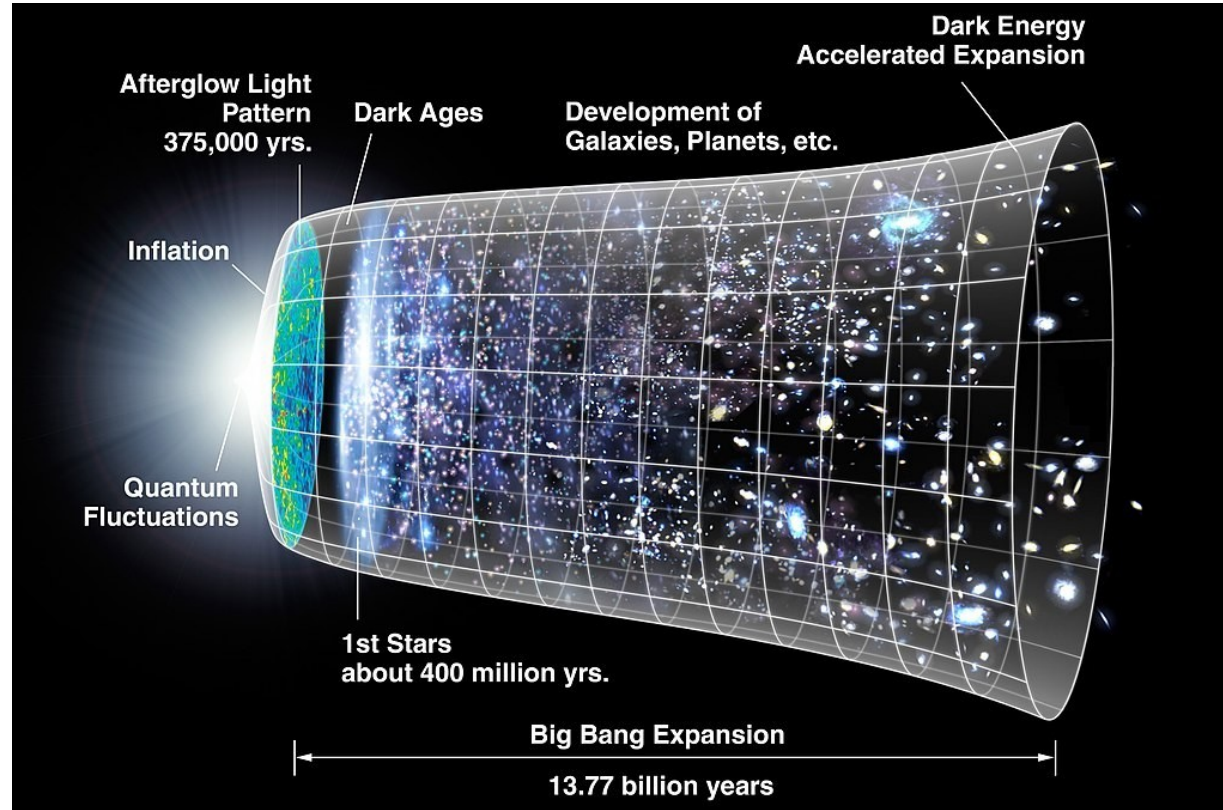


Kosmologia



Teoreettinen pohja

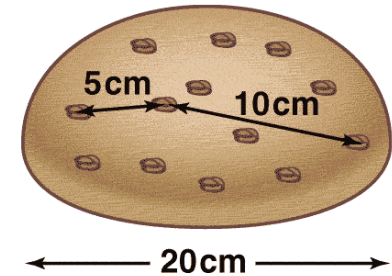
- **Yleinen suhteellisuusteoria**
 - Kaikki energia kaareuttaa aika-avaruutta, mikä havaitaan gravitaationa
 - Toimii suurilla mittakaavoilla
- **Kvanttimekaniikka**
 - Kuvailee alkeishiukkaset ja niiden väliset vuorovaikutukset (sähkömagnetismi, vahva ja heikko vuorovaikutus)
 - Mitään ei voida sanoa täysin varmasti, vain tietyillä todennäköisyyksillä
 - Kvanttikenttäteoria (nykyään perustavanlaatuisin kvanttimekaniikan teoria) sisältää myös suppean suhteellisuusteorian, muttei yleistä: maailmankaikkeus koostuu kvanttikentistä
 - Toimii pienillä mittakaavoilla
- Molemmat toimivat omilla alueillaan, mutta eivät ole yhteensopivia: tarvittaisi kvanttigravitaatioteoria
 - Ristiriitoja aiheuttavat esimerkiksi mustat aukot, aika-avaruus hyvin pienillä mittakaavoilla, aika

Havaintoja kaikkeudesta

- Yötaivas on pimeä
 - Olbersin paradoksi: äärettömässä ja ikuisessa maailmankaikkeudessa, joka on täynnä tähtiä, näkösäteemme pitäisi joka suunnassa osua tähden pintaan
- Mitä kauempana jokin galaksi on meistä, sitä nopeammin se loittonee
 - Maailmankaikkeus laajenee
- Galaksien superjoukot ovat jakautuneet tasaisesti joka suunnassa
 - Miten kaukaiset galaksit eri suunnissa "tietävät" olla jakautuneet yhtä tasaisesti, jos niiden välillä ei ole koskaan kulkenut mikään signaali?
 - Kosmologinen periaate: maailmankaikkeus on suurilla mittakaavoilla homogeeninen ja isotrooppinen (samanlainen kaikkialla ja joka suunnassa)
- Meitä ympäröi joka suunnassa tasainen mikroaaltosäteily, jonka mustan kappaleen lämpötila on 3 K
 - Kosminen mikroaaltotausta

Alkuräjähdyks

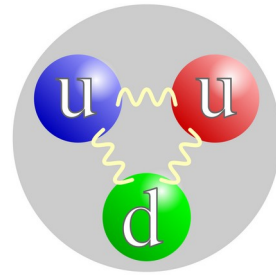
- Maailmankaikkeus laajenee: menneisyydessä se on siis ollut pienempi
 - Universumi ollut 13.8 mrd vuotta sitten äärimmäisen pienessä, kuumassa ja tiheässä tilassa
- Ei varsinainen räjähdys, pelkästään ajan alkuhetki
 - (Toisinaan alkuräjähdyksellä viitataan joihinkin myöhempisiin ajanhetkiin, esimerkiksi kosmisen inflaation jälkeisiin)
- Mitä oli ennen alkuräjähdyttä? Missä alkuräjähdyks tapahtui?
 - Jos kaikki todella sai alkunsa alkuräjähdyksestä, ei ole mielekäästä kysyä mitä oli sitä ennen (vrt. mitä on pohjoisnavasta pohjoiseen)
 - Tapahtui ”kaikkialla”, maailmankaikkeus ei laajene ”minnekään”, pikemminkin venyy
- Alkuräjähdyksen todisteet
 - Universumi laajenee
 - Kosminen mikroaaltotausta
 - Vedyn ja heliumin pitoisuudet
 - Galaksien kehitys varhaisesta maailmankaikkeudesta nykyiseen



MAP990404

Rusinat paisuvassa taikinassa ovat hyvä analogia universumin laajenemiselle. Etäisyydet venyvät ja rusinat etääntyvät toisistaan, mutteivät laajene itsessään.

Ensimmäinen sekunti



Protoni koostuu kahdesta ylös-kvarkista (u) ja yhdestä alaspäin-kvarkista (d). Kuva: Arpad Horvath.

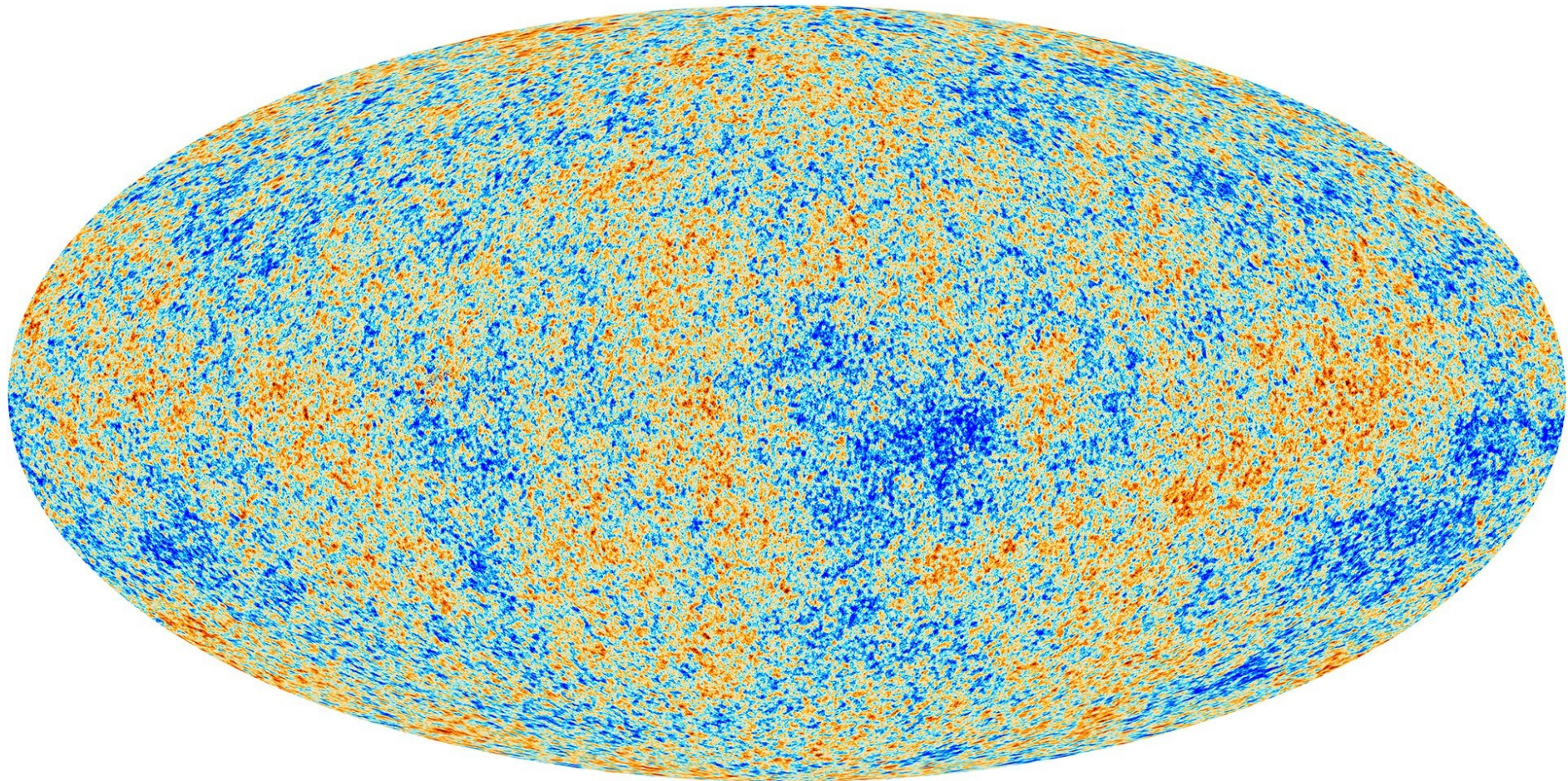
- Planckin epookki $0-10^{-43}$ s
 - Varhaisinta hetkeä ei pystytä kuvaamaan ilman kvanttigravitaatiota; alkoiko kaikki singulariteetista?
- Suuri yhtenäisepookki $10^{-43}-10^{-35}$ s
 - Sähkömagnetismi, vahva ja heikko vuorovaikutus käyttäytyivät luultavasti kaikki yhden voiman tavoin
 - Vahvan vuorovaikutuksen erkaantuminen saattoi käynnistää inflaation
- Kosminen inflaatio $10^{-35}-10^{-32}$ s
 - Maailmankaikkeus laajeni paljon valoa nopeammin ja venyi suunnattomiin mittoihin – selittää galaksien tasaisen jakauman joka suunnassa, sillä ennen inflaatiota kaukaiset alueet olisivat ehtineet vuorovaikuttaa keskenään ja niiden tiheyserot tasoittua
 - Inflaatiokenttä hajosi nykyisiksi alkeishiukkasiksi: kentän pienet kvanttiheilahtelut toimivat kaikkien myöhempien rakenteiden siemeninä
- Sähköheikko epookki $10^{-32}-10^{-12}$ s
 - Sähkömagnetismi ja heikko vuorovaikutus käyttäytyivät yhä yhden voiman tavoin, mutta hajoavat lopulta erillisiksi voimiksi
- Kvarkkiepookki $10^{-12}-10^{-6}$ s
 - Maailmankaikkeus on liian kuuma hadronien (protonit ja neutronit) muodostumiselle: kvarkit ja gluonit vapaana kvarkki-gluoniplasmana
- Hadroniepookki $10^{-6}-1$ s
 - Kvarkit yhtyvät hadroneiksi

Nykyisen aineen synty

- Kun lämpötila oli riittävän korkea parinmuodostukselle (korkeaenerginen fotoni synnyttää hiukas-antihiiukkasparin), syntyi uutta ainetta ja antiainetta jatkuvasti – tasapaino uusien hiukkasten muodostumisen ja annihiloitumisen välillä
- Universumin laajentuessa ja jäähtyessä energia ei enää riitä parinmuodostukseen (tapahtuu eri aikaan eri hiukkasille) – hiukkaset ja antihiiukkaset annihiloivat toisensa, jäljelle jää vain säteilyä
 - Symmetriarikko: ainetta noin miljardisosa enemmän kuin antiainetta, joten nykyinen aine jää jäljelle
- Alkuräjähdyksen ydinsynteesi: ensimmäisten minuuttien aikana koko maailmankaikkeuden olosuhteet sopivat vedyn fuusiolle – 25% hadroneista heliumiksi (+hyvin pieniä määriä deuteriumia, tritiumia, litiumia, berylliumia ja booria)

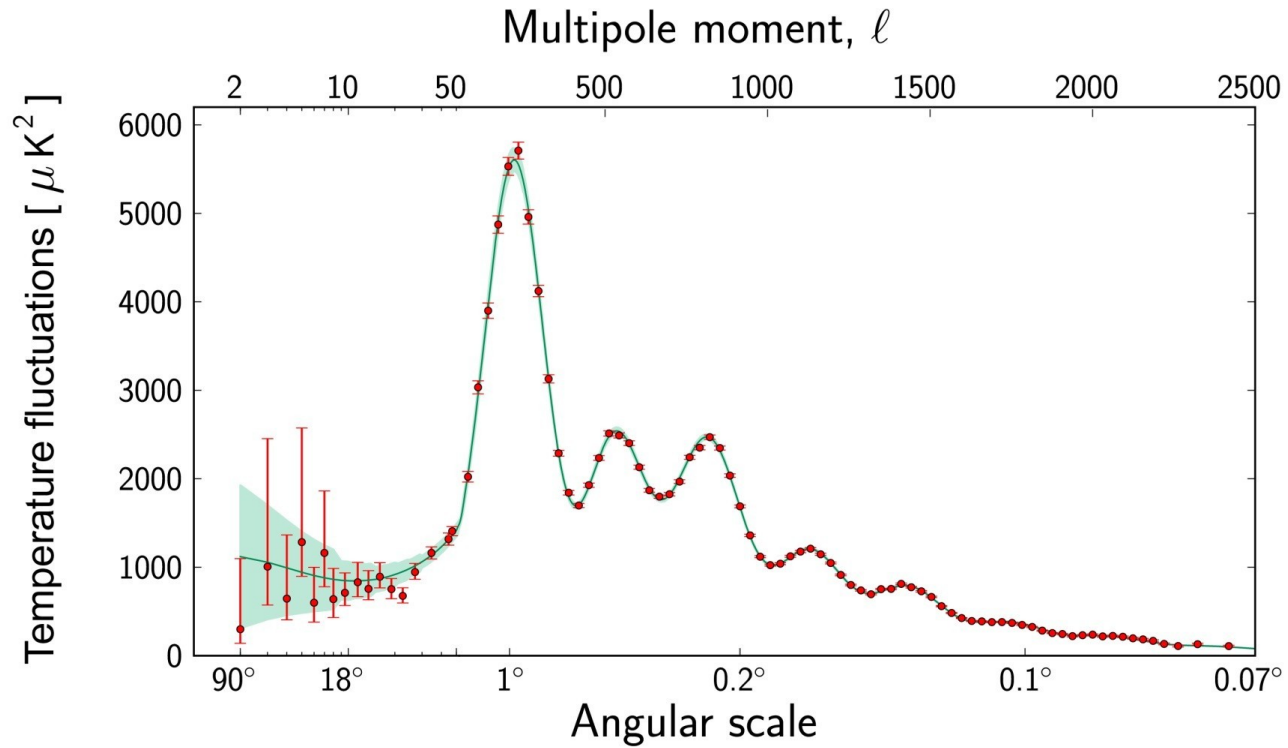
Kosminen mikroaaltotausta

- 380 000 vuotta: universumi on laajentunut ja jäähtynyt noin 3000 K lämpötilaan, elektronit asettuvat atomiytimien ympärille – sähköisesti neutraalit atomit syntyvät
- Maailmankaikkeus muuttuu fotoneille läpinäkyväksi
- Samat 380 000 vuoden ikäisestä aineesta irtaantuneet fotonit kulkevat yhä kaikkialla: kosminen mikroaaltotausta
 - Alkujaan infrapunasäteilyä, nykyään punasiirtynyt (universumin laajenemisen takia) mikroaalloiksi joiden mustan kappaleen lämpötila 2.7 K
 - Suurin osa maailmankaikkeuden fotoneista edelleen peräisin mikroaaltotaustasta!
- Hyvin tasaista, noin 1/100 000 asteen lämpötilaeroja, jotka ovat peräisin pienistä eroista silloisen aineen tiheydessä
 - Näistä pienistä tiheyseroista ovat sittemmin syntyneet maailmankaikkeuden nykyiset rakenteet



Kosminen mikroaaltotausta Planckin kuvaamana. Punaiset alueet vastaavat hieman kuumempia ja harvempia alueita 380 000 vuoden ikäisen aineen jakaumassa, siniset viileämpiä ja tiheämpiä.

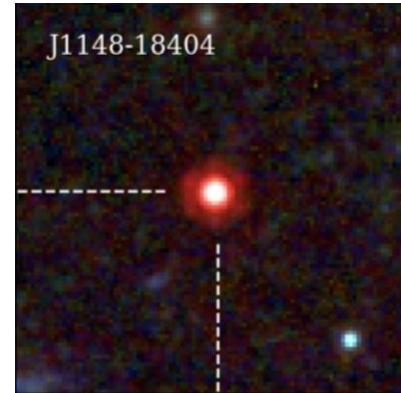
Maailmankaikkeus nyt 2026



Mikroaaltotaustan lämpötilaerojen kokoskaalat kertovat valtavan paljon varhaisesta universumista. Kuvaajan ensimmäinen piikki kertoo sen, miten maailmankaikkeus on kaareutunut, toinen kertoo tavallisen aineen määrän, ja kolmas pimeään aineen määrän. ESA/Planck Collaboration.

Varhainen universumi

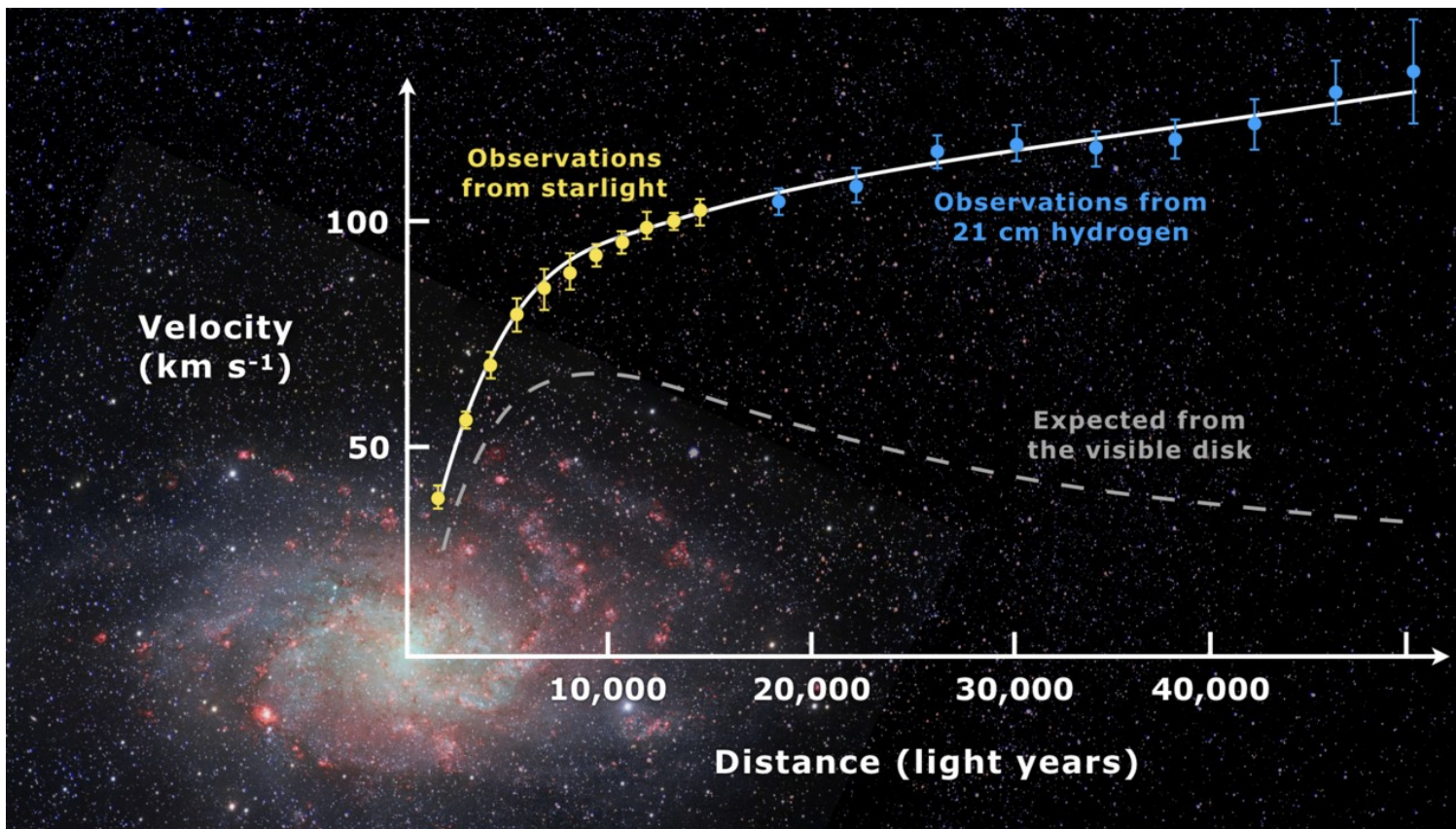
- Pimeä aika päättyy: ensimmäiset tähdet (ns. Populaation III tähdet) syntyvät noin 100 miljoonan vuoden paikkeilla
 - Koostuivat pelkästään vedystä ja heliumista, mikä mahdollisti tähdille paljon suuremman massan kuin nykyään, satoja tai tuhansia Auringon massoja ("metalleilla" enemmän spektriviivoja jotka absorboivat säteilyä, kasvattaen tähtituulta)
 - Reionisaatio: tähtien UV-säteily ionisoi jälleen atomeita, mutta aine nyt riittävän harvaa jotta maailmankaikkeus pysyi fotoneille läpinäkyvänä
 - Massiiviset tähdet räjähtivät nopeasti supernovina, tuoden universumiin raskaampia alkuaineita
 - Supermassiivisten mustien aukkojen siemenet syntyneet ensimmäisistä tähdistä vai romahtaneet suoraan kaasusta mustiksi aukoiksi? Joka tapauksessa kasvoivat todella nopeasti
 - Pienet punaiset pisteet: James Webbin havaitsemat kaukaiset kohteet varhaisia massiivisia tähtiä, vai sittenkin varhaisia galakseja tai niiden aktiivisia ytimiä?
- Suuremmilla mittakaavoilla galaksit muodostuvat



Pieni punainen piste (Little Red Dot) JWST:n kuvaamana. Matthee et al. (2024).

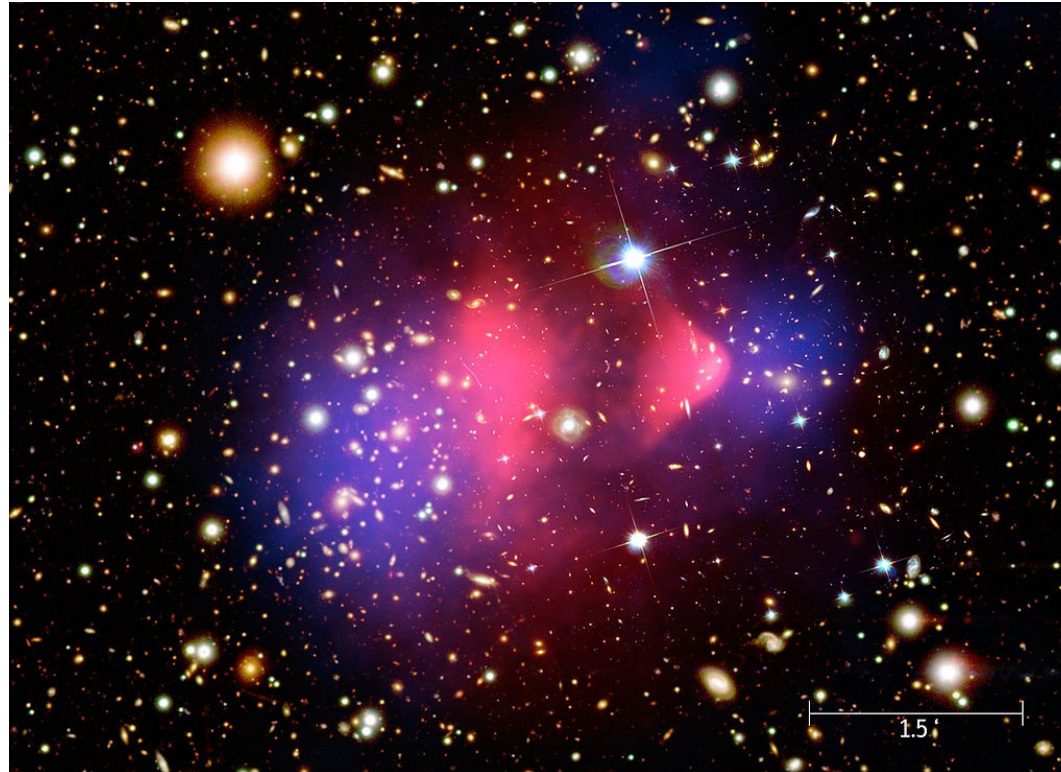
Pimeä aine

- 1930-luvulla Fritz Zwicky päätteli Coman galaksijoukon galaksien liikkeestä, että joukossa täytyy olla paljon enemmän massaa kuin siinä näkyvissä galakseissa
- 1970-luvulla galaksien pyörimiskäyristä pääteltiin, että galaksien ulko-osissa täytyy olla piilossa suuria määriä näkymätöntä massaa (mm. Vera Rubin)
- Epäsuora todiste pimeälle aineelle myös se, että galaksit ovat ylipäättään ehtineet kehittyä nykyisen kaltaisiksi
- Johtopäätös: maailmankaikkeuden aineesta suurin osa on meille näkymätöntä
- Luultavasti kyseessä on heikosti vuorovaikuttava tuntematon hiukkanen
 - Neutriinoja pidettiin aiemmin hyvänä kandidaattina, mutta ne eivät riitä
 - Myöskään mustat aukot, ruskeat kääpiöt ja muut himmeät kohteet eivät pysty selittämään ainakaan kaikkea pimeää ainetta
- Yrityksistä huolimatta hiukkaskiihdyttimissä ei olla pystytty tuottamaan pimeän aineen hiukkasia, eikä niitä olla havaittu tavalliselta aineelta eristetyissä ilmaisimissa – gravitaatio ainoa vuorovaikutus mikä pimeältä aineelta tunnetaan



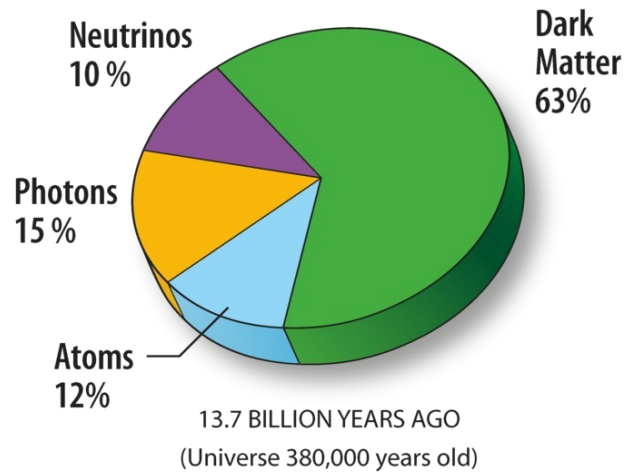
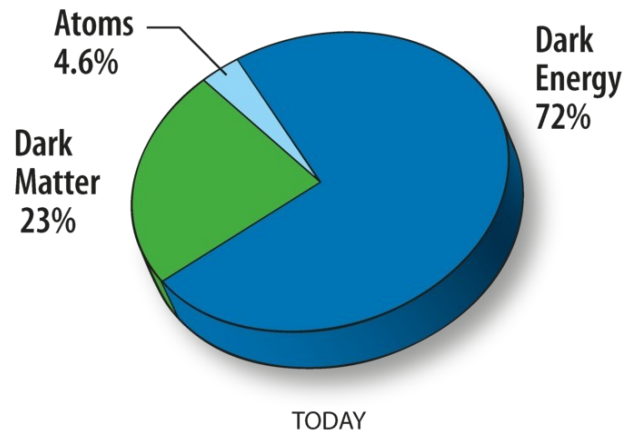
Kolmion galaksin (M33) pyörimiskäyrästä nähdään, että galaksin ulko-osat pyöriivät nopeammin kuin näkyvän aineen perusteella voisi odottaa. Galaksin ulko-osissa täytyy siis olla huomattava määrä näkymätöntä massaa.

Kuva: Mario De Leo



Luotijoukko on tunnettu kahden galaksijoukon törmäys, jota pidetään todisteena pimeän aineen olemassaolosta. Punainen väri osoittaa röntgenemissiosta mitatun kaasun sijainnin, joka on hidastunut kun joukot ovat kulkeneet toistensa läpi. Sininen väri osoittaa gravitaatiolinssien perusteella lasketun massajakauman, jota pimeä aine dominoi. Pimeä aine ei vuorovaikuta törmäyksessä, joten sen liike ei ole hidastunut, ja kaasu on jäänyt siitä jälkeen.
NASA/CXC/M. Weiss

Maailmankaikkeus nyt 2026



Maailmankaikkeuden kokonaisenergian jakauma nyt ja kosmisen mikroaaltotaustan muodostumisen aikaan WMAPin mittausten mukaan

Maailmankaikkeus nyt 2026

Pimeää energiaa

- 1998 havaittiin eri etäisyyksillä sijaitsevien Ia supernovien punasiirtymistä, että maailmankaikkeuden laajenemisnopeus kiihtyy
 - Gravitaation tulisi hidastaa laajenemista, ellei jokin tuntematon tekijä sitä kiihdytä – nimetty pimeäksi energiaksi
 - Tuntematon energiamuoto, jolla negatiivinen paine
- Pimeän energian luonne tuntematon, vaihtoehtoja mm.:
 - Suosituin selitys tyhjiöenergia: ”kosmologinen vakio”, jonka energiatiheys on aina vakio
 - Kun avaruus laajenee, tyhjiötä tilaa tulee lisää, ja pimeän energian määrä kasvaa – laajenemisnopeus sopii tähän malliin, laajeneminen kiihtynyt viimeisten 7 miljardin vuoden aikana
 - Kvanttimekaniikka ennustaa tyhjiöenergian suuruuden, mutta siinä on kertoimen 10^{120} ero havaintoihin!
 - Kosmologinen vakio peräisin Einsteinilta, joka lisäsi vastaavan tekijän yleiseen suhteellisuusteoriaan, mutta poisti sen kun universumin laajeneminen kävi ilmi
 - Standardikosmologia (Λ -CDM, ”Lambda-Cold Dark Matter”) rakentuu tämän mallin varaan
 - Kvinteesenssi: jokin tuntematon kvanttikenttä, jonka suuruus voi muuttua ajassa ja paikassa
 - Ehkä pimeää energiaa ei tarvita, vaan kiihtyvä laajeneminen selittyy sillä ettei yleinen suhteellisuusteoria päde suurilla etäisyyksillä, tai sillä että oletus että universumi on suurilla etäisyyksillä samanlainen kaikkialla on väärin

Havaittava maailmankaikkeus

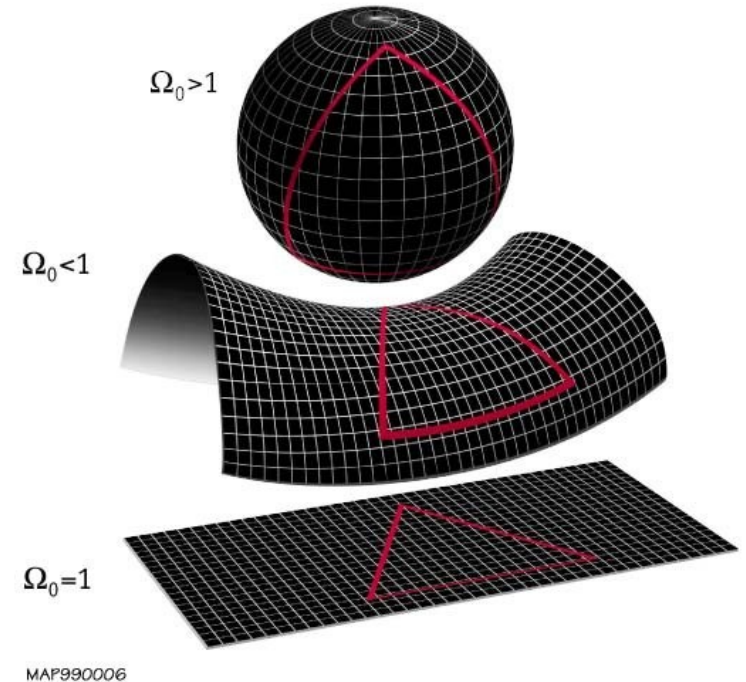
- Emme tiedä onko maailmankaikkeus äärellinen vai ääretön, mutta voimme joka tapauksessa havaita siitä vain osan
- 13.8 mrd vuoden ikäinen maailmankaikkeus laajenee kiihtyvällä nopeudella, eikä valo ehdi mukaan
 - Valonnopeus rajaa "havaittavan maailmankaikkeuden", mistä valo on ehtinyt kulkea meille
 - Maailmankaikkeuden laajetessa valoa nopeammin, on havaittava maailmankaikkeus säteeltään noin 45 mrd valovuotta
 - Näemme kaukaisimmat kohteet sellaisina kuin ne olivat 13.8 mrd vuotta sitten, sijaitessaan "lähempänä"
 - "Mukana liikkuva etäisyys"
- Eksponentiaalisesti laajenevassa universumissa yhä läheisemmät kohteet häviävät lopulta "kosmisen horisontin" taakse

Multiversumi?

- Voiko olla olemassa muita maailmankaikkeuksia, ns. multiversumi?
- Erilaisia vaihtoehtoja mm.
 - Singulariteetit (mustat aukot) synnyttävät uusia universumeja
 - Alkuräjähdyksessä syntyi myös antimailmankaikkeus, missä aika etenee taaksepäin
 - Kaikki mahdolliset kvanttitapahtumat tapahtuvat jossain universumissa
- Mikään ei periaatteessa estä niiden olemassaoloa, mutta onko mahdollista havaita niitä?

Maailmankaikkeuden muoto

- Kaikki energia kaareuttaa aika-avaruutta. Onko universumi kokonaisuutena kaareutunut?
- 3 vaihtoehtoa:
 - Kokonaistiheys yli ns. kriittisen tiheyden: gravitaatio pysäyttää laajenemisen (jos pimeää energiaa ei huomioida), positiivinen kaareutuminen, pallomainen maailmankaikkeus
 - Suljettu, äärellinen universumi
 - Kokonaistiheys alle kriittisen tiheyden: gravitaatio ei pysäytä laajenemista, negatiivinen kaareutuminen, hyperbolinen maailmankaikkeus
 - Universumi voi olla äärellinen tai ääretön
 - Kokonaistiheys täsmälleen kriittinen tiheys: rajatapaus, ei kaareutumista, laakea maailmankaikkeus
 - Universumi voi olla äärellinen tai ääretön
 - Universumi vaikuttaisi olevan lähellä tätä tilaa



Maailmankaikkeuden tulevaisuus

- Riippuu pimeän energian luonteesta, vaihtoehtoja mm.
 - Lämpökuolema
 - Pimeä energia kosmologinen vakio, universumin laajeneminen jatkuu ikuisesti yhä kiihtyvällä nopeudella, todennäköisimpänä pidetty vaihtoehto
 - Loppurepeämä
 - Pimeän energian tiheys kasvaa tulevaisuudessa, kaikki etäännyy toisistaan nopeammin kuin lämpökuolemassa ja universumi repeää hajalle jo kauan ennen sitä
 - Loppurysäys
 - Ilman pimeää energiaa riittävän tiheässä maailmankaikkeudessa gravitaatio olisi pysäyttänyt laajenemisen ja lopulta kaikki olisi romahtanut kasaan
 - Tyhjiön hajoaminen
 - Tyhjiö ei ole vakaa tila, vaan "valetyhjiö" saattaa joskus spontaanisti tunneloitua todelliseen matalimman energian tilaansa, jolloin kaikki aineen rakenne hajoaa

Maailmankaikkeuden tulevaisuus (lämpökuolema-malli)

- 1-2 biljoonaa vuotta: paikallinen galaksiryhmä sulautunut yhteen, paikallisen superjoukon ulkopuolella ei näy enää muita galaksijoukkoja
- 100 biljoonaa vuotta (10^{14}): tähtien synty lakkaa ja viimeiset tähdet sammuvat, jäljellä vain tiiviitä tähtijäänteitä eli valkoisia kääpiöitä, neutronitähtiä ja mustia aukkoja
- 10^{20} vuotta: planeetat putoavat tähtijämiin säteilyään gravitaatioaaltoja tai sinkoavat ulos aurinkokunnistaan ohitettuaan muita tähtivanhuksia
- 10^{30} vuotta: tähtijäänteet ovat joko sinkoutuneet ulos galakseista tai pudonneet mustiin aukkoihin
- 10^{34} vuotta: protonit ja neutronit alkavat mahdollisesti hajota alkeishiukkasiksi ja säteilyksi
 - Monien hiukkasfysiikan mallien (ns. Grand Unified Theory, yritykset yhdistää vahva ja sähköheikko vuorovaikutus) mukaan protoni ei ole vakaa pitkällä ajoilla
- 10^{40} vuotta: kaikki aine hajonnut alkeishiukkasiksi ja säteilyksi, mustat aukot hallitsevat universumia, haihtuvat hitaasti Hawkingin säteilyn kautta
 - Auringon massainen aukko haihtuu noin 10^{67} vuodessa
- 10^{100} vuotta: massiivisimmatkin mustat aukot ovat haihtuneet, universumissa vain matalaenergistä säteilyä, alkeishiukkasia, pimeää ainetta(?), hyvin vähän mitään tapahtuu – aika pysähtyy?? (Lämpökuolemassa universumi saavuttanut maksimientropian)



Hubble Ultra Deep Field on syvimpiä universumista otettuja kuvia. Kaukaisimmat kuvassa näkyvät galaksit ovat alle miljardin vuoden ikäisiä.

Maailmankaikkeus nyt 2026

Harjoituskysymys 1

Tarkastellaan kahta samankokoista aurinkokunnan pienkappaletta, joista toinen on kivinen ja toinen jäinen. Kumpi niistä on todennäköisesti peräisin kauempaa aurinkokunnan ulko-osista?

- a) Kivinen
- b) Jäinen

Harjoituskysymys 2

Verrataan kahta eksoplaneettasysteemiä, joista toisessa planeettojen ratataso nähdään suoraan sivulta, ja toisessa suoraan ylhäältä. Kummasta systeemistä on helpompi saada tarkempaa tietoa?

- a) Sivulta nähdystä
- b) Ylhäältä nähdystä

Harjoituskysymys 3

Röntgenkaksoistähtenä havaittavassa järjestelmässä $2 M_{\odot}$ massainen neutronitähti kiertää $4 M_{\odot}$ massaista punaista jättiläistä. Kumpi tähdistä on syntyessään ollut massiivisempi?

- a) Neutronitähti
- b) Punainen jättiläinen

Harjoituskysymys 4

Verrataan kahta galaksia, joista toinen on ellipsi ja toinen spiraali. Jos halutaan tutkia kuumia, nuoria tähtiä UV-teleskoopilla, kumpaan galaksiin laite kannattaa suunnata?

- a) Ellipsigalaksiin
- b) Spiraaligalaksiin

Harjoituskysymys 5

Mistä valtaosa maailmankaikkeuden heliumista on peräisin?

a) Inflaatiokenttä hajosi nykyiseksi hiukkasiksi 10^{-30} s ikäisessä universumissa, muodostaen myös heliumia

b) Ensimmäisten minuuttien ikäisen universumin ydinfuusioista