

| | |
|--|-----------|
| II ÕPPEMOODUL: MIS ON VALGUS? | 25 |
| 1 Kas valgus koosneb osakeste voost? | 25 |
| 1.a Newtoni valgusosakeste teooria | 25 |
| 1.b Foucault katse, mis võrdleb valguse kiirust õhus ja vees | 27 |
| 2 Kas valgus koosneb lainetest? | 28 |
| 2.a Christiaan Huygeni oletused | 28 |
| 2.b Kuidas saavad valguskiired üksteist läbistada? | 29 |
| 2.c Milline ümberpaigutus toimub, kui eraldi lained ühinevad? | 29 |
| 2.d Lainefront, lainepikkus, periood | 30 |
| 2.e Laine kiirus | 31 |
| 3 Kuidas Huygens seletas valguse omadusi | 32 |
| 3.a Huygeni printsiip | 32 |
| 3.b Peegeldumise ja murdumise seletamine laineteooriat kasutades | 33 |
| 3.c Difraktsiooni seletamine laineteooria kaudu | 33 |
| 4 Kahe pilu katse valguslainetega | 35 |
| 4.a Miks ilmnevad kahe pilu katses miinimumid ja maksimumid? | 36 |
| 4.b Erinev kaugus, erinev faas | 36 |
| 5 Difraktsioonivöödid | 37 |
| 6 II õppemooduli mõisted | 38 |

Autorile viitamine-mitteäriline eesmärk-jagamine samadel tingimustel 4.0 rahvusvaheline (CC BY-NC-SA 4.0)



Kasutamine järgmistel tingimustel:

- Autorile viitamine — te peate [kohaselt viitama](#), litsentsi lingi andma ning [näitama ära võimalikud tehtud muudatused](#). Seda võib teha mõistlikul viisil, kuid mitte selliselt, mis võib tekitada väärarusaama, et litsentsiandja tõstab teid või teie poolt teose kasutamist esile.
- Mitteäriline eesmärk — Te ei või materjali kasutada [ärilistel eesmärkidel](#).

Te võite:

- jagada — materjali iga meediumi vahendusel ja igas formaadis kopeerida ja levitada
 - kohandada — materjali segada, muuta ja täiendada
- Litsentsiandja ei saa teile seda keelata, senikaua kui järgite litsentsi tingimusi.

Peate sellele tööle viitama järgmiselt:

Frans R., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium

TÕLGE:



Quantum Spin-Offi rahastab Euroopa Liit LLP Comenius programmi kaudu (540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP).

Renaat Frans, Hans Bekaert, Laura Tamassia, Erica Andreotti

Kontakt: renaat.frans@khlim.be

See teave kajastab ainult teksti autori seisukohti ning Euroopa Komisjon ei ole vastutav selle informatsiooni kasutamise eest

Sissejuhatus 1. osasse: Milleks kvantfüüsika?

Õppemoodulite 1. osas uurime kvantfüüsika päritolu, alustades nähtustega, mida klassikaline füüsika ei suutnud seletada. Samm-sammult püüame neist nähtustest aru saada. Õppemoodulites käsitleme kõrvuti klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõisteid, et paremini aduda, kuidas kvantfüüsika on aidanud meil universumi toimimist mõista. Kuna klassikalise füüsika mõisted on kvantmaailma mõistmiseks väga olulised ja õppemoodulites leiavad käsitlust mõlemad, on iga peatüki lõpus toodud kokkuvõtte peamistest klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõistetest. See kokkuvõtte on harjutuse vormis, andes õpilasele võimaluse neid kahte "tüüpi" mõisteid eristada ja õpitud materjal veelkord üle vaadata.

Järgnevalt tutvustame iga õppemooduli sisu, et enne õppemoodulitega töö alustamist anda õpitavast parem ülevaade ja saada selgust, kust alustame ja kuhu välja tahame jõuda.

I õppemoodul: Seletamatu nähtus

Meie teekond algab elektronidega tehtava kahe pilu katsega: kas väikestel osakestel on kindel trajektoor, nagu näeb ette klassikaline füüsika? Kas saame vaadeldavaid nähtusi seletada, mõeldes elektronidest kui väga väikestest osakestest? Võrdleme kahe pilu katseid, mida tehakse liiva, elektronide ja valgusega, ning püüame mõista mateeria ja valguse loomust – kas saame ikka veel tõmmata selge piiri meie maailma lainelise ja osakeseline käitumise vahele?

Seejärel püüame seletada molekulide omadusi, mida klassikaline füüsika ei ole suutnud siiani seletada. Vaatame elementide kiirgus- ja neeldumisspektreid ning mõtleme, kas need on seletatavad Rutherfordi klassikalise aatomimudeliga või vajame selleks hoopis kvantfüüsika mõisteid.

II õppemoodul: Mis on valgus?

II õppemoodulis alustame kahe pilu katse tulemustest ja keskendume valguse loomusele. Valguse käitumise mõistmine aitab meil paremini aru saada kõigi osakeste käitumisest ning I õppemoodulis tehtud vaatlustest. Siin on peamiseks küsimuseks, kas valguse käitumist saab seletada, mõeldes valgusest kui osakestest koosnevast kiirest või hoopis kui lainest. Seda uurime klassikalise füüsika abil ning tutvume valgusteooriate ajalooga.

III õppemoodul: Mis võngub valgusega?

Kui valgust pidada laineks, siis peame uurima, mis paneb valguslained võnkuma ja levima. Uurime seda klassikalisele füüsikale tuginedes ning võrreldes valgust mehaaniliste lainetega. Süüvime ka klassikalise füüsika "välja" mõistesse, mis on üheks põhimõisteks ka kvantfüüsikas.

IV õppemoodul: Osakese-laine dualism

Eelnevates õppemoodulites käsitlesime valguse kui laine omadusi, seletades neid klassikalise füüsika abil. Nüüd on aeg astuda samm edasi ja uurida valguse kvantloomust. Mis juhtub, kui teeme kahe pilu katse madala intensiivsusega valgusega? Kas valgus tundub endiselt käituvat ainult lainena? Või näib sel olevat ka osakeselisi omadusi? Selles õppemoodulis arvutame valguskvandi energia, kasutades selleks Plancki-Einsteini võrrandit. Osakese lainepikkuse arvutamiseks tuginame de Broglie' hüpoteesile. Nii avastame, et laine-osakese dualism on valguse ja mateeria üks põhiomadusi.

V õppemoodul: Vesiniku kiirgusjoonte ennustamine kvantmudeliga

Meie teekonna selles punktis oleme juba tuttavad põhimõistetega, mis on vajalikud selliste nähtuste mõistmiseks, mis ei ole seletatavad klassikalise füüsika abil. Lähme tagasi elementide diskreetsete kiirgus- ja neeldumisjoonte juurde ning püüame omandatud teadmiste abil neid mitte ainult seletada, vaid ka arvutada välja vesiniku kiirgusjoonte sagedused.

Kõik õppemoodulid on kättesaadavad projekti veebilehel www.quantumspinoff.eu.

Soovime teile põnevat teekonda läbi tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud rakendusvõimalused!

II õppemoodul: Mis on valgus?

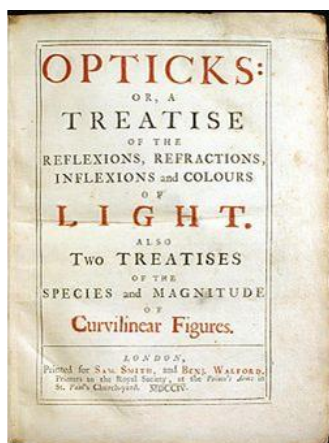
1 Kas valgus koosneb osakeste voost?

Valgus on kõikjal. Seetõttu võiks arvata, et teadlastel on lihtne avastada, mis valgus on ning kuidas see tegelikult töötab. Kuid nagu on selgunud: valgus ei taha oma saladusi kergekäeliselt avaldada. Füüsikud on kaua murdnud pead küsimuse üle: kas valgus on aineosakeste kiirgus või pigem laine?

Valguse tõelise olemuse mõistmine on füüsikuid kuni tänapäevani tegutsema pannud – alates antiikajast kuni moodsa kvantfüüsika ajastuni. Nii et asugem rännakule, et avastada, mis valgus tegelikult on.

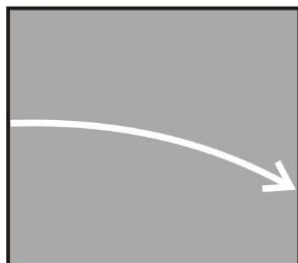
1.a Newtoni valgusosakeste teooria

Umbes aastal 1700 oletas suur Newton, kes sõnastas kolm mehaanika põhiprintsiipi ja gravitatsiooni universaalse seaduse, et valgus koosneb väikestest osakestest. Ta arvas, et neil valgusosakestel, nagu teistelgi aineosakestel, on loomulikult ka mass.



Joonis 1 Newton selgitas oma töös "Opticks" valguse omadusi osakeste teooriaga (1704). Kuid hilisemas väljaandes tutvustas ta kõikehõlmavat eetrit, mil olid mõned laine omadused. Aineosakesed reageerisid eetriga. (Allikas: Wikipedia avalik domeen).

Gravitational field



Kuna Newtoni aineosakeste valgusteoorias on valgusosakestel mass, järeldas ta, et Maa pinnaga paralleelne valguskiir paindub Maa gravitatsioonivälja tõttu allapoole. See tähendab, et valguse trajektoor oleks parabool, mitte sirgjoon. Valgus liiguks paraboolis nagu horisontaalselt välja tulistatud suurtükk.

Põhjus, miks me aga seda efekti tähele ei pane, on Newtoni arvates see, et valguse kiirus on väga suur. Valguse kiirus oli Newtoni ajal veel tõepoolest teadmata, kuid Galilei oli varasemalt näidanud, et see on kindlasti ülikiire ning võimalik, et lõpmatult kiire.

Siiski oli Newton võimeline oma osakeste teooria kaudu valguse geomeetrilisi omadusi väga hästi kirjeldama. Ka oma põhikooliaastatel kirjeldasite valgust kui kiiri ning seletasite

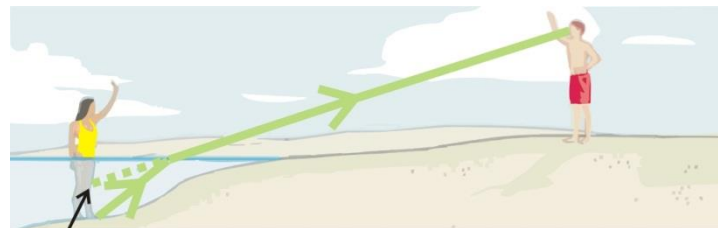
paljusid valguse omadusi geomeetrilise optika abil, just nagu Newton. Kiiri võib teatud ulatuses tõepoolest tajuda osakeste voona.

i) Nimeta vähemalt kolm valguse omadust (geomeetrisest optikast), mida saab Newtoni kombel seletada, mõeldes valgusest kui osakeste voost.

| Omadus | Visanda see nähtus | Kas saad seda valguse omadust seletada osakeste teooria kaudu? |
|-----------------------------|--------------------|--|
| 1. Valgusel on pidev kiirus | | |
| 2. ... | | |
| 3. ... | | |

Kuid kas pole valgusel omadusi, mida ei saa osakeste teooria kaudu seletada?

Näiteks valguse murdumine või paindumine. See juhtub, kui kiired lähevad ühest keskkonnast teise keskkonda.



Foot appears to be here

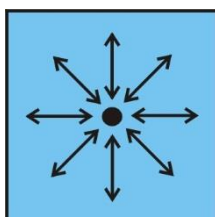
Joonis 2 Valguskiired murduvad keskkonna vahetudes.

ii) Kas saad valguse murdumist seletada, eeldades, et valgus on osakeste voog?

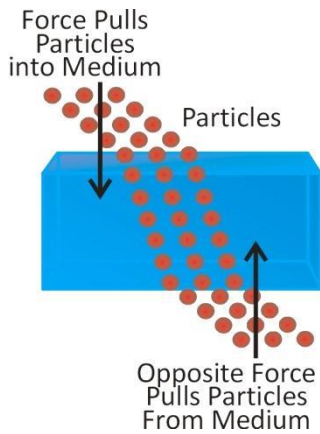
jah/ei

.....

Kuid Newton seletas **ka murdumist oma osakeste teooriaga!** Vaatame, kuidas ta seda tegi.



Newton arvas, et kui valgusosakesed satuvad keskkonda, näiteks õhku või vette, tõmbuvad nad selle keskkonna osakestega nendevahelise jõu (gravitatsiooni) tõttu. Keskkonna (nt õhu või vee) sees ümbritsevad valgusosakesi võrdselt selle keskkonna osakesed. Selle tulemusena avaldab külgetõmbejõud kõikidele külgedele võrdselt survet, muutes lõpliku jõu nulliks. Seega ei avalda see valgusosakestele mõju ning valgus läheb edasi sirge joonena, kuniks ta püsib samas keskkonnas.



Kuid keskkonna piiril toimub muutus. Minnes õhust vette, murdub valgus normaali poole (= joon, mis on pinnaga risti). Newtoni kohaselt juhtub see seetõttu, et vees on rohkem materiat kui õhus ning valgusosakesi tõmbab tihedama keskkonna poole. Selle tulemusena osakeste voog nihkub, paindub järsku ning toimub **murdu mine**.

Newtoni selgitus tundub töötavat. Kes teab. Kuid sellest mõttekäigust saab teha järelduse valguse kiiruse kohta tihedas keskkonnas võrreldes valguse kiirusega hõredas keskkonnas.

Joonis 3 Keskkondade piiril pole ruumilist sümmetriat: üleval on õhusakesed ja all on veeosakesed. Tihedam keskkond, praegusel juhul vesi, põhjustaks Newtoni teooria järgi kogukiirenduse vee poole. Valgusosakesed kiirendavad vee poole, mis põhjustab valgusvoos nihke. (Allikas: olympusmicro)

iii) **Mida saab Newtoni mõttekäigust järeldada valguse kiiruse kohta vees võrrelduna valguse kiirusega õhus?**

Vali:

$$v_{vesi} < v_{õhk}$$

$$v_{vesi} > v_{õhk}$$

$$?$$

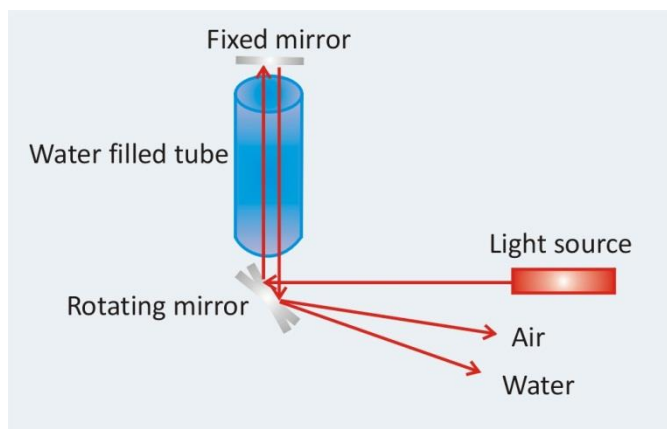
Seleta:

.....

.....

Te saate seda oletust katsega kinnitada! Kas see pole mitte füüsika puhul hea! Just seda tegi 1862. aastal tegi Léon Foucault (seesama Foucault, kes kasutas Maa pöörlemise tõestamiseks pendlit). Foucault viis läbi järgmise katse, et lõpuks teada saada, kas valguse kiirus on tihedas keskkonnas suurem kui hõredas.

1.b Foucault katse, mis võrdleb valguse kiirust õhus ja vees



Joonis 4 Foucault katse, milles võrreldakse valguse kiirust õhus ja vees. Allolev peegel tiirleb kella suunas. (Allikas: University of Virginia <http://galileo.phys.virginia.edu>).

Foucault seadis katse üles Pariisis asuvas vaatlusjaamas. Ta keerutas peeglit (tol ajal saadavaloleva aurumootori abil!). Peegel pöörles kiirusega 24.000 pööret minutis!

Ta lasi valgusallikal peegli peale paista. Valguskiir läks torust üles ja peegeldas toru peale kinnitatud peeglile. Pärast seda, kui valgus peegeldas taas alla pöörlevale peeglile (mis oli nüüdseks veidi edasi pöörelnud), tuli valgus tagasi valgusallikast veidi allapoole (kohta, kus joonisel on sõna „air“).

*Seejärel kordas Foucault oma katset, kuid seekord veega täidetud toruga. Kui valguse kiirus vees on suurem kui õhuga täidetud torus, tuleb valgus varasemast kiiremini pöörleva peegli tagasi (ja peegel on vähem edasi pöörelnud), ning peegeldunud kiir tuleks välja **ülalpool** seda kohta, kus õhuga tehtud katse puhul kiir väljus.*

*Katse näitas siiski, et peegeldunud kiir tuli veest välja **allpool** seda kohta, kus õhuga tehtud katse puhul kiir väljus. See oli kindlaks tõendiks, et valguse kiirus vees on (VÄIKSEM/SUUREM) kui valguse kiirus õhus!*

Foucault katse ei andnud Newtoni valgusosakeste teooriale asu... See näitab ideaalselt, kuidas võib üks briljantne teooria, nagu Newtoni oma seda oli, sattuda raskustesse, kui see eeldab midagi (nt seda, et valguse kiirus on tihedamates ainetes suurem), mida ei saa katsetustega tõestada. See on midagi teadusele omast. Füüsik nagu Newton, kes oli edukas mehaanikas, oli siiski edutu oma „valguse mehaanikaga“.

Oli selge, et valgus ei järgi Newtoni osakeste mehaanikat. Kas võib olla tõsi, et valgus on pigem laine?

2 Kas valgus koosneb lainetest?

2.a Christiaan Huygeni oletused

Hollandlane Christiaan Huygens (1629-1695) arvas – erinevalt samal ajal elanud kuulsast Newtonist – et valgus on laine. Ta eeldas, et valgus võib tõusta vibratsioonina, mis levib ruumis edasi lainena. Umbes nagu vibreeriv objekt tekitab helilaineid, mis edasi kanduvad; nagu vee pinnal tekkiv vibratsioon paneb veelained liikuma.

Ta arendas oma teooriat teoses „Traité de la Lumière“ (1690), mis muide ilmus veidi enne Newtoni teooriat. Huygens tugines järgmistele eeldustele:

1. Valguse kiirus on väga suur, mistõttu on ebatõenäoline, et valgus koosneks osakeste voost. Sellise kiirusega liikuvatele osakestele avalduks Newtoni 2. seaduse kohaselt tugev vastujõud. See vastujõud põhjustaks nende seiskumise, just nagu laual veerev pall jõu tõttu peatub.
2. Kaks valguskiirt paistavad üksteisest läbi ilma üksteist mõjutamata. Kuidas saavad nad osakestest koosneda? Osakesed pörkuksid üksteisega.
3. Murdumise nähtust saab seletada, eeldades, et valguse levimise kiirus muutub olenevalt selle läbitavast keskkonnast: valguse kiirus *väheneb* tihedas keskkonnas (vastupidiselt Newtoni teooriale selle suurenemise kohta)!

Vaadakem nüüd valguse teist omadust – seda, mis tihti tähelepanuta jääb!

2.b Kuidas saavad valguskiired üksteist läbistada?

Iga laps näeb, kuidas kiired ristuvad selliselt, nagu nad poleks kunagi teineteisega kokku põrganud. Seda näeb iga päev ning just see nähtus pani Huygensi sügavalt kahtlema Newtoni arvamuses, et valgus koosneb osakeste voost. Huygens mõtiskles:

Kuidas saavad kaks valguskiirt üksteist läbistada ilma, et osakesed üksteisega kokku põrkaks?



Kui kaks kiirt ristuvad ja jätkavad ilma üksteist häirimata endiselt sama teekonda, siis kuidas nad saavad koosneda osakekestest?

Huygens mõistis, et lainetel, ja mitte osakestel, on võime üksteisest puutumata läbi minna. Nad jätkavad oma teekonda, nagu midagi poleks juhtunud.

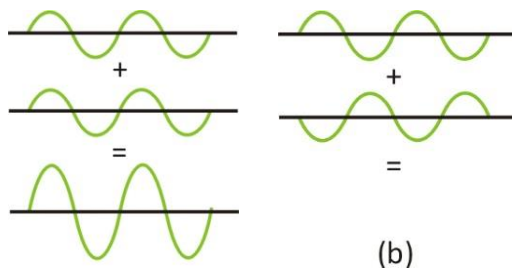
Vaata alloleval lehel heli ja vibratsiooni instituudi (University of Southampton, UK) animatsiooni (inglise keeles). Näete, mis juhtub, kui kaks lainet kohtuvad. <http://web.bryanston.co.uk/physics/Applets/Wave%20animations/Sound%20waves/Superposition%20of%20Waves.htm>

2.c Milline ümberpaigutus toimub, kui eraldi lained ühinevad?

Okei, nad lähevad üksteisest läbi. Aga mis juhtub nende paigutusega ristlõikes? Vaata vajadusel uuesti animatsiooni.

.....

Kaks lainet lähevad üksteisest läbi. Ristlõikes toimub ümberpaigutus, mis on eri lainete



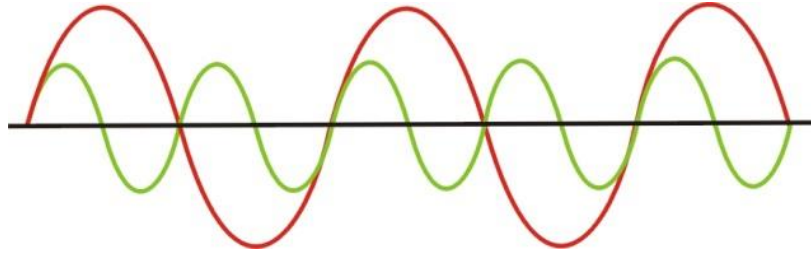
ümberpaigutuste summa. See nähtus on lainetele omane ning seda kutsutakse *superpositsiooniks* või *interferentsiks*. Superpositsioon võib põhjustada kahe laine võimendamise, kuid ka üksteise kustutamise. Vaata, kuidas ümberpaigutused rakenduvad.

Kui ühe laine hari kohtub samas kohas teise laine põhjaga, on lained selles punktis VASTANDfaasis. Lained tõmbavad üksteist maha. Kas oskad visandada lainet, mis on tulemuseks joonisel b?

Joonisel (a) nähtuvat kutsutakse konstruktivseks ehk **tõusinterferentsiks** või superpositsiooniks. Joonisel (b) nähtuvat kutsutakse **destruktiivseks interferentsiks** või superpositsiooniks.

Joonista allpool olevate üksteist läbistavate lainete ümberpaigutuse tulemus.

Harjutus: Kas oskad joonistada ümberpaigutuse tulemuse igas punktis ja seega tulemuseks oleva laine?



2.d Lainefront, lainepikkus, periood

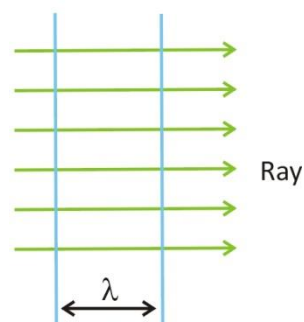
Kui viskad kivi tasesse vette, ilmuvad üha suurenevad ringid. Need ringid koosnevad osakekestest, mis hakkavad võnkuma. Kõik samal *laineharjal* olevad osakesed liiguvad ühel ajal üles ja alla.

Tegelikult on lõpmatu arv laineharju, kuid me joonistame laineharjad üksnes neile osakestele, mis asuvad positiivsel maksimumil.

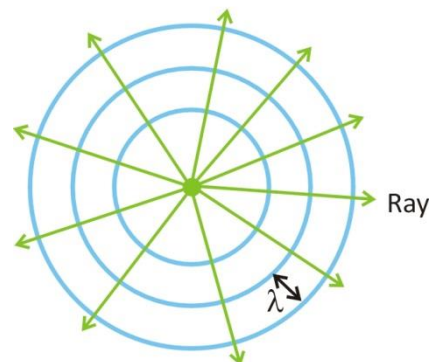
Laineharjadel võib olla erinev kuju:

- sirged või tasandilised: neid kutsutakse **tasalaineteks**, nt helilaine tunnelis;
- ringid: need on **keralained**, nt lained veepinnal;
- sfäärilised: need on **sfäärilised** lained, nt helilained ruumis.

Plane wavefront



Spherical wavefront



Kiired näitavad laineharja liikumise suunda. Kiired on laineharjadega risti.

Lainemuster kordab end teatud vahemaa tagant, seda kutsutakse **lainepikkuseks** λ . Selle vahemaa jooksul avaldub lainele omane muster. Märkige alloleval pildil lainepikkus neljas kohas:



Aega, mis lainel kulub ühe täisulatuse lainepikkuse läbimiseks, kutsutakse laine **perioodiks** (T). Näiteks võib lainel minna $\frac{1}{2}$ sekundit ühe lainepikkuse läbimiseks. See laine teeb täisvõnke ... korda sekundis ning selle **sagedus** on seega 2 Hz.

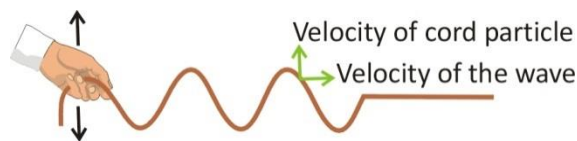
Laine, mis läbib ühe lainepikkuse $\frac{1}{10}$ sekundiga, teeb täisvõnke ... korda sekundis. Selle laine sagedus on Hz. (Hz tähendab „sekundis“)

Sagedus ja periood on seega pöördvõrdeliselt seotud:

$$f = \frac{1}{T}$$

Harjutus: Kui laine sagedus on 1000 Hz, siis mis on ajaliselt selle laine periood?

2.e Laine kiirus



Foucault leidis, et valguse levimise kiirus vees on (suurem/väiksem) kui õhus. Huygens kasutas seda murdumise nähtuse seletamiseks.

Laine kiiruse, pikkuse ja perioodi suhe on järgmine:

Laine kiirus v on loomulikult
$$v = \frac{\text{läbitud vahemaa}}{\text{aeg}}$$

Kui läbitud ajaks märkida üks lainepikkus, siis saame lainete põhisuhte:
$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Laine kiirus on lainepikkus korrutatud selle sagedusega. Laine tegelik kiirus sõltub keskkonna omadustest, nt selle tihedusest, kokkusurutavusest ja rõhust.

Heli kiirus õhus (20°C juures) on 343 m/s, kuid vees on see umbes 1500 m/s. Valguse kiirus vaakumis on (umbes) 300.000 km/s või $3,0 \times 10^8$ m/s. Valguse kiirus tahketes materjalides (nt klaasis) on sellest madalam.

Küsimus: raadiomoodul edastab raadiolaineid sagedusel 88,1 MHz. Mis on nende raadiolainete lainepikkus? (vastus: 3,4 m)

.....

3 Kuidas Huygens seletas valguse omadusi

3.a Huygensi printsiip

Mingem tagasi Huygensi mõtete juurde. Ta arvas, et kui tahta nt vees teha tasalaineid, siis võib selles hoida lamedat lehte ning teha vertikaalseid üles-alla liigutusi.

Huygens hakkas mõtlema, kas sellist lainet saaks luua vaid mõne laineallika abil. Paberilehe asemel võib kasutada näiteks markereid, mis laine teekonnal üles-alla liiguksid. Kas need laineallikad, tegelikult keskpunktid, moodustaksid uue laineharja? Proovi seda, pöörates tähelepanu sellele, et markerid ühes faasis võnguksid (liigutage neid koos üles-alla).

Huygens selgitas: kõik need keskpunktid tekitavad keralaineid. Lained hääbuvad ja jõuavad pärast teatud vahemaad samasse kohta: nad lähevad üksteisest läbi (nagu lained teevad!) ning ümberpaigutusel rakenduvad üksteisega. Pool lainepikkust tagapool kohast, kus võnkuvad markerid moodustasid laineharja, liituvad nende ümberpaigutused kõik kokku, ning luuakse uus lainehari!

Plane wavefront



Spherical wavefront



Huygens leidis, et see on lainete uus printsiip:

Lainefrondi iga punkti võib vaadelda keskpunktide seeriana, mis ühes faasis võnguvad. Neist eralduvad keralained ning see põhjustab uue lainefrondi moodustumise poole lainepikkuse kaugusel.

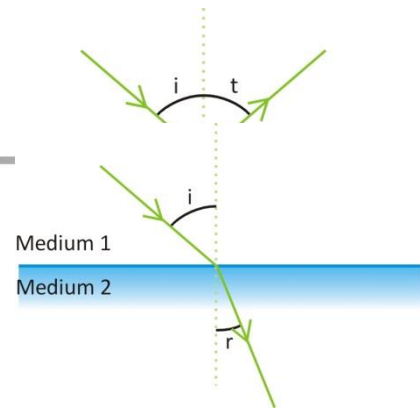
Seda kutsutakse **Huygensi printsiibiks**.

3.b Peegeldumise ja murdumise seletamine laineteooriat kasutades

Huygensi printsiipi kasutades saab seletada:

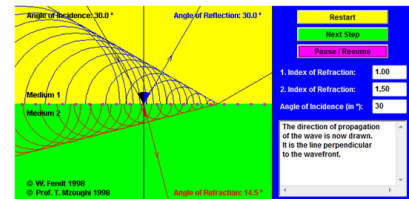
- miks on peegeldumisel langemisnurk sama, mis peegeldamisnurk;
- valguse murdumisel ühest keskkonnast teise üleminekul, on langemisnurga siinus i ja murdumisnurga siinus r vahel kindel suhe (refraktsiooniindeks). Huygens näitas, et murdumisnurgad moodustuvad täpselt valguse levimise eri kiiruse tõttu eri keskkondades. Tegelikult ta demonstreeris, et refraktsiooniindeks n võrdub täpselt esimese ja teise keskkonna laineikiiruste suhtega.

$$\frac{\sin(i)}{\sin(r)} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1 \rightarrow 2} = cte$$



**Reflection and Refraction of Waves
(Explanation by Huygens' Principle)**

the reflection and the refraction of waves by the principle of Huygens. Explanations for each of the "Next Step" button. You can stop and continue the simulation by using the "Pause / Resume" button. The medium with the smaller index of refraction

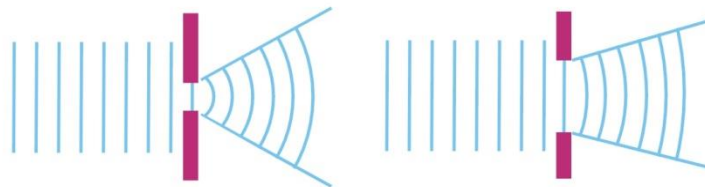


Selle apleti abil saate Huygensi arutluskäiku jälgida (apleti autor Walter Fendt, inglise keeles): www.walter-fendt.de/html5/phen/refractionhuygens_en.htm

Just laine kiiruse muutus teise keskkonda sisenemisel põhjustab selle laine murdumise.

3.c Difraktsiooni seletamine laineteooria kaudu

Lained võivad peegelduda, murduda ning ka painduda takistuse ümber või avanemisel. Seda kutsutakse **difraktsiooniks**.





Seda näitavad hästi hellained: sa oled võimeline kuulma lähedal toas räägitavat juttu, kui uks on lahti. Samamoodi painduvad näiteks merelained läbi väikse avause.

Merelainete paindumine Peloponnesose poolsaare Voidokilia rannas Kreekas.



Difraktsiooni võib seletada ka Huygensi printsiibi abil: iga punkt avanemisel või takistuse äärel käitub keskpunktina, mis tekitab laineharju igasse suunda.

Difraktsiooni hulk sõltub avanemise või takistuse suuruse proportsioonist lainepikkusega. Helil on suur lainepikkus: arvuta nt heli lainepikkus sagedusel 440 Hz.

Harjutus: Kas lained võivad painduda ka ümber takistuse (mitte ainult läbi avause)? Kas oskad teha selgitava joonistuse?

Harjutus:

Kui pikad on helilained?

Arvuta näiteks sellise heli lainepikkus, mille sagedus on 440 Hz!

..... (Vastus 0,773 m).

Avaused ja takistused, mille suurusjärg on võrreldav helilaine omaga, tekitavad neile lainetele märkimisväärse difraktsiooni.

Harjutus: Kui suured on nähtava valguse lainepikkused? Nähtaval valgusel on võrreldes helilainetega kõrge sagedus. Arvuta sellise punase valguse lainepikkus, mille sagedus on 500 THz (Tera = 10^{12} . Arvutamiseks vajad ka valguse kiirust – kui sa seda ei tea, siis vaata järele)!

..... (Vastus 600 nm).

Kas valgus paindub ümber akna? Miks või miks mitte?

.....

Kas näed valguse difraktsiooni väikeste takistuste või avauste ümber? Miks?

.....

Difraktsioon igapäevaelus:

- Miks ei tekita maanteede ääres olevad müratõkkeseinad seinataha täielikku vaikust?

.....

- Helilained võivad olla väga pikad, lausa müratõkkeseinaga samas suurusjärgus. Seetõttu painduvad nad rohkem ümber takistuse.

Arvuta näiteks sellise heli **lainepikkus**, mille sagedus on 1000 Hz. Võrdle seda sellise heli lainepikkusega, mille sagedus on 100 Hz. Kas müratõkkeseinad summutavad paremini madalaid või kõrgeid helisid?

.....

(Vastus: $\lambda=3,4$ m, kui sagedus on 100 Hz ja $\lambda= 0,343$ m, kui sagedus on 1000 Hz.)

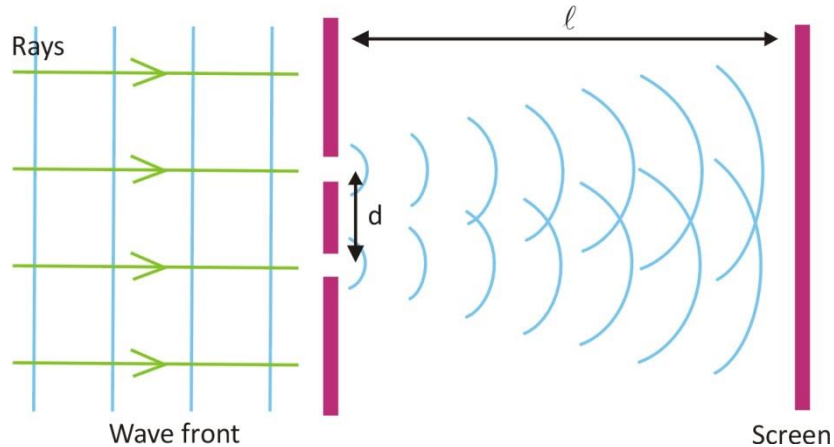
4 Kahe pilu katse valguslainetega

Tuleme nüüd tagasi valgusega tehtava kahe pilu katse juurde ja selgitame, miks lainete puhul tekivad miinimumid ja maksimumid. 1803. aastal demonstreeris Thomas Young (1773-1829), et kahe pilu katses tekib lainete interferents, mis on lainete põhiomadus! Kuigi usuti, et see katse tõestab lõplikult, et valgus koosneb lainetest, jäi nende lainete tõeline olemus siiski avamata. Mis see siiski valguslainetes vibreeris? Järgmises õppemoodulis arutame valguse olemust põhjalikumalt.

Aga esmalt uurime kuulsat kahe pilu katset valgusega, mõeldes valgusest kui lainetest.

4.a Miks ilmnevad kahe pilu katses miinimumid ja maksimumid?

Valgusallikas levitab valgust tasalainete harjadena. Nad jõuavad kahe piluga takistuseni. Huygensi printsiibi järgi tekib lainehari, mis paindub ning jõuab pilude taga olevate punktideni.



Kõik katse elemendid on selgelt märgitud ülal asuvale joonisele. Eri dimensioonide ja teepikkuste suhted ei selgita *reaalset* kahe pilu katset. Pilud on palju kitsamad kui nende vaheline osa d . Pilusid võib näha *punktikujulistena*. Ning ekraan on piludest palju kaugemal.

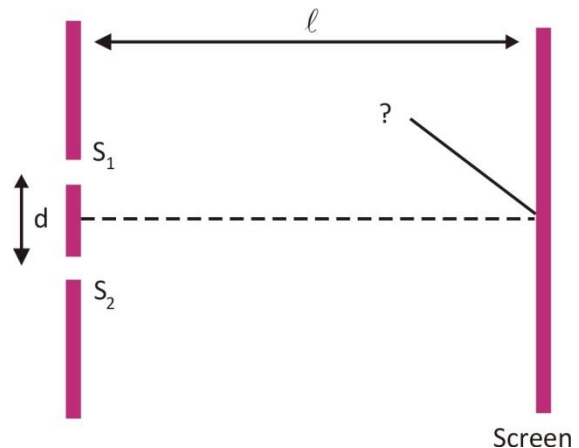
Kuidas on võimalik, et ekraanile ei ilmugi valgust või ilmub valguse muster?

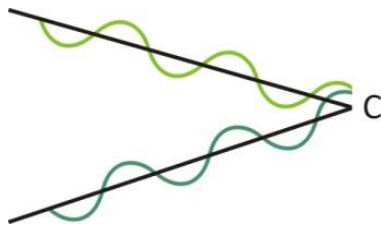
Pilude taga on kaks lainet kerakujuliste lainefrontidega, mis teatud piirkonnas üksteisega kattuvad. Nad rakenduvad või *interfereeruvad*. Kuna need kaks lainet olid enne pilu üks, on nad pilu juures põhimõtteliselt samas faasis: nad käivad koos üles-alla. Kuid pilude taga ei tarvitse need lained enam sama teekonda läbida, mistõttu ei pruugi nad enam olla samas faasis.

4.b Erinev kaugus, erinev faas

**Mida näed kahe pilu taga keskel?
Kas kirkast punkti või mitte? Miks?**

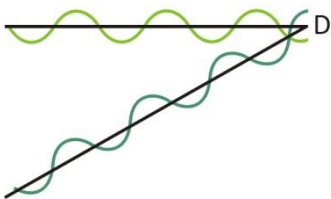
.....
.....





Täpselt kahe pilu taga olevas piirkonnas (tähistatud C-ga) on mõlemad lained läbinud sama kauguse. Lained olid pilude juures samas faasis ning on seda ka punktis C. Lained võnguvad ühes taktis ning kaks lainet võimendavad üksteist: ilmneb kirkas maxima (*tõusinterferents*).

Sellest keskel asuvast punktist pisut vasakul (või paremal) on üks pilu kaugemal kui teine. See tähendab, et lained ei liigu enam ühes faasis. Tulemusena toimub ühisest taktist mõningane kõrvalekaldumine.



Kindlas nurgas erineb ühest pilust tulev valgus täpselt poole lainepikkuse võrra teisest pilust tulevast valgusest: kui üks laine liigub alla, siis teine laine liigub üles. Kui lainete amplituud on sama, elimineerivad lained üksteist (vt joonisel punkti D). Ilmneb *destruktiivne interferents*.

Suuremate nurkade puhul on läbitud vahemaa pikkus jälle üks lainepikkus. Mõlemad lained on neis kohtades jälle ühes faasis ning võimendavad üksteist: ilmneb maksimum. Nurka veidi veel laiendades ilmneb jälle miinimum, ja nii edasi. Nii tekib maksimumide ja miinimumide muster.

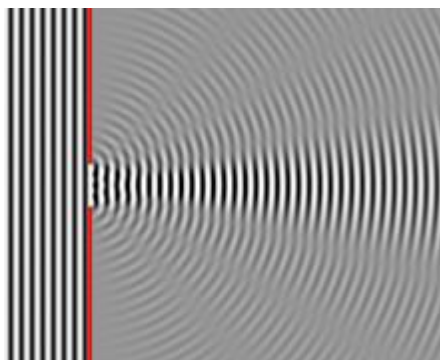
Praktiline tegevus: Kui valguse lainepikkus väheneb, siis kas näeksid ekraanil rohkem või vähem maksimume? Selgita, miks.

.....



Interferentsimuster, mis on tekkinud punase laserkiire suunamisel läbi kahe pilu

5 Difraktsioonivöödid

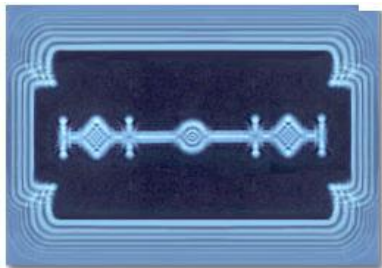


Ka üheainsa pilu puhul on erinevatest Huygensi laineallikatest tulevate lainete levimisteedade pikkustes erinevusi. Seega tekib erinevatest allikatest pärit lainete puhul superpositsioon.

Sõltuvalt faasierinevusest ilmnevad ühe pilu tekitatud difraktsioonis maksimumid ja miinimumid.

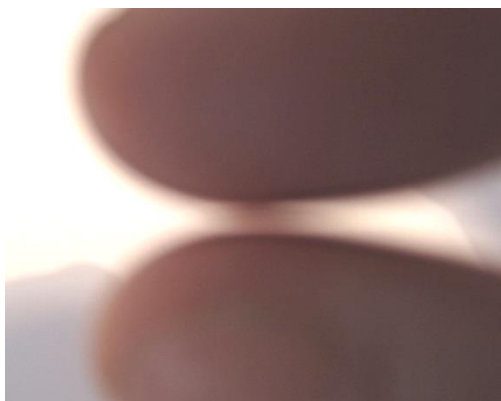
Valguse difraktsioonivöödid igapäevaelus?

Kui valguslaine teele jäävad ette igapäevased takistused, ei paindu see peaaegu üldse, sest nähtava valguse lainepikkus on võrreldes takistuste mõõtmetega väga väike. Siiski võid mõningatel juhtudel ka igapäevaelus kohata valguse difraktsiooni!



Valguse difraktsioon ümber žiletitera pisikeste äärte

Katse:



Pane põial ja nimetissõrm peaaegu kokku ja vaata, kuidas tekivad tumedad ja heledad vöödid. (Kõige paremini on see näha valgel taustal.)

Katse: Õppemooduleid täiendavate **praktiliste tegevuste** käigus saad mõõta juuksekarva paksust, mõõtes ära miinimumide vahelise kauguse.

6 II õppemooduli mõisted

Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

Klassikalise füüsika mõisted:

Valguse omaduste seletamine osakeseteooriaga: valgusel on kindel kiirus, mis sõltub; pinnad, millele paistab valgus, soojenevad; peegeldumine.

Valguse omadused, mida osakeste teooria EI seleta: valguse

Lainete konstruktiivne ehk tõus- ja destruktiivne

Lainete difraktsioon

Lainete omadused: kiirus, sagedus, lainepikkus, periood

Huygeni printsiip

Kvantfüüsika mõisted: siin puuduvad.