КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ
Физико-технический факультет
Кафедра теоретической и ядерной физики

«Основы производства радиоактивных изотопов»

# Лекция 2. Общие физико-химические свойства радиоактивных соединений.

*и.о. доцента кафедры*
*теоретической и ядерной физики*
*PhD Зарипова Ю.А.*

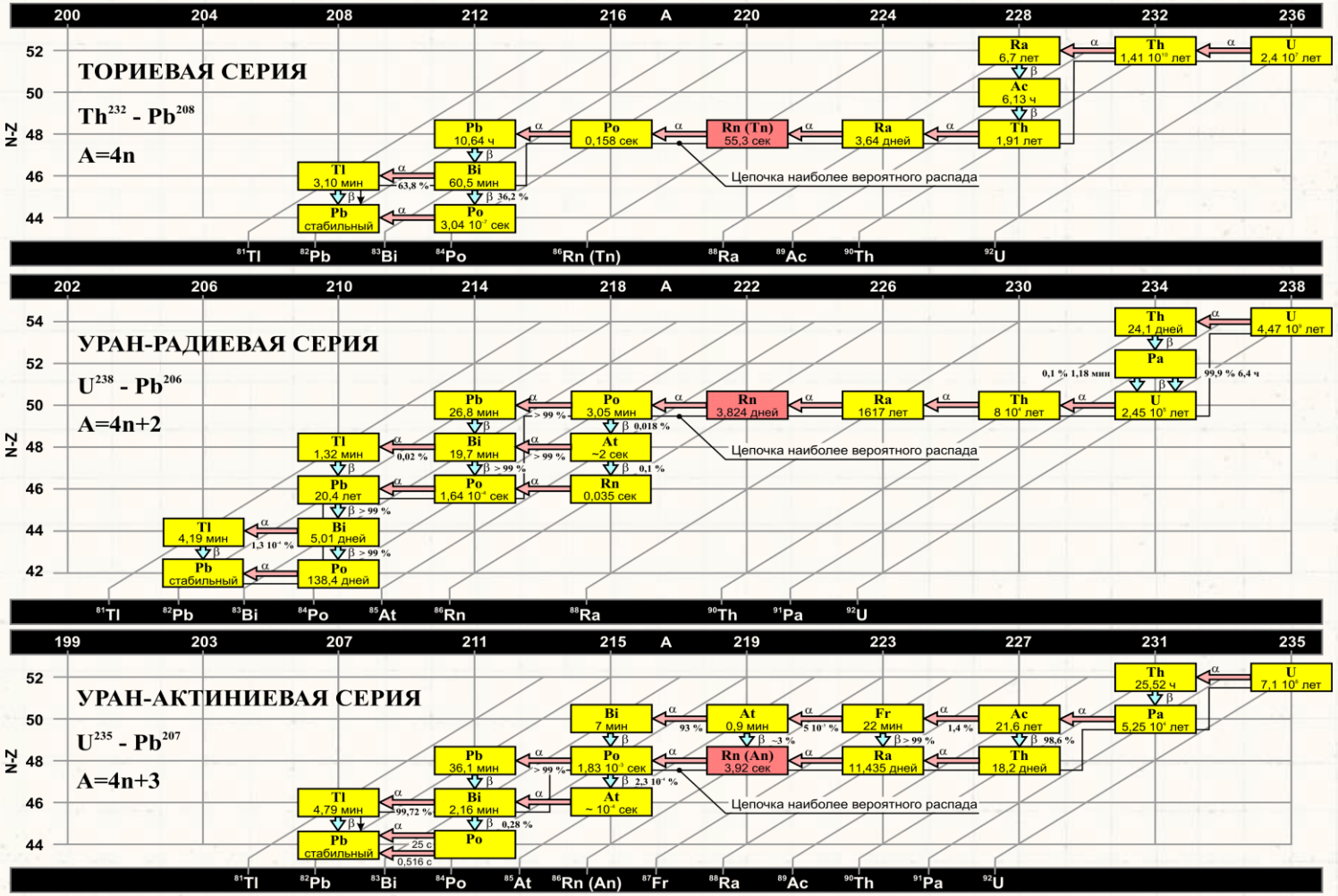
**Цель лекции:** сформировать представление об основных физико-химических свойствах радиоактивных соединений, раскрыть взаимосвязь между радиоактивностью, изотопным составом и структурой вещества, а также охарактеризовать влияние ионизирующего излучения на физические и химические свойства материалов.

**Результаты обучения:**

*По завершении лекции обучающийся будет способен:*

1. Объяснять особенности радиоактивных соединений и различать естественные и искусственные радиоактивные элементы.
2. Характеризовать изотопный эффект и его влияние на физико-химические свойства веществ.
3. Объяснять процессы тепловыделения, радиолиза и радиационной деструкции под действием ионизирующего излучения.
4. Различать изотопно-замещенные и изотопно-меченые соединения.
5. Описывать основные способы получения радионуклидов и направления их практического применения.

# Естественные природные радиоактивные ряды



# Изотопный эффект

Изотопный эффект – проявление различий свойств химических веществ, отличающихся по составу изотопов.

**Изотопный эффект зависит от трех факторов:**

- **MMI (mass-moment of inertia)** – отражает вклад в изотопный эффект энергии поступательного движения и вращения молекулы или ее части.
- **ZPE (zero-point energy)** – отражает вклад в изотопный эффект энергии нулевых колебаний изотопных форм для исходной молекулы.
- **EXC (excited vibrational states)** – отражает вклад в изотопный эффект энергии возбужденных колебательных состояний.

| Радионуклид /основной нуклид элемента | Отношение масс |
|---|---|
| $^{3}H/^{1}H$ | 3 |
| $^{11}C/^{12}C$ | 0,917 |
| $^{14}C/^{12}C$ | 1,167 |
| $^{18}F/^{19}F$ | 0,947 |
| $^{32}P/^{31}P$ | 1,032 |
| $^{33}P/^{31}P$ | 1,065 |
| $^{45}Ca/^{40}Ca$ | 1,125 |
| $^{123}I/^{127}I$ | 0,969 |
| $^{131}I/^{127}I$ | 1,031 |
| $^{235}U/^{238}U$ | 0,987 |

# Изотопный эффект

Молекулы, имеющие разный изотопный состав, отличаются массой. Это отражается на химических и физических свойствах вещества. Например,

| | $^1H_2O$ (обычная вода) | $^2H_2O$ (тяжелая вода) |
|---|---|---|
| **Температура плавления** | **0°C** | **3,8°C** |
| **Температура кипения** | **100°C** | **101,4°C** |
| **Плотность при 25°C** | **0,997 г/см$^3$** | **1,104 г/см$^3$** |

Различие свойств молекул с разным изотопным составом называется изотопным эффектом (ИЭ). Так как отношение масс изотопов уменьшается с увеличением атомной массы элементов, ИЭ наиболее велики для изотопов легких элементов.

- Термодинамический ИЭ (ТИЭ) отражает различие в константах равновесия.
- Кинетический ИЭ (КИЭ) отражает различие в скоростях процессов (скорости реакции).

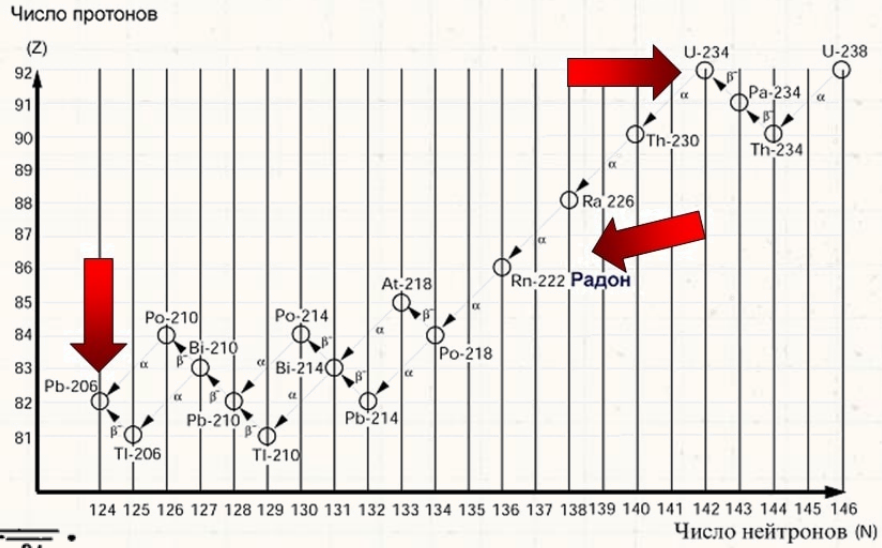
$$HDS + H_2O \leftrightarrow H_2S + HDO$$

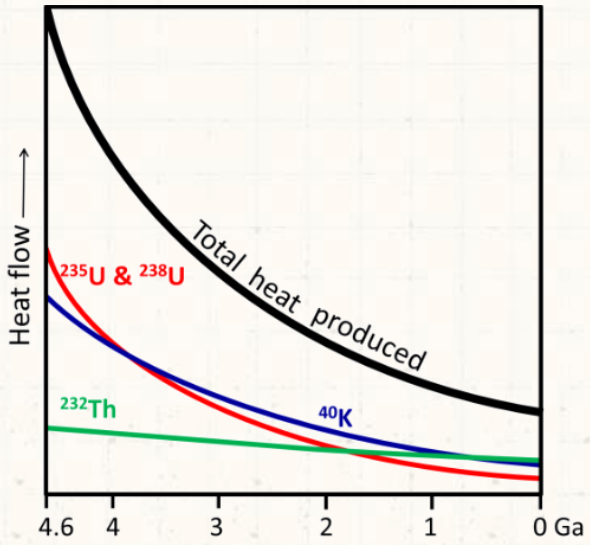
# Тепловыделение

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$u(z, t) = T_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{z}{2\sqrt{a^2 t}}} e^{-\alpha^2} d\alpha.$$

$$\left.\frac{\partial u}{\partial z}\right|_{z=0} = \left.\frac{T_0}{\sqrt{\pi}\sqrt{a^2 t}} e^{-\frac{z^2}{4a^2 t}}\right|_{z=0} = \frac{T_0}{\sqrt{\pi}\sqrt{a^2 t}}.$$



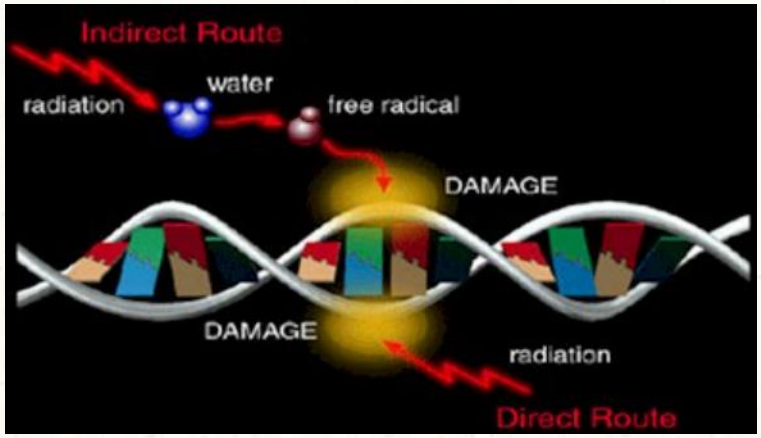



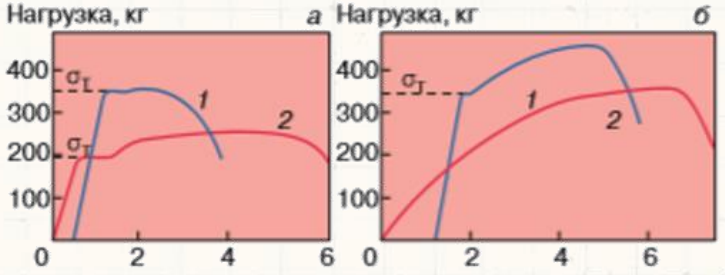

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + f \qquad \left(f = \frac{A}{c\rho}\right),$$

$$u(z) = \begin{cases} \frac{A}{k}\left(Hz - \frac{z^2}{2}\right), & 0 \leqslant z \leqslant H, \\ \frac{A}{k}\frac{H^2}{2}, & z \geqslant H, \end{cases}$$

# Влияние ионизирующего излучения приводит к:

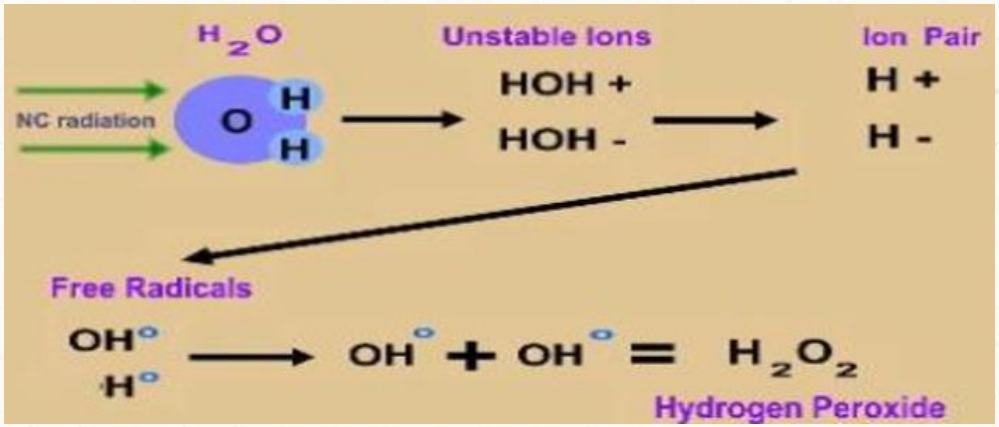
- **изменению структуры кристаллической решётки** (дефекты, дислокации);
- **радиолизу** - разрушению химических связей под действием излучения (например, разложение воды на водород и кислород);
- **изменению окраски кристаллов** (появление цветовых центров);
- **разрушению органических веществ** или **образованию новых фаз** в неорганических соединениях.

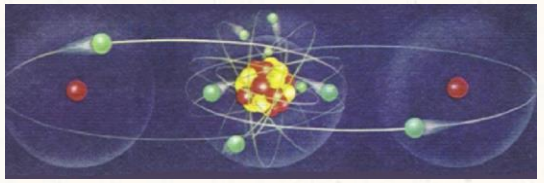



*Кривые напряжение-деформация для облученных (1) и необлученных (2) образцов железа (а) и никеля (б). Доза облучения 1,1 $10^{20}$ нейтрон/см².*

# Радиолиз и радиационная деструкция



**H-O-H → $H^+$ + $OH^-$ (ионизация)**

**H-O-H → $H^0$+$OH^0$ (образование свободных радикалов)**

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H_2O^+ + e^-$$

$$H_2O \xrightarrow{h\nu} H_2O^* \rightarrow H\cdot + HO\cdot$$

$$H_2O^* \rightarrow H_2 + O\cdot$$

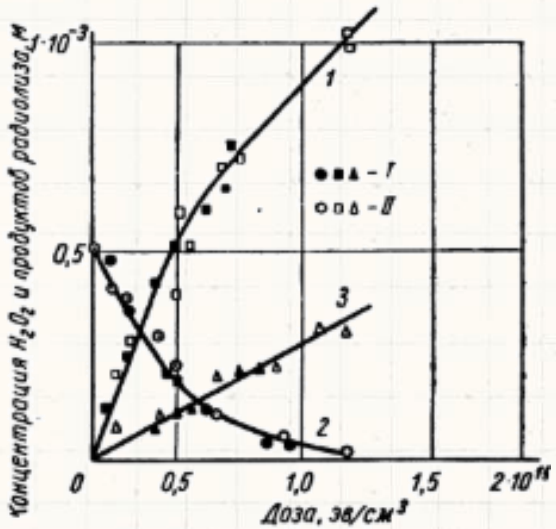
$$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + HO\cdot$$

$$e^- + H_2O^* \rightarrow H_2O^- \rightarrow H\cdot + OH^-$$

$$HO\cdot + HO\cdot \rightarrow H_2O_2$$

$$H_2O_2 + HO\cdot \rightarrow HO_2\cdot + H_2O$$

и др.



## Влияние ЛПЭ на величины начальных выходов продуктов радиолиза нейтральной воды (частица/100 эВ) при 298 К

| ЛПЭ, МэВ/см | $G(e_{гидр})$ | G(H) | G(OH) | G(H2) | $G(H_2O_2)$ | $G(HO_2)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 30 | 3, 00 | 0, 65 | 2, 95 | 0, 45 | 0, 80 | 0, 002 |
| 180 | 1, 3 | - | 1, 3 | 0, 63 | 0, 72 | 0, 03 |
| 400 | 0, 64 | 0, 35 | 0, 68 | 1, 08 | 1, 03 | 0, 05 |
| 680 | 0, 72 | 0, 42 | 0, 72 | 0, 96 | 1, 00 | 0, 05 |
| 1190 | 0, 42 | 0, 27 | 0, 40 | 1, 11 | 1, 08 | 0, 07 |
| 3200 | - | - | 0, 2 | 1, 2 | 0, 90 | 0, 2 |
| 13700 | - | - | <0, 05 | 1, 45 | 0, 82 | 0, 27 |

## Влияние температуры на начальные выходы продуктов гамма-радиолиза нейтральной воды (частица/100 эВ )

| T, K | $G(e_{гидр})$ | G(H) | G(OH) | $G(H_2O_2)$ | $G(H_2)$ | $G(OH^-)$ | $G(H^+)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 298 | 3, 00 | 0, 65 | 2, 95 | 0, 80 | 0, 45 | 0, 60 | 3, 60 |
| 323 | 3, 07 | 0, 65 | 3, 06 | 0, 78 | 0, 45 | 0, 66 | 3, 73 |
| 373 | 3, 17 | 0, 76 | 3, 37 | 0, 73 | 0, 45 | 0, 93 | 4, 10 |
| 423 | 3, 49 | 0, 78 | 3, 77 | 0, 70 | 0, 45 | 1, 11 | 4, 60 |
| 473 | 3, 91 | 0, 88 | 4, 37 | 0, 66 | 0, 45 | 1, 43 | 5, 34 |
| 523 | 4, 41 | 1, 04 | 5, 13 | 0, 61 | 0, 45 | 1, 85 | 6, 26 |

***Все молекулы с измененным изотопным составом делят на две категории.***

## 1. Изотопно-замещённые

| | | | |
|---|---|---|---|
| $^{14}CH_4$ | $CH_3$-$^{14}COOH$ | $^{14}CH_3$-COOH | $^{2}H$-$CH_2$-$CH_2$-COOH |
| *($^{14}C$) метан* | *(1-$^{14}C$) уксусная кислота* | *(2-$^{14}C$) уксусная кислота* | *(3-$^{2}H_1$) пропионовая кислота* |

## 2. Изотопно-меченные

| Тип | Написание формулы |
|---|---|
| Специфично-меченные | $CH_3C[^2H_3]$<br>[1-$^2H_3$] этан |
| Селективно-меченные | [1-$^2$H]$CH_3CH_3$<br>[1-$^2$H] этан |
| Неселективно-меченные | [$^2$H]$CH_3CH_3$<br>[$^2$H] этан |
| Равномерно-меченные | [U-$^2$H]$CH_3CH_3$<br>[U-$^2$H] этан |
| Обще-меченные | [G-$^2$H]$CH_3CH_3$<br>[G-$^2$H] этан |
| Изотопно-дефицитные | [*def* -$^2$H]$CH_3CH_3$<br>[*def* -$^2$H] этан |

# Способы получения радионуклидов

- выделение из природных объектов (полезные ископаемые).
- выделение из отработанного ядерного топлива.
- облучение материалов в ядерном реакторе (например, с получением Mo, I), реакция (n,γ) и др.
- облучение мишеней на циклотронах потоками заряженных частиц (протоны, дейтроны, более тяжелые ядра), реакции (p,n), (d,n) и др.
- фотоядерные реакции (γ,n), (γ,p) и др.
- изотопные генераторы (при распаде материнского ядра образуется дочернее, извлекаемое хроматографией или экстракцией).

## Выводы:

1. Радиоактивность является свойством атомного ядра, однако процессы радиоактивного распада влияют на физико-химическое состояние вещества.
2. Изотопный эффект обусловливает различия в свойствах веществ с разным изотопным составом и лежит в основе методов разделения изотопов.
3. Радиоактивный распад сопровождается выделением энергии, а ионизирующее излучение может вызывать радиолиз, радиационное повреждение и изменение структуры материалов.
4. Физико-химические свойства радиоактивных соединений определяют особенности их получения, хранения и применения в медицине, энергетике, науке и промышленности.

## Вопросы для самопроверки:

1) Что представляет собой радиоактивность и чем она отличается от обычных химических свойств вещества?
2) Чем различаются естественные и искусственные радиоактивные элементы? Приведите примеры.
3) Что такое изотопы и в чём заключается изотопный эффект?
4) В чём заключается влияние ионизирующего излучения на структуру и свойства вещества?
5) Каковы основные способы получения радионуклидов?
6) В каких областях науки, техники и медицины применяются радиоактивные соединения?

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

