

J. Wirths Aktuelle Astronomie

Doppelvortrag: *„Brauchen wir eine neue Kosmologie?“*

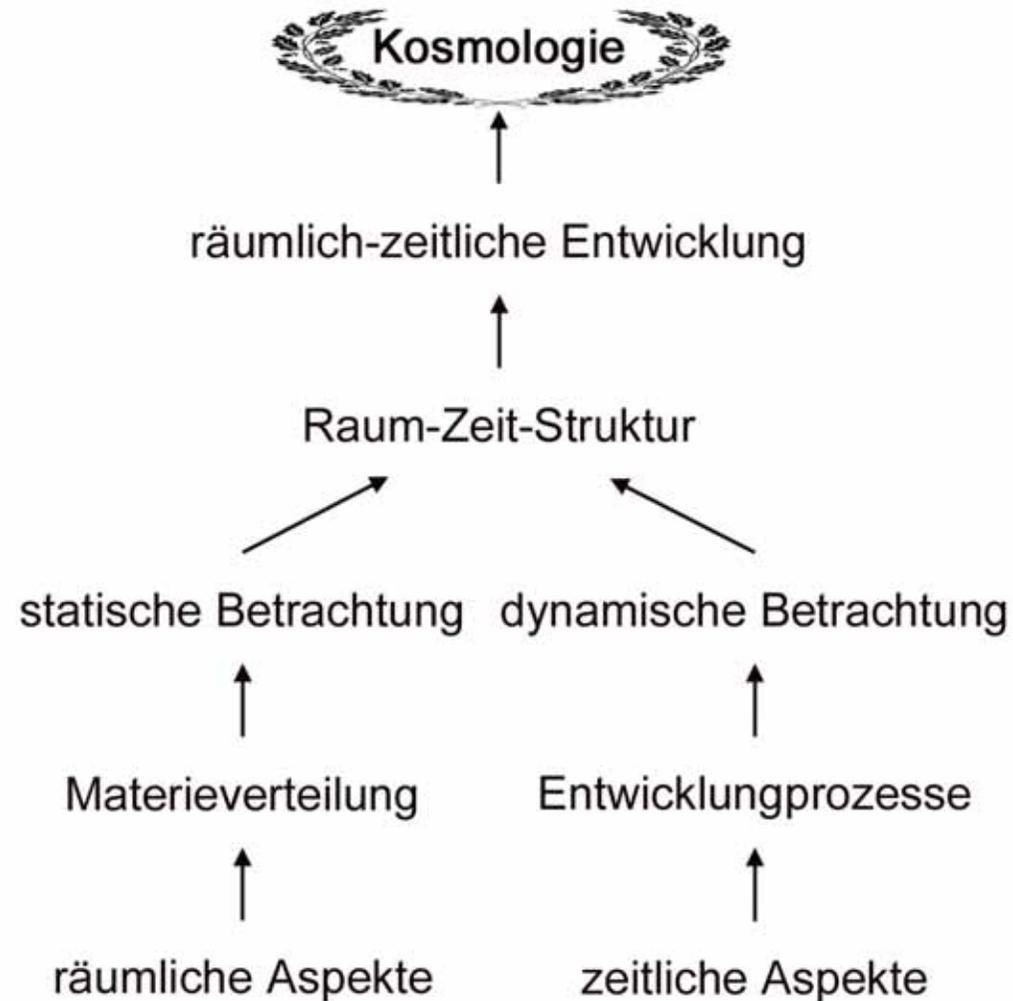
Stand: 2024 August 26

Themen

1. Aspekte der Kosmologie
2. Grundlagen:
Metrik, Raumgeometrie, Beobachtungsbefund
3. Klassifikation der Weltmodelle
4. Entwicklung von Weltmodellen
5. Auswahl eines Weltmodells
6. Inflation
7. Entwicklungsphasen des Universums
8. Universelles Schwarzes Loch?
9. Weltmodelle mit Vorgeschichte
10. Alternative Weltmodelle
11. Die neuen Beobachtungen des JWST
12. *Brauchen wir eine neue Kosmologie?*
Résumé und aktuelle Probleme

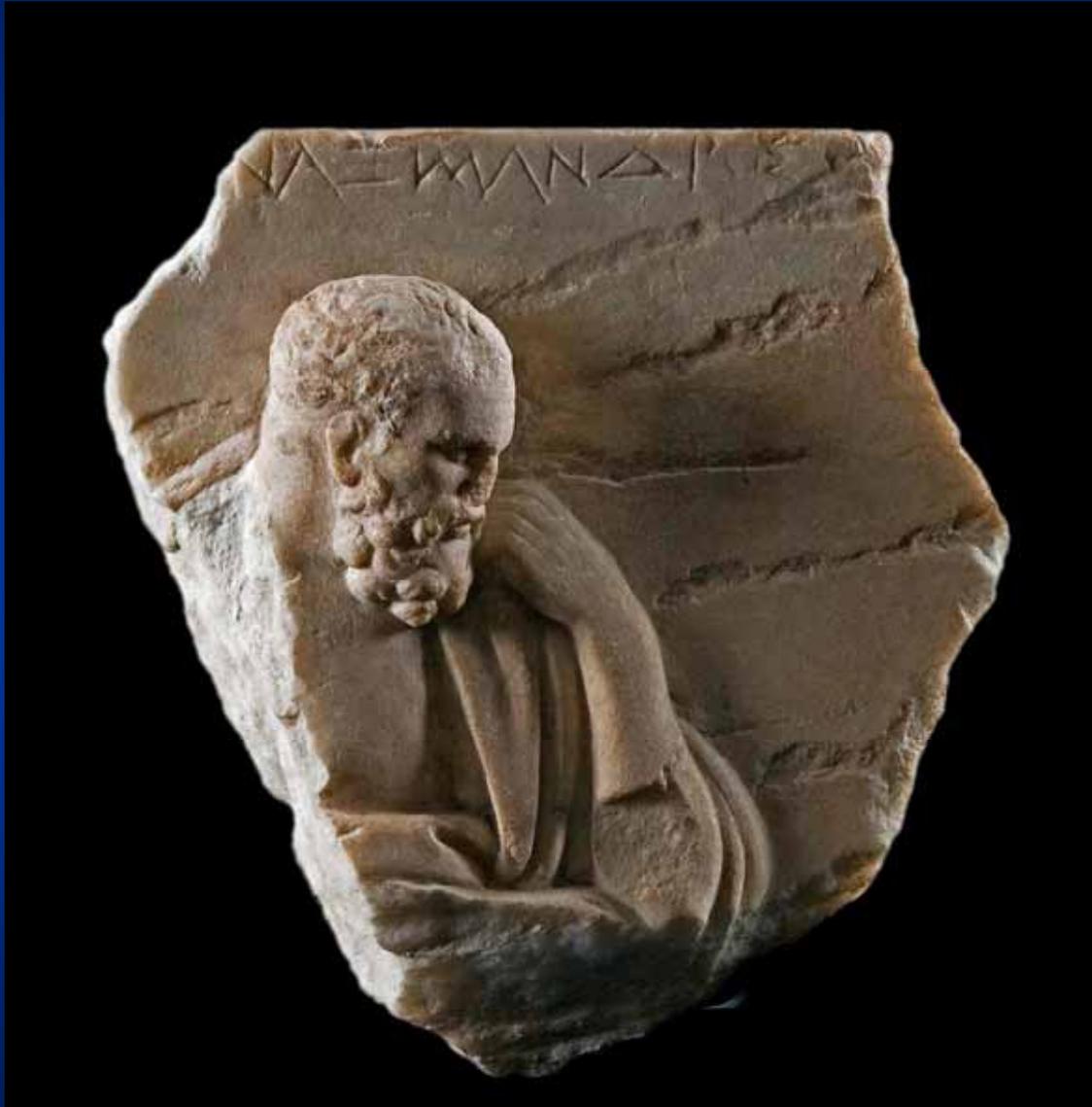
Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie



Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie



~610 bis ~547 v.Chr.

Anaximander aus Milet, der erste Kosmologe?

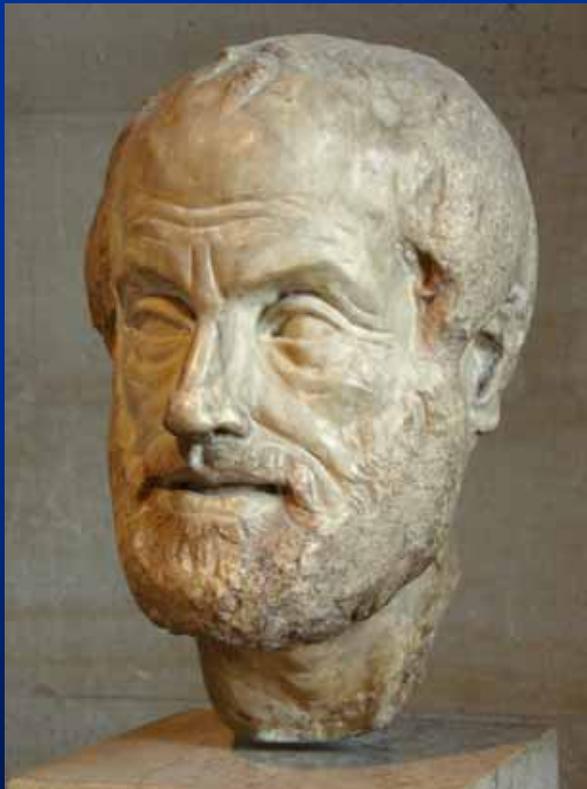
- Die Erde schwebt im Kosmos
- Definierte als Erster eine kosmische Entfernungsskala
- *„Das Prinzip der seienden Dinge ist das Grenzenlose, denn aus diesem entsteht alles und zu diesem vergeht alles.“*
- Anfang feurig und explosiv
- Erklärung der physischen Welt ohne Götter

Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie

Kosmologie ist vermutlich eine der ältesten astronomischen Disziplinen.

Schon Aristoteles (384-322 v.u.Z) schreibt:



(Louvre)

„Weil sie staunen haben die Menschen zuerst wie jetzt noch zu philosophieren begonnen; sie wunderten sich anfangs über das Unerklärliche, was ihnen entgegentrat. Allmählich machten sie auf diese Weise Fortschritte und stellten sich über Größeres Fragen, etwa über die Geschehnisse des Mondes und die von Sonne und Sternen und über die Entstehung des Alls.“

Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie

Und George Gamow schreibt 1951:

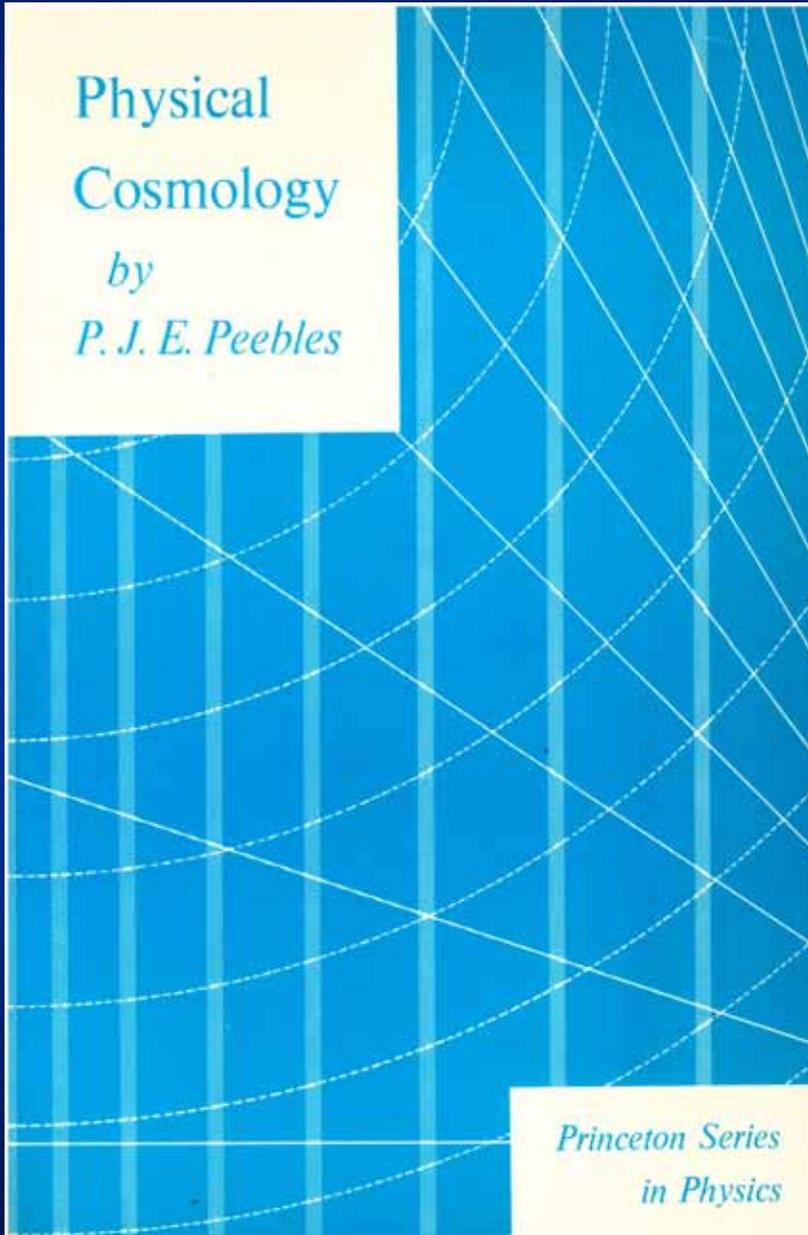
„Wir müssen also wohl die Vorstellung von einem auf Dauer unveränderlichen Universum aufgeben und stattdessen annehmen, dass die Grundmerkmale, die das uns heute bekannte Universum charakterisieren, direkte Folge einer Evolution sind, die vor ein paar Milliarden Jahren begonnen haben muss. ...



Unter dieser Annahme lässt sich das Problem einer wissenschaftlich fundierten Kosmologie als Versuch formulieren, diese Entwicklungsprozesse zu rekonstruieren, die von der Einfachheit des ersten Schöpfungstages bis zur heutigen ungeheuren Komplexität der Universums um uns herum geführt haben.“

Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie



1971:

**Das erste Buch mit einer
Beschreibung der
physikalischen Kosmologie**

Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie

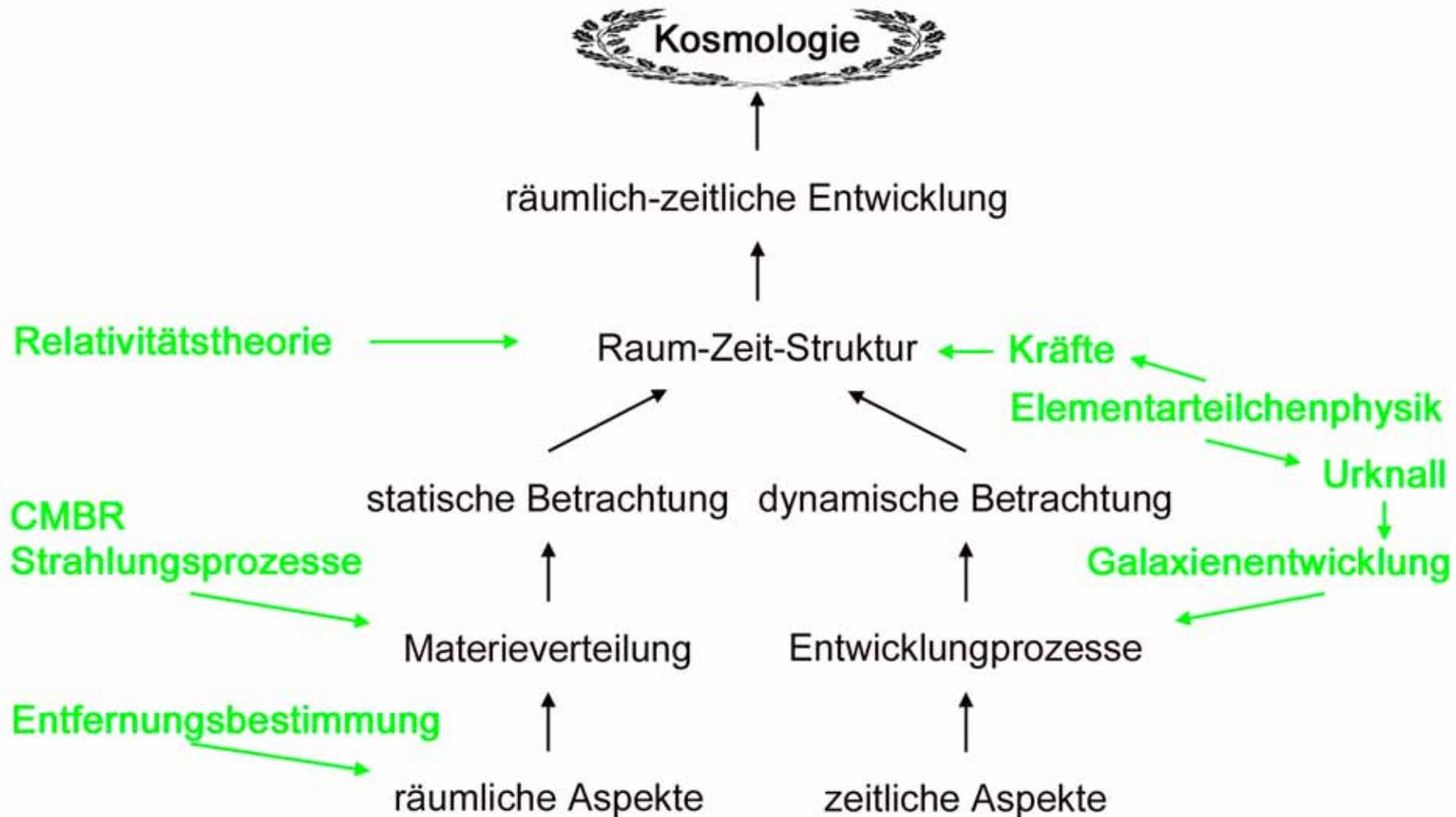
Arnold Benz schreibt 1997:

„Als besonders eindrucksvoll und harmonisch empfinde ich, dass sich die ganze Physik auf einige wenige Gesetze gründet, die mathematisch formuliert werden können. Millionen von Erscheinungen der atomaren und subatomaren wurden in den letzten fünfzig Jahren erfolgreich mit einer einzigen Theorie, der Quantenmechanik beschrieben. Ihr Kern ist die Schrödinger'sche Gleichung, nach der alle diese Naturvorgänge vor sich gehen. Die Grundprozesse der Natur scheinen einfach zu sein. Aber die Vorgänge auf der nächsthöheren Stufe, im Molekül, sind bereits so verflochten, dass sie nur angenähert und mit größter Mühe auf die physikalischen Grundgesetze zurückgeführt werden können.“



Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie



Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie

Zu erklärende Fakten:

- Das Weltall expandiert und diese Expansion ist heute beschleunigt.
- Das Weltall ist vermutlich endlich (= geschlossen), seine Geometrie jedoch nahezu flach.
- Die Expansion begann vor ca. 13.787 ± 0.02 Mrd. Jahren (= Weltalter) und endet nie.
- Die Expansion entspringt möglicherweise aus einer Singularität.
- Sie lässt sich zurück führen bis zu den Dimensionen der Planck-Größen.

Kosmologie

Einschub: Planck-Einheiten

Definiert von Max Planck im Jahr 1899 bilden die Planck-Einheiten ein System von Zahlen, die sich aus Naturkonstanten ableiten.

Planck-Masse:*

$$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{hc}{2\pi G}} = 2.18 \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$

Planck-Länge:

$$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^3}} = 1.62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Planck-Dichte:

$$\rho_{\text{Pl}} = \frac{c^2}{hG^2} = 5 \cdot 10^{92} \text{ g cm}^{-3}$$

Planck-Zeit:

$$t_{\text{Pl}} = \frac{l_{\text{Pl}}}{c} = \sqrt{\frac{hG}{2\pi c^5}} = 5.39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

Planck-Temperatur:

$$T_{\text{Pl}} = \frac{m_{\text{Pl}} c^2}{k} = 1.42 \cdot 10^{32} \text{ K}$$

c: Lichtgeschwindigkeit
G: Gravitationskonstante
h: Plancksches Wirkungsquantum
k: Boltzmann-Konstante

* die Masse, für die Schwarzschild-Radius = Compton-Wellenlänge λ_C

Kosmologie

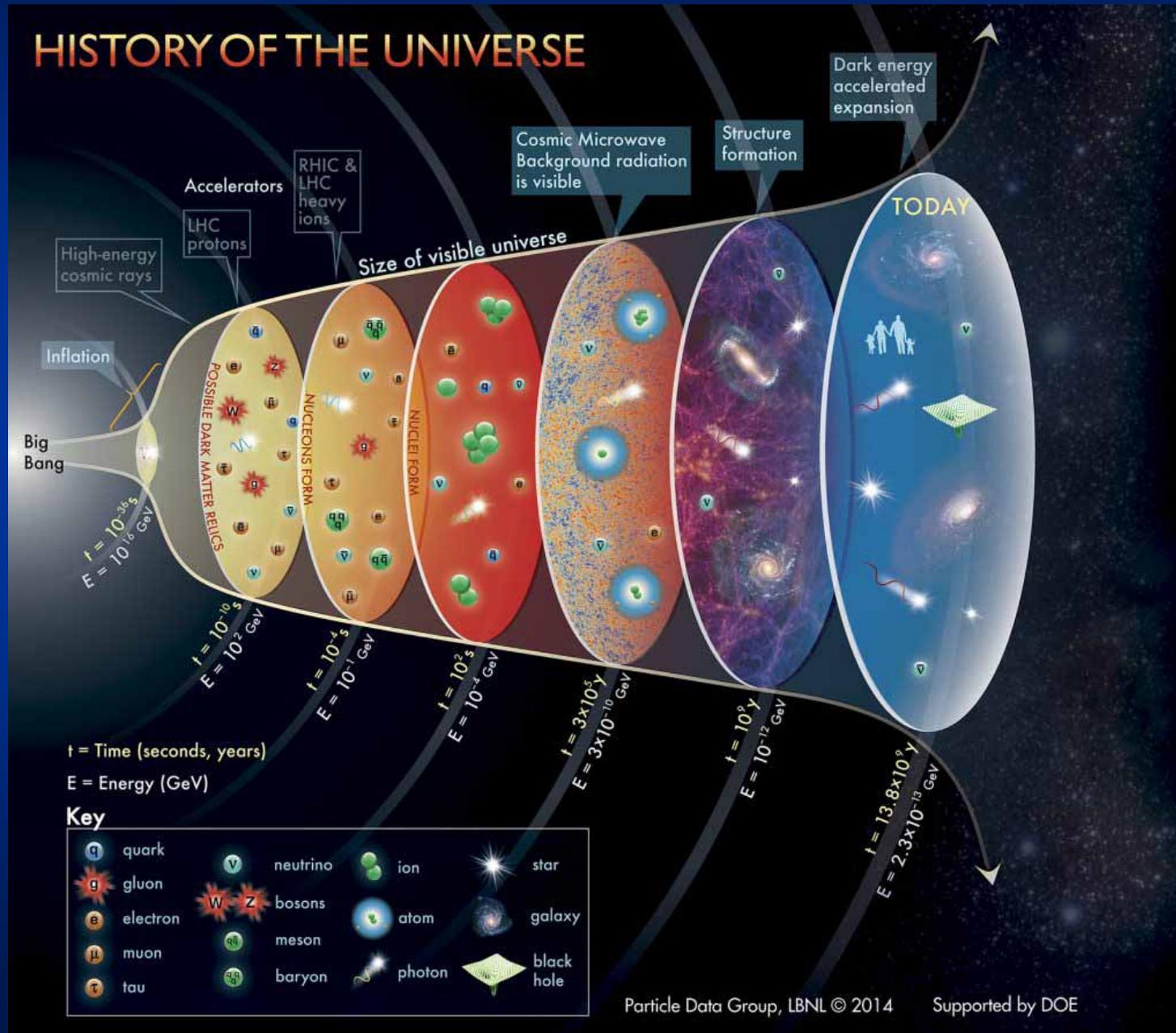
1. Aspekte der Kosmologie

Zu erklärende Fakten:

- Das Weltall expandiert und diese Expansion ist heute beschleunigt.
- Das Weltall ist vermutlich endlich (= geschlossen), seine Geometrie jedoch nahezu flach.
- Die Expansion begann vor ca. 13.787 ± 0.02 Mrd. Jahren (= Weltalter) und endet nie.
- Die Expansion entspringt möglicherweise aus einer Singularität.
- Sie lässt sich zurück führen bis zu den Dimensionen der Planck-Größen.
- Das Weltall ist erfüllt von Dunkler Materie.

Kosmologie

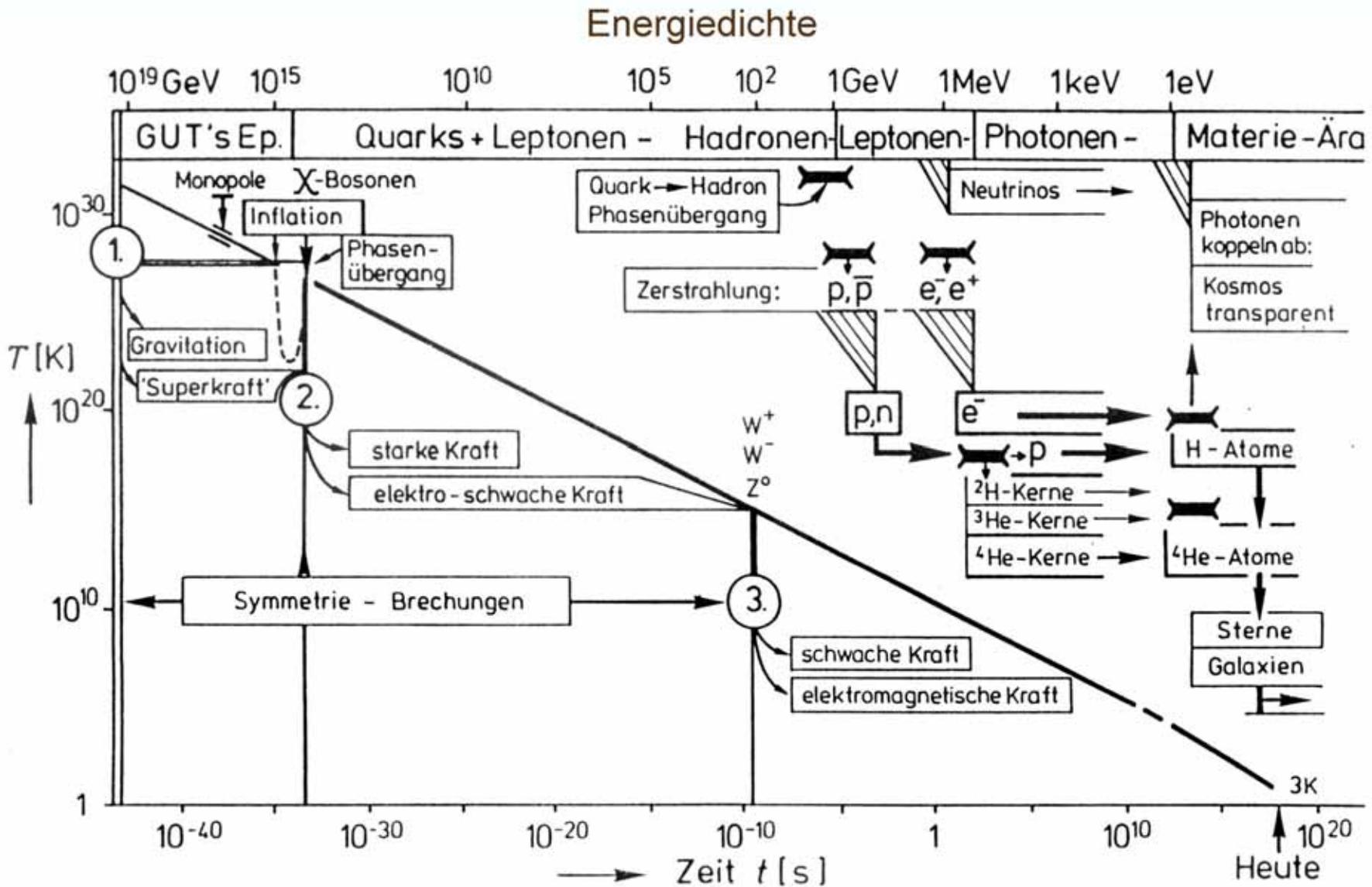
1. Aspekte der Kosmologie



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Kosmologie

1. Aspekte der Kosmologie



Kosmologie

2. Grundlagen: Die Metrik

Für alle Geometrien gilt:

Die Geometrien sind kongruent, d.h.:

Die Metrik ist uniform, homogen und isotrop.

Kosmologie

2. Grundlagen: Die Metrik

1. Euklidische Geometrie (nach Euklid, 4.-3. Jh.v.u.Z.)

Beschreibung: flach, unendlich,
keine innere Skalenlänge ($R = \infty$)

Krümmungsparameter: $k = 0$; Krümmung: $K = k/R^2 = 0$

Umfang eines Kreises: $U = \pi d$

Winkelsumme im Dreieck: 180°

Parallelen: 1

Kosmologie

2. Grundlagen: Die Metrik

2. Sphärische Geometrie (nach Riemann, 1826-1866)

Beschreibung: sphärisch, endlich, innere Skalenlänge R

Krümmungsparameter: $k = +1$; Krümmung: $K > 0$

Umfang eines Kreises: $U < \pi d$

Winkelsumme im Dreieck: $> 180^\circ$

Parallelen: 0

Äquivalenz im euklidischen Raum: Kugeloberfläche

Kosmologie

2. Grundlagen: Die Metrik

3. Hyperbolische Geometrie

(nach Gauß, Lobatschewskij, Bolyai, ~1850)

Beschreibung: hyperbolisch, unendlich, innere Skalenlängen $\pm R$

Krümmungsparameter: $k = -1$, Krümmung: $K < 0$

Umfang eines Kreises: $U > \pi d$

Winkelsumme im Dreieck: $< 180^\circ$

Parallelen: ∞

Äquivalenz im euklidischen Raum: nicht darstellbar!

Kosmologie

2. Grundlagen: Die Metrik

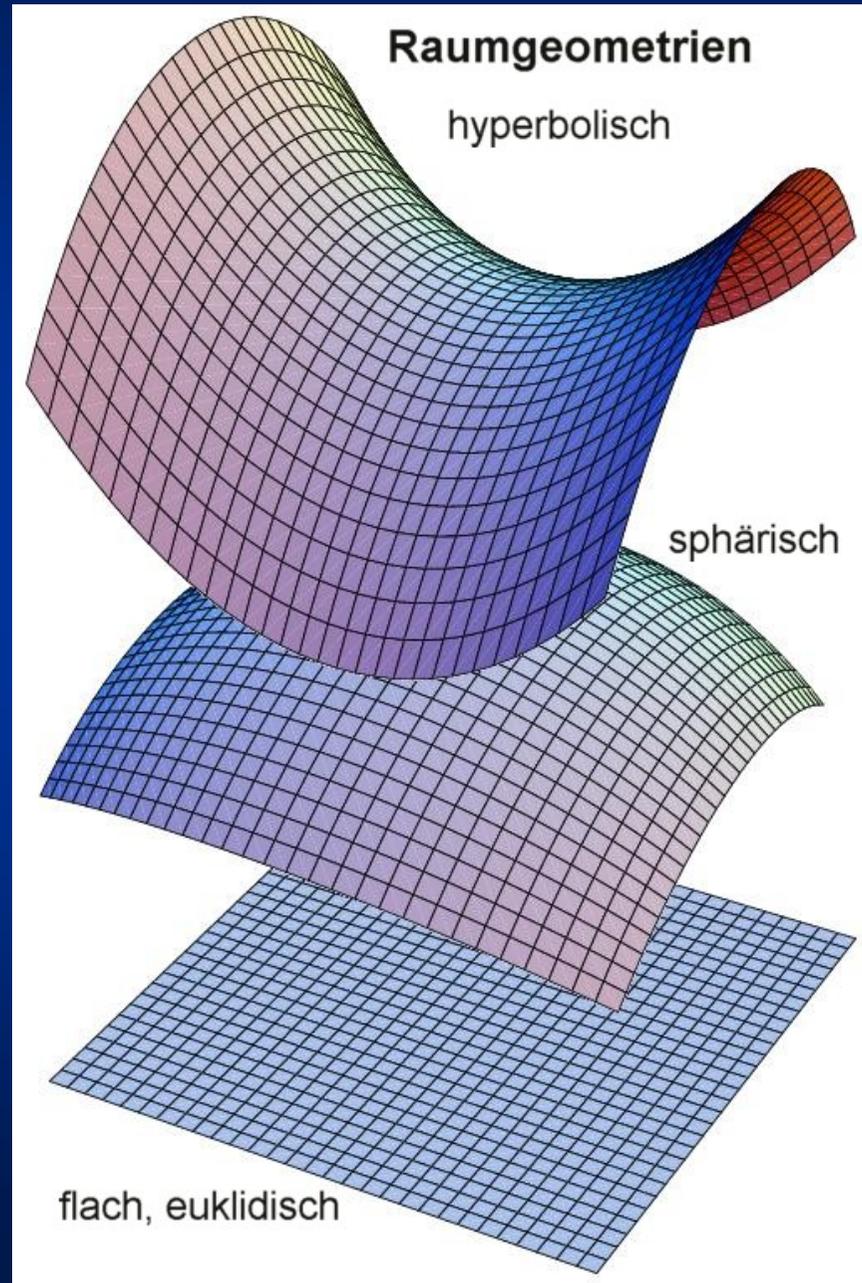
4. Krümmung

Die Krümmung $K = k/R^2$ ist als innere Eigenschaft der Metrik / Geometrie des Raums zu verstehen und bedarf keiner äußeren Einbettung.

Bei großer Skalenlänge / Skalenparameter sind die verschiedenen Geometrien in kleinen Raumgebieten nicht zu unterscheiden!

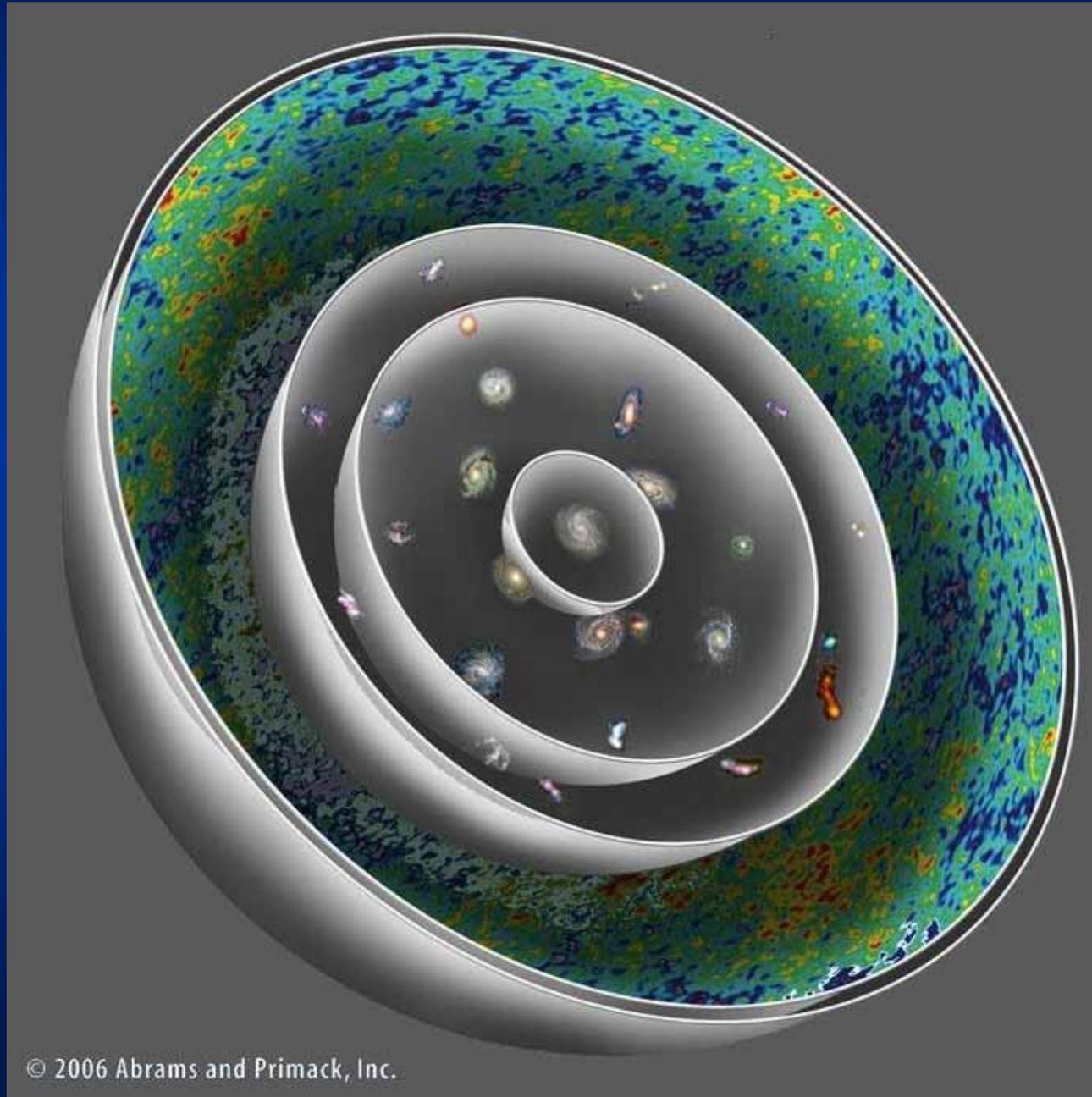
Kosmologie

2. Grundlagen: Raumgeometrien



Kosmologie

2. Grundlagen: Beobachtungsbefund



© 2006 Abrams and Primack, Inc.

Kosmologie

3. Klassifikation der Weltmodelle

Unterscheidung

- Geometrie / Metrik: nach Krümmung (k-Parameter)
- Kinematik: statisch, expandierend, kollabierend
- Dynamik: nach Friedmann-Lemaître-Gleichungen

Krümmung: $k = -1; 0; +1$

$\Lambda < 0$
 $\Lambda = 0$
 $0 < \Lambda < \Lambda_{\text{Einstein}}$
 $\Lambda = \Lambda_{\text{Einstein}}$
 $\Lambda > \Lambda_{\text{Einstein}}$

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Definitionen

Maßfaktor / Skalengröße

$$R$$

„Weltradius“

Krümmung

$$K = \frac{k}{R^2} \quad \text{mit } k = -1, 0, 1$$

Hubble-Lemaître-Parameter

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

Hubble-Zeit

$$\tau = \frac{1}{H_0}$$

„Weltalter“

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Definitionen

Verzögerungs- / Bremsparameter

$$q = -\frac{\ddot{R}}{R} \frac{1}{H^2} \quad \text{mit} \quad h = \frac{\dot{R}}{R} \quad \Rightarrow \quad q = -\frac{h}{H^2}$$

2. Friedmann-Gleichung

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

$q > 0.5$ geschlossen

mit $q = 0.5$ flach

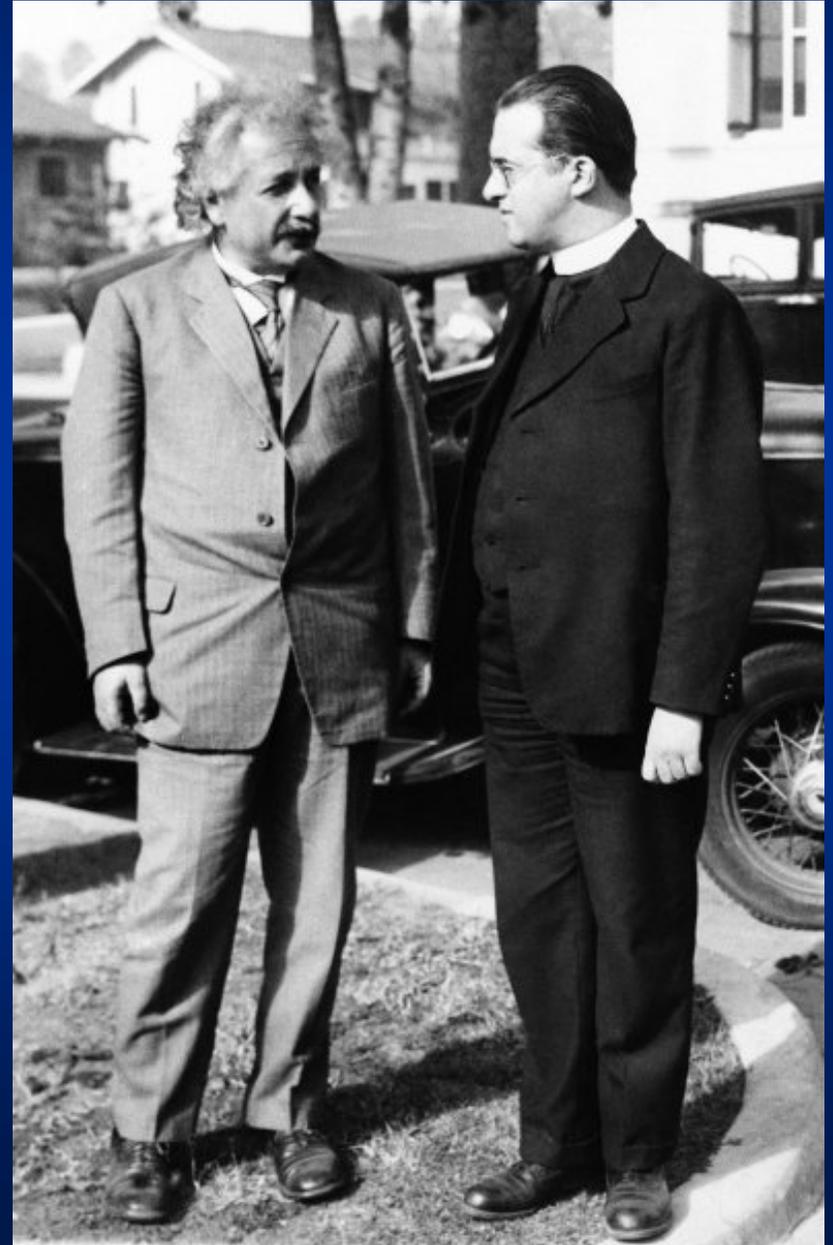
$q < 0.5$ offen

$$q_0 = \frac{4\pi G}{3H_0^2} (\rho_0 - \Lambda c^2)$$

Λ : kosmologische Konstante aus der ART - geometrische Krümmung der Raumzeit mit der Bedeutung einer (positiven oder negativen) Energiedichte des Vakuums

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

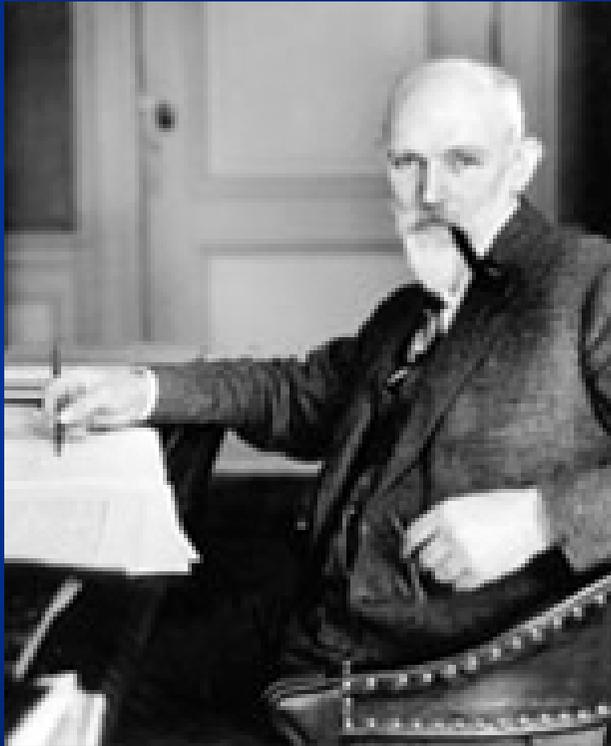


Albert Einstein und George Lemaître 1933 in Pasadena

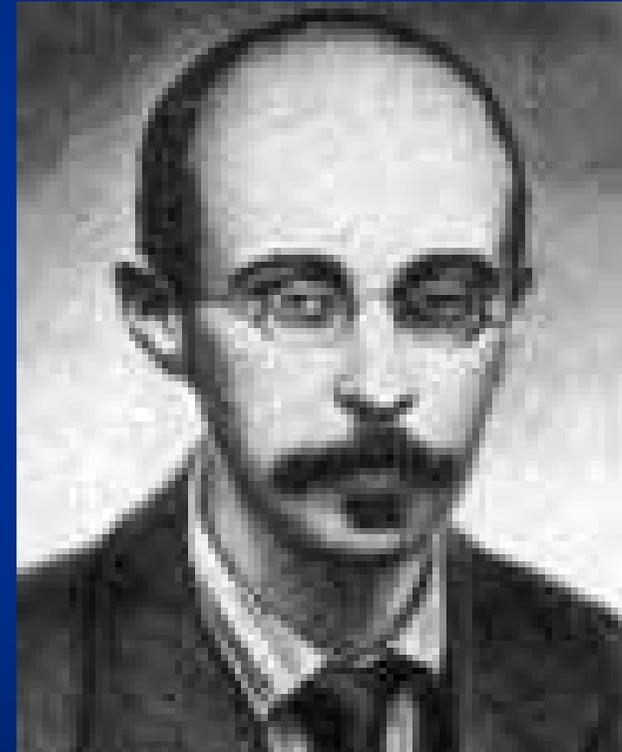
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Geschichte



Willem de Sitter (1872-1934)



Alexander Friedmann (1888-1925)

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Geschichte

De Sitter-Universum (1917)

$q=-1$ $k=0$ \Rightarrow Metrik: offen, eben, keine Materie
stationär

Λ -Kraft \Rightarrow Expansion

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Geschichte

Friedmann - Universen (1922-24)



gleichförmig expandierend, $q > 0$

Einstein-de Sitter-Modelle

Knümmung	$k = -1$	0	$+1$
Alter	$t > \frac{2}{3} \frac{1}{H}$	$= \frac{2}{3} \frac{1}{H}$	$< \frac{2}{3} \frac{1}{H}$
Beschleunigung	$q < \frac{1}{2}$	$= \frac{1}{2}$	$> \frac{1}{2}$
Dichte	$\rho < \rho_{kr}$	$= \rho_{kr}$	$> \rho_{kr}$
	hyperbolisch offen	eben offen	Sphärisch geschlossen

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Geschichte

Kritische Dichte: $\rho_c = 3 H_0^2 / 8\pi G$

für $H_0 = 73 \text{ km/s}\cdot\text{Mpc}$ beträgt $\rho_c = 1.001 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$

Universelle Gravitationskonstante: $G = 6.674 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$

Aktuelle Bestimmungen von H_0 in $\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$:

HST	74.2 ± 3.6	Gravitationslinsen	69.7 ± 4.9
WMAP	70.9 ± 1.3	Planck	67.04 ± 0.46
Chandra	77 ± 4	SN & Cepheiden	73.04 ± 1.0
Aktueller Bestwert (CCHP, August 2024)			69.96 ± 1.05

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Geschichte

Friedmann-Lemaître-Universen (1927/30)

$\Lambda > 0 \Rightarrow$ Metrik: offen, hyperbolisch

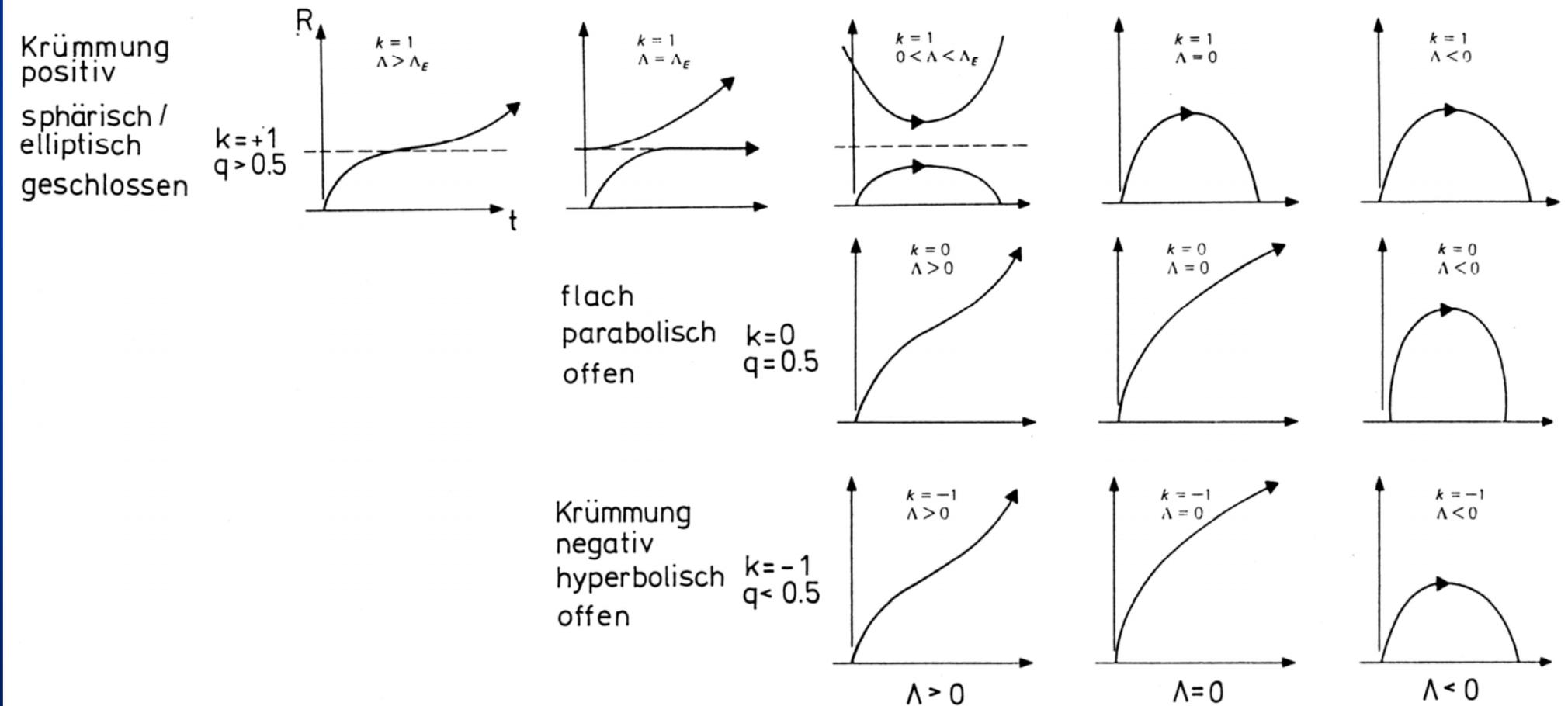
anfangs überwiegt Gravitation \Rightarrow Abbremsung
dann überwiegt die Λ -Kraft \Rightarrow Beschleunigung

$\Lambda < 3.1 \cdot 10^{-52} \text{ m}^{-2} = \Lambda_{\text{Einstein}} \Rightarrow$ ohne Wirkung

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Kaleidoskop von Weltmodellen



Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Oszillierende / pulsierende Modelle

$$V = 2\pi^2 R^3$$

$$M = 2\pi^2 R^3 \rho$$

$$R = \frac{2GM}{\pi c^2} = \frac{1}{\pi} r_s$$

oszillierend

$$R_{\max} = R_0 \left(\frac{2q}{2q-1} \right)$$

$$T = \frac{2\pi q}{(2q-1)^{3/2}} \frac{1}{H}$$

$$q=1: T = 2\pi t$$

(100 Mrd.a)

T, R_{\max}, P

nehmen von

Periode zu Periode
zu

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Parameter

Dichte-Parameter:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

Massendichte:
(barionisch + nicht-barionisch)

$$\rho_M = \frac{M}{V} = 3.17 \cdot 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

Barionischer Anteil:

$$\rho_B = 0.49 \cdot 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$$

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Parameter

Dichte-Parameter:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

Massendichte:
(barionisch + nicht-barionisch)

$$\rho_M = \frac{M}{V} = 3.17 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

Strahlungsdichte:

$$\rho_s = 0.0005 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_s = \frac{\rho_s}{\rho_c}$$

„Lambda“-Dichte (äquiv.):

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} = 6.83 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

Kosmologische Konstante:

$$\Lambda = 6.83 \cdot 10^{-21} \frac{8\pi G}{c^2} = 1.27 \cdot 10^{-46} \text{ m}^{-2}$$

Heute: zeitlich konstante Energiedichte ρ_v des Vakuums

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Parameter

Dichte-Parameter:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

Massendichte:
(barionisch + nicht-barionisch)

$$\rho_M = \frac{M}{V} = 3.17 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

Strahlungsdichte:

$$\rho_s = 0.0005 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_s = \frac{\rho_s}{\rho_c}$$

„Lambda“-Dichte (äquiv.):

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} = 6.83 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

Kosmologische Konstante:

$$\Lambda = 6.83 \cdot 10^{-21} \frac{8\pi G}{c^2} = 1.27 \cdot 10^{-46} \text{ m}^{-2}$$

Das entspricht $5.24 \cdot 10^{-10} \text{ J m}^{-3}$. Quantenphysikalische Ableitungen ergeben mit $10^{111} \text{ J m}^{-3}$ um 120 Größenordnungen höhere Werte für ρ_v .

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Parameter

Dichte-Parameter:

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_c}$$

Massendichte:
(barionisch + nicht-barionisch)

$$\rho_M = \frac{M}{V} = 3.17 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_M = \frac{\rho_M}{\rho_c}$$

Strahlungsdichte:

$$\rho_s = 0.0005 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_s = \frac{\rho_s}{\rho_c}$$

„Lambda“-Dichte (äquiv.):

$$\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} = 6.83 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

„Krümmungs“-Dichte (äquiv.):

$$\rho_k = \frac{-kc^2}{H_0^2 R_0^2} = -0.03 \cdot 10^{-30} \text{ gcm}^{-3}$$

$$\Omega_k = \frac{\rho_k}{\rho_c}$$

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter

„Die Krümmung der Welt ist direkter Ausdruck des Schwerefeldes und proportional zur Massendichte. So bestimmen es die Einsteinschen Gleichungen. Dabei kann die Krümmung einen Grundzustand haben, der durch die sogenannte kosmologische Konstante dargestellt wird, die man auch als Schwerewirkung des leeren Raums ansehen kann.“

(Prof. D.-E. Liebscher, AIP 1992)

Ändert sich das Maß des Raums mit der Zeit, ergibt sich aus den Einsteinschen Gleichungen die Friedmann-Gleichung.

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter

Friedmann-Gleichung:

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

Die Friedmann-Gleichung stellt einen Zusammenhang her zwischen dem Hubble-Parameter H , der die zeitliche Veränderung der Größe des Universums beschreibt, und der Dichte ρ , der Geometrie / Krümmung k und der Dunklen Energie in Form der kosmologischen Konstanten Λ .

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt} \text{ ist die zeitliche Veränderung von } R.$$

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter

Friedmann-Gleichung:

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



$$\frac{8\pi G \rho_M}{3H^2} + \frac{8\pi G \rho_\Lambda}{3H^2} - \frac{k}{H^2 R^2} = 1$$

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$

mit: $\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_\nu + \Omega_\gamma$

$$\dot{R} = \frac{dR}{dt} \text{ ist die zeitliche Veränderung von R.}$$

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter

$$\Omega_B + \Omega_{DM} + \Omega_\nu + \Omega_\gamma + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1$$

$$\sim 0.049 + \sim 0.268 + \sim 0 + \sim 0 + \sim 0.683 + \sim 0 = 1$$

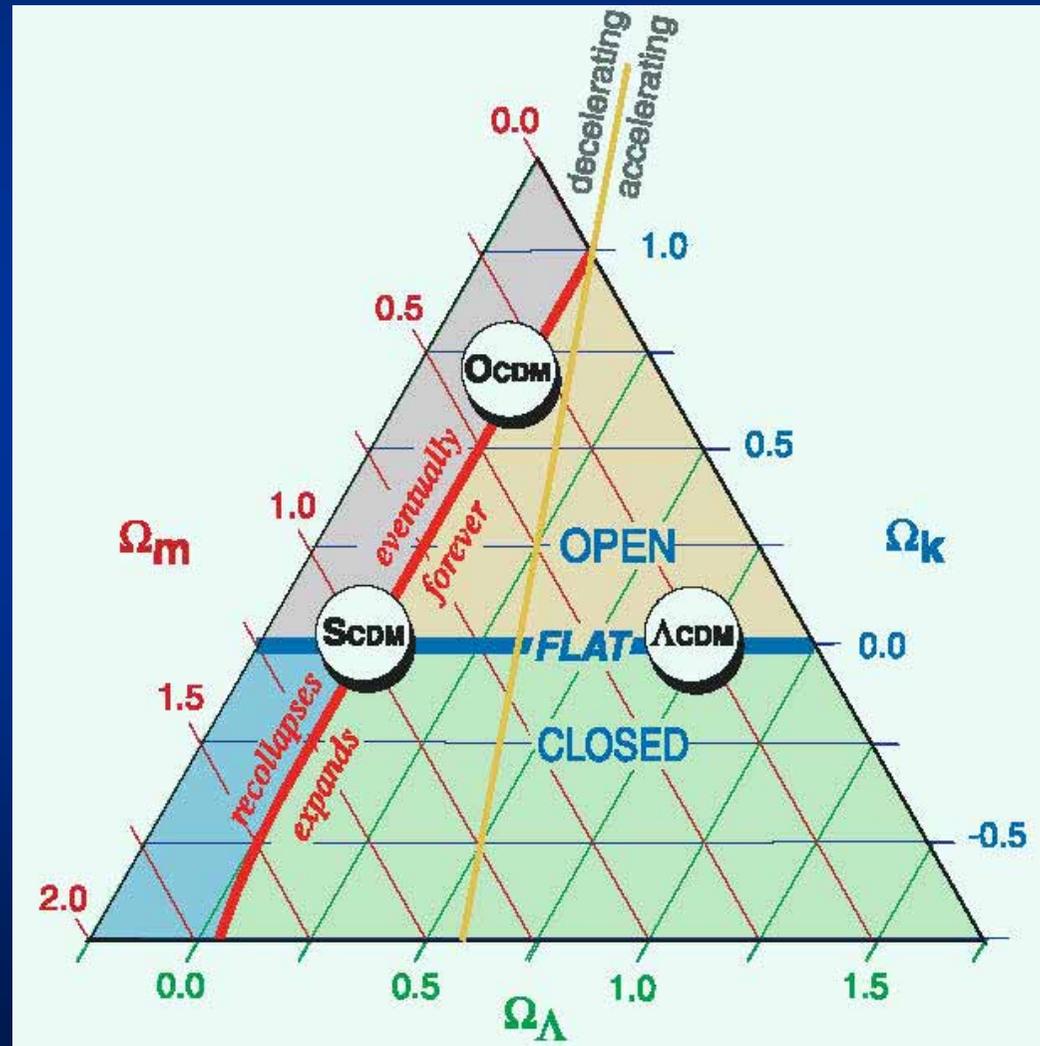
(<0.0072) (~0.00001) (-0.003)

Ω_B	Baryonischer Materiedichteanteil
Ω_{DM}	Dunkler Materiedichteanteil
Ω_ν	Äquivalenter Dichteanteil der Neutrinos
Ω_γ	Äquivalenter Dichteanteil der Photonenstrahlung
Ω_Λ	Äquivalenter Dichteanteil von Λ („Dunkle Energie“)
Ω_K	Äquivalenter Dichteanteil der Krümmung

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Das kosmische Dreieck

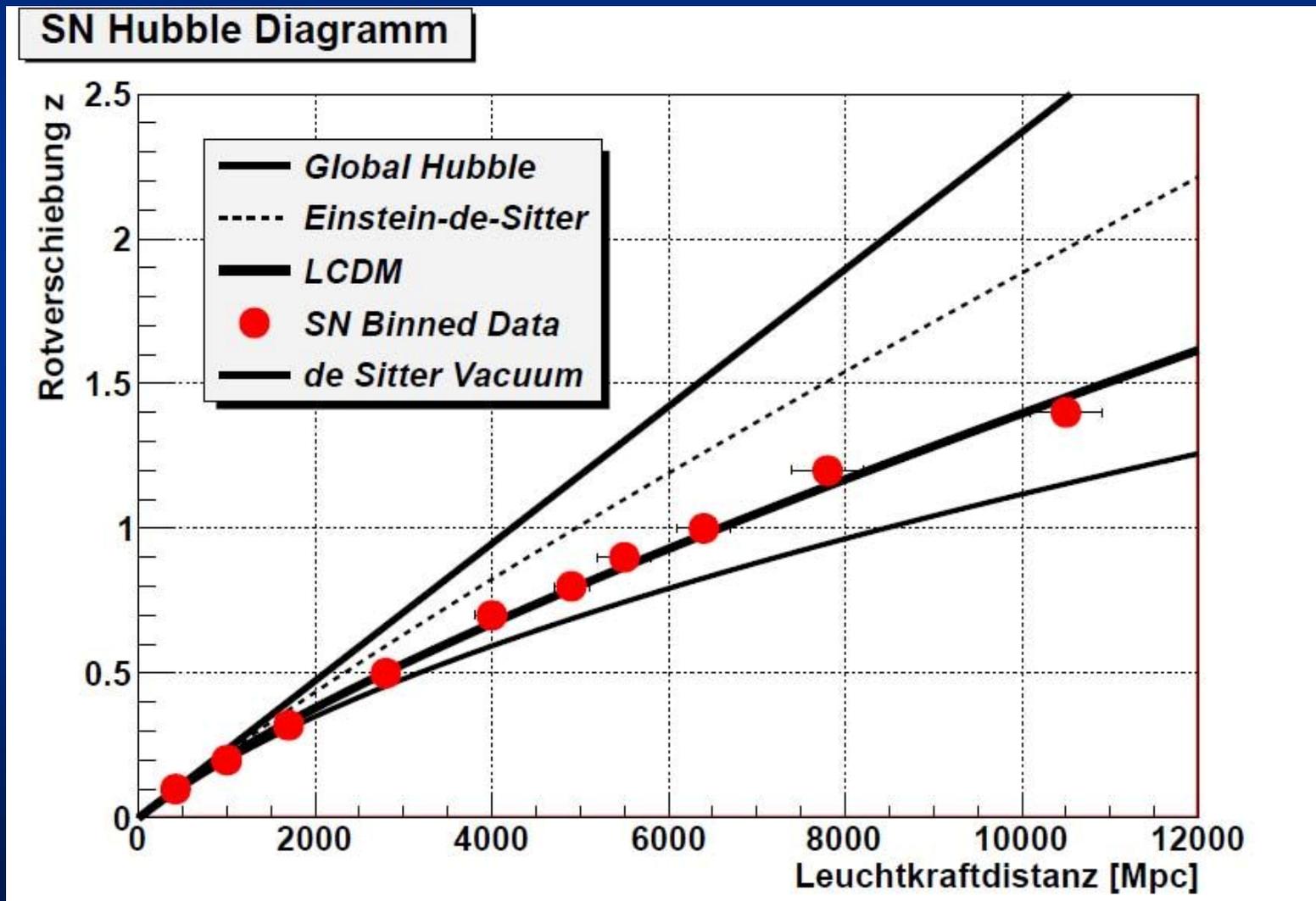


The Cosmic Triangle. Bahcall et al. Science 284,1481 (1999)

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter

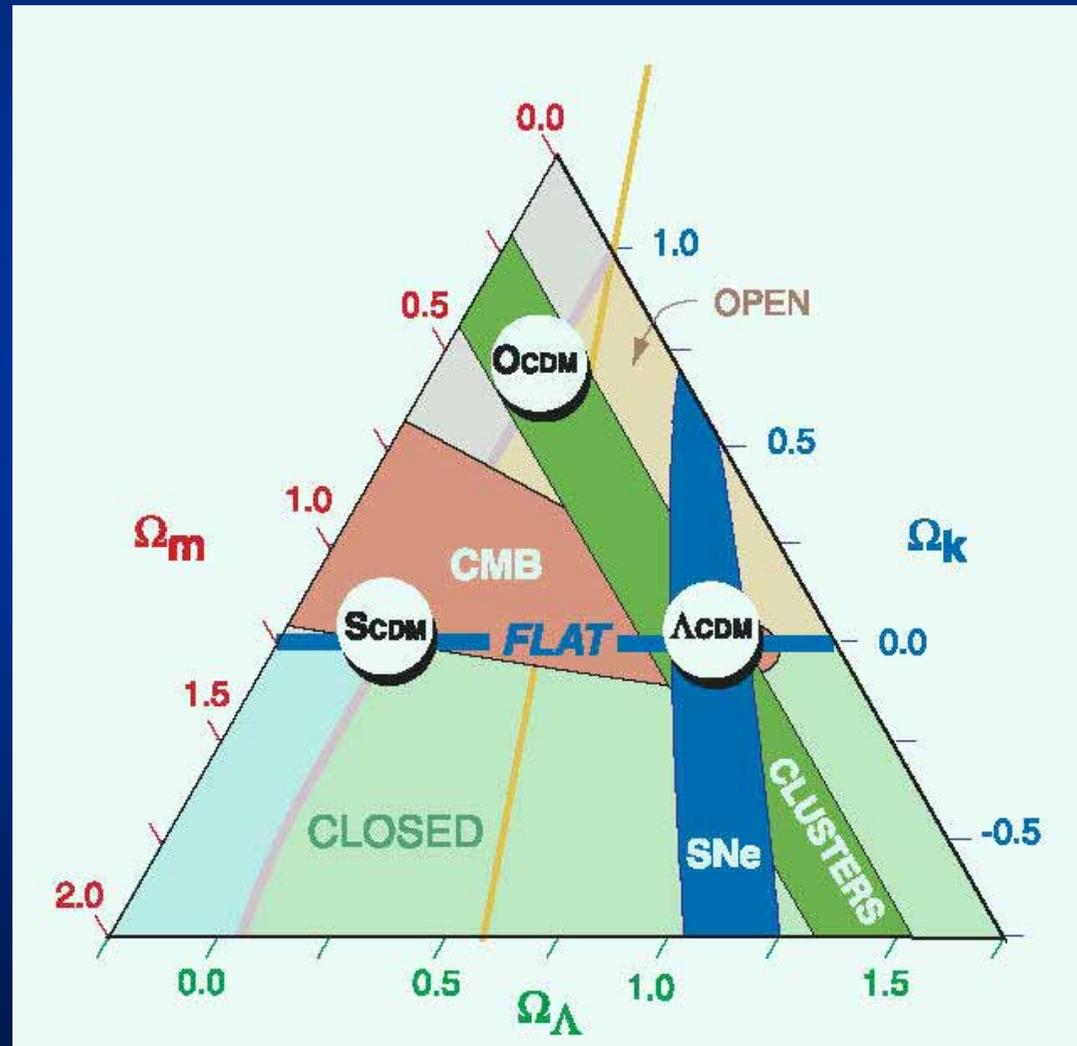


Max Camenzind (2011)

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Das kosmische Dreieck

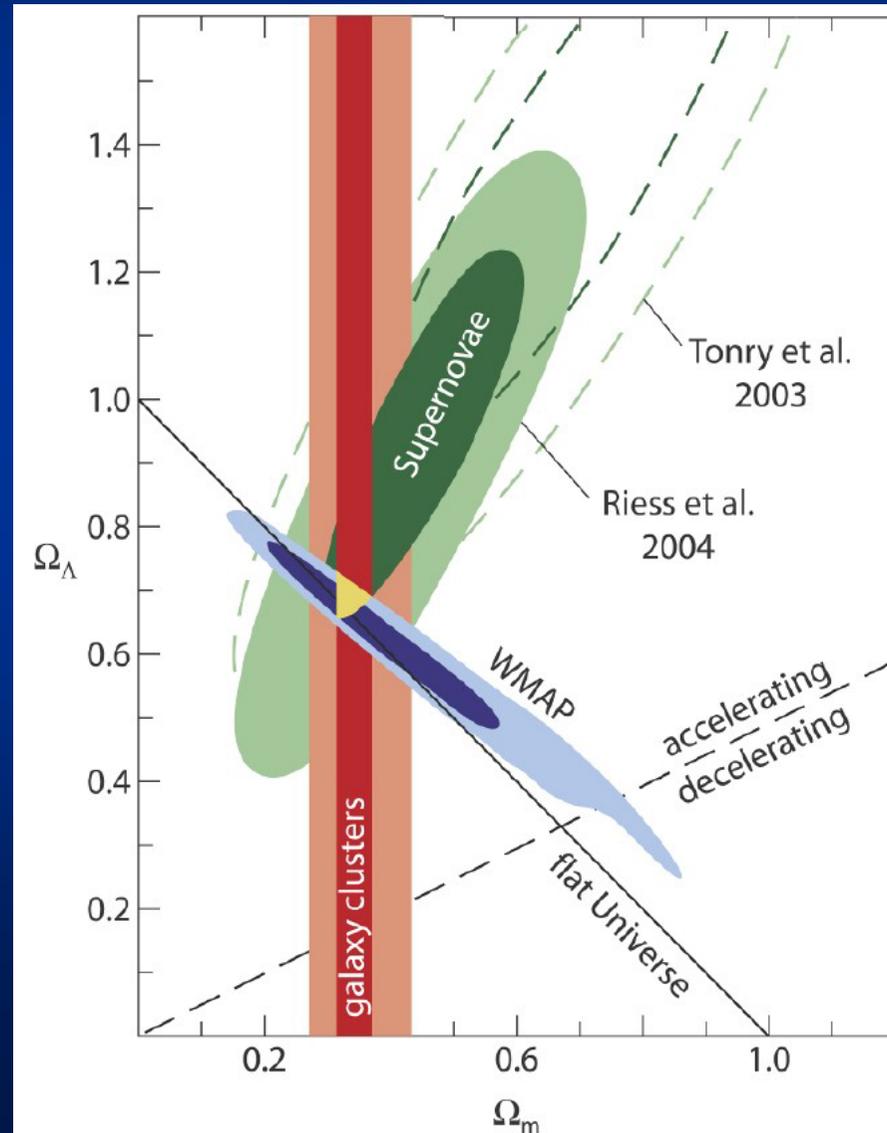


The Cosmic Triangle. Bahcall et al. Science 284,1481 (1999)

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Überprüfung der Parameter



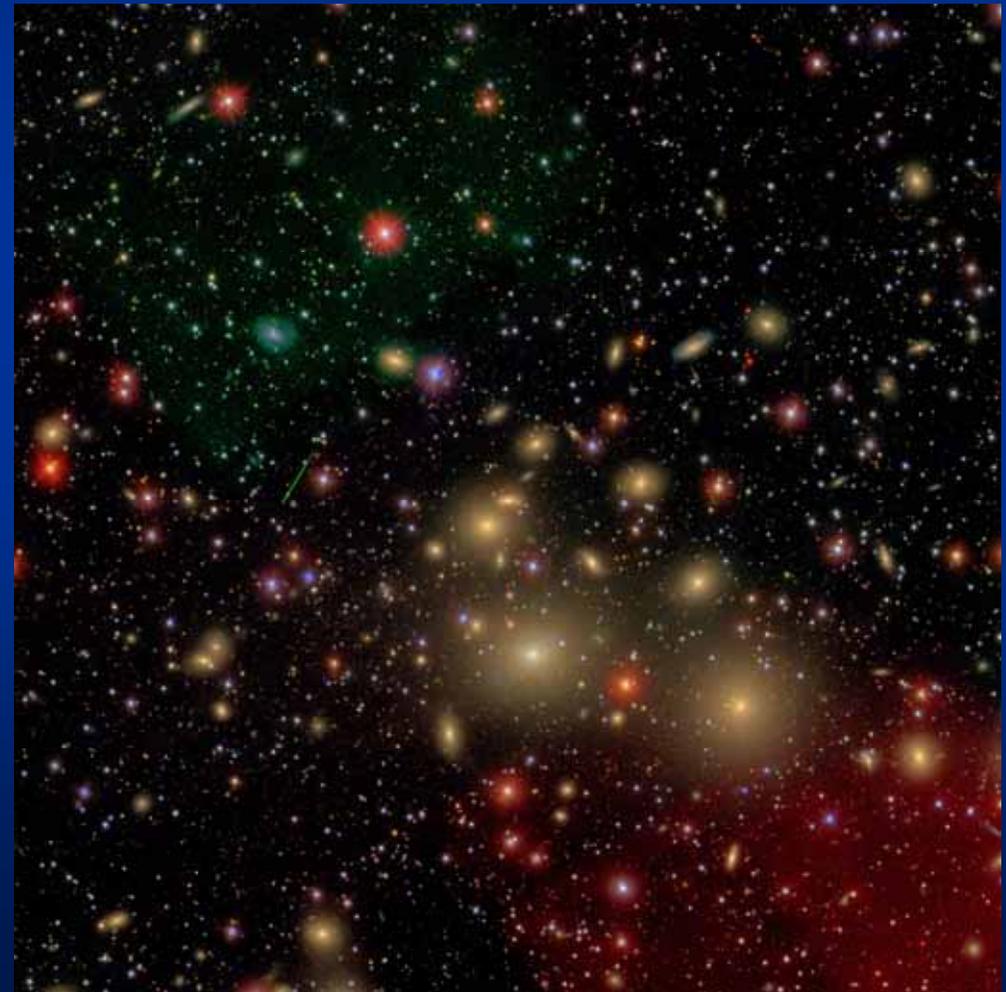
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

1. Das beobachtbare Universum ist endlich.

◀ Der Himmel ist dunkel.
(Olbersches Paradoxon)



*Credit: David W. Hogg, Michael Blanton,
and the SDSS Collaboration*

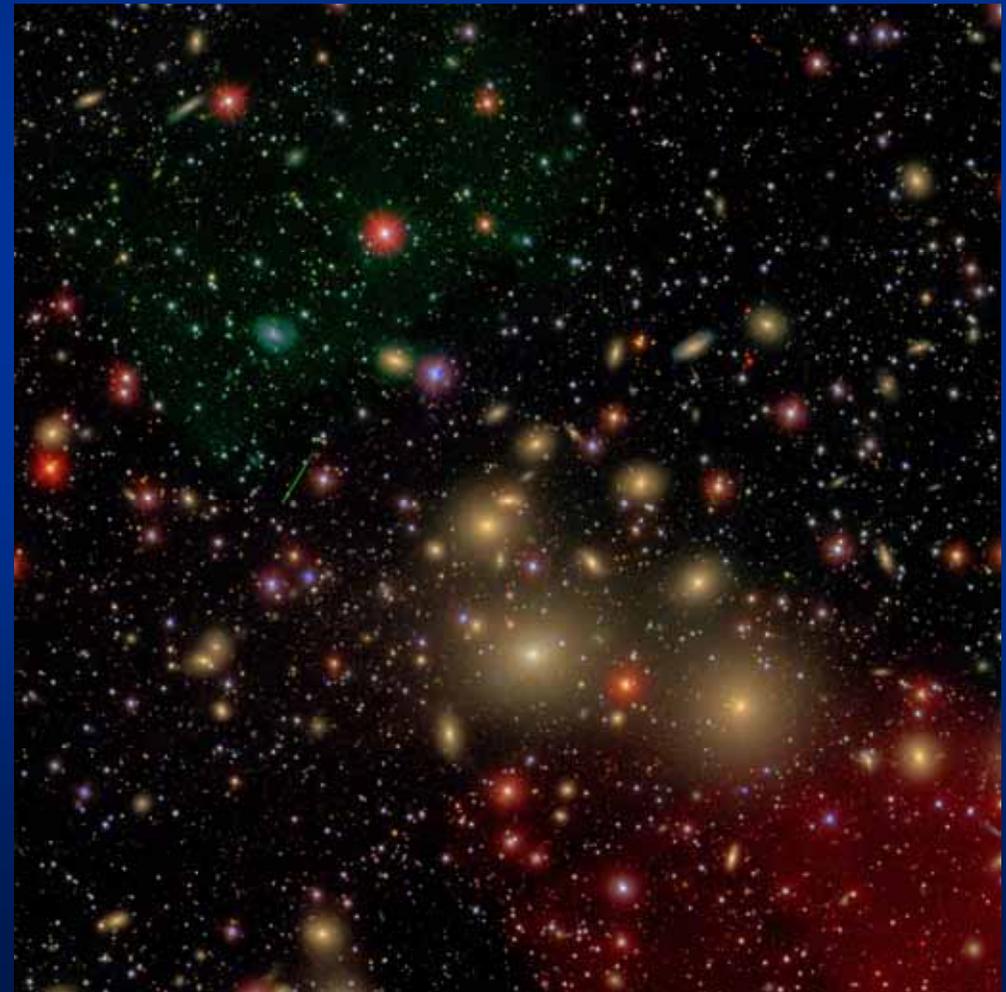
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

2. Das beobachtbare Universum ist angefüllt mit Materie.

◀ Bis in die größten Entfernungen sind Objekte beobachtbar.



Credit: David W. Hogg, Michael Blanton, and the SDSS Collaboration

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

3. Das Universum expandiert gleichmäßig.

- ◀ „Fluchtgeschwindigkeit“ der Galaxien wächst mit ihrer Entfernung stetig an.
Modellparameter:
Lemaître-Hubble-Parameter H_0

Vesto Slipher maß 1912-1915 die ersten Rotverschiebungen.



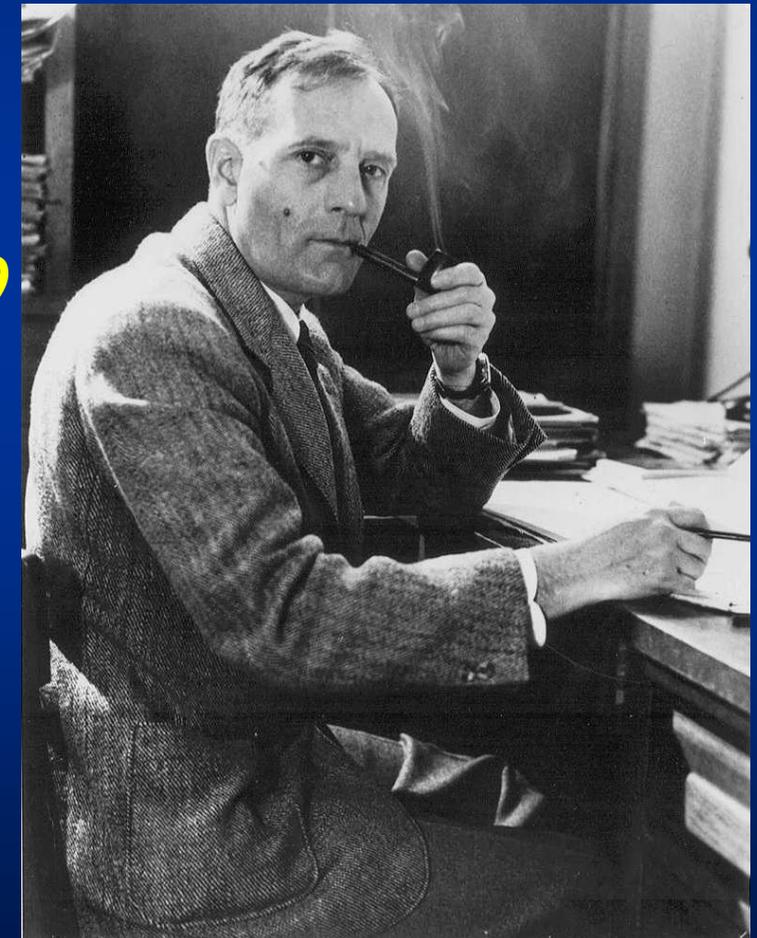
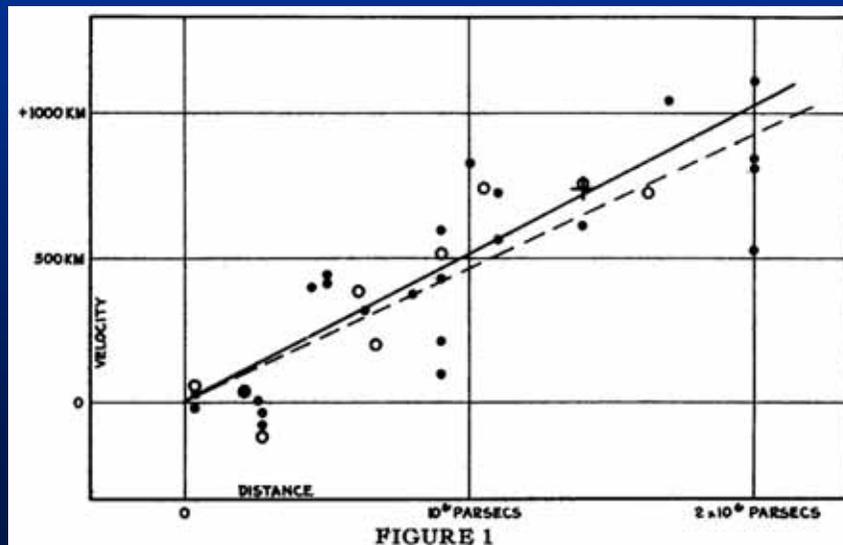
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

3. Das Universum expandiert gleichmäßig.

- Edwin Hubble formte daraus 1929 das nach ihm benannte Gesetz, heute Hubble-Lemaître-Gesetz.



H_0 damals 500 km/s Mpc

Kosmologie

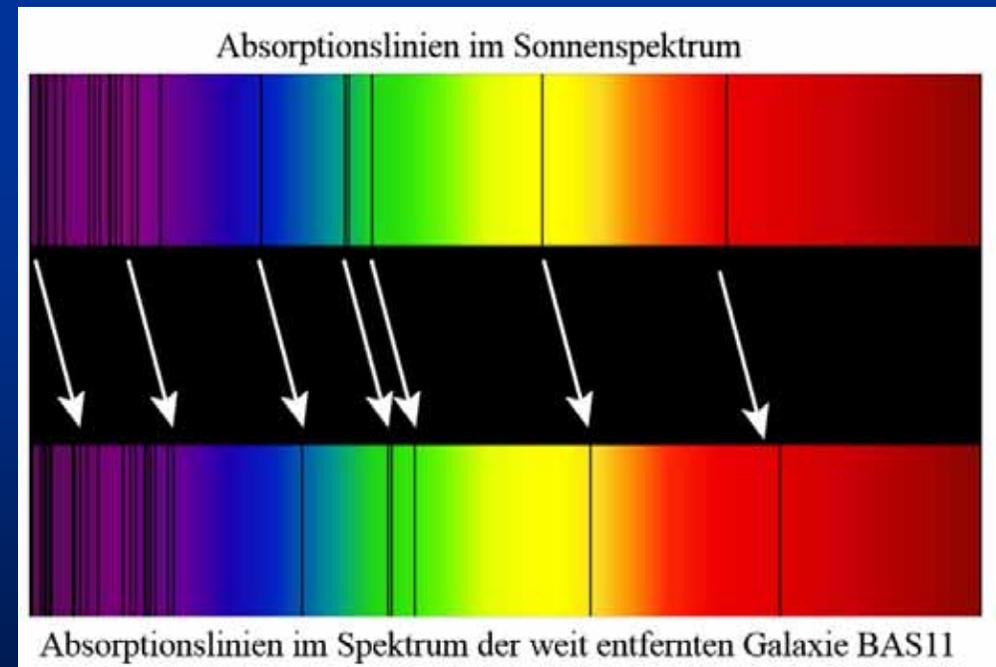
4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

3. Das Universum expandiert gleichmäßig.

➤ Rotverschiebung z der Galaxien wächst mit ihrer Entfernung stetig:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \Rightarrow z + 1 = \frac{\lambda}{\lambda_0}$$



Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

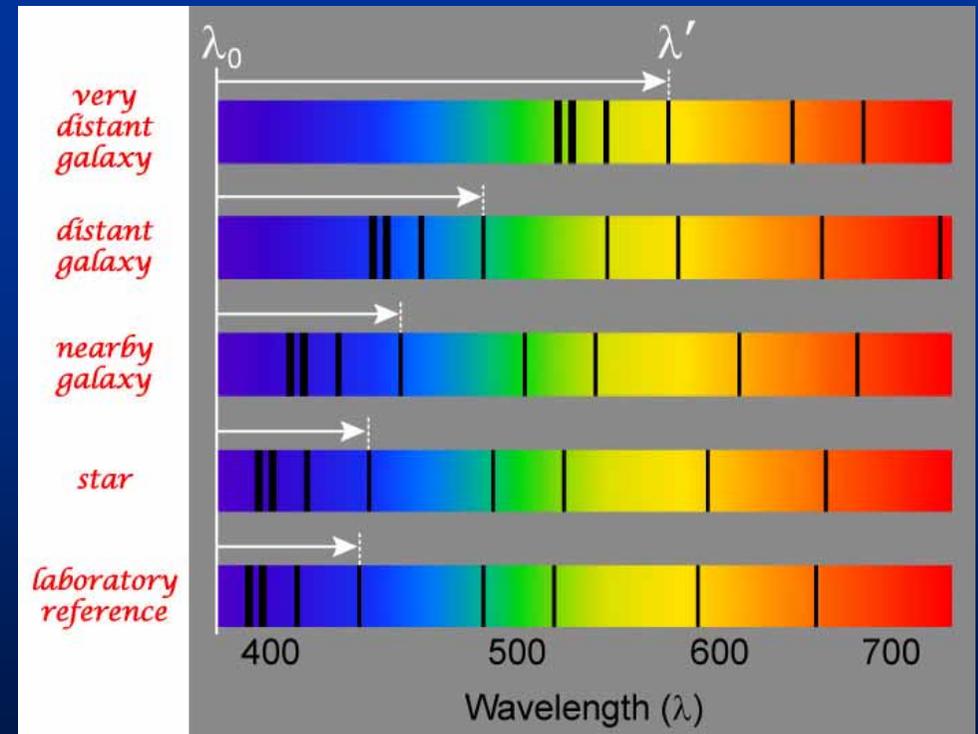
3. Das Universum expandiert gleichmäßig.

◀ Rotverschiebung z der Galaxien wächst mit ihrer Entfernung stetig:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \Rightarrow z + 1 = \frac{\lambda_0}{\lambda}$$



$$z + 1 = \frac{1}{R(t)}$$



Kosmologie

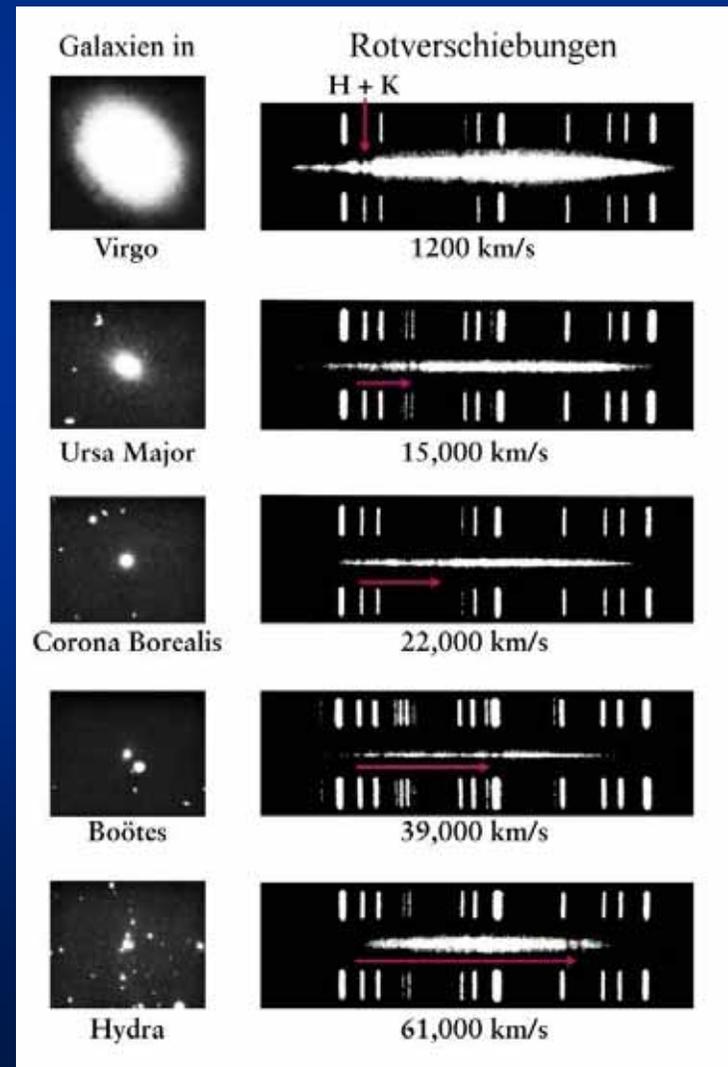
4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

3. Das Universum expandiert gleichmäßig.

➤ Es ist keine „Fluchtgeschwindigkeit“, die die Rotverschiebung z bestimmt, sondern der Skalenfaktor R des expandierenden Universums.

$$z + 1 = \frac{1}{R(t)}$$



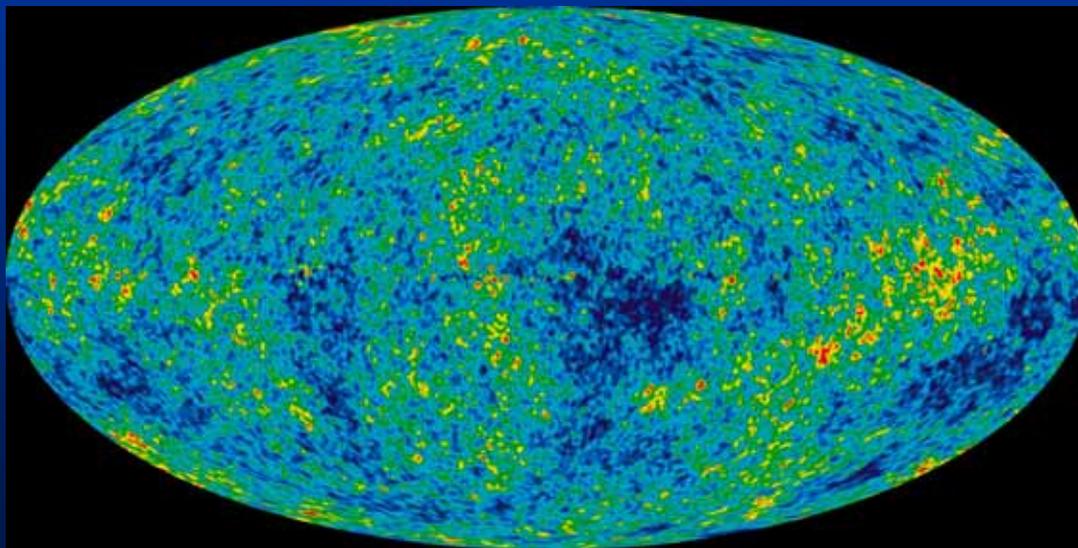
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

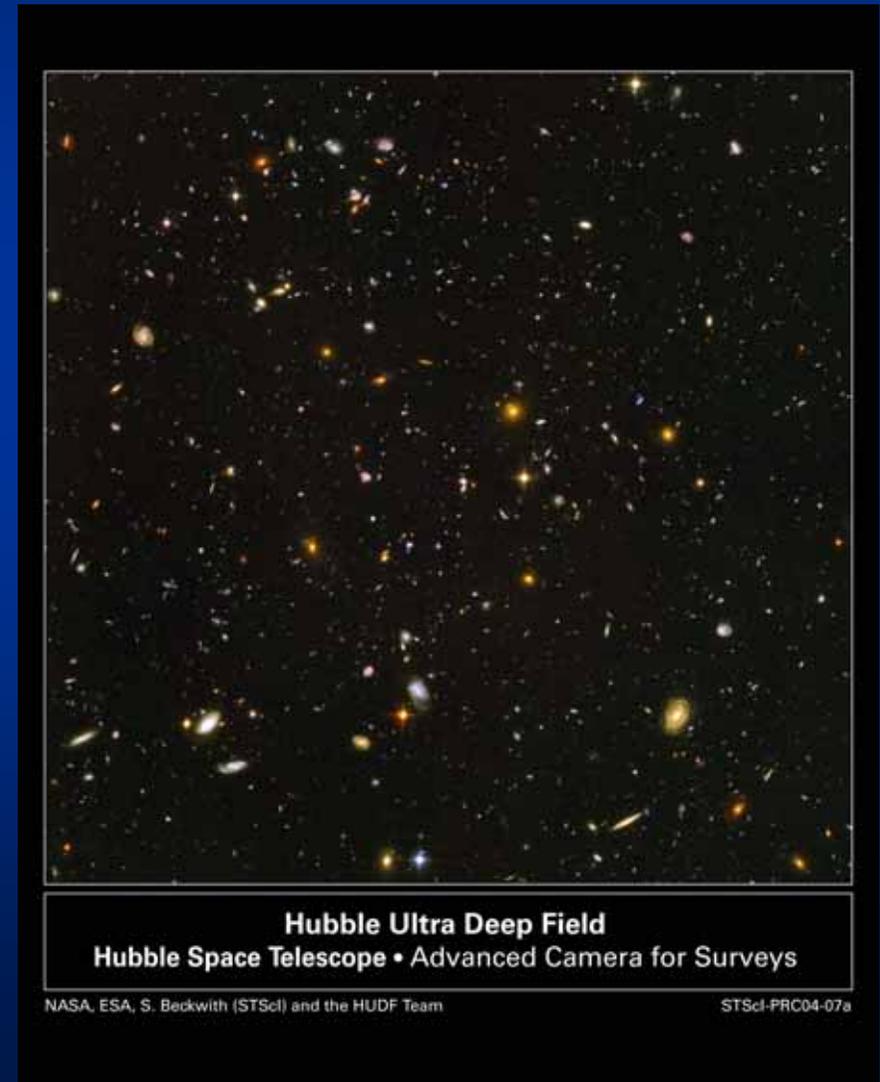
Modellparameter und Randbedingungen

4. Das Weltall ist nicht statisch, sondern entwickelt sich.

➤ Beobachtung entfernter Protogalaxien und der CMBR ($z=1089$, $t=379'000$ a).



(WMAP 2013)



Hubble Ultra Deep Field
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and the HUDF Team

STScI-PRC04-07a

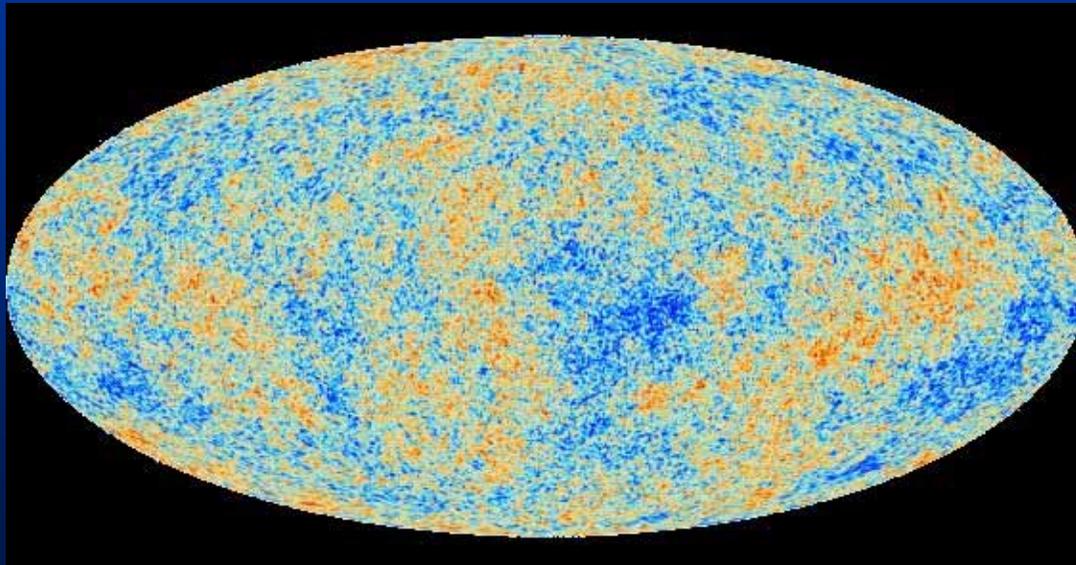
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

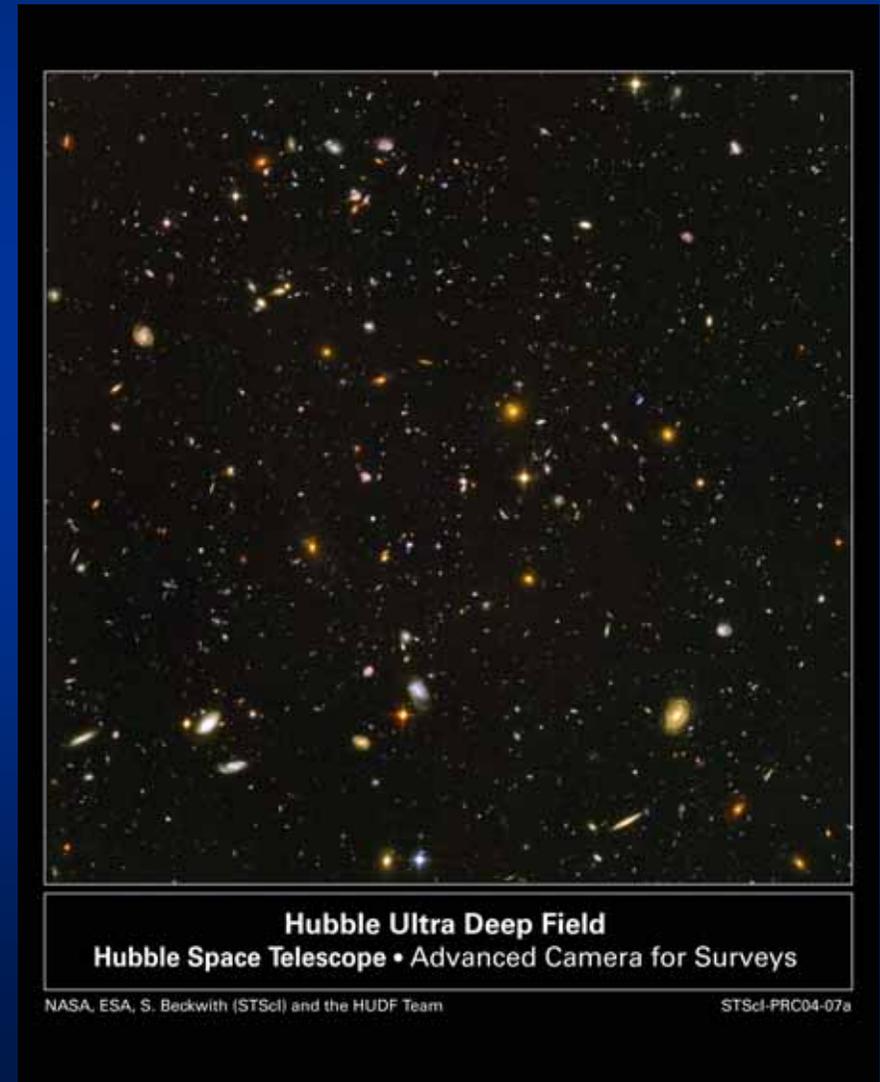
Modellparameter und Randbedingungen

4. Das Weltall ist nicht statisch, sondern entwickelt sich.

◀ Beobachtung entfernter Protogalaxien und der CMBR ($z=1089$, $t=379'000$ a).



(Planck 2013)



Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

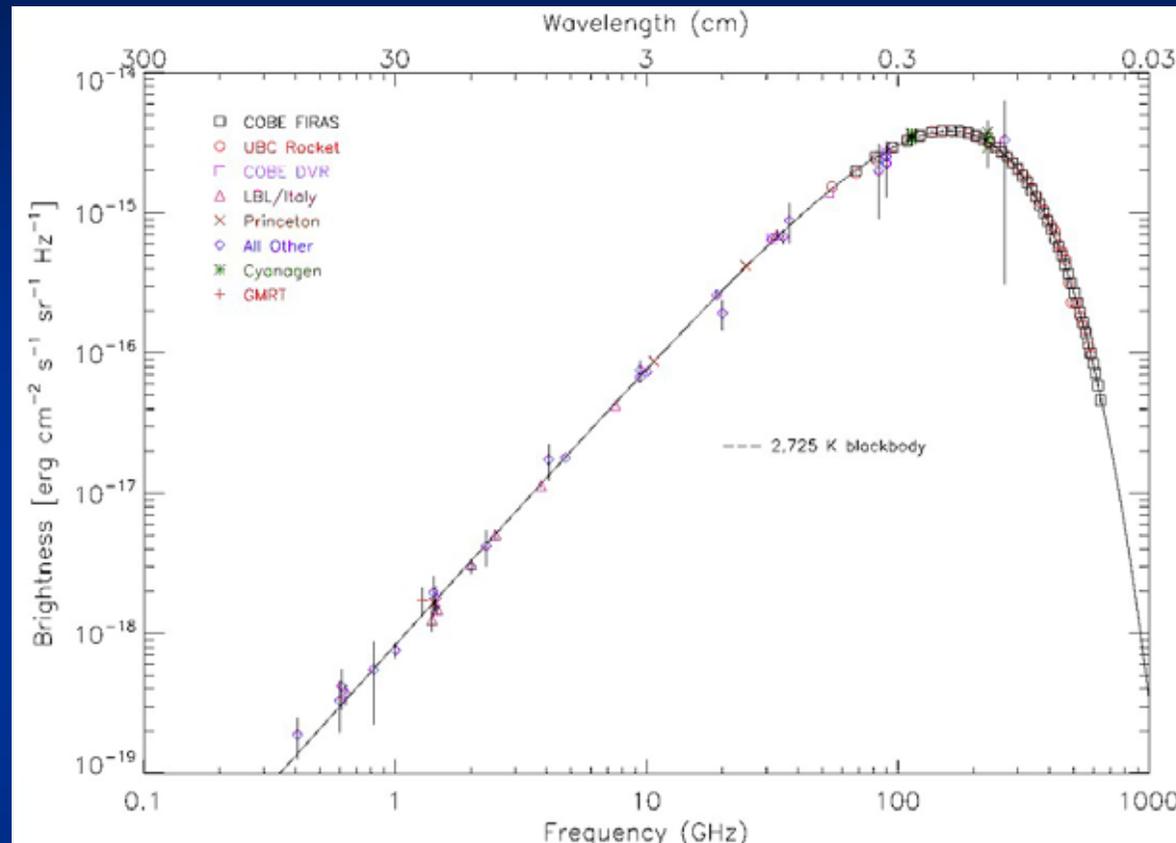
Anmerkung:

Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) ist unser prinzipieller Beobachtungshorizont, da vorher das Universum für Strahlung undurchsichtig war.

Informationen aus der Zeit davor sind nur in Strukturen des CMB zu finden oder in Gravitationswellen.

Kosmologie

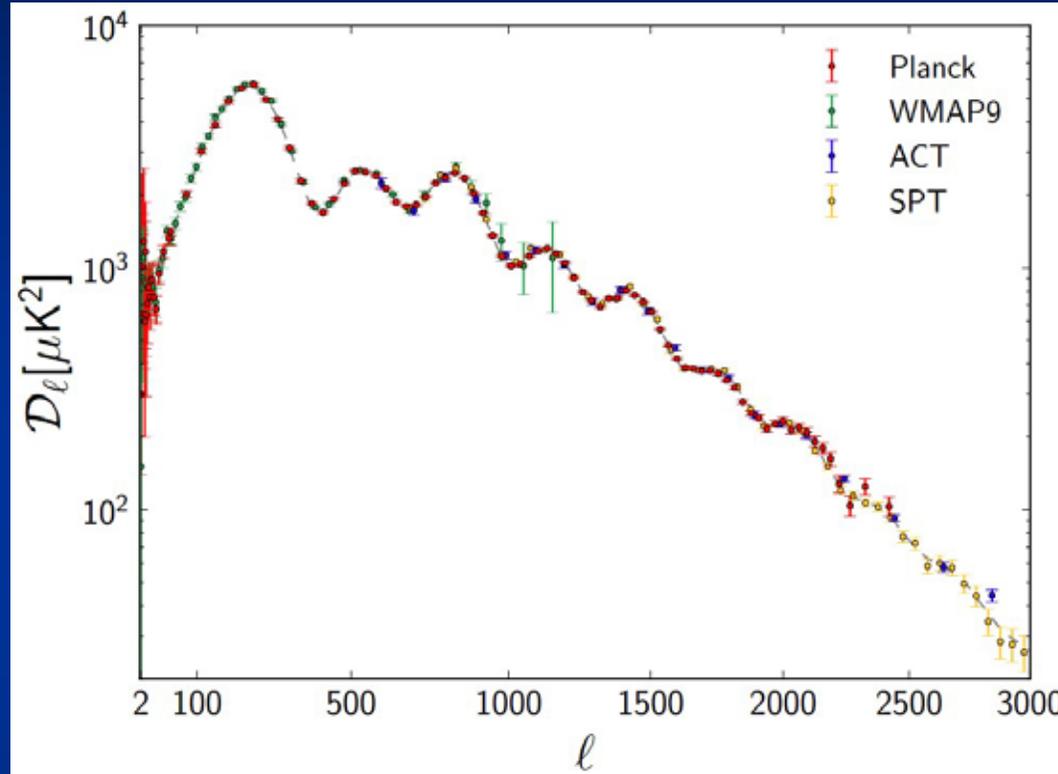
4. Entwicklung von Weltmodellen



Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) zeigt das perfekte Spektrum einer Temperaturstrahlung von 2.72548 ± 0.00057 K.

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen



Das Winkelleistungs- (Multipol-) Spektrum der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung zeigt Fluktuationen im Bereich von 0.9° (1. Maximum), 0.3° (2. Maximum) und darunter. Die Gesamtkrümmung / Geometrie des Universums bestimmt die Lage des 1. Maximums, die Dichte der baryonischen Materie zeigt sich in der Höhe des 2. Maximums. Die Dichte der kalten Dunklen Materie (CDM) kann aus dem 3. Maximum ermittelt werden.

Kosmologie

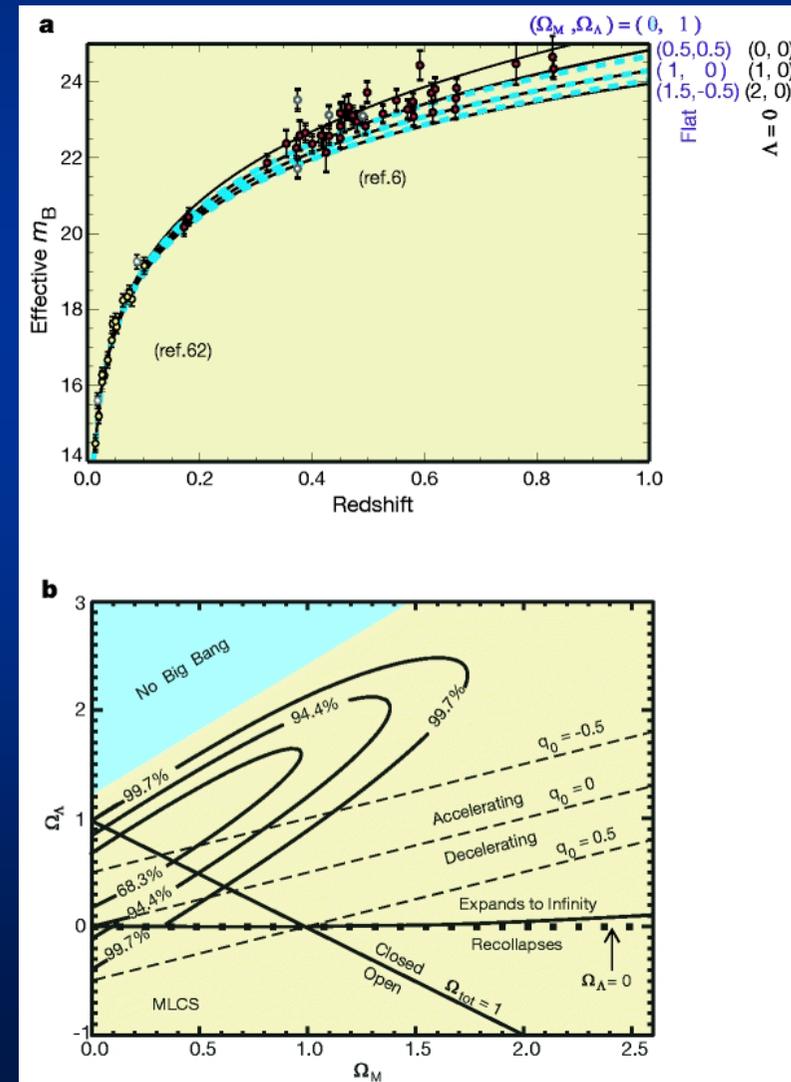
4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

5. Die Expansion sollte wegen der Endlichkeit und der abbremsenden Gravitation verlangsamt sein, ist aber heute beschleunigt.

Entfernung beobachtbarer SNe Ia-Supernovae.
 Modellparameter: Λ , k sowie $H(t)$

(Burrows, Nature 403, 731 (2000))



Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

6. Das Weltall enthält 5½mal mehr Dunkle Materie als sichtbare (baryonische).

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?



Bereits 1933 postulierte Fritz Zwicky aufgrund der Anwendung des Virialsatzes die Existenz von nicht-sichtbarer (dunkler) Materie in Galaxienhaufen.

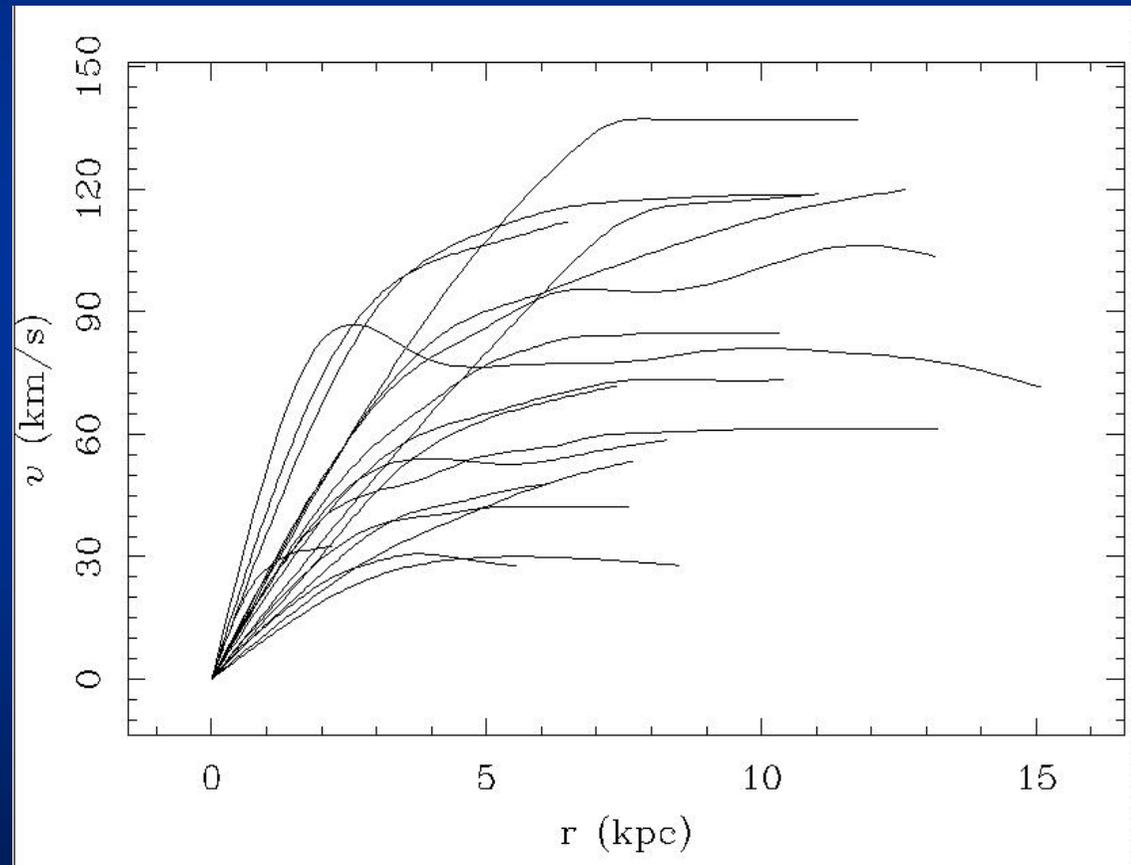
Nur mit der strahlenden (sichtbaren) Materie wären die Galaxienhaufen dynamisch nicht stabil, sondern würden aufgrund der einzelnen Geschwindigkeiten auseinander fliegen.

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Die Rotationskurven der Scheibengalaxien verlaufen flach, d.h. dass sich außerhalb der sichtbaren Scheiben nicht-sichtbare Materie befinden muss.

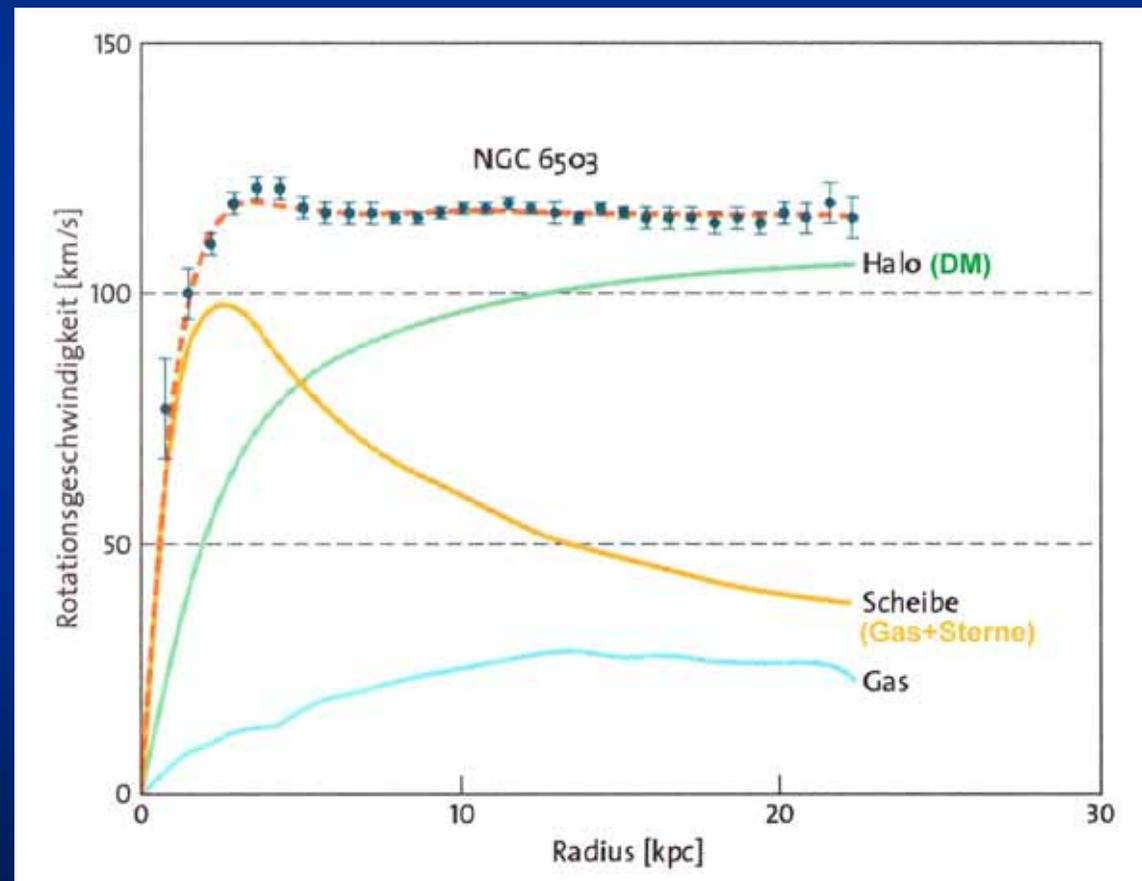


Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Die Rotationskurven der Scheibengalaxien verlaufen flach, d.h. dass sich außerhalb der sichtbaren Scheiben (gelb) nicht-sichtbare Materie (grün) befinden muss.



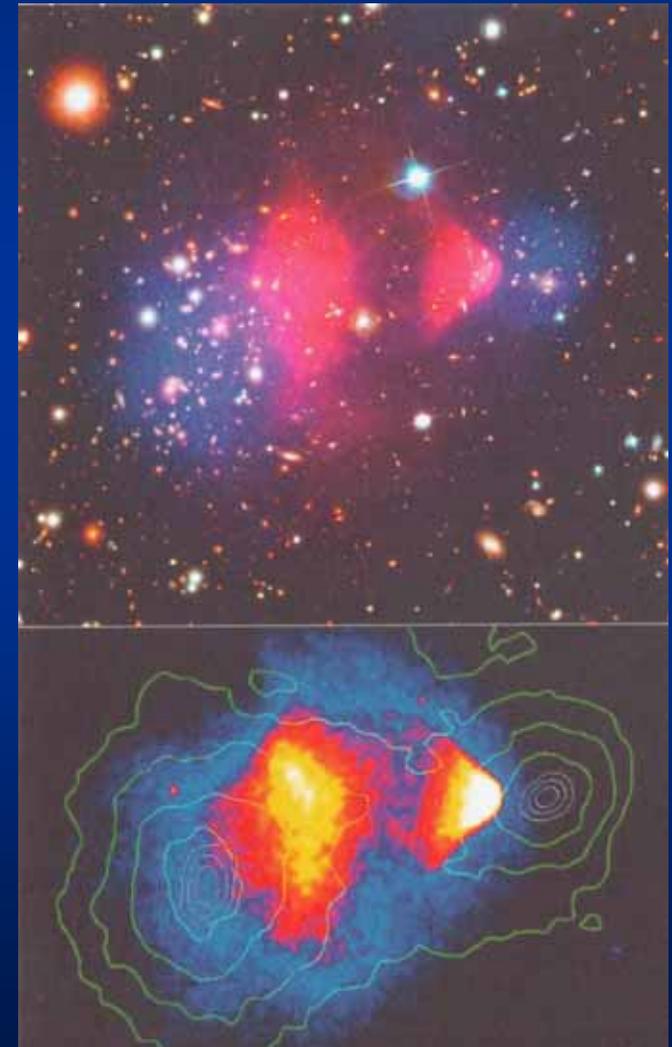
nach Abb. 2.18 aus: Gaßner/Müller, Kosmologie (2022)

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Der Bullet-Cluster: Vor 100 Mio. a hat der kleinere Galaxienhaufen (jetzt rechts) den größeren durchdrungen. Die Sterne wechselwirkten dabei so gut wie gar nicht, das galaktische Gas (rot) elektromagnetisch, nicht jedoch die Dunkle Materie (blau), nachgewiesen durch Gravitationslinseneffekte.



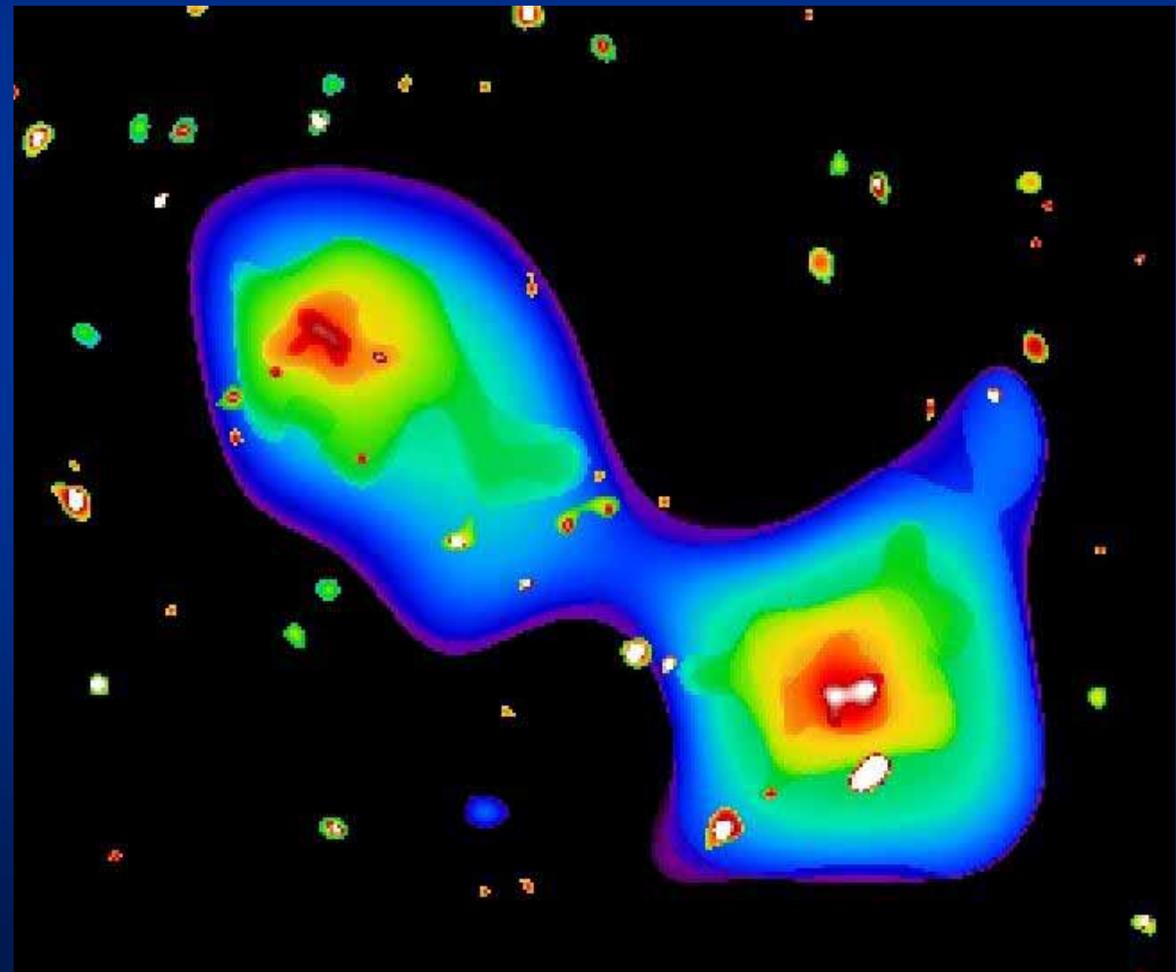
Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Der Galaxienhaufen Abell 3128 im XR (r.) bei $z=0.058$ und ein entfernter Haufen (l.) bei $z=0.44$.

Bei den hohen Gastemperaturen (Geschwindigkeiten wären die Haufen ohne Dunkle Materie nicht stabil.

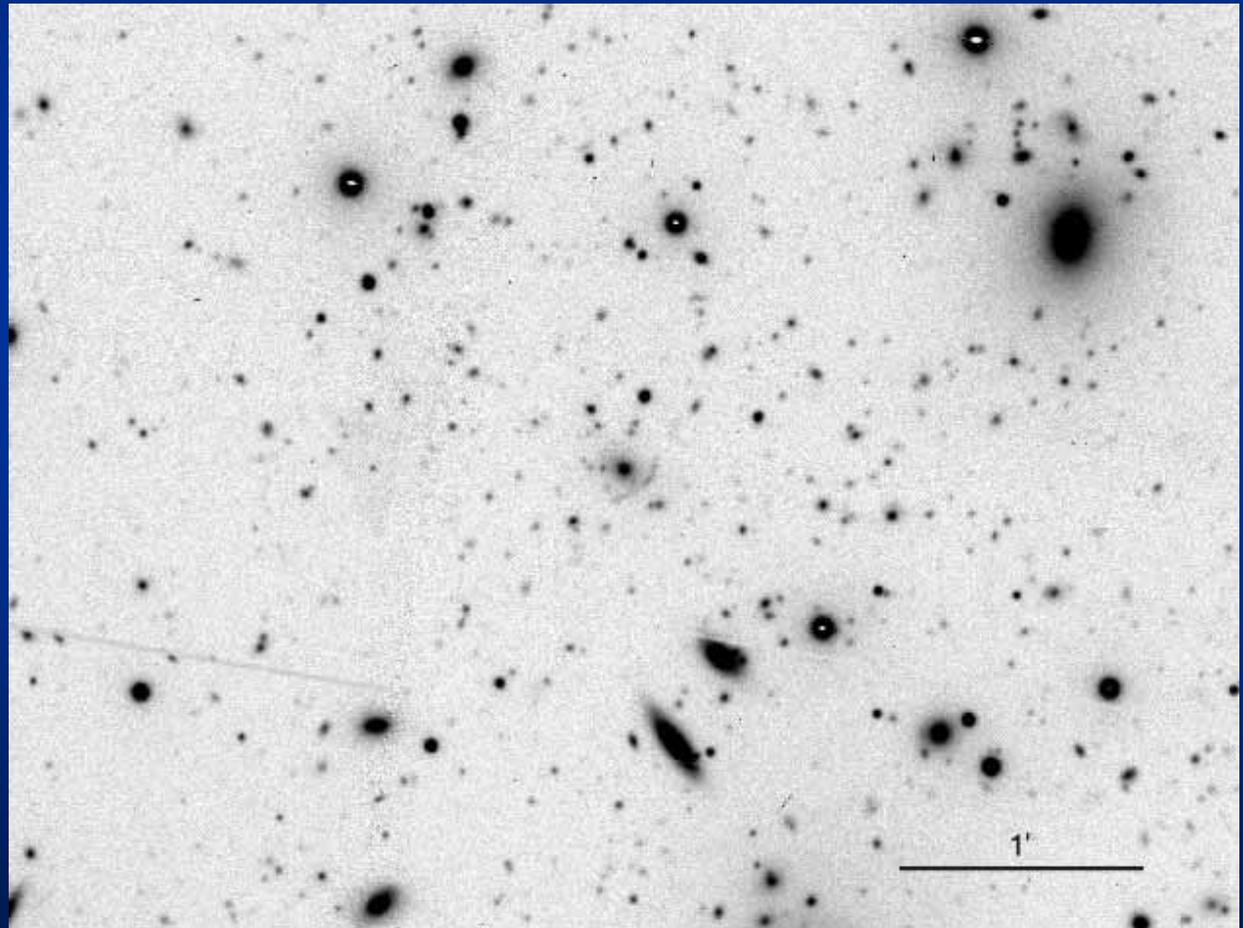


Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Die gleiche Region im R-Band. In der Mitte ein Verzerrungs-bogen des Gravitationslinseneffekts.



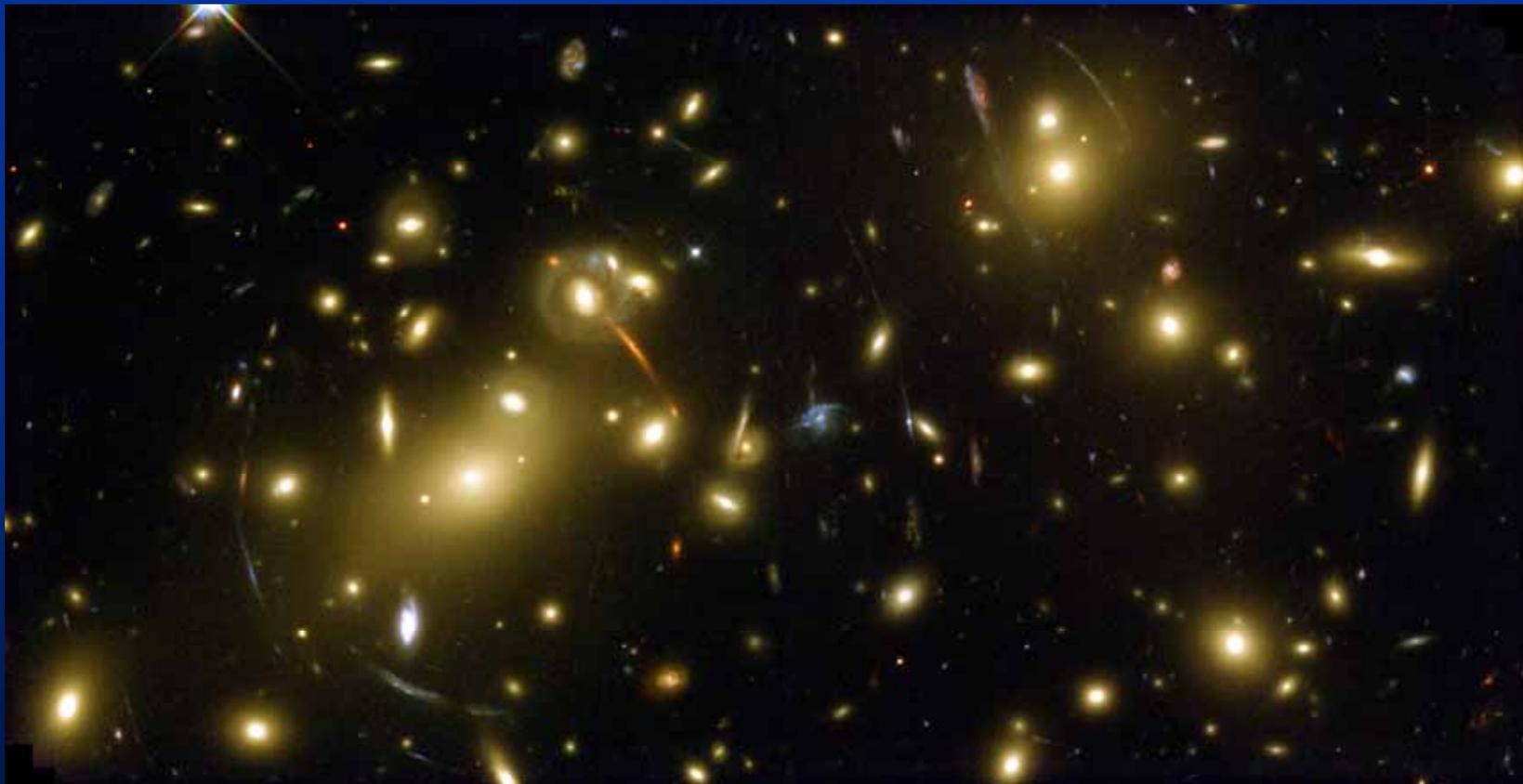
N. Werner et al., Complex X-ray morphology of Abell 3128 (2018)

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Die Gravitationslinseneffekte in Galaxienhaufen erlauben eine Massenabschätzung dieser Haufen. *[Abell 2218 (HST 2000)]*



Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Warum Dunkle Materie?

Kandidaten für die Dunkle Materie:

Kandidat	Masse
Axione*	$10^5 \text{ eV}/c^2$
Neutralinos (SUSY)	$>20 \text{ GeV}/c^2$
Primordiale SL	$>10^{12} \text{ kg}$

*Axione sind hypothetische Elementarteilchen ohne Ladung und Spin 0, die bisher nicht nachgewiesen werden konnten.

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Geht es auch anders?

Modifizierte Newtonsche Dynamik (MoND)

Mordehai Milgrom entwickelte 1983 MoND als Gegenentwurf zum Konzept der Dunklen Materie. Er postulierte, dass in sehr schwachen Gravitationsfeldern das Newtonsche Gravitationsgesetz:

muss. Unter einer Grenze beschleunigung von das Gesetz so lauten: nung nimmt die langsamer ab als in der Newtonschen Formel.

modifiziert werden der Gravitations- $g_0=1.2 \cdot 10^{-10} \text{ m s}^{-2}$ soll D.h. mit der Entfernung Gravitationskraft

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

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$$

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Geht es auch anders?

Modifizierte Newtonsche Dynamik (MoND)

Vorteil: Manche gravitativen Effekte, die nur mit DM erklärt werden können, können so ohne diese erklärt werden.

Nachteile: Das gilt nicht für alle Effekte, und es fehlt derzeit an Möglichkeiten zur experimentellen Überprüfung. Braucht man für die DM neue, exotische und bisher unbekannte Elementarteilchen, so führt die MoND eine neue Naturkonstante ein, deren Herkunft nicht abgeleitet werden kann, verletzt die Allgemeingültigkeit physikalischer Gesetze und den Impulserhaltungssatz.

Kosmologie

Einschub Dunkle Materie

Geht es auch anders?

Modifizierte Newtonsche Dynamik (MoND)

TeVes ist eine relativistische Verallgemeinerung von MoND mit Erweiterungen der Feldgleichungen um zusätzliche Tensor- (Te), Vektor- (Ve) und Skalarfelder (S), von Jakob Bekenstein 2004 eingeführt, wird nach wie vor kontrovers diskutiert.

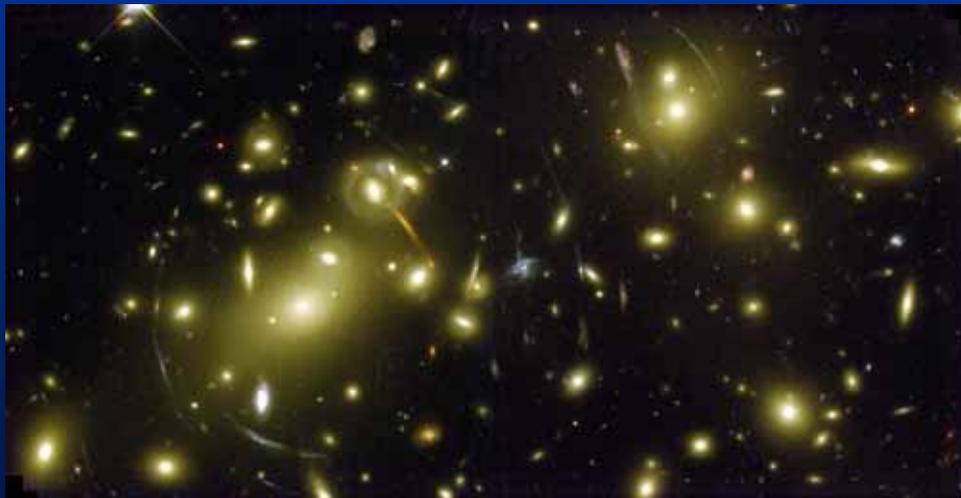
Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

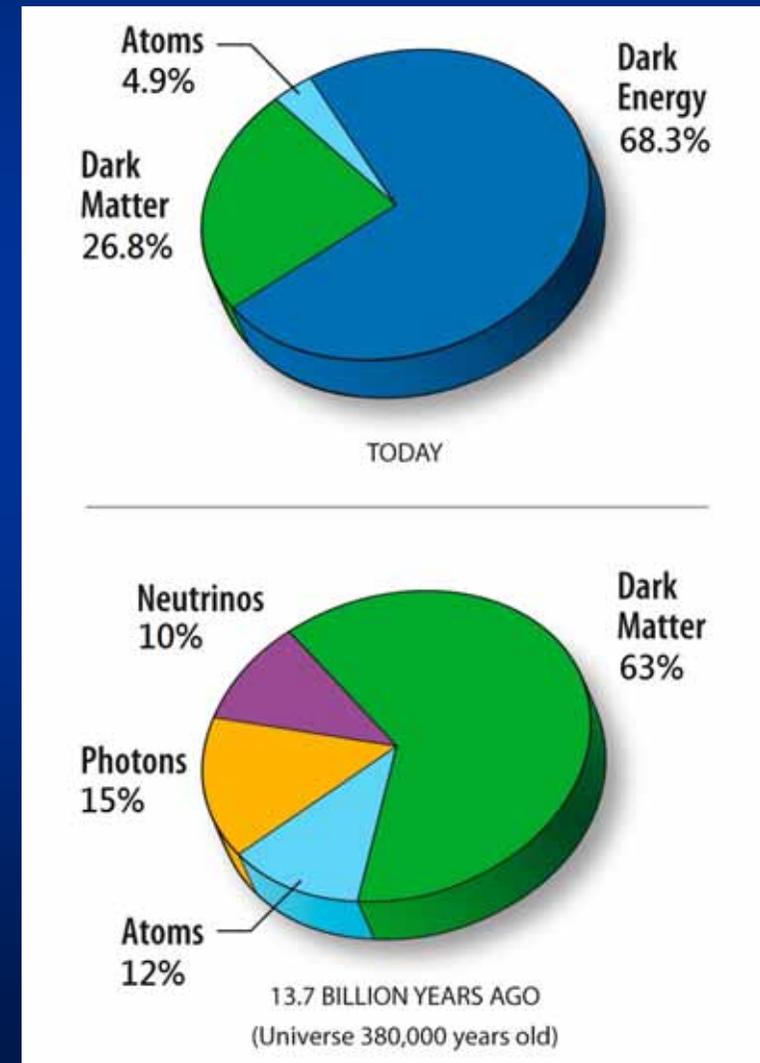
Modellparameter und Randbedingungen

6. Das Weltall enthält 5½mal mehr Dunkle Materie als sichtbare (baryonische).

◀ Gravitationslinsen, CMBR
Modellparameter: Ω



(Abell 2218 (HST))



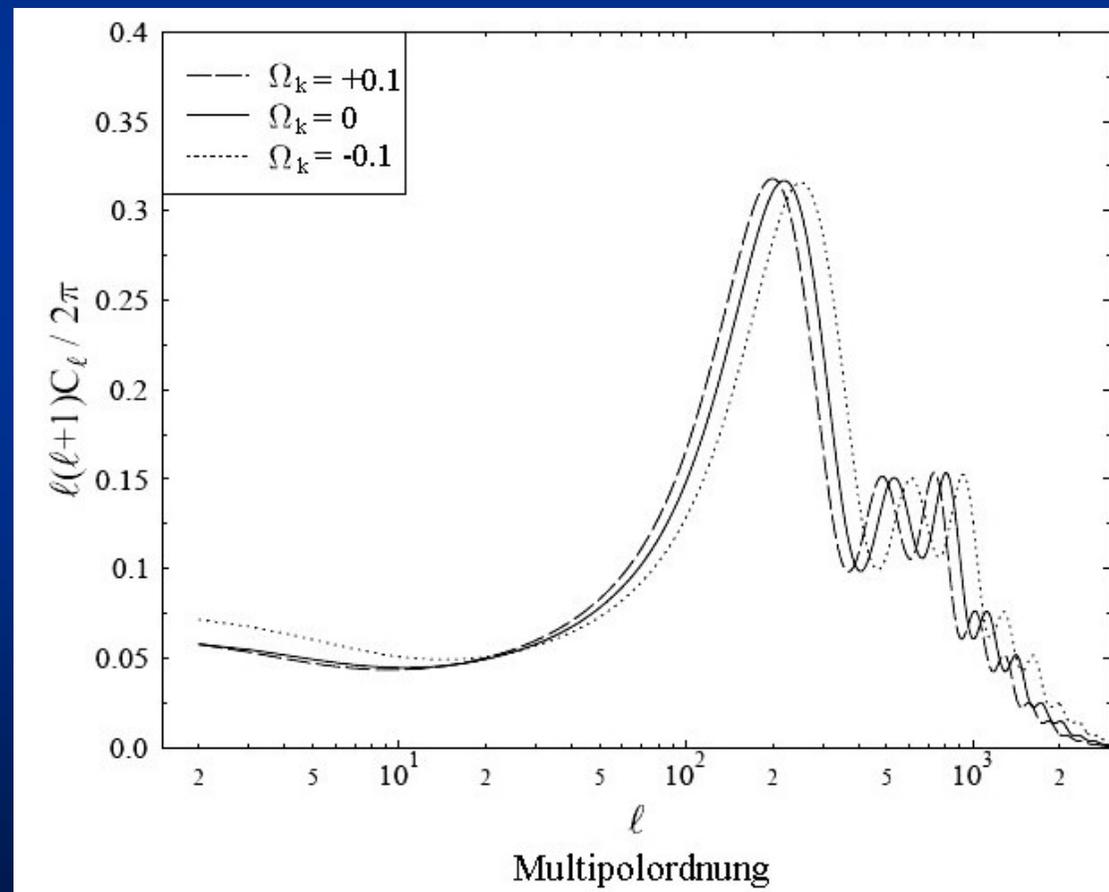
Planck (2013))

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

Krümmung ist nur sehr schwer zu bestimmen und daher unsicher!

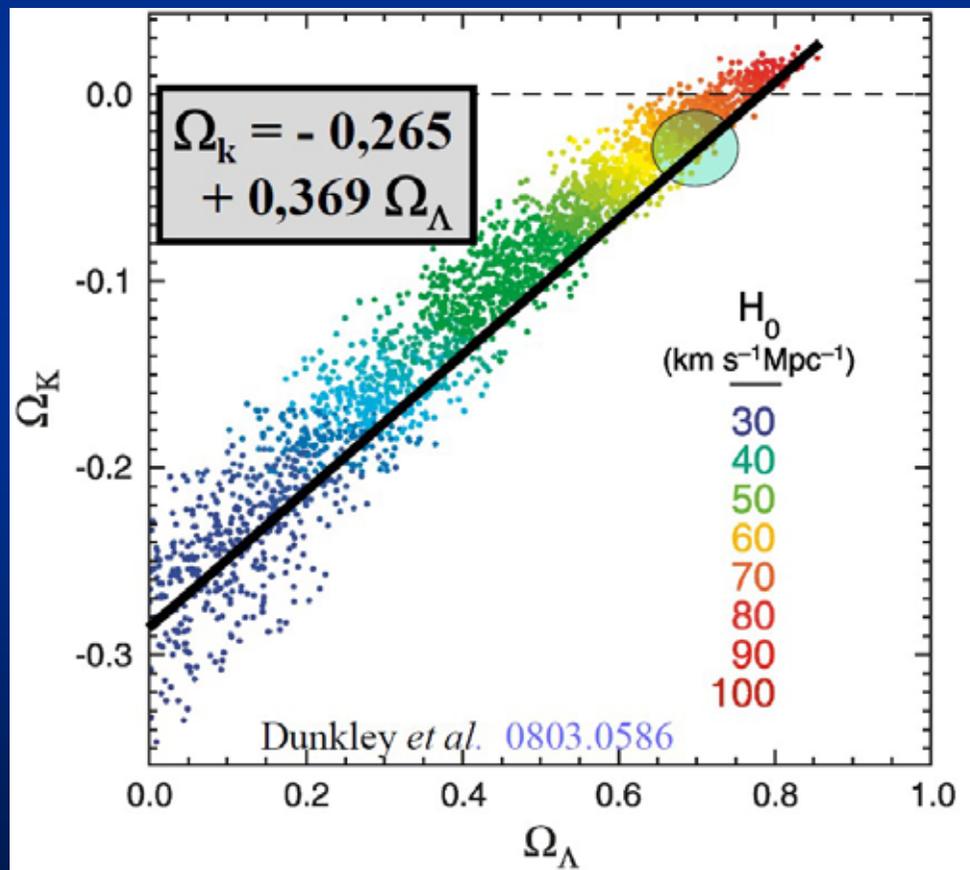


Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Modellparameter und Randbedingungen

Krümmung ist nur sehr schwer zu bestimmen und daher unsicher!



ergibt $\Omega_\Lambda = 0.683$ (Planck 2013)
 $\Omega_K = -0.013$
also ein geschlossenes
Universum mit sphärischer
Metrik

Das ist verträglich mit
 $H_0 = 73 / 69$ km/Mpc s

Zusammenhang von Krümmung, kosmologischer Konstanten und Hubble-Parameter
(Camenzind, 2012)

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

Titelblatt der Veröffentlichung zu den Ergebnissen des Planck-Satelliten betr. die kosmologischen Parameter (insgesamt 73 Seiten)

arXiv:1807.06209v4 [astro-ph.CO] 9 Aug 2021

Astronomy & Astrophysics manuscript no. 118 © ESO 2021
August 10, 2021

Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters

Planck Collaboration: N. Aghanim^{1,4}, Y. Akrami^{1,2,3,9}, M. Ashdown¹⁰, J. Aumont¹¹, C. Baccigalupi¹², M. Ballardini^{13,14}, A. J. Banday^{15,16}, R. B. Barreiro¹⁷, N. Bartolo^{18,19}, S. Basak²⁰, R. Battye²¹, K. Benabed^{22,23}, J.-P. Bernard²⁴, M. Bersanelli^{25,26}, P. Bierewicz^{27,28}, J. J. Black^{29,30}, J. R. Bond³¹, J. Borrill^{32,33}, F. R. Boscher^{34,35}, F. Boulanger^{36,37,38}, M. Bucher³⁹, C. Burigana^{40,41,42}, R. C. Butler⁴³, E. Calabrese⁴⁴, L.-F. Cardoso^{45,46}, J. Carron⁴⁷, A. Challinor^{48,49,50}, H. C. Chiang⁵¹, J. Chluba⁵², L. P. L. Colombo⁵³, C. Combet⁵⁴, D. Contena⁵⁵, B. P. Crill^{56,57}, F. Curtidei⁵⁸, P. de Bernardis⁵⁹, G. de Zotti⁶⁰, J. Delabrotte⁶¹, J.-M. Delouis⁶², E. Di Valentino⁶³, J. M. Diego⁶⁴, O. Doni^{65,66}, M. Doucas⁶⁷, A. Ducout⁶⁸, X. Dupac⁶⁹, S. Dusza⁷⁰, G. Efstathiou^{71,72}, P. Elahi⁷³, T. A. Enflin⁷⁴, H. K. Eriksen⁷⁵, Y. Fantaye⁷⁶, M. Farhang⁷⁷, I. Ferrusca⁷⁸, R. Fernández-Cobos⁷⁹, F. Finelli^{80,81}, F. Forastieri⁸², M. Fraili⁸³, A. A. Fraisse⁸⁴, E. Franceschi⁸⁵, A. Frolov⁸⁶, S. Galeotta⁸⁷, S. Galli^{88,89}, K. Gangui⁹⁰, R. T. Génova-Santos^{91,92}, M. Gerbino⁹³, T. Ghosh⁹⁴, J. González-Nuevo⁹⁵, K. M. Górski^{96,97}, S. Gratton⁹⁸, A. Gruppis^{99,100}, J. E. Gudmundsson^{101,102}, J. Hamann¹⁰³, W. Handley¹⁰⁴, F. K. Hansen¹⁰⁵, D. Herranz¹⁰⁶, S. R. Hildebrandt¹⁰⁷, E. Hivon¹⁰⁸, Z. Huang¹⁰⁹, A. H. Jaffe¹¹⁰, W. C. Jones¹¹¹, A. Karakci¹¹², E. Kästner¹¹³, R. Keisler¹¹⁴, K. Kiymen¹¹⁵, J. Kim¹¹⁶, T. S. Knaib¹¹⁷, L. Knox¹¹⁸, N. Kraussmair¹¹⁹, M. Kunz^{120,121}, H. Kurki-Suonio¹²², G. Lagache¹²³, J.-M. Lamarca¹²⁴, A. Lassetty¹²⁵, M. Lattanzi^{126,127}, C. R. Lawrence¹²⁸, M. Le Jeune¹²⁹, P. Lesgourgues¹³⁰, J. Lesgourgues¹³¹, A. Lewis¹³², M. Liguori^{133,134}, P. B. Lilje¹³⁵, M. Lilley¹³⁶, V. Linares^{137,138}, M. López-Camacho¹³⁹, P. M. Lubin¹⁴⁰, Y.-Z. Ma^{141,142}, J. F. Macías-Pérez¹⁴³, G. Maggio¹⁴⁴, D. Maitino^{145,146}, N. Mandic¹⁴⁷, A. Mangilli¹⁴⁸, A. Marcos-Caballero¹⁴⁹, M. Marín¹⁵⁰, P. G. Marin¹⁵¹, M. Marinelli¹⁵², E. Martínez-González¹⁵³, S. Matarrese^{154,155}, N. Marni¹⁵⁶, J. D. Mclwain¹⁵⁷, P. R. Metzger¹⁵⁸, A. Mielchiorri¹⁵⁹, A. Monetti¹⁶⁰, M. Migliaccio¹⁶¹, M. Milten^{162,163}, S. Mitra¹⁶⁴, M.-A. Miville-Deschênes¹⁶⁵, D. Molinari^{166,167}, L. Moulin¹⁶⁸, G. Morgante¹⁶⁹, A. Moss¹⁷⁰, P. Natoli^{171,172}, H. U. Nørgaard-Nielsen¹⁷³, L. Pagano^{174,175}, D. Poletti¹⁷⁶, B. Pardijs¹⁷⁷, G. Patanchon¹⁷⁸, H. V. Peiris¹⁷⁹, F. Perrotta¹⁸⁰, V. Petronio¹⁸¹, E. Piacentini¹⁸², L. Polastri¹⁸³, G. Polenta¹⁸⁴, J.-L. Piquer¹⁸⁵, J. P. Rachen¹⁸⁶, M. Reinecke¹⁸⁷, M. Remazeilles¹⁸⁸, A. Renzi¹⁸⁹, G. Rocha¹⁹⁰, C. Rosseti¹⁹¹, G. Roulier^{192,193}, J. A. Rubio-Martín¹⁹⁴, B. Ruiz-Granados¹⁹⁵, L. Salvati¹⁹⁶, M. Sandri¹⁹⁷, M. Savelainen^{198,199}, D. Scott²⁰⁰, E. P. S. Shellard²⁰¹, C. Sirignano²⁰², G. Sirri²⁰³, L. D. Spencer²⁰⁴, R. Stanyav²⁰⁵, A.-S. Sun-Uski²⁰⁶, J. A. Tauber²⁰⁷, D. Tavagnacco²⁰⁸, M. Tenti²⁰⁹, L. Toffolatti²¹⁰, M. Tomasi^{211,212}, T. Trombettoni²¹³, L. Valentiano²¹⁴, J. Valiviita²¹⁵, B. Van Tent²¹⁶, L. Vibert²¹⁷, P. Vielva²¹⁸, F. Villa²¹⁹, N. Vittorio²²⁰, B. D. Wandelt²²¹, J. K. Weisbecker²²², M. White²²³, S. D. M. White²²⁴, A. Zacchei²²⁵, and A. Zonca²²⁶

(Affiliations can be found after the references)

August 10, 2021

ABSTRACT

We present cosmological parameter results from the final full-mission Planck measurements of the cosmic microwave background (CMB) anisotropies, combining information from the temperature and polarization maps and the lensing reconstruction. Compared to the 2015 results, improved measurements of large-scale polarization allow the reionization optical depth to be measured with higher precision, leading to significant gains in the precision of other correlated parameters. Improved modelling of the small-scale polarization leads to more robust constraints on many parameters, with residual modelling uncertainties estimated to affect them only at the 0.5 σ level. We find good consistency with the standard spatially-flat 6-parameter Λ CDM cosmology having a power-law spectrum of adiabatic scalar perturbations (denoted “base Λ CDM” in this paper), from polarization, temperature, and lensing, separately and in combination. A combined analysis gives dark matter density $\Omega_{\text{dm}}^0 = 0.120 \pm 0.001$, baryon density $\Omega_{\text{b}}^0 = 0.0224 \pm 0.0001$, scalar spectral index $n_s = 0.965 \pm 0.004$, and optical depth $\tau = 0.054 \pm 0.007$ (in this abstract we quote 68% confidence regions on measured parameters and 95% on upper limits). The angular acoustic scale is measured to 0.03% precision, with $100\theta_s = 1.0411 \pm 0.0003$. These results are only weakly dependent on the cosmological model and remain stable, with somewhat increased errors, in many commonly considered extensions. Assuming the base- Λ CDM cosmology, the inferred (model-dependent) late-Universe parameters are: Hubble constant $H_0 = (67.4 \pm 0.5) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$; matter density parameter $\Omega_m = 0.315 \pm 0.007$; and matter fluctuation amplitude $\sigma_8 = 0.811 \pm 0.006$. We find no compelling evidence for extensions to the base- Λ CDM model. Combining with baryon acoustic oscillation (BAO) measurements (and considering simple parameter extensions) we constrain the effective extra relativistic degrees of freedom to be $N_{\text{eff}} = 2.99 \pm 0.17$, in agreement with the Standard Model prediction $N_{\text{eff}} = 3.046$, and find that the neutrino mass is highly constrained to $\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$. The CMB spectra continue to prefer higher lensing amplitudes than predicted in base Λ CDM at over 2σ , which pulls some parameters that affect the lensing amplitude away from the Λ CDM model; however, this is not supported by the lensing reconstruction or (in models that also change the background geometry) BAO data. The joint constraint with BAO measurements on spatial curvature is consistent with a flat universe, $\Omega_k = 0.001 \pm 0.002$. Also combining with Type Ia supernovae (SNe), the dark-energy equation of state parameter is measured to be $w_0 = -1.03 \pm 0.03$, consistent with a cosmological constant. We find no evidence for deviations from a purely power-law primordial spectrum, and combining with data from BAO, BICEP2, and Keck Array data, we place a limit on the tensor-to-scalar ratio $r_{0.002} < 0.06$. Standard big-bang nucleosynthesis predictions for the helium and deuterium abundances for the base- Λ CDM cosmology are in excellent agreement with observations. The Planck base- Λ CDM results are in good agreement with BAO, SNe, and some galaxy lensing observations, but in slight tension with the Dark Energy Survey’s combined-probe results including galaxy clustering (which prefers lower fluctuation amplitudes or matter density parameters), and in significant, 3.6σ , tension with local measurements of the Hubble constant (which prefer a higher value). Simple model extensions that can partially resolve these tensions are not favoured by the Planck data.

Key words. Cosmology: observations – Cosmology: theory – Cosmic background radiation – cosmological parameters

¹Corresponding author: G. Efstathiou, gpe@ast.cam.ac.uk
²Corresponding author: S. Galli, galli@iap.fr
³Corresponding author: A. Lewis, astm@cosmologist.info

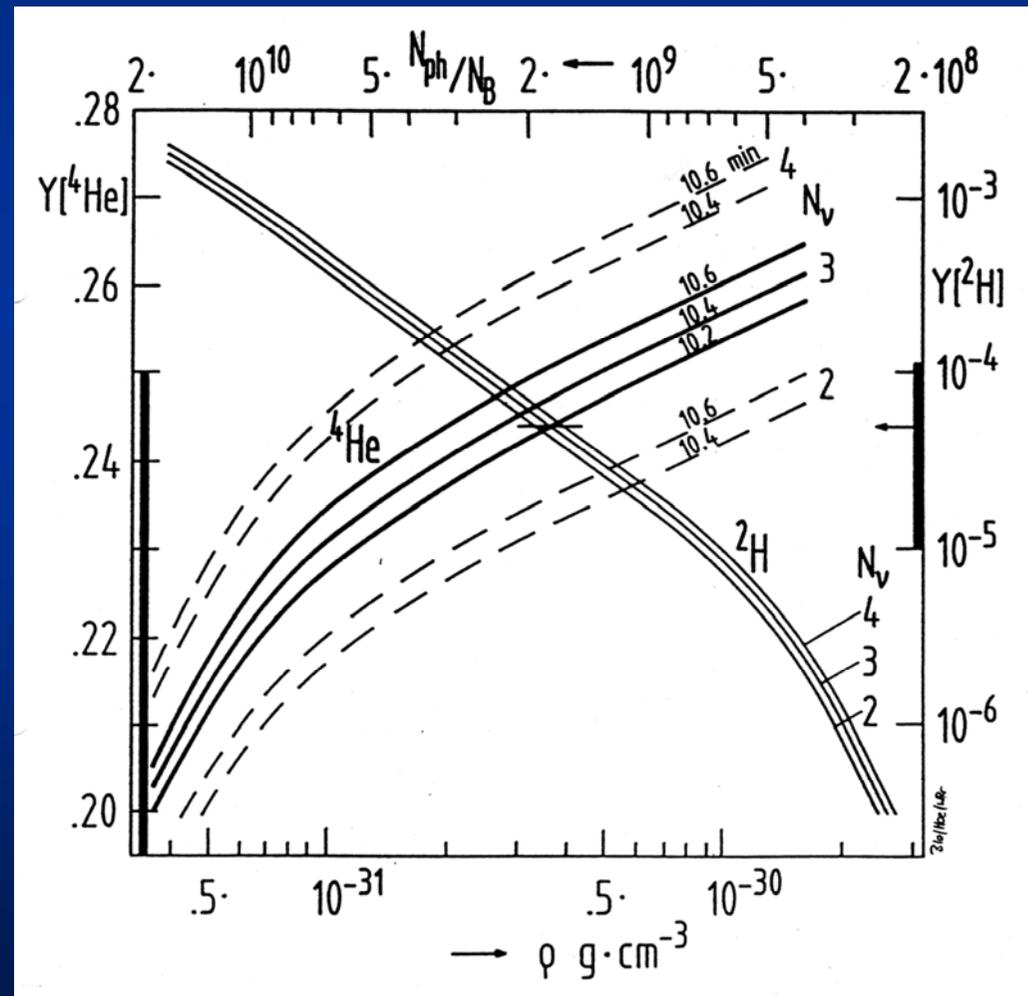
„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Kosmologie

4. Entwicklung von Weltmodellen

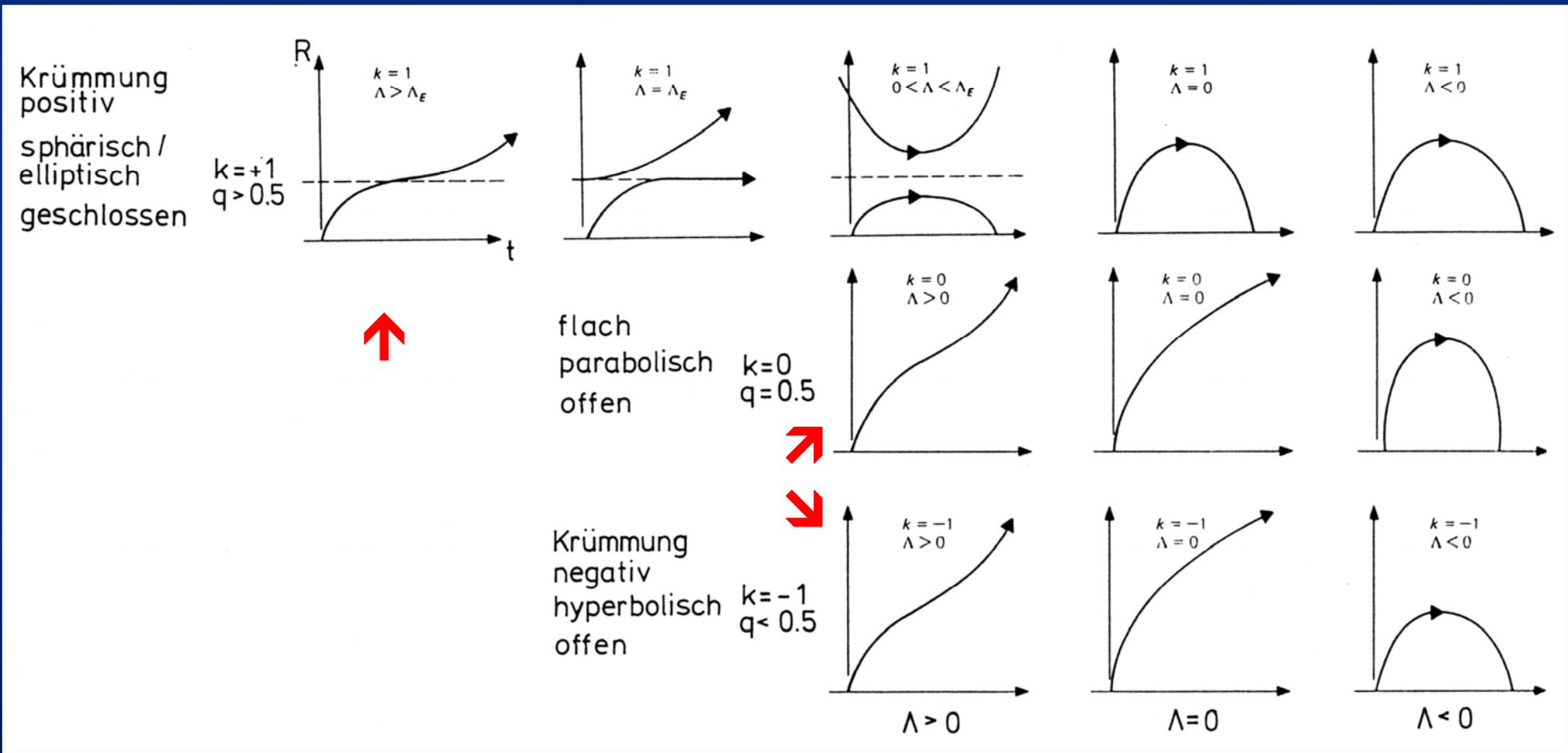
Modellparameter und Randbedingungen

Abhängigkeit des Heliumanteils von der Zahl der Neutrinosorten und dem Verhältnis Photonen zu Baryonen im frühen Universum



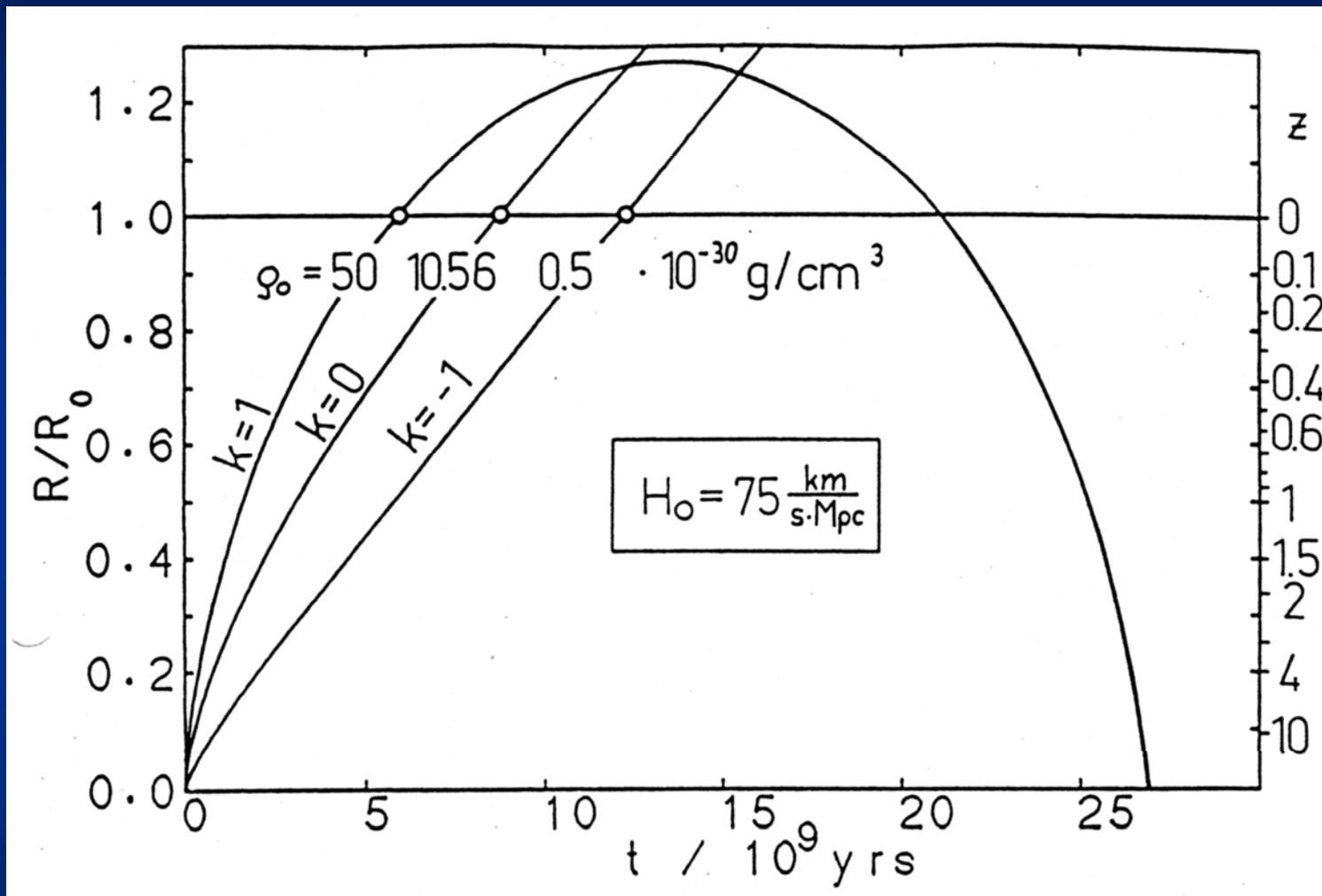
Kosmologie

5. Auswahl eines Weltmodells



Kosmologie

5. Auswahl eines Weltmodells



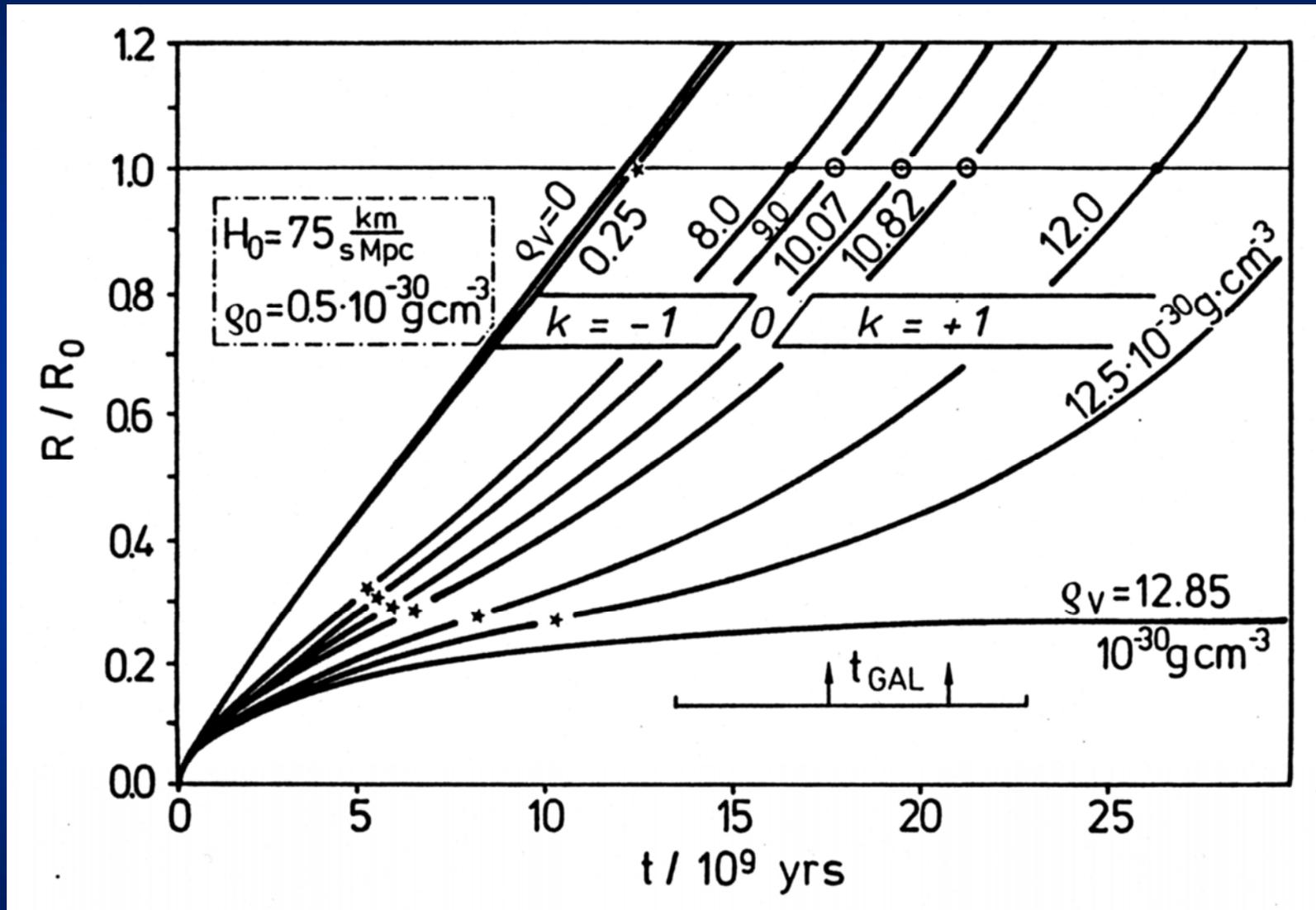
Expansion (& Kollaps) des Kosmos im früheren Standardmodell

(Priester et al. 1987)

$k=0$ ist ein flaches (euklidisches), offenes und unendliches Weltall mit kritischer Dichte ρ_c . Heute wird $\rho_c = 10.01 \cdot 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$ angenommen.

Kosmologie

5. Auswahl eines Weltmodells



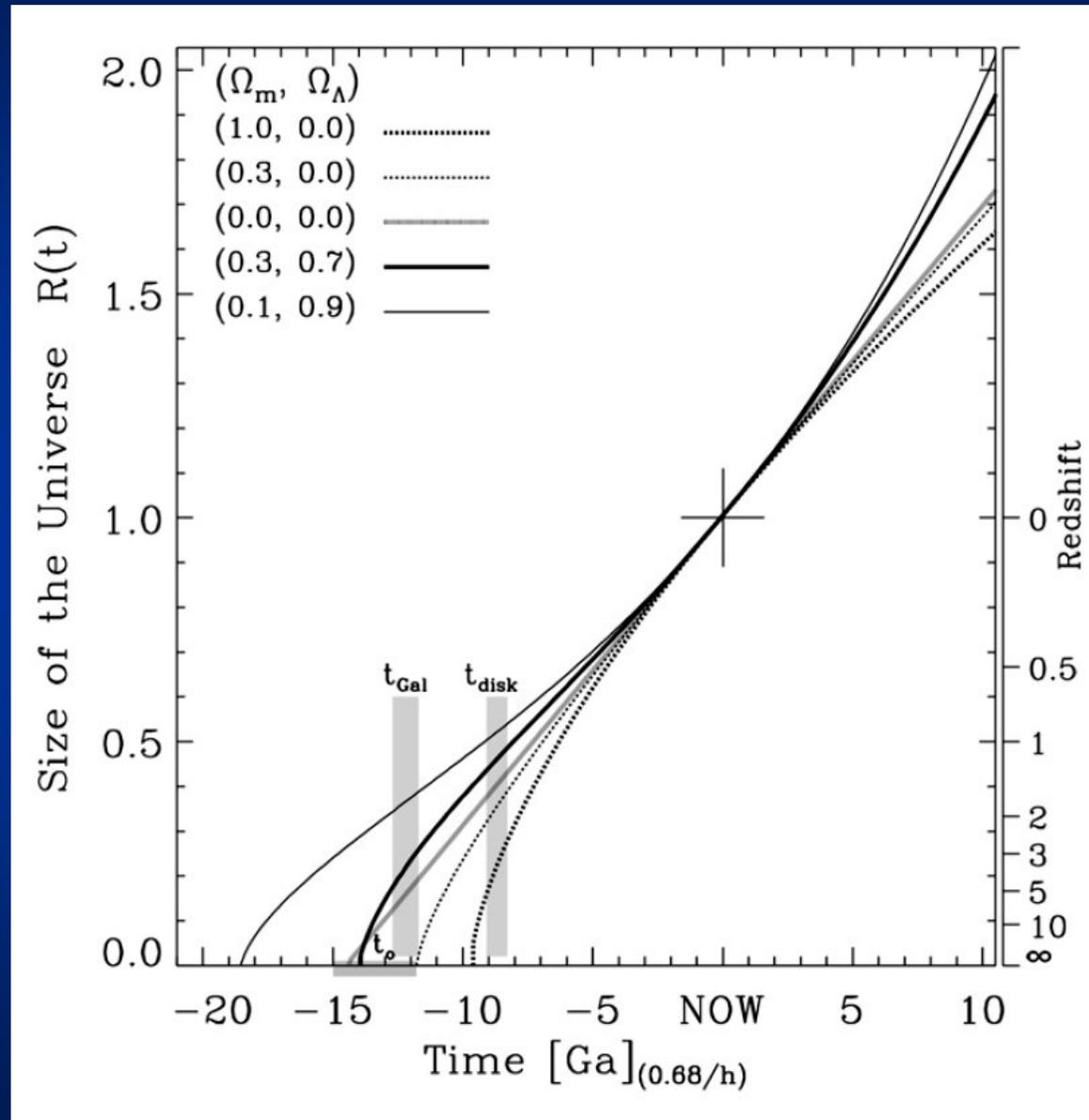
„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Expansion des Kosmos in Friedmann-Lemaître-Modellen
 [Änderung des Hubble-Parameters H_0 ändert im wesentlichen die Zeitachse!]

(Priester et al. 1987)

Kosmologie

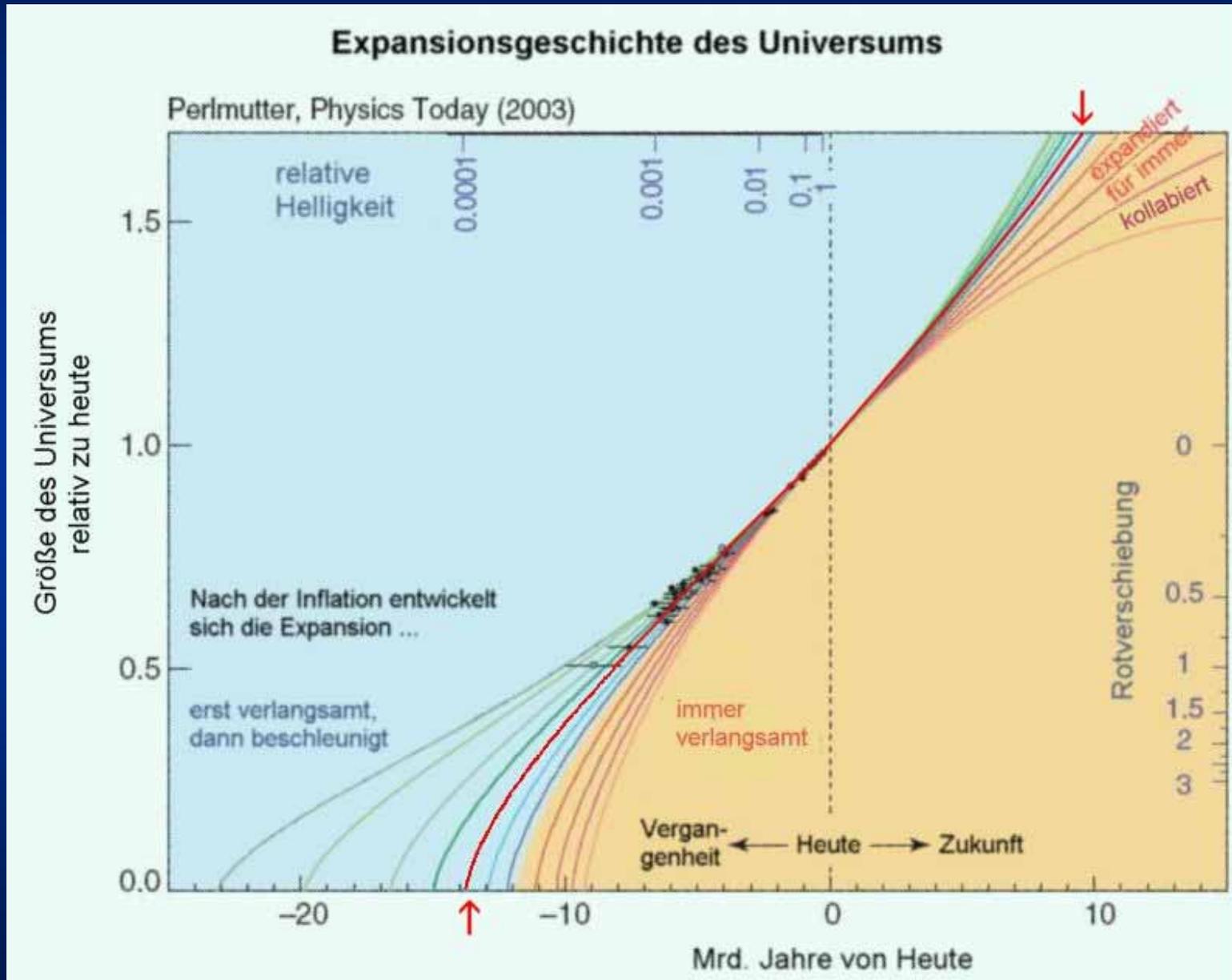
5. Auswahl eines Weltmodells



Expansionsgeschichte des Universums
(Lineweaver, Science 284, 150 (1999))

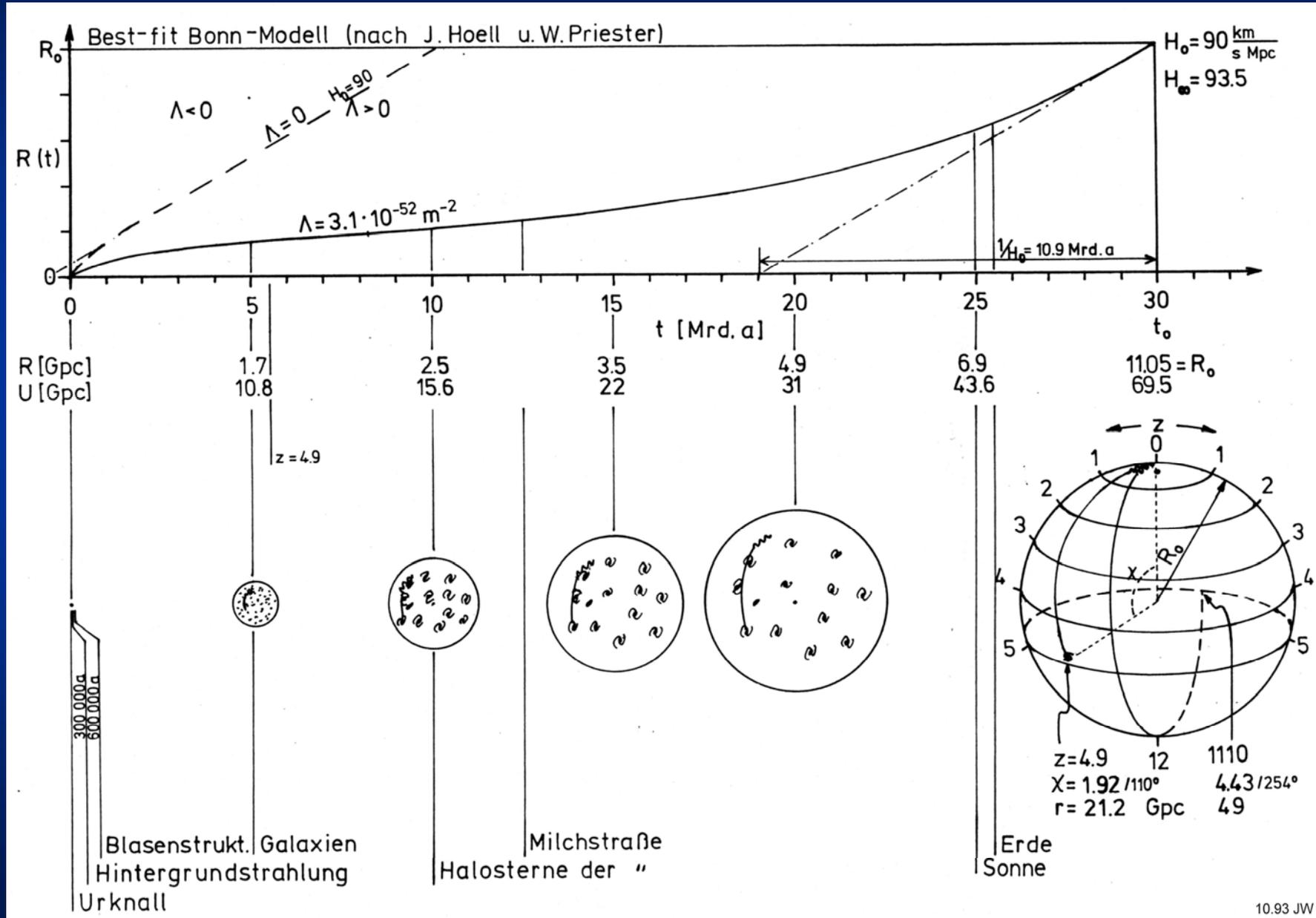
Kosmologie

5. Auswahl eines Weltmodells



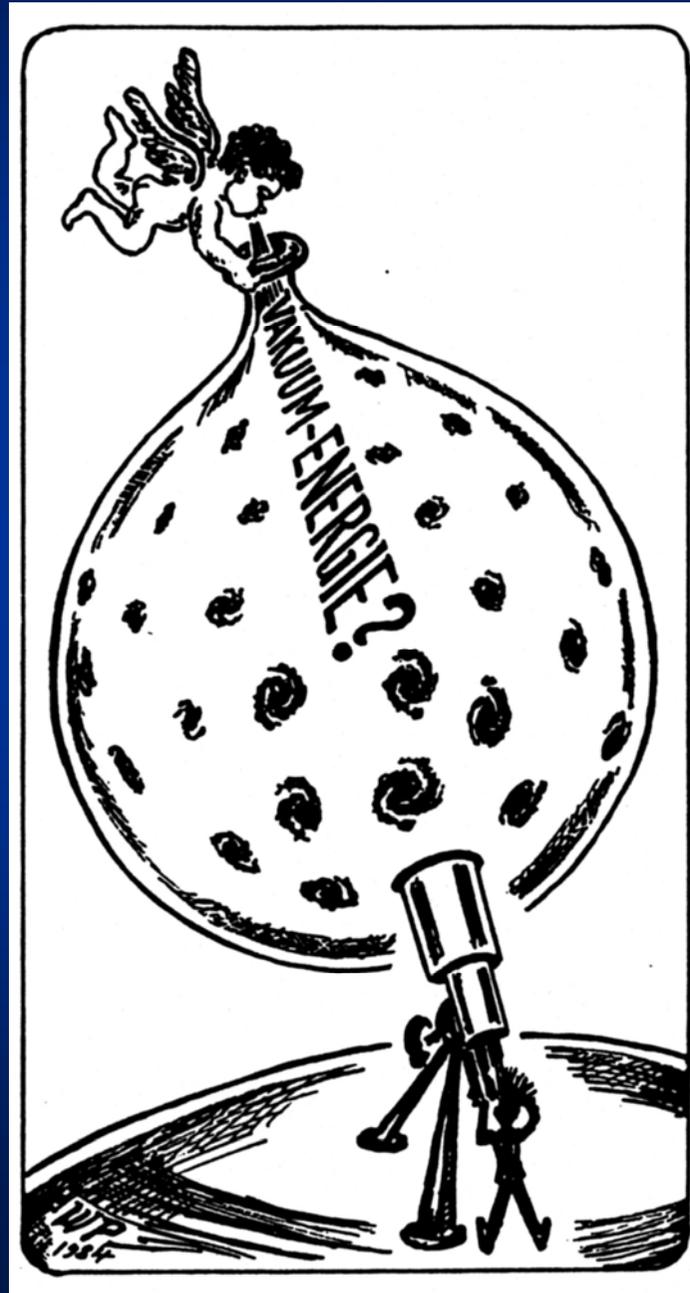
Kosmologie

5. Auswahl eines Weltmodells



Kosmologie

Das große Geheimnis



(Wolfgang Priester 1984)

Kosmologie

6. Inflation

Fünf zu lösende Probleme:

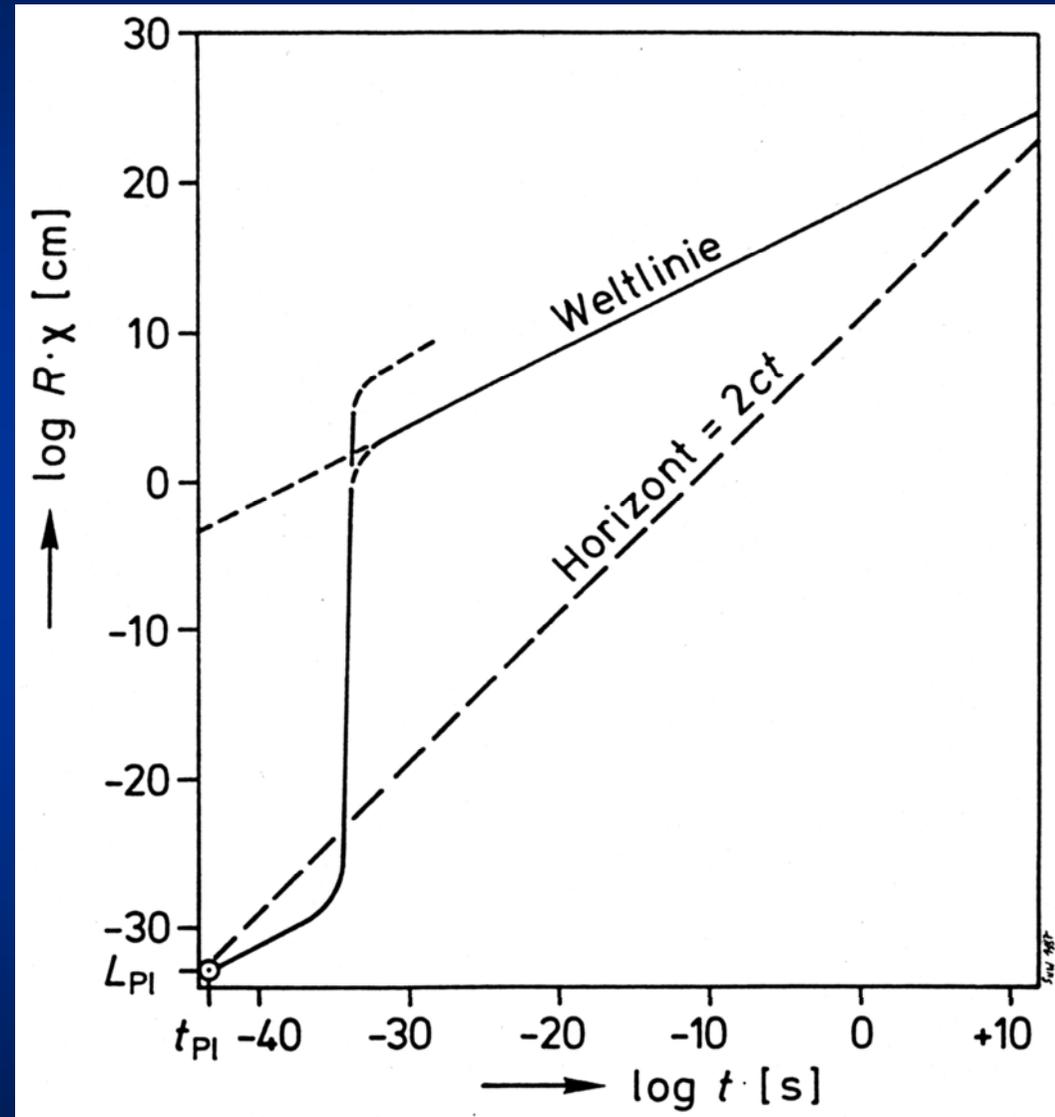
1. Singularitätsproblem: Was war vor dem Urknall? Wer oder was startete die Expansion? Ein Start aus dem Nichts?
2. Flachheitsproblem: Extreme Krümmung bei den Planck-Größen, heute flach auf Skala von 10^{30} m
3. Horizontproblem: Wer gab das Kommando, dass alle Regionen gleichzeitig expandieren?
4. Homogenitätsproblem: Auf Skala von 10^{10} Lj extrem homogen, darunter z.T. extrem inhomogen
5. Einzigartigkeit: Warum ein 4-dimensionales Raum-Zeit-Kontinuum? Wo kommen all die Naturkonstanten her?

Einstein: „*Was mich wirklich interessiert ist, ob Gott die Welt hätte anders gestalten können.*“

Kosmologie

6. Inflation

Alan Guth (1982):
„Oft hört man, nichts sei umsonst. Es könnte jedoch sein, dass das Universum selbst umsonst ist.“



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

L_{PI} und t_{PI} : Planck-Länge und -Zeit, R : Skalenfaktor des Universums

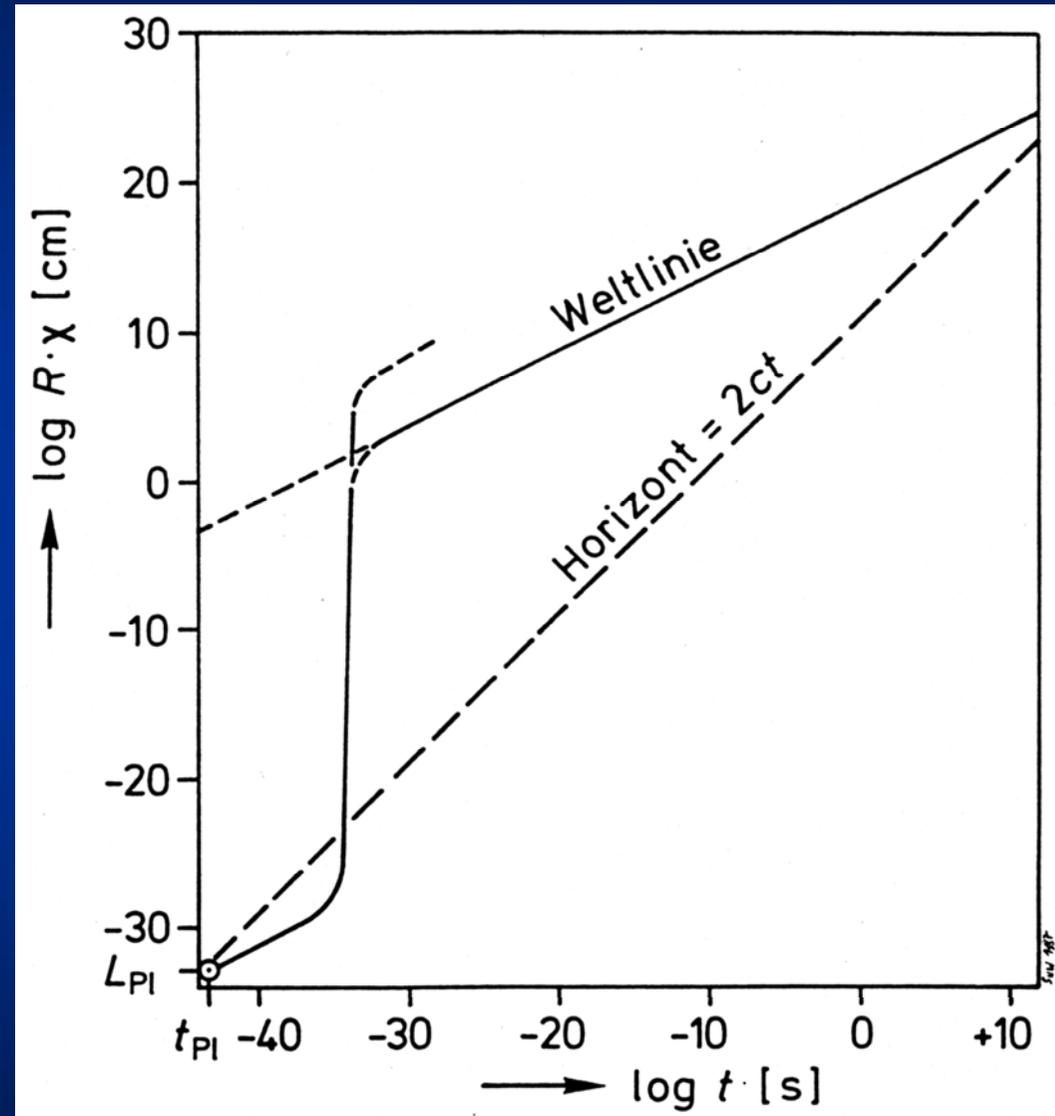
Kosmologie

6. Inflation

Die Inflation begann bei etwa 10^{-35} s und dauerte bis etwa 10^{-33} bis 10^{-30} s. GUT-Ära
GUT = Grand Unified Theory

1980 von Alan H. Guth vorgeschlagen.

1982 von Linde, Albrecht und Steinhardt modifiziert.

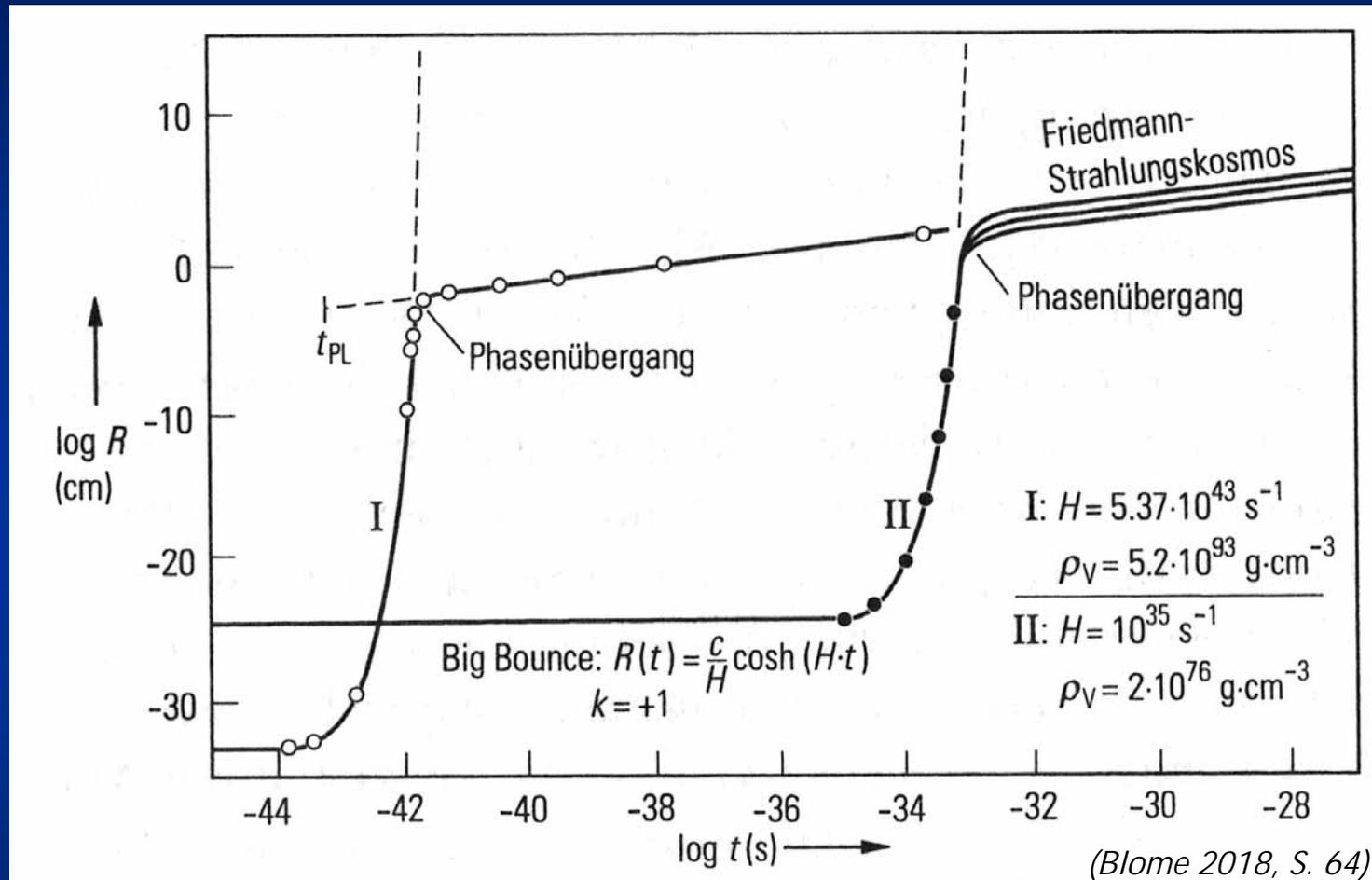


„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

L_{PI} und t_{PI} : Planck-Länge und -Zeit, R : Skalenfaktor des Universums

Kosmologie

6. Inflation



- I** zeigt den Verlauf der Inflation mit nach dem Phasenübergang folgender Expansion, beginnend mit den Planck-Größen.
- II** zeigt den Verlauf nach dem Big Bounce-Modell von W. Priester et al., beginnend bei einer Mindestgröße.

Kosmologie

6. Inflation

Nach Guths Theorie und der Modifikation durch Linde, Albrecht & Steinhardt ist die Energiedichte des Vakuums:

$$\rho \sim T^4 \text{ mit } \rho \rightarrow \rho_0, \text{ wenn } T \rightarrow 0$$

ρ_0 ist dann ein metastabiles „falsches“ Vakuum, ein Skalarfeld, das die Eigenschaften eines Higgs-Feldes besitzt und einen negativen (antigravitativen) Druck erzeugt. „Inflatonfeld“

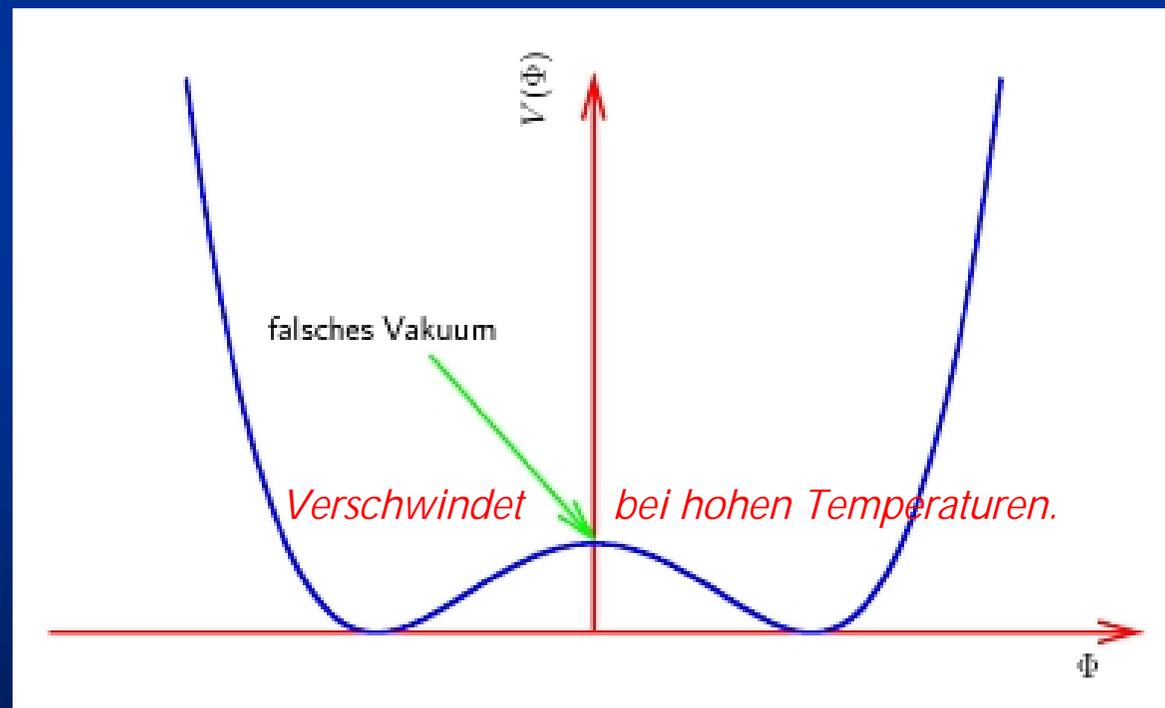
Die Friedmann-Gleichung wird abhängig von der Temperatur und ihrer zeitlichen Veränderung.

Bei Abkühlung dominiert irgendwann die Energiedichte des falschen Vakuums, das durch exponentielle Expansion zerfällt.

Kosmologie

6. Inflation

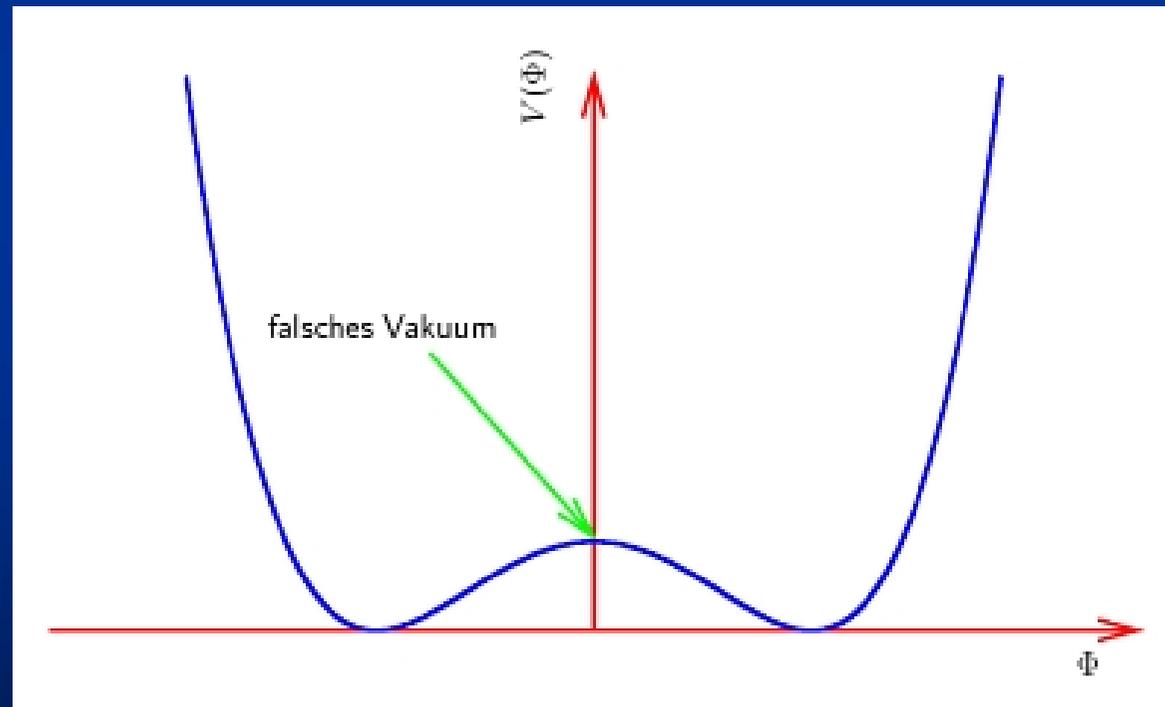
Bei Abkühlung dominiert irgendwann die Energiedichte des falschen Vakuums, das durch exponentielle Expansion zerfällt. Seine Energie wird durch Kopplung des Feldes an das GUT-Feld in Teilchenerzeugung umgesetzt (\rightarrow „heiße Ursuppe“).



Kosmologie

6. Inflation

Bei Abkühlung dominiert irgendwann die Energiedichte des falschen Vakuums, das durch exponentielle Expansion zerfällt. Seine Energie wird durch Kopplung des Feldes an das GUT-Feld in Teilchenerzeugung umgesetzt (\rightarrow „heiße Ursuppe“).



Die beobachtbaren Dichtefluktuationen entstammen den Quantenfluktuationen des Inflatonfeldes.

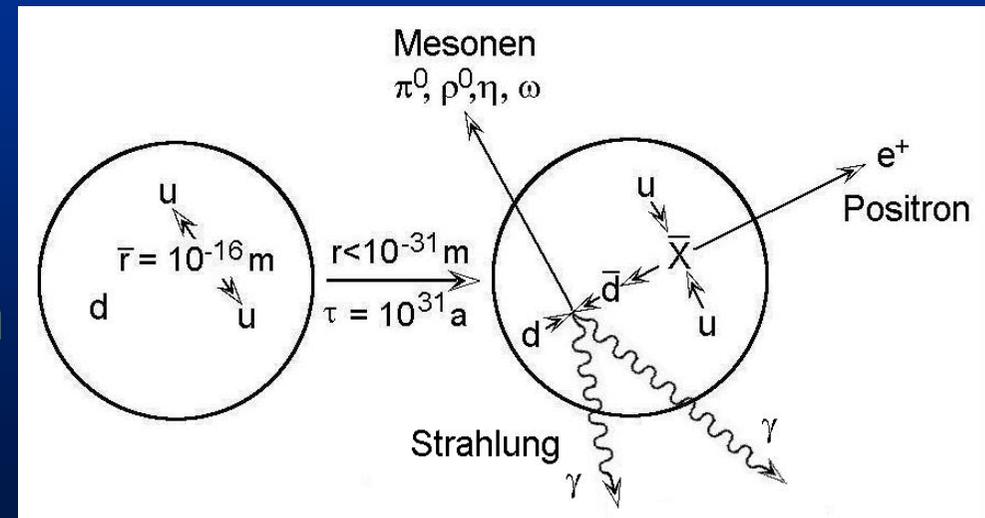
Kosmologie

6. Inflation

Durch die Ausdehnung um den Faktor $\geq 10^{26}$ wird die Dichte der in der GUT als Solitone auftretenden Magnetischen Monopole (Masse: 10^{16} GeV , Größe: 10^{-15} m) so verdünnt, dass heute keine mehr nachweisbar sind. Die Spezielle Relativitätstheorie ist hier nicht anwendbar, da der komplette Raum expandiert.

Diese Magnetischen Monopole sind flächige Objekte, quasi winzige Ballungen von Feldenergie mit komplexer, innerer Struktur, an denen Teilchen-Antiteilchen-Paare entstehen und zerstrahlen. Sie sind möglicherweise für die endliche Lebensdauer der Protonen mit $\tau > 10^{29}$ a (Protonenzerfall) verantwortlich .

(Protonenzerfall)

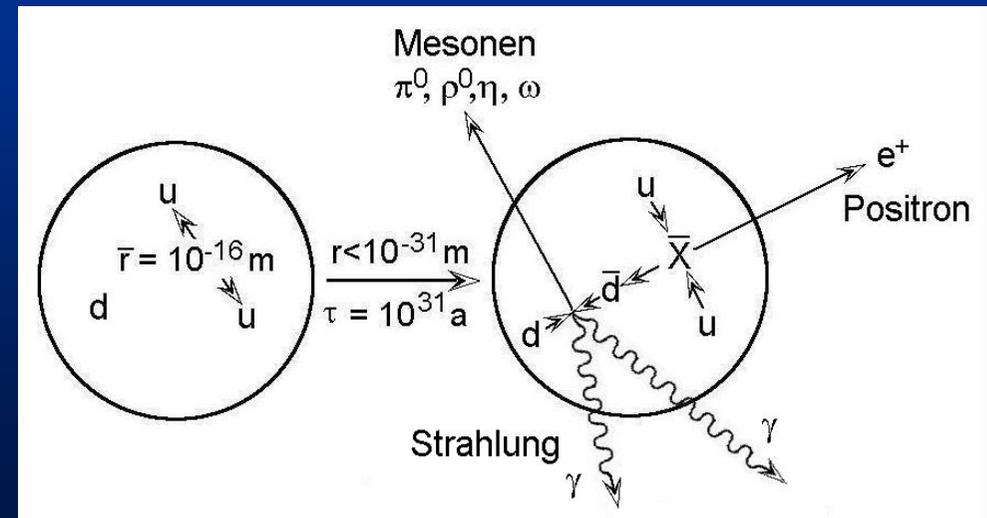


Kosmologie

6. Inflation

Durch die Ausdehnung um den Faktor $\geq 10^{26}$ wird die Dichte der in der GUT als Solitone auftretenden Magnetischen Monopole (Masse: 10^{16} GeV , Größe: 10^{-15} m) so verdünnt, dass heute keine mehr nachweisbar sind. Die Spezielle Relativitätstheorie ist hier nicht anwendbar, da der komplette Raum expandiert.

»Läge die Protonenlebensdauer unter 10^{16} Jahren, so entspräche das 30'000 Zerfällen pro Sekunde, und unser Körper müsste aus Strahlenschutzgründen aus dem Verkehr gezogen werden.«
(Maurice Goldhaber)



Kosmologie

6. Inflation

Durch die Ausdehnung um den Faktor $\geq 10^{26}$ wird die Dichte der in der GUT als Solitone auftretenden Magnetischen Monopole (Masse: 10^{16} GeV , Größe: 10^{-15} m) so verdünnt, dass heute keine mehr nachweisbar sind. Die Spezielle Relativitätstheorie ist hier nicht anwendbar, da der komplette Raum expandiert.

Die Inflation löst das Flachheits-, das Homogenitäts-, das Horizontproblem und die Materie-/Antimaterie-Asymmetrie:

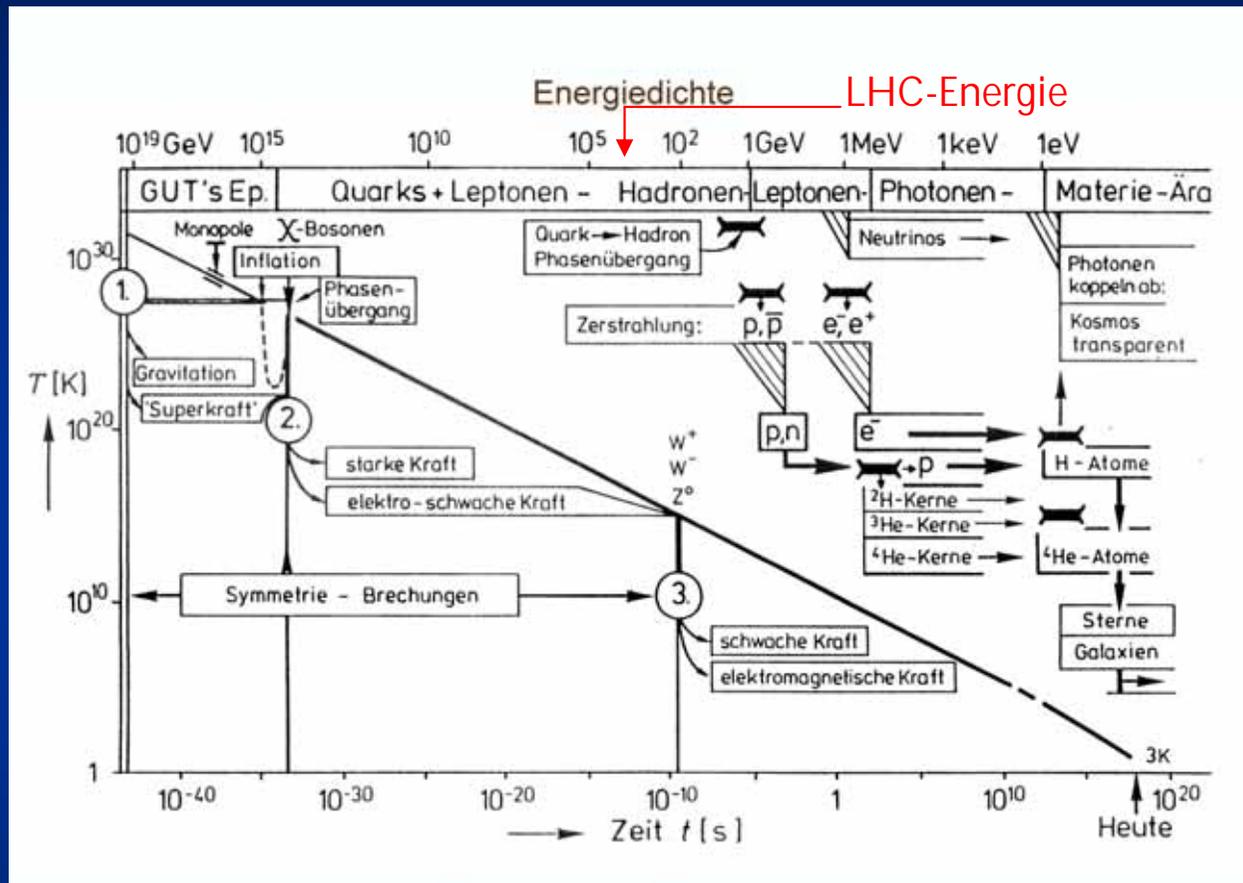
$$\eta = (6,14 \pm 0,25) \cdot 10^{-10}$$

(WMAP 2003)

Letztere unter Nichterhaltung der Baryonenzahl und Verletzung der C-/CP-Invarianz. Auf die Inflation folgt eine Erwärmungsphase durch den Zerfall der Energiedichte des spinlosen Feldes und der Beginn des heißen Urknalls mit der Bildung der Quantenteilchen.

Kosmologie

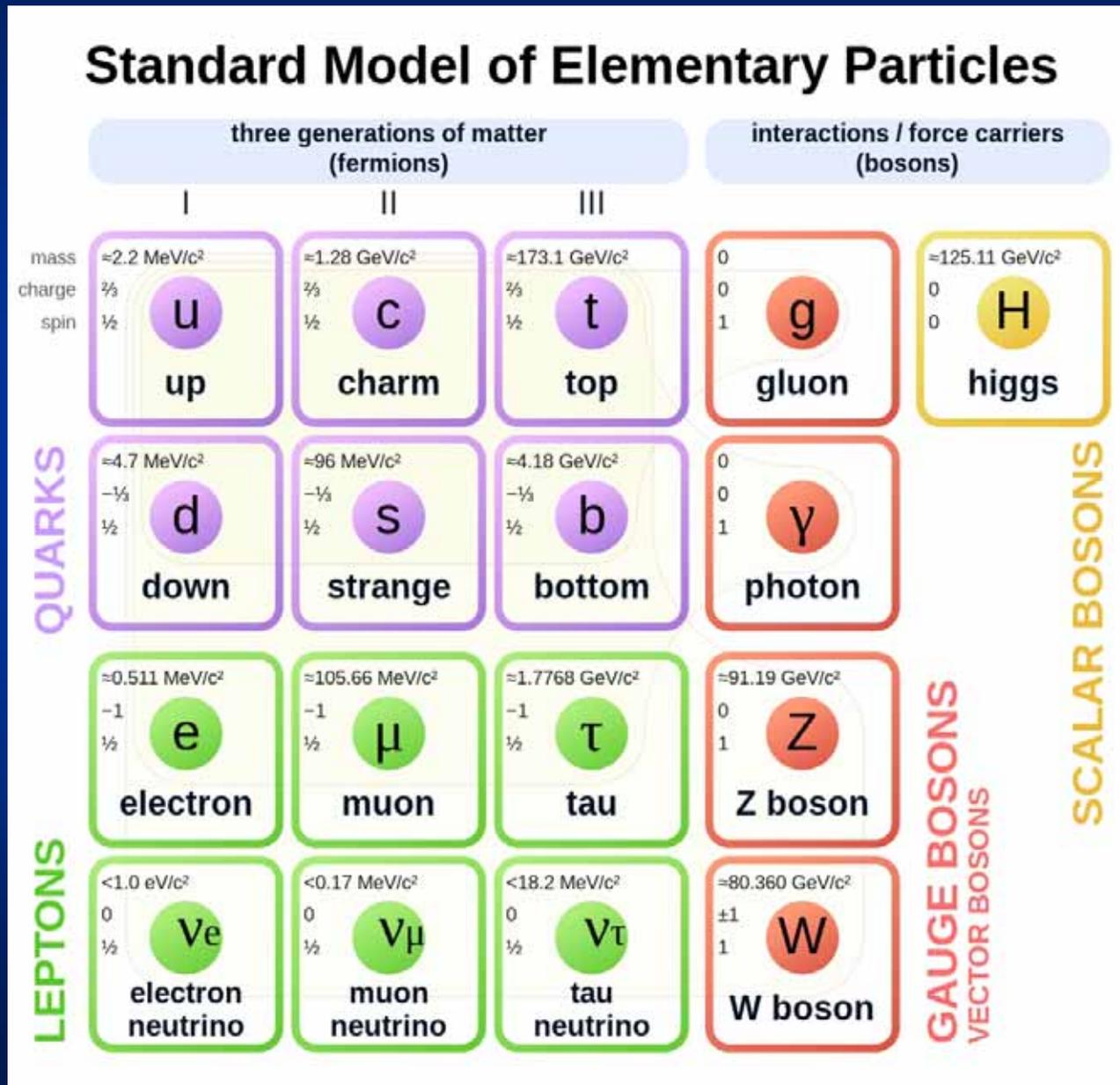
Einschub: Elementarteilchenphysik



Je mehr man sich dem Anfang ($t=0$) nähert, umso dominanter bestimmen die Eigenschaften der Quanten und Quantenfelder die Entwicklung des Universums. Experimentelle Bestätigungen sind nur bis zu den höchsten Beschleunigerenergien möglich: LHC (Large Hadron-Collider, CERN): 2×6.5 TeV

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik



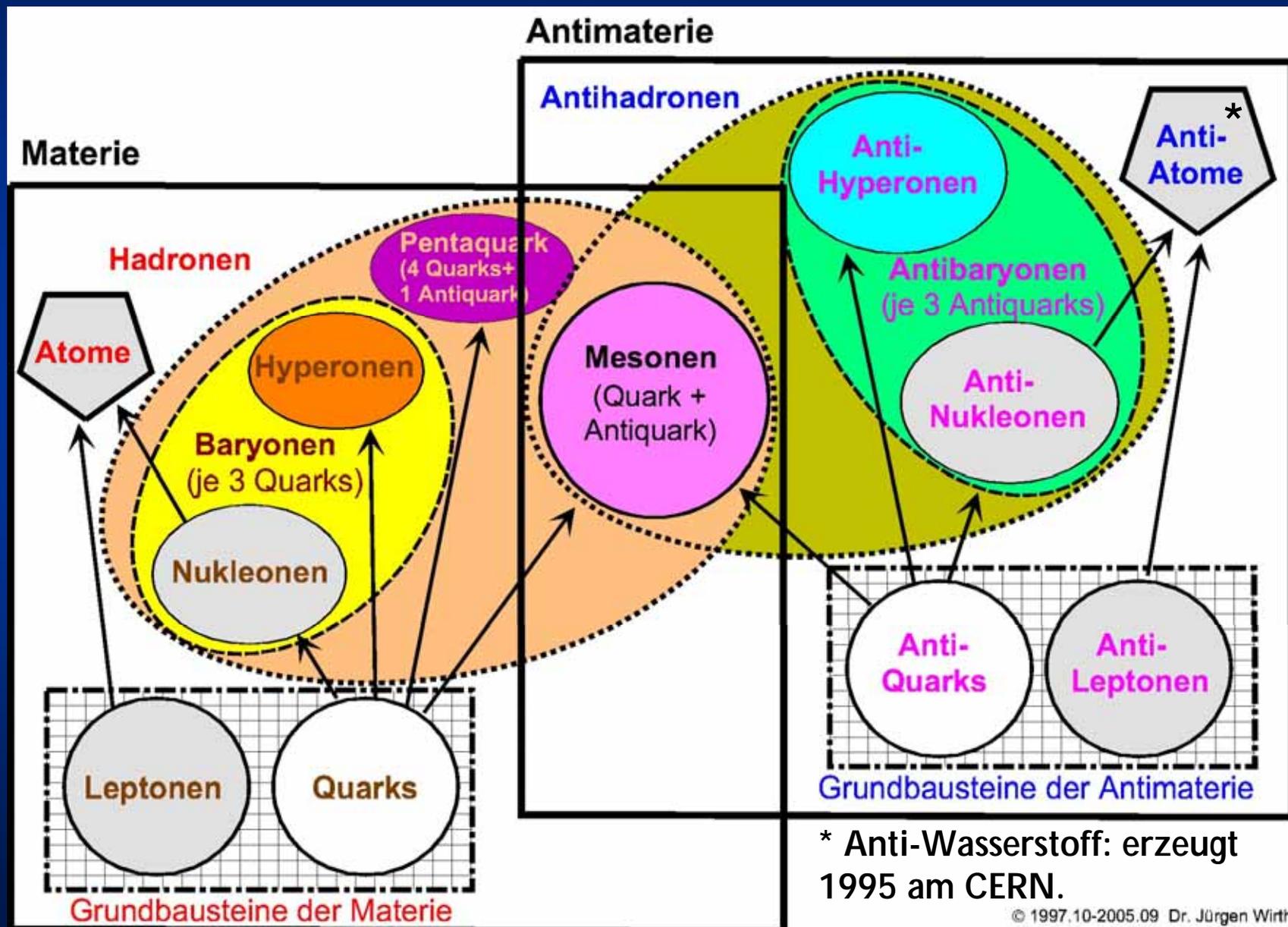
2024:
Entdeckung eines
Gluonenballs aus
2 Gluonen mit
Spin=0,
 $2.39 \text{ GeV}/c^2$
benannt X(2370)

Gauge-Bosons =
Eichbosonen,
Vermittler der
Eichfelder

(Wikipedia)

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik



Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik

Name der Wechselwirkung	relative Stärke	dimensionslose Kopplungskonstante	Wechselwirkungskonstante, Einheit	Reichweite / m	Austauschteilchen (M / kg)
starke	1	$g_s^2 \cdot 2\pi/hc$ 0.3...1	g_s^2 $3.1 \cdot 10^{-26}$ J·m	$2 \cdot 10^{-15}$	Gluonen (0) [Pionen $\pi^{0,\pm}$ ($2.6 \cdot 10^{-28}$)]
elektromagnetische	10^{-2}	$G_e e^2 / 2hc$ $7.3 \cdot 10^{-3}$	G_e $1.13 \cdot 10^{11}$ J·m/C ²	∞	Photonen (0)
schwache	10^{-7}	$G_F m_n^2 \cdot 8\pi^3 c/h^3$ $1.02 \cdot 10^{-5}$	G_F $1.42 \cdot 10^{-62}$ J·m ³	10^{-18}	Bosonen W^\pm, Z ($\approx 1.5 \cdot 10^{-25}$)
Gravitation	10^{-40}	$G m_n^2 / 2hc$ $4.7 \cdot 10^{-40}$	G $6.67 \cdot 10^{-11}$ J·m/kg ²	∞	Gravitonen (0)
Vereinheitlichungen:		Energie		Ergebnis:	
elektromagnetisch + schwach		10^5 MeV		elektroschwache Wechselwirkung	
elektroschwach + stark		10^{17} MeV		GUT (Große Vereinheitlichung)	
GUT + Gravitation		10^{22} MeV ?		L Reichweite: 10^{-31} m	

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik

Supersymmetrie

Supersymmetrie (SUSY) ist ein hypothetisches Konzept der Elementarteilchenphysik, in dem alle „normalen“ Teilchen Superpartner mit Massen von 100 - 1000 GeV/c² haben, so die Leptonen die Leptinos, Photonen die Photinos, Quarks und Gluonen die Quarkinos und Gluinos.

Unter Symmetriebrechung können Bosonen (ganzzahliger Spin) und Fermionen (halbzahliger Spin) ineinander transformiert werden.

Das leichteste Superteilchen (LSP), das sogenannte Neutralino, soll stabil sein und gilt als Kandidat für die Dunkle Materie.

Supersymmetrie gilt heute experimentell als weitgehend widerlegt.

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik

Supersymmetrie

Weiterhin bietet die Supersymmetrie eine Chance zur weiteren Vereinheitlichung von Wechselwirkungen, z.B. der GUT (Grand Unified Theory: starke & elektroschwache Ww) und evtl. der Gravitation in Form der Supergravitation (SUGRA) mit dem Gravitino als Feldquant mit Spin $3/2$.

Derzeit gibt es keine experimentellen Hinweise auf die Existenz einer Supersymmetrie.

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik

Stringtheorie / Superstringtheorie

Die Stringtheorie betrachtet Elementarteilchen nicht als punktförmige Teilchen (0-dimensional), sondern als sogenannte Strings mit eindimensionaler Ausdehnung.

Mitte der 1990er Jahre lagen eine bosonische Stringtheorie mit 26 Dimensionen und fünf weitere 10-dimensionale Stringtheorien vor.

Insbesondere als supersymmetrische Version ist sie Kandidat für eine alle Naturkräfte vereinheitlichende Theorie, die das Standardmodell der Elementarteilchenphysik und die Gravitation zusammenführt, auch da sie konkrete Vorhersagen für die Symmetriegruppen einer GUT macht.

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik

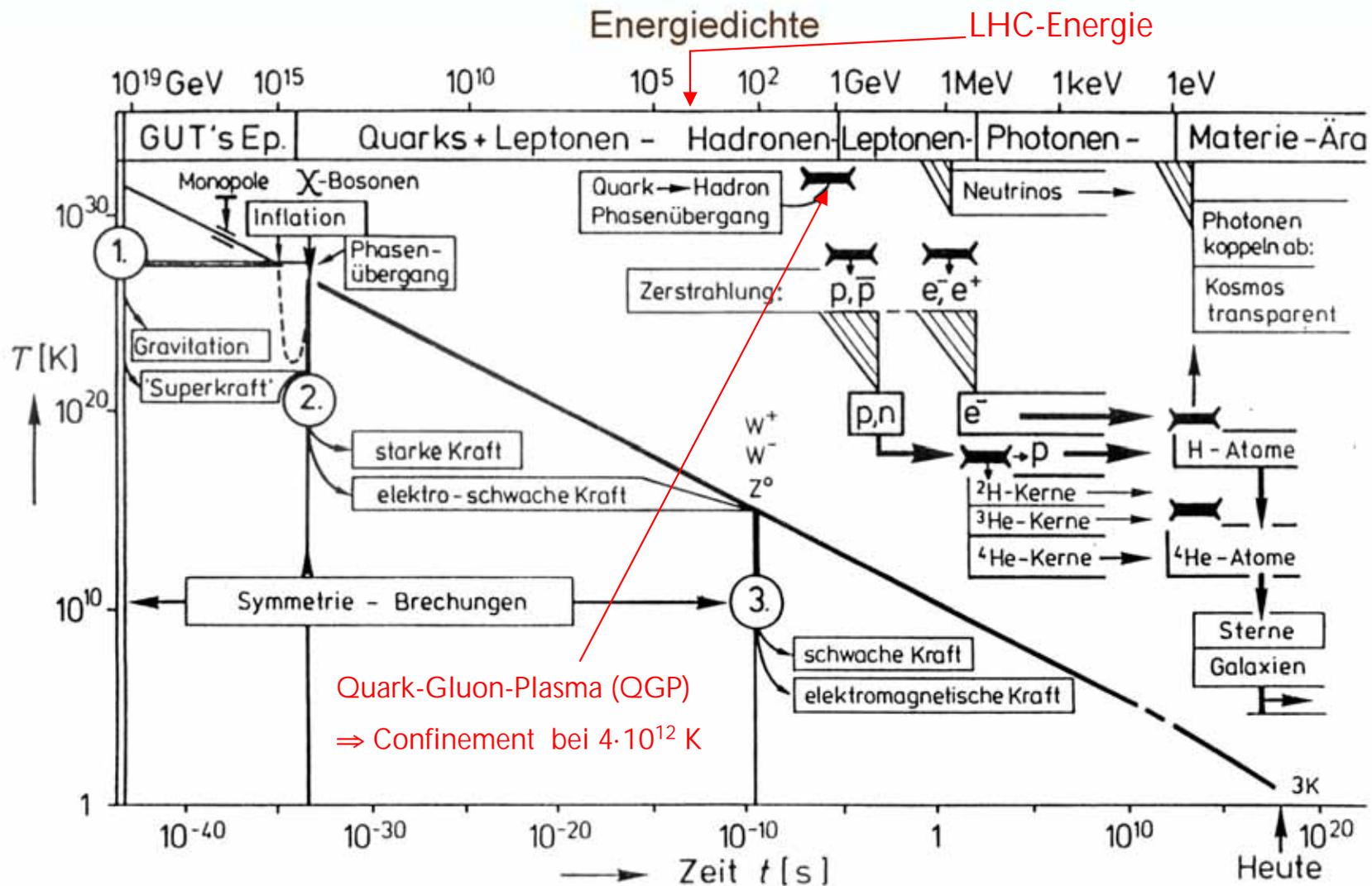
Stringtheorie / Superstringtheorie

In der sogenannten „M-Theorie“ wurden die bis dahin bekannten Superstringtheorien und die 11-dimensionale Supergravitation miteinander verbunden.

Trotz zahlreicher gezielter Experimente gibt es bis jetzt keine Hinweise auf räumliche Extradimensionen.

Kosmologie

Einschub: Elementarteilchenphysik



Kosmologie

Einschub: Dimensionalität

Warum ist das Universum vierdimensional?

Das Universum beginnt möglicherweise als mehrdimensionaler kompakter Raum, von dem heute das beobachtbare vierdimensionale Raum-Zeit-Kontinuum übrig geblieben ist.

Hierfür gibt es derzeit keine Erklärung. Es kann sein, dass die übrigen Dimensionen kompaktisiert worden sind und sich so der Beobachtung entziehen.

Kosmologie

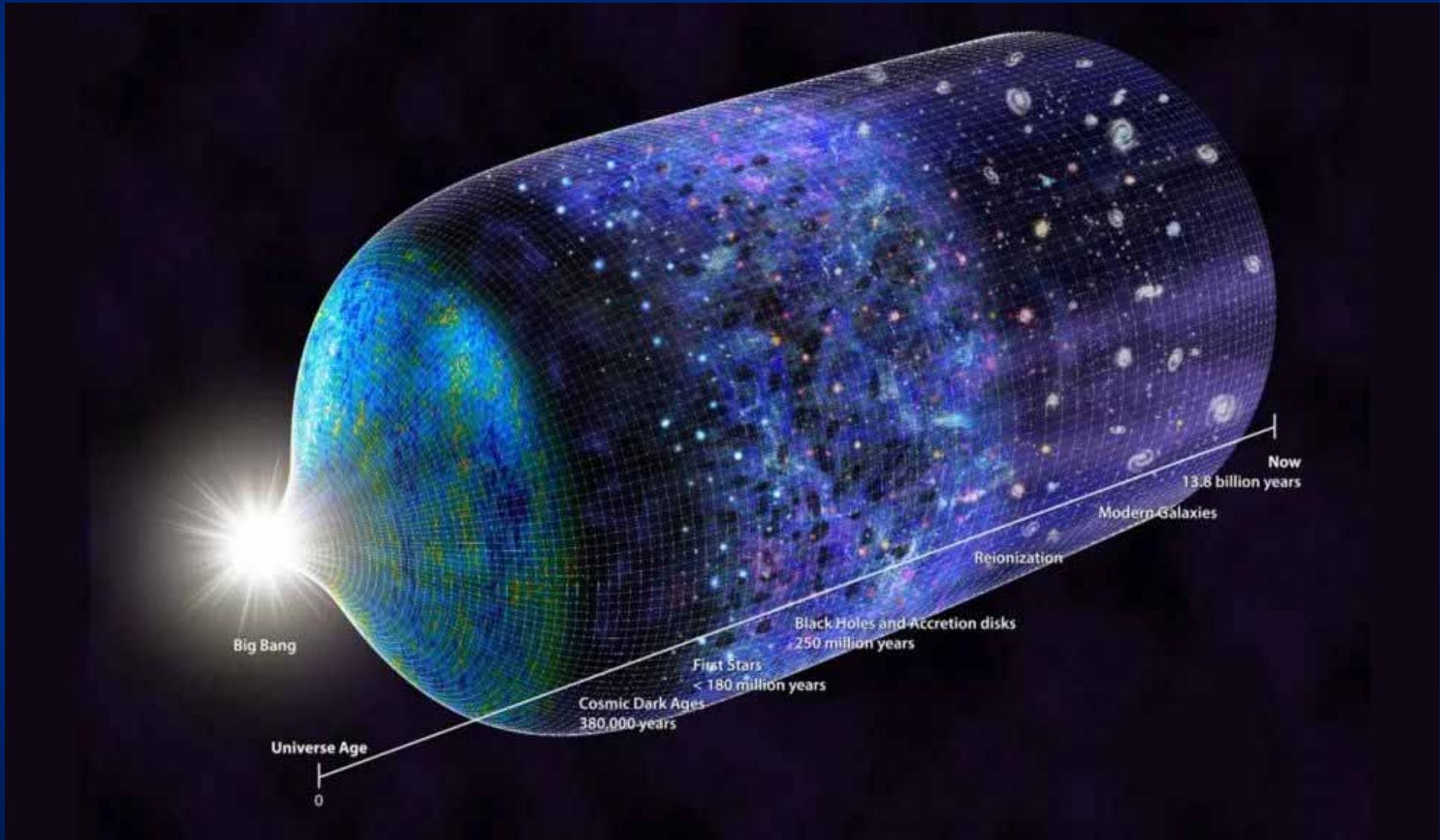
7. Entwicklungsphasen des Weltalls

»Das Nichts «vor« der Entstehung des Universums ist der vollständigste Hohlraum, den wir uns vorstellen können; es gibt dort keinen Raum, keine Zeit, keine Materie. Es ist eine Welt ohne Ort, ohne Dauer, ohne Ewigkeit und ohne Zahl; die Mathematiker nennen so etwas »Nullmenge«. Und doch wandelt sich dieser unvorstellbare Hohlraum als notwendige Folge physikalischer Gesetze von selbst in das Plenum der Existenz um. Wo stehen die Gesetze in diesem Hohlraum geschrieben? Was »sagt« dem Hohlraum, dass in ihm ein mögliches Universum steckt? Selbst der Hohlraum scheint einem Gesetz, einer Logik, zu gehorchen, die schon vor Raum und Zeit existiert hat.«

(Heinz R. Pagels, 1987)

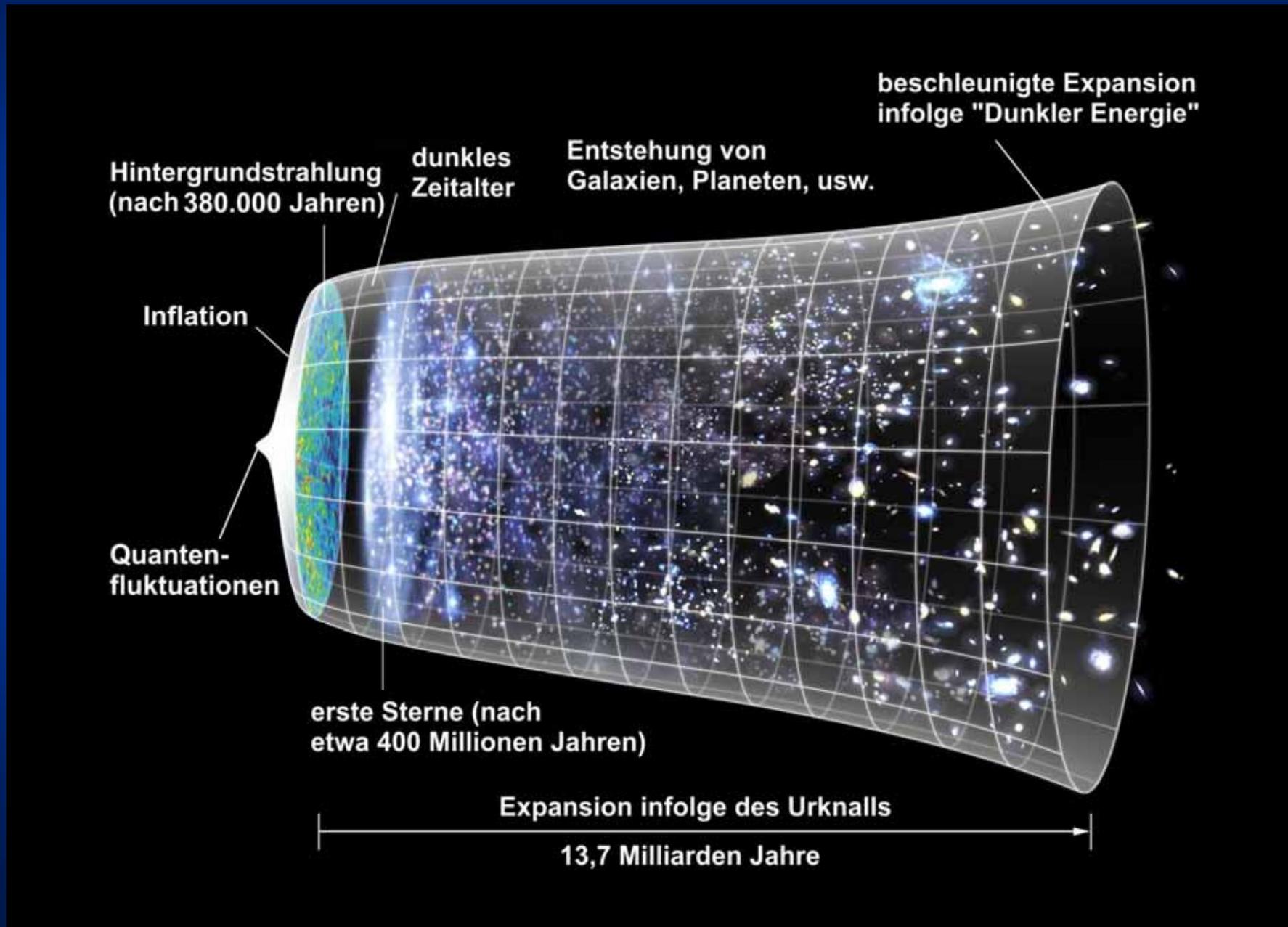
Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

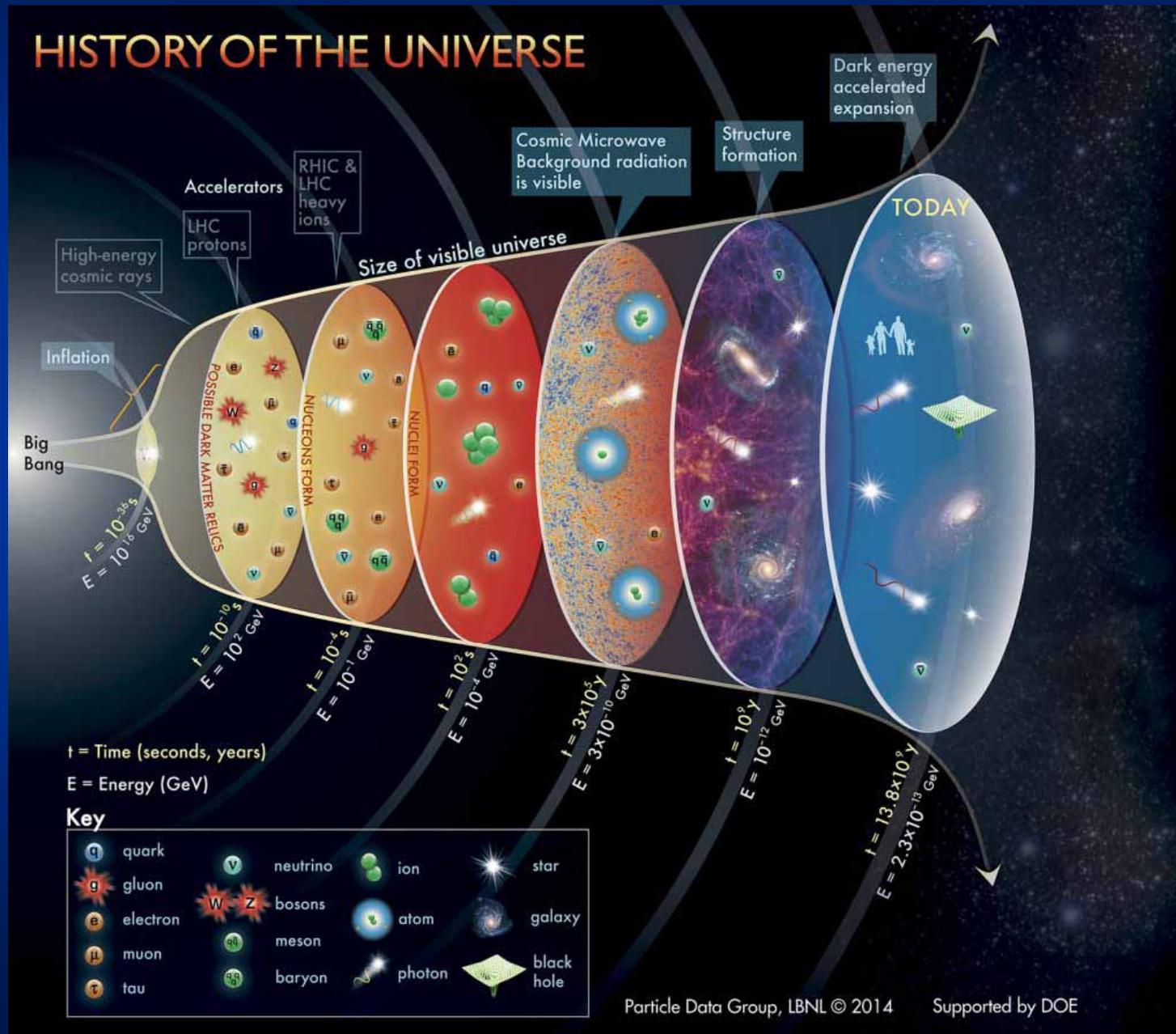


„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

(Michael Kubi 2022)

Kosmologie

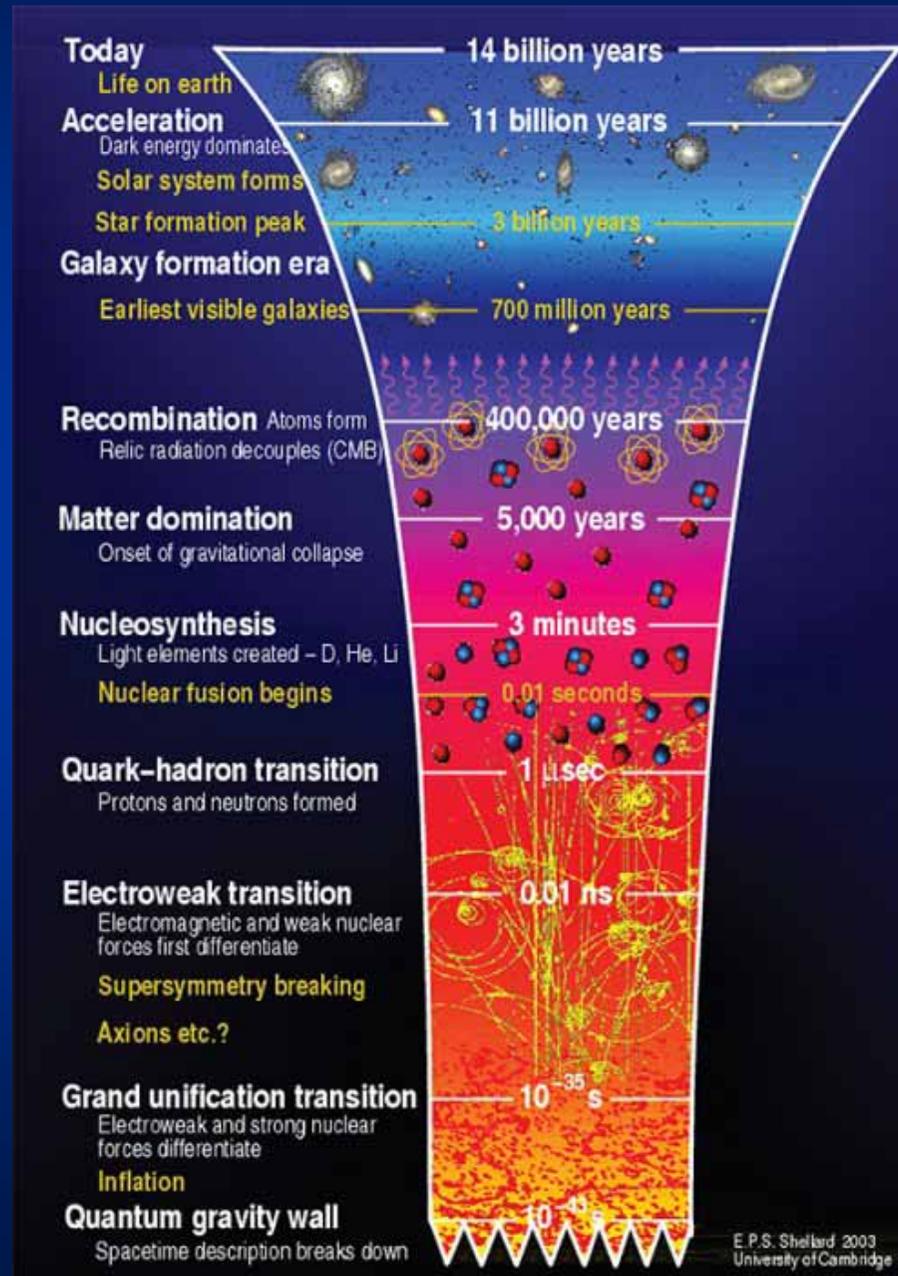
7. Entwicklungsphasen des Weltalls



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Ganz zu Beginn dominieren Quantenfluktuationen das Universum und das allgegenwärtige Higgs-Feld, das durch Wechselwirkung allen massebehafteten Elementarteilchen ihre Masse vermittelt.

Zu diesem Feld gehört das skalare Higgs-Boson. Außerdem ermöglicht das Higgs-Feld die Vereinheitlichung der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung zur elektroschwachen Ww.

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Die Anfangsphasen des Universum sind Strahlungs-dominiert, da die Strahlungsenergiedichte mit σT^4 geht (Stefan-Boltzmann-Gesetz und -Konstante σ).

$$H^2 \sim \frac{1}{R^4} \Rightarrow \dot{R} \sim \sqrt{t}$$

\Rightarrow verlangsamte Expansion

Unterhalb $T=3000$ K dominiert die Materieenergiedichte, die proportional zu T^3 ist (bei $1.6 \cdot 10^{12}$ s = 51'000 a).

$$H^2 \sim \frac{1}{R^3} \Rightarrow \dot{R} \sim t^{\frac{2}{3}}$$

\Rightarrow verlangsamte Expansion

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Anmerkung:

Die Expansion des Raums findet nur in den „freien“ Bereichen des Raums statt, nicht in gravitativ gebundenen Objekten wie Galaxienhaufen, Galaxien, Planetensystemen etc.

Die „Kraft der Expansion“ ist in unserem Sonnensystem z.B. um 22 Größenordnungen kleiner als die Gravitation

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Ära	Beginn /s	Maßfaktor R /m	Temperatur /K	Dichte /g cm ⁻³	z	Vorgänge
0 Singularität	0	n/d	n/d	n/d		Urknall
1 Planck~	0	n/d	n/d	n/d		Plancksche Elementarzeit; Urkraft
2 GUT~ (Raumstur m~)	$1.4 \cdot 10^{-43}$	$1.6 \cdot 10^{-35}$	10^{32}	10^{94}		Symmetriebrechung: Gravitation entkoppelt; erste Quantenerscheinungen; Gravitonen
3 Inflations~	10^{-36}	10^{-27}	10^{27}			Symmetriebrechung: Starke Ww. entkoppelt; Inflation: Ausdehnung $\geq 10^{26}$
4 Quark~	10^{-33}	10^{-1}	10^{25}			Quark-Gluon-Plasma
5	$4.4 \cdot 10^{-24}$			10^{51}		X-Bosonen entkoppelt; Quark-Kollisionen erzeugen Gravitonen
6 Topophase	10^{-12}		10^{16}			Symmetriebrechung: Elektroschwache Ww. zerfällt in schwache und elektromagnetische Ww.
7 Hadronen~	10^{-6}		10^{13}	$5 \cdot 10^{10}$		Quarks entkoppeln bei $E < 1$ GeV
8 Leptonen~	10^{-4}		10^{12}			Quarks bilden Nukleonen; Nukleonen-Zerstrahlung
9	1		10^{10}	$3 \cdot 10^5$		Neutrinos entkoppeln; Leptonen-Zerstrahlung
10 Photonen~	13.833	10^9	10^2			thermisches Gleichgewicht endet; primordiale Kernfusion: ^2D , ^3He ; ^4He ; Li; Be
11	200	$9 \cdot 10^8$				primordiale Kernfusion endet: 13% n; 87% p; 74% H+D (0.001%); 25% He

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Zum Abschluss der Leptonen-Ära koppeln bei 1 s die Neutrinos bei einer Temperatur von 10^{10} K aus dem thermischen Gleichgewicht ab und zeigen heute eine Temperatur von 1.95 K. Heutige Neutrino-Dichte: $\sim 3 \cdot 10^7$ pro m^3 .

Dass diese Temperatur unter der der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) liegt, hängt mit der später erfolgten Heizung durch die Zerstrahlung von Elektronen und Positronen bei $5 \cdot 10^9$ K zusammen, so dass die CMBR eine höhere Temperatur von 2.725 K aufweist.

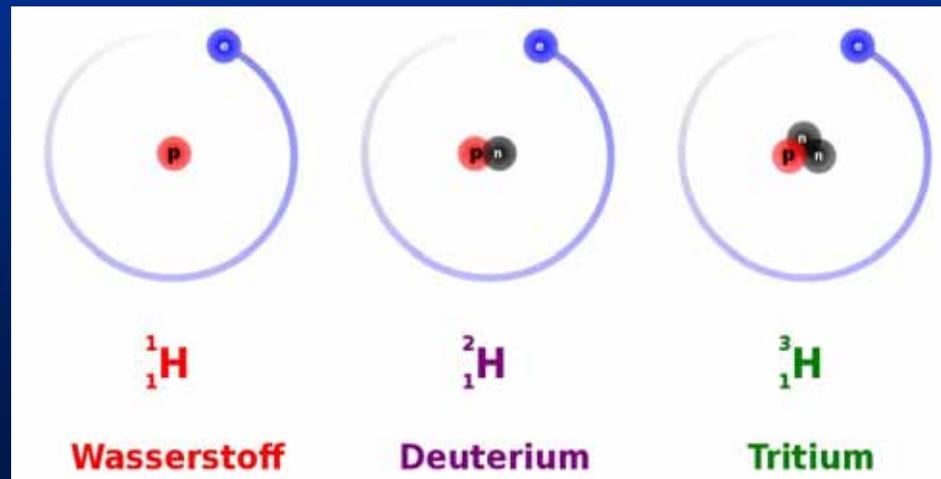
Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Am Ende der Photonenära („Die ersten drei Minuten“) ist die primordiale Elemententstehung beendet:

Von ursprünglich 16 Nukleonen sind vier (2 n und 2 p) in Heliumkernen (α) gebunden, die restlichen 12 sind Protonen (Wasserstoffkerne H^+).

Außerdem gibt es geringe Anteile von 3He und D (Deuterium = 2H), deren Anteil stark von der Temperaturgeschichte des Universums abhängt.



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Entscheidend für die primordiale Nukleosynthese ist der Zeitpunkt, bei dem das thermische Gleichgewicht zwischen Protonen und Neutronen ausfriert, was bei ca. 10^{-2} s passiert.

Dieser Zeitpunkt tritt ein, wenn die Wachstumsrate des Universums H größer als die Reaktionsrate der schwachen Wechselwirkung Γ wird (bei 0.8 MeV):

$$\frac{\Gamma}{H} \sim \left(\frac{T}{0.8 \text{ MeV}} \right)^3$$

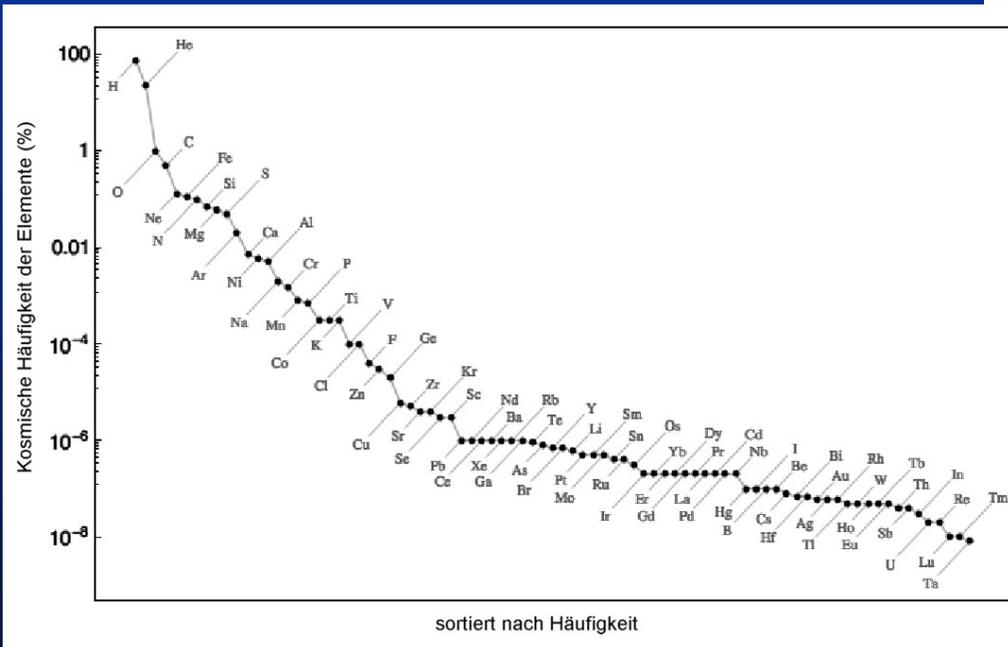
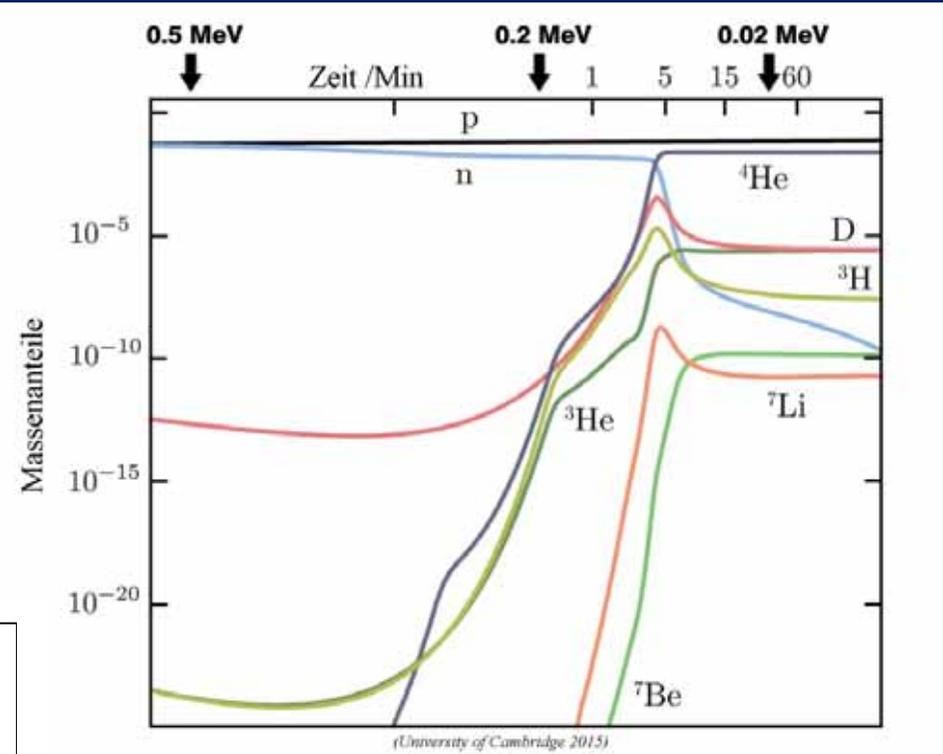
Bei 0.1 MeV beginnt das „Ausfrieren“ des Deuteriums und der Fusionsprozess:



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Die Häufigkeit der leichtesten Elemente ist ein Prüfstein für Temperatur- und Expansionsgeschichte des Universums.



Die heutigen Verhältnisse nach der laufenden stellaren Nukleosynthese

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Zusammenfassend kann man sagen, dass das Modell der primordialen Nukleosynthese sehr gut mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmt und somit die beste Bestätigung für das Urknallmodell ist. Die Standardkosmologie scheint das Universum ab Zeiten von ungefähr 10^{-2} Sekunden und Energiedichten unter ca. 10 MeV korrekt zu beschreiben.

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

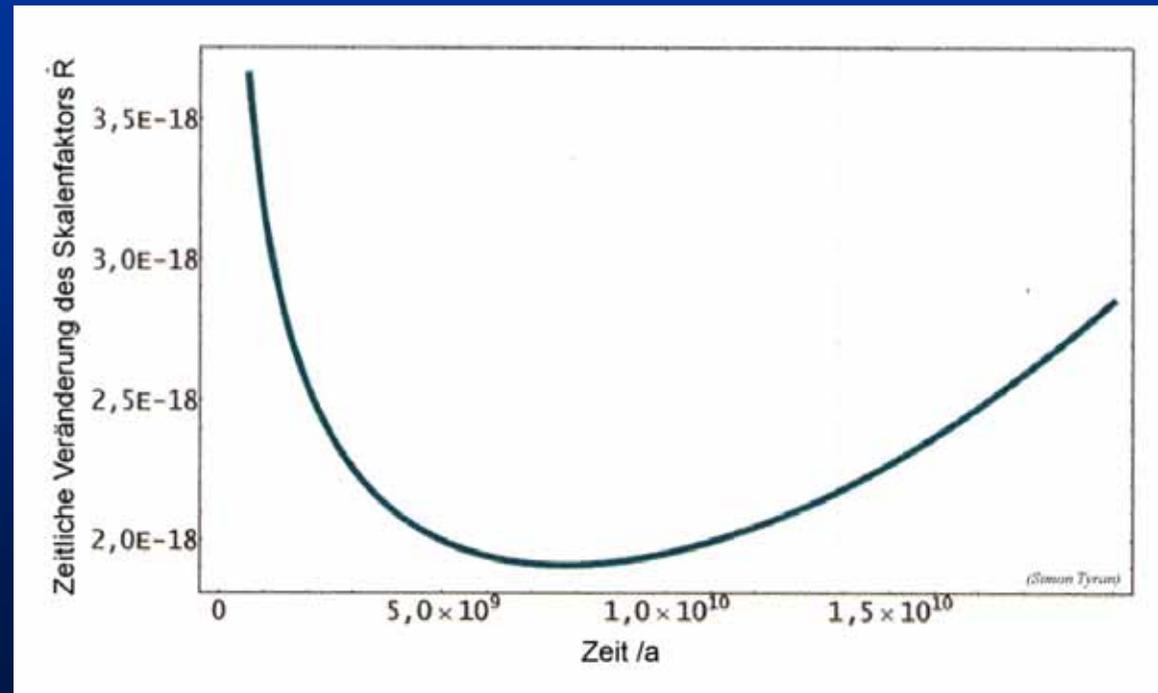
Auf die Materie-dominierte Ära folgt bei $10.33 \cdot 10^9$ a die Λ -dominierte Ära:

$$H^2 \sim \frac{\Lambda c^2}{3} \Rightarrow \dot{R} \sim e^{\sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}} t}$$

\Rightarrow beschleunigte Expansion

Veränderung des Skalenfaktors R:

Die „Schubumkehr“ setzt bereits lange vor Beginn der Λ -dominierten Ära bei ca. $7.7 \cdot 10^9$ a ein.



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Auf die Materie-dominierte Ära folgt bei $10.33 \cdot 10^9$ a die Λ -dominierte Ära:

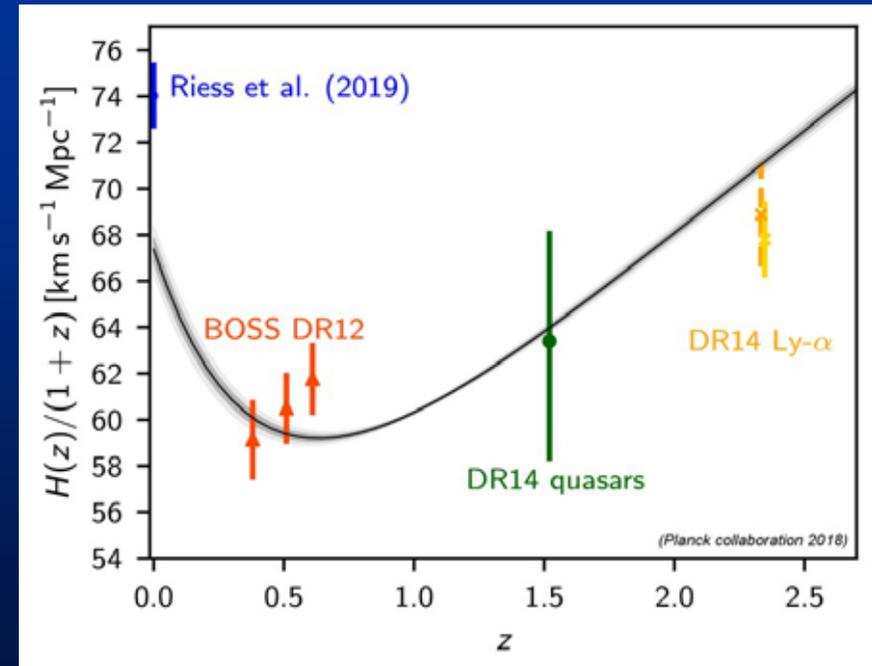
$$H^2 \sim \frac{\Lambda c^2}{3} \Rightarrow \dot{R} \sim e^{\sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}} t}$$

\Rightarrow beschleunigte Expansion

Veränderung des Hubble-Parameters mit z (0 = heute):

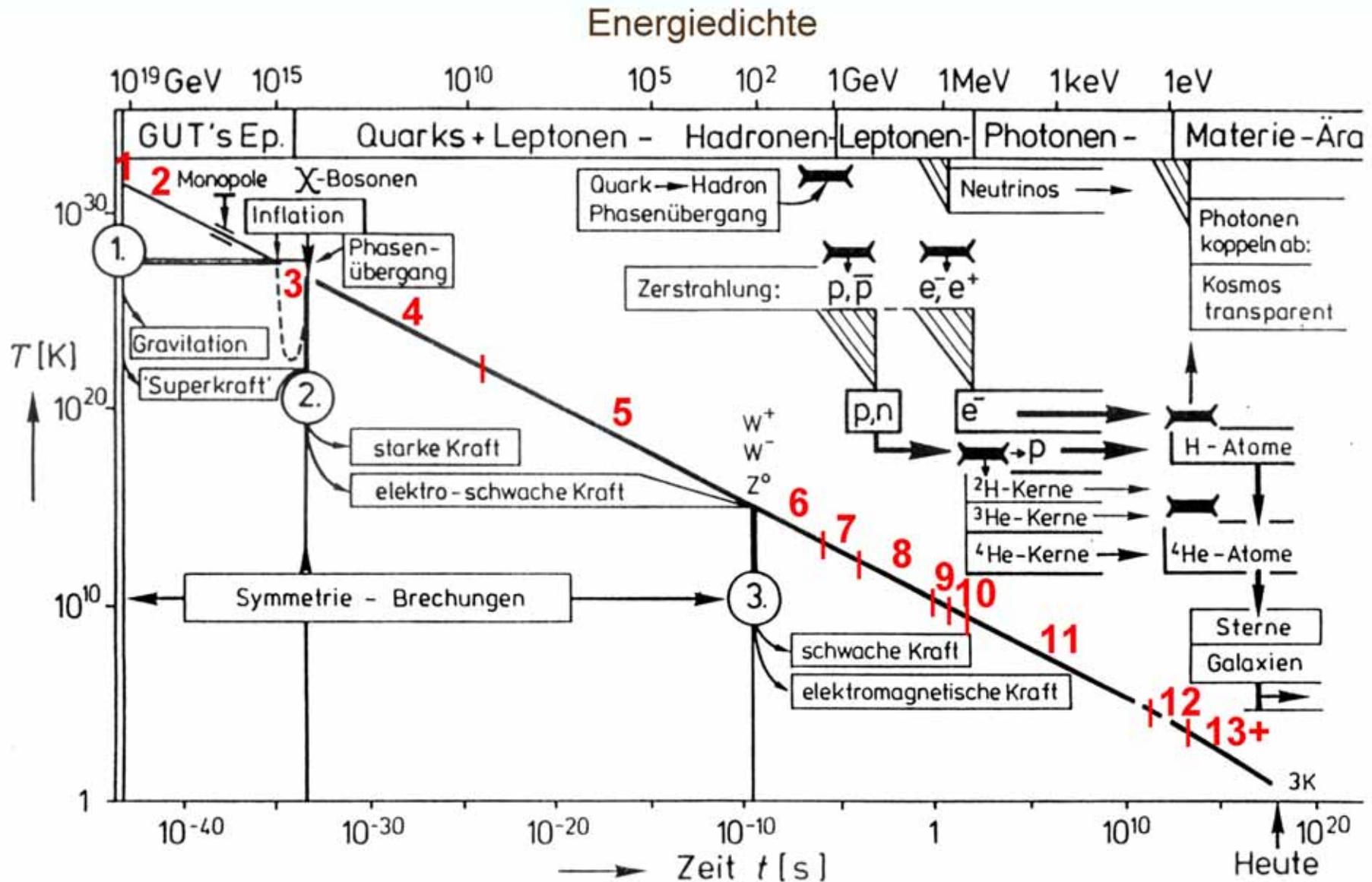
Messergebnis von Planck (2018)

Minimum bei $t = 7.53 \cdot 10^9$ a



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls



Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Ära	Beginn /a	Maßfaktor R /m	Temperatur /K	Dichte /g cm ⁻³	z	Vorgänge	
12	Materie~	10 ⁴		10 ⁴	10 ⁻²¹		Beginn der Materiekondensation
13		379'000		3·10 ³		1'089	Hintergrundstrahlung entkoppelt; Universum transparent; Rekombination
14		10 ⁶					Blasenstruktur entsteht
15		10 ⁸					Galaxienbausteine entstehen Ältester Stern Pop. II
16							Sternentstehung Pop. III
17		10 ⁸					Protogalaxis der Milchstraße kollabiert, Sternentstehung Pop. II
18							Sternentstehung Pop. I
19		8.8·10 ⁹					Protosolare Wolke
20		9.16·10 ⁹					Planetenenstehung
21	Λ-Dominanz	10.7·10 ⁹					erste Lebensformen
22		13.20·10 ⁹					erste Pflanzen
23		13.54·10 ⁹					erste Primaten
24	heute	13.70·10 ⁹	3·10 ¹⁰ pc	2.728	2·10 ⁻³¹	0	Astronomievorträge bei der Volkssternwarte Bonn

© 2007-12-11 Dr. Jürgen Wirth, aktualisiert 2024-06-18

* Urknall-Neutrinos: 1.95 K

Maßfaktor ≙ Skalengröße

Die belebte Phase des Universums dauert von 10⁹ a – Beginn der stellaren Nukleosynthese – bis 10¹⁴ a – Erlöschen der letzten Sterne. (Nach Blome/Zaun, Der Urknall, S. 81)

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Ausblick in die Zukunft

25. Beschleunigte Expansion bis zu dem immensen Endwert von $60'500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ nach:

$$\Lambda c^2 = 3H_{\infty}^2$$

26. Zerstrahlen der Schwarzen Löcher (Hawking-Strahlung) mit Lebensdauer:

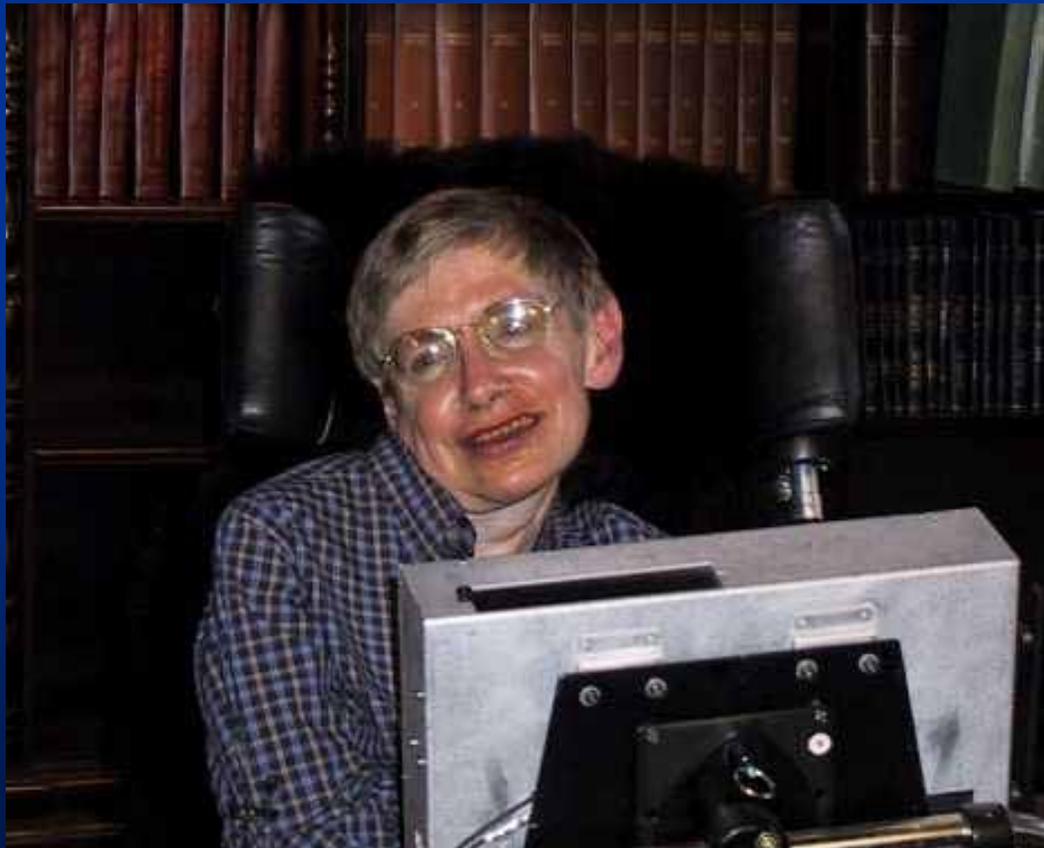
$$\tau = \frac{G^2 M^3}{\hbar c^4} \approx 2.1 \cdot 10^{67} \left(\frac{M}{M_{\text{Sonne}}} \right)^3 \text{ a}$$

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Anmerkung:

Die Hawking-Strahlung wurde von Stephen Hawking 1975 aus der Quantenfeldtheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt. Anschauliche Vorstellung: Bei Ent-



stehung eines virtuellen Teilchenpaares in der Nähe des Ereignishorizonts fällt das eine mit negativer Energie in das SL, das andere materialisiert außerhalb mit positiver Energie. Auf diese Weise sinkt die Masse des SL. Da dadurch die Entropie des SL verändert wird, muss es auch eine Temperatur haben.

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Anmerkung:

Jeder temperaturbehaftete Körper hat eine Strahlung. Das ergibt sich hieraus und aus anderen thermodynamischen Überlegungen:

$$T \approx 10^{-6} \frac{M_{\text{Sonne}}}{M} \text{ /K}$$

SL mit stellaren Massen haben eine Temperatur geringer als die Temperatur der CMB und absorbieren zunächst Strahlung. Ihre Zerstrahlung hat noch nicht begonnen.

Kosmologie

7. Entwicklungsphasen des Weltalls

Ausblick in die Zukunft

25. Beschleunigte Expansion bis zu dem immensen Endwert von $60'500 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ nach:

$$\Lambda c^2 = 3H_{\infty}^2$$

26. Zerstrahlen der Schwarzen Löcher (Hawking-Strahlung) mit Lebensdauer:

$$\tau = \frac{G^2 M^3}{\hbar c^4} \approx 2.1 \cdot 10^{67} \left(\frac{M}{M_{\text{Sonne}}} \right)^3 \text{ a}$$

27. Absolute Verdünnung der Materie und Kältetod

»Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik kann es für das Universum nur ein Ende geben – einen »Hitzetod«, bei dem die Temperatur so niedrig ist, dass sich kein Leben mehr halten kann.«

(Sir James Jeans)

Kosmologie

8. Universelles Schwarzes Loch?

Erfüllt das Universum als Ganzes die Kriterien für ein Schwarzes Loch?

Volumen des gekrümmten Universums	$V_{\text{Univ}} = 6'685 R_0^3$
	$V_{\text{Univ}} = 5.2 \cdot 10^{84} \text{ m}^3$
Mittlere Gesamtmasendichte	$\rho_m = 2.56(38) \cdot 10^{-30} \text{ g cm}^{-3}$
Gesamtmasse des gekrümmten Universums	$M_{\text{Univ}} = 1.33 \cdot 10^{58} \text{ kg}$
Schwarzschild-Radius:	

$$r_{s \text{ Univ}} = \frac{2 G M_{\text{Univ}}}{c^2} = 1.98 \cdot 10^{31} \text{ m} = 641 \cdot 10^{12} \text{ pc} = 641 \text{ Tpc}$$

Zum Vergleich: „Weltumfang“ $U_0 = 5.8 \cdot 10^{27} \text{ m} \approx 188 \text{ Gpc}$

Universum befindet sich innerhalb seines Schwarzschild-Radius!

Nein, nicht wirklich!

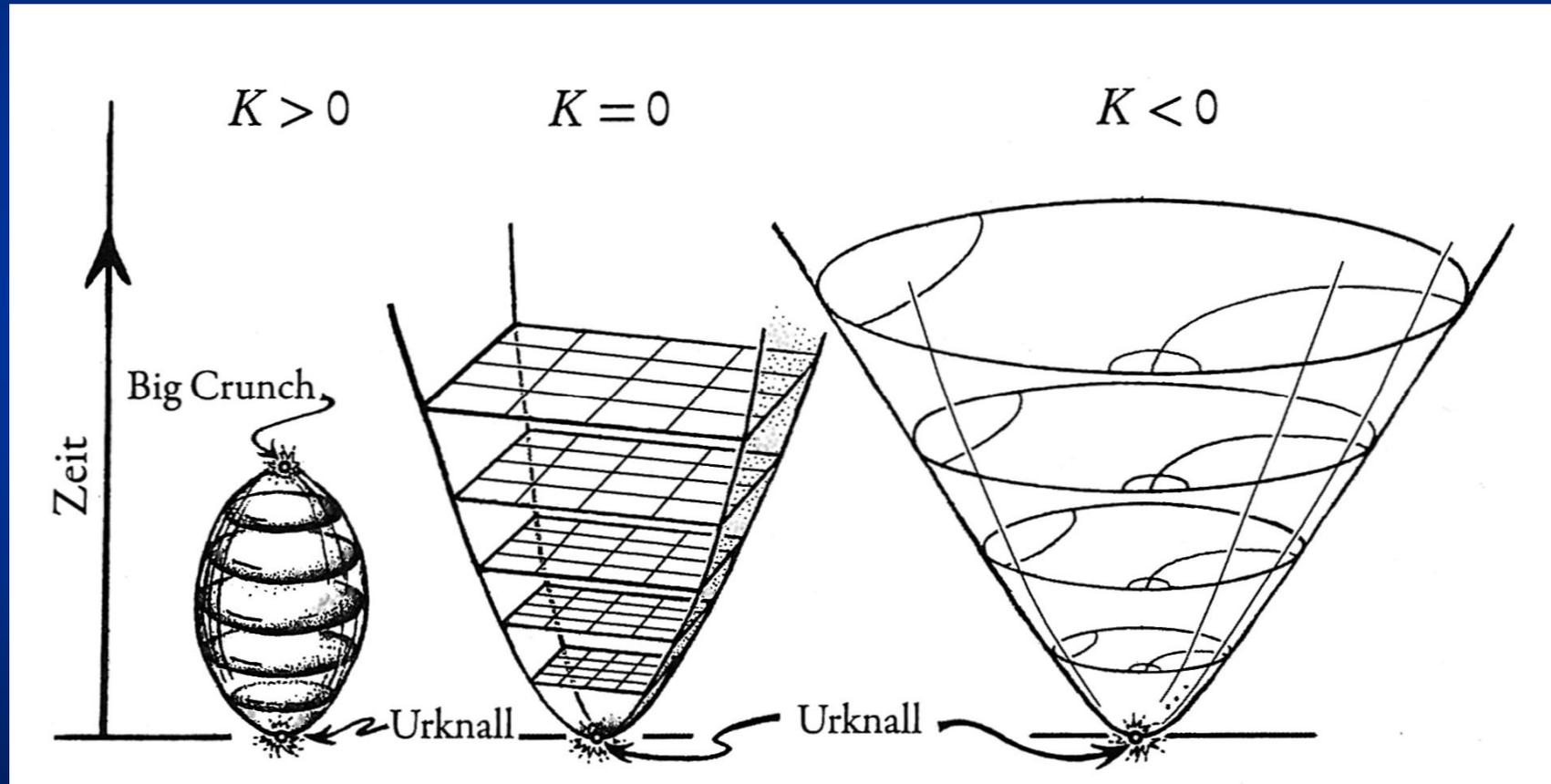
Die Raumzeit eines Schwarzen Lochs wird i.w. durch die Kerr-Metrik (*nach Roy Kerr, 1963*) beschrieben, die in die äußere Raumzeit des Universums eingebettet ist.

Ob das Universum als Ganzes in eine äußere Struktur, eine äußere Raumzeit eingebettet ist, lässt sich derzeit nicht beantworten.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

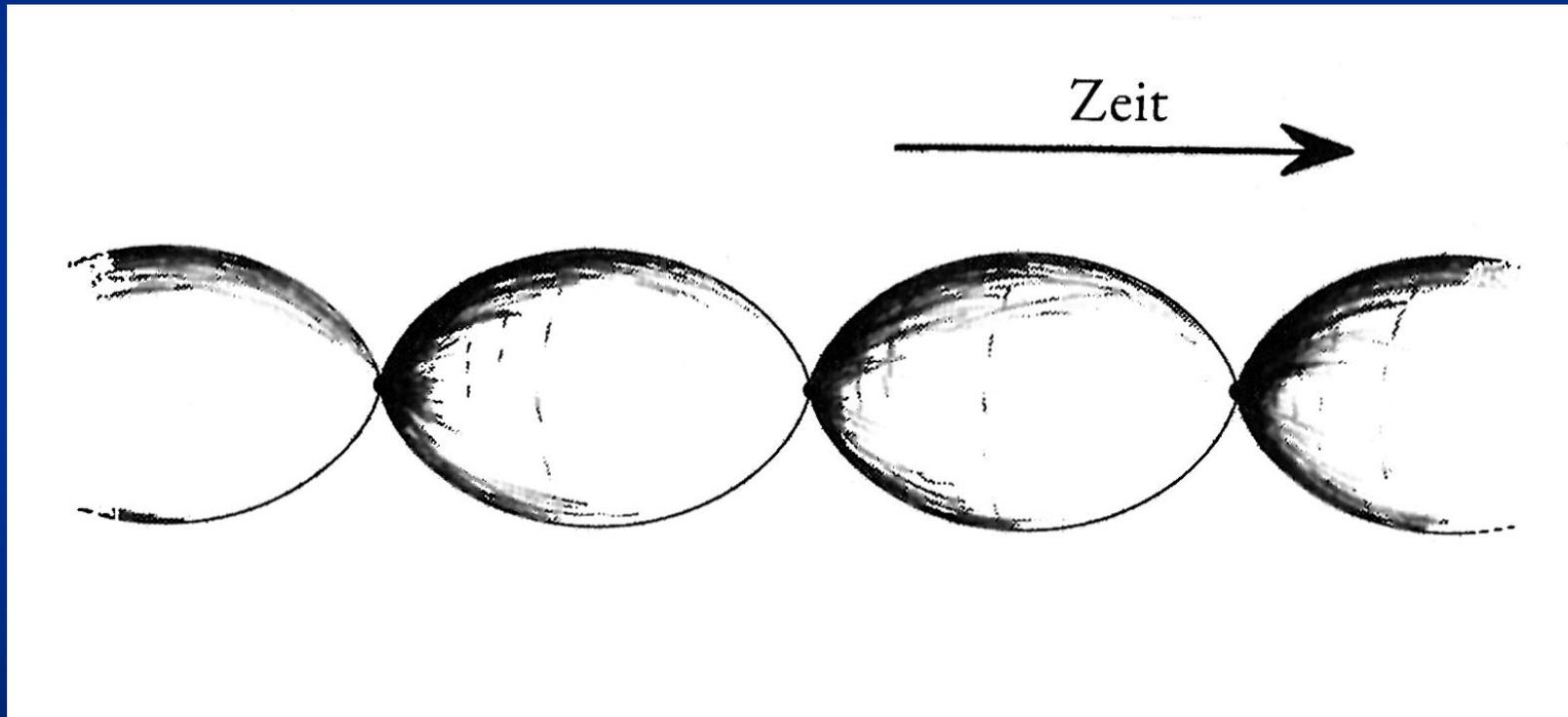
Alexander Friedmann (1922/24)



Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

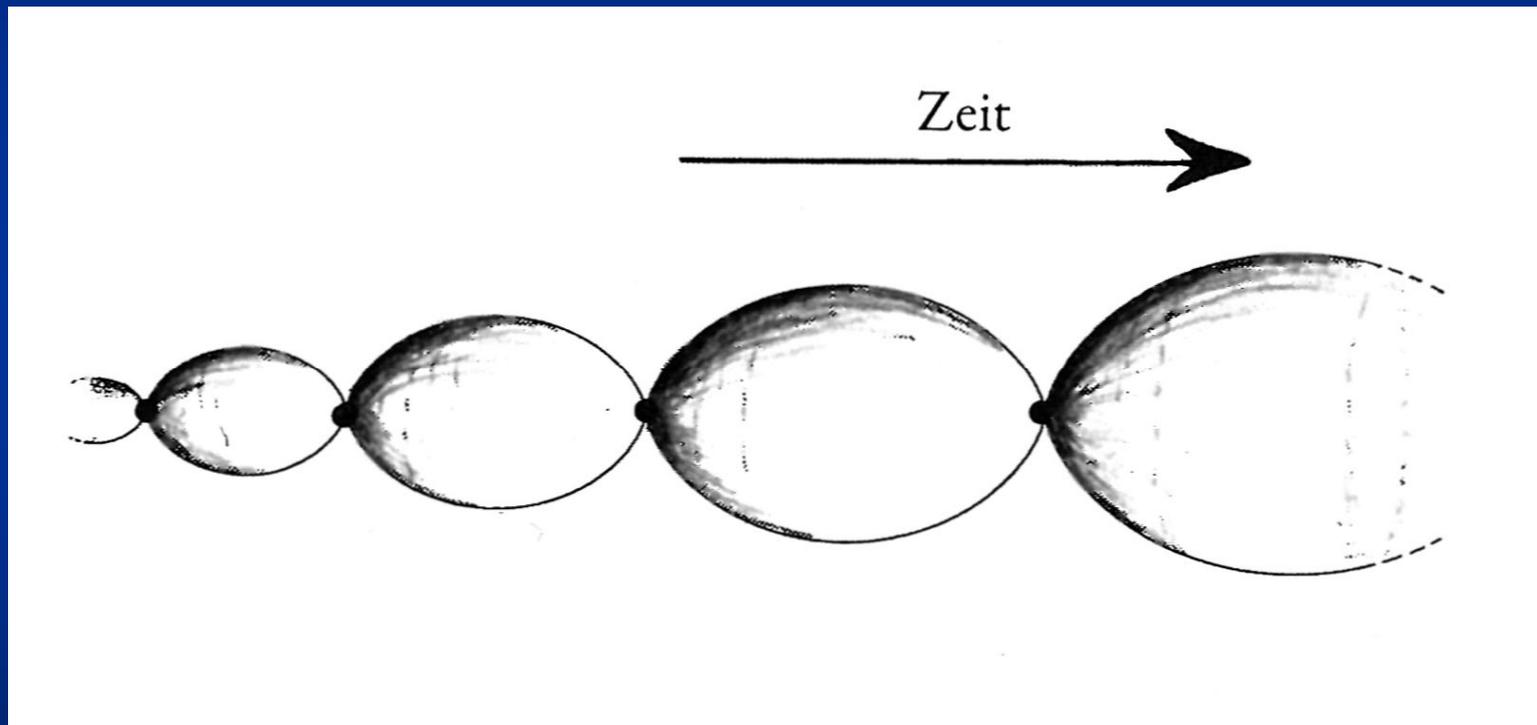
Alexander Friedmann oszillierend (1922/24)



Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

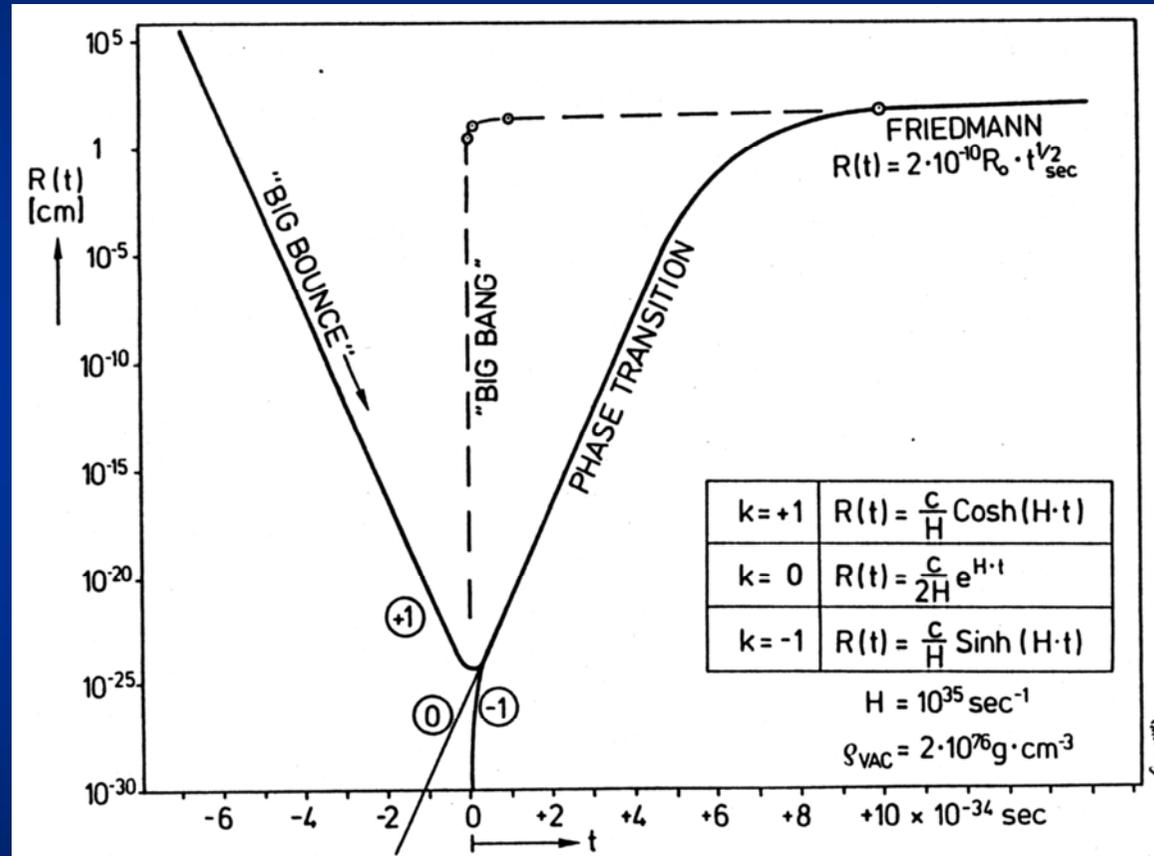
Alexander Friedmann/Chace Tolman oszillierend (1934)



Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Priester et al.: Big Bounce (1984)



Der Big Bounce ist der Zusammensturz eines Vorgängeruniversums bis zu einer minimalen Größe oberhalb der Planck-Größen mit „Rückprall“ in einem Phasenübergang in eine Expansion.

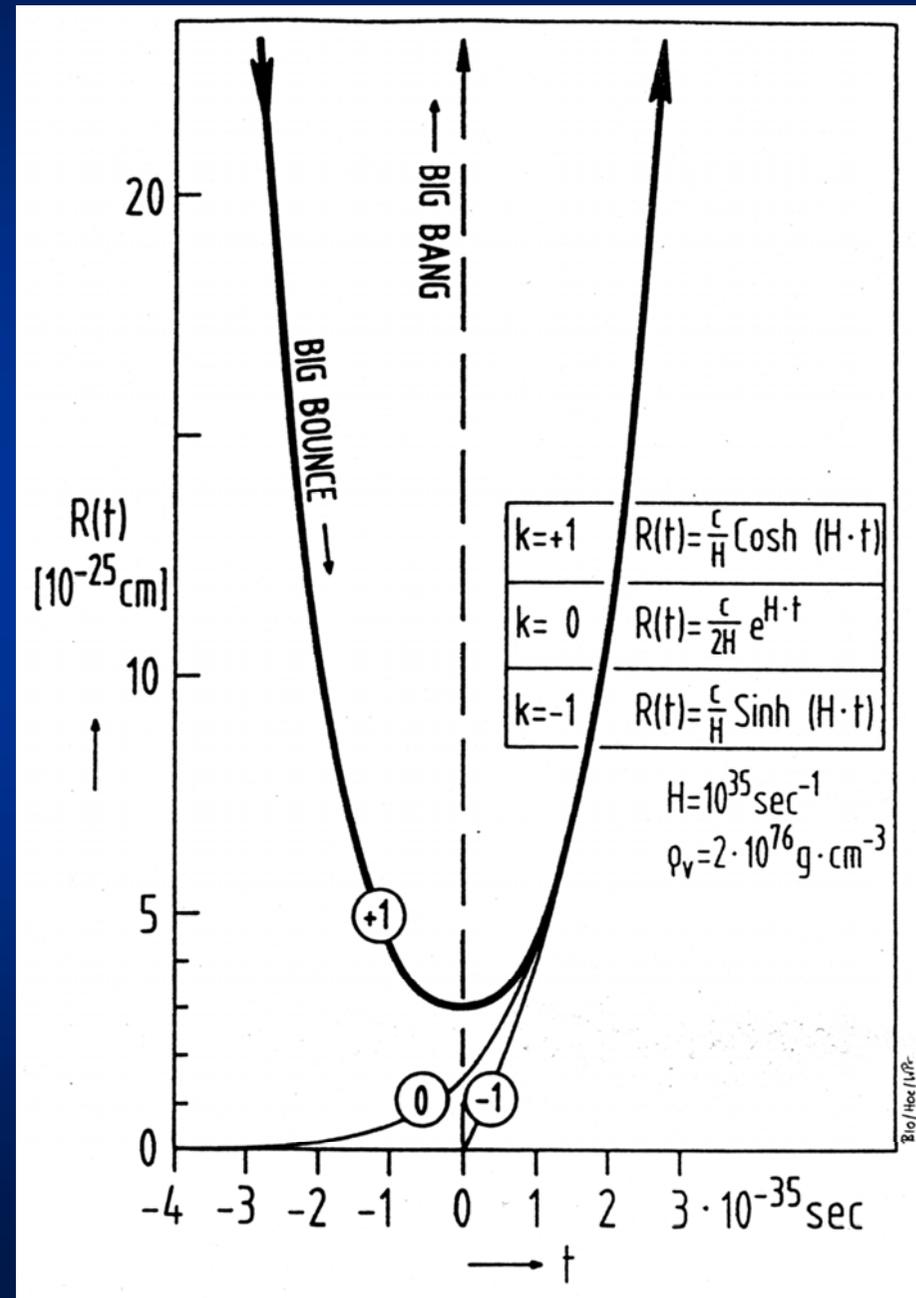
Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Priester et al.: Big Bounce (1984)

Motivation:

Vermeidung physikalischer Zustände mit Singularität und unendlicher Dichte und damit des Widerspruchs gegen das Unbestimmtheitsprinzip der Quantenmechanik.

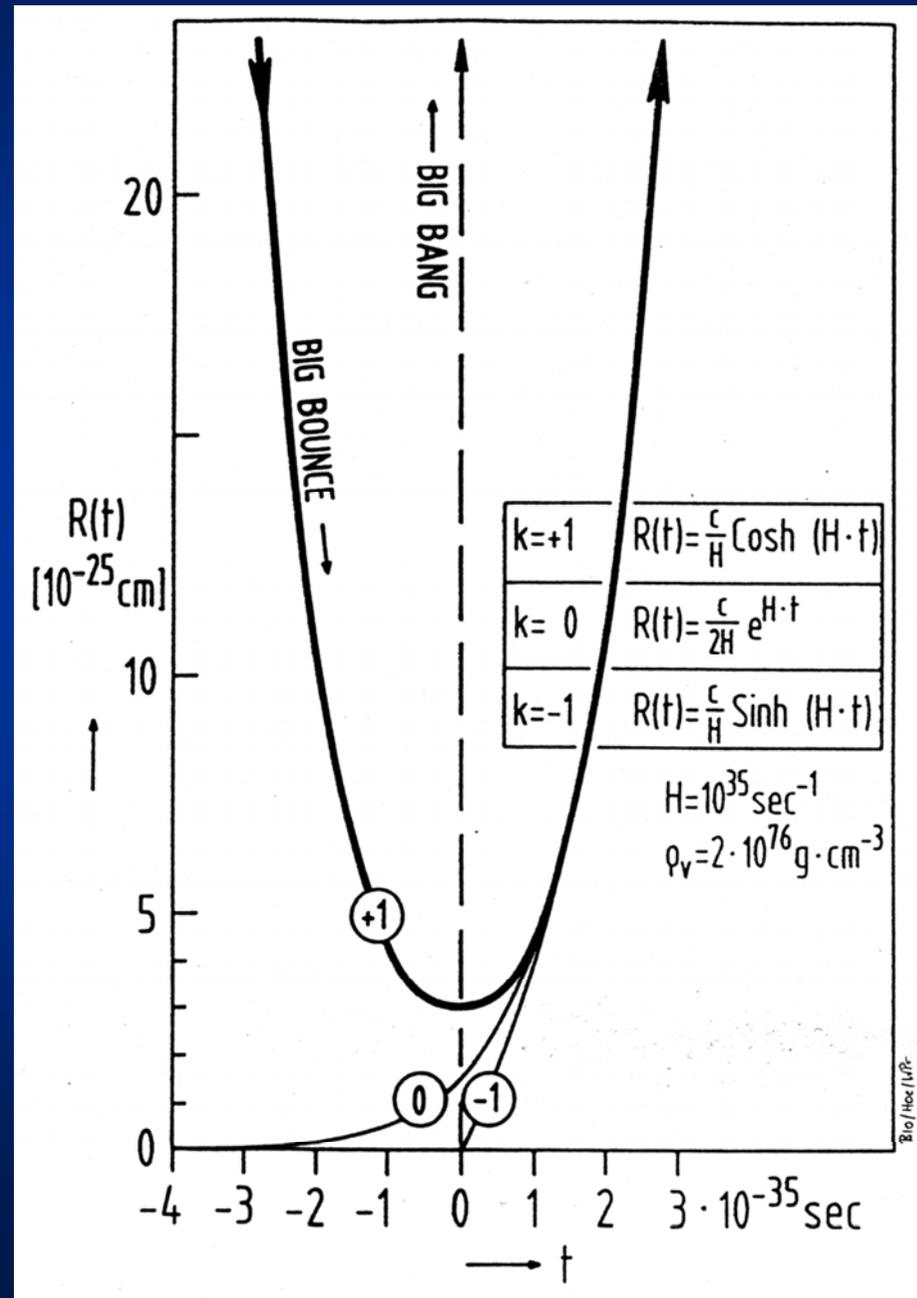
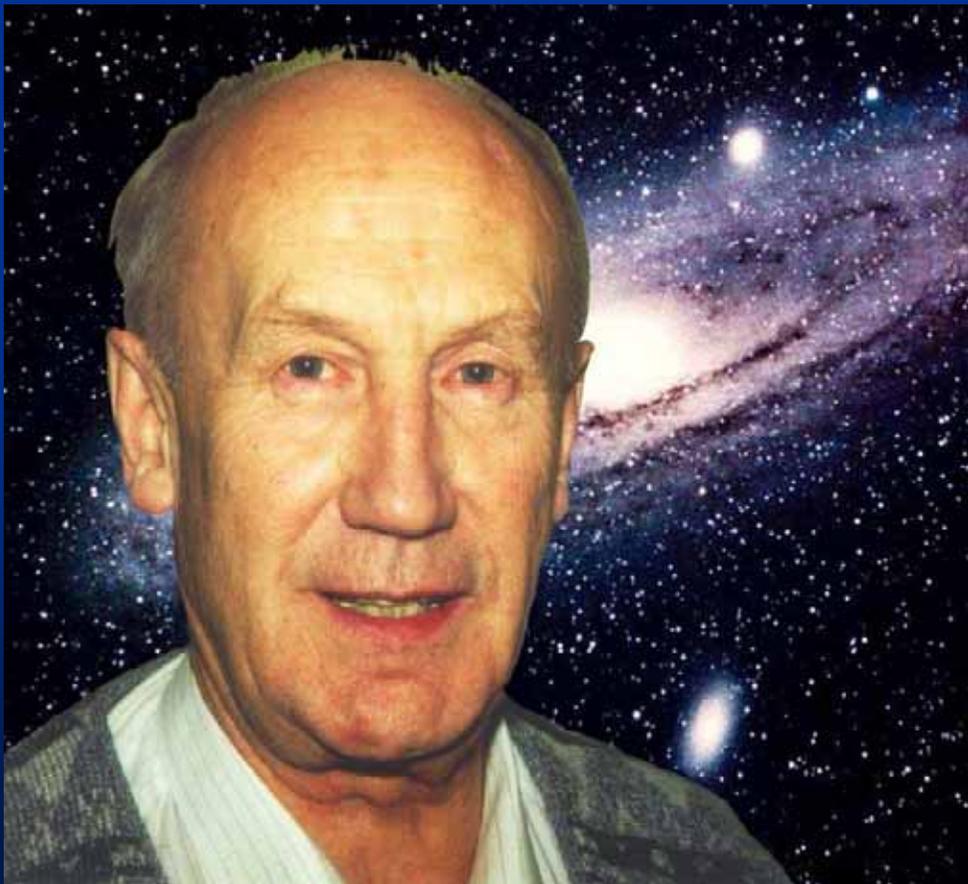


Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Priester et al.: Big Bounce (1984)

Wolfgang Priester (Aufn.: Hans Fahr, 2004)



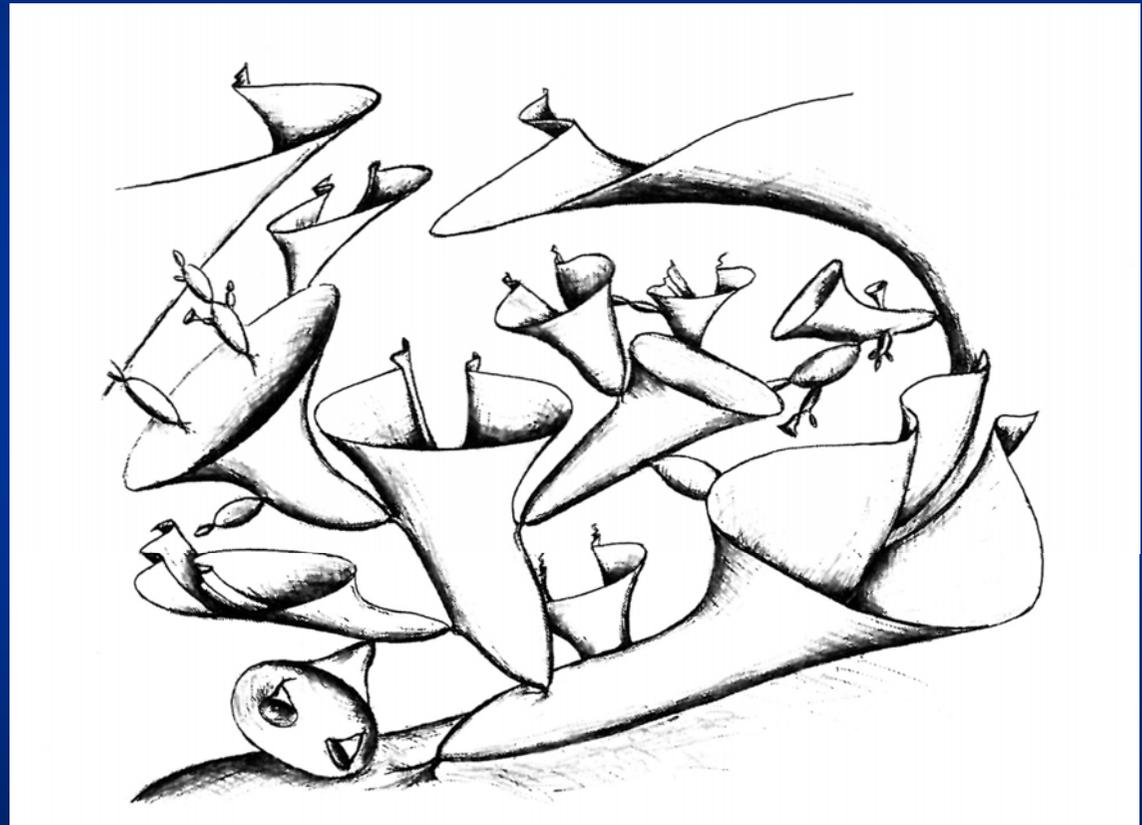
Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Lee Smolin: Baby-Universen (1997)

Jede Implosion eines Schwarzen Lochs ist der Urknall eines neuen Tochter-Universums in einer separaten Raumzeit.

Dabei findet in gewissem Maße eine Vererbung von Eigenschaften statt.



Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

Zukünftige Entwicklung des Universums:

- Zunehmende Bildung kompakter Objekte und Schwarzer Löcher
- Verdünnung der Sternstrahlung und des CMB
- Hawking-Strahlung vom „Verdampfen“ Schwarzer Löcher ab 10^{60} a
- Dunkle Materie ? Protonenzerfall ? Zerstrahlung der Materie ?
- Verlust der Materie-Eigenschaften
- Universum ausgefüllt mit Photonen und Gravitonen aus SMSL-Zusammenstößen
- „Zeitalter der Langeweile“ bis 10^{100} a

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

Zeit:

- Zeit ist an Masse gekoppelt, keine Zeitmessung ohne Masseeigenschaft
- Zeitloser Zustand ?

Kosmologie

Einschub: 2. Hauptsatz der Thermodynamik

- Wärme kann nicht *von selbst* von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.
- Wärme kann durch eine periodisch arbeitende Maschine *nicht vollständig* in Arbeit umgewandelt werden. Dies wäre eine Realisierung eines Perpetuum mobile zweiter Art.
- Der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses kann nicht übertroffen werden.
- Alle spontan (in eine Richtung) ablaufenden Prozesse sind irreversibel.
- Alle Prozesse, bei denen Reibung stattfindet, sind irreversibel.
- Ausgleichs- und Mischungsvorgänge sind irreversibel (abgesehen von reversiblen Mischungen idealer Gase).
- In einem geschlossenen adiabaten System kann die Entropie nicht geringer werden.
- Das Gleichgewicht isolierter thermodynamischer Systeme ist durch ein Maximalprinzip der Entropie ausgezeichnet.

Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik in der Formulierung von Clausius lautet:

„Es gibt keine Zustandsänderung, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niederer auf einen Körper höherer Temperatur ist.“

Quelle: Wikipedia

Entropie: $S = k \ln W$ bezeichnet den Grad an „Unordnung“ oder den Energieverlust eines Prozesses und wächst ohne Energiezufuhr immer. W bezeichnet die Anzahl der zu einem Makrozustand gehörigen Mikrozustände (Freiheitsgrade).

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

Die CCC versucht eine mathematisch konsistente und unter den heute bekannten physikalischen Gesetzen streng gültige Lösung.

Dabei verwendet sie in starkem Umfang mathematische Gesetze zur Beschreibung der Raumzeit und deren Reskalierung und versucht unter allen Umständen den 2. Hauptsatz der Thermodynamik nicht zu verletzen.

Die Ruhemassen sämtlicher Teilchen sollten bis zum Ende eines Weltzeitalters (Äons) verschwinden, an dem jeweils die Reskalierung stattfindet.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

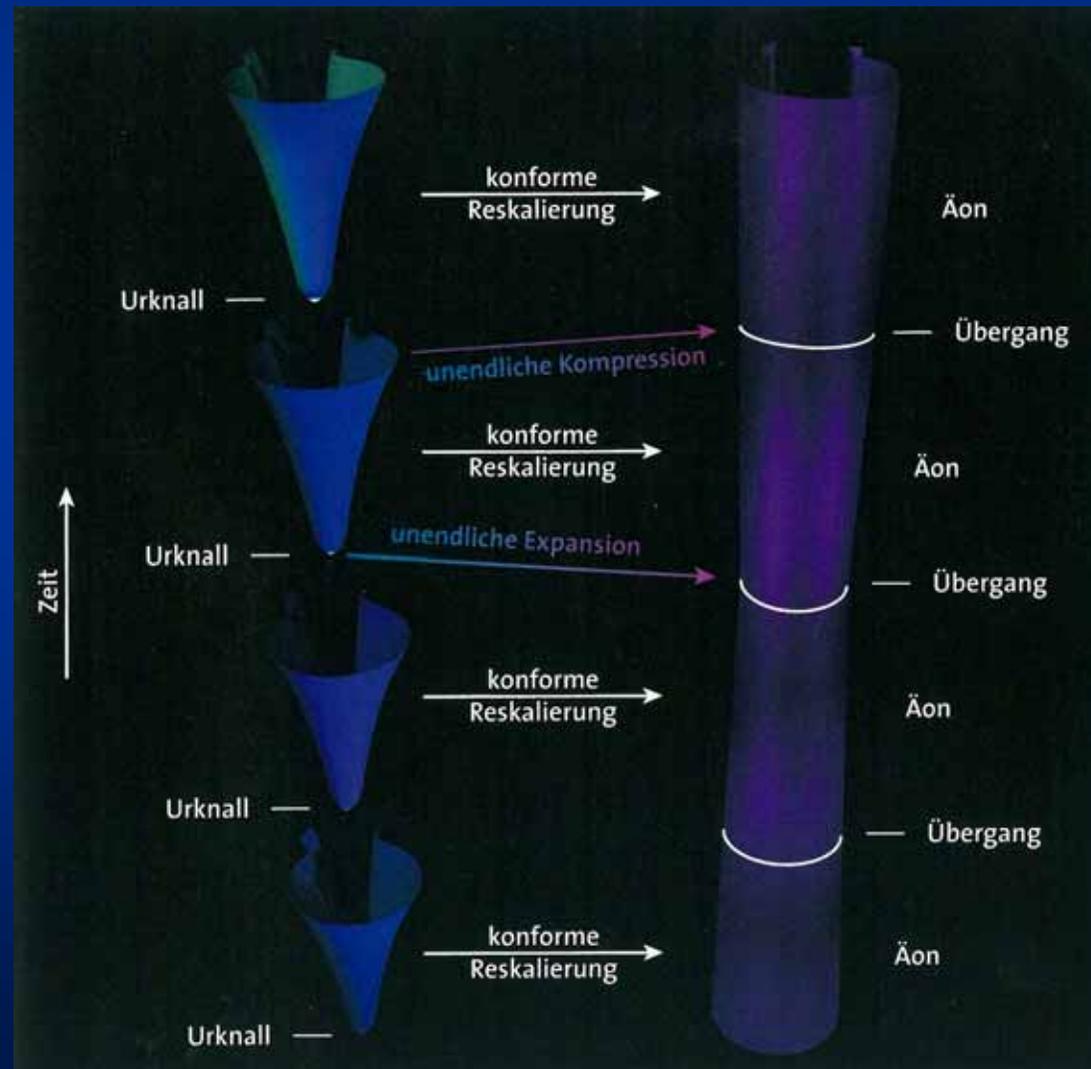
Stichwort Reskalierung:

Nicht wie im menschlichen Umfeld gibt es im Universum keine absoluten Skalen. Solche Skalen werden in der CCC jeweils nur für ein Äon gesetzt, in unserem Universum z.B. durch die CMB. Geht es nach vielleicht 10^{100} a in einen Zustand der extremsten Verdünnung der Strahlung und Materie über, verliert es auch jeden Maßstab, jede Skala, auch der Zeit. In diesem Zustand findet in der CCC die Reskalierung statt, d.h. die extremen Dimensionen werden durch Verkleinerung über extrem viele Größenordnungen zu Dimensionen eines neuen Urknalls reskaliert.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

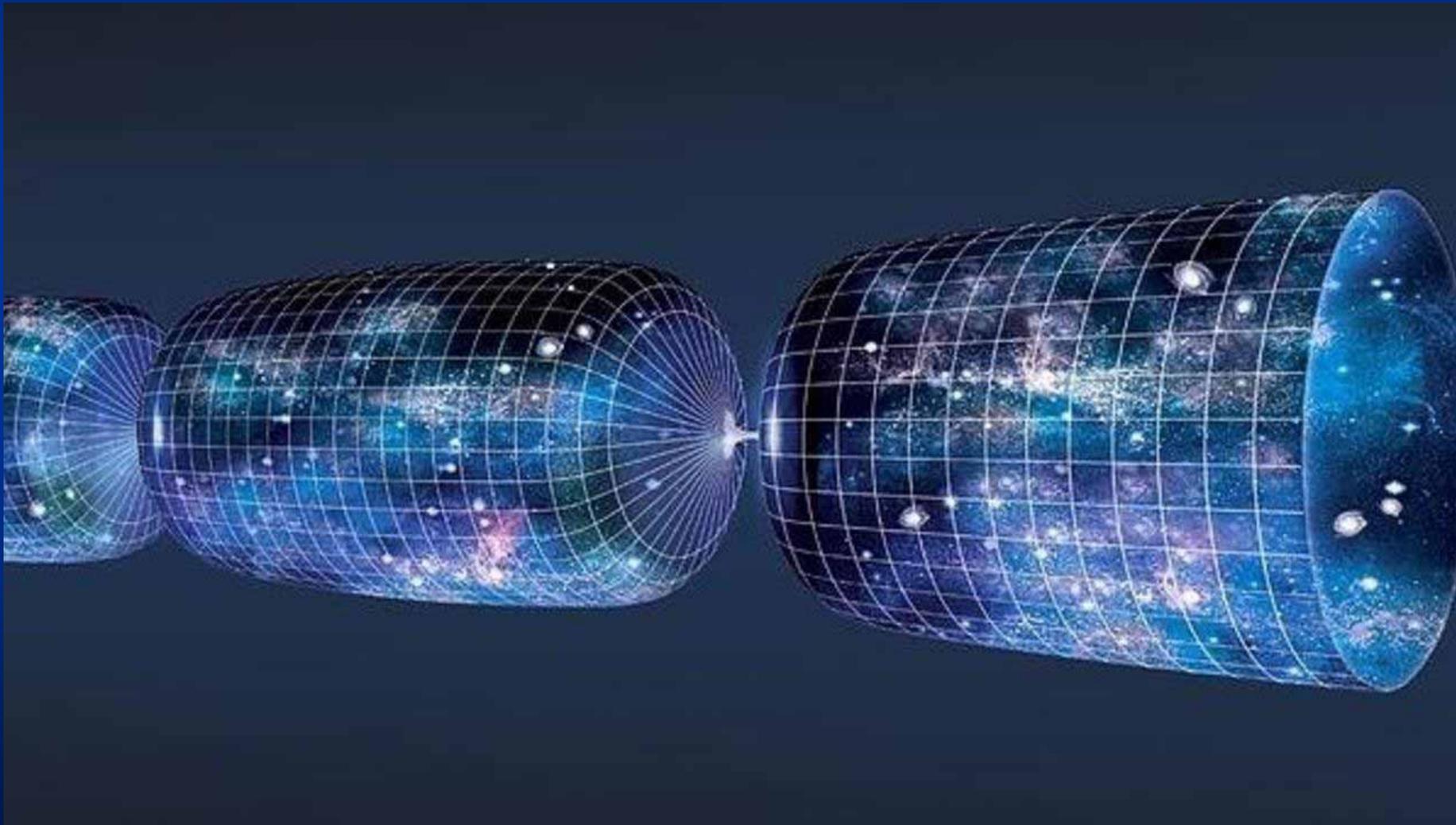
Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)



Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)



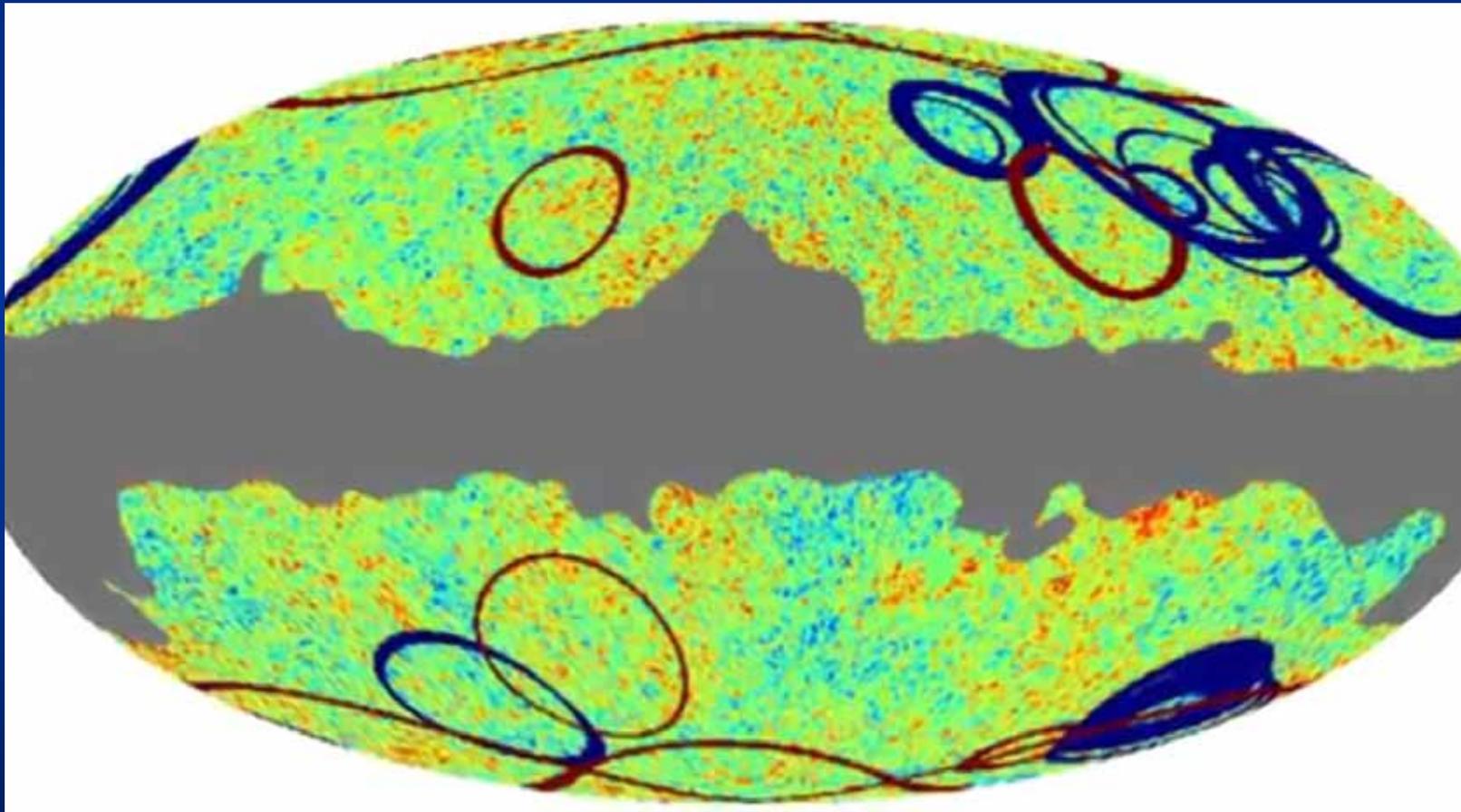
„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Quelle: ScienceDirect / Elsevier 2019

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

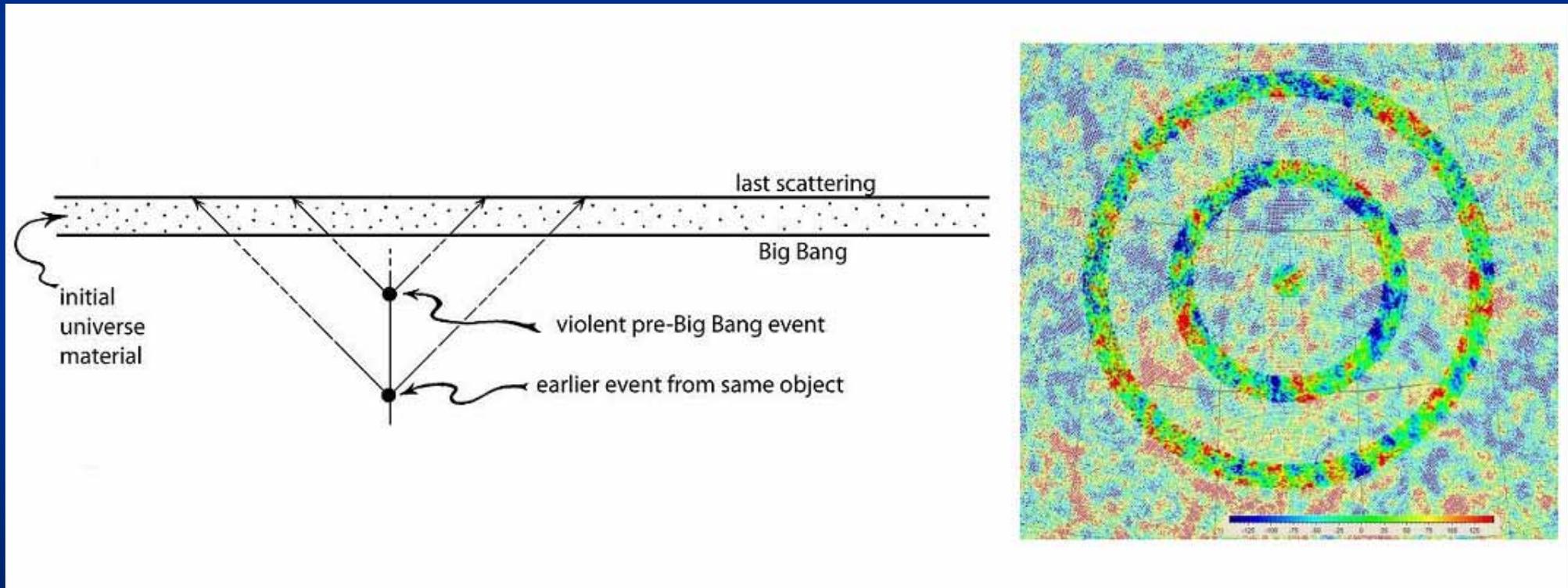


Ringstrukturen in der CMBR als Überreste der Schockwellen von SMSL-Kollisionen in einem früheren Äon.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)

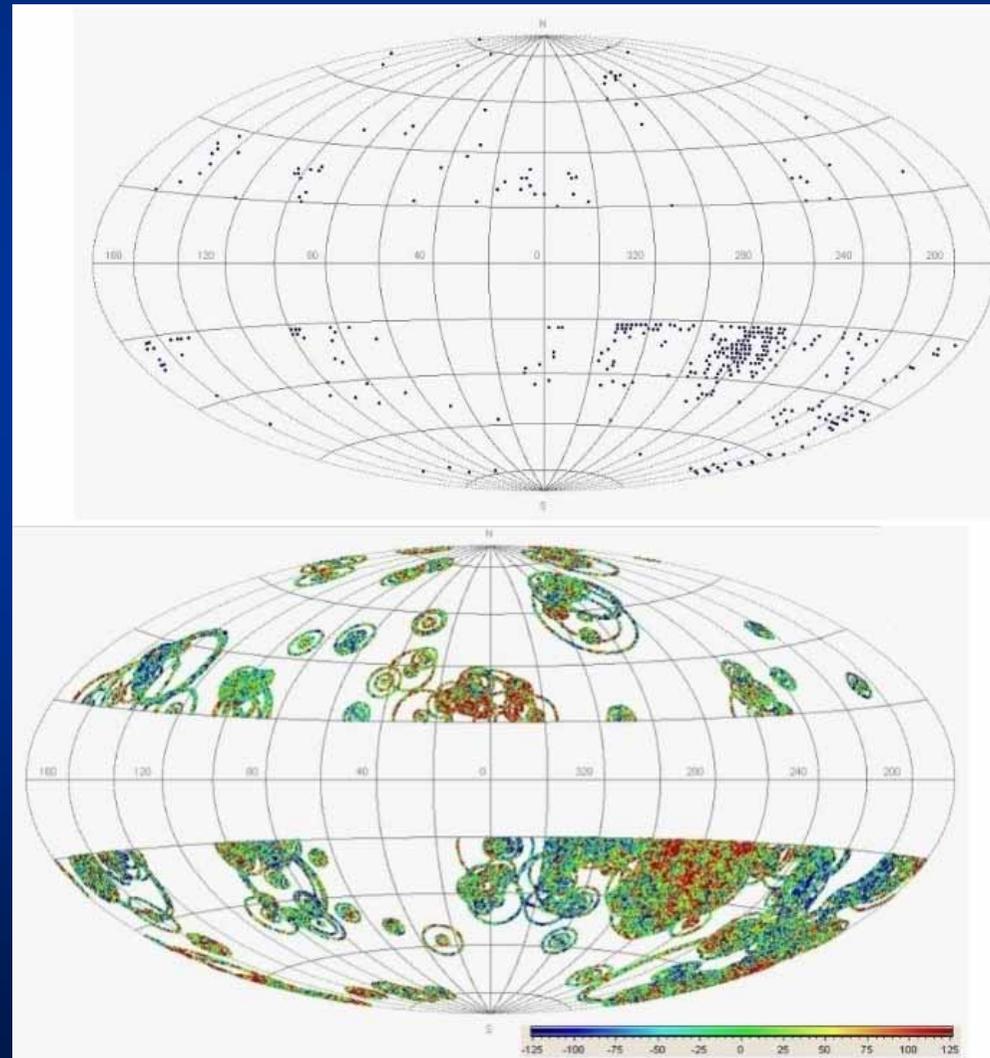


Derartige Strukturen sollten in der CMBR nachweisbar sein, wurden aber nicht gefunden.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Roger Penrose: Conformal cyclic cosmology (CCC) (2010)



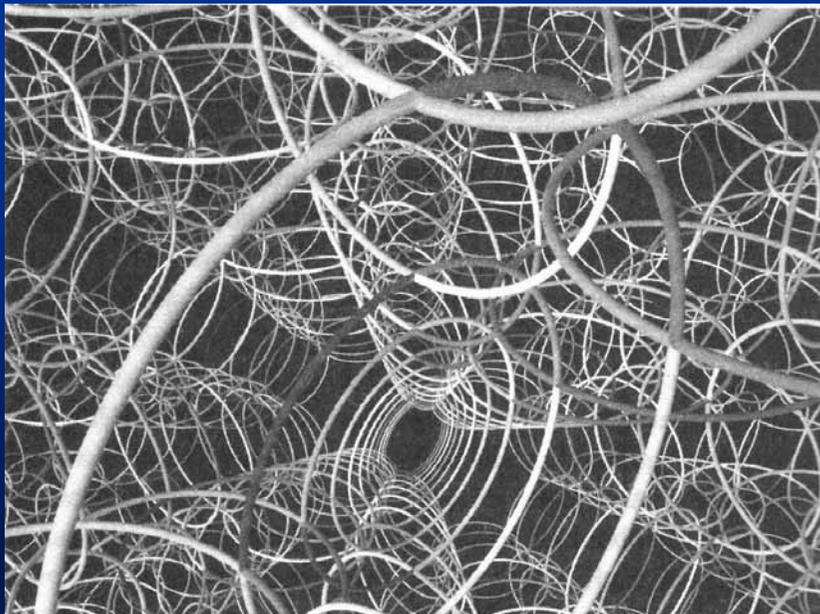
Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Schleifenquantengravitation (SQG)

Abbay Ashtekar (1986) und Martin Bojowald (2008):

Ein pulsierendes Universum, in dem Raum und Zeit gequantelt sind auf der Größenordnung der Planck-Skala mit einer Struktur von 10^{99} Raumzeitquanten pro cm^3 , wobei die Quanten in Form eines Raum-Zeit-Geflechts ein



schleifenförmiges Aussehen haben.

Beispielhaftes Bild eines Knäuels von Raum-Zeit-Schleifen

Die Raum-Zeit-Schleifen sind nicht in einen Raum eingebettet, sondern stellen den Raum selber dar.

(Bojowald, S. 114)

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Schleifenquantengravitation (SQG)

Wellenfunktion des Universums:

$$C_+ \Psi_{n+1} + C_0 \Psi_n + C_- \Psi_{n-1} = \hat{H} \Psi_n \quad \text{mit } \hat{H}: \text{Materiegehalt}$$

Die SQG vermeidet eine Anfangs-Singularität im Urknall, da durch die anwachsende Energiedichte der einzelnen Raum-Zeit-Quanten in der Nähe der Planck-Dimensionen l_{pl} und t_{pl} eine abstoßende Kraft entsteht.

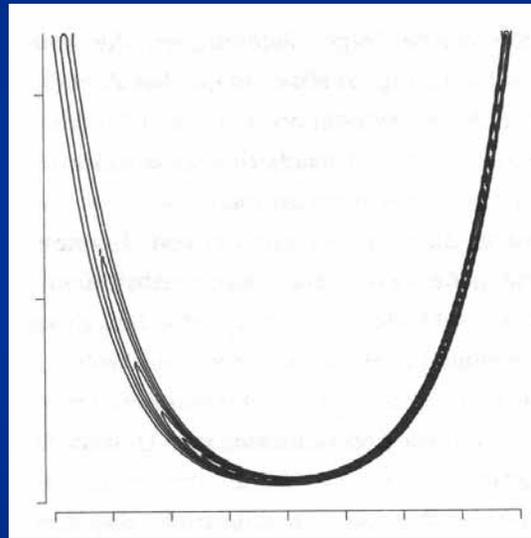
Die SQG definiert somit ein Universum mit einer Geschichte vor dem Urknall.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Schleifenquantengravitation (SQG)

Wellenfunktion eines Universums ohne Anfangs-Singularität:



(Bojowald, S. 140)

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Schleifenquantengravitation (SQG)

Das führt dazu, dass das Licht entfernter Objekte an den „Quanten-Körnern“ gestreut wird und dass wellenlängenabhängige Laufzeiteffekte bei Licht auftreten.

Beide Effekte sind in den Beobachtungen entfernter Quellen derzeit nicht nachweisbar.

Kosmologie

9. Weltmodelle mit Vorgeschichte

Allen diesen Weltmodellen ist gemeinsam, dass es derzeit keine Ansätze gibt, ihre Hypothesen durch Beobachtungen zu überprüfen.

»Je mehr wir über das Universum wissen, umso mehr tritt hervor, dass es sinn- und zwecklos ist.«

(Steven Weinberg)

»Über die Entstehung des Universums gibt es viele Meinungen. Wundere dich also nicht, Sokrates, wenn wir nicht imstande sind, Erklärungen zu geben, die in jeder Hinsicht exakt sind und konsistent miteinander.«

(Platon)

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Steady State Universum

Fred Hoyle, Hermann Bondi, Thomas Gold (1948):

Ein expandierendes Universum ohne Urknall, in dem permanent und homogen im gesamten Raum neue Materie erzeugt wird, ein Neutron pro m^3 pro 10 Jahre, was zu einer gleichbleibenden Materiedichte führt.

Diese Theorie ist durch die Entdeckung der Kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) widerlegt.

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Branenkosmologie

Schon Anfang des 20. Jahrhunderts wurde Vorstellungen über die Existenz weiterer Raumdimensionen entwickelt: Gunnar Nordström (1914), Theodor Kaluza (1919), Oskar Klein (1926, Kaluza-Klein-Theorie).

Später wurde dies im Rahmen der Stringtheorie aufgegriffen, wobei zusätzliche Dimensionen in der Größenordnung der Planck-Größen kompaktifiziert angenommen werden.

Die vierdimensionale Raumzeit entspricht dabei einer Brane, die in eine höherdimensionale Raumzeit, den sogenannten Bulk, eingebettet, aber im Alltag nicht wahrnehmbar ist.

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Multiversum



(Getty Images iStock Photos)

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Multiversum

Hugh Everett III (1957):

Existenz von Parallelwelten, vorgeschlagen als Erklärung, warum in der Quantenphysik Wahrscheinlichkeiten exakt vorausgesagt werden können, Einzelmessungen jedoch nicht (Unschärfeprinzip).



Andrei Linde

Andrei Dmitrijewitsch Linde (1980) und Alexander Vilenkin:

Eine anfangs kleine Region des Raumes kann nach endlicher Expansion ihren „Phasenübergang“ vollenden und beispielsweise unser ganzes, heute beobachtbares Universum umfassen.

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Ekpyrotisches Universum

Paul Steinhardt und Neil Turok (2001):

Im Entstehungsprozess unseres Universums kollidiert eine dreidimensionale Brane mit einer Brane aus einem Paralleluniversum innerhalb eines fünfdimensionalen Raums.

Dabei wird genug Energie freigesetzt, um die Entstehung von Materie und Strahlung im Rahmen eines Urknalls zu erklären.

Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

Quintessenz

Paul Steinhardt und Christof Wetterich (1988):

Vorschlag eines Skalarfeldes, des Kosmon, später Quintessenz genannt, mit virtuellen Kosmon-Quanten und mit einer zeitlich veränderlichen kosmologischen Konstante.

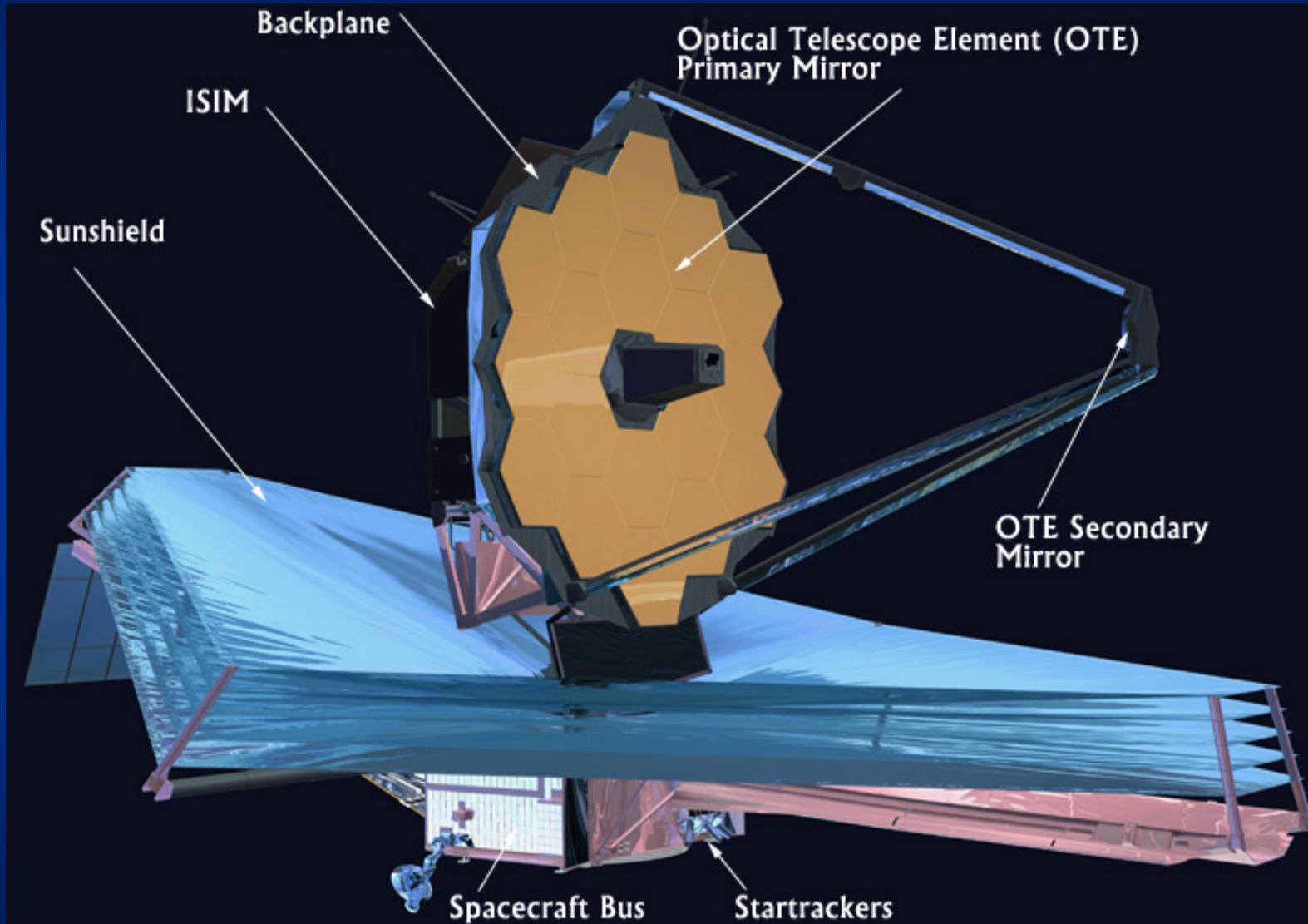
Kosmologie

10. Alternative Weltmodelle

**Die Vielfalt von Alternativvorschlägen ist groß
und kann hier nicht annähernd erschöpfend
dargestellt werden.**

Kosmologie

11. Die neuen Beobachtungen des JWST

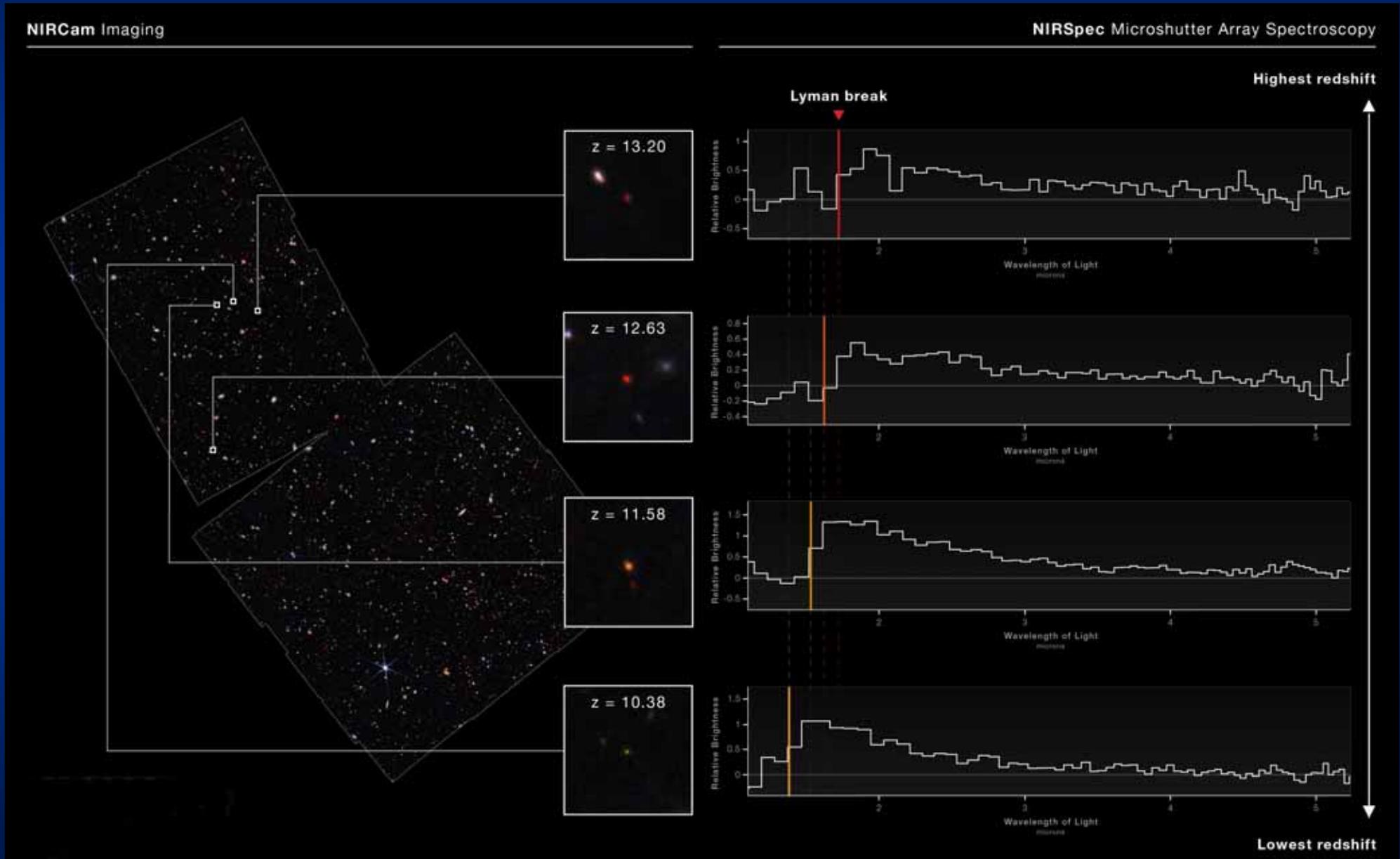


„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

James Webb Space Telescope

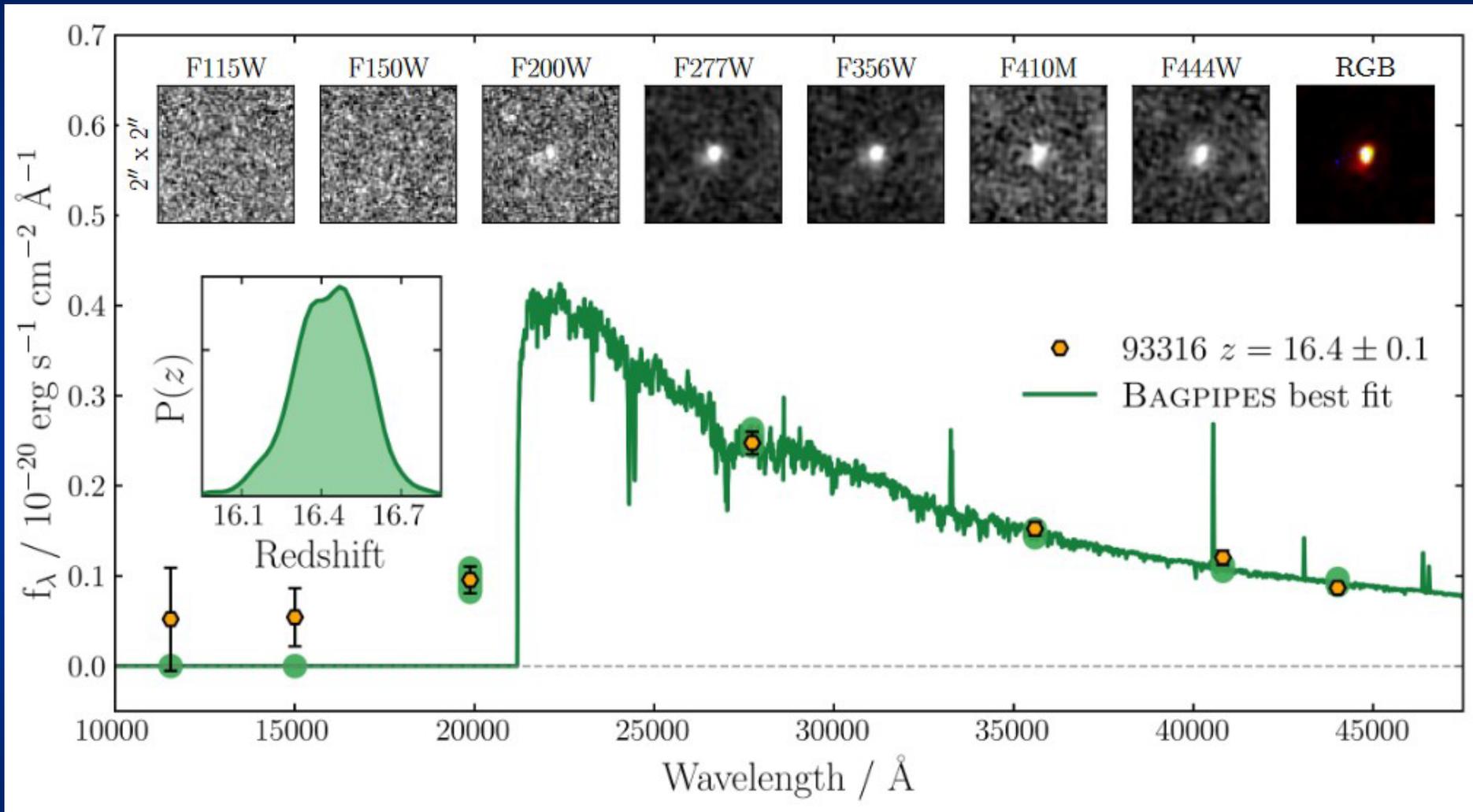
Kosmologie

11. Die neuen Beobachtungen des JWST



Kosmologie

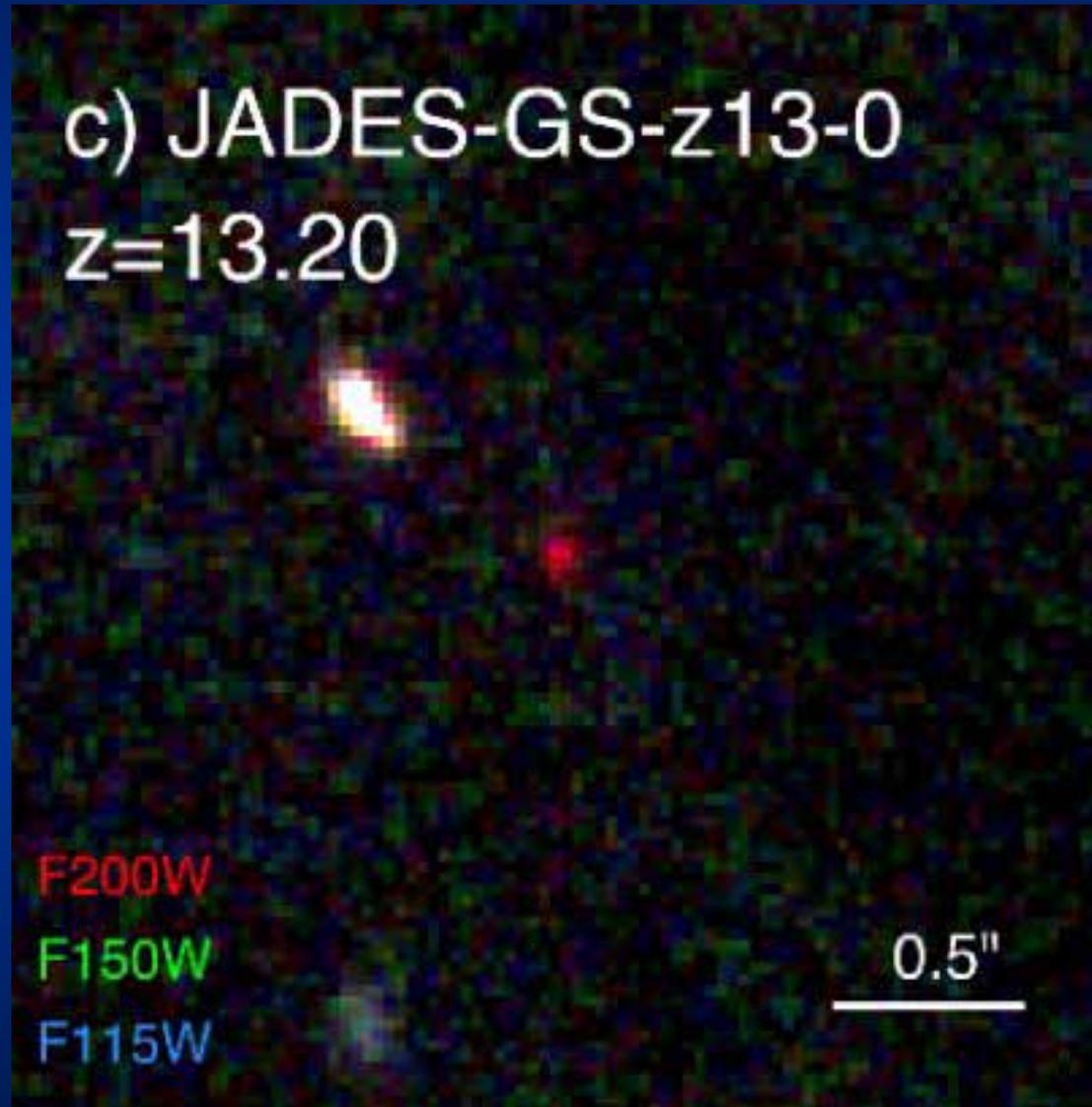
11. Die neuen Beobachtungen des JWST



**Ly α = 121.5 nm = 1215 \AA
bei $z=16$: 19'450 \AA**

Kosmologie

11. Die neuen Beobachtungen des JWST



z=13.2, Lichtlaufzeit: $13.4 \cdot 10^9$ a, aktuelle Distanz: $33.6 \cdot 10^9$ Lj

Kosmologie

11. Die neuen Beobachtungen des JWST

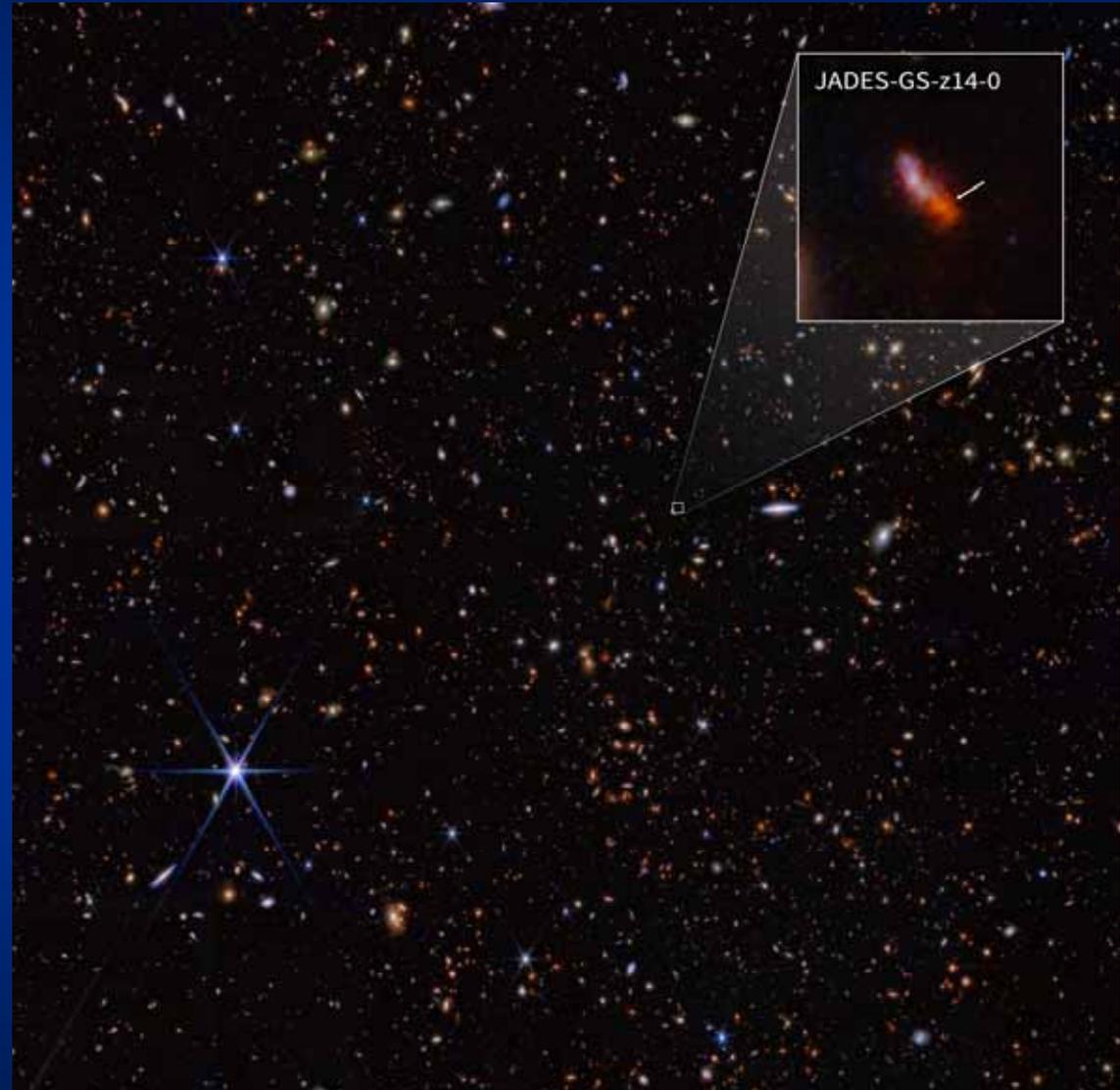
JADES-GS-z14-0

Entfernteste, bisher
bekannte Galaxie:

$z=14.2$

Lichtlaufzeit: $13.576 \cdot 10^9$ a

„Weltalter“: $290 \cdot 10^6$ a



„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Credit: NASA,ESA, CSA, STScI, Brant Robertson (UC Santa Cruz), Ben Johnson (CfA), Sandro Tacchella (Cambridge), Phill Cargile (CfA), Joseph Olmsted (STScI), Science: S. Carniani (Scuola Normale Superiore), JADES Collaboration (2024-05-30)

Kosmologie

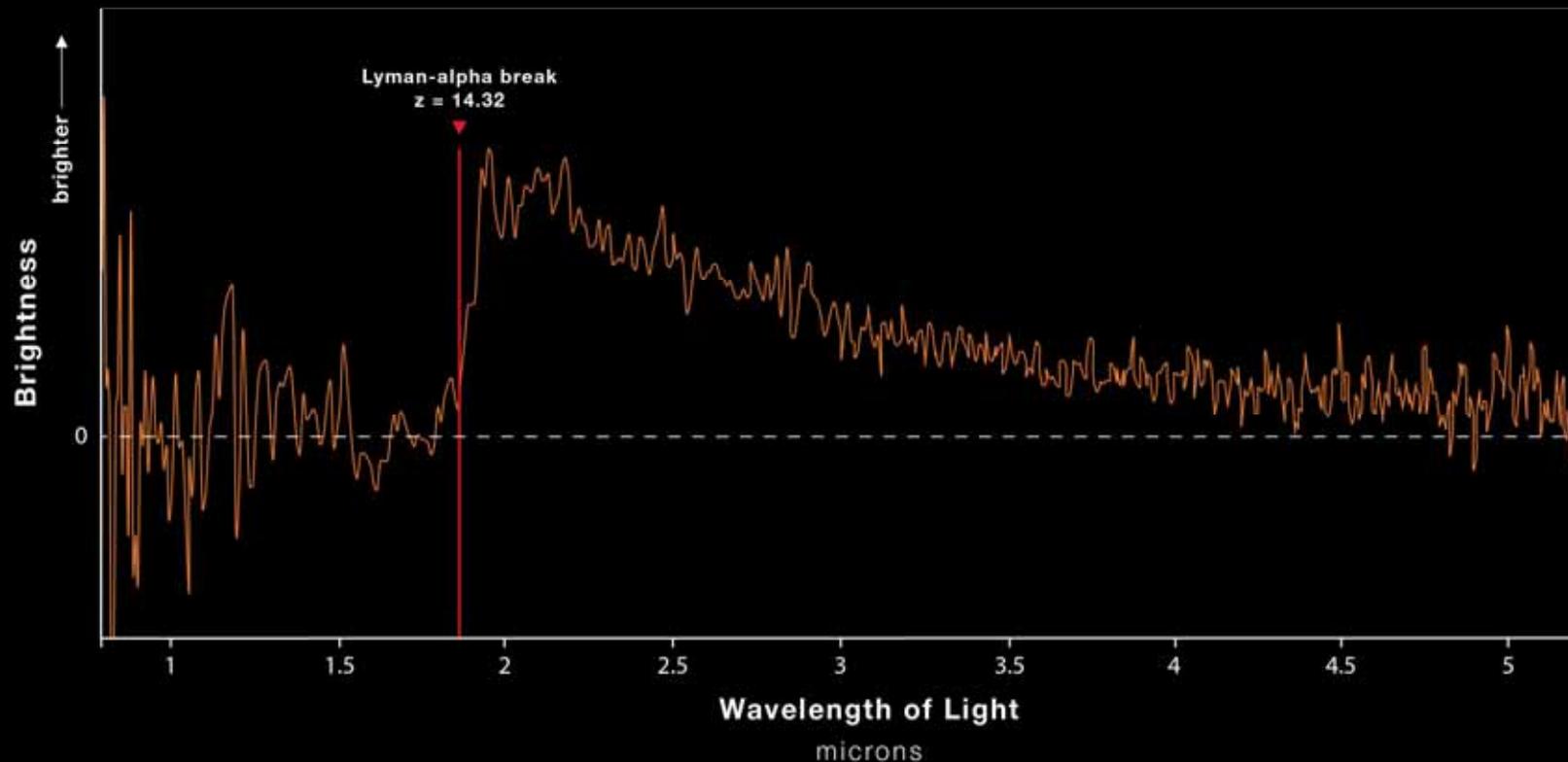
11. Die neuen Beobachtungen des JWST

JADES-GS-z14-0

GALAXY JADES-GS-Z14-0

GALAXY EXISTED 300 MILLION YEARS AFTER BIG BANG

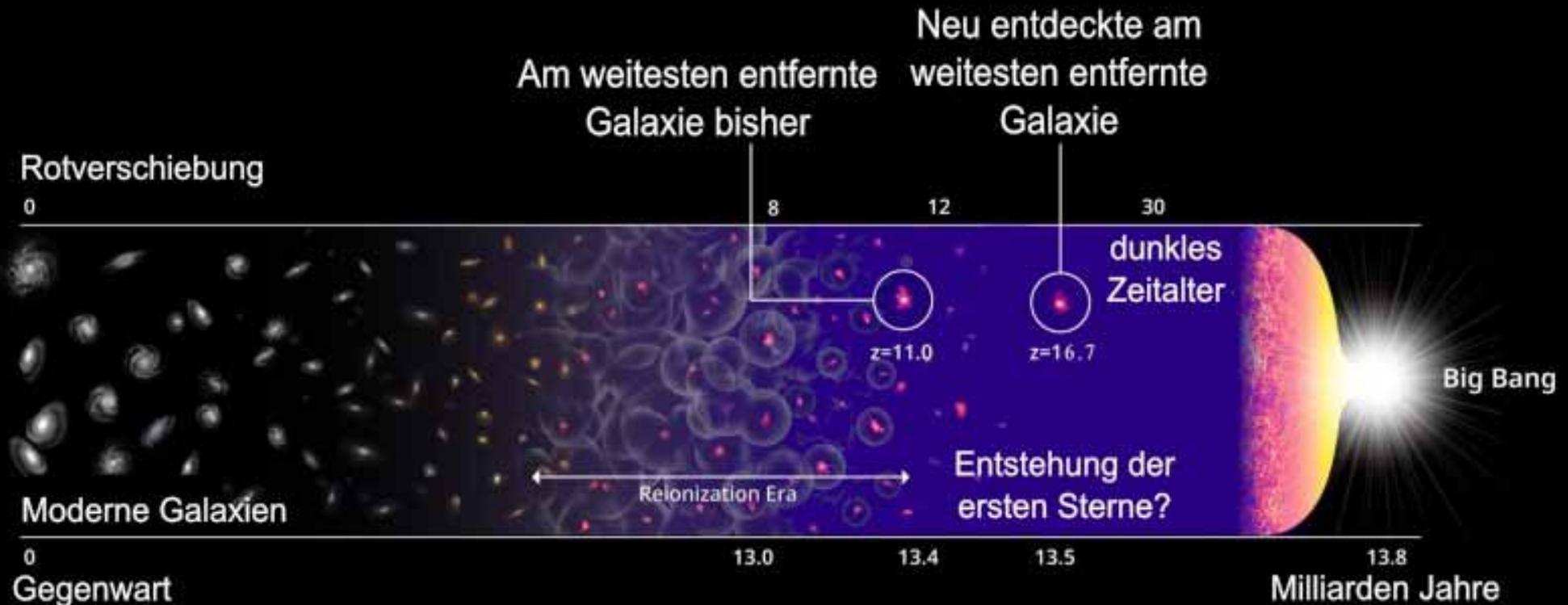
NIRSpec Microshutter Array Spectroscopy



WEBB
SPACE TELESCOPE

Kosmologie

11. Die neuen Beobachtungen des JWST



(Allexkoch 2022)

„Aktuelle Astronomie“ von Dr. Jürgen Wirth © 2024

Dunkles Zeitalter: die Phase, als nach der Entstehung der CMBR noch keine strahlenden Objekte wie Galaxien oder Sterne entstanden waren.

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

Schlussbemerkungen

Moderne Kosmologie lebt davon, dass

- a. Mathematiker Werkzeuge zur Verfügung stellen;
- b. theoretische Physiker damit Quantenfeldtheorien entwickeln, die erkannte Probleme lösen können;
- c. durch Beobachtungen theoretische Aussagen überprüfbar werden;
- d. Hochenergiephysiker die vorausgesagten Quanteneigenschaften nachweisen.

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

Schlussbemerkungen

»Vielleicht gibt es eine letzte Wahrheit über das Universum; ich weiß es nicht. Aber nur wenn wir solche Glaubensansichten aufgeben, eröffnen sich uns neue Wege in der Forschung. Später können wir unsere frisch gewonnenen Kenntnisse und Überzeugungen mit den alten vergleichen. Oft schließen solche Vergleiche Widersprüche ein, aber diese führen auch wieder zu neuen kreativen Erkenntnissen über die Ordnung der Wirklichkeit. Die Fähigkeit, Kompliziertheit zu ertragen und Widerspruch zu begrüßen, gehört zu einem Forscher, nicht das Streben nach Einfachheit und Gewissheit.

(Heinz R. Pagels, 1987)

Kosmologie

12. Résumé: *Brauchen wir eine neue Kosmologie?*

1. Die neuen Beobachtungen des JWST stellen die derzeitigen Modelle der Kosmologie nicht grundsätzlich in Frage.

Die Entdeckung sehr weit entfernter, schon entwickelter Galaxien kürzer nach dem Urknall, als bisher angenommen, erfordert die Überarbeitung der bisherigen Annahmen und Theorien zur frühen Galaxienbildung und Sternentstehung.

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

2. Bekannte Probleme der kosmologischen Modelle:

- die Anfangssingularität, die sich physikalisch nicht beschreiben lässt, ihre Herkunft und der Grund für den sich daraus entwickelnden Urknall
- die Natur von Dunkler Materie und Dunkler Energie
- die Herkunft der Inflation
- die „Geschichtslosigkeit“ des herkömmlichen Urknall-Modells
- eine fehlende Theorie der Quantengravitation
- und weitere

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

3. Die mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelten Friedmann-Gleichungen:

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

und

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3\frac{p}{c^2} \right)$$

beschreiben die beobachtbare Expansionsgeschichte des Universums konsistent und mit großer Genauigkeit.

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

4. Das Lovelock-Theorem (1971) beweist mathematisch, dass jede metrische Gravitationstheorie in vier Dimensionen so aussehen muss wie die Einsteinsche Allgemeine Relativitätstheorie.

Diese enthält einen anziehenden Anteil mit der Newtonschen Gravitationskonstante G und einen abstoßenden mit der kosmologischen Konstante Λ .

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

Einsteins Feldgleichung

$G_{\mu\nu}$

Einstein-Tensor

$g_{\mu\nu}$

Metrischer Tensor

$T_{\mu\nu}$

Energie-Impuls-Tensor

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

5. *„Die Hoffnung ruht also auch in diesem Jahrtausend auf zwei Dingen: auf neuen cleveren Experimenten und Beobachtungen, die uns einen entscheidenden Hinweis auf die richtige Stoßrichtung in der Forschung geben, und auf dem Geist einer Person, die wie damals Albert Einstein einen revolutionären neuen theoretischen Ansatz wagt und gewinnt.“*

(Andreas Müller & Matthias Bartelmann, 2022)

Kosmologie

12. Résumé: *Brauchen wir eine neue Kosmologie?*

Fazit: Nein!

Kosmologie

12. Résumé: Brauchen wir eine neue Kosmologie?

»Wenn man erwartet, dass einem die Wissenschaft alle Antworten auf so wunderbare Fragen liefert wie, was wir sind, wohin wir gehen, was das Universum bedeutet usw., dann wird man meines Erachtens sehr leicht enttäuscht und sucht nach irgendeiner mystischen Antwort. Wie ein Wissenschaftler eine mystische Antwort hinnehmen kann, verstehe ich nicht. Ich kann diese Geschichten nicht glauben, die es über unsere Beziehung zum ganzen Universum gibt. Sie kommen mir zu einfach, zu zusammenhängend, zu kleinkariert vor. Die Leute fragen mich, ob die Wissenschaft wahr ist. Ich sage: Nein, wir wissen nicht, was wahr ist. Wir versuchen nur, es herauszufinden, doch vielleicht ist alles falsch. Ich kann mit Zweifel und Ungewissheit leben. Ich glaube, es ist viel interessanter, zu leben und etwas nicht zu wissen, als Antworten parat zu haben, die vielleicht falsch sind. Ich habe angenäherte Antworten, mögliche Überzeugungen und verschiedene Grade der Gewissheit zu verschiedenen Dingen, aber absolut sicher weiß ich nichts. Über vieles weiß ich gar nichts, zum Beispiel auch darüber, ob es überhaupt einen Sinn hat, zu fragen, warum wir da sind. Aber ich brauche darauf keine Antwort zu wissen. Es ängstigt mich nicht, wenn ich etwas nicht weiß oder in einem geheimnisvollen Universum ohne Sinn und Zweck verlorengelasse, denn so ist es doch wirklich, soweit ich es sagen kann. Das schreckt mich überhaupt nicht.«

(Richard Feynman, 1918-1988)

Kosmologie

Literaturauswahl



424 S., 1985

Trotz des Alters und einiger veralteter Bezeichnungen eine empfehlenswerte Lektüre, auch für physikalische Laien. Beschreibt gut die Beziehungen zwischen Kosmologie und Elementarteilchenphysik.



512 S., 2022

Eine hochaktuelle, in die Tiefe gehende, sehr vollständige Darstellung, die im Verständnis auf Schulphysik und -mathematik aufbaut.

Kosmologie

Literaturauswahl



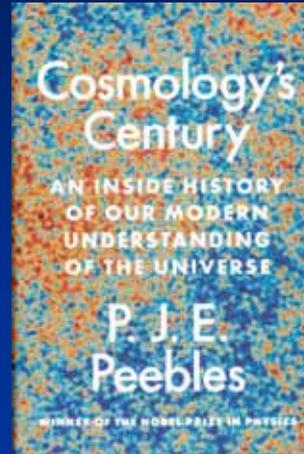
343 S., 2009

Einführung, Beschreibung und Begründung der Schleifen-Quanten-gravitation von dem an der Entwicklung beteiligten Astrophysiker



350 S., 2010

Beschreibung der Conformal Cyclic Cosmology (CCC) von ihrem Entwickler



404 S., 2020



352 S., 1997



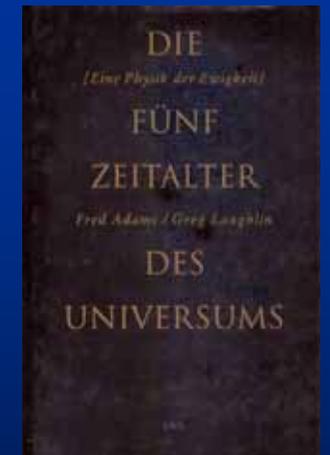
216 S., 1998



216 S., 1994



128 S., 2018



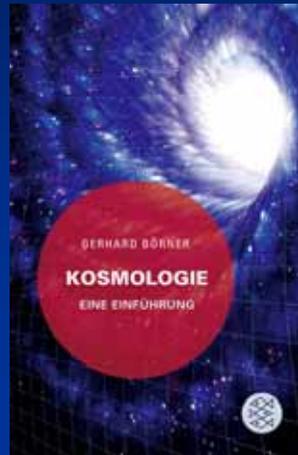
272 S., 1999

Kosmologie

Literaturauswahl



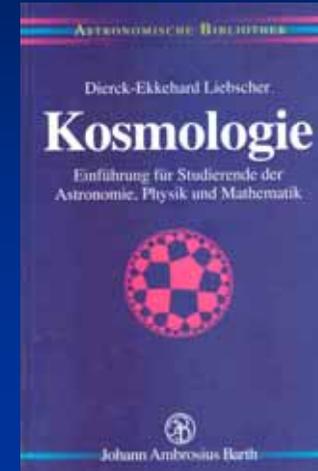
239 S., 1991



128 S., 2011



259 S., 1998



252 S., 1994



658 S., 1983



208 S., 1985