



HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



Fysiikkaa runoilijoille

Osa 6

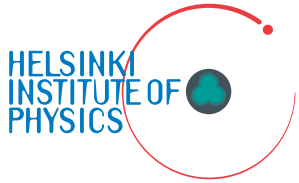
Kosmologia

Syksy Räsänen

Helsingin yliopisto, fysiikan laitos
ja fysiikan tutkimuslaitos



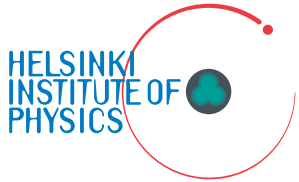
Kaikkeuden tutkimista



- Kosmologia tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena.
 - Astrofysiikka/tähtitiede tutkii maailmankaikkeudessa olevia kappaleita.
- Keskeisiä kysymyksiä: laajeneminen, ainesisältö, alkuhetket, kohtalo.
- 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



- Einstein esitti ensimmäisen kosmologisen mallin vuonna 1917. Hän oletti, että maailmankaikkeus on samanlainen kaikkialla ja aina.
- Yleisen suhteellisuusteorian mukaan avaruus yleensä laajenee tai supistuu.
- Einstein muutti teoriaa lisäämällä **kosmologisen vakion**.
- Tavallisen aineen gravitaatio vetää puoleensa, kosmologisen vakion gravitaatio hylkii. (Antigravitaatio.)
- Einstein tasapainotti nämä kaksi vaikutusta.
 - Tällainen maailmankaikkeus on kuin kärjellään seisova kynä.



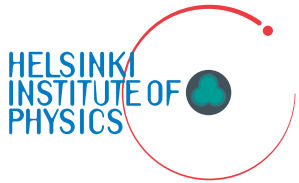
Muuttuva maailmankaikkeus



- 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.



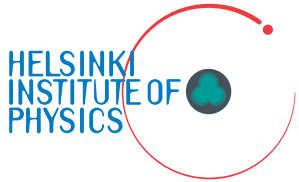
Galaksien yksinäisyys



- Edwin Hubble (1889-1953) määrittäi vuonna 1924 ”tähtisumujen” etäisyyksiä ja osoitti, että ne ovat Linnunradan ulkopuolella: ne ovat toisia galakseja.
- Vuonna 1927 Georges Lemaître (1894-1966) osoitti, että yleisen ST:n mukaan galaksien **punasiirtymä** on verrannollinen niiden etäisyyteen.
- Tämä tuli sittemmin tunnetuksi **Hubblen lakina**.
- Kun havaittiin, että maailmankaikkeus laajenee, Einsteinin kerrotaan kutsuneen kosmologista vakiota pahimmaksi munauksekseen.



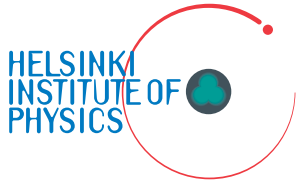
Punasiirtymä



- 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 FRW-malli tuli yleisesti hyväksytyksi kuvaksi maailmankaikkeudesta.
- FRW-mallissa oletetaan, että avaruus on samanlainen kaikkialla, mutta voi muuttua ajassa.
- Se miten maailmankaikkeus laajenee/supistuu riippuu siitä, millaista ainetta siinä on sekä alkutilanteesta.



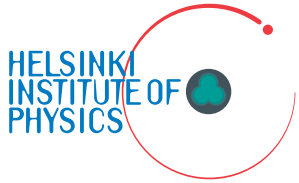
Laajenemisen merkitys



- 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 suhteellisuusteoria ennustaa, että ajalla ja avaruudella on alku: **alkuräjähdyks.**
- Kysymys ”Mitä oli ennen alkuräjähdystä?” 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.

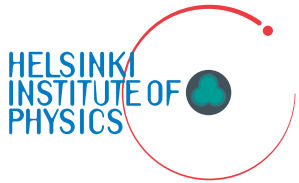


1 sekunti sitten



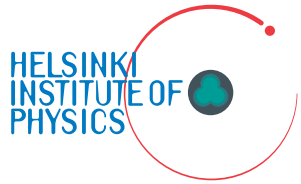


8 minuuttia sitten



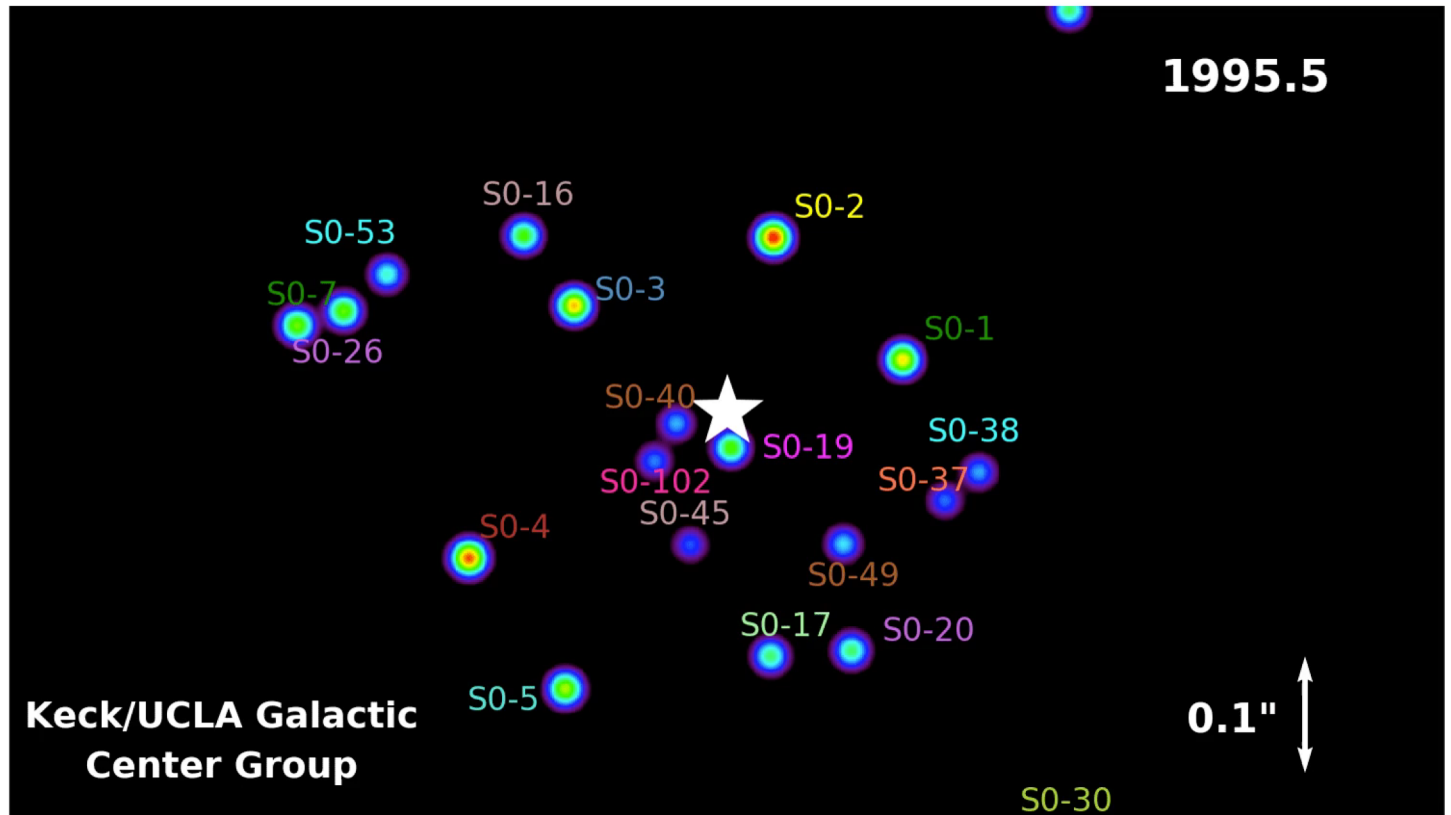
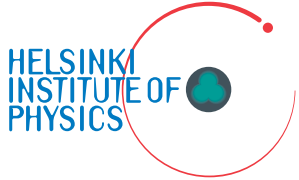


4 vuotta sitten



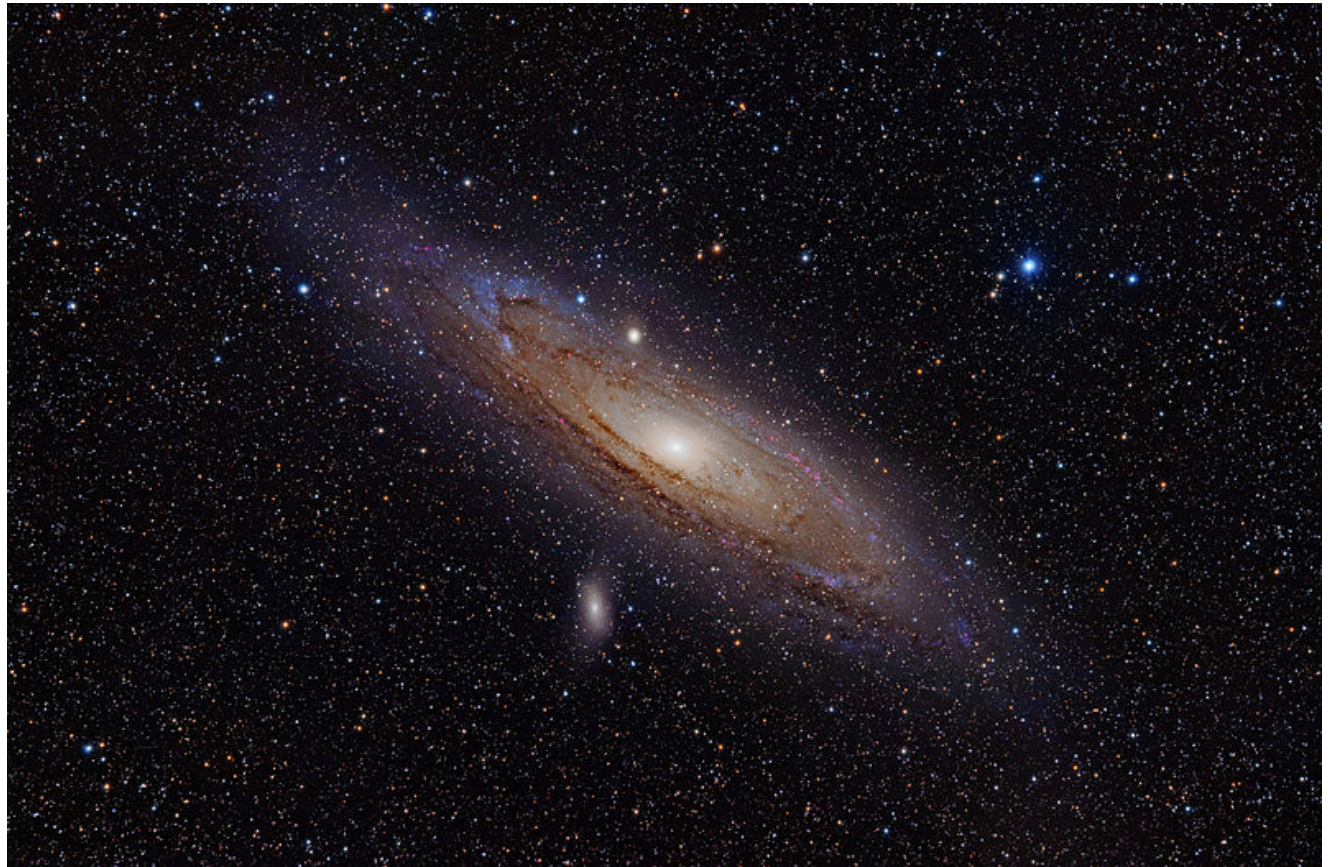


25 000 vuotta sitten



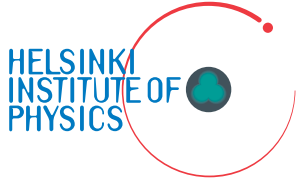


2.5 miljoonaa vuotta sitten





13 miljardia vuotta sitten





Taivaan merkit



- Kuten Newtonin mekaniikan kohdalla, myös yleisen suhteellisuusteorian 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 –luvulla.
- Sen jälkeen havainnoista oli pitkään epävarmuutta.
- Lev Landau (1908-1968): *"Cosmologists are often in error, but never in doubt."*
- 1990-luvulla tapahtui suurin murros sitten laajenemisen löytämisen. (*"Täsmäkosmologia."*)
 - Teoreettiset puitteet laadittu 80-luvulla.



Aine ja avaruus

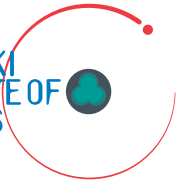


- Nykykosmologiassa kvanttikenttäteoria (ja muu kuvaus aineesta) on yhtä tärkeä kuin yleinen ST.
- Kvanttikenttäteoria kertoo millaista ainetta on olemassa, yleinen ST miten maailmankaikkeus laajenee.
- Kosmologia kertoo, millaisia muodonmuutoksia aine on käynyt läpi.
- Kosmologia käsittelee myös kaiken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



Kosmologian aikakaudet

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS

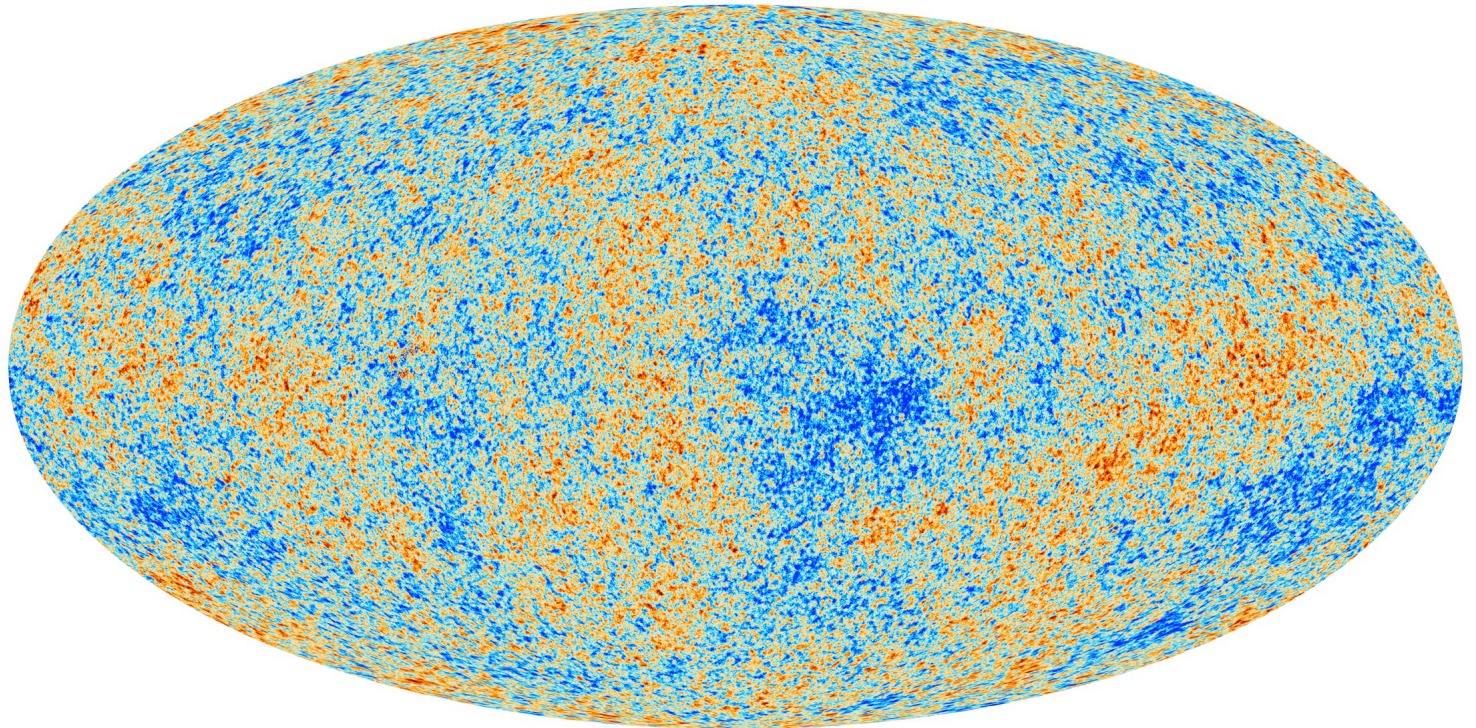
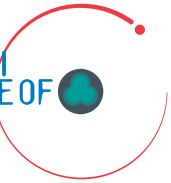


Ikä	Lämpötila	Tapahtuma
14 miljardia v	3 K	tänään
8 miljardia v	5 K	laajeneminen kiihtyy
40 miljoonaa v	200 K	ensimmäiset rakenteet
380 000 v	3000 K	valo ja aine eroavat
1 s-30 min	10^9 K	kevyiden alkuaineiden synty
10^{-5} s	10^{12} K	protonien ja neutronien synty (?)
10^{-11} s	10^{15} K	Higgsin olomuodon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



14 miljardia vuotta sitten

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS





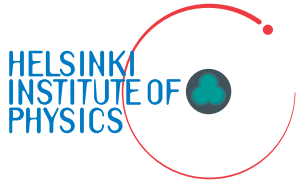
Näkymätön valo aikaisilta ajoilta



- **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 silmille näkyvää, osittain infrapunaista. Nyt se on venynyt mikroaalloiksi.



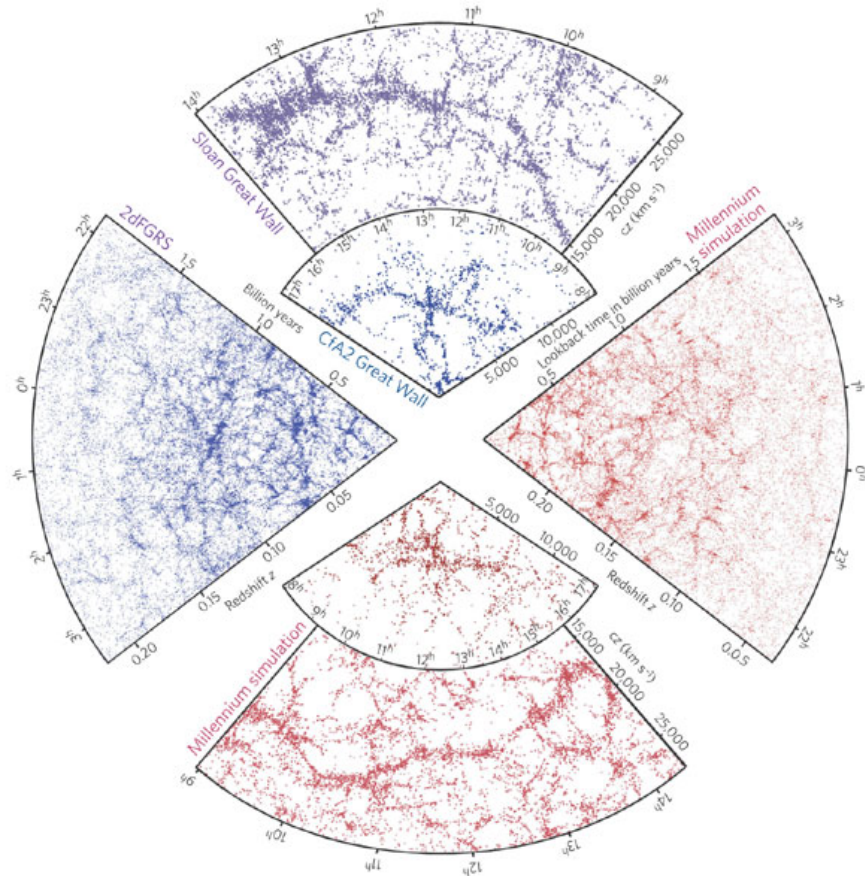
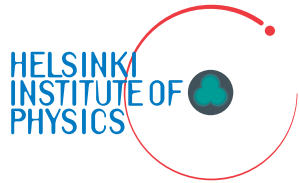
Kaikkeuden alkuehdot



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

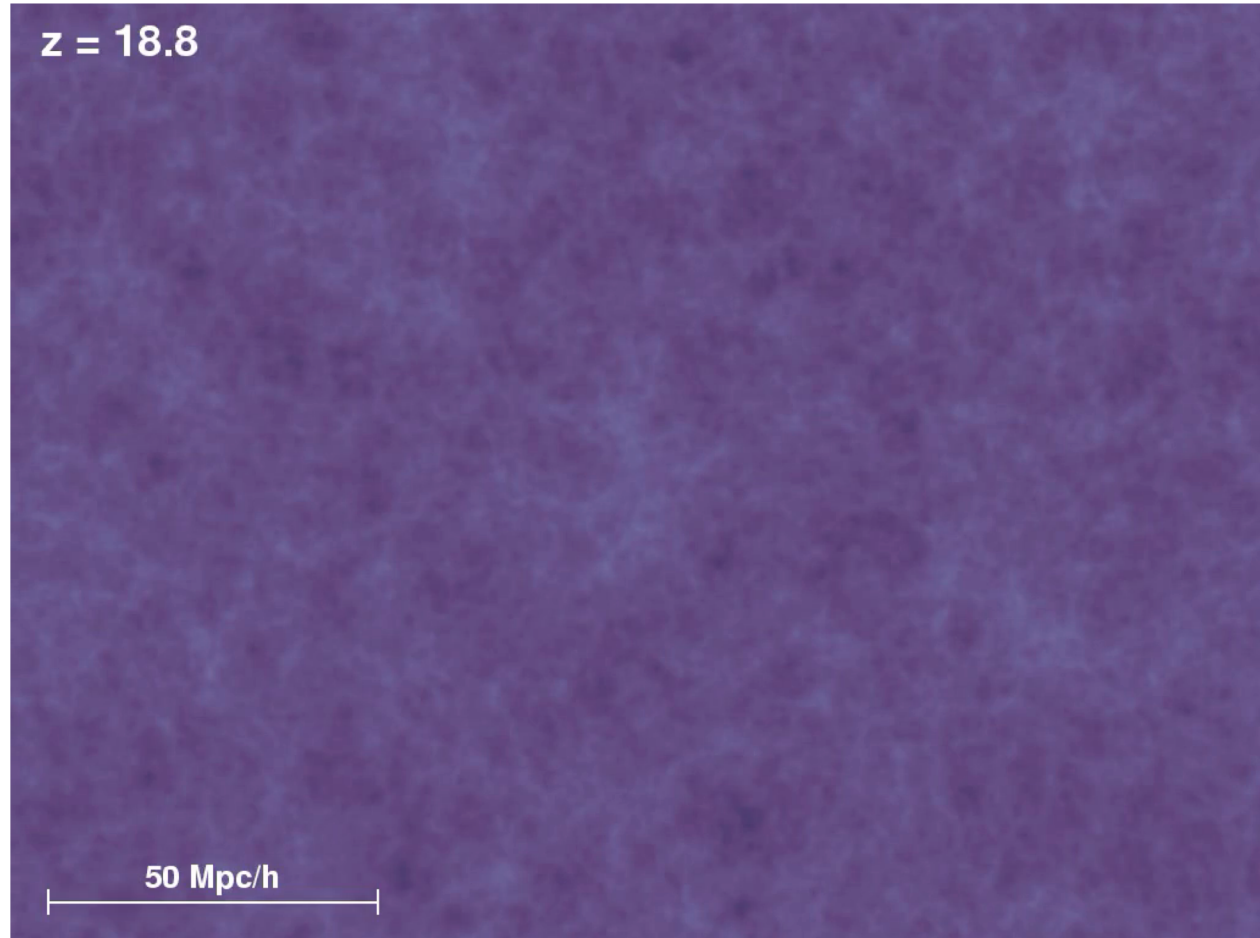
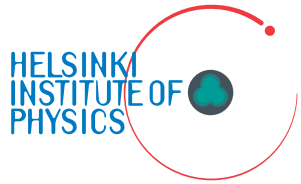


Suuren mittakaavan rakenne





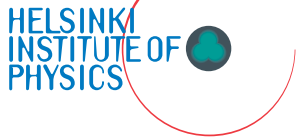
Kosmisen verkon kasvu





Pienestä isoon

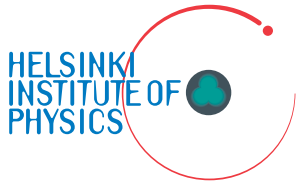
https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/data_vis/index.shtml





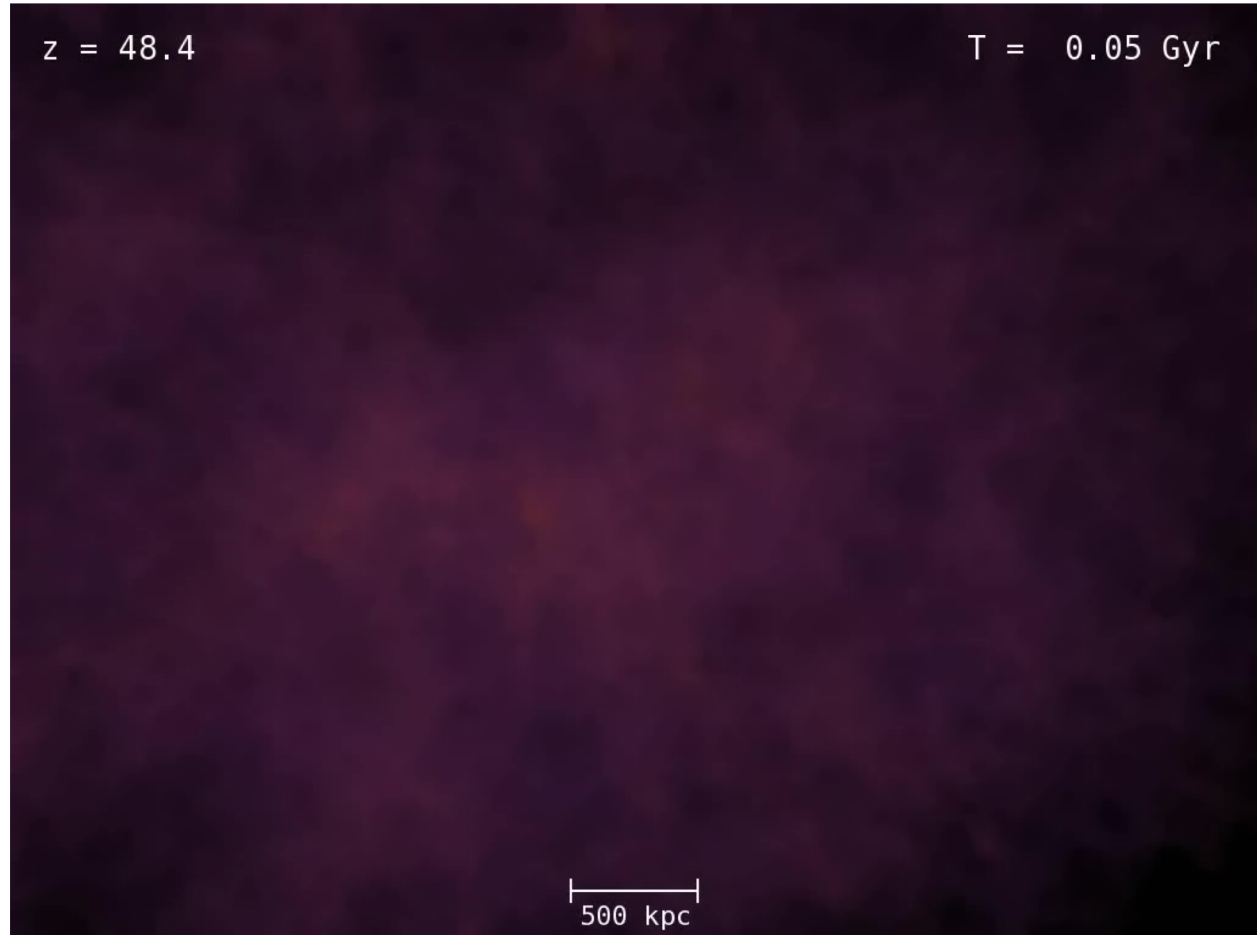
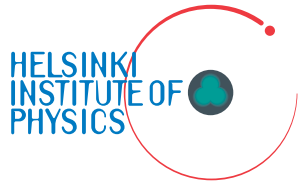
Rikas rypäs

<https://wwwmpa.mpa-garching.mpg.de/galform/virgo/millennium/#movies>



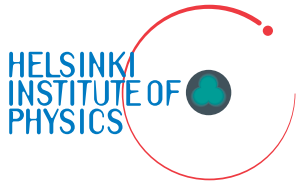


Linnunradan synty





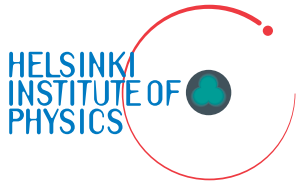
Pimeää aine



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

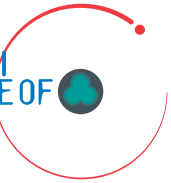
<http://hubblesite.org/gallery/album/pr2007019j>

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



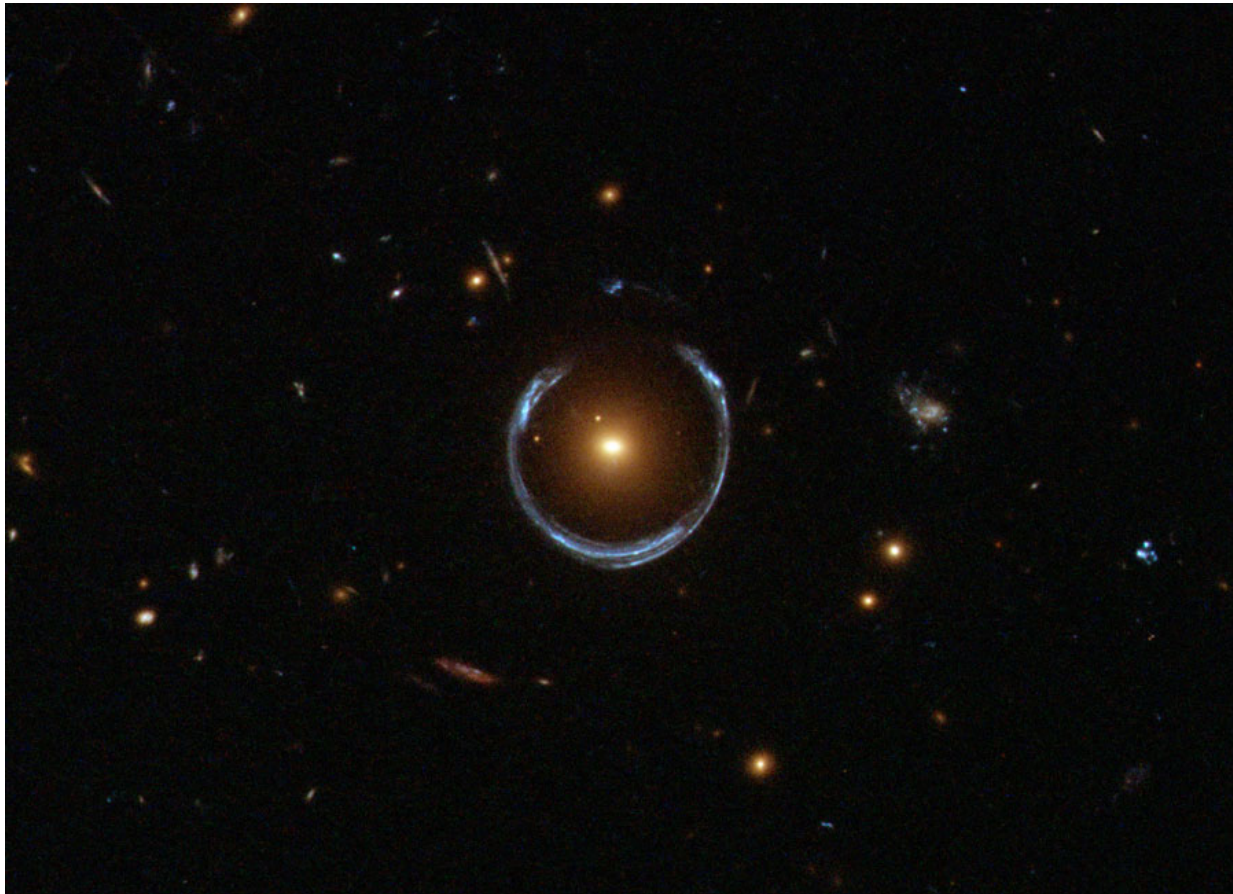
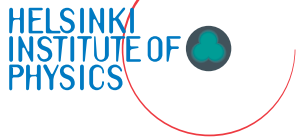
Galaksien pimeä kehto

HELSINKI
INSTITUTE OF
PHYSICS



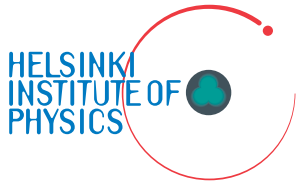


Einsteinin kehä





Taivuttaa koskettamatta



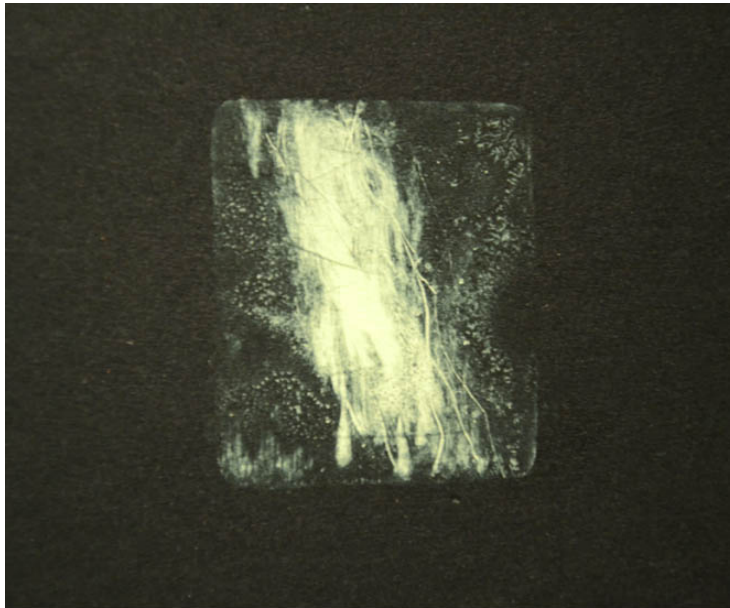
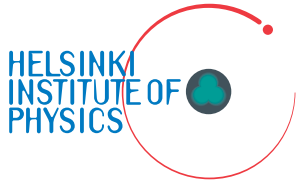
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

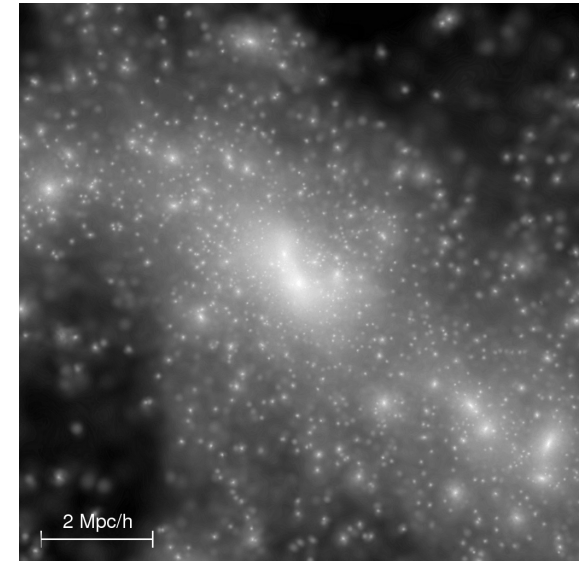
NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08



Rihmastoja



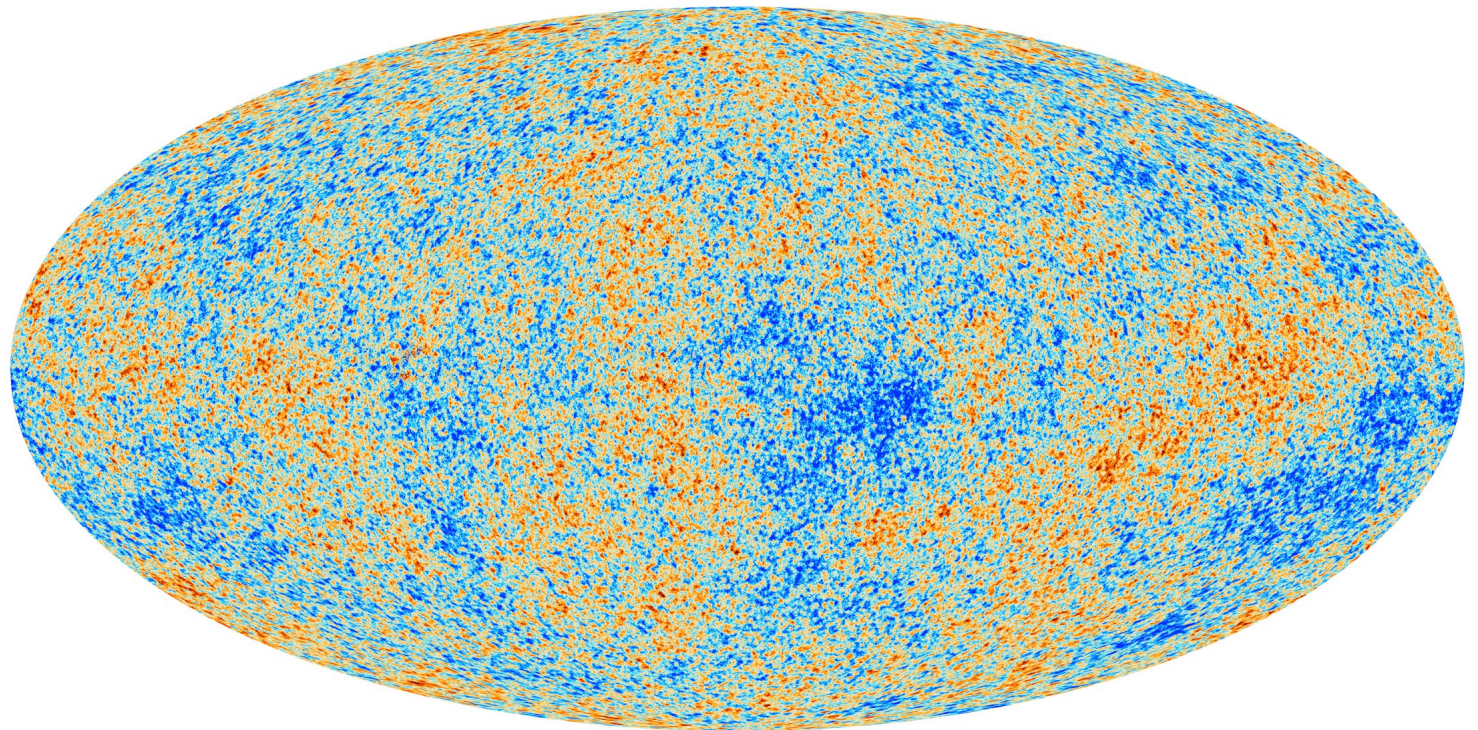
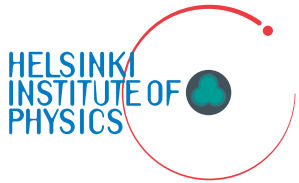
Tonja Goldblatt (1977-): sarjasta
Pimeä aine (2014)



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

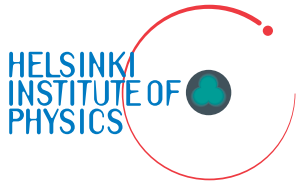


Aallot valon alussa





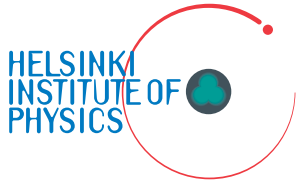
Pimeyden luonne



- Pimeä aine luultavasti koostuu toistaiseksi tuntemattomista hiukkasista, joilla ei ole sähkövarausta.
 - 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.



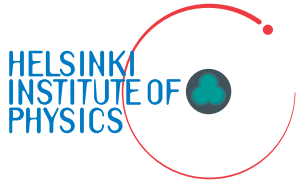
Varmuus pimeydestä



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



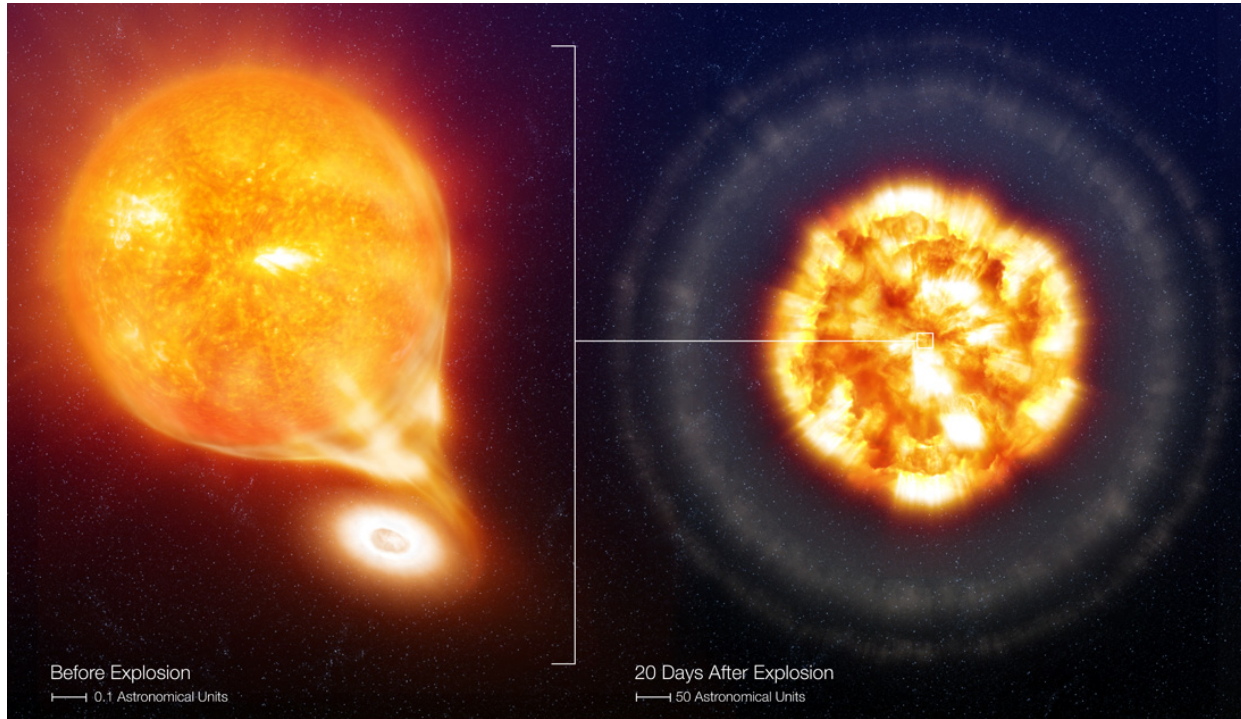
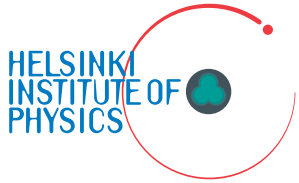
Pimeä energia



- 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.
- Pimeä energia on 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.





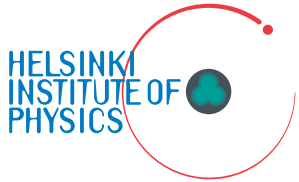
Kirkkaudesta pimeyteen



- Havainto: varhaiset kohteet ovat odotettua kauempana.
- Tulkinta: laajeneminen on kiihtynyt.
- Syy: pimeä energia?



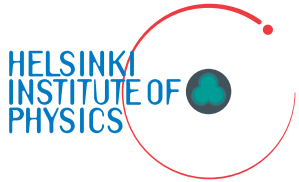
Tyhjön energia



- Luonnollisin 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.



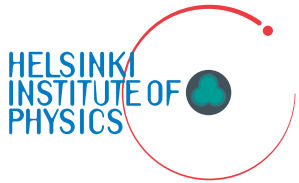
Yhteensattumaongelma



- 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?



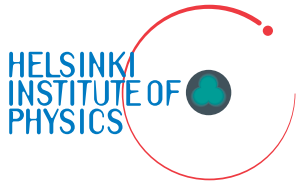
Kolme vaihtoehtoa



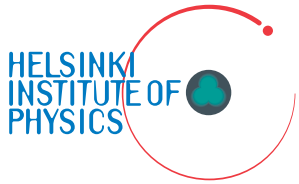
- On kymmeniä pimeän energian malleja.
 - Tyhjän energia on ylivoimaisesti suosituin.
- Pimeälle energialle on kaksi mahdollista vaihtoehtoa.
- Muutos gravitaatiossa.
 - Yleisen ST:n pätevyysalueen ylittyminen.
- Rakenteiden vaikutus: FRW-mallissa oletetaan maailmankaikkeuden olevan samanlainen kaikkialla.
 - 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)

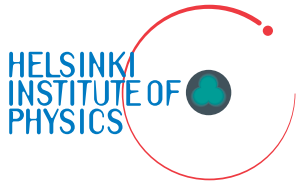


Kohti tyhjiyttä ja pimeyttä

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



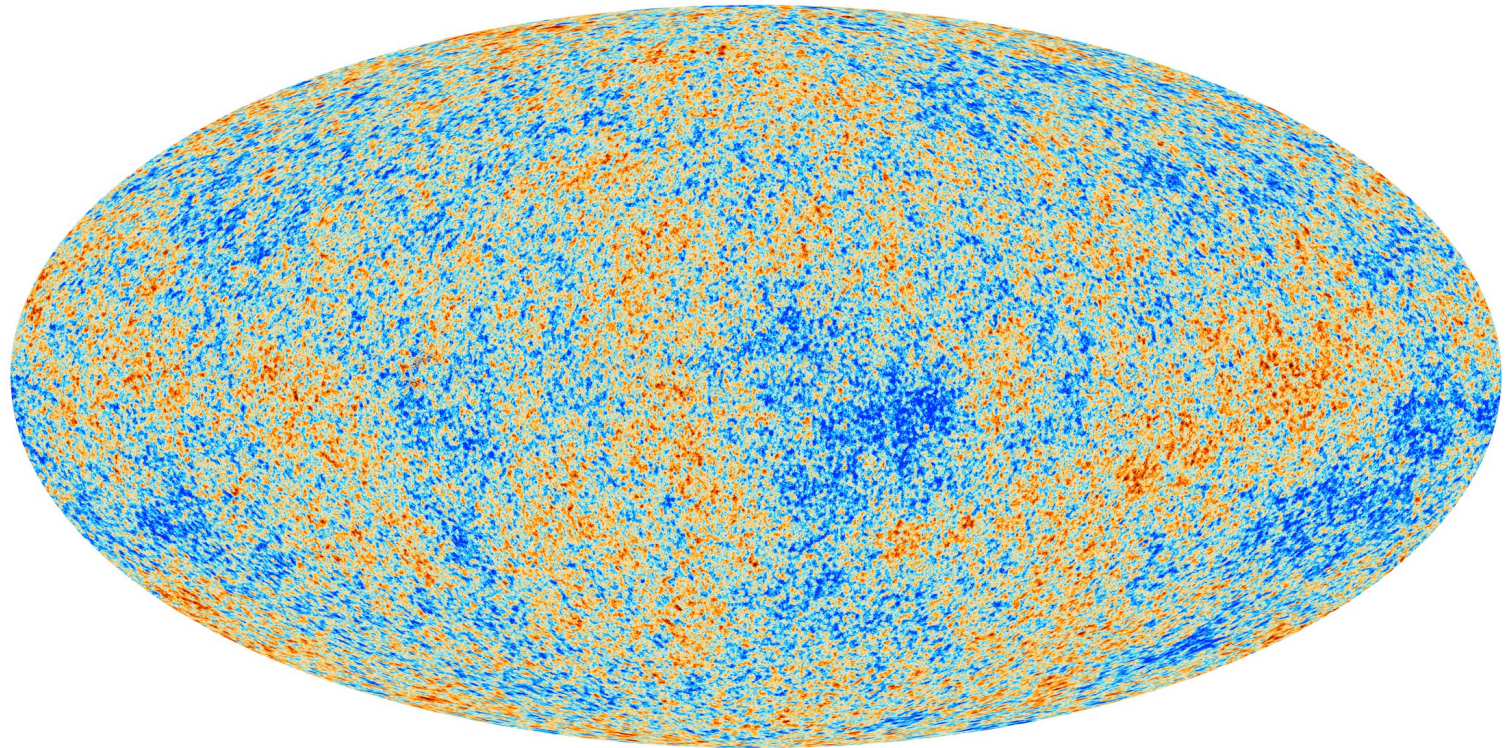
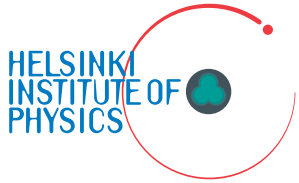
Teoreettisista löydöistä



- 8.10.2019 ilmoitettiin, että James Peebles saa puolet fysiikan Nobelin palkinnosta ”*teoreettisista löydöistä fysikaalisessa kosmologiassa*”.
- Peeblesillä on ollut tärkeä rooli monissa kosmologian keskeisistä kysymyksistä:
 - Kosminen mikroaaltotausta
 - Pimeä aine
 - Pimeä energia
- Pimeä aine on nyt tunnustettu Nobelin palkinnolla.

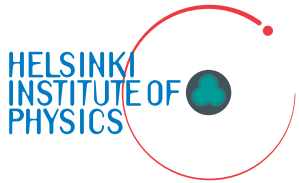


Näkymä ensimmäisen sekunnin perukoille





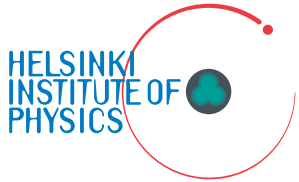
Kosminen inflaatio



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



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 myös, että se kertoo, miksi maailmankaikkeus on hieman epätasainen.



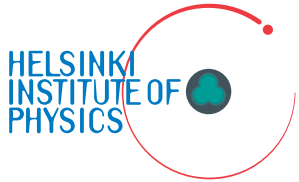
Tyhjyyden epämääräisyys



- Inflaatiota ajaa avaruuden täyttävä kenttä.
- Inflaation aikana kentän **kvanttivärähtelyt** venyvät hiukkasfysiikan skaaloista kosmisiin mittoihin ja jäätyvät paikalleen.
- Inflaation loputtua kenttä hajoaa hiukkasiksi.
- Niihin kohtiin, missä kentällä on enemmän energiaa, syntyy enemmän hiukkasia.
- Aineen kvanttivärähtelyistä tulee rakenteen siemeniä.



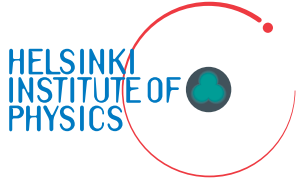
Ennustusvoimaa



- Inflaatio on ennustanut oikein, että epätasaisuuden siemenet ovat
 - lähes samanlaisia kaikissa mittakaavoissa,
 - korkeudeltaan tietyn todennäköisyysjakauman mukaisia, ja
 - samanlaisia valolle, tavalliselle aineelle ja pimeälle aineelle.
- Ei kuitenkaan tiedetä, miten inflaatio on yksityiskohtaisesti tapahtunut.
- Inflaatiosta voi olla vastuussa Higgsin kenttä tai joku tuntematon kenttä.
- *”Something like inflation is something like proven.”*



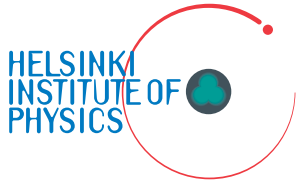
Aaltoileva avaruus



- Inflaatiossa avaruuden kvanttivärähtelyistä syntyy gravitaatioaaltoja.
- Inflaation gravitaatioaalto syntyvät tyhjästä.
 - Vrt. vuonna 2015 havaitut gravitaatioaalto syntyvät aineen liikkeistä.
- Inflaation gravitaatioaaltoja ei ole vielä havaittu.



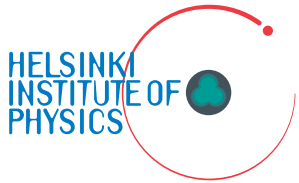
Rakenteiden synty ja epädeterminismi



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



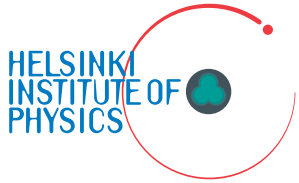
Kööpenhaminan tuolla puolen



- 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**.



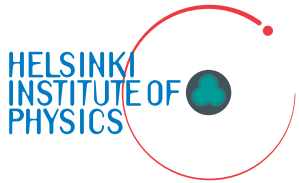
Sattumasta syntyneet



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



Taivaallista tietoa



- Kosmologian avulla luodattaan korkeita energioita: varhainen maailmankaikkeus on hiukkasfysiikan laboratorio.
- Viime aikoina kosmologia on tuonut enemmän tietoa hiukkasfysiikasta kuin maanpäälliset kokeet.
- Inflaatio, pimeä aine ja baryogeneesi eivät ole ole teorioita eivätkä malleja, vaan ideoita, jotka toteutuvat useissa malleissa.
- Ei tiedetä, millaisen teorian osia nämä ideat ovat, eli miten ne sopivat yhteen keskenään ja Standardimallin kanssa.
- Inflaation kautta on saatu kokeellinen kosketus kvantti-gravitaatioon.