

<b>ÕPPEMOODUL IV: OSAKESE-LAINE DUALISM</b>	<b>39</b>
<b>1 Topeltpilude katse madalal intensiivsusel valgusega</b>	<b>39</b>
<b>2 Valguse ja aine kvantteooria</b>	<b>41</b>
2.a Elektromagnetlained ja nende energiakvandid: fotonid	41
2.b Materiaalained ja kvandid	41
<b>3 Kvantväljad</b>	<b>43</b>

TÕLGE:



**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 või formaadis kopeerida ja levitada
  - kohandada — materjali segada, muuta ja täiendada
- Litsentsiandja ei saa teile seda keelata, senikaua kui järgite litsentsi tingimusi.

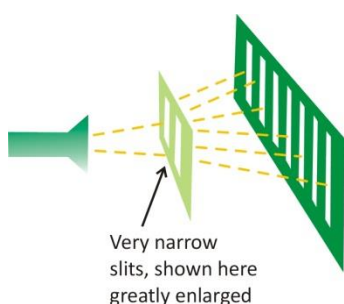
Peate sellele tööle viitama järgmiselt:

Frans R., Tamassia L. (2014) Quantum SpinOff Learning Stations. Centre for Subject Matter Teaching, KHLim Katholieke Hogeschool Limburg, Diepenbeek, Belgium

# Õppemoodul IV: Osakese-laine dualism

## 1 Topeltpilude katse madalal intensiivsusel valgusega

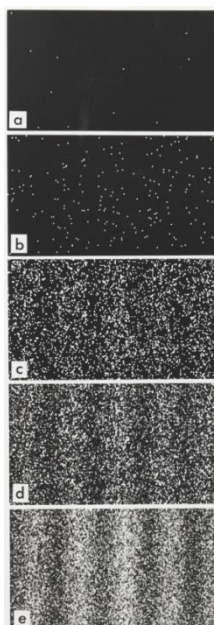
19. sajandil sai selgeks, et valgus on lainega sarnanev nähtus: **elektri- ja magnetväljade** laine. Kuid varsti selgus, et see ei avanud valguse tõelist olemust siiski täielikult. Vaadeldakse seega uuesti topeltpilude katset valgusega:



Me teame, et valgus, läbides kaks pilu, moodustab ekraanile interferentsimustri. Kuna tajume valgust lainetena, saame selle mustri tekkimist selgitada mõlema pilu erineva kauguse tulemusel tekkiva tõusinterferentsi või destruktivse interferentsi kaudu (vt õppemoodulit II).

Esimeses õppemoodulis juba nägime, mis juhtub topeltpilude katses elektronidega. Kas me saame elektrone tajuda osakestena või peaksime neid tajuma lainetena? Miks see nii on?

Kuid vaadeldakse topeltpilude katset väga madala intensiivsusega valguse korral. Me küsime endalt, kas on põhimõtteliselt võimalik valguse intensiivsust vähendada nii madalale tasemele, kui ise soovid? Einstein vastas sellele juba 1905. aastal – ta leidis, et esineb füüsiline piir ning valguse intensiivsust ei saa lõputult vähendada: looduses esineb *kõige väiksem valguse hulk*.



Me saame seda jälgida, vähendades topeltpilude katses valguse intensiivsust piisavalt (nt filtreid kasutades): võiks oodata üha nõrgenevat interferentsimustrit, kuid see ei ole nii. Võib näha, kuidas valgus saabub punkt punkti, *kvant kvandi* haaval.

Esmalt tundub, et valguskvandid saabuval täiesti juhuslikult (vt pilte a ja b). Kuid mõne aja möödudes (tavaliselt pärast paari minutit, kui kasutatakse piisavalt madala intensiivsusega valgust), on selge, et jällegi **moodustub interferentsimuster**. Seega moodustuvad **ükshaaval** saabuval punktid mustri!

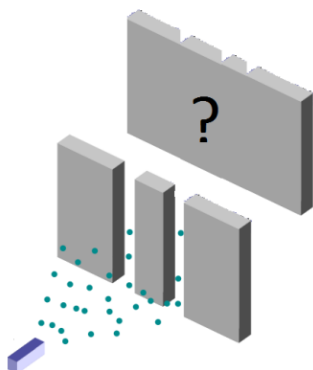
Kas *elektronidega* tehtud topeltpilude katset (vt õppemoodulit I) saab võrrelda *valgusega* tehtud topeltpilude katsega? Kas need on sarnased või mitte?

Joonis 1 Interferentsimustri moodustumine. Tabatud elektronide arv on 100 (b), 3000 (c), 20000 (d), 70000 (e). (Allikas: Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., ja Kawasaki, T. (1989) Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern, *American Journal of Physics* 57 (2), 117–120)

**Kuidas seda mõista?**

Einstein arvas, et **valguse energia** (või üldisemalt elektromagnetvälja energia) saab "liikuda" ainult energiaportsjonites või kvantides.

**Elektromagnetvälja energia** levib ainult väikestes kvantides. Teisisõnu ei saa valguse energia pidevalt muutuda, vaid see liigub üksnes väikeste **diskreetsete hüpetega**, mida kutsutakse **kvantideks**.

**Kui kas neid valguskvante saab mõista kui väikeseid pallikesi?**

Esimesest õppemoodulist teame juba, et väikeste pallikeste või tilgakeste kahe pilu vahelt läbi tulistamine tekitab ekraanile kaks "saabumise tsooni". Kuid kas me nägime seda topeltpilude katses? Kas saame elektrone või valgust topeltpilude katses tajuda väikestest pallikestest koosnevana?

(Jah/Ei)

Joonis 1 Topeltpilude katse osakestega (Allikas: kohandatud Wikipedia avalikust domeenist)

Valgus **ei** saabu **osakestena** (mis moodustaksid kaks ala) **ega** ka mitte **lainetena** (mis moodustaksid hääbuva interferentsimustri): interferentsimuster luuakse osakeste haaval. *Tundub, et valgusosakesed on kokku leppinud, kuidas nad saavad: lainete interferentsimustrina.* Seetõttu näib, et valgusel on samal ajal nii osakese kui ka laine omadused.

Füüsikud kutsuvad seda ettekujuteldamatut probleemi osakese-laine dualismiks. Valguse kummaline iseloom ei vasta ei osakeste ega lainete klassikalisele käsitlusele.

**Osakese-laine dualism on valguse ja mateeria alusprintsiiip**

Looduses on valguse ja mateeria vahel teatav sümmeetria. Kvantmehaanikas ei saa elektroni vaadelda kui pelgalt "pallikest", nagu klassikalises füüsikas. Sama kehtib footonite kohta. Nii elektronidel kui ka footonitel on lainete ja osakeste omadused:

Elektronid ja footonid saavad topeltpilude katses *ükshaaval*, kuid nende *moodustatav muster on interferentsimuster, mille põhjustavad nende osakeste lainete omadused!*

See osakese-laine dualism on looduse üks alusprintsiipe. Kvantmehaanika on tõepoolest muutnud seda, kuidas me maailma olemusest mõtleme.



Siit näed, kuidas ka foto ehitatakse üles footon footoni haaval (allikas: Rose, A (1973) Vision: human and electronic. Plenum Press)

## 2 Valguse ja mateeria kvantteooria

Madalal intensiivsusel valgusega läbi viidud topeltpilude katsest selgus, et *valgusel* on laine ja..... omadused.

Topeltpilude katsest elektronidega selgus, et *elektronidel* on osakeste ja ..... omadused.

Osakeste mudel ja lainemudel täiendavad üksteist, ning reaalsus on keerukam, kui need kaks mudelit suudaksid iseseisvalt seletada. **Osakese-laine dualism** on valguse ja mateeria uus omadus füüsikas. See on moodsa füüsika, mitte klassikalise füüsika omadus.

### 2.a Elektromagnetlained ja nende energiakvandid: footonid

Valguse **energiakvantidele** viidatakse kui **footonitele**. Max Planck avastas suhte footoni energia (aineosakese omaduse) ja valguslaine sageduse (laine omaduse) vahel. Selle kuulsa Planck-Einsteini võrrandi abil saab arvutada elektromagnetvälja energia hulka:

$$E = h \cdot f \quad (1.)$$

kus  $h$  on väga väike, kuid fundamentaalne **looduse konstant**, mis näitab kvandis oleva valguse peeneteralisust: **Planckikonstant**  $= 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

- a) Arvuta valguskvandi väärtus kollase valguse puhul, mille sagedus on  $f = 5 \times 10^{14} \text{ Hz}$

$E = \dots\dots\dots$

See on väikseim energiakvant, mis saab sel valguse sagedusel looduses eksisteerida.

- b) Arvuta kolme kollase footoni energia

$E = \dots\dots\dots$

Kollase valguse energial ei saa olla suvalist väärtust, see on alati footoni energia (täis-/mitte täis-) kordne, mille arvutasid välja punktis a. **Valguse energial pole pidevat väärtuste skaalat, vaid see on kvanditud.**

Kuid kuna valgus koosneb elektromagnetilisest vibreerivast väljast, võib kokkuvõtvalt öelda, et **elektromagnetvälja energia** on ise **kvanditud**. Energia saab liikuda üksnes ühe prootoni haaval, seega portsjonitena.

### 2.b Materialained ja kvandid



Aastaid enne elektronide topeltpilude katse läbiviimisest ennustas prantsuse füüsik **Louis de Broglie** mateeria *laineomadusi*. Louis De Broglie uskus looduse sümmeetriasse: kui elektromagnetlained toimivad diskreetsete energiakvantide kaudu (mida me tajume footonitena), siis oli tema jaoks selge, et kehtib ka vastupidine: ka materiaosakesi, mida seni ei loetud välja kvantide hulka, peaks samal viisil käsitlema.

## Quantum Spin-Off

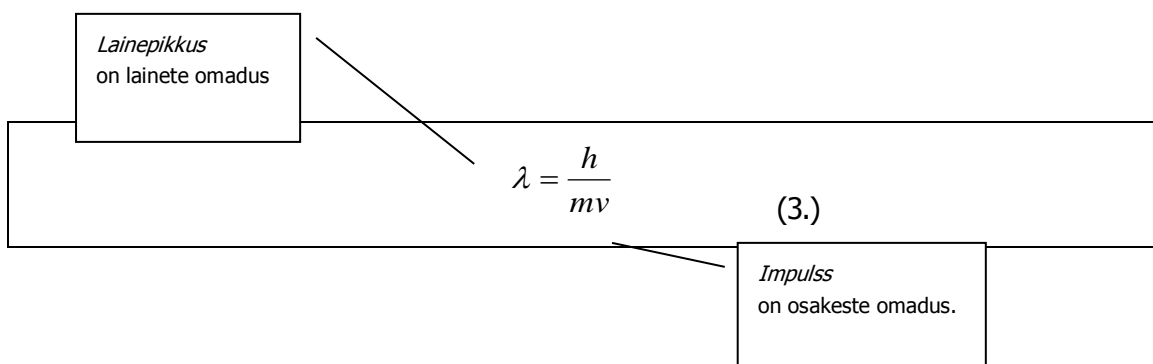
*Lainet*, mille kvante me osakestena näeme, kutsus ta **materiaalaineks**. De Broglie *postuleeris* selliste materiaalinete olemasolu. Seega oli ta esimene, kes tugines materiaalinete lainelisele iseloomule. Ja mis veel: De Broglie oskas üles kirjutada ka täpse suhte seni tundmatu materiaalinete ja materiaalinete tavaliste omaduste, nagu massi ja kiiruse vahel.

De Broglie töötas välja seose impulsi ehk liikumishulga kohta, mis on tuntud ka klassikalises mehaanikas keha massi ja kiiruse korrutisena:

$$p = mv \quad (2.)$$

Impulss on osakeste klassikaline omadus, mis oli tuntud ka Newtoni mehaanikas (nt võib madala kiirusega veoautol olla sama impulss, mis väikesel, kuid kiirelt liikuval autol).

Teisest küljest on **lainet omaduseks** lainepikkus. De Broglie ühendab nüüd need enne ühildamatuna tundunud osakeste ja lainete omadused täpsesse suhtesse:



De Broglie hüpoteesis ühendatakse materiaalinete osakeste ja lainete omadused Plancki imetillukese konstandi kaudu:

*Materiaalinete lainepikkus (kvant) on pöördvõrdelises seoses selle impulsi.*

Seetõttu on suure impulsi osakestel lühike lainepikkus.

Elektronide osas märgib de Broglie järgmist:  $p = h / \lambda$ , kus  $p$  on elektroni ..... ja  $\lambda$  on ..... lainepikkus, mis on elektroniiga ühendatud.

Miks on see nii, et saame (nt topeltpilude katses) **jälgida elektroni lainepikkust**, kuid me ei märka **palli lainepikkust**? Arvutagem kahe osakeste lainepikkused De Broglie suhte abil.

a) Arvuta De Broglie elektroni lainepikkus, mille kiirus on  $v = 6 \times 10^6$  m/s?

(Sul on vaja teada elektroni massi. Uuri see järgi!)  $m_e = \dots \dots \dots$  kg

$\lambda = \dots \dots \dots$

b) Arvuta De Broglie palli lainepikkus, kui mass on  $m = 0,20$  kg ja kiirus  $v = 15$  m/s?

$\lambda = \dots \dots \dots$

c) Võrdle neid kaht lainepikkust valguse lainepikkusega (vaata uuesti mõnd eelnevat õppemoodula, kus rääkisime elektromagnetilisest spektrist):

Nähtava valguse lainepikkuse vahemik on .....

Tavalise palli lainepikkus on ..... kui nähtava valguse lainepikkus.

Elektroni lainepikkus on ..... kui nähtava valguse lainepikkus.

## Quantum Spin-Off

- d) Mis põhjusel ei uuri me tavalise palli lainelisi omadusi (isegi mitte hästivarustatud laboris)?

-----

*Kuid milline laine on materjalaine? Proovime sellele vastuse leida.*

### 3 Kvantväljad

Eelnevalt nägime, et teadlased ei tahtnud aktsepteerida ideed „tegevus distantsilt“ seoses jõududega nagu gravitatsioon või magnetjõud. Et seda „tegevust distantsilt“ teaduslikult kinnitada, tutvustasid nad **välja** mõistet. Klassikalised väljad, nagu elektromagnetväljad ja gravitatsiooniväljad on tuntud kui jõudude (või pigem energia) vahendajana. Kvantteoorias kannavad energiat materjalained (mida võib pidada materjaväljadeks) ning ka seal on **energia** vahendaja mõiste, kuid seda rakendatakse ka materia enda peal, mis on üsna ootamatu lahendus.

Füüsikud lüüsid **kvantväljateooria**, millest nad saavad tuletada kõik, mida saame universumis jälgida: materia ja jõud. Võrreldes klassikaliste väljadega (nt gravitatsiooni- või elektromagnetväljadega), saavad *kvantväljad* anda energiat ainult diskreetsetes portsjonites või kvantides. Näiteks kõiki osakeste kiirendites (nt CERNis Genevas) mõõdetavaid osakesi ennustatakse kvantväljateooria kaudu.

Kvantvälju defineeritakse nagu tavalisigi välju ruumi kõikides punktides. Nad võivad aja jooksul lainena varieeruda ning see on nende levimise viis.



Kvantväljadeenergia seisneb *diskreetsete võnketüüpide vibreerimises* (nagu muusikainstrumentide keeled). Energiaportsjoneid vabastatakse siis, kui väli läheb kõrgemast vibreerivast olekust madalamasse. Sammud vibratsioonide võnketüüpide vahel on kvantitud ning seega vabastatakse välja kõrgema vibratsiooni seisundist madalamasse minemisel üksnes portsjoneid. Sellise kvandi lahkumine väljalt on lokaalne ning me tõlgendame seda, öeldes, et „osake“ on välja antud.

Näiteks võib **elektromagnetvälja** kvandina luua **footoni**. Aga ka materia ise, nt elektronid ja protonid, on vibreerivate materjaväljade kvandid. Näiteks elektron on kvantvälja teooria järgi elektronide materjavälja kvant.

Nüüd saame seletada interferentsimustri *ülesehitamist* topeltpilude katses kvantväljateooria kaudu.

#### **Diskreetse interferentsimustri ülesehitamine topeltpilude katses kvantväljateoorias**

Kvantvälja lained on topeltpilude katses võimelised piludest läbi minema ning interfereerima. Seega loob mõlemast pilust tulevate lainete superpositsioon maxima ja minima interferentsimustri. Maxima ilmub kohtadesse, kus teekonna pikkuse erinevus on selline, et ühest pilust tulev laine on samas faasis teisest pilust tuleva lainega (tõusinterferents). Teistes kohtades on teekonna pikkus selline, et kahe laine vahel toimub destrukttiivne interferents.



Joonis 2 Kvantväljade teooria eeldab, et väli on ühendatud osakestega nagu elektronid. Väli läbib pilusid ning interfereerub (konstruktiivselt ja destruktivselt) eri kohtades. Kui amplituudid on suured, on suur tõenäosus, et väli annab ära diskreetse energiaportsjoni. Seda jälgime kui osakest.

Kuid kui esineb lainete maxima, pole siiski kindel, kas sellega kaasneb osake. Siin tuleb kvantteooriasse sisse **tõenäosuse** mõiste.

Kohtades, kus välja amplituud on maximas (interferentsi maximas), on lihtsalt **suur tõenäosus, et väli energiaportsjoni vabastab**. Seega, elektronide topeltpilude katse puhul on maxima korral suur tõenäosus elektroni ilmumiseks. Valgusega tehtud topeltpilude katse puhul on maximals kohad, kus väli suure tõenäosusega footoni välja annab.

*Lainete amplituud on võrdeline tõenäosusega, et väli kvandi välja annab. See tõenäosuse alusomadus seletab täpikeste (osakeste) suvalist paiknemist topeltpilude katsetes. Elektroni täpset ilmumist ei saa ennustada, vaid üksnes selle tõenäosust hinnata.*

Osakese-laine dualismi ja tõenäosust käsitletakse kvantvälja teorias uue füüsika alustaladena, kus materjal ja valgusel on sümmeetrilised omadused. Kvantvälja teooria värskes käsitluses nähakse isegi jõudu (mäletatavasti tegevus distantsilt) kui kvantide väljade vahetamise tulemust. Kõik need kvandid on teadaoleva materia (nagu teame Mendelejevi perioodilisest tabelist) ja jõuväljade ülesehitajateks. CERNis tehtavates katsetes testitakse seda kvantteooriat materia ja jõudude osas ning silmapiiril võib olla isegi uus füüsika, mis otsib vastuseid veel teadmata nähtustele nagu tume materia ja tume energia.



Seoses kvantväljade teooriaga on jäänud üks probleem, nimelt see, et gravitatsioonivälja ei saa kvantväljade teooria kaudu mõista. Gravitatsiooni käsitletakse seetõttu puhtalt klassikalise valdkonnana, ja seda isegi Einsteini üldrelatiivsusteoorias. Füüsikud on juba pea 100 aastat otsinud gravitatsiooni kvantteooriat. Kõik loodavad, et Brout-Englert-Higgsi bosoni katsete teel kinnitamine 2012. aasta juulis heidab sellele probleemile valgust (Nobeli füüsikaauhind belglasele François Englertile ja šotlasele Higgsile 2013. a).

Joonis 3 François Englert ja Peter Higgs pärast Brout-Englert-Higgsi bosoni katselist kinnitamist 2012. a juulis Cernis. Nad mõlemad said 2013. a detsembris Nobeli füüsikaauhinna selle BEH-välja kvandi avastamise eest kuuekümnendatel aastatel (allikas:CERN, Geneva).