НОВОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ - ЛОКАЛЬНЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА

Игорь Бобошин

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ

План доклада

1. Предыстория
2. Суть явления
3. Доказательства существования
4. Объяснение
5. Добро пожаловать в Новый Магический Мир! Обновленная схема оболочек

Предыстория

1. Для обеспечения проведения фотоядерных экспериментов на микротроне ОЭПВАЯ НИИЯФ потребовались экспериментальные данные об энергиях и заселенностях одночастичных уровней в ядрах f-p оболочки. Соответственно, мною был разработан метод совместной оценки данных реакций срыва и подхвата, позволяющий извлекать с хорошей точностью и надёжностью указанную информацию из такого рода данных. Метод получил одобрение руководителей работ, проводимых в ОЭПВАЯ - И.М. Капитонова, В.В. Варламова и Б.С. Ишханова, и был использован для информационного сопровождения этих работ.
2. Метод далее использовался в совместных работах с Е.А. Романовским и О.В. Беспаловой для тестирования и развития дисперсионной оптической модели.
3. С накоплением большого количества новых полученных данных по оболочечной структуре я обнаружил определенные закономерности. Сопоставив их с характеристиками ядер, я пришел к выводу о существовании нового типа атомных ядер с особыми свойствами – локальных магических ядер. Далее было установлено, что упомянутые свойства определяются специфической эволюцией ядерных оболочек.

2. Суть явления: локальные магические ядра

Новый тип ядер обладает наблюдаемыми свойствами традиционных магических ядер, однако, в отличие от традиционных, локальные магические ядра не составляют последовательностей магических изотопов (т.е. ядер с **магическим числом** протонов Z) или магических изотонов (т.е. ядер с **магическим числом** нейтронов N). Как показывает опыт, последовательности ядер с традиционными магическими числами Z или N весьма протяженны – они пересекают всю (или, в некоторых случаях, почти всю) карту известных нуклидов. В отличие от традиционных, локальные магические ядра – это «уединенные» ядра, они описываются **магическими парами чисел** ($\underline{N}$, Z), (N, $\underline{Z}$) или ($\underline{N}$, $\underline{Z}$), где подчеркнутое число является магическим только в указанной паре. Традиционными магическими числами принято считать числа 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Одно или оба числа из упомянутых выше пар не являются традиционными магическими числами.

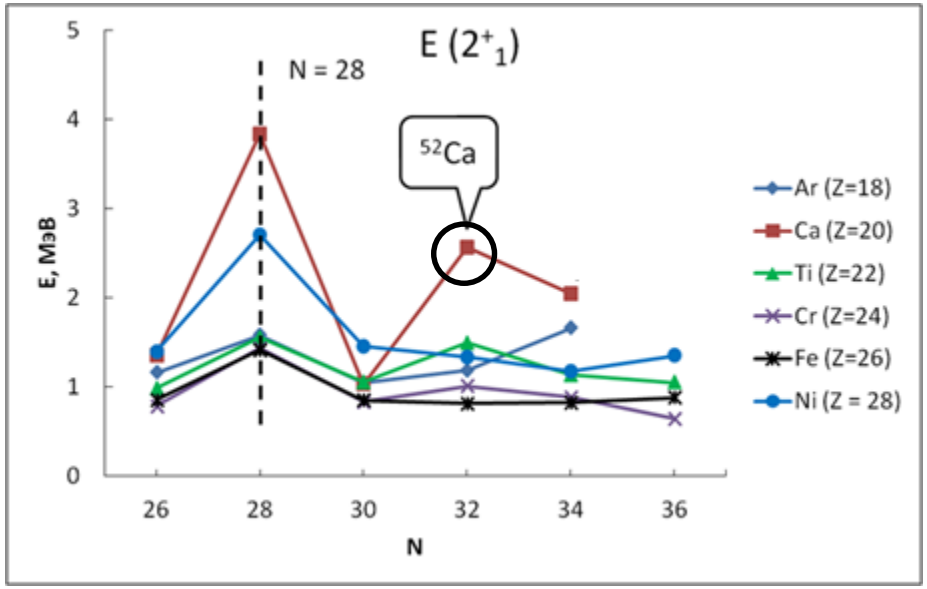
Магические ядра вообще демонстрируют особые свойства: повышенную энергию первого возбужденного состояния 2^+, наличие скачка в энергиях отделения нуклона, наименьшую деформацию, повышенную β-стабильность и т.д. В области Z = 20 – 50 на основании анализа данных по энергиям $E(2_1^+)$ и энергиям отделения нуклонов автором обнаружены следующие л.м.я.: ^{52}Ca, ^{68}Ni, ^{96}Zr и ^{114}Sn, обладающие магическими парами нуклонов (N, Z) = (<u>32</u>, 20), (<u>40</u>, 28), (<u>56</u>, <u>40</u>), (<u>64</u>, 50) соответственно. Недавно обнаружено л.м.я. ^{146}Gd, обладающее магической парой (N, Z) = (82, <u>64</u>) и находящееся вне указанной области.

Вопрос к аудитории:
как лучше назвать эти пары (N, Z) –
магические пары;
чудесные пары;
волшебные пары?

Доказательства существования: наблюдаемые физические характеристики

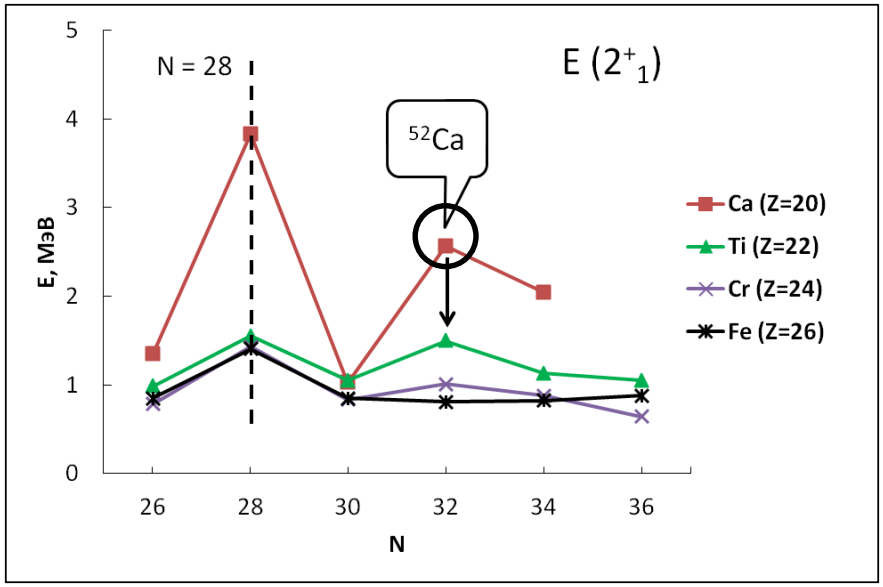
Традиционные магические числа были установлены Марией Гепперт-Мейер и другими авторами на основе анализа имеющихся данных. Пойдём по этому же пути.

Классическое магическое число N = 28 и
локальное магическое ядро ^{52}Ca - магическая пара (N, Z) = (32, 20).



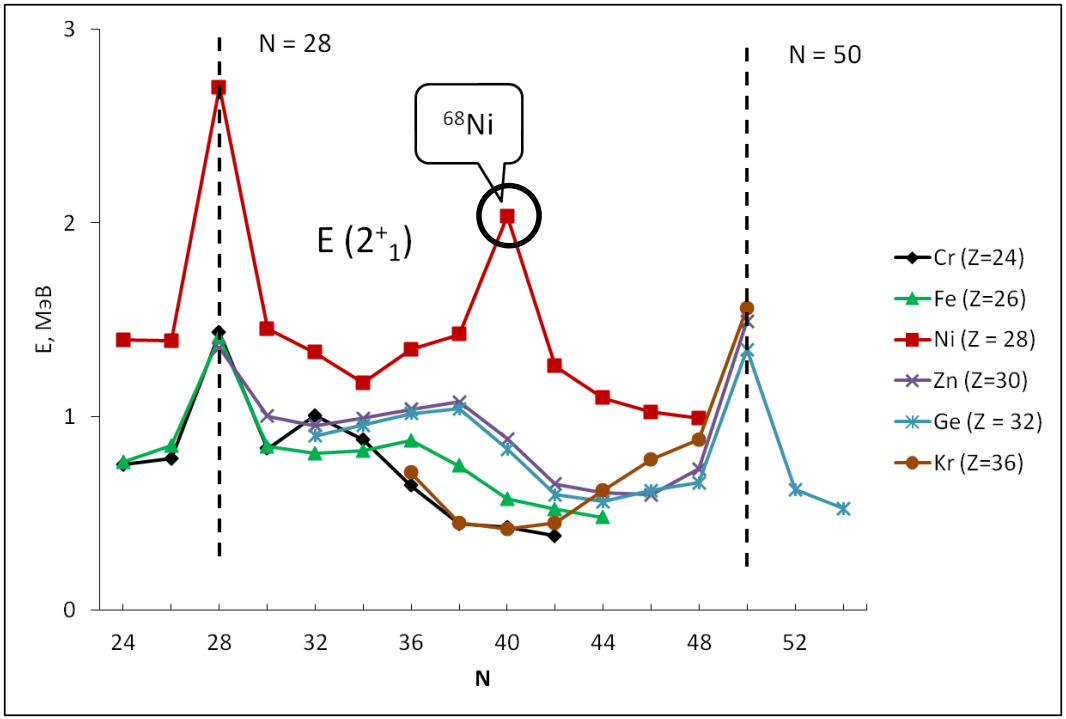
Энергии первых возбужденных состояний 2^+ (здесь и далее на аналогичных графиках имеющиеся экспериментальные данные)

Устойчивые сильные максимумы при традиционном магическом числе нейтронов N = 28 наблюдаются для большого количества ядер (практически через всю карту нуклидов). Они отмечены вертикальным пунктиром. В то же время сильный максимум при N = 32 появляется, только если Z = 20, и быстро исчезают при изменении Z в любую сторону. Это локальное магическое ядро ^{52}Ca. При N = 34 максимумы исчезают при Z > 20, при Z < 20 сохраняются. Возможно, это проявление новой устойчивой оболочки N = 34 при Z < 20.



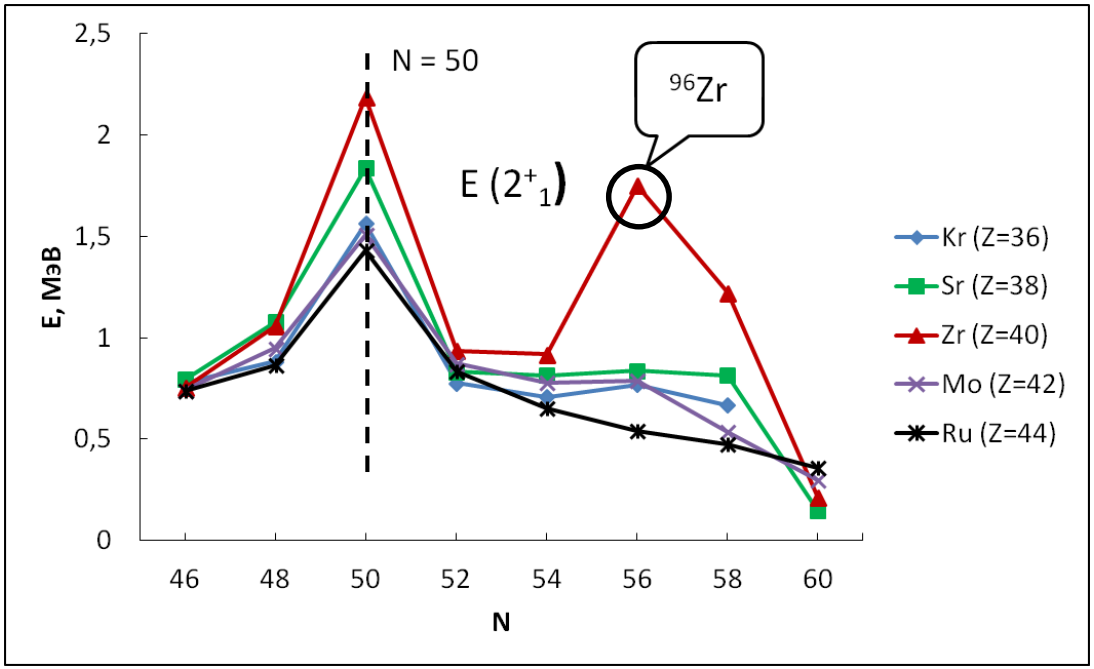
Фрагмент предыдущего рисунка. Стрелка на рисунке показывает быстрое ослабление и полное исчезновение максимума N = 32 при удалении от Z = 20 (локальная магичность (N, Z) = (32, 20)). В то же время максимумы N = 28 остаются устойчивыми при любых Z (традиционная магичность N = 28).

Локальное магическое ядро
^{68}Ni, (N, Z) = (<u>40</u>, 28)



Ядра с классическими магическими числами 28 и 50 и локальное магическое ядро ^{68}Ni. Числа нуклонов составляют магическую пару (N, Z) = (<u>40</u>, 28)

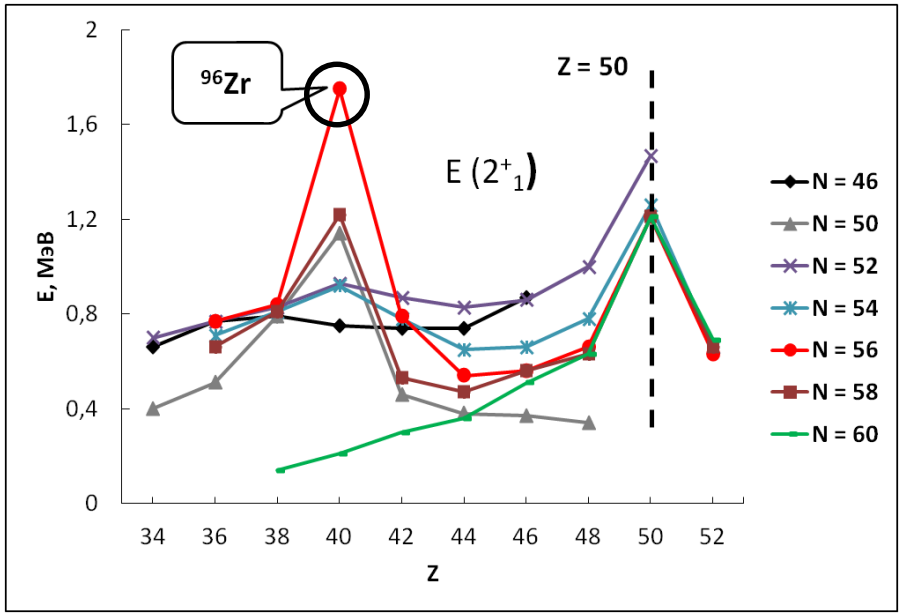
Ядра с классическим магическим числом *N* = 50 и локальное магическое ядро ^{96}Zr - магическая пара (*N*, *Z*) = (56, 40)



Энергии первых возбужденных состояний 2^+ (имеющиеся экспериментальные данные)

Устойчивые сильные максимумы при традиционном магическом числе нейтронов *N* = 50 наблюдаются для ядер через всю карту нуклидов. Они отмечены вертикальным пунктиром. В то же время сильный максимум при *N* = 56 имеет место только если *Z* = 40 и быстро исчезает при изменении Z в любую сторону, что являет принципиальную разницу. Это локальное магическое ядро **^{96}Zr**.

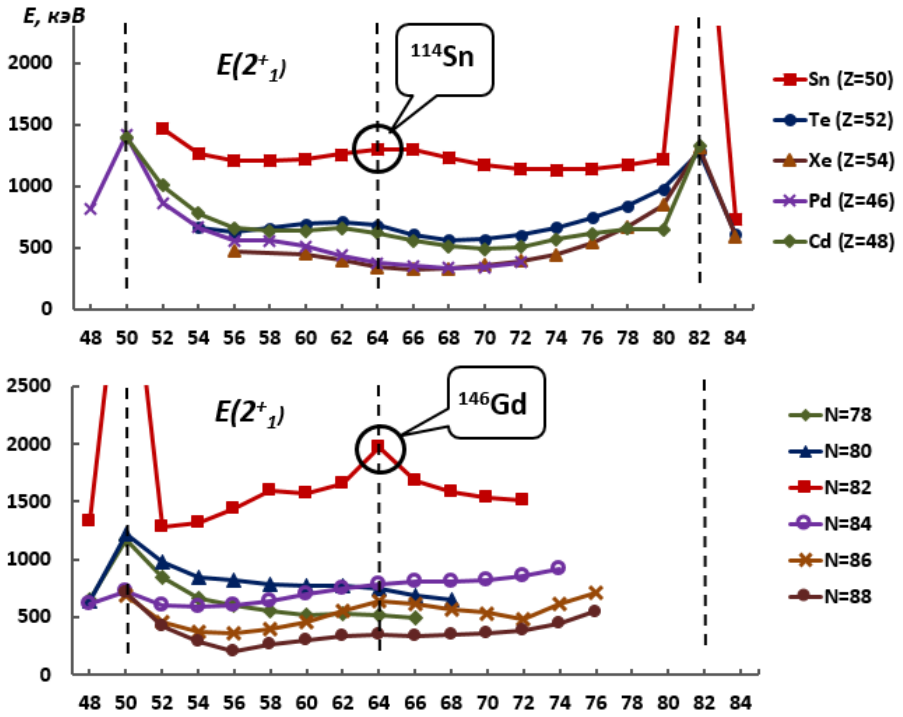
Локальное магическое ядро
^{96}Zr, (N, Z) = (56, <u>40</u>)



Ядро ^{96}Zr является также локальным магическим по числу протонов 40. Оно проявляет соответствующие свойства, если N = 56. (На рисунке кривая N =50 понижена, чтобы скомпенсировать нейтронную составляющую).

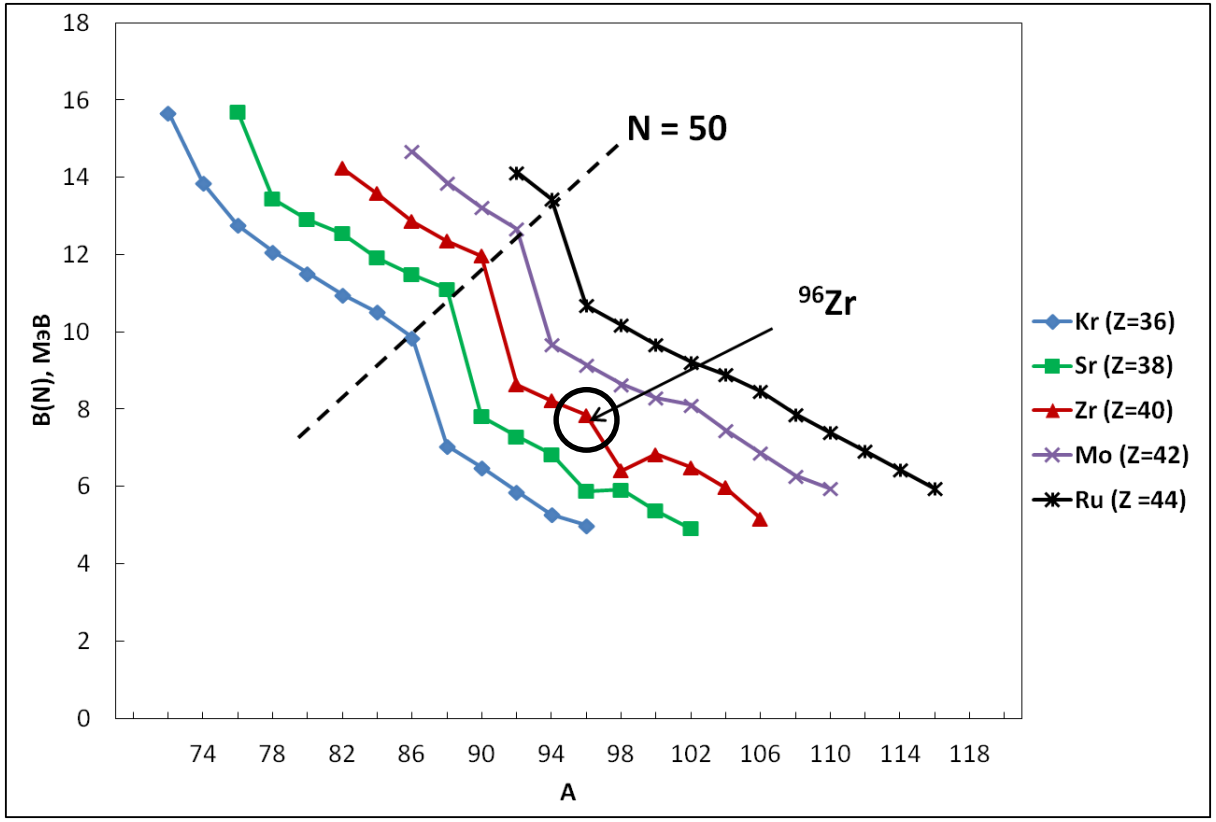
Ядро ^{96}Zr является локальным магическим по обоим числам (N, Z) = (<u>56</u>, <u>40</u>).

Локальные магические ядра ^{114}Sn, (N, Z) = (<u>64</u>, 50) и ^{146}Gd, (N, Z) = (82, <u>64</u>)

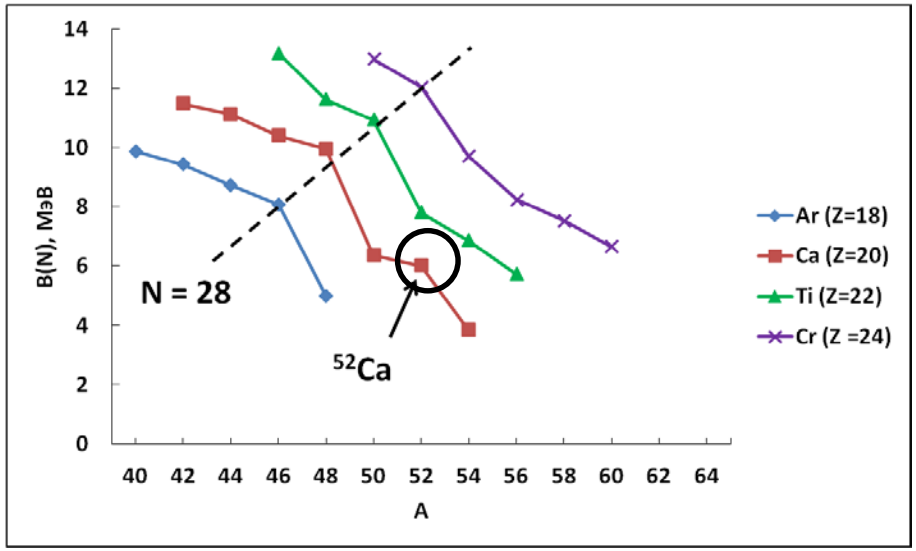


Энергии первых возбужденных уровней 2+ изотопов вблизи Z = 50 и изотонов вблизи N = 82

Энергии отделения нейтрона (имеющиеся данные)

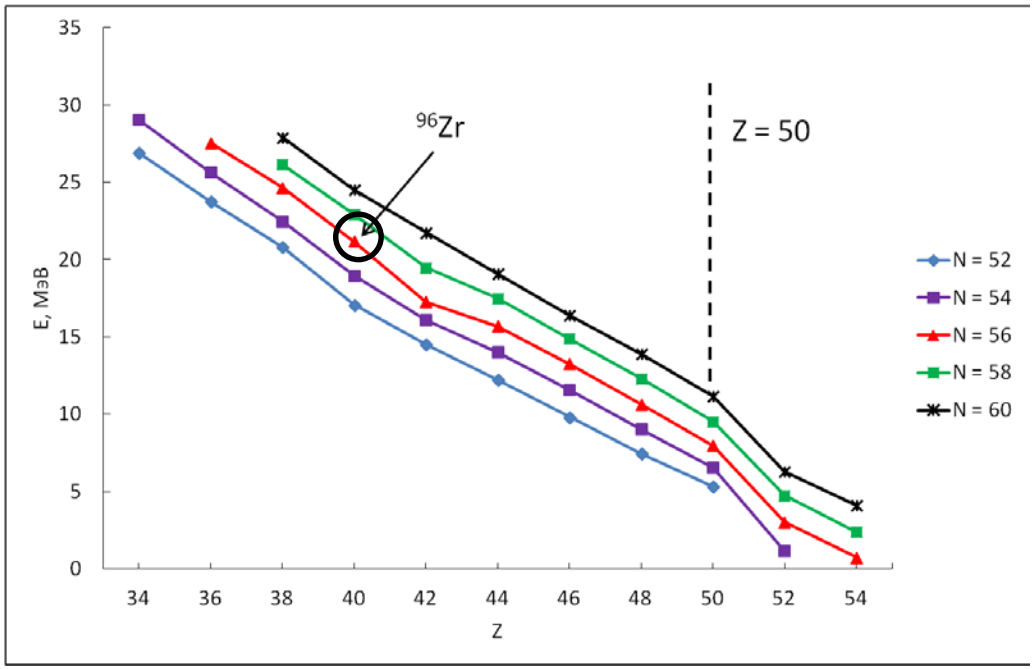


Локальная магичность нейтронного числа N = 56 в ^{96}**Zr** проявляет себя в энергиях отделения.



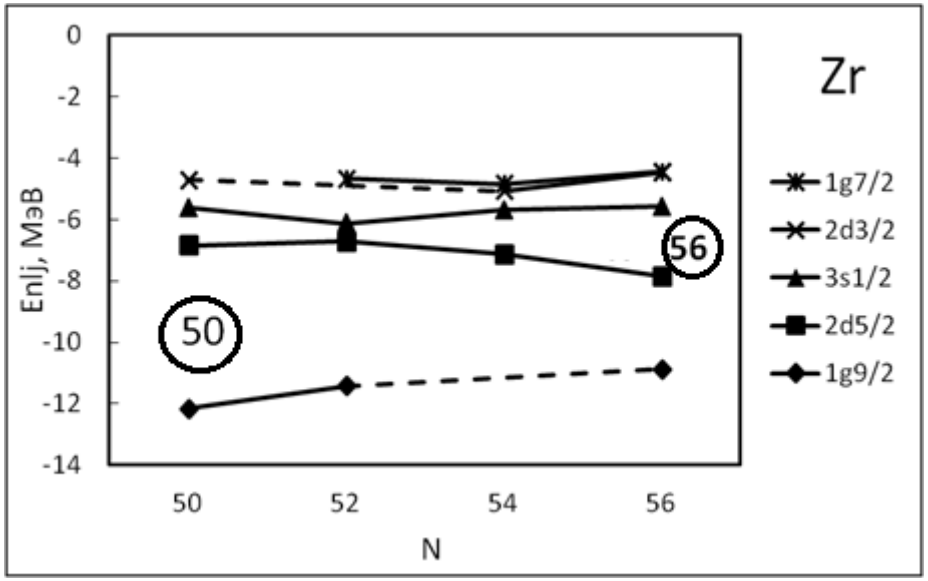
Энергии отделения нейтрона в изотопах вблизи Z = 20.
Имеющиеся экспериментальные данные.

Энергии отделения двух протонов (имеющиеся данные)

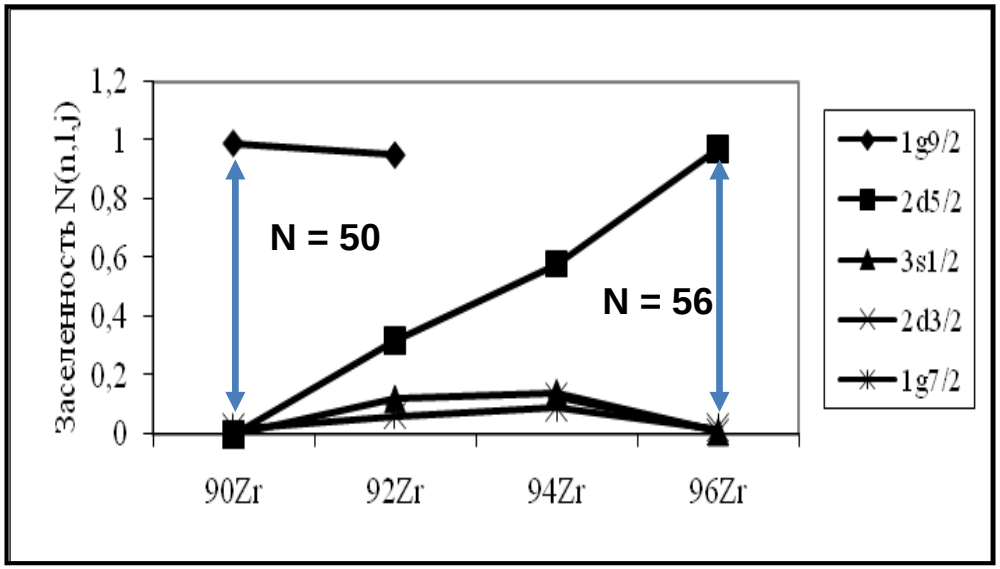


4. Объяснение. Эволюция оболочечной структуры

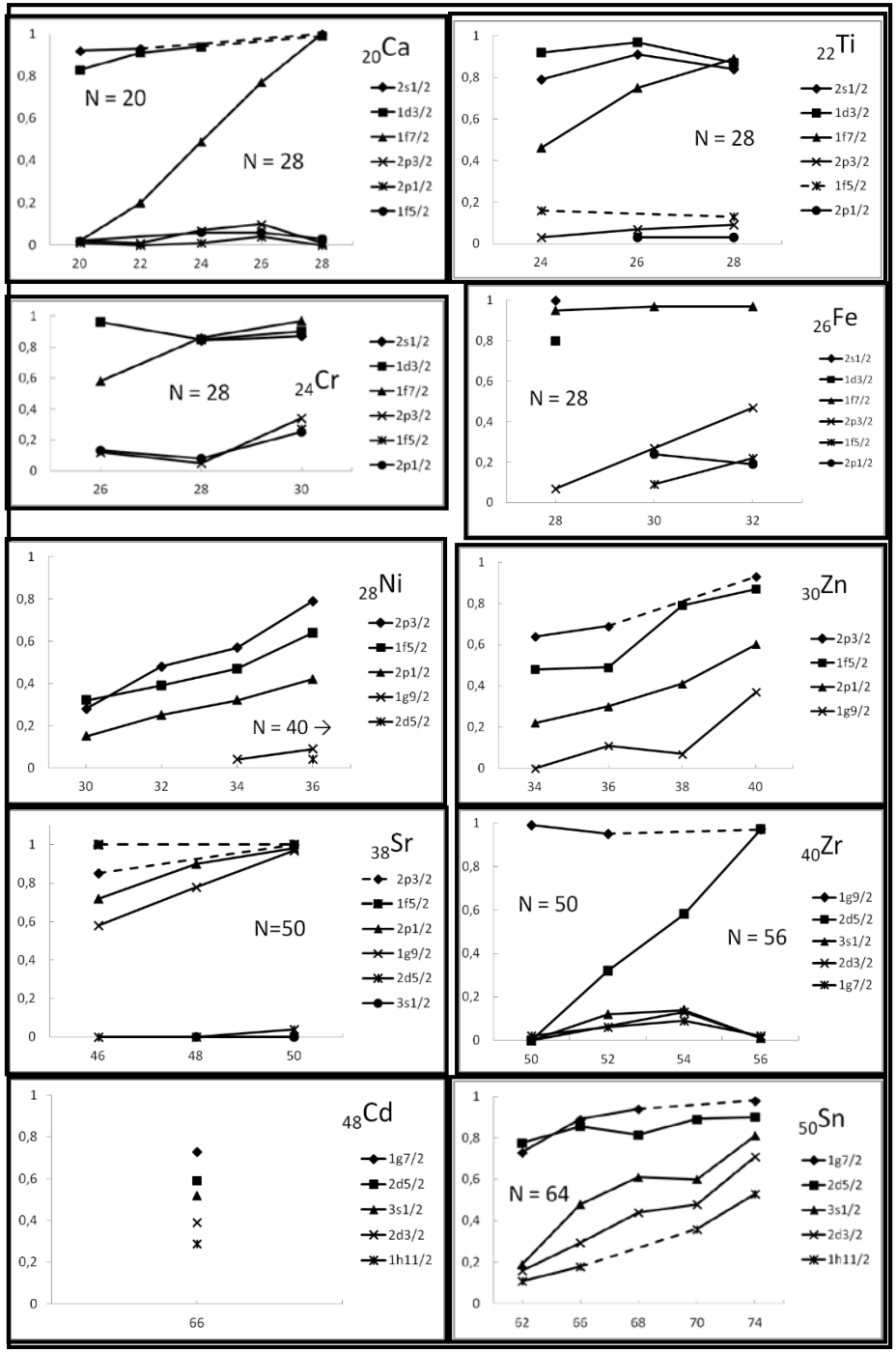
Замыкание нейтронной подоболочки $2d_{5/2}$ в ^{96}Zr



Энергии нейтронных орбит. Щель «*N* = 50» = 5.3 МэВ, щель «*N* = 56»= 2.3 МэВ. Получены автором с использованием метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата.



Заселенности (вероятности заполнения) нейтронных орбит в изотопах Zr. Получены автором с использованием метода совместного анализа данных реакций срыва и подхвата.

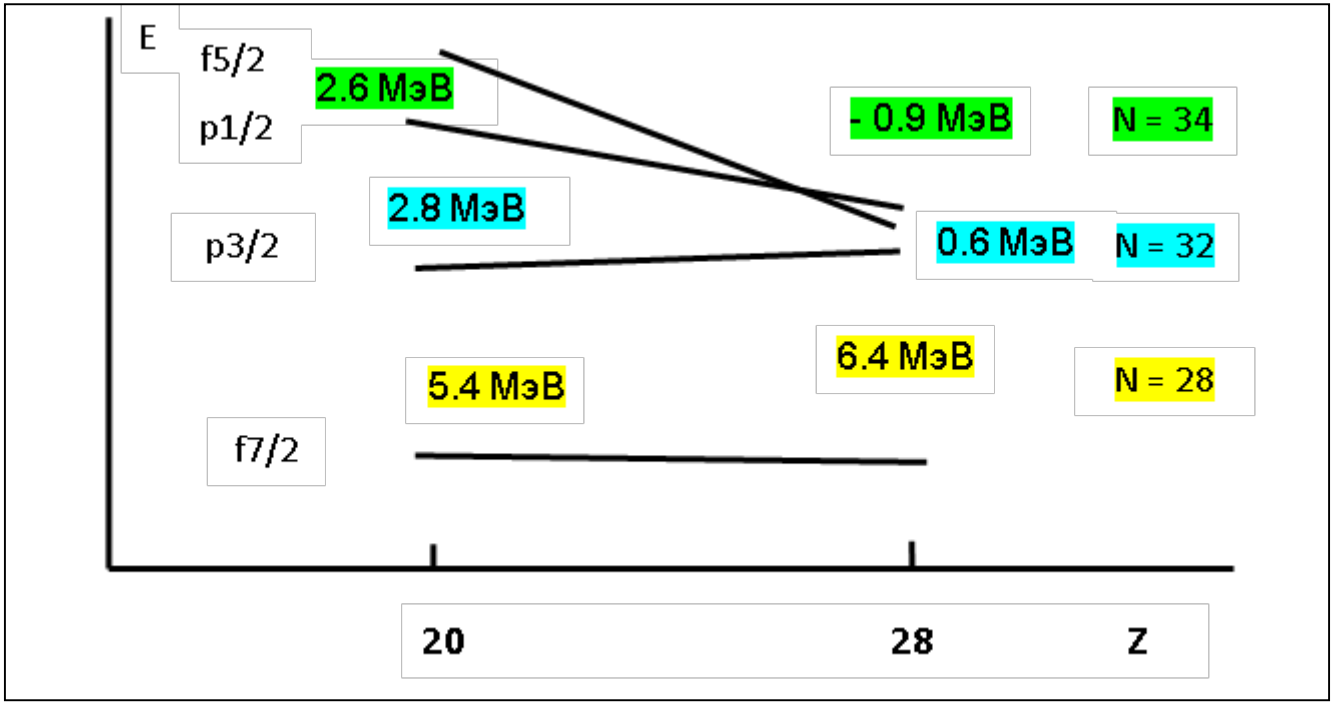


Вероятности заполнения (заселенности) нейтронных орбит, полученные методом согласования данных реакций срыва и подхвата и данных по спинам-четностям. По горизонтальным осям отложены числа нейтронов *N*. Пунктир соединяет точки при недостатке данных.

Обнаружены разрывы заселенностей при магических числах – как классических, так и «локальных».

Обнаружены два типа заселения орбит при добавлении нейтронов в ядро: параллельный (одновременный) и последовательный.

Замыкание нейтронных (под)оболочек. Традиционное магическое ядро ^{48}Ca, локальное магическое ядро ^{52}Ca, и ^{54}Ca, теряющее нейтроную магичность при Z > 20



Изменения нейтронных щелей N = 28, N = 32 и N = 34 при изменении Z. Величины щелей получены частично из анализа данных срыва и подхвата, частично оценены из энергий отделения нейтронов.

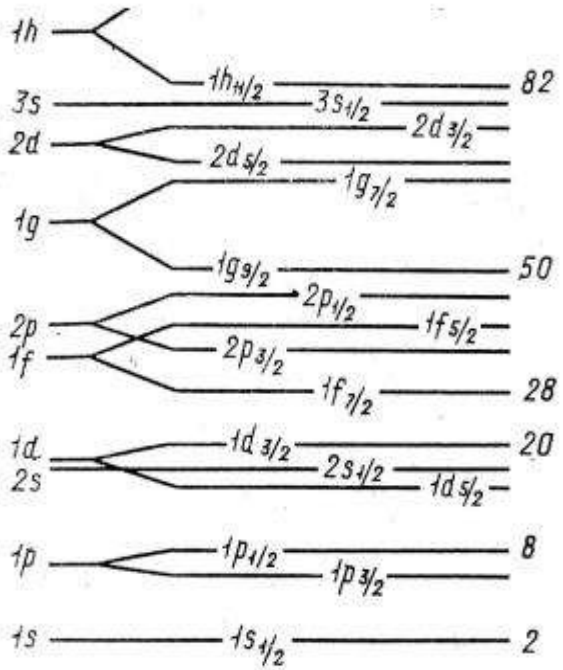
Итак, мы установили наличие значительных энергетических щелей в оболочечной структуре новых ядер.

Но - локальность?.....

Эти энергетические щели возникают и исчезают?

Как это может быть и какова причина?

Схема ядерных оболочек



Открыта в 1949 г.

Нобелевская премия 1963 г.

Геперт-Майер, Йенсен

Потенциал типа осциллятора или прямоугольной ямы + спин-орбитальное взаимодействие

Вопрос: как в этой схеме могут возникать другие магические числа, причём каждое - для одного единственного ядра?

Современная оболочечная теория учитывает как одночастичное среднее поле, так и двух- (иногда также трех-) частичные силы. Эти силы часто описываются посредством эффективных двухчастичных нуклон-нуклонных сил. В расчетах используются двухчастичные матричные элементы (ТВМЕ), отражающие действие такого рода сил. Особую роль играют монопольные составляющие ТВМЕ. Замечательным свойством соответствующего изменения энергий является линейность. Если в некотором ядре на орбиту j_1 добавлено n_1 нуклонов, то энергия орбиты j_2 изменяется на

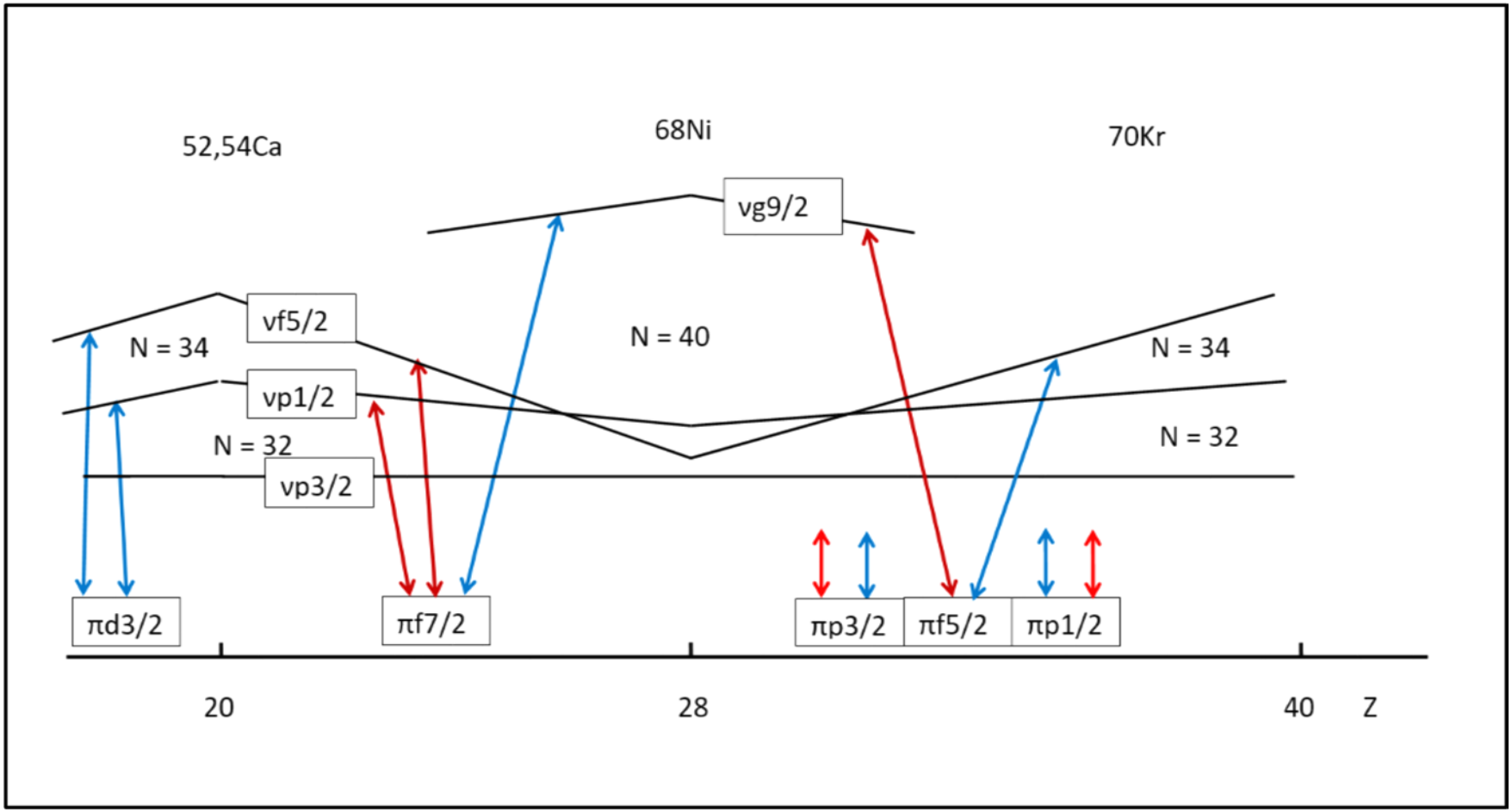
$$\Delta E_{j2} = V_{j1j2}^{p1p2}\, n_1, \tag{1}$$

где p_1, p_2 – виды частиц на орбитах j_1 и j_2, V_{j1j2}^{p1p2} – монопольное взаимодействие между этими частицами. Таким образом, коэффициенты V_{j1j2}^{p1p2} дают ключ к информации об изменениях энергий орбит, происходящих благодаря действию эффективных двухчастичных сил.

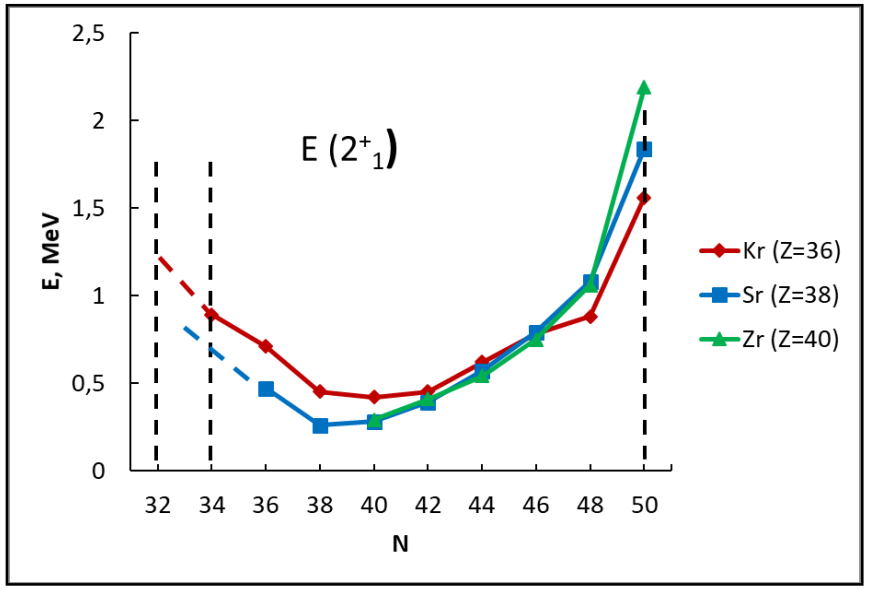
Мы получили значения двухчастичных матричных элементов V_{j1j2}^{p1p2} из наших данных по энергиям и заселенностям орбит. Они определяют направление и величину πν и νν сил. Мы используем их при реконструкции эволюции оболочек.

p1	j1	p2	j2	V, МэВ
π	$1f_{7/2}$	ν	$1f_{7/2}$	- 0.82
π	$1f_{7/2}$	ν	$1f_{5/2}$	- 0.99
π	$1f_{7/2}$	ν	$2p_{3/2}$	- 0.70
π	$1f_{7/2}$	ν	$2p_{1/2}$	- 0.78
π	$1f_{7/2}$	ν	$1d_{3/2}$	- 0.65
π	$1f_{7/2}$	ν	$2s_{1/2}$	- 0.59
ν	$1f_{7/2}$	ν	$1f_{7/2}$	- 0.37
ν	$1f_{7/2}$	ν	$2p_{3/2}$	+ 0.18
ν	$1f_{7/2}$	ν	$2p_{1/2}$	+ 0.17
ν	$1f_{7/2}$	ν	$1f_{5/2}$	+ 0.01
ν	$1f_{7/2}$	ν	$1d_{3/2}$	0.00
ν	$1f_{7/2}$	ν	$2s_{1/2}$	> + 0.26
ν	$2d_{5/2}$	ν	$2d_{5/2}$	- 0.20
ν	$2d_{5/2}$	ν	$2d_{3/2}$	+ 0.04
ν	$2d_{5/2}$	ν	$1g_{7/2}$	+ 0.06
ν	$2d_{5/2}$	ν	$3s_{1/2}$	+ 0.01
ν	$2d_{5/2}$	ν	$1g_{7/2}$	+ 0.21

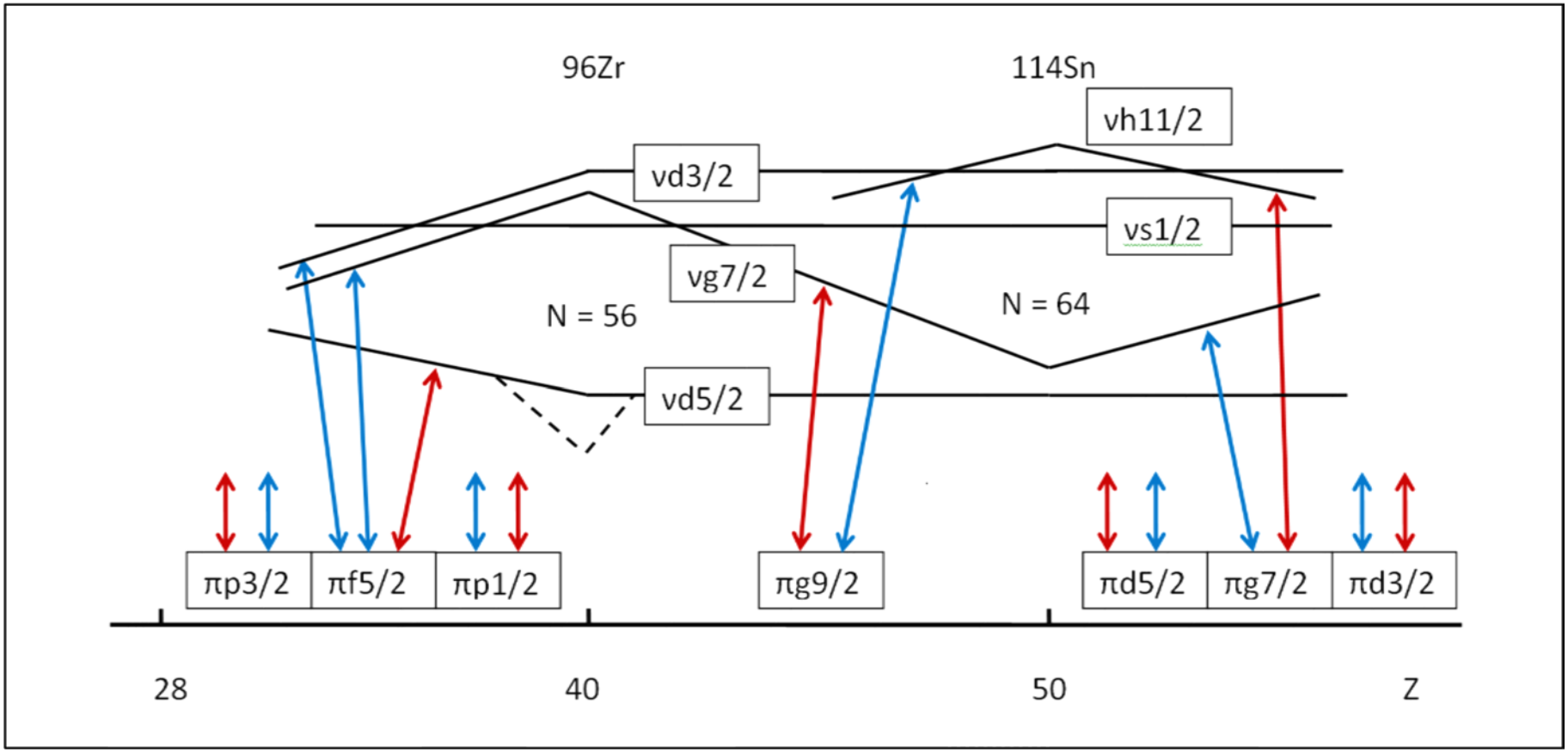
Полученные значения двухчастичных матричных элементов V_{j1j2}^{p1p2} указывают на решающий вклад **тензорных сил** в изменение относительных энергий одночастичных состояний. Впервые возможность решающего вклада тензорных сил в изменение относительных энергий была предположена в работах Оцука и коллег (2005). Поэтому мы, для оценки эволюции оболочек в тех случаях, когда отсутствуют вычисленные значения V_{j1j2}^{p1p2}, предполагаем решающий вклад тензорных сил.



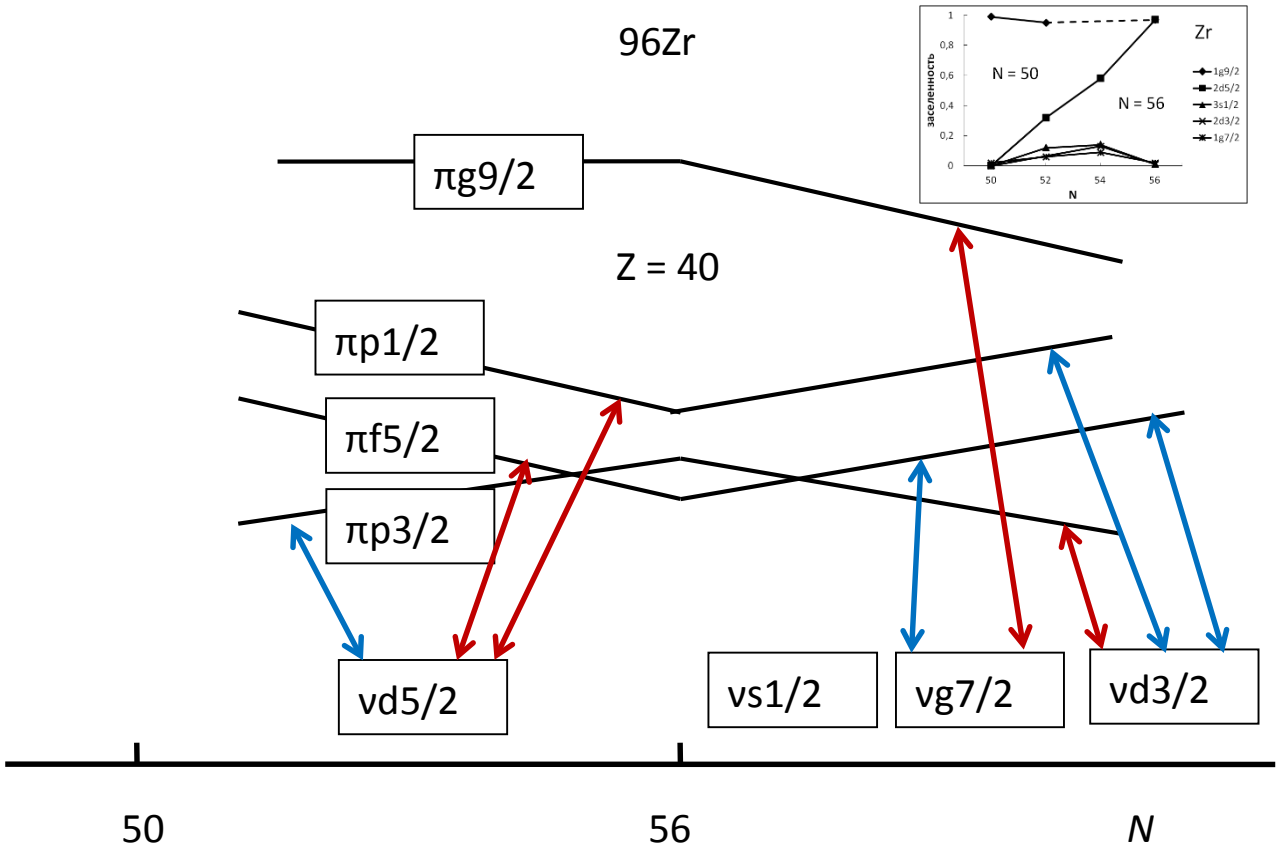
К объяснению локальной магичности ^{52}Ca и ^{68}Ni. Энергии нейтронных орбит относительно энергии $\nu p_{3/2}$ как функция *Z*. Дрейф *fp*-орбит при *Z* = 20 – 40 соответствует данным реакций срыва и подхвата. Изменение всех энергий соответствует действию тензорных $\pi\nu$ - сил. Красные стрелки означают притяжение протонов и нейтронов, синие стрелки – их отталкивание.



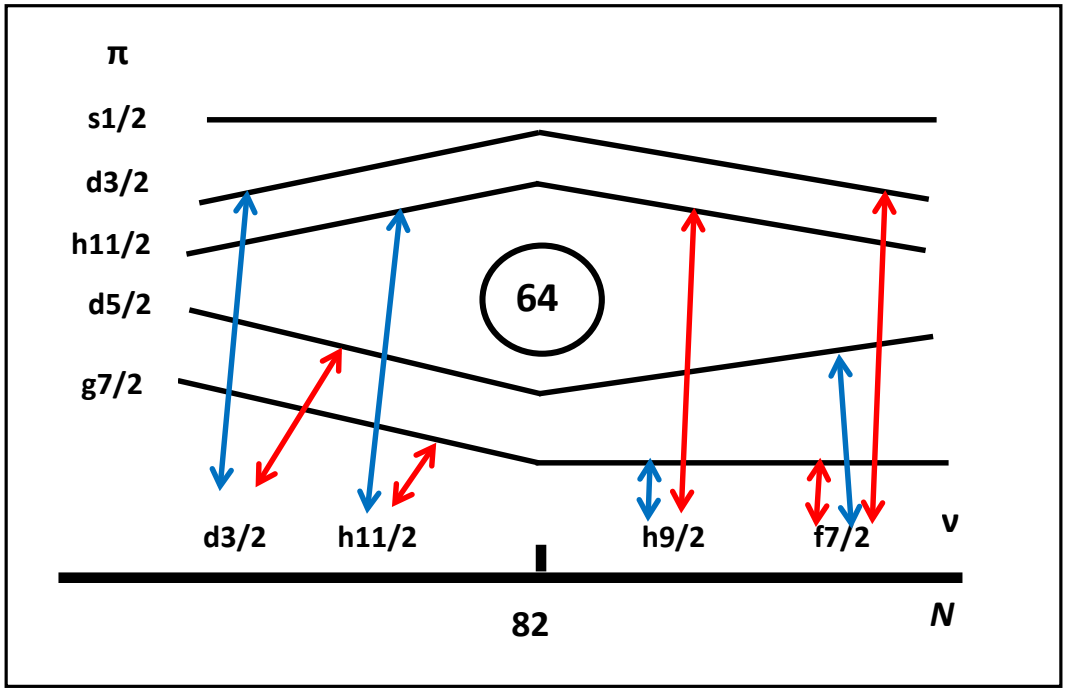
К предсказанию возникновения магических чисел *N* = 32 и 34 в протонно-избыточных ядрах, сделанному на основании предыдущей диаграммы. Имеющиеся данные о первых 2^+ возбуждениях в ядрах Z ≈ 40. Тенденция подтверждает предсказания.



К объяснению локальной магичности ^{96}Zr и ^{114}Sn. Энергии нейтронных орбит относительно энергии $\nu s_{1/2}$ как функции Z. Красные стрелки означают притяжение протонов и нейтронов, синие стрелки – отталкивание благодаря протон-нейтронным тензорным силам при Δl = 0 и 1. Положение орбит при Z = 40 и 50 соответствуют результатам расчетов на основании данных срыва и подхвата. Пунктир означает дополнительное понижение орбиты $\nu d_{5/2}$ за счет действия $\nu\nu$ сил.

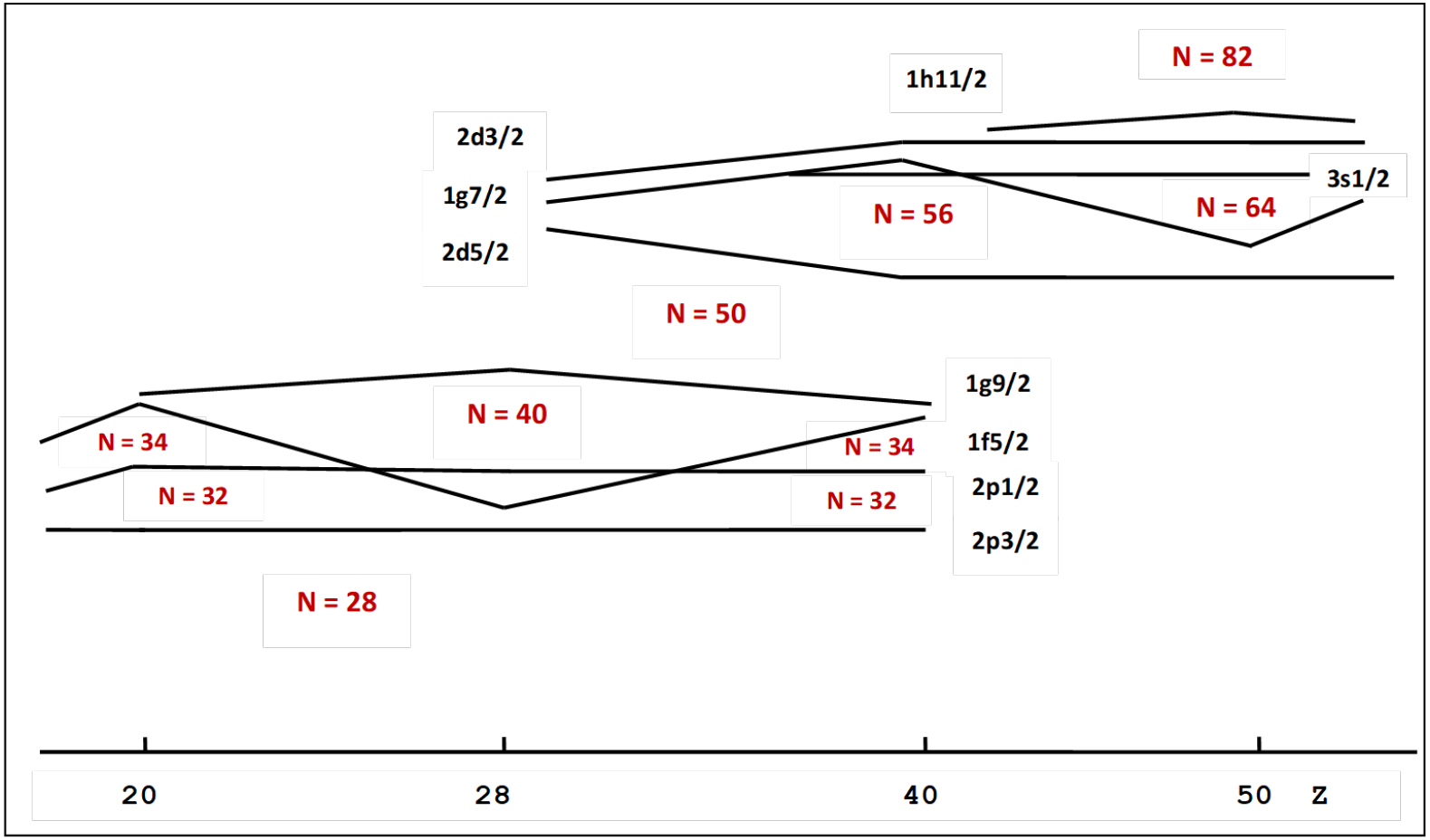


К объяснению протонной локальной магичности ^{96}Zr. Эволюция протонной оболочки 28-50 вблизи ^{96}Zr. Энергии f-p орбит при N = 54, 56 соответствуют данным срыва и подхвата. Изменения энергий определяются $\pi\nu$ тензорными силами Δl = 0, 1. Красные стрелки означают притяжение протонов и нейтронов, синие стрелки – отталкивание. Энергии показаны относительно $\pi g_{9/2}$ при N = 50 – 56.



Формирование локального магического ядра ^{46}Gd (N, Z) = (82, 64): изменения энергий протонных орбит в ядрах под действием тензорных сил приводят к возникновению компактной щели Z = 64.

Добро пожаловать в Новый Магический Мир!



доклад окончен

Волшебное слово: **Спасибо!**