

ПРЕДСКАЗАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОТОПОВ 107-110 ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ МАССОВЫХ СООТНОШЕНИЙ

М.В. Симонов¹, Е.В. Владимирова¹, Т.Ю. Третьякова²

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет;*

² *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова*

E-mail: simonov.mv16@physics.msu.ru

Введение.

Сверхтяжелые элементы ($Z > 100$) – очень интересный объект с точки зрения ядерной физики. Такие ядра являются многонуклонными системами ($A \sim 250$) с большим нейтронным избытком ($N/Z \sim 1,5$). По-прежнему стоят вопросы о соотношениях между их распадными каналами, оболочечными и спаривательными эффектами. Открытие новых изотопов и измерение их характеристик – необходимая задача для изучения нуклон-нуклонного взаимодействия и структуры ядер.

Данная работа посвящена методу локальных массовых соотношений и построенным на их основе оценкам энергии связи ядра и энергии α -распада как основной моде распада для неизвестных изотопов с $Z = 107-110$.

Методика расчета.

Метод локальных массовых соотношений предлагает множество алгебраических соотношений, связывающих между собой массы, или энергии связи, ядер; метод отличается хорошей точностью [1] и относительной математической простотой.

Поскольку синтез богатых нейтронами и короткоживущих сверхтяжелых нуклидов затруднен, исследуемая область NZ-диаграммы отличается небольшим количеством экспериментальных данных для энергии связи. Поэтому приоритет отдавался соотношениям, объединяющим небольшое количество ядер для расчета и обладающим наибольшей гладкостью.

Так называемое остаточное протон-нейтронное (np-) взаимодействие

$$\Delta_{np}(Z, N) = B(Z, N) + B(Z + 1, N + 1) - B(Z - 1, N) - B(Z, N - 1) \quad (1)$$

с успехом может применяться [2] для расчетов в области сверхтяжелых ядер ($B(Z, N)$ – энергия связи ядра). Для этого необходимо найти аппроксимацию $\Delta_{np}(Z, N)$ и затем с помощью найденной зависимости итерационно рассчитывать одну из энергий связи B в уравнении (1). Однако такой подход имеет ограниченное применение: максимально достигаемые $Z = 106$ и $N = 157$ определяются распределением по NZ-диаграмме измеренных на сегодняшний день масс нуклидов. Результаты расчетов для элементов 102-106 представлены в [3,4].

Для получения оценок для ядер с $Z = 107-110$ были рассмотрены другие массовые соотношения с предсказуемым поведением. Энергии отделения 2-х протонов S_{pp} и отделения 2-х нейтронов S_{nn}

$$S_{pp}(Z, N) = B(Z, N) - B(Z - 2, N) \quad (2)$$

$$S_{nn}(Z, N) = B(Z, N) - B(Z, N - 2) \quad (3)$$

на изотонах и изотопах ведут себя как линейный функции. Рассматривалась еще одна массовая характеристика

$$\Delta_{np}^4(Z, N) = \frac{(-1)^{N+1}}{4} [B(Z + 1, N + 1) - 3B(Z, N) + 3B(Z - 1, N - 1) - B(Z - 2, N - 2)] \quad (4)$$

$\Delta_{np}^4(Z, N)$ отражает расщепление расщепление массовой поверхности между четно-четными и нечетно-нечетными ядрами. $\Delta_{np}^4(Z, N)$ была аппроксимирована константой для на изолиниях $N - Z = \text{const}$ [5]. С помощью найденных зависимостей были получены опорные массовые точки в области $Z > 106$ и $N > 157$, массы остальных ядер до ${}_{110}^{270}\text{Ds}_{160}$ оценивались по вариациям формулы (1). Сравнение с экспериментальными данными и оценками из других работ показало, что наилучший результат дает подход на основе энергий отделения 2-х протонов и 2-х нейтронов. Таким образом, использование линейной аппроксимации соотношения Δ_{np}^4 , которое дает удобные опорные точки на линии относительной стабильности, не оправданно. В таблице 1 сравниваются 3 способа расчета: « $S_{pp}\&S_{nn}$ » – опорные точки получены по аппроксимации $S_{pp}(Z)$ при $Z=100$ и $S_{nn}(N)$ при $N = 154$; « Δ_{np}^4 » – опорные точки получены по аппроксимациям Δ_{np}^4 при $N-Z = 49, 53, 55$; подход « $S_{pp}\&S_{nn}\&\Delta_{np}^4$ » учитывает оба приближения.

Таблица 1. Аппроксимации разностных характеристик и отклонение от экспериментальных данных

Метод	$S_{pp}\&S_{nn}$	Δ_{np}^4	$S_{pp}\&S_{nn}\&\Delta_{np}^4$
Аппроксимация	$S_{pp}(Z)=$ $(-0,910\pm 0,021)\cdot Z+$ $(100,7\pm 2,1)$ $S_{nn}(N)=(72\pm 4)\cdot N+$ $(-0,39\pm 0,03)$	$\Delta_{np}^4(N-Z=49)=-0,11\pm 0,03$ $\Delta_{np}^4(N-Z=53)=-0,210\pm 0,016$ $\Delta_{np}^4(N-Z=55)=-0,213\pm 0,021$	Те же
Срkv. отклонение, МэВ	0,0006	0,05	0,014

Результаты.

С использованием аппроксимаций для энергии отделения 2-х протонов $S_{nn}(N)$ и энергии отделения 2-х нейтронов $S_{pp}(Z)$ были получены оценки для энергии связи ядер с $Z = 100$ и $N = 158-160$ (по $S_{nn}(N)$), $N = 154$ и $Z = 107-110$ (по $S_{pp}(Z)$). Цепочки изотопов 107-110, а также 106 представлены на рисунке 1, где линиями обозначены результаты расчетов этой работы, данные расчетов в модели FRDM [6] обозначены пустыми маркерами с крестом, данные систематики AME16 [7] – закрашенными (для эксперимента) и пустыми маркерами (для оценок). График демонстрирует хорошее совпадение с данными AME16.

Также на основе энергий связи для дочернего и материнского ядра были получены оценки для энергии α -распада как преобладающего канала распада для сверхтяжелых нуклидов:

$$Q_{\alpha}(Z, N) = B(Z, N) - B(Z - 2, N - 2) \quad (5)$$

Результат расчетов энергии α -распада представлен на рисунке 2 (обозначения, как на рисунке 1). Поскольку энергии α -распада – разностная характеристика, ее значения сильно зависят от точности определения энергии связи ядер, соответственно расчеты согласуются хуже.

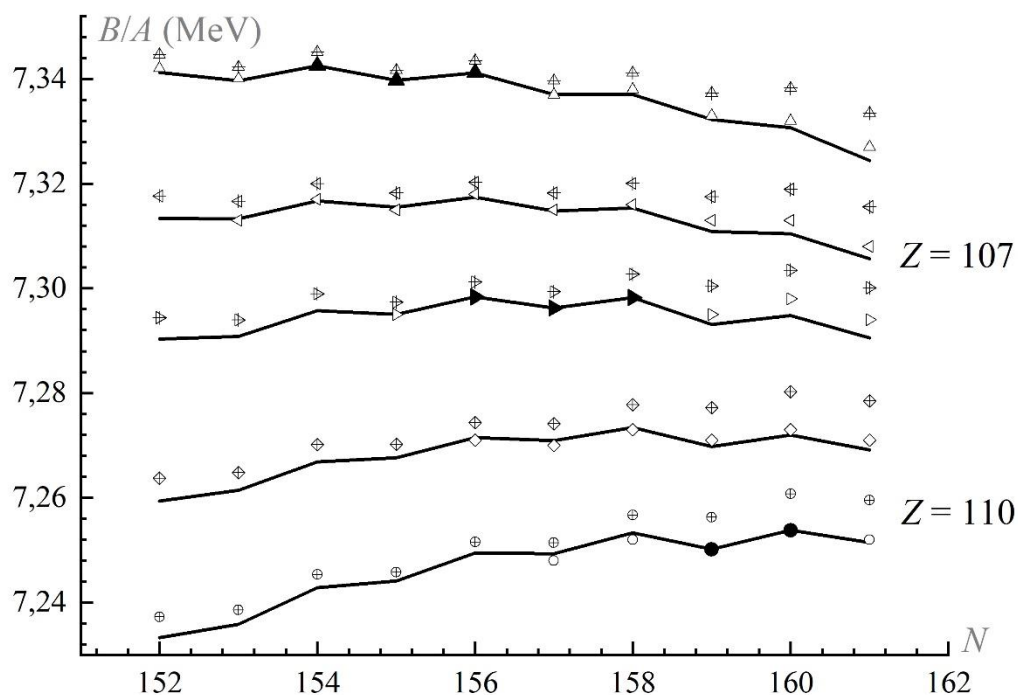


Рисунок 1. Расчет удельной энергии связи для цепочек изотопов $Z=107-110$

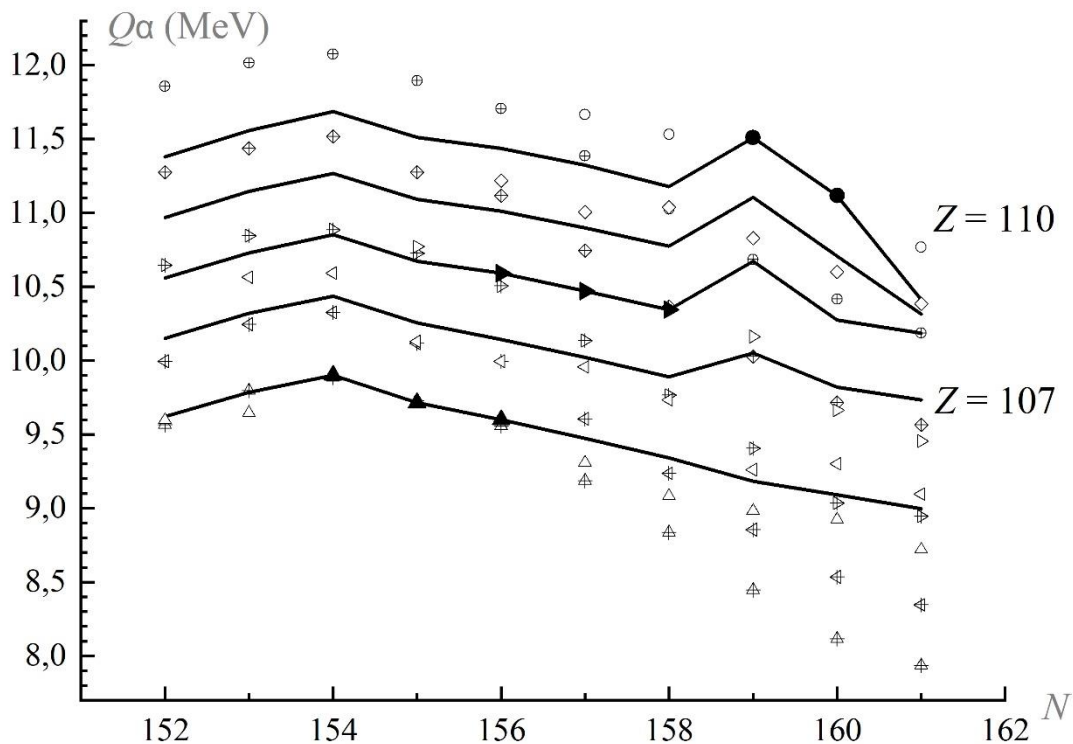


Рисунок 2. Расчет энергии α -распада для цепочек изотопов $Z=107-110$

Вывод.

В данной работе с помощью метода локальных массовых соотношений получены энергии связи и энергии α -распада для изотопов элементов $_{107}Bh$, $_{108}Hs$, $_{109}Mt$, $_{110}Ds$ с $N = 152-161$. Используя как приведенные (S_{pp} , S_{nn} , Δ_{np}^4 , Δ_{np}), так и другие соотношения, можно получать оценки для массовых характеристик неизвестных изотопов.

Список литературы.

1. D. Lunney, J. M. Pearson, C. Thibault. Recent trends in the determination of nuclear masses // *Reviews Of Modern Physics* 2003. Vol.75, N3, p. 1021-1082.
2. G.J. Fu et al. // *Phys. Rev. C*. 2011. 84. 034311.
3. М.В. Симонов, Е.В. Владимирова, Т.Ю. Третьякова. Предсказание характеристик изотопов 102-106 элементов на основе массовых соотношений // Труды XIX Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. – М.: Университетская книга, 2018.
4. Е. В. Владимирова, Б. С. Ишханов, М. В. Симонов, Т. Ю. Третьякова. Оценка энергий связи сверхтяжелых ядер на основе массовых соотношений для остаточного пр-взаимодействия // *Ученые Записки Физического Факультета МГУ*. 2019. № 3. С. 1930409
5. Ishkhanov B.S., Sidorov S.V., Tretyakova T.Yu., Vladimirova E.V. // *Chinese Phys.* 2019. С. 43. 014104.
6. P.Möller, A.J.Sierk, T.Ichikawa, H.Sagawa // *At. Data and Nucl. Data Tabl.* 2016. 109-110, p. 1-204.
7. G.Audi, F.G.Kondev et al. // *Chin. Phys.* 2017. С 41. 030001.