

# Sissejuhatus osakestefüüsikasse ja kosmoloogiasse

## Loeng 4: Varajane universum: nukleosüntees, inflatsioon ja struktuuriteke

Sven Põder<sup>1</sup>

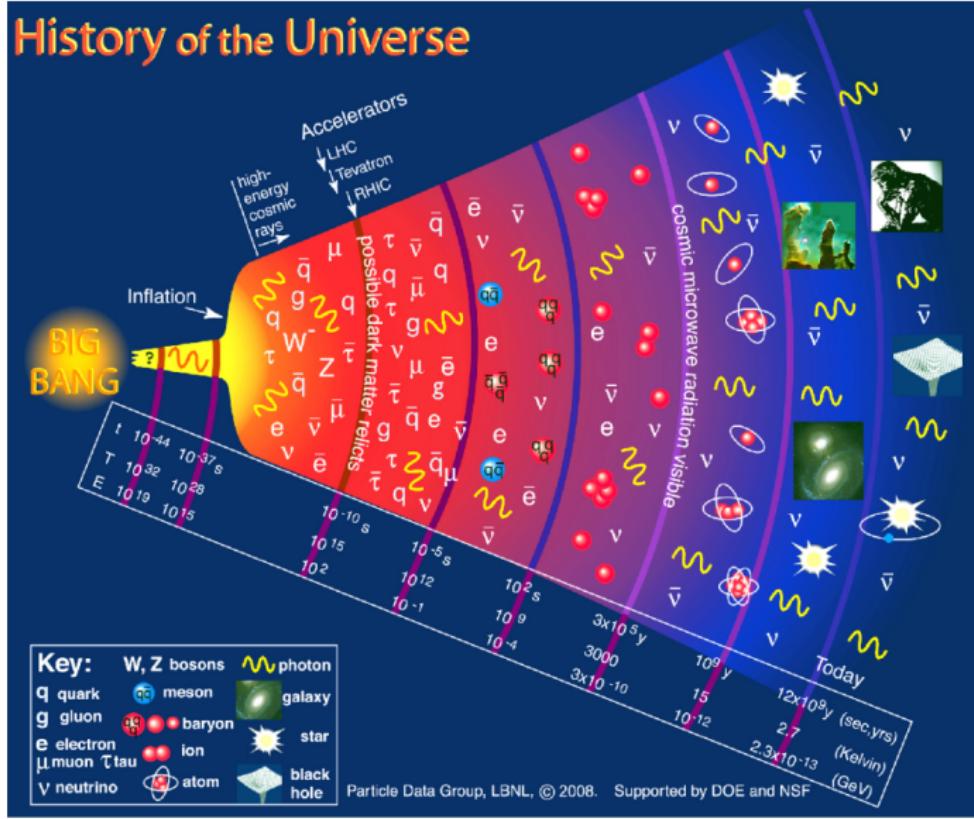
<sup>1</sup>Keemilise ja Bioloogilise Füüsika Instituut (KBF)

<sup>2</sup>Tallinna Tehnikaülikool (TalTech)

TalTech, May 2024

## Universumi Ajalugu

# History of the Universe



# Tuumafüüsika ja Kosmoloogia

Uurides universumi paisumist näeme energia muutust vahemikus:  $E_{kesk}(t_p) \approx 10^{28}$  eV ja  $E_{kesk}(t_0) \approx 10^{-3}$  eV. Osad suurusjärgud on meile huvitavad kui teised, näiteks:

- Rekombinatsiooni ja photoionisatsiooni energia:  $Q = 13.6$  eV
- Tuumasüntees ja -lõhustumine -  $\approx 8$  MeV

Protsessid, mis hõlmavad tuumalõhustamist ja -sünteesi, toimuvad kõrgematel energiatel.

Tuuma **sidumisenergia** B on energia, mis on vaja tuuma lõhustamiseks. Samaaegselt on ta energia, mis kiirgub tuumasünteesil.

# Sidumisenergia nukleoni kohta

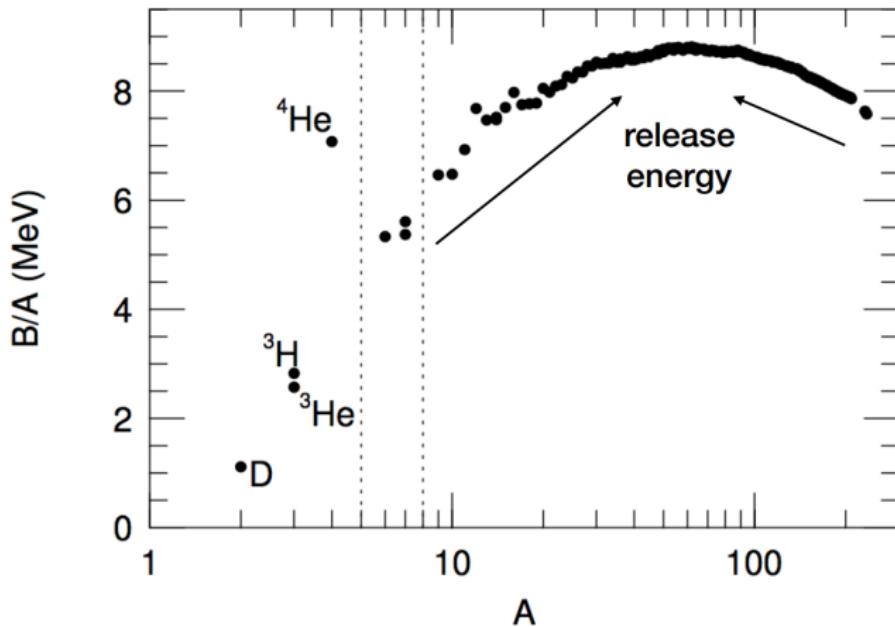


Figure: Tuuma sidumisenergia massinumbri kohta.

# Suur Paugu Nukleosüntees (BBN)

- Universumi paisumise tõttu energia kahaneb deuteroni sidumisenergiani (2.22 MeV), mistõttu toimub tuumasüntees prootonite ja neutronite vahel ← **analoogne rekombinatsiooniga**
- Deuteeriumist raskemate tuumade süntees järjestikustes termotuumareaktsioonides
- Nukleosüntees on väga ebatõhus protsess, mida tõendavad:
  - 3/4 barüonmassist on endiselt  $^1\text{H}$
  - Fe, Ni ainult 0.15% barüonmassist

Ürgse heliumi ja kogu barüonmassi suhe

$$Y_p = \frac{\rho(^4\text{He})}{\rho_{barü}} \quad (1)$$

Päikese pinnalähedased piirkonnad -  $Y_p \approx 0.27$ , üldiselt minimaalne vääratus on aga  $Y_p \approx 0.24$

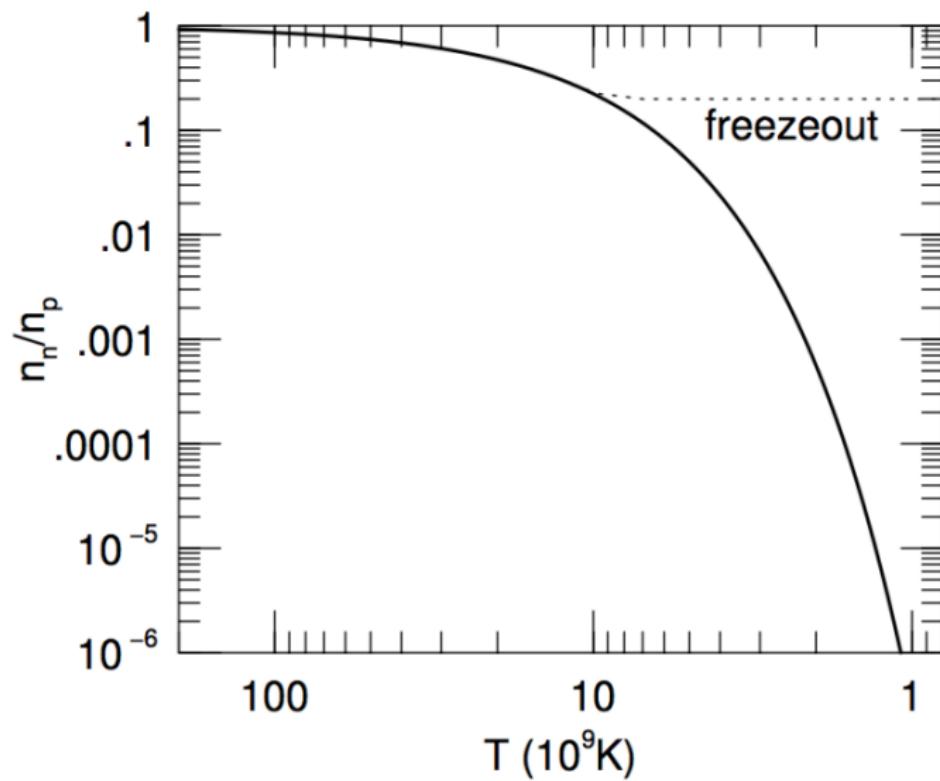
# Enne deuteeriumi sünteesi

- Kõik osakesed olid kineetilises tasakaalus kui universum oli  $\approx 0.1\text{ s}$  vana
- Neutriino ristlõige on väike  $\Rightarrow$  prootonid eelistatud neutronitele
- Ajal kui  $\Gamma = H$  ( $t \approx 1\text{ s}$ ), neutron-prooton arvsuhe "külmub" väärtsusele  $\approx 0.2$  - **väljakülmumine**
- Nukleosünteesil on limiteeritud ajaaken, sest  $T \propto t^{-1/2}$
- Maksimaalne (teoreetiline) ürgse heliumi ( ${}^4\text{He}$ ) massisuhe

$$Y_{max} = \frac{2f}{1+f}, \quad (2)$$

kus  $f = \frac{n_n}{n_p}$ . Kui vaatluslikult kinnitatud väärthus  $Y_p = 0.24 > Y_{max}$ , siis on väga halvasti.

# Väljakülmumine



# Deuteeriumi süntees

Deuteeriumi sünteesi alguseks:

- $\frac{n_n}{n_p} = 0.2$
- Aeg on  $t \approx 2 s$
- Neutriinod lahtisidestunud ülejäävud universumist ning ei interakteeru enam elektronidega

Nukelosünteesis toimub raskemate nukleonide süntees läbi järjestikuste kahe keha reaktsioonide ning oluline esimene samm hõlmab deuteeriumi:

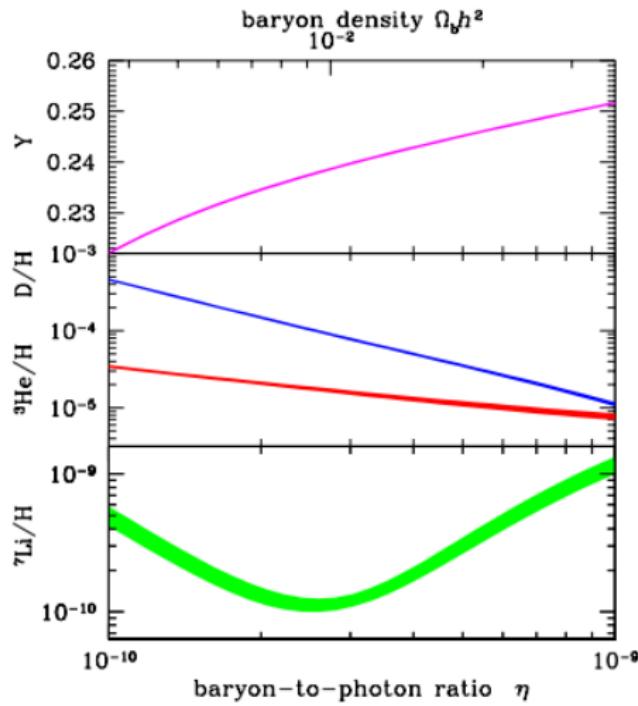


kus  $\gamma$  on sidumisenergia  $B_D$ .

# Raskemad nukleonid

- Peale deuteeriumi tekkimist, saab nukleosüntees edasi kulgeda raskemate nukleonide poole - reaktsioonid on kiired, sest toimuvad läbi tugeva vastastikmõju (suur ristlõige)
- ${}^4\text{He}$  isotoobi juures on takistus - tugev seotus,  $A=5$  juures stabiilseid nukleone ei leidu
- Triitiumile ja heliumile lisaks moodustub ka vähestes kogustes liitiumi ( $\text{Li}$ ) ja berülliumi ( $\text{Be}$ )
- Tekkinud elementide kogused sõltuvad erinevatest füüsikalistest parameetritest - **kõige olulisem neist aga barüon-footon suhtarv  $\eta$** 
  - Kõrgem  $\eta$  väärtus suurendab deuteeriumi sünteesi algtemperatuuri ja seega nukleosüntees kestab kauem → jõuab sünteesida rohkem  ${}^4\text{He}$

# Kergete elementide massisuhe



**Figure:** Kergete elementide massisuhte sõltuvus barüon-footoon suhtavust.  
[Cyburt et al., 2016]

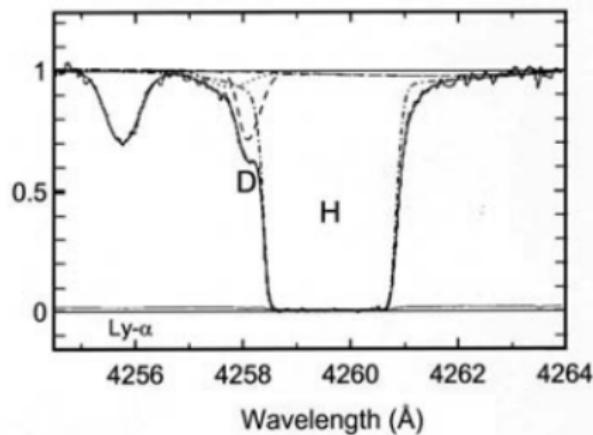
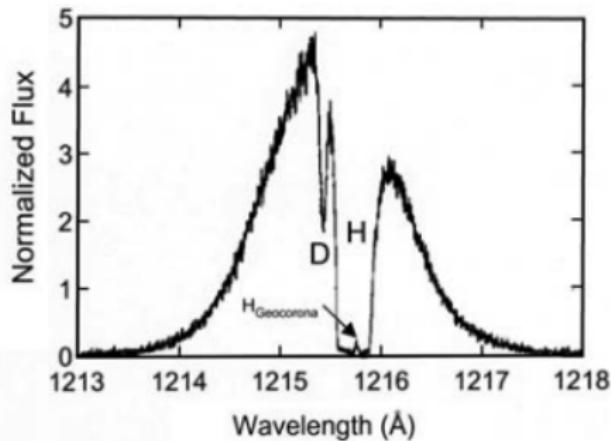
# Vaatlused ja Suure Paugu mudeli kontrollimine

Nukleosüntees on üks vähesid varajase universumi protsesse, millel on otsesed eksperimentaalsed või vaatluslikud tagajärjed. Teoria vastupidavust saame kontrollida vaadeldes kergemate elementide ( $D$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $\text{Li}$ ) ürgseid tihedusi.

Kõige kasulikum element selleks on  $D$ , sest tal on tugev sõltuvus  $\eta$ -st.

- Lokaalses tähtedevahelises tolmus  $D/H \approx 1.6 \times 10^{-5}$
- Galaktikavahelises gaasis on leitud  $D/H = (2.53 \pm 0.04) \times 10^{-5}$
- Kasutades viimast väärust nukleosünteesi võrrandites saame  $\eta = (6.0 \pm 0.1) \times 10^{-10} \leftarrow$  kooskõlas vaatlustega CMB-st!

# Galaktikavahelise aine uurimine



**Figure:** Lyman-alpha absorptsiooni spekter. Vasakul on Lokaalne Tähtedevaheline Pilv (HST). Paremal kvasarite poolt valgustatud galaktikatevaheline pilv. (Keck-10 Telescope)

# Kommentaare nukleosünteesist

Nukleosüntees on lõppenud ajahetkeks  $t \approx 1000\text{ s}$

- Temperatuur oli siis  $T \approx 3 \times 10^8\text{ K}$
- Peaaegu kõik barüonid on kas prootonite või  ${}^4\text{He}$  kujul
- Reageerimata neutronid lagunevad prootoniteks -  $\tau \approx 880\text{ s}$

# Barüon-Antibarüon Asümmeetria

Nukleosünteesist teame, milline oli Universum kui  $T_{nuc} \approx 7.6 \times 10^8 K$ .

- $\eta$  on väga väike  $\approx 6 \times 10^{-10}$  - Miks?
- Universum eelistab anti-barüonide asemel barüone - Miks?

Standard Mudel ennustab võrdsest kvarke ja anti-kvarke

Kui universumi temperatuur  $> kt \approx 150 MeV$ , ei olnud kvargid barüonideks kujunenud ning moodustasid kvarkidest "suppi" ning esimestel mikrosekunditel toimus paari tootmine ja annihilatsioon

Järelejäänud kvarke ümbritses eelnenuud annihilatsiooni protsessidest moodustatud footonid.

# Barüogenees

Barüon-antibarüon asümmeetria tekkimiseks peavad olema täidetud 3 tingimust, mida nimetatakse Sakharovi tingimusteks:

- Barüonnumbri sümmeetria rikkumine
- C ja CP sümmeetria rikkumine
- Soojusliku tasakaalu kadumine

Barüogeneesi mehhanism võib olla seletatav seega mingisuguse massiivse osakese olemasoluga, mida universumi jahtumise tõttu pole võimalik enam luua, ning mille lagunemine rikub nii barüonnumbri kui C/CP sümmeetriat.

# Suure Paugu problemaatika

Kuumaa Suure Paugu mudelil on kolm olulist probleemi:

- Lameduse probleem - universum on lame ja kunagi oli veel lamedam.
- Horisondi probleem - universum on homogeenne ja isotroopne ja oli kunagi veel homogeensem ja isotroopne.
- Monopooli probleem - universumis puuduvad monopoolid.

# Lameduse probleem

- Lameduse probleemi saame uurida kui kasutame Friedmanni võrrandit kujul, mis seob omavahel ruumi kõveruse ja tiheduse parameetri  $\Omega$
- CMB ja la supernootade vaatlused annavad:

$$|1 - \Omega_0| \leq 0.005 \quad (4)$$

Miks on ta nii lähedal 1-le? Probleem süveneb kui ekstrapoleerime  $\Omega(t)$  ajas tagasi.

- Öelda, et see on kokkusattumus ei ole rahuldav - oleks vaja leida füüsikaline mehanism, mis "lamendaks" universumi tema varajases ajaloos

# Horisondi probleem

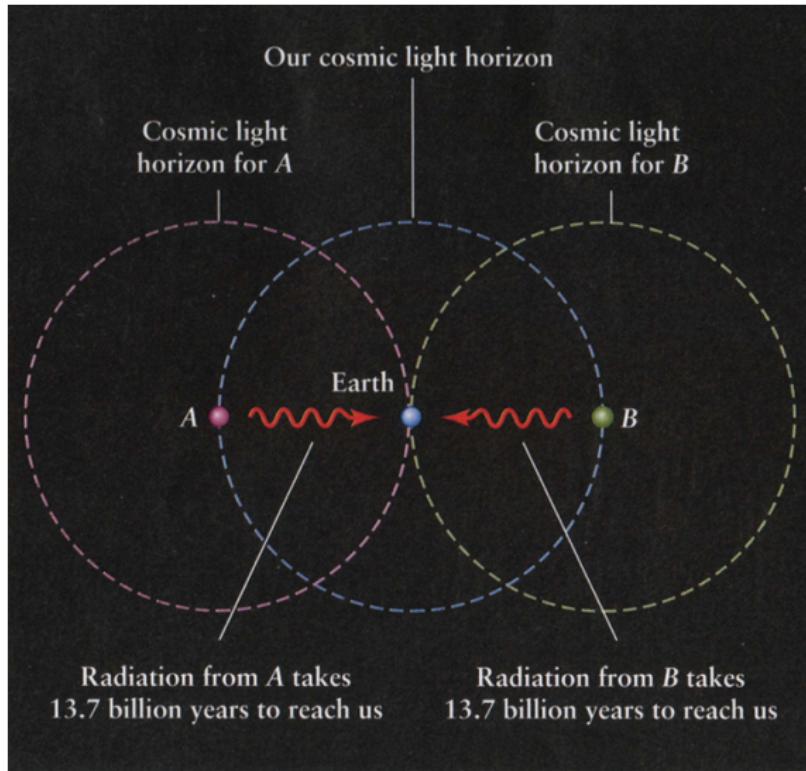
Universum on peaaegu homogeenne ja isotroopne väga suurte skaaladel -  
Miks on see probleem?

- Universumil ei ole kohustust meile asju kergeks teha
- Probleemi näeme täpselt kui kujutama kahte vastastikust punkti viimase hajumise pinnal. Omakaugus selleni on:

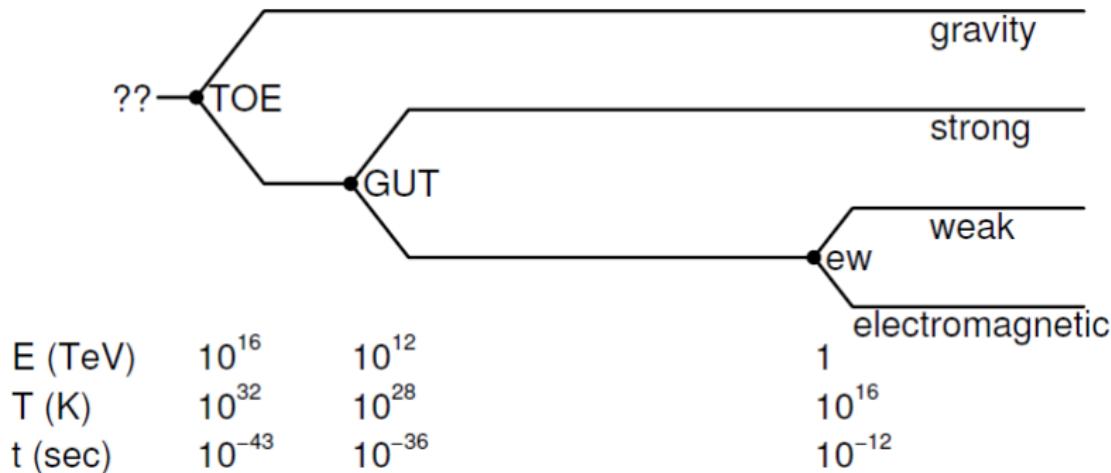
$$d_p(t_0) = c \int_{t_{ls}}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = 0.98 d_{hor}(t_0) \quad (5)$$

- Seega, kaks vastastikust punkti on üksteisest kaugusel  $1.96 d_{hor}(t_0)$

# Kosmiline horisont



# Monopooli probleem I



# Monopooli probleem II

- GUT ennustab, et universumis toimus **faasisiire** kui temperatuur langes alla  $T_{GUT} = 10^{28} K$
- Faasisiirded on seotud spontaanse sümmeetria murdmisega
  - Näiteks, enne  $t_{gut}$  on sümmeetria elektonõrga ja tugeva jõu vahel
- Faasisiirded põhjustavad **topoloogilisi defekte**, mis võivad olla erinevate dimensioonidega
  - 0D - Magnetilised monopoolid
  - 1D - Kosmilised stringid
  - 2D - Domeeni piir
- GUT teoriast oodati, et sümmeetria murdumine põhjustab punktilaadseid defekte, mis käituvad kui magnetilised monopoolid

# Inflatsiooni lahendus

- Alan Guth tutvustas inflatsiooni, et lahendada lameduse, horisondi ja monopooli probleemid
- Inflatsioon** - hüpotees, et väga varajases universumis oli ajajärk, kus toimus kiirenev ja eksponentsiaalne paisumine ( $\ddot{a} > 0$ )

$$a(t) \propto e^{H_i t} \quad (6)$$

- Inflatsiooniline epohh on ajavahemikus  $10^{-36}$  kuni  $10^{-32}$  s
- Saab mõelda kui ajast, kui ajutiselt domineeris universumis mingisugune positiivne kosmoloogiline konstant  $\Lambda_i$ , millel  $w = -1$

# Struktuuritekke alged

Ürgsed tiheduse fluktuatsioonid annavad algtingimused struktuuri loomiseks universumis

- Eksponentisaalne paisumisteguri suurenemine põhjustab inflatoni välja kvantfluktuatsioonide väljavenitamist makroskoopilistele skaaladele
- Fluktuatsioonide omadusi uuritakse CMB anisotroopsuse ja galaktikate punanihke vaatluste abil- olulised ei ole konkreetsed tiheduse ekstreemumid aga pigem välja  $\delta(r)$  statistilised omadused
- Sarnaselt CMB temperatuuri puhul huvitab meid pigem  $\delta(T)/T$

# Suureskaalaline struktuuriteke

- Kosmoloogias mõeldakse **suureskaalalise struktuuri** all üksikutest galaktikatest suuremaid struktuure
- Kaardistades galaktikaid suurte punaniheteni näeme, et nad paiknevad superklastrites, mida ümbritsevad tühimikud
  - Superklastrid ise on võrdlemisi lineaarsed või lamedad struktuurid, mis alles tänapäeval kollapseeruvad enda gravitatsiooni tõttu
  - Klastrid paiknevad superklastrite sees ja nad kollapseerunud süsteemid - võrdlemisi tasakaalus
  - Filamendid ja tühimikud nende ümber moodustavad kärgja või "mullitava" kosmilise võrgustiku
- Gravitatsiooniline ebastabiilsus võimendab initsiaalseid tiheduse perturbatsioone ning on struktuuritekke peamine mehanism

# 2dF Galaxy Redshift Survey

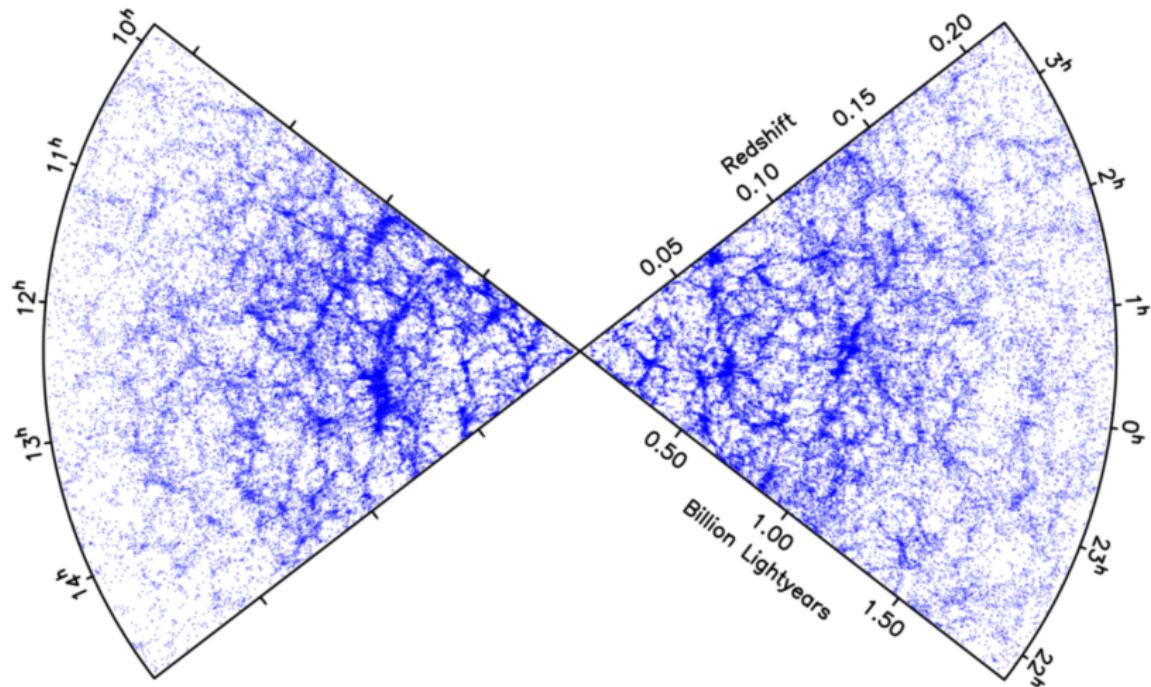


Figure: Galaktikate jaotused suurel skaalal.

# Külm ja soe tumeaine

Ajal  $t_{rm} \approx 5 \times 10^4$  yr tiheduse perturbatsioonide amplituud hakkab kasvama märkimisväärselt. Perturbatsionide olemus (võimsusspektri kuju) oleneb tugevasti tumeaine omadustest.

- Külm tumeaine - osakesed on mitterelativistlikud varakult (nt. WIMP, aksion)
- Soe tumeaine - osakesed on relativistlikud peale lahtisidestumist teistest universumi komponentidest (nt. neutriinod)

"Külm" või "soe/kuum" tumeaine vihjab osakeste termilistele kiirustele konkreetsetel universumi ajaloo hetkedel.

# Külm ja soe tume aine

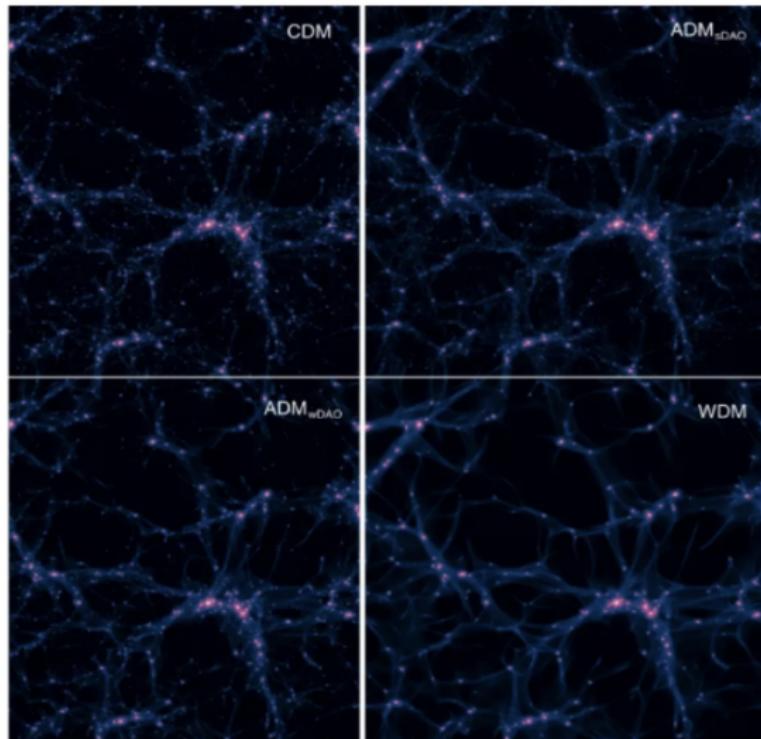


Figure: Tumeaine halod erinevates mudelites.

# Struktuuritekke sõltuvus tumeainest

- Kui tume aine oleks kuum, siluks ta väikeste skaalade aine tiheduse ebaühtlusi liiga palju ning esimesed kujunenud struktuurid oleksid superklastrid
  - Klastrid ja galaktikad tekisid siis superklastrite fragmenteerumisel
  - Sellise stsenaariumi puhul öeldakse, et struktuur kujuneb **ülevalt alla**
- Teame, et enamus tume ainest peab olema külm tume aine, sest sel juhul tekib suureskaalaline struktuur **alt üles**:
  - Kõige vanemad struktuurid universumis ei ole superklastrid - nad alles kollapseeruvad
  - Galaktikad on eksisteerinud vähemalt  $z \approx 10$  ajast

# Galaktikate jaotused vaatlustes ja simulatsioonides

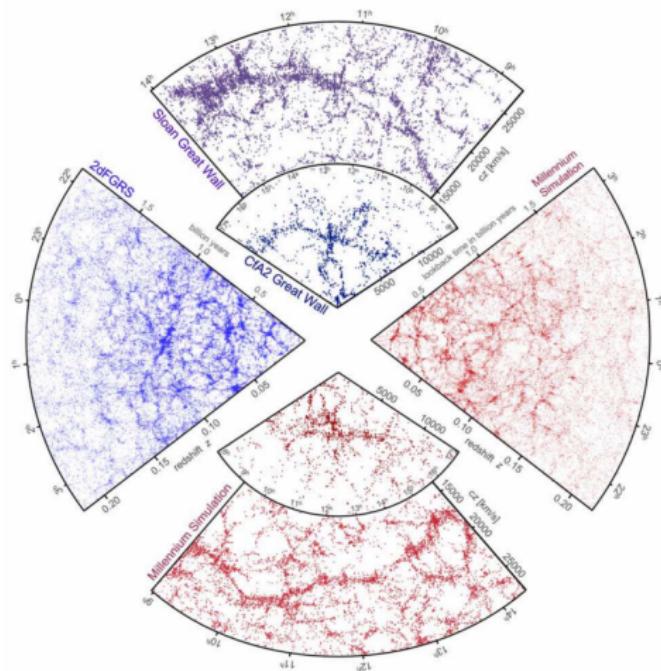


Figure: Galaktikate jaotuste vaatlusandmed võrreldes Millenniumi simulaatsiooniga.

# Barüon-akustilised ostsillatsioonid (BAO)

- Varajases barüon-footon plasmas põhjustab gravitatsioon suurema tihedusega piirkondi kokku tömbumba, mis seejärel uuesti paisuvad suurenenud rõhu tõttu - tekivad ostsillatsioonid, mis on analoogsed helilainetele
- Need akustilised lained moodustasid nö. kerad, mis levisid kiiresti ning "tempeldati" mateeria jaotusse väga varajases universumis
- See video iseloomustab jälgje, mis BAOd jätavad galaktikate jaotusele:  
<https://www.youtube.com/watch?v=jpXuYc-wzk4>

# BAO piik SDSS andmetes

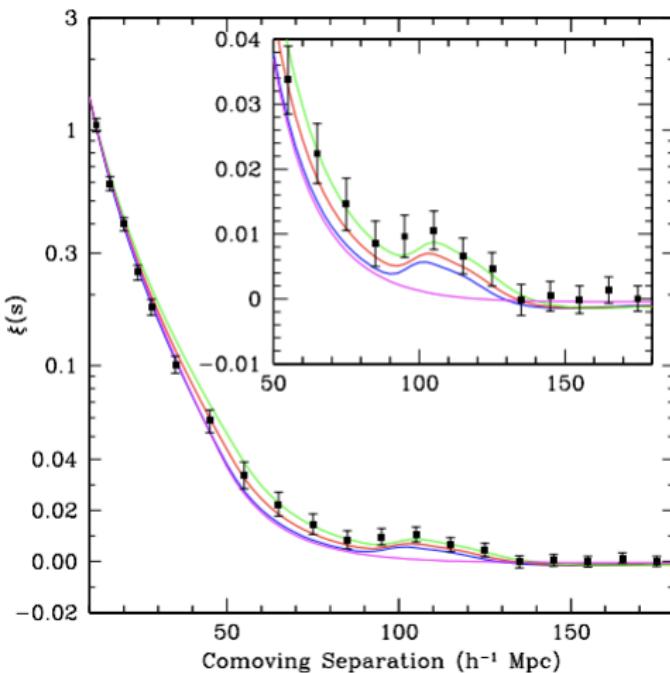


Figure: BAO piik, mis tuvastati SDSS andmetes. [Eisenstein et al., 2005]

# Standardne Kosmoloogiline Mudel ( $\Lambda$ CDM)

Tänapäevane kosmoloogiline raamistik, mida toetab lai vaatluste pagas ning kus peamised energiatiheduse komponendid on:

- Kosmoloogiline konstant ( $\Lambda$ )
- Mitte-relativistlik ehk külm tumeaine (CDM)

$\Lambda$ CDM alguseks võib lugeda 1990-ndaid ning nüüd peetakse teda kosmoloogia standard mudeliks.

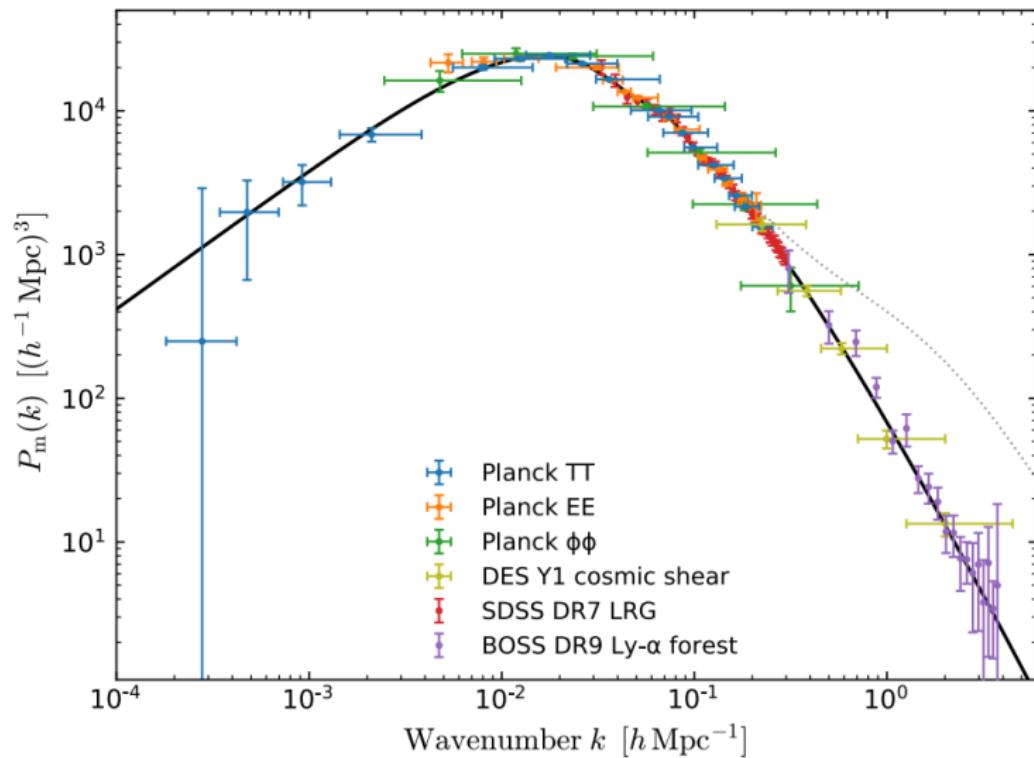
# $\Lambda$ CDM edulugu

Vaatluslikke asjaolusid, mis toetavad  $\Lambda$ CDM kosmoloogiat, on mitmeid:

- CMB anisotroopsus ja polarisatsioon
- Suureskaalaline struktuur (galaktikate punanihke vaatlused)
- Barüon-akustilised ostsillatsioonid (BAO)
- Läbi BAO ja tüüp Ia Sne uuritud universumi paisumise ajalugu
- Kergete elementide ürgsed kogused
- Galaktikaparvede kogused
- Galaktikate omaduste ja tekkeprotsessid

$\Lambda$ CDM on seega oluline näide täpsuskosmoloogia edukusest, kus vaatlusandmed on suure arengu teinud nii mahus kui täpsuses.

# Plancki kompileeritud võimsusspekter



# Mida teame siiani

- $t \ll 10^{-5} \text{ s} \Rightarrow \textbf{Inflatsioon}$ . Periood, kus nõrgalt sidestunud skalarvälja potentsiaalne energia põhjustab kiirendatud paisumise. Lõppeb kui skalarvälja potentsiaalne energia konverteeritakse osakesteks, mis termaliseeruvad ja tekib kvargi "supp".
- $t \ll 10^{-5} \text{ s}$  kuni  $t \approx 10^{-5} \text{ s} \Rightarrow \textbf{Kvargi "supp"}$ . Periood, kus on enamasti soojslik tasakaal, kuid kus toimub kaks mitte-tasakaalulist sündmust: barüogenees ja tume aine osakeste loomine.
- $t \ll 10^{-2} \text{ s}$  kuni  $t \approx 200 \text{ s} \Rightarrow \textbf{Nukleosüntees}$ , mille käigus tekib võrdlemisi suures koguses  ${}^4\text{He}$  ja väiksemates kogustes D,  ${}^3\text{He}$  ja  ${}^7\text{Li}$ .

- $t \approx 64\,000 \text{ yr} \Rightarrow$  Mateeria muutub domineerivaks komponendiks ning barüonid langevad gravitatsiooni potentsiaaliaukudesse, mis tekivad CDM tõttu. Akustilised ostsillatsioonid.
- $t \approx 380\,000 \text{ yr} \Rightarrow$  Tekivad neutraalsed aatomid. Footonite **lahtisidestumine/viimane hajumine** ning tekib CMB. Struktuur hakkab moodustama hierarhiliselt: galaktikad  $\rightarrow$  galaktikaparved  $\rightarrow$  superklastrid
- Umbes 5 Gyr tagasi  $\Rightarrow$  **Kosmiline kiirendus**. Kosmoloogiline konstant ületab tumeaine gravitatsiooni ning jõuame tänapäevasesse perioodi, kus universumi paisumine kiireneb ning edasine suuremate struktuuride loomine on takistatud

Mõned olulisemad lahendamata mõisatused  $\Lambda$ CDM kosmoloogias:

- Milline osakese mudel seletab ära tume aine olemus?
- Mis on tume energia olemus?
- Missugune füüsika peitub inflatsiooni taga?
- Milline võiks olla standardne barüogeneesi mudel, mis oleks ka vaatluslikult kontrollitav?