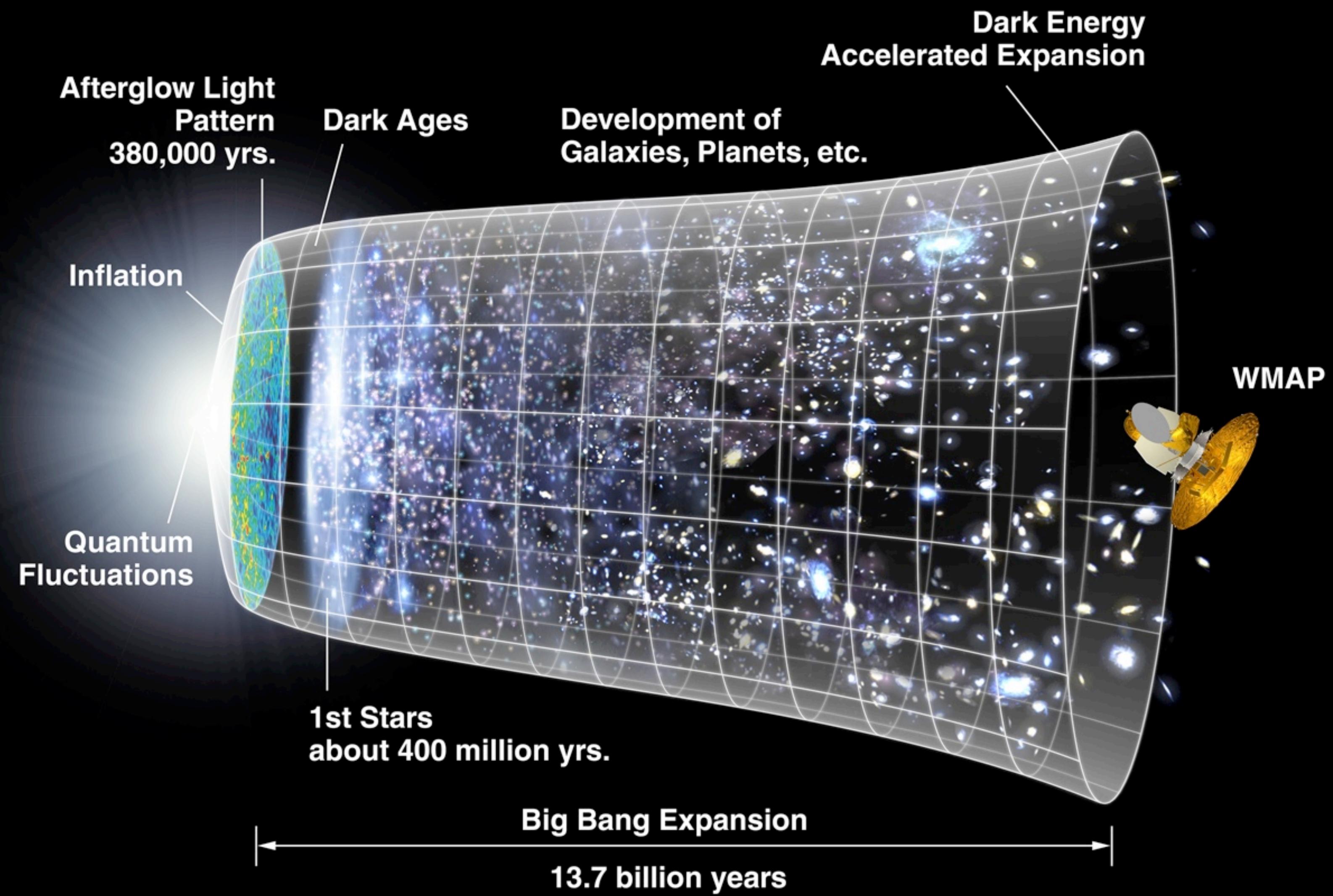


Sternentstehung im kosmologischen Kontext Population-III-Sterne

Astrophysik-Seminar, Sommersemester 2010
Matthias Rampke

Überblick

- Rekombination
- Strukturbildung
- Erste Sterne
- Rückwirkung auf die Sternentstehung



Die Big-Bang-Theorie

- Universum dehnt sich aus
- Rotverschiebung z : Maß für die Ausdehnung
- Energiedichten (\sim Temperaturen) skalieren mit $z + 1$

$$T(z) = T_0 \cdot (1 + z) = 2.73(1 + z)\text{K}$$

Λ CDM-Modellparameter

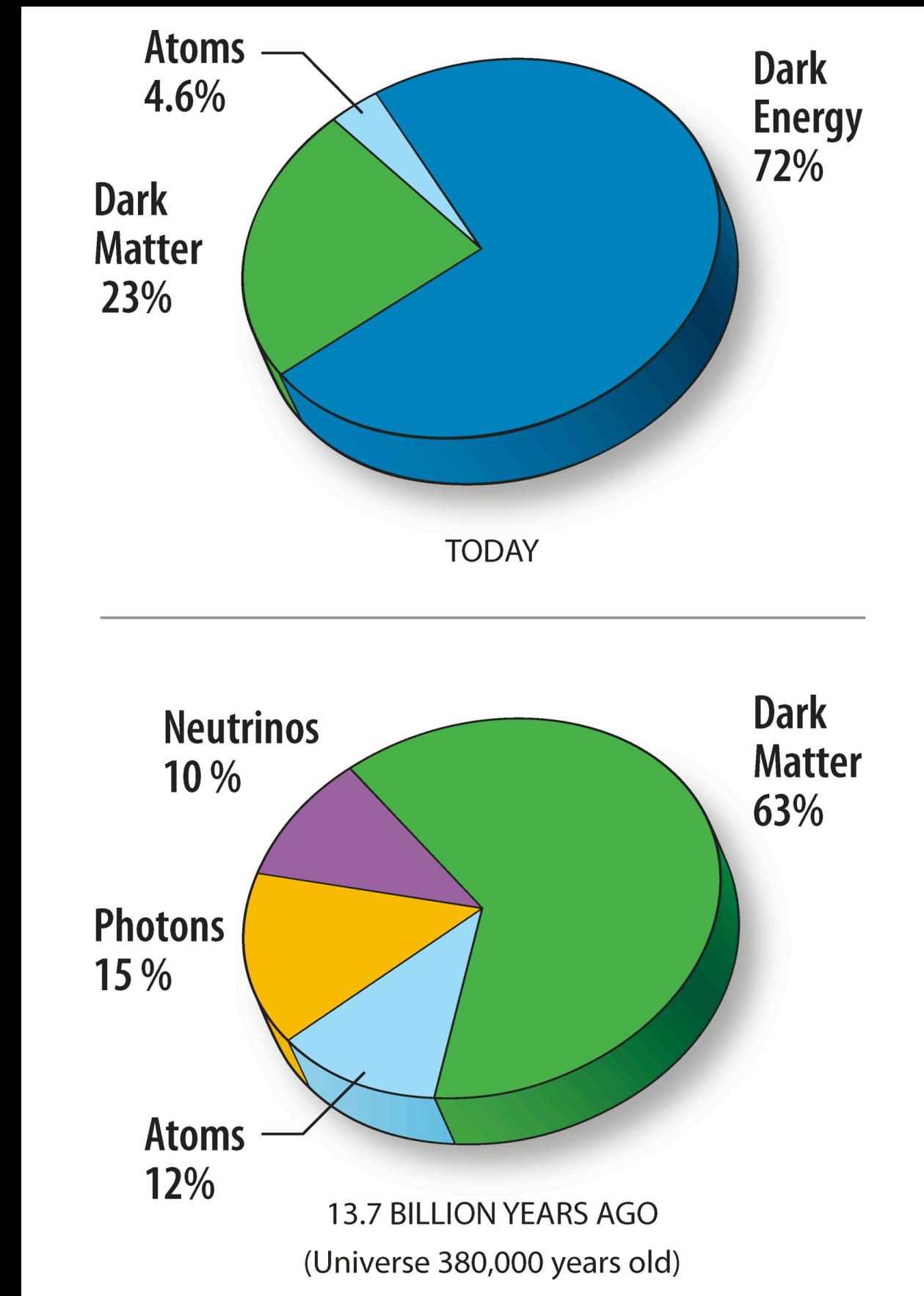
$$\Omega_{dm} = 0.227 \pm 0.014$$

$$\Omega_b = 0.0456 \pm 0.0016$$

$$\Omega_\Lambda = 0.728^{+0.015}_{-0.016}$$

$$H_0 = 100h \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

$$h = 0.704^{+0.013}_{-0.014}$$



Rekombination

- $z \gtrsim 1300$: Universum ist gefüllt mit heißem Plasma
- ${}^1\text{H} \sim 75\%$, ${}^4\text{He} \sim 25\%$, $\text{D} \sim 10^{-5}$, ${}^3\text{He} \sim 10^{-5}$, ${}^7\text{Li} \sim 10^{-10}$
- $T \gtrsim 3000$ K: ständige Ionisation durch Strahlung

- bei Rekombination eines Atoms emittierte Photonen ($h\nu = 13.6 \text{ eV}$) reionisieren sofort ein anderes Atom
- effektive Rekombination nur durch 2-Stufen-Rekombination mit 2-Photonen-Zerfall

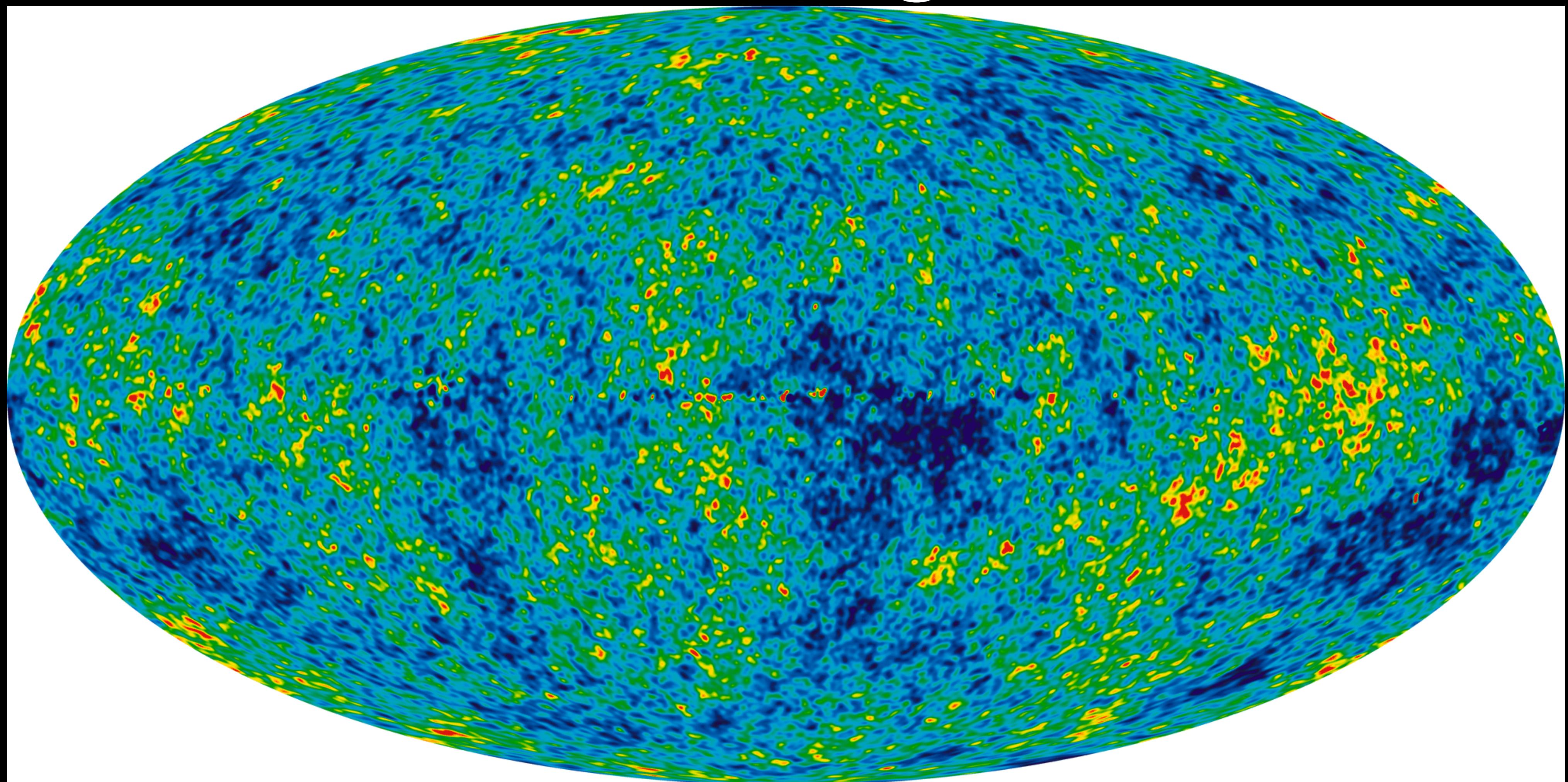
Für $1200 \gtrsim z \gtrsim 800$:

$$\left(\frac{n_e}{n_p}\right)(z) = 2.4 \times 10^{-3} \frac{\sqrt{\Omega_m h^2}}{\Omega_b h^2} \left(\frac{z}{1000}\right)^{12.75}$$

Optische Dichte der Thompson-Streuung:

$$\tau(z) = 0.37 \left(\frac{z}{1000}\right)^{14.75}$$

Last Scattering Surface



Strukturbildung

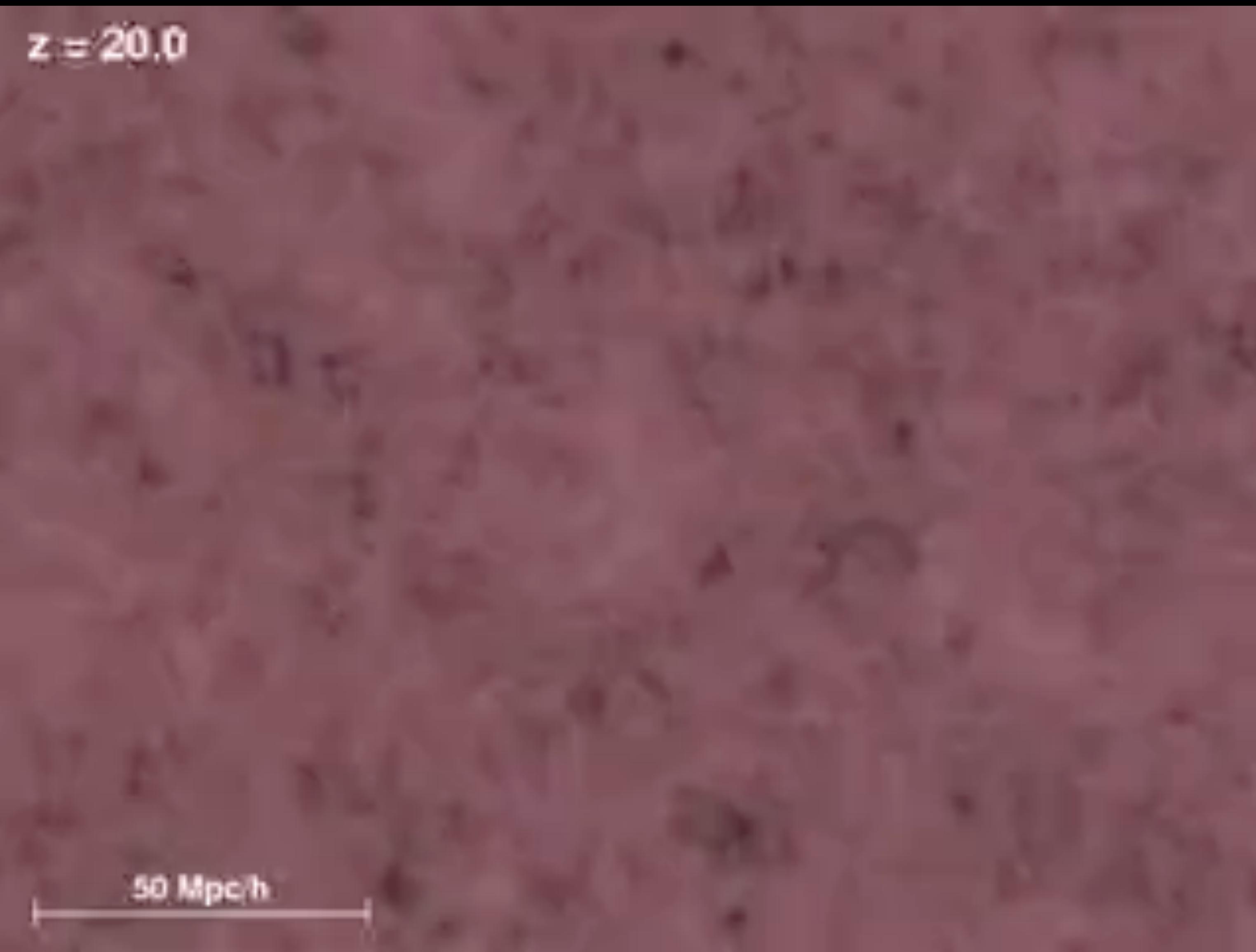
- Λ CDM-Modell: Kalte Dunkle Materie mit kosmologischer Konstante
- Dunkle Materie: WIMPs
- statistische Anfangsschwankungen (Gauß-Feld) der Dichte werden durch gravitativen Kollaps verstärkt
- Bottom-Up: kleinere Objekte bilden sich zuerst

- Plasma ist optisch dicht
- Dichteschwankungen werden vor der Rekombination durch den Strahlungsdruck ausgeglichen
- Dunkle Materie ist davon entkoppelt
- Dichteschwankungen können sich schon vor der Rekombination verstärken

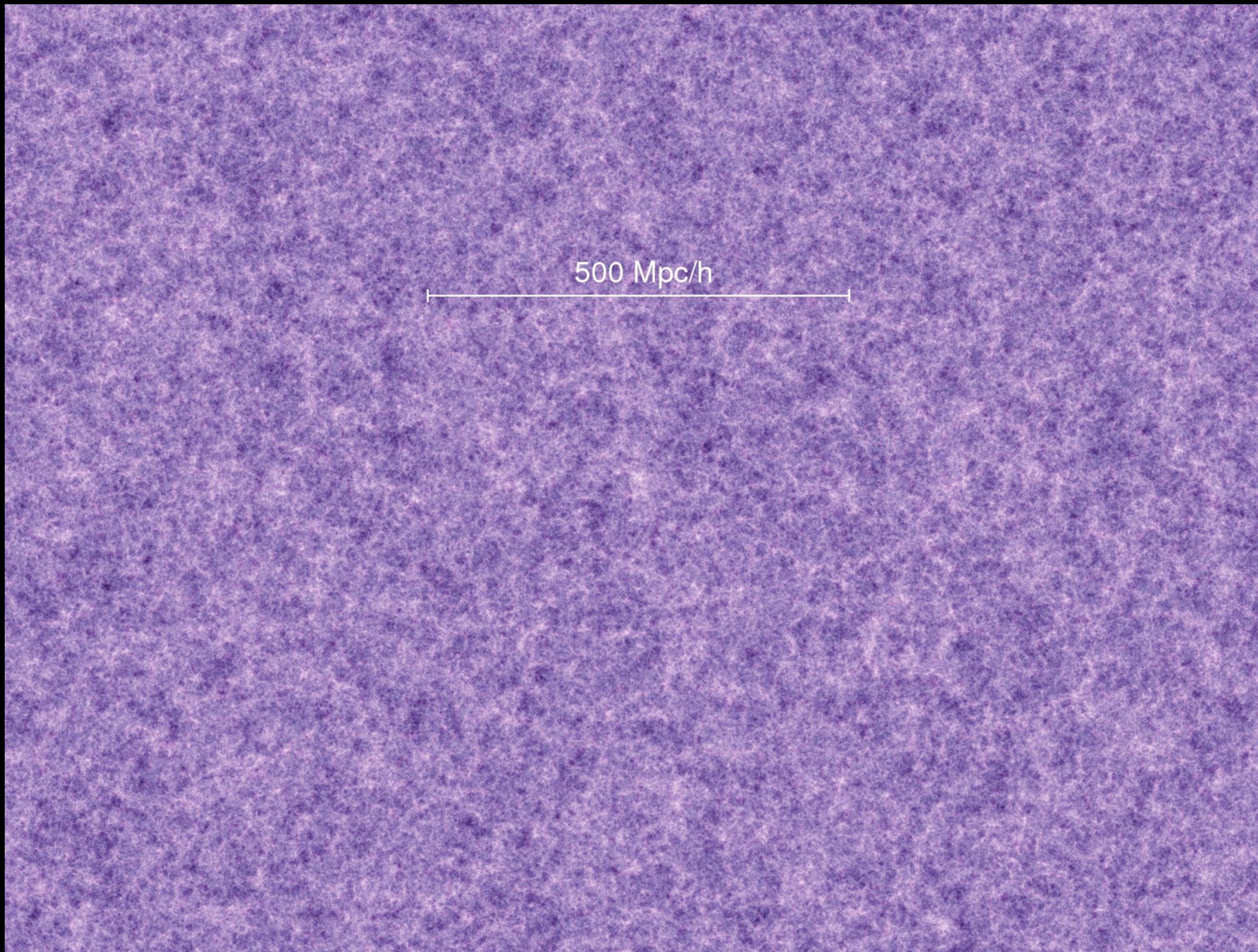
Millennium Simulation

- Nature 435:629-636,2005 | arXiv:astro-ph/0504097
- <http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/millennium/>
- > 10 Milliarden Teilchen à \sim 1 Mrd. Sonnenmassen
- 2 Mly Kantenlänge
- $z = 127 \dots 0$

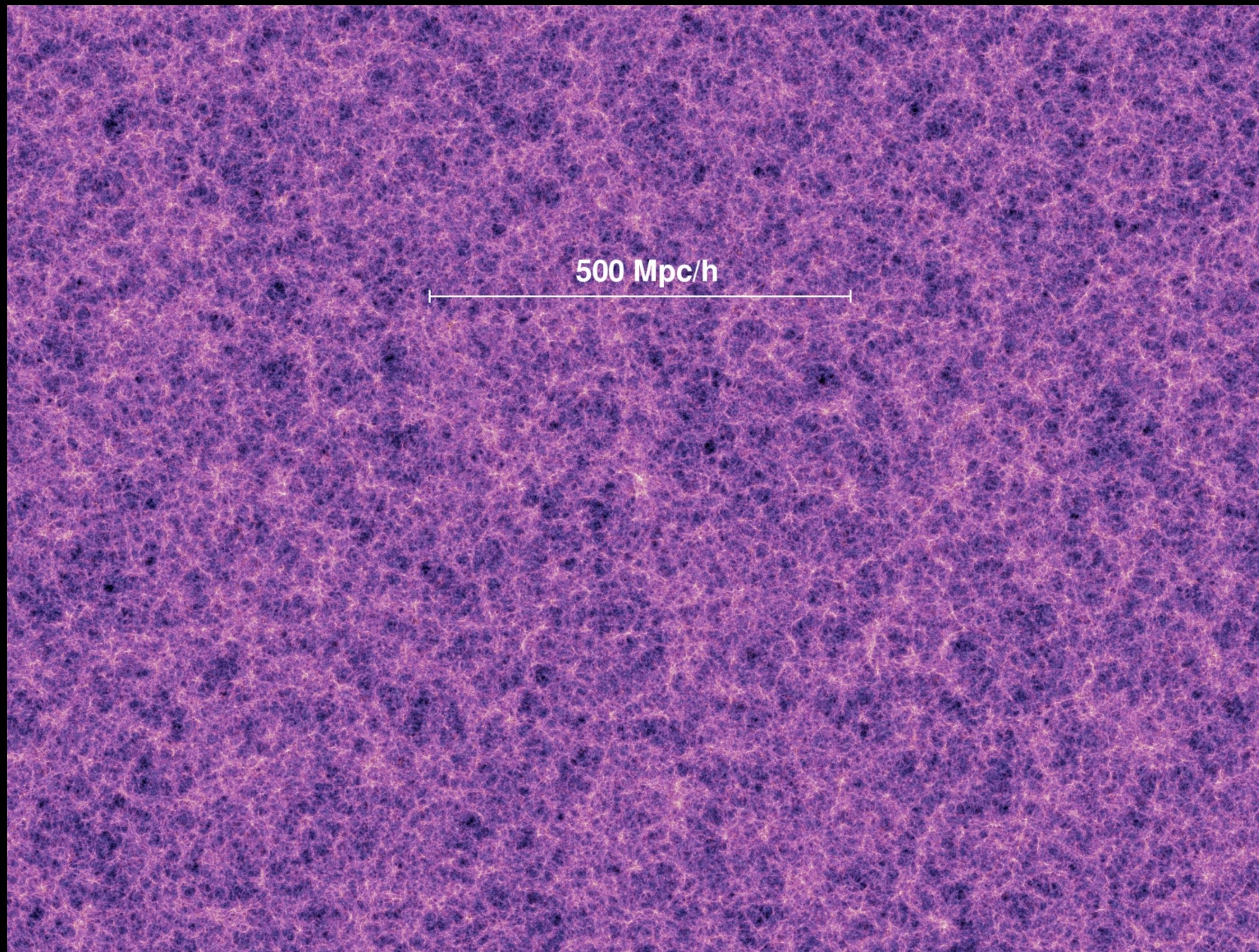
$z=20.0$



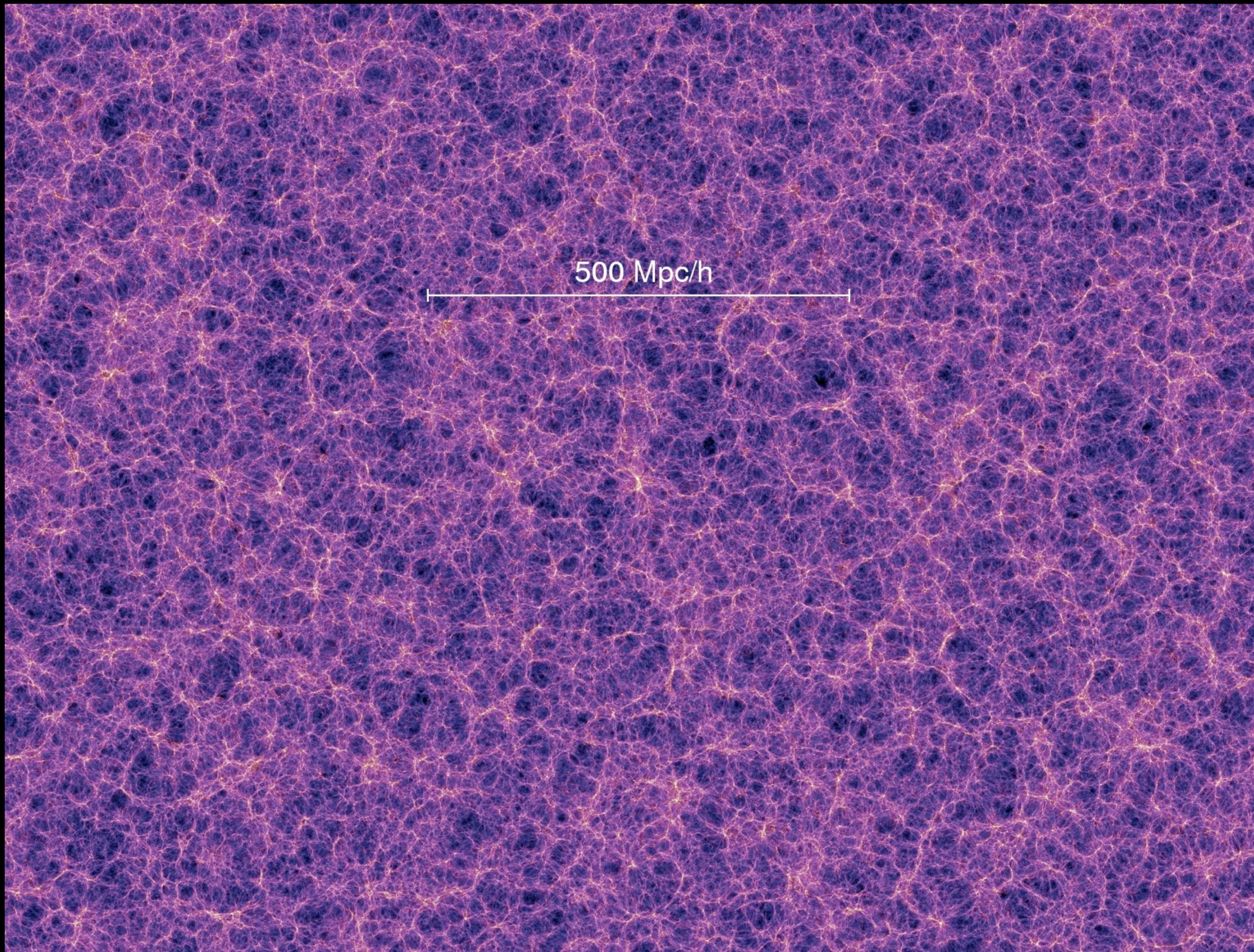
$z = 18.3$



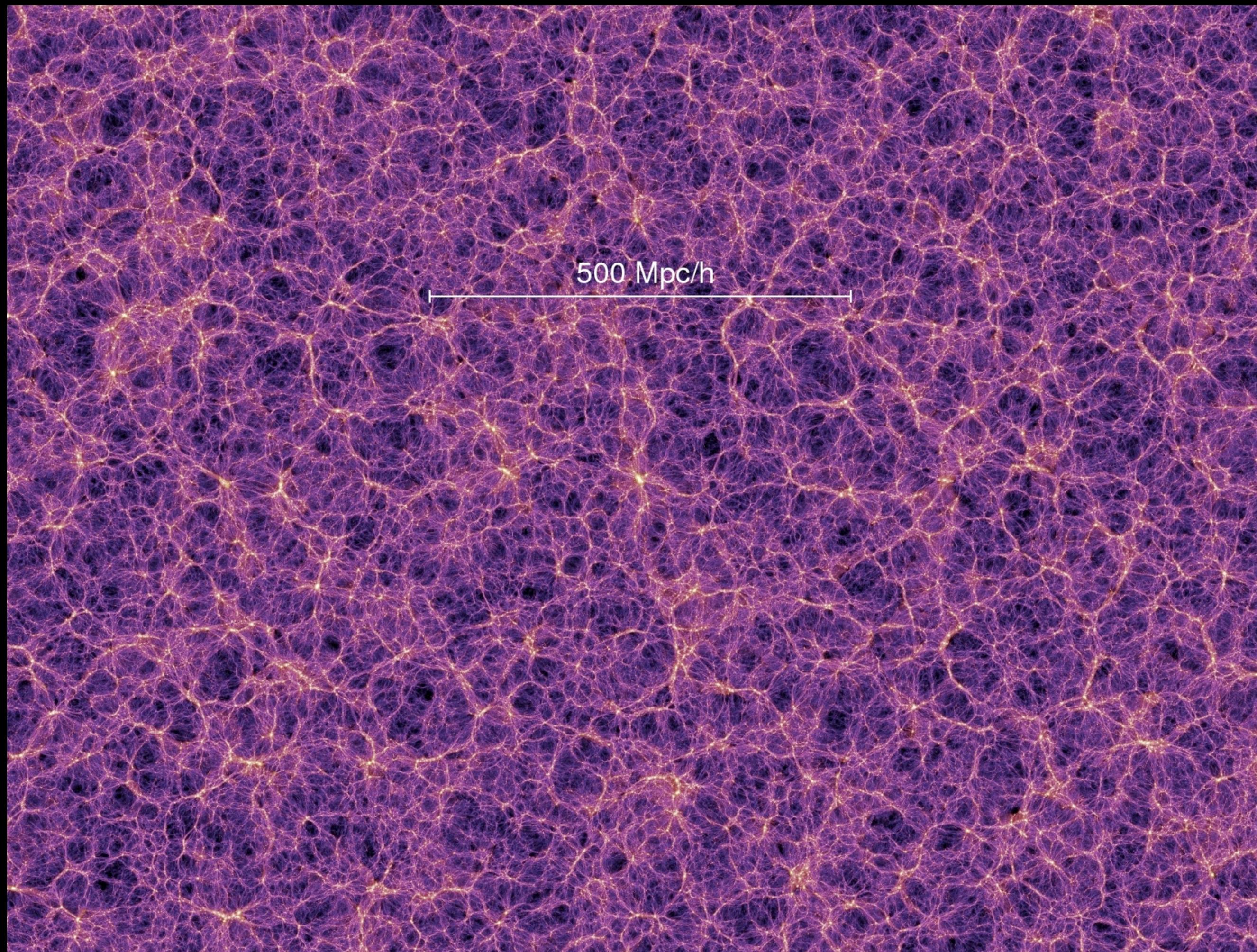
$z = 5.7$



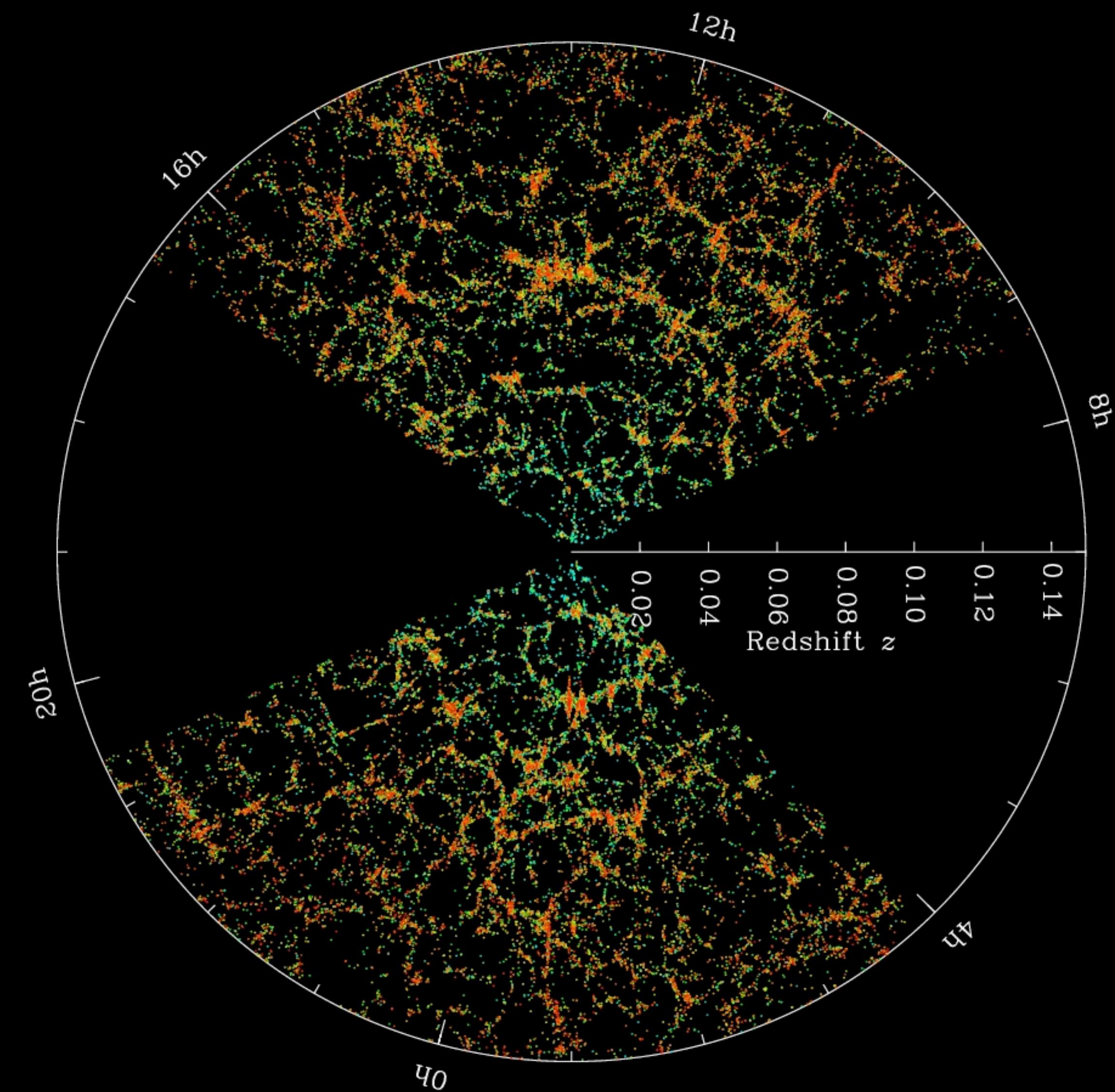
$z = 1.4$



$z = 0$



SDSS



Population-III-Sterne

- Population I: $Z \sim 0.02$
- Population II: $Z \sim 0.001$
- Primordiales Gas: $Z = 0$
- Warum sehen wir keine Sterne mit $Z = 0$?

Terminologie

- Population III: entstanden aus Gas, das nicht genug Metall enthält um die Sternentstehung relevant zu beeinflussen
 - Population III.1: Erste Sterne; Entstehung nur abhängig von kosmologischen Parametern
 - Population III.2: beeinflusst von Vorgängersternen, aber nicht mit Metallen angereichert
- Population II: $Z/Z_{\odot} > 10^{-6}$

Entstehung von Population-III-Sternen

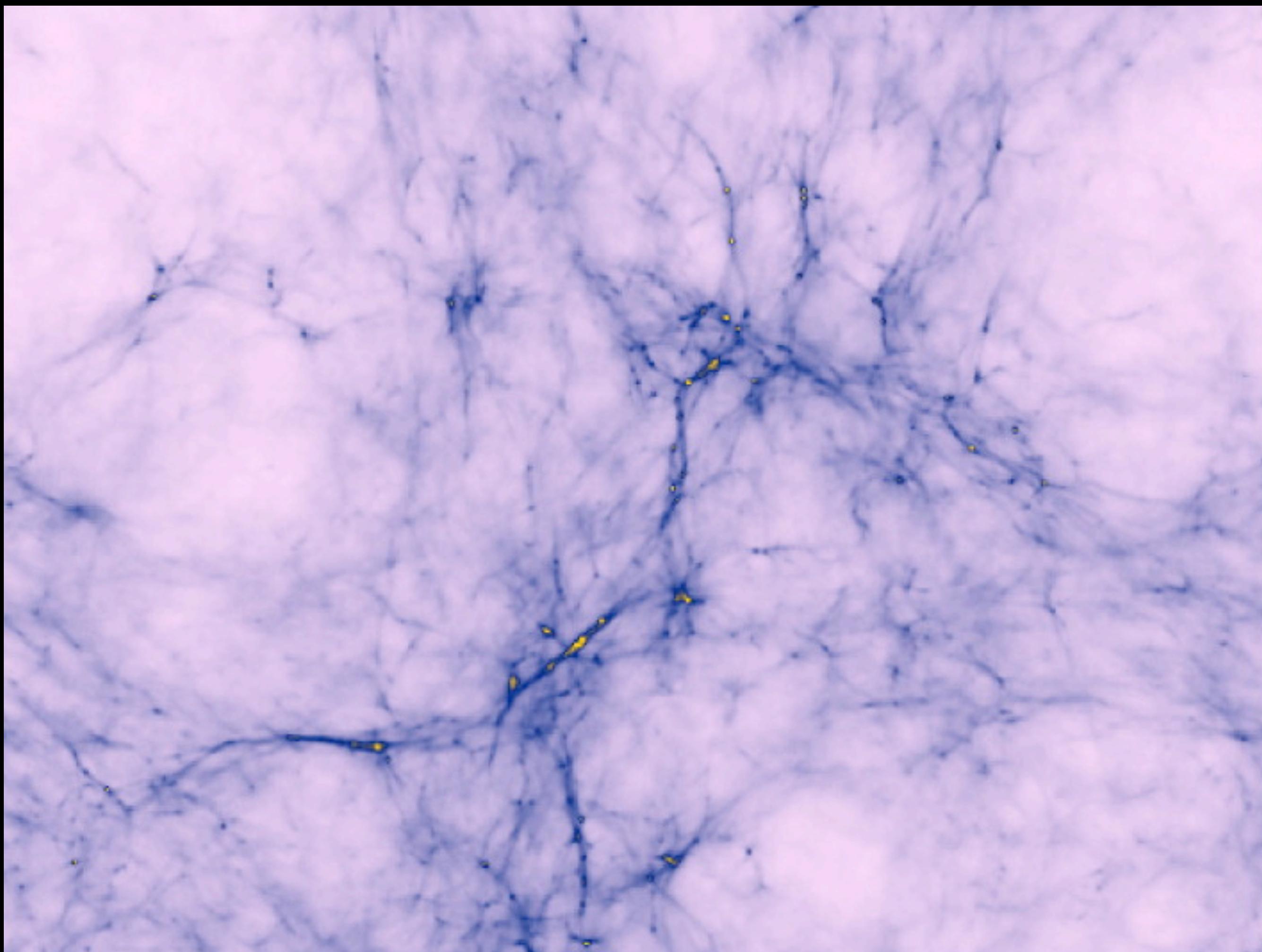
- kleine Dichteschwankungen der dunklen Materie
- wie sind die ersten Sterne verteilt?
- keine Metalle im primordialen Gas
- Sternentstehung ohne den Einfluss von Metallen?

Bildung kalter, dichter Gaswolken

- Baryonisches Gas: H (75%), He (25%), ^7Li (Spuren)
- Keine Kühlung über Linien von atomarem Wasserstoff, Metalle, Staub

- Kühlung durch molekularen Wasserstoff
- H₂-Bildung wird katalysiert durch freie Elektronen
- Kalte, dichte Gaswolken ($T \lesssim 0.5 T_{vir}$, $n_H > 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$):
 - H₂-Anteil $f_{H_2} > 10^{-4}$
 - $f_{H_2} \propto T_{vir}^{1.5}$, $T_{vir} \propto M^{2/3}(l+z)$

- $z \sim 30 \dots 20$: DM-Minihalos, $M \sim 10^6 M_\odot$
- entsprechen 3σ - 4σ -Peaks im primordialen Dichtefeld



Gasdichte bei $z=17$ (Yoshida et al., 2003)

- Spin-Parameter $\lambda = L |E|^{1/2} / (G M^{5/2})$
- misst die Stützwirkung der Rotation gegen gravitativen Kollaps, $F_{\text{centrifugal}} / F_{\text{gravitation}} \sim \lambda^2$ bei Virialisierung
- in Simulationen Log-Normal-verteilt, $\bar{\lambda} = 0.04$

Unterschiede zur Sternentstehung heute

- keine Metalle, kein Staub
- keine starken Magnetfelder
- keine Einflüsse durch vorherige Sternengenerationen

- durch H₂-Kühlung: charakteristische Dichte und Temperatur
 - $T_c \sim 200$ K
 - $n_c \sim 10^4$ cm⁻³
- temporär quasi-stationärer Zustand

- Bedingung für Kollaps: Gasmasse \gtrsim Jeans-Masse

$$M_J \simeq 500 M_{\odot} \left(\frac{T}{200 \text{ K}} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{n}{10^4 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

Fragmentierung

- Heute: starke Fragmentierung von Molekülwolken
 - bevorzugt kleinere Sterne ($M \lesssim M_{\odot}$)
- in primordialen DM-Minihalos: keine oder sehr geringe Fragmentierung
 - Endmasse im Wesentlichen bestimmt durch Akkretion

- In Mehrfachsystemen wird Drehimpuls durch Gezeitenkräfte in Orbitalbewegung umgewandelt
- Drehimpulstransport in Einzelsystemen nicht vollständig geklärt
 - hydrodynamische Schocks?
 - anomale Viskosität durch Magnetfelder

Mechanismen für “kleine” Population-III-Sterne

- in 1- und 2-dimensionalen Simulationen
 - für sehr hohe Anfangsdichte ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$): $M_c \sim 1 M_\odot$
 - sonst $M_c \sim 100 M_\odot$
- HD-Kühlung
 - nur für Abkühlung von $> 10^4 \text{ K}$
- Schockkompression durch erste Supernovae

Protostellarer Kollaps

- bei $n \sim 10^8 \text{ cm}^{-3}$: effiziente H_2 -Bildung durch Drei-Körper-Stöße ($3\text{H} \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$)
- $n \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$: Protostern, Gas wird optisch dicht
- Masse des hydrostatischen Kerns $M_{\text{core}} \sim 5 \times 10^{-3} M_{\odot}$

Akkretion

- bestimmt die finale Sternmasse
- heute: begrenzt durch Eddington-Luminosität ($\sim 150 M_\odot$)
- staubfreies primordiales Gas kann wesentlich länger akkretieren
- insbesondere in der Äquatorialebene

Realistische Endmasse

$60 M_{\odot}$ – $300 M_{\odot}$

Endstadien

- $M \lesssim 140 M_{\odot}$: Core Collapse
- $140 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 260 M_{\odot}$: Paarinstabilitäts-Supernova
- $260 M_{\odot} \lesssim M$: Photodisintegration

Paarinstabilitäts-Supernova

- Teilweiser Kollaps durch e^+e^- -Paarbildung
- unkontrolliertes Abbrennen, kein Überrest
- $E \sim 10^{44} \dots 10^{46}$ J
- Sehr hell, sehr langsamer Anstieg der Lichtkurve
- Kandidaten: SN 2006gy, Sn 2007bi

- sehr hohe Metallproduktion ($\sim 50\%$)
- kaum schwerere Elemente als Eisen
- starkes Odd-Even-Muster: gerade Kernzahlen bevorzugt

Feedback-Effekte

Metallanreicherung

- Metalle aus PISN entfliehen dem DM-Minihalo fast vollständig
- $Z_{IGM} \sim 10^{-2} Z_\odot \gg Z_{crit} \sim 10^{-4} Z_\odot$
- metallangereichertes Gebiet \sim ionisierte Region

Nachfolgende Sternentstehung

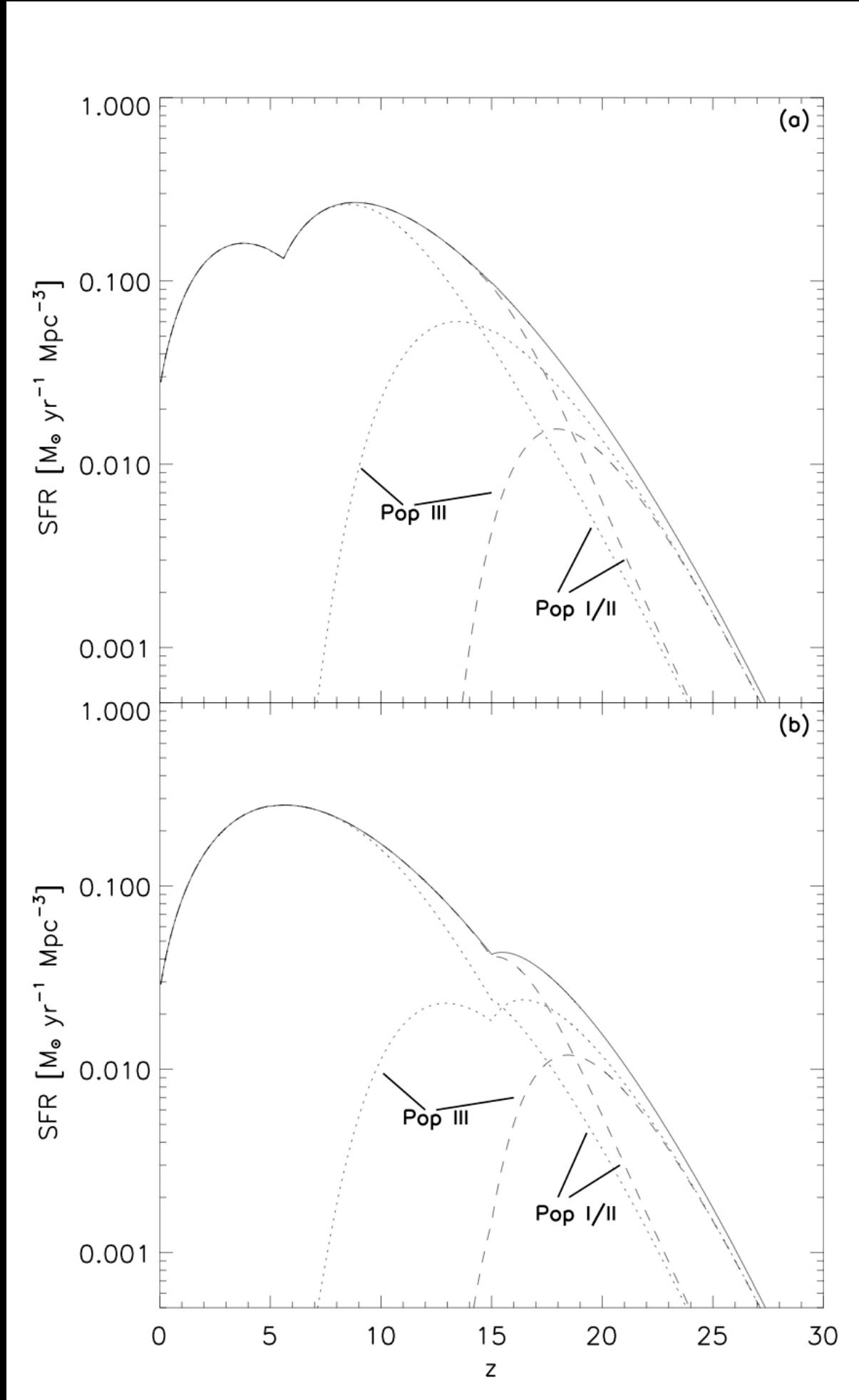
- Lyman-Werner-Strahlung zerstört H₂
 - freie e⁻ ermöglichen Neubildung
- Photoheating zerstreut Gaswolken in Minihalos
- zweite Sterneneration entsteht verzögert

Reionisierung

- $z < 6$: IGM ist vollständig ionisiert
- letzte vollständige Ionisierung nicht vor $z \sim 9$
- Thomson-Scattering: $\tau_e = 0.087 \pm 0.014$

- $z \sim 17 \dots 15$: erste (teilweise) Reionisierung durch Population-III-Sterne
- Rekombination während Sternentstehungspause
- $z \sim 7$: vollständige Reionisierung durch Population-II-Sterne in massiveren Systemen

Sternentstehungsrate / z



- oben: späte Reionisierung ($z \sim 7$)
- unten: frühe Reionisierung ($z \sim 17$)
- --- starkes chemisches Feedback
- ... schwaches chemisches Feedback
- — kumulative Sternentstehungsrate

Mögliche Beobachtungen

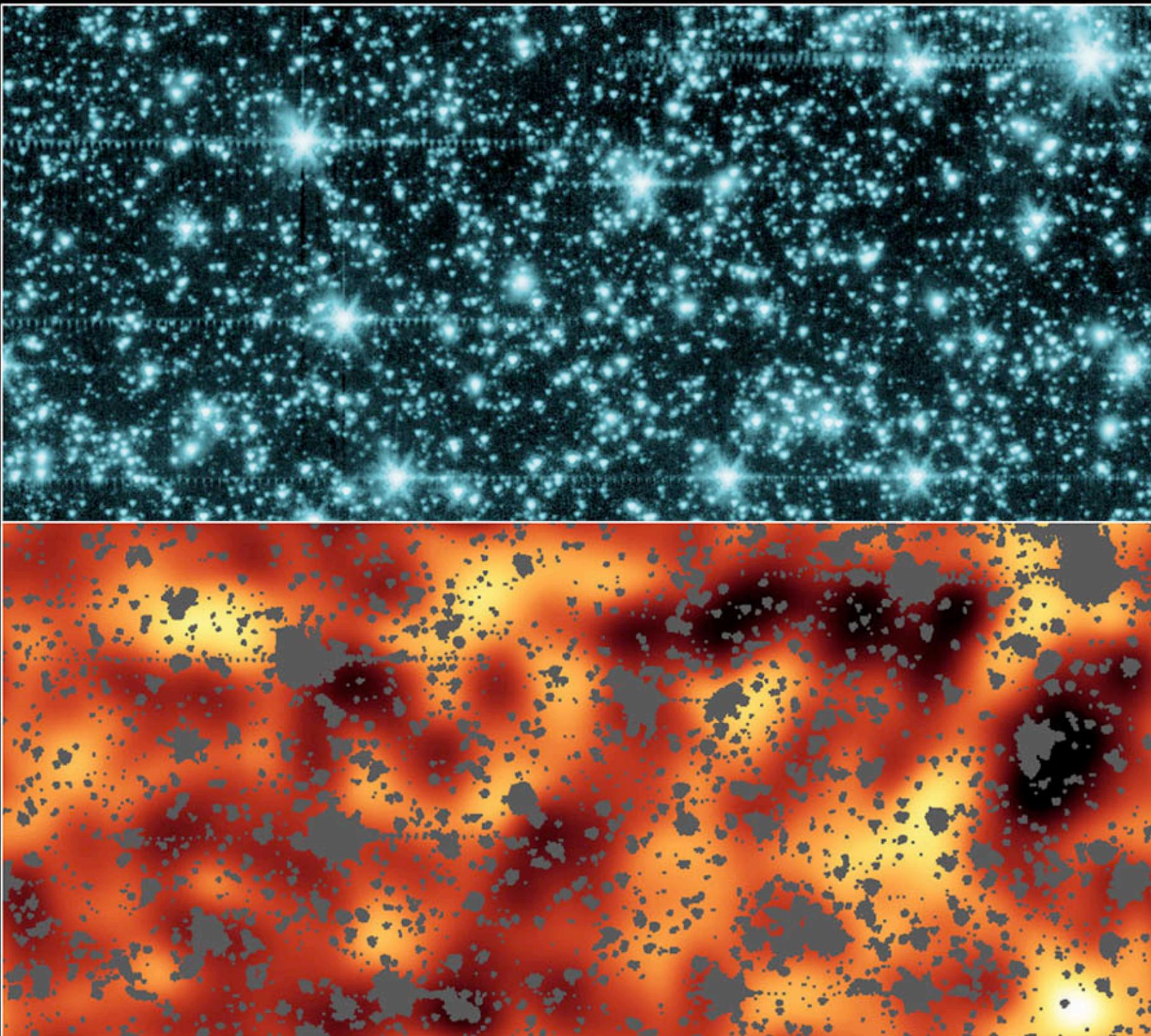
Stellare Archäologie

- wegen kurzer Lebensdauer heute keine Pop.-III-Sterne zu erwarten
- aber: HE0107-5240, HE1327-2326 – $[\text{Fe}/\text{H}] \lesssim -5$, $\text{M} \sim \text{M}_\odot$
 - $[\text{C}/\text{H}] \sim -1$, $Z > Z_{crit}$
 - häufig ($\sim 20\%$) $[\text{C}/\text{Fe}] > 1.0$ für $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$

Gamma-Ray-Bursts

- erfordern Verlust der Wasserstoff-Hülle und stark rotierenden Kern
- mögliche Pfade: Close Binaries, Fast Rotators
- genaue Häufigkeit unsicher, vermutlich selten

Nahinfrarot-Hintergrund



Infrared Background Light from First Stars
NASA / JPL-Caltech / A. Kashlinsky (GSFC)

Spitzer Space Telescope • IRAC
ssc2005-22a

Zusammenfassung

- Population-III-Sterne sind Quelle der ersten Metalle
- Entstehung metallfreier Sterne grundsätzlich unterschiedlich von heutiger Sternentstehung
- große Unsicherheit in Details
- heute noch nicht direkt beobachtbar

?