



Sternentstehung im kosmologischen Kontext Population-III-Sterne

Astrophysik-Seminar, Sommersemester 2010
Matthias Rampke

Mittwoch, 30. Juni 2010

Bild: NASA (artist's rendition)

Überblick

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

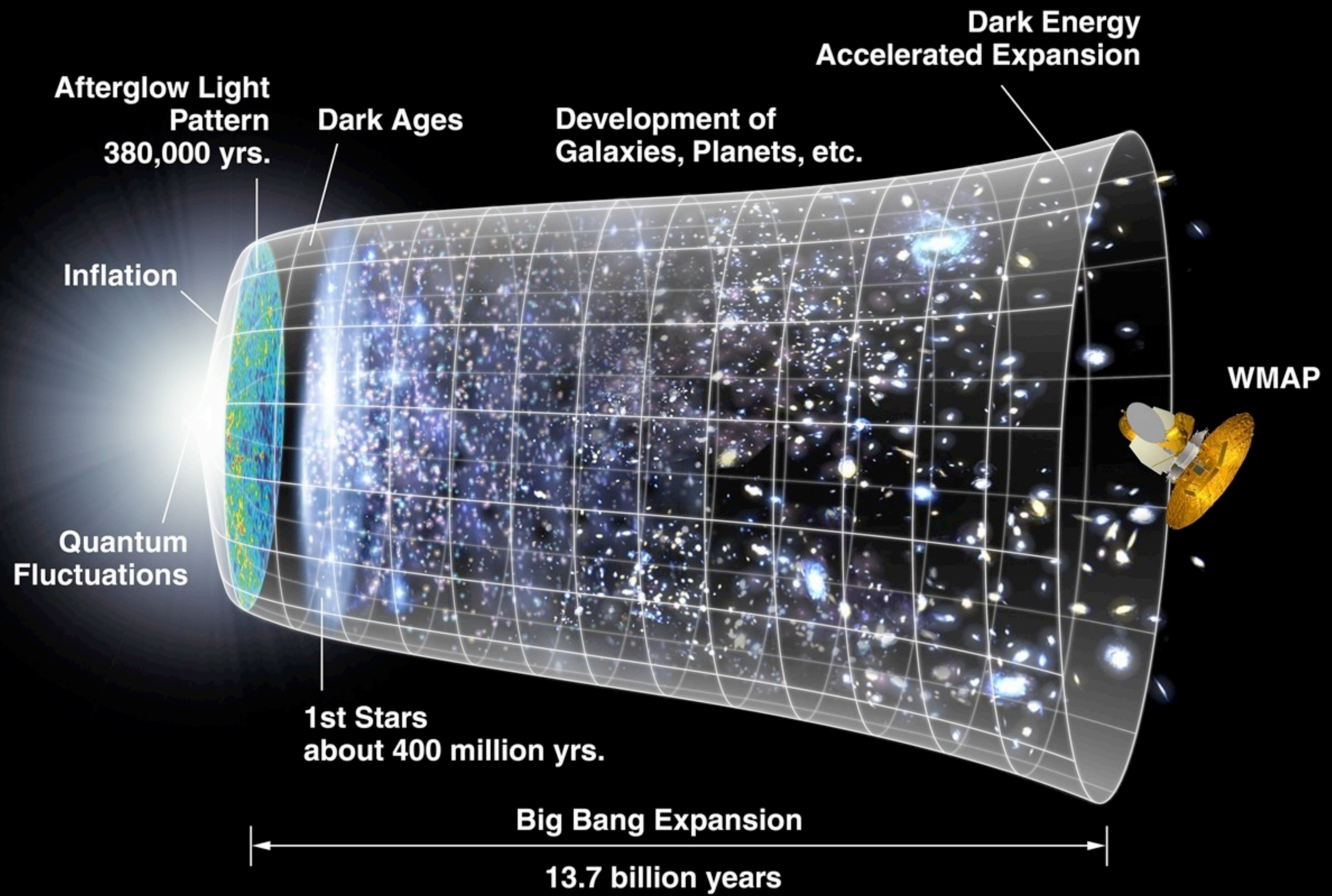
Mittwoch, 30. Juni 2010

Nukleosynthese & Rekombination: kurz

Strukturbildung: aus numerischen Simulationen

erste Sterne: Unterschiede zur (wohlbekannten) derzeitigen Sternentstehung

Rückwirkung: Übergang zur derzeitigen 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

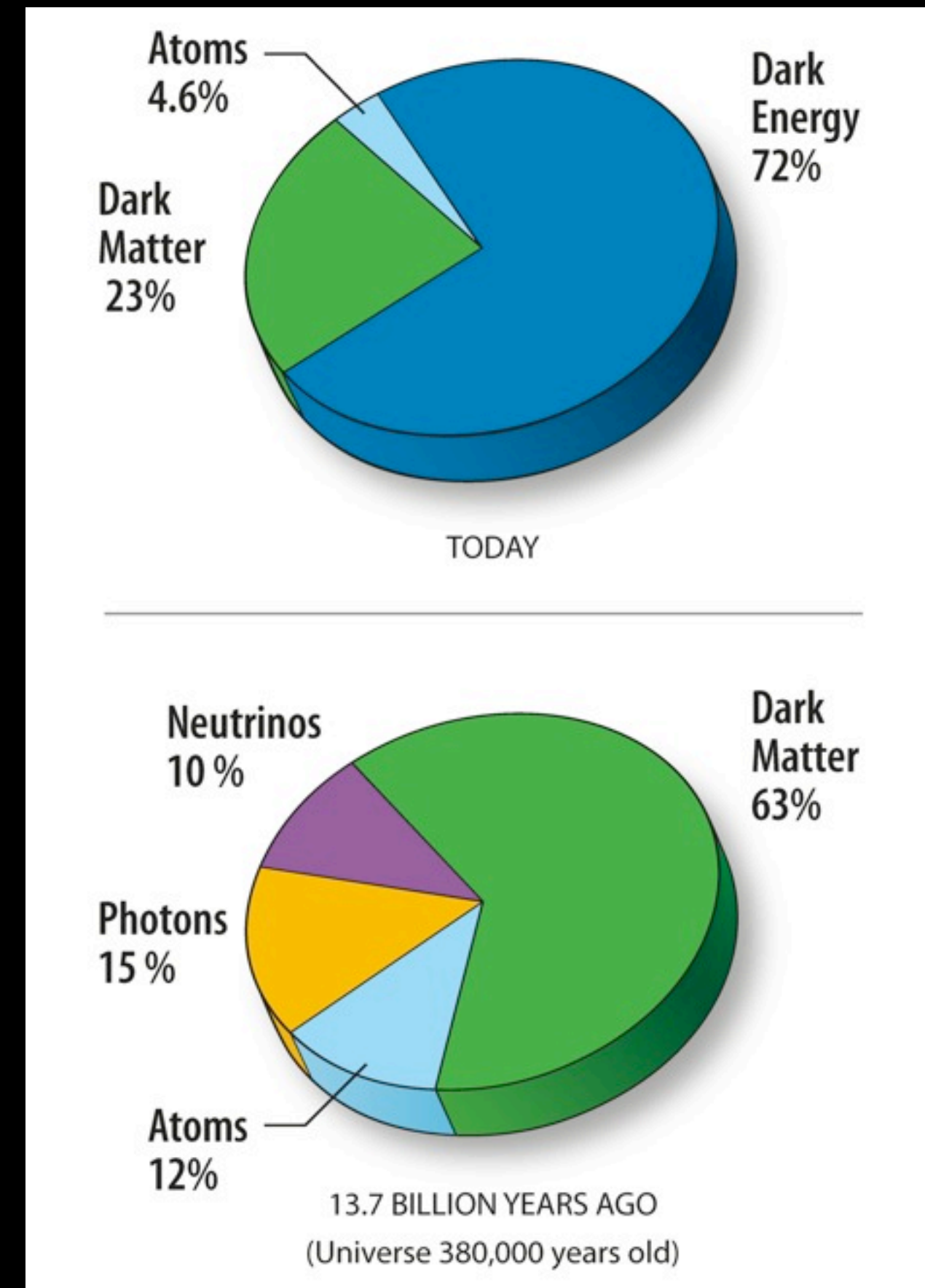
$$\Omega_{dm} = 0.227 \pm 0.014$$

$$\Omega_b = 0.0456 \pm 0.0016$$

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

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

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



Mittwoch, 30. Juni 2010

Λ CDM: Kalte Dunkle Materie + Kosmolog. Konstante (=Dunkle Energie)

$\Omega_{dm} + \Omega_b$: Massenanteil an der Energiedichte = 0.2726 ± 0.016

Ω_Λ : Dunkle Energie (heute)

Ω_b : baryonischer Anteil ($0.17 \Omega_m$)

(Werte *heute*, hängen von z ab, insbes. da Stärke der Dunklen Energie von Größe des Universums abhängt)

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

auch für 2-Stufen-Rekombination: Ly α -Photonen regen anderes Atom an => leichter ionisierbar
2-Photonen-Zerfall: $E(\text{Ly}\alpha)/2$ => reicht nicht mehr um Atome aus Grundzustand zu heben
Häufigkeit $\sim 10^{-8}$ Ly α -direkt

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:

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

Aus Bilanz aller Rekombinationsprozesse (Schneider)

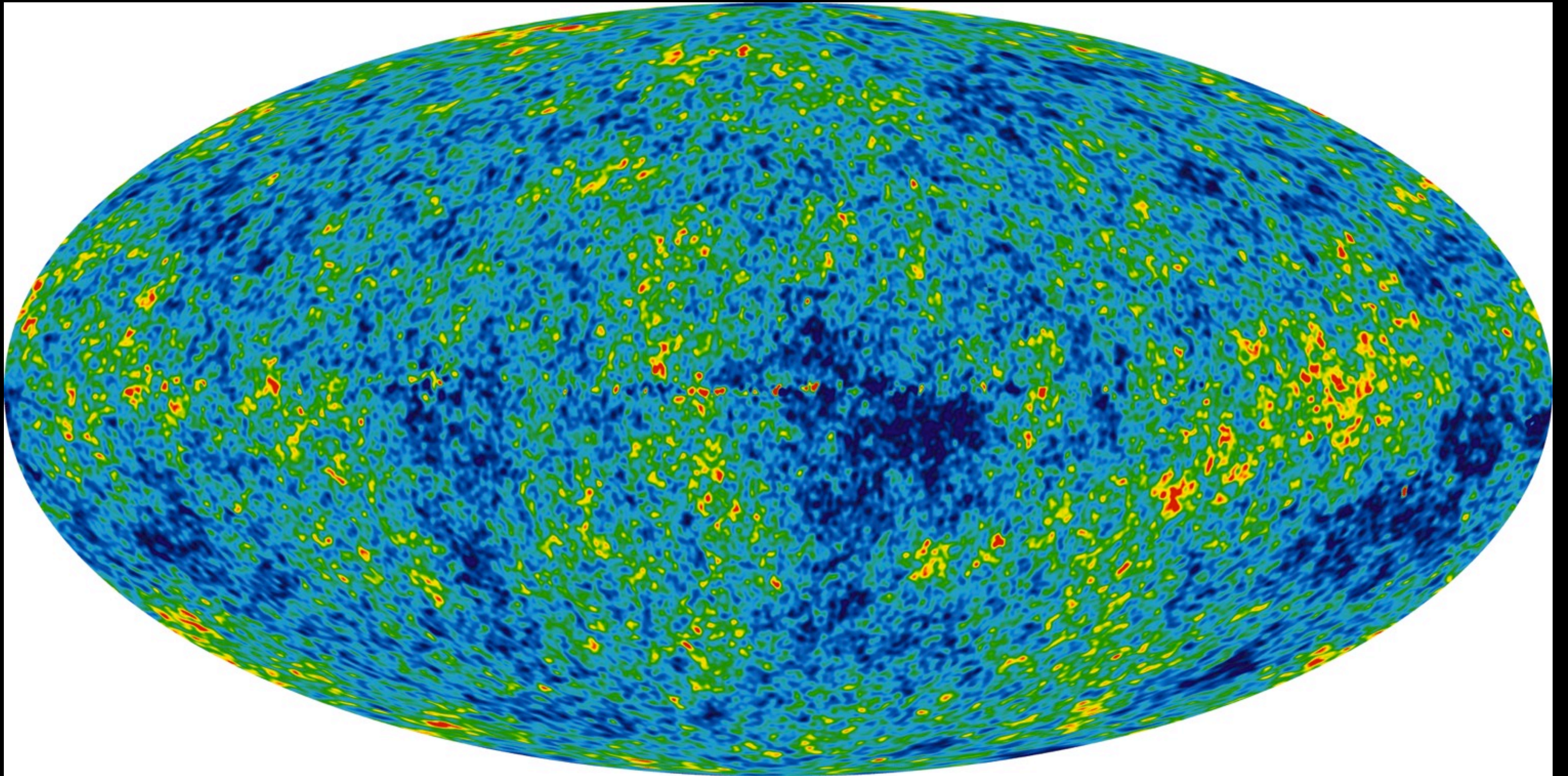
n_e : *freie* Elektronen; n_p : *alle* Protonen (= alle Elektronen)

Thompson-Streuung: Streuung von Photonen an freien Elektronen

=> "Last Scattering Surface" $\tau \sim 1 \Rightarrow z \sim 1070$ (+- ~30) ($t = 394 \text{ ky}$) ==> CMB (Photonen frei beweglich für $h\nu < 1216 \text{ \AA} = \text{Ly}\alpha$)

Restionisation $\sim 10^{-4}$ (Expansion > Rekomb.geschw.)

Last Scattering Surface



Mittwoch, 30. Juni 2010

WMAP 7-Jahres-Daten, kombiniert aus allen 5 Bändern

Variation \sim Dichteschwankungen der Dunklen Materie, Gauß-Feld, durch Inflation aufgeblähte Quantenfluktuationen

Strukturbildung

Mittwoch, 30. Juni 2010

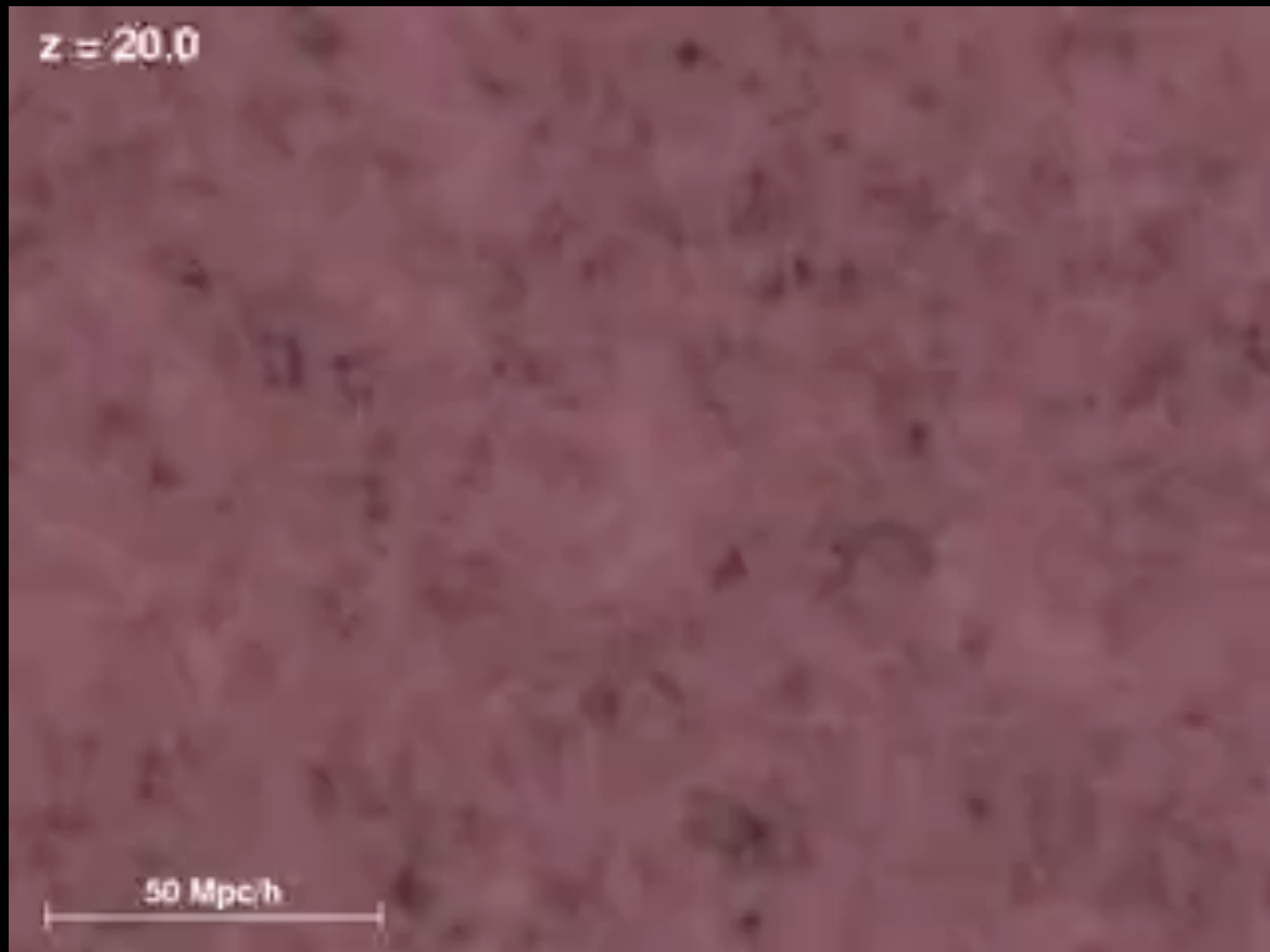
“Dunkles Zeitalter” (und danach)

- 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 ~1 Mrd. Sonnenmassen
- 2 Mly Kantenlänge
- $z = 127 \dots 0$



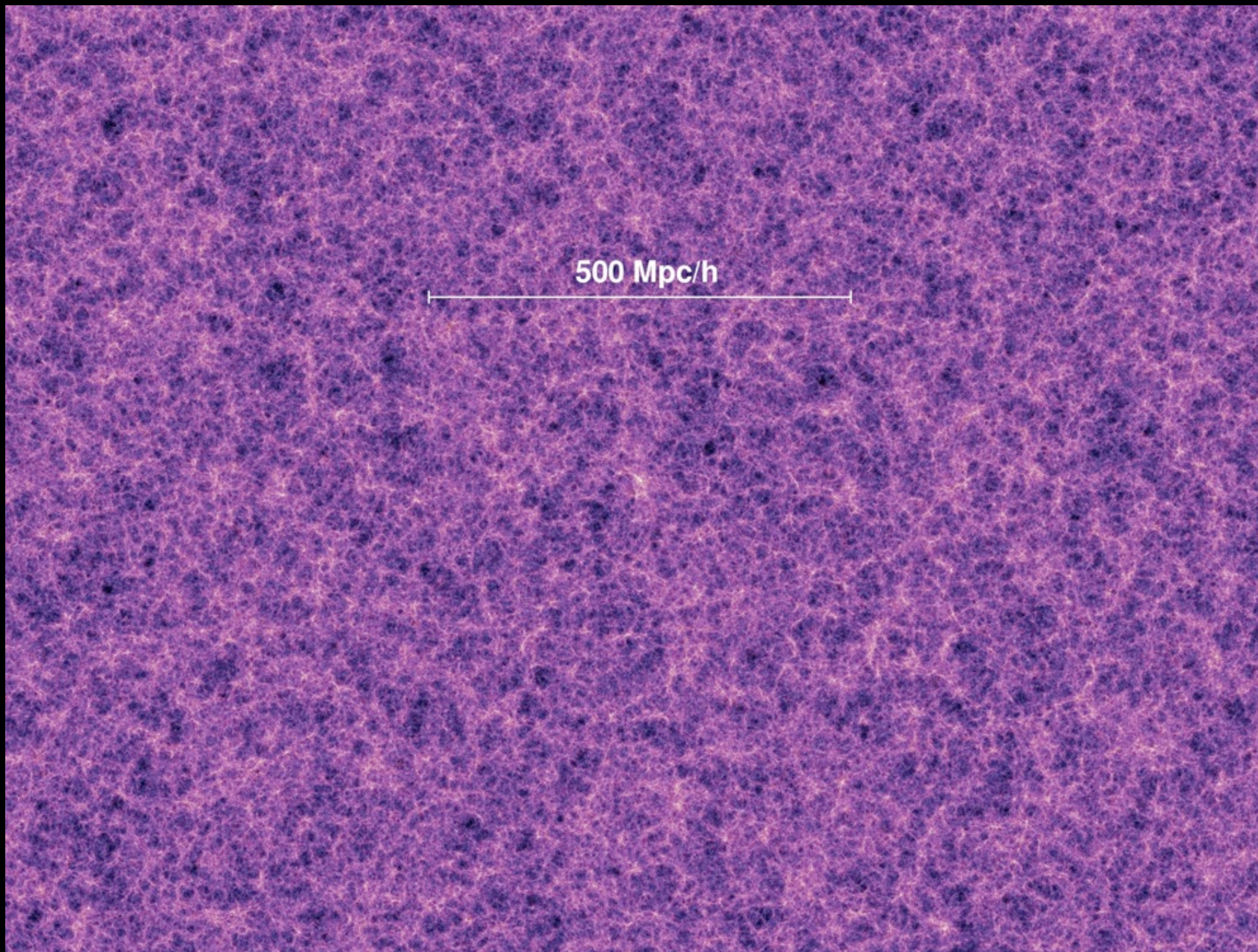
$$z = 18.3$$



Mittwoch, 30. Juni 2010

210 Mio. Jahre
Schnitt, 50 Mpc dick

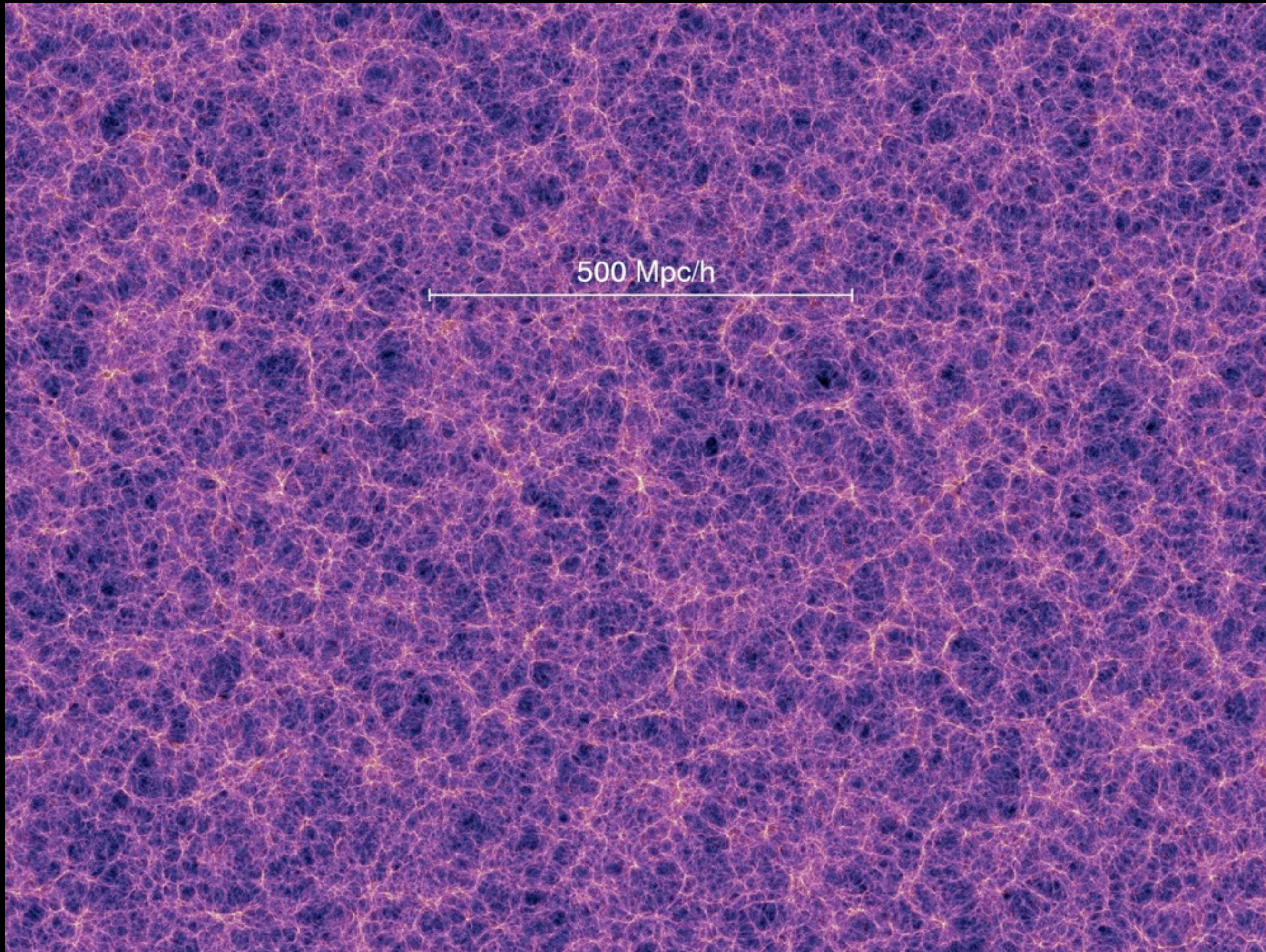
$$z = 5.7$$



Mittwoch, 30. Juni 2010

1.0 Mrd. Jahre

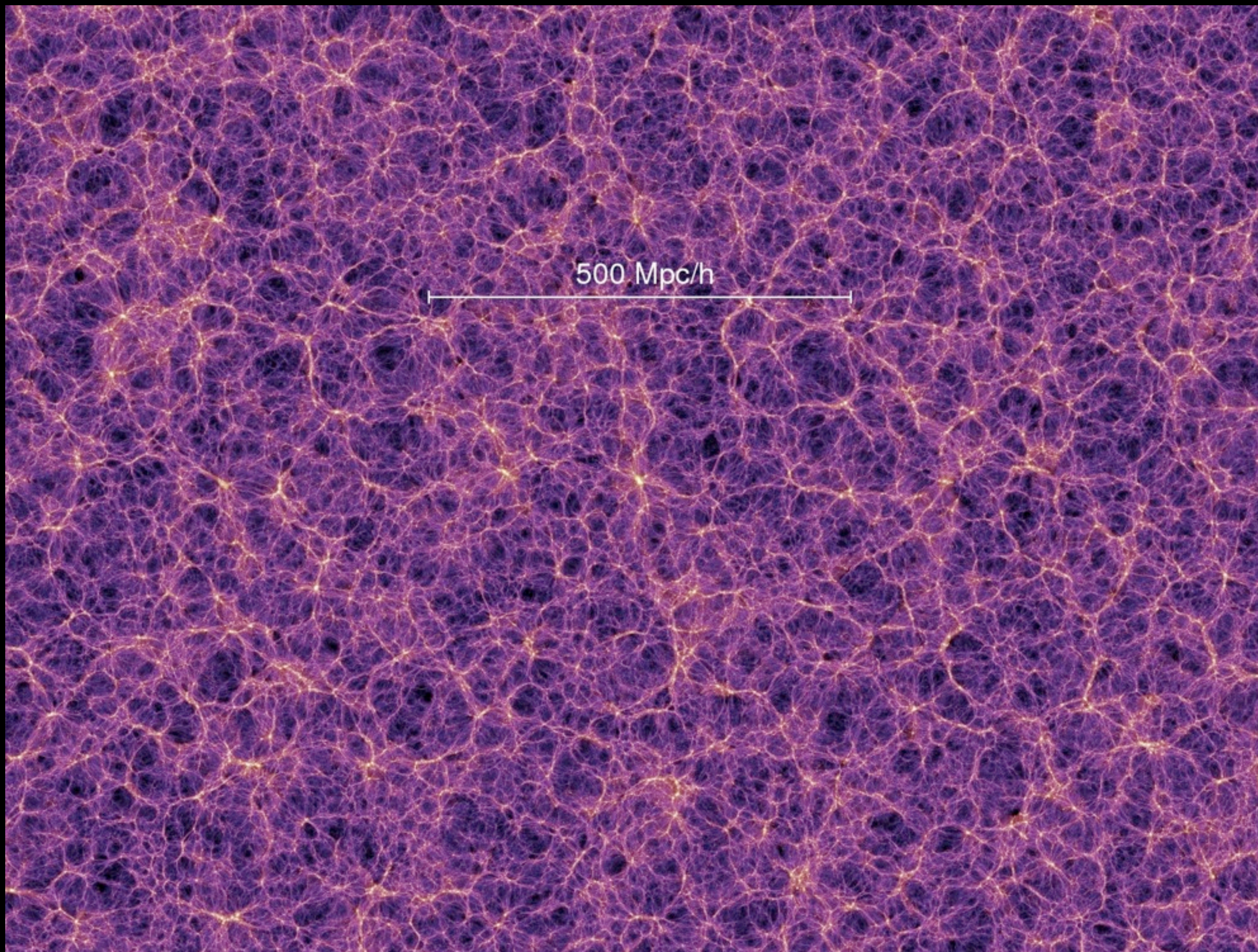
$$z = 1.4$$



Mittwoch, 30. Juni 2010

4.7 Mrd. Jahre

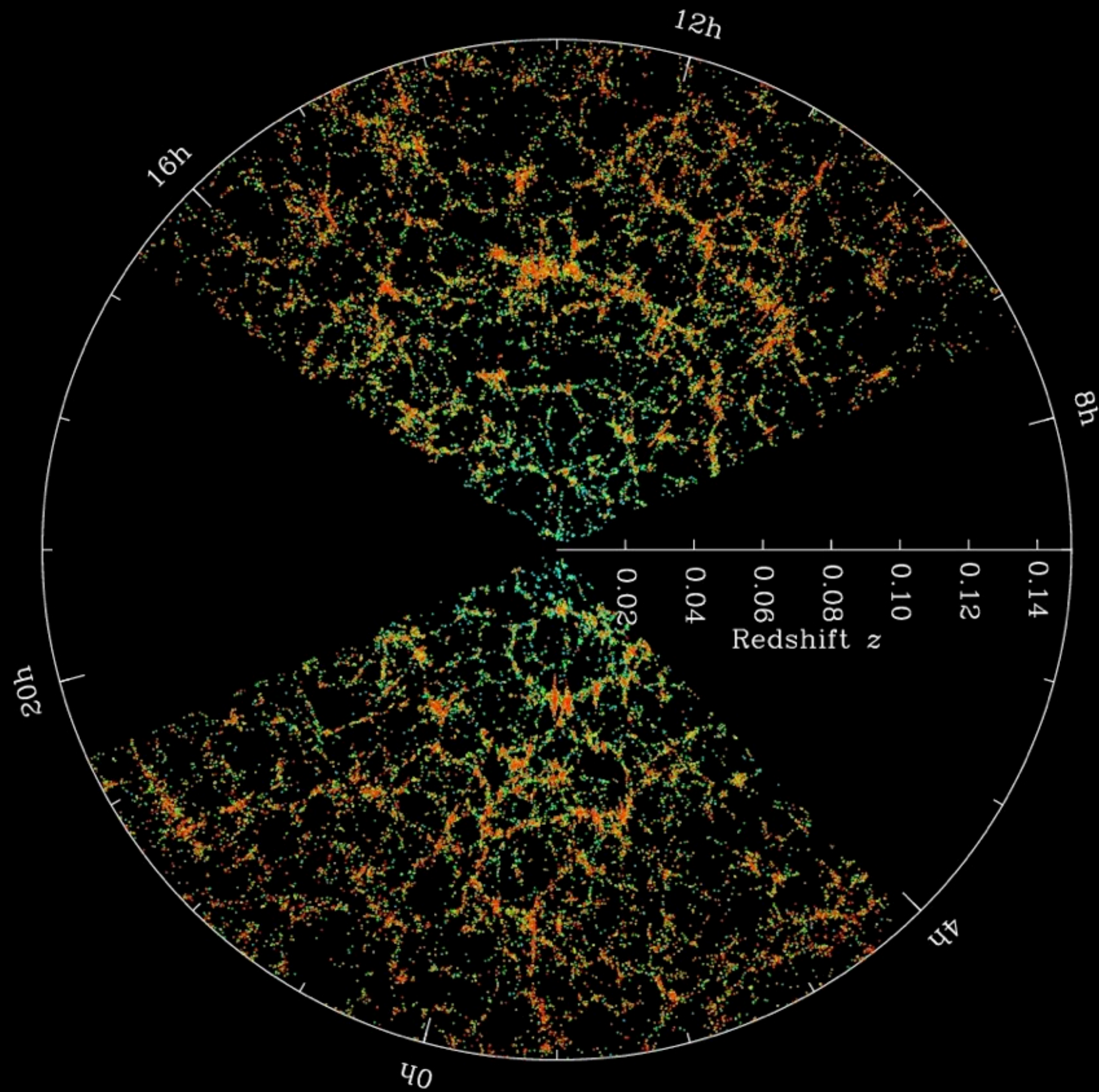
$$z = 0$$



Mittwoch, 30. Juni 2010

heute, 13.6 Mrd. Jahre

SDSS



Mittwoch, 30. Juni 2010

Slices through the SDSS 3-dimensional map of the distribution of galaxies. Earth is at the center, and each point represents a galaxy, typically containing about 100 billion stars. Galaxies are colored according to the ages of their stars, with the redder, more strongly clustered points showing galaxies that are made of older stars. The outer circle is at a distance of two billion light years. The region between the wedges was not mapped by the SDSS because dust in our own Galaxy obscures the view of the distant universe in these directions. Both slices contain all galaxies within -1.25 and 1.25 degrees declination. Credit: M. Blanton and the Sloan Digital Sky Survey.

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: $Z/Z_{\odot} > 10^{-6}$

Mittwoch, 30. Juni 2010

Es muss Sterne geben, die vor der Population II kamen

=> "Pop. III" vorerst einfach ein Name dafür

Terminologie nach Bromm et al.: Formation of the First Stars and Galaxies, 2009

Grenze 10^{-6} vorerst willkürlich (könnte auch 10^{-4} sein), spielt aber im Endeffekt keine Rolle, da Anreicherung schon durch erste Sterne wesentlich höher

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?

Mittwoch, 30. Juni 2010

Metalle: alles > Helium

insbes. Kohlenstoff, Sauerstoff

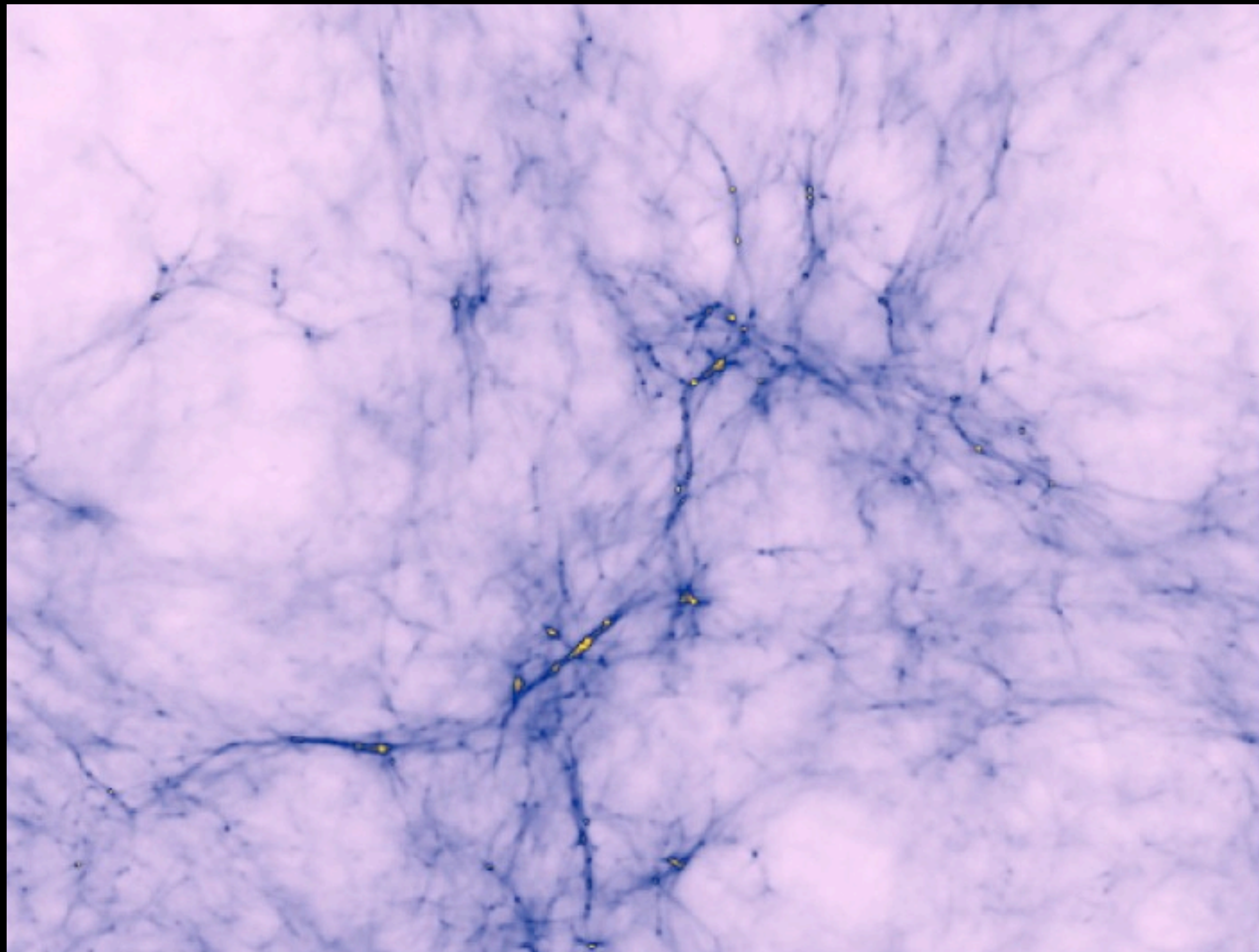
Henne-Ei-Problem, aber: wir wissen (Nukleosynthese) dass es am Anfang keine Eier gab => Wie entstand die erste Henne?

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 ($T \approx 0.5 T_{\text{vir}}, n_{\text{H}} > 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$):
 - H₂-Anteil $f_{\text{H}_2} > 10^{-4}$
- $f_{\text{H}_2} \propto T_{\text{vir}}^{1.5}, T_{\text{vir}} \propto M^{2/3}(1+z)$

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



Gasdichte bei $z=1/7$ (Yoshida et al., 2003)

Mittwoch, 30. Juni 2010

Helle Punkte: Sternentstehungsgebiete/-halos
Box ~ 50 kpc

- Spin-Parameter $\lambda = L |E|^{1/2} / (G M^{5/2})$
- misst die Stützwirkung der Rotation gegen gravitativen Kollaps, $F_{centrifugal} / F_{gravitation} \sim \lambda^2$ 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 Sterngenerationen

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

heute: $T \sim 10 \text{ K}$

H₂-Kühlung: Anregung von Rotationsniveaus durch Stöße mit H-Atomen, strahlende Abregung

für kleinere Temperaturen H₂-Kühlung ineffizient wg. Abständen der Rotationsniveaus, $E/k_B \sim 512 \text{ K}$

für höhere Dichten ineffizient wg. dominierender Stoßabregung (kann weitergehen, aber langsamer)

zudem: kosmische Hintergrundstrahlung $\sim 80 \text{ K}$

(in Simulationen) unempfindlich ggü. Variation der Anfangsbedingungen

- 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

Mittwoch, 30. Juni 2010

Fragm. durch:
thermische Instabilitäten (Kühlung zu langsam)
=> grav. Instabilität
äußere Störungen (SNe) => Turbulenzen

Fragmentierung tritt in einigen Simulationen auf, abhängig von Anfangsbed. (hoher Drehimpuls => Scheibe => zerbricht); nicht bei kosmologischen Anfangsbedingungen

wegen fehlender Metalllinien wesentlich höhere Eddington-Luminosität als heute

- 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

Mittwoch, 30. Juni 2010

Anfangsdichte: unklar, wie zu erreichen

HD: kühlt effizienter als H₂ wg. el. Dipolmoment und kleinerem Abstand zw. Rotationsniveaus

10^4 K : z.B. durch Photoionisationsheizung oder Schocks in Zwerggalaxien ($10^8 M_\text{sun}$)

Schockkompression von metallfreiem Gas: \rightarrow Pop. III.2/“II.5”, evtl. in massiveren Systemen

\Rightarrow nur unter sehr speziellen Umständen \Rightarrow Pop.III i.d.R. sehr massiv

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

$60 M_{\odot} - 300 M_{\odot}$

Mittwoch, 30. Juni 2010

(Bromm et al. 2009)

Zum Vergleich: heutzutage sind die Mehrzahl aller neu entstehenden Sterne < Sonne
heißer als heutige Sterne gleicher Masse (warum?)

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

Core-Collapse: abbrennen bis Eisen => Schwarzes Loch (keine oder nur kleine Explosion für sehr große Sterne falls Drehimpuls nicht zu groß (cf. Kollapsar/GRB))

Photodisintegration: Zerstörung von Atomkernen durch Gammastrahlen => Schwarzes Loch (direkt)

GRB? => nicht in derzeitigen Modellen, da Wasserstoffhülle nicht abgestoßen wird

evtl. durch starke Rotation?

Paarinstabilitäts-Supernova

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

$140 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 260 M_{\odot}$, niedrige Metallizität

Paarinstabilität: Bildung von e^+e^- -Paaren aus Gammastrahlen \Rightarrow Verringerung des Strahlungsdrucks \Rightarrow heißer \Rightarrow höhere Gammaenergien \Rightarrow

Runaway-Effekt \Rightarrow teilweiser Kollaps \Rightarrow plötzliches, völliges Abbrennen (thermonukleare Explosion)

Energie $>$ grav. Bindungsenergie \Rightarrow Gaswolke im Minihalo wird vollständig verteilt

Metalle: v.a. Nickel-56 \rightarrow Kobalt-56 \rightarrow Eisen-56

kaum r-Prozess \Rightarrow kaum schwerere Elemente als Eisen, gerade Kernzahlen stark bevorzugt

- 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

Mittwoch, 30. Juni 2010

90% in ~ 4 My, füllen heiße Blase der Explosion (~ 1 kpc \sim HII-Region)

erreichen Nachbarhalos nicht (sofort)

Z_{crit} : Übergang von PopIII zu PopII \Rightarrow bevorzugt kleinere Sternmassen

Nachfolgende Sternentstehung

- Lyman-Werner-Strahlung zerstört H_2
 - freie e^- ermöglichen Neubildung
- Photoheating zerstreut Gaswolken in Minihalos
- zweite Sterngeneration entsteht verzögert

Mittwoch, 30. Juni 2010

LW: 11.2...13.6eV, elektron. Anregung => Vibrationskontinuum d. Grundzustandes => Dissoziation // kann neutrales IGM durchdringen => LW-Hintergrund

freie e^- durch Röntgenstrahlung (SN-Reste, Akkretion auf Schwarze Löcher), HII-Regionen von Sternen, Schockwellen

Photoheating durch ionisierende (UV-)Strahlung, $T > 10\,000\text{ K}$ => Gas "verdampft" aus DM-Minihalos

neue Sternbildung erst in Zwerggalaxien ($\sim 10^8$ Sonnenmassen)

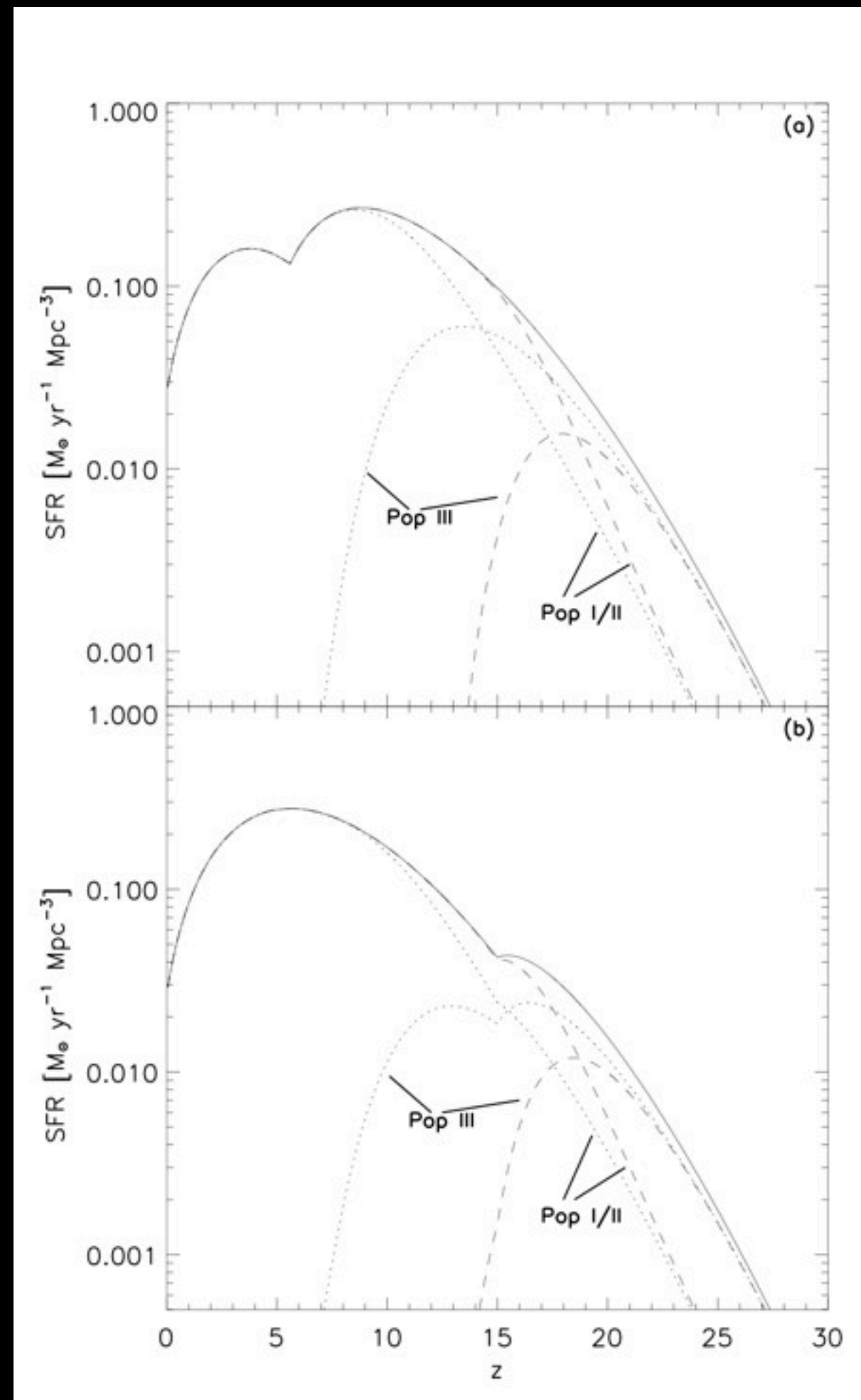
ABER: überall gleichzeitig?

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

Madau-Plot

SFR vs. z für zwei verschiedene Szenarien; Wahrheit vermutl. irgendwo dazwischen

aus Bromm&Loeb 2006, "High-Redshift Gamma-Ray Bursts from Population III Progenitors"

Nur Kühlung durch atomaren Wasserstoff beachtet => Pop.III kann auch noch früher einsetzen

Mögliche Beobachtungen

Stellare Archäologie

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

C/N/O 'reichlich' vorhanden

Erklärung 1: kl. Partner in Doppelsternsystem ($\sim 20\text{AU}$), hat durchmisches Material von gr. Partner in dessen Roter-Riese-Phase (Helium-Flash-getriebene Konvektion) + Verunreinigung der Oberfläche mit SN-Ejecta – Entstehung d. kl. Pop.-III-Sterns ungeklärt (möglw. in größeren Halos ($\sim 10^8 M_{\text{sun}}$): bessere H_2 -Kühlung durch teilw. Ionisation?)

C/N/O in Primary produziert+aufgewirbelt, mit Wasserstoffhülle abgestoßen, auf Secondary akkretiert, dort wieder eingemischt

Schwerere Elemente aus verschmutzter Ursprungswolke oder nachträglich (Unterscheidung über rel. Häufigkeiten, aber noch nicht möglich (aber: keine Variation der Radialgeschwindigkeit (R. Lunnan in prep.))

Erklärung 2: Pop.II, Metalle aus PopIII-SN $\sim 25 M_{\text{sun}}$; eisenreiche Ejecta fallen zurück in Schwarzes Loch

Erklärung 4: Pop.II, Metalle aus PopIII-SN $\sim 60 M_{\text{sun}}$ m. Rotation

Gamma-Ray-Bursts

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

Mittwoch, 30. Juni 2010

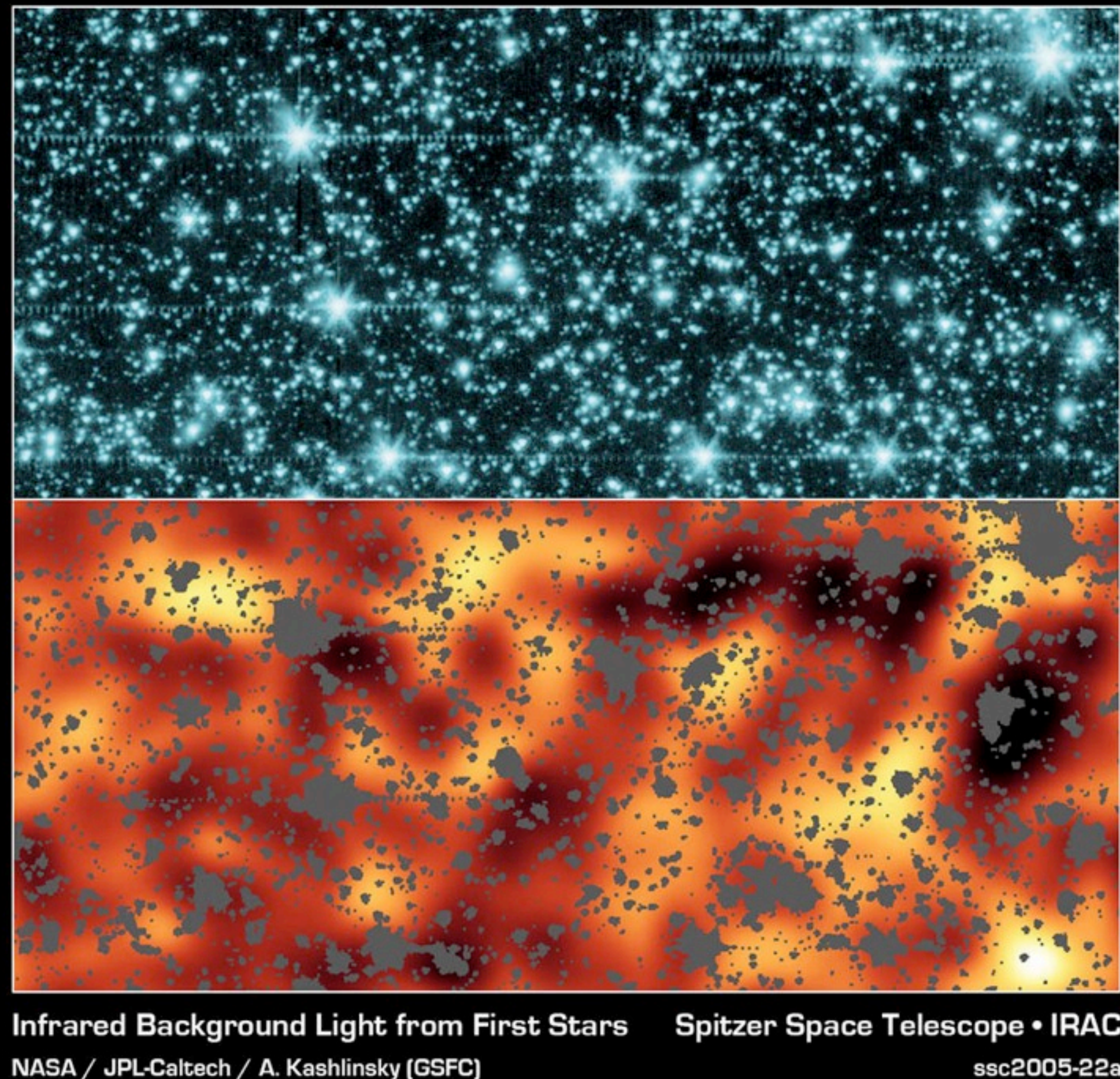
H-Hülle: ausgedehnte H-Hülle quencht Jets. Kann in Pop.III wg. mangelnder Opazität nicht abgestoßen werden (cf. Wolf-Rayet)

rot. Kern: damit sich Akkretionsscheibe um entstehendes Schwarzes Loch bildet

Close Binary: kl. Partner verliert H-Hülle in Common-Envelope-Phase (Heizung durch Reibung), spin up durch Gezeiten. Häufigkeit von Binaries unklar, aber auch unter konservativen Annahmen spin up zu selten. Für SWIFT <0.1 Detektion/yr (in optimistischen Modellen) erwartet, <0.05 /yr mit Drehimpulsübertrag auf kollabierenden Kern

Fast Rotator: starke Durchmischung, bei niedriger Metallizität wenig Drehmomentverlust. Häufigkeit?

Nahinfrarot-Hintergrund



Mittwoch, 30. Juni 2010

Nature 438, 45–50 (3 November 2005), A. Kashlinsky et al.

CIB / Cosmic Infrared Background

Bild zeigt Fluktuation, nicht Intensität (0. und 1. Ordnung des power spectrum entfernt)

weißes und Instrumentenrauschen abgezogen

Spektrum der Fluktuationen nicht konsistent mit ISM–Cirrus, Zodiakallicht durch Vergleich über 6 Monate ausgeglichen

in 4 Wellenlängenkanälen gemessen, Schwankungen korreliert

Einfluss von Hintergrundgalaxien abgeschätzt

Pop.III: Plausibel, sollten zu Intensität und Anisotropie des CIB beitragen (durch kurzen Zeitraum werden die Anisotropien der Verteilung nicht verschmiert)

für $z=20\ldots 10$ korrespondierende rest-frame-Wellenlängen $0.2\ldots 0.8\mu\text{m}$ => free-free-Emission => langsam ansteigend für größere Wellenlängen, konsistent mit Beobachtung

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

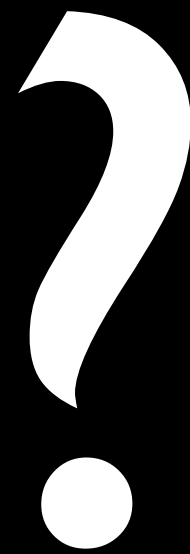
Mittwoch, 30. Juni 2010

Literatur:

Rekombination, Strukturentwicklung, Überblick: Peter Schneider, Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie, Springer 2006

Parameter des Universums: Seven-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations, 2010

Population III: Bromm & Larson: First Stars, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2004; Bromm & Yoshida & Hernquist & McKee: The formation of the first stars and galaxies, Nature 2009



Mittwoch, 30. Juni 2010

Fragen?