

J. Wirths Aktuelle Astronomie

J. Wirths Aktuelle Astronomie

Montagsvortrag: *„Die rätselhafte Expansion des Alls“*

Stand: 2024 November 28

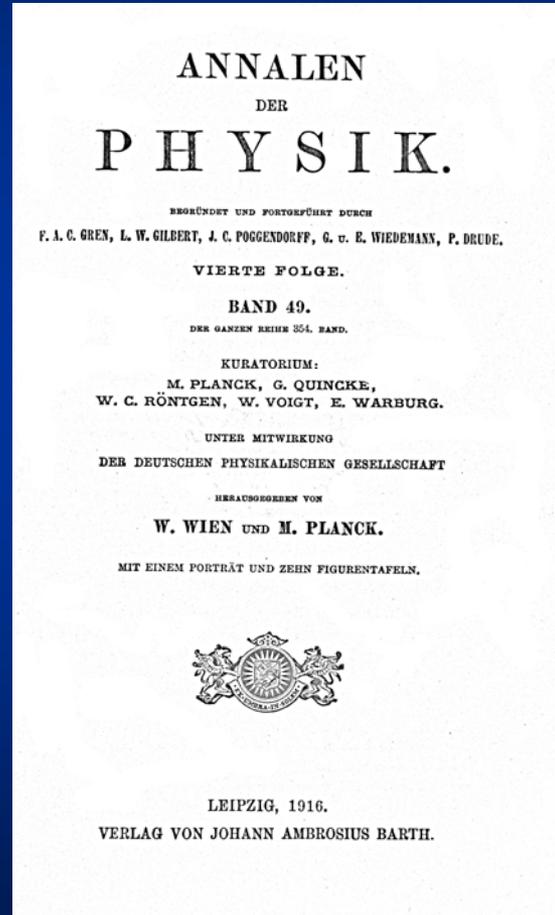
Themen

1. Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie und ein statisches Universum
2. Vesto Slipher und die Rotverschiebung der Galaxien
3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht
4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos
5. Urknall und gebremste Expansion
6. Inflation
7. Supernovae und die beschleunigte Expansion
8. Die Kraft der Dunklen Energie
9. Eine Expansion ins Dunkel

Expansion des Alls

1. Einsteins Allg. Relativitätstheorie und ein statisches Universum

1916 - Albert Einstein begründet die allgemeine Relativitätstheorie



Expansion des Alls

1. Einsteins Allg. Relativitätstheorie und ein statisches Universum

Bei der Aufstellung der Feldgleichungen zur Allgemeinen Relativitätstheorie ging Einstein zunächst von einem endlich unbegrenzten, aber statischen Universum aus:

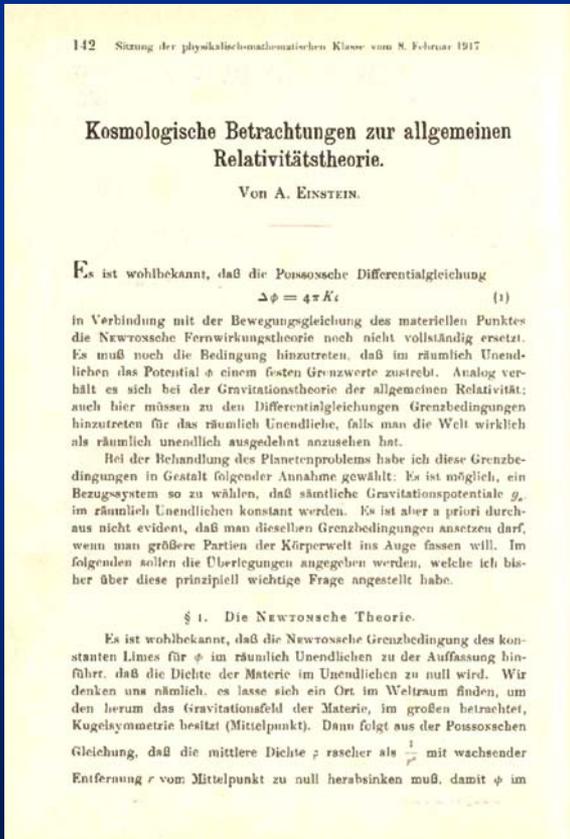
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot R \cdot g_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$	Einstein-Tensor
G	Allgemeine Gravitationskonstante
c	Lichtgeschwindigkeit
$T_{\mu\nu}$	Energie-Impuls-Tensor
$R_{\mu\nu}$	Ricci-Krümmungstensor
R	Ricci-Krümmungsskalar
$g_{\mu\nu}$	metrischer Tensor

Expansion des Alls

1. Einsteins Allg. Relativitätstheorie und ein statisches Universum

Aber bereits ein Jahr später, 1917, hat er seine Feldgleichung in dieser Arbeit um die kosmologische Konstante Λ erweitert, da nur so ein statisches Universum zu beschreiben war:



Das Gleichungssystem (14) erlaubt jedoch eine naheliegende, mit dem Relativitätspostulat vereinbare Erweiterung, welche der durch Gleichung (2) gegebenen Erweiterung der Poisson'schen Gleichung vollkommen analog ist. Wir können nämlich auf der linken Seite der Feldgleichung (13) den mit einer vorläufig unbekanntem universellen Konstante $-\lambda$ multiplizierten Fundamentaltensor $g_{\mu\nu}$ hinzufügen, ohne daß dadurch die allgemeine Kovarianz zerstört wird; wir setzen an die Stelle der Feldgleichung (13)

$$(\ddot{r}_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu}) = -\kappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right) \quad (13a)$$

Die Konstante Λ taucht hier in Gleichung 13a erstmals auf.

Die damit modifizierte Feldgleichung:

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

Expansion des Alls

1. Einsteins Allg. Relativitätstheorie und ein statisches Universum

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

Auch wenn diese Gleichung mit ihren wenigen Termen vergleichsweise einfach aussieht - gültige Lösungen für sie zu finden ist außerordentlich schwierig und erfordert komplexe Mathematik.

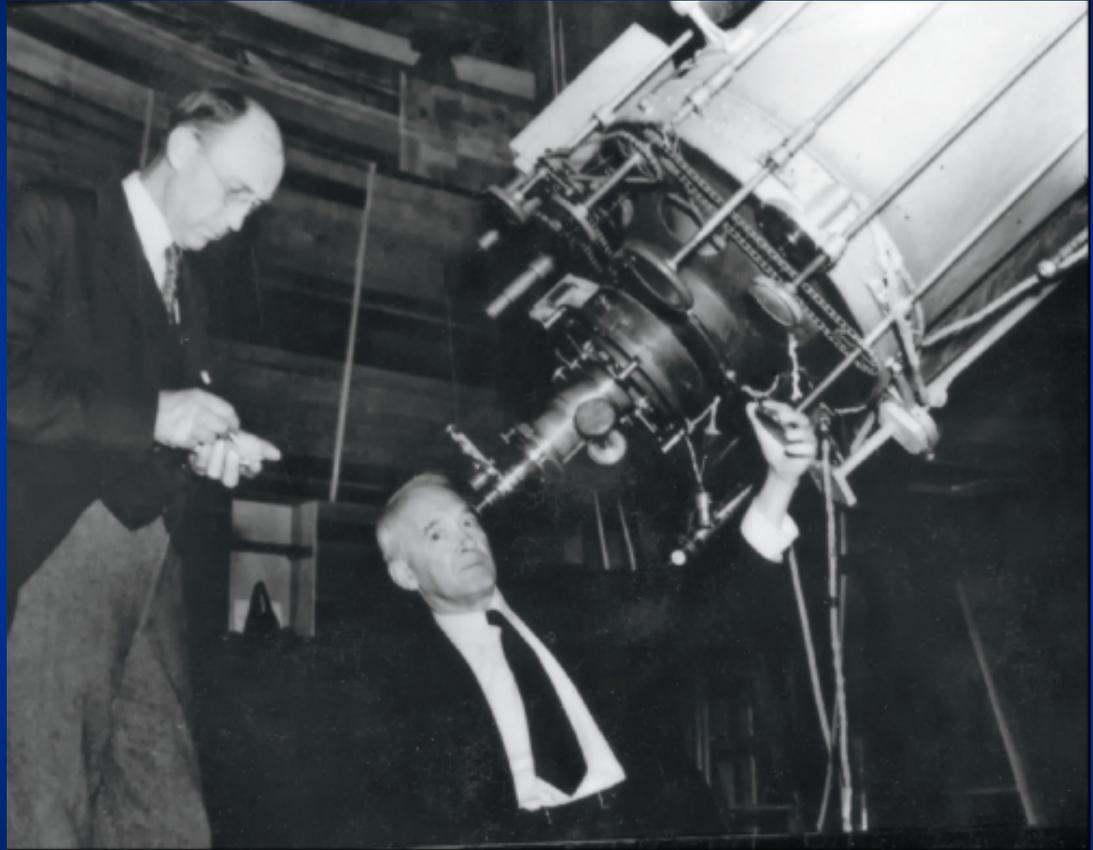
Einstein hat die kosmologische Konstante damals nicht wirklich Ernst genommen. Nach George Gamow hat er diese angeblich als die „größte Eselei meines Lebens“ bezeichnet.

Expansion des Alls

2. Vesto Slipher und die Rotverschiebung der Galaxien



(1875-1969)



am Alvan-Clark-61 cm-Refraktor des
Lowell-Observatory, Flagstaff/AZ

Expansion des Alls

2. Vesto Slipher und die Rotverschiebung der Galaxien


 The Observatory
LOWELL OBSERVATORY

BULLETIN No. 58

VOL. II

No. 8

THE RADIAL VELOCITY OF THE ANDROMEDA NEBULA



Keeler, by his splendid researches on the nebula, showed, among other things, that the nebulae are generally spiral in form, and that such nebulae exist in far vaster numbers than had been supposed. These facts seem to suggest that the spiral nebula is one of the important products of the forces of nature. The spectra of these objects, it was recognized, should convey valuable information, and they have been studied, photographically, first by Huggins and Scheiner, and recently more extensively by Fath and Wolf; but no attempt has to my knowledge been made to determine their radial velocity, although the value of such observations has doubtless occurred to many investigators.

The one obstacle in the way of the success of this undertaking is the faintness of these nebulae. The extreme feebleness of their dispersed light is difficult to realize by one not experienced in such observing, and it no doubt appears strange that the magnificent Andromeda Spiral, which under a transparent sky is so evident to the naked eye, should be so faint spectrographically. The contest is with the low intrinsic brightness of the nebular surface, a condition which no choice of telescope can relieve. However, the proper choice of parts in the spectrograph will make the best of this difficulty. The collimator must of course fit the telescope, but the dispersion-piece and the camera may and should be carefully selected for their special fitness for the work. While the speed of the camera is all-important in recording the spectrum, the detail in the spectrum depends upon the dispersion, for obviously a line, no matter how dark it may be, must have a certain magnitude or else it cannot be recorded by the granular surface of the photographic plate. Hence the light must be concentrated by a camera of very short focus and the dimension of the spectral line be increased by using a high angular dispersion and a wider slit, as one in this way attains a higher resolving power in the photographed spectrum.

Although I had made spectrograms of the Andromeda Nebula a few years ago, using the short camera, it was not until last summer that I thought to employ the higher dispersion and the wider slit. The early attempts recorded well the continuous spectrum crossed by a few Fraunhofer groups, and were particularly encouraging as regards the exposure time required. The first of the recent plates was exposed for 6 hours and 50 minutes, on September 17, 1912, using a very dense 64-degree prism, the instrument having already been tried out on some globular star clusters.

When making this exposure the brightness of the nebula on the slit-plate compared with that of the clusters indicated that one night's exposure should suffice for the single-prism, and suggested that, by extending the exposure through several nights, one could employ the battery of three dense flint prisms whose dispersion would make it possible to observe the velocity of the nebula. The success of the plate bore out this suggestion. Indeed, upon subsequent examination of this plate it was seen that the nebular lines were perceptibly displaced with reference to the comparison lines. The next plate secured showed the same displacement. Still other single-prism plates were obtained during the autumn and early winter, but the observing program with the 24-inch telescope did not allow an opportunity to carry out the original plan to make the longer exposure spectrogram with the prism-train.

These spectrograms were measured with the Hartmann spectrocomparator, using a magnification of fifteen diameters. A similar plate of Saturn was employed as a standard. The observations were as follows:

1912, September 17,	Velocity, —284 km.
November 15-16,	" 296
December 3-4,	" 308
December 29-30-31,	" —301
Mean velocity,	—300 km.

Tests for determining the degree of accuracy of such observations have not been completed, but in rounding off to 300 kilometers in taking the mean one is doubtless well within the accuracy of the observations. The measures extended over the region of spectrum from F to H.

The conditions were purposely varied in making the observations. This was done although it was early noted that the shift at the violet end of the spectrum was fully twice that at the blue end, which should be the case if it were due to velocity.

The magnitude of this velocity, which is the greatest hitherto observed, raises the question whether the velocity-like displacement might not be due to some other cause, but I believe we have at the present no other interpretation for it. Hence we may conclude that the Andromeda Nebula is approaching the solar system with a velocity of about 300 kilometers per second.

This result suggests that the nebula, in its swift flight through space, might have encountered a dark "star," thus giving rise to the peculiar nova that appeared near the nucleus of the nebula in 1885.

Zwischen September und Ende 1912 maß Slipher am Spiralnebel im Sternbild Andromeda (heute M31) Blauverschiebungen, die er in Radialgeschwindigkeiten zwischen -284 und -308 km/s (Mittel: -300) umrechnete.



am
Spektrograph
des Refraktors

Expansion des Alls

2. Vesto Slipher und die Rotverschiebung der Galaxien

Im August 1914 konnte Slipher auf der AAS-Tagung in Evanston/IL Radialgeschwindigkeiten von 15 Nebeln (heute Galaxien) präsentieren, fast alle als Fluchtbewegungen (+), aufgrund von Rotverschiebungen in den Spektren.

In the table is a list of the spiral nebulae observed. As far as possible their velocities are given, although in many cases they are only rough provisional values.

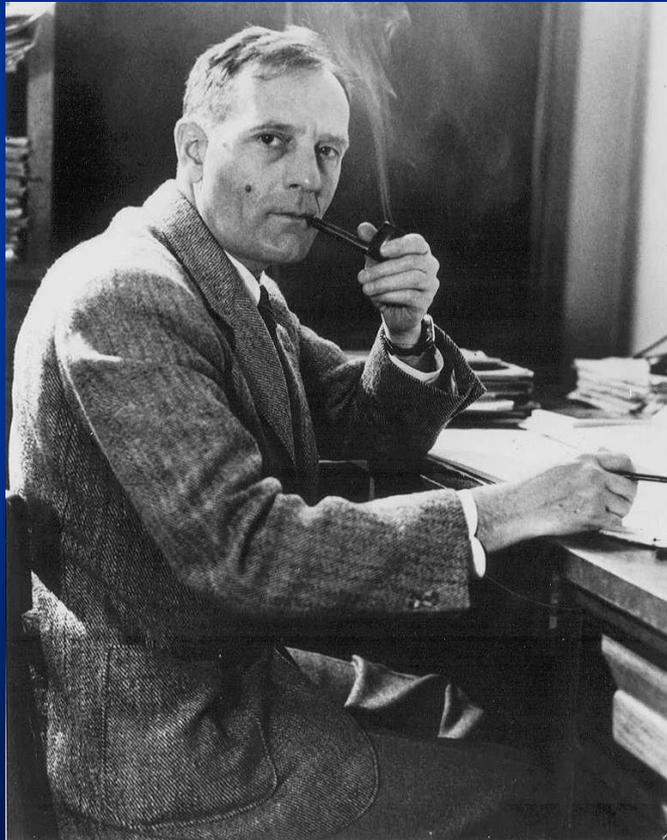
N.G.C.	221	Velocity	— 300 km	} These nebulae are on the south side of the Milky Way.
	224 †		— 300	
	598		—	
	1023		+ 200 roughly	
	1068		+ 1100	
	7331		+ 300 roughly	
	3031		+ small	} These are on the north side of the Milky Way
	3115		+ 400 roughly	
	3627		+ 500	
	4565		+ 1000	
	4594		+ 1100	
	4736		+ 200 roughly	
	4826		+ small	
	5194		± small	
	5866		+ 600	

Ausschnitt aus dem Tagungsbericht

Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht

1923 konnte Edwin Hubble am Mount-Wilson-Observatorium auf der Basis von Sliphers Arbeiten nachweisen, dass der Andromedanebel (später M31) weit außerhalb der Milchstraße liegt.



(1889-1953)

1929 veröffentlicht er eine Arbeit über die Radialgeschwindigkeiten und Entfernungen von ca. 50 extragalaktischen Objekten und begründet damit das nach ihm benannte Gesetz der „Galaxienflucht“.

*A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

By EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

Communicated January 17, 1929

Determinations of the motion of the sun with respect to the extra-galactic nebulae have involved a K term of several hundred kilometers which appears to be variable. Explanations of this paradox have been sought in a correlation between apparent radial velocities and distances, but so far the results have not been convincing. The present paper is a re-examination of the question, based on only those nebular distances which are believed to be fairly reliable.

Distances of extra-galactic nebulae depend ultimately upon the application of absolute-luminosity criteria to involved stars whose types can

Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht

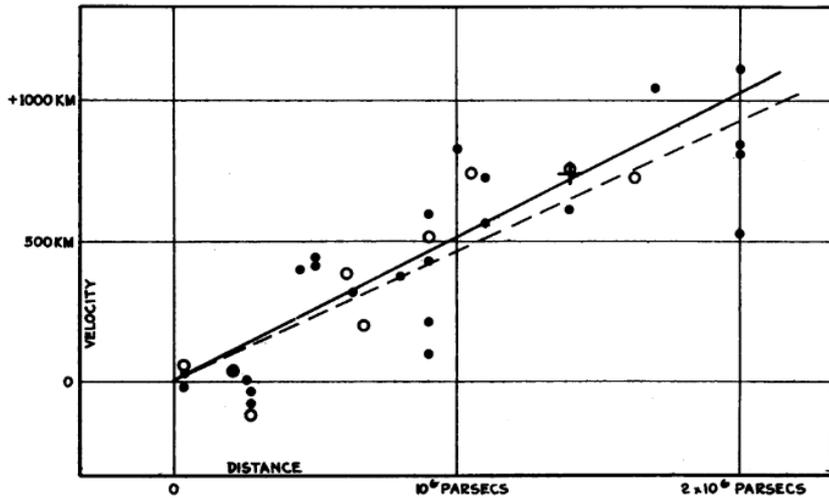


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

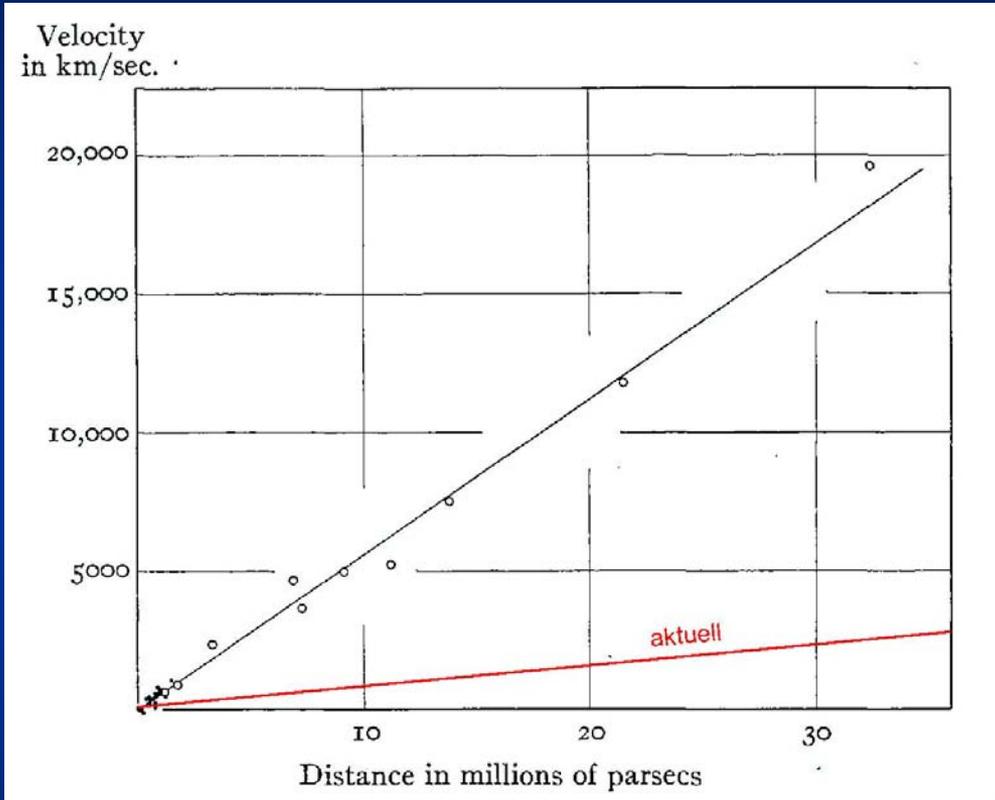
Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

In dem entstehenden Diagramm, heute Hubble-Diagramm genannt, zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Radialgeschwindigkeit und Entfernung, dessen Steigung durch die sogenannte Hubble-Konstante H_0 , heute Hubble-Lemaître-Konstante, beschrieben wird.

Hubble bestimmte diesen Wert auf $500 \text{ km/s}\cdot\text{Mpc}$, der heutige Bestwert (CCHP, August 2024) liegt bei $69.96 \pm 1.05 \text{ km/s}\cdot\text{Mpc}$.

Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht

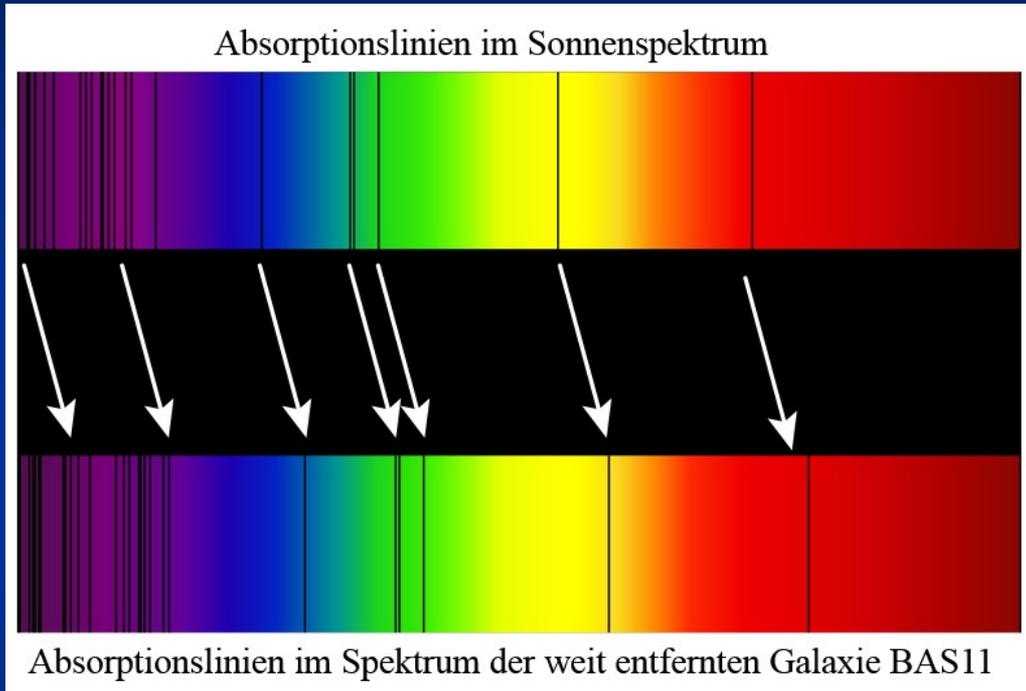


1931 veröffentlicht er im *Astrophysical Journal* gemeinsam mit Milton Humason eine weitere Arbeit, die auf einer wesentlich breiteren Datenbasis und einem wesentlich größeren Entfernungsbereich zu einem $H_0 = 558 \pm 50 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ führt.

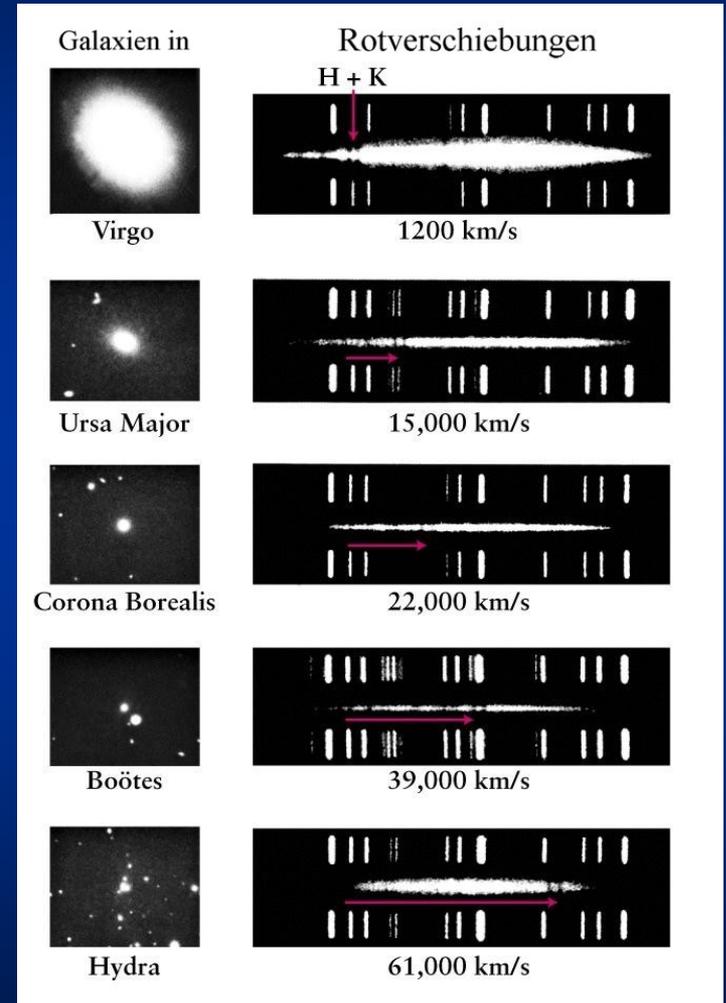
Die rote Linie entspricht dem heutigen Wert.

Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht

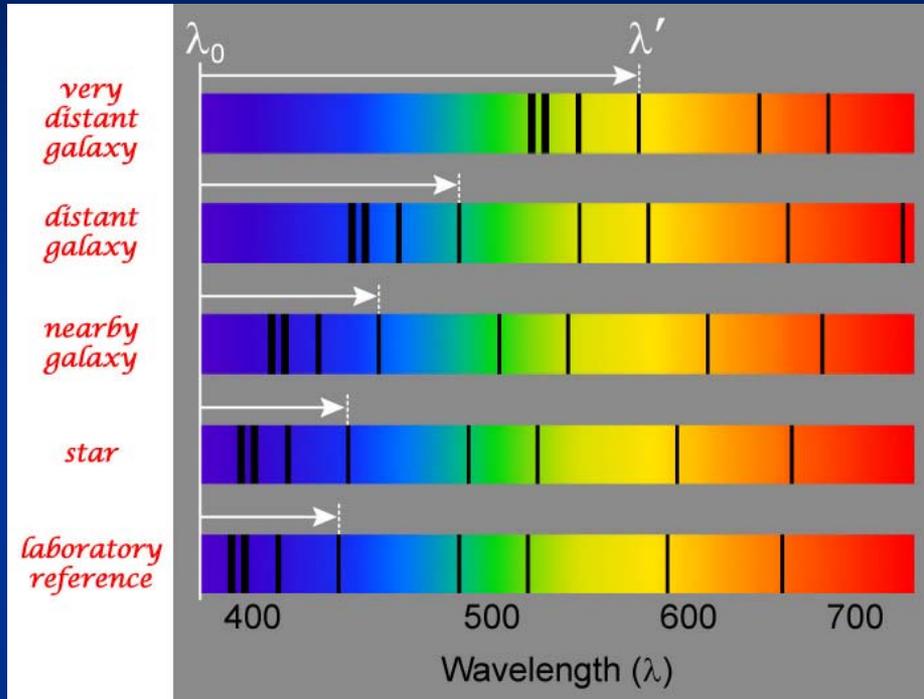


Rotverschiebung und Radialgeschwindigkeit in der Beobachtung



Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht



Die Rotverschiebung wird als z definiert und wächst mit zunehmender Entfernung der Galaxien stetig an.

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

Das bedeutet, dass sich die Galaxien umso schneller von der Milchstraße entfernen, je weiter sie entfernt sind.

Expansion des Alls

3. Edwin Hubble und das Gesetz der Galaxienflucht

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

(CCHP: Chicago-Carnegie Hubble Program)

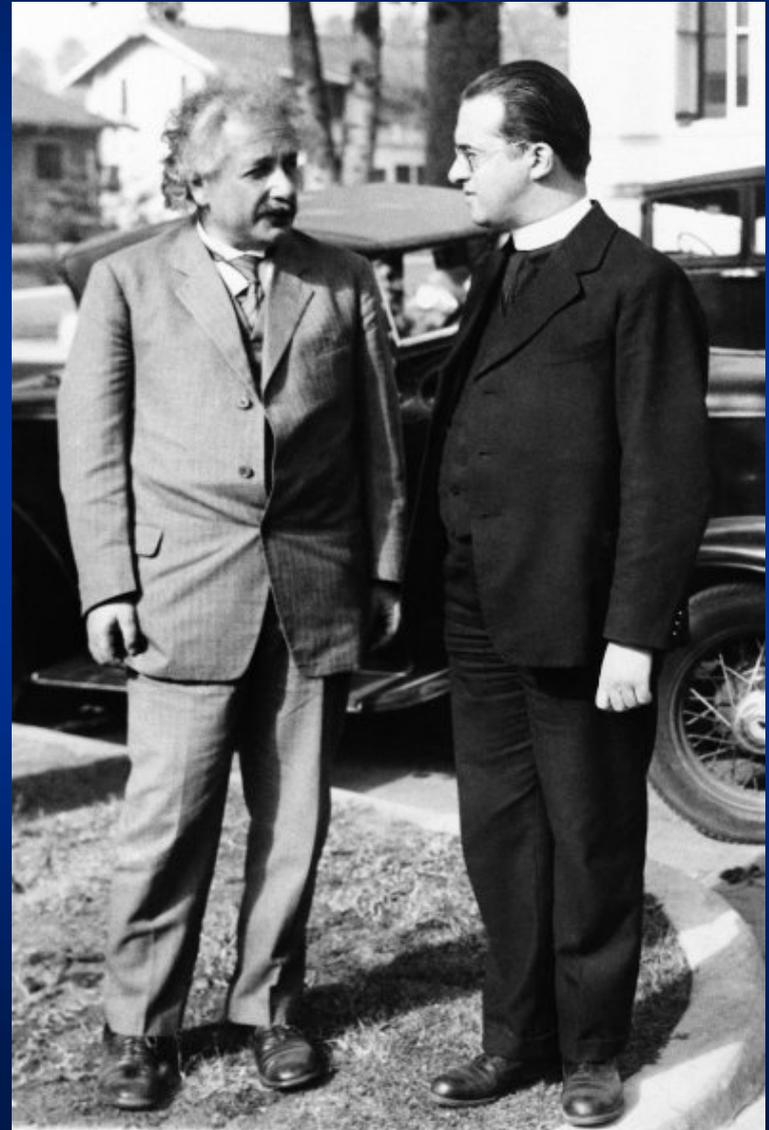
Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos



(1894-1966)

Albert Einstein und Georges Lemaître
1933 in Pasadena



Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos

Georges Lemaître entwickelte die Idee von der Expansion des Universums und veröffentlichte 1927, zwei Jahre vor Hubble, darüber auf Französisch eine Arbeit. Jahre zuvor (ab 1922) hatte Alexander Friedmann in Sankt Petersburg bereits Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen entwickelt, die auch solche für ein expandierendes Universum einschlossen, die Lemaître aber vermutlich nicht kannte.

- 49 -

UN UNIVERS HOMOGENE DE MASSE CONSTANTE ET DE RAYON CROISSANT,
RENDANT COMPTE
DE LA VITESSE RADIALE DES NÉBULEUSES EXTRA-GALACTIQUES

Note de M. l'Abbé G. LEMAÎTRE

1. GÉNÉRALITÉS.

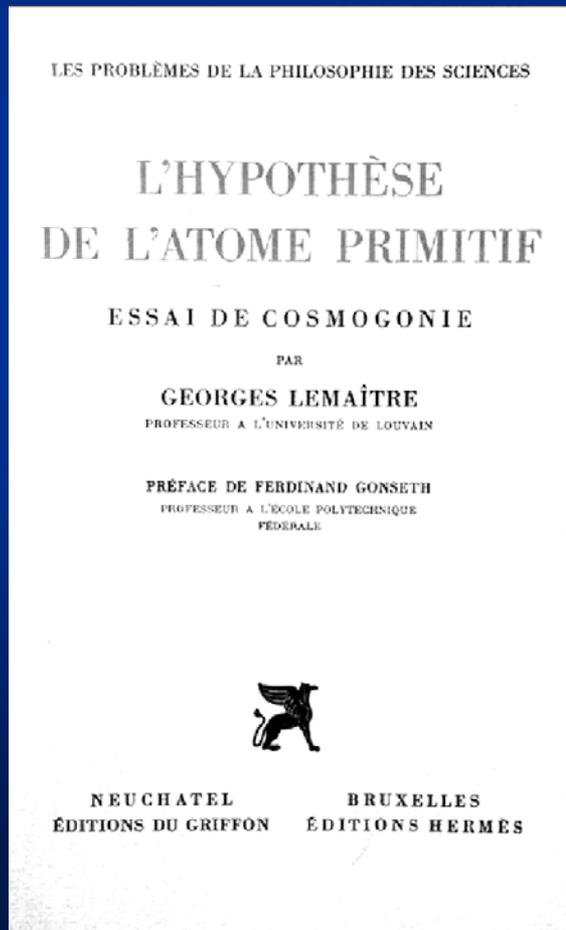
La théorie de la relativité fait prévoir l'existence d'un univers homogène où non seulement la répartition de la matière est uniforme, mais où toutes les positions de l'espace sont équivalentes, il n'y a pas de centre de gravité. Le rayon R de l'espace est constant, l'espace est elliptique de courbure positive uniforme $1/R^2$, les droites issues d'un même point repassent à leur point de départ après un parcours égal à πR , le volume total de l'espace est fini et égal à $\pi^2 R^3$, les droites sont des lignes fermées parcourant tout l'espace sans rencontrer de frontière ⁽¹⁾.

Annales de la Société scientifique de Bruxelles (1927)

Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos

1931 ging er weiter und führte die Idee des Urknalls als quantenphysikalischen Beginn der kosmischen Expansion ein, die er später auch unter dem Titel „L'Hypothèse de l'Atome Primitif“ veröffentlichte.



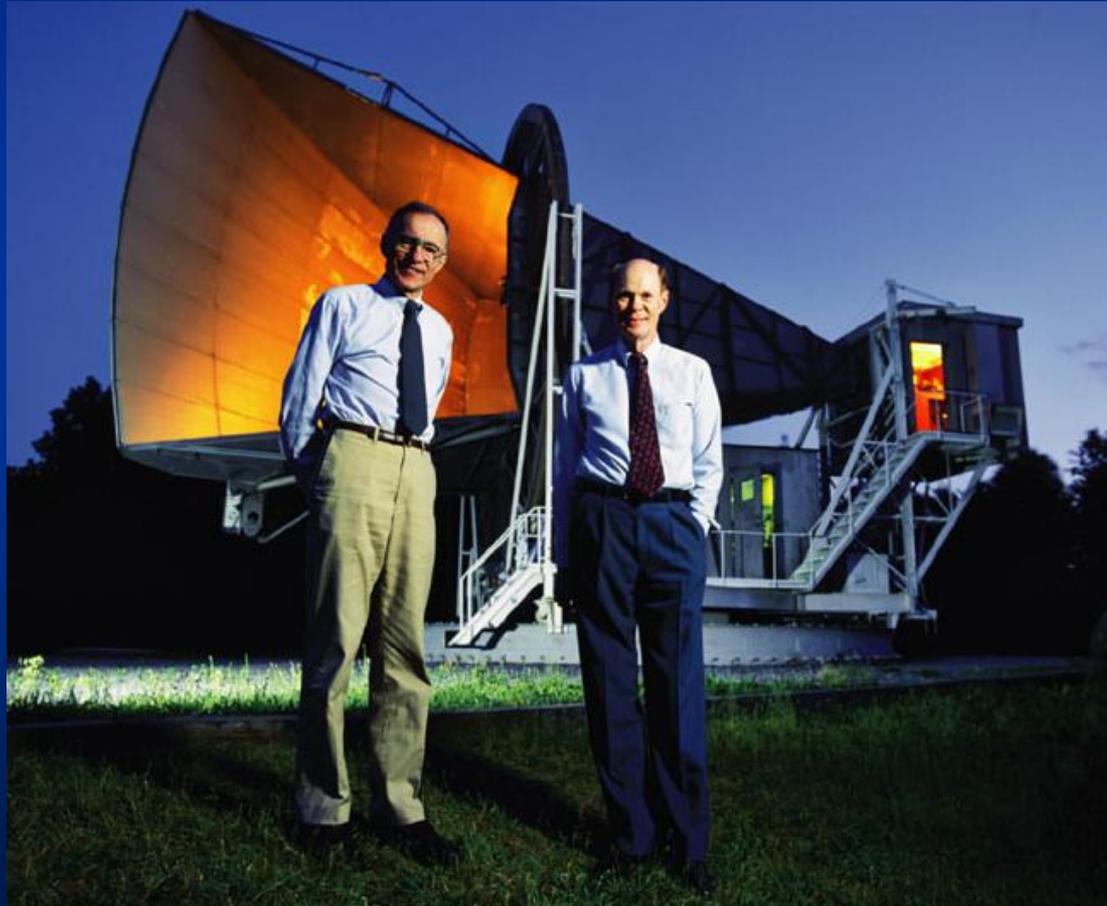
Es ist keine „Fluchtgeschwindigkeit“, die die Rotverschiebung z bestimmt, sondern der Skalenfaktor R des expandierenden Universums.

Lemaître kann damit als derjenige gelten, der den Urknall in die Kosmologie eingeführt hat.

Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos

1964 bestätigte die Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) durch Arno Penzias und Robert Wilson Lemaîtres Hypothese.

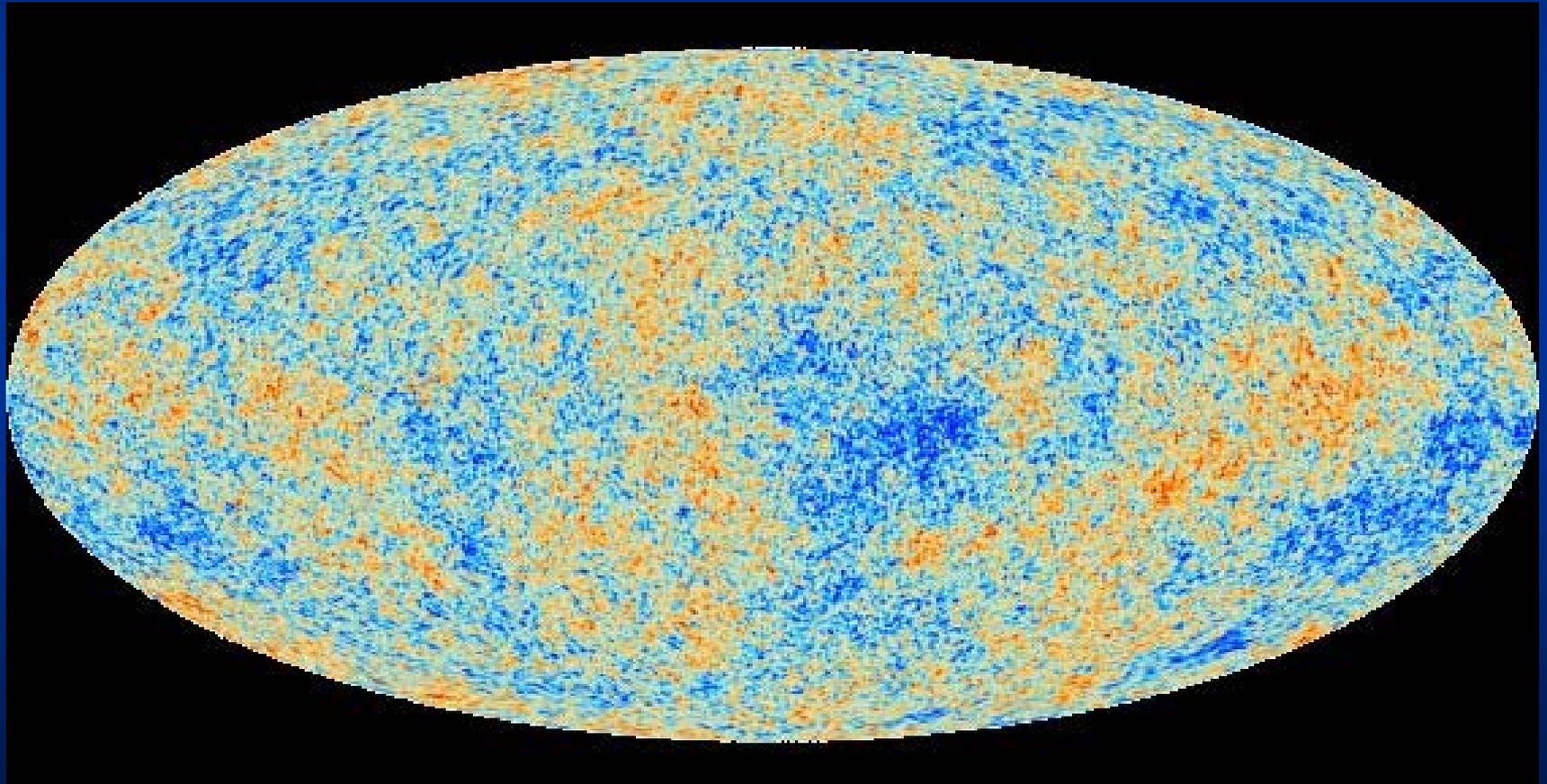


(Holmdel Horn Antenna, südlich von New York City)

Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos

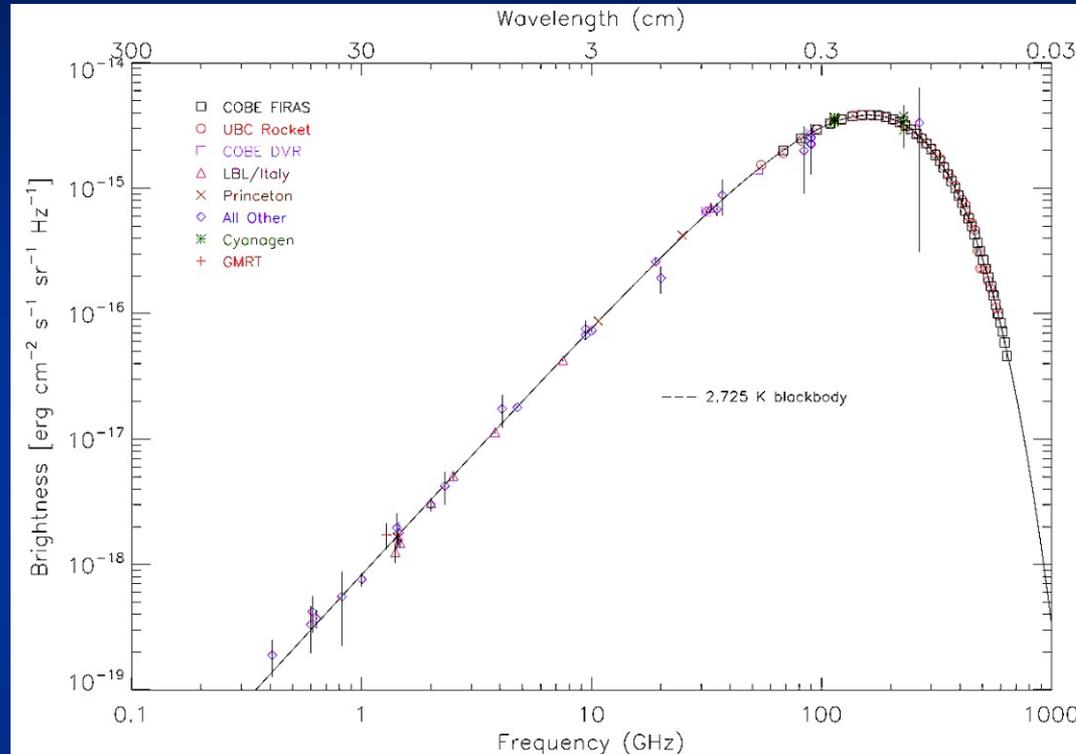
1964 bestätigte die Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) durch Arno Penzias und Woodrow Wilson Lemaîtres Hypothese.



(Satellit Planck 2013)

Expansion des Alls

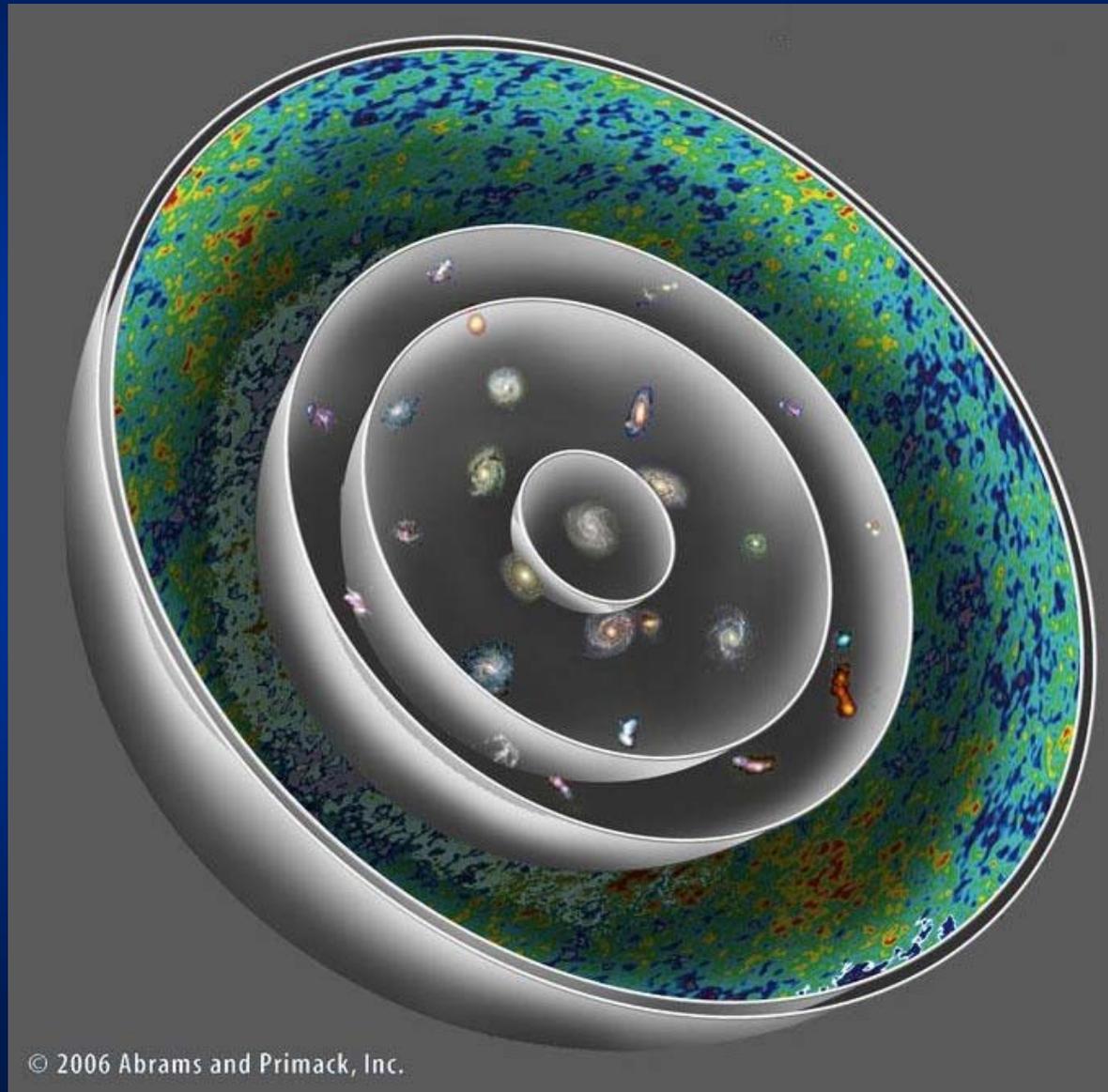
4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos



Die Mikrowellen-Hintergrundstrahlung (CMBR) entstand 379'000 a nach dem Urknall bei einer Temperatur von ca. 3000 K und zeigt heute das perfekte Spektrum einer Temperaturstrahlung von 2.72548 ± 0.00057 K. Dies entsteht jedoch nicht aufgrund einer Abkühlung, sondern infolge der Expansion des Raums.

Expansion des Alls

4. Georges Lemaître und die Expansion des Kosmos



© 2006 Abrams and Primack, Inc.

Expansion des Alls

5. Urknall und gebremste Expansion

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“

Expansion des Alls

5. Urknall und gebremste Expansion

Wird der Urknalls durch einen einmaligen Prozess ausgelöst, dann wird die folgende Expansion auf Grund der durch den Materieinhalt des Universums herrschenden Gravitation abgebremst sein.

Das Ausmaß der Abbremsung wird durch die Materiedichte ρ bestimmt. ρ_c ist dabei die kritische Dichte.

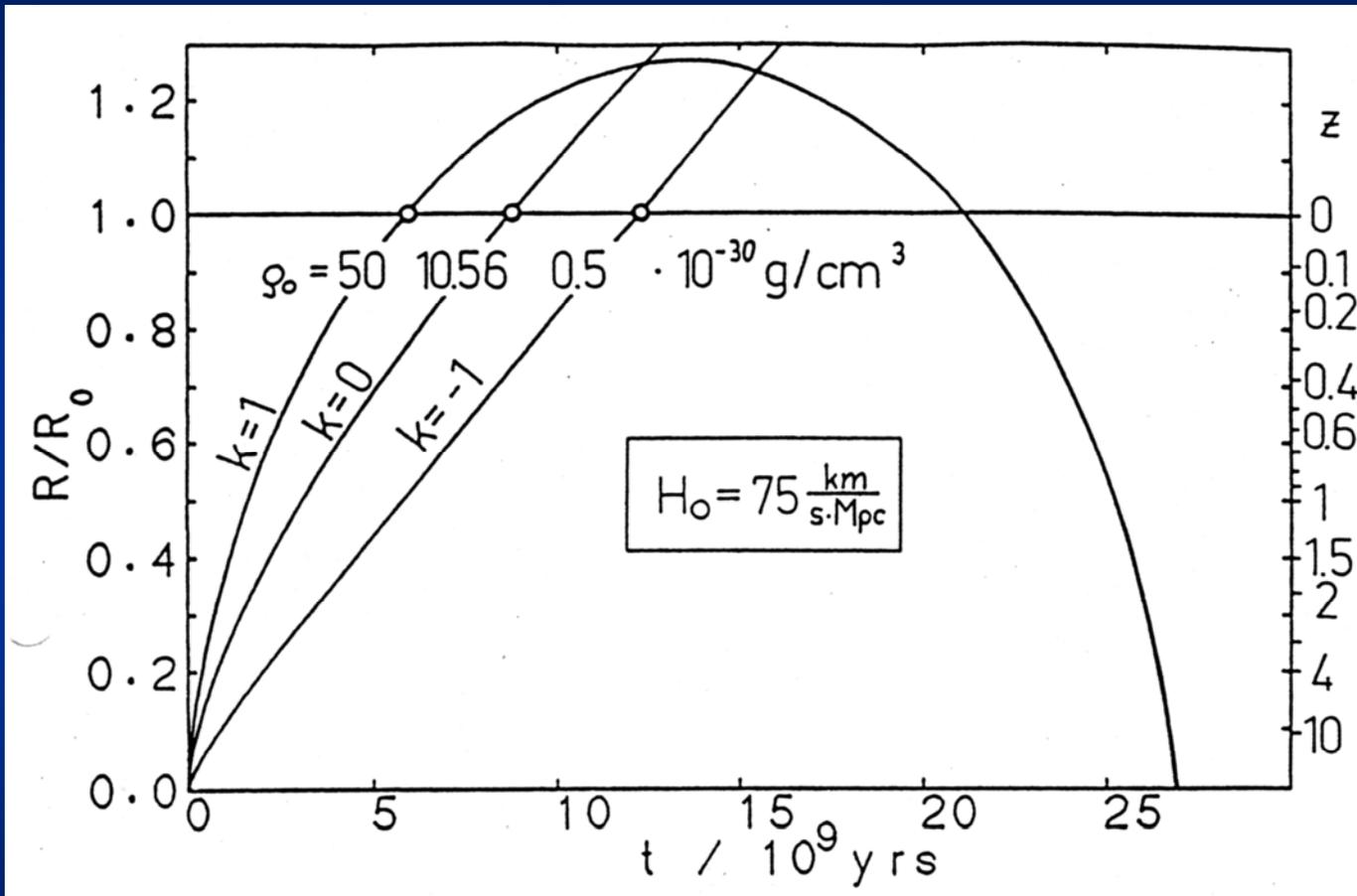
Ist $\rho = \rho_c$ ($k=0$), dann wird die Expansion nach unendlicher Zeit zum Stillstand kommen. Die Geometrie ist flach, offen, die Metrik parabolisch.

Ist $\rho < \rho_c$ ($k=-1$), dann geht die Expansion unendlich weiter. Die Geometrie ist unendlich, offen, die Metrik hyperbolisch.

Ist $\rho > \rho_c$ ($k=+1$), dann geht die Expansion nach einer maximalen Ausdehnung in eine Kontraktion über. Die Geometrie ist endlich, geschlossen, die Metrik sphärisch.

Expansion des Alls

5. Urknall und gebremste Expansion



Expansion (& Kollaps) des Kosmos im früheren Standardmodell

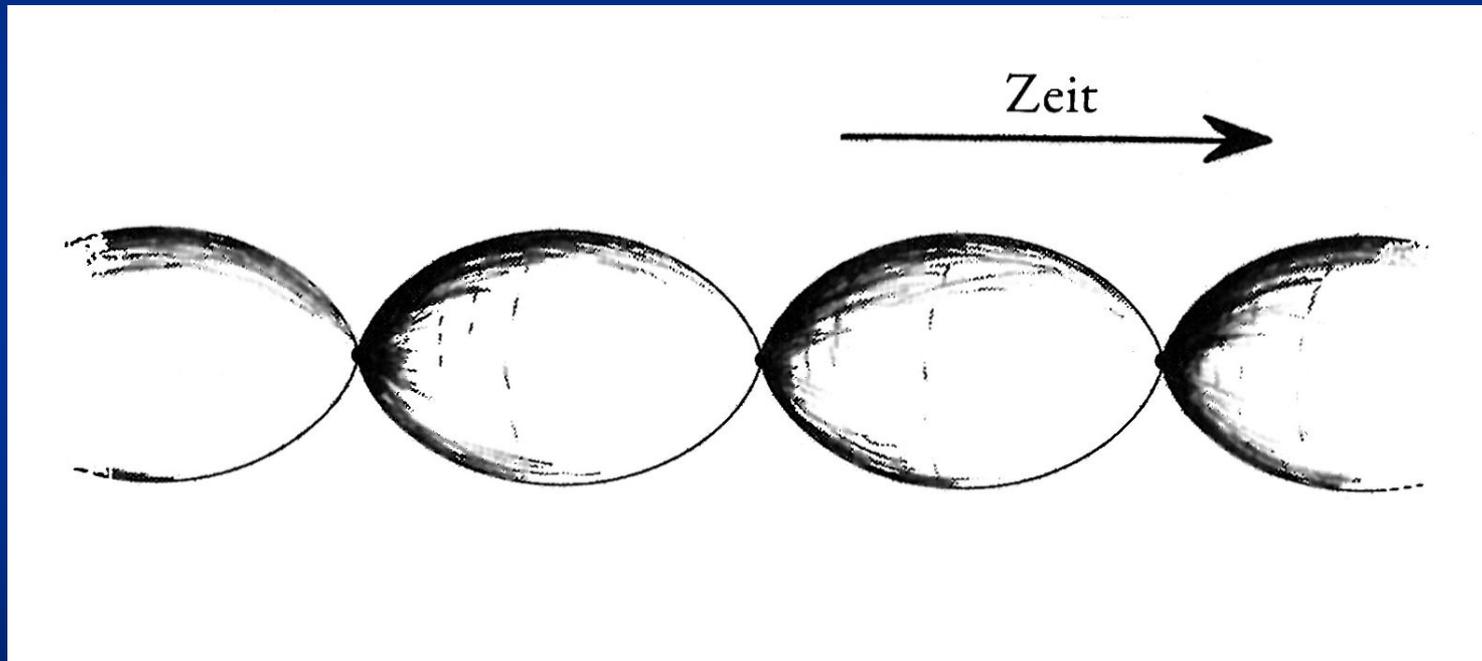
(Priester et al. 1987)

$k=0$ 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.

Expansion des Alls

5. Urknall und gebremste Expansion

Alexander Friedmann entwickelte 1922/24 auch oszillierende Weltmodelle:



Expansion des Alls

6. Inflation

Die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik beschreibt als exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine homogene, isotrope Expansion des Universums, die mit den Beobachtungsbefunden übereinstimmt.

homogen: Der mittlere Zustand ist ortsunabhängig.

isotrop: Der mittlere Zustand ist richtungsunabhängig.

Expansion des Alls

6. Inflation

Die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik beschreibt als exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine homogene, isotrope Expansion des Universums, die mit den Beobachtungsbefunden übereinstimmt.

Es gibt jedoch drei grundsätzliche Probleme:

1. Flachheitsproblem
2. Horizontproblem
3. Fehlende Magnetische Monopole

Expansion des Alls

6. Inflation

Die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik beschreibt als exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine homogene, isotrope Expansion des Universums, die mit den Beobachtungsbefunden übereinstimmt.

Es gibt jedoch drei grundsätzliche Probleme:

1. Flachheitsproblem

Die Geometrie des Universums ist extrem flach auf Skala von 10^{30} m:
Die Abweichung von der absoluten Flachheit ($\Omega = \rho/\rho_c = 1.0$) beträgt mit $\Omega_0 = 1.0005 \pm 0.0065$ weniger als 7‰.

2. Horizontproblem

3. Fehlende Magnetische Monopole

Expansion des Alls

6. Inflation

Die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik beschreibt als exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine homogene, isotrope Expansion des Universums, die mit den Beobachtungsbefunden übereinstimmt.

Es gibt jedoch drei grundsätzliche Probleme:

1. Flachheitsproblem

2. Horizontproblem

Die Laufzeit des Lichts zum "Horizont" der CMBR beträgt in beliebiger Himmelsrichtung 13.7 Mrd. a, was bedingt durch die in dieser Zeit abgelaufenen Expansion einer aktuellen Entfernung des Horizonts von jeweils 46 Mrd. Lichtjahren entspricht. Wechselwirkung ist zwischen diesen Bereichen innerhalb des Weltalters nicht möglich. Trotzdem beträgt die Schwankung der CMBR-Temperatur nur 2.72548 ± 0.00057 K.

3. Fehlende Magnetische Monopole

Expansion des Alls

6. Inflation

Die Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik beschreibt als exakte Lösung der Einsteinschen Feldgleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie eine homogene, isotrope Expansion des Universums, die mit den Beobachtungsbefunden übereinstimmt.

Es gibt jedoch drei grundsätzliche Probleme:

1. Flachheitsproblem

2. Horizontproblem

3. Fehlende Magnetische Monopole

Die GUT (Grand Unified Theory) postuliert die Bildung einer großen Zahl von extrem hochenergetischen (Masse: 10^{16} GeV/c²) Magnetischen Monopolen (Größe: 10^{-15} m) 10^{-36} s nach der Planck-Zeit, als die Temperatur noch 10^{28} K betrug. Diese sind jedoch heute nicht mehr zu nachzuweisen.

Expansion des Alls

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

Expansion des Alls

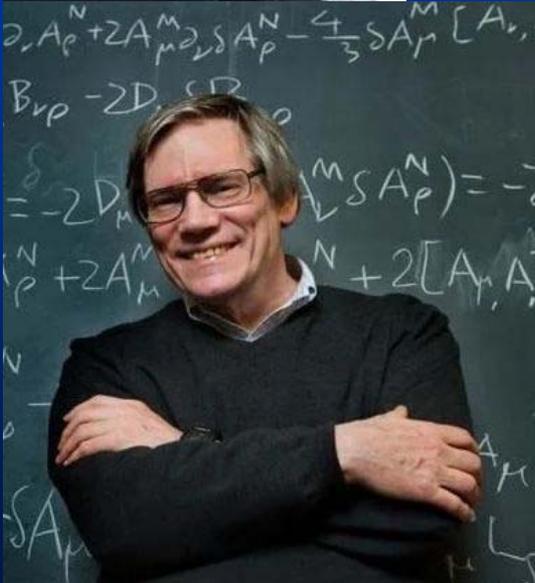
6. Inflation

Erste Ideen zur Lösung dieser Problematik lieferte Andrei Linde 1970.



(Andrei Linde
*1948,
Stanford 2008)

Alan Guth (*1947) griff diese Idee 1979 auf und entwickelte daraus 1981 die Theorie eines inflationären Universums.



PHYSICAL REVIEW D

VOLUME 23, NUMBER 2

15 JANUARY 1981

Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems

Alan H. Guth*

Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California 94305

(Received 11 August 1980)

The standard model of hot big-bang cosmology requires initial conditions which are problematic in two ways: (1) The early universe is assumed to be highly homogeneous, in spite of the fact that separated regions were causally disconnected (horizon problem); and (2) the initial value of the Hubble constant must be fine tuned to extraordinary accuracy to produce a universe as flat (i.e., near critical mass density) as the one we see today (flatness problem). These problems would disappear if, in its early history, the universe supercooled to temperatures 28 or more orders of magnitude below the critical temperature for some phase transition. A huge expansion factor would then result from a period of exponential growth, and the entropy of the universe would be multiplied by a huge factor when the latent heat is released. Such a scenario is completely natural in the context of grand unified models of elementary-particle interactions. In such models, the supercooling is also relevant to the problem of monopole suppression. Unfortunately, the scenario seems to lead to some unacceptable consequences, so modifications must be sought.

I. INTRODUCTION: THE HORIZON AND FLATNESS PROBLEMS

The standard model of hot big-bang cosmology relies on the assumption of initial conditions which are very puzzling in two ways which I will explain below. The purpose of this paper is to suggest a modified scenario which avoids both of these puzzles.

By "standard model," I refer to an adiabatically expanding radiation-dominated universe described by a Robertson-Walker metric. Details will be given in Sec. II.

completely described.

Now I can explain the puzzles. The first is the well-known horizon problem.²⁻⁴ The initial universe is assumed to be homogeneous, yet it consists of at least $\sim 10^{83}$ separate regions which are causally disconnected (i.e., these regions have not yet had time to communicate with each other via light signals).⁵ (The precise assumptions which lead to these numbers will be spelled out in Sec. II.) Thus, one must assume that the forces which created these initial conditions were capable of violating causality.

Expansion des Alls

6. Inflation

Das Modell des inflationären Universums beschreibt eine exponentielle Expansion des Universums in einem sehr frühen Zustand in der GUT-Ära ab 10^{-35} s bis 10^{-33} (10^{-30}) s. Der Ausdehnungsfaktor erreicht dabei 10^{26} , was der Ausdehnung von der Größe eines Protons bis auf 10 cm entspricht.

Manche Autoren gehen sogar von 10^{50} bis 10^{100} aus. Danach geht die Expansion mit der Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik weiter.

Die exponentielle Ausdehnung geschieht scheinbar mit erheblicher Überlichtgeschwindigkeit. Es bewegen sich jedoch keine Objekte in einer räumlichen Umgebung, sondern der Raum selbst dehnt sich aus. Daher ist die Spezielle Relativitätstheorie in diesem Fall nicht anwendbar.

Expansion des Alls

6. Inflation

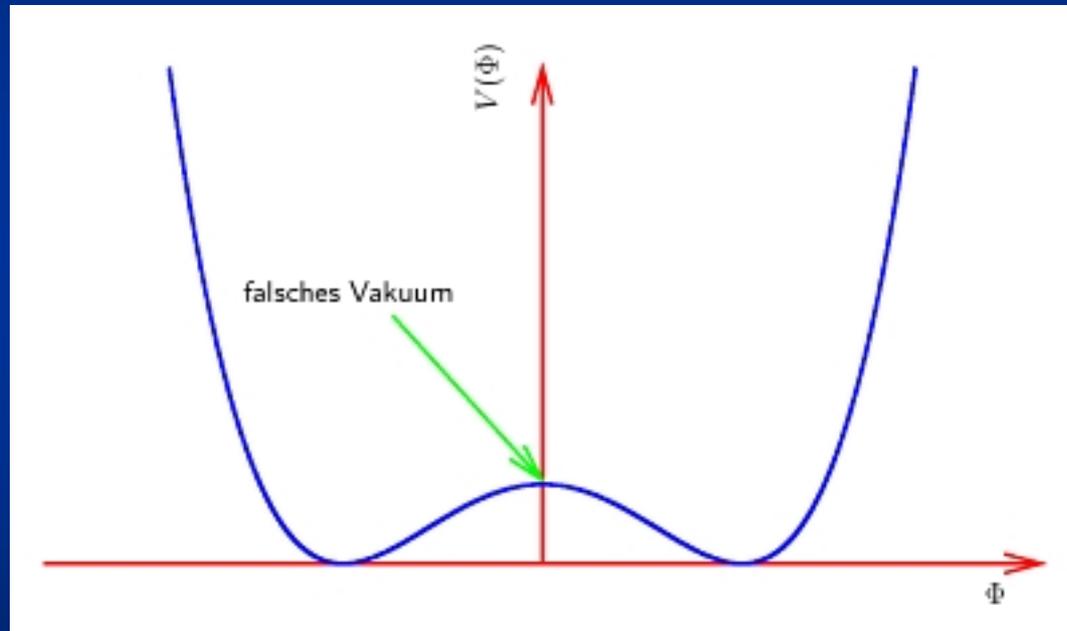
Das Modell des inflationären Universums ist in der Lage, die drei genannten Probleme zu lösen:

1. **Flachheit:** Selbst kleine Abweichungen von der Flachheit vor der Inflation werden durch die extreme Ausdehnung „weggeglättet“.
2. **Horizont:** Gebiete, die heute weit außerhalb ihrer Wechselwirkungsreichweiten liegen, lagen vor der Inflation innerhalb. Die Wechselwirkungsreichweite wird durch die Lichtgeschwindigkeit bestimmt, deren Konstanz als höchste Signalgeschwindigkeit unter allen Umständen Bestand hat. Dadurch wurde vor der Inflation eine Homogenisierung der Zustände bewirkt. Fluktuationen, genauer: Quantenfluktuationen, haben sich nach der Inflation in den geringen Variationen in der CMBR erhalten und haben zur Galaxienbildung beigetragen.
3. Die ursprünglich wohl hohe Dichte von Magnetischen Monopolen ist durch die extreme Ausdehnung auch extrem verdünnt worden, so dass sie heute nicht mehr auffindbar sind.

Expansion des Alls

6. Inflation

Die Inflation wurde ausgelöst, weil durch Quantenfluktuationen das Universum bei seiner Abkühlung in den Zustand eines falschen Vakuums geriet, in dem es niedrigere Energiezustände als das Vakuum gibt.

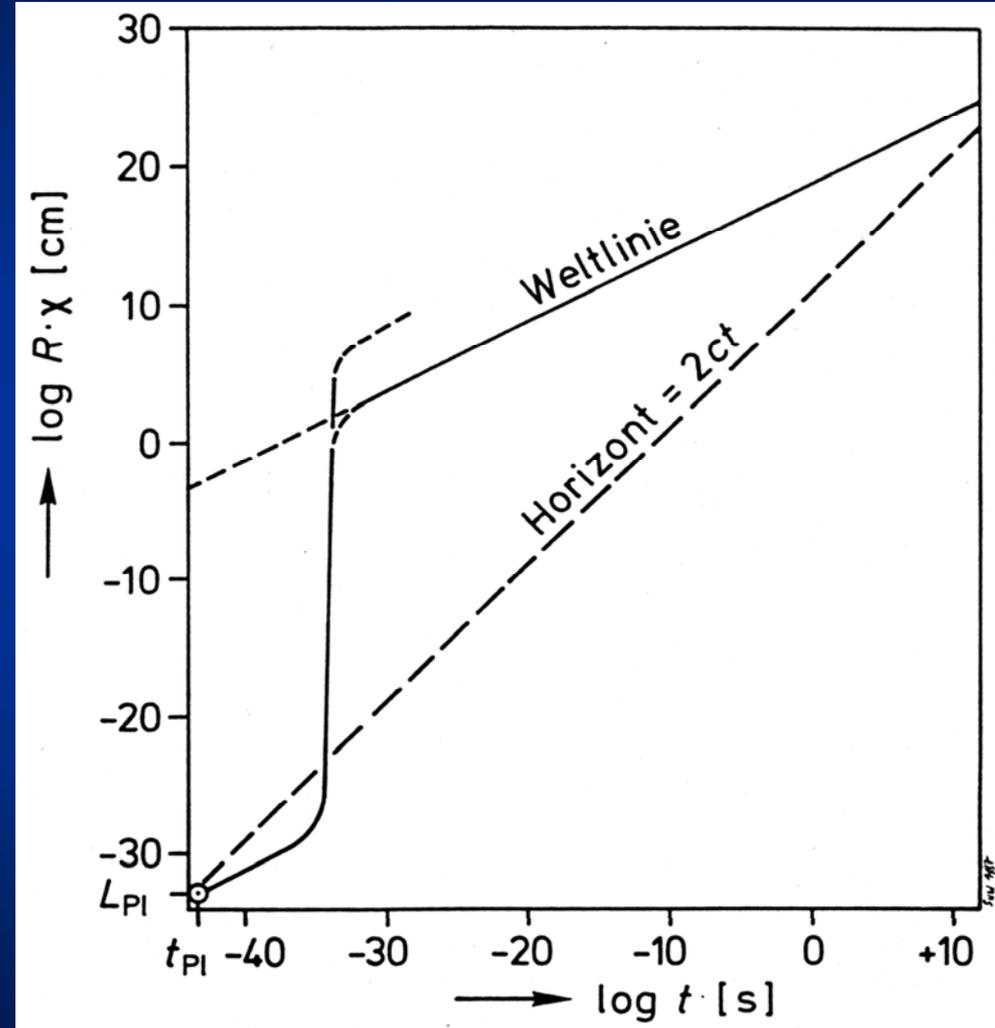


Hierbei entsteht ein negativer Druck, der nach der Allgemeinen Relativitätstheorie mit einer abstoßenden Kraft einhergeht, solange das falsche Vakuum besteht. Diese Kraft treibt die exponentielle Expansion der Inflation.

Expansion des Alls

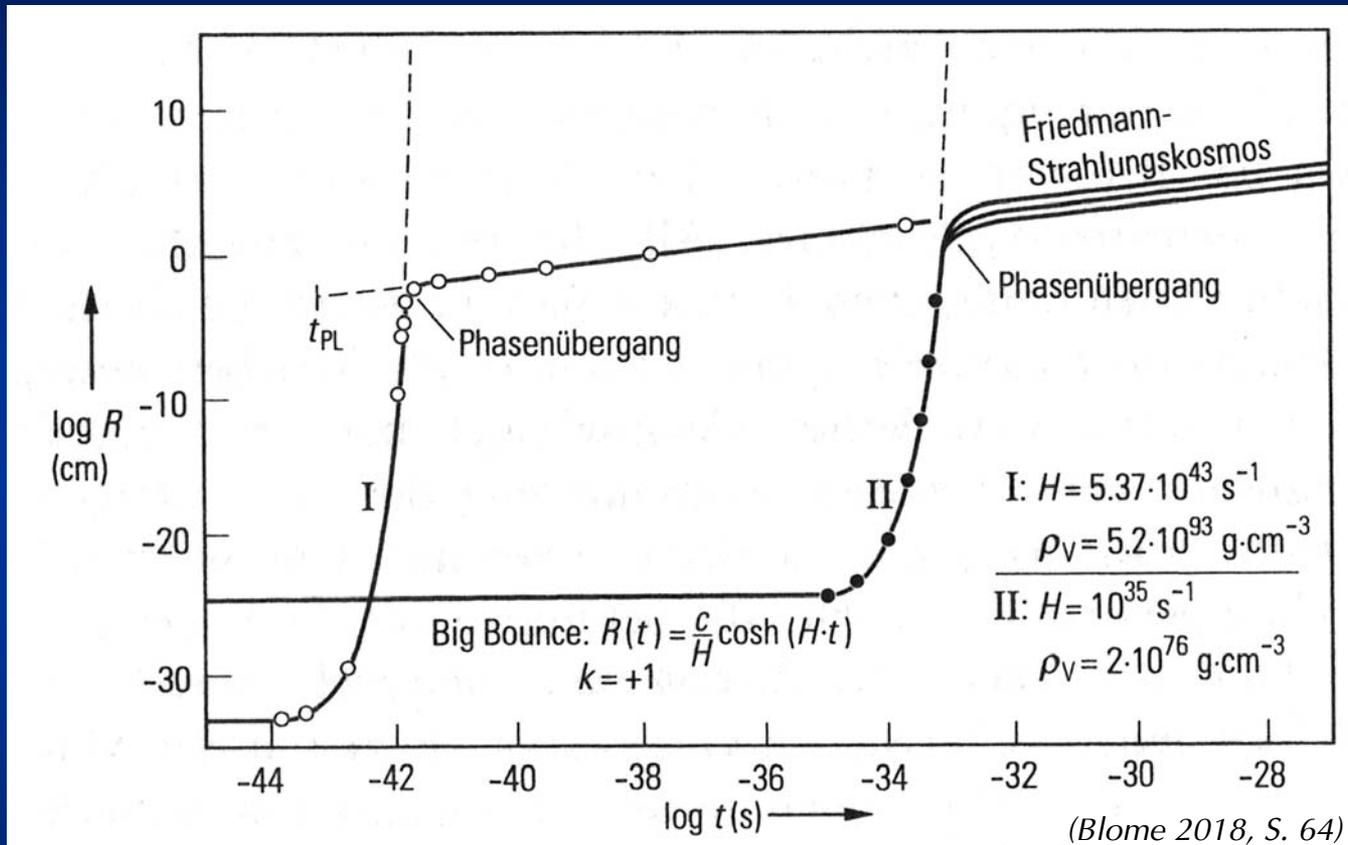
6. Inflation

Zwischen dem falschen und dem echten Vakuum gibt es für das gesamte Universum einen immensen Energieunterschied, der in dem so genannten Inflatonfeld gespeichert ist. Diese Energiemenge wird in einem Phasenübergang in das Higgs-Feld umgesetzt, das Universum kommt damit durch den Übergang in das echte Vakuum in sein energetisches Minimum, die Inflation ist zu Ende und die Expansion folgt wieder der Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker-Metrik.



Expansion des Alls

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.

Expansion des Alls

6. Inflation

Zum Begriff des Vakuums:

„Bürgerlich“ versteht man darunter eine absolute Leere. In der Physik ist dieser Zustand in der realen Welt weder vorhanden noch irgendwo erzielbar.

Quantenphysikalisch ist jedoch auch ein materie- und strahlungsfreies Vakuum kein Zustand ohne Energie. Sondern das Vakuum ist erfüllt von Vakuumenergie. Und es gibt verschiedene Experimente von Elementarteilchenphysik und Quantenfeldtheorie, die die Existenz der Vakuumenergie bestätigen. Strittig ist ihre Größe.

Quantenphysikalische Berechnungen ergeben

Vakuumenergiedichte: $w_v = 7.67 \cdot 10^{113} \text{ J/m}^3$ oder äquivalent: $\rho_v = 10^{94} \text{ g/cm}^3$

Kosmologische Abschätzungen führen dagegen zu

Vakuumenergiedichte: $w_v = 5.24 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$ oder äquivalent: $\rho_v = 6.83 \cdot 10^{-30} \text{ g/cm}^3$

Aktuell ist in einer Mine auf Sardinien das Archimedes-Experiment im Aufbau, mit dem dieser Wert bestimmt werden soll.

Expansion des Alls

6. Inflation

Eine Besonderheit der Vakuumenergie ist, dass sie durch die Expansion des Universums nicht verdünnt wird, sondern konstant bleibt. Ihre Bedeutung gegenüber den anderen Energieformen und der Materie nimmt somit im Laufe der Expansion zu, da sich die anderen Komponenten mit der Ausdehnung des Raums verdünnen.

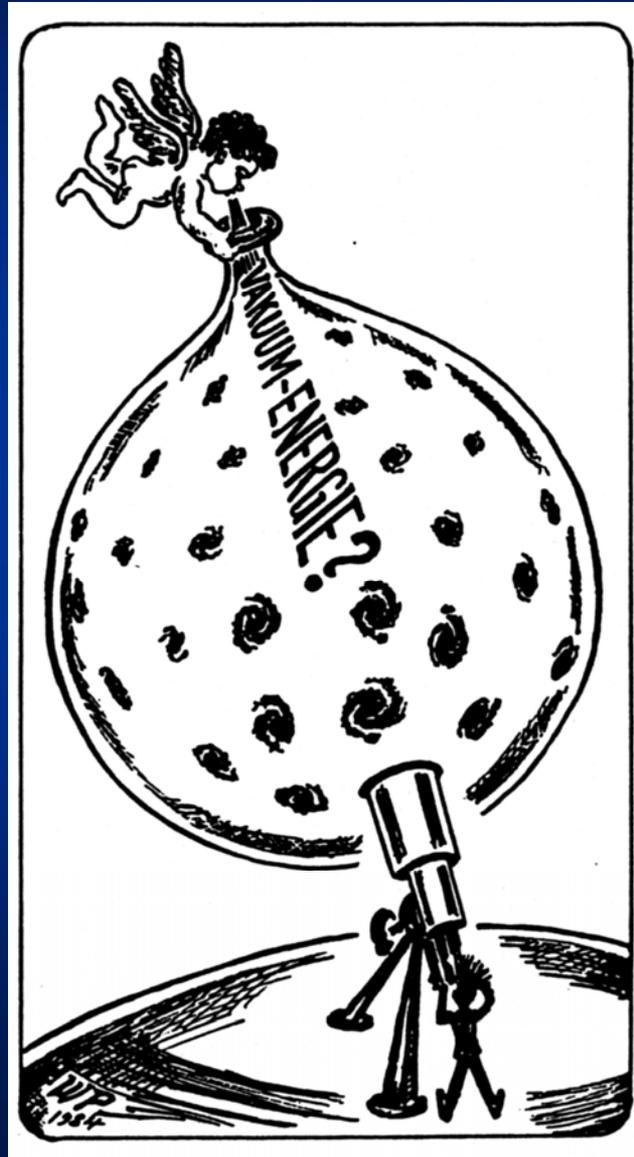
Die kosmologische Konstante Λ wird in diesem Zusammenhang als Ausdruck der Vakuumenergiedichte interpretiert, das ρ_v oder ρ_Λ als äquivalente Materiedichte der Vakuumenergie.

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

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

Expansion des Alls

Das große Geheimnis



(Wolfgang Priester 1984)

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

Supernova-Ausbrüche des Typs SNIa finden statt, wenn in einem Doppelstern-System Materie von z.B. einem Roten Riesen auf den zweiten Stern, der schon zu einem Weißen Zwerg (mit Hauptbestandteilen C und O) geworden ist, überströmt und dieser dann irgendwann die Chandrasekhar-Grenze von 1.457 Sonnenmassen überschreitet.

Zuvor hatten erneute thermonukleare Prozesse an seiner Oberfläche stattgefunden, die den Weißen Zwerg schrumpfen lassen. Die Dichte im Zentrum steigt von ca. 3 t/cm³ auf >1000 t/cm³, der Stern wird instabil, und erneute Kernfusion in seinem Zentrum führt zu einer thermonuklearen Explosion, die den Stern vollständig zerreißt.

Da dieser Prozess unter klar definierten Bedingungen stattfindet, ergibt sich für diese Explosionen eine klar definierte, große absolute Helligkeit. Andere Theorien gehen vom Zusammensturz zweier Weißer Zwerge oder vom schnellen Zerfall von ⁵⁶Ni in ⁵⁶Co im Kern eines Weißen Zwerge aus. Unabhängig davon eignen sich diese Supernovae gut als „Standardkerzen“ zur Bestimmung der Entfernung von Galaxien.

Expansion des Alls

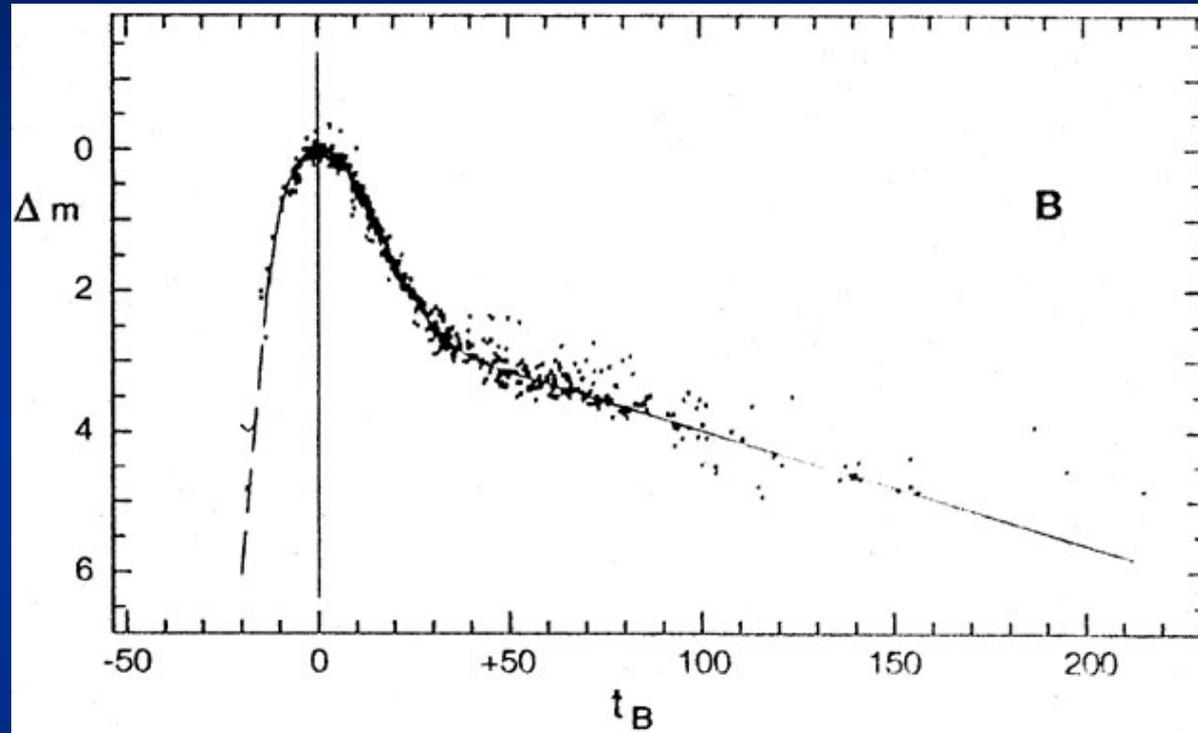
7. Supernovae und die beschleunigte Expansion



**SN1998bu in der Galaxie M96, $d=160$ Mio. Lj
vor, im und nach dem Ausbruch**
(Nicholas Suntzeff, CTIO/AURA/NSF)

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

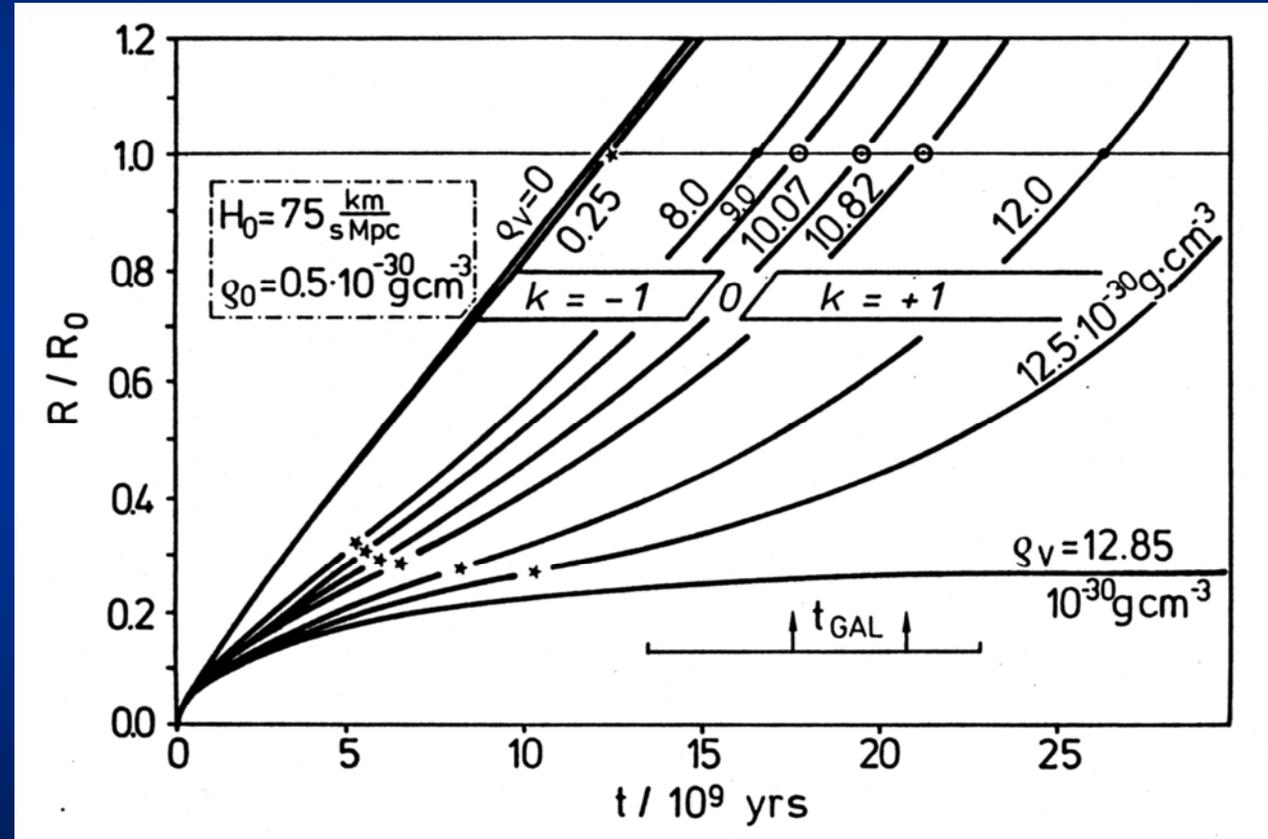


Lichtkurve mehrerer SNIa im Blauen

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

Die Beobachtung dieser Supernova-Ausbrüche ermöglicht es, den Hubble-Parameter über kosmologische Distanzen zu bestimmen und eine Entscheidung über den Expansionsverlauf zu treffen.



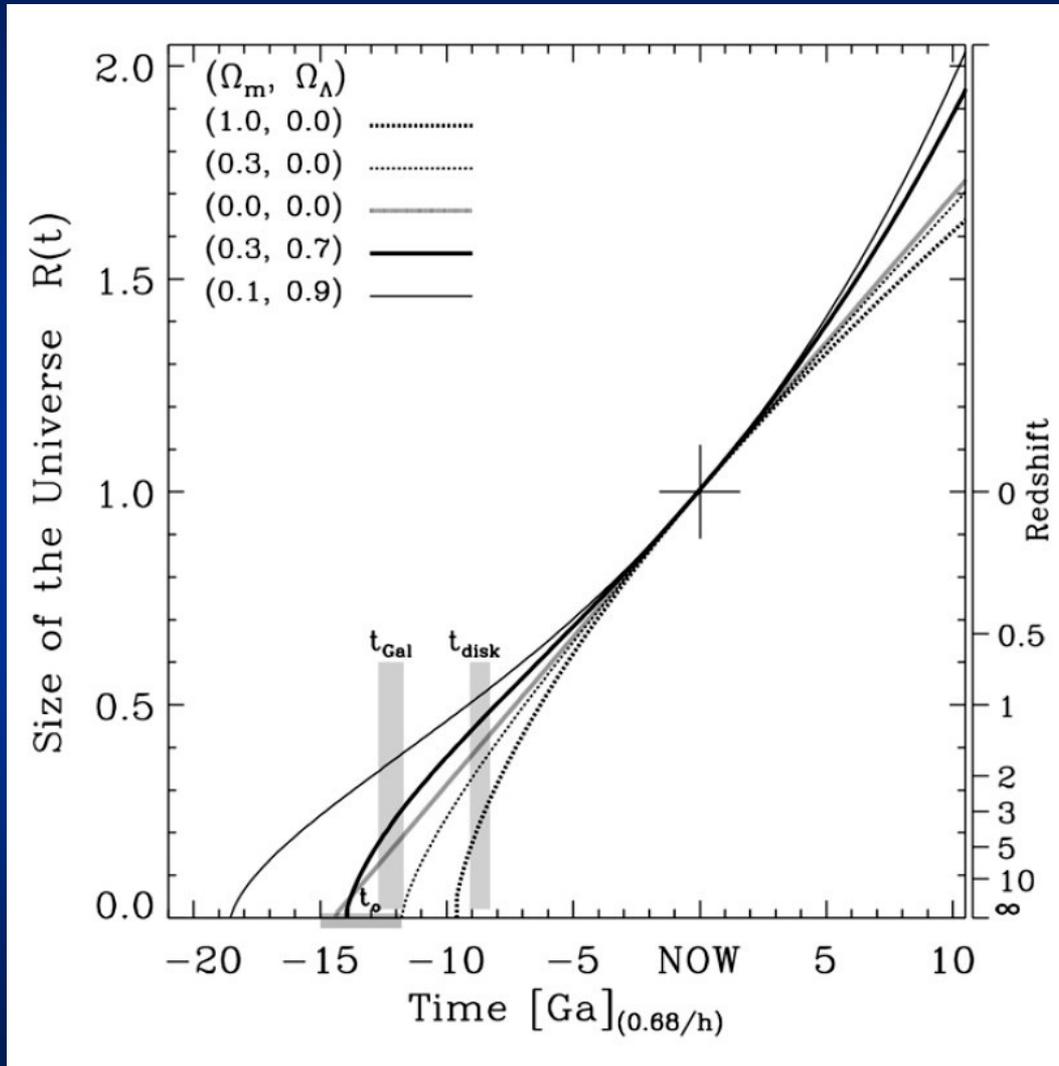
Expansion des Kosmos in Friedmann-Lemaître-Modellen

[Änderung des Hubble-Parameters H_0 ändert im wesentlichen die Zeitachse!]

(Priester et al. 1987)

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

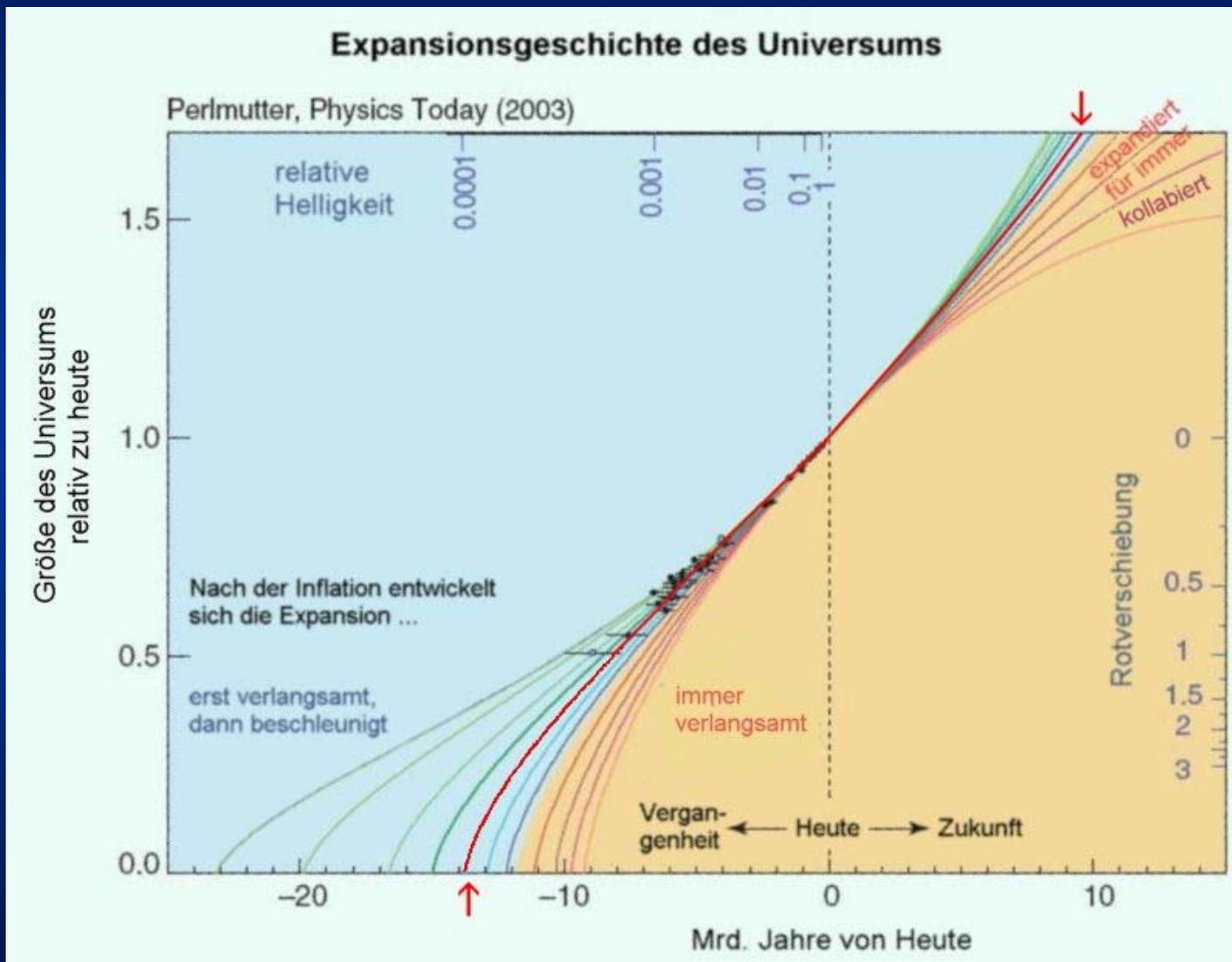


Expansionsgeschichte des Universums

(Lineweaver, Science 284, 150 (1999))

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion



Expansionsgeschichte des Universums

Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

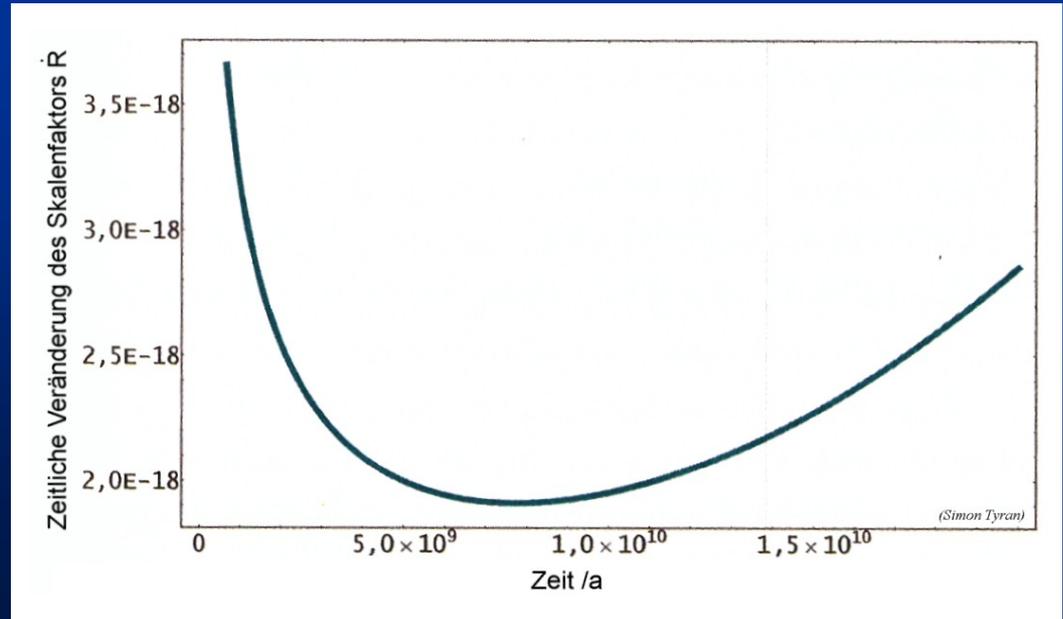
Auf die Materie-dominierte Ära folgt bei $10.33 \cdot 10^9$ a die Λ -dominierte Ära:

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

gebremste Expansion \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.



Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion

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

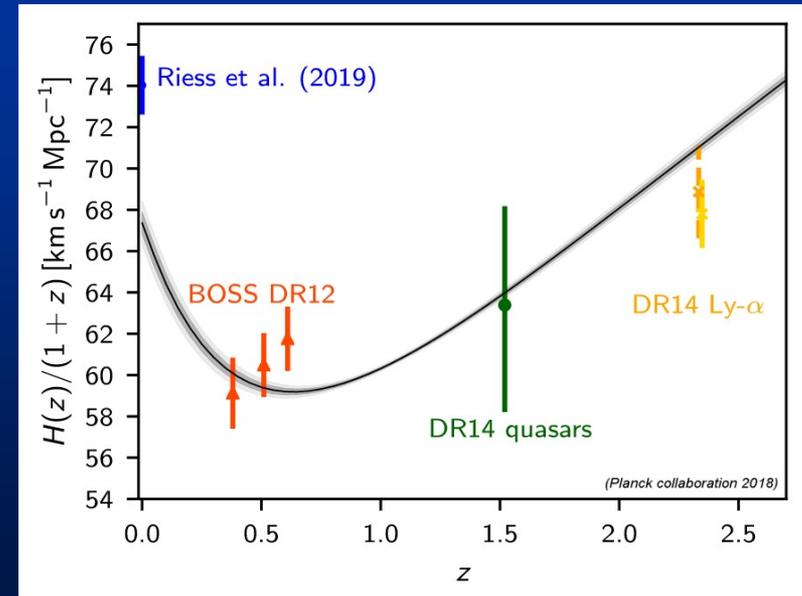
$$H^2 \sim \frac{\Lambda c^2}{3} \Rightarrow \dot{R} \sim e^{\sqrt{\frac{\Lambda c^2}{3}} t}$$

gebremste Expansion \Rightarrow beschleunigte Expansion

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

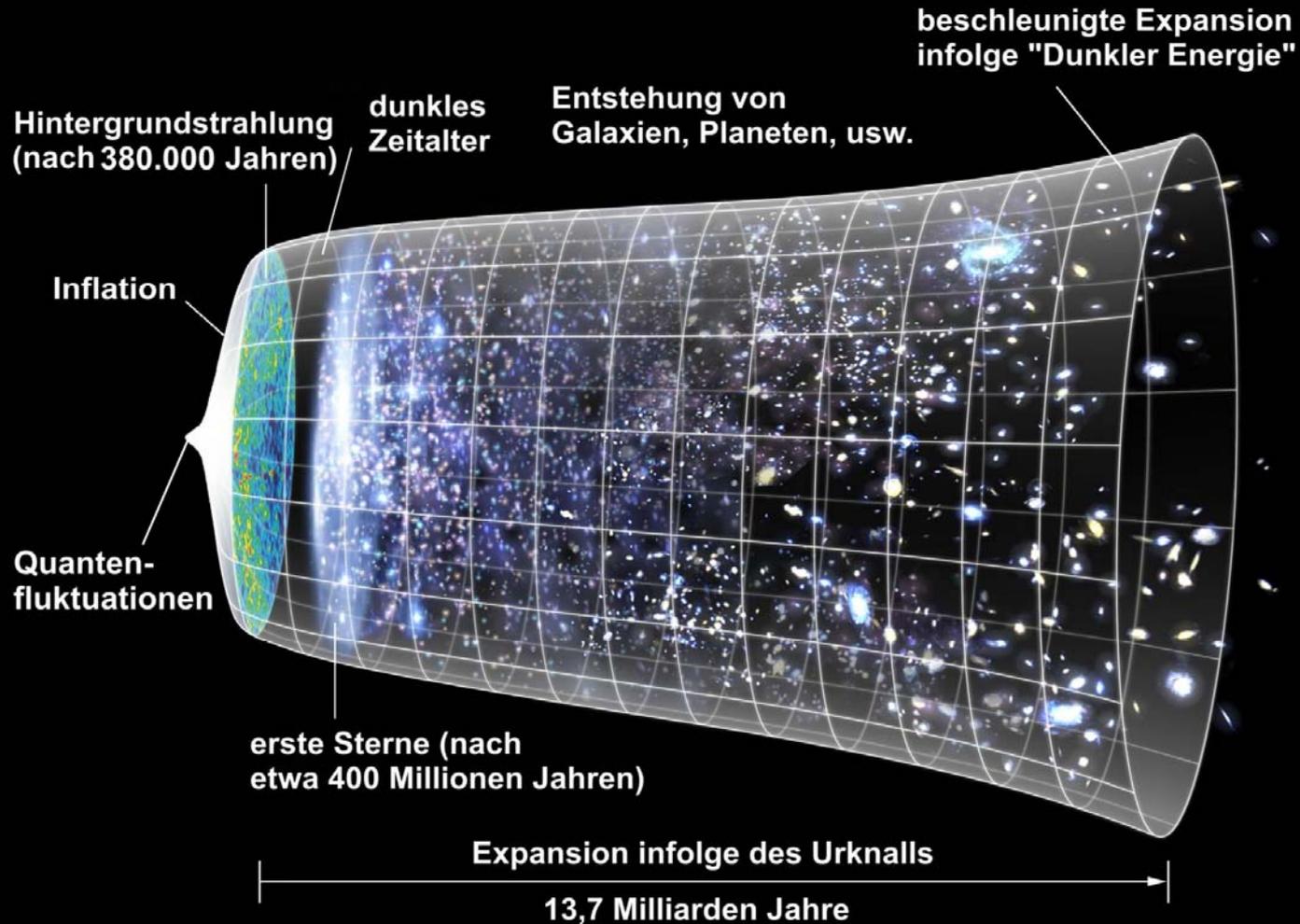
Messergebnis von Planck (2018)

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



Expansion des Alls

7. Supernovae und die beschleunigte Expansion



Expansion des Alls

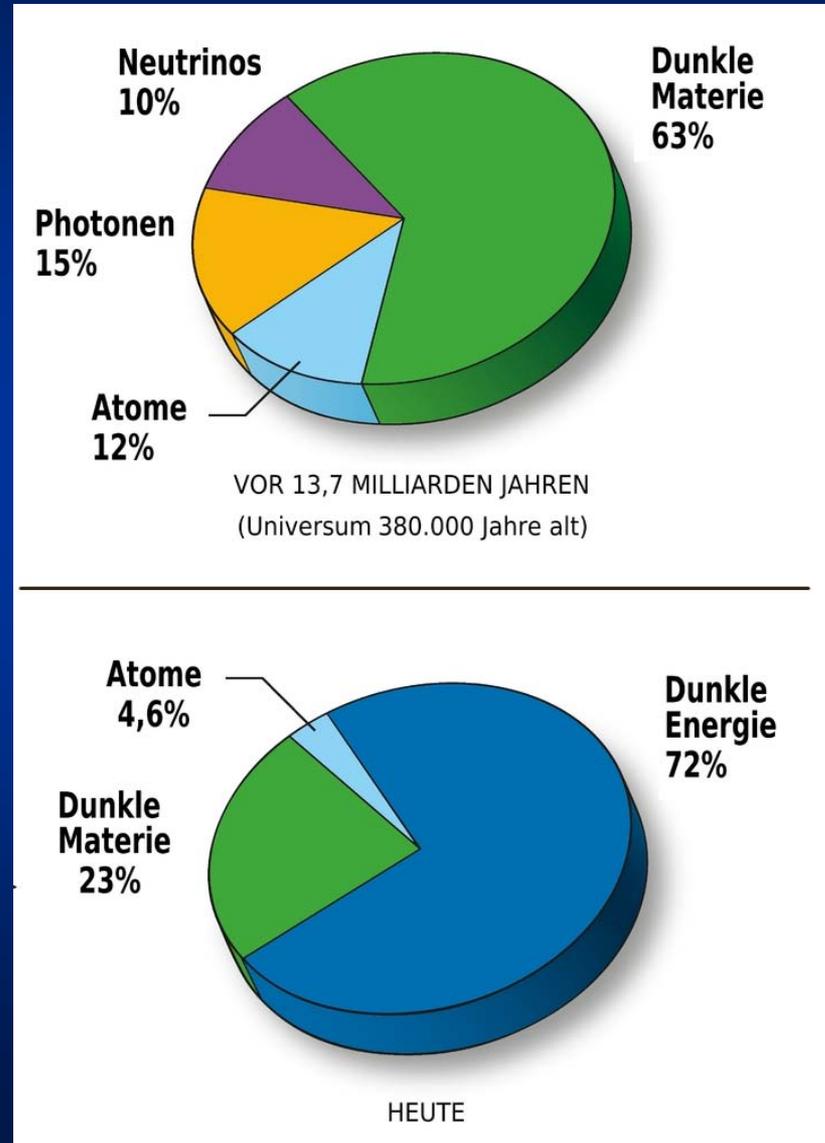
8. Die Kraft der Dunklen Energie

Der Begriff "Dunkle Energie" wurde 1998 von Michael S. Turner geprägt, eine hypothetische Form der Energie, eingeführt als Verallgemeinerung der kosmologischen Konstanten Λ .

Am Anfang der Expansion spielte die Dunkle Energie bzw. die kosmologische Konstante noch keine Rolle.

Im Laufe der Expansion ist sie jedoch zur bestimmenden Kraft geworden, von der angenommen wird, dass sie die Beschleunigung der Expansion antreibt.

In der Energie-/Materiebilanz des Universums stellt sie heute den weitaus größten Anteil.



(nach Wikipedia)

Expansion des Alls

8. Die Kraft der Dunklen Energie

Unterscheidung

- **Geometrie / Metrik:** nach Krümmung (k-Parameter)
- **Kinematik:** statisch, expandierend, kollabierend
- **Dynamik:** nach Friedmann-Lemaître-Gleichungen
- **Krümmung: $k = -1; 0; +1$**
 - $\Lambda < 0$
 - $\Lambda = 0$
 - $0 < \Lambda < \Lambda_{\text{Einstein}}$
 - $\Lambda = \Lambda_{\text{Einstein}}$ (**Einsteins Annahme**)
 - $\Lambda > \Lambda_{\text{Einstein}}$

Expansion des Alls

8. Die Kraft der Dunklen Energie

In Friedmann-Lemaître-Universen mit

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

überwiegt anfangs die Gravitation \Rightarrow Abbremsung
dann überwiegt die Λ -Kraft (Dunkle Energie) \Rightarrow Beschleunigung

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

Derzeit wird $\Lambda = 1.27 \cdot 10^{-46} \text{ m}^{-2}$ angenommen.

Die Lösung der Frage nach der Natur der Dunklen Energie ist eines der zentralen Anliegen der heutigen Kosmologie und eine entscheidende Information über den Inhalt unseres Universums.

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

Ausblick in die Zukunft

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

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

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

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

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

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.

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

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.

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

Ausblick in die Zukunft

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

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

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

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

3. 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)

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

Die mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie entwickelten Friedmann-Gleichungen:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{Kc^2}{a^2} \quad \text{und} \quad \frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3\frac{p}{c^2}\right)$$

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

Expansion des Alls

9. Eine Expansion ins Dunkel

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

Expansion des Alls

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)

Expansion des Alls

Schlussbemerkungen

»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

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



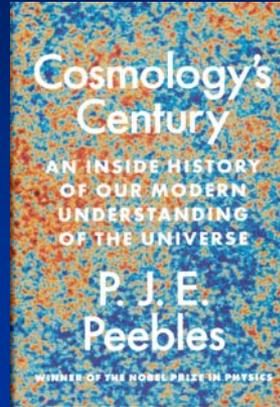
343 S., 2009

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

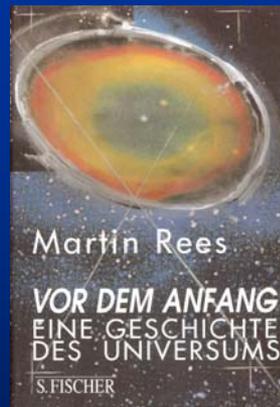


350 S., 2010

Beschreibung der Conformal Cyclic Cosmology (CCC) von ihrem Entwickler



404 S., 2020



352 S., 1997



216 S., 1998



216 S., 1994



128 S., 2018



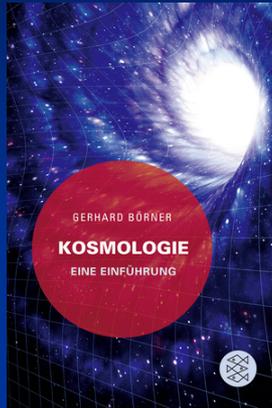
272 S., 1999

Kosmologie

Literaturauswahl



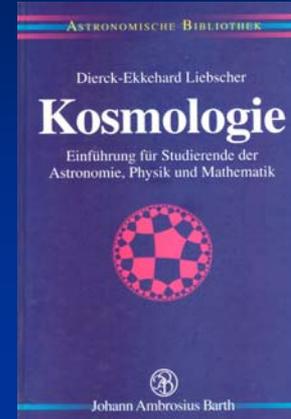
239 S., 1991



128 S., 2011



259 S., 1998



252 S., 1994



658 S., 1983



208 S., 1985