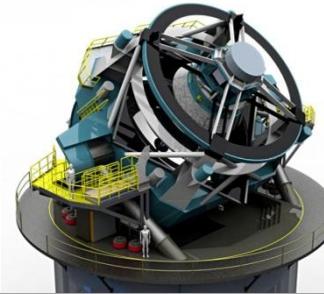


Astroteilchenphysik - I

WS 2012/2013

Vorlesung # 08, 13.12.2012

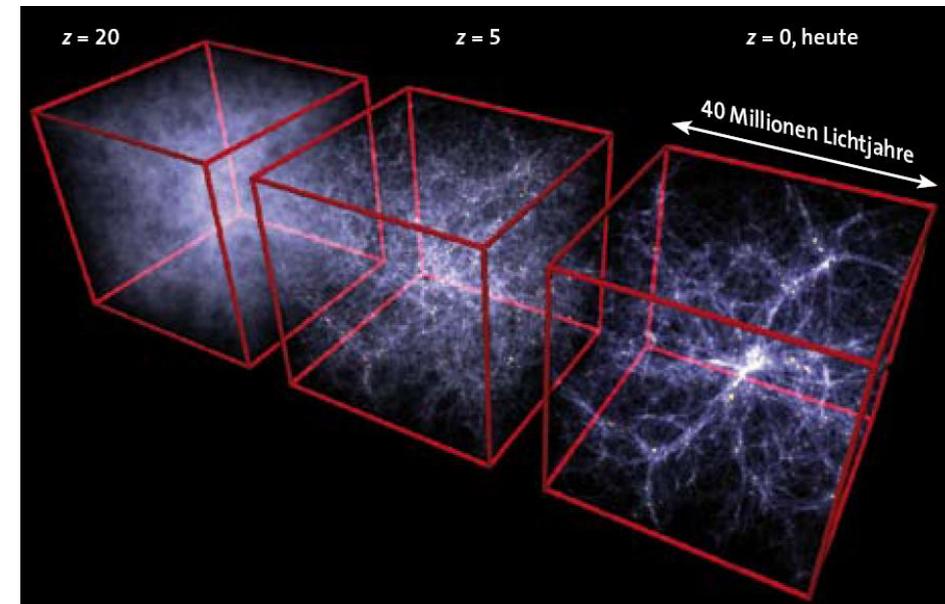


Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

neutrino

Strukturentwicklung:

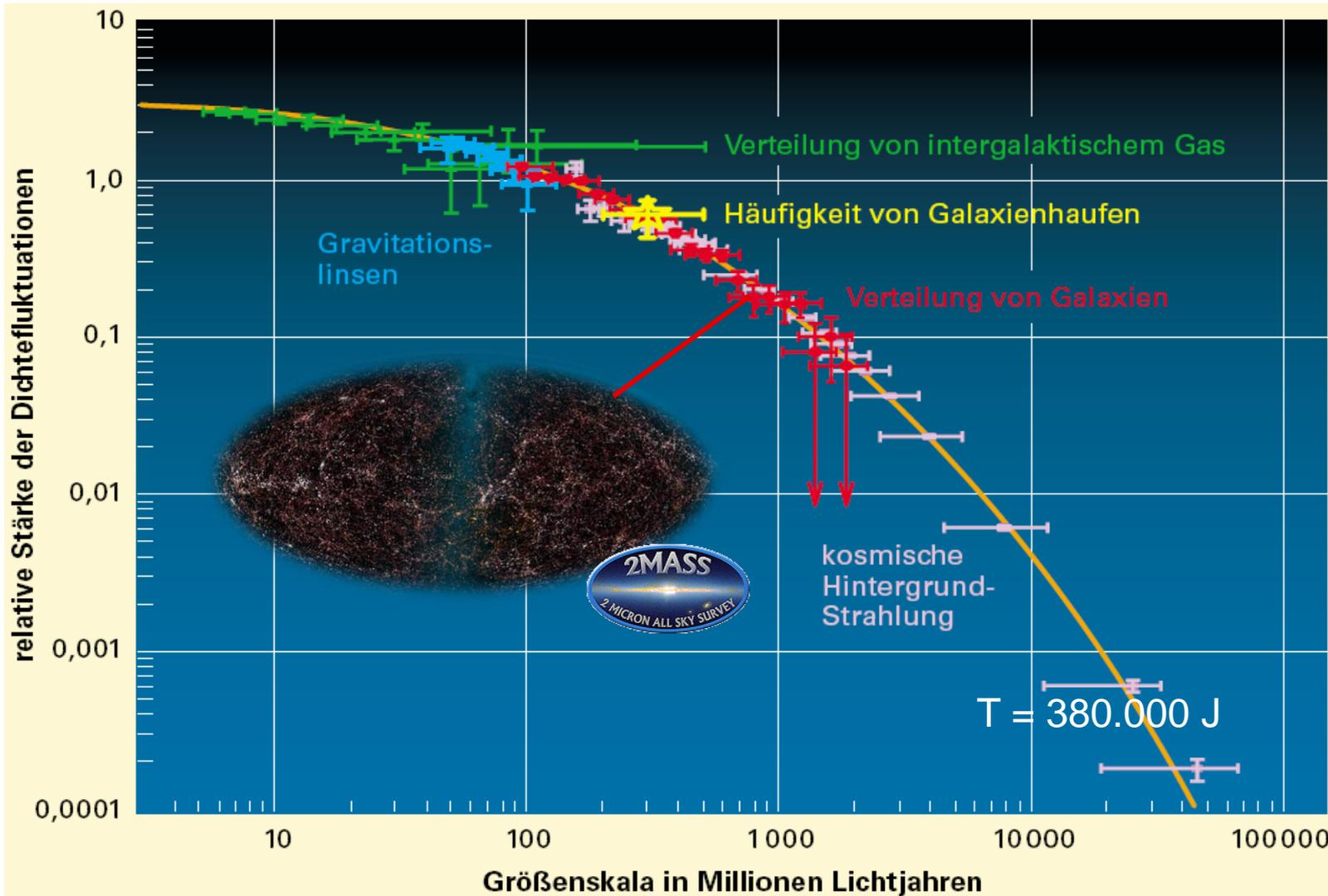
- primordiale Neutrinos
aus dem Big Bang als HDM
- ν -free-streaming & LSS
- ν -Massenresultate aus LSS-Daten
- Dunkle Materie:
astronomische Evidenzen



Strukturentwicklung

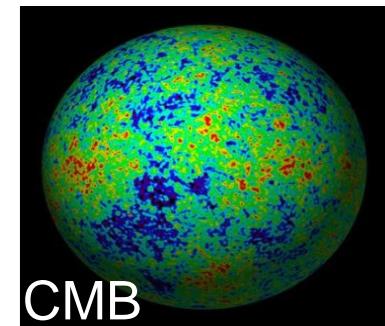
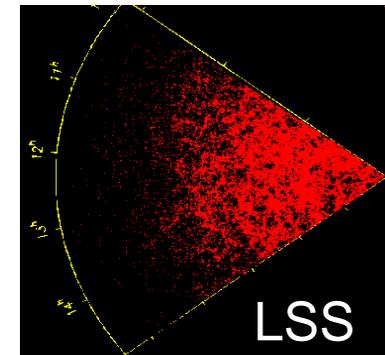


- **primordiale Dichtefluktuationen** entwickeln sich unter dem Einfluss der Gravitation zu den heute beobachtbaren Strukturen (LSS)



■ Szenarien:

- top-down: HDM (ν)
- bottom-up: CDM (χ)
- ↳ DM-Eigenschaften



Dunkle Materie: heiß, warm oder kalt?



- Vergleich von **DM-Modellen** mit Beobachtungen
Auswaschen auf unterschiedlichen Längenskalen ($\lambda_{\text{free-streaming}}$)

Heiße Dunkle Materie

Teilchen:

aktive Neutrinos $\nu_{e,\mu,\tau}$
 $m \sim 0.05 - 2$ **eV**



Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 1$ **Gpc**

Warme Dunkle Materie

Teilchen:

sterile Neutrinos ν_s
 $m \sim 1 - 20$ **keV**



Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 100$ **kpc**

Kalte Dunkle Materie

Teilchen:

SUSY-Neutralinos χ^0
 $m \sim 10 - 1000$ **GeV**



Wirkung:

Auswaschen von
Skalen $\lambda < 0.1$ **pc**

Primordiale Neutrinos aus dem Big Bang

- Rolle von Neutrinos auf dem Big Bang als **heiße dunkle Materie**:

Phase I : Erzeugung im thermischen Gleichgewicht

- Erzeugung & Vernichtung von Neutrinos mit T_ν



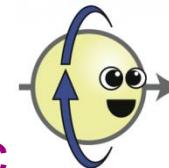
Phase II : Ausfrieren der schwachen Wechselwirkung

- Hubble-Expansion übersteigt Wechselwirkungsrate



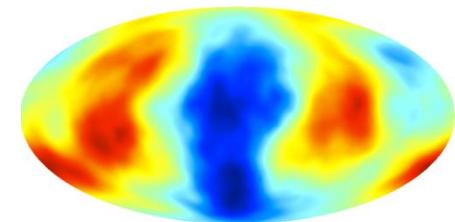
Phase III : Wechselwirkungsfreie Propagation

- kleiner Wq. $\sigma < 10^{-40} \text{ cm}^2$, **ultra-relativistisch** $v = c$



Phase IV : Akkumulation in Gravitationspotenzialen

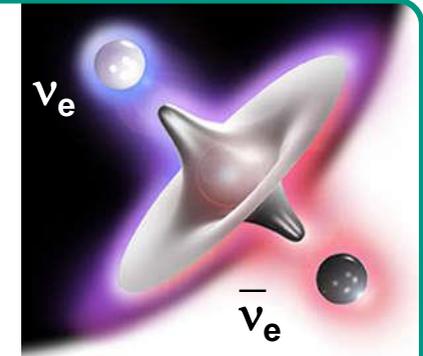
- heutige Temperatur $T_\nu = 1.9 \text{ K}$, $E_{\text{kin}} = \mu\text{eV}$



Primordiale Neutrinos: Phase I

■ Thermodynamisches Gleichgewicht:

Neutrino-Reaktionen nur über schwache Wechselwirkung (Erzeugung & Vernichtung), $T_\nu = T_\gamma = T_{\text{bary}}$
 thermisches Gleichgewicht mit CMB (γ) & Materie (p, n)



- geladene (CC) & neutrale (NC) Ströme

Charged **C**urrent **N**eutral **C**urrent

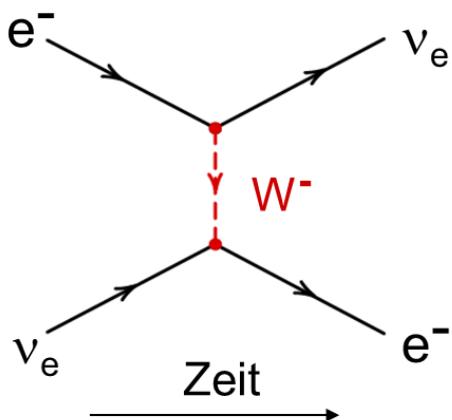
$$\gamma \leftrightarrow e^+ + e^- \leftrightarrow \nu_i + \bar{\nu}_i$$

vgl. Kap. 5.1

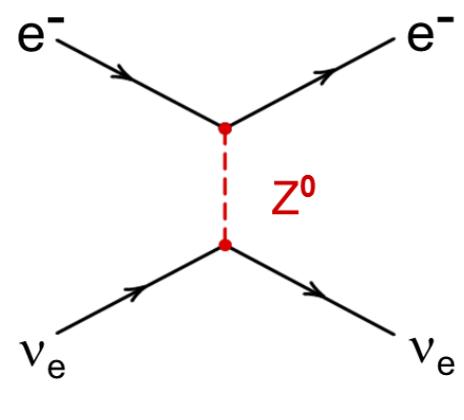
$$\begin{aligned} \nu_e + e^+ &\leftrightarrow \bar{\nu}_e + e^- \\ \nu_e + e^- &\leftrightarrow \bar{\nu}_e + e^+ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \nu_e + \bar{\nu}_e &\leftrightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e \\ \nu_e + \nu_e &\leftrightarrow \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_e \\ \nu_e + \bar{\nu}_e &\leftrightarrow \nu_{\mu,\tau} + \bar{\nu}_{\mu,\tau} \\ \nu_e + \bar{\nu}_{\mu,\tau} &\leftrightarrow \nu_e + \bar{\nu}_{\mu,\tau} \\ \nu_e + \nu_{\mu,\tau} &\leftrightarrow \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_{\mu,\tau} \\ \nu_e + \bar{\nu}_e &\leftrightarrow e^+ + e^- \end{aligned}$$

CC



NC



Primordiale Neutrinos: Phase II

- Neutrinos entkoppeln da schwache Wechselwirkung ausfriert ($T \sim 1 \text{ MeV}$)

$$\Gamma(\text{schwache Wechselwirkung}) \sim T^5$$

$$H \text{ (Expansionsrate)} \sim T^2$$

vgl. Kap. 2.1



- genaue Berechnung der Entkopplungstemperatur (& Zeitpunkt):

$$T(\nu_{\mu,\tau}) = 3.12 \text{ MeV}$$

$$T(\nu_e) = 1.87 \text{ MeV}$$

$$t \sim 0.1 \text{ Sekunde}$$

nur NC-Reaktionen CC&NC-Reaktionen

■ Aufheizung der CMB-Photonen

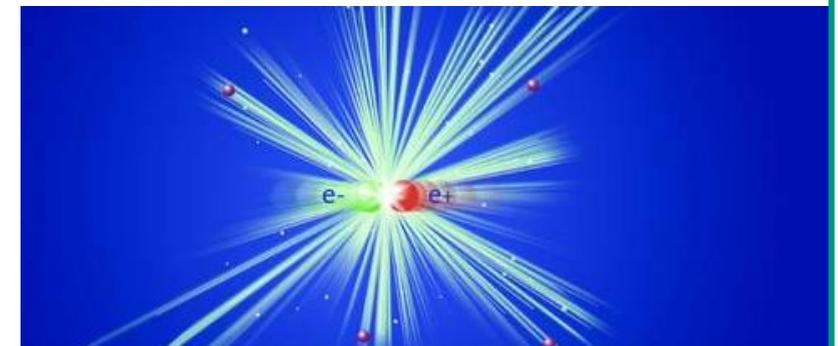
- kurz nach Neutrino-Entkopplung bei $T \sim m_e/3$ ($T \sim 0.2 \text{ MeV}$)

Elektron-Positron Annihilation $e^- + e^+ \rightarrow \gamma\gamma$

- $T_{\text{CMB}} > T_\nu$ durch spätes Aufheizen



$$T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_\gamma \approx 0.71 \cdot 2.73 \text{ K} = 1.95 \text{ K}$$



Primordiale Neutrinos: heute

■ Neutrinoanzahl $N_\nu = n(\text{Neutrinos}) + n(\text{Antineutrinos})$

- im *heutigen* Universum lässt sich N_ν ableiten aus

N_γ der CMB über Fermionen/Bosonen-Statistik:

$$N_\gamma = 411.8 \cdot (T_\gamma / 2.725 \text{ K})^3$$

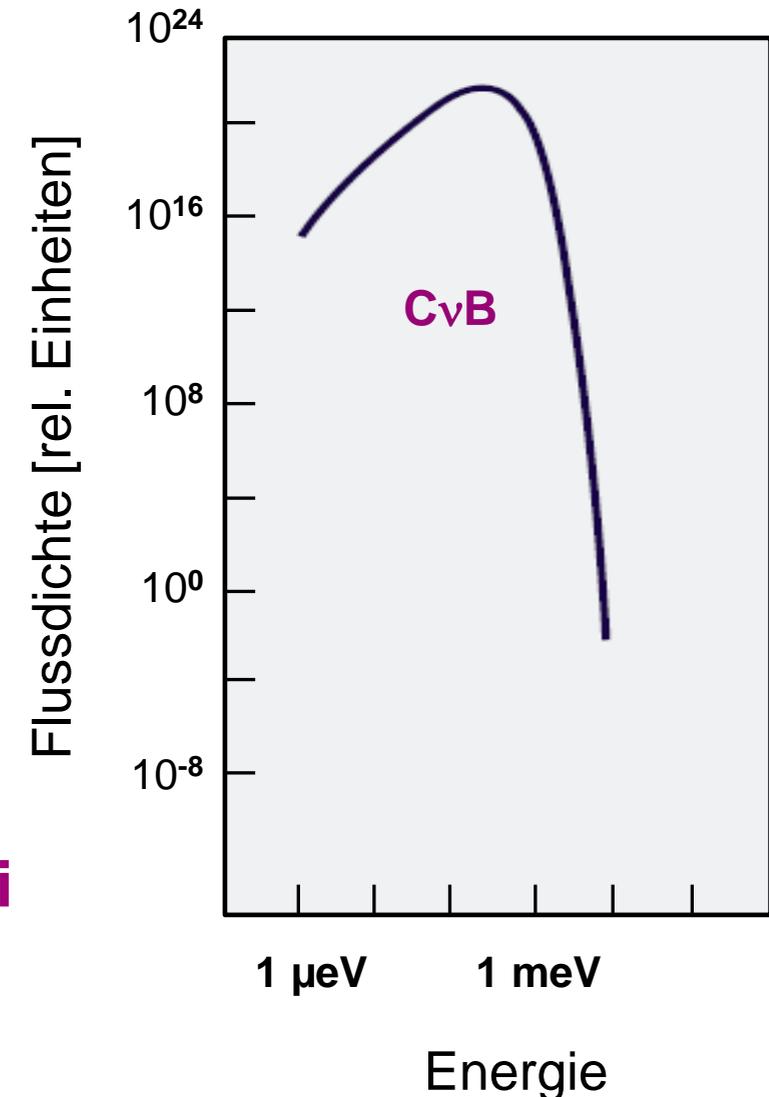
$$N_\nu = \frac{3}{11} \cdot N_\gamma = 113 / \text{cm}^3$$

- gilt für jeden ν -Flavourzustand (ν_e, ν_μ, ν_τ)
d.h. $N_\nu = 339 / \text{cm}^3$ für **alle** ν -Flavours

■ Neutrinos entkoppeln von CMB und Materie

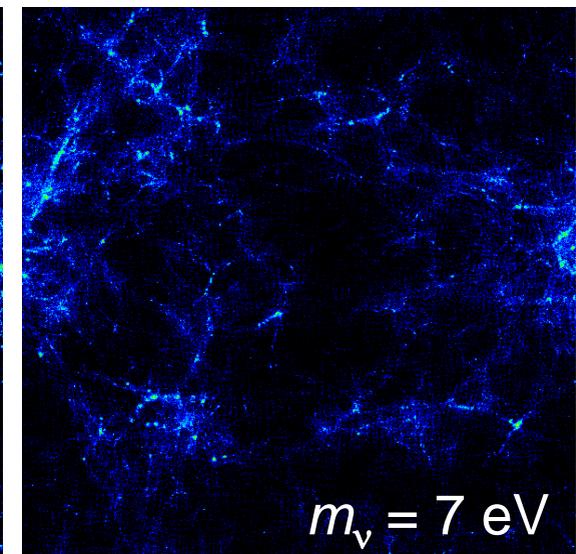
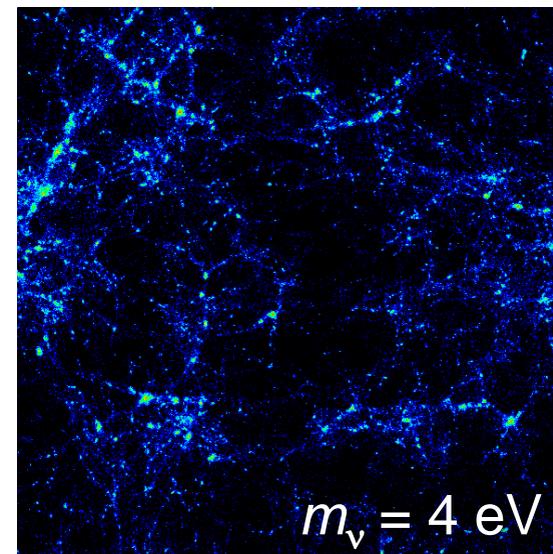
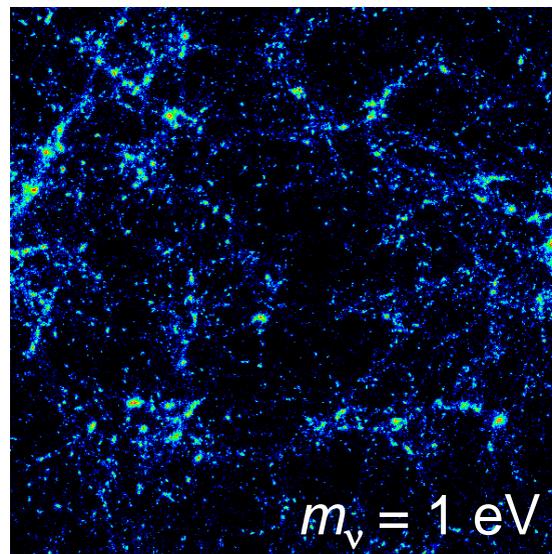
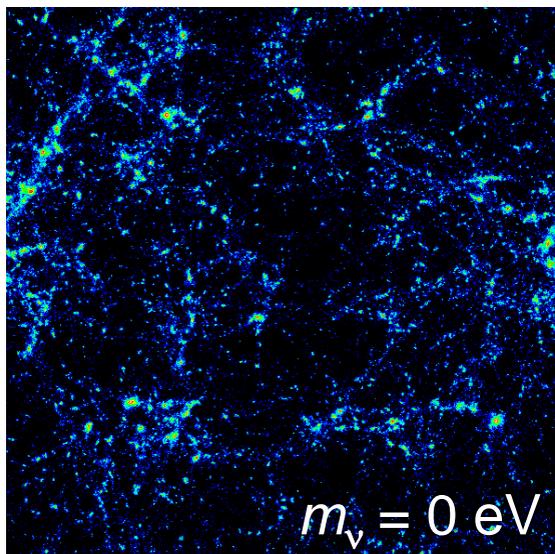
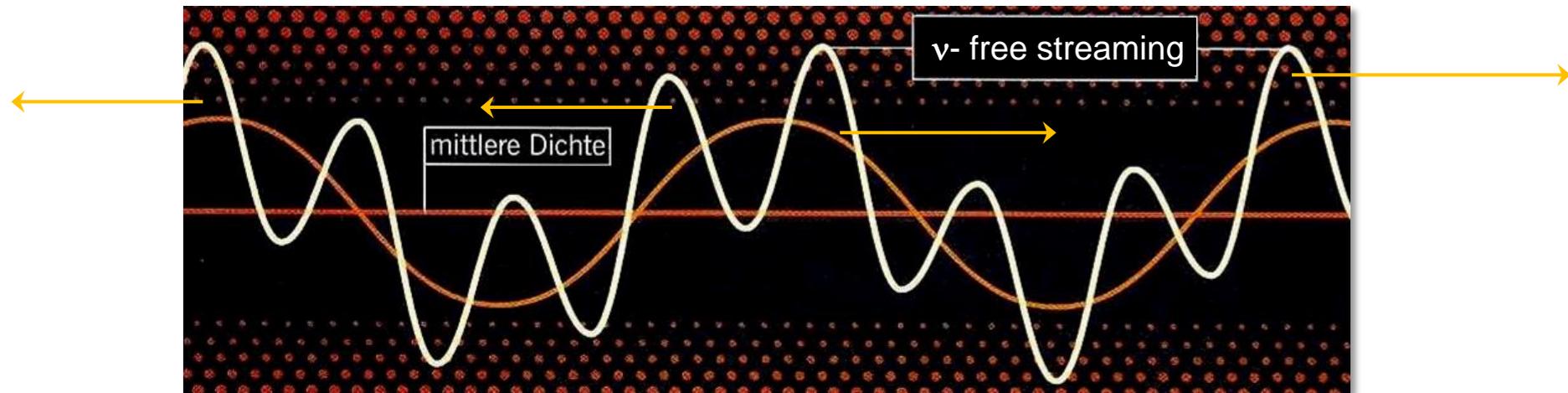
↪ Neutrinos propagieren wechselwirkungsfrei

↪ kosmischer Neutrinohintergrund (C ν B)



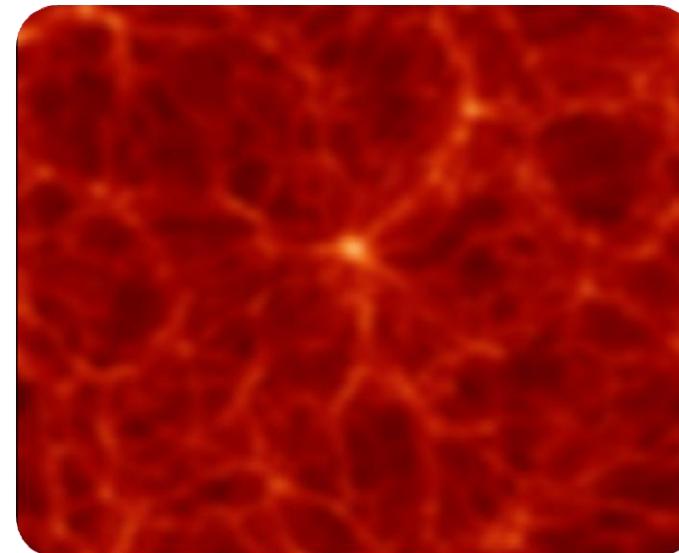
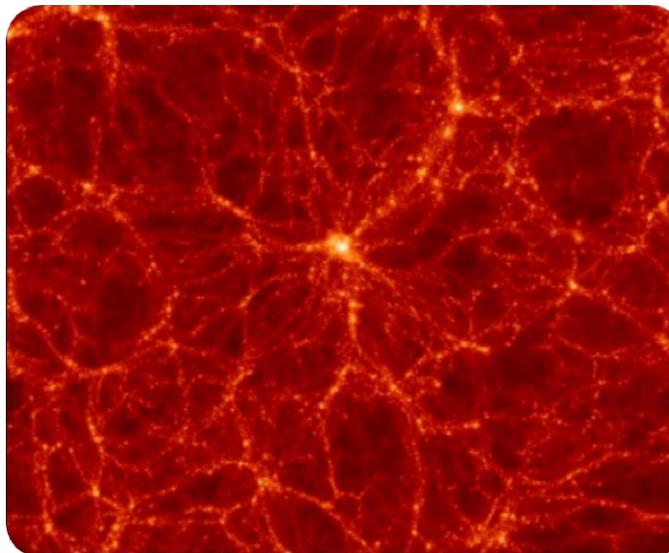
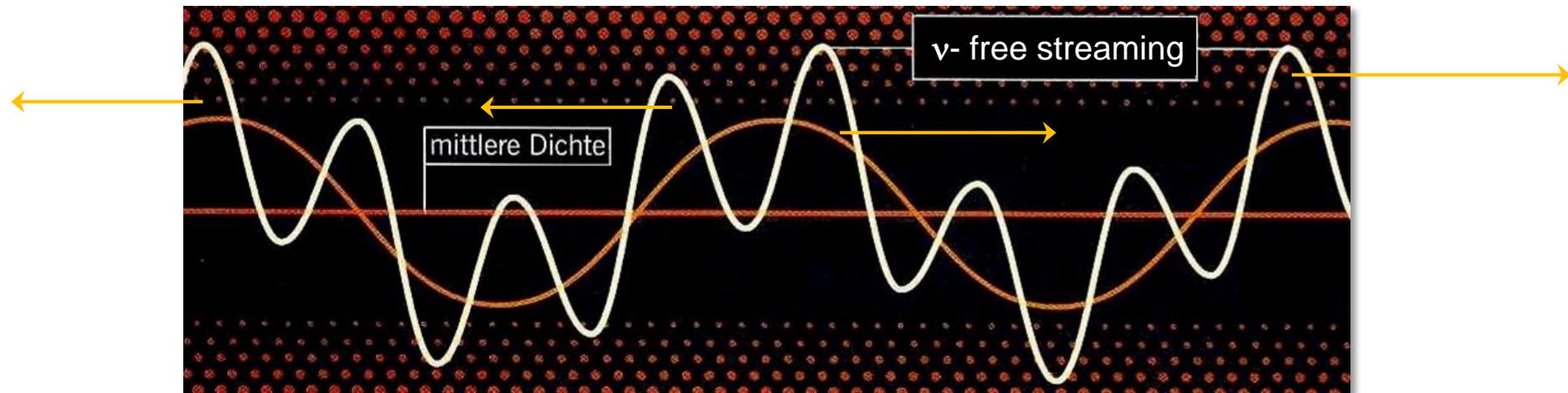
Heiße Dunkle Materie: Urknall-Neutrinos

- Simulation des Einflusses der kosmischen Hintergrund- ν 's auf die Strukturbildung im Universum: **kleine Strukturen werden ausgewaschen**



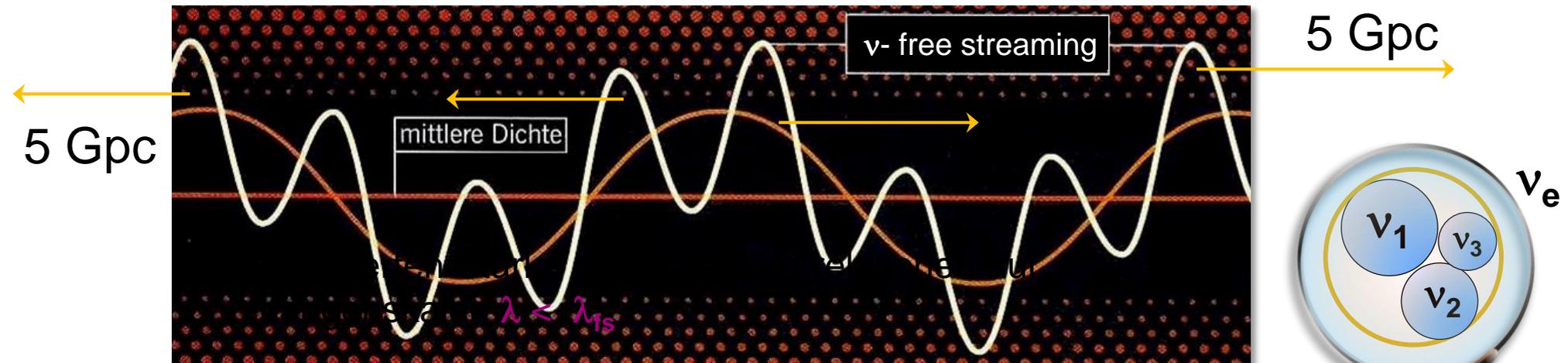
Heiße Dunkle Materie: Urknall-Neutrinos

- Simulation des Einflusses der kosmischen Hintergrund- ν 's auf die Strukturbildung im Universum: **kleine Strukturen werden ausgewaschen**



Heiße Dunkle Materie: Urknall-Neutrinos

- Simulation des Einflusses der kosmischen Hintergrund- ν 's auf die Strukturbildung im Universum: **kleine Strukturen werden ausgewaschen**



■ Neutrino-Free-Streaming

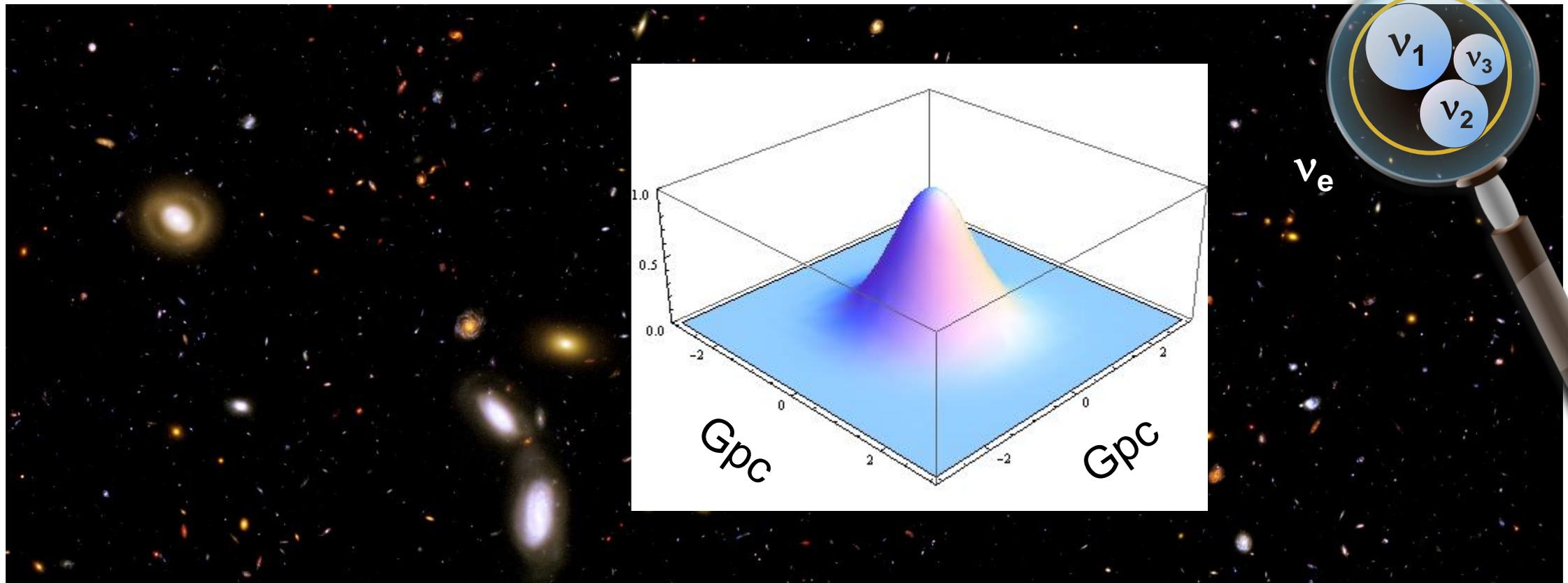
frühes Universum: leichte massive ν 's sind relativistisch & strömen aus Dichtefluktuationen heraus, mit typischer 'free-streaming' Skala $\lambda_{fs} = 1 \text{ Gpc} / m_\nu [1 \text{ eV}]$

↳ reduzierte Stärke der Materiefluktuationen $\delta\rho/\rho$ auf typischen Längenskalen $\lambda < \lambda_{fs}$

■ Ende des Free-Streamings

Neutrinos nicht-relativistisch bei Rotverschiebung:

$$z_\nu = 1.4 \left(\frac{m_\nu}{3} \right) \frac{1}{2.73K} = 2 \cdot 10^3 (m_\nu / \text{eV})$$



■ Strukturbildung im einem reinen 'top-bottom' Szenario

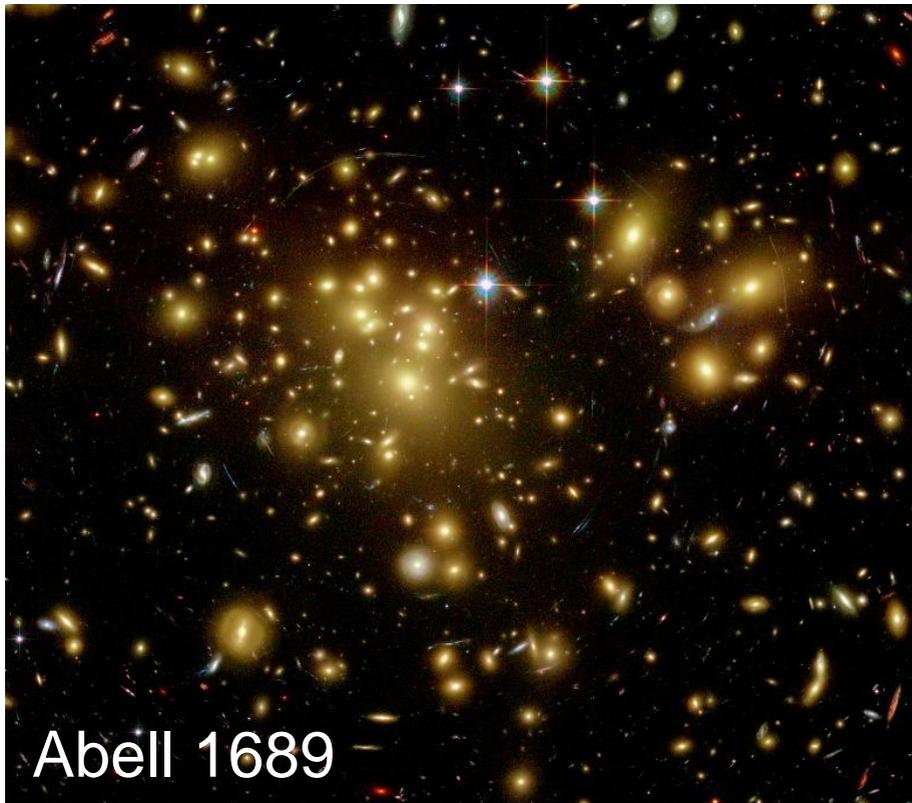
Parameter der ersten Strukturen die sich bei reiner HDM bilden können

$$l_\nu = 2 t_\nu (1 + z_\nu) \approx 250 \text{ Mpc} (eV/m_\nu)$$

minimale Länge

$$M_\nu = 1.5 \times 10^{17} M_\odot (m_\nu / eV)^{-2}$$

minimale Masse: Supercluster



■ 'top-bottom' Szenario nicht realisiert

- dominante HDM in der Form von ν 's
Massen > 2 eV ausgeschlossen
- HDM ist sub-dominante Form der DM
- HDM mit Massen im Bereich ~ 50 meV
gravitativ in Halos um Galaxien gebunden



Urknallneutrinos – kosmologische Effekte

■ Beitrag massebehafteter Neutrinos zur Energiedichte im Universum

auch Neutrinos mit Massen im sub-eV Bereich ($\Omega_\nu > 0.01$) sind kosmologisch wichtig

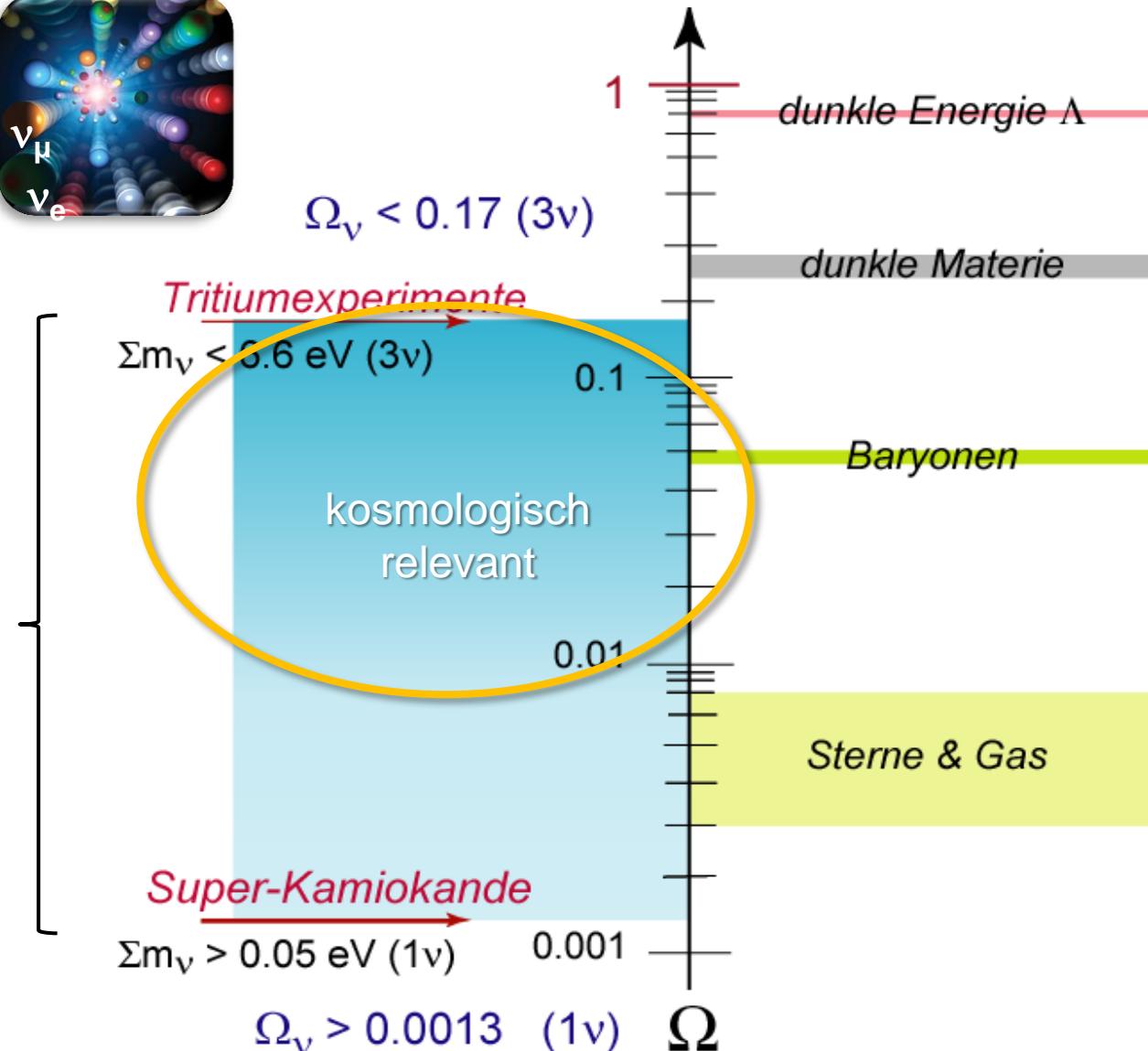


■ Dichte ρ_ν primordialier Neutrinos

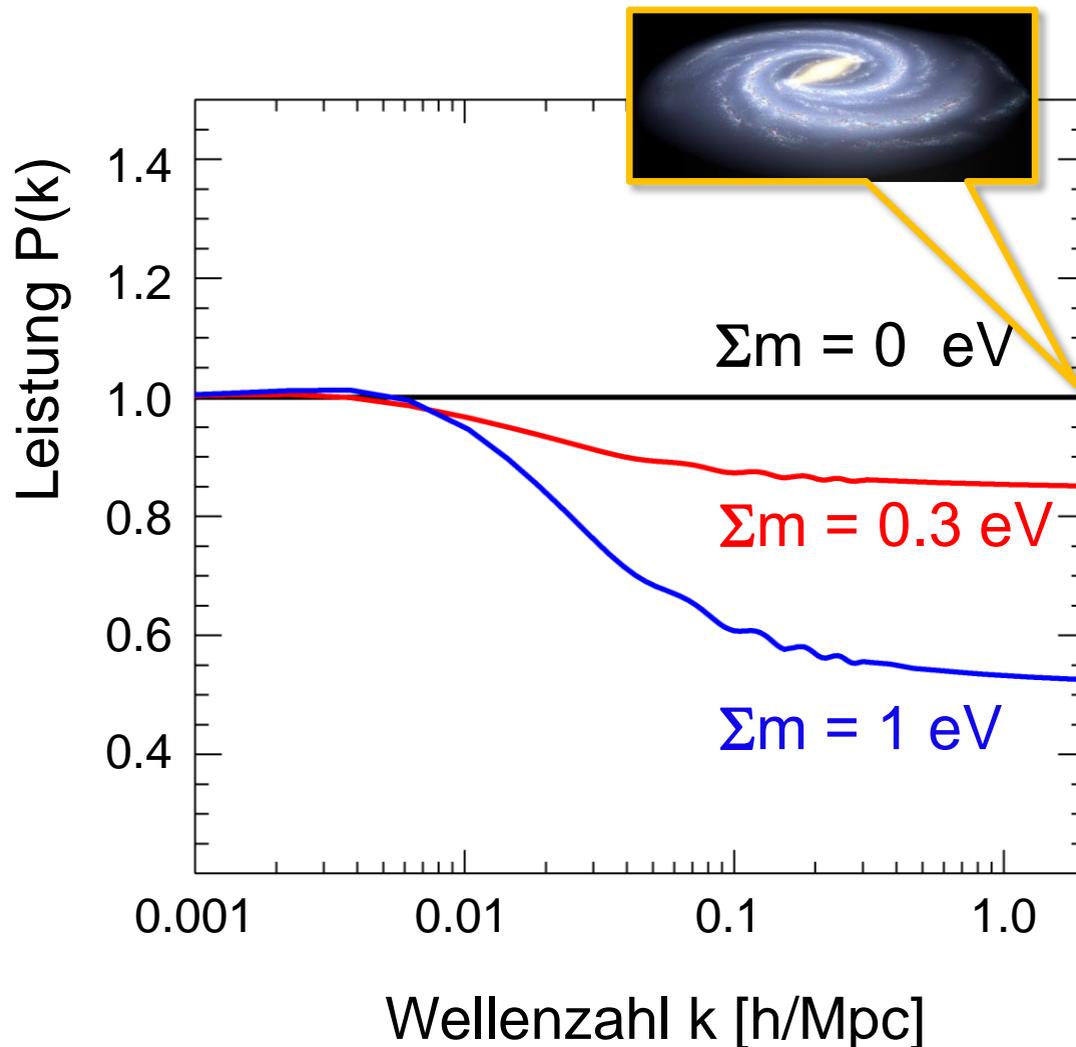
$$\rho_\nu = \frac{113}{\text{cm}^3} \sum_j m_{\nu_j} = \frac{\rho_{\text{krit}}}{h^2} \sum_j \frac{m_{\nu_j}}{94 \text{eV}}$$

■ Beitrag Ω_ν von Neutrinos zu Ω_{tot}

$$\Omega_\nu h^2 = 3 \times \frac{3}{4} \times \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma} \right)^3 \frac{n_\gamma m_\nu}{\rho_{\text{krit}}} \approx \frac{m_\nu}{30 \text{eV}}$$



- Signatur des 'free-streaming' von massebehafteten, primordialen ν 's:
Reduktion des Leistungsspektrums $P(k)$ der Materie



- Leistungsspektrum $P(k)$ =
Fouriertransformierte der
Materiekorrelation

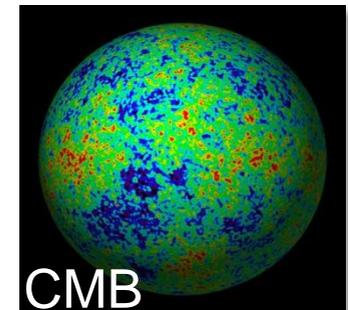
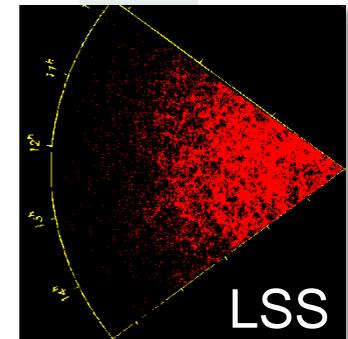
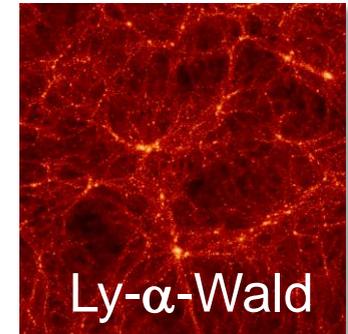
$$P(k) \sim P_{CDM}(k) \cdot \left(1 - \frac{8\Omega_\nu}{\Omega_M}\right)$$

- Beispiel: $m(\nu) = 0.1 \text{ eV}$
↳ 15%-ige Reduktion im
Leistungsspektrum $P(k)$
auf kleinen Skalen
 $k > 0.01 \text{ h/Mpc}$

Urknallneutrinos - Massenresultate

■ Übersicht über neuere Neutrinomassen-Resultate aus der Kosmologie

Autor	Resultat	Datensätze
WMAP	$< 13 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP
Spergel et al.	$< 0.69 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP, CMB, 2dF, σ_8 , H_0
Hannestad	$< 1.01 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP, CMB, 2dF, H_0
Allen et al.	$= 0.69 \text{ eV}$ [68% CL.]	WMAP, CMB, 2dF, σ_8 , H_0 , XLF
Tegmark et al.	$< 1.8 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP, SDSS
Barger et al.	$< 0.65 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP, CMB, 2dF, SDSS, H_0
Crotty et al.	$< 1.0 \text{ eV}$ [95% CL.]	WMAP, CMB, 2dF, SDSS, H_0



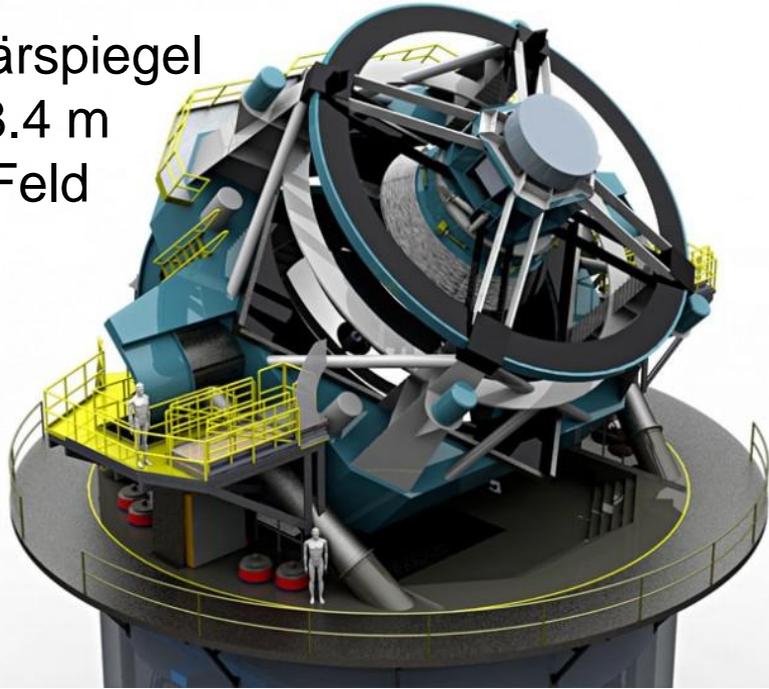
Neutrinomassen aus der Kosmologie sind stark modellabhängig

- Auswahl der Datensätze (teilweise inkompatibel, z.B. Ly α)
- Entartung von kosmologischen Parametern
- kosmologisches Λ CDM Modell



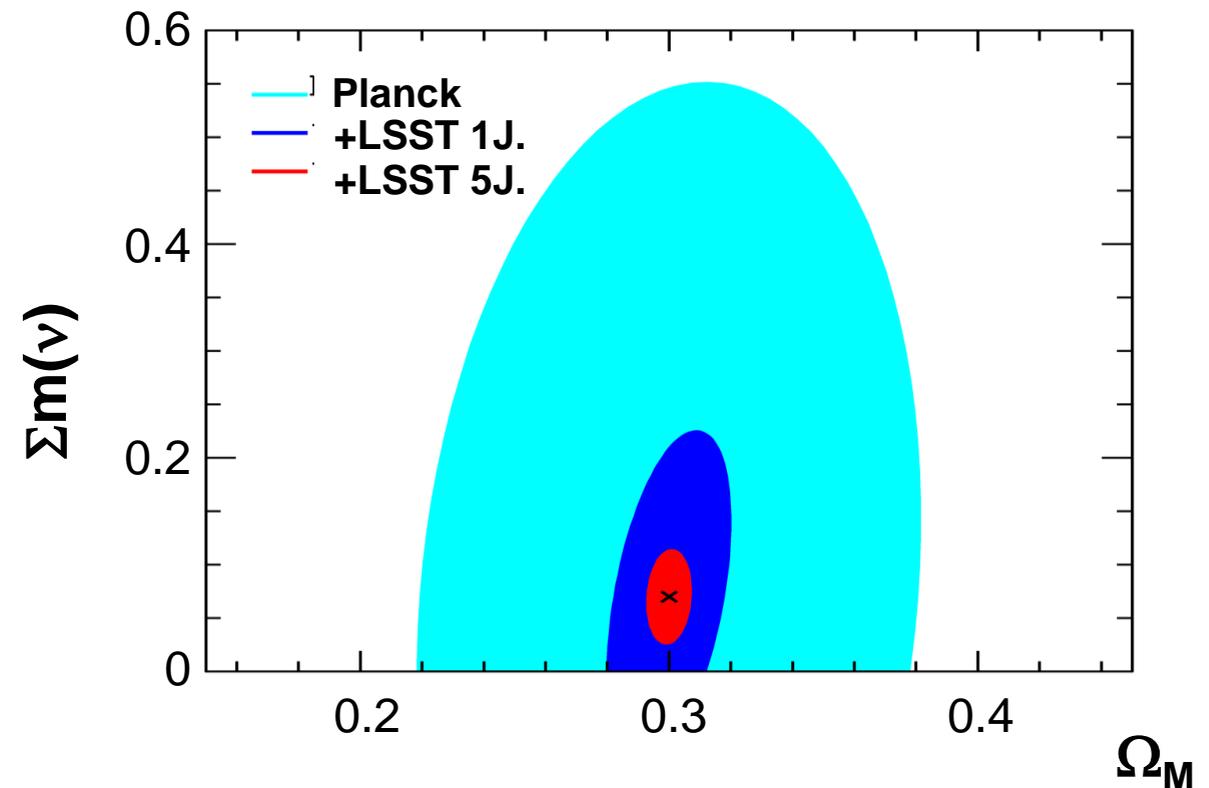
Zukünftige Experimente zur LSS

Primärspiegel
 $\varnothing = 8.4 \text{ m}$
 3.5° Feld



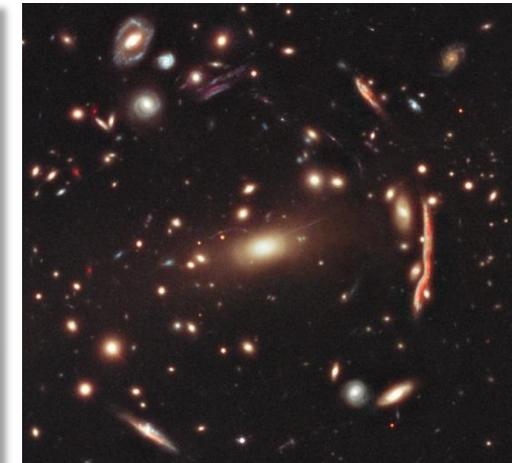
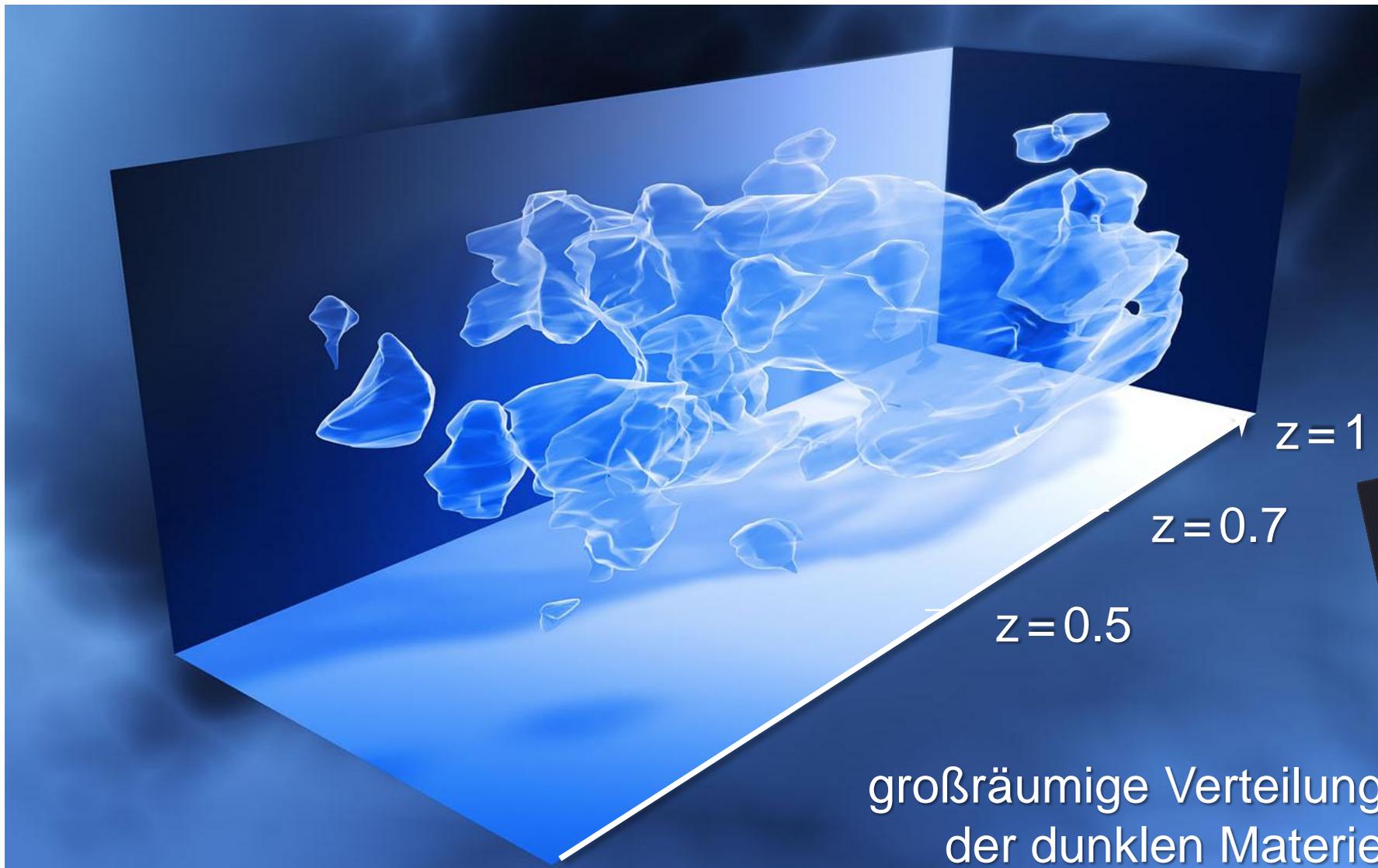
■ LSST – Large Synoptic Survey Teleskop

Ziel: Messung der geometrischen Verzerrung von $>10^9$ Galaxienscheiben durch Gravitationspotenzial der dunklen Materie (vgl. Kap. 3.2), $\sim 30 \text{ TByte/Nacht}$



3.2 heutige Strukturen: astronomische Evidenzen für dunkle Materie

- astronomische Nachweismethoden: Galaxienrotation, Clustergas, Linsen



großräumige Verteilung
der dunklen Materie

Erste Hinweise durch Galaxiencluster

■ erste Postulierung der dunklen Materie (F. Zwicky, 1933) -

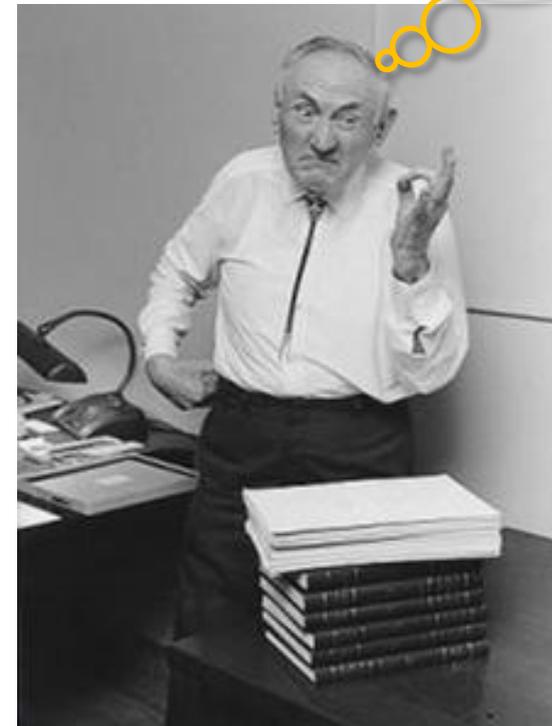
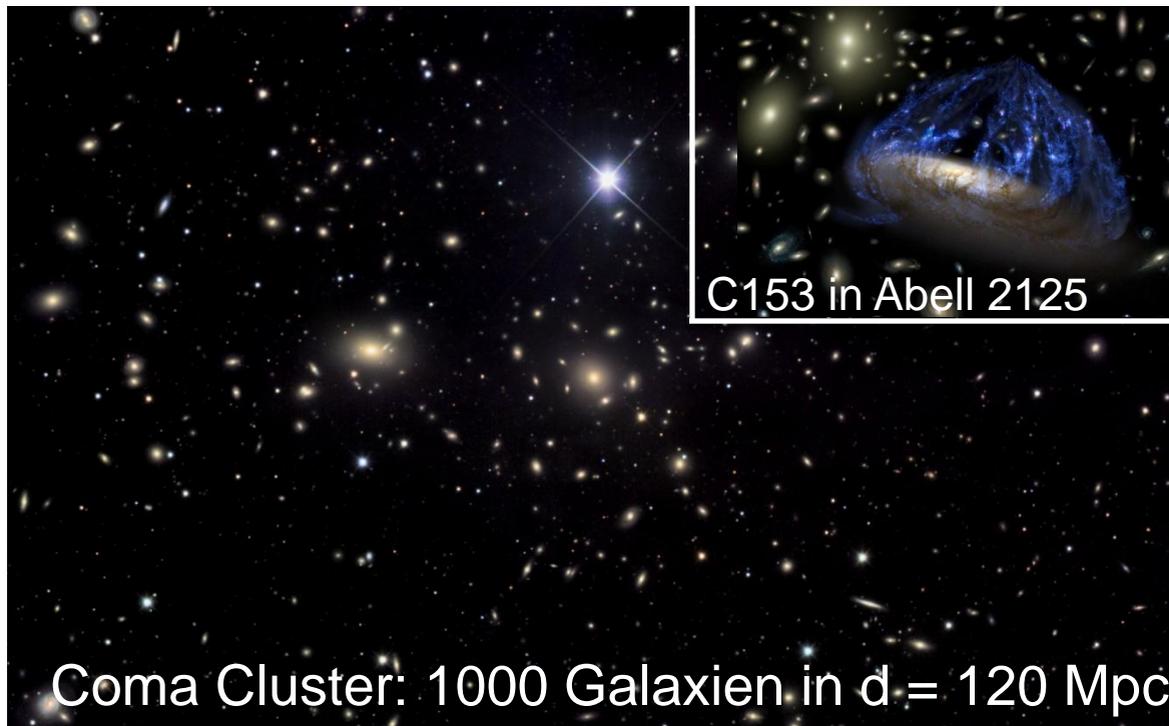
- nichtleuchtende, nur gravitativ wechselwirkende Form von Materie

↳ Erklärung der hohen (Pekuliar-)Geschwindigkeiten von einzelnen Galaxien im Coma-Galaxienhaufen

Virialsatz:

$$\langle E_{kin} \rangle = -\frac{1}{2} \langle U_{pot} \rangle = -E$$

nichtleuchtende Materie
~ 90% der Masse
im Coma-Cluster...

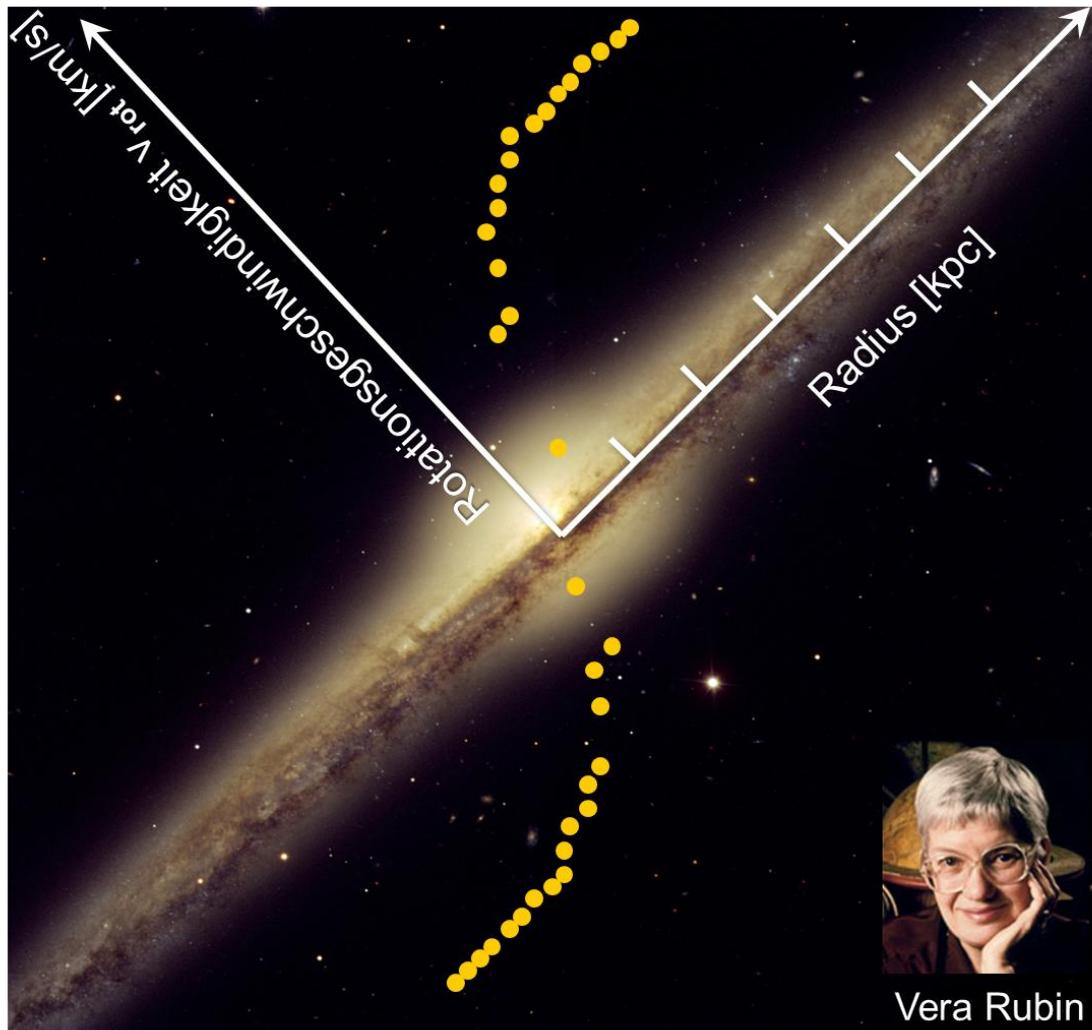


F. Zwicky
Helv. Phys. Acta **6**
110-127 (1933)
'Die Rotverschiebung
von extragalaktischen
Nebeln'

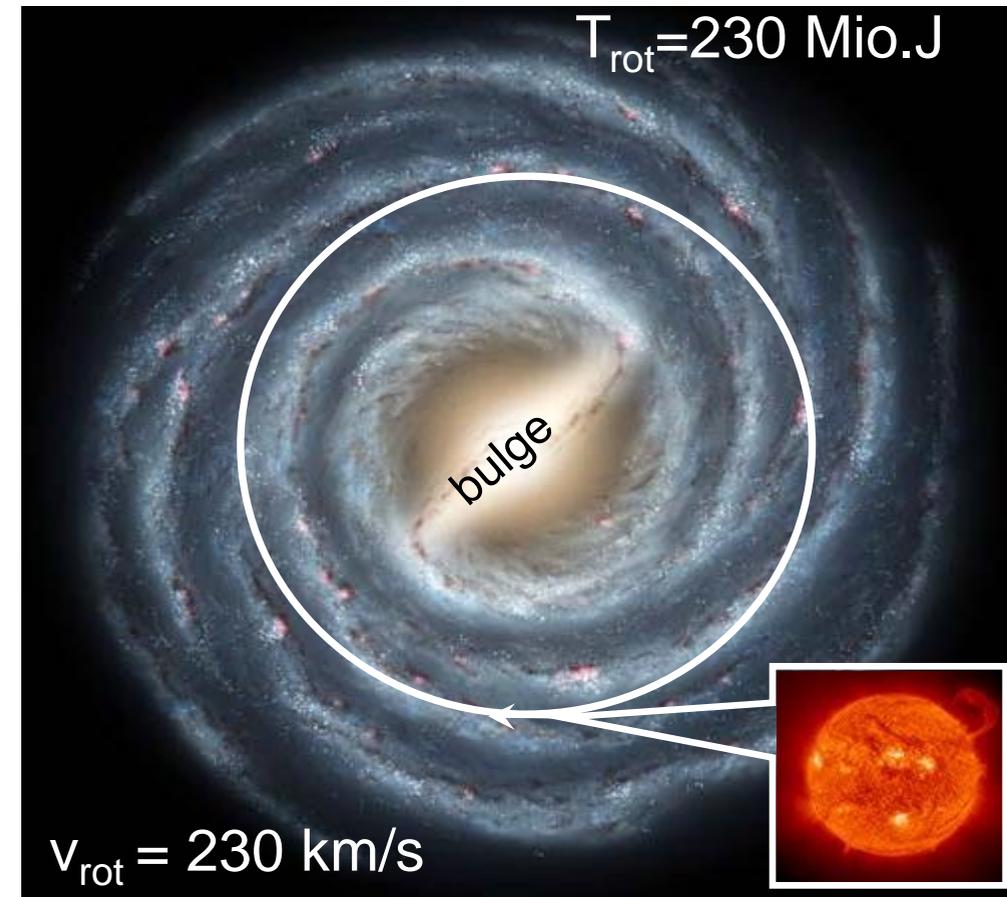
Fritz Zwicky
(1898-1974)

Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien

- **deutliche Hinweise auf dunkle Materie in Galaxien** (V. Rubin, 1972):
 - **Beobachtung:** flache Rotationskurven von Galaxien mit $v_{\text{rot}} = \text{const.}$

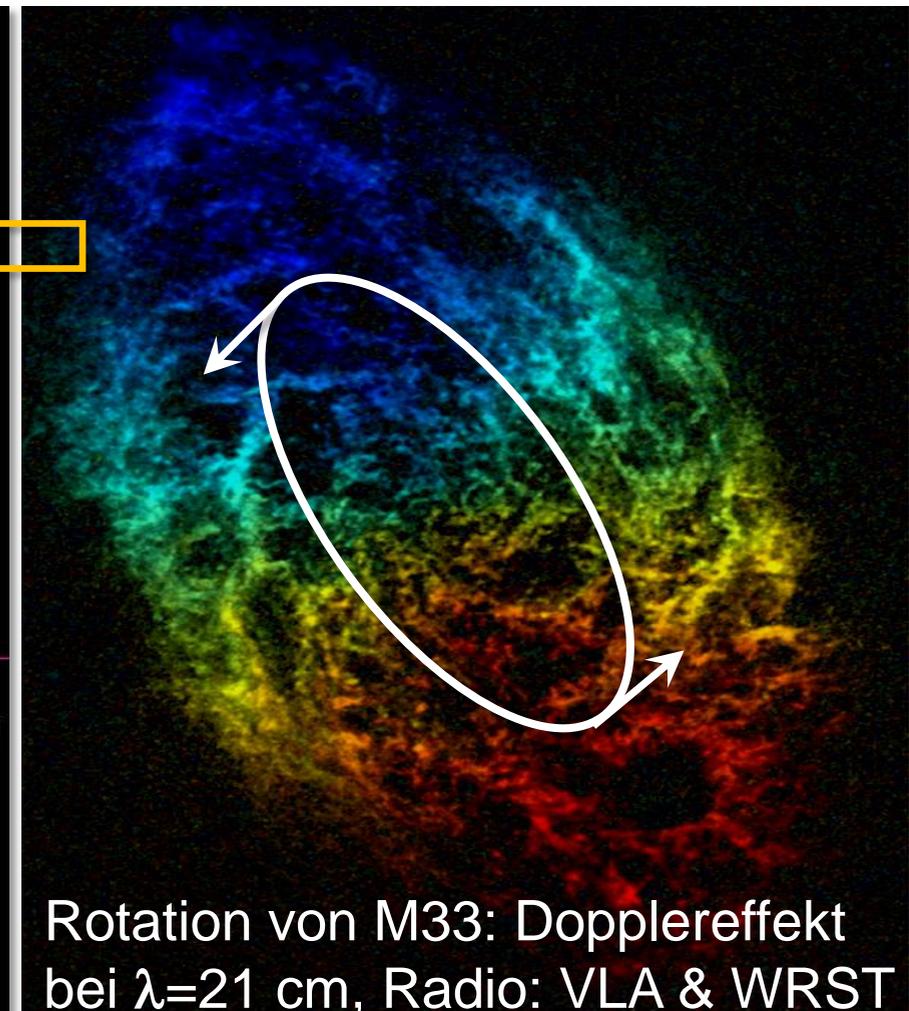
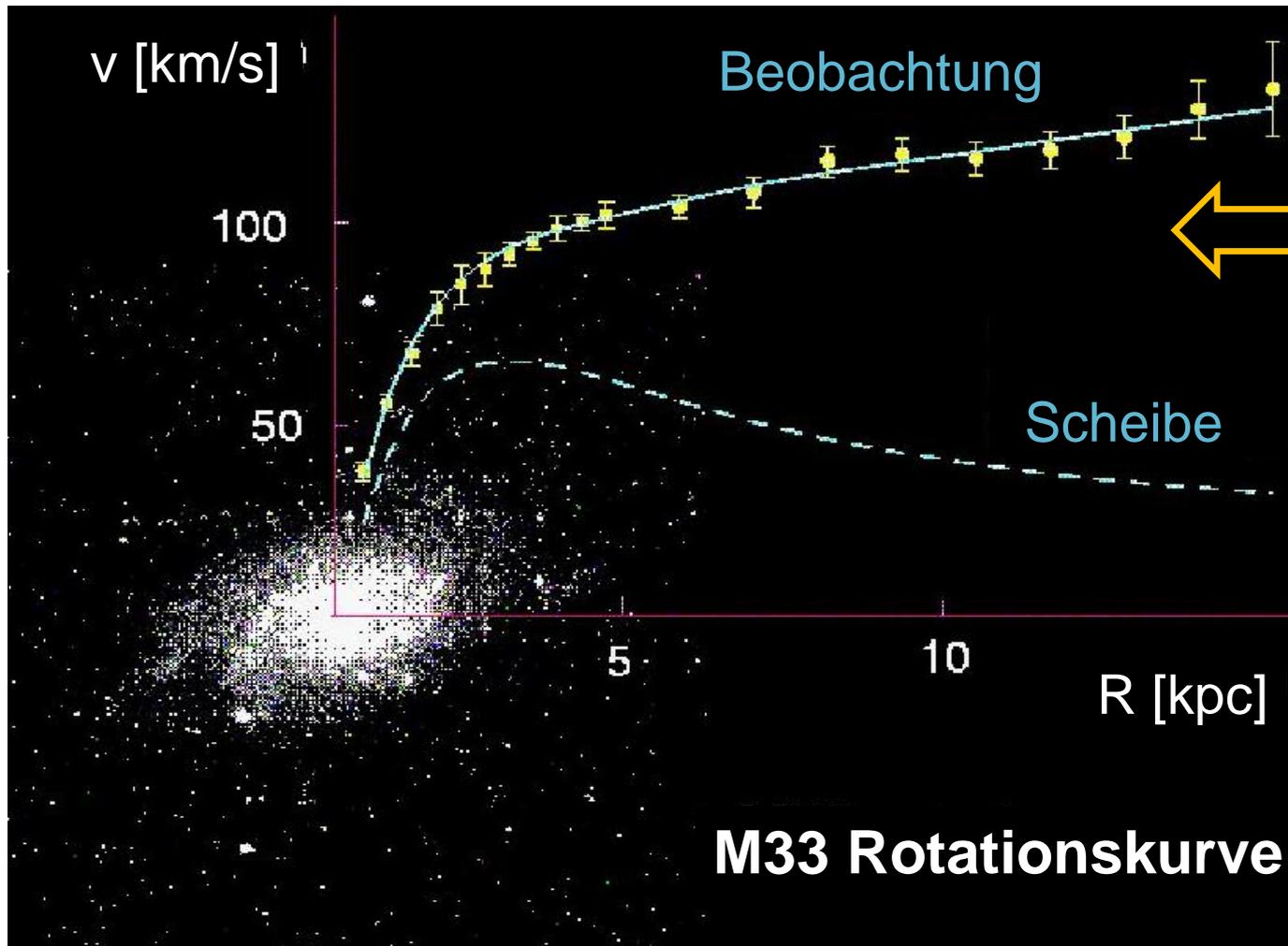


- solare Rotationsparameter in Galaxis



Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien

- **deutliche Hinweise auf dunkle Materie in Galaxien** (V. Rubin, 1972):
 - **Beobachtung:** flache Rotationskurven von Galaxien mit $v_{\text{rot}} = \text{const.}$
 - **Erwartung:** abfallende Rotationskurven $v_{\text{rot}} \sim R^{-1/2}$



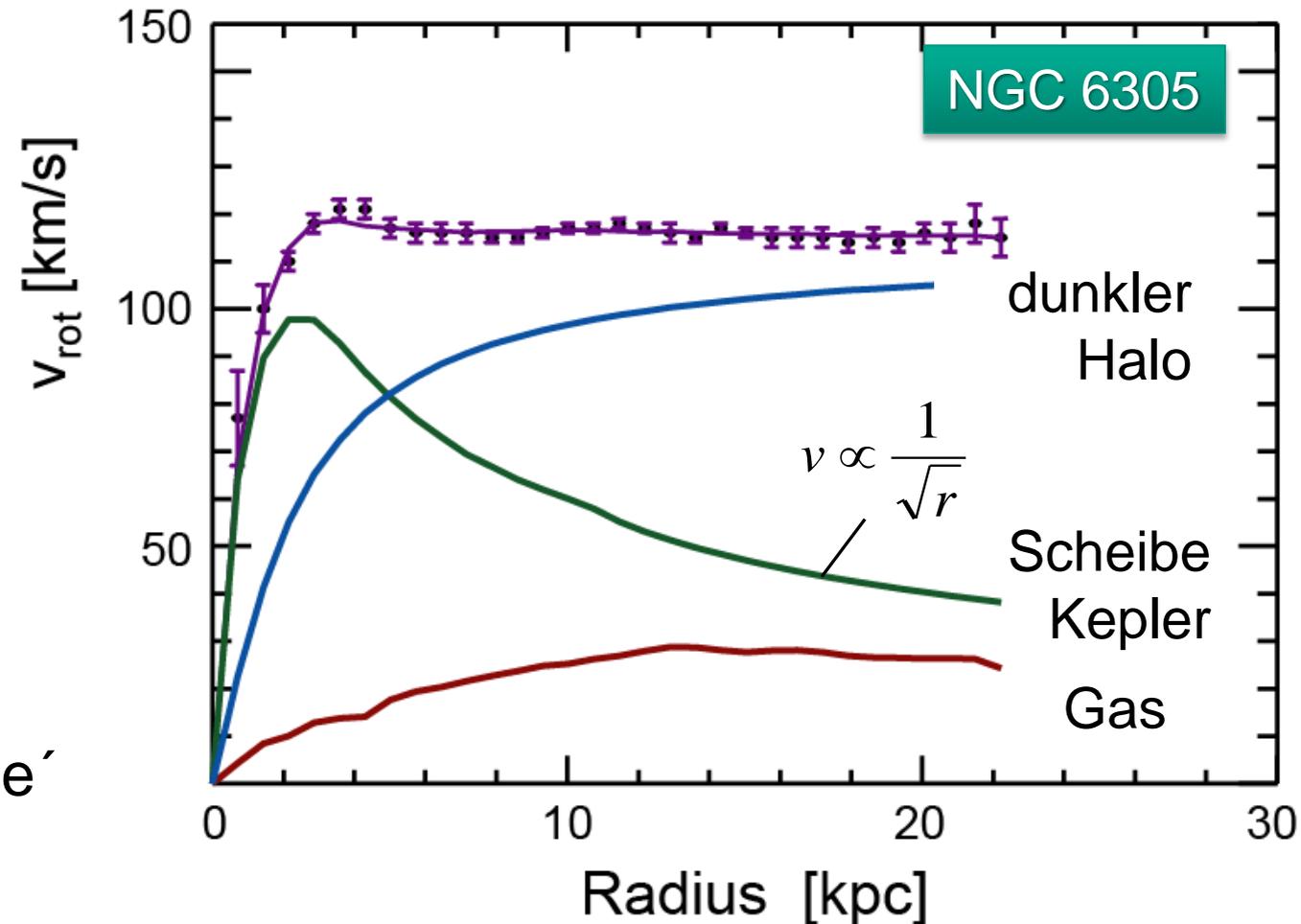
Evidenzen – Rotationskurven Galaxien

- **Kepler'sche Bahn:** Rotationsgeschwindigkeit v_{rot} eines Sterns der Masse m um innere Zentralmasse M_r
- Radius r außerhalb der galaktische Bulge, $r > 5\text{kpc}$



$$F = \frac{GM_r m}{r^2} = m \cdot a$$
$$a = \frac{v_{rot}^2}{r} = \frac{GM_r}{r^2}$$
$$\Rightarrow v_{rot}(r) = \sqrt{\frac{GM_r}{r}}$$

- experimentelle Beobachtung
 $v_{rot}(r) = \text{const.}$
Problem der 'fehlenden Masse'
↳ **Dunkelmaterie-Halo**



Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien

■ sphärischer Halo aus Dunkler Materie

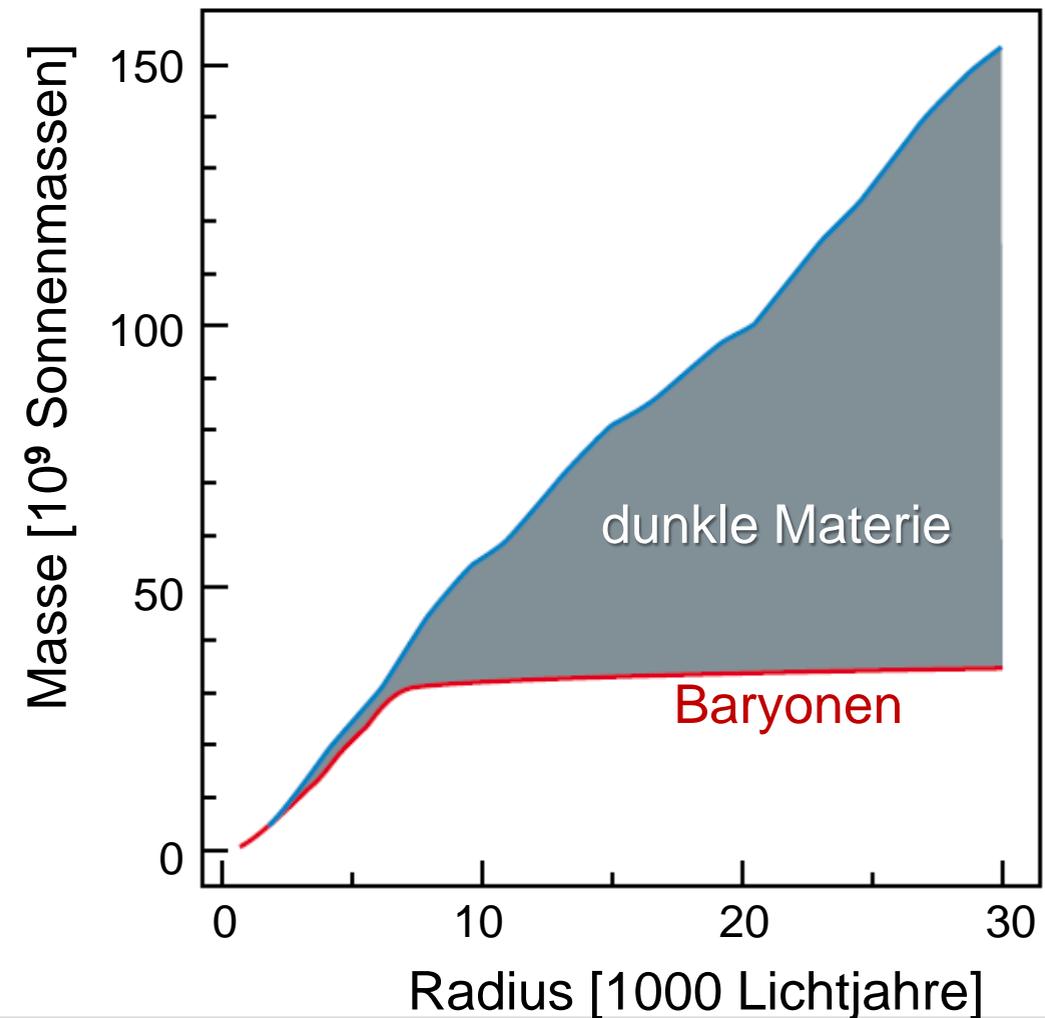
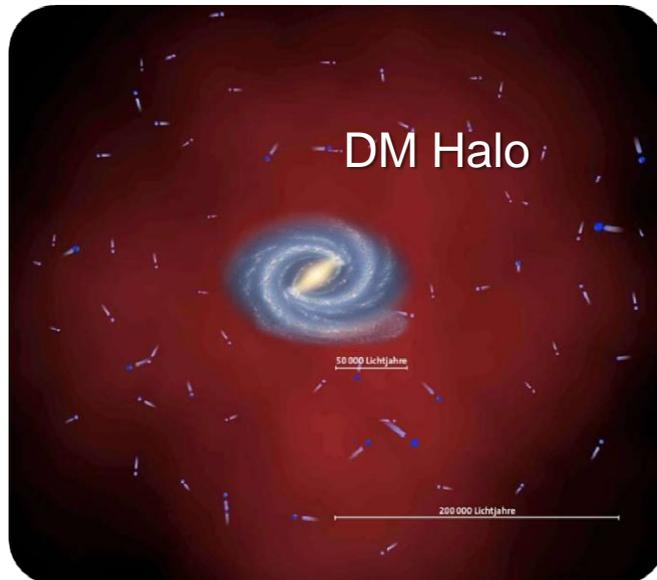
- lineare Massenzunahme des DM-Halos mit Radius (heute bis 50 kpc)

$$M(r) \propto r$$

$$\Rightarrow \rho(r) \propto \frac{1}{r^2}$$

■ Dark Matter Halo:

- bildet ~80 - 90% der Gesamtmasse einer Galaxis
- Halo entstand aus primordialen Dichtfluktuationen

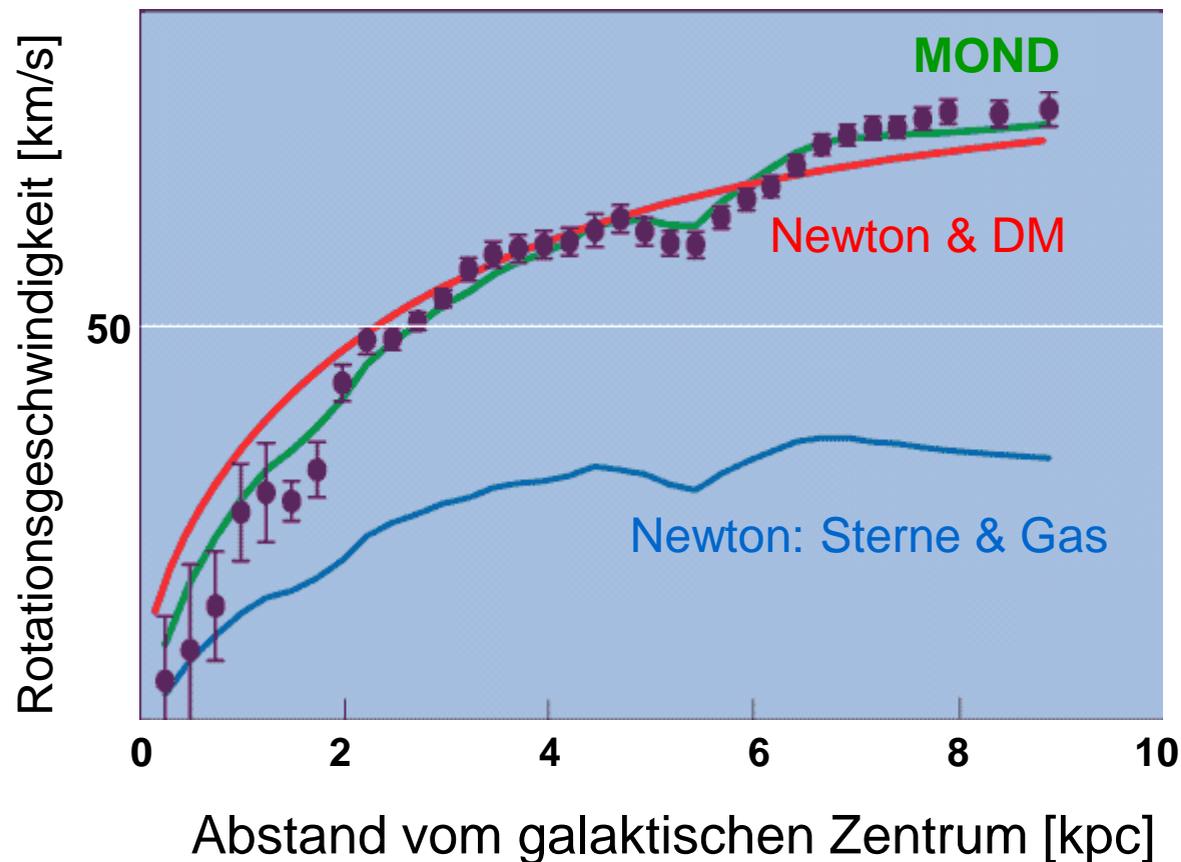


MOND-Theorie & galaktische Rotation

- **MO**dified **N**ewtonian **D**ynamics (MOND) - alternativer Ansatz zur Erklärung der galaktischen Rotationskurven (1983, M. Milgrom)

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad \Rightarrow \quad \vec{F} = m \cdot \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \cdot \vec{a}$$

falls $a/a_0 \gg 1$: $\mu = 1$ **Newton**
falls $a/a_0 \ll 1$: $\mu = a/a_0$ **MOND**

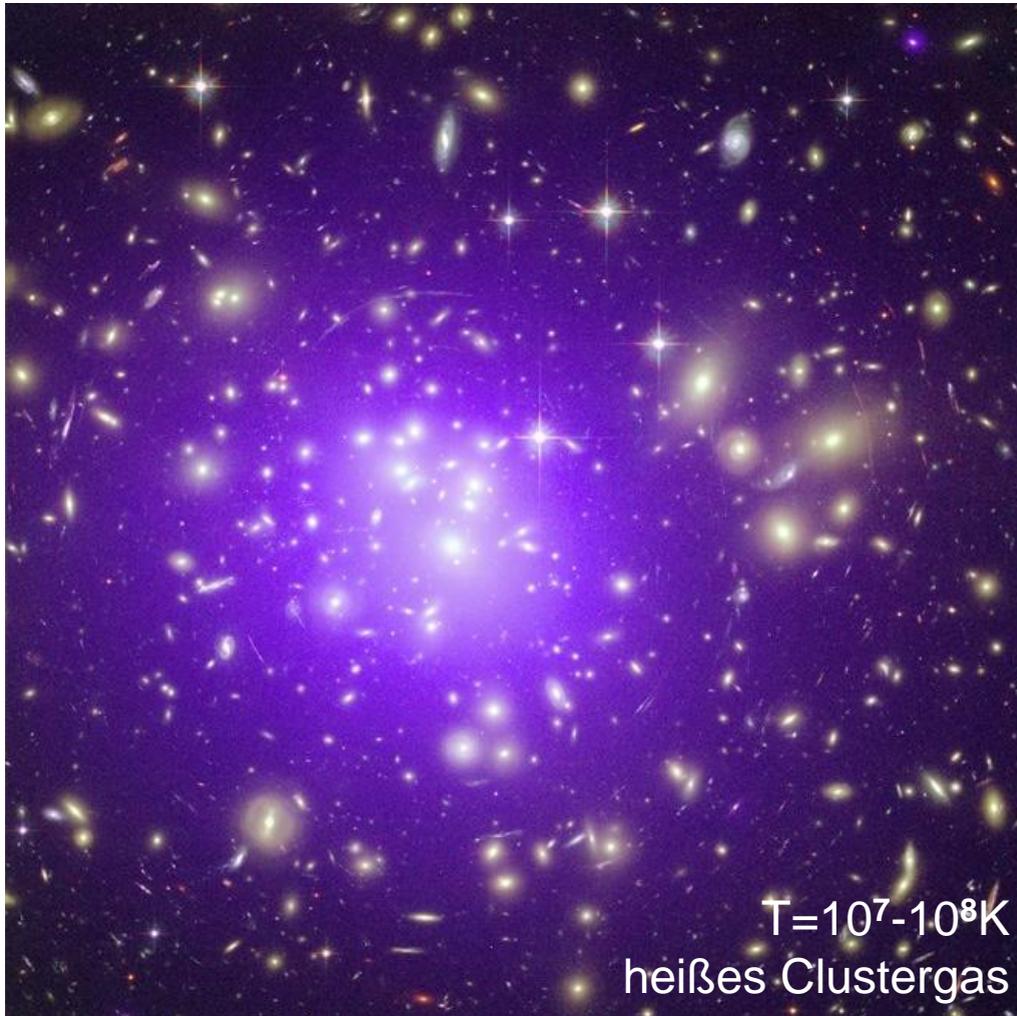


Parameter $a_0 = 1.2 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$

- **Kritik an MOND:**

- nur relevant auf der Skala von Galaxien & Clustern
- nur *effektive* Theorie
(d.h. keine Ursache für Effekt)
- inkompatibel mit:
 - Bullet-Cluster
 - ‘weak lensing’ Studien
 - CMB-Multipolspektrum

- Dritte Evidenz: **Temperaturprofil des heißen Gases in Galaxienclustern**
 - Gas emittiert im Röntgenbereich (Chandra, XMM-Newton)
 - Gas enthält ~90% der Baryonen!



- **Erwartung** Gas-Dichteprofil $\rho \sim 1/r^2$
↳ Temperaturprofil $T_{\text{x-ray}} \sim 1/r$

$$kT \approx (1.3 - 1.8) \text{ keV} \cdot \left(\frac{M_r}{10^{14} M_\odot} \right) \cdot \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{r} \right)$$

- **Beobachtung:** $T_{\text{x-ray}} = \text{const.} = 10 \text{ keV}$
T ist unabhängig vom Radius r,
d.h. wiederum gilt $M_r \sim r$
- Dunkle Materie dominiert auch Masse von Galaxien-Clustern