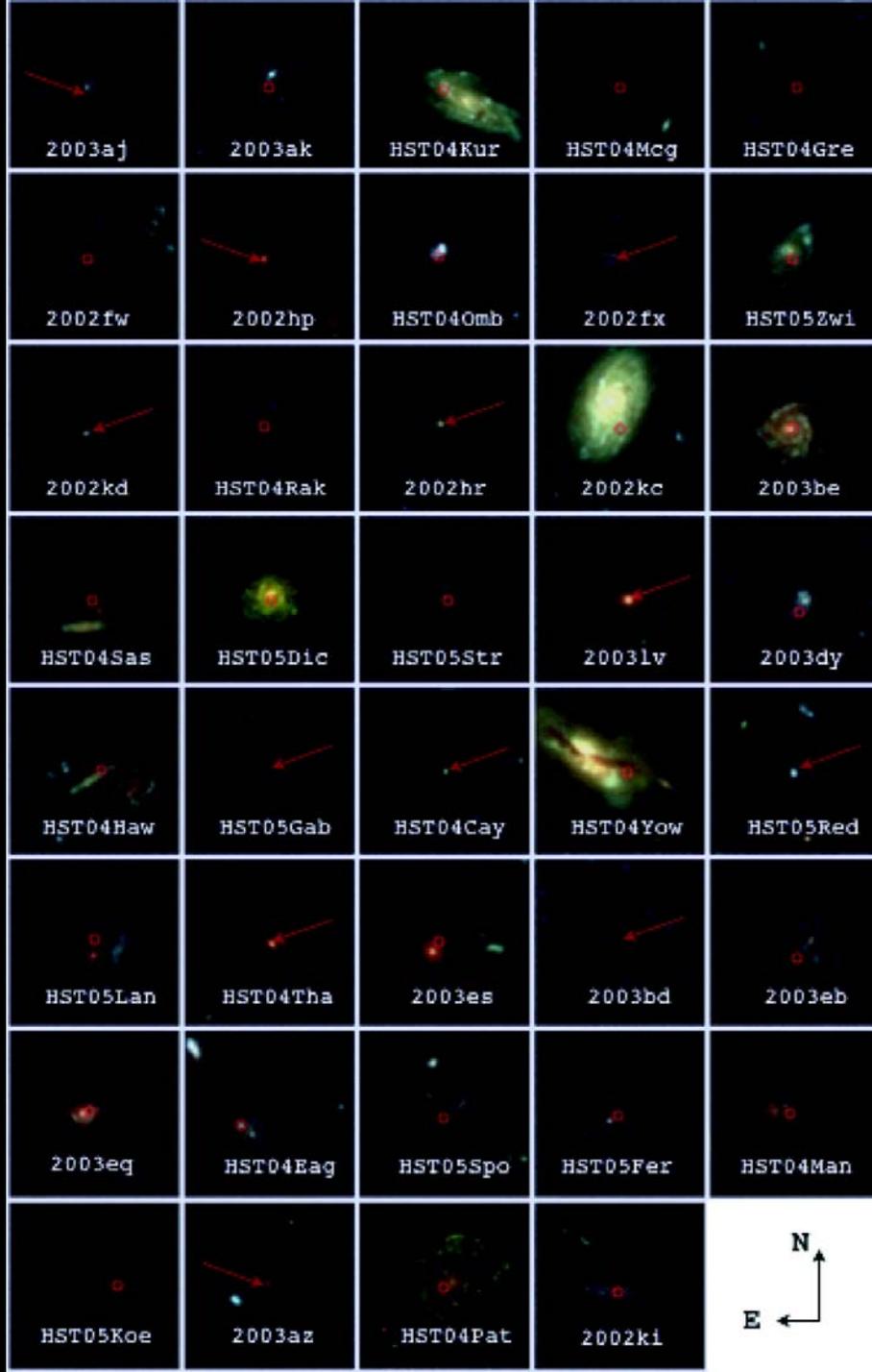


Supernovae vermessen das Universum

**Bruno Leibundgut
ESO**

Supernova!

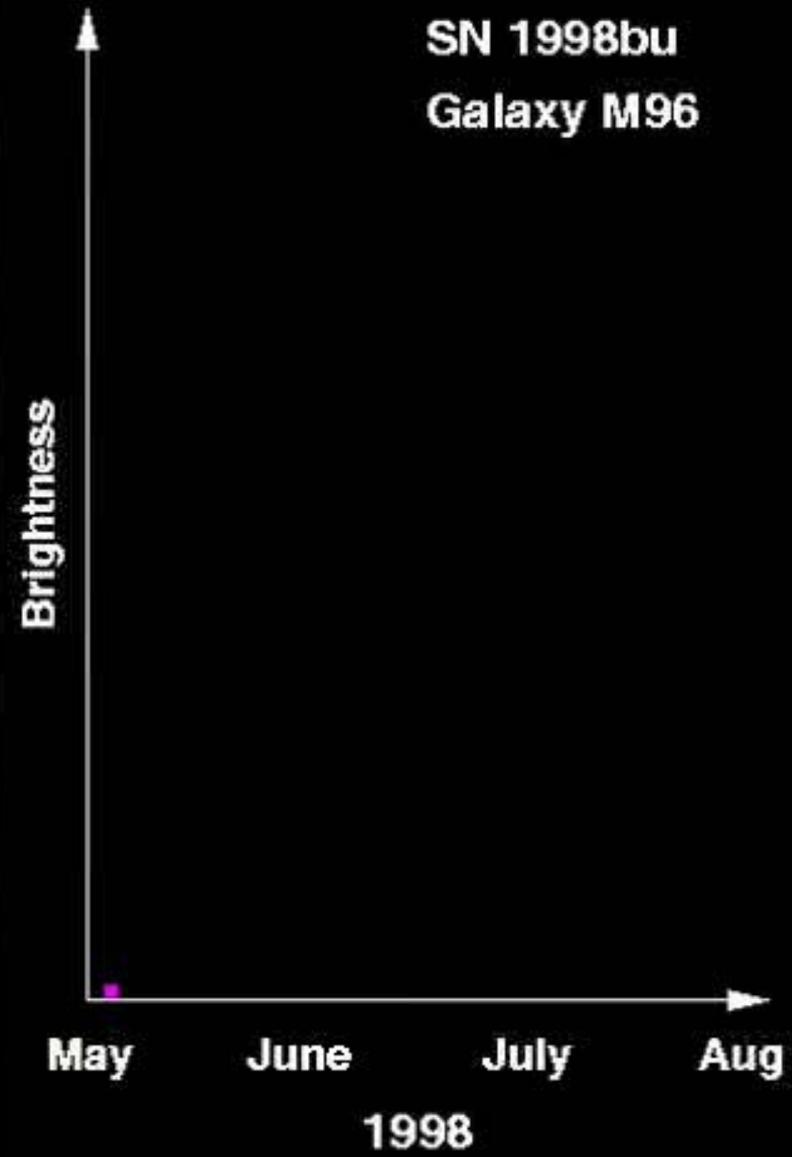




Riess et al. 2007

SN 1994D





Historische Bedeutung von Supernovae

- Historische Supernovabeobachtungen vor allem im asiatischen Raum (China, Korea)
 - Zusammen mit “Haarsternen” (Kometen) als himmlische Zeichen (typischerweise schlechte) interpretiert
- Erscheinungen am Fixsternhimmel
 - Im Widerspruch zum Ptolemäischen Weltbild der Himmelsphären

Historische Bedeutung von Supernovae

- SN1572 beobachtet von Tycho Brahe
 - De stella nova
 - Keine messbare Parallaxe → außerhalb des Sonnensystems
- SN1604 Kepler's Supernova
- Beobachtung von S Andromeda (SN1885B)
 - Lundmark (1925) schlägt vor, dass Andromeda extra-galaktisch ist

Magnesium

XMM-Newton

Silizium

EPIC

Histori

SN 1

SN 1

SN 1

De s

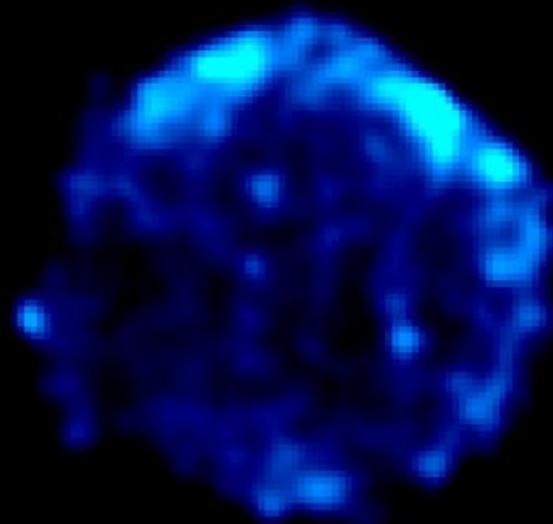
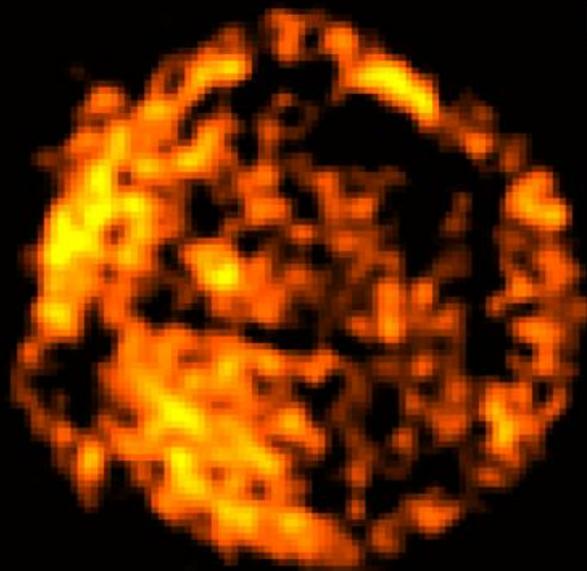
Kepl

Cass

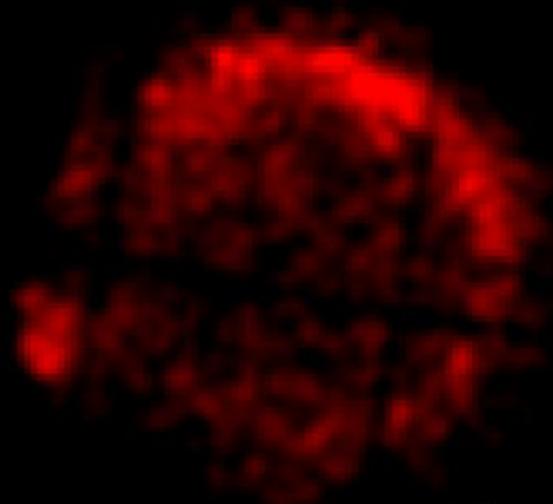
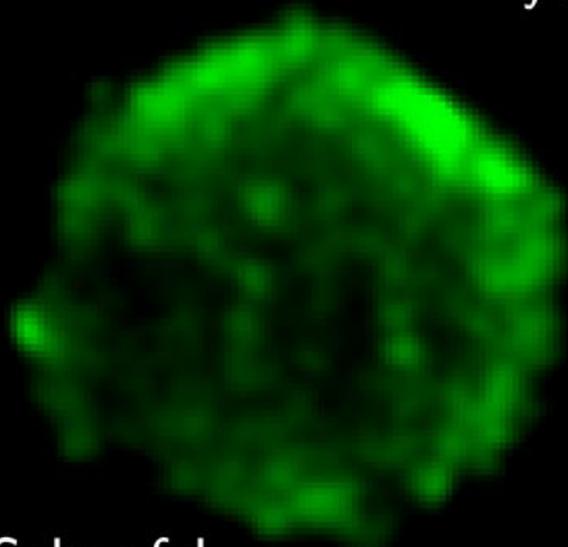
S An

SN 1

Wo



Tycho's SNR



Schwefel

Eisen

Supernovae

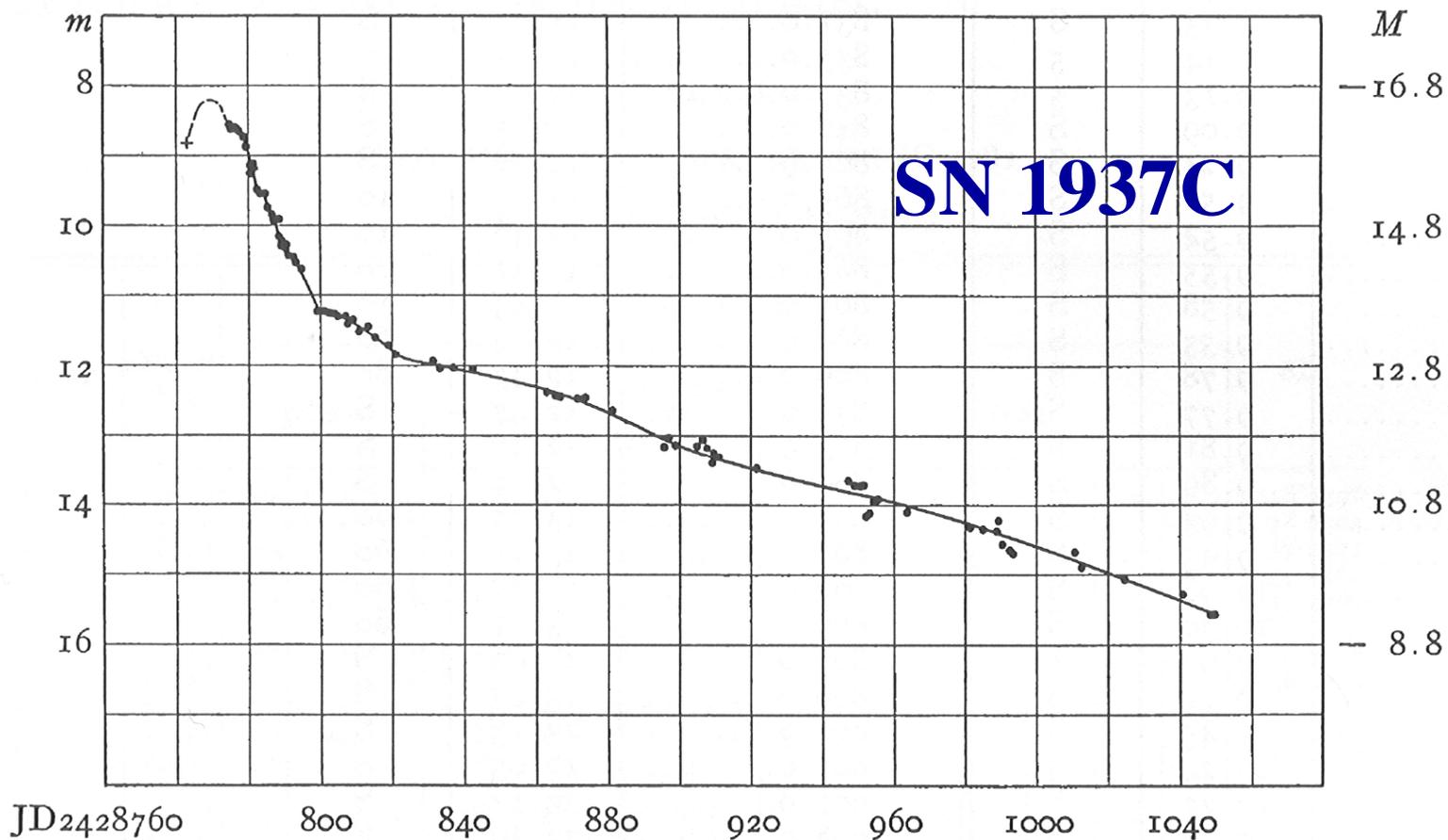
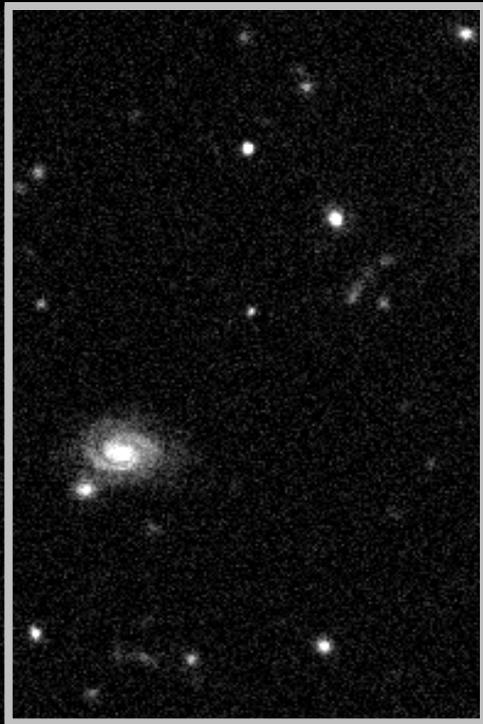


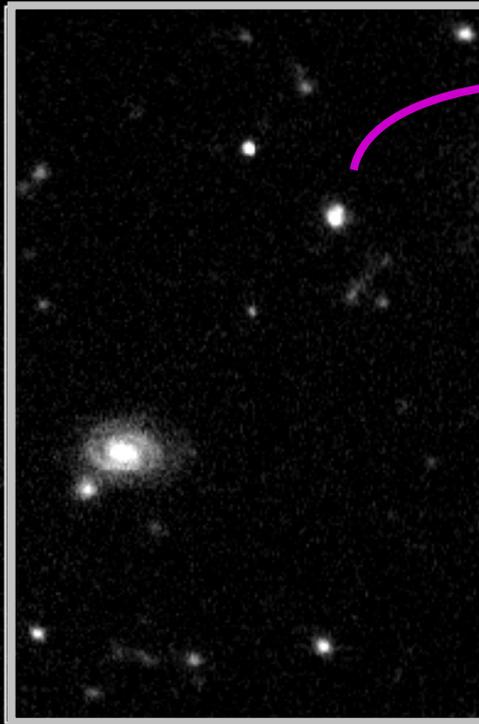
FIG. 1.—Photographic light-curve of supernova in IC 4182

Supernova Suche

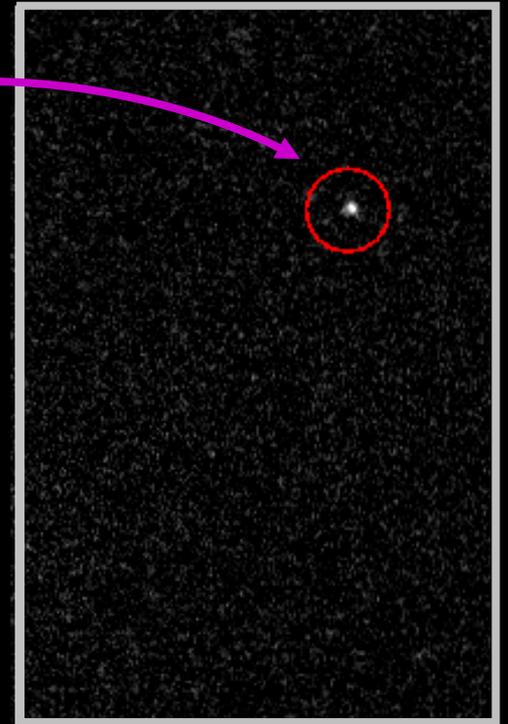
Epoch 1



Epoch 2 (3 weeks later)



Epoch 2 - Epoch 1



(High-z Supernova Team)

Beobachtungsgrößen

- Licht- und Farbkurven
(elektromagnetische Strahlung)
- Spektrale Entwicklung
- Umgebung
 - Muttergalaxie
 - interstellares Material
- Vorgängerstern
- Überreste
- Raten
- Neutrinos und Kosmische Strahlung

Was ist eine Supernova?

Eine Supernova ist ein Ereignis, bei dem ein Stern das meiste seines Material in einer gewaltigen Explosion verliert und seine Existenz als Stern endet. Dies ist eine physikalische Beschreibung. Die Beobachtungen lassen oft eine solche eindeutige Zuordnung oft nicht zu. Nichtsdestotrotz, eine Supernova kann definitionsgemäß nicht wiederkehrend sein.

Leibundgut (2008)

Supernovae

Physik

Explosion
Nukleosynthese
Strahlungs-
transport
Schocks
Evolution des
Vorgänger-
sternes

Astrophysik

Anreicherung des
Universums mit
höheren
Elementen
Sternentwicklung
Sternentstehung
Galaxienentwick-
lung
Schwarze Löcher
Neutronensterne
Staubentstehung

“Instrumente”

Kosmologie
Sternentstehungs-
raten
Staubverteilung in
anderen
Galaxien

Supernova Klassifizierung

Aufgrund der optischen
spektroskopischen Erscheinung

**Kernkollaps
in massiven Sternen**

SN II (Wasserstoff H)

SN Ib/c (kein H/He)

Hypernovae/GRBs

SN Ia (kein H)

**Thermonukleare
Explosionen**

Supernovae

group											13	14	15	16	17	18	
1*											IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa	0	
Ia**																	
1																2	
H																He	
2																	
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	4	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Na	Mg	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	VIIIb	IXb	Xb	XIb	XIIb	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	(Uub)	(Uut)	(Uuq)	(Uup)	(Uuh)		118
																	(Uuo)
lanthanide series	6	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
actinide series	7	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

Urknall

Sterne

Supernovae

* Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC)
 ** Numbering system widely used, especially in the U.S., from the mid-20th century.
 *** Discoveries of elements 112–116 and 118 are claimed but not confirmed. Element names and symbols in parentheses are temporarily assigned by IUPAC.

Supernova Typen

Thermonukleare SNe

- Vorgängersterne haben kleine Massen ($<8M_{\odot}$)
- weit entwickelte Sterne (Weisse Zwerge)
- Explosives C und O Brennen
- Doppelsternsysteme
- Vollständige Zerstörung

Kernkollaps SNe

- Vorgängersterne haben grosse Massen ($>8M_{\odot}$)
- große Sternhülle (Kernfusion noch im Gange)
- Brennen wegen der hohen Dichte und Kompression
- Einzelsterne (Doppelsterne für SNe Ib/c)
- Neutronenstern als Überrest

Energie Quellen

- Gravitation → **Typ II Supernovae**
 - Kollaps einer Sonnenmasse oder mehr in einen Neutronenstern

**Gamows Bild einer
Kernkollaps Supernova**

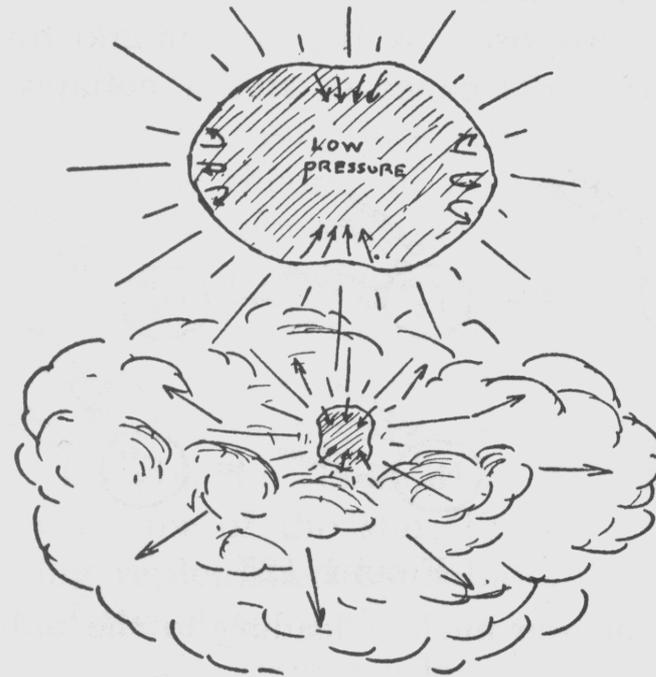
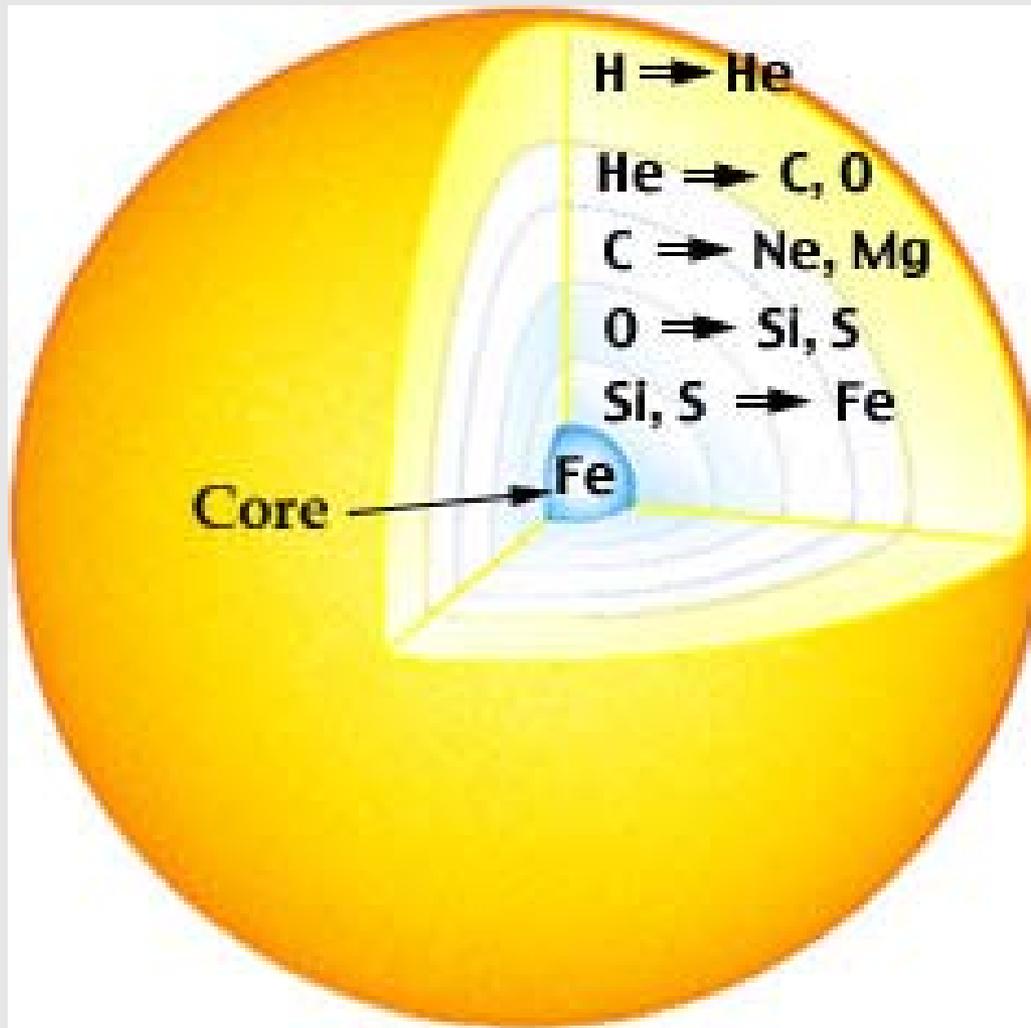


FIGURE 126

An early and a late stage of a supernova explosion.

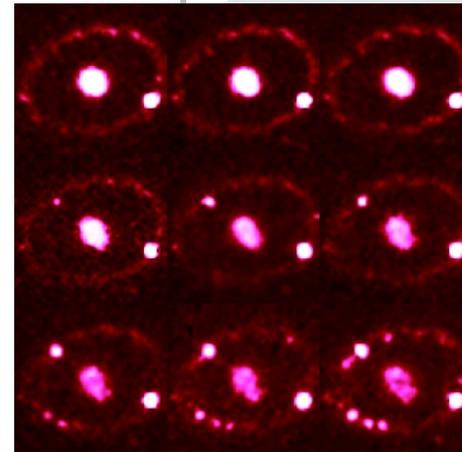
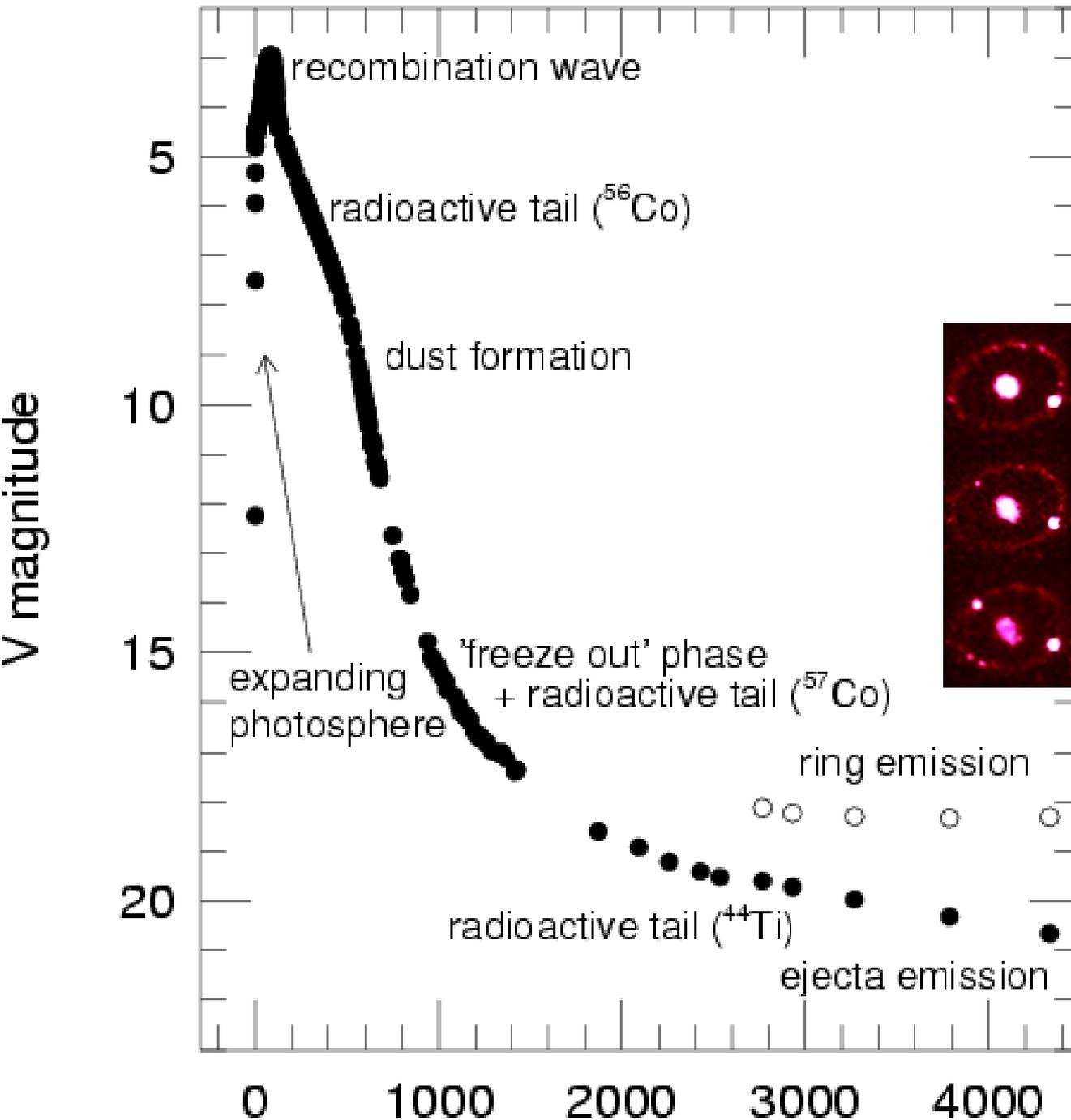
Struktur eines Vorgängersterne von Kernkollaps Supernovae



Energie Quellen

- Schocks
 - Ausbruch an der Sternoberfläche
 - Kinetische Energie
- Kühlung
 - adiabatisch aufgrund der Expansion der Ejecta
- Radioaktivität
 - Nukleosynthese
- Rekombination
 - Atome im vom Schock ionisierten Material rekombinieren

SN 1987A



Suntzeff (2003)

Energie Quellen

- **Gravitation** → **Typ II Supernovae**
 - Kollaps einer Sonnenmasse der mehr in einen Neutronenstern
 - Freisetzung von 10^{46} Joule
 - vor allem Elektron Neutrinos ν_e
 - 10^{44} Joule in kinetischer Energy (Expansion der Ejecta)
 - 10^{42} Joule in Strahlung
- **Nukleare (Bindungs-) Energy** → **Typ Ia**
 - explosives Kohlenstoff- und Sauerstoff-Brennen von etwa einer Sonnemasse
 - Freisetzung von 10^{42} Joule

Thermonukleare Supernovae

Das “Standartmodel”



Weisser Zwerg in
einem
Doppelsternsystem

Durch den
Massentransfer wächst
der Weisse Zwerg zu
einer kritischen Masse
(Chandrasekhar Masse,
 $M_{\text{Chand}} = 1.4 M_{\odot}$)

Supernovae

Extrem helle Sternexplosionen

Wichtig für die Produktion von schweren chemischen Elementen

Endprodukt der Sternentwicklung

- für massive Sterne als Kernkollaps mit nachfolgendem Neutronenstern oder Schwarzem Loch
- für kleine Sterne in engen Doppelsternsystemen
- (der Rest der Sterne erlischt langsam)

Supernovae

Extrem helle Sternexplosionen

Wichtig für die Produktion von schweren chemischen Elementen

Beste Entfernungsindikatoren im Universum

The only reliable way of determining extragalactic distances is through supernova investigations.

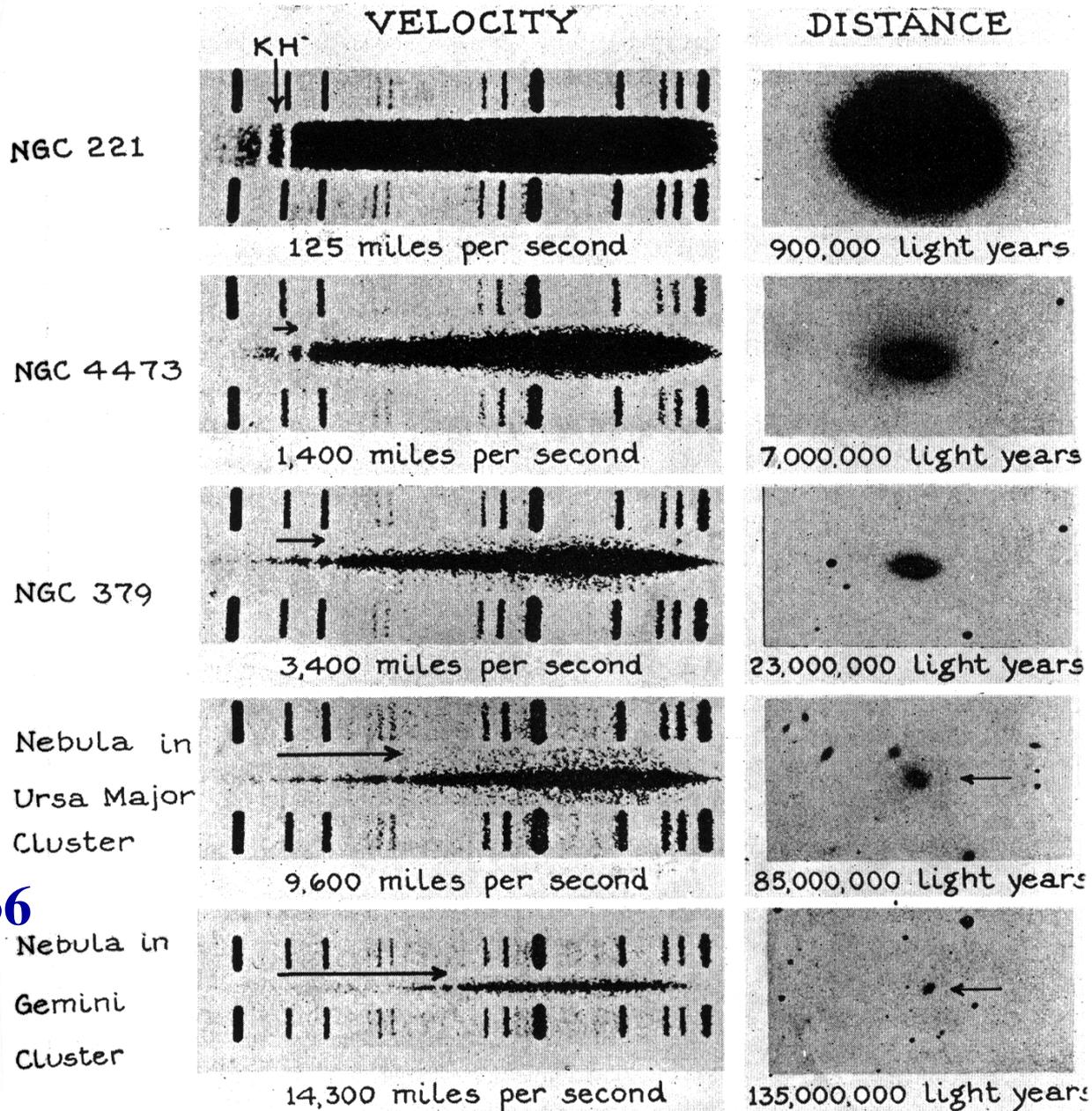
F. Zwicky

Kosmologie mit Supernovae

Entfernungen sind im Universum schwer zu messen. Sie sind aber essentiell, um die Expansionsrate und deren Geschichte bestimmen zu können.

Typ Ia Supernovae sind ausgezeichnete Entfernungskennzeichen, die im nahen Universum geeicht werden.

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION FOR EXTRA-GALACTIC NEBULAE



Hubble 1936

Das original Hubble Diagram

Geschwindigkeit

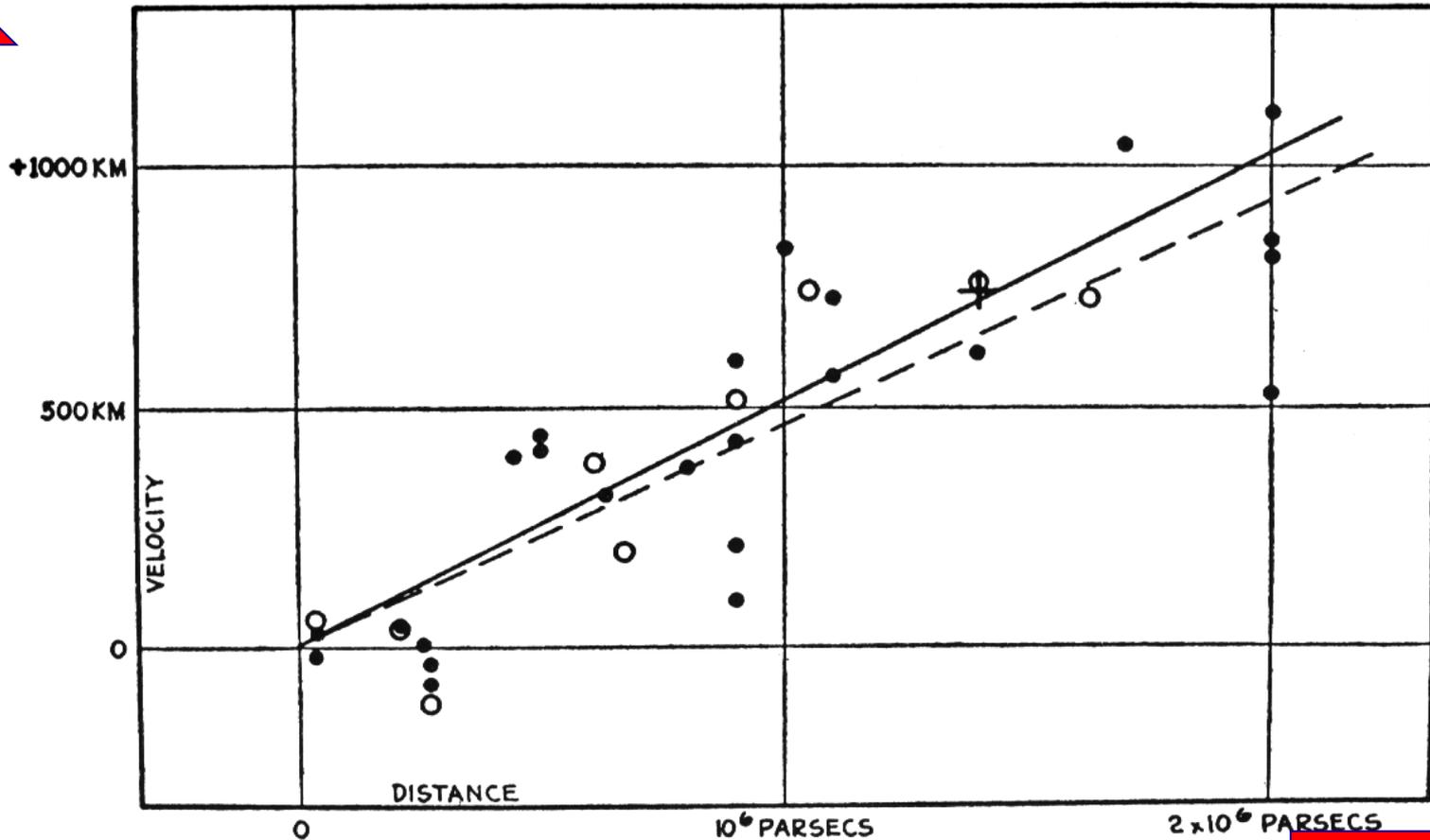
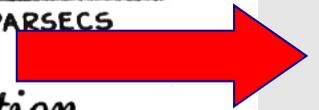
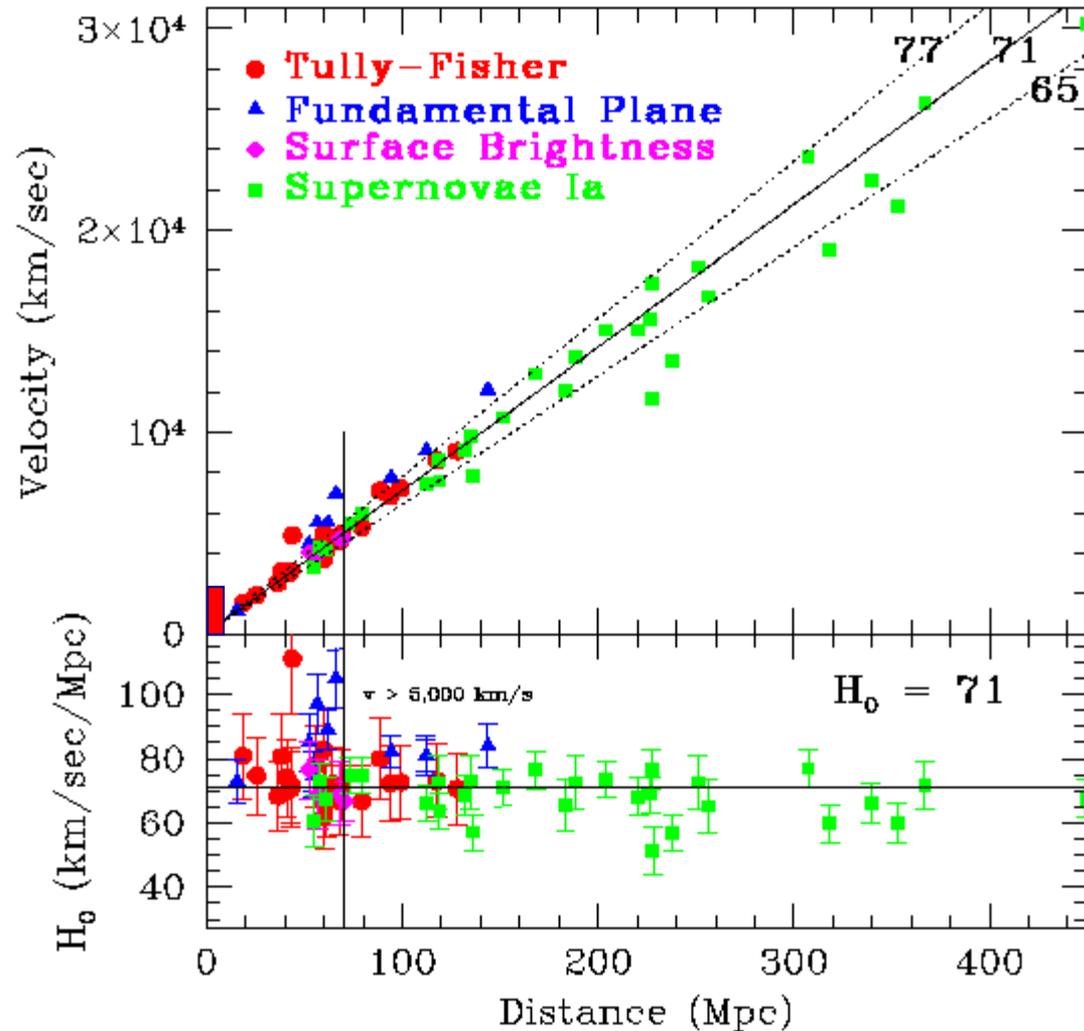


FIG. 9. *The Formulation of the Velocity-Distance Relation.*

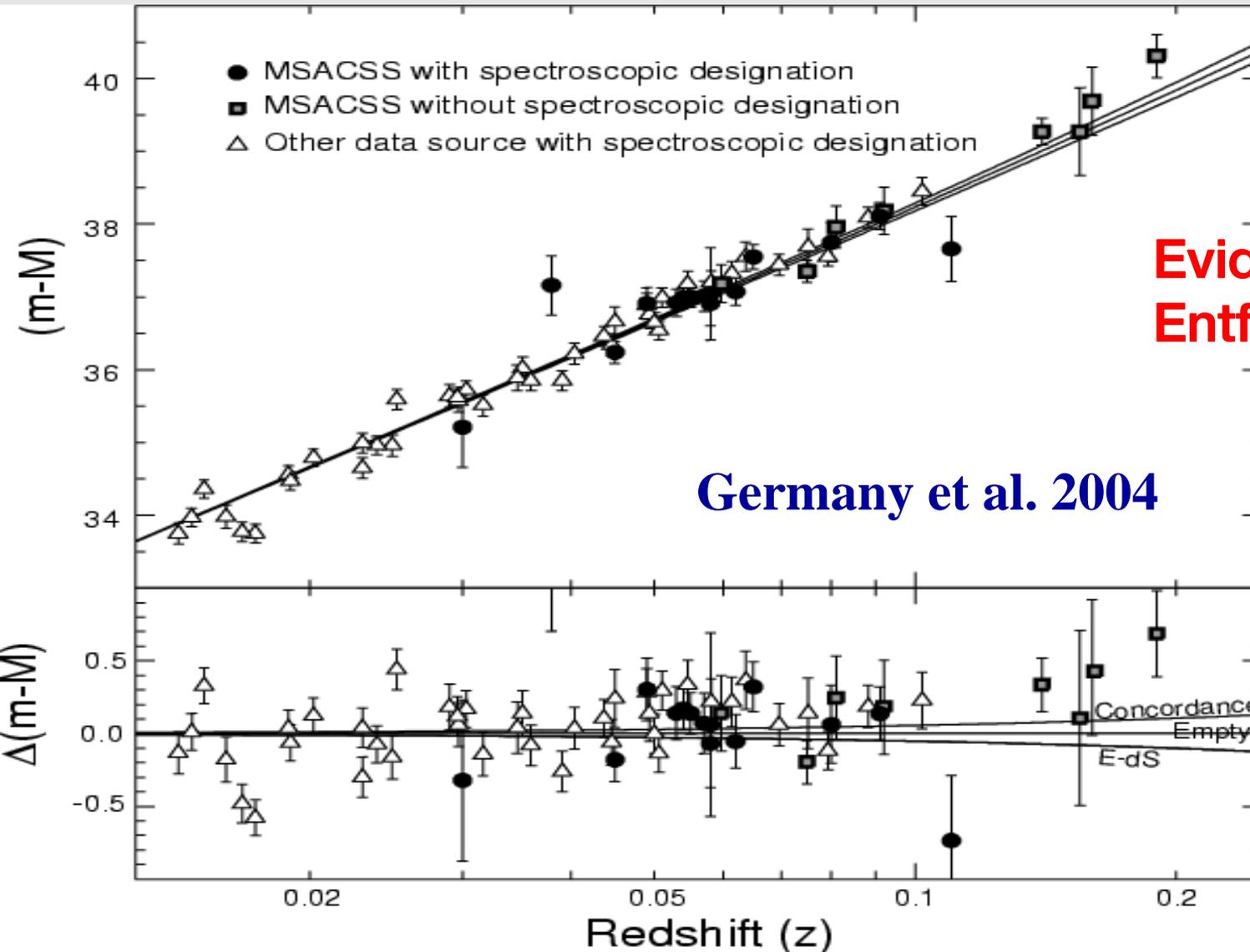
Entfernung



Ein modernes Hubble Diagramm



Die nahen SNe Ia



Entfernungsmessung mittels einer Lichtquelle



1000w



1000w

Der Energieinhalt dominiert das entfernte Universum

Die Expansionsgeschichte wird vom Energieinhalt des Universums bestimmt. Materie, wegen $E=mc^2$, ist auch Energie und aufgrund der anziehenden Gravitation müsste sich die Expansion mit der Zeit verlangsamen. Dies ist in den **Einsteinschen Feldgleichungen** kodiert.



WALL STREET
ALL BENEFIT
FOR WORLD
CUP
2003
LHO M...

$R_{pv} - \frac{1}{2} g_{pv} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{pv}$
A. EINSTEIN

ERWIN S. ALBA

INDAM
VOL...

Fundamente der Kosmologie

Gravitationstheorie

Einsteinsche Relativitätstheorie

Isotropie

**Es gibt keine bevorzugte Richtung im
Universum**

Homogenität

**Es gibt keine bevorzugte Region
(e.g. es gibt kein Zentrum des Universums)**

Anthropisches Prinzip

Das Universum hat uns erzeugt

Friedmann-Lemaître Kosmologie

Annahme:

ein homogenes und isotropes Universum

Nullgeodesie in der Friedmann-Robertson-Walker Metrik:

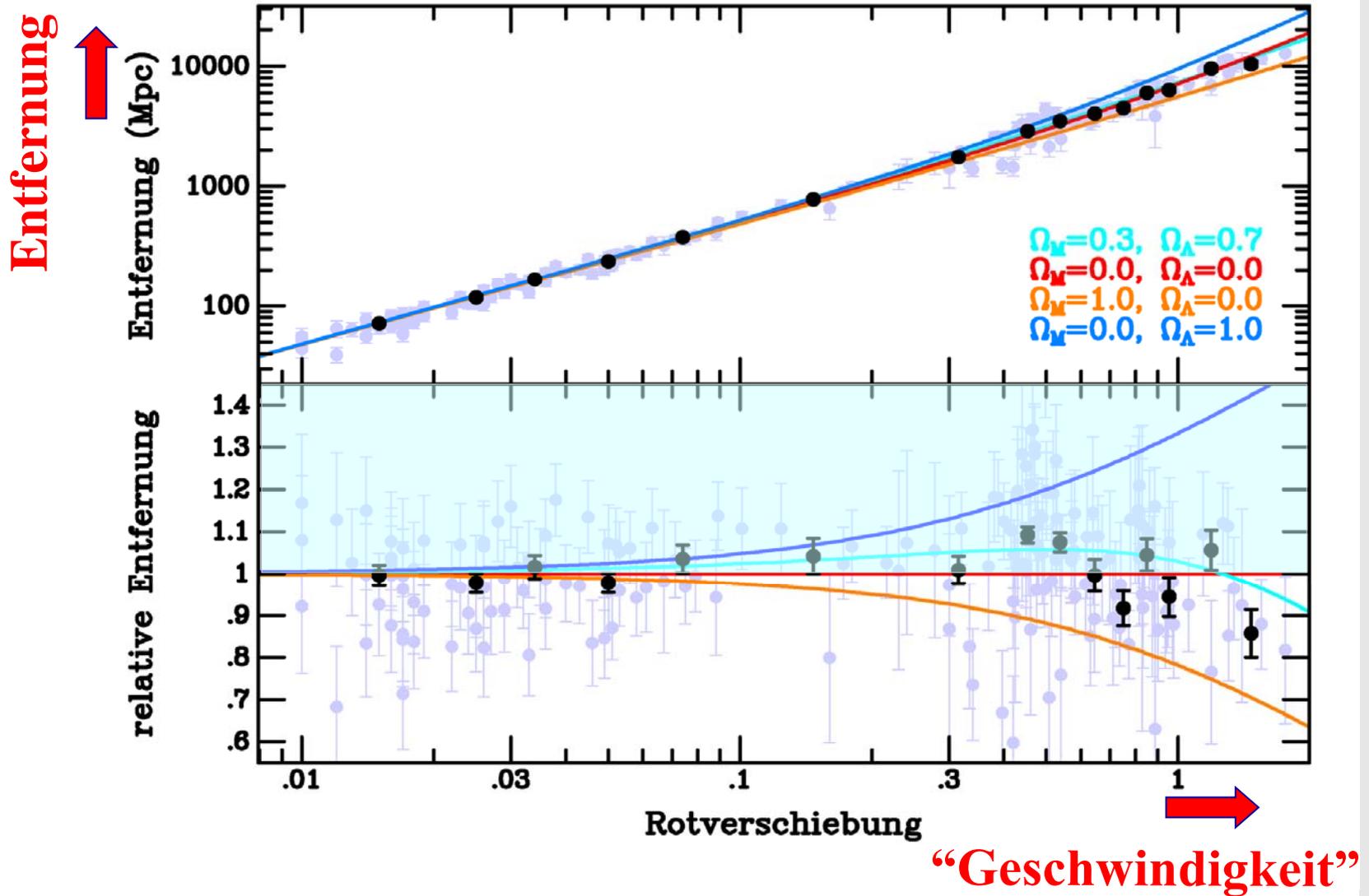
$$D_L = \frac{(1+z)c}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} S \left\{ \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \left[\Omega_k (1+z')^2 + \Omega_M (1+z')^3 + \Omega_\Lambda \right]^{-1/2} dz' \right\}$$

$$\Omega_M = \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_M$$

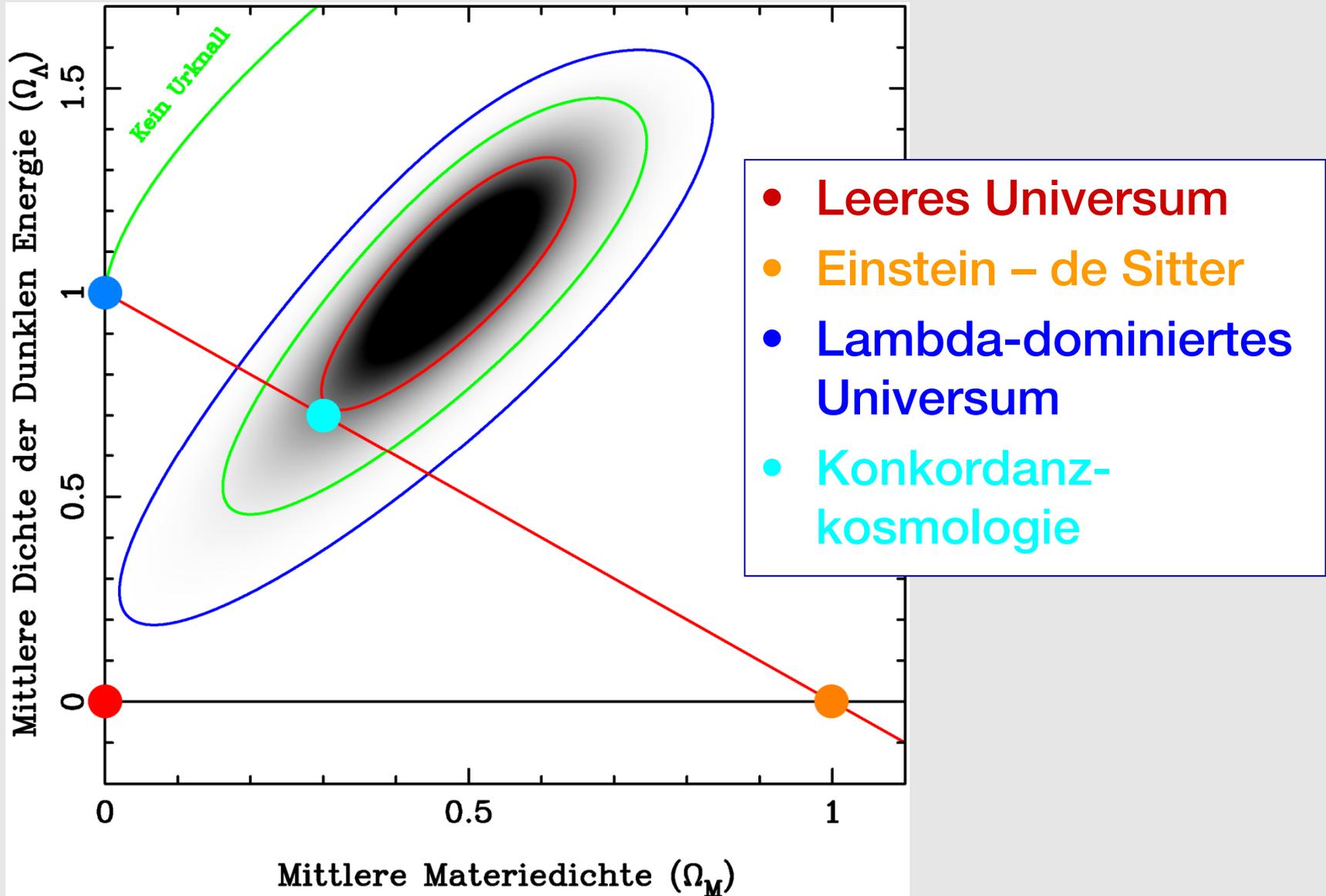
$$\Omega_k = -\frac{kc^2}{R^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}$$

Das vollständige Hubble Diagramm



Kosmologische Implikation





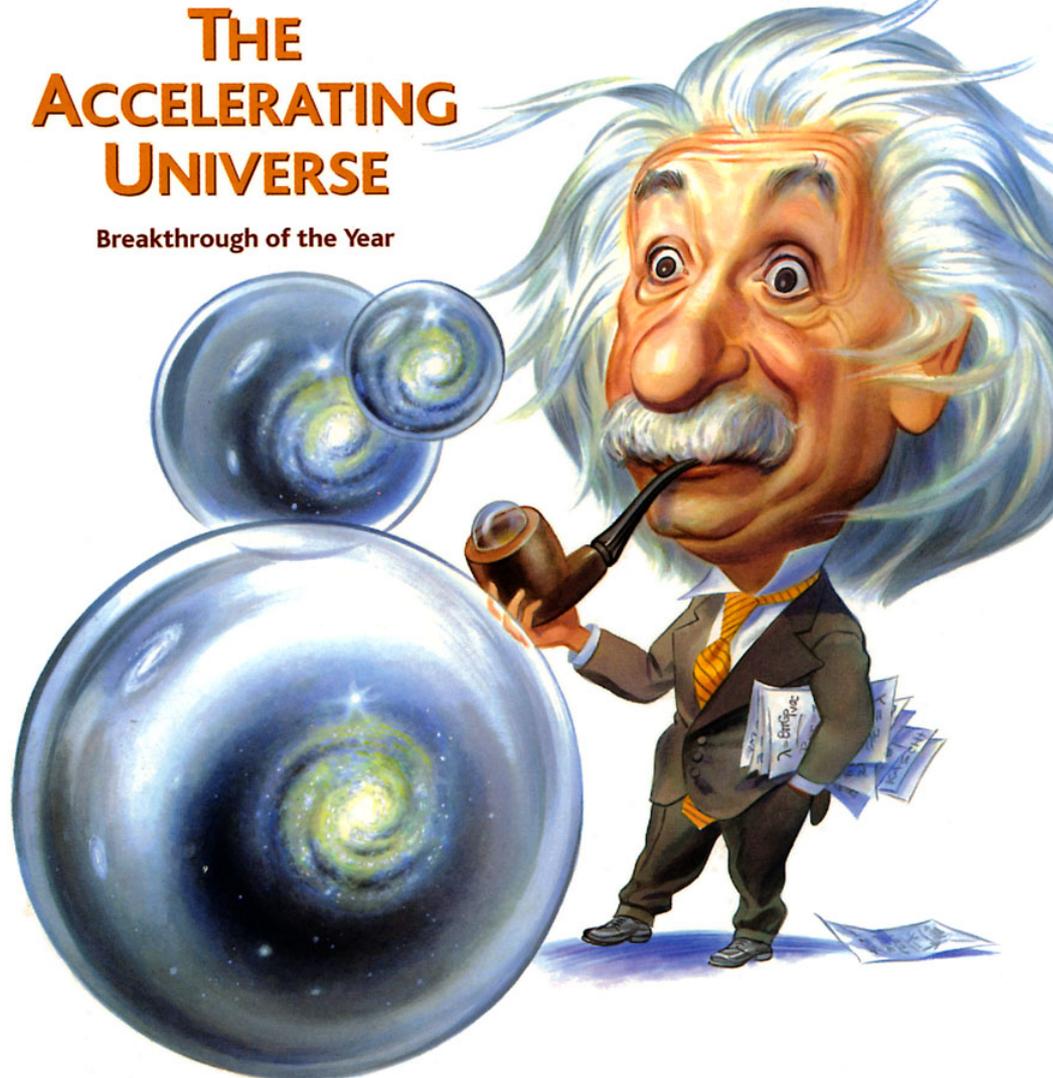
Science

18 December 1998

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

THE ACCELERATING UNIVERSE

Breakthrough of the Year



AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE

Entfern
entfern
expand
Univers
abstoss
werden

ne

Einstein zur Kosmologischen Konstante

Wir geben hierfür zunächst einen Weg an, der an sich nicht beansprucht, ernst genommen zu werden; er dient nur dazu, das Folgende besser hervortreten zu lassen.

Im folgenden führe ich den Leser auf dem von mir selbst zurückgelegten, etwas indirekten und holperigen Wege, weil ich nur so hoffen kann, daß er dem Endergebnis Interesse entgegenbringe. Ich komme nämlich zu der Meinung, daß die von mir bisher vertretenen

[Die Kosmologische Konstante] haben wir nur nötig, um eine quasi-statische Verteilung der Materie zu ermöglichen, wie es der Tatsache der kleinen Sterngeschwindigkeiten entspricht.

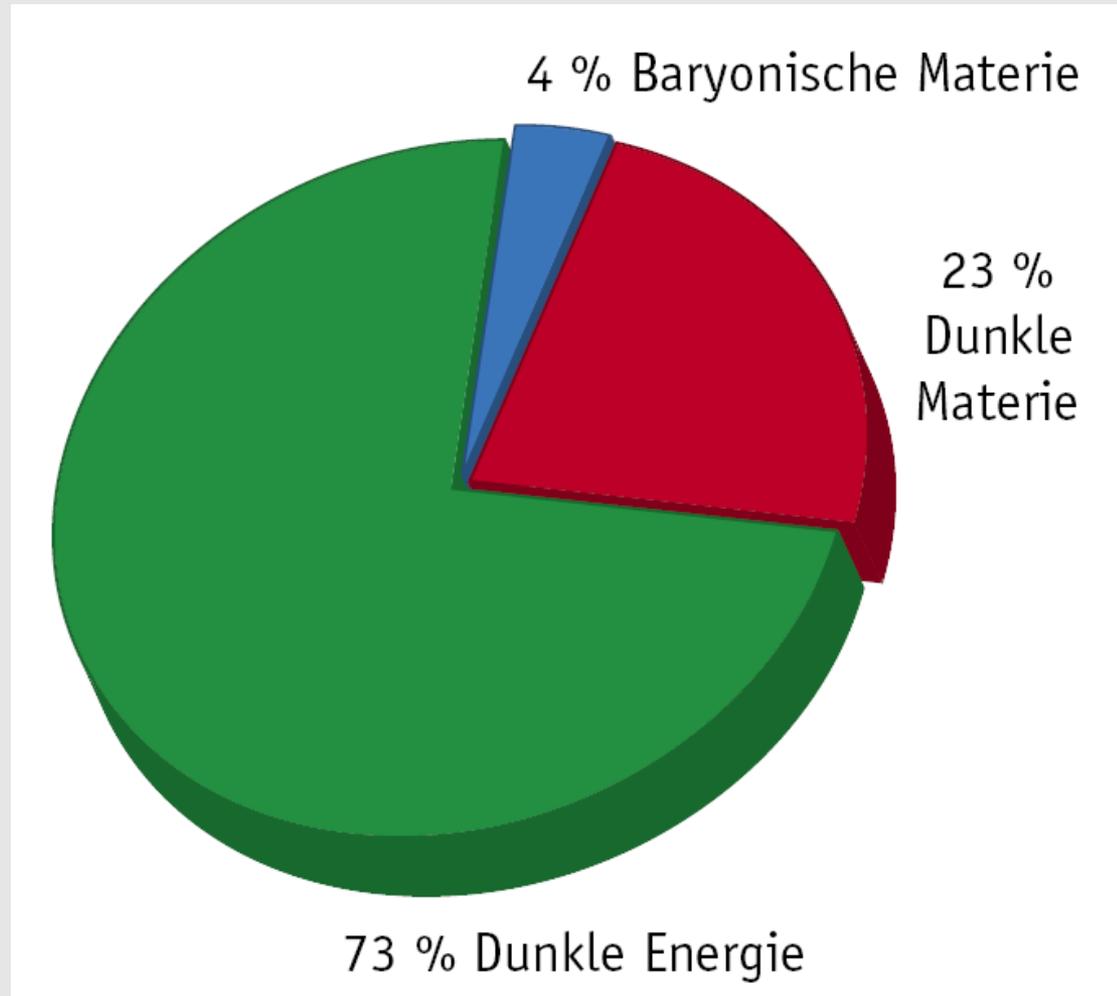
zeitlich und örtlich variabel, läßt sich aber im großen durch einen sphärischen Raum approximieren. Jedenfalls ist diese Auffassung logisch widerspruchsfrei und vom Standpunkte der allgemeinen Relativitätstheorie die naheliegendste; ob sie, vom Standpunkt des heutigen astronomischen Wissens aus betrachtet, haltbar ist, soll hier nicht untersucht werden. Um zu dieser widerspruchsfreien Auffassung zu gelangen, mußten wir allerdings eine neue, durch unser tatsächliches Wissen von der Gravitation nicht gerechtfertigte Erweiterung der Feldgleichungen der Gravitation einführen.

Einstein (1917)

Der Inhalt des Universums

Dunkle Materie und Dunkle Energie sind die bestimmenden Energiebeiträge des Universums.

Was sind sie?



Was bedeutet das? (3)

Das Universum besteht im wesentlichen
aus

nichts.

Das Universum expandiert für immer.

Im Moment existiert keine
überzeugende physikalische
Interpretation der Vakuumsenergie
(Dunkle Energie).

Interpretationen/Spekulationen

Einstein's Kosmologische Konstante

Bisher kein "Platz" im Standard Model der Teilchenphysik

Quintessence

Quantenmechanisches Teilchenfeld, das Energie in das Universum entlässt

Anzeichen einer höheren Dimension

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

Phantom Energie

Die Dunkle Energie ist so stark, dass das Universum auseinander fällt (Big Rip)

Zusammenfassung

95% der Energie im Universum
unverstanden

Materie wie wir sie kennen ist nur Verzierung

Vergangene Entwicklung des Universums
erklärbar

Dynamisches Alter des Universums grösser
als die ältesten bekannten Objekte

Neue Zweifel ...

Wie konstant sind die Naturkonstanten?

G , α , h , c