КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

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

Алматы

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 α-, β- и γ-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 α- 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 - дальнодействующее.

3. Слабое взаимодействие. Этим типом взаимодействия объясняется β - 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 γ-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 ≡ **p** – протон, стабильная частица с зарядом q = + e и с массой $m_p c^2 \approx 938{,}2$ МэВ.
- Нуклон **≡ 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

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e, \qquad (1)$$

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 EMC-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 оганесон).
- Атомы одного и того же химического элемента, ядра которых содержат различное число нейтронов, называются *нуклидами*.

НУКЛИД $_{N}{}^{A}\mathbf{Y}_{Z}$ **–** 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

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

- Нуклидом является атом $_0{}^1H_1$, то есть ядро водорода плюс его орбитальный электрон.
- Атомы $_8{}^{16}O_8$ и $_9{}^{17}O_8$, 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°. В природной естественной смеси изотопов существуют три изотопа водорода (^{1}H, ^{2}H(D), ^{3}H(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.	$^{1}H_2{}^{16}O$	Питьевая	7.	$^{3}H_2{}^{16}O$ или $T_2{}^{16}O$	Ядовита	13.	$^{1}HT^{16}O$	Ядовита
2.	$^{1}H_2{}^{17}O$	Питьевая	8.	$T_2{}^{17}O$	Ядовита	14.	$^{1}HT^{17}O$	Ядовита
3.	$^{1}H_2{}^{18}O$	Питьевая	9.	$T_2{}^{18}O$	Ядовита	15.	$^{1}HT^{18}O$	Ядовита
4.	$^{2}H_2{}^{16}O$ или $D_2{}^{16}O$	Ядовита	10.	$^{1}HD^{16}O$	Ядовита	16.	$DT^{16}O$	Ядовита
5.	$D_2{}^{17}O$	Ядовита	11.	$^{1}HD^{17}O$	Ядовита	17.	$DT^{17}O$	Ядовита
6.	$D_2{}^{18}O$	Ядовита	12.	$^{1}HD^{18}O$	Ядовита	18.	$DT^{18}O$	Ядовита

Продолжим перечисление общих понятий ядерной физики.

ЯДРО АТОМА $_N{}^AX_Z$ – 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}H имеет Z=1, N=0; последующие изотопы $^{2}H(D)$, $^{3}H(T)$, ^{4}H, ^{5}H, … , сохраняя неизменным Z, наращивают последовательно число нейтронов каждый на единицу.
- Для тяжелых ядер: ^{107}Ag, Z = 47, N = 60; ^{197}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 Na_{11} зарядовое число Z = 11.
- У ядра 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 $_0{}^1H_1$ A = 1. У ядра $_{60}{}^{107}Ag_{47}$ A = 107. У ядра $_{118}{}^{197}Au_{79}$. A = 197.

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

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

Примеры:

- Атомная масса ядра ^{12}C равна 12,000 000 000 аем; его масса в граммах равна $M_{12C} = 12 \bullet 1{,}660 \bullet 10^{-24} = 1{,}992 \bullet 10^{-23}$ г.
- Энергетический эквивалент массы в 1 аем равен: 1 аем ≡ (931,4812 ± 0,0052) МэВ; таким образом, $M_{12C} = 12 \bullet 931{,}4812 = 11177{,}774$ МэВ.
- Масса протона равна m_p = 1,0078252 аем = $1{,}673 \bullet 10^{-24}$ г = 938,770 МэВ. Масса нейтрона m_n = 1,008665 аем = $(1{,}674920 \pm 0{,}000011) \bullet 10^{-24}$ 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 $^1H_1$ и 0,02% для $^{238}U_{92}$ можно считать массой ядра значение атомной массы соответствующего нуклида

$$M(_N{}^AX_Z) = M(_N{}^AY_Z). \quad (5)$$

- Масса нуклида $^1H_1$ равна $M(_0{}^1H_1)$ = 1,007825 аем, что на 0,05% превышает массу протона (см. выше).
- Масса ядра ^{12}C равна 12 аем.

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

Примеры:

- В области легких ядер: $^{10}{}_5B_5$ и $^{11}{}_6B_5$.
- В области тяжелых ядер: $^{205}{}_{123}Pb_{82}$ и $^{208}{}_{126}Pb_{82}$.
- В изотопическом ряду урана: $^{235}{}_{143}U_{92}$ и $^{238}{}_{146}U_{92}$.

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

Примеры:

- $^{40}{}_{20}Ca_{20}$ и $^{42}{}_{20}Ti_{22}$.
- $^{174}{}_{100}W_{74}$ и $^{170}{}_{100}Yb_{70}$.
- $^{222}{}_{136}Rn_{86}$ и $^{228}{}_{136}U_{92}$.

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

Примеры:

- $^7{}_4Li_3$ и $^7{}_3Be_4$.
- $^{70}{}_{40}Zn_{30}$ и $^{70}{}_{38}Ge_{32}$.
- $^{232}{}_{142}Th_{90}$ и $^{232}{}_{140}U_{92}$.

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}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.
- $^{69m}{}_{39}Zn_{30}$, $T_{1/2}$ = 46,5 ч.; $^{115*}In_{49}$ уровень 335 кэВ со спином $½^-$.

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

Примеры:

- $^{12}{}_{6}C_{6}$.
- $^{44}{}_{24}Ca_{20}$.
- $^{142}{}_{82}Nd_{60}$.

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

Примеры:

- $^{10}{}_{5}B_{5}$.
- $^{58}{}_{31}Co_{27}$.
- $^{208}{}_{125}Bi_{83}$.

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

Примеры:

- $^{13}{}_{7}C_{6}$.
- $^{57}{}_{31}Fe_{26}$.
- $^{135}{}_{79}Ba_{56}$.

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

Примеры:

- $^{15}{}_{8}N_{7}$.
- $^{65}{}_{36}Cu_{29}$.
- $^{175}{}_{104}Lu_{71}$.

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 *физическойой 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

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

Примеры:

- Так как реально измеряются не массы ядер, а массы атомов, то строгую формулу для ΔW лучше переписать в виде

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

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

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

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 Вейцзеккера следующий. Коэффициент a_1 учитывает *свойство короткодействия* ядерных сил; само же понятие о короткодействии исторически получено из экспериментальных фактов. А именно, первое

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

Второе, *плотность вещества ядра*

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

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 ε – это величина, равная средней энергии связи данного ядра, приходящейся на один нуклон

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

Примеры:

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

ИЗБЫТОК МАССЫ ЯДРА Δ - это разность между массой ядра в атомных единицах массы M и его массовым числом A

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

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)аем x 931,4812 МэВ/аем = 8,071 МэВ; избыток массы протона $\Delta_p \equiv \Delta(1,0)$ = (1,007825 – 1)аем x 931,4812 МэВ/аем = 7,289 МэВ; избыток массы дейтрона $\Delta_d \equiv \Delta(1,2)$ = (2,014102 – 2)аем x 931,4812 МэВ/аем = 13,135 МэВ.
- Масса нуклида (ядра) очень просто выражается через массовое число A и избыток массы данного ядра Δ(Z,A)

$$M(Z,A) \equiv M(Z,N) = A + \Delta(Z,A). \qquad (13)$$

- избыток массы изотопа урана $^{238}U_{92}$ $\Delta_U \equiv \Delta(92,238)$ = (238,050812 – 238)аем x 931,4812 МэВ/аем = 47,328 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 Вейцзеккера 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