



HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



Fysiikkaa runoilijoille

Osa 7

Kohti kaiken teoriaa

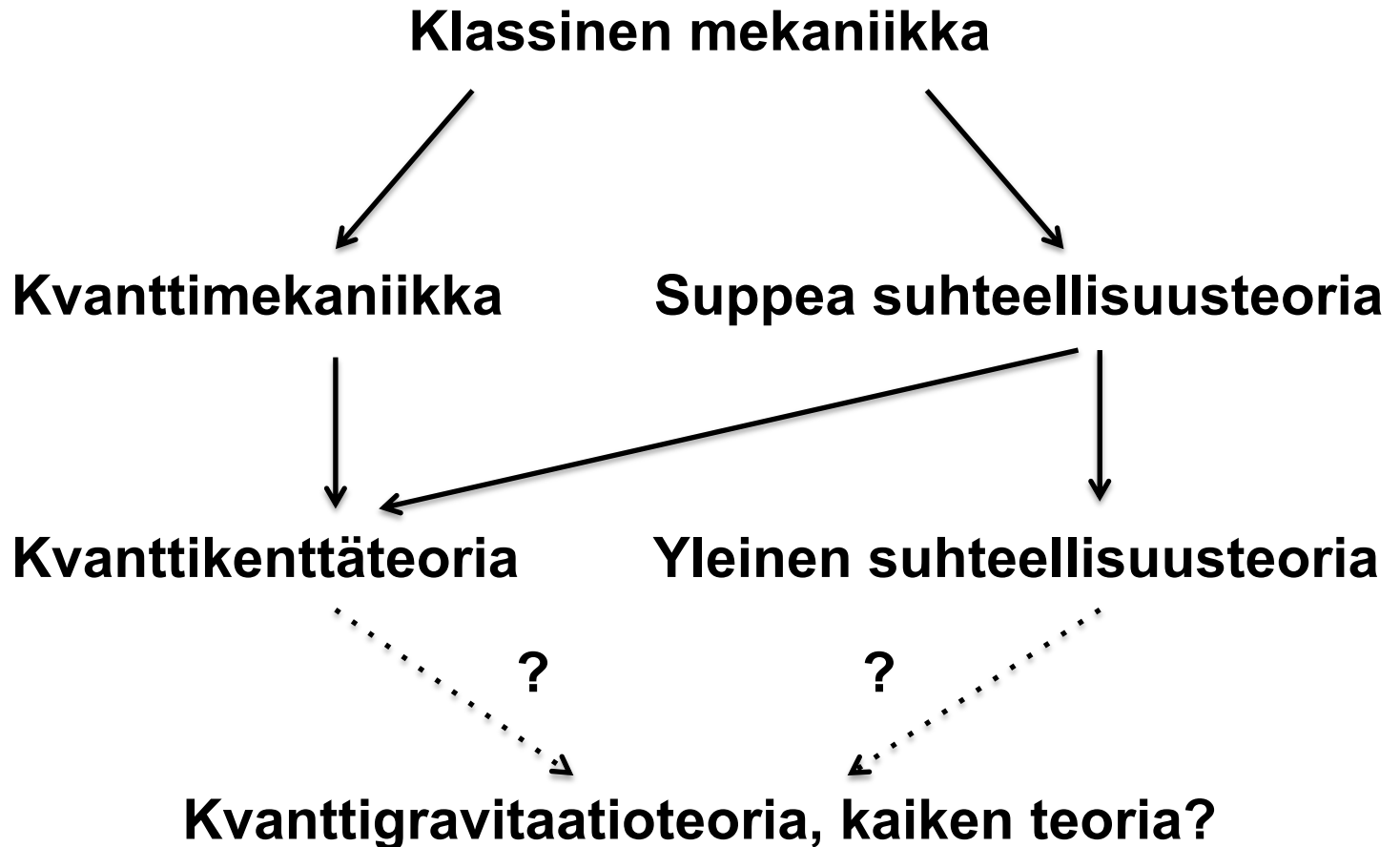
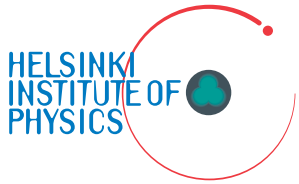
Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos

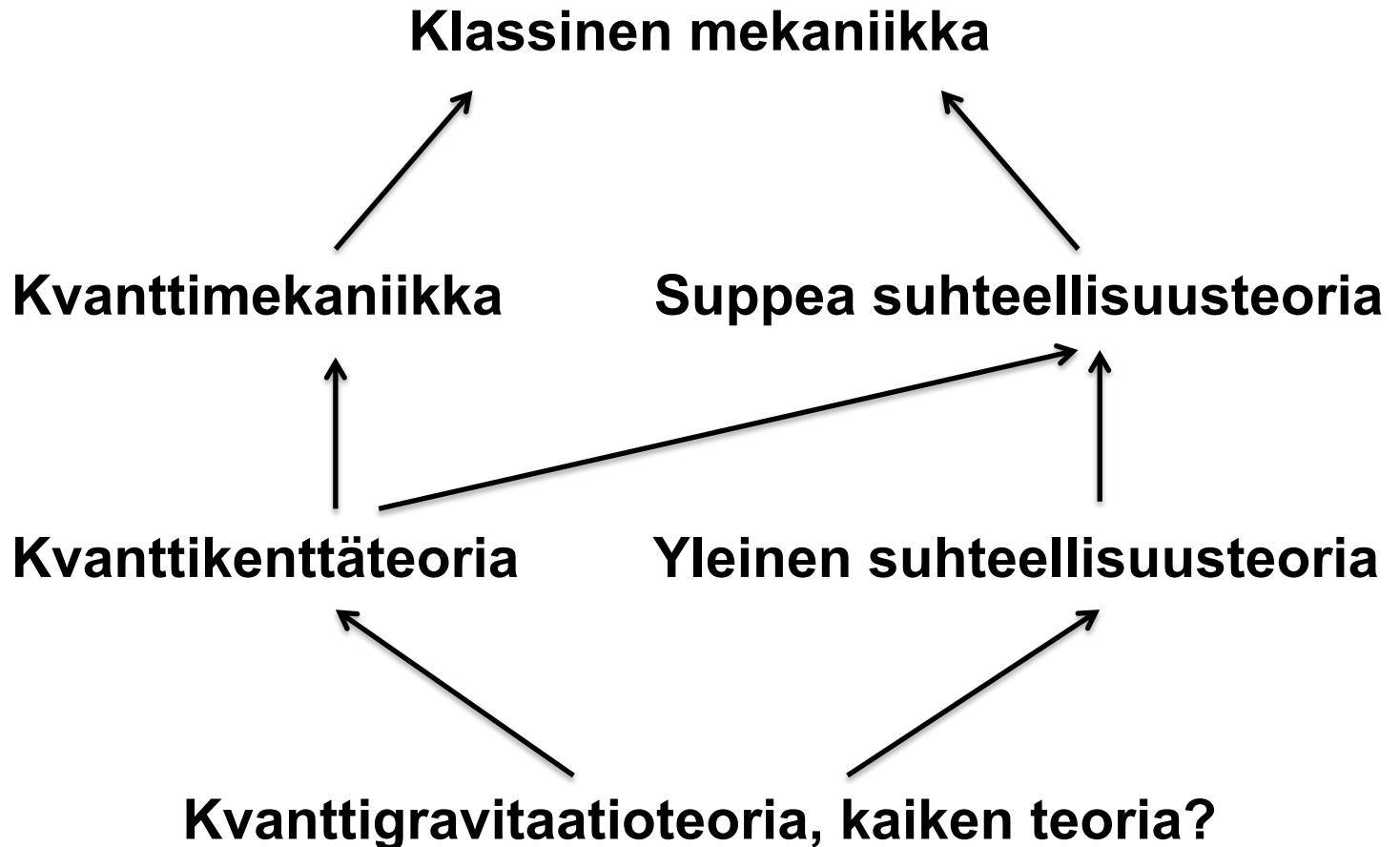
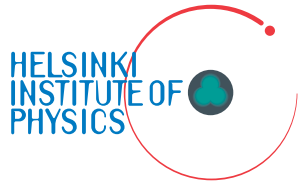


Modernin fysiikan sukupuu





Fysiikan teorioiden rajatapauksia





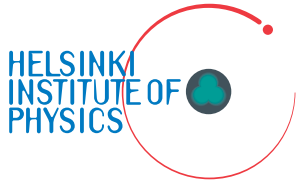
Kaksi pilaria



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



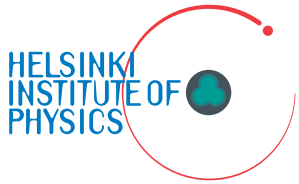
Hämärä tie



- 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 ole juuri saatu.
- Inflaatio, pimeä aine, baryogeneesi ja kiihtyvä laajeneminen ovat vihjeitä, mutta ei ole selvää, mitä on tunnettujen teorioiden tuolla puolen.



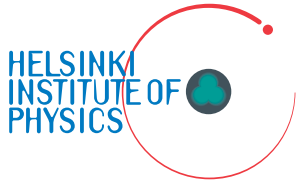
Standardimallin tuolla puolen



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



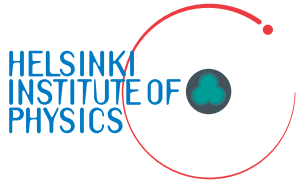
Supersymmetria



- 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.



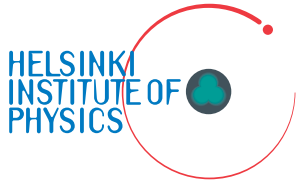
Yhtäläiset puoliset



- 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 samat 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 hiukkanen (kevyin superpartneri on stabiili).
 - Vuorovaikutukset näyttävät melkein yhtyvän, mikä voi olla vihje suuresta yhtenäisteoriasta.
 - Supersymmetrian rikkoutumisen skaala selittää Higgsin massan.
 - Superpartnereita odottaisi näkyvän LHC:ssä ja muualla.
- MSSM:llä on seuraavia ongelmia:
 - Ei tiedetä, mikä rikkoo supersymmetrian.
 - Mitään merkkejä siitä ei ole näkynyt.



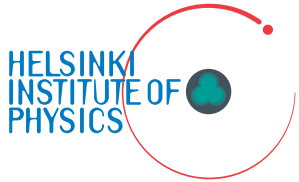
Tekniväri



- Yksi supersymmetrian kanssa kilpaileva idea on **tekniväri**.
- Ideana on, että Higgs ei ole alkeishiukkanen.
- Supersymmetria selittää Higgsin massan supersymmetrian rikkoutumisen skaalalla.
- Teknivärissä Higgsin massan määräytyy sidottujen tilojen muodostumisen energiasta.



Värin isoveili



- QCD:ssä kvarkit sitoutuvat hadroneiksi.
 - Vain kevyin baryoni (protoni) on stabiili.
 - Protonin massa määräytyy väri vuorovaikutuksen voimakkuudesta.
- Teknivärissä on sama idea, mutta massat ovat isompia eli energiat korkeampia.
- Teknivärissä on **teknikvarkkeja**, jotka sitoutuvat **teknihadroneiksi**.



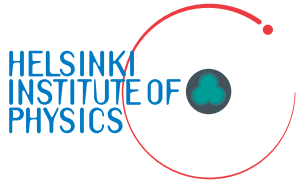
Higgs ja muut ongelmat



- Joissain teknivärimalleissa ei ole Higgsin hiukkasta.
 - Osoittautuivat vääriksi vuonna 2012, kun Higgs löytyi.
- Toisissa Higgs on yhdistelmähiukkanen.
 - Kokeissa ei ole havaittu Higgsin sisärakennetta.
- Protonin ja neutronin lisäksi on monia muita hadroneita. Odottaisi, että teknihadroneitakin on muita kuin Higgs.
 - Uusia hiukkasia ei ole löydetty.
 - Kevyin teknibaryoni voi olla pimeään aineen hiukkanen.



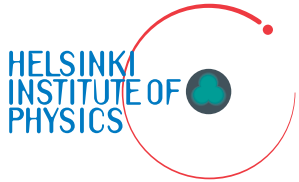
Samanlaisia pettymyksiä



- Tekniväristä on seuraavaa hyötyä:
 - Pimeän aineen hiukkanen (kevyin teknibaryoni on stabiili).
 - Teknihadronien muodostumisen skaala selittää Higgsin massan.
 - Teknihadroneita odottaisi näkyvän LHC:ssä ja muualla.
- Teknivärillä on seuraavia ongelmia:
 - Vaikea selittää kaikkien hiukkasten massoja kauniisti.
 - Mitään merkkejä siitä ei ole nähty LHC:ssä tai muualla.



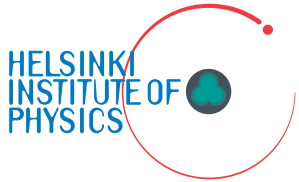
Suuri yhtenäisteoria



- 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.
- Kaikki vuorovaikutukset ovat osa yhtä kokonaisuutta.



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.



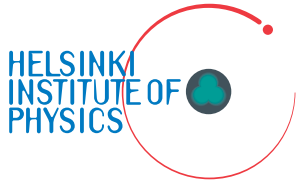
Kvanttigravitaatio ja kaiken teoria



- 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.



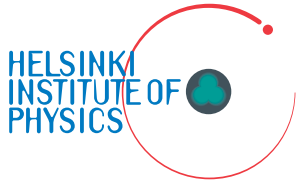
Kvanttigravitaatio



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



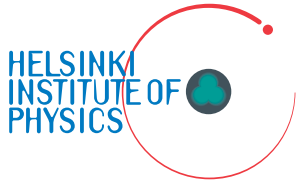
Painavia ongelmia



- Voidaan yrittää QED:n reseptiä gravitaatiolle: tehdään klassisesta kentästä kvanttikenttä.
- Yleisen suhteellisuusteorian tapauksessa tämä on 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.



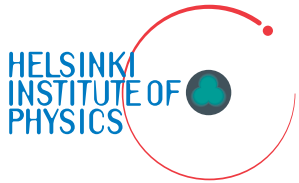
Aika-avaruuden klimppejä



- Yleisestä suhteellisuusteoriasta on yritetty rakentaa kvanttiteoriaa ainakin 1950-luvulta alkaen.
- Pieniä poikkeamia ei-kvanttifysikaalisesta aika-avaruudesta osataan käsitellä kvanttikenttäteorien keinoin kuten muidenkin kenttien tapauksessa.
- Näitä aika-avaruuden hiukkasia kutsutaan nimellä **gravitoni**.
 - Inflation gravitaatioaallot.



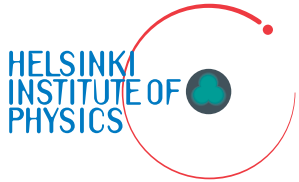
Tunnetun käsittelyn rajat



- Isoja tai voimakkaasti vuorovaikuttavia poikkeamia aika-avaruudessa ei osata käsitellä kvanttikenttäteorian vakiokeinoin.
- Gravitonien vuorovaikutuksen voimakkuus kasvaa energian kasvaessa, ja erilaisia vuorovaikutuksia on äärettömän monta.
- Ei osata kuvata kvanttifysikaalisesti mustia aukkoja, koko maailmankaikkeutta eikä isoja energioita.



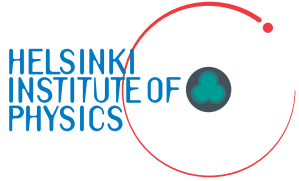
Monia suuntia



- On useita erilaisia yrityksiä rakentaa kattava kvanttigravitaatioteoria.
- Ei tiedetä, onko mikään niistä oikeilla jäljillä.
- On myös tutkittu mahdollisuutta, että aika-avaruus ei ole perustavanlaatuinen, vaan emergentti.



Supergravitaatio



- Yksi yleisen suhteellisuusteorian yleistys kvanttiteoriaan on **supergravitaatio**.
- Siinä yhdistetään yleinen suhteellisuusteoria ja supersymmetria.
- Mukaan tulee 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.



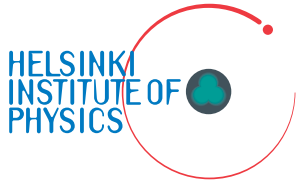
Uudesta kulmasta



- 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.



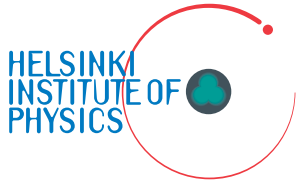
Säieteoria



- 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.



Ulottuvuuksien luku



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



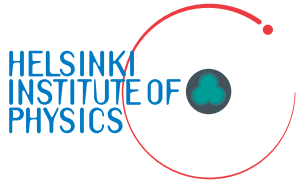
Viisi nurkkaa, yksi teoria?



- 1984 hahmotettiin, että on vain viisi erilaista mahdollista säieteoriaa.
- Vrt. ääretön määrä kvanttikenttäteorioita.
- 1995 ehdotettiin, että ne ovat rajatapauksia kaiken teoriasta, **M-teoriasta**, jossa on 10+1 ulottuvuutta.
- 11-ulotteinen supergravitaatio on sen approksimaatio.



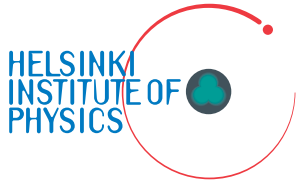
Lunastamattomia lupauksia



- M-teorian ja säieteorian ongelmia:
 - Ei tiedetä, mikä M-teoria on.
 - Havaitsemme vain 3+1 ulottuvuutta.
 - Supersymmetriaa ei ole havaittu.
 - Säieteorian sisältämä gravitaatioteoria on erilainen kuin yleinen suhteellisuusteoria, ja ristiriidassa havaintojen kanssa.



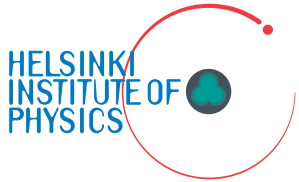
Lukemattomia piiloja



- Ongelmien uskotaan liittyvän toisiinsa: jos ylimääräisten ulottuvuuksien oletetaan olevan äärellisiä ja pieniä, niin teoria muuttuu.
- Jos ylimääräiset ulottuvuudet ovat pieniä, niiden havaitseminen on vaikeaa.
- Ne vaikuttavat kuitenkin teorian havaittavaan hiukkassisältöön.



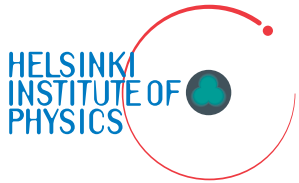
Lukemattomia piiloja



- On valtavan monta tapaa kääriä ulottuvuuksia.
 - Kääriminen vaikuttaa siihen, millaisia hiukkasia ja vuorovaikutuksia on.
- Ei tiedetä:
 - Millä periaatteella oikea kääriminen määräytyy. (Miksi 3+1?)
 - Onko sellaista periaatetta olemassa.
 - Onko oikeaa käärimistä 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 ainoaa oikeaa.
- Idea, että maailmankaikkeuden ominaisuudet määräytyvät siitä, että olemassaolomme on mahdollista, tunnetaan nimellä **antrooppinen periaate**.
 - Herättää voimakkaita tunteita tiedeyhteisössä.



Kaikkeuksien kaikkeus



- Jos kaikki erilaisia käärimisiä vastaavat maailmankaikkeudet ovat olemassa (mitä se tarkoittaakaan) **multiversumissa**, niin ennusteita voi tehdä ainoastaan tilastollisesti.
 - Pitää tuntea luonnonlakien jakauma multiversumissa.
- Kaikkia käärimisiä eikä niiden jakaumaa ei tunneta, joten ei voida ennustaa mitään.



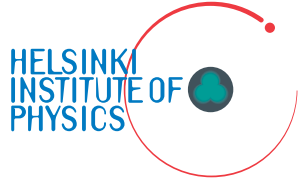
Ratkaisu yhteensattumaongelmaan?



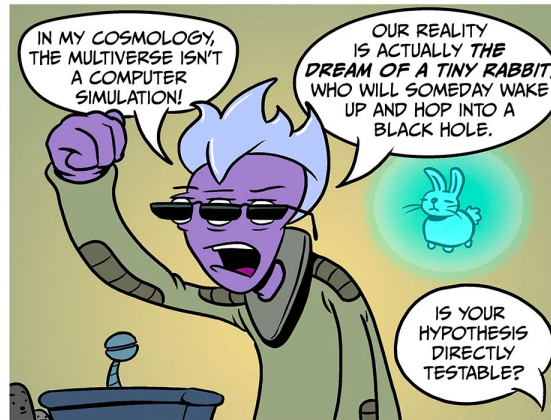
- Miksi aineen ja tyhjän energiatiheys ovat samaa suuruusluokkaa juuri nyt?
- Jos tyhjän energia olisi vähän isompi, rakenteita ei muodostuisi.
- Pitää keksiä syy, miksi pienet arvot ovat epätodennäköisiä.
- Ei ennusta mitään.



Ennustusten merkitys



METACENTER FOR THE UNKNOWABLE, DEBATEZONE, CENTRAL BRANES

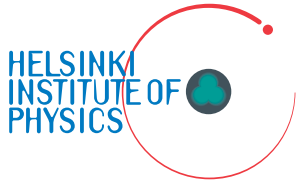


scenes from a multiverse :: jul 29 2010 amultiverse.com

©2010 Jonathan Rosenberg.



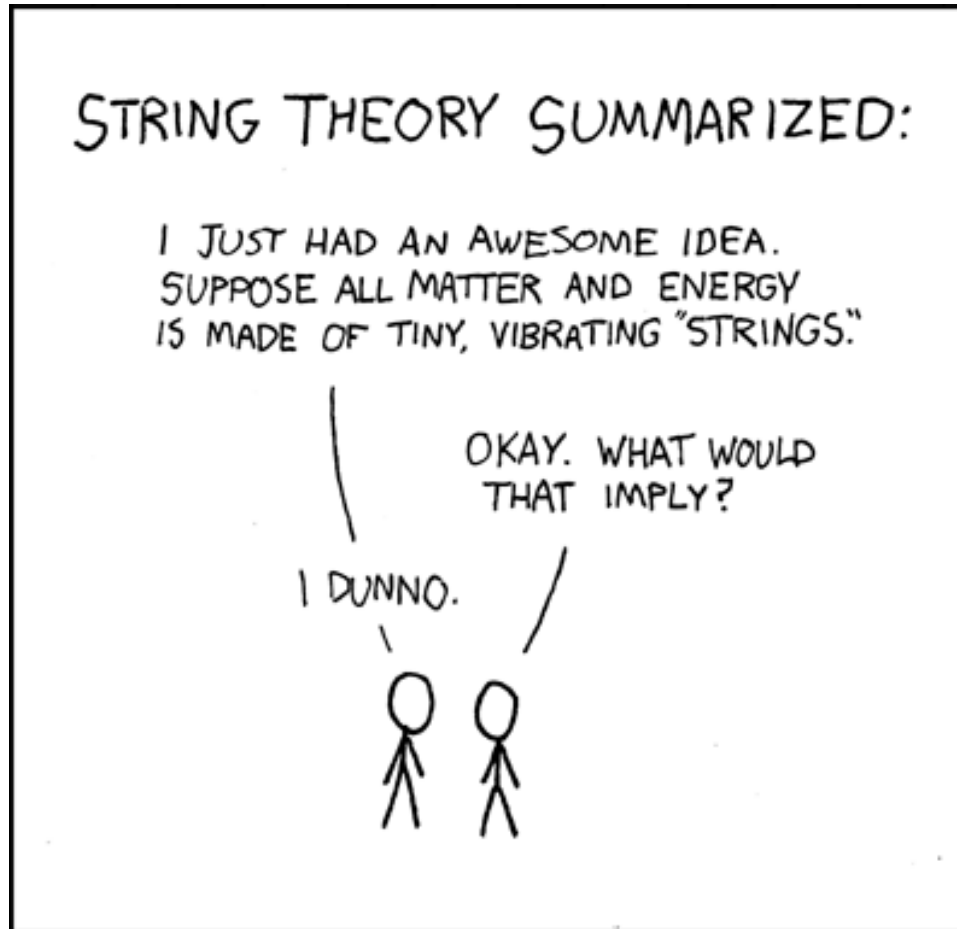
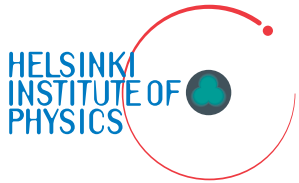
Kaiken tai ei minkään teoria



- 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 vieläköön ei tiedetä kahta asiaa:
 - Mikä säieteoria on.
 - Kuvaako se todellisuutta.
- Säieteoriaa on johtanut matemaattisiin oivalluksiin ja hyödyllisiin laskennallisiin apuvälineisiin.

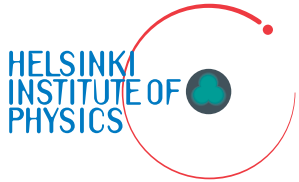


Yksi kuva





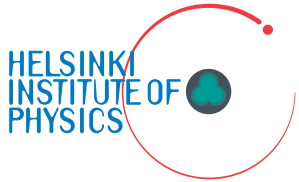
Neljä vuosikymmentä



- Supersymmetria, tekniväri, 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 tulee viimeinen viikkotehtävä. Niiden tekeminen on edellytys kurssin suorittamiselle.
- Lisäksi on palautekysely ja loppuessee.
- Deadline 13.11..