

М. А. Ревенок (ГГУ имени Ф. Скорины, Гомель)
Науч. рук. **О. М. Дерюжкова**, канд. физ.-мат. наук, доцент

ПАРАМЕТРЫ РАЗМЕРА И ФОРМЫ ИЗОТОПОВ МАГИЧЕСКОГО ЯДРА КАЛЬЦИЯ

Деформация атомных ядер представляет собой сложный механизм проявления микроскопической ядерной структуры, обусловленный связью одночастичных и коллективных степеней свободы. Для анализа размера и формы деформированных атомных ядер воспользуемся современным подходом в описании и систематизации свойств и характеристик ядер. Будем считать, что тип симметрии ядра (форма ядра) не является его неизменной характеристикой. Такая же мера условности отвечает и выбору ядерных моделей. Количественную оценку модели, описывающей структуру деформированного ядра, проведем с использованием параметра равновесной деформации β_2 , извлекая и интерпретируя его с помощью банков ядерных данных Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИЯФ МГУ [1], и параметра деформации δ модели Нильссона, характеризующего отклонение формы ядра от аксиально-симметричной [2].

Продemonстрируем данный подход при исследовании характеристик размера и формы изотопов магического ядра кальция. В настоящее время известно 23 изотопа кальция с числами нуклонов A от 34 до 57 (число протонов $Z=20$, нейтронов N от 14 до 37), из них шесть изотопов ${}_{20}\text{Ca}^{40}$, ${}_{20}\text{Ca}^{42}$, ${}_{20}\text{Ca}^{43}$, ${}_{20}\text{Ca}^{44}$, ${}_{20}\text{Ca}^{46}$, ${}_{20}\text{Ca}^{48}$ стабильны, а два изотопа ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ и ${}_{20}\text{Ca}^{48}$ являются дважды магическими ядрами.

Размер и форма деформированного ядра связаны с его средним зарядовым радиусом и параметром квадрупольной деформации β_2 соотношением

$$\langle r^2 \rangle = r_0^2 \left(1 + \frac{5}{4\pi} \beta_2^2 \right),$$

из которого следует, что среднеквадратичный радиус растет с увеличением параметра квадрупольной деформации независимо от его знака, $r_0 = 1$ Фм. На рисунке 1 представлена зависимость зарядовых радиусов изотопов кальция от числа нейтронов N на основе численных данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер» [1]. Из анализа рисунка 1 следует, что значения среднеквадратичного радиуса для дважды магических ядер ${}_{20}\text{Ca}^{40}$ и ${}_{20}\text{Ca}^{48}$ примерно одинаковы, и равны соответственно $r = 3,4777 \pm 0,0012$ Фм и $r = 3,4772 \pm$

0,0013 Фм. Такое поведение объясняется в модели ядерных оболочек тем, что наиболее устойчивые и полностью заполненные оболочки заканчиваются на магическом числе нуклонов. В данном случае $Z=N=20$, а также $N=28$.

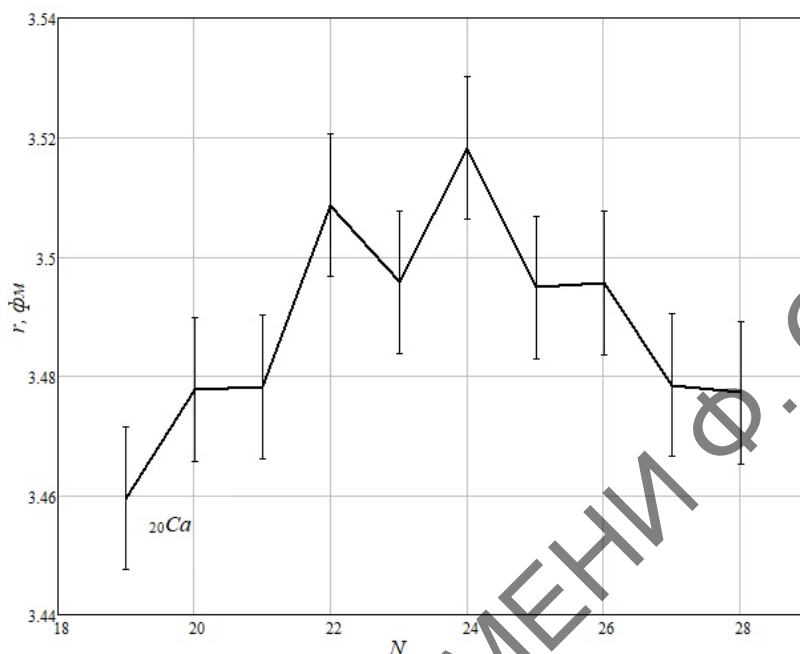


Рисунок 1 – Зависимость зарядового радиуса r ядра от числа нейтронов N для изотопов кальция ${}^{20}\text{Ca}$

С помощью численных данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер» установим зависимость модуля квадрупольной деформации $|\beta_2|$ от числа нуклонов A для изотопов кальция ${}^{20}\text{Ca}$ [1]. На рисунке 2 продемонстрированы три графика, построенные на основе данных о параметрах квадрупольной деформации ядер, полученных тремя различными способами: из экспериментальных значений приведенной вероятности переходов из основного состояния ядра в первое возбужденное состояние со спином и четностью 2^+ ($|\beta_2(B(E2)\uparrow)|$); из значений квадрупольных моментов ядер Q ($|\beta_2(Q_{mom})|$) и рассчитанные теоретически в модельном подходе ($|\beta_2-calc|$). Из анализа графиков зависимости рисунка 2 следует существенное различие в оценке параметра квадрупольной деформации, полученной приведенными выше способами. Численные данные типа $|\beta_2(B(E2)\uparrow)|$ заметно превышают данные типа $|\beta_2(Q_{mom})|$. В первом случае минимальные значения параметра квадрупольной деформации наблюдаются вокруг магических чисел нейтронов $N=20, 28$. В остальной области значений A нуклоны, находящиеся сверх заполненных оболочек деформируют сферически симметричную форму ядра, и β_2 возрастает. Во втором случае численные данные для параметра деформации значительно

меньше и наблюдаются практически во всей области исследуемых значений A . Такое поведение параметра квадрупольной деформации β_2 служит свидетельством неустойчивости равновесной формы изотопов кальция ${}_{20}\text{Ca}$.

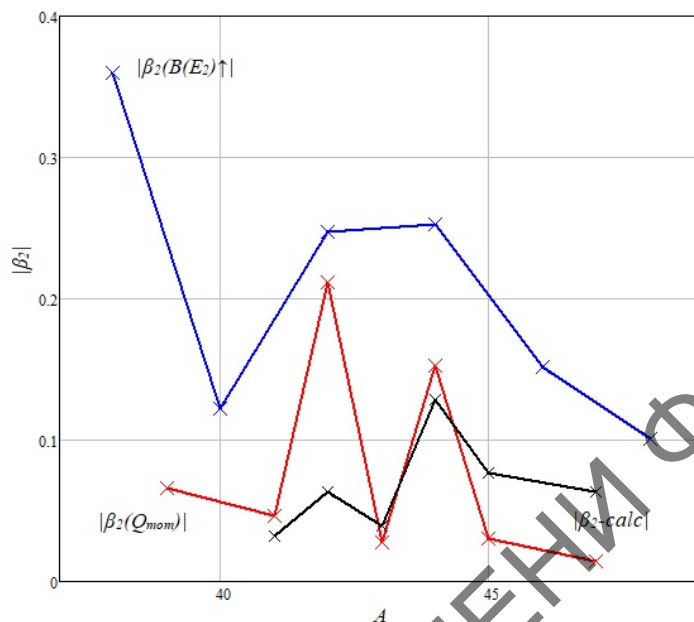


Рисунок 2 – Зависимость модуля квадрупольной деформации $|\beta_2|$ от числа нуклонов A для изотопов кальция ${}_{20}\text{Ca}$

Если ядро не обладает не только сферической, но и аксиальной симметрией (модель Нильссона), то его форма определяется тремя характеристиками: квадрупольным моментом Q , параметром квадрупольной деформации β_2 и параметром деформации δ . Параметр деформации δ , введенный Нильссоном, связан с обычным параметром равновесной деформации β_2 соотношением:

$$\delta(\beta_2) = \frac{2\left(\frac{8}{15}\pi\right)^{-\frac{1}{2}}\beta_2 \left[\left(1 + \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}}\beta_2\right)^2 \left(1 - 2\left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}}\beta_2\right) \right]^{-\frac{1}{3}}}{2\kappa}, \quad (1)$$

где параметр $\kappa=0,08$.

На рисунке 3 а), б) представлена зависимость параметра деформации δ модели Нильссона от параметра квадрупольной деформации β_2 для изотопов кальция ${}_{20}\text{Ca}$, полученная на основе формулы (1) и данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер». Параметр деформации δ с учетом данных типа $|\beta_2(B(E_2)\uparrow)|$ (рисунок 3, а)) принимает значения в пределах до 5, а в случае данных типа $|\beta_2(Q_{mom})|$ (рисунок 3, б)) – до 3. Это является признаком проявления динамической деформации изотопов кальция ${}_{20}\text{Ca}$, связанной с колебаниями ядерной поверхности не только в возбужденных состояниях, но и в основном.

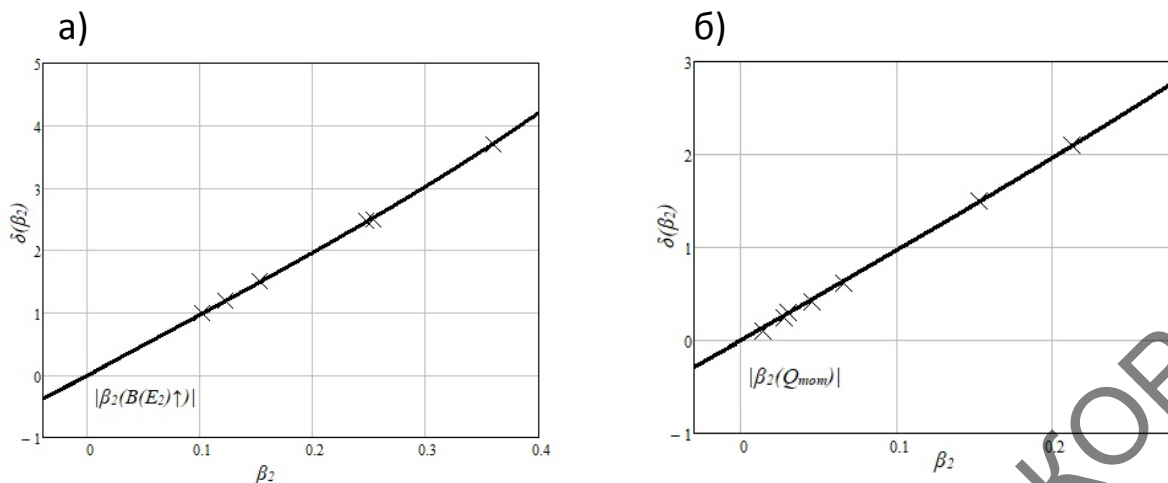


Рисунок 3 – Зависимость параметра деформации δ модели Нильссона от параметра квадрупольной деформации β_2 для изотопов кальция ${}_{20}\text{Ca}$ в случае данных типа: а) $|\beta_2(B(E_2)\uparrow)|$, б) $|\beta_2(Q_{mom})|$ ♦

Анализ параметров формы и размера изотопов магического ядра кальция ${}_{20}\text{Ca}$ в модельном подходе, основанном на использовании потенциала Нильссона, а также численных данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер» ЦДФЭ, позволяет получить информацию о статической и динамической деформации ядер. Колебательные степени свободы ядра играют существенную роль в области легких изотопах кальция. При возникновении статической деформации для тяжелых изотопов кальция на первый план выходят вращательные степени свободы. Динамическая деформация поверхности ядер наблюдается в возбужденных состояниях.

Литература

1. Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) [Электронный ресурс] / Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ). – Россия, 2003. – Режим доступа: <http://cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html>. – Дата доступа: 15.03.2020.
2. Нильсон, С. Связанные состояния индивидуальных нуклонов в сильно деформированных ядрах / С. Нильсон // Сборник «Деформация ядерных ядер». – Перев. с англ. М.: Иностран. лит., 1958. – С. 232-304.