

MALLIT FYSIIKASSA¹

Fysiikan sisäinen ristiriita

Luonnontieteellä on kaksi suurta yleistä tavoitetta. Etsiessään oikeata tietoa luonnosta se pyrkii kohti *totuutta*. Samalla se tahtoo selittää luonnon ilmiöt tavoitellen *ymmärtämistä*.

Fysiikan totuus on aina kokeellinen. Havainto on tiedon ylin ja ainoa auktoriteetti. Vain suureita, jotka voidaan määritellä tietyn mittaamenettelyn avulla, on lupa pitää fysikaalisina. Samoin vain sellaiset lauseet ovat fysikaalisia, jotka voidaan mittaamalla osoittaa oikeiksi tai vääriksi. Kaikki muu on metafysiikkaa.

Näin saavutettava puhdas "fysiikan todellisuus" on suunnaton luvuin ilmaistujen mitaustulosten joukko, numeroröykkiö, joka sellaisenaan on mielenkiinnoton ja käyttökelvoton. Sen sisältö jää tyhjäksi, ellemmme löydä järjestystä sen numeeriseen kaaokseen, ellemmme ymmärrä sitä. Pyrkimys ymmärtämiseen tai hahmottamiseen merkitsee aina *mallien* rakentamista. Mallit ovat perusluonteeltaan abstraktisia, metafysiisiä. Ne sisältävät käsitteitä, jotka voidaan asettaa vastaamaan havaittavia fysikaalisia suureita. Niiden toimintaa hallitsevat sopivasti valitut matemaattiset perusoletukset. Mallin ja fysikaalisten suureiden välisen vastaavuuden vuoksi nämä toiminta säännöt voidaan lausua ikäänkuin ne olisivat luonnossa vallitsevia relaatioita. Jos nämä relaatiot vastaavat koetuloksia, me koemme ymmärtävämmä tarkasteltavat ilmiöt. Vastaavuus siis konkretisoi abstraktisen mallimme ja antaa meille mielikuvan, että mallia hallitsevan matematiikan osaaminen merkitsee luontoa hallitsevien luonnonlakien tuntemista ja siten luonnon ymmärtämistä. Jokainen fysikaalinen teoria on tällainen malli.

Kokeellinen fysiikka siis edustaa pyrkimystä totuuteen, ja *teoreettinen* fysiikka tavoittelee sen ymmärtämistä. Totuus vaatii kaiken sellaisen poiskarsimista, mitä ei voida tietää eli mitä ei voida mittauksin todentaa, täydellistä *irtisanoutumista metafysiikasta*. Ymmärtäminen puolestaan merkitsee todellisuuden samastamista malliin eli *turvautumista metafysiisiin selityksiin*. Fysiikan tavoitteisiin kätkeytyy siten syvälinen ristiriita, joka aiheuttaa siinä jatkuvan sisäisen jännitystilan.

Mallin suhde todellisuuteen

Mallien asemaa tarkasteltaessa kysymys on oikeastaan teorian suhteesta kokeelliseen tutkimukseen. Tämän suhteen luonteen, määrää yllä kaavailtu ristiriitainen tehtäväjako, jonka tiedostaminen on tarpeen oppiaksemme välttämään fysiikan jommankumman puolen ylikorostusta toisen kustannuksella.

Kokeellinen puoli on tiedon lopullisena auktoriteettina luonnollisesti ensisijainen, mutta se jää vaille sisältöä, ellemmme ymmärrä sitä, eli ilman teoriaa. Emme pysty edes puhumaan luonnon ilmiöistä ilman jonkinlaista käsitteenmuodostusta, joka jo merkitsee mallinkehittelyn alkua. Emme yksinkertaisesti tule toimeen ilman malleja, johon ajatuksemme voivat samastaa luonnon. Puhuessamme paikasta, impulssista, massasta, varauksesta ym. meillä on välitön mielikuva tarkasteltavasta suureesta, emmekä mielessämme erota puhummeko mallista vai fysikaalisesta systeemistä itsestään. Ja kun puhumme fysikaalisesta systeemistä, emme niinkään ajattele tiettyjä mittaustuloksia, jotka yksin edustavat sitä puhtaimmassa fysikaalisessa mielessä, vaan joitakin objekteja, joiden olemassaolo ja ominaisuudet käsityksemme mukaan aiheuttavat nämä havainnot. Mutta ainoa mielikuva, mikä meillä voi olla näistä objekteista tai niiden muodostamasta sys-

¹ Matemaattisten Aineiden Aikakauskirja **35**, 3/1971, 128-138.

teemistä, on juuri käyttämämme malli. Tällä tavoin malli tuntuu muodostavan mittaus-tulosten takana olevan, kokeellista aidomman todellisuuden.

Teorian merkitys korostuu tällä tavoin voimakkaasti. Se tuntuu usein jopa kokeellista puolta tärkeämmältä. Niinpä kiinnitämmekin päähuomiomme fysiikan opiskelussa ja opetuksessa fysiikan teoriaan, koska "ymmärtäminen on tärkeintä". Tämä on helppo ratkaisu, koska matematiikka on aina selvää ja loogista, ja me opimme sen vuoksi hel- posti hallitsemaan mallin matemaattisen käyttäytymisen täydellisesti. Pakko verrata sitä mittauksiin tuntuu vain kiusalliselta rasitteelta, joka häiritsee teorian täydellistä selkeyt- tä ja estää meitä käyttämästä hyväksi sen tarjoamaa ehdotonta tarkkuutta. Ahkeran ope- tuksemme palkkiona onkin useimpien oppilaiden syvä vakaumus: "Fysiikka on vain epätarkkaa matematiikkaa". Kuitenkin juuri mallin ja todellisuuden välinen vastaavuus, joka on tämän "epätarkkuuden syy ja syvin olemus, on keskeisintä fysiikassa. Siihen keskittyy fysiikan vaikeus ja sen mielenkiinto. Teorian matematiikka yksinään, samoin kuin mittaus tulokset, ilman tämän vastaavuuden antamaa sisältöä, on tyhjä itseäänsel- viö.

Mallin ja todellisuuden samastus on virhe. Mutta niin kauan kuin malli vastaa ha- vaintoja, se ei häiritse. Kun havainnot yhdessäkin kohden poikkeavat mallista, tämä virhe aiheuttaa *ymmärryksen kriisin*: luonto ei toimikaan niinkuin sen pitäisi. Vasta täl- löin ajattelumme malliluonteen vaarallisuus paljastuu ja olemme pakotetut tietoisesti purkamaan samastuksen, selvittämään mallin rajoitukset ja etsimään uutta parempaa mallia.

Teorian asema todellisuuden mallina merkitsee, että on mieletöntä elättää kuvitelmaa lopullisesta oikeasta teoriasta. Malli ei koskaan ole oikea eikä väärä, vain hyvä tai hu- no. Sama ajatusvirhe kätkeytyy vaatimukseen hylätä teoria, jos jotkin havainnot poik- keavat sen mukaisista tuloksista. Päinvastoin fysikaalinen teoria on täysin valmis vasta, kun sen rajoitukset tunnetaan; vasta silloin sen käyttö sovellutuksissa on turvallisesti hallittua.

Teorian ja todellisuuden suhde on kuitenkin ongelmallisempi. Mallin käsitteeseen kätkeytyvä arvojärjestys tai alistussuhde kääntyy pääläelleen joka kerran, kun teoria ennustaa oikein. ennentuntemattoman ilmiön. Ajatelkaamme vaikkapa positronin, pio- nin, neutriinin tai Ω^- -baryonin historiaa. Onko teoria sittenkin joskus enemmän kuin pelkkä malli? Ehkä ymmärryksemme sittenkin pystyy raottamaan mitattavuuden vaati- muksen rautaesirippua ja näkemään vilahduksen puhtaana fysikaalisen todellisuuden takaisesta metafysiisistä, vaikka tämän objektiiviseen toteamiseen ei olekaan pienintä- kään mahdollisuutta.

Tällä tavoin fysiikka ja metafysiikka kietoutuvat toisiinsa erottamattomasti. Siksi fy- siikan olemukseen liittyy aina hiven mystiikkaa, johon sen viehätys suurelta osalta pe- rustuu.

Atomifysiikan ajatuskehä

Viime vuosisadanvaihteessa klassisen fysiikan käyttämien mallien rajoitukset alkoi- vat käydä ilmi atomaaristen ilmiöiden yhteydessä. Seurasi ymmärryksen kriisi. Sama kriisi toistuu aina fysiikkaa opiskeltaessa, kun Newtonin mekaniikan ja Maxwellin säh- ködynamiikan jälkeen päästään atomifysiikkaan. Sen vaikeus johtuu siitä, että klassisten teoriain kohdalla mallin ja ilmiöiden samastuminen on niin vahva. Jokaisella suureella, yhtälöllä ja laskutoimituksella on niissä - ainakin näennäisesti - fysikaalinen vastine, mikä antaa teorioille voimakkaan konkreettisen leiman: olemme koko ajan käsittele- vinämme fysikaalisia objekteja itseään ja niiden ominaisuuksia, emmekä vain niiden abstraktisia malleja. Tämä on siinä määrin tunnusomainen piirre, että se voitaisiin ottaa määritelmäksi: *klassinen = konkreettinen* fysiikka.

Konkreettisuus on luonnollinen seuraus siitä, että nämä teoriat on alunperin kehitetty

kuvaamaan makroskooppisia ilmiöitä. Siten niiden esittämät luonnon säännönmukaisuudet ovat samoja kuin ne, joille ihmisen oma aistein tapahtuva havaitseminen ja siten koko hänen luontainen käsityskykynsä perustuvat, tai ne ovat ainakin riittävän läheisiä inhimilliselle ajatusmaailmalle, jotta niitä voidaan kuvata välittömästi tajuttavilla käsitteillä.

Atomaaristen ilmiöiden maailma on hyvin kaukana konkreettisesta havaintomaailmasta, johon ymmärryksemme perustuu. Meiltä puuttuu sentähden sellaisten käsitteiden luontainen taju, joita siellä ilmenevien relaatioiden käsittely edellyttäisi. Olisi merkittävää luonnon köyhyyttä, jos makromaailman säännönmukaisuuksiin pohjautuva käsitteistö riittäisi teorian perustaksi vielä tälläkin alueella. Yritykset rakentaa konkreettiseen klassiseen käsitteistöön nojautuvia atomimalleja sisältävät loogisen virheen. Meidän selitämme makromaailman rakennetta ja ilmiöitä palauttamalla ne atomaarisiin alkeisobjekteihin ja -ilmiöihin. Jos sitten yritämme vuorostamme selittää atomimaailmaa klassisesti, me oikeastaan pyrimmekin palauttamaan sen takaisin makromaailman käsitteistöön ja syyllistymme *kehäajatteluun*.

Ainoa vaihtoehto on havaittavien säännönmukaisuuksien matemaattinen, abstraktinen kuvailu. Konkretismin aika fysiikassa on peruuttamattomasti ohi, sillä atomifyysiikan irtautuminen siitä merkitsee vain fysikaalisen teorian malliluonteen tiedostamista. Tämä kehityskulku on yhäkin keskeisimpiä ja havainnollisimpia esimerkkejä malliajattelun merkityksestä. Tarkastelemme seuraavassa eräitä sen piirteitä tältä kannalta.

Hiukkaset ja aallot

Fysiikan klassisessa ajattelussa luonnon objektit olivat kahdenlaisia: hiukkasia ja kenttiä - tai aaltoliikettä, kuten ajallisesti muuttuvaa kenttää voidaan yleisesti nimittää. Tässä siis tapahtui luonnon objektien samastaminen kahden mallin, *hiukkasen* ja *aallon* kanssa, joilla on intuitiivisesti selvä konkreettinen merkitys. Havainto, että samoilla objekteilla on sekä hiukkasille että aalloille tunnusmerkkisiä ominaisuuksia, eli dualismi, merkitsi sentähden ymmärryksen ristiriitaa.

Hiukkaset ovat *lokaalisia* ja *erillisiä* objekteja. Niiden ominaisuuksia luonnehtivat suureet, kuten massa, varaus, impulssi, energia, ovat keskittyneet yhteen pisteeseen (tai hyvin rajoitettuun alueeseen). Hiukkasen paikka kunakin hetkenä on siten täysin määrätty, ja se liikkuu pitkin tiettyä *rataa* $\mathbf{r} = \mathbf{r}(t)$. Sen käyttäytyminen hallitaan klassisen mekaniikan mukaan sen liikeyhtälöllä $\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{F}$. Jos hiukkasen paikka ja nopeus alkuhetkellä tunnetaan, tästä yhtälöstä voidaan laskea sen rata. Hiukkasten erillisuus tarkoittaa, että ne ovat yksilöitä; ne voidaan numeroida tai nimetä siten, että kutakin niistä voidaan erikseen seurata.

Aaltoliike kuuluu aina tiettyyn kenttään. Sen kuvaaminen edellyttää, että ilmaistaan, miten kenttä vaihtelee kussakin avaruuden pisteessä. Sitä edustaa siten jokin kenttäsuure (kenttävoimakkuutta tms.) esittävä funktio $A = A(\mathbf{r}, t)$. Aalto on siis *laaja-alainen*, periaatteessa kaikkialle ulottuva objekti. Kahta tai useampaa aaltoa ei voida yksilöidä, sillä ne interferoivat. Tapahtuu niiden *superpositio*: $A_1(\mathbf{r}, t) + A_2(\mathbf{r}, t) = A(\mathbf{r}, t)$; ne vahvistavat tai heikentävät toisiaan riippuen siitä ovatko ne saman- vai erisuuntaiset (-merkkiset tms.) tarkasteltavassa kohdassa tarkasteluhetkenä. Energian jakautuminen kentässä muodostuu toisenlaiseksi kuin osa-aaltojen energiajakautumat edellyttäisivät.

Juuri superpositio erottaa aaltoliikkeen ratkaisevasti hiukkasista. *Adolph Baker* kuvaa tätä sattuvasti kirjassaan *Modern physics and antiphysics* (Addison Wesley, Reading, Massachusetts, 1970). Pojat ja maitotölkit käyttäytyvät kuten hiukkaset, hän selittää. Siksi lähettäessämme kaksi poikaa ostamaan litran maitoa saamme aina tulokseksi kaksi poikaa ja kaksi litran maitotölkkiä (oletetaan ideaaliset pojat ja ideaalinen kauppa). Jos ne käyttäytyisivät aaltoliikkeen tavoin, voisikin sattua, että maitokaupasta palaa yksi jättipoika kahden litran tölkkiä kantaen tai ettemme saa yhtään mitään, miten milloin-

kin.

Valon interferenssi merkitsee ilmeistä todistetta sen aaltoluonteen puolesta. Paikallisia ja hetkellisiä prosesseina tapahtuva energian ja impulssin vaihto valon ja ainehiukkasten välillä todistaa sen hiukkasluonteen puolesta. Elektronien käyttäytyminen sähkö- ja magneettikentässä, niiden määrätty massa ja varaus sekä klassista liikeyhtälöä noudattavat radat osoittivat ne hiukkasiksi. Niiden diffraktio kiteessä on puolestaan kiistaton osoitus aaltoluonteesta.

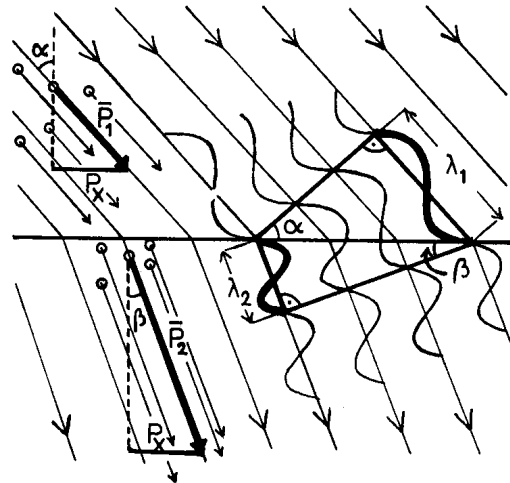
Tätä tilannetta on mahdoton ymmärtää purkamatta mallin ja objektin samastusta. On lakettava ihmettelemästä, onko valo tai elektronisuihku aaltoliikettä vai hiukkasia. On opittava kysymään, kuinka hyvin voimme kuvata sitä aaltoliikkeellä tai hiukkasilla.

De Broglien hypoteesit

Dualismi johtaa mielenkiintoiseen tilanteeseen: samaa ilmiötä kuvataan yhtäaikaan kahdella täysin erilaisella mallilla. Tästä seuraa välttämättä näiden *mallien välinen kytkentä*. De Broglien hypoteesit $p = \hbar k$, $E = \hbar \omega$ merkitsevät juuri tätä. Ne liittävät hiukasten impulssin p ja kokonaisenergian E aaltoliikkeen aaltolukuvektoriin k (aallonpituus $\lambda = 2\pi/k$ ja kulmataajuuteen ω (taajuus $f = \omega/2\pi$) Planckin vakion $h = 2\pi\hbar$ välityksellä. Aikanaan ne olivat fysiikan historiassa ainutlaatuiset yhtälöt. Ne poikkesivat kaikista aikaisemmin kirjoitetuista siinä suhteessa, etteivät ne olleet tietyn teorian sisäisiä kaavoja vaan esittivät kahden eri mallin tai teorian välistä yhteyttä. Niiden ohi on mahdotonta kulkea näkemättä teoriaa mallina.

Näiden relaatioiden merkitystä voidaan valaista tutkimalla, miten eri mallit esittävät säteilyn erilaisia havaittavia ominaisuuksia. Homogeenisen, tiettyyn suuntaan etenevän säteilyn rinnastettavina malleina tulevat kysymykseen *monoenergeettinen hiukkasuihku* ja *monokromaattinen aaltoliike*. Yksinkertaisin näiden välinen yhteys saadaan toteamalla, että säteilyn *etenemissuunta* vastaa hiukkasilla impulssin suuntaa, aaltoliikkeessä aaltolukuvektorin suuntaa. Mallien välillä vallitsee siis relaatio $p \parallel k$.

Säteilyn käyttäytymistä rajapinnassa luonnehtii *taitekerroin* $\mu = \sin \alpha / \sin \beta$, joka on säteilylle ja rajapinnalle luonteenomainen vakio. Jos säteilyä pidetään hiukkasuihkuina, ymmärretään taittumisen tapahtuvan siten, että impulssin pinnan suuntainen komponentti säilyy. Taitekerroimeksi saadaan tällöin $\mu = p_2/p_1$. Aaltoliikkeen taittumisen tarkastelu taas on alkeisoptiikasta tuttu ja antaa $\mu = \lambda_1/\lambda_2 = k_2/k_1$. Samanaikainen kuvaaminen kytkee siis mallien välille relaation $p_2/p_1 = k_2/k_1$. Koska tämän tulee olla voimassa mielivaltaiselle rajapinnalle, merkitsee tämä yleisesti, että impulssi on aaltolukuun verrannollinen eli $p = \hbar k$.



Hiukkasmallissa energia etenee hiukasten mukana. *Säteilyenergian etenemisnopeutta* vastaa siis hiukasten nopeus p/m . Aaltomallissa taas energia etenee ryhmänopeudella $d\omega/dk$. Jos äskeinen impulssin ja aaltoluvun välinen yhteys otetaan huomioon, tämä voidaan käsitellä funktion $\omega(p)$ differentiaaliyhtälöksi. Epärelativistisessa tarkastelussa m on vakio, ja saadaan välittömästi $H\omega = p^2/2m + C$, missä C on integroimisvakio. Vakion C valintaa voidaan perustella toteamalla, että "ei mitään" merkitsee hiukaskuvassa $E = 0$ ja aaltokuvassa $\omega = 0$. Näin tämä relaatio saadaan muotoon $E = H\omega$, missä E on hiukasten kokonaisenergia. Sama tulos saadaan myös, jos käytetään massalle sen relativistista lauseketta impulssin funktiona.

Saadut relaatiot ovat samat kuin De Broglien kaksi ehtoa paitsi; ettei "mallienkytkentävaktion" H arvoa voida päätellä muuten kuin mittamalla. Samanaikaisen kuvaamisen aiheuttama kytkentä edellyttää enintään, että se on säteilylajille luonteenomainen. De Broglien osaksi jää siten oletus, että tämä vakio on objektista riippumaton yleinen luonnonvakio $H = \hbar$.

Heisenbergin epätarkkuusperiaate

Lokaaliset kvantit, joita havaitaan kaikessa atomaarisessa säteilyssä, ovat - ainakin näennäisesti - hiukkasmallia suosiva ilmiö. Tietyllä hetkellä tietyssä paikassa todettu kvantti, jonka impulssi ja energiakin voidaan määrittää havaintojen perusteella, on luontevaa tulkita hiukkaseksi.

Myös aaltoliike voi kuitenkin muodostaa suppean *aaltopaketin*, jonka voidaan ajatella esittävän säteilykvanttia. Tällöin aaltoliike ei enää ole monokromaattinen, vaan se muodostuu eri aaltolukujen k ja kulmataajuuksien ω jakautumasta, jonka muoto voidaan laskea aaltopaketin muodosta Fourierin integraaliteoreeman avulla. Tästä teoreemasta seuraa myös, että paketin paikallisuus ja hetkellisyys eli sen r - ja t -jakautumien leveydet kytkeytyvät k - ja ω - jakautumien leveyksiin siten, että niiden hajonnat toteuttavat epätarkkuusrelaatiot $\Delta r \Delta p \geq 3/2$; $\Delta t \Delta \omega \geq 1/2$. Kvantin paikka ja aaltoluku, samoin kuin sen esiintymishetki ja kulmataajuus, eivät siten voi olla yhtäikaa mielivaltaisen terävät.

Toisaalta hiukkasen paikan ja impulssin, sekä sen kokonaisenergian ja elinajan, samanaikainen tarkka määrittäminen ei myöskään ole mahdollista, koska toisen mittaaminen häiritsee toista (sen lisäksi, että jokainen mittaaminen sisältää tietyn epätarkkuuden). Monet ajatuskokeet antavat näiden mittausten periaatteelliseksi äärimmäisrajaksi Heisenbergin epätarkkuusperiaatteen $\Delta r \Delta p \geq 3\hbar/2$; $\Delta t \Delta \omega \geq \hbar/2$.

Jos otamme huomioon De Broglien ehdot, aalto- ja hiukkasmalleihin säteilykvantin kuvaamisen yhteydessä liittyvät epätarkkuusperiaatteet ovat ekvivalentit. Niiden sisältö vain on hiukan erilainen. Edellinen merkitsee, että objektin paikalla ja impulssilla on tietyt jakautumat, ts. ne ovat olemukseltaan epätarkat. Jälkimmäiseen liittyy mielikuva, jonka mukaan paikka ja impulssi ovat luonteeltaan tarkat, mutta niiden määrittäminen on epätarkka. Näiden malleja luonnehtivien toteamusten välistä eroa ei kuitenkaan ole mahdollista todeta mittauksin. Ne ovat siis metafysisiä lausemia. Siispä esim. paikan ja impulssin arvojen tarkkuus on klassisen hiukkasmallin metafyyssinen piirre, josta hyvin voidaan luopua, jos paremman mallin muodostaminen sitä edellyttää. Säteilykvanttia koskevien mittausten kannalta aalto ja hiukkanen ovat ilmeisestikin yhtä hyviä malleja.

Dualistinen malli

De Broglien ehdot merkitsevät suureiden p ja k sekä suureiden E ja ω varsin syvällistä samastettavuutta. Esitetyn tarkastelun perusteella nämä ovat fysikaalisessa mielessä, ts. säteilyn mitattavien ominaisuuksien kannalta ekvivalentteja suureita. Jos haluamme rakentaa dualistisen teorian, joka selittää sekä aalto- että hiukkasominaisuudet, on siihen sisällytettävä tämä samastus niin, että on yhdentekevää puhutaanko sen puitteissa impulssista vai aaltoluvusta, energiasta vai kulmataajuudesta. Pelkästään tältä pohjalta edeten voidaan nykyaikaisen kvanttimekaniikan aaltofunktioesitys johtaa hämmästyttävän pitkälle.

Mallit ovat kuitenkin toisensa poissulkevia, joten ennenkuin ne voidaan yhdistää mielekkääksi kokonaisuudeksi on kummastakin tingittävä. Äskeiset tarkastelut koskivat ilmiöitä, jotka kumpikin malli selittää, eivätkä niiden rajoitukset tietenkään tulleet ilmi. Dualismin luonteen selvittämiseksi on tarkasteltava ilmiöitä, joita kumpikaan malli ei selitä.

Kaikilla atomaarisen säteilyn lajeilla voidaan interferenssikoe järjestää siten, että havaitaan sopivan hilan kautta kulkeneen säteilyn kvanttien osumat varjostimella. *Osumakohtien* jakautuma muodostaa tällöin *interferenssikuvion*. Sekä valolla että elektroneilla tämä on onnistuttu suorittamaan siten, että voidaan sanoa todellakin vain yhden kvantin kerrallaan kulkeneen hilan läpi. Tässä tilanteessa esiintyy kummankin mallin olennaisia piirteitä samanaikaisesti. Interferenssikuvio on aaltoluonteen tunnus, mutta aaltoobjektit levittäytyisivät varjostimelle kukin samanlaisena interferenssikuvion muotoisena rintamana eivätkä yksityisinä paikallisina ja hetkellisinä osumina. Hiukkasobjektit taas kulkisivat kukin omaa muista riippumatonta rataansa hilan läpi. Ne eivät voisi ryhmittyä interferenssikuvioksi, koska se merkitsee, että jokainen objekti noudattaa koko hilasta riippuvaa tilastollista käyttäytymistä; jokaisen hiukkasen pitäisi sitä varten "tuntea" koko hila, kaikki tiet sen läpi.

Säteily ei siis muodostu aalto-objekteista, mutta siihen liittyy yksityisten kvanttien *esiintymistodennäköisyyttä* vallitseva aaltoluonne. Yhdestä hiukkasesta puhuttaessa tätä aaltoa ei ole mitenkään mahdollista havaita. Se on siis luonteeltaan täysin abstraktinen, metafyyssinen ilman suoraa konkreettista vastinetta. Fysikaalisessa mielessä sitä ei ole. Kuitenkin se on dualistiselle mallille täysin välttämätön. Ei myöskään voida ajatella, että säteilyn kvantit olisivat hiukkasobjekteja, joilla vain on tietty todennäköinen käyttäytyminen, sillä tämä puhetapa ilmaisee kuitenkin tietyn, vaikkakin todennäköisyyslakien mukaan määräytyvän radan olemassaolon. Interferenssikoe kieltää objekteilta hiukkasten ajallisesti säilyvän yksilöllisyyden, ja radan käsitekin on tällöin mahdoton. Vaikka systeemiimme kuuluisi vain yksi elektroni, ei olisi fysikaalisessa mielessä oikeutettua väittää, että se on koko ajan sama elektroni.

Realistisemman mallin hintana olemme saaneet maksaa sen abstrahoitumisen. Pyrkimässämme kohti todenmukaisempaa kuvausta olemme olleet pakotetut ottamaan käyttäntöön uusia, yhä selvemmin metafyyssisiä käsitteitä. Samalla on tullut yhä vaikeammaksi pysyä uskollisena fysikaalisen totuuden määritelmälle, toistettavalle mittaukselle. Mallin kytkeminen mitattavaan todellisuuteen vaatisi meitä nyt käsittelemään fysikaalisina suureina todennäköisyyksiä, joiden yksikin mittaus jo edellyttäisi äärettömän monen samanlaisen kokeen suorittamista. Tuntuu kuin kietoutuisimme yhä pahemmin fyysikalle annetun tehtävän sisäisten ristiriitojen verkkoon, ja kuitenkin kiistämättömästi tämä samalla merkitsee sekä tiedon että ymmärryksen lisääntymistä.