

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЧИСЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ИЗОТОПАХ ВОДОРОДА С ПОМОЩЬЮ САЙТА ЦДФЭ

В настоящее время известно семь изотопов ядра водорода ${}_1H$: протон $p={}_1H^1$, дейтрон $d={}_1H^2$, которые стабильны; тритон $t={}_1H^3$, подвергающийся бета-распаду и очень неустойчивые тяжелые изотопы ${}_1H^4$, ${}_1H^5$, ${}_1H^6$, ${}_1H^7$. Изотопы водорода уникальны тем, что для каждого из них наблюдаются значительные отличия физических, химических, термодинамических и ядерных свойств, что не имеет аналогов в периодической системе. Этим обусловлен интерес к изучению свойств и характеристик данных изотопов.

Продемонстрируем как получить численные данные для характеристик изотопов водорода ${}_1H$, используя калькуляторы системы реляционных баз данных (БД), находящиеся в свободном доступе на интерактивном веб-сайте Центра данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) НИИЯФ МГУ [1]. Калькуляторы дают возможность на основе оцененных ядерных данных рассчитать энергию связи и удельную энергию связи атомных ядер, энергию распадов всех известных ядер, а также вычислить пороги и энергии ядерных реакций. Система БД согласно необходимому запросу строит графики зависимости полученных энергий от полного числа нуклонов A .

На рисунке 1 приведена поисковая форма БД калькулятор «Энергии связи ядер» для определения энергии связи, удельной энергии связи и разности энергий связи, полученных экспериментально и с помощью формулы Вайцзеккера, для изотопов водорода ${}_1H$, а также выходная форма запроса [1]. Энергия связи является важнейшей характеристикой прочности ядра и вычисляется по формулам в соответствии с определением [2]

$$E_{ce}(Z, A) = Zm_p + Nm_n - M_{яд}(Z, A)$$

и согласно теории Вайцзеккера

$$E_{ce} = a_1A - a_2A^{\frac{2}{3}} - a_3Z^2A^{-\frac{1}{3}} - a_4(N - Z)^2A^{-1} + \delta E_{ce},$$

где $a_1 = 15,75$ МэВ; $a_2 = 17,8$ МэВ; $a_3 = 0,71$ МэВ; $a_4 = 23,7$ МэВ; $|\delta| = 34 \cdot A^{-3/4}$.

Удельная энергия связи – это энергия связи, приходящаяся на один нуклон:

$$\varepsilon_{ce}(Z, A) = \frac{E_{ce}(Z, A)}{A}.$$

1. Энергии связи ядер

Каждое поле формы может быть пустым. [Помощь...]

Входные параметры	
Z:	<input type="text" value="1"/> Пример: 20, 40-60
N:	<input type="text"/> Пример: 20, 40-60
A:	<input type="text"/> Пример: 20, 40-60
Варианты расчета:	<input checked="" type="checkbox"/> Энергия связи <input checked="" type="checkbox"/> Удельная энергия связи <input checked="" type="checkbox"/> Разность энергий связи (Эксперимент - Вайцзеккер)
На ось 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 - $E_{св}(A,Z)$, $\epsilon(A,Z) = E_{св}(A,Z)/A$, $\delta(A,Z) = E_{св}(A,Z)_{exp} - E_{св}(A,Z)_{theor}$:

Elem	Z	N	A	$E_{св}$	ϵ	δ
H	1	0	1	0.0000	0.0000	26.4600
H	1	1	2	2.2245	1.1123	19.7603
H	1	2	3	8.4821	2.8274	6.6499
H	1	3	4	5.6036	1.4009	23.6249
H	1	4	5	6.6851	1.3370	23.0579
H	1	5	6	5.7467	0.9578	42.4805
H	1	6	7	6.6182	0.9455	46.5178

Рисунок 1 – Входная и выходная формы запроса по определению энергии связи ядер для изотопов водорода 1_1H

Используя полученные численные данные из таблицы рисунка 1 можно построить графики зависимости трех видов энергий связи от полного числа нуклонов A для изотопов водорода 1_1H (рисунок 2).

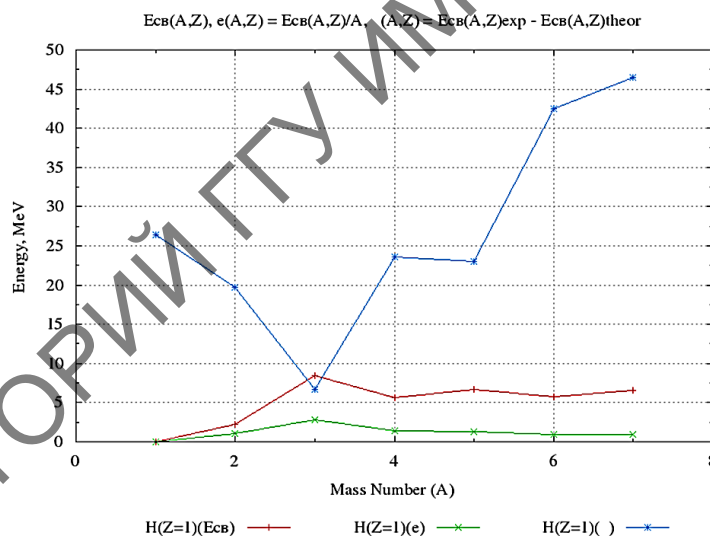


Рисунок 2 – График зависимости энергии связи от полного числа нуклонов A для изотопов водорода 1_1H

Из графиков рисунка 2 видно, что энергия связи изотопов водорода 1_1H плавно растет с увеличением числа нуклонов A и лежит в интервале примерно 2–9 МэВ (красная линия), удельная энергия связи для всех изотопов водорода 1_1H , исключая стабильный протон, примерно одинакова и находится в пределах 1–3 МэВ/нуклон (зеленая линия). Максимальное значение удельной энергии связи 2,8274 МэВ/нуклон (рисунок 1) соответствует тритию 3_1H , в ядре которого нуклоны связаны наиболее прочно. Данные результаты подтверждают выводы о том, что удельная энергия связи легких атомных ядер мала из-за поверхностных эффектов, происходящих в ядре, что объясняется на основе полуэмпирической формулы Вайцзеккера.

На рисунке 3 приведена поисковая форма БД калькулятор «Энергии распадов» и выходная форма запроса для расчёта энергии распада выбранного ядра [1]. Калькулятор позволяет определить энергии α -распада, электронного или β -распада, позитронного или β^+ -распада, а также электронного захвата. В качестве исследуемых ядер выбираем изотопы водорода 1H .

3. Энергии распадов

Энергии распадов рассчитаны на основании значений атомных масс по стандартным формулам.
Каждое поле формы может быть пустым. [Показать...]

Входные параметры	
Z:	<input type="text" value="1"/> 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 - $Q\alpha(A,Z)$, $Q\beta^-(A,Z)$, $Q\beta^+(A,Z)$, $Q\epsilon(A,Z)$:

Elem	Z	N	A	$Q\alpha$	$Q\beta^-$	$Q\beta^+$	$Q\epsilon$
H	1	2	3	-	0.0190	-	-
H	1	3	4	-	23.4750	-	-
H	1	4	5	-	21.5000	-	-
H	1	5	6	-	24.3049	-	-
H	1	6	7	-	22.9990	-	-

Рисунок 3 – Входная и выходная формы запроса по определению энергии распада изотопов водорода 1H

Из таблицы рисунка 3 видно, что α -распаду не подвержен ни один изотоп водорода 1H , т. к. это легкое ядро, а α -распад характерен в основном для тяжелых ядер. Электронный или β^- -распад наблюдается у 5 из 7 изотопов водорода 1H ($A = 3-7$), протон и дейтрон стабильны. Позитронный или β^+ -распад и e -захват не характерны для изотопов водорода 1H .

На основе полученных численных данных можно построить график зависимости энергии β^- -распада, так как другие отсутствуют, от полного числа нуклонов A для изотопов водорода 1H (рисунок 4). Под энергией, выделяющаяся в результате β^- -распада $Q\beta^-$, следует понимать максимальную энергию, которую приобретает электрон в результате β^- -распада. Ее обычно называют верхней границей β^- -спектра. Из рисунка 4 видно, что энергия β^- -распада увеличивается с ростом числа A и лежит в интервале 0-24,5 МэВ. Для тяжелых изотопов водорода ($A = 4-7$) она примерно одинакова. Явно выраженные максимумы и минимумы энергии на графике рисунка 4 свидетельствует об эффекте спаривания одинаковых нуклонов, при этом изотопы водорода с четным числом нуклонов $A = 4$ и 6 обладают большей энергией распада, а с нечетным числом нуклонов $A = 5$ и 7 – меньшей.

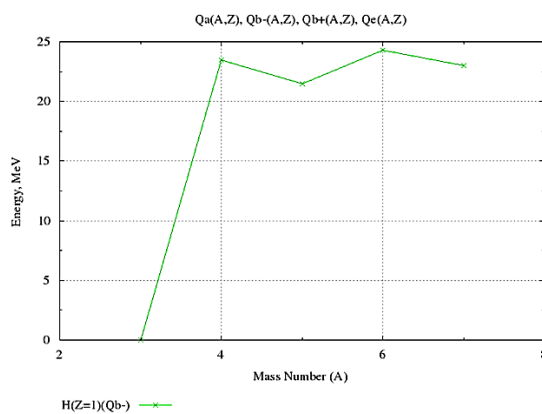


Рисунок 4 – График зависимости энергии β^- -распада от полного числа нуклонов A для изотопов водорода 1H

Рассмотрим работу калькулятора «Пороги и энергии реакций» системы базы данных [1]. Он дает возможность рассчитать энергетические пороги и энергии любых ядерных реакций: под действием любых налетающих частиц и для любой комбинации образующихся продуктов. Энергия реакции Q – это кинетическая энергия, выделяющаяся или поглощающаяся в процессе реакции. Порог ядерной реакции $E_{пор}$ – минимальная кинетическая энергия налетающей частицы, при которой начинается эндотермический процесс ($Q < 0$). Формула для вычисления энергии реакции через известные дефекты масс частиц и ядер Δ , участвующих в данной реакции, имеет вид [3]:

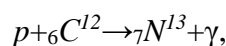
$$Q = \Delta_1 + \Delta_2 - \Delta_3 - \Delta_4.$$

Порог ядерной реакции определяется формулой:

$$E_{пор} = |Q| \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right),$$

где m_1 и m_2 – массы налетающей частицы и ядра-мишени соответственно.

На рисунке 5 приведена поисковая форма калькулятора для определения порога и энергии термоядерной реакции на Солнце углеродно-азотного цикла [2]:



а также результат работы калькулятора или выходная форма запроса. В соответствии с видом реакции налетающей частицей в выпадающем меню выбирается протон p , как ядро-мишень указывается ядро с $Z = 6$ и $A = 12$, как вылетающая частица 1 отмечен γ -квант с $Z = 0$ и $A = 0$, в поле ядро-продукт реакции система автоматически выдает ядро с $Z = 7$ и $A = 13$.

4. Пороги и энергии реакций

Каждое поле формы может быть пустым [Помощь]

Входные параметры:	Z:	A:	Число частиц
Ядро-мишень:	6	12	1
Налетающая частица:	p(протон) (для ввода ионов >>>)		
Вылетающая частица 1:	0	0	0
Вылетающая частица 2: <small>(если больше частиц >>>)</small>			0
Ядро-продукт реакции:	7	13	1

Входные параметры:	Символ:	Z:	A:	Масса, u:
• Ядро-мишень:	C	6	12	12
• Налетающая частица:	протон	1	1	0
• Ядро-продукт реакции:	N	7	13	13.005738609

Результаты расчета: Порог реакции: нет порога
Энергия реакции: 1.94349 (26) МэВ

Деление по данному каналу происходит при любой энергии налетающей частицы.

Рисунок 5 – Входная и выходная формы запроса по определению энергетического порога и энергии термоядерной реакции углеродно-азотного цикла

Как видно из данных, представленных на рисунке 5, порог термоядерной реакции $p + {}_6^{12}\text{C} \rightarrow {}_7^{13}\text{N} + \gamma$ не определяется, так как реакция является экзотермической $Q = 1,94349$ МэВ ($Q > 0$), следовательно, происходит при любой энергии налетающей частицы.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение калькуляторов «Энергии связи ядер», «Энергии распадов» и «Пороги и энергии реакций» позволяет на основе современных экспериментальных данных рассчитать необходимые численные значения с заданной точностью, максимально быстро и доступно. Калькуляторы веб-сайта ЦДФЭ дают возможность провести качественную наглядную интерпретацию полученных результатов с помощью автоматически сформированных таблиц числовых данных и соответствующих им графиков. При этом вычисления ограничены только количеством известных изотопов и численной информацией по их свойствам.

Список использованных источников

- 1 Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) [Электронный ресурс] / Центр данных фотоядерных экспериментов (ЦДФЭ) – ЦДФЭ, 2003. – Режим доступа : <http://cdfe.sinp.msu.ru/index.ru.html> – Дата доступа : 14.10.2020.
- 2 Широков, Ю. М. Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. – Москва : Наука, 1980. – 728 с.
- 3 Варламов, В. В. Физика ядра и банки ядерных данных: учебное пособие / В. В. Варламов, Н. Г. Гончарова, Б. С. Ишханов. – Москва : Университетская книга, 2010. – 246 с.