



MIKSI KAIKEN TEORIALLA ON MERKITYSTÄ?

SYKSY RÄSÄNEN

Laskennallisen materiaalfysiikan professori Kai Nordlund pyysi minua pitämään puolustuspuheen kaiken teorialle viime Tieteen päivillä Helsingissä. Tämä kirjoitus pohjaa siellä 11.1.2017 pitämäni esityksen. Hahmottelen mistä kaiken teoriassa on kyse ja kerron kaksi syytä, miksi se on tärkeä.

Fyysiikan lait voidaan jakaa kahteen luokkaan: *perustavanlaatuisiin ja emergentteihin*. Emergentit lait palautuvat ainakin periaatteessa muihin tunnettuihin lakeihin. Esimerkiksi molekyylit rakentuvat atomeista, joten niiden käyttäytyminen viime kädessä määräytyy atomifysiikasta. Vastaavasti solujen käytös palautuu molekyyliin ja eläinten toiminta soluihin.

Perustavanlaatuiset lait

Usein emergentit lait ovat hyvin erilaisia kuin ne lait, joihin ne pohjaavat. Esimerkiksi vettä ja muita nesteitä kuvaava hydrodynamiikka poikkeaa luonteeltaan ja muodoltaan täysin atomeja kuvaavista laeista. Tämä johtuu siitä, että emergentit lait kuvaavat suuren joukon keskimääräisiä ominaisuuksia. Kun tarkastellaan isoja järjestelmiä, ei ole mahdollista kuvata kaikkia osia yksityiskohtaisesti, ja niiden vuorovaikutukset voivat saada aikaan ominaisuuksia, jotka eroavat merkittävästi yhden tai muutaman osan käyttäytymisestä. Toinen syy siihen, että emergentit lait voivat olla erilaisia on se, että yksinkertaisia rajatapauksia tarkasteltaessa jotkut teorian keskeiset piirteet jäävät piiloon. Esimerkiksi suppean suhteellisuusteorian ajan ja avaruuden yhtenäisyys näyttää rikkoutuvan lyhyitä aika- ja paikkavälejä ja pieniä nopeuksia tarkas-

teltaessa, ja se surkastuu Newtonin mekaniikaksi¹.

Usein emergenttejä lakeja ei pystytä käyttäen johtamaan, vaikka se olisi periaatteessa mahdollista. Esimerkiksi kvarkkien ominaisuudet ja vuorovaikutukset ovat yksinkertaisia ja ne tunnetaan täsmällisesti, mutta niistä koostuvien protonien, neutronien ja muiden yhteishiukkasten piirteitä ja käytöstä – eli ydinfysiikkaa – ei vielä osata täysin päätellä kvarkeista lähtien. Vasta 2000-luvulla on saatu luotettavia tuloksia super tietokoneiden avulla, mutta vieläkin vain pieni osa ydinfysiikasta pystytään johtamaan kvarkkien ominaisuuksista.

Perustavanlaatuiset lait ovat sellaisia, joita ei voida edes periaatteessa johtaa mistään, ainakaan toistaiseksi. Se, onko laki perustavanlaatuinen vai emergentti riippuu yleensä tietämättömyydestämme: kun lakien pohja ymmärretään, ne lakkaavat olemasta perustavanlaatuisia ja muuttuvat emergenteiksi. 1800-luvulla Newtonin mekaniikka ja Maxwellin sähkömagnetismi olivat perustavanlaatuisia, nykyään ne ovat suhteellisuusteorian ja kvanttielektrodynamiikan rajatapauksia.

¹ Käytän sanaa emergentti laajassa merkityksessä. Usein emergenteiksi luuttaisiin vain ison kappalejoukon keskimääräistä käyttäytymistä kuvaavat lait, eikä lakien yksinkertaisia rajatapauksia, approksimaatioita, laskettaisi nimikkeen alle.

Kaksi tukipilaria

Tällä hetkellä on kaksi perustavanlaatuaista fysiikan teoriaa. Kvanttikenttäteoria, tarkemmin sanoen sen standardimallina tunnettu sovellus, kuvaa kaikkea tunnettua ainetta sen osasten välisiä vuorovaikutuksia, gravitaatiota, lukuun ottamatta. Yleinen suhteellisuusteoria puolestaan kuvaa aika-avaruutta ja sen vuorovaikutusta itsensä ja aineen kanssa. Kaikki muu tunnettu fysiikka palautuu näihin kahteen tukipilariin. Ne eivät kuitenkaan ole viimeinen sana. Standardimallin tuolla puolen saattaa olla vielä laajempi hiukkasfysiikan teoria (ilman gravitaatiota), johon kuuluu hiukkanen, josta pimeä aine koostuu, ehkä kosmiseen inflaatioon liittyvä hiukkanen ja kenties paljon muuta. On myös paljon tutkittu mahdollisuutta, että on olemassa yleistä suhteellisuusteoriaa laajempi gravitaatioteoria (ilman kvanttifysiikkaa), joka eroaa sen ennusteista hyvin isossa tai pienessä mittakaavassa. Joka tapauksessa sekä kvanttikenttäteoria ilman gravitaatiota että gravitaatioteoria ilman kvanttifysiikkaa ovat vain approksimaatioita: kvanttifysiikka ja gravitaatio ovat totta yhtä aikaa. Teoriaa, joka nivoo nämä todellisuuden kaksi puolta yhteen, kutsutaan *kvanttigravitaatioteoriaksi*.

Kvanttiteoria ja gravitaatio on jo onnistuneesti yhdistetty *kosmisen inflaation* kuvaamisessa. Inflaatio on vaihe maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin murto-osan perukoilla, jolloin avaruuden laajeneminen kiihtyi. Nykymaailmankaikkeuden kaiken rakenteen – galaksien, planeettojen, solujen – siemenet ovat syntyneet inflaation aikana aineen ja aika-avaruuden yhteisistä kvanttivärähtelyistä. Kvanttiteoriaa ja gravitaatiota on sovitettu yhteen muutenkin, erityisesti mustia aukkoja tarkasteltaessa, mutta inflaatio on ainoa fysiikan osa-alue, missä kvanttigravitaatiota on päästy luomaan kokeellisesti. Havainnot ovat vastanneet ennusteita erinomaisen tarkkaan. Inflaation kuvaamiseen riittää kuitenkin hyvin yksinkertainen kvanttiteorian ja gravitaation yhdistäminen: koko aika-avaruutta ja kaikkea ainetta ei tarvitse kuvata kvanttifysikaalisesti, ainoastaan niiden pieniä värähtelyitä. Siksi inflaatiota kuvaavien mallien ennusteet eivät riipu täyden kvanttigravitaatioteorian yksityiskohdista. Tämän kääntöpuoli on se, että ennusteiden menestys ei anna juuri osviittaa kokonaisen kvanttigravitaatioteorian löytämiseen.

Monet tutkijat odottavat, että kvanttigravitaatioteoria olisi aidosti perustavanlaatuinen, eli että sitä ei edes periaatteessa voisi johtaa mistään, kahdella sanalla sanoen *kaiken teoria*. On myös mahdollista, että kvanttigravitaation takana on vielä uutta fysiikkaa, josta meillä ei ole vielä aavistustakaan. Periaatteessa voisi myös olla, että teorioiden ketjulla ei ole päätepistettä, eli että mitään lopullista teoriaa ei ole olemassa, ainoastaan yhä tarkempia kuvauksia todellisuudesta. Tällainen vaihtoehto ei tosin ole fyysikoiden keskuudessa järin suosittu.

Ehdokkaita kvanttigravitaatioteoriaksi ja kaiken teoriaksi on tutkittu vuosikymmeniä. Suosituin ehdokas on säieteoria, mutta sen ymmärtämisessä kaiken teoriana ei ole 2000-luvulla juuri edistytty. Ei tiedetä, kuvaako säieteoria todellisuutta eikä edes sitä, millainen säieteoria täsmälleen on. Vaihtoehdot, kuten silmukakvanttigravitaatio, eivät nekään ole olleet kiistattoman menestyneitä. Yksi ongelma kaiken teorian kehittämiseksi on kokeellisten vihjeiden puute.

Yllättävät sovellukset

Kaiken teoria poikkeaa merkittävästi ennusteiltaan kvanttikenttäteoriasta ja yleisestä suhteellisuusteoriasta vain olosuhteissa, jotka ylittävät niiden pätevyysalueen. Yleisesti arvellaan, että tämä tarkoittaa hyvin pieniä mittakaavoja, erittäin korkeita energioita tai äärimmäisen vahvoja gravitaatiokenttiä. Monissa teoriaehdokkaissa kvanttigravitaatiolle leimalliset ilmiöt ovat merkittäviä vasta kun mittaluokkana on *Planckin pituus*, noin 10^{-34} m. Tämä on suhteessa protoniin yhtä pieni kuin mitä protoni on suhteessa vuoreen. Tätä vastaava *Planckin energia* on 10^{14} kertaa isompi kuin se, mikä CERNin LHC-kiihdyttimessä saavutetaan. Niinpä kvanttigravitaatioon on vaikea päästä kokeellisesti käsiksi. Tämän perusteella voisi myös arvella, että sillä ei olisi mitään käytännön sovelluksia. Tämän takia Nordlund kyseenalaisti sen, onko kaiken teorian etsimisestä mitään iloa.

On kuitenkin kaksi syytä, miksi kaiken teorian löytäminen ei ole vain akateeminen kysymys. (On muuten huolestuttavaa ja huvittavaa, että yleisessä kielenkäytössä sana ”akateeminen” tarkoittaa samaa kuin ”merkityksetön”.)

Se, että kaiken teorian skaala on kaukana arjen ulottumattomissa, ei tarkoita sitä, etteikö sillä voi-

si olla teknologisia sovelluksia. 1800-luvun loppupuolella kiisteltiin siitä, koostuuko aine atomeista vai onko se jatkuva. Tämän olisi voinut kuvitella olevan pelkästään akateeminen kysymys, koska (kuten lopulta saatiin selville) atomit ovat yhtä pieniä suhteessa meihin kuin me olemme suhteessa Aurinkoon. Klassinen fysiikka – eli Newtonin mekaniikka ja Maxwellin sähkömagnetismi – kuvasivat hyvin kaikkia arjen ilmiöitä (ja kuvaavat vieläkin) riippumatta siitä, millainen aineen hierorakenne on. Kuitenkin atomien ymmärtäminen on mullistanut arkielämän.

Vetyatomia tutkimalla löydettiin kvanttimekaniikka, mikä on kaiken elektroniikan ja nykykemian pohjana, samoin kuin DNA:n ja muiden biologisten rakennuspalikoiden ymmärtämisen. Arkemme on kvanttimekaniikan sovellusten läpituokema. 1800-luvulla olisi ollut mahdotonta ennustaa, millaisia sovelluksia atomifysiikalla tulee olemaan, saati sitä, millaisia yhteiskunnallisia muutoksia ne tekisivät mahdolliseksi.

Päätelyssä, että atomifysiikalla ei ole merkitystä arkielämälle, koska atomit ovat niin pieniä, menee pieleen se, että teknologisissa sovelluksissa ei ole kyse yksittäisistä atomeista. Yhdellä atomilla ei ole arkiskaalassa merkitystä, mutta yksittäisten atomien hahmottaminen auttaa ymmärtämään kvanttimekaniikan lakeja, jotka avaavat oven uudenlaiseen tapaan manipuloida ainetta isossakin mittakaavassa.

Lisäksi tiedon arvo ei rajoitu sovelluksiin. Kaiken teorian odotetaan eroavan kvanttikenttäteoriasta ja yleisestä suhteellisuusteoriasta yhtä merkittävästi kuin mitä ne eroavat klassisesta fysiikasta. Kun ei tiedetä, millainen kaiken teoria on, ei voi arvata, miten sen avulla voi muokata todellisuutta, eli minkälaista teknologiaa sen avulla voi rakentaa.

Kaikkeuden ymmärtäminen

Kvanttimekaniikka sai alkunsa aineen tutkimisesta, minkä kautta hahmotettiin maailman epädetermistinen ja epämääräinen luonne. Se osoitti, että arkikäsitteemme tapahtumisesta ja olemisesta ovat juuriaan myöten virheellisiä. Vastavasti suhteellisuusteoria mullisti kuvamme ajas-

ta ja avaruudesta. Suppean suhteellisuusteorian myötä aika ja avaruus hahmotettiin erottamattomiksi osiksi isompaa kokonaisuutta, aika-avaruutta. Yleinen suhteellisuusteoria puolestaan osoitti, että avaruus ei ole passiivinen näyttämö tapahtumille, vaan reagoi aineeseen ja muuttuu ajan myötä, ja vastaavasti ajan kulku riippuu aineesta ja on erilainen eri paikoissa. Ajassa muuttuvan avaruuden keskeinen seuraus, maailmankaikkeuden laajeneminen, avasi puolestaan oven maailmankaikkeuden muodonmuutosten hahmottamiseen.

Kaiken teoria oletettavasti muuttaisi käsityksemme yhtä perinpohjaisesti ja paljastaisi todellisuudesta piirteitä, joille meillä ei ole vielä edes käsitteitä.

Fysiikan sovellusten merkitystä on vaikea yliarvioida. Jos Maapallolla koskaan päästään tilanteeseen, missä ihmiset voivat kaikki elää ihmisarvoista elämää ja osallistua yhtäläisesti ihmisyhteisön asioihin, niin se on mahdollista ainoastaan fysiikan sovellusten, kuten automatisaation, digitalisaation ja modernin tiedonvälityksen, ansiosta. Yhtä tärkeää on kuitenkin se, miten fysiikka auttaa meitä ymmärtämään maailmaa: se selittää sateenkaaren värit, kertoo tähtien olevan etäisiä aurinkoja, paljastaa maailmankaikkeuden historian olevan meidän historiaamme. Lyhyesti sanottuna, fysiikka kehystää inhimillisen kokemuksen, ja kaiken teoria olisi viimeinen sana siitä ympäristöstä, mikä määrittää olemassaolostamme.

Lisälukemista

- Hossenfelder, Sabine: *Backreaction*, <http://backreaction.blogspot.fi/>
- Krauss, Lawrence: *Hiding in the Mirror: The Quest for Alternate Realities, from Plato to String Theory (by way of Alice in Wonderland, Einstein, and The Twilight Zone)*. Penguin 2006.
- Smolin, Lee: *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Mariner Books 2007
- Woit, Peter: *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Basic Books 2007.
- Woit, Peter: *Not Even Wrong*, <http://www.math.columbia.edu/~woit/wordpress/>

Kirjoittaja on teoreettisen fysiikan dosentti ja yliopistotutkija Helsingin yliopiston fysiikan laitoksella. Hän kirjoittaa blogissa *Kosmukseen kirjoitettua* Ursan sivuilla hiukkafysiikasta ja kosmologiasta.