КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 5. ***Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом*****.**

Цель лекции: сформировать у обучающихся знания по основным физическим закономерностями взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом, механизмами потерь энергии и ослабления излучений, а также познакомить с их практическим значением для расчётов радиационной защиты и обеспечения радиационной безопасности.

Введение: Рассмотрим теперь не отдельные акты ядро-ядерных столкновений, а средние макроскопические физические эффекты и явления, возникающие при прохождении атомных ядер и элементарных частиц через вещество. Эти макроскопические закономерности, эффекты и явления важны, прежде всего, с прикладной точки зрения. А именно, в первую очередь, для построения радиационных защит и обеспечения радиационной безопасности населения.

При изучении проблемы взаимодействия ядерных излучений с веществом, прежде всего, выделим один главный момент: взаимодействие с веществом электрически нейтральных частиц (n, γ, X, ν) принципиально отличается от взаимодействия заряженных частиц (α, β, p, t, h, ТИ). Это принципиальное отличие связано с двумя главными параметрами, характеризующими радиоактивность: а) качество излучения (это его энергия Е); б) количество излучения (это его поток Ф). При прохождении слоя вещества нейтральные частицы, не теряя своего качества (энергии), теряют поток. Заряженные частицы, наоборот, на каждом бесконечно малом участке пути теряют свое качество (в основном энергия теряется на ионизацию – этот процесс дал название – ионизирующее излучение), но сохраняют свое количество – поток Ф.

Основная часть:

Понятно, что в отличие от отдельного акта столкновения статистические макроскопические эффекты очень сложны, т. к. на протяжении пути ядра или элементарной частицы непрерывно изменяются механизмы и сечения взаимодействия. Учесть весь набор механизмов в одной формуле невозможно, но все-таки выделим главные из них.

ИОНИЗАЦИЯ АТОМА – это процесс превращения электрически нейтрального атома вещества в ион, то есть электрически заряженную частицу, образующуюся при потере или избыточном присоединении электронов данным атомом.

Примеры:

- Поток ионизирующих или ядерных частиц характеризуется двумя параметрами: 1) качеством - энергией частиц; 2) количеством - числом частиц. В процессах взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом следует понять главное их отличие друг от друга: 1. нейтральные частицы (n, γ, ν) при прохождении через вещество теряют свое

количество, сохраняя качество - энергию прямого пучка; 2. заряженные частицы (e-, p, d, t, h, α, ТИ), наоборот, теряют качество (энергию), сохраняя свою численность.

- При неупругом столкновении с атомами и молекулами среды энергия электронов затрачивается как на ионизацию, так и на возбуждение атомов.
- При больших энергиях электроны могут вызвать тормозное излучение. В результате упругого столкновения с молекулами и атомами среды часть энергии электронов преобразуется в тепловую энергию.

ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ – это потери энергии движущимися сквозь вещество заряженными частицами на механизм ионизации атомов вещества.

Примеры:

- При потерях энергии на ионизацию заряженная частица приобретает отрицательное ускорение. Поэтому любая частица, включая электрон и позитрон, должна излучать фотоны. Тормозное излучение – это электромагнитное излучение ускоренно движущейся заряженной частицы.
- В рентгеновской трубке, попадая в вещество антикатода, ускоренные до этого электроны теряют энергию на ионизацию, вследствие чего получают отрицательное ускорение и начинают испускать непрерывный рентгеновский спектр Х-квантов.
- В синхротронах – круговых ускорителях электронов, также возникает рентгеновское излучение. Это, так называемое, синхротронное излучение возникает за счет того, что электроны приобретают нормальную (перпендикулярную) составляющую скорости, т.е. движутся с ускорением.

ТОРМОЗНАЯ СПОСОБНОСТЬ ВЕЩЕСТВА – это ионизационные потери энергии заряженными частицами при их движении в веществе.

Примеры:

- Ионизационные потери энергии являются основным механизмом взаимодействия заряженных частиц при прохождении ими слоя вещества. Частицы, пролетая в среде вещества, постепенно теряют свою энергию, расталкивая своим кулоновским полем атомные электроны, возбуждая и ионизуя при этом атомы, до полной своей остановки в веществе. Ионизационные потери на 1 см пути обозначаются как dE/dx.
- Ионизационные потери на единицу длины пути и плотности ρ вещества 1 г/см^2: $1/\rho*(dE/dx)$.

КРИВАЯ БРЭГГА – это зависимость вероятности ионизации, а, следовательно, и потерь энергии, от скорости (энергии) движущейся сквозь вещество заряженной частицы.

Примеры:

- Ионизационные потери на поляризацию атомов среды – это эффект плотности. С ростом энергии заряженной частицы до релятивистских значений радиус цилиндрической области вокруг траектории частицы, где происходит возбуждение и ионизация атомов среды, увеличивается и потери возрастают. Однако атомы, расположенные вблизи траектории, поляризуются, что приводит к уменьшению электромагнитного поля, действующего на электроны, и к уменьшению крутизны возрастания потерь. Поскольку поляризация пропорциональна числу электронов в $1см^3$, этот эффект сильно зависит от плотности среды (эффект плотности).
- Ионизационные потери на ядерное торможение и перезарядку движущегося атома. Когда скорость заряженной частицы достигает скорости электрона на К-оболочке атома среды, частица начинает захватывать или терять электроны, то есть происходят процессы перезарядки. Когда скорость частицы становится сравнимой со скоростью валентных электронов, начинают играть роль потери от упругих частица-атомных столкновений, то есть с атомом как с целым (ядерное торможение).
- Ионизационные потери на образование ионов и возбуждение электронных оболочек атомов среды. С уменьшением скорости заряженной частицы время ее пребывания вблизи атома среды увеличивается, поэтому вероятность ионизации и потери энергии быстро растут.

СРЕДНИЙ ПРОБЕГ – это средний путь, пройденный заряженной частицей в веществе до ее остановки.

Примеры:

- Длина пробега альфа-частиц R в различных веществах может быть определена по формулам: а) Брэгга $R=(AE^3)^{1/2}/\rho$; б) Глессена $R=[AE^{3/2}]/[\rho Z^{2/3}]$.
- Величину пробега α-частиц в любой среде можно определить по величине пробега в воздухе, если известна относительная тормозная способность.
- Согласно электродинамике, заряд, испытывающий ускорение, излучает электромагнитную энергию (тормозное излучение). Углубляясь в вещество, заряженная частица попадает в кулоновское поле атомов и под его влиянием изменяется ее скорость, как по величине, так и по направлению, т.е. двигается ускоренно. Это и является физической причиной рождения тормозного излучения.

ЭКСТРАПОЛИРОВАННЫЙ ПРОБЕГ ЭЛЕКТРОНОВ – максимальная глубина проникновения электронов в вещество, определяемая экспериментально путем экстраполяции прямолинейных участков кривых поглощения.

Примеры:

- Электроны теряют энергию в веществе по разнообразным, плохо изученным механизмам (возбуждение и ионизация атомов; радиационные потери; обратное и многократное рассеяние; поляризационные эффекты и др.), поэтому для них говорят не о среднем пробеге, а о максимальной глубине проникновения.
- Если испускаемые при альфа-распаде частицы монохроматичны, то в β-распаде частицы имеют непрерывный спектр по энергии, изменяющийся от нуля до максимального значения. Непрерывность спектра объясняется участием в распаде трех частиц (ядро, β и электронное антинейтрино). При этом суммарная энергия частиц постоянна для данного изотопа.
- При расчете радиационной защиты от β-излучения необходимо, чтобы толщина экрана была равна или больше максимального пробега β-частицы в материале защиты.

ФОРМУЛА БЕТЕ-БЛОХА – это основное соотношение для расчетов тормозных способностей dE/dx частиц тяжелее электрона:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{4\pi z^2}{\beta^2} n_e r_0^2 m_e c^2 \left[\ln\left(\frac{2m_e c^2 \beta^2}{\bar{I}}\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2\right],$$

где m_e − масса электрона ($m_e c^2$ = 511 кэВ − энергия покоя электрона); c − скорость света; β = v/c; v - скорость частицы; z − заряд частицы в единицах заряда позитрона; n_e − плотность электронов вещества; $\bar{I}$ − средний ионизационный потенциал атомов вещества среды, через которую проходит частица: $\bar{I}$ = 13.5Z эВ, где Z − заряд ядер вещества среды в единицах заряда позитрона; $r_0 = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13}$ см - классический радиус электрона.

Примеры:

- С уменьшением скорости частицы потери энергии на единицу пути возрастают. Физически это связано с увеличением времени пребывания частицы в поле орбитальных электронов, т.е. с увеличением вероятности возбуждения или ионизации атома.
- Для α-частиц при энергиях около 10^3-10^4 МэВ функция dE/dx от энергии имеет минимум, после которого функция начинает медленно возрастать.

ПРАВИЛО БРЭГГА – тормозная способность сложного вещества равна взвешенной сумме тормозных способностей составляющих элементов.

Примеры:

- Таким образом, основная формула Бете остается справедливой и для сложного вещества, если вместо среднего ионизационного потенциала I подставить его усредненную величину.
- Линейный коэффициент ослабления μ [$см^{-1}$] характеризует степень уменьшения интенсивности излучения после слоя вещества в 1 см. Коэффициент μ пропорционален плотности вещества из данного химического элемента. Поэтому удобно ввести наряду с линейным - массовый коэффициент ослабления μ_m [$см^2/г$], который характеризует степень ослабления излучения единицей массы этого вещества: $\mu_m = \mu/\rho$. [$см^{-1}*(г/см^3)=см^2/г$].
- Для веществ сложного химического состава: $\mu_m = \mu_{m1}P_1 + \mu_{m2}P_2 + \mu_{m3}P_3 + \ldots$, где μ_{mi} - массовые коэффициенты ослабления i-ых веществ, P_i - их относительные весовые количества.

Рассмотрим теперь механизмы взаимодействия для гамма-квантов.

ФОТОЭФФЕКТ – механизм взаимодействия гамма-квантов с веществом, при котором атом поглощает гамма-квант и испускает электрон. Оставшийся в возбужденном состоянии атом переходит в основное состояние, испуская рентгеновские кванты или электроны Оже

$$\gamma + A \rightarrow \beta^- + A^+. \qquad (955)$$

Примеры:

- При энергиях до 0,2 МэВ этот процесс является наиболее существенным и происходит главным образом на К-оболочке (80%) и L-оболочке тормозящих атомов. Поэтому сечение фотоэффекта претерпевает резкие скачки при энергиях, равных энергиям ионизации соответствующих оболочек.
- Это фотоатомные реакции поглощения γ-кванта атомом с испусканием электрона из электронных оболочек атома и ионизацией этого атома. При этом электрон покидает атом с кинетической энергией $E_\beta = E_\gamma - J_i$, где E_γ - энергия γ-кванта, J_i - потенциал ионизации i-й оболочки атома.
-

КОГЕРЕНТНОЕ ТОМСОН-РЭЛЕЕВСКОЕ РАССЕЯНИЕ - механизм взаимодействия гамма-квантов с веществом, при котором фотон отклоняется атомными электронами без потери энергии: $\gamma + A \rightarrow \gamma + A$.

Примеры:

- Этот процесс дает некоторый вклад в сечение взаимодействия при низких энергиях.

- Это процесс "упругого" атомного рассеяния квантового γ-излучения, когда $\lambda \gg R_{атом}$.
- По классической теории рассеяния первичные γ-кванты вызывают вынужденные колебания слабо связанных электронов атомов, которые в результате этого сами излучают γ-кванты с той же длиной волны. Так при прохождении γ-квантов через вещество возникает рассеяние без потерь энергии.

НЕКОГЕРЕНТНОЕ КОМПТОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ - механизм взаимодействия гамма-квантов с веществом, при котором фотон не только рассеивается атомным электроном, но и передает ему момент и энергию, достаточные для того, чтобы перевести электрон из связанного состояния в несвязанное: $\gamma + A \rightarrow \gamma' + \beta^- + A^+$.

Примеры:

- Этот процесс является основным в области энергий гамма-квантов от 0,1 до 5 МэВ.
- Это процесс "неупругого" рассеяния γ-кванта на слабосвязанном электроне атома с выбиванием его из внешней электронной оболочки атома и ионизацией атома.
- При падении на атом γ-кванта с большой энергией наблюдается уменьшение коэффициента рассеяния и изменение длины волны рассеянного гамма-кванта. Это явление уже не описывается классической волновой теорией, а объясняется в квантовой теории рассеяния.

РОЖДЕНИЕ ПАР - механизм взаимодействия гамма-квантов с веществом, при котором пара электрон-позитрон рождается в поле ядра и в поле атомных электронов: $\beta^- + \gamma \rightarrow \beta^- + \beta^+ + \beta^-$ или $\gamma + {}^{A}X_{Z} \rightarrow \beta^- + \beta^+ + {}^{A}X_{Z}$.

Примеры:

- Этот процесс имеет место лишь при энергиях γ-квантов, превышающих удвоенную массу покоя электрона, равную 1,022 МэВ. Электрон такой пары, проходя через вещество, создает тормозное излучение и ионизацию атомов среды. Позитрон аннигилирует, создавая новые фотоны.
- Вследствие равенства масс электрона и позитрона наиболее вероятно равное разделение между ними кинетической энергии. Эта кинетическая энергия образуется как разность между энергией падающего γ-кванта и суммарной энергией покоя электрона и позитрона. Менее вероятен разлет пары с разными энергиями. Пространственное распределение между электроном и позитроном формируется таким образом, чтобы суммарный импульс, равный импульсу γ-кванта, был равен векторной сумме их импульсов плюс импульс ядра, в поле которого произошло рождение пары.

- В ядерной физике рождение электрон-позитронных пар может осуществляться и при переходе из возбужденных состояний некоторых ядер в основные. Так, уровень в ядре ^{12}C при энергии E=7,65 МэВ с квантовыми числами $J^{\pi},T= 0^{+},0$ не может распасться на основное состояние, имеющее такие же квантовые числа $0^{+},0$, путем излучения γ-квантов. Это связано с тем, что γ-кванты всегда несут отличный от нуля орбитальный момент. Электрон-позитронный переход к основному состоянию обозначают буквой π; ширина его очень мала $\sim 10^{-5}$ эВ. Конкурирующим этому процессу перехода в основное состояние является процесс последовательного излучения квадрупольных E2 γ-квантов через состояние $2^{+},0$ в ядре ^{12}C при энергии 4,44 МэВ. Кроме того, уровень $0^{+},0$ может распасться путем излучения α-частиц: $^{12}C \rightarrow \alpha + ^{8}Be$. Поскольку энергия α-частиц мала, то и ширина этого распада также мала. Полная ширина уровня $0^{+},0$ при энергии 7,65 МэВ в ^{12}C: $\Gamma=\Gamma_{\gamma}+\Gamma_{\pi}+\Gamma_{\alpha} = (8,5\pm1,0)*10^{-5}$ кэВ.

ЗАКОН ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ – интенсивность параллельного монохроматического пучка после прохождения однородного слоя толщиной определяется формулой

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 – первоначальная интенсивность; μ – коэффициент ослабления.

Примеры:

- Изучение взаимодействия гамма-излучения с веществом заключается в определении зависимости коэффициента ослабления μ от свойств вещества и энергии гамма-квантов.
- Линейный коэффициент ослабления для свинца вначале уменьшается с увеличением энергии γ-кванта, достигает минимума при энергии 3,5 МэВ, а затем растет.
- Для тяжелых элементов фотоэффект оказывает влияние на коэффициент ослабления до энергий 0,5-2 МэВ.

ДЛИНА СВОБОДНОГО ПРОБЕГА ГАММА-КВАНТОВ – это величина l, обратная коэффициенту ослабления μ в данном веществе

$$l=1/\mu.$$

Примеры:

- По закону поглощения гамма-квантов (формулы "узкого пучка") можно определять только интенсивность первичного ослабленного излучения.
- Пренебречь γ-квантами, испытавшими одно- и многократное рассеяние и пользоваться формулами "узкого пучка" можно лишь в условиях хорошей геометрии с коллимированным пучком.

- Если в пучке γ-квантов роль рассеянных частиц велика, то такой пучок называют "широким пучком".

Нейтроны в отличие от заряженных частиц взаимодействуют с веществом только одним механизмом – через ядерные реакции. Но именно этот механизм делает нейтроны самым грозным излучением, т.к. ядерные реакции – необратимые процессы в биообъектах.

ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ - механизмы взаимодействия нейтронов с веществом, при которых происходят превращения ядер вещества в другие ядра.

Примеры:

- Упругое резонансное рассеяние (n,n). Радиационный захват (n,γ).
- Неупругое рассеяние (n,n´). Ядерные реакции (n,p), (n,α), (n,2n).
- Деление ядра (n,f).

Заключение:

Взаимодействие излучений с веществом определяется их природой и энергией. Заряженные частицы теряют энергию на ионизацию и возбуждение атомов, тогда как нейтральные - ослабляются за счёт ядерных реакций и процессов поглощения. Изучение этих закономерностей позволяет количественно описывать процессы ионизации, торможения и ослабления излучений, что имеет решающее значение при проектировании радиационной защиты и обеспечении радиационной безопасности человека и окружающей среды.

Контрольные вопросы:

1) Объясните, в чём состоит принципиальное отличие взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом?

2) Объясните понятие ионизационных потерь и их роль в процессе движения заряженных частиц через вещество.

3) Что понимается под средним пробегом и экстраполированным пробегом электронов?

4) Какова физическая суть формулы Бете–Блоха и для каких частиц она применяется?

5) Перечислите основные механизмы взаимодействия γ-квантов с веществом.

6) В чём заключается закон поглощения γ-квантов и как определяется длина их свободного пробега?

7) Почему нейтроны считаются наиболее опасным видом излучения с точки зрения радиационной безопасности?

Список использованных источников:

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 384 с.
3. Гурачевский В.Л. Радиационный контроль: физические основы и приборная база: метод. пособие. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Минск : Институт радиологии, 2014. – 160 с.
4. Взаимодействие частиц с веществом. – http://nuclphys.sinp.msu.ru/partmat/index.html
5. Касьяненко А. А. Радиоэкологическая экспертиза и радиационные измерения. – Москва: Российский университет дружбы народов, 2016. – 252 с.