

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ имени Д.В. СКОБЕЛЬЦЫНА

И.Н.Бобошин

**НОВЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА И НЕЙТРОН-ПРОТОННОЕ
СПАРИВАНИЕ**

Препринт НИИЯФ МГУ – 2007 – 4/825

Москва, 2007 г.

NEW MAGIC NUCLEI AND NEUTRON – PROTON PAIRING

Preprint INP MSU – 2007 – 4/825

Abstract

The features of new magic nuclei and their connection with the shell structure are considered. As the reason of formation of new magic nuclei the mechanism a neutron - proton pairing is offered. The rule of nucleon pairing is formulated. The spin-parity values of a number of odd-odd nuclei are explained.

И.Н.Бобошин

НОВЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА И НЕЙТРОН-ПРОТОННОЕ СПАРИВАНИЕ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2007 – 4/825

Аннотация

Рассматриваются особенности новых магических ядер, их связь с оболочечной структурой. В качестве причины формирования новых магических ядер предложен механизм нейтрон-протонного спаривания. Сформулировано правило спаривания нуклонов. Объясняются значения спинов-четностей ряда нечетно-нечетных ядер.

1. Введение

Новые магические ядра определяются в настоящей работе как ядра, свойства которых аналогичны свойствам традиционных магических ядер с числами нуклонов 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 [1, 2], однако не следуют из стандартной оболочечной модели. Среди свойств, отличающих магические ядра, в работе исследуются наличие максимальных значений энергий первого 2^+ состояния, минимальных значений параметров квадрупольной деформации и отношений первых 4^+ и 2^+ состояний $E(4^+_{1})/E(2^+_{1})$ по сравнению с такими же величинами для соседних немагических ядер, а также наличие характерных особенностей в зависимостях значений энергий связи от числа нуклонов.

Исследование новых магических ядер может явиться ценным источником информации о силах, действующих между нуклонами в ядре и формирующих единый ядерный потенциал. В связи с этим оно представляет большой интерес.

Одной из составных частей оболочечной модели является идея, согласно которой нуклоны с одной и той же подоболочки связываются попарно таким образом, что суммарный момент каждой пары равен нулю, а четность положительна. Это позволило объяснить значения спинов и четностей основных состояний четно-четных ядер. В данной работе будет показано, что влияние спаривания нуклонов распространяется, возможно, шире, и взаимодействие такого рода может приводить к формированию новых магических ядер, а также определять спины и четности состояний нечетно-нечетных ядер.

2. Новые магические ядра: некоторые примеры

Особенностью новых магических ядер, отличающей их от таких же традиционных, является сравнительно узкая область проявления соответствующих свойств. Классические магические числа протонов и нейтронов остаются магическими в широком диапазоне изменения сопряженных чисел нуклонов, который включает в себя, как минимум, область стабильных ядер. В результате графики энергий первых 2^+ состояний традиционных магических ядер образуют прямые линии в координатах (N,Z) , соответствующие числам $N = 50, Z = 50, N = 82, Z = 82$ и т.д., которые пересекают большую область ядер (Рис. 1). В отличие от этого, новые магические ядра проявляют себя таким образом, что число нейтронов является магическим только при определенном и сравнительно небольшом числе протонов, и наоборот, причем это могут быть области как вблизи, так и вдали от линии стабильности. В результате новые магические ядра образуют некоторые множества,

которые проявляют себя в виде замкнутых областей на карте нуклидов. Эти области можно назвать островами магичности. Их размеры, как правило, меньше областей стандартной магичности. Более того, как будет показано далее, острова магичности формируются, как правило, вокруг отдельных точек в координатах (N,Z), и речь фактически идет о парах магических чисел $N \leftrightarrow Z$.

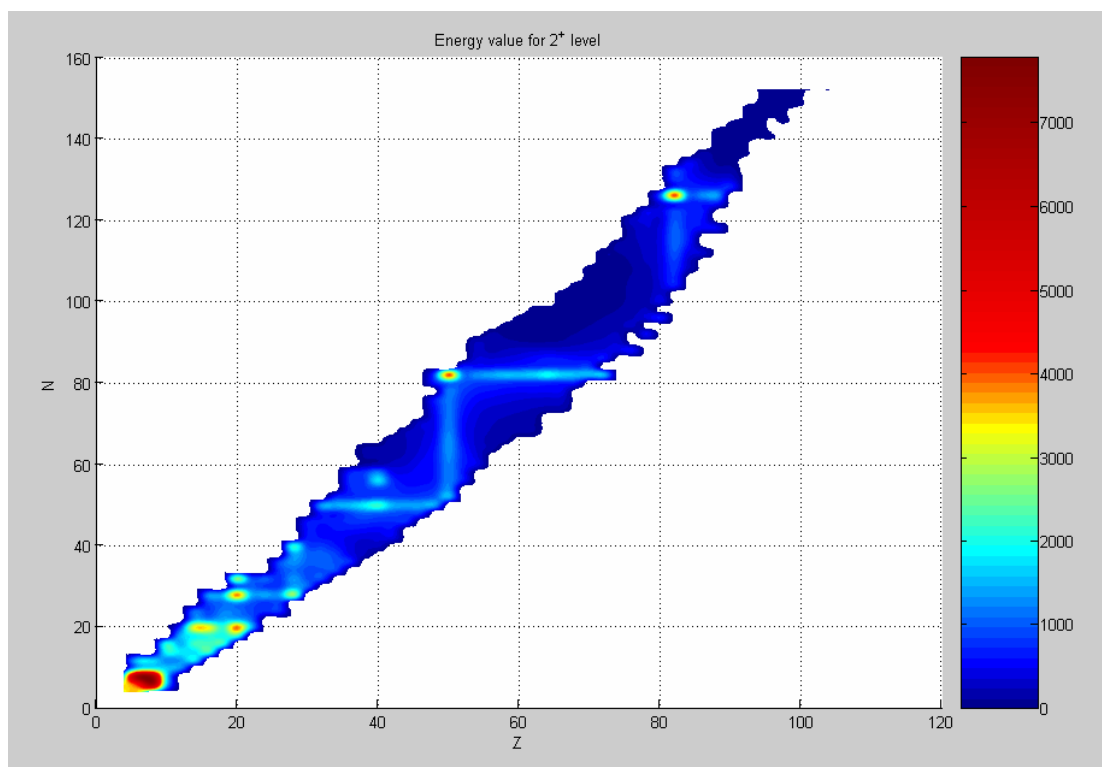


Рис. 1. Энергии первых 2^+ состояний ядер в зависимости от Z и N

Например, такую область новой магичности можно заметить на Рис. 1 при Z в диапазоне чисел 36 – 42 и N – в диапазоне 52 - 58. Этот остров магичности формируется вокруг точки $Z = 40$, $N = 56$. Также остров магичности можно обнаружить при величинах Z в районе значений 20 и N - в районе значений 32, и так далее.

Ниже в качестве примеров коротко рассмотрены некоторые области новых магических ядер. Более подробное рассмотрение систематик свойств новых магических ядер проведено в [3 - 5]. Как отмечалось выше, некоторые из исследуемых ядер (^{96}Zr , ^{14}C , ^{14}O , ^{30}Si , ^{30}S) являются стабильными при том, что другие (^{24}O , ^{54}Ca) - нейтронно-избыточны и располагаются вдали от линии стабильности. Эта особенность свидетельствует о том, что взаимодействия, приводящие к появлению новых магических ядер, носят универсальный характер.

2.1. Ядро ^{96}Zr и окрестности

Выше линии, образуемой классическим магическим числом $N = 50$ и пересекающей всю область представленных на Рис. 1 нуклидов, имеет место небольшой остров магичности. Этот остров формируется вокруг точки, имеющей максимум энергии 2^+ состояния и соответствующей числам $Z = 40$, $N = 56$, и более подробно изображен на Рис. 2.

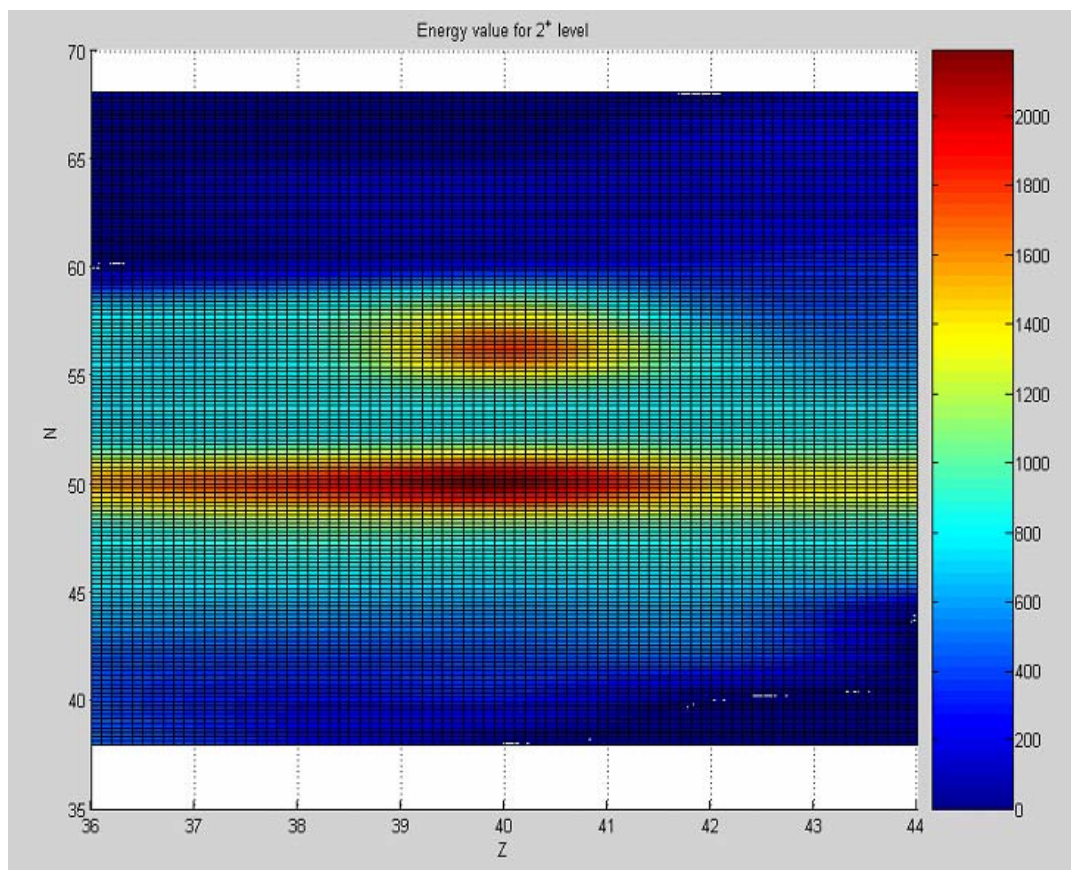


Рис.2. Энергии первых 2^+ состояний для ядер с величинами Z в районе значений 40.

Магические свойства ядер с $N = 56$ наиболее полно выражаются при $Z = 40$ и наоборот - магические свойства ядер с $Z = 40$ наиболее полно выражаются при $N = 56$. При удалении от этой точки происходит ослабление проявлений магических свойств обоих чисел, и при достаточной удаленности они исчезают. Например, зависимости энергий первых 2^+ состояний показывают, что магическое число $Z = 40$ исчезает для изотопов с $N \leq 48$ и с $N \geq 60$. Аналогично такие зависимости показывают, что максимумы, соответствующие $N = 56$, исчезают для изотопов с $Z \geq 44$. Граница в направлении малых Z не может быть четко прослежена из-за отсутствия данных, при $Z = 36$ магическое число N

= 56 все еще существует. Естественным исключением из закономерности, согласно которому магические свойства ядер уменьшаются по мере удаления от точки ($Z = 40, N = 56$), являются ядра с классическим магическим числом $N = 50$. Если двигаться от точки $N = 56$ в сторону меньших N , то при пересечении линии $N = 50$ наблюдается всплеск энергий первых 2^+ состояний, при дальнейшем движении в сторону меньших N значения этих энергий быстро и равномерно уменьшаются. Так можно коротко описать границы и структуру этого острова магичности.

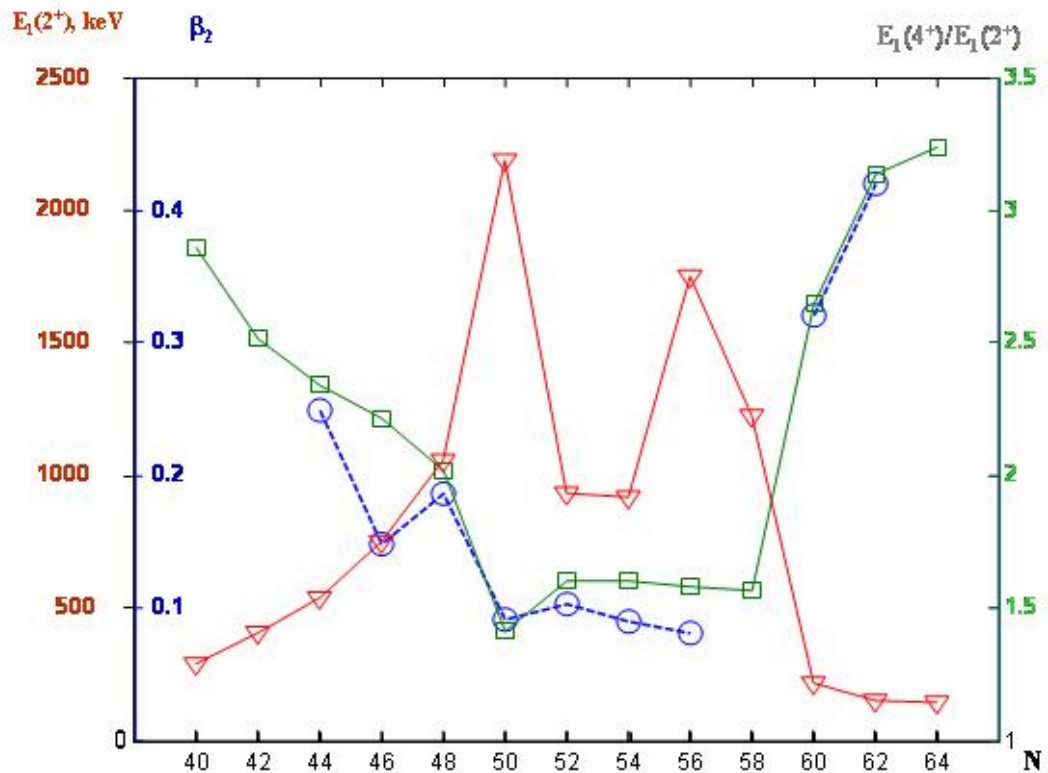


Рис. 3. Энергии первых 2^+ состояний - треугольники, отношения $E(4^+_{1})/E(2^+_{1})$ – квадраты и параметры квадрупольной деформации β_2 – кружки четно-четных изотопов Zr в зависимости от числа нейтронов.

Более подробное исследование [5] показывает, что изотоп ^{96}Zr действительно является ярким и бесспорным примером нового магического ядра, превосходящим по степени выраженности соответствующих свойств всех своих соседей. Энергия первого 2^+ состояния этого ядра равна 1.75 МэВ, что несколько уступает значению 2.19 МэВ для классического магического ^{90}Zr , однако заметно и систематически превышает подобные значения для соседних изотопов $^{92,94,98}\text{Zr}$ (0.9 – 1.2 МэВ) и значительно превышает такие же значения для более удаленных изотопов $^{100,102,104}\text{Zr}$ (0.14 – 0.21 МэВ). Аналогичные результаты дает сравнение с изотонами и другими соседними ядрами. Для ядра ^{96}Zr

характерно наличие не только максимума значений $E(2^+_{1})$, но и резонансного поведения других параметров, характеризующих магические ядра, а именно: наличия минимальных значений параметров квадрупольной деформации, минимальных значений отношения энергий первых 4^+ и 2^+ состояний $E(4^+_{1})/E(2^+_{1})$ (см. Рис. 3), а также - ярко выраженных характерных изломов в зависимостях значений энергий отделения нейтронов от числа нейтронов.

2.2. Ядро ^{54}Ca и окрестности

Рис. 1 показывает, что для $Z = 20$, помимо известных областей, ассоциируемых с числами $N = 20$ и $N = 28$, существует еще одна область ядер с повышенными значениями энергий первых 2^+ состояний. Эта область расположена в районе нейтронных чисел $N = 32 - 34$. Структура этой области подробно не определена из-за недостатка экспериментальной информации. Известно (см. [6] и ссылки), что максимумы энергий первых 2^+ состояний наблюдаются в ядрах Ca, Ti, Cr при $N = 32$ и отсутствуют в ядрах Ti, Cr при $N = 34$. Наиболее ярко максимум $N = 32$ представлен в изотопах Ca, т.е. при $Z = 20$. Самым интригующим в этом исследовании является не выясненный пока экспериментально вопрос о наличии максимума в ядре ^{54}Ca . Расчеты, выполненные в рамках оболочечной модели Монте-Карло [6], предсказывают как возможное наличие, так и отсутствие максимума в зависимости от феноменологического потенциала, положенного в основу расчетов. Если предположение о магичности ^{54}Ca подтвердится экспериментально, это будет означать, что указанное ядро следует считать центром острова магичности. Более подробно вопрос о структуре возбужденных состояний ядер в этой области изложен в [6].

2.3. Изотопы кислорода

Новые магические ядра представлены на двух краях изотопического ряда кислорода: при $N < 8$ и при N , сильно больших 8, в области нейтронно-избыточных ядер. Эти области необходимо рассматривать отдельно.

2.3.1. Изотоп ^{14}O

Таблица 1 представляет энергии первых 2^+ состояний четно-четных изотопов кислорода. Для изотопа ^{14}O эта энергия весьма высока и не сильно уступает значению для стандартного дважды магического ^{16}O . Если учесть, что энергия первого 2^+ состояния для

^{14}C равна 7012 кэВ, т.е. даже больше, чем для ^{16}O , то становится ясно, что рассматриваемая проблема выходит за пределы рассмотрения изотопов кислорода и существует как проблема магических чисел 6 и 8.

Таблица 1. Энергии первых 2^+ состояний ядер кислорода.

Ядро	J^π	E (кэВ)
^{14}O	2^+	6590
^{16}O	2^+	6917
^{18}O	2^+	1982
^{20}O	2^+	1674
^{22}O	(2^+)	3199
^{24}O	(2^+)	~3810

Данные по энергиям первых 2^+ состояний показывают, что и стандартное магическое число 8, и нестандартное магическое число 6 ярко, причем одинаково ярко, проявляют себя в ядрах с различным четным числом нуклонов противоположного типа. Обсуждаемые энергии равны приблизительно 3 - 4 МэВ и представляют максимумы в соответствующих изотопических и изотонических зависимостях. Интересно, что при числе нуклонов противоположного сорта больше, чем 8, т.е. 10, 12 и т.д., эффект магичности чисел 6 и 8 резко ослабевает, и соответствующие энергии равны 1.6 - 2.0 МэВ. Но более впечатляющими являются максимумы энергий, возникающие в ядрах с пересечением этих чисел, т.е. с числами протонов и нейтронов (6,8), (8,6), а также (8,8). Точные значения этих энергий представлены в Табл. 1 и в тексте выше, они находятся в диапазоне 6.6 – 7.0 МэВ. Пара (6,6) дает 4.4 МэВ. Изложенное дает основания рассматривать область ядер с числами нуклонов 6 или 8 как область магичности, причем центральными точками этой области являются точки (6,8), (8,6), (8,8) в координатах (N,Z). Рис. 4 хорошо показывает треугольник, образованный этими точками. Если пара (8,8) является хорошо известной парой стандартных магических чисел, то пары (6,8) и (8,6) требуют специального исследования.

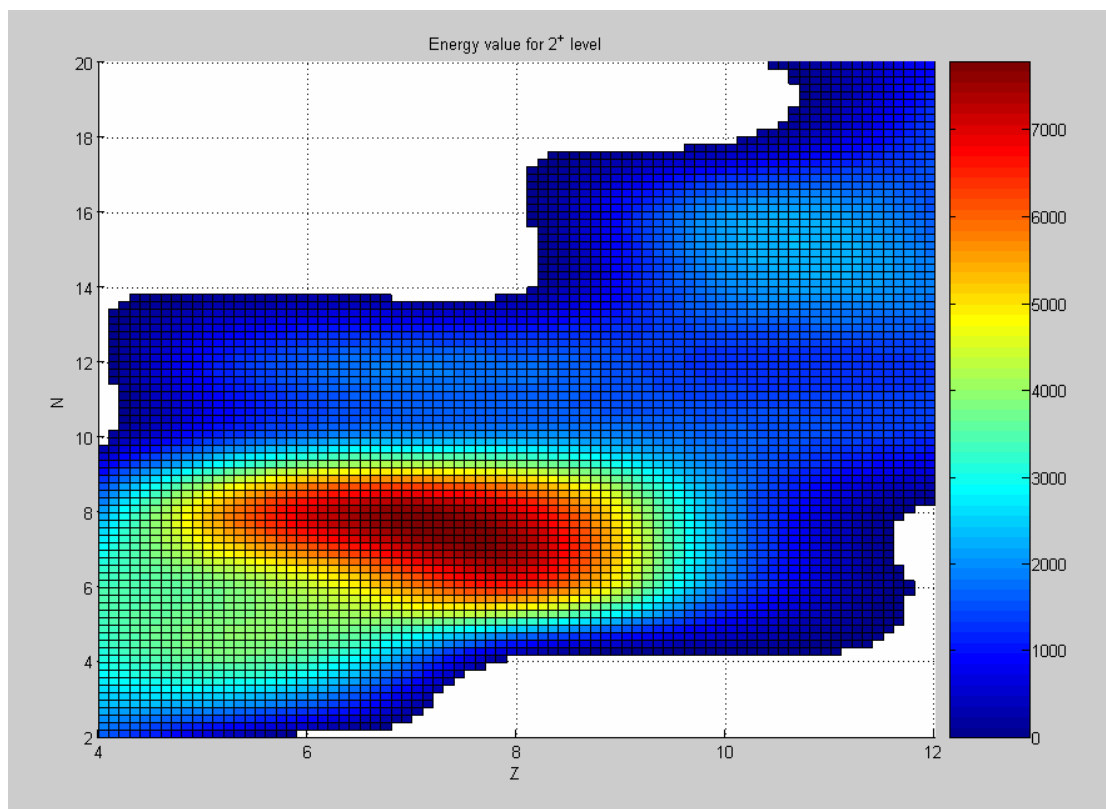


Рис. 4. Остров магичности вблизи чисел 6 и 8.

2.3.2. Изотопы кислорода с большим числом нейтронов

Энергия первого возбужденного состояния 2^+ для ядра ^{24}O предположительно [7] равна 3810 кэВ, что больше величин 1675 кэВ и 3190 кэВ для соседних ^{20}O и ^{22}O соответственно, а также почти в два раза превосходит значения энергий 2^+ для более тяжелых изотонов с $N = 16$ [7]. Эта оценка следует из учета нижней границы значения $E(2^+_1)$ для ^{24}O , установленной из экспериментов по гамма-спектроскопии [8] и равной 3.7 МэВ, и вычислений в рамках приближения случайных фаз [7]. Вычисления, использующие гамильтониан с феноменологическим однобозонным обменным потенциалом (ОБЕР) [9], успешно описывающий энергии отделения изотопов кислорода в этой области и структуру уровней ^{22}O , также указывают на тенденцию, согласно которой ядро ^{24}O имеет самую высокую энергию 2^+ среди изотопов кислорода с $N > 8$. Стоит добавить, что ядро ^{24}O является последним связанным изотопом кислорода в области больших N . Таким образом, в качестве центральной точки этой области новой магичности следует рассматривать ядро ^{24}O .

Особую интригу в рассматриваемый вопрос вносят обстоятельства, связанные с ядром ^{28}O . Эксперименты указывают на отсутствие связанного состояния этого дважды

магического ядра, имеющего числа протонов и нейтронов 8 и 20 [10]. При этом экспериментальные данные свидетельствуют о существовании связанных состояний ^{29}F и ^{31}F . Необходимо понять, как добавление одного протона может так усиливать ядерную стабильность и приводить к связыванию шести дополнительных нейтронов (см. [11] и ссылки).

2.4. Ядра с числами нуклонов 14 и 16

Подробное исследование [3, 4] указывает на существование области новых магических ядер с центром в точках (14,16), (16,16) и (16,14). Структура этой области аналогична рассмотренной ранее области, формирующейся вокруг точек (6,8), (8,8), (8,6) (Рис. 5).

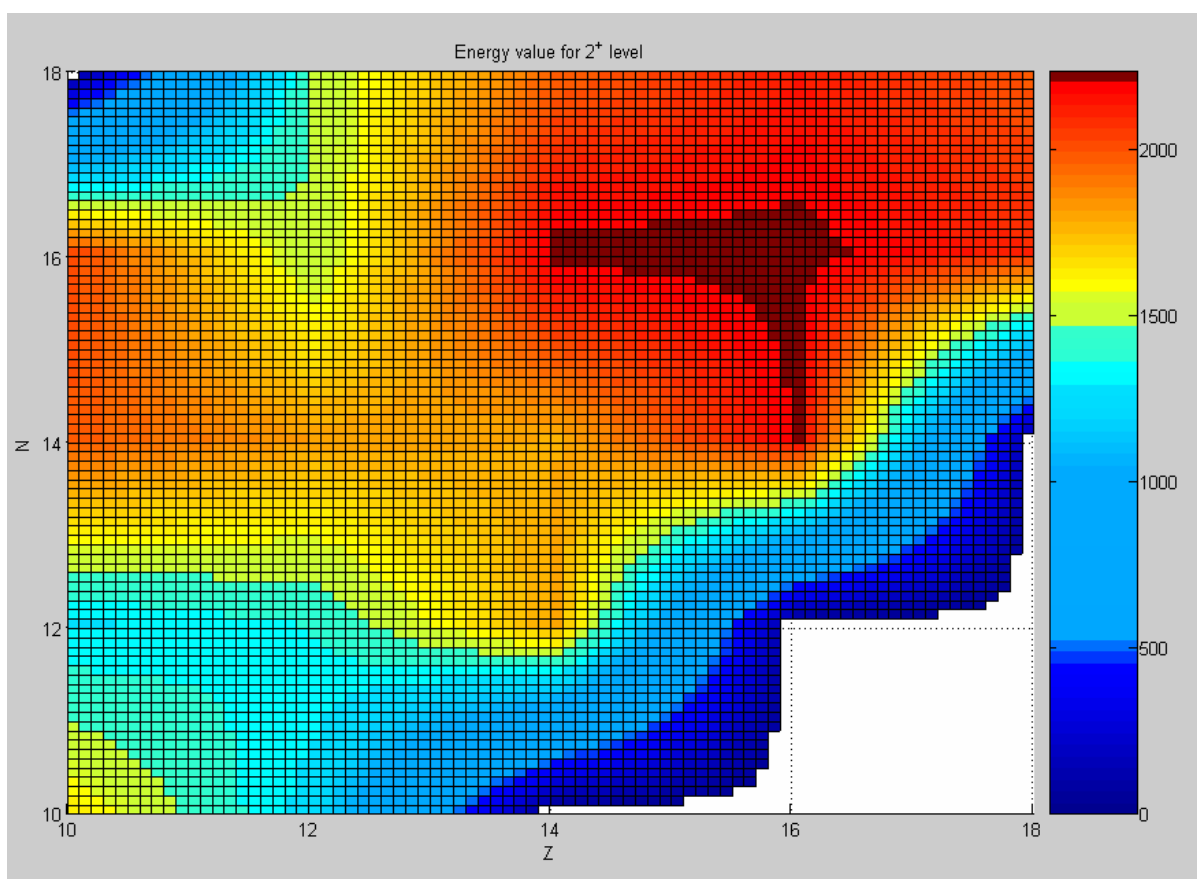


Рис. 5. Остров магичности вблизи чисел 14 и 16.

2.5. Магичность числа $N=26$

Продвижение в область избытка нейтронов или протонов может приводить к исчезновению стандартных магических чисел или возникновению новых. К примеру, выше указывалось на отсутствие связанного изотопа ^{28}O , которое можно истолковывать как исчезновение магичности числа $N = 20$ в ядрах кислорода. Примером возникновения нового магического числа может служить магичность $N = 26$ в ядрах с относительно большим числом нейтронов.

Магичность числа $N = 26$ является довольно необычной, поскольку число 26 не соответствует полному заселению нуклонами одночастичной подоболочки, в отличие от иных подобных случаев. Вывод о магичности числа нейтронов $N = 26$ был сделан на основании экспериментальных исследований ядерных масс [12]. На рис. 6 показаны экспериментальные значения энергий отделения 2 нейтронов, а на рис. 7 - микроскопические, или оболочечные, поправки к ядерным массам. Оба параметра могут служить признаками наличия ядерной магичности, если рассматривать это свойство исходя из энергий отделения, и оба показывают наличие магичности числа $N = 26$. Вторым признаком является более прямым индикатором наличия оболочечных эффектов [12]. Магическое число $N = 26$ проявляет себя вблизи точек $Z = 14$, $Z = 16$ и быстро исчезает при удалении от этих точек.

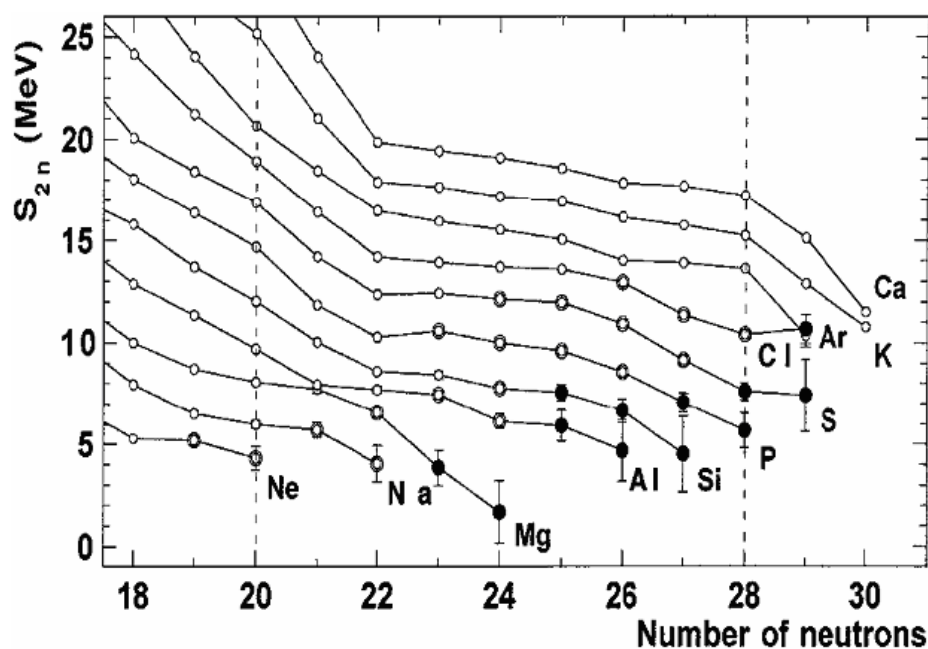


Рис. 6. Экспериментальные значения S_{2n} в области $N = 20$ и 28 ([12] и ссылки).

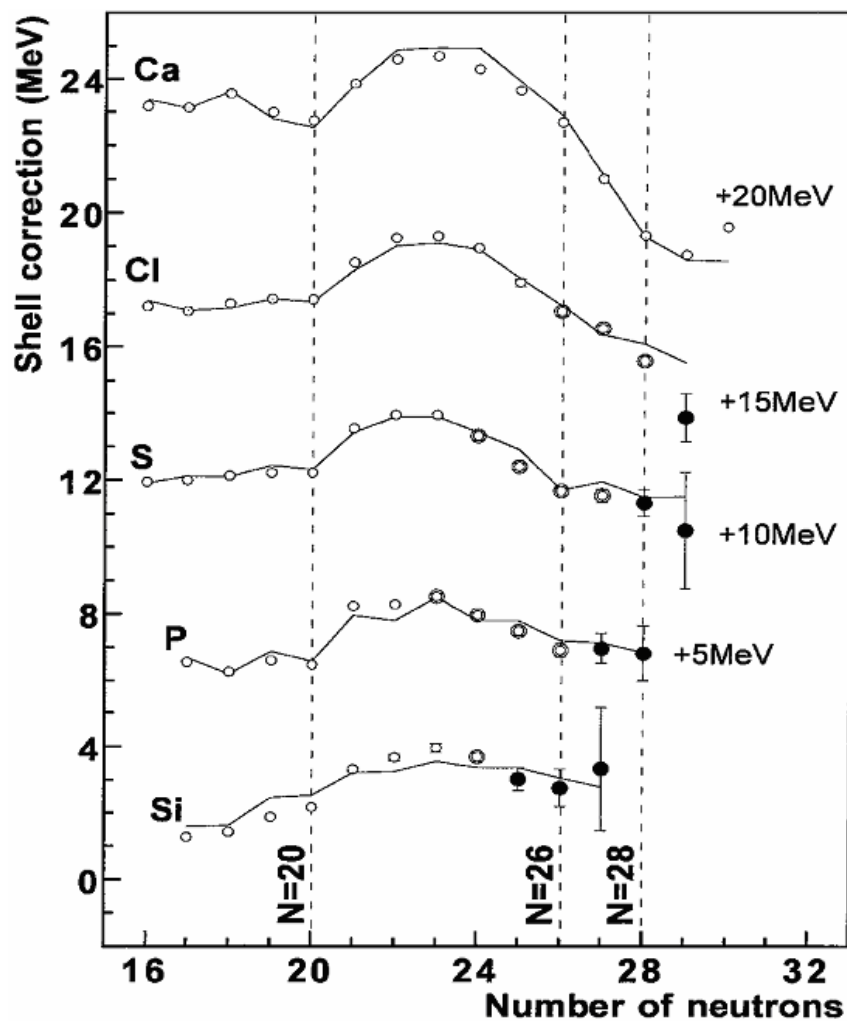


Рис. 7. Микроскопические поправки к ядерным массам.

Кружки - экспериментальные значения, линии – вычисления ([12] и ссылки).

3. Оболочечное строение новых магических ядер

Известно, что классическая ядерная магичность напрямую связана с оболочечной структурой ядер. Важным является вопрос, как новая ядерная магичность связана с такой структурой. Этот вопрос разбивается на два. Первый из них состоит в том, влияет ли вообще оболочечная структура на наблюдаемые свойства новых магических ядер, такие как минимумы параметров деформации, изломы зависимостей энергий отделений нуклонов и др., как это имеет место в случае классической ядерной магичности. Вторым, в случае положительного ответа на первый, касается выяснения конкретных особенностей такого влияния.

3.1. Метод получения оболочечных параметров из спектроскопических данных

Наиболее прямым источником экспериментальной информации об оболочечной структуре ядер являются данные экспериментов по срыву и подхвату нуклонов. Но и этот источник является недостаточно полным и надежным в силу наличия значительной доли систематических ошибок в конечных результатах. Поэтому экспериментальные данные этого типа нуждаются в дополнительной последующей обработке. С указанной целью был разработан [13] метод согласования данных различных экспериментов, в которые включены данные о спектроскопических факторах, полученные из экспериментов по срыву и по подхвату нуклонов, и данные о спинах и четностях ядерных состояний, полученные из всевозможных разных экспериментов. Результатом применения такого метода является получение оболочечных параметров ядер из спектроскопических данных.

Источником данных служила, главным образом, база данных ENSDF [14], использование данных сверх этой базы отмечается отдельно.

Главной идеей метода является стремление привести в непротиворечивое соотношение между собой данные экспериментов по реакциям срыва и подхвата нуклонов на одном ядре, а также данные о значениях спинов и четностей состояний конечных ядер этих реакций, полученные из максимально возможного количества различных экспериментов. Принципом, который кладется в основу при достижении этой цели, является стремление в максимальной степени избежать модельных зависимостей на конечные результаты экспериментов. Тем самым снижается доля систематических ошибок в этих результатах.

В основу математической процедуры положены правила сумм и перенормировка спектроскопических факторов. Из-за неопределенностей в значениях переданного момента j возникает большое количество, до нескольких десятков и сотен миллионов, возможных значений перенормирующих множителей для каждой реакции. Для решения задачи нахождения множителей используется процедура Монте-Карло. Компьютерные программы, написанные на основе перечисленных идей, позволяют определить диапазоны изменений значений нуклонных заселенностей подоболочек и эффективных одночастичных энергий.

3.2. Результаты для ядра ^{96}Zr

В [15] при помощи вышеописанного метода согласования на основании результатов спектроскопических экспериментов получены значения заселенностей и эффективных одночастичных энергий нейтронных и протонных состояний ядер $^{90,92,94,96}\text{Zr}$. Обнаружено, что в этих ядрах подоболочка $2d_{5/2}$ по мере заполнения нейтронами, все более понижаясь в пространстве энергий, отделяется от оболочки $2d_{5/2}---1h_{11/2}$ и в ядре ^{96}Zr , становясь полностью заполненной, занимает самое нижнее энергетическое положение, примерно посередине между вышележащей пустой $2d_{5/2}---1h_{11/2}$ оболочкой и нижележащей заполненной $2p_{3/2}---1g_{9/2}$. В результате в ядре ^{96}Zr нейтронная подоболочка $2d_{5/2}$ образует новую замкнутую отдельную оболочку и формирует энергетическую щель около 2.5 МэВ (Рис. 8). Аналогично для протонов: последняя замкнутая протонная подоболочка $2p_{1/2}$, мигрируя внутри своей оболочки, также образует значительную энергетическую щель около 3 МэВ [15].

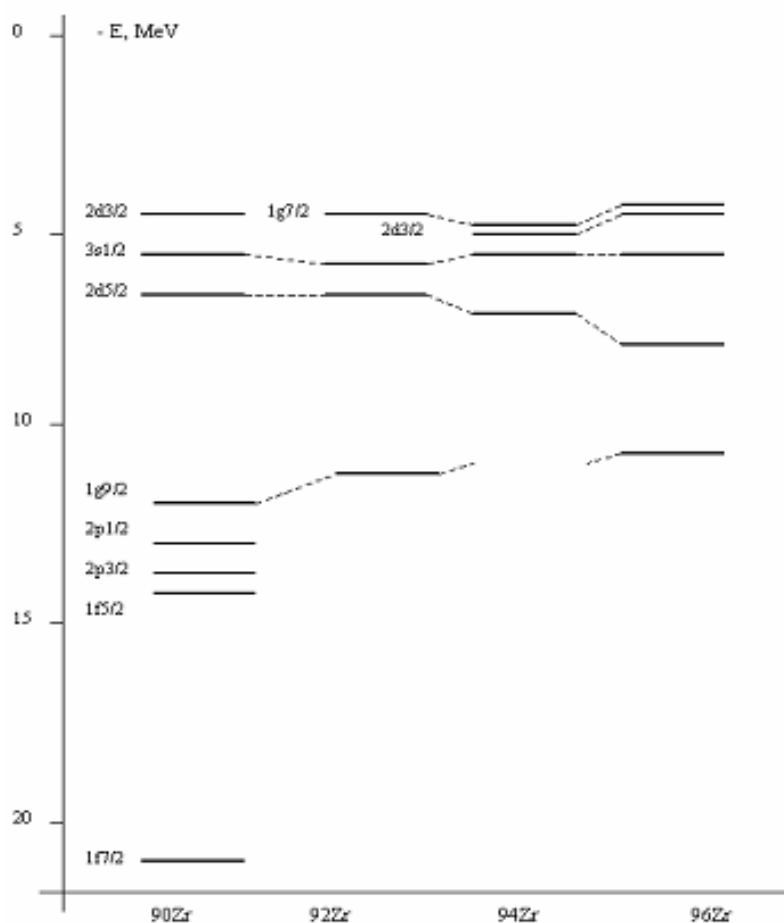


Рис. 8. Нейтронные подоболочки ядер Zr [15].

Таким образом, проведенные исследования [15] указывают на прямую связь между данными об оболочечной структуре, и данными о деформациях, энергиях отделения и т.д., указывающими на наличие магических свойств ядер. Наличие соответствующих свойств новых магических ядер сопряжено с наличием особой энергетической щели в оболочечной структуре этих ядер. В результате можно говорить о локальном, для фиксированных N и Z , образовании новых оболочек по аналогии с классическими магическими ядрами.

3.3. Закономерности в оболочечных конфигурациях новых магических ядер

Новые магические ядра, которые можно определить как центры областей магичности, обладают весьма схожими оболочечными конфигурациями [3, 4]. Например, в ядре ^{96}Zr последними заполненными являются нейтронная подоболочка $2d_{5/2}$ ($j = 5/2$) и протонная подоболочка $1f_{5/2}$ ($j = 5/2$) и, сверх нее, $2p_{1/2}$ ($j = 1/2$) (см. Рис. 9)

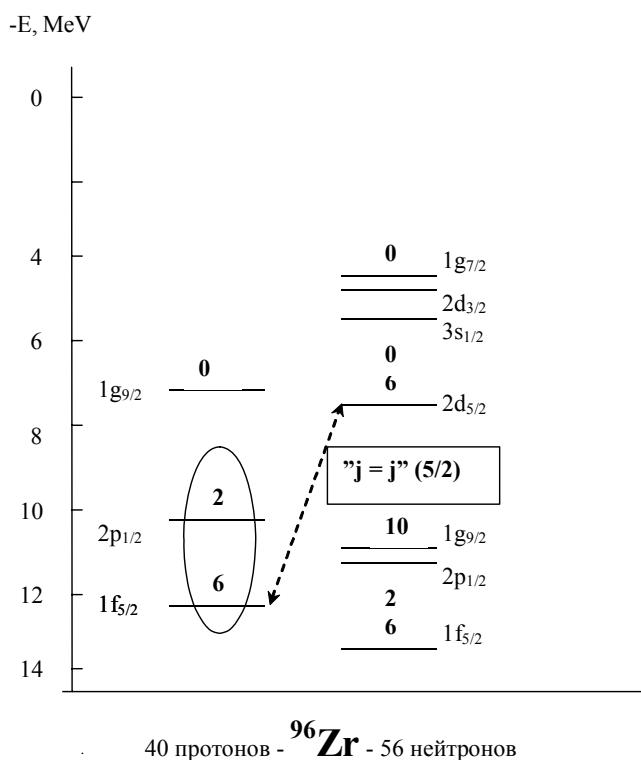


Рис. 9. Структура подоболочек ядра ^{96}Zr вблизи энергии Ферми.

Аналогично, в ядре ^{54}Ca конфигурация последних заполненных подоболочек выглядит следующим образом - $\pi 1d_{3/2}$ ($j = 3/2$) и $\nu 2p_{3/2}$ ($j = 3/2$), и, в добавление, сверху нейтронной находится заполненная $\nu 2p_{1/2}$ ($j = 1/2$) [6]. В ядре ^{14}C последними заполненными являются $\pi 1p_{3/2}$ ($j = 3/2$) и $\nu 1p_{3/2}$ ($j = 3/2$) и, сверх нее, $\nu 1p_{1/2}$ ($j = 1/2$). Во всех этих ядрах вблизи энергии Ферми имеются две заполненные подоболочки с одинаковыми значениями полного момента j . В добавление к этому сверху одной из этих подоболочек находится заполненная подоболочка с двумя нуклонами, имеющими $j = 1/2$. Если же двумя последними подоболочками с одинаковыми j являются подоболочки с $j = 1/2$, то дополнительная сверх- и близлежащая заполненная подоболочка с $j = 1/2$ отсутствует. Таким ядром, например, является ^{24}O .

Эти закономерности характерны для всех исследуемых в настоящей работе ядер, образующих вокруг себя острова магичности.

4. Нейтрон - протонное спаривание как причина формирования новых магических ядер

Формирование новых магических ядер объясняется, как правило, введением взаимодействия между нуклонами, которое является дополнительным по отношению к одночастичным силам. Например, в [6] вводится дополнительное взаимодействие между нейтронами и протонами, имеющими одинаковые значения l и разные значения j , для того, чтобы предсказать возможные магические свойства ^{54}Ca и объяснить исчезновение подобных свойств при увеличении Z сверх 20.

В настоящей работе высказывается предположение, что причина, приводящая к возникновению новой магичности в исследуемых ядрах, состоит в спаривании протонов и нейтронов, имеющих одинаковые полные угловые моменты j . Согласно этой гипотезе, парное взаимодействие протона и нейтрона с одинаковыми j приводит к их пространственной взаимной переориентации и одновременно к выигрышу в энергии. Предполагается, что для новых магических ядер, исследуемых в настоящей работе, пространственное перекрытие волновых функций протонов и нейтронов с одинаковыми j оказывается достаточно велико для того, чтобы они вступали между собой во взаимодействие с образованием пар по аналогии с тем, как в рамках гипотезы классической оболочечной модели протоны или нейтроны с одной подоболочки образуют пары с суммарным моментом, равным 0. Большое перекрытие волновых функций важно из-за короткодействия ядерных сил. В этом случае имеется достаточная доля вероятности,

что нуклоны подойдут достаточно близко друг к другу, чтобы вступить во взаимодействие. Для нуклонов одного и того же типа с одной и той же подболочки это условие выполняется всегда очень хорошо, поэтому эффект спаривания протонов или нейтронов с одной подболочки носит устойчивый характер, приводя к значениям спинов-четностей основных состояний четно-четных ядер 0^+ . Для протонов и нейтронов с разных подболочек пространственное перекрытие достаточно велико, если это замкнутые подболочки, расположенные близко к поверхности Ферми, т.е. достаточно большую часть своего времени нуклоны проводят в поверхностном слое ядра. В этом случае дополнительная близ- и сверхлежащая заполненная подболочка с $j = 1/2$ играет особую формообразующую роль, что приводит усилению перекрытия орбит. Результатом такого взаимодействия является взаимная переориентация и увеличение связывания соответствующих нуклонов и образование оболочечных энергетических щелей.

Например, магические свойства ядра ^{96}Zr обусловлены парным взаимодействием протонов с заполненной подболочки $1f_{5/2}$ и нейтронов с заполненной подболочки $2d_{5/2}$. Эти нуклоны имеют одинаковую величину момента $j = 5/2$. Протонная заполненная подболочка $2p_{1/2}$, расположенная выше $1f_{5/2}$, обеспечивает дополнительно высокую степень перекрытия протонных и нейтронных волновых функций. Подобным образом свойства других новых магических ядер объясняются парным взаимодействием нуклонов следующих конфигураций: $^{14}\text{C} - \pi 1p_{3/2} - (\nu 1p_{3/2} - \nu 1p_{1/2})$, $^{14}\text{O} - (\pi 1p_{3/2} - \pi 1p_{1/2}) - \nu 1p_{3/2}$, $^{24}\text{O} - \pi 1p_{1/2} - \nu 2s_{1/2}$, $^{30}\text{Si} - \pi 1d_{5/2} - (\nu 1d_{5/2} - \nu 2s_{1/2})$, $^{30}\text{S} - (\pi 1d_{5/2} - \pi 2s_{1/2}) - \nu 1d_{5/2}$, $^{32}\text{S} - \pi 2s_{1/2} - \nu 2s_{1/2}$, $^{54}\text{Ca} - \pi 1d_{3/2} - (\nu 2p_{3/2} - \nu 2p_{1/2})$

Исследования [15], проведенные для подболочек ядра ^{96}Zr , дают основания для приблизительной оценки энергии спаривания протона и нейтрона в этом случае. Она составляет 0.4 - 0.5 МэВ.

4.1. Объяснение магичности числа нейтронов $N = 26$

При помощи высказанной гипотезы удастся объяснить не только механизм формирования новых магических ядер с замкнутыми подболочками и закономерности в их оболочечной структуре, но и упомянутую ранее довольно необычную магичность нейтронного числа 26 для ядер между алюминием и аргоном.

Из Рис. 6 и 7 видно, что магичность числа нейтронов $N = 26$ возникает вблизи области, соответствующей заполнению протонами подболочки $1d_{5/2}$ (изотопы Si) и вышележащей $2s_{1/2}$ (изотопы S), и быстро исчезает при удалении от этой области. Между тем известно, что нечетно-четные и четно-нечетные ядра с числом нуклонов какого-то

одного типа 25 имеют аномалии в значениях спинов основных состояний. Таблица 2 представляет данные о спинах и четностях ядер с числами нуклонов вблизи этого значения. Для ядер с числом нуклонов одного типа 25 устойчиво наблюдается значение спина основного состояния $5/2^-$ вместо $7/2^-$, определяемого стандартной структурой подоболочек, и только для ядер, для которых число нуклонов другого типа является традиционным магическим, т.е. равно 20 или 28, это значение спина равно классическому $7/2^-$. Легко предположить, что причиной этой аномалии является некоторое расщепление в точке 26 подоболочки $1f_{7/2}$, например, по типу расщепления Нильссона, происходящее вследствие деформации (Рис. 10).

Таблица 2. Значения спинов и четностей основных состояний – особенности систем с 25 нуклонами.

Нейтроны				
	N = 21	N = 23	N = 25	N = 27
Z = 20, Ca	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$
Z = 22, Ti	$7/2^-$	$7/2^-$	$5/2^-$	$7/2^-$
Z = 24, Cr	X	$3/2^-$	$5/2^-$	$7/2^-$
Z = 26, Fe	X	$(7/2^-)$	$5/2^-$	$7/2^-$
Z = 28, Ni	X	$(7/2^-)$	$(7/2^-)$	$7/2^-$
Протоны				
	Z = 21, Sc	Z = 23, V	Z = 25, Mn	Z = 27, Co
N = 24	$7/2^-$	$3/2^-$	$5/2^-$	$(7/2^-)$
N = 26	$7/2^-$	$7/2^-$	$5/2^-$	$(7/2^-)$
N = 28	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$	$7/2^-$
N = 30	$(7/2^-)$	$7/2^-$	$5/2^-$	$7/2^-$
N = 32	$(7/2^-)$	$(7/2^-)$	$5/2^-$	$7/2^-$

В наиболее чистом виде расщепление такого типа прослеживается для изотопов Cr (Z = 24) и изотонов с N = 24, где имеет место более полная цепочка спинов нильссоновской схемы $3/2, 5/2, 7/2$.

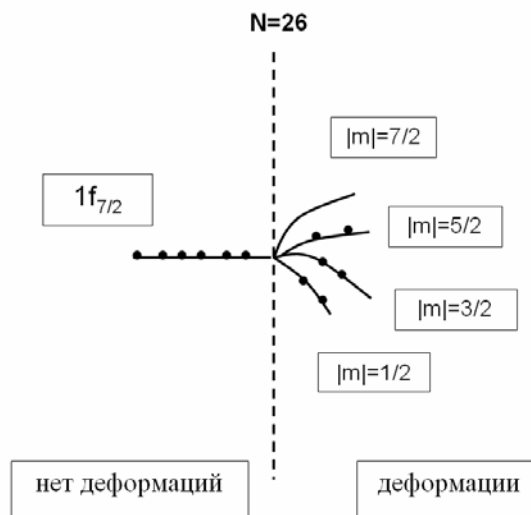


Рис. 10. Нильссоновское расщепление подболочки $1f_{7/2}$.

В [12] показано, что такая деформация, по-видимому, сохраняется для нейтронно-избыточных изотопов Cl, S и P, и предполагается возникновение псевдооболочки при $N = 26$. Впрочем, предположения о причинах и характере расщепления не имеют решающего значения в рамках данного рассмотрения и носят, скорее, иллюстративный характер. Как бы то не было и каковы бы не были причины, приводящие к аномалиям в значениях спинов, из рассмотрения самих значений спинов следует, что в точке 26 вырождение по величине проекции момента снимается, и последнюю замкнутую орбиту заполняют нуклоны, имеющие проекции полного момента, равные по абсолютной величине $5/2$.

В этом случае в ядрах с $N = 26$ происходит связывание нейтронов, имеющих модуль проекции полного момента $5/2$, и замыкающих (заполнивших) названную орбиту, с протонами, имеющими полный момент $5/2$ и замыкающими (заполнившими) орбиту $1d_{5/2}$, в пары, имеющие суммарную проекцию момента 0 (Рис. 23). Результатом является возникновение магических свойств у ядер Si - Cl с числом нейтронов $N = 26$.

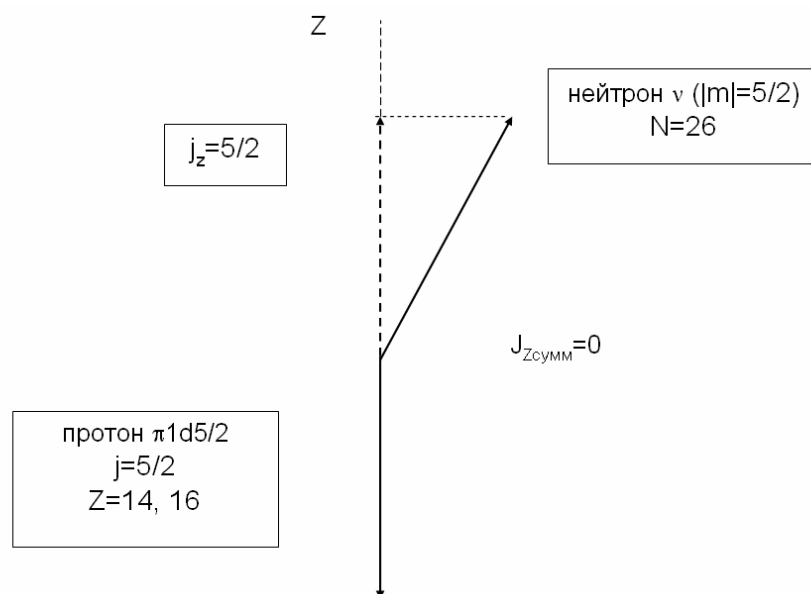


Рис. 11. Парное связывание нуклонов при $N = 26$.

4.2. Сосуществование форм как фактор стабильности

Новая магичность, рассматриваемая в данной работе, является результатом сочетания и одновременного воздействия трех факторов: наличия некоторой замкнутой конфигурации протонов, наличия замкнутой конфигурации нейтронов с такими же j и сильного перекрытия пространственных распределений этих конфигураций. Рассмотрение третьего пункта из перечисленных с необходимостью приводит к рассмотрению деформаций протонной и нейтронной конфигураций. В этой связи стоит остановиться на роли близ- и вышележащей заполненной подоболочки с $j = 1/2$ со стороны одной из конфигураций. В рамках настоящей гипотезы роль этой подоболочки сводится к определенному изменению форм.

Наличие такой подоболочки, протонной или нейтронной, приводит к тому, что пространственное распределение соответствующей конфигурации становится ближе к сферическому. Сосуществование двух схожих пространственных распределений, одно из которых ближе к сферическому распределению по сравнению с другим, обеспечивает наибольшую степень перекрытия волновых функций. Сказанное может быть прояснено при помощи Рис.12, на котором упрощенно представлены предельные случаи. Два схожих несовпадающих несферических распределения перекрываются слабо. Два сферических распределения также могут иметь слабую степень перекрытия, если они имеют сильно различающиеся радиусы. В то же время сферическое и «слегка несферическое» распределения

перекрываются достаточно сильно в широком диапазоне изменения радиусов и параметров деформации. Ясно также, что при сильно отличающихся средних радиусах, т.е. при сильном превышении N над Z , сосуществование вытянутой и сплюсненной форм приводит к большему перекрытию, чем сосуществование двух сферических распределений.

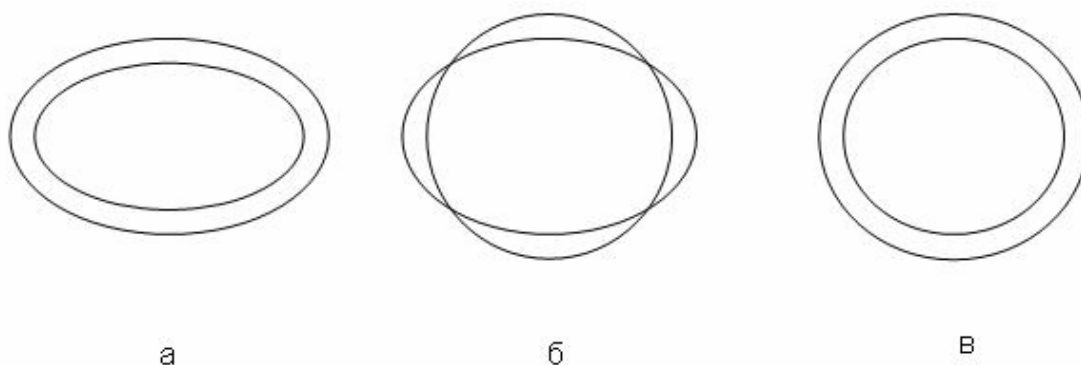


Рис. 12. Схематическое изображение взаимного перекрытия систем с различной формой: а) два подобных несферических распределения; б) сферическое и несферическое; с) два сферических.

То, что сосуществование двух форм может приводить к дополнительной стабильности, показано в [16]. Речь в этой работе шла о ядерных деформациях, именно сферической и несферической. Сосуществование этих двух форм могло объяснить возникновение дополнительной энергии связывания нуклонов в ядрах натрия с числом нейтронов $N = 20$ и 21 . Позже подобные идеи получили свое развитие в различных работах (см., например, [12, 11]).

В настоящей работе предлагается обобщить эту идею и рассматривать сосуществование форм протонной и нейтронной конфигураций. Такой подход не только объясняет существование новых магических ядер и дает объяснение эмпирической закономерности в оболочечном строении этих ядер, но и дает ключи для понимания причин исчезновения магических свойств в некоторых случаях.

Согласно этой гипотезе, нейтронно-избыточное новое магическое ядро ^{24}O есть продукт взаимодействия двух сферических конфигураций $\pi 1p_{1/2}$ и $\nu 2s_{1/2}$ с близкими радиусами. Отсюда следует, что две сферы $\pi(1p_{3/2} - 1p_{1/2})$ и $\nu 1d_{3/2}$, образующие ядро ^{28}O ,

могут иметь заметно различающиеся радиусы. То, что это сферы, следует из классической «магичности» чисел 8 и 20, а то, что радиусы этих сфер могут существенно различаться, следует из факта, что ^{28}O имеет 4 дополнительных нейтрона по сравнению с ^{24}O . Как следствие, необходимые для спаривания протонные и нейтронные орбиты в ядре ^{28}O слабо пересекаются, и связывания не возникает.

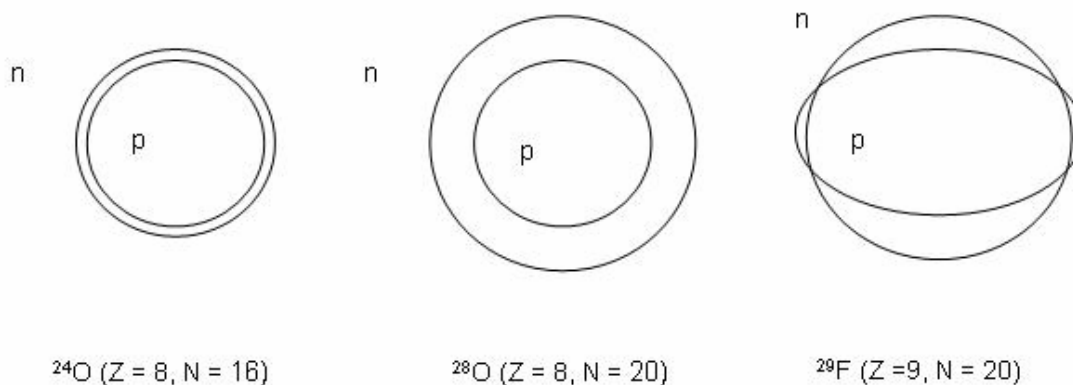


Рис. 13. ^{24}O - две сферы с близкими радиусами – магическое связанное ядро; ^{28}O - две сферы с разными радиусами – несвязанное ядро; ^{29}F - сосуществование сферической и несферической форм - связанное ядро.

Таким образом, как раз чрезмерная сферичность, «слишком много сферичности» являются причиной отсутствия связанности дважды магического ^{28}O . Косвенным подтверждением сказанного является наличие наблюдаемого связанного соседнего изотопа ^{29}F , у которого теряется сферичность протонной конфигурации и возникает сосуществование различных форм (Рис. 13).

5. Нейтрон-протонное спаривание и спины основных состояний нечетно - нечетных ядер

В рамках развиваемой гипотезы предполагается, что новые магические ядра суть продукт взаимодействия протонов и нейтронов, заполняющих хорошо перекрывающиеся подболочки с одинаковыми значениями j . Отсюда вытекает определенное следствие. Если взять ядро, у которого не хватает одного протона и одного нейтрона до заполнения таких хорошо перекрывающихся подболочек, то оставшиеся непарные протон и нейтрон

должны вступать между собой во взаимодействие с образованием пары. Спин и четность образовавшейся пары в таком случае определяют спин и четность ядра.

В настоящей работе предлагается следующее правило спаривания нуклонов.

Два нуклона с полными угловыми моментами \mathbf{j}_1 и \mathbf{j}_2 , причем такими, что $|\mathbf{j}_1| = |\mathbf{j}_2|$, четностями π_1 и π_2 , изотопическими спинами τ_1 и τ_2 взаимодействуют так, что энергетически выгодным является выполнение соотношения

$$K (\tau_1 \cdot \tau_2) (\mathbf{j}_1 \cdot \mathbf{j}_2) (\pi_1 \cdot \pi_2) = -1, \quad (1)$$

где $K = 1/(|\mathbf{j}_1 \cdot \mathbf{j}_2| \times |(\tau_1 \cdot \tau_2)|)$ - нормировочный множитель, а круглые скобки означают скалярное произведение.

Если положить $\tau_1 = \tau_2$ и $\pi_1 = \pi_2$, то в качестве частного случая мы сразу же получаем известный закон спаривания нуклонов одного вида с одной подоболочки, который был введен в оболочечную модель, чтобы объяснить спины и четности четно-четных ядер. Как известно, последняя закономерность хорошо подтверждается экспериментальными данными и не имеет исключений [17]. Если положить $\tau_1 \neq \tau_2$, т.е. взять нуклоны разного вида, то получается другой частный случай - закон спаривания протонов и нейтронов, который, в случае $(\tau_1 \cdot \tau_2) < 0$, звучит так:

Протон и нейтрон с одинаковым полным моментом j и разной четностью образуют пару с полным моментом, равным 0. Протон и нейтрон с одинаковым полным моментом j и одинаковой четностью образуют пару с полным моментом, равным сумме алгебраических величин этих моментов.

Иными словами, при образовании пары векторы моментов протона и нейтрона с разной четностью выстраиваются в противоположных направлениях, а протона и нейтрона с одинаковой четностью – в одном направлении.

Разумеется, четность образовавшейся пары равна произведению четностей нуклонов, каждая из которых равна $(-1)^l$.

Важным является факт, что каково бы не было n -р спаривание – параллельным или антипараллельным – ядра с четным числом протонов и с четным числом нейтронов будут иметь спин-четность 0^+ , поскольку имеется устойчивое антипараллельное p -р и n - n спаривание.

Спин-четность ядра с одним снятым с подболочки протоном и одним снятым с подболочки нейтроном при обеспечении условий их взаимодействия определяется последней нечетной n-p парой. Например, ядро с одним снятым с $1f_{5/2}$ протоном и одним снятым с $2d_{5/2}$ нейтроном ($Z = 37$, $N = 55$, ядро ^{92}Rb , производное от магического ^{96}Zr) должно иметь спин-четность 0^- . Дейтрон должен иметь 1^+ .

Таким образом, значения спинов-четностей основных состояний могли бы служить основой для проверки предложенного правила. Сравнение предсказанных и экспериментальных значений проведено в Таблице 3. Область исследуемых ядер определялась условием того, чтобы можно было проследить последовательность заполнения подболочек, исходя из соответствующих значений спинов и четностей близлежащих нечетных ядер.

Таблица 3. Сравнение предсказаний правила спаривания и экспериментальных данных.

p – n подболочки	Z	N	Ядро	Предсказание (1)	Эксперимент [18]
$1s_{1/2} - 1s_{1/2}$	1	1	^2H	1^+	1^+
$1p_{3/2} - 1p_{3/2}$	5	5	^{10}B	3^+	3^+
$1p_{1/2} - 1p_{1/2}$	7	7	^{14}N	1^+	1^+
$1p_{1/2} - 2s_{1/2}$	7	15	^{22}N	0^-	нет данных
$1d_{5/2} - 1d_{5/2}$	13	13	^{26}Al	5^+	5^+
$2s_{1/2} - 2s_{1/2}$	15	15	^{30}P	1^+	1^+
$1d_{3/2} - 1d_{3/2}$	19	19	^{38}K	3^+	3^+
$1d_{3/2} - 2p_{3/2}$	19	31	^{50}K	0^-	$(0^-, 1, 2^-)$
$1f_{7/2} - 1f_{7/2}$	27	27	^{54}Co	7^+	о.с. 0^+ (193 мсек) изомер (7^+) (1.48 мин)
$2p_{3/2} - 2p_{3/2}$	31	31	^{62}Ga	3^+	0^+
$2p_{1/2} - 2p_{1/2}$	33	33	^{66}As	1^+	нет данных
$1f_{5/2} - 1f_{5/2}$	39	39	^{78}Y	5^+	о.с. (0^+) (50 мсек) изомер (5^+) (5.7 сек)
$1f_{5/2} - 2d_{5/2}$	37	55	^{92}Rb	0^-	0^-
$1g_{9/2} - 1g_{9/2}$	49	49	^{98}In	9^+	нет данных

По итогам рассмотрения данных, представленных в Таблице 3, эффект спаривания протонов и нейтронов можно оценить как неожиданно сильный, так как проявляется он почти для всех нейтронных и протонных подболочек. Единственным исключением, явно противоречащим предсказаниям, является случай ^{62}Ga . Возможными причинами могут

быть либо изменение порядка следования и сильное перепутывание нейтронных подболочек, либо недостаточная степень перекрытия протонных и нейтронных волновых функций.

Обращает на себя внимание то, как проявляет себя этот эффект в ядрах ^{54}Co и ^{78}Y . Хотя основное состояние этих ядер и не соответствует предсказаниям, силы спаривания образуют изомерные состояния, более устойчивые, чем основные: времена жизни этих состояний на порядки больше, чем основного.

Следует отметить, что по мере заполнения подболочек их положение может меняться: заполнению протонной $1f_{5/2}$ соответствует $Z = 40$ для ядер с малым количеством нейтронов (порядок $2p_{3/2}-2p_{1/2}-1f_{5/2}$) и $Z = 38$ для ядер с нормальным и большим количеством нейтронов (порядок $2p_{3/2}-1f_{5/2}-2p_{1/2}$).

Заключение

В работе предложена гипотеза спаривания нейтронов и протонов с одинаковыми значениями полного углового момента j в ядре. Она связывает и объясняет два класса явлений – формирование новых магических ядер и значения спинов и четностей определенных нечетно-нечетных ядер. Предложенное в рамках этой гипотезы правило спаривания нуклонов определяет их энергетически наиболее выгодную взаимную ориентацию и позволяет найти спин и четность образовавшейся пары. В качестве частного случая оно включает в себя классический закон спаривания нуклонов одного сорта на одной подболочке.

Автор выражает глубокую благодарность профессорам В.В.Варламову, Б.С.Ишханову, И.М.Капитонову и Е.А.Романовскому за плодотворные дискуссии и неизменную поддержку данной работы. Автор признателен С.Ю.Комарову за весьма ценную помощь.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для ведущих научных школ (грант НШ № 5365.2006.2).

Литература

1. M.G.Mayer, Phys. Rev.,1949, v.75, p.1969.
2. O.Haxel, J. H. D. Jensen, and H. E. Suess, Phys. Rev. 1949, v.75, p.1766.
3. I.N.Boboshin, B.S.Ishkhanov, E.A.Romanovsky, V.V.Varlamov, LVII Internacional conf. on Nuclear Physics “Nucleus 2007”, book of abstracts, S.-Petersburg, 2007, p.92.
4. И.Н.Бобошин, В.В.Варламов, Б.С.Ишханов, Е.А.Романовский. Изв РАН, сер.физ., 2007, т.71, с.339.
5. О.В.Беспалова, И.Н.Бобошин, В.В.Варламов и др. Изв РАН, сер.физ., 2006, т.70, с.661.
6. M. Honma, T. Otsuka, B.A. Brown, and T. Mizusaki, Eur. Phys. J.,2005, v.A 25, s01, p.499.
7. A. Obertelli, S. P’eru, J.-P. Delaroche, A. Gillibert, M. Girod, and H. Goutte . Phys. Rev., 2005, v.C 71, p.024304
8. M. Stanoiu *et al.*, Phys. Rev., 2004, v.C 69, p.034312.
9. B. Alex Brown, and W. A. Richter. Phys. Rev.,2005, v.C 72, p.057301.
10. O. Tarasov *et al.*, Phys. Lett.,1997, v.B 409, p.64.
11. Ю.Э.Пенионжкевич, С.М.Лукьянов. ЭЧАЯ, 2006, т.37, с.439.
12. F. Sarazin, H. Savajols, W. Mittig, F. Nowacki. Phys. Rev. Lett., 2000, v.84, p.5062.
13. I. N. Boboshin, V. V. Varlamov, B. S. Ishkhanov and I. M. Kapitonov, Nucl. Phys.,1989, v.A 496, p.93.
14. T. W. Burrows, Nucl. Instrum. and Meth., 1990, v.A 286, p.5953.
15. I. N. Boboshin, B. S. Ishkhanov, V.V.Varlamov. Ядерная физика, 2004, т. 67, с.1872.
16. C.Thibault et al. Phys.Rev.,1975, v.C12, p.644.
17. М.Гепперт-Майер, И.Г.Д.Иенсен. Элементарная теория ядерных оболочек. Изд. Иностранной литературы, Москва, 1958.
18. J.K.Tuli Nuclear Wallet Cards, 7th edition, NNDC BNL 2005.

Бобошин Игорь Николаевич

НОВЫЕ МАГИЧЕСКИЕ ЯДРА И НЕЙТРОН-ПРОТОННОЕ СПАРИВАНИЕ

Препринт НИИЯФ МГУ – 2007- 4/825

Работа поступила в ОНТИ НИИЯФ МГУ 02.08.2007