

Fysiikka Standardimallin ulkopuolella

Vuoteen 2012 mennessä, kun Higgsin bosoni oli vahvistettu CERNin Suurella hadronitörmäyttimellä, Standardimalli (SM) oli paperilla valmis. Jokainen ennustettu hiukkanen oli löydetty. Sen yhtälöt olivat läpäisseet jokaisen kokeellisen testin hämmästyttävällä tarkkuudella.

Siitä huolimatta fysiikan ilmapiiri ei ollut päätöksen vaan epätäydellisyyden tuntu. Kuten Newtonin lait ennen Einsteinia tai klassinen fysiikka ennen kvanttimekaniikkaa, Standardimalli oli liian menestyksekkäs niillä mittakaavoilla, joita voimme testata, mutta kykenemätön vastaamaan syvempiin kysymyksiin. Se oli lähes täydellinen kartta – mutta vain pienestä osasta maisemaa.

Painovoima: Puuttuva voima

Kaikkein ilmeisin puute on painovoima.

- SM kuvaa kolme neljästä tunnetusta perusvoimasta: sähkömagnetismin, heikon vuorovaikutuksen ja vahvan vuorovaikutuksen.
- Painovoima, jota kuvaa Einsteinin **yleinen suhteellisuusteoria (GR)**, on täysin poissa.

Tämä on enemmän kuin pelkkä unohdus. Yleinen suhteellisuusteoria käsittelee painovoimaa avaruusajan kaareutumisenä, sileänä geometrisena kenttänä, kun taas SM käsittelee voimia kvanttikenttinä, joita hiukkaset välittävät. Yritykset kvantisoida painovoima samalla tavalla törmäävät äärettömyyksiin, joita ei voida renormalisoida.

Standardimalli ja GR ovat kuin kaksi eri käyttöjärjestelmää – loistavia omilla alueillaan, mutta perustavanlaatuisesti yhteensopimattomia. Niiden sovittaminen yhteen on kenties fysiikan suurin haaste tänä päivänä.

Neutriinon massat

SM ennustaa, että neutriinoilla ei ole massaa. Kokeet, alkaen Japanin Super-Kamiokande-ilmaisimesta (1998) ja vahvistettu maailmanlaajuisesti, osoittivat kuitenkin, että neutriinot oskilloivat eri makujen (elektroni, myoni, tau) välillä. Oskillaatio vaatii massaa.

Tämä oli ensimmäinen vahvistettu todiste fysiikasta Standardimallin ulkopuolella. Löytö voitti vuoden 2015 Nobelin palkinnon Kajitalle ja McDonalldille.

Neutriinot ovat äärimmäisen kevyitä, ainakin miljoona kertaa kevyempiä kuin elektroni. Niiden massoja ei selitä SM – mutta ne voivat vihjata uuteen fysiikkaan, kuten **keinumekanismiin**, steriileihin neutriinoihin tai yhteyksiin varhaiseen maailmankaikkeuteen. Joissakin skenaarioissa raskaat keinuneutriinot mahdollistavat

leptogeneesiin, jossa varhaisessa maailmankaikkeudessa luodaan leptonien asymmetria, joka myöhemmin muuttuu havaituksi **materia-antimateria-asymmetriaksi**.

Pimeä aine

SM:n kuvaama näkyvä aine muodostaa alle 5 % maailmankaikkeudesta. Loppu on näkymätöntä.

- **Pimeä aine** (~27 % maailmankaikkeudesta) paljastuu vain painovoiman kautta: galaksit pyörivät nopeammin kuin näkyvä aine sallii, galaksijoukot taivuttavat valoa enemmän kuin niiden pitäisi, ja kosminen mikroaaltotausta vaatii ylimääräistä näkymätöntä massaa.
- Yksikään SM:n hiukkasista ei voi selittää sitä. Neutriinot ovat liian kevyitä ja nopeita. Tavallinen aine on liian harvinaista.

Teoriat ehdottavat uusia hiukkasia: WIMPejä (heikosti vuorovaikuttavia massiivisia hiukkasia), aksioneita, steriilejä neutriinoja tai jotain oudompaa. Mutta vuosikymmenten etsinnöistä huolimatta – maanalaiset ilmaisimet, törmäyskokeet, astrofysikaaliset kartoitukset – pimeä aine pysyy tavoittamattomissa.

Pimeä energia

Vielä salaperäisempi on **pimeä energia**, voima, joka ajaa maailmankaikkeuden kiihtyvää laajenemista.

- Löydetty vuonna 1998 supernovahavaintojen kautta, pimeä energia muodostaa ~68 % maailmankaikkeudesta.
- Periaatteessa se voitaisiin selittää kvanttikenttien ”tyhjiöenergiana”. Mutta naiivit QFT-laskelmat ennustavat tyhjiöenergian tiheyden, joka on 120 suuruusluokkaa liian suuri – fysiikan huonoin ennuste.

Tämä **kosmologisen vakion ongelma** on kenties terävin ristiriita kvanttikenttäteorian ja painovoiman välillä. Standardimallilla ei ole mitään sanottavaa pimeästä energiasta. Se on valtava aukko ymmärryksessämme kosmosta.

Hierarkiaongelma

Toinen syvä arvoitus piilee itse Higgsin bosonissa.

Higgsin massa on mitattu 125 GeV:ksi. Kvanttikorjausten pitäisi kuitenkin työntää sen lähelle Planckin skaalaa (10^{19} GeV), ellei tapahdu ihmeellisiä kumoamisia. Miksi se on niin kevyt verrattuna painovoiman luonnollisiin energiaskaaloihin?

Tämä on **hierarkiaongelma**: Higgs vaikuttaa epänormaalisti hienosäädetyltä. Fyysikot epäilevät uutta fysiikkaa, kuten **supersymmetriaa (SUSY)**, joka voisi vakauttaa Higgsin massan tuomalla kumppanihiukkasia, jotka kumoavat vaaralliset korjaukset. (Keskustelut **luonnollisuudesta** sisältävät ideoita dynaamisista ratkaisuista **antrooppiseen** päättelyyn mahdollisessa ”maisemassa” tyhjiöistä.)

Materia–antimateria-asymmetria

SM sisältää jonkin verran CP-rikkomusta, mutta ei läheskään tarpeeksi selittämään, miksi nykyinen maailmankaikkeus on täynnä materiaa eikä saman verran materiaa ja antimateriaa. Kuten edellä mainittiin, mekanismit kuten **leptogeneesi** (usein sidottu neutriinon massojen keinumekanismiin) tarjoavat yhden vakuuttavan polun, jossa fysiikka SM:n ulkopuolella kallistaa vaakaa.

Kaunis mutta epätäydellinen kuva

Standardimallia kutsutaan joskus ”fysiikan menestyneimmäksi teoriaksi”. Sen ennusteet vastaavat kokeita 10–12 desimaalin tarkkuudella. Se selittää lähes kaiken, mitä näemme hiukkaskiihdyttimissä ja laboratorioissa.

Mutta se on epätäydellinen:

- Se sivuuttaa painovoiman.
- Se ei pysty selittämään neutriinon massoja.
- Se ei voi selittää pimeää ainetta tai pimeää energiaa.
- Se jättää syviä arvoituksia, kuten hierarkiaongelman ja materia–antimateria-asymmetrian, ratkaisematta.

Fyysikot kohtaavat nyt tutun hetken historiassa. Aivan kuten Newtonin mekaniikka väistyi suhteellisuusteorialle ja klassinen fysiikka kvanttimekaniikalle, Standardimallin on lopulta annettava tilaa jollekin syvemmälle.

Pyhä Graalin malja: Yhtenäinen teoria

Lopullinen tavoite on **Suuri yhtenäinen teoria (GUT)** tai jopa **Kaiken teoria (ToE)**: kehys, joka yhdistää kaikki neljä voimaa, selittää kaikki hiukkaset ja toimii johdonmukaisesti pienimmistä skaaloista (kvanttipainovoima) suurimpiin (kosmologia).

Tämä on modernin fysiikan Pyhä Graalin malja. Siksi tutkijat työntävät kiihdyttimiä korkeampiin energioihin, rakentavat massiivisia neutriinoilmaisimia, kartoittavat kosmosta teleskoopeilla ja keksivät rohkeita uusia matemaattisia lähestymistapoja.

Seuraavat luvut tutkivat johtavia ehdokkaita:

- **Supersymmetria (SUSY)** – symmetria aine- ja voima-hiukkasten välillä.
- **Säieteoria ja M-teoria** – jossa hiukkaset ovat värähteleviä säikeitä, ja graviton syntyy luonnollisesti.
- **Ylimääräiset ulottuvuudet** – Kaluza–Kleinin varhaisesta ideasta moderneihin Randall–Sundrum-malleihin.
- **Muut lähestymistavat** – kuten silmukakkvanttipainovoima ja asympotoottinen turvallisuus.

Jokainen näistä ideoista ei syntynyt dogmina, vaan tieteenä parhaimmillaan: huomaamalla halkeamia, rakentamalla uusia teorioita ja testaamalla niitä todellisuutta vastaan.

Supersymmetria: Seuraava suuri symmetria?

Fysiikalla on pitkä historia yhdistämisestä symmetrian kautta. Maxwellin yhtälöt yhdistivät sähköön ja magnetismin. Erityinen suhteellisuusteoria yhdistivät avaruuden ja ajan. Elektroheikko teoria yhdistivät kaksi neljästä perusvoimasta. Jokainen harppaus eteenpäin tuli paljastamalla luonnossa piilevä symmetria.

Supersymmetria – tai SUSY, kuten fyysikot sitä hellästi kutsuvat – on rohkea ehdotus, että seuraava suuri symmetria yhdistää kaksi näennäisesti erillistä hiukkasluokkaa: **aineen ja voimat**.

Fermionit ja bosonit: Aine vs. voima

Standardimallissa hiukkaset jakautuvat kahteen laajaan perheeseen:

- **Fermionit (spin 1/2):** Näihin kuuluvat kvarkit ja leptonit, aineen rakennuspalikat. Niiden puolikokonaislukuinen spin tarkoittaa, että ne noudattavat Paulin poissulkemisperiaatetta: kaksi identtistä fermionia ei voi olla samassa tilassa. Tämä selittää, miksi atomeilla on rakenteelliset kuoret ja miksi aine on stabiilia.
- **Bosonit (kokonaislukuinen spin):** Näihin kuuluvat fotonit, gluonit, W- ja Z-bosonit sekä Higgsin bosoni. Bosonit välittävät voimia. Toisin kuin fermionit, ne voivat kasaantua samaan tilaan, minkä vuoksi laserit (fotonit) ja Bose–Einstein-kondensaattorit ovat olemassa.

Lyhyesti: fermionit muodostavat aineen, bosonit kantavat voimia.

Supersymmetriahypoteesi

Supersymmetria ehdottaa symmetriaa, joka yhdistää fermionit ja bosonit. Jokaiselle tunnetulle fermionille on olemassa bosoninen kumppani. Jokaiselle tunnetulle bosonille fermioninen kumppani.

- Kvarkit → **skvarkit**
- Leptonit → **sleptonit**
- Gluonit → **gluinot**
- Gauge/Higgs-sektori → **neutralinot** (binon, winon, higgsinojen sekoitukset; neutraalit) ja **karginot** (winon, higgsinojen sekoitukset; varatut)

(“Fotino” ja “zino” ovat vanhempia gauge-ominaisnimityksiä; kokeet etsivät itse asiassa yllä mainittuja **massan ominaisarvoja**.)

Miksi ehdottaa näin radikaalia hiukkasmaailman kaksinkertaistamista? Koska SUSY lupaa elegantteja ratkaisuja joihinkin Standardimallin jättämiin syvimpiin ongelmiin.

Hierarkiaongelman ratkaiseminen

Yksi SUSY:n suurimmista vetovoimatekijöistä on sen kyky käsitellä **hierarkiaongelmaa**: miksi Higgsin bosoni on niin kevyt verrattuna Planckin skaalaan.

Standardimallissa virtuaalisten hiukkasten kvanttikorjaukset pitäisi ajaa Higgsin massa valtaviin arvoihin. Supersymmetria tuo mukanaan spartikkeleita, joiden panokset kumoavat nämä divergenssit. Tulos: Higgsin massa stabiloituu luonnollisesti ilman hienosäätöä (ainakin "luonnollisissa" SUSY-spektreissä).

SUSY ja suuri yhdistyminen

Toinen motivaatio SUSY:lle tulee voimien yhdistämisestä.

- Kun vahvan, heikon ja sähkömagneettisen voiman kytkentävakiot lasketaan korkeampiin energioihin, Standardimallissa ne melkein, mutta eivät aivan, kohtaavat yhdessä pisteessä.
- SUSY:ssa, spartikkeleiden vaikutuksen myötä, kytkentävakiot kohtaavat kauniisti noin 10^{16} GeV:ssä.

Tämä viittaa siihen, että erittäin korkeilla energioilla kaikki kolme voimaa voivat yhdistyä yhdeksi **Suureksi yhtenäiseksi teoriaksi (GUT)**.

SUSY pimeän aineen kandidaattina

Supersymmetria tarjoaa myös luonnollisen kandidaatin **pimeälle aineelle**.

Jos SUSY on oikein, yhden spartikkelin pitäisi olla stabiili ja sähköisesti neutraali. Johtava kandidaatti on **kevyin neutralino**, binon, winon ja higgsinonjen sekoitus.

Neutralinot vuorovaikuttaisivat vain heikosti, sopien WIMPien (heikosti vuorovaikuttavien massiivisten hiukkasten) profiiliin. Jos ne löydettäisiin, ne voisivat selittää maailmankaikkeuden puuttuvan 27 %:n aineen.

Kokeelliset etsinnät SUSY:lle

Vuosikymmenten ajan fyysikot toivoivat, että supersymmetriset hiukkaset ilmestyisivät juuri niiden energiaskaalojen yläpuolelle, joita oli jo tutkittu.

- **LEP (CERN, 1990-luku):** Ei SUSY-hiukkasia noin 100 GeV:iin asti.
- **Tevatron (Fermilab, 1990–2000-luku):** Ei spartikkeleita.
- **LHC (CERN, 2010–2020-luku):** Protonien-protonien törmäykset jopa **13,6 TeV** (suunnittelu: **14 TeV**). Huolimatta massiivisista etsinnöistä, ei todisteita skvarkeista, gluinoista tai neutralinoista useiden TeV:n skaaloihin asti.

SUSY:n löytöjen puute LHC:ssä on ollut pettymys. Monet yksinkertaisimmista SUSY-versioista, kuten "minimaalinen supersymmetrinen Standardimalli" (MSSM), ovat nyt voimakkaasti rajoitettuja. "Luonnolliset" spektrit työntyvät raskaampiin arvoihin, mikä merkitsee enemmän hienosäätöä, jos SUSY sijaitsee lähellä TeV-skaalaa.

Silti SUSY:ä ei ole suljettu pois. Monimutkaisemmat mallit ennustavat raskaampia tai hienovaraisempia spartikkeleita, ehkä LHC:n ulottumattomissa, tai vuorovaikutuksia, jotka ovat liian heikkoja helposti havaittaviksi.

SUSY:n matemaattinen kauneus

Fenomenologisten motivaatioidensa lisäksi SUSY:llä on syvä matemaattinen eleganssi.

- Se on ainoa mahdollinen avaruusajan symmetrioiden laajennus, joka on yhteensopiva suhteellisuusteorian ja kvanttimekaniikan kanssa.
- Supersymmetriset teoriat ovat usein laskettavampia: ne kesyttävät äärettömyydet ja paljastavat piilotettuja rakenteita QFT:ssä.
- Säieteoriassa SUSY on välttämätön konsistenssin kannalta: ilman sitä teoria sisältää takyoneja ja muita patologioita.

Vaikka luonto ei toteuttaisi SUSY:ä saavutettavissa olevilla energioilla, sen matematiikka on jo rikastuttanut fysiikkaa.

Supersymmetrian tila

Tänään SUSY pitää omituisen aseman.

- Se on edelleen yksi vakuuttavimmista kehyksistä fysiikalle Standardimallin ulkopuolella.
- Se ratkaisee hierarkiaongelman, tukee yhdistymistä ja tarjoaa kandidaatin pimeälle aineelle.
- Silti kokeellisia todisteita ei ole vielä löytynyt.

Jos LHC ja sen seuraajat eivät löydä mitään, SUSY saattaa toteutua vain energiaskaaloilla, jotka ovat kaukana ulottuvillamme – tai ehkä luonto valitsi täysin erilaisen polun.

Menetelmä, ei dogma

Supersymmetria havainnollistaa tieteellistä menetelmää toiminnassa.

Fyysikot tunnistivat ongelmia: hierarkiaongelman, yhdistymisen, pimeän aineen. He ehdottivat rohkeaa uutta symmetriaa, joka ratkaisee ne kaikki. He suunnittelivat kokeita sen testaamiseksi. Toistaiseksi tulokset ovat negatiivisia – mutta se ei tarkoita, että idea olisi hukkaan heitetty. SUSY terävöitti työkalumme, selvensi, mitä etsimme, ja ohjasi kokonaisia tutkimussukupolvia.

Kuten eetteri tai episyklit ennen sitä, SUSY voi osoittautua välietapiksi kohti syvempää totuutta, selviääkö se lopullisena sanana vai ei.

Säieteoria ja M-teoria

Fysiikka Standardimallin ulkopuolella on usein motivoitunut paikkauksista: hierarkiaongelman ratkaiseminen, pimeän aineen selittäminen, gauge-kytkentöjen

yhdistäminen. Säieteoria on erilainen. Se ei ala tietystä pulmasta. Sen sijaan se alkaa matematiikasta – ja päättyy muokkaamaan koko käsitystämme avaruudesta, ajasta ja aineesta.

Alkuperä: Epäonnistumisesta syntynyt teoria

Säieteoria alkoi yllättävästi, ei kaiken teoriana, vaan epäonnistuneena yrityksenä ymmärtää vahvaa ydinvoimaa.

1960-luvun lopulla, ennen kuin QCD oli täysin kehitetty, fyysikot yrittivät selittää hadronien eläintarhaa. He huomasivat hajoamisdatassa kuvioita, jotka viittasivat siihen, että resonansseja voisi mallintaa värähtelevillä säikeillä.

“Du-al resonanssimalli,” jonka Veneziano esitteli vuonna 1968, kuvasi vahvoja vuorovaikutuksia ikään kuin hadrons olisivat pienten säikeiden virityksiä. Se oli elegantti mutta nopeasti hylätty, kun QCD nousi vahvan voiman todelliseksi teoriaksi.

Silti säieteoria kieltäytyi kuolemasta. Sen yhtälöissä oli piilotettuja merkittäviä piirteitä, jotka tuntuivat viittaavan paljon ydinfysiikan ulkopuolelle.

Hämmästyttävä löytö: Graviton

Kun teoreetikot kvantisoivat säikeiden värähtelyjä, he huomasivat, että spektri sisälsi väistämättä **massattoman spin-2-hiukkasen**.

Tämä oli järkyttävää. Kvanttikenttäteoria oli osoittanut, että massaton spin-2-hiukkanen on ainutlaatuinen: sen on oltava painovoiman kvantti, **graviton**.

Kuten John Schwarz myöhemmin huomautti: *“Mutta hämmästyttävä tosiasia ilmeni: säiteorian matematiikka sisälsi väistämättä massattoman spin-2-hiukkasen – gravitonin.”*

Se, mikä alkoi hadronien teoriana, oli vahingossa tuottanut kvanttipainovoiman rakennuspalikan.

Ydinidea: Säikeet, ei pisteet

Säiteorian ytimessä pistehiukkaset korvataan pienillä yksidimensionaalisilla objekteilla: säikeillä.

- Säikeet voivat olla **avoinna** (kaksi päätepistettä) tai **suljettuja** (silmukoita).
- Säikeen eri värähtelymoodit vastaavat eri hiukkasia.
 - Erityinen värähtely voi näyttää fotonilta.
 - Toinen gluonilta.
 - Toinen kvarkilta.
 - Ja yksi moodi, väistämättä, gravitonilta.

Tämä yksinkertainen muutos – pisteistä säikeisiin – ratkaisee monet kvanttipainovoimaa vaivaavat äärettömyydet. Säikeen rajallinen koko hämärtää vuorovaikutukset, jotka muuten räjähtäisivät nollaetäisyydellä.

Supersymmetria ja superkielit

Varhaiset säieteorian versiot olivat ongelmallisia: ne sisälsivät takyoneja (epävakauksia) ja vaativat epärealistisia piirteitä. Läpimurto tuli **supersymmetrian** käyttöönoton myötä, mikä johti **superkieliteoriaan** 1970- ja 1980-luvuilla.

Superkielit poistivat takyonit, sisälsivät fermionit ja toivat uutta matemaattista johdonmukaisuutta.

Mutta oli yksi ongelma: säieteoria toimii vain korkeammissa ulottuvuuksissa. Tarkemmin sanottuna **10 avaruusajan ulottuvuutta**.

- Neljä, jotka näemme (kolme avaruudellista, yksi ajallinen).
- Kuusi muuta, tiivistettyjä tai käärittyjä pieniin skaaloihin, näkymättömiä nykyisille kokeille.

Tämä idea, vaikka radikaalilta tuntuukin, ei ollut täysin uusi. 1920-luvulla **Kaluza-Klein-teoria** oli jo vihjannut, että ylimääräiset ulottuvuudet voisivat yhdistää painovoiman ja sähkömagnetismin. Säieteoria herätti ja laajensi tämän idean valtavasti.

Viisi säieteoriaa

1980-luvun puolivälissä fyysikot huomasivat, että säieteoria ei ollut ainutlaatuinen, vaan sitä oli **viisi erilaista versiota**:

1. **Tyyppi I** – Avoimet ja suljetut säikeet, mukaan lukien sekä suunnatut että suunnattomat säikeet.
2. **Tyyppi IIA** – Suljetut, suunnatut säikeet, ei-kiraaliset.
3. **Tyyppi IIB** – Suljetut, suunnatut säikeet, kiraaliset.
4. **Heteroottinen $SO(32)$** – Suljetut säikeet hybridirakenteella.
5. **Heteroottinen $E_8 \times E_8$** – Erittäin symmetrinen versio, myöhemmin ratkaiseva realistisen hiukkasfysiikan yhdistämiseksi.

Jokainen näytti matemaattisesti johdonmukaiselta, mutta miksi luonto valitsisi yhden?

Ensimmäinen superkielirevoluutio

Vuonna 1984 Michael Green ja John Schwarz osoittivat, että säieteoria voi automaattisesti kumota kvanttianomaliat – jotain, mitä kvanttikenttäteorioiden piti huolellisesti suunnitella. Tämä löytö käynnisti **ensimmäisen superkielirevoluution**, jolloin tuhannet fyysikot kääntyivät säieteorian puoleen kandidaattina kaikkien voimien yhtenäiseksi teoriaksi.

Se oli ensimmäinen vakava kehys, jossa kvanttipainovoima ei ollut vain johdonmukainen vaan väistämätön.

Toinen superkielirevoluutio: M-teoria

1990-luvun puolivälissä tapahtui toinen vallankumous. Edward Witten ja muut huomasivat, että viisi eri säieteoriaa eivät olleet kilpailijoita, vaan yhden, syvemmän teorian erilaisia rajoja: **M-teorian**.

M-teorian uskotaan elävän **11 ulottuvuudessa** ja sisältävän paitsi säikeitä myös korkeamman ulottuvuuden objekteja, joita kutsutaan **braaneiksi** (lyhenne sanoista membraanit).

- 1-ulotteiset braanit = säikeet.
- 2-ulotteiset braanit = membraanit.
- Korkeamman ulottuvuuden braanit aina 9 avaruudelliseen ulottuvuuteen asti.

Nämä braanit synnyttivät rikkaita uusia mahdollisuuksia: kokonaiset maailmankaikkeudet voivat olla 3-braaneja, jotka kelluvat korkeamman ulottuvuuden avaruudessa, painovoiman vuotaessa tilavuuteen samalla kun muut voimat pysyvät rajoitettuina. Tämä kuva inspiroi moderneja ylimääräisten ulottuvuuksien malleja, kuten **Randall-Sundrum**.

Merkittäviä esimerkkejä: Kaluza-Klein ja Randall-Sundrum

- **Kaluza-Klein (1920-luku):** Ehdotti viidettä ylimääräistä ulottuvuutta painovoiman ja sähkömagnetismin yhdistämiseksi. Idea oli hyllytetty vuosikymmenten ajan, mutta säieteoria herätti sen uudelleen suuremmassa muodossa. Tiivistetyt ylimääräiset ulottuvuudet ovat edelleen keskeinen piirre säiemalleissa.
- **Randall-Sundrum (1999):** Ehdotti "vääristyneitä" ylimääräisiä ulottuvuuksia, joissa maailmankaikkeutemme on 3-braani, joka on upotettu korkeampiin ulottuvuuksiin. Painovoima leviää tilavuuteen, selittäen, miksi se on heikompi kuin muut voimat. Tällaiset mallit ennustavat mahdollisia signaaleja hiukkaskiihdyttimissä tai poikkeamia Newtonin laista hyvin lyhyillä etäisyyksillä.

Kokeelliset vihjeet ja haasteet

Säieteoria esittää rohkeita väitteitä, mutta niiden testaaminen on äärimmäisen vaikeaa.

- **Ylimääräiset ulottuvuudet:** Voivat paljastua puuttuvan energian signaalien kautta tai **Kaluza-Klein-viritysten** kautta – mahdollisesti **gravitoneille tai jopa Standardimallin kentille**, riippuen asetelmasta. Kiihdytinrajoitukset ulottuvat tyypillisesti **multi-TeV**-alueelle.
- **Gravitoni:** Massaton spin-2-hiukkanen ennustetaan, mutta yksittäisen gravitonin havaitseminen on nykyteknologian ulottumattomissa. Epäsuorat vaikutukset, kuten poikkeamat painovoima-aalloissa, ovat mahdollisia.
- **Supersymmetria:** Säieteoria vaatii SUSY:ä jossain skaalassa, mutta LHC ei ole vielä löytänyt spartikkeleita.
- **Kosmologia:** Varhainen maailmankaikkeus, inflaatio ja kosminen mikroaaltotausta voivat sisältää säiefysiikan jälkiä, vaikka tulokset ovat toistaiseksi epäselviä.

Haasteista huolimatta säieteoria on tarjonnut hedelmällistä maaperää matematiikalle, inspiroiden edistystä geometriassa, topologiassa ja dualiteeteissa, kuten AdS/CFT (joka yhdistää painovoiman korkeammissa ulottuvuuksissa kvanttikenttäteoriaan ilman painovoimaa).

Kauneus ja kiista

Kannattajat väittävät, että säieteoria on lupaavin tie yhtenäiseen teoriaan: se sisältää kvanttipainovoiman, yhdistää kaikki voimat ja selittää, miksi gravitonin on oltava olemassa.

Kriitikot väittävät, että ilman kokeellista vahvistusta säieteoria riskoi irtautua empiirisestä tieteestä. Sen valtava "maisema" mahdollisia ratkaisuja (jopa 10^{500}) tekee yksilöllisten ennusteiden poimimisen vaikeaksi.

Molemmat osapuolet ovat yhtä mieltä yhdestä asiasta: säieteoria on muuttanut tapaamme ajatella fysiikkaa, tarjoten uuden kielen yhdistämiselle.

Kohti kaiken teoriaa

Jos supersymmetria on seuraava askel Standardimallin ulkopuolelle, säieteoria on askel sen jälkeen: kandidaatti kauan etsittyyn **Kaiken teoriaan**.

Sen rohkein väite ei ole vain se, että se sisältää Standardimallin ja painovoiman, vaan että nämä ovat värähtelevien säikeiden väistämättömiä seurauksia korkeammissa ulottuvuuksissa. Graviton ei ole lisäosa – se on sisäänrakennettu.

Jää nähtäväksi, onko luonto valinnut tämän polun.

Rajojen koettelu: Kokeet Standardimallin ulkopuolella

Teoriat ovat fysiikan elinehto, mutta kokeet ovat sen sydämenlyönnit. Supersymmetria, säieteoria ja ylimääräiset ulottuvuudet ovat kauniita matemaattisia rakennelmia, mutta ne elävät tai kuolevat todisteiden perusteella. Jos niiden on tarkoitus olla muutakin kuin spekulatiota, niiden on jätettävä jälkiä dataan.

Fyysikot ovat kehittäneet nerokkaita tapoja etsiä näitä jälkiä – kiihdyttimissä, kosmoksessa ja itse avaruusajan rakenteessa.

Kiihdyttimet: Spartikkeleiden ja gravitonien metsästys

Suuri hadronitörmäytin (LHC) CERNissä on maailman tehokkain hiukkaskiihdytin, joka törmäyttää protoneja jopa **13,6 TeV** energioilla (suunnittelu: **14 TeV**). Se on ollut ihmiskunnan ensisijainen työkalu fysiikan tutkimiseen Standardimallin ulkopuolella.

Supersymmetria LHC:ssä

- **Spartikkeleiden etsinnät:** ATLAS- ja CMS-kokeet ovat käyneet läpi dataa etsiäkseen skvarkkeja, gluinoja ja neutralinoja/karginoja. Nämä ilmestyisivät usein "puuttuvan

energian” signaaleina, koska SUSY-hiukkaset pakenevat havaitsemista.

- **Tulokset:** Yksikään vahvistettu SUSY-hiukkanen ei ole löytynyt useiden TeV:n skaalaan asti. Tämä on sulkenut pois monia yksinkertaisimpia SUSY-malleja ja työntää ”luonnollisen” SUSY:n raskaampiin, hienosäädetympään alueisiin.

Gravitoni ja ylimääräiset ulottuvuudet

- **Kaluza–Klein-moodit:** Jos ylimääräiset ulottuvuudet ovat olemassa, **gravitonit tai jopa SM-kentät** voivat näkyä massiivisina KK-virityksinä, havaittavina resonansseina dileptoni-, difotoni- tai dijet-kanavissa.
- **Randall–Sundrum-signaalit:** Vääristyneet ylimääräiset ulottuvuudet voisivat tuottaa gravitoni-resonansseja, joilla on tyypillisiä spin-2 kulmamalleja.
- **Tulokset:** LHC:n etsinnät eivät ole toistaiseksi löytäneet todisteita, mutta ovat työntäneet rajoja **multi-TeV**-skaalaan, rajoittaen ylimääräisten ulottuvuuksien kokoa, vääristymää ja geometriaa.

Mikromustat aukot

Jotkut teoriat ehdottavat, että jos painovoima vahvistuu TeV-skaalassa, pieniä mustia aukkoja voisi muodostua LHC:n törmäyksissä, haihtuen hiukkaspurkauksina. Tällaisia tapahtumia ei ole nähty.

Tarkkuuskokeet: Painovoiman testaus pienillä skaaloilla

Jos ylimääräisiä ulottuvuuksia on olemassa, Newtonin painovoimalaki voi rikkoutua lyhyillä etäisyyksillä.

- **Vääntösalokokeet (“Eöt-Wash”):** Testaavat käänteisen neliön lakia **alimillimetri**-skaaloihin asti – tällä hetkellä **kymmeniä mikroneja (~50 μm)**.
- **Tulokset:** Poikkeamia ei ole löydetty. Nämä kokeet **sulkevat pois** laajan luokan ylimääräisten ulottuvuuksien skenaarioita, joiden karakteristiset pituudet ovat **yli ~10⁻⁴ m** (mallista riippuen).

Nämä pöytäkokeet ovat huomattavan herkkiä ja tutkivat skaaloja, joihin kiihdyttimet eivät pääse.

Painovoima-aallot: Uusi ikkuna kvanttipainovoimaan

Painovoima-aaltojen löytyminen LIGO:n toimesta vuonna 2015 avasi uuden rajan.

- **Ylimääräiset polarisaatiot / muutettu leviäminen:** Jotkut kvanttipainovoima- tai ylimääräisten ulottuvuuksien mallit ennustavat poikkeamia GR:stä (lisäpolarisaatioita, dispersiota tai muokattuja jälkikaiunta).
- **Jälkikaiuntaspektroskopia:** Mustien aukkojen ”soiminen” fuusion jälkeen voi paljastaa hienovaraisia poikkeamia GR:stä.
- **Alkuperäiset painovoima-aallot:** Big Bangin aaltoilut voivat kantaa säiefysiikan jälkiä, jotka ovat havaittavissa tulevilla observatorioilla, kuten LISA tai Einstein-teleskooppi.

Toistaiseksi havainnot ovat yhteneväisiä GR:n kanssa nykyisten epävarmuuksien puitteissa, mutta suurempi tarkkuus voi paljastaa yllätyksiä.

Kosmologia: Maailmankaikkeus laboratoriona

Itse kosmos on lopullinen hiukkaskiihdytin.

- **Kosmisen mikroaaltotaustan (CMB):** Pienet vaihtelut kartoittavat varhaisen maailmankaikkeuden. Jotkut säiemallit ennustavat spesifisiä signaaleja, kuten ei-gaussisia piirteitä tai oskillaatio-ominaisuuksia.
- **Inflaatio:** Maailmankaikkeuden nopea laajentuminen saattoi johtua säieteoriaan liittyvistä kentistä. Alkuperäisten B-moodien havaitseminen CMB:ssä olisi vahva vihje.
- **Pimeän aineen etsinnät:** SUSY:n neutralinot ovat ensisijaisia kandidaatteja pimeälle aineelle. Kokeet kuten XENONnT, LUX-ZEPLIN ja PandaX etsivät WIMPejä ydinrekyyliä kautta.
- **Aksionit:** Säieteoria ennustaa myös aksionimaisia hiukkasia, jotka voitaisiin havaita resonanssikaviteettien tai astrofysikaalisten havaintojen kautta.

Toistaiseksi taivas on hiljainen. Pimeää ainetta ei ole havaittu, ja kosmologiset tiedot sopivat Λ CDM-malliin ilman selkeitä säie jälkiä.

Nykyinen tila: Rajoitukset, ei vahvistukset

Vuosikymmenten etsintä ei ole vahvistanut SUSY:ä, ylimääräisiä ulottuvuuksia tai säiesignaaleja. Mutta todisteiden puuttuminen ei ole todiste poissaolosta:

- SUSY voi olla olemassa LHC:n ulottumattomissa olevilla skaaloilla tai vähemmän silmiinpistävissä spektreissä; nollatulokset tähän mennessä **suosivat enemmän hienosäädettyjä ("vähemmän luonnollisia")** versioita, jos SUSY on lähellä TeV-skaalaa.
- Ylimääräiset ulottuvuudet voivat olla pienempiä, vääristyneempiä tai muuten piilossa nykyisiltä koettimilta.
- Säieteoria voi jättää havaittavia jälkiä vain hyvin varhaiseen maailmankaikkeuteen, jotka ovat saatavilla vain kosmologian kautta.

Muutamit **tarkkuusanomaliat** (esim. myonin (**g-2**)-mittaus ja jotkut **makufysiikan** jännitteet) ovat edelleen **kiehtovia mutta ratkaisemattomia**; ne motivoivat jatkuvaa tarkastelua ilman, että ne vielä kaataisivat SM:ää.

Kokeet ovat **kaventaneet parametritilaa**. Ne ovat kertoneet meille, missä SUSY ei ole, kuinka pieniksi ylimääräisten ulottuvuuksien on oltava ja kuinka vahvasti pimeä aine voi tai ei voi vuorovaikuttaa.

Tie eteenpäin

Tulevat kokeet lupaavat sukeltaa syvemmälle:

- **Korkean luminositeetin LHC (HL-LHC):** Kerää $\sim 10\times$ enemmän dataa, tutkiakseen SUSY:ä korkeampiin massoihin ja harvinaisiin prosesseihin.
- **Tuleva pyöreä kiihdytin (FCC-hh):** Ehdotettu 100 TeV:n kiihdytin, riittävän tehokas tutkimaan energiaskaaloja, joissa GUT-fysiikka saattaa ilmestyä.
- **LISA (2030-luku):** Avaruuspohjainen painovoima-aaltojen observatorio, herkkä varhaisen maailmankaikkeuden alkusignaaleille.
- **Seuraavan sukupolven pimeän aineen ilmaisimet:** Herkkyydellä heikoille signaaleille ne voivat vihdoinkin napata WIMPin tai aksionin.

Tiede matkana

BSM-fysiikan kokeellinen tarina ei ole epäonnistumisen, vaan prosessin tarina.

- Nollatulokset sulkevat pois yksinkertaisia malleja ja terävöittävät teorioitamme.
- Jokainen rajoitus ohjaa meitä kohti hienostuneempia, ennustavampia kehyksiä.
- SUSY:n tai ylimääraisten ulottuvuuksien puuttuminen TeV-skaalassa ei tapa ideoita – se työntää ne uuteen alueeseen.

Aivan kuten Rutherfordin kultafoliokoe murskasi luumupudding-mallin tai LIGO murskasi epäilyt painovoima-aalloista, seuraava suuri löytö voi tulla äkillisesti – ja muuttaa kaiken.

Kohti kaiken teoriaa

Vuosisatojen ajan fysiikka on edennyt yhdistämisen kautta. Newton yhdisti taivaat ja maan yhteen gravitaatiolakiin. Maxwell yhdisti sähköön ja magnetismin. Einstein yhdisti avaruuden ja ajan. Elektroheikko teoria osoitti, että kaksi hyvin erilaista voimaa ovat yhden osa-alueita.

Seuraava askel on rohkein tähän mennessä: yhdistää **kaikki neljä perusvuorovaikutusta** – vahva, heikko, sähkömagneettinen ja gravitaatio – yhdeksi, itsensä kanssa johdonmukaiseksi kehykseksi. Tämä on fysiikan Pyhä Graalin malja: **Kaiken teoria (ToE)**.

Miksi ToE on tärkeä

Täydellinen yhdistyminen ei ole vain filosofista eleganssia; se käsittelee syviä käytännöllisiä ja käsitteellisiä ongelmia:

- **Kvanttipainovoima:** Yleinen suhteellisuusteoria hajoaa Planckin skaalassa (10^{19} GeV). Vain kvanttipainovoimateoria voi selittää mustat aukot ja Big Bangin singulariteetin.
- **Luonnollisuus ja hienosäätö:** Hierarkiaongelma ja kosmologisen vakion ongelma huutavat syvempää selitystä.
- **Standardimallin parametrit:** Miksi hiukkasilla on niiden massat ja varaukset? Miksi kolme kvarkkien ja leptonien sukupolvea? ToE voisi selittää nämä mysteerit.
- **Kosmologia:** Pimeä aine, pimeä energia ja inflaatio voivat kaikki liittyä fysiikkaan yhdistymisskaalassa.

ToE ei vain yhdistäisi voimia – se yhdistäisi skaalat, kvantiteorian pienimmistä säikeistä suurimpiin kosmisiin rakenteisiin.

Supersymmetria ja suuri yhdistyminen

Supersymmetria (SUSY), jos se toteutuu luonnossa, tarjoaa välietapin ToE:hen.

- **Hierarkiaongelma ratkaistu:** Spartikkelit kumoavat Higgsin massan divergoivat korjaukset.
- **Gauge-kytkentöjen yhdistyminen:** SUSY:n myötä kolmen voiman vahvuudet konvergoivat kauniisti 10^{16} GeV:ssä, vihjaten **Suureen yhtenäiseen teoriaan (GUT)**.
- **Pimeän aineen kandidaatti:** Neutralino tarjoaa luonnollisen selityksen kosmiselle pimeälle aineelle.

SUSY-inspiroimat GUT:t (kuten SU(5), SO(10) tai E_6) kuvittelevat, että ultrakorkeilla energioilla kvarkit ja leptonit yhdistetään suuremmiksi moninaisuuksiksi ja voimat sulautuvat yhteen gauge-ryhmään.

Mutta SUSY:ä ei ole vielä näkynyt kokeissa. Jos se on olemassa vain skaaloilla, jotka ovat ulottumattomissamme, sen yhdistävä voima voi jäädä houkuttelevaksi mutta piilotetuksi.

Säieteoria: Kvanttipainovoima ja graviton

Säieteoria menee pidemmälle. Sen sijaan, että paikkaisi Standardimallia, se kirjoittaa perustan uudelleen:

- **Säikeet, ei pisteet:** Kaikki hiukkaset ovat pienten säikeiden värähtelyjä.
- **Graviton syntyy luonnollisesti:** Massaton spin-2-viritys on väistämätön, mikä tarkoittaa, että kvanttipainovoima on sisäänrakennettu.
- **Yhdistyminen:** Erilaiset värähtelymoodit tuottavat kaikki tunnetut hiukkaset – kvarkit, leptonit, gauge-bosonit, Higgs – yhdessä kehyksessä.
- **Ylimääräiset ulottuvuudet:** Säieteoria vaatii 10 avaruusajan ulottuvuutta; M-teoria vaatii 11, piilotettujen ulottuvuuksien ollessa tiivistettyjä tai vääristyneitä.

Tässä visiossa yhdistyminen ei ole sattumaa – se on geometriaa. Voimat eroavat, koska säikeet värähtelevät eri tavoin, muotoiltuina ylimääräisten ulottuvuuksien topologialla.

M-teoria ja brana-maailmat

Löytö, että viisi säieteoriaa liittyvät dualiteetteihin, johti M-teoriaan, vieläkin mahtavampaan kehykseen:

- Sisältää säikeitä, membraaneja ja korkeamman ulottuvuuden braaneja.
- Viittaa siihen, että maailmankaikkeutemme voisi olla 3-braani, joka on upotettu korkeamman ulottuvuuden tilaan.
- Tarjoaa luonnollisia selityksiä sille, miksi painovoima on heikompi (se leviää ylimääräisiin ulottuvuuksiin) ja miten useita maailmankaikkeuksia voisi olla olemassa "multiversumissa".

M-teoria on vielä epätäydellinen, mutta se edustaa kunnianhimoisinta askelta kohti ToE:ta, jota on koskaan yritetty.

Muut tiet kvanttipainovoimaan

Säieteoria ja M-teoria eivät ole ainoita polkuja. Fyysikot tutkivat useita kehyksiä, joilla kaikilla on erilaisia vahvuuksia:

- **Silmukkakvanttipainovoima (LQG):** Yrittää kvantisoida avaruusajan suoraan, ennustaen, että avaruus on diskreetti Planckin skaalassa.
- **Asymptoottinen turvallisuus:** Ehdottaa, että painovoima voi olla hyvin käyttäytyvää korkeilla energioilla johtuen ei-triviaalista kiinteästä pisteestä.
- **Kausaalit dynaamiset triangulaatiot (CDT):** Rakentaa avaruusajan yksinkertaisista geometrisista rakennuspalikoista.
- **Twistor-teoria ja amplituhedrat:** Uusia matemaattisia kehyksiä, jotka uudelleenkuvailevat avaruusajan ja hajoamisamplitudit.

Vaikka mikään ei vielä kilpaile säieteorian yhdistävän laajuuden kanssa, ne havainnollistavat etsinnän rikkautta.

Kokeen rooli

ToE:n on oltava lopulta testattavissa. Vaikka Planckin skaala on kaukana nykyisten kokeiden ulottuvilla, fyysikot etsivät epäsuoria todisteita:

- **Kiihdyttimet:** SUSY-hiukkaset, ylimääräiset ulottuvuudet tai mikromustat aukot.
- **Tarkkuustestit:** Poikkeamat Newtonin laista lyhyillä skaaloilla.
- **Painovoima-aallot:** Eksoottiset polarisaatiot tai korkeamman ulottuvuuden kaiut.
- **Kosmologia:** Inflaation jäljet, pimeän aineen kandidaatit tai säieteorian ennustamat aksionit.

Toistaiseksi ToE jää ulottumattomiin, mutta jokainen nollatulokarsii mahdollisuuksia.

Kauneus ja haaste

Todellinen ToE ei vain yhdistäisi fysiikkaa – se yhdistäisi **inhimillisen tiedon**. Se yhdistää kvanttimekaniikan ja suhteellisuusteorian, mikro- ja makromaailman, hiukkasen ja kosmoksen.

Silti se kohtaa paradoksin: skaala, jossa yhdistyminen tapahtuu, voi olla ikuisesti kokeellisen ulottuvuuden ulkopuolella. 100 TeV:n kiihdytin tutkii vain murto-osan matkasta Planckin skaalaan. Meidän on ehkä luotettava kosmologiaan, matemaattiseen johdonmukaisuuteen tai epäsuoriin signaaleihin.

Unelma pysyy elossa kehysten syvän eleganssin vuoksi. Kuten Witten huomautti, säieteoria ei ole vain ”joukko yhtälöitä” vaan ”uusi kehys fysiikalle”.

Tiede menetelmänä, ei dogmana

ToE:n etsintä ei ole siitä, että julistetaan säieteoria, SUSY tai mikään yksittäinen idea "todeksi". Kyse on **tieteellisestä menetelmästä**:

- Nykyisten teorioiden halkeamien tunnistaminen.
- Rohkeiden uusien kehysten ehdottaminen.
- Niiden testaaminen todellisuutta vastaan, hylkääminen tai jalostaminen tarpeen mukaan.

Tarina on kaukana päättymisestä. Mutta juuri tämä avoimuus – kieltäytyminen pitämästä mitään teoriaa pyhänä – tekee fysiikasta elävän tieteen, ei dogman.

Horisontti edessä

Seuraava fysiikan vuosisata voi paljastaa:

- Todisteita supersymmetriasta tai sen vaihtoehdoista.
- Kosmologisia tietoja, jotka vahvistavat tai kumoavat säie-ennusteet.
- Syvemmän uudelleenmuotoilun itse avaruusajasta.

Tai ehkä todellinen ToE on jotain, jota kukaan ei ole vielä kuvitellut.

Mutta itse etsintä – halu yhdistää, selittää, nähdä luonto kokonaisuutena – on yhtä paljon osa ihmisyyttä kuin yhtälöt itse.

Viitteet ja lisälukemista

Supersymmetria ja suuri yhdistyminen

- Wess, J., & Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., & Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., & Glashow, S. L. (1974). "Unity of All Elementary-Particle Forces." *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Säieteoria ja M-teoria

- Green, M. B., Schwarz, J. H., & Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (Osa 1 & 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (Osa 1 & 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). "String Theory Dynamics in Various Dimensions." *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., & Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Silmukakkvanttipainovoima ja vaihtoehdot

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.

- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., & Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Kokeelliset rajat

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Saavutettavat kansantajuiset kertomukset

- Greene, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.