

Fysiikkaa runoilijoille

Osa 6

Kosmologia

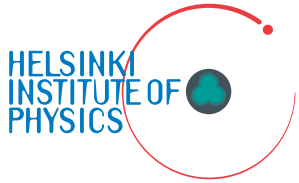
Syksy Räsänen

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.



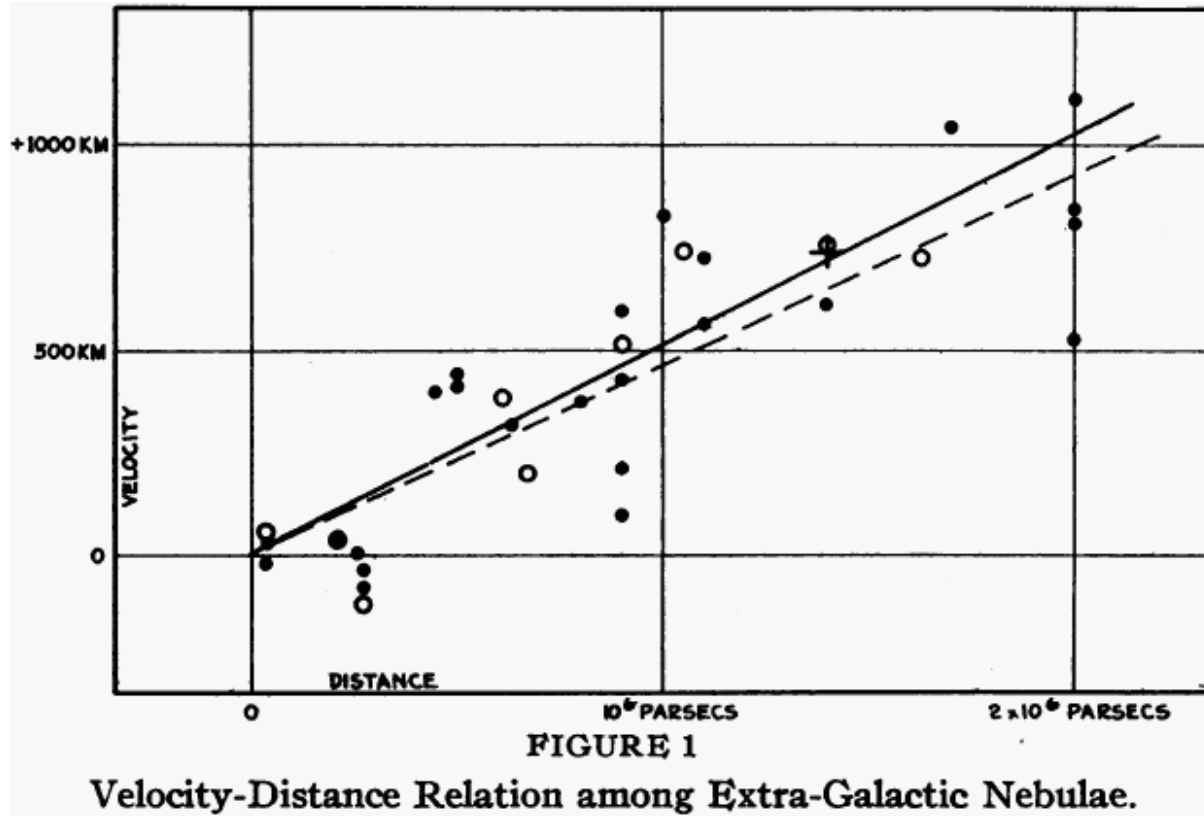
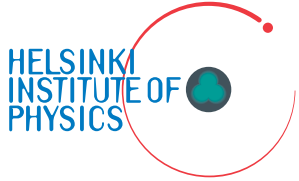
Galaksien etääntyminen



- 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 munaukseksi.



Hubblen laki vuonna 1929



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

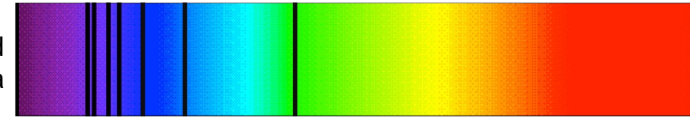


Punasiirtymä

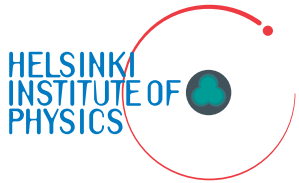
Emitted
Spectra



Observed
Spectra



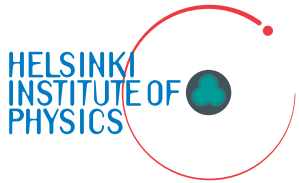
<http://voyages.sdss.org/preflight/light/redshift/>



- 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.



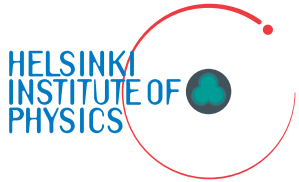
Laajenemisen merkitys



- 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?”.



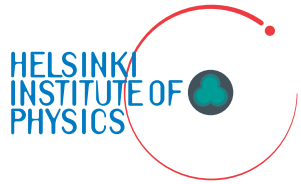
Jäätynyt museo



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

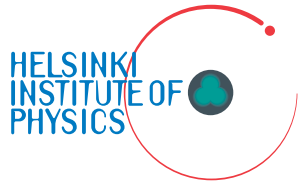


1 sekunti sitten



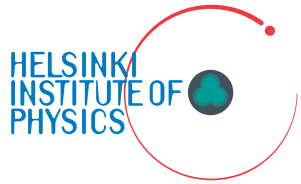


8 minuuttia sitten



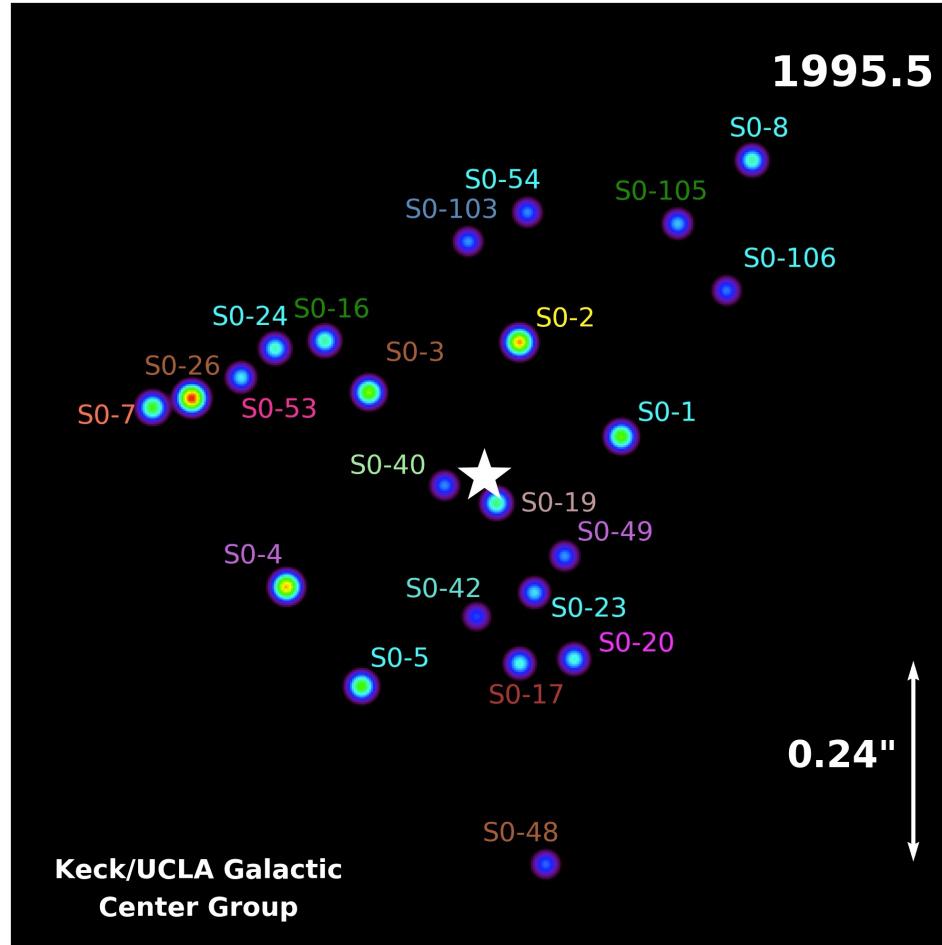
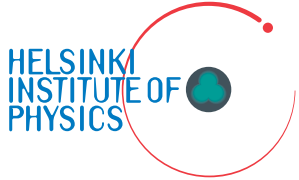


4 vuotta sitten



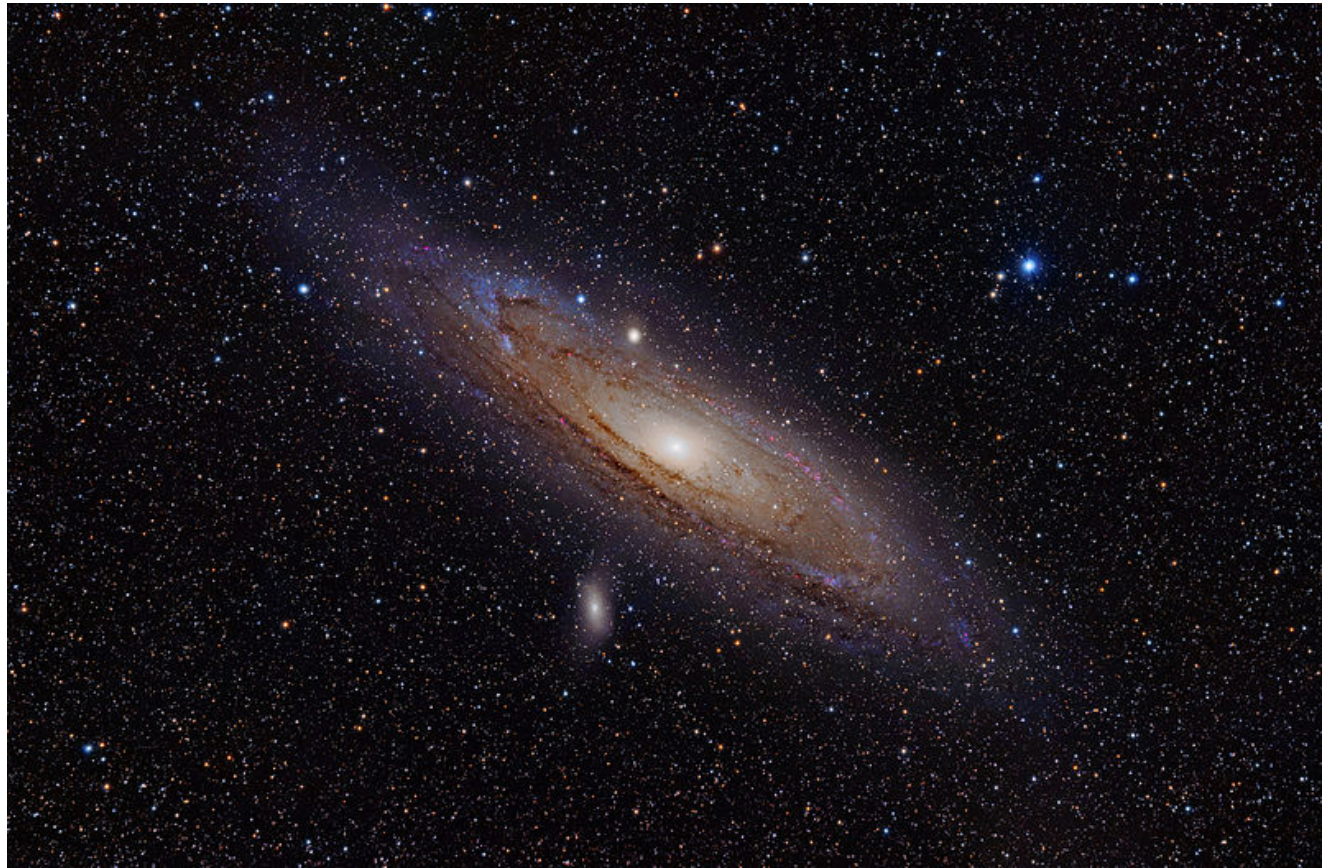


26 000 vuotta sitten



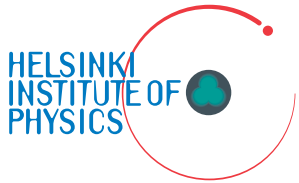


2.5 miljoonaa vuotta sitten



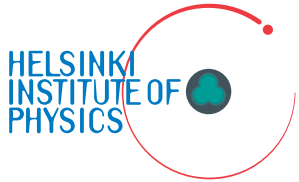


13 miljardia vuotta sitten





Taivaan merkit



- Kuten Newtonin mekaniikassa, myös yleisen ST:n ja kvanttikenttäteorian kohdalla taivaiden katsominen on tärkeää.
- 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

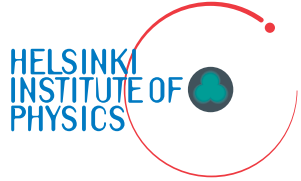


- Nykykosmologiassa kvanttikenttäteoria (ja muu kuvaus aineesta) on yhtä tärkeä kuin yleinen ST.
- Kvanttikenttäteoria kertoo millaista ainetta on olemassa, yleinen ST miten maailmankaikkeus laajenee.
- Kosmologia kertoo, millaisia muodonmuutoksia aine on käynyt läpi.
- Kosmologia käsittelee myös kaiken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



Kosmologian aikakaudet

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS

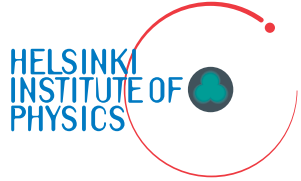


Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
100 miljoonaa v	80 K	tähdet syttyvät
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet syntyvät
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	10^9 K	kevyet alkuaineet syntyvät
10^{-5} s	10^{12} K	protonit ja neutronit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



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	-	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	-	kvanttigravitaatio?



Ytimien synnyn alkusoitto



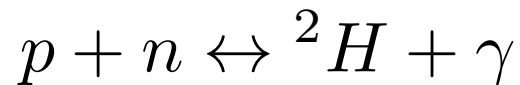
- Kun maailmankaikkeus on sekunnin ikäinen, neutriinot kytkeytyvät irti muusta aineesta.
 - Protonien ja neutronien suhde ei pysy tasapainossa.
$$p + e^{-} \leftrightarrow n + \nu_e$$
 - Neutronit hajoavat.
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$
- Samoihin aikoihin viimeiset positronit annihiloituvat.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



Ensimmäinen askel



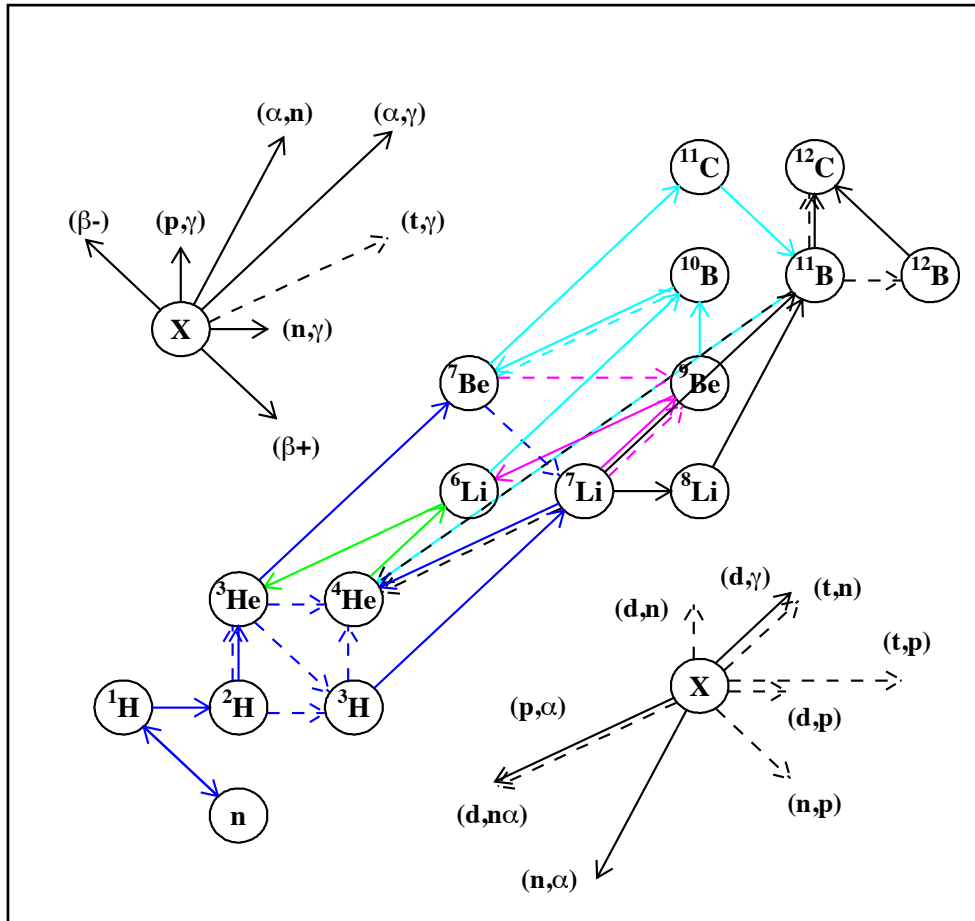
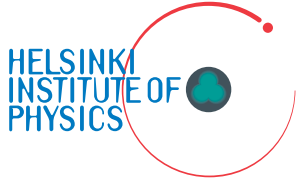
- Kun maailmankaikkeus on noin kolmen minuutin ikäinen, lämpötila on laskenut tarpeeksi, että protonin ja neutronin side ei rikkoudu.



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



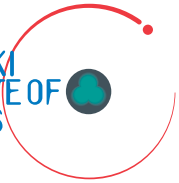
Alkuaineiden portaat





Kosmologian aikakaudet

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS

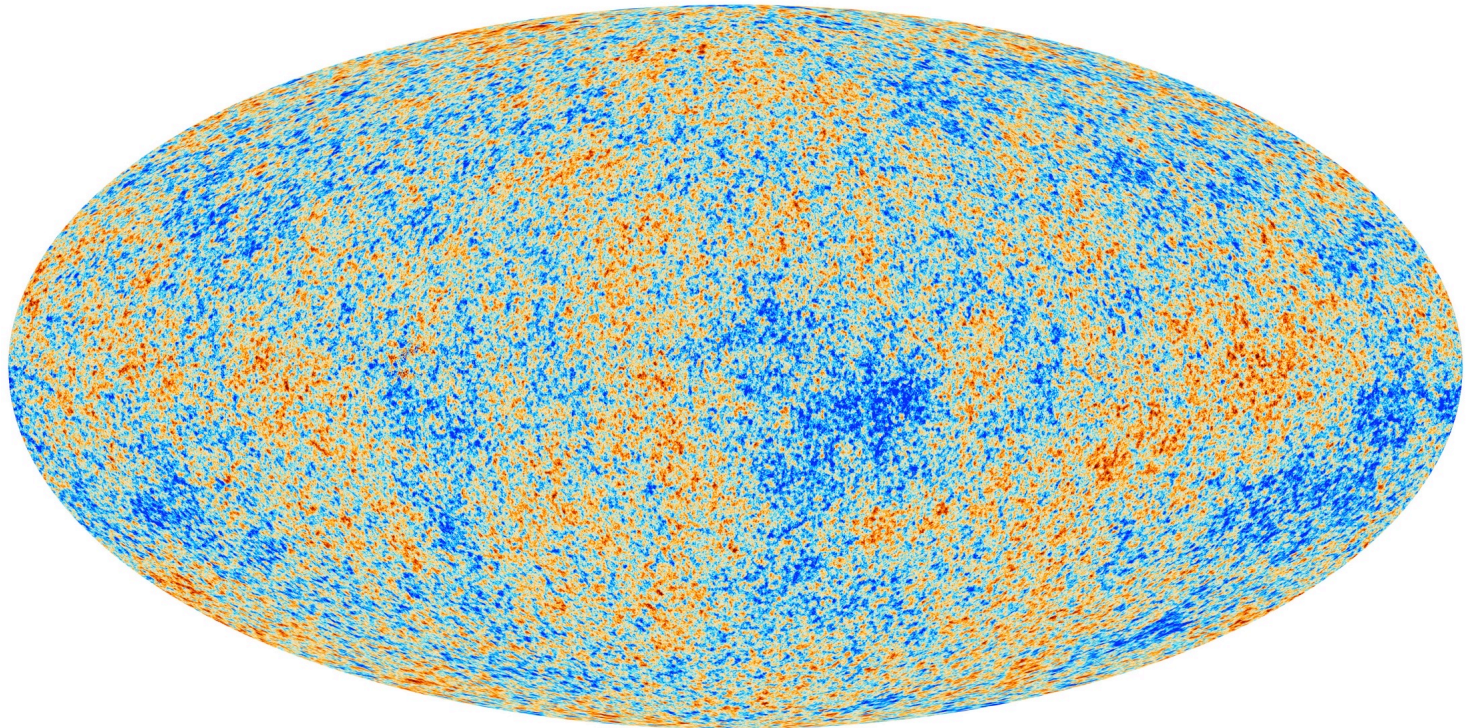
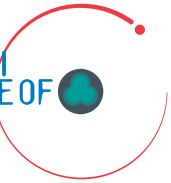


Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
100 miljoonaa v	80 K	tähdet syttyvät
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet syntyvät
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	10^9 K	kevyet alkuaineet syntyvät
10^{-5} s	10^{12} K	protonit ja neutronit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



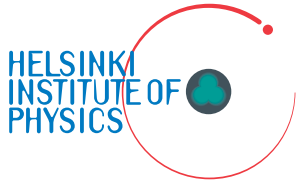
14 miljardia vuotta sitten

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.



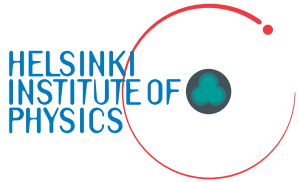
Näkymätön valo aikaisilta ajoilta



- 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.



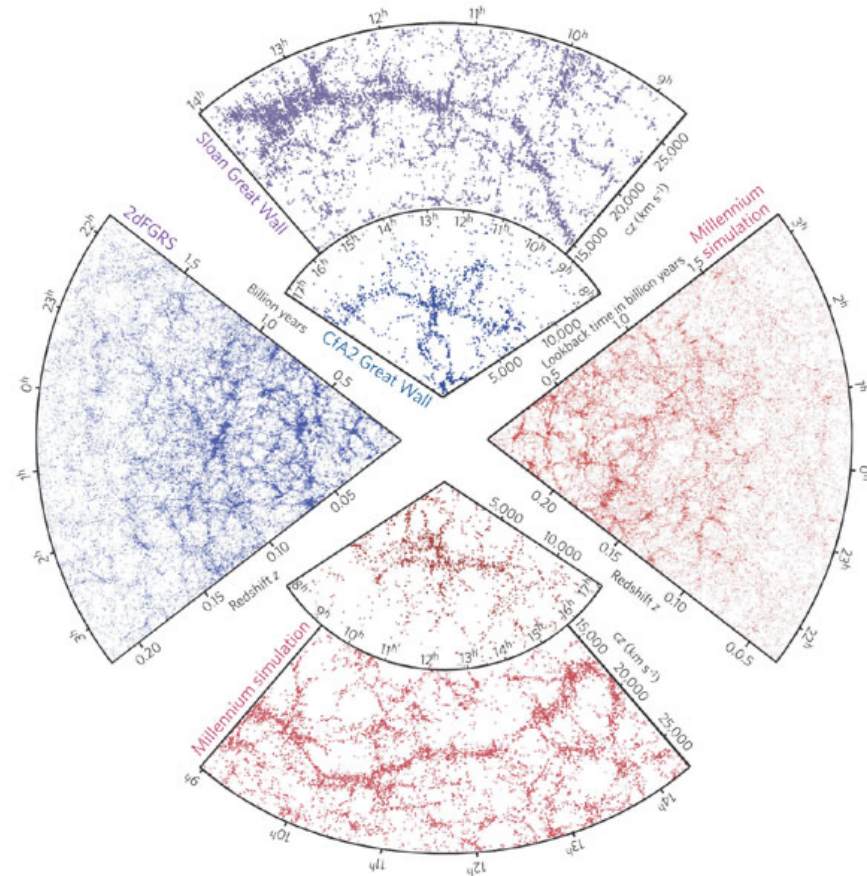
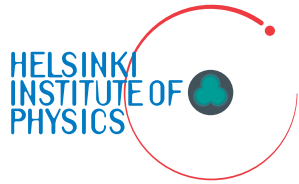
Kaikkeuden alkuehdot



- 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?

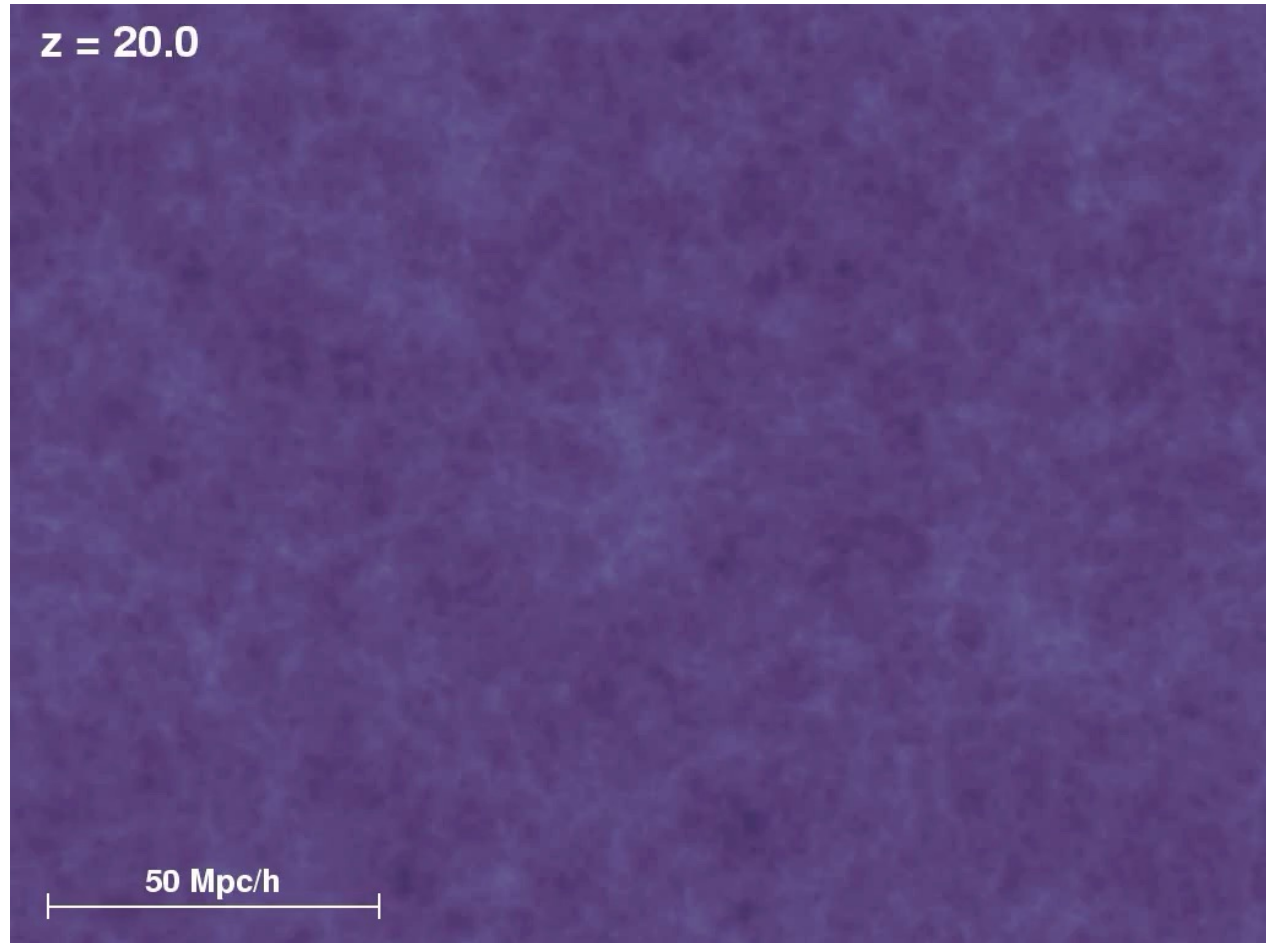
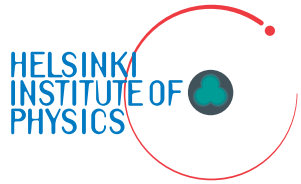


Suuren mittakaavan rakenne



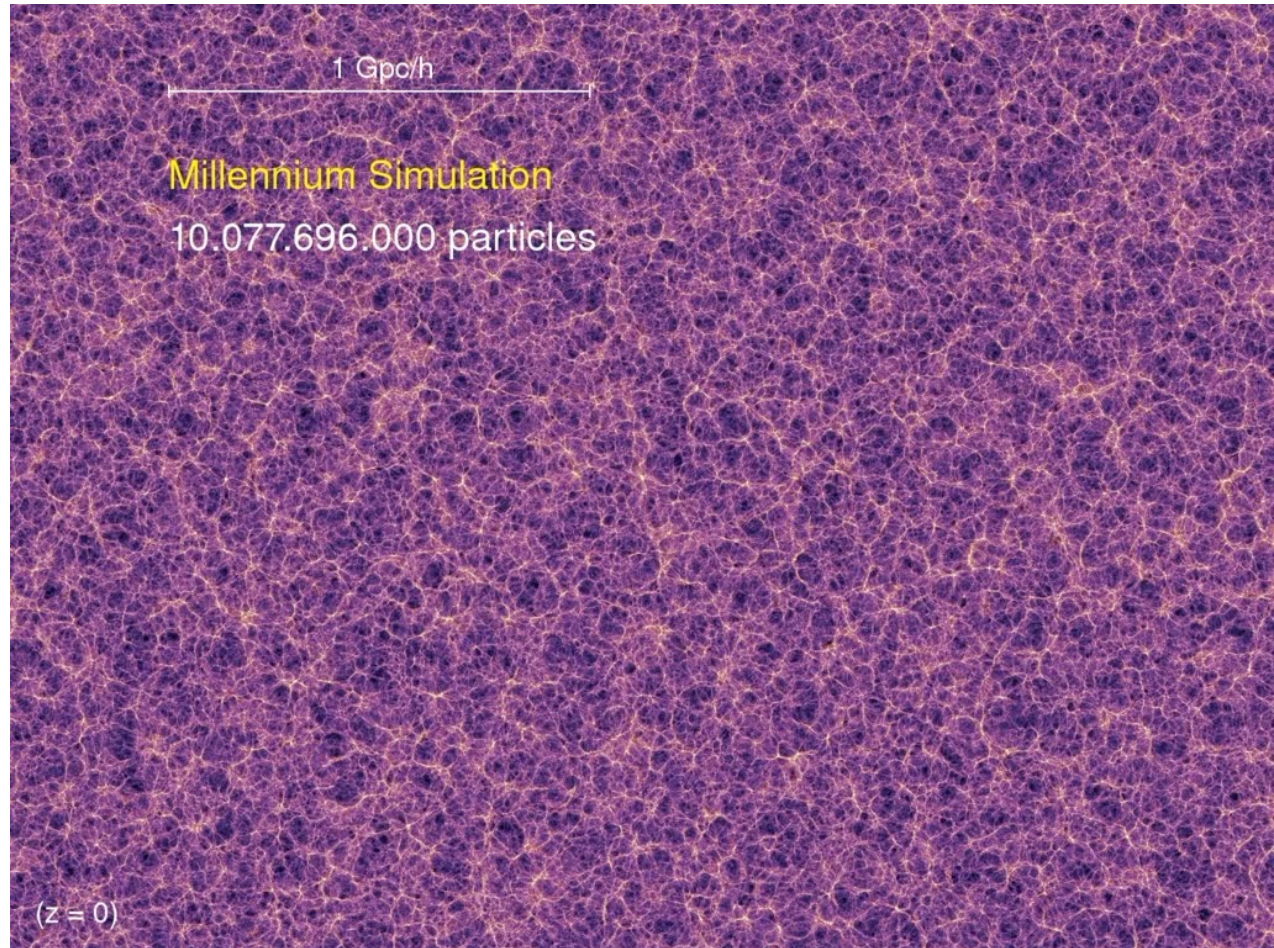


Kosmisen verkon kasvu



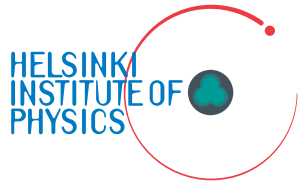


Pienestä isoon



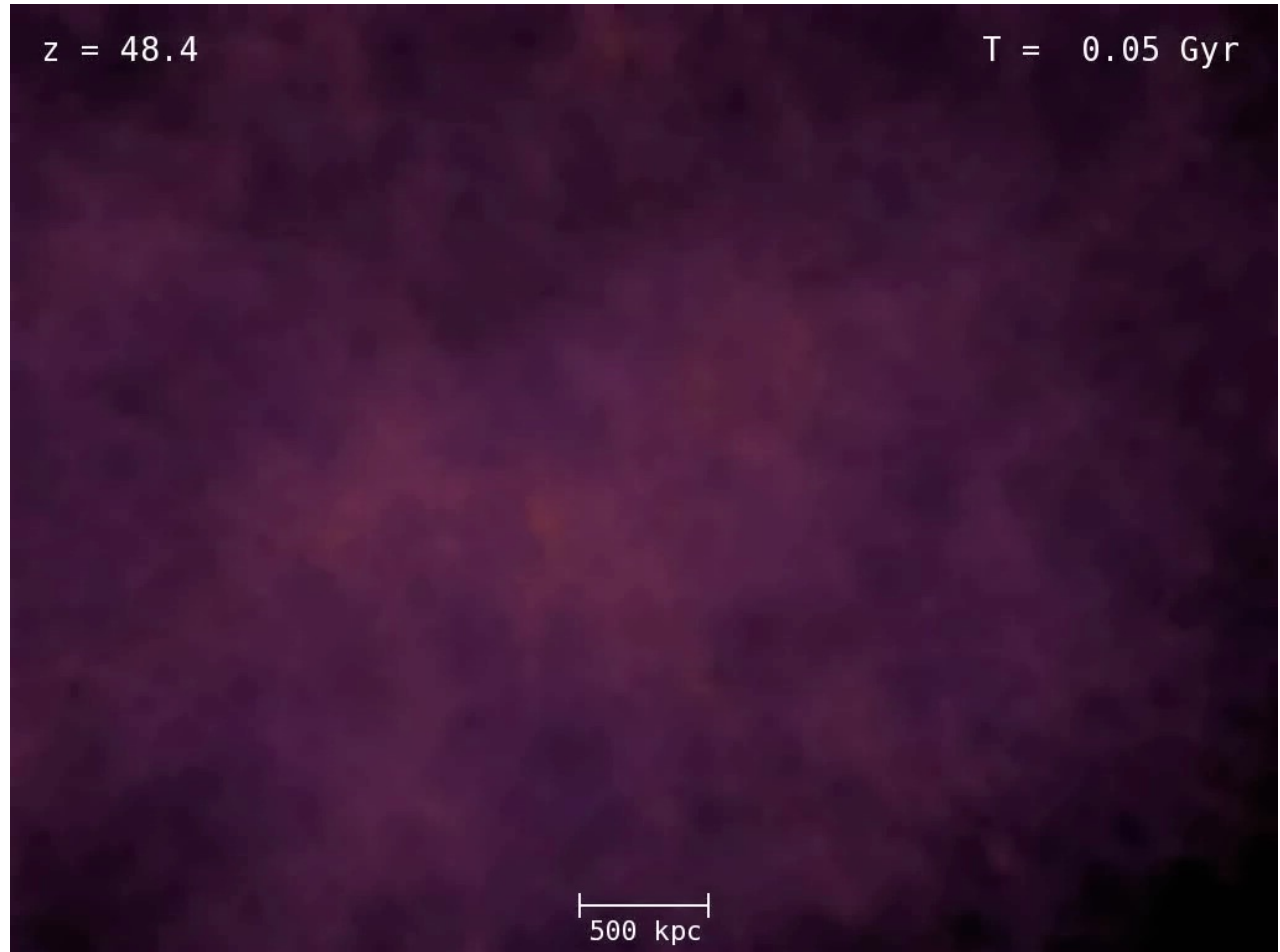
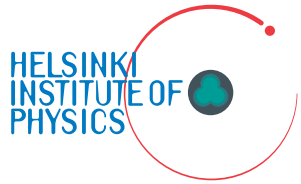


Rikas rypäs



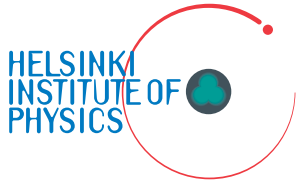


Linnunradan synty





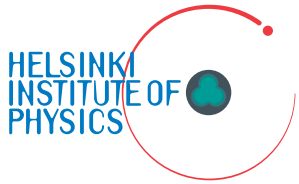
Pimeä aine



- 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



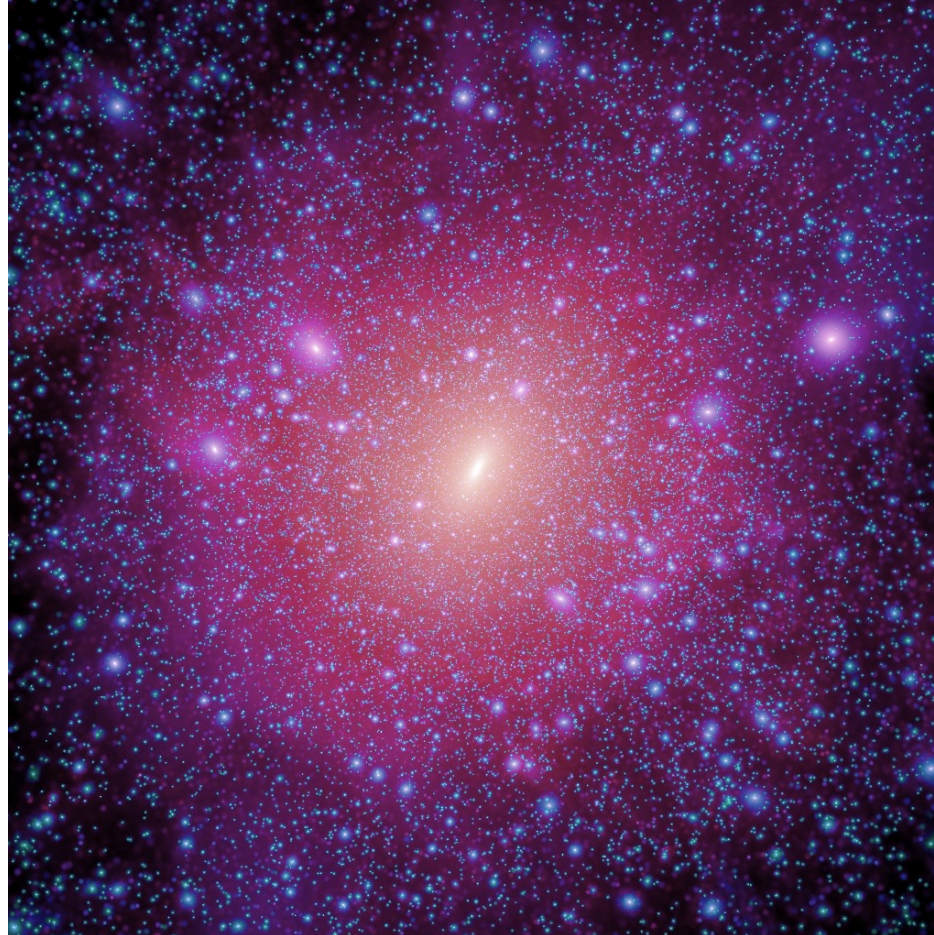
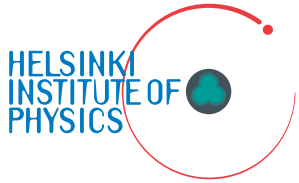
galaksi M81

<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.

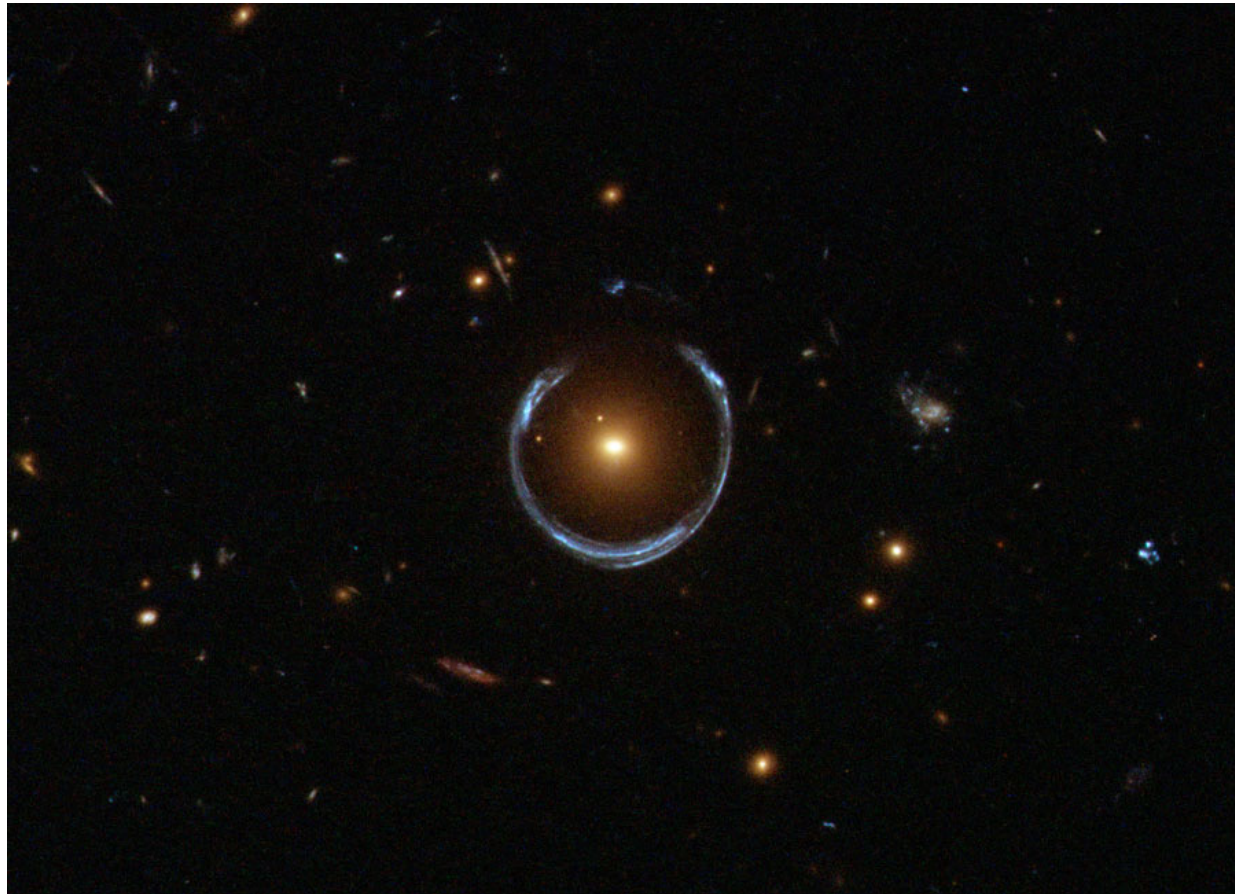
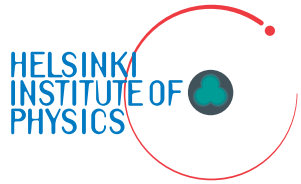


Galaksien pimeä kehto



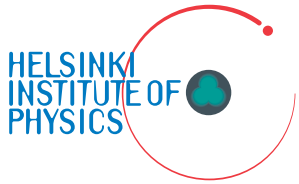


Einsteinin kehä





Taivuttaa koskettamatta



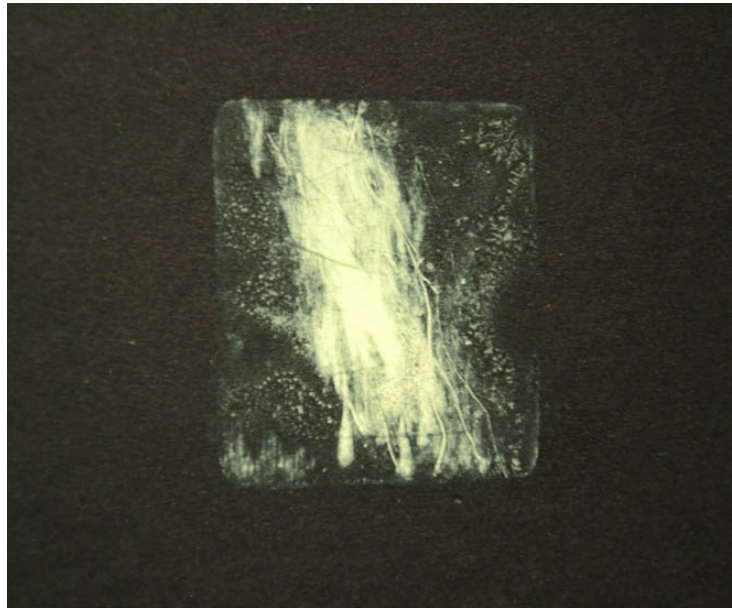
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

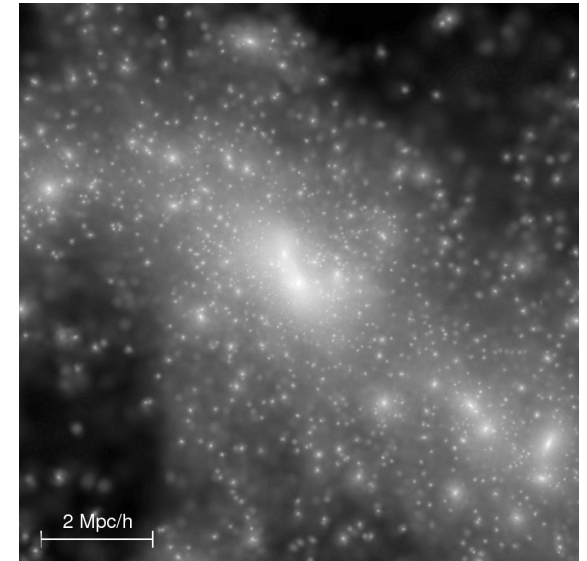
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



Rihmastoja



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

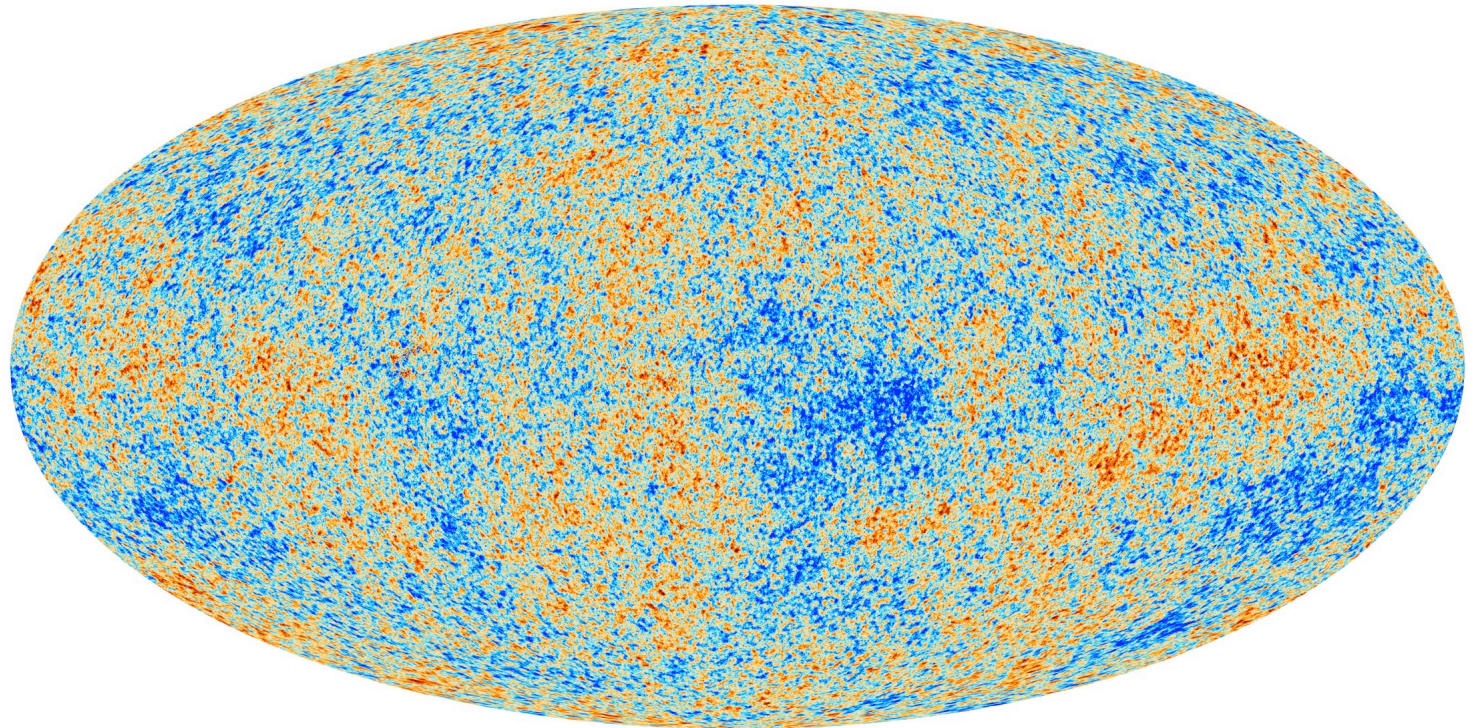
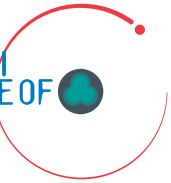


http://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/cluster_a_A_063.jpg



Aallot valon alussa

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





Pimeyden luonne



- Pimeä aine luultavasti koostuu toistaiseksi tuntemattomista hiukkasista, joilla ei ole sähkövarausta.
 - Voi myös koostua mustista aukoista.
 - Vaihtoehto olisi muokattu gravitaatiolaki.



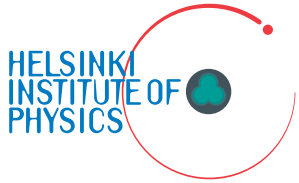
Pimeyden ehdokkaita



- Standardimallissa on hiukkasia, jotka ovat stabiileja ja joilla ei ole sähkövarausta: neutriinot.
 - Standardimallin neutriinot ovat massattomia, mutta tämä on helppo paikata.
 - Neutriinojen 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 yhteys tuntemaamme hiukkasfysiikkaan?
- Pimeän aineen hiukasta etsitään monin tavoin, se saattaa löytyä lähivuosina tai pysyä kauan tavoittamattomissa.



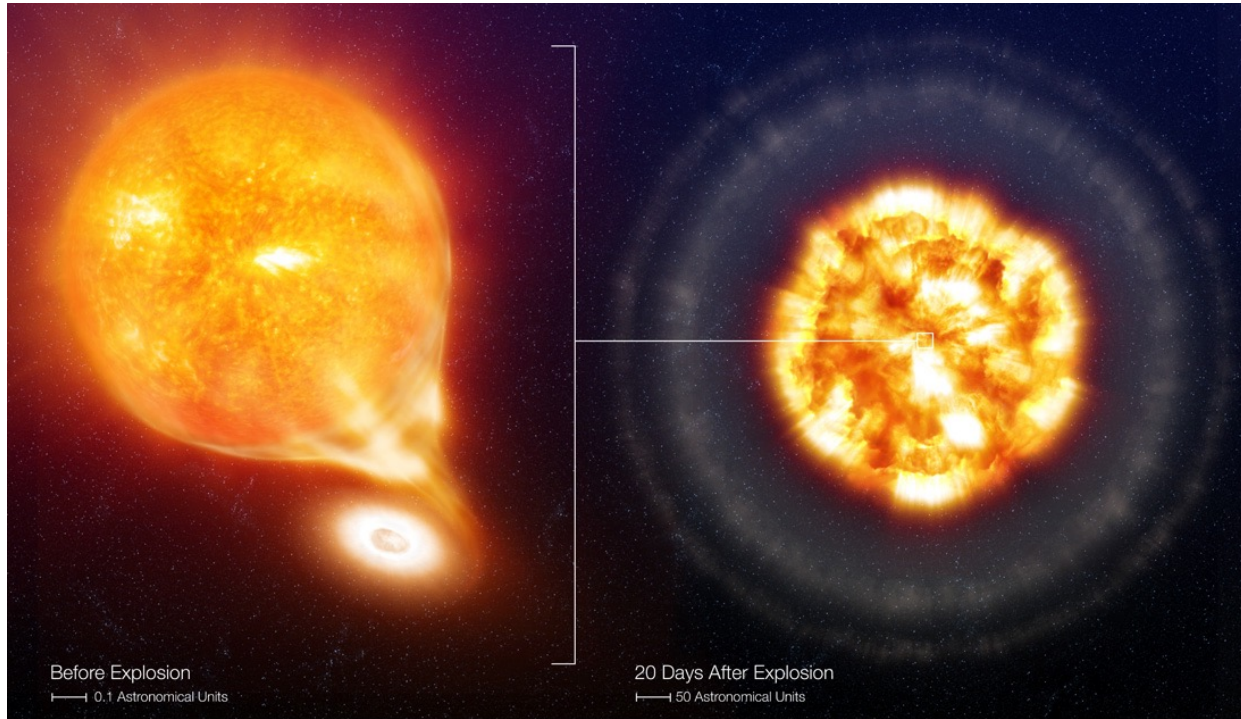
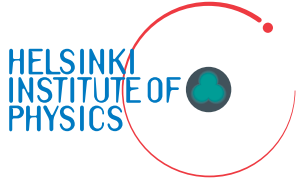
Pimeä energia



- 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.





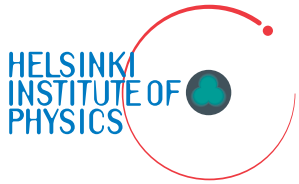
Kirkkaudesta pimeyteen



- 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?



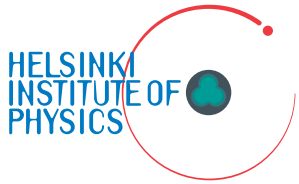
Kolme vaihtoehtoa



- 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.



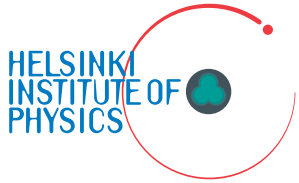
Kysymyksiä pimeydestä



- 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.



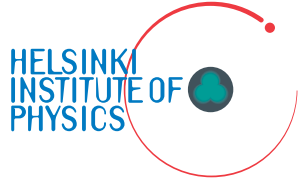
Hubblen vakio auki




- Tämän hetken merkittävin jännite kosmologisten havaintojen ja teorian välillä koskee Hubblen vakiota.
- Sen arvo on läheisten supernovien mittausten mukaan 73.0 ± 1.0 km/s/Mpc, CMB:n mukaan 67.4 ± 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	-	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	-	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 epäsuhtan synnyttävää tapahtumaa kutsutaan nimellä **baryogeneesi**.



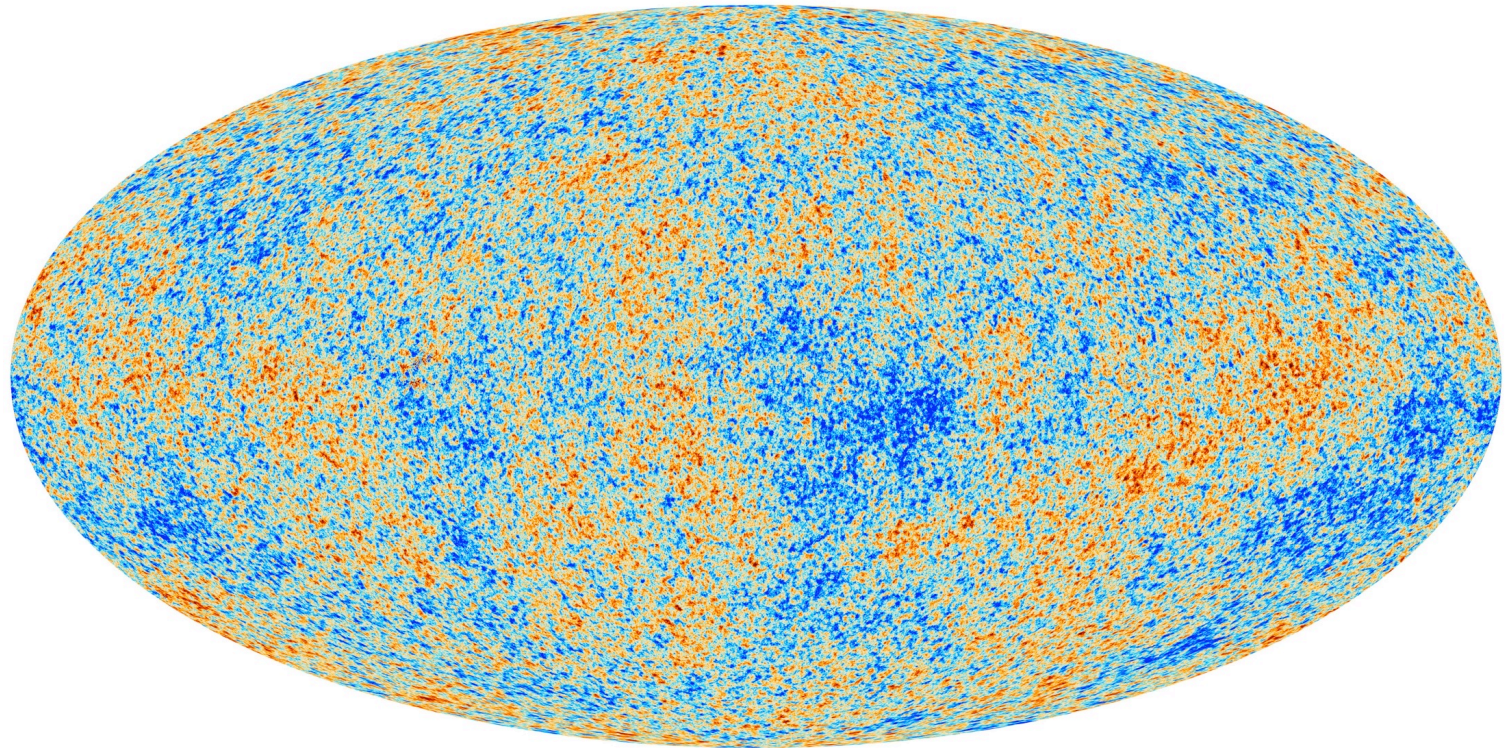
Todiste tuntemattomasta



- Aineen ja antiaineen välisen eron syntyminen edellyttää, että hiukkaset ja antihhiukkaset 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





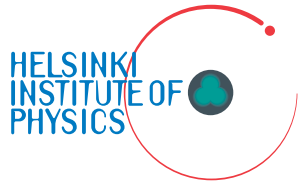
Kosminen inflaatio



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



Kosmologian aikakaudet

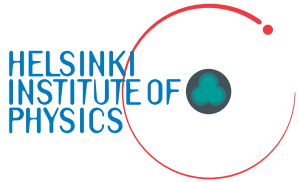


Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	10^9 K	kevyiden alkuaineiden synty
10^{-5} s	10^{12} K	protonien ja neutronien synty (?)
10^{-11} s	10^{15} K	Higgsin olomuodon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





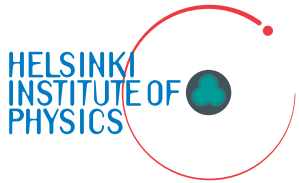
Selitys (epä)tasaisuudelle



- 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?



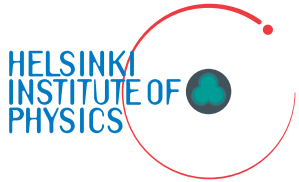
Aineen synty



- 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.



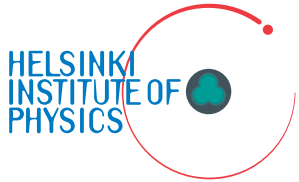
Ennustusvoimaa



- 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.



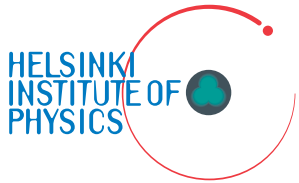
Sattumasta syntyneet



- Kaikki rakenteet, galakseista tähtiin ja planeettoihin, 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).



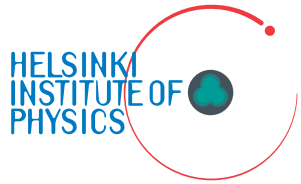
Kööpenhaminan tuolla puolen



- 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**.



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	-	inflaatio?
$10^{-13} \dots 10^{-42}$ s	-	kvanttigravitaatio?



Taivaallista tietoa



- Kosmologiassa luodataan 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 havaintokosketus kvanttigravitaatioon.