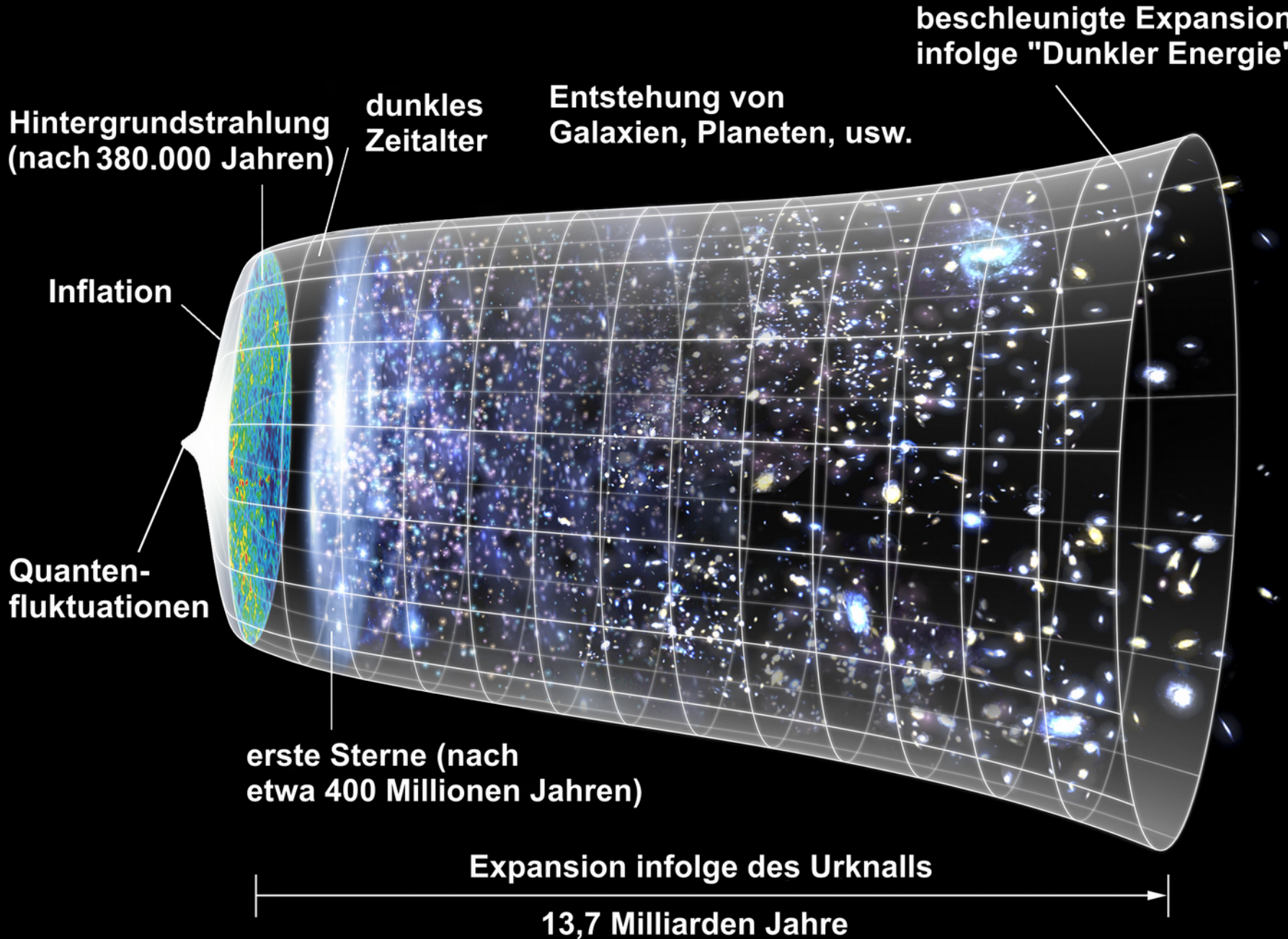


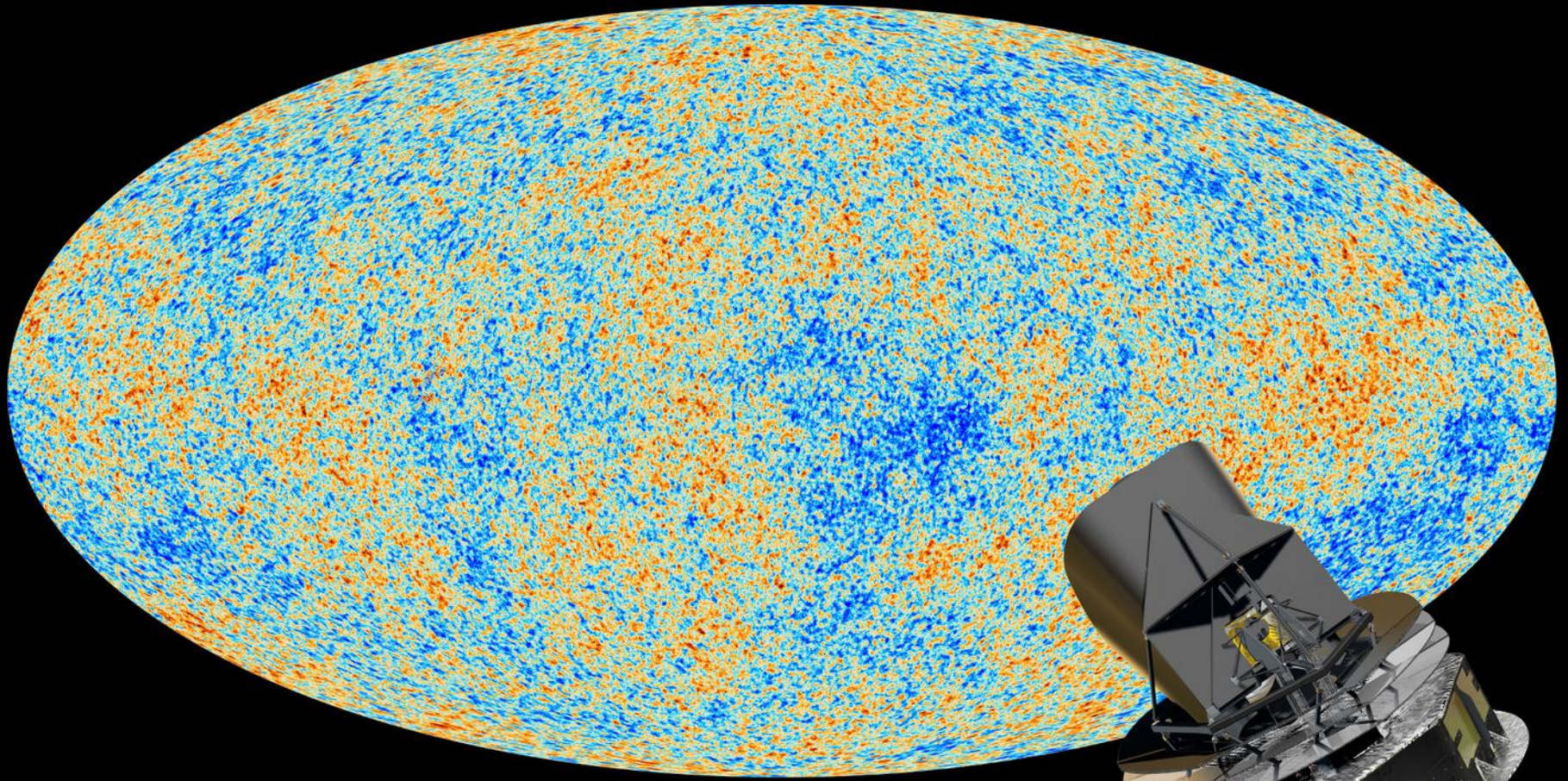
Kosmische Evolution für Nicht-Physiker:  
Wie unser Weltall wurde, was es heute ist

## 5. Entstehung großräumiger Struktur im Universum

Knud Jahnke, MPIA



# 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](http://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

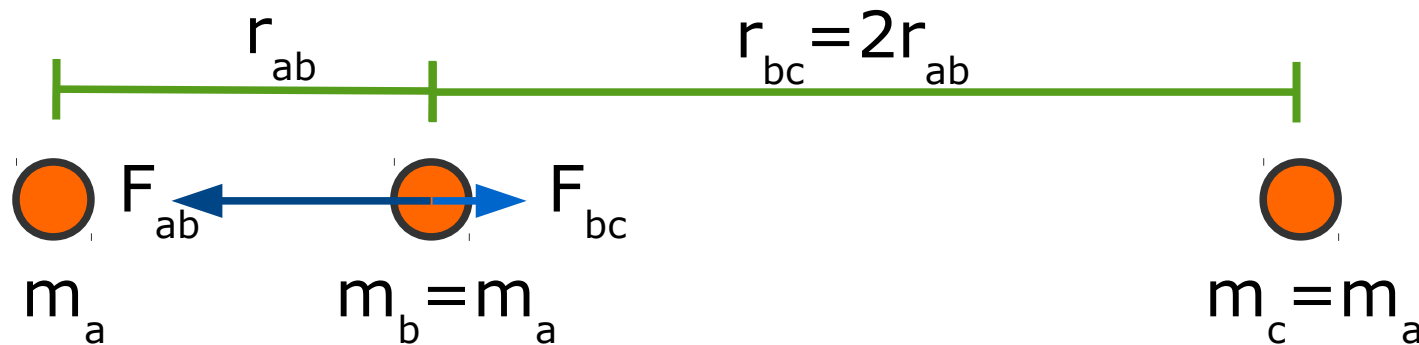
The diagram shows the equation  $F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$  with four orange arrows pointing to its components: 'Gravitationskraft' points to 'F', 'eine Masse' points to 'm1', 'andere Masse' points to 'm2', and 'Abstandsquadrat' points to 'r^2'. 'Gravitationskonstante' is also labeled but has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

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

# Gravitationsgesetz

Wohin bewegt sich Masse b?

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



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

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

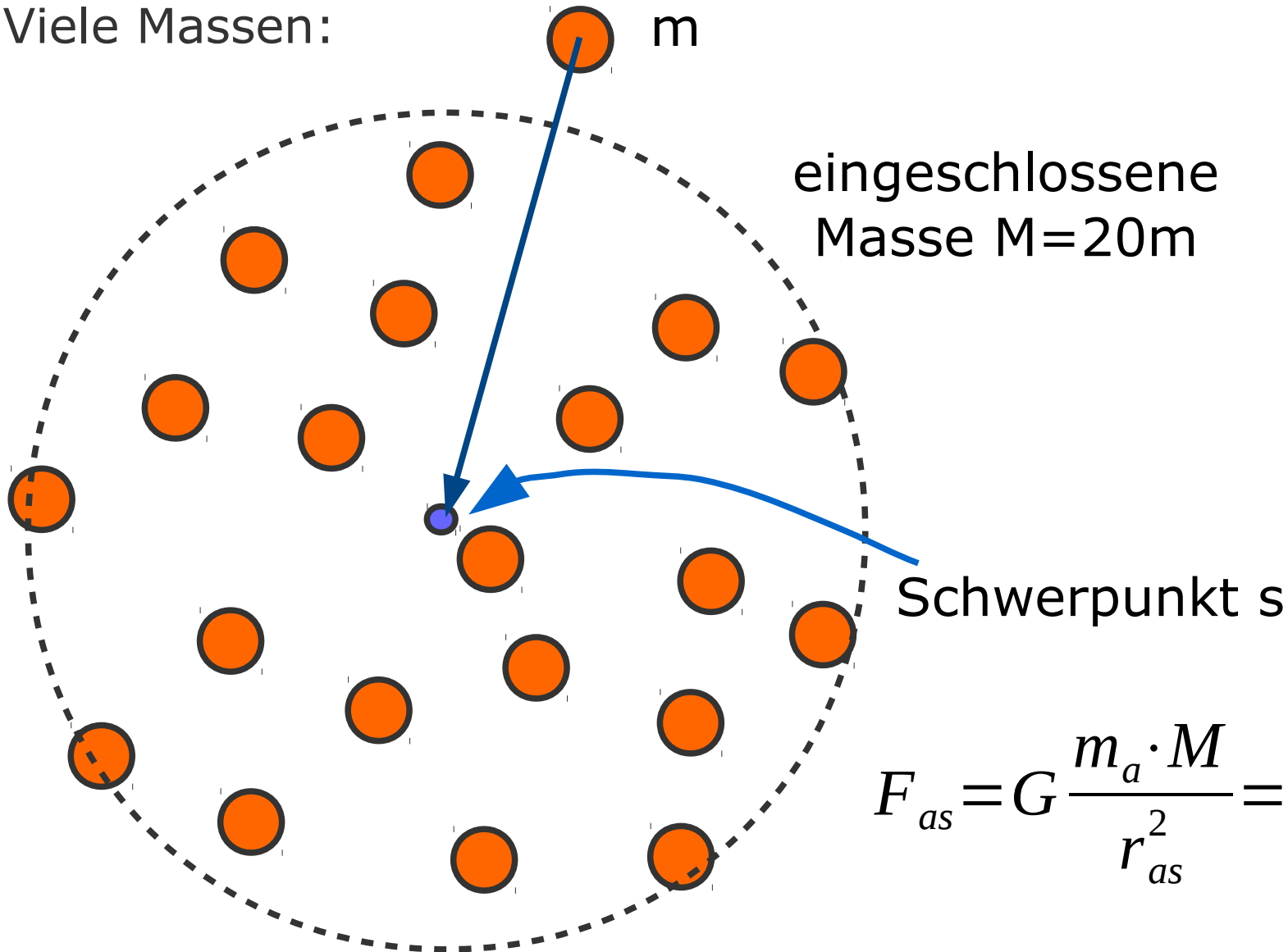
Hängt invers<sup>2</sup> vom Abstand ab!

# Gravitationsgesetz

Viele Massen:

 m

eingeschlossene  
Masse  $M=20m$

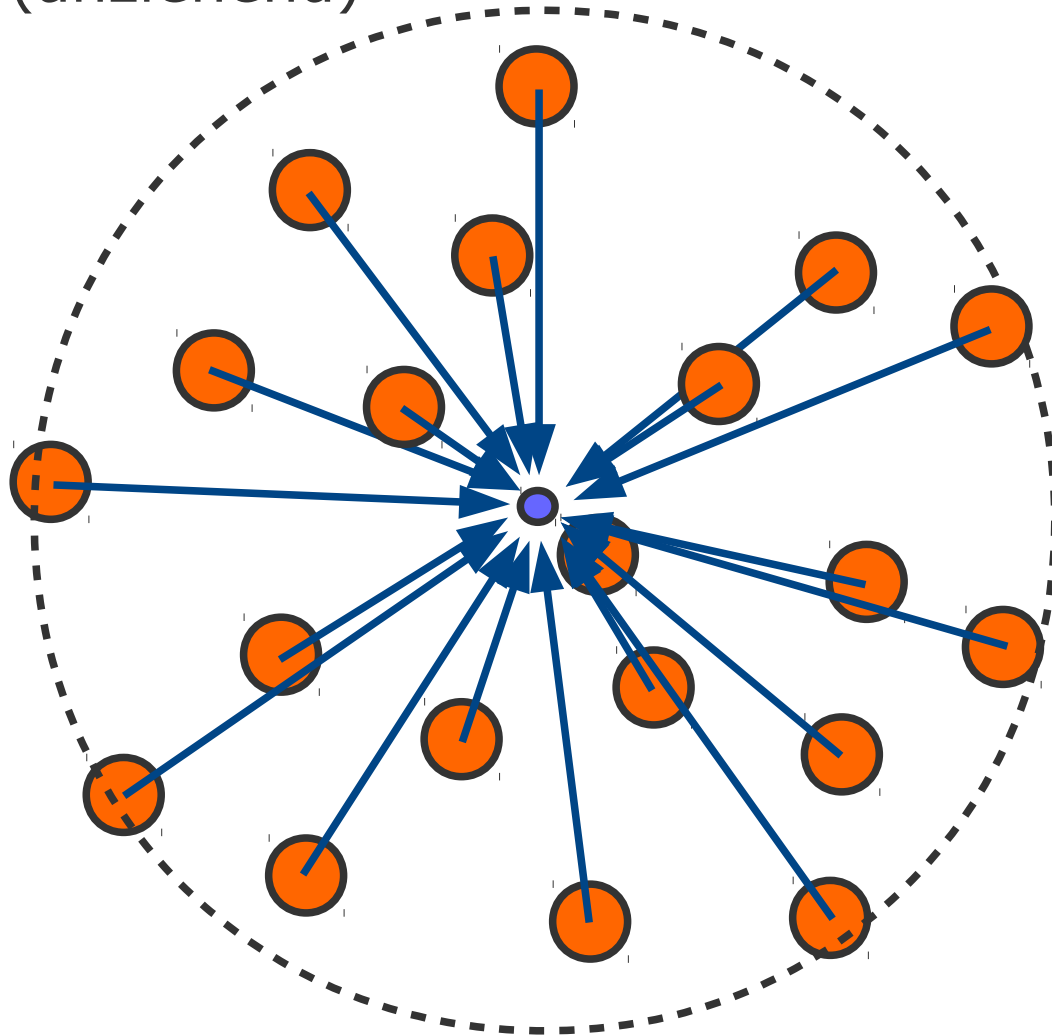


$$F_{as} = G \frac{m_a \cdot M}{r_{as}^2} = G \frac{20 \cdot m^2}{r_{as}^2}$$



# 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

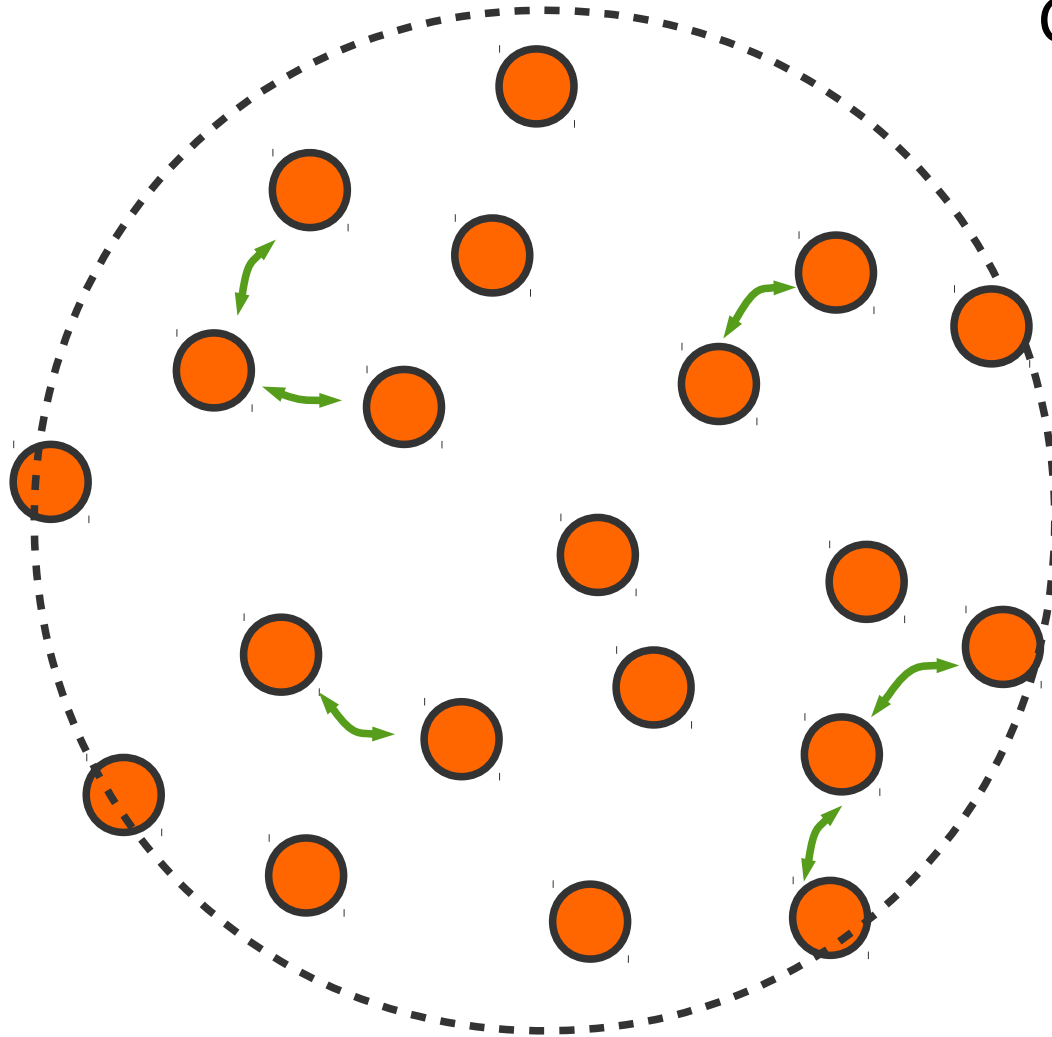


Gravitation: immer anziehend

Gasdruck: immer abstoßend

# Gasdruck

Teilchen-Stöße (abstoßend):



Ideale Gasgleichung

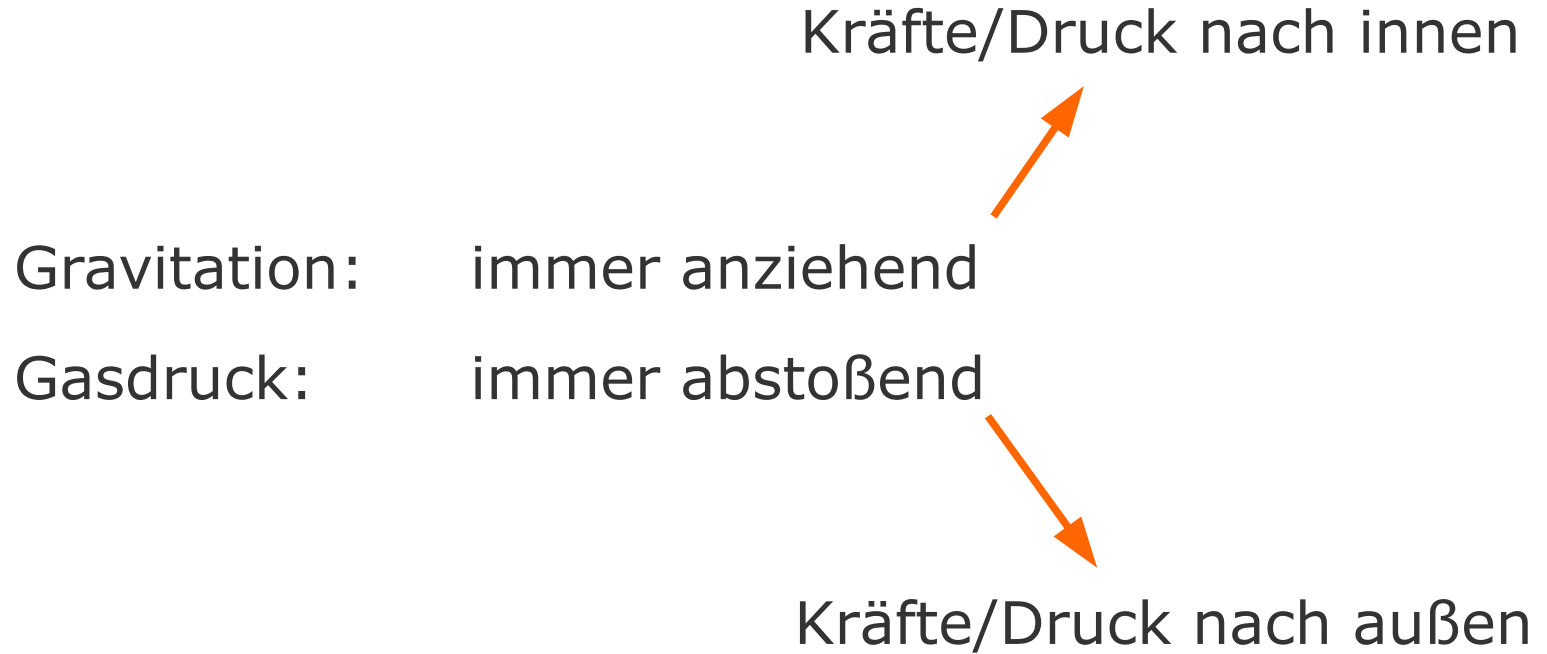
Gasdruck = nach außen

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

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

p	Druck
V	Volumen
$\rho$	Dichte
$\mu$	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

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

- $\rho$  Dichte
- $\mu$  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

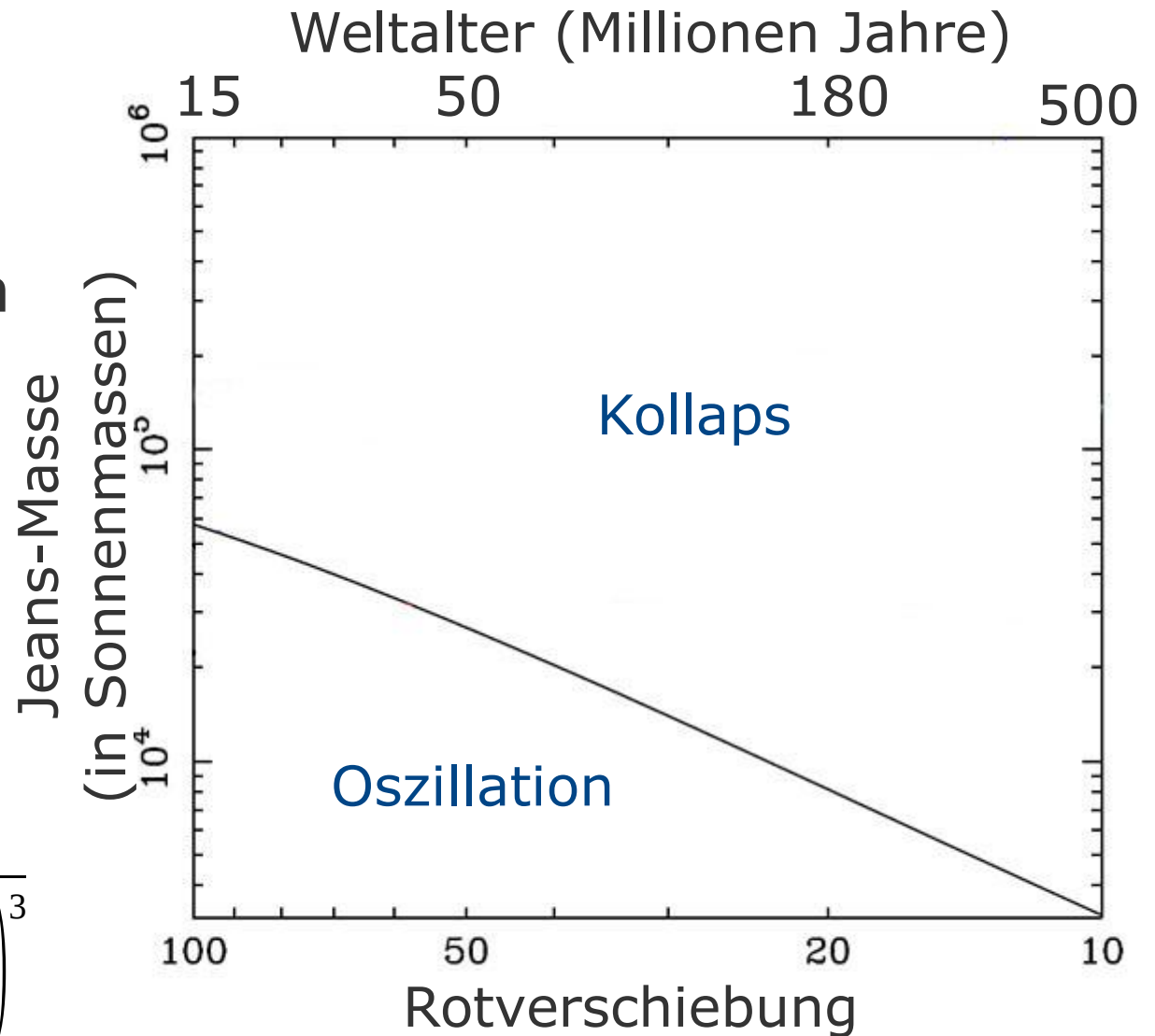
# Druck-Gleichgewicht: Jeans-Masse

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

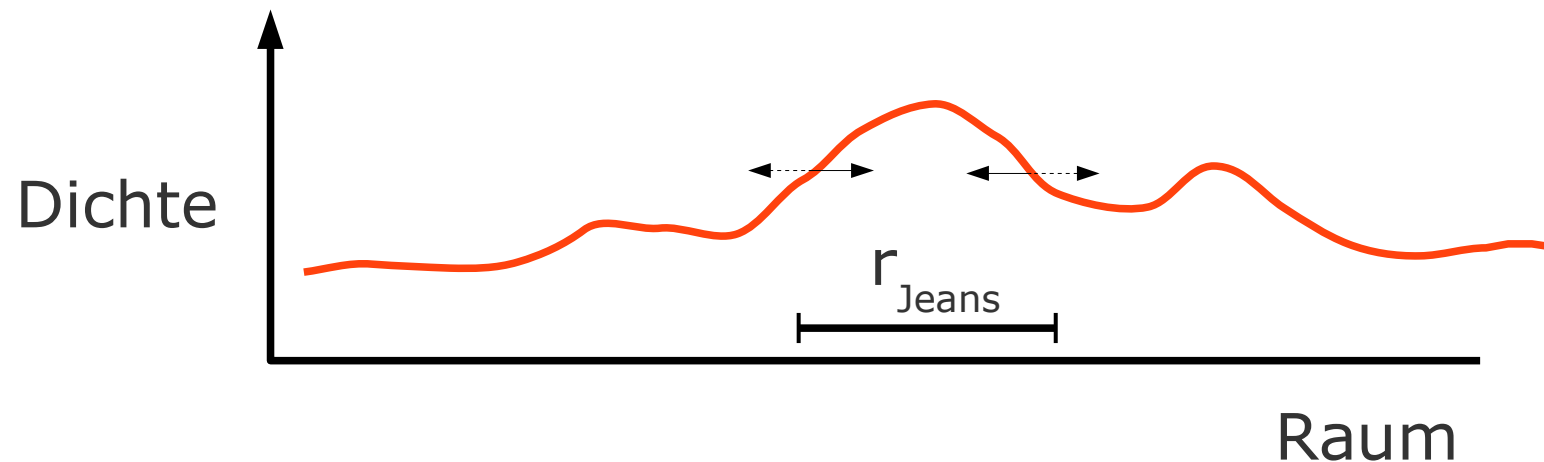
# Druck-Gleichgewicht: Jeans-Masse

Bei Störungen:

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

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

→ Jeans-Länge  $r_{\text{Jeans}}$



# Kollaps von Strukturen

Aber: wenn *nur normale Materie* (Baryonen)

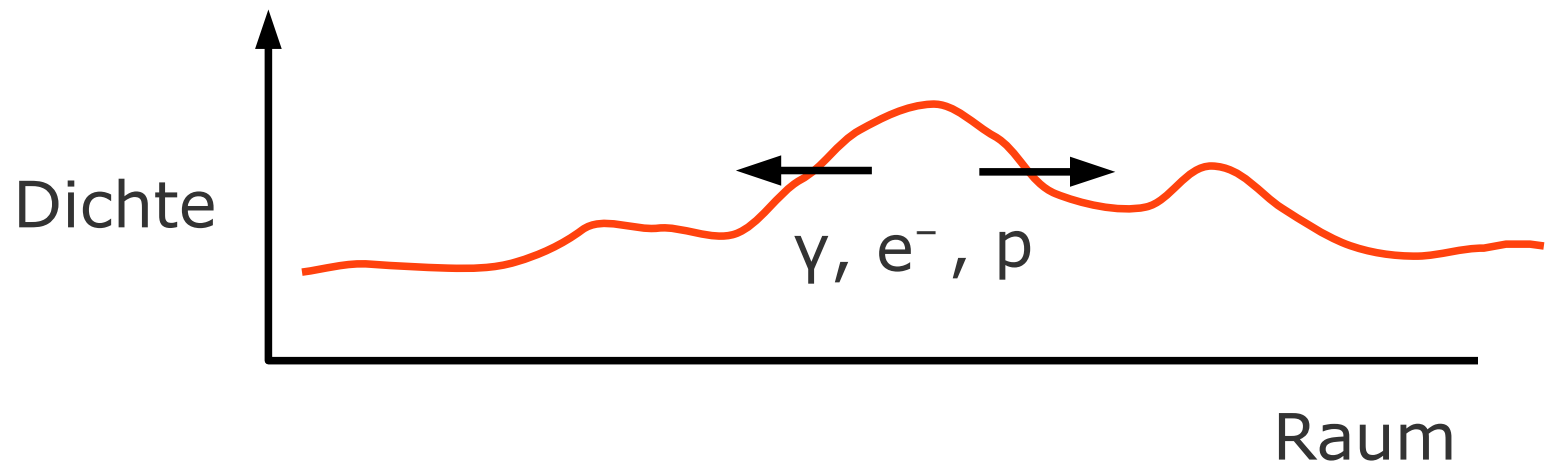
Photonen haben Zeit → Bewegung aus Bereich hinaus

→ 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)

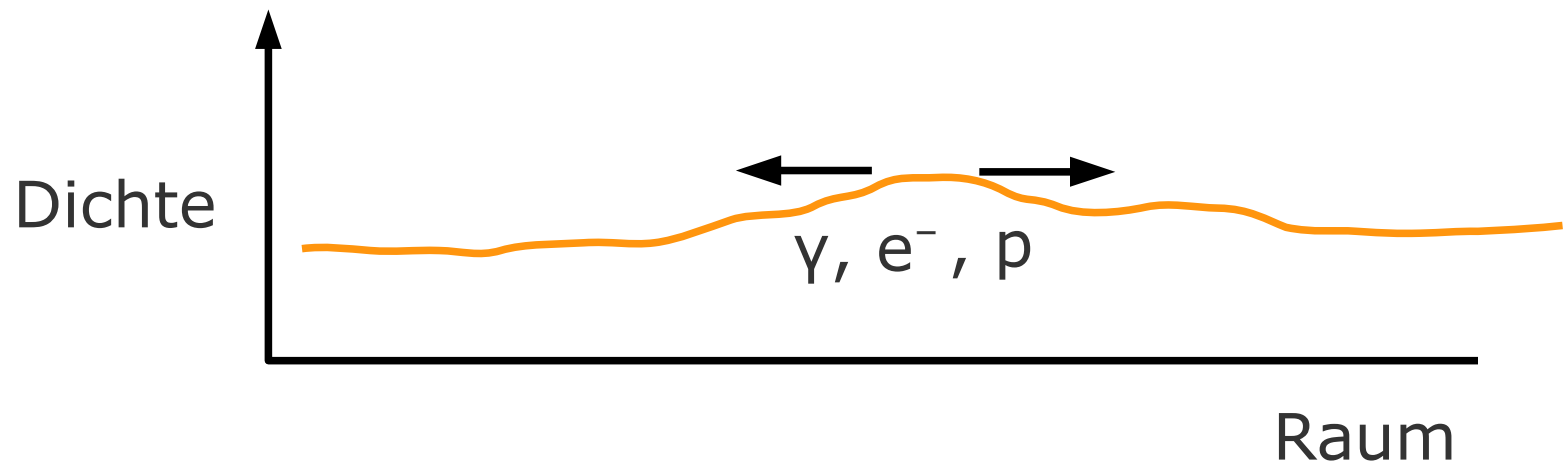
Photonen haben Zeit → Bewegung aus Bereich hinaus

→ 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!*

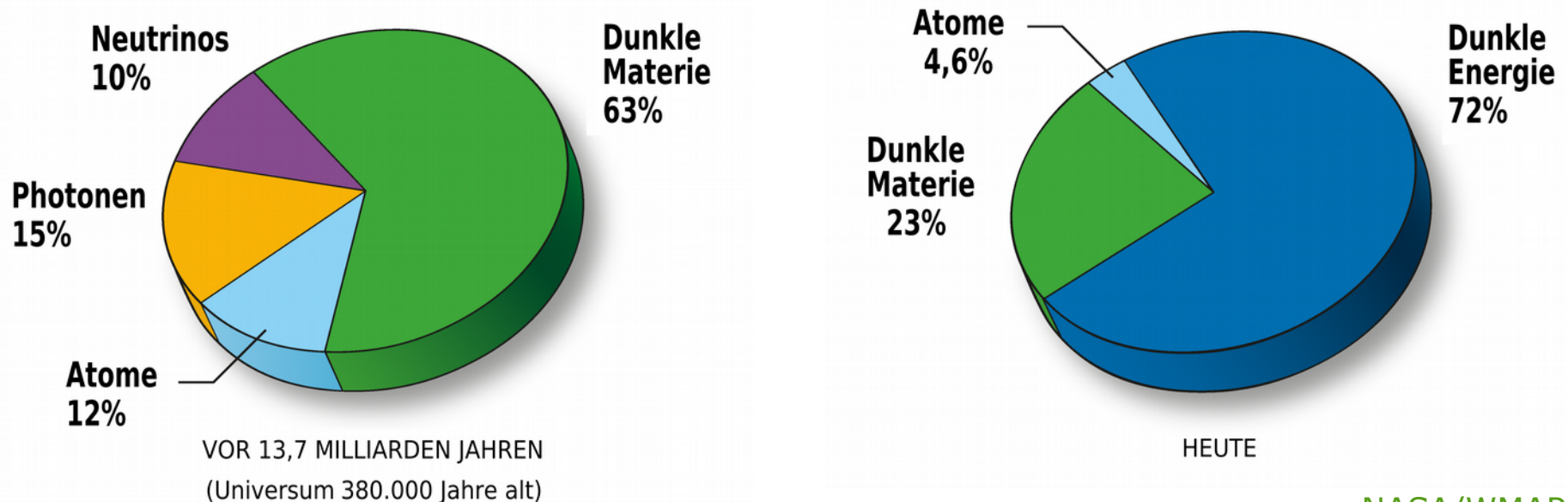
→ Nicht-geladene Teilchen: "Dunkle Materie"

# 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?

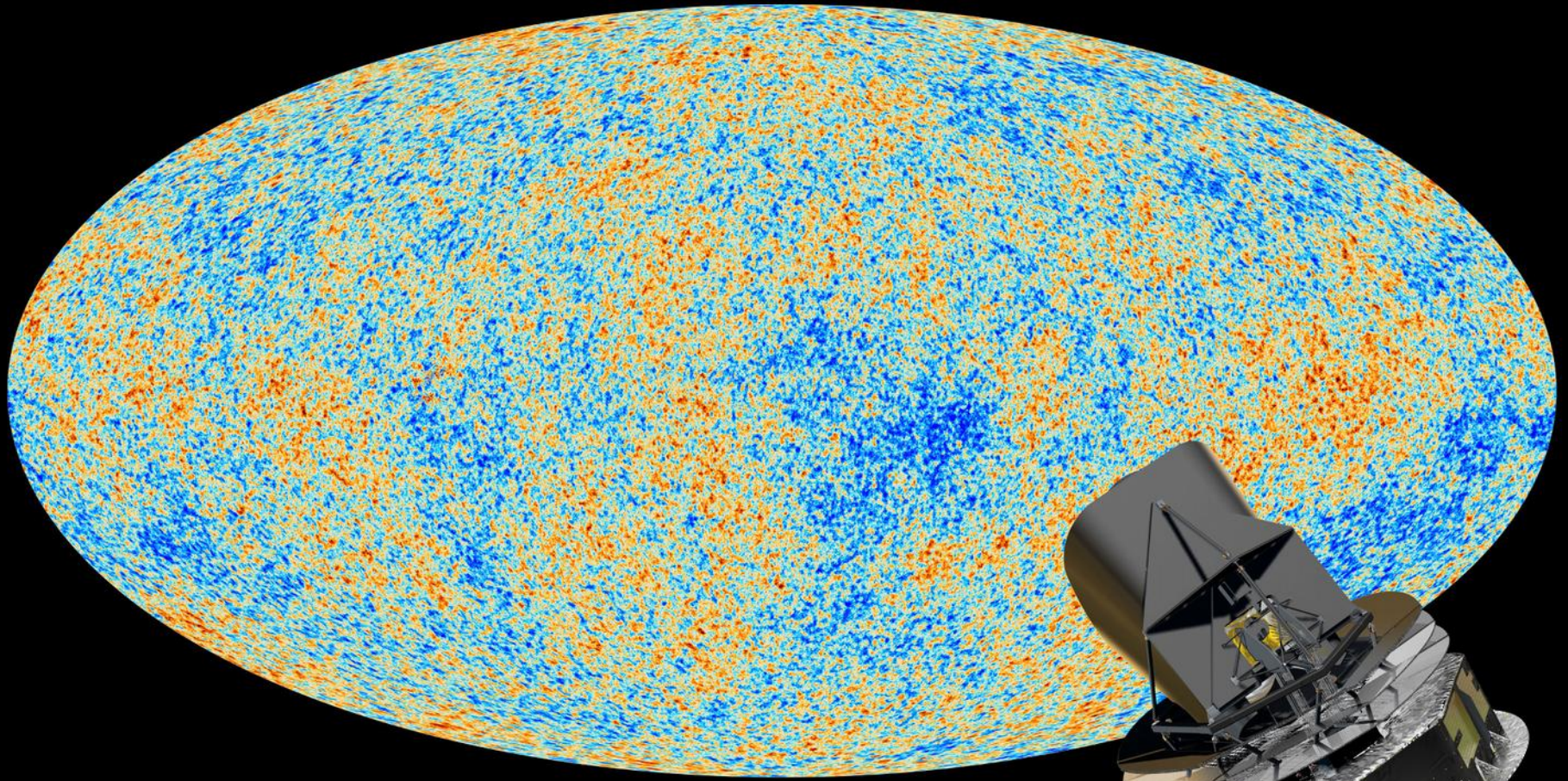
Dunkle Materie: "kalt"?

→ massereiche Teilchen → langsam (Teilchen=?)

Dunkle Materie: "heiß"?

→ massearme Teilchen → schnell (Neutrinos?)

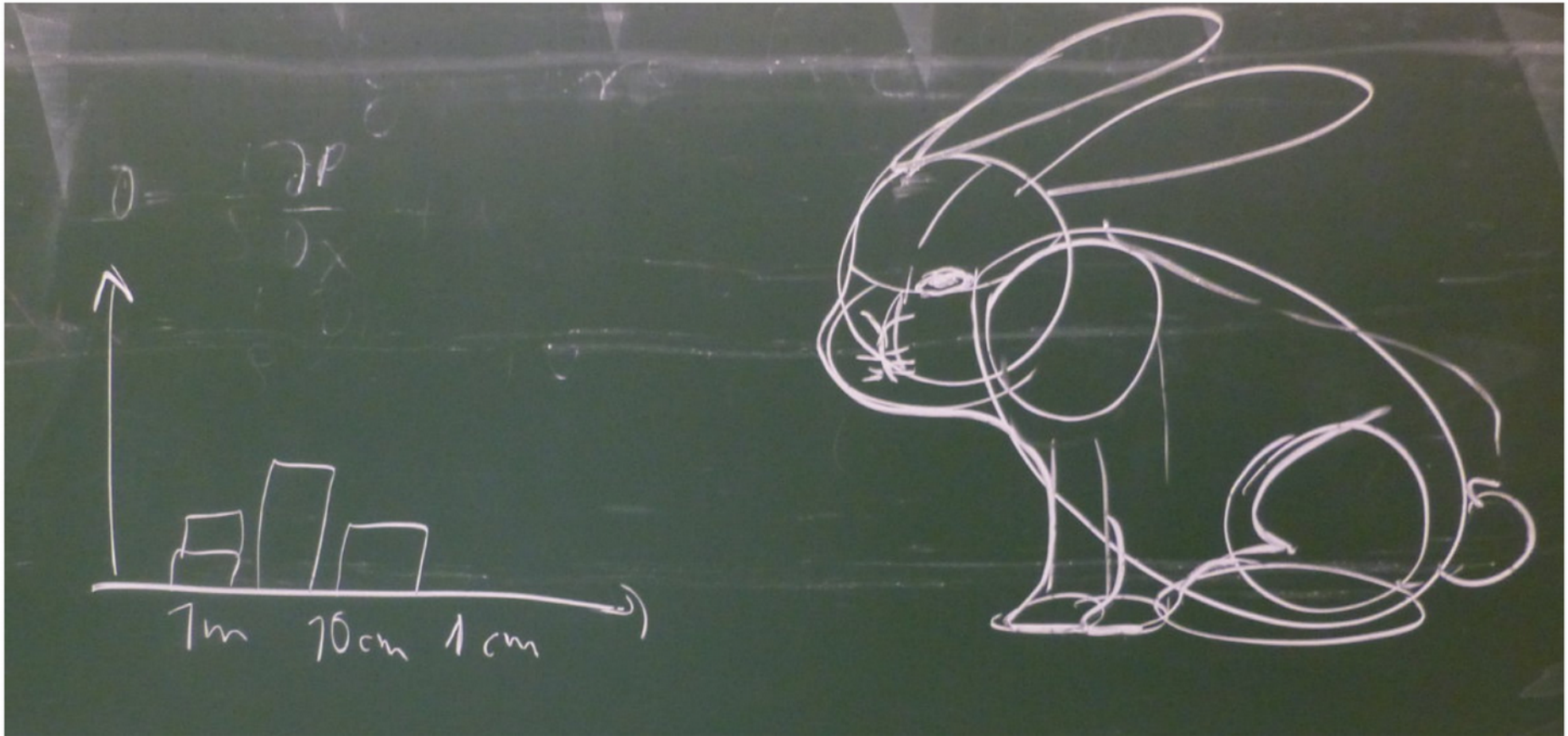
# 2,7 Kelvin Hintergrundstrahlung



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

ESA Planck Mission

# Kollaps von Strukturen



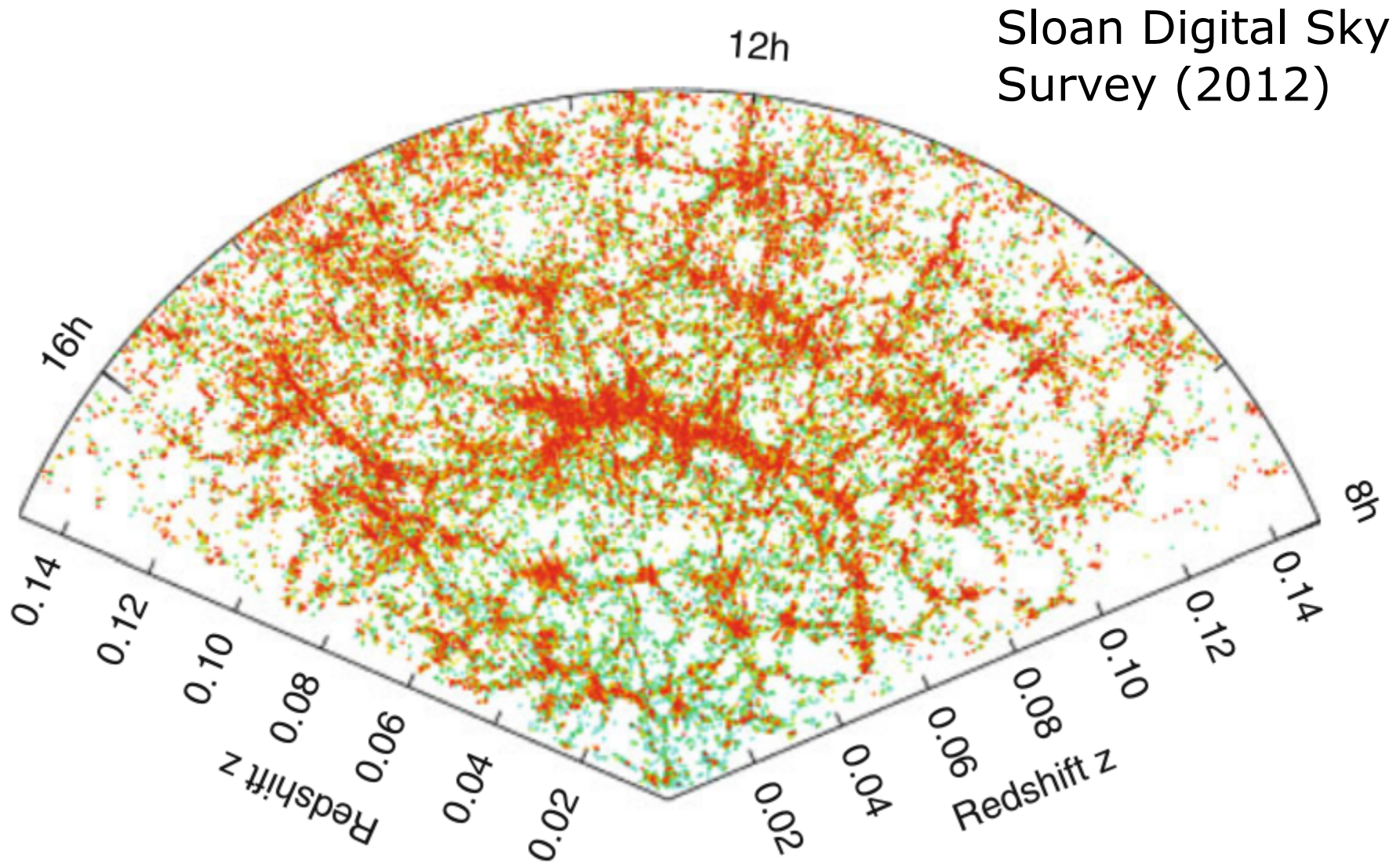
M. Pössel

# Kollaps von Strukturen

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

#2, #3

# Strukturen von Strukturen

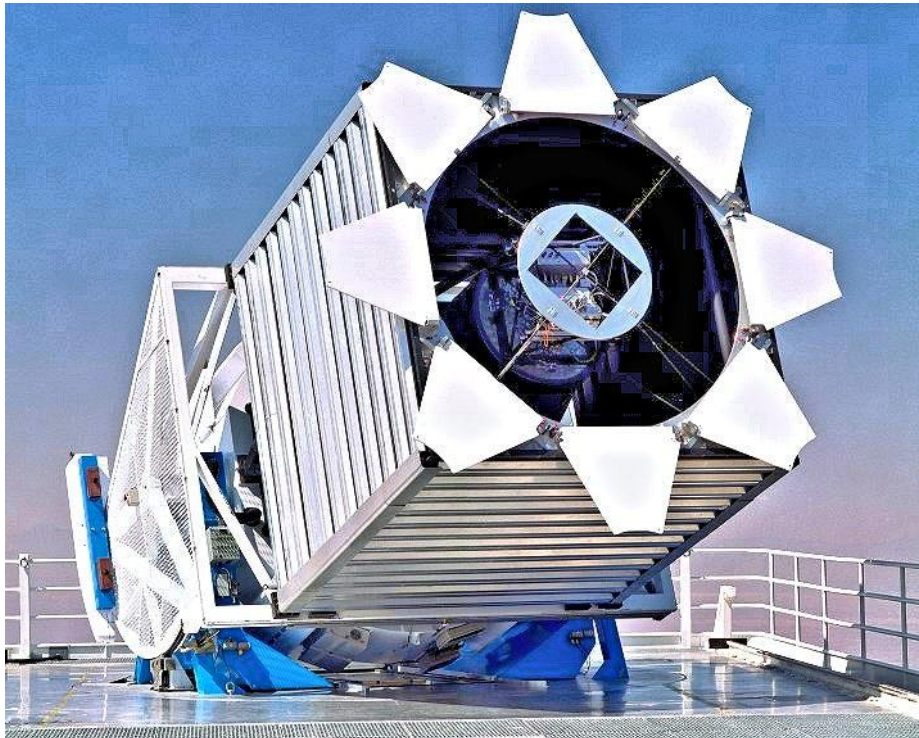


Allison Coil et al., 2013



# Exkurs: Sloan Digital Sky Survey

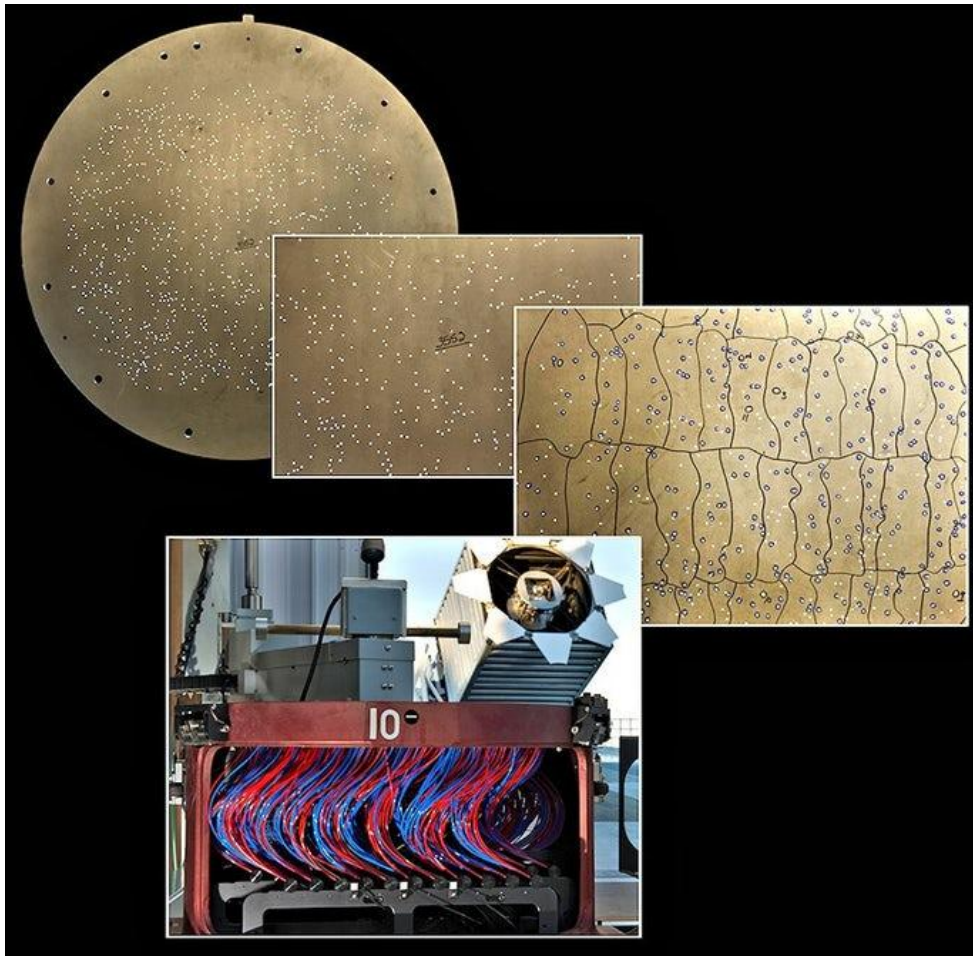
2,5m-Teleskop, Apache Point, New Mexico, USA



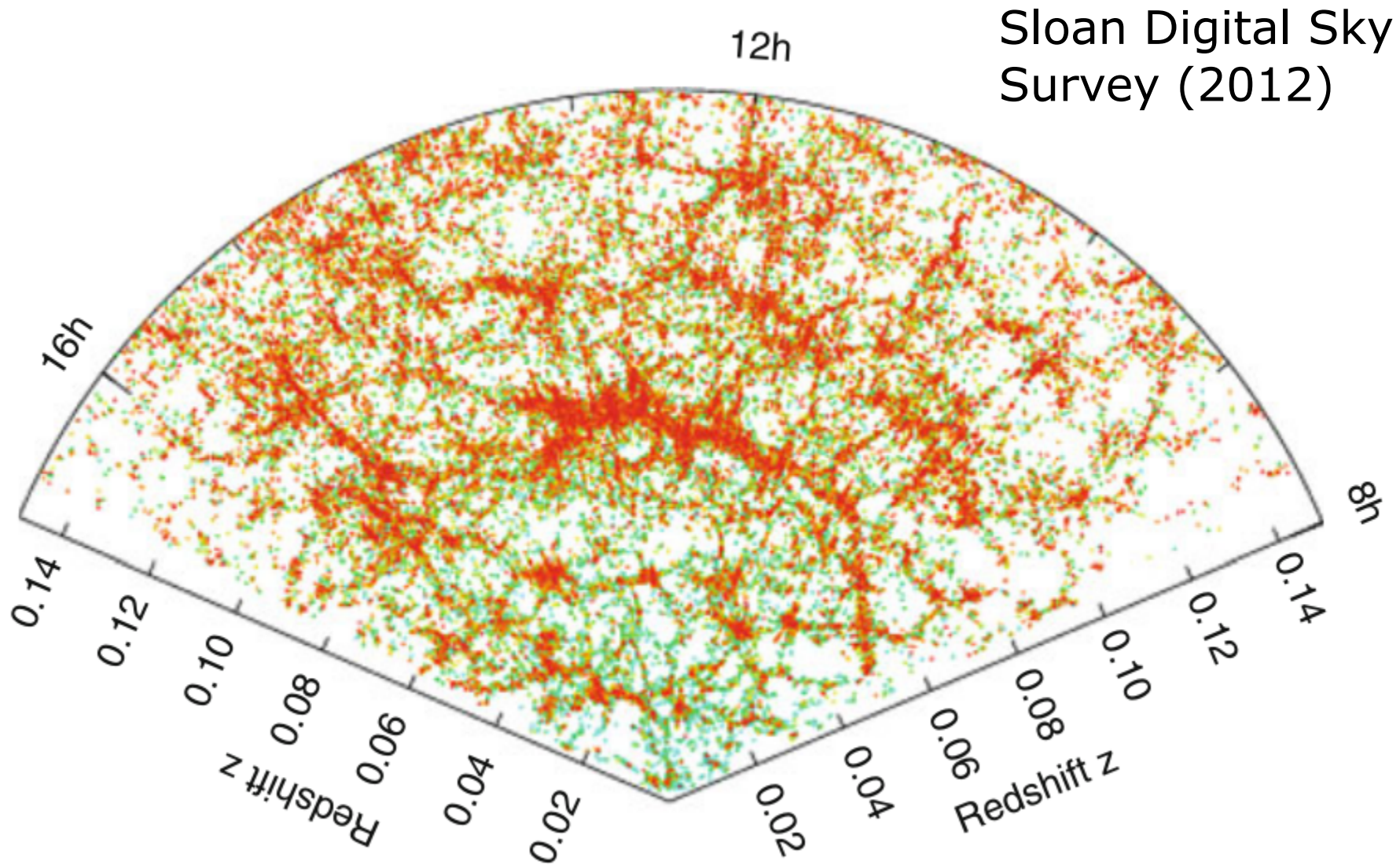
# Exkurs: Sloan Digital Sky Survey

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

Photometrie + Faser-Spektrograph, manuell bestückt

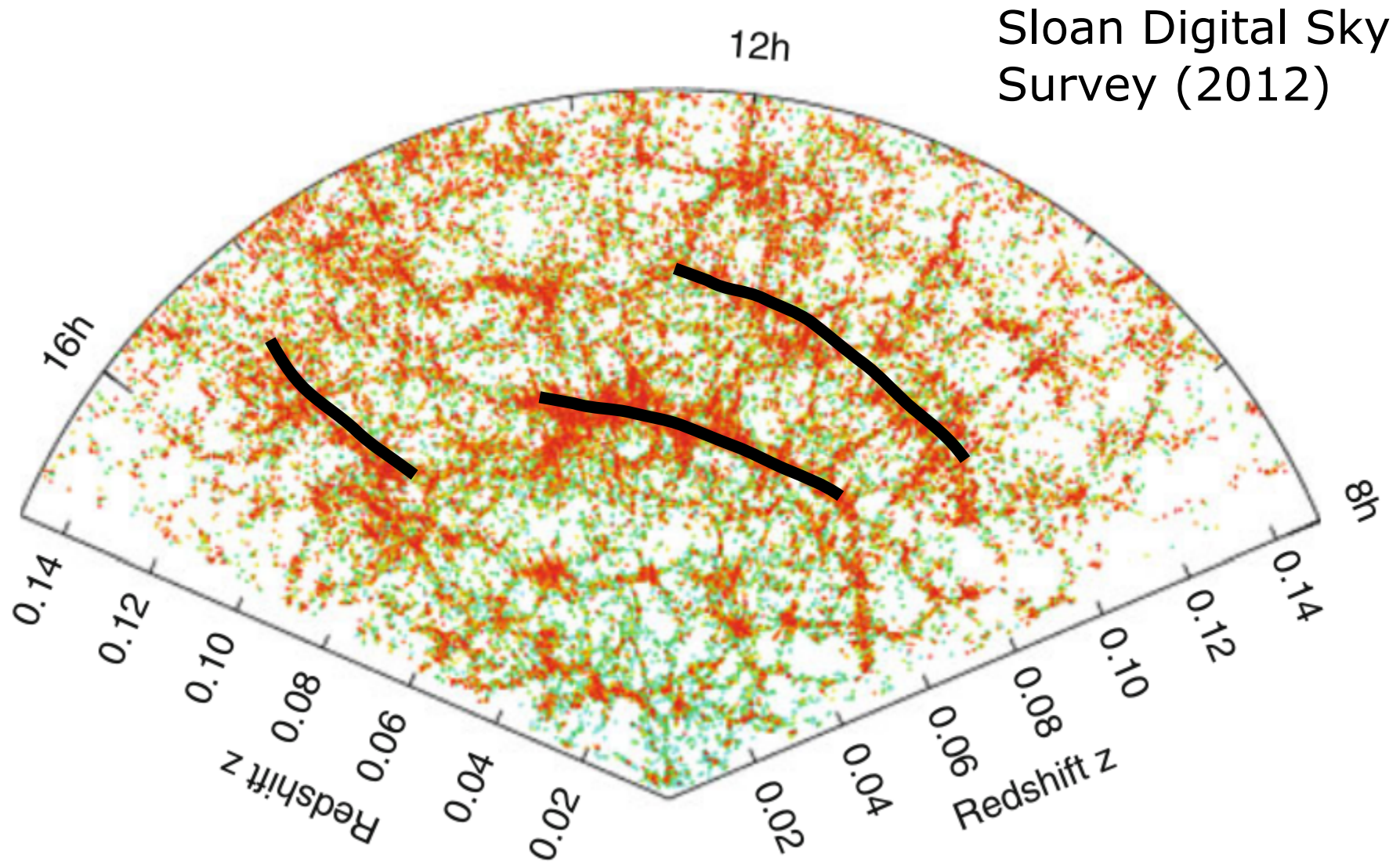


# Strukturen von Strukturen



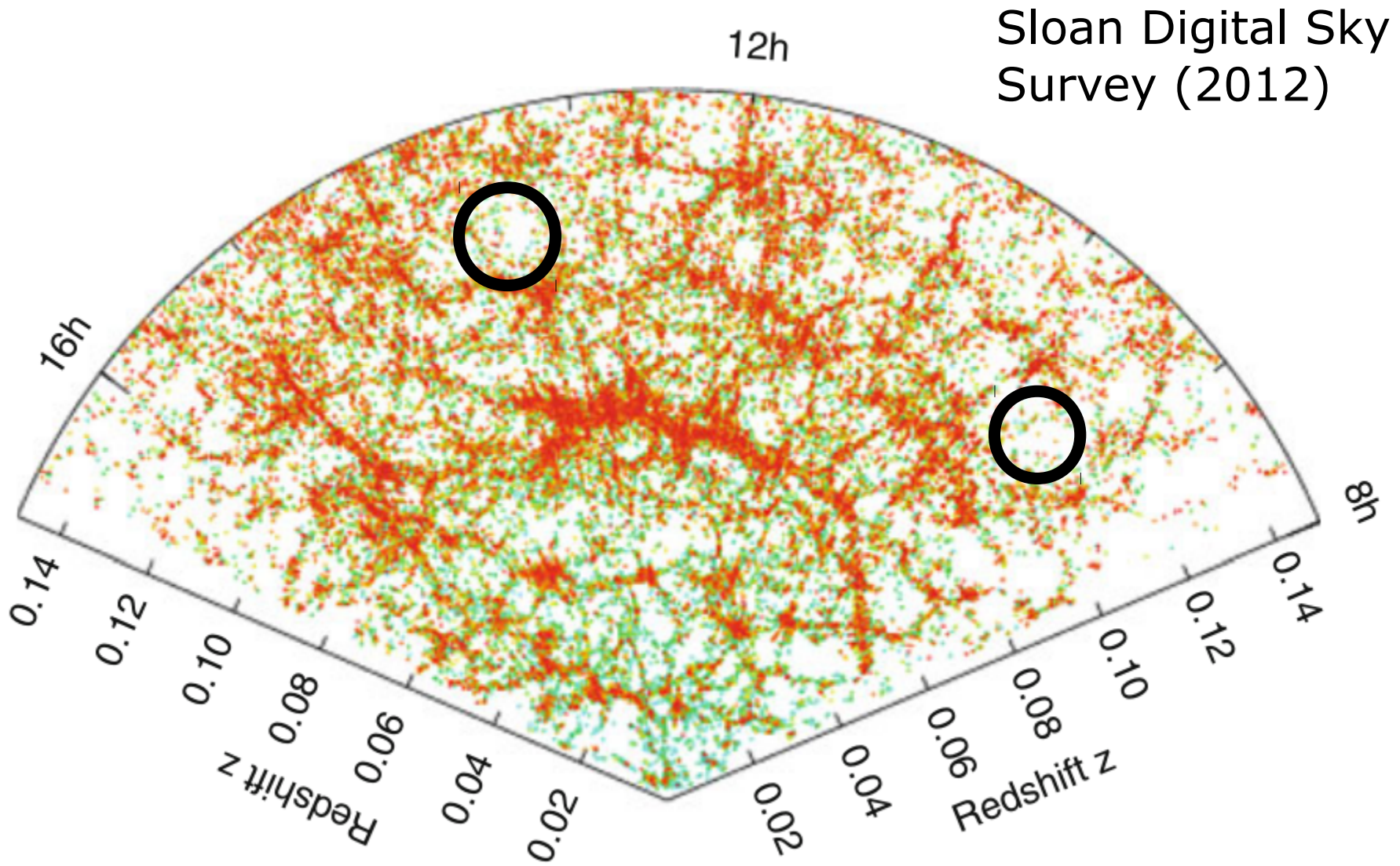
Allison Coil et al., 2013

# Filamente



Allison Coil et al., 2013

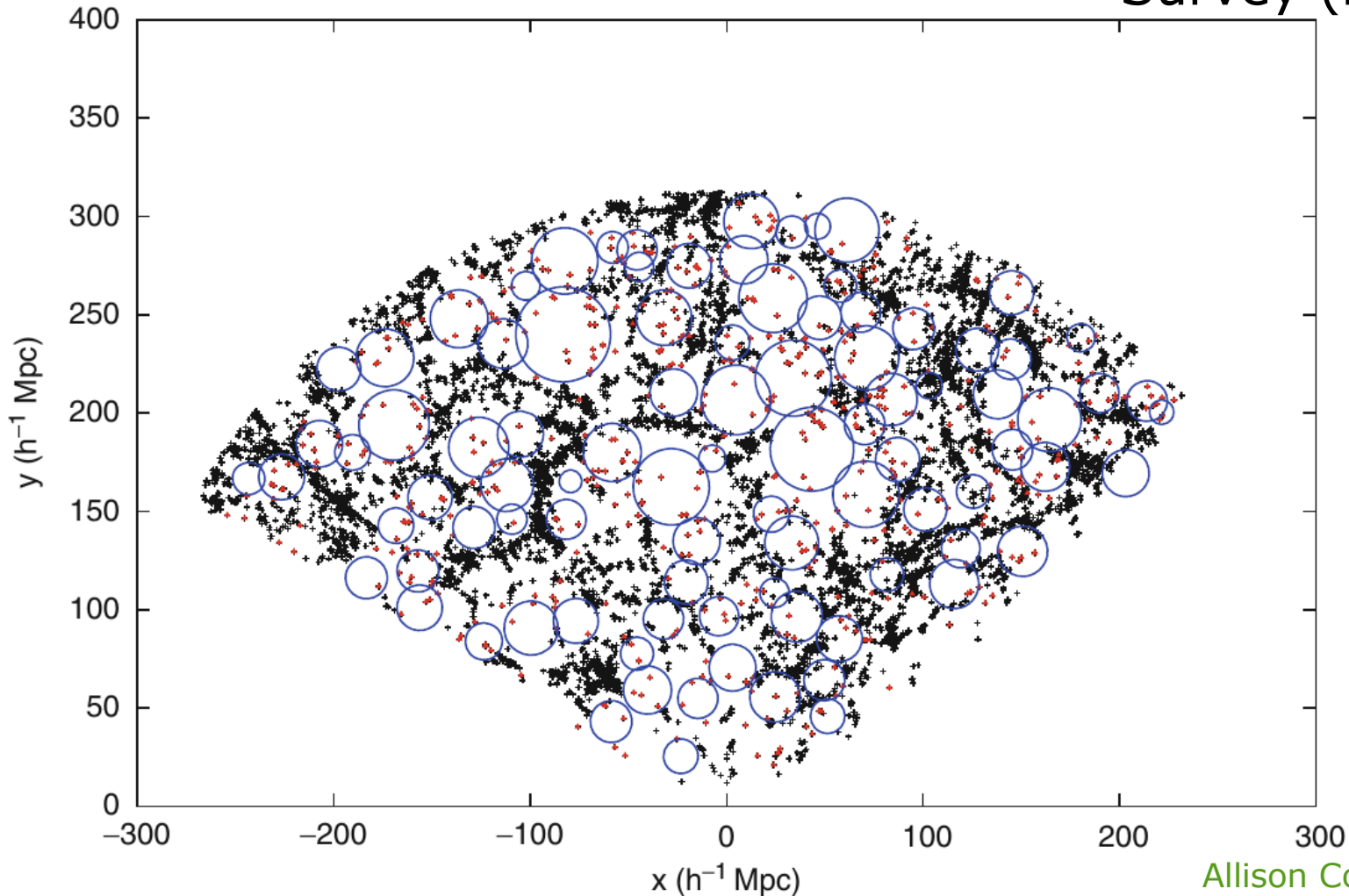
# Leerstellen (Voids)



Allison Coil et al., 2013

# Leerstellen (Voids)

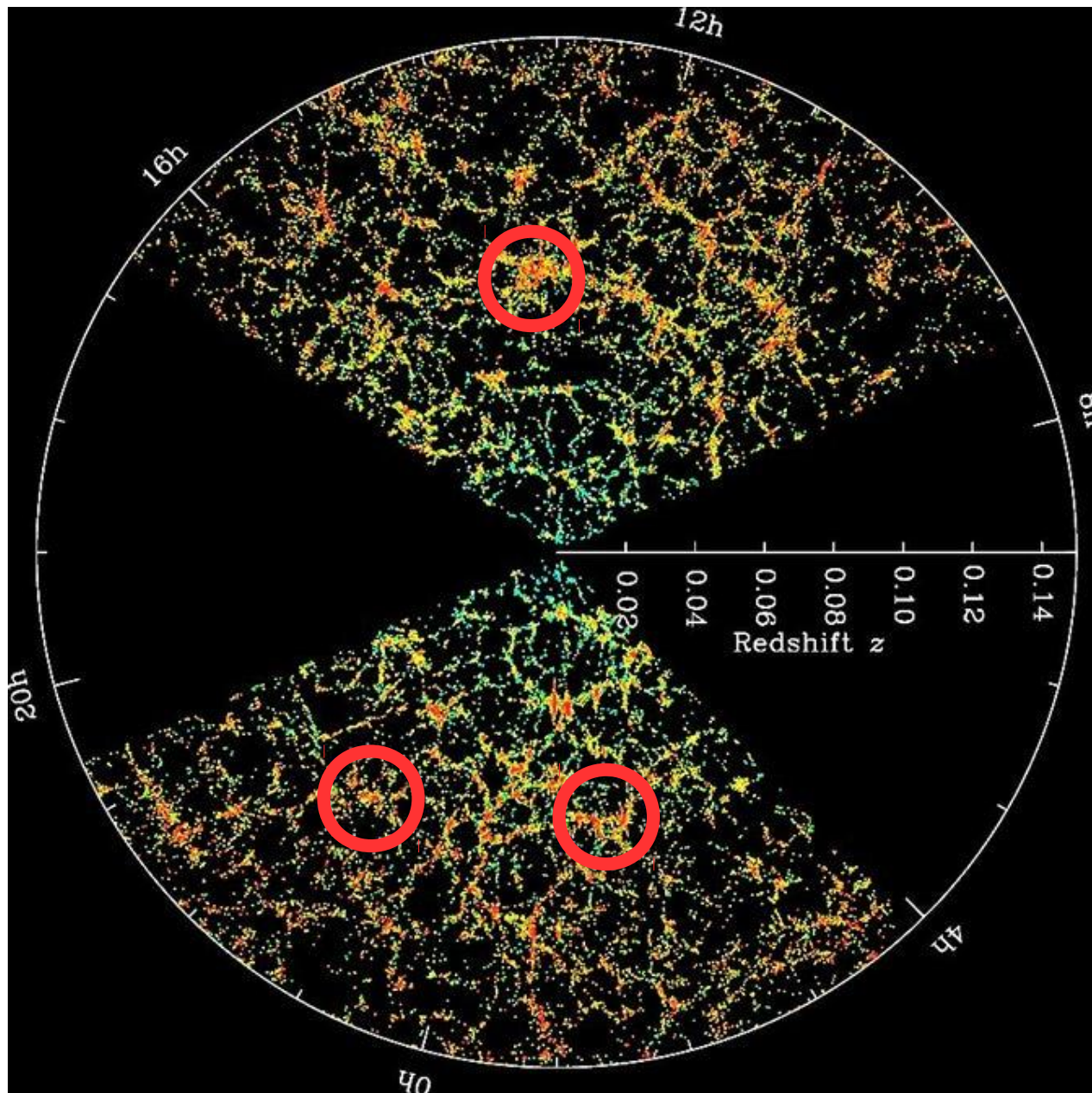
Sloan Digital Sky Survey (2012)



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



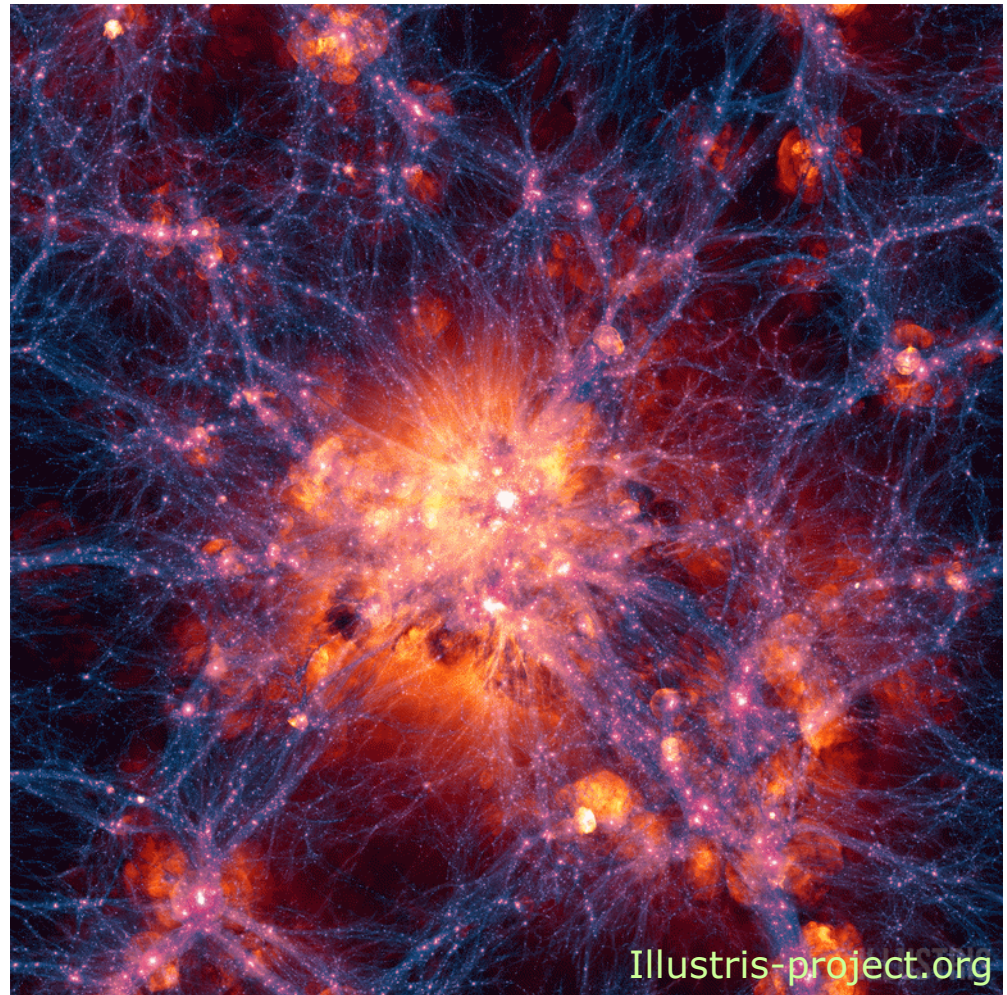
# Großskalige Strukturen

## 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