

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P4-96-318

Р.В.Джолос, Ю.В.Пальчиков

КЛАСТЕРНЫЕ СВОЙСТВА И СИЛЬНЫЕ
ОКТУПОЛЬНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ
В СРЕДНИХ И ТЯЖЕЛЫХ ЯДРАХ

Направлено в журнал «Ядерная физика»

1996

**Кластерные свойства и сильные октупольные корреляции
в средних и тяжелых ядрах**

Рассчитаны энергии np - nh частично-дырочных возбужденных состояний кластерного типа, где n — число нуклонов в кластере. Показано, что энергии этих возбуждений минимальны в ядрах, имеющих низколежащие 1^- -состояния и построенные на основных состояниях ротационные полосы с чередующейся четностью уровней и $\Delta I = 1$.

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

**Clustering and Strong Octupole Correlations
in Medium and Heavy Mass Nuclei**

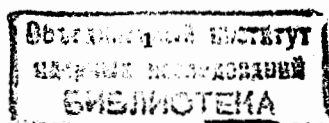
Energies of the cluster type np - nh particle-hole excited states, where n is the number of nucleons in the cluster, are calculated. It is shown that energies of these states take minimal values in nuclei with low lying collective 1^- -states and having ground state alternating parity rotational bands with $\Delta I = 1$.

The investigation has been performed at the Bogoliubov Laboratory of Theoretical Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 1996

Связь оболочечной структуры и деформации с кластеризацией в ядрах обсуждалась многими авторами [1-11]. В основном эти обсуждения затрагивали свойства легких ядер. Классическим примером такой связи может служить гипердеформированное состояние ядра ^{12}C , которое интерпретируется как конфигурация из трех альфа-частиц, выстроенных в линию. Расчеты предсказывают также существование деформированных состояний с нарушенной зеркальной симметрией, например в ^{24}Mg [12], где такое состояние может быть ассоциировано с кластерной конфигурацией $^{16}\text{O} + \alpha + \alpha$ или $^{16}\text{O} + ^8\text{Be}$.

В случае тяжелых ядер возможность появления среди низколежащих состояний таких, которые связаны с кластерными степенями свободы, обсуждалась в связи с обнаружением у ядер изотопов Ra и Th низколежащих 1^- -состояний. В подходе, предложенном в [7, 8], появление низколежащих 1^- -состояний объясняется существованием мягкой дипольной моды, описывающей движение альфа-частичного кластера относительно ядра-остатка. В [6] проявления кластерных свойств тяжелых ядер рассматривались в связи с возможным существованием у этих ядер гипердеформированных возбужденных состояний. В этой работе были выполнены систематические расчеты потенциальной энергии деформации четно-четных изотопов Rn, Ra, Th и U. Наиболее интересным результатом работы оказалось то, что гипердеформированный минимум соответствует двойной ядерной конфигурации, состоящей из тяжелого фрагмента, подобного ^{132}Sn , и более легкого, подобного ^{100}Zr . Например, одночастичный спектр ^{232}Th при деформации, соответствующей гипердеформированному минимуму, выглядит как суперпозиция сферического одночастичного спектра ^{132}Sn и деформированного нильссоновского спектра ^{100}Zr . Таким образом, кластеризация тяжелых ядер при больших продольных деформациях оказалась связанной с проявлениями оболочечной структуры. Оболочечная же структура проявилась и в том, что по крайней мере один из тяжелых кластеров является ядром с замкнутыми оболочками. Возникает вопрос, проявляются ли кластерные степени свободы, ассоциируемые с кластерами более тяжелыми, чем альфа-частица, при обычных деформациях? Приводят ли они в ядрах, которые можно представить состоящи-



ми из двух кластеров, каждый из которых является ядром с большой энергией связи, например, дважды магическим ядром, к тому, что состояния, связанные с возбуждением кластерных степеней свободы будут появляться при относительно низких энергиях возбуждения? Если два кластера существенно различаются по массе, то существование соответствующей кластерной моды приведет к нарушению зеркальной симметрии во внутренней системе координат. При низких энергиях возбуждения нарушение зеркальной симметрии среднего поля обычно ассоциируется с сильными октупольными корреляциями. Следовательно, эта кластерная мода может быть связана с октупольными корреляциями, т.е. с появлением низколежащих коллективных состояний отрицательной четности и ротационных полос с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней. Проверка этого предположения и является целью данной работы.

Оценим приближенно энергии возбуждения np - nh частично-дырочных состояний кластерного типа (n – число нуклонов в кластере) в ядрах, принадлежащих различным областям карты нуклидов, используя информацию об энергиях связи. Это позволит исследовать корреляции между энергиями таких состояний и энергиями наблюдаемых низколежащих 1^- -возбуждений в ядрах, имеющих основные ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью состояний.

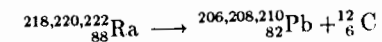
Приближенно энергию кластероподобных np - nh частично-дырочных возбуждений E^* можно оценить с помощью формулы

$$\begin{aligned} E^* &= E(Z + Z_c, N + N_c) + E(Z - Z_c, N - N_c) - 2E(Z, N) = \\ &= 2B(Z, N) - B(Z + Z_c, N + N_c) - B(Z - Z_c, N - N_c), \end{aligned} \quad (1)$$

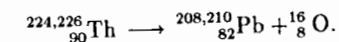
где $E(Z, N)$ – энергия основного состояния ядра с количеством протонов Z и количеством нейтронов N , $B(Z, N)$ – энергия связи соответствующего ядра, Z_c и N_c – числа протонов и нейтронов в кластере, $n = Z_c + N_c$ – число частиц (дырок) у возбужденного состояния. В (1) не учтена энергия взаимодействия частиц и дырок. Поэтому это выражение может быть использовано только для приближенных оценок. Формулы, подобные (1), применялись для оценки энергий возбуждений типа частица – дырка, возбуждений альфа-частичного типа [13] и парных вибрационных состояний [14]. Если величина E^* отрицательна,

то это может служить указанием на то, что основное состояние соответствующего ядра неустойчиво относительно возбуждений рассматриваемого кластерного типа, и в его волновой функции есть примесь компоненты, отвечающей относительно движению кластеров, составляющих ядро. Если эти кластеры имеют разные числа нуклонов, то отрицательное значение E^* будет означать, что ядро неустойчиво относительно деформации, нарушающей зеркальную симметрию во внутренней системе координат. В результате на основном состоянии сформируется ротационная полоса с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней. Если E^* положительна, но мала, то энергия, связанная с относительными колебаниями кластеров, мала. В этом случае также будут наблюдаться низколежащие состояния отрицательной четности. Таким образом, мы ожидаем, что значения E^* , рассчитанные по формуле (1), будут отрицательными или небольшими положительными величинами именно в ядрах, у которых известны низколежащие 1^- - или 3^- -состояния и основные ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней. Это изотопы Ra и Th, тяжелые изотопы Ba и Ce.

Расчеты были выполнены в предположении, что легкими кластерами являются ядра ^{12}C и ^{16}O . Были рассмотрены следующие области значений Z и N : $Z = 84 - 96$ и $N = 128 - 146$, $Z = 30 - 46$ и $N = 36 - 48$, $Z = 52 - 66$ и $N = 86 - 94$, $Z = 22 - 36$ и $N = 34 - 40$. Результаты расчетов приведены на рис.1-5. Из рисунков видно, что величина E^* принимает отрицательные значения именно в тех ядрах, у которых известны ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней, например, для изотопов $^{224,226}\text{Th}$, если легкий кластер – ядро ^{16}O . Таким образом, состояния отрицательной четности этих ядер могут быть связаны с относительным движением кластеров в следующих конфигурациях:

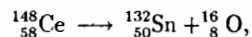


и

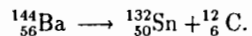


Конечно, речь не идет о полном геометрическом отделении кластера. Для этого продольная деформация ядер в рассматриваемых состояниях слишком мала. Но кластерная мода уже проявляется даже при небольших энергиях возбуждения.

Отрицательные значения E^* принимает также в случае ядра ^{148}Ce , которому соответствует кластерная конфигурация



и в случае ^{144}Ba , которому соответствует кластерная конфигурация



Во всех приведенных случаях ядра с отрицательными значениями E^* можно представить как суперпозицию тяжелого магического по Z (или дважды магического) кластера, а именно Pb , Sn и Ni и легкого кластера ^{12}C или ^{16}O .

Сложнее интерпретировать отрицательные значения E^* в изотопах Kf , Sg и Zr , у которых также известны низколежащие состояния отрицательной четности. В этих случаях тяжелые кластеры, которыми оказались изотопы Zn , Ge и Se , не являются магическими ядрами. Известно, однако, что изотопы Ge с большой вероятностью наблюдаются среди осколков деления U тепловыми нейтронами наряду с дважды магическим ^{132}Sn [15–16]. Кроме того, необходимо помнить, что выражение (1) не учитывает вклада частично-дырочного взаимодействия в E^* , что может, в принципе, повлиять на результаты, так как число частично-дырочных пар велико.

В заключение отметим, что приближенные расчеты энергий np - nh частично-дырочных возбужденных состояний кластерного типа с числами частиц и дырок n , равными числу нуклонов в легком кластере, например ^{12}C или ^{16}O , показали, что наименьшие значения эта энергия принимает именно в тех ядрах, для которых известны основные ротационные полосы с $\Delta I = 1$ и чередующейся четностью уровней или просто имеются низколежащие состояния с $I^\pi = 1^-, 3^-$. Это указывает на то, что проявления кластерных степеней свободы могут наблюдаться и при небольших энергиях возбуждения.

Авторы признательны Н.В. Антоненко, Г.Г. Адамяну и А.К. Насирову за полезные обсуждения. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 95-02-05684.

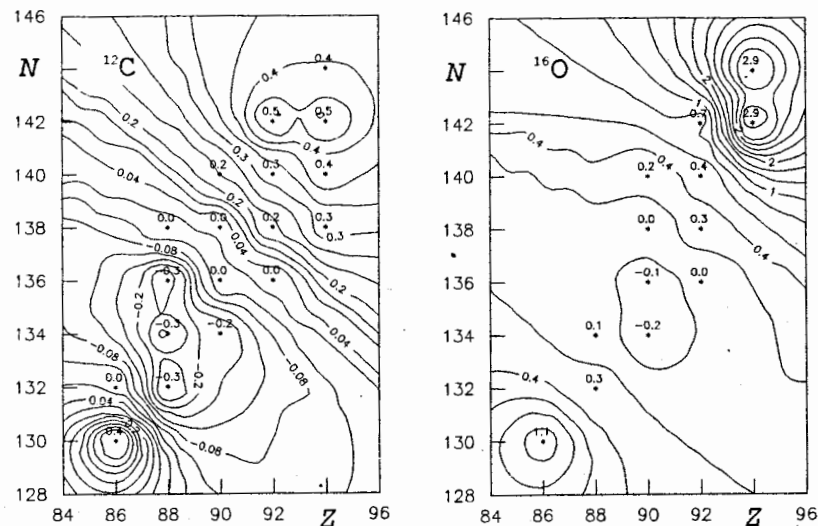


Рис. 1. Зависимость энергии E^* от количества нейтронов N и протонов Z в ядре в случае возбуждения кластерных состояний вида ^{12}C и ^{16}O в ядрах, близких к $^{228}_{90}\text{Th}$.

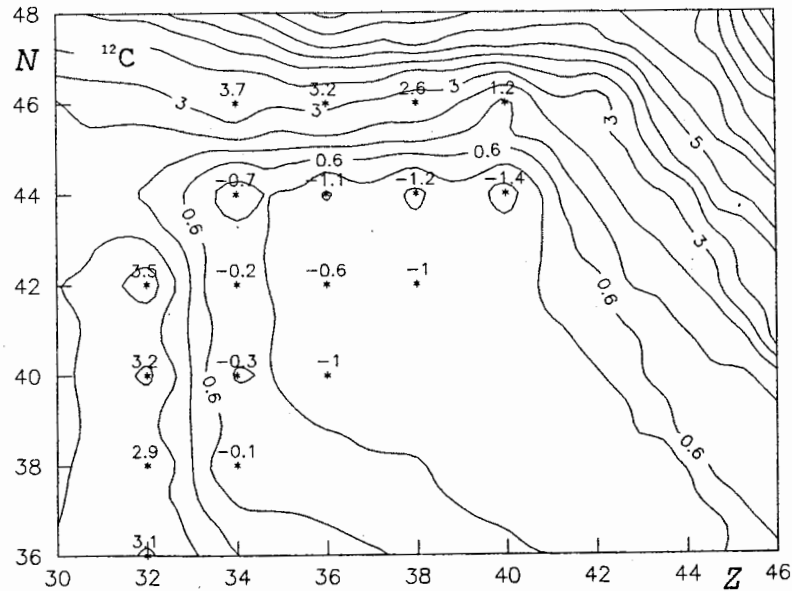


Рис. 2. Зависимость энергии E^* от количества нейтронов N и протонов Z в ядре в случае возбуждения кластерного состояния вида ^{12}C в ядрах, близких к $^{80}_{38}\text{Kf}$.

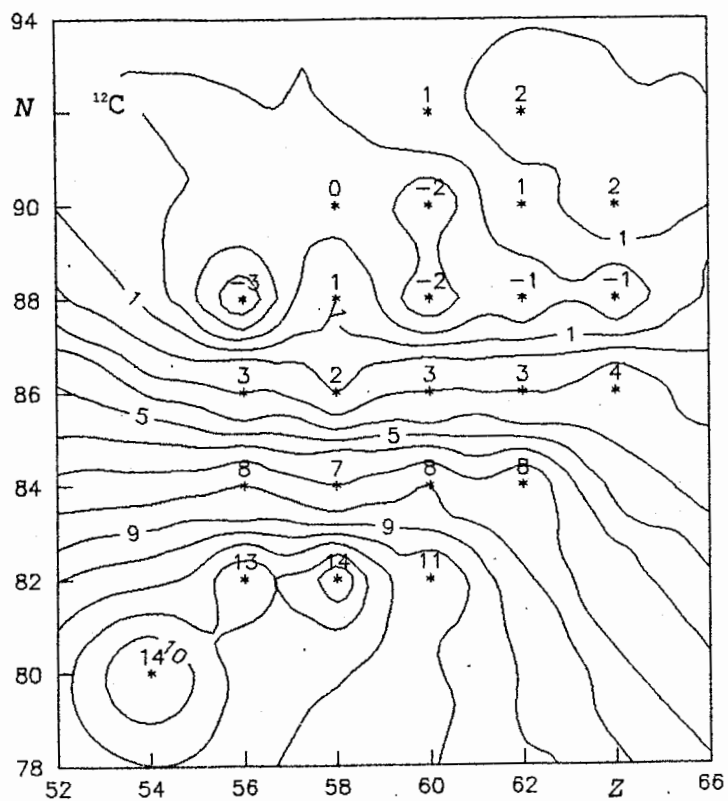


Рис. 3. Зависимость энергии E^* от количества нейтронов N и протонов Z в ядре в случае возбуждения кластерного состояния вида ^{12}C в ядрах, близких к ^{134}Xe .

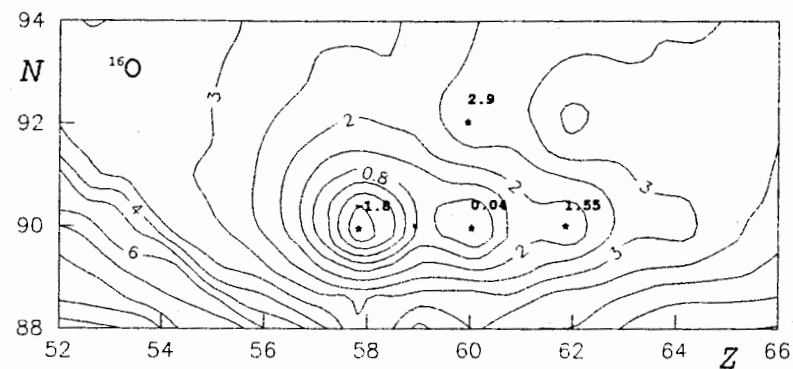


Рис. 4. Зависимость энергии E^* от количества нейтронов N и протонов Z в ядре в случае возбуждения кластерного состояния вида ^{16}O в ядрах, близких к ^{134}Xe .

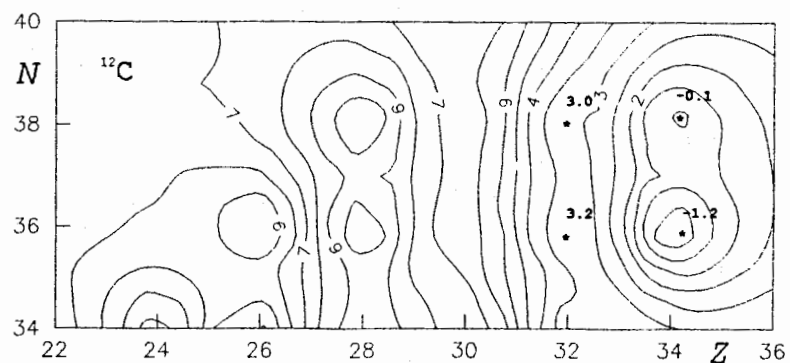


Рис. 5. Зависимость энергии E^* от количества нейтронов N и протонов Z в ядре в случае возбуждения кластерного состояния вида ^{12}C в ядрах близких к ^{58}Ni .

Литература

- [1] K. Ikeda // in Proc. 5th Int. Conf. on Clustering aspects in nuclear and subnuclear systems / Kyoto, 1988, p.277;
- [2] W.D.M. Rae // Int. Jour. Mod. Phys. A **3** (1988) 1343;
- [3] G. Rosensteel and J.P. Draayer // J. Phys. A **22** (1989) 1323;
- [4] W. Nazarewicz and J. Dobaczewski // Phys. Rev. Lett. **68** (1992) 154;
- [5] B.R. Fulton and W.D.M. Rae // J. Phys. G **16** (1990) 333;
- [6] S. Ćwiok *et al.* // Phys. Lett. B **322** (1994) 304;
- [7] F. Iachello and A.D. Jackson // Phys. Lett. **108** B 1982 151;
- [8] H.J. Daley and B.R. Barrett // Nucl. Phys. A **449** (1986) 256;
- [9] J. Cseh // J. Phys. G **19** (1993) L97;
- [10] Ю.С. Замятин и др. // ЭЧАЯ **21** (1990) 537;
- [11] J. Cseh, R.K. Gupta and W. Scheid // Phys. Lett. B **299** (1993) 205;
- [12] G.A. Leander and S.E. Larsson // Nucl. Phys. A **239** (1975) 93;
- [13] K. Heyde // in Proc. Int. Workshop, Bad Honnef, April 24 – 28, 1988 eds. J. Ebert, R.A. Meyer and K. Sisteich / Springer – Verlag, p.3;
- [14] A. Bohr // in Proc. Int. Symp. on Nuclear Structure, Dubna, 1968 / IAEA, p.191;
- [15] Yu.V. Pyatkov *et al.* // in Proc. Int. Conf. on Nuclear Structure and Nuclear Reactions at Low and Intermediate Energies 1992, Dubna, Russia / Dubna 1993, E4-93-58, p.347;
- [16] J. Terrel // Phys. Rev. C **127** (1962) 880.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 августа 1996 года.