КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

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

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Основные ядерно-физические термины и определения.

Лекция 2. Общие физико-химические свойства радиоактивных соединений.

Лекция 3. Радиоактивность и закон радиоактивного распада.

Лекция 4. Основы ядерных реакций.

Лекция 5. Радиоактивное мечение химических соединений.

Лекция 6. Производство радионуклидов на циклотроне.

Лекция 7. Производство радионуклидов на реакторе.

Лекция 8. Применение медицинских генераторов радионуклидов.

Лекция 9. Контроль качества радиоактивных изотопов.

Лекция 10. Применение радиоактивных изотопов.

Лекция 11. Радиационная безопасность и обращение с радиоактивными материалами.

Лекция 3. Радиоактивность и закон радиоактивного распада.

Цель лекции: сформировать у обучающихся понимание количественных характеристик радиоактивных процессов (постоянная распада, период полураспада, активность) и их практического применения в науке, технике и медицине.

Введение: Радиоактивность – одно из фундаментальных свойств вещества, связанное с нестабильностью некоторых атомных ядер. Она проявляется в самопроизвольном превращении одного химического элемента в другой, сопровождающемся испусканием ионизирующего излучения (частиц и/или квантов γ-излучения). Это явление является чисто ядерным – оно не зависит от химического состояния вещества, температуры, давления и других внешних факторов. Радиоактивный распад – квантово-механический процесс, обусловленный туннельным эффектом и внутренней перестройкой ядерных частиц.

Основная часть:

Историческое открытие радиоактивности:

- 1896 год – Анри Беккерель. Исследуя флуоресценцию урановых солей, он случайно обнаружил их способность самопроизвольно излучать невидимые лучи, способные засвечивать фотопластинку. Это стало первым наблюдением естественной радиоактивности.
- 1898 год – Пьер и Мария Кюри. Они выделили новые элементы – полоний (Po) и радий (Ra), проявившие активность, превышающую активность урана в сотни раз. Мария Кюри ввела термин «радиоактивность».
- 1902-1903 годы – Эрнест Резерфорд и Фредерик Содди разработали теорию радиоактивного распада и впервые установили, что активность вещества экспоненциально убывает со временем. Они также предложили закон радиоактивного распада, заложив основу статистического описания процессов в микромире.

Классификация радиоактивных превращений:

Существуют следующие типы распадов:

- α-распад: Ядро испускает α-частицу - ядро гелия ^{4}He. Массовое число уменьшается на 4, заряд на 2. Энергия вылетающдих α-частиц составляет от 4 до 9 МэВ. Скорость α-распада определяется вероятностью туннелирования α-частицы через потенциальный барьер ядра.
- β^--распад: Нейтрон превращается в протон с испусканием электрона и антинейтрино:

$$n \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_\mathrm{e}$$

На уровне ядра это можно сформулировать как ${}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A}Y_{Z+1} + e^{-} + \bar{\nu}_e$. Спектр β-частиц непрерывен (в отличие от α-частиц), что объясняется выносом части энергии антинейтрино.

- β^+-распад: Протон превращается в нейтрон $\mathrm{p} \rightarrow n + \mathrm{e}^+ + \nu_\mathrm{e}$.

На уровне ядра: ${}^{A}X_{Z} \rightarrow {}^{A}Y_{Z-1} + e^{+} + \nu_e$. Процесс возможен, если масса исходного ядра превышает массу дочернего не менее чем на 2 массы электрона.

- γ-излучение: Возбуждённое ядро переходит в состояние с меньшей энергией, испуская γ-квант: ${}^{A}X^{*}_{Z} \rightarrow {}^{A}X_{Z} + \gamma$. Энергия γ-квантов составляет от нескольких кэВ до десятков МэВ. Процесс сопровождает почти все виды радиоактивных превращений.

Каждое отдельное ядро распадается случайно, то есть невозможно предсказать момент распада конкретного атома. Однако для больших совокупностей ядер поведение становится статистически предсказуемым. Вероятность того, что ядро распадётся в течение малого интервала времени dt, равна: $d\mathrm{P} = \lambda\, dt$, где λ - постоянная распада, имеющая размерность [время]$^{-1}$.

Пусть $N(t) -$ число нераспавшихся ядер в момент времени t. Количество распавшихся ядер за малый промежуток времени dt пропорционально числу нераспавшихся ядер:

$$dN = -\lambda N\, dt$$

Интегрируем:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda\, dt$$

$$\Rightarrow \ln N = -\lambda t + C$$

При $t = 0$, $N = N_0$, следовательно, $C = \ln N_0$.

Отсюда:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Это и есть закон радиоактивного распада.

При работе с радиоактивность используются следующие характеристики ядер:

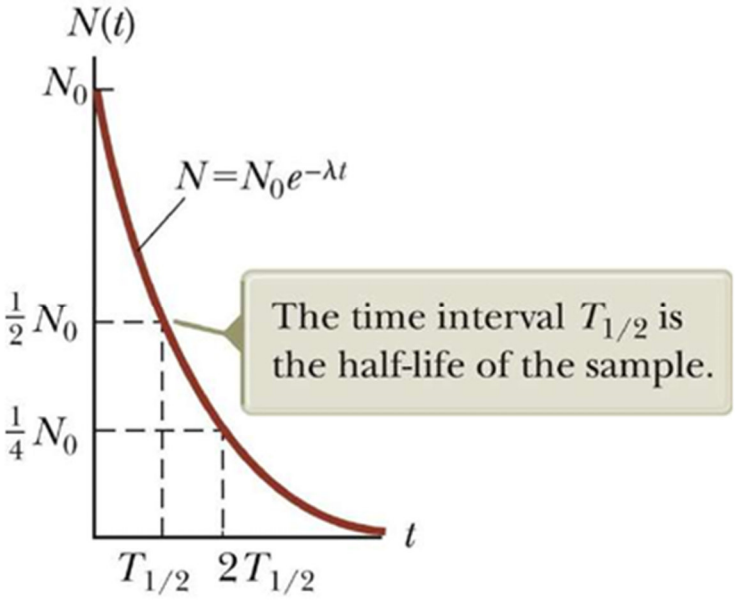
1_Период полураспада: Время, за которое число нераспавшихся ядер уменьшается вдвое:

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$$

Подставляем в закон распада получаем:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

$$T_{1/2} \approx \frac{0.693}{\lambda}$$



2_Среднее время жизни: Определяется как математическое ожидание времени существования ядра:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

и характеризует «среднюю продолжительность жизни» радиоактивных ядер.

3_Активность источника A – число распадов в единицу времени:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

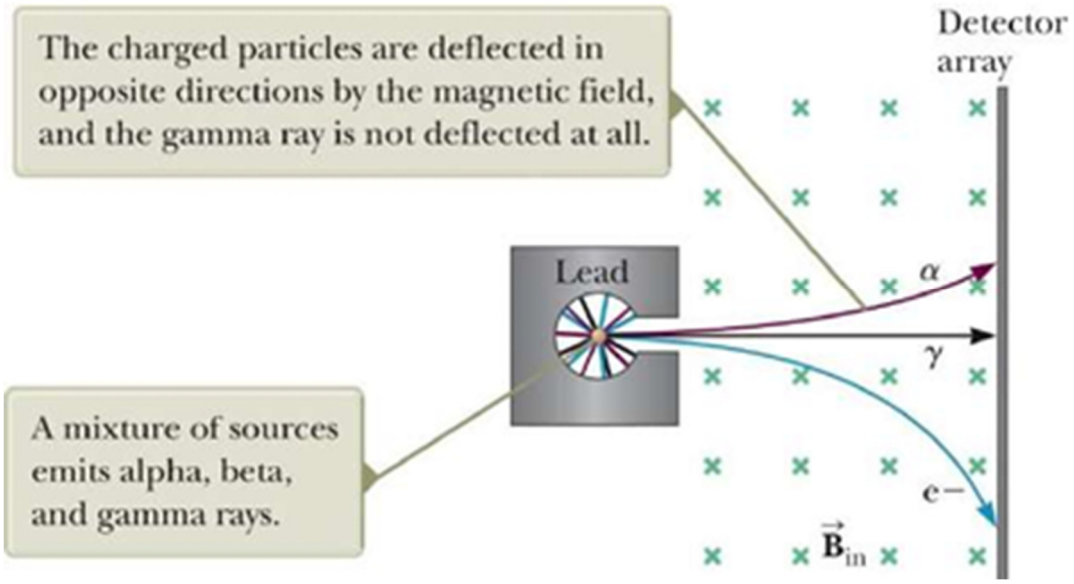
Единицы измерения: Беккерель (Бк): 1 Бк = 1 распад/с; Кюри (Ки): 1 Ки $= 3.7 \times 10^{10}$ Бк.

Энергия, выделяющаяся при распаде, связана с разностью масс исходного и конечного состояния:

$$Q = (m_{\text{исх}} - m_{\text{прод}})\, c^2$$

- Для α-распада $Q \approx 4 - 9$ МэВ
- Для β-распада $Q \approx 0.1$ - 3 МэВ
- Для γ-переходов $Q \approx 10 - 1000$ кэВ

Эта энергия выделяется в виде кинетической энергии частиц и излучения, а также переходит в тепло.



Для измерения активности и постоянной распада используют: счётчики Гейгера–Мюллера; ионизационные камеры; сцинтилляционные детекторы; полупроводниковые спектрометры.

Ядерная медицина – это раздел медицинской физики, использующий радиоактивные изотопы и ионизирующее излучение для: диагностики заболеваний (визуализация органов и тканей); терапии (лечебное воздействие на патологические клетки); мониторинга метаболических процессов. Основу всех этих методов составляет закон радиоактивного распада, который описывает изменение активности радиофармпрепарата во времени.

Для любого радиоактивного препарата активность уменьшается со временем по закону:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

где A_0 – начальная активность, λ – постоянная распада, t – время с момента приготовления препарата.

Этот закон важен при:

- расчёте дозы радиофармпрепарата для пациента;
- определении времени между приготовлением и введением;
- учёте остаточной активности при хранении.

Производство РН пропорционально числу атомов мишени N_M, плотности потока падающих частиц Φ и сечению реакции σ. Результирующая скорость изменения числа радиоактивных ядер продукта $N_П$ во время облучения равна:

$$\frac{dN_{\text{П}}}{dt} = N_{\text{М}} \cdot \Phi \cdot \sigma - \lambda \cdot N_{\text{П}}.$$

Активность продукта ***Ап*** к концу облучения равна

$$A_{\text{П}} = N_{\text{М}} \cdot \Phi \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}),$$

$$N_{\text{М}} = \frac{m}{M} \cdot x \cdot N_{\text{А}},$$

где m – масса мишени, N_A – число Авогадро, M – молярная масса вещества мишени, x – относительное содержание изотопа, Φ – плотность потока падающих частиц, σ – сечение реакции; λ – постоянная распада продукта, t – время облучения.

Если время облучения будет много больше периода полураспада радионуклида, тогда $(1\text{-}e^{-\lambda t})$ стремится к 1. Это означает, что скорость образования и скорость распада продукта равны, т. е. реакция достигла «насыщения».

Уравнение производства радионуклидов может иметь одну из двух форм в зависимости от того, облучается ли мишень изотропно в ядерном реакторе или мононаправленным пучком ускорителя. Наработанная активность РН для тонкой мишени равна

$$A_{\text{П}} = n \cdot I \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}),$$

$$n = \frac{\rho}{\text{М}} \cdot x \cdot N_A \cdot \Delta l,$$

где ρ – плотность материала мишени, Δl – толщина мишени, I – ток пучка (число бомбардирующих частиц в единицу времени).

Наработанная активность РН для толстой мишени равна

$$A_{\text{П}} = n \cdot I \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}) \int_{E_f}^{E_i} \frac{\sigma(E)}{dE / dx} dE,$$

где $\square_i$ и $\square_f$ – начальная и конечная энергия частицы, соответственно.

Выбор времени облучения на примере изотопа ^{18}F



Зависимость радиоактивного изотопа ^{18}F (мКи) от времени облучения (ч) при облучении тяжелой воды протонами.

Заключение:

Радиоактивность – это фундаментальное свойство вещества, связанное с самопроизвольным превращением атомных ядер и испусканием ионизирующего излучения. Её открытие и исследование Беккерелем, Кюри и Резерфордом заложило основу современной ядерной физики. Закон радиоактивного распада позволяет описывать изменение активности вещества во времени и используется во многих областях науки и техники. Понимание природы распада и его характеристик – периода полураспада, средней жизни и активности – имеет важное значение при работе с радионуклидами. Сегодня радиоактивность широко применяется в медицине, энергетике и промышленности, оставаясь мощным инструментом научного и практического прогресса.

Контрольные вопросы:

1. Что называют радиоактивностью и в чём состоит её физическая природа?
2. Как формулируется закон радиоактивного распада и что означает постоянная распада λ?
3. Что такое период полураспада и как он выражается через λ?
4. Почему β-спектр частиц является непрерывным, а α-спектр – дискретным?
5. В чём заключается практическое значение закона радиоактивного распада в ядерной медицине?

Список использованных источников:

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.

2. Кислов, А. Н. Атомная и ядерная физика: учеб. пособи. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 271 с.

3. Gopal S. Fundamentals of Nuclear Pharmacy. – Springer International Publishing, 2018. – 428 p.

4. Борисенко А. Ядерная медицина. Том 1. – Алматы: ИЯФ, 2006. – 200 с.

5. Cherry S., Sorenson J., Phelps M. Physics in Nuclear Medicine. – Elsevier Inc., 2012. – 523 p.

6. Денисов Е. И. Производство радиоактивных изотопов для медицинского применения: учебное пособие. – Издательство Уральского университета, 2017. – 94 с.