

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

3_6. ЯДРА АТОМОВ

Запустите программу компьютерного моделирования. Выберите модель «6.6. Энергия связи ядер».

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Знакомство с основными свойствами ядер атомов. Исследование состава ядер и его влияния на количество изотопов.

ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Прочитайте по учебнику соответствующий материал [1] – §§41.1 – 41.4 [2] - §§ 251 - 254. Законспектируйте краткую теорию. Рассмотрите изображение на рис. 1 и зарисуйте основные элементы в отчет по лабораторной работе. Подготовьте таблицы для заполнения в процессе измерений.

Получите допуск у преподавателя.

КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

***Ядром** называется центральная часть атома, которая имеет очень малый размер и в которой сосредоточена основная масса атома.* Оно в 2-4 тыс. раз массивнее, чем электроны, заполняющие основной объем атома.

***В состав ядра** входят частицы, называемые «нуклонами» (в переводе – ядерные частицы).*

A – массовое число ядра равно количеству нуклонов в данном ядре.

Нуклоны подразделяют на протоны и нейтроны.

***Протоном** называется нуклон, имеющий положительный заряд, равный элементарному.*

Z – зарядовое число ядра, равное количеству протонов в данном ядре. Оно же равно порядковому номеру данного химического элемента в таблице Менделеева.

Символ протона «p». Заряд протона $Q_p = +e$, где e – элементарный заряд, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл. Масса протона $m_p = 1839,7 m_e$.

Протон обладает собственным моментом импульса - спином, модуль которого равен

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{s_p(s_p + 1)},$$

где $s_p = \frac{1}{2}$ называется спиновым квантовым числом протона.

Протон – это фермион (подчиняется принципу Паули).

Протон имеет магнитный момент: $M_p = 1,3 M_{\text{Б.яд}}$, где ядерный магне-

тон Бора равен

$$M_{\text{Б.яд}} = \frac{e\hbar}{2m_p c}.$$

Нейтроном называется нуклон, не имеющий заряда (нейтральный – отсюда и название).

Его символ «n». Заряд нейтрона $Q_n = 0$. Количество нейтронов

$$N = A - Z.$$

Масса нейтрона чуть больше массы протона $m_n = m_p + 2.5 m_e$.

Нейтрон – это тоже фермион (подчиняется принципу Паули), т.к. его спиновое квантовое число $s_n = 1/2$.

Нейтрон имеет магнитный момент, несмотря на то, что он незаряжен.

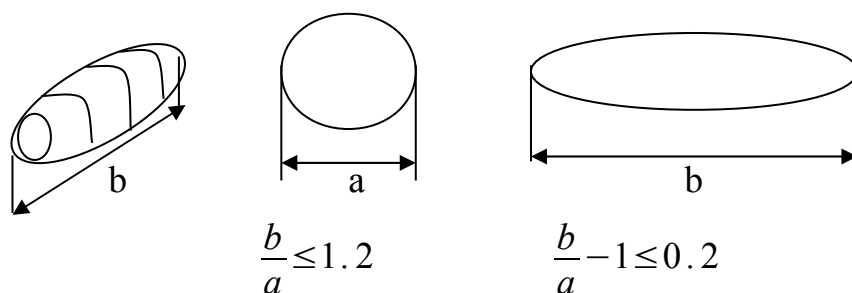
$$M_n = -1.91 M_{\text{Б.яд}}.$$

Отношение магнитных моментов нуклонов очень близко к отношению целых чисел:

$$\left| \frac{M_p}{M_n} \right| = \frac{2}{3}.$$

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДРА В ЦЕЛОМ

Форма ядра близка к сферической (точнее, эллипсоид вращения).



Несферичность ядра определяется отклонением b/a от 1, которое для всех известных ядер не превышает 20%.

Размер 10^{-15} м. Эмпирическая формула для радиуса ядра, которая выполняется с достаточной точностью $R = 1.3 \sqrt[3]{A} 10^{-15}$ м.

Такая зависимость является следствием того, что ядро состоит из частиц, которые плотно упакованы, т.е. расположены вплотную.

Плотность ядра практически однородна вплоть до его границ, т.е. вещество заполняет ядро без «пустот». В этом ядро коренным образом отличается от атома, у которого центральная часть (ядро) имеет плотность в 10^{18} раз больше, чем плотность остальной части атомов (электронных облаков).

Любое ядро имеет электрический заряд (положительный и кратный элементарному заряду $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

$Q_{\text{яд}} = Ze$, где Z – зарядовое число ядра (количество протонов в данном ядре).

Ядро имеет спин $\vec{S}_{\text{яд}}$ и магнитный момент $\vec{M}_{\text{яд}}$.

Модуль спина ядра квантован:

$$|\vec{S}| = \hbar \sqrt{S(S+1)},$$

где S – спиновое квантовое число ядра .

Проекция спина ядра на выделенную ось также квантуется.

Количество протонов Z в ядре может принимать любое целочисленное значение вплоть до наибольшего известного (104). **Количество протонов равно количеству электронов в атоме и, следовательно, определяет порядковый номер элемента в таблице Менделеева и химические свойства данного элемента.**

При фиксированном количестве протонов возможное количество нейтронов N в ядре не может быть любым! Количество нейтронов у легких ядер примерно равно количеству протонов, а у самых тяжелых – примерно на 60% больше. Только у одного элемента - водорода - в ядре отсутствуют нейтроны.

Изотопами данного элемента называются вещества, ядра которых имеют одно и то же количество протонов, но разное количество нейтронов.

Изотоп водорода, ядро которого содержит один нейтрон, называется дейтерием, а его ядро – дейтоном. ***Изотоп водорода, ядро которого содержит два нейтрона, называется тритием, а его ядро – тритоном.***

Самым необычным свойством ядер является наличие неустойчивых ядер, которые самопроизвольно превращаются в другие ядра и элементарные частицы.

Стабильными (устойчивыми) называются ядра, которые могут существовать бесконечно долго, не превращаясь в другие. У некоторых веществ имеется несколько стабильных изотопов, у которых наблюдается отличие на 1 – 10 нейтронов. Были обнаружены также и нестабильные ядра, которые, как и стабильные, могут иметь изотопы. К настоящему времени известно 104 химических элемента, около 300 устойчивых изотопов и свыше 1000 неустойчивых.

МОДЕЛИ ЯДЕР

Наиболее теоретически разработанными моделями ядер являются капельная и оболочечная модели.

В КАПЕЛЬНОЙ МОДЕЛИ ядро моделируется, как капля жидкости, ча-

стицы которой (нуклоны) участвуют в ядерном взаимодействии (вне контакта нуклонов между ними действуют силы притяжения, при контакте и сжатии - отталкивания). Нуклоны несжимаемы, расположены почти вплотную, но обладают подвижностью. Эту модель мы не будем рассматривать.

Согласно ОБОЛОЧЕЧНОЙ модели ядра каждый нуклон ядра движется колебательно в общем поле ядерных сил, создаваемом всеми нуклонами ядра. Усредненный потенциал этого поля можно аппроксимировать потенциалом трехмерного осциллятора. Решение уравнения Шредингера дает доступные квантовые состояния колебательного движения, которое определяется как суперпозиция трех независимых одномерных колебаний по осям X, Y и Z, имеющих энергию

$$E_{x_n} = \hbar \omega \left(n_x + \frac{1}{2} \right), \quad E_{y_n} = \hbar \omega \left(n_y + \frac{1}{2} \right), \quad E_{z_n} = \hbar \omega \left(n_z + \frac{1}{2} \right),$$

где $n_{x,y,z}$ - целые числа, принимающие значения 0, 1, 2, ..., есть квантовые числа для каждого одномерного колебания вдоль соответствующей оси декартовой системы координат. Произвольно движущийся нуклон имеет энергию, равную сумме этих энергий, которая квантована с помощью квантового числа n :

$$E_n = \hbar \omega \left(n + \frac{3}{2} \right),$$

где целое число $n = n_x + n_y + n_z = 0, 1, 2, 3, \dots$ является квантовым числом, определяющим энергию движения нуклона. Таким образом, тройка целых чисел n_x, n_y, n_z совместно с $m_s = \pm \frac{1}{2}$ (магнитное спиновое квантовое число нуклона) дают **четверку чисел, полностью определяющую состояние нуклона в ядре.**

Количество доступных состояний с фиксированным квантовым числом n можно вычислить по формуле

$$K_n = (n+1)(n+2).$$

По аналогии с атомом, совокупность доступных состояний с фиксированным числом n , принято называть оболочкой.

Подоболочкой можно называть совокупность состояний, имеющих данную тройку чисел n_x, n_y, n_z . Любая подоболочка имеет 2 доступных квантовых состояния, отличающихся магнитным спиновым квантовым числом m_s (+1/2 и -1/2).

Первая оболочка ($n = 0$) имеет 2 доступных состояния (0,0,0,1/2) и (0,0,0,-1/2) и одну подоболочку и (0,0,0,±1/2);

вторая ($n = 1$) имеет 6 доступных состояний и 3 подоболочки

$(1,0,0,\pm 1/2)$, $(0,1,0,\pm 1/2)$, $(0,0,1,\pm 1/2)$;

третья ($n = 2$) имеет 12 доступных состояний и 6 подоболочек $(2,0,0,\pm 1/2)$, $(0,2,0,\pm 1/2)$, $(0,0,2,\pm 1/2)$, $(1,1,0,\pm 1/2)$, $(1,0,1,\pm 1/2)$ и $(0,1,1,\pm 1/2)$.

Совокупность протонов и совокупность нейтронов в ядре являются самостоятельными квантовыми системами, поэтому доступные квантовые состояния заполняются нуклонами по отдельности: отдельно протонами, отдельно нейтронами. При этом выполняются известные основные принципы:

- **принцип минимальности энергии, т.е. сначала заполняются самые нижние уровни энергии (квантовые состояния с минимальной энергией), затем – расположенные выше, т.е. имеющие большую энергию;**
- **принцип Паули: в одной квантовой системе в одном квантовом состоянии может находиться не более одной частица с полуцелым спином.**

Подоболочка заполнена, если в ней находится 2 нуклона. Все сказанное относится как к протонам, так и к нейтронам, входящим в состав ядра.

Ядра с заполненными протонными подоболочками содержат четное количество протонов и будут иметь повышенную устойчивость и, следовательно, больше изотопов, чем ядра с нечетным количеством протонов. В лабораторной работе вы убедитесь в этом на опыте.

Для элемента, у которого 2 протона (гелий), первая оболочка полностью заполнена протонами (а остальные пусты).

Для элемента, у которого 8 протонов (кислород), заполнены первая (2 состояния) и вторая (6 состояний) оболочки.

Для элемента, имеющего 20 протонов (кальций), заполнены протонами первая, вторая и третья оболочки (12 состояний).

Ядра данных химических элементов обладают особой устойчивостью, количество протонов в них называют «магическими числами», а сами ядра называют «магическими». Химические элементы с магическими ядрами имеют особенно большое количество изотопов.

Дважды магическими называют ядра, у которых и количество протонов и количество нейтронов равно магическому числу. У них полностью заполнены оболочки, как для протонов, так и для нейтронов.

Экспериментальные значения магических чисел образуют следующий ряд: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 ...

В упрощенной модели магическими являются числа 2, 8, 20, 40, 70 и 112. Число 28 не предсказывается в упрощенной модели ядра, но получается в уточненной модели. Последующие числа хотя и отличаются, но довольно близки.

Дважды магическими ядрами обладают гелий ${}^4_2\text{He}$, кислород ${}^{16}_8\text{O}$, кальций ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ и свинец ${}^{208}_{82}\text{Pb}$.

МЕТОДИКА И ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

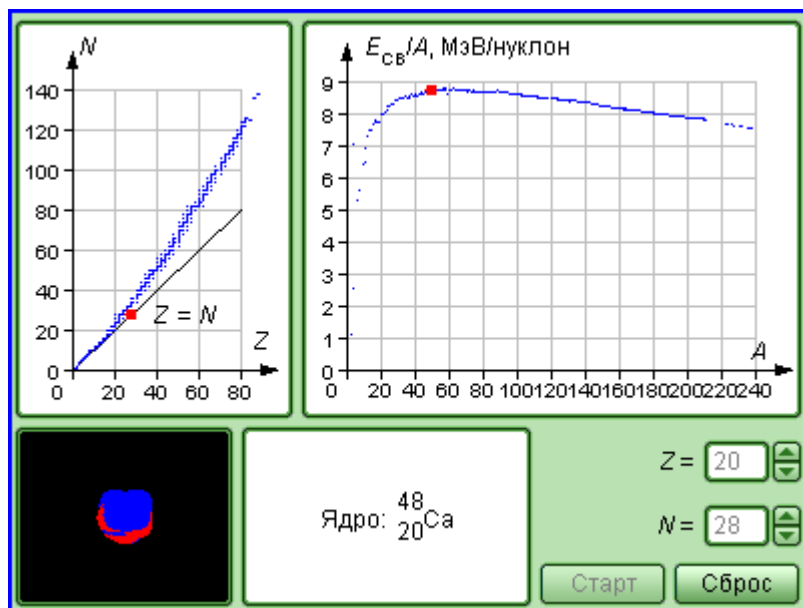


Рис.1. Модель для исследования устойчивости ядер.

На рис.1 представлено изображение экрана компьютера, на котором даны результаты экспериментальных исследований устойчивости ядер и удельной энергии связи нуклонов в ядре в зависимости от состава ядра.

На левом графике представлена совокупность точек, соответствующих составу ядер (Z и N) всех химических элементов, встречающихся в природе (включая изотопы). Фиксируя количество протонов Z , входящих в состав ядра, мы задаем химические свойства вещества, состоящего из атомов с такими ядрами. Изменяя количество нейтронов N при фиксированном количестве протонов, получаем изотопы данного химического элемента. Ядра полученного изотопа могут быть как стабильными, так и нестабильными. Это свойство ядер можно наблюдать на изображении, помещенном в левом нижнем углу модели. Каждый стабильный изотоп при наведении маркера мыши изображается в виде красной точки.

При исследованиях на данной компьютерной модели требуется определить количество стабильных изотопов для химических элементов, заданных для каждой бригады студентов.

ЗАМЕЧАНИЕ: по графику, приведенному сверху справа на рис. 1, вы можете наблюдать, как зависит удельная энергия связи нуклонов в ядре $E_{св}$ от его состава (количества нуклонов A).

Таблица 1 (не перерисовывать). Исходные данные.

Номера бригад	Количество протонов в ядре - Z												
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
1 и 5	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
2 и 6	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46
3 и 7	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58
4 и 8	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14

Таблица 2. Результаты измерений и расчетов (14 строк).

Бригада № _____

Количество протонов в ядре Z	Количество нейтронов в ядре изотопа - N										Количество изотопов $N_{из}$

ИЗМЕРЕНИЯ

1. С помощью регулировки справа установите количество протонов Z , заданное в строке для вашей бригады и первом столбце табл. 1.
2. Запишите значение Z в левом столбце табл. 2.
3. С помощью второго регулятора справа внизу установите количество нейтронов N , равное количеству протонов Z .
4. Нажмите кнопку «Старт». Если ядро неустойчиво, оно будет распадаться, и надо увеличить количество нейтронов на 1 и повторить действия по п.3.
5. Если ядро устойчиво, оно не будет распадаться. Запишите количество нейтронов N в табл. 2.
6. Увеличьте количество нейтронов на 1. Если ядро устойчиво, запишите количество нейтронов N в табл. 2.
7. Повторите п.5 пока не получите подряд несколько неустойчивых ядер. Тогда измените количество протонов, как указано в табл. 2 для вашей бригады.
8. Повторите действия, начиная с п.3 и записывая результаты в следующей строке табл. 2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

1. Подсчитайте количество изотопов для каждого химического элемента и внести в последний столбец табл.2.
2. Сделайте вывод по количеству изотопов химических элементов в заданном диапазоне порядковых номеров. Объяснить причину такого количества.
3. Постройте график зависимости количества изотопов $N_{из}$ от количества протонов Z только для четных Z .
4. Сделайте вывод по форме графика $N_{из}(Z)$.
5. По положению максимума на графике оцените значение магического числа.
6. Сравните значение магического числа, полученное экспериментально, с теоретическим значением числа, расположенным в данном диапазоне изменения Z .
7. Сделайте вывод о количестве изотопов у веществ, ядра которых имеют нечетное количество протонов Z .

ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Что называют ядром атома?
2. Что такое нуклон?
3. Что такое зарядовое число ядра и чему оно равно?
4. Что определяет порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева?
5. В чем состоит главное отличие нейтрона от протона?
6. Какие характеристики нейтрона точно совпадают с аналогичными характеристиками протона?
7. Что можно сказать о количестве протонов и нейтронов в ядрах?
8. У каких химических элементов количество протонов больше, чем количество нейтронов?
9. Что такое изотопы?
10. Назовите наиболее известные модели ядра атома.
11. Опишите особенности капельной модели ядра.
12. Опишите движение нуклона в ядре согласно оболочечной модели.
13. Запишите формулу энергии одномерного квантового осциллятора.
14. Запишите формулу энергии трехмерного квантового осциллятора.
15. Сколько квантовых чисел определяют доступное квантовое состояние нуклона в ядре? Назовите их и укажите их обозначения и числовые значения.
16. Перечислите принципы, которые выполняются при заполнении нуклонами доступных квантовых состояний в ядре.

17. Дайте определение оболочке для квантовых состояний нуклонов в ядре.
18. Дайте определение подоболочке для квантовых состояний нуклонов в ядре.
19. Какое свойство будут существенно разным у химических элементов, имеющих ядра с четным и нечетным количеством протонов?
20. Что такое магические ядра?
21. Что такое дважды магические ядра?
22. Напишите формулу для определения магических чисел.
23. Много или мало изотопов в среднем, как вы предполагаете, будут иметь химические элементы в заданном для вашей бригады диапазоне изменения Z и почему?
24. Как примерно должен выглядеть график $N_{из}(Z)$ для четных и нечетных Z с учетом значений Z для вашей бригады, приведенных в табл. 1?

ЛИТЕРАТУРА

- [1] - Калашников Н. П., Смондырев М.А. Основы физики. Т.2. М.: ООО «Дрофа», 2004.
- [2] - Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2004.

НЕКОТОРЫЕ ПОЛЕЗНЫЕ СВЕДЕНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ КОНСТАНТЫ

Название	Символ	Значение	Размерность
Гравитационная постоянная	γ или G	$6,67 \cdot 10^{-11}$	$\text{Н} \cdot \text{м}^2 \text{кг}^{-2}$
Ускорение свободного падения на поверхности Земли	g_0	9,8	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8$	$\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{26}$	кмоль^{-1}
Универсальная газовая постоянная	R	$8,31 \cdot 10^3$	$\text{Дж кмоль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$	$\text{Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$	Кл
Масса электрона	m_e	$9,11 \cdot 10^{-31}$	кг
Постоянная Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^4$	$\text{Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$	$\text{Ф} \cdot \text{м}^{-1}$
Магнитная постоянная	μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	$\text{Гн} \cdot \text{м}^{-1}$
Постоянная Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34}$	$\text{Дж} \cdot \text{с}$

ПРИСТАВКИ И МНОЖИТЕЛИ

для образования десятичных кратных и дольных единиц

Приставка	Символ	Множитель
дека	да	10^1
гекто	г	10^2
кило	к	10^3
мега	М	10^6
гига	Г	10^9
тера	Т	10^{12}

Приставка	Символ	Множитель
деци	д	10^{-1}
санти	с	10^{-2}
милли	м	10^{-3}
микро	мк	10^{-6}
нано	н	10^{-9}
пико	п	10^{-12}