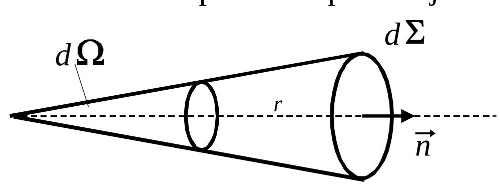
RADIOMEETRIA. FOTOMEETRIA.

Koostanud Hans Korge

1. Sissejuhatavad mõisted ja definitsioonid.

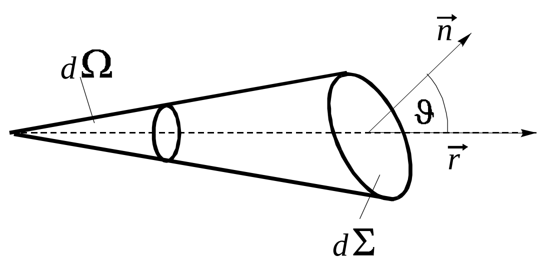
- Optikas tähendab radiomeetria elektromagnetkiirguse energia ja selle jaotumise mõõtmist.
- Fotomeetria on optika (valgustehnika) haru, mis tegeleb nähtavat kiirgust iseloomustavate suuruste mõõtmisega. Raadiomeetrilised suurused ei sobi fotomeetrilisteks, sest nähtav on väga kitsas elektromagnetlainete vahemik ($\lambda = 380 \div 760$ nm), pealegi pole selles vahemikus silma tundlikkus ühesugune (vt [1]).
- **<u>Ruuminurk</u>** (tähistus Ω, $d\Omega$, ω, $d\omega$) [2, lk 66-68].

Olgu meil sfääri pinnal kinnine joon. Kui ühendada kõik selle pinna punktid sfääri tsentriga, siis tekib koonuspind, mis hõlmab mingi ruumiosa. Hõlmatav ruumiosa on seda suurem, mida suurema pinnatüki hõlmab kinnine joon sfääri pinnal. Seepärast on sobiv mõõta koonuse poolt piiratud ruuminurka vastava pinnatüki pindala ja sfääri raadiuse ruudu suhtega:



$$\Omega = \frac{\Sigma}{r^2}, \quad d\Omega = \frac{d\Sigma}{r^2},$$

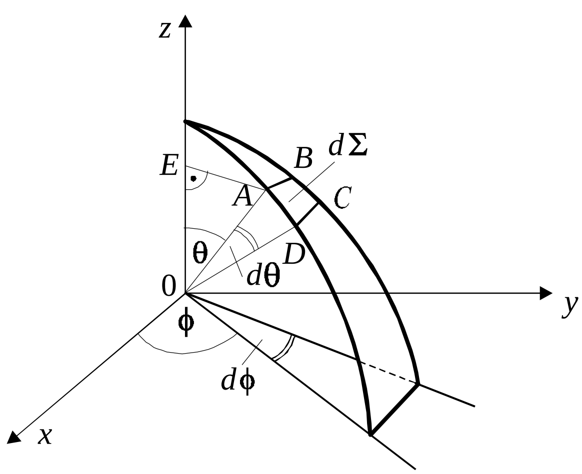
kus Σ või $d\Sigma$ on koonuspinna poolt sfääri pinnal haaratud pinnatüki pindala, r – sfääri raadius, $\vec{n}$ – pinnanormaal.



Ruuminurga ühik on 1 steradiaan (sr). Steradiaan on tipuga sfääri keskpunkti toetuv ruuminurk, mis haarab sfääri pinnal raadiuse ruuduga võrdse pindala.

Kui $\Sigma = 1\,\mathrm{m}^2$, $r = 1\,\mathrm{m}$, siis $1\,\mathrm{sr} = 1\,\mathrm{m}^2 / 1\,\mathrm{m}^2$.
Kogu ruuminurk e sfäärile vastav ruuminurk on

$$\Omega_{\text{kogu}} = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi = 12{,}566 \text{ sr}.$$



Kui pind on kaldu ($\vec{n}$ ja $\vec{r}$ pole paralleelsed), siis

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \cos\vartheta}{r^2}, \text{ kus } \vartheta = \angle(\vec{n}, \vec{r}).$$

Tsentraalsümmeetrilistes ülesannetes on kasulik avaldada ruuminurga element $d\Omega$ sfäärilistes koordinaatides $r, \theta, \phi.$ Võtame sfääril raadiusega r elemendi $ABCD$ pindalaga $d\Sigma = AB \cdot AD.$ Arvestades, et $OA = r$ ja $AE = r \cdot \sin\theta,$ saame $AB = AE \cdot d\phi = r \cdot \sin\theta \cdot d\phi$ ning $AD = r \cdot d\theta,$ millest

$$d\Sigma = r^2 \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi,$$

$$d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi,$$

kusjuures nurkade θ ja ϕ võimalikud muutumispiirkonnad on $\theta \in [0, \pi]$, $\phi \in [0, 2\pi]$ ja kogu ruuminurk

$$\Omega_{\text{kogu}} = \int_0^{\pi} \sin\theta \cdot d\theta \int_0^{2\pi} d\phi = 4\pi \text{ sr.}$$

- Loengust on teada tasalaine kiiritustihedus E_e e intensiivsus I, mis võrdub Poyntingi vektori ajalise keskväärtusega:

$$E_e \equiv I \equiv \left\langle \vec{S} \right\rangle = \tfrac{1}{2} c\varepsilon_0 E_0^2,$$

mida mõõdetakse ajaühikus pinnaühikut läbinud energia hulgaga ühikutes J/(m^2·s) või W/m^2.

- Praktikas aga ei saa piirduda ainult ühe suuruse ja ühikuga, sest on vaja iseloomustada:
  1) nii kiirgavaid kui ka kiiritatavaid objekte, kusjuures üldjuhul tuleb veel arvestada,
  2) et laine pole alati tasalaine,
  3) et kiirgus lähtub lõpliku suurusega pinnalt,
  4) et kiirgus võib olla ebaühtlane eri suundades,
  5) vastuvõtja orientatsiooni kiirguri suhtes jpm.

Edaspidi eristame tähistusi järgmiselt:

$\vec{S}$ – Poyntingi vektor,
Σ, $d\Sigma$ – kiirgav pind ja pinnaelement
σ, $d\sigma$ – kiiritatav pind ja pinnaelement.

Radiomeetriliste suuruste eristamiseks fotomeetrilistest on esimestele lisatud indeks e, näiteks Φ_e – kiirgusvoog, Φ – valgusvoog.

Nendest ühikutest võite lisaks lugeda 8. peatükki raamatust [2, lk 153-166].

2. Radiomeetria.

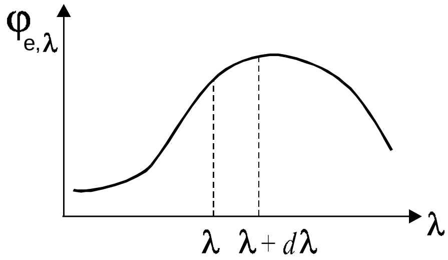
- Radiomeetriliseks põhisuuruseks on **kiirgusvoog** Φ_e (radiant flux, лучистый поток). Kiirgusvoog on määratud energiahulgaga, mida kiirgus kannab ajaühikus läbi pinna Σ:

$$\Phi_e = \int_{\Sigma} \left\langle \vec{S} \right\rangle \cdot d\Sigma.$$

  Kiirgusvoo mõõtühikuks on 1 W.

  Kiirgusvoo spektraalse tiheduse all mõistetakse suurust

$$\varphi_{e,\lambda} = d\Phi_e(\lambda) / d\lambda,$$



s.t kiirgusvoogu lainepikkuste vahemikus ($\lambda, \lambda + d\lambda$). Kuigi kiirgusvoo spektraalse tiheduse ühikuks on W/m, on praktikas otstarbekas kasutada ka W/nm.
Kiirgusvoo $\Phi_{e,12}$ mingis lainepikkuste vahemikus (λ_1, λ_2) saame integreerides:

$$\Phi_{e,12} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi_{e,\lambda}\, d\lambda,$$

kogu kiirgusvoo Φ_e aga integraalina

$$\Phi_e = \int_0^{\infty} \varphi_{e,\lambda}\, d\lambda.$$

NB! Ruumilise jaotuse suhtes võivad nii $\Phi_{e,12}$ kui ka Φ_e olla diferentsiaalsed suurused!

- **Kiirgustugevus** J_e (radiant intensity, энергетическая сила излучения) iseloomustab kiirguri kiirgusvoogu antud suunas ja on määratud ruuminurga elementi $d\Omega$ sattuva kiirgusvooga $d\Phi_e$:

$$J_e = d\Phi_e / d\Omega.$$

Üldjuhul J_e sõltub suunast: $J_e = J_e(\theta, \phi).$ Kiirgustugevuse mõõtühik on 1 W/sr.

Kiirgurilt lähtuv kogu kiirgusvoog on:

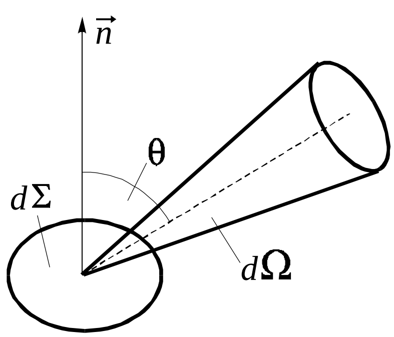
$$\Phi_{e,\mathrm{kogu}} = \int_{4\pi} J_e(\theta, \phi) \cdot d\Omega.$$

Kui kiirgur on isotroopne, siis $\Phi_{e,\mathrm{kogu}} = 4\pi J_e$.

Kiirgusallika koguvoogu saab optiliste seadmete abil ruumis ümber jaotada, aga mitte suurendada.

Kiirgustugevuse spektraalne tihedus $j_{e,\lambda} = dJ_e(\lambda) / d\lambda.$

- **Kirkus** L_e (radiance, энергетическая яркость). Kirkust kasutatakse ruum-, s.t mittepunktvalgusallikate iseloomustamiseks ja teda mõõdetakse kiirgusvooga $d\Phi_e$ antud suunas ruuminurka $d\Omega$ sõltuvana nähtava pinna suurusest $d\Sigma \cdot \cos\theta$:



$$L_e = \frac{d\Phi_e}{d\Sigma \cdot \cos\theta \cdot d\Omega}.$$

Kirkus on kõige diferentsiaalsem suurus radiomeetrias. Mõõtühik $1\,\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{sr}}$ (mõista kui 1 W nähtava pinna ruutmeetrilt steradiaani).
Kirkuse spektraalne tihedus $l_{e,\lambda} = dL_e(\lambda) / d\lambda.$

Kui allika kirkus igas suunas on ühesugune, s.o $L_e(\theta) = \mathrm{const},$ siis

$$d\Phi_e = L_e \cdot d\Sigma \cdot \cos\theta \cdot d\Omega,$$

s.t et kiirgusvoog igas suunas sõltub ainult nähtava pinna suurusest $d\Sigma \cdot \cos\theta$, seega sisuliselt vaid $\cos\theta -$st. Selliste kiirgurite korral kehtib Lamberti seadus (vt edaspidi) ja neid nimetatakse kas Lamberti või koosinuskiirguriteks, näiteks absoluutselt must keha, mattklaasiga lamp, Päikese ketas.

Kirkust kasutatakse mitte ainult aktiivsete, vaid ka passiivsete kiirgurite – peegeldajate – iseloomustamiseks.

- **<u>Kiirgavus</u>** M_e (radiant excitance, энергетическая светимость). Kiirgavust mõõdetakse kogu kiirgusvooga $d\Phi_e$, mis lähtub pinnaelemendilt $d\Sigma$ kõikides suundades, s.t ruuminurga 2π sr piires:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{d\Sigma}.$$

Kiirgavuse mõõtühik on $1\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ (1 W ruutmeetrilt). Kiirgavuse spektraalne tihedus:

$$m_{e,\lambda} = dM_e(\lambda)/d\lambda.$$

Keha kiirgavuse võime leida kirkuse kaudu, integreerides ruuminurga 2π sr piires:

$$M_e = \int_0^{2\pi} L_e(\theta) \cdot \cos\theta \cdot d\Omega = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} L_e(\theta) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta.$$

Kui meil on Lamberti kiirgur, siis $L_e(\theta) = \mathrm{const}$ ja

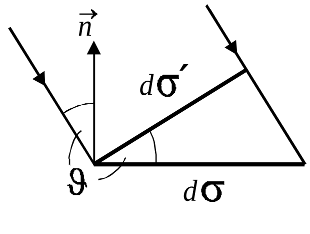
$$M_e = L_e \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta = L_e \cdot 2\pi \cdot \left(\tfrac{1}{2}\sin^2\theta\right)_0^{\pi/2} = \pi L_e.$$

Seega **Lamberti seadus:** $M_e = \pi L_e$.

- **<u>Kiiritustihedus</u>** E_e (irradiance, энергетическая освещенность). Kiiritustihedust mõõdetakse pinnale $d\sigma$ normaalselt langeva kiirgusvooga $d\Phi_e$:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{d\sigma}.$$

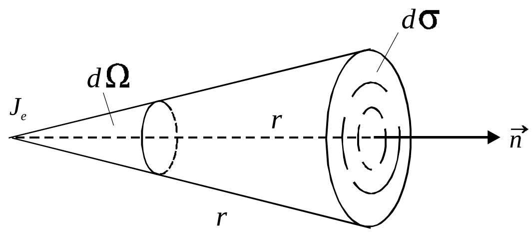
Mõõtühik $1\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2}$ (1 W ruutmeetrile). Kiiritustiheduse spektraalne tihedus $e_{e,\lambda} = dE_e(\lambda)/d\lambda$.



Kui kiired langevad pinnale $d\sigma$ kaldu, siis kiiritustihedus on väiksem (valgustatav pind $d\sigma$ on suurem, kui kiirtekimbu ristlõige $d\sigma'$:

$$\frac{d\sigma'}{d\sigma} = \cos\vartheta \quad \Rightarrow \quad d\sigma = \frac{d\sigma'}{\cos\vartheta},$$

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{d\sigma} = \frac{d\Phi_e}{d\sigma'}\cos\vartheta.$$



Isotroopse punktvalgusallika korral kiiritustihedus kaugusel r allikast võrdub:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{d\sigma} = \frac{J_e \cdot d\Omega}{r^2 \cdot d\Omega} = \frac{J_e}{r^2}.$$

3. Fotomeetrilised suurused.

On ilmselge, et valgusmõõtmistel, mis põhinevad silma valgustajul, energeetilised e radiomeetrilised suurused osutuvad ebasobivateks silma spektraalse tundlikkuse sõltuvuse tõttu valguse lainepikkusest [1].

Fotomeetrilised suurused baseeruvad etalonil ja baasühikuks pole mitte valgusvoog, vaid valgustugevus.

- **<u>Valgustugevus</u>** J (luminous intensity, сила света). Valgustugevus 1 kandela (1 cd) on SI põhiühik.

1 cd on kiirgusallika antudsuunaline valgustugevus, kui allikas kiirgab monokromaatilist kiirgust sagedusega $540 \cdot 10^{12}$ Hz **ja kui tema kiirgustugevus samas suunas on** $\frac{1}{683}\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{sr}}$.

- **<u>Valgusvoog</u>** Φ (luminous flux, световой поток):

$$d\Phi = J \cdot d\Omega.$$

Ühik on luumen: $1\,\mathrm{lm} = 1\,\mathrm{cd} \cdot \mathrm{sr}$.

- **<u>Heledus</u>** L (luminance, яркость):

$$L(\theta) = \frac{d\Phi}{d\Sigma \cdot \cos\theta \cdot d\Omega} = \frac{J}{d\Sigma \cdot \cos\theta}.$$

Ühik on $1\frac{\mathrm{cd}}{\mathrm{m}^2}$ e 1 nt (nitt), s.t 1 cd <u>nähtava</u> pinna ruutmeetrilt.

- **<u>Valgsus</u>** M (luminous excitance, светимость):

$$M = \frac{d\Phi}{d\Sigma}.$$

Ühik: $1\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{m}^2}$ (1 luumen ruutmeetrilt).

- **<u>Valgustatus</u>** E (illuminance, освещенность):

$$E = \frac{d\Phi}{d\sigma}.$$

Ühik $1\frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1\,\text{lx}$ (luks e 1 luumen <u>normaalselt</u> ruutmeetrile). **NB!** Valgsuse ja valgustatuse ühikud on sama dimensiooniga, kuid sisult erinevad, sellepärast kannabki valgustatus erinimetust luks.

Difuusselt peegeldava pinna valgsus M on seotud pinna valgustatusega E järgmiselt:

$$M = R\,E,$$

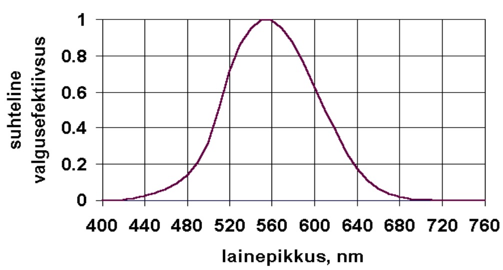
kus R on pinna peegeldustegur ja üldjuhul $R = R(\lambda)$.

- Kõikide fotomeetriliste suuruste jaoks saab analoogiliselt radiomeetriliste suurustega defineerida vastavate suuruste spektraalsed tihedused lainepikkuste vahemikus $(\lambda, \lambda + d\lambda)$.

4. Silma spektraalne tundlikkus.

Inimene näeb lainepikkuste vahemikus $380 \div 760\,\text{nm}$, kuid selles vahemikus on silma tundlikkus erineva lainepikkusega valguse suhtes erinev. Kui võtta kaks võrdset, kuid erineva lainepikkusega (värvusega) elektromagnetlaine voogu ($\Phi_{e1} = \Phi_{e2}$), siis silmale näivad nad erinevate valgusvoogudena ($\Phi_1 \neq \Phi_2$).

Inimsilma keskmine spektraalne tundlikkus saadakse paljude inimeste uurimisel. Rahvusvaheliselt on standardiseeritud silma suhtelise spektraalse tundlikkuse kõver $K_\lambda = f(\lambda)$ päevavalguse jaoks. Suhteline spektraalne tundlikkus K_λ on normeeritud maksimaalse tundlikkuse suhtes, mis loetakse võrdseks ühega, ja väljendab fakti, et kindla tasemega valgusaistingu tekitamiseks on vaja vähimat energiavoogu lainepikkusel 555 nm e sagedusel $540 \cdot 10^{12}$ Hz.



λ, nm	K_λ	λ, nm	K_λ
400	0,0004	560	0,995
440	0,0023	600	0,631
480	0,139	640	0,175
520	0,710	680	0,017
550	0,995	720	0,00105

Toome sisse spektraalse valgustundlikkuse (SVT) mõiste antud lainepikkuse λ jaoks ja määratleme ta kui suhte:

$$\text{SVT}_\lambda = \frac{\text{valgusvoog}}{\text{kiirgusvoog}} \quad \text{e} \quad V_\lambda = \frac{\Phi_\lambda}{\Phi_{e,\lambda}}.$$

SVT on maksimaalne lainepikkusel $\lambda = 555\,\text{nm}$ ($\nu = 540 \cdot 10^{12}$ Hz):

$$V_{555} = \frac{1\,\text{lm}}{\frac{1}{683}\,\text{W}} = 683\,\frac{\text{lm}}{\text{W}}.$$

Seega lainepikkusel 555 nm kiirgusvoog 1 W tekitab valgusvoole 683 lm vastava aistingu.

Suhteline spektraalne tundlikkus K_λ on SVT suhe antud lainepikkusel maksimaalsesse SVT-sse, s.t SVT-sse lainepikkusel 555 nm:

$$K_\lambda = \frac{V_\lambda}{V_{555}}, \qquad K_\lambda \leq 1.$$

Tähendab, et teades kiirgusvoogu $\Phi_{e,\lambda}$, saame leida valgusvoo Φ_{λ} valemi järgi:

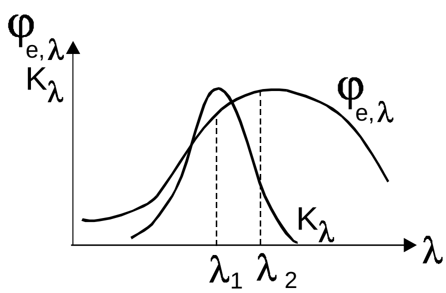
$$\Phi_{\lambda} = V_{555} \cdot K_{\lambda} \cdot \Phi_{e,\lambda}.$$

Näited valgusvoo leidmiseks, kui kiirgusvoog $\Phi_{e,\lambda} = 1\,\mathrm{W}$:

$$\lambda = 555\ \mathrm{nm} \qquad \Phi_{555} = 683\,\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \cdot 1 \cdot 1\,\mathrm{W} = 683\,\mathrm{lm};$$

$$\lambda = 440\ \mathrm{nm} \qquad \Phi_{440} = 683\,\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \cdot 0{,}0023 \cdot 1\,\mathrm{W} = 15{,}7\ \mathrm{lm};$$

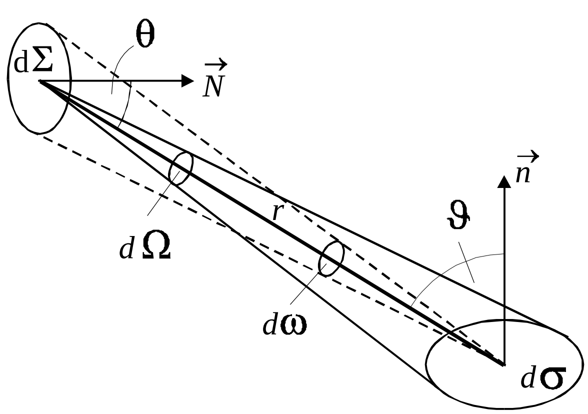
$$\lambda = 720\ \mathrm{nm} \qquad \Phi_{720} = 683\,\frac{\mathrm{lm}}{\mathrm{W}} \cdot 0{,}000105 \cdot 1\,\mathrm{W} = 0{,}717\ \mathrm{lm};$$



Kui on vaja määrata valgusvoogu lainepikkuste vahemikus λ_1, λ_2, siis viimases valemis kiirgusvoo $\Phi_{e,\lambda}$ asemel tuleb võtta kiirgusvoo spektraalne tihedus $\varphi_{e,\lambda}(\lambda)$ ja integreerida vajalikus lainepikkuste vahemikus:

$$\Phi_{\lambda_1,\lambda_2} = V_{555} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\lambda} \cdot \varphi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda.$$

5. Suure valgusallika poolt tekitatud valgustatus.



Olgu meil suvalise kujuga kiirgav pind Σ ja valgustagu ta suvaliselt orienteeritud pinda σ. Kuidas leida pinna σ valgustatus?

Võtame pinnal Σ pinnaelemendi $d\Sigma$ heledusega $L(\theta)$ ja valgustagu see element kaugusel r asuvat pinnaelementi $d\sigma$. Leiame elemendi $d\sigma$ valgustatuse dE.

Tähistame kiirgava (valgustava) pinna karakteristikud kui $d\Sigma,\ L(\theta),\ \vec{N},\ d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\phi$ ja valgustatava pinna karakteristikud kui $d\sigma,\ \vec{n},\ d\omega = \sin\vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\varphi.$ Elemendilt $d\Sigma$ lähtub valgusvoog $d\Phi = L(\theta) \cdot d\Sigma \cdot \cos\theta \cdot d\Omega,$ kusjuures $d\Omega$ on ruuminurk, mille all paistab pind $d\sigma$ elemendi $d\Sigma$ asukohas:

$$d\Omega = \frac{d\sigma \cdot \cos\vartheta}{r^2},$$

seega

$$d\Phi = \frac{L(\theta) \cdot d\Sigma \cos\theta \cdot d\sigma \cos\vartheta}{r^2}.$$

Arvestades, et $d\sigma$ poolt vaadatuna paistab element $d\Sigma$ ruuminurga

$$d\omega = \frac{d\Sigma \cdot \cos\theta}{r^2}$$

all, saame, et pinnale $d\sigma$ langeb valgusvoog

$$d\Phi = L(\theta) \cdot d\sigma \cdot \cos\vartheta \cdot d\omega,$$

ehk

$$dE = \frac{d\Phi}{d\sigma} = L(\theta) \cdot \cos\vartheta \cdot d\omega = L(\theta) \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\varphi$$

ja

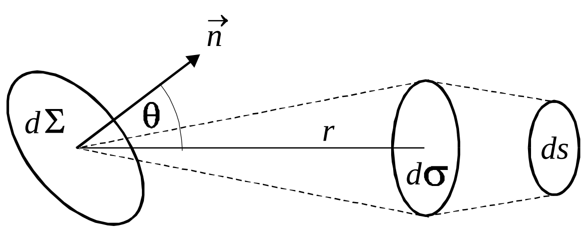
$$E = \int_{\vartheta}\int_{\varphi} L(\theta) \cdot \cos\vartheta \cdot \sin\vartheta \cdot d\vartheta \cdot d\varphi.$$

Kui $L(\theta) = \text{const},$ siis integreerimine üle ϑ ja φ ei tekita raskusi, vastasel juhul tuleb ülesande tingimuste kohaselt $L(\theta)$-lt üle minna $L(\vartheta)$-le.

6. Silma võrkkesta valgustatus difuusse kiirguri korral.

Punktides 6 ja 7 esitatud materjali kohta on kasulik täiendavalt lugeda raamatu [3] peatükke XVII ja XVIII.

Etteantud vaatlustingimuste korral objekti visuaalne või näiv heledus on määratud silma retseptoriteni jõudva valgusvooga, s.t võrkkesta valgustatusega. Joonisel on $d\Sigma$ igas suunas ühtlaselt heledusega L kiirgava pinna element ja $d\sigma$ – silmaava pindala. Eelmise punkti põhjal jõuab silma valgusvoog $d\Phi = \dfrac{L\, d\Sigma \cos\theta\, d\sigma}{r^2},$ kuna $\vartheta = 0.$ Võrkkestani jõuab valgusvoog $\tau\, d\Phi,$ kus τ on silma läbilaskvus, ja see voog jaotub pinnale $ds,$ mis on elemendi $d\Sigma$ kujutiseks võrkkestal. Võrkkesta valgustatus on niisiis $E_{\text{v.k.}} = \tau\, d\Phi / ds.$ Võrkkestale projekteeritakse $d\Sigma$ osa, mis on risti vaatesuunaga: $d\Sigma \cos\theta.$ Järelikult, kui l on võrkkesta kaugus tagumisest sõlmpunktist, siis $d\Sigma$ kujutise suurus võrkkestal on $ds = (d\Sigma \cos\theta)\dfrac{l^2}{r^2}$ ja võrkkesta valgustatus:



$$E_{\text{v.k.}} = \frac{\tau L \cdot d\sigma}{l^2}.$$

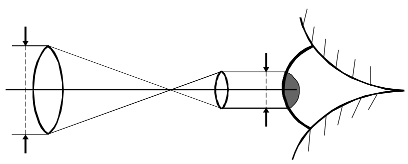
Seega võrkkesta valgustatus ja elemendi $d\Sigma$ näiv heledus ei sõltu θ-st ega r-st. Niisiis, igas suunas ühtlaselt kiirgav pind paistab ühesuguse heledusega sõltumata kaugusest ja vaatesuunast.

Stiles-Crawfordi efekti[1] pole siin vaja arvestada, sest vaatlustingimused, ka silmaava suurus, jäävad muutumatuks.

7. Objekti heledus optiliste instrumentide kasutamise korral.

- Suur e ulatuslik objekt. Kui inimene vaatleb objekti läbi optilise instrumendi, siis võib silmaava olla vaid osaliselt täidetud valgusega. Lisaks võib mõjuda Stiles-Crawfordi efekt. Järelikult, vaatevälja mingi osa näiv heledus ei pruugi sõltuda ainult instrumendi poolt tekitatud kujutise heledusest.

Defineerime objekti või kujutise näiva heleduse kui ühtlaselt hajutava pinna heleduse, mis varjutamata silmaava ja Stiles-Crawfordi efekti puudumisel annaks objekti või kujutise sama heleduse samades adaptsioonitingimustes jms. Näiv heledus on seega võrdeline vaadeldava objekti või kujutise poolt tekitatud võrkkesta valgustatuse ja kohase Stiles'i faktoriga eeldusel, et valguskiir satub silma sümmeetriliselt silma teljega. Eelmisest punktist on selge, et näiv heledus on võrdeline vaadeldava objekti või kujutise heleduse, silmaava pindala ja Stiles'i faktoriga.



Sisendava S Väljundava S/K^2

Olgu meil suur e ulatuslik objekt heledusega L, mida vaatleme pikksilmaga, mille suurendus on K, läbilaskvus T ja objektiivi pindala S (sisendava pindala). Väljundava pindala on S/K^2 ja kui ta on suurem silmaava pindalast $d\sigma$, siis viimane on täielikult valgustatud. Seega objekti näiv heledus läbi pikksilma on võrdeline suurustega L, T, $d\sigma$ ja ς_0, kus ς_0 on silmaava pindalale $d\sigma$ vastav Stiles'i faktor. Objekti näiv heledus vahetult aga on võrdeline L, $d\sigma$, ja ς_0-ga eeldusel, et silmaava suurus ja silma adaptsioonitase jäävad muutumatuks, millest:

$$\frac{\text{objekti näiv heledus läbi pikksilma}}{\text{objekti näiv heledus vahetult}} = T.$$

Kui pikksilma väljumisava on väiksem silmaavast, siis silmas valgustatakse ainult pinda S/K^2 ja objekti näiv heledus läbi pikksilma on võrdeline T, L, S/K^2 ja ς_1-ga, kus ς_1 on silmaavale pindalaga S/K^2 vastav Stiles'i faktor:

$$\frac{\text{objekti näiv heledus läbi pikksilma}}{\text{objekti näiv heledus vahetult}} = \frac{T\,S\,\varsigma_1}{d\sigma\,K^2\,\varsigma_0}.$$

- Punktallikas. Taevatäht kui objekt on punktallikas ja tema kujutis võrkkestal on Airy difraktsioonipilt. Lõplik suurendus ei saa suurendada punkti kujutise mõõtmeid ja järelikult sama difraktsioonipilt tekib tähest silma võrkkestal ka pikksilma kasutades. **Järeldus:** tähe vaatlemisel näiv heledus sõltub silma sattuvast kogu valgusvoost. Iga pikksilma korral kogu objektiivile langev valgusvoog sattub silma, kui pikksilma väljumisava pole suurem silmaavast.

---

[1] Stiles-Crawfordi efekti tõttu tekitab silmaava tsentri lähedal silma sisenev valgus tugevama valgusaistingu, kui perifeersetes osades sisenev valgus. Hinnatakse Stiles'i faktoriga ς : kui silmaava läbimõõt on 2 mm, siis $\varsigma = 0{,}95$, kuid läbimõõdu suurenemisel 4 mm-ni väheneb $\varsigma = 0{,}82$ -ni ja 6 mm korral $\varsigma = 0{,}66$.

Niisiis, on soovitav suurendada pikksilma suurendust vähemalt seni, kuni tema väljundava on kahanenud silmaava suuruseni. Kui see on saavutatud, siis

$$\frac{\text{tähe näiv valgustugevus läbi pikksilma}}{\text{tähe näiv valgustugevus vahetult}} = \frac{\text{silma sattuv valgusvoog läbi pikksilma}}{\text{silma sattuv valgusvoog ilma pikksilmata}} =$$

$$= T \times \frac{\text{pikksilma objektiivi pindala}}{\text{silmaava pindala}},$$

kus T on pikksilma läbilaskvus ja näiv valgustugevus punktallika on defineeritud analoogiliselt näiva heledusega ulatusliku allika jaoks. Stiles'i-Crawfordi efekti võib arvestamata jätta, kui silmaava suurus on eeldatavalt konstantne. Stiles'i-Crawfordi efekt esineb, kui väljumisava on väiksem silmaavast: valgus siseneb silma teljele lähemal ja tekitab tugevama vagusaistingu. Sel juhul on näiv valgustugevus suurem.

Niisiis, tähe kujutise heledus kasvab kui kasutada pikksilma suure ojektiiviapertuuriga: palja silmaga nähtamatuid tähti saab näha, kui kasutada pikksilma piisavalt suure objektiiviga. On kerge leida, kuidas pikksilma nägemisulatus sõltub tema objektiivi läbimõõdust.

Eeldame, et tähe nägemiseks peab silma sattuma vähemalt valgusvoog $\Phi_{0.}$ Kui silmaava raadius on r, siis kaugusel d olevale tähele toetuv ruuminurk on $\pi r^2 / d^2$, ning kui tähe valgustugevus on J, siis silma jõuab valgusvoog $J\pi r^2 / d^2$. Täht on nähtav, kui $J\pi r^2 \geq \Phi_0$.

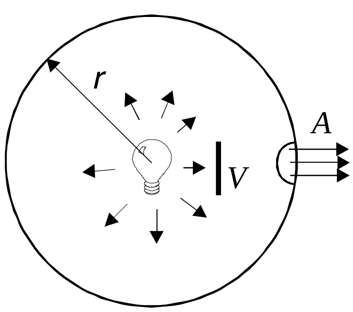
Vaadelgem nüüd suuremal kaugusel asuvat sama valgustugevusega J tähte läbi teleskoobi, mille objektiivi raadius on $R.$ Teleskoobi objektiivi poolt haaratud tähele toetuv ruuminurk on nüüd $\pi R^2 / D^2$. Kui pikksilma läbilaskvus on T ja suurendus on valitud selline, et tema väljundava pole suurem silmaavast, siis silma sattub valgusvoog $J\pi R^2 / D^2$, ning täht saab nähtavaks, kui $J\pi R^2 / D^2 \geq \Phi_0$.

Seega kaugused d ja D, millistel ühesuguse valgustugevusega tähed muutuvad nähtavaks palja silma ja pikksilma abil, on seotud järgmiselt:

$$D = d\frac{R}{r}\sqrt{T}.$$

see tähendab, et teleskoobi nägemisulatus on võrdeline tema objektiivi läbimõõduga. On huvitav märkida, et teleskoop võimaldab paljusid tähti näha päeva ajal. Nagu selgub eelnevast arutelust, suurendab pikksilm tähe näivat heledust, kuid mitte taustvalguse oma.

8. Fotomeetritest.



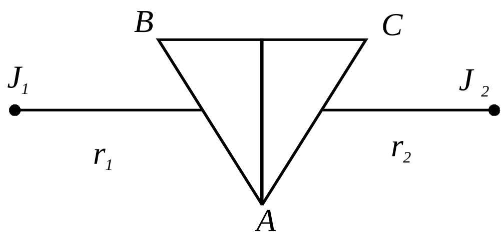
❑ Valgusallikate kogu valgustugevust mõõdetakse nn integreeriva sfääri abil. Allikas paigutatakse difuusselt peegeldavate valgete siseseintega sfääri tsentrisse ja mõõdetakse sfääri seina tehtud väikesest avast väljuvat valgusvoogu. Kui otsene valgusvoog on tõkestatud varjega V, siis ava A valgustatus on:

$$E = \frac{J_{\text{kogu}}}{r^2}\left(\frac{1}{1-R}\right),$$

kus r on kera raadius, R – siseseinte peegeldustegur.

Mõõtesfäär tuleb eelnevalt kaliibrida etalonallika abil.

- Visuaalsete fotomeetrite töö põhineb silma omadusel väga täpselt ära tabada kahe kõrvuoleva pinna ühesugune valgustatus – võrdse valgustatuse korral kaob nendevaheline piir.



Üks enamlevinuid on Lummer-Brodhuni mõõtepeaga fotomeeter (praktikumi töö nr 3.1). Siin kahe punktallika J_1 ja J_2 poolt difuusselt hajutavatel tahkudel AB ja AC tekitatud võrdse valgustatuse korral:

$$\frac{J_1}{r_1^2} = \frac{J_2}{r_2^2}.$$

Kui ühe valgusallika valgustugevus, näiteks J_1 on teada, siis $J_2 = J_1\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$.

- Eelkirjeldatuga sarnased fotomeetrid sobivad enam-vähem ühesuguse spektraalse koostisega valgusallikate võrdlemiseks. Kuidas aga toimida siis, kui valgusallikad kiirgavad eri värvi valgust?

Praegune kandela etalon kiirgab rohelist valgust ($\lambda = 555$ nm). Kuidas selle abil määrata, näiteks kasvõi hõõglambi valgustugevust? **Kuidas Teie lahendaksite selle probleemi?**

9. Kirjandus.

1. M.Laan. Optika valitud küsimusi. http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/optika/optikalisa/ovk.html
2. L. Sena. Füüsikaliste suuruste mõõtühikud ja nende dimensioonid. Tln, Valgus, 1985, lk 66-68.
3. R.S. Longhurst. Geometrical and Physical Optics. 3rd Edition. Longman Scientific & Technical [1973,…1990], pt XVII, XVIII.