

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

95-182

P6-95-182

В.А.Морозов

НЕЧЕТНЫЕ И ЧЕТНЫЕ
ПРОТОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ
В ЯДРАХ С $N = Z$

Направлено в журнал «Ядерная физика»

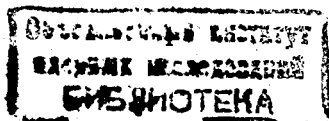
1995

Образование оболочек в ядрах с $N = Z$ характеризуется рядом особенностей как в четно-четных, так и в нечетно-нечетных ядрах. Общим для этого типа ядер является увеличение энергии связи ядер при $N = Z$ вследствие сильного перекрытия в них волновых функций протонов и нейтронов, что приводит к формированию особого класса оболочек в этих ядрах.

1. НЕЧЕТНЫЕ ПРОТОННЫЕ И НЕЙТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ В ЛЕГКИХ ЯДРАХ

Развитие представлений об оболочечной структуре ядра происходило по аналогии с представлениями об оболочках в атоме. Существенным различием в формировании оболочек в атомах и ядрах является то, что в атомах мы имеем дело с заполнением оболочек однотипными частицами — электронами, а в ядрах частицами двух типов — нейтронами и протонами, между которыми помимо кулоновского взаимодействия действуют также ядерные силы. Это приводит к тому, что, несмотря на аналогичный механизм формирования оболочек, магические числа в атомах и ядрах разные. Наблюдаемая аналогия в формировании оболочек в атомах и ядрах не могла до последнего времени считаться полной, так как при анализе потенциалов ионизации атомов помимо четных чисел — 2, 10, 18, 36, 54 и т.д., характеризующих замыкания оболочек, наблюдаются также небольшие максимумы в значениях потенциалов ионизации при $Z = 7, 15$ и 33. Такие конфигурации соответствуют середине заполнения p -оболочек, и для них реализуется максимальное число антисимметричных связей между p -электронами, и, следовательно, достигается минимальное кулоновское отталкивание, приводящее к повышению потенциала ионизации атома [1].

Уточнение некоторых особенностей оболочечной структуры ядра было сделано в работах [2—5]. В работе [2] при вычислении массовой формулы на основе представления о непрерывной мозаичной ядерной энергетической поверхности показано, что помимо известных магических чисел необходимо учитывать также и субмагические числа, среди которых в нейтронных оболочках должны быть и нечетные числа 33, 87, 89 и 101. Заключение о возможном существовании нечетной магической сферической оболочки с $N = 15$ приведено в работе [3] на основе данных, представленных в [4]. При этом проводился анализ энергии отделения S_{2n} для широкого круга



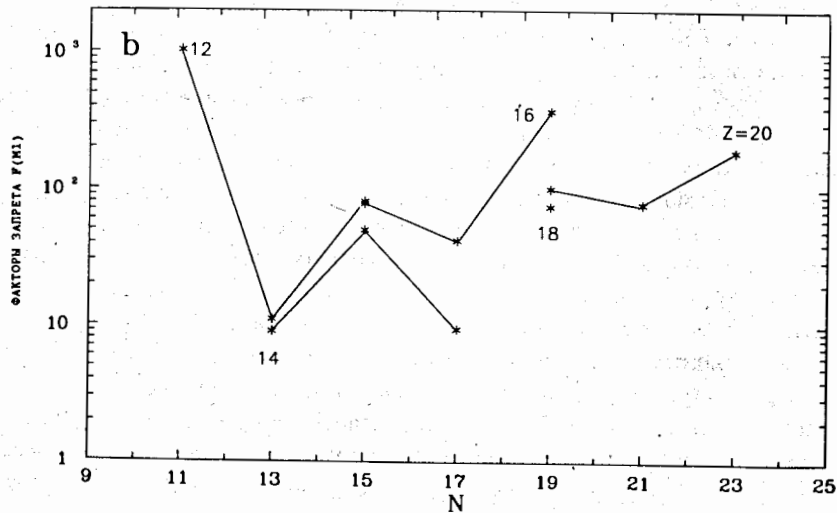
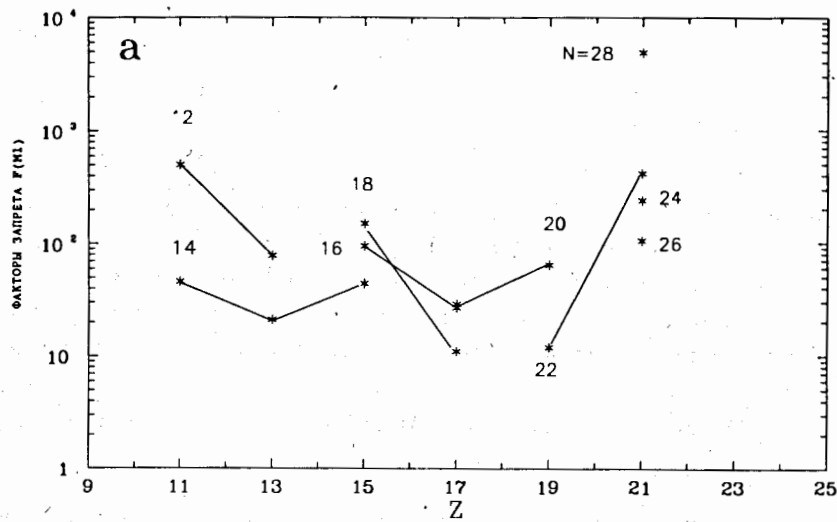


Рис. 1. Факторы запрета l -запрещенных переходов в легких ядрах. Числа на графиках показывают число четных нуклонов в четно-нечетных и нечетно-четных ядрах.

легких ядер. Основанием для идентификации нечетных оболочек в ядрах может быть как повышение энергии связи нуклонов, так и ее скачкообразное падение после прохождения оболочки, что и наблюдалось в данном слу-

чае. В дальнейшем в работе [5] было показано, что значения факторов запрета магнитных дипольных l -запрещенных переходов позволяют сделать аналогичное заключение о магичности числа $Z = 15$ (рис.1). Величины факторов запрета по Мошковскому, приведенные на рис.1, рассчитаны на основе данных, взятых из работ [6,7]. В расчетах учитывался также и статистический фактор.

Естественно возникает вопрос: имеются ли еще какие-либо аргументы в пользу существования нечетных магических чисел в ядрах? Известен эффект когерентного усиления замыкания оболочек в четно-четных ядрах вследствие взаимного влияния протонных и нейтронных оболочек. Особенно наглядно это видно в случае замыкания протонной подоболочки, например, в случае $Z = 64$ в ^{146}Gd при $N = 82$. В легких четно-четных ядрах при $Z = N$ ($A = 12 \div 32$) этот эффект также наблюдается [8]. Поэтому естественной является попытка обнаружения нечетных оболочек в нечетно-нечетных ядрах при $Z = N$. Таких нечетно-нечетных ядер, для которых известны экспериментально определенные величины S_n , S_p , S_{2n} , S_{2p} [9], всего 13: ^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N , ^{18}F , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{30}P , ^{34}Cl , ^{38}K , ^{42}Sc , ^{46}V и ^{50}Mn . Последовательность заполнения орбиталей протонами и нейтронами в этих ядрах одна и та же. Это дает основание рассчитывать на когерентное усиление эффекта замыкания нечетных оболочек в ядре вследствие суще-

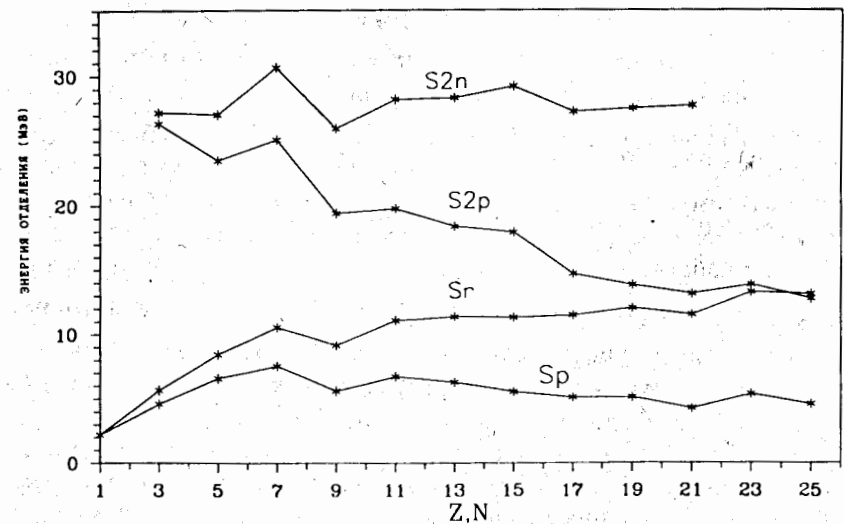


Рис. 2. Энергии отделения нуклонов и пар нуклонов в нечетно-нечетных ядрах при $Z = N$

ственного перекрытия волновых функций однотипных протонов и нейтронов. На рис.2 приведены зависимости энергии отделения S_p, S_n, S_{2p}, S_{2n} от Z, N . Отметим, что, помимо максимума функции S_{2n} при $N = 15$, наблюдается резкий спад значения S_{2p} после $Z = 15$, что подтверждает существование нечетной протонной оболочки, причем скачок в энергии отделения S_{2p} и S_{2n} для ядра с $N, Z = 15$ по сравнению с соседними ядрами достигает следующих величин: $\Delta S_{2p} = 3,22$ МэВ и $\Delta S_{2n} = 1,94$ МэВ, что соизмеримо с энергией отделения пар нуклонов при замыкании четных оболочек в легких ядрах, например, в ^{40}Ca — 8,30 МэВ и $\Delta S_{2n} = 9,09$ МэВ. Еще более определенно по сравнению с оболочками $Z, N = 15$ выделяются оболочки $N, Z = 7$. При этих оболочках $\Delta S_{2p} = 5,70$ МэВ и $\Delta S_{2n} = 4,67$ МэВ, что сравнимо с величиной энергий отделения пар нуклонов, наблюдаемых в дважды магических четно-четных ядрах. Общим для ядер с оболочками $Z, N = 7$ и 15 является спин основного состояния $I^\pi = 1^+$, значение которого определяется типом связи $(l_n + l_p) - (s_n + s_p)$. Аналогичный тип связи осуществляется и в ядре ^{38}K при $Z, N = 19$. При этом числе нуклонов наблюдается небольшой максимум в значениях энергии отделения S_n и S_p . Особый интерес вызывают оболочки при $Z, N = 23$. Спин основного состояния ^{46}V $I^\pi = 0^+$ определяется конфигурацией $(\pi 2s)^{-1} = 1/2^+$ и $(\nu 2s)^{-1} = 1/2^+$. Так как при этом протонные и нейтронные подоболочки $1f_{7/2}$ заполнены наполовину, то можно ожидать, что это ядро деформировано. Подтверждением этого может служить существование области деформации ядер Ne, Na, Mg, Al, P с $N > 20$. Можно отметить также наличие небольшого максимума в энергиях связи при $Z, N = 11$, что, как и в предыдущем случае, возможно, объясняется деформацией ядра, обусловленной заполнением наполовину подоболочки $1d_{5/2}$. Скачки в энергии отделения S_p, S_n, S_{2p}, S_{2n} для этих оболочек достигают 1—2 МэВ. Дополнительным аргументом в пользу существования нечетных оболочек при $Z, N = 11$ и 19 может также служить факт возрастания факторов запрета — $F(M1)$ l -запрещенных $M1$ -переходов при этих значениях (рис.1).

Рассмотренные ядра относятся к той группе легких ядер, ядерные свойства которых определяются в основном двухчастичными взаимодействиями в sd -оболочках. Замеченные ранее аномалии в энергии отделения S_{2n} при $N = 15$ и $N = 19, 20$ [10—12] нашли в основном свое объяснение при расчетах в рамках обобщенной оболочечной модели [13—15], в которой рассматриваются свойства легких ядер в полном sd -пространстве волновых

функций оболочечной модели $(0d_{5/2} - 1s_{1/2} - 0d_{3/2})$. Было показано, что скачкообразное изменение в энергии отделения S_{2n} определяется конкуренцией различных типов двухчастичных взаимодействий. Преобладающее двухчастичное взаимодействие притяжения при $N = 15$ $(0d_{5/2} - 0d_{5/2}), (0d_{5/2} - 1s_{1/2})_{J=2}$ и $(1s_{1/2} - 1s_{1/2})$ при $N = 16$ уступает место отталкивающему двухчастичному взаимодействию $(0d_{5/2} - 1s_{1/2})_{J=3}$. Аномалия в районе $N = 19, 20$, проявляющаяся для нейтроноизбыточных изотопов Na и Mg , может объясняться инверсией нижайших fp - и sd -орбит [16].

Представляет интерес проведение расчетов для нечетно-нечетных легких ядер при $Z = N$ в рамках обобщенной оболочечной sd -модели с целью установления вида двухчастичного взаимодействия при образовании обнаруженных нечетных оболочек.

Таким образом, в нечетно-нечетных легких ядрах вследствие возможного когерентного усиления замыкания оболочек наблюдаются нечетные оболочки при $Z, N = 7, 11, 15, 19, 23$. При этом оболочки $Z, N = 11$ и 23, скорее всего, относятся к классу деформированных. Оболочки $Z, N = 7$ и 15 аналогичны оболочкам с такими магическими числами в атомах и должны быть сферическими.

2. ЗАМЫКАНИЕ ОБОЛОЧЕК В ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДРАХ С $N = Z$

В работе [8] уже обращалось внимание на то, что в легких четно-четных ядрах с $N = Z$ ($A = 12—32$) происходит замыкание оболочек. Это было установлено по изменению энергий бета- и гамма-вибрационных состояний. Этот эффект наблюдается также и по изменению энергии связи легких ядер [1]. Более ярко и на большем числе ядер замыкание оболочек в ядрах при $N = Z$ наблюдается при анализе энергий отделения нуклонов и пар нуклонов — S_n, S_p, S_{2n}, S_{2p} . Этот анализ был проведен для широкого круга ядер от $Z = 2$ до 32. При этом рассматривались величины $\Delta S_n(Z, N) = S_n(Z, N) - S_n(Z, N+2)$ и $\Delta S_{2n}(Z, N) = S_{2n}(Z, N) - S_{2n}(Z, N+2)$, т.е. фактически проводилось дифференцирование поверхности энергий отделения нуклонов и пар нуклонов с целью выявления экстремальных отклонений в значениях этих энергий. В качестве примера на рис.3 представлены данные для изотопов с Z от 18 до 24. Во всех остальных рассмотренных случаях наблюдалась аналогичная картина.

Рассмотренные диаграммы позволяют сделать заключение о существовании слабой оболочки с $N = 24$ и установить зону ее действия, которая

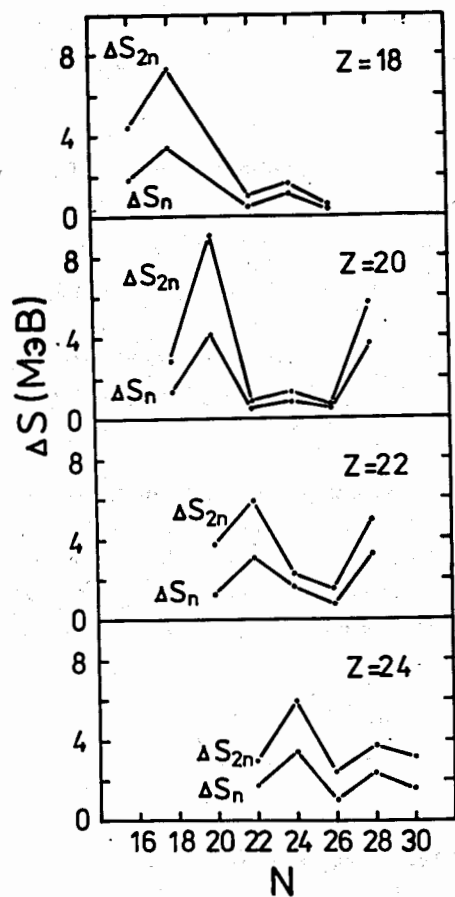


Рис. 3. Разности энергий отделения ΔS_n и ΔS_{2n} в четно-четных ядрах при $N = Z$.

прослеживается, по крайней мере, от $Z = 18$ до 24. Причем при $N = Z = 24$ эффект замыкания существенно усиливается, очевидно, вследствие обращения в ноль члена $B_{\text{symm}}(N - Z)^2/2A$, характеризующего

энергию симметрии ядра и входящего в выражение полной энергии связи ядра. Ранее оболочка с $N = 24$ была установлена в ядрах с $Z = 18$ и 22 по

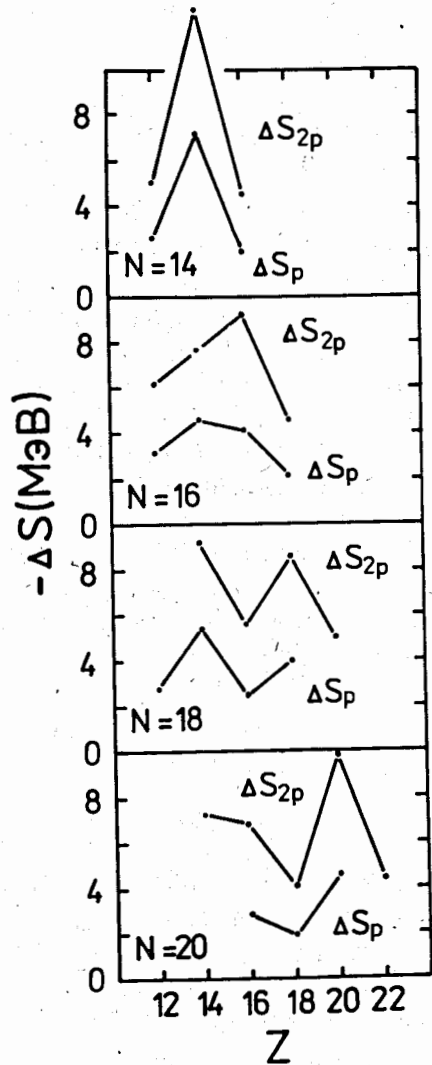


Рис. 4. Разности энергий отделения ΔS_p и ΔS_{2p} в четно-четных ядрах при $N = Z$.

изменению энергий состояний 0_2^+ и 2_2^+ [8]. Отметим, что, исходя из расчетов, проведенных в работе [2], в ядрах должны существовать оболочки как при $Z = 24$, так и при $N = 24$. Наблюдается закономерность в изменении энергий отделения протонов и пар протонов $\Delta S_p(Z, N) = S_p(Z, N) - S_p(Z+2, N)$ и $\Delta S_{2p}(Z, N) = S_{2p}(Z, N) - S_{2p}(Z+2, N)$, что аналогично характеру изменения ΔS_n и ΔS_{2n} . На рис. 4 приведены данные для некоторых изобаров. Видно замыкание оболочки при $N = 14$. Зона ее действия прослеживается от $N = 12$ до $N = 20$, и она является более сильной, чем оболочка с $N = 24$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Четно-четные и нечетно-нечетные легкие ядра с $N = Z$, в которых наблюдаются оболочки, имеют существенную разницу в энергиях отрыва нуклонов или пар нуклонов при прохождении четной или нечетной оболочки. Так, в ядрах с $A \approx 10$ для ΔS_n , ΔS_{2n} она достигает $5 \div 6$ МэВ для нечетно-нечетных ядер и $10 \div 20$ МэВ для четно-четных ядер, а для ядер с $A \approx 50$ разница достигает $1 \div 2$ МэВ для нечетно-нечетных ядер и $2 \div 3$ МэВ для четно-четных ядер. Другим отличительным свойством этой группы ядер, в которых наблюдаются оболочки, является периодичность в значениях массовых чисел A . Для четно-четных ядер $A = 4n$, где $n = 1, 2, 3$ и т.д. [1], а для нечетно-нечетных ядер $A = 2(4n + 7)$, где $n = 0, 1, 2$ и т.д.

Нечетные оболочки как нейтронные, так и протонные наблюдаются не только в нечетно-нечетных, но и в нечетно-четных и четно-нечетных ядрах, что можно установить не только по энергии отделения нуклонов и пар нуклонов, но и по изменению факторов запрета l -запрещенных $M1$ -переходов. Нечетные ядерные оболочки аналогичны атомным в той их части, которая обусловлена взаимодействием нуклонов с центральным самосогласованным полем, а отличные от атомных нечетные ядерные оболочки могут возникать, например, вследствие деформации ядер за счет остаточного двухчастичного взаимодействия.

Замкнутые оболочки в четно-четных ядрах с $N = Z$ идентифицируются как по энергии отделения нуклонов и пар нуклонов, так и по энергии возбужденных колебательных состояний в этих ядрах. Так, например, была установлена слабая оболочка $N = 24$ в изотопах элементов с $Z = 18, 20, 22, 24$. Можно, очевидно, сделать заключение, что появление четных и нечетных периодических оболочек в легких четно-четных и нечетно-нечетных ядрах с $N = Z$ обусловлено существованием пространственно-симметричных состояний в протонной и нейтронной системах ядра.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код гранта 95-02-05686-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bohr A., Mottelson B.R. — In: Nuclear Structure, vol.1 (Ed.A.Benjamin), Inc., New York, Amsterdam, 1969).
2. Колесников Н.Н. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1985, 49, с.2144.
3. Hamilton J.H. — Nucl. Phys., 1990, A520, с.377.
4. Audi G. — In: Workshop on Nuclear Structure of Light Nuclei Far From Stability. Obernai, France, Nov., 1989.
5. Морозов В.А. — ЯФ, 1993, т.8, с.311.
6. Endt P.M. — Nucl. Phys., 1978, A310, p.1.
7. Endt P.M. — Nucl. Phys., 1990, A521, p.1.
8. Morozov V.A. — Sov. Jour. Part. and Nuclei, 1991, 72(4), p.765.
9. Wapstra A.H., Audi G. — Nucl. Phys., 1985, A432, 55.
10. Roeckl E., Ditter P.F., Detraz C. et al. — Phys. Rev., 1974, C10, p.1181.
11. Vieira D.J. et al. — Phys. Rev. Lett., 1986, 57, p.3253.
12. Wouters J.M., Kraus R.H., Vieira D.J. et al. — Z. Phys., 1988, A331, p.229.
13. Wildenthal B.H., Chung W. — Phys. Rev., 1980, C22, p.2260.
14. Wildenthal B.H., Curtin M.S., Brown B.A. — Phys. Rev., 1983, C28, p.1343.
15. Wildenthal B.H. — Progr. Particle Nucl. Physics, 1984, v.11, p.5.
16. Watt A. et al. — J. Phys. G, Nucl. Phys., 1981, 7, pL145.

Рукопись поступила в издательский отдел
20 апреля 1995 года.

Морозов В.А.

P6-95-182

Нечетные и четные протонные и нейтронные оболочки
в ядрах с $N = Z$

На основе анализа значений энергии отделения нуклонов и пар нуклонов S_n , S_p , S_{2n} и S_{2p} в нечетно-нечетных и четно-четных легких ядрах с $N = Z$ было показано, что наблюдаются нечетные оболочки при $Z, N = 7, 11, 15, 19, 23$. При этом оболочки $Z, N = 11$ и 23 , скорее всего, относятся к классу деформированных. Оболочки $Z, N = 7$ и 15 аналогичны оболочкам с такими магическими числами в атомах и должны быть сферическими. Помимо известного факта замыкания оболочек в четно-четных ядрах при $N = Z$ наблюдаются также оболочки при $Z = 14$ и $N = 24$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1995

Перевод авторов

Morozov V.A.

P6-95-182

Odd and Even Proton and Neutron Shells in Nuclei with $N = Z$

It is shown by analysis of nucleon and nucleon pair separation energies S_n , S_p , S_{2n} , S_{2p} in odd-odd nuclei that odd shells are observed at $Z, N = 7, 11, 15, 19, 23$ as a result of coherently enhanced shell closure. The $Z, N = 11$ and 23 shells are most probably deformed. The $Z, N = 7, 15$ shells are similar to the shells with the same magic numbers in atoms and thus must be spherical. There were also established the shell closures for even-even nuclei ($N = Z$) at $Z = 14$ and $N = 24$.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1995