

Kosmische Evolution für Nicht-Physiker:
Wie unser Weltall wurde, was es heute ist

5. Entstehung großräumiger Struktur im Universum

Knud Jahnke, MPIA

Hintergrundstrahlung
(nach 380.000 Jahren)

dunkles
Zeitalter

Entstehung von
Galaxien, Planeten, usw.

beschleunigte Expansion
infolge "Dunkler Energie"

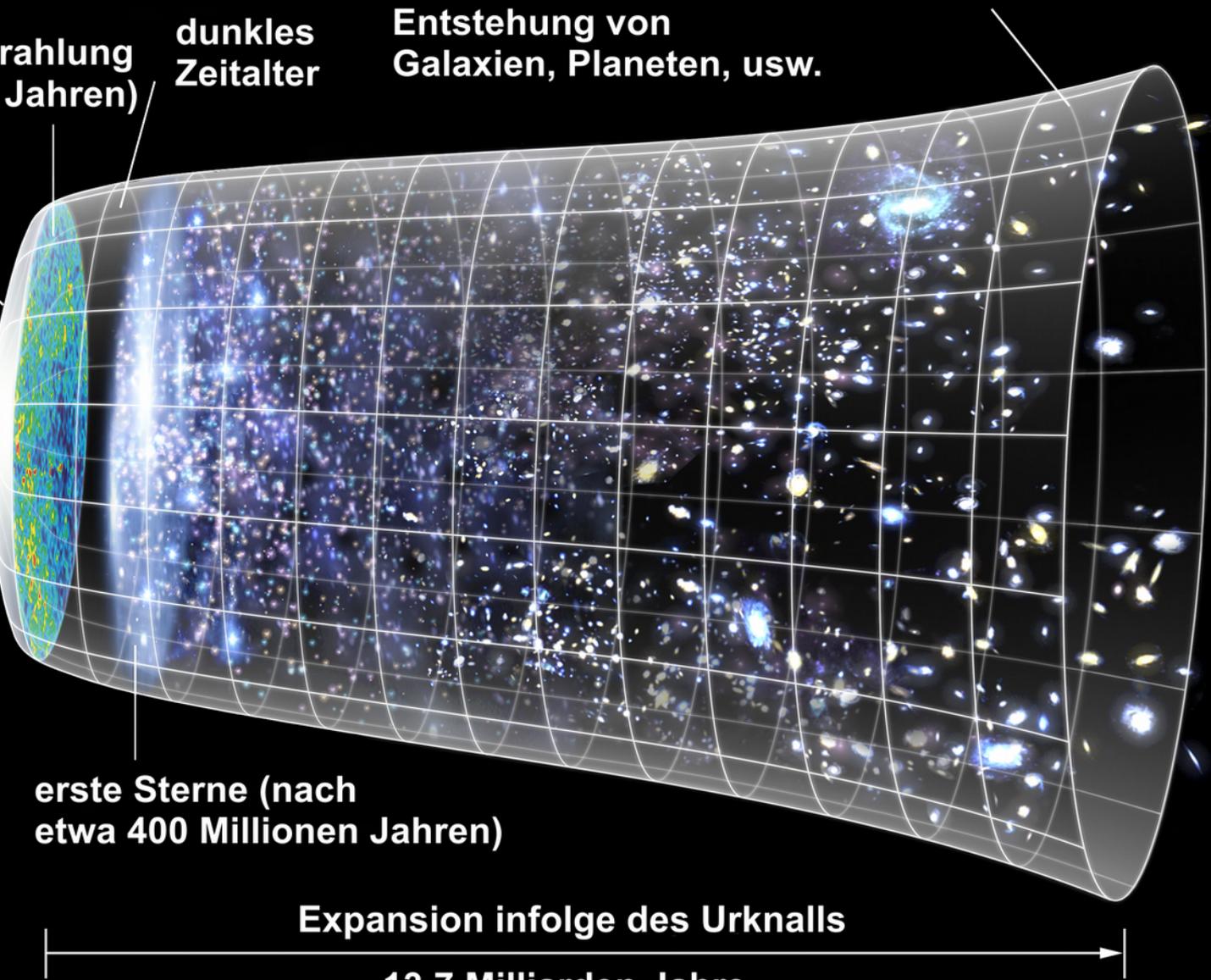
Inflation

Quanten-
fluktuationen

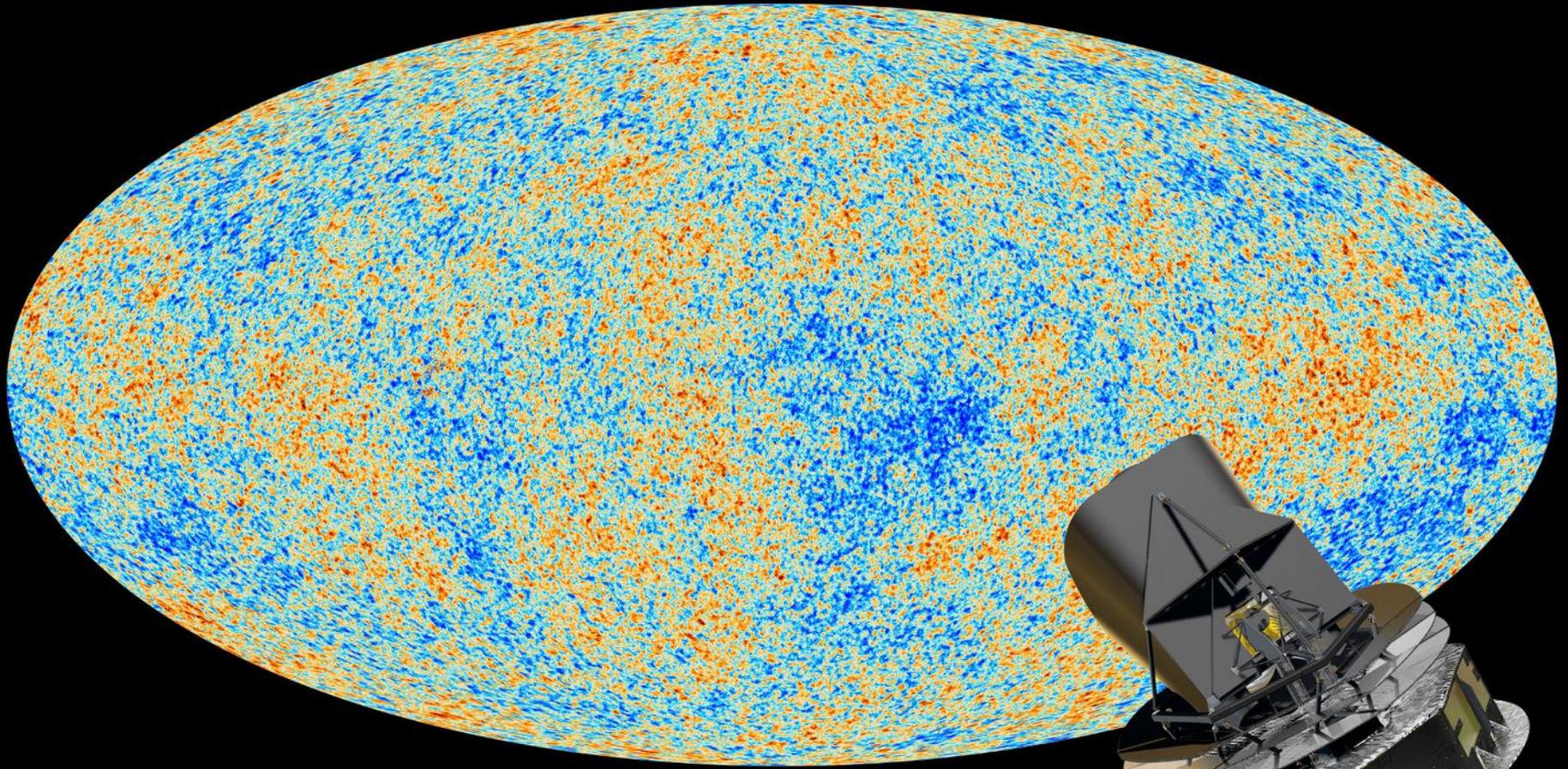
erste Sterne (nach
etwa 400 Millionen Jahren)

Expansion infolge des Urknalls

13,7 Milliarden Jahre



2,7 Kelvin Hintergrundstrahlung



(~380.000 Jahre nach Urknall,
nur ca. 0,001% Variationen)

ESA Planck Mission

Großskalige Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

[Illustris-Simulation: illustris-project.org/media]

#1

Gravitation + Gasdruck

Gravitation: immer anziehend

Gasdruck: immer abstoßend

Gravitationsgesetz

Gravitationskraft

eine Masse

andere Masse

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Gravitationskonstante

Abstandsquadrat

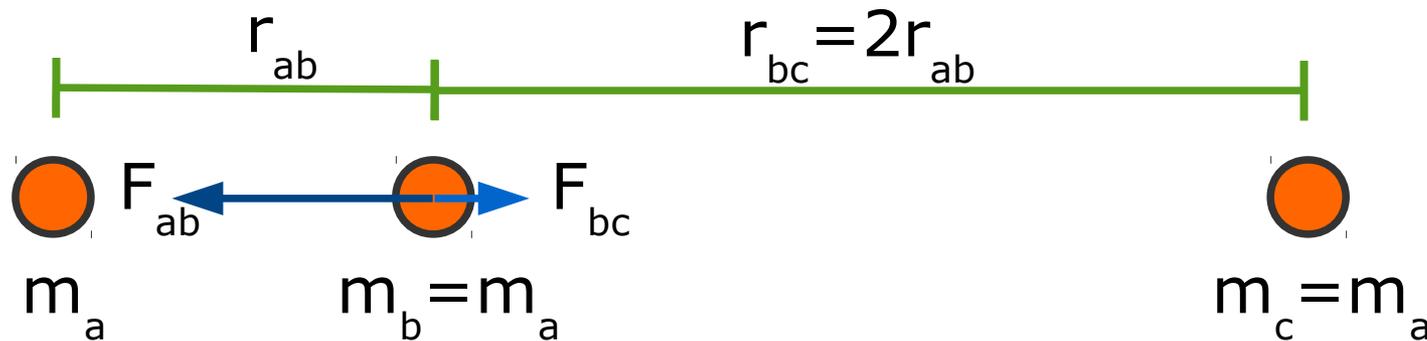
The diagram shows the equation $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ with four orange arrows pointing to its components: 'Gravitationskraft' points to 'F', 'eine Masse' points to 'm1', 'andere Masse' points to 'm2', and 'Abstandsquadrat' points to 'r^2'. 'Gravitationskonstante' is also labeled but has no arrow pointing to it.

$$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg s}^2)$$

Gravitationsgesetz

Wohin bewegt sich Masse b?

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$



$$F_{ab} = G \frac{m_a \cdot m_b}{r_{ab}^2} = G \frac{m_a^2}{r_{ab}^2}$$

$$F_{bc} = G \frac{m_b \cdot m_c}{r_{bc}^2} = G \frac{m_a^2}{(2 \cdot r_{ab})^2} = G \frac{m_a^2}{4 \cdot r_{ab}^2} = \frac{1}{4} F_{ab}$$

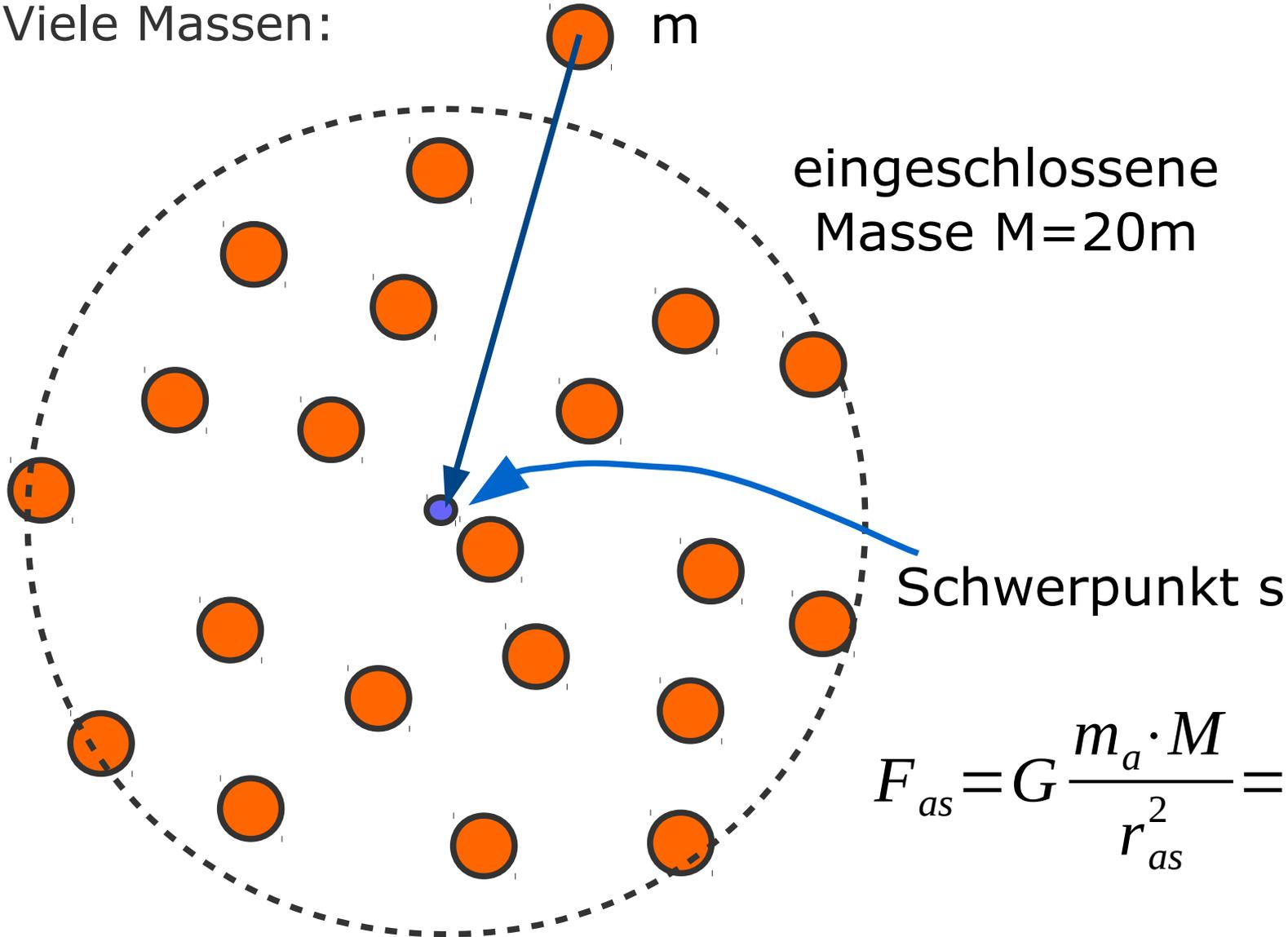
Hängt invers² vom Abstand ab!

Gravitationsgesetz

Viele Massen:

m

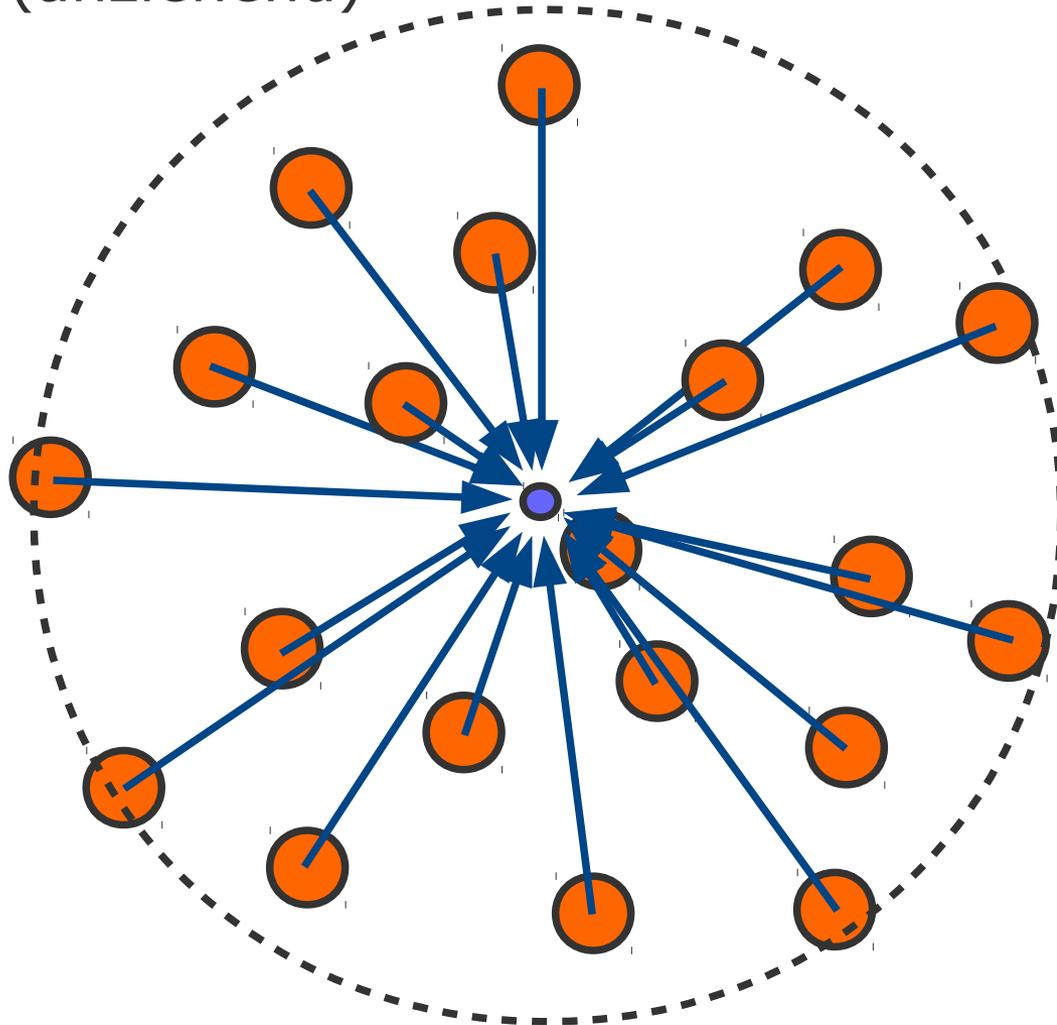
eingeschlossene
Masse $M=20m$



$$F_{as} = G \frac{m_a \cdot M}{r_{as}^2} = G \frac{20 \cdot m^2}{r_{as}^2}$$

Gravitationsgesetz

Druck durch Gravitation
(anziehend)



Richtung Schwerpunkt
(natürlich eigentlich
jedes Masse zu jeder):

“hydrostatischer Druck”
= nach innen

$$p = \frac{3}{8} \cdot \frac{G \cdot M^2}{\pi R^4}$$

p	Druck
G	Grav.-konstante
M	Gesamtmasse
R	Radius

Gravitation + Gasdruck

Kräfte/Druck nach innen

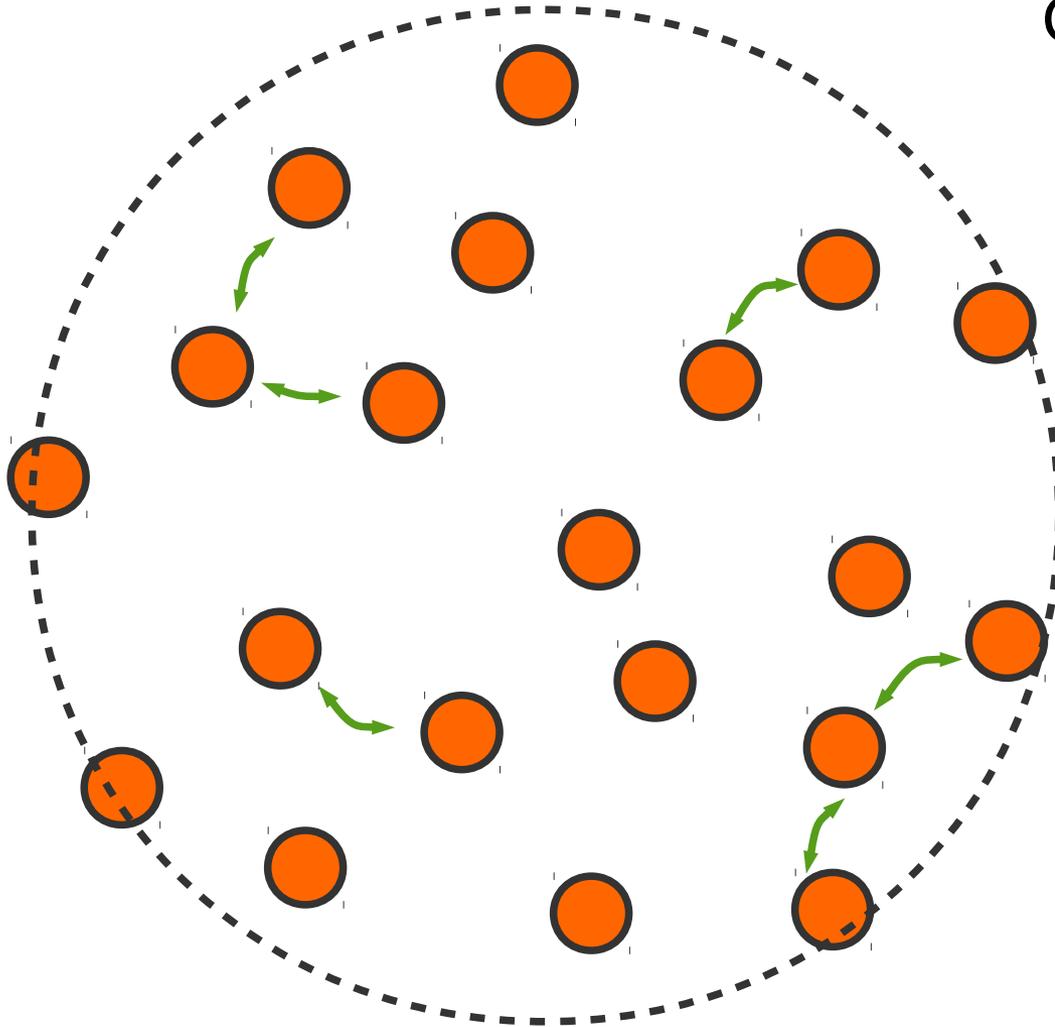


Gravitation: immer anziehend

Gasdruck: immer abstoßend

Gasdruck

Teilchen-Stöße (abstoßend):



Ideale Gasgleichung

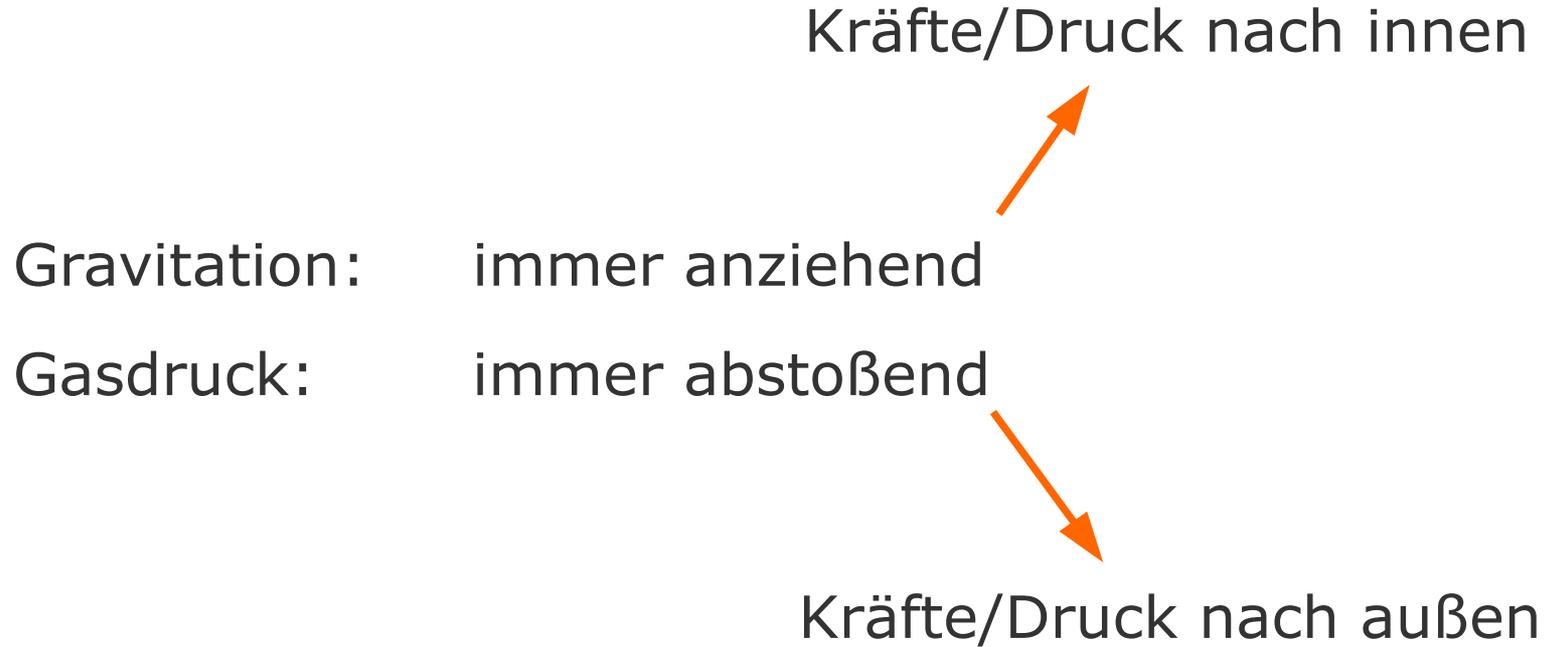
Gasdruck = nach außen

$$p = \frac{N \cdot k_B \cdot T}{V}$$

$$p = \frac{\rho}{\mu} k_B \cdot T$$

p	Druck
V	Volumen
ρ	Dichte
μ	Masse 1 Teilchen
N	Anzahl Teilchen
T	Temperatur
k_B	Boltzmannkonst.

Gravitation + Gasdruck



Druck-Gleichgewicht: Jeans-Masse

$$p = \frac{3}{8} \cdot \frac{G \cdot M^2}{\pi R^4} \quad \downarrow$$

$$\uparrow \quad p = \frac{\rho}{\mu} \cdot k_B \cdot T$$

Hydrostatischer Druck = Gasdruck

$$\frac{3}{8} \cdot \frac{G \cdot M^2}{\pi R^4} = \frac{\rho}{\mu} \cdot k_B \cdot T$$

ρ	Dichte
μ	Masse 1 Teilchen
T	Temperatur
k_B	Boltzmannkonst.
G	Grav.-konstante

$$\rightarrow M_{Jeans} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{k_B T}{G \mu} \right)^3}$$

$M > M_{Jeans}$: Kollaps durch Gravitation

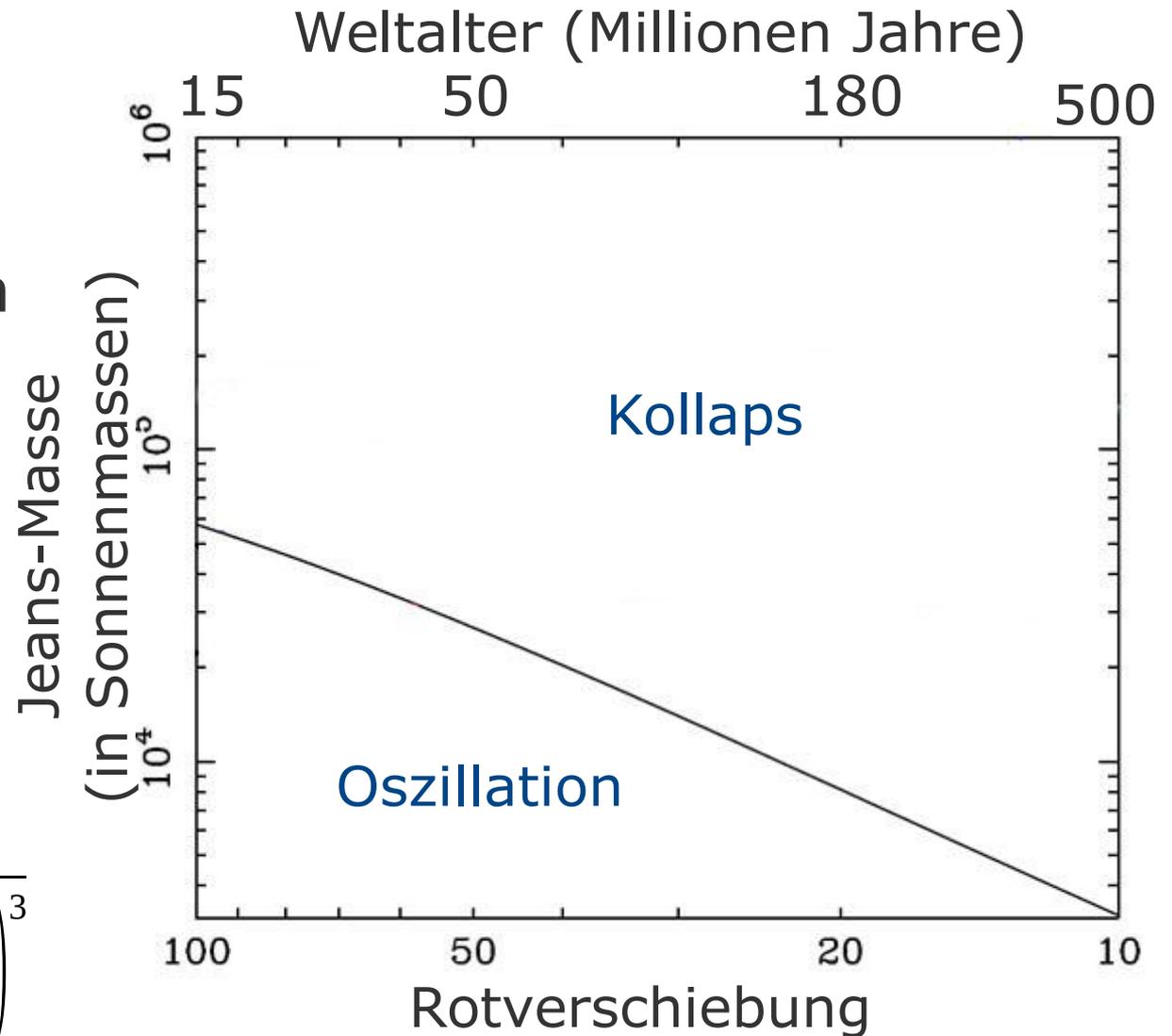
Druck-Gleichgewicht: Jeans-Masse

Bei Störungen:

$M > M_{\text{Jeans}}$: Kollaps
durch Gravitation

$M < M_{\text{Jeans}}$: nur
Oszillationen

$$M_{\text{Jeans}} = \sqrt{\frac{6}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{k_B T}{G \mu} \right)^3}$$



S. Glover, ITA Uni HD, 2012

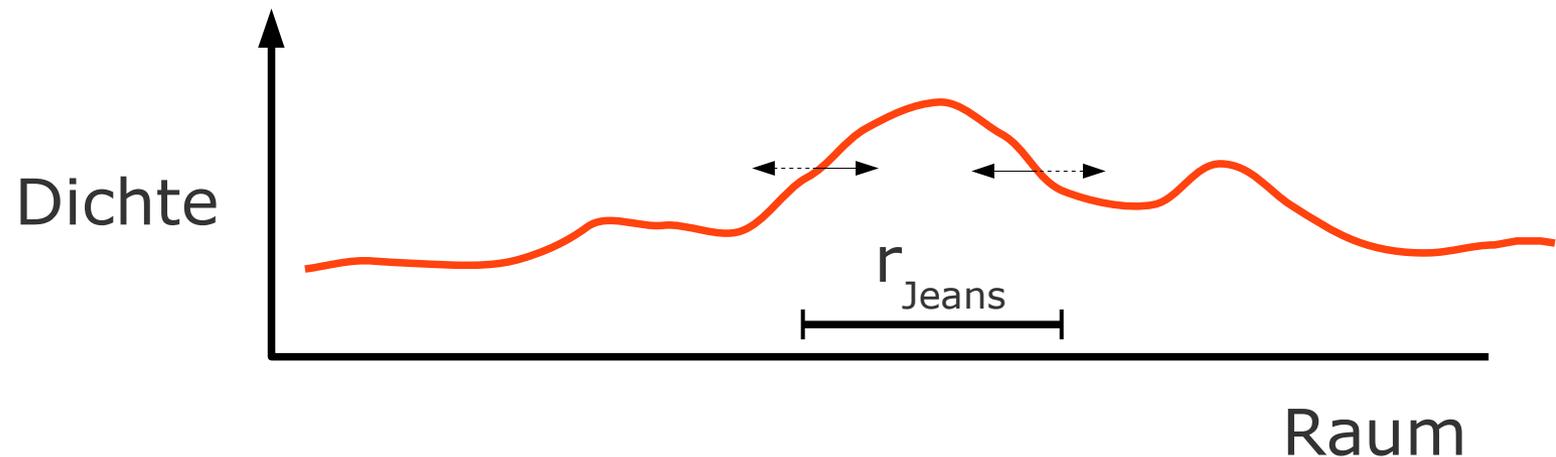
Druck-Gleichgewicht: Jeans-Masse

Bei Störungen:

$M > M_{\text{Jeans}}$: Kollaps
durch Gravitation

$M < M_{\text{Jeans}}$: nur
Oszillationen

→ Jeans-Länge r_{Jeans}



Kollaps von Strukturen

Aber: wenn *nur normale Materie* (Baryonen)

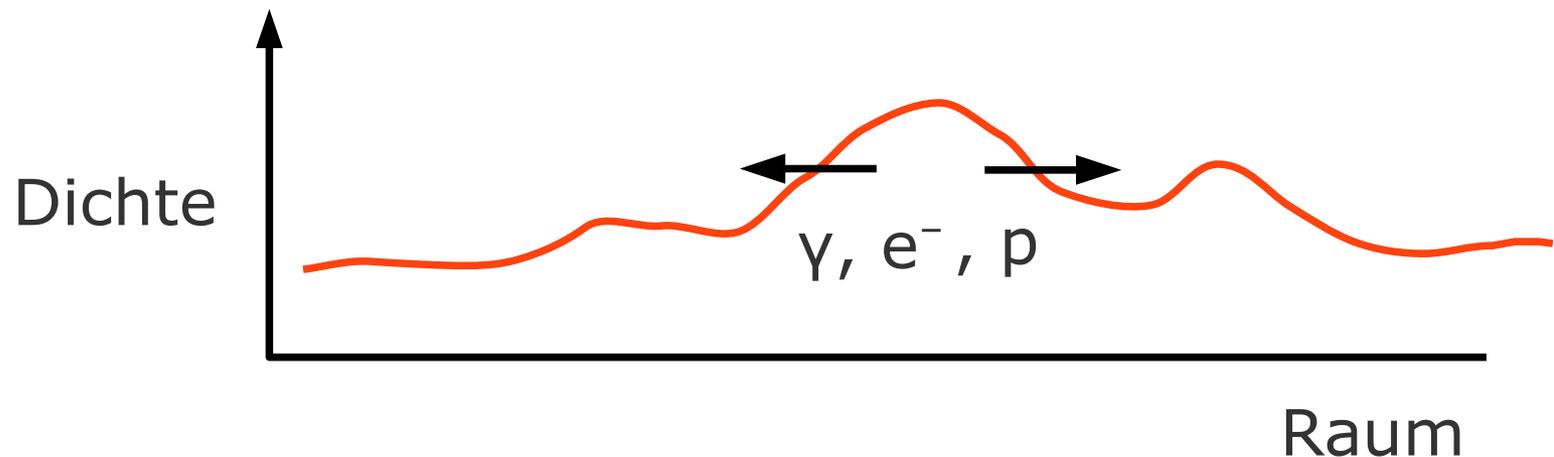
Photonen haben Zeit → Bewegung aus Bereich hinaus

→ Photonen stoßen auf Elektronen (e^-)

→ Elektronen bewegen sich hinaus

→ Ladungsanziehung, ziehen Protonen mit (p^+)

→ Dämpfung von Störungen → "Silk-Dämpfung"



Kollaps von Strukturen

Aber: wenn *nur normale Materie* (Baryonen)

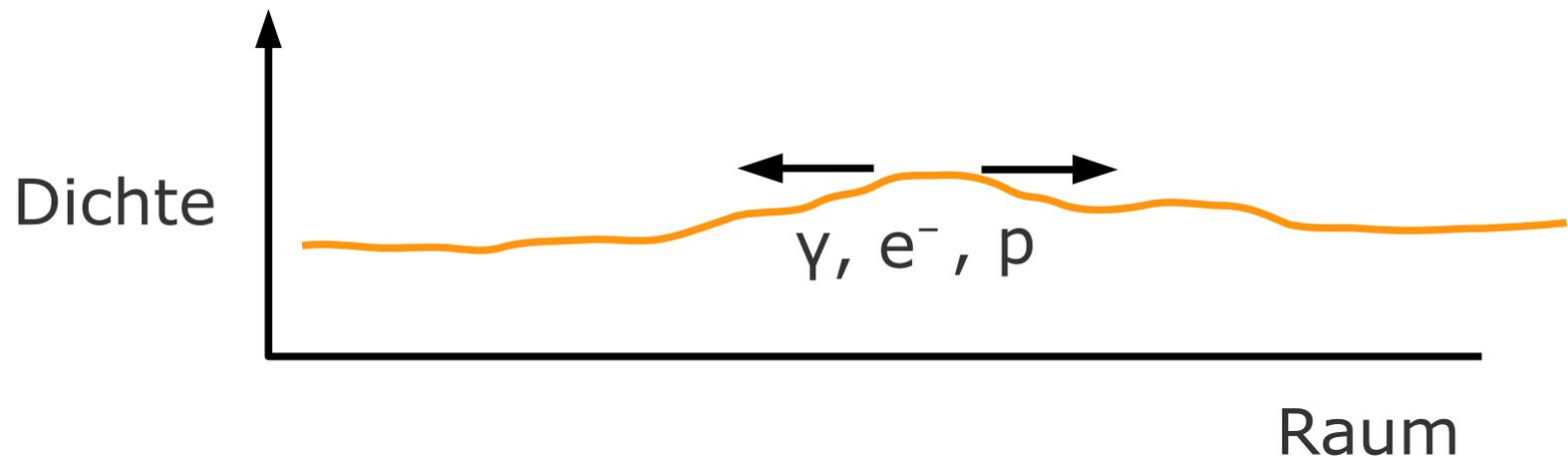
Photonen haben Zeit → Bewegung aus Bereich hinaus

→ Photonen stoßen auf Elektronen (e^-)

→ Elektronen bewegen sich hinaus

→ Ladungsanziehung, ziehen Protonen mit (p^+)

→ Dämpfung von Störungen → "Silk-Dämpfung"



Kollaps von Strukturen

Silk-Dämpfung, Effekt:

Protonen schwerste Teilchen → bis $z=1000$ (CMB)

$M < 10^{12} M_{\text{Sonne}}$ weggedämpft!

Masse Milchstraße (sichtbar): $4 \times 10^{11} M_{\text{Sonne}}$

Widerspruch! (Galaxienhaufen müssten früher entstehen als Galaxien)

→ Universum *nur* mit Baryonen (Protonen, Elektronen, Neutronen, etc.) *nicht möglich!*

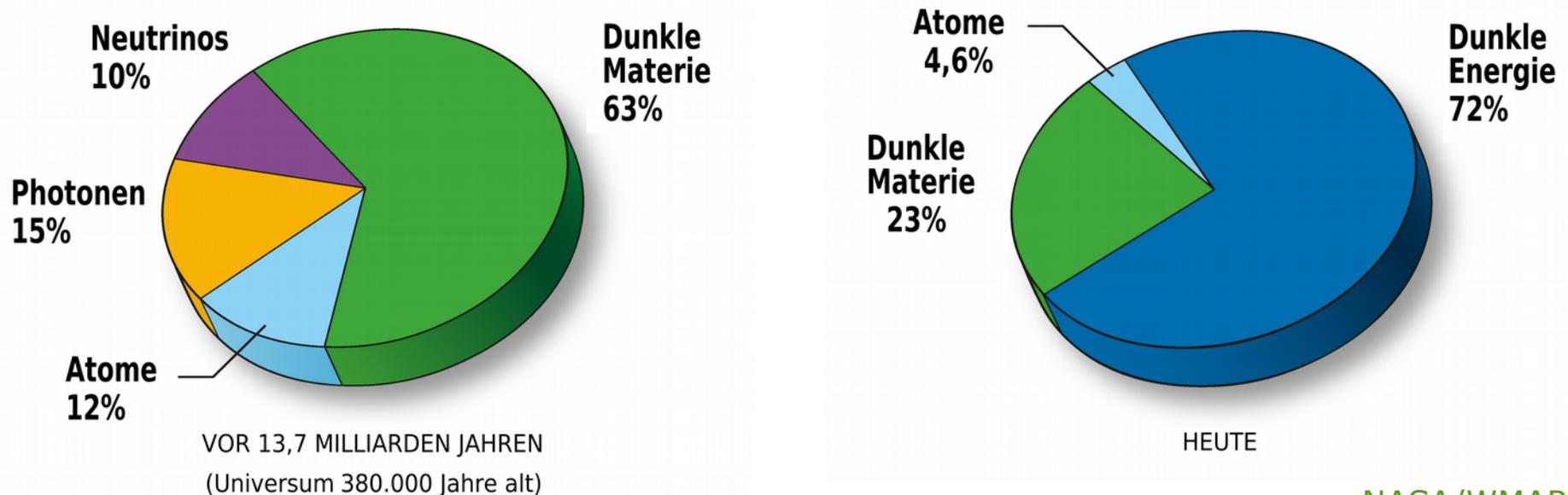
→ Nicht-geladene Teilchen: "Dunkle Materie"

Kollaps von Strukturen

Was passiert: Materie + Schwerkraft + Zeit?

→ Bildung großskaliger Strukturen

Materie im Universum: "leuchtende" + "dunkle"



NASA/WMAP

Kollaps von Strukturen

Was ist Dunkle Materie?

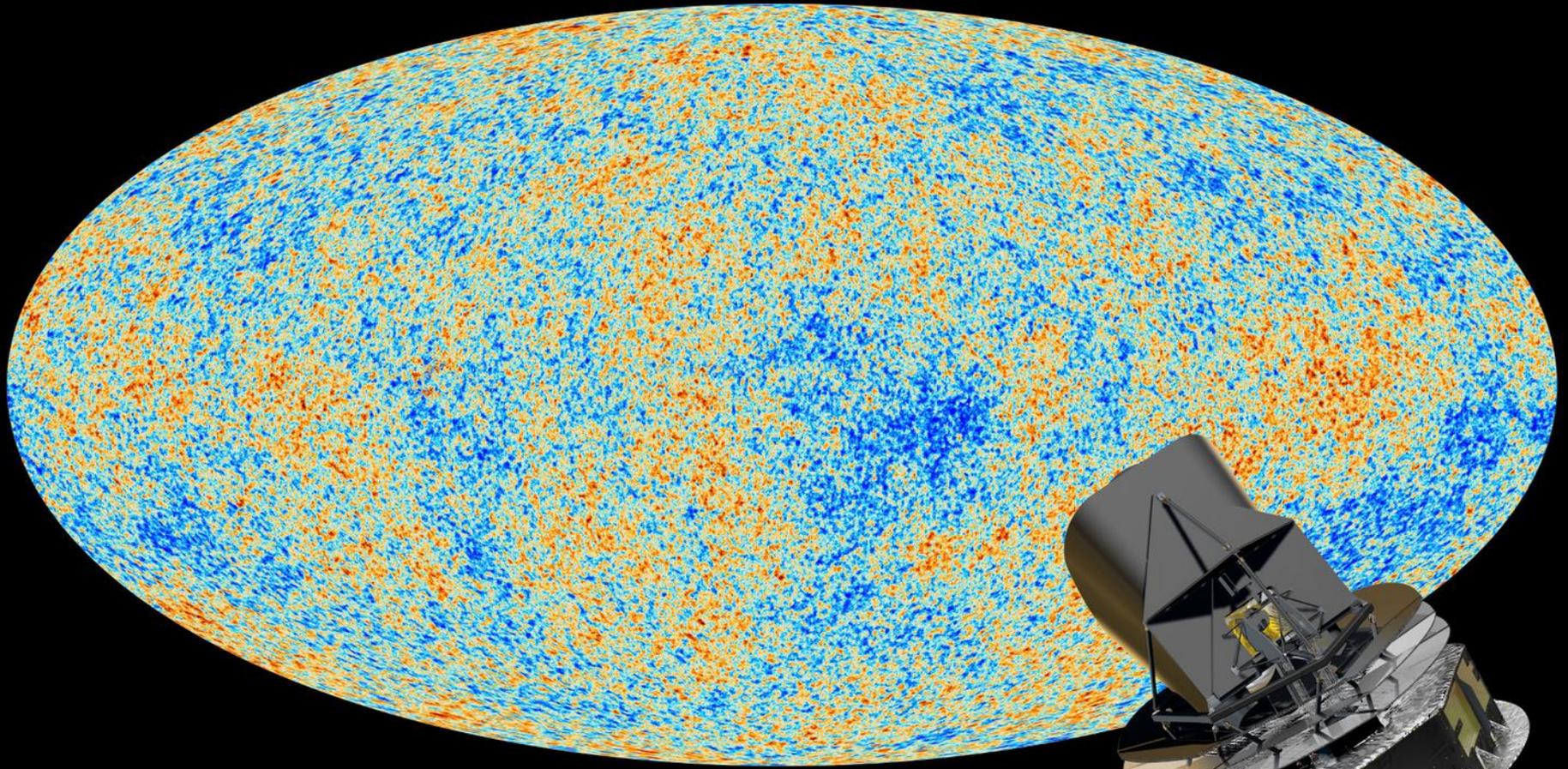
Dunkle Materie: "kalt"?

→ massereiche Teilchen → langsam (Teilchen=?)

Dunkle Materie: "heiß"?

→ massearme Teilchen → schnell (Neutrinos?)

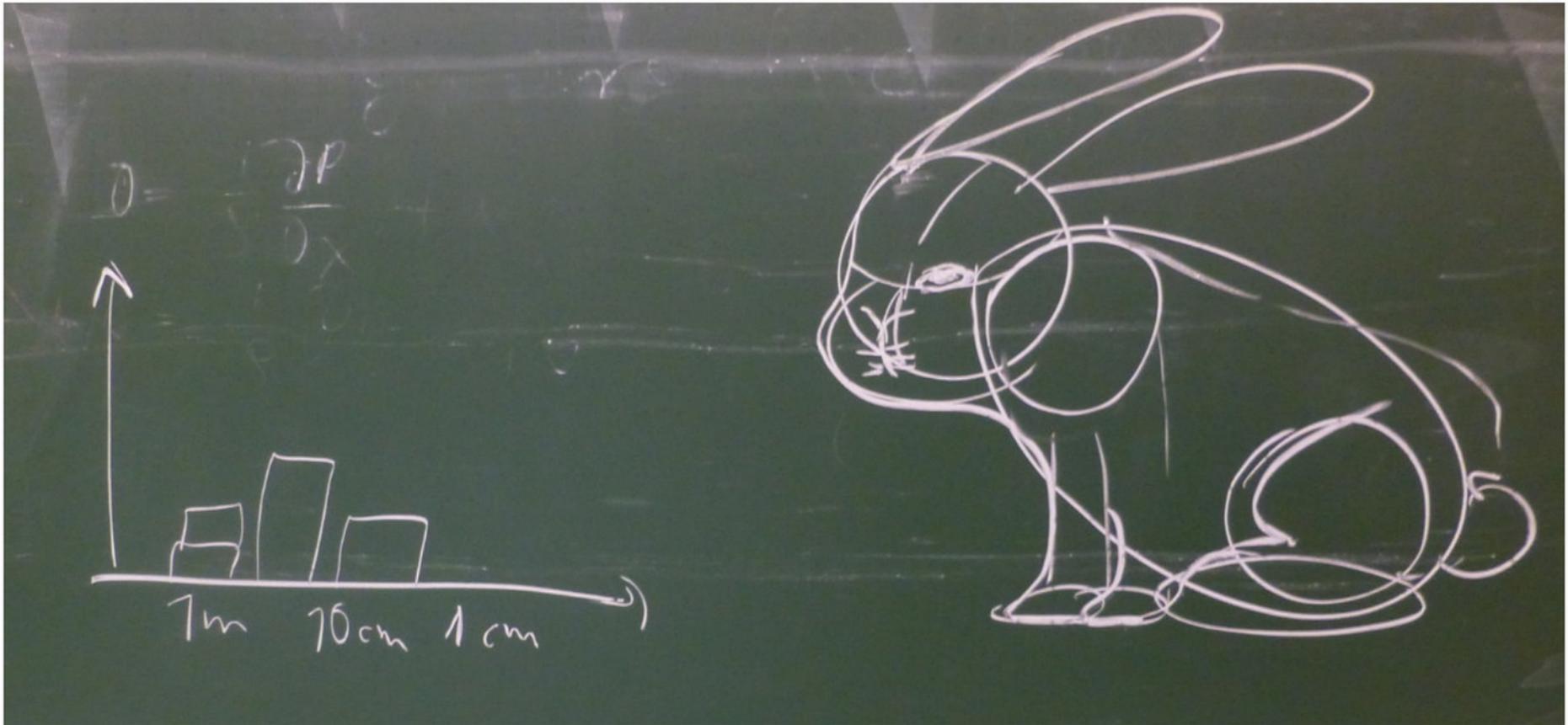
2,7 Kelvin Hintergrundstrahlung



(~380.000 Jahre nach Urknall,
nur ca. 0,001% Variationen)

ESA Planck Mission

Kollaps von Strukturen



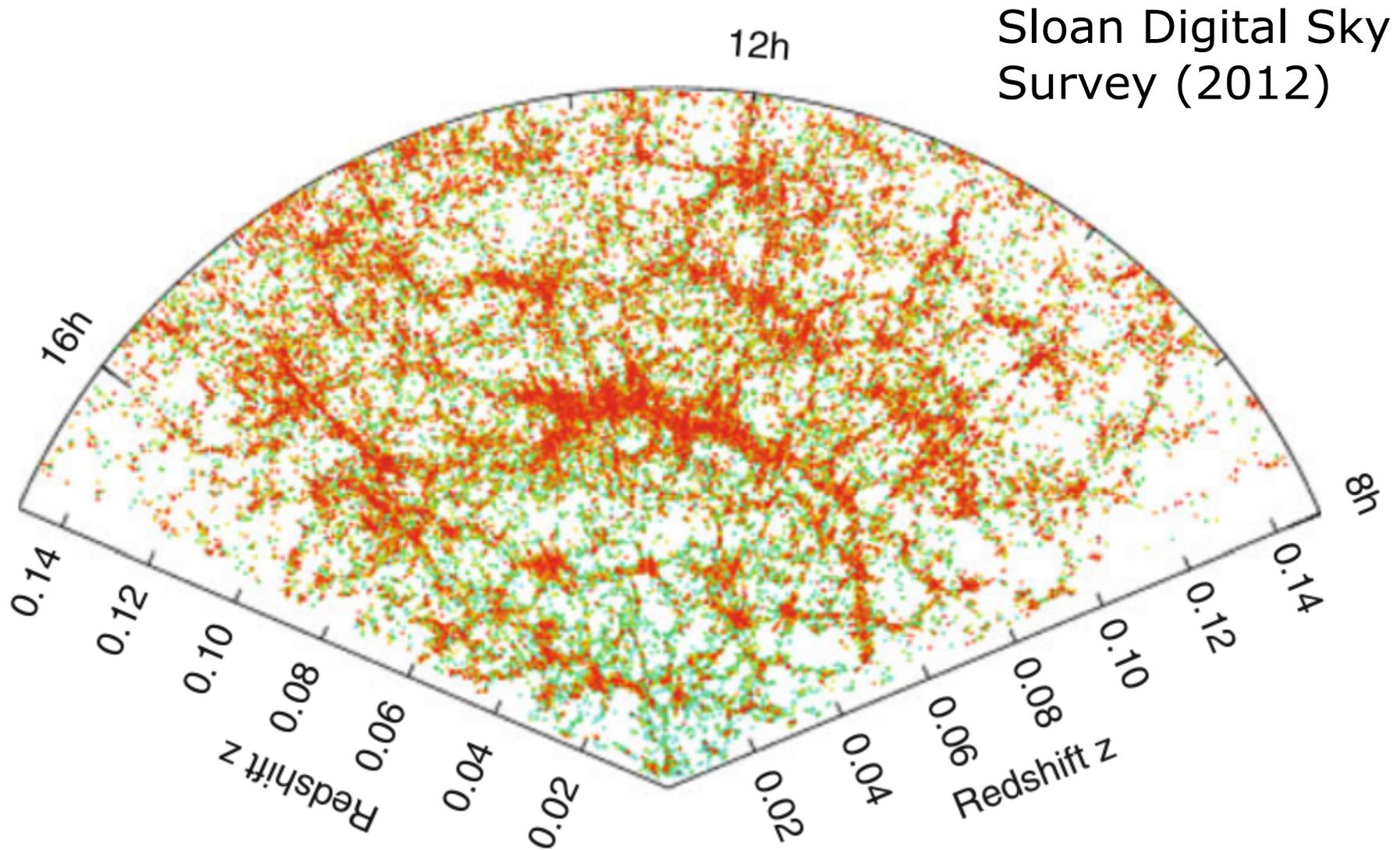
M. Pössel

Kollaps von Strukturen

[Illustris-Simulation: illustris-project.org/media]

#2, #3

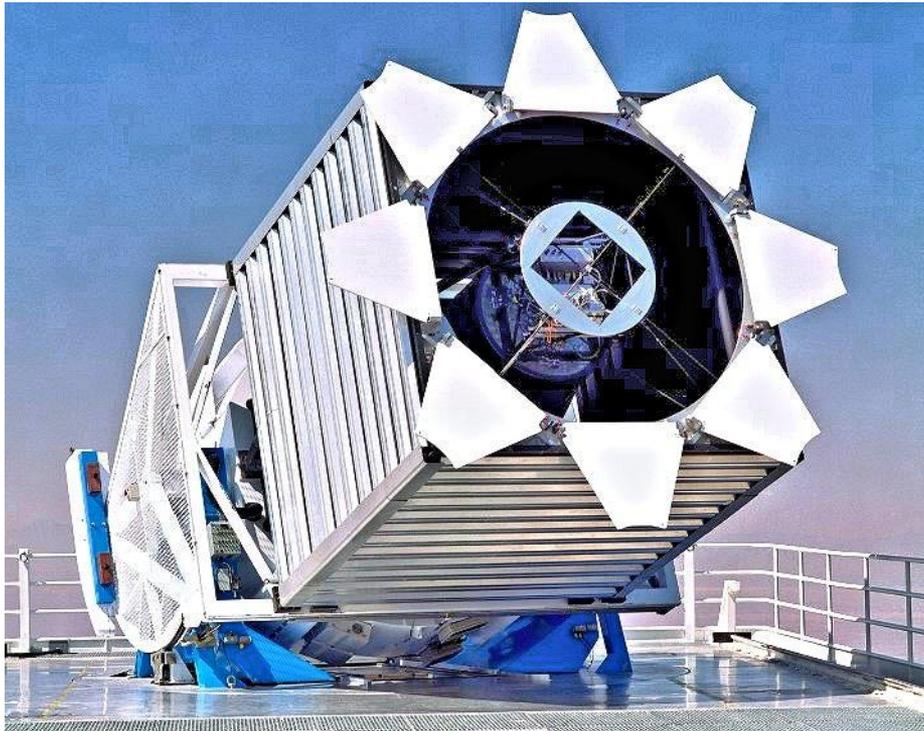
Strukturen von Strukturen



Allison Coil et al., 2013

Exkurs: Sloan Digital Sky Survey

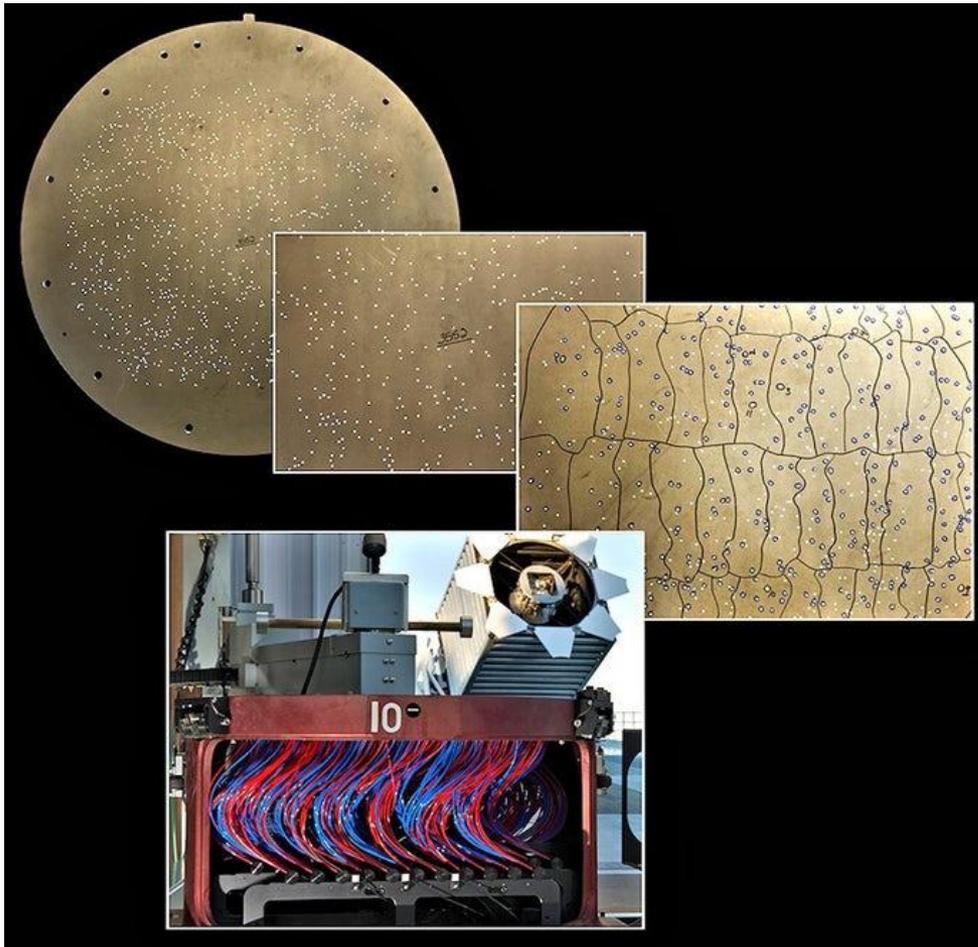
2,5m-Teleskop, Apache Point, New Mexico, USA



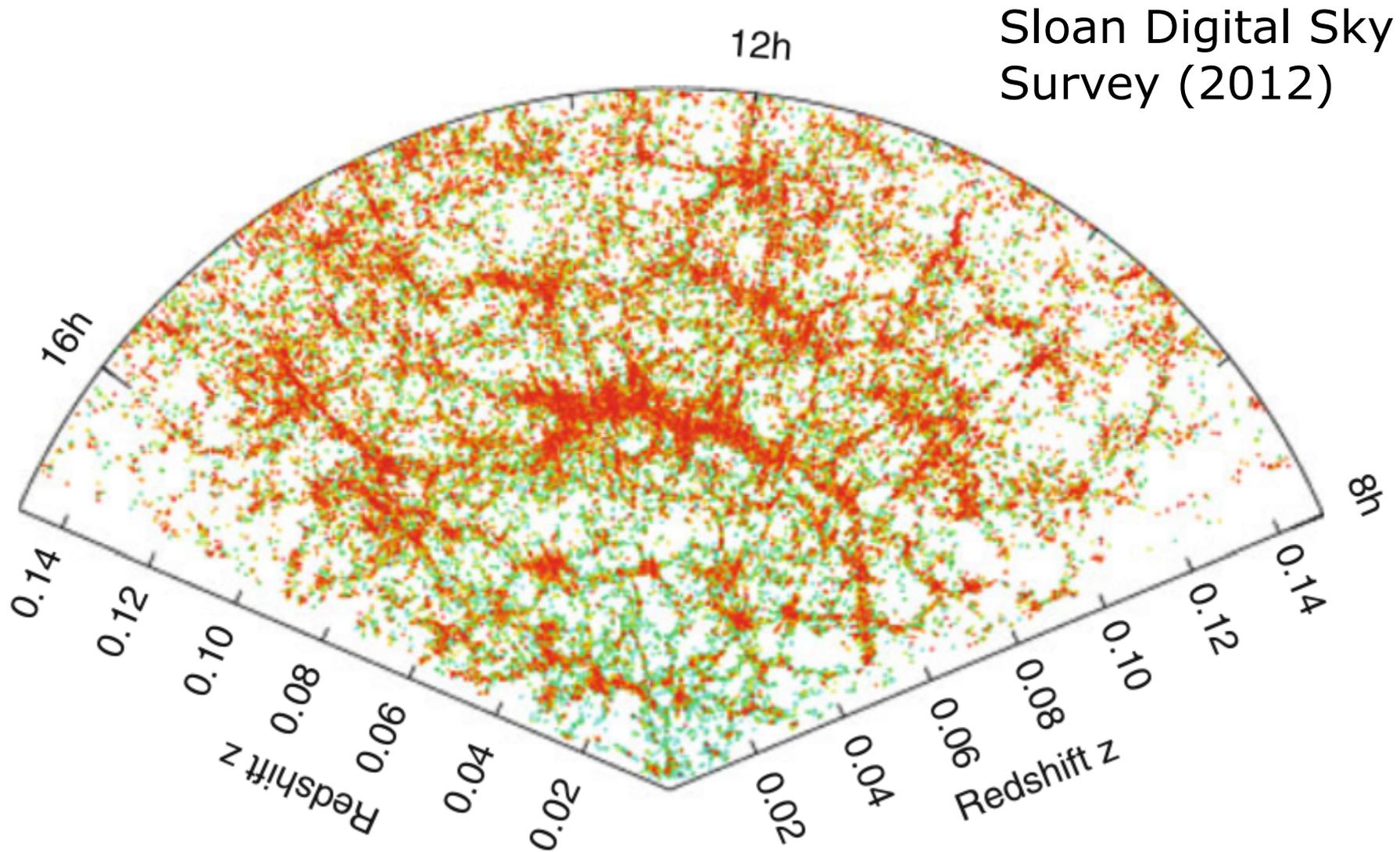
Exkurs: Sloan Digital Sky Survey

2,5m-Teleskop, Apache Point, New Mexico, USA

Photometrie + Faser-Spektrograph, manuell bestückt

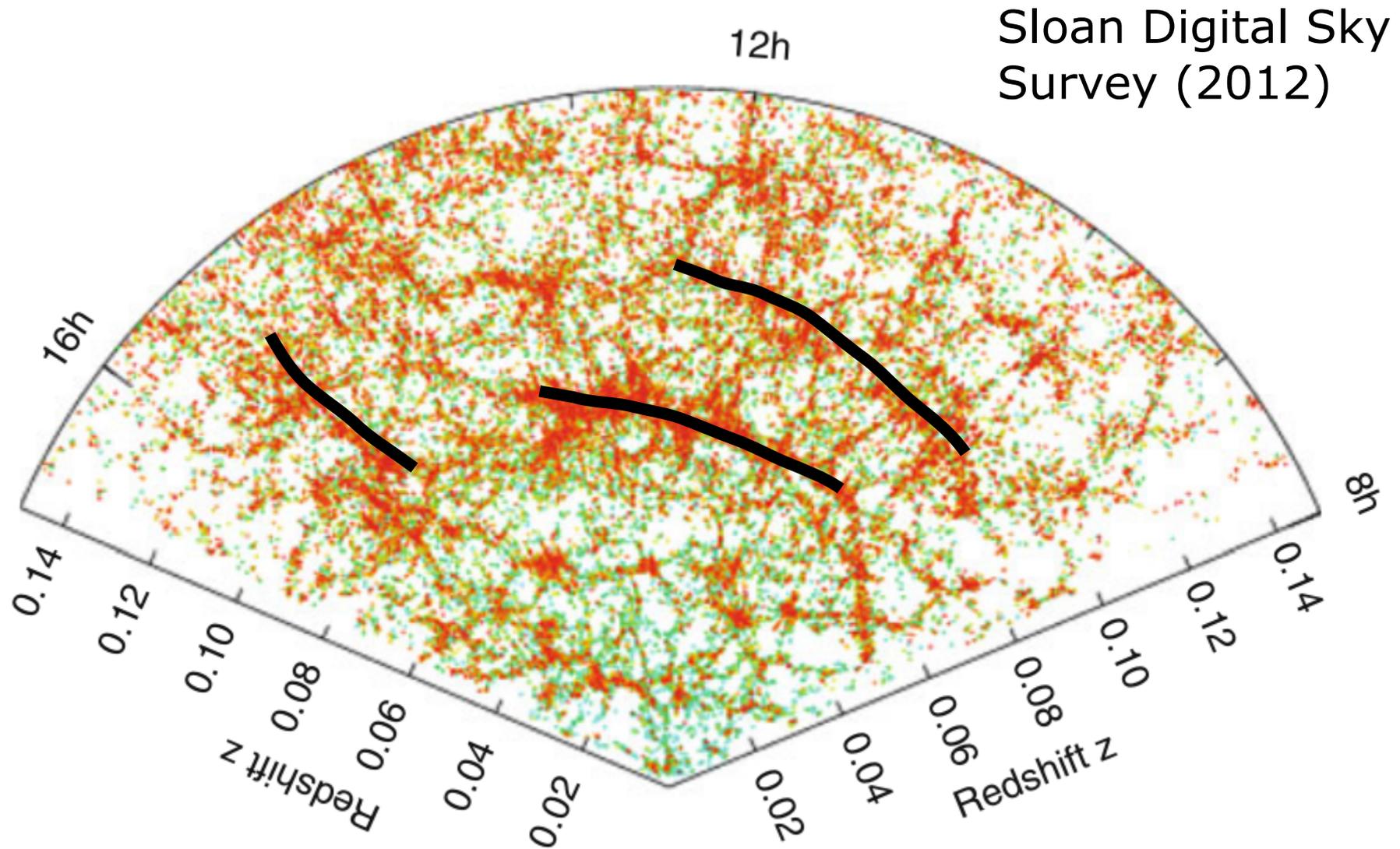


Strukturen von Strukturen



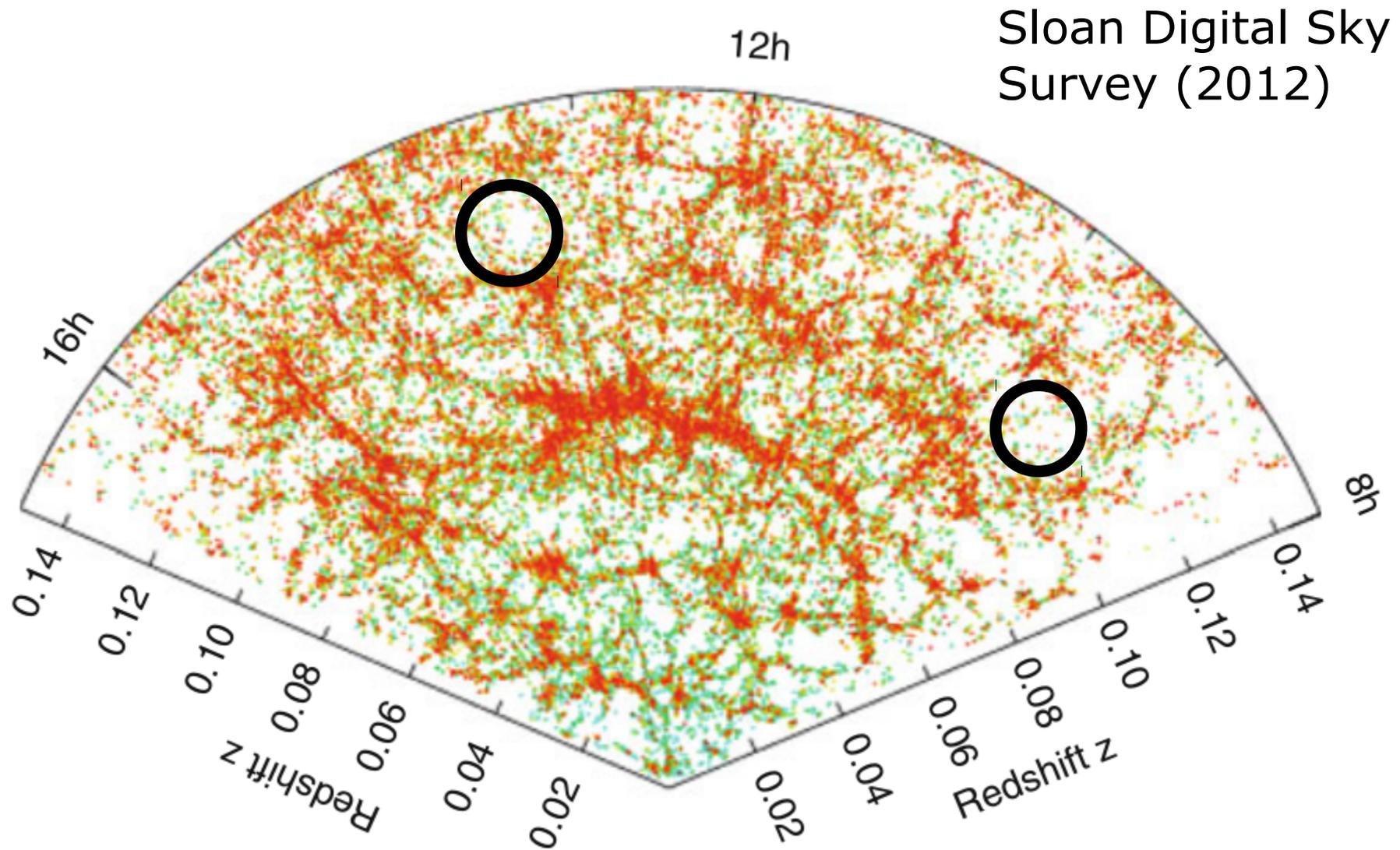
Allison Coil et al., 2013

Filamente



Allison Coil et al., 2013

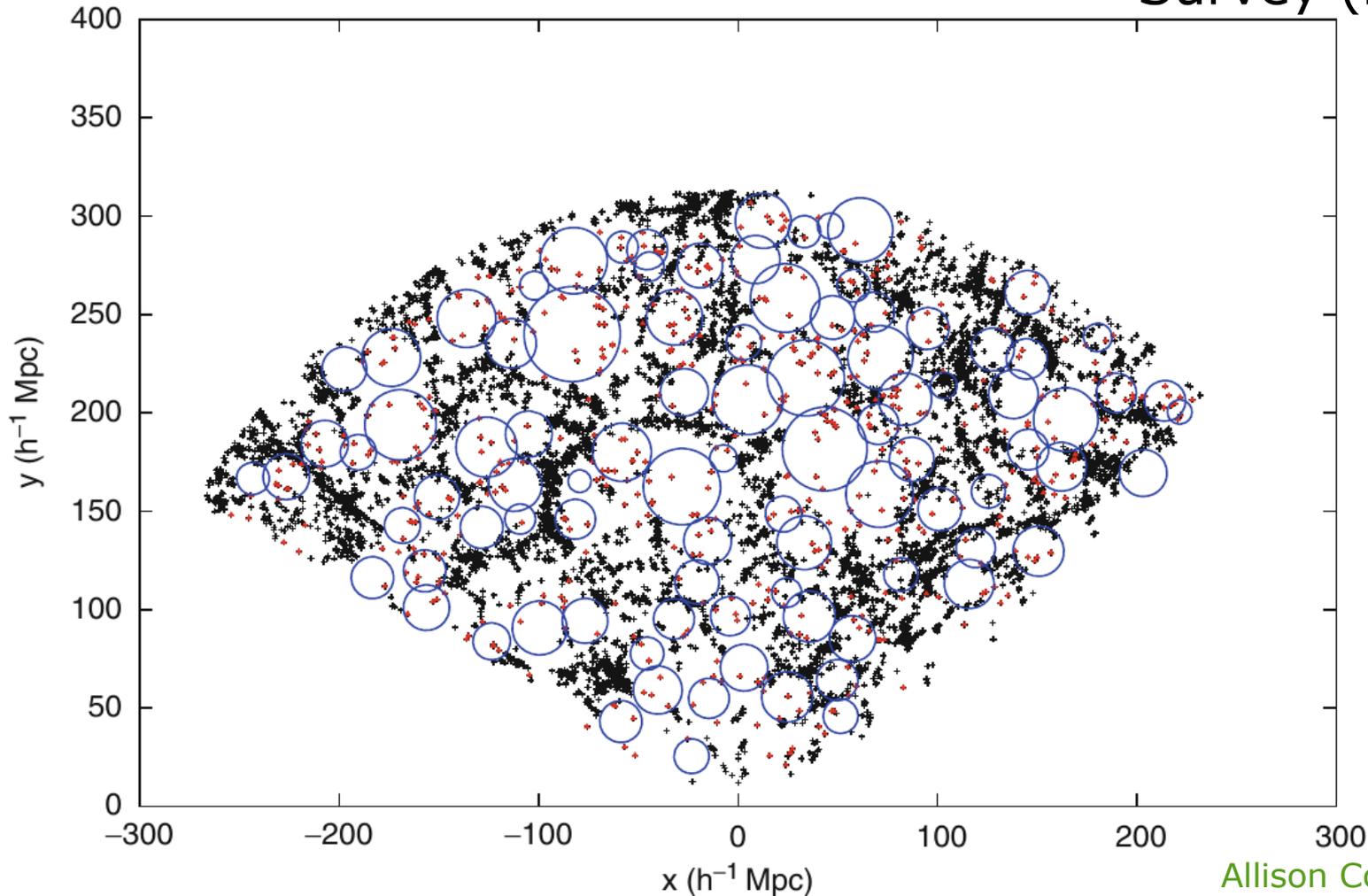
Leerstellen (Voids)



Allison Coil et al., 2013

Leerstellen (Voids)

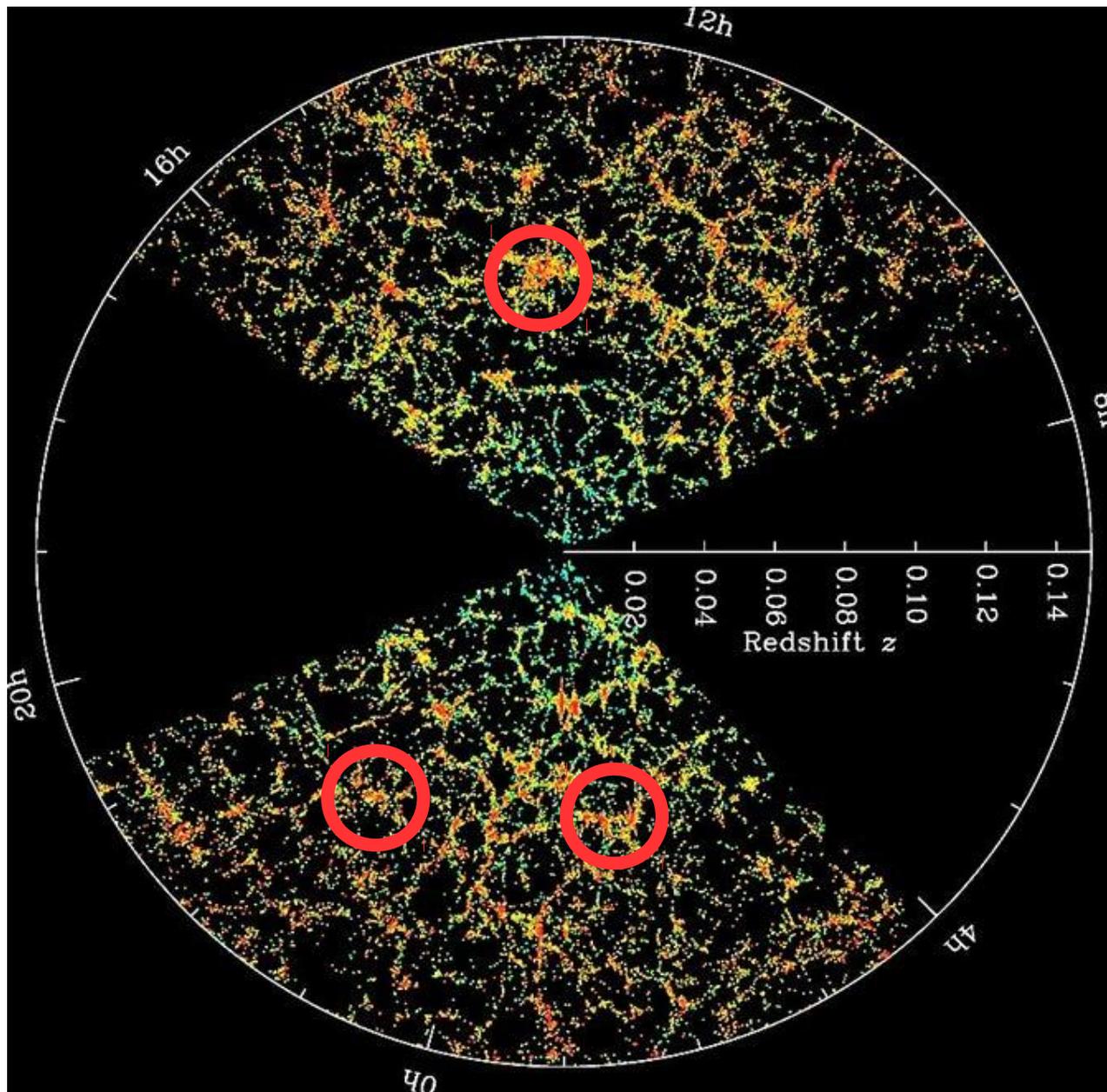
Sloan Digital Sky Survey (2012)



Allison Coil et al., 2013

Galaxienhaufen (Cluster)

Sloan Digital Sky Survey (2012)



SDSS III, 2012

Strukturen von Strukturen

Von Leerstellen

zu Filamenten

zu Haufen

→ Strukturen auf allen Skalen, durch Dunkle Materie

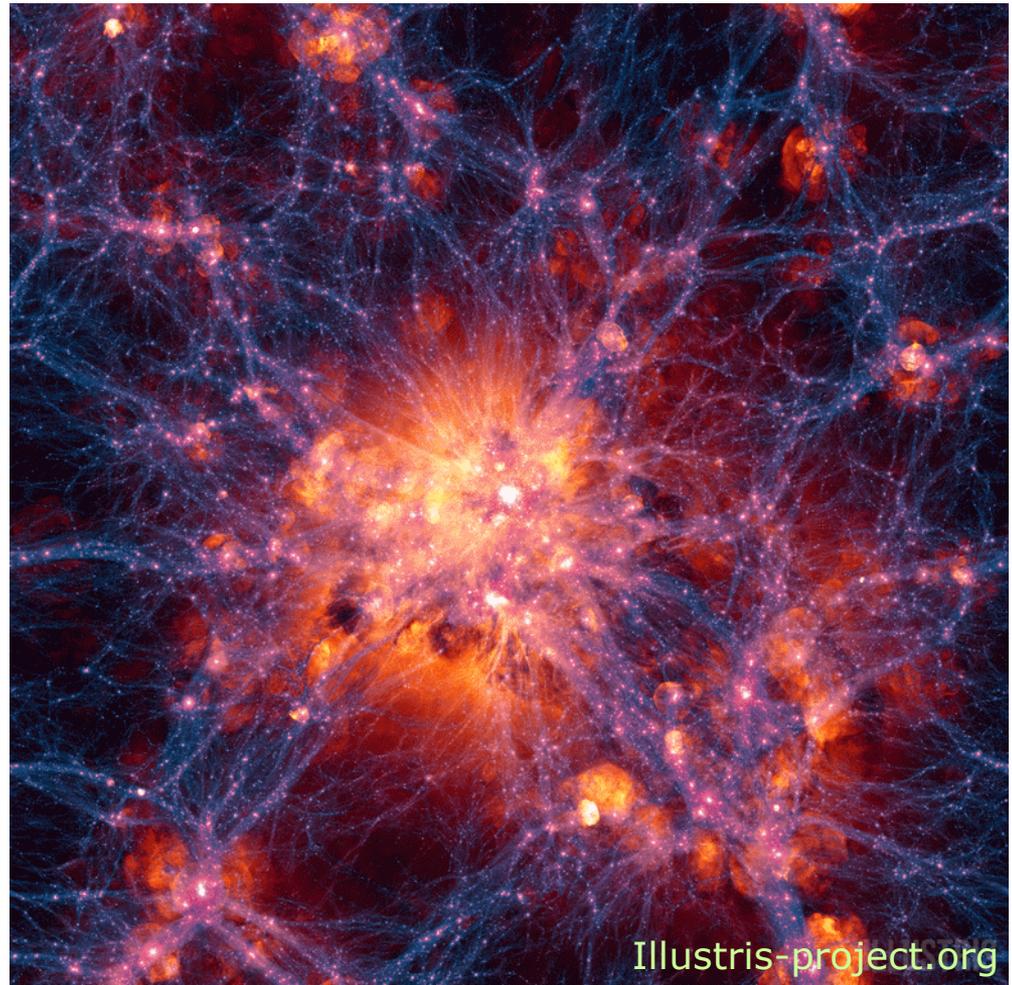
Großskalige Strukturen

Dunkle Materie Halos + Filamente

Gas "kondensiert"
in Zentren von Halos

→ Sterne entstehen

→ Galaxien



Zusammenfassung

- Gleichmäßiges Gas + Dunkle Materie
- Störungen auf allen Skalen
- Kollaps auf Jeans-Skalen, Oszillation darunter
- Entstehung von Strukturen aller Art, Über-/
Unterdichten
- Entstehung von Galaxien aus Baryonen (Gas)
in DM Halos