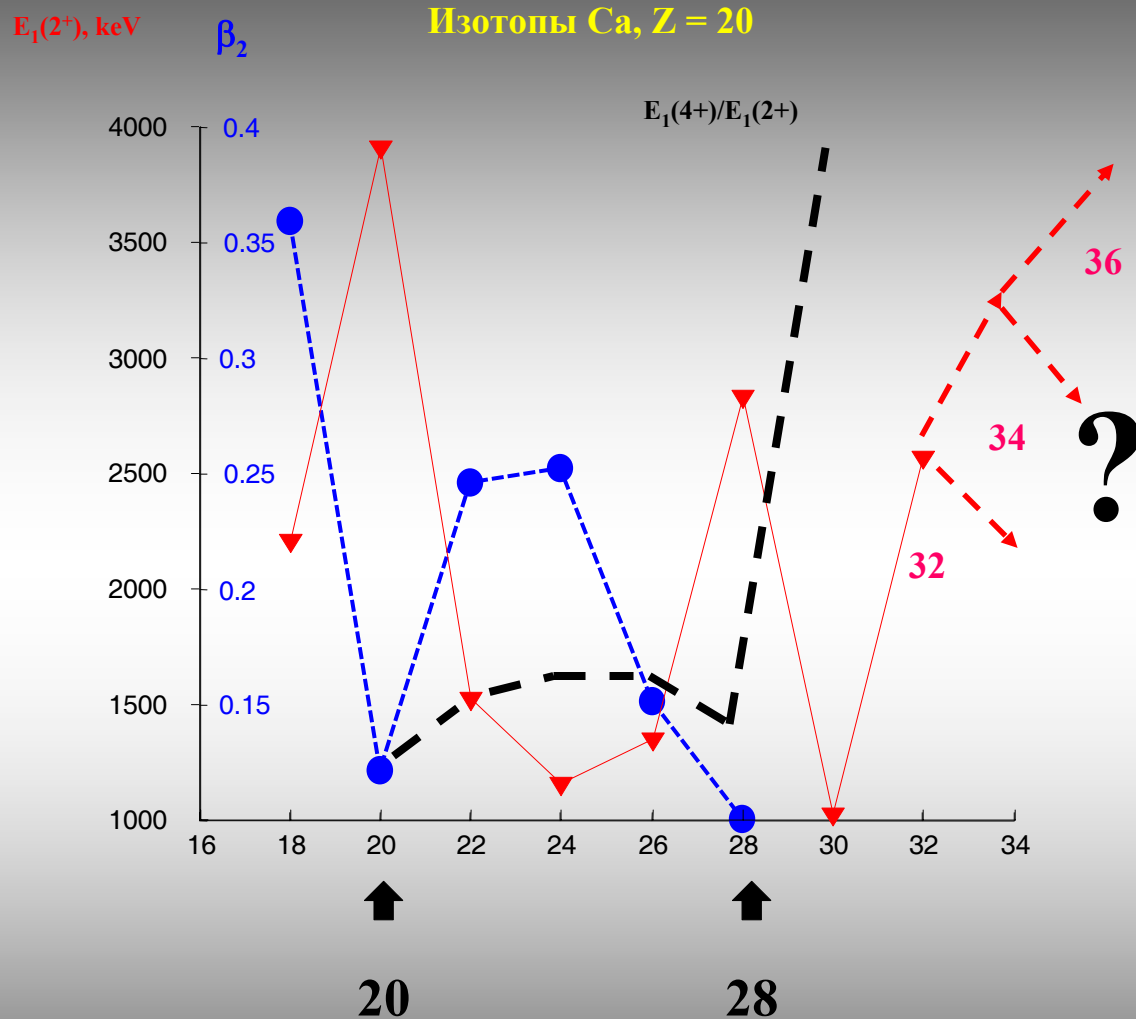
Дважды магическое $^{40}\text{Ca}(20, 20)$

Дважды магическое $^{48}\text{Ca}(20, 28)$

Изотопы Ca



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

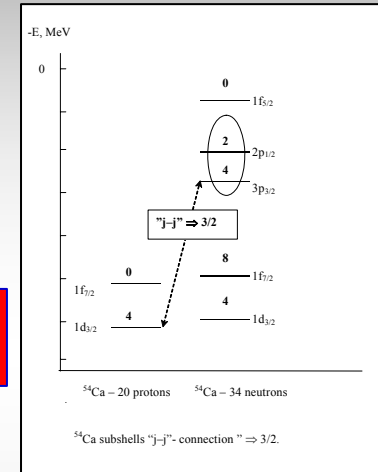
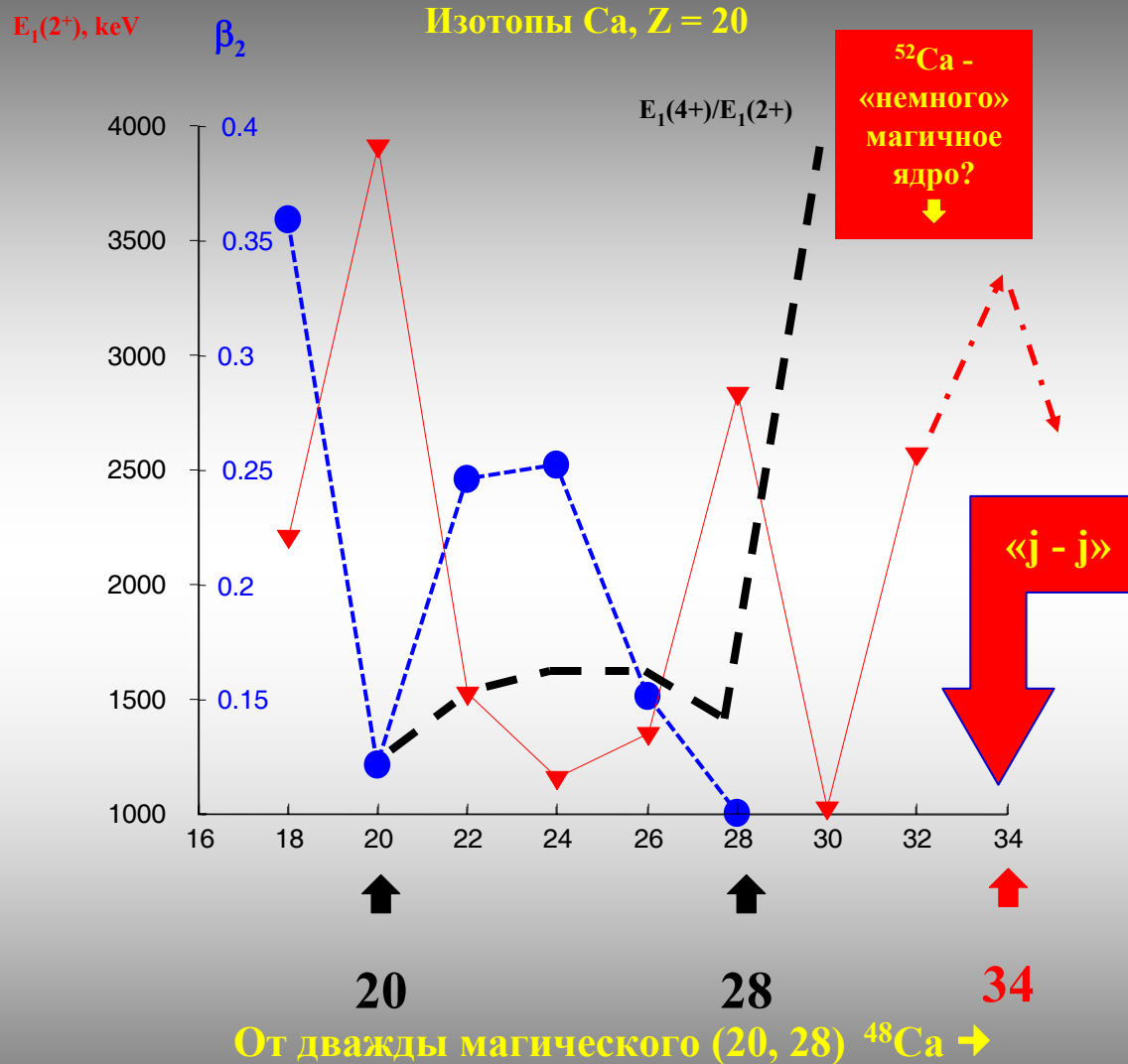


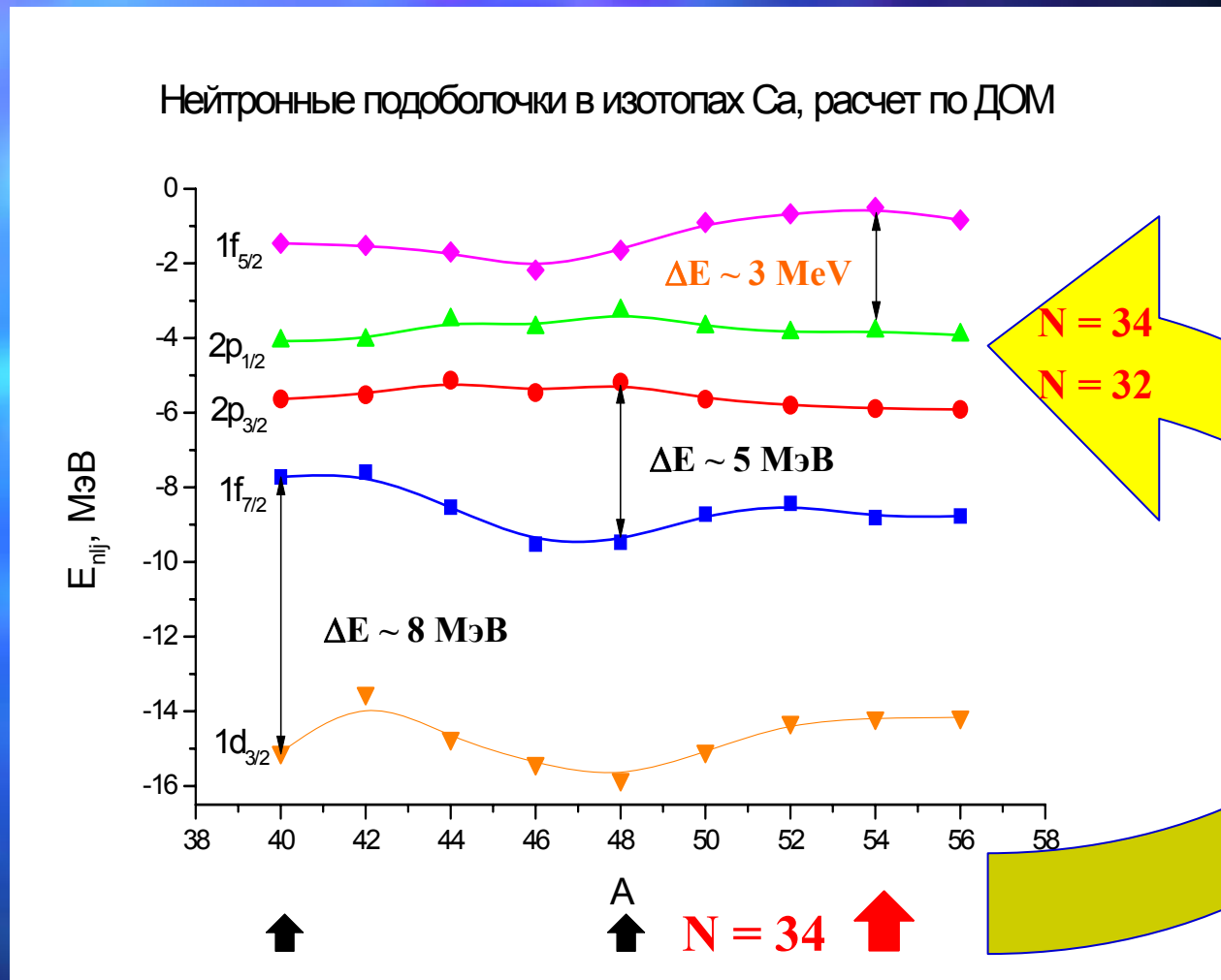
От дважды магического (20, 28)⁴⁸Ca → к чему?

⁵⁴Ca - ?



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ





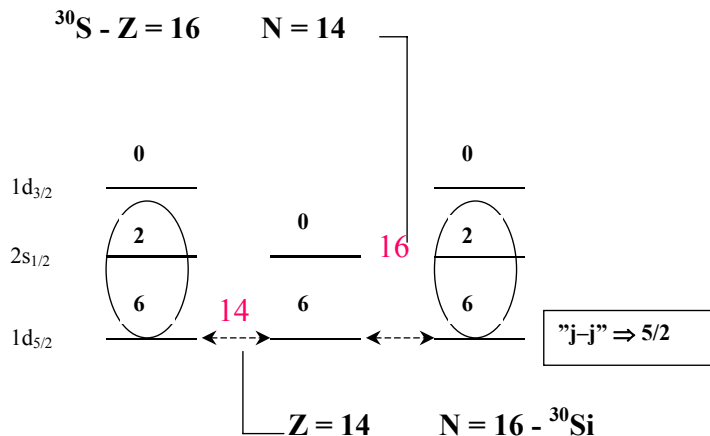
Большие энергетические щели между соответствующими подболочками в магических ядрах хорошо описываются в дисперсионной оптической модели (ДОМ).

Ca - щели



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

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



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 $Z/N = 16$!

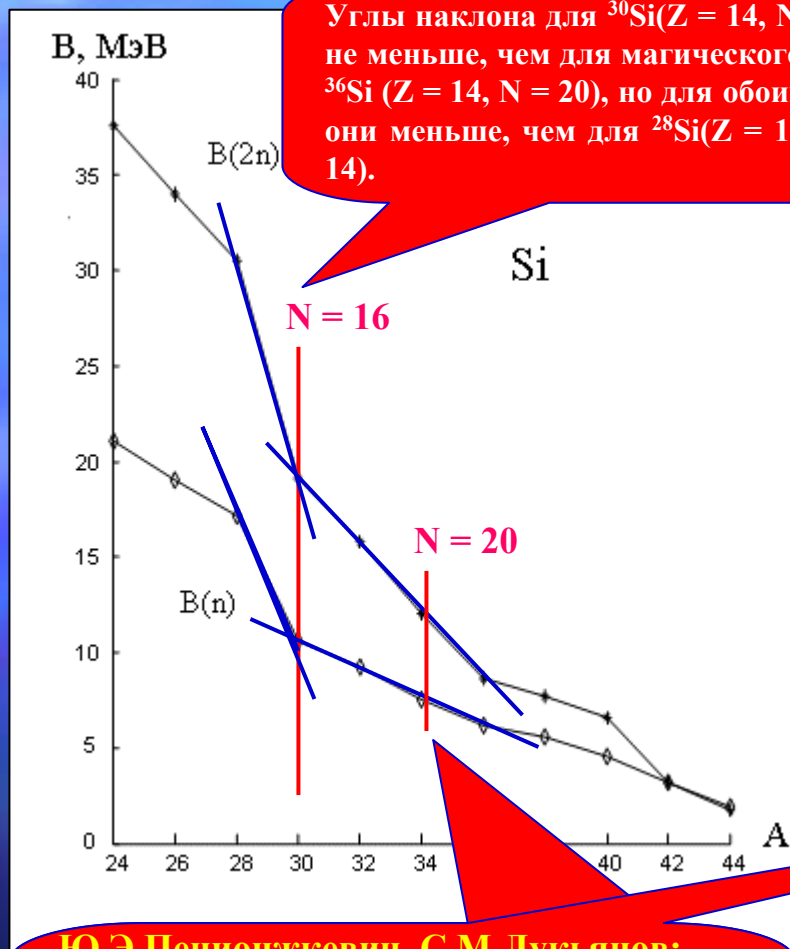
N = 14					Z = 14				
Nucl	Z	E(2 ⁺), keV	E(4 ⁺)/E(2 ⁺)	β_2	Nucl	N	E(2 ⁺), keV	E(4 ⁺)/E(2 ⁺)	β_2
²⁴ Ne	10	1982		0.41	²⁶ Si	12	1796	2.92	0.44
²⁶ Mg	12	1809	2.39	0.48	²⁸ Si	14	1779	2.6	0.42
²⁸ Si	14	1780	2.6	0.41	³⁰ Si	16	2235	2.36	0.32
³⁰ S	16	2211		0.34	³² Si	18	1942	2.69	0.35
					³⁴ Si	20	3228		0.18
					³⁶ Si	22	1399		0.26
					³⁶ Si	24	1084		0.25

Магическое число
 $N = 20$

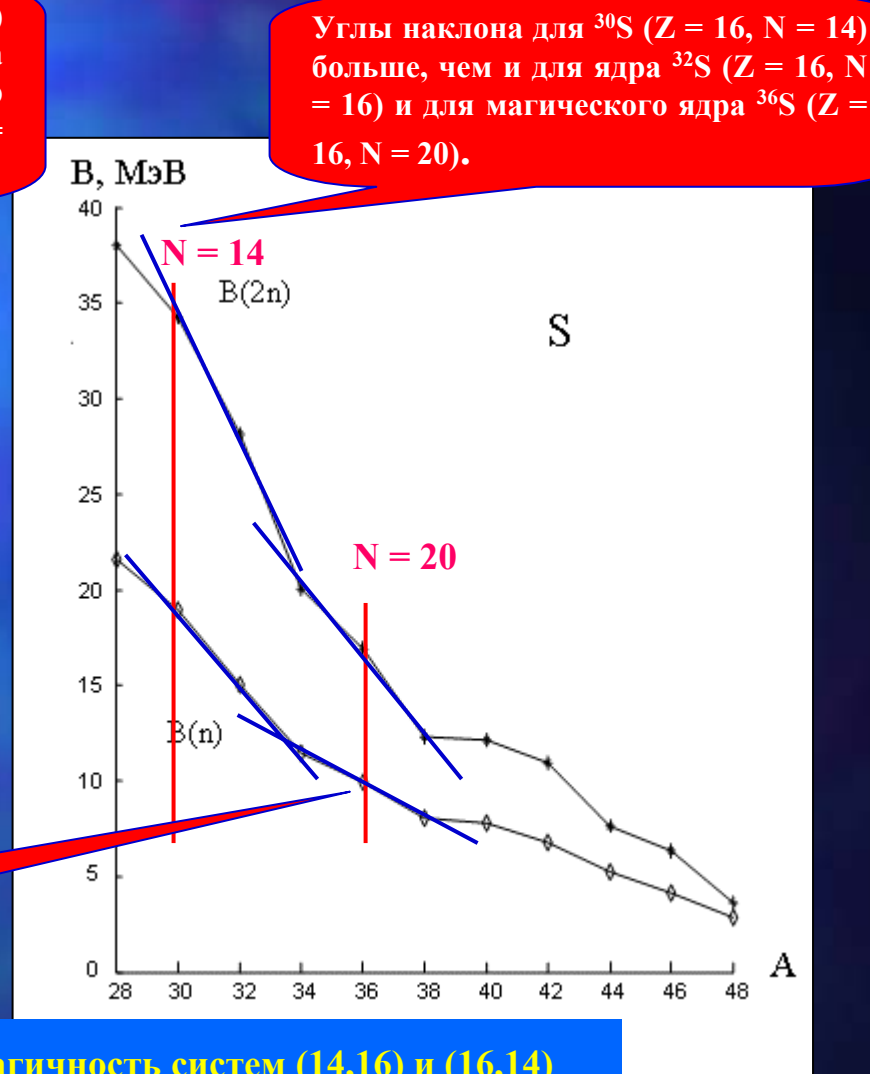
$^{30}\text{Si} - ^{30}\text{S}$



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



Ю.Э.Пенионжкевич, С.М.Лукьянов:
на основании анализа многих данных применительно к ядрам $^{34}\text{Si}(14,20)$ и $^{36}\text{S}(16,20)$ сделан вывод о том, что числа 14 и 16 являются магическими.



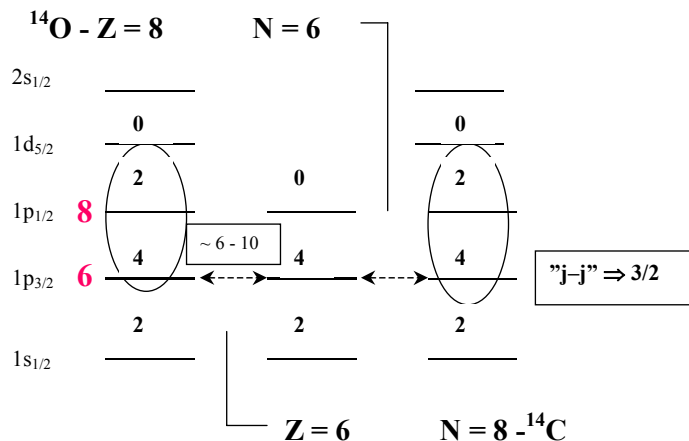
Магичность систем (14,16) и (16,14) больше, чем систем (14,20) и (16,20)?

Si - S -
B(n), B(2n)
36



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

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



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 ⁺), кэВ	E(4 ⁺ ₁)/E(2 ⁺ ₁)	β ₂	Ядро	N	E(2 ⁺), кэВ	E(4 ⁺ ₁)/E(2 ⁺ ₁)	β ₂
¹² Be	4	2102			¹⁴ O	6	6590	1.53	
¹⁴ C	6	7012	1.53	0.36	¹⁶ O	8	6917	1.52	0.36
¹⁶ O	8	6917	1.52	0.36	¹⁸ O	10	1982	1.8	0.36
¹⁸ Ne	10	1887	1.79	0.69	²⁰ O	12	1674	2.13	

Z = 6				
Nucl	N	E(2 ⁺), keV	E(4 ⁺)/E(2 ⁺)	β ₂
¹⁰ C	4	3354		0.82
¹² C	6	4439	3.17	0.59
¹⁴ C	8	7012	1.53	0.36
¹⁶ C	10	1766	2.35	
¹⁸ C	12	1620		

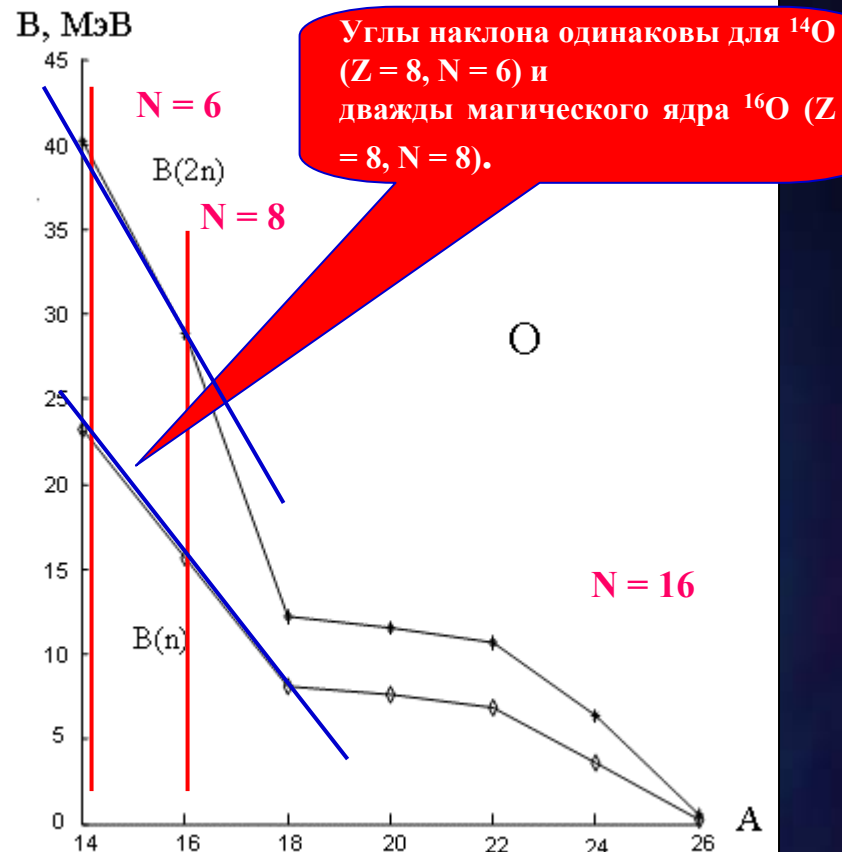
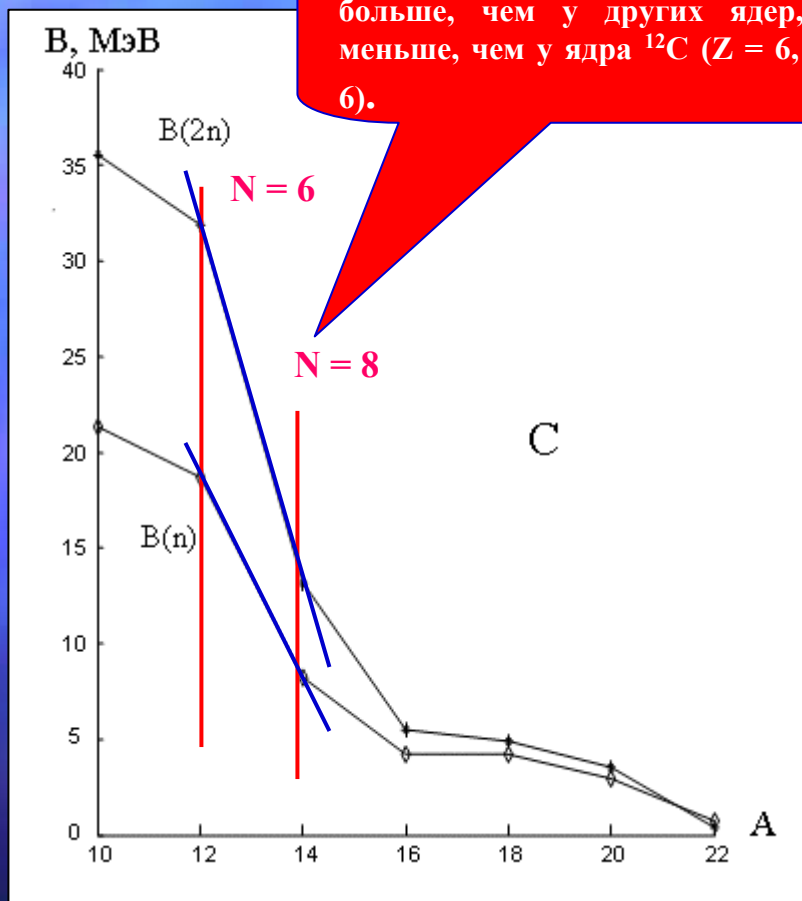
Для N = 8 «наиболее магическим» является Z = 6 (¹⁴C), а не Z = 8 (дважды магическое ¹⁶O).

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



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Углы наклона для ^{14}C ($Z = 6, N = 8$) больше, чем у других ядер, но меньше, чем у ядра ^{12}C ($Z = 6, N = 6$).

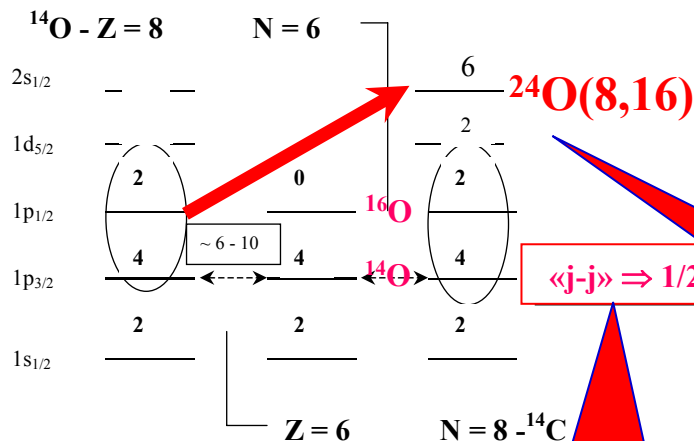


Углы наклона одинаковы для ^{14}O ($Z = 8, N = 6$) и дважды магического ядра ^{16}O ($Z = 8, N = 8$).



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

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



CDFE search engine. - Microsoft Internet Explorer

Файл Правка Вид Избранное Сервис Справка

Назад Поиск Избранное Медиа

Адрес: <http://cdfe.sinp.msu.ru/cgi-bin/hessy/v.14/hessy.cgi> Переход

CDFE ENSDF

Get all data

ENSDF Source	Nucleus	Level energy	Spin-parity	Half-life	Jpi number
26.5 Level plot	10-NE-26	2018.2 (1)	2+		2+ - 1 th (the last)
28.7 Level plot	12-MG-28	1473.4 (6)	2+	1.2 FS (1)	2+ - 1 th
30.14 Level plot	14-SI-30	2235.32 (2)	2+	248 FS (12)	2+ - 1 th
32.28 Level plot	16-S-32	2230.3 (2)	2+	168 FS (5)	2+ - 1 th
34.39 Level plot	18-AR-34	2090.9 (3)	2+	320 FS (40)	2+ - 1 th

Готово Интернет

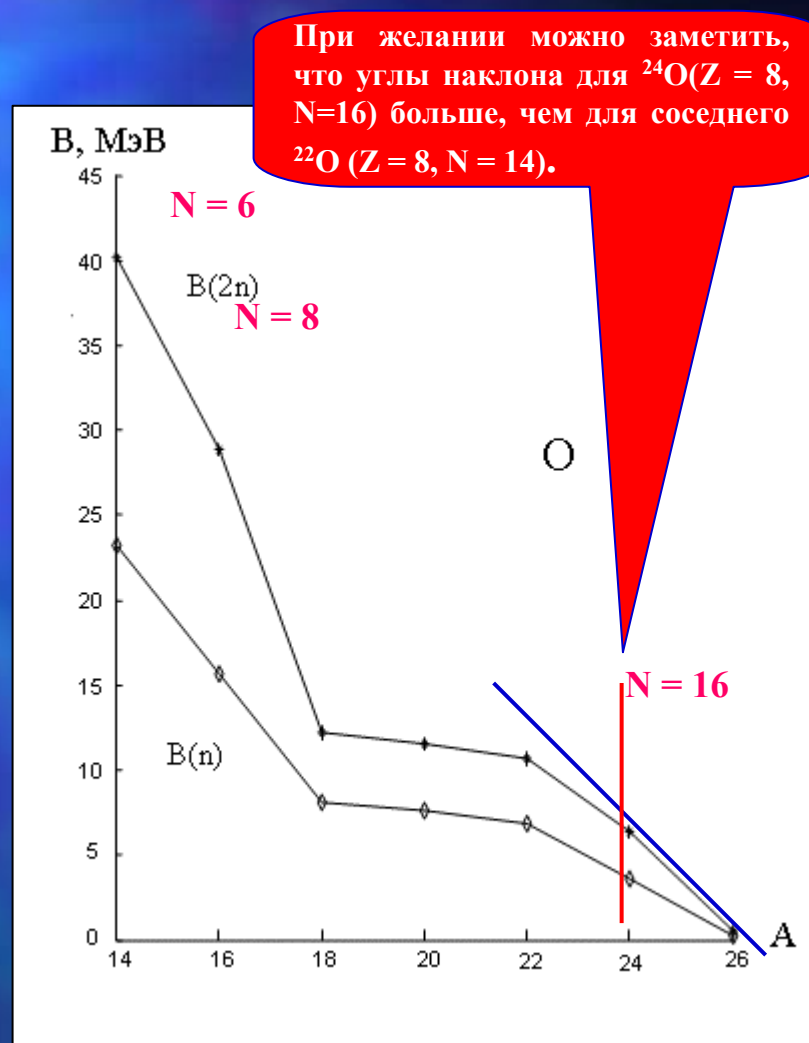
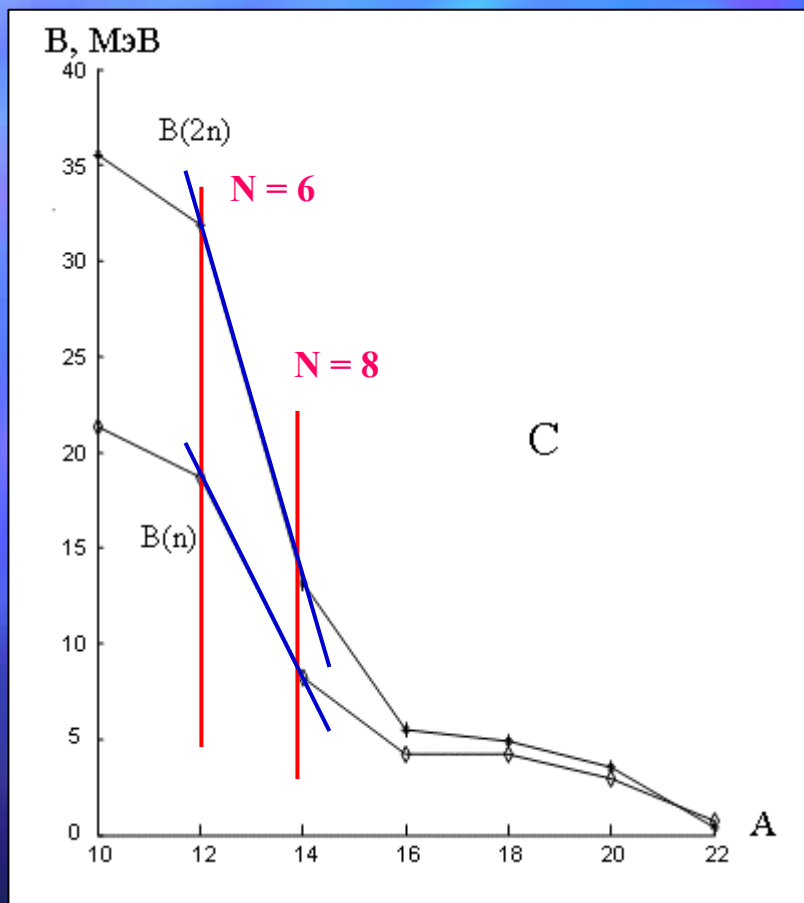
Применение эмпирического правила к $\pi 1p_{1/2}$ и $\nu 2s_{1/2}$ - подболочкам - $\langle j-j \rangle (1/2)$ связь - приводит к ядру ^{24}O ($Z = 8, N = 16$).
Дополнительной пары нуклонов нет, потому что в обоих случаях - $j = 1/2$.

Ю.Э.Пеннионжкевич, С.М.Лукиянов:
ядро ^{24}O ($Z = 8, N = 16$) является последним связанным изотопом кислорода и имеет энергию первого $2+$ уровня, существенно большую, чем соседние ядра ^{24}O ($Z = 8, N = 16$) - 3.81 (расчет)

$^{14}\text{C} - ^{14}\text{O} - 2$



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ



11.10.2006

Семинар НИИЯФ МГУ, 10 октября 2006 г.

С-О,
 $B(n)$, $B(2n)$
40



Таким образом:

систематики «параметров» магичности
 { энергия первого 2^+ уровня $E_1(2^+)$
 отношение энергий первого 4^+ и 2^+ уровней $E_1(4^+)/E_1(2^+)$
 параметр квадрупольной деформации β_2
 энергия отделения нейтрона }

выявляют существование новых магических ядер
 со идентичными характеристиками структуры оболочек
 («j – j» связь)

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

Основные
результаты



Центр данных фотоядерных экспериментов НИИЯФ МГУ

Исследованные ядра (^{14}C , ^{14}O , ^{24}O , ^{30}Si , ^{30}S , ^{54}Ca , ^{96}Sr , ^{96}Zr) слабо деформированы, не имеют дефицита или избытка нейтронов, обладают ярко выраженными «параметрами» магичности.

Существование таких ядер напрямую не предусмотрено классической моделью оболочек.

Финальные «горячие» вопросы:

- **Что представляет собой магичность ядра в целом?**
- **Традиционная магичность – взаимодействие между нуклонами (протонов с протонами или нейтронов с нейтронами), заполнение оболочек имеет характер пороговый?**
- **Новая магичность - взаимодействие заполненных оболочек (взаимодействие нейтронов с протонами), характер количественный, такой магичности может быть больше или меньше?**
- **Нельзя ли говорить о некоем дополнительном специфическом притягивающем протон-нейтронном взаимодействии (возможно, имеющего характер протон-нейтронного спаривания)?**
- **Какова, собственно, особая роль пары внешних нуклонов (2 протона или 2 нейтрона)?**



Спасибо за внимание!