

# Kvantmehaanika interpretatsioonid

PIRET KUUSK JA VEIKO PALGE

**Mis on kvantmehaanika interpretatsioonid? Ja miks on üht füüsikateooriat, mida peetakse 20. sajandi üheks kõige edukamaks teooriaks, üldse vaja interpreteerida? Edukad füüsikateooriad on ju tavaliselt edukad ka sellepärast, et nad annavad hea seletuse seni mõistatuslikuna näiva fenomenoloogia kohta; et nad korrastavad meie kontseptuaalse aparaadi ja loovad selguse sinna, kus varem oli segadus, sinna, kus varem ei nähtud korrapära. Kindlasti on üks hea seletuse tunnus asjaolu, et me saame temast aru. Ometigi on kvantmehaanikaga kummalisemad lood. Järgnevas anname ülevaate kvantmehaanika eri interpretatsioonide tekke põhjustest; samuti esitame lühiülevaate nendest interpretatsioonidest.**



WELLCOME COLLECTION

Materiailainete esitaja  
Louis de Broglie

## 1. Mõõtmisprobleem

Mis on kvantmehaanika? Kõige lihtsamalt öeldes on kvantmehaanika teooria, mis kirjeldab mikromaailma, seda, mismoodi käituvad elementaarosakesed ja nende kogumid, aatomid, molekulid; kuidas käituvad need objektid väga suurte kogumitena, nt tahkistena; kuidas käitub kiirgus, valgus; kuidas nn materia ja kiirgus interakteeruvad.

Kvantmehaanika esitatakse sageli postulaatidena. Esimene neist ütleb, et süsteemi seisund on antud normeeritud vektoriga Hilberti ruumis. Näiteks, kui tegu on kahetasemelise süsteemiga, siis

seada kirjeldab vektor, mille komponentideks on kaks kompleksarvu. Tähistame selle vektori  $|\psi\rangle$ -ga, see on kvantmehaanikas laialdaselt kasutatav nn Diraci *bra-ket*-sümbolism.

Füüsika kirjeldab objektide liikumist ehk seisundi muutumist ajas. Kvantmehaanika teine postulaat ütlebki, et süsteemi ajaline areng on määratud Schrödingeri võrrandiga

$$i \frac{d|\psi(t)\rangle}{dt} = H|\psi(t)\rangle,$$

kus  $H$  on süsteemi energia operaator ehk hamiltoniaan. Võrrandi formaalne

lahend on määratud unitaarse operaatoriga  $U = e^{-iHt}$  ehk teisisõnu, kui süsteemi seisund alghetkel on  $|\psi_0\rangle$ , siis ajahetkel  $t$  on seisund  $|\psi(t)\rangle = e^{-iHt}|\psi_0\rangle = U|\psi_0\rangle$ .

Enne kui läheme kolmanda postulaadi juurde, uurime ühte iseäralikku probleemi, mis tekib kahe esimese postulaadiga. Oletame, et meil on kvantosake seisundis  $|a_1\rangle$ , mis vastab mingi vaadeldava  $A$  omaväärtusele  $a_1$ , ja me teeme süsteemis mõõtmise.

Enne mõõtmist on mõõteseade algseisundis  $|M_0\rangle$  ning pärast mõõtmist peab ta olema seisundis, mis vastab mõõdetava vaadeldava  $A$  väärtusele  $a_1$ , tähistame selle seisundi vektoriga  $|M_1\rangle$ . Kokkuvõttes saame mõõtmisprotseduuri kujutada järgmise skeemiga:

$$|M_0\rangle |a_1\rangle \rightarrow |M_1\rangle |a_1\rangle,$$

kus tähistust  $|M_0\rangle |a_1\rangle$  võib lugeda „aparaat on seisundis  $|M_0\rangle$  ja kvantosake on seisundis  $|a_1\rangle$ “. Vasakul on kogusüsteemi algseisund, nool kujutab mõõtmise protsessi ning paremal on kogusüsteemi lõppseisund. Täpselt samamoodi saame mõõta osakest, mis on alghetkel seisundis  $|a_2\rangle$ , seda kirjeldab protsess

$$|M_0\rangle |a_2\rangle \rightarrow |M_2\rangle |a_2\rangle.$$

Kuid nüüd tekib meil järgmine probleem. Kvantmehaanika teine postulaat ütleb, et süsteemi ajaline areng – siin mõõtmise protsess – on antud mingi unitaarse operaatoriga  $U$ , ja see on lineaarne operaator. See tähendab, et kui meil on tegu seisundite summaga  $c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ , siis operaator  $U$  mõjub järgmiselt:

$$U(c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle) = c_1U|\psi_1\rangle + c_2U|\psi_2\rangle.$$

Kui me nüüd oletame, et enne mõõtmist oli kvantsüsteemi seisund antud kahe ülalmainitud seisundi summaga, siis saame järgmise mõõtmisprotsessi:

$$|M_0\rangle(c_1|a_1\rangle + c_2|a_2\rangle) \rightarrow c_1|M_1\rangle|a_1\rangle + c_2|M_2\rangle|a_2\rangle.$$

Kuidas peaks nüüd aru saama lõppseisundist? Kas aparatuur näitab tulemust  $a_1$ ? Ei, sest siis peaks ta olema seisundis  $|M_1\rangle$ . Kas ta näitab tulemust  $a_2$ ? Samuti mitte, sest siis peaks ta olema seisundis  $|M_2\rangle$ . Kvantmehaanika keskse postulaadi, Schrödingeri võrrandi järgi saame mõõtmise tulemusena seisundite  $|M_1\rangle|a_1\rangle$  ja  $|M_2\rangle|a_2\rangle$  nn superpositsiooni. Oluline on siin tähele panna, et mõlemad seisundid esindavad teineteist loogiliselt välistavaid situatsioone. Tegelikuses näeme mõõtmise lõpus aparatuuri näitamas kas ühte mõõtetulemust või teist mõõtetulemust, aga mitte mõlemat korraga. Ja ometigi ütlevad kvantmehaanika midagi muud.

Kuidas seda olukorda lahendada? Ilmselt tuleb meil ülaltoodud kvantmehaanika postulaatidele midagi juurde lisada, et teooria tegelikusega kooskõlla viia. See lisandus, mis teeb kvantmehaanika kogemusega kooskõlaliseks, ongi kvantmehaanika interpretatsioon. Kontseptuaalselt võib kvantmehaanika interpretatsioon vaadata kui püüdeid lahendada mõõtmisprobleem. Kvantmehaanika nüüd peaaegu saja-aastase ajaloo vältel on neid esitatud mitu, siin teeme ülevaate kolmest peamisest interpretatsioonist.

## 2. Mõõtmise postulaat ja kvantoleku kollaps

Tähelepanelik lugeja märkas, et meie tähtsime kvantmehaanika teooria tutvustamise katki ega esitanudki kolmandat postulaati. Seda sellepärast, et kolmas postulaat – mõõtmise postulaat –, mis standardselt kvantmehaanika teooria esituses antakse, kuulub meie nomenklatuuri järgi kvantmehaanika *kollapsi* interpretatsiooni, olguigi et see on füüsikute igapäevatööriist.

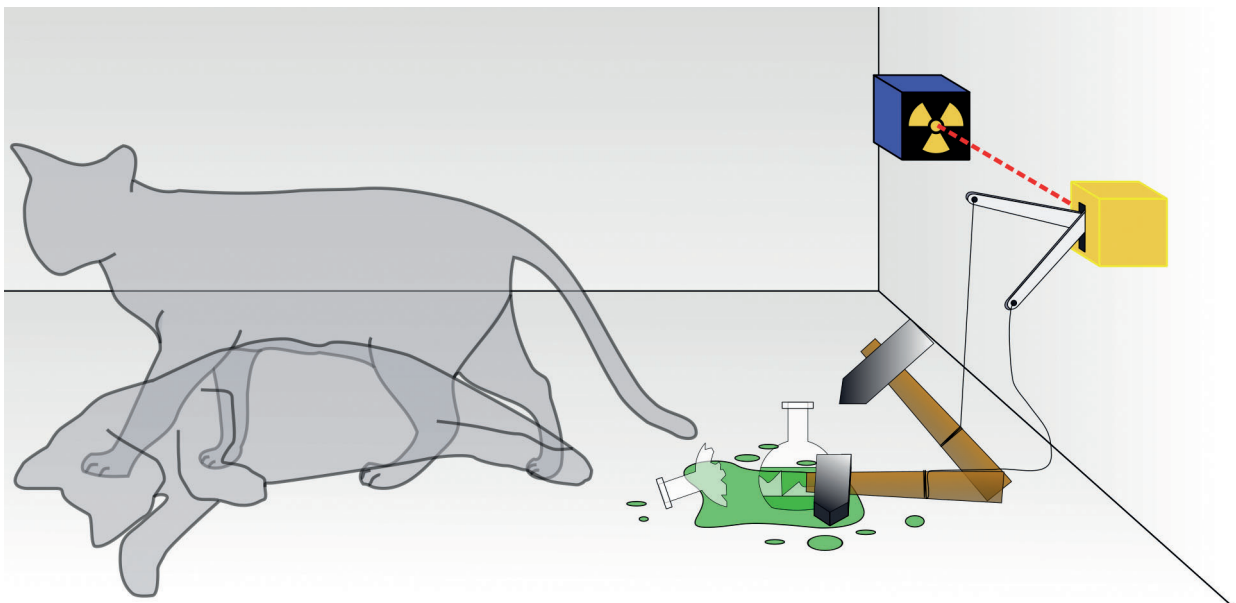
Mõõtmise postulaat väidab, et kui kvantsüsteem on olekus  $|\psi\rangle$  ja mõõdetakse omadust  $A$ , siis on tulemuseks ainult operaatori  $A$  mingi omaväärtus  $a_i$  ning kvantsüsteem on sellele omaväärtusele vastavas omaolekus  $|a_i\rangle$ . Seega, ülaltoodud mõõtmisprotsessi näites saame tulemuseks kas  $|M_1\rangle|a_1\rangle$  või  $|M_2\rangle|a_2\rangle$ , just nii, nagu eksperiment näitab. Mõõtmispostulaat ütlevad veel, et kui teha seisundiga  $|\psi\rangle$  suur hulk mõõtmisi, siis omaväärtus  $a_i$  esineb tõenäosusega  $|c_i|^2$ , kus kompleksarv  $c_i$  on korraga oleku  $|\psi\rangle$  esituses operaatori  $A$  baasis. Seda eeskirja nimetatakse ka Borni reeglaks.

Kuigi mõõtmisprotsessi kirjeldus on üsna matemaatiline, on selle tuum lihtne: kui enne mõõtmist on kvantsüsteem olekus  $|\psi\rangle$ , siis pärast mõõtmist on see olekus  $|a_i\rangle$ . Olek ei muutu ajas Schrödingeri võrrandi kohaselt pidevalt, vaid järsu, diskreetse hüppena ühte omaolekusse. Seda nimetatakse oleku kollapsiks: algolekut kirjeldavast lineaarkombinatsioonist on säilinud ainult üks sei-

sund, nimelt see, millele vastavat omaväärtust näitas mõõteaparatuur. Sel viisil on kollaps mõõtmisprobleemi lahendus: pärast mõõtmist ei kirjelda kvantsüsteemi enam meile üsna arusaamatu olekute superpositsioon, vaid üks kindel olek, mille saab määrata mõõtmistulemusest. Näiteks kui Schrödingeri kuuks elusa ja surnud oleku superpositsioonis, siis kasti sisse piilumine on mõõtmine, mis mitte ainult ei anna meile teada, kas kass on elus või surnud, vaid kassi olek kollapseerub ühte neist kahest olekust, selle põhjal, mida me näeme.

Kuid selline kahetine arusaam kvantobjekti ajalisest arengust ei ole algusest peale tundunud rahuldav ja ikka on otsitud võimalust, kuidas kaks arenguviisi ühendada üheksainsaks protsessiks. Näiteks on täiendatud Schrödingeri võrrandit nii, et lahend võiks kirjeldada kvantoleku juhuslikult toimuvat spontaanet kollapsit. Kuid sel juhul ei oleks kvantsüsteemi ajaline areng enam unitaarne ja see tekitab uusi probleeme. On vaadatud ka võimalusi, et kollapsi

**Lisandus, mis teeb kvantmehaanika kogemusega kooskõlaliseks, ongi kvantmehaanika interpretatsioon. Kontseptuaalselt võib kvantmehaanika interpretatsioone vaadata kui püüdeid lahendada mõõtmisprobleem.**



Schrödingeri kass elusa ja surnud oleku superpositsioonis

võivad esile kutsuda mitmesugused gravitatsiooniga seotud nähtused. Siin on takistuseks asjaolu, et kollaps kuulub kvantteooria valdkonda, aga praegu teada olevad gravitatsiooniteooriad on klassikalised ja seni ei ole veel õnnestunud gravitatsiooni kvantiseerida. Seega sisaldaks kollapsi seletamine gravitatsiooni kaudu taas kahetist arusaama.

Kollapsit on püütud seletada veel paljudel muudel viisidel, kuid ükski neist pole olnud ei probleemitu ega ka mitte üldtunnustatud. Ent kvantmehaanikal on ka teisi tõlgendusi, kus kollaps üldse puudub.

### 3. Mitme maailma interpretatsioon

Princetoni ülikooli doktorant Hugh Everett ja tema juhendaja John Archibald Wheeler esitasid 1957. aastal kvantmehaanika kohta uue arusaama, milles pole tarvis kvantoleku kollapsit. Nad tõlgendasid kvantmehaanika valemid täiesti realistlikult: kõik olekud kvantmehaanilises summas (superpositsioonis) on tegelikult olemas ja mõõtmisel esinevad kõik mõõtmistulemused ühekorraga, kuid igaüks eri maailmas, mille vahel puudub igasugune otsene side. Meie elame ühes kindlas maailmas: olekute superpositsiooni ühes liikmes, kus kvantmehaanika poolt määratud tõenäosusega ilmneb kindel mõõtarv Borni reegli alusel. Kuid meil pole põhimõtteliselt võimalik saada mingit katselist või vaatluslikku teavet teiste maailmade ja neis esinevate mõõtmistulemuste kohta.

Kümmekond aastat hiljem näitas Bryce DeWitt, et Everetti-Wheeleri arusaam pole midagi muud kui oletus, et kõiki kvantteooria valemite saab seada otsesesse vastavusse tegelikkusega, mida võib nimetada kvantmehaanika täiesti realistlikuks interpretatsiooniks mitteklassikalises mõttes. See tähendab, et reaalseks ei peeta mitte ainult seda ühte mõõtmistulemust, mis saadi „meie“ maailma ühes konkreetses mõõtmisaktis, vaid ka kõiki teisi võimalikke mõõtmistulemusi, mis küll selles mõõtmisaktis ei ilmnenu, kuid teooria kohaselt oleksid võinud teatud tõenäosusega ilmneda. Sealjuures „elavad“ kõikvõimalikud mõõtmistulemused eri maailmades ning mõõtmisaktis haruneb universum üksteisest täiesti eraldatud maailmadeks. Kvantoleku kollaps on siin asendatud maailmade paljususega. Niisuguse tõlgenduse puudus on asjaolu, et pole loomulikku viisi, kuidas

omistada eri mõõtmistulemustele tõenäosusi, mida on tarvis teoreetilise pildi kooskõlastamiseks katsetulemustega.

### 4. Bohmi interpretatsioon

Kvantmehaanika kujunemise algusaastail, 1920ndatel, esitas Louis de Broglie kvantmehaanika realistliku ja deterministliku tõlgenduse. Osakeste liikumine oli määratud võrrandiga, milles sisaldus Schrödingeri võrrandiga kirjeldatud kvantmehaaniline olekufunktsioon. Kuna olekufunktsioon „suunas“ osakeste liikumist, nimetati de Broglie' teooriat ka pilootlaine teooriaks.

Kolm aastakümnet hiljem hakkas de Broglie' teooriat täpsemalt välja arendama David Bohm. Matemaatiliselt on tema teorias kaks põhivõrrandit: Schrödingeri võrrand pilootlaine jaoks ja Bohmi võrrand osakeste trajektoride jaoks. Kuna osakesi ei saa katsetes jälgida, nimetatakse neid ka teooria varjatud parameetriteks.

Bohmi teorias ei ole kvantnähtuste tõlgendamisel neid probleeme, mis ilmnevad ortodoksses kvantmehaanikas. Mõõteriist ja mõõdetav objekt koosnevad (kvant)osakestest ja pärast mõõtmisprotsessi on mõlemad kindlates olekutes, mis välistab kvantoleku kollapsi vajaduse. Kvantteooriale iseloomulik tõenäosuslikkus tuleneb põhimõttelisest võimatusest täpselt määrata võrrandite algtingimusi. Teooria kujundati kooskõlaliseks kõikvõimalike katsetulemustega, mis tähendab, et füüsika raames pole võimalik üht teooriat teisele eelistada.

Kahjuks on Bohmi teorias väga vaevaline arvutada konkreetsete katsete tulemusi, mistõttu on takerdunud selle arendamine füüsikas. Kuid filosoofidele meeldib Bohmi teooria lihtne ja selge ontoloogia, nii et praegu räägivad ja kirjutavad sellest teooriast pigem teadusfilosoofid kui füüsikateoreetikud.

### 5. Lõpetuseks

Kui oluline on mõõtmisprobleem ja selle lahendamiseks pakutud kvantmehaanika interpretatsioonid? Ühelt poolt on selge, et mõõtmisprobleemi lahendamine on möödapääsmatu, kui kvantmehaanika tahab olla empiirilisel adekvaatne teooria. Kollapsiteooria oli üks esimesi lahendusi, mis välja arendati ning mis on tänini jäänud füüsika igapäevatööriistaks. Teisalt oli sellel lahendusel hulk probleeme, ja sellest tingitud rahulolematuse ajendas looma

## Suhtumine kvantmehaanika mõõtmisprobleemi tähtsusesse on füüsikute hulgas olnud ühest spektri äärest teise.

uusi interpretatsioone. Peab kohe lisama, et suhtumine kvantmehaanika mõõtmisprobleemi tähtsusesse on füüsikute hulgas olnud ühest spektri äärest teise. Kui näiteks Stephen Hawking on pidanud seda ebaprobleemiks, siis John Belli arvates on see üks olulisimaid kvantmehaanika probleeme. Bell eristas praktilist käsitlusviisi, kus me kasutame mõisteid 'mõõteaparaat' ja 'vaatleja' eksperimendi kirjeldamiseks, kuid osutas samas teravalt asjaolule, et kui kvantmehaanikat pidada reaalsuse fundamentaalseks kirjelduseks, siis ei ole sellistel hägusatel mõistetel teooria aksioomides kohta. Sest „[m]is kvalifitseerib mingi füüsikalise süsteemi 'vaatlejaks'? Kas pidi maailma lainefunktsioon kollapsihüppe tegemiseks ootama sadu miljoneid aastaid, kuni ilmus esimene üherakuline elav organism? Või pidi ta ootama natuke kauem, kuni ilmus pisut paremini kvalifitseeritud süsteem [---], kellel oli PhD kraad?“\* Samuti peaks kvantteooria kirjeldama maailma üldiselt, mitte ainult eksperimendi ja vaatleja kontekstis.

Kokkuvõtteks võib öelda, et pinged kvantmehaanika aluste ja mõõtmisprobleemi ümber on endiselt olemas. Viimase sajandi jooksul on tehtud palju tööd kvantmehaanika aluste probleemaatikas, selle tulemusena on meil palju selgem pilt kvantmehaanika kontseptuaalsest struktuurist, sh mõõtmisprobleemist, ning võimalustest seda lahendada. Kvantmehaanika interpretatsioonid on näited püüete kohta mõelda läbi erisugused loogilised võimalused ja asetada teooria rahuldavale kontseptuaalsele vundamendile. Paraku pole need püüded seni vilja kandnud. Kas see on vihje, et ainus väljapääs on uus füüsika, näiteks ühendada kvant- ja gravitatsiooniteooria Einsteinil püüdmatuks jäänud suurde ühendteooriasse? Tulevik näitab. •

\*John Bell (1990). „Against 'measurement'“, Physics World 3 (8) 33.

**Piret Kuusk** (1947) on füüsik ja teadusfilosoof, Tartu ülikooli füüsika instituudi kaasprofessor.

**Veiko Palge** (1971) on füüsik ja filosoof, Tartu ülikooli teoreetilise füüsika teadur.