

Atom

Atom je najmanja jedinica građe materije. Sastoji se od jezgra i elektronskog omotača u kom se nalaze elektroni. Jezgro atoma se sastoji od protona i neutrona. Jezgro atoma se prema latinskom nazivu zove i nukleus, hemijski element: nuklid, a elementarne čestice koje se nalaze u jezgru atoma (protoni i neutroni): nukleoni.

Obeležavanje hemijskog elementa X

${}_Z^AX^A$ Z-atomski broj \equiv redni broj u periodnom sistemu Mendeljejeva
 $Z \in \{-1, 0, 1, 2, 3, \dots, 102\}$ A-maseni broj $A \in \{0, 1, 2, \dots, 24^*\}$

Atomski (redni) broj označava broj protona u jezgru atoma i broj elektrona u elektronskom omotaču $Z = n({}_{+1}p^1) = n({}_{-1}e^0)$.

Maseni broj označava broj protona i neutrona u jezgru

$$A = n({}_{+1}p^1) + n({}_0n^1).$$

Rednim brojem 1, je obeležen vodonik ${}_1H^1$. Vodonik ima 1 proton i 1 elektron, nema neutrona.

Redni broj 2 nosi helijum ${}_2He^4$, koji ima 2 protona, 2 elektrona i 2 neutrona.

Hemijski elementi sa rednim brojem $Z \leq 92$ mogu da se nađu u prirodi pa ih nazivamo "prirodni". Redni broj $Z = 92$ ima uranijum, koji se koristi kao nuklearno gorivo. Hemijski elementi sa rednim brojem $Z > 92$ dobijeni su veštačkim putem u laboratorijama ili u nuklearnim reaktorima, radioaktivni su i posle nekog vremena će doživeti radioaktivni raspad.

Hemijski elementi imaju svoje izotope, to su elementi koji imaju isti redni broj, a različit maseni broj. Izotopi imaju isti broj protona i elektrona, a različit broj neutrona. Izotopi vodonika su vodonik $H = {}_1H^1$, deuterijum $D = {}_1H^2$ i tricijum $T = {}_1H^3$. Jezgra izotopa vodonika su proton p, deutron d, triton t.

Unificirana jedinica atomske mase iznosi 1/12 mase stabilnog ugljenikovog izotopa ${}_6C^{12}$

$$1u = \frac{1}{12} m({}_6C^{12}) = 1,660438 \times 10^{-27} \text{ kg}.$$

Preko unificirane jedinice atomske mase se izražavaju mase protona, neutrona i elektrona, sledstveno $m({}_{+1}p^1) = 1,007277 u$,

$$m({}_0n^1) = 1,008665 u,$$

$$m({}_{-1}e^0) = 0,000548597 u.$$

Masa protona je 1836 puta veća od mase elektrona.

Najmanja jedinica naelektrisanja u prirodi je za pozitivna naelektrisanja ona koju nosi proton, a za negativna ona koju nosi elektron. Jedinično naelektrisanje iznosi

$$q_e = 1,6 \cdot 10^{-19} C.$$

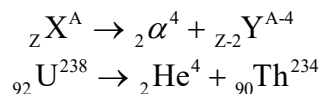
Ako je atom u neutralnom stanju gledano sa stanovišta naelektrisanja onda ima isti broj protona i elektrona.

Radioaktivnost

α - raspad

$$A \rightarrow A-4$$

$$Z \rightarrow Z-2$$



- elementi sa velikim A

β^- - raspad

$${}_0 n^1 \rightarrow {}_{-1} e^0 + {}_1 p^1 + \tilde{\nu} \quad (\beta^-)$$

$\tilde{\nu}$ - antineutrino

$$A \rightarrow A$$

$$Z \rightarrow Z+1$$

$${}_Z X^A \rightarrow {}_{-1} e^0 + \tilde{\nu} + {}_{Z+1} Y^A$$

$${}_1 \text{H}^3 \rightarrow \beta^- + {}_2 \text{He}^3 + \tilde{\nu}$$

β^+ - raspad

$${}_1 p^1 \rightarrow {}_{+1} e^0 + {}_0 n^1 + \nu \quad (\beta^+)$$

ν - neutrino

$$A \rightarrow A$$

$$Z \rightarrow Z-1$$

$${}_{+1} e^0 + {}_{-1} e^0 \rightarrow 2 \text{ fotona}$$

(anihilacija elektronskog para)

$${}_Z X^A \rightarrow {}_{+1} e^0 + \nu + {}_{Z-1} Y^A$$

$${}_{15} \text{P}^{30} \rightarrow \beta^+ + {}_{14} \text{Si}^{30} + \nu$$

K-zahvat

(zahvat elektrona iz ljuske najbliže jezgru)

$${}_{-1} e^0 + {}_1 p^1 \rightarrow {}_0 n^1 + \nu$$

$$A \rightarrow A$$

$$Z \rightarrow Z-1$$

$${}_4 \text{Be}^7 + {}_{-1} e^0 \rightarrow {}_3 \text{Li}^7 + \nu + x\text{-kvant}$$

x - zračenje je elektro-magnetno zračenje koje potiče iz orbite

Spontana fisija

Verovatnoća spontane fisije U^{238} je milion puta manja od verovatnoće α raspada.

γ -raspad

γ - zračenje je elektro-magnetno zračenje koje potiče iz jezgra

$${}_{27} \text{Co}^{60m} \rightarrow {}_{27} \text{Co}^{60} + \gamma$$

${}_{27} \text{Co}^{60m}$ - izomer – ima isti Z i A ali je jezgro na višem energetskom nivou

Radioaktivnost: Prosti raspad

Statistički zakon:

- verovatnoća radioaktivnog raspada jezgra u jedinici vremena je konstantna.

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

N - ukupan broj jezgara

λ - konstanta radioaktivnog raspada

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

N_0 - početni broj radioaktivnih jezgara

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

t - vreme

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t$$

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

Aktivnost:

- broj raspada u jedinici vremena. Jedinica aktivnosti je Bq – Bekerel (Becquerel), $[1\text{Bq}] = [1\text{s}^{-1}]$. Aktivnost izvora $1\text{Bq} = 1$ raspad u sekundi. Stara jedinica za merenje aktivnosti je Ci – Kiri (Curie), $[1\text{Ci}] = [3,7 \cdot 10^{10} \text{Bq}]$ i to odgovara aktivnosti $1\text{g } {}_{88}\text{Ra}^{226}$ (Ra - Radium). Postoji i jedinica za aktivnost Rd – Raderford (Rutherford), $[1\text{Rd}] = [10^6 \text{Bq}]$.

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N$$

$$A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

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

Vreme poluraspada $T_{1/2}$

- vreme za koje će doći do raspada polovine od ukupnog broja jezgara.

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

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

Određivanje aktivnosti 1 g radijuma $A(1\text{gRa})$:

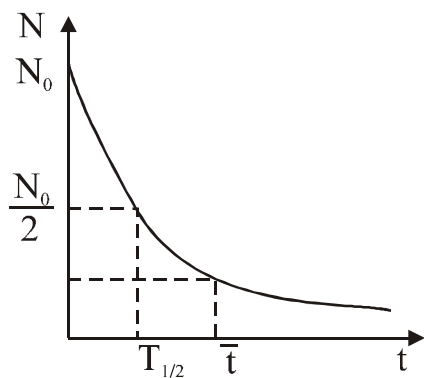
$$T_{1/2} = 1590 \text{ god}$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{1590 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} = 1,38 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$N = \frac{N_A}{a} = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{226} = 2,66 \cdot 10^{21} \frac{\text{at}}{\text{g}}$$

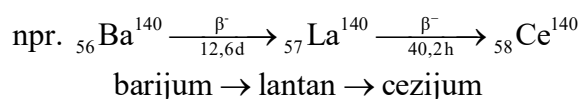
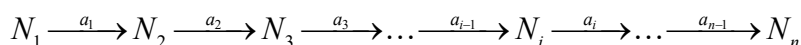
$$A(1\text{gRa}) = \lambda N \approx 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Ukupna količina radijuma u prirodi iznosi nekoliko kilograma.

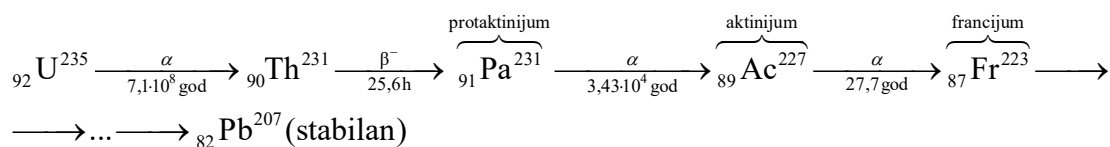


Lanac radioaktivnog raspada formira veći broj jezgara. Krajnji produkt radioaktivnog raspada je stabilno jezgro N_n .

$a_1 \dots a_{n-1}$ – elementarne čestice koje se emituju pri radioaktivnom raspadu



ili



Prolaz zračenja kroz materijalnu sredinu

Sudar naelektrisane čestice i atoma

- Ekscitacija

naelektrisana čestica (α , p^+ , e^-) u kontaktu sa atomom izaziva prebacivanje elektrona (e^-) sa orbite niže energije ε_1 na orbitu više energije ε_2 . Upražnjeno mesto na nižem energetsom nivou se ponovo popunjava pri čemu se pri prelasku e^- sa orbite više na orbitu niže energije emituje x- zrak energije

$$\nu = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{h}$$

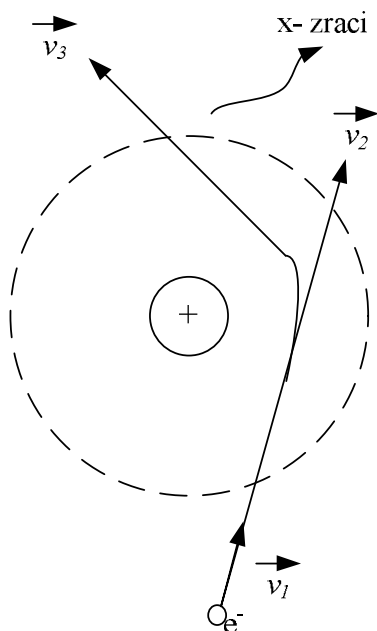
gde je ε_2 - energija na višoj orbiti, ε_1 - energija na nižoj orbiti, $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Plankova konstanta.

- Jonizacija

Ako naelektrisana čestica ima veću energiju, tada e^- može biti potpuno izbačen pa atom postaje pozitivan jon.

- Zakočno zračenje (Bremsstrahlung)

javlja se pri višim energijama elektronskog zračenja, odnosno ako elektron ima dovoljno energije da prodre u elektronski omotač atoma



jezgro privlači elektron, elektron se ubrzava $\vec{v}_2 > \vec{v}_1$

kada elektron napusti jezgro dolazi do njegovog usporavanja $\vec{v}_3 < \vec{v}_2$, pri ovom usporavanju javlja se zakočno zračenje (x zračenje)

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon}{h}$$

$\Delta \varepsilon$ - razlika kinetičke energije

$$\Delta \varepsilon = \frac{m_e v_2^2}{2} - \frac{m_e v_3^2}{2}$$

primena kod rendgenske cevi

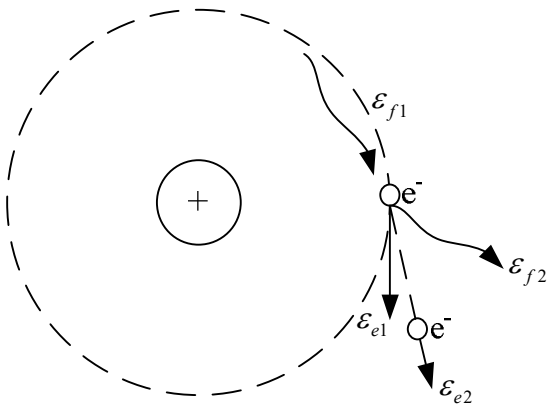
Sudar fotona sa atomom

- Foto-električni efekat

ako je niska energija fotona ($\varepsilon_f < 0,1 \text{ MeV}$) doći će do foto-električnog efekta. Foton se apsorbuje na orbitalnom elektronu i dolazi do emisije elektrona na određenim energetske nivoima, koji su jednaki energiji koju je elektron imao u omotaču.

- Komptonov efekat

javlja se ako je viša energija fotona. Posle sudara fotona i orbitalnog elektrona foton nastavlja da se kreće energijom ε_{f2} , a elektron biva izbačen sa orbite.



Ovo je potvrda da elektromagnetno zračenje može biti korpuskularne prirode.

$$\varepsilon_{f1} + \varepsilon_{e1} = \varepsilon_{f2} + \varepsilon_{e2} + \varepsilon_v$$

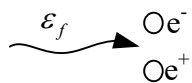
ε_v - energija veze u elektronskom omotaču

$$\nu_2 < \nu_1$$

Kompton je pojavu objasnio sudarom dva elastična tela, što je bio dokaz da se elektromagnetno zračenje može posmatrati kao kretanje korpuskula.

-Efekat stvaranja parova

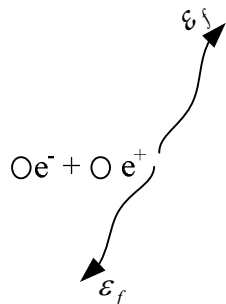
$$\varepsilon_f \geq 1,02 \text{ MeV}$$



Ako se foton sudari sa atomom može nastati elektron i pozitron

$$2m_{e,0}c^2 = 1,02 \text{ MeV}$$

$m_{e,0}$ - masa mirovanja elektrona ili pozitrona

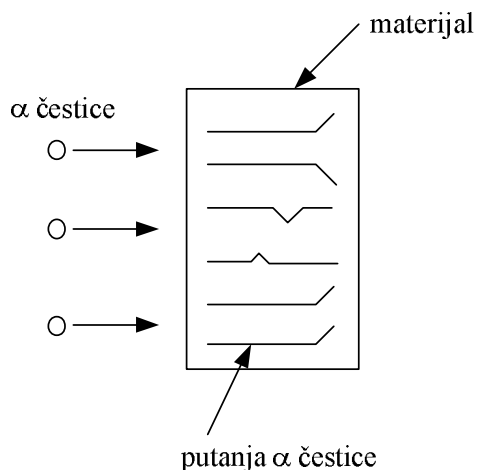


dolazi do anihilacije elektronskog para

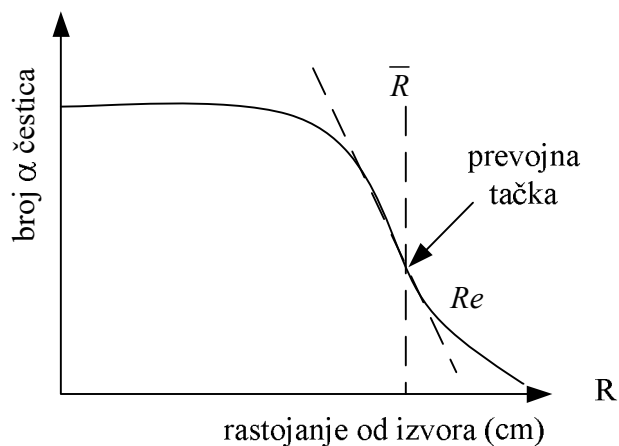
Prolaz α čestice kroz materijalnu sredinu

Pri prolasku α čestice kroz materijalnu sredinu mogu se očekivati eksitacija i jonizacija atoma, a ređe se javljaju rasejanje i transmutacija.

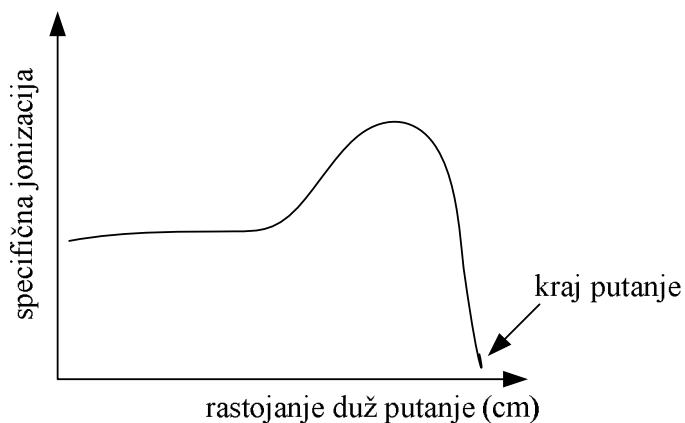
Posle gubitka kinetičke energije, α čestica se se zaustavlja i postaje atom He (uzima 2 elektrona).



Putanja α čestice je u početku pravolinijska, zbog njene inercije, a kada joj opadne kinetička energija α čestica skreće.



Pri svom kretanju α čestice izaziva jonizaciju i ekscitaciju.



$$\frac{dE}{dx} = -\omega I$$

I – specifična jonizacija $\left(\frac{\text{broj proizvedenih jonskih parova}}{\text{jedinica dužine putanje}} \right)$

E – energija čestice

ω – energija koja se troši za stvaranje jednog jonskog para

ω ne zavisi od energije čestice, to je konstantna vrednost za određenu vrstu gasa (za vazduh $\omega \approx 34$ eV/jonski par)

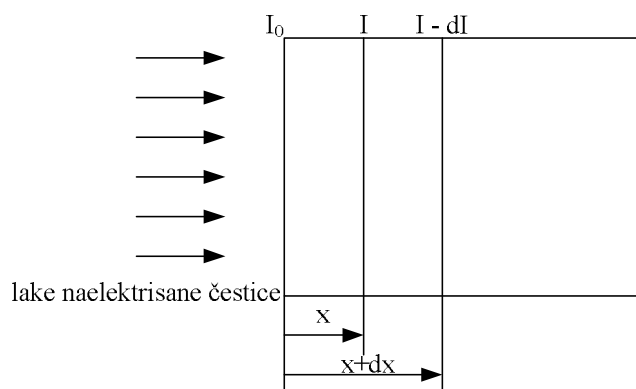
$\omega = \text{const}$ u argonu (Ar) za sve čestice α , β , p^+ , lake čestice. Zbog toga je Ar pogodan za jonske komore.

Dometa produkata fisije manji od dometa α čestice, većina produkata fisije ostaje u gorivnom elementu.

Prolaz lake naelektrisane čestice (β) kroz materijalnu sredinu

Interakcija β čestica sa materijalom:

- elastični sudar
- konverzija β^- i β^+ u dva fotona (anihilacija elektrona)
- neeleastično rasipanje (jonizacija, ekscitacija)
- Bremsstrahlung



Intenzitet zračenja je broj čestica koji prolazi kroz jedinicu površine u jedinici vremena $I \left(\frac{\text{čestica}}{m^2 s} \right)$

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

μ - linearni koeficijent apsorpcije $\left(\frac{1}{m} \right)$

$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$ - maseni koeficijent apsorpcije

$$I = I_0 e^{-\mu_m d}, \quad d \left(\frac{kg}{m^2} \right)$$

Ovakav zakon apsorpcije u materijalnoj sredini se odnosi na zračenje koje ulazi u materijal.

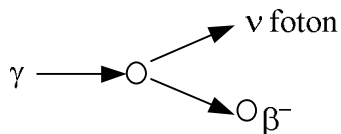
Da bi se uzelo u obzir i rasejanje koje dovodi do ponovnog usmeravanja čestice duž prvobitnog pravca i smera kretanja, uvodi se faktor nagomilavanja – faktor debljine $B \geq 1$ i određuje se eksperimentalno.

$$I = BI_0 e^{-\mu x}$$

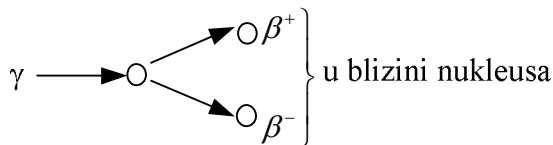
Gama (γ) i x- zraci

Interakcija γ zračenja sa materijalom:

- foto-električni efekat (u 80% slučajeva K- elektron biva izbačen iz atoma, a elektron sa više ljuske prelazi na K – ljusku uz emisiju x- zraka); $\varepsilon_\gamma \leq 0,1 \text{ MeV}$
- Kompton-ov (Compton) efekat
 $\varepsilon_\gamma \geq 0,1 \text{ MeV}$



- proizvodnja para



$$\varepsilon_\gamma \geq 2m_0c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

srednji domet

$$\bar{R} = \frac{\int_0^{I_0} x dI}{\int_0^{I_0} dI} = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} \mu dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x} \mu dx} = \frac{1}{\mu}$$

Polu-debljina je debljina zaštite koja smanjuje intenzitet zračenja za $\frac{1}{2}$.

$$\frac{I}{I_0} = 0,5 = e^{-\mu x_{1/2}}$$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Prolaz neutrona kroz materiju

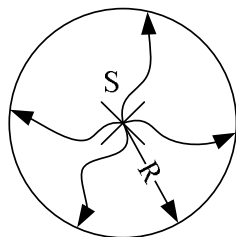
Interakcija neutrona sa materijom:

- elastični sudar (moderacija neutrona)
- neelastični sudar (ekscitirano jezgro emituje γ -zračenje)
- radioaktivni zahvat (n, γ): najverovatnije sa termalnim i epitermalnim neutronima
- emisija naelektrisane čestice (transmutacija): (n, p) sa brzim neutronima
(n, α) termalni neutroni $B^{10} + n^1 \rightarrow Li^7 + \alpha$

- fisija
- $\varepsilon_n \geq 100 \text{ MeV}$: rasejanje /neut. raspad na fotone i lake čestice

Zračenje iz tačkastog izvora zračenja

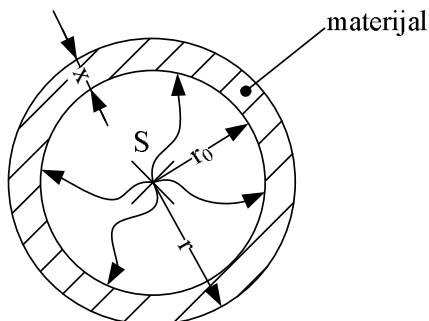
Čestice se mogu kretati sa podjednakom verovatnoćom u svim pravcima



Intenzitet zračenja slabi sa kvadratom rastojanja

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \left(\frac{1}{m^2 s} \right), \quad S \left(\frac{\text{čestica}}{s} \right)$$

tačkasti izotropski izvor u prostoru materijalne sredine



$$I = \frac{BS}{4\pi r^2} e^{-\mu x} \left(\frac{1}{m^2 s} \right)$$

Doze zračenja

DOZA EKSPOZICIJE (X):

Doza ekspozicije predstavlja količnik između ukupnog naelektrisanja jona istog znaka, nastalih pri prolazu zračenja kroz element zapremine vazduha i mase tog elementa. (Definiše se u odnosu na element zapremine vazduha, jer najčešće vazduh ispunjava prostor oko izvora zračenja.)

Jedinica: X (C/kg), stara jedinica (rendgen: $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$)

BRZINA DOZE EKSPOZICIJE: $\dot{X} = \frac{dX}{dt} \left(\frac{C}{kg \cdot s} \right)$

DOZA APSORPCIJE (D):

- količina energije zračenja koju telo primi, ako u radioaktivnoj zoni provede neko vreme t. Doza apsorpcije je jednaka apsorbovanoj energiji zračenja po jedinici mase.

Jedinica: D ($\text{Gy} = \text{J/kg}$, Gy - Grey), stara jedinica (radijaciona apsorpciona doza - rad:

$1\text{rad} = 10^{-2} \text{Gy} = 10^{-2} \text{J/kg}$)

Pošto je za nastanak jednog jonskog para u vazduhu potrebna energija od 34eV ("energija jonizacije"), veza između Gy i C/kg za vazduh glasi: $1 \text{C/kg} \Leftrightarrow 34 \text{Gy}$ ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$, $1\text{e} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)

BRZINA DOZE APSORPCIJE: $\dot{D} = \frac{dD}{dt} \left(\frac{\text{Gy}}{\text{s}} \right)$

EKVIVALENTNA DOZA APSORPCIJE (H):

- doza apsorpcije u tkivu

$$H = D \cdot Q$$

D - doza apsorpcije

Q – faktor kvaliteta (zavisi od vrste zračenja i energije zračenja)

Jedinica: H ($\text{Sv} = \text{J/kg}$, Sv - Sivert), stara jedinica (roentgen equivalent man - rem: $1\text{rem} = 10^{-2} \text{J/kg}$, $1\text{Sv} = 100 \text{rem}$) Najčešće se koristi jedinica mSv .

Zračenje	Q – faktor kvaliteta
x i γ - zraci	1
elektroni	1
termalni neutroni	2-5
brzi neutroni (10 MeV)	5-10
α - čestice	20
protoni (10 MeV)	10

α - čestice imaju 20 puta štetnije zračenje od x i γ - zraka ako se apsorbuju u tkivu. α - čestica je manje prodorna ali se njenim apsorbovanjem izaziva raskidanje DNK i RNK. Ako je α - zračenje niske energije može se zaustaviti kožom ili listom papira.

EFEKTIVNA EKVIVALENTNA DOZA (H_e):

$$H_e = \sum_i H_i \cdot \omega_i \text{ (Sv)} - \text{zbir za pojedine organe koji obrazuju celo telo}$$

H_i - ekvivalentna doza koju je primio neki deo ljudskog tela

ω_i - težinski faktor: udeo rizika od ozračivanja pojedinog organa u celokupnom riziku kada se ravnomerno ozrači celo telo

deo tela	ω_i
crvena koštana srž	0,12
površine kostiju	0,03
štitna žlezda	0,03
dojka	0,15
pluća	0,12
jajnici i testisi	0,25
ostala tkiva	0,30
celo telo	1,00

KOLEKTIVNA EKVIVALENTNA DOZA: $Hk = He \cdot N$ (čovjek - Sivert)

N – broj ljudi

- određuje se u slučaju ozračivanja grupe ljudi, neke sredine...

EKVIVALENTNE DOZE – u prirodi

Kosmičko zračenje	mSv/god
0 m nadmorske visine	0,2
1000 m	0,5
2500 m	1,0

Zgrade	mSv/god
cigla	0,3
beton	2,3

PRIRODNO OZRAČIVANJE

- spoljašnje:	mSv/god
kosmičko	0,3
zemaljsko (U, Th, K ⁴⁰)	0,4 - 0,6
	0,15 - 10 područja u Brazilu
	1,5 naše područje
- unutrašnje:	
U, Th, C ¹⁴ , T ³ , K ⁴⁰	0,2
	≈ 1mSv/god
	1,0 - 2,5 mSv/god
	sr. vrednost 1,3

VEŠTAČKO OZRAČIVANJE

- medicinsko ozračivanje	0,5 - 1mSv/god
- nuklearne eksplozije	0,06
- industrija (1/4 nuklearna)	0,01
	≈ 0,5 - 1mSv/god

Dozvoljene doze

MAKSIMALNO DOZVOLJENE EKVIVALENTNE DOZE

(primenjuje se za profesionalno osoblje)

- ozračenost celog tela	50 mSv/god
- akumulirano do N-te godine, celo telo	(N-18) · 50 mSv
- koža	150 mSv/god
- šake	750 mSv/god
- podlaktica	300 mSv/god
- drugi organi, tkiva	150 mSv/god
- trudnica (u odnosu na fetus)	5 mSv/tokom perioda trudnoće

DOZVOLJENE EKVIVALENTNE DOZE ZA UŽU GRUPU STANOVNIŠTVA ILI POJEDINCA

- pojedinac	5 mSv/god
- student	1 mSv/god

STANOVNIŠTVO (šira grupa)	1,7 mSv/god
----------------------------------	-------------

DOZVOLJENE EKVIVALENTNE DOZE U SLUČAJU OPASNOSTI:

- pojedinac koji spašava nečiji život (iznad 45 godina i dobrovoljac)	1 Sv
- ruke i podlaktica	2 Sv
ukupno:	3 Sv

SMRTNA DOZA:	6 - 10 Sv 80% - 100% bi umrlo u periodu od 2 meseca
---------------------	--

Određivanje doze apsorpcije

E - energija čestice (J)

$$I = \frac{S}{4\pi r^2} \text{ - intenzitet zračenja čestice energije } E \left(\frac{\text{čestica}}{\text{m}^2\text{s}} \right)$$

σ_A - mikroskopski efektivni presek za apsorpciju (m^2)

$$N_m = \frac{N}{\rho} \text{ - masena koncentracija (koncentracija po jedinici mase) } \left(\frac{\text{atoma/molekula}}{\text{kg}} \right)$$

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \sigma_A \cdot N_m \text{ - maseni koeficijent apsorpcije } \left(\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right)$$

$$I \cdot \sigma_A \cdot \frac{N}{\rho} = I \cdot \sigma_A \cdot N_m = I \cdot \mu_m$$

$$I \left(\frac{\text{čestica}}{\text{m}^2\text{s}} \right) \cdot \mu_m \left(\frac{\text{m}^2}{\text{kg}} \right) \text{ - broj reakcija apsorpcije zračenja po jedinici mase u jedinici vremena}$$

DOZA APSORPCIJE (D)

$$D = E \cdot \mu_m \cdot I \cdot t \left(\frac{J}{kg} = Gy \right) \quad (t - \text{vreme (s)})$$

BRZINA DOZE APSORPCIJE (\dot{D})

$$\dot{D} = E \cdot \mu_m \cdot I \left(\frac{Gy}{s} \right)$$

DOZA EKSPOZICIJE (X)

- ako je doza apsorpcije određena za vazduh možemo naći vezu između doze ekspozicije i doze apsorpcije jer se doza ekspozicije određuje samo za vazduh.

- za stvaranje jednog jonskog para u vazduhu potrebno je utrošiti 34 eV

$$X\left(\frac{C}{kg}\right) = \frac{D\left(\frac{J}{kg}\right)}{1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{J}{eV}\right)} \cdot \frac{1}{34 \left(\frac{eV}{jon. paru}\right)} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \left(\frac{C}{jon. paru}\right)$$

$$X\left(\frac{C}{kg}\right) = \frac{D\left(\frac{J}{kg}\right)}{34 \left(\frac{eV}{jon. paru}\right)}$$

Zaštita od zračenja

1. skraćivanje vremena provedenog u blizini izvora zračenja,
2. povećanje rastojanja od izvora,
3. korišćenje biološkog štita.

Štit za neutrone: voda, beton

Štit za γ - zrak: olovo (skupo), čelik, beton (jeftino, dodatak stroncijuma i barijuma)

- elementi sa velikim brojem elektrona su pogodni za zaštitu od γ - zračenja (a to su teški elementi)

Približno pravilo: "biološki štitovi približnih masa približno isto štite"

- kod nekih zračenja postoji sekundarno zračenje npr. (n, γ) izvor γ -zračenja, zaštitili smo se od jednog ali ne i od drugog zračenja.

- biološki štit apsorbuje zračenje. Apsorbovana energija se manifestuje kao toplota pa je potrebno obezbediti hlađenje.

Skladištenje radioaktivnog otpada

Istrošeno gorivo iz jezgra reaktora je izvor zračenja - to je visoko radioaktivni otpad.

Materijal koji je bio korišćen pri radu reaktora (delovi iz cirkulacionog kruga) predstavlja srednje ili nisko radioaktivni otpad.

Zapremina radioaktivnog otpada za godišnji rad elektrane od 1000MWe

- 4m³ visoko-aktivnog materijala
- 12m³ metalnih komponenti
- 70m³ slabo-aktivnog otpada zagađenog plutonijumom
- 30m³ slabo i srednje aktivnog čvrstog materijala

35 t visoko aktivan

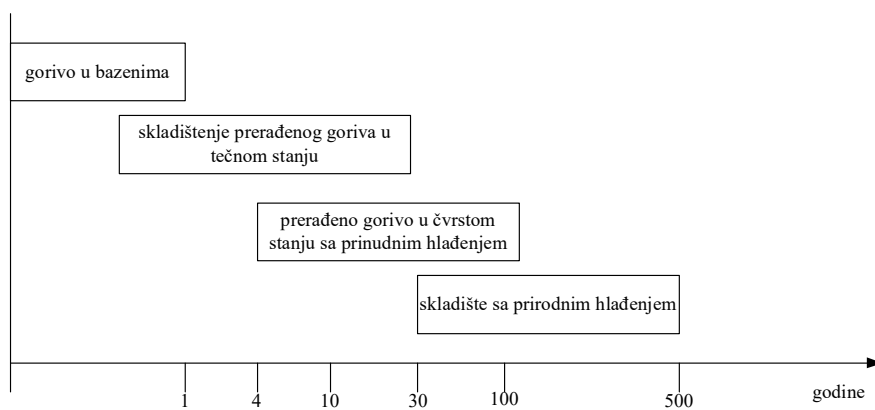
310 t srednje aktivan

460 t nisko aktivan

Emisija gasova iz termoelektrane snage 1000 MWe u toku godinu dana rada

- $6,5 \times 10^6$ tCO₂
- 900 tSO₂
- 320 000 t pepela

Posle 500 godina aktivnost prvobitno visoko-radioaktivnog otpada opada na vrednost aktivnosti prirodne rude uranijuma



Faze u preradi i odlaganju radioaktivnog otpada.