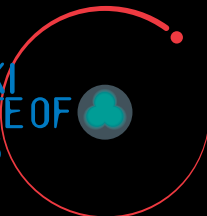




HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



Fysiikkaa runoilijoille

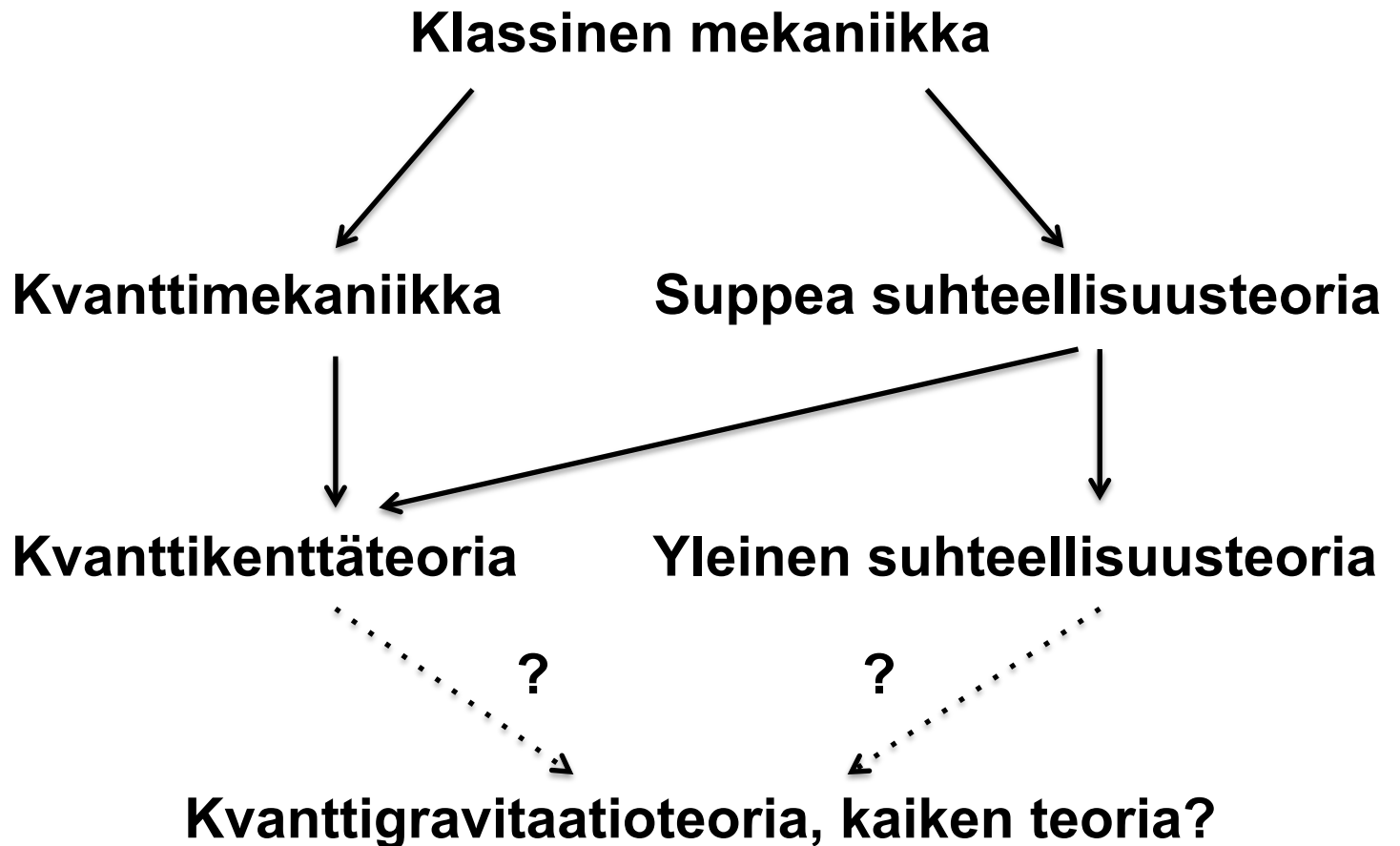
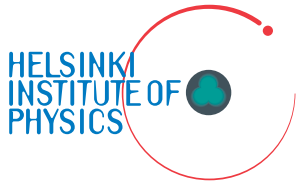
Osa 7: kohti kaiken teoriaa

Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto, fysiikan laitos
ja fysiikan tutkimuslaitos

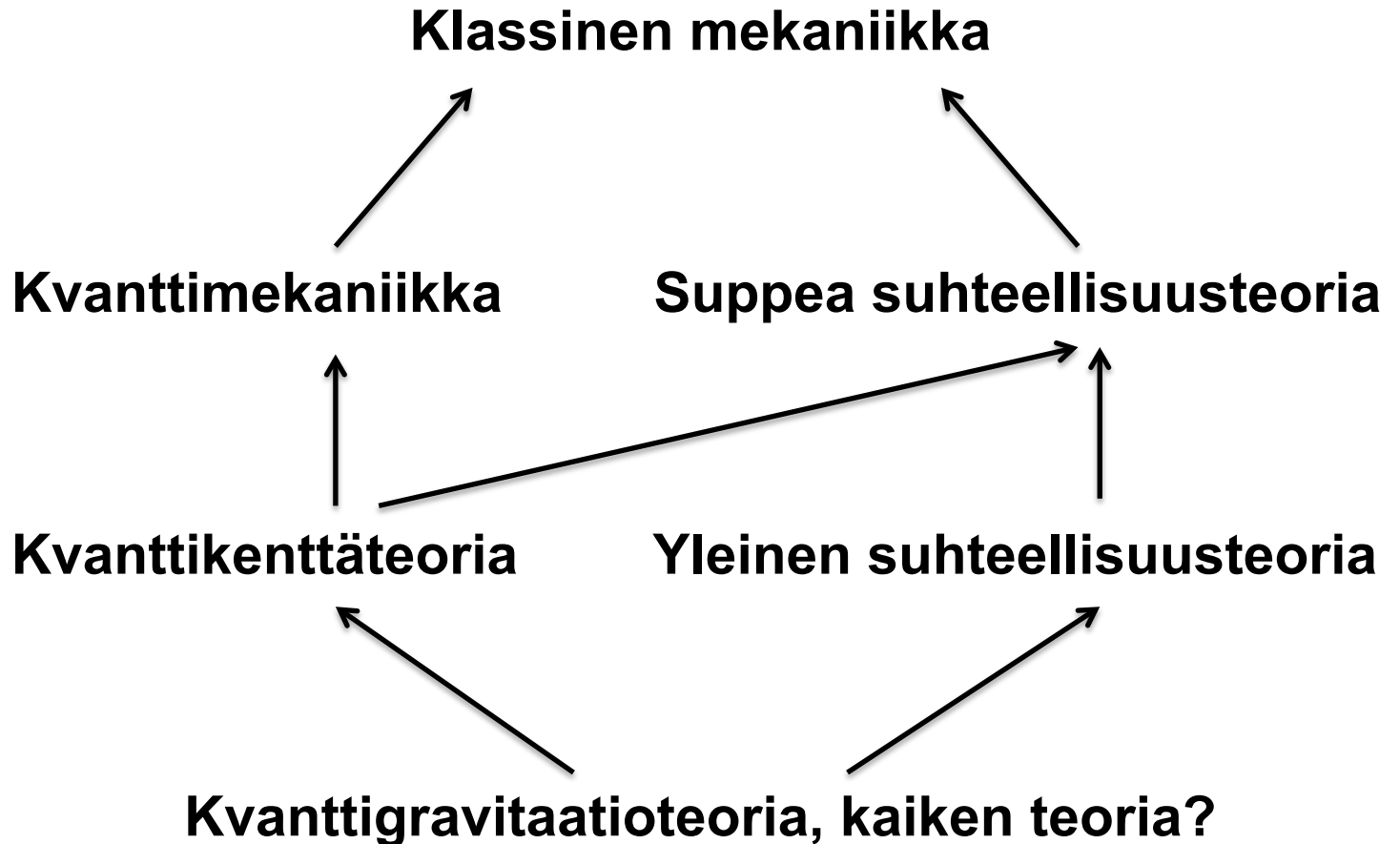
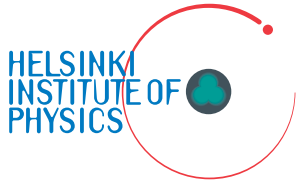


Modernin fysiikan sukupuu



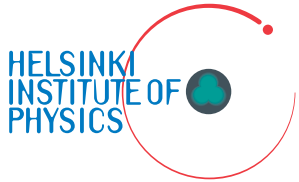


Fysiikan teorioiden rajatapauksia





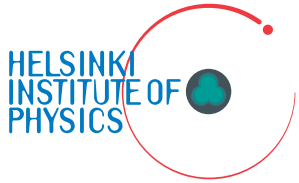
Kaksi pilaria



- 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.)



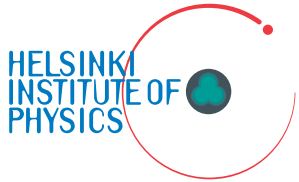
Hämärä tie



- 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.
- Inflaatiota, pimeää ainetta ja baryogeneesiä lukuun ottamatta ei ole selvää, mitä on tunnettujen teorioiden tuolla puolen.



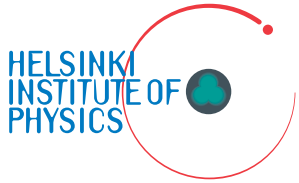
Standardimallin tuolla puolen



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



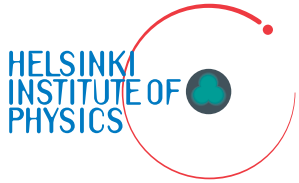
Supersymmetria



- 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.



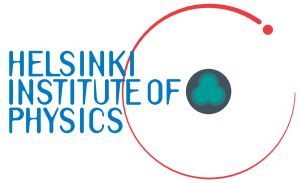
Yhtäläiset puoliset



- 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*.



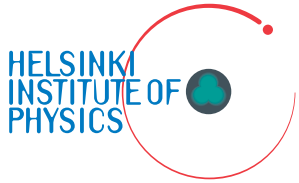
Liikaa kauneutta



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



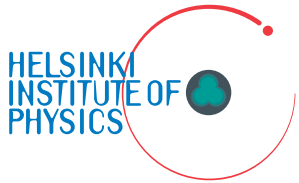
Piiloutuneet puoliset



- 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 pätyisi luonnossa, superpartnerit olisi löydetty.
 - Supersymmetria on rikkoutunut, tai sitä ei ole.



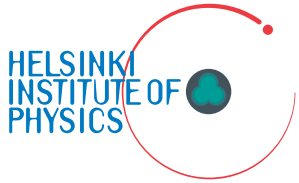
Minimaalinen Supersymmetrinen Standardimalli



- 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.



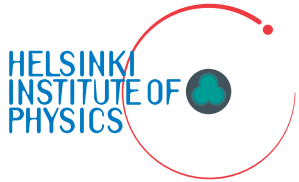
Lunastamattomia lupauksia



- 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.



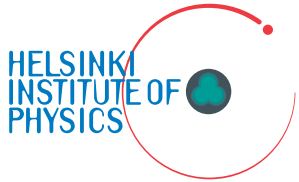
Suuri yhtenäisteoria



- 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.)



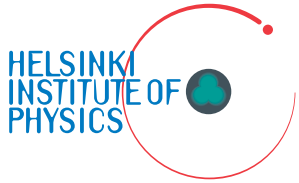
Yhtenäisyyden rikkominen



- 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.



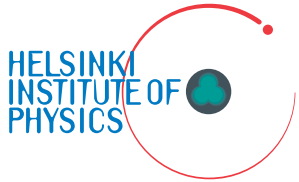
Suuria odotuksia



- 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.



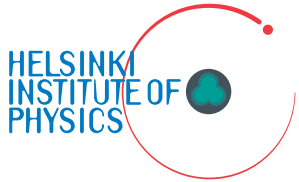
Kvanttigravitaatio ja kaiken teoria



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



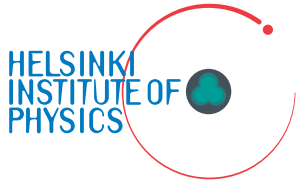
Kvanttigravitaatio



- 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



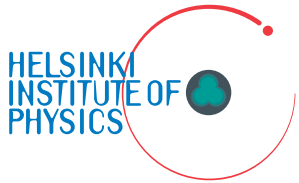
Painavia ongelmia



- 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.



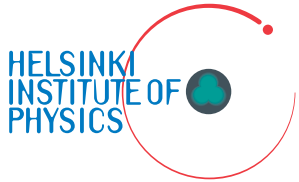
Aika-avaruuden klimppejä



- Yleisestä suhteellisuusteoriasta on yritetty rakentaa kvanttiteoriaa ainakin 1950-luvulta alkaen.
- Pieniä poikkeamia tasaisesta aika-avaruudesta osataan käsitellä kuten muitakin kenttiä: *gravitoni*.
 - Inflaation gravitaatioaallot.
- Tällainen kuvaus ei kelpaa mustille aukoille, koko maailmankaikkeudelle eikä isoille energioille.
- Ovelampia yrityksiä on, mutta ei tiedetä, ovatko ne oikein.
 - Aika-avaruuden saaminen tuloksena teoriasta, jossa sitä ei ole, on vaikeaa.



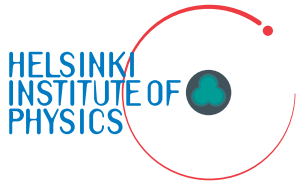
Supergravitaatio



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



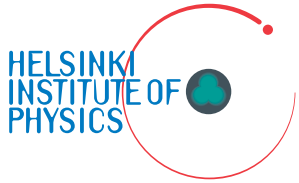
Korkeuksiin kurottamista



- Supergravitaation rakenne on vielä rajoittavampi kuin 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.



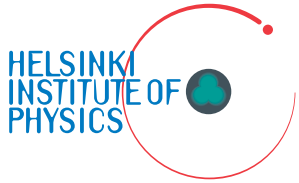
Uudesta kulmasta



- 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.



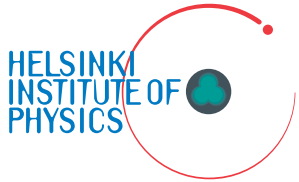
Säieteoria



- 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.



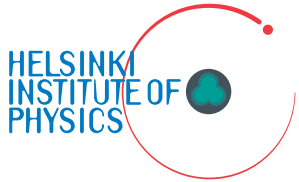
Ulottuvuuden luku



- 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.
 - Hedelmällinen idea: yksinkertaisesta ideasta seuraa monimuotoinen rakenne.



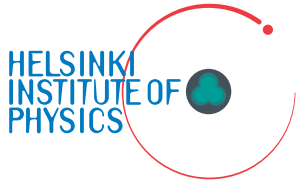
Viisi nurkkaa, yksi teoria?



- 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.



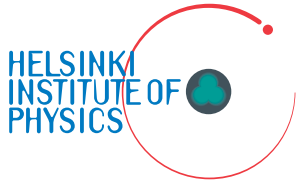
Lukemattomia piiloja



- 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.



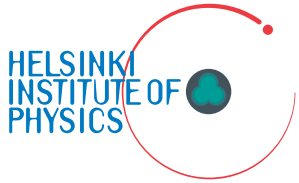
Kaikenlaisia selityksiä



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



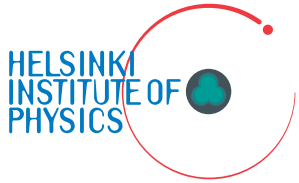
Kaikenlaisia selityksiä



- 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

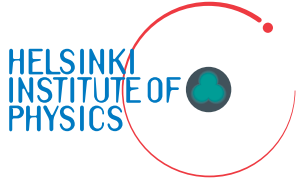


- Kvanttiteoria säikeistä pitää sisällään hiukkasfysiikan ja gravitaation.
 - Todellisuutta kuvaavan hiukkasfysiikan ja gravitaation saaminen siitä on vaikeaa.
- Säieteoriaa on tutkittu kaiken teoriana yli 40 vuotta, mutta vieläkin ei tiedetä kahta asiaa:
 - Mikä säieteoria on.
 - Kuvaako se todellisuutta.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



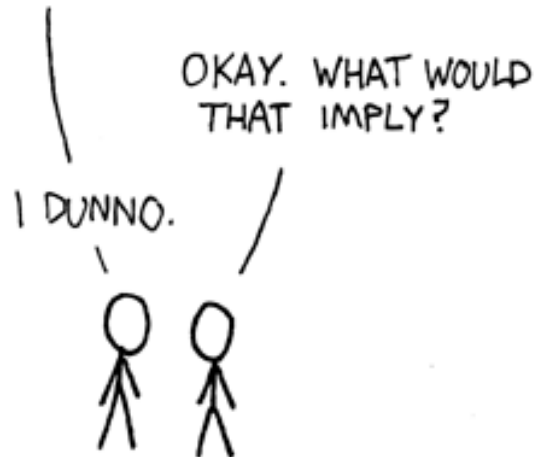
Yksi kuva

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



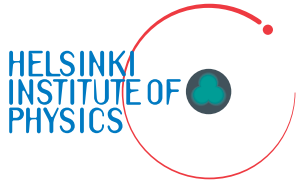
STRING THEORY SUMMARIZED:

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.
- Ei ole viitoitettua polkua oikeaan vastaukseen.