

Ионизирующее излучение: основные термины, понятия, механизмы

- Типы ионизирующих излучений, их взаимодействие с веществом (механизмы поглощения энергии).
- Относительная биологическая эффективность ионизирующих излучений, линейная передача энергии.
- Основные физические величины радиобиологии и единицы их измерения.

Основные физические величины радиобиологии и единицы их измерения

- **Радионуклид** - Радиоактивный нуклид (изотоп), ядро которого способно к радиоактивному распаду.
- **Активность радионуклида** – скорость, с которой происходит радиоактивный распад нуклеотида. В международной системе единицей активности является беккерель (Бк). $1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад в секунду}$. (**Удельная активность (Бк/кг), коэффициент накопления или перехода (КН или КП)**)
- **Доза излучения (экспозиционная доза)** измеряется для получения представления о количестве энергии ионизирующего излучения, падающей на объект за время облучения. Размерность экспозиционной дозы – это заряд, возникающий в единице массы поглотителя, в международной системе единиц - Кл/кг (кулон на килограмм). Также в настоящее время широко применяют внесистемную единицу – Р (Рентген).
- **Доза облучения (поглощенная доза)** – это величина энергии ионизирующего излучения, переданная веществу. В международной системе единиц поглощенная доза излучения измеряется в Грехах (Гр). $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.
- **Мощность дозы.** Эта величина характеризует скорость увеличения дозы за единицу времени. Измеряется в Гр/с или Кл/(кг * с).
- **Эквивалентная доза, эффективная доза**

радиобиологии

Физическая величина	Единица, ее наименование, международное и русское обозначение		Соотношение между единицами	
	внесистемная	международной системы	внесистемной и Международной системы	международной системы и внесистемной
Активность нуклида в радиоактивном источнике	кюри (Ci, Ки)	беккерель (Bq, Бк)	1 Ки = = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк	1 Бк = = $2,7 \times 10^{-11}$ Ки
Экспозиционная доза излучения	рентген (R, Р)	кулон на килограмм (C/kg, Кл/кг)	1 Р = = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг	1 Кл/кг = = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы излучения	рентген в секунду (R/s, Р/с)	ампер на килограмм (A/kg, А/кг)	1 Р/с = = $2,58 \times 10^{-4}$ А/кг	1 А/кг = = 3876 Р/с
Поглощенная доза излучения	рад (rad, рад)	грей (Gy, Гр)	1 рад = = 0,01 Гр	1 Гр = = 100 рад
Мощность поглощенной дозы излучения	рад в секунду (rad/s, рад/с)	грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	1 рад/с = = 0,01 Гр/с	1 Гр/с = = 100 рад/с

Ионизирующее излучение

- **Радиация** (излучение) – энергия, испускаемая каким-либо источником (электромагнитное, тепловое, гравитационное, космическое, ядерное)
- **Ионизирующее излучение** - излучение с энергией выше потенциала ионизации (>10 эВ) – способно ионизировать атомы и молекулы поглотителя
- **Ионизирующее излучение** обладает двумя отличительными свойствами:
 - способно проникать через вещество;
 - проходя через вещество взаимодействует с атомами и молекулами, что приводит к их возбуждению и ионизации;

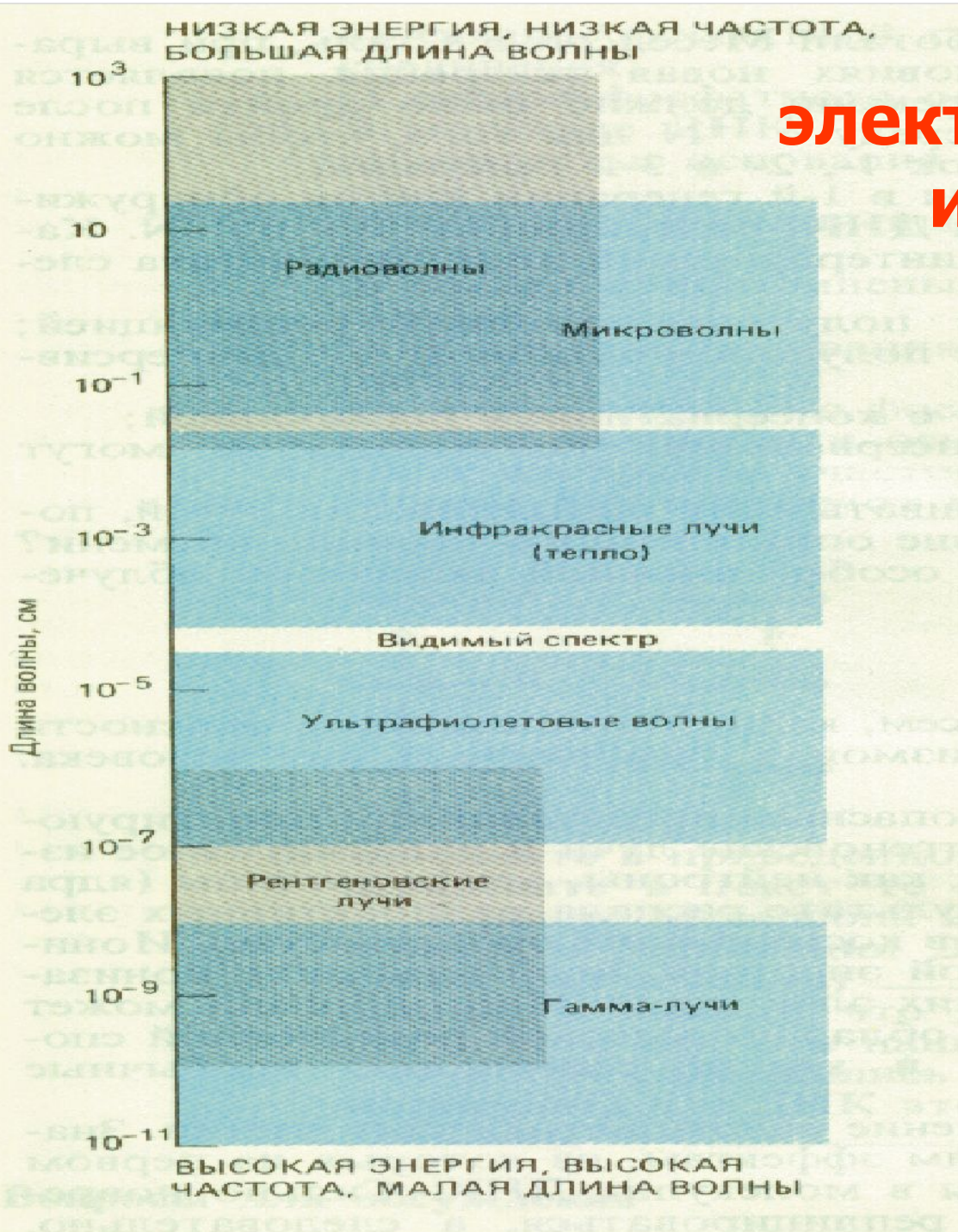
Физическая природа ионизирующих излучений

Типы ионизирующих излучений:

- Корпускулярные – частицы (электроны и позитроны - β -частицы; ядра атомов водорода – протоны, дейтерия – дейтроны, гелия - α -частицы и др.; нейтроны; нестабильные частицы – $\pi^{+,-,0}$ -мезоны и др.)
-
- Электромагнитные - коротковолновое излучение (рентгеновское, гамма-излучение) -

Спектр

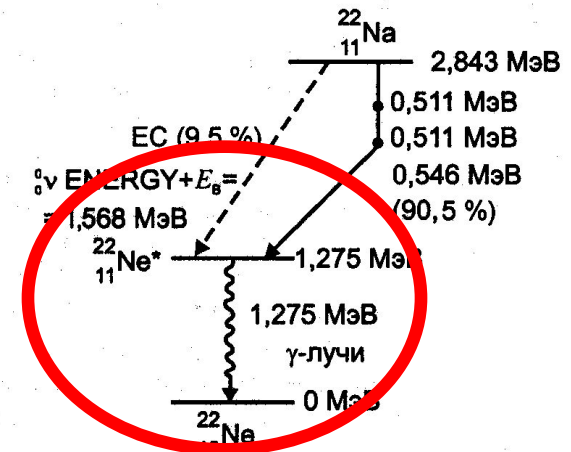
электромагнитных излучений



γ - ИЗЛУЧЕНИЕ

- Диапазон энергий гамма-квантов: 2,6 кэВ – 7,1 МэВ.
- Гамма-кванты испускаются ядрами атомов при изменении их энергетического состояния;
- при аннигиляции электрона и позитрона

Уровни масса-энергия нейтральных атомов

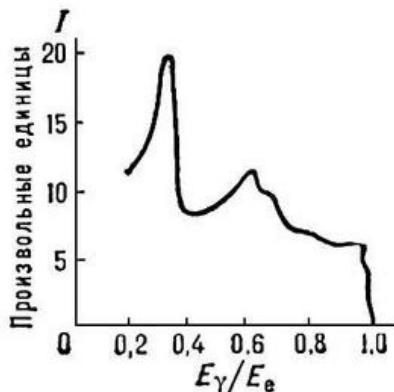


Если аннигилируют практически неподвижные e^- и e^+ , то фотоны уносят энергию, равную сумме энергий покоя e^- и e^+ , т.е. энергию $2mc^2 = 2 \cdot 0,511 \text{ МэВ} = 1,022 \text{ МэВ}$, где m – масса электрона и позитрона.

Фотоны разлетаются в противоположные стороны и каждый уносит энергию 0,511 МэВ.

Рентгеновское излучение (X-лучи)

- тормозное, с непрерывным спектром – испускается заряженными частицами высоких энергий (обычно e^-) при торможении в кулоновском поле ядра. *Применяется в рентгеновских трубках;*
- характеристическое, с линейчатым спектром - испускается атомом при заполнении вакансий на внутренних электронных оболочках, образованных в результате его взаимодействия с ускоренными электронами. *Применяется для рентгеноструктурного анализа*



Энергетический спектр фотонов у тормозного излучения как функция E_γ

-1917 г. Нобелевская премия за открытие характеристического рентгеновского излучения (Чарлз Баркле)

Синхротронное излучение (или магнитотормозное)

Испускается:

- заряженными частицами, движущимися по круговым орбитам со скоростями, близкими к скорости света в вакууме. Изменение направления движения электрона происходит под действием магнитного поля.

Рентгеновское, синхротронное и гамма-излучение при одинаковой энергии имеют одинаковые свойства и различаются только способом происхождения.

Нобелевские премии за исследования рентгеновских лучей и открытия, сделанные с их помощью (1901-1988 гг)

- в 1901 г. Нобелевская премия за открытие X-лучей (В.Рентгену);
- в 1913 г. Генри Мозли изучая рентгеновские спектры элементов доказал: порядковый номер элемента в периодической системе численно равен заряду ядра его атома. Но получить высшую научную награду Мозли не довелось: он трагически погиб через два года после своего открытия при высадке английского десанта в проливе Дарданеллы;
- в 1914 г. Нобелевская премия за открытие дифракции рентгеновских лучей (М. фон Лауэ);
- в 1915 г. Нобелевская премия за изучение структуры кристаллов с помощью рентгеновских лучей присуждена отцу и сыну Брэггам Уильям Генри и Уильям Лоренс, которые заложили основы рентгено-структурного анализа;
- в 1917 г. Нобелевская премия за открытие характеристического рентгеновского излучения (Чарлзу Баркле); Поскольку во время войны поездки были ограничены, церемонию награждения пришлось отложить, и только в 1920 г. Баркла смог прочитать свою Нобелевскую лекцию "Характеристическое рентгеновское излучение";
- в 1922 г. Нобелевская премия за разработку теории периодической системы элементов, используя закономерности изменения рентгеновских спектров (Нильсу Бору);
- в 1922 г. Открытие элемента Гафний по рентгеновским спектрам (А.Довийе);
- в 1924 г. Нобелевская премия за исследования спектров в диапазоне рентгеновских лучей (К.Сигбану);
- в 1925 г. Открытие элемента Рений по рентгеновским спектрам (супруги Ноддак)

Нобелевские премии за исследования рентгеновских лучей и открытия, сделанные с их помощью (1901-1981 гг)

- в 1927 г. Нобелевская премия за открытие рассеяния рентгеновских лучей на свободных электронах вещества (А.Комптон). Артур Комптон в 1923 г. обнаружил эффект (назван его именем), который сыграл крайне важную роль в развитии квантовой теории в 20-х гг;
- в 1936 г. Нобелевская премия за вклад в изучение молекулярных структур с помощью дифракции рентгеновских лучей и электронов (П.Дебаю);
- в 1946 г. Нобелевская премия по физиологии и медицине Герману Меллеру за обнаружение и изучение мутаций под действием рентгеновских лучей;
- в 1964 г. Дороти Кроуфут-Ходжкин (англ) – НП по химии: методом рентгеноструктурного анализа она определила строение белков и ряда биологически активных соединений.
- 1962 и 1988 гг – НП за открытие структуры молекул гемоглобина, дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и белков, соединений, ответственных за фотосинтез, лекарственных препаратов с помощью рентгеновских лучей;
- в 1979 г. Нобелевская премия за разработку метода осевой рентгеновской томографии (А.Кормаку и Г.Хаунсфилду);
- в 1981 г. Кай Сигбан (сын Карла Сигбана) - премия по физике за разработку рентгеновской электронной спектроскопии - метода широко применяемого в химических исследованиях.

Механизмы взаимодействия электромагнитного излучения (фотонов – квантовых частиц, не имеющих заряда) с веществом:

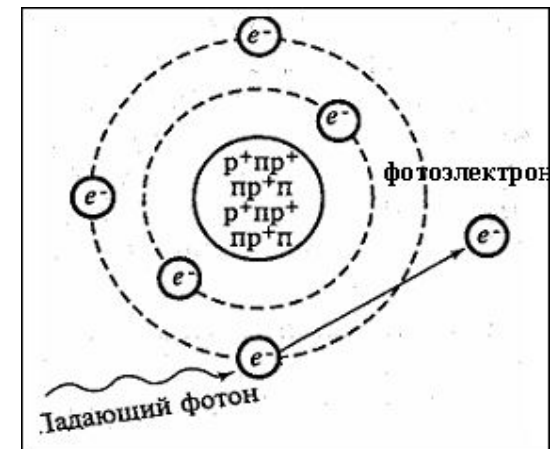
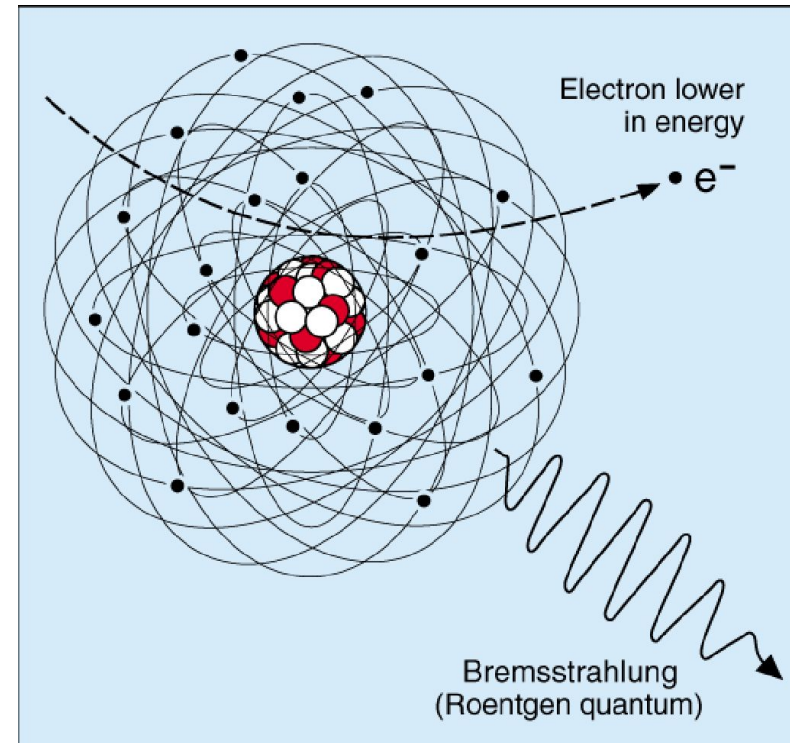
1. Фотоэффект
2. Комptonовский эффект (рассеяние)
3. Образование пар
4. Рэлеевское (когерентное) рассеяние;
5. Фотоядерные реакции

См. Кудряшов, 2003; Сивухин, 2006
(Атомная и ядерная физика)

Механизмы поглощения энергии фотонов

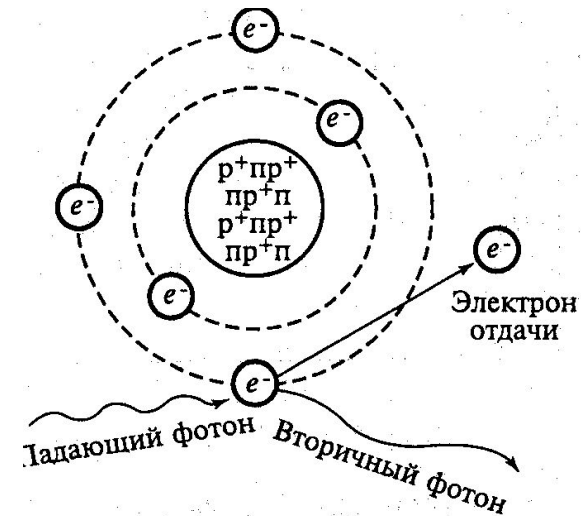
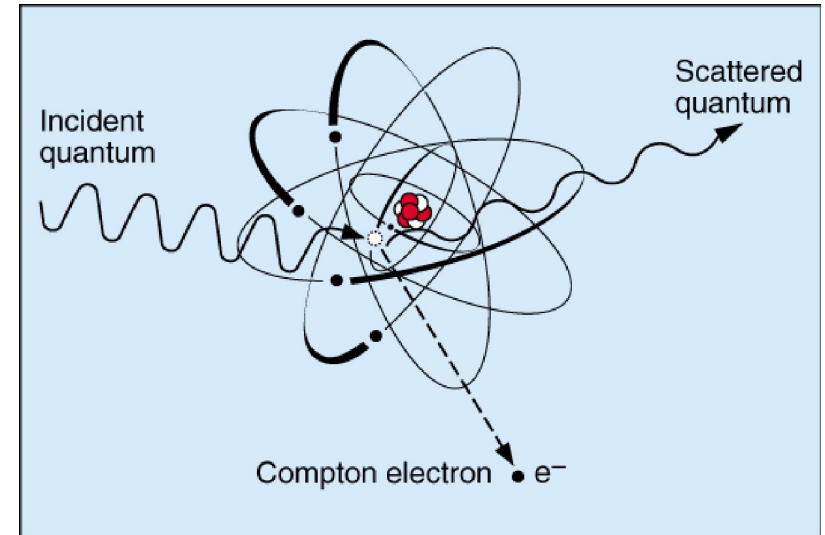
• Фотоэффект (только для длинноволнового рентгеновского излучения)

Энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате появляются свободные электроны с кинетической энергией, равной энергии захваченного кванта за вычетом энергии выхода электрона



● Эффект Комптона - упругое рассеяние падающих фотонов на электроне внешней орбиты

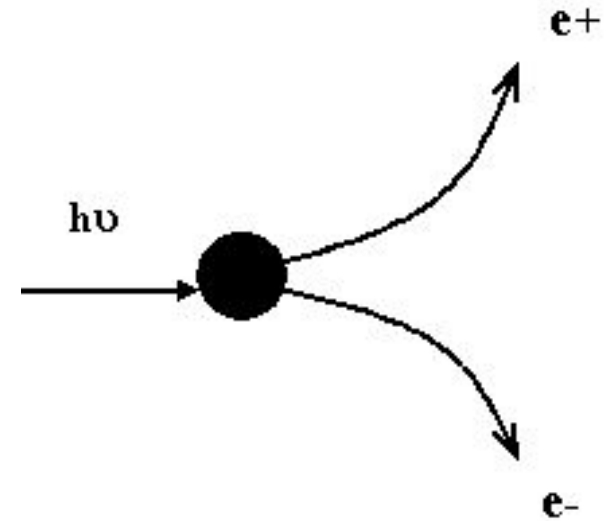
- Электрону внешней орбиты передается часть энергии фотона.
- Оставшуюся энергию уносят рассеявшиеся фотоны.
- Средняя энергия фотонов возрастает с увеличением энергии падающего излучения



Образование электрон-позитронных пар

*для фотонов с энергией $> 1,022$ МэВ, т.е.
превышающей внутриатомные энергии связи*

- В результате взаимодействия кванта излучения с кулоновским полем ядра атома, квант исчезает и одновременно возникает пара частиц электрон-позитрон.
- Позитрон аннигилирует с электронами среды, с образованием вторичных гамма-квантов
- Вторичные гамма-кванты проходя через вещество теряют энергию за счет фотоэффекта или эффекта Комптона



Поглощение фотонов в биологических тканях

Относительная вероятность реализации вышеперечисленных механизмов при облучении биологических тканей представлена на рисунке



10-100 кэВ – фотоэффект;
0,3-10 МэВ – эффект
Комптона;
>10 МэВ – образование пар

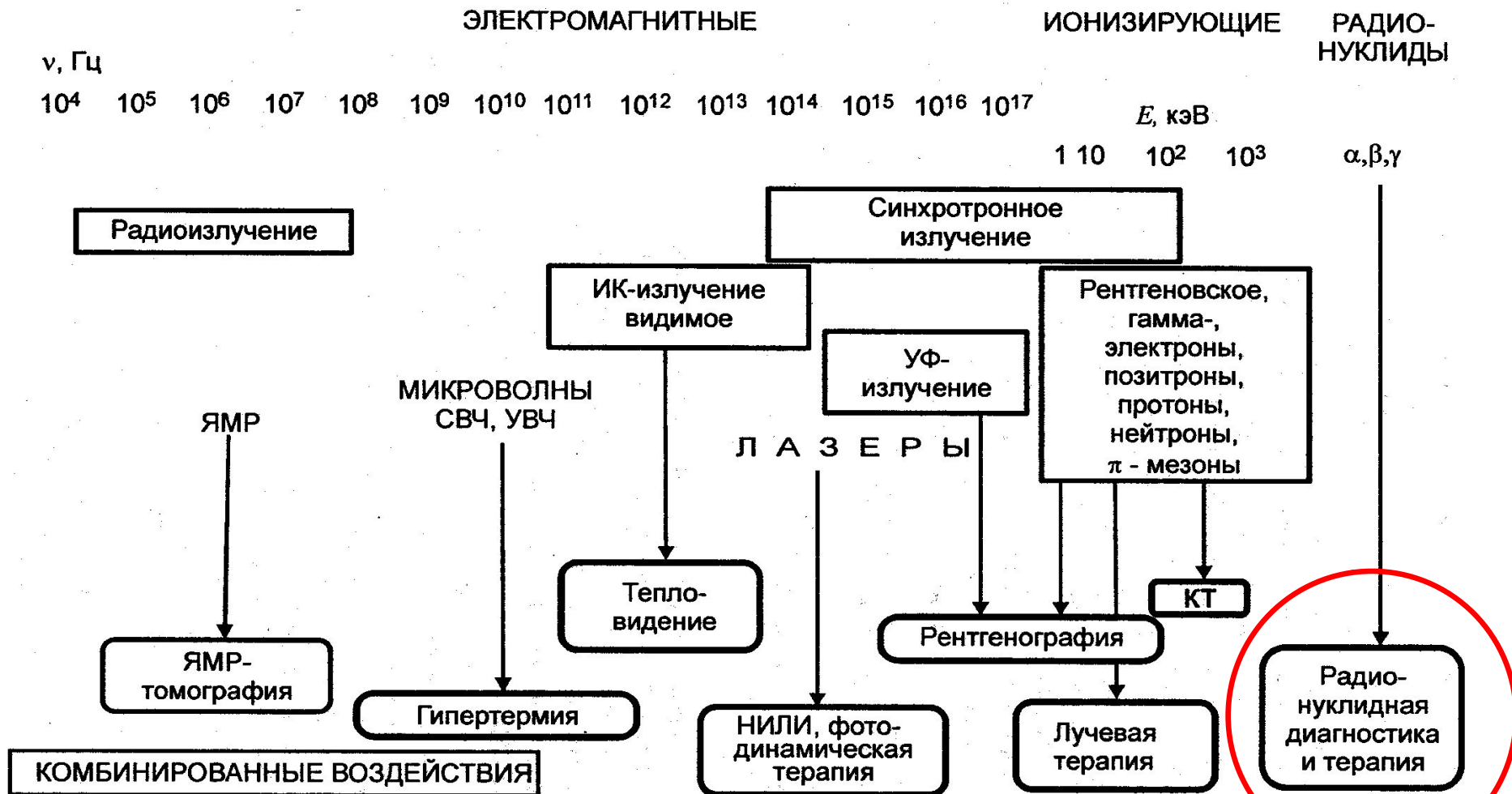
В большинстве случаев при облучении биологических объектов энергия электромагнитного излучения находится в диапазоне 0,2-2 МэВ, поэтому наибольшую роль играет эффект Комптона

Рис. 4.2. Относительная вероятность, %, поглощения фотонов различной энергии (E) в одном из трех видов взаимодействия излучения с веществом:
1 — фотоэффект, 2 — комpton-эффект, 3 — процесс образования пар

- При действии рентгеновского и гамма-излучения первичная ионизация (возникновение атомов, утративших электрон вследствие фото- и Комpton-эффекта) мала по сравнению с ионизацией в результате действия вторичных электронов.
- Поэтому электромагнитное излучение считают *косвенно ионизирующим*.

Использование ионизирующих излучений

Шкала излучений



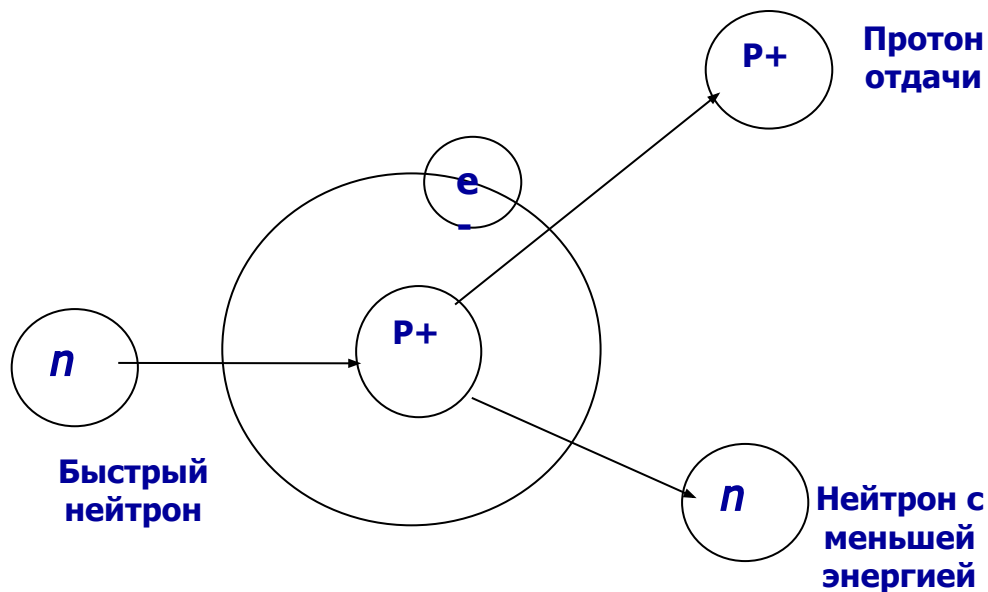
2. Корпускулярное излучение

Нейтроны (открыты в 1932 г):

- частицы с массой 1,0087 атомной единицы и нулевым зарядом
- Получают нейтроны в ядерных реакциях или при делении ядер урана и трансурановых элементов
- Свободный нейтрон нестабилен и распадается на протон, электрон и антинейтрино, $T_{1/2} = 918$ с.
- Время жизни нейтрона в биологических тканях = 0,0002 с (в 4,5 млн раз меньше $T_{1/2}$)
- в зависимости от энергии частиц делится на группы:
 - сверхбыстрые (энергия > 20 МэВ)*
 - быстрые (энергия 0,1-20 МэВ),*
 - промежуточные (0,5-100 кэВ),*
 - медленные (< 0,5 эВ)*
 - тепловые (0,025 эВ при температуре +20 °С, скорость 2200 м/с)*

Взаимодействие нейтронов с веществом:

1) Упругое рассеяние (для быстрых нейтронов) – в результате соударения нейтрона с ядром атома кинетическая энергия нейтрона распределяется между ним и «ядром отдачи». Чем меньше масса ядра, тем больше энергии оно получит (водород).



В биологических тканях, богатых водородом, появляются «протоны отдачи», обладающие значительной кинетической энергией и зарядом, могут взаимодействовать с электронными оболочками атомов и вызывать ионизацию

2) Неупругое рассеяние (при энергии больше нескольких кэВ)

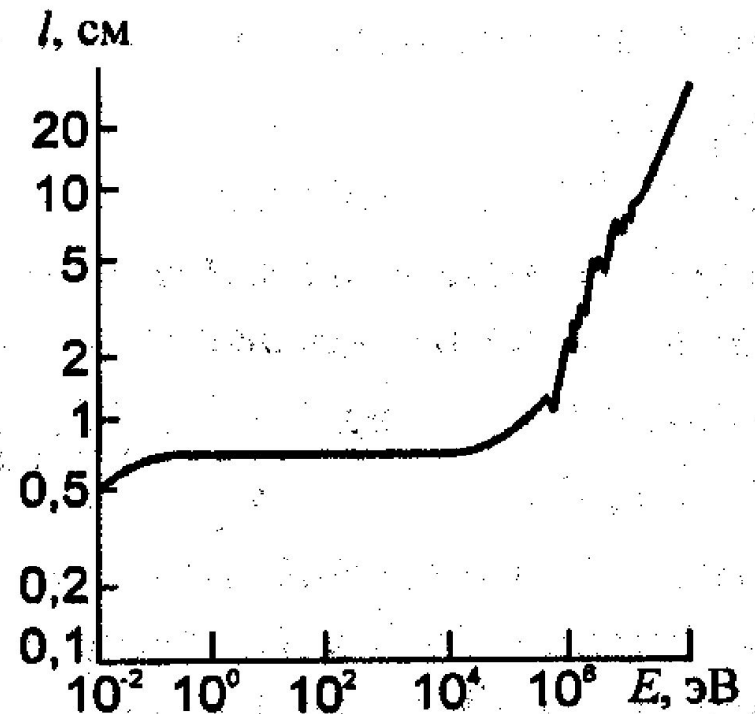
- Вся энергия нейтрона передается ядру
- Часть энергии нейтронов идет на возбуждение ядра, часть – на кинетическую энергию ядра.
- При переходе в основное состояние возбужденное ядро испускает гамма-кванты.

3) Радиационный (нейтронный) захват (для медленных нейтронов, $<10\text{МэВ}$)

нейтрон захватывается ядром с образованием короткоживущего высоковозбужденного ядра, которое переходит в стабильное состояние с образованием гамма-квантов (для легких ядер, водород), протонов или альфа-частиц (для более тяжелых ядер, азот).

Особенности взаимодействия нейтронов с биологическими тканями

- не взаимодействуют с кулоновским полем атомов и молекул – проходят в веществе значительные расстояния, не меняя направления траектории
- Ионизация поглотителя происходит косвенным путем за счет высвобожденных вторичных тяжелых заряженных частиц – ядер отдачи и продуктов ядерных реакций на элементах ткани или специально вводимых изотопах (например ^{10}B – в случае НЗТ)
- Наибольшее применение в радиобиологии имеют быстрые нейтроны, как наиболее глубоко проникающие в ткани (см. рис)



Зависимость средней длины пробега нейтронов в биологической ткани от их энергии

Пример использования нейтронов для терапии злокачественных новообразований

- **Нейтронно-захватная терапия (НЗТ)** -
 - Новая технология (реализуется на реакторе ИРТ МИФИ) -
Метод избирательного воздействия излучения на опухоль
 - НЗТ использует тропные к опухоли препараты, содержащие нуклиды (^{10}B или ^{157}Gd), которые поглощая нейтроны, образуют вторичное излучение, губительное для опухолевых клеток

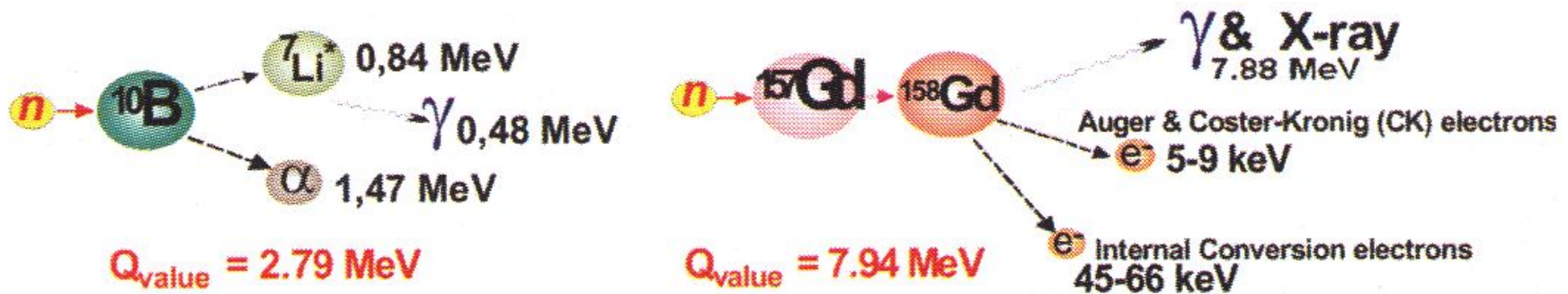
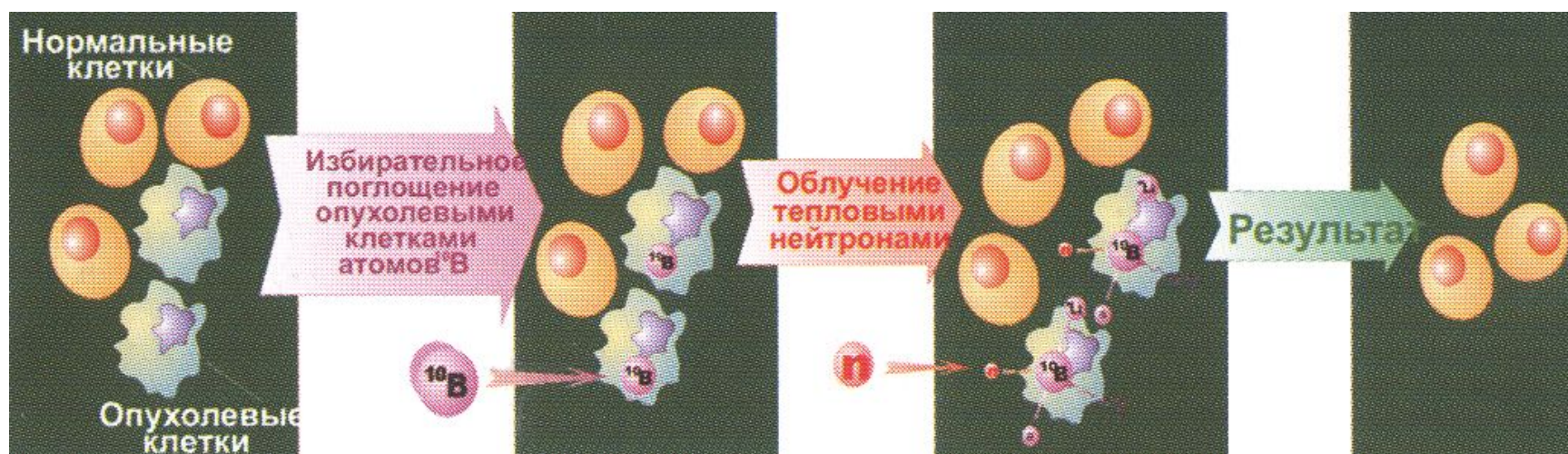


Схема разрушения опухолевых клеток при НЗТ

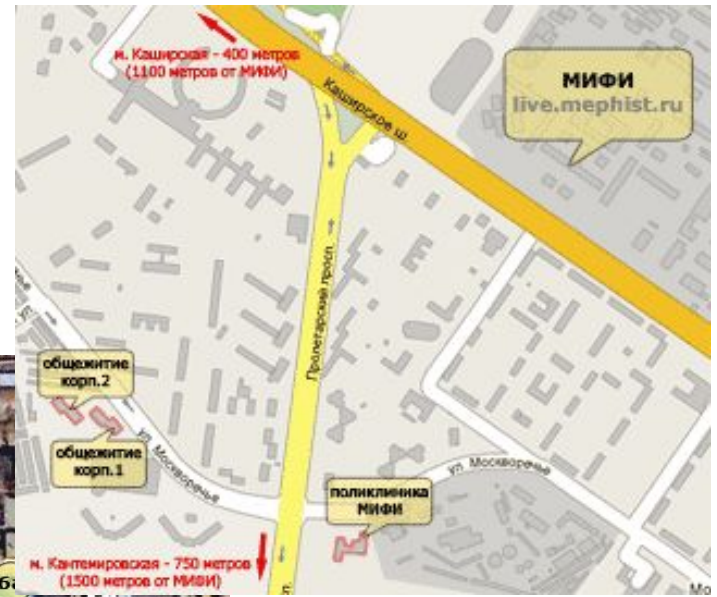
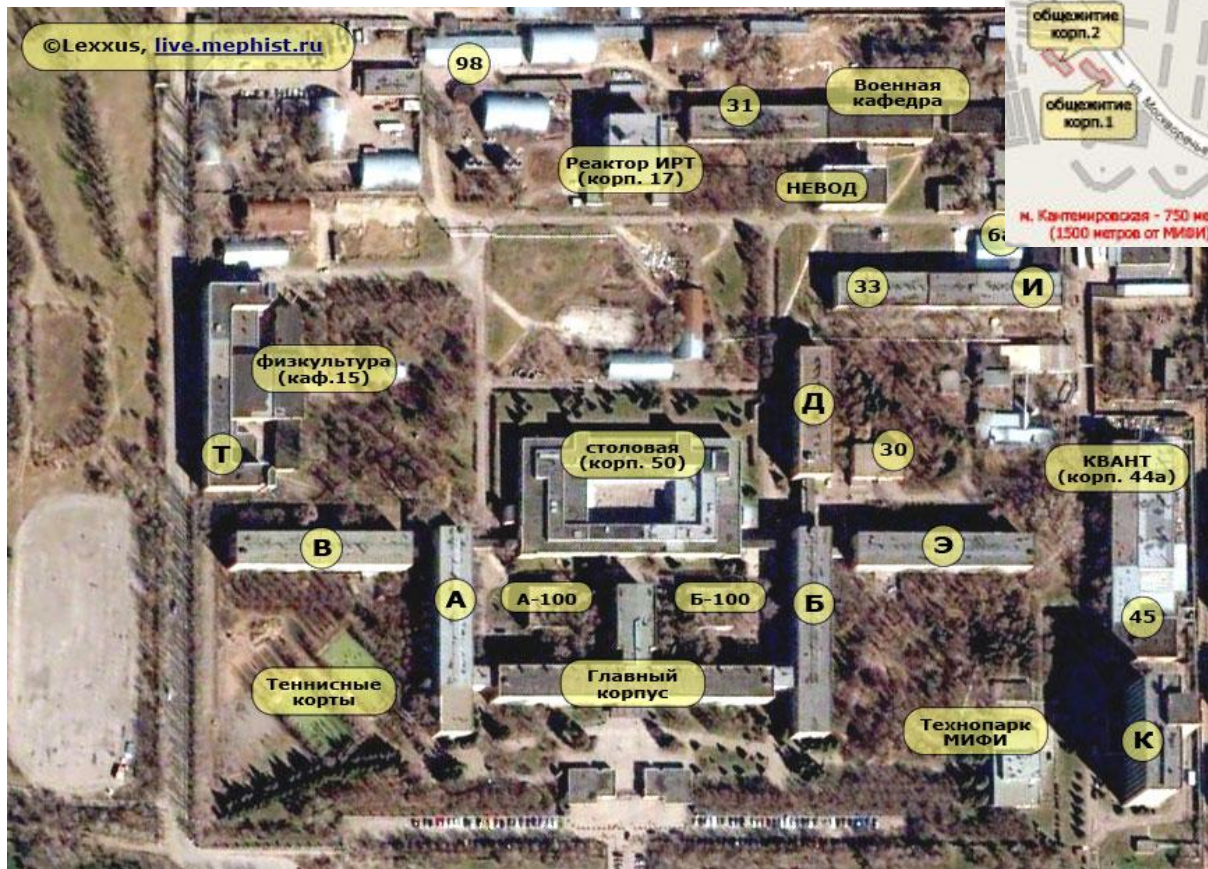


Атомный центр Московского инженерно-физического института (АЦ МИФИ)



- Под руководством В.Ф.Хохлова (ГНЦ ИБФ), А.А.Портнова, К.Н.Зайцева активно проводятся исследования по высокоэффективному методу **нейтрон-захватной терапии** злокачественных опухолей на основе соединений, содержащих ^{10}B и ^{157}Cd .
- В опытах на крупных лабораторных животных со спонтанной меланомой в 80% случаев достигнута полная резорбция опухолей.

Карта МИФИ



Примеры лечения методом НЗТ in vivo



- Меланома слюнной железы собаки до и после лечение методом НЗТ

Примеры лечения методом НЗТ in vitro



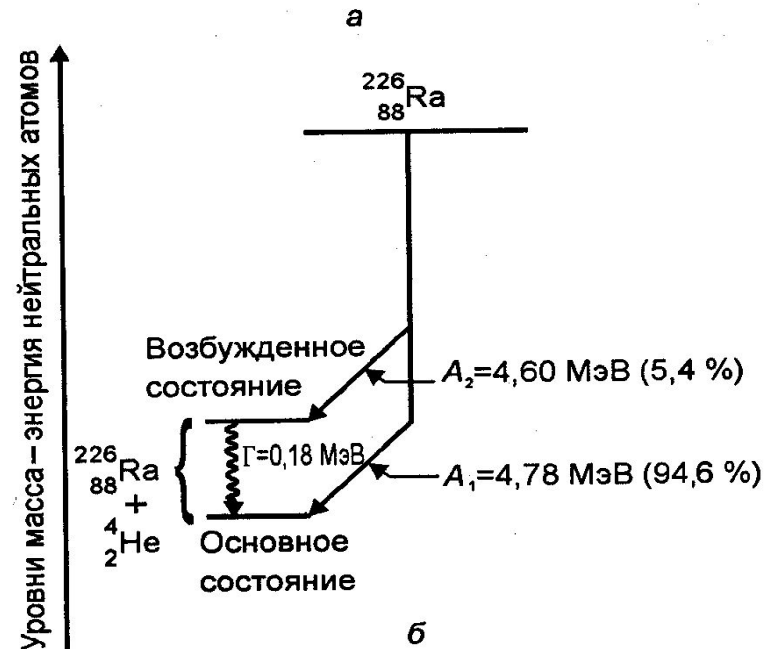
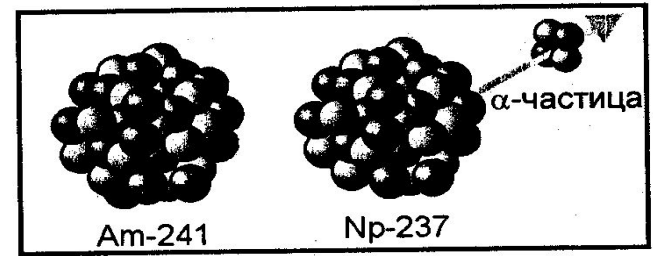
- Схема экстракорпорального лечения рака кости методом НЗТ

● П-мезоны

- Заряженные частицы с энергией 25-100 МэВ.
- Нестабильны ($T_{1/2} = 2,54 \cdot 10^{-8}$ с)
- МП протонов (в 6 раз) > **Масса покоя (МП) π^-** > МП e^- в 273 раз, поэтому π^- рассеиваются меньше, чем электроны, но больше, чем протоны
- Проходят путь в тканях до полного торможения почти без ядерных взаимодействий, в конце пробега захватываются ядрами атомов ткани, что сопровождается «микровзрывом» - вылетом набора частиц (нейтронов, протонов, альфа-)
- Благодаря особенности взаимодействия с тканями широко используются в лучевой терапии

- α -частицы (ядра атомов гелия, ${}^4\text{He}$ – 2 протона+2 нейтрона)

- Альфа-распад характерен для тяжелых элементов (урана, тория, плутония, полония и др. – всего 40 естественных и около 200 искусственных).
- Периоды α -распада - от 10^{-7} с до 10^{17} лет , при этом кинетическая энергия α -частиц=2-9МэВ.
- При альфа-распаде атомный номер уменьшается на 2, а массовое число на 4

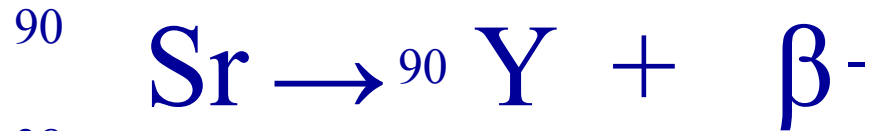


Взаимодействие альфа-частиц с веществом

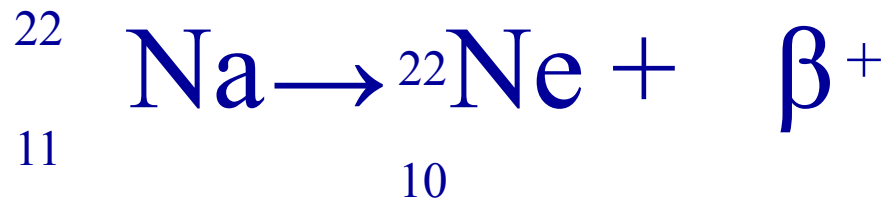
- Пробег альфа-частиц в воздухе не превышает 11 см, в мягких тканях человека – микроны. (Макс.энергия – 8,8 МэВ – распад ^{210}Po)
(Возможно ускорение до энергии в сотни МэВ, что приведет к увеличению длины пробега – использование в лучевой терапии)
- Альфа-частицы относятся к числу высокоионизирующих частиц

β -частицы образуются:

- При электронном β -распаде происходит превращение нейтрона в протон, заряд ядра и его порядковый номер увеличиваются на единицу. Массовое число ядра не изменяется

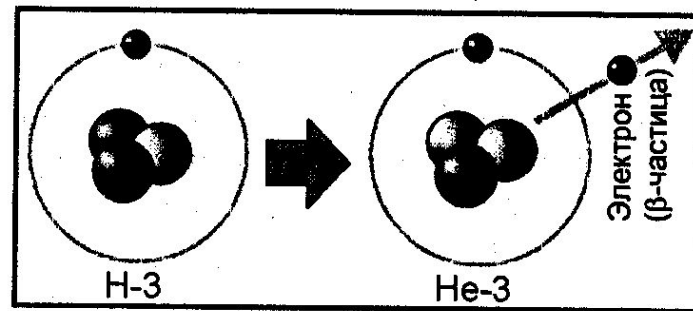
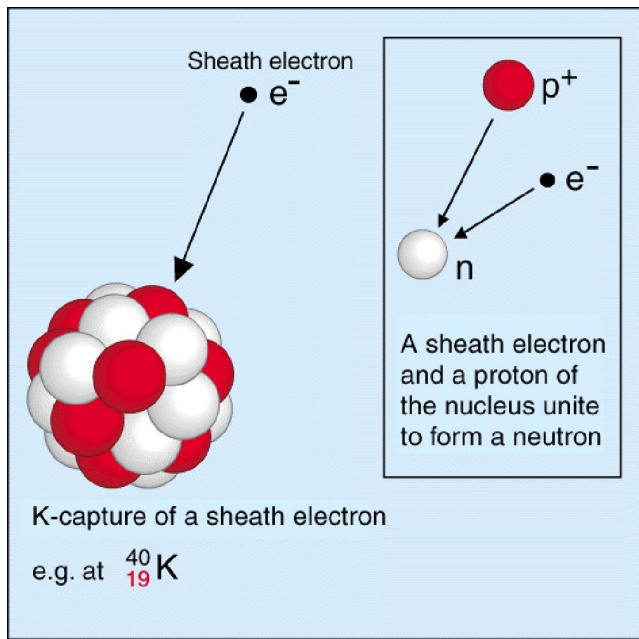
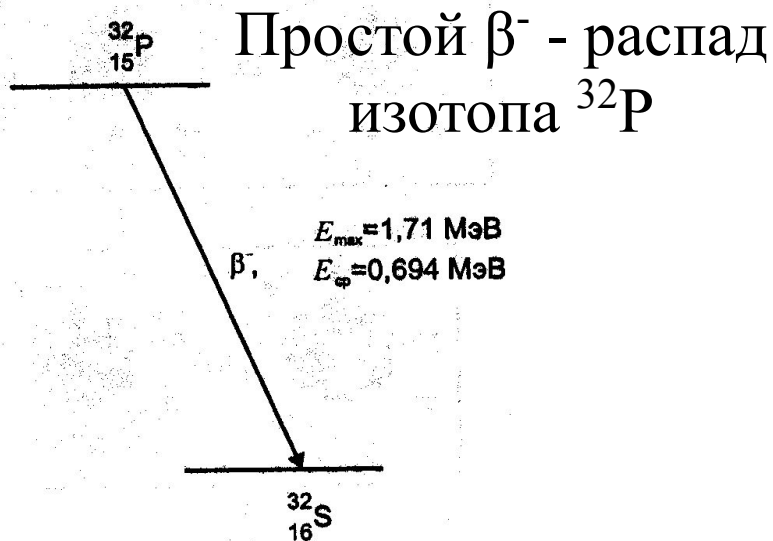


- При позитронном β -распаде происходит превращение протона в нейтрон, которое сопровождается выбросом позитрона. Заряд ядра и его порядковый номер уменьшаются на единицу. Массовое число ядра не изменяется

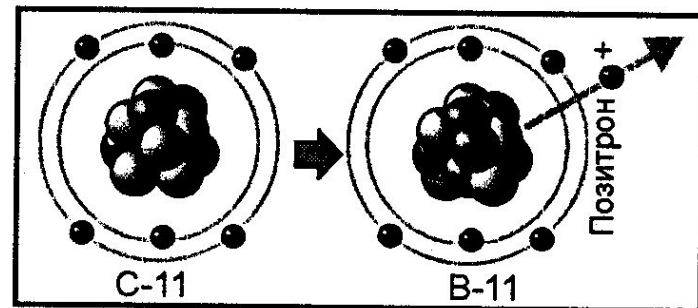


Примеры β -распада

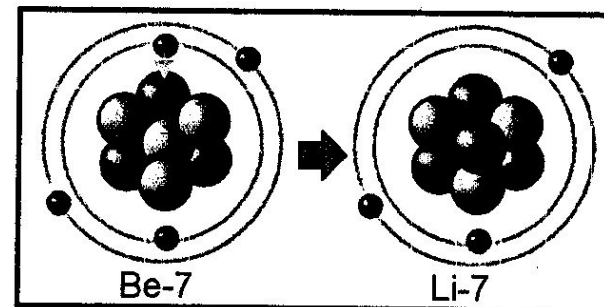
Уровни масса-энергия нейтральных атомов



a



б



- а) β^- - распад трития;
 б) β^+ - распад углерода ^{11}C ;
 в) электронный захват ^7Be

Взаимодействие с веществом

- ❖ Бета частицы имеют разную энергию, поэтому их пробег в веществе неодинаков.
- ❖ При взаимодействии с атомами среды бета-частицы отклоняются от своего первоначального направления, сильнее, чем альфа-частицы. Их путь в веществе представляет из себя ломаную линию.
- ❖ Ионизирующая способность бета-частиц меньше, чем альфа-частиц.
- ❖ При прохождении вблизи положительно заряженных ядер, бета-частицы тормозятся и теряют энергию в виде тормозного рентгеновского излучения.

Взаимодействие заряженных частиц с веществом:

- Заряженная частица испытывает электростатическое взаимодействие, (притягивается или отталкивается) с электронами или ядром атомов, мимо которых пролетает, и теряет при этом энергию.
- Частица с энергией 1 МэВ испытывает около 10^5 взаимодействий, пока не потеряет всю энергию.
- Чем больше масса частицы, тем меньше она отклоняется от первоначального направления.

Относительная биологическая эффективность, ЛПЭ и поражение клеток

- Относительная биологическая эффективность увеличивается с ростом ЛПЭ (рис. 1)

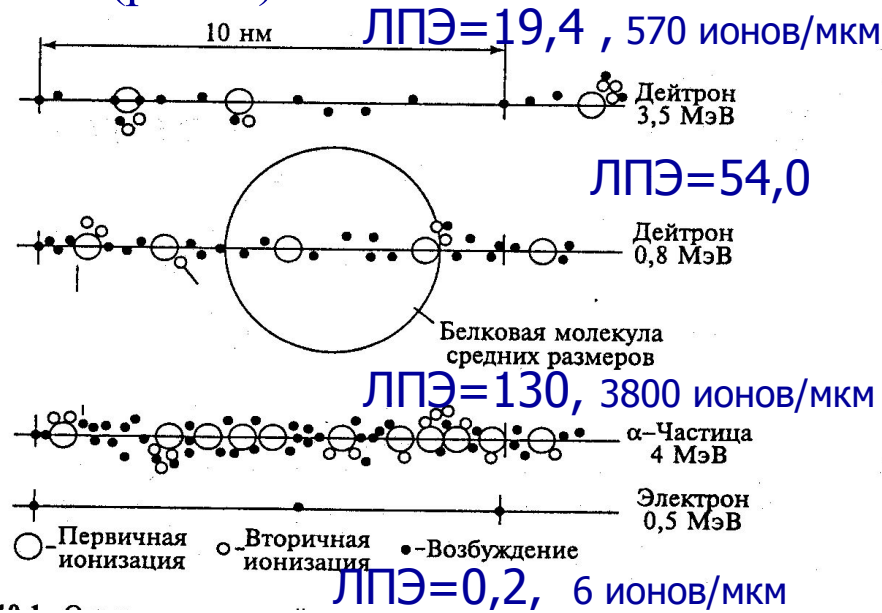


Рис.1. Схематическое распределение актов ионизации вдоль треков заряженных частиц различной природы и энергии. С ростом ЛПЭ вероятность поражения увеличивается

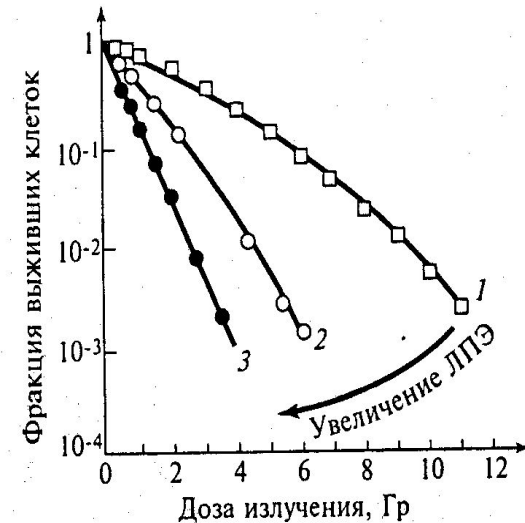


Рис. 2. Кривые выживания клеток почки человека, подвергнутых облучению.

1 – рентгеновское излучение, 2 – нейтроны, 3 – α-излучение.

- С ростом ЛПЭ повышается поражаемость клеток и снижается их способность к восстановлению (рис.2)
- Дейтрон = дейтерий = ${}^2\text{H}$ (1 протон+1 нейтрон)

Парадокс радиобиологии:

**Большое несоответствие между малой величиной
поглощенной энергии и выраженностью
реакции биологического объекта**

Н.В.Тимофеев-Ресовский

Пример: при облучении человека массой 70 кг в абсолютно смертельной дозе 10 Гр поглощается всего 167 калорий, что при переводе в тепловую энергию будет соответствовать нагреванию организма человека на $0,001^{\circ}\text{C}$,