

**Valgusallikate fotomeetrilised ja spektraalsed  
karakteristikud**

**Tartu 2015**



Nägemisaistingu tähtsus maailma tajumises on väga suur. Seetõttu on kasutuses radiomeetria spetsiaalne osa – **fotomeetria**, milles kasutatavad suurused baseeruvad inimese silma tundlikkuse kõveral.

Fotomeetria põhiühikuks on valgustugevuse ühik kandela. Vastavalt 1979.a. rahvusvahelisele kokkuleppele on üks kandela defineeritud kiirgustugevuse kaudu.

Kui allikas kiirgab sagedusel  $540 \times 10^{12}$  Hz, siis üks kandela (cd) on **valgustugevus** suunas, milles allika **kiirgustugevus** on  $1/683$  W/sr.

Üldjuhul ei ole allika kiirgus isotroopne, st erinevates suundades kiiratud võimsus on erinev ja seega sõltub ka valgustugevuse väärtus suunast.

Kõik teised fotomeetrite suuruste definitsioonid baseeruvad valgustugevuse ühikul. Kui allika valgustugevus on  $J$ , siis saadab ta ruuminurka  $d\Omega$  valgusvoogu  $d\Phi = Jd\Omega$  ja lõpliku suurusega ruuminurka  $\Omega$  saadetakse valgusvoogu  $\Phi = \int_{\Omega} Jd\Omega$ , isotroopse allika puhul on kogu valgusvoogu  $\Phi_{4\pi} = 4\pi J$ .

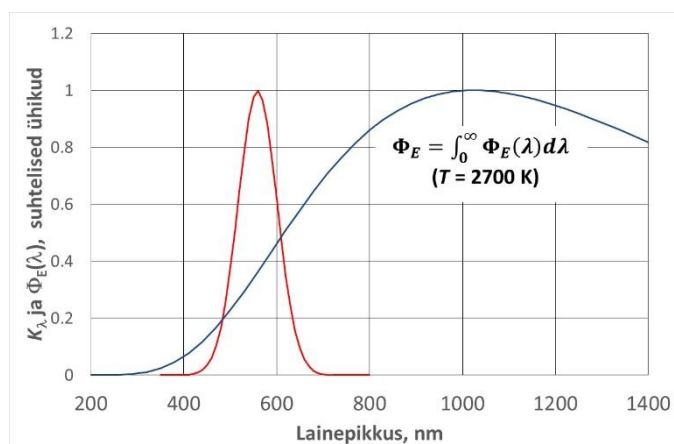
SI-s on valgusvoogu ühikuks lumen:  $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \times 1 \text{ sr}$ .

Kasutades valgustugevuse definitsiooni, saame, et lainepikkusel  $\lambda = 555$  nm on valgus- ja kiirgusvoogu seotud kordajaga  $V_{555} = 683 \text{ lm/W}$ .

Vastavalt Joonisel 1 toodud sõltuvusele erineb mingil teisel lainepikkusel  $\lambda$  samale kiirgusvoole vastav valgusvoogu lainepikkuse 555 nm omast  $K_{\lambda}$  ( $< 1$ ) korda:  $\Phi_{\lambda} = K_{\lambda} V_{555} \Phi_E$  ehk samale kiirgusvoole vastab vähem luumeneid.

Kui valgusallika kiirguse spekter  $\Phi_E(\lambda)$  on lai (Joonis 2), siis tema tekitatud valgusvoogu avaldub integraalina

$$\Phi = V_{555} \int_{380}^{760} K_{\lambda} \Phi_E(\lambda) d\lambda.$$



Joonis 2. Suhtelise valgusefektiivsuse ja musta keha maksimumi järgi normeeritud kiirgusvoogu sõltuvus lainepikkusest.

Must keha, mille spekter temperatuuril 2700 K on kujutatud Joonisel 2, kiirgab elektromagnetlainet tänu soojusliikumisele. Võrreldes kõigi teiste soojuskiirguritega (nt hõõglamp), on antud temperatuuril musta keha pinnaühikult kiiratud võimsus maksimaalne. Selleks, et teised soojuskiirgurid kiirgaksid sama palju kui must keha, peab nende temperatuur olema kõrgem. Sõltumata valguse tekitamise mehhanismist iseloomustatakse tihtipeale valgustamiseks kasutatavaid lampe värvustemperatuuriga  $T_C$ . See on sellise musta keha temperatuur kelvinites, mille värvus on kõige lähedasem vaadeldava valgusallika värvitooniga.

Kui  $T_C < 5000\text{K}$  (nt küünlaleek), on tegemist „sooja“ valgusega, kui aga  $T_C > 5000\text{K}$  (nt sinine taevas), on valgus „külm“.

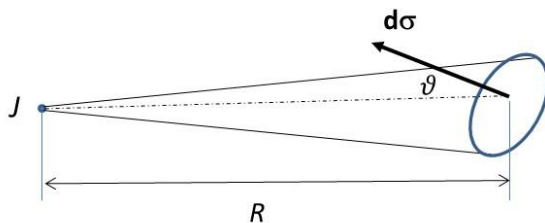
Jooniselt 2 järeldub ka, et soojuskiirgurite poolt kiirratavast koguenergiast kiiratakse vaid väike osa nähtavas piirkonnas, st soojuskiirgurite valgusviljakus  $\Phi/\Phi_E^3$  on väike.

Kui valgusvooge mõõdetakse valgusallikast sellistel kaugustel  $R$ , mille puhul võib allika karakterset lineaarsuurust  $d$  lugeda tühiseks ( $d/R \ll 1$ , punktallikas), siis piisab valgusvoo leidmiseks mingis suunas sellesuunalise valgustugevuse teadmisest. Kui aga punktallika tingimus pole täidetud, on vaja valgusallika kohta rohkem teavet [1, 2].

Pinnale suurusega  $d\sigma$  langevat valgust iseloomustab valgustatus  $E = \frac{d\Phi}{d\sigma}$ . Kui meil on tegemist punktallikaga, mille valgustugevus on  $J$  ja valguse levikusuuna ning  $d\sigma$  pinnanormaali vaheline nurk on  $\vartheta$ , siis pinna valgustatus avaldub kujul

$$E = J \cos\vartheta / R^2,$$

kus  $R$  on allika ja pinna vahel kaugus. SI-s on valgustatuse ühikuks luks (lx):  $1\text{lx} = 1\text{lm m}^{-2}$ .



Joonis 3. Pinna valgustatust iseloomustavad suurused.

## 2. Valgustite põhitüübid

### 2.1. Soojuskiirgurid.

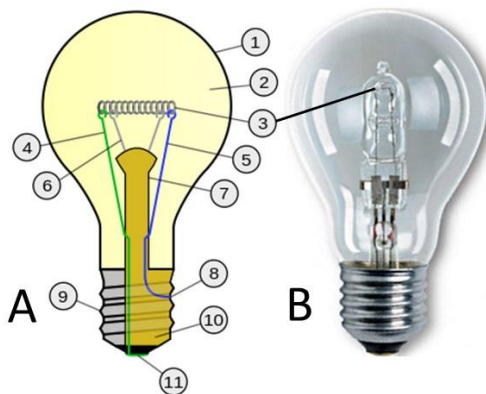
Nii tavalises hõõg- kui ka halogeenlambis tekib valgus volframist hõõgniidi kuumenemisel voolu toimel. Mida kõrgem on hõõgniidi temperatuur, seda lühemalainelisemasse ossa nihkub kiirguse maksimumile vastav lainepikkus  $\lambda_{\max}^4$  ja seda rohkem kiirgab valgusallikas nähtavat valgust. Vältimaks volframi liigkiiret aurustumist on hõõgniidi temperatuur vahemikus 2000 kuni 3300 K (volframi sulamistemperatuur on  $\approx 3700\text{K}$ ). Neil temperatuuridel jääb  $\lambda_{\max}$  lähedase infravalguse piirkonda (Joonis 2). Vähendamaks aurustumist ja volframi sadestumist lambi ballooni, on lambid täidetud raske inertgaasi (reeglina argoon) ning lämmastiku seguga (kogurõhk  $\approx 70\text{kPa}$ ). Lisaks vähendab raske inertgaas soojusjuhtivuse kadusid, lämmastiku lisamine aga välistab läbilöögi lambi pingestatud varraste vahel (Joonis 4).

Kuna halogeenlambi hõõgniidi temperatuur on kõrgem kui tavalisel hõõglambil, on tema valgusviljakus ca kaks korda suurem. Kõrgemal temperatuuril on aga aurustumine kiirem ja volframi sadestumine lambi ballooni vähendab tema läbilaskvust. Sadestumise vähendamiseks lisatakse täitegaasile halogeenühendeid. Halogeen (tavaliselt lisatakse broomi ühendid) reageerib aurustunud volframiga lambi madalama temperatuuri piirkonnas, tekkinud

<sup>3</sup> Siin on valgusvoo  $\Phi$  ja kiirgusvoo  $\Phi_E$  all silmas peetud voogude koguväärtusi üle ruuminurga  $4\pi$ . Voogusid võib ruumis ümber jaotada nt peeglite/läätsede abil, kuid see ei muuda koguvoo väärtust.

<sup>4</sup> Vastavalt Wieneri niikeseadusele  $\lambda_{\max} T = \text{const}$

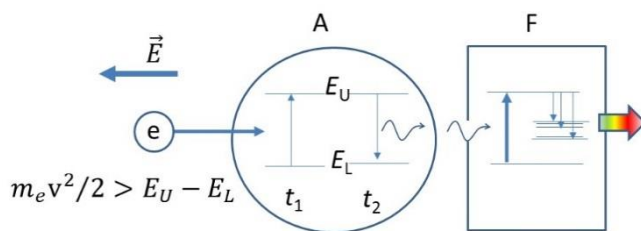
ühendi liikumisel kõrgema temperatuuri piirkonda ühend laguneb ja vabanenud volfram sadestub tagasi hõõgniidile. Selline pöörduv tsükkel vähendab volframi sadestumist ballooni pinnale ja lambi eluiga pikeneb.



Joonis 4. A – hõõglamp; B – halogeenlamp. Lahti kirjutatud on vaid olulisemad detailid.  
 1 – lambi balloon; 2- gaasitäide;  
 3 – spiraalikujuuline hõõgniit;  
 4, 5 – hõõgniidi ühendusvardad lambi sokli kontaktidega;  
 9, 11 – kontaktid, millele on rakendatud võrgupinge.

## 2.2. Fluorestsentslamp<sup>5</sup>

Fluorestsentslambis viib valguse tekkele kolmest põhisammust koosnev protsess (Joonis 5)



Joonis 5. Kiirguse tekke põhiprotsessid fluorestsentslambis

Selleks, et aatom A kiirgaks, peavad elektronid elektriväljas  $E$  omandama kineetilise energia, mis ületab aatomi üleminekuks seisundist L seisundisse U vajamineva energia ( $E_U - E_L$ ). Elektroni mitteelastsel põrkel siirdub aatom ergastatud seisundisse, kust ta eluea ( $t_2 - t_1$ ) möödudes pöördub tagasi alumisse seisundisse kiirates seejuures footoni. Aatomitest A lähtuvad suure energiaga foonid (ultravalguse (UV) piirkond) ergastavad luminofooris F energianivood, millest lähtuva kiirguse spekter püütakse teha võimalikult lähedaseks harjumuspärasele „valgele“ valgusele.

„Klassikaline“ fluorestsentslamp on pika silindri kujuline. Silindri mõlemas otsas paiknevad elektroodid, millele rakendatakse pinge. Silinder on täidetud madalal rõhul ( $< 1\%$  atmosfääri-rõhust) oleva inertgaasiga (tavaliselt argoon), millele on lisatud tilk elavhõbedat (Hg). Elektroodidele rakendatud piisavalt kõrge pinge puhul toimub läbilöökk, st algselt elektrit mittejuhtiv keskkond muutub juhtivaks. See juhtiv keskkonna (plasma) omadused on määratud laetud osakestega – elektronide ja ioonidega. Temperatuuri tõusu tõttu Hg aurustub ja elektronlöökkide tulemusena ergastatakse aatomite erinevad energianivood. Osa Hg kiirgusest kiiratakse UV lainepikkustel 253,7 ja 183 nanomeetrit. Selle UV kiirguse transformeerimine nähtavaks valguseks toimub lambi silindri sisepinnal olevas luminofooris, kus UV foonid

<sup>5</sup> Nimetus *fluorestsentslamp* väljendab kõige paremini tema tööpõhimõtte füüsikat. Käibelolevad paralleelnimetused *säästulamp*, *kompaktlamp* peegeldavad vaid mõnda tahku selle lambitüübi omadustest.

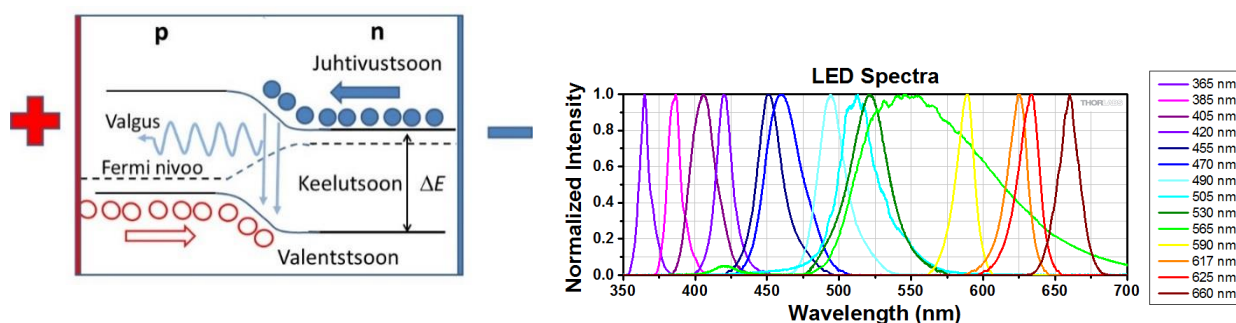
neelduvad. Tänapäeval kasutatakse rohelises ja sinises spektripiirkonnas  $Tb^{3+}$  ja  $Ce^{3+}$ -ga dopeeritud  $LaPO_4$  luminofoori ja punases osas kiirgab  $Eu:Y_2O_3$ .



Joonis 6. Kaks „kompaktlambi“ kuju: sirged silindrid ei ole otstarbekad kohtvalgustitena, kuid summaarne valgusvoog on seda suurem, mida suurem on kiirgava osa pindala, seepärast on loodud kõverad „silindrid“.

### 2.3. LED-lamp

LED-lambi (LED – *light emitting diode*) põhielemendiks on p-n diod. Kui diodile on rakendatud päripinge, siis triivivad p-pooljuhi augud ja n-pooljuhi elektronid p-n siirde poole (Joonis 7). Siirde piirkonnas on elektronid ja augud kohakuti ja nad rekombineeruvad, kiirates footoni, mille energia on ligilähedane keelutsooni laiusega  $\Delta E$ .

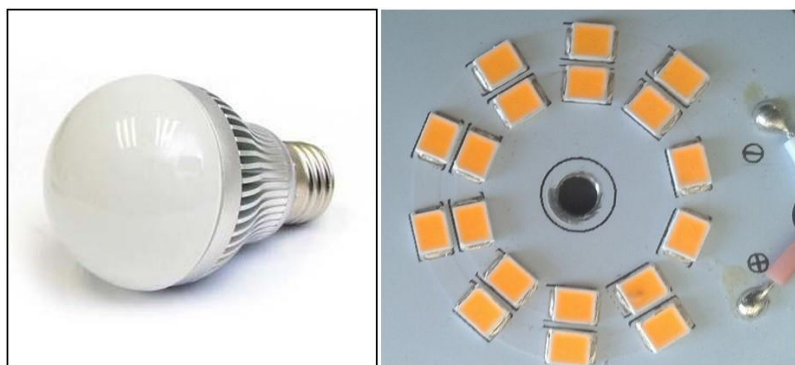


Joonis 7. Protsessid p-n siirde piirkonnas ja erinevate diodide kiirgusspektrid.

Erineva keelutsooni laiusega materjalide kasutamine lubab luua valgusdioode alates infravalgusest (nt GaAs,  $\lambda = 918$  nm) kuni ultravalguseni (nt GaN,  $\lambda = 365$  nm). Sõltuvalt spektripiirkonnast varieerub valgusdiiodide efektiivsus ( $\equiv$  kiirgusvoo suhe sisendvõimsusse) 15 - 40%.

Valgusdiiodide loomine sinises ja ultravalguse piirkonnas avas võimaluse nende kasutamiseks luminofooride ergastamisel<sup>6</sup>. Tööstuslikes valgustuseks mõeldud LED-lampides tekitatakse sinine valgus (nt  $\lambda = 450$  nm) GaN-l baseeruva valgusdiiodiga. Sinine valgus ergastab  $Ce^{3+}$ :YAG luminofoori, mis kiirgab lainepikkuste vahemikus 500-700 nm. Selline „valge“ valgusdiiod kiirgab spektraalpiirkonnas, mille laius on lähedane inimese silma tundlikkuse kõvera laiusele.

<sup>6</sup> 2014.a. Nobeli preemia füüsikas omistati jaapanlastele S. Nakamura, H. Amano ja I. Akasaki siniste valgusdiiodide loomise eest, mis lubas luua efektiivsed valged valgusallikad [3].



Joonis 8. Vasakul on LED-lambi väliskuju ja paremal on (suurendatult) lambis paiknevate oranži luminifooriga kaetud valgusdiodide paigutus.

Joonisel 8 on LED-lamp, mis on mõeldud lülitamiseks tavalisse vahelduvvoolu võrku (230 V, 50 Hz). Lambis eralduva soojuse efektiivselt ärajuhtimiseks paikneb tema allosas ribilise disainiga soojusvaheti (väiksema võimsusega lampidel soojusvaheti puudub). Poolsfäärilise valgust hajutava kupli all paikneb paneel, millele on paigutatud valgusdiodid. Paneeli all on elektriline skeem, mis muundab võrgupinge valgusdiodide jaoks sobivaks paarivoldiliseks alalispingeks.

### 3. Katsevahendid, mõõtmised ja andmetöötlus.

#### 3.1 Vahendid.

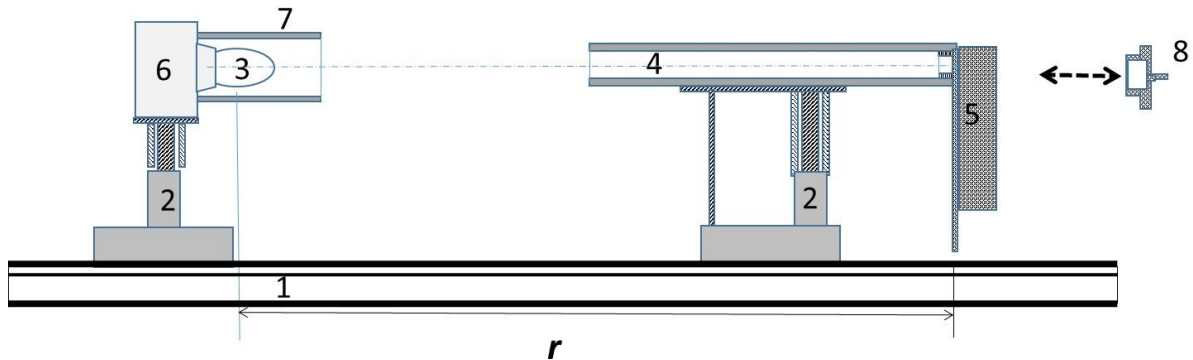
Osades 3.2 ja 3.3 testitakse hõõg-, fluorestsents- ja LED-lampi, kõikide lampide balloonid on valgust hajutavad<sup>7</sup>. Osas 3.4 kasutatavad hõõg- ja halogeenlamp on nn reflektorlampid – nende balloonide soklipoolne osa on valgust peegeldav, mis võimaldab valgusvoo kontsentreerimist kitsamasse ruuminurka.

Antud töös on ainsaks kvantitatiivselt mõõdetavaks fotomeetriliseks suuruseks valgustatus. Luksmeetri spektraalse tundlikkuse kõver vastab inimese silma tundlikkuse omale (Joonis 1). Luksmeeter *Peak Tech 5065* mõõdab valgustatust vahemikus 0 – 100000 lx (mõõtemääramatus on  $\pm 4\%$  näidust) ja tema vastuvõtja pindala on  $12,6(0,3) \text{ cm}^2$ . Vattmeetrite mõõtemääramatus on  $\pm 4\%$  näidust. Spektromeetri (Ocean Optics USB4000, registreerimispiirkond 200-850 nm) kirjeldus on osas 3.3 ja Lisas 2. Valgustatuse mõõtmise katsestendi ja fotomeetri kirjeldus on toodud osades 3.2 ja 3.3. Fotomeetri lambi L1 valgustugevus on 295(15) cd.

Mõõtmistulemused tuleb koheselt salvestada Exceli failis, omanimelise faili võib avada praktikumi arvuti kaustas „Tudeng“. Sellesse faili tuleb kopeerida ka spektromeetri kostefunktsiooni andmetulbad.

<sup>7</sup> Hajutavad katted lubavad vähendada lampide sisemise ehituse mõju mõõtmistulemustele.

### 3.2 Valgustatuse mõõtmine



Joonis 9. Katsestend valgustatuse mõõtmiseks. Detailide kirjeldus on allolevas tekstis.

Katsestend paikneb optilisel siinil 1 ja koosneb ratsuritel 2 olevatest valgusallika 3 ja registraatori 4, 5/8 sõlmest (Joonis 9). Seade on konstrueeritud nii, et lambi ja registraatori sümmeetriateljed langevad piisava täpsusega kokku ja enne mõõtmisi ei ole vaja täiendavat justeerimist.

Lambi 3 pesa on kinnitatud karbi 6 külge, samas on ka lüliti lambi pingestamiseks. Lamp lülitatakse vahelduvvoolu võrku üle vattmeetri. Registraatori varjuki 4 külge võib kinnitada luksmeetri 5 või pesa 8 spektromeetri fiibri kinnitamiseks. Siini külge kinnitatud mõõdulindi näit annab lambi ja luksmeetri vahelise ligikaudse kauguse  $r$ . Lambi vahetamiseks tuleb esmalt eemaldada varjuk 7, milleks tuleb vabastada varjuki ülaosas olev kruvi.

**NB!** Nii varjuk kui ka lambi balloon võivad olla kuumad, seepärast tuleb enne lampide vahetust oodata mõned minutid. Lampide vahetamisel tuleb kasutada kindaid.

Iga lambi puhul mõõdetakse valgustatus vähemalt viiel-kuuel registraatori kaugusel, minimaalne  $r$  väärtus on 0,55 m. Iga uuel kaugusel tuleb oodata, kuni luksmeetri näit stabiliseerub. Lisaks tuleb fluorestsentslambi puhul arvestada, et tema kiirgus saavutab oma statsionaarse väärtuse alles paar minutit peale lambi pingestamist.

Kui meil on tegemist punktallikaga ja luksmeetri vastuvõtja on risti langeva valgusega, siis kehtib valgustatuse  $E$  (lx) ja valgustugevuse  $J$  (cd) vahel lihtne seos  $E = \frac{J}{R^2}$ , st valgustatus sõltub lineaarselt kauguse ruudu pöördväärtusest.

Keerulise geometriaga ning lõplike mõõtmetega valgusallikaid võib lugeda punktallikateks alles alates teatud kriitilisest valgusallika ja luksmeetri vahelisest kaugusest. Hindamiseks kaugust  $r_{cr}$ , millest alates kehtib punktallika lähendus, tuleb iga lambi puhul koheselt ehitada graafik teljestikus  $E = f(1/r^2)$ . Üldjuhul erineb näit  $r$  ekvivalentse punktallika ja luksmeetri vahelisest kaugusest  $R$ . Leidmaks parandusliiget  $X^8$ , tuleb kasutada kahel erineval kaugusel ( $> r_{cr}$ ) registreeritud valgustatuse  $E_1$  ja  $E_2$ . Kuna

$$J = E_1(r_1 + X)^2 = E_2(r_2 + X)^2,$$

siis  $X = [r_1\sqrt{E_1/E_2} - r_2]/[1 - \sqrt{E_1/E_2}]$ . Korrigeeritud kauguse väärtus  $R$  lubab leida valgusallika valgustugevuse antud suunas<sup>9</sup>.

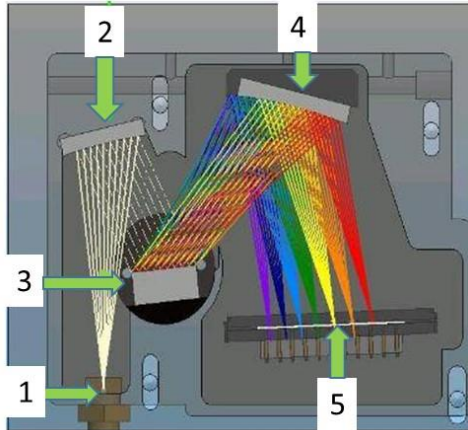
<sup>8</sup>  $X$  tuleb määrata iga lambi puhul eraldi.

<sup>9</sup> Tegemist on valgustugevusega ühes kindlas suunas (antud juhul lambi sokli sümmeetriateljeline suund) Mingis teises suunas võib valgustugevuse väärtus olla teine.



Lisaks valgustatuse mõõtmistele tuleb iga lambi puhul registreerida vattmeetriga ka lambi poolt tarbitav võimsus  $P$ . Kuna luksmeetri valgustundliku osa pindala on teada, siis saab mingi kauguse  $R$  jaoks esitada eri lambitüüpide valgusvoogude ja võimsuste suhte,  $\Phi/P$ , võrdluse<sup>10</sup>.

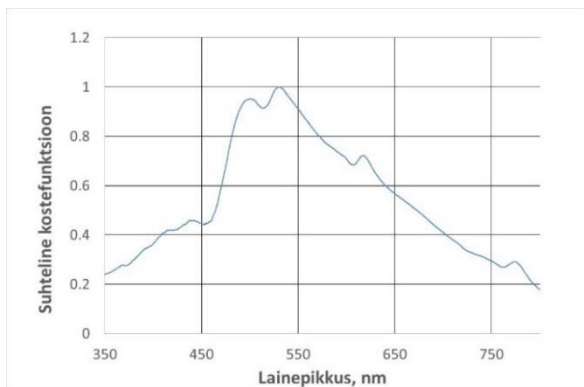
### 3.3 Spektrite mõõtmine



Joonis 10. Miniatuurne Ocean Optics firma spektromeeter.  
1 – sisendpilu ja ühendus optilise fiibriga; 2- nõguspeegel P1;  
3 – peegeldav difraktsioonivõre; 4 – nõguspeegel P2;  
5 - CCD jadavastuvõtja.

Lampide spektrite mõõtmiseks asendatakse luksmeeter fiibri pesaga 8. Fiibri teine ots on kinnitatud spektromeetri külge, mis on ehitatud Czerny-Turneri optilise skeemi järgi (Joonis 10).

Spektromeetri sisendpilu (laius  $25\ \mu\text{m}$ ) paikneb nõguspeegli P1 fokaaltasandis, millelt peegelduv kiirtekimp on seega paralleelne. Peegelvõre 3 lahutab langeva valguse spektriks (vt Lisa 2). Nõguspeegel P2 koondab erinevate lainepikkustega kiirtekimbud jadavastuvõtja CCD ( $\equiv$  CCD - ingl *Charge Coupling Device*) eri osadesse (vt Lisa 3).



Joonis 11. Näide spektromeetri suhtelisest spektraalsest kostefunktsioonist<sup>11</sup>.

CCD-s tekivad seesmise fotoefekti tulemusena fotoelektronid. Igale CCD elemendile ( $\equiv$  pikslile) vastab oma lainepikkus ja igale pikslile vastav loend (ingl *count*) on võrdeline pikslile langevate footonite arvuga. Kuna seesmise fotoefekti saagis ( $\equiv$  fotoelektron/footon) sõltub lainepikkusest (Joonis 11), siis reeglina erineb vahetult registreeritud spekter ( $\equiv$  toorspekter, ingl *raw spectrum*) lambi enda kiirgusspektrist.

Töös kasutatav spektromeeter registreerib valgust vahemikus 200-850 nm ja ta on eelnevalt lainepikkuste järgi kalibreeritud. Töö algul tuleb esmalt registreerida pingestamata lambile vastav

<sup>10</sup> Lihtsaimal juhul, kui lambid kiirgaksid isotroopselt, oleks see suhe võrdeline lambi valgusviljakusega. Kuna käesolevas töös on lampidel valgust hajutavad katted, siis võiks see eeldus ligikaudselt kehtida.

<sup>11</sup> Teades spektromeetri kostefunktsiooni, kogumisaja ja loendi väärtusi ning kasutades footoni energia avaldist, on võimalik leida kiirgusvoog vattides.

signaal<sup>12</sup>, mis tuleb andmete töötlemisel lahutada toorspektrist Leidmaks valgusallika kiirgusspektrit, tuleb toorspektri loend mingil lainepikkusel jagada kostefunktsiooni väärtusega sel lainepikkusel. Kostefunktsiooni tabel on failis **USB4000 kostefunktsioon.xlsx** (Saadav arvuti kaustas „Tudeng“).

Kolme lambi spektrid registreeritakse ühel ja samal kaugusel. Sõltuvalt valgusallika intensiivsusest, tuleb valida sobiv spektri kogumisaeg (ingl *integration time*). Vältimaks mittelineaarseid efekte on mõistlik valida kogumisaeg nii, et registreeritava spektri loendi tippväärtus ei ületaks 85% maksimaalselt võimalikust. Kogumisaeg tuleb registreerida protokollis.

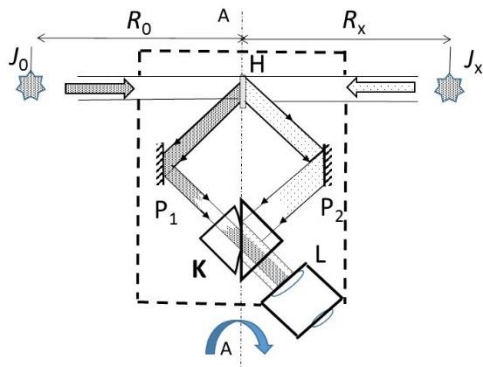
Juhised tööks spektrometriga on Lisas 4.

### 3.4 Valgustugevuste võrdlemine

Valgusallikate valgustugevusi saab võrrelda fotomeetriga. Visuaalses fotomeetris on valguse registreerijaks silm. Silm on võimeline eristama vaatevälja erinevate osade heleduse väikeseid erinevusi. Seetõttu põhineb üht tüüpi visuaalsete fotomeetrite töö vaatevälja kahe osa heleduste võrdsustamises: seda olukorda nimetatakse fotomeetriliseks tasakaaluks.

Joonis 12 edastab Lummer-Brodhuni fotomeetri töö põhimõtte. Fotomeetri pea tähtsaim osa on fotomeetriline kuup K. Kuup koosneb kahest prismast, mis oma keskosas on optilises kontaktis (kasutatavas fotomeetris on kontakti piirkond trapetsikujuline), kuid perifeersetes osades toimub prismade vahelise õhuvahe tõttu täielik peegeldumine.

Valgusallikatest 1 ja 2 langeb valgus kahepoolsele hajutavale pinnale H. Osa hajunud valgusest peegeldub peeglitelt P<sub>1</sub> ja P<sub>2</sub> ning langeb fotomeetrilisele kuubile. Vasakult saabuva kiirtekimbu tsentraalne osa läbib kuubi ja jõuab okulaari L, kuid kiirtekimbu servmised osad peegelduvad tagasi. Paremalt saabuva kiirtekimbuga on olukord vastupidine: täieliku peegeldumise tõttu jõuab okulaari tema servmine osa. Niisiis näeme okulaaris kahte piirkonda, mille heledused on üldjuhul erinevad. Nihutades fotomeetrilist pead piki optilist pinki, võib saavutada olukorra, kus okulaari vaateväljas on seesmise ja välimise piirkonna heledused on võrdsed, st on saavutatud fotomeetriline tasakaal.



Joonis 12. Lummer Brodhuni fotomeetri põhimõtteline skeem (pealtvaade). Kriipsjoonega on ümbritsetud fotomeetri pea, mida saab ümber telje AA 180° võrra keerata. Samuti saab oma pesast välja võtta valguse hajuti H ja teda ringi pöörata. Fotomeetrilise pea sisendavade ette saab lükata niitristidega klaasid.

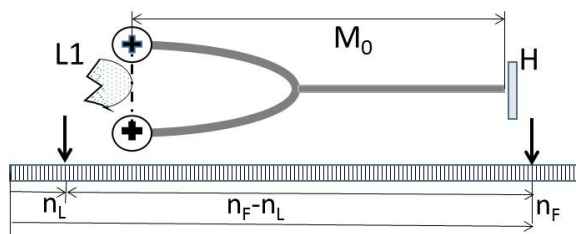
Fotomeetriline tasakaal tähendab seda, et hajuti H mõlema poole valgustatused on võrdsed. Seega, kui valgusallikaid võib lugeda punktallikateks ja hajuti H on risti fotomeetri teljega, siis fotomeetrilises tasakaalus kehtib seos  $J_0/R_0^2 = J_x/R_x^2$ . See seos lubab teadaoleva valgustugevuse  $J_0$  ning mõõdetud  $R_0$  ja  $R_x$  väärtuste põhjal arvutada tundmatu valgustugevus  $J_x$ .

<sup>12</sup> Selle signaalil on kaks komponenti- esimene on põhjustatud ümbritsevast ruumist lähtuvast valgusest (foonist) ja teine on CCD elektroonikast tingitud omamüra (ingl *electric dark*)

Mõõtmised tehakse millimeeterskaalaga varustatud optilisel pingil. Pingil on liigutatavad ratsurid, millel asetsevad valgusallikate hoidjad, fotomeetriline pea ja kaugusmõõdik. Ratsuri asendi pingil saab fikseerida markeri näidu järgi.

$R_0$  ja  $R_x$  määramiseks peavad 1) valgusallikad ja hajuti H keskpunkt olema ühel sirgel ( $\equiv$  tsentreeritud optiline süsteem) ja 2) nad tuleb siduda markerite näitudega.

Mõlema ülesande täitmiseks kasutame kaugusmõõdikut ( $\equiv$  mõõdik) (Joonis 13).



Joonis 13. Vahemaade määramine kaugusmõõdiku abil.  $M_0 = 473,0(2,0)$  mm.

Ratsurisse paigutatuna on mõõdiku varras paralleelne fotomeetri optilise teljega. Vasakpoolse valgusallika ja fotomeetri pea reguleerimiseks samale kõrgusele paigutame nende vahele ratsuril oleva mõõtevarda ja reguleerime mõõdiku kõrgust nii, et lambi ballooni tipp ja mõõdiku visiiristid oleksid samal sirgel. Järgnevalt lükkame fotomeetri pea vasakpoolse sisendava ette niitristiga klaasi ja nihutame fotomeetrilise pea kontakti mõõdiku otsaga. Nihutades nüüd fotomeetrilist pead vertikaalsihis saavutame olukorra, kus mõõdiku varda ots on niitristi keskel – nüüd on vasakpoolne lamp ja fotomeetrilise pea sisendava samal kõrgusel. Eemaldame nüüd niitristiga klaasi ja nihutades fotomeetrilist pead viime hajuti H kontakti mõõdiku vardaga – nüüd on lambi ja fotomeetri pea vaheline kaugus  $M_0$ . Sellisele detailide paigutusele vastab lambi ratsuri markeri näit  $n_{L1}$  ja fotomeetrilise pea ratsuri markeri näit  $n_F$ . Siit johtub, et esemetevaheline tõeline kaugus erineb näitude vahest suuruse  $\Delta_1 = M_0 - (n_F - n_{L1})$  võrra, kusjuures  $\Delta_1$  võib olla nii positiivne kui ka negatiivne. Kui nüüd näidud  $n_F$  ja  $n_L$  vastaksid fotomeetrilisele tasakaalule, siis  $R_0 = (n_F - n_{L1}) + \Delta_1$ .

Järgnevalt paigutame mõõdiku parempoolse lambi ja fotomeetrilise pea vahele; reguleerime lambi samale kõrgusele fotomeetrilise pea niitristiga ja leiame parandusliikme  $\Delta_2 = M_0 - (n_{L2} - n_F)$ , mis on vajalik  $R_x$  määramiseks.

Lamp L1 on tavaline hõõglamp, L2 on aga halogeenlamp. Vattmeetritega tuleb registreerida mõlema lambi poolt tarbitavad võimsused.

Hajuti H mõlemad pooled ei pruugi valgust hajutada ühtmoodi, samuti ei pruugi olla ühesugused ka teiste fotomeetrilise pea elementide omadused (nt peeglite  $P_1$  ja  $P_2$  peegelduskoefitsiendid). Neist teguritest tingitud mõõtemääramatuse süstemaatilise komponendi suurust saab hinnata, leides fotomeetriline tasakaal ka juhul, kui fotomeetrilist pead pöörata ümber horisontaaltelje  $180^\circ$  võrra. Pööramiseks tuleb väljapoole tõmmata fotomeetrilise pea tagaküljel olev fiksaator.

Fotomeetrilise tasakaal tuleb leida kahe lambi L2 asendi puhul, vastavate kauguste väärtustepaaridest  $R_{01}$ ,  $R_{x1}$  ja  $R_{02}$ ,  $R_{x2}$  saab leida lambi L2 valgustugevuse väärtused  $J_{x1}$  ja  $J_{x2}$ , mis peaksid mõõtemääramatuse piires olema võrdsed.

**Lamp L1 on eelnevalt kalibreeritud, tema sümmeetriatelje sihiline valgustugevus on**

$$\underline{J_1 = 295(15) \text{ cd.}}$$

#### 4. Tulemuste vormistamine

Töö protokoll peab peale eksperimendi katsekorralduse lähtetingimuste, skeemide ja mõõtmisprotseduuride kirjelduse veel sisaldama

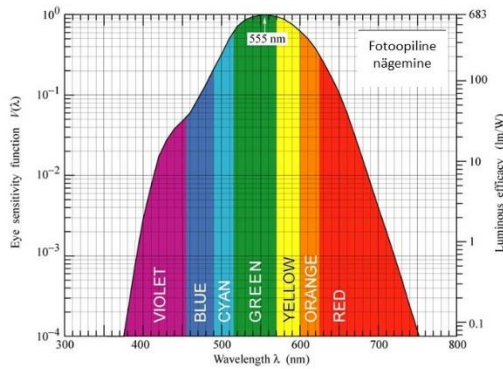
- Sõltuvuste  $E = f(1/r^2)$  ja  $E = f(1/R^2)$  graafikuid. Esimese graafiku alusel tuleb hinnata, millisest kaugusest alates võib lugeda, et on tegemist punktallikaga ja valida sellest piirkonnast valgustatused, mis on vajalikud parandusliikme  $X$  leidmiseks. Sõltuvuse  $E = f(1/R^2)$  tõus annab meile lambi sümmeetriatelje suunalise valgustugevuse.
- Tabelit, mille veergudeks on lambitüüp, valgustugevus  $J$ , tarbitavad võimsus  $P$ , parandusliige  $X$ , valgustatus  $E$  ja valgusvoog  $\Phi$  mingil kaugusel ning suhe  $\Phi/P$ .
- Graafikut lampide normeeritud spektritega, kus on kujutatud ka silma suhteline valgusefektiivsus (vt lähendusvalemit Lisas 1).
- Fotomeetriga määratud halogeenlambi valgustugevust ning tema ja tavalise hõõglambi valgusviljakuste võrdlust

Andmemassiivid on suured, kuid andmetöötlus ei nõua keerukamaid operatsioone. Seepärast on mugavam ka töö vormistamiseks kasutada **Excelit**. Töö tulemused peavad olema varustatud tegija kommentaaridega ning vastustega küsimustele ja loomulikult peab protokoll sisaldama mõõtemääramatuste hinnanguid.

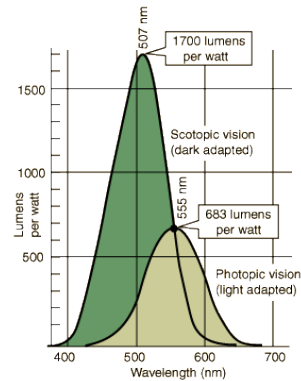
#### 5. Küsimused

1. Milline on luksmeetriga valgustugevuse määramisel domineeriv mõõtemääramatuse komponent?
2. Oletame, et lambid kiirgavad isotroopselt ruuminurka  $2\pi$ . Leida fluorestsents- ja LED-lambi valgusviljakused.
3. Kas ilma ja reflektoriga lambi teljesuunaliste valgustugevuste võrdlus lubab võrrelda ka valgusviljakusi?
4. Miks pole korrektne määrata hõõglambi ja fluorestsentslambi kiirguse visuaalsest fotomeetrilisest võrdlusest fluorestsentslambi valgustugevust?

## Lisa 1 Inimese silma tundlikkus



Joonis 14. Inimese silma spektraalne tundlikkus ja traditsioonilised seitse spektrivärvi.  
NB! Vertikaaltelg on logaritmiline!



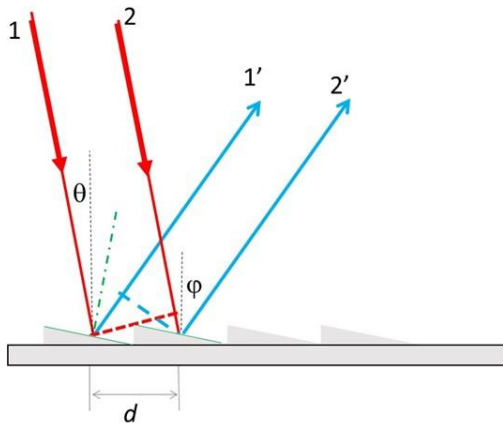
Joonis 15. Videviku (skotoopiline)- ja päevanägemine (fotoopiline): pimedas on silma tundlikkus suurem.

Jooniselt 14 on näha, et tegelikult on tundlikkuse kõver asümmeetriline, kuid empiiriline valem

$$K_{\lambda} = 1.019 \exp[-2.854 \cdot 10^{-4}(\lambda - 559)^2]$$

vastab piisava täpsusega Tabelis 1 toodud suhtelise valgusefektiivsuse väärtustele. NB!  
Valemis on lainepikkus nanomeetrites!

## Lisa 2. Peegeldav difraktsioonivõre ( $\equiv$ peegelvõre)



Joonis 16. Profileeritud peegelvõre.

Peegelvõre on perioodiline süsteem peegeldavatest ribadest, kus vahemaa kahe naaberriba vahel  $d$  ( $\equiv$  difraktsioonivõre periood) on palju-palju väiksem ribade pikkusest. Joonisel 16 on sellise peegelvõre lõige, mille kõik peegeldavad ribad on kaldu difraktsioonivõre tasandi suhtes ( $\equiv$  profileeritud difraktsioonivõre).

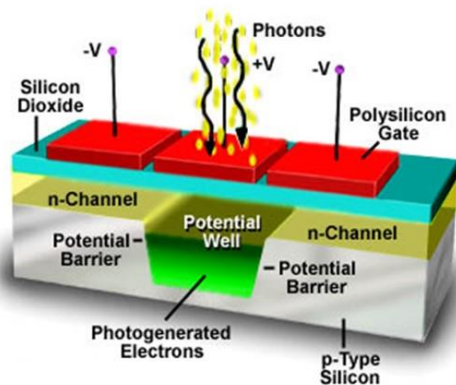
Kui langeva paralleelse kiirtekimbu ja difraktsioonivõre tasandi vaheline nurk on  $\theta$ , siis on naaberpiludele langevate kiirte 1 ja 2 vaheline käiguvahe  $d \sin \theta$  ja peegelduvate kiirte 1' ja 2' vaheline käiguvahe on  $d \sin \varphi$ . Vastavalt joonisele on summaarne käiguvahe  $d(\sin \varphi - \sin \theta)$ . Kui see käiguvahe võrdub mingi lainepikkuse täisarv kordsega  $m\lambda$ , siis tekib nurga  $\varphi$  all selle

lainepikkuse  $m$ -järku peamaksimum. Ribade kaldenurga valik võimaldab kontsentreerida difrakteerunud valguse maksimumi sobivasse spektrijärku.

Töös kasutatava spektromeetri võrel on millimeetrisel lõigul 600 riba ( $\equiv 600$  „joont“/mm). Ribade kalle on valitud nii, et difrakteerunud valguse maksimum langeb kokku lainepikkuse  $\lambda = 300$  nm esimest järku peamaksimumiga.

### Lisa 3. CCD tööpõhimõte

Kiirguse vastuvõtja ( $\equiv$  tajur) on laengusidestusega üherealine mälumaatriks e jadavastuvõtja. CCD muundab langeva valguse elektriliseks signaaliks, salvestab selle ja transpordib arvutisse. CCD põhielemendiks on metall-oksiid-pooljuhtkondensaator (Joonis 17). Footonid läbivad poolläbilaskva värati ja seesmine fotoefekt tekitab väikese juhtivusega ränis elektron-auk paari. Joonisel on elektrodid pingestatud nii, et tsentraalse elektroodi all tekitatakse piirkond, kus augud puuduvad, kuid on sügav potentsiaaliauk elektronide akumulereimiseks. Peale laengu kogumist toimub tema transportimine nt kui muuta parempoolse elektroodi pinge positiivseks ja keskmise oma – negatiivseks, siis nihkub akumulereitud laeng samuti paremale.



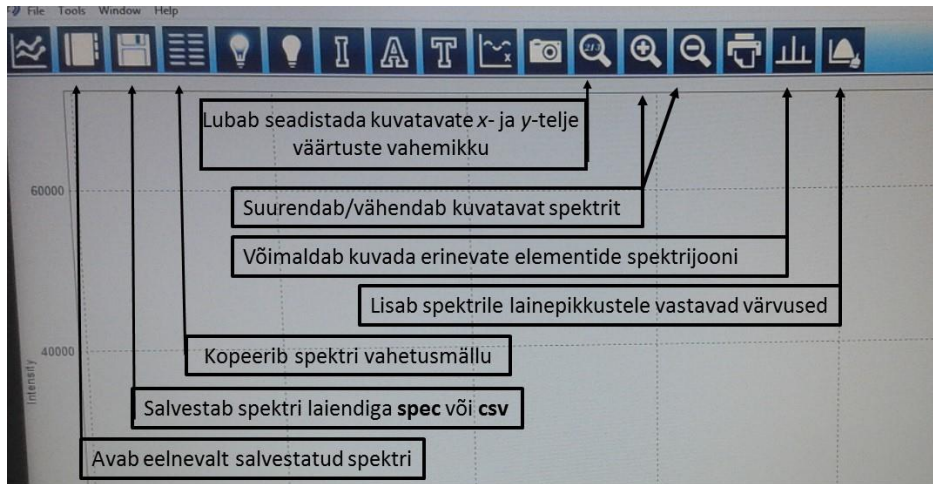
Joonis 17. MOS kondensaatoril baseeruv üks võimalikest CCD jadavastuvõtja lahendustest.

USB4000 spektromeetril on Toshiba TCD1304AP jadavastuvõtja, millel on 3648 pikslit suurusega  $8 \times 200 \mu\text{m}$  ning mille tundlikkus lainepikkustel 400 ja 600 nm on vastavalt 130 ja 60 footonit loendi kohta.

### Lisa 4 Juhised tööks spektritega

Töös kasutatakse üsna piiratud andmetöötluse võimalustega programmi **Overture**. Joonisel 18 on lahti kirjutatud vajaminevate ikoonide taha peituv. Ekraani allosas saab valida sobiva kogumisaja (ingl – *integration time*) väärtuse; spektrite arvu üle mille toimub keskmistamine<sup>13</sup> (ingl *average, scans*) ning pikslite arvu, üle mille toimub spektri silumine (ingl *smooth, pixels*). vasakul ja paremal mingist lainepikkusest. Klõkkides mingile kohale spektris kuvatakse tema all lainepikkus ja selle vastav loend.

<sup>13</sup> Meie juhul on signaal-müra suhe suur ja praktiline vajadus keskmistamiseks puudub.



Joonis 18. Programmi mõningate ikoonide funktsioonid.

Edasise töötluse lihtsustamiseks tuleb algul andmed salvestada vahetusmällu (ingl *clipboard*) ja sealt edasi transportida Excelisse.

Andmetöötluses on mõistlik käsitleda vaid andmeid, mis jäävad intervalli 350-850 nm. Iga lambi jaoks tuleks vormistada eraldi Exceli leht, mille tulpadeks on lainepikkus, toorspekter, pimekomponent, kostefunktsioon ja lõpptulemus – antud lambi kiirgusspekter. Selleks, et paremini võrrelda erinevate lampide spektreid, tuleb nad normeerida maksimaalse näidu järgi vahemikus 350-850 nm. Kõigi kolme lambi normeeritud spektrid koos silma suhtelise valgusefektiivsuse kõveraga tuleb esitada ühel graafikul.

#### Kirjandus

- [1]. <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/> → loeng *Radiomeetria*
- [2] <http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/foto.pdf> õppevahend *Fotomeetria. Radiomeetria.*
- [3]. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2014/advanced-physicsprize2014.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced-physicsprize2014.pdf)