

УДК 539.142; 004.67

ПАРАМЕТРЫ ФОРМЫ И РАЗМЕРА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЯДЕР, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ ОЦЕНЕННЫХ ЯДЕРНЫХ ДАННЫХ

О.М. Дерюжкова, А.С. Парахневич, М.А. Ревенок

Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

SHAPE AND SIZE PARAMETERS OF DEFORMED NUCLEI OBTAINED ON THE BASIS OF THE ASSESSED NUCLEAR DATA

O.M. Deryuzhkova, A.S. Parakhnevich, M.A. Revenok

F. Scorina Gomel State University

В рамках модели Нильссона, которая является объединением коллективной модели и модифицированной модели ядерных оболочек, исследованы параметры квадрупольной и аксиальной деформаций изотопов свинца с числом нуклонов $A = 178-215$. Анализ экспериментальной информации проведен с использованием базы данных «Карта параметров формы и размеров ядер».

Ключевые слова: деформация ядер, квадрупольный момент, параметры формы и размеров ядер, одночастичные и коллективные уровни, изотопы свинца.

The parameters of the quadrupole and axial deformations of lead isotopes with the nucleons number $A = 178-215$ have been studied in the Nilsson model, which is a combination of the collective model and the modified model of nuclear shells. The analysis of experimental information is carried out using the database «Map of the shape and size parameters of the nuclei».

Keywords: nuclei deformation, quadrupole moment, shape and size parameters of nuclei, single-particle and collective levels, lead isotopes.

Введение

В последнее время, благодаря совершенствованию современных исследовательских средств ядерной физики (ядерные реакторы, ускорители и детекторы частиц), накоплен богатый экспериментальный материал, позволяющий не только расширить возможности имеющихся теорий, но и упростить расчеты, повысив при этом их надежность и точность. С развитием исследований новых видов взаимодействий между нуклонами ядра, находящимися на оболочках с различными квантовыми характеристиками, возрос интерес к численным данным о квадрупольных моментах ядер и параметрах их деформации, описывающих форму ядра. Это касается не только общих сведений о форме атомного ядра, но и информации о том, как эта форма изменяется при переходе ядра из основного состояния в различные возбужденные состояния. Теоретическое описание изменения формы атомных ядер возможно в различных модельных подходах, круг которых достаточно широк [1]–[7].

Число экспериментальных исследований, посвященных изучению размеров и формы атомных ядер, также постоянно возрастает [8]–[10]. Разрабатываются новые подходы и способы исследований, создаются крупномасштабные базы параметров структуры ядра, позволяющие получать данные о деформации атомных ядер [11]. При этом важной задачей является разработка методов комбинированного изучения различных

экспериментов и оценка систематических погрешностей, т. е. для детального и системного анализа накопленной информации необходим свободный доступ к базам экспериментальных данных [12]. Такую возможность предоставляет современная информационная система, объединяющая ряд реляционных баз данных (БД), разработанная Центром данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) при Научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ). Она расположена на web-сервере ЦДФЭ и содержит оцененную, т. е. проанализированную экспертами самую точную и надежную на момент обновления последней версии числовую и библиографическую информацию [13]. Система позволяет интерактивно с большой эффективностью использовать базы ядерных данных и их поисковые ресурсы. При этом можно решать не только оригинальные ядерно-физические исследовательские задачи, получая новые результаты, но и рассмотреть уникальные проблемы, постановка и решение которых без БД невозможна [14].

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 проверку модели, описывающей структуру деформированного ядра, проведем с помощью параметра равновесной деформации β , извлекая и интерпретируя его с помощью банков ядерных данных ЦДФЭ, и параметра деформации δ модели Нильссона, характеризующего отклонение формы ядра от аксиально-симметричной.

1 Модель Нильссона для деформированных ядер

Форма атомного ядра зависит от того, в каком из возбужденных состояний оно находится. Уровни возбуждения ядра делятся на одночастичные и коллективные и имеют сложную, смешанную природу. Одночастичные уровни описываются оболочечной моделью ядра. Оболочечные эффекты могут приводить к образованию деформированных возбужденных состояний изначально сферических ядер, при этом их форма будет отличаться от равновесной. Согласно модели ядерных оболочек, полностью заполненные оболочки (число протонов Z и (или) число нейтронов N совпадает с магическим числом 2, 8, 20, 50, 82, 126) являются сферически симметричными, а уровни, не входящие в заполненные оболочки, анизотропны, что приводит к отклонению формы ядра от сферической. Коллективные уровни могут быть вращательными, соответствующими вращению ядра как целого, и колебательными, соответствующими колебаниям ядерной плотности или поверхности ядра. Такое поведение описывается в рамках капельной модели ядра и ее улучшенных модификациях. Таким образом, деформация атомных ядер проявляется на квантовом уровне и связана как с оболочечной структурой ядра, так и с коллективным, т.е. согласованным, характером движения нуклонов в ядре. Экспериментальным доказательством существования деформированных ядер являются спектры возбужденных состояний, которые образуют систему вращательных полос. Сравнение экспериментальных данных по спектрам возбуждений атомных ядер с теоретическими предсказаниями в различных модельных подходах дает интересную информацию о форме и размере ядра.

При незначительных деформациях ядра параметр β , определяющий форму и размер атомных ядер или степень отклонения формы ядра от сферически симметричной, связан с величиной квадрупольного момента Q и зависит от распределения плотности ядерного вещества:

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi}{5}} \frac{Q}{A \langle r^2 \rangle},$$

где A – число нуклонов ядра, $\langle r^2 \rangle$ – среднеквадратичный радиус ядра.

Наибольшие значения квадрупольных моментов имеют те ядра, у которых оболочки

заполнены лишь частично (числа протонов Z и нейтронов N находятся в середине между магическими числами). Все установленные деформированные ядра имеют форму вытянутых или сплюснутых эллипсоидов вращения (рисунок 1.1 *a, б*). Большие величины квадрупольных моментов характерны для вытянутых ядер ($Q > 0$ или $\beta > 0$), число которых больше, чем сплюснутых ($Q < 0$ или $\beta < 0$).

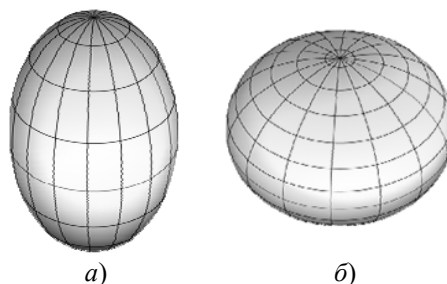


Рисунок 1.1 – Несферичная форма деформированных атомных ядер:
а) $Q > 0$, б) $Q < 0$

Рассмотрим один из вариантов обобщенной модели ядра для описания деформированных ядер: модель Нильссона, которая представляет собой объединение коллективной модели и модифицированной модели ядерных оболочек. В качестве потенциала в модели Нильссона используется потенциал гармонического осциллятора с добавленной анизотропией. При этом частоты осцилляторов вдоль трех декартовых осей не одинаковы $\omega_1 = \omega_2 \neq \omega_3$. В данной модели учитываются два типа ядерных движений: коллективное вращение ядра относительно внешней декартовой системы координат, обусловленное его деформацией, и одночастичное движение нуклонов относительно внутренней, вращающейся в деформированной потенциальной яме, системы координат. При этом форма ядра представляет собой эллипсоид с осью симметрии, принятой за z , т.е. для объяснения свойств деформированных ядер помимо изучения коллективных движений ядра как целого (вращение ядра и колебания его поверхности), необходимо также рассмотреть одночастичные состояния нуклонов (внутреннее движение в несферическом потенциале). Из-за взаимодействия между коллективными и одночастичными степенями свободы ядра в атомных ядрах наблюдаются как статические деформации, так и деформации формы или динамические. В адиабатическом приближении одночастичные и коллективные движения в ядре разделяются, поэтому полную волновую функцию ядра можно представить в виде произведения двух функций, каждая из которых описывает определенное движение. Рассматривая внутреннее движение в ядре, предполагаем, что отдельные нуклоны движутся

независимо в некотором фиксированном несферическом поле ядра. Гамильтониан внутреннего движения представляется, как и в обычной модели оболочек (без учета остаточного взаимодействия), в виде суммы одночастичных гамильтонианов. Таким образом, задача сводится к решению уравнения Шредингера для одной частицы, движущейся в трехмерной анизотропной гармонической осцилляторной потенциальной яме с учетом спин-орбитального взаимодействия. Данный потенциал, потенциал Нильссона, отражает основные особенности движения нуклонов в ядрах, форма которых отличается от аксиально-симметричной, и имеет простой вид. Он хорошо применим в случае средних и тяжелых атомных ядер.

Итак, потенциал Нильссона выбираем в виде суммы [2]:

$$M = \left(\frac{M}{2}\right)(\omega_1^2 x^2 + \omega_2^2 y^2 + \omega_3^2 z^2) + C(\bar{l}s) + Dl^2, \quad (1.1)$$

где $\left(\frac{M}{2}\right)(\omega_1^2 x^2 + \omega_2^2 y^2 + \omega_3^2 z^2)$ – потенциал анизотропного осциллятора, учитывающего несферичность потенциальной ямы и размытость ее края; $C(\bar{l}s)$ – потенциал спин-орбитального взаимодействия; Dl^2 – слагаемое, пропорциональное l^2 , вводится для понижения энергии одночастичного состояния при больших значениях орбитального момента l . Коэффициенты C и D подбираются так, чтобы при параметре деформации в потенциале Нильссона $\delta = 0$ наиболее точно воспроизводилась последовательность уровней сферического оболочечного потенциала. При больших деформациях последние слагаемые формулы (1.1) вносят в потенциал незначительный вклад.

Так как большинство несферических ядер имеет форму, близкую к эллипсоиду вращения, то поле ядра характеризуется аксиальной симметрией и в этом случае форму ядра при постоянном объеме или плотности ядерного вещества можно описать, введя всего лишь один параметр деформации β , который определяется следующим образом через осцилляторные частоты:

$$\omega_1^2 = \omega_2^2 = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right], \quad (1.2)$$

$$\omega_3^2 = \omega_0^2 \left[1 - 2 \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right], \quad (1.3)$$

где ω_0 – собственная частота гармонического осциллятора.

Параметр деформации δ , введенный Нильссоном, связан с обычным параметром равновесной деформации β соотношением:

$$\delta = \frac{2 \left(\frac{8}{15}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \hbar \omega_0(\beta)}{C}, \quad (1.4)$$

где C – модельный параметр.

Используя выражение (1.4), получим формулу для построения графической зависимости $\delta(\beta)$. Согласно (1.4) собственная частота гармонического осциллятора ω_0 , а значит и положение одночастичных уровней нуклонов в потенциале Нильссона, зависит от величины и знака деформации β . Это связано с исходным предположением о несжимаемости ядерной материи, поэтому в процессе деформации объем ядра не меняется, т. е. осцилляторные частоты $\omega_1, \omega_2, \omega_3 = const$. Тогда, используя формулы (1.2) и (1.3), получим:

$$\omega_0(\beta) = \omega_{00} \left[\left(1 + \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right)^2 \left(1 - 2 \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (1.5)$$

где ω_{00} – осцилляторная константа, которая связана с размером атомного ядра следующим образом: $\hbar \omega_{00} = 41A^{\frac{1}{3}}$ МэВ.

Умножив выражение (1.5) на \hbar , получим энергию нуклона в потенциале Нильссона аксиально-симметричной деформированной ямы со спин-орбитальной связью:

$$\hbar \omega_0(\beta) = \hbar \omega_{00} \left[\left(1 + \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right)^2 \left(1 - 2 \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right) \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (1.6)$$

Результаты расчетов в соответствии с формулой (1.4) и учетом формулы (1.6) зависят от параметров ω_{00} , C и β . Модельный параметр C подбирается таким образом, чтобы при $\beta = 0$ получилась правильная модель ядерных оболочек для сферического ядра:

$$C = 2\hbar \omega_{00} \kappa. \quad (1.7)$$

При этом параметр κ принимает два различных значения, меняясь в пределах от $\kappa = 0,05$ для $N > 50$ до $\kappa = 0,08$ для $N < 20$ (N – число нейтронов ядра).

Таким образом, выражение для моделирования, после подстановки (1.6) и (1.7) в уравнение (1.4), принимает вид:

$$\delta(\beta) = \left(\frac{8}{15}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \frac{1}{\kappa} \times \left[\left(1 + \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right)^2 \left(1 - 2 \left(\frac{4}{5}\pi\right)^{-\frac{1}{2}} \beta \right) \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (1.8)$$

Из формулы (1.8) следует, что δ не зависит от полного числа нуклонов ядра A , но равновесная деформация ядра β для различных ядер принимает разные значения в пределах от $-0,6$ до $+0,6$ [15]. Если деформация β положительна, то это значит, что нуклон колеблется быстрее в плоскости симметрии, перпендикулярной оси симметрии z , чем вдоль этой оси. При отрицательной деформации β большие колебания происходят вдоль оси симметрии z .

Обобщенная модель Нильссона позволяет провести классификацию уровней энергии ядра: одночастичных (связанных с возбуждением наружных нуклонов) и коллективных (вращательных и колебательных, связанных с возбуждением остова), определить энергии этих уровней, а также описать периодичность изменения формы ядра (от сферически симметричной до вытянутой или сплюснутой и обратно) при изменении числа нуклонов ядра.

2 Извлечение численной информации о деформированных ядрах с помощью БД «Карта параметров формы и размеров ядер»

Рассмотрим методы извлечения информации о ядрах через банки ядерных данных ЦДФЭ НИИЯФ МГУ. Доступ к содержанию БД возможен с главной страницы web-сайта ЦДФЭ (рисунок 2.1). Основными из них являются:

1. «База данных по ядерным реакциям» международной системы EXFOR, содержащая информацию об огромном количестве разнообразных характеристик (выходы, сечения, функции возбуждения реакций, энергетические, угловые, зарядовые, массовые и другие распределения частиц-продуктов реакций, поляризации, анализирующие способности, корреляции и другие) ядерных реакций под действием фотонов, нейтронов, заряженных частиц и тяжелых ионов.

2. «Полная реляционная база ядерно-спектроскопических данных «Relational ENSDF», включающая в себя всю известную информацию (энергии, спины, четности, времена жизни, мультипольности, коэффициенты ветвления и смешивания, вероятности переходов, значения параметра $\log ft$ распадов, абсолютно уникальные данные об изоспинах ядерных состояний, квадрупольных моментах и деформациях ядер и многие другие) об уровнях и переходах между ними для всех (~3500) известных в настоящее время атомных ядер из международного массива экспериментальных и оцененных данных по структуре ядер ENSDF.

3. База данных «Публикации по ядерной физике», включающая в себя справочно-библиографическую информацию из экспериментальных и теоретических работ по ядерной физике из международного массива NSR.



Рисунок 2.1 – Главная страница web-сайта ЦДФЭ

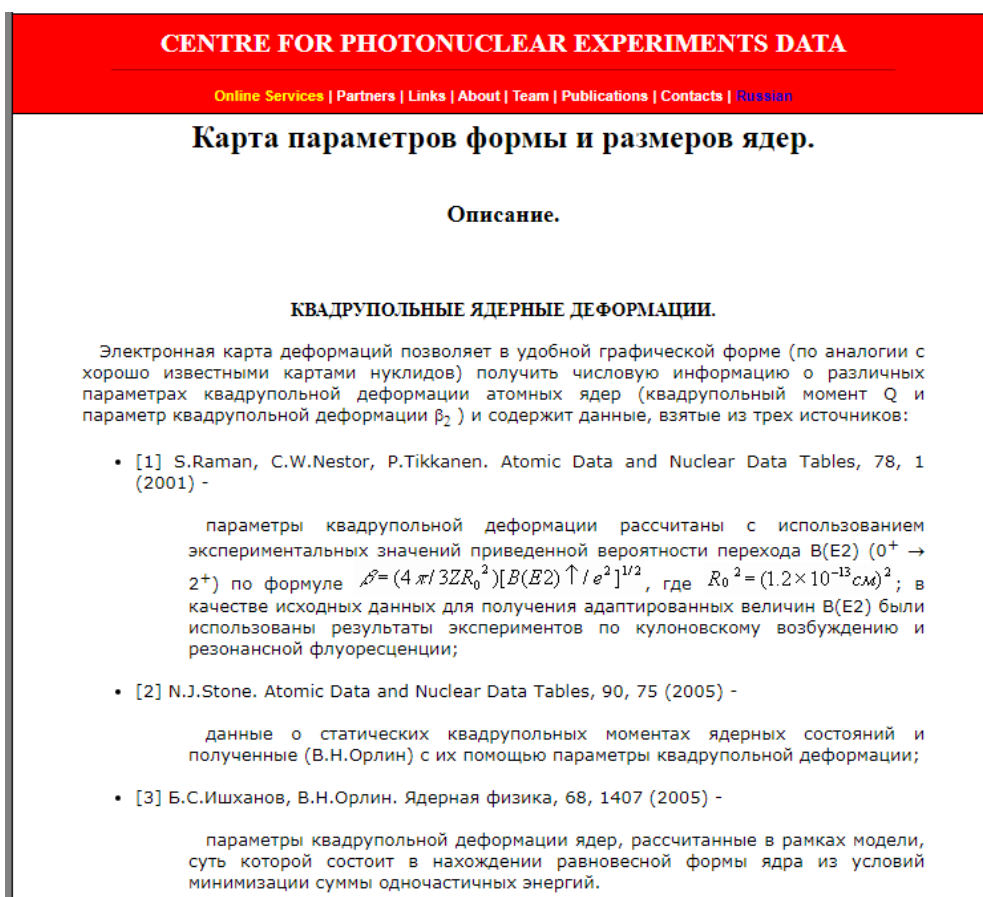


Рисунок 2.2 – Описание БД «Карта параметров формы и размеров ядер»

4. База данных «Параметры основных состояний атомных ядер», содержащая информацию о разнообразных характеристиках основных состояний атомных ядер (распространенность изотопов в естественной смеси, спин-четность, время жизни (период полураспада, ширина), масса, дефект массы, энергия связи, дипольный и квадрупольный моменты, изоспин, энергия первого изобар-аналогового состояния).

5. Интерактивный «Калькулятор порогов и энергий ядерных реакций», позволяющий на основе современных данных о массах ядер рассчитывать энергетические пороги и энергии любых возможных реакций.

Для каждой БД, кроме доступа к содержанию, организован доступ к разделу «Описание», в котором даны краткие сведения о БД. Помимо указанных основных баз данных имеются и некоторые другие, а в разделах «Партнеры» и «Ссылки» приведены гиперссылки на web-сайты других организаций, на которых также имеются электронные ресурсы, содержащие полезную ядерно-физическую информацию [13].

Данные о квадрупольном моменте Q , параметре квадрупольной деформации β_2 атомных ядер и их зарядовых радиусах r представлены в реляционной БД «Карта параметров формы и размеров ядер». При нажатии на главной странице

сайта под БД «Карта параметров формы и размеров ядер» кнопки «[описание]» появляется окно, содержащее информацию об электронной карте деформаций, таблице зарядовых радиусов и источниках численных данных (рисунок 2.2).

Рассмотрим использование БД по извлечению информации для исследования характеристик изотопов магического ядра свинца ${}_{82}\text{Pb}$ ($Z = 82$).

Для работы с БД разработана удобная графическая форма – расположение наборов данных в координатах $Z-N$. С целью облегчения поиска и идентификации данных для ядра (или группы ядер), имеющих определенную деформацию (и соответствующую ей форму), применена специальная расцветка элементов системы, аналогичная расцветке географических карт. На сайте ЦДФЭ «Карта параметров формы и размеров ядер» представлена в ярком сине-зелено-коричневом цвете. В данном случае, на рисунке 2.3 оттенками коричневого цвета («горы») обозначены ядра с положительной деформацией, то есть вытянутые; синего («морья») – ядра с отрицательной деформацией, то есть сплюснутые; зеленого («равнины») – ядра с деформацией неизвестного знака или нулевой. Пять градаций каждого цвета помогают идентифицировать параметры деформации по абсолютной величине –

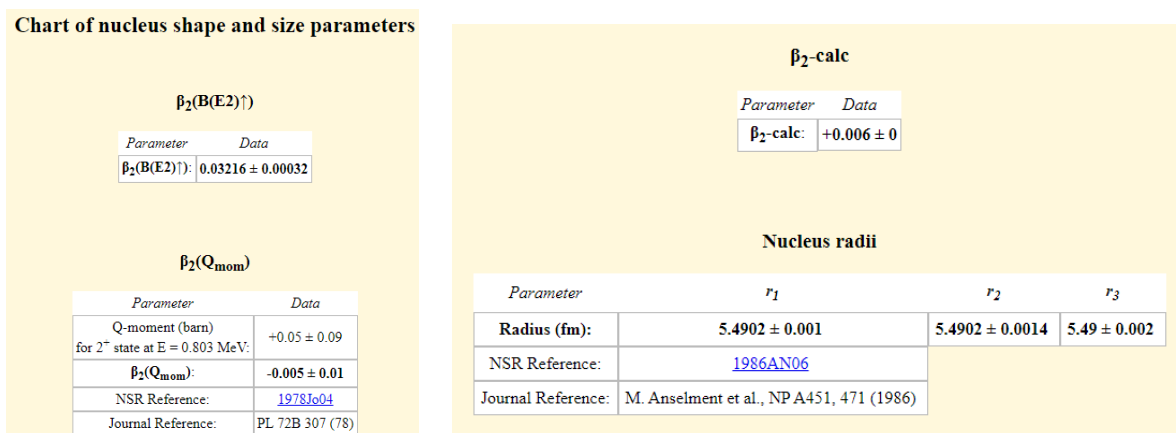


Рисунок 2.5 – Данные о квадрупольном моменте Q , параметре квадрупольной деформации β_2 и зарядовом радиусе r ядра свинца ${}_{82}\text{Pb}^{206}$

На рисунке 2.5 представлены численные данные для изотопа ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. Значение квадрупольного момента $Q > 0$, следовательно, ядро свинца ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ имеет форму вытянутого эллипсоида вращения. Значительное различие по модулю численных данных параметра квадрупольной деформации ядра ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ по типу « B » и « Q » свидетельствует о большой степени нестабильности его равновесной формы.

Из рисунка 2.5 видно, что квадрупольный момент четно-четного магического ядра свинца ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ $Q = +0,05 \pm 0,09$ барн, а параметр его квадрупольной деформации $\beta_2(B) = 0,03216 \pm 0,00032$ и $\beta_2(Q) = -0,005 \pm 0,01$. Сравнение данных типа « B » и « Q » показывает, что данные типа « B » превышают данные типа « Q ». Такое поведение параметра квадрупольной деформации β_2 при заметном превышении оценки $\beta_2(B)$ и значительной величине обеих оценок параметра деформации является признаком нестабильности равновесной формы изотопа свинца ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. Проявление динамической деформации ядра связано с колебаниями его поверхности не только в возбужденных состояниях, но и в основном. Значит данные типа « B » отражают не только статическую деформацию, т. е. форму ядра, но и динамическую деформацию, возникающую вследствие колебаний его поверхности в основном состоянии. Это также подтверждается различием в знаке между параметром квадрупольной деформации $\beta_2(Q)$ и рассчитанным теоретически значением $\beta_2 = +0,006 \pm 0$, полученным в рамках модели, в которой равновесная форма ядра определяется из условий минимизации суммы одночастичных энергий [19]. Степень различия данных типа « B » и « Q » о параметрах квадрупольной деформации ядер может быть использована для оценки степени стабильности его равновесной формы [20].

На рисунке 2.5 в таблицах для квадрупольной деформации $\beta_2(Q_{mom})$ и зарядового радиуса указаны ссылки 1978Jo04 и 1986AN06. Первые 4 цифры в них – год публикации; последующие буквы – фамилия первого автора; а последние две цифры – уникальный идентификатор (2 цифры для первичного эталонного или 2 буквы для вторичной ссылки). Если перейти по этим ссылкам, то можно получить дополнительные данные о свинце ${}_{82}\text{Pb}^{206}$. При этом практически вся информация обеспечена библиографическими ссылками на ее источники. Благодаря этой базе, можно значительно сократить время поиска необходимой информации и получить более точные результаты исследования того или иного ядра.

Знание квадрупольных моментов атомных ядер позволяет определить форму ядра, оценить степень ее отклонения от сферически симметричной, описать свойства и характеристики деформированных ядер, используя модельный подход.

3 Параметры формы и размера изотопов свинца, полученные в модельном подходе с использованием оцененных ядерных данных

В настоящее время известно 37 изотопов свинца с числами нуклонов A от 178 до 215 (число протонов $Z = 82$, нейтронов N от 96 до 133), из них 4 изотопа ${}_{82}\text{Pb}^{204}$, ${}_{82}\text{Pb}^{206}$, ${}_{82}\text{Pb}^{207}$, ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ стабильны [21]. Элементы, расположенные в периодической таблице после свинца, стабильных изотопов не имеют. Согласно модели ядерных оболочек свинец является магическим ядром, а его изотоп ${}_{82}\text{Pb}^{208}$ – дважды магическое ядро.

В соответствии с рисунком 2.4 информация, полученная с помощью БД «Карта параметров формы и размеров ядер», свидетельствует о том, что для легких изотопов свинца деформация неизвестна. Только начиная с изотопа ${}_{82}\text{Pb}^{197}$ можно определить квадрупольный момент Q и параметр квадрупольной деформации β_2 . Значит, в изотопах

свинца с $A > 196$ форма атомного ядра отличается от сферически-симметричной. Взаимодействие внешних нуклонов, связанных менее сильно, со сферически-симметричным остовом ядра приводят к его деформации, т. е. с увеличением числа нейтронов N в изотопах свинца нарушается сферическая симметрия ядерного потенциала.

Размер и форма деформированного ядра связаны с его средним зарядовым радиусом и параметром деформации β через соотношение

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

из которого следует, что среднеквадратичный радиус растет с увеличением параметра квадрупольной деформации независимо от его знака. На рисунке 3.1 построена зависимость зарядовых радиусов изотопов трех соседних ядер (ртути, свинца и полония) от числа нейтронов N на основе численных данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер» [13].

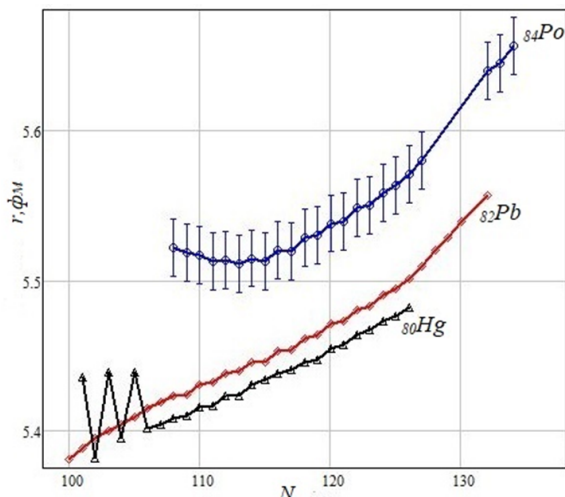


Рисунок 3.1 – Зависимость зарядового радиуса r ядра от числа нейтронов N для изотопов ртути ^{80}Hg , свинца ^{82}Pb и полония ^{84}Po

Для данных изотопов наблюдается рост радиусов с увеличением N , хотя вид зависимости для трех случаев различен. Так, для более легкого элемента ртути заметны резкие скачки значений r при переходе числа нейтронов N от 101 до 106. Радиусы изотопов свинца увеличиваются плавно. Зависимость от N для более тяжелого элемента полония имеет вначале кривой небольшой минимум, а в конце происходит значительный рост радиуса. Такое поведение радиусов связано с характером деформации ядер. При небольших N для каждого конкретного ядра изотопы имеют сферическую форму, затем происходит переход к вытянутой или сплюснутой форме, благодаря чему радиус увеличивается. Для свинца $^{82}\text{Pb}^{197}$ сферическая форма сменяется сплюснутой, а затем для свинца $^{82}\text{Pb}^{199}$ – вытянутой формой.

Такой переход происходит плавно и последовательно через промежуточные формы, которые не обладают аксиальной симметрией. Из рисунка 3.1 видно, что если к ядру добавлять нейтроны, то можно изменять равновесную форму ядра.

С помощью численных данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер» установим зависимость модуля квадрупольной деформации $|\beta_2|$ от числа нуклонов A для изотопов свинца ^{82}Pb (рисунок 3.2). На рисунке 3.2 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 рассчитанных теоретически в модельном подходе ($|\beta_2 - calc|$).

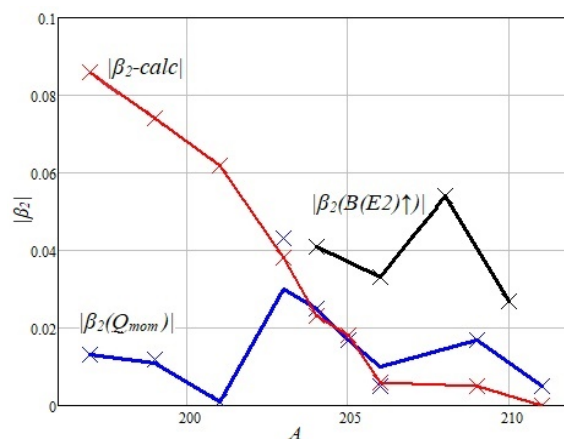


Рисунок 3.2 – Зависимость модуля квадрупольной деформации $|\beta_2|$ от числа нуклонов A для изотопов свинца ^{82}Pb

Из анализа графиков зависимости рисунка 3.2 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 значения параметра квадрупольной деформации наблюдаются вокруг магического числа нейтронов $N = 126$. Нуклоны, находящиеся сверх заполненных оболочек деформируют сферически симметричную форму ядра. 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 нестабильности равновесной формы изотопов свинца ^{82}Pb .

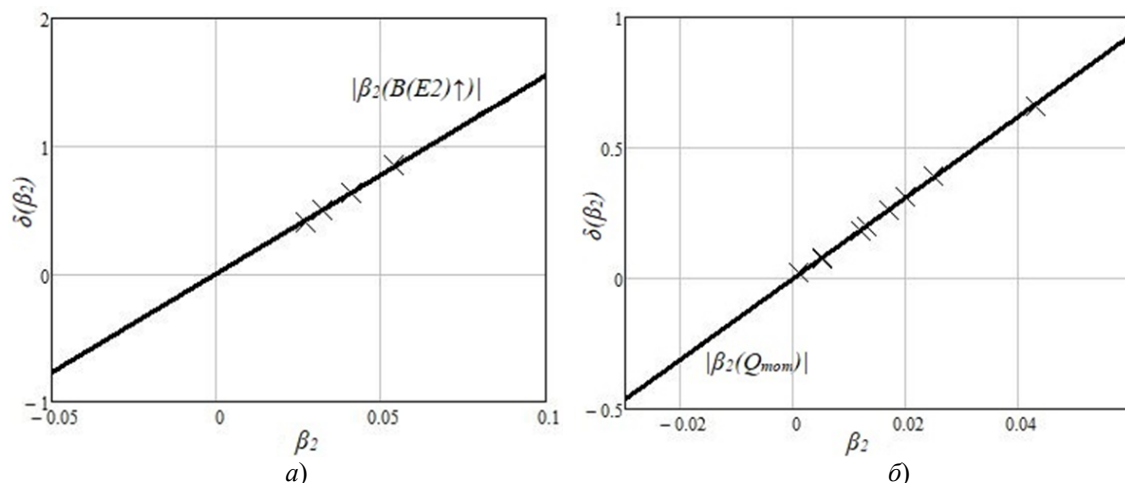


Рисунок 3.3 – Зависимость параметра деформации δ модели Нильссона от параметра квадрупольной деформации β_2 для изотопов свинца ^{82}Pb в случае данных типа: а) $|\beta_2(B(E2)\uparrow)|$, б) $|\beta_2(Q_{mom})|$

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 . На рисунке 3.3 а, б, представлена зависимость параметра деформации δ модели Нильссона от параметра квадрупольной деформации β_2 для изотопов свинца ^{82}Pb , полученная на основе формулы (1.8) с заменой β на β_2 и данных БД «Карта параметров формы и размеров ядер».

Для нейтроноизбыточных изотопов свинца ^{82}Pb (рисунок 3.3) характерны значительные колебания поверхности в основном состоянии. Параметр деформации δ с учетом данных типа $|\beta_2(B(E2)\uparrow)|$ (рисунок 3.3, а) принимает значения в пределах до 2, а в случае данных типа $|\beta_2(Q_{mom})|$ (рисунок 3.3, б) – до 1. Такое поведение параметра деформации δ является признаком проявления динамической деформации изотопов свинца ^{82}Pb , связанной с колебаниями ядерной поверхности не только в возбужденных состояниях, но и в основном.

Анализируя графики зависимостей $r(N)$, $|\beta_2|(A)$, $\delta(\beta_2)$ и создав таблицу численных значений, можно построить нуклонные одночастичные уровни в потенциале Нильссона как функции деформации ядра, предсказать спин и четность основных и возбужденных состояний некоторых деформированных атомных ядер.

Заключение

Деформация атомных ядер представляет собой сложный механизм проявления микроскопической ядерной структуры, обусловленный

связью одночастичных и коллективных степеней свободы.

Анализ параметров формы и размера изотопов магического ядра свинца ^{82}Pb в модельном подходе, основанном на использовании потенциала Нильссона, позволяет получить информацию о статической и динамической деформации ядер. Колебательные степени свободы ядра играют существенную роль в легких изотопах свинца. При возникновении статической деформации для тяжелых изотопов свинца на первый план выходят вращательные степени свободы. Динамическая деформация поверхности ядер наблюдается в возбужденных состояниях.

Отработанная методика извлечения оцененных ядерных данных через БД ЦДФЭ открывает огромные возможности работы с экспериментальными данными для проверки известных теорий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bohr, A. Collective and individual-particle aspects of nuclear structure / A. Bohr, B.R. Mottelson // Mat.-fys. Medd. – 1953. – Vol. 27, № 16. – P. –174.
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.
3. Давыдов, А.С. Возбужденные состояния атомных ядер / А.С. Давыдов. – М.: Атомиздат, 1967. – 265 с.
4. Соловьев, В.Г. Теория сложных ядер / В.Г. Соловьев. – М.: Наука, 1971. – 560 с.
5. Бор, О. Структура атомного ядра. Деформация ядер / О. Бор, Б. Моттelson. – М.: Мир, 1977. – Т. 2. – 663 с.

6. Блан, Д. Ядра, частицы, ядерные реакторы / Д. Блан. – М.: Мир, 1989. – 336 с.
7. Greiner, W. Nuclear models: with 39 worked examples and problems / W. Greiner, J.A. Maruhn. – Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Santa Clara, Singapore, Tokyo, Spinger, 1996. – P. 394.
8. Investigation of quadrupole deformation of nucleus and its surface dynamic vibrations / ed.: O. Bersillon, F. Gunsing, E. Bauge, R. Jacqmin, S. Leray. – EDP Sciences, 2008. – P. 65–68.
9. Ядерная спектроскопия изотопов молибдена / Б.С. Ишханов [и др.] // Физика. Астрономия. – 2016. – № 1. – С. 3–34.
10. IAEA Photoneuclear Data Library 2019 / T. Kawano [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2019. – P. 1–53.
11. Базы ядерных данных Центра данных фотоядерных экспериментов (CDFE): гипертекстовое представление в WWW / И.Н. Бобошин [и др.]; под общ. ред. И.Н. Бобошин. – Москва, 1999. – С. 1–23.
12. Панков, А.А. Международная сеть Центров ядерных данных и перспективы ее использования в атомной энергетике Беларуси / А.А. Панков, А.В. Цитринов, И.А. Панков // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2012. – № 2. – С. 26–31.
13. 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: 05.02.2020.
14. Бобошин, И.Н. Электронные коллекции ядерных данных как средства фундаментальных и прикладных исследований в области физики атомных ядер и ядерных реакций / И.Н. Бобошин. – RCDL'2008, Дубна, 2008. – С. 259–267.
15. Квадрупольная деформация ядра и динамические колебания его поверхности / И.Н. Бобошин, В.В. Варламов, С.Ю. Комаров, В.Н. Орлин // Известия Российской академии наук. Серия физическая. – 2007. – Т. 71, № 3. – С. 334–338.
16. Дерюжкова, О.М. Извлечение численной информации о ядрах на основе базы данных «Карта параметров формы и размеров ядер» / О.М. Дерюжкова, А.С. Парахневич // Проблемы теории и практики инновационного развития и интеграции современной науки и образования [Электронный ресурс]: сборник статей по итогам Международной междисциплинарной конференции (МГОУ, г. Москва, 20 февраля 2019 г.) / отв. ред. и сост. В.Г. Шевченко, М.В. Шевчук; ред. кол. Н.Н. Барабанова и др. – М.: ИИУ МГОУ, 2019. – С. 93–96.
17. Raman, S. Transition probability from the ground to the first-excited 2^+ state of even-even nuclides / S. Raman, C.W. Nestor, J.R.P. Tikkanen // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2001. – Vol. 78, № 1. – P. 1–128.
18. Stone, N.J. Table of nuclear magnetic dipole and electric quadrupole moments / N.J. Stone // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 2005. – Vol. 90. – P. 75–176.
19. Ишханов, В.С. Использование сфероида глобального потенциала для оценки квадрупольной деформации атомных ядер / В.С. Ишханов, В.Н. Орлин // ЯФ. – 2005. – Т. 68, № 8. – С. 1407–1423.
20. Два типа данных о параметре квадрупольной деформации ядра и динамические колебания его поверхности / И.Н. Бобошин [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – Вып. 1–2. – С. 33–44.
21. Isotopic compositions of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) / Juris Meija [et al.] // Appl. Chem. – 2016. – Vol. 88 (3). – P. 293–306.

Поступила в редакцию 10.01.20.