

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Fizikos fakultetas

Mokomoji atomo ir branduolio fizikos laboratorija

Laboratorinis darbas Nr. 16

ALFA DALELIŲ ENERGIJOS NUOSTOLIŲ ORE TYRIMAS

Parengė A. Poškus

2024-02-03

Turinys

Darbo tikslas	2
1. Užduotys	2
2. Kontroliniai klausimai	3
3. Sunkiųjų elektringųjų dalelių sąveika su medžiaga	4
4. Jonizuojančiosios spinduliuotės detektorių bendrosios savybės	6
5. Puslaidininkiniai detektoriai	6
6. Tyrimo metodika	6
6.1. Tyrimo metodo teorija	6
6.2. Darbo priemonės	9
6.3. Matavimo tvarka	10

Darbo tikslas

Ištirti alfa dalelių energijos skirstinio priklausomybę nuo atstumo, kurį jos nueina ore.

1. Užduotys

1. Išmatuoti silicio puslaidininkinio detektoriaus su paviršine barjerine sandūra impulsų amplitudžių pasiskirstymus, esant 7 cm atstumui tarp detektoriaus ir uždaro ^{241}Am alfa dalelių šaltinio ir esant kelioms oro slėgio vertėms (nuo 10 hPa iki ≈ 200 hPa). Kiekvieno matavimo trukmė – 2 min.
2. Išmatuoti impulsų amplitudžių pasiskirstymą, naudojant atvirą ^{241}Am alfa dalelių šaltinį, esant mažiausiam pasiekiamam oro slėgiui.
3. Naudojantis žinoma ^{241}Am spinduliuojamų alfa dalelių energijos verte (5,48 MeV) ir 2 punkto matavimo duomenimis, sukalibruoti detektorių, t. y. nustatyti proporcingumo koeficientą tarp dalelių energijos ir vidutinės impulsų amplitudės.
4. Kiekvienai 1 punkte išmatuotai slėgio vertei (p) apskaičiuoti atstumą x , kurį nulėkusi alfa dalelė ore esant vienos atmosferos slėgiui (1013 hPa) prarastų tiek pat energijos, kiek jos prarado nulėkusi 7 cm esant slėgiui p .
5. Pagal 1 ir 4 punktų duomenis apskaičiuoti ir grafiškai pavaizduoti alfa dalelių vidutinės energijos (E) priklausomybę nuo nulėkto atstumo x , esant vienos atmosferos oro slėgiui. Pagal šią priklausomybę apskaičiuoti ir tame pačiame grafike pavaizduoti alfa dalelių ilginės stabdymo gebos ($-dE/dx$) priklausomybę nuo x .
6. Pagal 5 punkto duomenis grafiškai pavaizduoti alfa dalelių ilginės stabdymo gebos ($-dE/dx$) priklausomybę nuo alfa dalelių vidutinės energijos (E), esant vienos atmosferos oro slėgiui.
7. Pagal 1 ir 4 punktų duomenis apskaičiuoti ir grafiškai pavaizduoti alfa dalelių energijos skirstinio pločio pusės maksimumo aukštyje priklausomybę nuo nulėkto atstumo x , esant vienos atmosferos oro slėgiui.
8. Aptarti pastebėtus dėsningumus, palyginti juos su teorijos teiginiais.

2. Kontroliniai klausimai

1. Ilginės stabdymo gebos ir atominės stabdymo gebos apibrėžtys. Sąryšis tarp ilginės stabdymo gebos ir atominio sąveikos skerspjūvio (išvedimas).
2. Apibrėžkite pagrindinius sunkiųjų elektringųjų dalelių sąveikos su medžiaga fizikinius mechanizmus. Delta spindulių apibrėžtis. Kodėl sunkiųjų elektringųjų dalelių trajektorija medžiagoje yra beveik tiesi?
3. Sunkiųjų elektringųjų dalelių ilginės stabdymo gebos išraiška (be išvedimo). Fizikiniu požiūriu (t. y. apytiksliai, be tikslių matematinių formuliu) pagrįskite pagrindines tos išraiškos ypatybes: priklausomybę nuo krintančiųjų dalelių greičio (v), priklausomybę nuo krintančiosios dalelės krūvio (ze) ir priklausomybę nuo medžiagos elektronų tankio (n). Apibrėžkite dalelės siekį ir išreikškite jį ilgine stabdymo geba.
4. Apibrėžkite vidutinės sužadinimo energijos \bar{I} sąvoką. Tos energijos empirinė išraiška. \bar{I} skaičiavimas, kai medžiagą sudaro kelių elementų atomai.
5. Kodėl dalelių energijų skirstinys platėja, joms pereinant pro medžiagą? Koks yra dalelių energijos skirstinio pavidalas? Dalelių energijos dispersijos apytikslė išraiška (be išvedimo).
6. Kas yra detektoriaus impulsų amplitudžių spektras ir energinė skyra? Kaip kalibruojami detektoriai, kuriais tiriami dalelių energijos spektrai?
7. Koks yra puslaidininkinio detektoriaus veikimo principas? Kas yra energijos juostos? Kokie yra laisvieji krūvininkai puslaidininkyje? Kas yra pn sandūra ir paviršinė barjerinė sandūra? Kokios tų sandūrų ypatybės yra svarbios puslaidininkinio detektoriaus veikimui?
8. Kokie veiksniai lemia puslaidininkinio detektoriaus energinę skyrą? Kokia yra puslaidininkinio detektoriaus energinės atsako funkcijos pločio tipiška vertė?

Literatūra:

1. Poškus A. Atomo fizika ir branduolio fizikos eksperimentiniai metodai. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2008. 213 – 218 p., 220 – 222 p., 225 – 227 p., 293 – 299 p., 300 – 304 p., 363 – 380 p.
2. Horodničius H. Branduolio fizika. Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 1997. p. 128 – 139.
3. Krane K. S. Introductory Nuclear Physics. New York: John Wiley & Sons, 1988. p. 193 – 198.
4. Lilley J. Nuclear Physics: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons, 2001. p. 129 – 136.
5. Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, 2000. p. 30 – 48.
6. Абрамов А. И. и др. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985, с. 27 – 41.
7. Laboratory Experiments. Phywe Systeme GmbH, 2005 (*kompaktinis diskas*).
8. Payne M. G. Energy straggling of heavy charged particles in thick absorbers // Physical Review, vol. 185, no. 2, 1969, p. 611 – 623.
9. Wilson J. W., Tai H. Range and energy straggling in ion beam transport // NASA STI Report (Technical Publication) NASA/TP-2000-209864, March 2000, 9 p.

3. Sunkiųjų elektringųjų dalelių sąveika su medžiaga

Pradinės žinios apie sunkiųjų elektringųjų dalelių vidutinės energijos mažėjimą, kai jos pereina tam tikro storio medžiagos sluoksnį, yra pateiktos [1] knygos 12.2.1, 12.2.3 ir 12.2.5 poskyriuose (214 – 218 p., 220 – 222 p. ir 225 – 227 p.). Ta pati informacija pateikta ir Atomo ir branduolio fizikos laboratorijos (V bendrosios fizikos laboratorijos) laboratorinio darbo Nr. 9 aprašo 3.3.1 – 3.3.3 ir 3.3.5 poskyriuose.

Aptarsime vieną iš reiškinių, kurie nėra paminėti [1] knygoje – dalelių *energinę sklaidą* (angl. *energy straggling*). Taip yra vadinamas dalelių energijos skirstinio pločio didėjimas, dalelėms pereinant pro medžiagą. Energinės sklaidos priežastis yra ta, kad energijos kiekis, kurį dalelė praranda vieno sąveikos įvykio (medžiagos atomo jonizavimo) metu, yra atsitiktinis. Tai akivaizdu iš šios sąveikos modelio, kuris pateiktas [1] knygos 12.2.1 poskyryje: juk dalelės energijos sumažėjimas ΔE dėl sąveikos su vienu elektronu priklauso nuo atstumo b , kuriuo dalelė pralekia pro tą elektroną (žr. (12.2.10) formulę), o šis atstumas yra atsitiktinis dydis. Dalelių vidutinė energija $\langle E \rangle$ yra vienareikšmiškai susijusi su atstumu x , kurį dalelės nuėjo medžiagoje. Pvz., jeigu pradinė visų dalelių energija buvo vienoda ir lygi E_0 , tada

$$\langle E(x) \rangle = E_0 - \int_0^x S(\langle E(x) \rangle) dx ; \quad (1)$$

čia $\langle E(x) \rangle$ yra dalelių energijų vidurkis po to, kai jos perėjo atstumą x duotoje medžiagoje, o $S(\langle E \rangle)$ yra ilginė stabdymo geba (ji priklauso nuo dalelių vidutinės energijos). Mažesnės energijos dalelės yra nuėjusios didesnę atstumą medžiagoje, todėl jos yra patyrusios didesnę susidūrimų skaičių, todėl jų energijų išsibarstymas yra didesnis. Ilginė stabdymo geba S nusako tik *vidutinės* energijos mažėjimo spartą, kai dalelė juda medžiagoje, tačiau nesuteikia informacijos apie dalelių energijų išsibarstymą. Kaip ir kitų tolydžiųjų atsitiktinių dydžių dalelių energijų statistinį pasiskirstymą po to, kai jos perėjo atstumą x duotoje medžiagoje, yra įprasta nusakyti dalelių energijos tikimybės tankiu $f(x, E)$. Atstumas x yra šios funkcijos parametras, o dalelės energija E yra tos funkcijos argumentas. Pagal bendrąją atsitiktinio dydžio tikimybės tankio apibrėžtį nykstamasis dydis $f(x, E) dE$ nusako santykinę dalį dalelių, kurių energijos yra tarp E ir $E + dE$ po to, kai dalelės perėjo atstumą x duotoje medžiagoje. Laikoma, kad visų dalelių energija taške $x = 0$ yra vienoda ir lygi E_0 , t. y. taške $x = 0$ dalelių energijos skirstinys yra Dirako delta funkcija: $f(0, E) = \delta(E - E_0)$. Dalelių energijos pasiskirstymo plotį įprasta apibūdinti funkcijos $f(x, E)$ pločiu pusės maksimumo aukštyje (šio dydžio angliška santrumpa yra „FWHM“: *full width at half-maximum*). Šį plotį žymėsime W . Aptariant sunkiųjų elektringųjų dalelių energijos skirstinio priklausomybę nuo atstumo x , reikia skirti tris atvejus:

- 1) maža x vertė, t. y. tokia x vertė, kai dalelių vidutinės energijos sumažėjimas yra daug mažesnis už dalelių pradinę energiją E_0 ;
- 2) tarpinė x vertė, t. y. tokia x vertė, kai dalelių vidutinės energijos sumažėjimas jau nėra daug mažesnis už dalelių pradinę energiją, tačiau W vis dar yra daug mažesnis už dalelių vidutinę energiją;
- 3) didelė x vertė, t. y. tokia x vertė, kai W jau nėra daug mažesnis už dalelių vidutinę energiją.

Teoriškai įrodyta [8], kad tarpinių ir didelių x verčių atveju sunkiųjų nereliatyvistinių elektringųjų dalelių energijos skirstinys yra apytiksliai Gauso skirstinio pavidalo, t. y. jo tikimybės tankį galima išreikšti šitaip:

$$f(x, E) = \frac{1}{\sigma_E(x)\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(E - \langle E(x) \rangle)^2}{2\sigma_E^2(x)}\right]; \quad (2)$$

čia $\sigma_E(x)$ yra dalelių energijos standartinis nuokrypis po to, kai jos perėjo atstumą x duotoje medžiagoje. Gauso skirstinys yra simetrinis, o jo plotis pusės maksimumo aukštyje yra lygus

$$W_E \approx 2,35\sigma_E. \quad (3)$$

W_E (kaip ir σ_E) didėja, didėjant x .

Yra žinoma, kad sunkiųjų elektringųjų dalelių energijos nuostolius medžiagoje lemia medžiagos atomų (arba molekulių) sužadinimas arba jonizavimas dėl sąveikos su krintančiųjų dalelių kuloniniu lauku. Tai yra atominis (o ne branduolinis) vyksmas, nes jį lemia krintančiųjų dalelių sąveika su medžiagos atomų elektronų sluoksniais (o ne su atomų branduoliais). Tamprieji kuloniniai susidūrimai su

atomų branduoliais yra labai reti ir jų galima nepaisyti. Todėl, skaičiuojant sunkiųjų elektringųjų dalelių energijos nuostolius, galima taikyti jonizacinės ilginės stabdymo gebos išraišką ([1] knygoje – (12.2.22) formulė). Nereliatyvistiniu atveju (kai krintančiųjų dalelių greitis yra daug mažesnis už šviesos greitį) jonizacinę ilginę stabdymo gebą galima išreikšti šitaip:

$$S_{\text{jon}} = \frac{1}{8\pi\epsilon_0^2} \frac{z^2 e^4 n M}{m_e E} \ln \frac{4m_e E}{\bar{M}}; \quad (4)$$

čia m_e yra elektrono krūvis, M yra krintančiosios dalelės masė, z yra jos krūvio skaičius, n yra elektronų koncentracija medžiagoje (įskaitant visus elektronus – ir tuos, kurie priklauso atomų vidiniams sluoksniams), o \bar{M} yra vidutinė atomo sužadinimo energija (įskaitant ir sužadinimą į ištisinio spektro sritį, kai atomas yra jonizuojamas ir atsiranda laisvasis elektronas). (4) formulės išvedimas paaiškintas [1] knygos 220 p.

Kadangi dalelių energijos nuostoliai atsiranda dėl medžiagos atomų sužadinimo arba jonizavimo, tai funkcijos $\sigma_E(x)$ tikslusis pavidalas priklauso nuo medžiagos atomų (arba molekulių) sužadinimo energijų bei nuo vyksmų, kurie sukelia tuos kvantinius šuolius, skerspjūvių. Kadangi šie skerspjūviai praktikoje nėra žinomi, tai tiksliai apskaičiuoti funkciją $\sigma_E(x)$ yra neįmanoma. Todėl sunkiųjų elektringųjų dalelių energinės sklaidos teorinė analizė remiasi įvairiais supaprastinamais. Pagrindinis supaprastinimas yra tas pats, kuriuo remiantis buvo gauta ilginės jonizacinės stabdymo gebos išraiška (4): laikoma, kad medžiagos elektronai yra laisvi, t. y., tikslusis atomo elektronų energijos spektras pakeičiamas laisvojo elektrono energijos spektru. Be to, patogu supaprastinti (4) funkcijos išraišką:

$$S_{\text{jon}}(E) \approx S_{\text{jon}}(E_1) \left(\frac{E_1}{E} \right)^a; \quad (5)$$

čia E_1 yra energijų intervalo, kuriame taikoma (5) aproksimacija, centras, o

$$a = 1 - \frac{1}{\ln \frac{4m_e E_1}{\bar{M}}}; \quad (6)$$

Pvz., jeigu

$$E_1 = 5\bar{M} / m_e, \quad (7)$$

tada

$$a = 1 - \frac{1}{\ln 20} \approx 0,666, \quad (8)$$

o (5) aproksimacijos santykinė paklaida yra mažesnė už 5%, kai

$$\frac{E_1}{2} < E < \frac{3E_1}{2}. \quad (9)$$

Kai E_1 išreiškiamas (7) formule, tada, nagrinėjant alfa dalelių energijos nuostolius ore, (9) intervalas apima svarbiausias energijos vertes (1 – 4 MeV). Remiantis (5) aproksimacija, gaunama tokia funkcijos $\sigma_E(x)$ kvadrato (t. y. dalelių energijos dispersijos) apytikslė išraiška (pagal [8]):

$$\sigma_E^2(x) \approx 2E_0^2 \frac{m_e}{M} \left[(3a+1) \ln \left(\frac{4m_e E_0}{\bar{M}} \right) \right]^{-1} \left\{ \frac{S_{\text{jon}}(\langle E(x) \rangle)}{S_{\text{jon}}(E_0)} \right\}^2 \left\{ 1 - \left[\frac{\langle E(x) \rangle}{E_0} \right]^{3a+1} \right\}. \quad (10)$$

Matome, kad ir ilginės stabdymo gebos išraiškoje (4), ir apytikslės dalelių energijos dispersijos išraiškoje (10) yra tik vienas medžiagos elementinę sudėtį atspindintis parametras – vidutinė sužadinimo energija \bar{I} . Ši energijos vertė dažniausiai nustatoma empiriškai. Viena iš empirinių formuliu, kurios susieja \bar{I} vertę ir elemento atominį numerį Z , yra šitokia:

$$\bar{I} \approx 9,2 \cdot Z + 4,5 \cdot Z^{1/3} \quad [\text{eV}]. \quad (11)$$

Jeigu medžiagą sudaro kelių elementų atomai, tada \bar{I} galima išreikšti atskirų elementų vidutinėmis sužadinimo energijomis šitaip:

$$\bar{I} = \sum_{k=1}^K c_k \bar{I}_k; \quad (12)$$

čia sumuojama skirtingų elementų atžvilgiu, K yra elementų skaičius, \bar{I}_k yra k -tojo elemento atomo vidutinė sužadinimo energija (ją galima skaičiuoti pagal (11) formulę), o c_k yra k -tojo elemento atomų santykinis skaičius (t. y. to elementų atomų skaičiaus ir pilnutinio atomų skaičiaus santykis). Pvz., anglies dvideginio (CO_2) anglies atomų santykinis skaičius yra 1/3, o deguonies atomų santykinis skaičius yra 2/3.

4. Jonizuojančiosios spinduliuotės detektorių bendrosios savybės

Pradinės žinios apie jonizuojančiosios spinduliuotės detektorių bendrąsias savybes, impulsų amplitudžių spektrus ir energinę skyra yra pateiktos [1] knygos 15.1 – 15.3 ir 15.5 poskyriuose (293 – 299 p. ir 300 – 304 p.). Ta pati informacija pateikta ir Atomo ir branduolio fizikos laboratorijos (V bendrosios fizikos laboratorijos) laboratorinio darbo Nr. 11 aprašo 4.1 – 4.4 poskyriuose.

5. Puslaidininkiniai detektoriai

Pradinės žinios apie jonizuojančiosios spinduliuotės puslaidininkinius detektorius yra pateiktos [1] knygos 19 skyriuje (363 – 380 p.).

6. Tyrimo metodika

6.1. Tyrimo metodo teorija

Šiame darbe matuojamas alfa dalelių energijos spektras. Matavimams naudojamas puslaidininkinis detektorius (tiksliau, silicio detektorius su paviršine barjerine sandūra), kuris generuoja įtampos impulsą kiekvieną kartą, kai į jį pataiko alfa dalelė. Nors skirtingų impulsų amplitudės nėra tiksliai vienodos net ir tada, kai tuos impulsus sukėlusios alfa dalelių energijos yra tiksliai vienodos, tačiau šis puslaidininkinio detektoriaus impulsų amplitudžių išsibarstymas yra palyginti mažas, todėl pagal impulsų amplitudžių pasiskirstymą (skirstinį) galima tirti dalelių energijų pasiskirstymą. Dalelių energijos matavimas remiasi tuo, kad vidutinė impulsų amplitudė yra proporcinga tuos impulsus sukėlusios alfa dalelių energijai (žr. [1] knygos (15.5.8) formulę). Impulsų amplitudžių spektras matuojamas specialiu prietaisu – *amplitudžių analizatoriumi*, taip pat vadinamu *daugiakanaliu analizatoriumi*. Daugiakanalį analizatorių galima įsivaizduoti kaip keletą turinčių bendrą įėjimą skaitiklių, kurių kiekvienas skaičiuoja tik tuos impulsus, kurių amplitudės priklauso tam tikram siauram intervalui, kuris vadinamas *kanalu*. Kanalai yra vienodo pločio, nepersikloja vienas su kitu, o tarp jų nėra tarpų. Todėl, kai į daugiakanalio analizatoriaus įėjimą patenka įtampos impulsas, kurio amplitudė yra tarp pirmojo kanalo apatinio krašto (t. y. mažiausios įtampos, kurią gali užregistruoti analizatorius) ir paskutiniojo kanalo viršutinio krašto (t. y. didžiausios įtampos), tada ta amplitudė būtinai priklauso vienam (ir *tik* vienam) kanalui. T. y. tokį impulsą užregistruoja vienas iš minėtųjų skaitiklių. Taigi, daugiakanalis analizatorius rūšiuoja impulsus pagal jų amplitudes. Taip matuojamas *impulsų amplitudžių spektras* – amplitudės funkcija $\delta N/\delta H$, kur δN yra kiekvieną kanalą atitinkantis impulsų skaičius, o δH yra kanalo plotis. Amplitudės matavimo vienetą patogiu pasirinkti lygų kanalo pločiui. Tada $\delta H = 1$, $\delta N/\delta H = \delta N$, o amplitudė H yra lygi kanalo numeriui. Šiuo atveju išmatuotasis amplitudžių spektras – tai impulsų amplitudžių histograma.

Kad detektorių būtų galima panaudoti dalelių energijos matavimui, jį reikia sukalibruoti. Energinio kalibravimo tikslas – nustatyti proporcingumo koeficientą sąryšyje tarp dalelių energijos ir vidutinės impulso amplitudės (žr. [1] knygos (15.5.8) formulę). Tam reikia išmatuoti detektoriaus impulsų vidutinę amplitudę H_{kal} , kai detektorius registruoja žinomos energijos E_{kal} α daleles. Tada dalelių, kurios sukelia amplitudės H impulsus, energiją E galima apskaičiuoti šitaip:

$$E = \frac{H}{H_{kal}} \cdot E_{kal} \quad (13)$$

Šiame darbe kalibravimui naudojamas atviras ^{241}Am šaltinis (t. y. jo spinduliuojamos α dalelės nepraranda energijos šaltinio apvalkale). Tačiau tiriamasis uždaras ^{241}Am šaltinis yra padengtas maždaug $2 \mu\text{m}$ storio aukso ir paladžio lydinio sluoksniu, kuriame α dalelės praranda dalį energijos, prieš pasiekdamos detektorių. Todėl išmatuotos ^{241}Am spinduliuojamų α dalelių energijos yra mažesnės už tikrąsias (pradinės) energijas, o jų energijų spektras yra išplitęs (išmatuotasis impulsų amplitudžių spektras išplinta dar ir dėl detektoriaus baigtinės energinės skyros, tačiau pastarasis veiksnys turi daug mažesnę įtaką galutiniam impulsų amplitudžių spektro pločiui, negu α dalelių, kurios krinta į detektorių, energijų išsibarstymas). Kitas veiksnys, kuris papildomai sumažina išmatuotą α dalelių vidutinę energiją ir papildomai padidina α dalelių energijų išsibarstymą, yra α dalelių energijos nuostoliai dujose, kurios skiria detektorių ir α dalelių šaltinį.

Kadangi puslaidininkiniai detektoriai su paviršine barjerine sandūra yra jautrūs regimajai šviesai, detektorius gali registruoti daug mažos amplitudės impulsus, kuriuos sukelia regimosios šviesos fotonai.

Šiluminiai triukšmai detektoriuje ir prie jo prijungtoje įrangoje taip pat gali sukelti mažos amplitudės impulsus. Be to, alfa dalelių šaltinis gali spinduliuoti ir mažos energijos gama kvantus, kurių sugertis (dėl jų mažos energijos) gali būti žymi netgi labai ploname puslaidininkinio detektoriaus jautriajame sluoksnyje (pvz., americio izotopas ^{241}Am spinduliuoja 20 keV ir 60 keV energijos gama kvantus). Išmatuotuose impulsų amplitudžių spektruose visi tie pašaliniai mažos amplitudės impulsai pasireiškia aukšta smaile mažiausių kanalų srityje (pačiame kairiajame spektro krašte). Jeigu nebus imtasi priemonių tų impulsų slopinimui, tada daugiakanalis analizatorius gali „nस्पèti“ registruoti „naudingųjų“ impulsų (kuriuos sukelia alfa dalelės). Taip yra dėl to, kad daugiakanalis analizatorius turi baigtinę „neveikos trukmę“ (tai yra laiko tarpas, kuris turi praeiti po kiekvieno užregistruoto impulso, kad analizatorius galėtų užregistruoti kitą impulsą). Kad analizatorius registruotų beveik visus impulsus, jų vidutinis dažnis turi būti daug mažesnis už atvirkštinę neveikos trukmę. Todėl, siekiant pašalinti minėtuosius pašalinius impulsus, yra padidinama analizatoriaus jautrio riba (taip vadinama mažiausioji impulso amplitudė, kurią gali užregistruoti analizatorius). Tą patį efektą galima pasiekti ir šiek tiek kitaip: visų impulsų amplitudės sumažinamos tam tikru pastoviu dėmeniu. Impulsai, kurių amplitudės po šio pakeitimo tampa neigiamos, nėra registruojami. Vokietijos kompanijos „Phywe Systeme“ daugiakanalis analizatorius, kuris naudojamas šiame darbe, turi programiškai valdomą parametą „Offset“ („poslinkis“), kuris nusako minėtąjį impulsų amplitudės sumažėjimą. Didinant šį parametą, impulsų amplitudžių spektras slenka į kairę (spektro kraštas, kuris atsiduria neigiamųjų impulsų srityje, yra „nukerpamas“). Minėtojo konkretaus analizatoriaus atveju, esant didžiausiam stiprinimo koeficientui, parametro „Offset“ vienetą atitinka 40 kanalų. T. y., kai Offset = 1, histograma pasislenka per 40 kanalų; kai Offset = 2, histograma pasislenka per 80 kanalų ir t.t. Atitinkamai, kai parametras „Offset“ nėra lygus nuliui, (13) formulę reikia modifikuoti tokiu būdu:

$$E = \frac{H + 40 \cdot \text{Offset}}{H_{\text{kal}} + 40 \cdot \text{Offset}} \cdot E_{\text{kal}}; \quad (14)$$

čia H ir H_{kal} yra kanalų numeriai, kurie atitinka „paslinktus“ amplitudžių spektrus (laikoma, kad parametras „Offset“ yra vienodas ir tiriamajam, ir kalibraciniam spektrams).

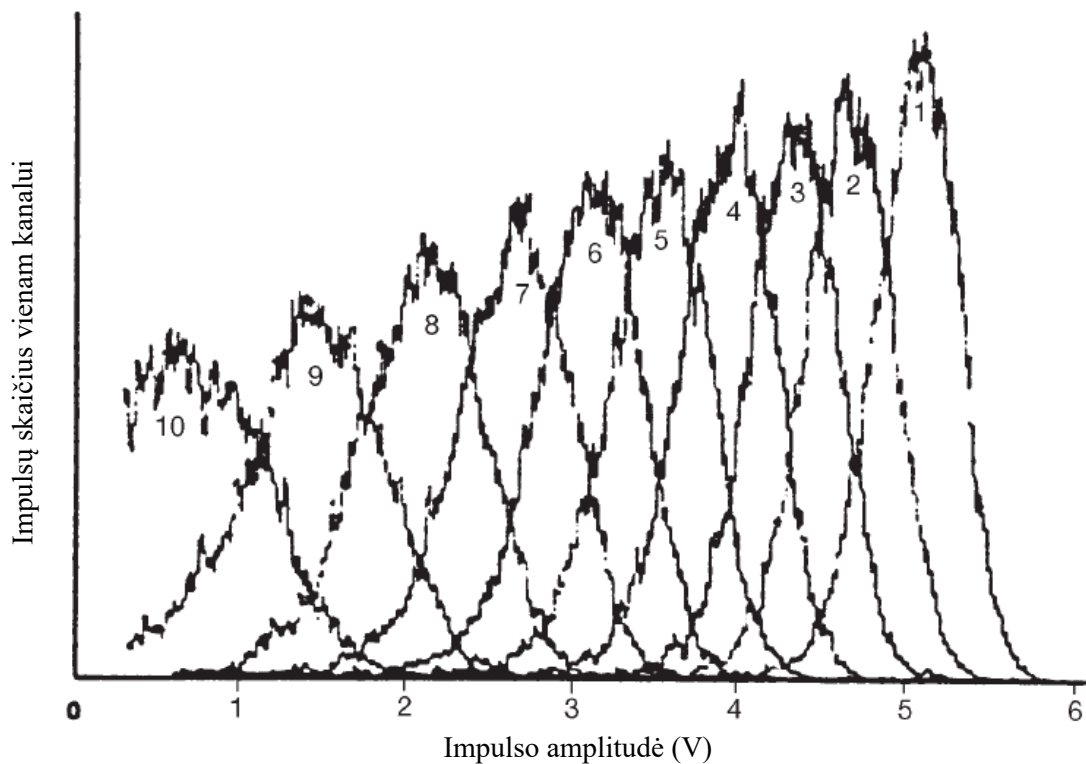
Vienas iš šio darbo tikslų – ištirti α dalelių energijos priklausomybę nuo atstumo x , kurį alfa dalelės nueina ore, esant vienos atmosferos slėgiui (1013 hPa). Siekiant padidinti matavimų tikslumą ir pašalinti matavimo geometrijos pokyčių įtaką matavimo duomenims, eksperimento metu yra keičiamas ne atstumas x tarp α dalelių šaltinio ir detektoriaus, o oro slėgis p , esant pastoviai atstumo x vertei. Pastarąją vertę žymėsime s . Atstumas x , kurį turėtų nueiti α dalelės esant vienos atmosferos slėgiui, kad jų vidutinė energija taptų lygi vidutinei energijai, kuri gauta nuėjus atstumą s esant slėgiui p , gali būti apskaičiuotas šitaip:

$$x = s \frac{p}{1013 \text{ hPa}}. \quad (15)$$

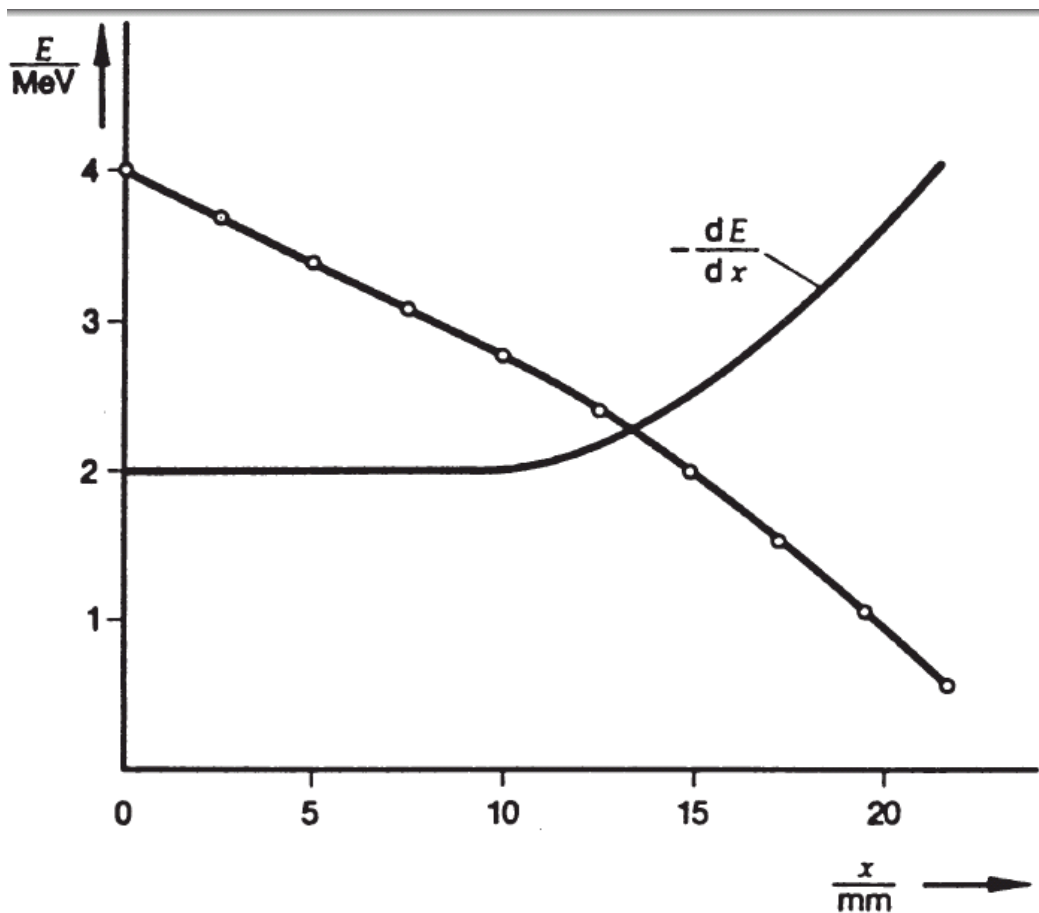
Kad būtų galima reguliuoti dujų, pro kurias sklinda alfa dalelės, slėgį, šaltinis ir detektorius yra vakuumo kameroje.

Kadangi elektrono masė yra 4 – 5 eilėmis mažesnė už sunkiosios elektringosios dalelės masę, tai sąveika su elektronais beveik neturi įtakos dalelės judėjimo *krypčiai* (ta sąveika mažina tik dalelės judėjimo *greitį*, t. y. kinetinę energiją). Todėl sunkiųjų elektringųjų dalelių trajektorijos medžiagoje yra praktiškai tiesios ir pilnutinis detektorių pasiekiančių dalelių skaičius per laiko vienetą beveik nepriklauso nuo slėgio. Pastarąjį skaičių nusako impulsų amplitudžių spektro integralas (jeigu spektro matavimo trukmė yra pastovi ir lygi minėtam laiko vienetui). Vadinasi, didėjant dalelių energijų išsibarstymui (t. y. spektro smailės *plotai*), spektro smailės aukštis turėtų mažėti (taip, kad smailės *plotas* liktų pastovus). Alfa dalelių impulsų amplitudžių spektrai, kurie atitinka skirtingus slėgius, bet vienodą spektro matavimo trukmę, yra pavaizduoti 1 pav. (šie spektrai buvo gauti naudojant kitokią matavimo įrangą, negu įranga, kuri naudojama šiam laboratoriniam darbui, todėl laboratorinio darbo duomenys gali skirtis nuo 1 pav.).

Pagal 1 pav. duomenis ir (14) bei (15) formules galima nustatyti alfa dalelių vidutinės energijos E , ilginės stabdymo gebos S ir energijos skirstinio pločio W priklausomybes nuo dalelių nueito kelio x ore. l -tojo spektro vidutinę amplitudę H_l ($l = 1, 2, \dots, L$, kur L yra spektrų skaičius) ir amplitudžių pasiskirstymo plotį W_{Hl} galima nustatyti šitaip. Spektro smailės pusės maksimumo aukštyje brėžiama horizontali tiesė. Jos sankirtos su spektro kreive abscisės pažymėsime $H_l^{(1)}$ ir $H_l^{(2)}$ (čia $H_l^{(2)} > H_l^{(1)}$).



1 pav. Alfa dalelių impulsų amplitudžių spektrai, kurie atitinka skirtingas oro slėgio vertes, tačiau vienodą spektro matavimo trukmę (iš [7]). Spektrai Nr. 1 – Nr. 10 atitinka slėgio vertes nuo 0 iki 225 hPa (slėgis keičiamas kas 25 hPa)



2 pav. Alfa dalelių vidutinės energijos E ir ilginės stabdymo gebos $-dE/dx$ priklausomybė nuo nueito atstumo ore, esant vienos atmosferos slėgiui (iš [7])

Tada

$$H_l = \frac{H_l^{(1)} + H_l^{(2)}}{2}, \quad (16)$$

$$W_{Hl} = H_l^{(2)} - H_l^{(1)}. \quad (17)$$

Įrašius (16) į (14) vietoj H , gaunama alfa dalelių vidutinė energija E_l , kuri atitinka l -tąjį spektrą. Analogiškai gaunamos ir energijos $E_l^{(1)}$ ir $E_l^{(2)}$, kurios atitinka spektro kraštus pusės maksimumo lygyje. Vadinas, alfa dalelių energijos skirstinio plotis, kuris atitinka l -tąjį spektrą, yra lygus

$$W_l = E_l^{(2)} - E_l^{(1)} = \frac{H_l^{(2)} - H_l^{(1)}}{H_{kal} + 40 \cdot \text{Offset}} \cdot E_{kal}. \quad (18)$$

Paskui pagal (15) formulę kiekvienai slėgio vertei p_l reikia apskaičiuoti atitinkamą efektinį atstumą x_l . Jeigu intervalai tarp x_l verčių yra pakankamai maži, tada galima teigti, kad priklausomybė $E(x)$ intervale nuo x_l iki x_{l+1} yra apytiksliai tiesinė, t. y. jos išvestinė (dydis, kuris priešingas ilginei stabdymo gebai) yra apytiksliai pastovi. Ilginės stabdymo gebos vertę, kuri atitinka energijos vertę $(E_l + E_{l+1}) / 2$, galima apskaičiuoti šitaip:

$$S\left(\frac{E_l + E_{l+1}}{2}\right) \equiv -\frac{dE}{dx}\bigg|_{E=\frac{E_l+E_{l+1}}{2}} \approx \frac{E_l - E_{l+1}}{x_{l+1} - x_l}; \quad (16)$$

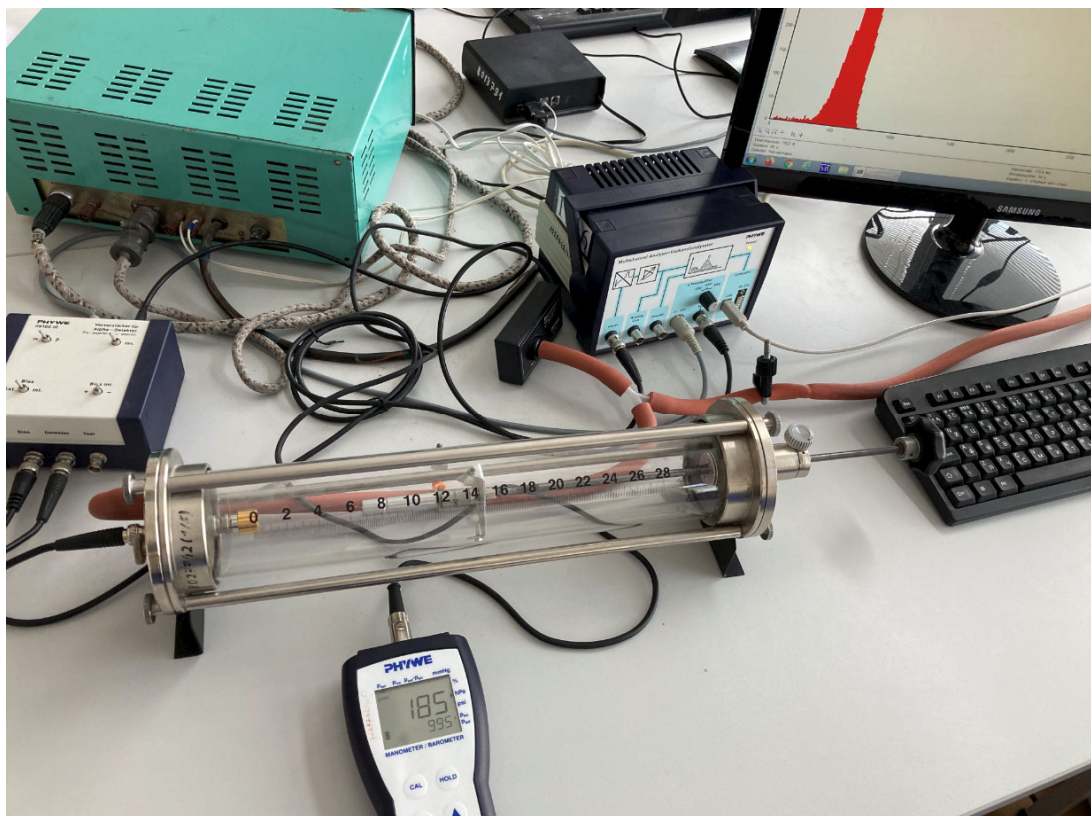
Tokiu būdu apskaičiuotų vidutinės energijos ir ilginės stabdymo gebos priklausomybių nuo x pavyzdžiai yra pateikti 2 pav.

6.2. Darbo priemonės

Šiam darbui naudojama Vokietijos kompanijos „Phywe Systeme“ mokomoji alfa spektroskopijos įranga. Darbo įrangos pagrindinės dalys yra šios:

- 1) alfa dalelių detektorius (puslaidininkinis silicio detektorius su paviršine barjerine sandūra).
- 2) alfa detektoriaus priešstiprintuvis;
- 3) atvirasis ^{241}Am šaltinis (aktyvumas 3,7 kBq);
- 4) uždarasis ^{241}Am šaltinis (aktyvumas 370 kBq);
- 5) stiklinė kamera branduolio fizikos eksperimentams;
- 6) rankinis barometras/manometras su išoriniu pjezovaržiniu slėgio jutikliu;
- 7) dviejų pakopų membraninis siurblys;
- 8) daugiakanalis analizatorius;
- 9) kompiuteris (amplitudžių spektrų atvaizdavimui ir išsaugojimui);

3 pav. parodytas matavimo įrangos bendras vaizdas. Radioaktyvusis šaltinis turi būti pritvirtintas ant slankaus strypo, kuris yra kameros dešinėje. Detektorius yra kairiajame kameros gale. Daugiakanalis analizatorius kartu atlieka ir detektoriaus maitinimo šaltinio vaidmenį.



3 pav. Matavimo įrangos bendras vaizdas

6.3. Matavimo tvarka

1. Įsitikinama, kad daugiakanalis analizatorius yra išjungtas (t. y. prie alfa detektoriaus neturi būti prijungta įtampa).

2. Į kamerą įdedamas uždarysis ^{241}Am radioaktyvusis šaltinis. Tuo tikslu kamera atidaroma (iš šaltinio laikiklio pusės, t. y. dešiniajame gale), prie stypo prisukamas radioaktyvusis šaltinis, kamera uždaroma. Uždarant kamerą, reikia patikrinti, ar guminė tarpinė yra teisingoje padėtyje (ji turi būti apskritame griovelyje).

Dėmesio! Su stikline kamera reikia elgtis labai atsargiai, kad ji neskiltų. Pvz., negalima jos atidarinti pakėlus ją už vieno galo. Kamera turi visada tvirtai stovėti ant stalo ir būti horizontali.

3. Įjungiamas rankinis barometras. Rodyklė, kuri yra barometro rodytuvo viršuje, turi būti nukreipta į užrašą „P_{ext}“. Jeigu taip nėra, tada ją reikia nukreipti į tą užrašą, naudojant mygtuką „▼“. Tokioje veikoje didesnis skaičius barometro rodytuve rodo slėgį matavimų kameros viduje, o mažesnis skaičius rodo aplinkos slėgį. Slėgio matavimo vienetas – hektopaskalis (1 hPa = 100 Pa).

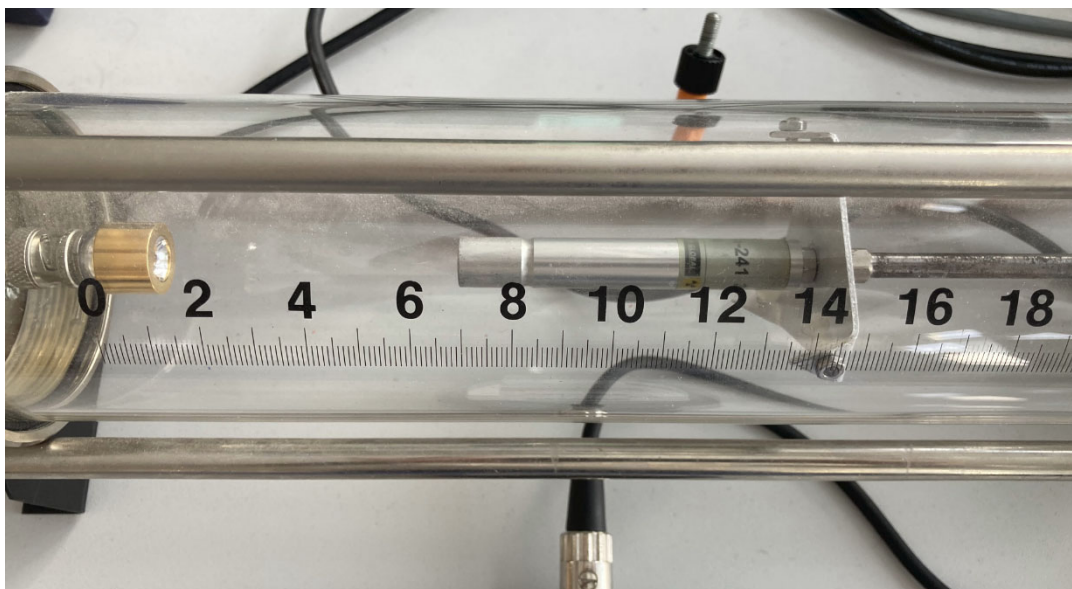
4. Užsukamas oro įleidimo varžtas, kuris yra ant kameros kairiojo šono (prie detektoriaus).

5. Įjungiamas siurblys. Atlaisvinami du spaustukai, kurie yra ant siurblio guminės žarnos (oranžinis spaustukas yra tarp kameros ir barometro, o juodasis spaustukas – tarp barometro ir siurblio). Palaukiama, kol slėgis kameros viduje nustos mažėti (jeigu barometro parodymai nemažėja 10 s, galima laikyti, kad slėgis nusistovėjo). Pasiekus reikiamą slėgį, minėtieji spaustukai priveržiami (t. y. siurblio guminė žarna užspaudžiama). Visų pirma reikia priveržti oranžinį spaustuką, o paskui – juodąjį. Užrašomas slėgis. Siurblys išjungiamas.

Pastabos: 1) Jeigu siurblys veikia normaliai ir vakuuminė sistema yra sandari, tada mažiausias pasiekiamas slėgis yra mažesnis už 10 hPa.

2) Priveržus abu spaustukus, barometro parodymai pradės sparčiai augti, nes tada barometras rodo slėgį tarp spaustukų, t. y. trišakyje, prie kurio prijungtas barometras (žr. 3 pav.). Šis trišakis nėra hermetiškas. Tačiau kameros viduje slėgis lieka praktiškai pastovus ir lygus užsirašytai vertei, nes kamera yra atskirta nuo minėtojo trišakio oranžiniu spaustuku.

6. Uždarysis ^{241}Am šaltinis pastatomas į tokią padėtį, kad jo korpuso galas būtų ties 7 cm padala (padalos yra nubrėžtos ant kameros korpuso). Tokia padėtis atitinka 7 cm atstumą tarp šaltinio ir detektoriaus (žr. 4 pav.).



4 pav. Uždarąjo ^{241}Am šaltinio padėtis matavimo metu

7. Alfa detektoriaus priešstiprintuvio jungiklis „ α/β “ turi būti padėtyje „ α “, o jungiklis „Inv“ turi būti išjungtas (t. y. kairiojoje padėtyje), o jungiklis „Bias“ turi būti padėtyje „Ext“ (tada jungiklio „Bias Int.“ padėtis gali būti bet kokia). Perjungiklis „Bias“, kuris yra ant daugiakanalio analizatoriaus („Multichannel Analyser“), turi būti padėtyje -99 V .

8. Įsitikinus, kad visų perjungiklių padėtys yra teisingos, įjungiamas daugiakanalio analizatorius (elektros tinklo jungiklis yra ant jo užpakalinės sienelės).

9. Startuojama programa „Measure“ (jos piktograma yra darbastalyje; be to, ji yra „Start Menu“ programų grupėje „PHYWE“).

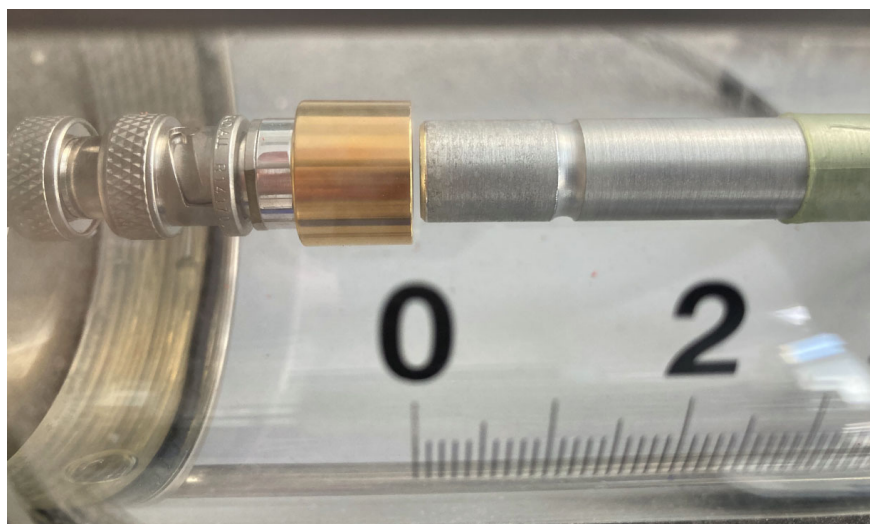
10. Programa paruošiama darbui. Tuo tikslu: **a)** pasirenkamas meniu „Gauge“ punktas „Multi Channel Analyser“, **b)** pasirenkama veika „Spectra recording“ ir pele nuspaužiamas mygtukas „Continue“, **c)** atsidariusiame histogramos lange, sąrašo „X-Data“ pasirenkamas punktas „Channel number“ (t. y. ant abscisių ašies turi būti atidėtas kanalo numeris); **d)** lauke „Interval width [channels]“ surenkamas skaičius „5“ ir nuspaužiamas klaviatūros klavišas „Enter“ (tai reiškia, kad kiekvienas histogramos stulpelis atitinka 5 gretimų kanalų sumą); **e)** slankiklis „Gain“ turi būti dešiniojoje kraštinėje padėtyje; **f)** teksto laukelyje, kuris yra šalia slankiklio „Offset“, surenkamas skaičius „6“ ir nuspaužiamas klaviatūros klavišas „Enter“; **g)** pažymimas „varnele“ laukelis „Recording time“, o žemiau įvedamas skaičius „120“ (tai yra spektro matavimo trukmė, išreikšta sekundėmis); **h)** nuspaužiamas programos mygtukas „Reset“; **i)** pažymimas „varnele“ laukelis „Start/Stop“. Tada programa pradeda registruoti impulsų amplitudžių histogramą.

11. Laukiama, kol analizatorius registruoja spektrą. Po 2 min programa pati sustabdo matavimą. Paskui reikia spustelėti mygtuką „Accept data“. Tada atsidaro naujas langas, kuriame pavaizduotas galutinis spektras.

12. Histograma išsaugoma diske. Tam atliekama meniu komanda „Measurement/Export data...“. Atsidariusiame dialogo lange „Export data“ reikia pažymėti laukelius „Copy to clipboard“ ir „Export as metafile“. Paskui reikia sukurti Microsoft Word failą ir atlikti Word meniu komandą „Edit/Paste“. Galima dar poredaguoti histogramą, įterpiančią paaiškinančius užrašus (tai galima atlikti ir „Word“ aplinkoje, ir programoje „Measure“, naudojant pastarosios programos meniu komandą „Measurement/Labels...“).

13. Histogramos duomenys išsaugomi teksto faile (skaičių stulpelių pavidalu) vėlesnei analizei. Tam vėl atliekama meniu komanda „Measurement/Export data...“, tačiau šį kartą reikia pažymėti laukelius „Save to file“ ir „Export as numbers“. Paskui reikia įvesti failo vardą (su plėtinium). Tame faile duomenys išdėstyti dviejų stulpelių pavidalu: pirmajame stulpelyje – kanalo numeris, o antrajame – atitinkamas impulsų skaičius. **Pastaba:** kadangi matavimo metu po 5 kanalus buvo sujungti į vieną kanalą, tai visi kanalų numeriai yra skaičiaus 5 kartotiniai.

14. Atlaisvinamas oranžinis spaustukas. Atsargiai atsukant oro įleidimo varžtą, slėgis kameros viduje padidinamas maždaug (15 – 20) hPa (tai yra slėgio *padidėjimas*; galutinė slėgio vertė priklauso nuo pradinės). Paskui oro įleidimo varžtas ir oranžinis spaustukas vėl užsukami (visų pirma reikia užsukti



5 pav. Atvirojo ^{241}Am šaltinio padėtis matavimo metu

oro įleidimo varžtą, o paskui iš karto užsukti oranžinį spaustuką). Pakartojami 10 – 13 punktai. Taip reikia išmatuoti iš viso 10 – 15 spektrų, atitinkančių slėgio vertes nuo maždaug 10 hPa iki maždaug 200 hPa. Kiekvienu atveju reikia užsirašyti ir atitinkamą slėgio vertę (tai yra slėgio vertė iš karto po to, kai buvo užsuktas oro įleidimo varžtas, bet dar prieš užsukant oranžinį spaustuką). Nebūtina siekti, kad intervalai tarp slėgio verčių būtų vienodi.

15. Į matavimų kamerą įleidžiamas oras. Tam atsukamas oro įleidimo varžtas.

16. Uždarasis ^{241}Am šaltinis nuimamas nuo laikiklio ir įdedamas į apsauginį konteinerį. Prie laikiklio pritvirtinamas atvirasis ^{241}Am šaltinis. Kamera uždaroama. Atvirasis ^{241}Am šaltinis pastatomas į tokią padėtį, kad atstumas tarp jo korpuso galo ir detektoriaus būtų 1 – 2 mm (žr. 5 pav.).

17. a) Užsukamas oro įleidimo varžtas, kuris yra ant kameros kairiojo dangčio; b) įjungiamas siurblys; c) atlaisvinami abu spaustukai; d) palaukiama, kol slėgis kameros viduje nustos mažėti; e) oranžinis ir juodasis spaustukai priveržiami (ta pačia tvarka); f) siurblys išjungiamas.

18. Pakartojami 10 – 13 punktai, naudojant tik vieną (mažiausią) slėgio vertę. Matavimo trukmė šiuo atveju nėra svarbi: pakanka tik, kad *pilnutinis* impulsų skaičius būtų didesnis už 20000 (pilnutinis impulsų skaičius yra rodomas programos „Measure“ lango kairiajame apatiniame kampe). Kuo didesnis pilnutinis impulsų skaičius, tuo mažesnė vidutinės impulso amplitudės matavimo paklaida. Todėl impulsų skaičius nėra ribojamas iš viršaus; vienintelis reikalavimas yra tas, kad jis neturi būti mažesnis už 20000.

19. Daugiakanalis analizatorius išjungiamas, į kamerą įleidžiamas oras, abu spaustukai atlaisvinami, kamera atidaroma, atvirasis ^{241}Am radioaktyvusis šaltinis nuimamas nuo laikiklio ir įdedamas į apsauginį konteinerį. Kamera uždaroama.

20. Atspausdinami matavimo duomenys (lentelių pavidalu). Lentelėse turi būti pateikti tik tie kanalai, kurie apima stebimuosius spektro maksimumus. Lentelės turi būti suformatuotos taip, kad būtų aiškios. Pvz., kiekviena lentelė turi būti su pavadinimu ir su stulpelių antraštėmis; visur turi būti nurodytos slėgio vertės. Lentelių apipavidalinimui galima panaudoti įvairias programas, pvz. „Word“, „Excel“ arba „Origin“. Spausdinimui reikia atlikti tos programos meniu komandą „File/Print“. Dialogo lange, kuris atsidaro įvykdžius komandą „File/Print“, turi matytis spausdintuvas, kuris yra laboratorijoje. **Pastaba:** Spausdintuvas, kuris šiuo metu naudojamas laboratorijoje, nėra tinklo spausdintuvas. T. y. jis prijungtas ne tiesiog prie kompiuterinio tinklo, o prie kompiuterio, kuris prijungtas prie kompiuterinio tinklo. Jeigu sistema negali užmegzti ryšio su spausdintuvu, tai gali reikšti, kad tas kompiuteris arba spausdintuvas nėra įjungtas.

21. Ant lapų su atspausdintais duomenimis reikia užrašyti savo vardą ir pavardę. Atspausdintą duomenų lentelę reikia įklijuoti į darbo žurnalą. Po atspausdinta duomenų lentelė turi pasirašyti darbo vadovas arba laborantas (jeigu duomenų lentelę sudaro daugiau negu vienas lapas, tada darbo vadovas arba laborantas pasirašo ant kiekvieno lapo).