

Hiukkasfysiikka ja kosmologiaa teoreetikon näkökulmasta

Alexi Vuorinen

Bielefeldin yliopisto

CERN, 3.6.2013

Sisältö

Johdanto

Motivaatiota

Luonnon skaalat ja efektiiviset teorit

Hiukkasfysiikan Standardimalli

Alkeishiukkaset ja vuorovaikutukset

Standardimallin rakenne ja rajoitukset

Standardimallin tuolla puolen

Kosmologiaa

Varhainen maailmankaikkeus

Kosmologian käsitteistöä

Yhteenveto

Sisältö

Johdanto

Motivaatiota

Luonnon skaalat ja efektiiviset teorit

Hiukkasfysiikan Standardimalli

Alkeishiukkaset ja vuorovaikutukset

Standardimallin rakenne ja rajoitukset

Standardimallin tuolla puolen

Kosmologiaa

Varhainen maailmankaikkeus

Kosmologian käsitteistöä

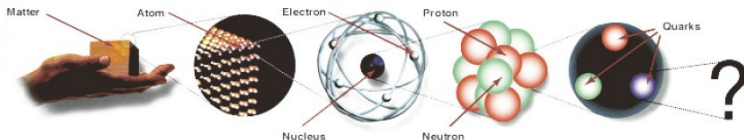
Yhteenveto

Mitä (teoreettinen) hiukkasfysiikka oikein on?

- ▶ Halu kuvata luonnon toimintaa pienimmillä pituuskaaloilla, ts. mahdollisimman fundamentaalilla tasolla
 - ▶ Hiukkasfysiikan peruskysymyksiä: Mistä kaikki koostuu? Mitkä ovat aineen pienimmät rakenneosaset? Miten niiden vuorovaikutuksia voi kuvata?
 - ▶ Läheinen yhteys myös kosmologian ongelmiin: Mikä on maailmankaikkeuden suuren skaalan rakenne? Miten universumi syntyi ja miten se tulee kehittymään?
- ▶ *Teoreettinen* fysiikka: ”liitutaalulla tehtävä työ”
 - ▶ Havaittujen luonnonlakien pukeminen matemaattisten mallien muotoon. Symmetrioilla usein tärkeä rooli prosessissa.
 - ▶ Lisähaaste: pyrkimys eleganssiin — toive selittää eri ilmiöt mahdollisimman yleispätevän teorian avulla

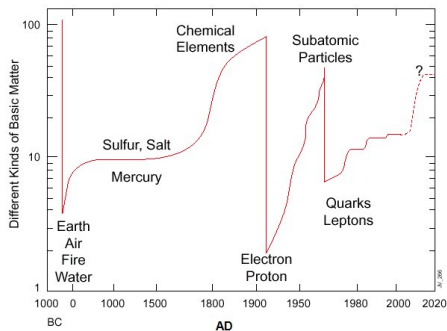
Mitä (teorettinen) hiukkasfysiikka oikein on?

- ▶ Hiukkasfysiikan historia matka kohti yhä pienempiä pituus- ja suurempia energiaskaaloja — ja uusia hiukkasia
 - ▶ Vrt. aaltoliikkeen perusyhtälö $\lambda = v/f$, aaltoshiukkasdualismi
 - ▶ Kehitys useimmiten koevetoista: ilmiö havaitaan ensin ja yritetään sitten selittää matemaattisella mallilla
 - ▶ Tällä hetkellä asetelma päinvastainen: kokeellisen hiukkasfysiikan "state of the art" 10^{-20}m , teoreettisen 10^{-36}m . Esim. Higgsin mekanismi jo miltei 50-vuotias.



Mitä (teorettinen) hiukkasfysiikka oikein on?

- ▶ Hiukkasfysiikan historian peruskaava: pitkiä jaksoja koevetoista työtä, joita seuraa (teorettinen) läpimurto
 - ▶ Jatkuuko sama myös tulevaisuudessa? Putoaako peruselementtien määrä vielä joskus yhteen?



Effektiiviset teoriat

Puheen loppuosa yhdessä lauseessa:

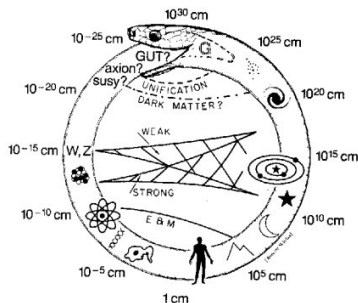
*Tähän päivään mennessä kokeellisesti havaittujen hiukkasfysiikan ilmiöiden **effektiivinen teoria** on **Standardimalli**.*

Effektiiviset teorit

- ▶ Kaikki fysiikan — ja muidenkin (luonnon)tieteiden — teorit efektiivisiä: äärellinen pätevyysalue
 - ▶ ”Kaiken teoria” ei luultavasti kovin käytännöllinen

Effektiiviset teorit

- ▶ Kaikki fysiikan — ja muidenkin (luonnon)tieteiden — teorit efektiivisiä: äärellinen pätevyysalue
 - ▶ ”Kaiken teoria” ei luultavasti kovin käytännöllinen
- ▶ Teoriaa rakennettaessa tärkeää identifioida:
 - ▶ Olennaiset vapausasteet (muuttujat)
 - ▶ Teoriaa kuvaavat parametrit, jotka mitataan tai lasketaan fundamentaalisimmasta teoriasta
- ▶ Esimerkkejä: atomifysiikka, kemia, sosiaalipsykologia, **Standardimalli**,...



Sisältö

Johdanto

Motivaatiota

Luonnon skaalat ja efektiiviset teorit

Hiukkasfysiikan Standardimalli

Alkeishiukkaset ja vuorovaikutukset

Standardimallin rakenne ja rajoitukset

Standardimallin tuolla puolen

Kosmologiaa

Varhainen maailmankaikkeus

Kosmologian käsitteistöä

Yhteenveto

Standardimallin osat ja rakenne

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssä vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoin havaittu, sähköisheikon symmetriariikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

Standardimallin osat ja rakenne

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssa vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoin havaittu, sähköisheikon symmetriariikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

Standardimallin osat ja rakenne

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssä vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoin havaittu, sähköisheikon symmetriariikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

Standardimallin osat ja rakenne

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

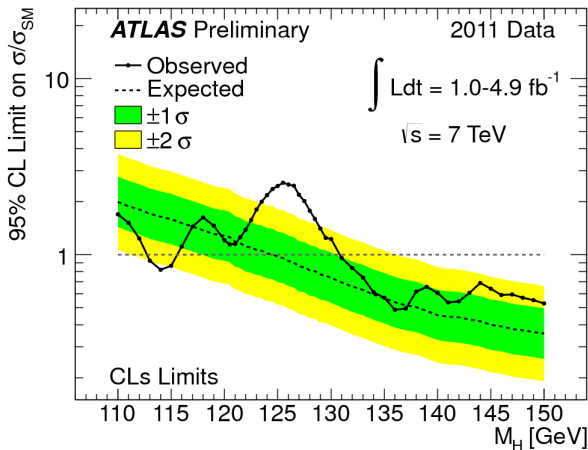
- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssa vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoin havaittu, sähköisheikon symmetriariikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

Standardimallin osat ja rakenne

Kaikki tavallinen aine koostuu atomeista, jotka puolestaan protoneista, neutroneista ja elektroneista

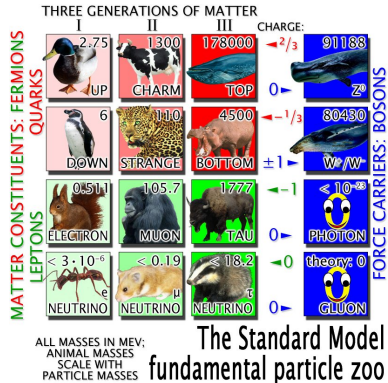
- ▶ Protoni ja neutroni esimerkkejä hadroneista, joilla edelleen alirakenne: pistemäiset *kvarkit*
 - ▶ Mesoni = kvarkki-antikvarkkiparin sidottu tila
 - ▶ Baryoni = kolmen kvarkin sidottu tila
- ▶ Elektroni esimerkki pistemäisistä *leptoneista*
- ▶ Lisäksi vuorovaikutusten välittäjähiukkasia, *mittabosoneja*
 - ▶ SM:ssa vuorovaikutuksia kolme: sähkömagneettinen sekä heikko ja vahva (ydin)voima
- ▶ ... sekä 2011 vihdoin havaittu, sähköisheikon symmetriarikon (massojen synnyn) selittävä *Higgsin hiukkanen*

Standardimallin osat ja rakenne



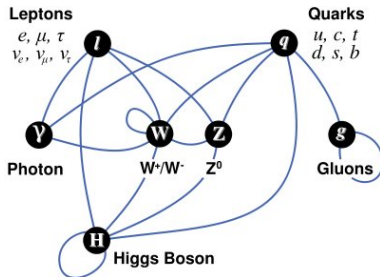
Standardimallin osat ja rakenne

- ▶ Ainehiukkaset
 - ▶ Kvarkit ja leptonit
 - ▶ 3 perhettä
- ▶ Välittäjähiukkaset
 - ▶ γ , W^\pm , Z , g
- ▶ Higgsin hiukkanen
 - ▶ Tarvitaan selittämään hiukkasten massat
 - ▶ $m_H \approx 126 \text{ GeV}$
- ▶ $1 \text{ MeV} = 1.8 \times 10^{-30} \text{ kg} \times c^2 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$



Standardimallin osat ja rakenne

- ▶ Sähkömagneettinen vuorov.
 - ▶ Välittäjä: fotoni γ
 - ▶ Tuntee: kaikki sähköisesti varatut hiukkaset
- ▶ Heikko ydinvoima:
 - ▶ Välittäjät: W^\pm , Z
 - ▶ Tuntee: Kaikki paitsi γ ja g
 - ▶ Erikoisuus: Mittabosonien massat, W :n itseisvuorovaikutus
- ▶ Vahva ydinvoima:
 - ▶ Välittäjä: gluoni g
 - ▶ Tuntee: kvarkit ja gluoni
 - ▶ g :n itseisvv, confinement



Standardimalli fysikaalisena teorianä

- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka
- ▶ Teorian peruselementtejä kentät, joiden pistemäisiä virittyneitä tiloja havaittavat hiukkaset ovat
 - ▶ Hiukkasen massa määrää sen aalto-/hiukkasluonteen: Mitä massiivisempi hiukkanen, sitä pienempi sen aallonpituus (ts. sitä vähemmän aaltomainen)
 - ▶ Hiukkasen elinikään vaikuttavat mm. mahdollisten hajoamiskanavien määrä
- ▶ Teorian perusominaisuuksia ovat sen *symmetriat*
 - ▶ Pääteltävissä hiukkaspektrin ominaisuuksista; määräävät vuorovaikutusten muodon
 - ▶ Standardimallin *mittaryhmä* $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

Standardimalli fysikaalisena teorian

- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka
- ▶ Teorian peruselementtejä kentät, joiden pistemäisiä virittyneitä tiloja havaittavat hiukkaset ovat
 - ▶ Hiukkasen massa määrää sen aalto-/hiukkasluonteen: Mitä massiivisempi hiukkanen, sitä pienempi sen aallonpituus (ts. sitä vähemmän aaltomainen)
 - ▶ Hiukkasen elinikään vaikuttavat mm. mahdollisten hajoamiskanavien määrä
- ▶ Teorian perusominaisuuksia ovat sen *symmetriat*
 - ▶ Pääteltävissä hiukkaspektrin ominaisuuksista; määräävät vuorovaikutusten muodon
 - ▶ Standardimallin *mittaryhmä* $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

Standardimalli fysikaalisena teoriana

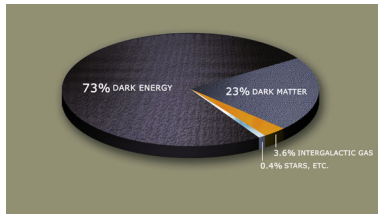
- ▶ Standardimalli on ns. *kvanttikenttäteoria*
 - ▶ Kvanttimekaniikan yleistys jatkumoon — vrt. klassinen mekaniikka ja elektrodynamiikka
- ▶ Teorian peruselementtejä kentät, joiden pistemäisiä virittyneitä tiloja havaittavat hiukkaset ovat
 - ▶ Hiukkasen massa määrää sen aalto-/hiukkasluonteen: Mitä massiivisempi hiukkanen, sitä pienempi sen aallonpituus (ts. sitä vähemmän aaltomainen)
 - ▶ Hiukkasen elinikään vaikuttavat mm. mahdollisten hajoamiskanavien määrä
- ▶ Teorian perusominaisuuksia ovat sen *symmetriat*
 - ▶ Pääteltävissä hiukkaspektrin ominaisuuksista; määräävät vuorovaikutusten muodon
 - ▶ Standardimallin *mittaryhmä* $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

Standardimallin puutteet

- ▶ Effektiivisenä teoriana SM epätäydellinen
 - ▶ Rajallinen pätevyysalue: ongelmia pienillä pituuskaaloilla / suurilla energioilla
 - ▶ Hiukkasten massoilla (ja monilla muilla parametreilla) ”mielivaltaiset” arvot
 - ▶ Perheiden lukumäärälle ei selitystä
 - ▶ Vain sähkömagneettinen ja heikko vuorov. yhdistyvät korkeilla energioilla, vahva jää erilleen
 - ▶ Hierarkiaongelma: miksi SM:n energiaskaala (100 GeV) niin kaukana kvanttigravitaation skaalasta (10^{19} GeV)?

Standardimallin puutteet

- ▶ SM ei selitä kaikkia havaintoja
 - ▶ Ei sisällä gravitaatiota
 - ▶ Neutriinoilla ei massoja, vaikka havainnot (neutriino-oskillaatio) osoittavat toisin
 - ▶ Ei selitä baryoniasymmetriaa: miksi ainetta enemmän kuin antiainetta?
 - ▶ Suurin osa maailmankaikkeuden energiasisällöstä ei SM:n piiristä (pimeä aine, pimeä energia)



Standardimallin puutteet

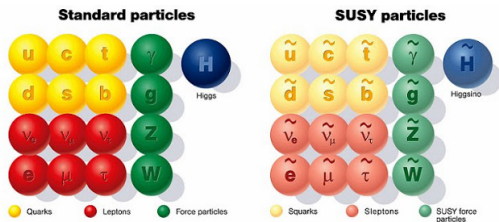
- ▶ SM ei selitä kaikkia havaintoja
 - ▶ Ei sisällä gravitaatiota
 - ▶ Neutriinoilla ei massoja, vaikka havainnot (neutriino-oskillaatio) osoittavat toisin
 - ▶ Ei selitä baryoniasymmetriaa: miksi ainetta enemmän kuin antiainetta?
 - ▶ Suurin osa maailmankaikkeuden energiasisällöstä ei SM:n piiristä (pimeä aine, pimeä energia)
- ▶ LHC:n törmäysenergian uskottu yleisesti riittävän SM:n ulkopuolisen fysiikan löytämiseen — toistaiseksi mitään viitteitä tästä ei kuitenkaan ole ilmaantunut

Standardimallin yleistyksiä

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa

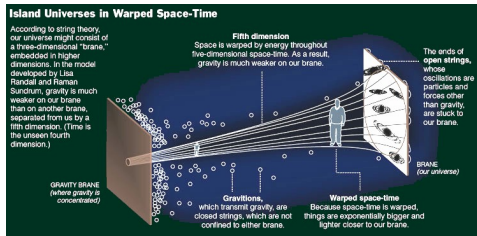
Standardimallin yleistyksiä

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ SUSY: Jokaisella SM:n hiukkasella *superpartneri*
 - ▶ Superpartnereja ei vielä löydetty \Rightarrow Symmetria rikkoutunut toistaiseksi tutkituilla energioilla
 - ▶ Tarjoaa selitysmallit mm. pimeälle aineelle ja baryoniasymmetrialle



Standardimallin yleistyksiä

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ Lisäulottuvuudet: entä jos universumissa on enemmän kuin $3 + 1$ dimensiota?
 - ▶ Ylimääräiset ulottuvuudet yleensä mikroskooppisia, eivätkä siksi helposti havaittavissa
 - ▶ Pimeä aine ja hierarkiaongelma ratkaistavissa



Standardimallin yleistyksiä

- ▶ Paljon malleja — vähän kokeellista dataa
- ▶ Säieteoria: Hiukkaset → Planckin pituuden kokoiset säikeet 9+1 ulottuvuudessa
 - ▶ Ratkaisee kvanttikenttäteorioiden UV-ongelman; lisäksi ainoa vakavasti otettava yrite kvanttigravitaation teoriaksi
 - ▶ Sisältää sekä SUSY:n että lisäulottuvuuksia
 - ▶ ”Landscape”-ongelma: säieteoria ei välttämättä koskaan prediktiivinen/falsifioitavissa

Sisältö

Johdanto

Motivaatiota

Luonnon skaalat ja efektiiviset teorit

Hiukkasfysiikan Standardimalli

Alkeishiukkaset ja vuorovaikutukset

Standardimallin rakenne ja rajoitukset

Standardimallin tuolla puolen

Kosmologiaa

Varhainen maailmankaikkeus

Kosmologian käsitteistöä

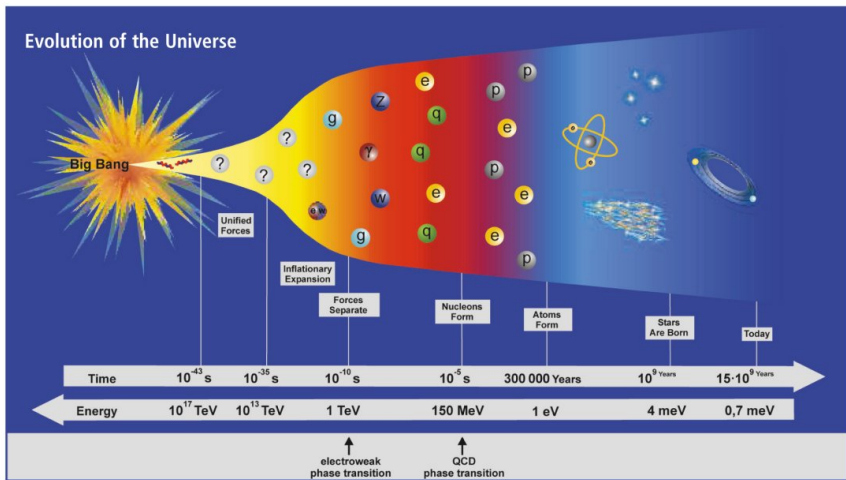
Yhteenveto

Varhainen maailmankaikkeus ikkunana SM:n ulkopuolelle

- ▶ Monet SM:n ulkopuoliset teoriat ennustavat mielenkiintoisia ilmiöitä energioilla $E \gg E_{\text{LHC}}$
 - ▶ Vaihtoehtoinen tutkimuslaboratorio: kosmologia(!)
- ▶ Varhaisessa maailmankaikkeudessa lämpötila (energia) laski ajan myötä: $T \sim t^{-1/2}$
 - ▶ Hyvin pian $t = 0$:n jälkeen lämpötila valtava
- ▶ Alkeishiukkaset ja niiden vuorovaikutukset \Rightarrow Varhaisen maailmankaikkeuden "energiasäilytys" \Rightarrow Laajanemisen nopeus ja sen aikaiset fysikaaliset prosessit
 - ▶ Baryoniasymmetria, nukleosynteesi, rakenteenmuodostus, kosmiset reliikit,...

Varhainen maailmankaikkeus ikkunana SM:n ulkopuolelle

- ▶ Monet SM:n ulkopuoliset teoriat ennustavat mielenkiintoisia ilmiöitä energioilla $E \gg E_{\text{LHC}}$
 - ▶ Vaihtoehtoinen tutkimuslaboratorio: kosmologia(!)
- ▶ Varhaisessa maailmankaikkeudessa lämpötila (energia) laski ajan myötä: $T \sim t^{-1/2}$
 - ▶ Hyvin pian $t = 0$:n jälkeen lämpötila valtava
- ▶ Alkeishiukkaset ja niiden vuorovaikutukset \Rightarrow Varhaisen maailmankaikkeuden "energiasäilytys" \Rightarrow Laajanemisen nopeus ja sen aikaiset fysikaaliset prosessit
 - ▶ Baryoniasymmetria, nukleosynteesi, rakenteenmuodostus, kosmiset reliikit,...



Varhainen maailmankaikkeus ikkunana SM:n ulkopuolelle

- ▶ Monet SM:n ulkopuoliset teoriat ennustavat mielenkiintoisia ilmiöitä energioilla $E \gg E_{\text{LHC}}$
 - ▶ Vaihtoehtoinen tutkimuslaboratorio: kosmologia(!)
- ▶ Varhaisessa maailmankaikkeudessa lämpötila (energia) laski ajan myötä: $T \sim t^{-1/2}$
 - ▶ Hyvin pian $t = 0$:n jälkeen lämpötila valtava
- ▶ Alkeishiukkaset ja niiden vuorovaikutukset \Rightarrow Varhaisen maailmankaikkeuden ”energiasäilytys” \Rightarrow Laajanemisen nopeus ja sen aikaiset fysikaaliset prosessit
 - ▶ Baryoniasymmetria, nukleosynteesi, rakenteenmuodostus, kosmiset reliikit,...

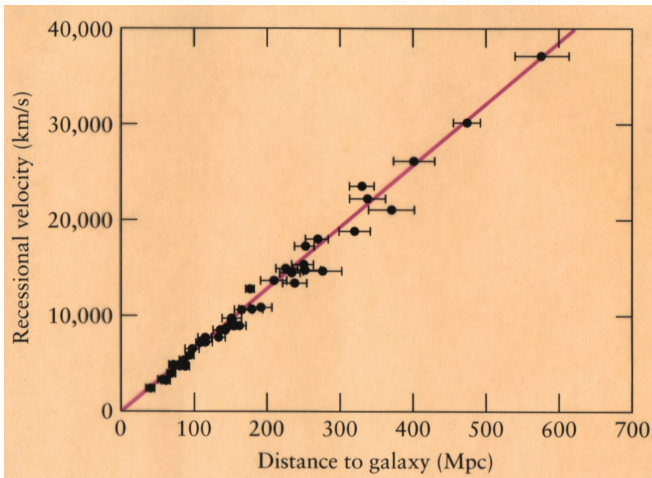
Kosmologiset havainnot

- ▶ Homogeenisuus ja isotrooppisuus: Maailmankaikkeus näyttää samalta kaikkialla / joka suunnassa
- ▶ Hubble'n laki: kaukaiset kohteet näyttävät loittonevan meistä nopeudella, joka on verrannollinen niiden etäisyyteen
 - ▶ Luonnollinen päätelmä: maailmankaikkeus laajenee
 - ▶ Laajenemisnopeus mitataan punasiirtymästä
 - ▶ Kosmologisten etäisyyksien määrittäminen hyvin vaikeaa: supernovat avuksi
- ▶ Suuren mittakaavan rakenne
 - ▶ Galaksit ja galaksijoukot muodostavat seinämiä ja säikeitä, joiden välissä tyhjiä alueita

Kosmologiset havainnot

- ▶ Homogeenisuus ja isotrooppisuus: Maailmankaikkeus näyttää samalta kaikkialla / joka suunnassa
- ▶ Hubble'n laki: kaukaiset kohteet näyttävät loittonevan meistä nopeudella, joka on verrannollinen niiden etäisyyteen
 - ▶ Luonnollinen päätelmä: maailmankaikkeus laajenee
 - ▶ Laajenemisnopeus mitataan punasiirtymästä
 - ▶ Kosmologisten etäisyyksien määrittäminen hyvin vaikeaa: supernovat avuksi
- ▶ Suuren mittakaavan rakenne
 - ▶ Galaksit ja galaksijoukot muodostavat seinämiä ja säikeitä, joiden välissä tyhjiä alueita

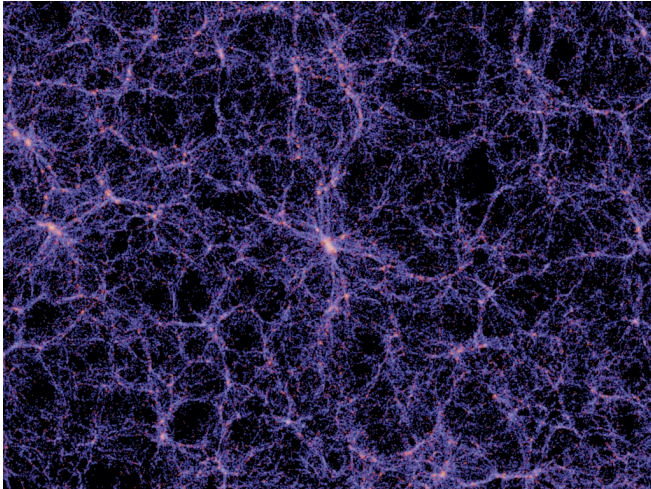
Kosmologiset havainnot



Kosmologiset havainnot

- ▶ Homogeenisuus ja isotrooppisuus: Maailmankaikkeus näyttää samalta kaikkialla / joka suunnassa
- ▶ Hubble'n laki: kaukaiset kohteet näyttävät loittonevan meistä nopeudella, joka on verrannollinen niiden etäisyyteen
 - ▶ Luonnollinen päätelmä: maailmankaikkeus laajenee
 - ▶ Laajenemisnopeus mitataan punasiirtymästä
 - ▶ Kosmologisten etäisyyksien määrittäminen hyvin vaikeaa: supernovat avuksi
- ▶ Suuren mittakaavan rakenne
 - ▶ Galaksit ja galaksijoukot muodostavat seinämiä ja säikeitä, joiden välissä tyhjiä alueita

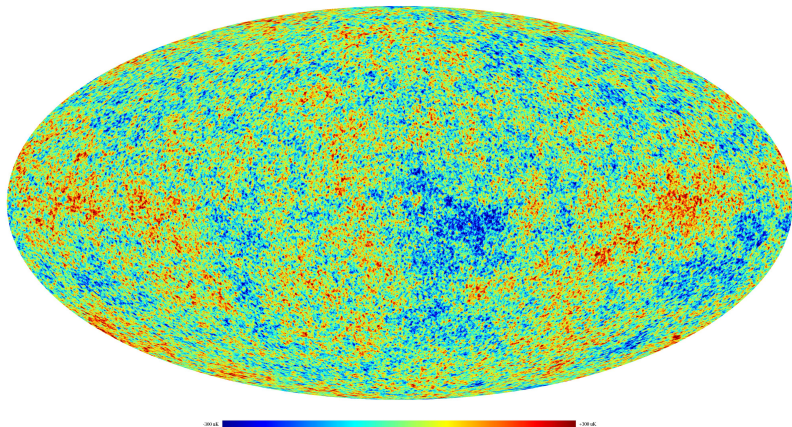
Kosmologiset havainnot



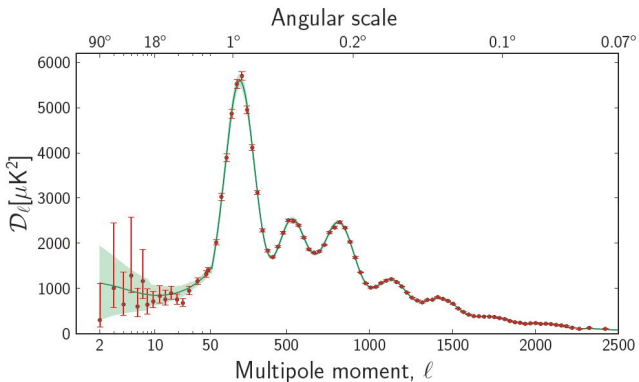
Kosmologiset havainnot

- ▶ Kosminen mikroaaltotaustasäteily (CMB)
 - ▶ Maailmankaikkeuden täyttävä elektromagneettinen säteily, jonka energia vastaa 2.7 K lämpötilaa
 - ▶ Peräisin atomien muodostumisen hetkeltä (n. 300.000 v), jolloin maailmankaikkeudesta tuli läpinäkyvä
 - ▶ Hyvin isotrooppisessa lämpötilajakaumassa kertaluokan 10^{-5} fluktuaatioita, joiden kulmajakaumaa voidaan verrata teoreettisiin ennusteisiin
- ▶ NASA:n WMAP- ja ESA:n Planck-satelliitin (3/2013) havainnot tehneet kosmologiasta tarkkuustiedettä
 - ▶ Maailmankaikkeuden ikä $13.80 \pm 0.06 \times 10^9$ v
 - ▶ Universumin energiasisältö: tavallinen (baryoninen) aine 5%, *pimeä aine* 27%, loput 68% *pimeää energiaa*

Kosmologiset havainnot



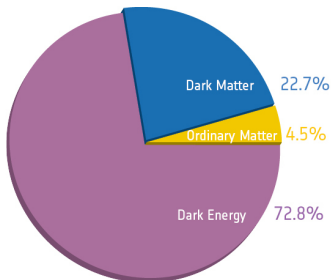
Kosmologiset havainnot



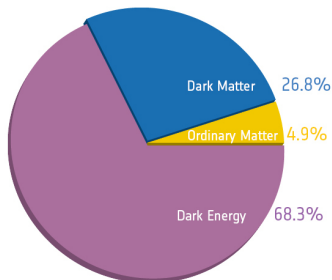
Kosmologiset havainnot

- ▶ Kosminen mikroaaltotaustasäteily (CMB)
 - ▶ Maailmankaikkeuden täyttävä elektromagneettinen säteily, jonka energia vastaa 2.7 K lämpötilaa
 - ▶ Peräisin atomien muodostumisen hetkeltä (n. 300.000 v), jolloin maailmankaikkeudesta tuli läpinäkyvä
 - ▶ Hyvin isotrooppisessa lämpötilajakaumassa kertaluokan 10^{-5} fluktuaatioita, joiden kulmajakaumaa voidaan verrata teoreettisiin ennusteisiin
- ▶ NASA:n WMAP- ja ESA:n Planck-satelliitin (3/2013) havainnot tehneet kosmologiasta tarkkuustiedettä
 - ▶ Maailmankaikkeuden ikä $13.80 \pm 0.06 \times 10^9$ v
 - ▶ Universumin energiasisältö: tavallinen (baryoninen) aine 5%, *pimeä aine* 27%, loput 68% *pimeää energiaa*

Kosmologiset havainnot



Before Planck

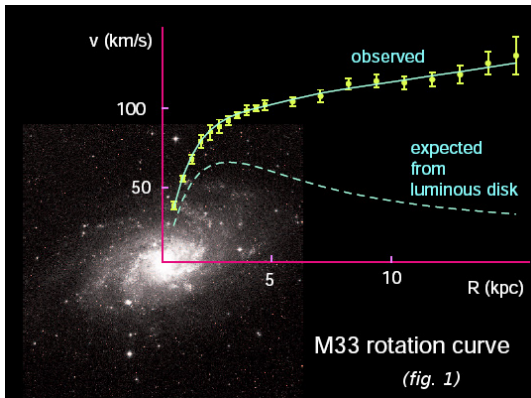


After Planck

Kosmologian haasteet hiukkasfysiikalle

- ▶ Pimeä aine: näkymätön aine, joka vastaa $> 80\%$ kaikesta materiasta
 - ▶ Pimeä = Ei vuorovaikuta valon (fotonien) kanssa
 - ▶ Olemassaolo päätelty mm. galaksien rotaatiokäyristä
 - ▶ Selittäminen vaatii uutta hiukkasfysiikkaa
 - ▶ Ehdokkaita:
 - ▶ SM:ssa pimeät baryonit, neutriinot — liian vähän
 - ▶ Varteenotettavin(?): fotonin SUSY-partneri, *neutraliino*
 - ▶ Muut: aksionit, pienet mustat aukot, technihiukkaset, neljännen perheen neutriino, korkeampiulotteisten kenttien massiiviset osat,...

Kosmologian haasteet hiukkasfysiikalle



Kosmologian haasteet hiukkasfysiikalle

- ▶ Pimeä energia: tasaisesti jakautunut energiatiheys, jonka paine negatiivinen
 - ▶ Pitää sisällään 70% universumin energiasisällöstä
 - ▶ Tarvitaan selittämään havaittu maailmankaikkeuden laajenemiseen kiihtyminen
 - ▶ Selitysmalleja:
 - ▶ Einsteinin ”kosmologinen vakio” Λ , *tyhjiöenergia* — hiukkasfysiikassa pientä arvoa kuitenkin vaikea selittää
 - ▶ Muu tyhjiöenergian tapaan käyttäytyvä ”aine”
 - ▶ Muutos gravitaatiolakiin suurilla etäisyyksillä
 - ▶ Supernovahavaintojen virheellinen tulkinta, erityisesti epähomogeenisuuksien merkityksen aliarvioiminen

Kosmologian haasteet hiukkasfysiikalle

- ▶ Inflaatio: varhaisen maailmankaikkeuden eksponentiaalinen laajeneminen
 - ▶ Auttaa selittämään universumin havaitun isotrooppisuuden, homogeenisuuden ja laakeuden
 - ▶ Universumin rakenne lähtöisin inflaation aikaisista kvanttifluktuaatioista
 - ▶ Vaatii uutta fysiikkaa: inflatonkenttä
 - ▶ Planckin tulokset (CMB-spektrin ei-gaussisuus häviävän pientä) yhteensopivia yksinkertaisimman yhden inflatonkentän mallin kanssa

Kosmologian haasteet hiukkasfysiikalle

- ▶ Baryogeneesi: miksi tavallista (baryonista) ainetta on enemmän kuin antiainetta?
 - ▶ Kiistaton havainto: $(n_B - n_{\bar{B}})/n_\gamma \approx 6 \times 10^{-10}$
 - ▶ Eron muodostuminen vaatii kolmen Sakharovin ehdon täyttymisen:
 1. Baryoniluku-symmetrian rikkoutuminen
 2. C- ja CP-symmetrioiden rikkoutuminen
 3. Terminen epätasapainotila
 - ▶ Standardimalli sisältää kaksi ensinmainittua, mutta sähköisheikko faasitransitio liian ”heikko” \Rightarrow Tarvitaan sen ulkopuolista fysiikkaa
 - ▶ Monissa SUSY-malleissa Sakharovin ehdot täyttyvät; muita mahdollisia skenaarioita mm. *Cold Electroweak Baryogenesis*

Sisältö

Johdanto

Motivaatiota

Luonnon skaalat ja efektiiviset teorit

Hiukkasfysiikan Standardimalli

Alkeishiukkaset ja vuorovaikutukset

Standardimallin rakenne ja rajoitukset

Standardimallin tuolla puolen

Kosmologiaa

Varhainen maailmankaikkeus

Kosmologian käsitteistöä

Yhteenveto

Yhteenveto

- ▶ Teoreettinen hiukkasfysiikka pyrkimistä kohti aineen pienimpien rakenneosasten vuorovaikutusten ymmärrystä ja matemaattista hallintaa
 - ▶ Lähes kaikki tähän päivään mennessä havaitut ilmiöt selittää Standardimalli
 - ▶ SM:n viimeinen ”puuttuva lenkki” vihdoinkin löytynyt
- ▶ Standardimallin ulkopuolinen fysiikka läheisesti yhteydessä kosmologiaan
 - ▶ Varhainen maailmankaikkeus hiukkasfysiikan laboratorio
 - ▶ Hiukkasfysiikka välttämätöntä universumin alkuhetkien ymmärtämiseksi
- ▶ Elämme jännittäviä aikoja: LHC:n löydöt määräävät pitkälti koko alan tulevaisuuden