ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТИВНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЧЕТНО-ЧЕТНЫХ ЯДЕР

Н.Г.Гончарова, А.П.Долгодворов
Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В.Скобельцына Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова,119991, Москва
n.g.goncharova@gmail.com

Первые десятилетия теоретических исследований атомных ядер показали, что многие свойства этих квантовых систем могут быть поняты с помощью модели, аналогичной представлениям о структуре электронных оболочек атома – одночастичной модели ядерных оболочек(ОМО). В этой модели получило простое объяснение существование « магических» ядер как замкнутых квантовых систем, в которых заполнены все квантовые состояния с энергиями $E \le E_{val}$, где E_{val} - энергия последней заполненной оболочки. Значительным успехом ОМО было простое объяснение значениям спинов и четностей ядер с одной частицей или с одной «дыркой» относительно заполненной оболочки или подоболочки (см. например,[1]). Недостаточность ОМО как метода объяснения ядерных свойств стала очевидной после обнаружения т.н. «гигантских резонансов» в сечениях ядерных реакций, интерпретация которых послужила толчком к формулировке многочастичной модели оболочек (ММО) [2]. Дальнейшее развитие теоретических методов исследования атомных ядер должно было учесть наличие в нуклон-нуклонных взаимодействиях сил спаривания, один из эффектов которых состоит в частичном разрушении замкнутых оболочек. (Необходимость учета сил спаривания была впервые доказана экспериментально при обнаружении низколежащих 1^+ состояний в спектрах возбуждения ядер ^{16}O и ^{40}Ca, полученных в реакциях (e,e') [3].) Низшее по энергии - основное – состояние «дважды магического» ядра, например Ca-40, оказывается незамкнутой структурой. Если без учета сил спаривания основное состояние такого ядра может считаться соответствующим физическому вакууму

$\Psi(^{40}Ca_{g.s.}) = \left|0p0h:0^+\right\rangle$, то учет сил спаривания приводит к значительно более сложной конфигурации

$$\Psi(^{40}Ca_{gr.st}) \approx a_1\left|0p0h:0^+\right\rangle + a_2\left|2p2h:0^+\right\rangle + ...; a_{i>1} \neq 0.$$

Однако и это усложнение теоретической модели является недостаточным для объяснения свойств основного и низших возбужденных состояний ядер. Одной из проблем микроскопического подхода к ядерной структуре является интерпретация положений низших возбужденных 2^+ уровней четно-четных ядер на энергетической оси и вероятностей перехода с них. В рамках ММО не удается последовательным образом получить характеристики этих уровней. Обычно низшие по энергии состояния четно-четных ядер рассматривают в рамках коллективных моделей ядра, где они

интерпретируются как проявления квадрупольных колебаний ядра. Потенциальная энергии таких колебаний связана со средним значением амплитуды β и т.н. «жесткостью» C ядра (rigidity)

$$V_N = \frac{C}{2}\beta_N^2 .$$

Среднее значение квадрата амплитуды колебаний зависит от числа N квантов коллективных колебаний - фононов, поглощенных ядром и их энергии

$$\beta_N^2 = \left\langle N,J,M \left| \sum_m |a_m|^2 \right| N,J,M \right\rangle = \frac{\hbar}{2D\omega}(2N+5) = \frac{\hbar\omega}{2C}(2N+5) .$$

Амплитуда колебаний (среднеквадратичная деформация) не равна 0 и в низшем по энергии основном состоянии квантовой системы - ядра:

$$\beta_0^2 = \frac{5\hbar\omega}{2\tilde{N}} .$$

С величиной среднеквадратичной деформации β_0 связан квадрупольный момент ядер в основном состоянии:

$$Q_0 \approx \frac{3ZR_0^2}{\sqrt{5\pi}}\beta_0 .$$

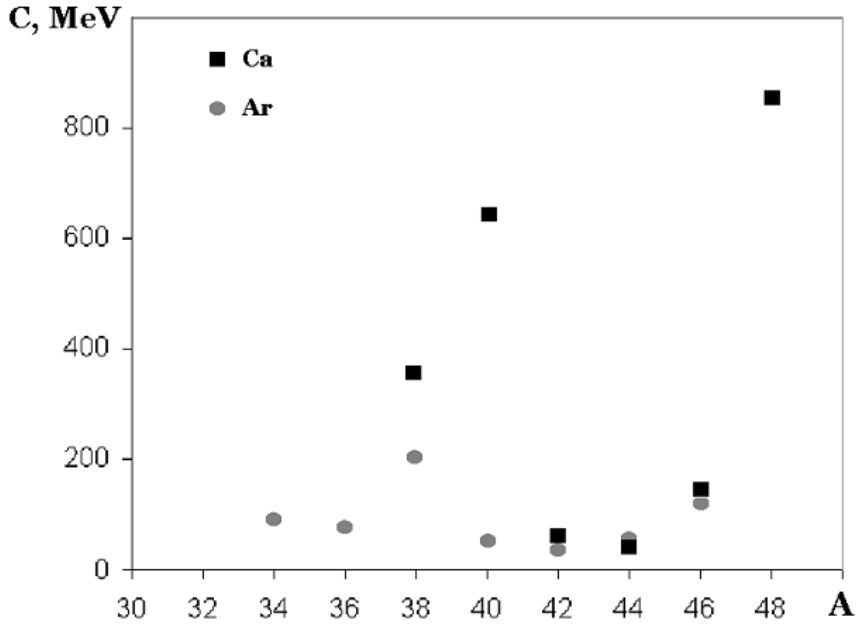
Величина квадрупольного момента ядра с моментом и четностью основного состояния 0^+ не может быть измерена в прямых экспериментах. Поэтому оценка среднеквадратичной деформации β_0 и связанного с ней квадрупольного момента четно-четных ядер проводится косвенными методами, основанными на экспериментальном определении вероятности ***E2*** перехода $2^+ \to 0^+$ [4]. Приведенные в обзоре [4] оценки величин β_0 позволяют определить также значения жесткости ядер в основных состояниях. В таблице 1 даны удельные энергии связи ряда четно-четных ядер sd-оболочки, энергии их первых 2+ уровней, величины среднеквадратичной деформации β_0 по данным [4] и значения жесткости C этих ядер в основных состояниях. Распределение величин C для изотопов аргона и кальция показано на рисунке.

Полученные нами величины жесткости позволяют подтвердить результаты работ [5], где было доказано существование ядер, по ряду свойств близких «магическим», но не являющихся, с точки зрения ОМО, замкнутыми квантовыми структурами.

Например, жесткость ядра Si-34 на порядок выше жесткости Si-28; жесткость S-36 значительно выше жесткости S-32, а жесткость нестабильного кислорода ^{22}O много выше, чем у дважды магического ^{16}O. Как видно из таблицы, жесткость ядер, традиционно входящих в группу «магических» является высокой. Однако наряду с ними существуют и другие четно-четные ядра с высокой жесткостью и другими свойствами, близкими к свойствам магических ядер. Проблема теоретической интерпретации свойств этой группы ядер остается пока открытой.

Таблица 1. Характеристики четно-четных ядер sd-оболочки

Ядро	ε, MeV	E(2+), MeV	β_0	C, MeV
O-16	7.96	6,92	0,36	130,6
O-22	7.35	3,19	0,21	184,3
Si-28	8.45	1,78	0,41	26,9
Si-34	8.32	3,33	0,18	259,8
S-32	8.50	2,23	0,31	57,3
S-36	8.57	3,29	0,17	291,4
Ar-36	8.56	1,97	0,26	75,1
Ar-38	8.57	2,17	0,16	204,2
Ar-40	8.55	1,46	0,25	57,9
Ar-42	8.50	1,21	0,28	40,0
Ar-44	8.49	1,14	0,24	49,5
Ca-38	8.35	2,21	0,13	353,6
Ca-40	8.55	3,9	0,12	644,5
Ca-42	8.65	1,52	0,25	62,3
Ca-44	8.69	1,16	0,25	45,3
Ca-46	8.69	1,34	0,15	143,1
Ca-48	8.67	3,83	0,11	852,2



Литература

1. Гончарова Н.Г. - Введение в физику атомного ядра, Изд. МГУ.М.,2006
2. Brown G.E., Bolsterly M. - Phys. Rev. Lett. **3** (1959) 472
3. A.Richter. – Prog.Part.Nucl.Phys.**1** (1985) 1
4. Raman S. *et al* -At. Data & Nucl.Data Tables. **78** (2001)1
5. Беспалова О.Б., Бобошин И.Н., Варламов В.В., Ишханов Б.С. и др, - Ядерная Физика, **66** (2003) 673 , **68**(2005)216