

ВЛИЯНИЕ ЗАМЫКАНИЯ ОБОЛОЧЕК НА ЭНЕРГИИ ВОЗБУЖДЕННЫХ СОСТОЯНИЙ ЯДЕР

В.А.Морозов

Идентификация новых магических и полумагических ядер и обнаружение эффектов замыкания оболочек и подоболочек позволяют установить границы применимости оболочечной модели или ее модификаций. Цель данной работы заключалась в выборе методов идентификации замкнутых оболочек в ядре. В работе впервые применен метод дифференцирования энергетической поверхности возбужденных состояний определенной природы, который позволил обнаружить замыкание оболочек, подоболочек и квазиоболочек в ядрах сферической, переходной и деформированной области. Показано замыкание нейтронной подоболочки при $N = 56$ и протонной подоболочки при $Z = 58$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

The Effect of the Shell Closure on Nuclear Excited State Energies

V.A.Morozov

The identification of new magic and semimagic nuclei and the discovery of the shell and subshell closure effects permit one to determine the limits of applicability of a shell model or its modifications. The aim of this work was to choose the methods of identification of closed shells in a nucleus. The method for differentiation of energy surface of excited states of a definite nature was applied for the first time. It permitted one to discover the closure of shells, subshells and quasishells in nuclei of spherical, transitional and deformed region. The closure of a neutron subshell at $N = 56$ and of a proton subshell at $Z = 58$ was shown.

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

Введение

Идентификация новых магических и полумагических ядер и обнаружение эффектов замыкания оболочек и подоболочек представляет большой интерес вследствие возможности установления границ применимости оболочечной модели ядра^{1/} или

ее модификаций. В последние годы появились экспериментальные и теоретические работы, посвященные доказательству существования нового магического числа $Z = 64$ в ${}^{146}_{64}\text{Gd}_{82}^{2-7}$. Характерной особенностью этого магического числа по сравнению с магическими числами $Z = 50, 82$ является меньшая устойчивость данной оболочки при изменении числа протонов и нейтронов в ядре. Поэтому идентификация новых магических чисел смыкается с задачей установления предела действия данной замкнутой оболочки в соседних ядрах.

Цель данной работы заключалась в выборе методов идентификации замкнутых оболочек в ядре и в анализе некоторых экспериментальных данных, свидетельствующих о замыкании ядерных оболочек.

Влияние замыкания оболочек на энергию возбужденных состояний в ядрах

1. Нечетные ядра

При последовательном изменении числа протонов или нейтронов прохождение замкнутой оболочки (подоболочки) ядра характеризуется для нечетных ядер пересечением ряда уровней. Это объясняется резким изменением химического потенциала в ядре при таком переходе. Проследивая ход изменения положения уровней от ядра к ядру, можно обнаружить замыкание оболочки. Наиболее наглядно замыкание оболочек обнаруживается при разностном энергетическом анализе, который характеризует изменение положения уровня определенной природы в изотопах или изотонах. Эту разность определим как

$$\Delta E(I)^{A, A+2} = E(I)^A - E(I)^{A+2},$$

где I — спин определенного состояния в ядре, а E — энергия этого состояния. Фактически диаграмма $\Delta E(I)^{A, A+2}$ характеризует дифференцирование энергетической поверхности (ДЭП) уровней определенного спина, проведенное по протонным сечениям изотопов или по нейтронным сечениям изотопов. Анализ диаграмм ДЭП позволяет обнаружить замыкание оболочек или подоболочек как в нечетных, так и в четно-четных ядрах. Встает вопрос — какие уровни могут быть использованы при построении диаграмм ДЭП? В нечетных сферических ядрах замыкание оболочек можно установить по диаграммам ДЭП одночастичных уровней. В четно-четных сферических ядрах в анализе могут быть использованы одnofонные и двухфонные уровни квадрупольных колебаний,

а также октупольное состояние. К анализу могут быть также привлечены квазиротационные уровни соответствующих состояний с целью установления помимо факта замыкания оболочек также и структурных изменений, происходящих в соответствующей полосе.

Аналогичный подход может быть применен и для установления квазиоболочек в деформированных ядрах. На рис.1а приведен пример перестройки системы уровней в нечетных ядрах с замкнутой нейтронной оболочкой ($N=126$) при прохождении другой протонной замкнутой оболочки с $Z=82$. Группирование частичных и дырочных уровней у нулевой линии при $Z=83$ свидетельствует о стабилизации положения как тех, так и других уровней в ядрах с $Z=83$ и 85 при переходе замкнутой оболочки $Z=82$.

Аналогичное поведение мы наблюдаем и при прохождении оболочки $Z=64$ — рис.1б — в нечетных ядрах с $N=82$. При замыкании нейтронной оболочки в нечетных ядрах с $Z=50$ диаграмма ДЭП имеет другой вид — рис.2а: по частичным уровням видно замыкание нейтронной оболочки при $N=62$, по дырочным — при $N=64$, а $N=66$ соответствует замыканию нейтронной оболочки как по частичным, так и по дырочным уровням. Это отличие, оче-

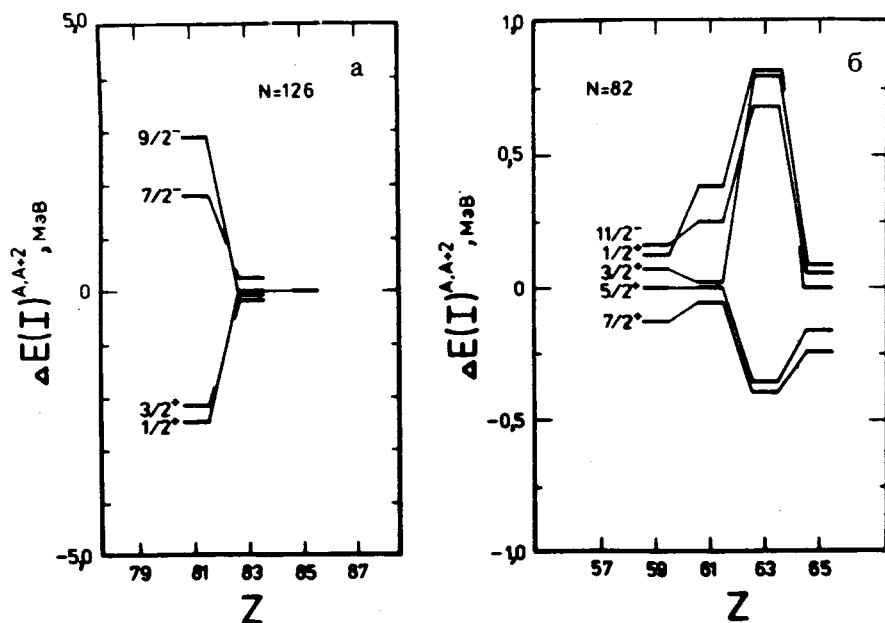


Рис. 1. а - диаграмма ДЭП для нечетных изотонов ядер с $N=126$, б - диаграмма ДЭП для нечетных изотонов ядер с $N=82$.

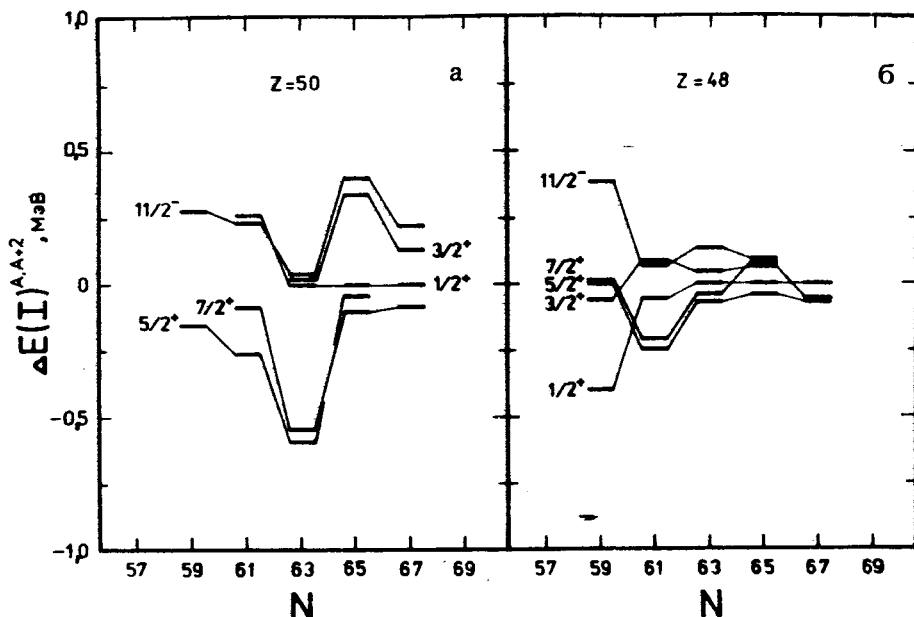


Рис. 2. а – диаграмма ДЭП для нечетных изотопов ядер с $Z = 50$, б – диаграмма ДЭП для нечетных изотопов ядер с $Z = 48$.

видно, связано с разной последовательностью заполнения подоболочек в изотонах с $N = 82$ ($Z = 59 \div 67$) и изотопах с $Z = 50$ ($N = 59 \div 71$). Орбиталь $S_{1/2}$ в изотопах с $Z = 50$ заполняется, начиная с ^{113}Sn ($N = 63$), а в изотопах с $N = 82$ орбиталь $S_{1/2}$ наблюдается только начиная с $Z = 65$ у ^{147}Tb . Но общим во всех этих случаях при анализе диаграмм ДЭП является раздельное группирование значений $\Delta E(I)^{A,A+2}$ для частичных и дырочных уровней в сравнительно узком энергетическом интервале перед замыканием оболочки и слитное группирование тех и других уровней около нулевого значения после замыкания оболочки. Устойчивость нейтронных оболочек при $N = 62 \div 64 \div 66$ можно оценить, изменяя последовательно Z от магического числа на 2. Например, $Z = 48$, $Z = 52$ и т.д. На рис.2б представлен один из случаев. Видно, что уже при $Z = 48$ стабилизирующее влияние протонной оболочки на замыкание нейтронной оболочки исчезает.

2. Четно-четные ядра

2.1. Нуклиды из сферической и переходной областей ядер

Особенно наглядно перестройка оболочек видна при анализе диаграмм ДЭП в четно-четных ядрах. На рис.3 представлены диаграммы для нижайших уровней с $1^\pi = 2_1^+, 4_1^+, 3_1^-$ в изотопах ядер с $Z = 80, 82, 84$. Энергии соответствующих состояний взяты из ра-

Рис.3. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $Z = 80 \div 84$.

боты ^{18/}. Характерной чертой является синфазное изменение $\Delta E(I) A, A+2$ для состояний с $I^\pi = 2_1^+, 4_1^+$ от отрицательного к положительному значению при прохождении замкнутой оболочки. Максимального значения эта разность достигает при $N = 126$, причем для дважды магических ядер отрицательное и положительное значения $\Delta E(I) A, A+2$ приблизительно равны по абсолютной величине. Для состояний $I^\pi = 3_1^-$ поведение $\Delta E(I) A, A+2$ аналогично, хотя пересечения нулевого уровня в этом случае не происходит. Изменение от $N = 82$ на ± 2 единицы приводит к существенному уменьшению эффекта замыкания оболочки. Аналогичный вид имеют диаграммы ДЭП и в области более легких ядер при заполнении оболочек с $N=20, 28, 50, 56$ — рис.4,5.

Рассмотрение диаграмм ДЭП для изотопов с $N=82, 82 \pm 2$ в районе $Z = 64$ (рис.6) дает возможность установить замыкание оболочек при $Z = 58$ по состояниям с $I^\pi = 2_1^+$

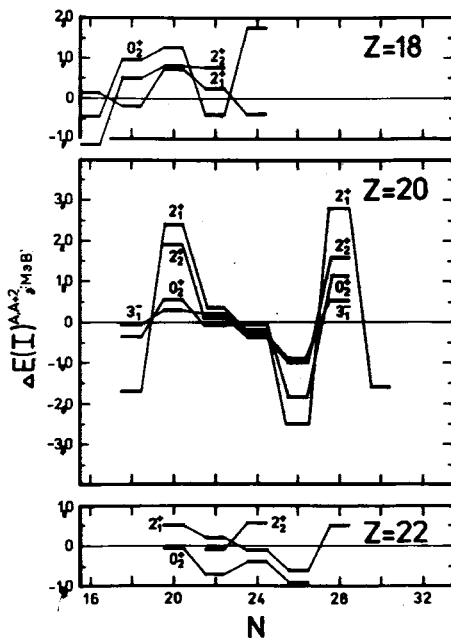
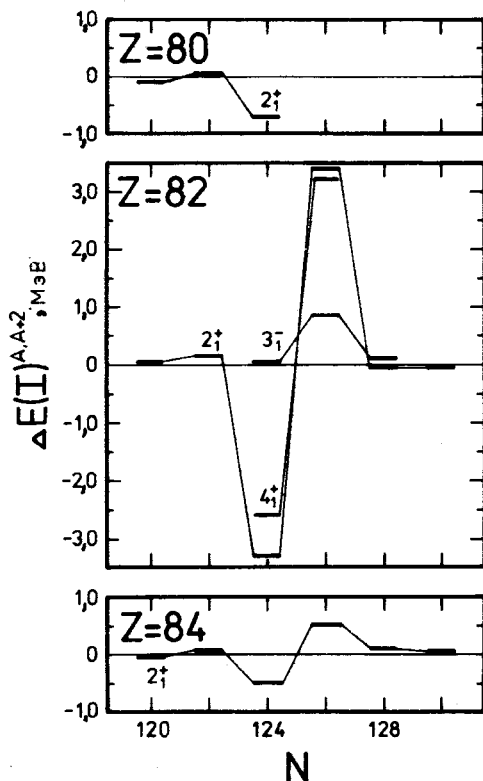


Рис.4. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $Z = 18 \div 22$.

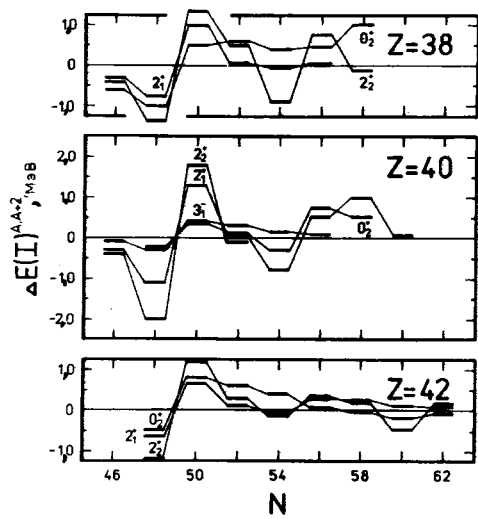


Рис.5. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $Z = 38 \div 42$.

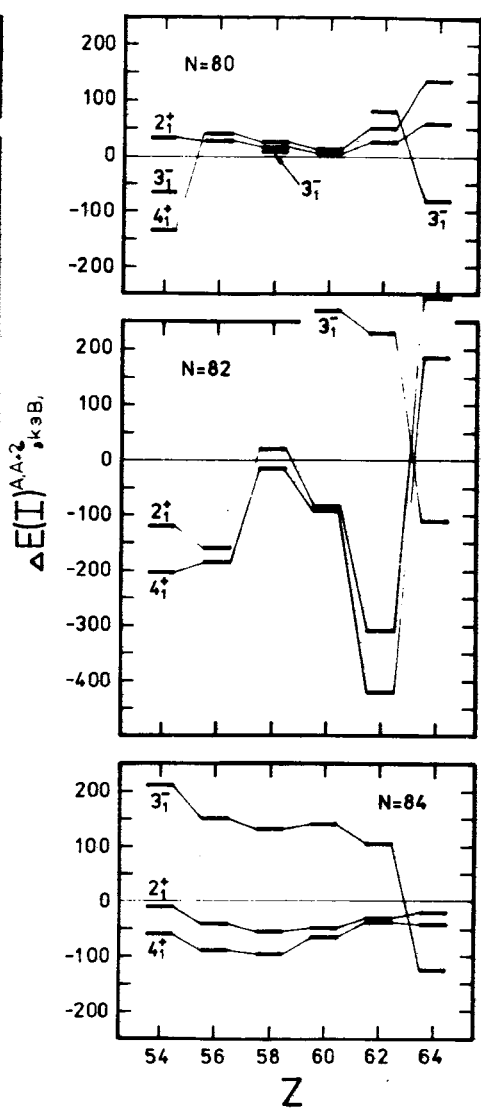
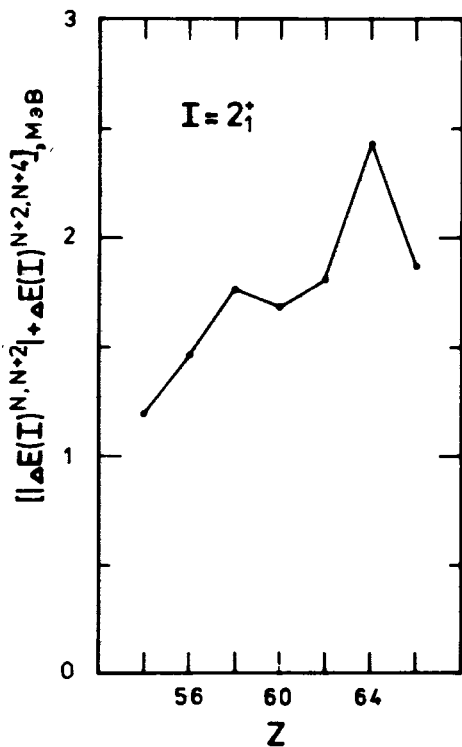


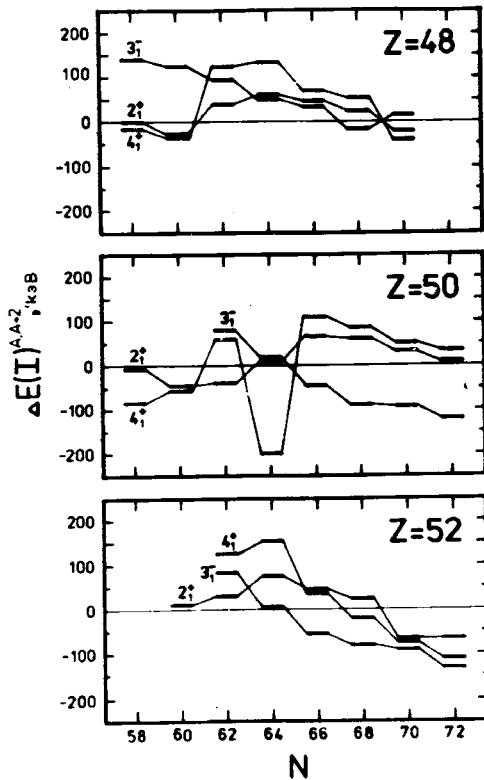
Рис.6. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $N = 80 \div 84$.

Рис.7. Диаграмма ДЭП для состояний с $I^\pi = 2_1^+$ в ядрах $Z = 54 \div 66$ (индекс $N = 80$).

Рис.8. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $Z = 48 \div 52$.

и при $Z = 64$ по состояниям $I^\pi = 2_1^+, 4_1^+$ и 3_1^- . Отличительной особенностью в данном случае является противофазное изменение разности энергии состояний с $I^\pi = 3_1^-$ по отношению к состоянию с $I^\pi = 2_1^+$ и 4_1^+ по сравнению с ранее рассмотренными случаями. Замыкание протонной оболочки при $Z = 58$ подтверждается также диаграммой, представленной на рис.7.

На основе рассмотренных случаев мы можем перейти к анализу замыкания нейтронной оболочки в изотопах олова при $Z = 50$ — рис.8. Можно констатировать, что в изотопах олова наблюдается замыкание только подоболочек, причем с меньшим эффектом замыкания, чем не только для дважды магических ядер, но также и для ^{146}Gd . Поведение состояний с $I^\pi = 4_1^+$ подтверждает, как и в нечетных изотопах олова, замыкание подоболочки с $N = 62$. По состояниям с $I^\pi = 2_1^+$ видно замыкание подоболочки с $N = 64$, а состояния с $I^\pi = 4_1^+$ и 3_1^- подтверждают, как и в нечетных изотопах олова, замыкание подоболочки с $N = 66$. Включение в анализ замыкания оболочек состояний $I^\pi = 6_1^+$ и $I^\pi = 2_1^+$ позволяет обнаружить помимо установленных оболочек замыкание нейтронных квазиоболочек у изотопов Sn при $N = 60, 68$ и 72 . Последовательное выделение нейтронных оболочек в изотопах Sn при заполнении нейтронных орбиталей парами нуклонов является существенным отличием от рассмотренных ранее примеров. При рассмотрении диаграммы ДЭП для цепочки изотопов для $Z = 50 \pm 2$ видны резкие структурные изменения диаграмм. При $Z = 48$ сохраняется только подоболочка $N = 62$, а при $Z = 52$, возможно, сохраняется только подоболочка $N = 66$.



2.2. Легкие четно-четные ядра с $N = Z$

Анализ диаграмм ДЭП в легких четно-четных ядрах с $N=Z$ позволил установить замыкание оболочек при $N=Z$ по уровням квази- β - и квази- γ -вибрационных состояний (рис.9).

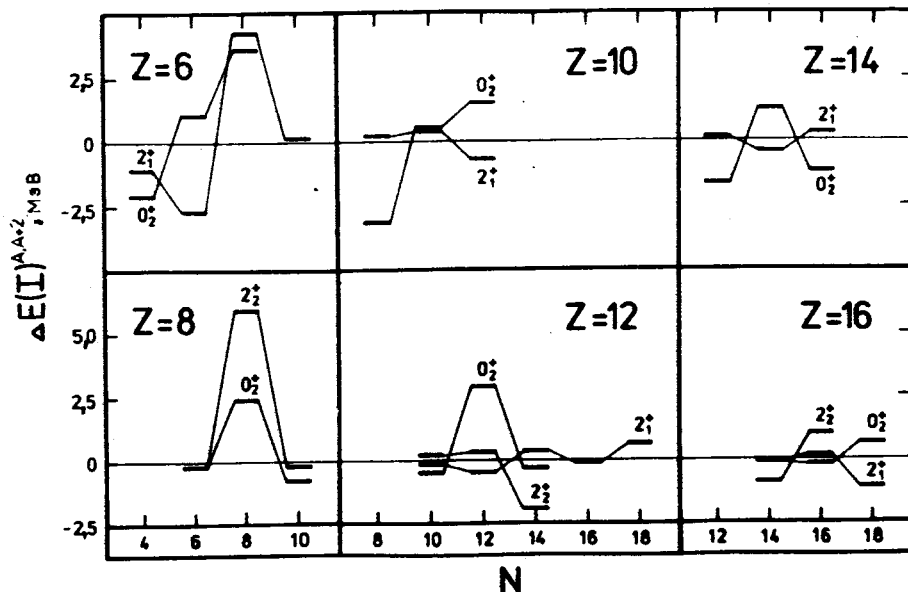


Рис.9. Диаграммы ДЭП для (ч-ч)-изотопов ядер с $Z=6 \div 16$.

2.3. Деформированные ядра

Анализ диаграмм ДЭП позволяет также идентифицировать квазиоболочки в четно-четных деформированных ядрах. В этом случае анализ можно проводить по возбужденным состояниям ротационных полос основных, β - или γ -вибрационных состояний. На основе анализа диаграмм ДЭП можно установить заполнение следующих квазиоболочек в деформированных ядрах: $N = 94, 98 \div 122$.

Интересным является то обстоятельство, что начиная с $N = 98$ и до $N = 122$ добавление каждой новой пары нейтронов проявляется как замыкание оболочки в сферическом ядре. Таким образом, снятие вырождения уровней вследствие деформации ядра прослеживается по диаграммам ДЭП для различных состояний ротационных полос в деформированных ядрах. Важно отметить, что эффект замыкания квазиоболочек в деформированных ядрах по величине $\Delta E(I)^{A,A+2}$ существенно меньше эффекта замыкания оболочек

в дважды магических ядрах. Очевидно, что заполнение различных орбиталей рассматриваемых ядер проявляется только для определенных состояний и при определенных характере науклон-нуклонного взаимодействия в ядре или характере движения ядерной материи. Подчеркнем необходимость дальнейшего накопления экспериментальных данных для установления зоны действия квазиоболочек по Z на уровни ротационных полос различной природы.

Заключение

Дифференцирование энергетической поверхности возбужденных состояний ядер одного спина определенной природы явилось методом, который позволяет обнаруживать замыкание нейтронных и протонных оболочек и подоболочек в сферических четно-четных и нечетных ядрах, а также замыкание квазиоболочек в деформированной и переходной области ядер. Наиболее важное следствие проведенного анализа — обнаружение избирательной чувствительности к замыканию оболочек в ядре состояний определенной природы и определенного спина, т.е. обнаружение того, что на энергию одних состояний замкнутые оболочки оказывают влияние, а на энергию других не оказывают. Поэтому вопрос о влиянии замыкания оболочки на все возбужденные состояния ядра не может быть решен однозначно.

Литература

1. Goeppert Mayer M., Jensen J.H.D. Elementary Theory of Nuclear Shell Structure, New York, John Wiley, 1955.
2. Schmidt-Ott W.D., Toth K.S. — Phys.Rev., 1976, C13, p.2574.
3. Kleinheinz P., Broda R. et al. — Z.Phys., 1979, A290, p.279.
4. Алхазов Г.Д., Ганбаатар Н. и др. Препринт ЛИЯФ № 1135, Л., 1985.
5. Артамонов С.А., Исаков В.И. и др. — ЯФ, 1983, т.39, с.328.
6. Артамонов С.А., Исаков В.И. и др. — В сб.: Материалы XX Зимней школы ЛИЯФ. Л.: Изд-во ЛИЯФ, 1985, с.11.
7. Antony M. ADNDT, 1984, v.31, No.3, p.389.

Рукопись поступила 5 ноября 1988 года.