

Braucht man Dunkle Energie in einem strukturiertem Universum?

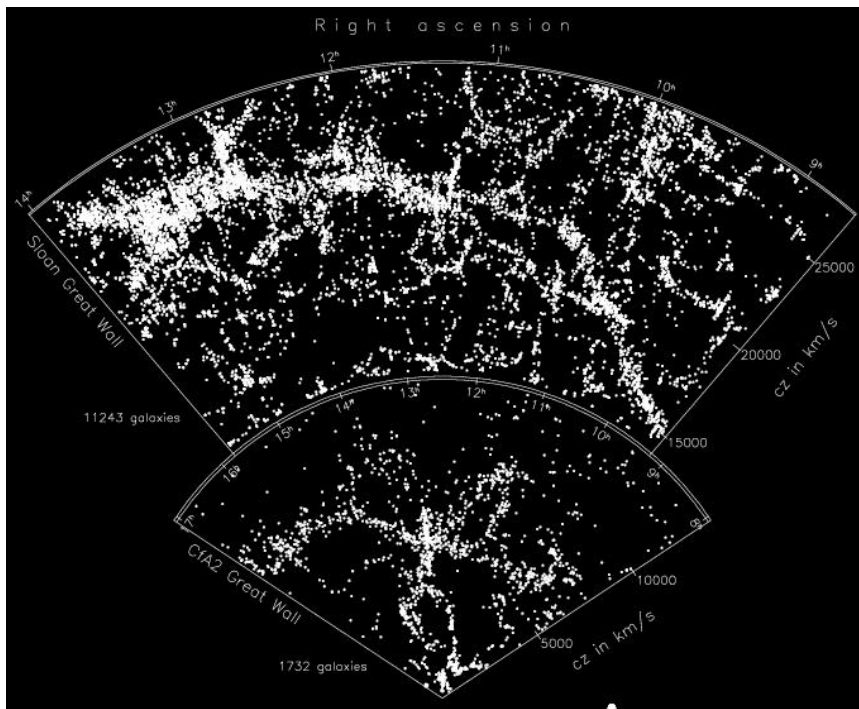
Michael Sokaliwska

AlfA

4.1.2011, Bonn

Was wissen wir über unser Universum?

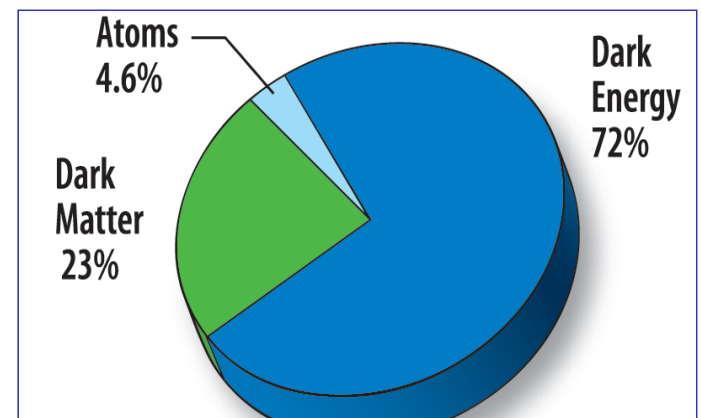
- Wir leben in ihm!
- ? ...



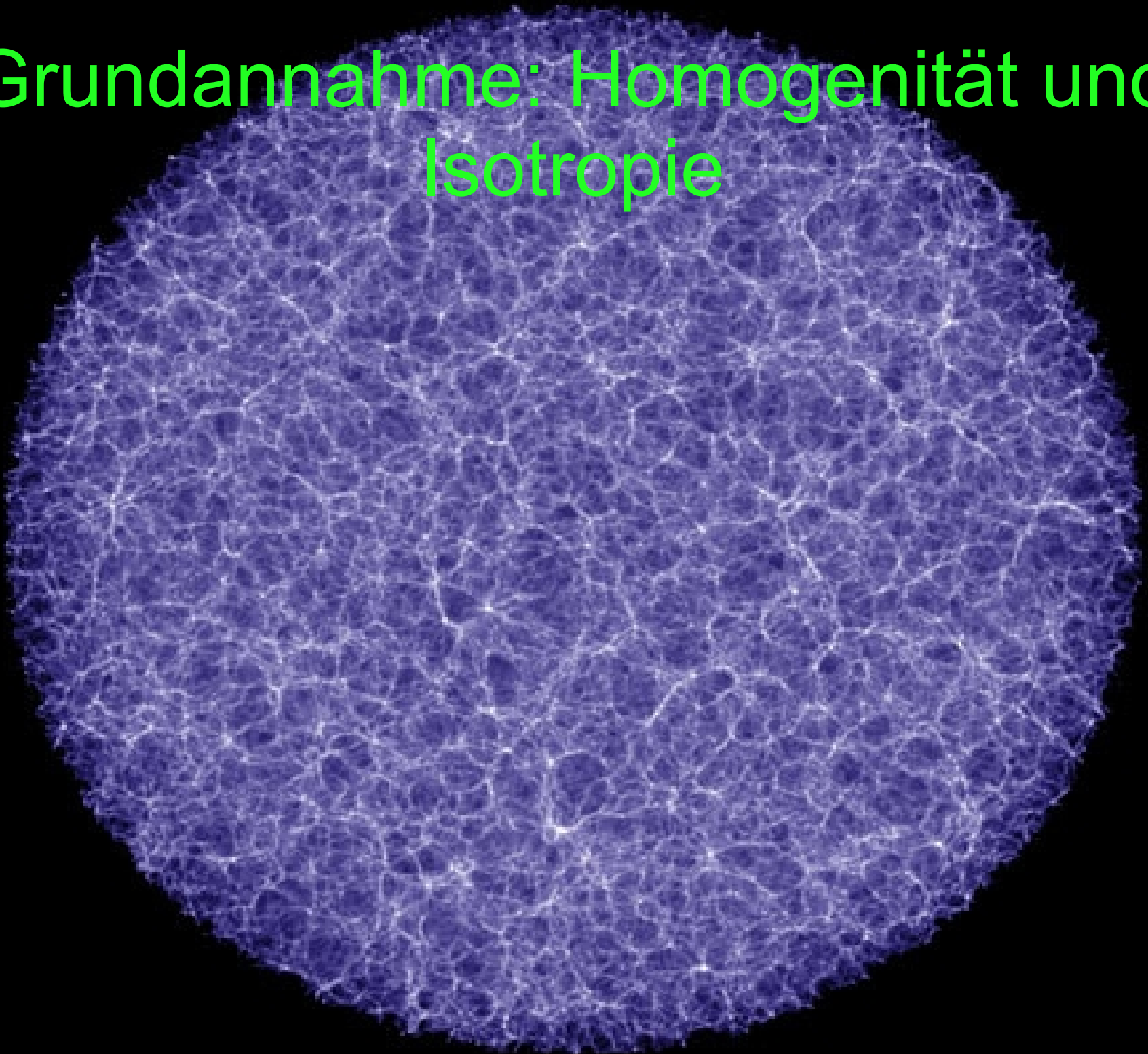
Vermutungen

Das Universum...

- war in einem sehr dichten, heißen Zustand → Big Bang!
- expandiert beschleunigt (Supernova Typ Ia)
- enthält große Mengen an dunkler Materie (Rotationskurven & Strukturbildung)
- Wird von dunkler Energie dominiert
- ...



Grundannahme: Homogenität und Isotropie



Konventionelle Behandlung

- Einsteinsche Feldgleichungen

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Friedmann-Gleichungen

$$\left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{Kc^2}{a(t)^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = - \frac{4\pi G}{3c^2} (3p(t) + \rho(t)c^2) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

→ Inhomogenitäten werden vernachlässigt

$$\Gamma \sim \partial g$$

$$E[g] \sim \partial \Gamma + \Gamma^2$$

$$E[g] = T$$

$$E[\langle g \rangle] - \langle E[g] \rangle \sim \langle \Gamma \rangle^2 - \langle \Gamma^2 \rangle \neq 0$$

FLRW $\rightarrow$ $E[\langle g \rangle] = \langle T \rangle$

Aber:

$$E[\langle g \rangle] = \langle T \rangle - C$$

$$C \sim \langle \Gamma \rangle^2 - \langle \Gamma^2 \rangle$$

Die Expansionsdynamik wird komplett ohne diesen Störterm behandelt

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G a^2 \delta \rho$$

Effekte der Mittelung über die Inhomogenitäten treten nur in zweiter Ordnung des Potentials auf

Buchert'sche Mittelwerte

- Druckfreie Materie
- Relative Volumen-Wachstumsrate

$$\dot{\Theta} + \frac{1}{3} \Theta^2 + 2\sigma^2 + 4\pi G \rho = 0$$

Modifizierte Friedmann-Gleichungen

$$\rightarrow \left(\frac{\dot{a}_D}{a_D} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \langle \rho \rangle_D - \frac{1}{6} (S_D + \langle R \rangle_D)$$
$$\frac{\ddot{a}_D}{a_D} = - \frac{4\pi G}{3} \langle \rho \rangle_D + \frac{1}{3} S_D$$

„Rückkopplung“ S_D

$$S_D \equiv \frac{2}{3} (\langle \Theta^2 \rangle_D - \langle \Theta \rangle_D^2) - 2 \langle \sigma^2 \rangle_D$$

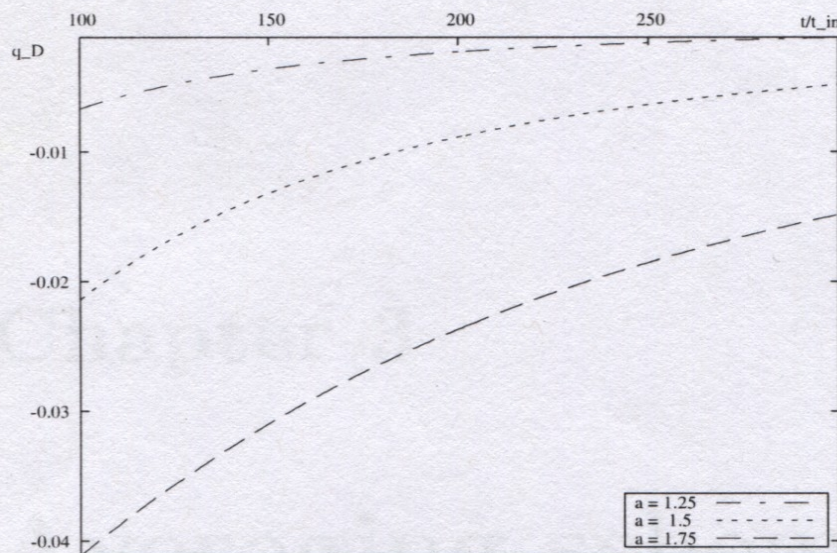
Beschleunigung fuer

$$S_D > 4\pi G \langle \rho \rangle_D$$

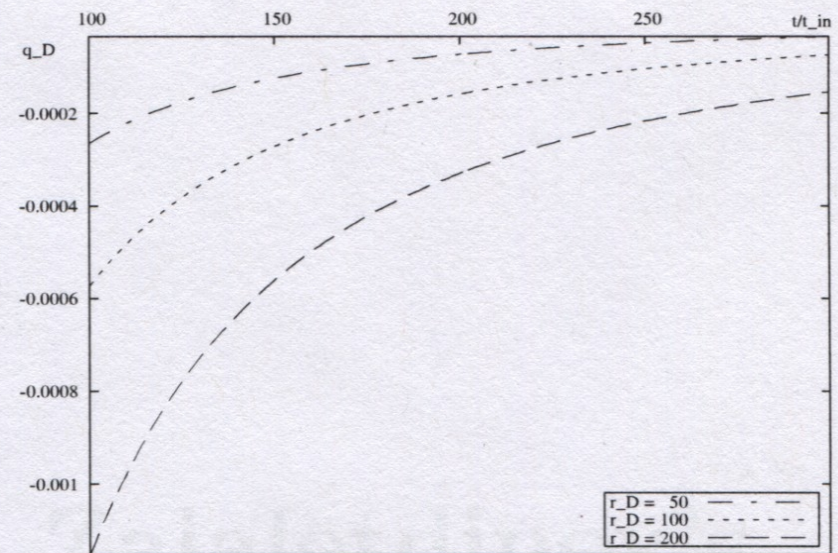
Beispiel

Anwendung auf LTB Loesung

$$q_D \equiv - \frac{\ddot{a}_D a_D}{\dot{a}_D^2} = 2 - 3 \frac{\ddot{V}_D V_D}{\dot{V}_D^2}$$

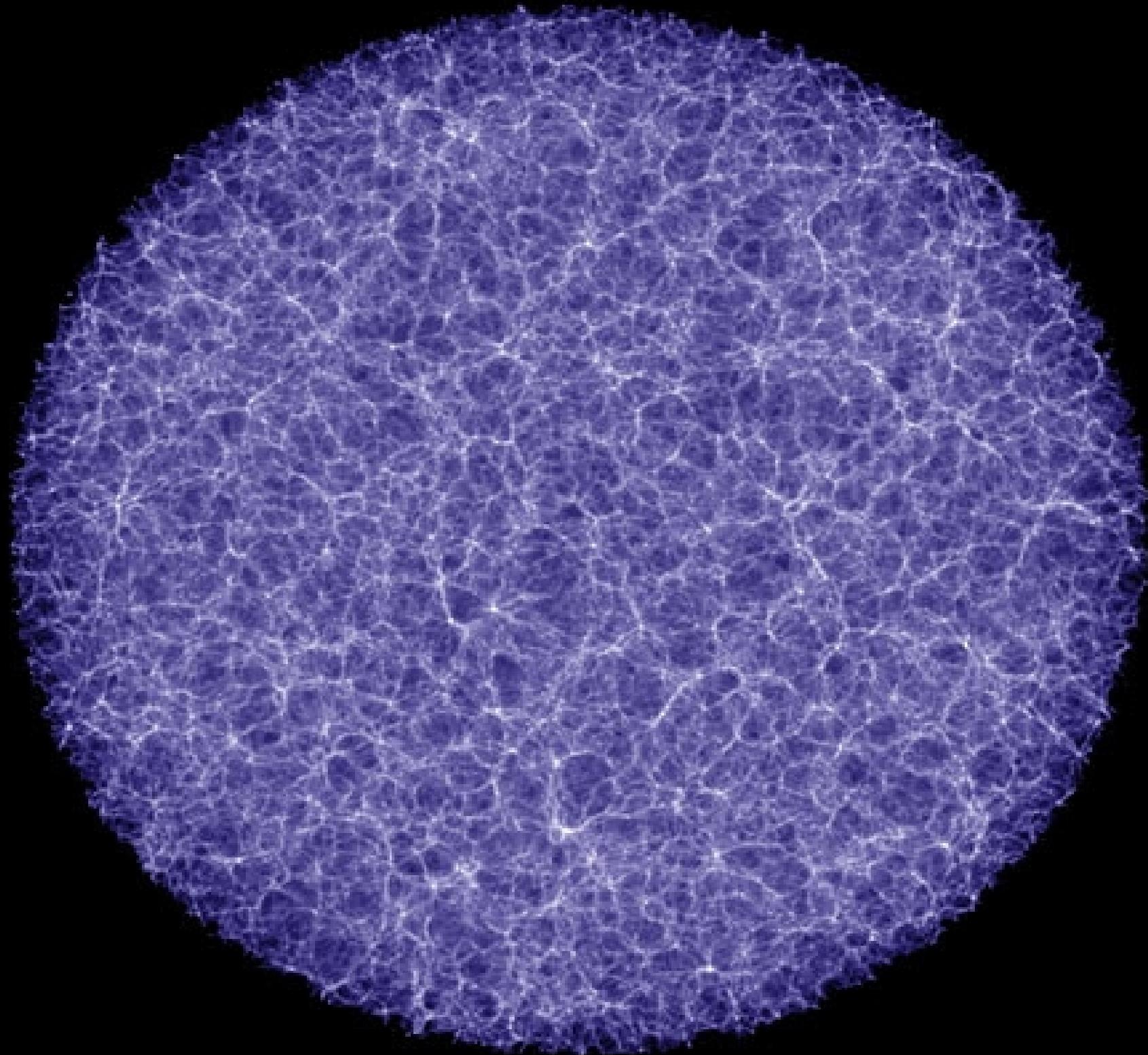


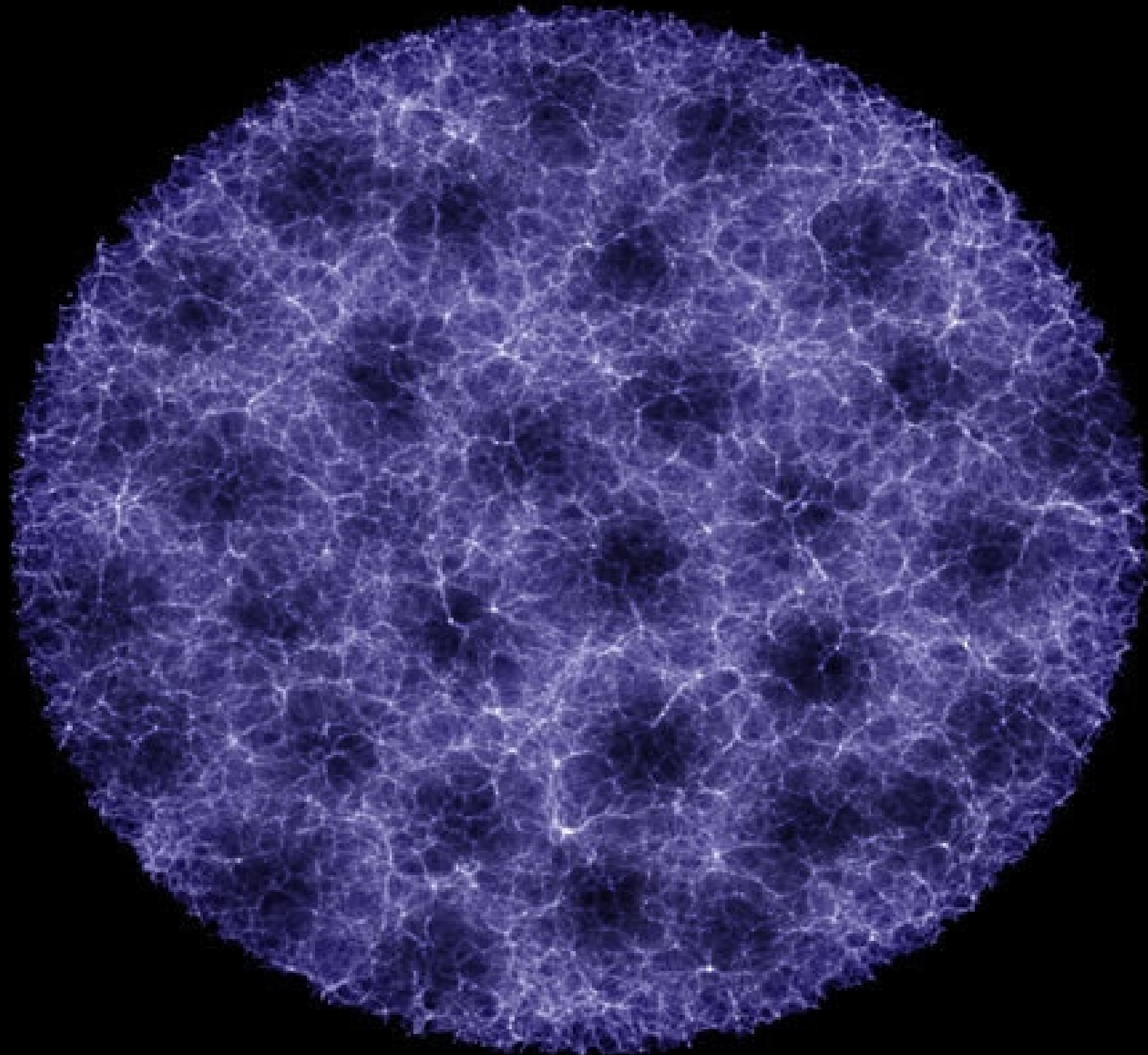
(a) Domain range $r_D = 250$



(b) Exponent $a = 1$

Figure 2.2: Evolution of q_D in the models with $k(r) = -1/(1+r^a)$, plotted against t/t_{in} for (a) three values of a with $r_D = 250$, and (b) three values of r_D with $a = 1$.





Größten beobachtbaren Strukturen

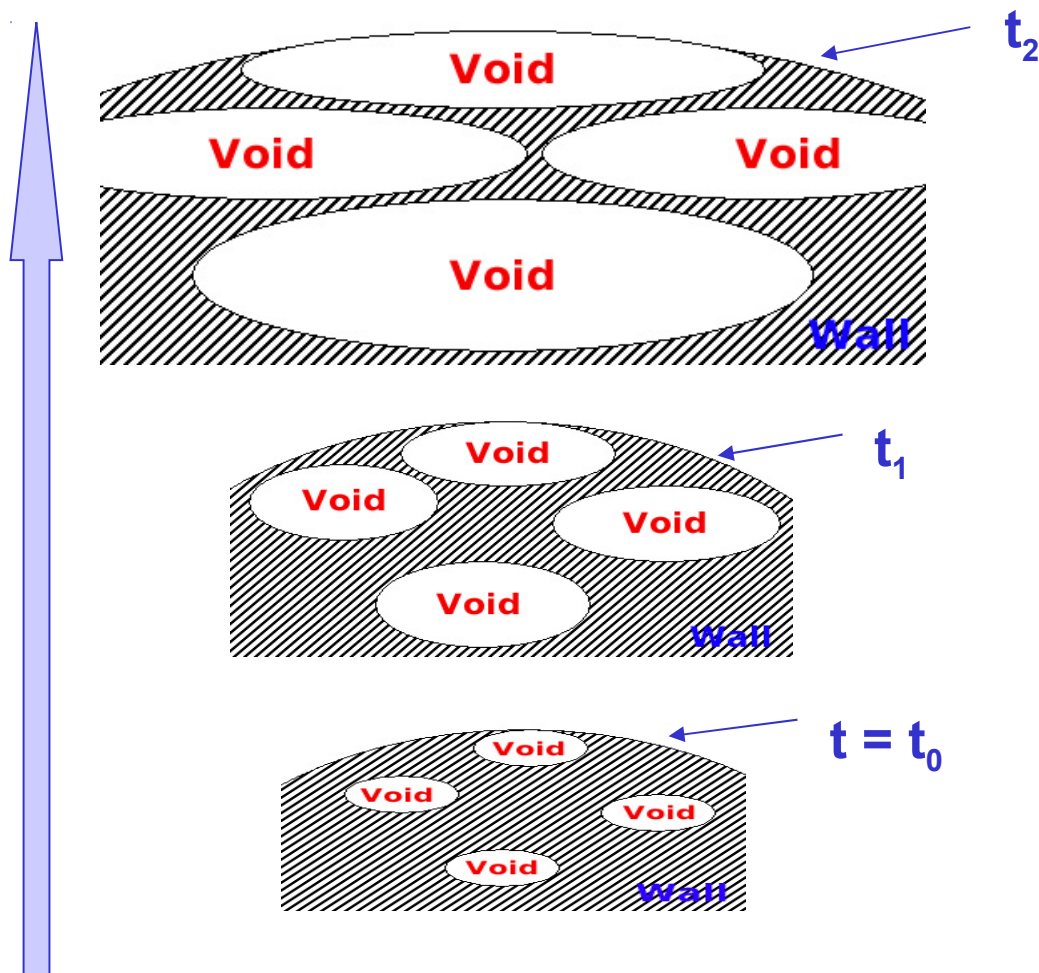
The Great Wall

- $\sim 2 \cdot 10^8$ Lichtjahre entfernt
- Durchmesser $\sim 5 \cdot 10^8$ Lichtjahre



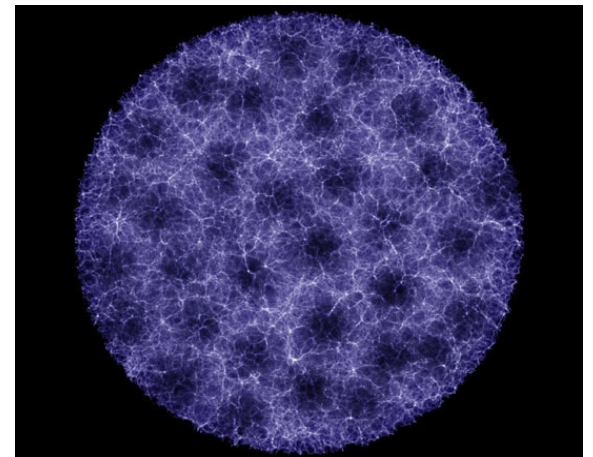
Struktur oder Dunkle Energie???

Annahme: Das Universum lässt sich als 2-Phasen-Universum beschreiben



Supernovae Typ-Ia in einem 2-Phasen-Universum

- Überdichte Regionen expandieren langsamer als unterdichte Regionen
- SNela, die in einer überdichten Region explodieren werden dort weniger rot verschoben
- Expansionsrate nimmt zum Zentrum des Voids hin zu (Dichte nimmt ab)
- Rotverschiebung ist geringer als in gleichmäßig expandierendem Universum, mit unserer lokalen Expansionsrate
- SNela erscheinen weiter weg
→ Beschleunigte Expansion



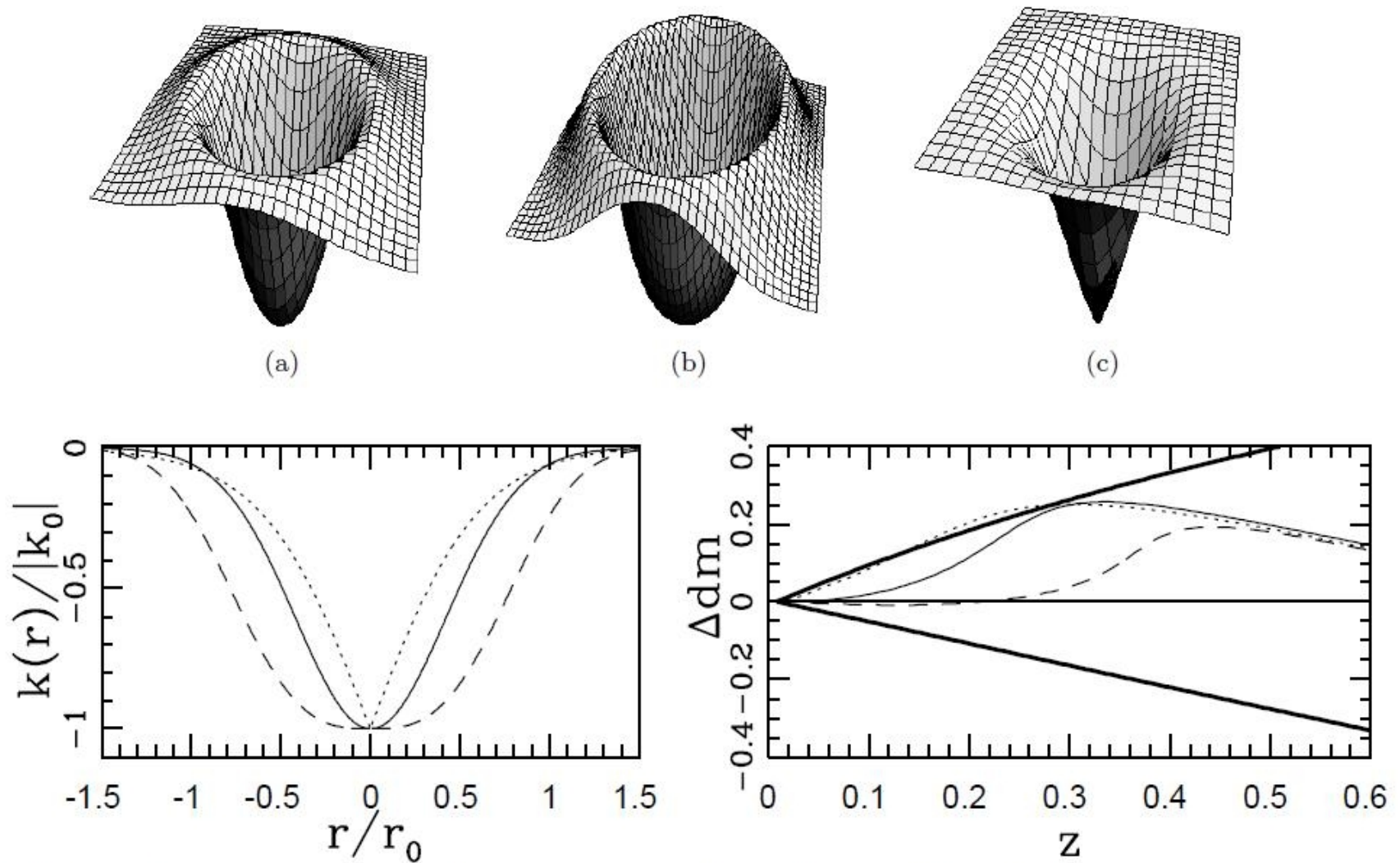


FIG. 1: Some representative forms for the curvature function, $k(r)$, and the corresponding distance moduli, normalised to an empty Milne cosmology, Δdm . Void (a) is a Gaussian in r (with FWHM r_0), void (b) is a $k \propto \exp\{-c|r|^3\}$, and void (c) is $k \propto \{1 - |\tanh(r)|\}$, all normalised to the curvature minimum k_0 . The three diagrams on top indicate the spatial distribution of energy density in the three voids at some sample time (solid line for void (a), dashed line for void (b) and dotted line for void (c)). The ascending thick solid line on the right hand plot corresponds to a universe containing dark energy only (de Sitter space), and the descending one to a flat universe containing only dust (an Einstein-de Sitter universe).

Clifton et al. (2008)

Möglichkeiten zur Überprüfung

- Dichte-Profil → Kein „Hexenhut“
- Weitere SNela-Daten
- Galaxienhaufen als „Spiegel“ der CMB-Strahlung

$$\bar{\Omega}_M = \frac{8\pi G \bar{\rho}_{M0} \bar{a}_0^3}{3\bar{H}^2 \bar{a}^3}; \quad \bar{\Omega}_k = \frac{-k_v f_{vi}^{2/3} f_v^{1/3}}{\bar{a}^2 \bar{H}^2}; \quad \bar{\Omega}_Q = \frac{-\dot{f}_v^2}{9f_v(1-f_v)\bar{H}^2}$$

$$f_v = \frac{3f_{v0}\bar{H}_0 t}{3f_{v0}\bar{H}_0 t + (1-f_{v0})(2+f_{v0})}$$

$$q = \frac{-(1-f_v)(8f_v^3 + 39f_v^2 - 12f_v - 8)}{(4 + f_v + 4f_v^2)^2}$$

Vorzeichenwechsel bei $f_c=0.57$

Wichtige Fragen

- Ist das Universum wirklich homogen?
- Ist die Masse des Universum konstant?
- Ist die Vakuum-Energie-Dichte konstant?
- Wenn nicht, wie laeuft dann die Strukturbildung ab?
- ...

Vielen Dank!!!