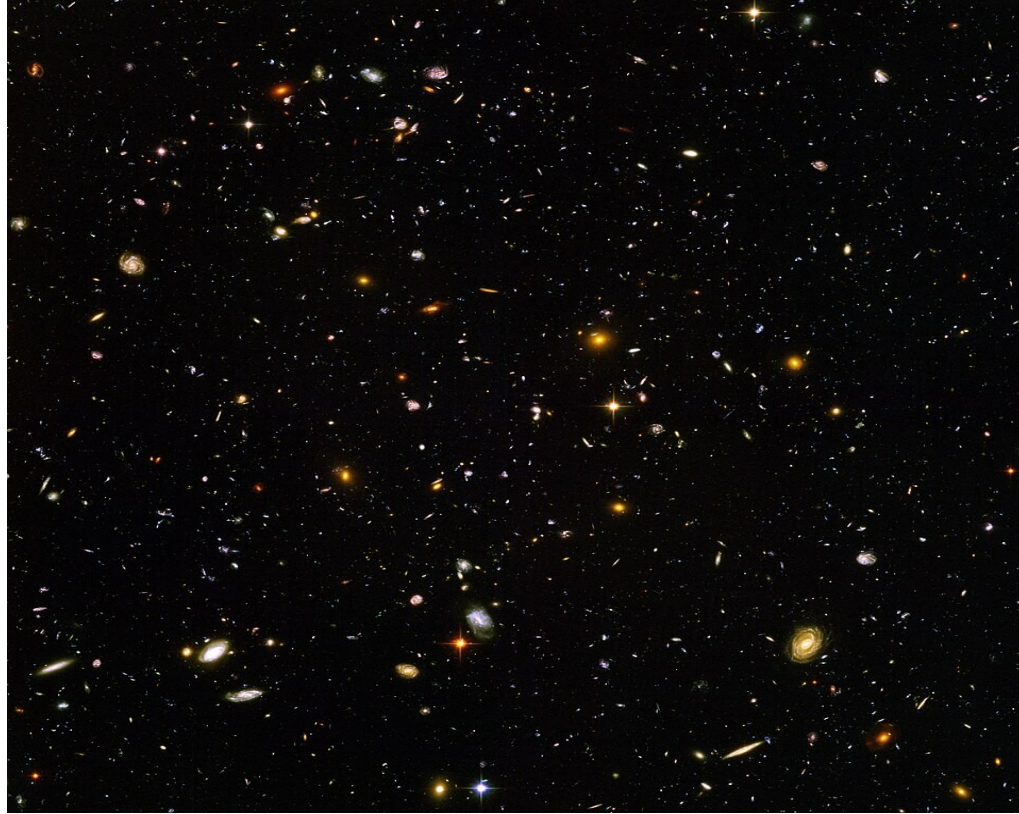


Luento 5: Kosmologia ja mustat aukot



Tähtitiedettä taviksille 2026

Mustat aukot



Tähtitiedettä taviksille 2026

Mikä on musta aukko?



- Pakonopeus on nopeus mitä vaaditaan jotta pääsee pakoon jonkin kappaleen painovoimaa
 - Esimerkiksi pakonopeus Maan pinnalta on noin 11 km/s, pakonopeus aurinkokunnasta (Maan paikkeilla) 42 km/s, Auringon pinnalta 618 km/s
- Mustan aukon *tapahtumahorisontin* kohdalla pakonopeus ylittää valonnopeuden (299 792 458 m/s): mikään ei pääse pakoon
 - *Schwartzchildin säde* (eli tapahtumahorisontin koko pyörimättömälle mustalle aukolle) Auringon massaiselle mustalle aukolle 3 km, Maan massaiselle 9 mm
- Tapahtumahorisontin sisällä nykytiedon valossa singulariteetti, mihin kaikki mustan aukon massa on puristunut äärettömän tiheäksi pisteeksi

Matka musta aukon sisälle

- Kuvitellaan uhkarohkea avaruusmatkaaja hyppäämään mustan aukon sisälle – mitä hän kokisi?
- Mustaa aukkoa ympäröi tyypillisesti voimakkaasti säteilevä kertymäkiekko
- Spagetifikaatio – jalat edellä hypäessä jalkoihin kohdistuva painovoima voimakkaampi kuin päähän, venyttäisi avaruusmatkiaan
- Tapahtumahorisontin ylitettyä ei ole paluuta
- Ulkopuolelta tilannetta tarkkaileva havaitsija ei kuitenkaan ikinä näkisi kaverinsa ylittävän tapahtumahorisonttia, vaan tämä näyttäisi vain lähestyvän sitä ja lopulta sulautuvan yhteen horisontin kanssa – avaruusmatkaja itse sen sijaan kokisi putoavansa sisään normaalisti
 - Mustan aukon lähellä voimakas painovoima vääristää aikaa



<https://www.astro.utu.fi/zubi/star/xbhole.htm>

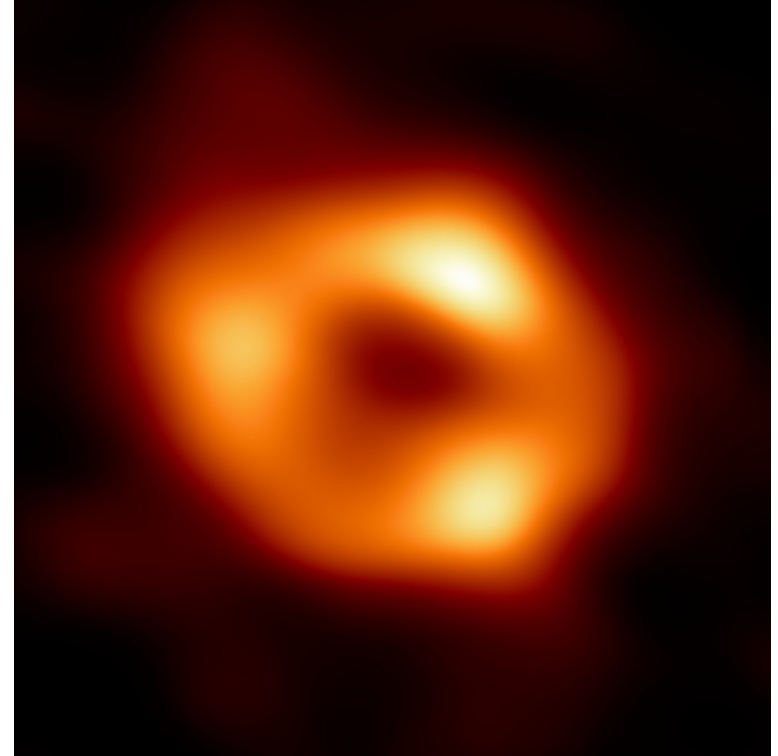
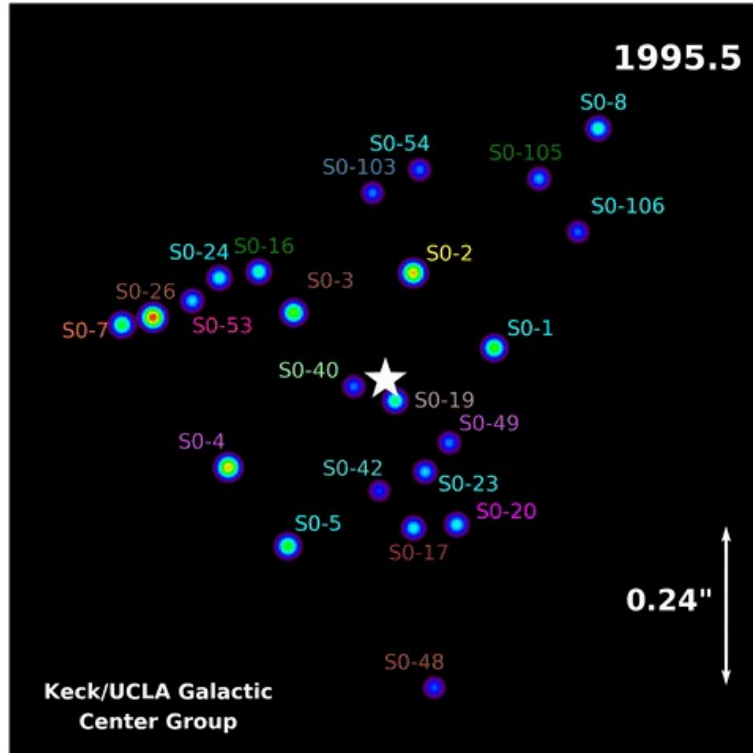
Miten mustat aukot syntyvät?

- Massiivisen tähden painovoima puristaa tähden kaasua kasaan valtavalla voimalla – tähti pysyy kasassa erinäisten vastavoimien ansiosta
 - Kaasun paine ei yksinään riitä, mutta tähden ytimessä ydinfuusiot tuottavat säteilyä, joka pyrkii ulos tähden sisältä ja aiheuttaa säteilypaineen
 - Kun fuusioreaktiot loppuvat, loppuu myös säteilypaine, ja painovoima pääsee voitolle – tähden ydin luhistuu
 - Massiivisimmat tähdet (yli noin 8 Auringon massaa) räjähtävät supernovina
 - Supernovana räjähtävän tähden ydin muodostaa äärimmäisen tiheän neutronitähden (parin Auringon massa 10 km säteellä, yhtä tiheää kuin atomiytimet), missä neutronien välinen vahva vuorovaikutus estää lopullisen luhistumisen
 - Kaikista massiivisimpien tähtien tapauksessa edes neutronien välinen paine ei riitä pysäyttämään painovoiman aiheuttamaa luhistumista
- Mustan aukon tapauksessa mikään voima ei enää pysty vastustamaan painovoimaa, vaan kaikki luhistuu kasaan singulariteetiksi

Millaisia mustia aukkoja on olemassa?

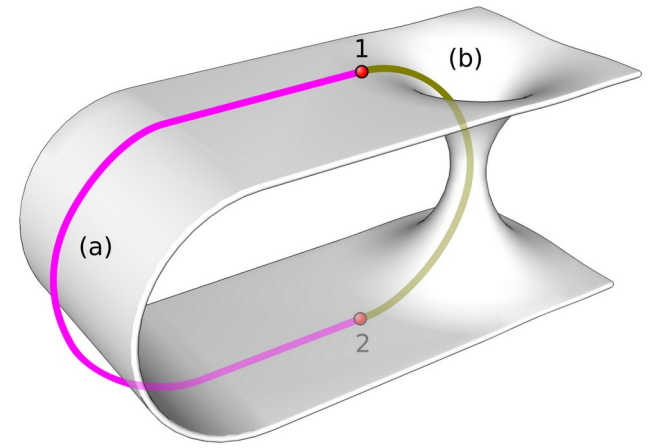
- Tähden massaiset
 - Massa muutamasta Auringosta noin sataan
 - Syntyvät supernovaräjähdyksissä
- Supermassiiviset
 - Massa satoja tuhansia tai jopa kymmeniä miljardeja Aurinkoja
 - Syntytapa yhä mysteeri; ovat kuitenkin syntyneet nopeasti varhaisessa maailmankaikkeudessa
- Spekulaatioita myös keskisuurista sekä mikroskooppisen pienistä mustista aukoista, mutta näistä ei ole varmoja havaintoja

Sagittarius A* (Linnunradan keskustassa)



Entä valkoiset aukot?

- Valkoinen aukko on hypoteettinen kohde, joka olisi yhteydessä mustaan aukkoon madonreiän kautta
- Aine putoaisi mustaan aukkoon, ja siirtyisi madonreiän kautta valkoiseen aukkoon, joka sylkisi sen ulos
- Mitään havaintoja todellisista valkosista aukoista tai madonrei'istä ei ole

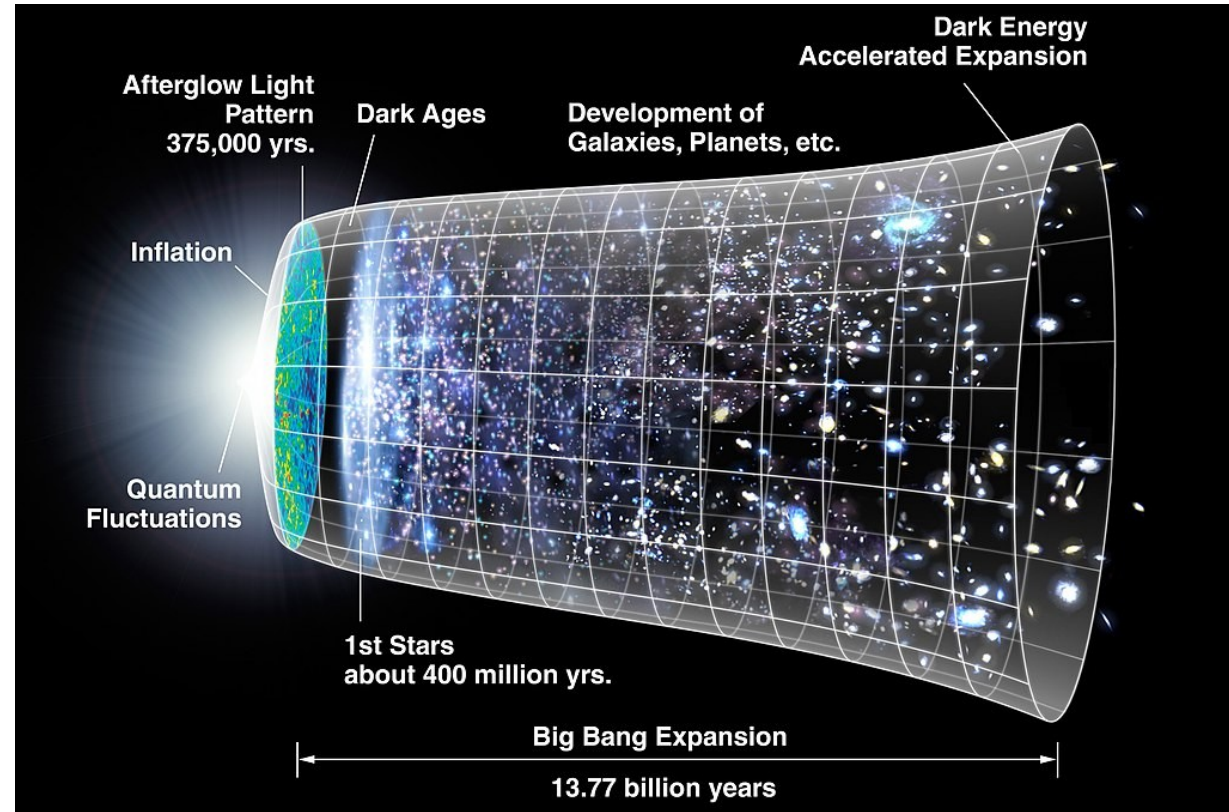


Havainnekuva ja simulaatio madonreiästä.
MikeRun & CorvinZahn.



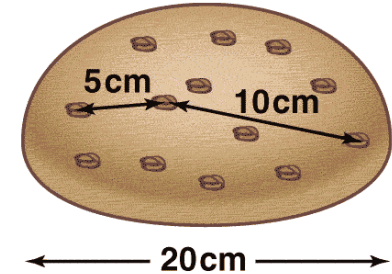
Kosmologia

- Kosmologia tutkii maailmankaikkeutta kokonaisuutena
- Nykykosmologian voi sanoa alkaneen Einsteinin yleisestä suhteellisuusteoriasta (1916) sekä Hubble'n havainnoista, joiden mukaan maailmankaikkeus laajenee (1920-luvulla)



Miten mustat aukot liittyvät alkuräjähdykseen?

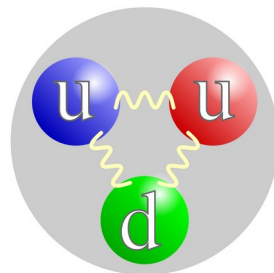
- Tunnetun aineen äärimmäisin olomuoto on äärettömän tiheä singulariteetti
- Maailmankaikkeus laajenee: menneisydessä se on ollut pienempi
- 13.8 miljardia vuotta sitten maailmankaikkeus on ollut äärimmäisen pieni, tiheä ja kuuma, kenties singulariteetti
- Alkuräjähdys ei siis ollut mikään räjähdys, pelkästään ajan alkuhetki (joskin todellisesta alkuhetkestä emme oikeasti tiedä mitään)
- Mitä oli ennen alkuräjähdystä? Jos kaikki tosiaan sai alkunsa alkuräjähdysestä, ei tämä ole mielekäs kysymys, vähän kuin kysyisi mitä on pohjoisnavasta pohjoiseen
- Nykyfysiikka ei osaa käsitellä singulariteettia, tähän tarvittaisi teoria *kvanttigravitaatiosta*
 - Paras nykyinen gravitaatioteoria on yleinen suhteellisuusteoria
 - Hyvin pienillä mittakaavoilla kvanttimekaniikan oudot ilmiöt on otettava huomioon, eikä suhteellisuusteoria tähän kykene



MAP990404

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

Ensimmäinen sekunti



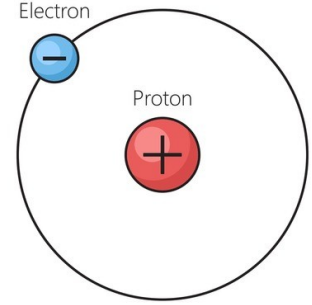
Protoni koostuu kahdesta ylös-kvarkista (u) ja yhdestä alas-kvarkista (d).
Kuva: Arpad Horvath.

- 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
 - 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 neutronien) muodostumiselle: kvarkit ja gluonit vapaana kvarkki-gluoniplasmana
- Hadroniepookki $10^{-6}-1$ s
 - Kvarkit yhtyvät hadroneiksi

Aineen synty

- Nykyiset alkeishiukkaset olivat syntyneet noin sekunnin ikäisessä maailmankaikkeudessa: alkuaneista vety-ytimet olivat siis olemassa (vety-ydin = yksi protoni)
- Noin 20 minuutin aikana koko maailmankaikkeuden olosuhteet vastasivat nykyisten tähtien ytimiä: 25% vedystä fuusioitui heliumiksi
- Maailmankaikkeuden laajetessa se jäähdyi jatkuvasti: 380 000 vuoden päästä lämpötila oli noin 3000 astetta, jolloin elektronit saattoivat asettua atomiytimien ympärille: neutraalit atomit syntyivät

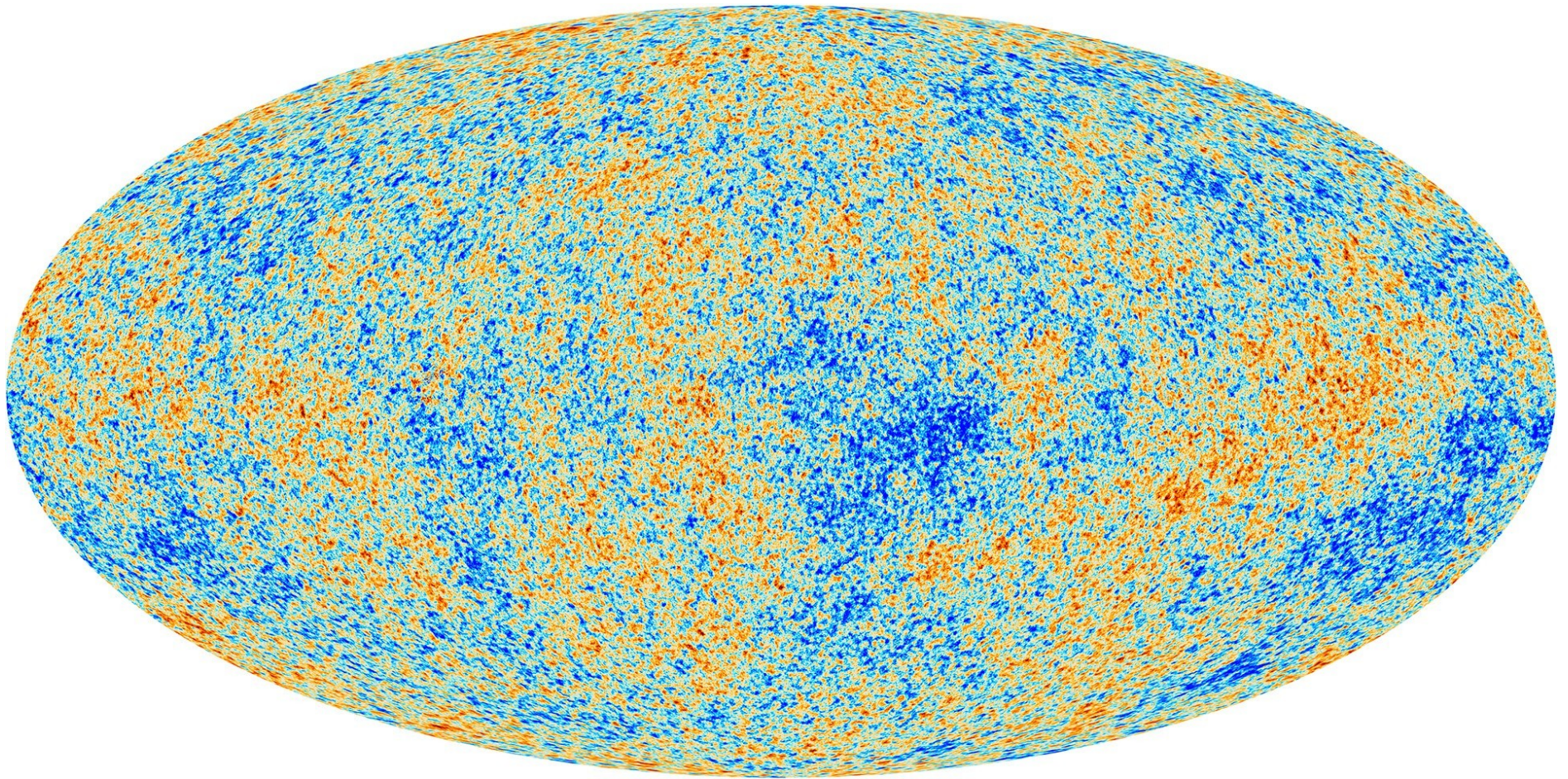
Hydrogen atom



Vetyatomi koostuu yhdestä protonista ja yhdestä elektronista

Kosminen mikroaaltotausta

- 380 000 vuoden ajan fotonit (eli valo) eivät pystyneet kulkemaan vapaasti
 - Fotoni sähkömagneettisen voiman välittäjähiukkanen
- Aineen muututtua sähköisesti neutraaliksi, pääsivät fotonit ensimmäistä kertaa etenemään vapaasti: maailmankaikkeus muuttui läpinäkyväksi
- Samat silloisesta universumista irtaantuneet fotonit kulkevat yhä kaikkialla: kosminen mikroaaltotausta, eli maailmankaikkeuden vanhin valo (tai tarkemmin mikroaaltoja)
 - Hyvin tasaista (muttei täysin!): noin $1/100000$ asteen kokoisia lämpötilaeroja, jotka ovat peräisin aineen silloisista tiheyseroista
 - Näistä pienistä tiheyseroista ovat sittemmin kehittyneet tähdet, galaksit ja kaikki muu

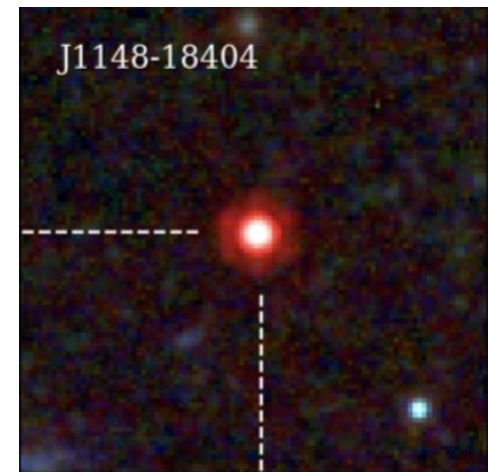


Kosminen mikroaaltotausta Planckin kuvaamana. Punaiset alueet vastaavat hieman kuumempia ja harvempia alueita 380 000 vuoden ikäisen aineen jakaumassa, siniset viileämpiä ja tiheämpiä.

Tähtitiedettä taviksille 2026

Tähtien ja galaksien synty

- Pimeä aika päättyy: ensimmäiset tähdet syntyvät noin 100 miljoonan vuoden paikkeilla
 - Varhaisessa maailmankaikkeudessa oli pelkästään vetyä ja heliumia, mutta 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 miljardien aurinkojen kokoisiksi!
 - Pienet punaiset pisteet: James Webbin havaitsemat kaukaiset kohteet varhaisia massiivisia tähtiä, vai sittenkin varhaisia galakseja tai niiden aktiivisia ytimiä?
- Suuremmilla mittakaavoilla galaksit muodostuvat

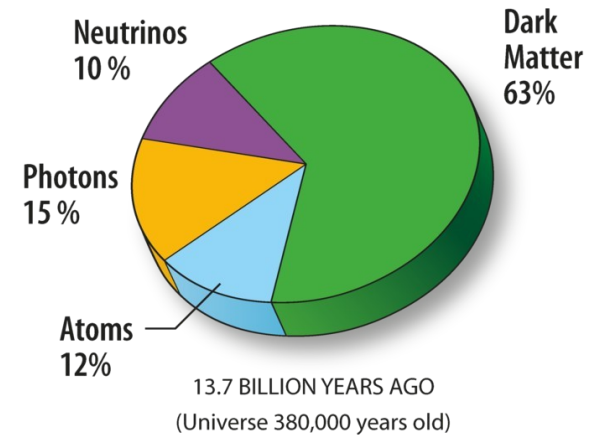
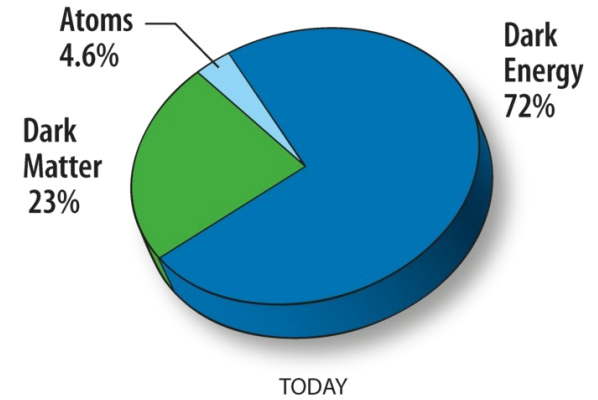


Pieni punainen piste (Little Red Dot) JWST:n kuvaamana. Matthee et al. (2024).

Kohti nykyhetkeä ja yli

- Maailmankaikkeuden laajeneminen jatkuu, mutta gravitaatio hidastaa sitä: pysähtyykö laajeneminen joskus?
- Itse asiassa laajeneminen onkin vuosimiljardien edetessä alkanut kiihtyä: pimeä energia
 - Havaittiin 1998 kaukaisten supernovien avulla, jotka loittonevat nopeammin kuin voisi olettaa
 - Mitä pimeä energia on? Ei tiedetä. Sitä kuitenkin tulee lisää, ja nykyään noin 72% kaikesta energiatiheydestä on sitä.
 - Mahdollinen selitys tyhjiöenergia: kun universumi laajenee, tulee tyhjää tilaa lisää, ja samalla pimeän energian määrä kasvaa
 - Nykykäsityksen mukaan pimeä energia tulee kiihdyttämään maailmankaikkeuden laajenemista ikuisesti, kunnes noin 10^{100} vuoden sisällä päädytään "lämpökuolemaan" – kaikki on todella harvaa ja kylmää, eikä mitään enää pysty tapahtumaan

Tähtitiedettä taviksille 2026



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