

# Kvanttifysiikan todellisuuskäsite

Stig Stenholm

Kvanttifysiikka on menestyksellisin teorianme luonnosta. Se määrää elektronien kulun kännyköissämme ja maailmankaikkeuden alkuhetkien olosuhteet. Se antaa yksikäsitteisiä reseptejä miten koetulokset laboratoriossa voidaan ennustaa ja tulkita. Mitään ristiriitaa kokeellisen tiedon kanssa ei tunneta. Työkaluna se toimii, ja sen soveltamista ymmärretään. Kuitenkin sen tulkinnasta ei ole saatu mitään yleistä sopua. Sen käsitteistö on niin kaukana jokapäiväisestä kokemusmaailmastamme, että teoriaa ei voida sovittaa siihen. Kvanttifysiikan tarjoamassa maailmassa ihminen ei voi elää. Ja sittenkin se jollain käsittämättömällä tavalla kuvaa todellisuuden aitoja piirteitä.

Käytännön kysymyksissä toimiva fyysikko voi hyvin perusteluin sanoa, että kvanttifysiikka koneistona on täysin riittävä. Mitään lisää ymmärtämistä ei tarvita. Näin olen tietenkin itsekin useimmiten toiminut, mutta mielestäni kuitenkin kannattaa yrittää tehdä selkeäksi mikä on teorian tarjoama todellisuuskuva. Tämä kirjoitukseni on yritys koota kvanttifysiikan todellisuutta kuvaavat piirteet. Tämä on pakosta suoritettava vain pinnallisen tarkastelun perusteella. Täydellinen analyysi olisi kovinkin muodollinen ja muuten aivan ylivoimainen. Tuon esille vain yksinkertaistetun version kvanttifysiikasta, mutta sekin saattaa selvittää minkälainen ongelma on.

Vastauksia ei tietenkään saavuteta, mutta kuten usein, pyrkimys on itsessään arvokas, vaikka sen päämäärä on saavuttamaton.

## Realismin todellisuus

Realistinen maailmankuvaus sisältää kaksi keskeistä kysymystä:

- Mitkä oliot ovat todellisuudessa olemassa?
- Mitkä ovat näiden ominaisuudet tai mitä ne tekevät?

Maailman oliot joko tekevät jotain (Pekka juoksee) tai omistavat jonkin attribuutin (Pallo on punainen). Maailman kuvaus on täydellinen, jos voidaan luetella ne olosuhteet jotka toisistaan riippumatta voivat olla tosiväitteiden kohteina, ja jotka yhteensä luettelevat kaikki oleelliset tosiväitteet. Tämä on klassisen fysiikan kuvaama maailma, joka pitkälti yhtyy intuitiiviseen ympäristökuvaamme.

Jos muutamme jonkin väitteen sen vastaväitteeksi, saamme toisen mahdollisen maailman. Kaikkien näin muutettujen maailmojen joukko on filosofien *mahdollisten maailmojen* joukko. Jos tutkija on puhdasoppisesti empiristinen, hän voi kokeellisesti päättää mikä näistä maailmoista yhtyy siihen missä me elämme.

Fysiikan historiassa näin esitettyjen olioiden etäisvaikutus muodostui ongelmaksi; miten gravitaatio voi vaikuttaa tyhjiön läpi kappaleiden välillä? Samoin sähköisten varausten välilliset voimat näennäisesti edellyttäisivät vaikutusta kantavaa väliainetta, niin sanottua eetteriä. Tämä ongelma ratkaistiin siten, että tyhjiön välittämälle kentälle myönnettiin tosiolevan asema, joten sekin ilmeni teoriaan olemassa olevana oliona.

Klassisen fysiikan maailma oli näin saatu järjestykseen: se oli ymmärrettävissä sellaisen kaavion puitteissa, missä elementit sopivat ihmisen intuitiiviseen havaintomaailmaan.

Moderni fysiikka muutti tämän kuvan oleellisella tavalla. Suhteellisuusteoria antoi ensimmäisen viittauksen siitä että kuvauksen puitteet oli muutettava. Kvanttifysiikka aiheutti lopullisesti klassisen maailmankuvan turmion.

## Kvanttifysiikan käsitteistö

Kvanttimekaniikan menestys luonnonkuvauksen perusteena toi mukaansa ei vain uuden ajattelutavan vaan myös kokonaisen uuden kielenkäytön. Sen kuvaama peruselementti ei ole olio vaan systeemi. Jos halutaan, voidaan ehkä sanoa että kvanttifysiikan peruselementit ovat energian

kantajia tai ehkä mieluummin energian ilmene-  
mismuotoja. Ne koostuvat tyhjiön eksitaatioista,  
ja energiamuodot sisältävät kentät, alkeishiuk-  
kaset ja myöskin näiden yhdistelmät. Kvantti-  
mekaniikassa esiintyy klassisista poikkeavia  
korrelaatioita, joten kvanttisysteemi koostuu  
kokonaisuuksista jotka selvästi ovat enemmän  
kuin niiden osajärjestelmien yhdistelmä. Tämä on  
kvanttimekaniikan kuuluisa *lomittuminen*.

Esimerkkinä mainitsen, että teoreettisen ku-  
vauksen mukaan eri energiatilassa oleva vety-  
atomi on eri massatilassa ja näin ollen sen kulku  
gravitaatiokentässä on erilainen.

Energia on siis tavallaan korvannut skolastik-  
kojen *substanssikäsitteen*, mistä kaikki koostuu.

Kaikki mahdollinen tieto kvanttisysteemistä  
perustuu abstraktiseen elementtiin, niin sanot-  
tuun tilavektoriin. Tämän oleelliset ominaisuu-  
det sisältyvät väitteisiin:

- Tilavektori on lineaarisen moniston elementti.  
Näin ollen, jos systeemi voi olla kahdessa eri  
fysikaalisessa tilassa, se voi olla niiden yhdis-  
telmässäkin (*superpositio*). Näennäisesti klassi-  
sen fysiikan mukaan tulkittuna, systeemi voi  
tehdä kahta mahdollista asiaa yhtäaikaan. Tähän  
perustuu kvantti-ilmiöiden käyttö kvanttiti-  
tokoneissa.
- Toisaalta, kvanttitiila määrää vain eri mittaus-  
tulosten todennäköisyyksiä; mikä tulos rek-  
isteröidään havaintona on aidosti sattuman  
sanelema. Teoria on perusteeltaan stokastinen  
ja vailla täydellistä determinismää. Teoria sallii  
lisäksi yhteen sovittamattomia havaintoja, jo-  
ten havainnoissa aktualisoidut todennäköisyys-  
jakaumat riippuvat myös siitä mitkä mittaukset  
päätetään suorittaa. Esimerkkinä tarjoan spinin  
eri komponenttien määräämisen.

Kvanttitiila sisältää siis monen eri mittauksen po-  
tentialisia tuloksia. Kun havaitsija on päättänyt,  
minkä mittauksen hän suorittaa, tila antaa jokai-  
sen valitun vaihtoehdon statistiset jakaumat.  
Tämä voidaan kuitenkin verifioida vain jos on  
käytettävissä riittävän suuri joukko samassa ti-  
lassa olevia systeemejä. Voidaan sanoa että teo-  
ria määrää vain rekisteröityjen mittaustulosten  
numeerisia taulukkoja. Missä on sellaisessa ti-  
lanteessa todellisuus?

### *Kvanttifysiikan tulkinta*

Koska kvanttiteorian ennusteet ovat verifioita-  
vissa vain jos suoritetaan joukko mittauksia, voi-

taisiin ajatella että teoria kuvaa tällaisen joukon  
(*ensemblen*) ominaisuuksia. Näin ei kuitenkaan voi  
olla. Tiedämme, että tunnetussa kaksirakokokees-  
sa havaittujen pisteiden muodostama kuvio seura-  
aa teorian ennustamaa todennäköisyysjakaumaa  
silloinkin, kun tarkasteltujen olioiden virtaus on  
niin harva, että laitteessa ei voi olla kun yksi olio  
kerrallaan. Jollakin tavalla jokainen kokeeseen  
osallistuva yksilö on tietoinen sen kvanttitiilan  
määräämistä todennäköisyysjakaumasta. Tila-  
vektori liittyy siis läheisesti yksittäiseen systeemiin,  
vaikka sitä ei voi sen avulla määrätä.

Mutta mistä tilavektori oikeastaan tulee?  
Teoria opettaa, että se määräytyy systeemin val-  
mistelussa (*preparaatio*). Kun tutkittava systeemi  
tuodaan koetilanteeseen, se ohjataan tilaan,  
joka on täysin preparaivan laitteen määräämä.  
Kun laite on tunnettu, jokainen potentiaalinen  
havaitsija voi tehdä kaikki kvanttiteorian sallimat  
ennusteet tilavektorin perusteella. Eri mit-  
tausjärjestelyihin liittyvien havaintojen jakaumia  
on ennustettavissa. Mittaus itse vaikuttaa tilaan  
sitte, että yleensä alkuperäisen tilan kantama tie-  
to on häipynyt tai vääristynyt. Preparaatio luo  
tilan tulevaisuuteen mutta mittaus kohdistuu  
menneisyyteen.

Mutta miten tällainen formalismi voi olla ob-  
jekttiivinen todellisuuden kuvaus? Vastaus on,  
että jokainen havaitsija, jolla on maksimaali-  
nen tieto systeemin historiasta, osoittaa sille sam-  
an kvanttitiilan. Se on siis muisti fysikaalisesta  
preparoinnista. Tämä vuorostaan on kuvattava  
klassisen fysiikan keinoin niin kuin myöskin  
mittajärjestely. Sellainen on Niels Bohrin esittä-  
mä kuvaus kvanttifysiikan tulkinnasta: Jokainen  
kvantti-ilmiö on loppuun viety kokonaisuus. Jos  
jokin osa-elementti muutetaan tässä kuvaukses-  
sa, puhutaan eri fysikaalisesta ilmiöstä. Ja teorian  
ainoa tarkoitus on kuvata luonnon ilmiöitä, ei  
kertoa mitään luonnon todellisesta olemukses-  
ta. Sitä ei ole sinänsä olemassa, on vain me ja  
koetoimintamme. Erityisesti teoria ei tarjoa täy-  
dellistä klassisen fysiikan oletamaa maailman-  
kuvausta.

### *Kvanttifysiikan todellisuus*

Kvanttiteorian todellisuuskuvauksesta saatetaan  
tehdä kaksi perusteetonta johtopäätöstä:

- Voidaan olettaa, että todellisuus on olemassa  
vain havaitsijan mielessä. Hänen tietonsa il-  
miöstä määrää, miten mittaustulokset tulevat  
ilmenemään – ja siten ihmisistä riippumatonta

todellisuutta ei ole olemassa. Tällainen täysin idealistinen ajatustapa on esiintynyt filosofian historiassa. Se on myöskin muodostanut osan sekä von Neumannin että Wignerin ajamassa tulkinnassa. Se on läheistä sukua filosofian *solipsismin* kanssa. Tämä olettaa että vain Minä olen olemassa, ja kaikki havaittava on minun mielikuvitukseni vain (unelmani?). Ajatusta ei tietenkään voi todistaa vääräksi, mutta se ei vaikuta järkevästi hyväksyttävältä.

- Voidaan olettaa, että kvanttifysiikan tarjoama epämääräinen maailmankuva johtuu ainoastaan ihmiskunnan puutteellisesta ymmärtämiskyvystä. Todellisuus on olemassa, sen takaa Absoluuttinen olento, useimmiten Jumalaksi kutsuttu. Hänen tietoisuutensa kuuluu maailman yksikäsitteinen kuva, josta me emme voi saada täydellistä tietoa. Tämän ratkaisun esitti jo piispa Berkeley, ja se on uskonnollisissa puutteissaan täysin looginen vastaus todellisuuden ongelmaan. Tavallaan se on historian paras esimerkki tyydyttävästä filosofisen ongelman ratkaisusta. Kvanttifysiikan monen maailman tulkinta tulee ymmärrettäväksi vain senkaltaisen olettamuksen puutteissa. Ratkaisu ei kuitenkaan tyydytä modernin tieteen harjoittajia.

Mikä on sitten se todellisuuskuva, joka ilmenee kvanttifysiikan formalismista? Fyysikkona täytyy olettaa, että on olemassa jossain mielessä meistä riippumaton todellisuus. Miten voisimme muuten ymmärtää, että joskus parhaiten tietojemme mukaan tehty johtopäätös on virheellinen? Minkä kanssa teoriamme ennustama tulos on ristiriidassa? Kokeellinen tutkimus antaa aitoa tietoa olemassa olevasta.

Mutta tätä olemassa olevaa ei voida klassisen fysiikan puutteissa kuvata. Se ei koostu esineistä ja niiden relaatioista. Sen takia sanotaan usein että kvanttifysiikka on ei-realistinen teoria. Mutta tämä väite perustuu klassisen fysiikan käsitteisiin, ja mikä velvollisuus on todellisuudella tyydyttää meidän klassisen fysiikkamme asettamia vaatimuksia? Jos todellisuus on olemassa, se on sellainen kuin se on, ja me saamme tyytyä siihen, että kuvaamme sitä parhaalla käytettävissämme olevalla teorialla. Tällä hetkellä se on kvanttiteoria.

Kvanttiteorian tutkimuksen kohteet ovat energian esiintymismuotoja: valo, alkeishiukkaset ja kvanttikentät. Nämä kuvaavat todellisuuden aitoja piirteitä. Hiukkasilla on määrättyjä attribuutteja: massa, varaus, spin jne. Nämä esiintyvät määrättyinä numeerisina suureina, joten

ne perustuvat luonnon todellisiin mahdollisuuksiin. Mahdolliset fysikaaliset systeemit määräytyvät näistä, ja niiden muodostamat mahdolliset kokonaisuudet määräytyvät olioiden vuorovaikutuksista. Tämä ratkaisee mikä voi olla olemassa maailmassa.

Näiden systeemien ainoa tutkijoiden käytettävissä oleva attribuutti on niiden kvanttitila. Se muokataan systeemiin preparoinnissa, ja se määrää kausaalisesti mitä tietoa voimme saada systeemistä. *Mahdolliset energian ilmenemismuodot ovat todellisuuskuvauksemme perusolioita ja tilavektori on niiden muutettavissa oleva attribuutti.* Näin tulkittuna kvanttifysiikan tarjoama maailma on muodoltaan samanlainen kun klassisen fysiikan puutteelliseksi todettu kuva. Se on tulkittava realistiseksi, mutta tämän seurauksena on että tilavektorikin on aito *todellisuuden elementti.* Tässä mielipiteeni poikkeaa monen tunnetun kvanttifysiikan esittäjästä väitteistä.

Onko tällainen näkemys todellisuudesta mahdollinen maailma?

- Loogisesti se on tietenkin sellainen; mitään loogista ristiriitaa siinä ei ole.
- Kuitenkaan se ei salli kaikkien mahdollisten maailmojen keräämistä joukoksi. Sitä ei voida kuvata täydellisellä riippumattomien väitteiden joukolla. Kvanttikorrelaatiot eivät salli sitä. Mahdollisten havaintojen yhteensovittamattomuus estää sen.

Klassisen fysiikan tarjoama varma todellisuus ei ole uuden ajan ihmiselle mahdollinen näkemys. Kvanttifysiikka tarjoaa meille vain hyvän työkalun siirtää piirteitä todellisuudesta ihmiskunnan tietoon. Jos sen tiedollemme asettamat rajoitukset ovat lopullisia, vain tulevaisuus tulee osoittamaan sen.

Miksi näin on, emme tiedä. Mutta toisaalta, jos klassinen maailmankuvaus olisi osoittautunut päteväksi, emme sittenkään olisi tienneet, miksi näin on. Tiede ei vastaa kysymykseen "miksi".

Ja sitten kaiken jälkeen jää kysymys, mikä on tämä ihmiskunta ja sen niin kutsuttu tieto?

*Maan kuilut kuljin, piirit auringon,  
näin Saturnuksen ylhän kuitamon,  
ja moni pulma ratkes sillä tiellä ...  
ei pulmain pulma ihmiskohtalon.*

Omar Khaijam (k. 1123)

*Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan professori emeritus Kungliga tekniska högskolanissa Tukholmassa. Kirjoitus perustuu esitelmään Tieteen päivillä 10.1.2007.*