

УДК 539.14

НОВОЕ ЛОКАЛЬНОЕ МАГИЧЕСКОЕ ЯДРО ^{146}Gd

© 2023 г. И. Н. Бобошин*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
“Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова”,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия

*E-mail: Boboshin@depni.sinp.msu.ru

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 28.04.2023 г.

Недавно было обнаружено существование особого класса атомных ядер — локальных магических ядер. На основании анализа экспериментальных данных представлены свидетельства существования нового локального магического ядра ^{146}Gd , обладающего магической парой нуклонов $(N, Z) = (82, 64)$. Получена схема эволюции протонной оболочки, приводящая к возникновению данного явления. Показано, что ведущую роль в указанной эволюции играют тензорные протон-нейтронные силы.

DOI: 10.31857/S0367676523702125, EDN: ZCTRQK

ВВЕДЕНИЕ

Ранее нами было показано существование нового типа атомных ядер — локальных магических ядер [1]. Суть нового явления состоит в следующем. 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 (далее л.м.я.) — 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 являются 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 в работе [1] на основании анализа данных по энергиям $E(2_1^+)$ и энергиям отделения нуклонов обнаружены следующие л.м.я.: $^{52, 54}\text{Ca}$, ^{68}Ni , ^{96}Zr и ^{114}Sn , обладающие магически-

ми парами нуклонов $(N, Z) = (\underline{32}, 20)$, $(\underline{34}, 20)$, $(\underline{40}, 28)$, $(\underline{56}, \underline{40})$, $(\underline{64}, 50)$ соответственно.

В указанной выше работе мы приводим схемы одночастичных состояний л.м.я. и соседних ядер, рассчитанные нами при помощи предложенного ранее метода [2] совместного анализа данных реакций срыва и подхвата. Было обнаружено, что в л.м.я., обладающих магической парой (N, Z) , внутри оболочек имеют место значительные (≈ 2 –3 МэВ) энергетические щели, которые соответствуют подчеркнутому числу в этой паре. Изменение в паре числа, сопряженного с подчеркнутым, приводит к исчезновению значительной щели. В некотором смысле эта быстро возникающая и быстро исчезающая большая щель напоминает дырку внутри оболочки. Ее образование и исчезновение происходит в результате определенной миграции протонных или нейтронных орбит в пределах оболочки. Щель внутри оболочки играет ту же роль, что и щель между оболочками. Как известно, особые свойства традиционных магических ядер объясняются замыканием оболочек в этих ядрах, которое состоит в том, что все одночастичные состояния в определенных нижних оболочках заполнены, а все состояния выше этих оболочек пусты и отделены от нижних большой энергетической щелью. Подобно этому в л.м.я. происходит замыкание подоболочек, расположенных ниже щели внутри оболочек при определенных (N, Z) . Как следствие, формируются л.м.я., свойства которых идентичны свойствам ядер, обладающих традиционными магическими числами.

Данная работа является продолжением исследований, начатых в [1], и посвящена новому л.м.я

^{146}Gd , которое находится за пределами ранее изученной области ядер.

НАБЛЮДАЕМЫЕ СВОЙСТВА ОКАЛЬНОГО МАГИЧЕСКОГО ЯДРА ^{146}Gd

Одним из любопытных новых явлений, обнаруженных в [1], стало явление “слабого замыкания” подоболочек в локальных магических ядрах, суть которого состоит в следующем. При определенных N или Z внутри некоторой оболочки может возникать щель, которая существенно больше, чем средние расстояния между орбитами, однако недостаточно большая, чтобы разделить заселенности нижних и верхних орбит точно на 1 и 0. Нижние орбиты “почти” заполнены, а верхние “почти” пусты. Иными словами, несмотря на щель, небольшое размытие заселенностей остается (это размытие — следствие действия сил спаривания). По этой причине упомянутые ранее свойства соответствующего л.м.я. (такие, к примеру, как повышенные энергии $E(2_1^+)$) выражены слабо.

Слабое замыкание нейтронных подоболочек было обнаружено нами в ядре ^{114}Sn [1]. На рис. 1а приведены энергии первых возбуждений 2^+ в изотопах $Z = 46, 48, 50, 52, 54$ [3]. Для всех изотопов, как и ожидалось, наблюдаются значительные и устойчивые максимумы при $N = 50$ и 82 . В добавление к ним в изотопах Sn ($Z = 50$) имеет место область слабых максимумов вблизи числа нейтронов $N = 64$. В соседних изотопах при удалении от $Z = 50$ максимумы $N = 64$ исчезают, что позволило отнести ядро ^{114}Sn к числу л.м.я., которому соответствует магическая пара $(N, Z) = (64, 50)$. Имеющиеся данные по энергиям отделения нейтрона от изотопов Sn и ближайших изотопов подтверждают сделанный вывод [1]. Используя метод совместной оценки данных реакции срыва и подхвата [2], мы получили значения заселенностей и энергий нейтронных орбит в стабильных четно-четных изотопах Sn и обнаружили следующее: 1) группа нижних нейтронных орбит $2d_{5/2}$ и $1g_{7/2}$ в оболочке 50–82 в изотопах Sn отделена от группы верхних нейтронных орбит $3s_{1/2}$, $2d_{3/2}$ и $1h_{11/2}$ устойчивой щелью ≈ 1.5 МэВ, в то время как расстояния между орбитами внутри каждой из групп равны ≈ 0.5 МэВ; 2) заполнение нейтронных орбит в указанных изотопах неравномерное, что связано с наличием упомянутой выше щели между группами орбит, причем в изотопах Sn с числом нейтронов вблизи $N = 64$ наблюдается наибольший скачок вероятностей заполнения (заселенностей) орбит в среднем от ≈ 0.2 в верхней группе до ≈ 0.8 в нижней группе. Энергетическая щель и скачок заселенностей при $N = 64$ суммарно дают эффект магического ядра ^{114}Sn . Указанные характеристики, собственно, и составляют

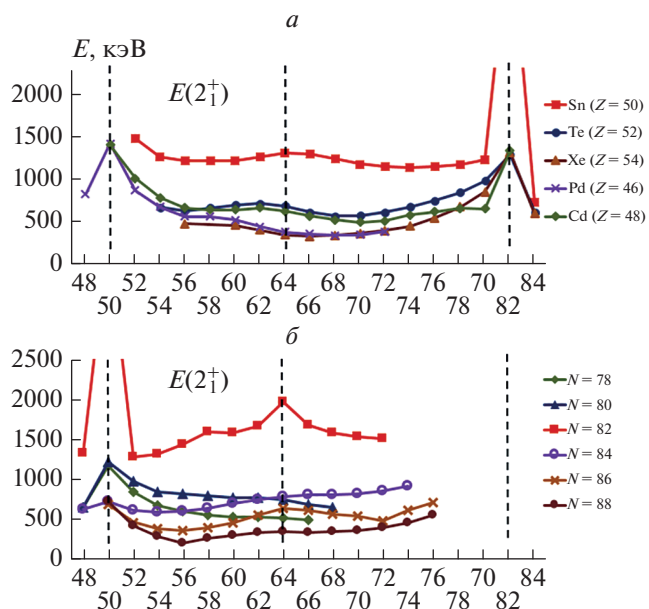


Рис. 1. Энергии первых возбужденных состояний 2^+ : в изотопах $Z = 46, 48, 50, 52, 54$ (а); в изотопах $N = 78, 80, 82, 84, 86, 88$. Пунктирные линии отмечают максимумы энергий (б). Максимум при $Z = 50, N = 82$ показан частично из-за большой величины 4041 кэВ.

феномен слабого замыкания. Мы показали также на примере ядра ^{114}Cd , что упомянутая выше щель между группами орбит исчезает при $Z \neq 50$, что приводит к локализации магичности.

Показательно, что такая же, точнее сказать, зеркальная $N \leftrightarrow Z$ картина энергий первых состояний 2^+ наблюдается для изотонов вблизи $N = 82$ (см. рис. 1б). Все представленные изотопы демонстрируют, в согласии с классической оболочечной теорией, значительные и устойчивые максимумы при $Z = 50$. В добавление к этому, в изотопах $N = 82$ наблюдается небольшой максимум при $Z = 64$. Этот максимум быстро исчезает в других изотопах по мере удаления от $N = 82$. При $N = 86$ значительно более слабый максимум $Z = 64$ все еще имеет место, однако при дальнейшем удалении от $N = 82$ он окончательно исчезает. На основании сделанного наблюдения ядро ^{146}Gd определяется как локальное магическое ядро, обладающее магической парой нуклонов $(N, Z) = (82, 64)$.

Для того, чтобы детально описать одночастичную структуру ^{146}Gd , необходимы данные реакции срыва и подхвата нуклонов на этом ядре, однако такие данные отсутствуют. Имея в виду аналогию с ^{114}Sn , естественно предположить, что в ^{146}Gd имеет место слабое замыкание протонных подоболочек $2d_{5/2}$ и $1g_{7/2}$.

На рис. 2 приведены энергии отделения протона $S(p)$ в изотопах $N = 78, 80, 82, 84, 86$ [4]. Для

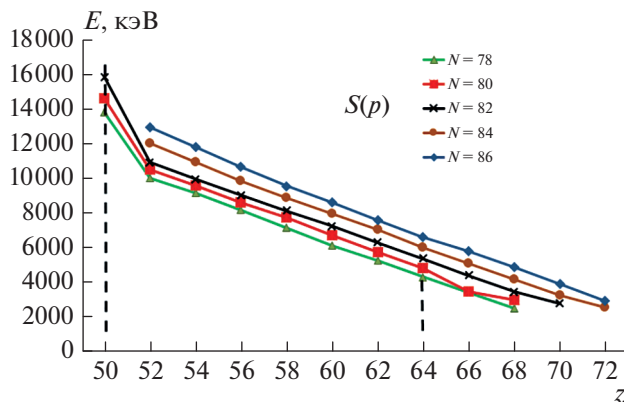


Рис. 2. Энергии отделения протонов. Пунктирные линии отмечают изломы графиков, обсуждаемые в тексте.

всех изотонов имеются соответствующие традиционному магическому числу $Z = 50$ изломы графиков. Дополнительно в изотонах $N = 80$ наблюдается небольшой одиночный излом, соответствующий $Z = 64$. Таким образом, данные по $S(p)$ свидетельствуют о локальной магичности числа $Z = 64$, однако не в паре с $N = 82$, как ожидалось, а в паре с $N = 80$. Последний факт весьма необычен. Как правило, магическая пара, определяемая на основе энергий отделения, точно совпадает с парой, определяемой на основе энергий первых состояний 2^+ . Единственный подобный случай был обнаружен ранее в л.м.я. ^{68}Ni [1]. Как может возникнуть подобное смещение? Одно из объяснений можно получить, рассматривая эволюцию оболочечной структуры, приводящую к формированию свойств ^{146}Gd .

ОБОЛОЧЕЧНАЯ СТРУКТУРА

Современная оболочечная теория учитывает как одночастичное среднее поле, так и двух- (иногда также трех-) частичные силы. Одночастичное поле, как правило, плавно меняется с изменением чисел протонов и нейтронов в ядре. Поэтому сильные точечные аномалии оболочечной структуры, имеющие место в л.м.я., обязаны своим появлением, скорее всего, двух- и трехчастичным силам. Эти силы часто описываются посредством эффективных двухчастичных нуклон-нуклонных сил. В расчетах используются двухчастичные матричные элементы, отражающие действие такого рода сил. Особую роль играют монополярные двухчастичные матричные элементы, усредненные по всем направлениям ориентации взаимодействующих нуклонов. Замечательным свойством соответствующего изменения энергий является линей-

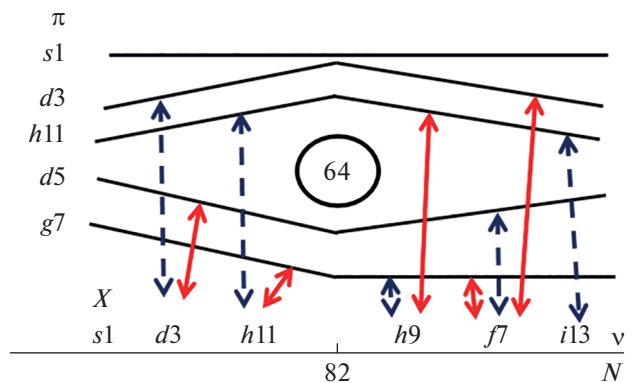


Рис. 3. Диаграмма образования локальной щели в протонной оболочке 50–82 при $N = 82$. Сплошные стрелки означают притягивание соответствующих нуклонов, пунктирные — отталкивание благодаря тензорным силам. Обозначение орбит сокращенное: $d3$ означает $2d_{3/2}$ и т.д. Крест вблизи обозначения орбиты $3s_{1/2}$ означает отсутствие тензорного взаимодействия.

ность. Если в некотором ядре на орбиту j_1 добавлено n_1 нуклонов, то энергия орбиты j_2 изменяется на

$$\Delta E_{j_2} = V_{j_1 j_2}^{p_1 p_2} n_1, \quad (1)$$

где p_1, p_2 — виды частиц на орбитах j_1 и j_2 , $V_{j_1 j_2}^{p_1 p_2}$ — монополярное взаимодействие между этими частицами [5]. При одновременном заполнении нескольких орбит изменение энергии орбиты j_2 является линейной суперпозицией изменений (1).

На рис. 3 представлена диаграмма, объясняющая возникновение локальной щели внутри оболочки $Z = 50$ –82 в точке $N = 82$. Она представляет собой схемы протонных орбит в ^{146}Gd и ближайших четно-четных изотопах Gd, которые показывают, как должно меняться взаимное расположение орбит в протонной оболочке 50–82 в этих изотопах в зависимости от числа нейтронов благодаря монополярному взаимодействию (1). Для того, чтобы построить наиболее реалистичные схемы, требуются значения энергий и заселенностей нейтронных и протонных орбит в изучаемом л.м.я. и в ядрах вблизи него, для получения которых, в свою очередь необходимы данные реакций срыва и подхвата протонов и нейтронов. Однако, как отмечалось ранее, в изучаемом случае такие данные отсутствуют. По этой причине при построении диаграммы на рис. 3 для оценок порядка следования орбит были использованы общепринятые схемы протонных и нейтронных оболочек [6], полученные на основе теоретических расчетов.

Кроме того, для построения подобного рода диаграмм необходимы значения $V_{j_1 j_2}^{p_1 p_2}$, описывающие взаимодействия валентных нуклонов в данной области нуклидов. Для оценки указанных

значений мы предполагаем, что решающий вклад в изменение относительных энергий орбит вносят тензорные нейтрон-протонные силы. Это предположение было впервые выдвинуто и успешно проверено в [7]. Основополагающий вклад нейтрон-протонных тензорных сил был также подтвержден нами в [1] на основании значений V_{jl}^{p1p2} для разных ядер, которые мы получили, пользуясь методом [2] совместной оценки данных реакций срыва и подхвата. Как показало исследование [1], в изменение относительных энергий орбит вносят вклад также нейтрон-нейтронные и протон-протонные силы, однако нейтрон-протонные тензорные силы определяют направление этих изменений и, являясь своеобразным триггером, включают действие других нуклон-нуклонных сил. Чтобы оценить изменение энергий протонных орбит при изменении числа нейтронов, мы на диаграмме рис. 3 в первом приближении заменяем все эффективные монополюсные двухчастичные протон-нейтронные силы на тензорные протон-нейтронные силы.

Диаграммы, подобные той, что представлена на рис. 3, впервые были применены в работе [1]. Они успешно описывают возникновение и исчезновение щелей внутри оболочек в перечисленных ранее л.м.я. в области $Z = 20-50$.

При построении диаграммы на рис. 3 учитывались последние три нейтронные орбиты оболочки 50–82 и первые три орбиты следующей оболочки в предположении, что именно они заполняются наиболее интенсивно при переходе числа нейтронов через точку $N = 82$ и определяют динамику протонных орбит в данной области. На диаграмме показаны отталкивающие и притягивающие тензорные монополюсные протон-нейтронные силы. Они определяют направление изменения энергий протонных орбит в изотопах Gd в соответствии с формулой (1). Мы учитываем при построении диаграммы, как и ранее в [1], только взаимодействия между нейтронами и протонами, имеющими разницу орбитальных моментов $\Delta l = 0$ или 1, полагая, что в этих случаях имеет место наибольшее перекрытие волновых функций. Двухчастичные монополюсные силы достигают наибольших значений, если совпадают главное квантовое число и орбитальный момент: $\Delta n = \Delta l = 0$.

Диаграмма показывает, как при $N = 82$ возникает щель внутри протонной оболочки 50–82 между группой нижних $2d_{5/2}$ и $1g_{7/2}$ и верхних $3s_{1/2}$, $2d_{3/2}$ и $1h_{11/2}$ орбит, что приводит к магичности числа протонов $Z = 64$. Исчезновение щели при других значениях N приводит к локальной магичности ^{146}Gd .

На основании диаграммы рис. 3 можно понять отмеченное ранее расхождение магических пар, определяемых на основании энергий $E(2_1^+)$ и на

основании энергий $S(p)$ отделения протона. Суть дела в том, что протоны, формирующие состояние 2^+ , и протоны, определяющие энергию отделения, не вполне одни и те же. Участие орбиты $1h_{11/2}$ в формировании состояния 2^+ сильно подавлено, поскольку частично-дырочные возбуждения типа $h_{11/2} \otimes x^{-1}$, где x — любая другая орбита из рассматриваемой оболочки, исключены в силу отрицательной четности протонов, заселяющих орбиту $1h_{11/2}$. Также двухчастичное возбуждение $1h_{11/2}^2$ имеет малый вес из-за малой заселенности орбиты $1h_{11/2}$. В дополнение, участие орбиты $1g_{7/2}$ в формировании возбуждения 2^+ ограничено, поскольку исключены возбуждения $s_{1/2} \otimes g_{7/2}^{-1}$. Напомним, что порядок следования нейтронных орбит оценен нами приблизительно на основании теоретических расчетов. Предположим теперь, что нейтронная орбита $1h_{11/2}$ в действительности расположена несколько глубже, чем $2d_{3/2}$ и $3s_{1/2}$ — настолько глубоко, что полностью заполнена уже при $N = 80$. (Порядок следования протонных орбит снизу вверх $1h_{11/2} - 2d_{3/2} - 3s_{1/2}$ в данной области предполагается, примеру, в [8]). Тогда рис. 3 следовало бы слегка изменить. В этом случае максимум щели между протонными орбитами $1h_{11/2}$ и $1g_{7/2}$ будет достигнут при $N = 80$. Поскольку эти орбиты обладают самой большей степенью вырождения квантовых состояний, они дают самый весомый вклад в энергию отделения по сравнению с остальными. Таким образом, при $N = 80$ может быть достигнута максимальная разница между энергиями отделения протона в ядрах с $Z = 64$ и $Z = 66$. Далее, при переходе от 80 до 82 щель между $1h_{11/2}$ и $1g_{7/2}$ может уменьшиться по тем или иным причинам, к примеру, благодаря заполнению нейтронной орбиты $2d_{3/2}$ (при построении диаграммы мы в первом приближении пренебрегаем взаимодействием протонных орбит $1h_{11/2}$ и $1g_{7/2}$ с нейтронной орбитой $2d_{3/2}$ из-за большой разницы угловых моментов, тем не менее, оно существует). Поскольку замыкание слабое, при определенных значениях энергий и заселенностей орбит указанная миграция орбит может привести к уменьшению разницы между энергиями отделения протона в ядрах с $Z = 64$ и $Z = 66$ при $N = 82$. В итоге образуется картина энергий отделения, наблюдаемая на графике рис. 2. В силу ограниченного влияния орбит $1h_{11/2}$ и $1g_{7/2}$ на формирование возбуждения 2^+ , указанные процессы не повлияют на положение максимума $E(2_1^+)$. Оставшиеся протонные орбиты, дающий основной вклад в формирование возбуждения 2^+ , образуют максимальную энергетическую щель

при $N = 82$ в соответствии с рис. 3, что приводит к максимуму энергий $E(2_1^+)$ при $N = 82$ и $Z = 64$. В итоге образуется картина энергий $E(2_1^+)$, представленная на рис. 1б). Приведенное качественное рассуждение — пример того, как можно объяснить отмеченное выше расхождение на основании диаграммы рис. 3. Более точное объяснение возможно при наличии достоверных сведений о заселенностях и энергиях всех нейтронных и протонных орбит, задействованных в процессе. Для их получения необходимы экспериментальные данные по спектроскопическим факторам соответствующих ядерных состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлены доказательства существования локального магического ядра ^{146}Gd . Они основаны на имеющихся данных по энергиям первых возбуждений 2^+ и данных по энергиям отделения протона. Построена диаграмма, которая объясняет свойства ^{146}Gd образованием значительной энергетической щели между протонными одночастичными состояниями при $N = 82$, которая соответствует магическому числу протонов $Z = 64$. При изменении N щель исчезает, что приводит к локальной магичности протонного числа 64. Как и для ранее открытых л.м.я., при построении диаграммы в данном случае полагалось, что основополагающий вклад в указанную эволюцию оболочки вносят нейтрон-протонные тензорные силы. Данные по энергиям первых возбуждений 2^+ определяют пару

$(N, Z) = (82, \underline{64})$, графики энергий отделения протона определяют пару $(N, Z) = (80, \underline{64})$. Смещение магической пары связано с особенностями слабого замыкания подоболочек в данной области. Единое по своей сути явление описывается магической парой $(N, Z) = (82, \underline{64})$, поскольку именно переход числа нейтронов через точку $N = 82$ является определяющим. В некотором смысле обнаруженное новое явление аналогично л.м.я. ^{114}Sn с магической парой $(N, Z) = (\underline{64}, 50)$. Для дальнейшего более детального исследования л.м.я. ^{146}Gd требуется проведение экспериментов по изучению реакций срыва и подхвата нейтронов и протонов на указанном ядре и ядрах вблизи него с получением спектроскопических факторов уровней конечных ядер реакций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобошин И. // Препринт НИИЯФ МГУ № 2018-1/892. 2018.
2. Boboshin I.N., Varlamov V.V., Ishkhanov B.S., Kapitonoov I.M. // Nucl. Phys. 1989. V. A496. P. 93.
3. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
4. Meng Wang, Audi G., Kondev F.G. et al. // Chin. Phys. C. 2017. V. 41. No. 3. Art. No. 030003.
5. Sorlin O., Porquet M.-G. // Prog. Part. Nucl. Phys. 2008. V. 61. P. 602.
6. Povh B., Rith K., Scholz C., Zetsche F. Particles and nuclei. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer-Verlag, 1995. 340 p.
7. Otsuka T., Suzuki T., Fujimoto R. et al. // Phys. Rev. Lett. 2005. V. 95. Art. No. 232502.
8. Хатаф Р. Модели ядер и ядерная спектроскопия. М.: Мир, 1968. 403 с.

New local magic nucleus ^{146}Gd

I. N. Boboshin*

Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: Boboshin@depni.sinp.msu.ru

Recently, the existence of a special class of atomic nuclei, local magic nuclei, has been discovered. In the present paper, evidence for the existence of a new local magic nucleus, ^{146}Gd , is presented on the base of experimental data. This nucleus has a magic pair of nucleons $(N, Z) = (82, \underline{64})$. The shell evolution scheme leading to this phenomenon was obtained. It is shown that the tensor proton-neutron force plays a crucial role in this evolution.