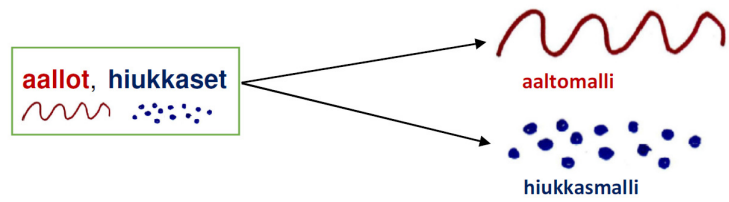


Aaltohiukkasdualismi

aaltoliike käyttäytyy **aaltoliikkeen tavoin** ja lisäksi myös hiukkasten tavoin
hiukkaset käyttäytyvät **hiukkasten tavoin** ja lisäksi myös **aaltoliikkeen tavoin**

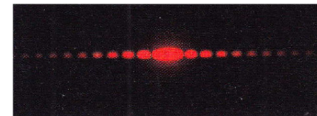


KAKSOISRAKOKOE

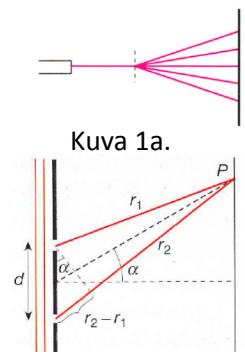
Kaksoisrakokoe on koe, jossa sähkömagneettista säteilyä tai hiukkassäteilyä kohdistetaan kaksoisrakoön, jonka takana on varjostin tai valokuvauslevy. Kaksoisrakokoe todisti/todistaa sähkömagneettisen säteilyn ja hiukkassäteilyn dualistisen luonteen. Aallot ja hiukkaset käyttäytyvät molemmat sekä aaltoliikkeen että hiukkasten tavoin.

Kun monokromaattista eli yksiväristä laserin valoa kohdistetaan kaksoisrakoön, havaitaan valon taipuminen eli diffraktio ja varjostimella näkyy interferenssikuvio (Youngin koe v. 1801). Varjostimelle syntyy valoisa kohta eli intensiteettimaksimi, kun raoista lähtevät valosäteet vahvistavat toisiaan (kuvat 1abc). Tämä tapahtuu, kun säteiden matkaero on kokonainen määrä aallonpituuksia eli $dsin\alpha = k\lambda$ (hilayhtälö). Ilmiö selitetään **valon aaltomallilla**.

Varjostimella nähdään kuvan 1b mukainen interferenssikuvio.

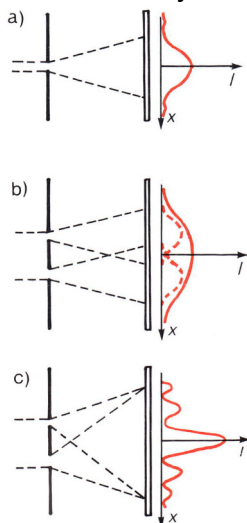


Kuva 1b



Kuva 1c.

Kun samasta lähteestä tuleva yhdensuuntainen sähkömagneettinen aalto, esim. laser-valo, kohtaa yhden raon, fotonien intensiteettihiippu on raon kohdalla (Kuva 2a). Kahden raon kokeessa, raoista tulevat aallot interferoivat keskenään ja intensiteettijakauma on erilainen kuin eri rakojen synnyttämien intensiteettikuvioiden summa (kuva 2b). Kaksoisrakokokeen lopputuloksena on, että valo muodostaa varjostimelle kuvan 3c mukaisen aaltomallille tyypillisen intensiteettijakauman.



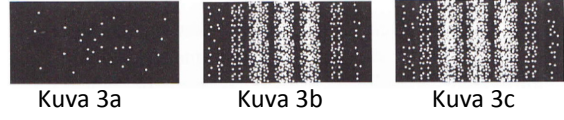
a) Yhden raon aiheuttama intensiteettijakauma. Intensiteettihiippu on raon kohdalla.

b) Kahden raon koe: *katkoviiva* esittää kummankin raon *erikseen* antamaa intensiteettijakaumaa ja **teoreettisesti laskettu** hiukkasmallin mukainen rakojen summajakauma *yhtenäisellä viivalla*.

c) kaksoisraon todellinen mitattu intensiteettijakauma

Kuva 2. Kaksoisrakokoe

Sama interferenssi-ilmiö havaitaan myös vesiaalloilla. Korvataan sitten varjostin fluoresoivalla pinnalla ja tutkitaan interferenssikuvioita mikroskoopilla. Kun käytetään heikkoa valoa, niin fluoresoivalle pinnalle ilmestyy sinne tänne yksittäisiä valoisia pisteitä, fotonien eli valokvanttien osumakohtia (kuva 3a). Fotoni osuu aina vain yhteen fluoresoivan pinnan kohtaan. Havainto osoittaa, että **valo ei käyttäydy niin kuin klassisen fysiikan aalto**. Havainto voidaan siis selittää **valon hiukkasmallilla**. Vasta kokeen jatkuessa tarpeeksi kauan muodostuu tyypillinen interferenssikuvio (kuvat 3bc). Jos valon intensiteetti on pieni, niin riittävän pitkän ajan kuluttua syntyvä kuvio on samanlainen kuin voimakkaalla valolla aikaansaatu kuvio. Ilmiö selitetään **valon aaltomallilla**. Havaittaessa mikromaailman kohteita, kuten fotoneja, **hiukkasmalli ja aaltomalli täydentävät toisiaan**. Tarkastelemalla suuria hiukkasmääriä saadaan ilmiölle erittäin hyvä ennustettavuus. Suuret hiukkasmäärät noudattavat tilastollisia lakeja. Aalloille ominainen diffraktiokuvio syntyy hiukkasille yksittäisistä osumista, säteilyn lajista tai intensiteetistä riippumatta. Valo käyttäytyy siis dualistisesti; aaltojen ja hiukkasten tavoin.



Kuva 3a

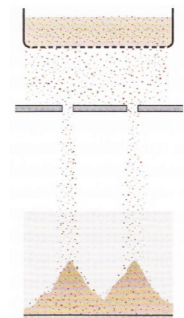
Kuva 3b

Kuva 3c

Kaksoisrakokoe valolla, kun valaistusaika kasvaa.

Entä materiaaliset hiukkaset kaksoisrakokokeessa?

Putoavat hiekanjyvät muodostavat kaksoisrakokokeessa kaksi kekoa (kuva 4).



Kuva 4.

Hiekanjyvät kaksoisrakokokeessa.

Entä elektronit kaksoisrakokokeessa?

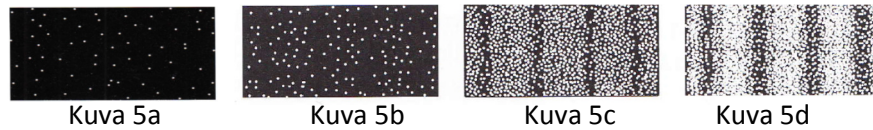
Tarkastellaan elektronisuihkun käyttäytymistä kaksoisraossa. Jos elektronien ajatellaan olevan hiukkasia, niin voisi olettaa, että varjostimella näkyisi kaksi erillistä maksimia rakojen kohdalla kuten kaksoisrakoon putoavien hiekanjyvien kohdalla kuvassa 4. Mutta näin eivät kokeet osoita!

Elektroneilla suoritettavat kokeet antavat samanlaisia tuloksia kuin valolla (fotoneilla) suoritettavat kokeet (Kuva 5abcd). Kun kaksoisrakokoe tehdään yksittäisiä elektroneja käyttäen, varjostimella nähdään ensin mielivaltaisissa paikoissa yksittäisiä pisteitä. Interferenssikuvio tulee näkyviin vasta ajan mittaan. Koejärjestelyssä kaksoisraon läpi kulki vain yksi elektroni kerrallaan, joten yksittäisellä elektronilla on aaltoluonne. Hiukkasilmaisimilla voidaan määrittää elektronien liikemäärä ja energia. Kokeelliset tulokset osoittavat, että mitatut elektronien liikemäärä ja energia vastaavat de Broglien lakien ($p = h/\lambda$, $E = hf$) ennusteita.

Elektronienkin osumiskohta varjostimella riippuu siitä, ovatko molemmat raot samanaikaisesti auki vai eivät. Elektronien intensiteettijakauma kaksoisrakokokeessa on selitettävissä aaltomallilla. Kun koe suoritetaan valolla tai elektroneilla, on kyse aina valtavasta määrästä fotoneja tai elektroneja. Suuren joukon tilastollinen yhteiskäyttäytyminen on ennustettavissa – varjostimelle syntyy ennustettu interferenssikuvio (kuva 2c). Yksittäisten hiukkasten osumakohtia varjostimella ei voida ennustaa. Varjostimen intensiteettijakauma on selitettävissä aaltomallilla, kun aallonpituutena käytetään de Broglien aaltojen aallonpituutta: $\lambda = h/p$. **Elektronit käyttäytyvät siis aaltohiukkasdualismin mukaisesti sekä hiukkasten että aaltoliikkeen tavoin.**

Varjostimelle muodostuu kaksoisrakokokeessa samanlainen interferenssikuvio kuin valollekin kuvassa 2c. **Kaksoisrakokokeessa hiukkasten käyttäytymisen selitys vaatii aaltomallin käyttöä.**

Kuvasarjassa 5 näkyy, miten interferenssikuvion rakenne muuttuu kaksoisrakokokeessa elektronien määrän kasvaessa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa 5a elektronien määrä on pienin, oikeanpuoleisessa kuvassa 5d suurin.

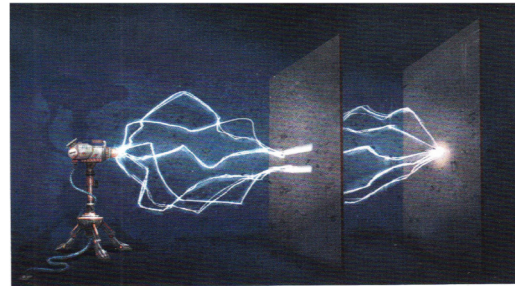


Kaksoisrakokokeen interferenssikuvio elektroneilla, kun elektronien lukumäärä kasvaa.

Kaksoisrakokokeen interferenssi-ilmiö on havaittu muillakin materiaalisilla hiukkasilla, esim. protoneilla, neutroneilla, vetymolekyyleillä ja jopa 70 hiiliatomin fullereenimolekyyleillä.

Kaksoisrakokoe on malliesimerkki kvanttimekaanisesta mittauksesta. Oletetaan, että ammutaan vain yksi hiukkanen kerrallaan. Jos vain yksi rako on auki, ei interferenssiä synny. Heti kun toinenkin rako avataan, havaitaan interferenssikuvio. **Yksi hiukkanen kulkee siis molempien rakojen kautta!** Ja mikä vielä erikoisempaa, niin *interferenssikuvion häviämiseksi riittää, että rakoihin asetetaan ilmaisin, joka kertoo, että raosta kulkee hiukkanen.* Hiukkanen ei siis ikään kuin halua meidän tietävän kummasta raosta se kulkee, vaan haluaa meidän uskovan, että se kulkee molempien rakojen kautta yhtä aikaa, kuten aalto. Ellei elektronin rataa todeta mittauksen avulla, elektronia kuvaava aaltofunktio ulottuu kummankin raon ylitse ja elektroni pysyy näin ikään kuin interferoimaan itsensä kanssa. Sama koskee fotonia. **Niin kauan kuin ei tiedetä, kumman raon lävitse fotoni kulkee, se tuottaa interferenssikuvion. Jos mitataan, minkä raon läpi fotoni kulkee, interferenssikuvio häviää.**

Fotoni voi olla samanaikaisesti siis monessa eri paikassa. Richard Feynmanin kvanttimekaniikan *polkuintegraaliformalismin* mukaan fotoni kulkee valonlähteestä varjostimelle/valokuvauslevylle periaatteessa kaikkia mahdollisia reittejä pitkin yhtä aikaa interferoiden itsensä kanssa (kuva 6). Kuvassa 6 on esitetty muutamia niistä äärettömän monista reiteistä, joita pitkin yksittäinen hiukkanen (esim. fotoni tai elektroni) voi kulkea säteilylähteestä varjostimen fosforoivalle pinnalle. *Yksi hiukkanen voi näin ollen kulkea samanaikaisesti molempien rakojen läpi.*



Kuva 6.
Kaksoisrakokokeen polkuintegraaliselitys.

Niels Bohr: *"Ne, jotka eivät ole hämmästyneet tutustuessaan kvanttimekaniikkaan, eivät ole mitenkään voineet ymmärtää sitä."*

Richard Feynman: *"Voi hyvin sanoa, että kukaan ei ymmärrä kvanttimekaniikkaa."*

Lähteet:

- Hatakka-Saari-Sirviö-Viiri-Yrjänäinen: Physica 8, Aine ja säteily, 1-2. painos, Sanoma Pro/WSOY 2009
 Lehto-Havukainen-Maalampi-Leskinen: Fysiikka 8, Aine ja säteily, 1. painos, Tammi 2011
 Lehto-Havukainen-Leskinen-Luoma: Fysiikka 8, Aine ja säteily, 1. painos, Tammi 2007
 Eskola-Ketolainen-Stenman: Fotoni 8, Aine ja säteily, 1. painos, Otava 2007
 Eero Rauhala: Esitelmä fysiikan todellisuudesta, 2008 (<http://www.ursa.fi/yhd/komeetta/esitelma/FysiikanTodellisuus.htm>)
 Brian Greene: Kosmoksen rakenne, Terra Cognita, 2005
 Brian Greene: Kätkeyty ulottuvuudet, Tammi, 2000
 Bruce A. Schumm: Syvällä asioiden sydämessä, Hiukkasfysiikan kauneus, Terra Cognita, 2006
 Stephen Hawking & Leonard Mlodinow: Ajan lyhyempi historia, WSOY 2008
 Jukka Maalampi & Tapani Perko: Lyhyt modernin fysiikan johdatus, 4. korjattu painos, Limes 2006
 Kari Enqvist: Olemisen porteilla, WSOY 1998
 Wikipedia