

# LD16B. KVANTINIŲ ŠVIESOS SAVYBIŲ TYRIMAS

## Darbo tikslai

Ištirti dujų spinduliuotės spektrų ypatumus ir spalvoto tirpalo šviesos sugertį.

## Užduotys

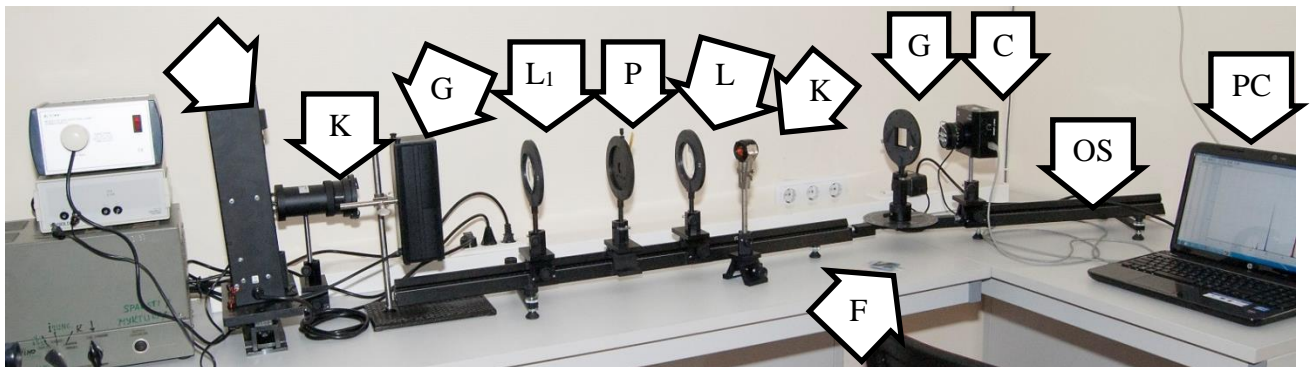
1. Atlikti gardelinio spektrometro kalibravimą.
2. Išmatuoti vandenilio dujų spinduliuotės spektro Balmerio serijos linijų bangos ilgius ir apskaičiuoti Rydbergo konstantą.
3. Nustatyti kalio bichromato tirpalo spektro sugerties juostos krašto bangos ilgį ir apskaičiuoti Planko konstantą.

## Teorinės temos

- Vandenilio atomas. Balmerio serija.
- Šviesos sugertis ir spinduliavimas.
- Spektrų tipai.

## Darbo priemonės ir prietaisai

Optinių suolų sistema su kampamačiu (OS), difrakcinė gardelė (G) (600 rėžių/mm); glaudžiamieji lęšiai ( $L_1$ ) ir ( $L_2$ ), reguliuojamo pločio plyšys (P), *VideoCom* kamera (C), kompiuteris (PC), gyvsidabrio garų lempa (GL), vandenilio lempa (VL), kaitrinė lempa (KL), kiuvetė (K) su kalio bichromato ( $K_2Cr_2O_7$ ) tirpalu, šviesos filtrų rinkinys (F) (1 pav.).

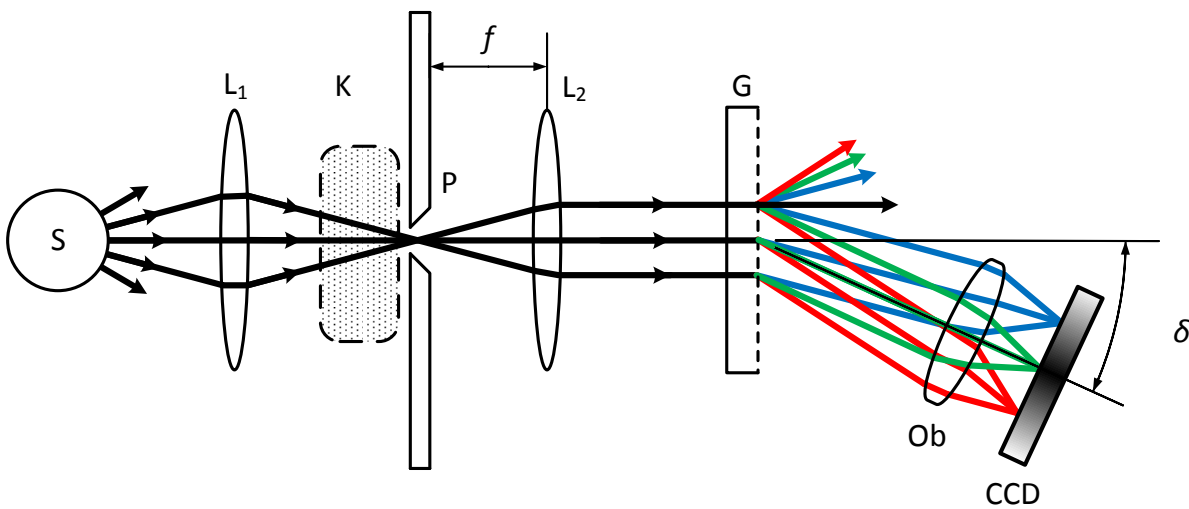


1 pav. *LEYBOLD Didactic* kvantinių šviesos savybių tyrimo stendas








## Tyrimo metodika






### Matavimo įrangos vpatybės ir darbo principai

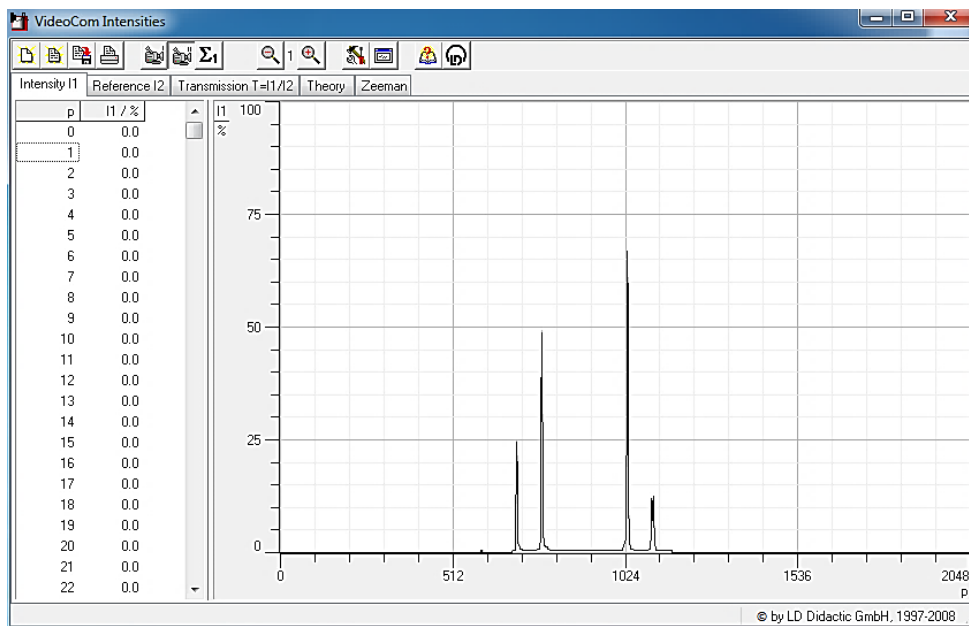
Šis tyrimas yra pagrįstas medžiagų spinduliuotės ir sugerties spektrų matavimu gardelinio spektrometru, kurio optinė schema yra pateikta (2 pav.) Šviesos šaltinio (S) spinduliuotė yra sukoncentruojama glaudžiamuoju lęšiu ( $L_1$ ) į plyšį (P). Plyšys ir glaudžiamasis lęšis ( $L_2$ ) sudaro kolimatorių, kuriuo sukuriamas lygiagrečių šviesos spindulių pluoštas yra išplečiamas ir krinta į difrakcinę gardelę (G). Dėl difrakcijos išsisklaidę skirtingo bangos ilgio šviesos spinduliai yra surenkami fotografiniu objektyvu (Ob) ir sufokusuojami ant CCD liniuotės. Atlikus elektroninį ir programinį užregistruotųjų signalų apdorojimą programos lange atvaizduojamas tiriamasis spektras.



2 pav. Gardelinio spektrometro optinė schema

Spektrometru kalibruoti ir spektrams registruoti yra skirta programa *VideoCom Intensities*. Šios programos langas yra pavaizduotas (3 pav.). Jo viršuje yra įrankių juosta su mygtukais (piktogramomis), kuriais atliekamos prietaiso kalibravimo, spektrų registravimo, duomenų saugojimo bei išvesties funkcijos. Mygtukais  ir  paleidžiamas ir stabdomas spektrų registravimas. *VideoCom* kameroje naudojama CCD liniuotė yra sudaryta iš diskretinių elementų – pikselių. Nuspaudus mygtuką  signalus fiksuoja ir perduoda programai kas aštuntas detektorių matricos elementas, o nuspaudus mygtuką  – visi elementai (atitinkamai 256 ir 2048 pikseliai), todėl spektrometras gali veikti dviem skirtingos skyros režimais. Mygtuku  atidaromas spektrometro kalibravimo langas, kuriame įvedami nustatymai prietaisui suderinti. Mygtukais  ir  mažinama arba didinama integravimo trukmė – registravimo laikas, lemiantis signalo amplitudę. Tarp šių mygtukų esantis skaičius (nuo 1 iki 8) nurodo sąlyginę integravimo trukmę, kuri gali būti keičiama tam

tikrais žingsniais nuo 1,25 ms iki 20 ms. Nuspaudus mygtuką  atliekamas užregistruotų signalų amplitudžių verčių vidurkinimas. Įrankių juostos kairėje pusėje esančiais keturiais mygtukais atliekamos manipuliavimo eksperimento duomenimis operacijos. Mygtukas  yra skirtas pašalinti prietaiso kalibravimo duomenis, kad būtų galima iš naujo jį suderinti. Mygtuku  atidaromas langas atverti anksčiau atliktų ir išsaugotų matavimų rezultatus. Mygtuku  išsaugomi eksperimento rezultatai, o nuspaudus mygtuką  galima atsispausdinti duomenis lentelės arba grafiko pavidalu.

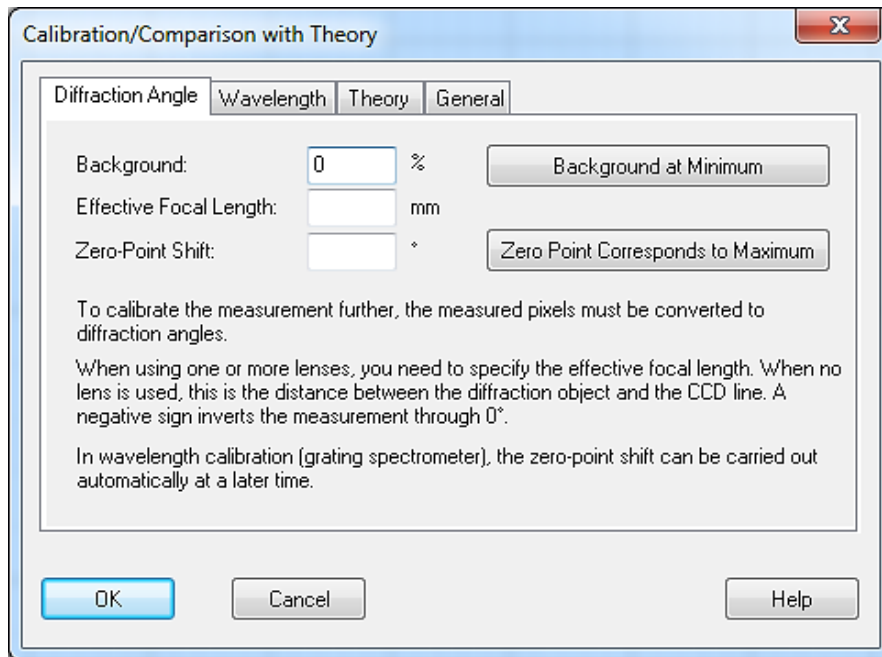


3 pav. *VideoCom Intensities* programos langas

Programos lange yra pateikiama detektoriaus fiksuojama informacija lentelės (kairėje lango pusėje) ir grafiko pavidalu. Pradėjus spektrų registravimą nesukalibruotu prietaisu pirmiausiai yra fiksuojama kiekvieno CCD liniuotės elemento registruojamo signalo santykinė amplitudė, kaip parodyta (3 pav.). Detektoriaus elemento užfiksuoto signalo amplitudė yra diskretizuojama – pagal signalo lygį jai yra priskiriama vertė nuo 1 iki 250, kuri vėliau yra išreiškiama procentais. Atlikus kalibravimą abscisių ašyje nurodomi bangos ilgiai nanometrais. Dešiniuoju kompiuterio pelės klavišo spustelėjimu iškviečiamas papildomas meniu. Vykdam jame nurodomas komandas galima atlikti papildomas operacijas, kurios bus aptartos vėliau.

Derinant spektrometrą visų pirma atliekamas jo kolimatoriaus (lęšių ( $L_1$ ) ir ( $L_2$ ) bei plyšio (P) sistema) justiravimas. Optiniai elementai tarpusavyje turėtų būti suderinti taip, kad kameros registruojamas signalas atspindėtų kalibravimui naudojamo šaltinio spinduliuotės spektro prigimtį. Gyvsidabrio emisijos spektras yra linijinis dėl to programoje stebimas detektoriaus atsako signalas turėtų būti labai siaurų smailių rinkinys. Tai yra įgyvendinama pastatant lęšį ( $L_2$ ) židinio nuotolio

atstumu nuo plyšio, o plyšys praveriamas tiek, kad viena iš fiksuojamų didelio intensyvumo linijų turėtų dvi aiškias smailes. Be to, tokiu atveju reikia atitinkamai suderinti kameros objektyvą: jis turi būti sufokusuotas į begalybę, jo diafragma – maksimaliai atverta.



4 pav. Spektrometro kalibravimo lango vaizdas (skirsnis *Diffraction Angle*)

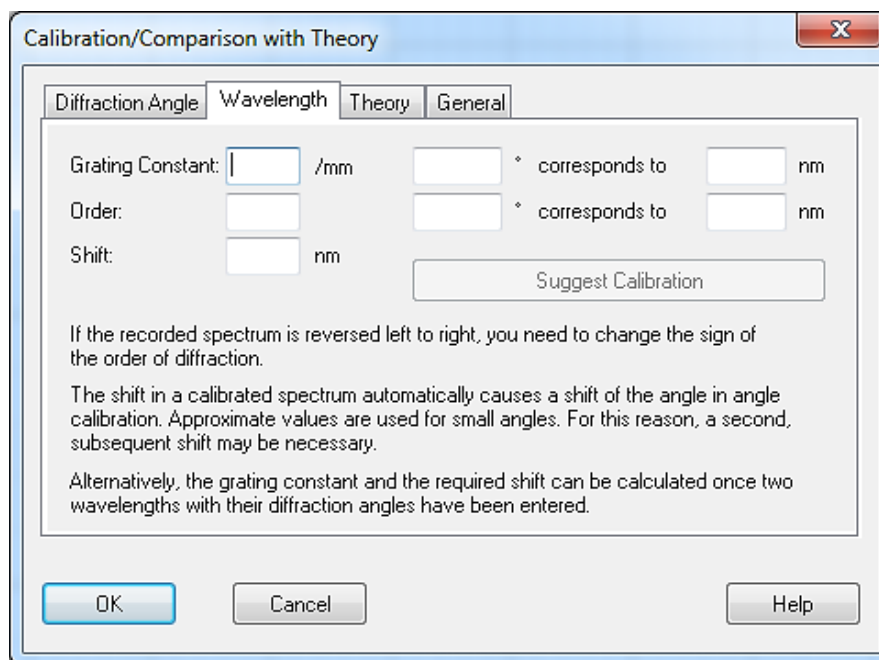
Spektrometrui sukalibruoti yra būtina susieti gyvsidabrio lempos spinduliuotės linijų bangos ilgus su jų atitinkamos eilės difrakcijos maksimumų kampais. Tam programoje CCD liniuotės pikselių skalė turi būti pakeista kampų matavimo skale. Tai padaroma prietaiso kalibravimo lange, skirsnyje *Diffraction Angle* (4 pav.), įvedant *VideoCom* kameros objektyvo židinio nuotolį ir objektyvo optinės ašies nuokrypio nuo kolimatoriaus optinės ašies kampą  $\delta$  (žr. 2 pav.). Šis kampas nurodo vietą, ties kuria yra fiksuojami  $m$ -osios eilės difrakcijos maksimumai, ir yra nuskaitomas nuo kampamačio skalės. Patvirtinus įvestus parametrus programos lange pavaizduojamas spektro linijas atitinkančių signalo amplitudžių pasiskirstymas pagal nuokrypio kampus.

Gardelinio spektrometro kalibravimo algoritmas yra pagrįstas skaičiavimais pagal difrakcinės gardelės lygtį

$$d(\sin \varphi + \sin \vartheta) = m\lambda; \quad (1)$$

čia  $d$  – difrakcinės gardelės konstanta,  $\vartheta$  – spindulių pluošto kritimo į gardelę kampas,  $\varphi$  – bangos ilgio  $\lambda$  spindulių difrakcijos kampas,  $m$  – difrakcijos maksimumo eilė. Remiantis užrašytąja lygtimi akivaizdu, jog didesni nuokrypio kampai turėtų atitikti didesnius bangos ilgus atitinkančias spektro amplitudes, matomas programos lange. Tam patikrinti yra pasirenkami du skirtingi šviesos filtrai. Filtras įstatomas prieš gardelę ir stebimos filtro praleidžiamoje spektro srityje esančios didesnio intensyvumo linijos, pagal pateiktą gyvsidabrio spinduliuotės spektro linijų atlasą nustatomi jų bangų

ilgiai ir juos atitinkantys difrakcijos kampai. Jeigu kampai netenkina (1) lygties, kalibravimo lango skiltyje *Diffraction Angle* pakeičiamas nuokrypio kampo ženklas.

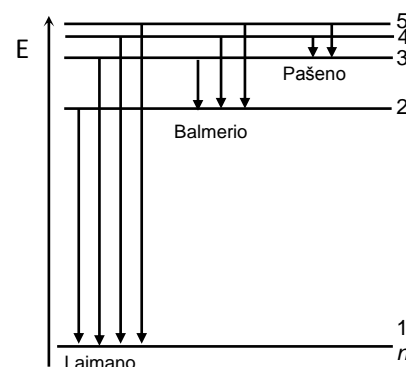


5 pav. Spektrometro kalibravimo lango vaizdas (skirsnis *Wavelength*)

Atidarius kalibravimo lango skirsnį *Wavelength* (5 pav.) įvedami nustatytieji bangos ilgiai ir juos atitinkantys difrakcijos kampai bei spektrinių linijų eilė. Nuspaudus mygtuką *Suggest Calibration* automatiškai apskaičiuojamas gardelės rėžių tankis (atvirkštinis dydis gardelės konstantai) ir spektro linijų poslinkis. Pastarasis dydis atsiranda dėl nepakankamai tikslios gardelės orientacijos krintančio į ją šviesos spindulių pluošto atžvilgiu, paklaidos nuskaitant kampo dydį nuo kampamačio ir kameros objektyvo. Ši pataisa iš esmės atitinka (1) lygties kairės pusės antrąjį narį, išreikštą bangos ilgio vienetais. Įvertinus programos skaičiavimo rezultatus ir juos patvirtinus, programos lange vaizduojamas spektras – spinduliuotės intensyvumo skirstinys pagal bangos ilgius.

### Rydbergo konstantos nustatymas

Tiriant vandenilio dujų spinduliuotės (emisijos) spektrą yra registruojama tiksliai į regimąją sritį patenkanti jo dalis. Tai Balmerio (*Balmer*) serijos linijos, žymimos (bangos ilgių mažėjimo tvarka)  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  ir t.t. Šios serijos linijų bangos ilgiai atitinka bangos ilgius fotonų, išspinduliuojamų vykstant elektrono šuoliams vandenilio atome iš aukštesniųjų energetinių lygmenų, žymimų pagrindiniais kvantiniais skaičiais  $n = 3; 4; 5\dots$ , į pirmąją sužadintąją būseną ( $n = 2$ ) (6 pav.). Remiantis Boro (*Bohr*) postulatais, didesnis atominių lygmenų, tarp kurių įvyksta šuolis, energijų skirtumas atitinka didesnio



6 pav. Vandenilio atomo energijos lygmenų diagrama

dažnio (trumpesnio bangos ilgio) išspinduliuojamus fotonus. Balmerio serijos spektro linijų bangos skaičiai  $\tilde{\nu}$  reiškiami tokia formule:

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H^\infty \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right); \quad (2)$$

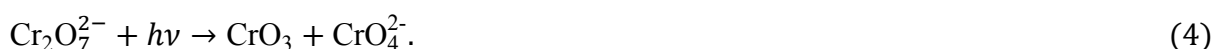
čia  $R_H^\infty$  – Rydbergo (*Rydberg*) konstanta. *VideoCom Intensities* programa užregistravus vandenilio emisijos spektrą ir nustatčius Balmerio serijos linijų bangos ilgius galima apskaičiuoti Rydbergo konstantą.

### **Planko konstantos įvertinimas nustatant tirpalo sugerties juostos krašto padėtį**

Veikiant šviesai medžiagoje gali vykti įvairūs pokyčiai, pvz., suskilti molekulės. Paprastai vienas sugertas šviesos kvantas suskaido vieną molekulę. Skaidyti gali tik tie kvantai, kurių energija yra ne mažesnė už energiją  $w_0$ , reikalingą tai molekulei suskaidyti:

$$h\nu \geq w_0; \quad (3)$$

čia  $\nu = c/\lambda$  – spinduliuotės dažnis,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s – šviesos greitis vakuume,  $h$  – Planko (*Planck*) konstanta. Pastarajai nustatyti naudojamas kalio dichromato ( $K_2Cr_2O_7$ ) vandens tirpalas. Tirpalą apšviečiant ištisinio spektro spinduliuote jame susidariusį joną  $Cr_2O_7^{2-}$  šviesa skaido taip:



Fotono, kurio energijos dar pakanka suskaidyti joną, bangos ilgis yra  $\lambda$ . Šis parametras nurodo tirpalo sugerties juostos krašto padėtį regimojoje srityje registruojamame jo sugerties (arba pralaidumo) spektre. Čia tenkinama sąlyga:


$$h \frac{c}{\lambda} = w_0. \quad (5)$$


(4) reakcijos šiluminis efektas  $w$  yra žinomas; jis lygus 222 kJ/mol. Norint išreikšti  $w_0$  (energijos kiekį vienai molekulei suskaidyti), reikia padalyti  $w$  iš Avogadro (Avogadro) skaičiaus  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ . Tada Planko konstanta apskaičiuojama pagal formulę

$$h = \frac{w\lambda}{N_A c}. \quad (6)$$



## Darbo eiga

### 1. Spektrometro parengimas darbui

Ijungiamo gyvsidabrio lempa (GL) (1 pav.) ir pastatoma taip, kad lęšiu ( $L_1$ ) sukurtos šviesios dėmės simetrijos ašis būtų ties plyšio viduriu. Patikrinami kameros  $C$  objektyvo nustatymai: fokusavimo žiedu nustatomas begalinis fokusuojamo objekto nuotolis, o diafragmos valdymo žiedu (jis yra arčiau kameros korpuso) parenkamas minimalus santykinės angos skaičius, nurodantis, kad diafragma yra maksimaliai praverta. Įjungiamas kompiuteris, paleidžiama programa *VideoCom Intensities* ir spektrų registravimas mygtuku .

Stebint programos lange matomą vaizdą – CCD liniuotės užregistruotą signalą – keičiamas plyšio (P) plotis ir lęšio ( $L_2$ ) padėtis tol, kol gaunamas panašus vaizdas į parodytąjį (3 pav.). Suderinus stendo optinius elementus mygtuku  paspaudimu atidaromas spektrometro kalibravimo langas (3 pav.). Skirsnyje *Diffraction Angle* įvedamas kameros objektyvo židinio nuotolis ir nuokrypio kampas  $\delta$  (žr. 2 pav.), kuris nuskaitomas nuo kampomačio skalės. Įvedus nurodytus parametrus paspaudžiama *OK*, kad programos lange būtų pavaizduotas spektro smailių pasiskirstymas pagal difrakcijos kampus.

Prieš difrakcinę gardelę (G) (1 pav.) ant jos įtvaro įtaisomas ir spaustukais prispaudžiamas mėlynas juostinis šviesos filtras. Įstačius filtrą patikrinama difrakcinės gardelės padėtis – prie jos stovo pritvirtinta balta rodyklė kampomačio skalėje turi rodyti  $0^\circ$ . Iš difrakcinių maksimumų pasiskirstymo pagal kampus žymekliu (pasirenkama dešiniu juo pelės mygtuku atidaromame meniu *Set Marker* → *Vertical Line*) nustatoma didžiausio intensyvumo smailės kampinė padėtis, o iš pateiktojo gyvsidabrio spinduliuotės spektro atlaso – tą smailę atitinkančios spektrinės linijos bangos ilgis. Veiksmai pakartojami įstačius geltoną šviesos filtrą.

Jeigu nustatytieji kampai ir bangos ilgiai tenkina (1) lygtį, mygtuku  atidaromas kalibravimo langas, rezultatai įvedami į atitinkamus langelius skirsnyje *Wavelength* (žr. 5 pav.) ir nuspaudžiama *Suggest Calibration*. Jeigu gardelės režių tankis skiriasi nuo nurodytojo ne daugiau 10–20 režių/mm, kalibravimo rezultatai patvirtinami paspaudžiant *OK*. Dabar programos lange pateikiamas spektro amplitudžių pasiskirstymas pagal bangos ilgius. Siekiant geresnės rezultatų vizualizacijos, dešiniojo pelės klavišo paspaudimu iškviečiamas meniu ir pasirenkama *Show Colour Spectrum*. Patikrinamos didžiausio intensyvumo spektro smailių bangos ilgių vertės, nustatytos programoje, su tikrosiomis. Jeigu tos pačios spektro linijos bangos ilgiai skiriasi daugiau nei 5 nm, kalibravimo procedūra atliekama iš naujo paspaudžiant .

Visi darbo metu išmatuoti spektrai (grafiko pavidalu) išsaugomi dešiniu juo pelės mygtuku paspaudimu atidaromame meniu pasirenkant *Copy Diagram* → *Metafile*, patį grafiką įkeliant į *MS*




Word dokumentą. Išjungiamo gyvsidabrio lempa.

## 2. Rydbergo konstantos nustatymas matuojant vandenilio dujų spinduliuotės spektro Balmerio serijos linijų bangos ilgį

Vandenilio lempa (VL) (1 pav.) pastatoma optinio suolo gale prieš lęšį ( $L_1$ ) ir plyšį (P) (2 pav.).

Ijungus šviesos šaltinį jo padėtis pakoreguojama taip, kad ant plyšio įtvarto ties jo viduriu lęšiu ( $L_1$ ) būtų sudaromas dujų išlydzio vamzdelio vidurinės dalies, šviečiančios rausvai, atvaizdas.

Spektrometro programos lange turi būti matomos kelios (daugiausia keturios arba penkios) ryškios smailės regimosios spektro srities diapazone – Balmerio serijos linijos  $H_\alpha$  (raudona),  $H_\beta$  (žydra),  $H_\gamma$  (violetinė) ir t.t. Norint padidinti stebimų spektrinių linijų intensyvumą, galima truputį padidinti spektrometro kolimacijos plyšio plotį ir (arba) prietaisu registruojamo signalo integravimo trukmę įrankių juostos mygtuku .

Spektro smailių (linijų) padėtys nustatomos pagal lentelės duomenis pažymint smailės viršūnę arba dešiniojo pelės mygtuko paspaudimu iškviečiamame meniu pasirenkant žymeklį (*Set Marker* → *Vertical Line*). Pasirinkus šią komandą pažymima smailė ir būsenos juostoje (programos lango apačioje) nurodomas ją atitinkantis bangos ilgis. Siekiant „pritraukti“ mažo intensyvumo spektrines linijas (pakeisti spektrogramos ašių mastelį) nuspaudus dešininį pelės klavišą pasirenkama komanda *Zoom*, įvykdoma kairiuoju pelės mygtuku pažymint norimą priartinti spektro sritį.

Nustačius vandenilio spektro linijų bangos ilgį pagal (2) formulę apskaičiuojama Rydbergo konstantos  $R_H^\infty$  vertė, kuri palyginama su teorine jos verte, nurodoma informacijos šaltiniuose. Vandenilio lempa išjungiamo ir patraukiama į šalį.

## 3. Planko konstantos įvertinimas nustatant tirpalo sugerties juostos krašto padėtį

Ant optinio suolo galo prieš lęšį ( $L_1$ ) įtaisoma ir įjungiamo kaitrinė lempa (KL) (1 pav.). Lempos spinduliuotė nukreipiama į spektrometro plyšį P.. Jeigu detektorių matricos elementų registruojami signalai pasiekė soties lygį (registruojamas intensyvumas siekia 100 %), keičiama plyšio apšvieta stumdant galinę lempos korpuso dalį arba sumažinamas plyšio plotis.

Tarp lęšio ( $L_1$ ) ir plyšio (P) pastatoma kiuvetė (K) su tiriamuoju tirpalu (žr. 2 pav.). Programos lange atidaroma skiltis *Transmission* (pralaidumas) nustatyti kalio bichromato sugerties juostos krašto padėtį ilgesnių bangų srityje. Naudojant žymeklį nustatomas juostos krašto padėtį atitinkantis bangos ilgis.

Pagal (6) formulę apskaičiuojama Planko konstanta. Baigus darbą kaitrinė lempa ir kompiuteris išjungiami, šviesos filtrai supakuojami.



## Literatūra

1. *LEYBOLD Didactic VideoCom* instruction sheet 337 47.
2. V. A. Šalna. Optikos laboratoriniai darbai. Vilnius, VU leidykla, 2009. ([www.mopl.bfsk.ff.vu.lt](http://www.mopl.bfsk.ff.vu.lt))
3. N. Astrauskienė ir kt. Elektromagnetizmas. Banginė ir kvantinė optika. Atomo, branduolio ir puslaidininkų fizika. Laboratoriniai darbai. Vilnius, Technika, 1997.