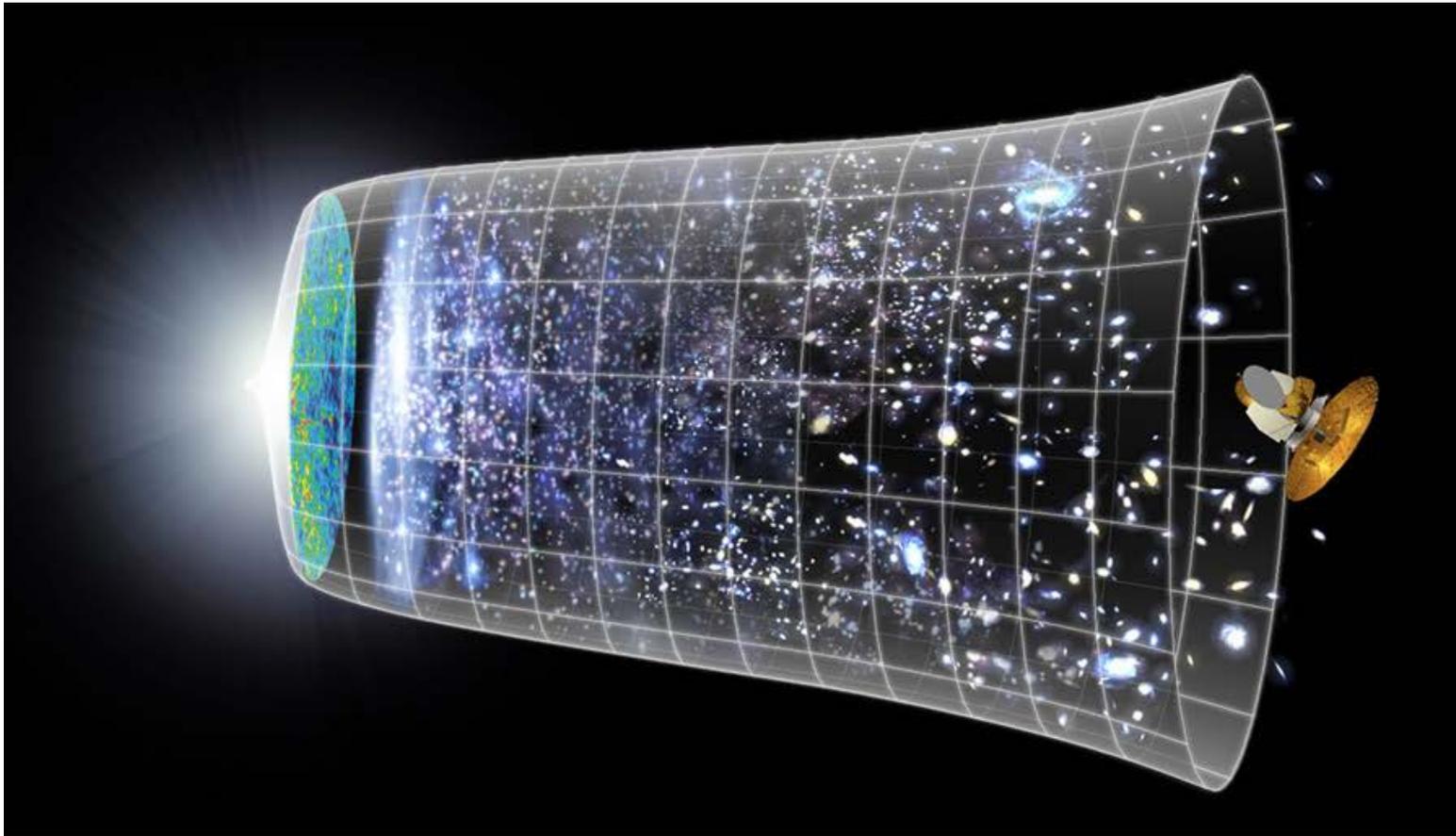


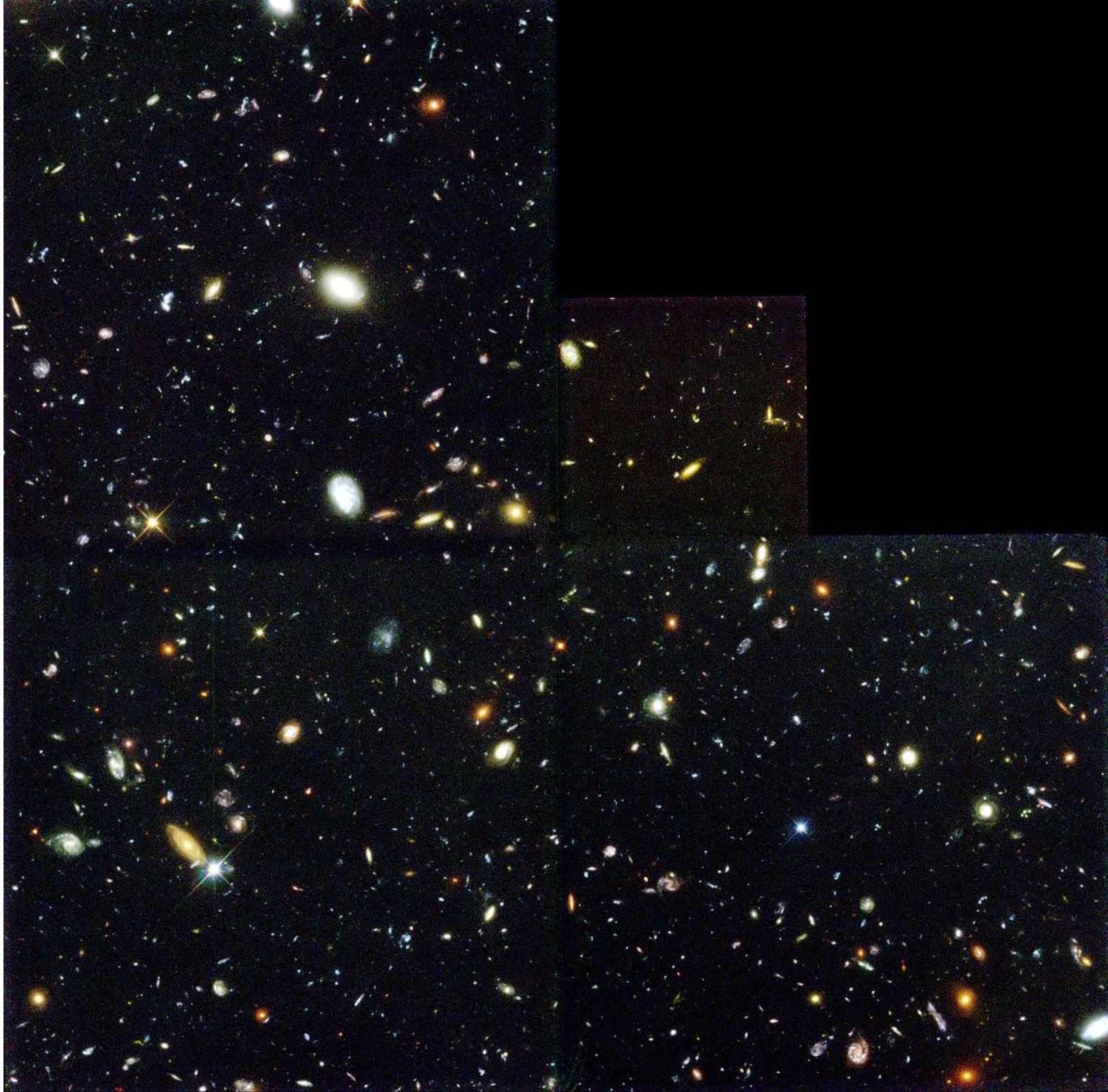
Kosmologie und Strukturbildung



Matthias Steinmetz (AIP)

Beobachtete Fakten über das Universum

1. Der Nachthimmel ist dunkel



Beobachtete Fakten über das Universum

1. Der Nachthimmel ist dunkel
2. Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beschreibt Gravitation auf Skalen \approx Ausdehnung des Sonnensystems
3. Das Universum ist
 - isotrop auf den größten Skalen (sehr präzise).
 - homogen: kann gezeigt werden, aber wenig zwingend (Genauigkeit etwa 10%)
 - zu Einsteins Zeiten (1915) waren beide Annahmen ohne jede empirische Evidenz

Homogenität und Isotropie

- Homogenität: Das Universum stellt sich einem Beobachter unabhängig von dem Punkt im Raum, an dem er sich befindet, immer gleich dar. (kopernikanisches Prinzip)
- Isotropie: Das Universum stellt sich einem Beobachter unabhängig von der Beobachtungsrichtung im Raum immer gleich dar
- Topologie \Rightarrow Homogenität ist äquivalent zur Isotropie an jedem Punkt
- Für hinreichend reguläre Räume (keine „Löcher“ o.ä.) Homogenität ist äquivalent zur Isotropie um zwei disjunkte Punkt

Das Universum ist auf großen Skalen isotrop

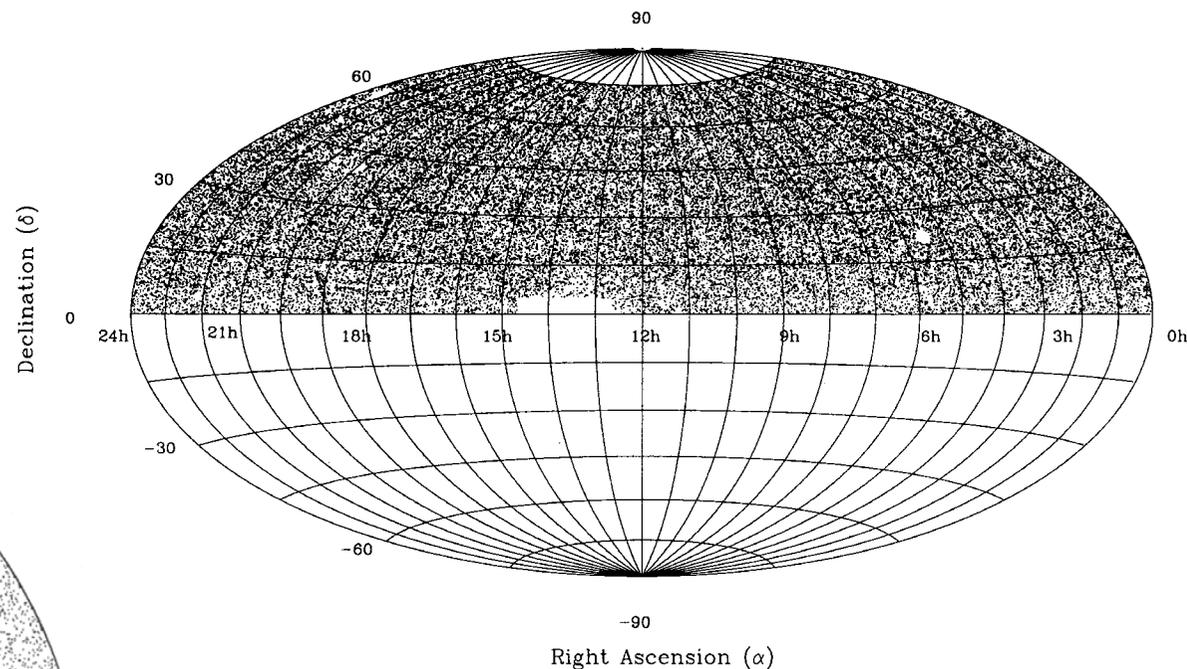
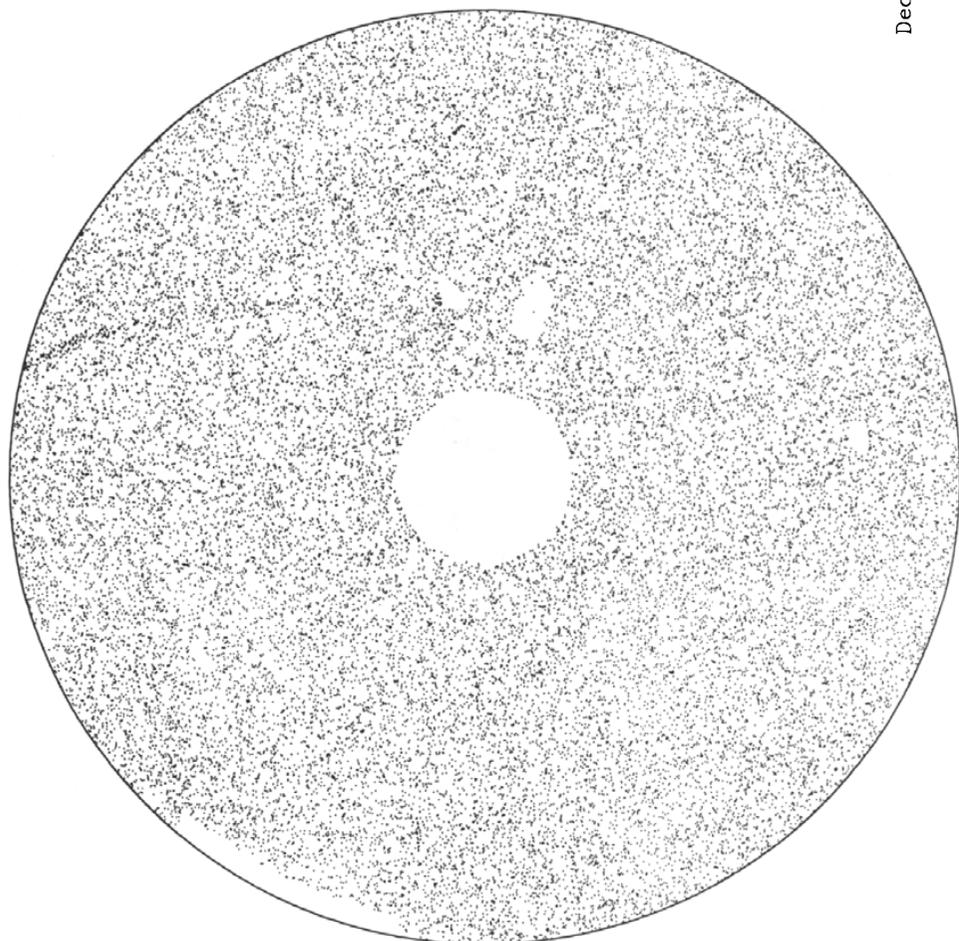


FIG. 1.—1987 Green Bank 4.85 GHz catalog containing 54,579 sources with angular sizes $\leq 10'.5$ and $S \geq 25$ mJy

Kooiman et al, 1995

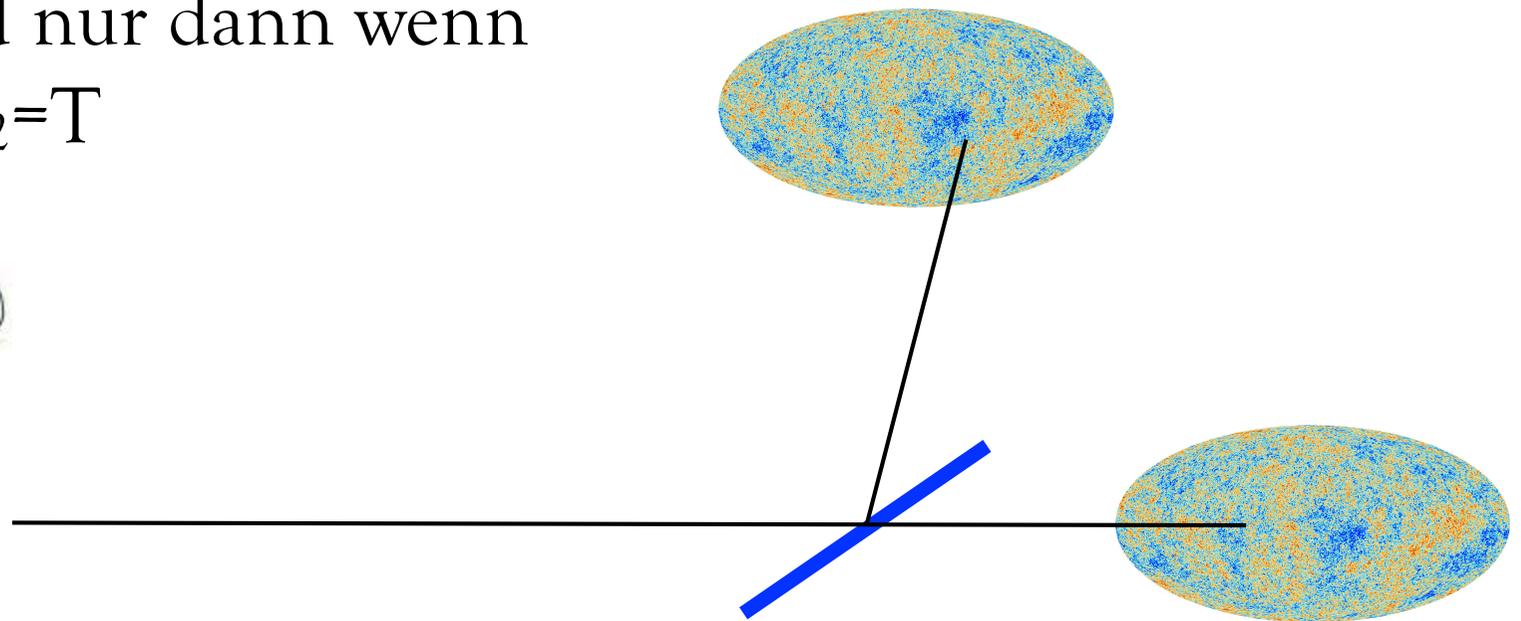
Figure 3.10. Angular distribution of the $\sim 31,000$ brightest 6 cm radio sources (Gregory and Condon 1991.)

Das Universum ist auf großen Skalen homogen

- Über Isotropie um einen anderen Punkt, betrachte Intensität des kombinierten Signals:

$$I_\nu d\nu \propto \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT_1}} - 1} + \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT_2}} - 1} \propto \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

dann und nur dann wenn
 $T_1 = T_2 = T$



Das kosmologische Prinzip

- Kosmologisches Prinzip: Homogenität und Isotropie
- perfektes kosmologisches Prinzip: Homogenität in Zeit und Raum sowie Isotropie

Beobachtete Fakten über das Universum

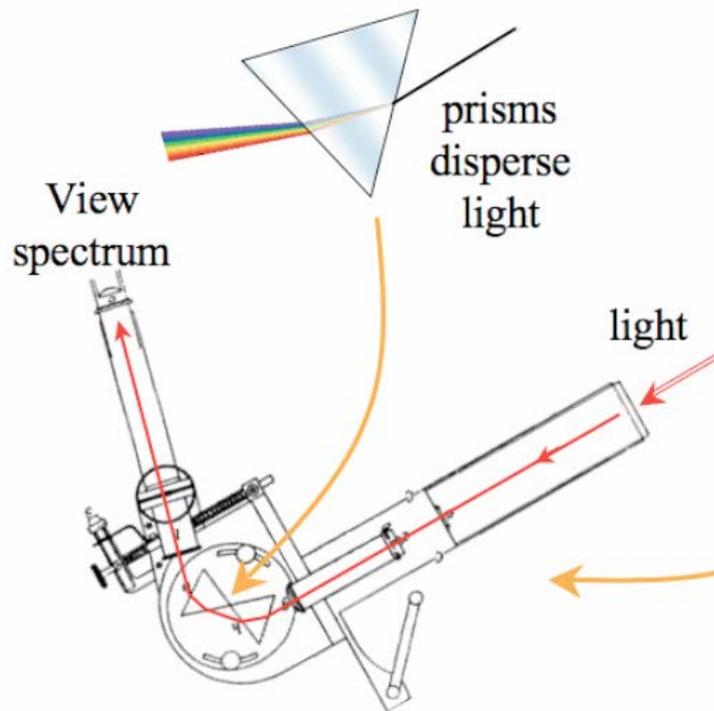
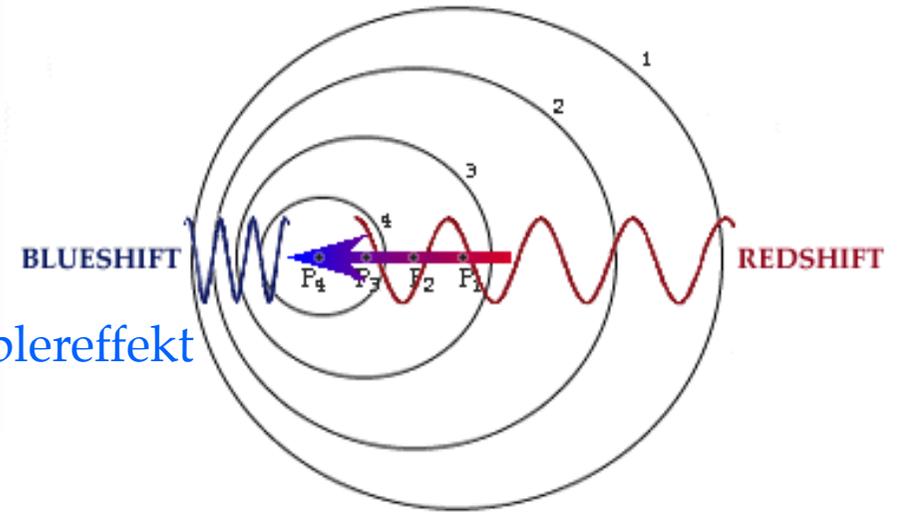
1. Der Nachthimmel ist dunkel
2. Allgemeine Relativitätstheorie (ART) beschreibt Gravitation auf Skalen \approx Ausdehnung des Sonnensystems
3. Das Universum ist
 - isotrop auf den größten Skalen (sehr präzise).
 - homogen: kann gezeigt werden, aber wenig zwingend (Genauigkeit etwa 10%)
 - zu Einsteins Zeiten (1915) waren beide Annahmen ohne jede empirische Evidenz
4. Entfernte Galaxien bewegen sich schneller von uns weg als nahe $\Rightarrow v = H r$



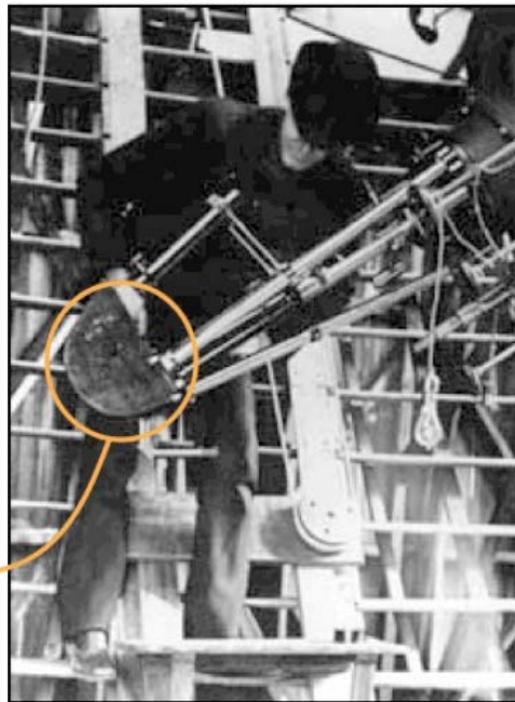
Messung von Rotverschiebungen

V. Slipher 1912 bei der Messung von Rotverschiebungen

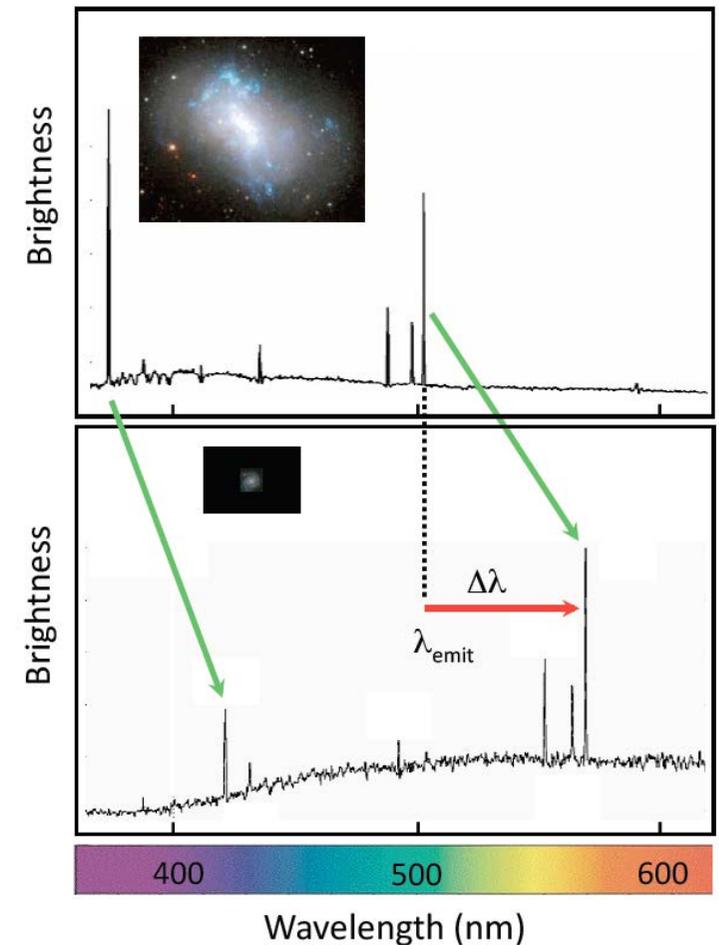
Dopplereffekt



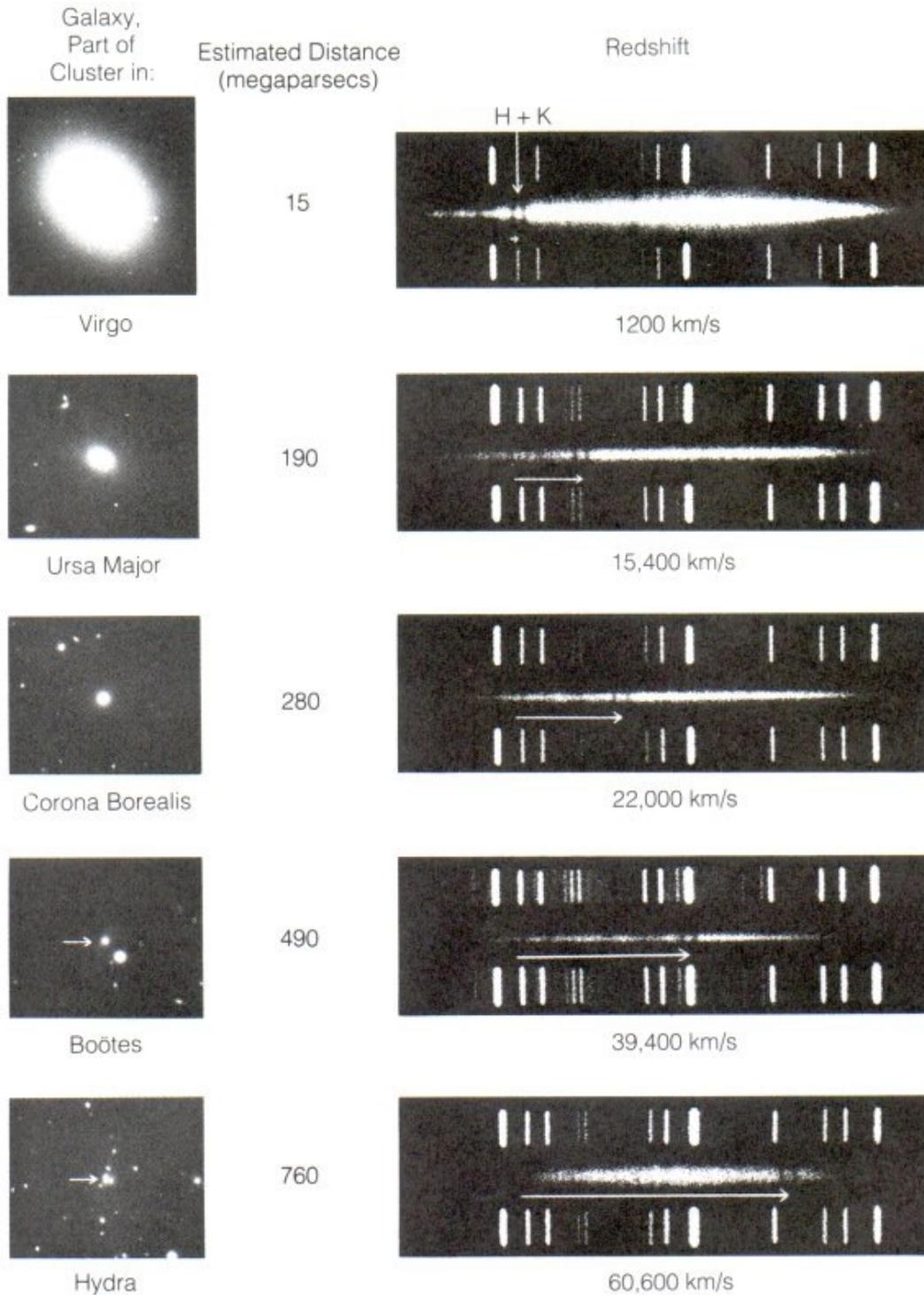
A two-prism spectrograph



Vesto Slipher
(1875-1969)



Relation Between Redshift and Distance for Remote Galaxies



Entfernung -
Radialgeschwindigkeit
Proportionalität

Palomar / Caltech

Original (Hubble 1929)

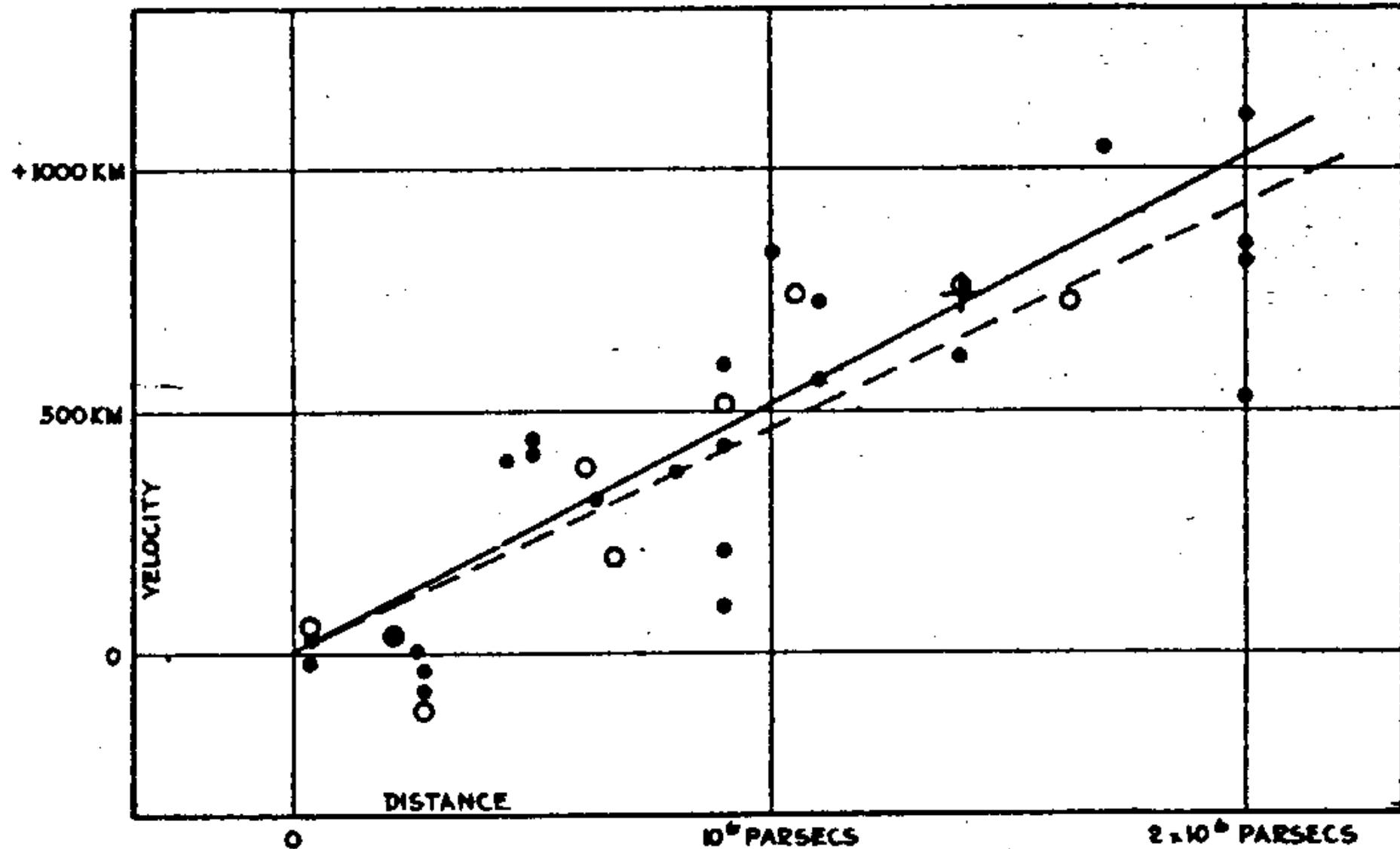
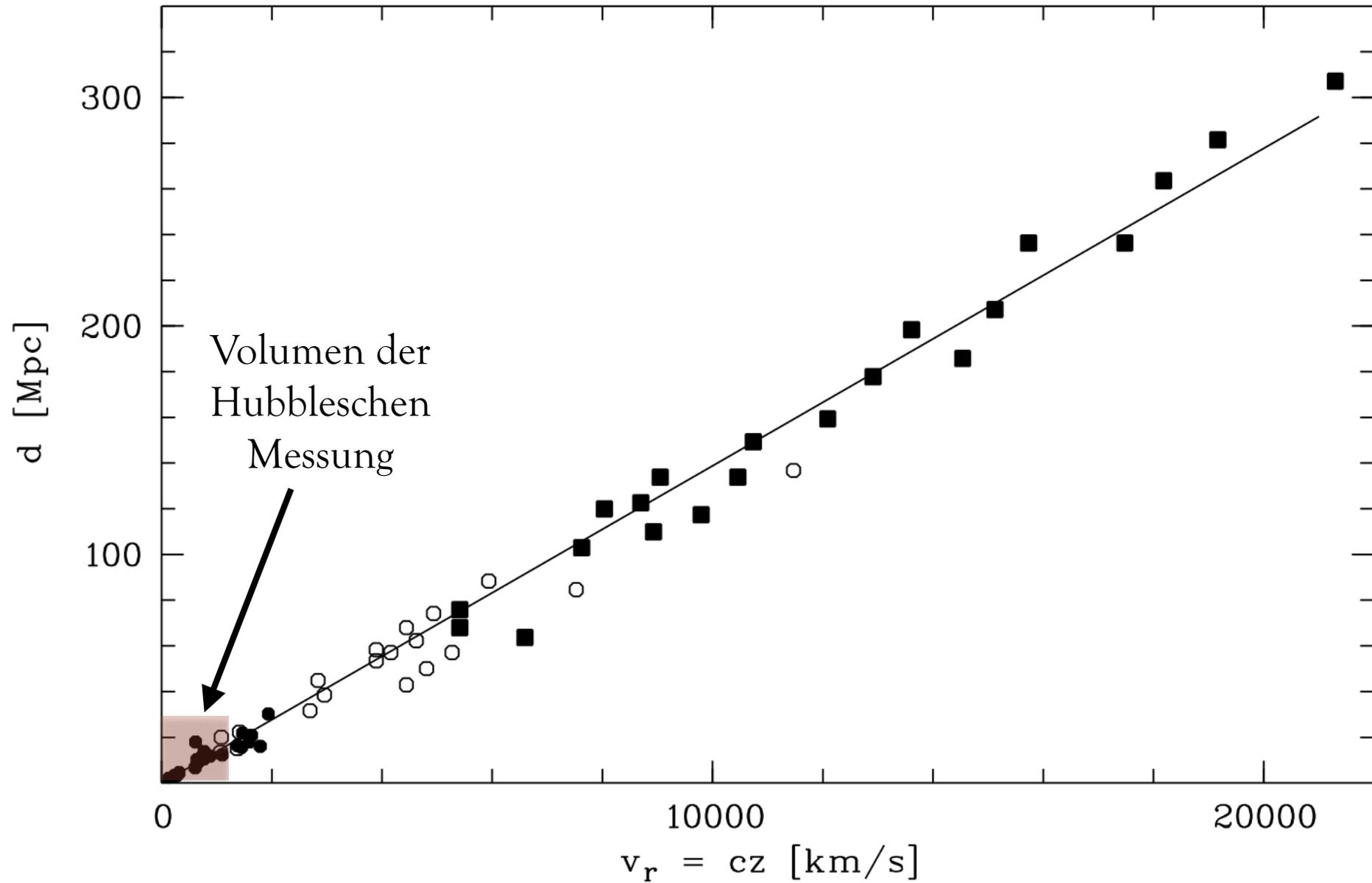


FIGURE 1

Hubble-Gesetz mit modernen Messungen



Hauptergebnisse

- Die meisten Galaxien bewegen sich von uns weg
- Die Fluchtgeschwindigkeit v ist um so größer, je weiter die Galaxie entfernt ist. Die Relation zwischen der Fluchtgeschwindigkeit v und Abstand d ist linear:

$$v = H_0 \times d$$

- Hubbles Messung der Konstante H_0 :

$$H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$$

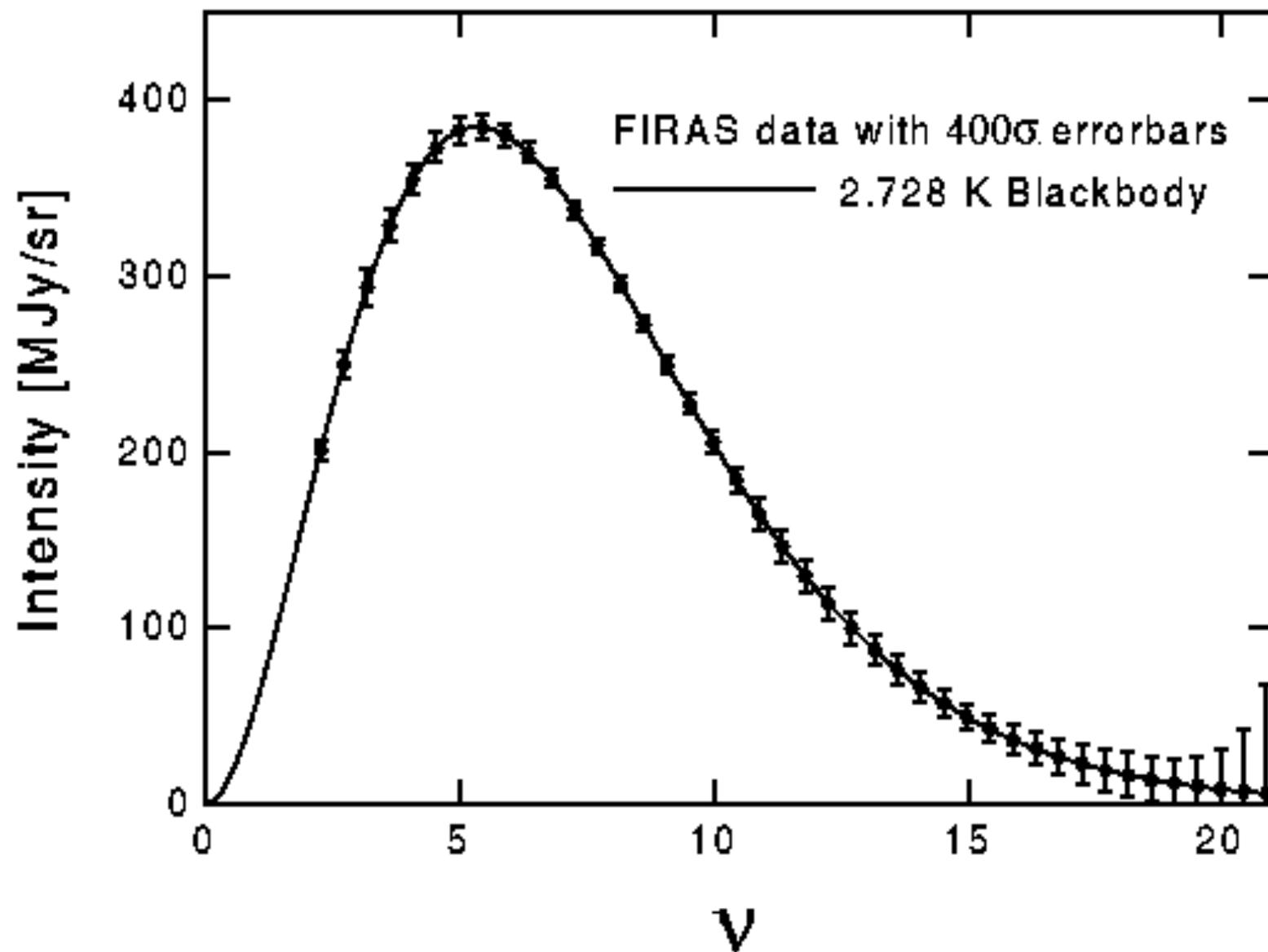
- Heutiger Wert:

$$H_0 = 71 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$$

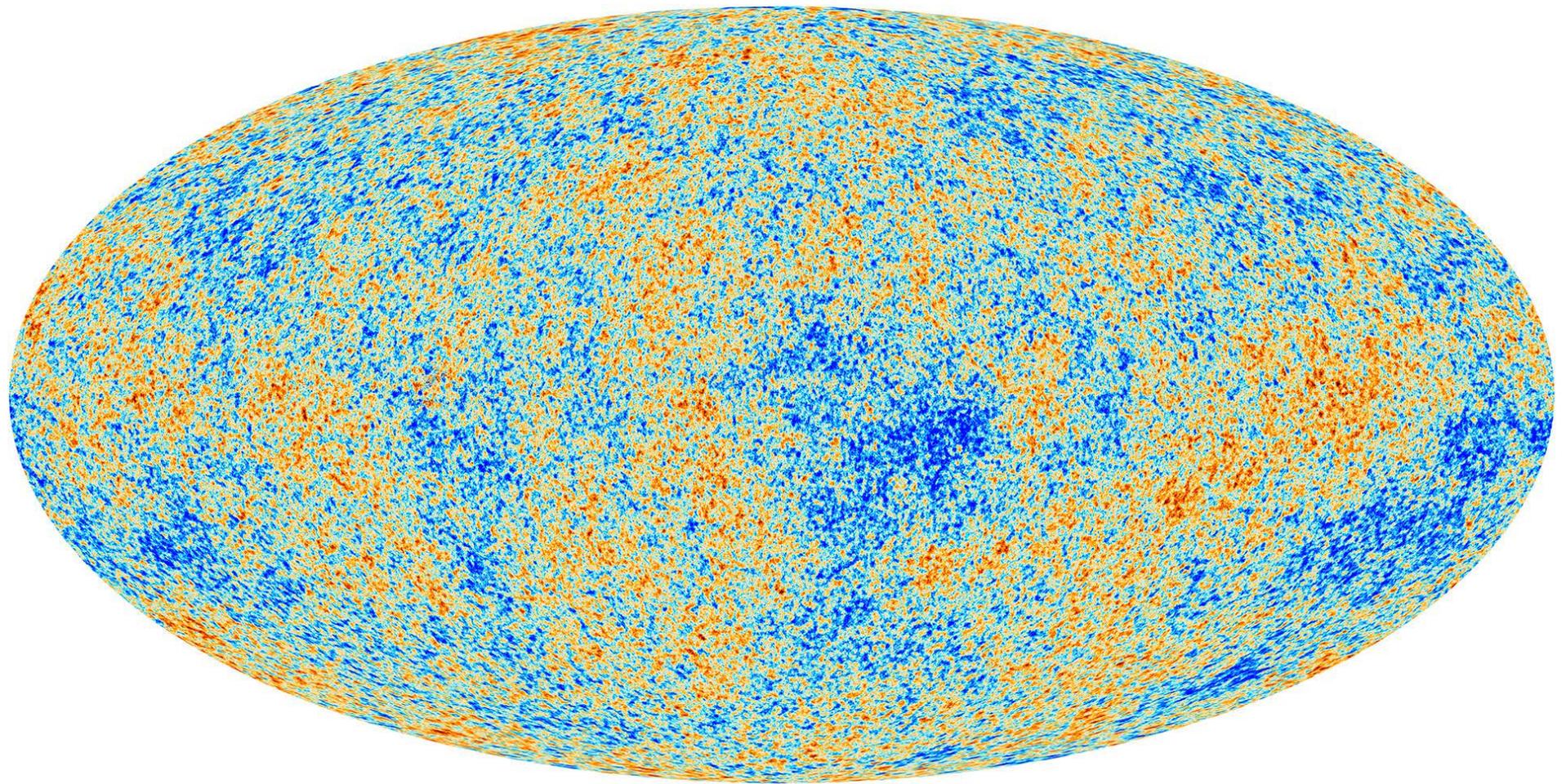
Beobachtete Fakten über das Universum

5. Es gibt eine nahezu perfekt isotrope kosmische Hintergrundstrahlung mit der Charakteristik eines schwarzen Körpers ($T=2.7\text{K}$, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$)

Spektrum der kosmischen Hintergrundstrahlung

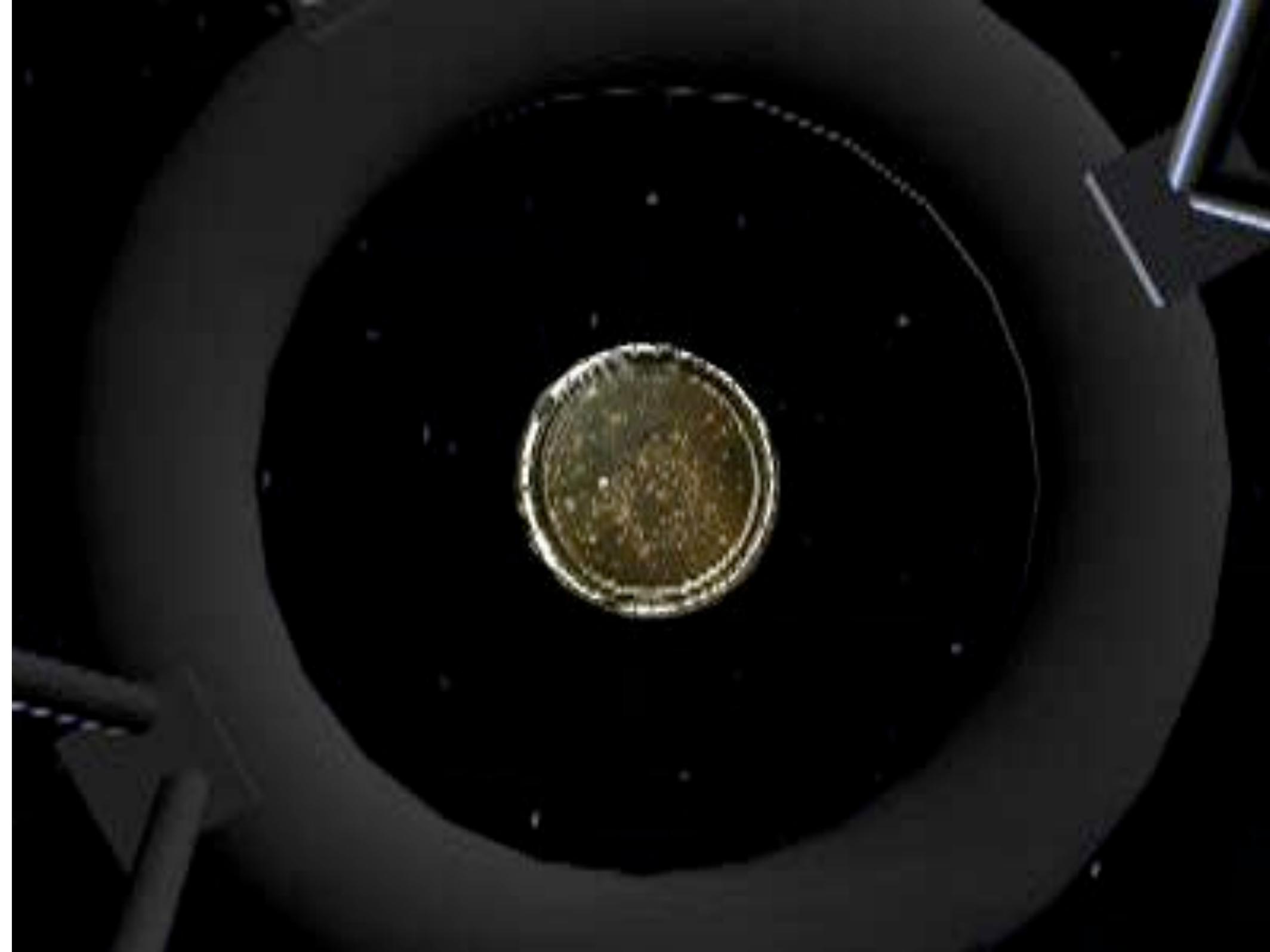


Karte der kosmischen Hintergrundstrahlung (Planck)



Beobachtete Fakten über das Universum

5. Es gibt eine nahezu perfekt isotrope kosmische Hintergrundstrahlung mit der Charakteristik eines schwarzen Körpers ($T=2.7\text{K}$, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$)
6. Das heutige Universum zeigt Strukturen (Sterne, Galaxien, großräumige Strukturen)

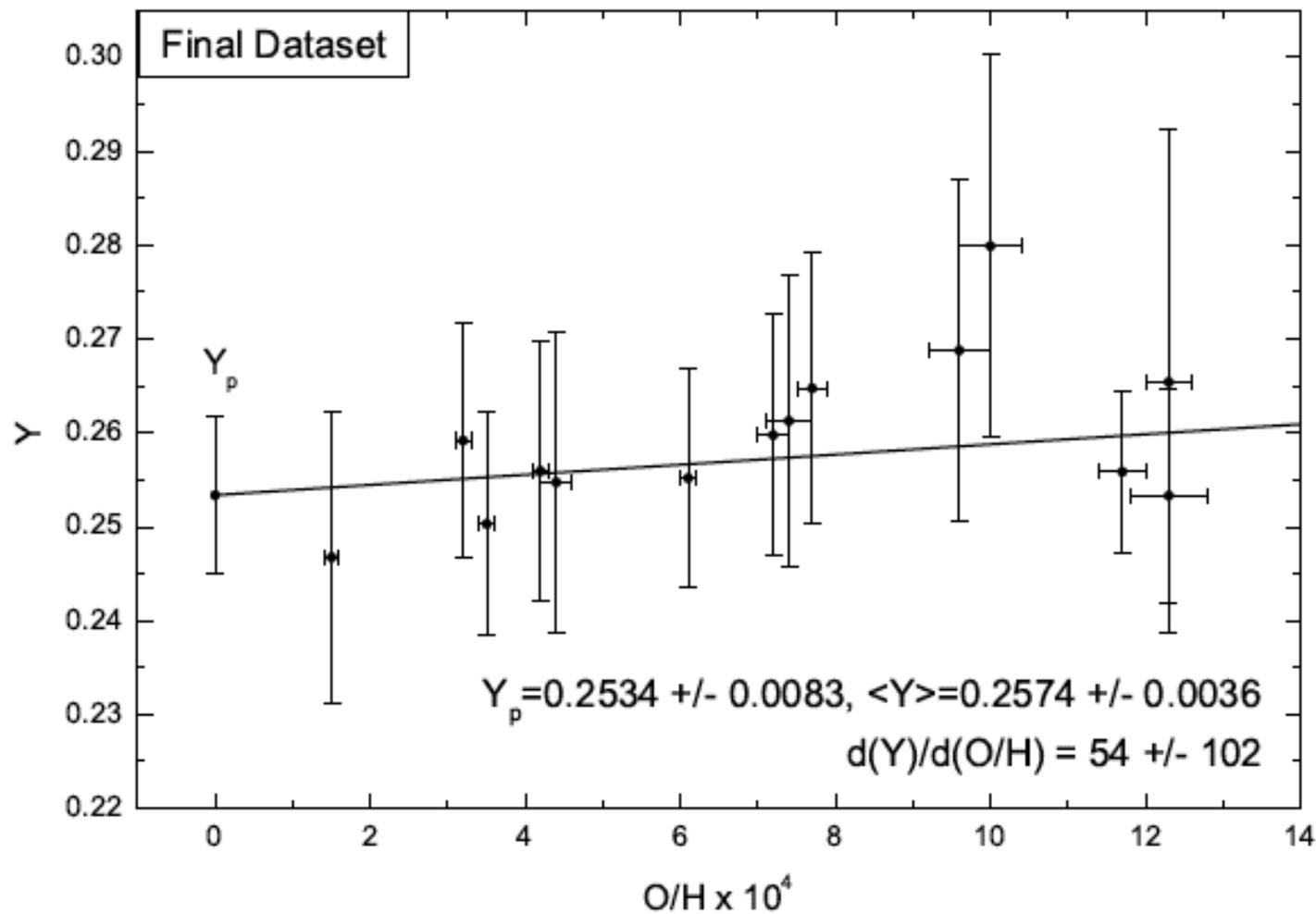


Beobachtete Fakten über das Universum

5. Es gibt eine nahezu perfekt isotrope kosmische Hintergrundstrahlung mit der Charakteristik eines schwarzen Körpers ($T=2.7\text{K}$, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$)
6. Das heutige Universum zeigt Strukturen (Sterne, Galaxien, großräumige Strukturen)
7. He-Häufigkeit in Sternen niedriger Metallhäufigkeit: 25%, Deuterium: 10^{-5}

Helium im Vergleich zu Sauerstoff

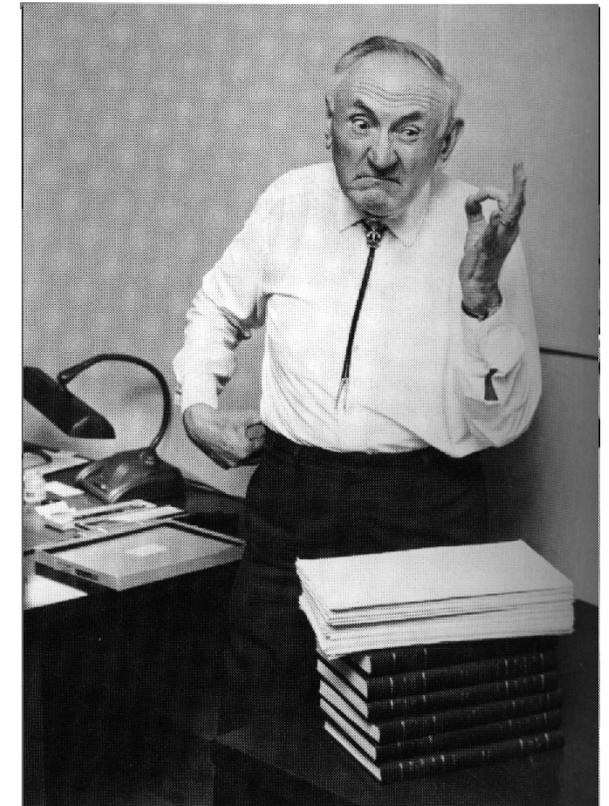
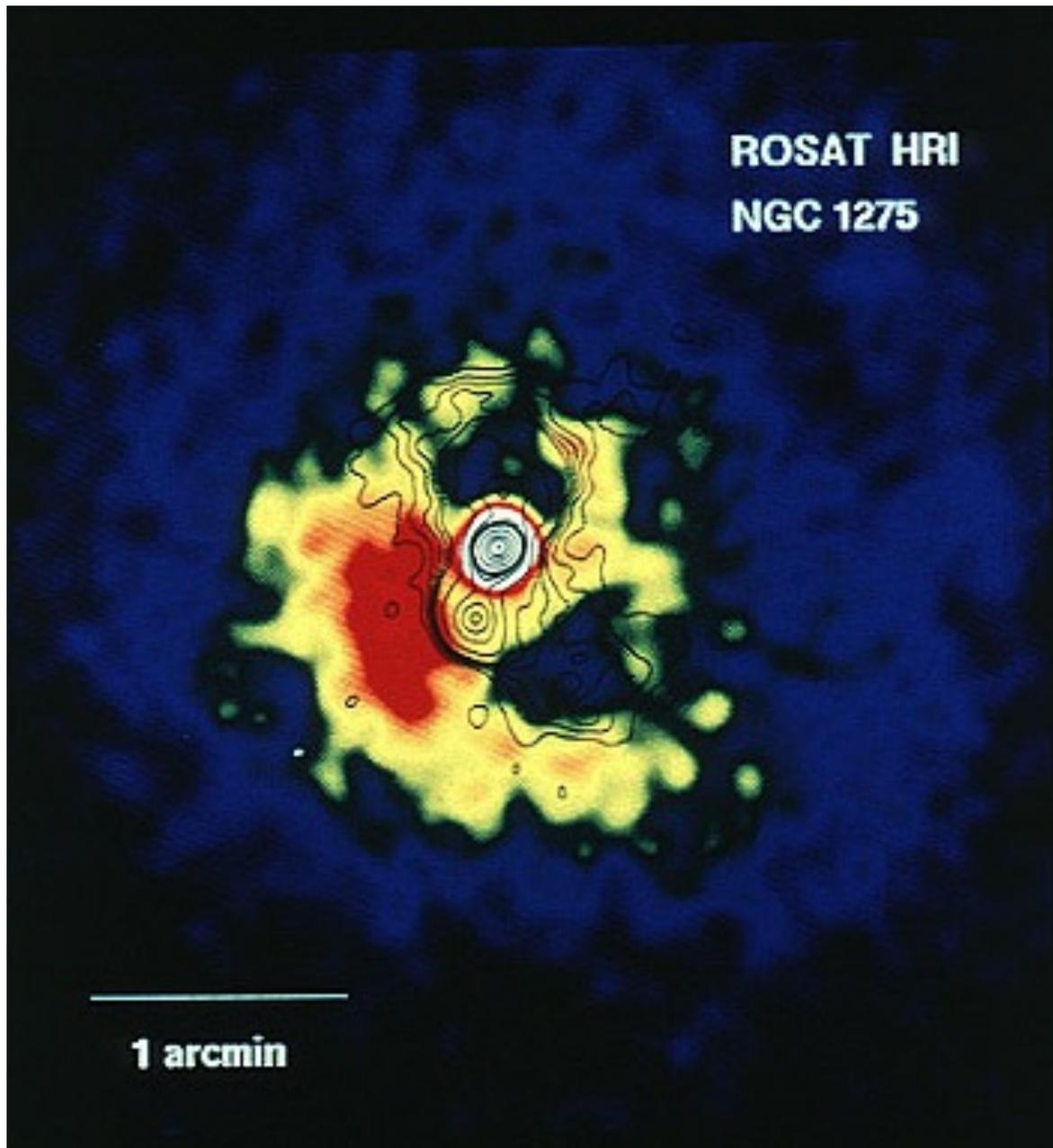
Selbst sehr metallarme Sterne haben etwa 25% Helium. „Urmaterie“: 75% H, 25% He



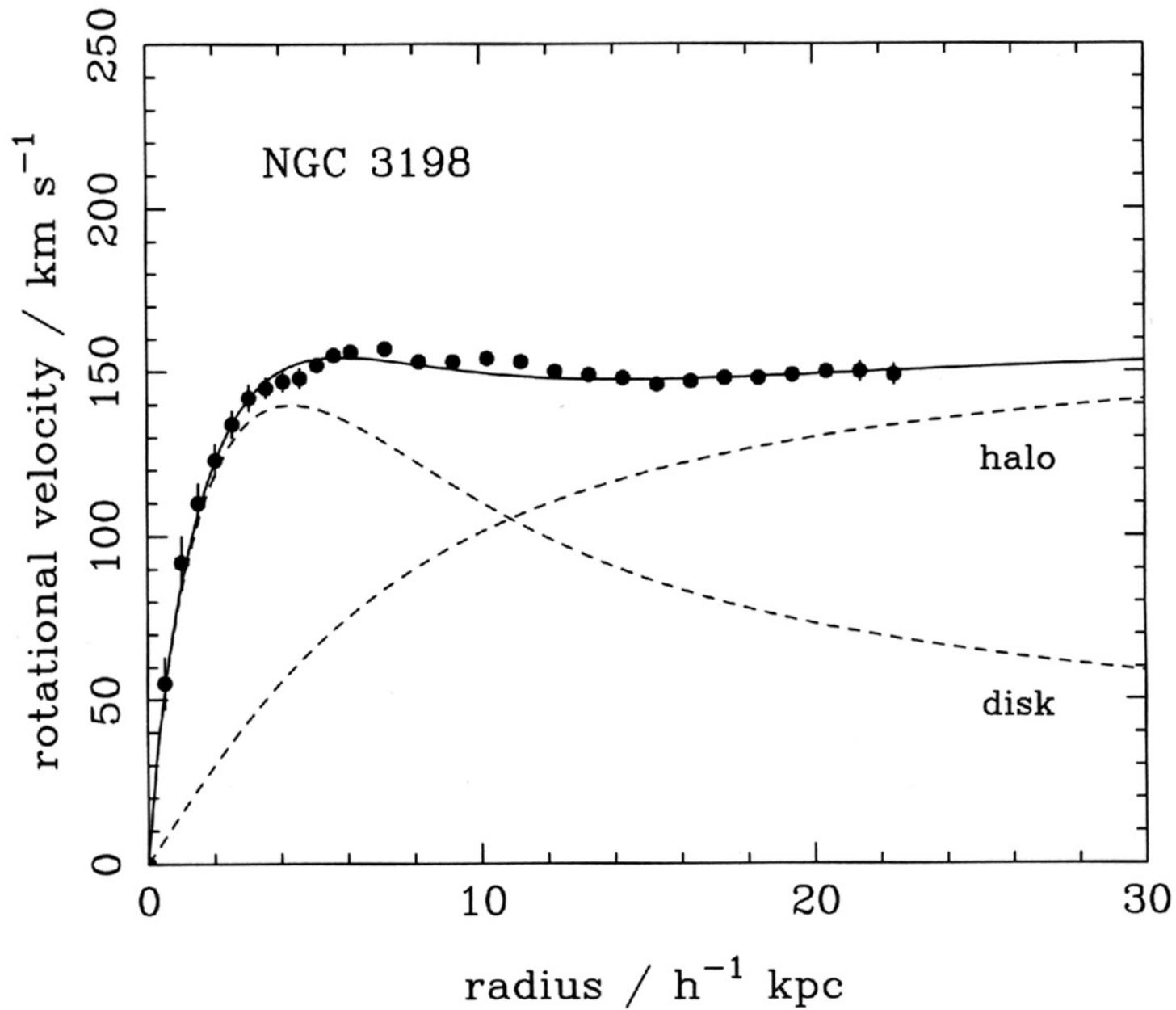
Beobachtete Fakten über das Universum

5. Es gibt eine nahezu perfekt isotrope kosmische Hintergrundstrahlung mit der Charakteristik eines schwarzen Körpers ($T=2.7\text{K}$, $\Delta T/T \approx 10^{-5}$)
6. Das heutige Universum zeigt Strukturen (Sterne, Galaxien, großräumige Strukturen)
7. He-Häufigkeit in Sternen niedriger
Metallhäufigkeit: 25%, Deuterium: 10^{-5}
8. Dynamik der Galaxien und Galaxienhaufen: der Großteil der Masse ist dunkel

Indirekt messbare Masse - Röntgencluster



Indirekt messbare Masse - Rotationskurven



Indirekt messbare Masse - Gravitationslinsen



Unmittelbare Schlussfolgerungen

- Dunkler Nachthimmel verbietet ein zeitlich und räumlich unendliches, homogenes und isotropes Universum (Olbersches Paradoxon)

Das Paradoxon von Olbers (1826)

- Warum ist der Nachthimmel dunkel?
- Wenn
 - (i) das Universum grenzenlos ist
 - (ii) wir nicht an einem speziellen Ort sind
- dann müssten unendlich viele Sterne am Himmel eine unendlich hohe Helligkeit erzeugen
- Modifikation: Sterne haben einen endlichen Radius/
Winkeldurchmesser
 - aber jeder Punkt des Himmels wäre durch einen Stern abgedeckt.
Himmel so hell wie die durchschnittliche Sternoberfläche
- Absorption (Planeten, Staub etc) hilft nicht, da remittiert,
Energieerhaltung im thermischen Gleichgewicht.

Olbers Paradoxon

- Auf Detektor der Fläche A empfangenes Licht einer Quelle der Leuchtkraft L in der Entfernung r :

$$F = \frac{L A}{4\pi r^2}$$

- Homogenität: Zahl der Quellen pro Volumen: n
- Zahl der Quellen dN im Volumen dV gebende durch Raumwinkel $d\Omega$ und Abstand d

$$dN = n r^2 dr d\Omega$$

- Auf dem Detektor empfangenes Licht $d\Phi$

$$d\Phi = F dN = n \frac{L A}{4\pi} dr d\Omega$$

- Integriert über alle Abstände

$$\Phi = \int_0^{\infty} n \frac{L A}{4\pi} dr d\Omega = n L A \int_0^{\infty} dr \rightarrow \infty$$

Olbers Paradoxon

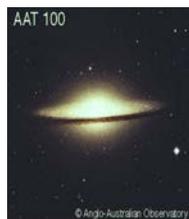
- Wenn die Schlussfolgerung korrekt, dann muss das Problem in den Prämissen liegen
- Prämisse (ii) ist Teil des kosmologischen Prinzips und Grundlage der modernen Kosmologie
- Folglich kann Prämisse (i) nicht erfüllt sein, das Universum ist nicht unbegrenzt. Genauer: das endliche Alter (Urknall-Modell) bedeutet eine zeitliche und (über die begrenzte Lichtgeschwindigkeit) auch räumliche Begrenzung
- Auflösung des Paradox, statt Integration $r \rightarrow \infty$ nur bis $r = c \cdot t_{\text{Univ}}$.
- Hubble Deep Field: jede Menge „Leerraum“ zwischen den Galaxien

Unmittelbare Schlussfolgerungen

- Dunkler Nachthimmel verbietet ein zeitlich und räumlich unendliches, homogenes und isotropes Universum (Olbersche Paradoxon)
- Hubble-Gesetz: Expansion des Raums



Anfangsabstand: 1 LE
 Endabstand: 2 LE
 Fluchtgeschw.: 1 LU/TU



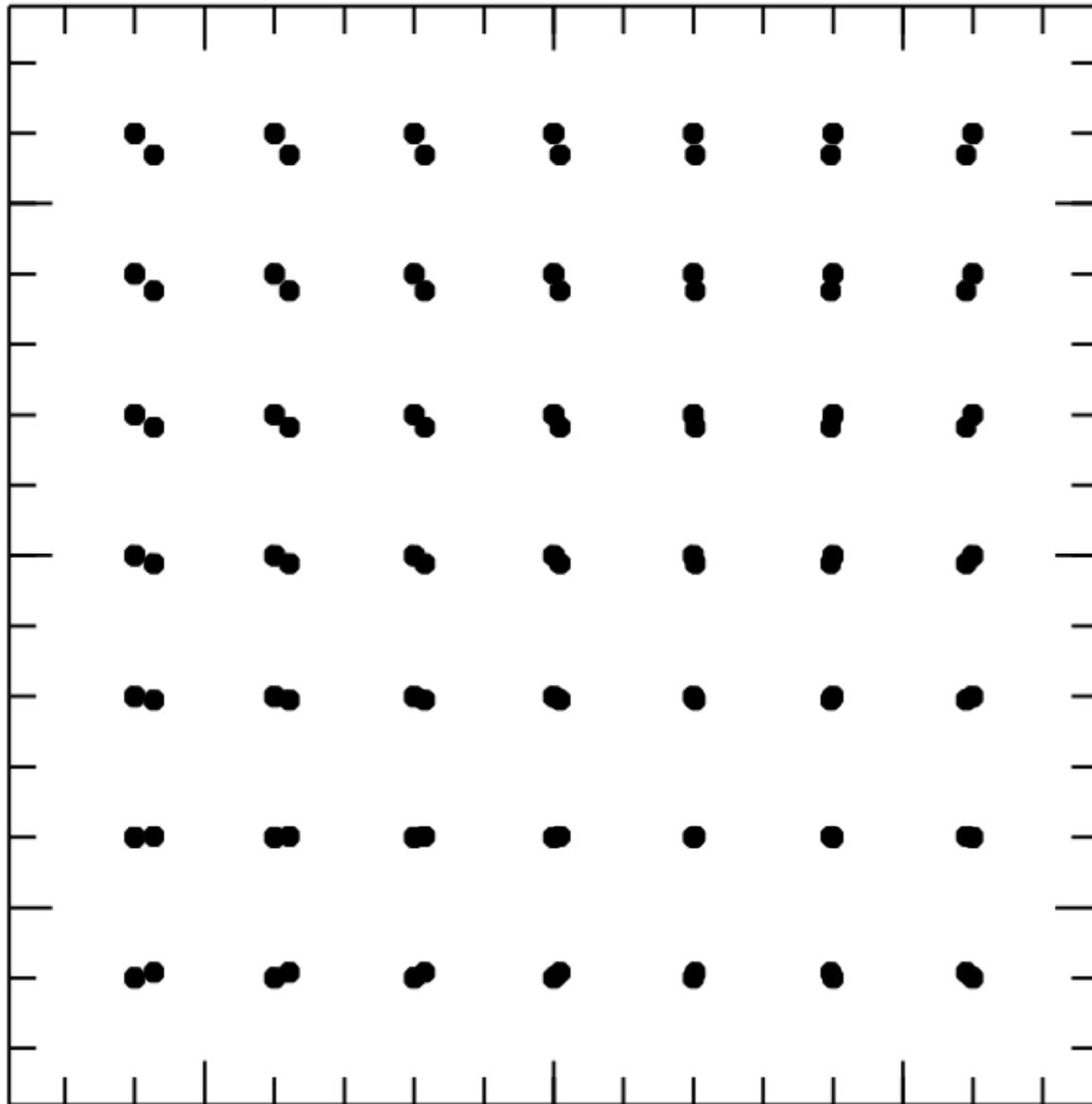
Anfangsabstand: 2 LE
 Endabstand: 4 LE
 Fluchtgeschw.: 2 LU/TU

} $\Rightarrow v \propto r$

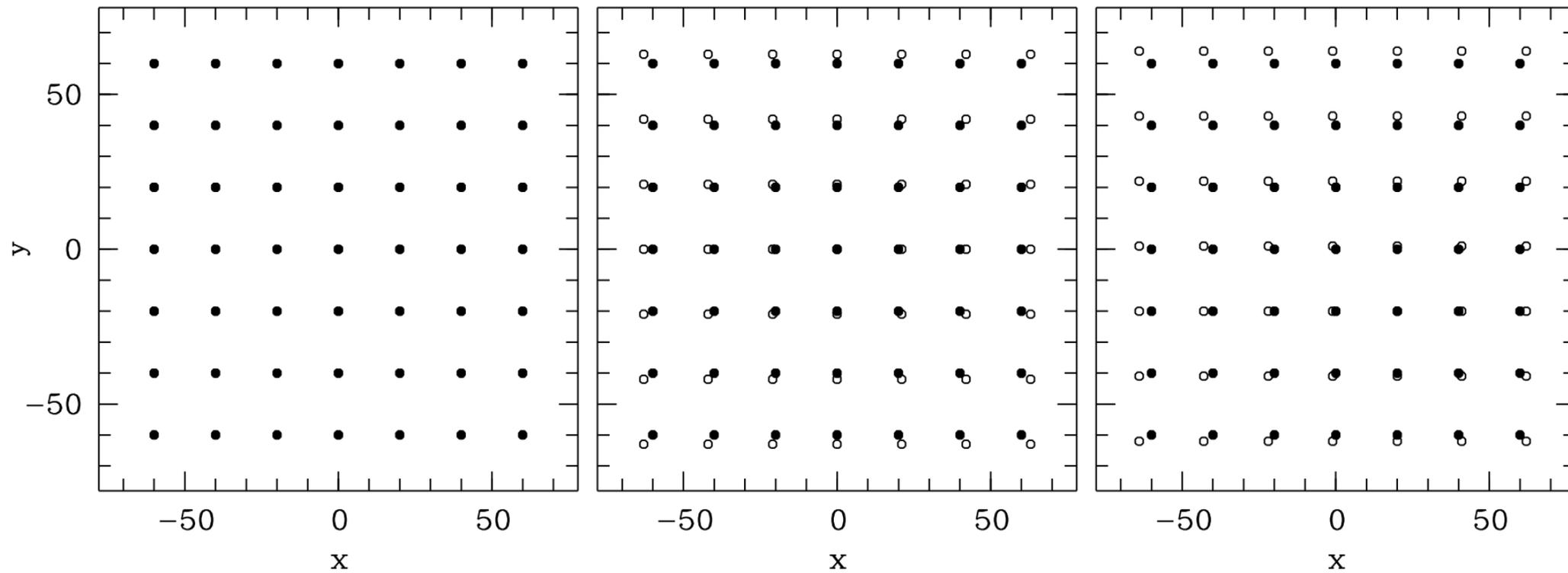
Wenn alle Galaxien sich von uns weg bewegen, bedeutet das nicht, dass wir im Zentrum des Weltalls sind ?

Nicht notwendigerweise, denn es kann auch bedeuten, dass das Universum sich ausdehnt und wir (sowie jeder andere Beobachter) keinen besonderen Platz einnehmen. Für jeden Beobachter scheint sich das Universum um ihn herum auszudehnen.

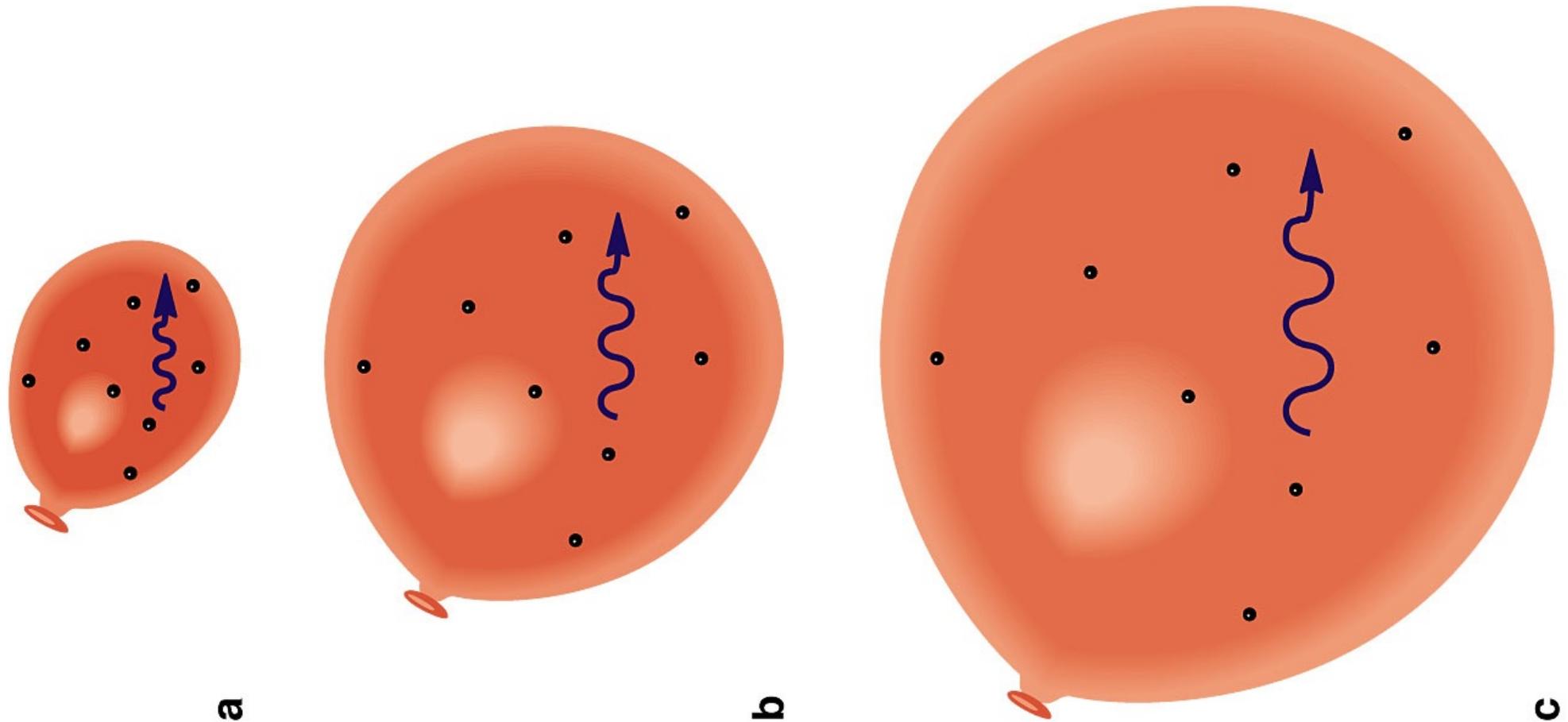
Die Expansion des Raumes und das Hubble-Gesetz



Die Expansion des Raumes und das Hubble-Gesetz



Kosmologische Rotverschiebung als Resultat der Expansion des Raumes



- Kosmologische Rotverschiebung erklärt sich aus der Ausdehnung des Raumes (grundsätzlich zu unterscheiden vom Doppler-Effekt)

Unmittelbare Schlussfolgerungen

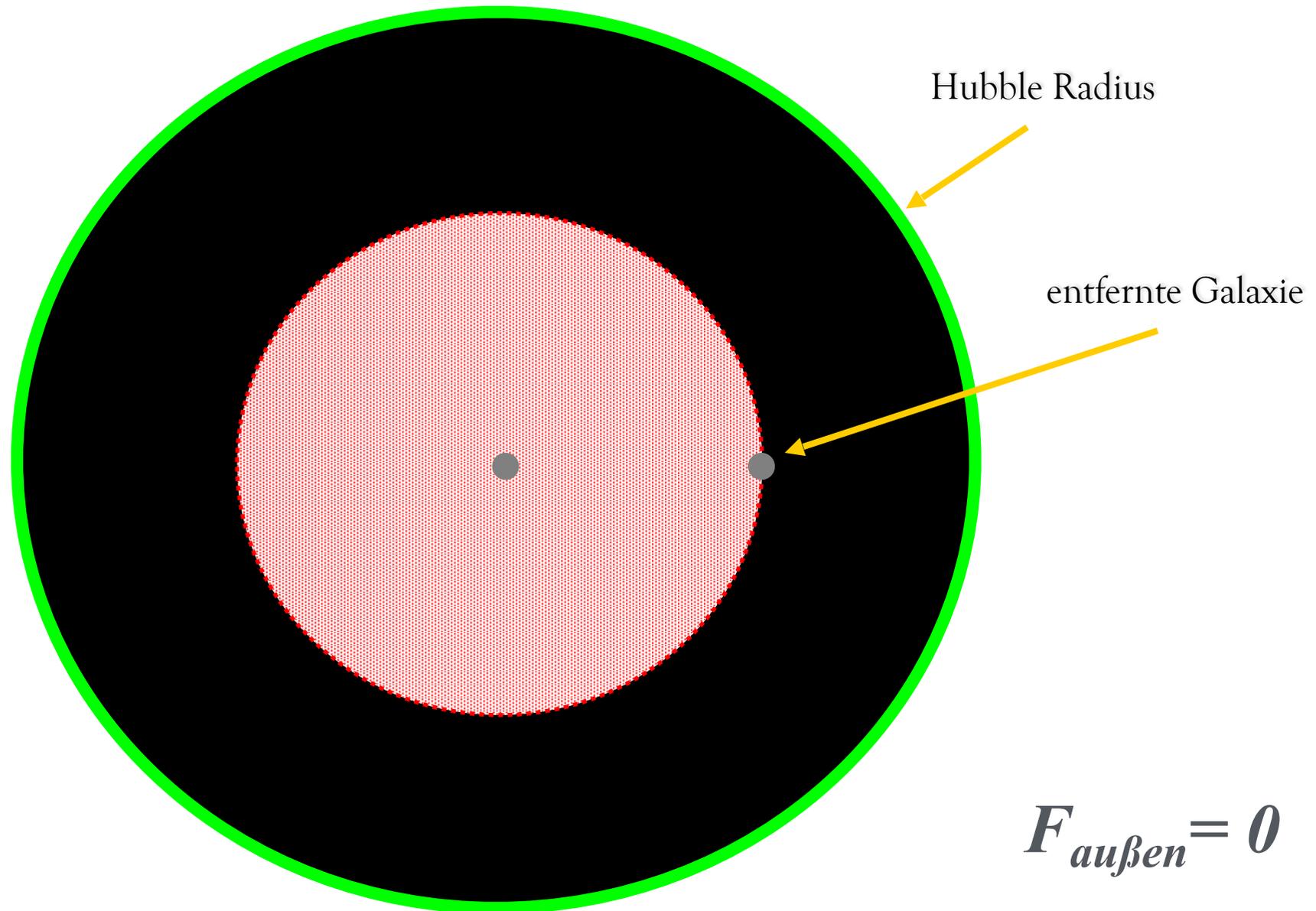
- Dunkler Nachthimmel verbietet ein zeitlich und räumlich unendliches, homogenes und isotropes Universum (Olbersches Paradoxon)
- Hubble-Gesetz: Expansion des Raums
- Homogenität und Isotropie ergeben Hubbles Gesetz. Beweis:
 - Betrachte Geschwindigkeitsfeld $\vec{v}(\vec{r}, t)$
 - Isotropie $\frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_y}{\partial y} = \frac{\partial v_z}{\partial z} = H(\vec{r}, t)$
 - Homogenität: $H(\vec{r}, t)$ kann nur von der Zeit t abhängen: $H(t)$
 - Integration: $\vec{v} = H(t)\vec{r}$

Unmittelbare Schlussfolgerungen

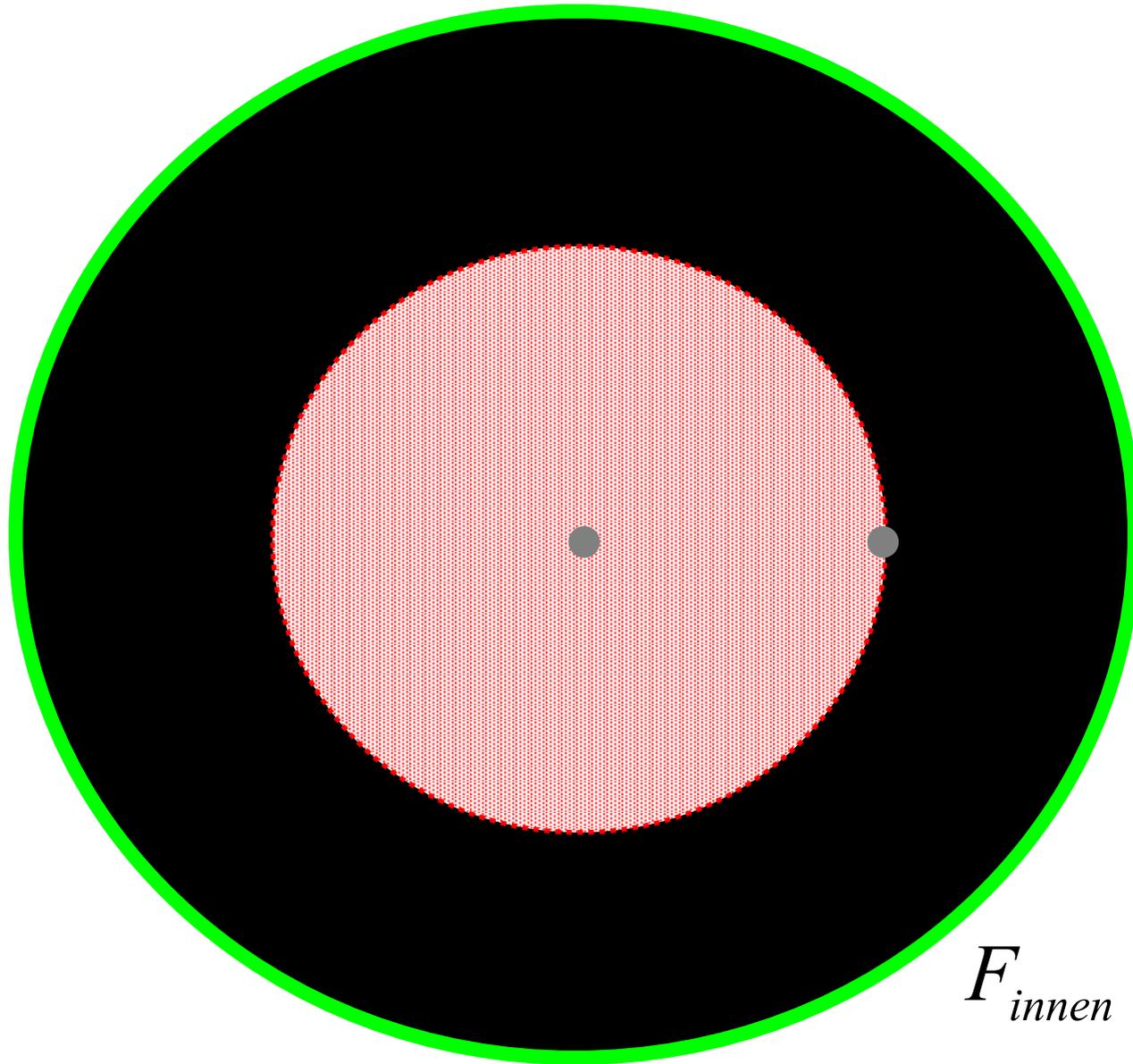
- Ausdehnendes Universum (Beobachtung)
⇒ Modell des Urknalls
- Urknall ist eine Singularität
- Urknallmodell ⇒ Existenz einer kosmischen Hintergrundstrahlung, aber Temperatur ist nicht fixiert
- Urknallmodell + 2.7K ⇒ Häufigkeiten primordialer Elemente (He, D, Be, B, Li),
- alternativ: Urknallmodell + Dichte, bei der Kernreaktionen stattfinden ⇒ $T \sim 5K$

Bis jetzt Einsteingleichungen
o.ä. nicht verwendet!

Newtonsche Kosmologie



Kann man $R(t)$ berechnen?



$$F_{innen} = -G \frac{M_{innen} m_{gal}}{R^2}$$

Was wird in Zukunft mit der Galaxie geschehen ?

- Kritische Geschwindigkeit: Fluchtgeschwindigkeit

$$v_{esc} = \sqrt{\frac{2GM_{inside}}{R}}$$

- $v < v_{esc}$: Galaxie wird irgendwann anhalten und zurückfallen
- $v > v_{esc}$: Galaxie wird sich für immer weg bewegen

Ein paar Umformungen ...

$$v^2 = \frac{2GM_{inside}}{R} + 2\varepsilon_{\infty}$$

- $\varepsilon_{\infty} < 0 \Rightarrow v < v_{esc}$: Galaxie wird irgendwann anhalten und zurückfallen
- $\varepsilon_{\infty} > 0 \Rightarrow v > v_{esc}$: Galaxie wird sich für immer weg bewegen

Ein paar Umformungen ...

- Homogene Sphäre der Dichte ρ :

$$M_{inside} = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$

- Folglich für die Geschwindigkeit:

$$v^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2 + 2\varepsilon_\infty$$

Ein paar Umformungen ...

- Oder mit :

$$R(t) = a(t)R_0 \Rightarrow v(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}R(t)$$

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{2\varepsilon_\infty}{R^2}$$

(Friedmannsche Gleichung)

- aber was ist die Integrationskonstante ε_∞ ?

4-dimensionale Räume

- Expandierender Raum (eben)

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - R^2(t) \left(\Delta r^2 + r^2 \Delta\theta^2 + r^2 \sin^2\theta \Delta\phi^2 \right)$$

$R(t)$ ist der **Skalenfaktor**

- Gekrümmter Raum: i.allg.

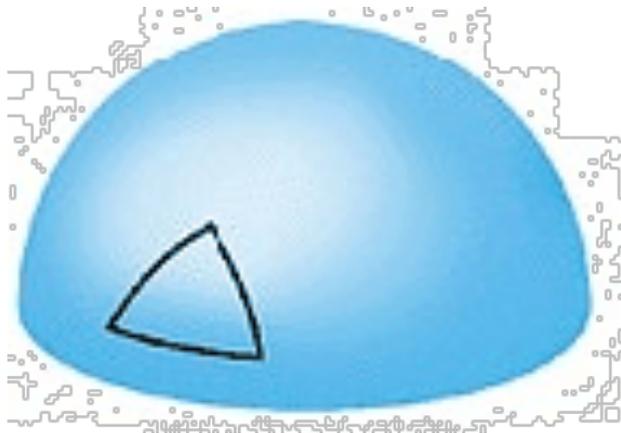
$$ds^2 = g_{ij} dx^i dx^j$$

- g_{ij} : Metrik: symmetrischer 4×4-Tensor
- x_i, x_j : i-te bzw. j-te Komponente des 4d-Ortsvektors (0 Zeit, 1-3 Ort)

Robertson-Walker Metrik

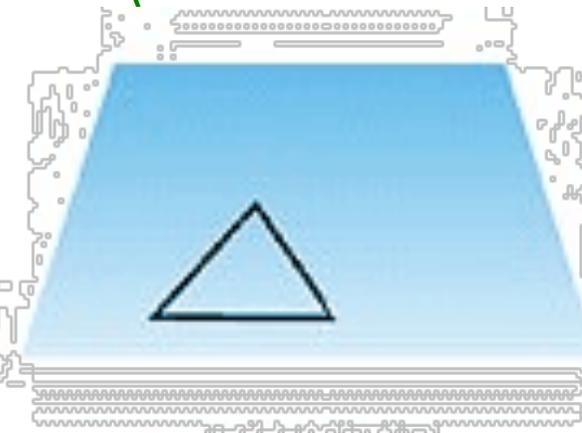
Expandierender gekrümmter Raum
(homogen und isotrop)

$$\Delta s^2 = (c\Delta t)^2 - R^2(t) \left(\frac{\Delta r^2}{1 - kr^2} + r^2 \Delta\theta^2 + r^2 \sin^2\theta \Delta\phi^2 \right)$$



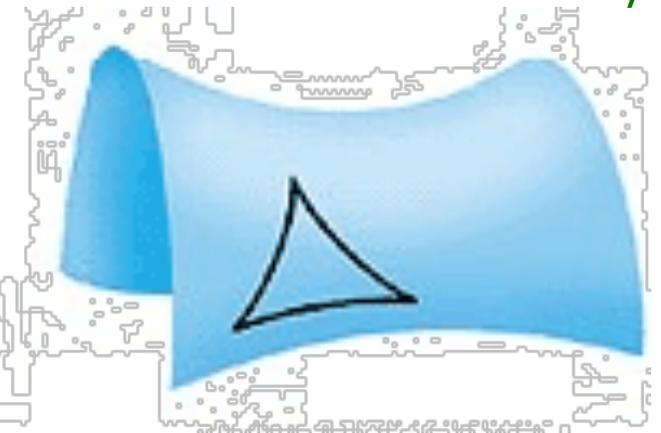
$k > 0$

sphärische Geometrie
(Winkelsumme
im Dreieck $> 180^\circ$)



$k = 0$

ebene Geometrie
(Winkelsumme
im Dreieck $= 180^\circ$)



$k < 0$

hyperbolische
Geometrie
(Winkelsumme
im Dreieck $< 180^\circ$)

Einsteinsche Kosmologie



- Lösung der Einsteinschen Gleichungen für eine homogene, isotrope Massenverteilung:
 - Wie in der Newtonschen Dynamik, ist die Gravitation immer anziehend
 - ein homogene, isotropes und anfänglich statisches Universum kollabiert auf Grund seiner eigenen Anziehung
 - Alternative: sich ausdehnendes Universum (Friedmann)

Einsteins Vorschlag: Kosmologische Konstante Λ

- Es gibt eine einheitliche, abstoßende Kraft im Universum. Zwei Interpretationen, energetisch oder geometrisch:
 - Vakuum übt Druck aus
 - Leerer Raum ist nicht eben, sondern gekrümmt
- Die abstoßende Kraft kompensiert die anziehende Gravitation \Rightarrow statisches Universum ist möglich
- aber: Ein solches Universum ist instabil. Man kann es statisch aufsetzen, aber es wird nicht statisch bleiben
- Einstein: “Größte Eselei seines Lebens”, aber ist es das wirklich ... ?

Einsteinsche Kosmologie ($\Lambda=0$)

- Friedmann-Gleichung

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) - \frac{kc^2}{R^2}$$

- k wie in der Robertson-Walker-Metrik
- ART erklärt Bedeutung der Integrationskonstante ϵ_∞ , sie gibt die Krümmung des Raums an.

Können wir die Zukunft des Universums vorhersagen?

- Friedmann-Gleichung auf heutige Epoche ($t=t_0$) angewandt

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho_0 - \frac{kc^2}{R_0^2}$$

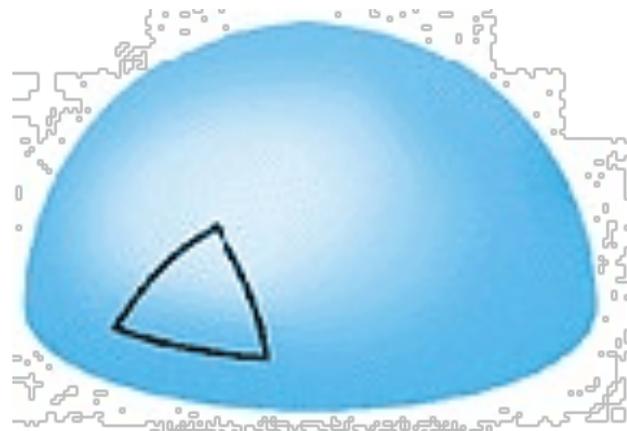
- für $k=0$:

$$\rho_{\text{krit}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

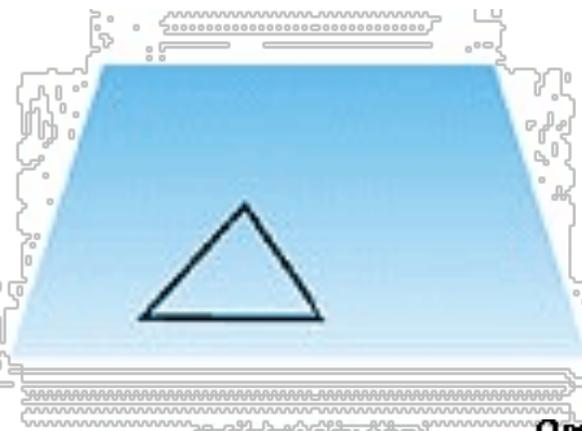
Können wir die Zukunft des Universums vorhersagen ?

- Beträgt die Dichte ρ des Universums
 - $\rho = \rho_{\text{krit}}$: ebener Raum, expandiert für immer
 - $\rho > \rho_{\text{krit}}$: sphärische Geometrie, wird rekollabieren
 - $\rho < \rho_{\text{krit}}$: hyperbolische Geometrie, expandiert für immer
- Was ist die mittlere Dichte des Universums?
 - Schwierig zu bestimmen und direkt nur ungenau vermessen
 - $\rho > \rho_{\text{krit}}$ sehr unwahrscheinlich
 - favorisiert: $\rho \approx 0.3 \rho_{\text{krit}}$

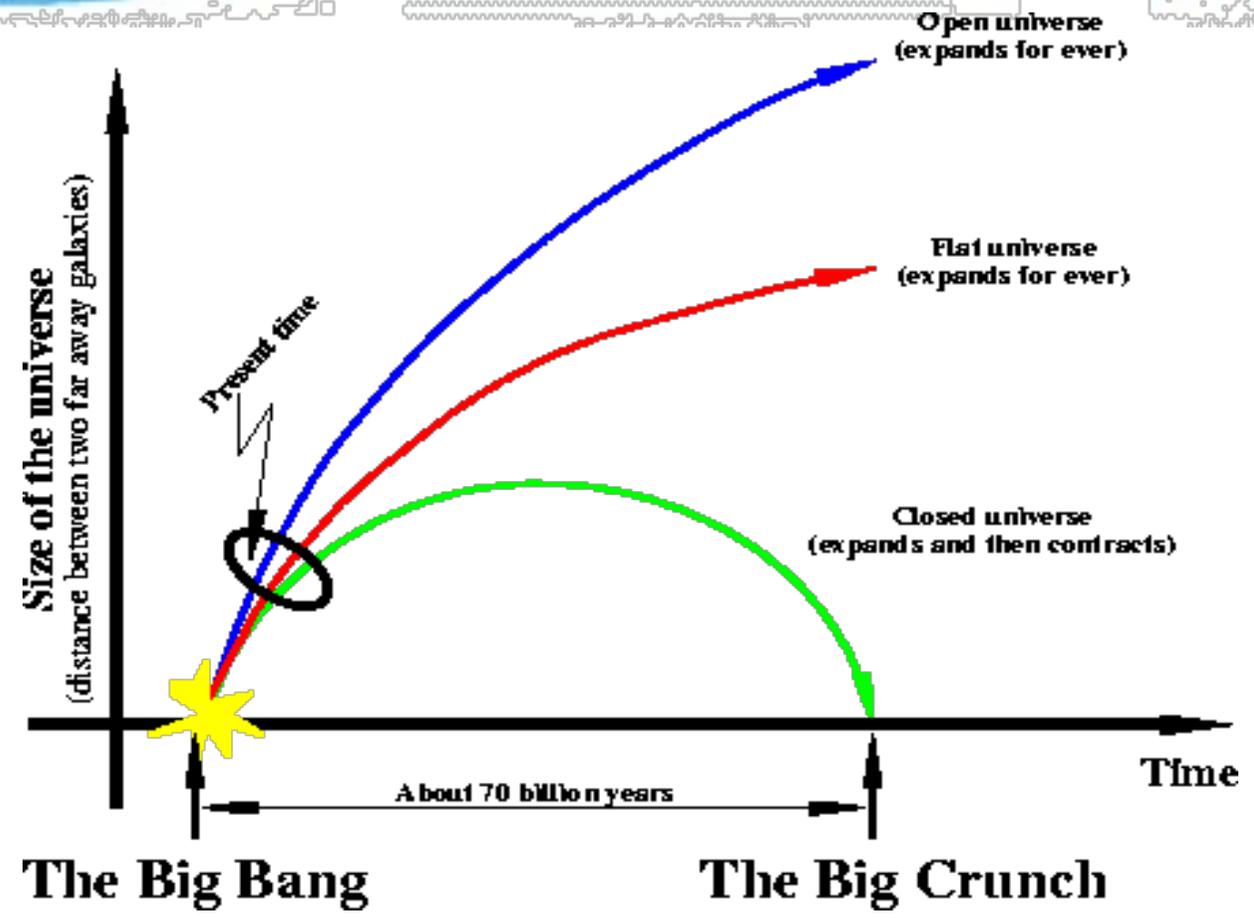
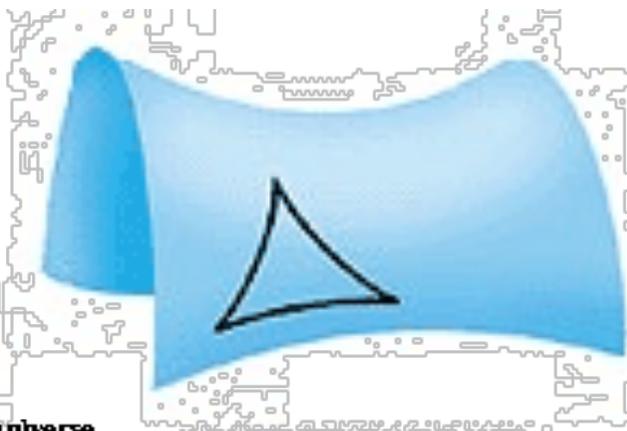
$$k > 0, \rho > \rho_{\text{krit}}$$



$$k = 0, \rho = \rho_{\text{krit}}$$



$$k < 0, \rho < \rho_{\text{krit}}$$



Können wir die Zukunft des Universums vorhersagen ?

$$\Omega(t) = \frac{\rho(t)}{\rho_{\text{krit}}(t)} = \frac{8\pi G \rho(t)}{3H_0^2}$$

- Dichteparameter Ω
 - $\Omega = 1$: ebener Raum, expandiert für immer
 - $\Omega > 1$: sphärische Geometrie, wird rekollabieren
 - $\Omega < 1$: hyperbolische Geometrie, expandiert für immer

Die große Synthese (~1933)

- Berühmtes Treffen von Einstein, Hubble und Lemaître in Kalifornien
 - Einstein: Allgemeine Relativitätstheorie
 - Friedmann und Lemaître: ein sich ausdehnendes homogenes und isotropes Universum ist eine (die?) Lösung der Einsteinschen Gleichungen
 - Hubble: Nachweis, dass sich das Universum in der Tat ausdehnt



Die große Synthese (~1933)

- Konsequenz:
 - Einstein zu Lemaître: „Dies ist die schönste und befriedigendste Erklärung der Schöpfung, die ich je gesehen habe“
 - Das Universum begann von einem Punkt aus vor ca. 3 Milliarden Jahren
 - Modell des Urknalls (Big Bang)
- Problem: bereits damals war bekannt, dass die Erde mindestens 4 Mia Jahre alt ist \Rightarrow Erde ist älter als das Universum?
- Baade (1952): zwei Typen von Cepheiden
 - Extragalaktische Entfernungsskala verdoppelte sich

Wie alt ist das Universum? ($\Lambda=0$)

- Eine Galaxie mit Abstand d entweicht mit der Geschwindigkeit $v=H_0 \times d$.
- Angenommen, die Geschwindigkeit ändere sich nicht (keine Kräfte, $\Omega=0$). Wann ist die Position dieser Galaxie identisch mit der unseren?

$$t_{Hubble} = \frac{d}{v} = \frac{1}{H_0}$$

- t_{Hubble} : Hubble-Zeit.
Für $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$: $t_{Hubble} = 14 \text{ Gyr}$
- Für $\Omega>0$ bewegten sich die Galaxien früher schneller, $t_{Hubble} = 14 \text{ Gyr}$ ist eine obere Schranke

Wie groß ist das Universum

- Kann nicht beantwortet werden. Wir sehen (und sind beeinflusst) nur von dem Teil des Universums, der zu mindestens einer Epoche, heute oder in der Vergangenheit, näher lag, als Licht in der Zeit entsprechend dem Alter des Universums reisen konnte.
- Wir können aber bestimmen, wie groß das beobachtbare Universum ist:

$$d_{\text{Hubble}} = ct_{\text{Hubble}} = \frac{c}{H_0}$$

- d_{Hubble} : Hubble-Radius
- für $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$: $d_{\text{Hubble}} \approx 4 \text{ Gpc}$

Wie können wir Ω_0 messen?

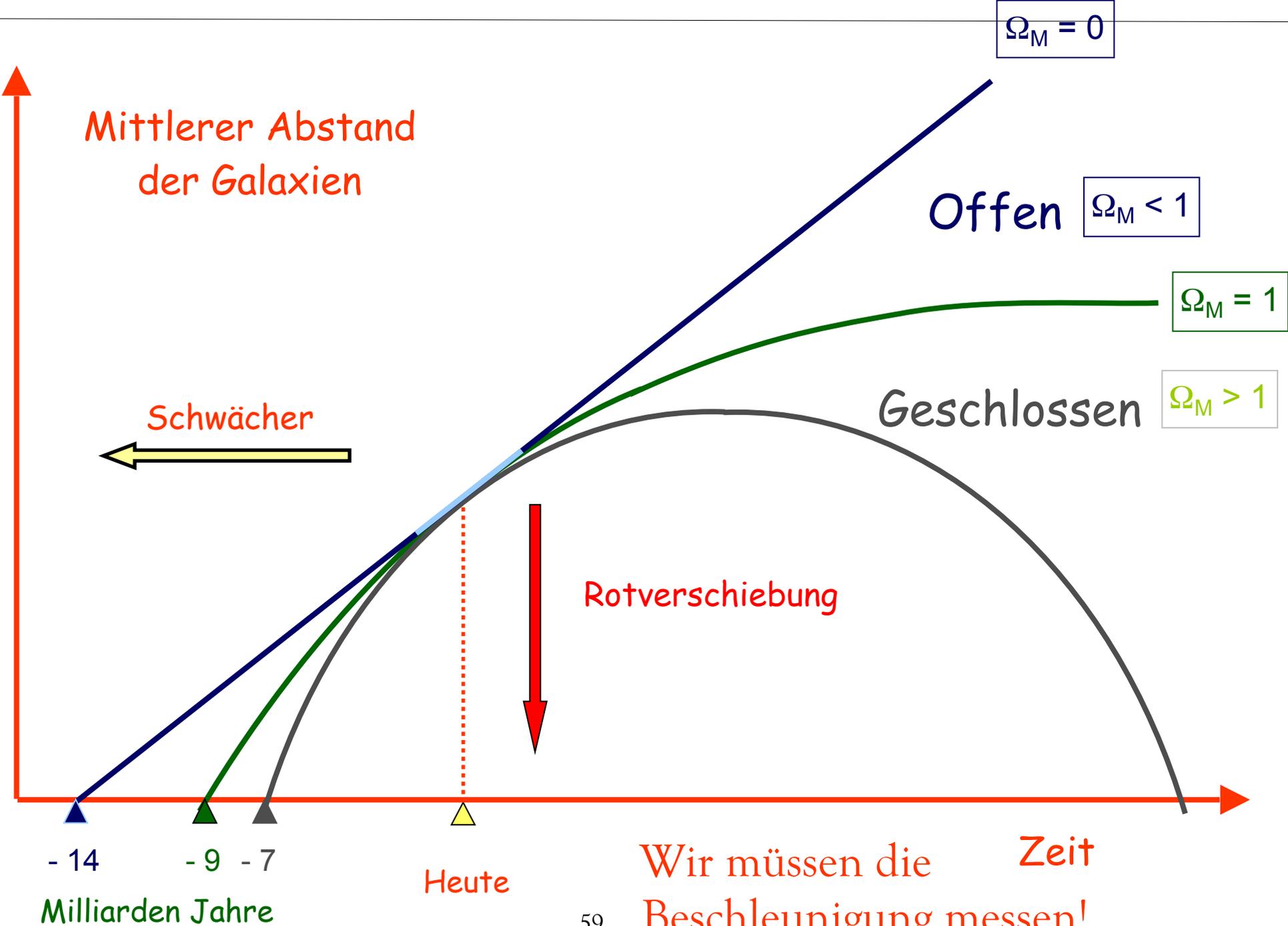
- Addiere alles, was man sehen kann
 - aber ein Teil der Masse mag unsichtbar sein
- Messe, wie sich die Ausdehnungsrate des Universums verlangsamte
 - Die Ausdehnung eines Universum höherer Dichte wird stärker verlangsamt.
- Vermesse die Geometrie des Universums
 - Ist sie sphärisch, hyperbolisch oder eben ?

Ω_0

$$q_0 = -\frac{\ddot{R}R}{\dot{R}^2} = \frac{\Omega_0}{2}$$

k

Das weitere Schicksal des Universums



Typ Ia Supernova als Standardkerzen



Hubble Results

Using $z > 2500$ Discard 900, only 4 obs within $-10 - 40 d_{10}$

disc	dys	size	M.x	σ	num	$H_0 = 63.9$
		0.0		.14	12	
		5.0		.17	27	
		10.0		.19	30	
		15.0		.23	35	
		20.0		.24	37	
		-3.0		.15	8	

Only B & V $-10 \leftrightarrow 40$ Spirals $\sigma = .20$ num 91 $z_p = -3.220$ ellipticals $\sigma = .11$ num 6 $z_p = -3.219$ for $\Omega_\Lambda = 0$

$$H_0 = 64.4, \Omega_m = -0.36 + 0.18$$

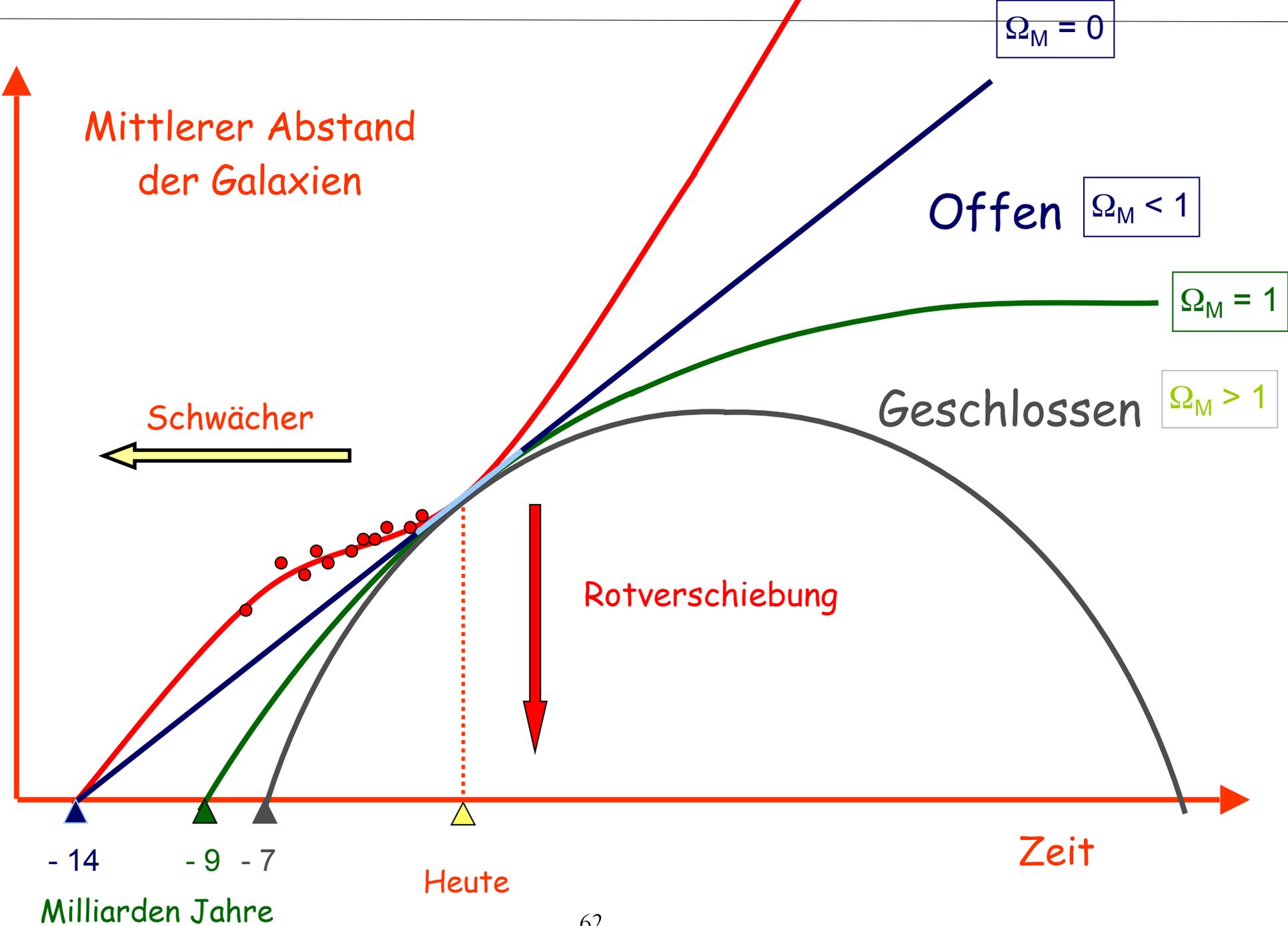
$$-0.9 + ?$$

for $\Omega_\Lambda = 0$, $m \geq 34.5$ get around void

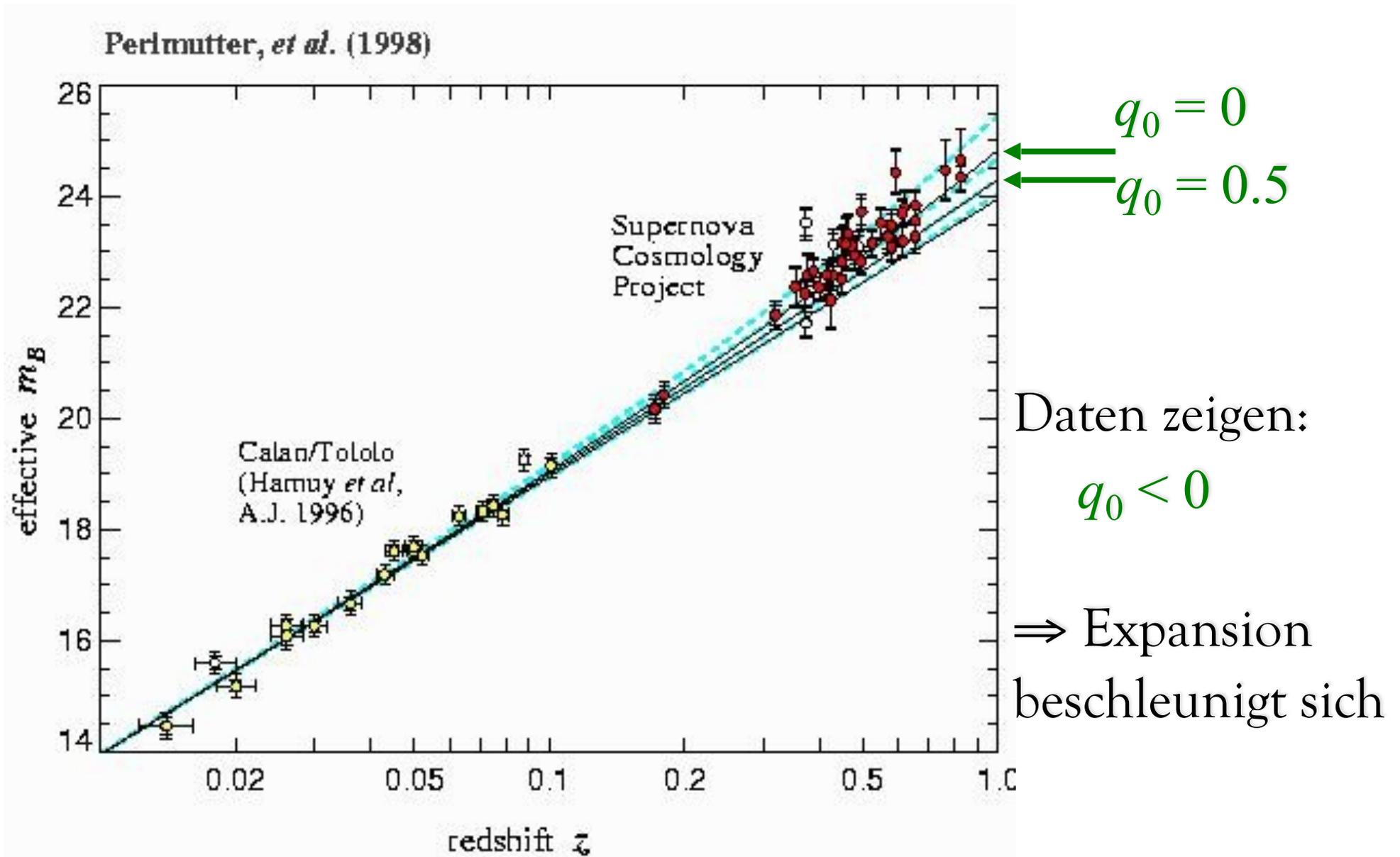
$$H_0 = 63.6, \Omega_m = -0.28 + 0.20$$

$$-0.16$$

Das weitere Schicksal des Universums

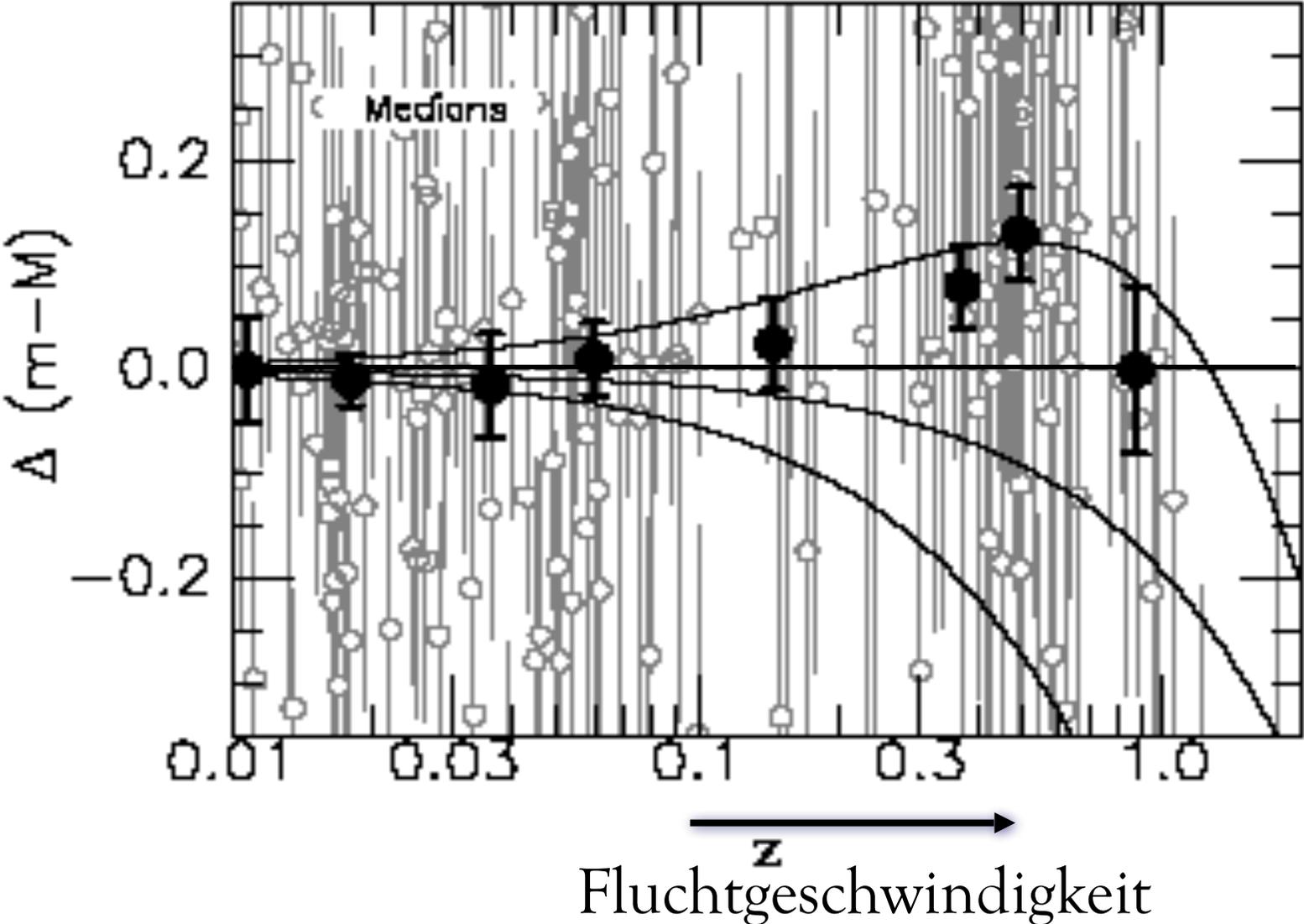


Messung von q_0 !



Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich

Scheinbare Helligkeit



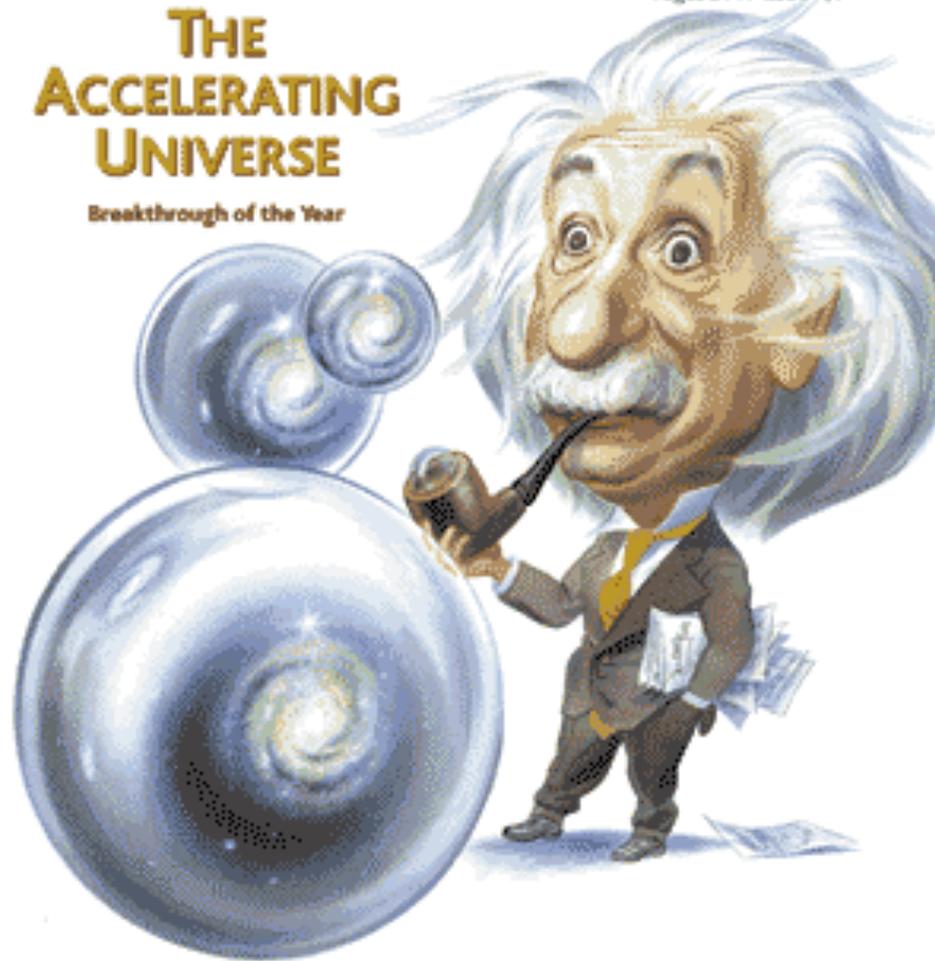
Science

18 December 1998

Vol. 282 No. 5397
Pages 2141-2336 \$7

THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year

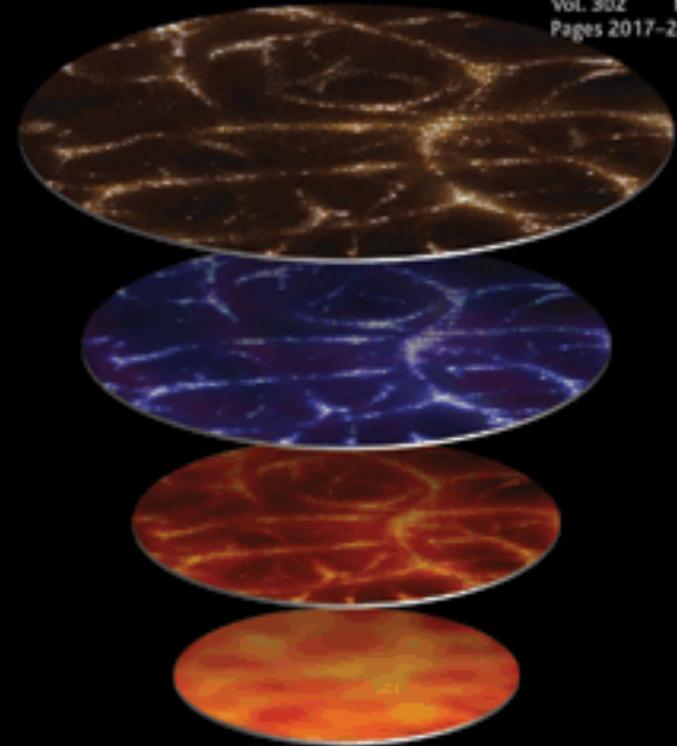


 AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

Science

19 December 2003

Vol. 302 No. 5653
Pages 2017-2172 \$10



Breakthrough of the Year

Cosmic Convergence

 AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

- Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich
- Gravitation ist immer anziehend

⇒ Wiedergeburt der kosmologischen
Konstante Λ

Physik Nobelpreis 2011



Saul
Perlmutter



Adam
Riess



Brian
Schmidt

$$G^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu} + g^{\mu\nu} \Lambda$$

kosmologische
Konstante

Interpretationen

Einsteins Kosmologische Konstante

Bisher kein “Platz” im Standardmodell der Teilchenphysik
Quantenphysik sagt eine um 120 Größenordnungen größere
Vakuumenergie voraus. Schlechteste Vorhersage der Physik
aller Zeiten!

Quintessence

Quantenmechanisches Teilchenfeld, das Energie in das
Universum entlässt

Anzeichen einer höheren Dimension

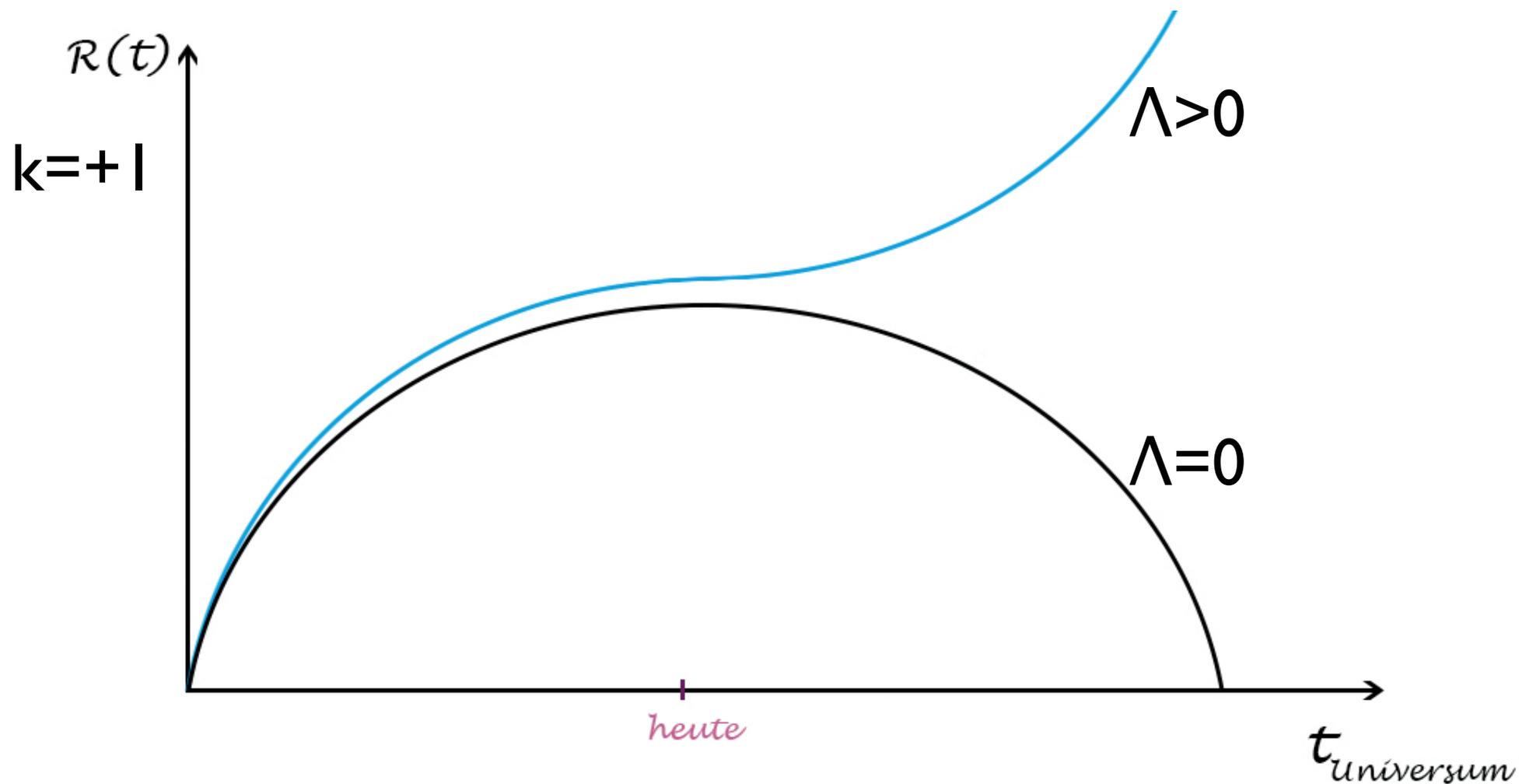
Gravitation ist am besten beschrieben in einer Theorie mit
mehr als vier Dimensionen

Friedmann-Gleichung für $\Lambda \neq 0$

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

- k gibt die Krümmung an
 - $k=0$: eben
 - $k>0$: sphärisch
 - $k<0$: hyperbolisch
- Für hinreichend große Λ kann auch ein sphärisch gekrümmtes Universum für immer expandieren

Schicksal des Universums für $\Lambda > 0$



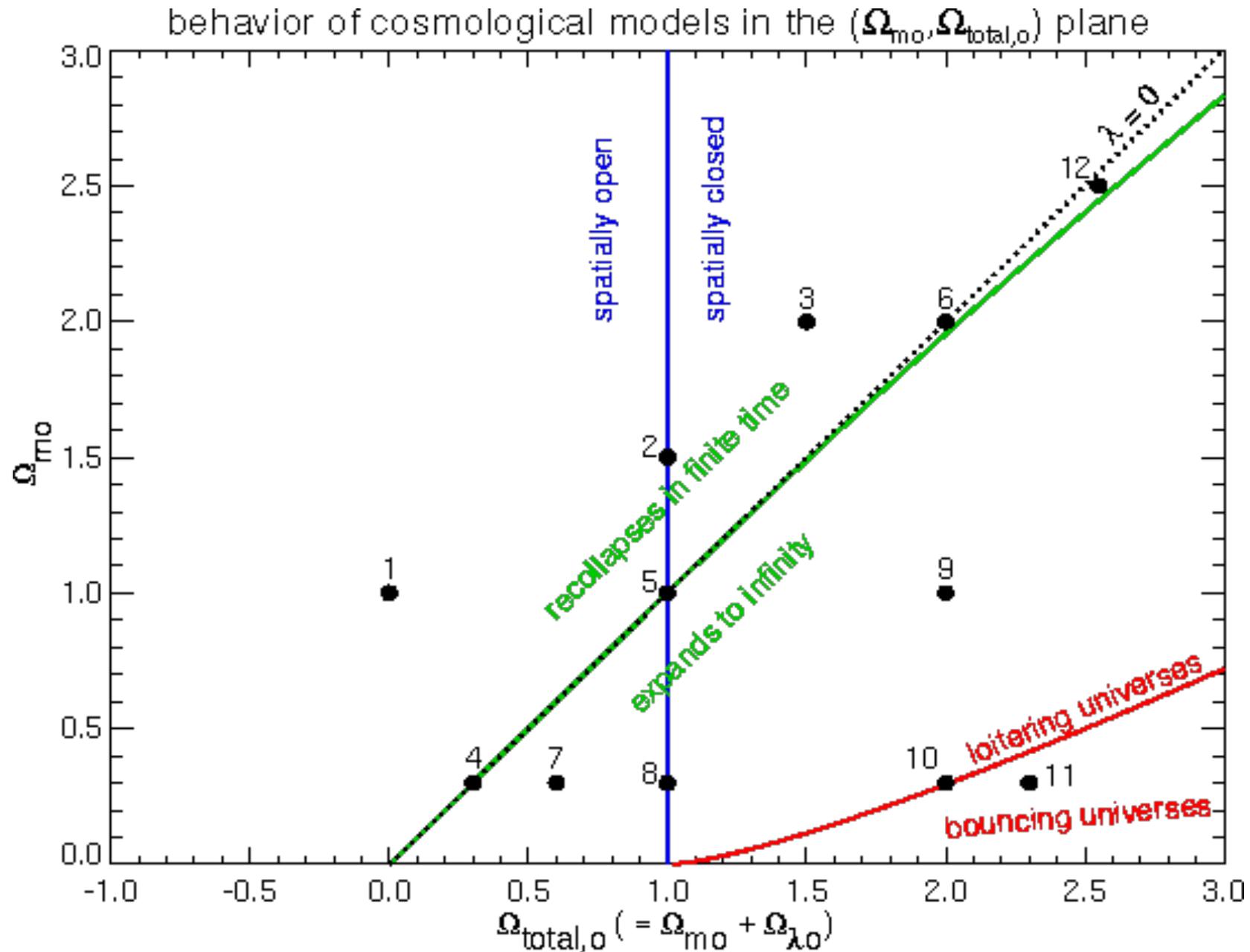
Ist das Schicksal bestimmt ?

- Abbremsung:
 - $\frac{1}{2}\Omega_0 - \Omega_\Lambda > 0$: abbremsend
 - $\frac{1}{2}\Omega_0 - \Omega_\Lambda < 0$: beschleunigt
- Krümmung
 - $\Omega_0 + \Omega_\Lambda = 1$: eben
 - $\Omega_0 + \Omega_\Lambda < 1$: hyperbolisch
 - $\Omega_0 + \Omega_\Lambda > 1$: sphärisch
- Zwei Gleichungen für zwei Variablen
⇒ bestimmtes Problem

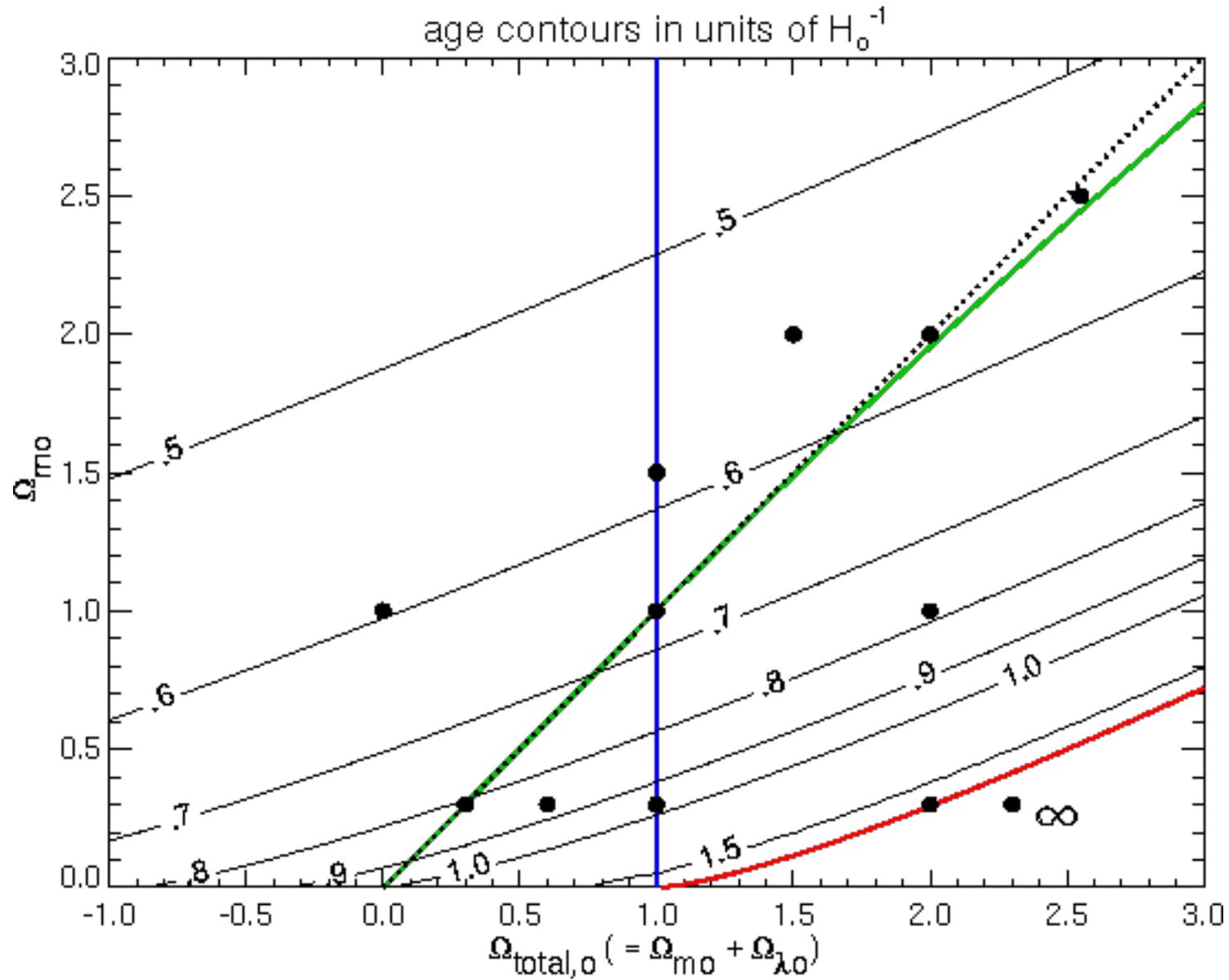
Kosmologie: die Suche nach drei Zahlen

- Hubble-Konstante H_0
 - ⇒ wie schnell expandiert das Universum
- Dichteparameter Ω_0
 - ⇒ wie viel Masse ist im Universum
- Kosmologische Konstante Ω_Λ
 - ⇒ die Vakuumenergie des Universums

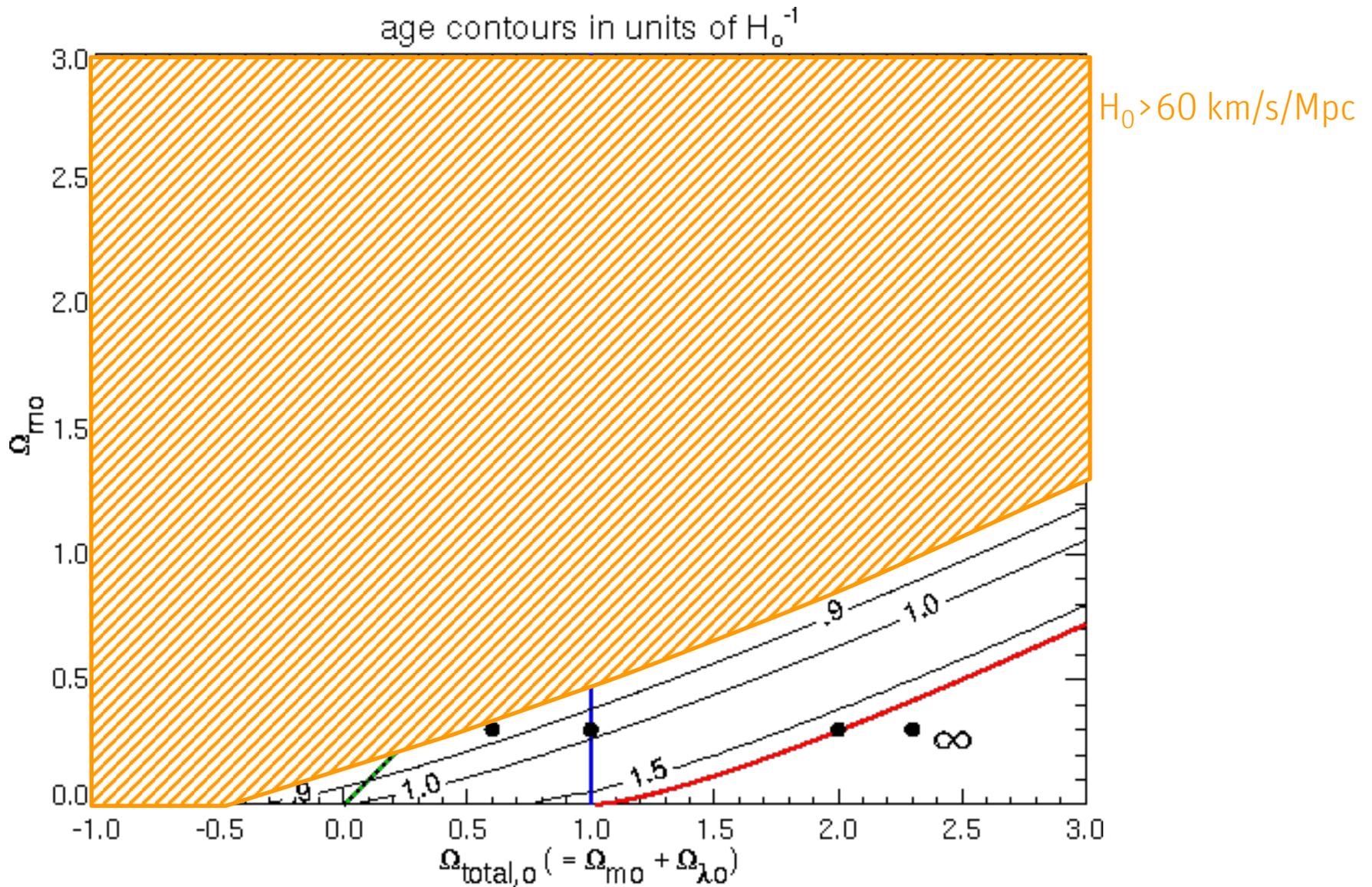
Verhalten eines $\Lambda \neq 0$ -Universum



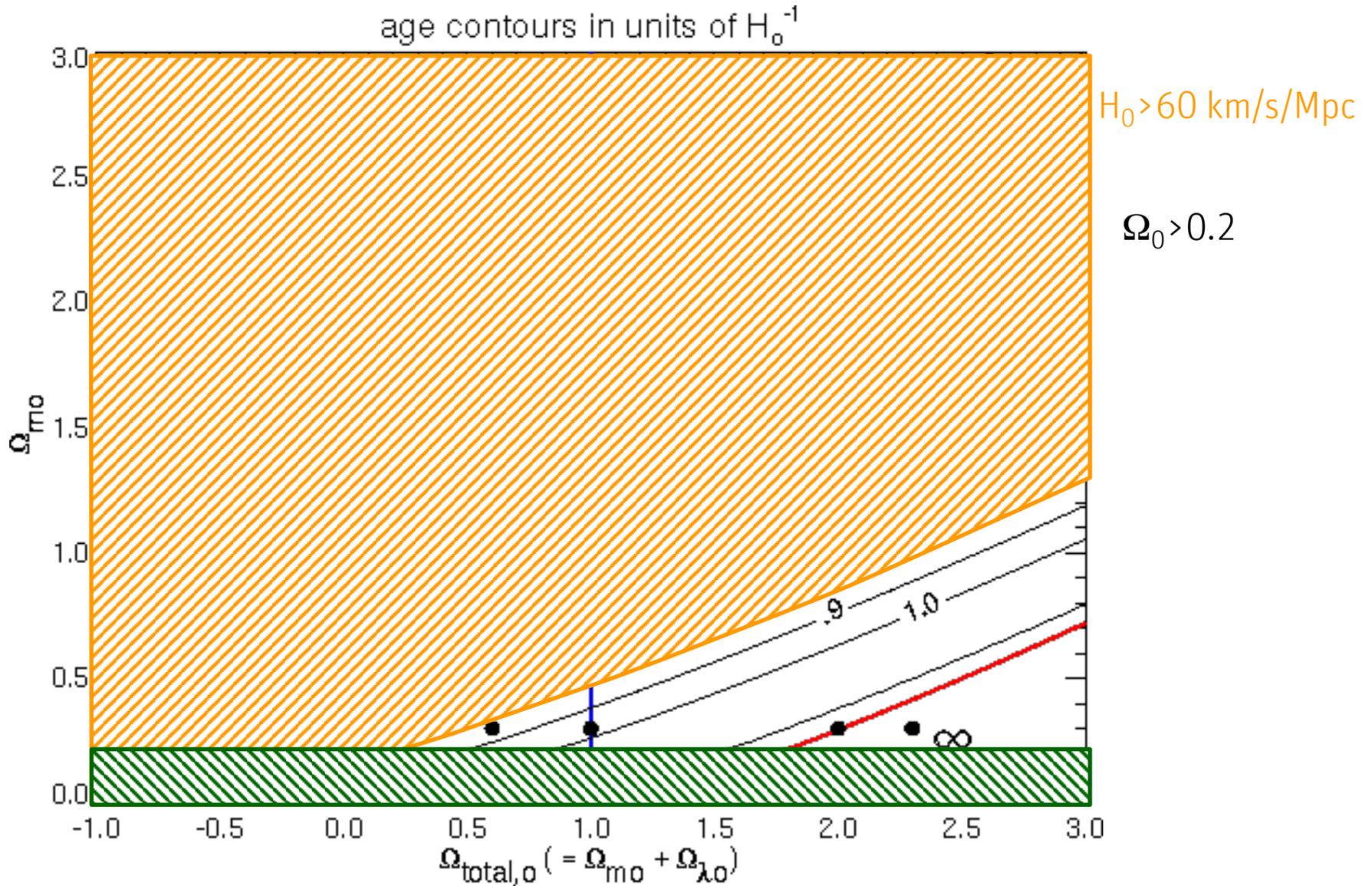
Alter eines Universums ($\Lambda \neq 0$)



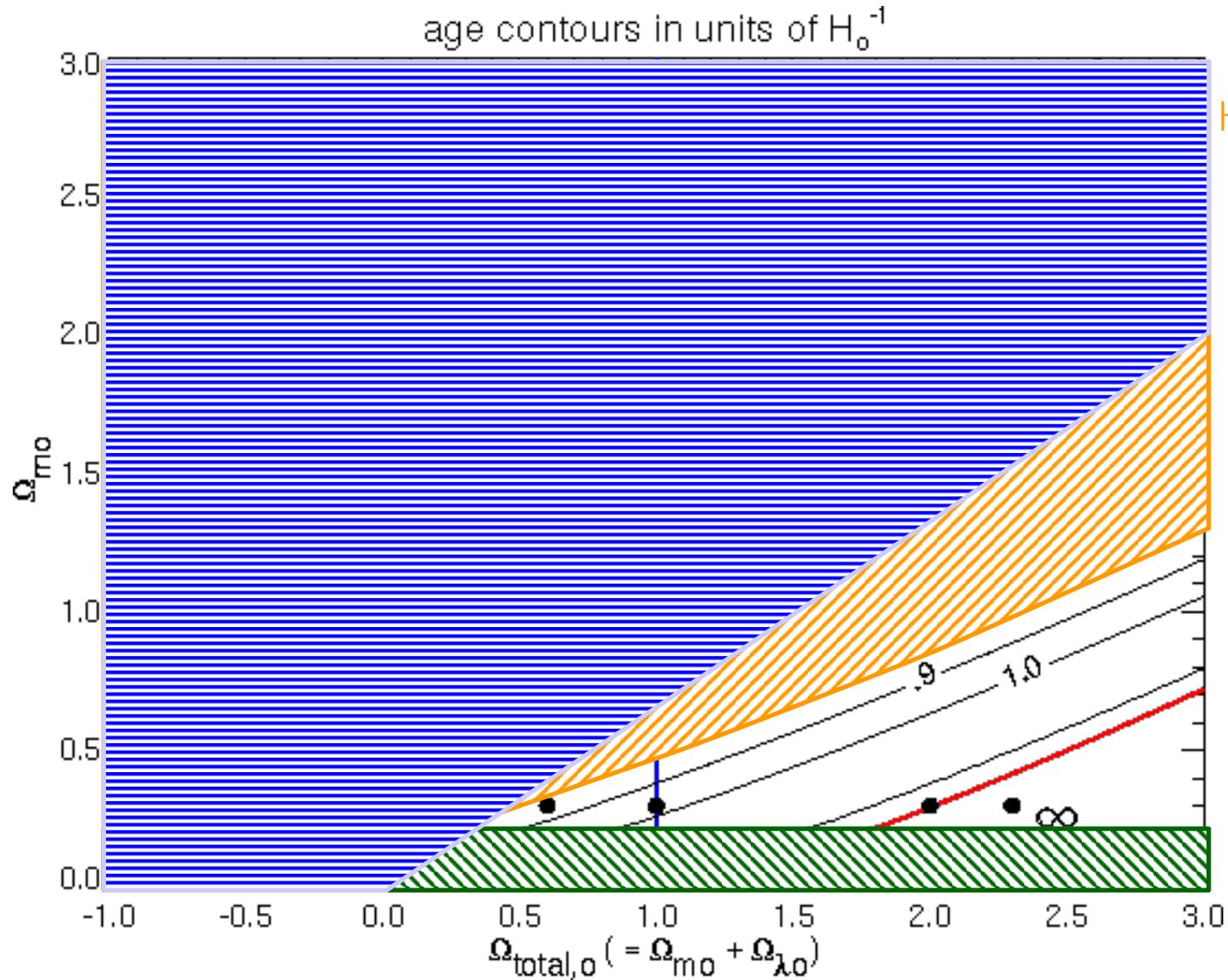
Konservative Einschränkung der Parameter



Konservative Einschränkung der Parameter



Konservative Einschränkung der Parameter

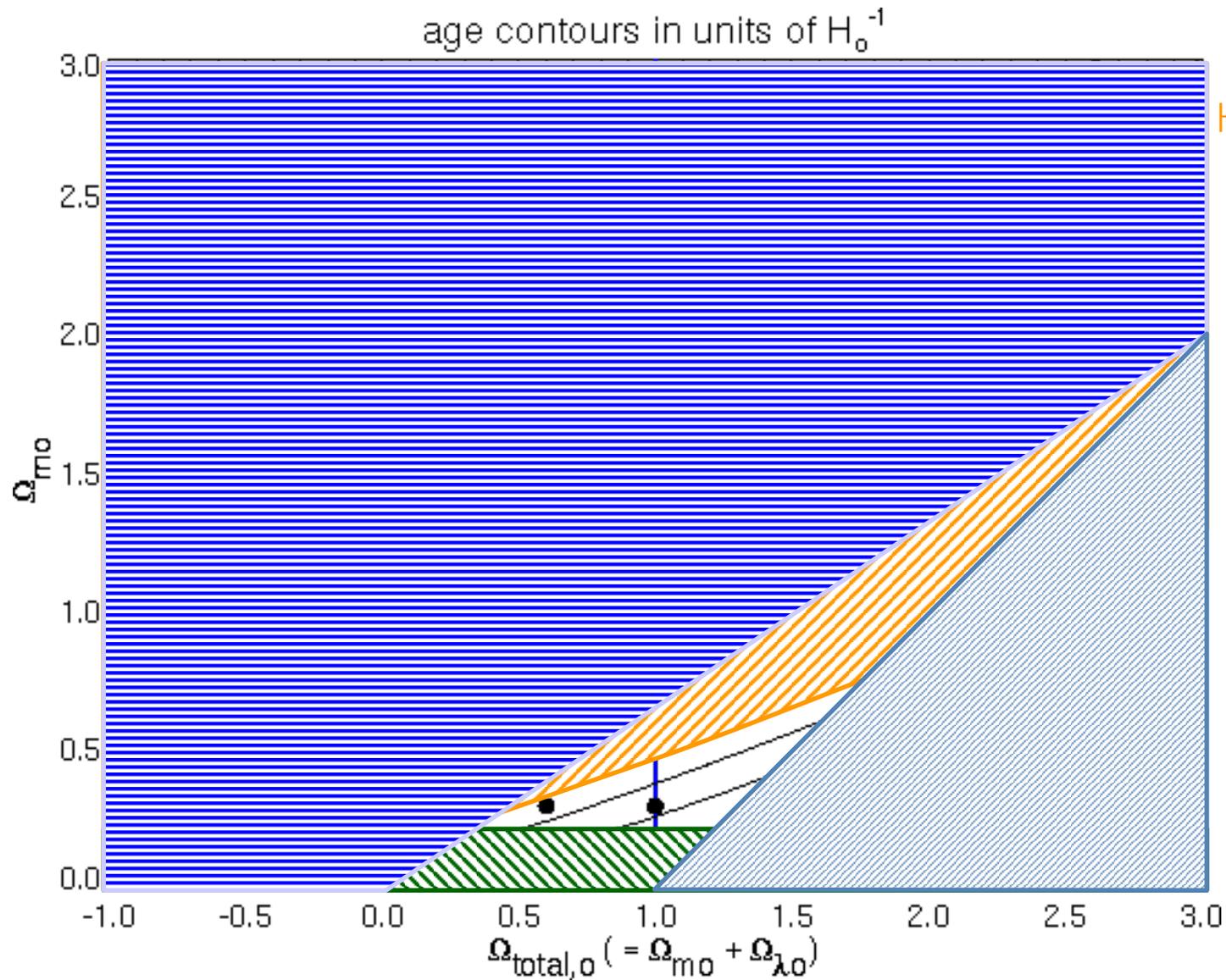


$H_0 > 60 \text{ km/s/Mpc}$

$\Omega_0 > 0.2$

$$q_0 = \frac{1}{2} \Omega_0 - \Omega_\Lambda < 0$$

Konservative Einschränkung der Parameter



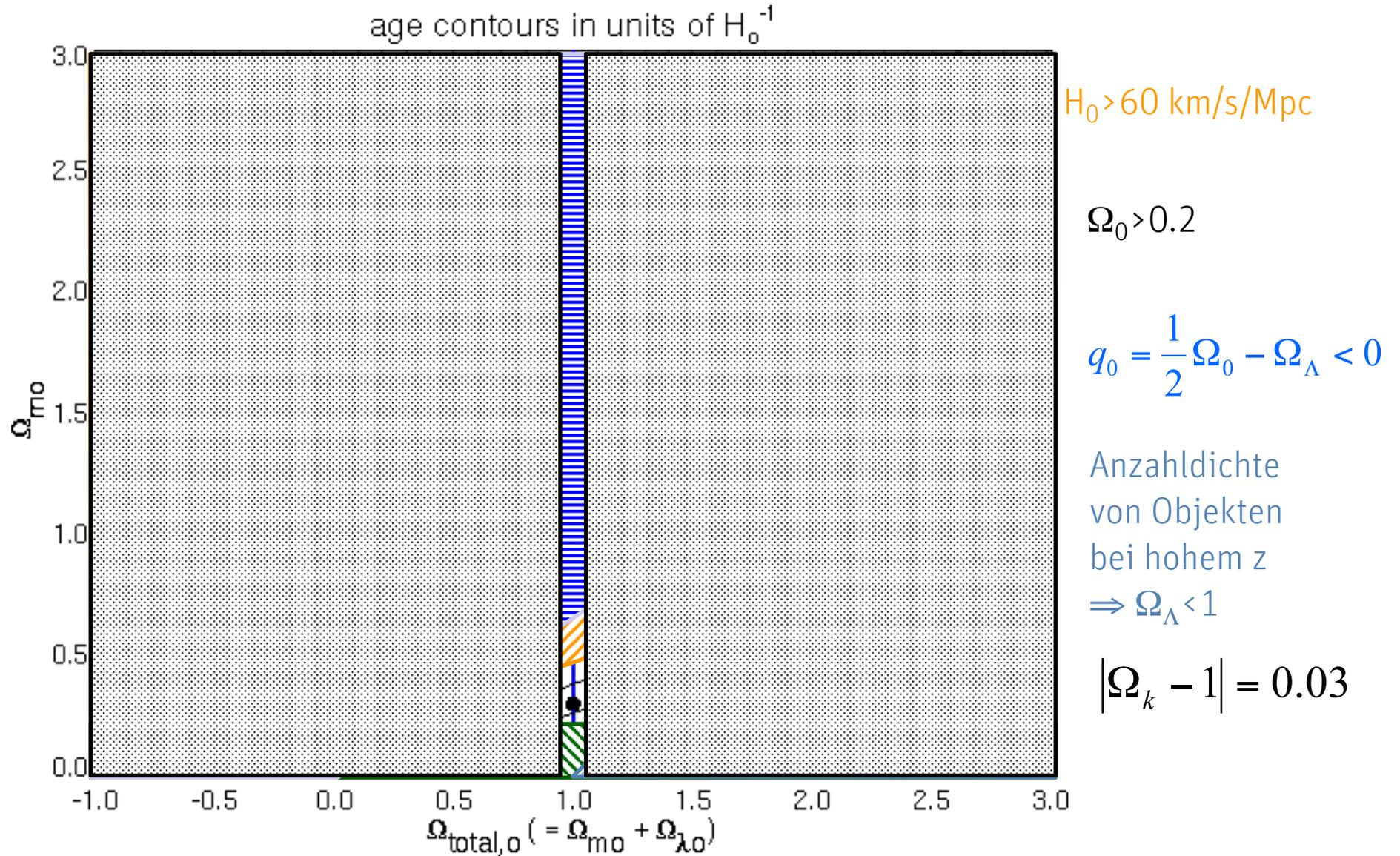
$H_0 > 60 \text{ km/s/Mpc}$

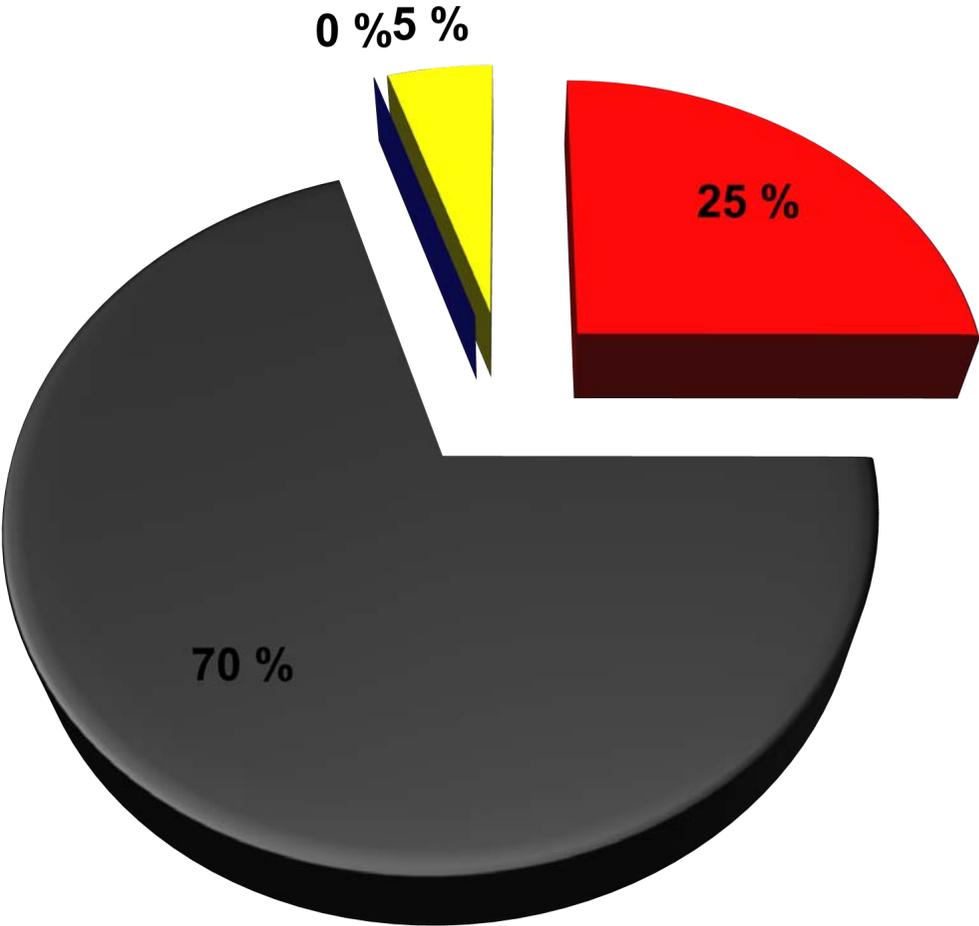
$\Omega_0 > 0.2$

$$q_0 = \frac{1}{2} \Omega_0 - \Omega_\Lambda < 0$$

Anzahldichte
von Objekten
bei hohem z
 $\Rightarrow \Omega_\Lambda < 1$

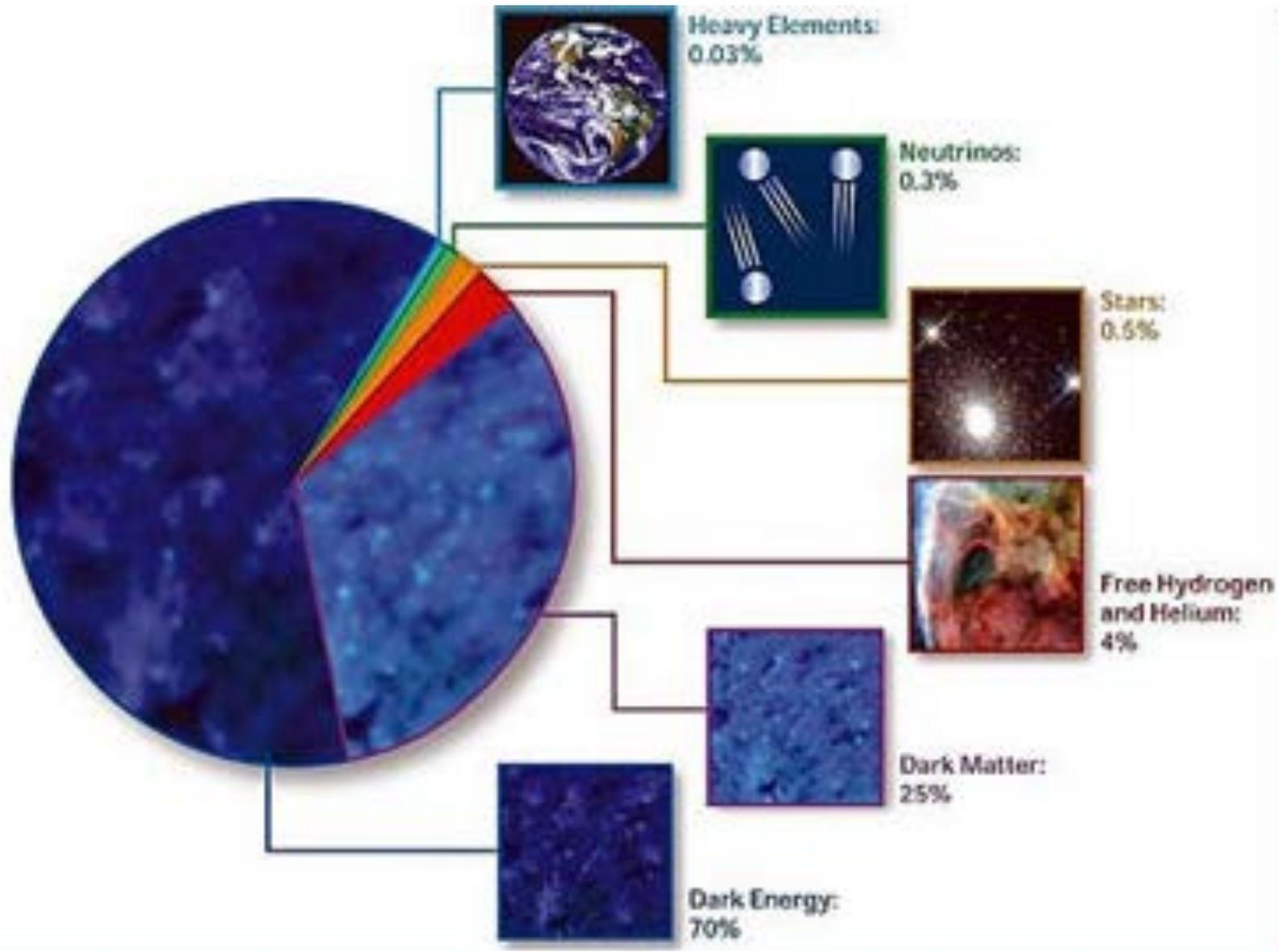
Konservative Einschränkung der Parameter

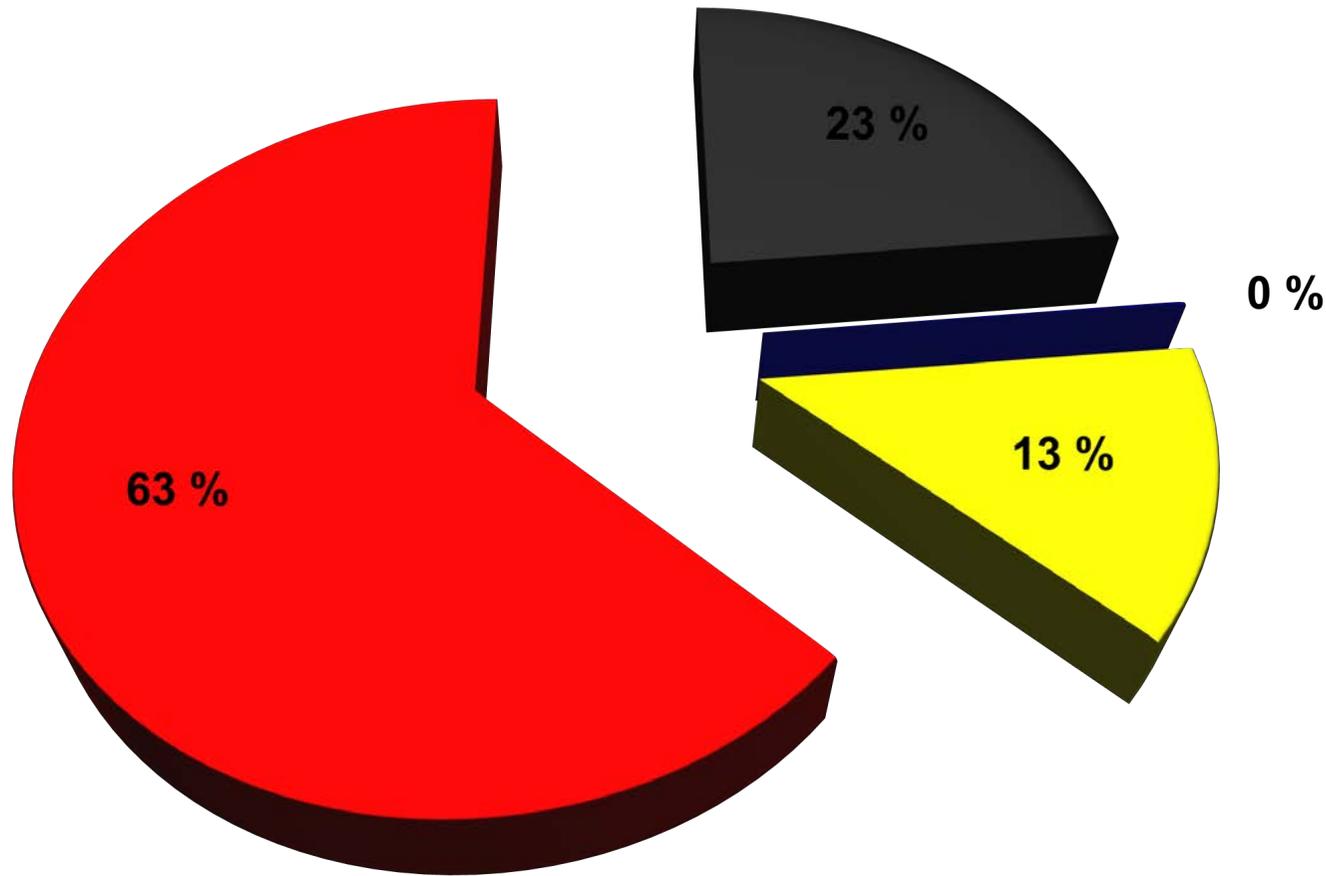




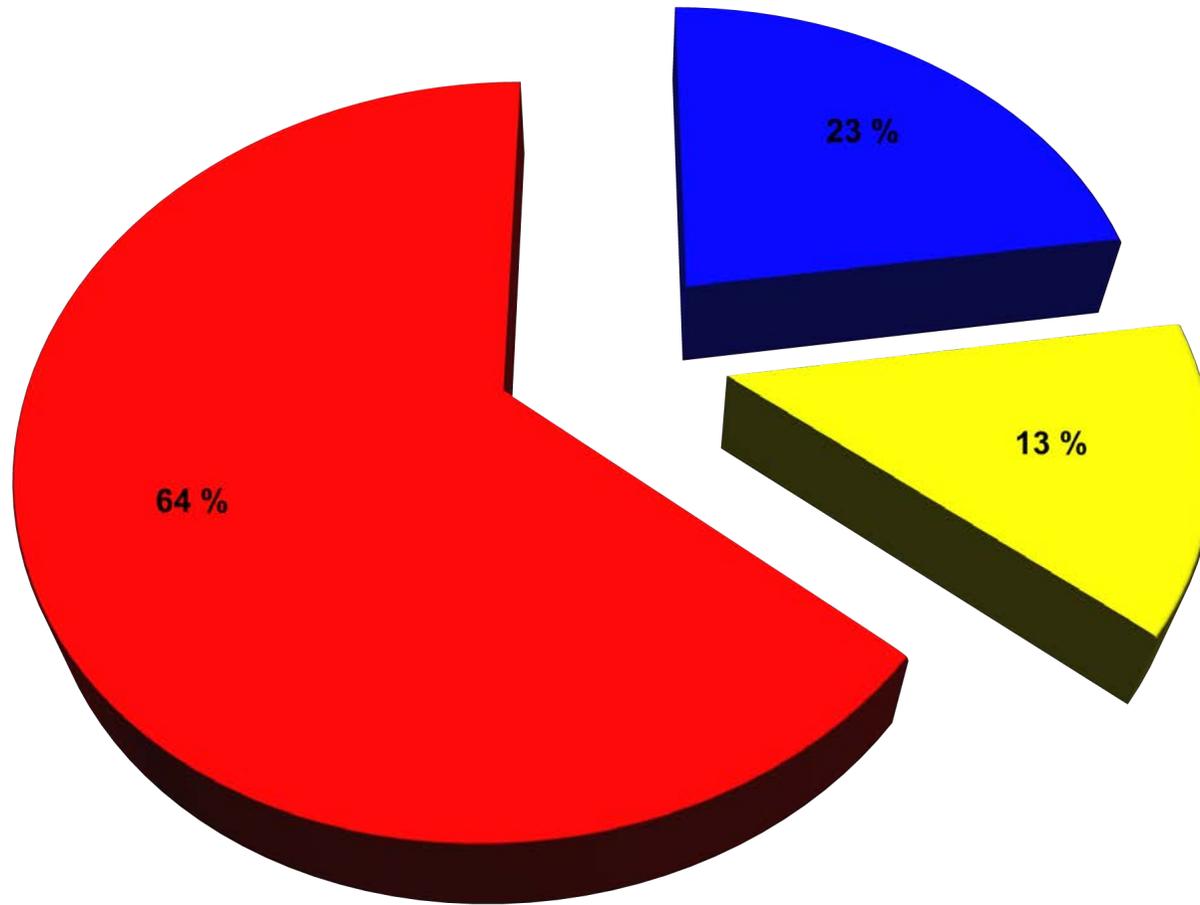
$z=0$; $a=1$ (heute)

Kosmologisches Standardmodell



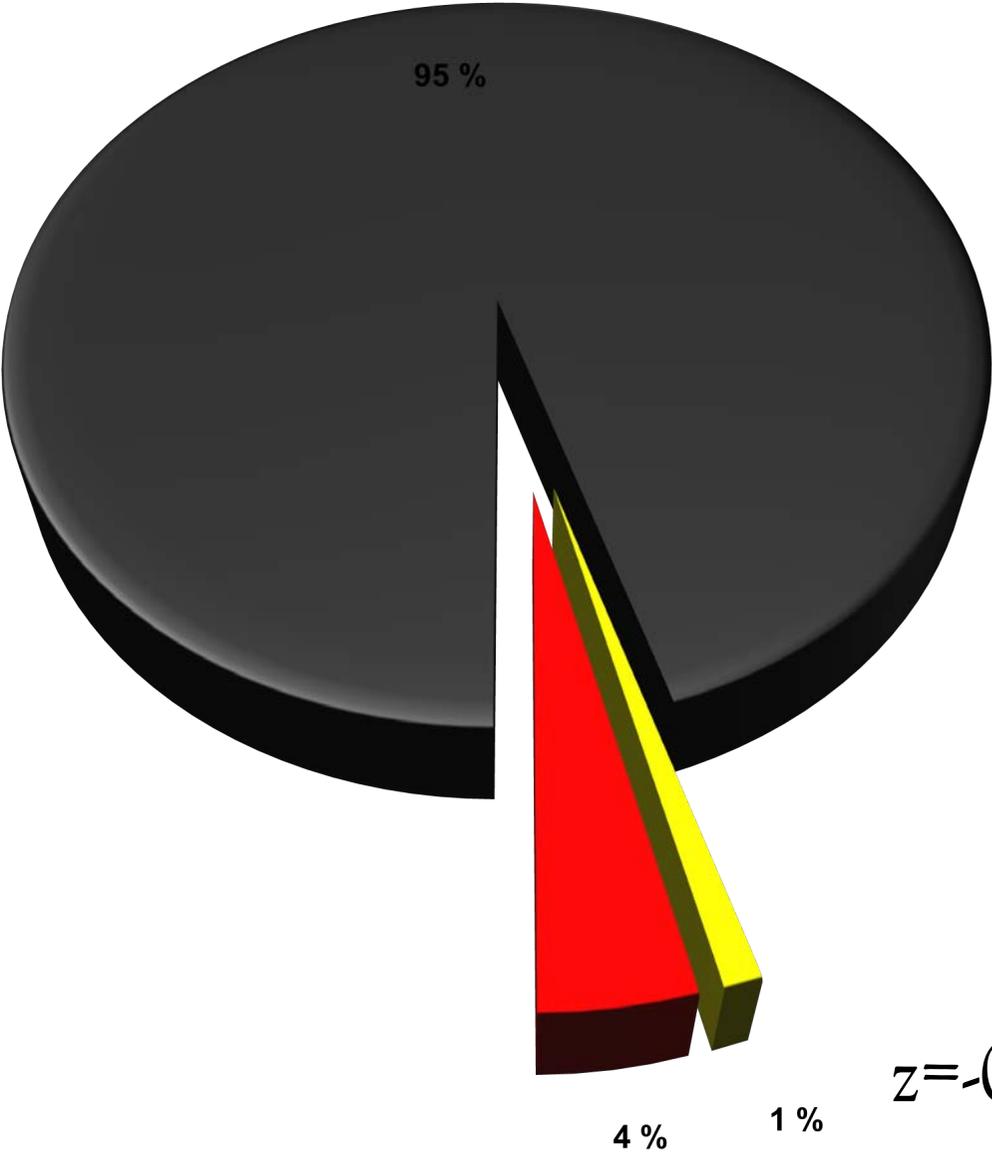


$z=1$; $a=0.5$ (vor 8 Ga)



$z=1100$; $a=9 \times 10^{-4}$ (vor 14 Ga)

- Dunkle Energie
- Baryonische Materie
- Dunkle Materie



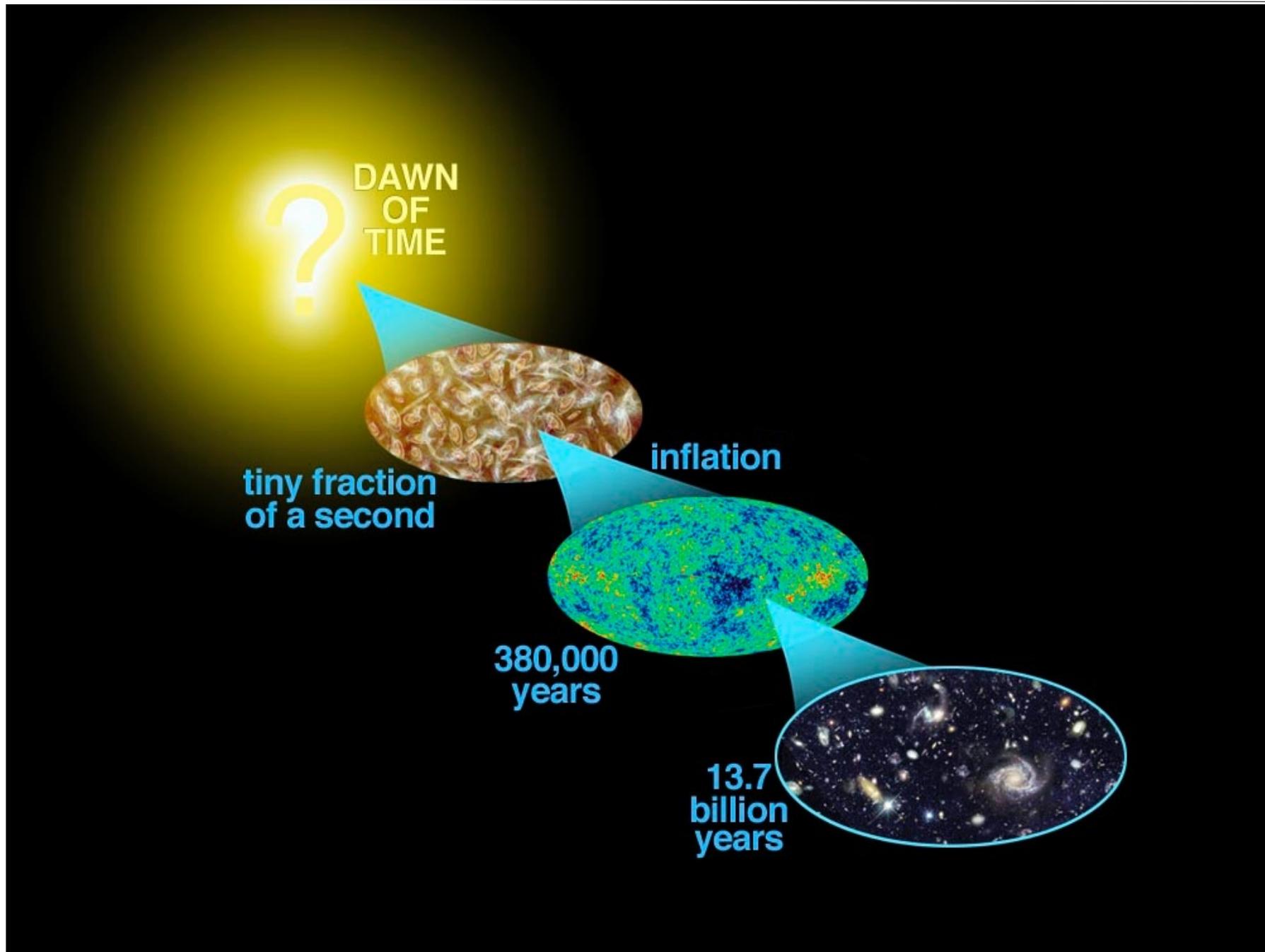
$z = -0.5 ; a = 2$ (in 10 Ga)

Ein groteskes Universum

- 95% des Universums sind von mysteriöser Natur (>99% unsichtbar)
- Es gibt mehrere Komponenten, alle derselben Größenordnung; dabei könnten sie leicht ganz verschiedener Größenordnung sein.
- In der Tat, für die meiste Zeit waren sie dies auch bzw. werden es sein.
- Nichtsdestotrotz lassen sich mit dem Modell detaillierte Vorhersagen über den Zustand des Universums machen, die zudem mit der überwiegenden Mehrheit astronomischer Beobachtungen übereinstimmen.

Zufall ?

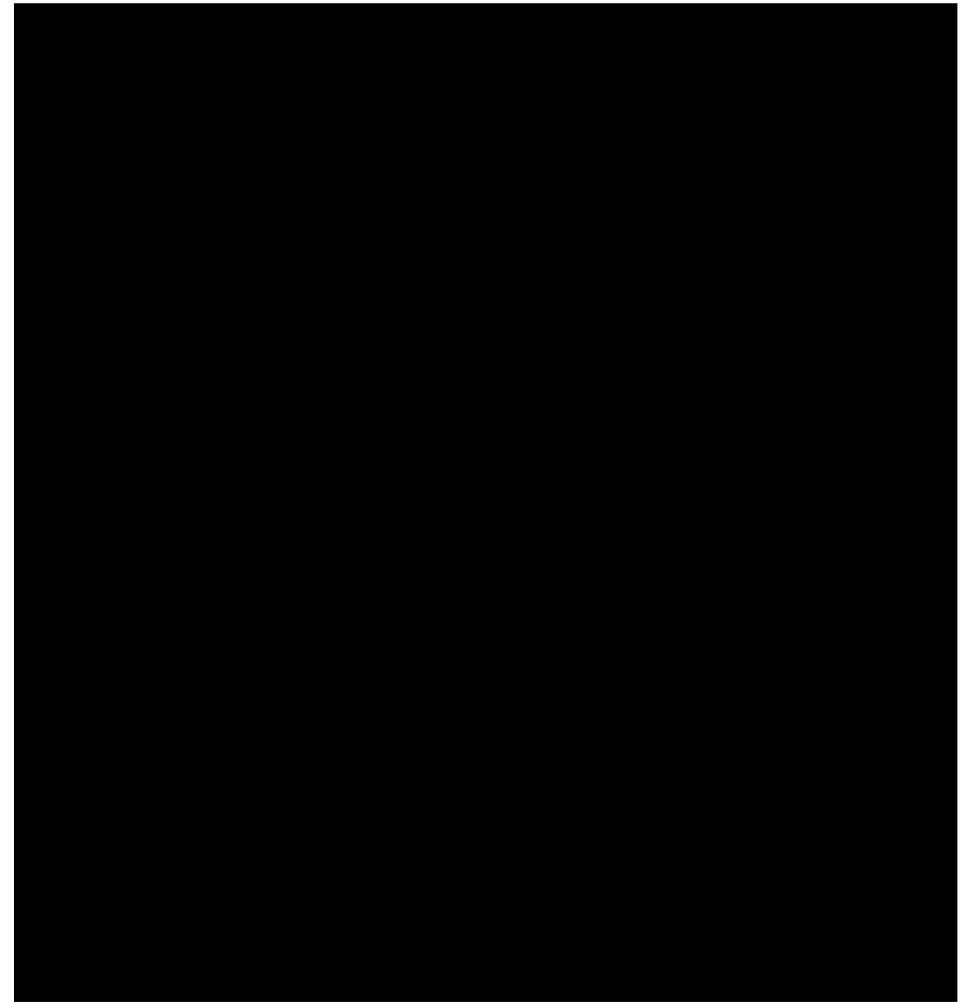
Strukturbildung im Universum (schematisch)



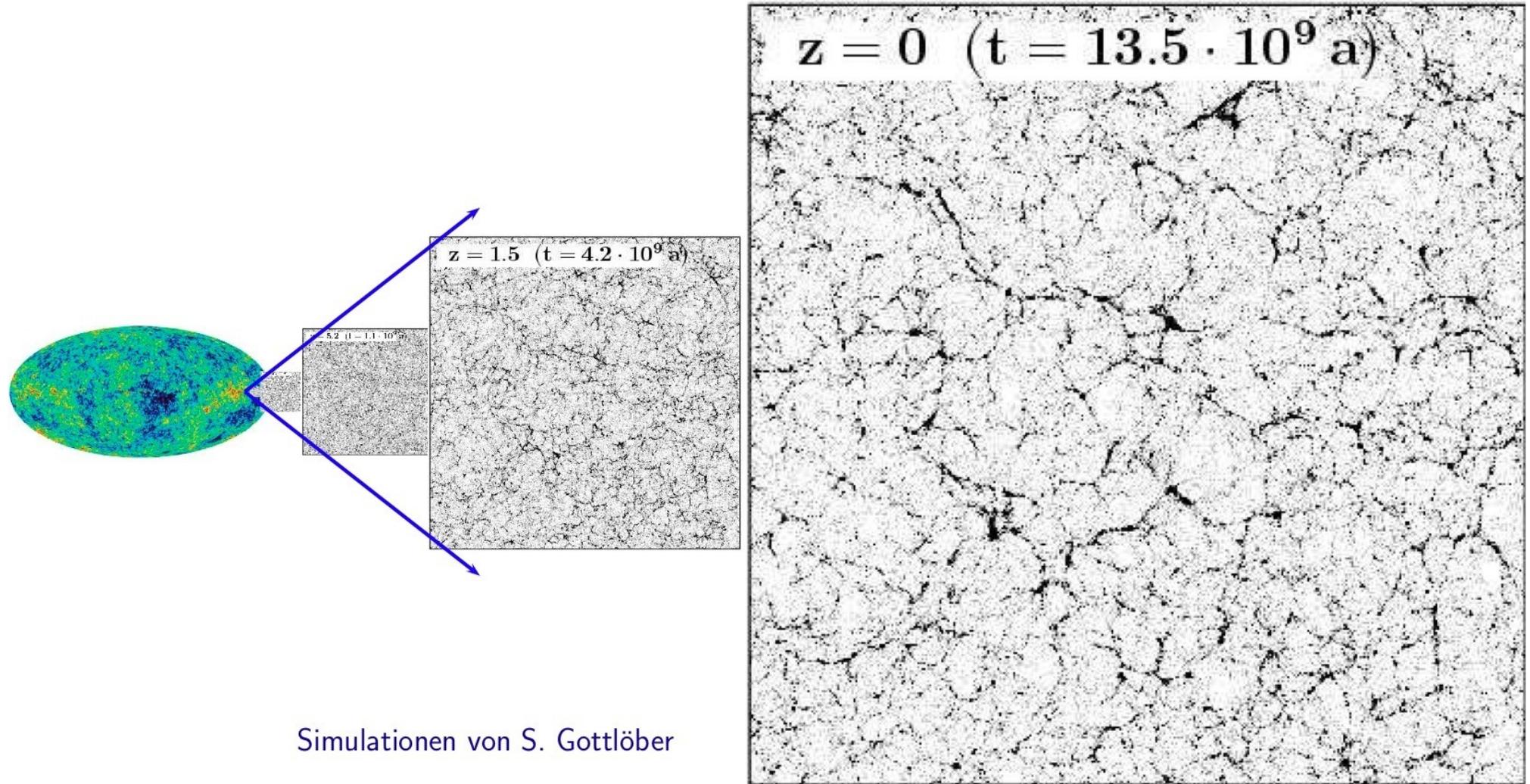
Erster Versuch: ohne dunkle Materie

beobachtet

modelliert

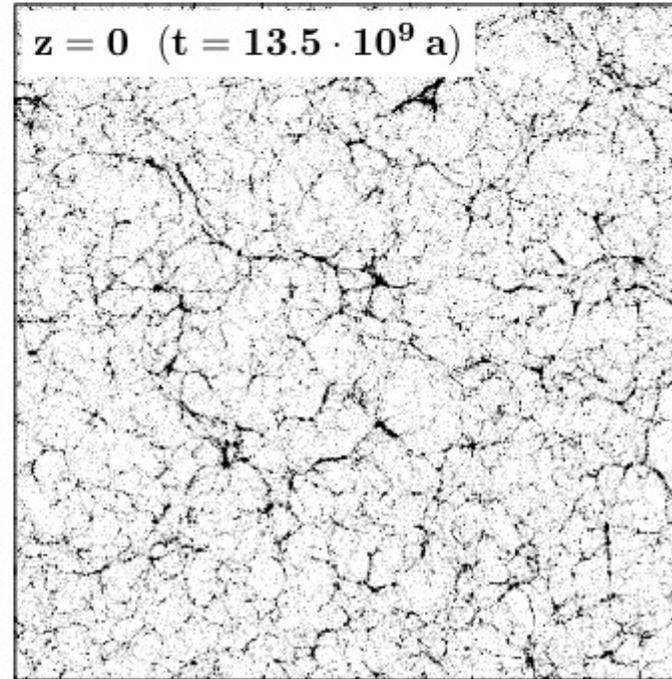
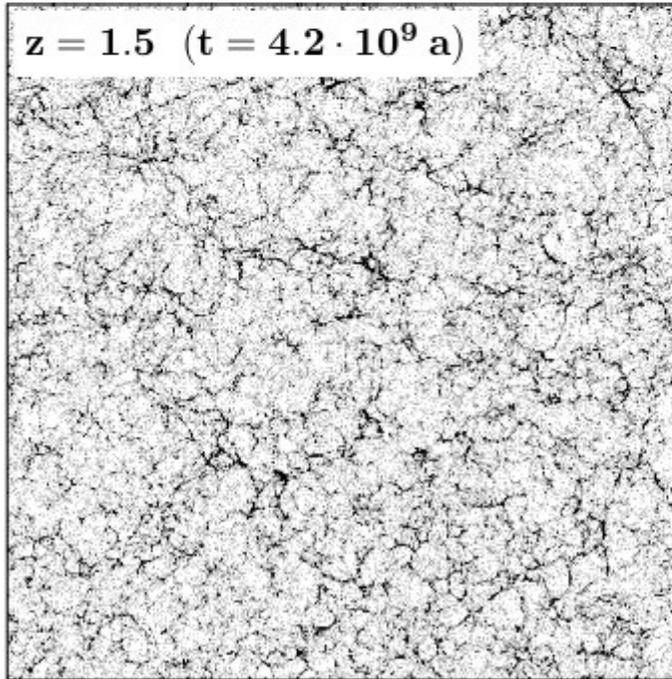
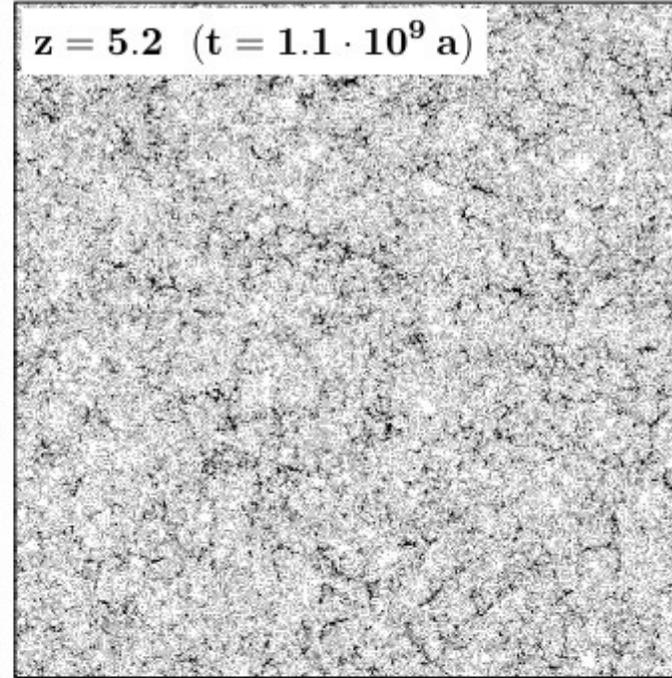
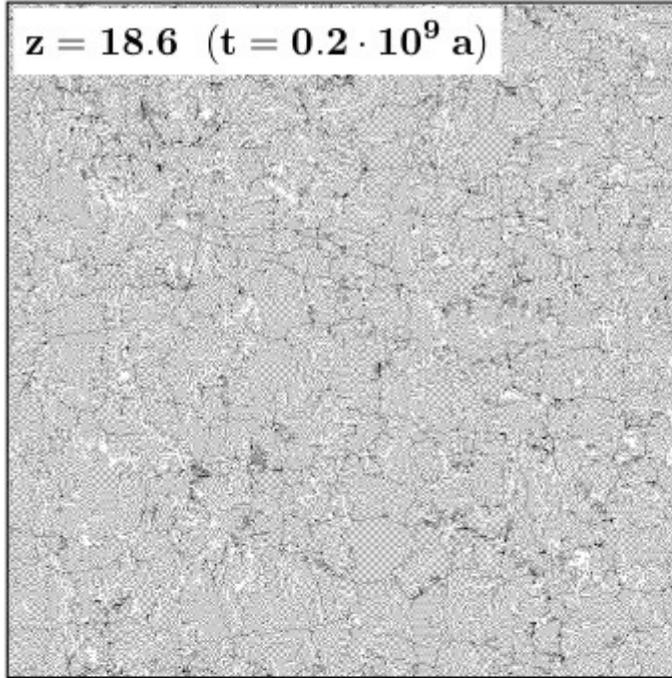


Strukturbildung und kosmische Expansion

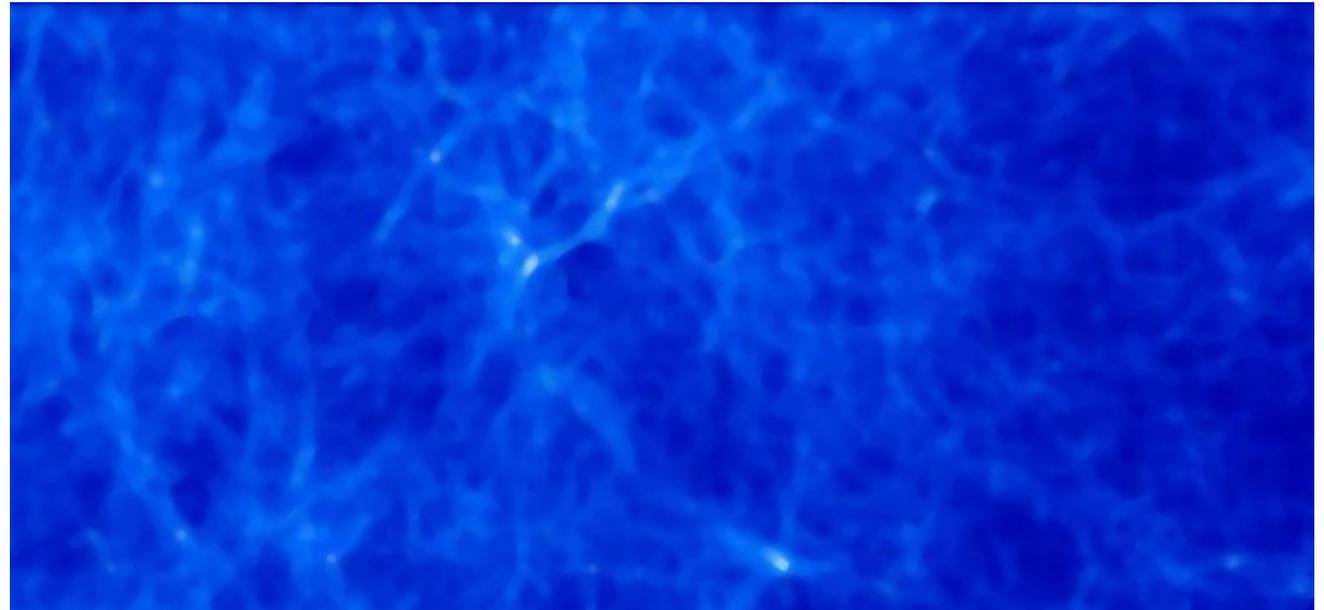


Simulationen von S. Gottlöber

Strukturbildung (korrigiert für Expansion)



Zel'dovich (1970): „pancakes“



$z=40.999$

180 Mpc/h

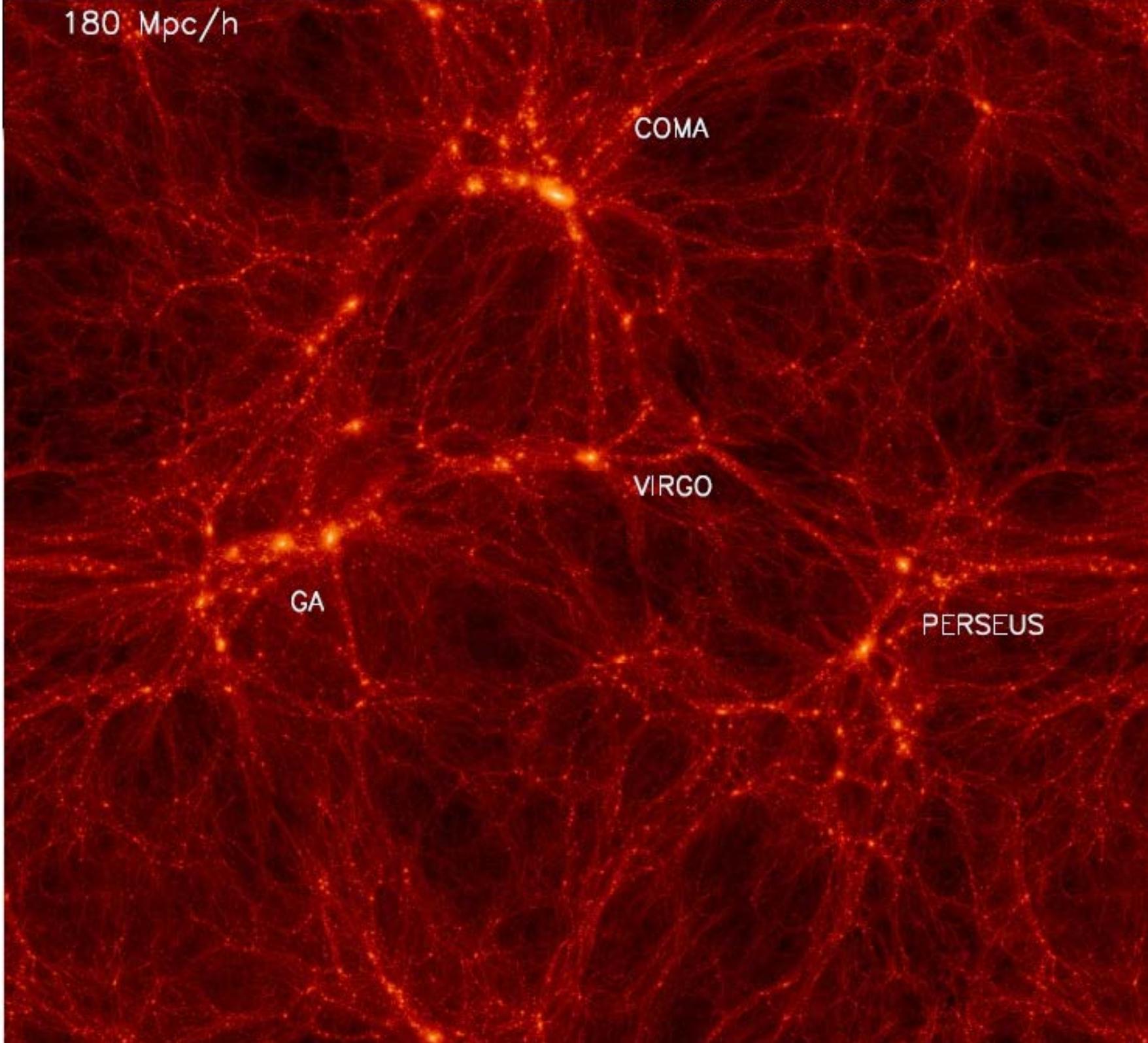
COMA

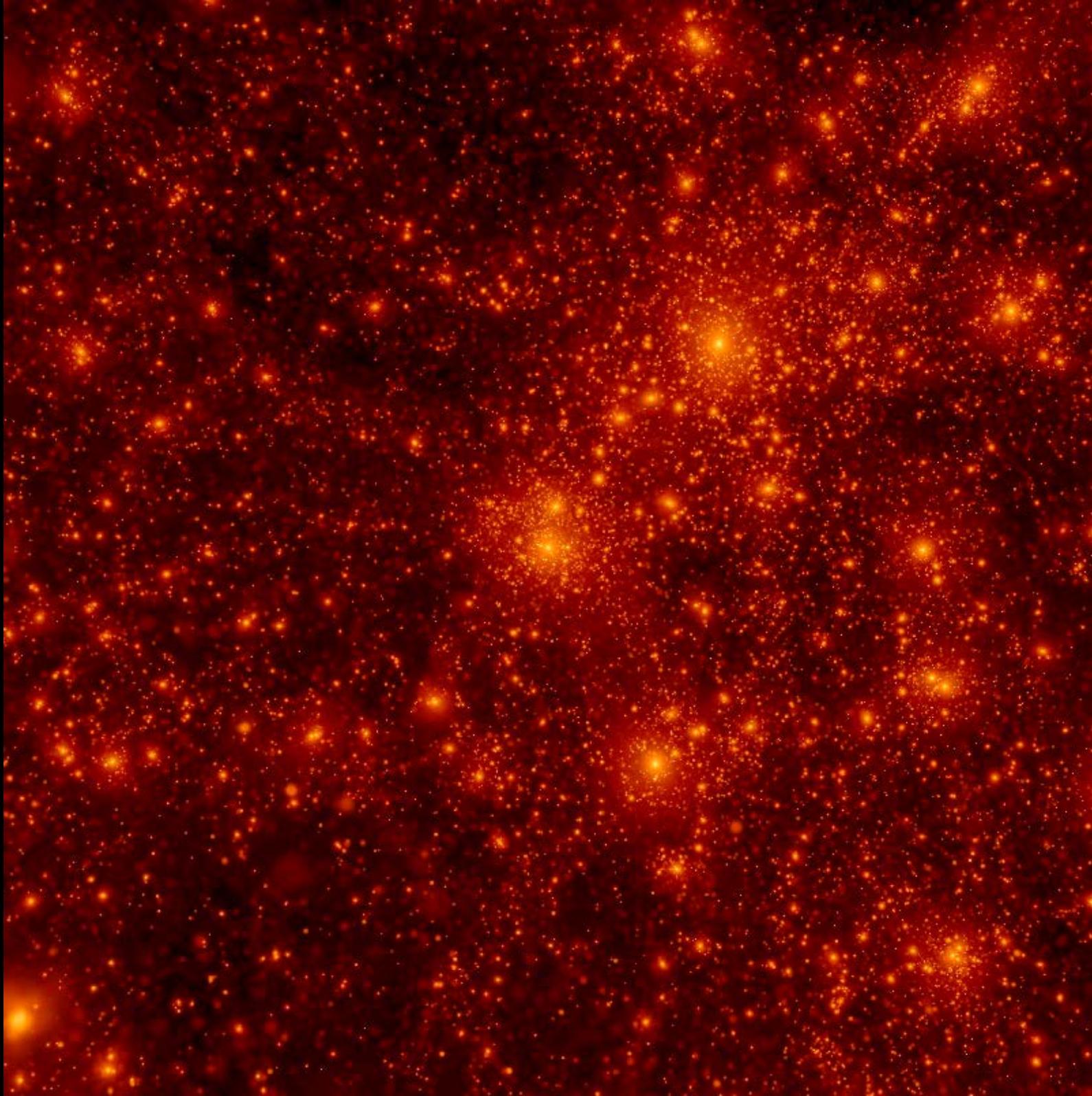
VIRGO

GA

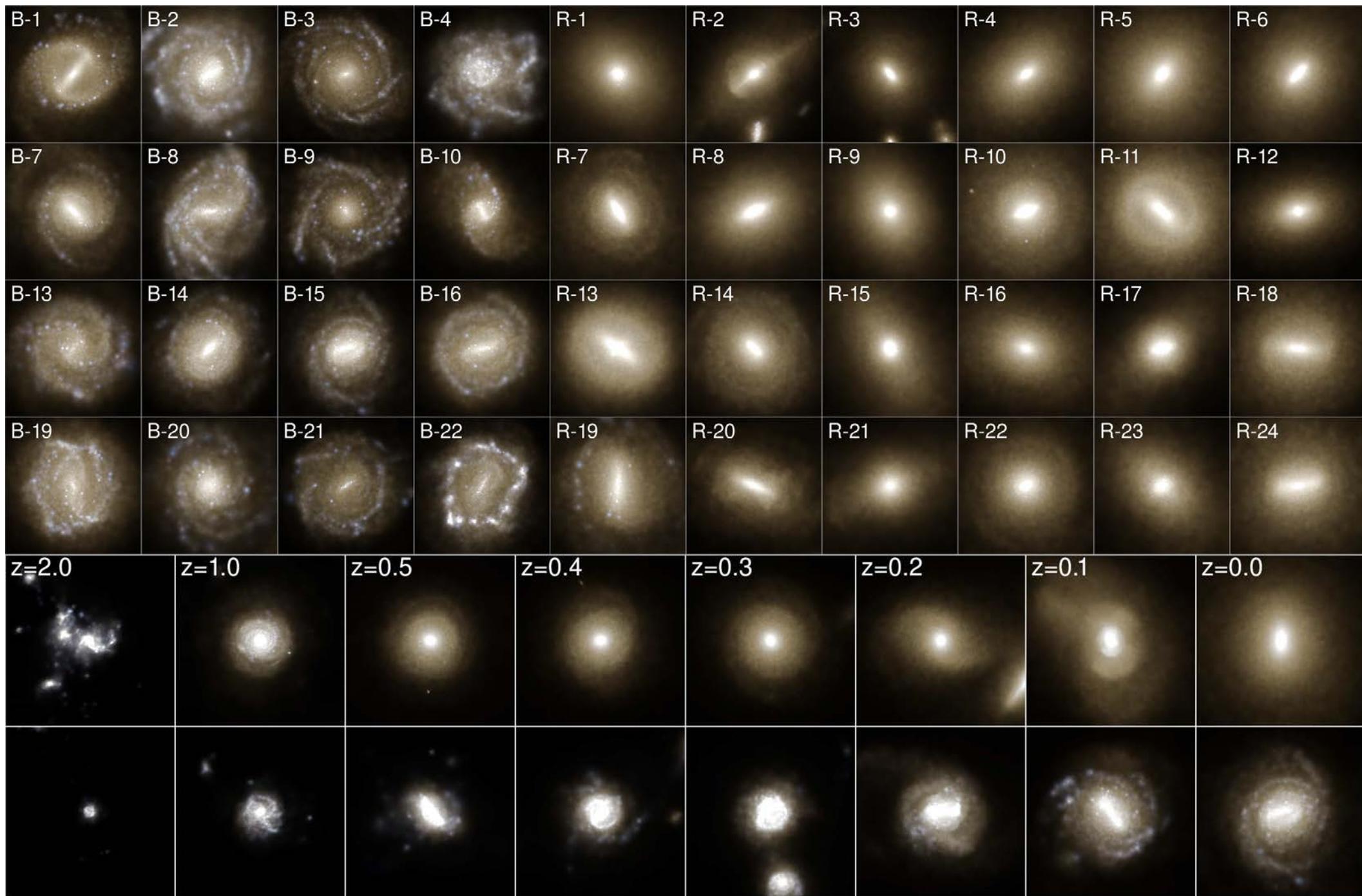
PERSEUS

$160h^{-1}$
Mpc





Illustris Simulationen (Vogelsberger et al 2014)



COSMOLOGY MARCHES ON

