



HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



# Fysiikkaa runoilijoille

## Osa 7

# Kohti kaiken teoriaa

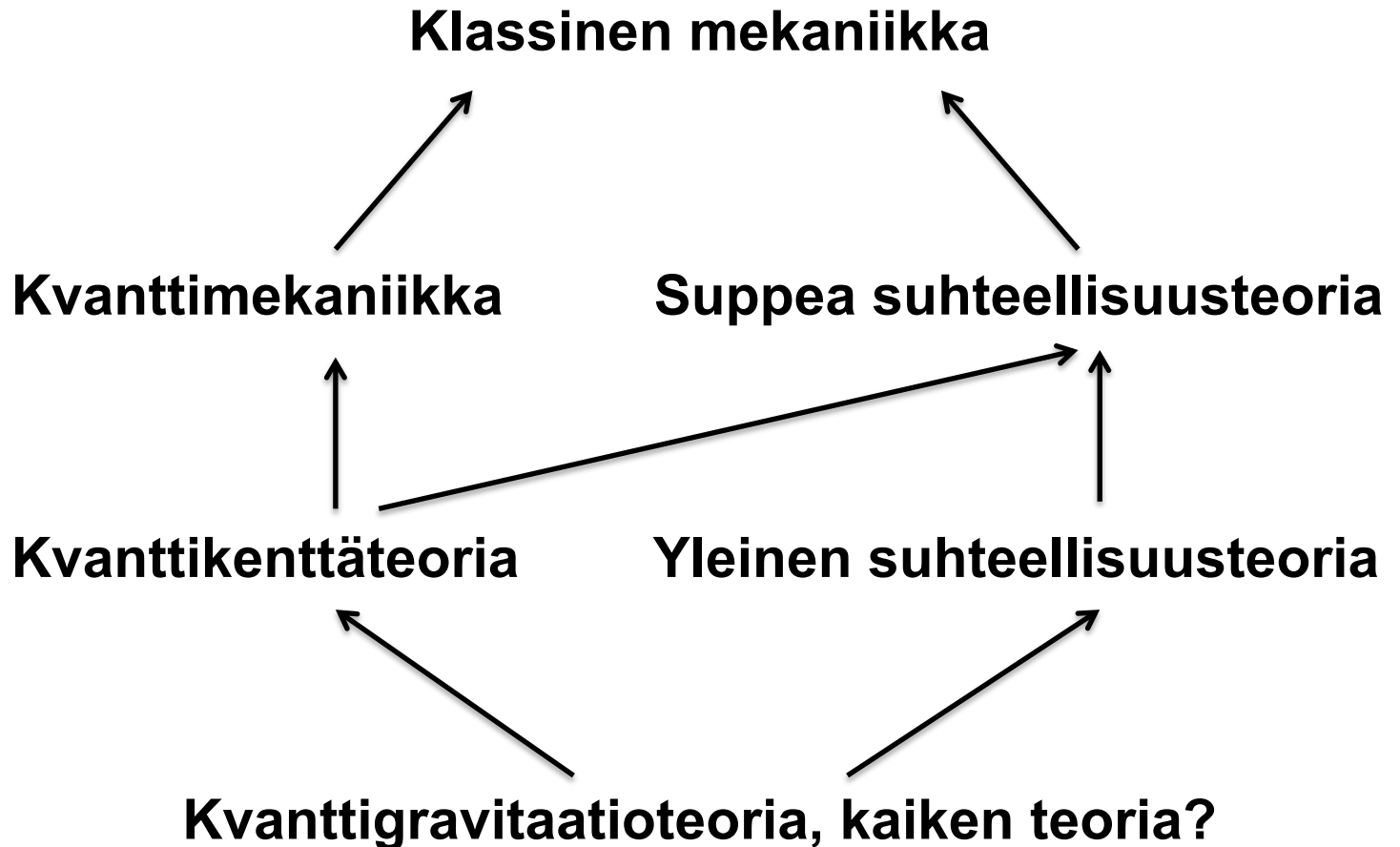
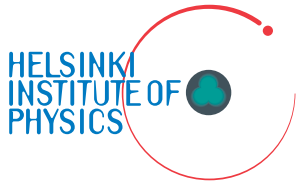
*Syksy Räsänen*

Helsingin yliopisto, fysiikan laitos  
ja fysiikan tutkimuslaitos





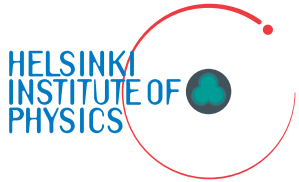
# Fysiikan teorioiden rajatapauksia





# Kaksi pilaria

---



- Yleinen suhteellisuusteoria kuvaa aika-avaruutta ja gravitaatiota.
- Standardimalli kuvaa ainetta ja muita tunnettuja vuorovaikutuksia.
- Ne voi yleistää kolmella tavalla:
  - Kehittämällä Standardimallia laajemman kvanttikenttäteorian.
  - Kehittämällä yleistä ST:tä laajemman gravitaatioteorian.
  - Yhdistämällä kvanttikenttäteorian ja yleisen ST:n. (Kvanttigravitaatio.)



# Hämärä tie

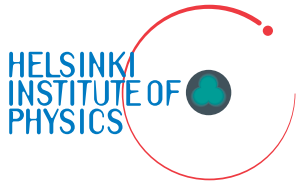


- Standardimallin ja yleisen ST:n laajennuksia sekä kvanttigravitaatiota on tutkittu kymmeniä vuosia kymmenissä tuhansissa artikkeleissa.
- On toivottu, että uudet kiihdyttimet kuten LHC löytäisivät merkkejä Standardimallin tuolta puolen.
  - Tässä on petytty.
  - Kokeellista varmennusta ideoille ei juuri ole saatu.
- Inflaatio, pimeä aine ja baryogeneesi ovat vihjeitä, mutta ei ole selvää, mitä on tunnettujen teorioiden tuolla puolen.



# Standardimallin tuolla puolen

---



- Suurin osa Standardimallin laajennuksista on variaatioita muutamasta teemasta.
- Laajennuksissa tyypillisesti lisätään uusia hiukkasia ja uusia symmetrioita.
- Eräitä suosittuja ideoita:
  - **Supersymmetria**
  - **Suuri yhtenäisteoria**



# Supersymmetria



- Kenties suosituin laajennus pohjaa supersymmetriaan.
- Supersymmetria yhdistää suppean suhteellisuusteorian ja hiukkasfysiikan symmetriat.
- Kvanttikenttäteoriat kuten QED ovat symmetrisiä aika-avaruuden Lorentz-muunnoksissa ja kenttäavaruuden muunnoksissa.
- Supersymmetriassa nämä muunnokset liitetään yhdeksi kokonaisuudeksi.
  - Vrt. avaruuden kiertojen ja Galilei-muunnoksen yhdistäminen suppeassa ST:ssä.



# Yhtäläiset puoliset



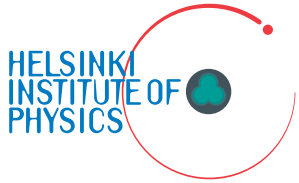
- Lorentz-muunnosten ja kenttien muunnosten yhdistäminen onnistuu vain, jos teoria on symmetrinen välittäjähiukkasten ja ainehiukkasten vaihtamisen suhteen.
- Jokaista ainehiukkasta pitää siis vastata välittäjähiukkanen, jolla on samanlaiset ominaisuudet. (Massa, sähkövaraus, ...)
- Näitä sanotaan **superpartnereiksi**.





# Liikaa kauneutta

---



- Supersymmetriassa on etuna:
  - Kaunis matemaattinen idea.
  - Laskennallinen helppous.
  - Rajoittava rakenne. (Hiukkasilla pitää olla parit.)
- Supersymmetriassa on ongelmana:
  - Rajoittava rakenne: superpartnereita ei ole nähty.



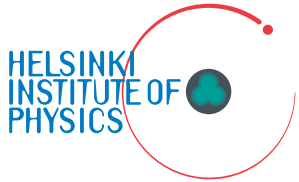
# Piiloutuneet puoliset



- Millään tunnetuilla hiukkasilla ei ole samaa massaa (paitsi fotonilla ja gluoneilla, joiden massa on nolla).
  - Supersymmetria ei liitä tunnettuja hiukkasia toisiinsa, vaan tuntemattomiin hiukkasiin.
  - Vrt. positronin ennustaminen 1931, löytäminen 1932.
- Jos supersymmetria pätsisi luonnossa, superpartnerit olisi löydetty.
  - Supersymmetria on rikkoutunut, tai sitä ei ole.



# Minimaalinen Supersymmetrinen Standardimalli



- MSSM on Standardimallin yksinkertaisin supersymmetrinen laajennus.
- Siinä otetaan Standardimalli ja lisätään kaikille hiukkasille supersymmetriset partnerit.
- Sitten rikotaan supersymmetria.
  - Standardimallissa Higgs rikkoo sähköheikon symmetrian.
  - MSSM ei sisällä mekanismia supersymmetrian rikkomiseen.
- Rikkomisen jälkeen superpartnerien massat eroavat.



# Lunastamattomia lupauksia

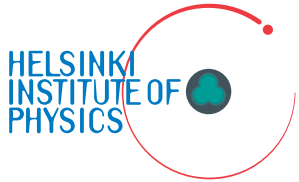


- MSSM:stä on seuraavaa hyötyä:
  - Pimeän aineen kandidaatti (kevyin superpartneri on stabiili).
  - Vuorovaikutukset näyttävät yhtyvän, mikä voi olla vihje suuresta yhtenäisteoriasta.
  - Supersymmetrian rikkoutumisen skaala selittää Higgsin massan.
  - Kokeellisesti superpartnereita odottaisi näkyvän LHC:ssä ja muualla.
- MSSM:llä on seuraavia ongelmia:
  - Ei tiedetä, mikä rikkoo supersymmetrian.
  - Mitään merkkejä siitä ei ole näkynyt.



# Suuri yhtenäisteoria

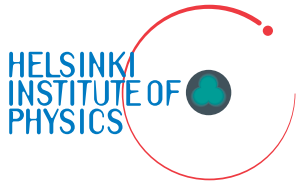
---



- Standardimallissa on kolme vuorovaikutusta: sähkömagneettinen, heikko ja vahva.
- Sähköheikko vuorovaikutus yhdistää sähkömagneettisen ja heikon vuorovaikutuksen.
- Suuressa yhtenäisteoriassa (**Grand Unified Theory, GUT**) yhdistetään sähköheikko ja vahva vuorovaikutus.
  - Ei sisällä gravitaatiota. (Oikeasti siis keskikokoinen.)



# Yhtenäisyyden rikkominen

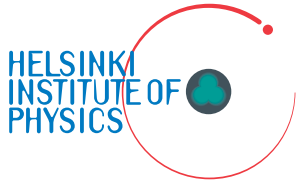


- Sähkömagneettinen ja heikko vuorovaikutus ovat yhdessä korkeilla energioilla.
- Niiden symmetrian rikkoo Higgsin kenttä, joka antaa massan  $W$ - ja  $Z$ -bosoneille, mutta ei fotonille.
- Suuressa yhtenäisteoriassa on sama idea.
  - Keksitään teoria, jossa on vain yksi symmetria ja siten yksi vuorovaikutus korkeilla energioilla.
  - Rikotaan symmetria lisäämällä higgsinkaltaisia kenttiä, jotka erottavat vahvan ja sähköheikon vuorovaikutuksen.
- Tuloksena on teoria, jossa kaikki vuorovaikutukset ovat osa yhtä kokonaisuutta, mutta näyttävät erilaisilta.



# Suuria odotuksia

---



- Suurten yhtenäisteorioiden hyötyjä:
  - Selittävät Standardimallin ainesisältöä. (Miksi kaksi leptonia ja kaksi kertaa kolme kvarkkia per perhe?)
  - Voivat selittää hiukkasten massojen arvot.
  - Voivat selittää baryogeneesin.
  - Toivotaan olevan astinlauta kvanttigravitaatioon.
- Suurten yhtenäisteorioiden ongelmia:
  - Uusien Higgsien rakenne on monimutkainen.
  - Rikkoutumisen energiaskaalan pitää olla korkea, koska protonin hajoamista ei ole nähty.



# Kvanttigravitaatio ja kaiken teoria

---



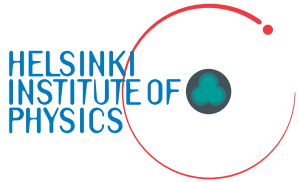
- Suuri yhtenäisteoria ei sisällä gravitaatiota.
- Kaksi suuntaa:
  - Gravitaation liittäminen kvanttifysiikkaan (**kvanttigravitaatio**).
  - Kvanttigravitaation yhdistäminen hiukkasfysiikkaan (**kaiken teoria, Theory of Everything, TOE**).
- Arvellaan, että jälkimmäinen tuottaisi perustavanlaatuisimman mahdollisen teorian, joka ei edes periaatteessa palautuisi mihinkään.





# Kvanttigravitaatio

---



- Yleinen suhteellisuusteoria on deterministinen teoria aika-avaruudesta.
- Aika-avaruuden geometriaa kuvataan kentällä, joka kertoo, miten aika-avaruus kaareutuu.
- Sähkömagnetismi:
  - QED -> Maxwellin yhtälöt -> Coulombin laki
- Gravitaatio:
  - ? -> Einsteinin yhtälö -> Newtonin gravitaatiolaki



# Painavia ongelmia

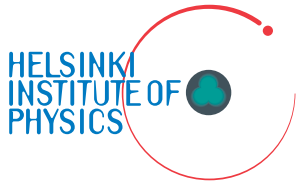
---



- Voidaan yrittää QED:n reseptiä gravitaatiolle: tehdään klassisesta kentästä kvanttikenttä.
- Yleisen suhteellisuusteorian tapauksessa tämä on paljon vaikeampaa kuin sähkömagnetismin.
- Kvanttikenttäteoriassa oletetaan yleensä aika-avaruus, joka on muuttumaton ja passiivinen.
- Gravitaation kuvaaminen vaatii, että aika-avaruus voi muuttua ja vuorovaikuttaa aineen kanssa.



# Aika-avaruuden klimppejä

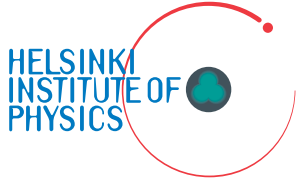


- Yleisestä suhteellisuusteoriasta on yritetty rakentaa kvanttiteoriaa ainakin 1950-luvulta alkaen.
- Pieniä poikkeamia tasaisesta aika-avaruudesta osataan käsitellä kuten muitakin kenttiä: **gravitoni**.
  - Inflaation gravitaatioaalto.
- Tällainen kuvaus ei kelpaa mustille aukoille, koko maailmankaikkeudelle eikä isoille energioille.
- Ovelampia yrityksiä on, mutta ei tiedetä, ovatko ne oikein.
  - Yksi mahdollisuus on se, että aika-avaruus ei ole perustavanlaatuinen, vaan emergentti.



# Supergravitaatio

---



- Yksi yleisen suhteellisuusteorian yleistys kvanttiteoriaan on **supergravitaatio**.
- Siinä yhdistetään yleinen suhteellisuusteoria ja supersymmetria.
- Siinä otetaan mukaan gravitonin supersymmetrinen partneri.
- Tässäkin tapauksessa supersymmetria pitää rikkoa, koska superpartnereita ei ole nähty.



# Korkeuksiin kurottamista



- Supergravitaation rakenne on vielä rajoittavampi kuin muun supersymmetrian.
- Se kytkee aika-avaruuden ja hiukkassisällön yhteen.
- Supergravitaatioteoriat käyttäytyvät eri tavalla eri määrässä ulottuvuuksia.
- 10+1 ulottuvuudessa on vain yksi mahdollinen supergravitaatioteoria.
  - Symmetria sanelee aineen ja vuorovaikutukset yksikäsitteisesti.
  - Ei kuvaa todellisuutta, ainakaan sellaisenaan.



# Uudesta kulmasta

---



- Monet tutkijat ajattelevat, että kvanttifysiikan ja yleisen suhteellisuusteorian yhdistäminen, ja kaiken teorian löytäminen, vaatii perusteellista käsitteellistä muutosta.
- Tutkituin ehdokas periaatteiltaan uudenlaiseksi kvanttigravitaatioteoriaksi ja kaiken teoriaksi on **säieteoria**.
- Säieteoria on laaja alue, jota on tutkittu tuhansissa artikkeleissa.



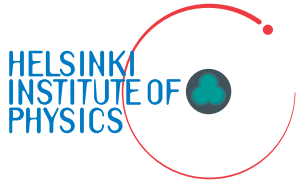
# Säieteoria



- Säieteoria on kvanttiteoria **säikeistä**, kaksiulotteisista kappaleista.
  - Vrt. kvanttimekaniikka on kvanttiteoria yksiulotteisista kappaleista.
  - Säieteoria ei perustu kvanttikenttäteoriaan.
- Säikeiden värähtelyt vastaavat hiukkasia.
- Säieteoriaa tutkittiin alun perin 1960-luvulla ehdokkaana vahvojen vuorovaikutusten teoriaksi.
- 1974 hahmotettiin, että se sisältää gravitaation.



# Ulottuvuuden luku

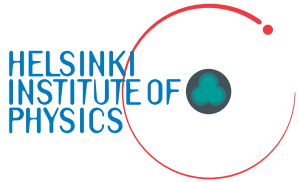


- Säieteoria on (tavallisissa versioissaan) mahdollinen vain, jos ulottuvuuksia on  $9+1$ .
- Ensimmäinen teoria, joka ennustaa ulottuvuuden lukumäärän.
- Säieteoria sisältää myös supersymmetrian ja suuren yhtenäisteorian.
- Kvanttigravitaatioteorian etsiminen johtaa ehdokkaaseen kaiken teoriaksi.
  - Hedelmällistä: yksinkertaisesta ideasta seuraa monimuotoinen rakenne.





# Viisi nurkkaa, yksi teoria?



- 1984 hahmotettiin, että mahdollisia säieteorioita on vain viisi erilaista.
- 1995 ehdotettiin, että ne ovat rajatapauksia kaiken teoriasta, **M-teoriasta**, jossa on  $10+1$  ulottuvuutta.
  - 11-ulotteinen supergravitaatio on sen approksimaatio.
- Ongelmia:
  - Ei tiedetä, mikä M-teoria on.
  - Havaitsemme vain  $3+1$  ulottuvuutta.
  - Supersymmetriaa ei havaita.
  - Säieteorian sisältämä gravitaatioteoria on erilainen kuin yleinen suhteellisuusteoria, ja ristiriidassa havaintojen kanssa.



# Lukemattomia piiloja



- Ongelmien uskotaan liittyvän toisiinsa: kun ylimääräiset ulottuvuudet kääritään pieniksi, niin teoria muuttuu.
- Emme näe ylimääräisiä ulottuvuuksia, jos ne ovat pieniä.
- On valtavan monta tapaa kääriä ulottuvuuksia.
  - Käärminen vaikuttaa siihen, millaisia hiukkasia ja vuorovaikutuksia on.
- Ei tiedetä:
  - Millä periaatteella oikea käärminen määräytyy. (Miksi 3+1?)
  - Onko sellaista periaatetta olemassa.
  - Onko oikeaa käärmistä olemassa.



# Kaikenlaisia selityksiä

---



- Epäonnistuminen on yritetty kääntää voitoksi sanomalla, että kaikki käärimiset kuvaavat todellisuutta, mutta voimme havaita vain sellaisen, joissa olemassaolomme on mahdollista.
  - Ei kannata etsiä 'sitä ainoa oikeaa'.
- Se idea, että maailmankaikkeuden ominaisuudet määräytyvät siitä, että olemassaolomme on mahdollista, tunnetaan nimellä **antrooppinen periaate**.
  - Herättää voimakkaita tunteita tiedeyhteisössä.



# Kaikenlaisia selityksiä

---



- Jos kaikki erilaisia käärimisiä vastaavat maailmankaikkeudet ovat olemassa (mitä se tarkoittaakaan) **multiversumissa**, niin ennusteita voi tehdä ainoastaan tilastollisesti, jos tuntee luonnonlakien jakauman multiversumissa.
- Kaikkia käärimisiä ei tunneta, joten ei voida ennustaa mitään.



# Kaiken tai ei minkään teoria



- Kvanttiteoria säikeistä pitää sisällään hiukkasfysiikan ja gravitaation.
  - Todellisuutta kuvaavan hiukkasfysiikan ja gravitaation saaminen siitä on vaikeaa.
- Säieteoriaa on tutkittu kaiken teoriana yli 40 vuotta, mutta vieläkin ei tiedetä kahta asiaa:
  - Mikä säieteoria on.
  - Kuvaako se todellisuutta.
- Säieteoriaa on johtanut matemaattisiin oivalluksiin ja mahdollisesti hyödyllisiin laskennallisiin apuvälineisiin.



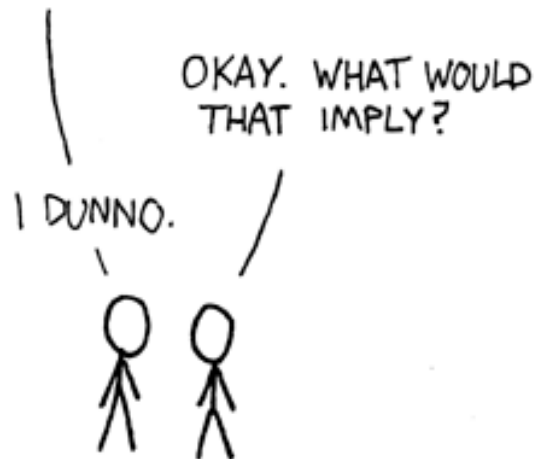
# Yksi kuva

HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



## STRING THEORY SUMMARIZED:

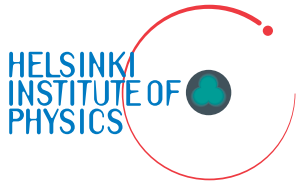
I JUST HAD AN AWESOME IDEA.  
SUPPOSE ALL MATTER AND ENERGY  
IS MADE OF TINY, VIBRATING "STRINGS."





# Neljä vuosikymmentä

---

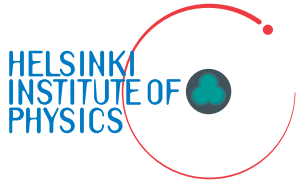


- Supersymmetria, yhtenäisteoriat, säieteoria (kaiken teoriana) on aloitettu 1970-luvulla.
- Ne nousivat merkittäviksi 1980-luvulla.
- Niille ei ole löytynyt tukea havainnoista.
- Voi olla, että supersymmetriaa ja suurta yhtenäisteoriaa ei ole, ja kvanttigravitaatio on aivan erilainen kuin säieteoria.
- Ei ole viitoitettua polkua oikeaan vastaukseen.



# Käytännöstä

---



- Tänään annetaan viimeinen viikkotehtävä ja esseen aiheet.
- Lisäksi on palautekysely.
- Esseiden deadline on 10.11. ja sen pituus on 10 000-30 000 merkkiä.