

Оглавление

№ раздела	Название раздела	Стр.	Название файла и его расширение
I	Урок – теоретическая часть		Радиобиология – медицина будущего.docx
I.1	Введение	2-3	
I.2	Предмет радиобиологии. История радиобиологии: от физики к медицине	4-8	
I.3	Физика – медицинской диагностике: рентгенология	9-15	
I.4	Классификация заряженных частиц. Их преимущества в лучевой терапии. Работы российских ученых (школы акад. М.А. Сергеева , президента РАН) – прорыв в лучевой терапии	16-18	
I.5	Список литературы	19	
II	Практикумы (лабораторные работы)		
II.1	Лабораторная работа №1.	1-7	Лабораторная работа №1.doc
II.2	Лабораторная работа №2	Слайды 1-10	Лабораторная работа №2.pptx (исходник), Лабораторная работа №2.ppsx (симуляция)

I.1. ВВЕДЕНИЕ

Радиобиологию – науку о взаимодействии излучения и биологического вещества принято считать той предметной областью, где *впервые в развитии наших знаний о живом произошел «стык» физики, биологии и медицины*. В настоящее время такой «стык» в англоязычной литературе именуется значительно более длинным словосочетанием и потому, на наш взгляд, менее удачным (interdisciplinary investigations) и представляет в XXI веке магистральный путь наших знаний о природе как здорового, так и больного человека. Ясно, что данная междисциплинарная область, которая сегодня именуется *медицинская радиобиология*, как и любая междисциплинарная область изысканий, может представлять и представляет чрезвычайный интерес для любых специалистов вышеизложенных специальностей: физиков, химиков, биологов и, естественно, медиков, т.е. тех людей, которым по определению суждено исправлять те повреждения органов, тканей и клеток организма, которые подверглись действию радиации. Поэтому, вполне закономерным результатом их интересов стало то, что уже к середине прошлого века радиобиология стала самостоятельной отраслью науки.

И, как это часто бывает в развитии любых отраслей и «междисциплинариев», это ее преимущество (самостоятельность радиобиологии) обернулось существенным недостатком. Довольно скоро стало очевидным, что собственными методами радиобиологии исследующими сам физический фактор воздействия и его биологический эффект, невозможно проследить все стадии механизма воздействия физического фактора – радиации на биологический объект, включая те патологические изменения, которые, в конце концов, в ряде случаев приводят к летальному исходу [«Молекулярная радиобиология» Дертингер Г., Юнг Х., Атомиздат, 1973г.]. Данная ситуация достаточно образно проиллюстрирована в высказывании одного из основателей радиобиологии А.Холлендера *«...радиобиология это толе битвы на котором были проиграны все сражения»* [там же, стр.11]. Тем более, кажется не удивительным утверждение, которое приведено в первом абзаце исторического очерка «Развитие радиобиологии» [там

же, стр.9] «для неспециалиста радиобиология кажется чрезвычайно сложным, и почти непостижимым конгломератом физики, химии, биологии и медицины». Надо сказать, что, вскоре был найден выход из этого положения, в котором оказалась данная междисциплинарная наука, а именно, выход был найден в **биофизике** – физической постановке биологических задач [«Биофизика», Владимиров Ю.А., М: Медицина, 1983г.].

Выше поставленная проблема и, обозначенный в биофизике путь ее решения, определили **цели и задачи** настоящего урока.

1. Отталкиваясь от фундаментальных физических закономерностей научиться понимать механизмы воздействия физического фактора излучения (радиации) на биологический объект.
2. В эксперименте «воздействие протонной пушки на опухоль», выполненном в технологии «совмещенной реальности», обосновать практическую значимость новых подходов радиационной физики в медицине, в одном из ее актуальных разделов – онкологии.
3. Но не по счету третье, а самое важное (пожалуй, первое). Как так случилось, что изначально начатые в **чистой физике** исследования, выполненные:
 - И.П.Пулюем (1892г. - 1894г)
 - В.К. Рентгеном (1895г.) – открытие нового вида электромагнитного излучения X-лучей, позже названные рентгеновскими
 - А.Беккерелем (1896г) - открытие радиоактивности,
 - П.Кюри и М.Склодовской –Кюри (1897г. – начало XX века) – открытие свойств радиоактивных элементов (полония¹, радия)

привели к возникновению **чисто медицинских** приложений – лучевой диагностике и лучевой терапии.

Вот с этого последнего - истории возникновения предмета - и начнем, т.к. известно, чтобы познать что-то, нужно понять, как оно возникло.

Полоний ($^{210}_{84}\text{Po}$) – радионуклид с периодом полураспада 138 дня – крайне радиоактивен, излучает α -частицы. При его введении (инкорпорировании) в организм в ничтожных дозах может наблюдаться лучевая болезнь (М. Кюри, ее дочь – лейкемия). Спустя более 100 лет – отравление Литвиненко со смертельным исходом.

1.2. Предмет радиобиологии. История радиобиологии: от физики к медицине

Из СовЭнцС. «**Радиобиология** (*radio* (лат.) – испускаю лучи, *radius* – луч, *logos* – закономерность) – наука о действии всех видов ионизирующих излучений на организмы и их сообщества. Радиобиология охватывает все виды взаимодействия в живой природе (если в основе лежит близкое действие, т.е. любая частица взаимодействует с другой частицей через поле или излучение). Радиобиология занимается изысканием различных средств защиты организма от излучения и путей его пострадиационного восстановления от повреждений, прогнозированием опасности для человечества повышающегося уровня радиации окружающей среды, изысканием новых путей использования в медицине, сельском хозяйстве, пищевой и микробиологической промышленности. Сформировалась в 1-ой пол. 20 в.»

Определение

Радиобиология (в широком смысле) – наука о закономерностях взаимодействия биологического вещества и излучения (П.В. Сергеев).

Радиобиология (в узком смысле) – наука о взаимодействии ионизирующего излучения (ИИ) и биообъекта (БО) с целью выяснения:

- первичных физико-химических этапов взаимодействия (этапы взаимодействия с веществом)
- патоморфогенеза лучевого поражения органов и тканей (радиационный метагенез)
- выработки способов управления радиочувствительностью клеток и тканей организма (лечение опухолей – увеличение радиочувствительности клеток опухоли, снижение радиочувствительности клеток нормальной ткани)
- разработки способов защиты от излучения
- разработка реабилитационных мероприятий, направленных по повышению устойчивости организма ко всем видам излучения (ИИ, диагностическое – рентгеновское, УЗ, дисплея компьютера, СВЧ, КВЧ, лазерное)

Этапы воздействия излучения на БО:

- физическая стадия
- физико-химическая стадия
- биохимическая стадия
- биологическая стадия

Из названий следует, что радиобиология **объединяет** знания физики, химии, биохимии, биофизики, биологии и медицины.

В нашем уроке будет рассматриваться ИИ.

Предмет РБ

ИИ – поток частиц (электронов, протонов, нейтронов, ядер атомов, α -частиц) и электромагнитных волн (γ -кванты – порождаются внутриатомными квантовыми переходами) с энергией, **значительно превышающей** 10-15 эВ (энергии ионизации – необходимой для отрыва электрона от ядра).

Физическая постановка задач (значение) радиобиологии (опираясь на узкое определение РБ):

1. Изучение первичных эффектов взаимодействия ИИ с веществом (поглощение, образование свободных радикалов, сшивки ДНК-РНК-белок) позволяет освоить основы лучевой диагностики (дает понимание природы информации на УЗИ, R-снимке: почему изображение костей светлое, а мышц – темное)
2. Понимание механизма патоморфогенеза лучевых поражений – загадки малых доз. Например, пик заболеваемости раком щитовидной железы возникает через 4-5 лет после воздействия, а раком легких – спустя 15-25 лет. Причины этого, характер изменений в организме в течение этого времени, патогенез и способы предупреждения заболеваний можно попытаться установить методами РБ. Вопрос важен, т.к. 70% лучевой нагрузки мы получаем, проходя диагностические процедуры, а порога излучения нет
3. Управление радиочувствительностью (РЧ). РЧ – способность реагировать на лучевое воздействие. Способы повышения РЧ опухолевых клеток и снижения РЧ нормальных тканей организма могли бы использоваться в лучевой терапии.

Пример

А. Фотодинамические эффекты в биофизике: вводится хромофор – молекула, поглощающая энергию, связывается с ДНК и акцептируя световую энергию, разрушает ДНК

Отметим, что РБ не является узкой специальностью, знания которой не нужны в повседневной жизни. Ведь ИИ – это и электронный смог от дисплеев, 70% от нагрузки в обычной жизни (вне АЭС) приходится на диагностические процедуры (рентгенография в стоматологии, флюорография, радиоизотопная диагностика и др.). В Москве около 100 предприятий выбрасывают в окружающую среду радионуклиды.

Прикладное значение РБ

1. Разработка методов онкодиагностики
2. В 1925г. радиобиолог Меллер впервые установил физическую природу мутаций
3. В 1924г. – отечественные ученые Надсон и Филиппов – теория мутаций (воздействие излучения нарушает структуру хромосом)

Основной радиобиологический парадокс

В РБ показано, что летальная доза человека составляет $10 \text{ Гр} = 10 \text{ Дж/кг}$; для средней массы 70 кг она составляет $70 \cdot 10 = 700 \text{ Дж} \approx 170 \text{ кал}$.

Суть парадокса в том, что ничтожно малая доза энергии ионизирующего излучения (столько же человек получает энергии из 17 мл воды, нагретой до 46°C) вызывает летальный исход организма. Чувствительность организма к излучению в 10^4 раз превосходит чувствительность рецепторного аппарата клетки к стероидным гормонам, например, ядерных рецепторов к стероидному гормону тестостерону (данные из III т. «Молекулярной биологии клетки»). Кроме того, при получении малой дозы радиации последствия могут проявиться через $15\text{-}20$ лет, т.о. задача имеет не только фундаментальное биологическое значение, но и практическое.

Краткая история РБ – история физики, биологии и медицины

Конец 1895	Начало РБ связано с открытием физиком Рентгеном Х-лучей (обнаружил свечение кристаллов платино-синеродистого бария). С этого момента началось развитие рентгеновской диагностики
01.1986	Кулликер (анатом) – 1-я рентгенограмма кисти
1896	Тарханов. «Действие Х-лучей на ЦНС»
03 февр. 1896	Лесгафт (медик, С-Пб). «Опыт Рентгена в приложении к медико-биологическим исследованиям»
1896	Анри Беккерель обнаружил явление радиоактивности (соли урана вызывают почернение фотопластины) – испускание ИИ атомами в процессе самопроизвольного

	распада
1898	Пьер и Мария Кюри обнаружили материальные носители радиоактивности (полоний и радий)
1900	Постоянная Планка
Нач. 20в.	Е.С. Лондон «Влияние излучения радия на изменения в ЦНС и кроветворных органах»
1906	Бергонье, Трибондо (фр.). правило: РЧ прямо пропорциональна скорости деления клеток и обратно пропорциональна степени их дифференцировки. $RЧ = f(\uparrow V_{д}; \downarrow Д)$
1911-1912	Планетарная модель атома Резерфорда-Бора
1913	Хевеши (венгр.), В.Вернадский. Начало применения изотопов в диагностике (изотопы и воздействия изотопов на организм)
1925	Тимофеев-Ресовский, Дельбрюк, Циркль – сформулировали принцип попадания и принцип мишени: чем больше размер молекулы тем больше вероятность ее поражения
1934	Открыта искусственная радиоактивность
1942	Ферми – разработал реактор для получения плутония
1945	Хиросима и Нагасаки
1952	Хуг, Келлерер. Стохастическая теория РБ эффектов (взаимодействие ИИ с БО – вероятностное)
1954	Тарусов. Липидная теория поражения клетки, роль свободных радикалов
1963	Впервые в стране введен курс лекций по РБ во 2-м МОЛГМИ
1980	Карагодина. Теория радиационных повреждений, опирающаяся на несоответствие механизмов поражения, репарации...

1996	Концепция воздействия малых доз (МД)ИИ, построенная МБФ совместно с Институтом физической химии (конформационные переходы в макромолекулах)
XX-XXI	Медицинская радиобиология в онкологии: лучевая терапия заряженных частиц (протонная пушка). Примечание – тема настоящего урока. Трансляционная медицина

Этапы развития РБ

1. конец 19в. – 1920 г. – качественный этап (накопление фактов)
2. 1920 – 1980 гг. – количественный этап (теория мишеней и принцип попадания)
3. С 1980 – информационный период (нарушение внутриклеточных и межклеточных взаимодействий)
4. XX - XXI в. – РБ как биомедицинская технология. Лучевая диагностика: рентгенология, КТ – компьютерная томография, МРТ – магниторезонансная терапия, ПЭТ – позитрон-эмиссионная терапия, УЗИ – ультразвуковое исследование (пример использования неионизирующих излучений в медицине)

1.3. Физика – медицинской диагностике: рентгенология

Рентгенология – пожалуй, единственная область медицины, где уже с позапрошлого века (1895) физика и практическая медицина впервые «состыковалась», сформировав первую междисциплинарную как теперь принято называть медико-биологическую область исследований. А рентгеновская КТ, МКРТ, изотопная и позитрон-эмиссионная диагностика есть прямое следствие дальнейшего прогресса этой «стыковки»: ядерная физика, импульсная техника и компьютерные технологии. Как показали современные исследования в физике (Н. Васильев-Дерибас, В. Тютюнник, 2001) открыл X-лучи (и дал им это название) специалист именно в междисциплинарной области: спектроскопия и электротехника – И.П. Пулюй. Иван Петрович Пулюй, родом из Тернопольщины, профессор физики Пражского университета, декан первого в мире электротехнического факультета, ученик А. Эйнштейна и В.К. Рентгена в первой половине 80-х гг. позапрошлого века изобрел газоразрядную трубку, известную как «лампа Пулюя», которая отличалась от других (Леннарда, Крукса) высоким качеством фокусировки излучения, которое он и назвал X-лучами. Весной 1895 г. Пулюй получил первый фотоснимок руки человека и скелета морской свинки. Эти снимки, благодаря их высокому качеству, в отличие от нечетких снимков В.Рентгена, охотно публиковались в ведущих европейских журналах. Так, Э.Э. Ким писал: «Во время демонстрации Пулюевой лампы мы убедились в чистоте фотографии, в то время как снимки, сделанные Рентгеном, лишены яркости и четкости, а, следовательно, для точной постановки диагноза не имеют особого значения. На исследовательскую работу Рентгена следует посмотреть скептически». О своих экспериментах Пулюй подробно доложил своему учителю – В.К. Рентгену, который воспроизвел его опыты зимой того же года (Вюцбург, ноябрь – декабрь 1885 г.)

В чем же тогда заслуга В.К. Рентгена? А она состоит в том, что он их воспроизвел, экспериментируя с самыми разными газоразрядными трубками (Леннарда, Гитторфа, Крукса), т.е. показал **воспроизводимость** нового явления. А во-вторых, и что главное, первое свое сообщение сделал в Вюрцбурге 28 декабря на заседании физико-медицинского общества, где присутствовали и физики, и медики. Т.о. гениальность предвидения Рентгена в том, что он осознал, прежде всего, междисциплинарную важность этого явления изложив свой доклад в междисциплинарной среде (физики, медики)

Кроме того, Рентген открыл новое физическое явление – рентгенолюминесценцию – свечение некоторых кристаллов (работал с платиново-синеродистым барием) под воздействием X-лучей. В настоящее время его открытие применяется во всех

устройствах регистрации ионизирующих излучений. По сути, на основе его открытий «невидимое» становится видимым человеческим глазом.

Там же он сделал снимок руки анатомического советника доктора фон Колликера. Впечатлившийся Колликер предложил отныне X-лучи называть «рентгеновскими». Таким образом, открытие физиков стало (немедленно!) и на вполне понятном языке доступно медикам. Действительно, что может быть понятней зрительного образа (рентгенограмма)?

А что интересного и важного для нас сегодня в эксперименте Пулюя, в котором он (на полгода раньше) получил снимки руки человека и скелета морской свинки? Спустя сто с лишним лет с точки зрения современного направления Доказательной медицины, гениальное предвидение Пулюя заключается в том, что он впервые построил **доказательное свидетельство (evidence)** соответствия рисунка костей в фотоснимке руки, невидимых в световых лучах и провел сопоставление зрительно осязаемого скелета и его фотографий в невидимых лучах. Кроме того, он нашел способ визуализации (т.е. зрительной осязаемости) этих невидимых лучей – фотографический, преобразующий излучение рентгеновского диапазона в световой. А свет - это специфический раздражитель зрительного анализатора т.е. воздействие, порождающее субъективное ощущение.

Такое физически строгое проведение морфологического (биологического) исследования (сопоставление зримого и незримого) позволило **доказательно** объяснить (проинтерпретировать) новую информацию, полученную в «неизвестных» X-лучах. А это означает – доказательно осознать, что является основным принципом Доказательной медицины, который следует из ее определения.

Доказательная медицина – применение новых информационных технологий, позволяющих врачу сознательно использовать наилучшие (т.е. наиболее доказательные) свидетельства при лечении конкретного больного [11, 12].

Очевидно, что для рентгенологии доказательность заключений в значительной мере определяется **знанием закономерностей взаимодействия рентгеновского излучения и БО, т.е. основными РБ закономерностями**. Следует отметить, что этот раздел Доказательной медицины и использование фундаментальных знаний о физических закономерностях еще находятся в стадии разработки (точнее, с точки зрения эмбриологии, на стадии «первичных мозговых пузырей»)

Что такое рентгеновское излучение с точки зрения физики

Итак, что есть X-лучи? И чем отличаются по информационному содержанию снимки Берты Рентген и современная рентгенограмма после ее цифровой обработки?

Рентгеновское излучение (смесь тормозного и характеристического излучения) относится к ИИ, т.е. энергия фотонов > 13 эВ (энергия ионизации атома водорода

Диапазоны рентгеновского излучения (Rö)

Энергия (E): от 114 КэВ до 13 эВ

Длина волны: от 0,11 ангстрем до 900 ангстрем

Разбиение диапазона рентгеновского излучения на области мягкого (0,6 – 900 ангстрем) и жесткого (0,11 – 0,6 ангстрем) излучений имеет важное значение для исследования строения вещества на атомарном (жесткое) и молекулярном (мягкое) уровнях. По результату взаимодействия рентгеновского излучения можно судить о состоянии атомов вещества, так сказать в их изолированном от окружающей среды виде, т.к. характеристическое излучение с глубоких энергетических уровней на которых находятся электроны в атоме практически не зависит от внешних полей. В то же время **мягкое рентгеновское излучение** позволяет судить о молекулярных свойствах вещества (рентгеноструктурный анализ), определяемых взаимодействием атомов в молекулах (внешние энергетические уровни). Последнее обстоятельство важно при исследовании строения кристаллических веществ. Кстати, кость тоже относится к поликристаллическим веществам. Для рентгенологии, кроме того, важно то, что мягкое и жесткое излучение различаются по ослаблению в организме человека. Известно, что применяемый диапазон рентгеновского излучения 17-150 КэВ. Мягкий рентген поглощается преимущественно за счет фотоэффекта, давая основной вклад в поглощенную дозу. Для обеспечения высокого контраста (особенно при визуализации крупных органов) предпочтительно увеличение жесткости X-лучей. Однако с увеличением жёсткости растет комптон-эффект (некогерентное рассеяние). Поэтому при выборе энергии квантов, определяемой напряжением на рентгеновской трубке, необходимо искать компромисс между требованием минимизации дозы излучения и обеспечением достаточного контраста изображения. В этом отношении использование компьютерных систем обработки изображения для повышения контраста (на основе применения системы морфоденситометрического анализа) имеет важное практическое значение, обеспечивая существенное снижение дозы.

Все окружающие нас тела и предметы можно разделить на самосветящиеся (излучающие) объекты (рентгенолюминесценция, техногенные источники: кинескопы, лампы, радиофармпрепараты) и несамосветящиеся (отражение, светорассеяние, пропускание, преломление излучения, исходящего от источника). Большинство предметов видимого мира (включая человеческое тело) относятся к телам второго типа (отражающие свет).

Условие визуализации для несамосветящихся объектов отражающих свет, коэффициент преломления (n) для несамосветящихся объектов: $n \neq 1$, например $n_{\text{стекла}} \approx n_{\text{воды}} = 1,3$

Для тела человека (с точки зрения оптики, гетерогенная сильно рассеивающая среда, содержащая белки (1,4 кг), благодаря сильному светорассеиванию, слой половинного поглощения среды $\approx 1-3$ мм

Уникальная особенность рентгеновского излучения состоит в том, что для него в биологических объектах [1]:

$$n = 1 - \frac{N * e^2}{4\pi * m_e * c} * \lambda = 0.999986 \approx 1 \dots (1)$$

где:

N – число атомов в единице объема

e - заряд

c – скорость света

λ – длина волны

m_e – масса электрона

Следовательно, рентгеновское излучение **минимально рассеивается и преломляется при прохождении через ткани человека**, что и позволяет использовать его в рентгенологии. Так, слой половинного поглощения $l_{1/2} = 10-20$ см для рентгеновского излучения, в отличие от видимого света ($l_{1/2} \approx$ несколько мм)

Так слой половинного поглощения рентгеновского излучения в организме человека для рентгеновского излучения - 10-20 см, в отличие от видимого света (миллиметры). Исключение: Гриффитс (человек-невидимка, Г.Уэллс). Т.е. тело человека для рентгеновского излучения – объект **полупрозрачный** – частично

пропускающий и частично поглощающий данное излучение. В этом то и заключается гениальность открытия И.П.Пулюя и К.В.Рентгена: был найден диапазон электромагнитных волн ($0,1 - 1 \text{ \AA}$), в котором биологические ткани «просвечиваются насквозь», т.е. полупрозрачны вследствие очень слабого когерентного рассеяния.

Еще одной не менее значимой особенностью открытия стало то, что был найден способ визуализации (перевода лучистой потока в световой, т.е. видимый глазом поток).

И.П. Пулюй для этого весной 1895 г применил фотопластинку, а К.В. Рентген наблюдал свечение платино-синеродистого бария, т.е. рентгенолюминесценцию. Сегодня оба способа (пленочная рентгенография и использование рентгенолюминесценции (флюорография)) применяются в рентгенологии.

Механизм взаимодействия рентгеновского излучения с веществом

Так как энергия квантов рентгеновского излучения $\gg 13 \text{ эВ}$ (энергия ионизации) следовательно взаимодействие X-лучей с веществом является ионизацией, это и определяет название этого вида излучения – ионизирующее. Квантово-механические механизмы приводящие к ионизации – фотоэффект и комптон-эффект. Рентгеновский ФЭ можно представить, как процесс, состоящий из двух стадий. На первой стадии (классический фотоэффект, первичная ионизация) энергия рентгеновского излучения поглощается электронами атома (например, серебра) находящимся на К-атомной оболочке (реже на L-оболочке). Если поглощаемая электронами энергия рентгеновского излучения превышает работу выхода электронов из вещества, то происходит вырывание этих электронов из К-оболочки. На второй стадии (внутриатомный ФЭ, вторичная ионизация) происходит замещение вырванного из К-оболочки электрона, электрона из более внешней оболочки, М или L. Как известно, при переходе из более верхнего энергетического уровня, например, E_K на более нижний, E_L , электрон испускает квант энергии, который играет роль нового первичного излучения, которое ионизирует свой собственный исходный атом, т.е. выбрасывает следующий электрон из К или L оболочки. Образовавшиеся в результате первичной и вторичной ионизации электроны называются фотоэлектронами. Можно сделать вывод, что рентгеновское излучение является дважды (!) ионизирующим.

Еще один эффект наблюдающийся при взаимодействии X-лучей использующийся в рентгенодиагностике – это комптон-эффект

Он нарастает с увеличением энергии квантов (в противоположность фотоэффекту). Комптон-эффект – квантово-механическое явление представляющее собой рассеяние излучения и фотоэффект. Суть этого явления заключается в том, что свободные электроны, взаимодействуя с квантами излучения, ускоряются, а рентгеновские кванты меняют свою энергию (уменьшение) и направление.

В рентгеновском аппарате регуляция жесткости достигается изменением напряжения на трубке. Например, диапазоны R_ö излучения

- 30-50 эВ – дети, а также малые объекты (кисть, стопа). Однако, в этом диапазоне поглощенная доза выше (!)
- 60-70 эВ – взрослые, крупные объекты (грудная клетка)

Как известно из оптики, физическая модель образования тени, т.е. физическое обоснование *скиалогии* – это закон (точнее, правило) Бугера-Ламберта-Бера (5). Интересно отметить, что история открытия и обоснования этого правила БЛБ растянулась на сто лет. Так что непросто нам даются тайны зримости мира. А механизм формирования зрительного образа в зрительном анализаторе человека неочевиден и по сей день. Вот пример: ПЗС-телекамера регистрирует освещенность своих фотоэлементов, а в случае накопления сигнала – дозу (экспозиционную), а глаз дифференцирует освещенность благодаря *саккадам* – кратковременным (0,1-1 с) перемещениям глазного яблока. «Неподвижный» глаз – слеп (!), а само изображение на сетчатке – уменьшенное, перевернутое. Переворот изображения на 180° происходит в головном мозге, где-то в *s. calcarinus*.

В простейшей форме (для гомогенной среды) закон поглощения света может быть представлен в виде:

$$I = I_0 * e^{-Kx}$$

где K – коэффициент (погашения), $[K] = \frac{1}{L} = \frac{1}{\text{см}}$

Величина $W = \frac{1}{K}$ называется средней глубиной проникновения; W – то расстояние на котором I уменьшится в e раз ($\approx 2,72$)

В рентгенологии применяется характеристика ослабления излучения – массовый коэффициент ослабления (μ)

$$\frac{K}{\rho} = \mu, [\mu] = \frac{\text{см}}{\text{г}}, \rho - \text{плотность вещества}$$

Различные формы представления закона БЛБ для светового излучения и для ИИ могут быть сведены в единую форму

$$\left. \begin{array}{l} (8) I = I_0 * e^{-QNx} \\ (9) I = I_0 * e^{-\varepsilon cl} \end{array} \right\} \sim I_0 * e^{-Kx} \dots (10)$$

Q – микроскопический коэффициент поглощения, $[L^2]$

N – число мишеней в единице объема, $[L^{-3}]$

x – глубина проникновения

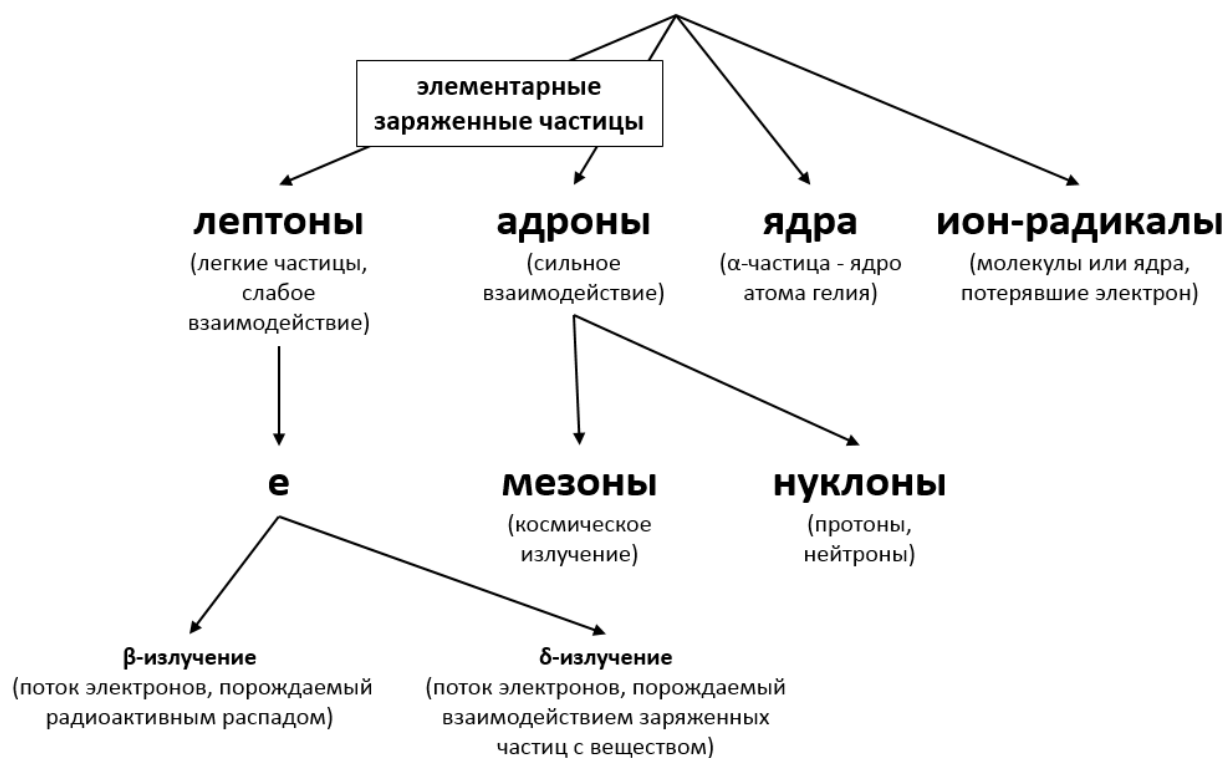
K – макроскопический коэффициент поглощения (коэффициент ослабления)

Из (9) и (11) следует что вещества с большим атомным номером (Z) и числом мишеней (N) могут значительно ослаблять R \ddot{o} излучение. Это объясняет причину использования элементов с большим Z (йод (I), бром (Br)) для контрастирования сосудов (ангиография), а также причину высокой R \ddot{o} плотности кости (кальций (Ca), фосфор (P)). Для сравнения – средний атомный номер биологического вещества – 13,2.

Заключение раздела. Как видим, перенос и внедрение фундаментальных физических закономерностей взаимодействия ионизирующего излучения с биологическим веществом в практическую медицину (в лучевую диагностику), что и составляет предмет **трансляционной медицины**, - привел к появлению новых медицинских технологий, объединённых понятием «лучевая диагностика. В РНИМУ им. Пирогова на медико-биологическом факультете (МБФ) осуществляется подготовка специалистов в такой актуальной междисциплинарной области медицинской радиологии на отделении «Медицинская биофизика» (специальность - врач-биофизик). А профориентация осуществляется в физико-математической школе «Потенциал» при МФТИ.

I.4. Классификация заряженных частиц. Их преимущества в лучевой терапии. Работы российских ученых (школы акад. М.А. Сергеева, президента РАН) – прорыв в лучевой терапии

Схематически (таксономически) классификация заряженных частиц может быть представлена следующей схемой.



Все заряженные частицы можно разделить на **лептоны** (легкие частицы) и **адроны** (от слова hard – тяжелые).

Из лептонов нас будут интересовать электроны. Электроны можно разделить на β-излучение (поток электронов первичных) и δ-электроны (вторичные электроны). Адроны можно разделить на мезоны и нуклоны.

Космическое излучение действующее на организм, преимущественно мезонного происхождения.

Нуклоны будем рассматривать на примере протонов (именно этот тип частиц начал применяться в лучевой терапии российскими учёными).

Характеристика этих частиц:

Характеристика частиц	Электроны	Мезоны	Протоны	Ядра атомов He	Ион-радикалы
Масса	1	200	2000	8000	>10000
Заряд	-1	± 1	+1	+2	+, „„
Источник	Космические лучи	β -распад	Ядерные реакции	Ядерные реакции, α -распад	Ядерные реакции

Не останавливаясь подробно на свойствах частиц, укажем такие свойства, которые имеют практическое значение в лучевой терапии (см. файл **Лабораторная работа №1**).

Как следует из рисунка, количество энергии, выделяемое тяжелыми заряженными частицами при попадании в тело человека можно управлять (!!), в отличие от γ -излучения. В зависимости от глубины расположения опухоли, можно управлять начальной скоростью вылета частиц, добиваясь максимума выделения энергии именно на глубине расположения опухоли. В случае же воздействия электромагнитного излучения (γ -излучения), выделение энергии подчиняется закону поглощения, впервые сформулированный Бугером-Ламбертом-Бером (1725 – 1864). Основная особенность поглощения энергии для γ -излучения - экспоненциальное уменьшение при увеличении глубины проникновения излучения в вещество. Более подробно со свойствами мы ознакомимся ниже, см. Лабораторная работа №1, раздел 2.1. Применительно к проблемам медицины, данный тип ИИ обладает существенным недостатком: вышележащие ткани, которые находятся над опухолью, будут поглощать большую энергию, чем та, которая «дойдет» до опухоли.

А распределение энергии для тяжелых заряженных частиц имеет принципиально иной вид – в зависимости от начальной скорости вылета можно добиться выделения максимума энергии на требуемой глубине (расположения опухоли).

Поэтому в настоящее время в лучевой терапии применяются активно протонные пушки. Основная проблема применения подобного рода методов ЛТ состоит в следующем. Устройства, которые обеспечивают нужную скорость движения частиц – ускорители (синхротроны, синхрофазатроны) имеют большие габариты. Например, Большой адронный коллайдер (БАК) имеет размеры 28 км. Поэтому основная проблема при внедрении данного вида физических устройств в медицину заключается в их миниатюризации. Пример. В ЦЕРНе (европейском центре ядерных исследований – ведущем мировом центре...) разрабатывается такое средство, какжое из которых [Потенциал. Журнал для старшеклассников и учителей. 2018-1. Стр. 70]. Ясно что внедрение подобного рода габаритных приборов в медицину представляет существенную проблему.

Что же происходит у нас, в России? Как отмечается акад. М.А. Сергеевым [Физика против рака. Интервью акад. М.А. Сергеева / В мире науки. 2018-№1, Стр. 119], «...уже в 70-80 гг. прошлого века Советский союз был той страной, где операций по протонной терапии было проведено больше всех других стран; правда, они проводились неспециализированным образом, а на тех ускорителях, которые были у физиков. Именно там развивалась протонная терапия, где мы были тогда лидерами. Но прошли десятки лет, а у нас по-прежнему нет специализированной установки для протонной терапии. Сейчас появилась первая установка, которая тестируется в Обнинске». В Институте прикладной физики ведутся работы, результаты которых могут обеспечить прорыв в лечении онкозаболеваний – управление начальной скоростью вылета частиц может производиться гораздо более миниатюрными средствами, путем управления лазерным излучением высоких энергий, обеспечивая «разгон» и требуемую скорость вылета.

Ниже в разделе лабораторная работа №2 нами подготовлена симуляционная модель протонной пушки, для элиминации (уничтожения) опухоли, находящейся на определенной глубине.

I.5. Список литературы:

1. Лекции проф. А.В. Жукоцкого по радиобиологии. Кафедра молекулярной фармакологии и радиобиологии МБФ РНИМУ им. Н.И. Пирогова
2. Дегтярева А.Н. Медицинские проекты ЦЕРН. // - Потенциал. Ежемес. журнал для старшеклассников и школьников. 2017-1.. с. 60-71
3. Физика против рака. Интервью президента РАН А.М. Сергеева // В мире науки. 12/2-2018. – с. 117-123
4. Электронные ресурсы: <http://www.advancedoncotherapy.com>, <http://www.eps-hep2015eu/excursion-to-medAustron>