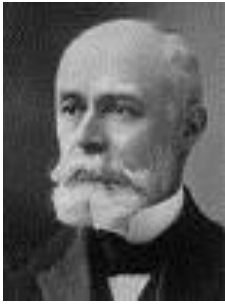


1. РАДИОАКТИВНОСТЬ

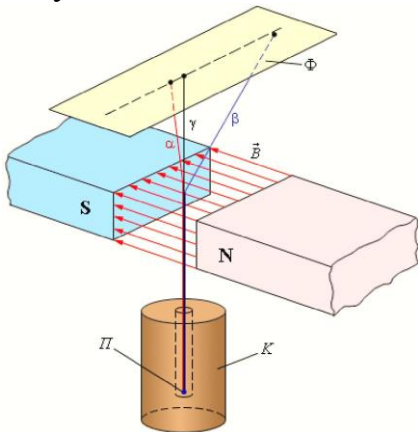


А. Беккерель ¹

Радиоактивностью называется явление самопроизвольного превращения путем распада одних атомных ядер в другие с испусканием одной или нескольких частиц.

Явление радиоактивности было открыто в 1896 году французским физиком А. Беккерелем, который обнаружил, что соли урана испускают неизвестное излучение, способное проникать через непрозрачные для света преграды и вызывать почернение фотоэмульсии. Тогда считалось, что это излучение связано с атомными процессами. Лишь с открытием атомных ядер стало ясно, что это внутриядерный процесс – изменение ядер химических элементов.

Через два года французские физики М. и П. Кюри обнаружили радиоактивность тория и открыли два новых радиоактивных элемента – полоний ${}_{84}^{210}\text{Po}$ и радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$. В последующие годы исследованием природы радиоактивных излучений занимались многие физики, в том числе Э. Резерфорд и его ученики. Было выяснено, что радиоактивные ядра могут испускать частицы трех видов: положительно и отрицательно заряженные частицы и частицы, не имеющие заряда. Эти три вида излучения были названы α , β и γ – излучениями.

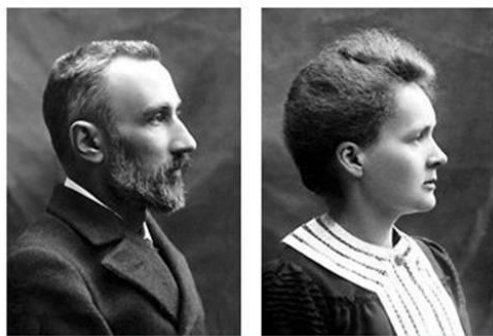


На рисунке показана схема эксперимента, позволяющая обнаружить сложный состав радиоактивного излучения (К – свинцовый контейнер, П – радиоактивный препарат, Ф – фотопластинка, \vec{B} – магнитное поле. В магнитном поле α и β – лучи испытывают отклонения в противоположные стороны, причем β – лучи отклоняются сильнее, γ – лучи в магнитном поле не испытывают отклонения.

В 1898 г. Мария и Пьер Кюри выделили новый радиоактивный элемент – полоний, названный в честь Польши (Нобелевская премия 1903 г.). Вторую Нобелевскую премию М. Кюри получила в 1911 году за открытие радия.

В 1903 г. Э. Резерфорд обнаружил в излучении радиоактивных веществ α -частицы – это ядра гелия, бета-частицы – это электроны. Позднее Виллард обнаружил гамма-лучи.

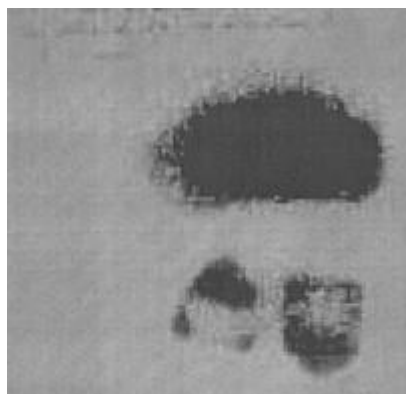
¹ Антуан Анри Беккерель – французский физик, Нобелевская премия 1903 г. «...за открытие спонтанной радиоактивности».



*Пьер и Мари Кюри*²

Всякое ядро, которое изменяет свою структуру, испуская гамма-лучи или другие ядерные частицы (например, p , α , β^+ или β^-), называется радиоактивным ядром. Всего в природе найдено 272 стабильных атомных ядра химических элементов. Все остальные ядра (радиоизотопы) радиоактивны в той или иной мере.

В таблице приведены различные типы реакций распадов естественных радиоактивных ядер.



Первое свидетельство радиоактивного распада атомных ядер, обнаруженное А. Беккерелем. На фотопластинке отчетливо видны потемнения, образовавшиеся в результате того, что А. Беккерель положил на нее образцы урановой соли.

Таблица

Типы ядерных распадов

α – распад	${}^A_Z\text{M} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{M} + {}^4_2\text{He}$	
β^- – распад	${}^A_Z\text{M} \rightarrow {}^A_{Z+1}\text{M} + {}^0_{-1}\beta + \bar{\nu}$	
β^+ – распад	${}^A_Z\text{M} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{M} + {}^0_1\beta + \nu$	
β – захват	${}^A_Z\text{M} + {}^0_{-1}\beta \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{M} + \nu$	
γ – распад	$({}^A_Z\text{M})^* \rightarrow {}^A_Z\text{M} + \gamma$	
Здесь ν и $\bar{\nu}$ – нейтрино и антинейтрино; $({}^A_Z\text{M})^*$ – ядро в возбужденном состоянии, возвращается в основное, испуская γ -квант.		

Обычно все типы радиоактивности сопровождаются испусканием гамма-излучения – жесткого, коротковолнового электромагнитного излу-

² Французские физики Мария и Пьер Кюри, Нобелевская премия по физике 1903 г. «в знак признания... их совместных исследований явлений радиации, открытых профессором Анри Беккерелем», с которым они разделили премию.

чения. Гамма-излучение является основной формой уменьшения энергии возбужденных продуктов радиоактивных превращений. Ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется *материнским*; возникающее дочернее ядро, как правило, оказывается возбужденным, и его переход в основное состояние сопровождается испусканием γ -фотона.

В табл. 1 приведены основные типы радиоактивности.

Таблица 1

Тип радиоактивности	Изменение заряда ядра Z	Изменение массового числа A	Характер процесса
α -распад	$Z - 2$	$A - 4$	Вылет α -частицы – системы двух протонов и двух нейтронов, соединенных воедино
β -распад	$Z \pm 1$	A	Взаимные превращения в ядре нейтрона (1_0n) и протона (1_0p)
β_- -распад	$Z + 1$	A	${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p + ({}^0_{-1}e + {}^0_0\tilde{\nu}_e)$
β_+ -распад	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$
Электронный захват (e^- или К-захват)	$Z - 1$	A	${}^1_1p \rightarrow {}^1_0n + ({}^0_1e + {}^0_0\nu_e)$ ${}^0_0\nu_e$ и ${}^0_0\tilde{\nu}_e$ – электронное нейтрино и антинейтрино.
Спонтанное деление	$Z - (1/2)A$	$A - (1/2)A$	Деление ядра обычно на два осколка, имеющих приблизительно равные массы и заряды

2. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Постоянная распада. Пусть N – число радиоактивных ядер в образце в заданный момент времени t , dN – распавшихся ядер за интервал времени от t до $t + dt$. Тогда вероятность распада ядер

$$w = -dN / N$$

Знак минус означает, что в результате распада количество радиоактивных ядер в образце уменьшается.

Вероятность распада ядра λ в единицу времени t

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = const.$$

Активность образца – величина $A = |dN/dt = \lambda N|$. Она характеризует число распадов, происходящих с ядрами образца в одну секунду.

Активность измеряют в «Кюри» (Ки) и милликюри (мКи):

1 Ки = $3,700 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду;

1 мКи = $3,7 \cdot 10^7$ распадов в секунду.

Формулу (4.22) можно переписать так: если в момент времени $t = 0$ имелось N_0 атомов, то

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_{t=0}^t -\lambda t, \quad \text{то есть} \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t.$$

Потенцируя (4.23), получим окончательно

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Или

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t},$$

где $\lambda N_0 = A_0$ – начальная активность образца, то есть в момент времени $t = 0$; $\lambda N = A$ – активность в момент времени t .

Таким образом, для активности образца имеем

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

или, после логарифмирования

$$\ln A = \ln A_0 - \lambda t$$

Период полураспада – время $T_{1/2}$ – время, за которое распадается $1/2$ первоначального числа ядер, т. е. время, за которое активность образца уменьшается вдвое относительно первоначальной активности.

К моменту времени $t = T_{1/2}$ число оставшихся ядер данного типа равно $N = 1/2 N_0$ и поэтому, согласно формуле (4.24) $(1/2)N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$. Откуда после сокращения и логарифмирования для периода полураспада получаем

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

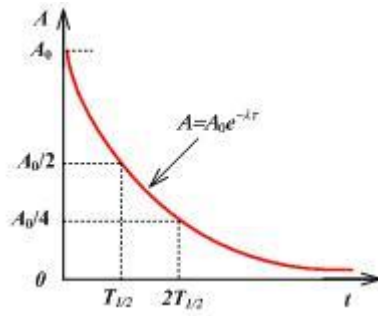


Рис.. Закон радиоактивного распада

Среднее время жизни радиоактивных ядер. Если в образце имеется dN_1 атомных ядер, которые живут в течение времени t_1 , dN_2 ядер, которые живут в течение времени t_2 , и т. д., то среднее время жизни \bar{T} ядер определяется как

$$\bar{T} = \frac{t_1 dN_1 + t_2 dN_2 + \dots}{dN_1 + dN_2 + \dots},$$

или более точно

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\infty} t dN}{\int_0^{\infty} dN} = - \frac{\int_0^{\infty} t dN}{N_0}$$

Но: $dN = d(N_0 e^{-\lambda t}) = -\lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$, тогда, получим:

$$\bar{T} = \frac{\int_0^{\infty} -\lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt}{N_0} = -\lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

Интегрируем по частям;

$$\bar{T} = \lambda \left(-\frac{t}{\lambda} e^{-\lambda t} + \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt \right) = \lambda \left(-\frac{t}{\lambda} e^{-\lambda t} - \frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda t} \right) \Bigg|_0^{\infty}$$

Таким образом, окончательно имеем

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda}$$

Среднее время жизни и период полураспада связаны соотношением

$$\bar{T} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \quad \text{или} \quad T_{1/2} = 0,693 \bar{T}.$$

Естественная радиоактивность наблюдается у ядер атомов химических элементов, расположенных за свинцом в периодической системе Менделеева. Естественная радиоактивность легких и средних ядер наблюдается лишь у ядер ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{37}^{87}\text{Rb}$, ${}_{49}^{115}\text{In}$, ${}_{57}^{138}\text{La}$, ${}_{62}^{147}\text{Sm}$, ${}_{71}^{175}\text{Lu}$, ${}_{75}^{187}\text{Re}$.

При радиоактивном распаде ядер выполняется закон сохранения электрического заряда:

$$Z_{\text{яд}}e = \sum_i Z_i e,$$

где $Z_{\text{яд}}e$ – заряд материнского ядра, $Z_i e$ – заряды ядер и частиц, возникших в результате радиоактивного распада. Этот закон применяется при исследовании всех ядерных реакций.

Правило сохранения массовых чисел при явлениях естественной радиоактивности:

$$A_{\text{яд}} = \sum_i A_i,$$

где $A_{\text{яд}}$ – массовое число материнского ядра, A_i – массовые числа ядер или частиц, получившихся в результате радиоактивного распада.

Правила смещения (правила Фаянса и Содди) при радиоактивных α - и β -распадах:



Здесь ${}^A_Z X$ – материнское ядро, Y – символ дочернего ядра, ${}^4_2 \text{He}$ ядро гелия, ${}^0_{-1} e$ – символическое обозначение электрона, для которого $A = 0$ и $Z = -1$.

Если дочернее ядро оказывается также радиоактивным, то возникает цепочка радиоактивных превращений. Естественные радиоактивные ядра образуют *три радиоактивных семейства*, называемых семейством урана (${}^{238}_{92}\text{U}$), семейством тория (${}^{232}_{90}\text{Th}$) и семейством актиния (${}^{235}_{89}\text{Ac}$). Свои названия они получили по «родоначальнику» – долгоживущему изотопу с наибольшим периодом полураспада. Все семейства после цепочки α - и β -распадов заканчиваются на устойчивых ядрах изотопов свинца – ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ и ${}^{207}_{82}\text{Pb}$. Семейство нептуния, начинающееся от трансуранового элемента нептуния ${}^{237}_{93}\text{Np}$, получено искусственным путем и заканчивается на ${}^{200}_{83}\text{Bi}$.

Если происходит цепочка радиоактивных распадов и за время dt из общего числа $N_{\text{м}}$ материнских ядер распадается $\lambda_{\text{м}} N_{\text{м}} dt$ ядер, а за это же время распадается $\lambda_{\text{д}} N_{\text{д}} dt$ дочерних ядер, то общее изменение $dN_{\text{д}}$ числа

ядер дочернего вещества за единицу времени выразится следующим образом:

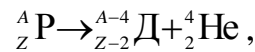
$$\frac{dN_d}{dt} = \lambda_m N_m - \lambda_d N_d.$$

В случае подвижного равновесия между материнским и дочерним веществами $dN_d/dt = 0$ и выполняется условие радиоактивного равновесия

$$\lambda_m N_m = \lambda_d N_d.$$

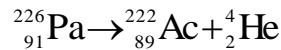
3. Альфа-распад

Альфа-распад. Альфа-распад – вид радиоактивного распада ядра, в результате которого происходит испускание альфа-частицы. При этом массовое число уменьшается на 4, а атомный номер - на 2. Альфа-распад наблюдается только у тяжёлых ядер (Атомный номер должен быть больше 82, массовое число должно быть больше 200).



где P – родительское, а D – дочернее ядро.

В качестве примера рассмотрим распад ядра протактиния с образованием актиния и альфа -частицы



Энергетический эффект Q для этой ядерной реакции можно найти, составляя разность начальной и конечной масс

Начальная масса $m_p = 226,0280$ а. е. м.

Конечная масса $\begin{cases} m_d = 222,0178 \\ m_\alpha = 4,0026 \end{cases}$ а. е. м.

226,0204 а. е. м.

Отсюда для энергетического эффекта имеем

$$\Delta m = m_p - (m_d + m_\alpha) = 226,0280 - 226,0204 = 0,0076 \text{ а.е.м.}$$

или в единицах энергии:

$$Q = 0,0076 \cdot 931 \text{ МэВ} / \text{а.е.м.} = 7,07 \text{ МэВ.}$$

Так как $Q > 0$, энергия в этой реакции выделяется.

Остановимся на альфа - распадах подробнее. Закон сохранения массы и энергии для реакции дает:

$$m_p c^2 = m_d c^2 + m_\alpha c^2 + E_d + E_\alpha$$

где E_D и E_α – кинетическая энергия дочернего ядра и альфа-частицы. Кинетическую энергию родительского ядра не учитываем, так как считаем, что оно до начала реакции покоилось.

Энергетический эффект будет равен

$$Q = E_D + E_\alpha = [m_p - (m_D + m_\alpha)]c^2 > 0$$

В соответствии с законом сохранения импульса имеем

$$m_\alpha v_\alpha = m_D v_D$$

(т. к. $m_p v_p = 0$, альфа - частица и ядро разлетаются в противоположные стороны). Возведем в квадрат и разделим пополам

$$\frac{m_\alpha^2 v_\alpha^2}{2} = \frac{m_D^2 v_D^2}{2},$$

или

$$m_\alpha E_\alpha = m_D E_D.$$

Для масс имеем следующие значения:

$$m_\alpha = 4 \text{ а. е. м.}; \quad m_D = (A - 4) \text{ а. е. м.}$$

Тогда получаем $4E_\alpha = (A - 4)E_D$, или

$$E_D = \frac{4}{A - 4} E_\alpha$$

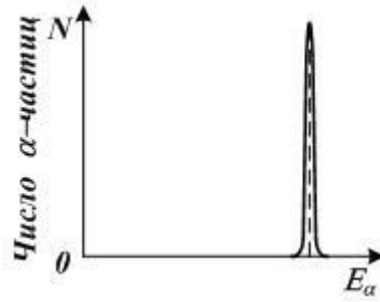
Величину Q можно рассчитать

$$Q = \frac{4}{A - 4} E_\alpha + E_\alpha = \frac{A}{A - 4} E_\alpha.$$

Отсюда получаем формулу, выражающую кинетическую энергию α -частиц через энергетический эффект реакции

$$E_\alpha = \frac{A - 4}{A} Q$$

Из этого следует, что пучок α -частиц моноэнергетичен



Энергетический спектр α -частиц

Подставляя $E_\alpha = \frac{A-4}{A}Q$ в $E_d = \frac{4}{A-4}E_\alpha$, получим для кинетической энергии дочернего ядра E_d

$$E_d = \frac{4}{A}Q$$

Для очень тяжелых ядер A велико и $(A-4) \cong A$, так что для кинетических энергий альфа - частиц и дочернего ядра имеем:

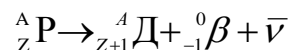
$$E_\alpha \approx Q \quad \text{и} \quad E_d \approx 0,$$

т. е. α -частица уносит практически всю энергию, выделяющуюся при альфа - распаде в форме кинетической энергии.

Так как α -частицы массивны (4 нуклона) и имеют двойной заряд ($+2e$), длина свободного пробега в веществе для них очень невелика. Большинство α -частиц не проникают сквозь лист бумаги. Длина свободного пробега α - частиц в воздухе при альфа - распаде ядер урана составляет $\sim 2,7$ см, при альфа -распаде ядер радия – 3,3 см, что соответствует энергии α - частиц $\sim 6 \div 7$ МэВ.

4 БЕТА-РАСПАД

Бета-распад представляется схематически уравнением



где ${}^0_{-1}\beta$ - электрон; $\bar{\nu}$ - антинейтрино (античастица нейтрино), не имеет ни заряда, ни массы.

По закону сохранения энергии и массы имеем

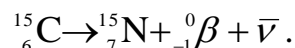
$$(m_p - Zm_e)c^2 = [m_d - (Z+1)m_e]c^2 + m_e c^2 + E_d + E_\beta + E_{\bar{\nu}}.$$

Энергетический эффект Q реакции электронного ядерного распада

$$Q = E_d + E_\beta + E_{\bar{\nu}} = (m_p + m_d)c^2,$$

причем, только при $m_p > m_d$ ($Q > 0$) распад в самом деле может произойти.

Рассмотрим пример: может ли углерод ^{15}C испускать электроны?



Разность масс ядер в реакции равна

$$m_p = 15,01060 \text{ а. е. м.}$$

$$m_d = 15,00011 \text{ а. е. м.}$$

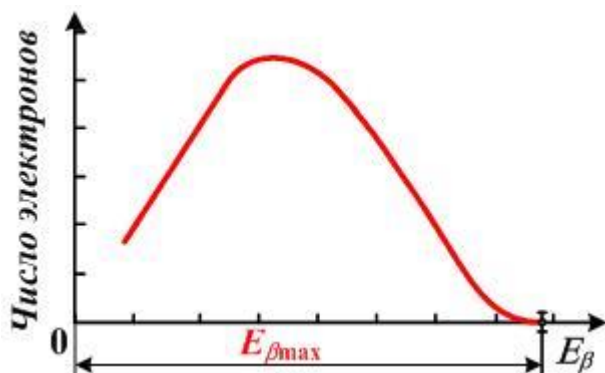
$$m_p - m_d = 0,01049 \text{ а. е. м.}$$

Таким образом

$$Q = 0,01049 \text{ а.е.м.} \times 931 \text{ МэВ/а.е.м.} = 9,8 \text{ МэВ.}$$

Так как $Q > 0$, эта реакция может идти самопроизвольно.

Энергетический спектр испускаемых электронов будет не дискретным, а непрерывным, с ярко выраженной максимальной энергией



Энергетический спектр электронов

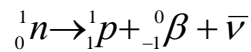
Электронный пучок был бы моноэнергетичным, если бы при бета-распаде не было испускаемых нейтрино. Так как родительское ядро покоится, электроны обладали бы одинаковым с ядром импульсом $p_\beta = p_d$. Для объяснения непрерывного спектра энергий электронов, испускаемых при бета-распаде, потребовалось ввести новую, третью частицу – нейтрино. Так как родительское ядро по условию покоится, то по закону сохранения импульса

$$\vec{p}_d + \vec{p}_\beta + \vec{p}_\nu = 0$$

Использование нейтрино (антинейтрино) позволяет объяснить непрерывный спектр электронов, так как импульсы \vec{p}_d , \vec{p}_β и \vec{p}_ν могут теперь принимать непрерывные множества различных значений, хотя все они в векторной сумме и **дают ноль!** Резкий обрыв спектра происходит

при энергии $E_{\beta_{\max}} = Q$; при этом $E_{\text{д}} = E_{\bar{\nu}} = 0$ и электрон уносит всю энергию, выделяющуюся при реакции.

Очевидно, что дочернее ядро имеет $Z + 1$ протонов, то есть на один протон больше, чем родитель. Кроме того, дочернее ядро имеет на один нейтрон меньше, чем родитель, так как $N = A - (Z + 1)$. Это заставляет считать, что здесь в действительности происходит реакция распада нейтрона, входящего в состав атомного ядра:

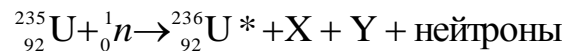


5. ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ. ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

Облученный нейтронами уран проявляет искусственную бета-радиоактивность. Как оказалось, в этом случае ядра урана подвергаются реакции деления, в результате которой одно ядро урана расщепляется на два ядра примерно одинаковой массы, но меньших размеров.

Нейтроны, обладая способностью близко подходить к ядру, имеют большое эффективное сечение захвата для тепловых нейтронов, налетающих на ядро ${}_{92}^{235}\text{U}$, так как они могут долго находиться в поле действия ядерных сил. Медленные нейтроны получают путем замедления в водородосодержащих материалах (парафин, вода).

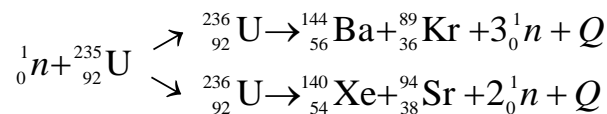
Схема реакции деления урана



где ${}_0^1n$ – медленный нейтрон; ${}_{92}^{236}\text{U}^*$ – крайне нестабильный изотоп урана; X и Y – ядра-фрагменты, получаемые при делении урана.

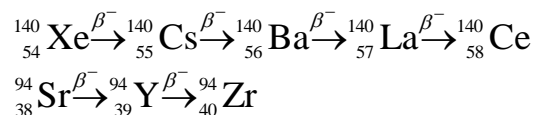
Ядра-фрагменты могут быть, конечно, разные, как это и показывает опыт.

Типичные реакции:



где Q – энергия, выделяемая при реакции.

Бета-активность, которую наблюдал Ферми, происходит от радиоактивных распадов ядер-фрагментов, например



После захвата ядром ${}_{92}^{235}\text{U}$ нейтрона образуется промежуточное ядро ${}_{92}^{236}\text{U}^*$, которое находится в возбужденном состоянии (рис.). При этом энергия нейтрона равномерно распределяется между всеми нуклонами, а

само промежуточное ядро деформируется и начинает колебаться. Если возбуждение невелико, то ядро, освобождаясь от излишка энергии путем испускания γ -кванта или нейтрона, возвращается в устойчивое состояние. Если же энергия возбуждения достаточно велика, то деформация ядра при колебаниях может быть настолько большой, что в нем образуется перетяжка, аналогичная перетяжке между двумя частями раздваивающейся капли жидкости. Ядерные силы, действующие в узкой перетяжке, уже не могут противостоять значительной кулоновской силе отталкивания частей ядра. Перетяжка разрывается, и ядро распадается на два "фрагмента", которые разлетаются в противоположные стороны.

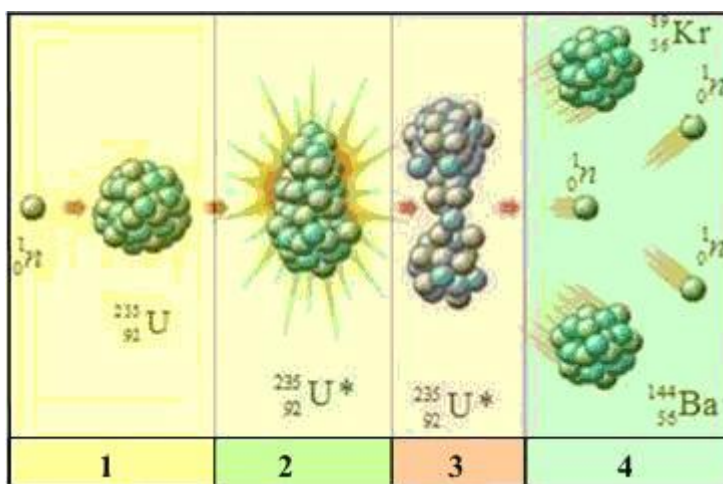
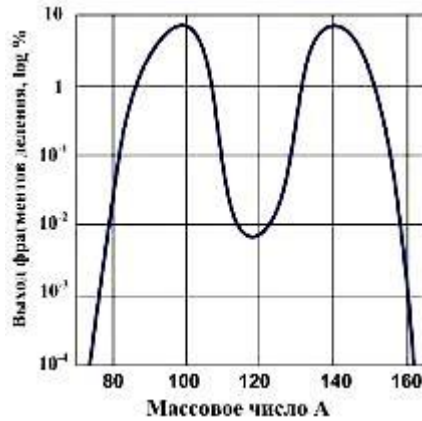


Рис. Схема деления ядра урана-235

В продуктах деления урана-235 было обнаружено около 300 изотопов различных элементов: от $Z=30$ (цинк) до $Z=64$ (гадолиний). Кривая зависимости относительного выхода изотопов, образующихся при облучении урана-235 медленными нейтронами, от массового числа — симметрична и по форме напоминает букву «М». Два выраженных максимума этой кривой соответствуют массовым числам 95 и 134, а минимум приходится на диапазон массовых чисел от 110 до 125.

Образующиеся при делении урана все ядра-фрагменты имеют избыточное число нейтронов, поэтому они нестабильны. Большинство нейтронов испускается мгновенно (за время, меньшее $\sim 10^{-13}$ с). Часть нейтронов (около 0,75 %), получивших название запаздывающих, испускается не мгновенно, а с запаздыванием от 0,05 с до 1 мин. Эти нейтроны очень важны для осуществления контроля за ядерными реакциями в атомных реакторах.



Распределение ядер-фрагментов по массовым числам

При ядерных реакциях деления выделяется довольно много энергии в форме кинетической энергии испускаемых ядер-фрагментов, нейтронов, электронов, фотонов и нейтрино. Чтобы грубо оценить порядок величины энергии, выделяемой при реакции деления урана, возьмем для примера реакции (3).

Здесь $^{236}_{92}\text{U}^*$ расщепляется в конечном итоге на $^{140}_{58}\text{Ce}$ и $^{94}_{40}\text{Zr}$, шесть бета-частиц и два нейтрона. Массы продуктов реакции до и после деления составляют в а. е. м.:

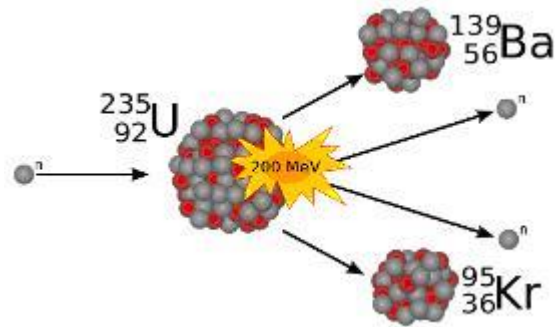
	<i>Массы до деления</i>	<i>Массы после деления</i>	
$^{235}_{92}\text{U}^*$	235,0439	$^{140}_{58}\text{Ce}$	139,9054
1_0n	1,0087	$^{94}_{40}\text{Zr}$	93,9036
	<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>	2^1_0n	2,0173
	$\Sigma_1 = 236,0526$	$6\beta^{-1}$	0,0033
			<hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/>
			$\Sigma_2 = 235,8296$

Разность масс составляет

$$\Delta m = \Sigma_1 - \Sigma_2 = 0,223 \text{ а. е. м.},$$

что дает громадный энергетический эффект

$$Q = 0,223(\text{а. е. м.}) \times 931 \left(\frac{\text{МэВ}}{\text{а. е. м.}} \right) = 208 \text{ МэВ !!!}$$

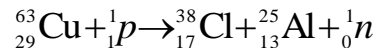


Распад ядра урана-235

Для сравнения: энергия, выделяющаяся при альфа - распаде одного ядра, равна ~ 5 МэВ, а энергия, выделяемая в одном акте химической реакции горения ~ 4 эВ.

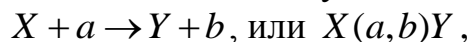
Нейтроны, получающиеся в результате деления, можно снова использовать для получения реакций деления следующих ядер $^{235}_{92}\text{U}$. При этом будет выделяться все больше энергии. Впервые цепная ядерная реакция была получена Э.Ферми в 1942 году.

Реакция деления может быть получена и бомбардировкой мишеней другими частицами. Например, Лоуренсом в 1931 году в результате деления ядер меди действием протонов, ускоренных в циклотроне, получена реакция



6. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Ядерная реакция – это превращение атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y – исходные и конечные ядра, a и b – бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частица.

В ядерной физике эффективность взаимодействия характеризуют эффективным сечением σ . С каждым видом взаимодействия частицы с ядром связывают своё эффективное сечение:

- эффективное сечение расщепления определяет процесс расщепления;
- эффективное сечение поглощения – процессы поглощения.

Эффективное сечение ядерной реакции σ находится по формуле

$$\sigma = dN / (nNdx),$$

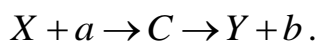
где N – число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объёма n ядер; dN – число этих частиц, вступающих в реакцию в слое толщиной dx . Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдёт реакция.

Единица измерения эффективного сечения ядерных процессов – **барн** (1 барн = 10^{-28} м²).

В любой ядерной реакции **выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел**: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в реакцию, равна сумме зарядов (и сумме массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Выполняются также **законы сохранения энергии, импульса и момента импульса**.

В отличие от радиоактивного распада, который всегда протекает с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как **экзотермические** (с выделением энергии), так и **эндотермические** (с поглощением энергии).

Важнейшую роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение Н. Бора (1936 г.) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия – это захват ядром X частицы a , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и образование промежуточного ядра C , называемого составным (или компаунд-ядром). Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в возбуждённом состоянии. При столкновении нуклонов составного ядра, один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон) или α -частица могут получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате наступает вторая стадия ядерной реакции – распад составного ядра на ядро Y и частицу b .

В ядерной физике вводится **характерное ядерное время** – время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины равной диаметру ядра ($d \approx 10^{-15}$ м). Так для частицы с энергией 1 МэВ (что соответствует её скорости 10^7 м/с) характерное ядерное время $\tau \approx 10^{-22}$ с. С другой стороны, доказано, что время жизни составного ядра $10^{-16} - 10^{-12}$ с, т.е. составляет $(10^6 - 10^{10})\tau$. Это означает, что за время жизни составного ядра, может произойти очень много столкновений нуклонов между собой, т.е. перераспределение энергии между нуклонами действительно возмож-

но. Следовательно, составное ядро живет настолько долго, что полностью «забывает», каким образом оно образовалось. Поэтому характер распада составного ядра (испускаемые им частицы b) – вторая стадия ядерной реакции – не зависит от способа образования составного ядра, первой стадии.

Если испущенная частица тождественна с захваченной ($b \equiv a$), то схема (4.5.2) описывает рассеяние частицы: упругое – при $E_b = E_a$; неупругое – при $E_b \neq E_a$. Если же испущенная частица не тождественна с захваченной ($b \neq a$), то имеем сходство с ядерной реакцией в прямом смысле слова.

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по *следующим признакам*:

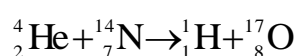
- *по роду участвующих в них частиц* – реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

- *по энергии вызывающих их частиц* – реакции при малых энергиях (порядка электронвольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (порядка до нескольких МэВ), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протон, α -частицы); реакции, происходящие при высоких энергиях (сотни и тысячи МэВ), приводящие к появлению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющих большое значение для их изучения;

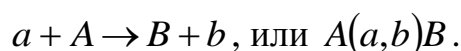
- *по роду участвующих в них ядер* – реакции на лёгких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжёлых ядрах ($A > 100$);

- *по характеру происходящих ядерных превращений* – реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переход в основное состояние, испуская один или несколько γ -квантов).

Когда о ядро ударяется частица с большой энергией и ядро меняет свои свойства, то говорят, что произошла ядерная реакция. Первую ядерную реакцию осуществил Резерфорд в 1919 году, бомбардируя альфа - частицами ядра азота и получил ядра кислорода и протоны

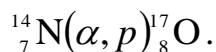


Для записи ядерных реакций приняты символические обозначения



где a – налетающая (бомбардирующая) частица; A – ядро мишень; b – легкая частица, образующаяся в конечном состоянии; B – конечное ядро (ядро отдачи).

Ядерную реакцию можно записать короче



Она называется реакцией (α, p) типа.

До появления первого ускорителя Ван де Граафа было известно ограниченное число ядерных реакций, в качестве источников бомбардирующих частиц – протонов и альфа-частиц – использовались естественные изотопы. Широкие возможности для осуществления многих ядерных реакций появились только после развития техники ускорения заряженных частиц.

Все ядерные реакции, и высоко- и низкоэнергетические, подчиняются общим правилам (законам):

1. Закон сохранения электрического заряда: сумма зарядов частиц и ядер до реакции равна сумме зарядов частиц и ядер, образующихся в результате реакции:

$$\sum Z_i = \sum Z_f,$$

например, для реакции ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$ $\sum Z_i = \sum Z_f = 2 + 7 = 1 + 8$.

2. Закон сохранения полного числа нуклонов: сумма массовых чисел частиц и ядер до и после ядерной реакции должны быть равны:

$$\sum A_i = \sum A_f.$$

Для реакции ${}^4_2\text{He} + {}^{14}_7\text{N} \rightarrow {}^1_1\text{H} + {}^{17}_8\text{O}$ $\sum A_i = \sum A_f = 2 + 7 = 1 + 8$.

При высоких энергиях частиц могут быть отклонения из-за взаимопревращения частиц

3. Закон сохранения массы и энергии: для изолированной от внешних влияний системы в силу соотношения между массой и энергией только полная масса-энергия системы остается неизменной.

4. Закон сохранения импульса. $\sum \vec{p}_i = \sum \vec{p}_f$ - В любой ядерной реакции сумма импульсов вступающих в реакцию ядер и частиц равна сумме импульсов конечных ядер и частиц, полученных в результате реакции.

5. Закон сохранения момента количества движения: в ядерных реакциях сохраняется полный момент количества движения замкнутой системы

$$\sum J_i = \sum J_f,$$

где J_i и J_f – полные моменты количества движения в начальном и конечном состояниях.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ

Для реакции $A(a,b)B$, где ядро-мишень A покоится, закон сохранения массы и энергии имеет вид

$$m_a c^2 + E_a + M_A c^2 = m_b c^2 + E_b + M_B c^2 + E_B,$$

где $m_a c^2$ и E_a – энергия покоя и кинетическая энергия частицы-снаряда; $M_A c^2$ – энергия покоя ядра-мишени; $m_b c^2$ и E_b – энергия покоя и кинетическая энергия получаемой частицы; $M_B c^2$ и E_B – энергия покоя и кинетическая энергия ядра отдачи.

Энергетическим эффектом Q ядерной реакции называется энергия, выделяемая за счет разности суммы масс частицы-снаряда и ядра-мишени и суммы масс получаемой частицы и ядра отдачи:

$$Q = [(m_a + M_A) - (m_b + M_B)]c^2 = E_b + E_B - E_a.$$

Когда $(m_a + M_A) > (m_b + M_B)$, часть массы в ядерной реакции теряется и превращается в энергию, которая получается за счет «потерянной» массы;

$$(\Delta m)c^2 = \Delta E = Q.$$

где Δm – потеря массы («дефект массы»); ΔE – соответствующая полученная энергия.

Это и есть энергетический эффект.

Если $Q > 0$, реакция называется «экзоэнергетическая», в результате реакции выделяется энергия, которая преобразуется в массу $\Delta m = \Delta E / c^2$. Если $Q < 0$, реакция с поглощением энергии и называется «эндоэнергетическая».

РАДИОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ

Известно, что радиоактивные излучения – гамма, альфа, бета, нейтроны и др. – вредны для человека. Уже через год после открытия рентгеновских лучей были обнаружены повреждения рук у производителей рентгеновских аппаратов. Беккерель получил ожог груди, так как носил пузырек с радием в кармане.

Вредное влияние излучения связано с ионизацией и возбуждением атомов клеток. При анализе вредного воздействия излучения учитываются такие физические явления, как фотоэффект, эффект Комптона, эффект

образование пар, тормозное излучение, и др. Ядерные реакции приводят к появлению в организме вообще не свойственных ему химических элементов.

Под воздействием излучения составные части живой клетки изменяются или разрушаются, и продукты разрушения действуют как яды. Разрушаются хромосомы, происходит распухание ядер клеток и разрушения самих клеток. Часто нормальный процесс замены клеток организма новыми, полностью нарушается из-за того, что облученные клетки не способны воспроизводиться.

Основная характеристика для взаимодействия ионизирующего излучения и среды – это ионизационный эффект. В начальный период развития радиационной дозиметрии чаще всего приходилось иметь дело с рентгеновским излучением, распространявшимся в воздухе. Поэтому в качестве количественной меры поля излучения использовалась степень ионизации воздуха рентгеновских трубок или аппаратов. Количественная мера, основанная на величине ионизации сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении, достаточно легко поддающаяся измерению, получила название экспозиционная доза.

Экспозиционная доза определяет ионизирующую способность рентгеновских и гамма-лучей и выражает энергию излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха. Таким образом, экспозиционная доза представляет собой отношение суммарного заряда всех ионов одного знака в элементарном объёме воздуха к массе воздуха в этом объёме.

В системе СИ единицей измерения экспозиционной дозы является кулон, деленный на килограмм (Кл/кг). Внесистемная единица – рентген (Р). $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$.

При расширении круга известных видов ионизирующего излучения и сфер его приложения, оказалось, что мера воздействия ионизирующего излучения на вещество не поддается простому определению из-за сложности и многообразности протекающих при этом процессов. Важным из них, дающим начало физико-химическим изменениям в облучаемом веществе и приводящим к определенному радиационному эффекту, является поглощение энергии ионизирующего излучения веществом.

В результате этого возникло понятие поглощенная доза. Поглощенная доза показывает, какое количество энергии излучения поглощено в единице массы любого облучаемого вещества и определяется отношением поглощенной энергии ионизирующего излучения к массе поглощающего вещества.

За единицу измерения поглощенной дозы в системе СИ принят грэй (Гр) – такая доза, при которой массе 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1Дж.

Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад.

Изучение отдельных последствий облучения живых тканей показало, что при одинаковых поглощенных дозах различные виды радиации производят неодинаковое биологическое воздействие на организм. Обусловлено это тем, что более тяжелая частица (например, протон) производит на единице длины пути в ткани больше ионов, чем легкая (например, электрон). При одной и той же поглощенной дозе радиобиологический разрушительный эффект тем выше, чем плотнее ионизация, создаваемая излучением. Чтобы учесть этот эффект, введено понятие эквивалентной дозы.

Эквивалентная доза рассчитывается путем умножения значения поглощенной дозы на специальный коэффициент – коэффициент относительной биологической эффективности (ОБЭ) или коэффициент качества. Единицей измерения эквивалентной дозы в СИ является зиверт (Зв). Величина 1 Зв равна эквивалентной дозе любого вида излучения, поглощенной в 1 кг биологической ткани и создающей такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр фотонного излучения. Внесистемной единицей измерения эквивалентной дозы является бэр (до 1963 года - биологический эквивалент рентгена, после 1963 года - биологический эквивалент рада). $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$.

Таблица

Коэффициент относительной биологической эффективности для различных видов излучений

Вид излучения	Коэффициент, Зв/Гр
Рентгеновское и γ -излучение	1
β -излучение(электроны, позитроны)	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1-10 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
α -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Одни органы и ткани человека более чувствительны к действию радиации, чем другие: например, при одинаковой эквивалентной дозе возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез особенно опасно из-за риска генетических повреждений. Поэтому дозы облучения разных органов и тканей следует учитывать с разным коэффициентом, который называется коэффициентом радиационного риска. Умножив значение эквивалентной дозы на соответствующий коэффициент радиационного риска и просуммировав по всем тканям и органам, получим эффективную дозу, отражающую суммарный эффект для организма.

Таблица

Значение коэффициента радиационного риска для отдельных органов

Органы, ткани	Коэффициент
Гонады (половые железы)	0,2
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Желудок	0,12
Лёгкие	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных поверхностей	0,01
Головной мозг	0,025
Остальные ткани	0,05

Взвешенные коэффициенты устанавливают эмпирически и рассчитывают таким образом, чтобы их сумма для всего организма составляла единицу. Единицы измерения эффективной дозы совпадают с единицами измерения эквивалентной дозы. Она также измеряется в зивертах или бэрах.

Таблица

Биологические нарушения при однократном (до 4-х суток) облучении всего тела человека

Доза облучения, (Гр)	Степень лучевой болезни	Начало проявления первичной реакции	Характер первичной реакции	Последствия облучения
До 0,25 0,25 - 0,5 0,5 - 1,0	Видимых нарушений нет. Возможны изменения в крови. Изменения в крови, трудоспособность нарушена			
1 - 2	Лёгкая (1)	Через 2-3 ч	Несильная тошнота с рвотой. Проходит в день облучения	Как правило, 100% -ное выздоровление даже при отсутствии лечения
2 - 4	Средняя (2)	Через 1-2 ч Длится 1 сутки	Рвота, слабость, недомогание	Выздоровление у 100% пострадавших при условии лечения
4 - 6	Тяжёлая (3)	Через 20-40 мин.	Множественная рвота, сильное недомогание, температура -до 38	Выздоровление у 50-80% пострадавших при условии спец. лечения
Более 6	Крайне тяжёлая (4)	Через 20-30 мин.	Эритема кожи и слизистых, Жидкий стул, температура -выше 38	Выздоровление у 30-50% пострадавших при условии спец. лечения
6-10	Переходная форма (исход непредсказуем)			
Более 10	Встречается крайне редко (100%-ный смертельный исход)			

Мощность дозы или интенсивность облучения представляет собой приращение соответствующей дозы под воздействием данного излучения за единицу времени. Имеет размерность соответствующей дозы (поглощенной, экспозиционной и т. п.), делённую на единицу времени. Допускается использование различных специальных единиц (например, Зв/час, бэр/мин, мЗв/год и др.).

Таблица

Сводная таблица единиц измерения ионизирующего излучения

Физическая величина	Внесистемная единица	Системная единица	Переход от внесистемной к системной единице
Активность нуклида в радиоактивном источнике	Кюри (Ки)	Беккерель (Бк)	$1\text{Ки}=3,7 \cdot 10^{10}\text{Бк}$
Экспозиционная до-	Рентген (Р)	Кулон/килограмм	$1\text{Р}=2,58 \cdot 10^{-4}\text{Кл/кг}$

за		(Кл/кг)	
Поглощенная доза	Рад (рад)	Грей (Дж/кг)	1рад=0,01Гр
Эквивалентная доза	Бэр (бер)	Зиверт (Зв)	1бэр=0,01 Зв
Мощность экспозиционной дозы	Рентген/секунда (Р/с)	Кулон/килограмм в секунду (Кл/кг*с)	1Р/с=2.58·10 ⁻⁴ Кл/кг*с
Мощность поглощенной дозы	Рад/секунда (Рад/с)	Грей/секунда (Гр/с)	1рад/с=0.01Гр/с
Мощность эквивалентной дозы	Бэр/секунда (бэр/с)	Зиверт/секунда (Зв/с)	1бэр/с=0.01Зв/с
Интегральная доза	Рад-грамм (Рад-г)	Грей-килограмм (Гр-кг)	1рад-г=10 ⁻⁵ Гр-кг

Каждый житель Земли на протяжении всей своей жизни ежегодно облучается дозой в среднем 250-400 мбэр. Полученная доза складывается из природных и искусственных источников ионизирующего излучения.

Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) предельно допустимая (безопасная) эквивалентная доза облучения для жителя планеты определена в 35 бэр, при условии её равномерного накопления в течение 70 лет жизни.

Предельно допустимая доза - это наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которая при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.