

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ



Зарипова Ю.А.

**РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки  
«Физические и химические науки»

Алматы 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

***Лекция 2. Основы ядерной физики.***

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

## Лекция 2. Основы ядерной физики.

**Цель лекции:** сформировать у обучающихся базовое представление о структуре, свойствах и превращениях атомных ядер, а также об основных понятиях и законах ядерной физики.

**Введение:** Ядерная физика - наука о строении, свойствах и превращениях атомного ядра – сравнительно молодая наука. Еще в конце XIX в. ничего не было известно об атомном ядре: атом считался мельчайшей неделимой частичкой вещества. Открытие в 1895 г. катодных и рентгеновских лучей и в 1896 г. естественной радиоактивности показало, что в устройстве атомов всех элементов есть что-то общее. Все они, например, содержат и при известных условиях могут испускать электроны  $e$ , а самые тяжелые из них обладают свойствами  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -радиоактивности.

### *Историческая справка*

- 8 ноября 1895 года Вильгельм Рентген (первый в истории физики лауреат Нобелевской премии) открыл X – лучи (рентгеновское излучение).
- 1896 - первое явление в области ядерной физики (естественная радиоактивность).
- 1897 - открытие электрона.
- 1904 - Томпсон предложил модель атома («пудинговая модель»)
- 1911 - Резерфорд исследовал рассеяние  $\alpha$ - частиц
- 1919 - Астон открыл изотопы атомов ( $M_{ат}$  разные, но химические свойства одинаковые).
- 1919 - Резерфорд доказал, что в состав каждого атома входит ядро водорода протон.
- 1932 - открыт нейтрон (Чедвик).
- 1932 - Иваненко предложил протонно-нейтронную модель ядра.
- 1939 - Ган и Штрассман открыли цепную реакцию ядер урана
- 1942 – запущен первый ядерный реактор под руководством Э.Ферми.
- 1953 - Рейнес и Коуэн впервые зарегистрировали предсказанную теорией в 1931 году частицу – нейтрино.
- 1964 - Гелл-Ман, Цвейг выдвинули гипотезу о кварковой модели ядра.
- 1994 - открыт последний 6-й кварк ( $t$  - кварк).
- 10 февраля 2000 года - получена кварк - глюонная плазма.
- 21 июля 2000 года - в лаборатории Ферми возле Чикаго впервые зарегистрировали  $t$  нейтрино, после предсказания Паули. Всего существует 3 типа нейтрино: электронное, мюонное,  $t$ - нейтрино.
- К 2025 году открыли 118-й элемент таблицы Д. И. Менделеева. В настоящее время известно ~400 элементарных частиц.

Кварки и лептоны - истинно элементарные частицы. Таких частиц существует 3 типа: кварки, лептоны, переносчики взаимодействия (глюоны, фотоны, гравитоны). Одним из основных свойств всех элементарных частиц является их взаимодействие между собой.

Обычно различают 4 типа взаимодействия:

1. Сильное взаимодействие (ядерное). С помощью этого взаимодействия удерживаются в ядре протоны и нейтроны. Частицы, участвующие в сильном взаимодействии называются адроны.

Характерное время процессов взаимодействия в этом случае  $t \sim 10^{23}$  с. За счет сильного взаимодействия протоны притягиваются, а не отталкиваются согласно закону Кулона.

2. Электромагнитное взаимодействие существует между частицами, обладающими электрическим зарядом. С помощью электромагнитного взаимодействия объясняются упругие силы, силы трения, химическое взаимодействие и т.д. Характерное время взаимодействия  $t_{вз} \sim 10^{-20}$  с. Электромагнитное взаимодействие - дальнodelствующее.

3. Слабое взаимодействие. Этим типом взаимодействия объясняется  $\beta$  - распад атома. Характерное время взаимодействия в этом случае  $t \sim 10^{-6} - 10^{14}$  с. Частицы, участвующие в слабом взаимодействии также называются лептонами.

4. Гравитационное взаимодействие является универсальным для частиц, обладающих массой. Характерные расстояния  $R \sim 10^{-33}$  см.

Все типы взаимодействия отличаются по интенсивности. Самое сильное – это сильное взаимодействие.

**Основная часть:** Все атомные ядра можно разделить на стабильные и радиоактивные. Стабильные ядра остаются неизменными неограниченно долго, радиоактивные испытывают самопроизвольные превращения. Основными характеристиками стабильного ядра являются массовое число  $A$ , электрический заряд  $Z$ , масса  $M$  (и энергия связи), радиус  $R$ , спин  $I$ , магнитный момент, квадрупольный электрический момент, изотопический спин  $T$ , четность волновой функции  $P$ . Радиоактивные ядра дополнительно характеризуются типом радиоактивного превращения, периодом полураспада  $T_{1/2}$ , энергией испускаемых частиц и т.п.

Атомное ядро может находиться в различных энергетических состояниях. Состояние с наименьшей энергией называется основным, остальные возбужденными. Основное состояние стабильного ядра стационарно. Возбужденные состояния любого ядра (в том числе стабильного) нестационарны (испытывают  $\gamma$ -переход и др.).

В числе первых дадим понятие нуклона, как основного «кирпичика» атомного ядра.

**НУКЛОН** [лат. nucleus - ядро] – общее наименование для нейтронов и протонов - частиц, из которых построены все ядра атомов. Предполагается, что нуклон имеет два зарядовых состояния, одно из которых с положительным единичным электрическим зарядом называется **протон**, а второе электрически нейтральное называется **нейтрон**.

**Примеры:**

- Нуклон  $\equiv p$  – протон, стабильная частица с зарядом  $q = +e$  и с массой  $m_p c^2 \approx 938,2$  МэВ.
- Нуклон  $\equiv n$  – нейтрон, радиоактивная частица с временем жизни 16,9 мин, с зарядом  $q = 0$  и массой  $m_n c^2 \approx 939,5$  МэВ. Распадается по формуле



где  $\tilde{\nu}_e$  - электронное антинейтрино. При распаде нейтрона выполняются законы сохранения электрического заряда, барионного и лептонного квантовых чисел.

- Нуклон вне ядра и нуклон внутриядерный: их свойства неодинаковы. Это называется ЕМС-эффектом (European Meson Collaboration) - отличие размеров свободного нуклона и нуклона внутри ядра. Кроме того, известен и другой феномен - нейтрон свободный нестабилен, а в ядре - стабилен.

Далее дадим понятия ближайшим к ядру надструктурам – атому и нуклиду. Это тем более необходимо, т.к. понятие «нуклид» вообще вышло из ядерной физики и часто употребляется в радиоэкологии, радиационной безопасности и дозиметрии.

**АТОМ** [греч. ατομ - неделимый] - это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов, связанных между собой электромагнитным взаимодействием.

#### Примеры:

- В настоящее время уже открыты химические элементы (атомы) с  $Z$  от 1 до 118 (от водорода до оганесона).
- Атомы одного и того же химического элемента, ядра которых содержат различное число нейтронов, называются *нуклидами*.

**НУКЛИД**  ${}_N^AY_Z$  – это атом химического элемента  $Y$ , состоящий из ядра с определенным числом протонов  $Z$  и определенным числом нейтронов  $N$  и числа электронов, равного числу протонов, которые связываются с ядром посредством электромагнитных сил.

#### Примеры:

- Таким образом, масса нуклида  $M_Y$  равна массе ядра  $M(Z,N)$  плюс массе  $Z$  электронов  $Zm_e$  минус массовый эквивалент энергии связи  $B_e(Z)$  всех электронов в оболочках атома

$$M_Y = M(Z,N) + Zm_e - B_e(Z). \quad (2)$$

- Нуклидом является атом  ${}_1^1H_1$ , то есть ядро водорода плюс его орбитальный электрон.
- Атомы  ${}_8^{16}O_8$  и  ${}_8^{17}O_8$ , то есть изотопы шестнадцатого и семнадцатого кислорода плюс их орбитальные электроны.

Одной из интересных иллюстраций понятия «нуклид» может быть вопрос: «Правильна ли химическая формула воды  $H_2O$ ?». Корректный ответ на этот вопрос с позиций понятия «нуклид» - «Нет!». В самом деле, молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода, расположенных по линиям связи с кислородом под углом около  $104^\circ$ . В природной естественной смеси изотопов существуют три изотопа водорода ( ${}^1H$ ,  ${}^2H(D)$ ,  ${}^3H(T)$ ) и три изотопа кислорода ( ${}^{16}O$ ,  ${}^{17}O$ ,  ${}^{18}O$ ). Заметим, что концентрация трития до периода испытаний термоядерного оружия была ничтожно мала, а после этого периода – весьма заметна! Помещая последовательно в молекулу воды разные сочетания нуклидов водорода и кислорода, получим следующие правильные формулы воды (табл. 1).

Из этих формул видно, что формула  $H_2O$  совершенно не отражает истинного положения вещей, т.к. различные сочетания нуклидов разных типов дают совершенно разные физико-химические свойства полученного вещества, называемого обычно водой.

Таблица 1 – Химические нуклидные формулы природной элементарной воды

|    |                                                                 |          |     |                                                                 |         |     |                            |         |
|----|-----------------------------------------------------------------|----------|-----|-----------------------------------------------------------------|---------|-----|----------------------------|---------|
| 1. | $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$                                     | Питьевая | 7.  | $^3\text{H}_2^{16}\text{O}$<br>или<br>$\text{T}_2^{16}\text{O}$ | Ядовита | 13. | $^1\text{HT}^{16}\text{O}$ | Ядовита |
| 2. | $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$                                     | Питьевая | 8.  | $\text{T}_2^{17}\text{O}$                                       | Ядовита | 14. | $^1\text{HT}^{17}\text{O}$ | Ядовита |
| 3. | $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$                                     | Питьевая | 9.  | $\text{T}_2^{18}\text{O}$                                       | Ядовита | 15. | $^1\text{HT}^{18}\text{O}$ | Ядовита |
| 4. | $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$<br>или<br>$\text{D}_2^{16}\text{O}$ | Ядовита  | 10. | $^1\text{HD}^{16}\text{O}$                                      | Ядовита | 16. | $\text{DT}^{16}\text{O}$   | Ядовита |
| 5. | $\text{D}_2^{17}\text{O}$                                       | Ядовита  | 11. | $^1\text{HD}^{17}\text{O}$                                      | Ядовита | 17. | $\text{DT}^{17}\text{O}$   | Ядовита |
| 6. | $\text{D}_2^{18}\text{O}$                                       | Ядовита  | 12. | $^1\text{HD}^{18}\text{O}$                                      | Ядовита | 18. | $\text{DT}^{18}\text{O}$   | Ядовита |

Продолжим перечисление общих понятий ядерной физики.

**ЯДРО АТОМА**  $^{\text{A}}\text{X}_{\text{Z}}$  – это структура материи, представляющая собой микрочастицу, состоящую из нуклонов с различными зарядовыми состояниями (N нейтронов и Z протонов), связанных ядерными силами, то есть сильными взаимодействиями.

**Примеры:**

- Значение ядерных сил на расстояниях, порядка размеров ядра, т.е.  $10^{-13}$  см, или  $10^{-15}$  м, превосходит силы электрического отталкивания между положительно заряженными протонами примерно в десять тысяч раз.
- Ядра первого химического элемента водорода:  $^1\text{H}$  имеет  $Z=1$ ,  $N=0$ ; последующие изотопы  $^2\text{H}(\text{D})$ ,  $^3\text{H}(\text{T})$ ,  $^4\text{H}$ ,  $^5\text{H}$ , ... , сохраняя неизменным Z, наращивают последовательно число нейтронов каждый на единицу.
- Для тяжелых ядер:  $^{107}\text{Ag}$ ,  $Z = 47$ ,  $N = 60$ ;  $^{197}\text{Au}$ ,  $Z = 79$ ,  $N = 118$ .

Теперь дадим систему понятий, характеризующих состав ядра.

**ЗАРЯДОВОЕ ЧИСЛО ЯДРА Z (ПОРЯДКОВЫЙ НОМЕР ЯДРА)** – это количество протонов в ядре, то есть атомный номер химического элемента в периодической таблице Менделеева.

**Примеры:**

- Электрический заряд ядра q с зарядовым числом Z равен:  $q = Ze$ , где e - элементарный электрический заряд.
- В ядре  $\text{Na}_{11}$  зарядовое число  $Z = 11$ .
- У ядра  $\text{Sb}_{51}$   $Z = 51$ .

**МАССОВОЕ ЧИСЛО ЯДРА A** – это полное число нуклонов (Z протонов плюс N нейтронов) в ядре:  $A = Z + N$ .

**Примеры:** У ядра  $^1_0\text{H}_1$   $A = 1$ . У ядра  $^{107}_{60}\text{Ag}_{47}$   $A = 107$ . У ядра  $^{197}_{118}\text{Au}_{79}$ .  $A = 197$ .

**АТОМНАЯ ЕДИНИЦА МАССЫ аем** – это 1/12 часть массы ядра углерода  $^{12}\text{C}$

$$1 \text{ аем} = M_{^{12}\text{C}}/12 = (1,660531 \pm 0,000011) \cdot 10^{-24} \text{ г.} = 931,48 \text{ МэВ.} \quad (3)$$

**Примеры:**

- Атомная масса ядра  $^{12}\text{C}$  равна 12,000 000 000 аем; его масса в граммах равна  $M_{12\text{C}} = 12 \cdot 1,660 \cdot 10^{-24} = 1,992 \cdot 10^{-23}$  г.
- Энергетический эквивалент массы в 1 аем равен: 1 аем  $\equiv (931,4812 \pm 0,0052)$  МэВ; таким образом,  $M_{12\text{C}} = 12 \cdot 931,4812 = 11177,774$  МэВ.
- Масса протона равна  $m_p = 1,0078252$  аем  $= 1,673 \cdot 10^{-24}$  г  $= 938,770$  МэВ. Масса нейтрона  $m_n = 1,008665$  аем  $= (1,674920 \pm 0,000011) \cdot 10^{-24}$  г  $= 939,5527$  МэВ.

**МАССА ЯДРА  $M(N^AX_Z)$**  – это масса нуклида минус масса всех атомных электронов и плюс их суммарная энергия связи с ядром.

**Примеры:**

- Экспериментально измеряется масса нуклида. Однако почти вся масса нуклида сосредоточена в ядре, поэтому, пользуясь экспериментальными таблицами масс нуклидов, можно говорить о массе ядра

$$M(N^AX_Z) = M(N^AY_Z) - Zm_e + B_e(Z). \quad (4)$$

С точностью 0,05% для  $^1\text{H}_1$  и 0,02% для  $^{238}\text{U}_{92}$  можно считать массой ядра значение атомной массы соответствующего нуклида

$$M(N^AX_Z) = M(N^AY_Z). \quad (5)$$

- Масса нуклида  $^1\text{H}_1$  равна  $M(^1_0\text{H}_1) = 1,007825$  аем, что на 0,05% превышает массу протона (см. выше).
- Масса ядра  $^{12}\text{C}$  равна 12 аем.

**ИЗОТОПЫ** – ядра, имеющие одно и то же  $Z$ , при разных  $N$  и  $A$ .

**Примеры:**

- В области легких ядер:  $^{10}_5\text{B}_5$  и  $^{11}_5\text{B}_5$ .
- В области тяжелых ядер:  $^{205}_{123}\text{Pb}_{82}$  и  $^{208}_{126}\text{Pb}_{82}$ .
- В изотопическом ряду урана:  $^{235}_{143}\text{U}_{92}$  и  $^{238}_{146}\text{U}_{92}$ .

**ИЗОТОНЫ** – ядра, имеющие одно и то же  $N$ , при разных  $Z$  и  $A$ .

**Примеры:**

- $^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$  и  $^{42}_{20}\text{Ti}_{22}$ .
- $^{174}_{100}\text{W}_{74}$  и  $^{170}_{100}\text{Yb}_{70}$ .
- $^{222}_{136}\text{Rn}_{86}$  и  $^{228}_{136}\text{U}_{92}$ .

**ИЗОБАРЫ** – ядра, имеющие одно и то же  $A$ , при разных  $Z$  и  $N$ .

**Примеры:**

- $^7_4\text{Li}_3$  и  $^7_3\text{Be}_4$ .
- $^{70}_{40}\text{Zn}_{30}$  и  $^{70}_{38}\text{Ge}_{32}$ .
- $^{232}_{142}\text{Th}_{90}$  и  $^{232}_{140}\text{U}_{92}$ .

**ИЗОМЕРЫ** – возбужденные ядра с одинаковыми количествами протонов и нейтронов по сравнению с ядром в основном состоянии, но имеющие большое время жизни в возбужденном метастабильном энергетическом состоянии.

**Примеры:**

- Таким образом, изомер не является новым нуклидом; он обязательно переходит в основное состояние ядра в соответствии со своим периодом полураспада.
- Гафний-изомер  $^{181m}\text{Hf}$ ;  $T_{1/2} = 45,00$  дней. Этого вещества нет на Земле, но в ОИЯИ (г. Дубна) его на пучке ускорителя наработали в заметных количествах.
- $^{69m}_{39}\text{Zn}_{30}$ ,  $T_{1/2} = 46,5$  ч.;  $^{115*}_{49}\text{In}_{49}$  уровень 335 кэВ со спином  $\frac{1}{2}^-$ .

**ЧЕТНО-ЧЕТНЫЕ ЯДРА** – это ядра, состоящие из четного числа протонов  $Z = 0, 2, 4, \dots$  и четного числа нейтронов  $N = 0, 2, 4, \dots$ .

**Примеры:**

- $^{12}_6\text{C}_6$ .
- $^{44}_{24}\text{Ca}_{20}$ .
- $^{142}_{82}\text{Nd}_{60}$ .

**НЕЧЕТНО-НЕЧЕТНЫЕ ЯДРА** – это ядра, состоящие из нечетного числа протонов  $Z = 1, 3, 5, \dots$  и нечетного числа нейтронов  $N = 1, 3, 5, \dots$ .

**Примеры:**

- $^{10}_5\text{B}_5$ .
- $^{58}_{31}\text{Co}_{27}$ .
- $^{208}_{125}\text{Bi}_{83}$ .

**ЧЕТНО-НЕЧЕТНЫЕ ЯДРА** – это ядра, состоящие из четного числа протонов  $Z = 0, 2, 4, \dots$  и нечетного числа нейтронов  $N = 1, 3, 5, \dots$ .

**Примеры:**

- $^{13}_7\text{C}_6$ .
- $^{57}_{31}\text{Fe}_{26}$ .
- $^{135}_{79}\text{Ba}_{56}$ .

**НЕЧЕТНО-ЧЕТНЫЕ ЯДРА** – это ядра, состоящие из нечетного числа протонов  $Z = 1, 3, 5, \dots$  и четного числа нейтронов  $N = 0, 2, 4, \dots$ .

**Примеры:**

- $^{15}_8\text{N}_7$ .
- $^{65}_{36}\text{Cu}_{29}$ .
- $^{175}_{104}\text{Lu}_{71}$ .

В любой структуре материи можно выделить ряд ее физических параметров, которые основаны только на законах сохранения (энергии, импульса, числа частиц и т.п.). Т.е. эти параметры никак не

связаны с внутренним составом, структурой и динамикой внутреннего движения, т.е. со всем тем, что принято называть *физической моделью*. Применительно к ядерной физике перечислим эти *безмодельные параметры* и дадим формулировки соответствующих понятий.

**ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ ЯДРА** – это энергия, необходимая для полного расщепления ядра на отдельные, составляющие его, протоны и нейтроны, то есть энергия, равная работе по удалению их на бесконечность друг от друга

$$\Delta W = \{[ZM_p + NM_n] - M(Z,N)\}c^2. \quad (6)$$

### Примеры:

- Так как реально измеряются не массы ядер, а массы атомов, то строгую формулу для  $\Delta W$  лучше переписать в виде

$$\Delta W = \{ [ZM_H + NM_n] - M_{ат}(Z,N) \} c^2. \quad (7)$$

Удивительные, обнаруженные экспериментально, ядерные свойства позволили полуэмпирически вывести формулу для вычисления энергии связи – *формулу Вейцеккера*

$$\varepsilon(A) = a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 Z^2 A^{-1/3} - a_4 \frac{(A - 2Z)^2}{A} - a_5 \frac{\delta}{A^{3/4}}, \quad (8)$$

где  $a_1=15,75$  МэВ – коэффициент объемной энергии связи;  $a_2=17,8$  МэВ – коэффициент поверхностной энергии связи;  $a_3=0,710$  МэВ – коэффициент кулоновской энергии связи;  $a_4=23,7$  МэВ – коэффициент симметрической энергии связи;  $a_5= -34$  МэВ – коэффициент спаривательной энергии связи. Ясно, что, имея 5 свободных подгоночных параметров в формуле, можно идеально подогнать расчетные энергии связи к экспериментальным. Те из физических взаимодействий, которые не вошли в формулу, будут просто перенормированы в указанных пяти коэффициентах.

Физический смысл каждого члена в формуле Вейцеккера следующий. Коэффициент  $a_1$  учитывает *свойство короткодействия* ядерных сил; само же понятие о короткодействии исторически получено из экспериментальных фактов. А именно, первое

$$E_{св} \approx 8 \text{ МэВ/нуклон} \approx \text{const}; \quad (9)$$

Второе, *плотность вещества ядра*

$$\rho \approx 0,137 \text{ г/Ферми}^3 \approx \text{const}. \quad (10)$$

Коэффициент  $a_2$  учитывает *свойство несжимаемости* ядерной материи, делающее ядро похожим на каплю жидкости. При этом энергия связи объемная должна уменьшиться на величину поверхности ядерной капли. Коэффициент  $a_3$  учитывает очевидное *свойство электростатического отталкивания* протонов внутри ядра. Коэффициент  $a_4$  учитывает *свойство отклонения* числа протонов от числа нейтронов в ядре. Физическая природа уменьшения энергии связи для ядер с  $Z \neq N$  до сих пор не ясна. Коэффициент  $a_5$  учитывает *эффект спаривания* пар протонов и пар нейтронов, т.е. связан с *эффектом четности-нечетности* барионного числа (барионного заряда).

**УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ  $\varepsilon$**  – это величина, равная средней энергии связи данного ядра, приходящейся на один нуклон

$$\varepsilon = \Delta W/A. \quad (11)$$

**Примеры:**

- Удельная энергия связи дейтрона  ${}^2\text{H}_1$  равна  $\varepsilon = 2,224 \text{ МэВ}/2 \text{ нуклона} = 1,112 \text{ МэВ/нуклон}$ .
- Удельная энергия связи  ${}^{238}\text{U}_{92}$  равна  $\varepsilon = 1801,652 \text{ МэВ}/238 \text{ нуклонов} = 7,670 \text{ МэВ/нуклон}$ .
- Функция  $\varepsilon(A)$  имеет максимум в районе средних масс. Этот экстремум и дает физические основания для термоядерной и ядерной энергетики.

**ИЗБЫТОК МАССЫ ЯДРА  $\Delta$**  - это разность между массой ядра в атомных единицах массы  $M$  и его массовым числом  $A$

$$\Delta = M - A. \quad (12)$$

**Примеры:**

- Реально избыток массы определяется как разность между экспериментально определенной массой атома (нуклида) и массовым числом; например, избыток массы нейтрона  $\Delta_n \equiv \Delta(0,1) = (1,008665 - 1) \text{ ае м} \times 931,4812 \text{ МэВ/ае м} = 8,071 \text{ МэВ}$ ; избыток массы протона  $\Delta_p \equiv \Delta(1,0) = (1,007825 - 1) \text{ ае м} \times 931,4812 \text{ МэВ/ае м} = 7,289 \text{ МэВ}$ ; избыток массы дейтрона  $\Delta_d \equiv \Delta(1,2) = (2,014102 - 2) \text{ ае м} \times 931,4812 \text{ МэВ/ае м} = 13,135 \text{ МэВ}$ .
- Масса нуклида (ядра) очень просто выражается через массовое число  $A$  и избыток массы данного ядра  $\Delta(Z,A)$ 
$$M(Z,A) \equiv M(Z,N) = A + \Delta(Z,A). \quad (13)$$
- избыток массы изотопа урана  ${}^{238}\text{U}_{92}$   $\Delta_U \equiv \Delta(92,238) = (238,050812 - 238) \text{ ае м} \times 931,4812 \text{ МэВ/ае м} = 47,328 \text{ МэВ}$ .

**Заключение:**

Ядерная физика – это фундаментальная область знаний, лежащая в основе современных представлений о материи и взаимодействиях. С момента открытия радиоактивности и структуры атомного ядра человечество прошло путь от первых моделей атома до квантово-полевых теорий элементарных частиц. Мы рассмотрели ключевые понятия и параметры, характеризующие атомное ядро, включая нуклоны, изотопы, изобары, изомеры, а также ядерные взаимодействия и энергию связи. Понимание этих основ необходимо не только для дальнейшего изучения физики, но и для прикладных задач – от медицины и экологии до энергетики и обороны. Таким образом, ядерная физика – это не только теория, но и основа высокотехнологического будущего.

**Контрольные вопросы:**

1) Какие типы фундаментальных взаимодействий существуют в природе и какое из них удерживает протоны и нейтроны в атомном ядре?

- 2) Чем отличаются изотопы, изобары, изотоны и изомеры друг от друга? Приведите примеры.
- 3) Каковы основные физические характеристики стабильных и радиоактивных ядер?
- 4) Что такое нуклид и как он отличается от атома и изотопа?
- 5) В чём заключается физический смысл членов формулы Вейцеккера для энергии связи ядра?
- 6) Докажите, что энергия связи атомного ядра может быть выражена через массу атома согласно формуле (7).

**Список использованных источников:**

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 384 с.
3. Кислов, А. Н. Атомная и ядерная физика: учеб. пособи. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 271 с.
4. Черняев А.П., Белоусов А.В., Лыкова Е.Н. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. – М.: ООП физического факультета МГУ, 2019. – 104 с.
5. Fabjan C.W., Schopper H. Particle Physics Reference Library. – Springer Cham, 2020. – 1078 p.
6. Бекман И.Н. Ядерная индустрия. – М.: МГУ. – <https://profbeckman.narod.ru/NI.htm>