

A complex, white, web-like structure resembling a cosmic web or a dense network of fibers, set against a black background. The structure consists of many interconnected, thin, white lines that form a mesh-like pattern, with some lines being thicker than others, creating a sense of depth and complexity.

$\Lambda?$ CDM

Gert Hütsi
KBFI

UURIJA-PROFESSORITE KONVERENTS

9. detsembril 2025

1. Intro

2. Λ CDM

3. DESI: Λ ?

SISSEJUHATUS

Üldrelatiivsusteooria & kosmoloogiline printsiip

- Einsteini võrrandid

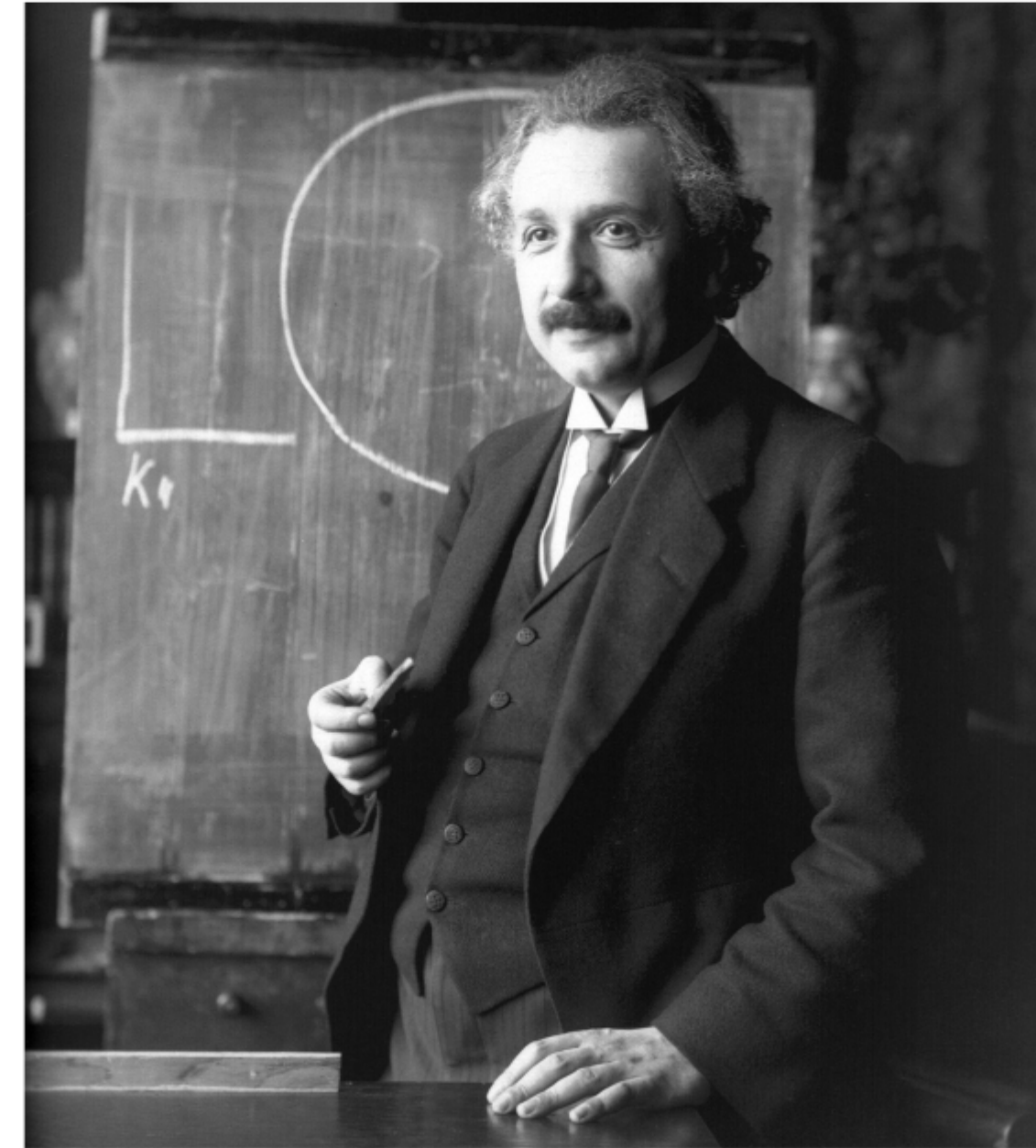
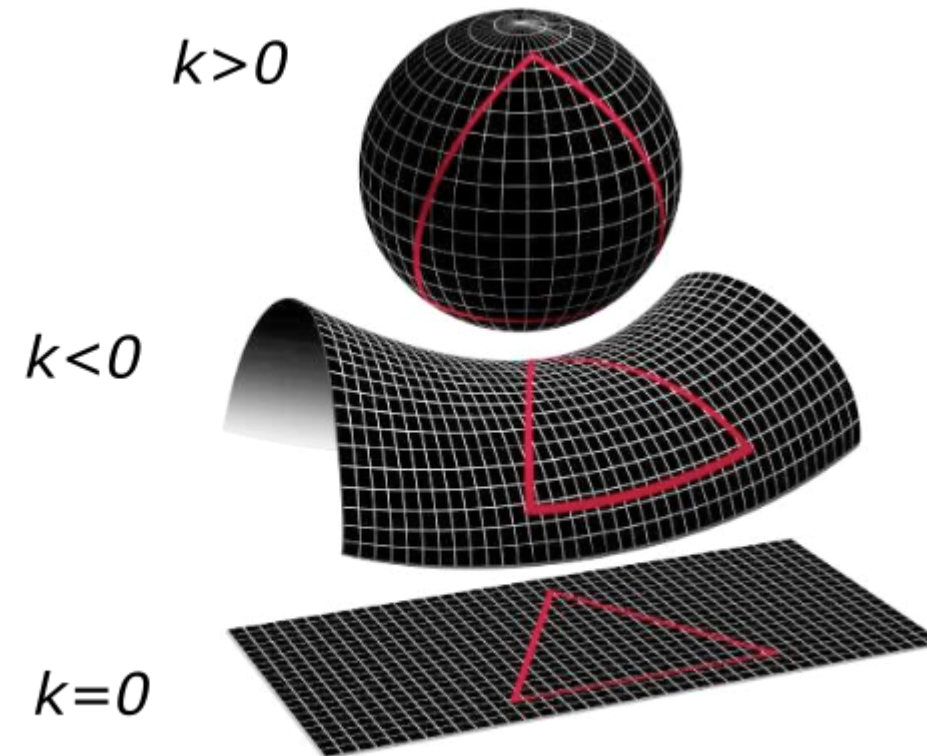
$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\mathcal{R}g_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

- Kosmoloogiline printsiip = homogeensus & isotroopia $\implies$ FLRW meetrika

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu = dt^2 - a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

- ruumilisi koordinaate skaleerib **mastaaptegur** $a(t)$: $a(t_0) = 1$, $x_{\text{phys}}^i = a(t)x_{\text{com}}^i$

- 3-ruumi kõverust kirjeldab parameeter k :



[Albert Einstein (1879–1955)]



[Alexander Friedmann (1888–1925)]

Friedmann-Lemaître võrrandid

- $G_{00} = 8\pi GT_{00}$ annab **FL võrrandid**

$$H^2 \equiv \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$



[Georges Lemaître (1894–1966)]

- Tihedused antakse enamasti **kriitilise tiheduse** kaudu

$$\Omega_I \equiv \frac{\rho_{I,0}}{\rho_{\text{crit},0}} \quad \Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \quad \Omega_k \equiv -\frac{k}{H_0^2 a^2}$$

$$\rho_{\text{crit},0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1.9 \times 10^{-29} h^2 \text{ g cm}^{-3}$$

- Need rahuldavad järgmist **sulgumistingimust**:

$$\Omega_{\text{tot}} \equiv \{\Omega_r \equiv \Omega_\gamma + \Omega_\nu\} + \{\Omega_M \equiv \Omega_b + \Omega_{\text{cdm}}\} + \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_k .$$

- **FL** saab kirjutada siis kujul:

$$H^2(a) = H_0^2 [\Omega_r a^{-4} + \Omega_M a^{-3} + \Omega_k a^{-2} + \Omega_\Lambda]$$

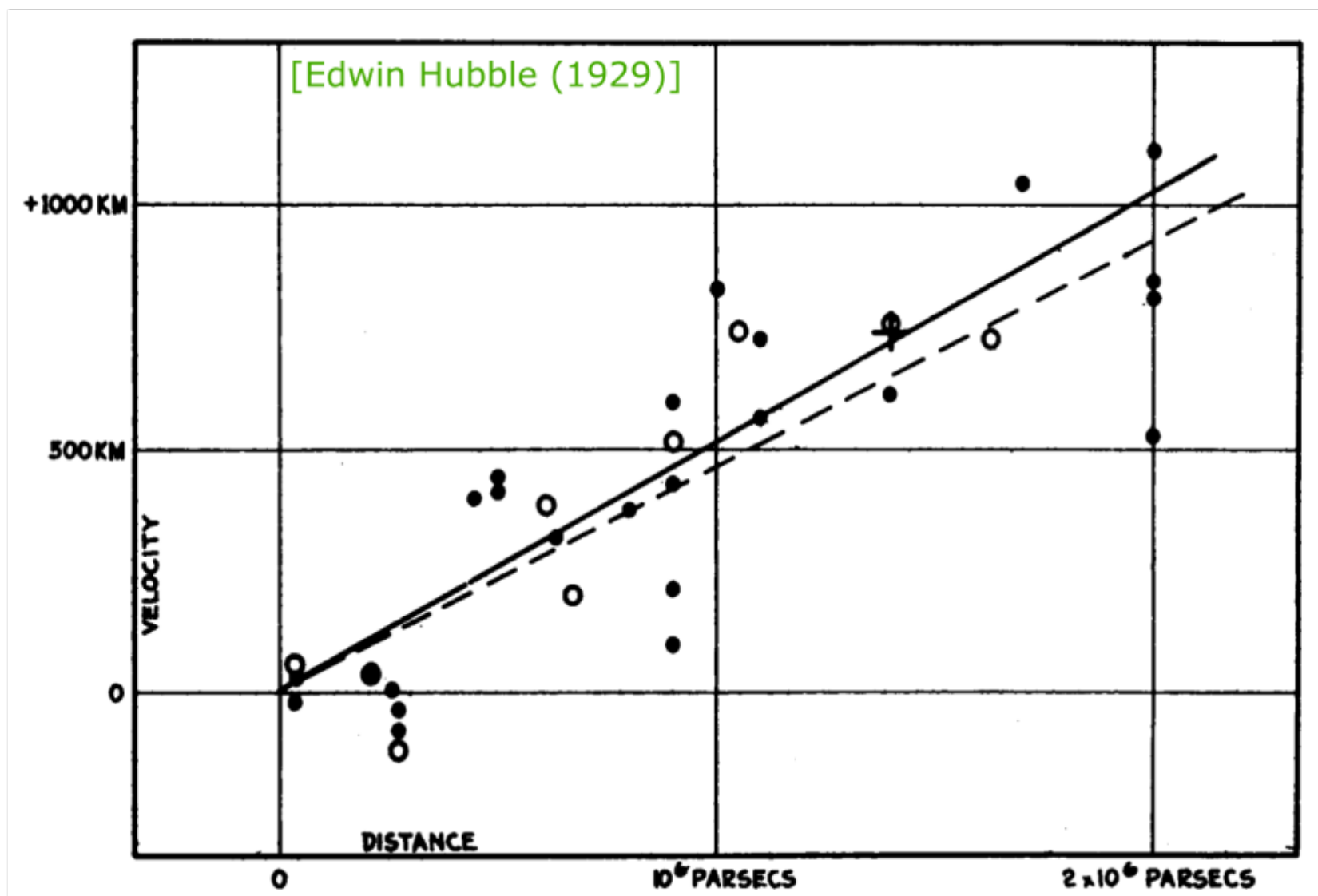
Hubble-Lemaître seadus

- Hubble'i konstant H_0 mõõdab Universumi praegust ($z=0$) paisumiskiirust

$$v_{\text{phys}} = \frac{dx_{\text{phys}}}{dt} = a \frac{dx_{\text{com}}}{dt} + \frac{\dot{a}}{a} x_{\text{com}} \equiv v_{\text{pec}} + H_0 D$$

$$v_{\text{flow}} \simeq cz \simeq H_0 D$$

$$1 + z \equiv \frac{1}{a}$$



[Edwin Hubble (1889–1953)]

- Kehtib vaid piisavalt suurtel kaugustel $\gtrsim$ mõnikümme Mpc! Vastasel juhul on pekuliaarkiirused olulised

MINNES AJAS TAGASI:
KUUM ALGOLEK!



Big Bang vs Steady State

- 1931 — Lemaître'i „ürgaatomide idee” — kosmilised kiired selle lagunemise jäänuk



[George Gamow (1904—1968)]

- 1946 — George Gamow — Suure Pangu nukleosünteesi idee
- 1948 — kuulus „Alpher-Bethe-Gamow” töö
- 1948 — Alpher & Herman — 5K reliktkiirguse ennustus

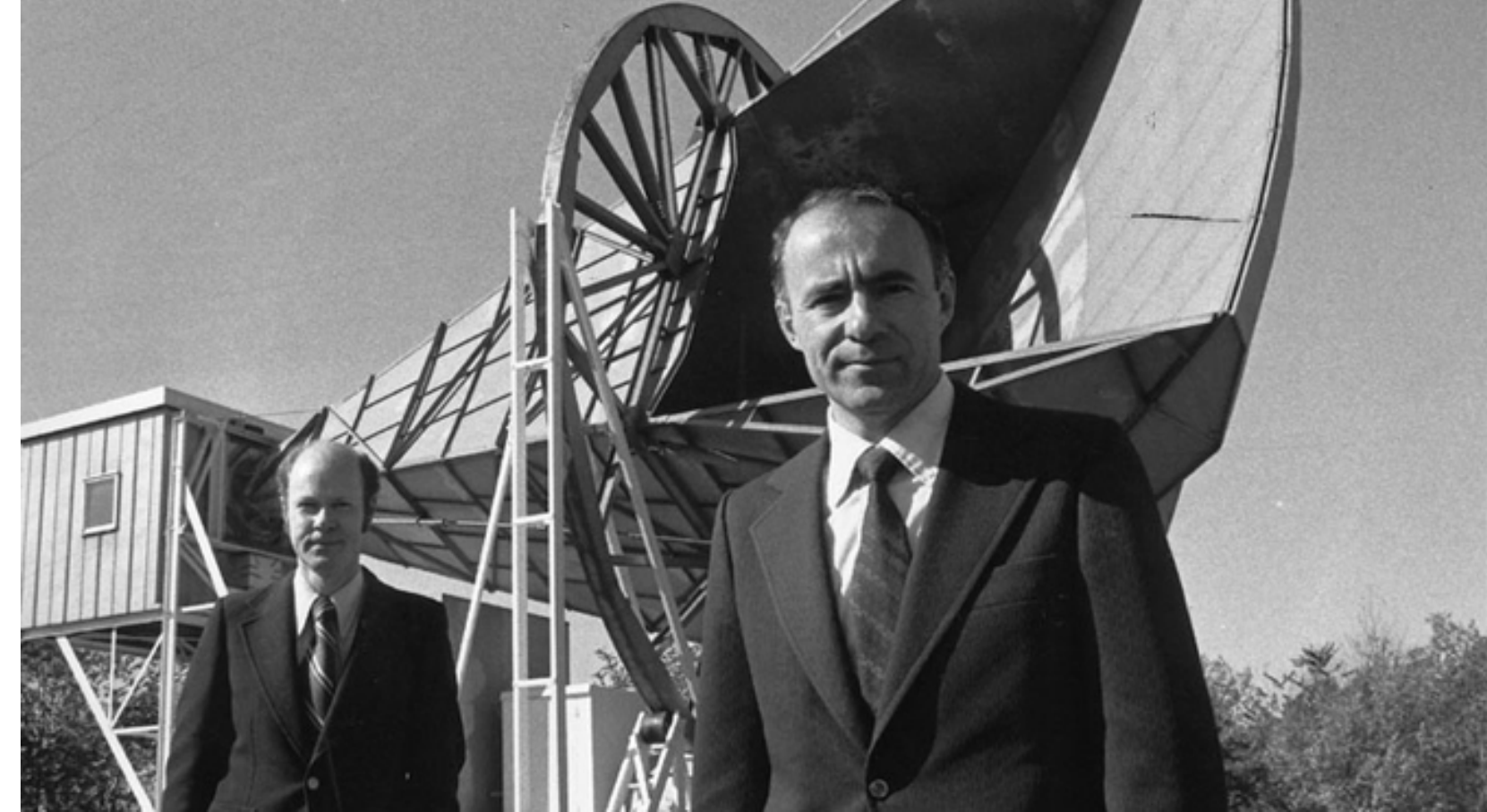


[Fred Hoyle (1915—2001)]

- Statsionaarne kosmoloogia — Hoyle & Bondi & Gold
- Täielik kosmoloogiline printsiip — KP aegruumi jaoks: KP + aja homogeensus
- Ainet peab pidevalt juurde tekkima
- Mitte kõik ühe korraga nagu Suure Pangu puhul
- Big Bang — Fred Hoyle — BBC 1949 — põlastav väljend „algplahvatuse” kohta

Kosmilise reliktkiirguse avastamine

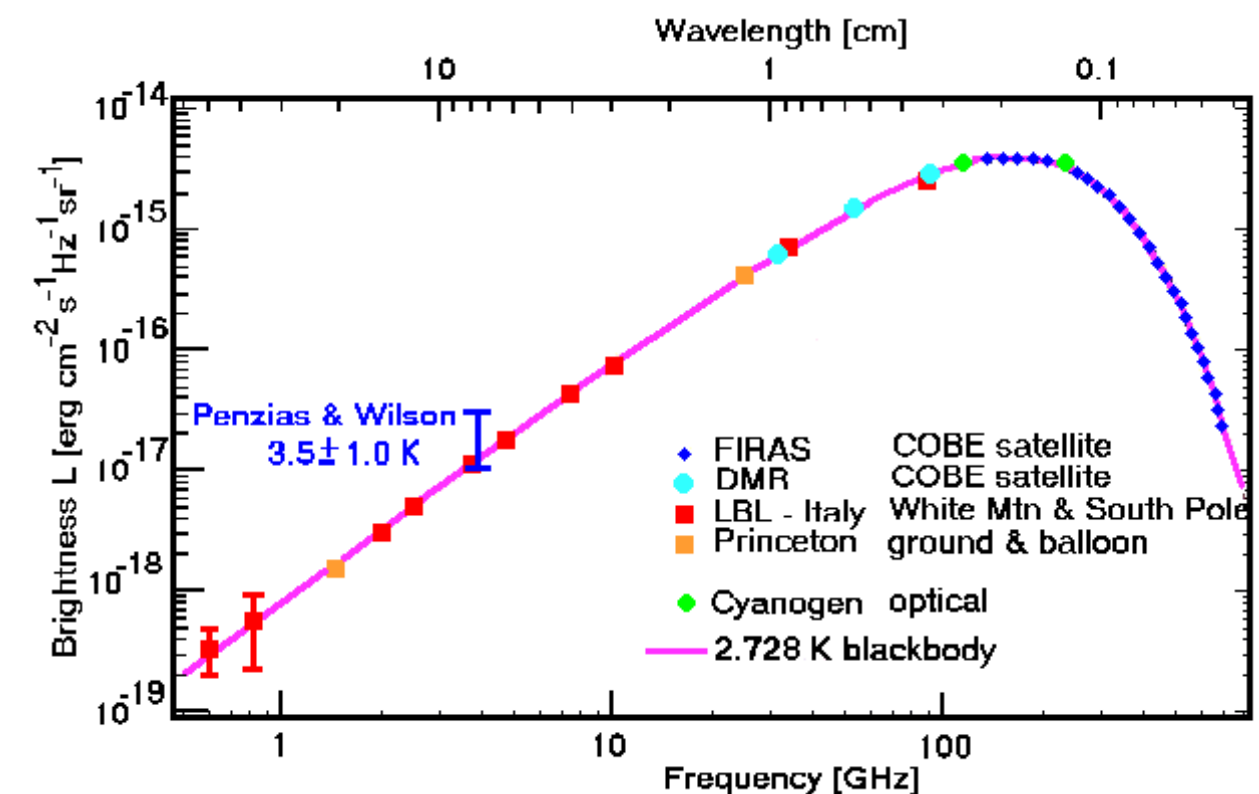
- Penzias & Wilson 1964 — „juhuslik” avastus
- 1978 Nobeli füüsikapreemia
- Princetoni rühm Robert Dicke'i juhtimisel jäi veidi hiljaks



[Robert Wilson (1936—), Arno Penzias(1933—2024)]

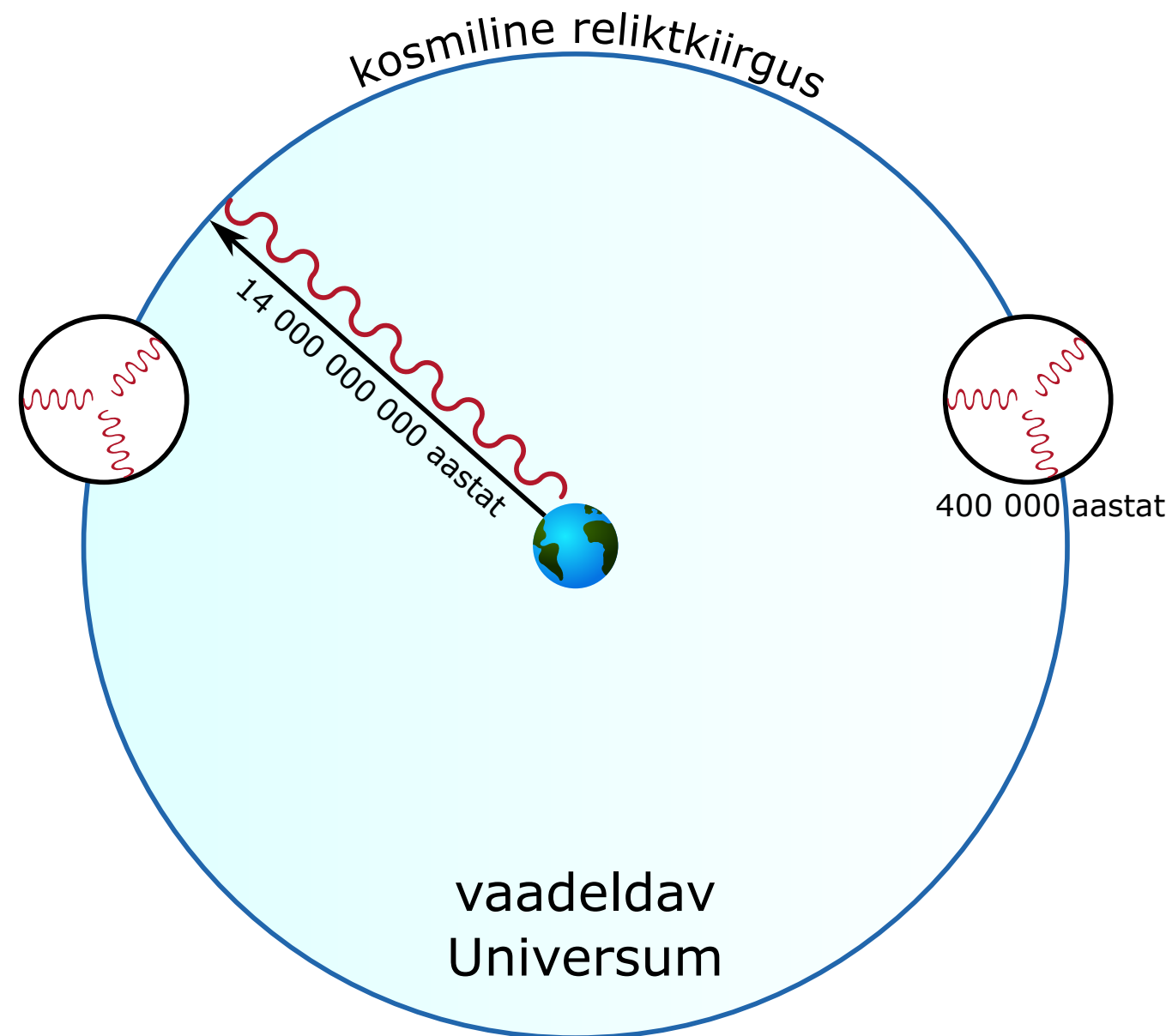
Suure Paugu teooria üldine heakskiit!

- CMB avastamine oleks võinud toimuda juba 1941. aastal: Andrew McKellar tuvastas ergastava kiirguse olemasolu CN molekuli optilisi neeldumisjooni uurides, ent tollal ei suudetud veel vajalikku seost luua



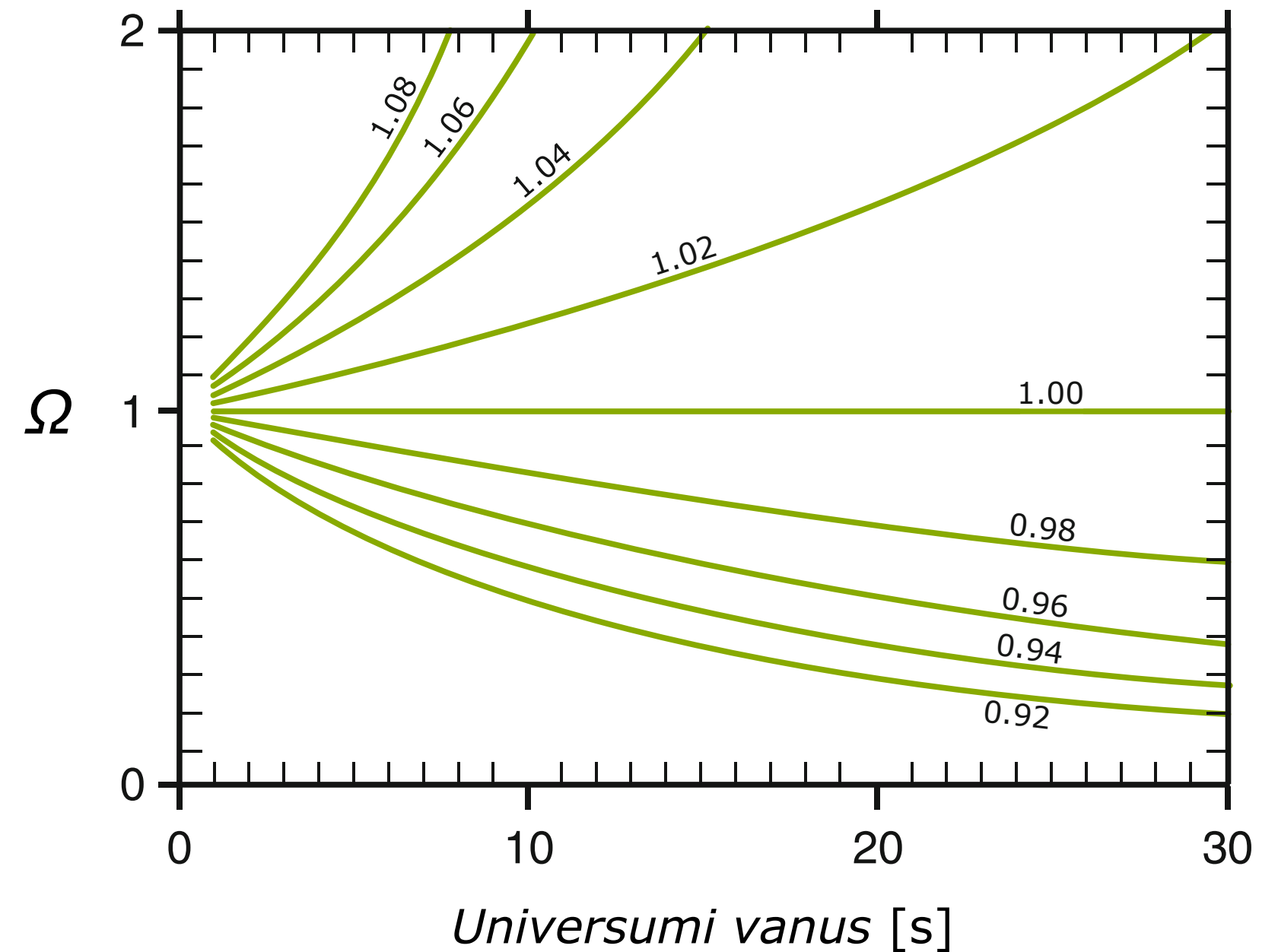
Suure Paugu probleemid

- Horisondi probleem



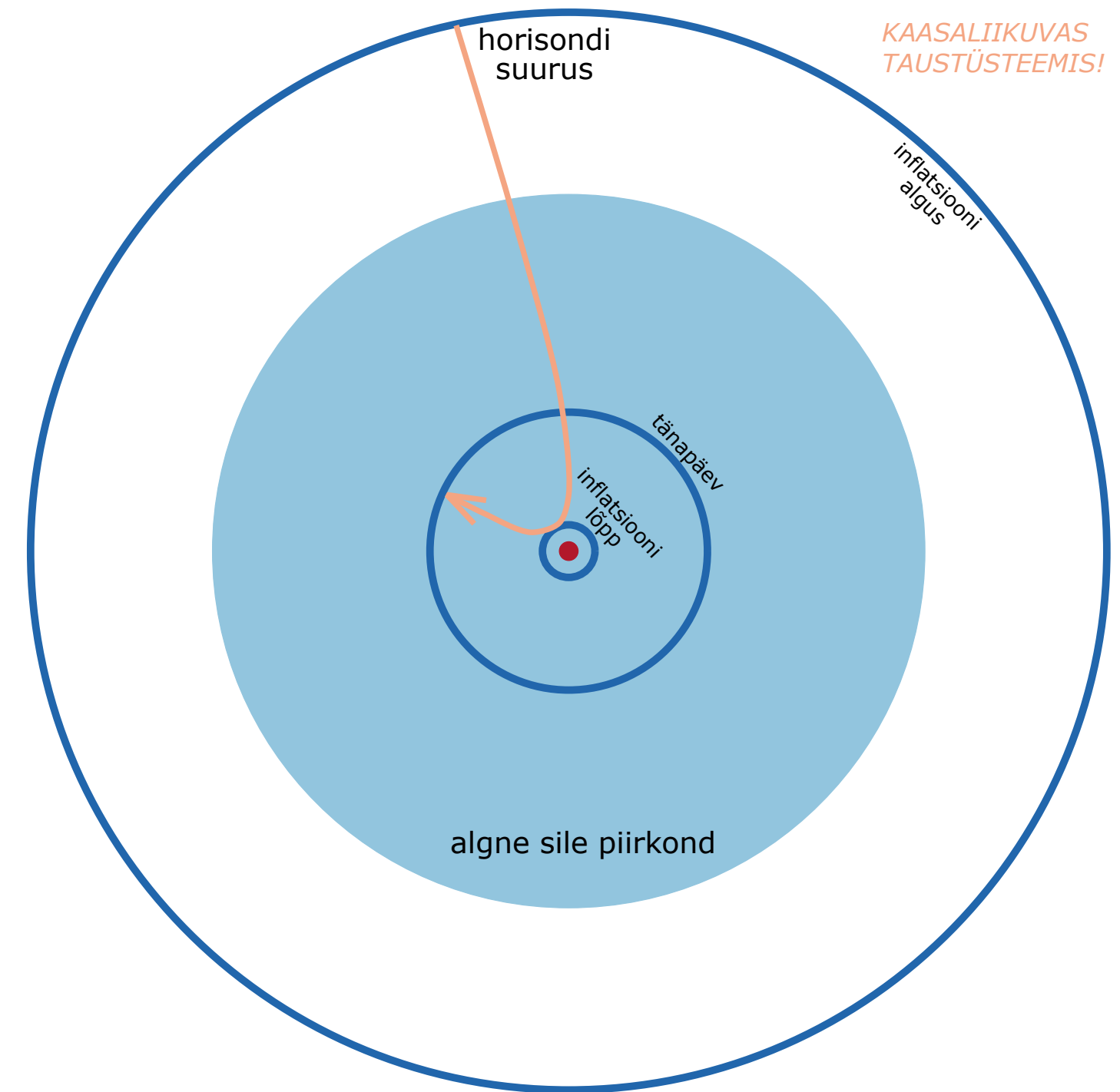
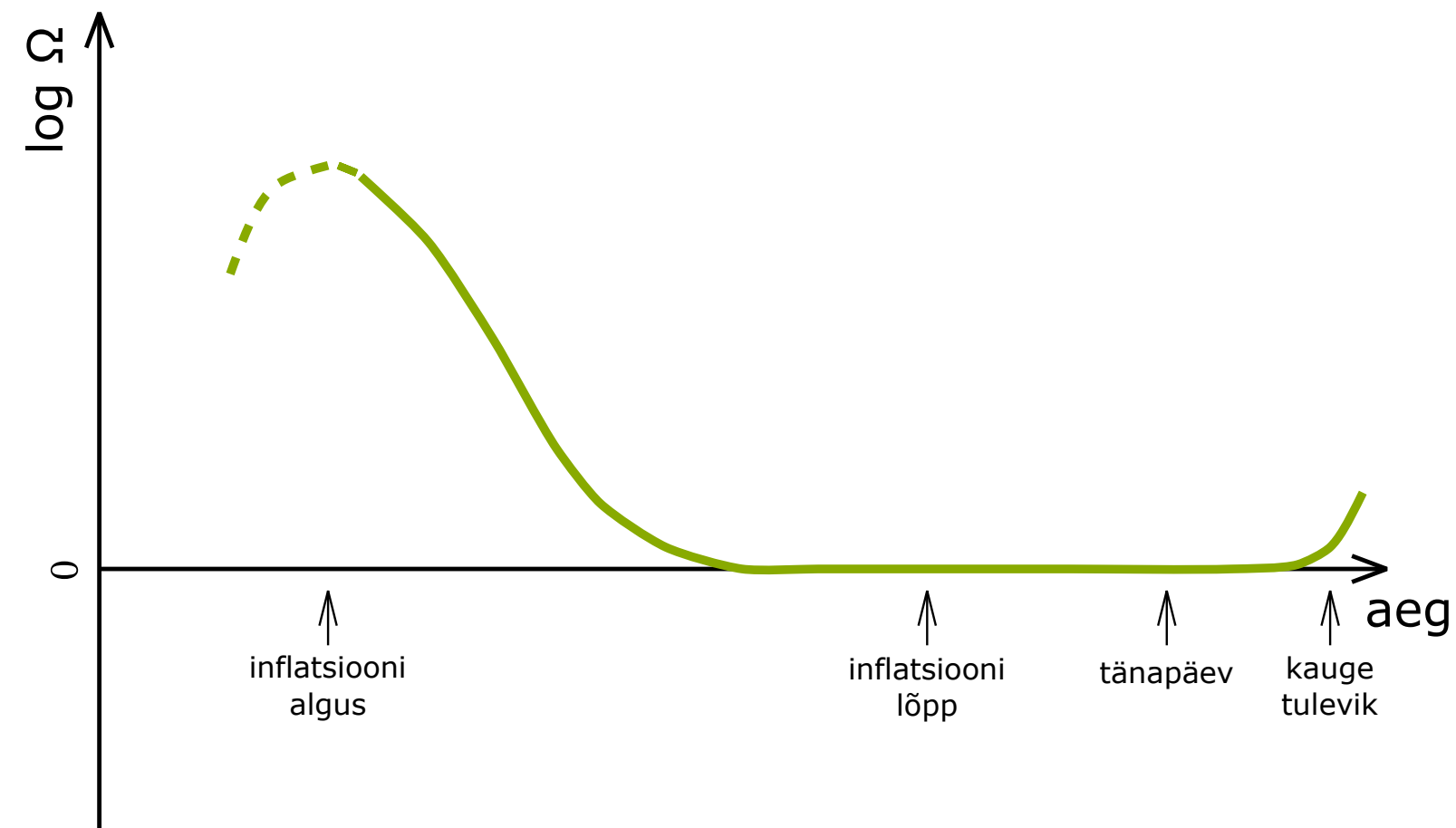
- Monopolide (ja teiste topoloogiliste defektide) probleem
- Horisondiüleste häirituste probleem

- Tasasuse (Universumi suure vanuse) probleem



... ning lahendus neile

- Inflatsioon — kiirenev paisumine varases universumis



- Inflaton — skalaarväli, mis põhjustab inflatsiooni ning laguneb selle lõppedes Standardmudeli osakesteks, kuumutades nii universumit ja käivitades standardse Suure Paugu arengu
- Inflatsioon venitab kvantfluktuatsioonid kosmiliste mõõtmeteni, tekitades seejuures vaatlustega kooskõlalisi alghäiritusi

kaasaegne kosmoloogia = inflatsioon + kuum Suur Pauk

Λ CDM

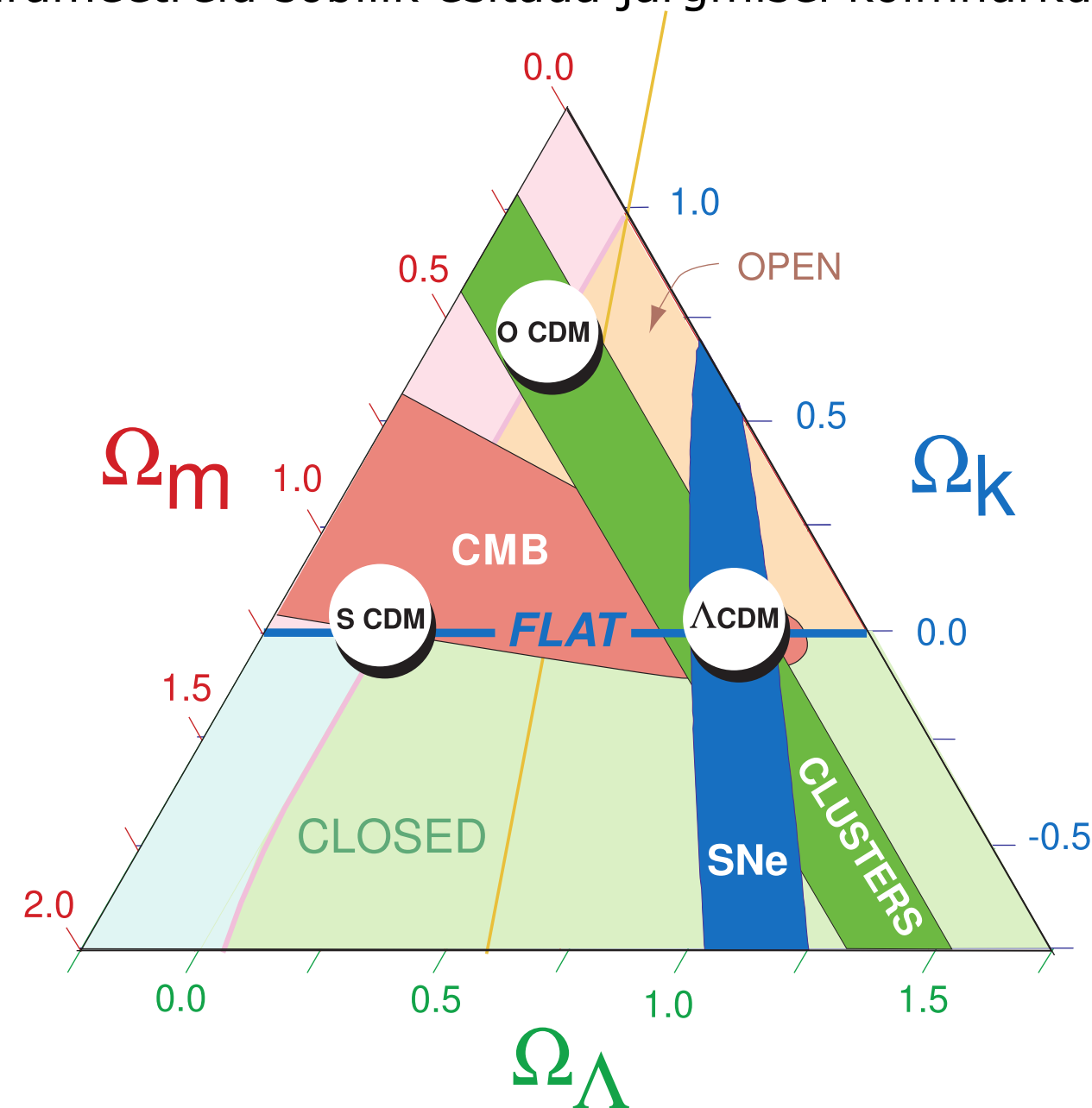
Λ CDM esiletõus — 1990-ndate lõpp

- Kosmiline kolmnurkdiagramm (*Bahcall et al. 1999*)

Et tihedusparameetrid rahuldavad järgmist sulgumistingimust (hilises Universumis, kus $\Omega_r \sim 0$)

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

on neid parameetreid sobilik esitada järgmisel kolmnurkdiagrammil:



	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	h
Λ CDM	1/3	2/3	0	2/3
OCDM	1/3	0	2/3	2/3
SCDM	1	0	0	1/2

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$$

- CMB:

$$\Omega_k \sim 0$$

- SN Ia:

$$q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_\Lambda \sim -1/2$$

- LSS:

- galaktikaparved

$$f_b \equiv \Omega_b / \Omega_m \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

/ BBN: $\Omega_b \sim 0.05$ /

- LSS P(k)

$$\Gamma \equiv \Omega_m h \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

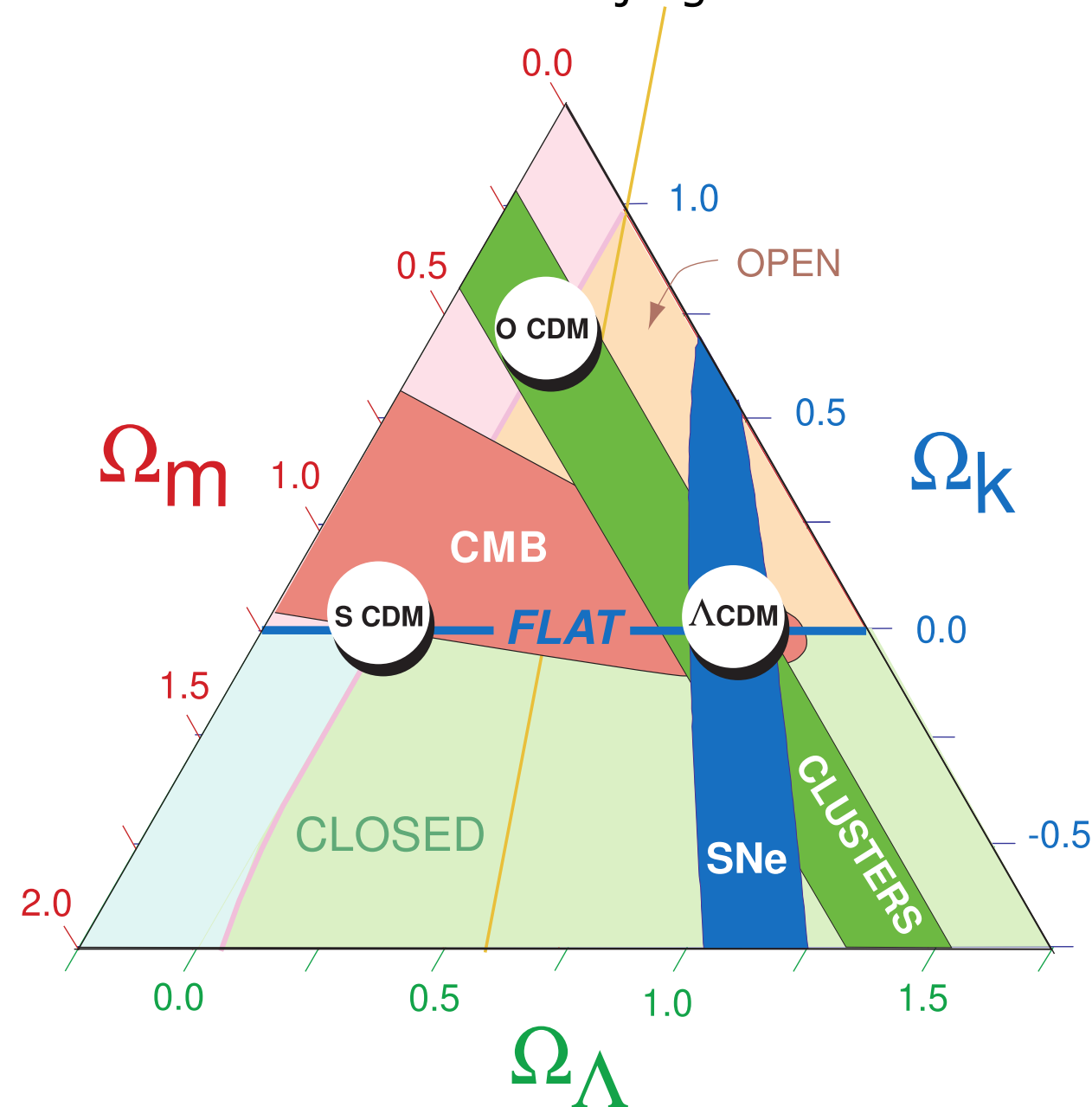
Λ CDM esiletõus — 1990-ndate lõpp

- Kosmiline kolmnurkdiagramm (*Bahcall et al. 1999*)

Et tihedusparameetrid rahuldavad järgmist sulgumistingimust (hilises Universumis, kus $\Omega_r \sim 0$)

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

on neid parameetreid sobilik esitada järgmisel kolmnurkdiagrammil:



	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	h
Λ CDM	1/3	2/3	0	2/3
OCDM	1/3	0	2/3	2/3
SCDM	1	0	0	1/2

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$$

- CMB:

$$\Omega_k \sim 0$$

- SN Ia:

$$q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_\Lambda \sim -1/2$$

- LSS:

- galaktikaparved

$$f_b \equiv \Omega_b / \Omega_m \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

/ BBN: $\Omega_b \sim 0.05$ /

- LSS P(k)

$$\Gamma \equiv \Omega_m h \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

- Λ CDM mudeli parameetrid: $\{H_0, \omega_b, \omega_m, A_s, n_s, \tau_{\text{reio}}\}$

$$\omega \equiv \Omega h^2, \quad \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$$

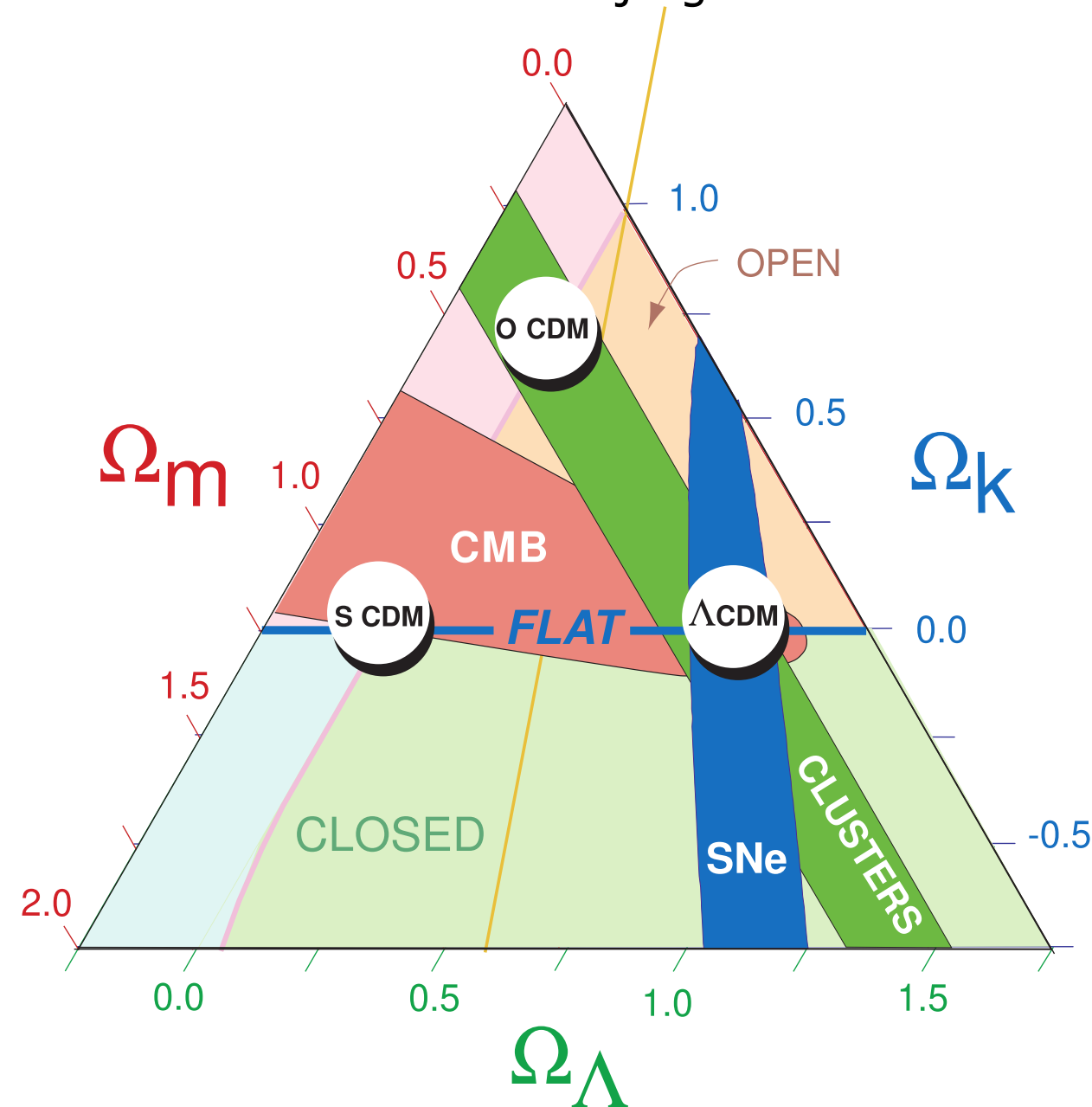
Λ CDM esiletõus — 1990-ndate lõpp

- Kosmiline kolmnurkdiagramm (*Bahcall et al. 1999*)

Et tihedusparameetrid rahuldavad järgmist sulgumistingimust (hilises Universumis, kus $\Omega_r \sim 0$)

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

on neid parameetreid sobilik esitada järgmisel kolmnurkdiagrammil:



	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	h
Λ CDM	1/3	2/3	0	2/3
OCDM	1/3	0	2/3	2/3
SCDM	1	0	0	1/2

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$$

- CMB: $\Omega_k \sim 0$
- SN Ia: $q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_\Lambda \sim -1/2$
- LSS:

- galaktikaparved

$$f_b \equiv \Omega_b / \Omega_m \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

/ BBN: $\Omega_b \sim 0.05$ /

- LSS P(k)

$$\Gamma \equiv \Omega_m h \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

- Λ CDM mudeli parameetrid: $\{H_0, \omega_b, \omega_m, A_s, n_s, \tau_{\text{reio}}\}$

Universumi koostis

$$\omega \equiv \Omega h^2, \quad \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$$

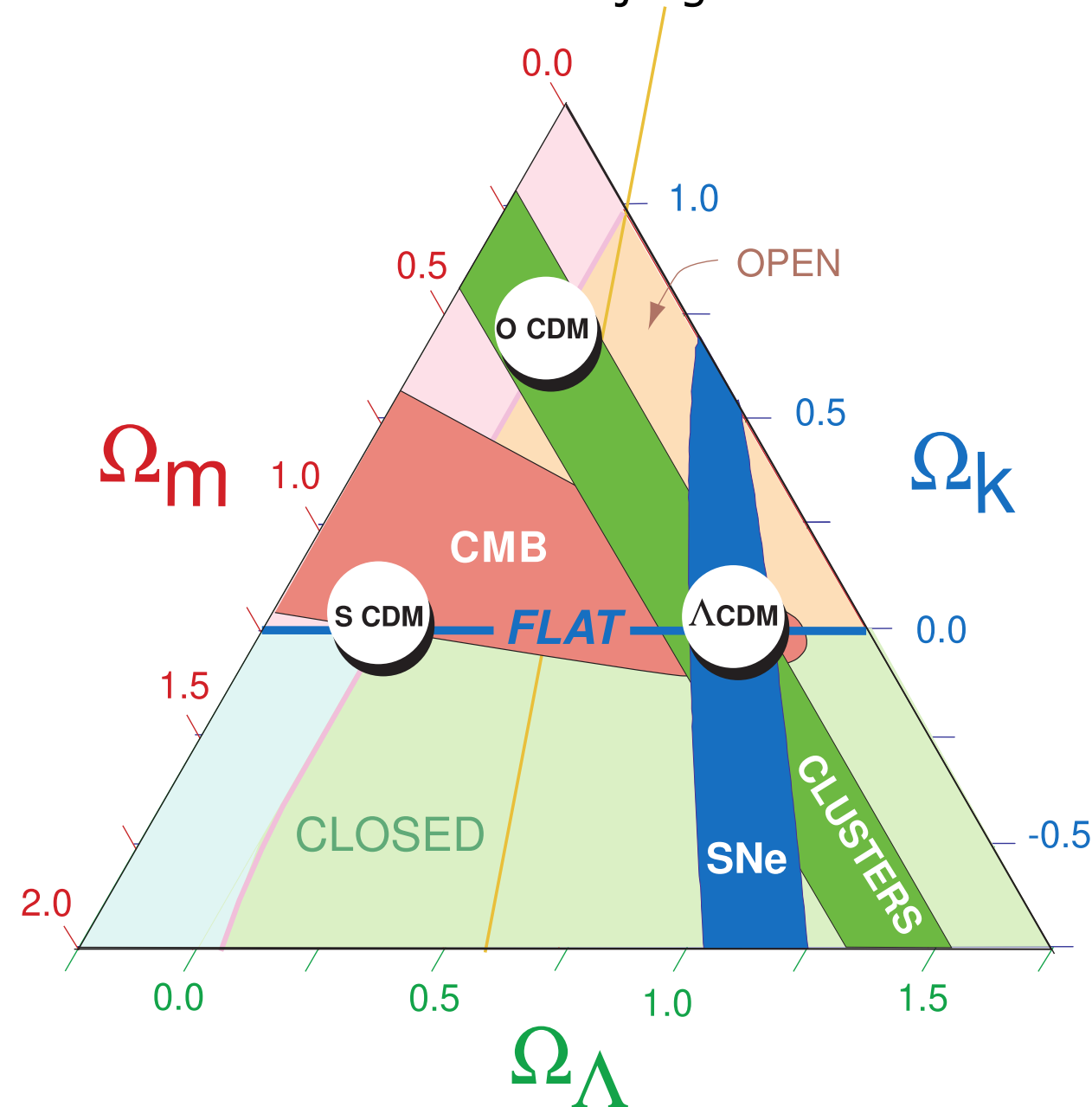
Λ CDM esiletõus — 1990-ndate lõpp

- Kosmiline kolmnurkdiagramm (*Bahcall et al. 1999*)

Et tihedusparameetrid rahuldavad järgmist sulgumistingimust (hilises Universumis, kus $\Omega_r \sim 0$)

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

on neid parameetreid sobilik esitada järgmisel kolmnurkdiagrammil:



	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	h
Λ CDM	1/3	2/3	0	2/3
OCDM	1/3	0	2/3	2/3
SCDM	1	0	0	1/2

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$$

- CMB: $\Omega_k \sim 0$
- SN Ia: $q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_\Lambda \sim -1/2$
- LSS:

- galaktikaparved

$$f_b \equiv \Omega_b / \Omega_m \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

/ BBN: $\Omega_b \sim 0.05$ /

- LSS P(k)

$$\Gamma \equiv \Omega_m h \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

- Λ CDM mudeli parameetrid: $\{H_0, \omega_b, \omega_m, A_s, n_s, \tau_{\text{reio}}\}$

Universumi koostis Inflatsioon

$$\omega \equiv \Omega h^2, \quad \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$$

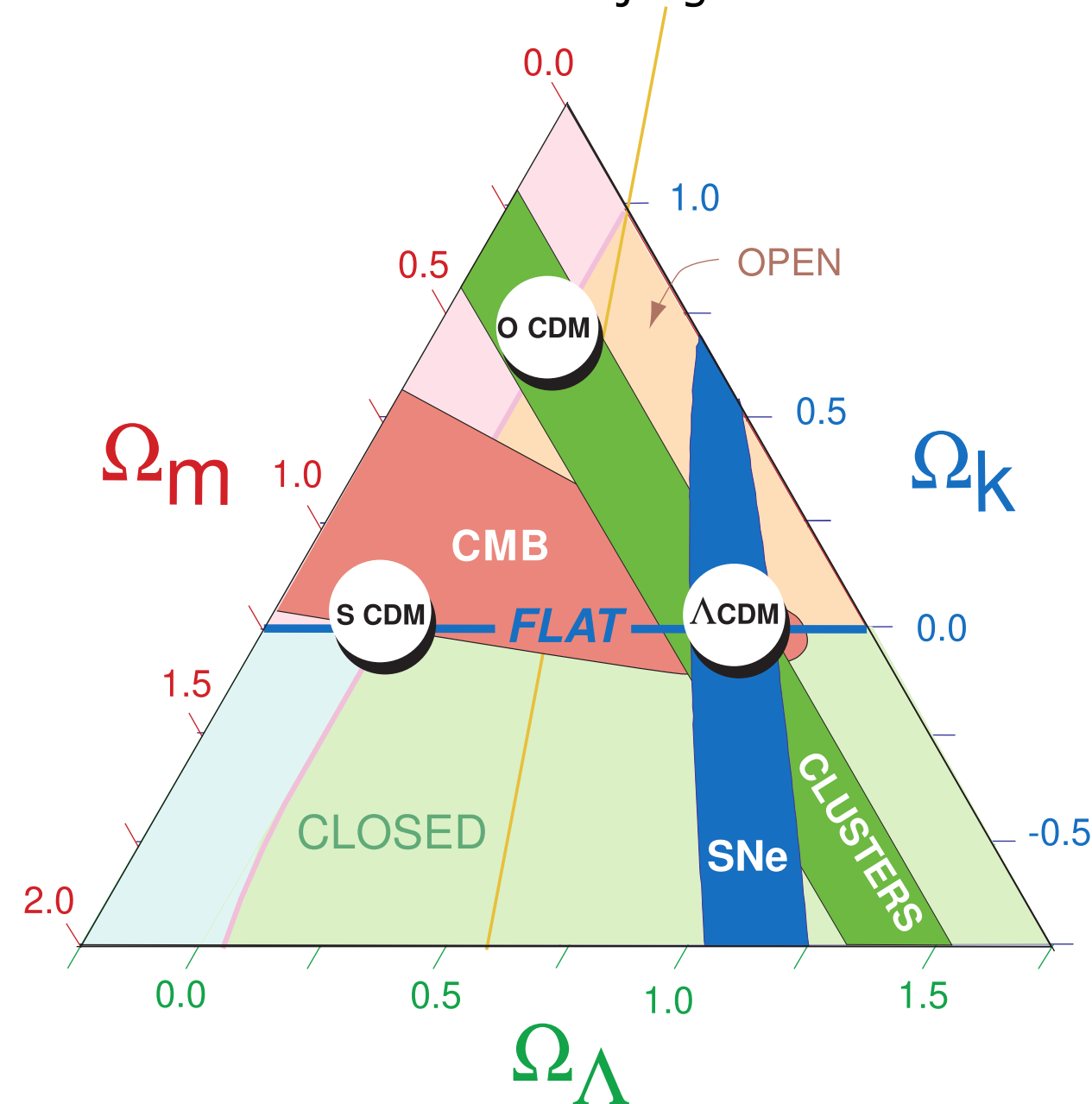
Λ CDM esiletõus — 1990-ndate lõpp

- Kosmiline kolmnurkdiagramm (*Bahcall et al. 1999*)

Et tihedusparameetrid rahuldavad järgmist sulgumistingimust (hilises Universumis, kus $\Omega_r \sim 0$)

$$\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

on neid parameetreid sobilik esitada järgmisel kolmnurkdiagrammil:



	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	h
Λ CDM	1/3	2/3	0	2/3
OCDM	1/3	0	2/3	2/3
SCDM	1	0	0	1/2

$$h \equiv H_0 / (100 \text{ km/s/Mpc})$$

- CMB: $\Omega_k \sim 0$
- SN Ia: $q_0 = \Omega_m/2 - \Omega_\Lambda \sim -1/2$
- LSS:

- galaktikaparved

$$f_b \equiv \Omega_b / \Omega_m \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

/ BBN: $\Omega_b \sim 0.05$ /

- LSS P(k)

$$\Gamma \equiv \Omega_m h \sim 1/5 \Rightarrow \Omega_m \sim 1/3$$

- Λ CDM mudeli parameetrid: $\{H_0, \omega_b, \omega_m, A_s, n_s, \tau_{\text{reio}}\}$

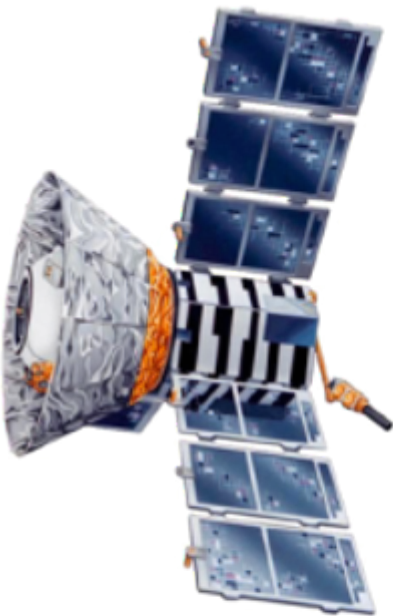
Universumi koostis

Inflatsioon

Reionisatsioon

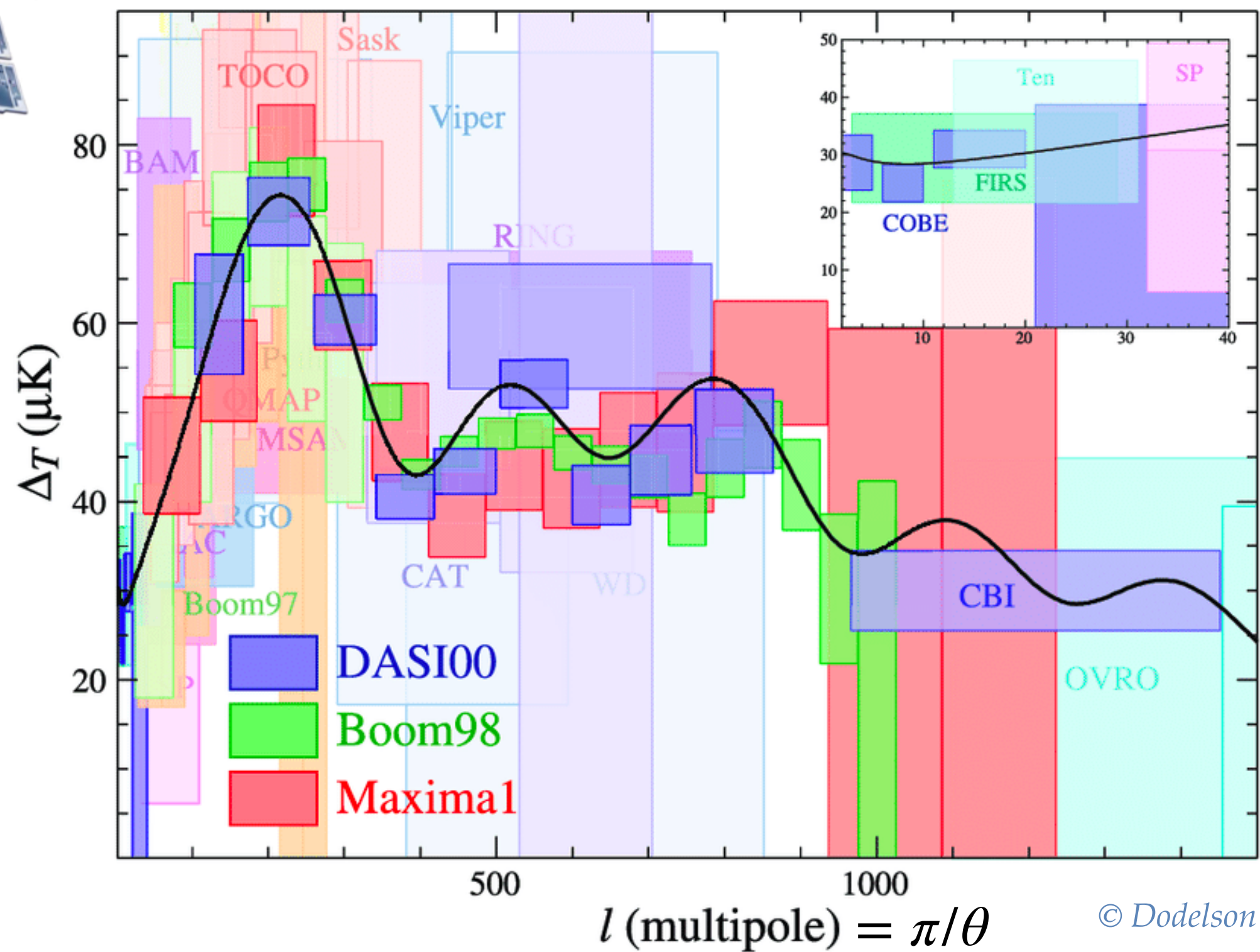
$$\omega \equiv \Omega h^2, \quad \Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m$$

Λ CDM aastal 2000



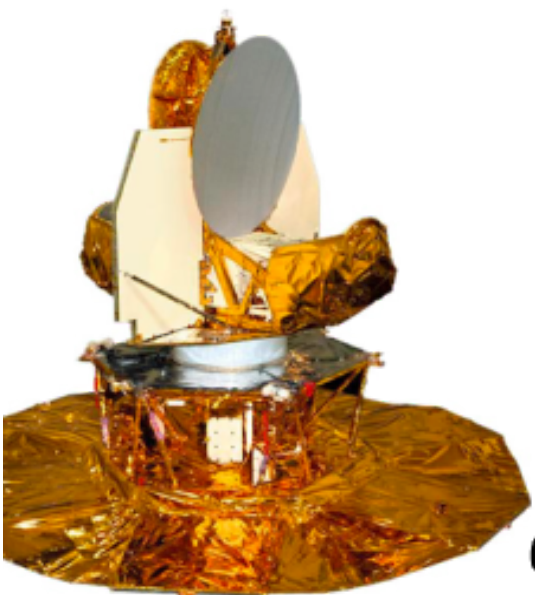
COBE

25 aastat tagasi

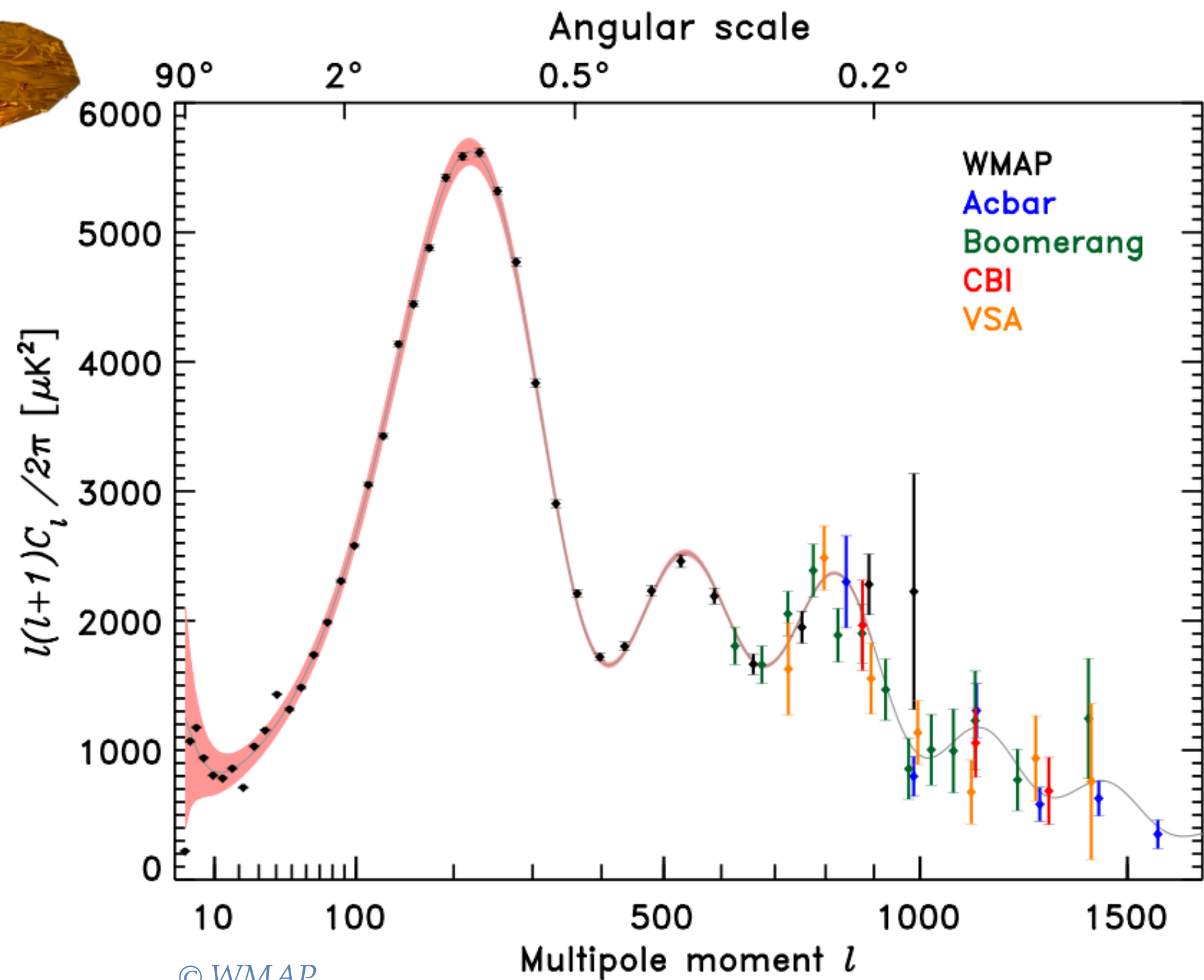


H_0	72 ± 8	11%
$\Omega_b h^2$	0.022 ± 0.004	18%
$\Omega_m h^2$	0.162 ± 0.04	25%
A_s	...	14%
n_s	1.01 ± 0.07	7%
τ	tundlikkus puudub	-

WMAP (2001 - 2010) — Λ CDM kuldajastu

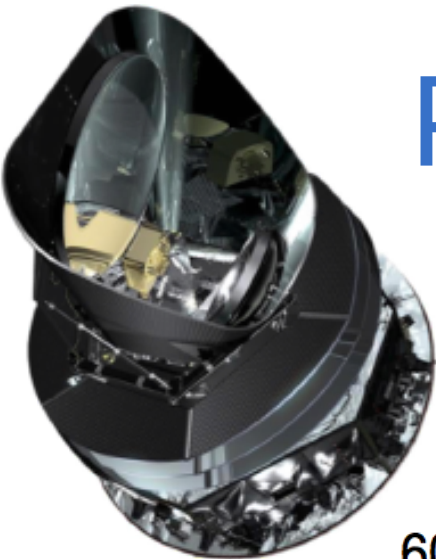


15 aastat tagasi



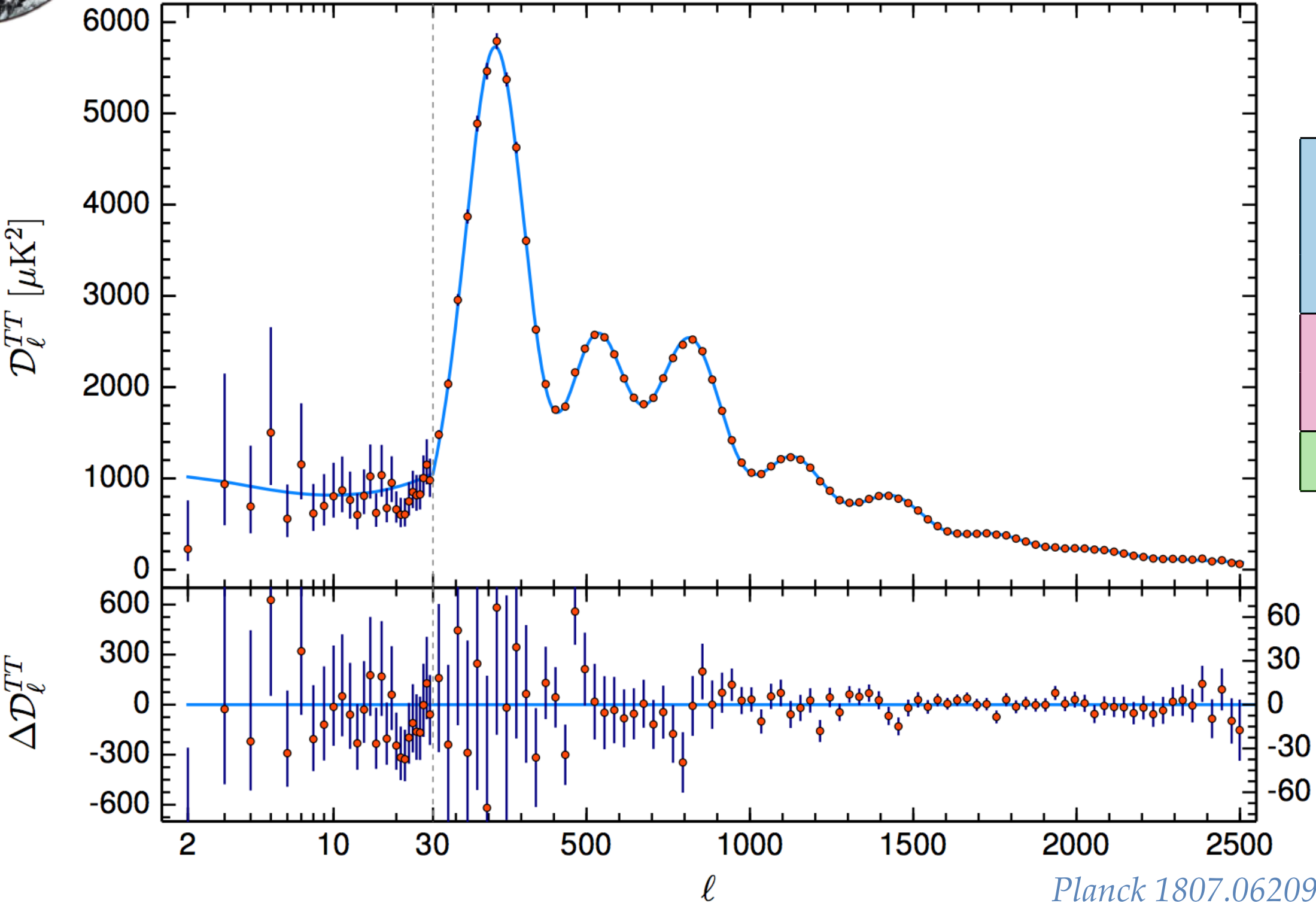
© WMAP

H_0	69.33 ± 0.88	1.3%
$\Omega_b h^2$	0.02266 ± 0.00043	1.9%
$\Omega_m h^2$	0.1384 ± 0.0023	1.7%
A_s	...	3.3%
n_s	0.971 ± 0.010	1.0%
τ	0.088 ± 0.013	15%



Planck (2009 - 2013) — Λ CDM esimesed probleemid

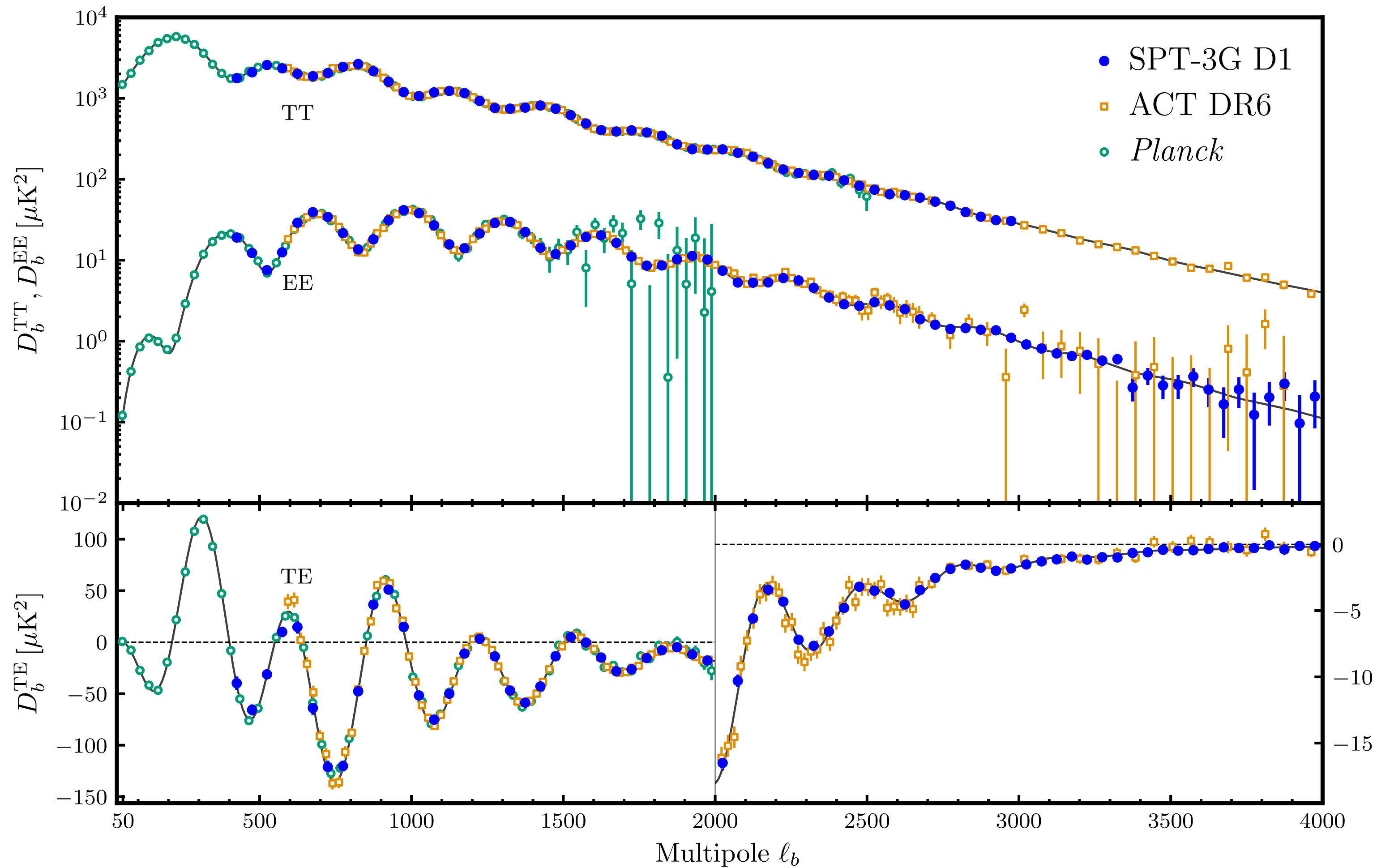
10 aastat tagasi



H_0	67.66 ± 0.42	0.62%
$\Omega_b h^2$	0.02242 ± 0.00014	0.62%
$\Omega_m h^2$	0.14240 ± 0.00087	0.61%
A_s	...	0.46%
n_s	0.9665 ± 0.0038	0.39%
τ	0.0561 ± 0.0071	13%

• SNIa: $H_0 = 73.04 \pm 1.04$ km/s/Mpc

Λ CDM 2025





- Einsteini väljavõrranditesse saab alati lisada meetrikaga võrdelise teguri $\Lambda g_{\mu\nu}$ (muutmata seejuures energia-impulsi jäävust, $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$, kuna $\nabla^\mu g_{\mu\nu} = 0$):

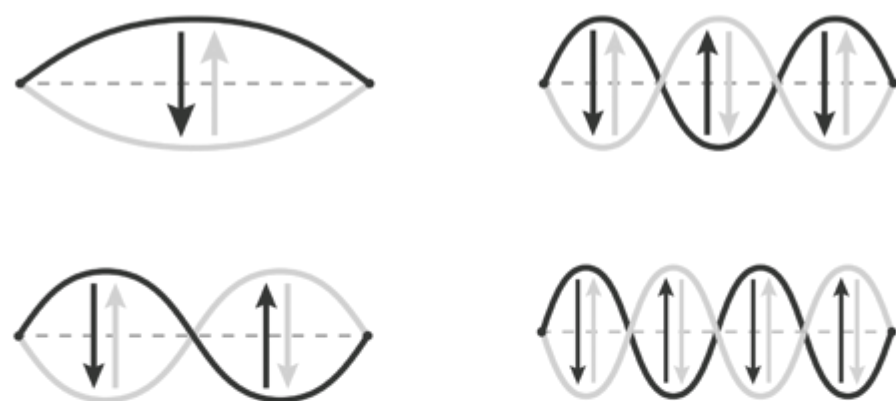
$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Tõstes selle liikme võrrandi paremale poolele saab seda interpreteerida kui konstantset vaakumi energiat

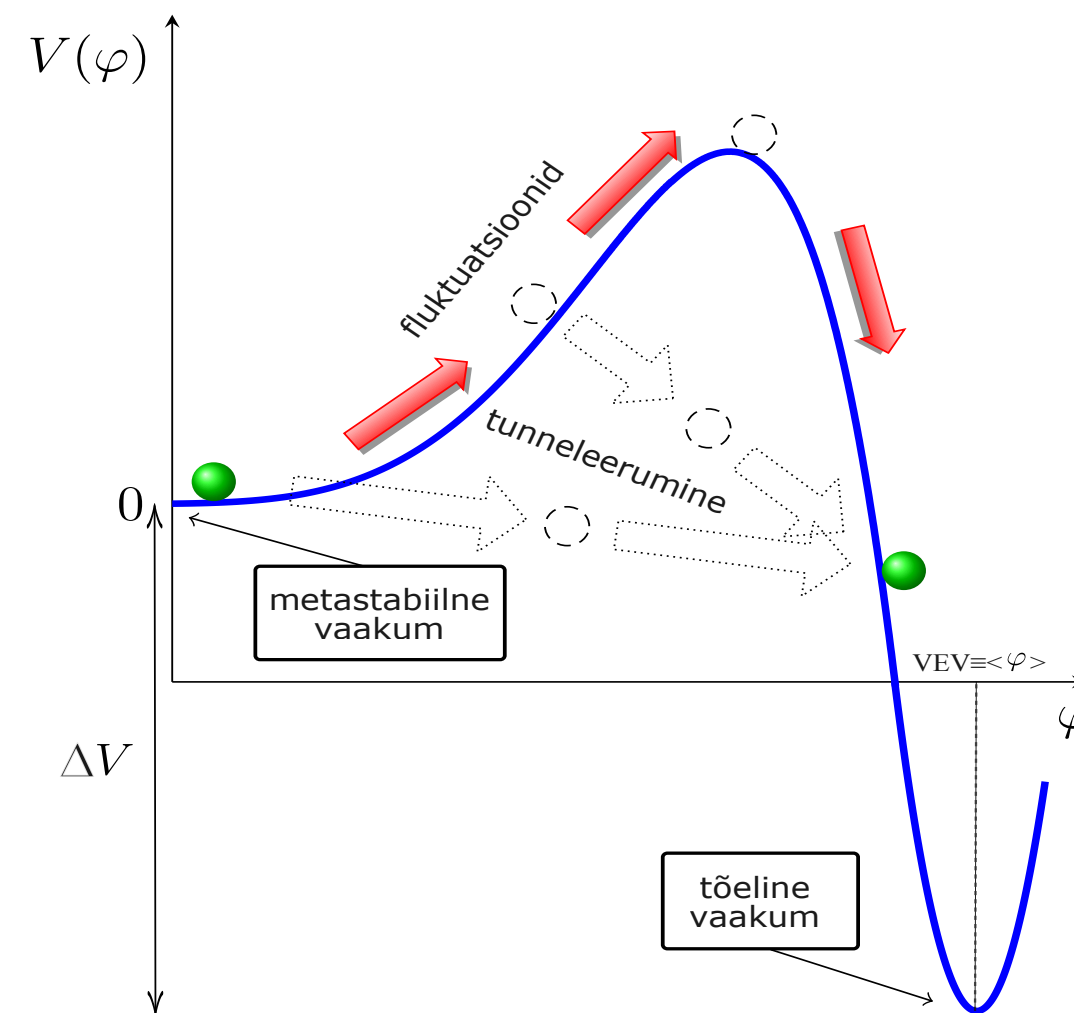
$$T_{\mu\nu}^{(\Lambda)} = -\frac{\Lambda c^4}{8\pi G} g_{\mu\nu} \equiv -\rho_\Lambda c^2 g_{\mu\nu} \implies w_\Lambda = -1 \quad \left(\begin{array}{l} \text{ideaalse vedeliku olekuvõrrand} \\ \text{kaasaliikivas süsteemis:} \\ \text{diag}(\rho c^2, p, p, p) \end{array} \right)$$

- Λ saab palju erinevaid panuseid

- väljade vaakum-fluktuatsioonid:
boson- ja fermionväljad annavad vastasmärgiga panuseid (bosonid "+", fermionid "-")



- Universumi evolutsiooni käigus aset leidnud faasisiiretel toimunud vaakumstruktuuri muutused



Λ -probleem:

palju erimärgilisi panuseid, mis kõik absoluutväärtuselt mitmeid ja mitmeid suurusjärke suuremad kui Λ_{obs} , ent ikkagi summeeruvad kokku niivõrd väikeseks suuruseks — vajalik ülim peenhäälestus!

Weinberg 1987: antropne põhjendus

Alternatiivid Λ -le:

- Dünaamiline skalaarväli — kvintessents
- Modifitseeritud gravitatsioon

Λ CDM — tihedusparameetrite areng

$$w_x \equiv \frac{P_x}{\rho_x}$$

$$\rho_x \propto (1+z)^{3(w_x+1)}$$

- kiirgus:

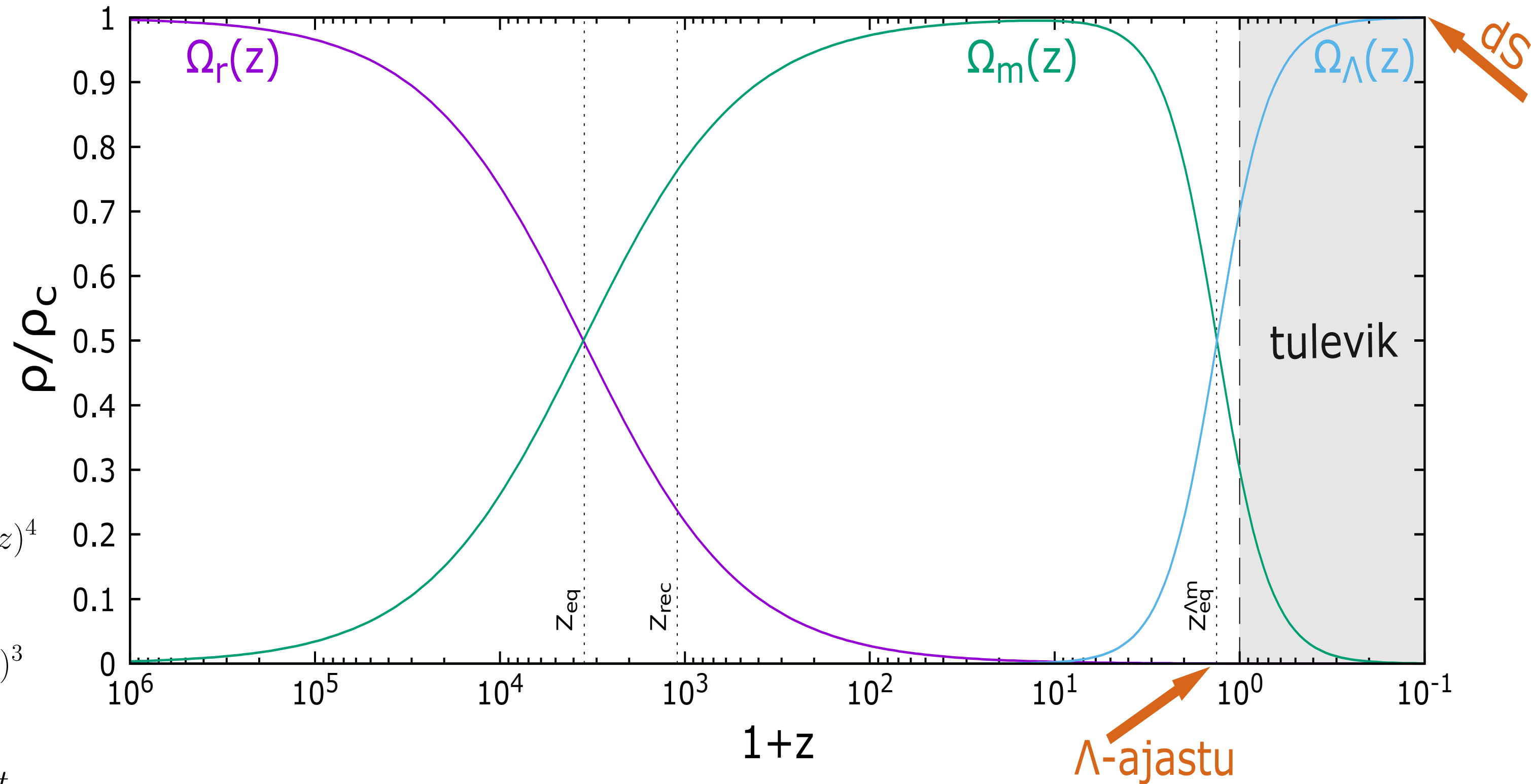
$$w_r = 1/3 \Rightarrow \rho_r \propto (1+z)^4$$

- aine:

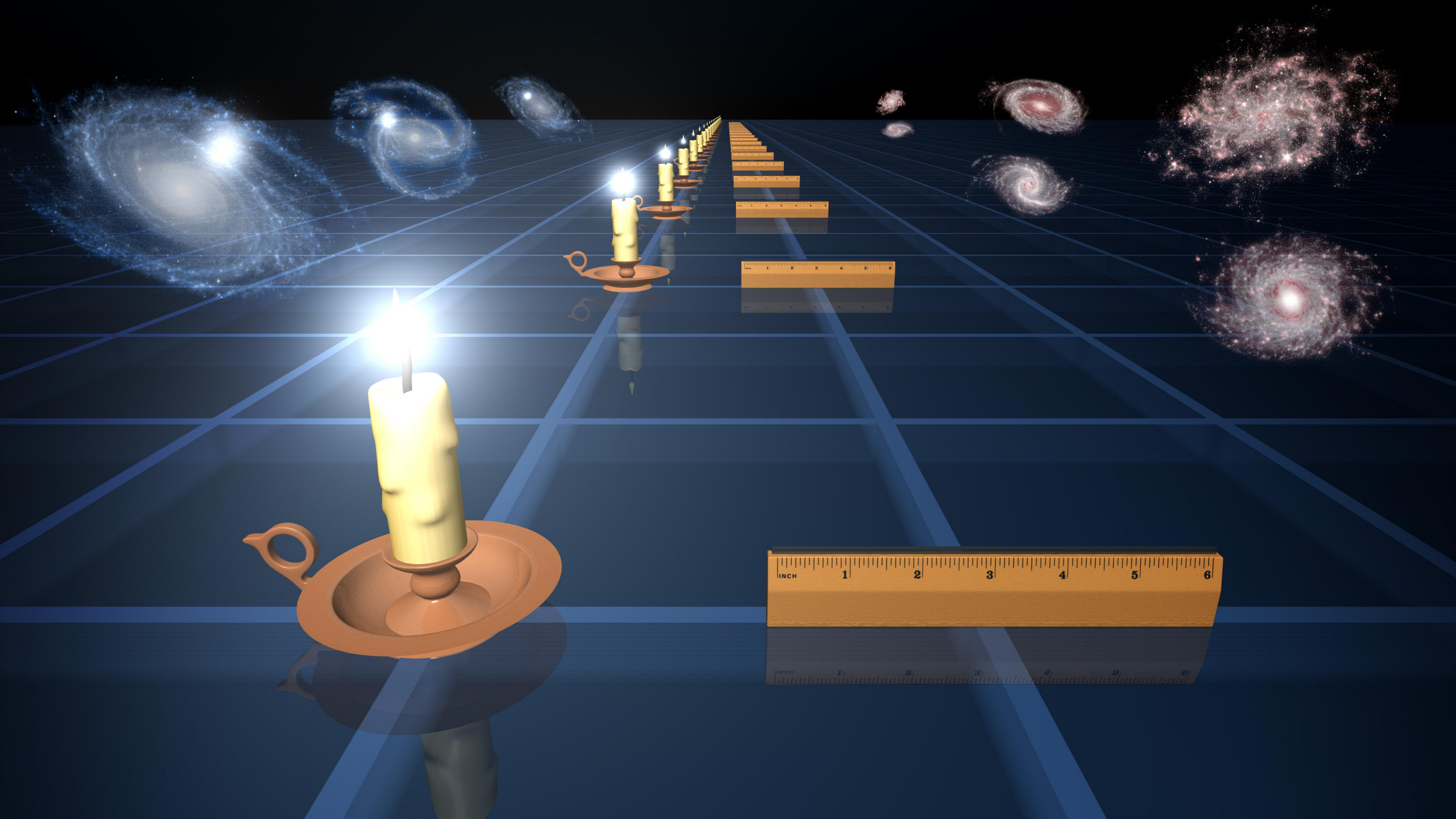
$$w_m = 0 \Rightarrow \rho_m \propto (1+z)^3$$

- vaakumi energia:

$$w_\Lambda = -1 \Rightarrow \rho_\Lambda = \text{const}$$



TÖÖRIISTAKAST



standard-küünlad & -joonlauad

- Ia tüüpi supernoovad (SNIa)

- ✗ Detailne füüsika ja tekkekanal (DD vs SD) lahtine $\Rightarrow$ potentsiaalne süstemaatiliste vigade oht
- ✓ Vaatlusprogrammid mõõduka kuluga

$$\text{Kaasaliikuv kaugus } \chi = \int_{t_e}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$$

- *Heleduskaugus* allikale, mille kiirgusvoog ja heledus on teada

$$F = \frac{L}{4\pi d_L(a)^2} \quad d_L = \frac{\chi(a)}{a} = \chi(z)(1+z)$$

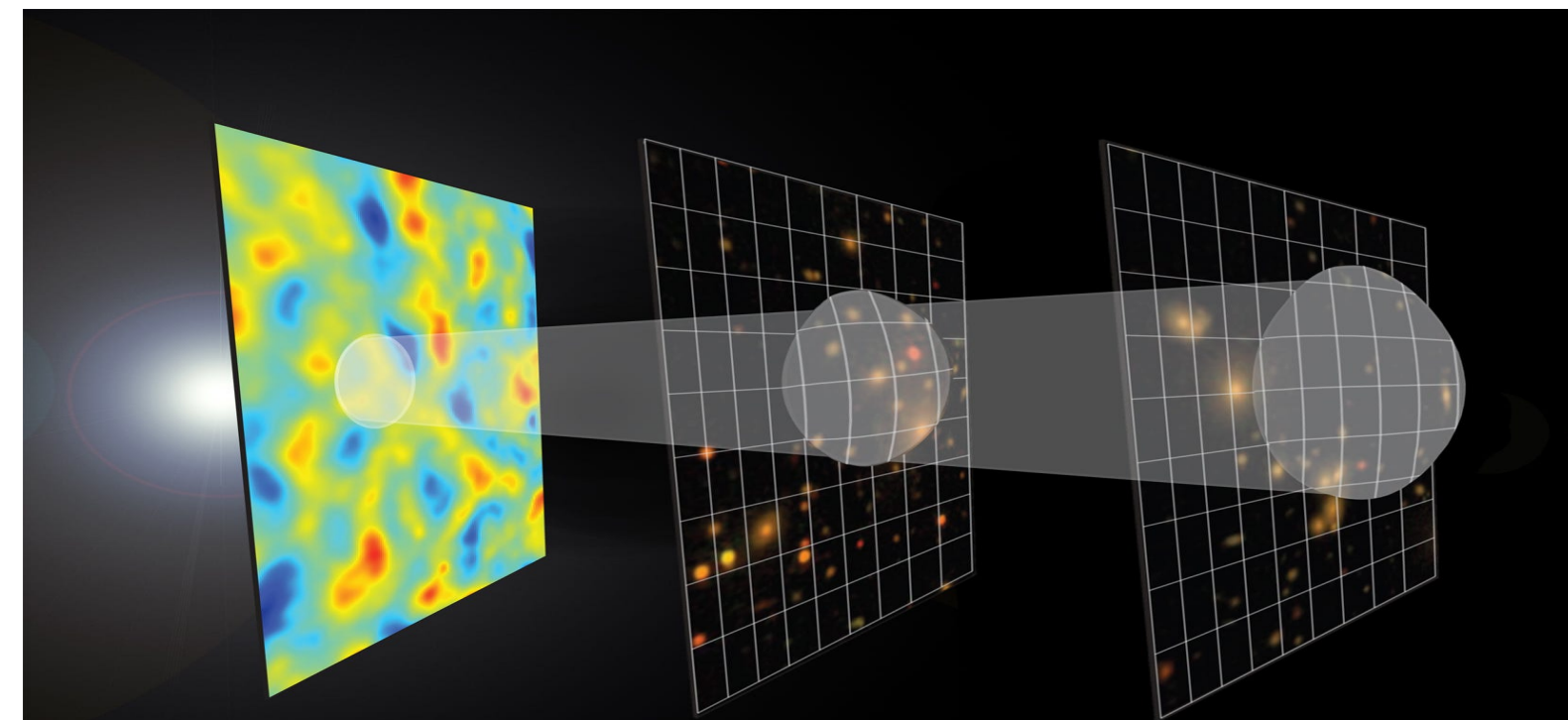
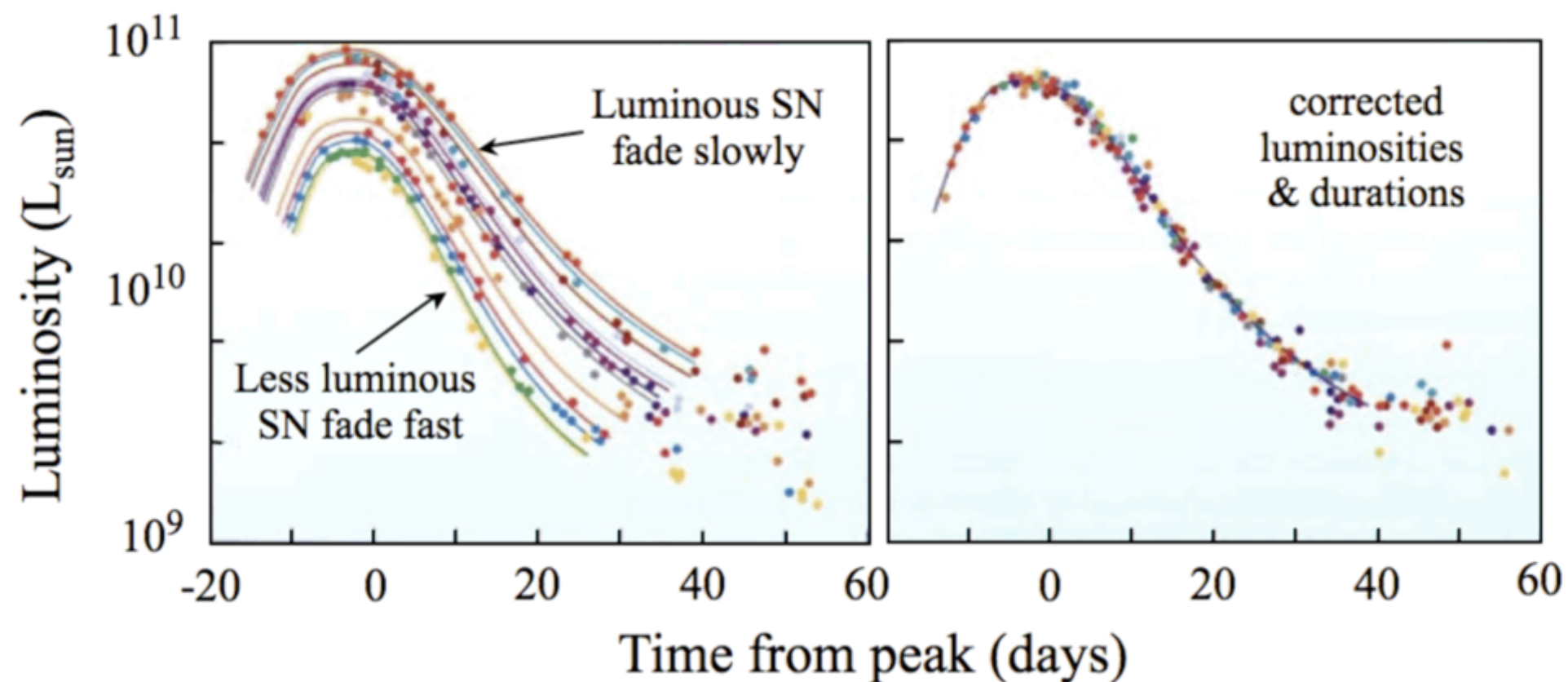
- Barüon-akustilised ostsillatsioonid (BAO)

- ✓ Füüsika hästi teada
- ✗ Vajalikud väga mahukad vaatlusprogrammid

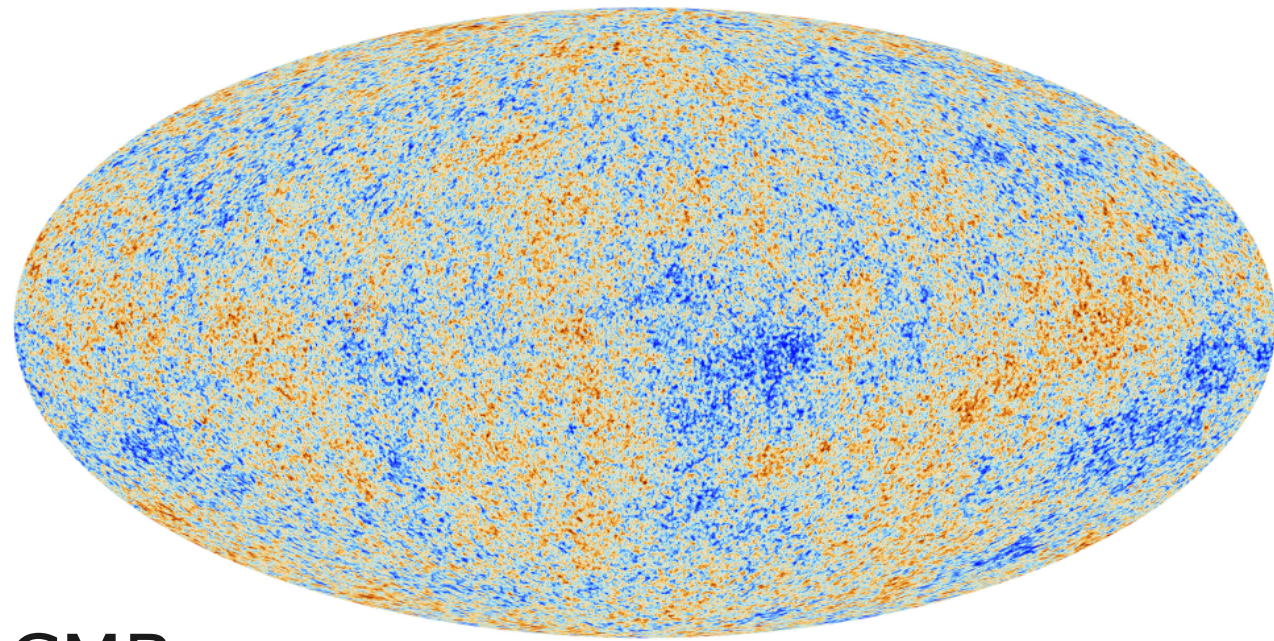
- *Nurkkaugus* allikale, mille tegelik ja näiv suurus on teada

$$\delta\theta = \frac{D}{d_A} \quad d_A = a\chi(a) = \frac{\chi(z)}{(1+z)}$$

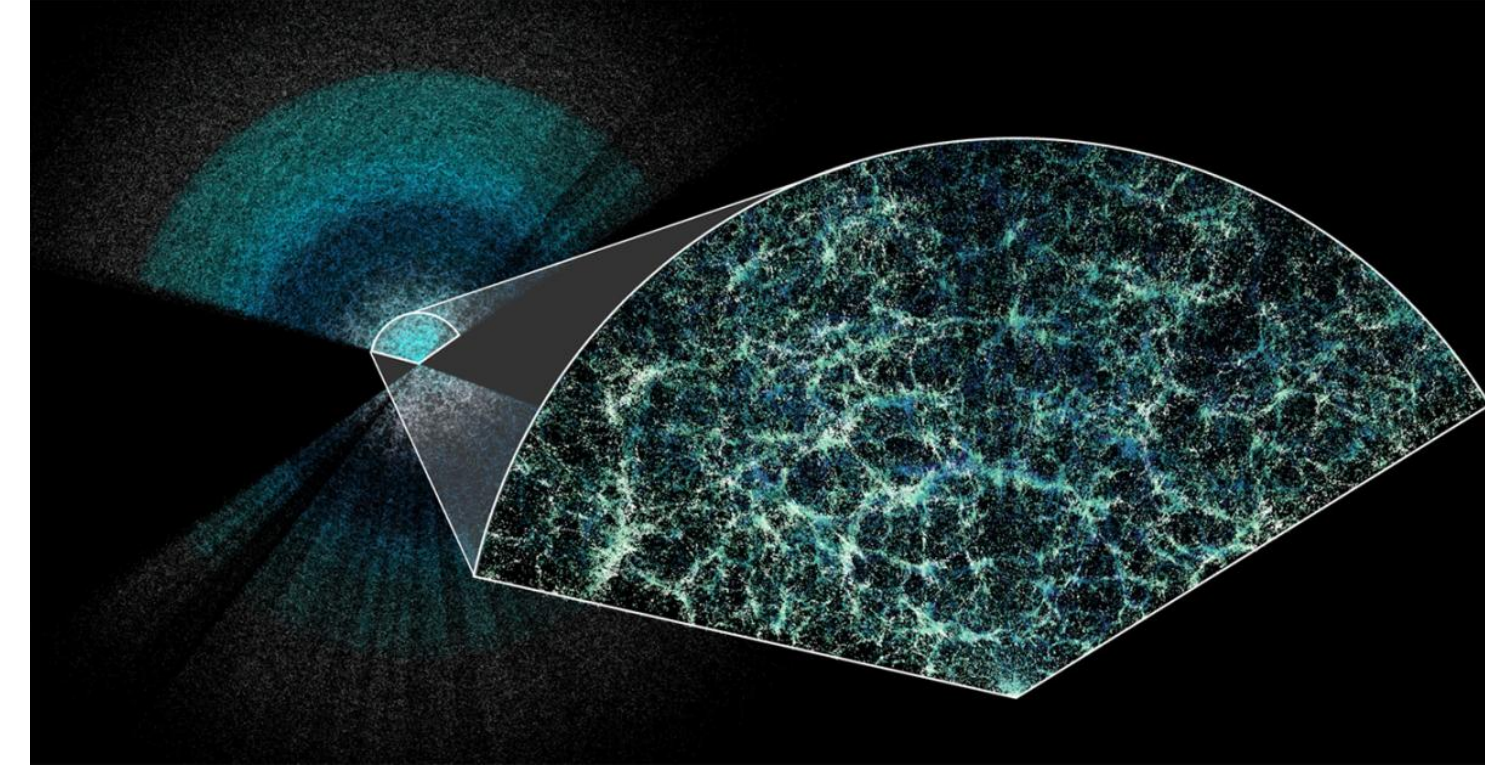
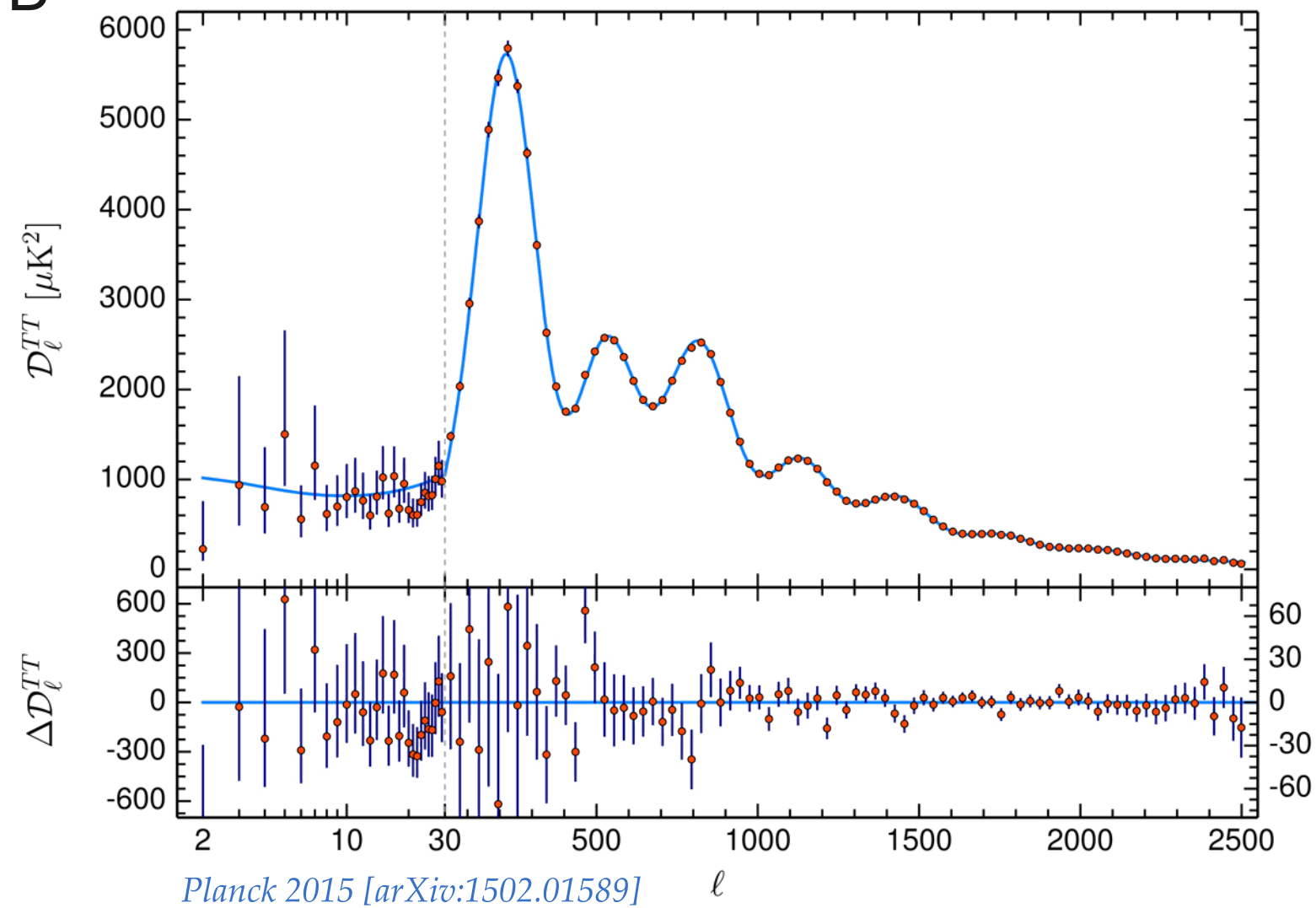
Etheringtoni kaugus-duaalsuse seos $d_A = d_L/(1+z)^2$



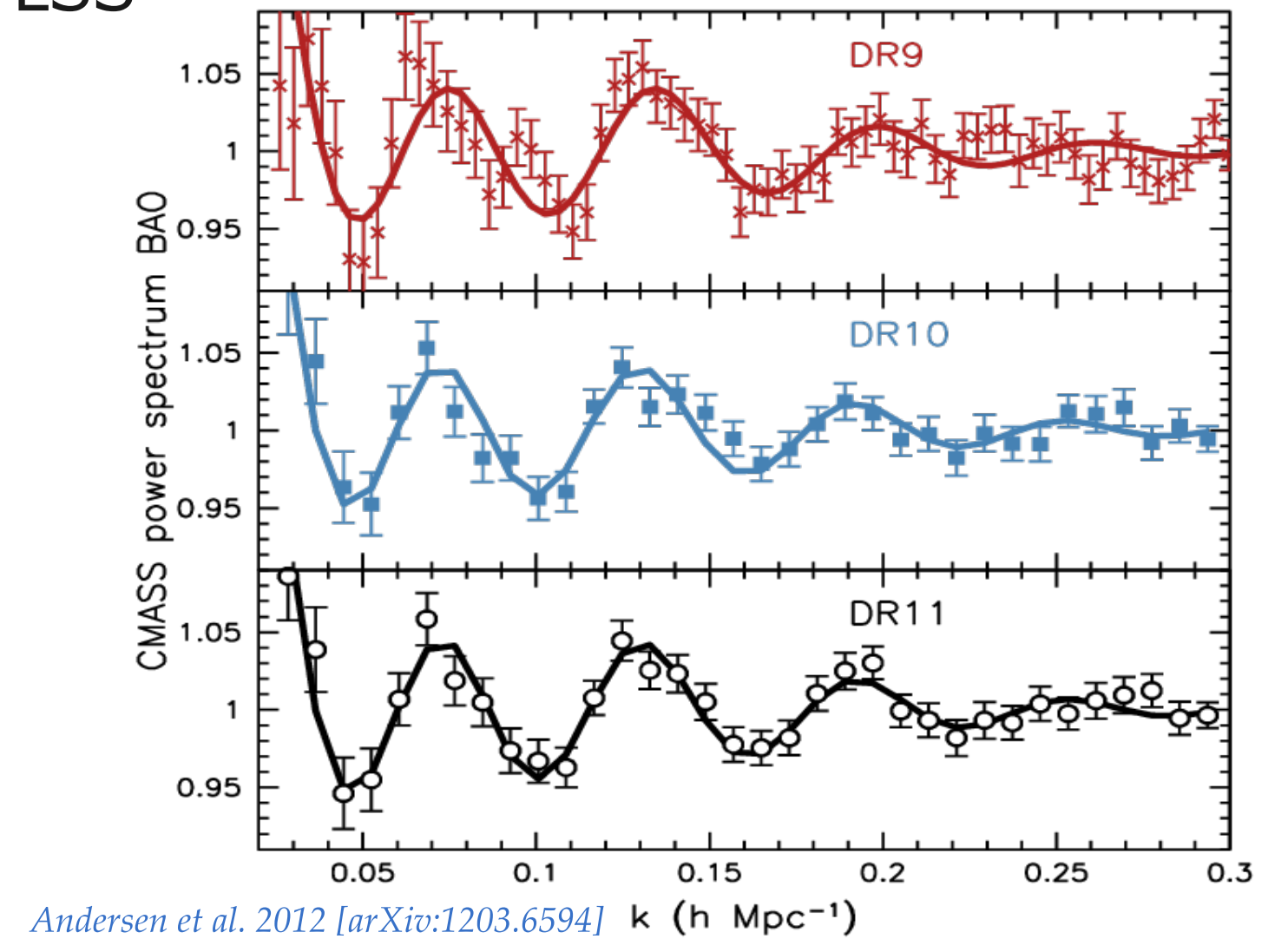
Barüon-akustilised ostsillatsioonid



- CMB



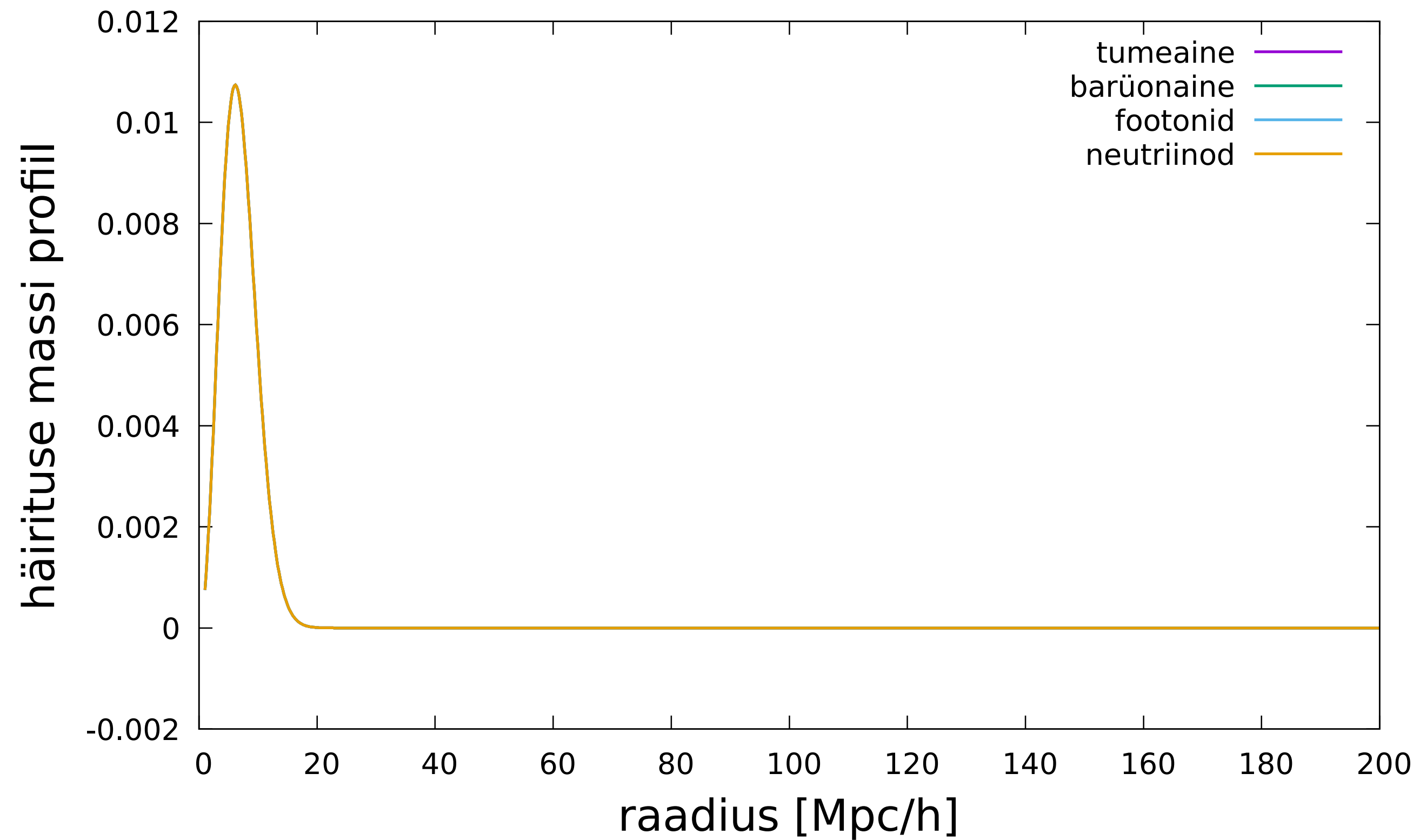
- LSS



- Perioodilisele signaalile Fourier' ruumis vastab üks kindel ruumiline skaala — helihorisont

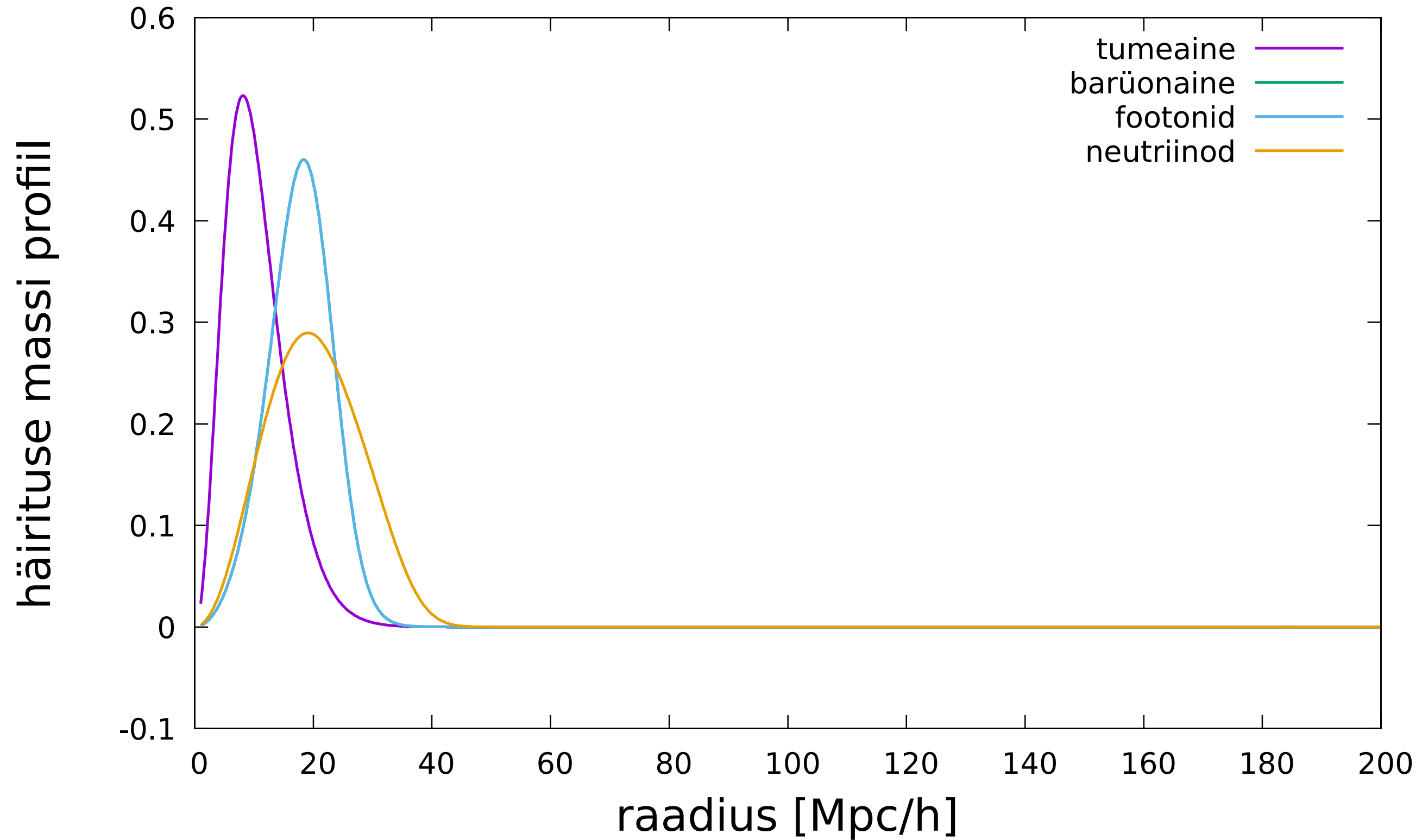
Intuitiivne BAO füüsika

$z=80000$



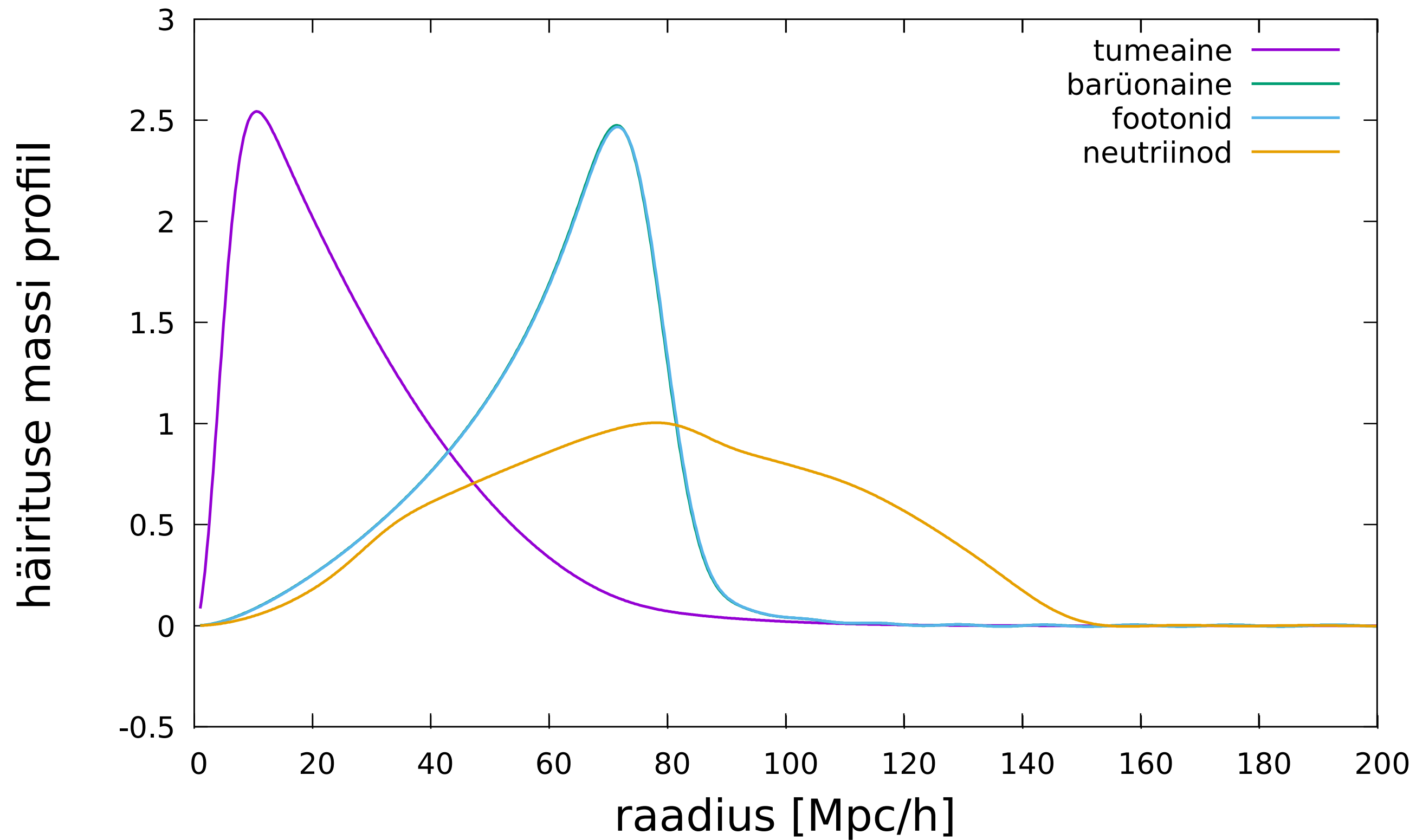
Intuitiivne BAO füüsika

$z=8000$



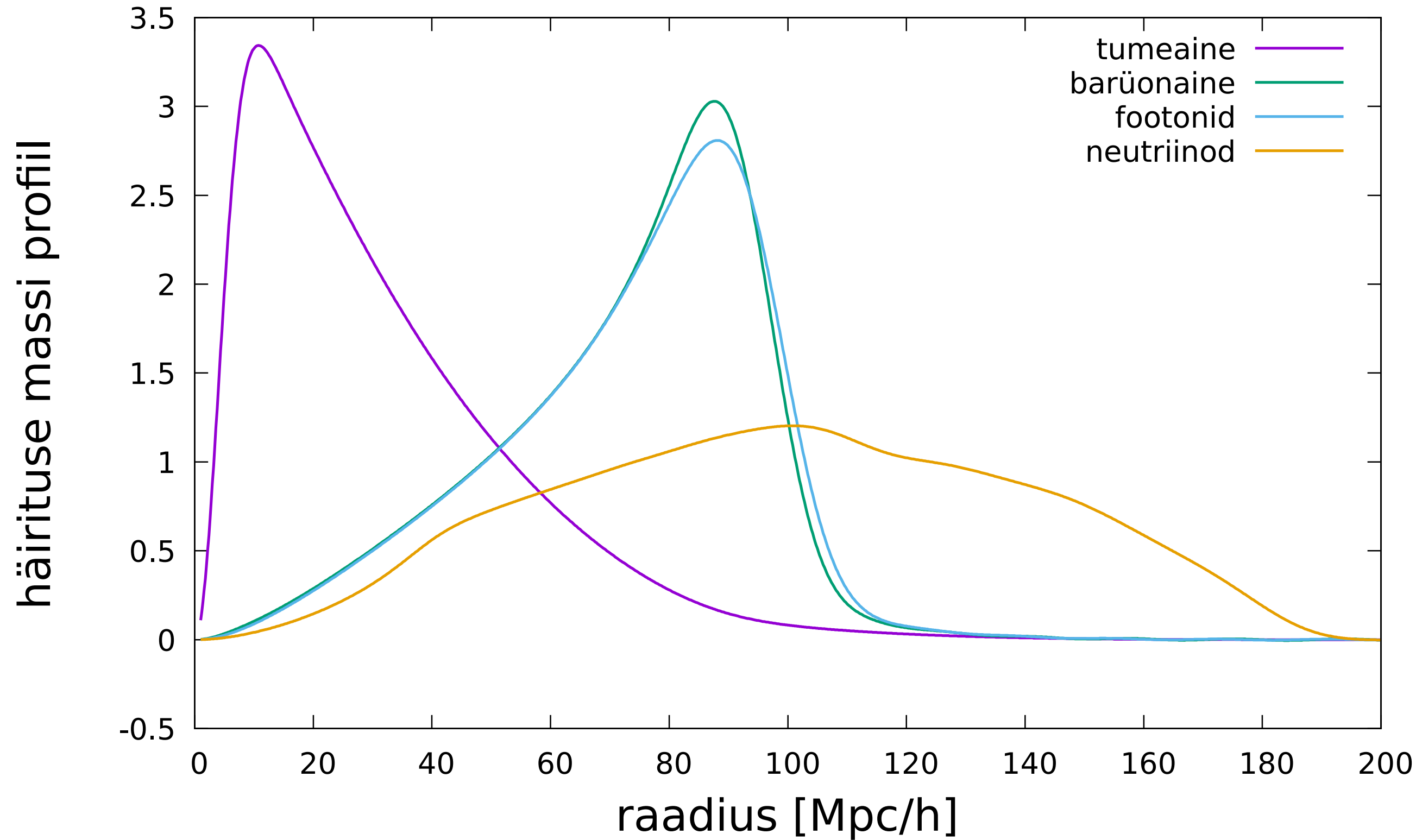
Intuitiivne BAO füüsika

$z=1500$



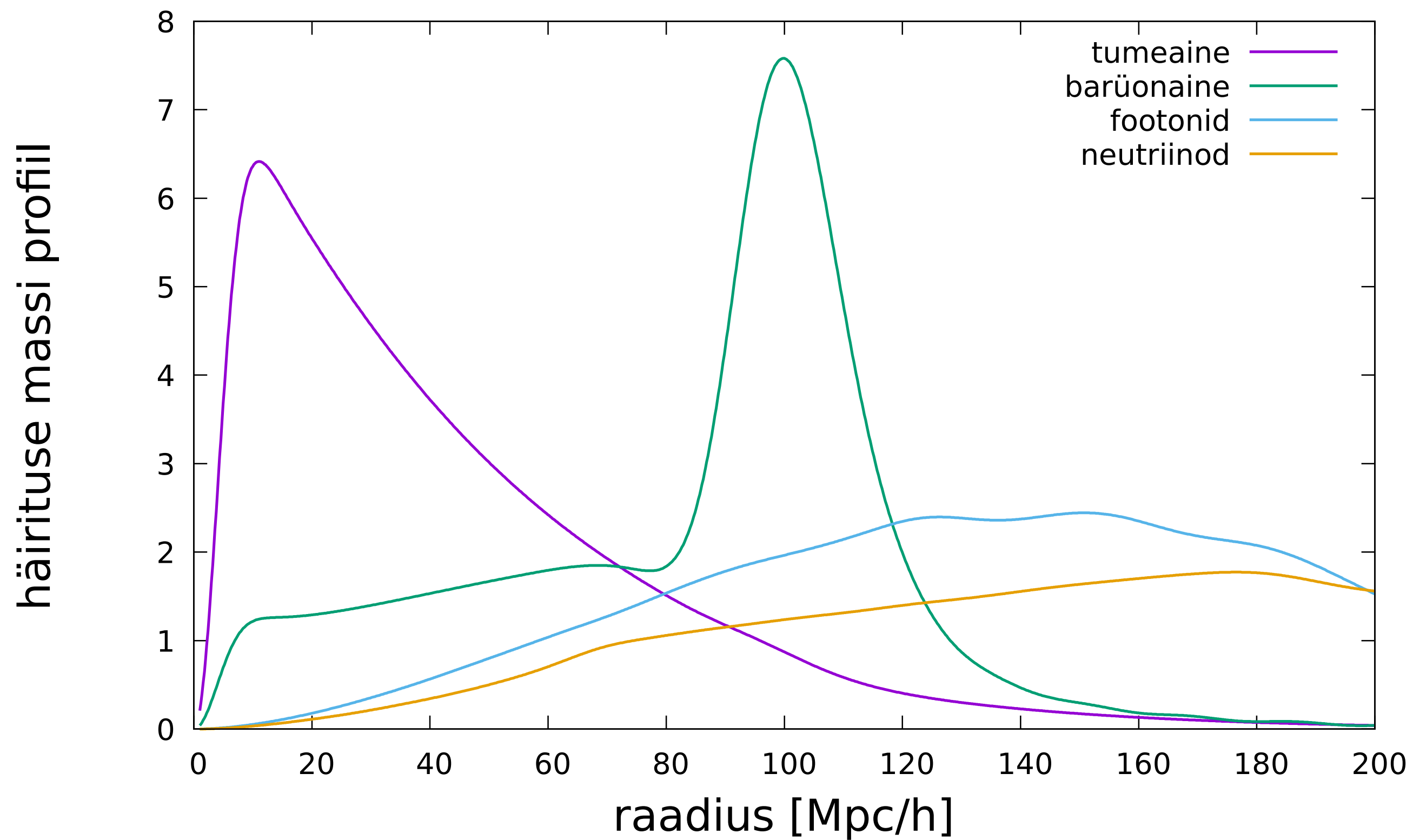
Intuitiivne BAO füüsika

$z=1080$



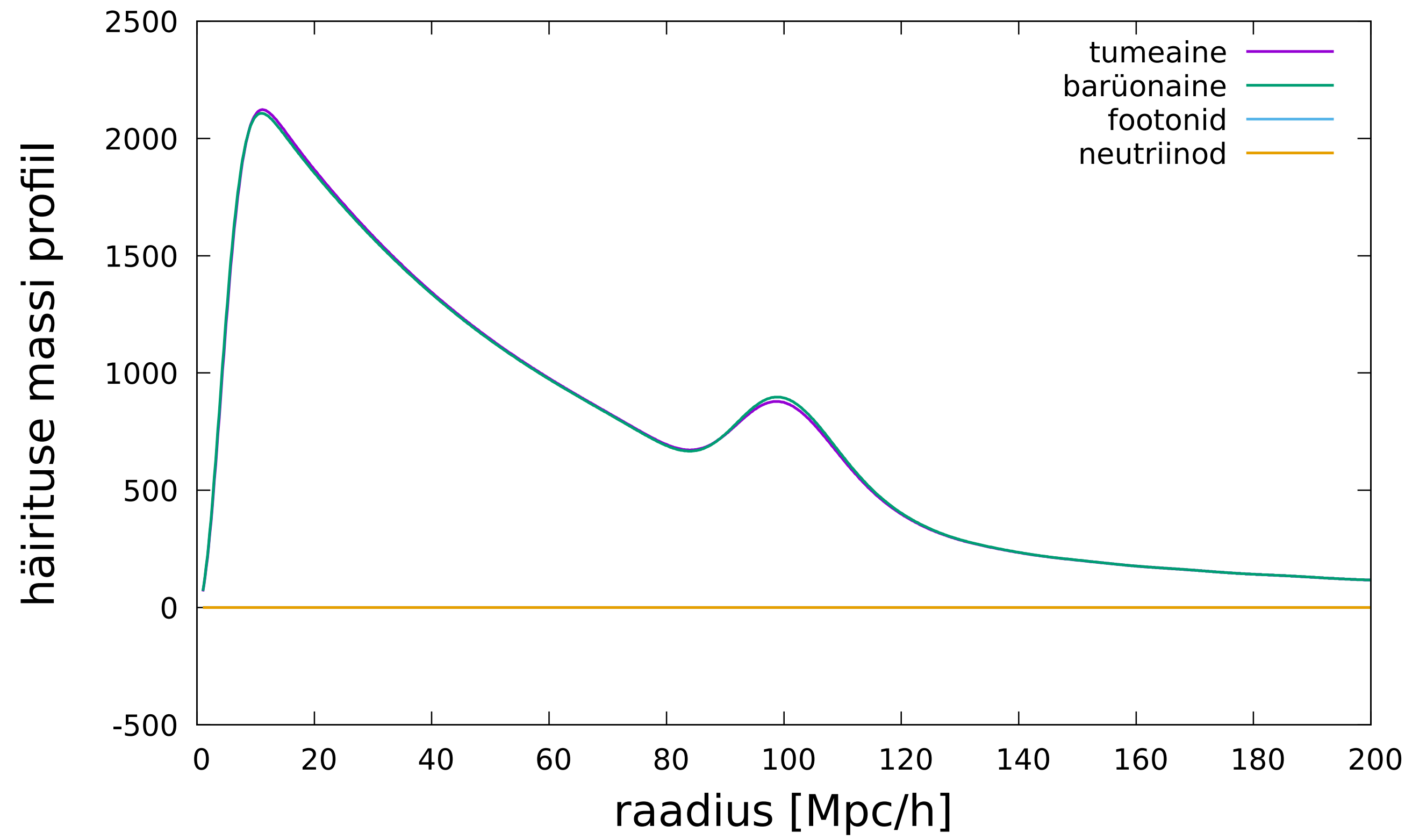
Intuitiivne BAO füüsika

$z=500$



Intuitiivne BAO füüsika

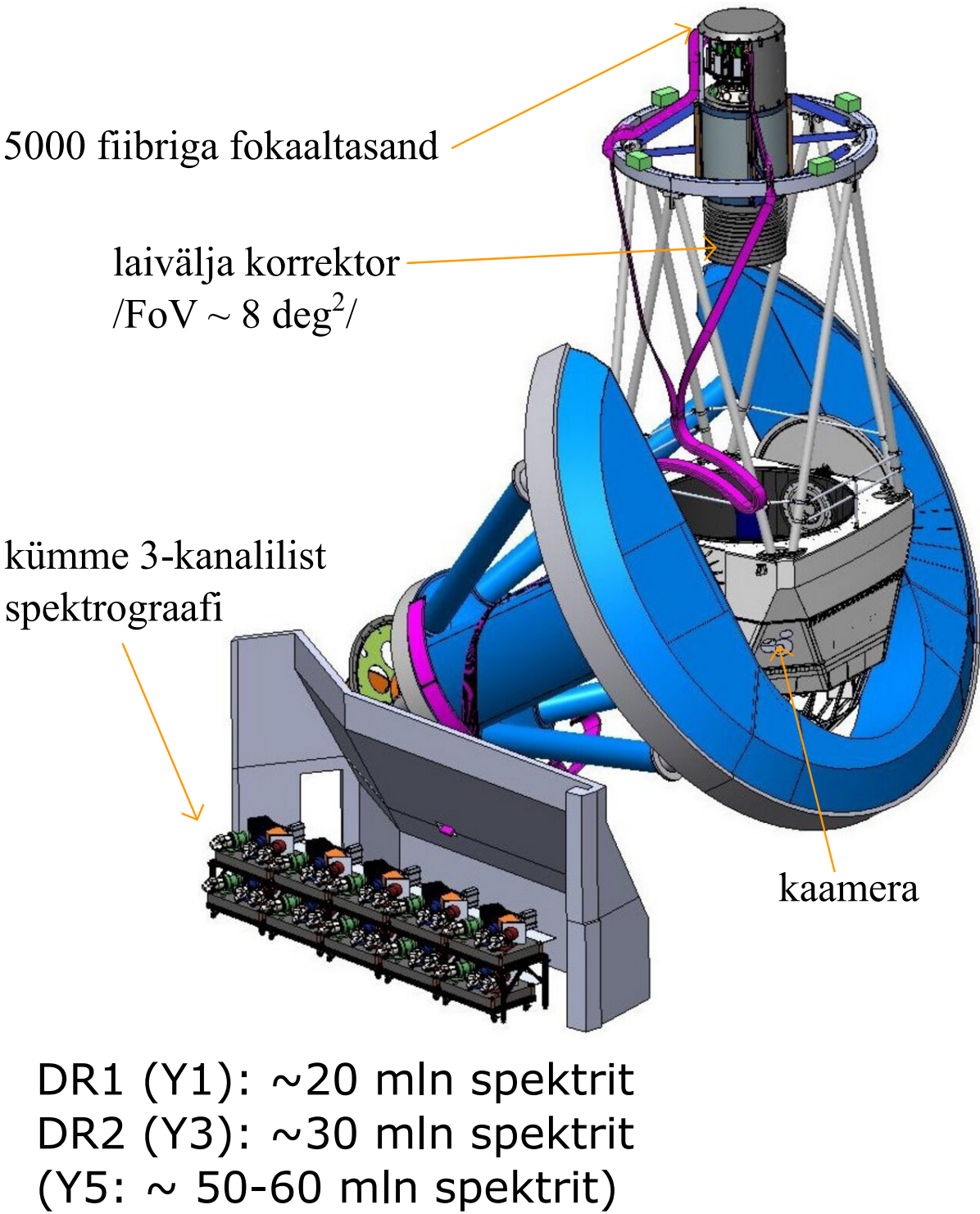
$z=0$



DESI: Λ ?

DESI — Dark Energy Spectroscopic Instrument

4-meetrise peegliga Mayalli teleskoop
Kitt Peaki observatooriumis (US, Arizona)



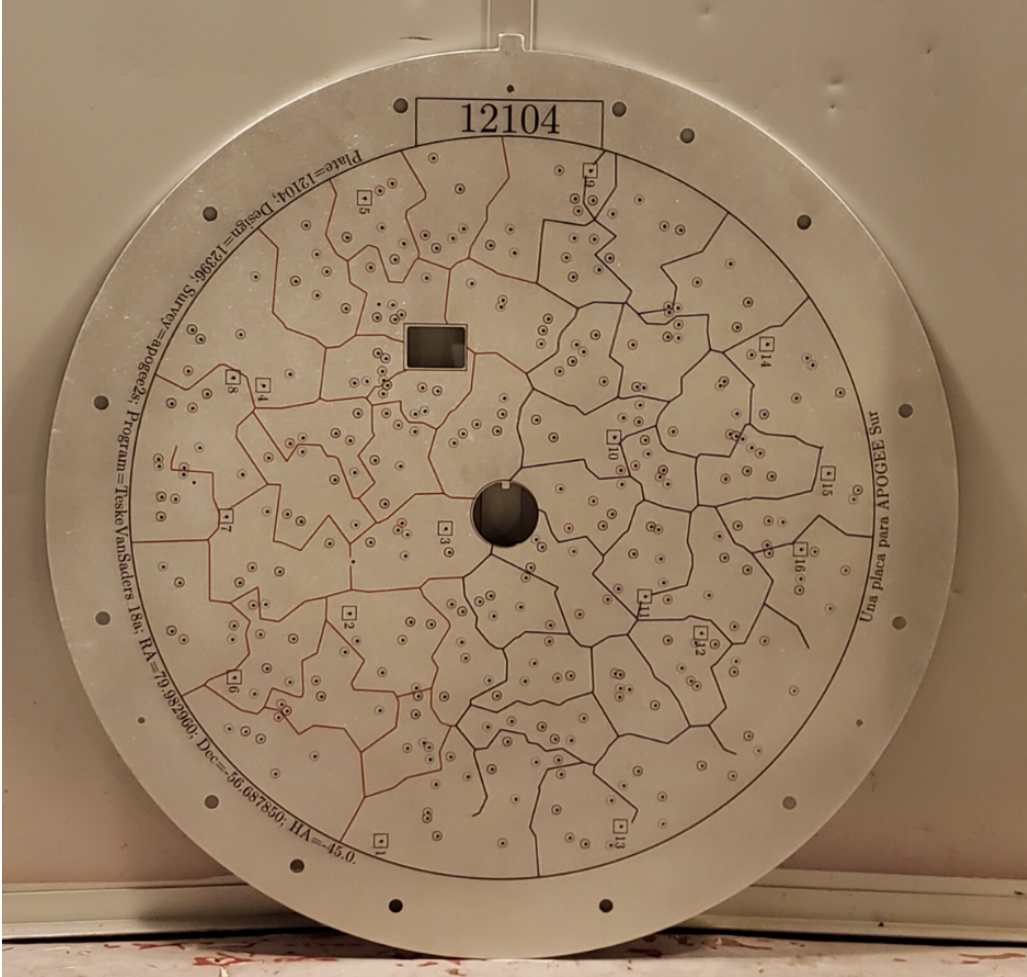
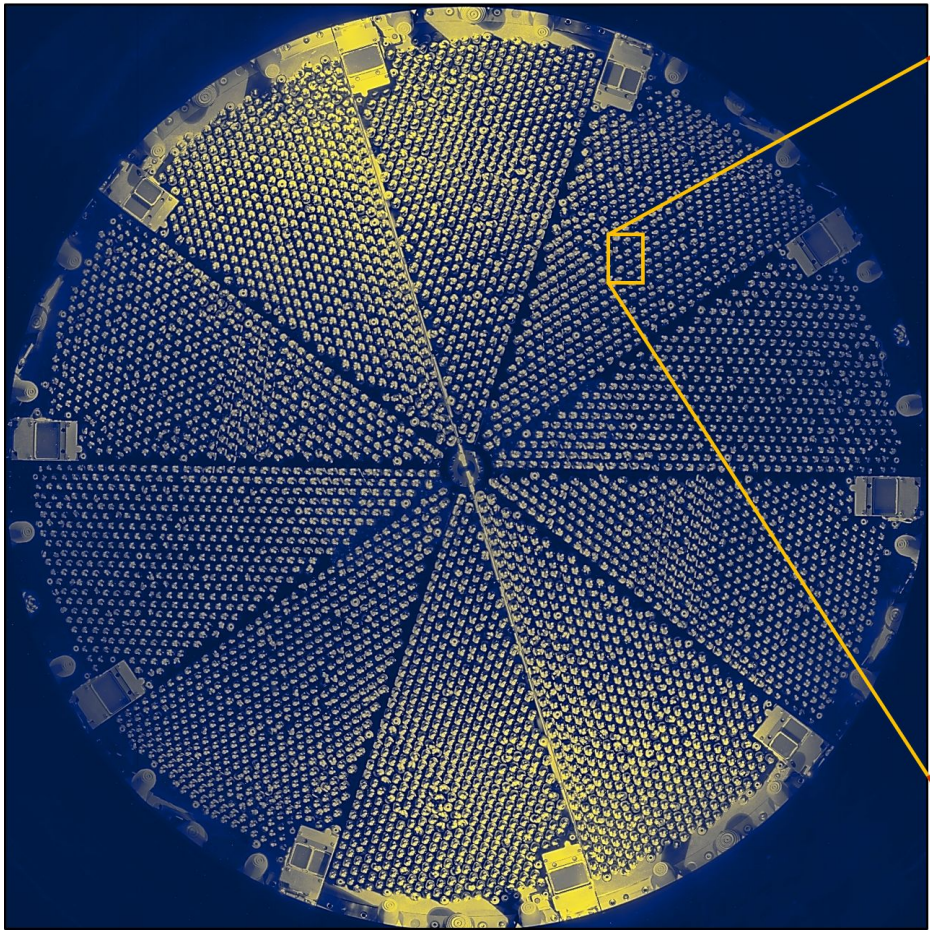
⇒ ~10 mln spektrit/a

- DESI vs SDSS

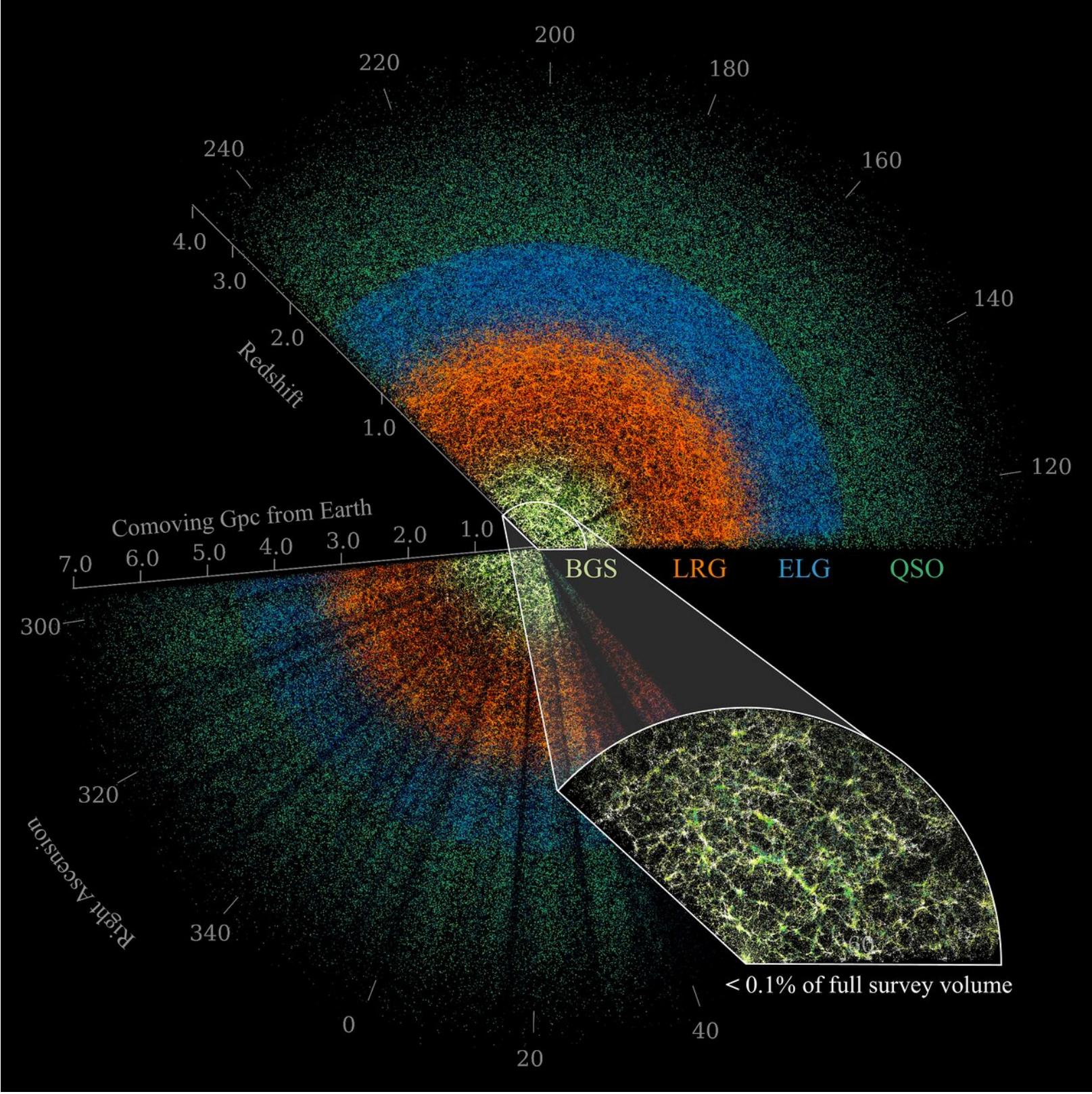
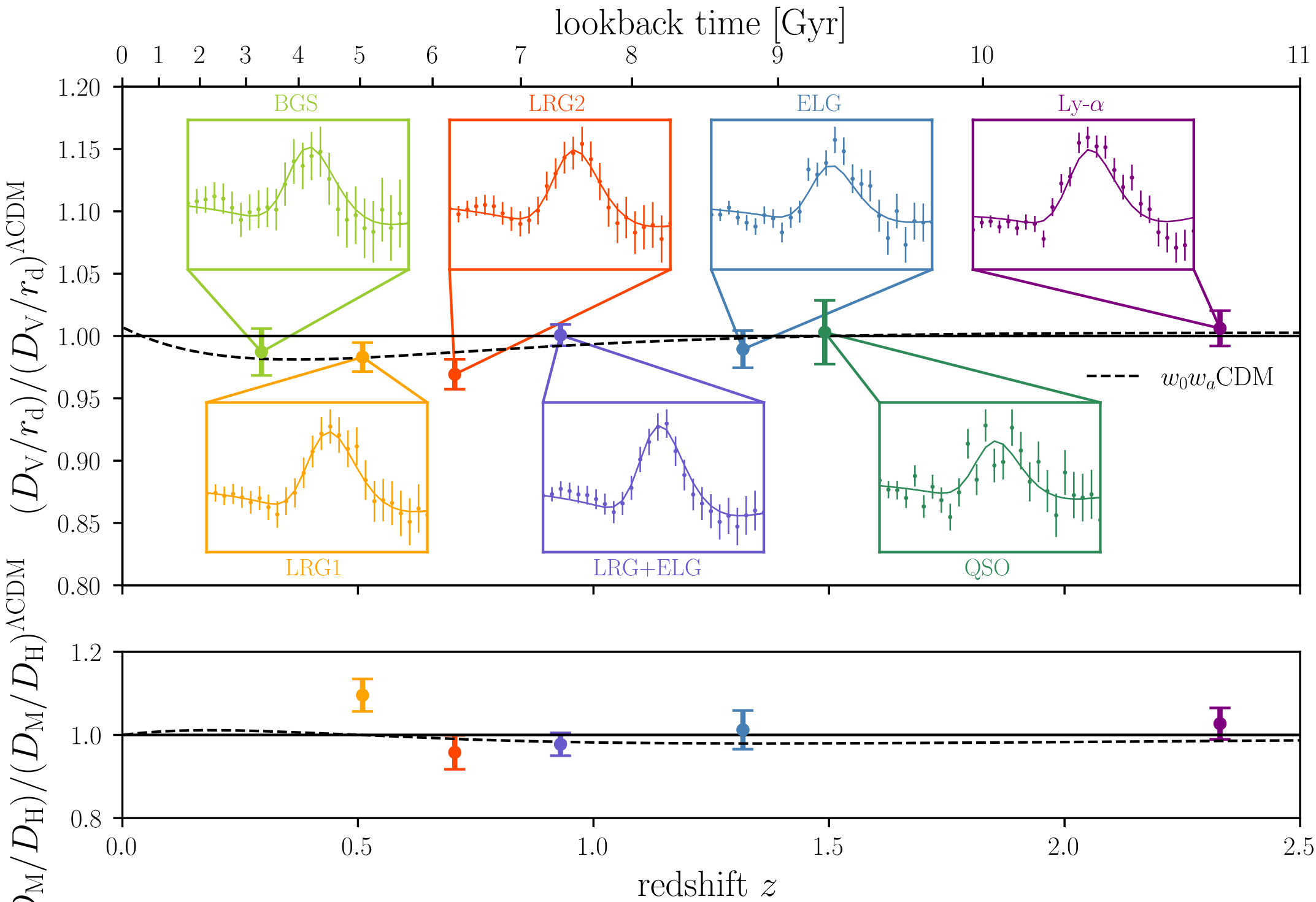
	teleskoop	vaateväli	fiibreid
SDSS	2.5 m	3 deg ²	640
DESI	4 m	8 deg ²	5000

- SDSS käsitööna valminud fokaaltasandi plaadid & manuaalne fiibrite paigaldus vs DESI täielikult automatiseeritud süsteem

- Juba esimese kahe kuuga ületas DESI poolt kogutud spektrite arv kogu senise astronoomia ajaloo jooksul mõõdetu
- Heade vaatlustingimuste korral suuteline mõõtma kuni 100 000 spektrit ühe ööga!



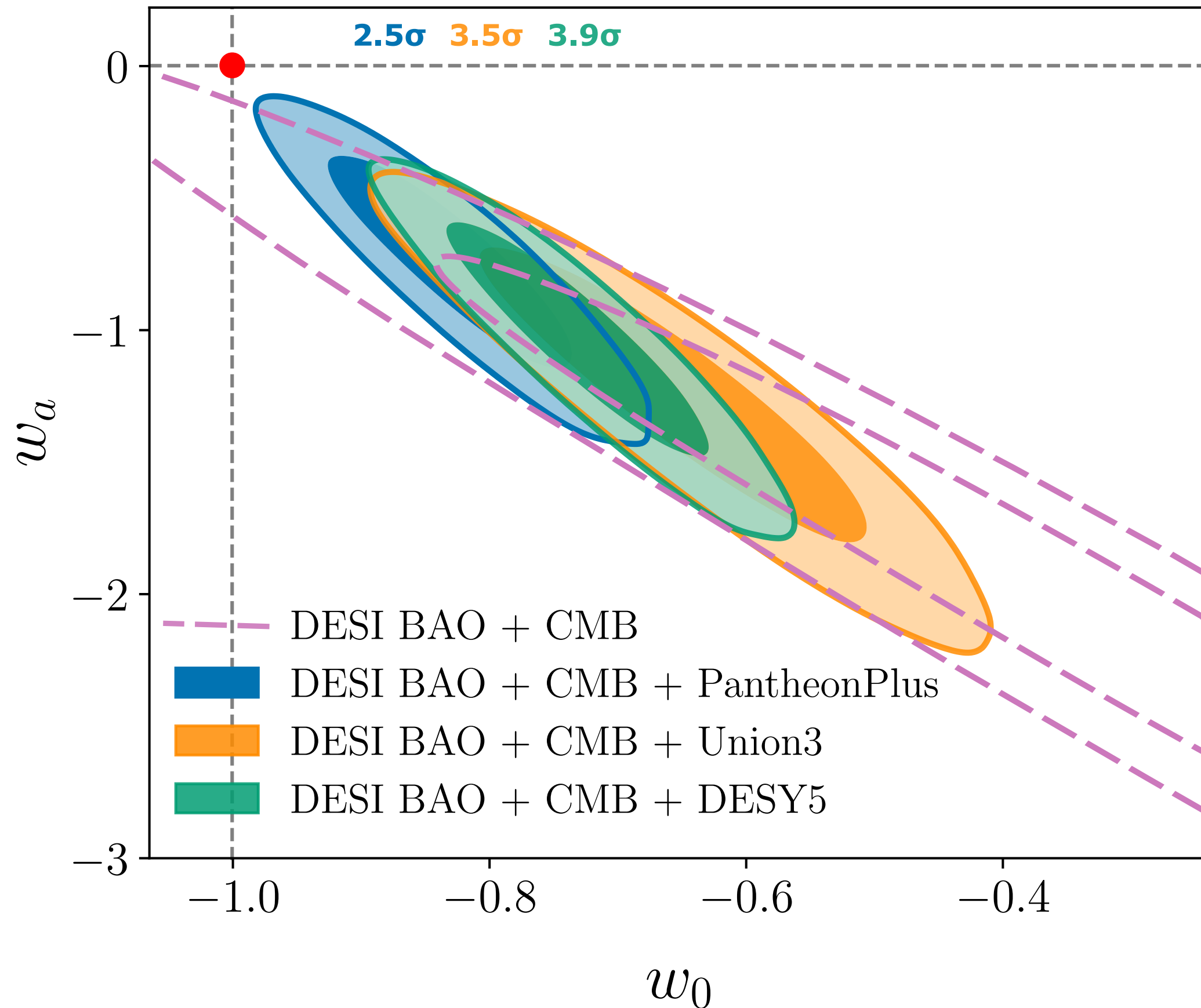
DESI BAO



5 aastaga ~50 miljonit punanihet:

- 4 mln QSOd
Ly α : $z > 1.8$
3D: $0.8 < z < 2.1$
- 10 mln LRGd
 $0.4 < z < 0.8$
- 20 mln ELGd
 $0.6 < z < 1.6$
- 17 mln BGd
 $0 < z < 0.4$

DESI Y1 BAO



$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

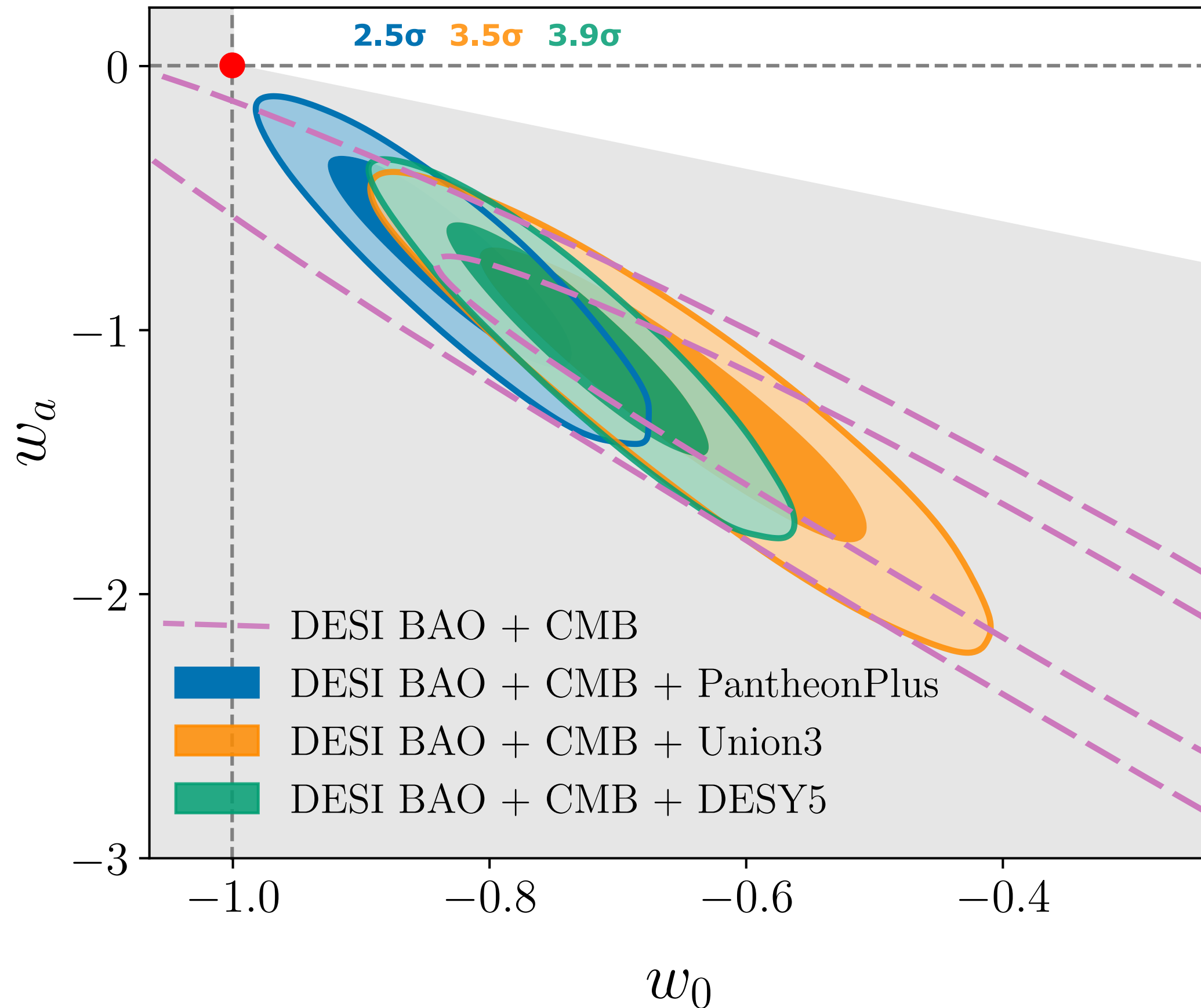
$$a \equiv 1/(1 + z)$$

- tumeenergia on ajas muutuv!
- Λ CDM: $\sim(3-4)\sigma$ vastuolu vaatlusandmetega

- $$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(w+1)} \xrightarrow{a \uparrow}$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{de}} \downarrow & \text{kui } w > -1 \\ \rho_{\text{de}} = \text{const} & \text{kui } w = -1 \\ \rho_{\text{de}} \uparrow & \text{kui } w < -1 \end{cases}$$

DESI Y1 BAO



$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

$$a \equiv 1/(1 + z)$$

- tumeenergia on ajas muutuv!
- Λ CDM: $\sim(3-4)\sigma$ vastuolu vaatlusandmetega

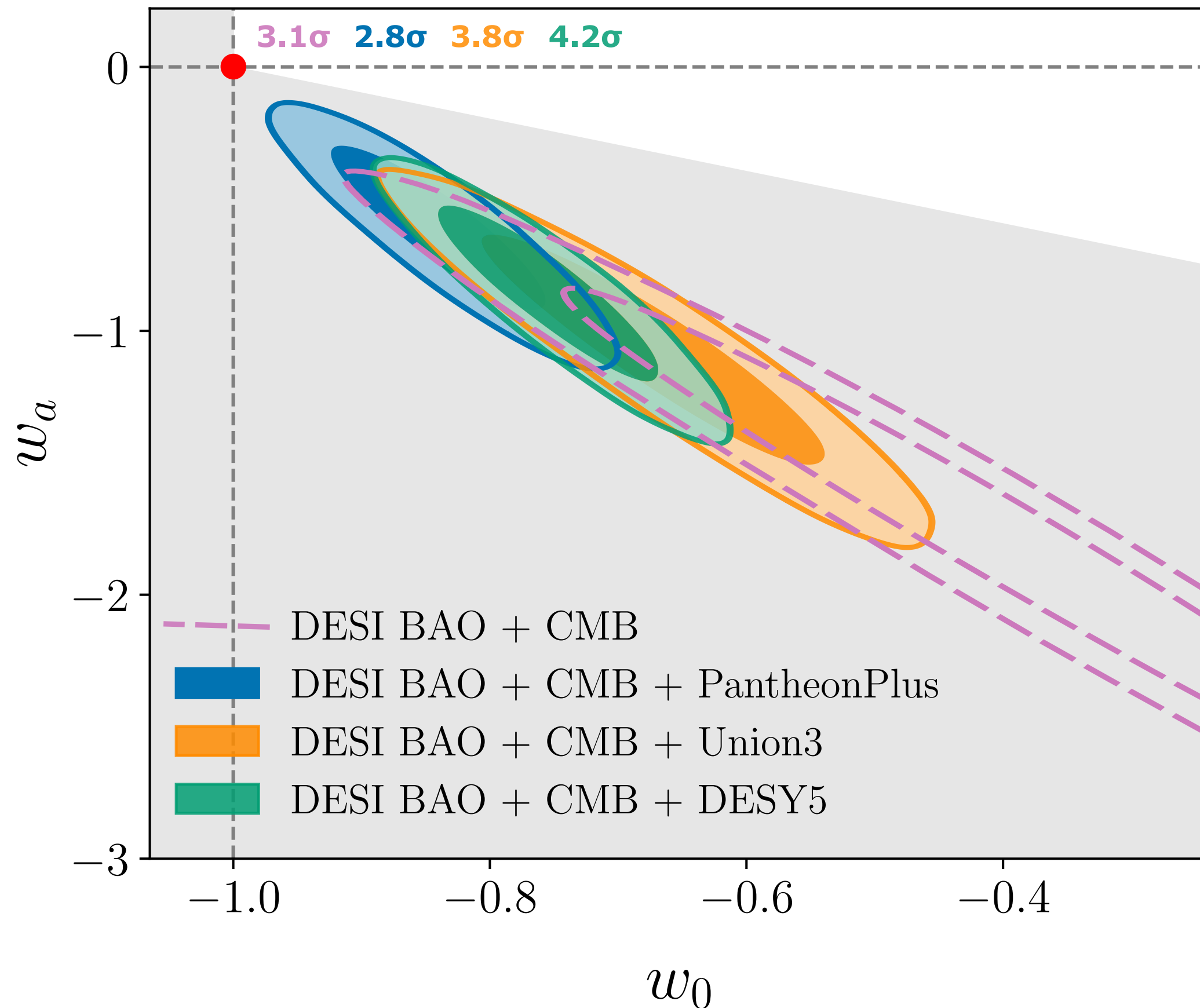
- $$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(w+1)} \xrightarrow{a \uparrow}$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{de}} \downarrow & \text{kui } w > -1 \\ \rho_{\text{de}} = \text{const} & \text{kui } w = -1 \\ \rho_{\text{de}} \uparrow & \text{kui } w < -1 \end{cases}$$

fantomtumeenergia

DESI Y3 BAO

DESI + CMB: 3.1σ !



$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

$$a \equiv 1/(1 + z)$$

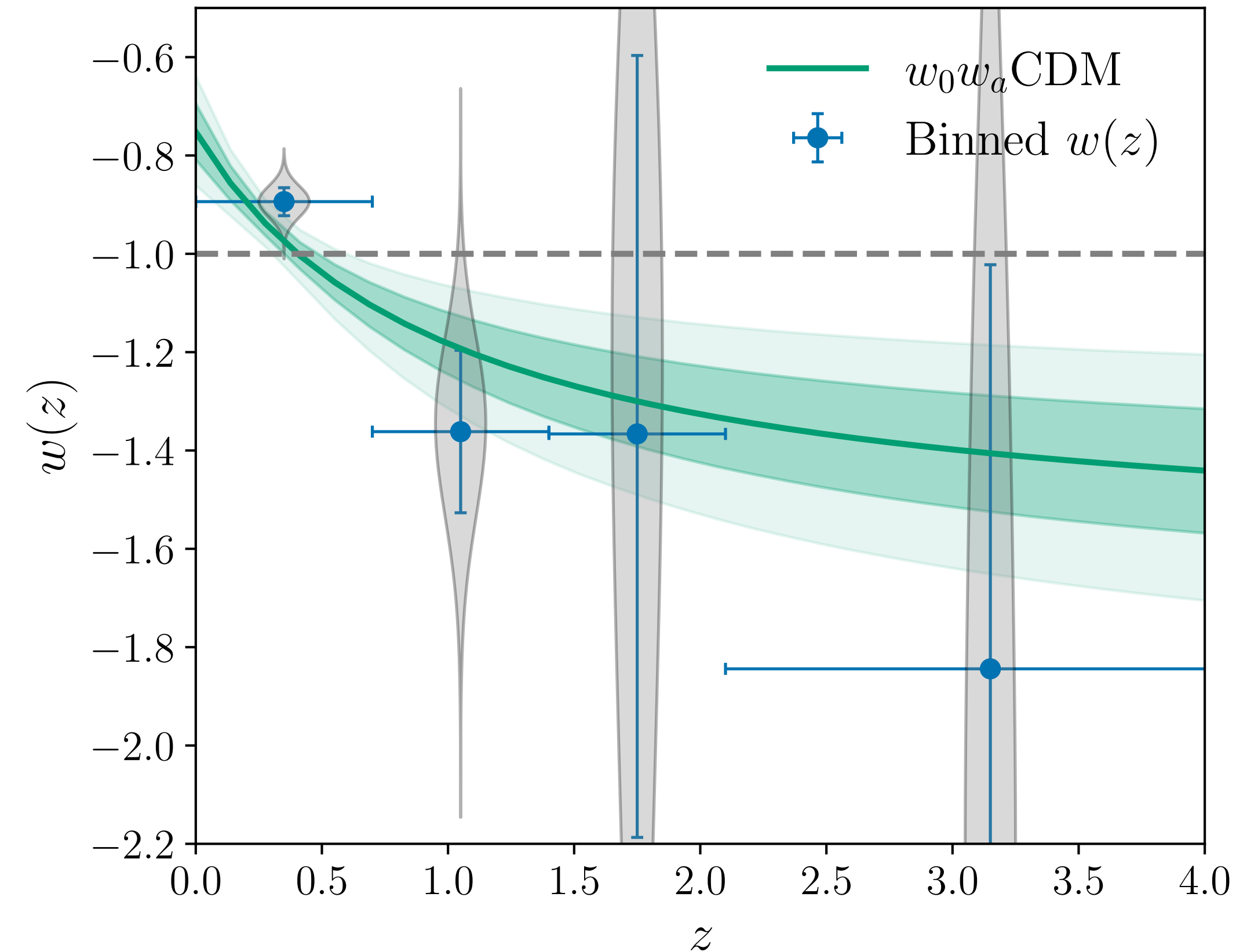
- tumeenergia on ajas muutuv!
- Λ CDM: $\sim(3-4)\sigma$ vastuolu vaatlusandmetega

- $$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(w+1)} \xrightarrow{a \uparrow}$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{de}} \downarrow & \text{kui } w > -1 \\ \rho_{\text{de}} = \text{const} & \text{kui } w = -1 \\ \rho_{\text{de}} \uparrow & \text{kui } w < -1 \end{cases}$$

fantomtumeenergia

DESI Y3 BAO



$$w(a) = w_0 + (1 - a)w_a$$

$$a \equiv 1/(1 + z)$$

- tumeenergia on ajas muutuv!
- Λ CDM: $\sim(3-4)\sigma$ vastuolu vaatlusandmetega

- $$\rho_{\text{de}} \propto a^{-3(w+1)} \xrightarrow{a \uparrow}$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{de}} \downarrow & \text{kui } w > -1 \\ \rho_{\text{de}} = \text{const} & \text{kui } w = -1 \\ \rho_{\text{de}} \uparrow & \text{kui } w < -1 \end{cases}$$

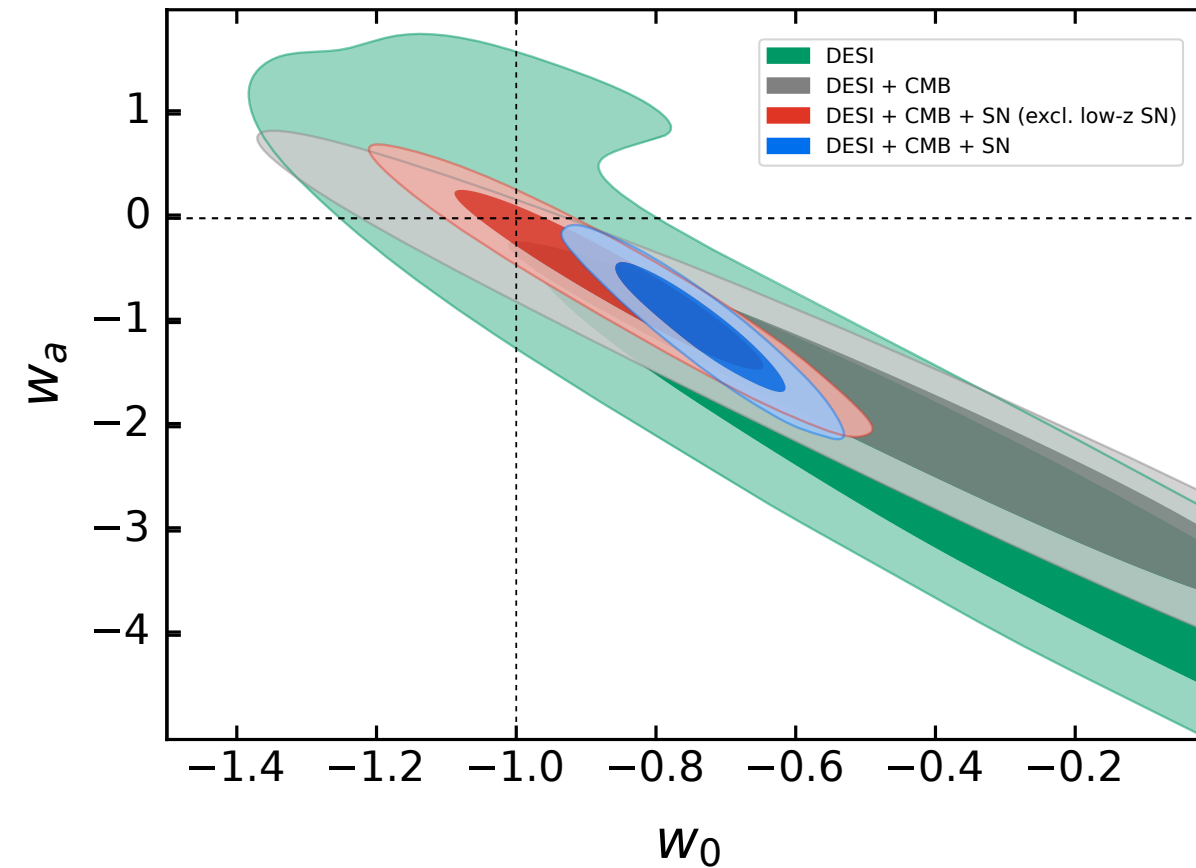
fantomtumeenergia
on see vajalik???

DESI: meie tööd (Y1)

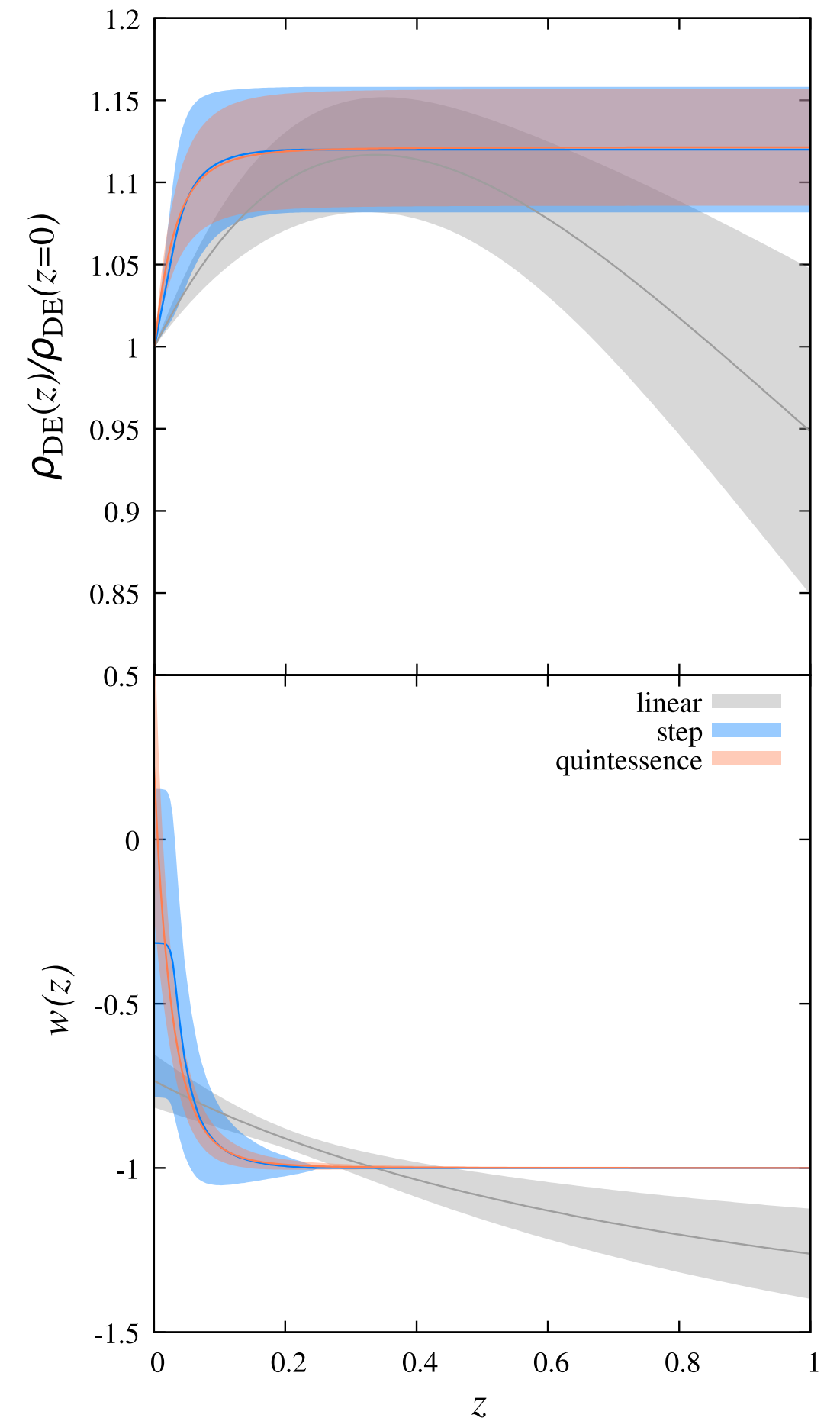
Interpreting DESI 2024 BAO: Late-time dynamical dark energy or a local effect?

Phys.Rev.D 111 (2025) 4, 043540

- kvintessents (skalaarväli) sama hea kui fantoom
- tumeenergia vähenemine
 $\Delta\rho_{\text{DE}}/\rho_{\text{DE}} \sim 10\%$
- kvintessentsi puhul toimub see muutus madalamatel punanihetel ja kiiremini kui w_0 - w_a mudelis
Miks just nüüd???
- $z \lesssim 0.1$ supernoovade eemaldamine taastab kooskõla Λ CDM-ga



- kvintessents $w = \frac{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 - V(\phi)}{\frac{1}{2}\dot{\phi}^2 + V(\phi)}$
kui $\dot{\phi}^2 \ll V(\phi)$ siis $w \simeq -1$
Tavaliselt $-1 < w < 1$
Negatiivse potentsiaali korral võib w minna kuitahes suureks
- fantoomtumeenergia
 - mittestandardne kineetiline energia nn k-essents
 - modifitseeritud gravitatsioon
 - mitmest interakteeruvast komponendist koosnev tumesektor

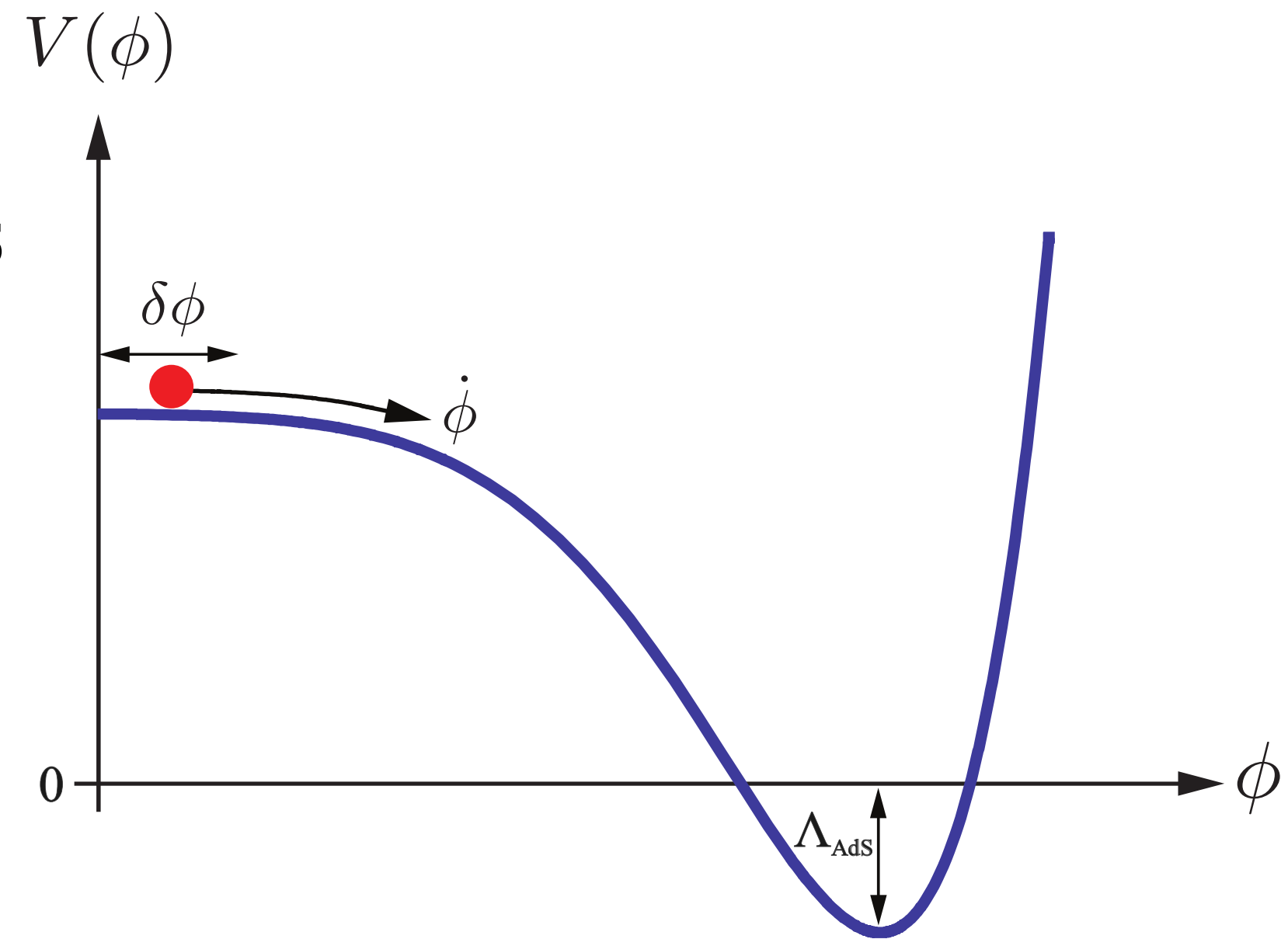
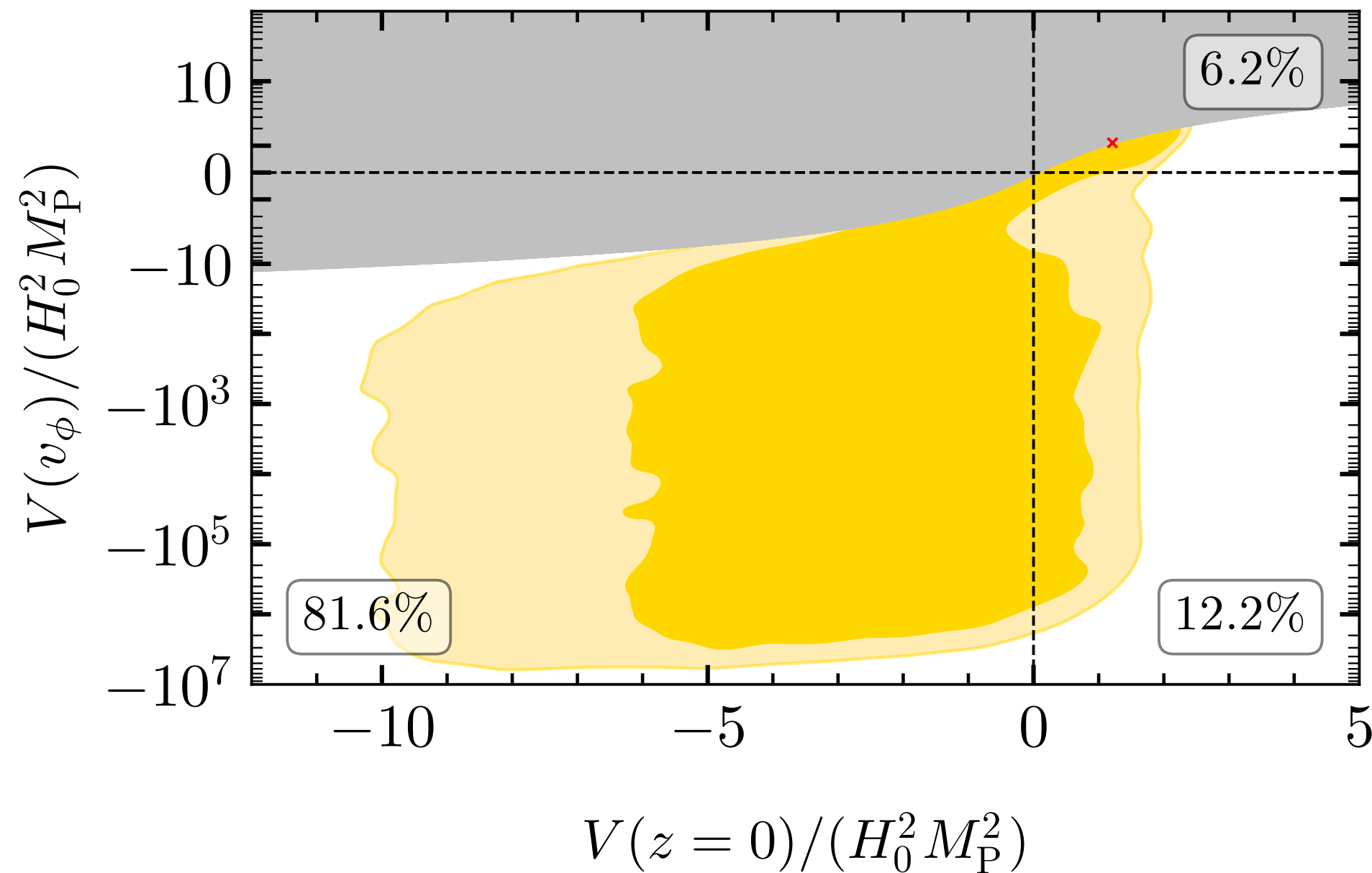


DESI: meie tööd (Y3)

Quintessence and phantoms in light of DESI 2025

Phys.Rev.D 112 (2025) 6, 063551

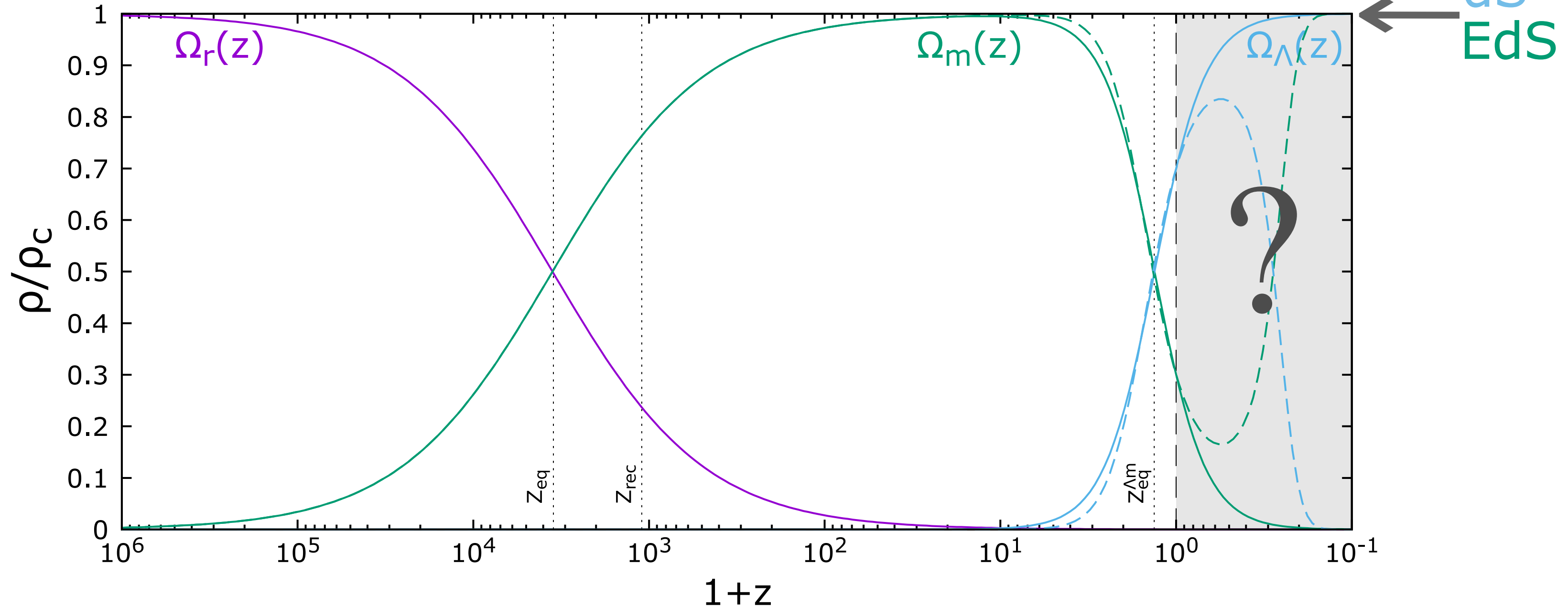
- kvintessentsi puhul realistlik Higgsi potentsiaaliga skalaarväli
- fantoommudelid annavad väikese eelise kvintessentsi ees
- lubame potentsiaalil minna negatiivseks — see võimaldab kirjeldada ka negatiivse efektiivse Λ -ga AdS vaakumit



- suur osa mudelitest on juba praegu (81.6%) või tulevikus (12.2%) negatiivse potentsiaali piirkonnas $\implies$ asümptootiline AdS $\implies$ Universumi kollaps

TULEVIK

- ajaskaala: aasta
DESI 5Y & Euclid DR1
- ajaskaala: gigaaasta



— võimalik ka AdS tulevik & Universumi kollaps

Me ei tea Universumi tuleviku kohta midagi!

Aitäh!