

Sissejuhatus osakestefüüsikasse ja kosmoloogiasse

Loeng 3: Universumi tihedus, tumeaine ja CMB

Sven Põder^{1 2}

¹Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut (KBF)

²Tallinna Tehnikaülikool (TalTech)

TalTech, April 2024

Ajalooline Kontekst

- Fritz Zwicky (1933), Coma galaktikaparv - kiiruste dispersioonid liiga suured, et süsteemi nähtav mass oleks stabiilne
- Galaktikate lamedad pöörlemiskõverad avastati 1970-ndatel, mis jälgigi viitasid "peidetud" massile
- Vaatluslik kosmoloogia hakkas kiirelt arenema tänu raadioastronomia läbimurretele 60-ndatel, mis tõi fookusesse ka galaktikate puuduva massi probleemi
 - Hakati otsima massi, et universum oleks suletud ($\Omega \geq 1$)

Kosmoloogia arengust

Aastatel vahemikus 1965 - 1975, refereeritud publikatsioonide arv kosmooloogias 10-kordistus

- Galaktikate pöörlemiskõverad ja klastrite puuduva massi probleem kombineeriti 1974. aastal. Ilmusid kaks artiklit iseseisvalt töötavate teadusgruppide poolt:
 - James Peebles, Jeremiah Ostriker, Amos Yahil - Princeton
 - Jaan Einasto, Ants Kaasik, Enn Saar - Tartu Observatoorium
- Mõlemad gruppid leidsid, et massitihedus galaktikates on 20% kriitilisest tihedusest (ε_c)



Figure: Pildil on Jaan Einasto, James Peebles, George Abell ja Malcom Longair. IAU Sümpoosium, Tallinn (1977). [de Swart et al., 2017]

Tähtede "kaalumine"

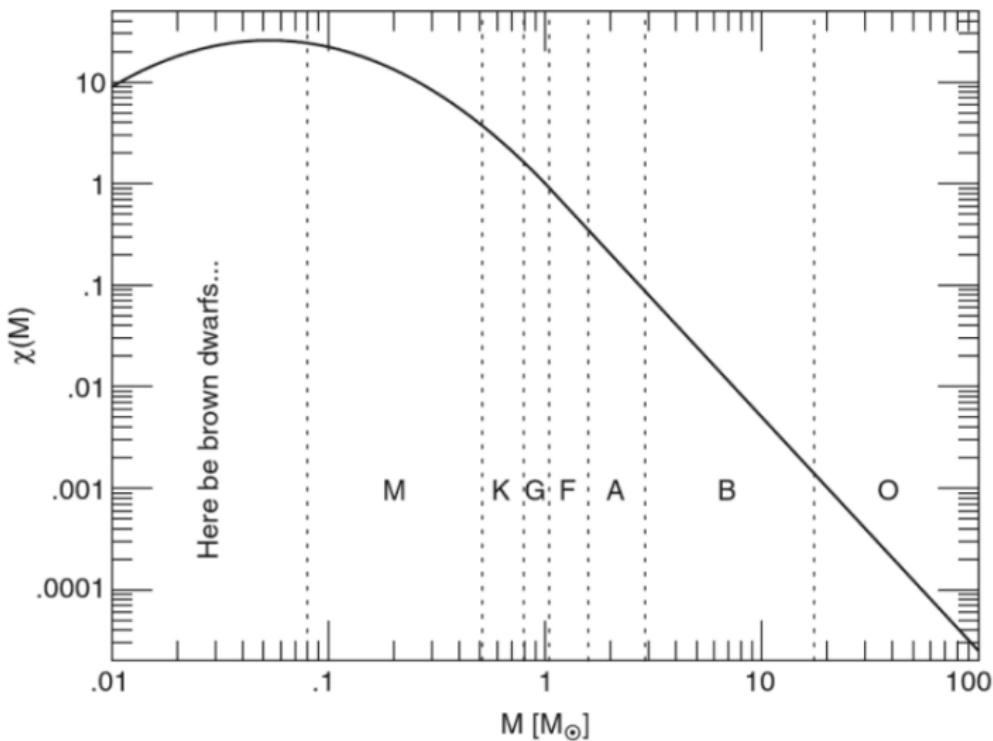
Tähtede panust $\Omega_{m,0}$ parameetrile saame hinnata läbi nende heleduse.

- Lokaalses universumis heleduse tihedus $\Psi_V = 1.1 \times 10^8 L_{\odot,V} Mpc^{-3}$. Sellest masstiheduse saamiseks on vaja teada massi ja heleduse suhet.
- Suvalise galaktika massi ja heleduse suhe ($\frac{M}{L_V}$) on sõltuv erinevatest tähtedest, millest ta koosneb.
- Empiiriliselt on leitud, et rohkem tähti moodustub väiksema massiga kui suurema massiga. Seda kirjeldab massifunktsioon, mis on astmelise sõltuvusega

$$\chi(M) \propto M^{-\beta} \quad [M > 1M_{\odot}] \quad (1)$$

$$\chi(M) \propto \frac{1}{M} \exp\left(-\frac{(\log M - \log M_c)^2}{2\sigma^2}\right) \quad [M < 1M_{\odot}] \quad (2)$$

Chabrier'i funksioon



Galaktikatevaheline gaas (Coma näide)



Figure: Coma galaktikaparv nähtavas valguses. [Sloan Digital Sky Survey]

Galaktikatevaheline gaas (Coma näide)

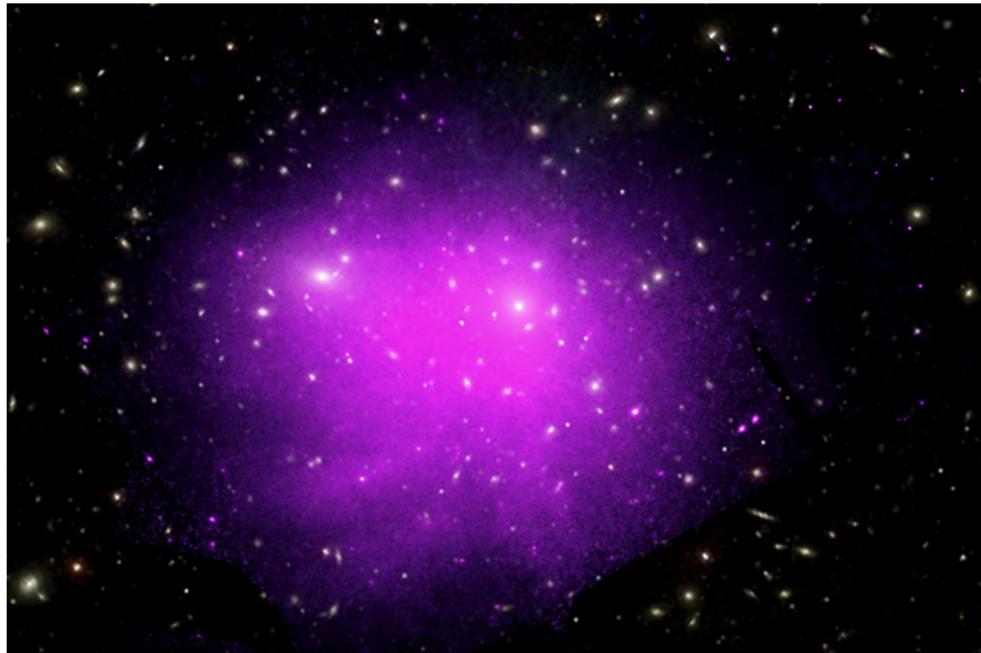
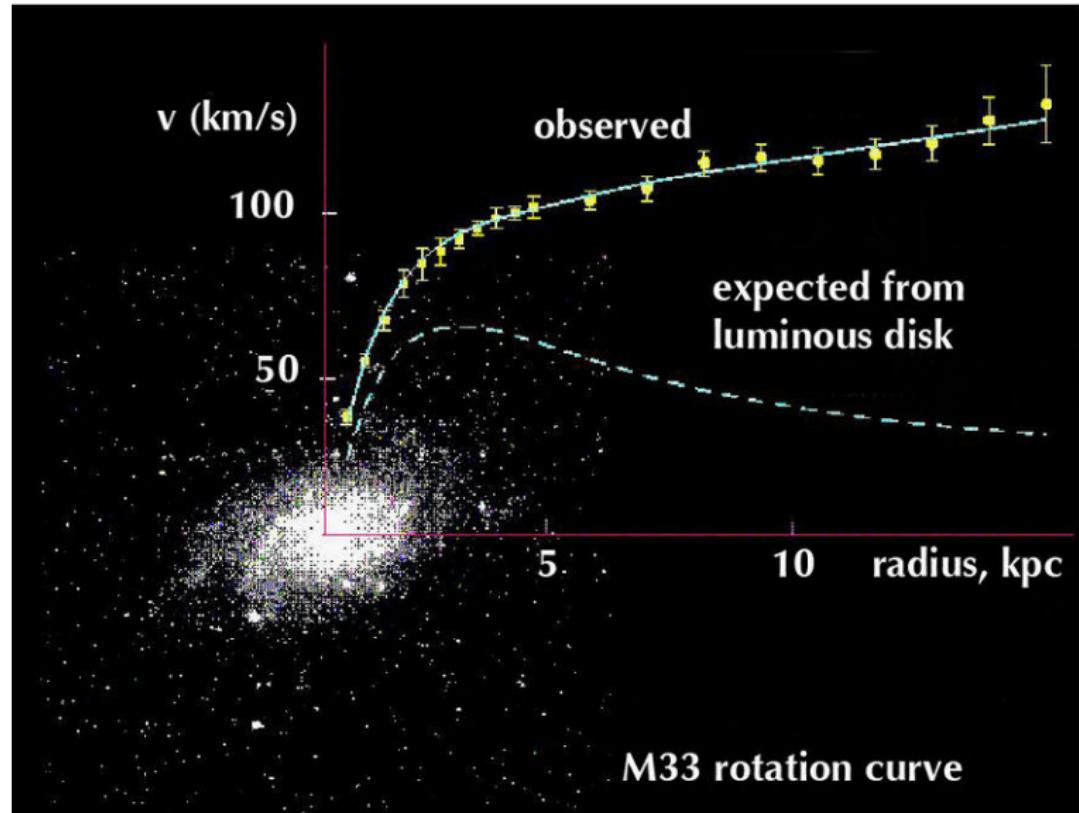


Figure: Coma galaktikaparv röntgenis. [NASA/CXC/Univ. of Chicago, I. Zhuravleva et al]

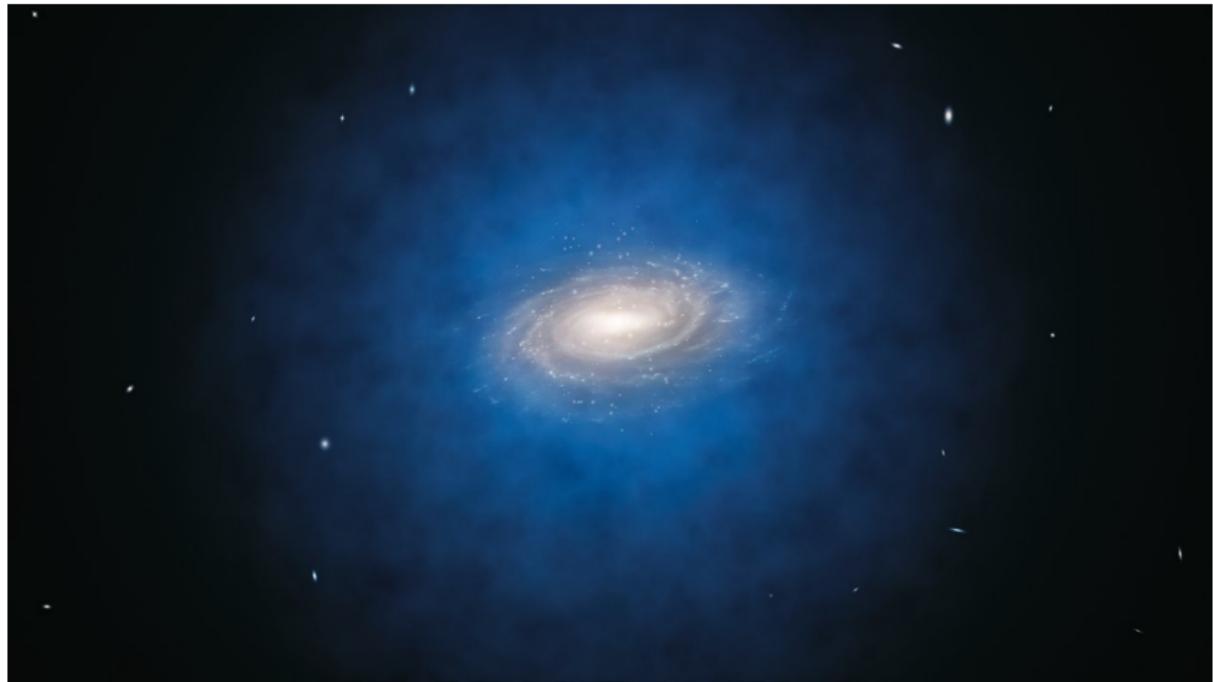
Tume aine galaktikates

- Enamus barüonilisest ainest pole võimalik detekteerida ning enamus ainest pole isegi barüoniline!
- Tume aine kogust/tihedust saame kaudselt hinnata läbi gravitatsiooniliste efektide
- Vera Rubin, Kent Ford (1970) - Mõõtsid M31 pöörlemiskõvera ja leidsid, et kiirused ei jälggi Kepleri pöörlemist. Pöörlemiskiirused konstantsed isegi kaugusel $R = 35 \text{ kpc}$.
- Galaktikaid hoiab seega koos **tume halo**, mis käitub nagu ankur, et tähed ei lenduks galaktikast välja
- Tumeda halo raadiust on keeruline hinnata. Linnutee puhul võib ta olla 75 kpc, aga on ka spekulatiivseid hinnanguid, mis viitavad 300 kpc.

M33 põörlemiskõver



Tume halo



Tume aine galaktikaparvedes

- Fritz Zwicky uuris 1930-ndatel Coma galaktikaparve (Slaidid 6 ja 7) ning märkas, et galaktikate radiaalkiiruste dispersioon oli liialt suur ($\approx 1000 \text{ km/s}$), et parv saaks koos püsida
- Galaktikaparvede massi on võimalik hinnata kasutades viriaalteoreemi.
 $M_{\text{Coma}} \approx 2 \times 10^{15} M_{\odot}$. $M_{\text{Coma,tähed}} \approx 2 \times 10^{13} M_{\odot}$.
- Galaktikatevahelist gaasi massi saab hinnata kui rakendada hüdrostaatilise tasakaalu võrrandit ning Coma puhul on see $M_{\text{Coma,gaas}} \approx 2 \times 10^{14} M_{\odot}$
- Galaktikaparve domineerivast tume ainest annab märku ka fakt, et galaktikatevaheline gaas ei ole paisunud parvest välja
- Massi ja heleduse suhtarvud tavalistel galaktikaparvedel on sarnased Comale ning liites kokku nende massid on saadud ka alampiir galaktikaparvede tihedusparameetrile: $\Omega_{\text{parv}, 0} \approx 0.2$

Kokkuvõte Komponentide Kaalumisest

- Nähtav barüoniline mateeria - $< 0.01\Omega$
- Tume barüoniline komponent - $\approx 0.04\Omega$
- Mitte-barüonilist tume ainet on 5 korda rohkem kui barüone

Tume aine kandidaatidest

Mis see on?! Spekulatsioone on palju:

- Aksionid (10^{-5} eV) - CERN Axion Solar Telescope
- Ürgsed mustad augud ($m_{BH} \approx 10^5 M_\odot$)
- Neutriinod - välistatud, ei teki suurel skaalal struktuuri
- Steriilsed neutriinod - ei ole välistatud, kuid tõenäoliselt ei moodusta suurt osa tume ainest oma väikse massi tõttu
- WIMPs - hüpoteetilised osakesed, mille mass on neutriino massi ülempiirist suurem ning mis interakteeruvad läbi nõrga vastastikmõju. Populaarne "külma" tume aine kandidaat, sest standard mudeli osakestest lahtisidestumisel on kokkupörkevabad ja käituvad nagu klassikaline vedelik olles mitterelativistlik väga varajasest ajast.

Tume aine olemuse leidmine on tänapäeva kosmoloogia, osakestefüüsika ja astrofüüsika Püha Graal.

Tugevad gravitatsiooniläätsed



Figure: Abell 370 galaktikaparv [ESA/Hubble]

Tugevad gravitatsiooniläätsed

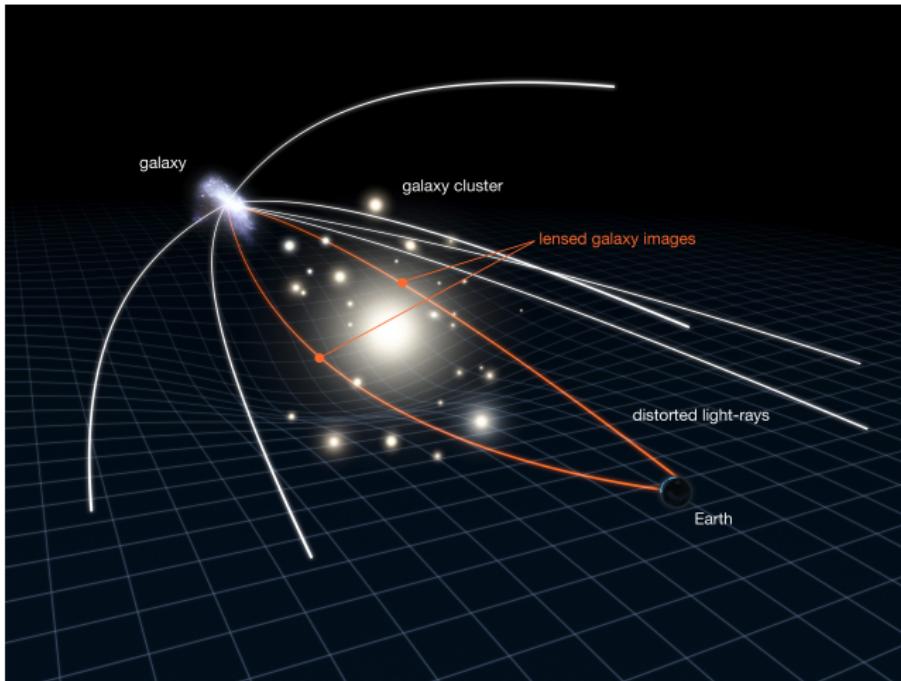
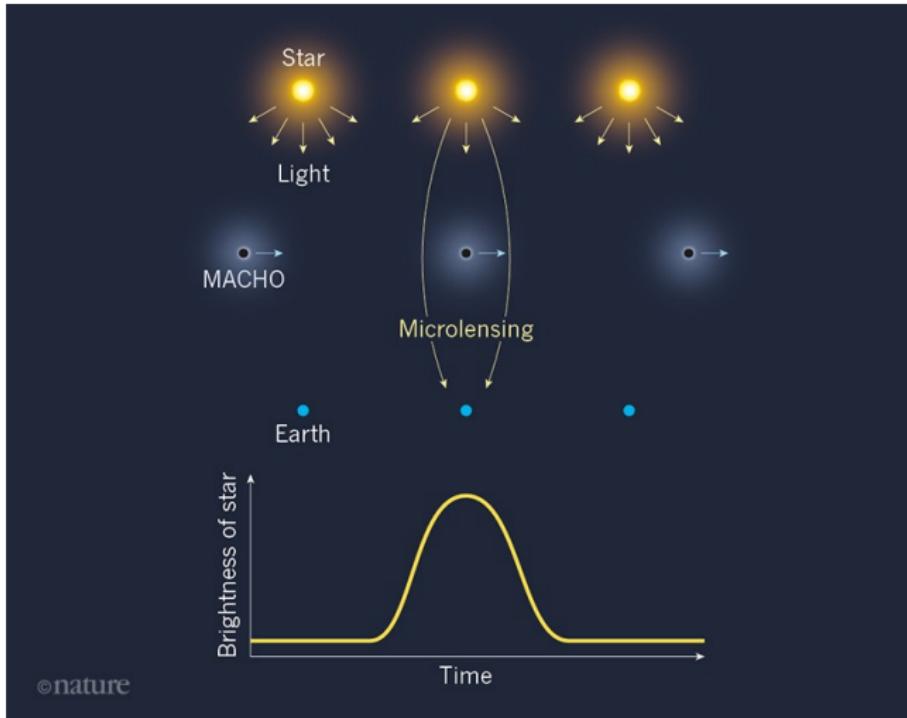


Figure: Illustreriv joonis tugevast gravitatsiooniläätsest. [NASA, ESA & L. Calçada]

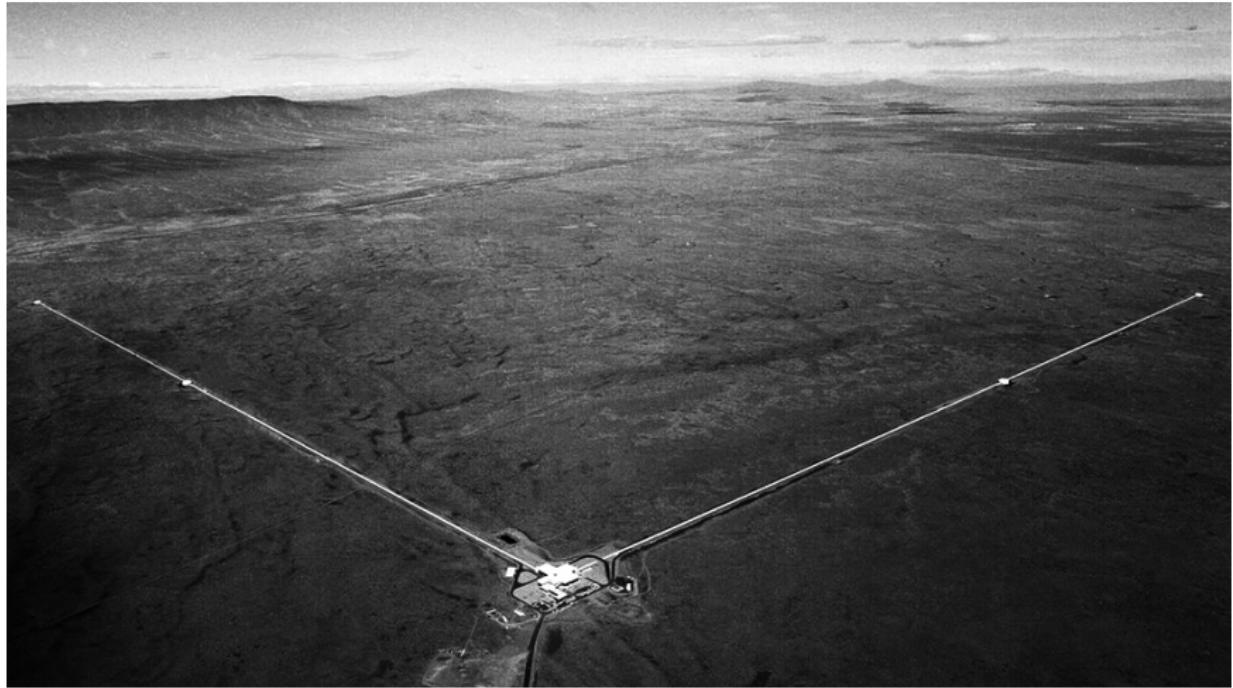
Mikrogravitatsiooniläätsed (MACHOd)



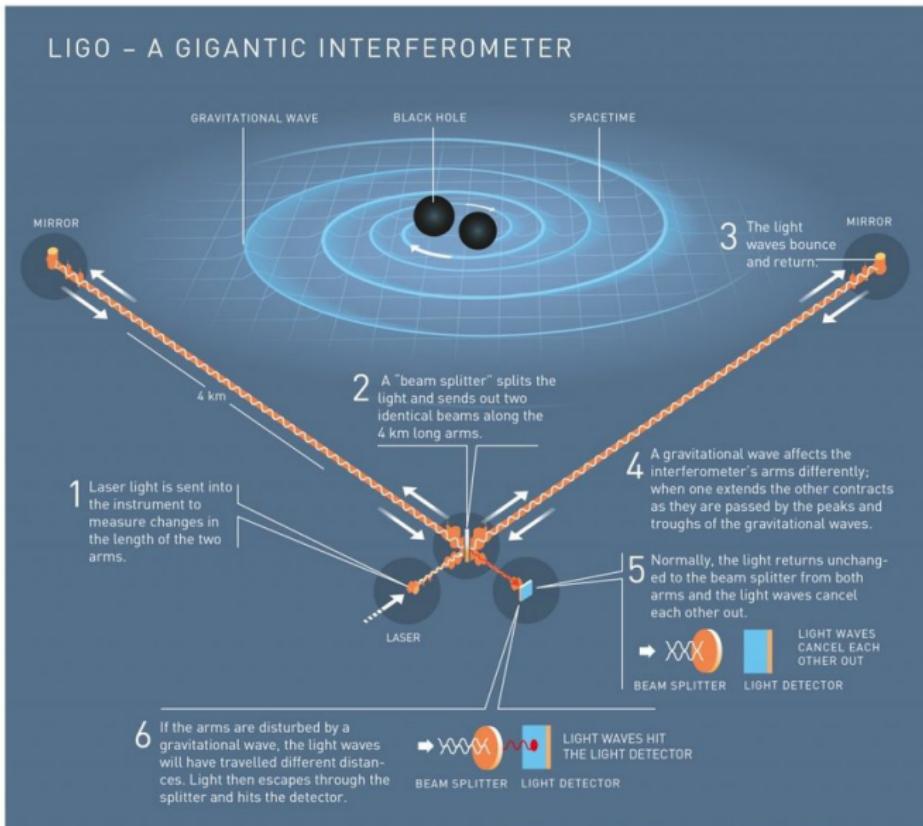
Gravitatsioonilained ja ürgsed mustad augud

- Einstein ennustas gravitatsiooni laineid juba 1916. aastal - kiirendavad massiivsed objektid häirivad aegruumi ja tekitavad selles võnkeid
- Esimene eksperimentaalne signaal - LIGO, 14. september, 2015
- Kuigi gravitatsioonilained tekivad ekstreemsetes protsessides, on Maale jõudes võnked pisikesed - u. 1000x väiksemad kui aatomituum
- Gravitatsioonilainete detekteerimine võimaldab uurida taevakehi ning protsesse kauges (ja varajases) universumis, mida muidu oleks keeruline uurida EM-kiirgusega - Näiteks ürgsete mustade aukude arvukust ja massijaotust

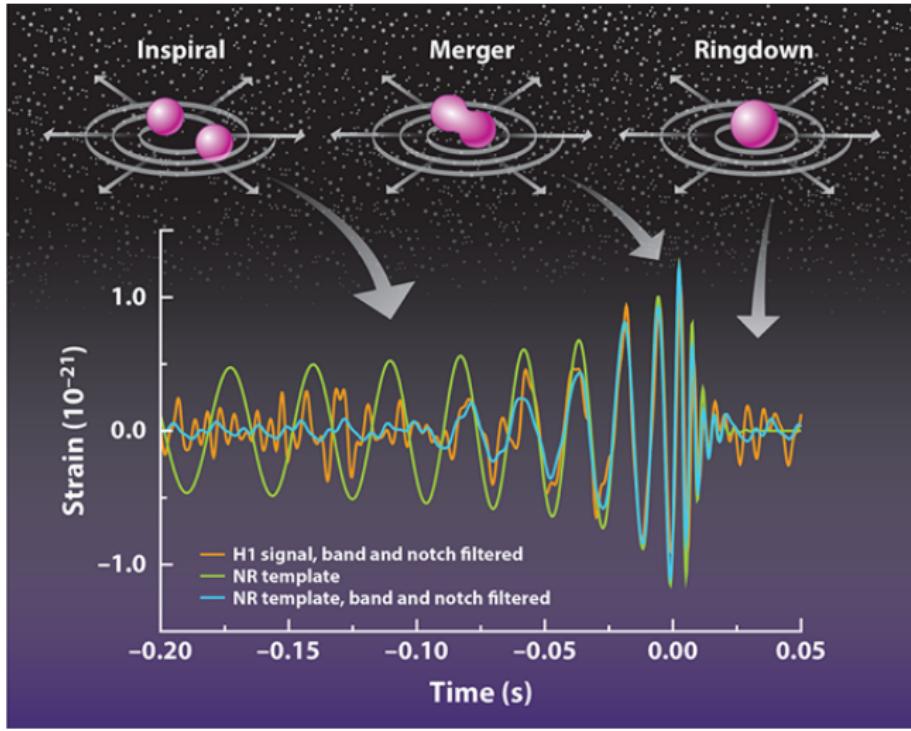
LIGO - Laserinterferomeetri gravitatsioonilainete vaatluskeskus



LIGO - Tööpõhimõte



LIGO - Signaal



LIGO - Signaal II

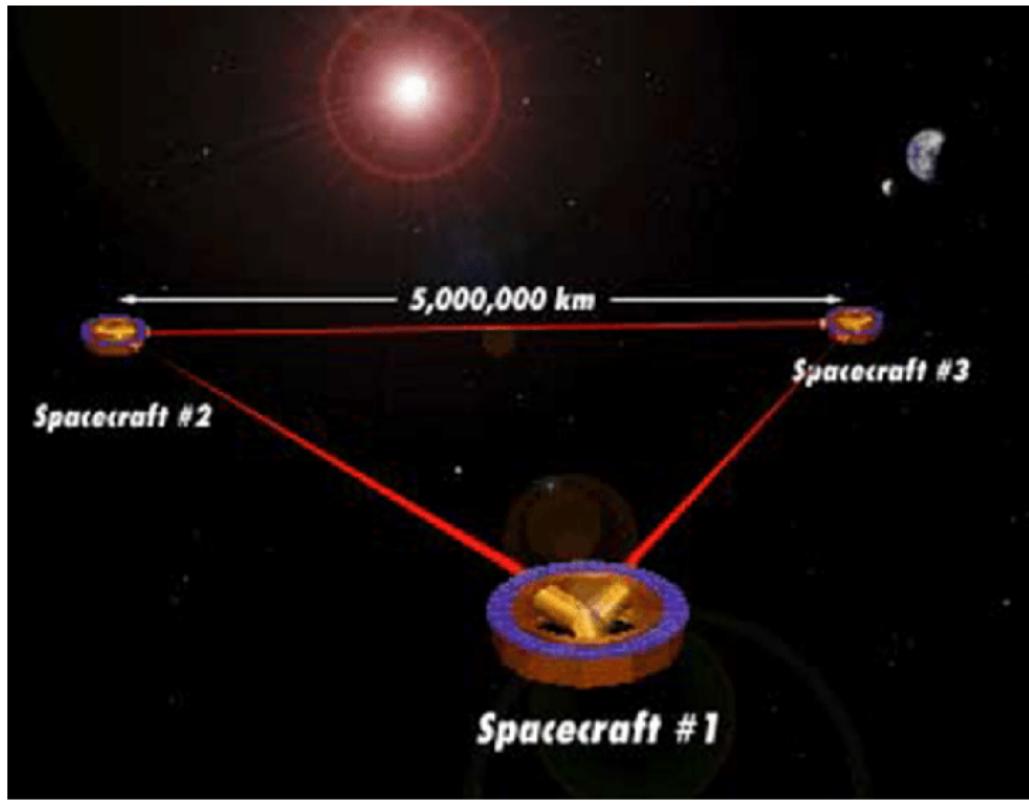
Lühike video LIGO poolt detekteeritud gravitatsioonilainete signaalist. Kui mustade augud lähenevad üksteisele, gravitatsioonilainete sagedus kasvab.
https://www.youtube.com/watch?v=dP6ZWew83_Q

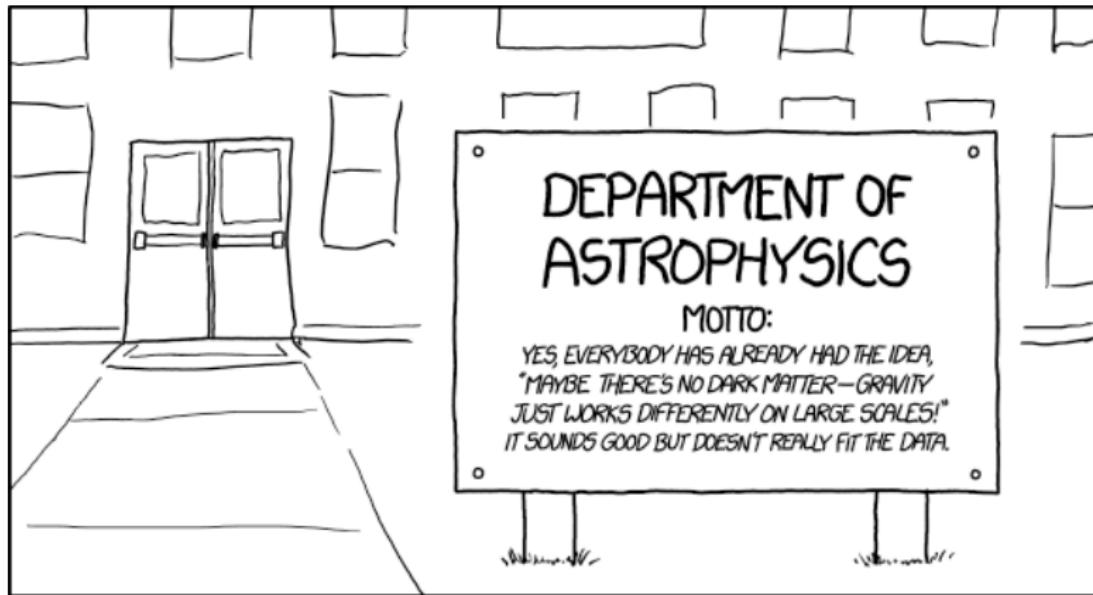
Caltechi video neutron tähtede ühinemisest:

<https://www.youtube.com/watch?v=e7LcmWic10s>

- Gravitatsioonilaine signaal, mille detekteerisid LIGO ja Virgo detektorid (17. august, 2017) ning esimene signaal, mida nähti ka mittegravitatsiooniliste instrumentidega
- Signaali põhjustasid kaks ühinevat neutron tähte galaktikas NGC 4993 ($\approx 44 \text{ Mpc}$ kaugusel)
- 1.7 sekundit peale GW signaali detekteeriti gamma kiirguse signaal ka näiteks Gammakiirguse teleskoobiga Fermi ning üldse nähti sündmust elektromagnetkiirguses 70-nes observatooriumis - märkimisväärne läbimurre "multi-messenger" astronoomias
- "Standardsireenid" annavad meile jälle uue viisi, kuidas saame Hubble'i parameetrit mõõta

LISA - Laser Interferometer Space Antenna





Bullet cluster

Kokkuvõte tume ainest

- Mis me teame tume ainest: osakestel on gravitatsiooniline vastasmõju, liiguvad aeglaselt, ei interakteeru barüonidega (see või väga nõrk vastasmõju) - See ka põhjus miks raske detekteerida kuigi tume ainet ennast on suures koguses.
- Ilma tume aineta ei teki kosmoloogilistes simulatsioonides ka struktuuri, mida näeme universumis. Lisaks sellele, peab tume aine komponent olema "külm" (mitterelativistlik) ja seda juba väga varajases universumis.

Kosmiline Taustkiirgus (CMB)

- A. Penzias ja R. Wilson avastasid 1965. aastal mikrolainelise isotroopse taustkiirguse
- Jälgib väga hästi musta keha spektri kuju - on kõige lähedasem sellele, mis seni vaadeldud loodus
- Musta keha kiirgus on läbipaistmatutel objektidel, mis tähendab, et ka varajane universum pidi olema läbipaistmatu - barüoniline aine oli ioniseeritud
- Oluline kosmoloogiline vihje, mis põhjustas **Suure Paugu teooria** eelistamist üle **statsionaarseisu teooria** - perfektse kosmoloogilise printsibi rikkumine

CMB - Vaatluslik Ajalugu

- Arno Penzias ja Robert Wilson (1965) kasutasid raadio antenni, mis töötas lainepekkusel $\lambda = 7.35 \text{ cm}$
- CMB spektri mõõtmine ei ole kuigi kerge ülesanne, sest H_2O neelab tõhusalt footoneid $\lambda \approx 3 \text{ cm}$
- COBE (Cosmic Background Explorer) satelliit (1989) mõõtis Maa orbiidil olles CMB-d laias laineribas
- WMAP (Wilkinson Anisotropy Probe) (2001) ja Plancki satelliit (2009) suutsid mõõta CMB-d aga veelgi suurema nurklahutusega olles Maa-Päikese L_2 Lagrange'i punktis
- Kosmiline isotroopne musta keha kiirgus on kergesti seletatav kui universum oli kunagi kuum, tihe ja läbipaistmatu \Rightarrow oluline Suure Paugu Teooria töendusmaterjal

COBE Tulemused

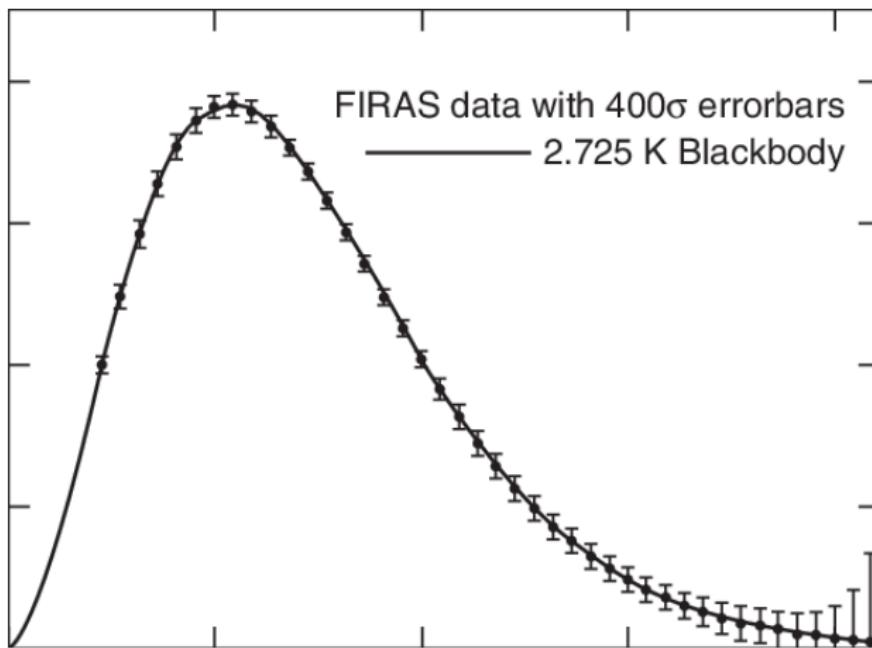
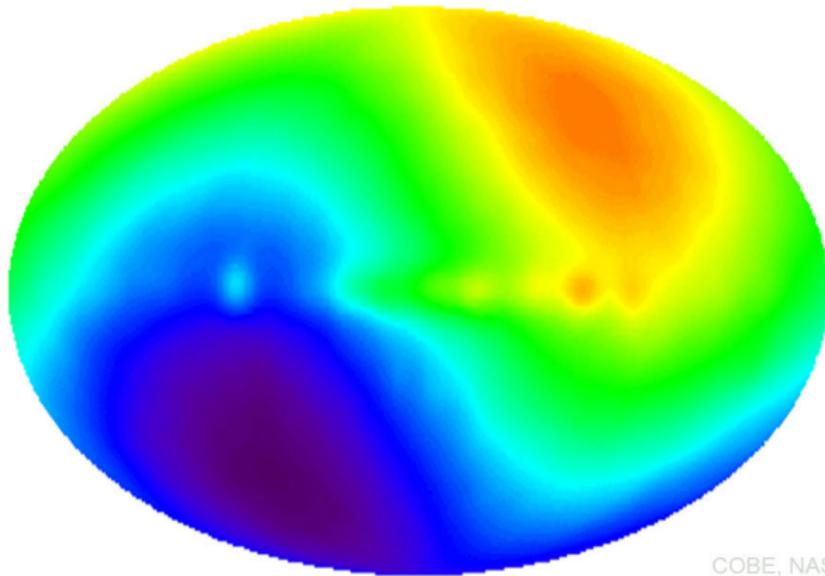


Figure: COBE satelliidid data võrdlus teoreetilise musta keha kiirguse kõveraga.

CMB dipool



COBE, NASA

Figure: Lokaalne Grupp on kiirendumas Virgo klastri suunas, mis omakorda kiirendab Hydra-Centauruse superklastri suunas. Seetõttu on Doppleri nihke tõttu CMB pooles taivas kuumem ning teises pooles külmem. ($\approx \pm 3.5 \text{ mK}$)

WMAP Tulemused

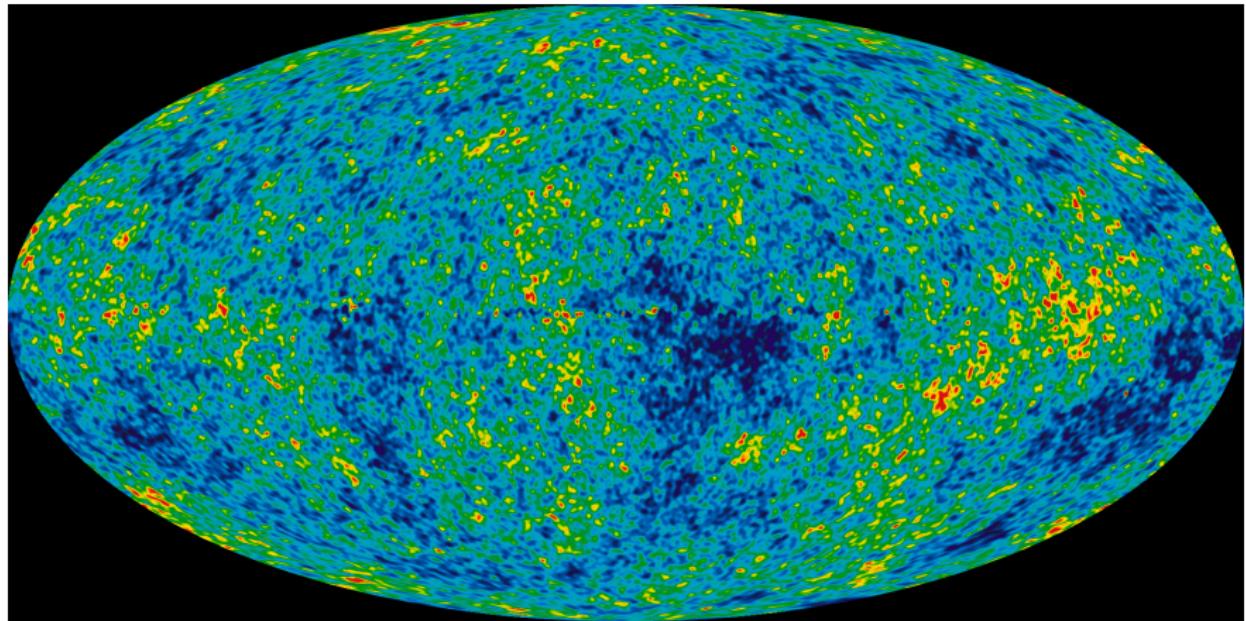


Figure: Pilt WMAP dataset. Temperatuuri fluktuatsioonid on vahemikus $\pm 200 \mu K$.

WMAP vs Planck

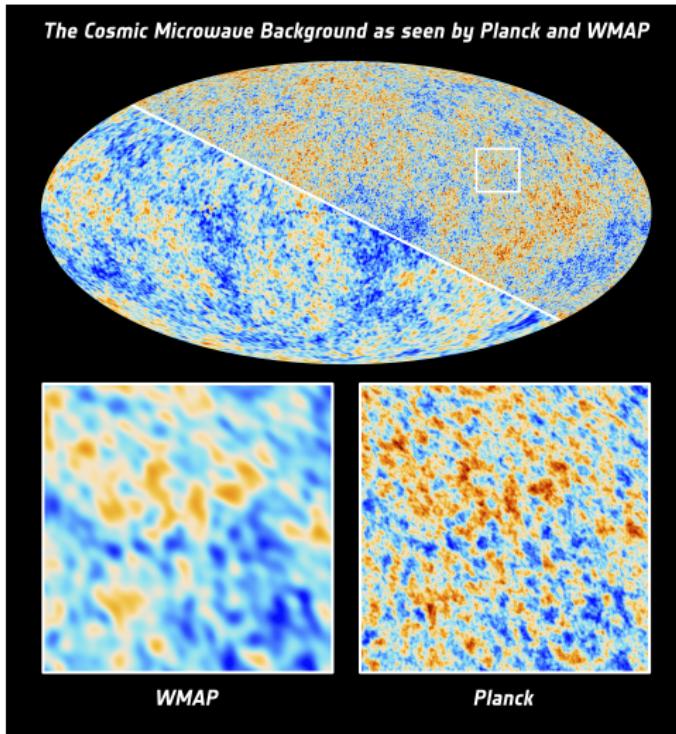


Figure: Võrdlus Plancki ja WMAPi tulemustest. Plancki tulemused on 15 kuu vaatluste põhjal, WMAP-i data põhineb 9 aastat kestnud vaatlustest.

CMB-ga seotud olulised epohhid

Kosmilise taustkiirguse tekke põhjuste selgitamiseks peame uurima lähemalt protsesse, kus barüoniline aine muutub ioniseeritud plasmast neutraalsete aatomitega gaasiks.

Seejuures on kolm üksteisega seotud mõistet, millega räägime lähemalt:

- **Rekombinatsioon** - epohh, mil barüoniline universumi komponent muutub ioniseeritud olekust neutraalseks
- **Footonite lahtisidestus** - ajahetk, mil footonite hajumise sagedus elektronidelt muutub väiksemaks kui Hubble'i parameeter
- **Viimane hajumine** - epohh, mil keskmise CMB footon viimati hajus elektronilt

Tõenäosus, et suvaline footon hajub elektronilt peale lahtisidestumist on väga väike, seega kaks viimast ajahetke on üksteisele väga lähedal.

Footonite lahtisidestus

- Footonid sidestunud elektronidega seni kuni $\Gamma > H$ ehk keskmise vaba tee pikkus väiksem kui Hubble'i teepikkus (c/H)
- Kui $\Gamma < H$, universum muutub läbipaistvaks, sest footonid ei jõua interakteeruda elektronidega enam paisumise tõttu
- Võrdlemisi äkiline protsess, mille põhjustab järsk vabade elektronide tiheduse langemine rekombinatsiooni tõttu

Rekombinatsioon

Rekombinatsiooni epohhi aegne temperatuur sõltub barüonfooton suhtarvust η ja vesiniku ionisatsiooni energiast Q (13.6 eV).

Saha võrrand

$$\frac{n_H}{n_p n_e} = \left(\frac{m_e k T}{2\pi \hbar^2} \right)^{-3/2} \exp\left(-\frac{Q}{k T}\right) \quad (3)$$

Võrrand, mis seob omavahel vesiniku aatomite ning vabade prootonite ja elektronide numbertihedused tingimusel, et fotoionisatsioon on tasakaalus radiatiivse rekombinatsiooniga.

Saha võrrandi saab viia kujule, kus tekib seos X, T ja η vahel, kui kasutada järgmist asendust

$$n_H = \frac{1 - X}{X} n_p, \quad (4)$$

kus X on suhteline ionisatsioon, mis kirjeldab barüonilise komponendi ioniseerituse astet. ($X = 1 \rightarrow$ täiesti ioniseeritud, $X = 0 \rightarrow$ kõik aatomid neutraalsed)

Rekombinatsioon II

Tehtes vajalikud asendused muudetud Saha võrrandis, saame ruutvõrrandi

$$X = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4S}}{2S}, \text{ kus} \quad (5)$$

$$S(T, \eta) = 3.84\eta \left(\frac{kT}{m_e c^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \quad (6)$$

Sättes $X = 1/2$, ja eeldades et $\eta = 6.1 \times 10^{-10}$ on rekombinatsiooni temperatuur

$$kT_{rec} = 0.324 \text{ eV} = \frac{Q}{42} \quad (7)$$

See vastab temperatuurile $T_{rec} = 3760 \text{ K}$ või punanihkele $z_{rec} = 1380$.

Lahtisidestuse aja leidmine

Rekombinatsiooni tõttu vabade elektronide arv kahaneb kiirelt, seega footonite lahtisidestus toimub varsti peale seda.

Footonite hajumise sagedus on antud kui

$$\Gamma(z) = n_e(z)\sigma_e c = X(z)(1+z)^3 n_{bary,0} \sigma_e c \quad (8)$$

Punanihe footonite lahtisidestuse ajal on leitab kui leida Hubble'i parameeter tollel perioodil (mateeria on dominantne komponent) ja seada vastavusse $\Gamma = H$.

Lahtisidestuse punanihkeks saame öelda $z_{dec} = 1090$ ehk kui $T_{dec} = 2970\text{ K}$ ja $t_{dec} = 371000\text{ yr}$

Suhteline ionisatsioon X

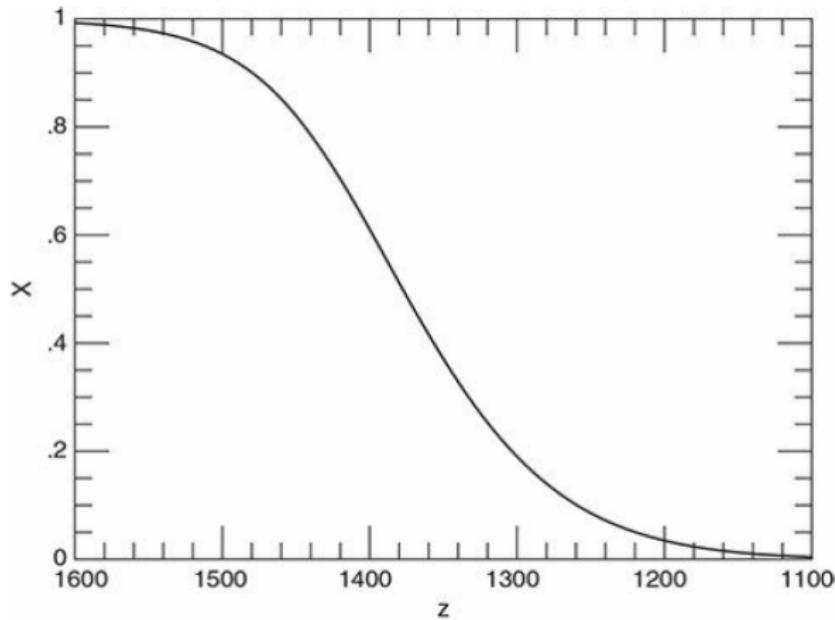
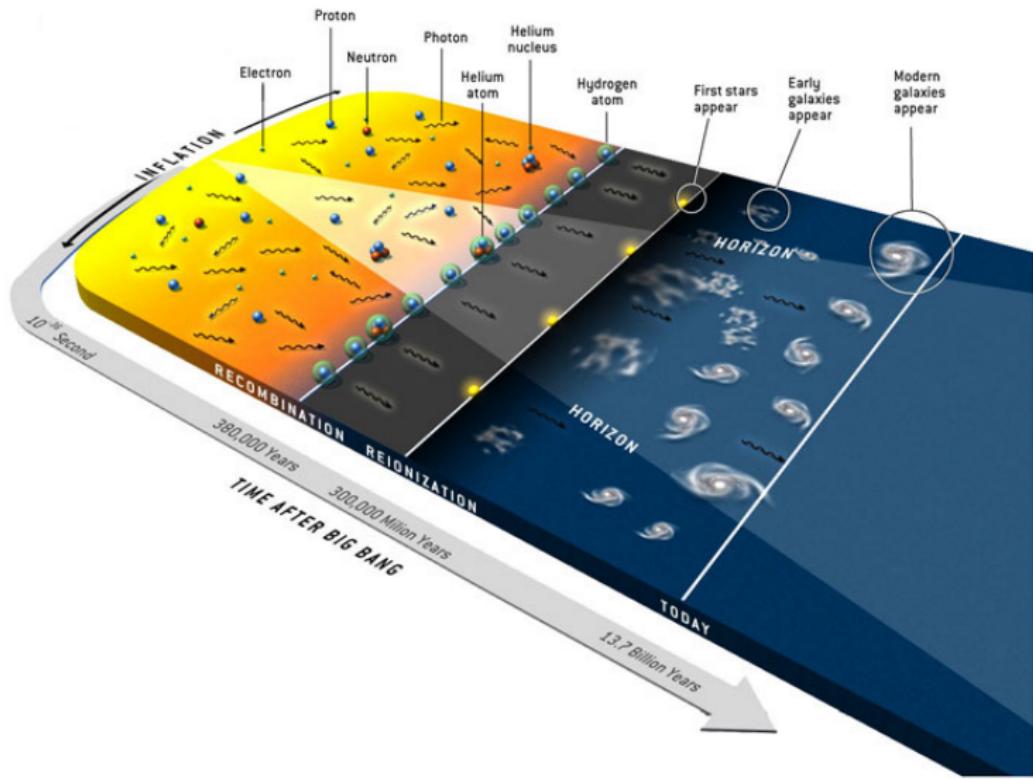


Figure: Suhtelise ionisatsiooni ja punanihke graafik eeldades, et $\eta = 6.1 \times 10^{-10}$.

Varajasest universumist tänapäevani



Temperatuuri fluktuatsioonid I

CMB temperatuuri kaartidel näeme väikese amplituudiga fluktuatsioone, mille on põhjustanud mittehomogeensused viimase hajumise ajal.

Temperatuuri fluktuatsioonid on suurusjärgus

$$\left(\frac{\delta T}{T}\right) \approx 10^{-5}, \quad (9)$$

mis viitab sellele, et ka tume aine tiheduse ja seega gravitatsioonilise potentsiaali kõikumine oli selles suurusjärgus \Rightarrow Varajane universum oli seega väga ühtlane.