

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P6-95-182

В.А.Морозов

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

Направлено в журнал «Ядерная физика»

VOL 2 № 6 2

1995

**We regret that  
some of the pages  
in the microfiche  
copy of this report  
may not be up to  
the proper legibility  
standards, even  
though the best  
possible copy was  
used for preparing  
the master fiche**

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

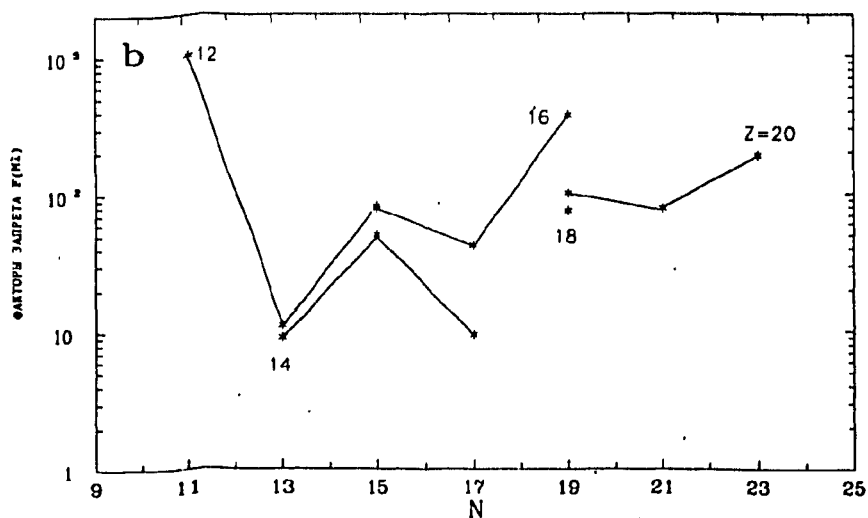
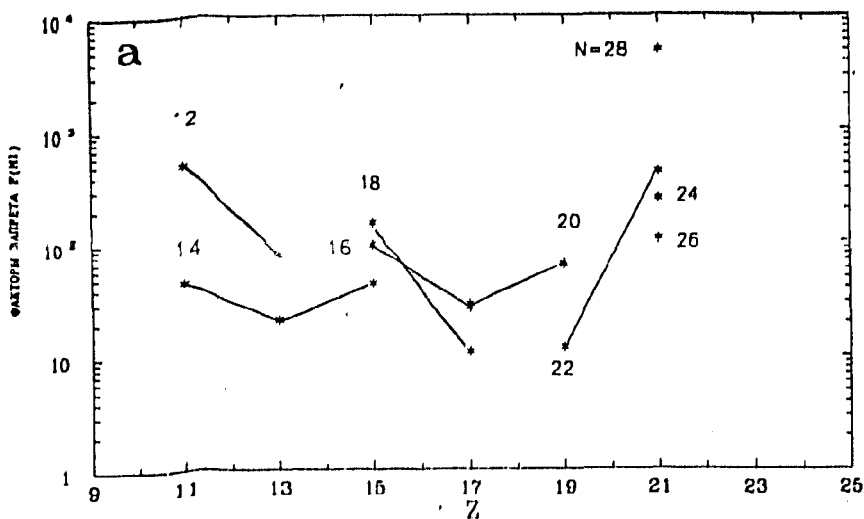


Рис. 1. Факторы запрета  $l$ -запрещенных переходов в легких ядрах. Числа на графиках показывают число четных нуклонов в четно-нечетных и нечетно-четных ядрах.

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-

час. В дальнейшем в работе [5] было показано, что значения факторов запрета магнитных дипольных  $l$ -запрещенных переходов позволяют сделать аналогичное заключение о магии 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  $^{146}\text{Gd}$  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:  $^2\text{H}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{F}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{30}\text{P}$ ,  $^{34}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{K}$ ,  $^{42}\text{Sc}$ ,  $^{46}\text{V}$  и  $^{50}\text{Mn}$ . 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-

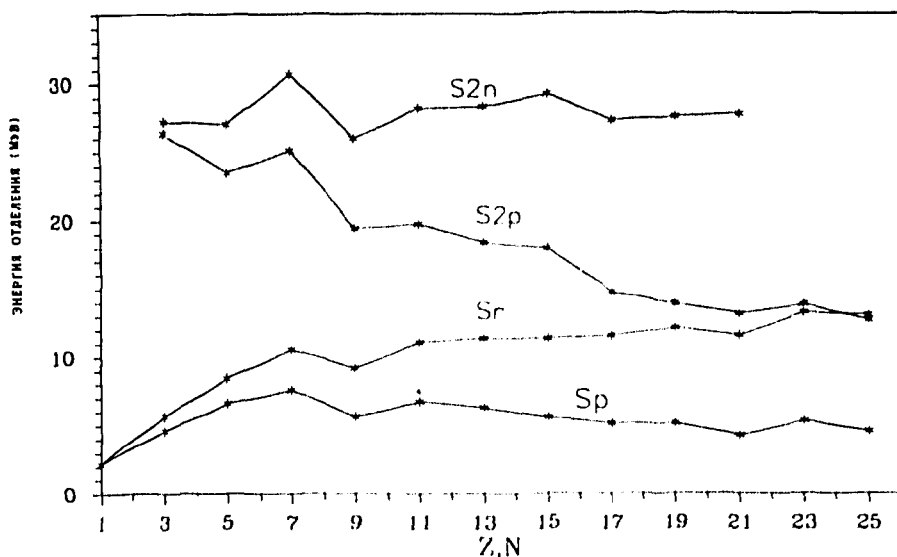


Рис. 2. Энергии отделения нуклонов и пар нуклонов в нечетно-нечетных ядрах при  $Z = N$

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  $^{40}\text{Ca}$  — 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  $^{38}\text{K}$  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  $^{46}\text{V}$   $I^\pi = 0^+$  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  $\text{Ne}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{P}$  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

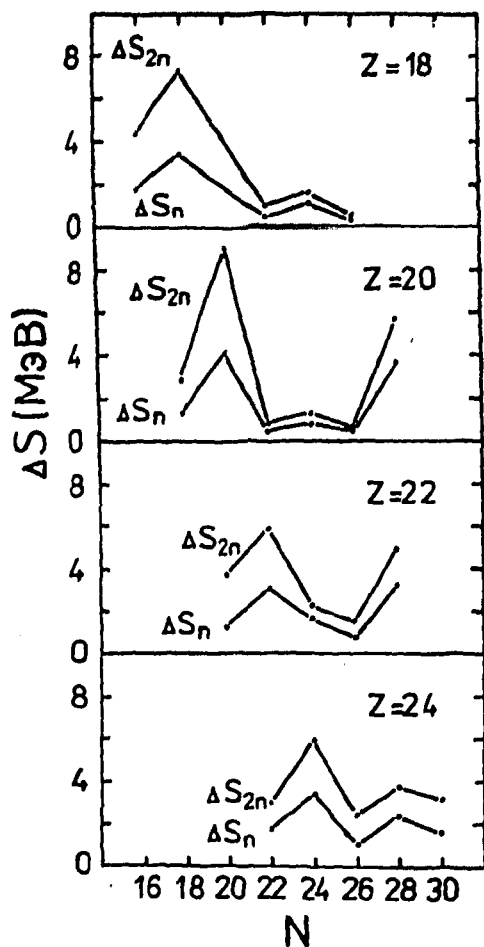


Рис. 3. Разности энергий отделения  $\Delta S_n$  и  $\Delta S_{2n}$  в четно-четных ядрах при  $N = Z$

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

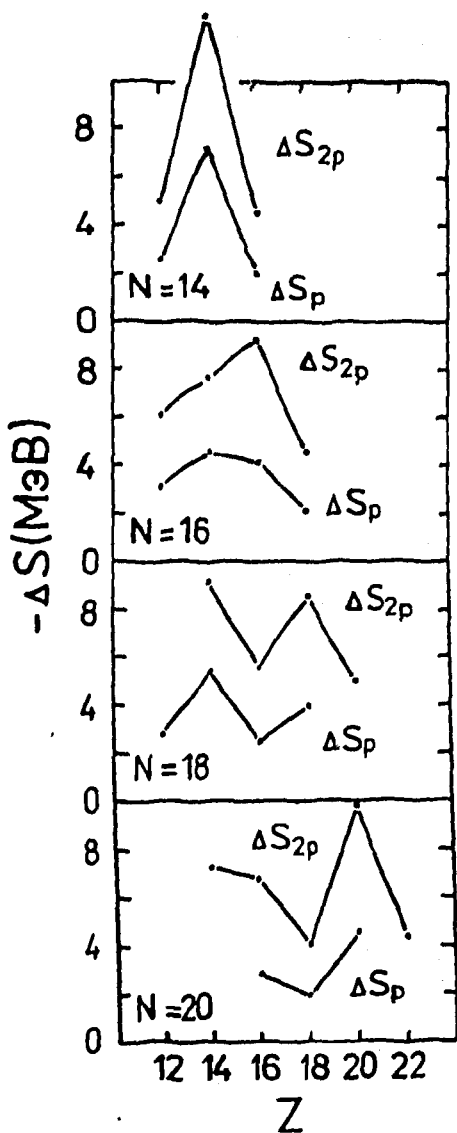


Рис. 4. Разности энергий отделения  $\Delta S_p$  и  $\Delta S_{2p}$  в четно-четных ядрах при  $N = Z$ .



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  $\Delta S_n$  и  $\Delta S_{2n}$ . 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  $A \cong 10$  для  $\Delta S_n$ ,  $\Delta S_{2n}$  она достигает  $5 \div 6$  МэВ для нечетно-нечетных ядер и  $10 \div 20$  МэВ для четно-четных ядер, а для ядер с  $A \cong 50$  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. Vicira D.J. et al. — *Phys. Rev. Lett.*, 1986, 57, p.3253.
12. Wouters J.M., Kraus R.H., Vicira 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, p.L145.

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

Редактор М.И.Зарубина. Макет Т.Е.Попеко

Подписано в печать 7.07.95

Формат 60×90/16. Офсетная печать. Уч.-изд.листов 0,77

Тираж 325. Заказ 48379. Цена 462 р.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
Дубна Московской области