

1. Įvadas

Fotonai

Rentgeno spinduliuotė – tai elektromagnetinės bangos, kurių bangos ilgis yra 1 angstromo eilės arba mažesnis ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$). Tas bangas galima nagrinėti kaip tam tikrų dalelių – fotonų – srautą. Fotono energija:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

čia h yra **Planko konstanta**: $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, c yra šviesos greitis: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, ν yra spinduliuotės dažnis, λ yra bangos ilgis.

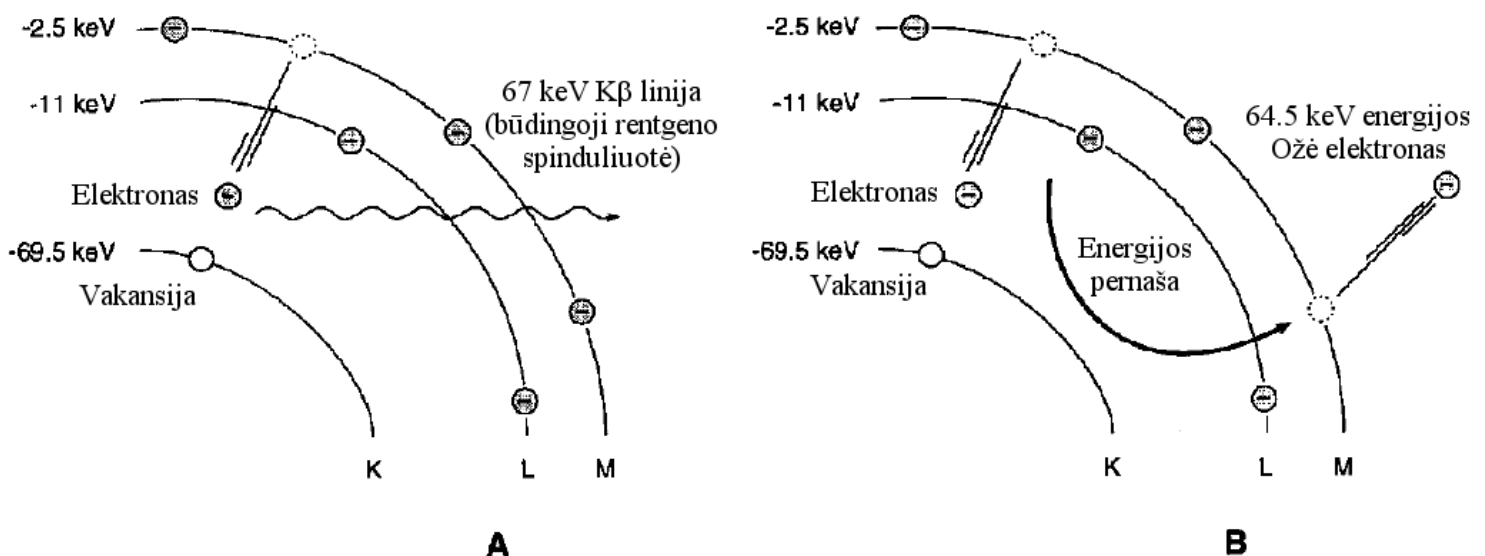
Energijos vienetai:

elektronvoltas: $1 \text{ eV} = e \cdot 1 \text{ V} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

kiloelektronvoltas: $1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$.

Elektronų šuoliai tarp atomo energijos lygmenų

Jeigu viename iš vidinių sluoksnių yra „vakansija“, tada į ją pereina elektronas iš aukštesnio sluoksnio. Šio vyksmo metu išsiskiria energija. Ta energija gali išsiskirti fotono pavidalu (**būdingoji rentgeno spinduliuotė**) arba gali būti perduota kitam to paties atomo elektronui, kuris išlekia iš atomo (**Ožė efektas**).



1.1 pav. Elektronų šuoliai sužadintame volframo atome

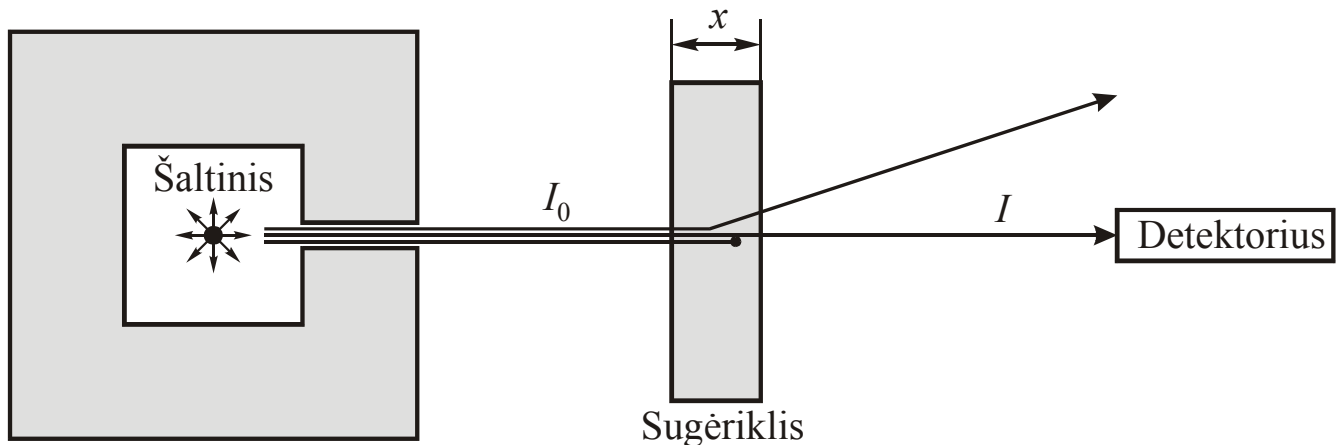
2. Rentgeno spinduliuotės sąveika su medžiaga

2.1. Sąveikos vyksmai. Silpimo koeficientas

Sklaida – toks sąveikos vyksmas, kai krintantysis fotonas pakeičia judėjimo kryptį.

Sugertis (absorbicija) – tai sąveikos vyksmas, kai krintantysis fotonas nustoja egzistuoti.

Siauro lygiagretaus spinduliuotės pluošto formavimas vadinamas **kolimacija**, o įrenginys jam gauti vadinamas **kolimatoriumi**.



Rentgeno arba gama spinduliuotės sugerties medžiagoje tyrimo eksperimentas. Siauras lygiagretus spinduliuotės pluoštas krinta į medžiagos („sugėriklio“) sluoksnį, kurio storis x . Tame sluoksnyje kai kurie fotonai yra sugeriami arba išsklaidomi. Detektorius pasiekia visi likusieji fotonai (tie, kurie nesąveikavo su medžiaga)

Sąveikavusių su medžiaga fotonų skaičius, kai lygiagretus spinduliuotės pluoštas pereina per nykstamo storio medžiagos sluoksnį, kurio storis dx :

$$-dN = \mu N dx ;$$

čia N yra kritusių į sluoksnį fotonų skaičius, o μ yra **ilginis silpimo koeficientas**.

μ priklauso nuo Z ir nuo fotonų energijos spektro. Vienos energijos fotonų atveju μ yra vienodas visuose pluošto taškuose, todėl suintegravus išvedama:

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} .$$

Masinis silpimo koeficientas:

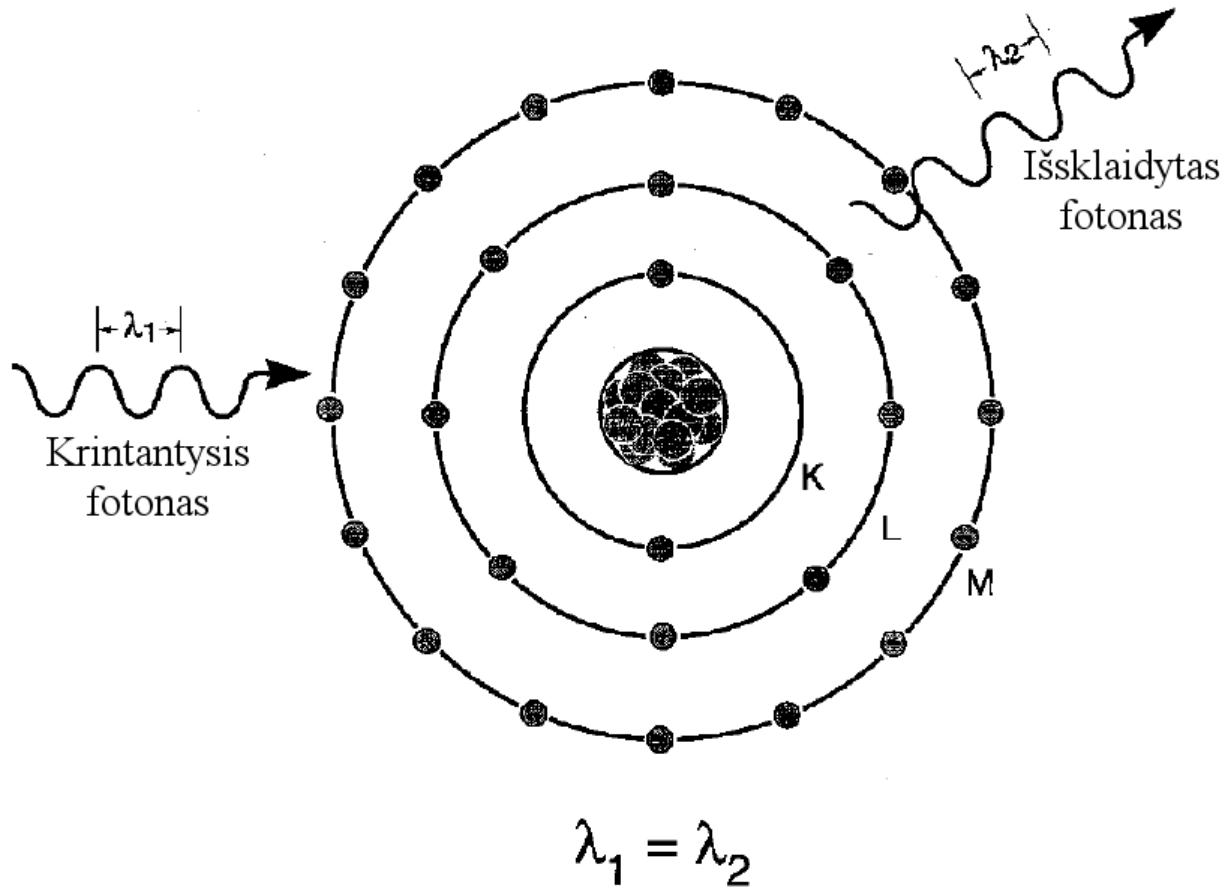
$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} ,$$

čia ρ yra medžiagos tankis. μ_m priklauso tik nuo medžiagos cheminės sudėties.

Jeigu yra galimi kelių rūšių sąveikos vyksmai, tada silpimo koeficientas yra suma koeficientų, atitinkančių kiekvieną iš tų vyksmų.

2.1.1. Reilėjaus sklaida

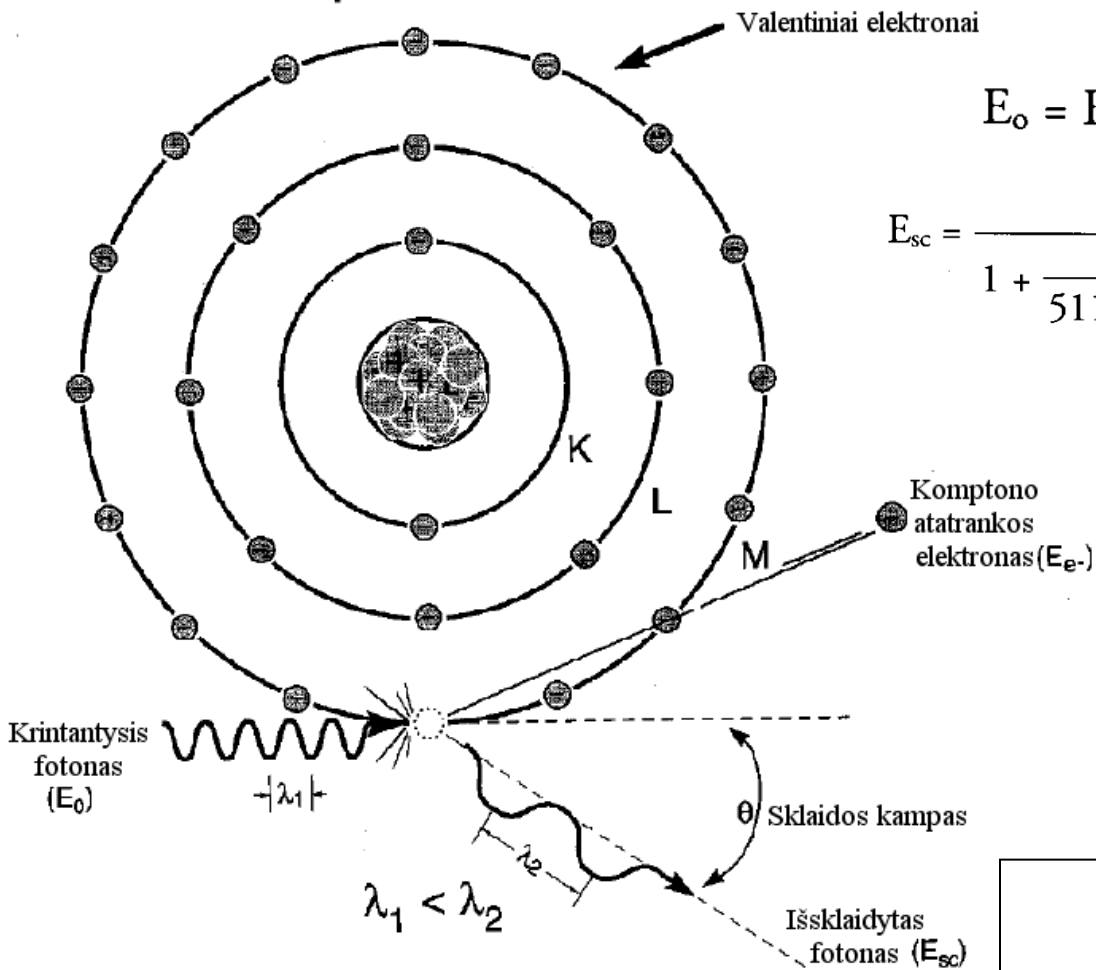
Reilėjaus sklaida (angl. *Rayleigh scattering*) – tai tokia sklaida, kai fotoną išsklaido atomas ir nepakinta fotono dažnis (tuo pačiu nepakinta ir fotono energija bei bangos ilgis).



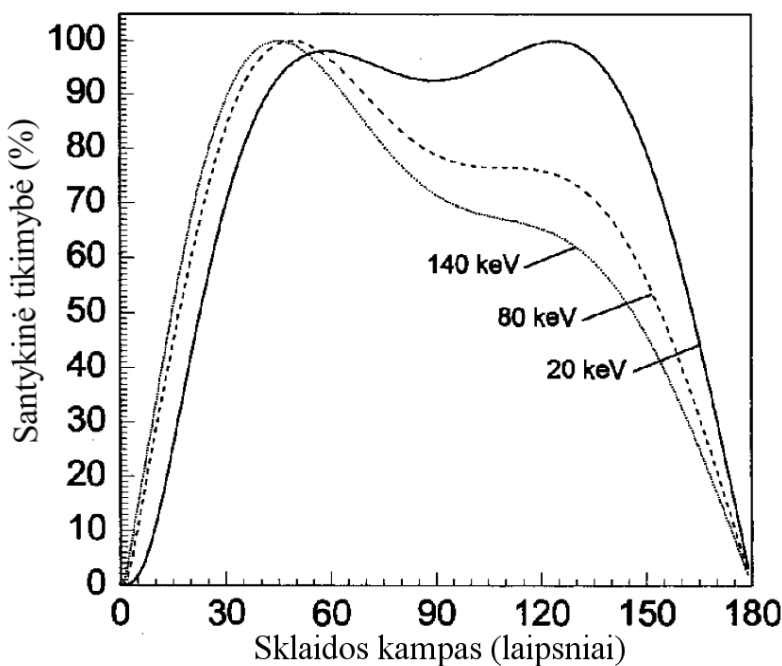
2.1 pav. Reilėjaus sklaida

2.1.2. Komptono sklaida

Komptono sklaida (angl. *Compton scattering*) – tai tokia sklaida, kai fotoną išsklaido atomas ir sumažėja fotono dažnis bei energija (padidėja fotono bangos ilgis). Dalį fotono energijos gauna **Komptono atatrunkos elektronas**, kuris išlekia iš atomo.



2.2 pav. Komptono sklaida



$\mu_{\text{Kompt.}} \sim \rho,$

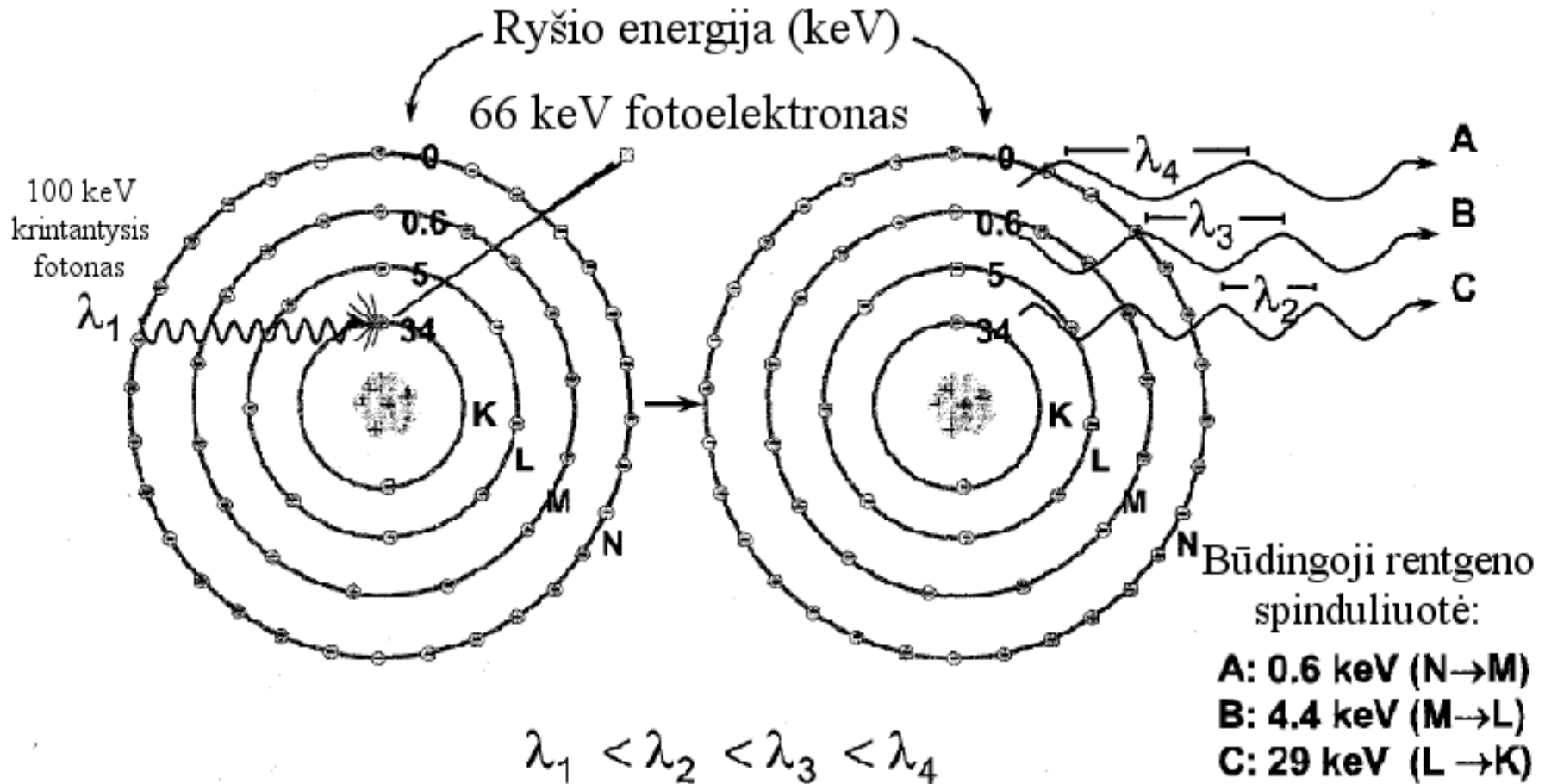
t. y. $\mu_{\text{m(Kompt.)}}$ apytiksliai vienodas skirtingoms medžiagoms

Didėjant $h\nu$, $\mu_{\text{Kompt.}}$ didėja. Kai $h\nu > 10 \text{ keV}$, Komptono sklaidos tikimybė yra didesnė negu Reilėjaus sklaidos.

2.3 pav. Komptono sklaida yra **anizotropinė**, t. y. sklaidos intensyvumas skirtingomis kryptimis yra skirtingas. Čia pavaizduota Komptono sklaidos įvairiais kampais santykinės tikimybės priklausomybė nuo sklaidos kampo

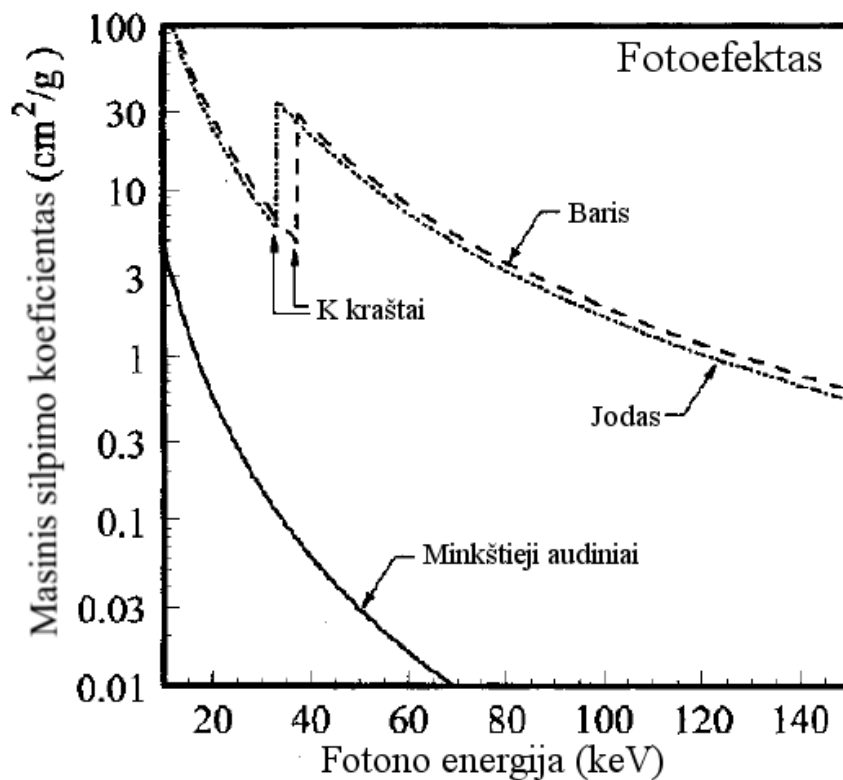
2.1.3. Fotoefektas

Fotoelektrinė sugertis (trumpiau – *fotoefektas*) – tai tokia fotono sąveika su atomu, kai fotonas nustoja egzistuoti, o iš atomo išleikia elektronas (*fotoelektronas*). Dažniausiai iš atomo išlaisvinami vidiniai – K sluoksnio elektronai. Kadangi dėl fotoefekto atsiranda vakansijos vidiniuose elektronų sluoksniuose, tai fotoefektą lygi *būdingoji rentgeno spinduliuotė*. Ji atsiranda, kai į laisvą vietą elektronų sluoksnyje pereina elektronas iš aukštesnio sluoksnio.



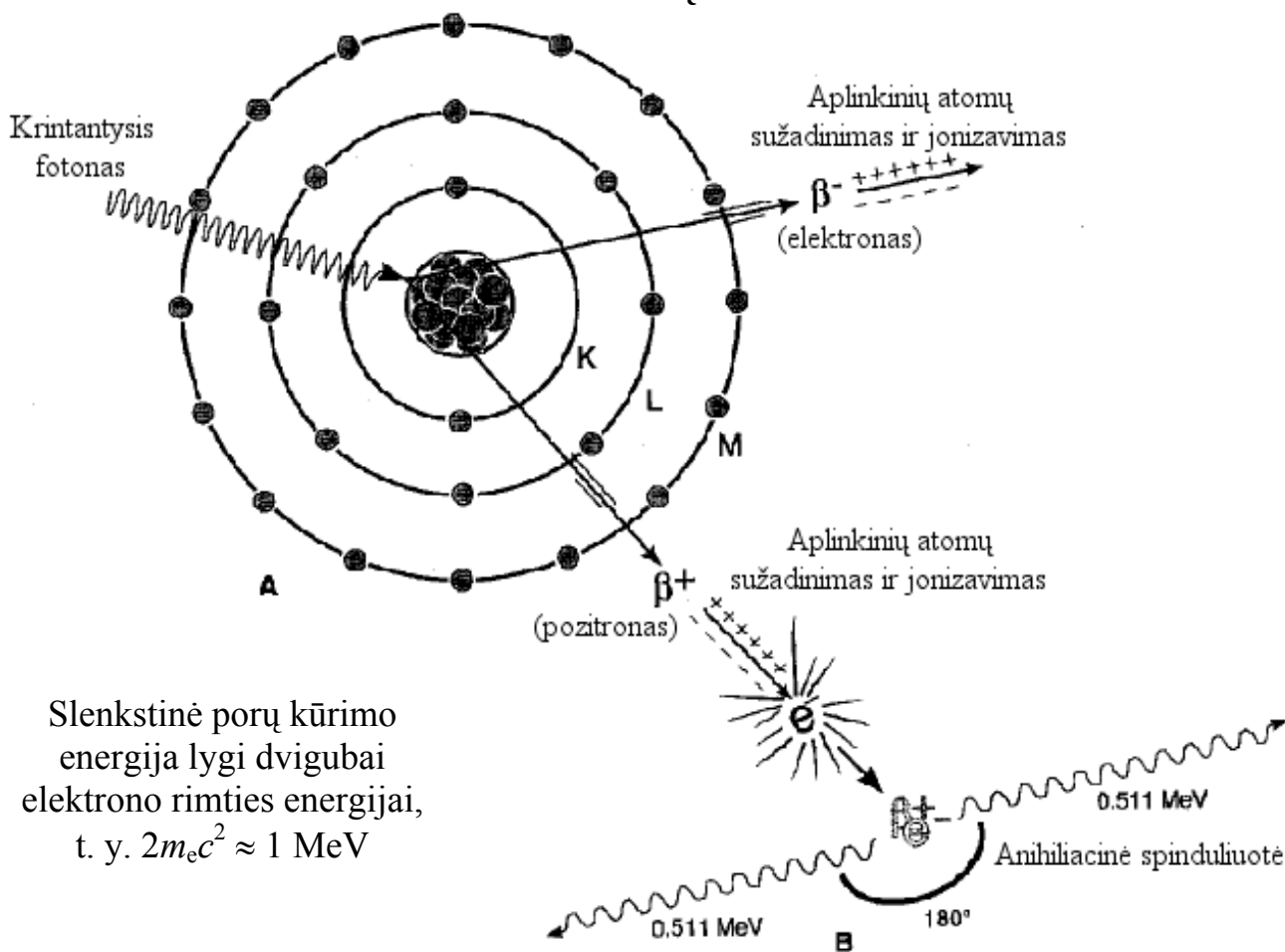
2.4 pav. Fotoefektas

$$\mu_m(\text{fotoef.}) \sim Z^3 / (h\nu)^3$$



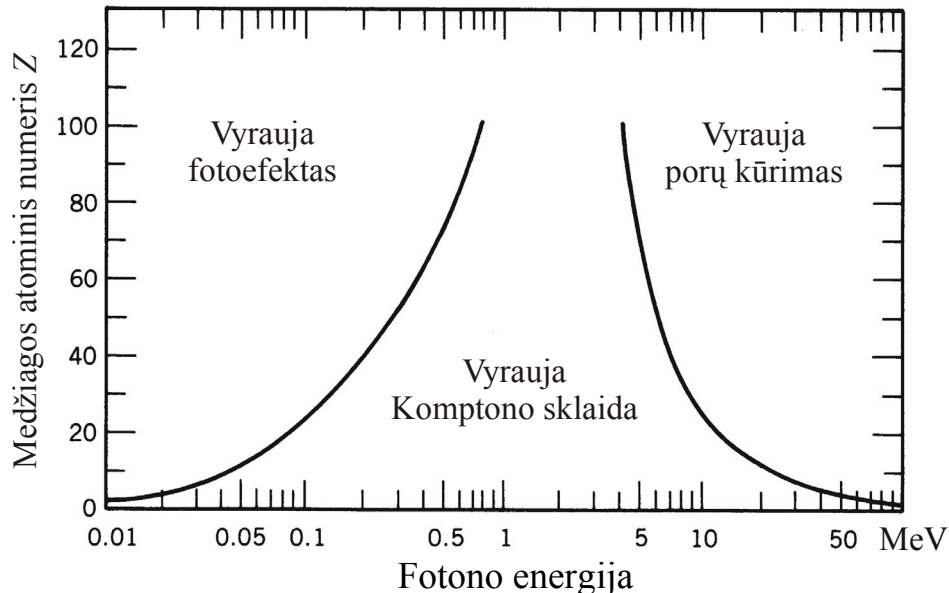
2.5 pav. Fotoelektrinio masinio silpimo koeficiento priklausomybė nuo fotono energijos, kai sugėriklis yra biologinis audinys ($Z = 7$), jodas ($Z = 53$) ir baris ($Z = 56$)

2.1.4. Porų kūrimas



Slenkstinė porų kūrimo energija lygi dvigubai elektrono rimties energijai, t. y. $2m_e c^2 \approx 1 \text{ MeV}$

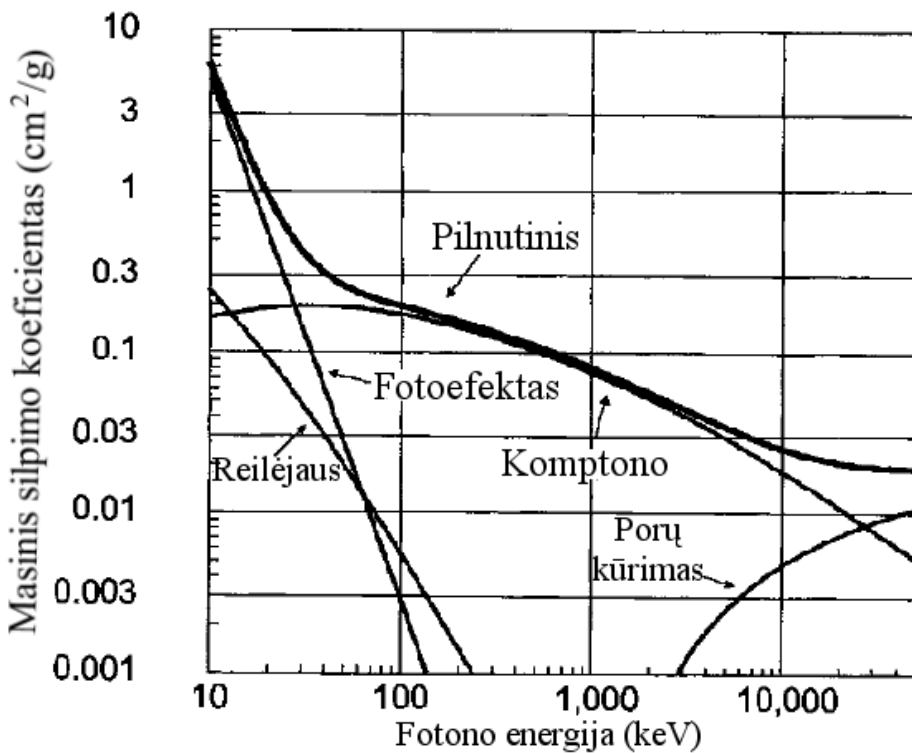
2.6 pav. Porų kūrimas



2.7 pav. Įvairių rentgeno spinduliuotės sąveikos su medžiaga mechanizmų santykinė svarba

2.2. Rentgeno spinduliuotės silpimas medžiagoje

Minkštųjų audinių masiniai silpimo koeficientai

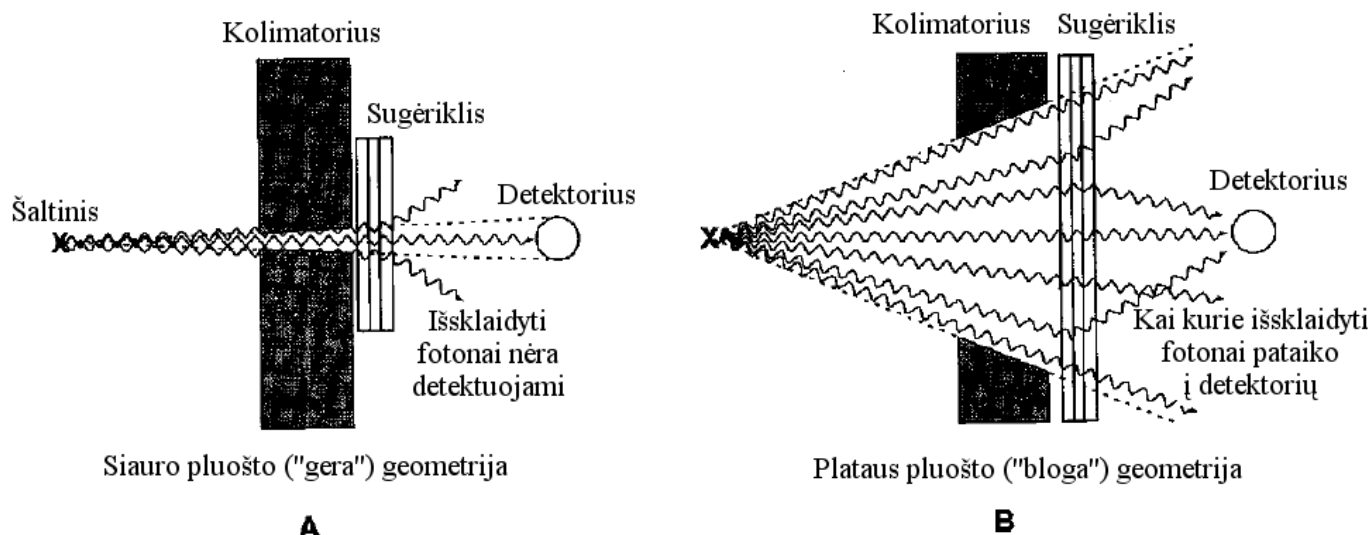


2.8 pav. Silpimo koeficientų, kurie atitinka Reilėjaus sklaidą, fotoelektrinę sugertį, Komptono sklaidą ir porų kūrimą, priklausomybė nuo energijos, kai sugėriklis yra biologinis audinys ($Z = 7$)

Pusėjimo storis (angl. *half value layer*, *HVL*).

Jeigu spinduliuotė yra monoenerginė, o matavimai atliekami naudojant siauro pluošto geometriją, tada HVL ir μ vertės yra vienareikšmiškai susijusios tarpusavyje:

$$\begin{aligned}
 N_0/2 &= N_0 e^{-\mu(\text{HVL})} \\
 1/2 &= e^{-\mu(\text{HVL})} \\
 \ln(1/2) &= \ln e^{-\mu(\text{HVL})} \\
 -0.693 &= -\mu(\text{HVL}) \\
 \text{HVL} &= 0.693/\mu
 \end{aligned}$$



2.9 pav. A: Siauro pluošto (arba „gera“) geometrija reiškia, kad detektorius pasiekia tik fotonai, kurie nesąveikavo su medžiaga. **B:** Plataus pluošto (arba „bloga“) geometrijos sąlygomis kai kurie išsklaidytieji fotonai gali pasiekti detektorius.

Vidutinis laisvasis kelias (angl. *mean free path, MFP*):

$$\text{MFP} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0.693/\text{HVL}} = 1.44 \text{ HVL}$$

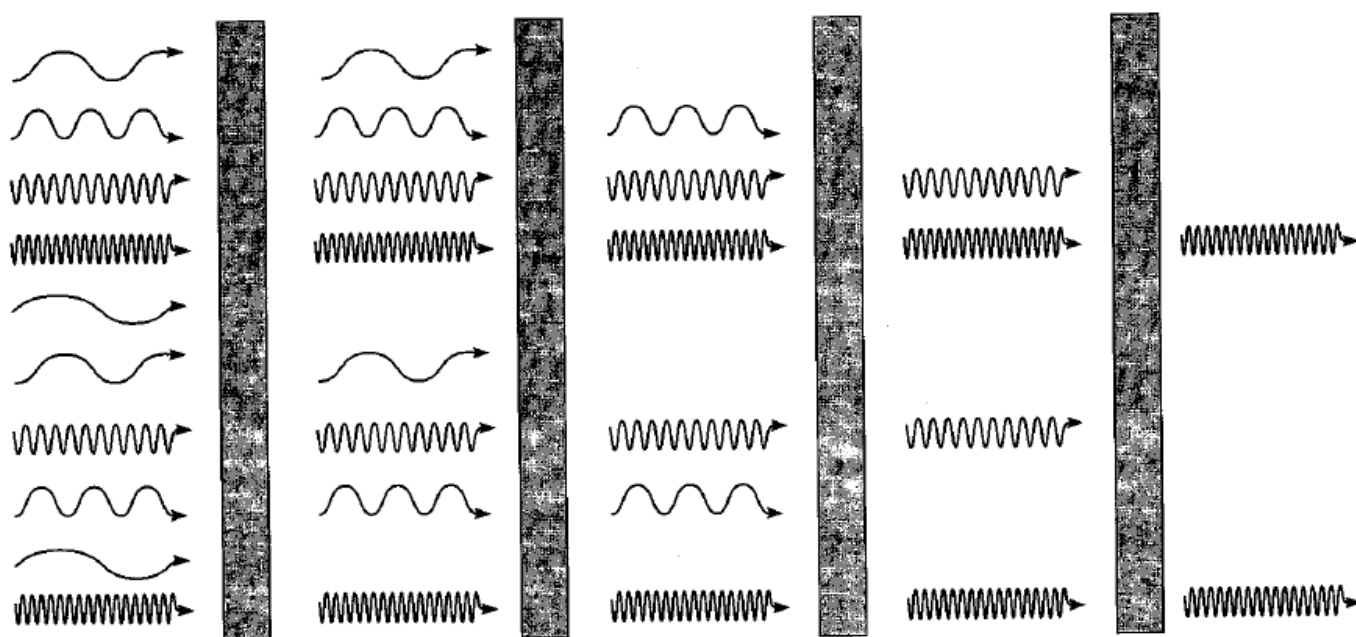
Efektinė energija – tai monoenerginio (t. y. vienos energijos fotonų) pluošto, kurio HVL yra toks pats kaip duotojo polienerginio (t. y. įvairių energijų fotonų) pluošto, energija.

Aluminio HVL ir efektinės energijos sąryšis

HVL (mm Al)	Efektinė energija (keV)
0.26	14
0.39	16
0.55	18
0.75	20
0.98	22
1.25	24
1.54	26
1.90	28
2.27	30
3.34	35
4.52	40
5.76	45
6.97	50
9.24	60
11.15	70
12.73	80
14.01	90
15.06	100

Pluošto „kietėjimo“ efektas

Vidutinė fotono energija ir HVL didėja
 →
 Fotonų srauto tankis („intensyvumas“) mažėja



2.10 pav. Vidutinė pluošto energija didėja (t. y. pluoštas „kietėja“), nes mažos energijos fotonai pereina mažesni storį, negu didelės energijos fotonai

2.3. Rentgeno spinduliuotės energijos sugertis medžiagoje

2.3.1. Fotonų arba energijos įtėkis, srautas, srauto tankis

$$\text{Fotonų įtėkis: } \Phi = \frac{\text{Fotonų skaičius}}{\text{Plotas}}$$

$$\text{Energijos įtėkis: } \Psi = \frac{\text{Energija}}{\text{Plotas}} \equiv \Phi \cdot E$$

$$\text{Fotonų srautas: } I = \frac{\text{Fotonų skaičius}}{\text{Laikas}}$$

$$\text{Energijos srautas: } I_E = \frac{\text{Energija}}{\text{Laikas}}$$

$$\text{Fotonų srauto tankis: } \dot{\Phi} = \frac{\text{Fotonų skaičius}}{\text{Plotas} \cdot \text{Laikas}}$$

$$\text{Energijos srauto tankis: } \dot{\Psi} = \frac{\text{Energija}}{\text{Plotas} \cdot \text{Laikas}} \equiv \dot{\Phi} \cdot E$$

2.3.2. Kerma ir sugertoji dozė

Energijos perdava:

Fotonų energija medžiagoje iš pradžių virsta tos medžiagos elektronų bei antrinių (būdingosios spinduliuotės) fotonų kinetine energija.

Energijos sugertis:

Tie elektronai ir antriniai fotonai irgi sąveikauja su ta pačia medžiaga ir perduoda jai savo energiją. Šis energijos perdavimas yra kelių stadijų vyksmas. Jis baigiasi, kai vėl nusistovi šiluminė pusiausvyra (medžiagos temperatūra padidėja).

Dalį energijos greitieji elektronai gali išspinduliuoti fotonų pavidalu. Fotonai yra palyginti skvarbios dalelės, todėl jie gali būti sugerti toli nuo savo atsiradimo vietos. Todėl energijos kiekis, kuris buvo *perduotas* tam tikrai medžiagos sričiai, yra didesnis negu *toje pačioje srityje sugertas* energijos kiekis. Šiems dviems energijos kiekiams nusakyti naudojami du dozimetriniai dydžiai – atitinkamai kerma ir sugertoji dozė.

„Kerma“: „*kinetic energy released in matter*“ – energijos kiekis, kurį krintantieji fotonai perdavė medžiagos elektringosioms dalelėms (elektronams), esančioms vienetinės masės srityje. Kermos apskaičiavimas:

$$K \equiv \frac{\Delta E_{\text{kin}}}{\Delta m} = \Psi \left(\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \right)_E,$$

čia μ_{tr} yra **energijos perdavos koeficientas**.

$\mu_{\text{tr}} < \mu$, nes kai kuriuose sąveikos vyksmuose fotonai netenka tik dalies energijos.

Sugertoji dozė yra energijos kiekis, kuris buvo *sugertas* vienetinės masės srityje, dėl *tos pačios srities* apšvitinimo jonizuojančiąja spinduliuote.

$$D \equiv \frac{\Delta E}{\Delta m} = \Psi \left(\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_E$$

čia μ_{en} yra **energijos sugerties koeficientas**.

$\mu_{\text{en}} < \mu_{\text{tr}}$, nes dalis perduotos energijos gali būti sugerta už apšvitintos srities ribų. Tačiau kai krintančiųjų fotonų energija yra palyginti maža (10 keV eilės), $\mu_{\text{en}} \approx \mu_{\text{tr}}$ ir $D \approx K$.

Kermos ir sugertosios dozės SI vienetas yra grėjus: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} / \text{kg}$. Mažesnis vienetas yra radas: $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$.

2.3.3. Ekspozicinė dozė

Ekspozicinė dozė – tai pilnutinis vieno ženklo krūvis, kuris atsirado oro masės vienetė dėl oro molekulių jonizavimo, veikiant orą jonizuojančiąja elektromagnetine spinduliuote:

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

Nesisteminis ekspozicinės dozės vienetas yra **rentgenas**:

$$1R = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Rentgeno spinduliuotės sugertoji dozė minkštuosiuose audiniuose, išreikšta radais, yra apytiksliai lygi ekspozicinei dozei, išreikštai rentgenais.

2.3.4. Sugertoji energija, lygiavertė dozė ir efektinė dozė

Ilginė energijos perdava („IEP“; angl. „linear energy transfer“, LET) – tai yra energijos kiekis, kurį krintančioji dalelė perdavė artimiems atomams ir molekulėms vienetinio ilgio kelyje. Matavimo vienetas – keV/μm. Didelės IEP spinduliuotė nepataisomai pažeidžia daugiau ląstelių, negu toks pats sugertas energijos kiekis mažos IEP spinduliuotės. Santykinį nepataisomai pažeistų ląstelių kiekį nusako **spinduliuotės svorinis daugiklis**.

Įvairių rūšių spinduliuotės svoriniai daugikliai

Spinduliuotės rūšis	Energija	Svorinis daugiklis w_R
Fotonai, elektronai	Visos energijos	1
Neutronai	< 10 keV	5
	10 – 100 keV	10
	100 keV – 2 MeV	20
	2 – 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protonai	< 20 MeV	5
α dalelės, dalijimosi skeveldros, sunkieji branduoliai		20

Lygiavertė dozė:

$$H = w_R D$$

Lygiavertės dozės SI vienetas yra sivertas.

Jonizuojančiosios spinduliuotės poveikio žmogui pasekmės priklauso ne vien nuo sugertosios dozės ir spinduliuotės rūšies, bet ir nuo to, kokia žmogaus kūno dalis buvo paveikta spinduliuotės. **Efektinė dozė** yra lygi lygiaverčių dozių, padaugintų iš atitinkamų audinio svorinių daugiklių, sumai:

$$H_{ef} = \sum_a w_a H_a$$

Atskirų žmogaus kūno organų audinių svoriniai daugikliai

Audinys	Audinio svorinis daugiklis w_a
Lytiniai organai	0,20
Raudonieji kaulų smegenys	0,12
Storoji žarna	0,12
Plaučiai	0,12
Skrandis	0,12
Šlapimo pūslė	0,05
Krūtinė	0,05
Kepenys	0,05
Stemplė	0,05
Skydinė liauka	0,05
Oda	0,01
Kaulų paviršius	0,01
Likusioji kūno dalis	0,05

3. Projekcinės rentgeno radiografijos metodai ir įrenginiai

3.1. Įvadas

Radiografija – spinduliuotės panaudojimas kuriant objektų atvaizdus.

Rentgeno spinduliuotės intensyvumas medžiagoje mažėja eksponentiškai:

$$I(l) = I_0 \exp(-\mu l).$$

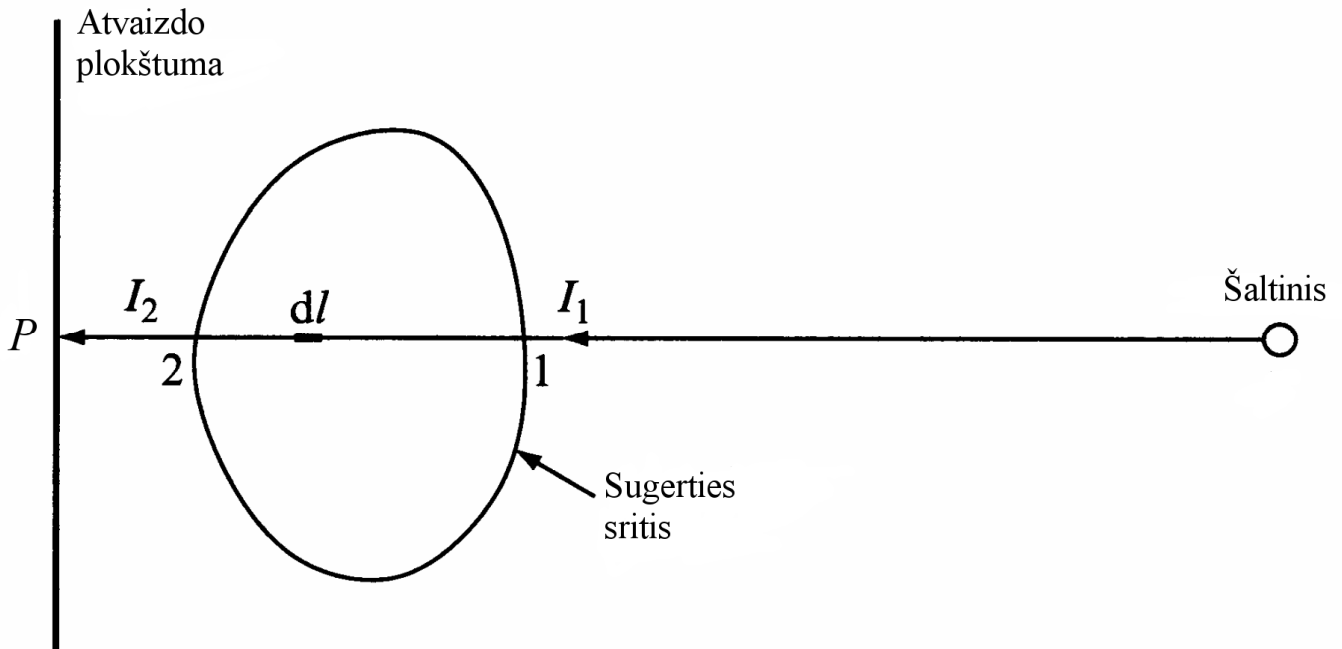
Jeigu μ kinta išilgai spinduliuotės sklidimo krypties, tada

$$I_2 = I_1 \exp\left(-\int_1^2 \mu dl\right)$$

(žr. pav.).

$$\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = \int_1^2 \mu dl.$$

Kiekvienas atvaizdo taškas suteikia informaciją apie silpimo koeficiento integralą išilgai spindulio, kuris pataiko į tą tašką.



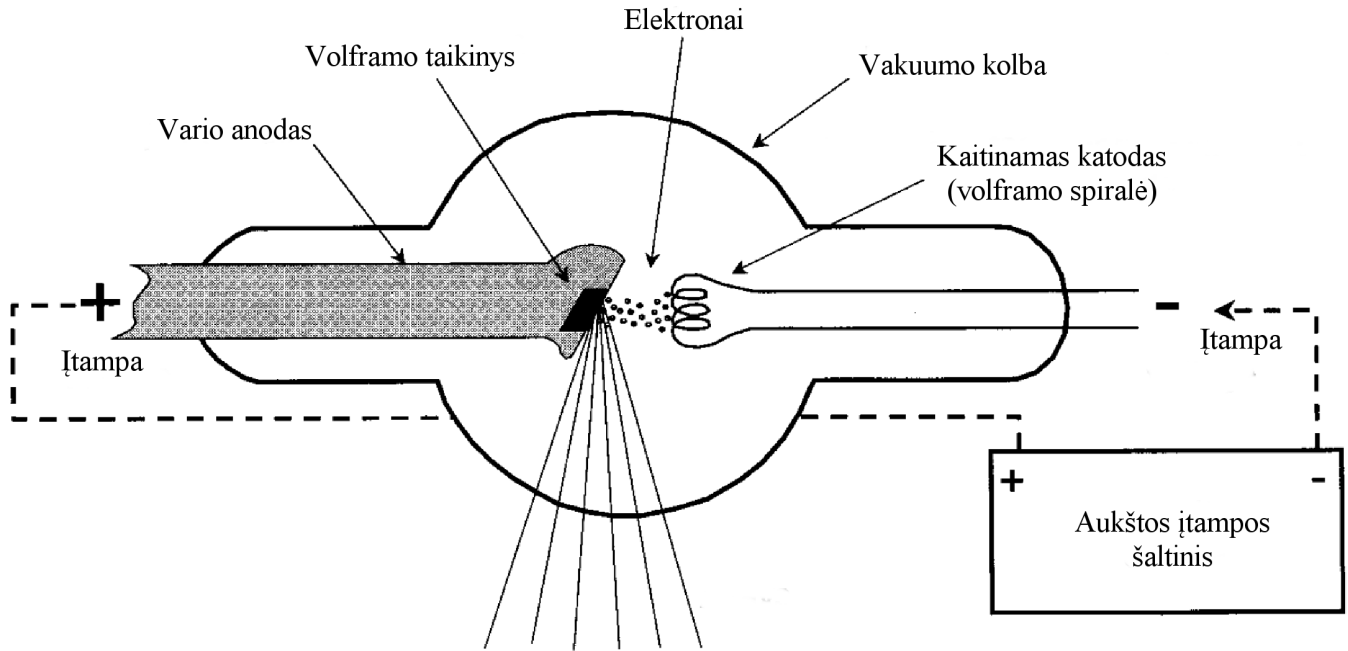
3.1 pav. Projekcinio atvaizdo formavimas naudojant išorinį spinduliuotės šaltinį. Parodytas spindulys, kuris išeina iš spinduliuotės šaltinio ir pataiko į atvaizdo plokštumos tašką P . I_1 ir I_2 yra atitinkamai krintančiosios ir praėjusios spinduliuotės intensyvumai taškuose 1 ir 2.

Rentgeno radiografijos variantai:

1. **Projekcinė rentgeno radiografija**: Suformuojamas dvimatis atvaizdas ant fotografinės plėvelės.
2. **Fluoroskopija**: Dvimatis atvaizdas formuojamas ant specialaus sluoksnio, kuris rentgeno spinduliuotės fotonus paverčia regimosios šviesos blyksniais.
3. **Kompiuterinė rentgeno tomografija**: naudojama daug ekspozicijų, kurios skiriasi spinduliuotės sklidimo kryptimi. Paskui atkuriamas trimatis objekto vaizdas.

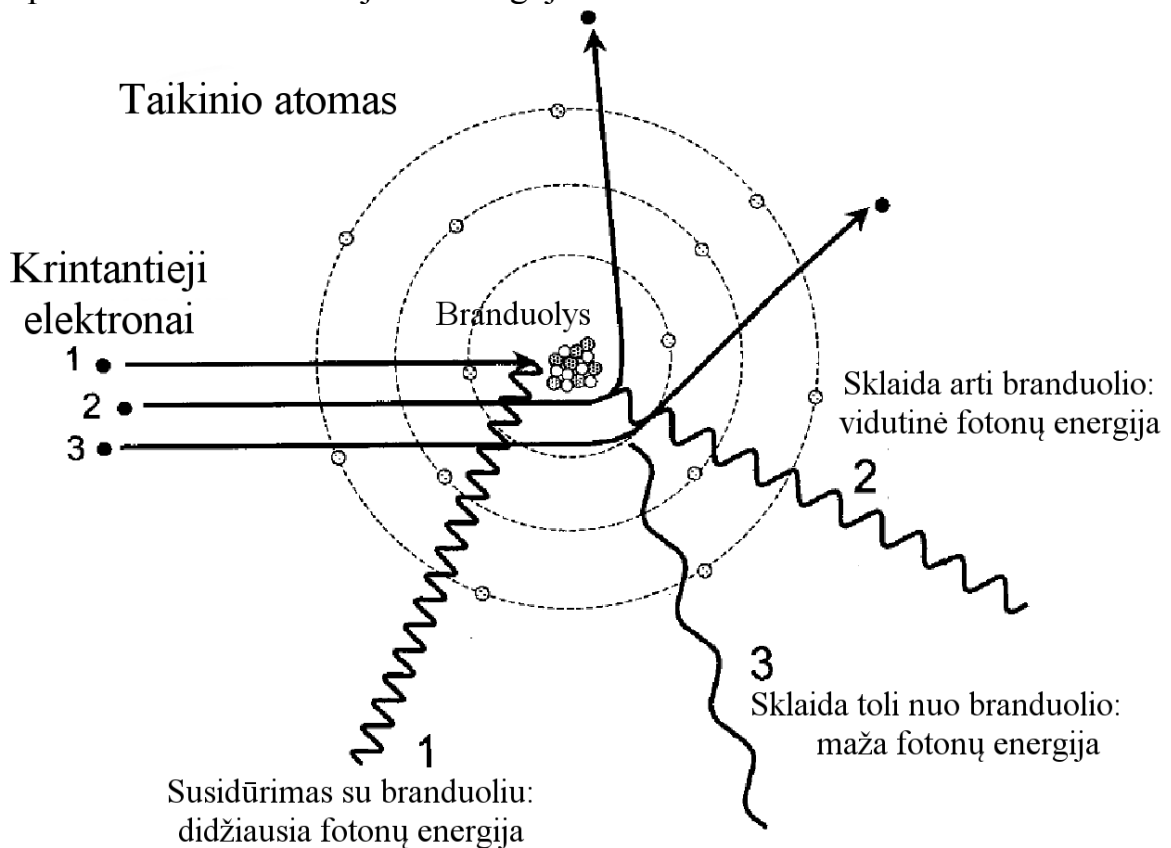
3.2. Rentgeno spinduliuotės generavimo fizikiniai principai ir spektras

Pagrindinė rentgeno aparato dalis yra *rentgeno vamzdis*.



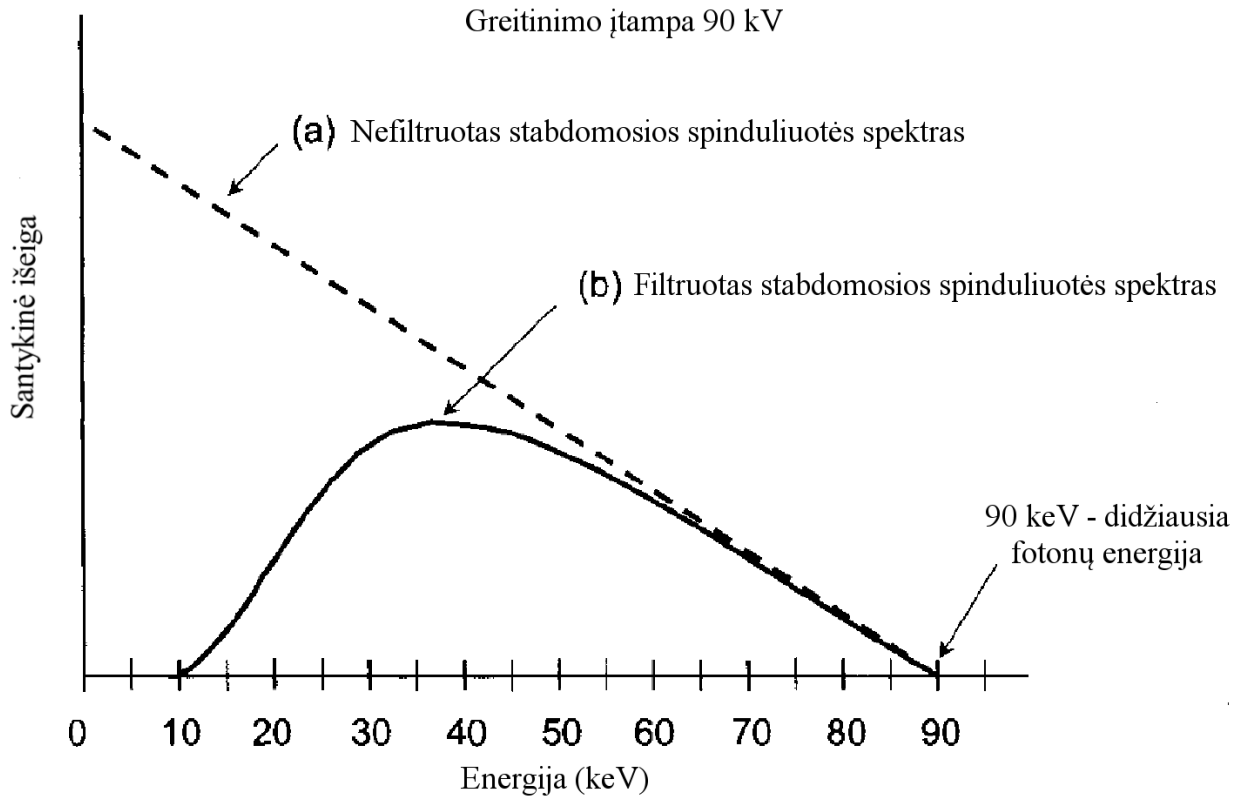
3.2 pav. Paprasčiausia rentgeno spinduliuotės generavimo sistema

Elektronams smogiant į anodo medžiagos atomus, yra sužadinama dviejų rūšių rentgeno spinduliuotė: stabdomoji ir būdingoji.



3.3 pav. Stabdomosios rentgeno spinduliuotės atsiradimas

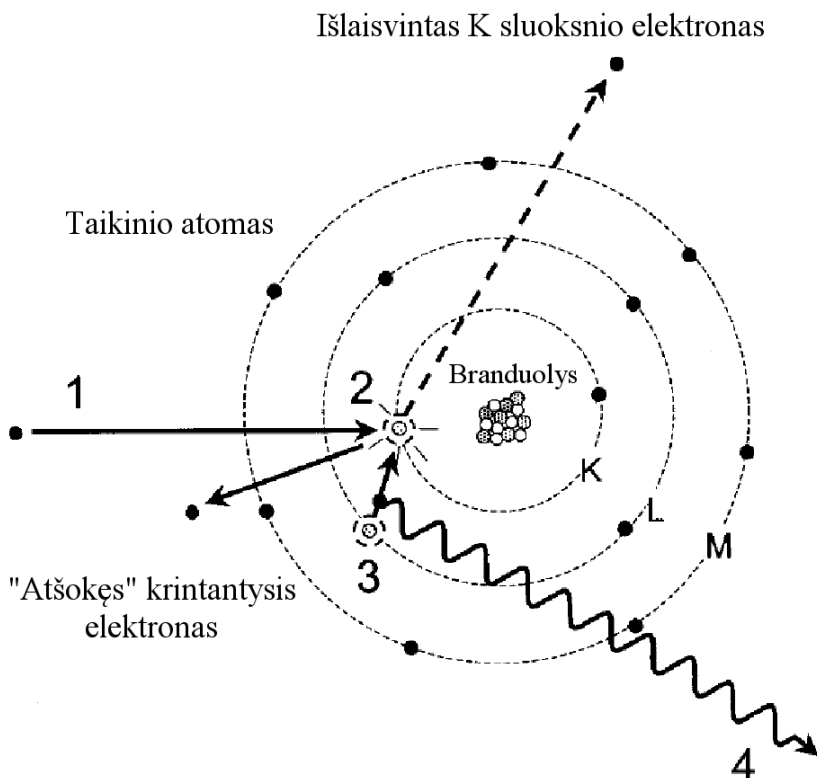
Stabdomosios rentgeno spinduliuotės energijos spektras yra tolydus (ištininis).



3.4 pav. Stabdomosios rentgeno spinduliuotės energijos pasiskirstymas, kai greitinimo įtampa yra 90 kV.

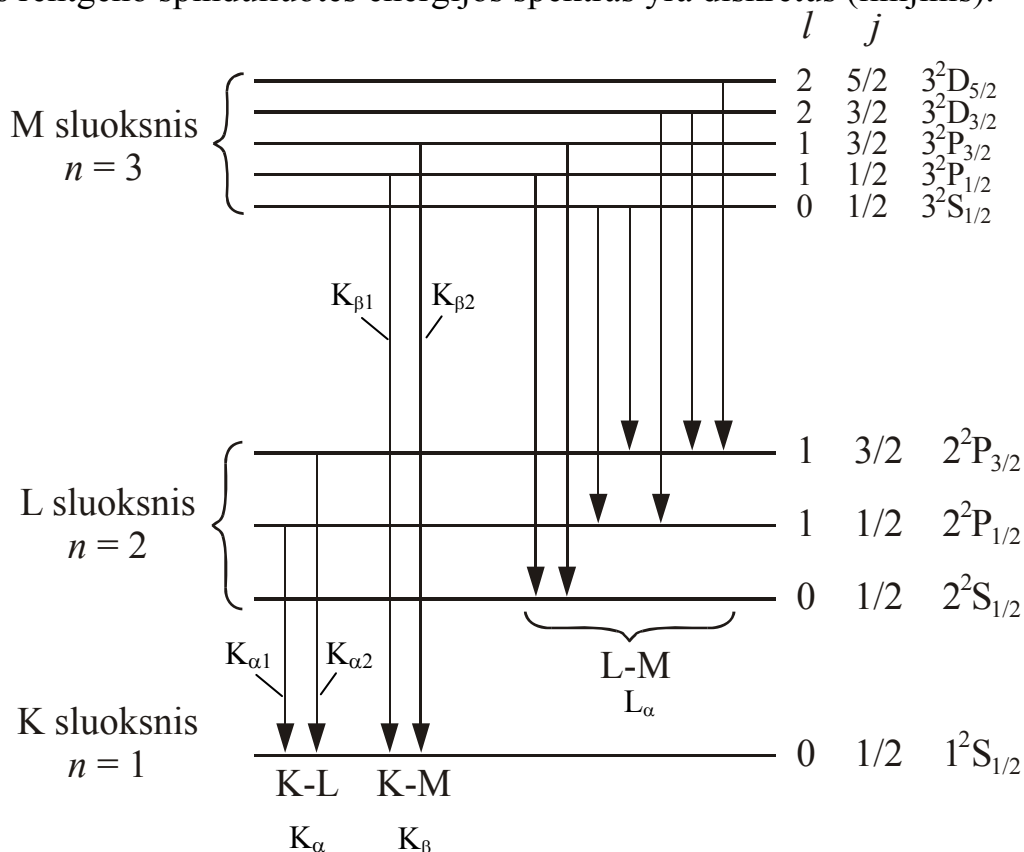
$$\frac{\text{Elektrono energijos sumažėjimas dėl stabdomosios spinduliuotės}}{\text{Elektrono energijos sumažėjimas dėl atomų sužadavimo ir jonizavimo}} = \frac{E_k Z}{820000}$$

čia E_k yra elektrono kinetinė energija (keV).

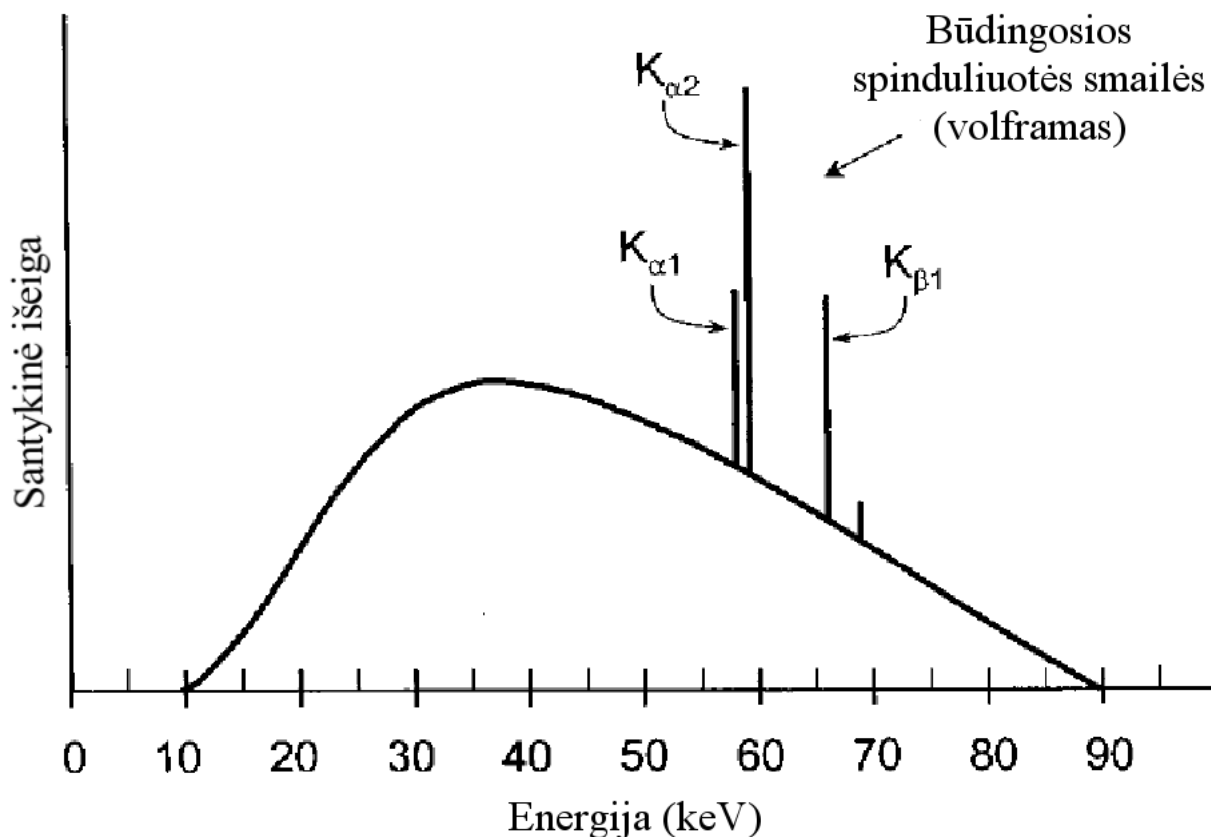


3.5 pav. Būdingosios rentgeno spinduliuotės generavimo elektroniniuose rentgeno vamzdžiuose fizikinis mechanizmas

Būdingosios rentgeno spinduliuotės energijos spektras yra diskretus (linijinis).



3.6 pav. Būdingosios rentgeno spinduliuotės spektro smulkioji sandara



3.7 pav. Filtruotas stabdomosios rentgeno spinduliuotės fotonų energijos spektras ir būdingosios spinduliuotės spektras, kai anodo medžiaga yra volframas, o rentgeno vamzdžio greitinimo įtampa yra 90 kV

3.1 lentelė. Kai kurių medžiagų, iš kurių dažnai gaminami rentgeno vamzdžių anodai, elektronų ryšio energijos

Elektronų sluoksnis	Volframas	Molibdenas	Rodis
K	69.5	20.0	23.2
L	12.1/11.5/10.2	2.8/2.6/2.5	3.4/3.1/3.0
M	2.8–1.9	0.5–0.4	0.6–0.2

3.2 lentelė. Kai kurių medžiagų, iš kurių dažnai gaminami rentgeno vamzdžių anodai, intensyviausių K linijų fotonų energijos

Linijos žymuo	Volframas	Molibdenas	Rodis
$K_{\alpha 1}$	59.32	17.48	20.22
$K_{\alpha 2}$	57.98	17.37	20.07
$K_{\beta 1}$	67.24	19.61	22.72

Elemento būdingosios spinduliuotės spektras nepriklauso nuo to, ar elementas yra laisvas, ar cheminio junginio sudėtyje. Pvz., jodo atomo ir jodo molekulės būdingieji rentgeno spektrai yra vienodi. Tuo būdingieji rentgeno spektrai skiriasi nuo optinių.

3.3. Mozlio dėsnis

Vandeniliškojo atomo pilnutinė mechaninė energija:

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \approx -\frac{Z^2}{n^2} \cdot 13,6 \text{ eV} \quad (n = 1, 2, \dots);$$

čia Ze yra branduolio krūvis, $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ yra elektrinė konstanta, $m = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ yra elektrono masė, n yra elektronų sluoksnio numeris. Fotono, kuris emituojamas L elektronui pereinant į vakansiją K sluoksnyje, energija lygi

$$h\nu_{K-L} = E_L - E_K = Z^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \cdot 13,6 \text{ eV}.$$

Jeigu atomas turi daugiau negu vieną elektroną, tada reikia atsižvelgti į elektronų tarpusavio sąveiką („ekranavimą“). Atitinkamai branduolio krūvio skaičių Z reikia pakeisti efektyviu krūvio skaičiumi $Z - \sigma_K$, kur σ_K yra K sluoksnio **ekranavimo konstanta**:

$$h\nu_{K-L} = (Z - \sigma_K)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) \cdot 13,6 \text{ eV}.$$

Iš čia $K_{\alpha 1}$ ir $K_{\alpha 2}$ linijų (taip pat vadinamų „K-L linijomis“) vidutinis bangos skaičius

$$k_{K-L} \equiv \frac{1}{\lambda_{K-L}} = \frac{\nu}{c} = \frac{13,6 \text{ eV}}{hc} (Z - \sigma_K)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = R(Z - \sigma_K)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right),$$

čia R yra **Rydbergo konstanta**, kuri apibūdinama šitaip:

$$R = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \approx \frac{13,6 \text{ eV}}{hc} \approx 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}.$$

Analogiškai:

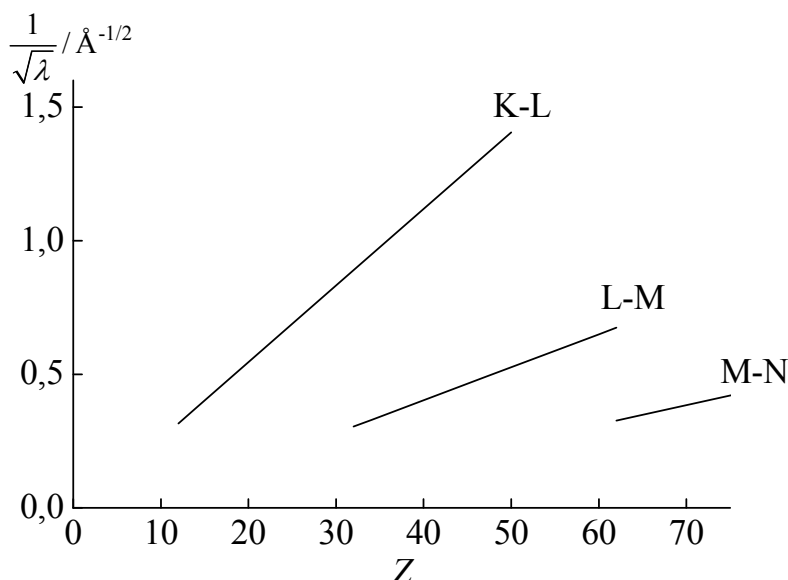
$$k_{K-M} = \frac{1}{\lambda_{K-M}} = R(Z - \sigma_K)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right); \quad (3.2.6)$$

$$k_{L-M} = \frac{1}{\lambda_{L-M}} = R(Z - \sigma_L)^2 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right); \quad (3.2.7)$$

Mozlio dėsnis:

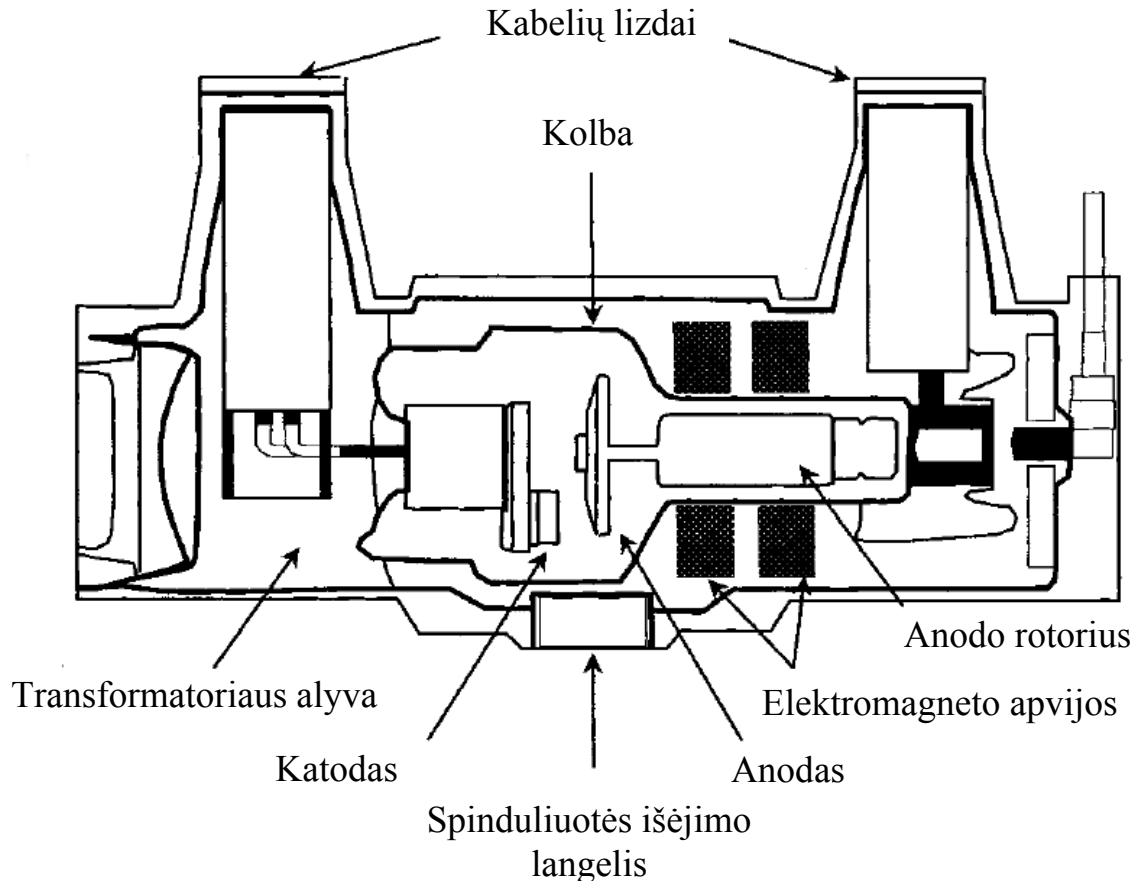
$$Z - \sigma = A \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A\sqrt{k}; \quad (3.2.8)$$

čia K-L linijos $A = 1/\sqrt{R[(1/1^2) - (1/2^2)]}$, L-M linijos $A = 1/\sqrt{R[(1/2^2) - (1/3^2)]}$ ir t. t.



3.8 pav. Mozlio diagramos

3.4. Medicininėje radiografijoje naudojami rentgeno vamzdžiai



3.9 pav. Pagrindinės šiuolaikinio rentgeno vamzdžio dalys

Pagrindiniai trys rentgeno vamzdžio parametrai, kurie lemia spinduliuotės pluošto fotonų energiją ir skaičių, yra:

- vamzdžio greitinimo įtampa (20 kV – 150 kV),
- vamzdžio srovė (fluoroskopija: 1 mA – 5 mA; projekcinė radiografija: 100 mA – 1000 mA),
- ekspozicija, t. y. apšvitinimo trukmė (projekcinė radiografija: < 0,1 s).

Židinio sritis (angl. *focal spot*) – anodo paviršiaus sritis, į kurią pataiko elektronai.

Nuotėkio spinduliuotė į aplinką išeina ne pro langelį, o pro kitas vamzdžio vietas.

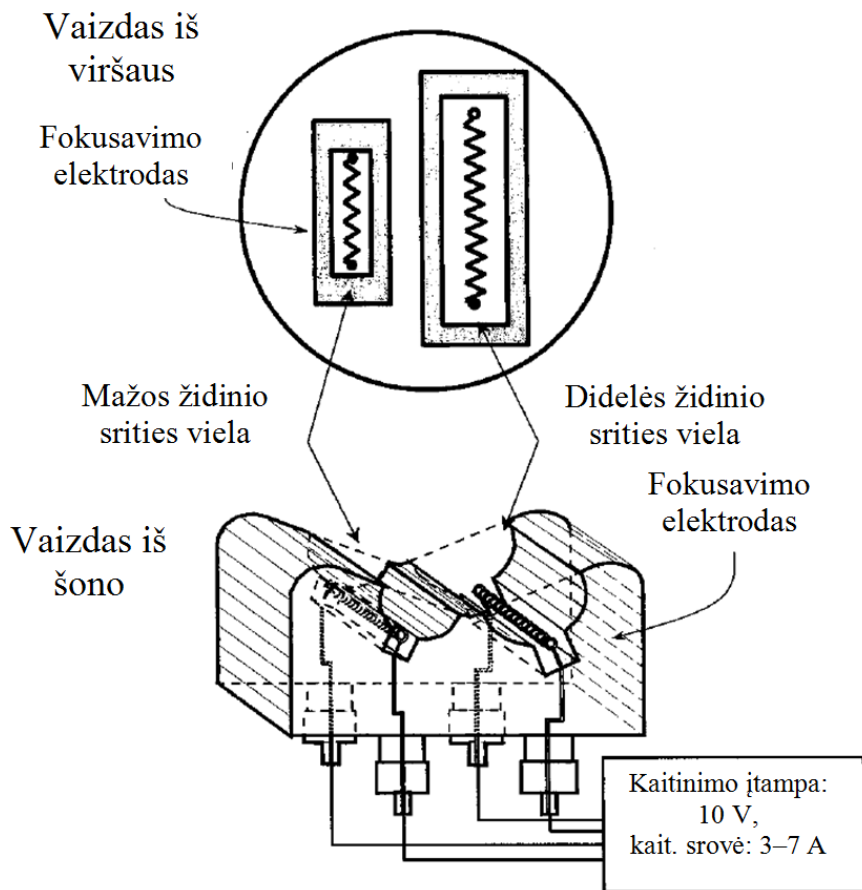
3.4.1. Katodas

Katodas yra volframo siūlas, kurią supa fokusavimo elektrodas.

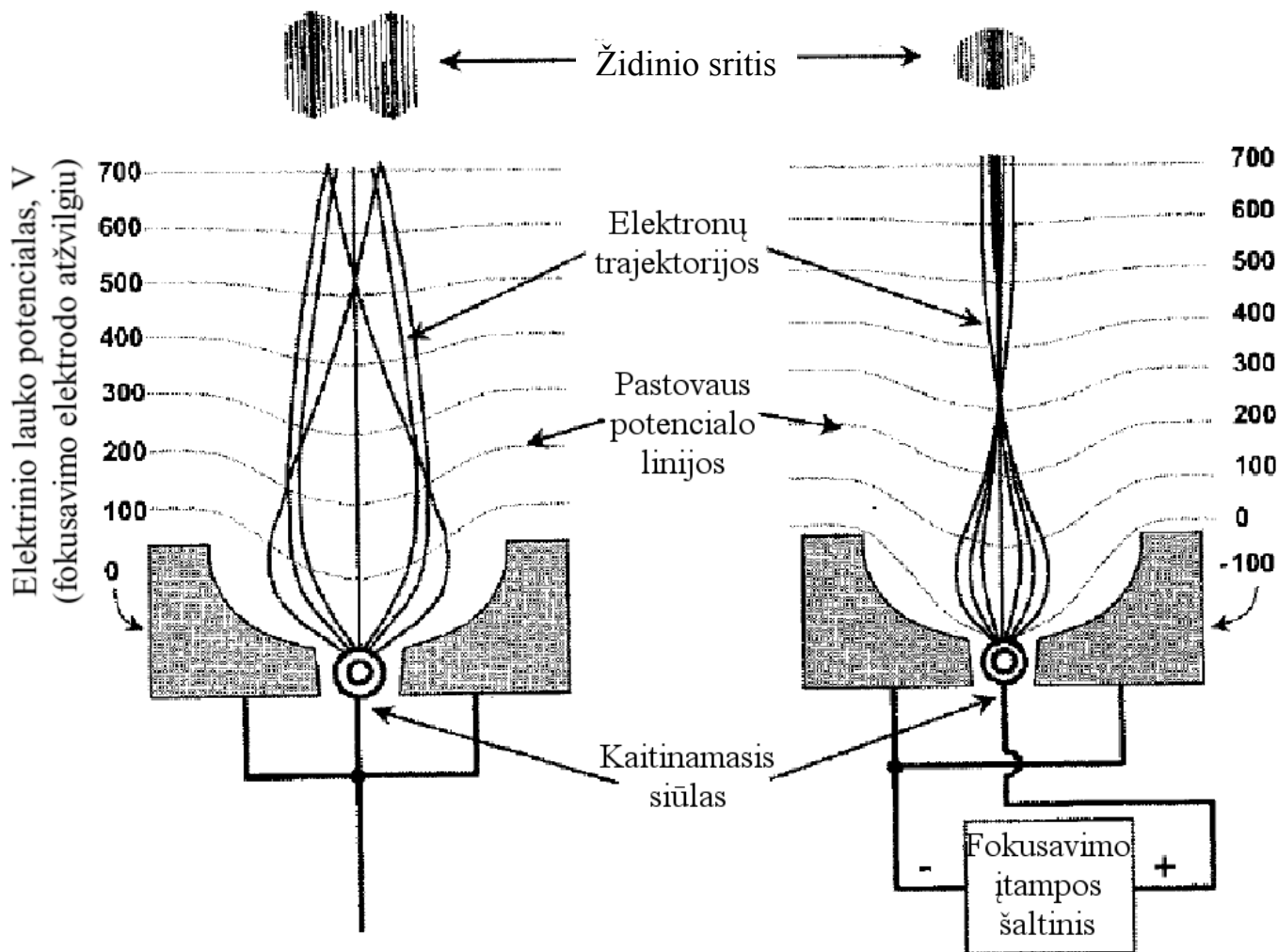
Volframo siūlu teka elektros srovė, todėl jis įkaista ir pradeda spinduliuoti elektronus (**termoelektronine emisija**).

Rentgeno vamzdžio (anodo) srovė – tai per laiko vienetą į anodą pataikantis pagreitintų elektronų elektros krūvis.

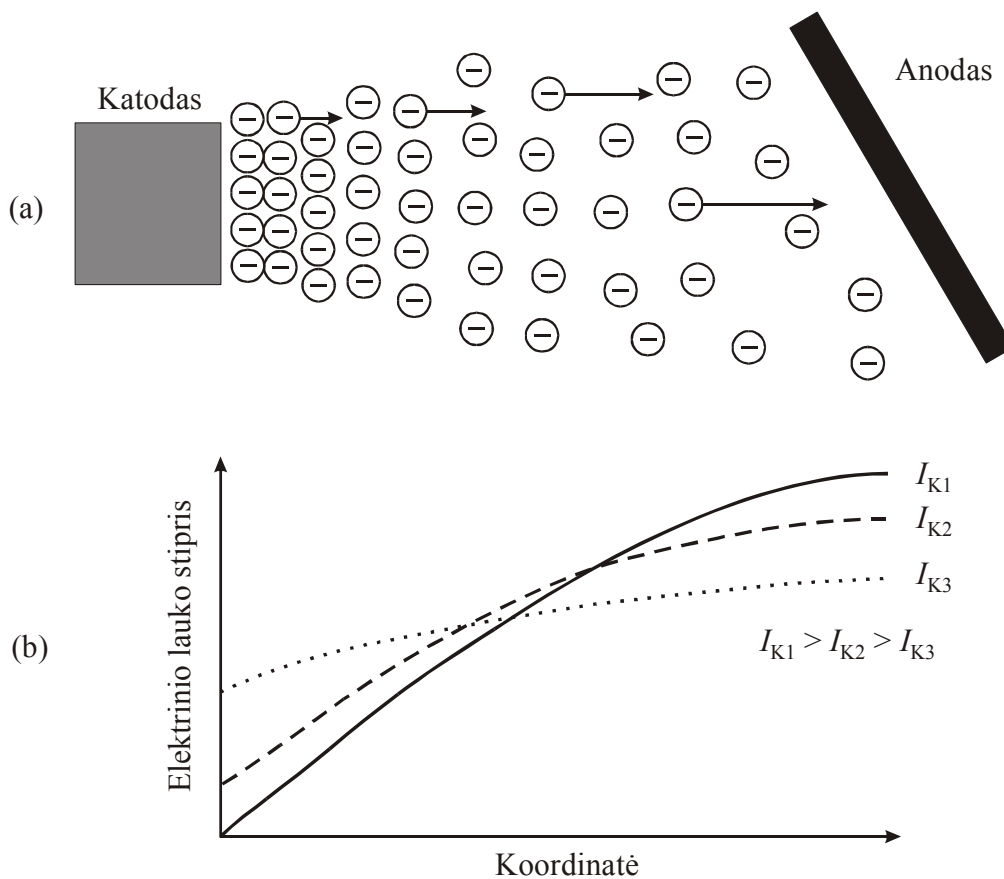
Fokusavimo elektrodas supa volframo vielą ir formuoja elektronų pluoštą.



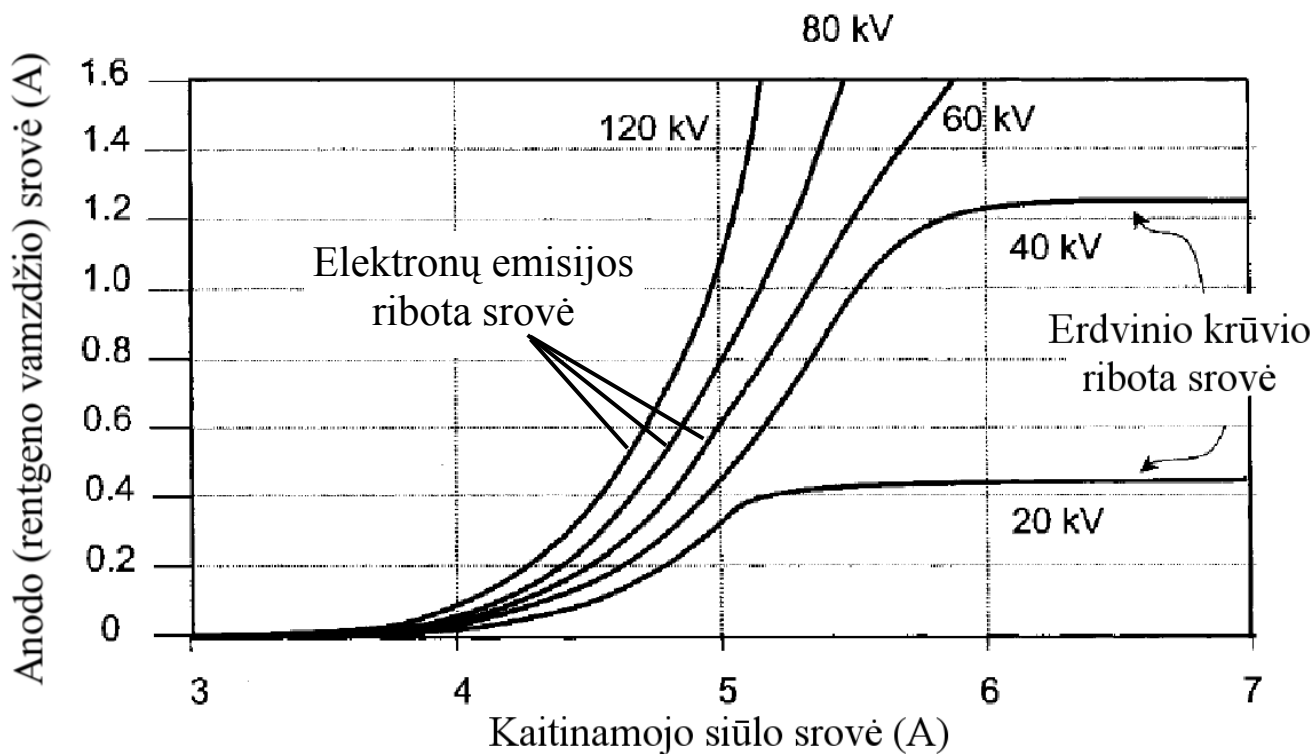
3.10 pav. Rentgeno vamzdžio katodą sudaro volframo viela ir fokusavimo elektrodas



3.11 pav. Fokusavimo elektrodas gali būti to paties potencialo kaip volframo viela (kairėje) arba gali turėti mažesnę potencialą negu volframo viela (dešinėje). Antruoju atveju gaunama mažesnė židinio sritis



3.12 pav. (a) Tarp katodo ir anodo egzistuoja erdvinis neigiamas elektronų krūvis. To krūvio tankis yra didžiausias prie katodo. (b) Elektrinio lauko priklausomybė nuo koordinatės (t. y. nuo atstumo iki katodo), esant trims kaitinimo srovės vertėms. Trečioji kreivė (atitinkanti didžiausią kaitinimo srovę) atitinka *erdvinio krūvio ribotą veiką* (elektrinio lauko stipris prie katodo yra lygus nuliui)

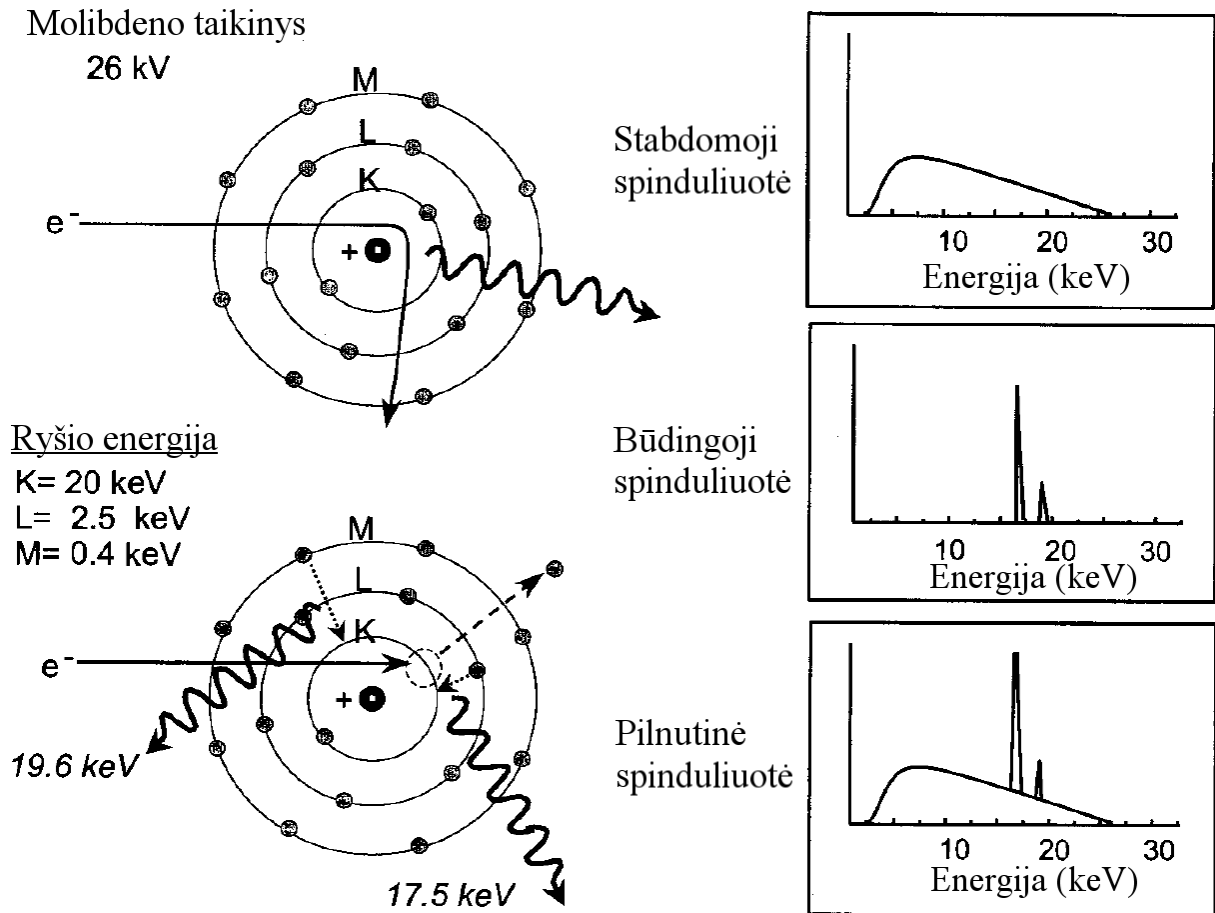


3.13 pav. Rentgeno vamzdžio (anodo) srovės priklausomybė nuo kaitinimo (volframo vielos) srovės, esant kelioms greitinimo įtampoms (U) vertėms

3.4.2. Anodas

Stabdomoji spinduliuotė silpniau sugerama anodo medžiagoje negu būdingoji. Todėl, jeigu reikalinga didelė fotonų energija (artima 100 keV), anodą naudingiau gaminti iš didelio atominio numerio medžiagų, nes tada didesnė spinduliuotės energijos dalis atitinka stabdomąją spinduliuotę. Dažniausiai naudojamas volframas (W, $Z = 74$).

Jeigu spinduliuotės fotonų energija turi būti palyginti maža (pvz., 20 keV), tada anodą naudingiau gaminti iš medžiagų, kurios skleidžia reikalingos energijos būdingąją spinduliuotę.



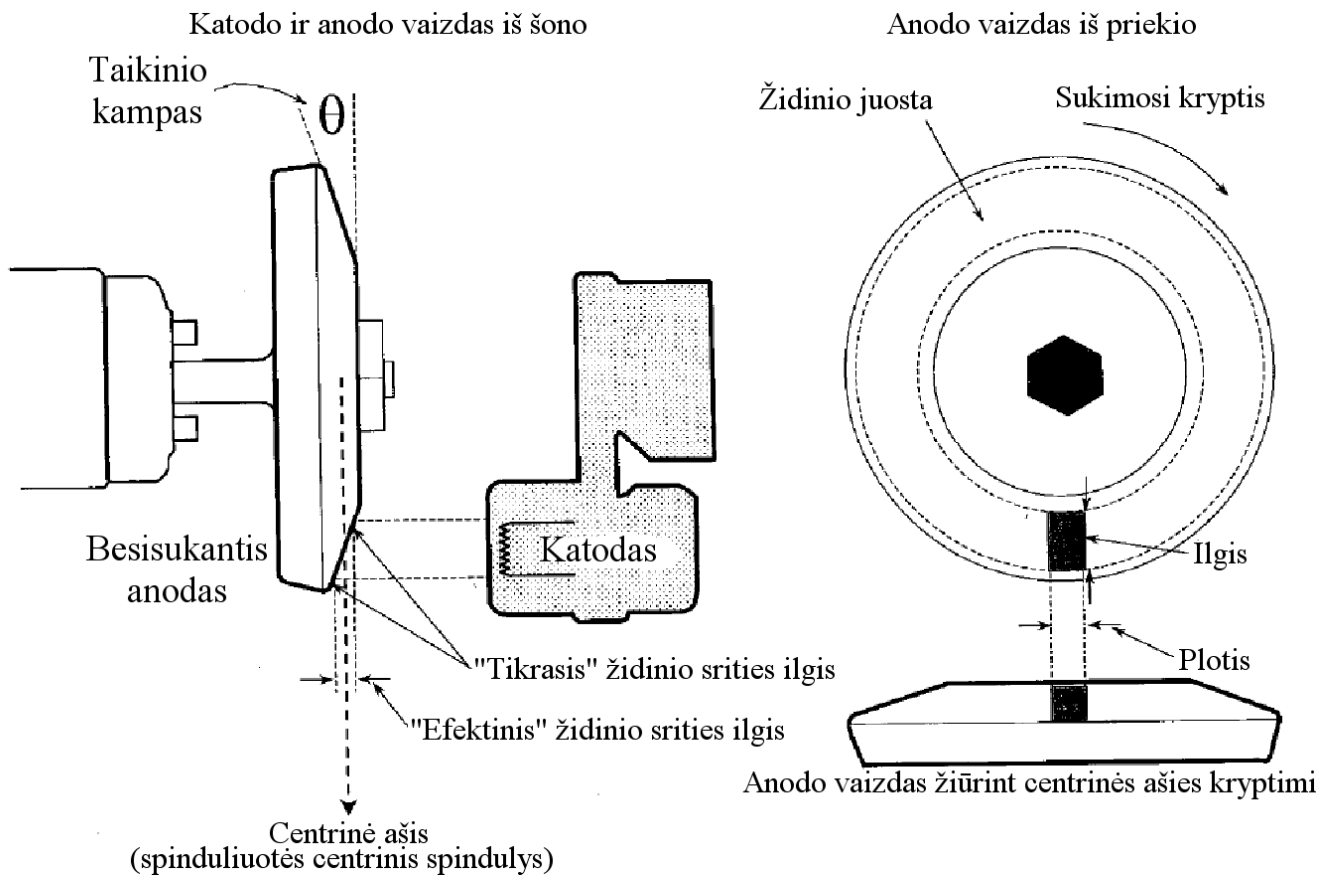
3.14 pav. Rentgeno spinduliuotės spektro formavimas, kai reikalinga maža fotonų energija (iki 20 keV). Molibdeno būdingosios spinduliuotės fotonų energijos (17,5 keV ir 19,6 keV) yra beveik optimalios mamografiniams tyrimams.

Anodas gali būti stacionarus arba besisukantis. Naudojant besisukantį anodą, galima gauti didesnę anodo srovę (t. y. didesnę rentgeno spinduliuotės intensyvumą), nes efektyviau pašalinama šiluma.

Anodo dalis, į kurią pataiko elektronai („taikiny“), dažnai gaminama iš kitos medžiagos negu likusioji anodo dalis. Pvz., taikiny gali būti pagamintas iš volframo, o likusioji anodo dalis – iš vario. Spinduliuotės savybes lemia elektronų sąveika su taikinio medžiaga.

3.4.3. Anodo kampas ir židinio srities dydis

Anodo kampas θ – tai kampas tarp taikinio paviršiaus ir rentgeno spinduliuotės centrinio spindulio.



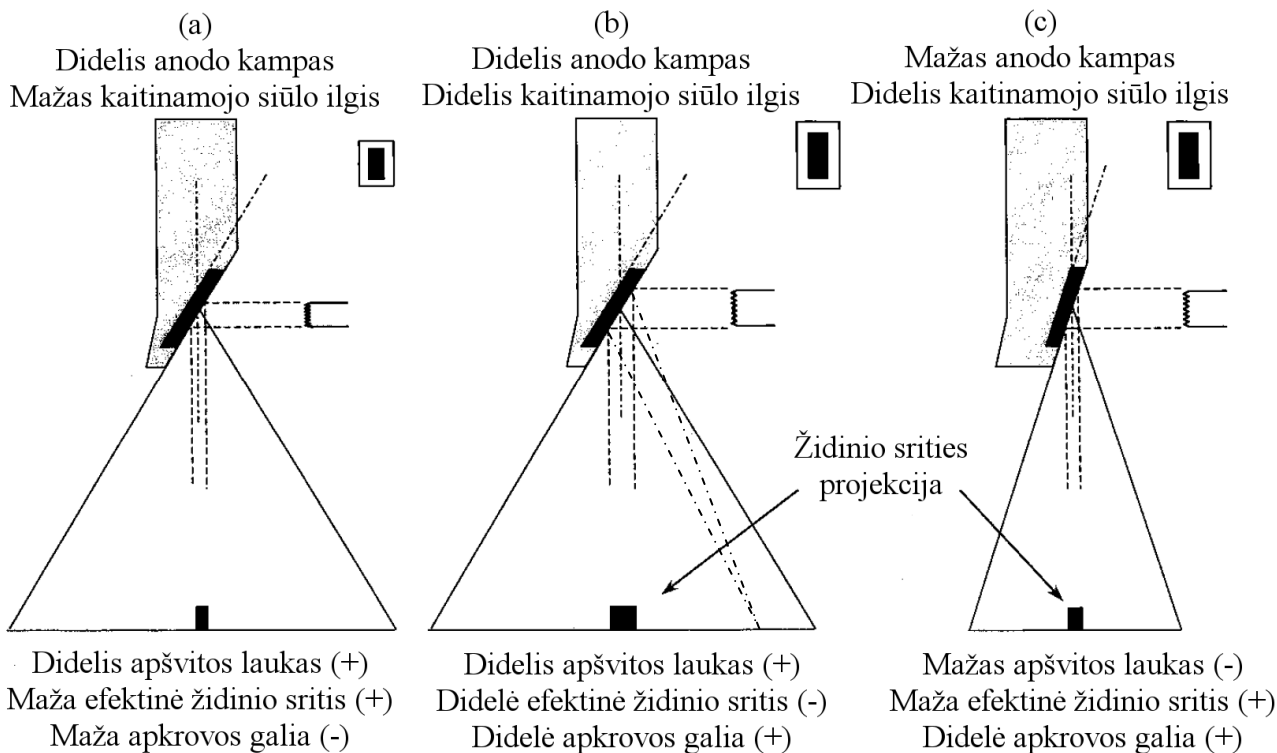
3.15 pav. Anodo kampas θ ir jo įtaka „efektiniam“ židinio srities ilgiui

Diagnostiniuose rentgeno vamzdžiuose anodo kampas yra $7^\circ - 20^\circ$.

$$\text{Efektinis židinio srities ilgis} = \text{tikrasis židinio srities ilgis} \times \sin \theta$$

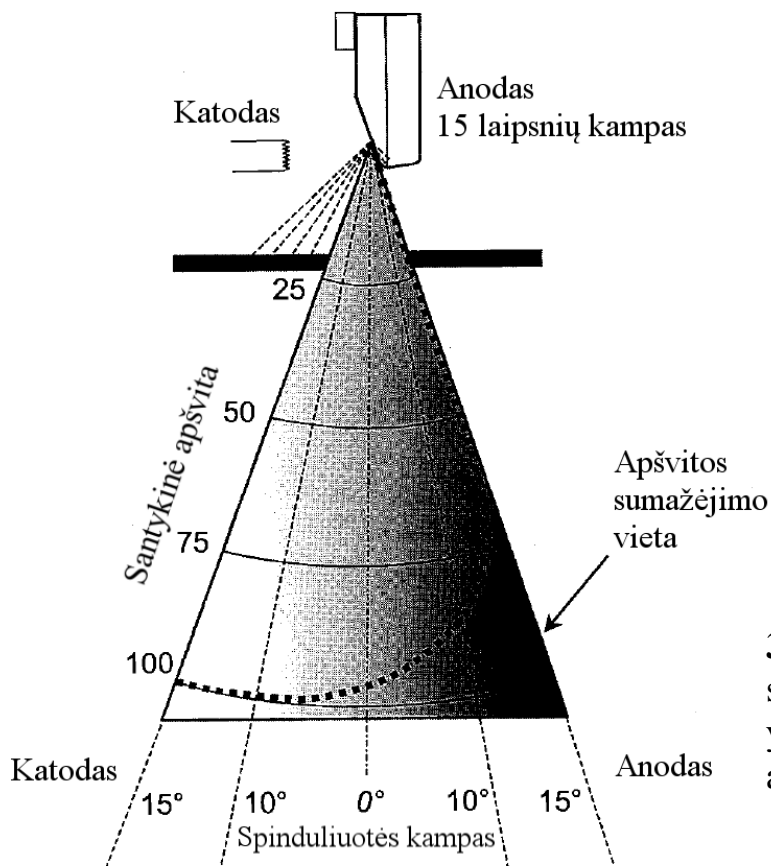
Pasirenkant optimalų anodo kampą, reikia atsižvelgti į tris veiksnius:

- tiriamo objekto matmenys (**apšvitos laukas**),
- reikalingas atvaizdo kontrastingumas (gerėja mažėjant efektiniam židinio srities ilgiui)
- reikalingas atvaizdo ryškumas (gerėja didėjant **apkrovos galiai** $P = IU$).



3.16 pav. Apšvitos lauko dydis ir efektinis židinio srities ilgis priklauso nuo anodo kampo

3.4.4. Vaizdo iškraipymai



3.17 pav. Spinduliuotės intensyvumo sumažėjimas atvaizdo dalyje, kuri yra arčiau anodo („kulno efektas“, angl. *heel effect*)

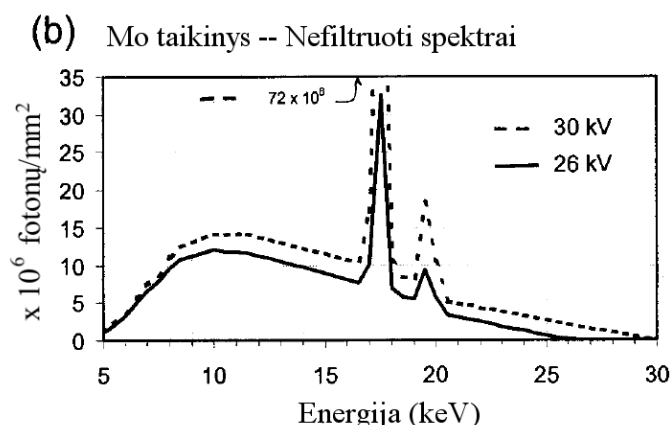
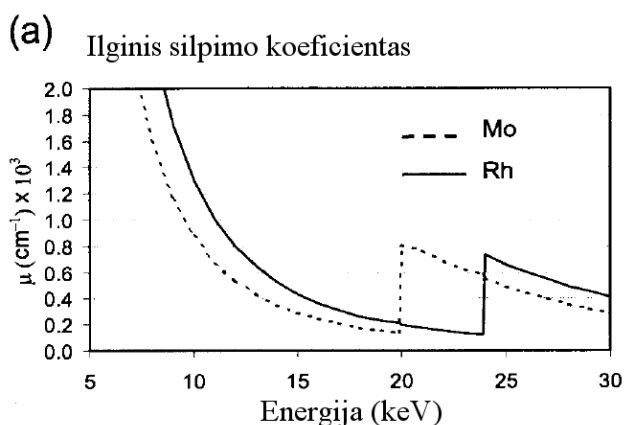
Kitas vaizdo iškraipymas yra susijęs su *nefokusuota spinduliuote* (angl. *off-focus radiation*), t. y. su spinduliuote, kuri sklinda ne iš židinio srities.

3.4.5. Filtravimas

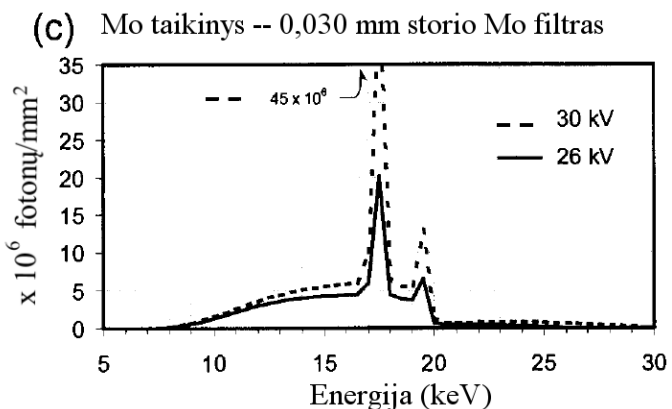
Filtravimas – tai rentgeno spinduliuotės fotonų pašalinimas iš pluošto, kai pluoštas pereina medžiagos sluoksnį.

- Vidinis filtravimas (angl. *inherent filtration*) – filtravimas langelio medžiagoje
- Papildomas filtravimas (angl. *added filtration*) – metalo plokštelės

Jeigu yra siekiama išskirti tam tikrą būdingosios spinduliuotės spektro liniją, tada naudojami filtrai, pagaminti iš tos pačios medžiagos kaip taikynys. Tada filtro medžiagos „sugerties kraštai“ leidžia pasiekti, kad būtų sugeriami ne tik mažiausių energijų fotonai, bet ir fotonai, kurių energija viršija sugerties krašto energiją.



3.18 pav. (a) Mo ir Rh silpimo koeficientų priklausomybė nuo energijos. Mažo silpimo koeficiento „langas“ egzistuoja žemiau K sugerties krašto energijos. (b) Nefiltruoti spektrai naudojant Mo taikinį ir 26 kV bei 30 kV greitinimo įtampas. Šiuose spektruose yra palyginti daug mažų ir didelių energijų fotonų. (c) Filtruoti spektrai naudojant Mo taikinį ir 26 kV bei 30 kV greitinimo įtampas, kai tarp rentgeno vamzdžio ir spinduliuotės detektoriaus yra patalpintas 30 μm storio Mo filtras. Filtras pašalina didžiąją dalį mažos ir didelės energijos fotonų



3.4.6. Veiksniai, kurie lemia rentgeno spindulių emisiją

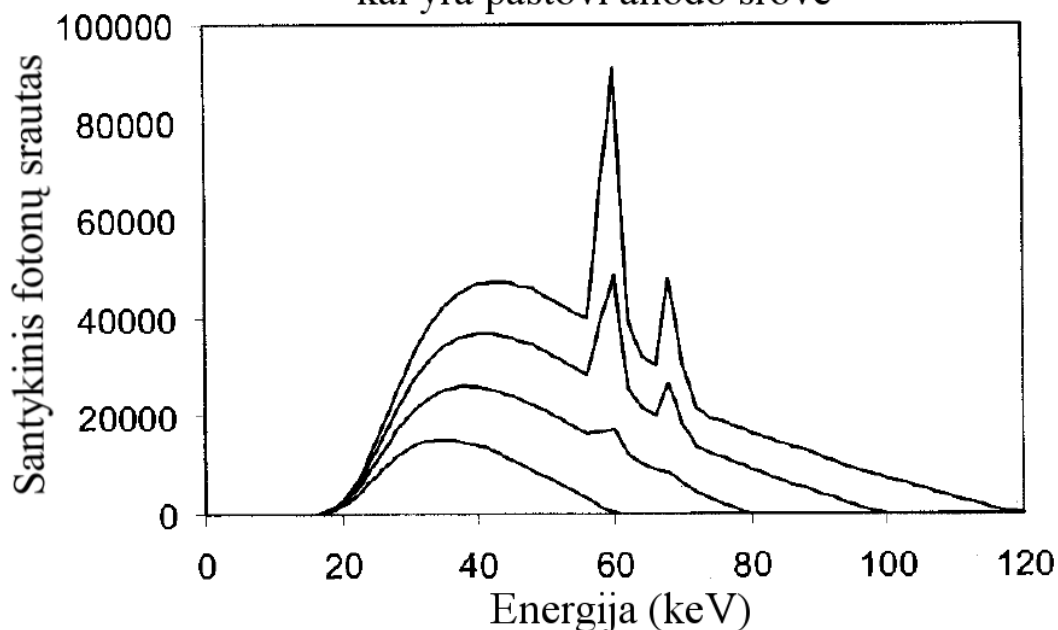
Rentgeno vamzdžio spinduliuotė dažnai apibūdinama šiais terminais:

- 1) spinduliuotės kietumas (anglų literatūroje dažnai naudojamas terminas *quality*: „kokybė“),
- 2) spinduliuotės fotonų skaičius (spinduliuotės „kiekis“, angl. *quantity*),
- 3) spinduliuotės ekspozicinė dozė (angl. *exposure*).
- 4) spinduliuotės generavimo efektyvumas

Pagrindiniai penki veiksniai, kurie lemia rentgeno spinduliuotės generavimo efektyvumą, ekspozicinę dozę, kietumą ir kiekį, yra šie:

- 1) rentgeno vamzdžio taikinio medžiaga (generavimo efektyvumas $\sim Z$),
- 2) greitinimo įtampa U (fotonų skaičius $\sim U^2$),
- 3) anodo srovė I (fotonų skaičius ir ekspozicinė dozė $\sim I$),
- 4) apšvitos trukmė (fotonų skaičius ir ekspozicinė dozė $\sim t$),
- 5) pluošto filtravimas (fotonų skaičius sumažėja, o vidutinė fotonų energija padidėja).

Rentgeno spinduliuotės spektras,
kai yra pastovi anodo srovė



3.19 pav. Rentgeno spinduliuotės, kurią skleidžia rentgeno vamzdis, energijos srautas stipriai priklauso nuo vamzdžio greitinimo įtampos. Šiame pavyzdyje greitinimo įtampa keičiama nuo 60 kV iki 120 kV kas 20 kV, o anodo srovė palaikoma pastovi. Fotonų srautas yra proporcingas spektro integralui, t. y. plotui, kuris yra po kiekviena kreive. Jeigu nepaisoma būdingosios spinduliuotės, kurią atitinka dvi smailės, tada tas plotas yra apytiksliai proporcingas greitinimo įtampos kvadratui

3.5. Kontrastas ir dozė radiografijoje

Optinis tankis (OT) yra priešingas išryškintos rentgenografinės plėvelės pralaidumo (T) dešimtainiam logaritmui:

$$OT = -\lg(T).$$

Pralaidumas duotajame taške – tai praėjusios ir kritusios spinduliuotės intensyvumų santykis:

$$T = \frac{I}{I_0}.$$

3.3 lentelė. Optinio tankio (OT) ir pralaidumo (T) reikšmių pavyzdžiai diagnostinėje radiologijoje

T	OT	Komentaras
1	0	Idealiai skaidri plėvelė (neegzistuoja)
0,776	0,11	Neišryškinta plėvelė
0,1	1	Šviesiai pilka plėvelė
0,01	2	Tamsi plėvelė
0,001	3	Labai tamsi plėvelė (reikia karštos lempos)
0,00025	3,6	Didžiausias optinis tankis medicininėje radiografijoje

Taškų A ir B **radiografinis kontrastas** yra lygus atitinkamų optinių tankių skirtumui:

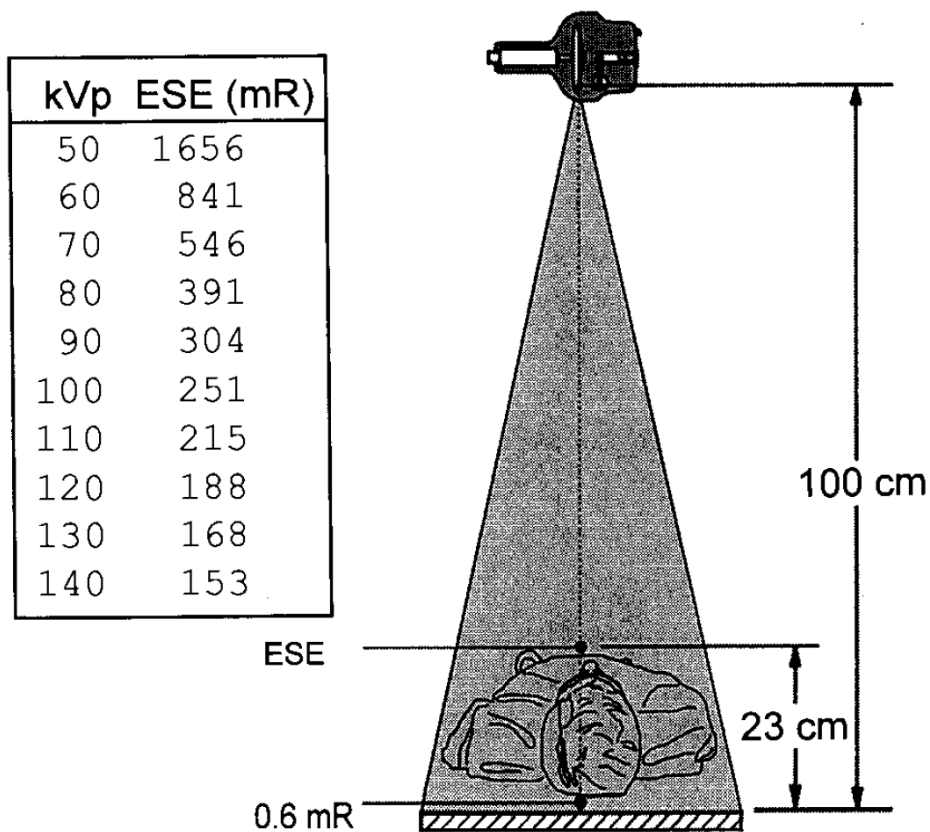
$$\text{Radiografinis kontrastas} = OT_A - OT_B.$$

Objekto kontrastas (angl. *subject contrast*):

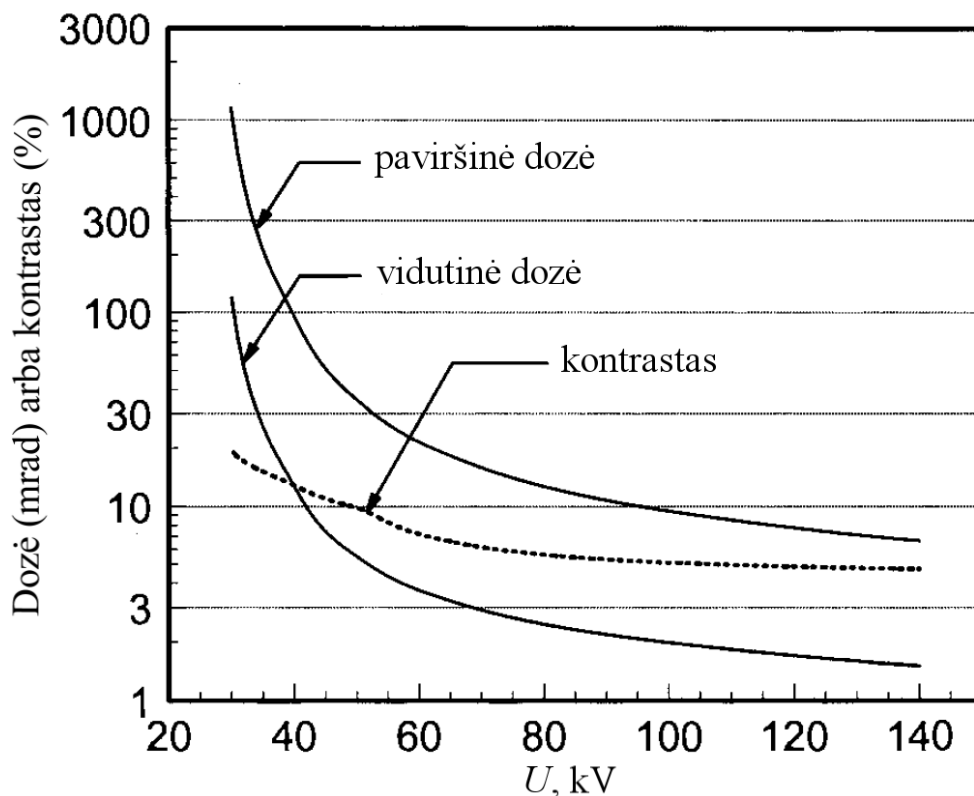
$$C = \frac{A - B}{A},$$

čia A ir B yra fotonų srauto tankiai, išeinantys iš skirtingų objekto taškų.

Kontrastas priklauso nuo greitinimo įtampos, tiriamo organo, paciento storumo.



3.20 pav. Tipinės radiografinės apšvitos geometrija. Lentelėje parodyta paviršinės ekspozicinės dozės („ESE“), kuri reikalinga gauti 0,6 mR ekspozicinę dozę prie plėvelės paviršiaus, priklausomybė nuo greitinimo įtampos („kVp“)

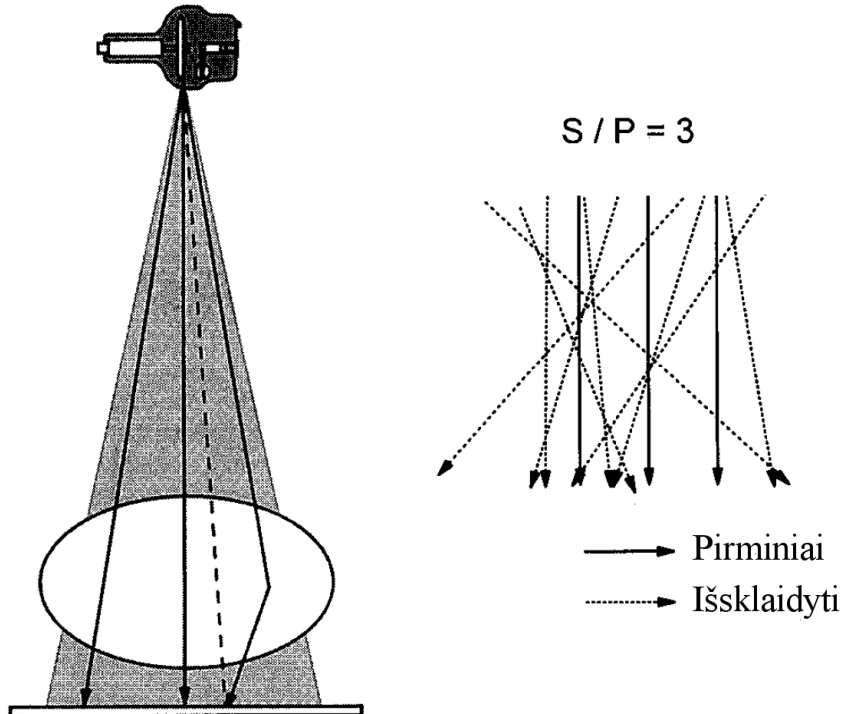


3.21 pav. Kontrasto ir dozės priklausomybė nuo greitinimo įtampos. Yra parodytos paviršinė sugertoji dozė (apskaičiuota 1 cm storio sluoksniui po oda) ir vidutinė sugertoji dozė (vidurkis apskaičiuotas visame paciento stovyje, kuris lygus 23 cm)

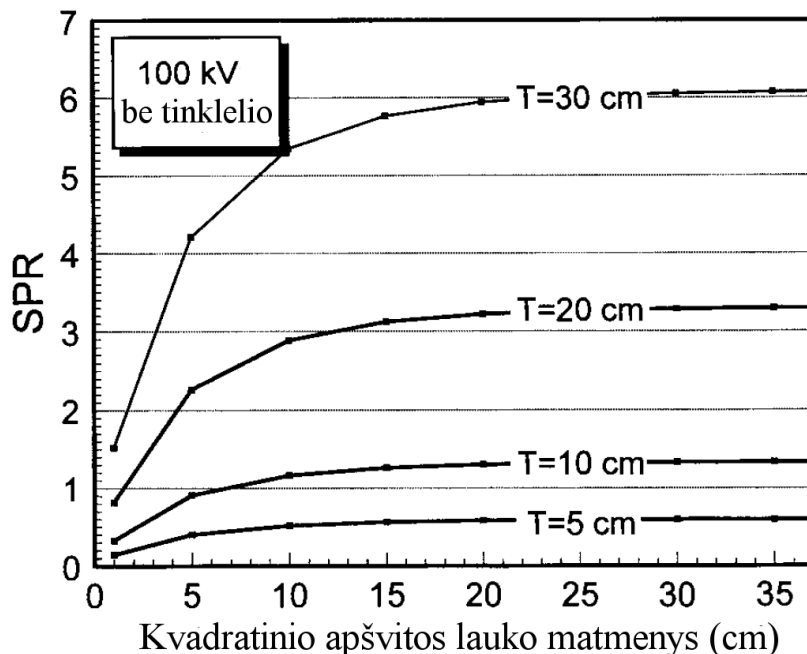
3.6. Išsklaidytoji spinduliuotė projekcinėje radiografijoje

Bendros paskirties radiografijoje naudojamas fotonų energijų (E) intervalas yra 15 – 120 keV. Minkštame audinyje Komptono sklaida vyrauja, kai $E > 26$ keV, o kauliniame audinyje – kai $E > 35$ keV.

Išsklaidyti fotonai blogina vaizdo kokybę. Nusakant sklaidos įtaką atvaizdo kokybei, naudojama sklaidos ir pirminio fotonų srautų santykio sąvoka („S/P santykis“).



3.22 pav. (a) Spinduliuotės sklaida pažeidžia pagrindinį geometrinį projekcinio vaizdinimo principą, kuris remiasi prielaida, kad fotonai juda tiesiomis linijomis. (b) Sklaidos ir pirminio srautų santykis (S/P) nusako, kiek išsklaidytų fotonų atitinka kiekvieną pirminį fotoną.



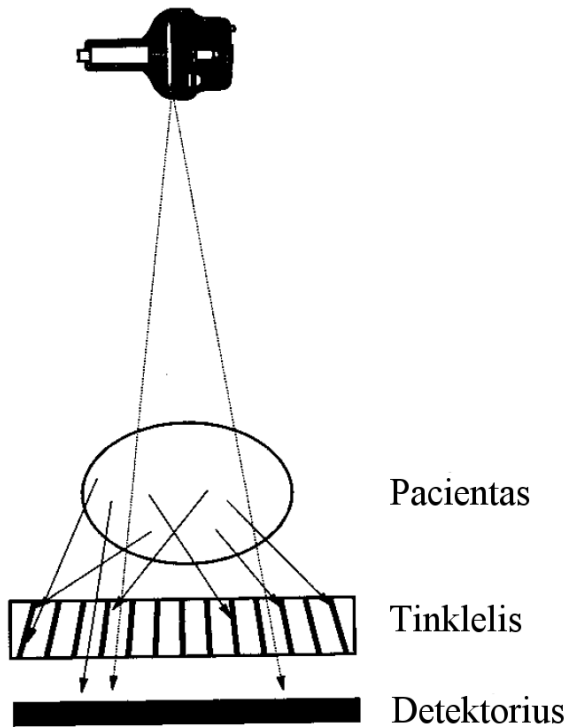
3.23 pav. Sklaidos ir pirminio srautų santykio (S/P) priklausomybė nuo apšvitos lauko matmenų, esant keliems paciento storiams (T)

Kai yra sklaida, kontrastas tampa lygus

$$C' = C \frac{1}{1 + S/P},$$

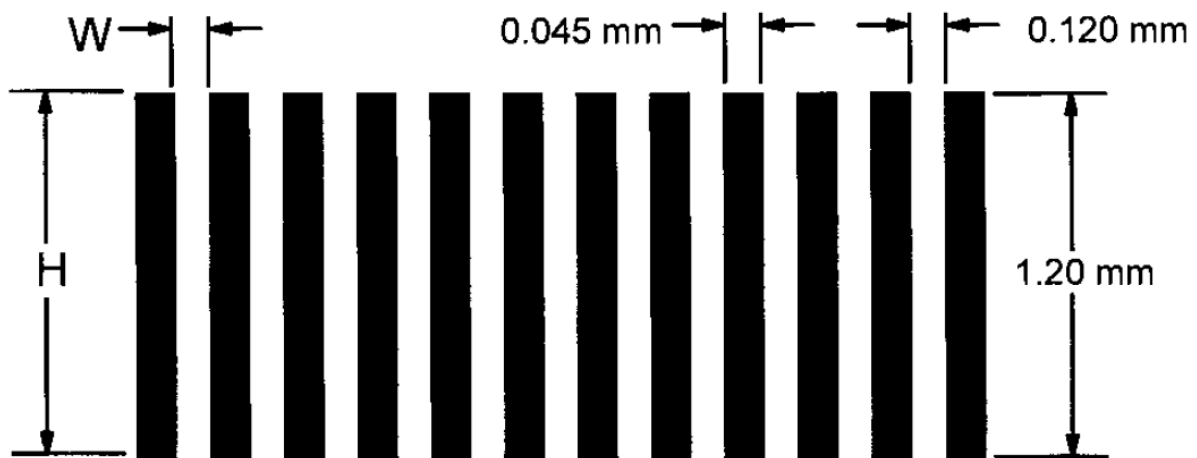
čia C yra kontrastas, kai nėra sklaidos. Daugiklis $(1 + S/P)^{-1}$ yra vadinamas **kontrasto sumažėjimo faktoriumi** (angl. *contrast reduction factor*).

Diagnostinėje radiografijoje sklaidos efektai dažnai sumažinami naudojant **kolimacinį tinklelį** (angl. *antiscatter grid*).



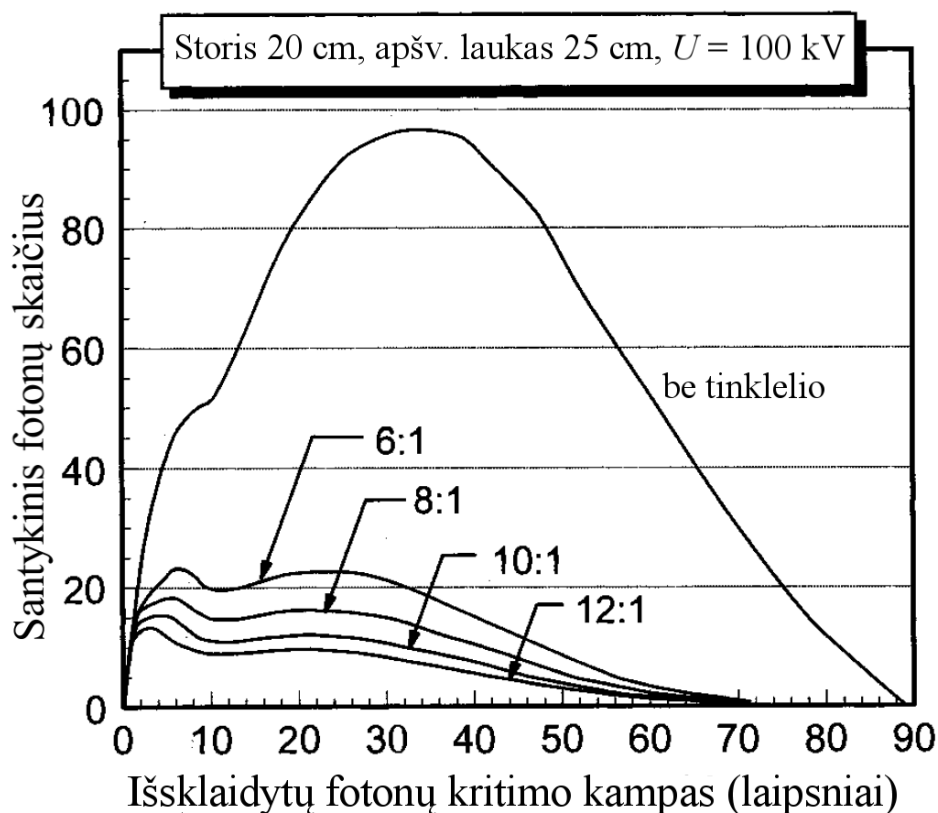
3.24 pav. Kolimacinio tinklelio geometrija

Tinklelio santykis = H / W



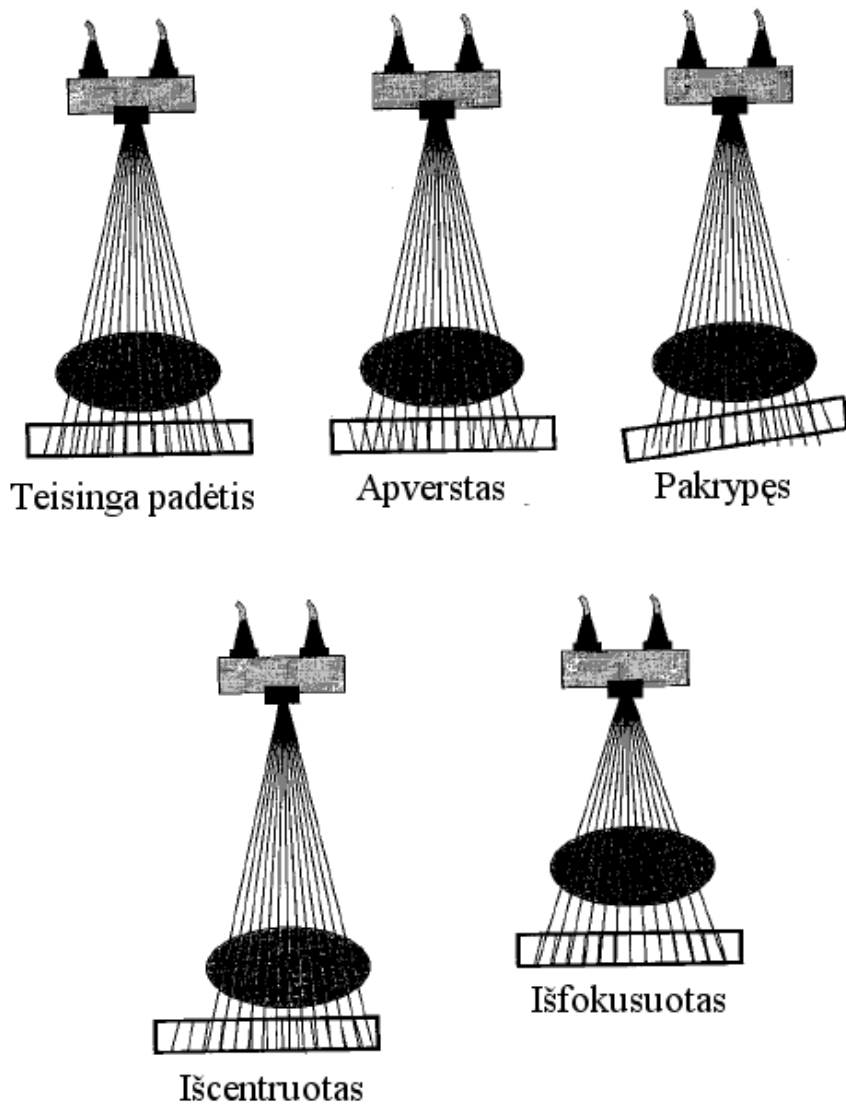
3.25 pav. Kolimacinio tinklelio sandara

Svarbiausias kolimacinio tinklelio parametras yra *tinklelio santykis* (angl. *grid ratio*), t. y. tinklelio plyšio aukščio ir pločio santykis. Bendros paskirties radiografijoje dažniausiai naudojamos tinklelio santykio reikšmės yra 8:1, 10:1 ir 12:1, o mamografijoje dažniausiai naudojami tinkleliai, kurių santykio reikšmė yra 5:1.



3.26 pav. Paciento kūne išsklaidytų fotonų, kurie pasiekia detektorių, kampų pasiskirstymas, kai nėra kolimacinio tinklelio ir kai yra naudojami tinkleliai su įvairiomis tinklelio santykio reikšmėmis

Kitas svarbus kolimacinio tinklelio parametras yra *židinio nuotolis* – atstumas nuo tarp tinklelio ir spindulių, kurie gali jį pereiti, sankirtos taško.



3.27 pav. Teisinga kolimacinio tinklelio padėtis ir keturios neteisingos padėtys