ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПРОФЕССОРА В.Ф. ВОЙНО-ЯСЕНЕЦКОГО» МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Кафедра онкологии и лучевой терапии с курсом ПО

Заведующий кафедрой:

Д.м.н, ~~доцент~~ профессор Зуков Руслан Александрович

РЕФЕРАТ

на тему:

Физические основы лучевой терапии

Выполнил:

клинический ординатор 1 года

Лютиков Дмитрий Игоревич

Проверил:

кафедральный руководитель ординатора

к.м.н., доцент, Гаврилюк Дмитрий Владимирович

Красноярск, 2021

Оглавление

1. Введение

2. Фотонное и корпускулярное излучение

3. Фотоэффект и эффект Комптона

4. Альфа- и бета-излучение

5. Бета-излучатели в практической медицине

6. Список литературы

Введение

Ионизирующее излучение условно можно разделить на фотонное и корпускулярное. К фотонному излучению относят электромагнитные колебания, к корпускулярному — поток частиц. Понятия «электромагнитного», «квантового», «фотонного» излучения можно считать эквивалентными.

Тип взаимодействия фотонов с атомами вещества зависит от энергии фотонов. Для измерения энергии и массы микрочастиц используют внесистемную единицу энергии - электронвольт. 1 эВ — кинетическая энергия, которую приобретает частица, несущая один элементарный заряд, под действием разности потенциалов в 1В. 1эВ = 1,6 х 10^{19} Дж. Кратные единицы: 1 кэВ = 10^3 эВ; 1 МэВ = 10^6 эВ.

Согласно современным представлениям, заряженные частицы (α-, β-частицы, протоны и др.) ионизируют вещество непосредственно, а нейтральные частицы (нейтроны) и электромагнитные волны (фотоны) являются косвенно ионизирующими. Поток нейтральных частиц и электромагнитных волн, взаимодействуя с веществом, вызывают образование заряженных частиц, которые и ионизируют среду. [1,2]

Фотонное и корпускулярное излучение

В лучевой терапии используют рентгеновское излучение рентгенотерапевтических аппаратов, гамма-излучение радионуклидов и тормозное (рентгеновское) излучение высоких энергий.

Рентгеновское излучение - фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения.

Тормозное излучение - коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при изменении скорости (торможении) заряженных частиц при

взаимодействии с атомами тормозящего вещества (анода). Длины волн тормозного рентгеновского излучения не зависят от атомного номера тормозящего вещества, а определяются только энергией ускоренных электронов. Спектр тормозного излучения непрерывный, с максимальной энергией фотонов, равной кинетической энергии тормозящихся частиц. [1,2,4]

Характеристическое излучение возникает при изменении энергетического состояния атомов. При выбивании электрона из внутренней оболочки атома электроном или фотоном атом переходит в возбужденное состояние, а освободившееся место занимает электрон из внешней оболочки. При этом атом возвращается в нормальное состояние и испускает квант характеристического рентгеновского излучения с энергией, равной разности энергий на соответствующих уровнях. Характеристическое излучение имеет линейный спектр с определенными для данного вещества длинами волн, которые, как и интенсивность линий характеристического спектра рентгеновского излучения, определяются атомным номером элемента Z и электронной структурой атома.

Интенсивность тормозного излучения обратно пропорциональна квадрату массы заряженной частицы и прямо пропорциональна квадрату атомного номера вещества, в поле которого происходит торможение заряженных частиц. Поэтому для увеличения выхода фотонов используют относительно легкие заряженные частицы - электроны и вещества с большим атомным номером (молибден, вольфрам, платину).

Источником рентгеновского излучения для целей лучевой терапии является рентгеновская трубка рентгенотерапевтических аппаратов, которые в зависимости от уровня генерируемой энергии делятся на близкофокусные и дистанционные. Рентгеновское излучение близкофокусных

рентгенотерапевтических аппаратов генерируется при анодном напряжении менее 100 кВ, дистанционных - до 250 кВ. [1,3,4]

Тормозное излучение высокой энергии, как и тормозное рентгеновское излучение, — это коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при изменении скорости (торможении) заряженных частиц при взаимодействии с атомами мишени. Этот вид излучения отличается от рентгеновского высокой энергией. Источниками тормозного излучения высокой энергии являются линейные ускорители электронов - ЛУЭ с энергией тормозного излучения от 6 до 20 МэВ, а также циклические ускорители - бетатроны. Для получения высокоэнергетического тормозного излучения используют торможение резко ускоренных электронов в вакуумных системах ускорителей. [1]

Гамма-излучение — коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами при радиоактивных превращениях или ядерных реакциях, а также при аннигиляции частицы и античастицы (например, электрона и позитрона).

Источниками гамма-излучения являются радионуклиды. Каждый радионуклид испускает γ-кванты своей определенной энергии. Радионуклиды производят на ускорителях и в ядерных реакторах.

Под активностью радионуклидного источника понимают количество распадов атомов в единицу времени. Измерения производят в Беккерелях (Бк). 1 Бк - активность источника, в котором происходит 1 распад в секунду. Несистемная единица активности - Кюри (Ки). 1 Ки = 3,7 х 10^{10} Бк.

Источниками γ-излучения для дистанционной и внутриполостной лучевой терапии являются ^{60}Co и ^{137}Cs. Наибольшее распространение

получили препараты ^{60}Co с энергией фотонов в среднем 1,25 МэВ (1,17 и 1,33 МэВ).

Для проведения внутриполостной лучевой терапии применяют ^{60}Co,^{137}Cs, ^{192}Ir.

При взаимодействии фотонного излучения с веществом происходят явления фотоэффекта, эффекта Комптона, процесс образования электронпозитронных пар. [1,2,3,4,5]

Фотоэффект состоит во взаимодействии гамма-кванта со связанным электроном атома (рис. 10). При фотоэлектрическом поглощении вся энергия падающего фотона поглощается атомом, из которого выбивается электрон. После вылета фотоэлектрона в атомной оболочке образуется вакансия. Переход менее связанных электронов на вакантные уровни сопровождается выделением энергии, которая может передаваться одному из электронов верхних оболочек атома, что приводит к его вылету из атома (эффект Оже), или трансформироваться в энергию характеристического рентгеновского излучения. Таким образом, при фотоэффекте часть энергии первичного гамма-кванта преобразуется в энергию электронов (фотоэлектроны и электроны Оже), а часть выделяется в виде характеристического излучения. Атом, потерявший электрон, превращается в положительный ион, а выбитый электрон - фотоэлектрон - в конце пробега теряет энергию, присоединяется к нейтральному атому и превращает его в отрицательно заряженный ион. Фотоэффект происходит при относительно малых энергиях - от 50 до 300 кэВ, которые используются при рентгенотерапии. [1]

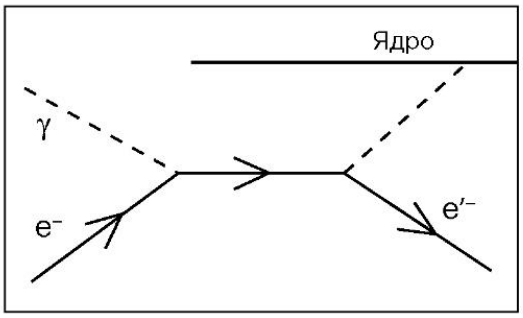

Рис. 1. Фотоэффект

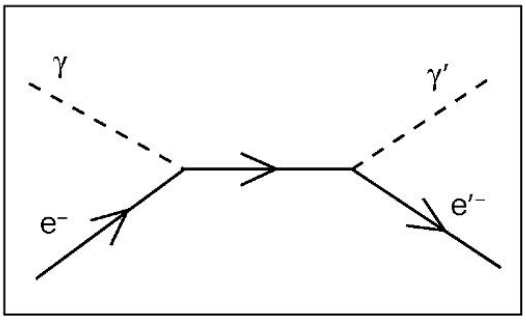

Рис. 2. Эффект Комптона

Эффект Комптона (некогерентное рассеяние) возникает при энергии фотона от 120 кэВ до 20 МэВ, то есть при всех видах ионизирующих излучений, применяемых при лучевой терапии. При эффекте Комптона падающий фотон в результате упругого столкновения с электронами теряет часть своей энергии и изменяет направление первоначального движения, а из атома выбивается электрон отдачи (комптоновский электрон), который производит дальнейшую ионизацию вещества (рис. 11). [1]

Образование электрон-позитронных пар - процесс превращения энергии первичного фотона в кинетическую энергию электрона и позитрона и в энергию аннигиляционного излучения. Энергия кванта должна быть больше 1,02 МэВ (удвоенной энергии покоя электрона). Такое взаимодействие квантов с веществом происходит при облучении больных на высокоэнергетических линейных ускорителях пучком тормозного излучения высокой энергии. Фотон исчезает в кулоновском поле ядра (или электрона).

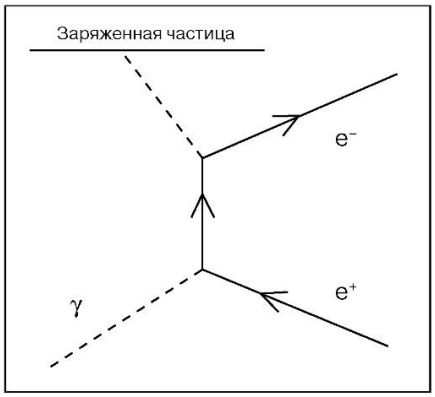

Рис. 3. Образование электрон-позитронных пар

При этом возникшей паре передается вся энергия падающего фотона за вычетом энергии покоя пары. Возникающие в процессе поглощения гамма-квантов электроны и позитроны теряют свою кинетическую энергию в результате ионизации молекул среды, а при встрече аннигилируют с испусканием двух фотонов с энергией 0, 511 МэВ каждый (рис. 3).

В результате перечисленных выше процессов взаимодействия фотонного излучения с веществом возникает вторичное фотонное и корпускулярное излучение (электроны и позитроны). Ионизационная способность частиц значительно больше, чем фотонного излучения. При чередовании процессов образования электрон-позитронных пар, тормозного излучения в среде создается огромное число фотонов и заряженных частиц, так называемая лавина излучения, которая с уменьшением энергии каждых вновь образующихся фотонов и частиц затухает.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом сопровождается его ионизацией и определяется двумя основными эффектами - фотоэлектрическим поглощением и комптоновским рассеянием. При взаимодействии тормозного излучения высокой энергии с веществом происходит комптоновское рассеяние, а также образование пар ионов, так как энергия фотонов больше 1,02 МэВ.

Интенсивность фотонного излучения точечного источника изменяется в пространстве обратно пропорционально квадрату расстояния. [1,2,3]

Корпускулярное излучение - потоки заряженных частиц: электронов, протонов, тяжелых ионов (например, ядер углерода) с энергиями в несколько сот МэВ, а также нейтральных частиц - нейтронов. Облучение с помощью потока частиц в настоящее время начали называть адронной терапией. К адронам (от греческого слова hadros - «тяжелый») относятся нуклоны, входящие в них протоны и нейтроны, а также π-мезоны и др. Источниками частиц являются ускорители и ядерные реакторы. В зависимости от максимальной энергии ускоряемых протонов условно ускорители делят на 5 уровней, причем ускорители 5-го уровня с Ep > 200 МэВ (мезонные фабрики) используются для производства отдельных радионуклидов. Как правило, производство этих радионуклидов на циклотронах другого уровня невозможно или неэффективно.

Электронный пучок высокой энергии генерируется такими же ускорителями электронов, как и при получении тормозного излучения. Используют пучки электронов с энергией от 6 до 20 МэВ. Электроны высокой энергии обладают большой проникающей способностью. Средняя длина свободного пробега таких электронов может достигать в тканях человеческого организма 10-20 см. Электронный пучок, поглощаясь в тканях, создает дозное поле, при котором максимум ионизации образуется вблизи поверхности тела. За пределами максимума ионизации происходит довольно быстрый спад дозы. На современных линейных ускорителях имеется возможность регулировать энергию пучка электронов, а соответственно, создавать требуемую дозу на необходимой глубине. [3]

Нейтрон - частица, не имеющая заряда. Процессы взаимодействия нейтронов (нейтральных частиц) с веществом зависят от энергии нейтронов и

атомного состава вещества. Основной эффект действия тепловых (медленных) нейтронов с энергией 0,025 эВ на биологическую ткань происходит под действием протонов, образующихся в реакции (n, p) и теряющих всю свою энергию в месте рождения. Большая часть энергии медленных нейтронов расходуется на возбуждение и расщепление молекул тканей. Почти вся энергия быстрых нейтронов с энергией от 200 кэВ до 20 МэВ теряется в ткани при упругом взаимодействии. Дальнейшее выделение энергии происходит в результате ионизации среды протонами отдачи. Высокая линейная плотность энергии нейтронов препятствует репарации облученных опухолевых клеток.

Еще один вид воздействия нейтронами - нейтронозахватная терапия, которая является бинарным методом радиотерапии, соединяющим два компонента. Первый компонент - это стабильный изотоп бора ^{10}B, который при введении в составе препарата может накапливаться в клетках определенных видов опухолей головного мозга и меланомах. Второй компонент - поток низкоэнергетических тепловых нейтронов. Образующиеся в результате захвата ядром ^{10}B теплового нейтрона тяжелые высокоэнергетические заряженные частицы (бор распадается на атомы лития и α-частицы) уничтожают только клетки, находящиеся в непосредственной близости к атомам бора, почти не поражая прилегающие нормальные клетки. Помимо бора, в нейтронозахватной терапии перспективно использование препаратов с гадолинием. Для глубокорасположенных опухолей перспективным является использование эпитепловых нейтронов в диапазоне энергий 1 эВ - 10 кэВ, которые обладают большой проникающей способностью и, замедляясь в ткани до тепловых энергий, позволяют осуществить нейтронозахватную терапию опухолей, расположенных на глубине до 10 см. Получение высоких потоков тепловых и эпитепловых нейтронов осуществляется с использованием ядерного реактора. [1,2]

Протон - положительно заряженная частица. Используется метод облучения на «пике Брэгга», когда максимальная энергия заряженных частиц выделяется в конце пробега и локализуется в ограниченном объеме облучаемой опухоли. В результате образуется большой градиент доз на поверхности тела и в глубине облучаемого объекта, после чего происходит резкое затухание энергии. Меняя энергию пучка, можно изменять место его полной остановки в опухоли с большой точностью. Применяются пучки протонов с энергией 70-200 МэВ и техника многопольного облучения с разных направлений, при которой интегральная доза распределяется на большой площади поверхностных тканей. При облучении на синхроциклотроне в ПИЯФ (Петербургский институт ядерной физики) используют фиксированную энергию выведенного протонного пучка - 1000 МэВ и применяют методику облучения напролет. Протоны такой высокой энергии легко проходят сквозь облучаемый объект, производя равномерную ионизацию вдоль своего пути. При этом происходит малое рассеяние протонов в веществе, поэтому сформированный на входе узкий с резкими границами пучок протонов остается практически таким же узким и в зоне облучения внутри объекта. В результате применения облучения напролет в сочетании с ротационной техникой облучения обеспечивается очень высокое отношение дозы в зоне облучения к дозе на поверхности объекта - порядка 200:1. Узкий протонный пучок с размерами на половине интенсивности в 5-6 мм используют для лечения различных заболеваний головного мозга, таких как артериовенозные мальформации головного мозга, аденомы гипофиза и др. Поражающий эффект ионов углерода оказывается в пике Брэгга выше чем у протонов в несколько раз. Происходят многократные двойные разрывы спирали ДНК атомов облучаемого объема, которые после этого уже не подлежат восстановлению. [1,3]

π-Мезоны - бесспиновые элементарные частицы с массой, величина которой занимает промежуточное место между массами электрона и протона.

π-Мезоны с энергиями 25-100 МэВ проходят весь путь в ткани практически без ядерных взаимодействий, а в конце пробега захватываются ядрами атомов ткани. Акт поглощения π-мезона сопровождается вылетом из разрушенного ядра нейтронов, протонов, α-частиц, ионов Li, Be и др. Активному внедрению в клиническую практику адронной терапии пока препятствует высокая стоимость технологического обеспечения процесса.

Преимуществами использования излучения высокой энергией для лечения злокачественных опухолей, находящихся на глубине, являются при увеличении энергии возрастание глубинной дозы и уменьшение поверхностной, более высокая проникающая способность с увеличением относительной глубинной дозы, меньшая разница между поглощенной дозой в костях и мягких тканях. При наличии линейного ускорителя или бетатрона отпадает необходимость захоронения радиоактивного источника, как при использовании радионуклидов.

При проведении брахитерапии, системной радионуклидной терапии используют α-, β-, γ-излучающие радионуклиды, а также источники, обладающие смешанным, например γ- и нейтронным (n), излучением. [1,3]

α-Излучение - корпускулярное излучение, состоящее из ядер ^{4}He (два протона и два нейтрона), испускаемых при радиоактивном распаде ядер или при ядерных реакциях, превращениях. α-Частицы испускаются при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца или образуются в ядерных реакциях.

α-Частицы обладают высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью, несут два положительных заряда.

Радионуклид ^{225}Ac с периодом полураспада 10,0 сут в соединении с моноклональными антителами применяют для радиоиммунотерапии опухолей. В перспективе - использование для этих целей радионуклида ^{149}Tb

с периодом полураспада 4,1 ч. α-Излучатели начали использовать для облучения эндотелиальных клеток в коронарных артериях после проведения операций - аортокоронарного шунтирования. [1,2,3]

β-Излучение - корпускулярное излучение с непрерывным энергетическим спектром, состоящее из отрицательно или положительно заряженных электронов или позитронов (β^- или β^+ частиц) и возникающее при радиоактивном β-распаде ядер или нестабильных частиц. β-Излучатели используются при лечении злокачественных опухолей, локализация которых позволяет обеспечить непосредственный контакт с этими препаратами.

Источниками β-излучения являются ^{106}Ru, β^--излучатель с энергией 39,4 кэВ и периодом полураспада 375, 59 дня, ^{106}Rh, β^--излучатель с энергией 3540,0 кэВ и периодом полураспада 29,8 с. Оба β-излучателя ^{106}Ru + ^{106}Rh входят в комплекты офтальмологических аппликаторов.

β^--Излучатель ^{32}P с энергией 1,71 МэВ и периодом полураспада 14,2 дня используется в кожных аппликаторах для лечения поверхностных заболеваний. Радионуклид ^{89}Sr является практически чистым β-излучателем с периодом полураспада 50,6 дня и средней энергией β-частиц 1,46 МэВ. Раствор ^{89}Sr - хлорида используется для паллиативного лечения костных метастазов.

^{153}Sm с энергиями β-излучения 203,229 и 268 кэВ и с энергиями γ-излучения 69,7 и 103 кэВ, периодом полураспада 46,2 ч входит в состав отечественного препарата самария-оксабифора, предназначенного для воздействия на метастазы в костях, а также применяемого у больных с выраженным болевым синдромом в суставах при ревматизме.

^{90}Y с периодом полураспада 64,2 ч и максимальной энергией 2,27 МэВ используется для различных терапевтических целей, включая

радиоиммунотерапию с мечеными антителами, лечение опухолей печени и ревматоидного артрита. [1,2,3,4]

Радионуклид ^{59}Fe в составе таблетированного радиофармацевтического препарата применяют в Российском научном центре рентгенорадиологии (Москва) для лечения больных раком молочной железы. Принцип действия препарата, по мнению авторов, заключается в распространении железа током крови, избирательном накоплении в клетках опухолевой ткани и воздействии на них β-излучением. ^{67}Cu с периодом полураспада 2,6 сут соединяют с моноклональными антителами для радиоиммунной терапии опухолей.

^{186}Re в составе препарата (рения сульфид) с периодом полураспада 3,8 сут используют для лечения болезней суставов, а баллонные катетеры с раствором перрената натрия применяют для проведения эндоваскулярной брахитерапии. Считается, что есть перспектива для применения β^+-излучателя ^{48}V с периодом полураспада 16,9 сут для проведения внутрикоронарной брахитерапии с использованием артериального стента из сплава титана и никеля.

^{131}I применяют в виде растворов для лечения заболеваний щитовидный железы. ^{131}I распадается с испусканием сложного спектра β- и γ-излучения. Имеет период полураспада 8,06 дня.

К рентгеновским и Оже-электронным излучателям относят ^{103}Pd с периодом полураспада 16,96 дней и ^{111}In с периодом полураспада 2,8 сут. ^{103}Pd в виде закрытого источника в титановой капсуле применяют при брахитерапии опухолей. ^{111}In применяют при радиоиммунотерапии с использованием моноклональных антител.

^{125}I, являющийся γ-излучателем (тип ядерного превращения - электронный захват с превращением йода в теллур и выделением γ-кванта),

используют в виде закрытого микроисточника для брахитерапии. Период полураспада - 60,1 сут.

Смешанное γ^+нейтронное излучение свойственно ^{252}Cf с периодом полураспада 2,64 года. Применяют для контактного облучения, причем с учетом нейтронной составляющей, при лечении высокорезистентных опухолей. [1,4,5]

Список использованной литературы

1. Лучевая терапия: учебник. - Т. 2. - Труфанов Г.Е., Асатурян М.А., 2010. - 192 с. : ил.
http://kingmed.info/knigi/Luchevaya_diagnostika_i_luchevaya_terapiya/book_967/Luchevaya_terapiya_Uchebnik_Tom_2-Trufanov_GE_Asaturyan_MA_Jarinov_GM-2007-pdf

2. Терапевтическая радиология. Национальное руководство. – А.Д. Каприн, Ю.С. Мардынский - Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2018. - 704 с.
https://www.rosmedlib.ru/book/ISBN9785970446584.html

3. Медицинская радиология. – Л.Д. Линденбратен, Ф.М. Лясс – Москва, «Медицина», переиздание 2011г. – 368 с. : ил.

https://drivems.by/new/wp-content/uploads/Lindenbraten-Korolyuk-Meditsinskaya-radiologiya-i-rentgenologiya.pdf

4. Основы радиобиологии. Учебно-методическое пособие. - А.Д.Доника, С.В.Поройский. – Волгоград, 2010г. – 173с.

https://www.volgmed.ru/uploads/files/2011-11/7760-osnovy_radiobiologii_uchebno-metodicheskoe_posobie.pdf

5. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 09/2009 г.). Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.25.23-09.

http://docs.cntd.ru/document/902170553