

## 7. DIFRAKTSIOONI JA INTERFERENTSI JÄLGIMISE TINGIMUSED

- Koherentsed lained
- Avade väiksuse nõuded

Põhjusi, mis segavad valguse difraktsiooni või interferentsi jälgimist, on mitu. Võib öelda, et valguse lainelised omadused avalduvad vaid teatud tingimustel. Selles pole midagi erilist. Ühtki asja ei saa teha, kui selleks pole tingimusi. Näiteks korvpalli mängimiseks peavad olema sile ja kõva väljak, korvid, pall ning mängijad. Kui kas või üks neist puudub, ei tule korvpallist midagi välja.

### 7.1. KOHERENTSED LAINED

Tuletame kõigepealt meelde mehaaniliste lainete interferentsi. Püsiv interferentsipilt tekib ainult siis, kui liituvate lainete allikad võnguvad täiesti ühesuguselt. See tähendab, et liituvatel lainetel peavad olema ühesugused lainepikkused. Samuti ei tohi ühe allika võnkumine muutuda teise suhtes, näiteks hetkeks lakata. Teisiti öelduna, lainete kuju ei tohi aja jooksul muutuda. Selliseid laineid nimetatakse **koherentseteks laineteks**.<sup>1</sup> Neil on ühesugune lainepikkus ja aja jooksul muutumatu faaside vahe. Interferentsi korral liituvad (interfereeruvad) koherentsed lained. Samuti saavad difraktsiooni põhjustada (difrageeruda) koherentsed lained.

Kui visata vette kaks ühesugust kivi, siis tekitavad mõlemad ühesuguseid laineid. Miks peakski ühe kivi tekitatud laine teise kivi poolt tekitatud lainest erinema. Kivide vette kukkumise kohad on laineallikaiks. Sealt hakkavad veepinnal levima koherentsed lained, mis kohtudes interfereeruvad. See tähendab, et mingites kohtades lained tugevnevad – tekib suurema amplituudiga laine, kuid teisel lainel nõrgenevad.

Kui aga tühjas toas tekitada kaks ühesugust valgusallikat, näiteks süüdata korraga kaks ühesugust laelampi, ei

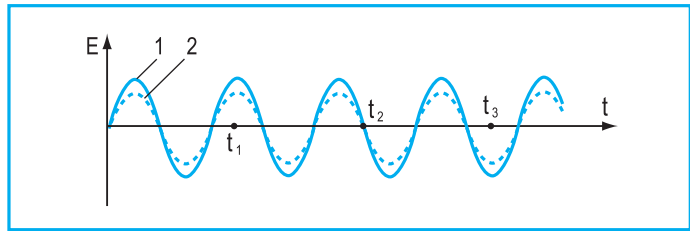


MILLISED LAINED ON KOHERENTSED?

VEELAINETE KOHERENTSSUS.

<sup>1</sup> lad. *cohaerentia* 'seostatus, seos'

Joon. 7.1. Koherentsed valguslained (1) ja (2) on sama lainepikkusega ja samas faasis.

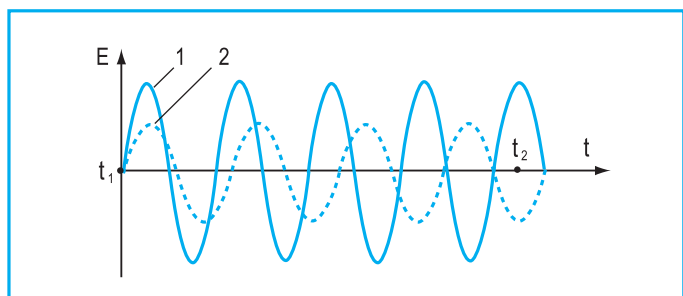


### VALGUSLAINETE KOHERENTSUS.

### VALGUSLAINETE MITTEKOHERENTSUST VÕIB PÕHJUSTADA ERINEVA LAINEPIKKUS.

### VALGUSLAINETE MITTEKOHERENTSUST VÕIB PÕHJUSTADA ERINEVA KESTUSEGA PAUS LAINETES.

Joon. 7.2. Valguslainete (1) ja (2) mittekoherentsus, mis on tingitud erinevatest lainepikkustest.



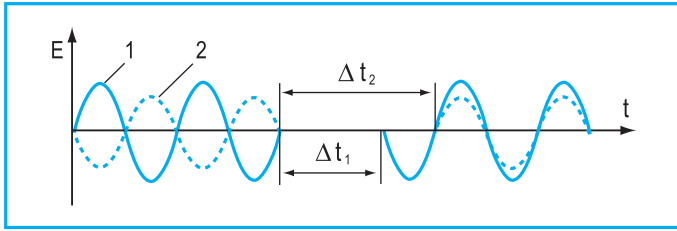
teki kusagil valguslainete tugevnemist (heleda valgusega kohti) ega nõrgenemist (pimedaid kohti). See tähendab, et lampidest tulevad valguslained ei interfereeru, sest nad pole koherentsed. Aga miks?

Vaatleme valguslainete koherentsust lähemalt. Joonisel 7.1 on toodud kahe sama lainepikkusega (monokromaatses) valguslaine graafikud. Nagu näha, nende lainete kuju (amplituud, kestus) aja jooksul ei muutu. Need lained liiguvad edasi samas faasis. Mõlemal lainel on näiteks ajahetkel  $t_1$  maksimum. Mingil teisel ajahetkel  $t_2$  läbivad mõlemad lained tasakaaluasendit, ajahetkel  $t_3$  on aga mõlemal lainel miinimum jne. Need lained on koherentsed ja saavad interfereeruda ja diffrageeruda.

Joonisel 7.2 on esitatud kaks mittekoherentset lainet. Mittekoherentsus on tingitud sellest, et lainetel on erinevad lainepikkused. Nüüd on lained ajahetkel  $t_1$  samas faasis, aga ajahetkel  $t_2$  vastandfaasis.

Kuid ka monokromaatsed lained ei pruugi alati olla koherentsed. Põhjuseks võib olla lainete ajutine katkemine, kusjuures pauside kestused ei ole võrdsed (joon. 7.3). Siin on lained algul vastandfaasides. Pärast pause hakkasid lained levima aga erinevail ajahetkedel. Selle tulemusena on lained nüüd samas faasis.

**Lainete mittekoherentsus on tingitud kas lainepikkuste erinevusest või erineva kestusega pausidest lainetes.** Miks aga peaks valguslained katkema või nende



Joon. 7.3. Sama lainepikkusega valguslainete (1) ja (2) mittekoherentsus, mis on tingitud erineva kestusega pausidest.

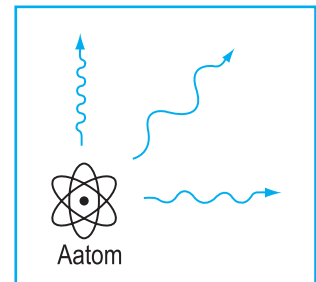
lainepikkus muutuma? Valguslainet kirjeldab ju pidev siinusfunktsioon, mille kaju ajas ei muutu.

Tuleb välja, et meie mudel ei kajasta valguse kiirgumise seotud asjaolusid. Nagu 9. klassi füüsikakursusest teame, tekib valgus aatomeis. Valguslained kannavad aatomist energiat ära ja aatomi energia väheneb. Valgus ei kiirgu aatomeist pidevalt. Kiirgus kestab teatava aja, mille vältel aatomist väljub valguslaine, mida nimetatakse **lainejaldaks**. Soojuslikes valgusallikates kestab ühe aatomi kiirgus keskmiselt  $10^{-9} - 10^{-8}$  s. Pärast kiirgamist aatom „kustub”, st ei kiirga enam valgust. Aatom kogub mingi aja jooksul energiat, mida näiteks hõõglampi toob elektrivool, et siis jälle hetkeks valgust kiirata. Olukorra täpsema kirjeldamise teeb võimatuks asjaolu, et pole ette teada, millal kiirgusakt algab, kui kaua ta kestab ja millise lainepikkusega lainejada kiiratakse. Piltlikult võib kiirgavaid aatomeid ette kujutada kui plinkivaid majakaid. Ainult „aatomimajakate” puhul pole teada, kui kaua ta kiirgab, kui pikk on paus või mis värvi on kiirguv valgus. Kõik oleneb sellest, milliselt energiatasemelt elektron vabaneb ja millisele energiatasemele ta siirdub. Need protsessid on soojuslikes valgusallikais täiesti juhuslikud. Soojuslike valgusallikate kiirgus on mittekoherentne.

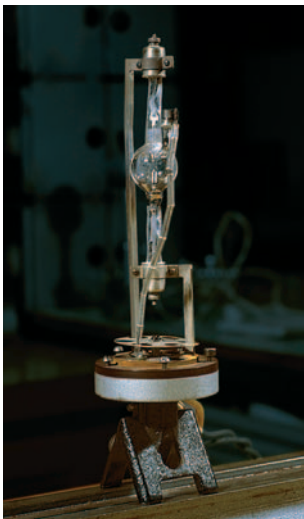
Valguse kiirgumise mehhanismist järeldub, et difraktsiooni ja interferentsi korral ei liitu mitte kaks pidevat lainet, vaid kaks erinevat lainejada. Kui muutuvad lainejadad, muutub ka liitumise tulemus. Soojuslike valgusallikate korral tähendab see, et muutused toimuvad iga  $10^{-9} - 10^{-8}$  s järel. Kui näiteks interferentsipildis muutuvad miinimumide ja maksimumide asukohad sellises tempos, siis inimsilm ei suuda neid muutusi jälgida.

Siit saamegi vastuse oma küsimusele. Kividest tingitud veelained on pidevad, aga laelambid kiirgavad üksikuid lainejadasid. Nende liitumine ehk interferents muutub nii kiiresti ja juhuslikult, et meile tundub, nagu oleksid toa põrand, lagi ja seinad ühtlaselt valgustatud. Sarnast nähtust saab jälgida, kui näiteks kinnitada mingi pilt käiaketta

## KUIDAS VALGUS AATOMEIST KIIRGUB?



**VALGUSLAINETE  
KOHERENTSUS OLENEB  
VALGUSALLIKA LIIGIST.**



Elavhõbedalamp



Neonlamp

külge. Niikaua kui käiaketas seisab paigal, on pilt selge. Kui aga panna käi pöörlema, läheb pilt segaseks, sest iga natukese aja tagant on pilt uues kohas ja meie silmas ei jõua pildi kujutist tekkidagi. Me näeme mingit ühtlast valgusriba.

Kuid on olemas ka valgusallikaid, millest valguse kiirgumisel ei valitse selline kaos. Nii kiirgab laser ühevärvilist, monokromaatset valgust, kusjuures lainete kiirgumine on omavahel rangelt kooskõlastatud. **Laser kiirgab koherentseid valguslaineid.**

Mõnevõrra halvem on olukord koherentsusega gaaslahenduslampide puhul, kuhu kuuluvad ka Hg või Na täitega tänavavalgustuslambid, neonreklaam jne. Sellised allikad kiirgavad kas ühe lainepikkusega valgust (Na-lamp) või mitut kindla lainepikkusega valgust (Hg-lamp). Kuid gaaslahenduslampides on kiirgusaktid omavahel kooskõlastamata, lainejadad ei „pea takti“. Nende lampide valguslained on osaliselt koherentsed.

Difraktsiooni või interferentsi jälgimiseks peavad valguslained olema koherentsed.

Kokkuvõttes võib öelda, et kõige paremini sobib difraktsiooni- ja interferentsikatseteks laserivalgus. Ka gaaslahenduslambid koos ühevärvilist valgust läbilaskvate valgusfiltritega annavad häid tulemusi. Hoopis raskem on valguse laineefekte näha soojuslike allikate valguses (Päike, hõõglamp, küünal jne).



Töötavad laserid

## 7.2. AVADE VÄIKSUSE NÕUDED

Kõigepealt täpsustame, mida tähendab üldse „väike“. Iga asi võib olla nii väike kui suur, kõik oleneb sellest, millega teda võrreldakse. Tavaliselt me võrdleme esemete suurusi (mõõtmeid) iseendaga. Näiteks, kui ütleme, et maja on suur, aga hernes on väike, siis peame silmas, et maja on meist palju suurem ja hernes palju väiksem. Kuid ka meie suhtes väikesed asjad võivad omavahel võrrelduna olla kas suured või väikesed. Nii hernes kui ka liivatera on meie jaoks väikesed, kuid neid omavahel võrreldes on selge, et hernes on suur ja liivatera väike.

Sama lugu on ka avade mõõtmete ja nende vaheliste kaugustega. Nende suuruse või väiksuse üle otsustamiseks võrreldakse neid valguse lainepikkusega. **Optikas on suured sellised kaugused, mis on palju suuremad valguse lainepikkusest**, hoolimata sellest, et need kaugused ulatuvad ainult mõne millimeetri.

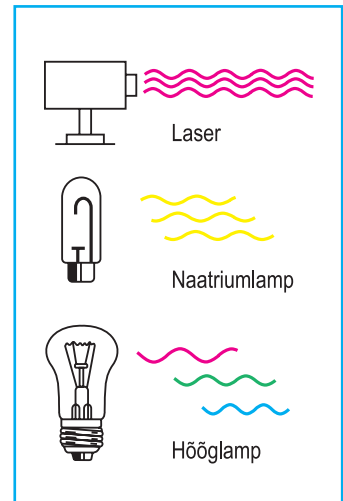
Kuid miks ikkagi peavad avad ja nende vahekaugused olema väikesed? Sellele küsimusele ei ole lihtne vastata, kuid niisuguse nõude vajalikkust saab ise kontrollida. Proovige, kas on võimalik difraktsiooni jälgida läbi 5 mm laiuse pilu? Või kas õnnestub saada kahe pilu interferentsipilti, kui pilud on žiletiga musta filmitüki sisse lõigatud, aga pilude vahekaugus on näiteks 2 mm? Mõlemad katsed nurjuvad.

Viimati nimetatud katse ebaõnnestumist saab seletada ka meie optikateadmiste abil. Selleks tuleb analüüsida kahe pilu interferentsi maksimumide ja miinimumide asukohti kirjeldavaid avaldisi. Neist on näha, et suunad, millistes valgus tugevneb või nõrgeneb, on ühe kindla interferentsijärgu korral määratud valguse lainepikkuse  $\lambda$  ja piludevahelise kauguse  $d$  suhtega:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}.$$

Kui piludevahelist kaugust suurendada, siis nihkuvad kõik maksimumid ja miinimumid sümmeetriatelje poole. Ühtlasi vähenevad nende vahelised kaugused ja neid on üha raskem eristada.

**Näide.** Kuidas muutub kahe pilu interferentsipildis naabermaksimumide vaheline nurkkaugus  $\delta\alpha$ , kui piludevahelist kaugust suurendada 0,01 mm-lt 5 mm-ni ( $\lambda = 500$  nm)?



Joon. 7.4. Erineva koherentsusega valguse allikad. Laser kiirgab sama lainepikkusega laineid samas faasis; Na-lamp kiirgab sama lainepikkusega laineid erinevais faasides; hõõglamp kiirgab kõikvõimalike lainepikkustega laineid kõikides faasides.

**MIDA TÄHENDAB SUUR JA VÄIKE?**

$$1 \text{ mm} \gg \lambda$$

**VÄIKSUSE NÕUE OPTIKAS.**

**KUIDAS OLENEB INTERFERENTSIPILT PILUDEVAAHELISEST KAUGUSEST?**

**NAABERMAKSIMUMIDE VAHEKAUGUSE LEIDMINE KAHE PILU INTERFERENTSIPILTI KORRAL.**

A n d m e d

$$\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$d_1 = 0,01 \text{ mm} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

$$d_2 = 5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta\alpha_1 = ?$$

$$\delta\alpha_2 = ?$$

Interferentsimaksimumi tingimus  $k$ -ndat järku maksimumi jaoks on:

$$d \sin \alpha_k = k\lambda. \quad (1)$$

Naabermaksimum tähendab, et interferentsijärk on ühe võrra erinev. Seega  $k + 1$  järku maksimumi korral:

$$d \sin \alpha_{k+1} = (k + 1) \lambda. \quad (2)$$

Nurkade  $\alpha_k$  ja  $\alpha_{k+1}$  tähendus selgub jooniselt 7.5.

Nurkkaugus  $\delta\alpha$  kahe naabermaksimumi vahel on nurkade  $\alpha_{k+1}$  ja  $\alpha_k$  vahe, s. t.:

$$\delta\alpha = \alpha_{k+1} - \alpha_k.$$

Väikeste nurkade korral on  $\sin \alpha \approx \alpha$ . Sel juhul

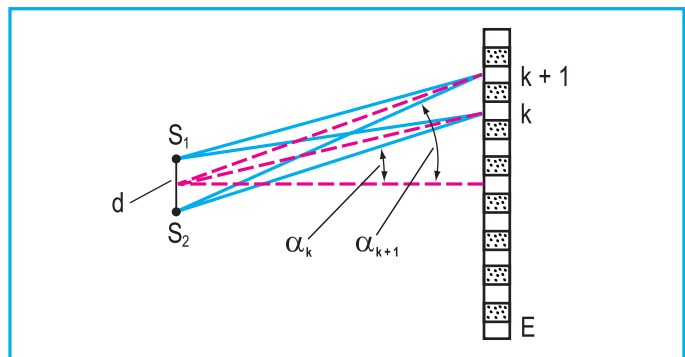
$$\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k \approx \alpha_{k+1} - \alpha_k = \delta\alpha. \quad (3)$$

Leiame  $\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k$ . Selleks lahutame võrrandist (2) võrrandi (1) ja saame

$$d (\sin \alpha_{k+1} - \sin \alpha_k) = \lambda.$$

Arvestades seost (3), saame

$$\delta\alpha = \frac{\lambda}{d}.$$



Joon. 7.5.

$$\text{Esimesel juhul } \delta\alpha_1 = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{1 \cdot 10^{-5} \text{ m}} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ rad} \approx 3^\circ,$$

$$\text{teisel juhul } \delta\alpha_2 = \frac{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 10^{-4} \text{ rad} \approx 0,006^\circ.$$

V a s t u s: nurkkaugus naabermaksimumide vahel vähe-  
neb  $3^\circ$  kuni  $0,006^\circ$ .

Toodud näites nihkuvad interferentsimaksimumid üksteisele nii lähedale, et neid pole võimalik palja silmaga enam eristada, sest inimsilma lahutusvõime on keskmiselt  $0,02^\circ$ .

Kokkuvõttes võib öelda, et kui avade (tõkete) mõõtmed ja nende vahelised kaugused on valguse lainepikkusest palju suuremad ( $d \gg \lambda$ ), siis pole difraktsiooni ja interferentsi võimalik jälgida. Sellisel juhul räägitakse valguslainete asemel ainult valguskiirtest ja kehtivad nn geomeetrilise optika seadused.

**MILLAL VÕIB KASUTADA  
LAINETE ASEMELE KIIRI?**

## ÜLESANDED

1. \*Leidke kahe erineva lainepikkusega sinusoidaalse laine summa (vt. joon 7.2).
2. Kui pika lainejada kiirgab aatom: a)  $10^{-9}$  s jooksul?; b)  $10^{-8}$  s jooksul?
3. Millistel juhtudel asub esimene maksimum sümmeetriateljest kaugemal kui 1 mm, st on praktiliselt veel eristatav? Ekraani kaugus piludest on 1 m ja  $\lambda = 500$  nm. Pilude vahelkaugus on: a)  $5 \mu\text{m}$ ; b)  $10^{-5}$  m; c)  $10^{-4}$  mm; d)  $10^{-1}$  cm?



1. Kuidas leida lainejada pikkus, kui on teada selle kestus?
2. Miks aatomid ei saa valgust kiirata pidevalt?
3. Kaksikpilu interferentsikatses kasutatakse valgusfiltreid. Ühe pilu ees on sinine ja teise ees punane valgusfilter. Kas ekraanil tekib interferentsipilt? Põhjendage.
4. Kas interferentsi korral on pilude vahelkaugusel ka alumine piir? Mis juhtub, kui  $d < \lambda$ ?

## STOP

1. Difraktsiooni ja interferentsi saab jälgida, kui valguslained on koherentsed, st neil on sama lainepikkus ja ajas muutumatu faaside vahe.
2. Aatomid ei kiirga valgust mitte pidevalt, vaid lainejadadena.
3. Laser on koherentse valguse allikas.
4. Valguse lainelised omadused ei avaldu, kui avade (tõkete) mõõtmed ja nende vahelised kaugused on suured (palju suuremad valguse lainepikkusest).