

LÖYTYYKÖ VIIDES VOIMA? TUTKIMUSKENTTÄ, JOKA SAATTA LAAJENTAA FYSIIKAN STANDARDIMALLIA



Fyysikot ovat löytäneet hiukkasfysiikan standardimallista puutteita. Yksi tutkimussuunta on selvittää, löytyykö nykyfysiikassa tunnettujen vuorovaikutusten lisäksi viides voima. Käsityksemme maailmasta voi muuttua vielä tällä vuosikymmenellä.

Lähes kaikki luonnon ilmiöt voidaan selittää neljän perusvuorovaikutuksen avulla: painovoiman, sähkömagnetismin, vahvan ydinvoiman (toisin sanottuna värivoiman) ja heikon ydinvoiman.

Kemia perustuu atomien ja molekyylien välisiin sähkömagneettisiin vuorovaikutuksiin. Valo on sähkömagneettista aaltoliikettä. Makroskooppisia ilmiöitä kuvaavat lämpö- ja ääniopit palautuvat mikroskooppisella tasolla atomien välisiin vuorovaikutuksiin.

Atomin ydin pysyy kasassa vahvan ydinvoiman avulla, ja sen avulla voidaan selittää radioaktiivinen alfahajoaminen. Heikko ydinvoima puolestaan aiheuttaa beeta- ja sähkömagnetismi gammahajoamisen. Ydinvoimat pitävät auringon kuumana ja samoin maan sisäosan, minkä ansiosta mannerlaatat liikkuvat ja tulivuoret purkautuvat.

Kaikki nämä ilmiöt ovat alkeishiukkas-ten välisiä vuorovaikutuksia, ja niitä kuvaa nykyisin hiukkasfysiikan standardimalliksi kutsuttu teoria. Se kehitettiin nykyiseen muotoonsa vuosina 1970–73 vuosikymmenien työn jälkeen.

STANDARDIMALLIN HIUKKASET

Standardimalli koostuu kolmentyyppisistä hiukkasista: Higgsin bosoneista, ainehiukkasista ja vuorovaikutuksen välittäjähiukkasista. Ainehiukkaset ovat kvarkkeja, elektroneja ja neutriinoja. Ne jaetaan kolmeen sukupolveen, ja ensimmäisen sukupolven hiukkaset ovat vakaita (katso seuraavan sivun kuva).

Sähkömagneettista vuorovaikutusta välittää valohiukkanen eli fotoni, vahvaa ydinvoimaa liimahiukkanen eli gluoni sekä heikkoa ydinvoimaa W- ja Z-bosonit. Gluonit

Hiukkasfysiikan standardimalli

	FERMIONIT			BOSONIT	
massa	<1,0 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<18,2 MeV/c ²	≈91,19 GeV/c ²	≈124,97 GeV/c ²
varaus	0	0	0	0	0
spin	½	½	½	1	0
	V_e elektronin neutriino	V_μ myonin neutriino	V_τ taun neutriino	Z Z-bosoni	H Higgsin bosoni
LEPTONIT	≈0,511 MeV/c ² -1 ½	≈105,66 MeV/c ² -1 ½	≈1,7768 GeV/c ² -1 ½	≈80,39 GeV/c ² ±1 1	
	e elektroni	μ myoni	τ tau	W W-bosoni	
	≈2,2 MeV/c ² 2/3 ½	≈1,28 GeV/c ² 2/3 ½	≈173,1 GeV/c ² 2/3 ½	0 0 1	
	u ylös	c lumo	t huippu	γ fotoni	
KVARKIT	≈4,7 MeV/c ² -1/3 ½	≈96 MeV/c ² -1/3 ½	≈4,18 GeV/c ² -1/3 ½	0 0 1	
	d alas	s outo	b pohja	g gluoni	SKALAARIBOSONIT
					MITTABOSONIT

sitovat kvarkit yhteen protoneiksi ja neutroneiksi, ja ne puolestaan muodostavat atomin ytimen. Ydintä ympäröi elektroneista koostuva elektronipilvi. Lukuun ottamatta neutriinoa ainehiukkaset, W-bosonit- ja Z-bosonit saavat massansa vuorovaikuttaessaan Higgsin kentän kanssa.

Painovoimalla ei standardimallissa ole välittäjähiukkasta, vaan sen vaikutuksia kuvaa suhteellisuusteoria. Sen mukaan painovoima on oikeastaan seuraus neliulotteisen aika-avaruuden geometriasta. Kaikki avaruudessa olevien suurten kappaleiden liikkeet voidaan selittää **Albert Einsteinin** paino-

Hiukkasfysiikassa etsitään nyt kaikin voimin lisää poikkeamia standardimallin ennusteista, jotta sitä voitaisiin laajentaa uudella hiukkassisällöllä ja mahdollisesti myös uudella perusvuorovaikutuksella, jota on alettu kutsua viidenneksi voimaksi.

voimateorialla: avaruudessa lentävät avaruusluotaimet, asteroidit, komeetat, planeetat, tähdet, mustat aukot, galaksit ja galaksijoukot eivät välitä lainkaan sähkömagneettisista tai ydinvoimista, ja niiden radat noudattavat Einsteinin teorian mukaisia ennusteita. **Isaac Newtonin** painovoimateoria on sen sijaan riittävä heikossa painovoimakentässä ja ”pienillä” nopeuksilla eli silloin, kun nopeus on alle kymmenesosa valonnopeudesta.

TARVE UUSILLE VUOROVAIKUTUKSILLE

Nyt hiljalleen saattaa syntyä virheellinen käsitys siitä, että kaikki on jo selitetty. Tämä ei kuitenkaan pidä paikkaansa, sillä on saatu pitäviä todisteita ilmiöistä, joita ei voida selittää nykyisten fysiikan teorioiden valossa.

Maailmankaikkeuden sisältämästä aineesta valtaosa on pimeää, siis sellaista, joka ei synnytä, sirota tai ime valoa. Pimeä aine ”nähdään” vain sen painovoimavaikutusten kautta, eikä se myöskään muodosta suurempia rakenteita. Se on myös hyvin heikosti

vuorovaikuttavaa ja kulkee siksi kaiken (myös ihmisten) läpi huomaamatta. Neutriinoja lukuun ottamatta tällaista ainetta ei löydy standardimallista. Neutriinot ovat kuitenkin niin kevyitä, että itse asiassa korkeintaan yksi prosentti pimeää ainetta voi koostua niistä.

Neutriinot ovat standardimallissa hiukkasia, jotka syntyvät tietyissä ydinreaktioissa ja jotka ovat täysin harmittomia kulkiessaan kaiken lävitse. Standardimalli ennusti niiden olevan massattomia, mutta vuosituhaten vaihteessa kyettiin osoittamaan, että niillä on kuin onkin massa. Ne vain ovat yli miljoona kertaa keveämpiä kuin toiseksi keveimmät massalliset hiukkaset, elektronit.

Neutriinon massan lisäksi hiukkasfysiikassa etsitään nyt kaikin voimin lisää poikkeamia standardimallin ennusteista, jotta sitä voitaisiin laajentaa uudella hiukkassisällöllä ja mahdollisesti myös uudella perusvuorovaikutuksella, jota on alettu kutsua viidenneksi voimaksi. Uusia poikkeamia standardimallista on viime vuosina ilmestynyt, mutta niiden tilastollinen varmuus ei ole vielä tar-

Viidennen voiman tutkimus lähestyy hiukkasfysiikkaa eri tavalla kuin niin sanotut suuret yhtenäisteoriat.

peeksi vahva löydön kuuluttamiseksi. ”Vääriä hälytyksiä” halutaan ehdottomasti välttää: vasta kun todennäköisyys satunnaiselle kohinalle on vähemmän kuin yksi miljoonasta, voidaan puhua varmasta löydöstä.

VIIDES VOIMA TUTKIMUSAIHEENA

Viides voima on kiehtova tutkimusaihe erityisesti sen takia, että se on teoreetikon kannalta hyvin joustava. Se voi selittää monia eri asioita sen mukaan, millaisia ominaisuuksia sillä on. Tämä on myös kaksiteräinen miekka, sillä se ei ole ainoa mahdollinen ratkaisu kaikkiin pulmiin. Se ei myöskään voi selittää kaikkia ongelmia yhtä aikaa.

Useimmiten viidennestä voimasta puhuttaessa sillä tarkoitetaan yksinkertaisia laajennuksia, joissa sen ennustama uusien hiukkasten määrä on pieni. Aivan minimaalinen malli lisää ainoastaan vuorovaikutuksen välittäjähiukkasen. Jotta tutkijoilla olisi edes mahdollisuus havaita tällainen hiukkanen, sen on vuorovaikutettava standardimallin muiden hiukkasten kanssa. Muuten fyysikot ennustaisivat hiukkasen, jota ei pystytä havaitsemaan.

Viidennen voiman tutkimus lähestyy hiukkasfysiikkaa eri tavalla kuin niin sanotut suuret yhtenäisteoriat, joita on kehitetty jo pitkään. Suuret yhtenäisteoriat eivät lisää vuorovaikutuksia vaan päinvastoin yhdistävät jo tunnetut hiukkasfysiikan vuorovaikutukset samaan tapaan kuin **James Clerk Maxwell** (1831–1879) yhdisti sähkön ja magnetismin yhtenäiseksi sähkömagnetismin teoriaksi, vaikka ne oli aiemmin käsitetty eri ilmiöiksi. Ensimmäinen askel tähän suuntaan on jo tehty, sillä standardimallissa sähkömagnetismi ja heikko ydinvoima yhdistyvät erittäin korkeassa lämpötilassa samaksi vuorovaikutukseksi. Suuret yhtenäisteoriat samaistavat vielä vahvan ydinvoimankin.

Yhtenäisteoriat eivät kuitenkaan enää ole yhtä suuressa suosiossa kuin aiemmin. Yksinkertaisimmat yhtenäisteoriat on jo suljettu pois, sillä ne ennustavat protonin aivan liian lyhytikäiseksi epävakaaaksi hiukkaseksi.

Z'-BOSONI

Mikäli viidennen voiman välittäjähiukkanen on massiivinen, se olisi samankaltainen kuin standardimallin Z-bosoni. Siksi tällaista mas-



CERN on suunnitellut Future Circular Collider -hiukkaskiihdytintä, joka olisi sata kilometriä pitkä. Se voisi arvioiden mukaan olla käytössä noin vuonna 2040. Pienempi kehä kuvaa nykyistä CERN:in LHC-hiukkaskiihdytintä ja suurempi Future Circular Collideria.

siivista viidennen voiman välittäjähiukkasta on tapana kutsua Z_2 - tai Z' -bosoniksi (lausutaan Z-kaksi tai Z-pilkku).

Miksi Z' -bosonia ei ole vielä havaittu, jos se on olemassa? On kaksi mahdollisuutta: se on joko liian raskas nykyisille koejärjestelyille tai riittävän kevyt mutta vuorovaikuttaa muiden hiukkasten kanssa liian heikosti.

Mikäli Z' on liian raskas nykyisille koejärjestelyille, sen havaitseminen käy kalliiksi. Sveitsin ja Ranskan rajalla sijaitseva Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskuksen (CERN) renkaan muotoinen suuri hadronitörmäytin (LHC) on 27 kilometriä pitkä, mutta sen avulla ei ole löytynyt yhtään standardimallin ulkopuolista hiukkasta. Seuraava askel olisi

Nykyään hiukkasfysiikassa on yleistynyt selkeä suuntaus tehdä aiempaa pienempiä ja vaatimattomampia kokeita, jotka pystyvät silti luotaamaan tuntematonta aluetta.

rakentaa vieläkin suurempi hiukkaskiihdytin. CERN on tehnyt alustavia suunnitelmia sata kilometriä pitkistä hiukkaskiihdyttimestä, joka on nimetty Future Circular Collideriksi. Se olisi yli seitsemän kertaa energeettisempi kuin LHC, minkä vuoksi se voisi löytää paljon raskaampia Z'-bosoneja.

Kevyen Z'-bosonin tutkiminen on edullisempaa kuin raskaan Z'-bosonin. Sen mahdollista olemassaoloa voidaan tutkia nykyisillä hiukkaskiihdyttimillä. Erona on, että kohtuullisella törmäytysenergialla tapahtuvia hiukkasreaktioita on tuotettava paljon enemmän kuin nykyisin. Tällöin kiihdyttimien ei tarvitse olla energeettisempiä vaan intensiivisempiä, mutta se on helpompi hanke toteutettavaksi.

Aiemmin on löydetty uusia hiukkasia, kun koelaitteisto on päässyt käsiksi yhä suurempaan energiaan. Nykyään hiukkasfysiikassa on kuitenkin yleistynyt selkeä suuntaus tehdä aiempaa pienempiä ja vaatimattomampia kokeita, jotka pystyvät silti luotaamaan tuntematonta aluetta. Myös viidennen voiman tutkimus on vähitellen painottunut tähän

suuntaan. Esimerkiksi LHC-kiihdytintä parannelaan ei energia- vaan nimenomaan intensiteettisuunnan suhteen. Kesällä 2027 valmistuva ”korkean luminositeetin LHC” eli HL-LHC etsii heikosti vuorovaikuttavia Z'-bosoneja.

TUTKIMUKSEN HAASTEITA

Kvanttimekaniikassa on johdettu niin sanottu ajan ja energian epätarkkuusperiaate. Sen mukaan kevyet epävakaat hiukkaset elävät pidempään kuin raskaat. Mikäli Z' on kevyt, se elää tavallaan liian pitkään.

Kun hiukkaskiihdyttimen ilmaisimessa tuotetaan hiukkastörmäyksessä Z', se lentää pois sieltä ennen hajoamista. Tällaisia ”pitkäikäisiä” hiukkasia, jotka ovat olemassa pidempään kuin sekunnin miljardisosan, on etsittävä erillisessä ilmaisimessa, joka rakennetaan parinsadan metrin päähän törmäyspisteestä. Siellä hiukkaset hajoavat jo tunnetuiksi hiukkasiksi, jotka voidaan havaita. Näiden hiukkasten radat riippuvat niiden energioista. Energian säilymislain perusteella voidaan määrittää alkuperäisten pitkäikäisten

hiukkasten massat. Mikäli nämä massat eivät täsmää yhdenkään tunnetun hiukkasen kanssa, uusi hiukkanen on löydetty.

Kuten arvata saattaa, standardimallissa on jo valmiiksi tällaisia hiukkasia, jotka aiheuttavat ”väärää” taustasignaaleja. Niitä kutsutaan muun muassa myoneiksi, pioneiksi ja kaoneiksi. Näitä hiukkasreaktioita havaitaan suunnattomasti, joten hiukkasen radan määrittäminen ja tunnistaminen ilmaisimessa on hyvin pitkälle automatisoitu, jotta epätoivotavat signaalit voidaan suodattaa pois.

Viides voima eroaa muista voimista paitisi voimakkuudeltaan, myös kantamaltaan. Ydinvoimien kantama rajautuu atomiytimen sisälle, kun taas sähkömagnetismi ja painovoima ovat kantamaltaan äärettömiä. Kevyen Z'-bosonin välittämä viides voima olisi tällaisessa tapauksessa kantamaltaan parisataa metriä. Lyhyempi- ja pidempikantamaisia viidensitä voimia voisi havaita vastaavasti rakentamalla kaukoilmaisin eri etäisyydelle.

On mainittava vielä yksi vaihtoehto: jos viidennen voiman välittäjähiukkanen ei

vuorovaikuta Z-bosonin kanssa, sitä kutsutaan ”pimeäksi fotoniksi” ja vastaavaa viidettä voimaa ”pimeäksi sähkömagnetismiksi”. Pimeä ftoni voi olla massaton, mutta siinä tapauksessa sitä on vaikea erottaa standardimallin fotonista. Useimmiten sille oletetaan massa, jolloin sitä etsitään samalla tavalla kuin Z'-bosonia. Pimeä sähkömagnetismi on kuitenkin rajatumpi teoria kuin viides voima, sillä osa Z'-bosonille sallituista hiukkasreaktioista ei ole mahdollisia pimeälle fotonille.

VAIKUTTAAKO VIIDES VOIMA MYONEIHIN?

Myonit ovat muuten samanlaisia hiukkasia kuin elektronit, mutta ne ovat 207 kertaa painavampia kuin elektronit ja epävakaat: ne ”kylästyvät” olemassaoloonsa parissa mikrosekunnissa. **Carl Anderson** ja **Seth Neddermeyer** havaitsivat ne ensimmäisen kerran vuonna 1936, kun he tutkivat Maan ilmakehää pommittavia kosmisia säteitä. Elektronien tavoin myonit reagoivat sähkö- ja magneettikenttiin aivan kuin niil-

Varovaiset hiukkasfyysikot eivät vielä ole julistaneet havainneensa poikkeamaa standardimallista, sillä mittausvirheen todennäköisyys ei ole vielä pienempi kuin yksi miljoonasta.

lä olisi sähkövaraus ja magneettiset navat. Standardimalli ennustaa niiden ominaisuudet massaa lukuun ottamatta.

Kun myonit ovat vahvassa magneetikentässä, ne alkavat vaappua pyörivän hyrrän tavoin. Kun hyrrä on asetettu tasolle pyörimään, se ei suinkaan pysy täysin pystyssä, vaan pyörii itsensä lisäksi myös pyörimistasoa vastaan kohtisuoran (pysty)akselin ympäri. Tätä vaappumista kuvaa niin sanottu myonin magneettinen momentti. Standardimalli ennustaa sille arvon, joka täsmää kokeellisesti jopa kahdeksan desimaalin tarkkuudella. Näin suuren tarkkuuden laskeminen vaatii hienostuneita automatisoituja laskentamenetelmiä, joissa otetaan huomioon myonien vuorovaikutus tyhjiössä kuohuvien lyhytikäisten niin sanottujen virtuaalisten hiukkasten kanssa.

Myonien ja virtuaalisten hiukkasten vuorovaikutustapoja on ääretön määrä, mutta mitä monimutkaisempi vuorovaikutus on, sitä pienempi sen vaikutus on. Siksi kohtuulliseen tarkkuuteen riittää vain muutaman yksinkertaisimman vuorovaikutuksen huomioi-

minen. Ensimmäisen kerran tämän laskun teki kynällä ja paperilla **Julian Schwinger** vuonna 1948, jolloin hän otti vain yksinkertaisimman korjaustermien mukaan. Hän sai Nobel-palkinnon vuonna 1965. Nykyisin vuorovaikutuksia on laskettu jo tuhansia.

Uusimmat koetulokset vihjaavat kuitenkin, että standardimallin ennustama lukuarvo ei välttämättä ole oikea. Mallin ennustama arvo on 0,00116591810, mutta Fermilab julkaisi viime vuonna tuloksen myonin magneettisen momentin korjaustekijälle, ja se oli 0,001165920610. Lukujen ero on pieni mutta tilastollisesti merkittävä: todennäköisyys, että nämä arvot sopivat yhteen, on 1:40 000. Varovaiset hiukkasfyysikot eivät vielä ole julistaneet havainneensa poikkeamaa standardimallista, sillä mittausvirheen todennäköisyys ei ole vielä pienempi kuin yksi miljoonasta. Kokeet kuitenkin jatkuvat ja tarkentuvat, ja riittävä todennäköisyys saavutettaneen tällä vuosikymmenellä.

Vaikka sattuman todennäköisyys koetuloksessa on jopa niin ”suuri” kuin 1:40 000, teoreettiset hiukkasfyysikot ovat jo ennakoii-

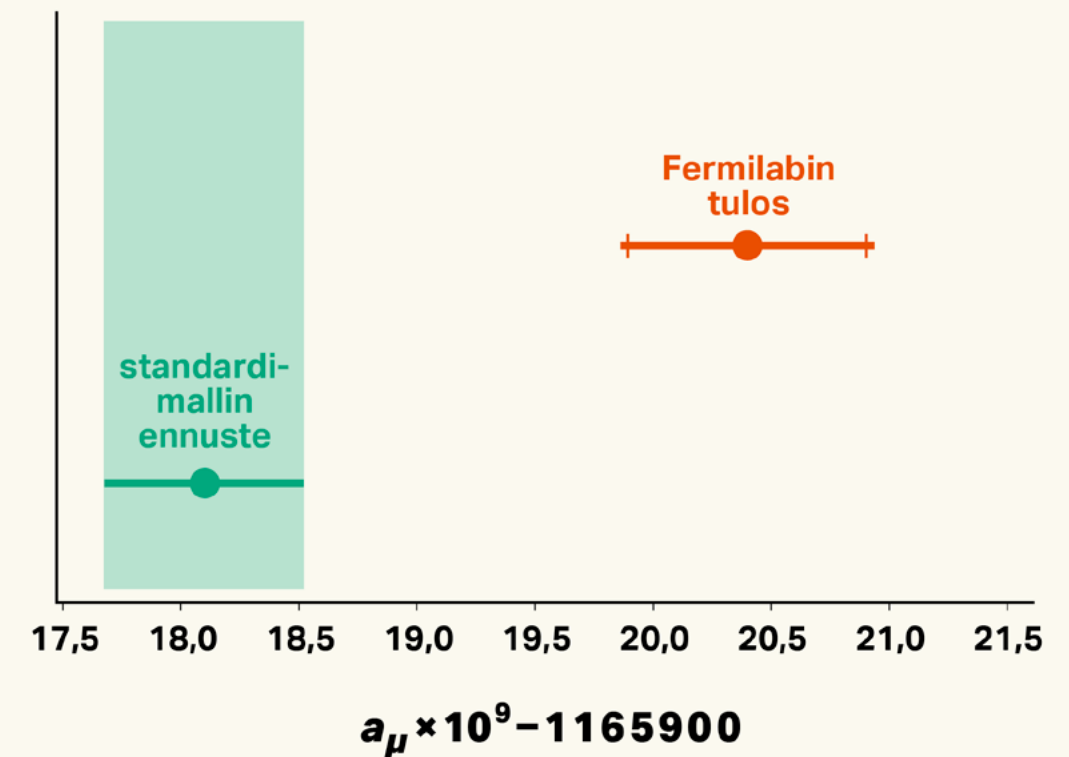
neet mahdollisia selityksiä sille. Mikäli on olemassa uusia tuntemattomia hiukkasia, ne saattavat vuorovaikuttaa myonin kanssa, jolloin niiden osuus magneettiseen momenttiin tulisi laskea. Tässä tapauksessa ei ole tärkeää laskea taas tuhansien eri vuorovaikutusten summaa, vaan uuden hiukkasen aiheuttaman poikkeaman suuruusluokka – tähän riittää jo yhden tai korkeintaan parin vuorovaikutuksen huomioiminen. Poikkeaman tulee olla todella pieni, noin miljoona kertaa

pienempi kuin standardimallin hiukkasten suurimmat korjaustermit. Yksi mahdollisuus monista on viidennen voiman välittäjähiukanen: pimeä fotoni tai Z' .

TÄHTIEN ELINIKÄ

Kevyt Z' -bosoni voi aiheuttaa muutoksia tähtitieteellisiin käsityksiin. Tähdet ovat pohjimmiltaan jättiläismäisiä ydinfuusio-reaktoreita, jotka muuttavat vetyä heliumik-

Koetulokset myonin magneettisen momentin korjaustermille



si ja tuottavat sivutuotteena suunnattomasti valoa ja neutriinoja. Neutriinot ovat laiskasti vuorovaikuttavia, joten ne lentävät pois miltei vapaasti. Samalla ne varastavat näkymättömästi mukanaan energiaa, minkä vuoksi tähti jäähtyy. Koska Z' on kevyt ja heikosti vuorovaikuttava, niitäkin pitäisi syntyä tähtien ytimissä. Myös niillä olisi kyky jäähdyttää tähteä. Tähti kuitenkin menettäisi tässä tapauksessa suuremman osan energiasta ”näkymättömästi” kuin siinä tapauksessa, että Z' -bosonia ei olisi olemassa.

Tähtitieteilijät pystyvät tähden massan perusteella ennustamaan sen kirkkauden ja jäähtymisnopeuden. Hyvin innokkaasti vuorovaikuttava Z' -bosoni lyhentäisi tähtien elinikää havaittavissa määrin, ja siksi sen mahdollisuus onkin jo suljettu pois. Heikosti vuorovaikuttava Z' voisi kuitenkin edelleen jäähdyttää tähtiä maltillisesti ja muuttaa myonin magneettista momenttia. Jo tällä vuosikymmenellä tehtävät kokeet luotaavat näitä mahdollisuuksia, ja mahdollisen viidennen voiman löytäjälle on takuuvarmasti luvassa fysiikan Nobel-palkinto.

Timo Kärkkäinen on teoreettisen fysiikan tutkijatohtori, joka työskentelee tällä hetkellä Eötvös Loránd -yliopistossa Budapestissä.