Лекция 10.Физические основы интроскопии. Ионизирующие излучения.

Лектор В.В. Войтик

1. Рентгеновское излучение. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом, физические основы применения в медицине.
2. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.
3. Взаимодействие α-, β- и γ-излучений с веществом. Радиолиз воды.
4. Механизмы действия ионизирующих излучений на организм человека. Дозиметрия ионизирующего излучения. Поглощенная , экспозиционная и эквивалентная дозы. Радиационный фон. Защита от ионизирующего излучения.
5. Физические основы интроскопии: рентгеновская компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, позитрон-эмиссионная томография.

Рентгеновское излучение

- Рентгеновское излучение - электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на энергетической шкале между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10−14 до 10−8 м. Энергетические диапазоны рентгеновского излучения и гамма-излучения перекрываются в широкой области энергий. Оба типа излучения являются электромагнитным излучением и при одинаковой энергии фотонов - эквивалентны.

Рентгеновское излучение

- Рентгеновские лучи возникают при сильном ускорении заряженных частиц (тормозное излучение), либо при высокоэнергетичных переходах в электронных оболочках атомов или молекул. Оба эффекта используются в рентгеновских трубках, в которых электроны, испущенные катодом, ускоряются под действием разности электрических потенциалов между анодом и катодом и ударяются об анод, где происходит их резкое торможение. При этом испускаются рентгеновские лучи, то есть тормозное излучение, и в то же время выбиваются электроны из внутренних электронных оболочек атомов анода. Пустые места в оболочках занимаются другими электронами атома. При этом испускается рентгеновское излучение с характерным для материала анода спектром энергий. В процессе ускорения-торможения лишь около 1% кинетической

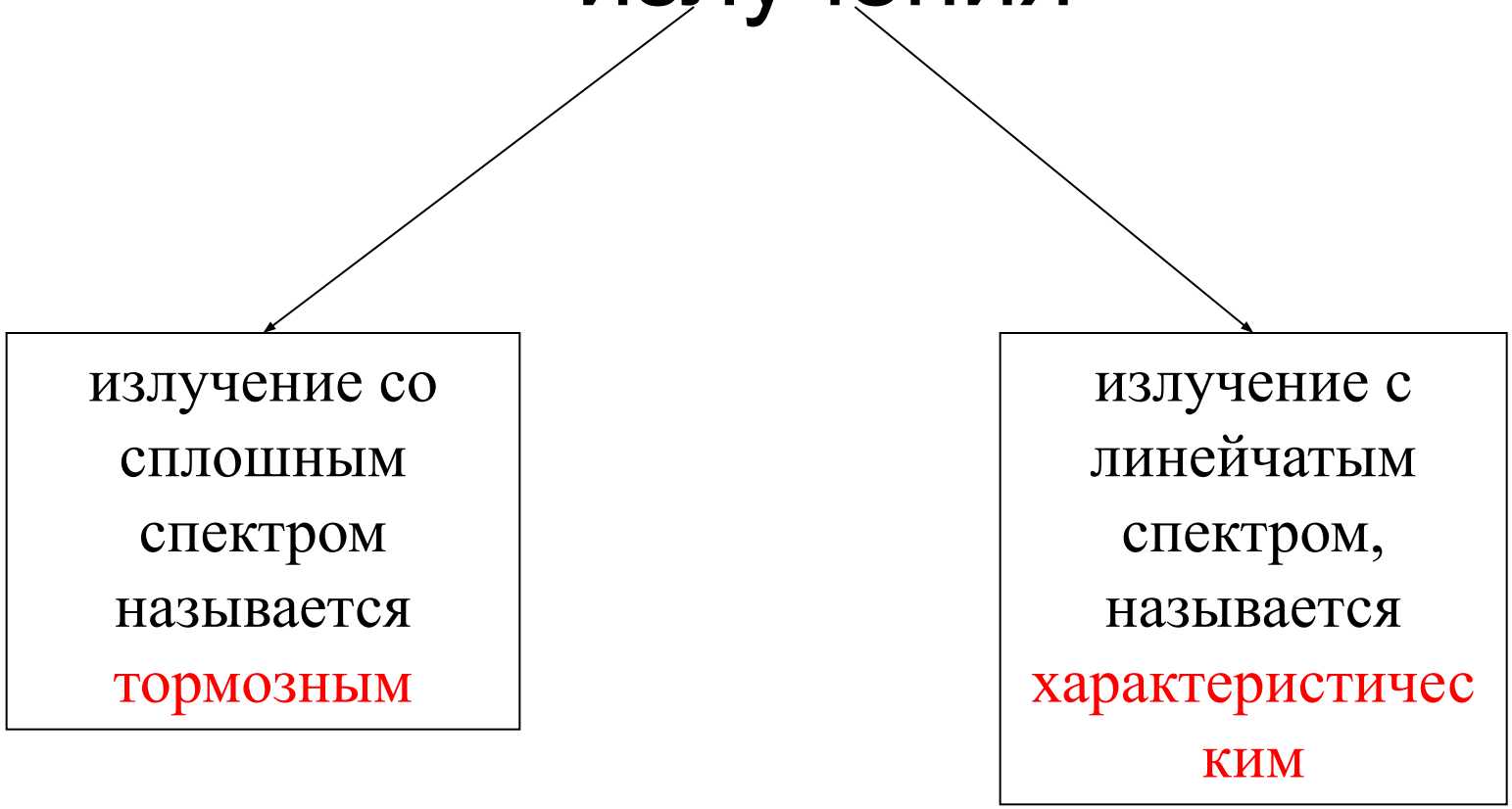
Рентгеновское излучение

Рентгеновские лучи могут проникать сквозь вещество, причём различные вещества по-разному их поглощают. Поглощение рентгеновских лучей является важнейшим их свойством в рентгеновской съёмке. Интенсивность рентгеновских лучей экспоненциально убывает в зависимости от пройденного пути в поглощающем слое $I = I_0 e^{-kd}$ где d - толщина слоя, коэффициент k пропорционален $Z^3\lambda^3$, Z - атомный номер элемента, λ - длина волны. Откуда видно, что в слоях, состоящих из химических элементов с более высокими порядковыми номерами, рентгеновское излучение будет поглощаться больше.

Рентгеновское излучение

При рентгенограмме костей, содержащих очень много соединений кальция (Z=20), именно кости «засвечиваются» по отношению к другим тканям, состоящим в основном из элементов с порядковыми номерами меньше, чем у кальция. В результате чего на рентгеновском снимке получается отчетливое изображение кости (как эффект поглощения рентгеновского излучения).

Типы рентгеновского излучения



Тормозное рентгеновское излучение

вызывается торможением быстрых электронов при их движении в веществе. Торможение быстрых электронов при их движении в веществе приводит к неравномерному движению, т.е. движению с ускорением, что в свою очередь вызовет непрерывное излучение с непрерывным, т.е. сплошным спектром частот. Этот спектр будет иметь границу, определенную условием

$$h\omega = e_0 U$$

где $e_0 U$ - кинетическая энергия

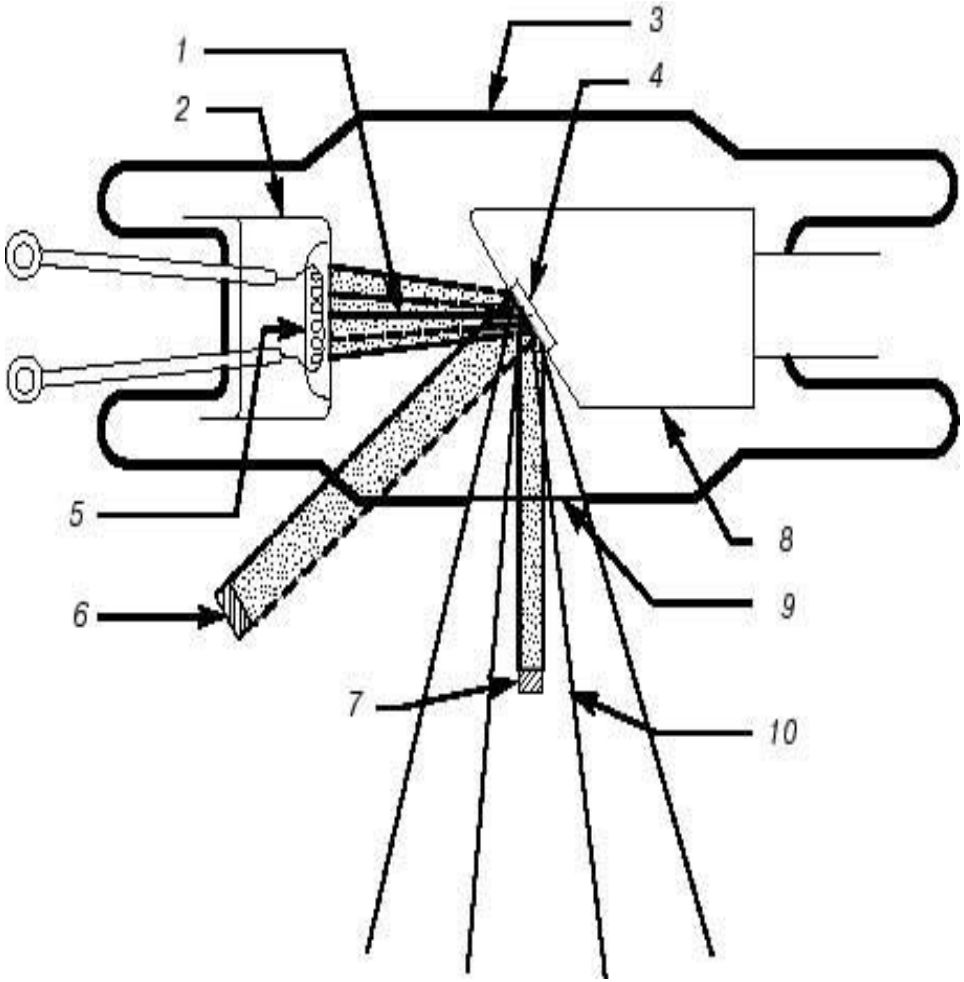
Характеристическое излучение.

Возникает после ионизации атома с выбрасыванием электрона с одной из его внутренних оболочек. Такая ионизация может быть результатом столкновения с атомом частицы с высокой энергией или поглощения атомом фотона. Спектр характеристического излучения – линейчатый. Частота линий спектра характерна для атомов каждого химического элемента. Каждому переходу (с n m) соответствует своя частота перехода ω_{mn}, что и создает спектральные линии

Свойства рентгеновского излучения

- рентгеновское излучение распространяется прямолинейно, давая достаточно резкую тень объекта на экране
- оно электрически нейтрально и не отклоняется магнитным полем
- часть излучения, которая поглощается объектом, может производить физическое (ионизация, флуоресценция), химическое (воздействие на фотопленку) и биологическое действия
- прозрачность объектов, через которые проходит рентгеновское излучение, зависит от свойства объекта (атомного номера его элементов), его плотности, толщины и разности потенциалов, приложенных к трубке

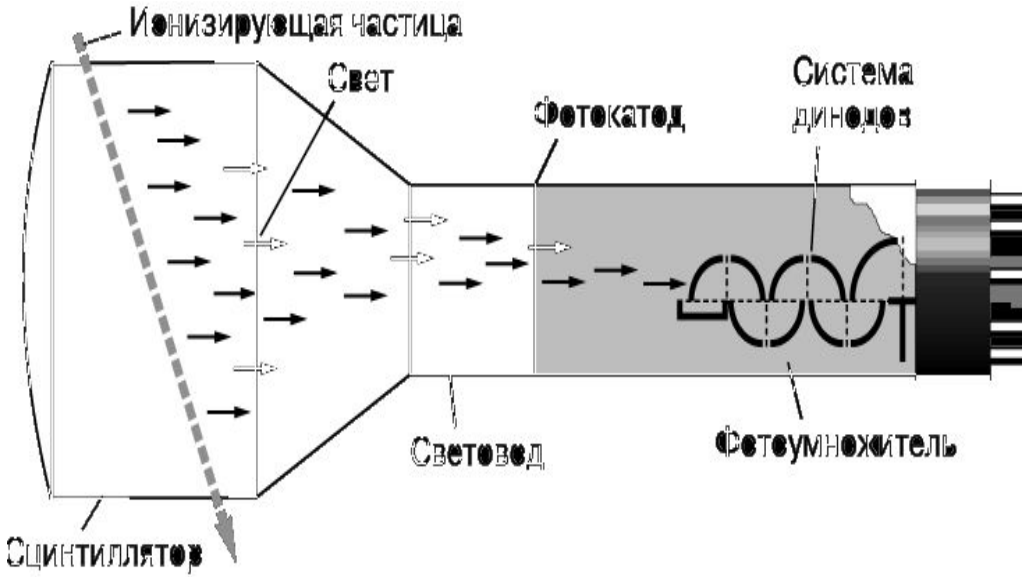
Генерация рентгеновского излучения



РЕНТГЕНОВСКАЯ ТРУБКА КУЛИДЖА

1 – электронный пучок
2 – катод с фокусирующим электродом
3 – стеклянная оболочка (трубка)
4 – вольфрамовая мишень (антикатод)
5 – нить накала катода
6 – реально облучаемая площадь
7 – эффективное фокальное пятно
8 – медный анод
9 – окно
10 – рассеянное рентгеновское излучение

Регистрация рентгеновского излучения

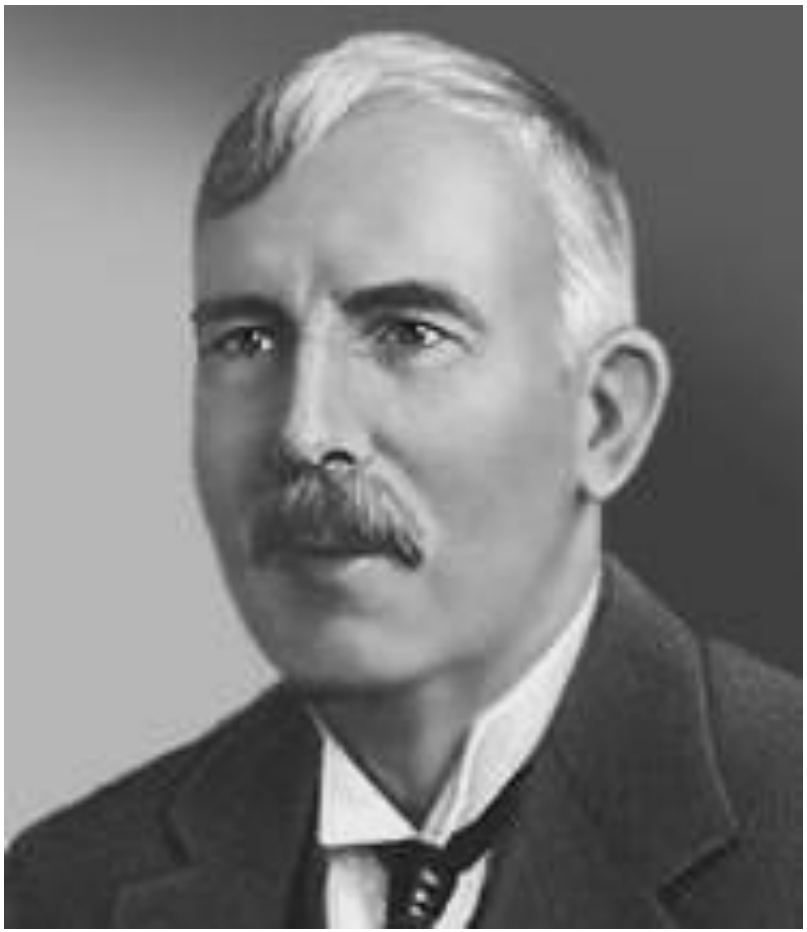


Регистрация рентгеновского излучения

Виды детекторов

- устройства рентгеновской флюорографии и рентгеноскопии, в которых пучок рентгеновского излучения проходит через исследуемый объект, а прошедшее излучение попадает на люминесцентный экран или фотопленку. Изображение возникает благодаря тому, что разные части исследуемого объекта поглощают излучение по-разному – в зависимости от толщины вещества и его состава
- устройства, в которых энергия рентгеновского излучения преобразуется в электрические сигналы, характеризующие относительную интенсивность излучения

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.



Резерфорд обнаружил, что активность тория, определямая как число альфа-частиц, испускаемых в единицу времени, остаётся неизменной в закрытой ампуле. Было обнаружено, что в результате атомного превращения образуется вещество совершенно нового вида, полностью отличная по своим физическим и химическим свойствам от первоначального

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.

- Атомы радиоактивного вещества подвержены спонтанным видоизменениям. Таким образом, радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием различных частиц.

Правило смещения при альфа-распаде.

- Превращения ядер подчиняются так называемому правилу смещения, сформулированному впервые Содди:при альфа-распаде ядро теряет положительный заряд 2e и масса его убывает приблизительно на четыре атомных единицы массы.
- В результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы.

Правило смещения при бета-распаде.

- При бета-распаде из ядра вылетает электрон. В результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса остаётся почти неизменной. После бета-распада элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы.

- Правила смещения показывают, что при радиоактивном распаде сохраняется электрический заряд и приближённо сохраняется относительная атомная масса ядер.
- Возникшие при радиоактивном распаде новые ядра в свою очередь обычно также радиоактивны.

Закон радиоактивного распада.

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}$$

- N–число радиоактивных ядер.
- No–число радиоактивных ядер в начальный момент времени.
- t–время распада.
- T–период полураспада. Период полураспада T - это то время, в течение которого распадается половина начального числа радиоактивных атомов.
- Для каждого вида ядер период полураспада является строго постоянной величиной.

Среднее время жизни.

- Помимо периода полураспада, радиоактивные ядра характеризуют ещё средним временем жизни.
- Активность любого радиоактивного вещества показывает, сколько радиоактивных распадов происходит в этом веществе за единицу времени.

Действие ИИ на воду

$$H_2O \rightarrow H_2O^* \rightarrow H^\bullet + OH^\bullet$$ гидроксильный радикал

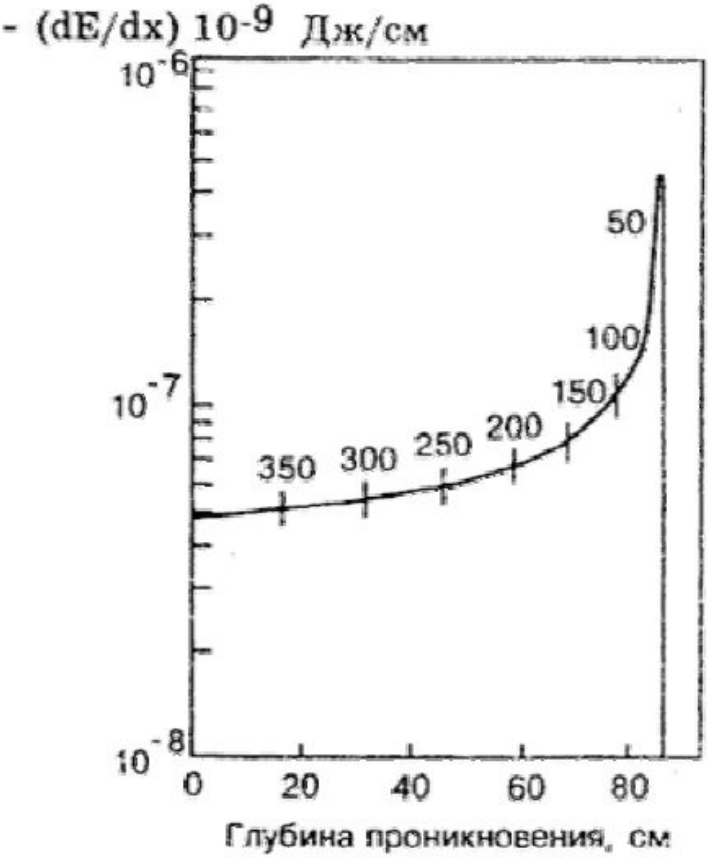
$$H^\bullet + H^\bullet \rightarrow H_2$$

$$OH^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O_2$$ пероксид водорода

$$H^\bullet + OH^\bullet \rightarrow H_2O$$

- Образовавшийся гидроксильный радикал мгновенно реагирует с любой окисляемой молекулой в ближайшем окружении. Из наиболее биологически важных компонентов клетки гидроксильный радикал способен окислять углеводы, нуклеиновые кислоты (что может привести к мутации или повреждению генов), липиды (вызывая перекисное окисление липидов) и аминокислоты.
- Перекись водорода относится к реактивным формам кислорода и при повышенном образовании в клетке вызывает оксидативный стресс(процесс повреждения клетки в результате окисления).

Взаимодействие тяжелых заряженных частиц (протоны, альфа-частицы, мезоны и др.) с веществом



Проходя через вещество, заряженная частица совершает десятки тысяч соударений, постепенно теряя энергию. Тормозная способность вещества может быть охарактеризована величиной удельных потерь dE/dx. **Соударения с электронами практически не изменяют траекторию движения тяжелой а-частицы (масса равна 4 а.е. м.), поэтому можно считать, что она движется практически прямолинейно.**

Поток а-частиц - это сильно ионизирующее излучение.

Взаимодействие с веществом b- излучения

В зависимости от энергии b-частиц различают:

- мягкое b-излучение (нескольких десятков кэВ);
- жесткое b-излучение (до нескольких единиц МэВ).

Вероятность взаимодействия b-частиц с веществом меньше, чем для a-частиц, так как b-частицы имеют в два раза меньший заряд и приблизительно в 7300 раз меньшую массу.

Удельная ионизация для b-частицы составляет 4 - 8 пар ионов на 1 мм пути, т.е. пробег b-частиц намного больше пробега a-частиц с той же энергией. Максимальные пробеги b-частиц с энергией 1 МэВ составляет в воздухе около 4 м, в воде - 4,4 м, в алюминии - 2 мм.

При взаимодействии b-частиц с электронами атомов массы соударяемых частиц можно считать одинаковыми, поэтому b-частицы при столкновении отклоняются гораздо сильнее, в результате чего при торможении траектория движения b-частиц имеет вид ломаной линии. Скорость b-частиц сравнима со скоростью света. Взаимодействие электронов и позитронов с веществом качественно одинаково и складывается из трех основных процессов: упругого рассеяния на атомных ядрах; рассеяния на орбитальных электронах; неупругих столкновений с атомным ядром.

- **Упругое рассеяние** b-частиц происходит в основном на ядрах, но могут также происходить и на атомных оболочках. Вследствие малой массы, b-частицы могут отклоняться на большие углы. Чем меньше энергия b-частиц, тем больше (в среднем) отклонение, которое она испытывает.
  Поэтому при радиометрических измерениях неюбходимо учитывать эффект обратного рассеяния, который может привести к увеличению счета.
  Рассеяние b-частиц на орбитальных электронах среды является наиболее важным процессом для регистрации b-частиц. Потерянная при столкновении энергия b-частицы передается орбитальному электрону, что ведет к возбуждению или ионизации атома.
- При ионизации b-частицы выбивают орбитальные электроны, которые могут производить вторичную ионизацию. Полная ионизация равна сумме первичной и вторичной ионизации. На 1 мкм пути в веществе b-частица создает несколько сотен пар ионов.
- При **неупругом столкновении** электронов с ядрами атомов происходит торможение электронов в поле ядра. Уменьшение энергии электронов в результате торможения приводит к испусканию тормозного рентгеновского излучения.

Потери энергии тем больше, чем больше энергия b-частицы и атомный номер элемента поглотителя. Поэтому для снижения тормозного излучения защиту для b-источников выполняют из материалов с малым атомным номером - алюминий, органическое стекло и др.

В случае применения тяжелых материалов возникает тормозное (вторичное) излучение, которое является рентгеновским и обладает большой проникающей способностью.

Взаимодействие с веществом g- излучение

Взаимодействие g-квантов с веществом существенно отличается от взаимодействия a- и b-частиц. В то время как заряженные частицы передают свою энергию электронам атомов при многократных процессах соударения, g-кванты отдают всю или, по крайней мере, большую часть своей энергии при однократном взаимодействии. Однако вероятность этого взаимодействие очень низка, поэтому g-кванты обладают гораздо большей проникающей способностью, чем заряженные частицы. При семикратной (по отношению к указанной выше величине) толщине слоя интенсивность уменьшается до 1% от первоначального значения; при десятикратной - до 0,1%.

Поглощенная доза ионизирующего излучения.

- Универсальной мерой воздействия любого вида излучения на вещество является поглощённая доза излучения, равная отношению энергии, переданной ионизирующем излучением веществу, к массе вещества:

$$D=E/m$$

За единицу поглощённой дозы в СИ принят грэй (Гр).

1 Гр = 1 Дж/кг (1 Гр равен поглощённой дозе излучения, при которой облучённому веществу массой 1 кг передаётся энергия ионизирующего излучения 1 Дж).

Отношение поглощённой дозы излучения ко времени облучения называется мощностью дозы излучения:

$$N = D/t$$

Единица мощности поглощённой дозы в СИ –

Экспозиционная доза.

- Физическое воздействие любого ионизирующего излучения на вещество связано прежде всего с ионизацией атомов и молекул. Количественной мерой действия ионизирующего излучения служит экспозиционная доза, характеризующая ионизирующая действия излучения на воздух. Экспозиционная доза равна отношению электрического заряда ионов одного знака, возникающих в сухом воздухе при его облучении фотонами, к массе воздуха: X=q/M. В СИ единицей экспозиционной дозы является Кл/кг. 1 Кл/кг равен такой дозе, при которой в сухом атмосферном воздухе массой 1 кг создаются ионы, несущие электрический заряд каждого знака, равный 1 Кл. До сих пор употребляется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р): 1 Р = 2,58 * (10)^(-4) Кл/кг.

Эквивалентная доза.

- Поглощенная доза D, умноженная на коэффициент качества k, характеризует биологическое действие поглощенной дозы и называется эквивалентной дозой H:

$$H = D*k$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является зиверт (Зв). 1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и коэффициент качества равен единице.

Основа физического воздействия ядерных излучений на живые организмы – ионизация атомов и молекул в клетках.

При облучении человека смертельной дозой гамма-излучения, равной 6 Гр, в его организме выделяется энергия, равная примерно:

$$E = mD = 70 \text{ кг} * 6 \text{ Гр} = 420 \text{ Дж}$$

Биологическое действие ионизирующих излучений.

Такая энергия передается организму человека одной чайной ложкой горячей воды. Поскольку эта энергия мала, то тепловое воздействие ионизирующей радиации не является непосредственной причиной лучевой болезни и гибели человека. Основной механизм биологического воздействия ионизирующей радиации на живой организм обусловлен хим. процессами, происходящими в живых клетках после их облучения.

Одним из первых следствий действия облучения на живую клетку является нарушение ее функции деления. Поэтому в первую очередь нарушаются функции органов и тканей организма, в которых происходит деление клеток, образование новых.

Острое поражение и последствия облучения.

- Острое поражение – повреждение живого организма, вызванное действием больших доз облучения и проявляющееся в течение нескольких часов или дней после облучения. Первые признаки поражения организма взрослого человека обнаруживаются начиная с 0,5–1 Зв. Эту эквивалентную дозу можно считать пороговой для общего поражения при однократном облучении. При такой эквивалентной дозе начинаются нарушения в работе кроветворной системы человека. При эквивалентных дозах облучения всего тела 3-5 Зв около 50% облученных умирает от лучевой болезни в течение 1-2 месяцев. Главной причиной гибели людей при таких дозах облучения является поражение костного мозга. При дозах облучения в 10-50 Зв смерть наступает через 1-2 недели от кровоизлияния в желудочно-кишечном

Естественный фон облучения.

- В большинстве мест на Земле значительная часть дозы естественного фона создаётся гамма-излучения, достигающим 8-15 мЗв в год. Это местности, в которых почвы содержат большое кол-во урана. Среднее значение эквивалентной дозы от внешнего фонового гамма-излучения можно принять равным 0,4 мЗв в год.
- Каждый живой организм подвергается внутреннему облучению. Оно обусловлено тем, что с пищей, водой и воздухом в организм попадают различные хим. элементы. Они обуславливают дозу примерно 0,2 мЗв за 1 год.

В целом среднее значение эквивалентной дозы облучения, попадающей в организм человека с пищей и водой составляет примерно 0,3 мЗв за 1 год.

источников ионизирующей радиацией для многих людей наибольшую роль играют источники рентгеновского излучения, используемые в медицине. Средняя эквивалентная доза, получаемая от них человеком за год, составляет около 1 мЗв, т.е около половины дозы естественного фона.

Предельно допустимая доза.

- Такие люди как врачи-рентгенологи, работники атомных электростанций, ученые и технический персонал, работающие в области физики и физики элементарных частиц, космонавты подвергаются дополнительному облучению. Для них нужно определить допустимую границу дополнительной дозы облучения (предельно допустимая доза). В качестве неё установлена эквивалентная доза облучения населения 5 мЗв за год, т.е 0,1 ПДД (предельно допустимая доза).

За всё время жизни человека (70 лет) допустимая доза облучения для населения составляет 5 мЗв/год * 70 лет = 350 мЗв = 0,35 Зв

Интроскопия

Интроскопией называется визуальное наблюдение объектов, явлений и процессов в оптически непрозрачных телах и средах (от латинского intro – внутри).

Физические основы интроскопии

- Компьютерная томография (КТ). Метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта, предложенный в 1972 году Годфри Хаунсфилдом и Алланом Кормаком, удостоенными за эту разработку Нобелевской премии. Метод основан на измерении и сложной компьютерной обработке разности ослабления рентгеновского излучения различными по плотности тканями.

Физические основы интроскопии

- Получение рентгеновского изображения основано на различной плотности органов и тканей. При обычной рентгенографии снимок является отражением исследуемого органа или его части. При этом мелкие патологические образования могут быть плохо видны или вовсе не визуализироваться вследствие суперпозиции тканей (наложения одного слоя на другой). Для устранения этих помех в практику была введена методика КТ. Метод дает возможность получения изолированного изображения поперечного слоя тканей. Это достигается с помощью вращения рентгеновской трубки с узким пучком рентгеновских лучей вокруг пациента, а затем реконструкции изображения с помощью специальных компьютерных программ. Изображение в поперечной плоскости, недоступное в обычной рентгенодиагностике, часто является оптимальным для диагностики, так как дает четкое представление о соотношении органов.

Физические основы интроскопии

- Прогресс КТ томографов напрямую связан с увеличением количества детекторов, т.е. с увеличением числа одновременно собираемых проекций. В первом поколении КТ томографов количество детекторов равнялось 2, во втором - 30-50, в третьем - 300-500, в четвертом - 1000-5000. Во втором поколении была впервые применена веерная форма пучка рентгеновского излучения. Каждое последующее поколение КТ томографов имело существенно меньшее время реконструкции КТ-изображений и большую скорость вращения рентгеновской трубки, что позволило ускорить и расширить сферы диагностического применения КТ-исследований

Физические основы интроскопии

Магнитно-резонансная томография (МРТ).

Томографический метод исследования внутренних органов и тканей с использованием физического явления ядерного магнитного резонанса. Метод основан на измерении электромагнитного отклика ядер атомов водорода на возбуждение их определённой комбинацией электромагнитных волн в постоянном магнитном поле высокой напряжённости.

Физические основы интроскопии

- Метод магнитно-ядерного резонанса позволяет изучать организм человека на основе насыщенности тканей организма водородом и особенностей их магнитных свойств, связанных с нахождением в окружении разных атомов и молекул. Ядро водорода состоит из одного протона, который имеет магнитный момент (спин) и меняет свою пространственную ориентацию в мощном магнитном поле, а также при воздействии дополнительных полей, называемых градиентными, и внешних радиочастотных импульсов, подаваемых на специфической для протона при данном магнитном поле резонансной частоте.

Физические основы интроскопии

- Прежде всего, пациента помещают внутрь большого магнита, где имеется довольно сильное постоянное (статическое) магнитное поле, ориентированное в большинстве аппаратов вдоль тела пациента. Под воздействием этого поля ядра атомов водорода в теле пациента, которые представляют собой маленькие магнитики, каждый со своим слабым магнитным полем, ориентируются определенным образом относительно сильного поля магнита. Добавляя слабое переменное магнитное поле к статическому магнитному полю, выбирают область, изображение которое надо получить. Затем пациента облучают радиоволнами, причем частоту радиоволн подстраивают таким образом, чтобы протоны в теле пациента могли поглотить часть энергии радиоволн и изменить ориентацию своих магнитных полей относительно направления статического магнитного поля. Сразу же после прекращения облучения пациента радиоволнами протоны станут возвращаться в свои первоначальные состояния, излучая полученную энергию, и это переизлучение будет вызывать появление электрического тока в приемных катушках томографа.

Физические основы интроскопии

- Зарегистрированные токи являются МР сигналами, которые преобразуются компьютером и используются для построения (реконструкции) МРТ.
- Соответственно этапам исследования основными компонентами любого МР томографа являются: магнит, создающий постоянное (статическое), так называемое внешнее, магнитное поле, в которое помещают пациента; градиентные катушки, создающие слабое переменное магнитное поле в центральной части основного магнита, называемое градиентным, которое позволяет выбрать область исследования тела пациента; радиочастотные катушки - передающие, используемые для создания возбуждения в теле пациента, и приемные - для регистрации ответа возбужденных участков; компьютер, который управляет работой градиентной и радиочастотной катушек, регистрирующий измеренные сигналы, обрабатывающий их, записывающий в свою память и использующийся для реконструкции МРТ.

Физические основы интроскопии

- Позитронно-эмиссионная томография - радионуклидный томографический метод исследования внутренних органов. Основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов. Позитроны возникают при позитронном бета-распаде радионуклида (изотопа), входящего в состав радиофармпрепарата (РФП), который вводится в организм перед исследованием. Наиболее часто используемым изотопом является 2-дезокси-2-[фтор-18]-фторо-D-глюкоза (18-ФДГ), аналог глюкозы, в котором гидроксильная группа замещена фтором-18. Период полураспада фтора-18 равен 110 минутам, что значительно больше, нежели у других изотопов, использующихся при ПЭТ. Так же могут использоваться изотопы: кислород-15 (период полураспада 2 минуты), азот-13 (период полураспада 10 минут) и углерод-11 (период полураспада 20 минут).

Физические основы интроскопии

- Из-за избытка протонов в ядре, во время радиоактивного распада эти изотопы излучают позитроны (положительно заряженные электроны), являющиеся формой антиматерии. Позитроны быстро соединяются с электронами, и их масса переходит в энергию. При каждом таком событии (соединение позитрона и электрона) масса переходит в энергию в виде 2 мощных гамма-лучей или фотонов аннигиляции с энергией 511 кэВ, которые распространяются на 180° друг от друга. Современные ПЭТ-системы способны мгновенно распознавать и фиксировать такие пары фотонов аннигиляции.