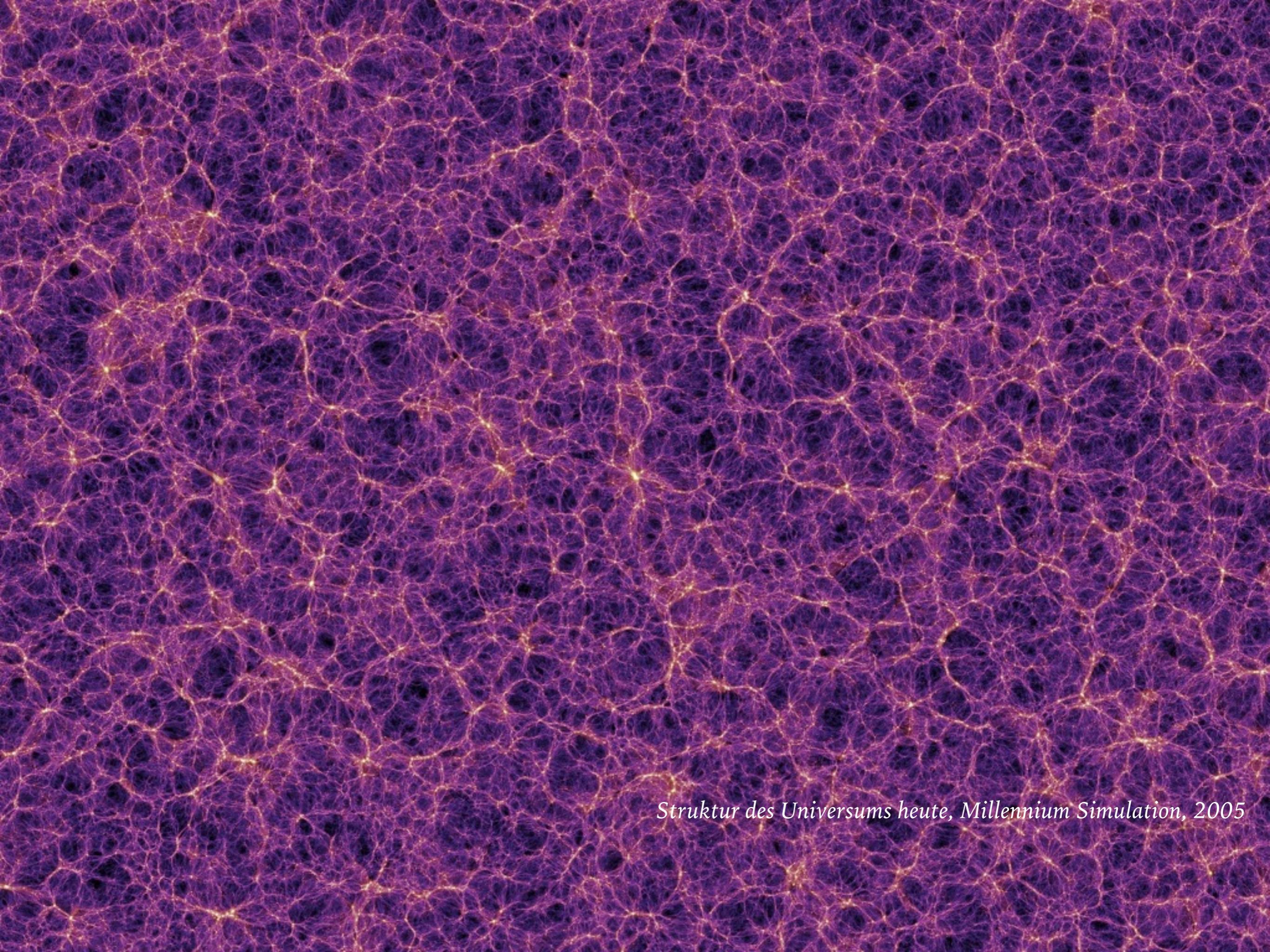


CMB mit $\Delta T = \pm 2 \cdot 10^{-4}$ K, Planck, 2013



Struktur des Universums heute, Millennium Simulation, 2005

WIE IST ES DAZU GEKOMMEN?

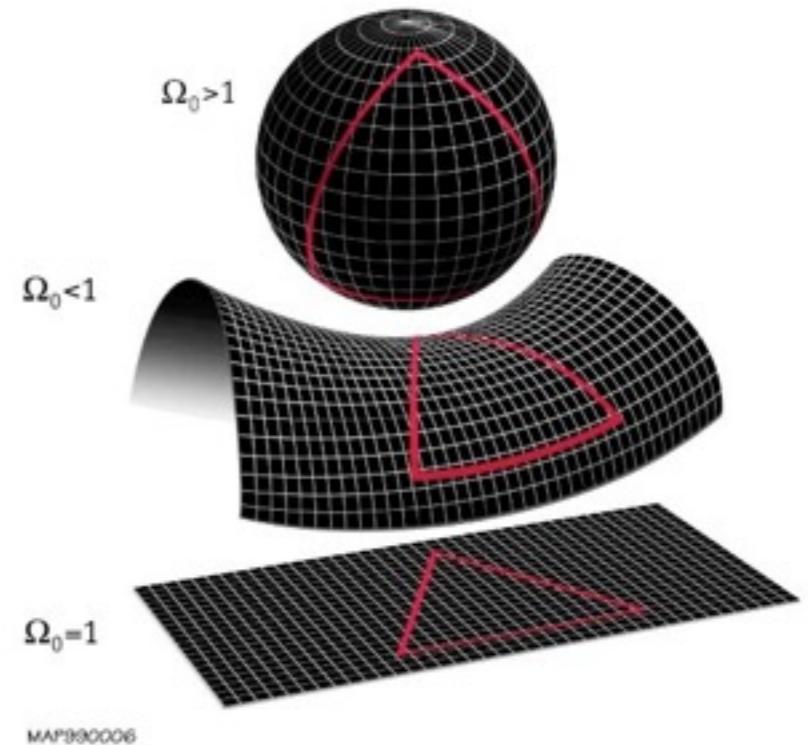
*Inflation, Dunkle Materie, Dunkle Energie,
Strukturbildung, Simulationen*

Seminarvortrag von Peter Manshausen

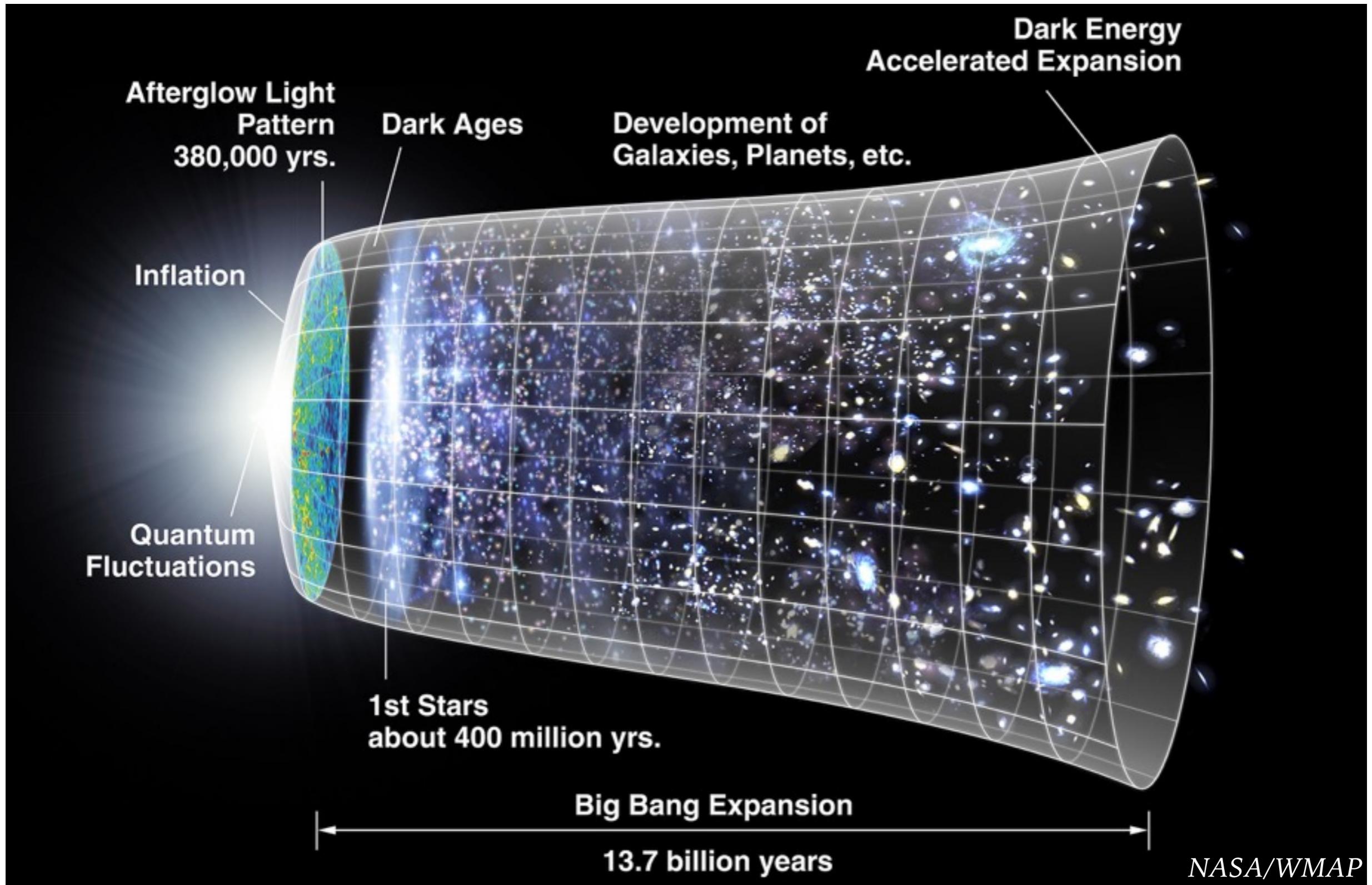
12.05.2017

BESTANDSAUFNAHME

- Kosmologisches Prinzip: Universum auf großen Skalen **homogen** und **isotrop**
- Universum flach ($k=0$)
- Beschleunigte Expansion
- Deutliche Strukturen auf Skalen $< 100 \text{ Mpc}$:
 - Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen, Superhaufen, Filamente



ENTWICKLUNGSGESCHICHTE



INFLATION – WARUM?

- Probleme des ursprünglichen Urknall-Modells:
 - Horizontproblem
 - Regionen mit $> 1^\circ$ Abstand im CMB: keine kausale Verbindung *aber*: beobachten thermisches Gleichgewicht überall
 - Flache Geometrie
 - $H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$
 - $H^2(a) = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{Kc^2}{a^2} = H^2(a) \left[\Omega_{\text{total}}(a) - \frac{Kc^2}{a^2 H^2} \right]$ $|\Omega_{\text{total}} - 1| = \frac{Kc^2}{a^2 H^2}$
 - Entwicklung von Ω_{total} weg von 1 \rightarrow extrem genaue Vorgaben an Anfangsbedingungen

INFLATION - LÖSUNG DER PROBLEME

- Inflation = Exponentielle, (beschleunigte) Ausdehnung des Universums um Faktor $>10^{26}$
- ca. 10^{-36} - 10^{-32} s nach dem Urknall
- Horizontproblem: kleiner Bereich in anfänglich kausalem Kontakt wird „aufgebläht“ auf das beob. Universum
- Flache Geometrie: a^2H^2 wächst während der Inflation, Ω_{total} nähert sich 1: $|\Omega_{\text{total}} - 1| = \frac{Kc^2}{a^2H^2}$

DUNKLE MATERIE - WARUM?

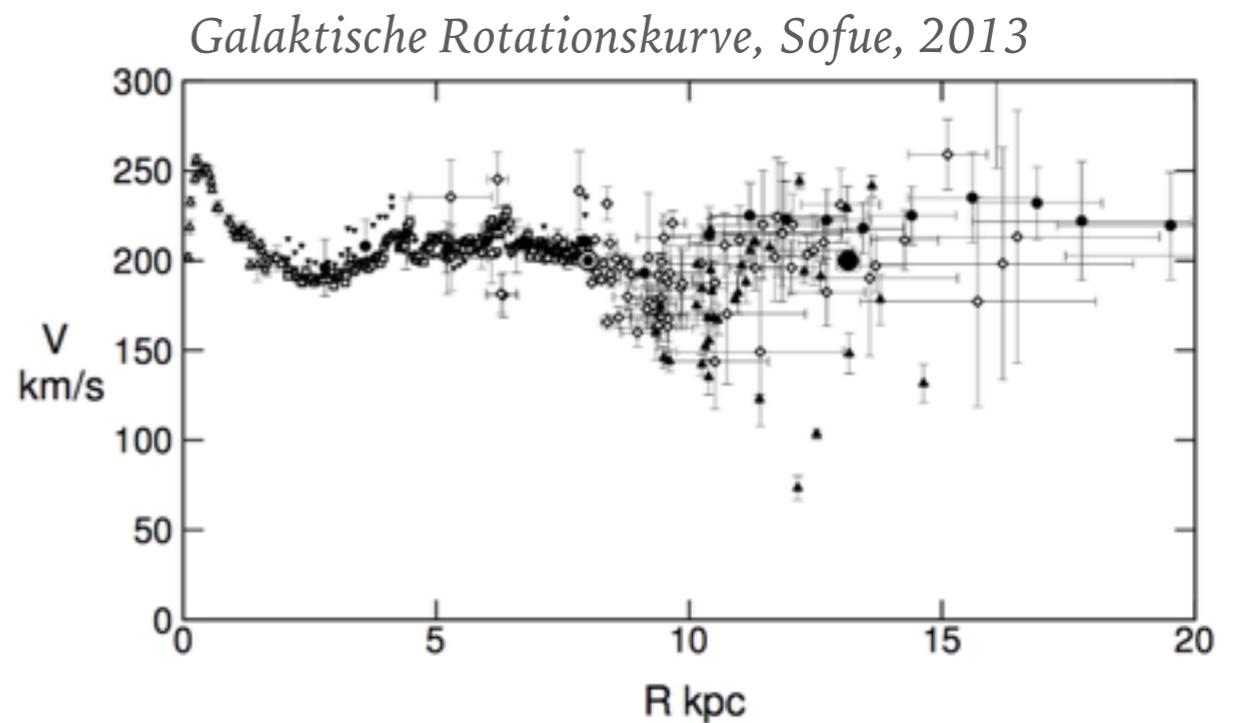
- Sternenbewegung in Galaxien

- Kepler:

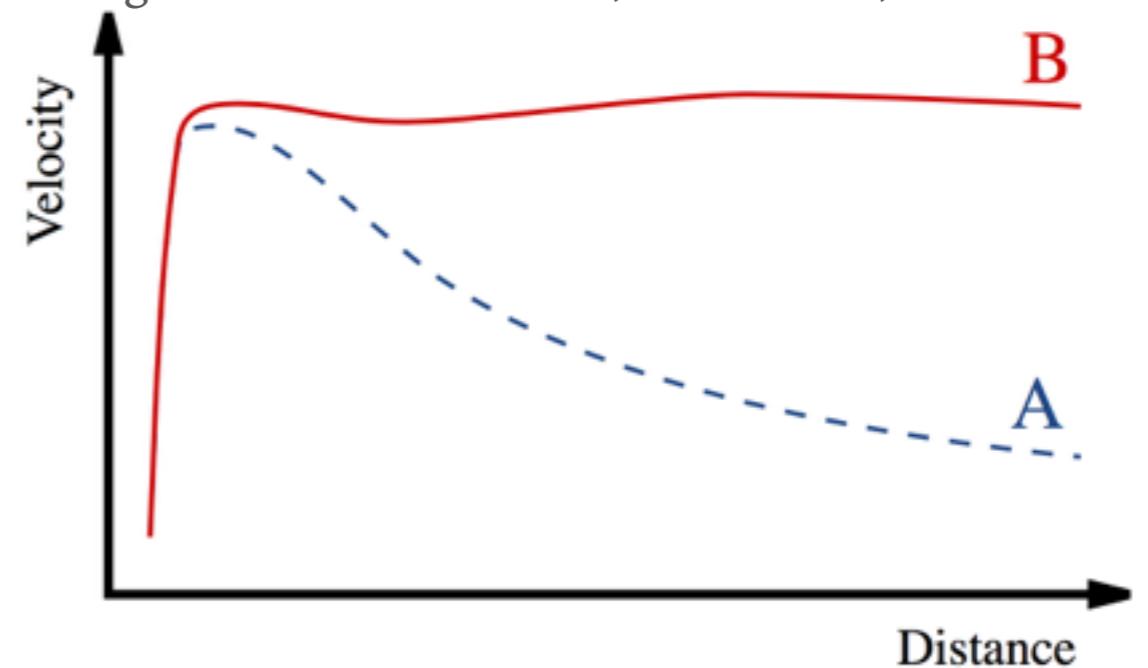
$$v \propto \sqrt{\frac{M(r)}{r}}$$

- Dichte sichtbarer Materie fällt exponentiell mit r

- Geschwindigkeit sollte abfallen, ist aber konstant



allgemeine Rotationskurve, schematisch, Phil Hibbs



DUNKLE MATERIE - WEITERE HINWEISE

- Galaxienhaufen als Gravitationslinsen
- hilft bei Strukturbildung (Dichteschwankungen treten früher auf)
- Galaxienhaufen-Dynamik
 - (Virialsatz)

Abell 1689, Hubble, 2003

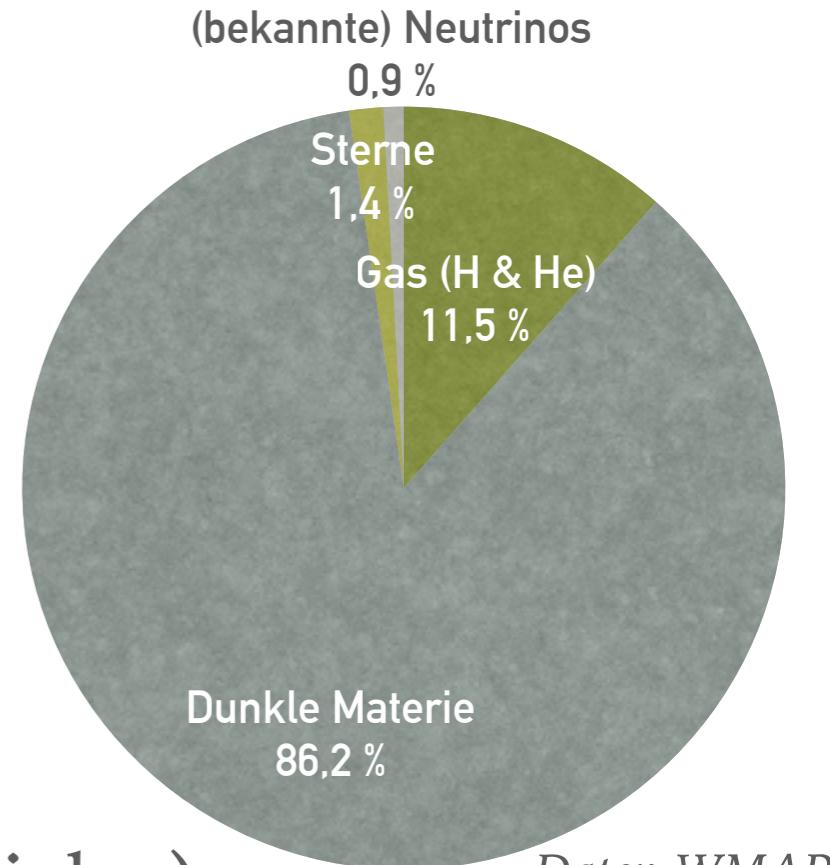


DUNKLE MATERIE - WORAUS?

- Eigenschaft: keine EM-Wechselwirkung
- Baryonen (Protonen, Neutronen, etc.):
 - MACHOs (MAssive Compact Halo Objects), nicht-leuchtende, schwere Objekte wie z. B. Schwarze Löcher, Braune Zwerge...
 - diffuses interstellares o. intergalaktisches Gas
- aber: Mikrolinsen-Untersuchungen schließen großen Beitrag von MACHOs aus
- auch diffuses Gas sollte strahlen

DUNKLE MATERIE – WORAUS DANN?

- Nichtbaryonische Materie:
 - (sterile) Neutrinos
 - Axionen
 - WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles)
- keiner der Kandidaten bisher überzeugend nachgewiesen
- Klassifikation:
 - kalt=langsame Bewegung im frühen Universum
 - heiß=schnelle Bewegung (weniger wahrscheinlich)



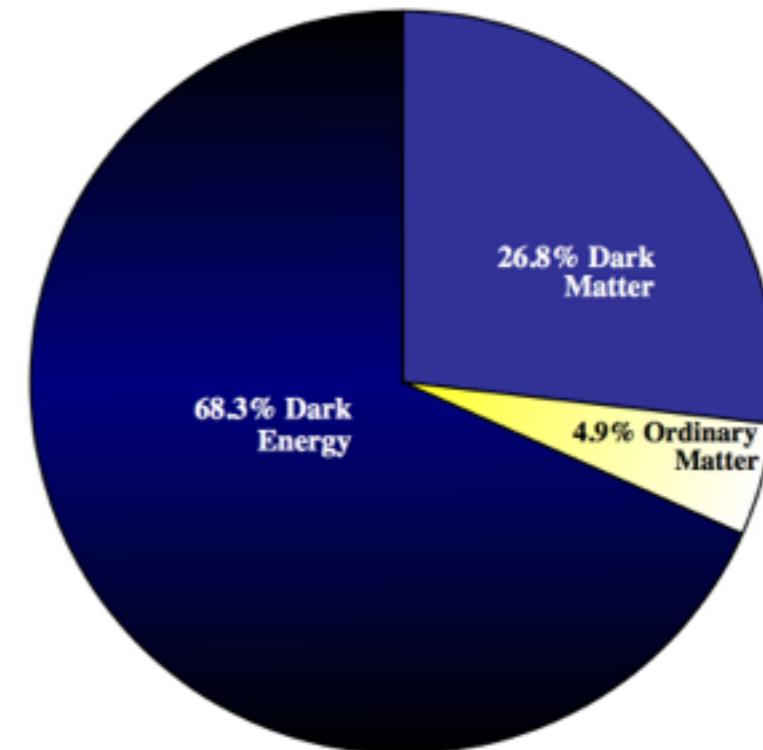
Daten: WMAP

DUNKLE ENERGIE – WARUM?

- Beschleunigte Expansion des beobachtbaren Universums
- Riess 1998: Distanz-Rotverschiebungs-Relation von SN1a
- Flache Geometrie, *aber*: nur 30% der kritischen Dichte können von dunkler Materie und baryonischer Materie herrühren



SN 1994D in Galaxie NGC 4526, Hubble



Kosmische Energieverteilung nach PLANCK, 2013

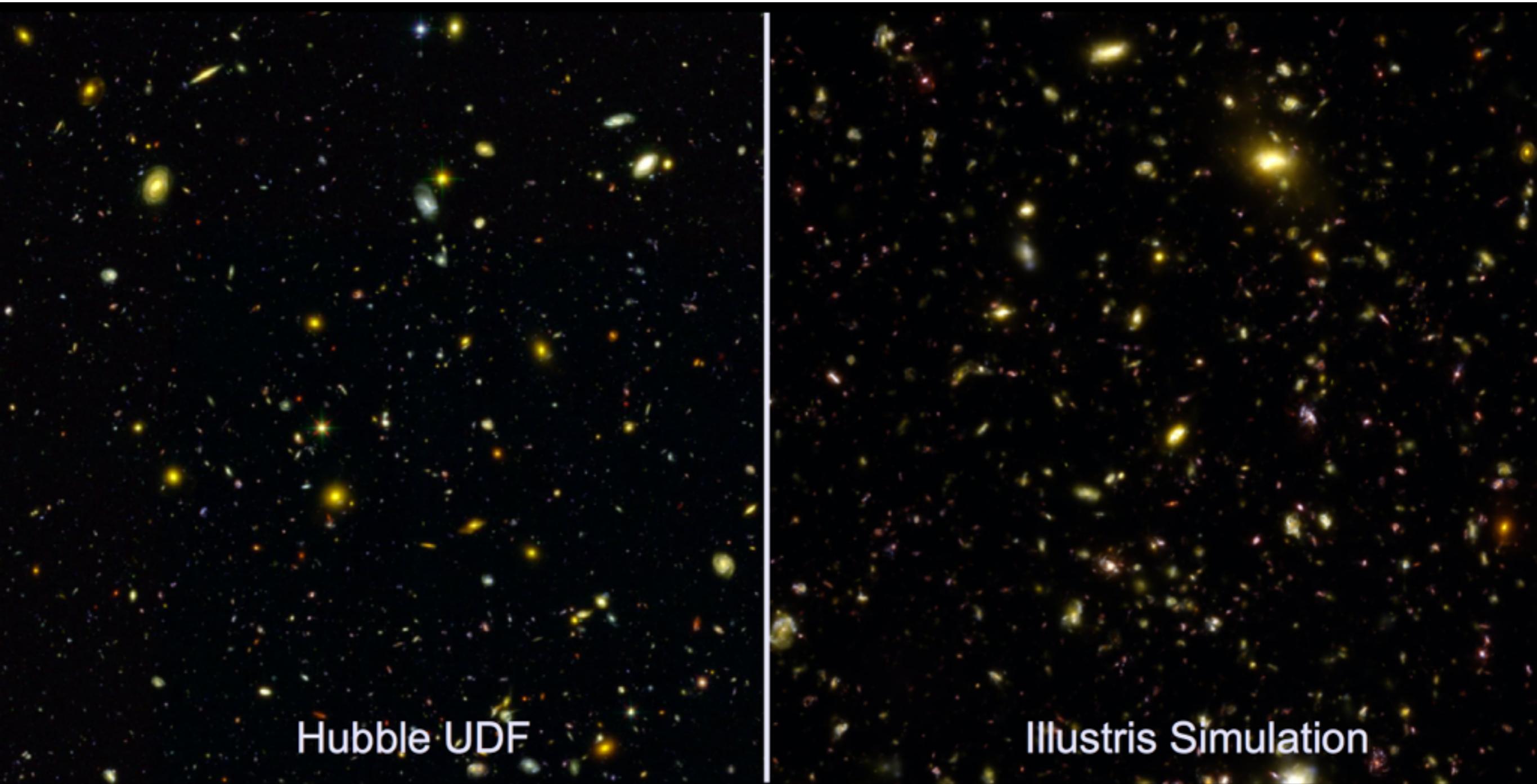
DUNKLE ENERGIE - WORAUS?

- Kosmologische Konstante Λ mit $\rho_\Lambda \propto a^0$

$$3\frac{\ddot{a}}{a} = \Lambda - 4\pi G(\rho + 3p)$$

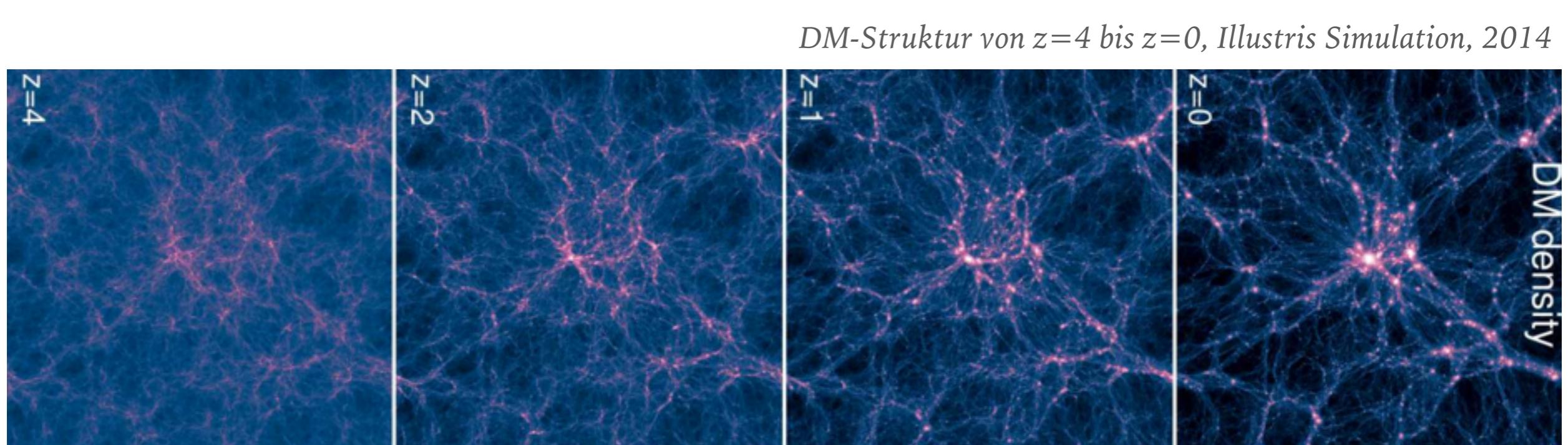
- möglicher Ursprung: „Vakuumenergie“
- Abschätzungen der Vakuumenergie um Faktor 10^{124} größer als Beobachtungen fordern
- "The worst theoretical prediction in the history of physics!"

STRUKTURBILDUNG – SIMULATIONEN



STRUKTURBILDUNG - SIMULATIONEN - DUNKLE MATERIE

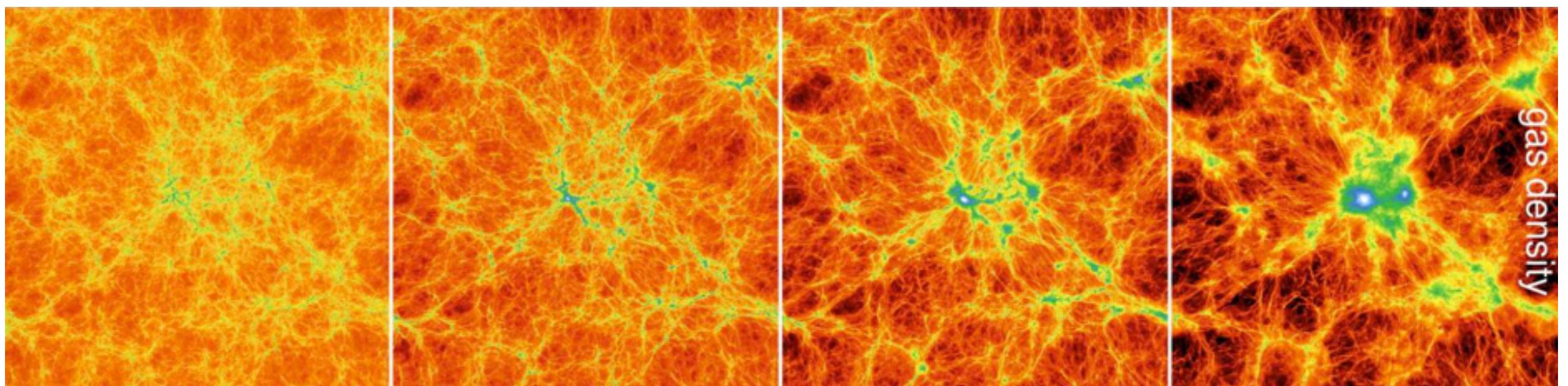
- Dunkle Materie: einfacher und früher
- Anziehung durch initiale Dichtefluktuation führt auf exponentiellen gravitativen Kollaps - „bottom up“
- Gegenteiliger Effekt „Hubble-Reibung“: Expansion des Raums auf gleicher Zeitskala

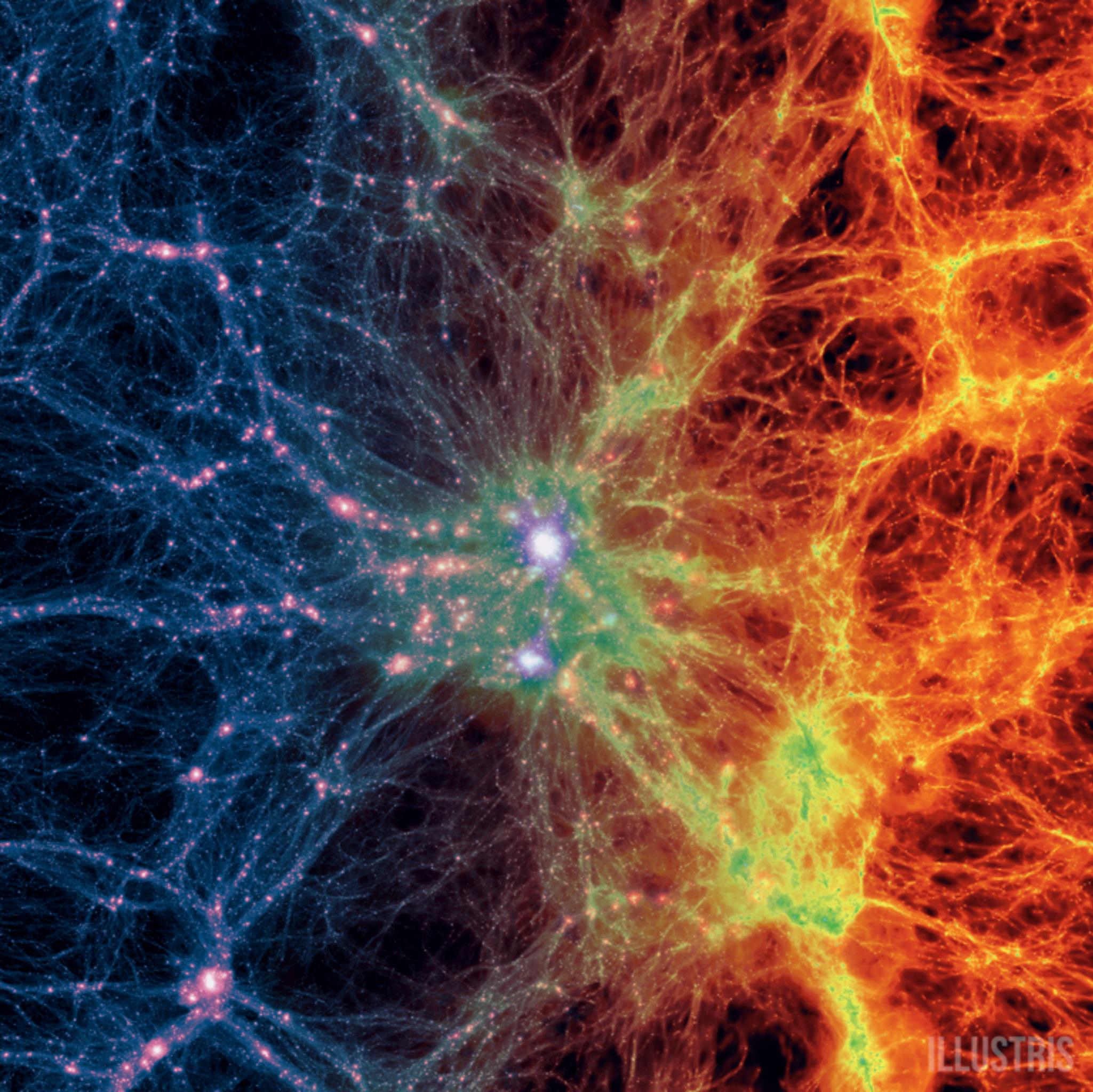


STRUKTURBILDUNG - SIMULATIONEN - GAS

- hemmende Effekte:
 - Wechselwirkung mit Photonen (frühes Universum)
 - Wechselwirkung mit sich selbst (Jeans-Länge)
- fördernde Effekte:
 - Dissipation von Energie durch Strahlung

Gas-Struktur von $z=4$ bis $z=0$, Illustris Simulation, 2014





ILLUSTRIS

STRUKTURBILDUNG - SIMULATIONEN - WEITERE EFFEKTE

- außerdem sehr wichtig für Auflösung von Galaxien:
 - Sternentstehung
 - stellares- und SN-Feedback
 - AGN-Feedback
 - mechanisch, thermal, radiativ
- Λ CDM-Modell liefert gute Übereinstimmung mit Beobachtungen

WIE IST ES DAZU GEKOMMEN?

Phänomen

Homogenität, Isotropie

Flache Geometrie

Beschleunigte Expansion

Deutliche Strukturen

Erklärungsansatz

Inflation

Inflation (anfangs), Dunkle Materie und Energie
(für $\Omega_{\text{total}}=1$)

Dunkle Energie

Gravitation vs. Expansion,
weitere Effekte für
baryonische Materie

ENDE

INFLATION - WIE?

- hypothetisches Inflatonfeld φ :
 - zugehörig: Potential $V(\varphi)$
 - Übergang von „Falschvakuum“ zu echtem Vakuum, wobei Falschvakuum hohe Energiedichte hat
 - Freiwerden von Energie, „Reheating“, Entstehung der meisten heute vorliegenden Teilchen