

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ЦДФЭ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ $\alpha$ -РАСПАДА

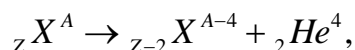
Парахневич А.С., Дерюжкова О.М.

УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,  
Гомель, Беларусь, [alina6970768@mail.ru](mailto:alina6970768@mail.ru), [dom@gsu.by](mailto:dom@gsu.by)

Воспользуемся веб-сайтом Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ) с целью извлечения необходимых сведений по основным свойствам и характеристикам  $\alpha$ -распада. Сайт представляет собой систему реляционных баз ядерных данных (БД) и содержит обширную информацию по ядерным реакциям под действием различных частиц, а также данные о свойствах атомных ядер и их структуре (энергетических уровнях, альфа-, бета-, гамма-переходах). Применение БД в исследованиях упрощает процесс обработки информации и улучшает восприятие полученного результата, предоставляя графическую интерпретацию [1].

Изучение процессов  $\alpha$ -распада ядер является одним из самых информативных методов исследования ядерной структуры. Ядерные реакции, а значит и  $\alpha$ -распад, используют с целью получения новых изотопов, а также информации о свойствах и характеристиках уже известных ядер. Альфа-распад из основного состояния наблюдается только у достаточно тяжёлых ядер, например, у радия-226 или урана-238,  $\alpha$ -радиоактивные ядра в таблице нуклидов появляются начиная с атомного номера  $Z=52$  (теллур) и массового числа  $A$  около 106–110, а при атомном номере  $Z>82$  и массовом числе  $A>200$  практически все нуклиды  $\alpha$ -радиоактивны. Среди природных изотопов  $\alpha$ -радиоактивность наблюдается у нескольких нуклидов редкоземельных элементов (неодим-144, самарий-147, самарий-148, европий-151, гадолиний-152), а также у нескольких нуклидов тяжёлых металлов (гафний-174, вольфрам-180, осмий-186, платина-190, висмут-209, торий-232, уран-235, уран-238) и у короткоживущих продуктов распада урана и тория [2]. В настоящее время известно более 300  $\alpha$ -активных ядер, большинство из них получено искусственным путем.

Явление  $\alpha$ -распада состоит в самопроизвольном испускании ядром  $\alpha$ -частицы или ядра гелия  ${}^2_2\text{He}^4$ :



где  ${}_Z X^A$  – материнское ядро или исходное;  ${}_{Z-2} X^{A-4}$  – дочернее ядро или образовавшееся в результате распада.

Рассмотрим баланс энергий при  $\alpha$ -распаде. Радиоактивность – экзотермический процесс ( $Q>0$ ), т.е. при  $\alpha$ -распаде энергия должна выделяться. Следовательно, чтобы  $\alpha$ -распад происходил, необходимо, чтобы энергия связи материнского ядра была меньше суммы энергий связи дочернего ядра и  $\alpha$ -частицы, то есть энергия  $Q$ , выделяющаяся при  $\alpha$ -распаде равна

$$Q = E_{св.} (Z - 2, A - 4) + E_{св.} (\alpha) - E_{св.} (Z, A) = E_{св.д.} + E_{св.а} - E_{св.м.} > 0. \quad (1)$$

В основном  $Q$  есть кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы образующейся в результате распада. Так как  $M_{яд} \gg M_{\alpha}$ , то

$$Q \approx T_{\alpha}. \quad (2)$$

Используя (1) и (2) получим условие, при котором возможен  $\alpha$ -распад. Для этого от энергии связи перейдем к удельным энергиям связи:  $\varepsilon_{св.} = \frac{E_{св.}}{A}$ ,  $E_{св.} = A\varepsilon_{св.}$ .

Тогда формула (1) примет вид:

$$T_{\alpha} = (A-4)\varepsilon_{св.д.} + 4\varepsilon_{св.а} - A\varepsilon_{св.м} > 0,$$

$$A(\varepsilon_{св.д.} - \varepsilon_{св.м}) > 4(\varepsilon_{св.д.} - \varepsilon_{св.а}),$$

$$\varepsilon_{св.д.} - \varepsilon_{св.м} > \frac{4}{A}(\varepsilon_{св.д.} - \varepsilon_{св.а}). \quad (3)$$

Из (3) видно, что энергия связи дочернего ядра больше энергии связи материнского ядра, то есть каждый нуклон в дочернем ядре должен быть в среднем связан более прочно, чем в материнском:

$$\varepsilon_{св.д.} > \varepsilon_{св.м}.$$

С увеличением числа нуклонов  $A$ , удельная энергия связи  $\varepsilon_{св}$  должна быстро убывать. Это происходит вследствие того, что с возрастанием  $Z$  увеличивается относительная роль кулоновского отталкивания, уменьшающего энергию связи ядра.

Продемонстрируем как численные значения, полученные с помощью калькулятора «Энергии распадов» БД ЦДФЭ НИИЯФ МГУ, подтверждают экспериментальные данные и согласуются с расчетными данными относительно области ядер, для которых наблюдается  $\alpha$ -распад. Для этого оценим работу калькулятора по извлечению информации о легких (изотопы алюминия  ${}_{13}Al$ ), редкоземельных (изотопы самария  ${}_{62}Sm$ ) и тяжелых (изотопы полония  ${}_{84}Po$ ) ядрах. Выясним, вначале, возможен ли  $\alpha$ -распада для изотопов алюминия  ${}_{13}Al$ . Для этого согласно отработанной методике заполним входную форму запроса (рисунок 1).

### 3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по [следующим формулам](#).  
 Каждое поле формы может быть пустым. [\[ Помощь... \]](#)

| Входные параметры |   |
|-------------------|---|
| Z:                | <input type="text" value="13"/> Пример: 20, 40-60   |
| N:                | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60  |
| A:                | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60  |
| Тип распада:      | <input checked="" type="checkbox"/> $\alpha$ (альфа-распад)<br><input type="checkbox"/> $\beta^-$ (бета-распад)<br><input type="checkbox"/> $\beta^+$ (позитронный бета-распад)<br><input type="checkbox"/> $\epsilon$ (электронный захват) |
| На оси абсцисс:   | <input type="radio"/> Z <input type="radio"/> N <input checked="" type="radio"/> A  |

Рисунок 1 – Входная форма запроса калькулятора «Энергии распадов» для определения энергии  $\alpha$ -распада изотопов алюминия  ${}_{13}Al$

Выходная форма запроса не формируется. Калькулятор устроен таким образом, что не вычисляет выходные данные и не строит график зависимости энергии распада от полного числа нуклонов  $A$  для изотопов  ${}_{13}Al$ , поскольку они относятся к группе легких элементов, для которых  $\alpha$ -распад не возможен из-за слишком больших периодов полураспада  $T_{1/2}$ .

Извлечем теперь информацию о возможных  $\alpha$ -распадах изотопов самария  ${}_{62}Sm$   $Z=62$ . Введем необходимые входные параметры на форму запроса калькулятора «Энергии распадов» (рисунок 2,а).

### 3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по [следующим формулам](#).  
 Каждое поле формы может быть пустым. [\[ Помощь... \]](#)

| Входные параметры  |  |
|--|--|
| Z:   | <input type="text" value="62"/> Пример: 20, 40-60  |
| N:   | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60   |
| A:   | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60   |
| Тип распада:   | <input checked="" type="checkbox"/> $\alpha$ (альфа-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\beta^-$ (бета-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\beta^+$ (позитронный бета-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\epsilon$ (электронный захват) |
| На оси абсцисс:  | <input type="radio"/> Z <input type="radio"/> N <input checked="" type="radio"/> A   |
| <input type="button" value="Вычислить"/> <input type="button" value="Построить график"/> <input type="button" value="Очистить"/> |  |

а

Result -  $Q_{\alpha}(A,Z)$ ,  $Q_{\beta^{-}}(A,Z)$ ,  $Q_{\beta^{+}}(A,Z)$ ,  $Q_{\epsilon}(A,Z)$ :

| Elem | Z  | N   | A   | $Q_{\alpha}$ | $Q_{\beta^{-}}$ | $Q_{\beta^{+}}$ | $Q_{\epsilon}$ |
|------|----|-----|-----|--------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Sm   | 62 | 66  | 128 | 3.0750       | -               | 7.9780          | 9.0000         |
| Sm   | 62 | 67  | 129 | 2.8750       | -               | 9.5780          | 10.6000        |
| Sm   | 62 | 68  | 130 | 2.8750       | -               | 6.8780          | 7.9000         |
| Sm   | 62 | 69  | 131 | 2.7750       | -               | 8.5180          | 9.5400         |
| Sm   | 62 | 70  | 132 | 2.5550       | -               | 5.4880          | 6.5100         |
| Sm   | 62 | 71  | 133 | 2.6750       | -               | 7.2580          | 8.2800         |
| Sm   | 62 | 72  | 134 | 2.6650       | -               | 4.2080          | 5.2300         |
| Sm   | 62 | 73  | 135 | 2.4850       | -               | 6.0980          | 7.1200         |
| Sm   | 62 | 74  | 136 | 2.1900       | -               | 3.3670          | 4.3890         |
| Sm   | 62 | 75  | 137 | 1.8750       | -               | 5.0200          | 6.0420         |
| Sm   | 62 | 76  | 138 | 1.7250       | -               | 2.4200          | 3.4420         |
| Sm   | 62 | 77  | 139 | 1.4080       | -               | 4.0940          | 5.1160         |
| Sm   | 62 | 78  | 140 | 1.3190       | -               | 1.7330          | 2.7550         |
| Sm   | 62 | 79  | 141 | 1.2160       | -               | 3.5620          | 4.5840         |
| Sm   | 62 | 80  | 142 | 0.6000       | -               | 1.1450          | 2.1670         |
| Sm   | 62 | 81  | 143 | 0.0420       | -               | 2.4210          | 3.4430         |
| Sm   | 62 | 83  | 145 | 1.1150       | -               | -               | 0.6160         |
| Sm   | 62 | 84  | 146 | 2.5280       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 85  | 147 | 2.3103       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 86  | 148 | 1.9860       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 87  | 149 | 1.8701       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 88  | 150 | 1.4487       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 89  | 151 | 1.1449       | 0.0770          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 90  | 152 | 0.2200       | -               | -               | -              |
| Sm   | 62 | 91  | 153 | -            | 0.8080          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 93  | 155 | -            | 1.6275          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 94  | 156 | -            | 0.7230          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 95  | 157 | -            | 2.7370          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 96  | 158 | -            | 2.0000          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 97  | 159 | -            | 3.8430          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 98  | 160 | -            | 2.9500          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 99  | 161 | -            | 4.8000          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 100 | 162 | -            | 3.8000          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 101 | 163 | -            | 5.7000          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 102 | 164 | -            | 4.9000          | -               | -              |
| Sm   | 62 | 103 | 165 | -            | 6.8000          | -               | -              |

б

Рисунок 2 – Входная и выходная формы запроса калькулятора «Энергии распадов» для определения энергии  $\alpha$ -распада изотопов самария  ${}_{62}\text{Sm}$

В результате работы калькулятора формируется выходная форма запроса в виде таблицы данных (рисунок 2,б). На основе полученных результатов можно построить график зависимости энергии  $\alpha$ -распада  $Q$  от полного числа нуклонов  $A$  (рисунок 3).

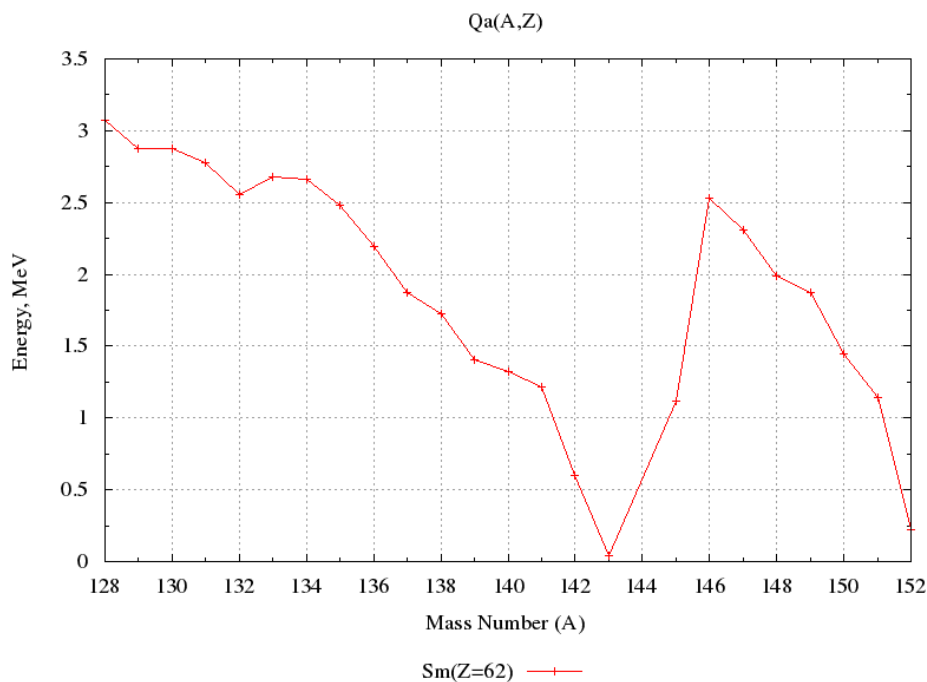


Рисунок 3 – График зависимости энергии распада  $Q$  от полного числа нуклонов  $A$  для изотопов самария  ${}_{62}\text{Sm}$

Из таблицы, представленной на рисунке 2,б видно, что  $\alpha$ -распаду подвержены 24 изотопа ( $A=128-152$ ). Остальные 12 изотопов самария ( $A=153-165$ ), перегруженные нейтронами, испытывают только  $\beta$ -распад. Таким образом, у ядер редкоземельных элементов  $\alpha$ -распад подавляется  $\beta$ -распадом. Из графика рисунка 3 следует, что  $\alpha$ -распад изотопов самария  ${}_{62}\text{Sm}$  становится возможным, начиная с  $A=128$ . Резкий пик энергии распада в пределах области  $A=146$  объясняется в оболочечной модели ядра и связан с заполнением нейтронной оболочки до магического числа нейтронов  $N=82$ .

Перейдем теперь в область тяжелых ядер и рассмотрим характеристики  $\alpha$ -распада изотопов полония  ${}_{84}\text{Po}$ . Заполним входную форму запроса (рисунок 4,а).

### 3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по [следующим формулам](#).  
Каждое поле формы может быть пустым. [\[ Помощь... \]](#)

| Входные параметры  |  |
|--|--|
| Z:   | <input type="text" value="84"/> Пример: 20, 40-60  |
| N:   | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60   |
| A:   | <input type="text"/> Пример: 20, 40-60   |
| Тип распада:   | <input checked="" type="checkbox"/> $\alpha$ (альфа-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\beta$ - (бета-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\beta^+$ (позитронный бета-распад)<br><input checked="" type="checkbox"/> $\epsilon$ (электронный захват) |
| На оси абсцисс:  | <input type="radio"/> Z <input type="radio"/> N <input checked="" type="radio"/> A   |
| <input type="button" value="Вычислить"/> <input type="button" value="Построить график"/> <input type="button" value="Очистить"/> |  |

Result - Q $\alpha$ (A,Z), Q $\beta$ -(A,Z), Q $\beta$ +(A,Z), Q $\epsilon$ (A,Z):

| Elem | Z  | N   | A   | Q $\alpha$ | Q $\beta$ - | Q $\beta$ + | Q $\epsilon$ |
|------|----|-----|-----|------------|-------------|-------------|--------------|
| Po   | 84 | 104 | 188 | 8.0820     | -           | 5.6400      | 6.6620       |
| Po   | 84 | 105 | 189 | 7.7010     | -           | 7.6230      | 8.6450       |
| Po   | 84 | 106 | 190 | 7.6930     | -           | 5.3150      | 6.3370       |
| Po   | 84 | 107 | 191 | 7.5020     | -           | 7.1650      | 8.1870       |
| Po   | 84 | 108 | 192 | 7.3190     | -           | 4.4570      | 5.4790       |
| Po   | 84 | 109 | 193 | 7.0950     | -           | 6.4900      | 7.5120       |
| Po   | 84 | 110 | 194 | 6.9870     | -           | 3.9630      | 4.9850       |
| Po   | 84 | 111 | 195 | 6.7550     | -           | 5.9310      | 6.9530       |
| Po   | 84 | 112 | 196 | 6.6560     | -           | 3.5130      | 4.5350       |
| Po   | 84 | 113 | 197 | 6.4050     | -           | 5.3060      | 6.3280       |
| Po   | 84 | 114 | 198 | 6.3090     | -           | 2.8750      | 3.8970       |
| Po   | 84 | 115 | 199 | 6.0740     | -           | 4.5620      | 5.5840       |
| Po   | 84 | 116 | 200 | 5.9810     | -           | 2.3940      | 3.4160       |
| Po   | 84 | 117 | 201 | 5.8000     | -           | 3.8690      | 4.8910       |
| Po   | 84 | 118 | 202 | 5.7010     | -           | 1.7860      | 2.8080       |
| Po   | 84 | 119 | 203 | 5.4950     | -           | 3.2080      | 4.2300       |
| Po   | 84 | 120 | 204 | 5.4850     | -           | 1.3150      | 2.3370       |
| Po   | 84 | 121 | 205 | 5.3230     | -           | 2.5310      | 3.5530       |
| Po   | 84 | 122 | 206 | 5.3270     | -           | 0.8240      | 1.8460       |
| Po   | 84 | 123 | 207 | 5.2150     | -           | 1.8860      | 2.9080       |
| Po   | 84 | 124 | 208 | 5.2150     | -           | 0.3790      | 1.4010       |
| Po   | 84 | 125 | 209 | 4.9792     | -           | 0.8701      | 1.8921       |
| Po   | 84 | 126 | 210 | 5.4069     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 127 | 211 | 7.5935     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 128 | 212 | 8.9536     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 129 | 213 | 8.5364     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 130 | 214 | 7.8343     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 131 | 215 | 7.5257     | 0.7147      | -           | -            |
| Po   | 84 | 132 | 216 | 6.9054     | -           | -           | -            |
| Po   | 84 | 133 | 217 | 6.6600     | 1.5050      | -           | -            |
| Po   | 84 | 134 | 218 | 6.1140     | 0.2600      | -           | -            |
| Po   | 84 | 135 | 219 | 5.8750     | 2.4030      | -           | -            |
| Po   | 84 | 136 | 220 | -          | 1.1500      | -           | -            |

а

б

Рисунок 4 – Входная и выходная формы запроса калькулятора «Энергии распадов» для определения энергии  $\alpha$ -распада изотопов полония  ${}_{84}\text{Po}$

В результате работы калькулятор выдает численные значения энергии  $\alpha$ -распада в таблице выходной формы запроса (рисунок 4,б), из которой следует, что  $\alpha$ -распаду подвержен 31 изотоп полония ( $A=188-219$ ) и только 1 изотоп  ${}_{84}\text{Po}^{220}$  не испытывает  $\alpha$ -распад. Все это подтверждает экспериментальные данные и теоретические оценки области значений  $A$  и  $Z$  для  $\alpha$ -распада:  $\alpha$ -распад наблюдается в основном для тяжелых ядер.

На основе полученных данных можно построить график зависимости энергии  $\alpha$ -распада от полного числа нуклонов  $A$  (рисунок 5). Из рисунков 4,б и 5 видно, что энергия  $\alpha$ -распада уменьшается с ростом числа нуклонов  $A$  изотопов полония достигая для  ${}_{84}\text{Po}^{209}$  ( $N=125$ ) минимального значения 4,9792 МэВ. Резкий всплеск энергии объясняется в оболочечной модели ядра наличием магического числа нейтронов  $N=126$ .

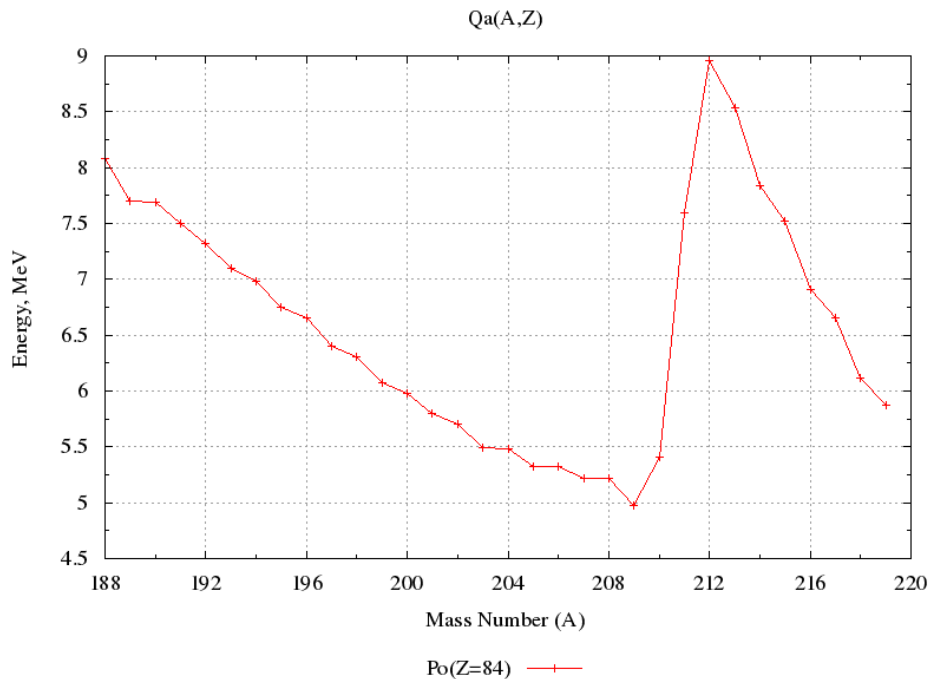


Рисунок 5 – График зависимости энергии распада  $Q$  от полного числа нуклонов  $A$  для изотопов полония  ${}_{84}\text{Po}$

Таким образом, с помощью баз данных можно значительно сократить время поиска необходимой информации и получить более точные результаты исследования свойств и характеристик того или иного ядра.

#### Список использованных источников

1. Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) [Электронный ресурс] / Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ). – ЦДФЭ, 2003. – URL: <http://cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html>. – Дата доступа: 11.11.2018.
2. Википедия [Электронный ресурс] / Википедия. – 5 ноября 2018. – URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki>. – Дата доступа: 13.11.2018.