

SYKSY RÄSÄNEN | **ULOS UMPIKUJISTA**
KVANTTIFYSIIKAN KEHITYS JA EPÄMÄÄRÄINEN TODELLISUUS



JOSEPH MALLORD WILLIAM TURNER (1775-1851). NORHAM CASTLE, SUNRISE 1845. TATE GALLERY, LONDON

Raitiovaunuista pilviin

Kvanttifysiikka ja suhteellisuusteoria veivät 1900-luvulla klassisen fysiikan tuolle puolen. Suppea ja yleinen suhteellisuusteoria löydettiin lähinnä teoreettisten pohdintojen kautta ja ne tulivat kerralla jokseenkin valmiiksi. Tämä on poikkeuksellista: kvanttifysiikan lait on saatu selville pala palalta havaintojen ja teorian yhteispelinä, mikä on fysiikassa tavallisempaa.

1900-luvun alkupuolella ymmärrettiin, että aine koostuu atomeista, joilla on positiivisesti varattu ydin, jota negatiivisesti varatut elektronit ympäröivät. Läpimurto johti ristiriitaan: klassisen fysiikan mukaan atomien olemassaolo on mahdotonta.

Klassisen fysiikan mukaan ytimen sähkövaraus vetää elektroneja puoleensa, joten ne kiertävät sitä kuin planeetat aurinkoa. Mutta kiihtyvässä liikkeessä oleva sähkövaraus lähettää sähkömagneettista säteilyä. Tämän takia elektronien pitäisi menettää energiaa ja pudota ytimeen sekunnin murto-osassa.

Niels Bohr esitti vuonna 1913 ratkaisun. Bohrin mukaan vain tietyt positiivisilla kokonaisluvuilla (1, 2, 3, ...) numeroidut ympyräradat ovat mahdollisia, eli radat ovat *kvantittuneita*. Mitä isompi kokonaisluku, sitä isompi säde. Tämän takia on olemassa pieni mahdollinen säde, jota lähemmäs ydintä elektroni ei pääse.

Samalla kun Bohrin malli tarjosi syyn siihen, että atomit pysyvät koossa, se selitti miksi ne lähettävät valoa vain tietyillä aallonpituuksilla – ja ennusti uusia aallonpituuksia. Oli havaittu, että atomit eivät voi säteillä millaista tahansa valoa, vaan valon aallonpituus määräytyy aina kahdesta positiivisesta kokonaisluvusta yksinkertaisella ta-

valla. Bohrin mallissa tämä seuraa automaattisesti. Elektronin energia on sitä isompi, mitä kauempana se on ytimeestä. Kun elektroni siirtyy sisemmälle radalle, se säteilee valoa, joka vie sen menettämän energian mukanaan, ja valon energia määrää sen aallonpituuden. Yksi kokonaisluku kertoo, miltä radalta elektroni lähtee ja toinen mille se päättyy.

Bohrin mallissa oli kaksi puutetta. Siinä oletettiin kvantittuminen ilman mitään syytä, ja se käsitelti vain atomeita, kertomatta miten niiden ominaisuudet liittyvät muuhun fysiikkaan. Mallin puutteet yhtä lailla kuin menestys viitoittivat tietä kvanttimekaniikkaan, joka löytyi 1920-luvun puolivälissä.

Kvanttimekaniikka on teoria, joka pyrkii kuvaamaan kattavasti kaikkea, ei vain atomeita. Kvanttimekaniikan mukaan todellisuus on *epämääräinen*: hiukkasella ei ole tiettyä sijaintia, vain todennäköisyys olla eri paikoissa. Kvanttimekaniikan mukaan teoria kertoo vain sen, millaiset havainnot ovat mahdollisia ja mitkä niiden todennäköisyydet ovat. Kyse ei ole siitä, että ei tiedetä enempää, vaan että ei ole enempää tiedettävää.

Erwin Schrödingerin vuonna 1925 löytämä ja hänen mukaansa nimetty yhtälö on laki kaikkien kvanttimekaanisten järjestelmien kehitykselle. Sovelletuna atomiin se kertoo, että elektronien energia on kvantittunut, koska ne ovat sidottuja ytimeen, samaan tapaan kuin molemmista päistä kiinni pidettyyn hyppynaruun sopii vain tietyn pituisia aaltoja. Kvanttimekaniikka siis selittää kvantittumisen seurauksena yleisestä laista, ei oletta sitä.

Samalla kun Schrödingerin yhtälö vahvisti Bohrin atomimallin ajatuksen kvantittumisesta, se osoitti, että malli on perusteiltaan virheellinen. Elektronit eivät kulje tiukoilla radoilla kuin raitiovaunut, vaan levittäytyvät todennäköisyyspilviin, joissa

on tiheämpiä ja harvempia kohtia. Jos elektronien todennäköisyys olisi iso Bohrin mallin ennustami- en ratojen kohdalla ja pieni muualla, niin voisi silti sanoa, että Bohr oli ainakin suunnilleen oikeassa. Tässäkin kuitenkin meni pieleen: elektronien toden- näköisyysjakaumalla on useita huippuja, joista yksi- kään ei satu Bohrin ratojen kohdalle.

Bohrin mallin kuva atomeista oli siis väärin sekä lähtökohdaltaan että lopputulokseltaan, vaikka sitä yhä koulujen oppikirjoissa esitelläänkin. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että malli olisi ollut hyödytön. Sen oikeaan osuneet ennustukset atomien säteile- män valon aallonpituuksista johdattivat ymmärtä- mään, että kvantittuminen on luonnon keskeinen ominaisuus.

Miten voi olla näin?

Jos ajattelee, että uuden teorian tarkoituksena on ratkaista ongelmia, joita edellinen on jättänyt avoi- miksi, niin kvanttimekaniikka saattaa tuottaa pet- tymyksen. Klassinen fysiikka ei pysty selittämään sitä, miten elektronit liikkuvat ytimen ympärillä. Sen sijaan, että antaisi vastauksen, kvanttime- kaniikka sanoo, että kysymys on mieletön, koska hiukkasilla ei ole määrättyjä paikkoja.

Vain teoria voi kertoa, mitkä kysymykset ovat mielekkäitä. Uudet teoriat tuovat mukanaan hie- nompia käsitteitä, joilla todellisuutta ymmärretään tarkemmin. Aiempien teorioiden puutteet ovat as- tinlautoja ymmärrykselle, ja kysymysten jahtaami- nen voi olla hedelmällistä, vaikka ne lopulta ymmär- rettäisiin merkityksettömiksi.

Kvanttimekaniikka ennustaa havaintoja erit- täin täsmällisesti ja oikein, mutta sen paljastamaa kuvaa epämääräisestä todellisuudesta on vaikea so-

vittaa yhteen arkisen kokemuksemme kanssa. Tämä outous johti monet fyysikot ajattelemaan, että pitää keskittyä vain havaintojen ennustamiseen. Niels Bohr ilmaisi ajatuksen kaunopuheisesti: "On väärin ajatella, että fysiikan tehtävänä olisi selvittää, millai- nen maailma on. Fysiikka käsittelee sitä, mitä voim- me sanoa maailmasta."

Tähän liittyy niin sanottu *Kööpenhaminan tulkinta*, joka on seuraavanlainen. (Nimi tulee siitä, että Bohrin aikaan Kööpenhamina oli yksi kvantti- mekaniikan tutkimuksen keskus.) Kvanttimekaniik- ka ennustaa todennäköisyydet sille, mikä nähdään, kun havaitaan elektronia tai muuta järjestelmää. Kun havainto tehdään, saadaan yksi tulos, ja järjes- telmän tila muuttuu epämääräisestä määrättyksi: elektroni on yhdessä paikassa eikä muualla. Sen jäl- keen elektronin todennäköisyyspilvi taas leviää.

Tämä on kelpo resepti kvanttimekaniikan todennäköisyyksien käyttämiselle, mutta se herät- tää paljon kysymyksiä. Se olettaa tiukan erottelun kvanttimekaanisen järjestelmän (kuten atomin) ja sen havaitsijan välille. Mutta koska ihmisetkin koos- tuvat atomeista, meitäkin pitäisi kuvata kvanttime- kaanisesti.

Jako klassiseen havaitsijaan ja kvanttimekaa- niseen havaittavaan törmää ongelmiin viimeistään silloin kun kvanttifysiikkaa sovelletaan koko maail- mankaikkeuteen. Idean nimeltä *kosminen inflaatio* mukaan kaikki maailmankaikkeuden rakenteet ovat peräisin maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin perukoilla syntyneistä kvanttivärähtelyis- tä. Niistä ovat kehittyneet galaksit, aurinkokunnat, molekyylit ja ihmiset. Inflaation ennusteet ovat osu- neet erittäin hyvin oikeaan, joten se on syytä ottaa vakavasti.

Kööpenhaminan tulkinnan mukaan maail-

mankaikkeuden rakenteiden tila on epämääräinen ennen kuin ihmiset ovat paikalla mittaamassa sitä, vaikka heidän olemassaolonsa on seuraus näiden rakenteiden kehityksestä, mikä tuntuu mahdottomalta solmulta. Tai ehkä pitäisi sanoa, että ei voida puhua siitä mitä tapahtui ennen kuin ihmiset olivat paikalla tekemässä mittauksia, mitä on sitäkin vaikea sulattaa.

Kööpenhaminan reseptiin kvanttimekaniikan tulkittamiselle pitää kenties suhtautua kuin Bohrin atomimallin: se on hyödyllinen, mutta sitä ei pidä viedä liian pitkälle. Mutta siinä missä meillä on parempi atomimalli, joka kertoo mitä Bohrin mallin onnistumisten takana on, ja koska sen rajat tulevat vastaan, emme vielä tiedä miten kvanttimekaniikan todennäköisyyksien laeista seuraa määrätyn näköinen maailma. Miksi havaitsemme kvanttimekaniikasta epämääräisyyttä vain pienissä järjestelmissä, emme arjen mittakaavassa?

Pitkään monet pitivät kvanttimekaniikan taustalla olevan todellisuuden pohtimista tuohon tuomittuna touhuna. Kuten fyysikoiden fyysikko **Richard Feynman** totesi vuonna 1964: "Älä kysy itseltäsi, jos vain voit välttää sitä, "Miten voi olla

näin?", koska menet hukkaan ja joudut umpikujaan, josta kukaan ei ole paennut. Kukaan ei tiedä miten voi olla näin."

Onneksi kaikki eivät uskoneet varoituksia, ja kvanttimekaniikan ymmärtämisessä on 1980-luvulta lähtien edistytty paljon. On hahmotettu, että kvanttimekaniikan piirteen nimeltä *dekoherenssi* takia toisiinsa kytkeytyneet järjestelmät ovat määrättyjä tai epämääräisiä yhtä aikaa. Emme koskaan näe isojen järjestelmien olevan kvanttimekaniikasta epämääräisiä, koska olemme niihin tiukasti kytkeytyneitä, eli meidänkin tilamme on silloin epämääräinen. Mutta emme ole vielä hahmottaneet, miten kvanttimekaniikan todennäköisyysjakaumasta valikoituu vain yksi vaihtoehto ja miten tämä tarkalleen liittyy havaitsemiseen.

Kvanttimekaniikka (ja kvanttikenttäteoria, joka yhdistää sen suppeaan suhteellisuusteoriaan) on historian ennustusvoimaisin ja teknologisesti hedelmällisin teoria. Jokseenkin kaikki nykyteknologia pohjaa siihen, ja sen vaikutus yhteiskuntaan on mittaamaton. Mutta kvanttifysiikka -tai ymmärtysemme siitä- ei ole valmis: emme tiedä miksi arki näyttää yksinkertaiselta.

SYKSY RÄSÄNEN



ON YLIOPISTOTUTKIJA HELSINGIN YLIOPISTON FYSIIKAN LAITOKSELLA. HÄNEN TUTKIMUSALANSA ON KOSMOLOGIA. HÄN PITÄÄ URSAN SIVUILLA HIUKKASFYSIIKAN JA KOSMOLOGIAN TIIMOILTA POPULAARIA BLOGIA KOSMOKSEEN KIRJOITETTUA.