

7. Применима ли формула Эйнштейна $E = mc^2$:

- а) к делению ядер;
- б) к ядерному синтезу;
- в) к ядерным реакциям?

8. Источником электромагнитной энергии, излучаемой Солнцем и другими звездами, служит термоядерный синтез. Какие условия в недрах звезд делают возможным протекание термоядерного синтеза?

§ 43. Ионизирующее излучение. Элементы дозиметрии

- Человек каждую секунду подвергается воздействию излучений. Излучение Солнца является одним из ключевых факторов возникновения и существования жизни на Земле. Однако некоторые виды излучения опасны для здоровья человека. Какие это излучения? Как от них можно защититься?

Заряженные частицы, рентгеновское и γ -излучения, распространяясь в веществе, взаимодействуют с его атомами. За счет своей энергии частицы излучения могут ионизировать атомы, выбивая из них электроны. Часто одна частица в состоянии ионизировать несколько атомов, поэтому процесс распространения такого излучения через вещество сопровождается его сильной ионизацией. Вследствие этого **ионизирующим** называют такой вид излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации его атомов и молекул (рис. 227).

Основу биологического действия ионизирующего излучения на живые ткани составляют химические процессы, происходящие в их клетках при



Рис. 227. Виды излучения

поглощении ими излучения. Ионизация атомов и молекул тканей вещества приводит к повреждению клеток и изменению структуры тканей. Часть атомов и молекул переходит в возбужденное состояние и, возвращаясь в невозбужденное состояние, отдает излишек энергии в виде электромагнитного излучения. Под воздействием этого излучения в тканях происходят биохимические реакции, обусловленные образованием новых молекул, чуждых нормальной клетке. В результате нарушается клеточное деление и образование новых клеток. В свою очередь это приводит к хромосомным перестройкам и возникновению мутаций, приводящих к изменениям в генах клетки. Таким образом, биологическое действие ионизирующего излучения сказывается не только на данном организме, но и на последующих поколениях.

Повреждения живого организма, вызванные действием ионизирующего излучения, называется *лучевой болезнью*. Опасность этой болезни усугубляется наличием скрытого периода, т. е. ее симптомы проявляются только через некоторый промежуток времени. Симптомами лучевой болезни являются тошнота, рвота, общая слабость, повышенная температура, выпадение волос, кровоизлияние.

Разные виды ионизирующего излучения обладают различной проникающей способностью (см. рис. 227). Биологическое действие различных видов излучения на живые организмы неодинаково. Например, α -частицы не способны проникнуть через наружный слой кожи. Поэтому они не представляют опасности до тех пор, пока радиоактивные вещества, испускающие α -частицы, не попадут внутрь организма с пищей, вдыхаемым воздухом, на слизистую оболочку или через открытую рану. β -излучение обладает большей проникающей способностью: оно проникает в ткани организма на 1—2 см. Проникающая способность γ -излучения настолько велика, что поглотить его может только достаточно толстая свинцовая или бетонная плита. Чем больше энергии передает излучение тканям живого организма, тем больше в них будет повреждений.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников ионизирующих излучений: космических лучей, радиоактивных изотопов, естественной радиоактивности горных пород и почвы, попадающих в пищу радиоактивных радиоизотопов. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи. В этом случае говорят о *внешнем облучении*. В то же время они могут находиться в пище, воде, воздухе и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют *внутренним*.

Основными источниками внутреннего фонового облучения человеческого организма являются:

1) естественный изотоп углерода ${}^14_6\text{C}$, содержащийся во всех тканях человеческого организма;

2) радон ${}^{222}_{86}\text{Rn}$, торий ${}^{232}_{90}\text{Th}$ и их дочерние продукты распада, вдыхаемые с воздухом и откладывающиеся в дыхательных органах человека;

3) долгоживущий изотоп радия ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ и его короткоживущий изотоп ${}^{224}_{88}\text{Ra}$, отлагающиеся в костных тканях;

4) естественный радиоактивный изотоп калия ${}^{40}_{19}\text{K}$, содержащийся в мягких тканях (преимущественно в мышцах).

Кроме того, отдельные источники ионизирующего излучения избирательно концентрируются в отдельных органах: йод — в щитовидной железе, стронций — в костях, уран — в почках — и подвергают их повышенному облучению.

Очень важно уметь определять результат действия ионизирующего излучения на вещество, мерой которого является *доза*. Этим занимается **дозиметрия**.

Количество энергии, переданной единице массы организма ионизирующим излучением, называется дозой (от греч. *δοση* (доза) — доля, порция). Существуют различные виды доз в зависимости от вида излучения, вида органа или ткани, подвергшихся облучению.

Поглощенная доза — количество энергии W , переданное веществу ионизирующим излучением любого вида в пересчете на единицу массы тела любого вещества.

Доза в органе или биологической ткани — средняя поглощенная доза D в определенном органе или ткани человеческого тела:

$$D = \frac{W}{m}, \quad (1)$$

где W — полная энергия, переданная ионизирующим излучением ткани или органу; m — масса органа или ткани.

В СИ единицей поглощенной дозы является **Грей (Гр)**. $1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

Поглощенная доза излучения равна 1 Гр, если в 1 кг вещества поглощено ионизирующее излучение, энергия которого равна 1 Дж.

Поглощенная доза расходуется на нагревание вещества и на физические и химические превращения в нем. Величина дозы зависит от вида излучения, энергии его частиц, плотности их потока и от состава облучаемого вещества.

При одинаковой поглощенной дозе α -излучение гораздо опаснее β - и γ -излучений. Для учета этого фактора дозу излучения следует умножить на коэффициент w_R , учитывающий способность излучения данного вида повреждать ткани организма. Он называется *коэффициентом качества излучения (взвешивающий коэффициент)*.

Коэффициент качества излучения показывает, во сколько раз радиационная опасность от воздействия на живой организм данного вида излучения больше, чем от воздействия γ -излучения (при одинаковых поглощенных дозах).

Значения w_R для различных видов ионизирующего излучения приведены в таблице 12.

Таблица 12. Взвешивающие коэффициенты w_R (коэффициенты качества) для различных видов ионизирующего излучения

Вид излучения	Взвешивающий коэффициент излучения (w_R)
Фотоны	1
Электроны и мюоны	1
Протоны и заряженные пионы	2
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ионы	20
Нейтроны	См. рис. 228

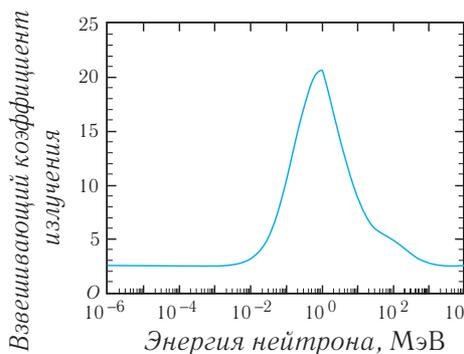


Рис. 228. Зависимость взвешивающего коэффициента излучения нейтронов от их энергии

Пересчитанную таким образом дозу называют *эквивалентной дозой*. **Эквивалентная доза H** — это поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий коэффициент качества излучения:

$$H = w_R D. \quad (2)$$

В СИ единицей эквивалентной дозы является **зиверт (Зв)**.

1 Зв равен эквивалентной дозе, при которой поглощенная доза равна 1 Гр и взвешивающий коэффициент равен единице.

Необходимо учитывать также, что одни части тела более чувствительны к облучению, чем другие. Поэтому дозы облучения органов и тканей организма необходимо учитывать с разными взвешивающими коэффициентами w_T (таблица 13). При умножении эквивалентной дозы на соответствующие коэффициенты и суммировании по всем органам и тканям получают **эффективную дозу**, отражающую суммарный эффект облучения для организма.

Таблица 13. Тканевый взвешивающий коэффициент (w_T) (2007)

Ткань	w_T
Костный мозг (красный), толстая кишка, легкие, желудок	0,12
Молочная железа, остальные ткани	0,12
Половые железы	0,08
Мочевой пузырь, пищевод, печень, щитовидная железа	0,04
Поверхность кости, головной мозг, слюнные железы, кожа	0,01

На практике широко используются внесистемные единицы:

рад — единица поглощенной дозы излучения:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}; \quad (3)$$

бэр (биологический эквивалент рад) — единица эквивалентной дозы:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}, \quad 1 \text{ Зв} = 1 \cdot 10^2 \text{ бэр}. \quad (4)$$

Облучению от естественных источников подвергается любой житель Земли. Естественный фон составляет около 1,3 мЗв в год на человека. Однако одни из них получают большую дозу, а другие — меньшую. Это зависит от места проживания, образа жизни. Использование газа для приготовления пищи, герметизация помещений, полеты на самолетах, применение некоторых строительных материалов — все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников. В среднем земные источники ионизирующего излучения обеспечивают более $\frac{5}{6}$ годовой эффективной дозы, получаемой населением, в основном за счет внутреннего облучения. Остальную часть естественного облучения вносят космические лучи путем внешнего облучения.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных



источников радиации. Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космического излучения эффективную дозу около 300 мкЗв в год. Для людей, живущих выше 2 км над уровнем моря, эта величина в несколько раз больше. При подъеме с высоты 4 км до высоты 12 км уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз.

В среднем примерно $\frac{2}{3}$ эффективной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников излучения, поступают от радиоактивных веществ, попавших в организм с водой, пищей и воздухом.

▶ Наиболее значительным из всех естественных источников ионизирующих излучений является невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ радон и его дочерние продукты. Именно они ответственны примерно за $\frac{3}{4}$ годовой индивидуальной эффективной дозы облучения, получаемой населением от земных источников ионизирующего излучения (рис. 229).



Для защиты от ионизирующего излучения, по возможности, нужно использовать следующие способы:

- 1) удаление на большое расстояние от источника;
- 2) ограничение времени пребывания на загрязненной местности;
- 3) применение защитных веществ (свинец, бор, кадмий), эффективно поглощающих ионизирующее излучение;
- 4) применение веществ, ослабляющих воздействие ионизирующих излучений на организм;



Рис. 229. Источники ионизирующего излучения

5) дозиметрический контроль окружающей среды и продуктов питания.

Широкое применение находят ионизирующие излучения в науке и технике. В результате взаимодействия частиц высоких энергий с исследуемым веществом образуются радиоактивные нуклиды. При переходе их в стабильное состояние испускается γ -излучение. По виду γ -спектров и интенсивности спектральных линий определяют химический состав вещества и концентрации содержащихся в нем элементов. Для этого метода характерны универсальность методики, быстрота измерения и очень высокая относительная чувствительность. Она достигает величины порядка 10^{-7} .

Радиоактивационный анализ широко применяется в геологоразведке, особенно при исследовании руд, содержащих редкие и драгоценные металлы. В технике благодаря высокой чувствительности им исследуют скорость износа металлических деталей, например исследование износа железнодорожных рельсов.

Радионуклиды (изотопы йода, технеция, ксенона, таллия) широко используются в медицинской диагностике.

В качестве приборов для измерения дозы или ее мощности используются дозиметры. Ими служат приборы, способные регистрировать ионизирующие излучения. Шкалы приборов специально проградуированы в единицах дозы либо в единицах мощности дозы.

Внимание! Знак, предупреждающий о радиационной опасности, изображен на рисунке 230.



Рис. 230. Знак радиационной опасности

► Беккерель первым столкнулся с «результатами» воздействия радиоактивного излучения на ткани живого организма. Он положил пробирку с радием в карман и получил серьезный ожог кожи.

Ионизирующее излучение используется в медицине как для лечения, так и в диагностических целях. Одним из самых распространенных медицинских приборов является рентгеновский аппарат. Самым значительным достижением рентгенодиагностики стала компьютерная томография. Ее применение позволило уменьшить дозы облучения в десятки раз.

Наиболее чувствительными к поражению ионизирующим излучением являются кроветворные органы, а наиболее опасными являются дозы, полученные в течение очень малого промежутка времени. Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы теряют способность нормально функционировать при дозах 0,5—1 Гр.

► По правилам МАГАТЭ (Международное Агентство по Атомной Энергии), предельная доза облучения составляет 5 мЗв в год для населения и 0,05 Зв в год для людей вредных профессий (не считая фонового излучения). В Республике Беларусь с 28 декабря 2012 г. введены следующие Нормы радиационной безопасности. Основным пределом доз для населения является эффективная доза, равная 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год или эффективная доза за период жизни (70 лет) — 70 мЗв. Эквивалентные дозы за год: в хрусталике глаза — 15 мЗв; в коже, кистях и стопах — 50 мЗв.



1. Какое излучение называют ионизирующим?
2. В чем проявляется биологическое воздействие ионизирующего излучения на живые организмы?
3. Какое излучение обладает наибольшей проникающей способностью?
4. К каким последствиям может привести облучение человека ионизирующим излучением?
5. Что является основными естественными источниками ионизирующего излучения?
6. Чем занимается дозиметрия?
7. Дайте определение поглощенной дозы излучения. Что является единицей измерения поглощенной дозы в СИ?
8. Что такое эквивалентная доза? Что является единицей эквивалентной дозы в СИ?
9. Что такое эффективная доза? Что является единицей эффективной дозы в СИ?
10. Какие внесистемные единицы используются для измерения поглощенной и эквивалентной доз?
11. Какие из естественных внутренних источников ионизирующего излучения являются наиболее опасными?
12. Какие органы человека являются наиболее чувствительными к поражению ионизирующим излучением?

§ 44. Элементарные частицы и их взаимодействия

- Долгое время протон, нейтрон и электрон считались незыблемыми «кирпичиками» материи. Однако по мере открытия новых частиц перед физиками встала проблема их классификации: сколько всего «кирпичиков» материи, какие из них являются простейшими, а какие имеют сложную структуру, т. е. образованы из других частиц. Как частицы взаимодействуют между собой? Как они распадаются?



Каждый электрон характеризуется собственным механическим моментом движения, который называется спином (от англ. spin — вращать).