

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
Fizikos fakultetas  
Atomo ir branduolio fizikos laboratorija

Laboratorinis darbas Nr. 18

**APLINKOS RADIACINIO FONO MATAVIMAS  
DOZIMETRAIS**

Parengė A. Poškus

2019-02-04

## Turinys

<b>1. UŽDUOTYS</b> .....	<b>2</b>
<b>2. KONTROLINIAI KLAUSIMAI</b> .....	<b>2</b>
<b>3. DARBO TEORIJA</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1. Pradinės žinios apie radioaktyvumą</b> .....	<b>3</b>
<b>3.2. Dozimetrijoje naudojami dydžiai ir vienetai</b> .....	<b>4</b>
<b>3.4. Atskirų jonizuojančios spinduliuotės tipų dozimetrija</b> .....	<b>6</b>
<b>3.4. Pagrindiniai jonizuojančiojo spinduliavimo šaltiniai</b> .....	<b>9</b>
<b>3.5. Jonizuojančiojo spinduliavimo biologinis poveikis</b> .....	<b>10</b>
<b>3.6. Didžiausios leistinos dozės</b> .....	<b>13</b>
<b>4. DARBO EIGA</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1. Aplinkos radiacinio fono matavimas</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2. Taškinio <math>\gamma</math>šaltinio dozės galios matavimas</b> .....	<b>15</b>

## Darbo tikslas

Ištirti jonizuojančiosios spinduliuotės dozės galios pasiskirstymą mokomojoje branduolio fizikos laboratorijoje darbu metu bei dozės galios priklausomybę nuo atstumo iki taškinio gama spinduliuotės šaltinio.

### 1. Užduotys

1. Laboratorinių darbų metu išmatuoti radiacijos foną darbo vietose, surašyti dozimetrinės būsenos protokolą.
2. Išmatuoti žinomo aktyvumo taškinio  $\gamma$  šaltinio dozės galią įvairiais atstumais nuo šaltinio. Matavimų rezultatus palyginti su teorinio skaičiavimo rezultatais.
3. Apskaičiuoti metinę lygiavertę dozę, kuri tenka mokomojoje branduolio fizikos laboratorijoje dirbančiam studentui (tarti, kad per metus atliekama 12 laboratorinių darbų, kurių kiekvieno trukmė 3 val.). Šią dozę palyginti su didžiausia leidžiama doze.

### 2. Kontroliniai klausimai

1. Dozimetrijoje vartojami fizikiniai dydžiai ir vienetai, sąryšiai tarp jų.
2. Pagrindiniai natūralūs ir dirbtiniai jonizuojančiojo spinduliavimo šaltiniai.
3. Jonizuojančiojo spinduliavimo biologinis poveikis. Rizikos koeficientas. Didžiausios leistinos dozės

### Literatūra:

1. Horodničius H. Branduolio fizika. – Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 1997, p. 154 – 158.
2. Жуковский Ю. Г., Сергеев В. О., Антоньева Н. М. *Практикум по ядерной физике*. – М.: Высшая школа, 1975, с. 105 – 121.
3. *Практикум по ядерной физике* / И. А. Антонова, А. Н. Бояркина, Н. Г. Гончарова и др. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988, с. 187 – 189.
4. Coggle J. E. *Biological Effects of Radiation*, 2nd ed. – 1983.
5. *Genetic and Somatic Effects of Ionizing Radiation* // United Nations Scientific Committee On The Effects Of Atomic Radiation. – 1986.

### 3. Darbo teorija

#### 3.1. Pradinės žinios apie radioaktyvumą

**Radioaktyvumas** – tai yra kai kurių elementų atomų branduolių savaiminis skilimas, kurio metu išspinduliuojamos viena arba daugiau dalelių. Pagal spinduliuojamų dalelių rūšį skiriamas  $\alpha$  skilimas,  $\beta$  skilimas ir savaiminis dalijimasis.  $\alpha$  dalelės – tai aukštos energijos  ${}^4\text{He}$  branduoliai, o  $\beta$  dalelės – tai aukštos energijos elektronai arba pozitronai.  $\alpha$  dalelių, kurias spinduliuoja radioaktyvieji branduoliai, energija būna nuo 4 MeV iki 9 MeV, o  $\beta$  dalelių didžiausia energija siekia 20 MeV. Savaiminis dalijimasis stebimas tik pačiuose sunkiausiuose branduoliuose ir pasireiškia branduolio skilimu į dvi artimos masės skeveldras.

Branduolio skilimo rūšį nusako branduolio masės ir krūvio pokytis skilimo metu. Branduolio masę nusako nukleonų (protonų ir neutronų) skaičius jame. Šis skaičius vadinamas branduolio **masės skaičiumi** arba tiesiog “branduolio mase” ir žymimas raide  $A$ . Kadangi neutronai yra neutralūs, tai branduolio krūvį lemia protonų skaičius jame. Kadangi atomas visumoje yra neutralus, o protono krūvis priešingas elektrono krūviui, tai protonų skaičius branduolyje yra lygus elektronų skaičiui atomo elektroniniame apvalkale. Šis skaičius vadinamas **atominio skaičiumi** arba **atomo numeriu** arba tiesiog “branduolio krūviu” ir žymimas raide  $Z$ . Branduoliai, kurie turi vienodą  $Z$ , tačiau skirtingą  $A$  (t.y., skirtingą neutronų skaičių), vadinami duotojo elemento **izotopais**.

Izotopo žymėjimui naudojamas užrašas  ${}_Z^A\text{X}$ , kur  $X$  yra cheminis simbolis, kuris atitinka elementą su duotuoju  $Z$ . Pvz., užrašas  ${}_4^9\text{Be}$  žymi berilio atomo branduolį, kurio  $Z = 4$ ,  $A = 9$  ir kuris turi 5 neutronus. Apatinis kairysis indeksas nėra būtinas, nes atominį numerį  $Z$  vienareikšmiškai nusako elemento pavadinimas. Todėl dažnai naudojamas sutrumpintas užrašymas, pvz.,  ${}^9\text{Be}$  (skaitoma “berilis devyni”).

$\alpha$  skilimas yra toks atomo branduolio virsmas, kurio metu branduolys savaime išspinduliuoja  $\alpha$  dalelę ( ${}^4_2\text{He}$  branduolį). Šio virsmo metu branduolio masės skaičius sumažėja keturiais vienetais, o atominis skaičius – dviem. Naudojant minėtuosius žymėjimus,  $\alpha$  skilimo lygtis užrašoma šitaip:



$\beta$  skilimas yra toks atomo branduolio virsmas, kurio metu branduolys savaime išspinduliuoja elektroną (žymėjimas –  $e^-$ ) ir lengviausiąją neutraliąją dalelę – antineutrą (žymėjimas –  $\tilde{\nu}$ ). Šio virsmo metu branduolio masė nepasikeičia, o branduolio krūvis padidėja vienu elementariuoju krūviu. T.y.,  $\beta$  skilimo lygtį galima užrašyti tokiu būdu:



T.y.,  $\beta$  skilimo metu vienas iš branduolio neutronų virsta protonu. Toks  $\beta$  skilimas vadinamas  **$\beta^-$  skilimu**. Kitas  $\beta$  skilimo procesas yra toks branduolio virsmas, kurio metu branduolys savaime išspinduliuoja pozitroną  $e^+$  ir kitą lengviausiąją neutraliąją dalelę – neutrą  $\nu$ . Šio virsmo metu branduolio masė taip pat nepasikeičia, o branduolio krūvis sumažėja vienu elementariuoju krūviu, t.y., vienas iš branduolio protonų virsta neutronu:



Toks  $\beta$  skilimas vadinamas  **$\beta^+$  skilimu**. Trečiasis branduolio virsmas, kuris taip pat priskiriamas prie  $\beta$  skilimo procesų, yra **elektrono pagavimas** arba  **$K$  pagavimas**. Šio virsmo metu branduolys “pagauna” vieną iš atominio apvalkalo elektronų (dažniausiai – iš artimiausio branduoliui  $K$  sluoksnio), ir vienas iš branduolio protonų virsta neutronu:



Skilimo metu susidaręs branduolys dažnai būna sužadintos būsenos (turi energijos perteklių). Tokiu atveju per  $10^{-12} \div 10^{-6}$  s įvyksta jo kvantinis šuolis į pagrindinę būseną, kurio metu energijos perteklius išspinduliuojamas fotono (elektromagnetinio spinduliavimo kvanto) pavidalu. Šis spinduliavimas vadinamas  $\gamma$  spinduliavimu, o jo kvantas vadinamas  *$\gamma$  kvantu*. Taigi,  *$\gamma$  spinduliavimas* – tai branduolio skilimo metu atsirandantis elektromagnetinis spinduliavimas.  $\gamma$  kvantų energija dažniausiai priklauso intervalui  $10 \div 5000$  keV.

Branduolių skilimo spartą nusako *skilimo pusamžis* – laikas, per kurį radioaktyviųjų branduolių skaičius bandinyje sumažėja 2 kartus. *Pagrindinis radioaktyvumo dėsnis* teigia, kad radioaktyviųjų branduolių skaičius bandinyje eksponentiškai mažėja laike:

$$N(t) = N_0 \exp(-\lambda t) = N_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}, \quad (3.1.5)$$

kur  $N_0$  yra pradinis radioaktyviųjų branduolių skaičius,  $T_{1/2}$  yra skilimo pusamžis, o  $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$  yra *skilimo konstanta*. Įvairių radioaktyviųjų izotopų skilimo pusamžiai kinta labai plačiose ribose – nuo sekundės dalių iki daugelio milijardų metų.

Vidutinis per laiko vienetą skylančių branduolių skaičius

$$I \equiv -\frac{dN}{dt} \quad (3.1.6)$$

vadinamas radioaktyviojo šaltinio *aktyvumu*. Kadangi skilimo metu branduolys išspinduliuoja vieną arba daugiau dalelių, tai aktyvumą galima išmatuoti, registruojant šias daleles ir randant jų vidutinį skaičių per laiko vienetą.

Įrašę (3.1.5) į (3.1.6), randame, kad radioaktyvaus bandinio aktyvumas yra proporcingas radioaktyviųjų branduolių skaičiui bandinyje:

$$I = \lambda N. \quad (3.1.7)$$

T.y., aktyvumas mažėja laike tuo pačiu eksponentiniu dėsniu (3.1.5), kaip ir radioaktyviųjų branduolių skaičius. Šis reiškinys naudojamas skilimo pusamžių matavimui.

### 3.2. Dozimetrijoje naudojami dydžiai ir vienetai

Kai jonizuojančioji spinduliuotė krinta į medžiagą, dalis spinduliuotės energijos yra sugerama. Medžiagos masės vienete sugertosios energijos kiekis yra vadinamas *sugertąja doze*. SI sistemoje vartojamas sugertosios dozės matavimo vienetas yra grėjus (Gy):

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg.}$$

Nesisteminis sugertosios dozės matavimo vienetas yra radas (rad):

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$$

*Sugertosios dozės galia* – tai sugertoji dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra Gy/s arba rad/s.

Jonizuojančiosios spinduliuotės biologinis poveikis priklauso ne vien nuo sugertosios dozės, bet ir nuo spinduliuotės rūšies ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , neutronai, branduoliai, jonai ir kt.) ir dalelių energijos. Taip yra todėl, kad spinduliavimo biologinis poveikis priklauso nuo *jonizacijos tankio* – elektrono ir teigiamo jono porų skaičiaus, kuris susidaro jonizuojančios dalelės kelio vienete, jai praeinant pro medžiagą. Šis dydis priklauso nuo spinduliavimo rūšies ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  arba neutronai), nuo dalelių energijos ir nuo absorbuojančios medžiagos. Pvz., ore 1 cm kelyje  $4 \div 9$  MeV energijos  $\alpha$  dalelė sukuria  $1.5 \cdot 10^4 \div 2.5 \cdot 10^4$  jonų porų,  $\beta$  dalelė – vidutiniškai 60 jonų porų, o  $\gamma$  kvantas – kelias jonų poras. Jonizuojančiojo spinduliavimo biologinis poveikis didėja, augant jonizacijos tankiui. Vadinasi, esant fiksuotam jonizuotų atomų skaičiui tūrio vienete (t.y., esant fiksuotai sugertajai dozei), spinduliavimo biologinis poveikis yra tuo didesnis, kuo daugiau yra *artimų* jonizuotų atomų. Todėl, pvz., duotosios  $\alpha$  spinduliavimo dozės biologinis poveikis yra stipresnis už tokio paties didumo  $\gamma$  spinduliavimo dozės poveikį,

nes  $\alpha$  spinduliavimo atveju visi jonizuoti atomai yra “išsirikiavę” išilgai  $\alpha$  dalelių trekų, o  $\gamma$  spinduliavimo atveju jie tolygiai pasiskirstę audinio tūryje<sup>1</sup>. Todėl, nusakant spinduliuotės biologinį poveikį, sugertoji dozė dauginama iš **kokybės koeficiento**  $k$ , kuris nusako, kiek kartų duotojo tipo spinduliuotės biologinis poveikis yra didesnis už tos pačios sugertosios dozės 200 keV energijos  $\gamma$  kvantų biologinį poveikį. Kadangi kokybės koeficientas nusako duotosios rūšies spinduliuotės biologinį poveikį, lyginant su kitų tipų jonizuojančiuoju spinduliavimu, tai jis dar vadinamas **santykinio biologinio efektyvumo koeficientu**. Kokybės koeficientai, kurie atitinka skirtingas jonizuojančiosios spinduliuotės rūšis, pateikti 1 lentelėje. Šitai apskaičiuotas dydis vadinamas **lygiaverte dozė** ir matuojamas **sivertais**:

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} / k.$$

Taigi, vienas sivertas atitinka tokią duotosios rūšies spinduliuotės sugertąją dozę, kurios biologinis poveikis yra toks pats kaip 200 keV energijos  $\gamma$  kvantų 1 Gy sugertosios dozės biologinis poveikis. Nesisteminis lygiavertės dozės vienetas yra vadinamasis **biologinis rentgeno ekvivalentas** arba REM (“Roentgen equivalent man”, rem). Tikslus šio vieneto pavadinimas būtų “biologinis rado ekvivalentas”, nes jis atitinka tokią duotosios rūšies spinduliuotės sugertąją dozę, kurios biologinis poveikis yra toks pats kaip 200 keV energijos  $\gamma$  kvantų 1 rad sugertosios dozės biologinis poveikis:

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv} = 1 \text{ rad} / k.$$

**Lygiavertės dozės galia** – tai lygiavertė dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra Sv/s arba rem/s.

**1 lentelė.** Skirtingų jonizuojančiosios spinduliuotės rūšių kokybės koeficientai

Spinduliuotės rūšis	$k$	Spinduliuotės rūšis	$k$
$\gamma$ spinduliuotė	1	Šiluminiai neutronai	3
Rentgeno spinduliuotė	1	5 keV energijos neutronai	2,5
$\beta$ spinduliuotė	1	20 keV energijos neutronai	5
$\alpha$ spinduliuotė ( $\leq 10 \text{ MeV}$ )	10	100 keV energijos neutronai	8
Protonai (10 MeV)	10	1 MeV energijos neutronai	10,5
Sunkieji atatrunkos branduoliai	20	10 MeV energijos neutronai	6.5

Spinduliuotės poveikį medžiagai lemia medžiagos sugertas spinduliuotės energijos kiekis (t. y. vidutinė sugertoji dozė, padauginta iš medžiagos masės), spinduliuotės rūšis ir spinduliuotės dalelių energija. Tačiau tiesiogiai išmatuoti sugertąją energiją yra gana sudėtinga. Dauguma dozimetrinių prietaisų matuoja ne energiją, o elektros krūvį, kuris sukuriama ore arba kitoje medžiagoje dėl jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio. Pagal tą krūvį paskui galima apytiksliai apskaičiuoti ir energiją, kurią sugertų koks nors žinomos sudėties kūnas (pvz., biologinis audinys), patalpintas į tiriamąją erdvės sritį. Pilnutinis vieno ženklo jonų krūvis, kuris susidarė atmosferos oro masės vienetė dėl jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio, yra vadinamas **ekspozicine dozė**. Taigi, ekspozicinę dozę ( $D_e$ ) galima išreikšti šitai:

$$D_e = \frac{dQ}{dm}; \quad (3.2.1)$$

<sup>1</sup> Tačiau išorinio  $\alpha$  spinduliavimo atveju beveik visa spinduliavimo energija sugerama odos audiniuose, o  $\gamma$  spinduliavimas yra sugeriamas visame organizmo tūryje, todėl  $\gamma$  spinduliavimas yra pavojingesnis sveikatai už to paties intensyvumo  $\alpha$  spinduliavimą.

čia  $Q$  yra sukurtas krūvis,  $m$  yra oro masė, o raidė „d“ žymi šių dydžių nykstantus kiekius (diferencialus). Iš ekspozicinės dozės apibrėžties išplaukia, kad ekspozicinės dozės sisteminis matavimo vienetas yra  $A \cdot s \cdot kg^{-1}$  (šis vienetas neturi specialaus pavadinimo). Nesisteminis ekspozicinės dozės matavimo vienetas yra rentgenas (R). 1 R – tai tokia ekspozicinė dozė, kuriai esant, 0,001293 g oro susidaręs vieno ženklo jonų krūvis lygus CGSE krūvio vienetui, t.y.,  $3,33 \cdot 10^{-10} C$  (0,001293 g – tai  $1 \text{ cm}^3$  oro masė normaliomis oro sąlygomis). **Ekspozicinės dozės galia** – tai ekspozicinė dozė per laiko vienetą. Šio dydžio matavimo vienetas yra  $A \cdot kg^{-1}$  arba R/s.

Pagrindiniai dozimetrijoje vartojami vienetai ir jų sąryšiai pateikti 2 lentelėje.

**2 lentelė.** Jonizuojančiosios spinduliuotės matavimo vienetai

Dydžio pavadinimas	SI vienetas	Nesisteminis vienetas	Santykis
Sugertoji dozė	Grėjus, Gy	Radas, rad	1 rad = 0,01 Gy
Sugertosios dozės galia	Grėjus per sekundę, Gy/s	Radas per sekundę, rad/s	1 rad/s = 0,01 Gy/s
Lygiavertė dozė	Sivertas, Sv	REM, rem	1 rem = 0,01 Sv
Lygiavertės dozės galia	Sivertas per sekundę, Sv/s	REM/s, rem/s	1 rem/s = 0,01 Sv/s
Ekspozicinė dozė	Kulonas kilograme, C/kg	Rentgenas, R	1 R = $2,58 \cdot 10^{-4} C/kg$
Ekspozicinės dozės galia	Amperas kilograme, A/kg	Rentgenas per sekundę, R/s	1 R/s = $2,58 \cdot 10^{-4} A/kg$

Pagal vidutinę atomo jonizacijos energiją nustatyta, kad, švitinant biologinį audinį  $\gamma$  arba Rentgeno spinduliais, radais išreikštos sugertosios dozės skaitinė vertė apytiksliai lygi rentgenais išreikštos ekspozicinės dozės skaitinei vertei. Tiksliau, 1 R ekspozicinė dozė atitinka 0.96 rad sugertąją dozę. Todėl praktikoje sugertoji dozė dažniausiai įvertinama pagal ekspozicinę dozę. Ši atitinkamybė galioja tik tuo atveju, kai spinduliavimą sugeria biologinis audinys. Pvz., kai spinduliavimą sugeria oras, 1 R ekspozicinė dozė atitinka 0.88 rad sugertąją dozę. Tuo galima įsitikinti tokiu būdu. Kadangi vienvalenčio jono (elektrono) krūvis  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$ , tai 1 R dozė sukuria  $1 \text{ cm}^3$  oro  $3.33 \cdot 10^{-10} / 1.6 \cdot 10^{-19} = 2.08 \cdot 10^9$  jonų porų, o 1 kg oro –  $2.08 \cdot 10^9 / 1.293 \cdot 10^{-6} = 1.61 \cdot 10^{15}$  jonų porų. Žinant, kad vienai jonų porai sukurti reikia vidutiniškai  $34 \text{ eV} \approx 54.4 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  energijos,  $1.61 \cdot 10^{15}$  poroms sukurti reikės  $1.61 \cdot 10^{15} \cdot 54.4 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 0.88 \cdot 10^{-2} \text{ J}$ . Vadinasi, 1 R ekspozicinė dozė yra tapati  $0.88 \cdot 10^{-2} \text{ J/kg} = 0.88 \text{ rad}$  sugertajai dozei ore.

### 3.4. Atskirų jonizuojančiosios spinduliuotės tipų dozimetrija

Pagrindinė radioaktyvaus šaltinio charakteristika yra jo aktyvumas. Tačiau šaltinio aktyvumas negali tiesiogiai apibūdinti spinduliavimo jonizuojančio poveikio. Duoto aktyvumo radioaktyvaus šaltinio jonizuojantis poveikis priklauso nuo spinduliavimo tipo ir energijos bei nuo švitinamos aplinkos prigimties. Žemiau pateiktos formulės, kurios susieja šaltinio aktyvumą su ekspozicinės arba sugertosios dozės galia.

#### a) $\gamma$ spinduliavimo dozimetrija

Įvertinant  $\gamma$  spinduliavimo jonizuojantį poveikį, naudojama jonizacinės konstantos sąvoka. Radioaktyvaus izotopo **jonizacinė konstanta** – tai ekspozicinės dozės galia (rentgenais per valandą, R/h), kurią sukuria taškinis 1 mCi ( $3.7 \cdot 10^7 \text{ Bq}$ ) aktyvumo  $\gamma$  šaltinis 1 cm atstumu.

Šaltinio, kuris spinduliuoja vienos energijos  $\gamma$  kvantus, jonizacinė konstanta lygi

$$K_{\gamma} = 1.959 \cdot 10^6 \cdot (\tau + \sigma) E_{\gamma} \left( \frac{\text{R} \cdot \text{cm}^2}{\text{mCi} \cdot \text{h}} \right), \quad (3.3.1)$$

kur  $\tau$  ir  $\sigma$  yra atitinkamai fotoefekto ir Komptono sklaidos indėliai į spinduliavimo absorbcijos koeficientą ( $\text{cm}^{-1}$ ), o  $E_{\gamma}$  yra  $\gamma$  kvanto energija (MeV). Skirtingų izotopų jonizacinės konstantos pateiktos 3 lentelėje.

3 lentelė. Skirtingų  $\gamma$  radioaktyvių izotopų jonizacinės konstantos

Izotopas	Skilimo pusamžis	$E_{\gamma}$ , MeV	$K_{\gamma}$ , $\text{R} \cdot \text{cm}^2 / (\text{mCi} \cdot \text{h})$
$^{24}\text{Na}$	14.9 valandos	1.368; 2.753	18
$^{60}\text{Co}$	5.3 m.	1.173; 1.332	13.5
$^{131}\text{J}$	8 dienos	Ištisinis spektras	2.6
$^{134}\text{Cs}$	2.3 m.	Ištisinis spektras	11.5
$^{137}\text{Cs}$	33 m.	0.6616	4.0
$^{152}\text{Eu} + ^{154}\text{Eu}$	15 m.	Ištisinis spektras	5.5
$\text{Tm}^{170}$	127 dienos	0.084	0.47
$^{192}\text{Ir}$	78 dienos	Ištisinis spektras	2.7
$^{226}\text{Ra}$	1620 m.	Ištisinis spektras	8.4

Žinant taškinio  $\gamma$  šaltinio aktyvumą ir jonizacinę konstantą, galima apskaičiuoti jo spinduliavimo dozės galią bet kuriuo atstumu nuo šaltinio. Taškinio  $\gamma$  šaltinio dozės galią lygi

$$P = \frac{K_{\gamma} A}{R^2}, \quad (3.3.2)$$

kur  $A$  yra šaltinio aktyvumas (mCi),  $R$  yra atstumas iki šaltinio (cm), o  $K_{\gamma}$  yra  $\gamma$  spinduliavimo jonizacinė konstanta, kuri priklauso nuo šaltinio spinduliuojamų  $\gamma$  kvantų energijos  $E_{\gamma}$ . Didėjant energijai,  $K_{\gamma}$  auga (žr. 3 lentelę).

#### b) $\beta$ spinduliavimo dozimetrija

Kalbant apie  $\beta$  spinduliavimo dozimetriją, reikia skirti organizme esančių  $\beta$  radioaktyvių izotopų dozimetriją ir išorinių  $\beta$  spinduliavimo srautų dozimetriją.

Radioaktyvių izotopų spinduliuojamų  $\beta$  dalelių siekiai biologiniame audinyje yra kelių milimetrų eilės (žr. 4 lentelę). Todėl tuo atveju, kai srities (organo), kurioje pasiskirstęs  $\beta$  radioaktyvus izotopas, matmenys yra didesni už 1 cm, galima laikyti, kad duotojo medžiagos kiekio sugerta energija lygi to paties medžiagos kiekio išspinduliuotų  $\beta$  dalelių energijai. Perėjus prie dozimetrijoje naudojamų vienetų (rad/h ir mCi), gaunama tokia  $\beta$  spinduliavimo sugertosios dozės galios išraiška:

$$P = 2.13 \cdot 10^3 \cdot E_{\beta} \cdot A/m \left( \frac{\text{rad} \cdot \text{g}}{\text{mCi} \cdot \text{h}} \right), \quad (3.3.3)$$

kur  $E_{\beta}$  yra vidutinė  $\beta$  dalelių energija (MeV), o  $A/m$  yra audinio masės vienetė esančio izotopo aktyvumas (mCi/g).

Žinomo aktyvumo išorinio  $\beta$  spinduliavimo šaltinio dozė įvertinama taip pat, kaip  $\gamma$  spinduliavimo atveju, t.y., naudojant jonizacines konstantas.



4 lentelė. Įvairių izotopų spinduliuojamų  $\beta$  dalelių siekiai įvairiose medžiagose

Radioaktyvus izotopas	Skilimo pusamžis	Maksimali $\beta$ dalelių energija, MeV	Maks. siekis ore, cm	Didžiausias siekis minkštajame biologiniame audinyje, cm	Didžiausias siekis Al, cm
$^{12}\text{C}$	5570 m.	0.155	22	0.02	0.008
$^{24}\text{Na}$	15.4 val.	1.390	465	0.72	0.222
$^{32}\text{P}$	14.3 dienos	1.704	610	0.92	0.285
$^{35}\text{S}$	87.1 dienos	0.167	28	0.02	0.01
$^{45}\text{Ca}$	165 dienos	0.255	47	0.06	0.022
$^{60}\text{Co}$	5.26 m.	0.310	62	0.09	0.029
$^{82}\text{Br}$	35.4 val.	0.465	116	0.16	0.056
$^{89}\text{Sr}$	50.36	1.500	510	0.80	0.247
$^{185}\text{W}$	73.2 dienos	0.430	93	0.15	0.044
$^{204}\text{Tl}$	3.56 m.	0.783	217	0.35	0.110

c)  $\alpha$  dalelių dozimetrija

$\alpha$  dalelių kelias medžiagoje yra apytiksliai tiesus. Todėl vienodos krypties  $\alpha$  dalelių skaičius beveik nekinta iki pat trajektorijos pabaigos. Vadinasi, krintant į medžiagos paviršių lygiagrečiam monoenerginėms  $\alpha$  dalelių pluoštui, visa dalelių energija sugerama medžiagos sluoksnyje, kurio storis lygus  $\alpha$  dalelės siekiui, o paviršiaus plotas lygus krintančio pluoštelio skerspjūvio plotui.  $\alpha$  spinduliuojimo sugertosios dozės vidutinės galios išraiška medžiagos sluoksniui, kuriame vyksta sugertis, yra analogiška (3.3.3) formulei:

$$P = 2.13 \cdot 10^3 E_{\alpha} \cdot I / m \left( \frac{\text{rad} \cdot \text{mg}}{\text{mCi} \cdot \text{h}} \right); \quad (3.3.4)$$

čia  $E_{\alpha}$  yra  $\alpha$  dalelių energija (MeV),  $I$  yra krintančio dalelių srauto tankis ( $\text{mCi}/\text{cm}^2$ ), o  $m$  yra  $1 \text{ cm}^2$  ploto medžiagos sluoksnio, kuris pilnai sugeria  $\alpha$  daleles, masė ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ). Žinant analogišką dydį orui ( $m_0$ ), šią masę galima apskaičiuoti pagal formulę

$$m = Cm_0; \quad (3.3.5)$$

čia koeficiento  $C$  vertė priklauso nuo medžiagos.  $m_0$  vertės, esant skirtingoms  $\alpha$  dalelių energijoms, ir  $C$  vertės skirtingose medžiagose pateiktos atitinkamai 5 ir 6 lentelėse.

5 lentelė. Įvairių energijų  $\alpha$  dalelių siekis

Radioaktyvus izotopas	Skilimo pusamžis	$\alpha$ dalelės energija, MeV	Siekis ore, cm	Siekis ore, $\text{mg}/\text{cm}^2$	Siekis minkštoje biologinėje medžiagoje, $\mu\text{m}$
$^{210}\text{Po}$	138.4 dienos	5.3	3.8	4.9	45
$^{212}\text{Po}$	$3 \cdot 10^{-7}$ s	8.8	8.6	11.1	105
$^{226}\text{Ra}$	1620 m.	4.8	3.3	4.3	40
$^{222}\text{Rn}$	3.83 dienos	5.5	4.0	5.2	49
$^{232}\text{Th}$	$1.4 \cdot 10^{10}$ m.	4.0	2.5	3.2	31
$^{238}\text{U}$	$4.5 \cdot 10^{10}$ m.	4.2	2.7	3.5	34
$^{239}\text{Pu}$	$2.4 \cdot 10^4$ m.	5.15	3.7	4.8	43

6 lentelė. Vienetinio ploto sluoksnio, kuris pilnai sugeria  $\alpha$  daleles arba protonus, masių įvairiose medžiagose ir jo masės ore santykis

Medžiaga	C	
	$\alpha$ dalelės	Protonai
Audinys	0.77	0.77
Aliuminis	1.20	1.14
Varis	1.70	1.55
Sidabras	2.17	1.78
Platina	3.09	2.55

### 3.4. Pagrindiniai jonizuojančiojo spinduliavimo šaltiniai

Trys pagrindiniai natūralaus foninio jonizuojančiojo spinduliavimo šaltiniai yra:

- 1) kosminiai spinduliai (žr. 7 lentelę),
- 2) Žemės plutoje esančių radioaktyvių elementų (radžio Ra, torio Th, urano U ir kt.) skilimas (žr. 8 lentelę)
- 3) vidinis organizmo spinduliavimas, kuris atsiranda, skylant gyvosiose ląstelėse esantiems radioaktyviems izotopams ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{14}\text{C}$  ir kt.).

Jūros lygyje pilnoji vidutinė natūralaus spinduliavimo dozė, kurią sugeria žmogaus organizmas per metus, lygi 1–2 mSv. Tačiau didesniuose aukščiuose, kur kosminis spinduliavimas yra intensyvesnis, arba vietose, kur dirvožemyje daugiau radžio, metinė dozė gali būti kelis kartus didesnė (žr. 7 ir 8 lenteles). Pastaruoju atveju dozės padidėjimą sąlygoja radioaktyvios inertinės dujos radonas (Rn), kurios susidaro, skylant radžiui. Šios dujos gali patekti į pastatus pro grindis arba rūsio sienas ir kauptis vidinių patalpų ore. Jeigu patalpos nėra periodiškai vėdinamos, tokių namų gyventojų gaunama metinė dozė gali siekti 100 mSv.

Metinė dozė, kurią sąlygoja vidinių radioaktyvių izotopų spinduliavimas, vidutiniškai lygi 0.36 mSv.

7 lentelė. Vidutinė metinė kosminių spindulių dozė įvairiuose aukščiuose

Vieta (aukštis)	Vidutinė ekvivalentinė dozė per metus, mSv
Jūros lygis	0.2 – 0.4
1500 m	0.4 – 0.6
3000 m	0.8 – 1.2
12000 m	28
36 – 600 km	70 – 150
Tarpplanetinė erdvė	180 – 250
Van Aleno radiacinės juostos (vidinė – 1000 ÷ 5000 km, išorinė – 15000 ÷ 25000 km)	< 15000

8 lentelė. Vidutinė metinė dozė dėl dirvožemio natūralaus radioaktyvumo

Vieta	Vidutinė ekvivalentinė dozė per metus, mSv
Normalios sritys	0.25 – 1.6
Granito telkiniai Prancūzijoje	1.8 – 3.5
Alūno telkiniai Šveicarijoje	1.58 – 2.2
Monazito aliuviniai telkiniai Brazilijoje	5 – 10
Monazito smėlynai Keraloje (Indija)	3.7 – 28

Šalia natūralaus spinduliavimo, žmones veikia ir įvairių dirbtinių šaltinių spinduliavimas. Pagrindinis dirbtinis jonizuojančiojo spinduliavimo šaltinis yra Rentgeno spindulių pritaikymas medicininėje diagnostikoje. Nors skirtinguose Rentgeno medicininuose tyrimuose gautos dozės kinta nuo kelių dešimtųjų mGy iki šimtų mGy (žr. 9 lentelę), tačiau vidutinė vienam gyventojui apskaičiuota metinė dirbtinės kilmės jonizuojančiojo spinduliavimo dozė yra artima natūralaus spinduliavimo metinei dozei, t.y.,  $1 \div 2$  mGy.

9 lentelė. Tipiškos dozės, kurias gauna švitinamieji audiniai Rentgeno tyrimų metu

Tyrimo pobūdis	Dozė per vieną ekspoziciją, mGy
Krūtinės Rentgeno nuotrauka	0.4 – 10
Pilvo ertmės Rentgeno nuotrauka	10
Galūnių Rentgeno nuotrauka	2.5 – 10
Fluoroskopija	100 – 200 per minutę
Kompiuterizuota tomografija	50 – 100 per vieną tyrimą

### 3.5. Jonizuojančiojo spinduliavimo biologinis poveikis

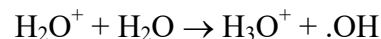
Greitos elektringos dalelės ( $\alpha$ ,  $\beta$ , protonai ir sunkūs branduoliai) ir didelės energijos fotonai (Rentgeno ir  $\gamma$  spinduliavimas) jonizuoja arba sužadina biologinio audinio molekules. Jonizacijos metu susidaro laisvas elektronas ir teigiamas molekulinis jonas, o sužadinimo metu įvyksta molekulės kvantinis šuolis į aukštesnį energijos lygmenį. Jonizacijos metu atsiradęs laisvasis elektronas (*antrinis elektronas*) gali analogišku būdu jonizuoti arba sužadinti kitas molekules. Kadangi kiekvienam jonizacijos ir sužadinimo aktui išseikvojamas tam tikras energijos kiekis, tai, judant radioaktyviai dalelei aplinkoje, jos energija mažėja. Skystose aplinkose (tame tarpe – ir žmogaus kūne) energijos nuostoliai jonizacijai ir sužadinimui yra apytiksliai vienodi. Tačiau biologinį poveikį sąlygoja beveik vien tik jonizacija. Žemiau yra išvardintos bendrosios elementariosios jonizacijos proceso savybės.

- 1) Atomo jonizacijos procesas, kai atomas yra molekulės sudėtyje, beveik nesiskiria nuo jonizacijos proceso, kai tas pats atomas yra laisvas. Todėl, kalbant apie jonizacinius energijos nuostolius, pirmuoju artutiniu galima neatsižvelgti į atomų cheminių ryšių molekulėje. T.y., jonizacija – visų pirma atominis, o ne molekulinis, procesas.
  - 2) Atomo jonizacija – tai atsitiktinis procesas. T.y., jeigu krintančios dalelės kelyje atsiduria atomas, šis atomas jonizuojamas tik su tam tikra tikimybe. Ši tikimybė yra mažiausia  $\gamma$  kvantų atveju ir didžiausia  $\alpha$  dalelių bei sunkiųjų branduolių atveju.
  - 3) Jonizacija įvyksta dėl atomo ir krintančios dalelės elektrinės sąveikos. T.y., tuo atveju, kai krintanti dalelė yra elektringa, jonizaciją sąlygoja atomo sąveika su krintančios dalelės elektrostatiniu lauku. Tuo atveju, kai atomas yra Rentgeno arba  $\gamma$  spinduliavimo sraute, jonizaciją sąlygoja atomo sąveika su elektromagnetine banga. Kvantinėje mechanikoje įrodoma, kad pastarąją sąveiką formaliai galima aprašyti kaip sąveiką su dalele – fononu.
- Kaip išplaukia iš pastarosios savybės, neutronai negali tiesiogiai dalyvauti jonizacijos procese, nes jie yra elektriškai neutralūs. Tačiau dėl tos pačios priežasties neutronai gali prasiskverbti pro atomo elektroninį apvalkalą ir priartėti prie branduolio tokiu atstumu, kuriuo pradeda pasireikšti artiveikė stiprioji (branduolinė) sąveika. Dėl sąveikos su branduoliu gali vykti neutrono sklaida arba branduolio aktyvacija:
- 1) Sklaidos metu neutronas perduoda dalį savo impulso ir energijos branduoliui. Jeigu krintančio neutrono energija yra pakankamai didelė, o branduolio masė pakankamai maža, neutronas gali “išmušti” branduolį iš molekulės. Pastarasis branduolys, judėdamas medžiagoje, gali sukelti jos jonizaciją.

2) Aktyvacijos metu branduolys sugeria neutroną. Kadangi naujasis branduolys dažniausiai yra nestabilus, tai jis skyla, išspinduliuodamas elektringą dalelę. Kartais išspinduliuojamas ir  $\gamma$  kvantas. Šios dalelės gali sukelti aplinkos jonizaciją.

Taigi neutronų atveju aplinkos jonizaciją sukelia antrinės dalelės, kurios atsiranda dėl neutronų sąveikos su medžiagos atomų branduoliais.

Dėl jonizacijos atsiradę molekuliniai jonai dažnai būna chemiškai nepatvarūs ir skyla į naujas molekules arba reaguoja su aplinkos molekulėmis. Jeigu tokiu būdu pažeidžiama molekulė, kuri yra svarbi ląstelės funkcionavimui (pvz., DNR molekulė), gali būti sutrikdyta normali ląstelės veikla (pvz., ląstelė gali netekti sugebėjimo dalintis). Toks biologinis poveikis vadinamas **tiesioginiu poveikiu**. Jonizuota molekulė gali ir neturėti svarbios įtakos ląstelės veiklai (pvz., vandens molekulė). Tačiau jos cheminių virsmų metu gali susidaryti laisvieji radikalai. Laisvieji radikalai – tai neutralios molekulės, kurios turi vieną nesuporuotą valentinį elektroną. Pvz., reaguojant vandens molekulės jonui su neutralia vandens molekule, susidaro hidratuotas vandenilio jonas (t.y., vandenilio jonas, kuris susietas su vandens molekule vandeniliniu ryšiu) ir laisvasis radikalas – neutrali hidroksido grupė:



(taškas prieš radikalo žymėjimą reiškia nesuporuotą elektroną). Dėl nesuporuoto elektrono egzistavimo laisvieji radikalai yra labai chemiškai aktyvūs. Laisvasis radikalas gali difunduoti pakankamai toli nuo savo atsiradimo vietos ir reaguoti su biologiškai svarbia molekule. Toks biologinis poveikis vadinamas **netiesioginiu poveikiu**. Nors laiko intervalas nuo pirminės jonizacijos iki biologiškai svarbios molekulės pažeidimo yra labai trumpas (žymiai trumpesnis už 1 s), tačiau gali praėti dar keletas metų arba dešimtmečių, kol pasireikš šio poveikio biologinis efektas (pvz., piktybinis auglys arba genetiniai defektai).

Didžiausią reikšmę ląstelės veiklai turi DNR molekulės, kuriose saugoma genetinė informacija. Vienos DNR molekulės pažeidimas gali būti ląstelės mirties arba mutacijos priežastis. Tačiau ląstelėje veikia pažeistų DNR molekulių “taisymo” mechanizmas, kuris greitai atstato pradinį DNR pavidalą, jeigu pažeidimas nėra per didelis. Todėl ilgalaikiam pažeidimui atsirasti dažniausiai nepakanka vieno jonizacijos akto: ta pati molekulė turi būti vienu metu pažeista keliuose vietose, kad taptų neįmanoma ją pilnai “pataisyti”. Todėl biologiškai aktyviausios yra tos radioaktyviosios dalelės, kurioms praeinant pro biologinį audinį, jonizacijos aktų skaičius trajektorijos ilgio vienetu yra didžiausias (t.y., atstumas tarp jonizuojamų atomų yra mažiausias). Tai yra sunkiosios elektringos dalelės (pvz.,  $\alpha$  dalelės arba protonai) ir neutronai. Šios dalelės turi didesnę sugebėjimą tiesiogiai veikti biologinius “taikinius”, negu  $\gamma$  kvantai.  $\gamma$  spinduliavimo biologinis poveikis dažniausiai yra netiesioginis.

Dėl minėtojo ląstelių “taisymo” mechanizmo jonizuojančiojo spinduliavimo biologinis poveikis priklauso ne vien nuo ekvivalentinės dozės, bet ir nuo laiko, per kurį ta dozė buvo sukaupta. Poveikis yra silpnesnis, kai dozė sukaupiamą lėtai arba dalimis. Eksperimentai rodo, kad maždaug 60 % poveikio, kurį sukelia vienas trumpas apšvitinimas  $\gamma$  arba Rentgeno spinduliais, yra “pataisoma” per kelias valandas. Kadangi ląstelių pažeidimai, kuriuos sukelia sunkiosios dalelės, yra didesni, negu  $\gamma$  ir Rentgeno spinduliavimo, tai ir ląstelių atsistatymo tikimybė yra kelis kartus mažesnė (ilgai švitinant neutronais – maždaug 100 kartų mažesnė).

Ląstelė yra jautriausia jonizuojančiojo spinduliavimo poveikiui tuomet, kai vyksta jos dalinimasis. Pažeistoji ląstelė dažniausiai miršta tuomet, kai ji bando dalintis pirmą kartą po pažeidimo. Todėl tos ląstelės, kurios nesidalina, o miršta dėl normalaus senėjimo proceso (pvz., nervų ir raumenų ląstelės), yra žymiai atsparesnės jonizuojančiam spinduliavimui. Jonizuojančio spinduliavimo biologinis poveikis yra didžiausias tuomet, kai apšvitinami audiniai, kuriuose vyksta nuolatinis ląstelių dalinimasis. Šiuose audiniuose nuolat “gaminamos” naujos ląstelės, kurios vėliau pakeičia pasenusias tos pačios rūšies ląsteles. Tai yra visų pirma oda, kaulų smegenys ir virškinimo traktas. Apšvitinus tokius audinius pakankamai didele doze, juose sumažėja besidalinančių ląstelių, todėl sulėtėja pasenusių

ląstelių keitimas naujomis. Atitinkamai, organizme sumažėja kurios nors rūšies ląstelių (pvz., kraujo ląstelių, kurios gaminamos kaulų smegenyse). Vėžio ląstelėms taip pat yra būdingas nekontroliuojamas intensyvus dalinimasis, todėl vienas iš vėžio auglių naikinimo būdų yra jų apšvitinimas didele jonizuojančiojo spinduliavimo doze.

Jonizuojantis spinduliavimas gali pakenkti ne tik apšvitinto žmogaus sveikatai, bet ir jo palikuonims. Atitinkamai, bendras kenksmingas spinduliavimo poveikis skirstomas į **somatinį** ir **genetinį** biologinius efektus. Somatiniai efektai savo ruožtu skirstomi į tuos, kurie pasireiškia, tik esant pakankamai didelei spinduliavimo dozei (neatsitiktiniai arba nestochastiniai efektai) – pvz., opų atsiradimas ant odos – ir į tuos, kurie gali pasireikšti, esant bet kokiai spinduliavimo dozei (atsitiktiniai arba stochastiniai efektai) – pvz., radiacijos sukeltas vėžys. Genetiniai efektai yra atsitiktinio pobūdžio. Somatiniai neatsitiktiniai efektai, esant ypač didelėms visam kūnui tenkančioms dozėms, išvardinti 10 lentelėje. Kadangi praktikoje dažniausiai susiduriama su žymiai mažesnėmis dozėmis, tai svarbiau mokėti įvertinti atsitiktinių efektų tikimybes. Pagrindinis jonizuojančiojo spinduliavimo pavojus – tai piktybinių auglių (vėžio) atsiradimas. Statistiniai duomenis apie žmones, kurių gauta ekvivalentinė dozė viršija 1 Sv, rodo, kad susirgimo vėžiu tikimybė yra apytiksliai proporcinga gautai dozei. T.y., susirgimo vėžiu tikimybę  $R$  galima išreikšti šitaip:

$$R = rH, \quad (3.5.1)$$

kur  $H$  yra žmogaus gauta ekvivalentinė dozė, o  $r$  – proporcingumo koeficientas, kuris vadinamas somatiniu **rizikos koeficientu**. Analogiškai nuo dozės priklauso ir tikimybė, kad apšvitinto žmogaus palikuonys turės genetinių defektų. Pagal šiuo metu turimus duomenis,  $r = 0.02 \div 0.1 \text{ Sv}^{-1}$ . T.y., iš 10000 žmonių, kurie buvo apšvitinti 1 Sv doze, vėžiu suserga vidutiniškai 200 ÷ 1000 žmonių daugiau, lyginant su 10000 žmonių, kurie nebuvo apšvitinti. Turint omenyje, kad natūraliomis sąlygomis iš 10000 žmonių vidutiniškai 2500 suserga vėžiu, galima teigti, kad 1 Sv dozė 8 ÷ 40 % padidina susirgimo vėžiu tikimybę. Genetinis rizikos koeficientas apytiksliai lygus trečdaliui somatinio rizikos koeficiento. Patikimų statistinių duomenų apie mažesnių dozių poveikį šiuo metu nėra. Praktikoje, įvertinant vėžio ir genetinių defektų tikimybę, kai dozė yra mažesnė už 1 Sv, tiesinė priklausomybė (3.5.1) ekstrapoliuojama (pratęsiama) iš didesniųjų dozių srities. T.y., naudojama ta pati rizikos koeficiento vertė, kaip ir didelių dozių atveju.

Papildomi statistiniai duomenys, atitinkantys skirtingas švitinimo trukmes ir skirtingas vėžio rūšis, pateikti 11 lentelėje.

10 lentelė. Reakcija į visam kūnui tenkančias dideles radiacijos dozes

Dozė	Reakcija
100 Sv	Mirtis per kelias valandas dėl centrinės nervų sistemos pažeidimo.
12 Sv	Mirtis po kelių dienų visų pirma dėl virškinimo trakto pažeidimo.
6 Sv	Mirtis po kelių savaitių dėl kraujotakos organų pažeidimų.
2 ÷ 6 Sv	Vėmimas 2 val. laikotarpyje. Kraujo ląstelių kiekio sumažėjimas. Padidėjęs jautrumas infekcijoms. Baigtis priklauso nuo gydymo. Esant mažesnėms dozėms, galima pasveikti per 1 mėn., didesnių dozių atveju – per 1 metus.
0.75 ÷ 2 Sv	Pakenkia laikinai. Dauguma žmonių turėtų pasveikti per kelias savaites.

11 lentelė. Vidutinis susirgimų vėžiu skaičiaus padidėjimas šimtui tūkstančių apšvitintųjų, esant mažoms visam kūnui tenkančioms radiacijos dozėms

Ekvivalentinė dozė		Susirgimų vėžiu skaičius			
Dozės pobūdis	Dozės dydis	Leukozė		Kitos vėžio rūšys	
		Moterys	Vyrai	Moterys	Vyrai
Ilgalaikė, per visą gyvenimą	1 mSv/metus	60	70	540	450
Ilgalaikė, 18 – 64 metų amžiuje	10 mSv/metus	310	400	2760	2480
Momentinė	0.1 mSv/metus	80	110	730	660

### 3.6. Didžiausios leistinos dozės

Turint omenyje, kad jonizuojantis spinduliavimas yra vienas iš veiksnių, kurie gali sukelti vėžį arba genetinius pakitimus, bet kokia veikla, kurios metu žmogus yra apšvitinamas jonizuojančiu spinduliavimu, yra rizikinga. Dažniausiai ši rizika yra žymiai mažesnė už riziką, kurią sąlygoja daugelis kitų kasdieniniame gyvenime sutinkamų kenksmingų poveikių. Tačiau tais atvejais, kai radiacinio apšvitinimo galima nesunkiai išvengti arba kai praktinė nauda iš veiklos, kuri susijusi su jonizuojančiojo spinduliavimo doze, yra labai maža, tokia rizika nėra priimtina. Todėl imamasi priemonių, siekiant išvengti nereikalingo kontakto su jonizuojančiu spinduliavimu medicinoje, moksle ir pramonėje. Tuo tikslu apribojamos dozės, kurias gali sukaupti skirtingi kūno audiniai (žr. 12 lentelę).

12 lentelė. JAV Nacionalinės Radiacinių Saugos ir Matavimų Tarybos rekomenduojamos didžiausios leistinos jonizuojančiojo spinduliavimo dozės

Apšvitinimo tipas	Didžiausia dozė (įskaitant foną, tačiau neįskaitant vidinio spinduliavimo)
Metinės dozės darbe:	
stochastiniai efektai	50 mSv
nestochastiniai efektai:	
akių lęšis	150 mSv
kiti organai	500 mSv
Pilna dozė, gauta neeilinių darbų metu	100 mSv
Dozė gyventojui per metus:	
nuolatinis arba dažnas apšvitinimas	1 mSv
nedažnas apšvitinimas	5 mSv
Mokymo proceso metu gauta metinė dozė:	
visam kūnui tenkanti vidutinė dozė	1 mSv
akims, odai ir galūnėms tenkanti dozė	50 mSv
Gemalo gauta pilnoji dozė	5 mSv

## 4. Darbo eiga

### 4.1. Aplinkos radiacinio fono matavimas

Gama spinduliuotės fono lygiavertės dozės galią reikia matuoti vienu iš dozimetru „Spingsė“ arba „MKS-05“ („Terra-P“). Reikalingą dozimetra duos darbo vadovas arba laborantas. Matuojant reikia gauti galimai pilnesnį laboratorijos radiacinio fono vaizdą, pagrindžiant matavimui pasirinkto taško tikslingumą. Matavimo metodika:

#### Naudojant dozimetra „Spingsė“:

Dozimetras „Spingsė“ turi dvi veikas: ekspozicinės dozės matavimo ir ekspozicinės dozės galios matavimo. Šiame darbe reikia naudoti dozės galios matavimo veiką. Šioje veikoje dozimetras vykdo nenutrūkstamą matavimų seką. Vieno matavimo trukmė – maždaug 50 s. T. y. dozometro parodymai atsinaujina kas 50 s (retkarčiais paskutinio matavimo rezultatas būna toks pats kaip ankstesniojo, t. y. skaičius gali nepasikeisti). Kiekvienoje vietoje reikia atlikti po 4 – 5 matavimus ir paskui apskaičiuoti rezultatų vidurkį. Ekspozicinės dozės galią dozimetras „Spingsė“ rodo mikrorentgenais per valandą (didžiausia atvaizduojama vertė yra 9999  $\mu\text{R} / \text{h}$ ). Norint gauti lygiavertės dozės galią, išreikštą mikrosivertais per valandą, reikia rodomą skaičių padalyti iš 100. Dozometro „Spingsė“ sisteminė matavimo paklaida yra  $\pm 50\%$ , kai lygiavertės dozės galia neviršija  $0,40 \mu\text{Sv} / \text{h}$ , ir  $\pm 25\%$ , kai dozės galia yra nuo  $0,40 \mu\text{Sv} / \text{h}$  iki  $99,99 \mu\text{Sv} / \text{h}$  (ši paklaida – tai 95 % pasikliautinio intervalo pusprotis).

#### Naudojant dozimetra „MKS-05“ („Terra-P“):

Norint įjungti dozimetra „Terra-P“, reikia spustelėti „MODE“ mygtuką, kuris yra dozometro dešiniojoje pusėje. Įjungus dozimetra „Terra-P“, automatiškai įsijungia lygiavertės dozės galios matavimo veika. Veiką galima pakeisti trumpais mygtuko „MODE“ spustelėjimais. Įsitikinti, kad yra įjungta dozės galios matavimo veika, galima pagal matavimo vienetus, kurie yra rodomi šalia skaičiaus (turi būti „ $\mu\text{Sv} / \text{h}$ “, t. y. mikrosivertai per valandą). Didžiausia lygiavertės dozės galios vertė, kurią gali atvaizduoti dozimetras „Terra-P“, yra  $9,99 \mu\text{Sv} / \text{h}$ .

Dozimetras „Terra-P“ turi programuojamą „aliarminį slenkstį“, t. y. dozės galios vertę, kurią viršijus girdimas nenutrūkstamas garsinis signalas (norint išjungti tą signalą, reikia nuspausti THRESHOLD (SLENKSČIO) mygtuką, kuris yra dozometro kairiojoje pusėje). Kai dozimetras įjungiamas, automatiškai nustatoma  $0,30 \mu\text{Sv}/\text{h}$  slenkščio vertė. Kadangi lygiavertės dozės galia arti radioaktyviojo bandinio gali būti didesnė už  $0,30 \mu\text{Sv}/\text{h}$ , tai, įjungus dozimetra, reikia užduoti didžiausią aliarminį slenkstį, t. y.  $9,99 \mu\text{Sv}/\text{h}$ . Tam reikia spausti ir laikyti „THRESHOLD“ mygtuką. Ekране turėtų pradėti mirksėti paskutinis skaitmuo. Trumpais „THRESHOLD“ mygtuko paspaudimais ir atleidimais nustatoma reikalinga paskutiniojo skaitmens vertė, t. y. „9“. Norint programuoti kitą skaitmenį, kuris pradės tuo metu mirksėti, reikia trumpai paspausti „MODE“ mygtuką. Panašiai programuojami kiti skaitmenys. Šitai pakeitus visus tris skaitmenis ir spustelėjus „MODE“, turėtų pasirodyti mirksintis garso simbolis „)))“. Dar kartą spustelėjus „MODE“, bus užfiksuotas nauja aliarminio slenkščio vertė ir bus galima pradėti matuoti dozės galią. **Pastaba:** Jeigu dozimetras buvo išjungtas, tada jį įjungus vėl automatiškai nusistatys aliarminis slenkstis  $0,30 \mu\text{Sv}/\text{h}$ .

Pakeitus dozometro „Terra-P“ ir radioaktyviųjų bandinių tarpusavio padėtį, dozės galios matavimo veikoje parodymai nusistovi maždaug per 70 s ir paskui yra periodiškai atnaujinami. Kol parodymai nenusistovėjo, rodomas skaičius mirksi. Tačiau ir vėliau, kai rodomas skaičius nustoja mirksėti, egzistuos statistiniai dozometro parodymų svyravimai. Todėl, matuojant dozimetru „Terra-P“ duotajame taške, reikia užsirašyti 4 – 5 rodmenis maždaug kas 50 s, o paskui apskaičiuoti jų vidurkį. Dozometro „Terra-P“ sisteminė matavimo paklaida yra  $\pm 25\%$  (ši paklaida – tai 95 % pasikliautinio intervalo pusprotis).

Jeigu per paskutines 5 min nebuvo nuspaustas nė vienas dozometro mygtukas, tada dozometro ekranas užgęsta ir nutyla garsinė indikacija. Tačiau dozimetras ir toliau matuoja dozės galią (t. y. jis neišsijungia). Spustelėjus mygtuką „MODE“, vėl atsiranda parodymai.

Norint išjungti dozimetą „Terra-P“, reikia nuspausti „MODE“ mygtuką ir laikyti nuspaudus keturias sekundes.

Matavimų rezultatus reikia surašyti į dozimetrinės kontrolės protokolą. Jame turi būti nurodyta kiekvieno matavimo vieta (pvz., seifas su radioaktyviaisiais šaltiniais, laboratorinio darbo pavadinimas, jame naudojamo radioaktyvaus izotopo pavadinimas), matavimo taško padėtis žmogaus kūno atžvilgiu (pvz., dirbančiojo galvos lygyje, krūtinės lygyje) ir išmatuoti lygiavertės dozės galia. Kiekvienoje darbo vietoje (išskyrus neutronų šaltinį ir Komptono efekto tyrimo stendą) matavimai turi būti atliekami dviejose padėtyse: prie stalo krašto, padėjus dozimetą ant stalo (t. y. dirbančiojo krūtinės lygyje), ir prie to stalo sėdinčio žmogaus galvos lygyje.

Vietos, kuriose reikia matuoti dozės galia:

- Laboratoriniai darbai Nr. 5, 6, 9–14, 17 (605 k.). Matuoti reikia tada, kai darbo vietoje padėtas radioaktyvusis bandinys. **Pastaba:** Prie laboratorinių darbų Nr. 1–4 ir Nr. 15 matuoti nereikia, nes tuose darbuose nėra naudojamos radioaktyvios medžiagos.
- Darbo Nr. 8 neutronų šaltinis (konteineris su neutronų šaltiniu yra 605 k. kampe, kuris yra toliausiai nuo įėjimo). Neutronų šaltinio atidengti nereikia. Matuoti reikia dviejose padėtyse: padėjus dozimetą ant neutronų šaltinio dangčio ir maždaug 1 m aukštyje virš to dangčio.
- Seifas su radioaktyviaisiais šaltiniais (621 k.). Matuoti dviejuose taškuose: 1) ties uždaryto seifo durelių centru (dozimetras turi liesti seifo durelių paviršių); 2) kitoje sienos pusėje (koridoriuje) tame pačiame aukštyje kaip ir „1“ atveju (dozimetras turi liesti sieną).
- Darbo Nr. 7 (Komptono efekto tyrimas) stendas (621 k.), kuriame yra naudojamas 3 GBq aktyvumo  $^{137}\text{Cs}$  bandinys. Matuoti reikia atidengus šaltinį, t. y. nuėmus dvi švino plytas, kurios uždengia angą švino „namelio“ šone (tos plytos yra vertikalios; jos pastatytos ant kitų dviejų švino plytų). Matuoti reikia stovint prie stendo, ties jo kraštu, dviejuose aukščiuose: stovinčio žmogaus juosmens aukštyje ir stovinčio žmogaus galvos aukštyje.

#### 4.2. Taškinio $\gamma$ šaltinio dozės galios matavimas

Išmatuojama dozės galia 10 cm ir 20 cm atstumu nuo žinomo aktyvumo  $\gamma$  šaltinio. Naudojamas  $^{137}\text{Cs}$  bandinys, kurio aktyvumas 2001 m. buvo  $3,7 \cdot 10^5 \text{ Bq} = 0,01 \text{ mCi}$ , o spinduliuojamų fotonų energija 662 keV (tokie patys šaltiniai naudojami ir darbuose Nr. 6 bei Nr. 14; laboratorijoje iš viso yra 4 tokie šaltiniai). Dozės galios registravimo metodika tokia pati, kaip ir ankstesniuose matavimuose. Matavimo vieta turi būti toli nuo visų kitų radioaktyviųjų bandinių (pvz., 605 k. kampe, kuris yra tame pačiame kambario gale, kaip ir neutronų šaltinis, bet ne prie lango, o koridoriaus pusėje). Atstumas turi būti matuojamas iki taško, kuris apytiksliai atitinka detektoriaus centrą. „Detektorius“ – tai Geigerio ir Miulerio vamzdelis, kuris yra dozometro viduje. Abiejuose minėtuose dozimetruose tas vamzdelis yra kairiajame dozometro šone, maždaug 1 cm gylyje nuo dozometro kairiojo krašto. A.2 paveiksle yra parodytas dozimetras „Terra-P“ su nuimtu dangteliu. Tame paveiksle matomas ir detektorius, esantis dozometro viduje. Taigi, matuojant atstumą nuo šaltinio iki detektoriaus, šaltinis turi būti dozometro kairėje, o atstumas turi būti matuojamas nuo šaltinio centro iki taško, kuris yra maždaug 1 cm gylyje dozometro kairiojo šono atžvilgiu. Su dozimetru „Spingsė“ atstumas turi būti matuojamas taip pat (dozimetre „Spingsė“ Geigerio ir Miulerio vamzdelio matmenys ir padėtis yra apytiksliai tokie patys, kaip dozimetre „Terra-P“).

$^{137}\text{Cs}$  bandinys padedamas toli nuo matavimo vietos (2 m atstumas yra pakankamai didelis). Išmatuojamas fonas toje pačioje vietoje.



Iš matavimų rezultatų atimamas fonas. Matavimų duomenys palyginami su teorinio skaičiavimo rezultatais (žr. (3.3.2) formulę). Apskaičiuojant teorinę dozės galią, reikia atsižvelgti į bandinio aktyvumo mažėjimą laike ( $^{137}\text{Cs}$  pusėjimo trukmė yra 30,04 m.) ir į tai, kad tik 85% visų  $^{137}\text{Cs}$  branduolių skyla išspinduliuodami  $\gamma$  kvantą. Todėl per laiko vienetą visomis kryptimis išspinduliuotų  $\gamma$  kvantų skaičius yra lygus aktyvumui, padaugintam iš daugiklio 0,85.

#### A PRIEDAS



A.1 paveikslas – Pagrindinis dozimetro „Terra-P“ vaizdas



A.2 paveikslas – Galinis dozimetro „Terra-P“ vaizdas su nuimtu dangteliu