



HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



# Fysiikkaa runoilijoille

## Osa 6

# Kosmologia

*Syksy Räsänen*

Helsingin yliopisto

fysiikan osasto ja fysiikan tutkimuslaitos



# Kaikkeuden tutkimista

---



- Kosmologia tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena.
  - Astrofysiikka/tähtitiede tutkii maailmankaikkeudessa olevia kappaleita.
- Keskeisiä kysymyksiä: laajeneminen, ainesisältö, aineen muodonmuutokset, alkuhetket.
- Yleinen suhteellisuusteoria kertoo, miten avaruus käyttäytyy, kun siinä on tietynlaista ainetta.
- Ainesisällön kertoo kvanttikenttäteoria ja havainnot.
  - Millaista ainetta on ja miten se on jakautunut?



# Aina samanlaista

---



- Ensimmäisen yleiseen suhteellisuusteoriaan pohjaavan kosmologisen mallin esitti Einstein vuonna 1917.
- Hän oletti, että maailmankaikkeus on samanlainen kaikkialla ja aina.
- Yleisen suhteellisuusteorian mukaan avaruus yleensä laajenee tai supistuu.



# Epävakaata tasapaino



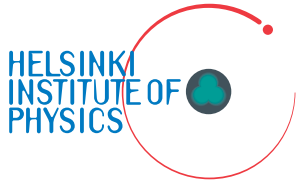
- Saadakse aikaan muuttumattoman maailmankaikkeuden Einstein vuonna 1917 muutti teoriaa lisäämällä **kosmologisen vakion**.
- Tavallisen aineen gravitaatio vetää puoleensa, kosmologisen vakion gravitaatio hylkii. (Antigravitaatio.)
- Einstein tasapainotti nämä kaksi vaikutusta.
  - Maailmankaikkeus kuin kärjellään seisova kynä.





# Muuttuva maailmankaikkeus

---

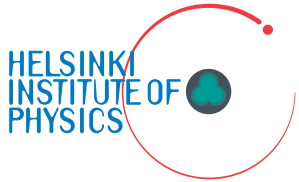


- Aleksander Friedmann (1888-1925) esitti vuonna 1922 yleiseen suhteellisuusteoriaan pohjaavan mallin laajenevasta maailmankaikkeudesta.
- Ajatusta siitä, että koko avaruus muuttuisi ajassa ei heti omaksuttu.
- Nopeasti etenevät havainnot ratkaisivat kiistan maailmankaikkeuden luonteesta.



# Galaksien yksinäisyys

---



- Vuonna 1924 Edwin Hubble (1889-1953) määritteli ”tähtisumujen” etäisyyksiä ja osoitti, että ne ovat Linnunradan ulkopuolella.
- Pääteltiin, että ne ovat toisia galakseja.



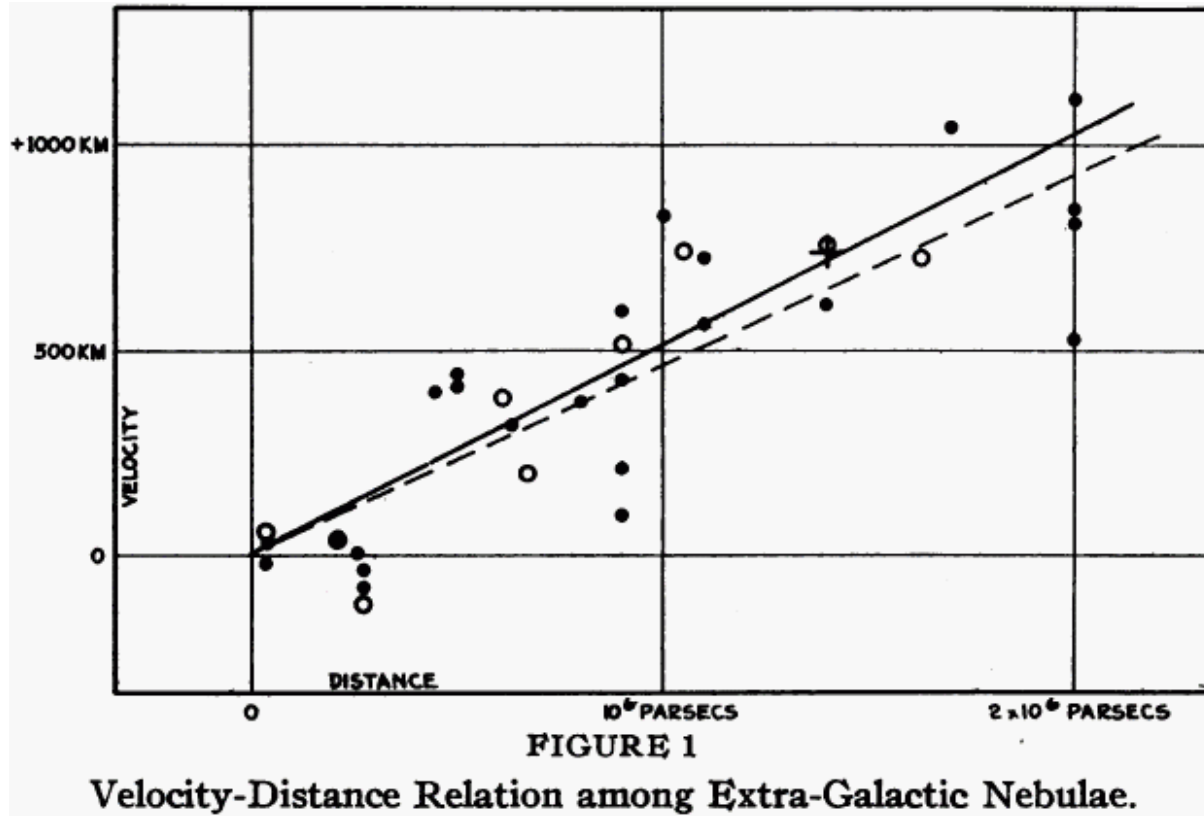
# Galaksien etääntyminen



- Vuonna 1927 Georges Lemaître (1894-1966) osoitti, että yleisen ST:n mukaan galaksien **punasiirtymä** on verrannollinen niiden etäisyyteen.
- Hubble totesi saman havainnoista 1929.
  - Suhde tuli tunnetuksi **Hubble'n lakina**.
- Einsteinin sanotaan kutsuneen kosmologista vakiota pahimmaksi munauksekseen.



# Hubblen laki vuonna 1929



(Huom: y-akselin yksiköt ovat km/s, ei km.)

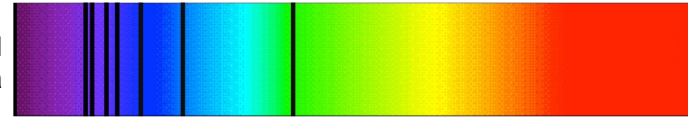


# Punasiirtymä

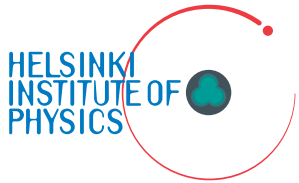
Emitted  
Spectra



Observed  
Spectra



<http://voyages.sdss.org/preflight/light/redshift/>

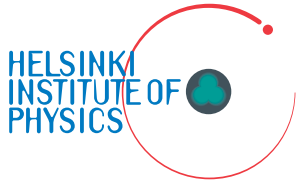


- Maailmankaikkeuden laajentuessa valon aallonpituus venyy.
- Punaisen valon aallonpituus on pisin, eli näkyvä valo siirtyy kohti punaista.
  - Valo voi venyä silmien näköalueen ulkopuolelle: suurin osa taivaan tapahtumista on näkymättömiä.
- Hubblen lain mukaan kohteesta tulleen valon venyminen on verrannollinen sen etäisyyteen.



# Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-malli

---

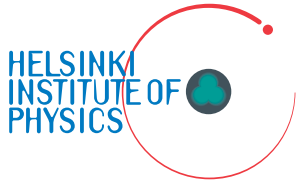


- Pian **FLRW-mallista** tuli yleisesti hyväksytty kuva maailmankaikkeudesta.
- Mallissa oletetaan, että avaruus on samanlainen kaikkialla, mutta voi muuttua ajassa.
- Se miten maailmankaikkeus laajenee/supistuu riippuu siitä, millaista ainetta siinä on sekä alkutilanteesta.



# Laajenemisen merkitys

---

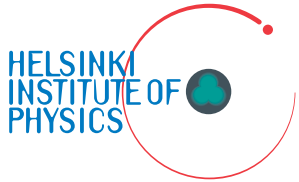


- Maailmankaikkeus on kaikki, mitä on olemassa.
  - Kysymys ”Mihin maailmankaikkeus laajenee?” ei tarkoita mitään.
- Laajeneminen tarkoittaa sitä, että kappaleiden väliin tulee lisää tilaa.
- Yhteen sitoutuneet kokonaisuudet (aurinkokunnat, galaksit, galaksiryppäät, ...) eivät laajene.



# Kohti kylmää ja pimeää

---

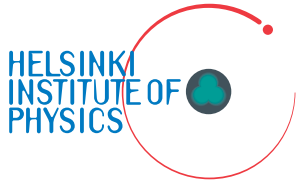


- Kun maailmankaikkeus laajenee, aineen tiheys laskee.
- Tiheys on siis menneisyydessä ollut isompi, samoin lämpötila.
- Laajeneminen hidastuu ajan myötä, jos gravitaatio on puoleensavetävä.
- Maailmankaikkeuden historia on jäähtymisen, harventumisen, hidastumisen ja eriytymisen historiaa.





# Ajan ääriin



- Kun otetaan huomioon tuntemamme ainesisältö, niin yleisen suhteellisuusteorian mukaan aineen tiheys menee äärettömäksi ja etäisyydet nollaan 14 miljardin vuoden päässä menneisyydessä.
- Yleinen ST ennustaa, että ajalla ja avaruudella on alku: **alkuräjähdyks.**
- Kysymys ”Mitä oli ennen alkuräjähdyttä?” ei (tässä viitekehyksessä!) tarkoita mitään.
  - Vrt. ”Mitä on pohjoisnavasta pohjoiseen?”, ”Mitä on sisempänä pallon keskipisteestä?”.



# Jäätynyt museo

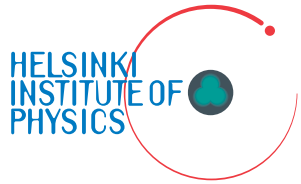
---



- Valon nopeus on äärellinen ja maailmankaikkeus ikä on äärellinen.
  - Näemme vain äärellisen etäisyyden päähän.
- **Kosminen horisontti** on noin 50 miljardin valovuoden päässä.
- Kun katsomme kauas, näemme menneisyyteen.

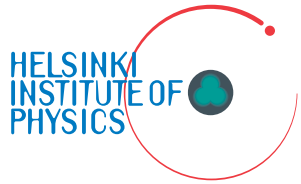


# 1 sekunti sitten





# 8 minuuttia sitten

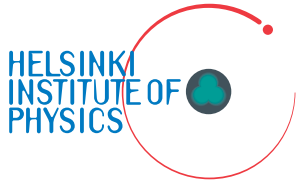






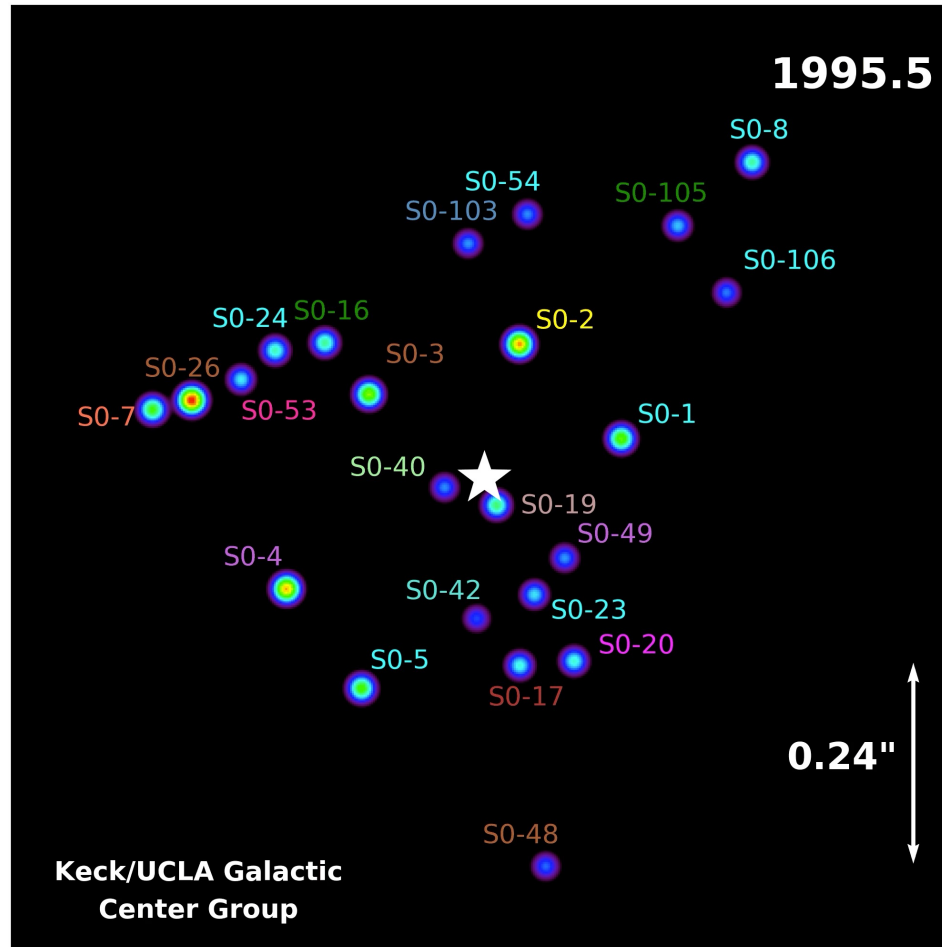
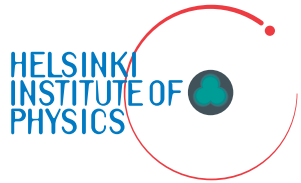
# 4 vuotta sitten

---





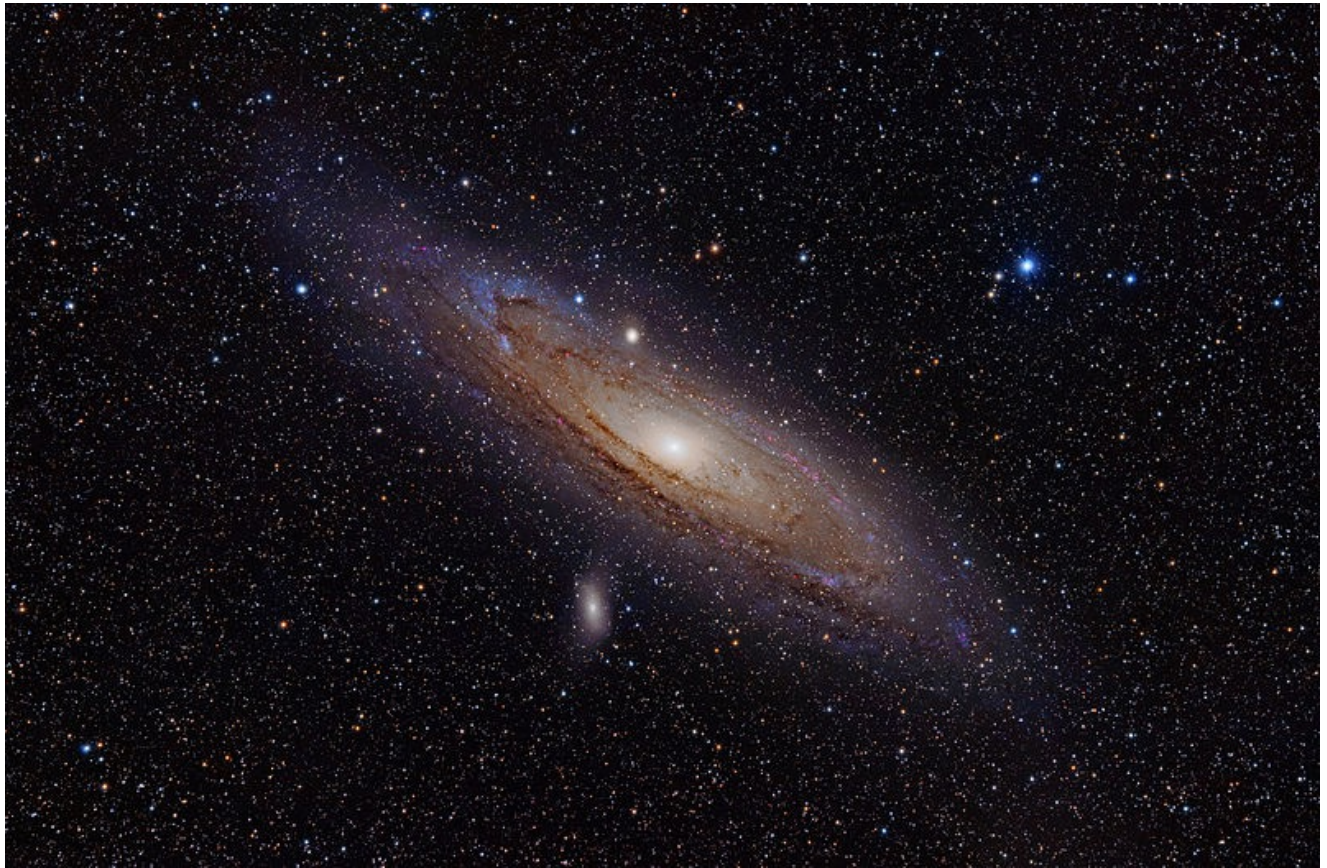
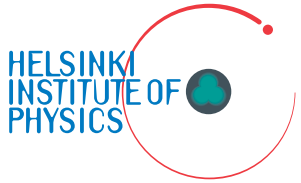
# 26 000 vuotta sitten







# 2.5 miljoonaa vuotta sitten





# 13 miljardia vuotta sitten

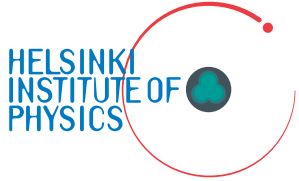






# Taivaan merkit

---



- Kuten Newtonin mekaniikassa, myös yleisen ST:n ja kvanttikenttäteorian kohdalla taivaiden katsominen on keskeistä.
- Hyötyjä
  - Avaruuden museo säilyttää menneisyyden.
  - Havaintoja on helppo toistaa.
  - Äärimmäisiä ilmiöitä (koko, kesto, energia).
- Ongelmia
  - Pitkät etäisyydet: kohteet pieniä ja himmeitä.
  - Ei kokeita, ainoastaan havaintoja: tulkinnanvaraisuus havainnoissa.



# Nykyään myös oikeassa

---

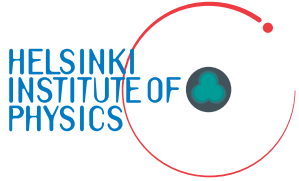


- Kosmologia syntyi 1920-30-luvuilla.
- Sen jälkeen havainnoista oli pitkään epävarmuutta.
- Lev Landau (1908-1968) kosmologeista: *”Often in error, but never in doubt.”*
- 1990-luvulla tapahtui suurin murros sitten laajenemisen löytämisen. (*”Täsmäkosmologia.”*)
  - Teoreettiset puitteet laadittu 80-luvulla.



# Aine ja avaruus

---

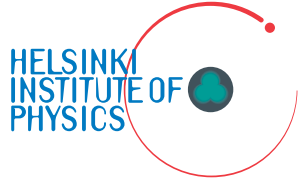


- Nykykosmologiassa kvanttikenttäteoria (ja muu kuvaus aineesta) on yhtä tärkeä kuin yleinen ST.
- Kvanttikenttäteoria kertoo millaista ainetta on olemassa, yleinen ST miten maailmankaikkeus laajenee.
- Kosmologia kertoo, millaisia muodonmuutoksia aine on käynyt läpi.
- Kosmologia käsittelee myös kaiken alkuehtoja.



# Kosmologian aikakaudet

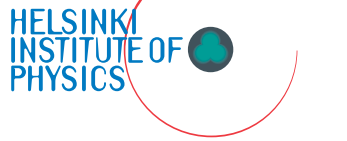
HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
100 miljoonaa v	80 K	tähdet syttyvät
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet syntyvät
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	$10^9$ K	kevyet alkuaineet syntyvät
$10^{-5}$ s	$10^{12}$ K	protonit ja neutronit syntyvät (?)
$10^{-11}$ s	$10^{15}$ K	Higgsin olomuoto muuttuu (?)
$10^{-11} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	baryogeneesi?
$10^{-13} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	$10^{16} \dots 10^{32}$ K	kvanttigravitaatio?



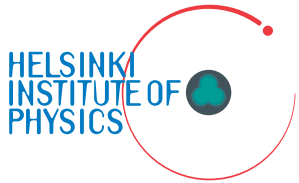
# Kosmologian aikakaudet



Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
100 miljoonaa v	80 K	tähdet syttyvät
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet syntyvät
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	$10^9$ K	kevyet alkuaineet syntyvät
$10^{-5}$ s	$10^{12}$ K	protonit ja neutronit syntyvät (?)
$10^{-11}$ s	$10^{15}$ K	Higgsin olomuoto muuttuu (?)
$10^{-11} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	baryogeneesi?
$10^{-13} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	$10^{16} \dots 10^{32}$ K	kvanttigravitaatio?



# Ytimien synnyn alkusoitto



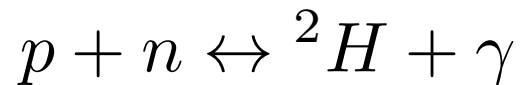
- Kun maailmankaikkeus on sekunnin ikäinen, neutriinot kytkeytyvät irti muusta aineesta.
  - Protonien ja neutronien suhde ei pysy tasapainossa.
$$p + e^{-} \leftrightarrow n + \nu_e$$
  - Neutronit hajoavat.
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$
- Samoihin aikoihin viimeiset positronit annihiloituvat.
$$e^{-} + e^{+} \rightarrow \gamma + \gamma$$
- Jäljelle jää elektroneja, fotoneita, protoneita ja neutroneita.
  - Neutriinot ja pimeää aine eivät osallistu reaktioihin.



# Ensimmäinen askel



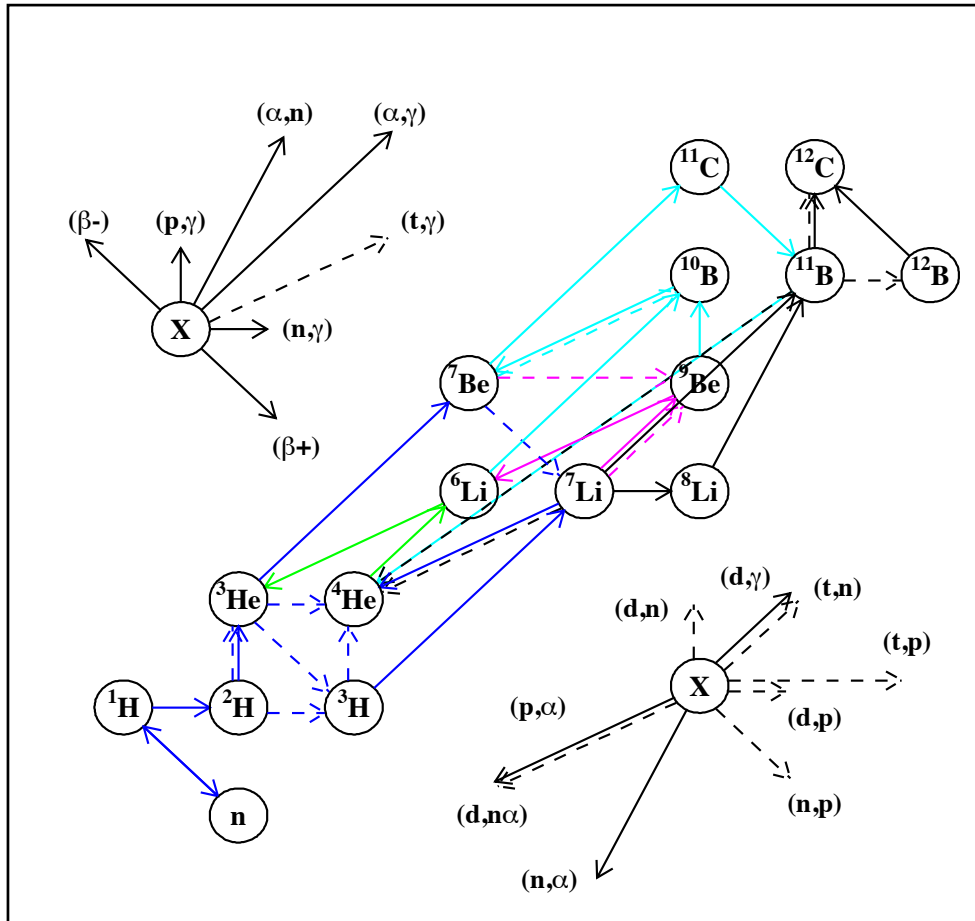
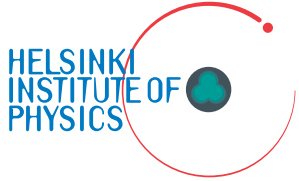
- Kun maailmankaikkeus on noin kolmen minuutin ikäinen, lämpötila on laskenut tarpeeksi, että protonin ja neutronin side ei rikkoudu.



- Jäljelle jääneet neutronit pelastuvat ytimien sisään.
- Kahden hiukkasen törmäysten kautta rakentuu yhä raskaampia ytimiä.



# Alkuaineiden portaat

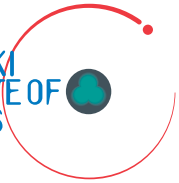






# Kosmologian aikakaudet

HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS



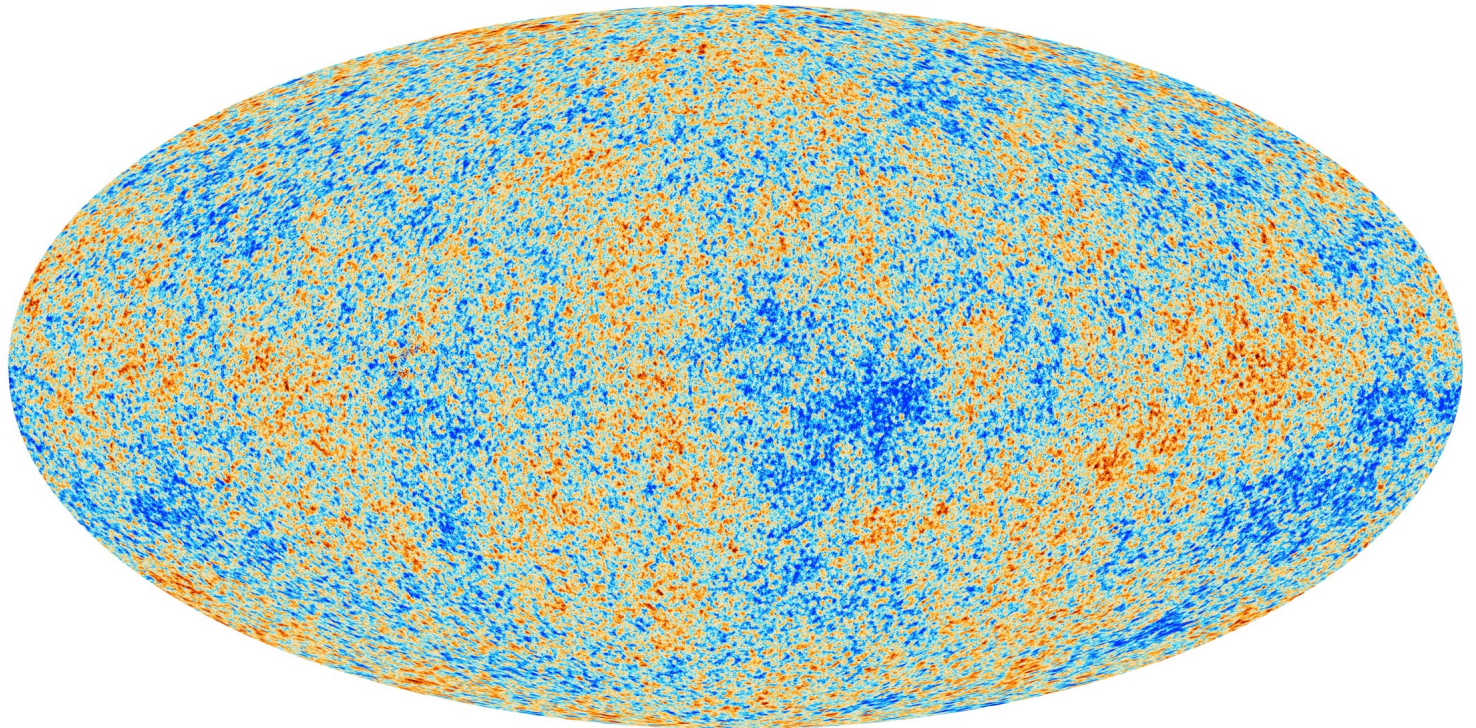
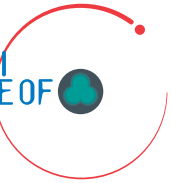
Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
100 miljoonaa v	80 K	tähdet syttyvät
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet syntyvät
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	$10^9$ K	kevyet alkuaineet syntyvät
$10^{-5}$ s	$10^{12}$ K	protonit ja neutronit syntyvät (?)
$10^{-11}$ s	$10^{15}$ K	Higgsin olomuoto muuttuu (?)
$10^{-11} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	baryogeneesi?
$10^{-13} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	$10^{16} \dots 10^{32}$ K	kvanttigravitaatio?



# 14 miljardia vuotta sitten

---

HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS





# Aalloista siemeniksi



- Maailmankaikkeuden saavuttaessa 380 000 vuoden iän lämpötila laskee alle 3 000 asteen.
  - Ytimet ja elektronit yhtyvät atomeiksi.
  - Atomit ovat sähköisesti neutraaleja: valo ja aine eivät enää tunne toisiaan.
- Tihentymät lopettavat sykkimisen ja puristuvat kasaan.
- Eron hetki on ikuistettu **kosmiseen mikroaaltotaustaan**.
  - Valokuva 14 miljardin vuoden takaa.



# Näkymätön valo aikaisilta ajoilta

---



- Kosminen mikroaaltotausta (**cosmic microwave background, CMB**) on valoa, joka irtosi aineesta kun maailmankaikkeus oli 380 000 vuoden ikäinen.
- CMB on maailmankaikkeuden vanhinta valoa. Sitä kauemmas ei (valon avulla) voi nähdä.
- CMB:n syntyessä se oli osittain näkyvää, osittain infrapunaista. Nyt se on venynyt mikroaalloiksi.



# Kaikkeuden alkuehdot

---

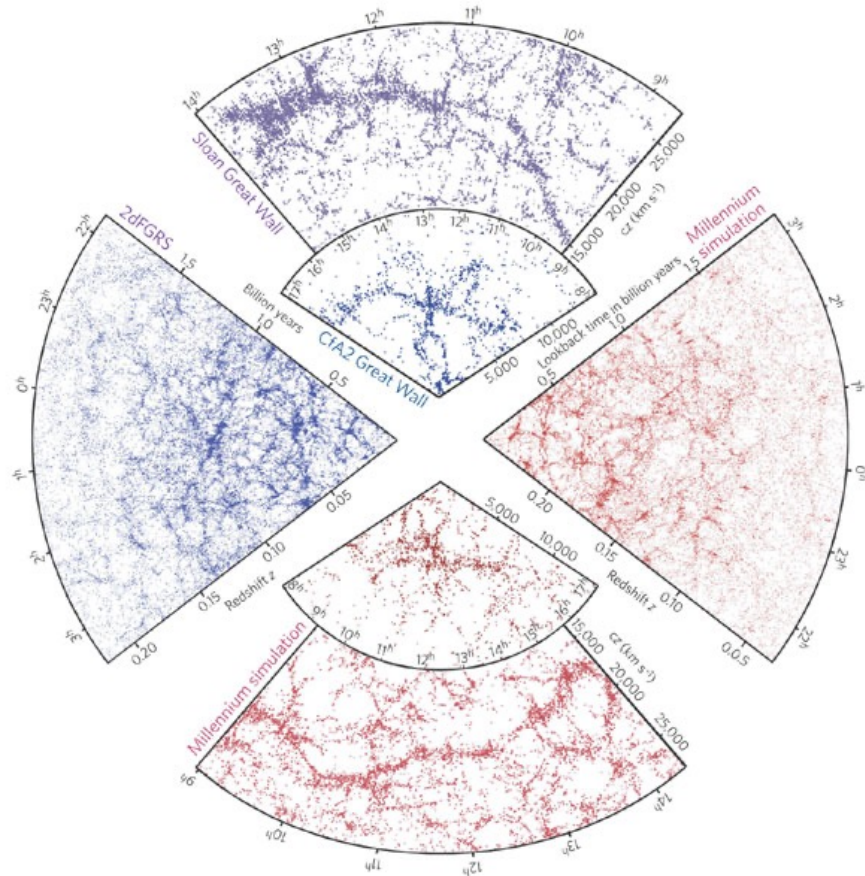
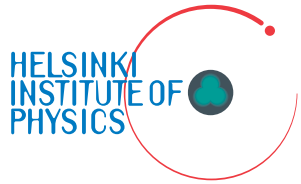


- Kosmologiassa täytyy kertoa luonnonlakien lisäksi myös alkuehdot.
- CMB kertoo, millainen maailmankaikkeus oli alkuaikoina.
- Siitä voidaan laskea, miten maailmankaikkeus kehittyy, jos aine ja vuorovaikutukset tunnetaan.
  - Vrt. Newtonin gravitaatioteoria ja kappaleiden radat: ellipsi vai hyperbeli?



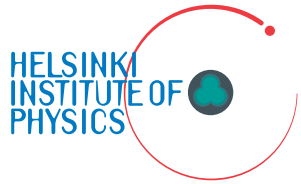


# Suuren mittakaavan rakenne

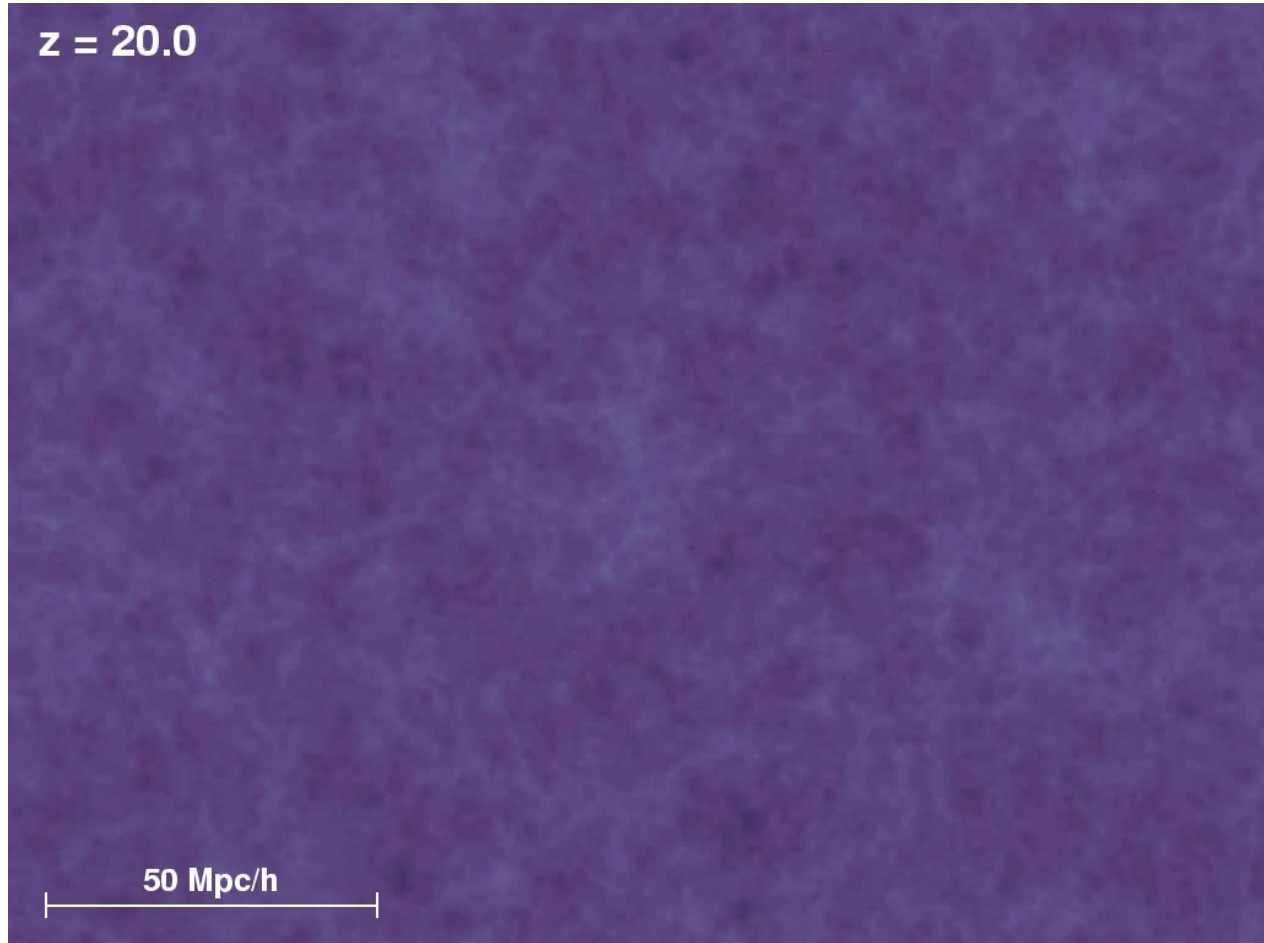




# Kosmisen verkon kasvu



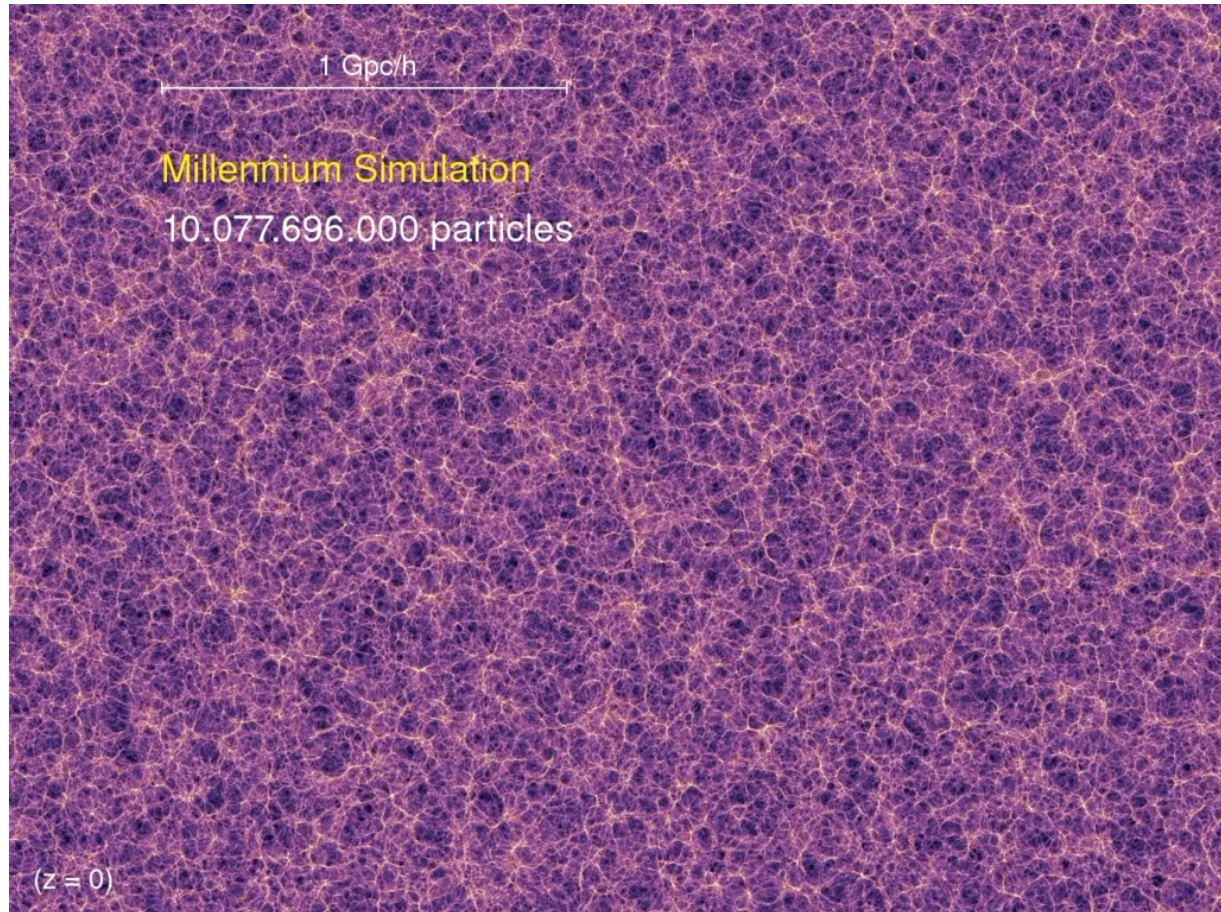
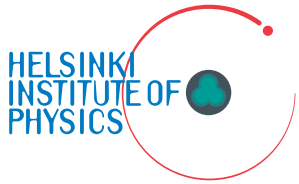
$z = 20.0$



50 Mpc/h



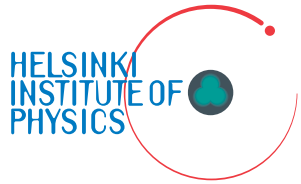
# Pienestä isoon





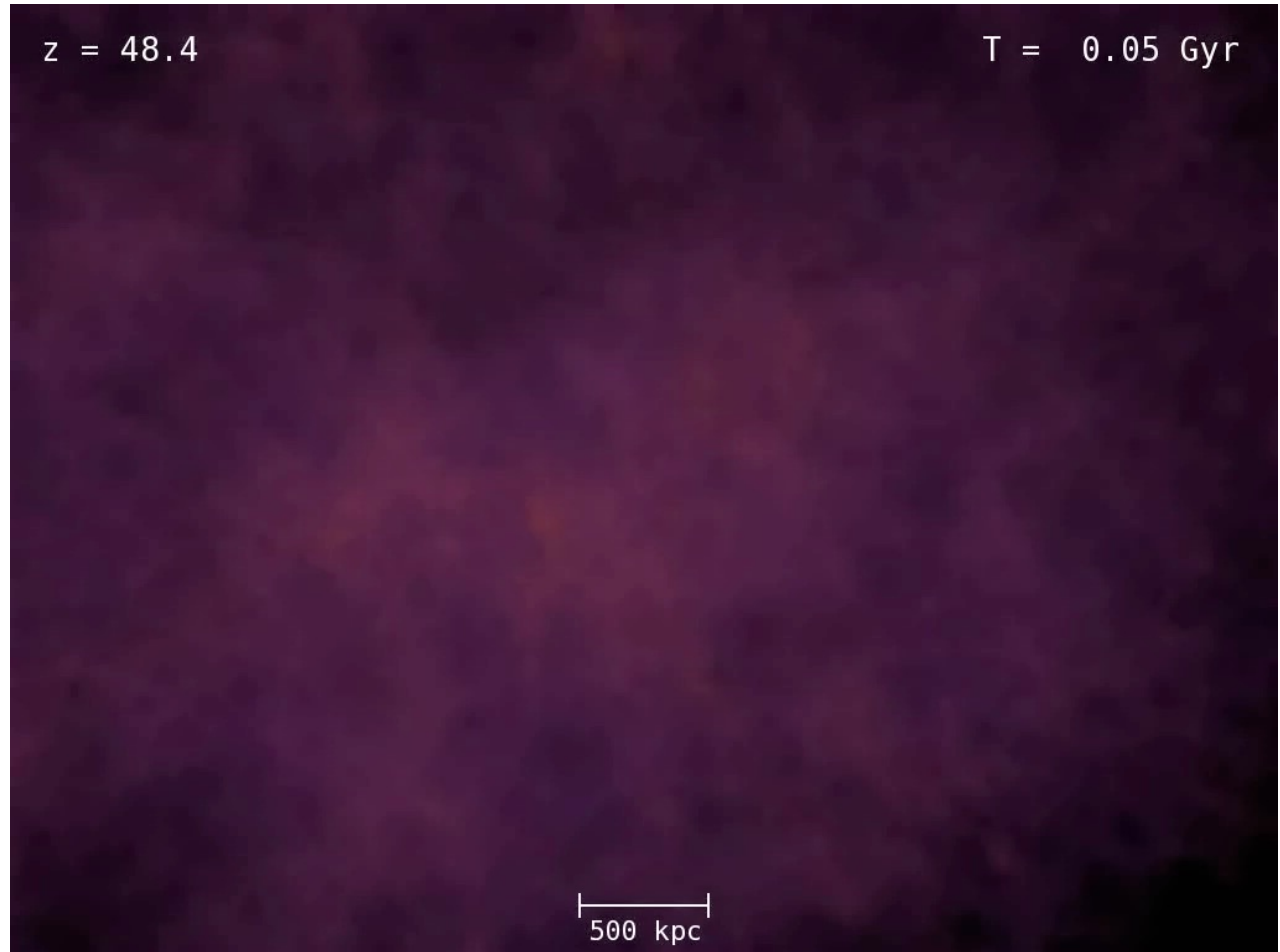
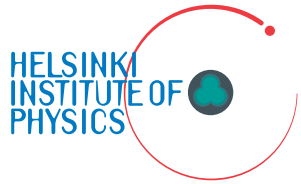


# Rikas rypäs





# Linnunradan synty





# Pimeä aine

---

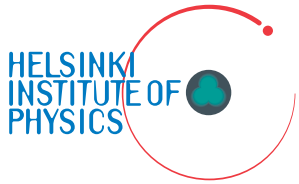


- Ytimistä ja elektroneista koostuva aine on vain noin 5% maailmankaikkeuden energiasisällöstä.
- Noin 25% on **pimeää ainetta**.
- Pimeä aine on näkymätöntä, eikä sitä voi koskea.
  - Vuorovaikuttaa heikosti tavallisen aineen ja valon kanssa.
  - Ei sähkövarausta. (Eikä värivarausta.)
- Luultavasti vuorovaikuttaa heikosti myös itsensä kanssa.
- Toistaiseksi havaittu vain gravitaation kautta.



# Näkymätön luuranko

---



- Koska 80% aineesta on pimeää ainetta, pimeä aine hallitsee galaksien ja isompien rakenteiden muodostumista.
- Pienemmässä mittakaavassa (kuten Aurinkokunnassa) pimeän aineen merkitys on vähäinen, koska näkyvä aine kasautuu tehokkaammin.



# Pimeyden historiaa

---



galaksi M81

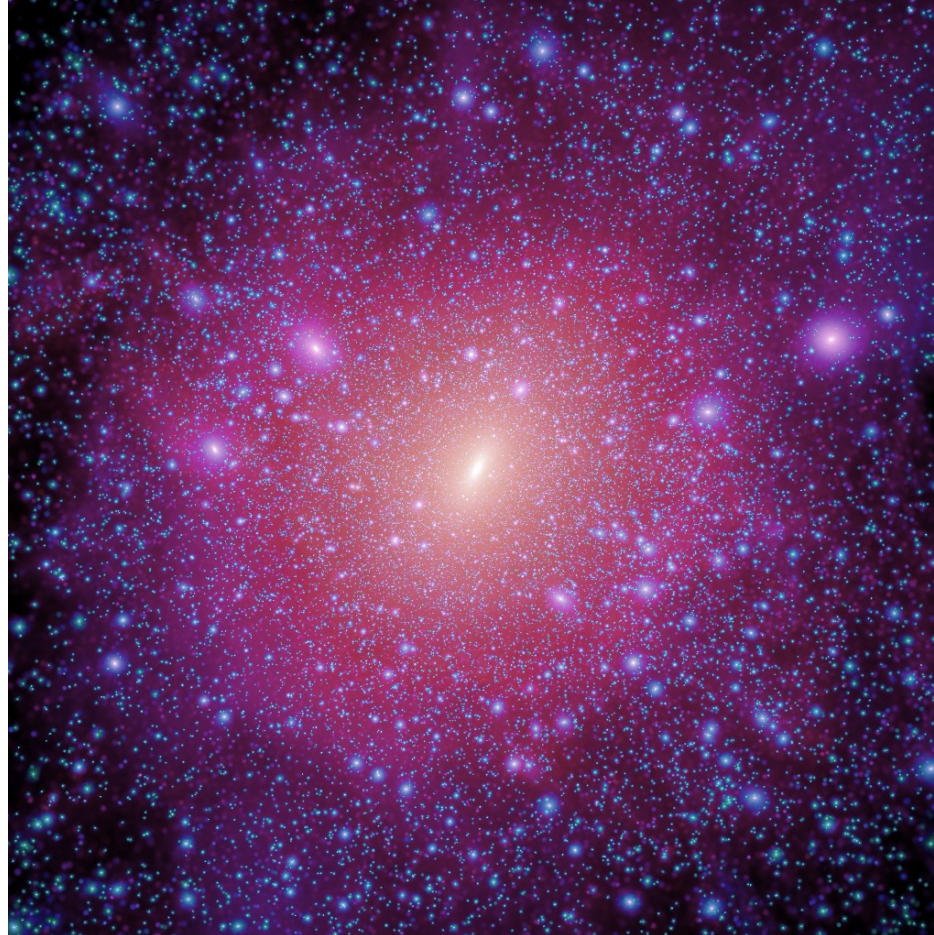
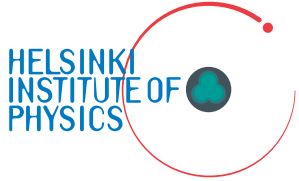
<http://hubblesite.org/gallery/album/pr2007019j>

- 1970-luvun lopulla havainnot tähtien kiertonopeudesta galakseissa osoittivat pimeän aineen tarpeen.
  - Isompi nopeus tarkoittaa enemmän massaa.
- Nykyään on paljon havaintoja, jotka selittyvät pimeällä aineella.
  - Galaksien rakenne (ja olemassaolo).
  - Suuren mittakaavan rakenne.
  - Gravitaatiolinssit.
  - Kosminen mikroaaltotausta.



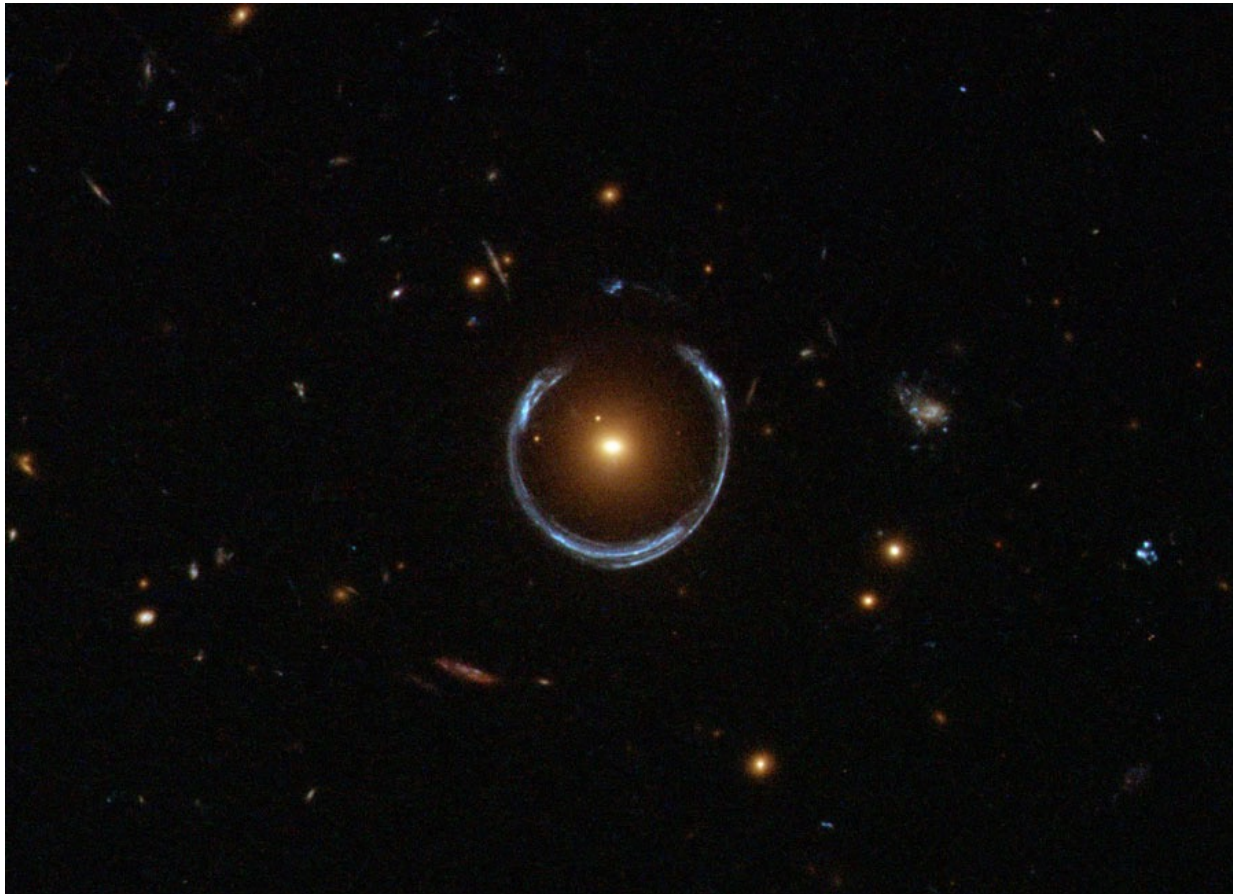
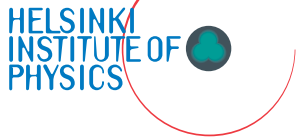


# Galaksien pimeä kehto





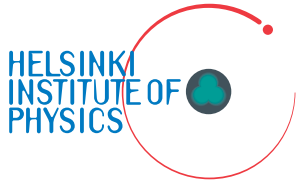
# Einsteinin kehä







# Taivuttaa koskettamatta



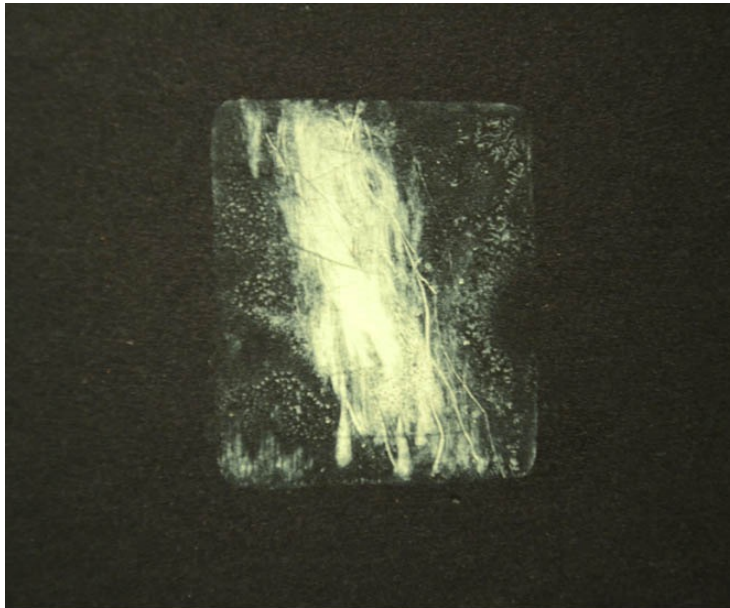
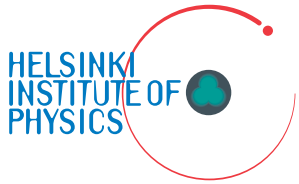
**Galaxy Cluster Abell 2218**

**HST • WFPC2**

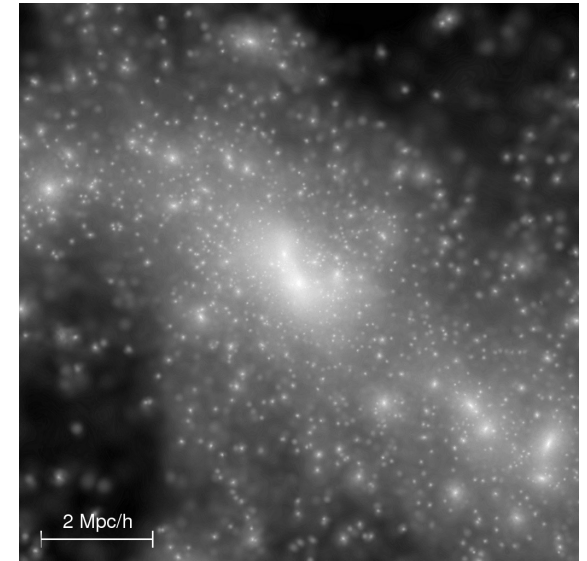
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



# Rihmastoja



Tonja Goldblatt (1977-): sarjasta  
*Pimeä aine* (2014)



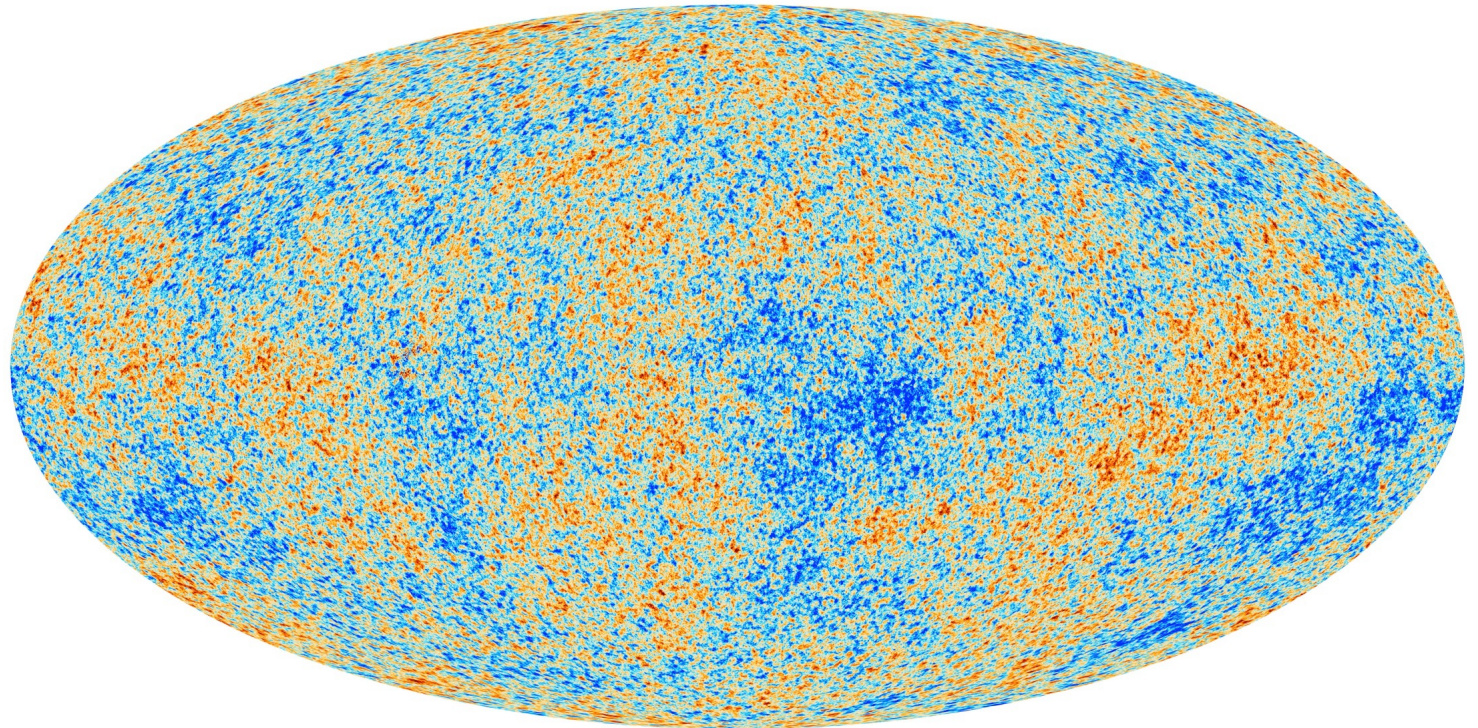
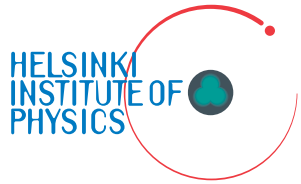
[http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/cluster\\_a\\_A\\_063.jpg](http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/cluster_a_A_063.jpg)





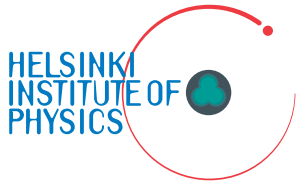
# Aallot valon alussa

---





# Pimeyden luonne



- Pimeä aine luultavasti koostuu toistaiseksi tuntemattomista hiukkasista, joilla ei ole sähkövarausta.
  - Voi myös koostua mustista aukoista.
  - Vaihtoehto olisi muokattu gravitaatiolaki.
- Standardimallissa on tällainen kandidaatti: neutriinot.
  - Standardimallin neutriinot ovat massattomia, mutta tämä on helppo paikata.
  - Havaitut massat ovat kuitenkin liian pienet.
- On siis olemassa hiukkasfysiikkaa Standardimallin tuolla puolen.
  - Satoja pimeän aineen malleja.



# Varmuus pimeydestä

---



- Pimeä aine on idea, joka on selittänyt ja ennustanut havaintoja menestyksekkäästi. (Nobelin palkinto 2019.)
- Keskeinen kysymys ei ole enää pimeän aineen olemassaolo, vaan sen ominaisuudet.
  - Mistä hiukkasesta on kyse?
  - Mikä on sen yhteys tuntemaamme hiukkasfysiikkaan?
- Pimeän aineen hiukasta etsitään monin tavoin, se saattaa löytyä lähivuosina tai pysyä kauan tavoittamattomissa.



# Pimeä energia

---

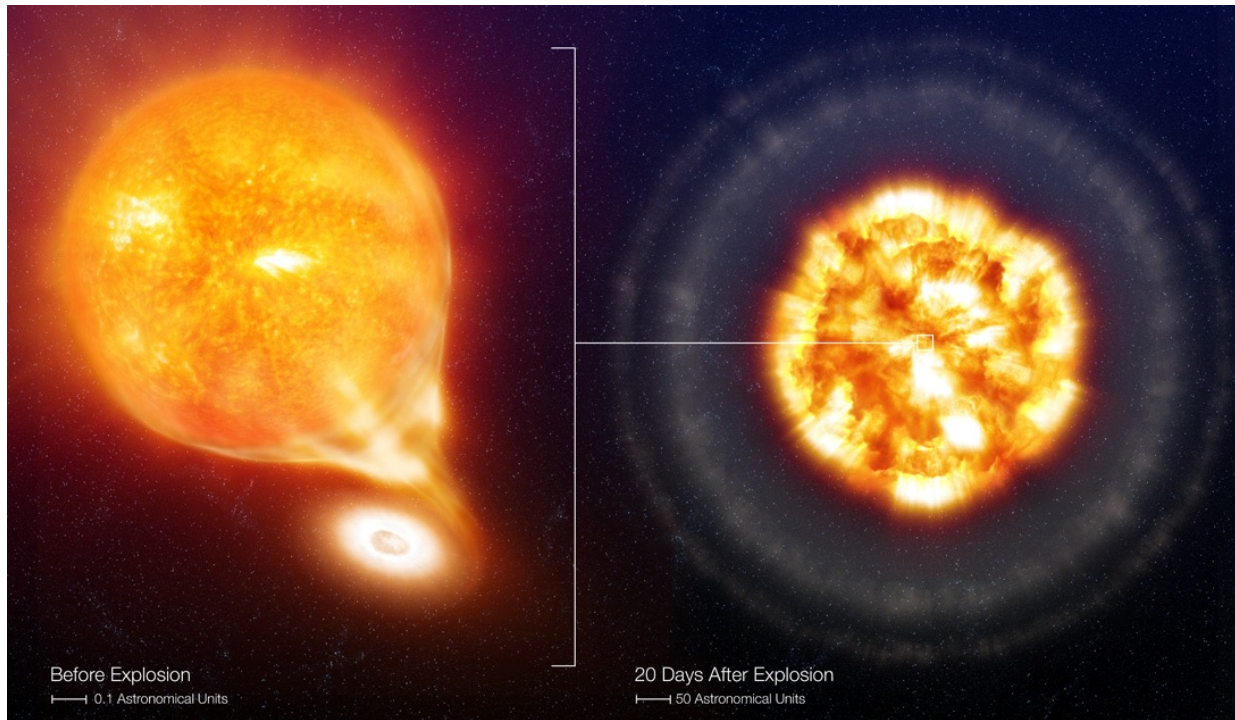
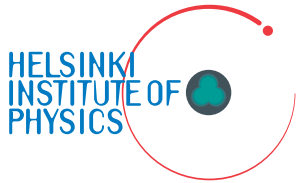


- Tavallinen aine ja pimeä aine ovat 30% maailmankaikkeuden energiatiheydestä.
- Lopuille 70% on annettu nimi **pimeä energia**.
  - Ei tiettävästi tekemistä pimeän aineen kanssa.
- Toisin kuin pimeä aine, pimeä energia on jakautunut tasaisesti avaruuteen, ja sen gravitaatio on hylkivä.
- Havaittu ainoastaan gravitaation avulla.
  - Kiihtyvästä laajenemisesta Nobelin palkinto vuonna 2011.





# Tyypin Ia supernovat



SN 2006X, before and after the Type Ia Supernova Explosion  
(Artist Impression)

ESO Press Photo 31b/07 (12 July 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

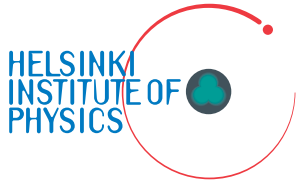






# Kirkkaudesta pimeyteen

---

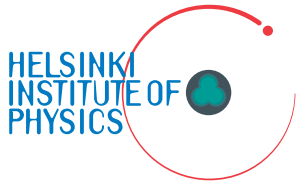


- Havainto: varhaiset kohteet ovat odotettua kauempana.
- Tulkinta: laajeneminen on kiihtynyt.
- Syy: pimeää energia?
- Nykyään useita havaintoja, jotka sopivat yhteen.



# Tyhjön energia

---



- Yksinkertaisin ehdokas pimeäksi energiaksi on tyhjän tilan energia.
- Kvanttikenttäteorioiden tyhjö on monimutkainen tila, jolla on energiatiheys ja jonka gravitaatio on hylkivä.
  - Ei osata laskea mikä energiatiheyden arvo on.
- Sopii hyvin havaintoihin.



# Yhteensattumaongelma

---



- Tyhjän energiatiheys ei muutu ajassa. Aineen energiatiheys laskee avaruuden laajentuessa.
- Miksi ne ovat samaa suuruusluokkaa juuri nyt?
- Toisin ilmaistuna: miksi elämme erityisenä ajankohtana maailmankaikkeuden historiassa?



# Kolme vaihtoehtoa

---

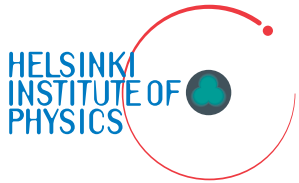


- Kymmeniä pimeän energian malleja.
  - Tyhjän energia on ylivoimaisesti suosituin.
- Pimeälle energialle on kaksi mahdollista vaihtoehtoa.
- Muutos gravitaatiossa.
  - Yleisen ST:n pätevyysalueen ylittyminen.
- Rakenteiden vaikutus: FLRW-mallissa oletetaan maailmankaikkeuden olevan samanlainen kaikkialla.
  - Vrt. Maan ja Kuun etäisyys Newtonin teoriassa.



# Kysymyksiä pimeydestä

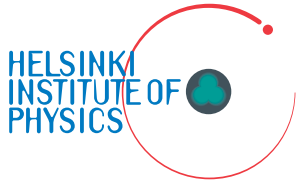
---



- Havainnot osoittavat, että laajeneminen on odotettua nopeampaa.
- Syynä voi olla pimeä energia, erilainen gravitaatiolaki tai rakenteiden muodostuminen.
- Suosituin vaihtoehto on tyhjän energia.
- *“dark energy [...] is an enigma, perhaps the greatest in physics today”* (Ruotsin kuninkaallinen tiedeakatemia, 2011)



# Kohti tyhjiyttä ja pimeyttä



- Jos pimeä energia on tyhjän energiaa, niin kiihtyvä laajeneminen jatkuu ikuisesti.
- Toisiinsa takertuneet galaksien ryppäät pysyvät yhdessä, etääntyen muista ryppäistä.
- Hiljalleen galaksit tai tähdet irtoavat ja joutuvat yksin.
- Tähdet sammuvat ja valo venyy näkymättömiin.
- Ihmiskunta on kuollut sukupuuttoon kauan sitten.



# Hubblen vakio auki

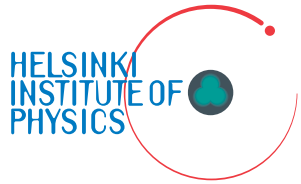


- Tämän hetken merkittävin jännite kosmologisten havaintojen ja teorian välillä koskee Hubblen vakiota.
- Sen arvo on läheisten supernovien mittausten mukaan  $73.0 \pm 1.0$  km/s/Mpc, CMB:n mukaan  $67.4 \pm 0.5$  km/s/Mpc.
  - Nämä eroavat toisistaan todennäköisyydellä  $1/8\ 600\ 000$ .
- Kyse on joko systemaattisista ongelmista havaintojen analysoimisessa tai siitä, että kosmologisessa mallissa on jotain väärin.





# Kosmologian aikakaudet



Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	$10^9$ K	kevyiden alkuaineiden synty
$10^{-5}$ s	$10^{12}$ K	protonien ja neutronien synty (?)
$10^{-11}$ s	$10^{15}$ K	Higgsin olomuodon muutos (?)
$10^{-11} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	baryogeneesi?
$10^{-13} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	$10^{16} \dots 10^{32}$ K	kvanttigravitaatio?





# Baryogeneesi



- Varatuilla hiukkasilla on antihiukkaset.
- Maailmankaikkeuden rakenteet koostuvat aineesta, eivät antiaineesta. Miksi?
- Maailmankaikkeudessa on noin miljardi fotonia jokaista protonia ja neutronia kohti.
  - Suurin osa aineesta on annihiloitunut.
- Aineen ja antiaineen epäsuhdan synnyttävää tapahtumaa kutsutaan nimellä **baryogeneesi**.



# Todiste tuntemattomasta

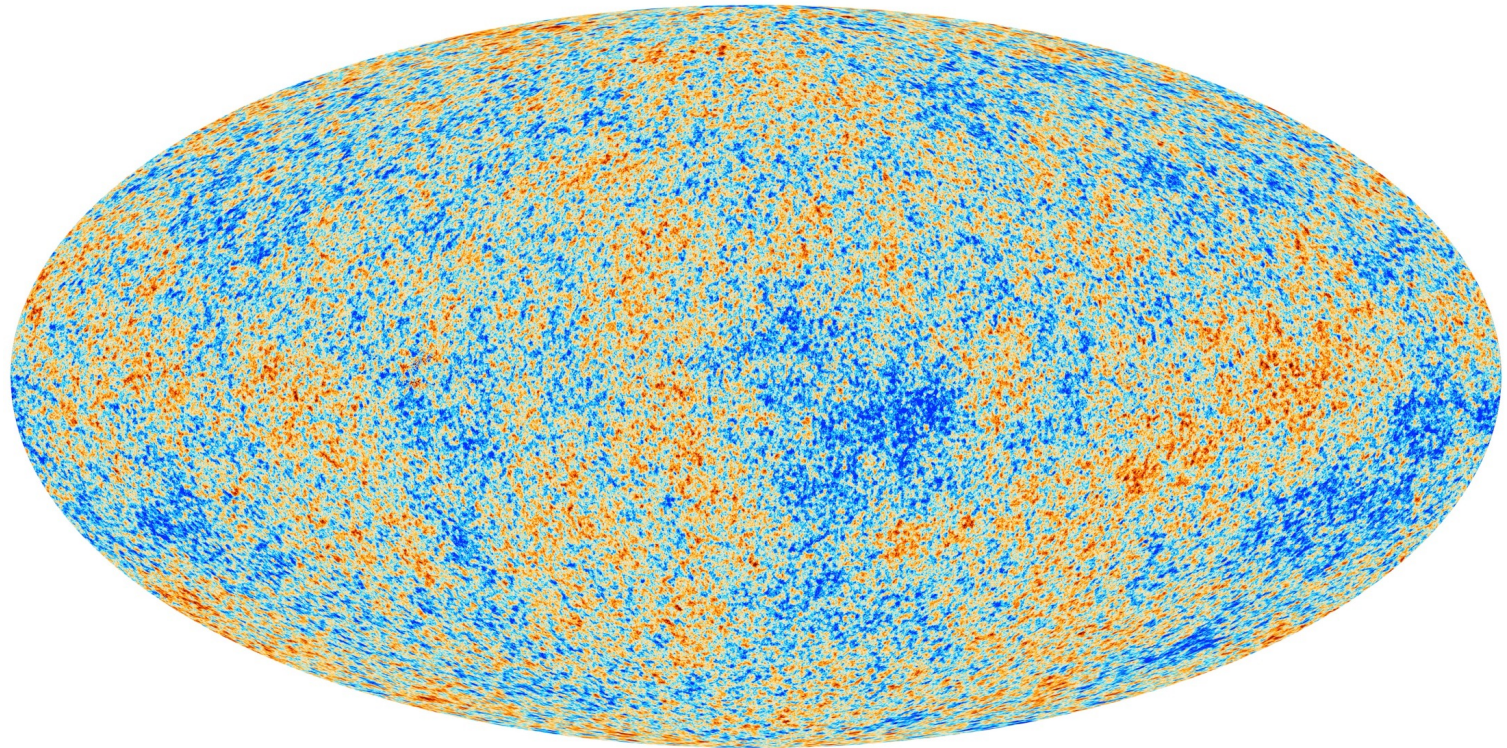
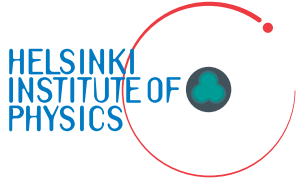


- Aineen ja antiaineen välisen eron syntyminen edellyttää, että hiukkaset ja antihiukkaset käyttäytyvät eri tavalla.
- Kokeellisesti varmennetuissa hiukkasfysiikan teorioissa tämä ei toteudu tarpeeksi voimakkaasti.
  - Tarvitaan uutta hiukkasfysiikkaa.
- Epäsuhta lienee syntynyt Higgsin olomuodon muutoksessa tai sitä ennen.



# Näkymä ensimmäisen sekunnin perukoille

---





# Kosminen inflaatio

---

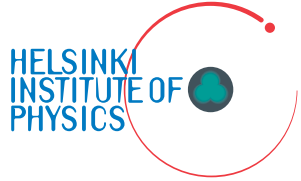


- CMB näyttää sadastuhannesosan tarkkuudella samalta joka suunnassa.
- Mistä taivas tietää olla samanlainen kaikkialla?
- Tähän keksittiin 1980-luvun alussa selitys: **kosminen inflaatio.**



# Kosmologian aikakaudet

HELSINKI  
INSTITUTE OF  
PHYSICS

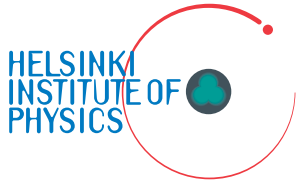


Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	$10^9$ K	kevyiden alkuaineiden synty
$10^{-5}$ s	$10^{12}$ K	protonien ja neutronien synty (?)
$10^{-11}$ s	$10^{15}$ K	Higgsin olomuodon muutos (?)
$10^{-11} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	baryogeneesi?
$10^{-13} \dots 10^{-36}$ s	$10^{16} \dots 10^{29}$ K	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	$10^{16} \dots 10^{32}$ K	kvanttigravitaatio?





# Selitys (epä)tasaisuudelle

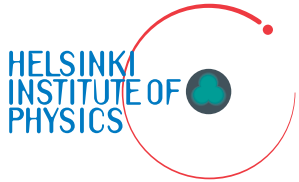


- Inflaatio tarkoittaa avaruuden kiihtyvää laajenemista ensimmäisen sekunnin murto-osan aikana.
- Kiihtyvä laajeneminen tasoittaa ja tyhjentää avaruuden.
- Näennäinen horisontti supistuu.
- Inflaatiolla haluttiin selittää, miksi maailmankaikkeus on lähes tasainen.
- Pian hahmotettiin, että se kertoo myös, miksi maailmankaikkeus on hieman epätasainen.





# Tyhjyyden epämääräisyys



- Inflaatiota ajaa avaruuden täyttävä kenttä.
- Kentän **kvanttivärähtelyt** venyvät hiukkasfysiikan skaaloista kosmisiin mittoihin ja jäätyvät paikalleen.
- Kvanttivärähtely tarkoittaa sitä, että kentän arvo on inflaation aikana epämääräisessä tilassa.
  - Mahdollisuus luodata kvanttifysiikkaa?



# Aineen synty

---



- Inflaation loputtua kenttä hajoaa hiukkasiksi.
- Niihin kohtiin, missä kentän energiatiheys on isompi, syntyy enemmän hiukkasia.
- Aineen kvanttivärähtelyistä tulee rakenteen siemeniä.
- Kaikki aine syntyy inflaatiota ajavasta kentästä.



# Ennustusvoimaa

---

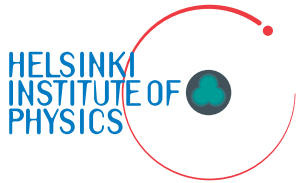


- Inflaatio on ennustanut oikein, että epätasaisuuden siemenet ovat
  - lähes mutta eivät aivan samanlaisia kaikissa mittakaavoissa,
  - korkeudeltaan tietyn todennäköisyysjakauman mukaisia, ja
  - samanlaisia valolle, tavalliselle aineelle ja pimeälle aineelle.



# Epäilyn rajalla

---

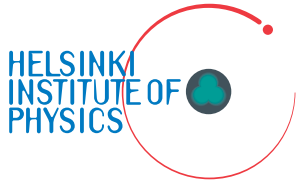


- Ei tiedetä, miten inflaatio on yksityiskohtaisesti tapahtunut.
  - Satoja erilaisia malleja.
- Inflaatiosta voi olla vastuussa Higgsin kenttä tai joku tuntematon kenttä.
- *”Something like inflation is something like proven.”*



# Aaltoileva avaruus

---

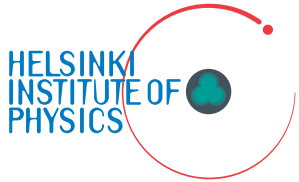


- Inflaatiossa avaruuden kvanttivärähtelyistä syntyy gravitaatioaaltoja.
- Inflaation gravitaatioaalto syntyvät tyhjästä.
  - Vrt. vuonna 2015 havaitut gravitaatioaalto, jotka syntyivät aineen liikkeestä.
- Inflaation gravitaatioaaltoja ei ole havaittu.



# Rakenteiden synty ja epädeterminismi

---

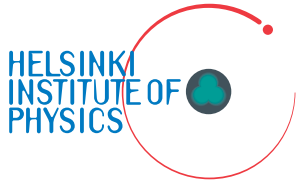


- Kosmologiassa tarvitaan lakien lisäksi alkuehdot.
  - Eli kosmisista havainnoista voidaan saada tietoa kaikkeuden alkuehdoista.
- Deterministisessä teoriassa rakenteet voi selittää vain aiemmilla rakenteilla (tai lailla, jossa tietyt paikat ovat erityisasemassa).
- Kvanttifysiikassa selitysten ketju päättyy: vaikka todennäköisyysjakauma on tasainen, toteutunut vaihtoehto ei ole.





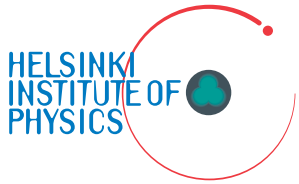
# Sattumasta syntyneet



- Kaikki rakenteet, galakseista tähtiin ja planeetoista DNA:han, ovat peräisin kosmisessa mikroaaltotaustassa näkyvistä epätasaisuuksista.
- Koko olemuksemme, historiamme ja kulttuurimme (tai todennäköisyysjakauma sille) palautuu inflaation kvanttivärähtelyihin.
- Ei tiedetä, mitä oli ennen inflaatiota (vai oliko mitään).



# Kööpenhaminan tuolla puolen



- Inflaatio synnyttää todennäköisyysjakauman epätasaisuuksille.
- Näemme vain yhden toteutuneen vaihtoehdon.
- Kööpenhaminan tulkinnan rajat tulevat vastaan: ei ulkoista havaitsijaa.
- Inflaatio on ainoa fysiikan osa, missä on kokeellisesti päästy kvanttikenttäteorian ja yleisen ST:n yhteiselle alueelle, **kvanttigravitaatioon**.



# Taivaallista tietoa

---



- Kosmologiassa luodetaan korkeita energioita: varhainen maailmankaikkeus on hiukkasfysiikan laboratorio.
  - Viime aikoina kosmologia on tuonut enemmän tietoa hiukkasfysiikasta kuin maanpäälliset kokeet.
- Pimeä aine, pimeä energia, baryogeneesi ja inflaatio eivät ole teorioita eivätkä malleja, vaan ideoita, jotka toteutuvat useissa malleissa.
- Ei olla varmoja, millaisen teorian osia nämä ideat ovat, eli miten ne sopivat yhteen keskenään ja Standardimallin kanssa.
- Inflaatiossa on saatu kokeellinen kosketus kvanttigravitaatioon.