

Viikon 3, maanantain esitehtävä:

Videolta minulle tuli mieleen kysymys siitä, että liittyykö todennäköisyydet jollain tapaa videolta havaittuun ilmiöön? Vai onko selittävä tekijä nimenomaan se superpositio?

Kyllä! Superpositio on se periaate joka selittää miten hiukkasen aaltofunktio käyttäytyy. Tuo aaltofunktio ei kuitenkaan ole suoraan mitattava suure, vaan siitä saadaan eri havaintojen todennäköisyysjakauma.

Videosta ei tullut erityisiä kysymyksiä mieleen, mutta usein interferometrien yhteydessä puhutaan polarisoivien kalvojen ja edellisellä luennolla esiteltyjen puoliksi heijastavien kalvojen käytön lisäksi kristallien käyttämisestä. Mitä kristallit käytännössä tekevät interferometrissä ja miksi niitä käytetään?

No tämä ei ollut kyllä minulle tuttua mutta googlailin hieman ja ymmärsin että kyseessä on neutroni-interferometri. Eli siinä missä valointerferometri tehdään pelien ja puoliläpäisevien kalvojen avulla, niin neutroneille voidaan vastaava ilmeisesti rakentaa jonkinlaisten kristallien avulla. En ala tätä enempää avaamaan kun en oikeasti aiheesta mitään tiedä :)

Yksi pohtimani asia onkin se, minkälaiset fysikaaliset vuorovaikutukset ovat "mittauksia" kvanttimekaniikan kannalta.

Hyvä kysymys. Vastaus valitettavasti vain riippuu hieman näkökulmasta. Mittauksessa on kyse pohjimmiltaan korrelaatioista – kvanttimekaanisen systeemin vapausasteet ja 'mittalaitteen' vapausasteet jotenkin kietoutuvat siten, että ne ovat korreloidut. Periaatteessa mikä tahansa objekti voi toimia mittalaitteena ja mikä tahansa vuorovaikutus voi tuon korrelaation synnyttää, mutta toisaalta tuon korrelaation voimakkuus määrää sitten sen kuinka paljon kvanttimekaanisen systeemin aaltopaketti romahtaa. Käsitellään vähän näitä asioita keskiviikon luennolla.

Hauska kysymys: Jos Marvel-supersankari Antman kutistuisi atomin tasolle, pitäisikö hänen ottaa huomioon itseensä vaikuttavat kvanttimekaaniset ilmiöt? :D

No ilman muuta! Kurssin viimeisen viikon ryhmälaskareissa on tarkoitus kokeilla erilaisia kvanttipelejä. Niillä pääsette näkemään miltä maailma Antmanin silmissä näyttäisi!

Itseäni kiinnostaa riittääkö, että perspektiiviä muuttaa tilanteesta riippuen siten, että tietyissä tilanteissa huomioidaan aalto-ominaisuudet ja tietyissä tilanteissa hiukkasominaisuudet vai tuleeko vastaan tilanteita, että molemmat täytyy huomioida samanaikaisesti.

Hmm. Mielenkiintoinen kysymys. Oikeastaan kysymys kuitenkin kuuluu, että mitä tarkoitetaan hiukkasominaisuuksilla? Aaltohiukkasdualismin 'hiukkasominaisuus' voidaan ymmärtää pieneen alueeseen rajautuneena aaltopakettina. Jos vastaavasti 'aalto-ominaisuus' on jonkinlainen

kaikkialle levittäytynyt harmonista aaltoa vastaava tila, niin silloin hiukkas- ja aalto-ominaisuudet muodostavat jatkumon, sillä hiukkasen aaltofunktio voi olla enemmän tai vähemmän lokalisoitunut.

Jos ymmärsin oikein niin myös makroskooppisilla kappaleilla voidaan havaita superpositiota? Onko tällä makroskooppisten kappaleiden superpositiolla fysikaalista merkitystä? Makroskooppiset kappaleethan ovat vain yhdessä tilassa?

Noo, vaikka tuo esitehtävävideon oligotetra...-molekyylillä aika iso olikin niin ei se toki vielä makroskooppinen ole. Oikeasti makroskooppisilla kappaleilla superpositiota ja/tai interferenssi-ilmiötä ei voida havaita, mutta syy ei nyky-ymmärryksellä ole fundamentaalinen vaan yksinkertaisesti tekninen, että isojen kappaleiden aallonpituus on niin naurettavan pieni että emme yksinkertaisesti kykene havaitsemaan niiden aaltoilmiöitä.

Kvanttimekaniikan pohtiminen isommalla mittakaavalla kuten suurilla molekyyileillä tuo mieleen monia kysymyksiä, kuten ilmeneekö tämä ilmiö meille luonossa jotenkin.

Isompien molekyylien interferenssi-ilmiöitä ei ehkä esiinny missään, mutta kyllä kvanttimekaaniset ilmiöt silti vaikuttavat moniin arkipäiväisiin asioihin. Kvanttibiologiaahan oli ensimmäisen viikon esitehtävävideossa ja laskareissa tulette törmäämään esimerkiksi kvanttimekaniikan rooliin ihan omassa näköaistissanne.

Artikkelissa sanottiin hiukkasten olevan kahdessa paikassa samaan aikaan. Missä mielessä tämä pitää paikkansa? Vai ovatko hiukkaset oikeasti kahdessa paikassa samaan aikaan 🤔?

Noo. Hiukkaset ovat kahden paikan superpositiotilassa. Mitä se sitten ikinä tarkoittaakin :)

Kuvaako kaksoisrakokoe hiukkasten aaltoluennetta?

Kyllä! Interferenssikuvion muodostuminen varjostimelle on aaltoilmiö, sillä se edellyttää aaltojen destruktiivista (ja konstruktivista) interferenssiä. Se että hiukkasilla havaitaan tuo kuvio, on osoitus siitä että ainakin jollakin tasolla hiukkaset käyttäytyvät kuin aallot.

Miten massallisten hiukkasten superpositiotila siis perustellaan? Toki se todistetaan kokeellisesti, mutta miten selitetään aalto-hiukkasdualismin jne ilmeneminen?

Tjaa-a. Minä perustelisin sen kyllä nimenomaan kokeellisesti. Jos kokeet eivät tuota superpositiotilaa tai sen välttämättömyyttä osoittaisi, niin luulen että heittäisimme superpositiotilan ilmiöihin romukoppaan.

Mutta kvanttikenttäteoriat antavat kyllä vaihtoehdoisen tavan katsoa asiaa: aallot kuvaavat kaikkia 'hiukkasia', niin massallisia kuin massattomiakin. Se mitä me ajattelemme 'hiukkasena' on ainoastaan hyvin pieneen alueeseen 'lokalisoitunut' aaltopaketti. Tällä tavoin

aalto-hiukkasdualismi purkautuu, koska kaikki ovat aaltoja. Mutta en ole ihan varma onko tämä arkielämää ajatellen kauhean tyydyttävä tapa asioita tarkastella ;)

Onko massan hitaudella siis jokin matemaattinen suhde aaltojen amplitudiin?

Ei varsinaisesti amplitudiin mutta kylläkin massallisen hiukkasen aaltofunktion aallonpituuteen. Kyse on de Broglien aallonpituudesta, $\lambda = h/p$, missä h on Planckin vakio ja $p = mv$ hiukkasen liikemäärä.

Mikä käytännössä selittää interferenssikuvion syntyminen esimerkiksi yksittäisten fotonien tapauksessa kun ne eivät todellisuudessa vuorovaikuta keskenään millään tavalla?

Hyvä kysymys ja tämä asia pohditutti J.J.Thomsonia 1900-luvun alussa. Taylorin koe 'hyvin heikolla valolla' kuitenkin osoitti, että yksittäiset fotonit interferoivat itsensä kanssa. Eli yksittäisellä fotonilla, jolla on useampi reitti päätyä havaitsimelle, kulkee näiden kaikkien mahdollisten reittien 'superpositiossa'. Mitä superpositio sitten tarkoittaa, en osaa sanoa ;)

Eli pohjimmiltaan maailmankaikkeus on pelkkiä todennäköisyyksiä?

Noo, itse asiassa ei :D Kvanttimekaniikka on täysin deterministinen

jos voidaan havaita vaikka vain yksi atomi molekyylistä, muiden paikka voidaan melko todennäköisesti arvata sen yhteyteen. Tarkoittaako tämä siis sitä, että koko molekyylin aaltoluonne katoaa, kun vain yksi osa siitä havaitaan?

Juu. Juuri näin. Riittää jos yksikin osa molekyylä havaitaan. Mutta mitä 'havaitseminen' tarkoittaa onkin sitten asia jota käsittelemme hieman keskiviikon luennolla.

Toki tämä herättää heti esimerkiksi kysymyksen: miltä liikkuvan elektronin aalto näyttää? Jäin miettimään sitä, että syntyykö interferenssikuvioita, jos ammutme elektroneja yksitellen. Ajattelemmeko siis tässä niin, että elektroni kulkee molempien rakojen läpi aikaan samaan aikaan ja interferoi itsensä kanssa?

Tuota elektronin aaltoa ei voida havaita. Jos mittaamme missä elektroni on, niin se löytyy aina jostakin yhdestä paikasta, mikä samalla 'romahduttaa' sitä kuvaavan aallon vastaamaan sitä paikkaa missä se on. Tietyssä mielessä tuo 'aalto' onkin vain matemaattinen rakennelma, jonka avulla elektronin käyttäytymistä voidaan selittää ja ennustaa.

Interferenssikuvio syntyy myös jos elektroneja ammutaan yksitellen. Itse asiassa tuossa esitehtävävideossa tehtiin juuri niin, eli yksi elektroni kerrallaan meni hilan lävitse varjostimelle. Kun monen yksittäisen elektronin osumapaikka kuvataan, saadaan lopulta selville tuon yksittäisen elektronin osumien todennäköisyysjakauma.

Tekstin yhden lauseen suomentaminen oli jokseenkin hankalaa: “The next generation of matter-wave experiments will push the mass by an order of magnitude,” the authors wrote. Mikä tämän lauseen sisältö olisi suomennettuna ja selvennettyinä?

Hyvä kysymys! Kääntäisin tuon seuraavasti: “Seuraavan sukupolven aineaaltokokeissa (hiukkasten) massaa kasvatetaan kertaluokalla.” Eli tarkoittaa että kokeessa ei suinkaan olla vielä saavutettu mitään rajaa sen suhteen kuinka suurilla molekyyleillä interferenssikokeen voi tehdä. Tulevaisuuden kokeissa käytetäänkin molekyyliä joiden massa on kymmenkertainen (=yksi suuruusluokka) verrattuna noihin oligo...-molekyyliihin.

Mietin, että miten elektroneja voidaan ampua mittalaitteiston läpi? Miten se on mahdollista ampua 1E-30 kg massaisia hiukkasia?

Hyvä kysymys. Tapoja on varmasti monia, mutta elektronien tapauksessa voidaan käyttää vaikka ultravioletta valoa jolla valaistetaan metallilevyä. Fotonit irrottavat metallista elektroneja, jotka voidaan sitten sähkö- ja magneettikenttien avulla kiihdyttää ja ohjata haluttuun suuntaan (ja vaikka diffraktiohilan lävitse). Myös esimerkiksi fullereenien diffraktiokokeessa muistaakseni kuumennettiin grafiittia, jolloin siitä ihan lämpöliikkeen myötä irtosi molekyyliä. Sopivilla sähkö- ja magneettikentillä saadaan sitten valikoitua sieltä oikean massaisia hiukkasia joilla sitten voidaan tehdä diffraktiokokeita.

Noista oligo-tetra...-molekyyleistä en tiedä miten ne on saatu ‘irrotettua’ ja kiihdytettyä.

Onko siis kaikki aine sekä hiukkasia että aaltoliikettä?

Se olisi aaltohiukkasdualismin idea, joskin kvanttikenttäteorioiden myötä kuva on ehkä siirtynyt enemmän tuonne aaltojen puolelle jolloin ‘hiukkanen’ on itse asiassa vain hyvin pieneen tilaan rajoittunut aaltopaketti.

Scientific Americanin artikkelista en ihan ymmärtänyt kuinka suurten molekyylien interferenssikuvion havaitseminen todisti väitetyksi molekyylien olevan samanaikaisesti useassa eri paikassa avaruudessa. Käsittääkseni kokeessa tulokset saatiin tarkastelemalla yksittäisten molekyylien osumakohtia detektorilla, jolloin yksi molekyyli osui edelleen tasan yhteen kohtaan avaruudessa, mutta useiden molekyylien osumakohdissa oli havaittavissa eräänlainen todennäköisyysjakauma viitaten molekyylien aaltomaisiin ominaisuuksiin.

Hyvä! Molekyylin havaitseminen detektorilla ei tosiaan kerro mitään siitä mitä kautta se on kulkenut. Kysymys kuitenkin kuuluukin sitten, että mitä ‘molekyylien aaltomaiset ominaisuudet’ oikeastaan tarkoittaa? Jollakin tavoin usean mahdollisen reitin olemassaolo vaikuttaa siihen mitä detektorilla lopulta havaitaan (kun osumia on kertynyt riittävästi) koska interferenssijakauma on sellainen kuin on. Kokeessa molekyylit eivät kuitenkaan vaikuta toisiinsa, joten tämän ‘monen reitin efekti’ täytyy koskea myös yksittäistä molekyyliä, vaikka yksittäisen molekyylin tapauksessa emme voikaan puhua vielä varsinaisesta interferenssikuvioista (koska se osuu vain yhteen paikkaan!)

Kavereiden kesken ollaan mietitty välillä, että onko maailmankaikkeus luonteeltaan "deterministinen", ja kvanttimekaniikka kiinnostaa minua siksi, että se voisi antaa jotain näkökulmaa tuohon kysymykseen. Vaikka kvanttimekaniikkaa käytetään helppona argumenttina determinismistä vastaan, niin en silti ole täysin vakuuttunut, etteikö determinismissä olisi jotain ajatuksia, jotka pätevät meidän kvanttitieteen maailmassa. Tai toisaalta voi olla, että jokin laajempi kokonaisuus on deterministinen, vaikka meidän näkökulmasta kaikki näyttääkin epä-determinoidulta.

Kvanttimekaniikka on itse asiassa deterministinen. Se on itse asiassa tiettyssä mielessä deterministisempi kuin klassinen fysiikka, sillä esimerkiksi kvantti-informaatiota ei ole mahdollista hävittää mikä puolestaan asettaa yllättäviä rajoitteita esimerkiksi kvanttietokoneiden algoritmeille. Tietty epä-deterministisyys tulee kvanttimekaniikan mittaustietokoneista, mutta siinä on (ainakin omasta mielestäni) kyse vain eräänlaisesti efektiivisestä prosessista, jossa oikeasti deterministinen ja kvanttimekaaninen prosessi 'keskiarvoistetaan' klassiseksi prosessiksi. Samalla hukataan tieto tuosta kvanttimekaanisesta determinismitä, eli kyse on pohjimmiltaan vain siitä että emme kuvaa mittausprosessia riittävän tarkasti.

Jättimolekyylien kokeesta tuli vain mieleen, että onko olemassa teoreettinen raja sille, kuinka suurilla hiukkasilla kaksoisrakokoe voitaisiin toteuttaa. (esim. niin, että interferenssikuvion havaitseminen vaatisi niin suuren etäisyyden, että painovoima, Maan magneettikenttä, Maan pyörimisliike, yms estäisivät aina kuvion havaitsemisen, vaikka sellainen syntyisi).

Gravitaatio ja maan pyörimisen aiheuttama Coriolisvoima joudutaan jo nyt ottamaan huomioon noissa kokeissa. En usko että interferenssikokeessa sinällään olisi mitään fundamentaalista rajaa, joka estäisi yhä suurempien hiukkasten käyttämisen. Mutta isommilla hiukkasilla tarkkuus pitää olla parempi, laitteen koko luultavasti suurempi, hiukkaset jäähdytetty paremmin ja tyhjiön olla täydellisempi.

Kuinka hiukkasen koko vaikuttaa sen superpositiotilaan? Onko elektronilla kokonsa nähden laajempaan tilaan ulottuva jakauma kuin ligo-tetraphenylporphyrins-molekyyleillä tai pingispallolla vai miksi näiden ilmiöiden ymmärtäminen makrotasolla on niin epäintuitiivista?

Hiukkasen aaltopakettien koko tosiaan riippuu sen koosta. De Broglie'n aallonpituus kertoo että hiukkasaallon aallonpituus (mikä kuvaa epämääräisyyttä sen paikasta) on h/p , missä p on hiukkasen liikemäärä ja h Planckin vakio. Massallisen hiukkasen liikemäärä on klassisesta mekaniikasta tuttu $p = mv$, eli mitä suurempi massa m , sitä suurempi p ja siis pienempi aallonpituus. Noilla oligo-tetra...-molekyyleillä tuo de Broglie'n aallonpituus oli luokkaa 50 femtometriä, mikä oli noin sadastuhannesosa molekyylin itsensä koosta.

Jos hiukkasen paikkaa mitataan ja sille saadaan mitattua joku tarkka arvo tietyssä paikassa... niin silloinhan hiukkasella on aina joku tarkka paikka olemassa. Ja me käytetään vaan todennäköisyyksiä hiukkasen paikalle sen takia, että tarkan paikan mittaaminen vaikuttaa hiukkaseen. Mutta eihän se vielä tarkoita sitä, että hiukkanen välttämättä olisi useammassa paikassa samaan aikaan? Joten tästä voisi ajatella, että hiukkaset, tai siis elektronit, tietävät toisen raon olevan olemassa! Eiku...

:D Kvanttimekaniikka ja sitä tukevat kokeelliset havainnot osoittavat että todellisuus sisältää jotain muutakin kuin vain sen meidän havaintomme. Jos mittaamme hiukkasen paikan, niin havaitsemme tosiaan sen olevan aina vain yhdessä paikassa kerrallaan. Mutta riippumatta kvanttimekaniikan tulkinnasta, tiedämme että tämä ei ole koko totuus. Se mihin mittauksemme ei pääse käsiksi on superpositioperiaate. Tähän voisi varmaan liittää jotain filosofisia lainauksia Platonilta ja siitä miten havaitsemme vain asioiden varjoja mutta itse asiat jäävät meiltä näkemättä, mutta jätän filosofiset pohdinnat filosofeille.

Tilan mittaaminen/observointi on itselle vieläkin melko ympäröivä käsite. Mitä tarkoitetaan mittaamisella? Eikö valon fotonit voisivat toimia observoijana, ja jos kyllä niin mitä se observoi? Millainen koejärjestely takaa että hiukkanen pysyy superpositiotilassa? Dekohärenssiä olisi myös kiva joskus luennolla käydä läpi tarkemmin.

Käsitlemme mittaustapausta ja sitä mitä mittaus nyt ensinkään tarkoittaa keskiviikon luennolla. Dekohärensin käsitteä en ajatellut käsitellä sillä meillä ei ole vielä oikein työkaluja sen kunnolliseen matemaattiseen määrittelyyn ja se tulee myöhemmillä kursseilla. Ei siinäkään itse matematiikka mitenkään vaikeaa ole, lähinnä matriisilaskentaa, mutta kyse on enemmän matematiikan yhdistämisestä fysikaalisiin suureisiin ja siinä joudumme etenemään askel askeleelta.

Herää vain kysymys siitä, kuinka monet muutkin "faktoina pidetyt" oletukset maailmasta eivät todellisuudessa pidä paikkaansa.

Hyvä kysymys. Sitä mukaa kun tietomme ja ymmärryksemme kasvaa, niin sitä suuremmaksi kasvaa tietomme ja ymmärryksemme rajapinta sen tuntemattoman osan kanssa. Tästä syystä, mitä enemmän asioita tutkimme ja mitä syvemmälle asioiden syissä pääsemme, sitä enemmän tuntuu siltä että uutta ja tuntematonta on aina vain enemmän. Ja kääntäen: mitä vähemmän tiedämme, sitä enemmän tuntuu siltä että tiedämme kaiken.

Missä kokoluokassa menee kvanttimekaanisten ilmiöiden raja? Tuon mainitun molekyylin koko on jo samaa kertaluokkaa hemoglobiinin kanssa.

Tietääksemme mitään rajaa ei ole, mutta interferenssi-ilmiö edellyttää tiettyä kvanttimekaanisen aaltopakettien säilyttämistä ja se käy sitä vaikeammaksi mitä suurempi kappale on kyseessä. Muistan että Tilman Esslinger, joka teki aikoinaan näitä diffraktiokokeita ainakin C60

molekyyleillä, sanoi taannoin Aallossa pitämässään puheessaan että heidän tavoitteenaan on osoittaa interferenssi-ilmiöt jollakin viruksella. Vielä tuota ei selvästikään ole tehty, eikä sillä näin kvanttimekaanikan kannalta mitään merkitystä ole, mutta olisihan se tietynlainen rajapyykki.

Tästä tuli mieleen se, että luonnossa suurin osa ilmiöistä noudattaa normaalijakaumaa, etenkin biologisissa ilmiöissä. Tässä on hieman jotain samankaltaisuutta kvanttimekaniikan ilmiöiden kanssa, koska samalla tavalla eri ajanhetkillä tapahtuvat mittaukset ovat normaalisti jakautuneita ja siten tuntuvat "tietävän mitä muissa mittauksissa on tapahtunut". Onko sitä tutkittu, että selittykö joidenkin makroskooppisten ilmiöiden normaalijakautuneisuus kvanttimekaniikalla?

Minusta on hyvin mielenkiintoinen kysymys, että näkyykö kvanttimekaniikan tason korrelaatiot jotenkin makroskooppisten ilmiöiden jakaumissa. En tiedä mutta veikkaan että varmaan yhteyksiä löytyy. Mutta korjaisin hieman ajatustasi. Normaalijakaumaa löytyy toki makromaailmassa monessa yhteydessä. Normaalijakauma on kuitenkin juuri se tilastollinen jakauma joka syntyy kun korrelaatioita ei ole. Esimerkiksi jos heitämme tuhat kertaa noppaa ja laskemme heitoista keskiarvon, saamme normaalijakauman. Tämä tunnetaan muistaakseni suurten lukujen lakina todennäköisyyslaskennassa. Normaalijakauma saa kuitenkin monesti liian suuren painoarvon ihmisten mielissä sillä makromaailman ilmiöissä kuitenkin yleisempiä tai ainakin tärkeämpiä ovat potenssilakijakaumat. Ne ovat nimenomaan seurausta taustalla olevista korrelaatioista ja sieltä voisinkin kuvitella löytyvän myös yhteyksiä kvanttimaailman ilmiöihin.

Oleelliset kysymykset mittausasetelmien vaikutuksesta ja tuloksista jäävät usein vastaamatta. Kuinka paljon mittavirheitä on odotettavissa? Vaikuttaako kaksoisraon materiaali interferenssiin? Vaikuttaako elektronien nopeus interferenssikuviin? Entä jos elektronit kulkevat vedessä (tai muussa aineessa)? Ja sitten on tietenkin tärkein kysymys, johon ei koskaan vastata: mitä tarkoittaa hiukkasen mittaaminen?

Hyviä kysymyksiä kieltämättä. Mittavirheisiin en ota kantaa. Kaksoisrakokoe on monesti toteutettu itse asiassa hilalla, joka ei tarkalleen ottaen ole kaksoisrako laisinkaan mutta ilmiö on hyvin samankaltainen. Käytetty hilamateriaali on toki oleellinen, mutta lähinnä vain siitä syystä että materiaalin valinta määrää rakojen välisen etäisyyden. Elektronien nopeus vaikuttaa niiden de Broglien aallonpituuteen, joten se vaikuttaa myös interferenssikuviin.

Koe pitää toteuttaa tyhjiössä, sillä kaikenlainen vuorovaikutus väliaineen kanssa hävittää interferenssi-ilmiön. Ja itse mittaamista käsittelemme keskiviikon luennolla.

Tavallaan mietin asiasta alkeellisesti ymmärtävänä myös, miksei hiukkasten nopeus voisi olla todella matala, jotta niitä voisi seurata paremmin juuri tuon määrittämiseksi, missä ne ovat milläkin hetkellä. Mutta tulisiko niiden aallon pituudesta sitten sellainen, että koejärjestelyä ei voisi rakentaa? Ja Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen mukaan paikkaa ei voisikaan määrittää tarkasti, jos nopeuden voi? Olisi mielenkiintoista kuulla tästä epätarkkuusperiaatteen enemmän liittyen elektronien kaksoisrakokokeeseen.

konjugaattisuureita ja konjugaattisuureisiin pätee Heisenbergin epätarkkuusperiaate, jota käsitellään vähän tämän viikon laskareissa.

Jos elektronit synnyttävät interferenssikuvion kaksoiraolla mutta eivät yhden raon kokeessa, ja käyttäytyisivät vain kaksoisraon tapauksessa kuten aallot ja fotonit käyttäytyvät aallon lailla molemmissa, yhden ja kahden raon, tapauksissa, niin mikä ero fotoneilla ja elektroneilla tällöin on?

Elektronit synnyttävät interferenssikuvion myös yhden raon tapauksessa. Elektroneilla ja fotoneilla ei siinä mielessä olekaan mitään eroa ja itse asiassa niiden ainoat erot ovat massa ja varaus. Lisäksi elektronit ovat fermioneja ja fotonit bosoneja, mutta näitä symmetriaeroja emme käsittele vielä meidän kurssillamme.

Elektronien diffraktio kaksoisraosta on ilmeinen osoitus aineen aaltoluonteesta. Herää kysymys, miten elektroni interferoi itsensä kanssa – siitähän kokeessa on kyse.

Kyllä, juuri siitä kokeessa on kyse. Elektronin interferointi itsensä kanssa on seurausta sen aaltoluonteesta. Tämä ei kuitenkaan anna meille mitään lisäymmärrystä koska pohjimmiltaan emme ymmärrä elektronin aaltoluonnetta. Mutta jos hyväksymme sen, että elektroni on pohjimmiltaan kuin aalto (todennäköisyysamplitudiaalto) niin mittaustapahtumaa lukuunottamatta elektronin ja muiden kvanttimekaanisten hiukkasten käyttäytyminen on ihan luonnollista ja tuttuakin aaltomekaniikkaa. Tähän aaltokuvaan vain sopii vähän huonosti ajatus hiukkasesta, joka mitattaessa näyttäytyy aina jossakin tietyssä paikassa.

Kun puhutaan yksittäisestä aallosta esim. fotonista, niin tarkoitetaanko sillä yhtä aallonpituuden kokoista pätkää aallosta vai jotakin äärettömän pientä kohtaa, joka liikkuu aallon radalla? Onko aalloista puhuttaessa edes käsitettä yksittäisistä aaltokappaleista?

Hyvä kysymys joskaan en ole varma että pystyn antamaan hyvää vastausta, sillä sähkömagneettisen kentän kvantisointi tulee vasta Quantum physics kurssilla sitten joskus pitkän ajan kuluttua :) Mutta yksinkertaistettuna fotonilla tarkoitetaan sähkömagneettisen kentän säteilykvanttia. Tilanteesta riippuen se voi tarkoittaa vähän eri asioita, mutta jos ajattelet esimerkiksi yksinkertaista sähkömagneettista siniaaltoa, niin se mikä siinä kvantittuu on sen amplitudi. Huomaa, että tämä säteilykvantti on lähtökohtaisesti jakaantunut kaikkialle avaruuteen (koska siniaallolla ei ole alkua eikä loppua). Jos tarkastelet lyhyttä sähkömagneettisen säteilyn pulssia, niin se koostuu itse asiassa monen fotonin superpositiosta.

En ole varma mitä tarkoitat aaltokappaleilla, mutta en nyt ihan heti keksi mitään tilannetta missä kannattaisi esimerkiksi siniaaltoa ajatella koostuvan sarjasta yhden jakson pituisista sinimuotoisista pätkistä... no jaa, keksin joitain, mutta ei mennä sinne.

Kiinnostavaa olisi tietää miten suurilla kappaleilla kvantti-ilmiöt ovat vielä merkittäviä ja milloin klassisen fysiikan käyttö on turvallista?

Ehdottomasti! Ja tuota rajaa onkin toki tutkittu pitkään, joskaan mitään selvää sääntöä tuohon ei varmaankaan voida antaa. Aallossakin on mielenkiintoista tutkimusta aiheeseen liittyen, esimerkiksi Quantum Nanomechanics ryhmän tutkimukset:

<https://www.aalto.fi/en/department-of-applied-physics/quantum-nanomechanics>

Herääkin kysymys, että miten joku on osannut edes ajatella tämänlaisia asioita alunperin ja puuttuuko meiltä vielä jotain erittäin tärkeää tietoa. Itse uskon, että meiltä puuttuu vielä jokin tärkeä palanen.

Kvanttimekaniikka, kuten kaikki muutkin tieteelliset teorit, ovat syntyneet pikku hiljaa ja pienin askelin. Lopputulos saattaa toki näyttää hyvin erilaiselta kuin aiemmat teorit, mutta se johtuu vain siitä että me emme näe kaikkia väliaskeleita ainakaan näin kurssilla. Mutta esimerkiksi atomikuvan kehitys Thomsonin mallista, Rutherfordin mallin kautta Bohrin atomimalliin ja aina edelleen de Broglien malliin ja lopulta kvanttimekaaniseen Schrödingerin malliin antaa aika hyvän kuvan kehityksen pienistä askeleista (eikä Schrödingerin epärelativistinen teoriakaan vielä viimeinen sana ole!) Saattaa meiltä uupua vielä jokin tärkeä palanenkin, mutta valitettavasti paluuta klassisen maailman kannalta loogiseen teoriaan ei ole: kokeellisesti todennetut havainnot osoittavat mikroskooppisen maailman vierauden makroskooppiseen maailmaan oppineille ihmisäivoille.

Viikon 3, keskiviikon esitehtävä:

Videossa ja ensimmäisen luennon ajatuskokeessa kyse on enemmän binääritapaus, mutta voiko olla vaikka kolme tai enemmän ominaisuutta, jotka vaikuttavat keskenään niin, että jokainen saa olla vain yksi tila?

Voi olla enemmänkin kuin kaksi niin kutsuttu konjugaattimuuttuja vaikka yleensä puhutaankin konjugaattimuuttujapareista. Esimerkkinä olisi hiukkasen spin-vapausasteen x, y ja z -komponentit, jotka ovat kaikki keskenään konjugaattimuuttujia. Uskoisin että pystyisimme generoimaan enemmänkin konjugaattimuuttujia, jos hiukkaselle olisi enemmän sisäisiä vapausasteita kuten esimerkiksi atomilla, jolla onkin jo aika paljon sisäistä rakennetta.

Videossa esiintyvä bra-ket-merkintä tuntuu toistaiseksi vähän perustelemattomalta. Mihin tällaista notaatiota oikein erikseen tarvitaan, kun on olemassa hyvin määritellyt vektorinotaatiot?

Bra-ket-formalismi tulee aikanaan hyvin tutuksi. Pelkän paikka-avaruudessa olevan aaltofunktion esittämiseen sitä ei toki tarvitakaan, ja siihen se itse asiassa on jossakin määrin kömpelökin. Mutta hieman abstraktimpien tila-avaruuksien esittämisessä se on kätevä. Tämä meidän kurssi voitaisiin ihan hyvin kuitenkin tehdä ilman bra-ket-formalismia.

Minua jäi kuitenkin mietityttämään, miten käytännössä nuo todennäköisyydet eri obersvoiduille tapahtumille määritetään. Löytyykö jokin todennäköisyysjakaumia hyödyntävä matemaattinen relaatio vai ovatko ne vain empiirisesti selvitettyjä tilastollisia todennäköisyyksiä?

Kokeellisesti ne todennäköisyydet määritetään toki tilastollisesti. Mutta itse kvanttimekaaninen teoria on täysin deterministinen: kun tiedät alkutilan niin kvanttimekaanisen aaltofunktion aikakehitystä kuvaava Schrödingerin (aalto)yhtälö kertoo täsmällisesti sen miten aaltofunktio kehittyä ajassa. Tuosta aaltofunktiosta puolestaan saadaan suoraan se todennäköisyysjakauma, joka sitten toistokokeissa pitäisi näkyä.

Luennon ajatuskokeessa ja videon aihe liittyvät superpositioon. Esimerkiksi videon polarisaatiokokeessa näytettiin konkreettisesti, kuinka tarkastelukohde "unohtaa" ensimmäisessä polarisaatiossa tehdyn jaon toisen polarisaation jälkeen. Voiko tarkastelukohde jakaa useampaan kuin kahteen komponenttiin?

Valon polarisaation tapauksessa ei voi jakaa useampaan komponenttiin, johtuen siitä että polarisaatiolla on vain kaksi mahdollista 'kohtisuoraa tilaa', eli tavallaan siinä ei ole enempää informaatiota tarjolla. Muilla hiukkasilla noita sisäisiä vapausasteita voi toki olla enemmän ja itse asiassa niin kutsutun 'täydellisen kannan' käsite onkin tärkeä, eli meidän täytyy pitää huolta että kuvatessamme kvanttimekaanista systeemiä on kantatiloilla pystyttävä esittämään mielivaltainen systeemin tila. Tarkastelemme itse asiassa tätä sitten vetyatomin yhteydessä.

Mietin, että miten polarisoiva kalvo voi tietää, onko säteily "pyörivää" vai "suoraa", jos niiden hetkelliset sähkö- ja magneettikenttien komponentit ovat kuitenkin samat?

Hauska kysymys! Mutta toki polarisoivilla kalvoilla on myös paksuutta. Esimerkiksi ympyräpolarisoitu filtti koostuu useammasta kalvosta, joilla säädellään valon vaihetta. Ensimmäinen kalvo on ns. neljännesaaltokalvo (quarter-wave plate), joka aiheuttaa $\pi/4$ -vaihe-eron vaaka- ja pystypolarisoiduille valoille. Käytännössä tämä muuttaa ympyräpolarisoidun valon diagonaalisesti (eli lineaarisesti) polarisoiduiksi. Sen jälkeen tulee ihan tavallinen lineaarisesti polarisoiva kalvo. Ja lopuksi vielä uusi neljännesaaltokalvo, jolla saadaan läpi mennyt lineaarisesti polarisoitu valo jälleen muutettua ympyräpolarisoiduksi. Nuo neljännesaaltokalvot perustuvat ilmiöön nimeltään kahtaistaituminen, ja siinä materiaalin taitekerroin riippuu valon polarisaatiosta.

miten esimerkiksi elektronin spin, jonka suuntaa kuvataan kvanttimekaniikassa niin vahvasti todennäköisyyksillä, voidaan mallintaa aaltona. Päteekö aaltomaisuus ollenkaan yksittäisille ominaisuuksille vai tulee se aina peliin vasta, kun katsotaan useita ominaisuuksia?

Hyvä! Aallon käsitettä pitää ehkä hieman laajentaa :) Oleellista elektronin aaltofunktiossa on se superpositioperiaate, että elektronin paikka on tietyllä tavalla epämääräinen. Elektronin spinille

pätee ihan sama tilan epämääräisyys ja sitä myöten myös superpositioperiaate ja lisäksi senkin aikakehitystä kuvaa Schrödingerin (aalto)yhdtälö. Aaltofunktioksi sitäkin siis kutsutaan mutta olet oikeassa että koska sillä on vain kaksi mahdollista tilaa (jos tarkastellaan spiniä jossakin tiettyssä suunnassa) niin ajatus 'aallostaa' on aika outo.

En ihan vielä ymmärrä miltä polarisoitumaton valo näyttää. Sillähan pitäisi olla sähkökentän värähteleviä komponentteja jokaiseen suuntaan, mutta kun niistä otetaan superpositio ei kenttää ole enää jokaiseen suuntaan. Eli onko polarisoitumattomalla valolla aina yhdessä kodassa tietty polarisaatiosuunta joka vaihtelee satunnaisesti kun siirrytään aaltoa pisin? Onko yksi fotonin aina polarisoitunut tiettyyn suuntaan?

Heh, ihan hyvä kysymys. Kaikkiin suuntiin osoittavat sähkökenttävektorit kun summataan saadaan tosiaan kenttä jonka amplitudi on nolla, eli kenttä ei olekaan. Polarisoitumaton valo pitää tosiaan olla varmaan epäkoherenttia, eli siinä pitää olla sekaisin erilaisia aallonpituuksia erilaisilla vaihe-eroilla, jolloin sähkökentän suunta eri kohdissa aaltoa olisi erilainen.

Fotonin polarisaatio voi olla superpositiossa, joskin kahden polarisaatiotilan superpositio on edelleen jokin polarisaatio. Yksittäisen fotonin pitänee olla kuitenkin koherentti, koska 'vertailukohtana' vaihe-erolle on se itse.

Tavallaan on helpompi ajatella superpositiota vain matemaattisen työkaluna. Se kuitenkin lienee ihan aito asia?

Joo. Klassisessakin tapauksessa voi ajatella vähän samankaltaista 'superpositioperiaatetta' esimerkiksi nopan heitossa. Kun olet heittänyt nopan, mutta et ole tulosta katsonut, niin sen lukema voi olla mikä tahansa 1,2,3,4,5 tai 6. Tiedät jopa todennäköisyydet näille. Tavallaan se on sinulle 'superpositiotilassa' koska sinulta puuttuu se oleellinen informaatio, kunnes lopulta teet mittauksen ja katsot mitä heitit.

Mutta kvanttimekaaninen superpositio ei ole vain matemaattinen tapa kuvata epätietoisuutta vaan jotakin ihan 'todellista' sillä tämä superpositiotila muuttaa mittaustuloksia interferenssin kautta.

Onko olemassa ilmiöitä, joissa fotonin menettää osan energiastaan, niin että sen taajuus pienenee. Ja jos tällaisia tapauksia on, miksi niin ei käy polarisoinnissa?

Hyvä kysymys. On sellainen ilmiö mutta se edellyttää aivan erityisiä materiaaleja. Tyhjiössä edetessään fotonin on 'jakamaton', mutta esimerkiksi viikon 2 esitehtävän videossa vilahtaneessa fluoresenssi-ilmiössä aineen atomit tai molekyylit absorboivat fotonin ja sitten purkavat viritystilansa kahdessa tai useammassa vaiheessa emittoiden pienempi energisiä (taajuisia) fotoneja. Näitä käytetään paljon kvanttioptiikassa, erityisesti materiaaleja jotka juuri sopivasti puolittavat tuon fotonin energian emittoiden kaksi identtistä fotonia, joiden taajuus on siis puolet tuosta alkuperäisestä fotonista. Ilmiö on englanniksi muistaakseni 'parametric down-conversion' tai jokin sen sellainen, en tiedä mikä se on suomeksi.

Fotoneista tuli nyt mieleen että jos ne ovat videon perusteella käyttäytyviä aaltoja, niin mikseivät fotonit vedä toisiaan millään tavalla puoleensa vai vetääkö jos niillä kuitenkin on vaihteleva sähkö- ja magneettikenttä? Sama mietityttää myös elektroneissa, jos nekin ovat aaltoja. Sähkömagnetismin kurssilla aika lailla kaikki voitiin aina todeta pistemäiseksi varaukseksi, mutta jos elektroni on aalto niin mihin se menettää sitten aaltoluonteensa vai menettääkö. Onko se vaan todettu elektrostatiikassa että pistemäisyys kuvaa tilanteita riittävän hyvällä tarkkuudella?

Fotonit ovat sähkömagneettisen kentän kvantteja eli jonkinlaisia peruspalikoita, joista niin sähkö-, magneetti- kuin sähkömagneettiset säteilykentätkin koostuvat. Koska näitä kenttiä kuvaavat Maxwellin yhtälöt eivät (ainakaan tyhjiössä) anna mitään 'epälineaarisia' termejä, ei ne vuorovaikuta keskenään millään tavoin. Eli fotonien välillä ei ole mitään vuorovaikutusta. Klassisessa sähkömagnetismissa elektronit ja muutkin varaukset oletetaan tosiaan pistemäisiksi (mikä tosin on epäkonsistenttia, sillä pistemäisen elektronin muodostaman sähkökentän kokonaisenergia on ääretön). Tämä on hyvä approksimaatio useimmissa tilanteissa, mutta mikromaailmassa tämä oletus pettää. Sinällään Maxwellin yhtälöt yleistyvät kuitenkin kvanttimekaniikkaan tosi helposti. Ainoa mitä tarvitsemme on oletus sähkömagneettisen kentän kvanttiutumisen, eli että intensiteettiä ei voida jatkuvana funktiona muuttaa vaan että hyvin pienillä intensiteeteillä muutos onkin epäjatkuvaa eli diskreettiä.

Bra-ket-merkinnän voidaan ilmeisesti sanoa ainakin olevan jonkinlainen vaihtoehtoinen merkintätapa vektorille?

Kyllä. Ket-vektori on sarakevektori ja bra-vektori on rivivektori. Nämä ovat kuitenkin hieman erilaisia vektoreita kuin mihin ehkä olette aiemmin tottuneet, koska ne eivät ole paikka-avaruuden vektoreita laisinkaan. Sen sijaan ne ovat abstraktimman tila-avaruuden vektoreita. Kvanttimekaanisen systeemin tila kun ei superpositioperiaatteen vuoksi voikaan enää koostua hiukkasen paikasta, koska paikka ei ole yksikäsitteinen. Ja yleensä emme ole edes kiinnostuneita hiukkasten paikasta, vaan saatamme olla kiinnostuneita jostakin muusta sen vapausasteesta, kuten esimerkiksi videolla ollut fotonin polarisaatio. Vielä parempi esimerkki, joka varmasti vapauttaa meidät paikka-avaruuden vektoreista ja suunnista, on ajatella esimerkiksi vetyatomien elektronin tilaa. Se onko elektroni alimman kuoren s-tilalla (jos kemiasta muistatte jotakin) vai onko se mahdollisesti vaikka viidennen kuoren d-tilalla tai jopa näiden tai monen muun mahdollisen orbitaalin superpositiona voidaan esittää näiden bra- ja ket-vektorien avulla. Eli kaikki mahdolliset elektronin tilat muodostavat 'tila-avaruuden', ja elektroni tila on sitten tämän tila-avaruuden vektori. Palaamme vetyatomiin ja sen elektronin mahdollisiin tiloihin kurssin viidennellä viikolla.

Videosta jäi sellainen kysymys, että miksi se ei ole 12,5% kaikisesta valosta, joka läpäisee kaikista kolmesta suodattimesta, ajatellen, että $(1/2)^3=1/8$ eikä 25%, joka kerrottiin videossa?

Hyvä! Olet aivan oikeassa. Mutta videossa tarkasteltiin niiden fotonien osuutta, jotka ovat jo läpäisseet ensimmäisen suodattimen. Vähän hassusti siinä kyllä sanottiin, että 25% läpäisee kaikki kolme filteriä mutta tuota lausahdusta edeltävässä keskustelussa lähetettiin tosiaan siitä oletuksesta, että fotoni on läpäissyt jo ensimmäisen filterin ja sen polarisaatio oli näin ollen pystyssä. Koska 'puolittavia' filtereitä oli tuon kohdan jälkeen enää vain kaksi, saadaan tuo 25%.

Luennolla puhuimme ylös-alas-ominaisuudesta ja oikea-vasen-ominaisuudesta. Mikäli nyt analogisesti ajattelemme, että tuo mystinen ominaisuus on värähtelyn suunta, niin päädyimmekö samoihin tuloksiin kuin luennolla?

Jep. Eli viikon 1 maanantain luennon ylös-alas ominaisuus voisi olla vaikkapa fotonin polarisaatio pysty- ja vaakasuunnassa. Ja tuo vasen-oikea-ominaisuus olisi sitten fotonin polarisaatio analysoitaessa 45 asteen kulmassa, eli kaksi diagonaalisuuntaa.

Oikeastaan haluaisin ehkä kysyä ja tietää hieman enemmän vielä tuosta ympyräpolarisoidusta valosta. Siinäkö aallon visualisointi etenevästä aallosta muuttuu jotakuinkin korkkiruuviksi?

Joo. Eli ympyräpolarisoidussa valossa tuo polarisaatio (eli säteilykentän sähkökenttä) muuttaa koko ajan suuntaa, eli se näyttää tosiaan korkkiruuvilta. Käytännössä se syntyy yhdistämällä kaksi kohtisuorasti lineaarisesti polarisoitua (pysty- ja vaakapolarisoitu) kenttää mutta siten että noilla kahdella kentällä on $\pi/2$ -vaihe-ero. Se pitää tosin ihan miettiä itse läpi miten lopputuloksena siitä tulee pyörivä polarisaatio.

Ja vaikka ympyräpolarisoitu kenttä on tällä tavoin kahden lineaarisesti polarisoidun kentän superpositio, niin oikeastaan parempi olisi ajatella lineaarisesti polarisoitu kenttä kahden ympyräpolarisoidun kentän superpositiona.

Syy ympyräpolarisoidun kentän 'paremmuuteen' peruskäsitteenä on se, että fotonin +1 ja -1 spin-tilat vastaavat suoraan ympyräpolarisoituja kenttiä. Lineaarisesti polarisoidussa kentässä fotoni on siis spin-tilojen superpositiotilassa. Mutta fotonin spin ei nyt varsinaisesti kuulu meidän kurssin aihepiiriin.