

1.3. Основные радиометрические понятия и определения

Источник ионизирующего излучения – объект, содержащий радиоактивный материал или техническое устройство, испускающее или способное в определенных условиях испускать ионизирующее излучение.

Радионуклидный источник ионизирующего излучения – источник ионизирующего излучения, содержащий радиоактивный материал.

Нуклид – вид атомов с данными числами протонов и нейтронов в ядре, характеризующийся массовым числом A (атомной массой) и атомным номером Z .

Изотоп – нуклид с числом протонов в ядре, свойственным данному элементу.

Радионуклид – нуклид, обладающий радиоактивностью.

Радиоизотоп – изотоп, обладающий радиоактивностью.

Внешнее излучение источника – поток ионизирующих частиц, выходящих из радионуклидного источника излучения через его рабочую поверхность.

Закрытый источник – радиоактивный источник излучения, устройство которого исключает поступления содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Открытый источник – радиоактивный источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду.

Техногенный источник – источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом этой деятельности.

Природный источник – источник природного происхождения, на который распространяется действие нормативных документов по радиационной безопасности.

Образцовый источник – радиоактивный источник излучения, служащий для проверки других источников и (или) приборов для измерения ионизирующих излучений и утвержденный (аттестованный) в качестве образцового в установленном порядке.

Контрольный источник – радиоактивный источник излучения, служащий для проверки работоспособности приборов.

1.3.1. Единицы измерения активности

Радиоактивность – самопроизвольное превращение неустойчивого нуклида в другой нуклид, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.

Активность радионуклида в источнике (образце) – отношение числа dN самопроизвольных (спонтанных) ядерных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в данном его количестве за интервал времени dt , к этому интервалу. Активность A – физическая величина, характеризующая числом dN распадов в данном количестве N_0 атомов (ядер) радионуклида в единицу времени dt .

Активностью радиоактивного источника называется число радиоактивных распадов в единицу времени:

$$A = \frac{dN}{dt},$$

где dN – число актов распада;

dt – промежуток времени.

Активность является мерой количества радиоактивного изотопа. Активность радиоактивного элемента прямо пропорциональна числу содержащихся в нем радионуклидов, т. е. количеству радиоактивного вещества. В то же время активность связана с периодом полураспада и постоянной распада данного изотопа. Чем больше период полураспада, тем меньше постоянная распада и меньше активность данного радиоактивного источника, и наоборот.

Величина активности характеризует лишь наличие радионуклида и интенсивность испускаемого им излучения, не определяя ни тип элемента, ни тип самого излучения.

Активность связана с постоянной распада λ следующим соотношением:

$$A = \lambda \cdot N,$$

где N – число ядер радионуклида;

λ – постоянная распада, характеризующая вероятность распада, за единицу времени (доля общего числа атомов изотопа, распадающихся каждую секунду).

Так как $\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$, то $A = \frac{0,693 \cdot N}{T_{1/2}}$.

С течением времени активность любого радионуклида убывает по основному закону радиоактивного распада:

$$A_t = A_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где A_t – активность в данный момент времени t ;

A_0 – активность в момент времени, принятый за начальный;

t – время, в течение которого идет убывание активности.

$\frac{A}{A_0}$ показывает, какая доля активности образца осталась через промежуток времени t .

За единицу активности в Международной системе единиц (СИ) принят один распад в секунду. Эта единица получила название беккерель (Бк): $1 \text{ расп/с} = 1 \text{ Бк} = \text{с}^{-1}$.

Размерность $[A] = T^{-1}$ – это производная единица. Внесистемная единица – кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}$.

Удельная активность радионуклида – отношение активности радионуклида в образце к массе образца m :

$$A_m = A/m.$$

Единица измерения – беккерель на килограмм, внесистемная единица – кюри на килограмм.

Объемная активность радионуклида – отношение активности радионуклида, содержащегося в образце, к его объему V :

$$A_v = A/V.$$

Единица измерения – беккерель на литр, беккерель на кубический метр, внесистемная единица – кюри на литр, кюри на кубический метр.

Поверхностная активность радионуклида – отношение активности радионуклида, содержащегося на поверхности образца, к площади S поверхности этого образца:

$$A_s = A/S.$$

Единица измерения – килобеккерель на квадратный метр, внесистемная единица – кюри на квадратный километр.

Линейная активность радионуклида – отношение активности радионуклида, содержащейся на длине образца, к его длине L :

$$A_L = A/L.$$

Единица измерения – беккерель на метр, внесистемная единица – кюри на метр.

Молярная активность $A_{\text{мол}}$ – активность, отнесенная к 1 молю данного радиоактивного вещества:

$$A_{\text{мол}} = A/M.$$

Единица измерения – беккерель на моль, внесистемная единица – кюри на моль.

Резерфорд (обозначение: Рд, Rd) – устаревшая внесистемная единица измерения активности радиоактивного источника.

1 Рд определяется как 10^6 актов распада в 1 с. Таким образом, $1 \text{ Рд} = 1 \cdot 10^6 \text{ Бк} = 1 \text{ МБк}$ (точно); $1 \text{ Рд} = 2,72 \cdot 10^{-5} \text{ Ки}$.

Названа в честь известного британского физика Эрнеста Резерфорда (1871–1937).

В настоящее время данная единица не рекомендована к применению.

1.3.2. Специальные единицы измерения активности

Для определения концентрации радиоактивных изотопов в жидкостях и газах применяются следующие внесистемные единицы.

Эман – внесистемная единица измерения удельной (объемной) активности радиоактивных источников: $1 \text{ эман} = 10^{-10} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}$ в 1 л, т. е. $1 \text{ эман} = 3,7 \text{ Бк/л}$. В основном эман используется для измерения концентрации радона в воде и воздухе. Данная единица была введена в 1921 году и в настоящее время применяется довольно редко.

Существует также единица концентрации радона **maxe** (М.Е.), которая соответствует такому количеству радона в 1 л жидкости или газа, которое производит ионизационный ток насыщения, равный 10^{-3} электростатических единиц в абсолютной электростатической системе (СГСЭ):

$$1 \text{ М.Е.} = 3,64 \text{ эман.}$$

Эту единицу можно встретить в медицинской и гидрологической литературе.

Для определения активности гамма-излучающих радионуклидов пользуются иногда миллиграмм-эквивалентом радия (мг-экв Ra) или грамм-эквивалентом радия (г-экв Ra).

Один миллиграмм-эквивалент радия – это активность любого радиоактивного источника, гамма-излучения которого при идентичных условиях измерения создают в воздухе такую же ионизацию, какую создает гамма-излучение 1 мг радия при прохождении через платиновый фильтр толщиной 0,5 мм.

Для характеристики миграции стронция-90 и цезия-137 по пищевым цепочкам часто используют так называемые **стронциевые (с.е.) и цезиевые единицы (ц.е.)**.

При исследованиях закономерностей перехода стронция-90 и цезия-90 от одного звена биологической цепи к другому было замечено, что радиостронций ведет себя сходно с кальцием, а радиоцезий (хотя в меньшей степени) – с калием. Поэтому миграцию стронция-90 и цезия-137 по пищевым цепочкам обычно рассматривают одновременно с перемещением Ca и K соответственно. Между стронцием-90 и кальцием, а также между цезием-137 и калием в различных звеньях пищевых цепочек складываются определенные соотношения, которые принято обозначать следующими терминами:

стронциевая единица (с.е.):

$$1 \text{ с.е.} = \frac{1 \text{ нКи}^{90}\text{Sr}}{1 \text{ г Ca}} = \frac{1 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}^{90}\text{Sr}}{1 \text{ г Ca}};$$

цезиевая единица (ц.е.):

$$1 \text{ ц.е.} = \frac{1 \text{ нКи}^{137}\text{Cs}}{1 \text{ г К}} = \frac{1 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}^{137}\text{Cs}}{1 \text{ г К}}.$$

Эти единицы могут изменяться при переходе от одного звена к другому в биологических цепочках.

1.3.3. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Термин «**радиация**» происходит от латинского слова *radius* и означает луч. В самом широком смысле слова радиация охватывает все существующие в природе виды излучений – радиоволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолет и, наконец, ионизирующее излучение. Все эти виды излучения, имея электромагнитную природу, различаются длиной волны, частотой и энергией (рис. 6).

Существуют также излучения, которые имеют другую природу и представляют собой потоки различных частиц, например, альфа-частиц, бета-частиц, нейтронов и т. д.



Рис. 6. Виды электромагнитных излучений

Каждый раз, когда на пути излучения возникает барьер, оно передает часть или всю свою энергию этому барьеру. И от того, насколько много энергии было передано и поглощено организмом, зависит конечный эффект облучения.

Излучение всех естественных и искусственных радионуклидов делится на два типа – корпускулярное и электромагнитное. Корпускулярное излучение представляет собой поток частиц (корпускул), которые характеризуются определенной массой, зарядом и скоростью. Это электроны, позитроны, ядра атомов гелия, дейтроны (ядра изотопа водорода дейтерия), нейтроны, протоны и другие частицы. Как правило, корпускулярное излучение непосредственно ионизирует среду.

Электромагнитное излучение – это поток квантов или фотонов. Это излучение не имеет ни массы, ни заряда и производит косвенную ионизацию среды.

На образование одной пары ионов в воздухе необходимо в среднем 34 эВ энергии. Поэтому к ионизирующим излучениям относятся излучения с энергией от 100 эВ и выше (не относят видимый свет и УФ-излучение).

Взаимодействие излучений с веществом **приводит к возбуждению или, как правило, к ионизации встречных атомов и молекул поглощающей среды.** Под взаимодействием излучения с веществом понимают те физические и химические процессы, которые возникают в веществе при прохождении через него излучения. В результате взаимодействия с атомами и молекулами окружающей среды излучения постепенно растрчивают свою энергию. Потери энергии могут быть двух видов: ионизационные и радиационные.

Ионизационные потери – это энергия излучения, растрчиваемая на ионизацию и возбуждение атомов встречного вещества. Если энергии на ионизацию не хватает (34 эВ на ионную пару), то могут возникнуть возбужденные атомы или молекулы.

Ионизационные потери тем больше, чем больше заряд частицы и меньше ее скорость. В конечном счете кинетическая энергия, теряемая заряженными частицами, превращается в тепловую.

Радиационные потери – это процесс потери энергии излучения на торможение в электрическом поле ядра встречных атомов, при этом тормозящаяся частица изменяет свое направление. Радиационные потери тем выше, чем больше порядковый номер атомов среды и энергия частицы. Заряженная частица приобретает в кулоновском поле ядра ускорение, а заряд, испытывающий ускорение, излучает энергию. Чем меньше масса частицы и чем больше заряд ядра, тем большее количество энергии излучается. При торможении частицы происходит излучение большого количества энергии в виде тормозного рентгеновского излучения.

Для здоровья человека наиболее опасны ионизирующие виды излучения. Проходя через ткань, ионизирующее излучение ионизирует атомы в молекулах, которые играют важную биологическую роль. Поэтому облучение любыми видами ионизирующего излучения влияет на здоровье человека. К их числу относятся: **альфа-излучение, бета-излучение, гамма-излучение, рентгеновское излучение, нейтронное излучение.**

Альфа-излучение представляет собой поток α -частиц, которые являются ядрами атомов гелия (${}^4_2\text{He}$). Альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, заряжена положительно и несет с собой два элементарных положительных заряда. Масса частицы $m\alpha = 4,003$ а.е.м. – это самая крупная из частиц. Скорость движения составляет $(14,1–24,9) \cdot 10^6$ м/с. В веществе альфа-частицы движутся прямолинейно, что связано со сравнительно большой массой и значительной энергией. Отклонение происходит только при лобовом столкновении с ядрами.

В природе альфа-частицы возникают в результате распада атомов тяжелых элементов, таких как **уран, радий и торий**. В воздухе альфа-излучение проходит до 10 см и, как правило, полностью задерживается листом бумаги или внешним омертвевшим слоем кожи (эпидермисом). Однако, если вещество, испускающее альфа-частицы, попадает внутрь организма с пищей или вдыхаемым воздухом, оно облучает внутренние органы и становится наиболее потенциально опасным.

Альфа-частицы, обладая большой массой и размером, при прохождении через вещество почти полностью отдают свою энергию в результате электростатического взаимодействия с электронами оболочек атомов.

Энергия α -частиц идет на ионизацию и возбуждение атомов поглощающей среды (**ионизационные потери**). Этот процесс может рассматриваться как **упругое столкновение α -частицы с электронами**, при котором α -частица теряет часть своей энергии.

Энергия образования одной пары ионов в воздухе составляет около 35 эВ, так что при прохождении α -частицы с энергией $E_\alpha = 4,2$ МэВ (${}^{238}\text{U}$) до момента ее поглощения образуется около 10^5 пар ионов. В конце пробега, когда энергия α -частицы уменьшается и становится недостаточной, чтобы производить ионизацию, α -частица, присоединив к себе два электрона, превращается в атом гелия.

Альфа-излучение всегда «мягкое», закона ослабления нет.

Бета-излучение – это поток бета-частиц, которые являются **электронами** или **позитронами** и испускаются ядрами радионуклидов при β -распаде. Несут один элементарный электрический заряд, $m\beta = 0,000548$ а.е.м. Двигутся со скоростью, близкой к скорости света, т. е. $(0,87 – 2,994) \cdot 10^8$ м/с. Скорость движения бета-частиц в среднем равна 160 000 км/с.

Бета-частицы могут проникать вглубь тела на несколько сантиметров. От бета-излучения можно защититься тонким листом металла, оконным стеклом и даже обычной одеждой. Если вещество, испускающее бета-частицы, попадет в организм, оно будет интенсивно облучать внутренние ткани.

Бета-частицы обладают сплошным энергетическим спектром.

В зависимости от энергии β -частиц различают:

- **мягкое β -излучение** (несколько десятков килоэлектронвольт);
- **жесткое β -излучение** (до нескольких единиц мегаэлектронвольт).

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

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

При взаимодействии β -частиц с электронами атомов массы соударяемых частиц можно считать одинаковыми, поэтому β -частицы при столкновении отклоняются гораздо сильнее, в результате чего при торможении траектория движения β -частиц имеет вид ломаной линии.

Скорость β -частиц сравнима со скоростью света.

Взаимодействие электронов и позитронов с веществом качественно одинаково и складывается из трех основных процессов (рис. 7):

- упругого рассеяния на атомных ядрах;
- рассеяния на орбитальных электронах;
- неупругих столкновений с атомным ядром.

Упругое рассеяние β -частиц происходит в основном на ядрах, но может также происходить и на атомных оболочках. Вследствие малой массы β -частицы могут отклоняться на большие углы. Чем меньше энергия β -частиц, тем больше (в среднем) отклонение, которое она испытывает. Поэтому при радиометрических измерениях необходимо учитывать эффект обратного рассеяния, который может привести к увеличению счета.

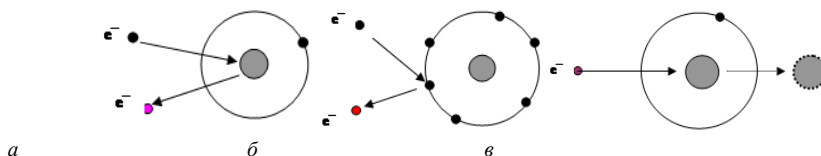


Рис. 7. Взаимодействие электронов и позитронов с веществом: *a* – упругое рассеяние β -частиц на ядрах атомов; *b* – упругое рассеяние β -частиц на электронах атома; *в* – вариант смещения ядра атома с кристаллической решетки

Рассеяние β -частиц на орбитальных электронах среды является наиболее важным процессом для регистрации β -частиц. Потерянная при столкновении энергия β -частицы передается орбитальному электрону, что ведет к возбуждению или ионизации атома.

При ионизации β -частицы выбивают орбитальные электроны, которые могут производить вторичную ионизацию. Полная ионизация равна сумме первичной и вторичной ионизации. На 1 мкм пути в веществе β -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 β -частицы и атомный номер элемента поглотителя. Поэтому для снижения тормозного излучения защиту для β -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.

Поэтому пробег β -частиц нельзя однозначно характеризовать длиной пробега. Явление рассеивания приводит к тому, что даже частицы с одинаковой энергией проходят в веществе совершенно разные по протяженности пути. Экспоненциальная зависимость ослабления β -частиц может быть записана в виде

$$I_1 = I_0 e^{-\mu l},$$

где I_1 и I_0 – число падающих на поглотитель частиц и число частиц, прошедших сквозь него;

l – толщина поглотителя (см);

μ – справочный коэффициент.

Обычно величину максимального пробега β -частиц определяют как слой половинного ослабления, т. е. слой, снижающий вдвое начальное количество частиц. Значения максимального пробега β -частиц в различных средах близки, поэтому поглощающую способность многих веществ характеризуют величиной максимального пробега, определяемой для алюминия, и выражают в граммах на квадратный сантиметр (поверхностная плотность).

Гамма-излучение – это поток фотонов (квантов) электромагнитного излучения. Скорость распространения их в вакууме равняется скорости света – 3×10^8 м/с. Так как гамма-излучение является волновым, то характеризуется длиной волны, частотой колебаний и энергией. Энергия γ -кванта пропорциональна частоте колебаний, а частота колебаний связана с длиной их волны. Чем больше длина волны, тем меньше частота колебаний, и наоборот, т. е. частота колебаний обратно пропорциональна длине волны. Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и, следовательно, проникающая способность. Энергия гамма-излучения естественных радиоактивных элементов колеблется от нескольких килоэлектронвольт до 2–3 МэВ и редко достигает 5–6 МэВ.

Гамма-излучение, если от него не защититься, может повредить внутренние ткани. Плотные и тяжелые материалы, такие как железо и свинец, являются отличными барьерами на пути гамма-излучения.

При взаимодействии **гамма-кванта** с веществом в зависимости от его энергии может произойти **фотоэффект** ($E_\gamma \leq 0,25$ МэВ), **комpton- эффект** ($0,25$ МэВ $\leq E_\gamma \leq 1,022$ МэВ) или **эффект образования электрон-позитронной пары** ($E_\gamma \geq 1,022$ МэВ).

Фотоэффект заключается в том, что гамма-квант, взаимодействуя с атомом или молекулой, выбивает из них электрон (называемый обычно фотоэлектроном). При этом гамма-квант полностью поглощается, вся его энергия передается электрону. В результате электрон приобретает кинетическую энергию, равную энергии γ -кванта, за вычетом энергии связи электрона в атоме. Этот вид взаимодействия наиболее вероятен, если энергия γ -кванта меньше 0,1–0,2 МэВ. Фотоэлектрическое поглощение быстро уменьшается с повышением энергии излучения. Вероятность фотоэффекта зависит от атомного номера и пропорциональна числу протонов поглотителя.

Эффект Комптона (комpton-эффект) – явление изменения длины волны электромагнитного излучения вследствие упругого рассеивания его электронами (рис. 8).

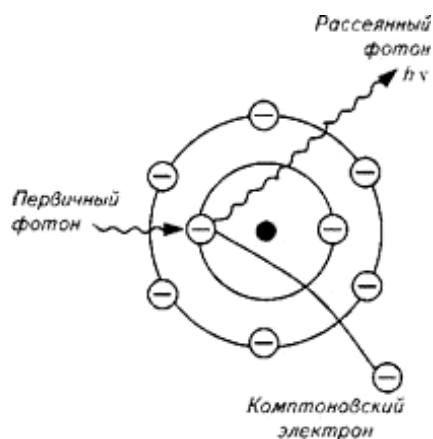


Рис. 8. Комpton-эффект

Эффект образования электрон-позитронной пары заключается в следующем. Некоторые γ -кванты с энергией не ниже 1,02 МэВ, проходя через вещество, превращаются под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома в пару «электрон – позитрон». Возникновение пары «электрон – позитрон» приводит, как и фотоэффект, к полному поглощению энергии γ -кванта. Позитроны, замедляясь веществом, взаимодействуют с электронами среды, давая аннигиляционное гамма-излучение (рис. 9).

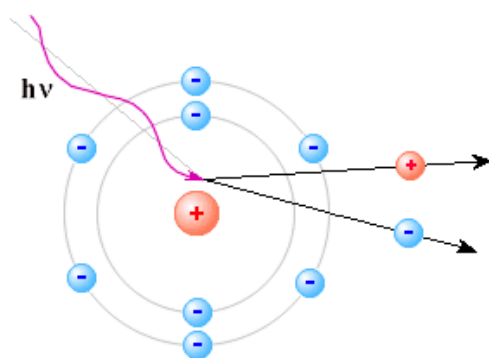


Рис. 9. Эффект образования электрон-позитронной пары

Интенсивность гамма-излучения при прохождении через вещество снижается в соответствии с экспоненциальным законом:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu l},$$

где I_1 – интенсивность излучения после прохождения слоя вещества толщиной « l »;

I_0 – исходная интенсивность излучения;

μ – справочный коэффициент.

Конечного пробега гамма-излучения в веществе нет, поэтому проникающую способность характеризуют толщиной слоя половинного ослабления ($d_{1/2}$).

Рентгеновское излучение – электромагнитные волны, энергия фотонов которых лежит на шкале электромагнитных волн между ультрафиолетовым излучением и гамма-излучением, что соответствует длинам волн от 10^{-2} до 10^3 Å (ангстрем) или от 10^{-12} до 10^{-7} м.

Рентгеновское излучение получается искусственно в рентгеновской трубке, которая сама по себе не радиоактивна, или при торможении заряженных частиц электрическим полем ядер (тормозное излучение) (рис. 10).

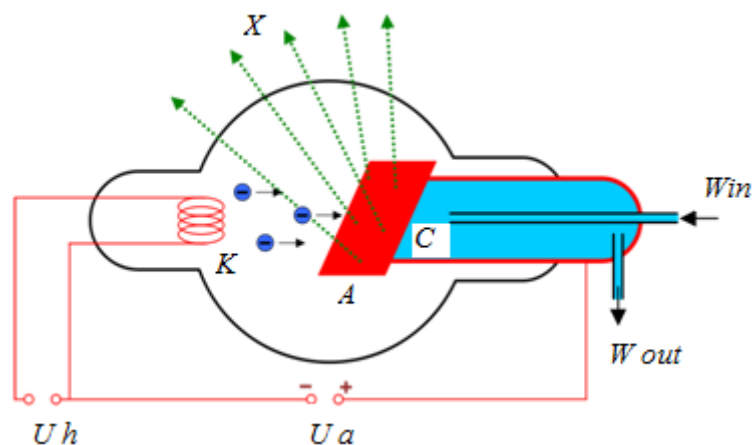


Рис. 10. Схематическое изображение рентгеновской трубки:
X – рентгеновские лучи; *K* – катод; *A* – анод (иногда называемый антикатодом);
C – теплоотвод; *U_h* – напряжение канала катода;
U_a – ускоряющее напряжение; *Win* – впуск водяного охлаждения;
Wout – выпуск водяного охлаждения

Рентгеновское излучение является ионизирующим. Оно воздействует на ткани живых организмов и может быть причиной лучевой болезни, лучевых ожогов и злокачественных опухолей. По причине этого при работе с рентгеновским излучением необходимо соблюдать меры защиты. **Считается, что поражение прямо пропорционально поглощенной дозе излучения. Рентгеновское излучение является мутагенным фактором.**

Рентгеновские лучи могут проникать сквозь вещество, причем различные вещества по-разному их поглощают. Поглощение рентгеновских лучей является важнейшим их свойством в рентгеновской съемке. Интенсивность рентгеновских лучей экспоненциально убывает в зависимости от пройденного пути в поглощающем слое:

$$I = I_0 \cdot e^{-kd}$$

где *d* – толщина слоя;

k – коэффициент пропорциональности.

$$k = Z^3 \cdot \lambda^3$$

где *Z* – атомный номер элемента;

λ – длина волны.

Поглощение происходит в результате фотопоглощения (фотоэффекта) и комптоновского рассеяния.

В отношении рентгеновского и гамма-излучения часто употребляют определения «**жесткое**» и «**мягкое**». Это относительная характеристика энергии и связанной с ней проникающей способности излучения.

Жесткое – большие энергия и проникающая способность, $E_\gamma \geq 0,25$ МэВ; **мягкое** – меньшие энергия и проникающая способность, $E_\gamma \leq 0,25$ МэВ.

Нейтронное излучение возникает при ядерных реакциях (в ядерных реакторах, промышленных и лабораторных установках, при ядерных взрывах). Свободный нейтрон – это нестабильная, электрически нейтральная частица с временем жизни около 15 мин (880,1 с).

Открытие нейтрона (1932 г.) принадлежит физика Дж. Чедвику, за это открытие он получил Нобелевскую премию по физике в 1935 г. Считается надежно установленным, что нейтрон является связанным состоянием трех кварков: одного «верхнего» (u) и двух «нижних» (d). Кварковая структура – udd (рис. 11).

Кварк – фундаментальная частица в стандартной модели, обладающая электрическим зарядом, кратным $e/3$, и не наблюдающаяся в свободном состоянии. Кварки являются точечными частицами вплоть до масштаба примерно $0,5 \times 10^{-19}$ м, что примерно в 20 тысяч раз меньше размера протона.

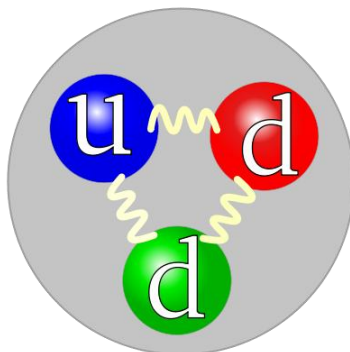


Рис. 11. Кварковая структура нейтрона

Нейтроны представляют собой поток незаряженных частиц, которые при прохождении через вещество взаимодействуют только с ядрами атомов. Нейтроны обладают широким диапазоном энергий – от долей до десятков миллионов электрон-вольт.

Проникающая способность нейтронов очень велика по причине отсутствия заряда и, как следствие, слабого взаимодействия с веществом. Проникающая способность нейтронов зависит от их энергии и состава атомов вещества, с которыми они взаимодействуют. Слой половинного ослабления легких материалов для нейтронного излучения в несколько раз меньше, чем для тяжелых. Тяжелые материалы, например металлы, хуже ослабляют нейтронное излучение, чем гамма-излучение.

В зависимости от энергии нейтронов обычно преобладают те или иные виды их взаимодействия с веществом. По уровню энергии они могут быть условно разделены на следующие группы:

- холодные (менее 0,025 эВ);
- тепловые (0,025–0,05 эВ);
- промежуточные (0,025–0,5 кэВ);
- быстрые (до 20 МэВ);
- сверхбыстрые (20–300 МэВ).

Медленные и тепловые нейтроны вступают в ядерные реакции, в результате которых могут образовываться стабильные или радиоактивные изотопы.

При прохождении пучка нейтронов через вещество могут появиться два вида их взаимодействия с ядрами вещества:

- во-первых, в результате соударения нейтронов с ядрами возможно упругое и неупругое рассеяние нейтронов;
- во-вторых, возникновение ядерных реакций типа (n, α) , (n, p) , $(n, 2p)$ и деление тяжелых ядер.

При неупругих взаимодействиях с веществом возникает вторичное излучение, которое может состоять как из заряженных частиц, так и из γ -квантов. При упругих взаимодействиях возможна обычная ионизация вещества.

Упругое рассеяние. Упругое взаимодействие нейтрона с ядрами аналогично столкновению бильярдных шаров. Если бильярдный шар, движущийся с большой скоростью, столкнется с неподвижным шаром, он передаст ему большую или меньшую часть энергии в зависимости от параметров удара, а сам изменит направление движения. Суммарная энергия обоих шаров до и после взаимодействия не изменится.

Из закона механики известно, что чем больше масса неподвижного шара по сравнению с массой движущегося, тем меньшая доля энергии будет ему передана при столкновении. Если массы сталкивающихся шаров равны, то при каждом столкновении движущийся шар будет терять в среднем половину своей энергии.

Аналогичным образом нейтроны, обладающие определенным запасом энергии, взаимодействуя с ядрами атомов, передают им часть энергии, а сами изменяют направление своего движения. Этот процесс называется **упругим рассеянием**.

Ядра атомов, получившие в результате столкновения определенный запас кинетической энергии (ядра отдачи), «выскакивают» из электронной оболочки и, проходя через вещество, производят ионизацию (поскольку они обладают зарядом). Чем меньше масса ядер среды, через которые проходят нейтроны, тем большую долю энергии они теряют в процессе упругого рассеяния. При каждом акте рассеяния на ядрах водорода нейтрон теряет в среднем половину энергии, при рассеянии на ядрах углерода – примерно 14–17 %, а при рассеянии на ядрах аргона – не более 8–9 %. Поэтому в качестве замедлителей нейтронов лучше всего использовать водородсодержащие или легкие вещества – обычную или тяжелую воду, парафин, бериллий, углерод.

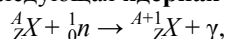
В процессе упругого рассеяния энергия нейтрона постепенно уменьшается и приближается к энергии теплового движения атомов и молекул среды, равной примерно 0,025 эВ. Такие нейтроны называются **тепловыми**. Чтобы нейтрон с первоначальной энергией 1 МэВ стал тепловым, число столкновений с ядрами водорода должно быть равно 25. В углероде энергия этого нейтрона достигает 0,025 эВ после 100 столкновений, а при взаимодействии с ядрами урана – после 2100 столкновений. Этот процесс завершается примерно через 10^{-6} секунды.

Неупругое рассеяние. При захвате нейтрона ядром может произойти ядерная реакция, в процессе которой образуется ядро исходного нуклида, но при этом энергия испущенного нейтрона меньше энергии захваченного.

В этом случае говорят о процессе **неупругого рассеяния**, поскольку суммарная энергия системы (нейтрон + ядро) до взаимодействия не равна энергии системы после взаимодействия. Процесс неупругого рассеяния имеет большую вероятность для атомных ядер середины и конца периодической системы элементов.

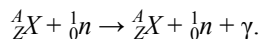
Радиационный захват. При достаточной тепловой скорости нейтрон может быть захвачен одним из ядер атомов среды. Ядро переходит при этом в возбужденное состояние. Возврат ядра в основное состояние сопровождается испусканием γ -квантов.

При радиационном захвате происходит следующая **ядерная реакция**:



т. е. **образуется изотоп исходного элемента, а избыточная энергия, полученная ядром вследствие такой перестройки, испускается в виде γ -кванта**. В ядерных реакторах, где создаются мощные потоки тепловых нейтронов, ядерная реакция указанного типа используется для получения искусственных радионуклидов.

Не только тепловые, но и быстрые нейтроны могут быть захвачены ядрами атомов. В результате произойдет ядерная реакция с вылетом β -частицы, протона и т. д. и образуется ядро другого элемента:



Радиационный захват нейтрона возможен при любой его энергии и на любых ядрах, но более вероятен на медленных нейтронах и тяжелых ядрах, что следует учитывать при выборе материала защиты.

Таким образом, при прохождении нейтронов через вещество происходят следующие взаимодействия с ядрами: упругое и неупругое рассеяния, радиационный захват и различного типа ядерные реакции. Вероятность различного типа взаимодействий зависит от энергии нейтронов.

Лучшими для защиты от нейтронного излучения являются **водородсодержащие материалы**. Обычно применяют воду, парафин, полиэтилен. Кроме того, нейтронное излучение хорошо поглощается бором, бериллием, кадмием, графитом. Поскольку нейтронное излучение сопровождается гамма-излучением, необходимо применять многослойные экраны из различных материалов: свинец-полиэтилен, сталь- вода и т. д. В ряде случаев для одновременного поглощения нейтронного и гамма-излучений применяют водные растворы гидроксидов тяжелых металлов, например, железа ($\text{Fe}(\text{OH})_3$).

К счастью, в мирной жизни нигде, кроме как непосредственно вблизи ядерных реакторов, нейтронное излучение практически не существует.