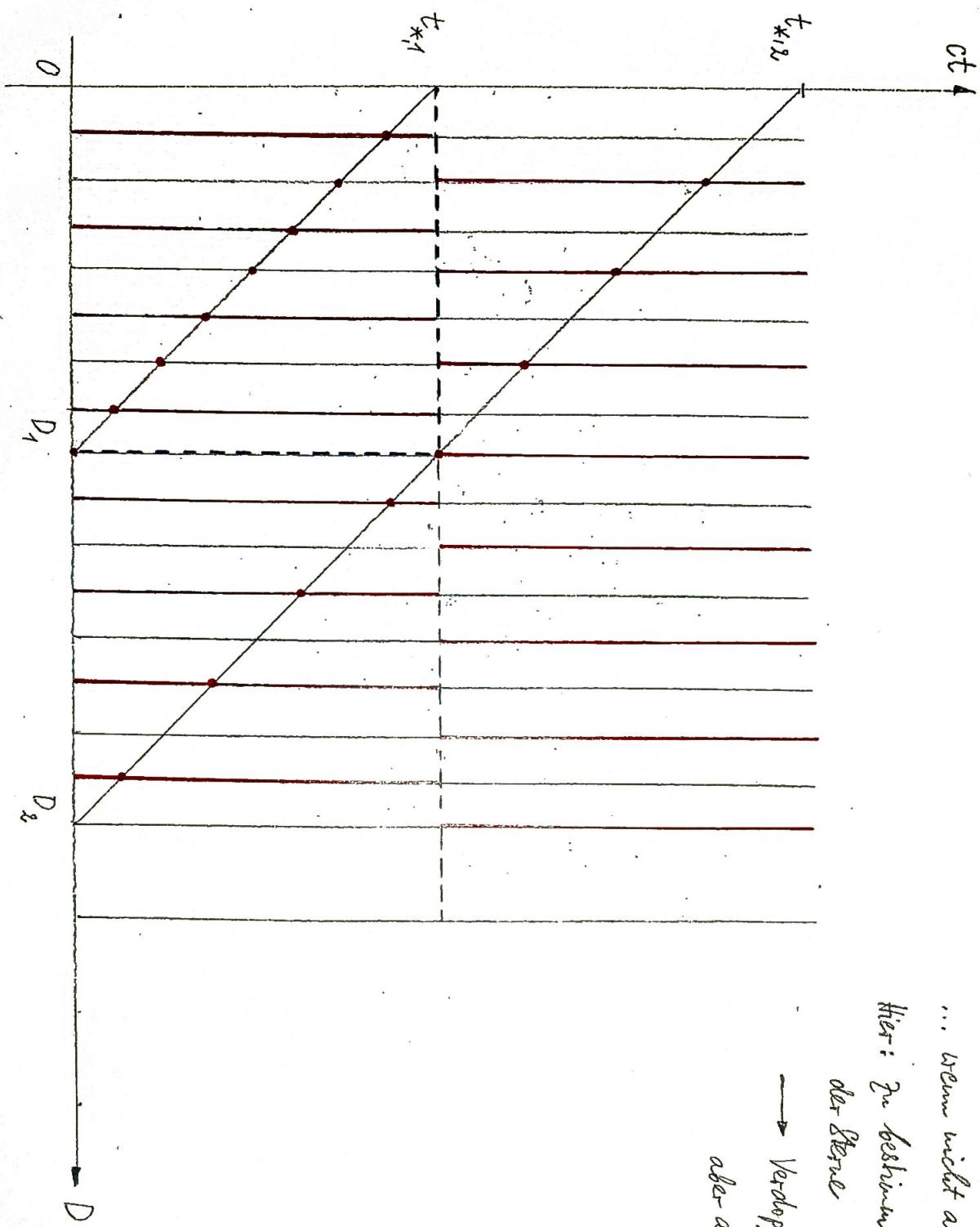


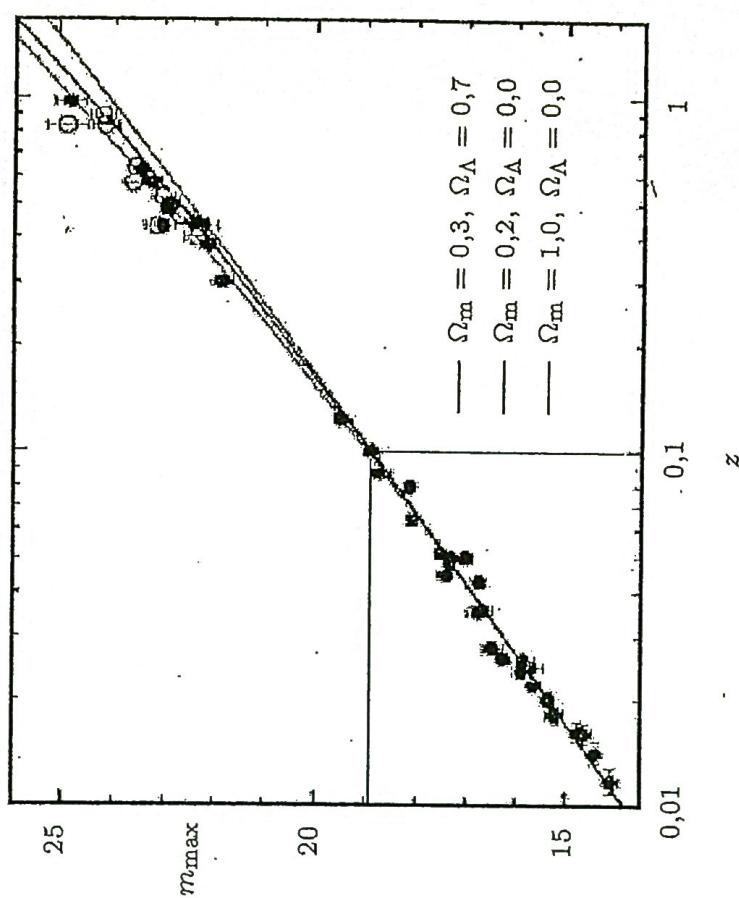
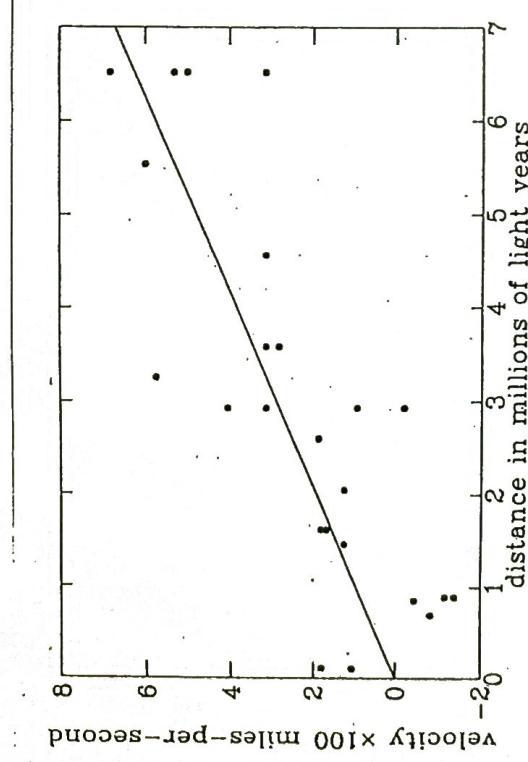
Zum Albers - „Paradoxon“



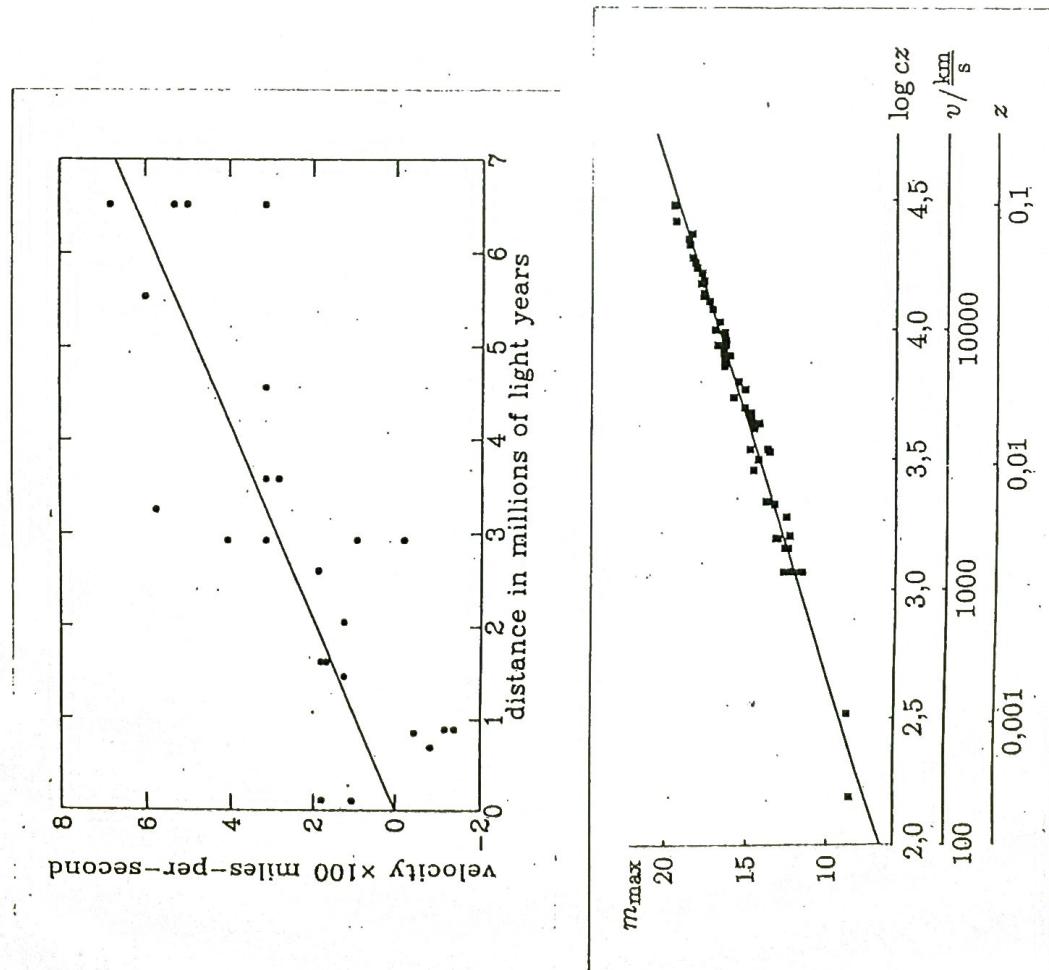
... Wenn nicht alle Sterne gleichzeitig leuchten.
Hier: Zu bestimmter Zeit leuchtet nur die Hälfte
der Sterne

→ Verdopplung der Rückblick-Distanz,
aber auch der Gesamt-Leuchtdauer

Das Hubble-Diagramm mit kleinen Rotverschiebungen



Das Hubble-Diagramm für Supernovae Ia mit großen Rotverschiebungen



Teilchenhorizont, Hubble-Kugel und Lichtkegel
in einem Einstein-de Sitter-Universum

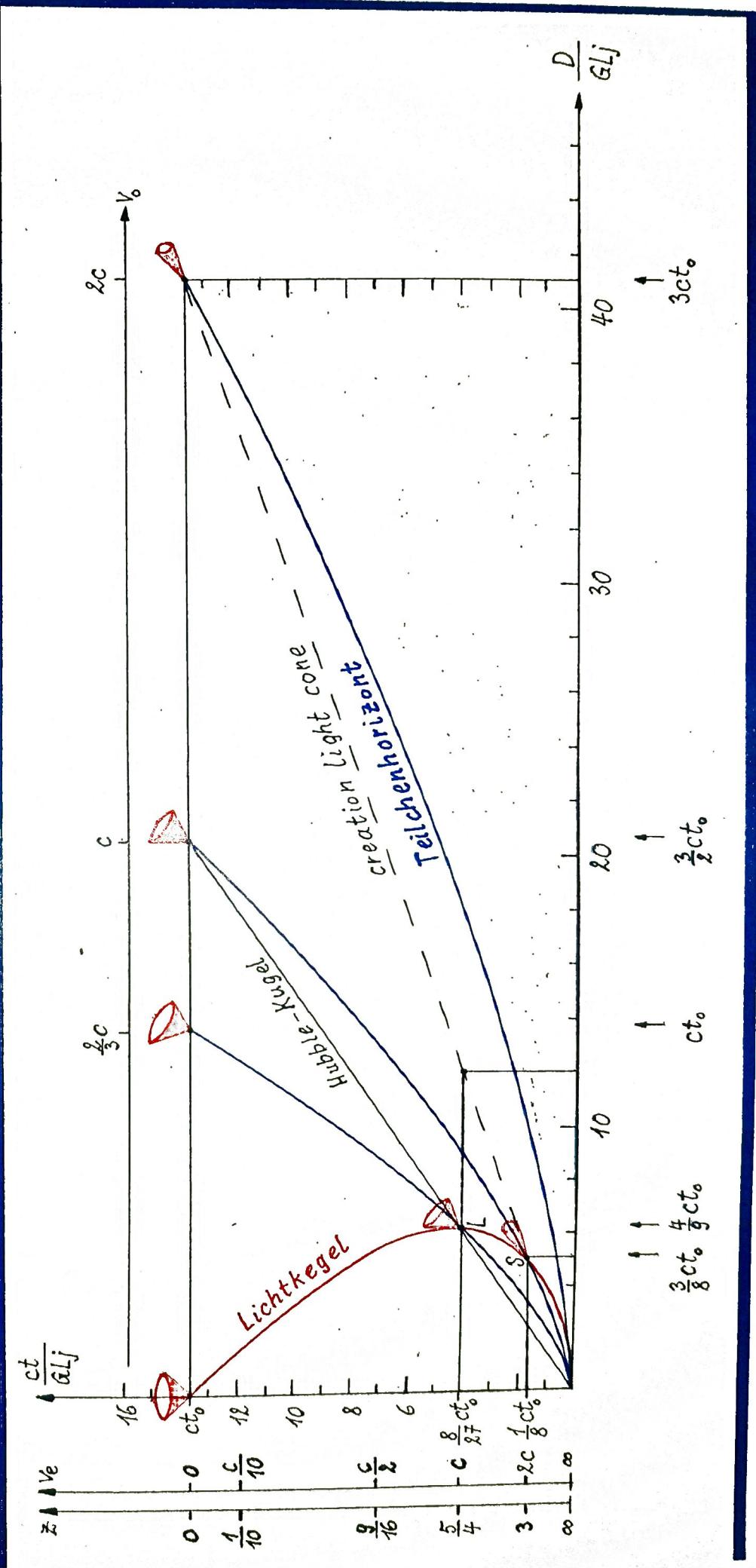
Nach ein Teilchenhorizont existiert,
dann handelt es sich um eine
Kugel um den Beobachter, die
das Universum in 2 Teile
teilt.

Hubble - Kugel + Teilchenhorizont

seit der
sichtbar

$$\text{Licht-} \text{,Kegel": } D = 3ct^{2/3} \left(t_0^{1/3} - t^{1/3} \right)$$

$$\text{Galaxien-Weltlinien: } D \propto (ct)^{2/3}$$



KOSMOLOGIE

Die ROBERTSON-WALKER-Metrik

- Das Linienelement

$$ds^2 = a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - \varepsilon r^2} + r^2 (\mathrm{d}\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \mathrm{d}\varphi^2) \right] - c^2 dt^2$$

- Die Koordinaten

$$x^1 \equiv r, \quad x^2 \equiv \vartheta, \quad x^3 \equiv \varphi, \quad x^4 \equiv ct$$

- Der metrische Tensor

$$g_{11} = \frac{a^2}{1 - \varepsilon r^2}, \quad g_{22} = a^2 r^2, \quad g_{33} = a^2 r^2 \sin^2 \vartheta, \quad g_{44} = -1$$

- Die CHRISTOFFEL-Symbole

Der Punkt bedeutet die Ableitung nach der Koordinatenzeit t . Griechische Indizes laufen von 1 bis 3.

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}^1 &= \frac{\varepsilon r}{1 - \varepsilon r^2}, & \Gamma_{22}^1 &= -r(1 - \varepsilon r^2), & \Gamma_{33}^1 &= -r(1 - \varepsilon r^2) \sin^2 \vartheta \\ \Gamma_{14}^1 &= \Gamma_{41}^1 = \frac{1}{c} \frac{\dot{a}}{a}, & & & & \\ \Gamma_{12}^2 &= \Gamma_{21}^2 = \frac{1}{r}, & \Gamma_{33}^2 &= -\sin \vartheta \cos \vartheta, & \Gamma_{24}^2 &= \Gamma_{42}^2 = \frac{1}{c} \frac{\dot{a}}{a} \\ \Gamma_{13}^3 &= \Gamma_{31}^3 = \frac{1}{r}, & \Gamma_{23}^3 &= \Gamma_{32}^3 = \cot \vartheta, & \Gamma_{34}^3 &= \Gamma_{43}^3 = \frac{1}{c} \frac{\dot{a}}{a} \\ \Gamma_{\alpha\beta}^4 &= \frac{1}{c} \frac{\dot{a}}{a} g_{\alpha\beta} & & & & \end{aligned}$$

- Der RICCI-Tensor

$$R_{\mu\nu} = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\ddot{a}}{a} + 2 \frac{\varepsilon c^2 + \dot{a}^2}{a^2} \right) g_{\mu\nu}, \quad R_{\alpha 4} = 0, \quad R_{44} = -\frac{3}{c^2} \frac{\ddot{a}}{a}$$

- Die Krümmungsinvariante

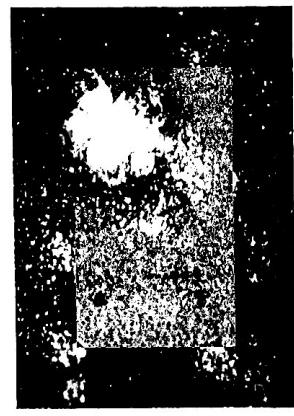
$$R = \frac{6}{c^2} \left(\frac{\ddot{a}}{a} + \frac{\varepsilon c^2 + \dot{a}^2}{a^2} \right)$$

Die kosmische Entfernungsleiter

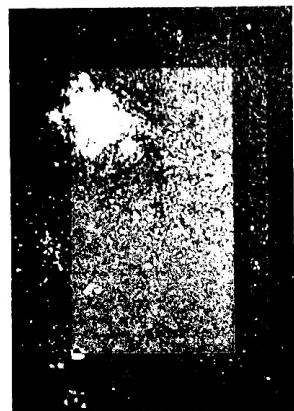
Kalibratoren: Cepheiden

Stufe I: Supernova SN1987A in LMC

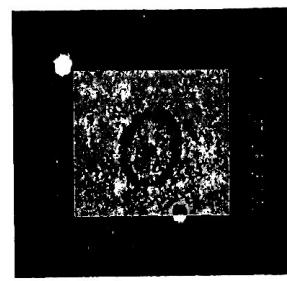
(MNU 51(1998)(4)218-222)



Februar 1994 (HST)



27.2.1987 (ESO)

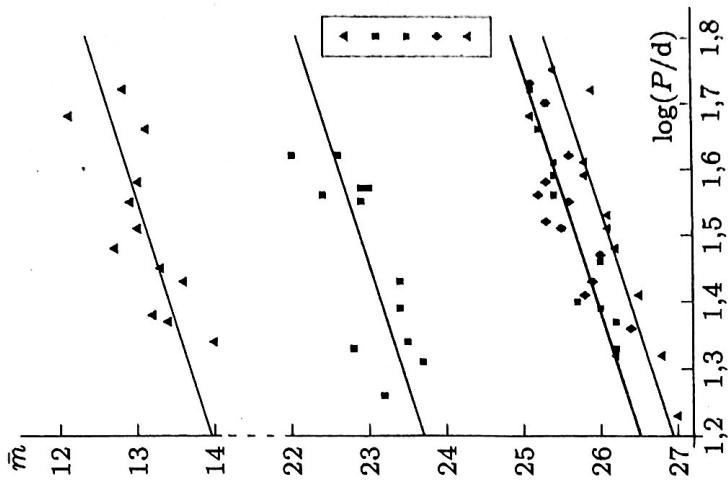


Februar 1987

scheinbarer Ringradius
 $\alpha = 0,8''$

wahrer Ringradius
 $a = 0,68 \text{ Lj}$

Entfernung:
 $r_{\text{LMC}} = 53,4 \text{ kpc}$



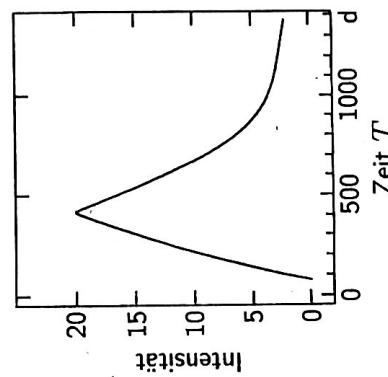
LMC

IC 4182

NGC 4536

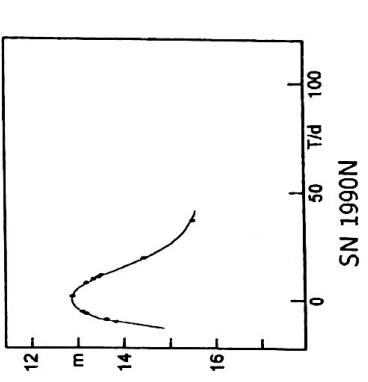
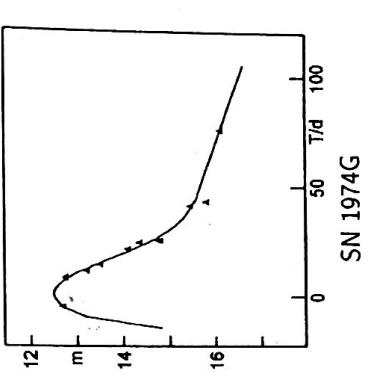
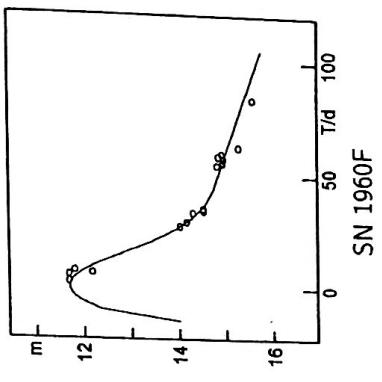
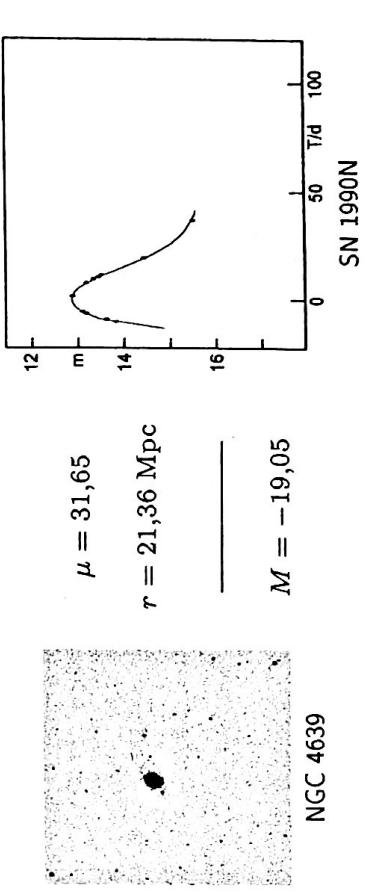
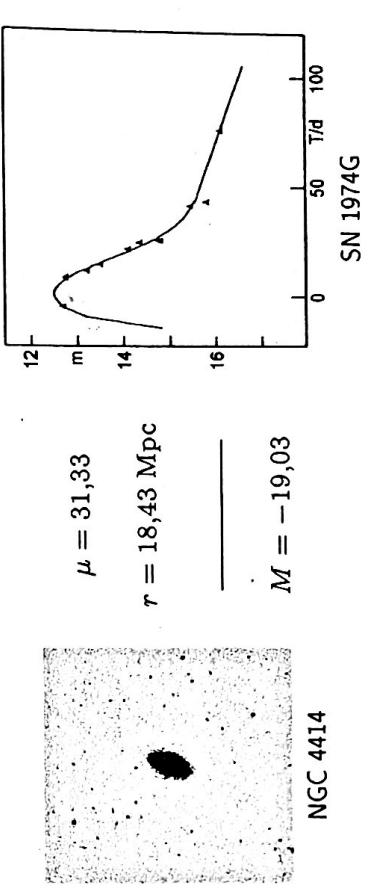
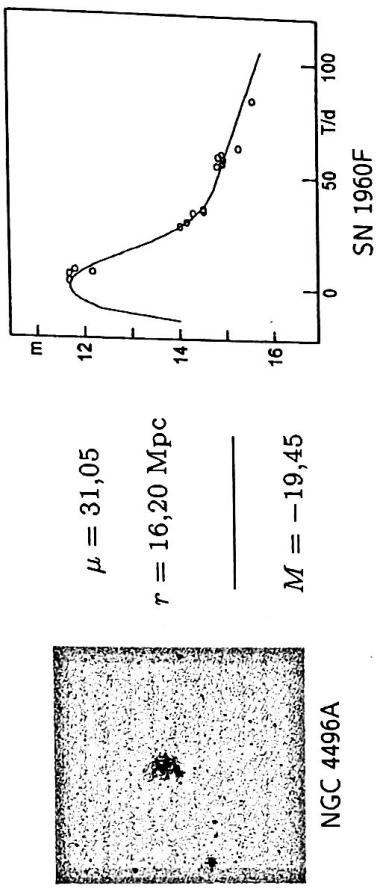
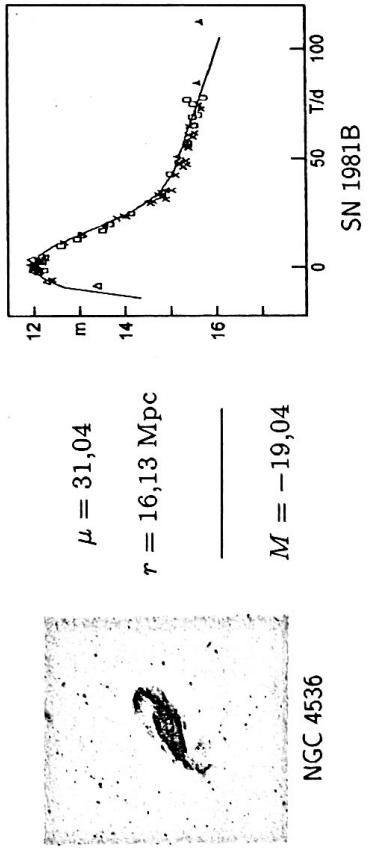
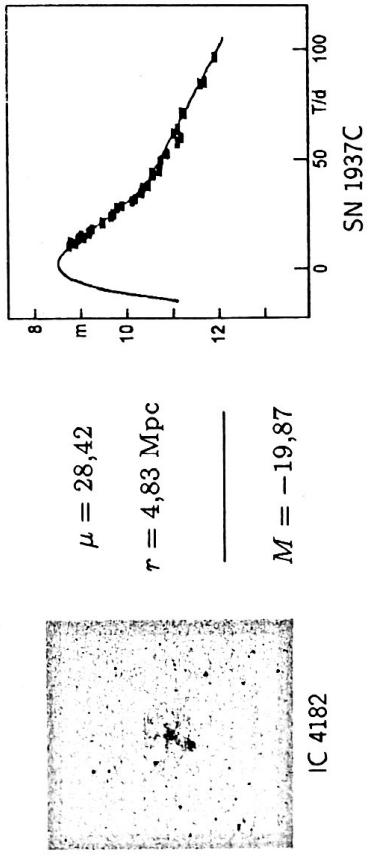
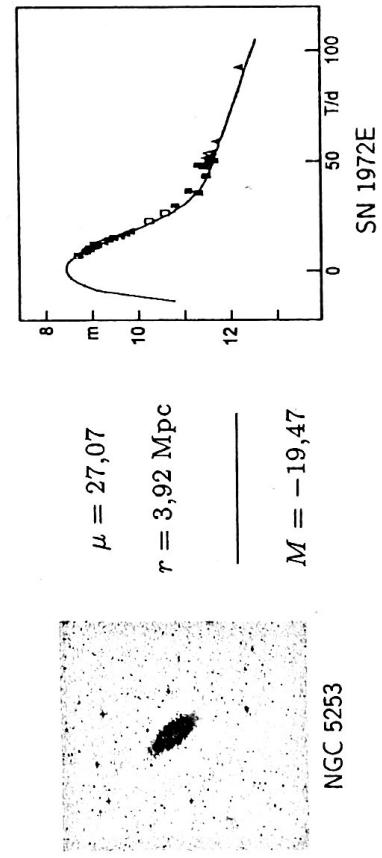
NGC 4496A

NGC 4639



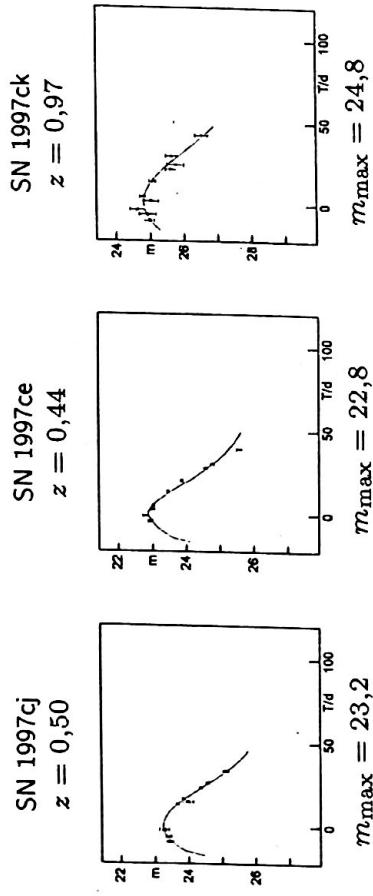
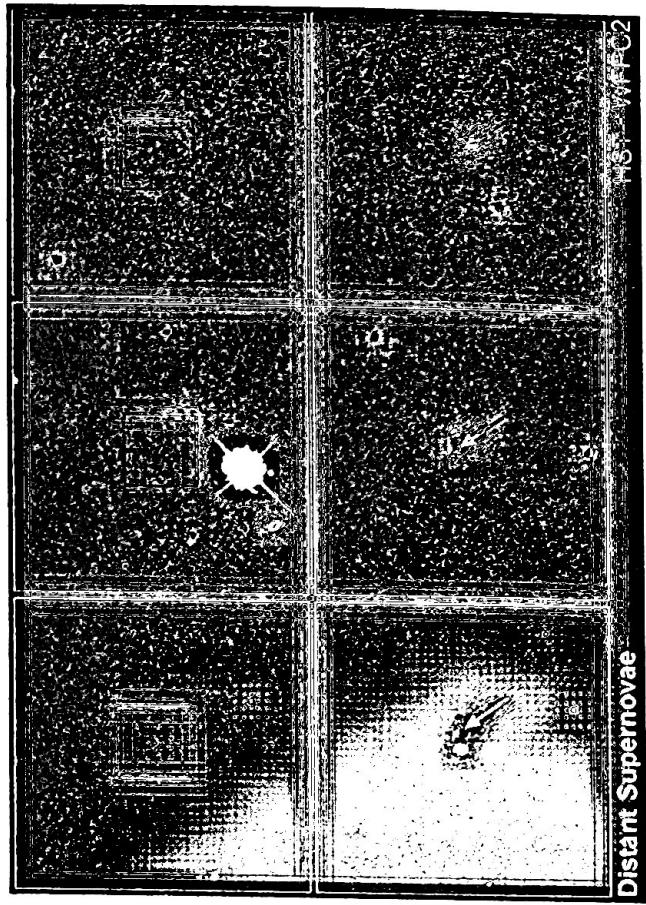
Kalibratoren: Supernovae Ia

Kalibratoren: Supernovae Ia

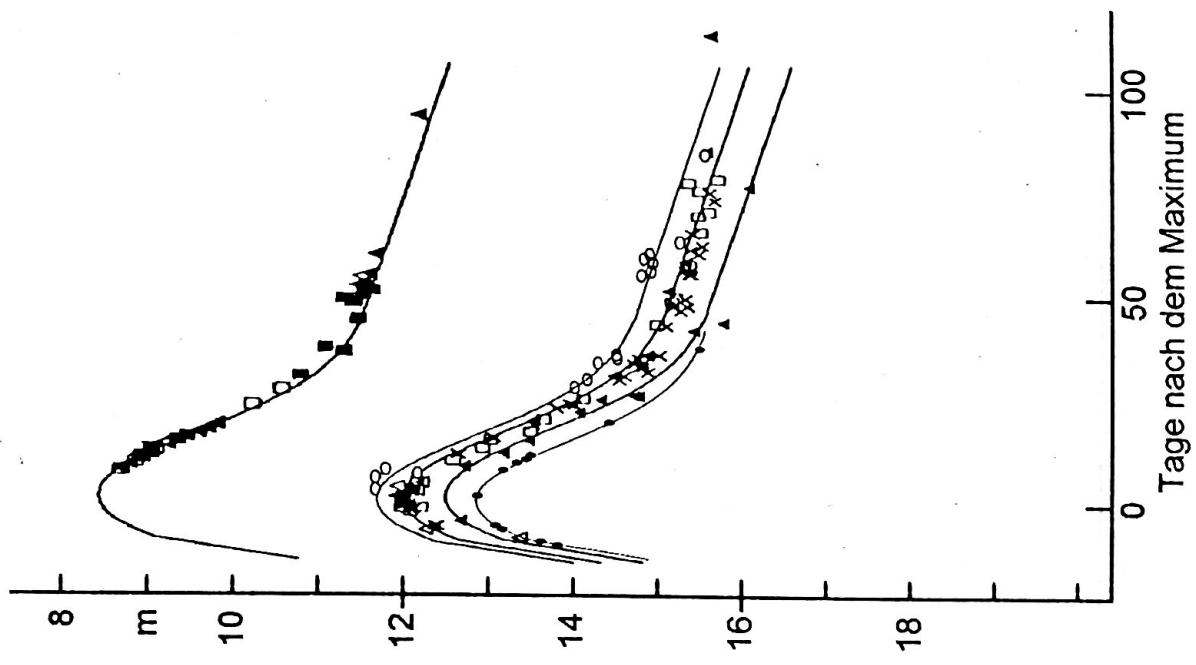


Supernovae Ia mit großen Rotverschiebungen

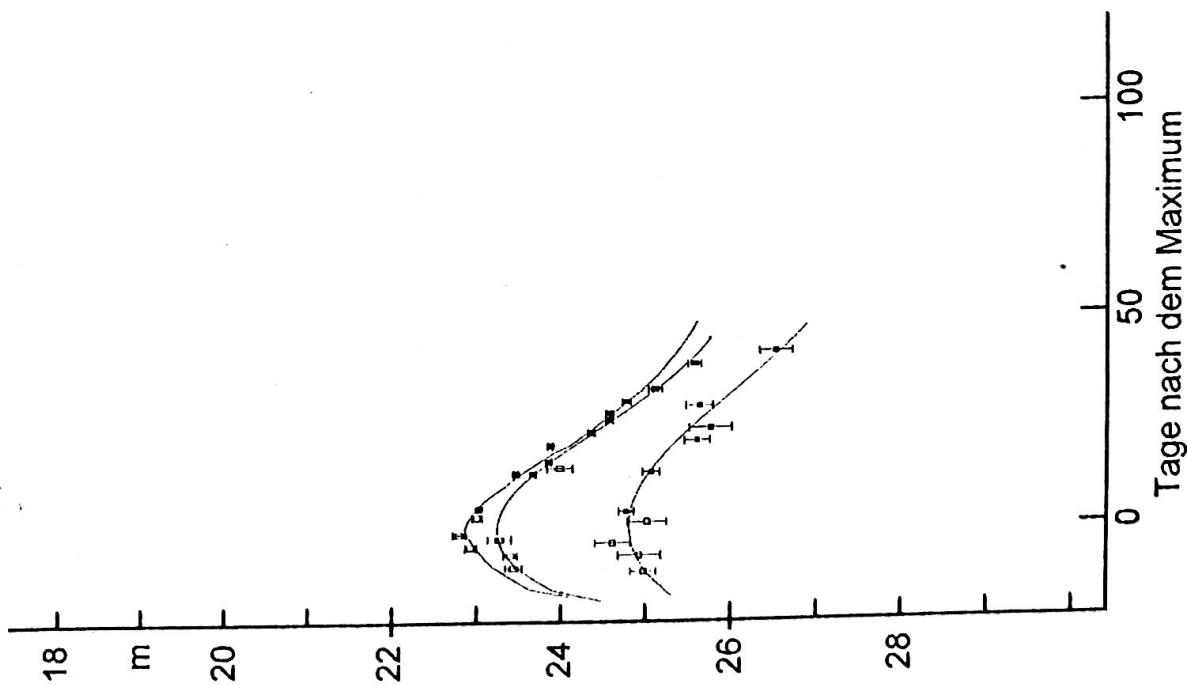
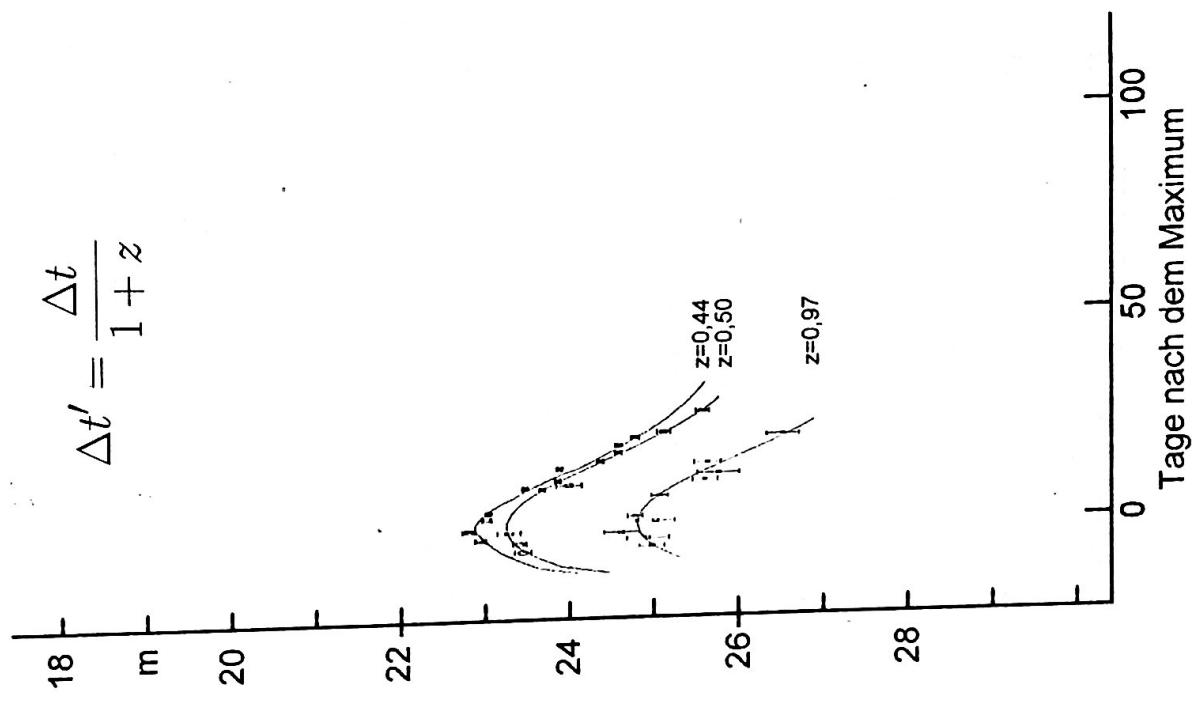
($z \approx 0,5 \dots 1$)



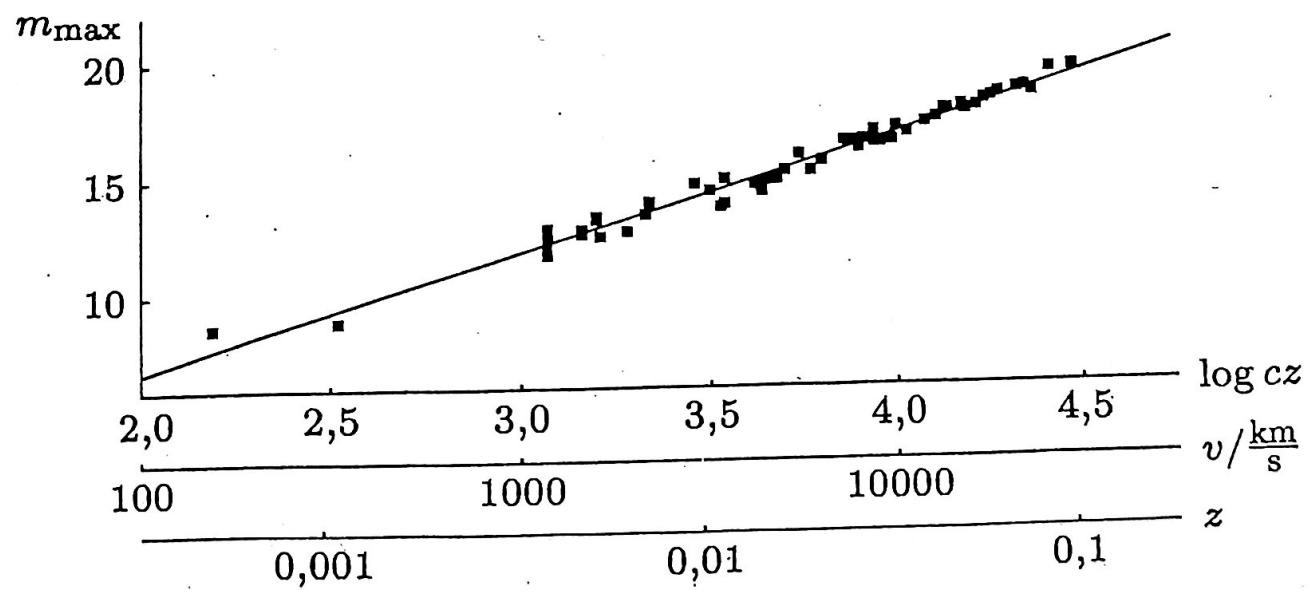
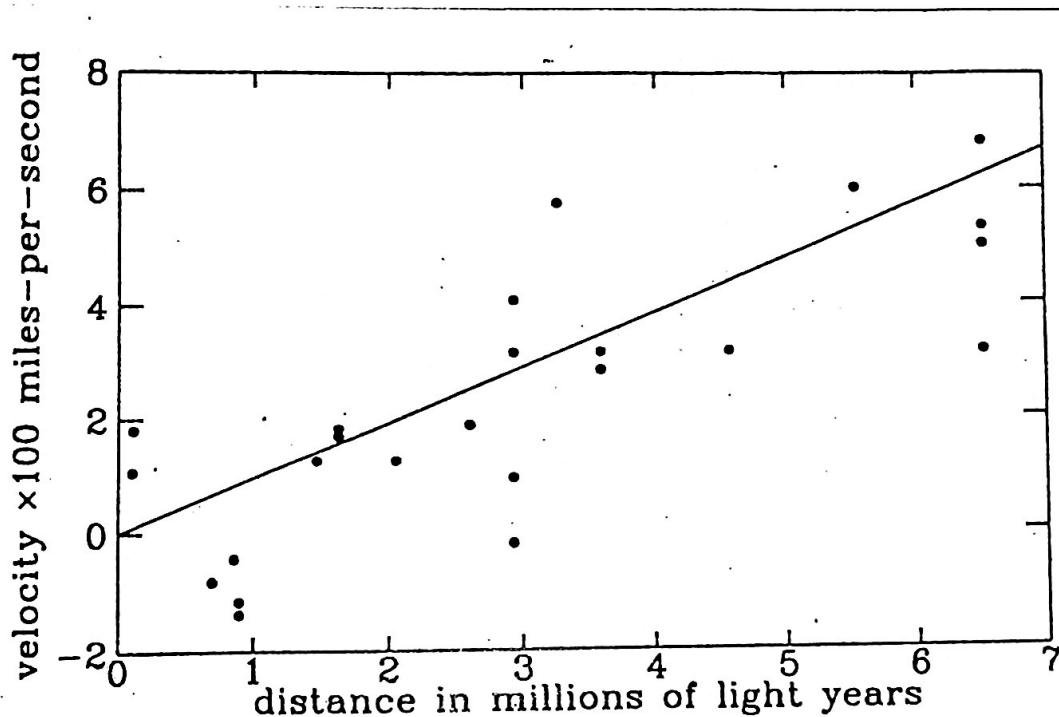
$M_{\max} = -19,32$
 $r = 2,6 \text{ Gpc}$
 $r = 6,5 \text{ Gpc}$



$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{1+z}$$



Das Hubble-Diagramm mit kleinen Rotverschiebungen



Kosmologie

– Literatur –

1. Hochschullehrbücher und Monographien

BARROW, J., F. TIPLER: *The Anthropic Cosmological Principle.*
Oxford University Press, Oxford, 1986

BERRY, M.: *Kosmologie und Gravitation.*
B.G. Teubner, Stuttgart, 1990

BÖRNER, G.: *The Early Universe – Facts and Fiction.*
Springer, Berlin, 1988

COLES, P., F. LUCCHIN: *Cosmology –
The Origin and Evolution of Cosmic Structure.*
Wiley, Chichester, 2002

D'INVERNO, R.: *Introduction to Einstein's Relativity.*
Clarendon Press, Oxford, 1992

DODELSON, S.: *Modern Cosmology.*
Academic Press, San Diego, 2003

GOENNER, H.: *Einführung in die Kosmologie.*
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994

HARTLE, J.B.: *Gravity – An Introduction to Einstein's General Relativity.*
Addison Wesley, San Francisco, Boston, New York, 2003

⑥ HOBSON, M.P., G. EFSTATHIOU, A.N. LASENBY: *General Relativity –
An Introduction for Physicists.*
Cambridge University Press, Cambridge, 2006

⑦ KARTTUNEN, H., P. KRÖGER, H. OJA, M. POUTANEN, K.J. DONNER:
Fundamental Astronomy.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995

KOLB, E., M. TURNER: *The Early Universe.*
Addison-Wesley Publishing Company, New York, 1990

⑧ LIDDLE, A.: *Einführung in die moderne Kosmologie.*
Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2009

MUKHANOV, V.: *Physical Foundations of Cosmology.*
Cambridge University Press, Cambridge 2005

PEACOCK, J.: *Cosmological Physics.*
Cambridge University Press, Cambridge, 1999

RICH, J.: *Fundamentals of Cosmology.*
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2001

- RINDLER, W.: *Essential Relativity*.
Springer, New York 1977
- ROWAN-ROBINSON, M.: *Cosmology*.
Clarendon Press, Oxford, 2004
- SCHNEIDER, P.: *Einführung in die extragalaktische Astronomie und Kosmologie*.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2006
- SEXL, R., H. URBANTKE: *Gravitation und Kosmologie – Eine Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie*.
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1995
- STEPHANI, H.: *Allgemeine Relativitätstheorie*.
Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1990
- WEBB, S.: *Measuring the Universe – The Cosmological Distance Ladder*.
Springer, Chichester, 1999
- WEINBERG, S.: *Gravitation and Cosmology*.
Wiley, New York, 1972
- WEINBERG, S.: *Cosmology*.
Oxford University Press, Oxford, 2008

2. Gesamtdarstellungen (fast) ohne mathematisch-technische Details

- BOJOWALD, M.: *Zurück vor den Urknall*.
S. Fischer-Verlag, Frankfurt/M. 2009
- BÖRNER, G.: *Schöpfung ohne Schöpfer – Das Wunder des Universums*.
Deutsche Verlags-Anstalt, München, 2006
- BÖRNER, G.: *Kosmologie – Die Evolution des Universums: Vom Urknall zur komplexen Welt der Galaxien*.
S. Fischer-Verlag, Frankfurt/M., 2002
- GUTH, A.: *Die Geburt des Universums aus dem Nichts – Die Theorie des inflationären Universums*.
Verlag Droemer/Knaur, München 1999
- HARRISON, E.: *Cosmology – The Science of the Universe*.
Cambridge University Press, Cambridge, 1999
- HARRISON, E.: *Darkness at Night: A Riddle of the Universe*.
Harvard University Press, Cambridge, 1987
- HASINGER, G.: *Das Schicksal des Universums – Eine Reise vom Anfang zum Ende*.
C.H. Beck Verlag, München 2007
- HAWLEY, J.F., K.A. HOLCOMB: *Foundations of Modern Cosmology*.
Oxford University Press, Oxford, 1998
- HETZNECKER, H.: *Expansionsgeschichte des Universums – Vom heißen Urknall zum kalten Kosmos*.
Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007

- HETZNECKER, H.: *Kosmologische Strukturbildung – Von der Quantenfluktuation zur Galaxie.*
Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009
- HOGAN, C.: *Das kleine Buch vom Big Bang.*
Deutscher Taschenbuch-Verlag, München 2000
- JONES, M.H., R.J.A. LAMBOURNE: *An Introduction to Galaxies and Cosmology.*
Cambridge University Press, Cambridge 2004
- KIEFER, C.: *Der Quantenkosmos.*
S. Fischer-Verlag, Frankfurt/M. 2008
- KIPPENHAHN, R.: *Licht vom Rande der Welt.*
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1984
- KIPPENHAHN, R.: *Kosmologie für die Westentasche.*
Piper-Verlag, München, 2003
- LEVIN, F.: *Calibrating the Cosmos – How Cosmology Explains Our Big Bang Universe.*
Springer, New York, 2007
- NUSSBAUMER, H., L. BIERI: *Discovering the Expanding Universe.*
Cambridge University Press, Cambridge, 2009
- PENROSE, R.: *Zyklen der Zeit.*
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2011
- REES, M.: *Vor dem Anfang – Eine Geschichte des Universums.*
S.-Fischer-Verlag, Frankfurt/M., 1998
- ROWAN-ROBINSON, M.: *Das Flüstern des Urknalls.*
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford, 1994
- SCHUTZ, B.: *Gravity from the ground up – An introductory guide to gravity and general relativity.*
Cambridge University Press, Cambridge, 2003
- SILK, J.: *Der Urknall – Die Geburt des Universums.*
Birkhäuser-Verlag, Basel, 1984
- SINGH, S.: *Big Bang – Der Ursprung des Kosmos und die Erfindung der modernen Naturwissenschaft.*
Carl-Hanser-Verlag, München, 2005
- SMOLIN, L.: *Warum gibt es die Welt? – Die Evolution des Kosmos.*
C.H. Beck, München 1999
- TREFIL, J.: *Im Augenblick der Schöpfung – Physik des Urknalls von der Planck-Zeit bis heute.*
Birkhäuser-Verlag, Basel, 1984
- VILENKO, A.: *Kosmische Doppelgänger.*
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- WEINBERG, S.: *Die ersten drei Minuten.*
Piper-Verlag, München, 1979

Zusätzliche Literatur für Kosmologie

- Ellis, G.F.R. / Maartens, R. / MacCallum, M.A.H. /
Relativistic Cosmology, Cambridge University Press 2012
- Olofsson, R.: Geometrie der Raumzeit — Eine mathematische
Einführung in die Relativitätstheorie
Vieweg / Teubner 2010⁵⁾