



Projekts: **Augstākā līmeņa fizikas studiju attīstība Latvijas Universitātē**
Projekta līguma Nr.: 2005/0110/VPD1/ESF/PIAA/04/APK/3.2.3.2/0029/0063
LU Reģistrācijas Nr.: ESS 2005/6

Latvijas Universitāte,
Fizikas un matemātikas fakultāte,
Fizikas bakalaura programma

Spektroskopijas laboratorija
Laboratorijas darba apraksts, autors Vladimirs Ivins

Alfa, beta un gamma starojuma absorbcija

1. Darba mērķi

1. Iepazīšana ar jonizējoša starojuma preparātiem, starojuma detektējošam ierīcem, reģistrēšanas metodēm.
2. Starojuma absorbcijas raksturojošo lielumu izpētē dažādas vides.

2. Teorētiskais apskats

2.1. Ievads

Lādētu, neitrālu daļiņu plūsmas un elektromagnētiskā starojuma mijiedarbība ar vidi izpaužas kvalitatīvi atšķirīgos efektos. Ta, piemēram, kustošas lādētas daļiņas galvenokārt izraisa elektronu pārvietošanos, jonizāciju, atomu nobīdi režģa mezglos, atomu un elektronu ierosināšanos un kodolreakcijas. Bez tam, lādētām daļiņām bremzējoties, parādās starojums, daļiņām elastiski saduroties, novērojama to kinētisko enerģiju pārsadalīšanās.

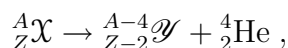
γ -starojuma izplatīšanās saistīta ar starojuma enerģijas pāreju citos enerģijas veidos, kā rezultātā rodas kustoši sekundārie elektroni, kas izraisa jonizāciju – galveno mijiedarbības rezultātu.

Neutroniem mijiedarboties ar vielu, jonizācija ir sekundārs efekts, bet primārais un galvenais ir atomu nobīde un, ja enerģija ir liela, kodolreakcijas.

Mijiedarbības procesu kvalitatīvā puse atkarīga no vielas īpašībām (blīvuma, masas skaitļa u.tml.), no starojuma enerģētiskā sastāva, daļiņu lādiņa un no masas.

2.2. Alfa-daļiņas mijiedarbība ar vielu

Alfa sabrukšanas rezultātā radioaktīvais elements spontāni izsviež α -daļiņas, t.i., hēlija atoma kodolus. Sabrukšanas procesu simboliski var attēlot šādi:



kur \mathcal{X} , \mathcal{Y} – attiecīgo elementu simboli.

Dažādi radioaktīvie elementi izsviež α -daļiņas ar dažādu enerģiju, kuru iespējams noteikt, izmērot daļiņas noskrējumu. Dažu radioaktīvo elementu izsviesto α -daļiņu noskrējums gaisā (temperatūra 15°C un spiediens normals) ir sekojošs: radijam ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ – 3,3 cm ($T_{1/2} = 1620$ gadu), polonijam ${}^{212}_{84}\text{Po}$ – 8,6 cm ($T_{1/2} = 3 \cdot 10^{-7}$ s). Ilgdzīvojošie izotopi izsviež daļiņas ar mazāku enerģiju nekā īsu laiku dzīvojošie izotopi. Šī likumība pastāv visiem radioaktīvajiem elementiem.

Izsviesto α daļiņu enerģijas tiešai mērīšanai var izmantot daļiņu trajektorijas izliekumu magnētiskajā laukā. Eksistē α daļiņas noskrējiena empiriskas formulas gaisā, t.s. Geigera formula:

$$E_0 = 2,12R^{2/3} ,$$

kur E_0 – sākuma enerģija, izteikta MeV, bet R – daļiņas noskrējiens gaisā (centimetros). Šī formula ir izmantojama α daļiņām, kuru noskrējiens gaisā ir no 3 līdz 7 centimetriem. Radioaktīvā elementa izsviesto α daļiņu noskrējiens saistīts arī ar pussabrukšanas periodu:

$$\ln \lambda = A + B \ln R ,$$

kur A un B – konstantes. Konstante B vienāda visām radioaktīvam saimēm, bet A vienāda vienas saimes elementiem. Šo sakarību sauc par *Geigera–Netola likumu*. Izmantojot atbilstošas sakarības, var iegūt šī likuma citi veidi:

$$\ln \lambda = A_1 + B_1 \ln v_0 ,$$

kur v_0 – daļiņas ātrums,

$$\ln \lambda = A_2 + B_2 \ln E_0 ,$$

kur E_0 – daļiņas sākuma enerģija.

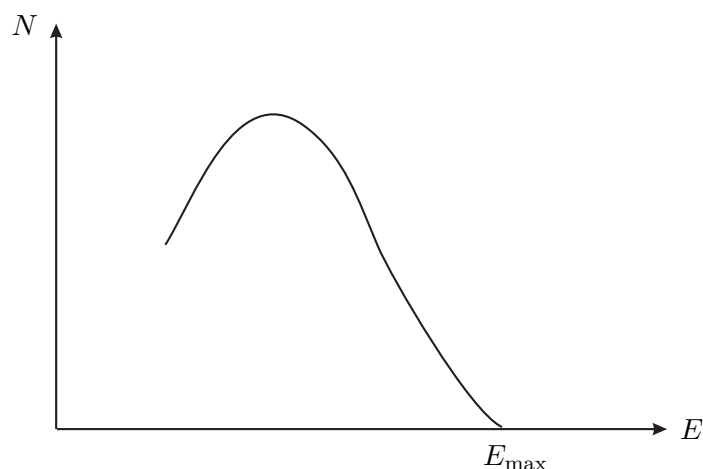
2.3. β starojuma mijiedarbība ar vielu

Par β -radioaktīviem kodoliem sauc tādus kodolus, kas sabrūk vai nu izstarojot pozitronu (e^+) vai elektronu (e^-), vai arī satverot elektronu no atomu elektronu čaulam (E -satveršana).

β -sabrūkšanas procesā tiek izstaroti elektroni vai pozitroni veselā lielā enerģiju intervālā no 0 līdz enerģijai E_{\max} , kuru nosauc par β -spektra maksimālo enerģiju. β -spektru maksimālā enerģija atbilst atoma kodola divu enerģētisko līmeņu starpībai. β -spektru nepartrauktību izskaidro tādejādi, ka radioaktīvais kodols sadalās trīs komponentēs: rezultējošais kodols, β -daļiņa, neitrīno vai antineitrīno. Kodola sabrukšanas rezultātā izdalītā enerģija sadalās starp trim daļiņām. Lielās masas dēļ rezultējošā kodola saņemtā enerģijas daļa ir niecīga, un enerģija sadalās starp elektronu un antineitrīno (pozitronu un neitrīno) tā, lai sumārā enerģija būtu E_{\max} . Tā tad β -spektra augšējā robeža atbilst gadījumam, kad visu kodola pārejas enerģija aiznes elektrons vai pozitrons.

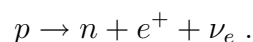
β -sabrūkšanā viens no kodolā esošiem neitroniem pārvēršas par protonu, elektronu un antineitrīno:

$$n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e ,$$

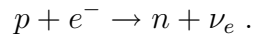


N – β -daļiņu skaits pie enerģijas E .

vai viens no kodola esošiem protoniem pārvēršas par neitronu, pozitronu un neitrīno:



Elektronu satvēršanā kodols satver kādu no kodolam tuvāk esošo čaulu elektroniem:



Sabrukšana enerģētiski iespējama, ja sistēmas miera masa izejas stāvoklī lielāka par sistēmas masu beigu stāvoklī.

β -starojuma mijiedarbība ar vielu

β -daļiņas, ejot caur vielu, zaudē savu kinētisko enerģiju vielas atomu ierosināšanai un jonizēšanai, ka arī rada bremzēšanas starojumu.

β -starojuma absorbciju vielā var aprakstīt ar eksperimentālu likumu. Ja uz slāni ar biezumu l paralēlā kūlī krīt N_0 daļiņas, tad slānim cauri izies tikai N daļiņas, pie kam N_0 un N saista sakarība

$$N = N_0 e^{-\mu l} , \quad (1)$$

kur l – absorbējošā slāņa biezums (cm) un μ – **lineārais absorbcijas koeficients** (cm^{-1}). Slānīša biezumu var mērīt arī *masas vienībās*, izsakot to ar vielas daudzumu gramos, kas ir vielas slānī, kurš atbilst starojuma kūļa 1 cm^2 šķērsgriezumam. Ja ar l' apzīmējam slānīša biezumu, izteiktu masas vienībās, tad

$$l' = l\rho ,$$

kur ρ ir vielas blīvums. Atbilstoši β -starojuma absorbcijas likumu var arī uzrakstīt

$$N = N_0 e^{-\mu' l'} ,$$

kur μ' – **masas absorbcijas koeficients** ar mērvienību $\frac{\text{cm}^2}{\text{g}}$. Masas absorbcijas koeficientu ar lineāro saista sakarība

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho} .$$

Lineārais absorbcijas koeficients μ atkarīgs no absorbējošās vielas dabas un absorbēta β -spektra maksimālās enerģijas E_{max} .

Masas absorbcijas koeficients μ' atkarīgs tikai no β -spektra īpašībam (E_{max}) un maz mainās no absorbētāja vielas uz vielu, jo vielas kārtas skaitlis Z periodiskajā sistēmā atšķiras maz.

β -starojuma absorbcijai vielā lieto jēdzienu **pusabsorbcijas slāņa biezums** D , t.i., tāda absorbējošā slāņa biezums, kas kritišo β -daļiņu skaitu samazina divas reizes. No β -starojuma absorbcijas likuma, to logaritmējot, dabūjam, ka, ja $\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2}$, tad $l = D$ un $\ln \frac{1}{2} = -\mu D$, vai

$$D = \frac{0,693}{\mu} \quad (\text{cm})$$

jeb

$$D' = \frac{0,693}{\mu'} \quad \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) .$$

Bieži svārīgi zināt β -daļiņu maksimālo noskrējumu vielā: to vielas slāņa biezumu, kuram dotā β -starojuma kūļa daļiņas praktiski cauri neiziet. Aptuveni β -daļiņu maksimālā noskrējuma noteikšanai alumīnijā var izmantot izteiksmes:

$$\begin{aligned} R'_{\text{max}} &= 0,407 E_{\text{max}}^{1,38} & \text{ja} & \quad 0,15 < E_{\text{max}} < 0,8 \text{ MeV} , \\ R'_{\text{max}} &= 0,542 E_{\text{max}} - 0,133 & \text{ja} & \quad 0,8 < E_{\text{max}} < 3 \text{ MeV} . \end{aligned}$$

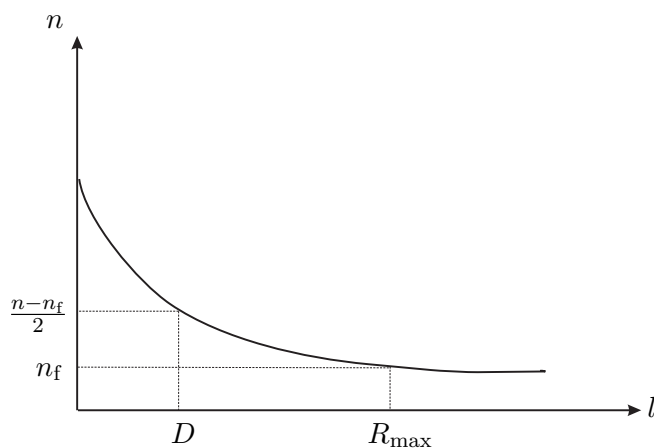
Ja absorbētājs nav alumīnijs, bet ir cits materiāls, tad tam

$$R'_{\text{max}} = R'_{\text{max Al}} \frac{\left(\frac{Z}{A} \right)_{\text{Al}}}{\left(\frac{Z}{A} \right)_{\text{x}}} .$$

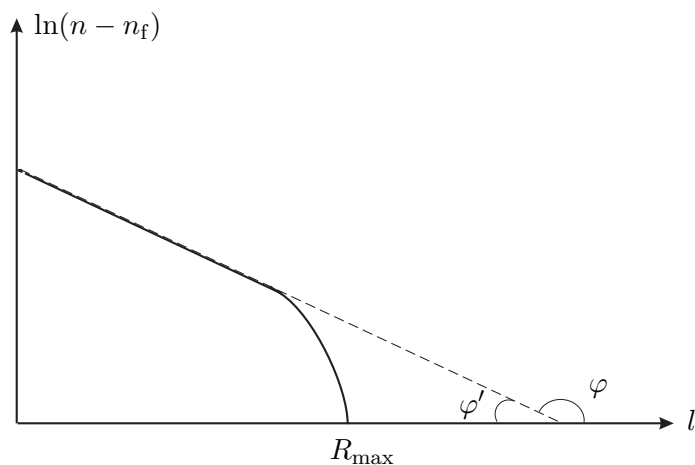
Korekcijas reizinātājs pie $R'_{\text{max Al}}$ parasti daudz neatšķiras no 1, un, piemēram, vara gadījumā tas ir 1,06.

β -starojuma raksturojošo lielumu eksperimentālā noteikšana

Eksperimentā ņem β -starojuma avotu, novieto to pie skaitītāja un mēra skaitīšanas ātrumu atkarībā no absorbcijas materiāla biezuma. Iegūtos rezultātus attēlo grafiski



No šī grafika nosakam fonu n_f , kas sastāv no dabiskā fona un bremzes starojuma radītā fona, un pusabsorbcijas slāņa biezumu. No grafika nosakam arī R_{\max} , t.i., vielas biezumu, kad likne sasniedz fona līmeni. Lielās eksperimentālo punktu izkliedes dēļ no šāda grafika R_{\max} nav nosakāms precīzi. Aplūkosim arī citu grafiku.



Dotas taisnes sākuma daļa atbilst eksperimentālajam absorbcijas likumam.

β -starojuma absorbcijas likumi logaritmējot, dabūjam

$$\ln(n - n_f) = \ln(n_0 - n_f) - \mu l .$$

Skaidrs, ka absorbcijas koeficients μ ir taisnes virziena koeficients

$$-\mu = \operatorname{tg} \varphi , \quad \mu = \operatorname{tg} (180^\circ - \varphi) = \operatorname{tg} \varphi' .$$

No grafika var iegūt eksperimentālo rezultātu

$$\mu = \operatorname{tg} \varphi' = \frac{\Delta \ln(n - n_f)}{\Delta l} .$$

Eksperimentālo likni ekstrapolējot līdz krustpunktam ar abscisu, nosaka R_{\max} .

No izteiksmes $R' = R\rho$ var aprēķināt maksimālo noskrējienu masas vienības.

β -spektru maksimālo enerģiju E_{\max} var noteikt no jau pazīstamam formulam, ja eksperimentāli noteikts μ' un R' .

2.4. γ -starojums

γ -starojums ir elektromagnētiskais starojums, ko izstaro atomu kodoli, pārejot no viena enerģētiskā līmeņa otrā. γ -starojumam salīdzinājumā ar rentgenstarojumu ir mazāks viļņa garums un atbilstoši lielāka to caurspiešanas spēja. Atšķirīgs ir γ - un rentgenstarojuma rašanās mehānisms. Rentgena starojuma rašanās saistīta ar procesiem atomu elektronu čaulās, bet γ -starojuma – ar procesiem atomu kodolos. γ -spektri vienmēr ir līniju spektri.

γ -starojuma mijiedarbība ar vielu

γ -starojumam ejot caur vielu, *gamma*-starojuma kūlis pavājinās, jo notiek γ -kvantu mijiedarbība ar vielas atomiem. Parālela γ -starojuma kūļa gadījumā pavājināšanās notiek pēc eksperimentāla likuma

$$N = N_0 e^{-\mu l} ,$$

kur N_0 – uz vielu krītošo γ -kvantu skaits, N – vielai caurizgājušo γ -kvantu skaits, l – vielas slāņa biezums, μ – absorbcijas koeficients.

Radioaktīvo preparātu γ -starojuma enerģiju diapazonā $(0,05 \div 3)$ MeV svarīgi ir trīs γ -kvantu mijiedarbības ar vielas: Komptona izkliede, fotoefekts un elektronu-pozitronu pāru veidošanās. Katrs no šiem mijiedarbības veidiem dod savu ieguldījumu γ -starojuma absorbcijā.

Komptona izkļiedes gadījumā γ -kvants saduras ar kādu no brīvajiem elektroniem, kas atrodas vielā. Elektronu var uzskatīt par brīvu, ja γ -kvantu enerģija pārsniedz elektrona saites enerģiju atomā. Komptona izkļiedes gadījumā

no primārā γ -kvanta ar enerģiju E_γ parādās izkliedētais γ -kvants ar enerģiju $E'_\gamma < E_\gamma$, kas iziet no primārā kūļa, bet elektrons uz kura notikusi γ -kvanta izkliede iegūst kinētisko enerģiju

$$E_e = E_\gamma - E'_\gamma, \quad E_\gamma = h\nu, \quad E'_\gamma = h\nu'.$$

No impulsa un enerģija nezūdamības likumiem seko, ka izkliedētām γ -kvantam mainās viļņa garums:

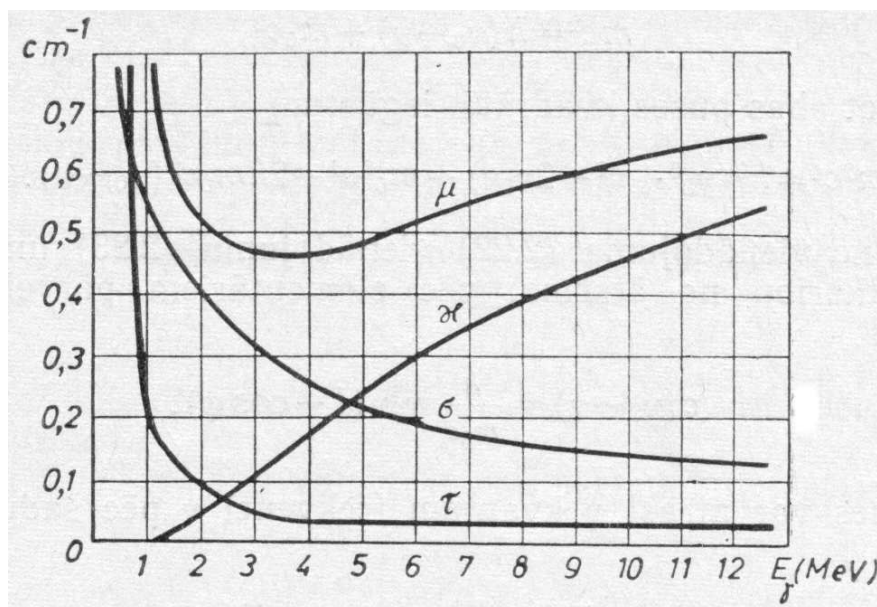
$$\lambda' - \lambda = \lambda_0(1 - \cos \theta),$$

kur λ – primārā γ -kvanta viļņa garums, λ' – izkliedētā γ -kvanta viļņa garums, $\lambda_0 = \frac{h}{m_0 c}$ – elektrona Komptona viļņa garums (m_0 – elektrona masa), θ – leņķis starp primāro un izkliedēto γ -kvantu impulsiem. Elektrona kinētiskai enerģijai pēc Komptona izklīdzes var iegūt izteiksmi

$$E_e = \frac{h\nu}{1 + \frac{m_0 c^2}{2h\nu \sin^2 \theta}},$$

t.i. elektrona kinētisko enerģiju nosaka krītošā γ -kvanta enerģija un γ -kvanta izklīdzes leņķis.

Pavājināšanās (absorbcijas) lineārais koeficients σ γ -starojumam vielā Komptona izklīdzes dēļ ir sarežģīta funkcija no γ -kvantu enerģijas un ir parādīts zīmējumā svinam (σ_{Pb}).



1. zīm. γ -kvantu absorbcijas koeficientu svinam atkarībā no γ -kvanta enerģijas..

Aprēķini rāda, ka

$$\sigma \sim \frac{\rho}{A} Z ,$$

kur ρ – absorbējošas vielas blīvums, A , Z – absorbējošas vielas masas un kārtas skaitli. Izmantojot pēdējo sakarību divam dažādām vielām, no kurām viena ir svins, kam σ_{Pb} zināms, varam aprēķināt σ_{X} otrai vielai

$$\sigma_{\text{X}} = \sigma_{\text{Pb}} \frac{\rho_{\text{X}}}{\rho_{\text{Pb}}} \cdot \frac{A_{\text{Pb}}}{A_{\text{X}}} \cdot \frac{Z_{\text{X}}}{Z_{\text{Pb}}} .$$

Tātad, ja σ_{Pb} zināms, varam aprēķināt σ jebkuram ķīmiskam elementam.

Fotoefekta fizikālā būtība saistīta ar to, ka γ -kvants izsit no atoma kādu no tā čaulas elektroniem. Šajā procesā γ -kvants patērē visu savu enerģiju. Daļa enerģijas tiek tērēta elektrona izraušānai (jonizācijas darbs), otra daļa – tam piešķirot kinētisko enerģiju. Jonizācijas darba lielums atkarīga no elementa kārtas skaitļa un no elektrona čaulas, no kuras elektrons tiek izsists. Ta, piemēram, svina atomā visdziļāk novietotā elektrona izraušānai jāpatērē 90 keV. Tā kā γ -kvantu enerģiju mēra megaelektronvoltos (MeV), tad izsistais elektrons parasti saņem lielu kinētisko enerģiju. γ -kvantu absorbcijas koeficients τ fotoefekta dēļ:

$$\tau \sim \frac{\rho}{A} Z^{4,6} .$$

Piemērot šo izteiksmi divam dažādām vielām, no kurām viena ir svins, dabūjam

$$\tau_{\text{X}} = \tau_{\text{Pb}} \frac{\rho_{\text{X}}}{\rho_{\text{Pb}}} \cdot \frac{A_{\text{Pb}}}{A_{\text{X}}} \left(\frac{Z_{\text{X}}}{Z_{\text{Pb}}} \right)^{4,6} .$$

γ -kvantu *absorbcijas lineārais koeficients fotoefekta dēļ* (τ_{Pb}) atkarībā no γ -kvantu enerģijas ir komplicēta funkcija un parādīts zīmējumā svinam.

Elektrona-pozitrona pāra rašanās. Atoma kodola tuvumā no γ -kvanta var rasties divu elementārdaļiņu – elektrona-pozitrona pāris. Pāra rašanās procesā γ -kvants izzūd. Šajā gadījumā γ -kvanta enerģija pārvēršas par abu daļiņu masu un kinētisko enerģiju. No masas un enerģijas nezūdamības likuma tad secinājums, ka

$$E_{\gamma} > 2m_0c^2 .$$

Ievērojot abu minēto daļiņu masas, secinām, ka process iespējams tad, kad $E_{\gamma} > 1,02 \text{ MeV}$. Enerģiju starpība $E_{\gamma} - 2m_0c^2$ tiek izlietota abu daļiņu kinētiskām enerģijām. Teorētiski un eksperimentāli iegūstama sakarība *lineārajam absorbcijas koeficientam pāru veidošanas dēļ*:

$$\kappa \sim \frac{\rho}{A} Z^2 .$$

Pielietojot šo izteiksmi divām dažādam vielām, no kurām viena ir svins, dabūjam:

$$\kappa_X = \kappa_{\text{Pb}} \frac{\rho_X}{\rho_{\text{Pb}}} \cdot \frac{A_X}{A_{\text{Pb}}} \left(\frac{Z_X}{Z_{\text{Pb}}} \right)^2.$$

Atkarība no γ -kvantu enerģijas κ svinam dod sakarību, kas parādīta zīmējumā.

Kopējais γ -starojuma absorbcijas koeficients ir visu triju iepriekšējo absorbcijas koeficientu summa

$$\mu = \sigma + \tau + \kappa,$$

kas arī parādīta zīmējumā. Līdzīga summēšanās notiek arī *masas absorbcijas koeficientam*:

$$\mu' = \sigma' + \tau' + \kappa',$$

jeb

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\tau}{\rho} + \frac{\kappa}{\rho}.$$

Lietojot masas absorbcijas koeficientu $\mu' = \frac{\mu}{\rho}$, *slāņa biezums* arī jāmēra *masas vienībās* $l' = \rho l \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right)$.

γ -starojuma absorbcijas koeficienta eksperimentāla noteikšana

Paralēlu γ -starojuma kūli virza uz dažāda biezuma absorbētājiem un mēra caurizgājušā starojuma intensitāti (skaitīšanas ātrumu). γ -starojuma skaitīšanas ātrums mainas eksponenciāla likuma:

$$N = N_0 e^{-\mu l} = N_0 e^{-\mu' l'}.$$

Ja uzzīmē grafiku, kurā uz abscisu ass atlikts absorbētāja biezums, bet uz ordinātu ass naturālais logaritms no skaitīšanas ātruma, tad šīs taisnes virziena koeficients būs γ -starojuma absorbcijas koeficients – *lineārais*, ja grafikā biezums atlikts cm, *masas*, ja biezums atlikts masas vienības $\left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^2} \right)$.

Rezultātu apstrādāšanas metodika ir tāda pati, ka β -starojumam. Grafikā dabūsim tikai tādā gadījumā, ja γ -starojums monoenerģētisks. Ja dabūjam lauztu līniju, kas atbilst nemonoenerģētiska γ -starojuma gadījumam, šī līkne jāsadala sastāvdaļās un jānosaka μ katrai līknes daļai.

γ -starojuma absorbcijas koeficienta noteikšanai var lietot kā reģistrējošo iekārtu gan jonizācijas, gan scintilācijas skaitītāju.

Ja absorbcijas koeficients eksperimentāli noteikts kādā labi izpētītā vielā, piemēram, svina, tad no grafika svinam var aptuveni noteikt γ -kvantu enerģiju.

3. Darba uzdevumi

1. Izmērīt α -preparata skaitīšanas ātrumu pie dažādiem gaisa spiedieniem. Atrast α -daļiņam vidējo vērtību maksimālam noskrējienam gaisā pie dažādiem tas blīvumiem.
2. Izmērīt β -preparātam absorbcijas koeficienti, β -starojuma pusabsorbcijas slāņa biezums un β -spektra maksimālo enerģiju E_{\max} dažādas vielās.
3. Izmērīt γ -preparātam absorbcijas koeficienti dažādas vielās. Novērtēt dažādu absorbcijas efektu ieguldījums. Aptuveni noteikt γ -kvantu enerģiju.

4. Darba piederumi

Radioaktīvo preparātu komplekts:

Am-241 preparāts, α , 370 kBq;

Co-60 preparāts, γ , 74 kBq;

Na-22 preparāts, γ un pozitroni, 74 kBq;

Sr-90 preparāts, β , 74 kBq.

(Preparāti ievietoti metāla aizsargapvalkā un glābājas vienā konteinerā).

Detektors α -starojuma un γ -kvantu detektēšanai.

Priekšpastiprinātājs α -detektoram.

Manometrs.

Spiediena sensors.

Vakuuma sūkņi.

Vakuumsistēmas komponentes.

Ekranēts kabelis.

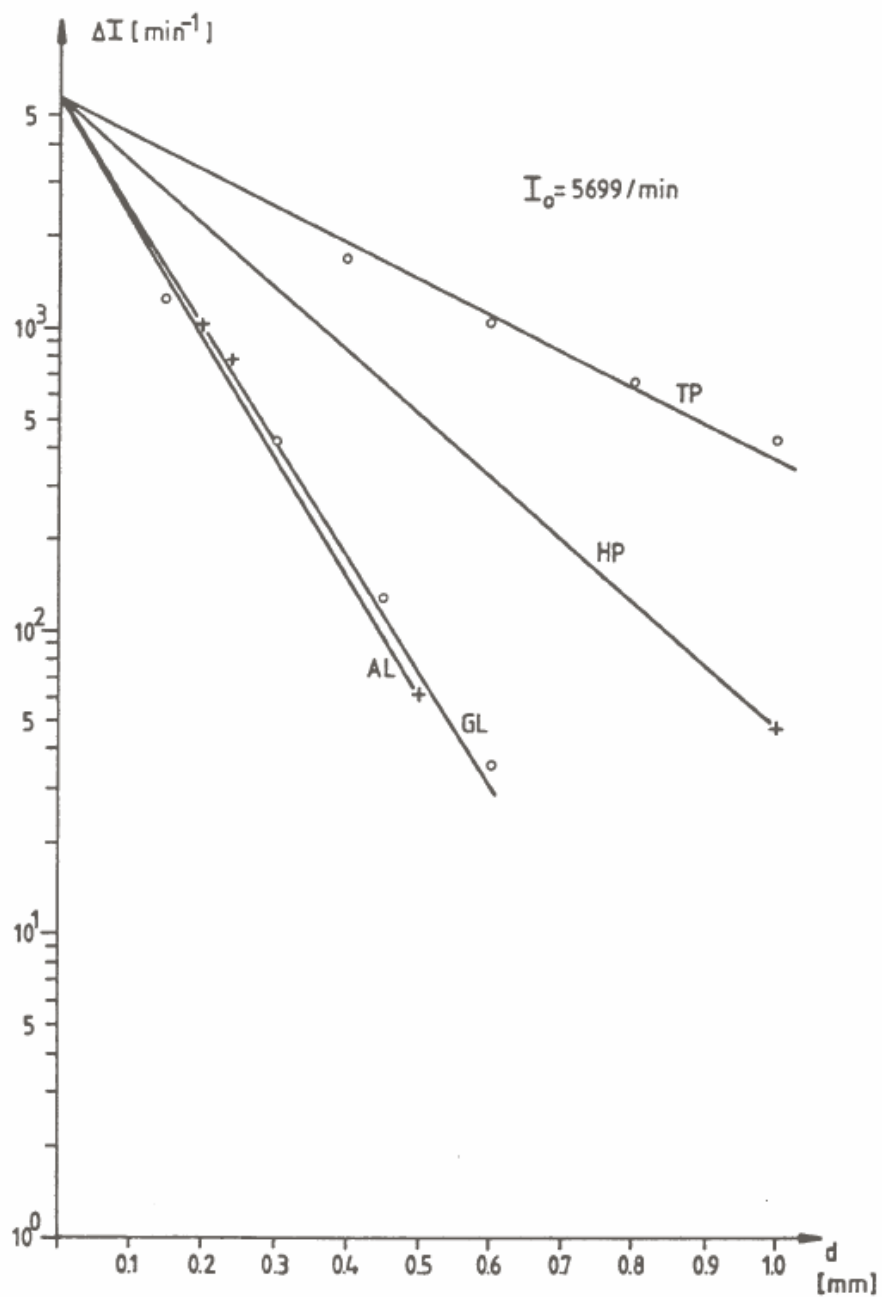
Datu kabelis.

Absorbētāji (aluminijs, organiskais stikls, papīrs).

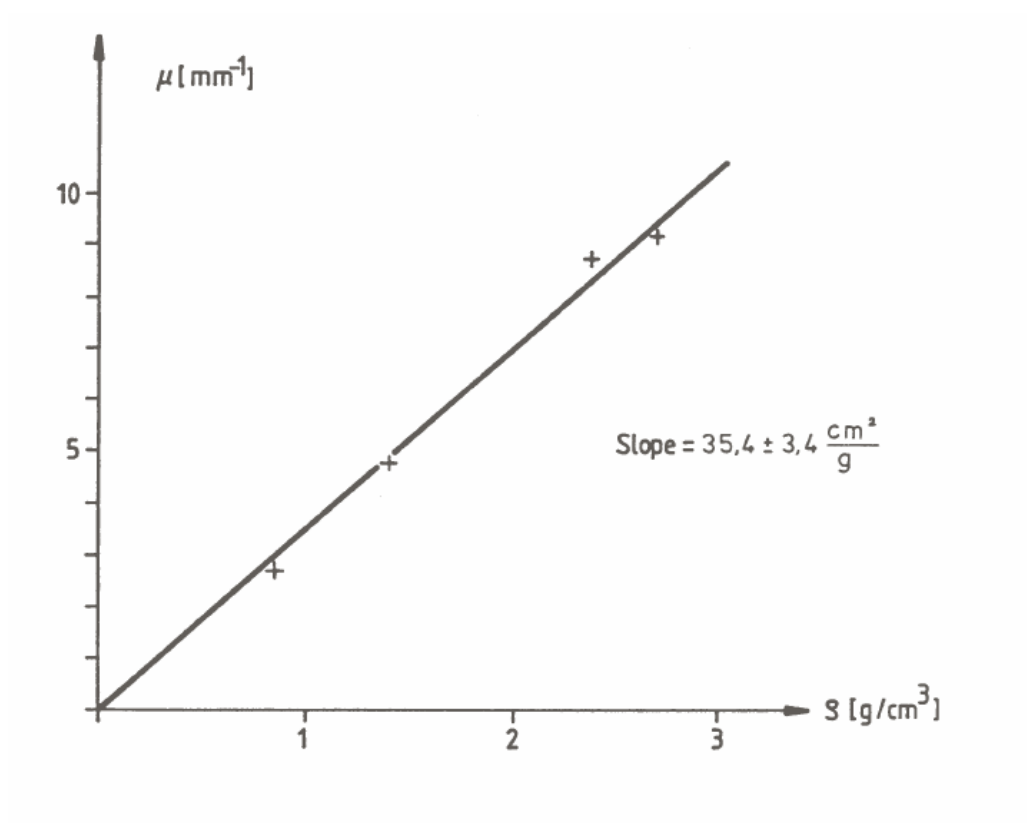
5. Eksperimenta shēma



6. Grafiku piemēri

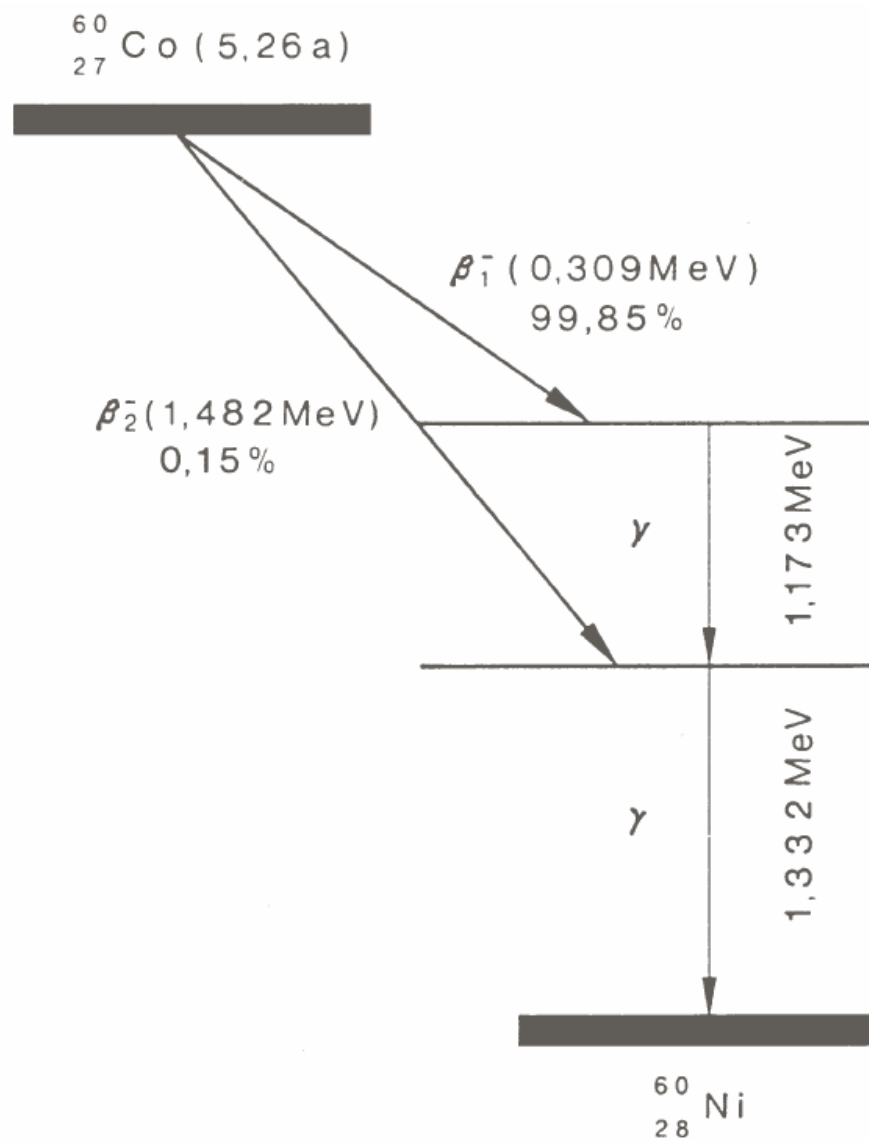


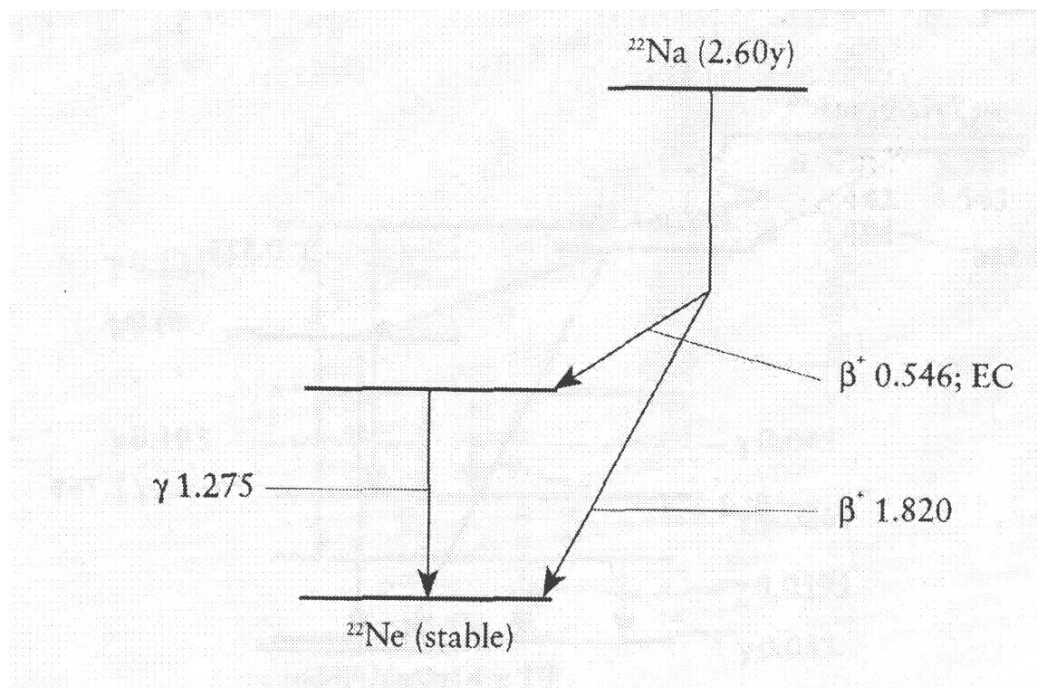
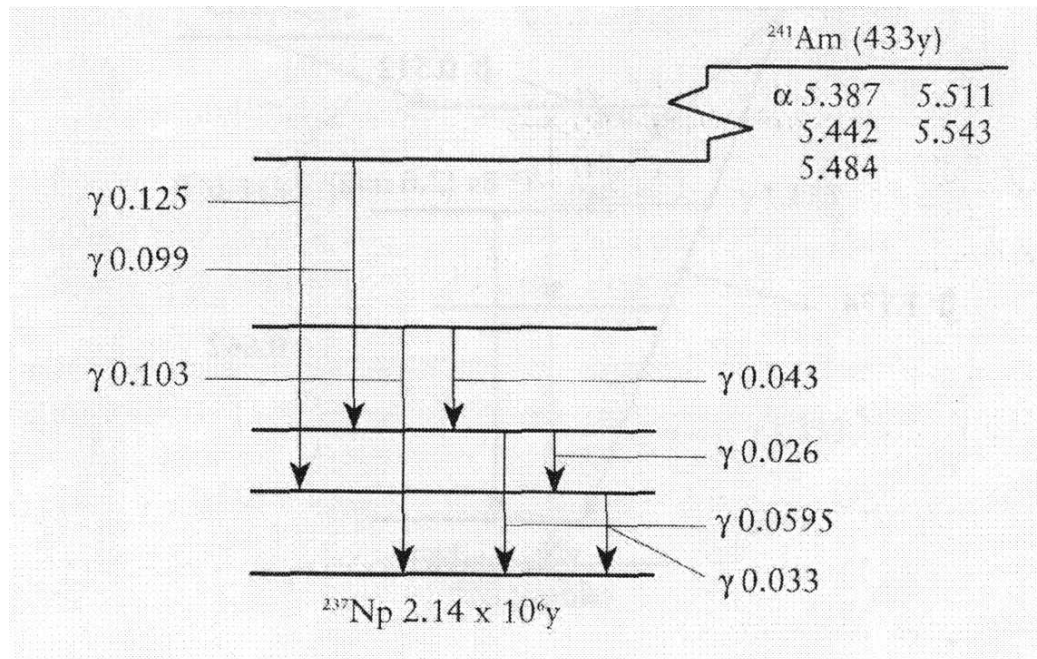
2. zīm.: Preparāta skaitīšanas ātrums atkarība no absorbētāja biezuma dažādam vielam.

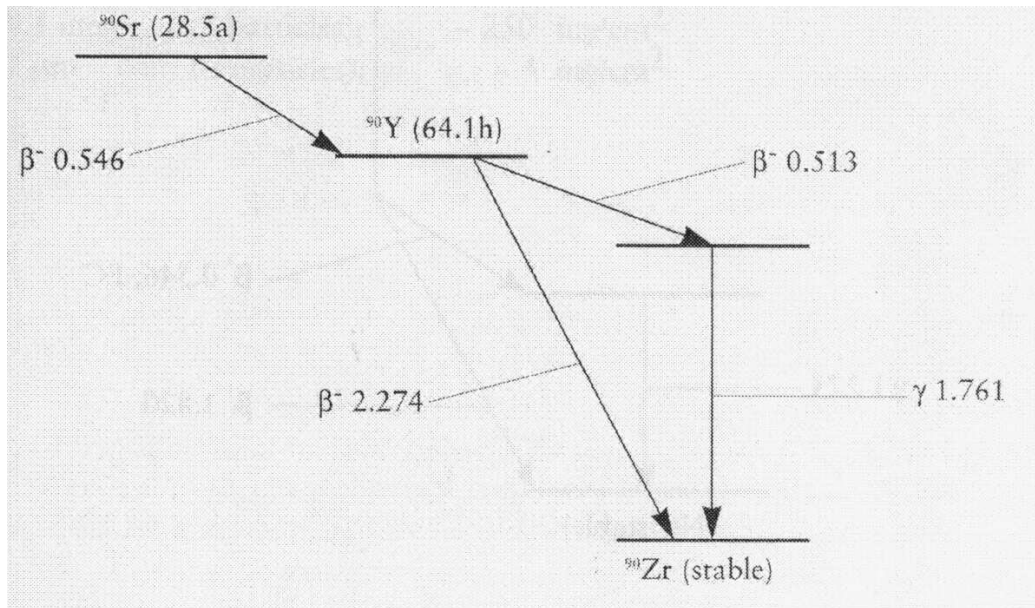


3. zīm. Lineārā absorbcijas koeficienta atkarība no absorbētāja blīvuma.

7. Sabrukšanas shēmas







8. Tabulas

Material	Density g/cm^3	Half-value (layer) thickness d_H in cm	Attenuation coefficient μ in cm^{-1}
Lead	11.11	1.41(1)	0.50
Iron	7.68	2.3(4)	0.30
Aluminium	2.70	7(3)	0.09
Concrete	1.87	6(3)	0.12
Plexiglas [®]	1.19	35(82)	0.02

Lead: ($\rho = 11.34 \text{ gcm}^{-3}$)

$$\begin{array}{ll} \mu &= 0.62 \text{ cm}^{-1}, & s_{\mu} &= 0.009 \text{ cm}^{-1} \\ d_{1/2} &= 1.12 \text{ cm}, & s_{d_{1/2}} &= 0.02 \text{ cm} \\ \frac{\mu}{\rho} &= 0.055 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}; & s_{\mu/\rho} &= 0.001 \text{ cm}^2\text{g}^{-1} \end{array}$$

Aluminium: ($\rho = 2.69 \text{ gcm}^{-3}$)

$$\begin{array}{ll} \mu &= 0.15 \text{ cm}^{-1}, & s_{\mu} &= 0.01 \text{ cm}^{-1} \\ d_{1/2} &= 4.6 \text{ cm}, & s_{d_{1/2}} &= 0.3 \text{ cm} \\ \frac{\mu}{\rho} &= 0.056 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}; & s_{\mu/\rho} &= 0.004 \text{ cm}^2\text{g}^{-1} \end{array}$$

Iron: ($\rho = 7.86 \text{ gcm}^{-3}$)

$$\begin{array}{ll} \mu &= 0.394 \text{ cm}^{-1}, & s_{\mu} &= 0.006 \text{ cm}^{-1} \\ d_{1/2} &= 1.76 \text{ cm}, & s_{d_{1/2}} &= 0.03 \text{ cm} \\ \frac{\mu}{\rho} &= 0.050 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}; & s_{\mu/\rho} &= 0.001 \text{ cm}^2\text{g}^{-1} \end{array}$$

Concrete: ($\rho = 2.35 \text{ gcm}^{-3}$)

$$\begin{array}{ll} \mu &= 0.124 \text{ cm}^{-1}, & s_{\mu} &= 0.009 \text{ cm}^{-1} \\ d_{1/2} &= 5.6 \text{ cm}, & s_{d_{1/2}} &= 0.4 \text{ cm} \\ \frac{\mu}{\rho} &= 0.053 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}; & s_{\mu/\rho} &= 0.004 \text{ cm}^2\text{g}^{-1} \end{array}$$

Plexiglas: ($\rho = 1.119 \text{ gcm}^{-3}$)

$$\begin{aligned} \mu &= 0.078 \text{ cm}^{-1}, & s_{\mu} &= 0.004 \text{ cm}^{-1} \\ d_{1/2} &= 8.9 \text{ cm}, & s_{d_{1/2}} &= 0.5 \text{ cm} \\ \frac{\mu}{\rho} &= 0.066 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}; & s_{\mu/\rho} &= 0.003 \text{ cm}^2\text{g}^{-1} \end{aligned}$$

$d[\text{mm}]$	corrected count rate [min^{-1}]	Material
0.15	1259	(Glass)
0.3	430	(Glass)
0.45	131	(Glass)
0.6	36	(Glass)
0.2	1021	(Aluminium)
0.24	786	(Aluminium)
0.5	61	(Aluminium)
0.4	1721	(Typing Paper)
0.6	1056	(Typing Paper)
0.8	672	(Typing Paper)
1.0	434	(Typing Paper)
1.0	48	(Hard Paper)

2. From the slope of the straight lines in Fig. 2, the attenuation coefficients can be calculated using Eq. (2). The values obtained together with the densities of the absorbing materials are shown in the following table:

	μ [mm^{-1}]	ρ [g/cm^3]
Typing Paper	2.71	0.852
Hard Paper	4.78	1.39
Glass	8.75	2.37
Aluminium	9.15	2.70

Literatūra

1. B.Rolovs. Kodolfizika. LVI Rīga.
2. L.Graudiņa. Laboratorijas darbi kodolfizikā. LU Rīga.