



SYKSY RÄSÄNEN

# YHTENÄISYYDEN KUORIMISTA

Jos hiukkasfyysikoilta kysyy, mikä on fysiikan suurin ratkaisematon ongelma, vastaus on selvä: *kaiken teorian* eli *lopullisen yhtenäisteorian* löytäminen. Fysiikan edistys on ollut yhtenäisteorioiden voittokulkua, ja kaiken teoria olisi vuoren huippu.

**YHTENÄISTEORIA** on rakennelma, joka osoittaa erillisiksi luultujen ilmiöiden olevan saman kokonaisuuden eri puolia. Esimerkiksi **James Clerk Maxwell** osoitti vuonna 1861, että sähkö ja magnetismi ovat molemmat *sähkömagnetismin* ilmentymiä. Maxwell kokosi (sittemmin hänen mukaansa nimettyihin) yhtälöihin silloin tunnetun tiedon sähköstä ja magnetismista ja laajensi sitä tavalla, joka kytki ne kauniisti yhteen.

Niputtaessaan sähköön ja magnetismin Maxwell tuli samalla osoittaneeksi, että samaan suppuun kuuluu myös kolmas aivan erilaiselta vaikuttava ilmiö: valo. Maxwellin yhtälöt kertovat, että valo on aaltoliikettä, jossa sähkömagneettiset kentät värähtelevät toisikseen. Maxwell hahmotti myös, että näkyvä valon lisäksi on olemassa sellaista sähkömagneettista säteilyä, jota emme näe.

Tämä oli mullistava löytö: se maailma, jonka silmämme voivat nähdä ja jota kätemme saavat koskea on vain pieni osa todellisuutta. Havaintojen taustalla on näkymätön valtameri täynnä asioita, jotka vaikuttavat meihin ja joita voimme käyttää hyödyksi. Nykyään näkymätön todellisuus on arkipäivää, ja tunnemme sen nimillä radioaallot, mikroaallot, infrapunavalot, ultraviolettivalot, röntgen- ja gammasäteet.

Yhtenäisteorioiden seuraava askel, *suppea suhteellisuusteoria*, puolestaan osoitti, että tuttuina ja yksinkertaisina pitämämme asiatkin ovat pohjimmiltaan vieraita ja muuttuvia. Aika ja avaruus ovat arkikokemuksen mukaan toi-

sistaan erillisiä ja vakaita asioita: avaruus on tapahtumien näyttämö, aika kertoo missä kohtaa näytelmää ollaan. **Albert Einstein** osoitti vuonna 1905 että tämä ei ole totta. Maxwellin yhtälöistä ponnistaen Einstein päätteli, että aika ja avaruus sekoittuvat toisiinsa samaan tapaan kuin sähkö- ja magneettikentät.

Einsteinille matematiikkaa opettanut **Hermann Minkowski** hahmotti kahta vuotta myöhemmin, että kyse ei ole vain siitä, että aika ja avaruus ovat suhteellisia (eli erilaisia eri havait-sijoille), vaan siitä, että ne ovat absoluuttisen (eli kaikille saman) aika-avaruuden eri suuntia. Esimerkiksi kun kaksiulotteista tasoa kierretään, x- ja y-suunnat muuttuvat toisikseen, mutta taso itsessään säilyy samana. Samaan tapaan nopeutta muutettaessa aika ja avaruus sekoittuvat -aikavälit venyvät ja pituudet kutistuvat- mutta aika-avaruus ei muutu.

*Yleinen suhteellisuusteoria* kehitti käsitystä aika-avaruudesta vielä pidemmälle. Yleinen suhteellisuusteoria on yhtenäisteoria kahdesta aivan erilaiselta vaikuttavasta käsitteestä: aika-avaruudesta ja painovoimasta. Einstein, **Michele Besso**, **Marcell Grossmann** ja **David Hilbert** osoittivat, että gravitaatio ei ole voima vaan aika-avaruuden kaarevuuden ilmentymä.

Kuten sähkömagnetismin esimerkki näyttää, yhtenäisteorioissa ei vain hitsata tunnettuja asioita yhteen, niissä paljastetaan suurempi kokonaisuus, jossa tunnetut asiat kytkeytyvät saumattomasti tuntemattomaan. Vuonna 1915

In conclusion I wish to say that in working at the problem here dealt with I have had the loyal assistance of my friend and colleague M. Besso, and that I am indebted to him for several valuable suggestions.

Albert Einstein, 1905

lopulliseen kuosiinsa saatu yleinen suhteellisuusteoria muuttikin käsitystämme todellisuudesta monin tavoin. Sen ennustamista monista uusista ilmiöistä mainittakoon erityisesti avaruuden laajeneminen, jonka hahmottaminen johti ymmärrykseen maailmankaikkeuden äärellisestä lästä ja avasi silmät sen kehityksen näkemiseen osana meidän historiaamme.

Yleisen suhteellisuusteorian teorian ja havaintojen kehittyessä tapahtumat etenivät myös toisella raiteella, kvanttifysiikassa. Siinä missä suhteellisuusteoria laajensi käsitystä ajasta ja avaruudesta, kvanttifysiikka osoitti, että arkikäsitteemme aineesta oli perusteltua virheellinen.

*Kvanttimekaniikan* myötä hahmotettiin, että aine ei koostu kiinteistä hiukkasista, ja samalla vedettiin kokonaan uusiksi sellaiset perustavaanlaatuiset -ja siksi yksinkertaisiksi luullut- käsitteet kuin oleminen ja tapahtuminen. Kvanttimekaniikan paljastama kuva todellisuudesta on oudompi kuin mitkään filosofiset pohdiskelut olivat aavistaneet, ja sen yhteen sovittaminen arkisen kokemuksemme kanssa on yhä avoin ongelma - mutta se on toinen tarina. Tästä puutteesta huolimatta kvanttifysiikka on ollut suuri menestys, erityisesti sen jälkeen kun kvanttimekaniikka 1940-luvulla yhdistettiin suppeaan suhteellisuusteoriaan, tuottaen *kvanttikenttäteorian*.

Kvanttikenttäteoria on ennustanut ja selittänyt koetuloksia yleistä suhteellisuusteoriaakin

suuremmalla tarkkuudella ja laajuudella, ja lähes kaikki nykYTEKNOLOGIA pohjaa siihen. Yhtenäisteorian se on vertaansa vailla.

Kvanttifysiikka selittää alkuaineiden moninaiset ominaisuudet raudan lujuudesta kullaan väriin ja hapen kaasumaisuuteen ydinten ja elektronien asetelmilla. Ydinten rakenne palautuu protoneihin ja neutroneihin sekä niitä sitovaan ydinvoiman, ja lopulta protonit, neutronit ja ydinvoima selittyvät *up-* ja *down-*kvarkeilla ja niiden välisellä vahvalla vuorovaikutuksella. Tämä on hämmästyttävä saavutus: kaikki havaitsemamme aineen moninaisuus selittyy eri tavoilla kasata kahdenlaista kvarkkia ja elektroneja.

1970-luvulle tultaessa kaikki tunnetut hiukkas- set, sähkömagnetismi sekä ytimille ja kvarkeille tärkeät heikko ja vahva vuorovaikutus oli laitettu yhteen kauniiksi paketiksi, joka sai nimen *Standardimalli*. Standardimallin tuonpuoleisia hiuk- kasia ja vuorovaikutuksia on kvanttikenttäteorian parissa tutkittu paljon. Suureellisempi tavoite oli kvanttifysiikan, ja erityisesti Standardimallin ja muun hiukkasfysiikan, yhdistäminen yleiseen suhteellisuusteoriaan.

Joskus ajatellaan, että yleisen suhteelli- suusteorian yhdistäminen kvanttifysiikkaan, eli kvanttigravitaation löytäminen, johtaa myös gravitaation ja hiukkasfysiikan yhdistämiseen, ja että sen taustalla ei ole enää uutta fysiikkaa. Täl- löin kvanttigravitaatio olisi myös kaiken teoria. Voi myös olla, että kvanttigravitaation, tai sen ja hiukkasfysiikan yhtenäisteorian, takana piileekin

— gravitaatio ei ole voima  
vaan aika-avaruuden  
kaarevuuden ilmentymä —

— havaitsemamme aineen  
moninaisuus selittyy eri tavoilla  
kasata kahdenlaista kvarkkia ja  
elektroneja —

uudenlaista fysiikkaa, josta meillä ei vielä ole aavistustakaan. Periaatteessa teorioiden ketju voi jatkua loputtomiin, niin että lopullista teoriaa ei ole, vaikka ajatus ei alan tutkijoiden keskuudessa olekaan kovin suosittu.

Toisin kuin sähkön ja magnetismin kohdalla, Standardimallin ja gravitaation yhdistämiselle ei ollut osviitaksi havaintoja, joten teoriaa rakennettiin matemaattisista ja esteettisistä periaatteista lähtien. 1980-luvulla vaikutti siltä, että pitkään hiotut hienostuneet tarkastelut viimein kantavat hedelmää.

Vuonna 1984 osoitettiin, että tietynlainen *säieteoria* on matemaattisesti ristiriidaton rakennelma, joka kuvaa sekä alkeishiukkasia ja niiden vuorovaikutuksia että gravitaatiota. Karkeasti sanottuna säieteorian mukaan perustavanlaatuiset rakennuspalikat ovat yksiulotteisia kappaleita, joiden värähtelyt kuvaavat alkeishiukkasia ja gravitaatiota. Hiukkasfyysikot valtasivat innostus, kun lopullinen teoria vaikutti olevan käden ulottuvilla. Julistettiin, että pian säieteoria olisi valmis, ja pian kaikki fysiikan lait voitaisiin johtaa siitä.

Aarre sateenkaaren päässä ei kuitenkaan tullut lähemmäksi kohti laukatessa. Säieteoria kuvaa gravitaatiota, mutta ei sellaista gravitaatiota jonka havaitsemme. Säieteoria sisältää luonnollisella tavalla hiukkasfysiikkaa, mutta Standardimallin johtaminen siitä osoittautui vaikeaksi. Keskeiseksi ongelmaksi nousi se, että säieteorian yksinkertaisimmassa muotoilussa

avaruudella on yhdeksän ulottuvuutta, mutta me havaitsemme vain kolme. Tämän voi selittää käärimällä ylimääräiset kuusi ulottuvuutta pieniksi, mutta on valtava määrä tapoja tämän tekemiseen, eikä ole osattu selittää, mikä niistä olisi oikea.

Nyt 35 vuotta säievallankumouksen jälkeen säieteoria on yhä suosituin ehdokas kaiken teoriaksi, koska parempaakaan ei ole keksitty. Tunnetuin kilpailija kulkee nimellä *silmukkakvanttigravitaatio*. Sen tavoite on säieteoriaa vaatimattomampi, silmukkakvanttigravitaatiossa pyritään vain yhdistämään gravitaatio ja kvanttifysiikka. Hiukkasfysiikan tuominen mukaan, eli kaiken teorian rustaaminen, jätetään myöhemmäksi huoleksi.

Silmukkakvanttigravitaation lähtökohtana on se, että aika-avaruus ei ole jatkuva, vaan koostuu erillisistä pisteistä. Kuten säieteoria, tämäkään idea ei ole saavuttanut kiistatonta menestystä eikä varmistettua yhteyttä havaintoihin.

Kvanttigravitaation tai kaiken teorian löytämisen vaikeutta kuvaa se, miten nämä ja muut kilpailevat tutkimusohjelmat ovat lähteneet etsimään vastausta aivan eri suunnista. Matkan vaivoja ja tavoitteen arvostusta kuvaa se, että on tullut tavaksi verrata kaiken teoriaa Graalin maljaan.

Mutta siinä missä perustavanlaatuisista ideoista lähtevät hienostuneet teoriat eivät ole päässeet maaliin, vaatimattomampi puuhastelu lähellä havaintoja on tuottanut tulosta. 1980-lu-

vun alussa, hieman ennen säieteoriahuumaa, esitettiin idea *kosmisesta inflaatiosta*. Kosminen inflaatio tarkoittaa sitä, että varhaisina aikoina avaruuden laajeneminen kiihtyi. Inflaatio esitettiin selitykseksi sille, että maailmankaikkeus näyttää samalta kaikissa suunnissa. Ajatuksena oli, että kiihtyvä laajeneminen pyyhkii epätasaisuudet pois ja asettaa samanlaiset olosuhteet kaikkialle. Samalla kvanttifysiikan mukaan kvanttivärähtelyt saavat väistämättä aikaan pieniä epätasaisuuksia, väreitä kosmisessa lamnessa. Inflation aikana värähtelyt jähmettyvät paikoilleen, ja myöhemmin galaksit ja kaikki muu rakenne kasvaa niistä gravitaation vetäessä ainetta alueisiin, missä tiheys on keskimääräistä isompi.

Ongelma siitä, miksi maailmankaikkeus on tasainen oli yksinkertaisempi, ja mikä tärkeää, lähempänä havaintoja kuin kunnianhimoiset kvanttigravitaatioteoriat. Inflaatio ennusti millaisia rakenteen siemeniä kvanttivärähtelyt synnyttävät tyhjistä, ja 1990- ja 2000-luvulla tehdyt havainnot ovat tarkkaan vastanneet ennusteita.

Inflaatiossa aine ja aika-avaruus värähtelevät yhdessä, joten inflaatiosta tuli ensimmäinen (ja toistaiseksi ainoa) fysiikan alue, joka tekee onnistuneita ennustuksia kvanttifysiikan ja gravitaation yhteydestä. Inflaatiossa kuitenkin käsitellään kvanttifysiikan keinoin vain yksinkertaista tapausta, hyvin pieniä aika-avaruuden värähtelyjä. Niinpä sen menestys juuri anna vih-

jeitä siitä, mihin suuntaan pitäisi jatkaa kvantti-gravitaation kokonaisuuden löytääkseen.

Inflation kautta olemme jo saaneet käsityksen siitä, mitä maailmankaikkeuden ensimmäisen sekunnin perukoilla tapahtui ja hahmottaneet, että kaikki näkemämme – tähdet, planeetat, DNA, ihmiset, koko inhimillinen kulttuuri – on lähtöisin sattumanvaraisista kvanttivärähtelyistä. Kokonaisen kvanttigravitaatioteorian, saati kaiken teorian, löytäminen luultavasti myllertäisi käsityksemme kosmisesta historiasta vielä perinpohjaisemmin, ja asettaisi ajan, avaruuden ja aineen aivan uuteen valoon. Toistaiseksi vuoren huippu on sumun peitossa, eikä tiedetä mikä polku sinne vie.

**KUKA**

## **SYKSY RÄSÄNEN**

**FT**

**teoreettisen fysiikan dosentti  
Helsingin yliopistolla,  
yliopistotutkija Hiukkasfysiikan ja  
astrofysiikan osastolla,  
adjungoitu tutkija Fysiikan  
tutkimuslaitoksella**

— kaikki näkemämme – tähdet, planeetat,  
DNA, ihmiset, koko inhimillinen kulttuuri  
– on lähtöisin sattumanvaraisista  
kvanttivärähtelyistä. —

NASA-ESA Hubble Space Telescope image shows a variety of intriguing cosmic phenomena

