

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ЦДФЭ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ α -РАСПАДА

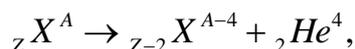
Парахневич А.С., Дерюжкова О.М.

УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины»,
Гомель, Беларусь, alina6970768@mail.ru, 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 α -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 α -распада ядер является одним из самых информативных методов исследования ядерной структуры. Ядерные реакции, а значит и α -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, α -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 α -радиоактивны. Среди природных изотопов α -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 α -активных ядер, большинство из них получено искусственным путем.

Явление α -распада состоит в самопроизвольном испускании ядром α -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 α -распаде. Радиоактивность – экзотермический процесс ($Q>0$), т.е. при α -распаде энергия должна выделяться. Следовательно, чтобы α -распад происходил, необходимо, чтобы энергия связи материнского ядра была меньше суммы энергий связи дочернего ядра и α -частицы, то есть энергия Q , выделяющаяся при α -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 α -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 α -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:

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

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

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

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:

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

С увеличением числа нуклонов A , удельная энергия связи $\varepsilon_{\text{св}}$ 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 α -распад. Для этого оценим работу калькулятора по извлечению информации о легких (изотопы алюминия ${}_{13}\text{Al}$), редкоземельных (изотопы самария ${}_{62}\text{Sm}$) и тяжелых (изотопы полония ${}_{84}\text{Po}$) ядрах. Выясним, вначале, возможен ли α -распада для изотопов алюминия ${}_{13}\text{Al}$. 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"/> α (альфа-распад) <input type="checkbox"/> β^- (бета-распад) <input type="checkbox"/> β^+ (позитронный бета-распад) <input type="checkbox"/> ϵ (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 α -распада изотопов алюминия ${}_{13}\text{Al}$

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 ${}_{13}\text{Al}$, поскольку они относятся к группе легких элементов, для которых α -распад не возможен из-за слишком больших периодов полураспада $T_{1/2}$.

Извлечем теперь информацию о возможных α -распадах изотопов самария ${}_{62}\text{Sm}$ $Z=62$. 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"/> α (альфа-распад) <input checked="" type="checkbox"/> β^- (бета-распад) <input checked="" type="checkbox"/> β^+ (позитронный бета-распад) <input checked="" type="checkbox"/> ϵ (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_{α}	$Q_{\beta^{-}}$	$Q_{\beta^{+}}$	Q_{ϵ}
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 α -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 α -распада Q от полного числа нуклонов A (рисунок 3).

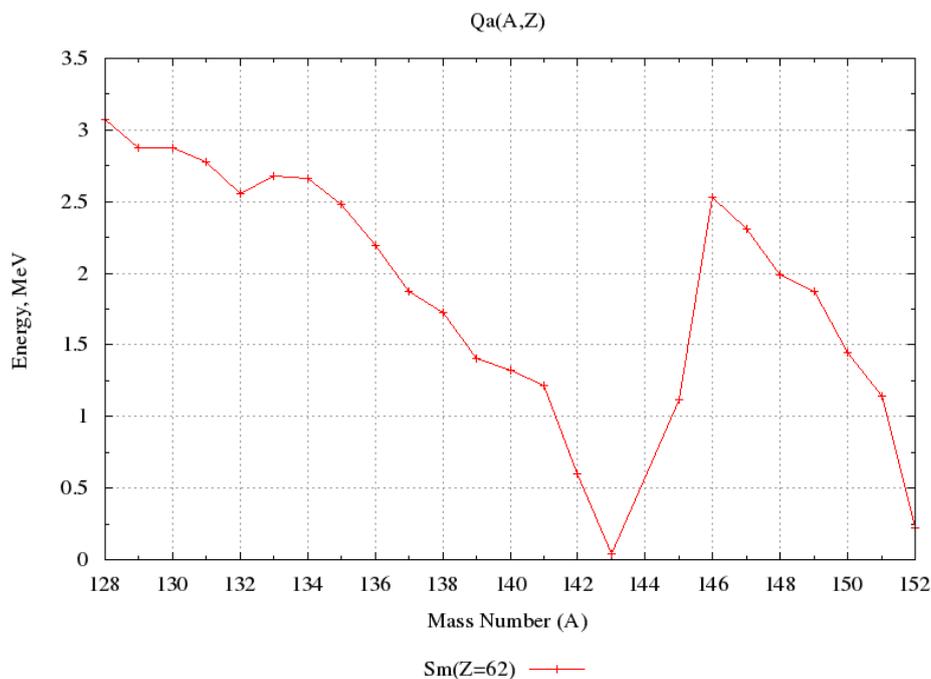


Рисунок 3 – График зависимости энергии распада Q от полного числа нуклонов A для изотопов самария ${}_{62}\text{Sm}$

Из таблицы, представленной на рисунке 2,б видно, что α -распаду подвержены 24 изотопа ($A=128-152$). Остальные 12 изотопов самария ($A=153-165$), перегруженные нейтронами, испытывают только β -распад. Таким образом, у ядер редкоземельных элементов α -распад подавляется β -распадом. Из графика рисунка 3 следует, что α -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 α -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"/> α (альфа-распад) <input checked="" type="checkbox"/> β - (бета-распад) <input checked="" type="checkbox"/> β^+ (позитронный бета-распад) <input checked="" type="checkbox"/> ϵ (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 α (A,Z), Q β -(A,Z), Q β +(A,Z), Q ϵ (A,Z):

Elem	Z	N	A	Q α	Q β -	Q β +	Q ϵ
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 α -распада изотопов полония ${}_{84}\text{Po}$

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

На основе полученных данных можно построить график зависимости энергии α -распада от полного числа нуклонов A (рисунок 5). Из рисунков 4,б и 5 видно, что энергия α -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 $N=126$.

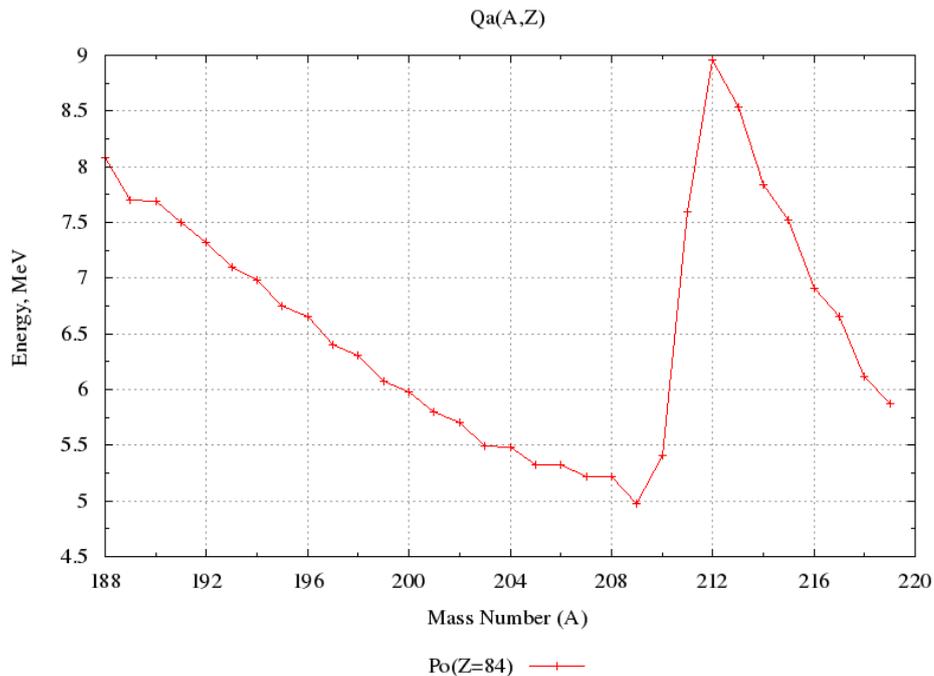


Рисунок 5 – График зависимости энергии распада Q от полного числа нуклонов A для изотопов полония ${}_{84}\text{Po}$

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.