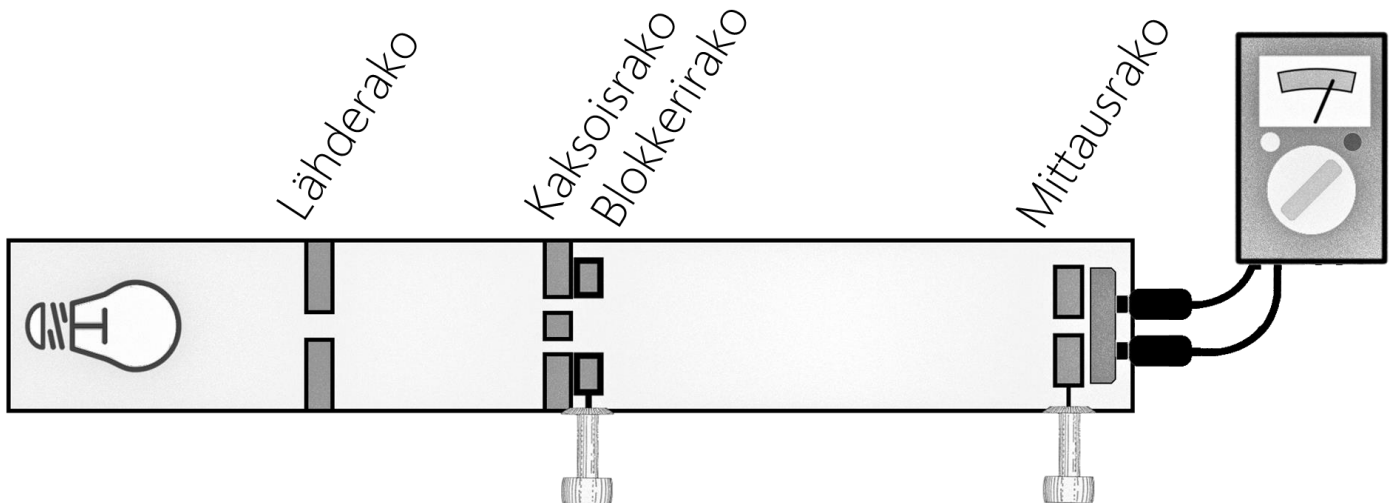


# Yhden fotonin kaksoisrakokoe – suppea versio

F2k-laboratorio

Ohjeessa oletetaan, että olette katsoneet YouTubeista johdantovideon *Kvanttifysiikan perusteita: Kaksoisrakokoe yhdellä fotonilla*. Jos ette ole katsoneet videota, kysykää lisäohjeita.



## 1 Laitteisto

Tutustukaa laitteistoon ja ohjeeseen. Älä kuitenkaan 1) koske laitteen sisäosiin, 2) muuta valonlähteen tai mittareiden säätöjä tai 3) avaa/sulje kantta ilman ohjaajan lupaa.

Jos laite ei ole päällä, pyytäkää ohjaajaa käynnistämään laite teille. Laite täytyy käynnistää fotonimittaustilaan, minkä ohjaaja osaa tehdä.

## 2 Kokeen tavoite

Suoritamme kvanttifysikaalisen yhden fotonin kaksoisrakokokeen. Kokeen kannalta on hyvä, että klassinen kaksoisrakoilmiö on tuttu seuraavilta osin:

- Kun valo kulkee kahdesta pienestä raosta, eri rakojen läpi kulkeneet valoallot voivat interferoida keskenään silmännähtävästi
- Jos kaksoisraon läpi kulkenut valo osuu valomittariin, havaitaan useita jaksollisesti toistuvia pimeitä ja kirkkaita kohtia, eli syntyy lukuisia kapeita valokaistaleita

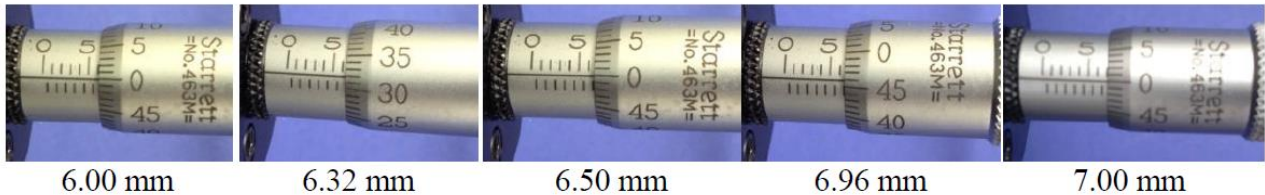
Yhden fotonin kokeessa käytämme heikkoa valolähdettä ja herkempää valomittaria (joka mittaa yksittäisiä fotoneja). Emme mittaa valon kirkkautta, vaan tutkimme, moniko fotoni mittariin osuu kymmenen sekunnin aikana.

Tavoitteena on selvittää, voiko interferenssiä tapahtua, jos kaksoisraon läpi kulkee yksittäisiä fotoneita. Tutkimme fotonien käyttäytymistä, kun ne kulkevat *yksi kerrallaan* kaksoisraon läpi.

### 3 Millimetrisäätimien käyttö

Muistele, mikä on molempien liikuteltavien rakojen (**blokkerirako** ja **mittausrako**) tarkoitus.

Kokeile käännellä säätimiä ja harjoittele merkintöjen lukemista. Alla oleva kuva voi auttaa.



Millimetrisäätimet. Yksi kokonainen pyöräytys vastaa puolta millimetriä. Pyörimätön asteikko kertoo kokonaiset ja puolikkaat millimetrit (vertaa 6,00 mm ja 6,50 mm). Pyörivä asteikko jakaa puolikkaan millimetrin 50 osaan. Kuvallähde: TeachSpin.

Varmista, että osaat siirtää **blokkeriraon** seuraaviin asentoihin:

- 2,30 ( $\pm 0,10$ ) mm: blokkerirako on hieman vasemmalla, ja kaksoisraosta vain vasemmanpuoleinen rako on auki
- 3,00 ( $\pm 0,10$ ) mm: blokkerirako on suurin piirtein keskiasennossaan, ja kaksoisrako on täysin auki
- 4,10 ( $\pm 0,10$ ) mm: blokkerirako on hieman oikealla, ja kaksoisraosta vain oikeanpuoleinen rako on auki

Harjoittele merkintöjen lukemista niin, että löydät tarvittaessa nämä kohdat. Voit katsoa edellisen sivun kuvaa, jos se auttaa hahmottamaan tilannetta.

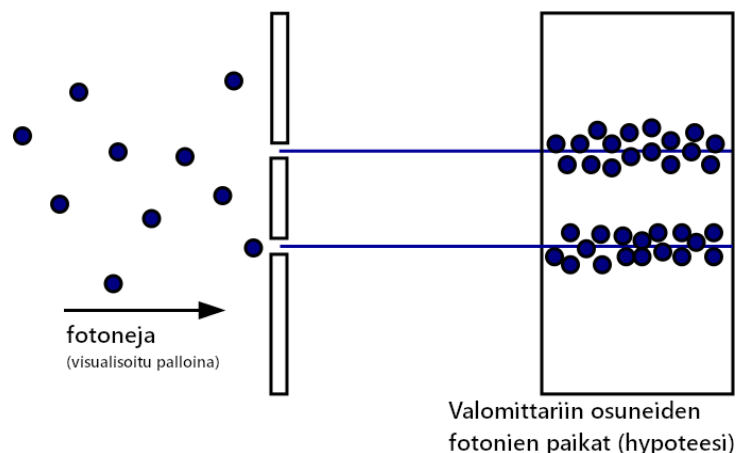
Harjoittele myös fotonien lukumäärän mittaamista. Siirrä **mittausrako** kohtaan 3,6 mm. Paina pöydällä olevan pulssilaskurin (erillinen pieni laite) MANUAL-vipua alaspäin. Kuinka monta fotonia 3,6 mm:n kohdalle osui 10 sekunnin aikana? Toista sama kohdassa 4,0 mm.

Pulssilaskurin säätöjä ei tarvitse muuttaa. Pulssilaskuri myös naksahuttaa joka kerta, kun se mittaa yksittäisen fotonin. Voittekin nyt kuunnella fotonihavaintojen taajuutta.

### 4 Hypoteesi

Fotonit kulkevat yksittäin kaksoisraon läpi.  
Millaisen mittaustuloksen odotamme saavamme?

Oheisessa kuvassa on esitetty eräs hypoteesi. Hypoteesin mukaan fotoneja osuu runsaasti kahdelle alueelle, jotka ovat kaksoisraon rakojen kohdalla. Muille alueille fotoneja ei osu.



## 5 Mittaus

*Aiemmin mittaamistanne fotonien lukumääristä voitaisiin jo laskea arvio sille, montako fotonia on matkalla lampusta valomittariin asti kerrallaan. Tämän arvion tekeminen on hyvä harjoitustehtävä, mutta sitä ei vaadita tässä. (Vinkki: jos Turkuun saapuu laiva Tukholmasta aina tunnin välein, montako laivaa on matkalla juuri nyt? Kaupunkien etäisyys on 300 km ja laivan nopeus 40 km/h.)*

*Jos tämän laskun tekee, selviää, että yli 99% ajasta yksikään fotoni ei ole matkalla lampusta kaksoisraon läpi valomittariin asti. Käytännössä siis jokainen mitattu fotoni on kulkenut kaksoisraon läpi yksinään.*

Liikuttakaa blokkerirakoa siten, että kaksoisrako on avoimena. Käynnistäkää tietokoneella oleva mittauspohja tai ladatkaa mittauspohja omalle koneelle: [bit.ly/fotonikoe](http://bit.ly/fotonikoe).

Mitatkaa fotonien osumien lukumäärää eri kohdissa mittauspohjan mukaisesti. Verratkaa fotonien osumakohtia aiemmin tehtyyn hypoteesiin.

Miten selitätte havaintonne? Millä tavalla fotoni kulkee kaksoisraon läpi? Keskustelkaa.

---

Olette nyt suorittaneet kokeen. Voitte halutessanne lukea lisätietoa seuraavalta sivuilta. Jos käytätte labran tietokonetta, sammuttakaa ohjelmat tallentamatta tuloksia. Kiitos!

### **Ekstra: lisäpohdintaa kiinnostuneille – kvanttifysiikan alkeita**

Mikä oikeastaan on fotoni? Mitä tarkoittaa ”fotonin taajuus  $f$ ” fotonin energian yhtälössä  $E=hf$  ? Onko mielestäsi perusteltua käyttää aalto- ja hiukkasmallia valosta yhden ja saman tutkimuksen toteutuksessa? Mitä ylipäättään aalto- ja hiukkasmalli tarkoittavat? Mitä muuta valo voisi olla?

Klassisesti ajatellen fotonin tulisi kulkea yksinkertaisesti jommastakummasta raosta ilman minkäänlaista interferenssiä. Näin ei kuitenkaan tapahdu, joten ajatus fotoneista jonkinlaisina pieninä ”paloina” ei voi pitää paikkaansa. Aivan ensikosketusta asiaan voi saada seuraavalla ajatuksella, joka ei vielä vaadi kvanttifysikaalisen matematiikan tuntemista. Selitystä on yksinkertaistettu runsaasti, jotta kokonaisuudesta olisi helpompi saada otetta.

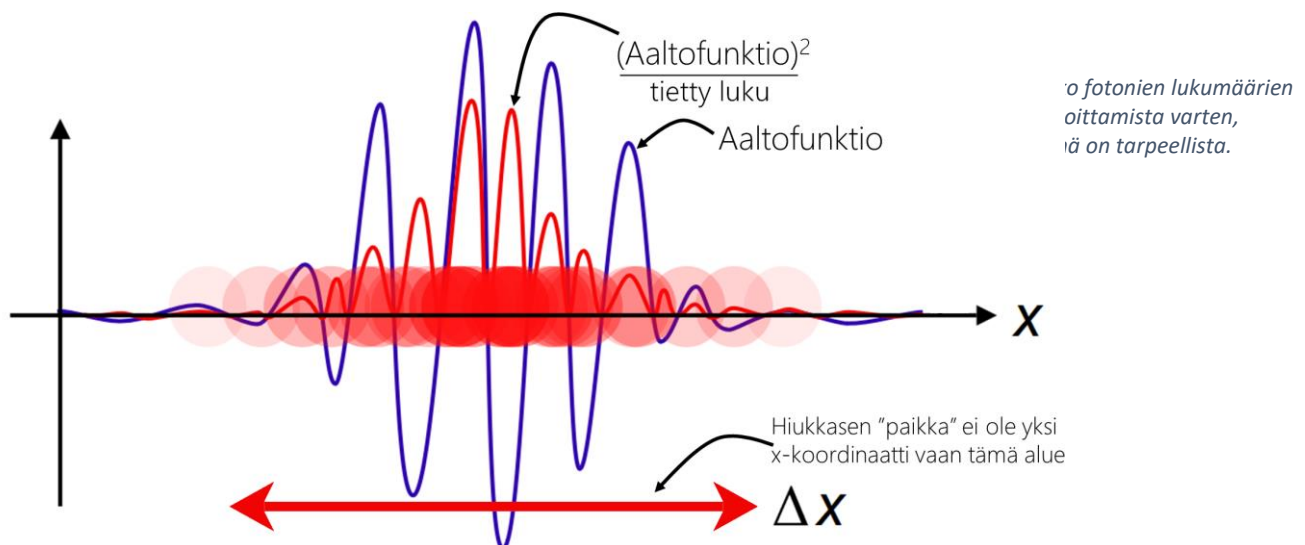
Kaikki aine ja energia koostuu *aaltofunktioista*. Aaltofunktion voi ajatella olevan ”maailmankaikkeuden tapa pitää kirjaa” siitä, missä esim. atomi tai foton on. Olisi hieman tarkempaa sanoa, että atomit ja fotonit *ovat* aaltofunktioita, mutta voimme mieltä tätä ”kirjanpitoa”.

Keskeistä tässä mielikuvassa on se, että kirjanpito ei ole absoluuttisen tarkkaa. Alla on yksinkertainen visualisaatio tästä ideasta. Kuvaajaan on piirretty hiukkasen aaltofunktio  $\Psi(x)$ . ”Aaltofunktiokirjanpitoa” luetaan näin: funktion arvo korotetaan toiseen potenssiin ja sitten jaetaan tietyllä luvulla. Näin saatu luku on todennäköisyys sille, että hiukkanen havaitaan kyseisessä paikassa, jos suoritetaan mittaus, jossa hiukkasen paikan täytyy määriytyä.

Toisin sanoen nykyäisyyden mukaan jokainen hiukkanen on aaltomainen funktio. Mutta kun se vuorovaikuttaa ympäristönsä kanssa (esim. herkän mittarin kanssa), se havaitaan jossain tarkassa pisteessä hiukkasmaisena oliona. Hiukkanen jotenkin ”lokalisoituu”, eli yhtäkkiä sillä onkin yksiselitteinen sijainti. Näin syntyy illuusio siitä, että hiukkanen aina olikin joku pieni pallo.

Alla olevaan kuvaan onkin piirretty useita häilyviä palloja, jotka kuvaavat hiukkasen ei-lokalisoitunutta luonnetta. Sillä ei siis ole tarkkaa paikkaa – ennen kuin ”on ihan pakko”. Aaltofunktio voi siis kulkea *molempien rakojen läpi*, ja siksi foton on voi interferoida *itsensä kanssa*. Vasta valomittari pakottaa fotonin ”päättämään”, missä se on. Lukio-oppikirjoissa tämä kaikki ilmaistaan niin, että olio on ”sekä aalto että hiukkanen”, vaikka kyse onkin aina aaltofunktioista.

Eräs avoimia kysymyksiä fysiikassa on, *miksi* hiukkanen kuitenkin aina lopulta mitataan yhdessä paikassa. Keskeisiä teorioita ovat mm. Kööpenhaminan tulkinta (aaltofunktion romahtaminen) ja Everettiläinen tulkinta (on olemassa useita maailmankaikkeuksia). Näiden keskeinen ero liittyy kysymykseen siitä, miten ja miksi klassinen maailma ja kvanttimaailma toimivat eri tavoin.



Lisätietoa laitteistosta: Käytetty valomittari on valomonistusputki (photomultiplier tube), eli käytännössä metallilevy, josta valosähköisen ilmiön myötä irtoaa elektroneja. (Vain 5-6% fotoneista irrottaa levystä elektronin, mutta tämä on huomioitu laitteiston säädöissä). Fotonin irrottama elektroni löytää itsensä kiihdyttävästä sähkökentästä, joka sinkoaa elektronin suurella energialla toiseen levyyn. Elektronin törmäys irrottaa tästä levystä keskimäärin 4 elektronia, jotka sinkoavat taas seuraavaa levyä kohti. Yhdeksän ”kerroksen” jälkeen yhden fotonin mitätön energia on ”monistettu” ( $4^9 = 262144$ -kertaiseksi). Tämä sähköinen pulssi voidaan havaita. (Kvanttimekaaninen huomio: tästä seuraa aaltofunktion romahtus / kietoutuminen mittalaitteen aaltofunktion kanssa. Siksi saadaan fotonista joko havainto tai ei havaintoa.