

A man in a brown sweater is looking at a blue industrial machine with a red interior. The machine has a circular opening and various components. The man's hand is visible near the machine.

**Тема лекции**

**Свойства радиоактивных веществ и  
ионизирующих излучений**

# Вопросы лекции

1. Строение атома, радиоактивность -- основные понятия и определения.

2. Свойства ионизирующих излучений и защита от них.

3. Современная система дозиметрических величин.



# 1. Строение атома, радиоактивность -- основные понятия и определения.



и электронов

- электрон ( $e^-$ ).

расстояние от ядра  
до электронов  $10^{-8}$  см

- нейтрон  
( ${}_0n^1$ ).

- протон ( ${}_1p^1$ ).

$m_{\text{ядра}} \approx 99,8\% m_{\text{атома}}$

$D_{\text{ядра}} 10^{-12} \text{—} 10^{-13}$  см;



- электрон ( $e^-$ ).

**Протон ( $p^+$ )** - элементарная частица, служащая ядром атома водорода и составляющая положительную часть всех атомных ядер (кроме водорода).

Имеет отрицательный (-) элементарный электрический заряд ( $\square -1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл).  
**Нейтрон ( $n^0$ )** - элементарная частица, имеющая нулевой электрический заряд и массу покоя условно принятую за 1 [а.е.м.] ( $\square 1,67 \cdot 10^{-27}$  Кг).

Общее количество протонов и нейтронов  
получило название --- **массовое число (A)**

Количество электронов ( $e^-$ ) электронной  
оболочки и равное ему количество протонов  
( ${}_1p^1$ ) в ядре, определяют химические свойства  
атома и называются-- **атомным номером (Z).**

Легкие ядра ---  **$A < 25$  (50/50)**

Средние ядра ---  **$25 < A < 80$**

Тяжелые ядра ---  **$A > 80$  (40/60)**

$^{56}\text{Fe}_{26}$  порядковой номер **26**  
атомная масса **56**  
число электронов в слоях **2,8,14,2**  
число нейтронов **30**

**Изотопы** – химические элементы, **ядра** атомов которых имеют одинаковое число  ${}_1p^1$  (порядковый номер), разное число  ${}_0n^1$ , т.е. разную атомную массу.

**изотопы урана – U-230, 233, 234, 235.**

**изотопы железа -- Fe--54,56,57,58.**

**Атомы** определенного стабильного изотопа получили название нуклид, а радиоактивного изотопа --  
**радионуклид**



**Явление радиоактивности** состоит в сомопроизвольном распаде ядер (альфа и бета распад), с испусканием одной или нескольких частиц, при переходе ядра в более устойчивое энергетическое состояние.

Среднее время жизни ядра --  $\tau = 1 / \lambda$

Период полураспада --  $T_{1/2} = 0,69\tau$

Процесс убывания радиоактивных ядер во времени описывает **закон радиоактивного распада**

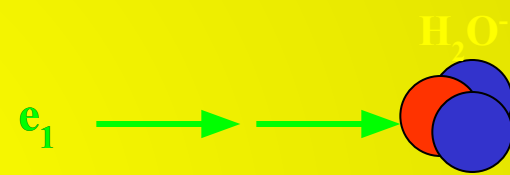
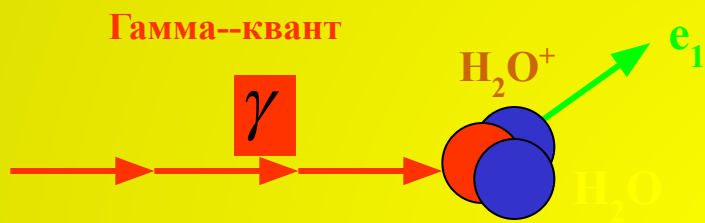
$$N_{(t)} = N_{(0)} e^{-\lambda t}$$



## 2. Свойства ионизирующих излучений и защита от них



Под ионизирующим излучением понимается поток элементарных частиц (**альфа, бета и нейтронное излучение**) или электромагнитные колебания сверхвысокой частоты (**рентгеновское, гамма излучение**) взаимодействие которых с окружающей средой приводит к образованию ионов разных знаков полярности (**ионизации среды**).



Для характеристики свойств различных видов ИИ используют следующие понятия:

- **Ионизирующая Способность (ИС)**, количественным выражением которой является Удельная ИС (УИС);
- **Проникающая Способность (ПС)**, количественным выражением которой является слой половинного ослабления.



**УИС** – число пар ионов, образующихся на единице пути в веществе.

Она характеризует степень концентрации продуктов ионизации в клетках биологических тканей, а следовательно и поражающую способность излучения. Чем Выше УИС – тем оно опаснее.

**ПС** – это способность излучения проходить через вещества определенной толщины (зависит от вида излучения, энергии частиц и плотности материала через который они проходят).

ИС и ПС взаимосвязаны и как правило конкурируют, т.е. чем  $\uparrow$  УИС тем  $\downarrow$  ПС.

## 2.1 Альфа распад

**$\alpha$ -излучение** – это поток (+) заряженных частиц в виде ядер атомов гелия (He) ( ${}_2\alpha^4$ ) состоящих из 2-х ( ${}_1p^1$ ) и 2-х ( ${}_0n^1$ ).

Сравнительно большой заряд частицы и не большая скорость (энергия 2÷10 МэВ) обуславливают эффективное взаимодействие частиц с электронами среды и  $\Rightarrow$  высокую УИС и низкую ПС.

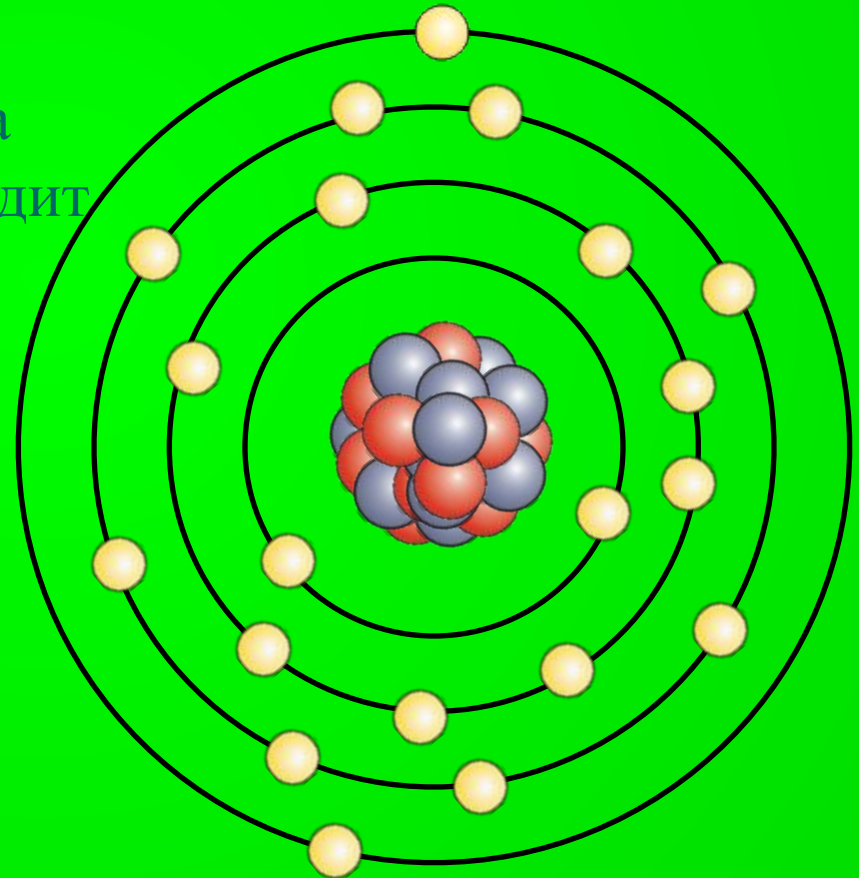
УИС – 6000 пар ионов на 1 мкм пути в биоткани;  
30000 пар ионов на 1 см пути в воздухе.

ПС – не более 130 мкм в биологической ткани;  
единицы см в воздухе.

# Взаимодействие альфа частицы с веществом (неупругое рассеяние)



Вследствие выбивания электрона с электронной оболочки происходит образование ионизированного атома, в котором количество положительно заряженных протонов превышает количество отрицательно заряженных электронов



## 2.1 Альфа распад

Внешнее  $\alpha$ -излучение не опасно (малая ПС).

Внутреннее облучение  $\alpha$ -активными веществами (попадание внутрь организма через загрязненный воздух) – чрезвычайно опасно (большая УИС) .

Меры защиты – недопущение попадания альфа частиц внутрь организма (применение средств защиты органов дыхания и кожи).



## 2.2 Бета распад

Явление **бета распада** заключается в том, что в ядре происходит превращение нейтрона ( ${}_0\text{n}^1$ ) в протон ( ${}_1\text{p}^1$ ) и при этом происходит испускание бета частицы ( $e^-$ ) и нейтрино



## 2.2 Бета распад

**Бета распад** представляет большую опасность по сравнению с альфа распадом не только тем, что бета частицы обладают большей проникающей способностью, но и тем, что при длинных цепочках бета распад сопровождается испусканием **гамма квантов**.



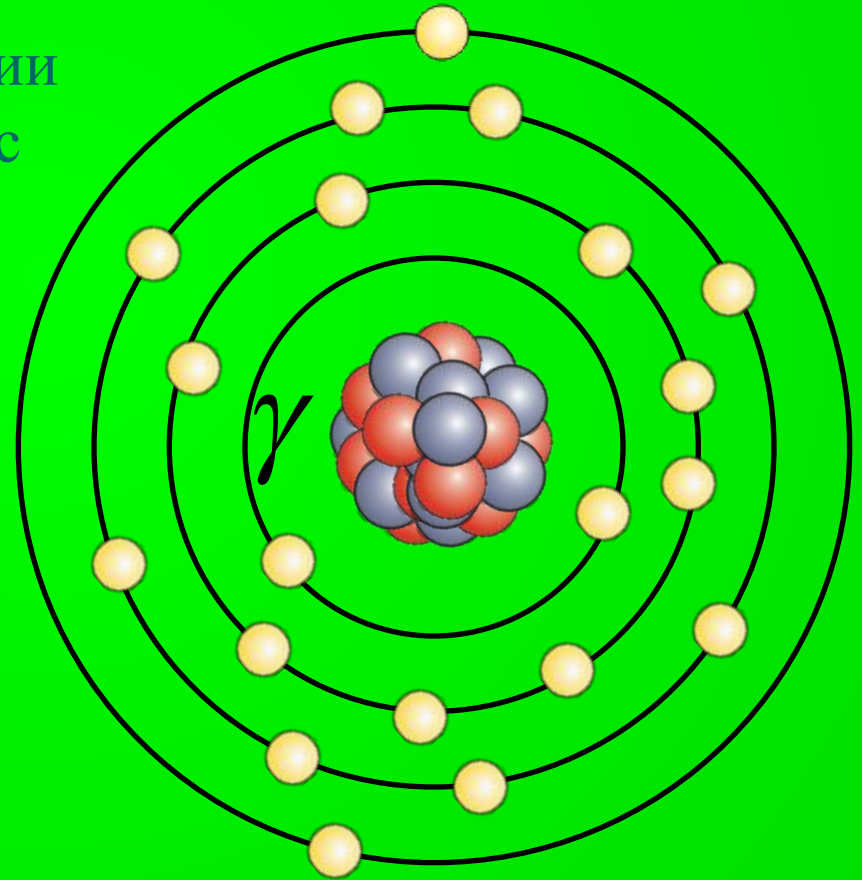
## 2.2 Бета распад

Взаимодействие *бета частиц* с веществом также отличается от взаимодействия *альфа частиц* с веществом.

Это связано с тем, что *бета частицы* при взаимодействии с веществом расходуют свою энергию не только на ионизацию атомов и молекул, но и на тормозное излучение (радиационные потери), которое сопровождается испусканием *гамма квантов*.

# Взаимодействие бета частицы с веществом (тормозное излучение)

Как мы видим при взаимодействии бета частиц с веществом наряду с процессами ионизации атомов, может также происходить образование гамма квантов вследствие “радиационных потерь” бета частицы в районе ядра.





## 2.2 Бета распад

### **УИС $\beta$ -частиц составляет:**

- 10 ÷ 40 пар ионов на 1 мкм в биоткани;
- 50 ÷ 100 пар ионов на 1 см в воздухе.

### **ПС зависит от энергии и достигает:**

- 1,5 см в биологической ткани;
- от 10 см до 30 м в воздухе.

Внешнее  $\beta$ -излучение может вызвать радиационные ожоги кожи. Особенно опасно при воздействии на глаза.

Большую опасность представляет облучение внутренних органов.

## 2.2 Бета распад

При работе АЭУ образуется большое количество  $\beta$ -активных изотопов, которые в аварийных ситуациях, связанных с утечкой газа, пара или контурных вод, могут появиться в производственных помещениях зоны контролируемого доступа.

Меры защиты – применение средств защиты органов дыхания и кожи.

## 2.3 Гамма излучение

Согласно современным представлениям *к электромагнитным излучениям* вызывающим ионизационный эффект относится рентгеновское и гамма излучения.

<i>Название</i>	<i>Длина волны, м</i>	<i>Частота, Гц</i>
радиоволны	$3 \cdot 10^5 - 3$	$10^3 - 10^8$
микроволны	$3 - 3 \cdot 10^{-3}$	$10^8 - 10^{11}$
инфракрасное излучение	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-7}$	$10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$
видимый свет	$8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
ультрафиолетовое излучение	$4 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{14} - 10^{17}$
рентгеновское излучение	$3 \cdot 10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{17} - 3 \cdot 10^{18}$
гамма-излучение	$< 10^{-10}$	$> 3 \cdot 10^{18}$

На шкале электромагнитных волн гамма излучение соседствует с рентгеновскими лучами, но имеет более короткую длину волны.

## 2.3 Гамма излучение

**Рентгеновское излучение** возникает при торможении электронов ускоряемых электрическим полем на аноде рентгеновской трубки.

**Гамма излучение** – вид электромагнитного излучения с чрезвычайно малой длиной волны --  $< 5 \times 10^{-3}$  нм и, вследствие этого ярко выраженными **корпускулярными** и слабо выраженными **волновыми** свойствами

**Гамма излучение** испускается при:

- переходах между возбуждёнными состояниями атомных ядер (энергии таких гамма - квантов лежат в диапазоне от  $\sim 1$  кэВ до десятков МэВ);
- ядерных реакциях (например, при аннигиляции электрона и позитрона);
- отклонении энергичных заряженных частиц в магнитных и электрических полях .



## 2.3 Гамма излучение

При взаимодействии гамма квантов с веществом как и в предыдущих случаях процессы ионизации обусловлены выбиванием электронов с электронной оболочки.

УИС  $\gamma$ -квантов не велика и составляет:

2 ÷ 3 пары ионов на 1 мкм пути в биоткани; 1 ÷ 2 пары ионов на 1 см пути в воздухе.

Малая ИС – обуславливает высокую ПС.

Большая ПС (до сотен метров в воздухе) определяет опасность  $\gamma$ -излучения как внешнего источника облучения.

## 2.3 Гамма излучение

В основу защиты от  $\gamma$ -излучения положены 3 принципа:

1. **Принцип защиты** экраном (реализован в биологической защите реактора, при авариях может быть реализован организационно, путем вывода л/с за крупногабаритные механизмы).

2. **Принцип защиты** расстоянием (предусматривает максимальное удаление л/с от источника ИИ).

3. **Принцип защиты** временем (предусматривает максимальное сокращение времени воздействия на л/с высоких уровней ИИ).

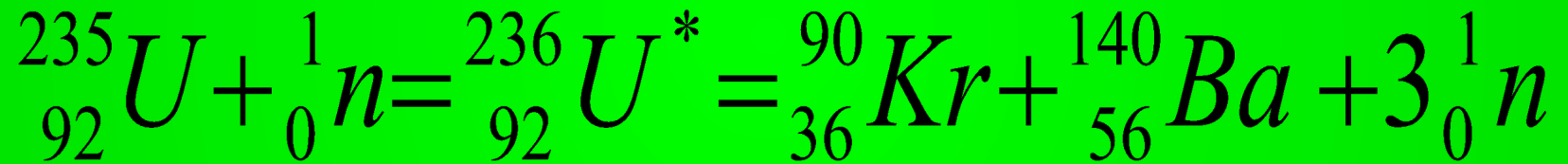
$\gamma$ -излучение нельзя полностью поглотить никаким слоем материала, его можно только ослабить.

Ослабление тем сильнее, чем меньше энергия  $\gamma$ -квантов и больше плотность вещества.

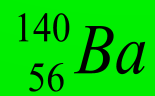
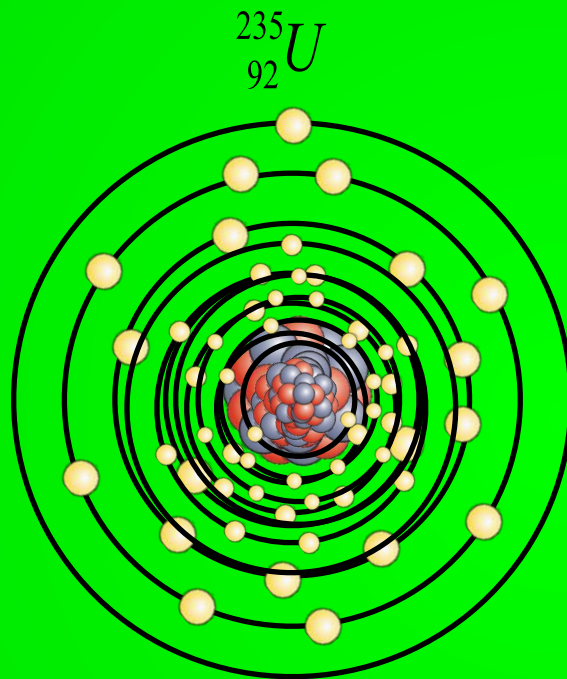
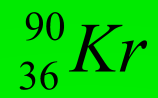
## 2.4 Нейтронное излучение

- --**Радионуклидные ( $\alpha, n$ ) источники** – представляют собой однородную смесь альфа – излучателей (Po, Ra, Pu, Am, Cm) с порошком металлического бериллия, бора или их карбидов, из которого под действием излучения выбиваются нейтроны.
- --**Генераторы нейтронов** – представляют собой ускорители частиц.
- --**Ядерные реакторы** – в которых нейтроны образуются в результате цепной реакции деления ядер урана. ( $\alpha, n$  и  $n, n$  реакции).

**Деление ядер** – реакция расщепления атомного ядра на две примерно равные по массе части (осколки деления)



# Реакция деления





## 2.4 Нейтронное излучение

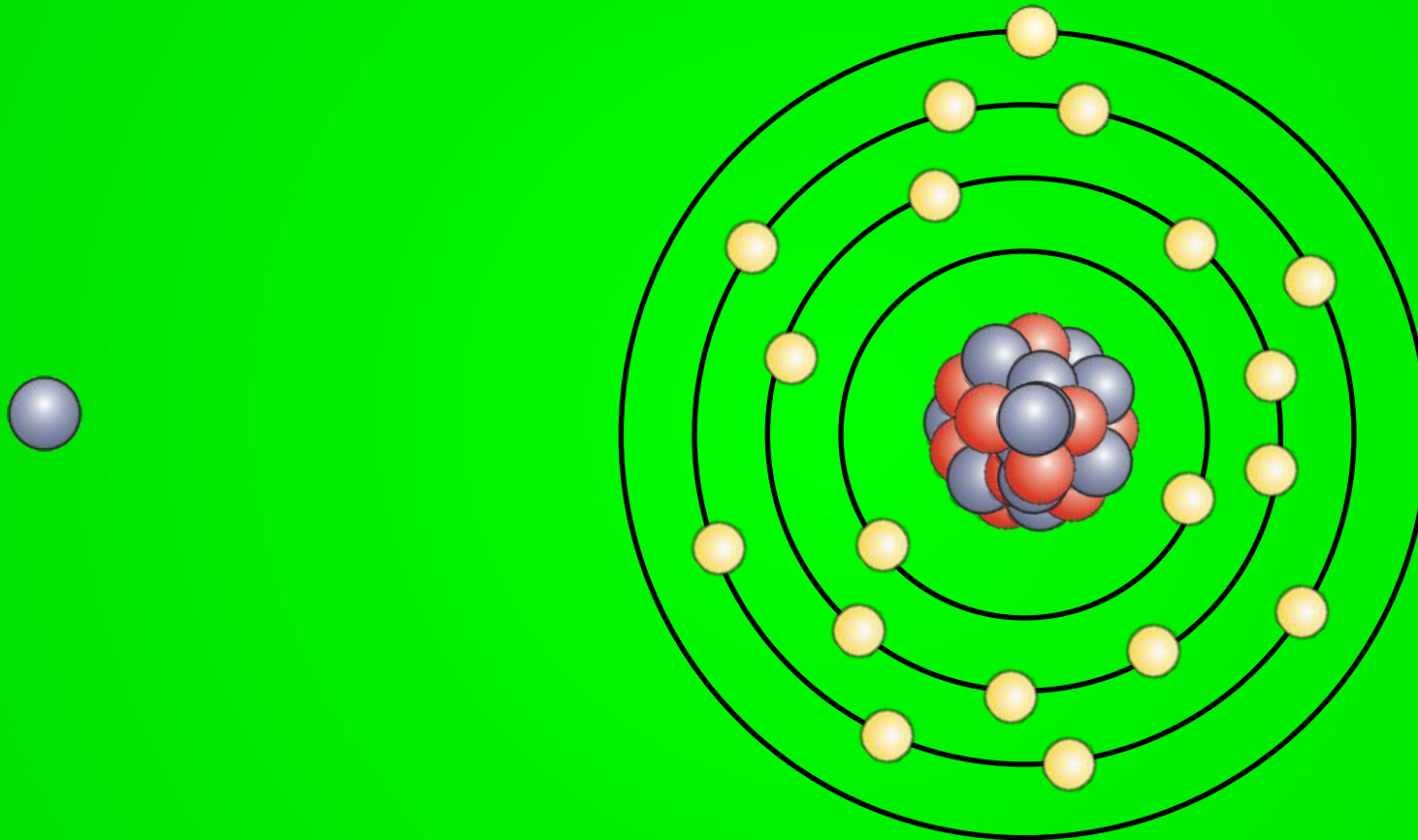
- -- **Ультра холодные нейтроны** – нейтроны с энергией менее 10 эВ
- -- **Холодные нейтроны** – нейтроны с энергией меньше  $5 \cdot 10$  эВ
- -- **Тепловые нейтроны** – нейтроны с энергией 0,025 эВ – 0,5 эВ
- -- **Надтепловые нейтроны** – нейтроны с энергией 0,1 эВ – 0,5 кэВ
- -- **Промежуточные нейтроны** – нейтроны с энергией 0,5 кэВ – 0,2 МэВ
- -- **Быстрые нейтроны** – с энергией 0,2 – 20 МэВ
- -- **Сверхбыстрые нейтроны** – обладают энергией более 20 МэВ

## 2.4 Нейтронное излучение

Наряду с реакцией деления процесс взаимодействия нейтронного излучения с веществом определяется реакциями:

-- **упругого рассеяния**, в результате которой из атома вылетает нейтрон с такой же энергией с которой и влетел в него.

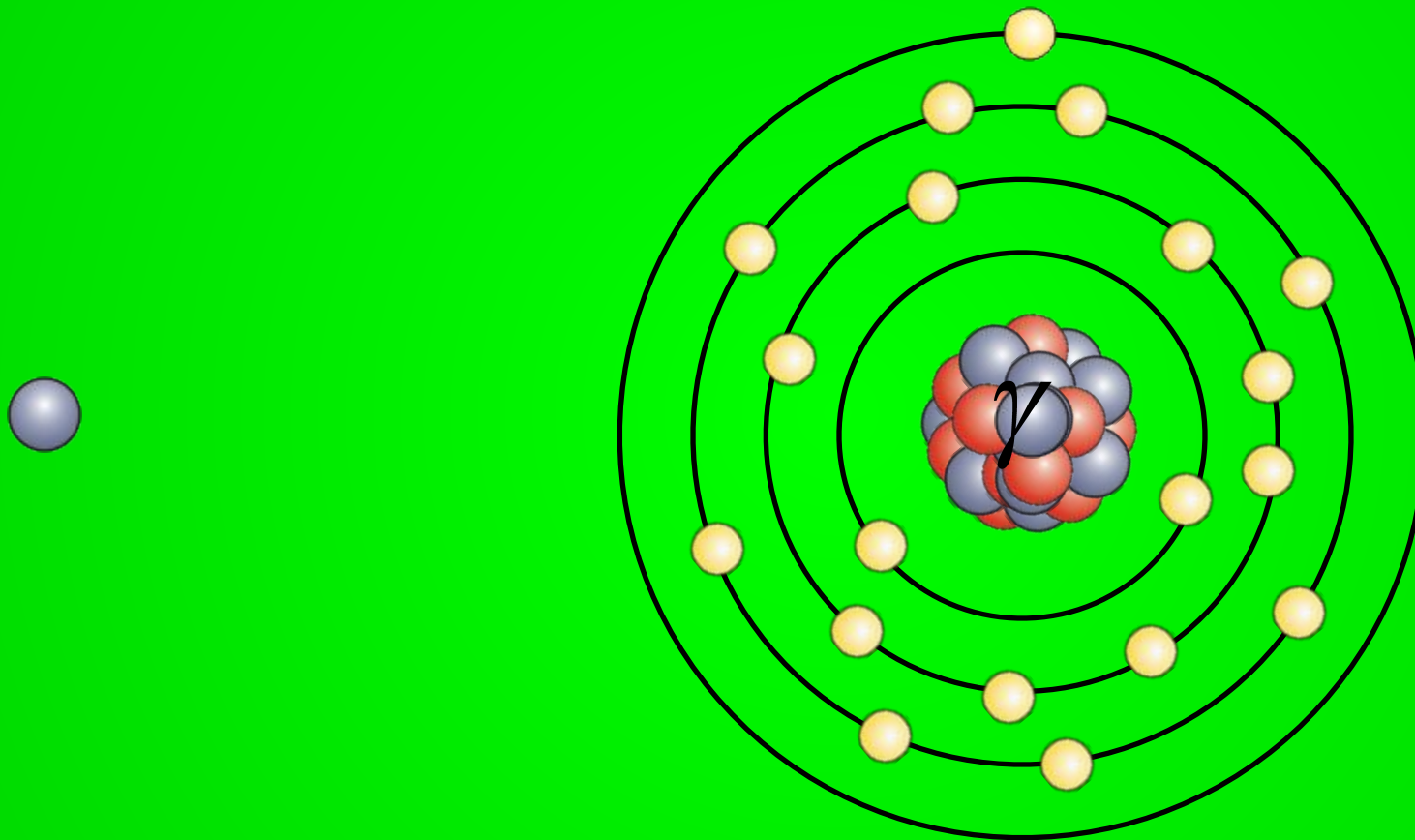
# Упругое рассеяние



## 2.4 Нейтронное излучение

-- неупругого рассеяния, в результате которой образуется гамма квант и нейтрон, но уже с меньшей энергией.

# Неупругое рассеяние

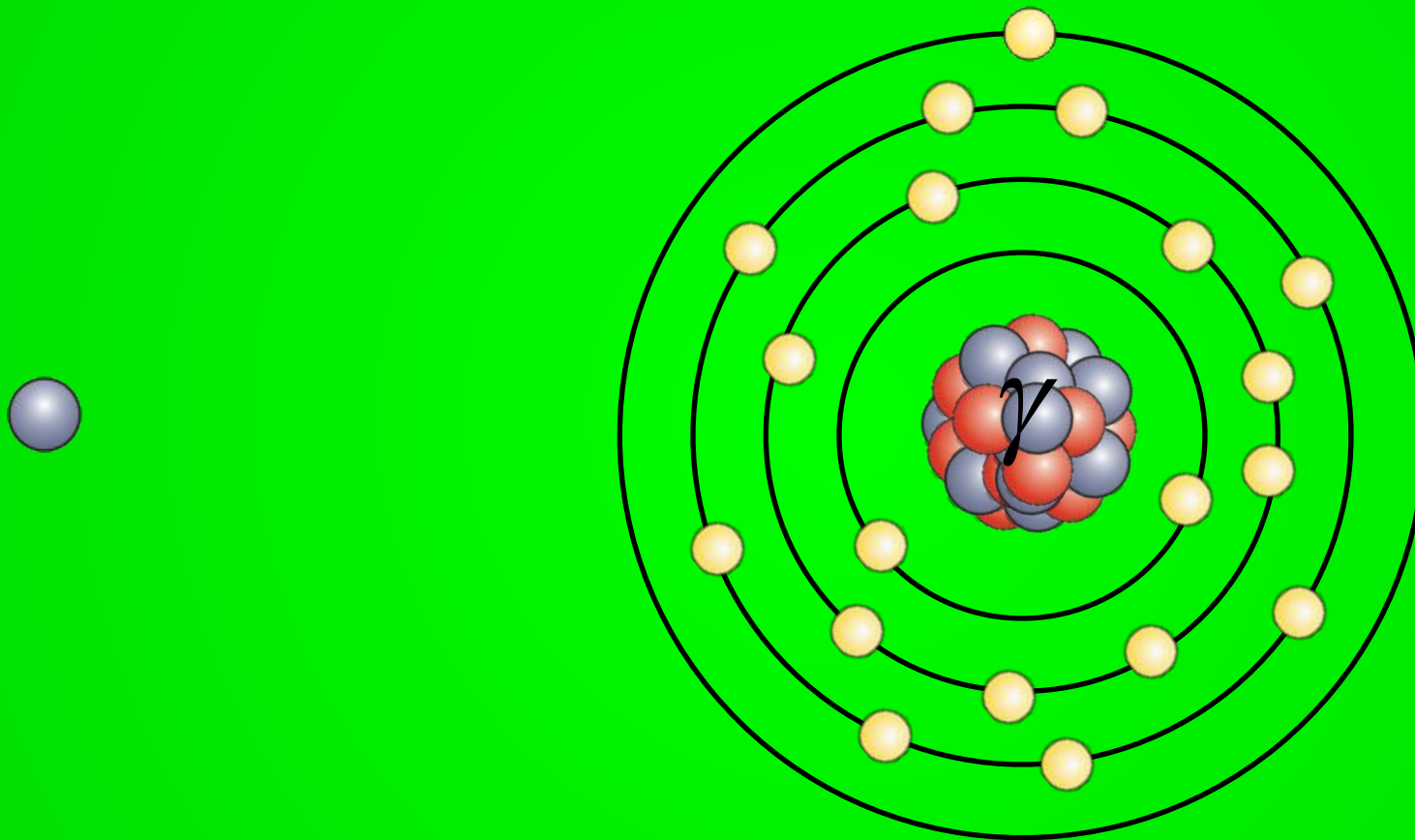


## 2.4 Нейтронное излучение

-- радиационного захвата, в результате которой образуется гамма квант.



# Радиационный захват



## 2.4 Нейтронное излучение

Особенностью данных механизмов как мы видим является то, что взаимодействуя по одному из них образуют заряженные частицы (ядра отдачи) и  $\gamma$ -кванты ( $\alpha \Rightarrow$  вторичные электроны) которые и обуславливают высокую ИС  ${}_0n^1$ -излучения.

При этом  ${}_0n^1$  будучи электрически нейтральными обладают высокой проникающей способностью.

УИС: 1000 пар ионов на 1 мкм пути в биоткани.

ПС:  $\sim 100$  метров в воздухе.

${}_0n^1$ -излучение вобрало в себя отрицательное свойство  $\alpha$ -излучения высокую ИС, и  $\gamma$ -излучения – высокую ПС.

## 2.4 Нейтронное излучение

Защита от  ${}_0n^1$ -излучения строится на тех же принципах, что и от  $\gamma$ -излучения (экран, расстояние, время).

Быстрые  ${}_0n^1$  – хорошо поглощаются ядрами легких элементов (вода, парафин, углерод, полиэтилен).

Промежуточные и тепловые  ${}_0n^1$  – эффективно взаимодействуют с ядрами тяжелых элементов (сталь, свинец).

Все эти свойства различных видов  ${}_0n^1$ -излучения так же учтены и реализованы при создании биологической защиты реактора.

Таким образом:

1. При эксплуатации АЭУ на персонал будут оказывать воздействие  $\gamma$  и  ${}_0n^1$ -излучение, в пределах допустимых норм.
2. При аварии или неисправности АЭУ возможно превышение допустимых уровней  $\gamma$ - ${}_0n^1$ -излучения, а также воздействие  $\beta$ -излучения при попадании РВ в обитаемые помещения.
3. При организации защитных мер от воздействия ИИ, необходимо учитывать их свойства и опасность их как «внешнего» или «внутреннего» облучателя.

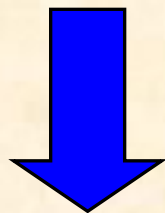
### 3. Современная система дозиметрических величин.





## Группы величин:

Все величины применяемые в области количественной оценки таких явлений как радиоактивность и ионизирующее излучение можно разделить на две группы.



Величины, которые характеризуют меру количества РВ.



Величины, которые характеризуют меру воздействия ИИ на организм.



## 3.1 АКТИВНОСТЬ

**Активность** - мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида в данном энергетическом состоянии в данный момент времени:

$$A = dN / dt ,$$

где  $dN$  - ожидаемое число спонтанных ядерных превращений из данного энергетического состояния, происходящих за промежуток времени  $dt$ .

Единицей активности является - беккерель, **Бк**.

Один беккерель равен одному ядерному превращению в одну секунду (1 Бк = 1 расп/с).

Внесистемная единица активности кюри (**Ки**) составляет  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк;  $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ .

# 3.1 АКТИВНОСТЬ

**Активность удельная** - отношение активности  $A$  радионуклида в веществе к его массе  $m$

$$A_{уд} = A / m ,$$

**Единица удельной активности** - беккерель на килограмм, Бк/кг. Внесистемная единица удельной активности - кюри на килограмм, Ки/кг.

**Активность объемная** - отношение активности  $A$  радионуклида в веществе к объему  $V$ , им занимаемому:

$$A_{об} = A / V ,$$

Единица объемной активности - беккерель на метр кубический, Бк/м<sup>3</sup>.

Внесистемная единица объемной активности - кюри на литр, Ки/л.

## 3.1 АКТИВНОСТЬ

В практике дозиметрии  $A_{об}$ , чаще принято выражать в таких терминах как концентрация инертных радиоактивных газов (ИРГ) и концентрация радиоактивных аэрозолей (РАЗ).

Эти величины принято обозначать соответственно  $C_{ИРГ}$  и  $C_{РАЗ}$ .

**Они характеризуют какое количество газообразных и твердых РВ находится в воздухе помещений.**

Единицей измерения этих величин является так же - беккерель на метр кубический, Бк/м<sup>3</sup>.

А внесистемная единица - кюри на литр, Ки/л.

## 3.2 Доза, мощность дозы.

В практике дозиметрии для оценки воздействия ионизирующего излучения рассматривают какую **дозу** энергии (D) она передает окружающей среде.

Для определения переданной энергии ионизирующего излучения во времени используется понятие **мощности дозы** (P)

$$P = D/t$$

Современная система дозиметрических  
величин

**Дозиметрические величины**

**Нормируемые величины**

**Операционные величины**

## 1. **Физические величины** – мера воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на вещество

**Экспозиционная доза** – выражает энергию ионизирующего излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха

Кл/кг ; 1 р (рентген) =  $2,08 * 10^9$  пар ионов/см<sup>3</sup>; 1р = 2, 58 Кл/кг

То есть когда говорят, что человек получил дозу гамма излучения равную 1 рентгену, то это равноценно затратам энергии гамма излучения на образования в 1 см<sup>3</sup> воздуха  $2,08 * 10^9$  пар ионов.



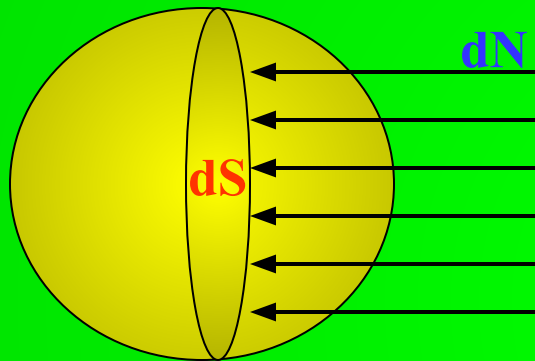
## 1. **Физические величины** – мера воздействия ионизирующего излучения на вещество

Но экспозиционная доза рассматривает, воздействие только гамма излучения, и только в воздухе. Поэтому в дозиметрии используют такое понятие как **поглощенная доза**.

**Поглощенная доза (D)** – величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу

$$D = dE/dm ; 1\text{ Дж/кг} = 1\text{ Гр}; 1\text{ Грей (Гр)} = 100\text{ рад}; 1\text{ р} = 0,9\text{ рад}$$

**Плотность потока ионизирующих частиц**— это отношение числа частиц  $dN$  проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения  $dS$  этой сферы, за единицу времени



**ЧАСТ / МИН. \* CM<sup>2</sup>**

**Уровень загрязнения поверхностей** — это величина характеризующая степень концентрации РВ на единице площади загрязненной поверхности.

В системе СИ данная величина измеряется в  $(\text{м}^{-2} * \text{с}^{-1})$ .

В нормативных документах единицей измерения применяют количество частиц испускаемых в минуту с 1 кв. сантиметра поверхности, част./мин.:см<sup>2</sup>.

## 2. Нормируемые величины -- мера ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека

Исследования влияния малых доз, показали, что биологический эффект от воздействия ИИ зависит не только от количества переданной им **энергии**, но и от **вида** ИИ и на какие **органы** оно воздействует. Для их учета в нормируемых величинах используются понятия эквивалентных и эффективных доз.

**Доза эквивалентная ( $H_{TR}$ )** – поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения

Единица измерения **зиверт (Зв)**

Вид излучения	Гамма излучение	Нейтронное излучение	Альфа частицы	Бета частицы
Коэф. К	1	5 -- 20	20	1

$$H_{TR} \text{ (Зв)} = D_{\text{поглощенная}} \text{ (Гр)} * K$$

## 1. Гамма излучение

$$\text{Если } D = 1 \text{ мГр, то } H_{T,R} = D * K = 1 \text{ мГр} * 1 = 1 \text{ мЗв}$$

## 2. Быстрые нейтроны

$$\text{Если } D = 1 \text{ мГр, то } H_{T,R} = D * K = 1 \text{ мГр} * 20 = 20 \text{ мЗв}$$

Из данного примера мы видим, что при передаче телу человека **гамма и нейтронным** излучением одного и того же количества энергии (**1 мГр**), биологический эффект (соответственно и вред) от быстрых нейтронов будет в **20 раз больше** чем от гамма излучения

Но биологический эффект от воздействия ИИ, зависит не только от вида ИИ, но и от того на какие органы человека оно воздействует. Для учета и этих характеристик в дозиметрии используется эффективная доза.

**Эффективная доза (E)** – мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности.

**Эффективная доза (E)** – равна сумме произведений эквивалентной дозы в органе или ткани, умноженной на соответствующие коэффициенты для данного органа или ткани

$$E = H_{TR} (ЗВ) * K$$

Гонады	Костный мозг	Толстый кишечник	Легкие	Желудок	Мочевой пузырь	Грудная железа
0,2	0,12	0,12	0,12	0,12	0,05	0,05

Печень	Пищевод	Кожа	Щитовидная железа	Клетки костных поверхностей	Остальное
0,05	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05

1.  $H_{TR} = 2$  мЗв на кожу, щитовидную железу, печень  
 $E = 2 (0,01 + 0,05 + 0,05) = 2 * 0,11 = \underline{0,22 \text{ мЗв}}$

2.  $H_{TR} = 2$  мЗв на костный мозг, легкие, гонады  
 $E = 2 (0,12 + 0,12 + 0,2) = 2 * 0,44 = \underline{0,88 \text{ мЗв}}$

В данном примере мы видим, что величина эффективной дозы (биологический эффект) зависит не только от величины эквивалентной дозы но и от того какие внутренние органы человека были подвергнуты воздействию ионизирующего излучения



**Эффективная доза (E)** является функционалом, приводящим все случаи неравномерного (внешнего и внутреннего) облучения тканей и органов тела человека к эквивалентному по ущербу равномерному облучению

1. Суммарная  $H_{TR}$  на все три органа (по 2 мЗв на кожу, щитовидную железу, печень) = 6 мЗв. Ее воздействие на человека эквивалентно воздействию на все тело эффективной дозе равной 0, 22 мЗв.

2. Суммарная  $H_{TR}$  на костный мозг, легкие и гонады (по 2 мЗв на каждый орган) = 6 мЗв. Ее воздействие на человека эквивалентно воздействию на все тело эффективной дозе равной 0, 88 мЗв.

Поскольку **эффективная доза** является вероятностной величиной (ее нельзя измерить техническими средствами радиационного контроля) то для оценки нормируемых величин в дозиметрии используют операционные величины

**3. Операционные величины** – непосредственно определяемые в измерениях величины, предназначенные для оценки нормируемых величин при радиационном контроле.

Операционные величины используются в своей деятельности специалистами радиационной безопасности и на них подробно мы останавливаться не будем

# Свойства радиоактивных веществ и ионизирующих излучений.

## Выводы.

1. Радиоактивность – явление самопроизвольного превращения отдельных ядер с испусканием элементарных частиц, способных производить ионизацию окружающей среды.
2. Количественной характеристикой процесса р/а распада является активность.  
Активность со временем снижается по закону р/а распада.
3. РВ являются источником ИИ – потока элементарных частиц или электромагнитных колебаний, взаимодействие которых с окружающей средой приводит к образованию ионов.

# Список рекомендованной литературы:

