

<b>IV ÕPPEMOODUL: OSAKESE-LAINE DUALISM</b>	<b>56</b>
<b>1 Osakese-laine dualism – valguse ja aine fundamentaalne omadus</b>	<b>56</b>
<b>2 Valguse ja materria kvantteooria</b>	<b>57</b>
2.a Elektromagnetlained ja nende energiakvandid: footonid	57
2.b Materrialained ja kvandid	58
<b>3 Kvantväljad</b>	<b>59</b>
3.a Lainete intensiivsus määrab kvantide tõenäosuse	59
3.b Osake kui lainepakike	60
3.c Heisenbergi määramatuse printsiip	62
<b>4 Kvantväljateooria</b>	<b>64</b>
<b>5 IV õppemooduli mõisted</b>	<b>65</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., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium



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](mailto: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 trajektor, 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 osakeselise käitumise vahele?

Seejärel püüame seletada molekulide omadusi, mida klassikaline füüsika ei ole suutnud siiani seletada. Vaatame elementide kiirus- 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 laineiks, 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 tugineme de Broglie' hüpoteesile. Nii avastame, et laine-osakese dualism on valguse ja mateeria üks põhiomadusi.

**V õppemoodul:** Vesiniku kiirusjoonte 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 kiirus- ja neeldumisjoonte juurde ning püüame omandatud teadmiste abil neid mitte ainult seletada, vaid ka arvutada välja vesiniku kiirusjoonte sagedused.

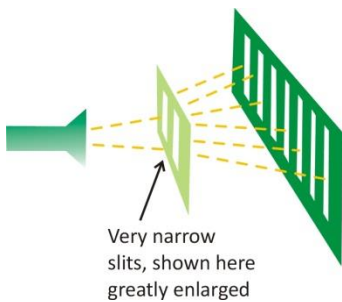
Kõik õppemoodulid on kättesaadavad projekti veebilehel [www.quantumspinoff.eu](http://www.quantumspinoff.eu).

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

# IV õppemoodul: Osakese-laine dualism

## 1 Osakese-laine dualism – valguse ja aine fundamentaalne omadus

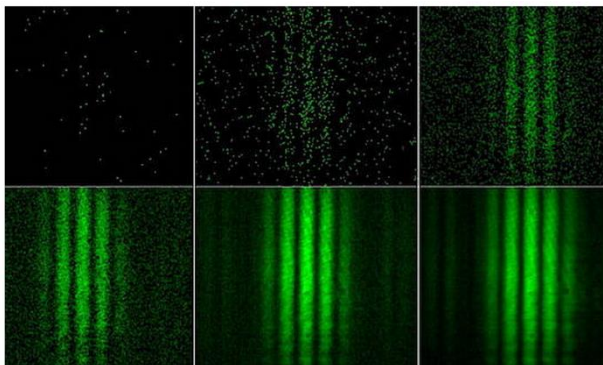
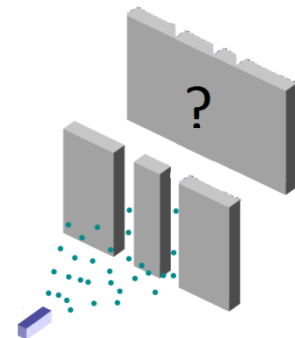
19. sajandil sai selgeks, et valgus on lainega sarnanev nähtus: **elektri- ja magnetväljade** laine. Kuid varsti selgus, et see ei avanud valguse tõelist olemust siiski täielikult. Vaadelgem seega uuesti topeltpilude katset valgusega:



Millist kujutist ootad ekraanile, kui valgus jõuab kohale osakestena? .....

Millist kujutist ootad ekraanile, kui hämar valgus jõuab kohale lainetena? .....

Kahe pilu katses nägime, et valgus ei ole ainult lained või ainult osakesed: see **ei** saabu **osakestena** (mis tekitaks kaks vööti) ega ka mitte ainult lainena (mis tekitaks hajuva interferentsimustri): interferentsimuster moodustub osakese haaval (I õppemoodul). *Näib, nagu oleksid valgusosakesed kokku leppinud, kuidas nad saavad: lainete interferentsimustrina.* Seega tundub valgus olevat samaaegselt nii osake kui laine.



*Joonis 1 Valgus kahe pilu katses: valgus jõuab kohale footoni kaupa, kuid footonid kuhjuvad ja moodustavad interferentsimustri, nagu oleks tegu lainega (kujutise jäädvustas A. Weis, Fribourg'i ülikool)*

Sama näib kehtivat aine kohta: elektronide, neutronite ja isegi molekulide.

Kas saame kahe pilu katse põhjal öelda, et elektronid või valgus koosnevad ainult väikestest pallikestest? (jah/ei)

Kas *elektronidega* tehtud topeltpilude katse tulemusi saab võrrelda *valgusega* tehtud topeltpilude katse tulemustega? Kas need on sarnased või mitte?

.....

Varem arvasime, et vähemalt aine käitub lihtsalt kui aine, kuid isegi väikesed aineosakesed

## Quantum Spin-Off

moodustavad pärast pilude läbimist interferentsimustri nagu lained. Seega näib, et ka ainel on lainelised 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 materia alusprintsiiip.

Looduses tundub valguse ja aine vahel valitsevat teatud sümmeetria.

Elektronid ja fotonid 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 foton foton haaval (allikas: Rose, A (1973) Vision: human and electronic. Plenum Press)

## 2 Valguse ja materia kvantteooria

Einstein oletas, et **valguse energiat** saab „vahetada ainult väikeste pakkide ehk **kvantidena**“. Seega mitte pideva voona nagu lainete puhul. Teisisõnu ei saa elektromagnetvälja energia varieerumine olla pidev, vaid see saab toimuda ainult väikeste **diskreetsete hüpetena**, mida nimetatakse **kvantideks**. Elektromagnetvälja energiakvante (lihtsamalt öeldes osakesi) nimetatakse **footoniteks**.

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

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: **Plancki konstant  $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$**

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

$E = 3 \cdot \text{a) vastus} \dots\dots\dots$

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.

**Katse:** Õppemooduleid täiendavate praktiliste tegevuste käigus saate teha katse, kus määrate kindlaks Plancki konstandi, mõõtes ära punaste, kollaste, roheliste ja siniste LED-ide süttimiseks vajalikud pinged.

**Tehnoloogia:** Asjaolu, et valgus on kvanditud, leiab rakendust kõigis digikaamerates. VI õppemoodulis saad selle rakenduse kohta rohkem teada.

## 2.b Materialained ja kvandid

Teame nüüd, et valgusosakesed on tegelikult elektromagnetvälja väikesed energiapakikesed. Kuid kas valguse ja materia ehk aine sümmeetria ulatub nii kaugele, et ka aineosakesi saab pidada mõne välja kvantideks?



Aastaid enne elektronide topeltpilude katse läbiviimisest ennustas prantsuse füüsik **Louis de Broglie** materia *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.

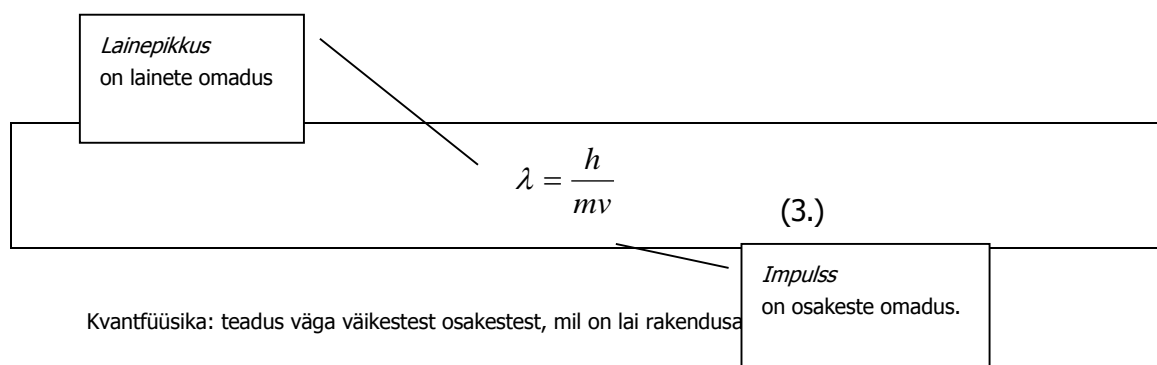
*Lainet*, mille kvante me osakestena näeme, kutsus ta **materiaalaineks**. De Broglie *postuleeris* selliste materiaalainete olemasolu. Seega oli ta esimene, kes tugines materia lainelisele iseloomule. Ja mis veel: De Broglie oskas üles kirjutada ka täpse suhte seni tundmatu materiaavälja ja materia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

De Broglie töötas välja seose impulsi ehk liikumishulga kohta, mis on tuntud ka klassikalisest mehaanikast 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 **laine omaduseks** lainepikkus. De Broglie ühendab nüüd need enne ühildamatuna tundunud osakeste ja lainete omadused täpsesse suhtesse:



De Broglie hüpoteesis ühendatakse materia osakese ja laine omadused Plancki imetillukese konstandi kaudu:

**Materia lainepikkus (kvant) on pöördvõrdelises seoses selle impulsiga.**

Seetõttu on suure impulsiga osakestel lühike lainepikkus.

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

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

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

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

$\lambda = \dots$

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

$\lambda = \dots$

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.

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

.....

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

### 3 Kvantväljad

#### 3.a Lainete intensiivsus määrab kvantide tõenäosuse

Vaatame uuesti kahe pilu katset, pidades seekord silmas de Broglie' hüpoteesi.

Kuidas seletada interferentsimustrit? Elektronide või neutronitega seotud välja lained saavad läbida mõlemad pilud ning iseendaga interfereeruda. Seega on maksimumide ja miinimumidega interferentsimustrit tekkimise põhjuseks nende kahe laine (üks läbi kummagi pilu) superpositsioon. Teame juba, et maksimumid tekivad kohtades, kus levimisteedade pikkuste erinevus on selline, et ühe pilu läbinud laine on samas faasis teise pilu läbinud lainega (konstruktiivne superpositsioon). Teistes kohtades on levimisteedade pikkused sellised, et kahe laine vahel tekib destruktivne interferents.



*Joonis 3 Kvantväljade teooria eeldab, et väli on ühendatud osakestega nagu elektronid. Väli läbib pilusid ning interfereerub (konstruktiivselt ja destruktiivselt) eri kohtades. Kui amplituudid on suured, on suur tõenäosus, et väli annab ära diskreetse energiaportsjoni. Seda jälgime kui osakest.*

Kuid uus arusaam on, et isegi kui esineb lainete maksimum, pole siiski kindel, kas sellega kaasneb osake. Siin tuleb kvantteooriasse sisse **tõenäosuse** mõiste. Kohtades, kus välja amplituud on maksimaalne (interferentsi maksimumis), on lihtsalt **suur tõenäosus, et väli energiaportsjoni vabastab**. Seega on elektronide kahe pilu katses maksimumi korral suur tõenäosus elektroni ilmumiseks.

### Välja intensiivsus määrab tõenäosuse, et väli annab välja kvandi

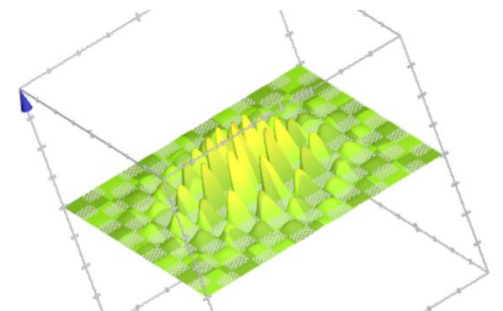
*See tõenäosuse alusomadus seletab täpikeste (osakeste) suvalist paiknemist topeltpilude katsetes. Elektroni täpset ilmumist ei saa ennustada, vaid üksnes selle tõenäosust hinnata.*

Valgusega tehtud kahe pilu katse puhul kehtib elektromagnetvälja kohta sama: maksimaalne arv footoneid ilmub kohtadesse, kus välja intensiivsus on maksimaalne. Nendes kohtades on suur tõenäosus, et väli footoni välja annab.

Selle välja intensiivsuse ja kvandi väljastamise teooriaga tuli välja Saksa füüsik Max Born. See tundub küll üsna kahtlane ja alguses ei uskunud seda ka paljud füüsikud, kuid selgus, et täpselt nii loodus toimibki. Seepärast nimetataksegi kvantlainet ka tõenäosuslaineteks. Tõenäosus, et väli energiakvandi (meie jaoks osakese) välja annab, muutub.

## 3.b Osake kui lainepakike

Materia ehk aine lainelise loomuse tõttu ei ole osakestel kindlat asukohta nagu klassikalises füüsikas. Newtoni mehaanikas on osakesel kindlaksmääratud asukoht ja kiirus. Osakeste lainelisest loomusest tingituna on kvantfüüsikas nende asukoht ja kiirus ebamäärasemad. Vaatame, mida see täpsemalt tähendab.

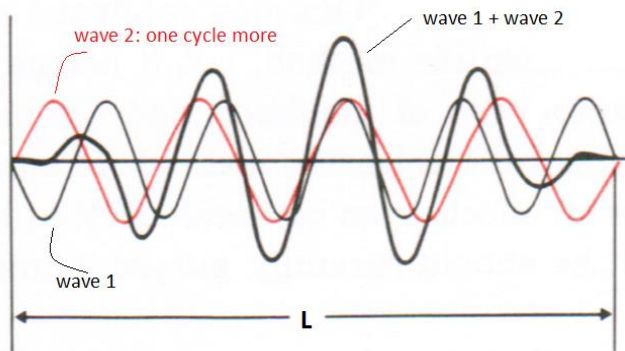


Kvantfüüsikas tuleks mõelda osakesest kui **lainepakikesest**, nagu võid näha üleval joonisel. Lainepakike koosneb erinevate lainete summast, mille vahel tekib teatud kohas konstruktiivne



## Quantum Spin-Off

superpositsioon. Mõnes teises kohas tekivad nendesamade lainete vahel faasierinevused, nii et nad kustutavad üksteist. Seetõttu on osakese välja andmise tõenäosus ainult piiratud kohas.



Vaatame seda näidet: kahe laine summana tekib komas laine, mis on nn lainepakike. Kas näed, et lainepakikese maksimum on selle keskel ning äärtel toimub hajumine? See kõik on vaid kahe sama konstantse amplituudiga laine liitumise tulemus: 1. laine lainepikkus mahub 4 korda pikkusesse  $L$ . 2. lainel on üks tsükkel lisaks, nii et selle lainepikkus mahub ..... korda pikkusesse  $L$ . Kas näed, et mõlemas

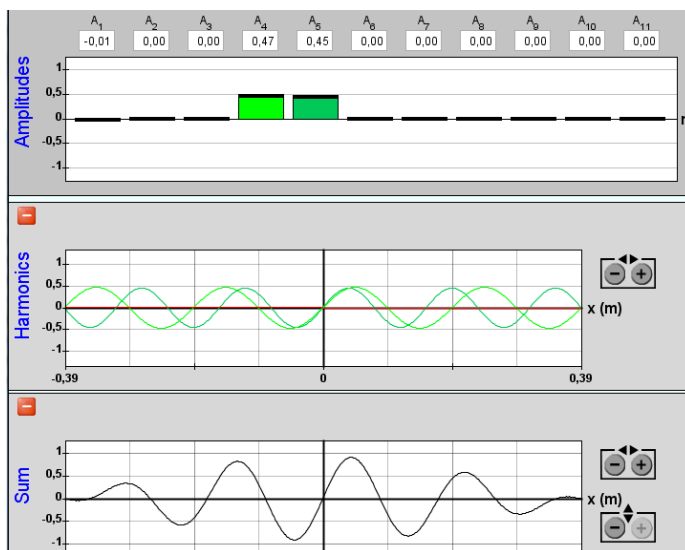
ääres tekib nende kahe laine vahel (konstruktiivne/destruktiivne) interferents? Keskaigas esineb nende vahel (konstruktiivne/destruktiivne) interferents.

### Harjutus rakendusega

Uuri lainete liitumist lainepakikeseks lähemalt rakendusega „Fourier“:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/fourier>

Püüa saavutada ülalkirjeldatud olukord kahe lainega, mis erinevad teineteisest on pikkuse  $L$  jooksul ühe tsükli võrra.



Mis võimaluse valisid?

1. laine tsüklite arv:

.....

2. laine tsüklite arv:

.....

Püüa nüüd anda osakesele kindlam asukoht. Kas saad seda teha, lisades rohkem laineid?

Lisades rohkem laineid, mille tsüklite arvus on kerged erinevused, esineb kaugemal üha rohkem (konstruktiivset/destruktiivset)

interferentsi. Ainult keskaigas toimub lainete vahel (konstruktiivne/destruktiivne) interferents.

Tegelikult tõestas Prantsuse matemaatik Fourier, et lisada tuleb lõputu arv laineid, mille tsüklite arvus on väiksed erinevused.

Võimalikud pakikesed, mis võiksid kaugemal tekkida, „tapetakse“ uute õigesti reguleeritud lainete lisamisega, nii et jääb ainult keskmine pakike. Seal ongi kõige suurem tõenäosus osakese ilmumiseks. Siiski on osakese ilmumise teatud tõenäosus ka sellel keskosa ümbritseval alal, kus lainete summa ei ole null. Seega – kas me saame täie kindlusega öelda osakese asukoha? .....

Vaata uuesti näidet: mida saame öelda osakese asukoha kohta selle põhjal, mida oleme rääkinud tõenäosusest? Teisisõnu – mis on osakese asukoha määramatus? .....

## Quantum Spin-Off

Enne mõõtmist on osake nn superpositsiooni olekus, mis on lainelise loomuse tagajärg. Näiteks kui teeme kahe pilu katset, ei saa me teada, kummast pilust osake läbi läheb, st me ei tea osakese asukohta. Kuid peale pilude läbimist on sellel ekraanil interferentsimustris täpne asukoht: oleme teinud mõõtmise ja nn superpositsiooni olek on kadunud, st osake on mõõtmise tulemusena täpselt määratud olekus.

## 3.c Heisenbergi määramatuse printsiip

## 1) Osakese asukoha ja impulsi määramatus

Osakese täpne asukoht on teada alles pärast osakese tuvastamist ning erinevalt klassikalisest füüsikast ei ole enne võimalik ennustada, kus osake tegelikult asub. Selle tagajärjeks on, et erinevalt Newtoni mehaanikast ei ole kvantmehaanikas võimalik samaaegselt määrata osakese asukohta ja osakese kiirust. See on nagu teatud vahetuskaup: mida rohkem tead osakese asukoha kohta, seda vähem tead selle kiiruse kohta. Werner Heisenberg näitas, et asukoha ja impulsi vahel valitseb täpne määramatuse suhe. Asi ei ole kehvast mõõteaparaadis, mida saab parandada, vaid tegu on osakestele iseloomuliku omadusega: nende asukohta ei saa täpselt määrata, sest enne mõõtmist ei olegi neil täpset asukohta. Vaatame nüüd, kuidas see on lihtsalt osakese kui lainepakikese loomuse tagajärg.

**Konkreetne näide: kaks lainet, mis erinevad ühe tsükli võrra**

Vaatame sellise kahe laine superpositsiooni näitel, mis erinevad teineteisest ühe tsükli võrra (pikkuse  $L$  jooksul), kuidas see viib määramatuseni.

Tsüklite arvu leiame, jagades pikkuse  $L$  lainepikkusega  $\lambda$ . Seega

$$\frac{L}{\lambda} = \text{tsüklite arv pikkuse } L \text{ jooksul}$$

Kuna sellel konkreetsel juhul on tsüklite erinevus 1, saame erinevuse nii:

$$2. \text{ laine tsüklite arv pikkuse } L \text{ jooksul} - 1. \text{ laine tsüklite arv pikkuse } L \text{ jooksul} = \dots \dots \dots ?$$

Või sümbolitega:

$$\frac{L}{\lambda_2} - \frac{L}{\lambda_1} = \dots$$

Nüüd toome sisse de Broglie' võrrandi, milleks on .....

ja asendame osa  $\frac{1}{\lambda_n}$  osaga  $\frac{p}{h}$

Niisiis saame, et  $\frac{Lp_2}{h} - \frac{Lp_1}{h} = \dots \dots$

Või:

$$L(p_2 - p_1) = \dots \dots \dots$$

Kui vaatame nüüd uuesti eespool toodud näidet, siis  $L$  on lainepakikese (ehk osakese) määramatus, tavaliselt tähistatud kui  $\Delta x$ .

Ja  $(p_2 - p_1)$  on osakese impulsi (mass korda kiirus) määramatus, tavaliselt tähistatud kui  $\Delta p$ . See annab terve vahemiku võimalikke väärtusi, mis lainepakikesel olla võivad.

## Quantum Spin-Off

Seega saame järgmise määramatuse võrrandi (kontrolli, kas said sama tulemuse):

$$\Delta x \cdot \Delta p = h$$

Meie konkreetsetes kahe laine superpositsiooni näites saame tulemuseks lainepakikese, mis katab pikkuse  $L$  (või  $\Delta x$ ). De Broglie' võrrandist lähtuvalt, kus laine on seotud osakese impulsiga, tähendab see ka  $\Delta p$ . Seega on määramatuste tulemus sel juhul vähemalt  $h$ .  $h$  on minimaalne võimalik väärtus nende kahe laine liitmisel. Seega peaksime kirjutama "≥"

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

### Üldine määramatuse võrrand

Eespool toodud näite üldisem järeldus on, et osakese asukoha ja impulsi määramatuse tulemus peab olema suurem kui  $h/4\pi$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$$

See on kuulus **Heisenbergi määramatuse printsiip**, mis ütleb, et ei ole võimalik täpselt määrata osakese asukohta ja impulssi ning seda mitte puuduliku mõõteaparaadi tõttu, vaid lihtsalt osakestele iseloomulikust lainelisest loomusest tingituna. Osakesel ei olegi täpset asukohta ega impulssi. Arvutuse  $\Delta x \cdot \Delta p$  tulemus on alati suurem kui  $h/2\pi$ .

Niisiis on kvantfüüsika meile näidanud, et absoluutne määratus ei ole loodusele iseloomulik (kuigi just seda füüsikud enne kvantfüüsika tekkimist arvasid). Teisalt ei ole loodusseadused ka täielikult meelevaldsed. See teema on palju peenem ja nüansirikam ning ka praegu käivad veel filosoofilised arutelud selle üle, mida see kõik meie universumi ja selles leiduva elu kohta ütleb.

### Harjutus:

Arvutame sellise elektroni kiiruse määramatuse, mis liigub aatomis, mille diameeter on  $10^{-10}$  m

.....  
(Vastus:  $\Delta v \geq 10^6$  m/s)

### 2) Osakese energia ja aja määramatus

Määramatuse vahetuskaup käib ka energia ja aja vahel.

Ka see on osakeste lainelise loomuse tagajärg. See on võrreldav olukorraga, kus tahad määrata mingi heli sagedust. Selleks pead heli teatud aja vältel kuulama (mõõtma). Seega

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq \text{mingi väärtus}$$

Võrreldav määramatus kehtib niisiis ka klassikalises füüsikas, näiteks akustikas. Ei ole võimalik määrata laine sagedust, kui laine ei kesta vähemalt ühte tsüklit. Ühe tsükli puhul  $\Delta t = T$  ja kuna  $\Delta f = 1/T$ , võrdub "mingi väärtus" 1.

$$\Delta f \cdot \Delta t \geq 1$$

Seega kuna kvantfüüsikas on osakestel ka lainelised omadused ja kvantlainete sagedus on seotud energiaga, mis Einsteini-Plancki valemi järgi on  $E = h \cdot f$ , siis saame järgmise tulemuse ( $f$  on nüüd  $E/h$ ):

$$\frac{\Delta E}{h} \cdot \Delta t \geq 1$$

## Quantum Spin-Off

Ja nii saame energia ja aja vahelise määramatuse võrrandi:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Täpne kuju on sellisel juhul

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h/2\pi$$

Seega on osakese energia määratav ainult teatud kindla ajavahemiku piirides. Erinevalt klassikalisest füüsikast ei ole kvantfüüsikas võimalik rääkida osakese energiast mistahes ajahetkel.

## 4 Kvantväljateooria

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 löid **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.



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

Näiteks võib **elektromagnetvälja** kvandina luua **footoni**. Aga ka materia ise, nt elektronid ja protonid, on vibreerivate materjaväljade kvandid. Näiteks kõiki osakeste kiirendites (nt CERNis Genfis) mõõdetavaid osakesi ennustatakse kvantväljateooria kaudu.

Tänapäeva kvantväljateoorias vaadatakse isegi jõudusid (kaudse mõjuga, nagu mäletate!) kui väljadevahelise energiakvantide vahetuse tulemust.

Kuid siiski on veel mõningaid probleeme: gravitatsioonivälja ei suuda kvantväljateooria ikka veel seletada. Seepärast käsitletakse gravitatsiooni endiselt tavalise klassikalise väljana, seda isegi Einsteini üldrelatiivsusteoorias. Üle 100 aasta on füüsikud otsinud gravitatsioonile kvantteooriat. Kõik loodavad, et Brout-Englert-Higgsi bosoni katseline tõestamine juulis 2012 annab tulevikuks uut lootust (2013. aastal said belglane François Englert ja šotlane Peter Higgs Nobeli füüsikapreemia). Ehk toob uusi tuuli ka sellistele nähtustele nagu **tumeaine** ja **tumeenergia** vastuste leidmine.

## Quantum Spin-Off

Kuid vaid tulevik näitab, milliseid uusi teadmisi ja rakendusi see kõik toob.



Joonis 4 François Englert ja Peter Higgs pärast Brout-Englert-Higgsi bosoni katselist kinnitamist 2012. a juulis CERNis. Nad mõlemad said 2013. a detsembris Nobeli füüsikapreemia selle BEH-välja kvandi avastamise eest kuuekümnendatel aastatel (allikas:CERN, Genf).

## 5 IV õppemooduli mõisted

**Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!**

### Klassikalise füüsika mõisted:

Impulss on ..... klassikaline omadus.

Lainepikkus on ..... klassikaline omadus.

Väli kui jõudude „vahendaja“

Osakeste asukoht ja kiirus on .....

### Kvantfüüsika mõisted:

Elektromagnetvälja energiat saab välja anda ainult ..... Valguse energia ei saa muutuda pidevalt, vaid ainult ....., mida nimetatakse .....

Valgusel on nii lainelised kui osakeselised omadused.

..... on valguse ja materia ehk aine fundamentaalne omadus.

Elektromagnetvälja energia on kvantiseeritud. Selle välja energiapakikeste (footonite) suurust saab arvutada Plancki-Einsteini valemiga  $E=h \cdot f$ , kus  $f$  on .....

De Broglie' hüpotees seob aine osakeselist ja lainelist loomust:  $\lambda = h/mv$ , kus  $\lambda$  on ..... ja  $mv$  on .....

Kvantväljateooria: kvantväljad saavad energiat välja anda ainult .....

Footon võib tekkida kui ..... kvant.

Aine, nagu näiteks elektronid ja prootonid, on võnkuvate ..... kvandid.

## Quantum Spin-Off

Kahe pilu katses tekivad diskreetne interferentsimuster on tegelikult ....., et (elektromagnet- või materia-)väli on väljastanud energiapakikese (kvandi).

Osakeste omadused, nagu näiteks asukoht ja kiirus, on .....