

J. Wirths Aktuelle Astronomie – Einführungskurs

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 1:** Sonne - Stern unter Sternen - 2010 Februar/März
- Modul 2:** Aufbau des Planetensystems und innere Planeten (Merkur und Venus) - 2010 Mai/Juni
- Modul 3:** Erde und Mond - 2010 August/September
- Modul 4:** Mars - 2010 November/Dezember
- Modul 5:** Jupiter, seine Monde und die Kleinen Körper
2011 Februar/März
- Modul 6:** Saturn und die faszinierende planetarer Monde
2011 Mai/Juni
- Modul 7:** Gasriesen am Rand des Sonnensystems (Uranus, Neptun und die Welt dahinter)
2011 Juli/September
- Modul 8:** Kometen, Heliosphäre und die Entstehung des Sonnensystems - 2011 November/Dezember

J. Wirths Aktuelle Astronomie – Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 9:** Interstell. Materie und die Entstehung von Sternen
2012 Februar 1, 15, 29
- Modul 10:** Aufbau u. Entwicklung v. Sternen u. ihre Strahlung
2012 Mai 9, 23, Juni 13
- Modul 11:** Die Sonne als Stern in der Milchstraße
2012 Juli 25, September 12, 26
- Modul 12:** Endstadien und Sonderfälle der Sternentwicklung
2012 November 7, 21, Dezember 5
- Modul 13:** Milchstraße
2013 Februar 6, 20, März 6
- Modul 14:** Galaxien, Galaxienhaufen, Dunkle Materie und die
großräumige Struktur des Kosmos
2013 Mai 15, 29, Juni 19

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

- Modul 15:** Radiogalaxien, Quasare und supermassive
Schwarze Löcher
2013 November 13, 27, Dezember 11
- Modul 16:** Dimensionen des Weltalls
2014 März 26, April 9, 23
- Modul 17:** Die Struktur des Kosmos
2014 Mai 14, 28, Juni 11

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modulübersicht

... wird fortgesetzt (2014, 2015 ...)

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Entgelte

9 €

**Schüler, Studenten, Auszubildende, Bonn-Ausweis,
Schwerbehinderte: 6 €**

J. Wirths Aktuelle Astronomie - Einführungskurs

Modul 16: *Dimensionen des Weltalls* *(Themen 3.5, 3.8, 4.1, 4.2)*

Modul 16

Themen

- 4.2 *Stein auf Stein –*
 Methoden der Entfernungbestimmung
- 3.5 *Alles flieht – das Hubble-Gesetz*
- 4.1 *Kosmologie –*
 Lebensgeschichte des Universums

4.2 *Stein auf Stein* –

Methoden der Entfernungsbestimmung

4.2.1 Grundlagen

	Kosmologie/Weltmodell	Methodik	Größe	Reichweite	M/m
statistische Methoden	Superhaufen	Hubble-Relation, Gravitationslinsen	z	< 4 Gpc	
	Galaxienhaufen	hellste Galaxien in Haufen	LKF	< 2.5 Gpc	-22...-20
	Virgo-Haufen	Supernovae SNe Ia, SN II	N/M _{pg}	< 2.5 Gpc	-20...-15
		H II-Regionen	∅	50 Mpc	–
Leuchtkraftfunktion		M _v	20 Mpc	-20...-15	
Delta Cephei-Veränderliche		P/L	20 Mpc	-7...-2	
indirekte Methoden	Kugelsternhaufen	LKF	20 Mpc	-10...-5	
	nahe Galaxien	hellste Sterne	M _v	20 Mpc	-9
	Lokale Gruppe	Novae	τ/L	20 Mpc	-9...-6
	Magellansche Wolken	hellste Sterne in Kugelsternhaufen	M _v	1 Mpc	-2.8...-1.9
	RR Lyrae-Veränderliche	M _v	1 Mpc	0.6	
	Sternhaufen	Hauptreihen Anpassung	m-M		
direkte Methoden	Eichung der Hauptreihe	spektroskopische	} Parallaxen	π	100 kpc
		Sternstrom-geometrische		π	5 kpc
				π	500 pc
	Astronomische Einheit	Himmelsmechanik	AE	500 AE	
	Radar	Laufzeiten	τ	100 AE	
	Urmeter	Winkelmessung	Sonnenparallaxe	π	1 AE

4.2.1 Grundlagen

Urmeter

Winkelmessung

Sonnenparallaxe

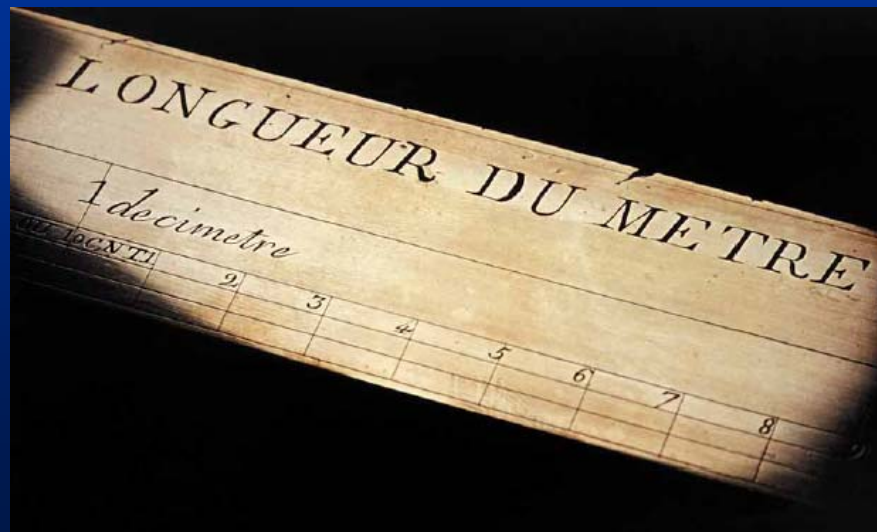
π

1 AE

4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das Urmeter

- 1790 Mai 8** Auftrag der Französischen Nationalversammlung an die Akademie der Wissenschaften
- 1791 März 26:** Beschluss der verfassunggeb. Versammlung: Längeneinheit 10^{-7} eines Erdmeridianquadranten
- 1795 April 7** Platin-Stab (25.3x4 mm): Urmeter (1 m bei 0°C) (Genauigkeit: 10^{-4})
- 1799 Juni 22** Fertigstellung. Heute im Bureau International des Poids et Mesures, Sevres bei Paris/F



4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das Urmeter

1790 Mai 8 Auftrag der Französischen Nationalversammlung an die Akademie der Wissenschaften

1791 März 26: Beschluss der verfassunggeb. Versammlung:
Längeneinheit 10^{-7} eines Erdmeridianquadranten

1795 April 7 Platin-Stab (25.3x4 mm): Urmeter (1 m bei 0°C)
(Genauigkeit: 10^{-4})

1799 Juni 22 Fertigstellung. Heute im Bureau International
des Poids et Mesures, Sevres bei Paris/F



4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das Urmeter

1790 Mai 8 Auftrag der Französischen Nationalversammlung
an die Akademie der Wissenschaften

1791 März 26: Beschluss der verfassunggeb. Versammlung:
Längeneinheit 10^{-7} eines Erdmeridianquadranten

1795 April 7 Platin-Stab (25.3x4 mm): Urmeter (1 m bei 0°C)
(Genauigkeit: 10^{-4})

1799 Juni 22 Fertigstellung. Heute im Bureau International
des Poids et Mesures, Sevres bei Paris/F



4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das 2. Urmeter

- 1790 Mai 8** Auftrag der Französischen Nationalversammlung an die Akademie der Wissenschaften
- 1791 März 26:** Beschluss der verfassunggeb. Versammlung: Längeneinheit 10^{-7} eines Erdmeridianquadranten
- 1795 April 7** Platin-Stab (25.3x4 mm): Urmeter (1 m bei 0°C) (Genauigkeit: 10^{-4})
- 1799 Juni 22** Fertigstellung. Heute im Bureau International des Poids et Mesures, Sevres bei Paris/F
- 1799 Dezember 10:** Einführung des metrischen Systems in Frankreich
- 1875 Mai 20** Anerkennung durch Intern. Meterkonvention
- 1889 September 26:** Neuer Meterstandard: Platin-Iridium-Stab (20x20 mm) (Genauigkeit: 10^{-7})

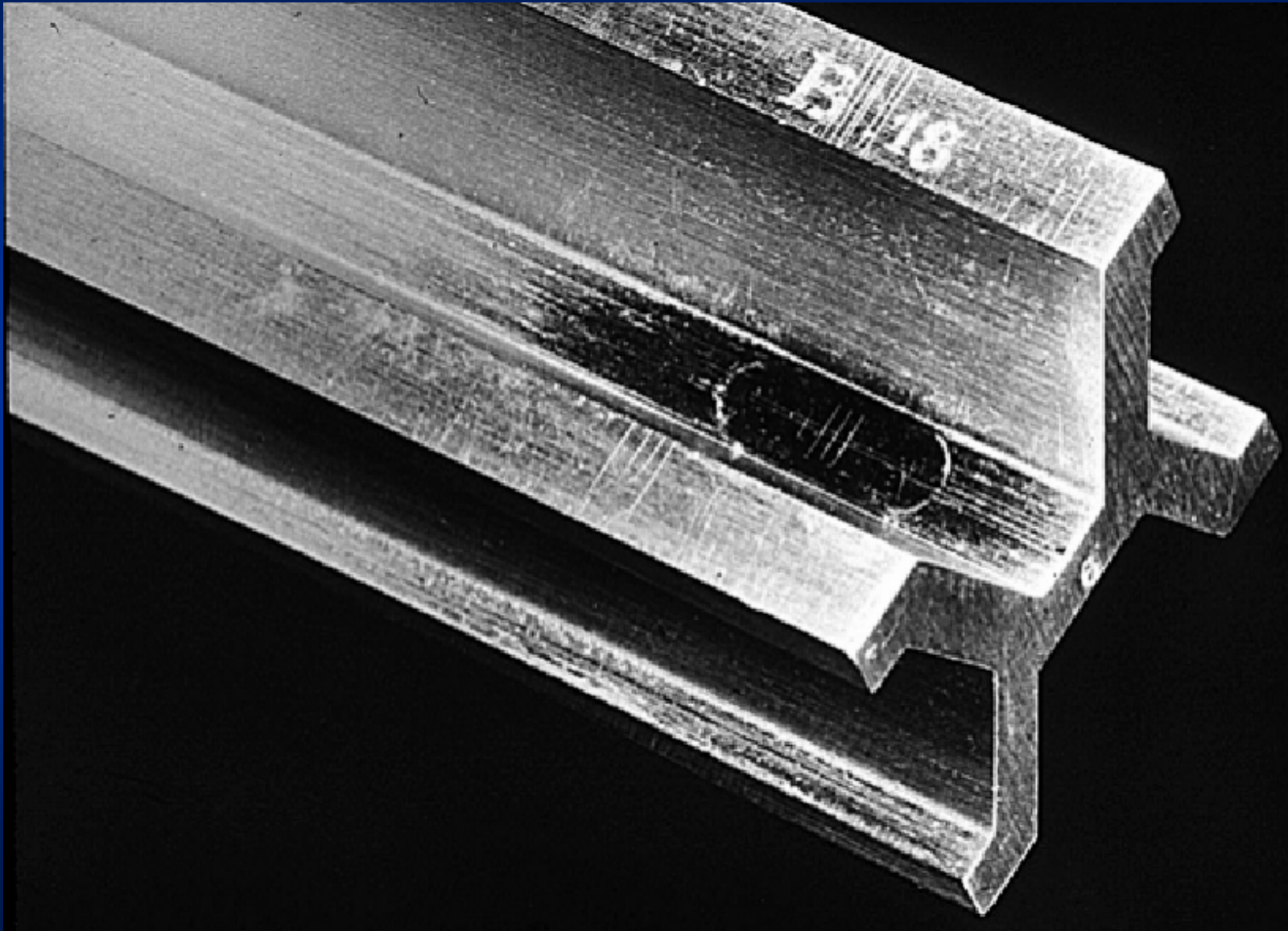
4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das 2. Urmeter



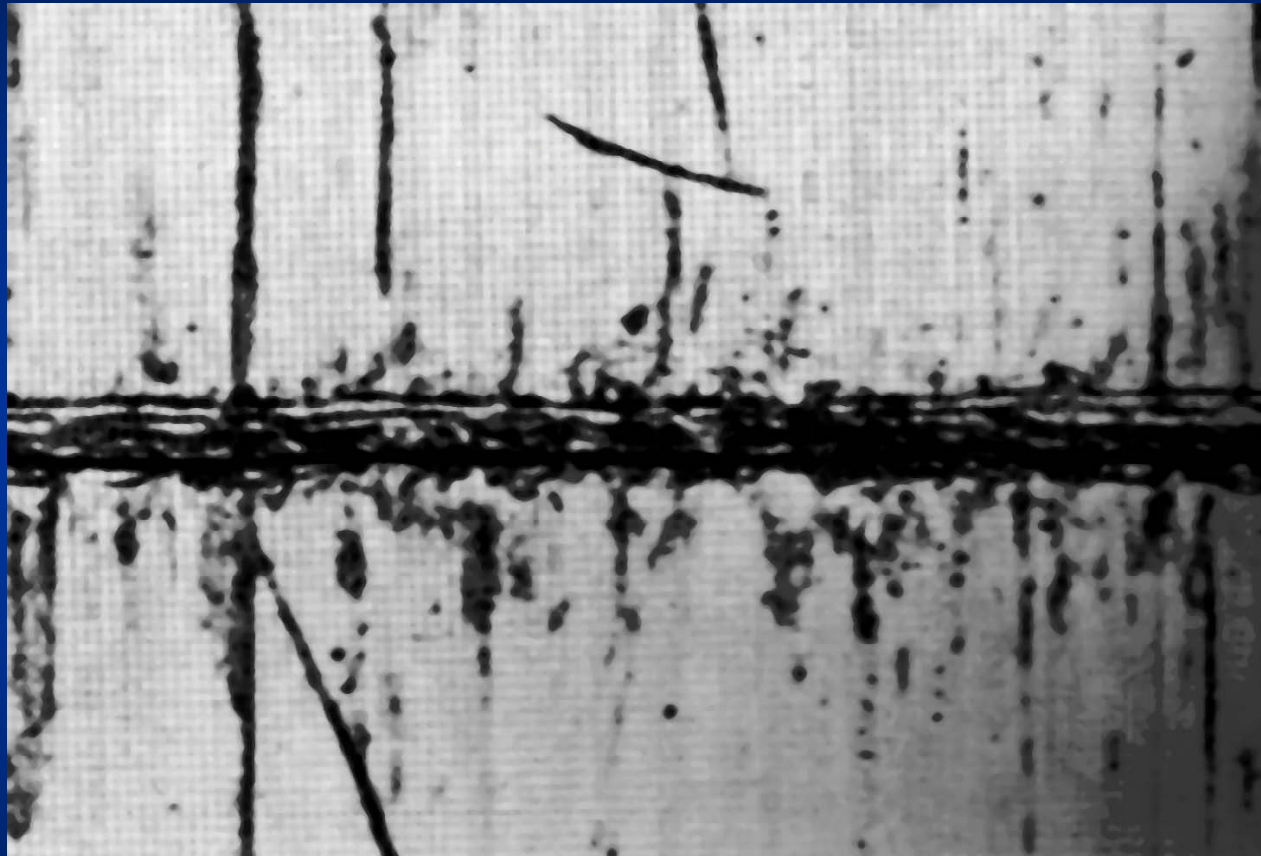
4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das 2. Urmeter



4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Das 2. Urmeter



Ritzung auf dem Maßstab

4.2.1 Grundlagen

4.2.1.1 Meterkonvention / Neudefinition

- 1960** **11. Generalkonferenz Maß und Gewicht:**
Einführung des „Système Internationale d’Unites“
(SI): $1 \text{ m} = 1'650'763.73 \lambda_{\text{m}}$
 $\lambda_{\text{m}} = 605.78027 \text{ nm}$ ($^{86}\text{Kr}: 5\text{d}^5 \Rightarrow 2\text{p}^{10}$)
(Genauigkeit: 10^{-8})
- 1974 März 2:** Einheitengesetz von 1969 (Neufassung)
Deutschland
- 1978 Januar 1:** Gesetzliches Verbot alter Einheiten in
Deutschland
- 1979 Dezember 20:** Richtlinie des EU-Rates (80/181/EWG)
(Einheiten im Messwesen)
- 1983 Oktober 20:** 17. Generalkonferenz definiert 1 m als die
Strecke, die das Licht in $1/299'792'458 \text{ s}$
zurücklegt. (Genauigkeit: 10^{-10} bis 10^{-11})

4.2.1 Grundlagen

4.2.1.2 Winkelmessung

Vollkreis: **Winkelmaß:** 360° ; $1^\circ = 60'$; $1' = 60''$
Bogenmaß: $2\pi = 6.283$
 (Umfang des Einheitskreises)

4.2.1 Grundlagen

4.2.1.3 Erdradius

1615

Willebrord Snell van Royen (gen. Snellius)

(*1580 – †1626-10-30)

Methode zur Triangulation des Erdumfangs

Alkmaar - Bergen op Zoom (Meridiendifferenz: 1°)

Veröffentlichung 1617 (Genauigkeit: ca. 3%)

(1621

Snelliussches Brechungsgesetz)

1669-70

Abbé Jean Picard (*1620-07-21 - ☼ 1628-10-12)

Bestimmung des Meridianbogens Soudon b.

Amiens - Malvoisine b. Paris über 35 Dreiecke zu

1°22'55" mit Quadrant, Fadenkreuzfernrohr

Teilstrecke: Faden + Hölzchen; 1 Toise = 1.949 m

1° = 57'060 Toise (Fehler: 0.025 %)

> Erdumfang: 40'035.56 km; -radius: 6'375.08 km

(heute: Äquator = 6'378.388; Pol = 6356.912 km)

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.1 Tägliche Parallaxe

Die Sonnenparallaxe π ist die tägliche Parallaxe der Sonne, das ist der Winkeldurchmesser, unter dem der Erdradius von der Sonne aus erscheint.

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.2 Geschichtliche Entwicklung

Autor	Datum	Herkunft der Daten	Entfernung Erde - Sonne	Sonnen- parallaxe π
Anaximander	-610...546		~54 Erdradien	~1.06°
Eudoxos	-408...355		9fache Mondentfernung	
Aristarch von Samos	-320...250		18...20fache Mondentfernung / 360 Erdradien	~9.5'
Hipparch	-190...120		2'490 Erdradien	~1.4'
Posidonius	-135...51		13'090 Erdradien	~15.8"
Ptolemäus	87...150		1'210 Erdradien	~2.8'
Nikolaus Kopernikus	1473...1543		1'500 Erdradien	~2.4'
Johannes Kepler	1571...1630		3'500 Erdradien	>1'

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.2 Geschichtliche Entwicklung

Autor	Datum	Herkunft der Daten	Entfernung Erde - Sonne	Sonnen- parallaxe π
Jeremiah Horrocks	1639	Venustransit 1639	87.7 Millionen km	15"
Giovanni Domenico Cassini	1672	Marsopposition Sept. 1672	138.4 Millionen km	9.5"
John Flamsteed	1672	Marsopposition Sept. 1672	131.5 Millionen km	10"
Abbé Jean Picard	1672	Marsopposition Sept. 1672	65.7 Millionen km	20"
Edmund Halley	1716	Trigonometrische Methode	111 Millionen km	

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.2 Geschichtliche Entwicklung

Autor	Datum	Herkunft der Daten	Entfernung Erde - Sonne	Sonnen- parallaxe π
William Smith	1770	Venustransite 1761/1769	152'895'091 km	8.6045"
Thomas Hornsby	1770	Venustransite 1761/1769	149'838'930 km	8.78"
Alexandre Guy Pingré	1770	Venustransite 1761/1769	142'998'457 km	9.2"
Josef Jérôme le François de Lalande	1770	Venustransite 1761/1769	148'151'555 km	8.88"
	1771	Venustransite 1761/1769	153(1) Millionen km	8.55 ...8.63"
Anders Johann Lexell	1771	Venustransite 1761/1769	151'565'185 km	8.68"
Alexandre Guy Pingré	1772	Venustransite 1761/1769	149'498'387 km	8.80"
Anders Planmann	1772	Venustransite 1761/1769	156'060'000 km	8.43"
Anders Johann Lexell	1772	Venustransite 1761/1769	152'443'315 km	8.63"
P. Maximilián Hell SJ	1773/1774	Venustransite 1761/1769	152'216'760 km	8.70"

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.2 Geschichtliche Entwicklung

Autor	Datum	Herkunft der Daten	Entfernung Erde - Sonne	Sonnen- parallaxe π
Johann Franz Encke	1824	Venustransite 1761/1769	153'374'581 km	8.5776"
Johann Franz Encke	1835	Venustransite 1761/1769	153'492'686 km	8.571(37)"
Asaph Hall	1862	Marsparallaxe	148'805'091 km	8.841"
Johann Gottfried Galle	1875	Flaraparallaxe	148'268'433 km	8.873"
Sir David Gill	1881	Marsparallaxe	149'838'930 km	8.78"
Simon Newcomb	1890	Venustransite 1761/1769	149.7(9) Millionen km	
Simon Newcomb	1891	Venustransite 1874/1882	149.59(31) Millionen km	8.85"
Arthur Robert Hinks	1900	Erosparallaxe	149'396'526 km	8.806"
	1941	Erosparallaxe	149'668'465 km	8.790"
IAU	1976		149'597'870.691(30) km	8.794'148"
NASA	1990	Radarmessung	149'597'836.257 km	8.794'15"

„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Entfernung Erde-Sonne errechnet sich mit der täglichen Parallaxe: $L = R / \pi$
 $R = \text{Erdradius} = 6'378.14 \text{ km}$

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.3 Planetendurchgänge

Merkurdurchgänge: 1970-2050

Datum	UT	Separation	Sichtbarkeit
1970 Mai 9	08:16	114"	
1973 Nov. 10	10:32	26"	
1986 Nov. 13	04:07	471"	
1993 Nov. 6	03:57	927"	
1999 Nov. 15	21:41	963" (streifend)	Süd-Pazifik; partiell: Australien, Neuseeland, Antarktis
2003 Mai 7	07:52	708"	Europa, Afrika, Asien, Australien
2006 Nov. 8	21:41	423"	
2016 Mai 9	14:57	319"	
2019 Nov. 11	15:20	76"	
2032 Nov. 13	08:54	572"	
2039 Nov. 7	08:46	822"	
2049 Mai 7	14:24	512"	

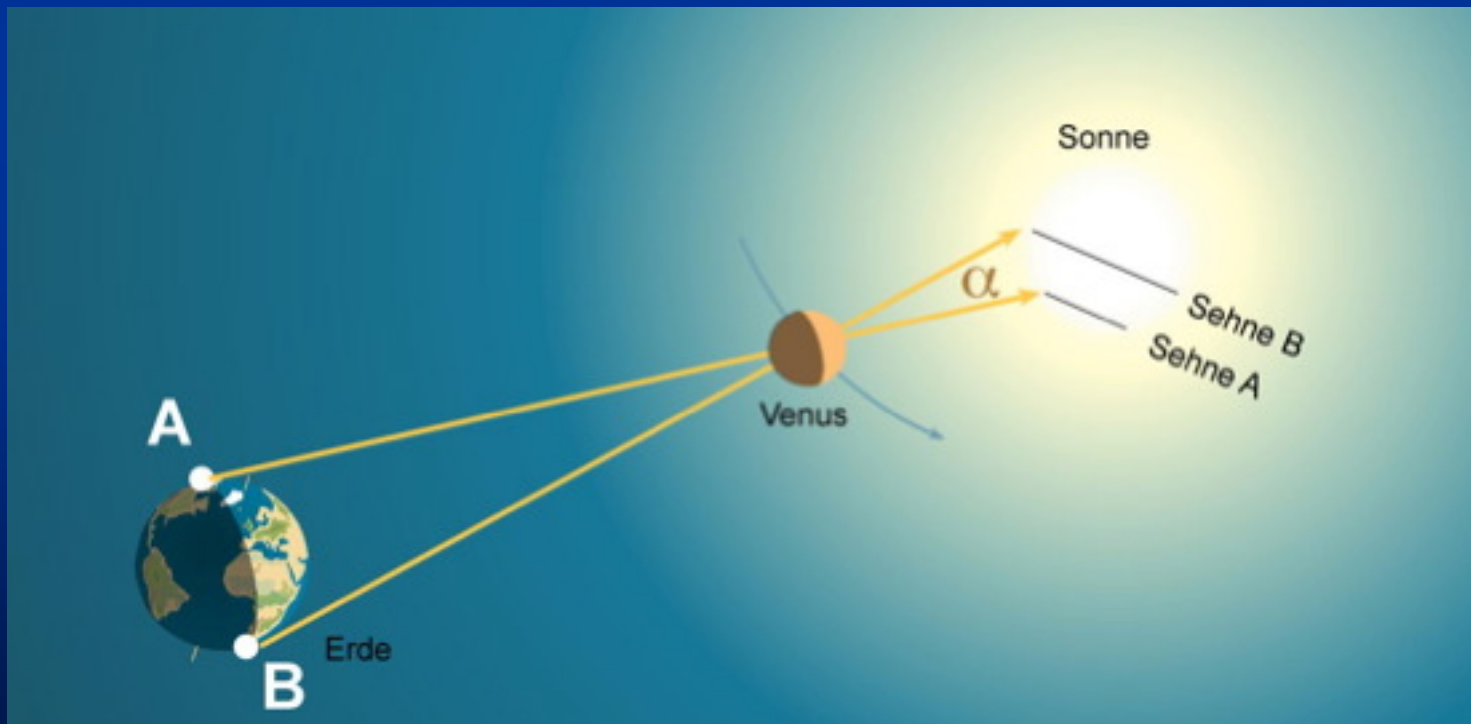
Scheinbare Größe: Mai - 12", November - 10"
Wiederholzyklus: alle 3, 7, 10, 13, 33 Jahre (letzte beiden für
die Mai-Termine)

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.3 Planetendurchgänge

Die Sonnenparallaxe π ist die tägliche Parallaxe der Sonne, das ist der Winkeldurchmesser, unter dem der Erdradius von der Sonne aus erscheint.

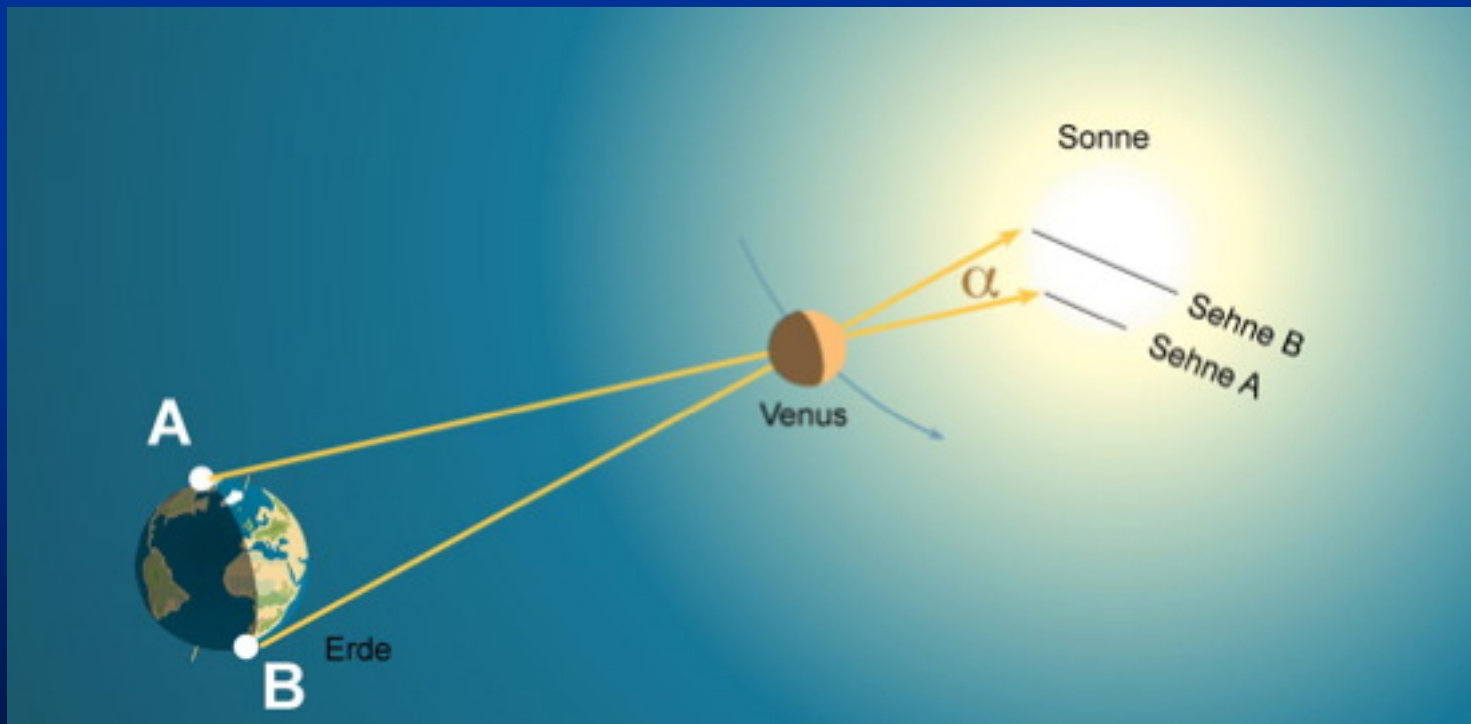
hier: $\alpha = 2\pi$



4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.3 Planetendurchgänge

Das Streckenverhältnis Erde-Venus zu Venus-Sonne ist durch das 3. Keplersche Gesetz bekannt.

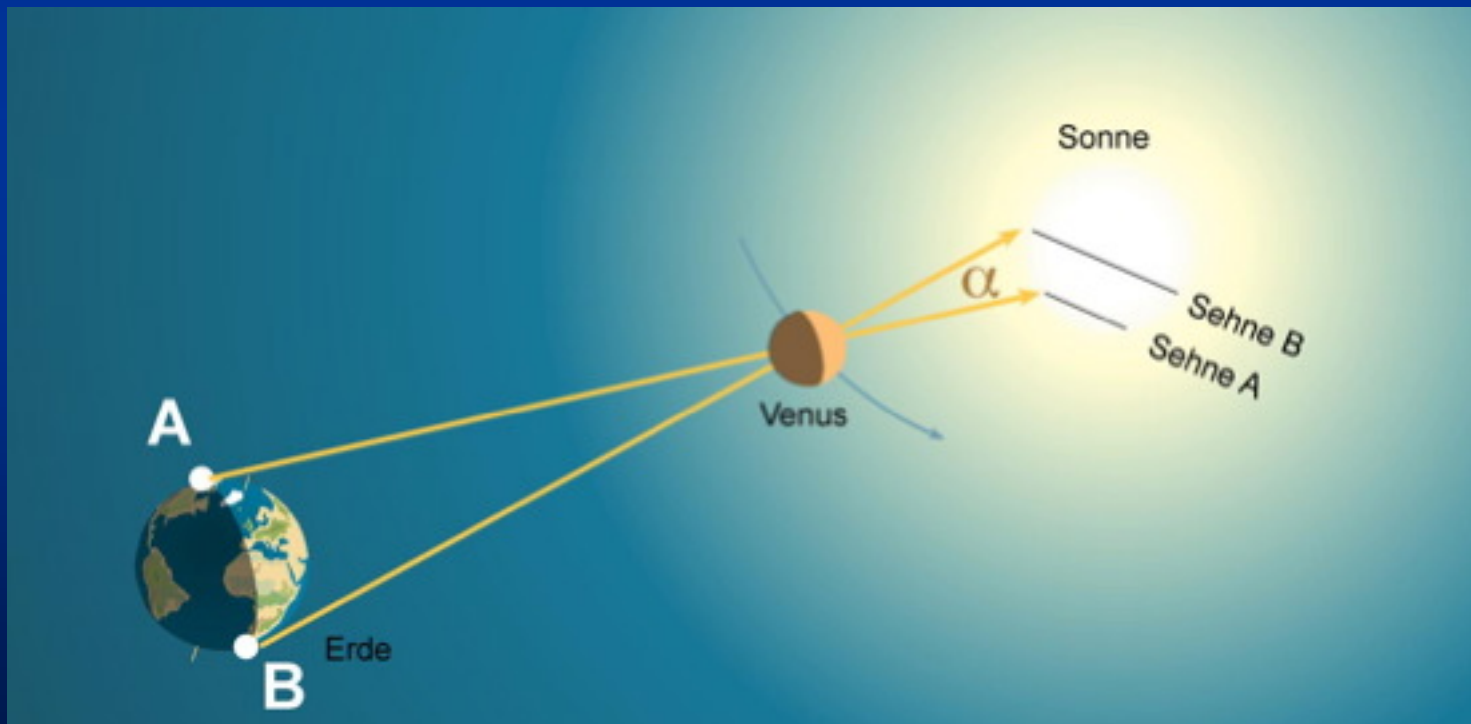


4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.3 Planetendurchgänge

Kann man den Parallaxenwinkel $\alpha = 2\pi$ messen, so erlaubt die Bestimmung der Strecke A-B auf der Erde (hier: Erddurchmesser $2R$) die Bestimmung der absoluten Entfernung Erde-Sonne L :

$$\alpha = 2\pi = 2R / L$$



4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.3 Planetendurchgänge

Venusdurchgänge: 1601-2200

Datum	UT	Separation	Sichtbarkeit
1631			
1639			
1761			
1769			
1874			
1882			
2004 Jun. 8	08:19	627"	Europa, Ost-Kanada, USA
2012 Jun. 6	01:28	553"	Ende: Europa
2117 Dez. 11	02:48	724"	
2125 Dez. 8	16:01	733"	

Scheinbare Größe: 61" (mit bloßem Auge sichtbar)
Wiederholzyklus: jeweils nach 8, 121.5, 8, 105.5 Jahren usw.

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.4 Bestimmung der Astronomischen Einheit

Umrechnung der Parallaxe vom Gradmaß ins Bogenmaß:

$$\begin{aligned} & (8.794'148'' / 3'600''/^{\circ}) \cdot 2\pi/360^{\circ} \\ & = 0.002'442'819^{\circ} \cdot 2\pi/360^{\circ} = 0.000'042'635'233 \end{aligned}$$

Bestimmung der Astronomischen Einheit:

$$L = R / \pi$$

$$L = 6'378.14 \text{ km} / 0.000'042'635'233 = 149'597'870.691 \text{ km}$$

4.2.2 Sonnenparallaxe

4.2.2.5 Radar-Echo-Vermessungen

Erreichen Genauigkeit von 10^{-4} .

4.2.3 Drittes Keplersches Gesetz

$$P_1^2 / P_2^2 = a_1^3 / a_2^3$$

P: Umlaufperiode
a: große Bahnhalbachse

Bei Vergleich mit der Erde vereinfacht sich die Gleichung auf:

$$P^2 = a^3$$

**wenn P in Jahren (a) und a in Astronomischen Einheiten (AE)
angegeben werden.**

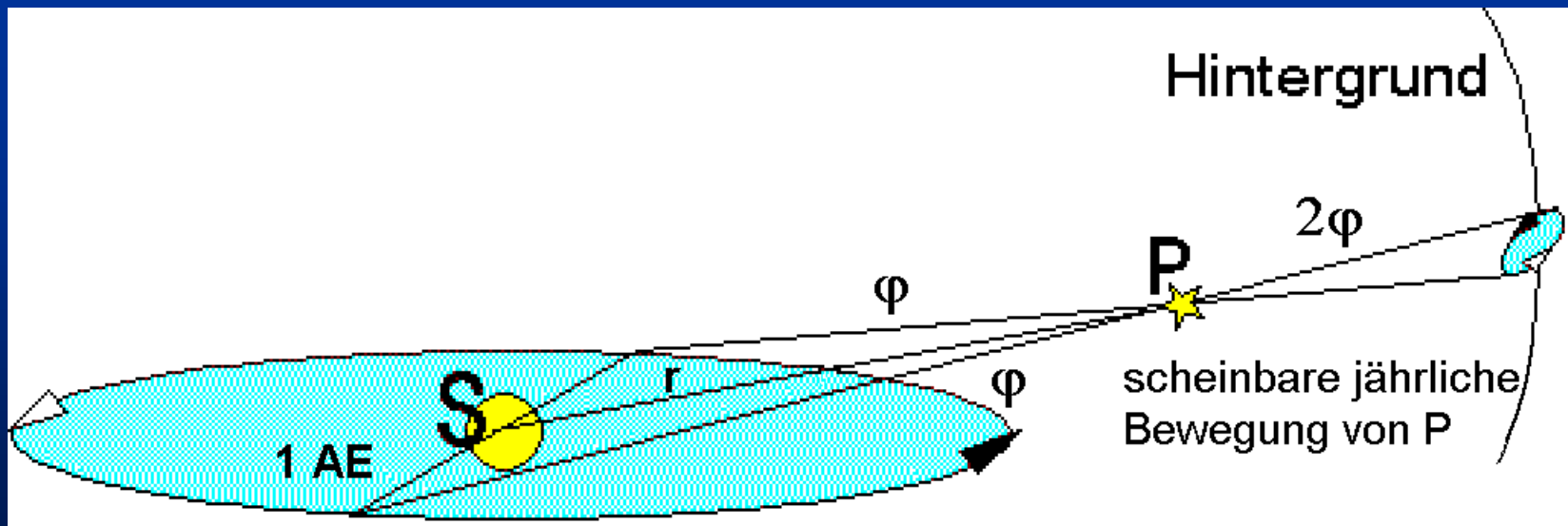
4.2.1 Grundlagen

direkte Methoden	Eichung der Hauptreihe		spektroskopische	} Parallaxen	π	100 kpc
	Astronomische Einheit		Sternstrom-		π	5 kpc
			geometrische		π	500 pc
			Himmelsmechanik		AE	500 AE
	Radar		Laufzeiten		τ	100 AE
	Urmeter	Winkelmessung	Sonnenparallaxe		π	1 AE

4.2.4 Trigonometrische Parallaxen

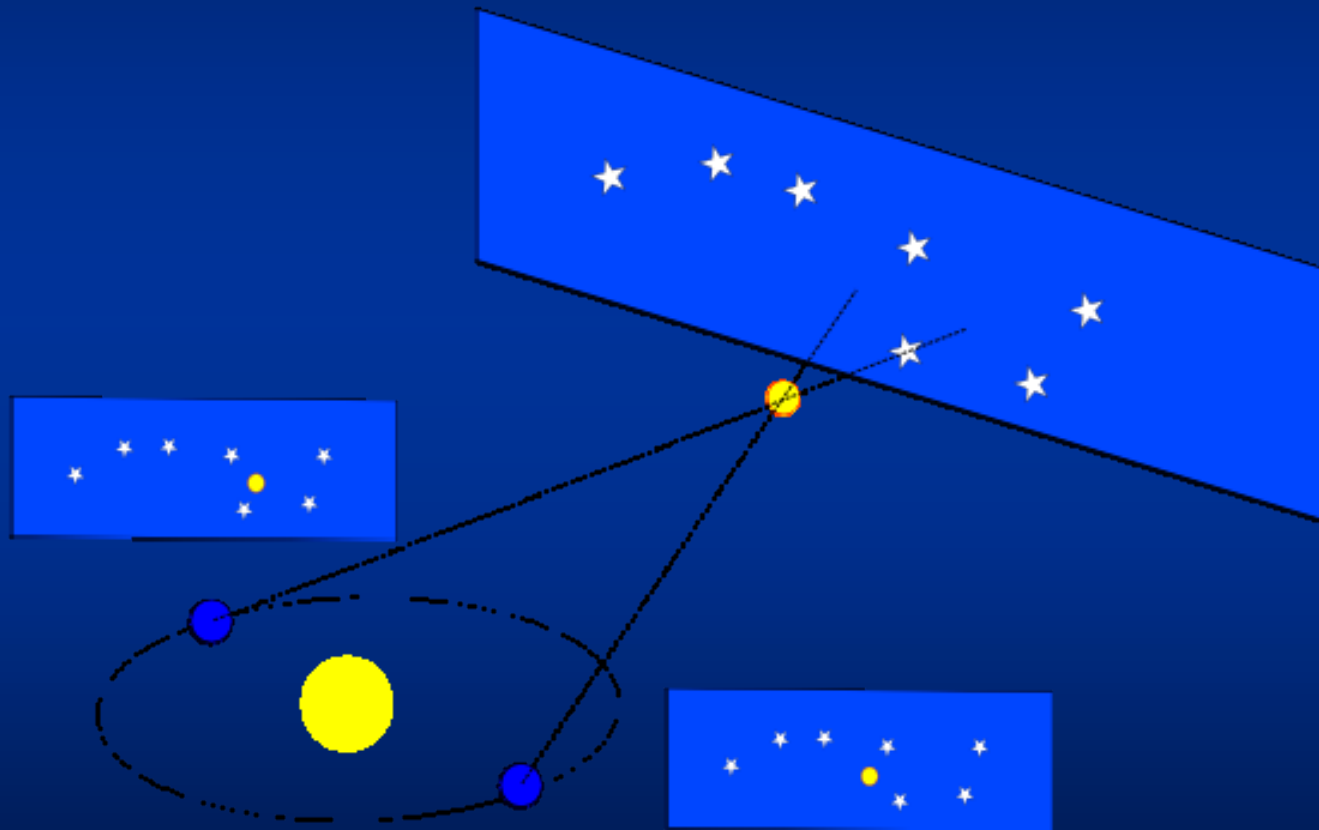
Die Sternparallaxe φ ist die jährliche Parallaxe eines Sterns und damit der Winkel, unter dem der Erdbahnhalm von einem Stern aus erscheint.

**Sie wird in Einheiten von „pc“ (parsec oder „Parallaxen-
sekunden“) gemessen und bei 1 pc geeicht. Das ist die
Entfernung, in der die scheinbare jährliche Bewegung einen
Winkel von 2φ umfaßt und entspricht 3.26 Lichtjahren.**



4.2.4 Trigonometrische Parallaxen

1. Sternparallaxe durch Friedrich Wilhelm Bessel (1837) am Stern 61 Cyg: $0.3''$



4.2.4 Trigonometrische Parallaxen

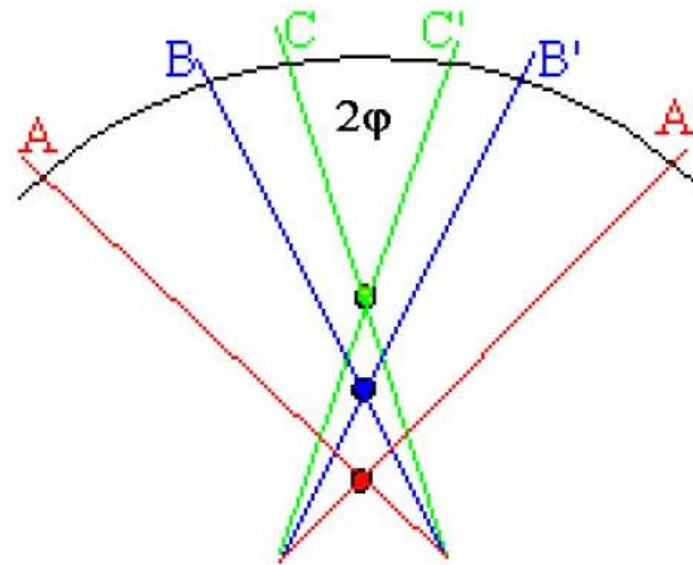
1. Sternparallaxe durch Friedrich Wilhelm Bessel (1837) am Stern 61 Cyg: 0.3''

$$r = \frac{1 AE}{\tan \varphi}$$

$$\varphi = 1'' \Rightarrow r = 206'265 AE$$

$$1 pc = 3.26 Lj$$

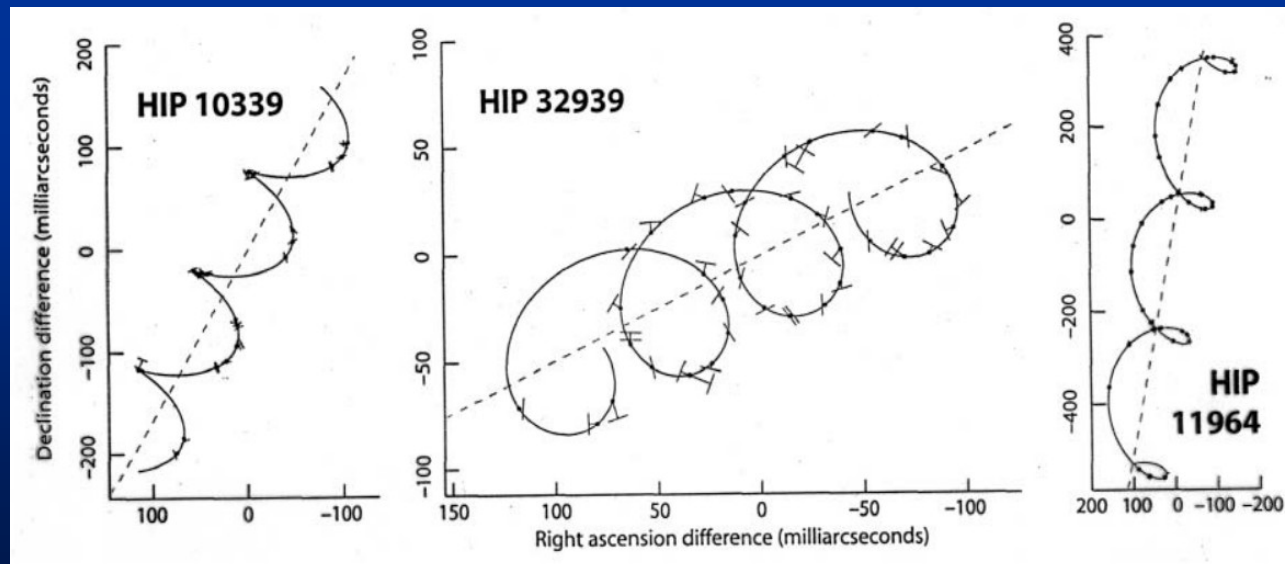
$$r = \frac{1''}{\varphi} / pc$$



4.2.4 Trigonometrische Parallaxen

Nächste Sterne	π / "	r / pc
Proxima Cen	0.772	1.31
α Cen a+B	0.746	1.34
Barnards Pfeilstern	0.546	1.83
Wolf 359	0.429	2.33
HD 95735	0.402	2.49

**Astrometrie-Satellit Hipparcos misst Parallaxen
 $\geq 0.002'' \Rightarrow$ Reichweite: 500 pc**



4.2.5 Christiaan Huygens' Versuch

zur Bestimmung des Abstands zu den Fixsternen an Sirius (1698)

Ausgangspunkt:

Sterne sind ungefähr so groß und hell wie die Sonne.

Er verfertigte eine Blende mit einem Loch, das er immer mehr verkleinerte, bis die Helligkeit, die hindurchfiel, etwa der des Sirius entsprach. Durch Vergleich und Umrechnung erhielt er folgendes

Ergebnis: 0.4 Lj – tatsächlich: ~9 Lj

(Sirius ist allerdings auch doppelt so groß und 25mal so hell wie die Sonne.)

„Es haben sich einige von uns Wissenschaftlern um die Erforschung des Raumes zu den Fixsternen bemüht, konnten aber wegen des Mangels an den hierzu benötigten genauen und enormen Fleiß erfordernden Beobachtungen keine Sicherheit erlangen.

Es scheint also, dass der einzige Forschungsweg mir überlassen wurde, auf dem wenigstens etwas, das der Wahrheit ähnelt, in dieser so schwierigen

Forschungsangelegenheit erlangt werden kann.“

4.2.6 Sternstromparallaxen

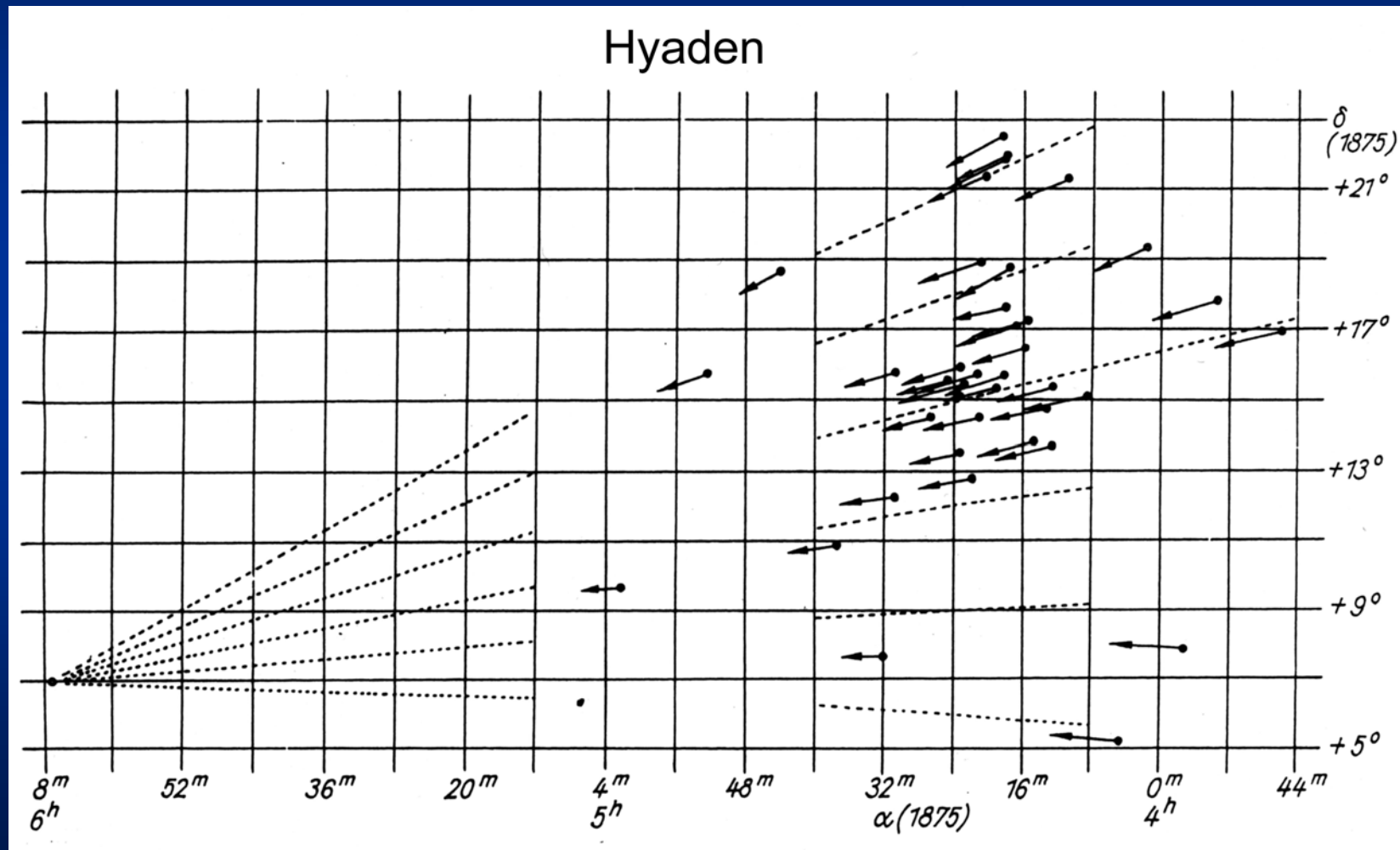
an Bewegungssternhaufen
1908 Boss an den Hyaden



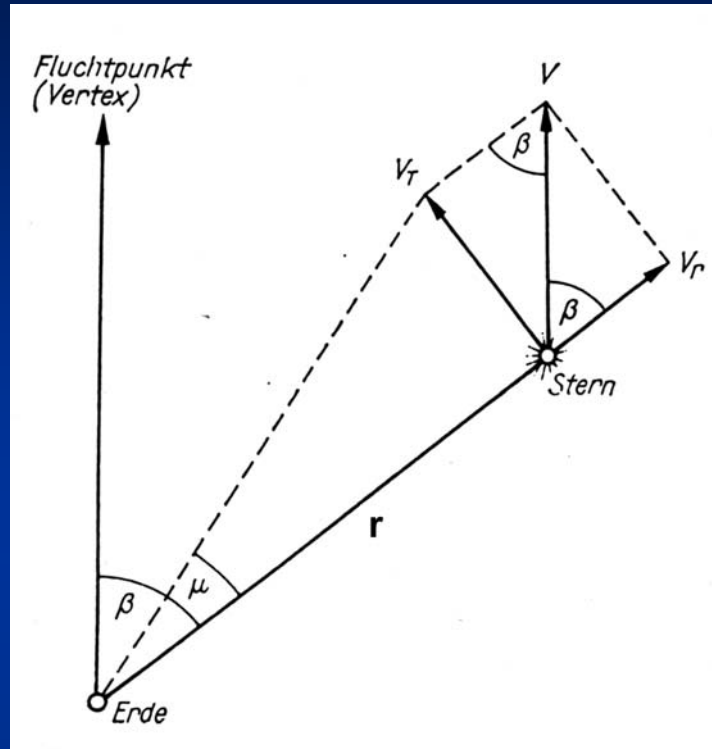
Sternbild Orion mit den Hyaden

4.2.6 Sternstromparallaxen

an Bewegungssternhaufen
1908 Boss an den Hyaden



4.2.6 Sternstromparallaxen



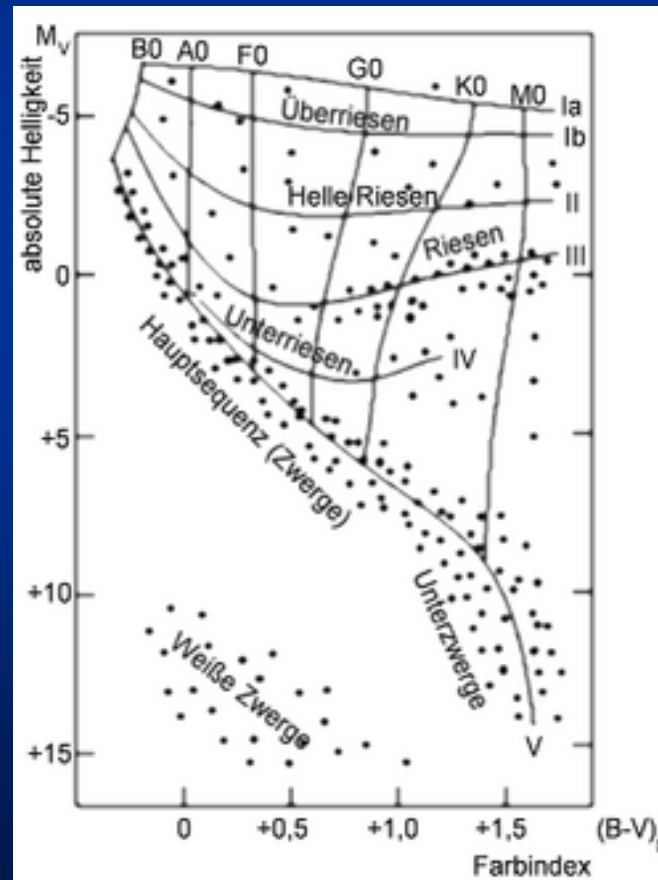
$$r = 0.21 v_r \tan \beta / \mu$$

(mit v_r /km s⁻¹ und μ /" pro Jahr)

4.2.7 Spektroskopische Parallaxen

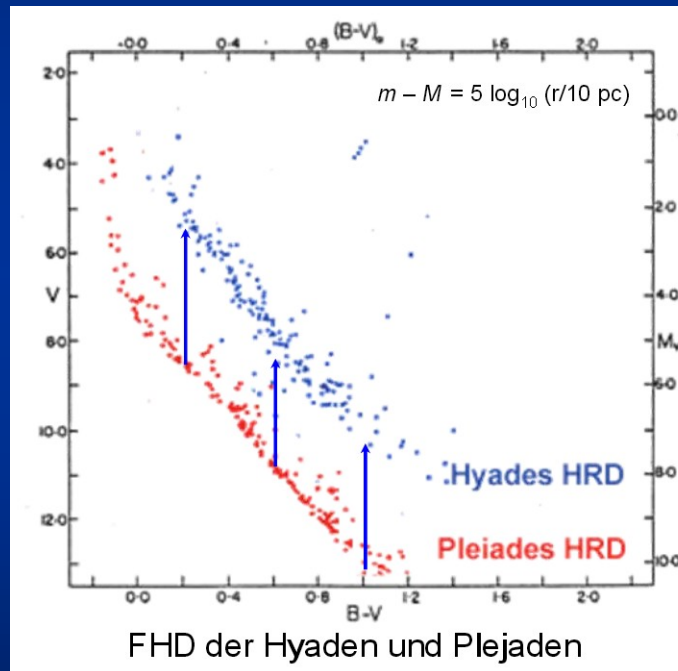
Spektrum von Sternen lässt Rückschluss auf Leuchtkraftklasse zu

$$\text{SpT} + \text{LKK} \Rightarrow M_V + m_V \Rightarrow r$$



4.2.8 Hauptreihenanpassung

Durch Vergleich mit bekanntem HRD erhält man das
Entfernungsmodul:
 $m - M = 5 \log r - 5$



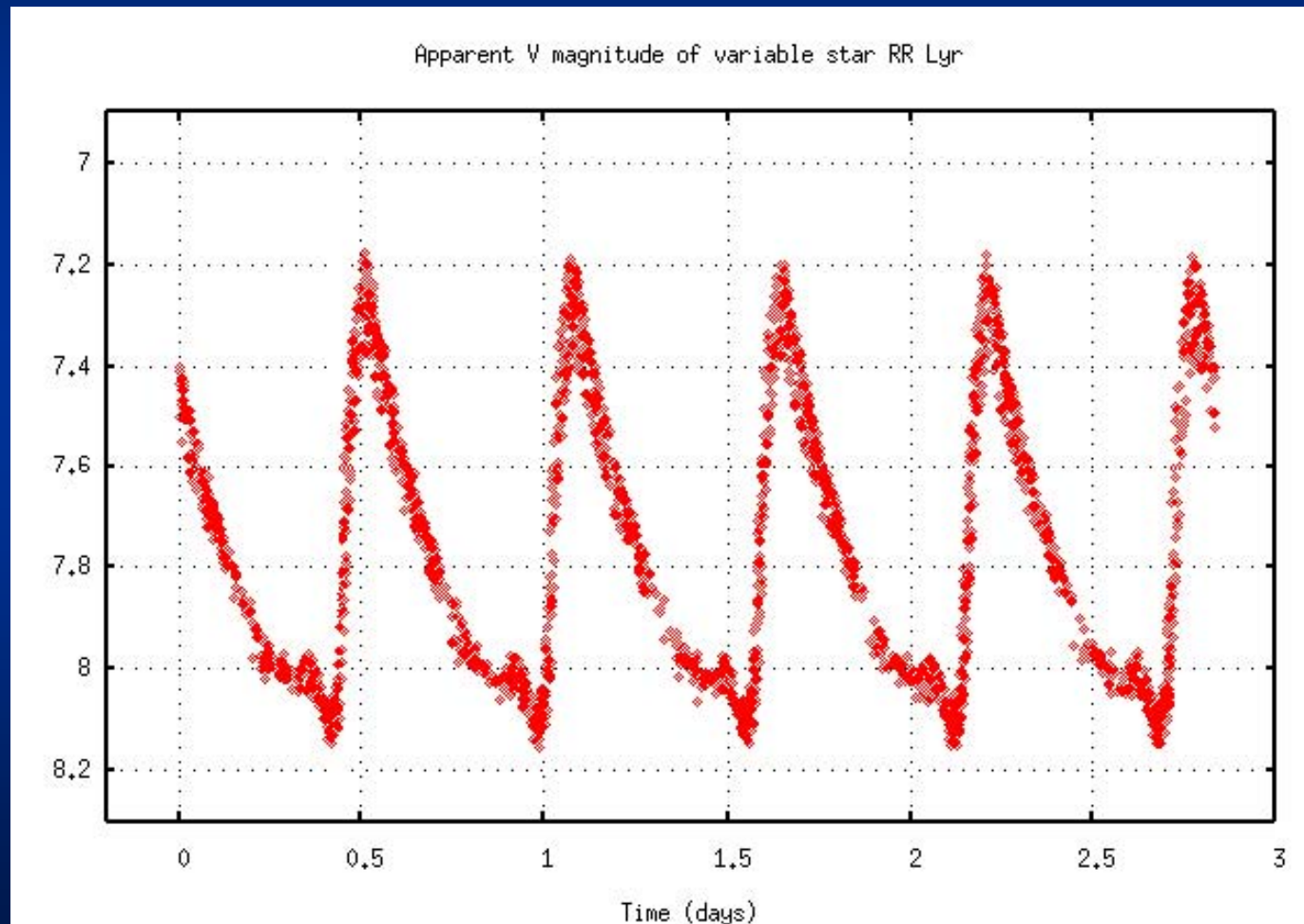
Hyaden: 46 pc
Plejaden: 135 pc

4.2.1 Grundlagen

indirekte Methoden	nahe Galaxien	hellste Sterne	M_V	20 Mpc	-9
	Lokale Gruppe	Novae	τ/L	20 Mpc	-9...-6
	Magellansche	hellste Sterne in Kugelsternhaufen	M_V	1 Mpc	-2.8...-1.9
	Wolken	RR Lyrae-Veränderliche	M_V	1 Mpc	0.6
direkte Methoden	Sternhaufen	Hauptreihen Anpassung	m-M		
	Eichung der Hauptreihe	spektroskopische	} Parallaxen	π	100 kpc
		Sternstrom-		π	5 kpc
		geometrische		π	500 pc
	Astronomische Einheit	Himmelsmechanik	AE	500 AE	
	Radar	Laufzeiten	τ	100 AE	
	Urmeter Winkelmessung	Sonnenparallaxe	π	1 AE	

4.2.9 RR Lyrae-Veränderliche

Es gibt eine Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für diesen Sterntyp in seinem Minimum.



4.2.9 RR Lyrae-Veränderliche

Es gibt eine Perioden-Leuchtkraft-Beziehung für diesen Sterntyp in seinem Minimum.

RR Lyrae-Veränderliche

log P	SpT*
-0.6	A4...A9
-0.4	A5...F1
-0.2	A5...F2
-0.0	A7...F3

$$M_V = +0.6 \pm 0.3^*$$

$$M_{pg} = +0.95^*$$

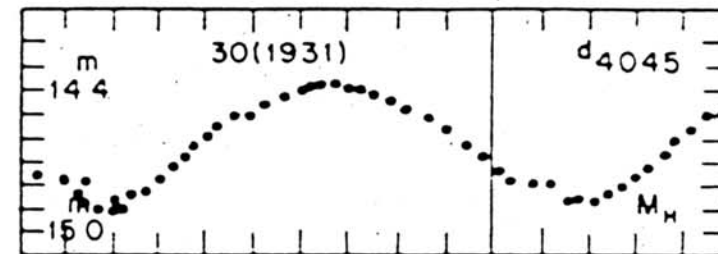
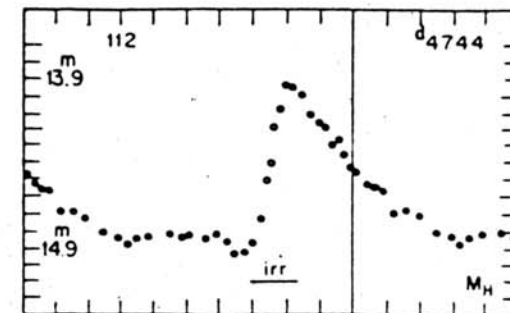
für RRab

$$m_* \approx 1 M_\odot$$

$$7.3 \leq R/R_\odot \leq 8.3$$

$$5'900 \leq T_{\text{eff}} / K \leq 7'200$$

* Daten nach C. Hoffmeister



4.2.10 Hellste Sterne in Kugelsternhaufen

In „metallarmen“ Kugelsternhaufen:

$$M_v = -2.5^m \pm 0.5^m$$



NGC 5466 (Adam Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona)

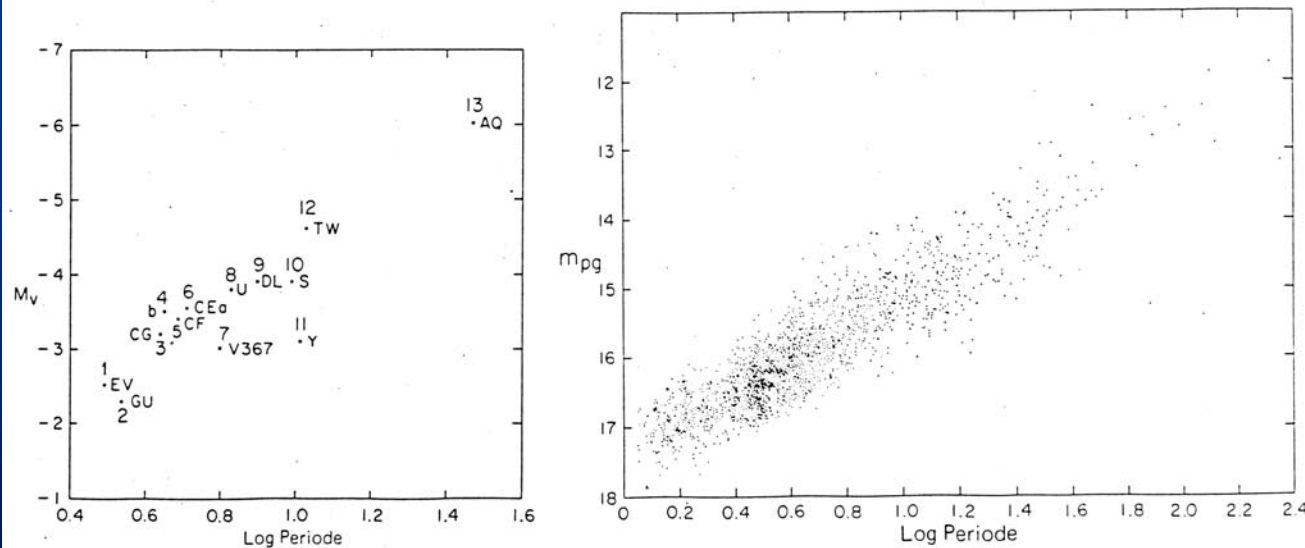
4.2.11 δ Cephei-/W Virginis-Veränderliche

Pulsationsveränderliche mit Ionisation/Rekombination von Wasserstoff und Helium über die Gasdichte innerhalb schmaler Temperaturgrenzen mit strenger Perioden-Leuchtkraft-Beziehung

4.2.11 δ Cephei-/W Virginis-Veränderliche

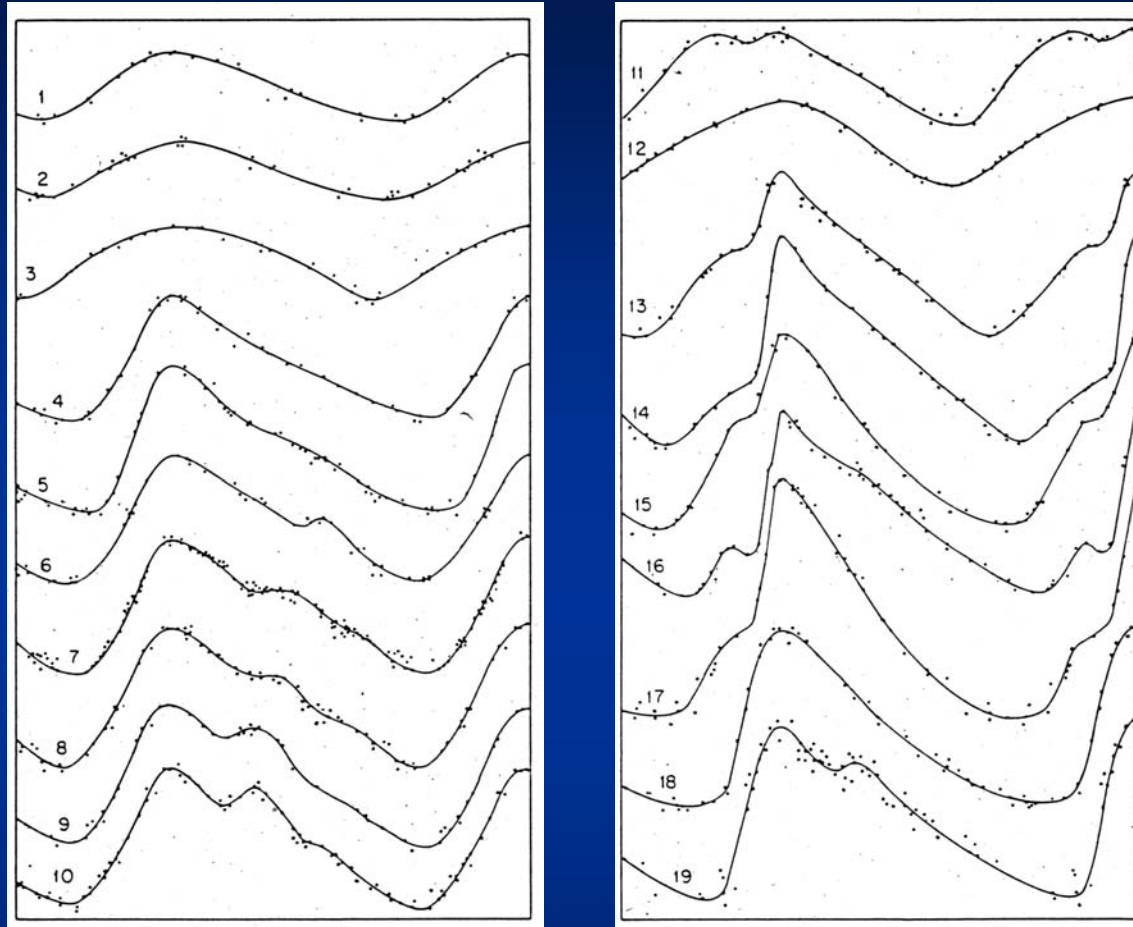
δ Cephei / W Virginis-Veränderliche

Typ	log P	M_V^*	M_B^*	M_{pg}^{**}	SpT*	$\Delta m(t)^*$
δ Cep	0.4	-2.6	-2.2	-2.0	F5...F8	0.4
	0.8	-3.5	-2.9	-3.0	F6...G3	0.8
	1.2	-4.4	-3.6	-4.0	F7...G8	1.0
	1.6	-5.3	-4.4	-5.0	F8...K1	1.4
	$M_V = 1.67^m - 2.54^m \log P^{***}$					
W Vir	0.4	-1.3	-0.9		F2...F5	0.6
	0.8	-2.2	-1.6		F4...G0	0.7
	1.2	-3.1	-2.3		F6...G3	0.8
	1.6	-4.0	-3.1		F7...G5	1.0
	$M_V = (-0.35 \pm 0.15)^m - (1.75 \pm 0.10)^m \log P^{***}$					



* Daten nach C. Hoffmeister; ** Daten nach C. Payne-Gaposchkin, *** nach M. Grewing

4.2.11 δ Cephei-/W Virginis-Veränderliche



Nr.	Name	Periode Tage	Nr.	Name	Periode Tage	Nr.	Name	Periode Tage
1	SU Cassiopeiae	1.95	7	U Sagittarii	6.75	13	Z Lacertae	10.89
2	DT Cygni	2.50	8	η Aquilae	7.18	14	TX Cygni	14.71
3	SZ Tauri	3.15	9	VY Cygni	7.86	15	SZ Cygni	15.11
4	V386 Cygni	5.24	10	S Sagittae	8.38	16	X Cygni	16.39
5	δ Cephei	5.37	11	BZ Cygni	10.14	17	CD Cygni	17.07
6	MW Cygni	5.96	12	ξ Geminorum	10.15	18	T Monocerotis	27.01
						19	SV Vulpeculae	45.13

4.2.11 δ Cephei-/W Virginis-Veränderliche



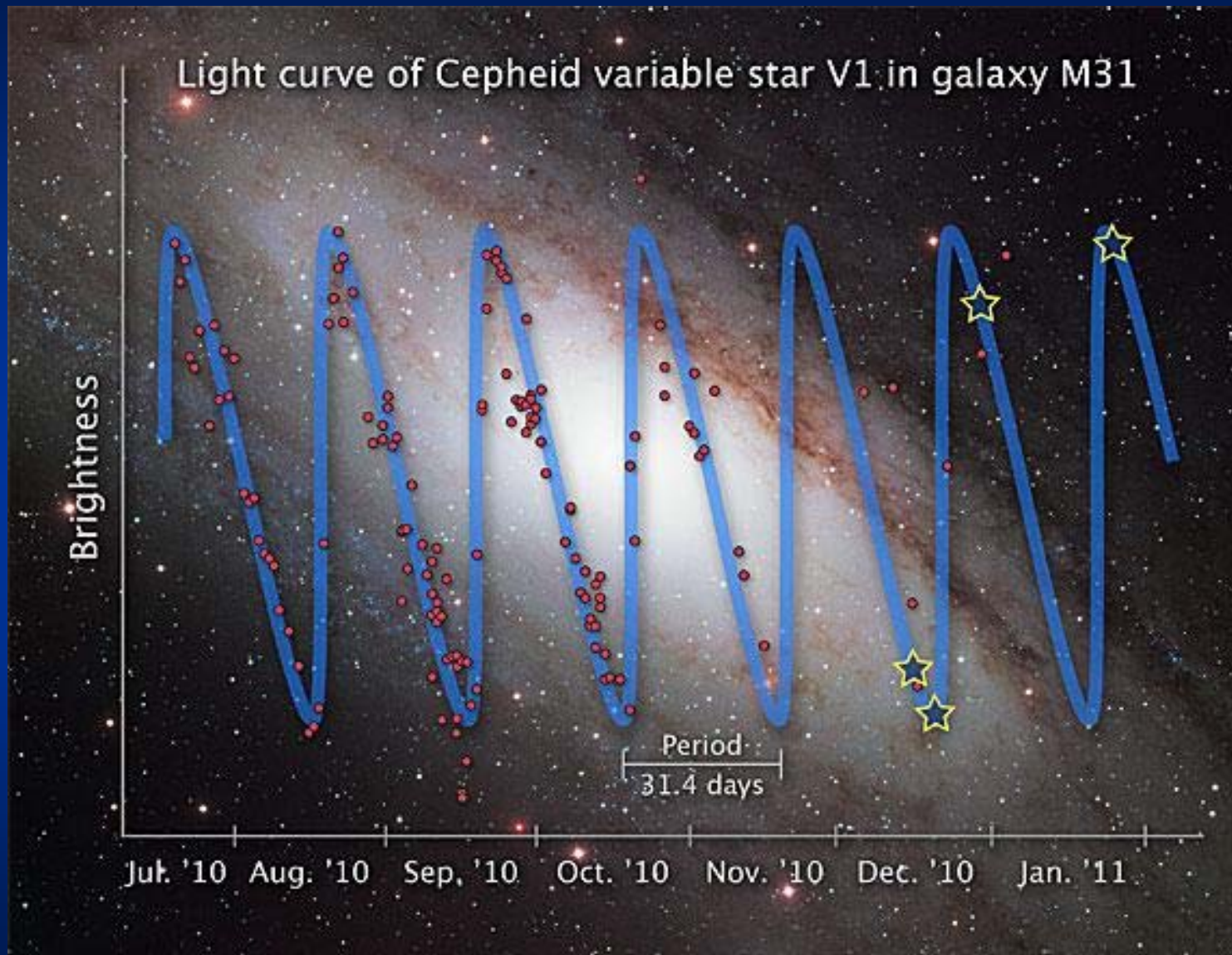
Cepheid Variable Star V1 in M31
Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS

NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), and R. Gendler

STScI-PRC11-15a

Hubbles Cepheide V1 im Andromeda-Nebel, Periode: 31.4^d
(HST, PRC 2011-15a)

4.2.11 δ Cephei-/W Virginis-Veränderliche



(HST, PRC 2011-15e)

4.2.12 Novae

Ableitung des Entfernungsmoduls für bestimmte Typen anhand ihrer absoluten Ausbruchshelligkeit



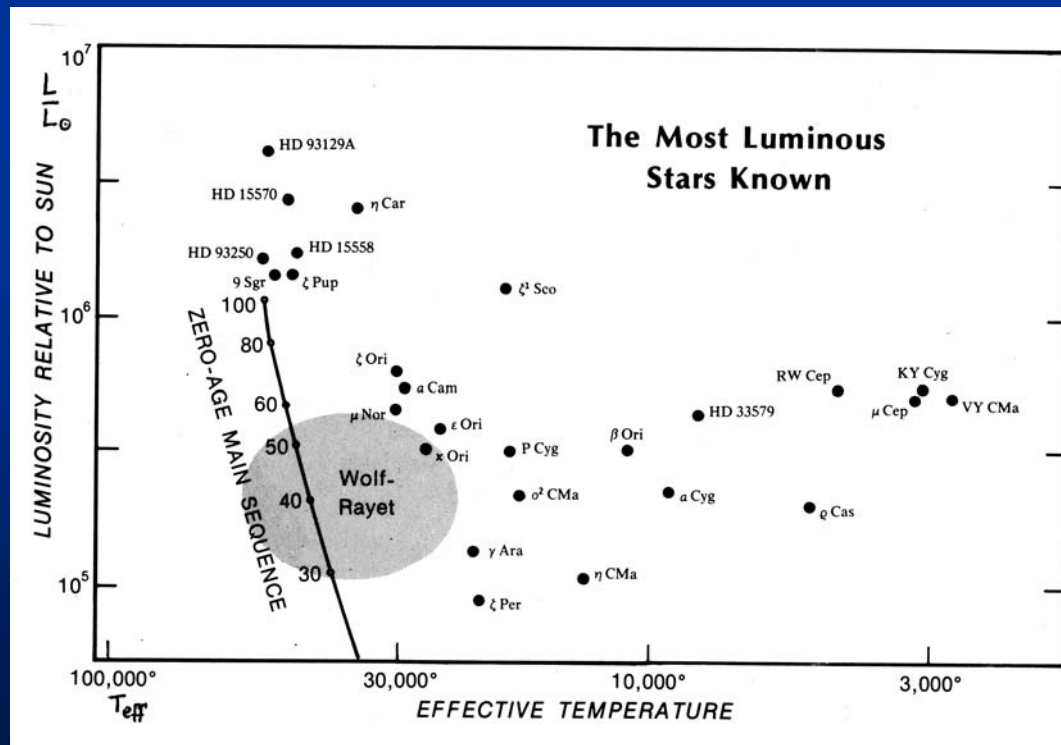
*Lichtechos eines Ausbruchs von V838 Monocerotis werden an 5 Lj entfernten Nebeln reflektiert
(HST - NASA, esa, and H. Bond/STScI)*

4.2.13 Hellste Sterne

Ableitung des Entfernungsmoduls anhand bekannter Absoluthelligkeiten am oberen Ende der Hauptreihe:

$$M_v \geq -9.3^m \pm 0.2^m$$

für die SpT: Ia0 und Ia0+



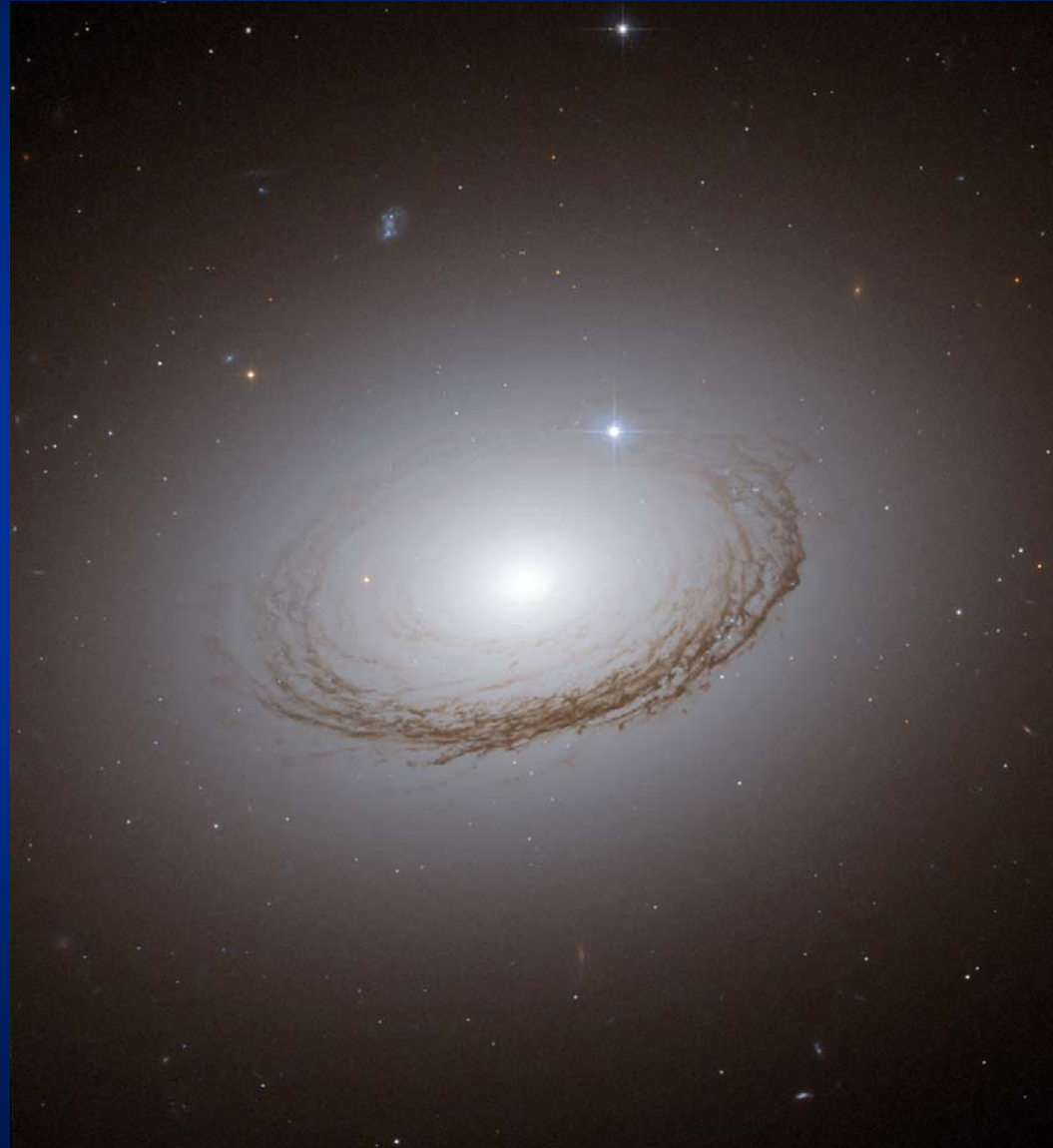
4.2.1 Grundlagen

indirekte Methoden	Virgo-Haufen	Supernovae SNe Ia, SN II	N/M_{pg}	< 8.5 Gpc	-20...-15
		H II-Regionen	$\emptyset$	50 Mpc	–
		Leuchtkraftfunktion	M_V	20 Mpc	-20...-15
		Delta Cephei-Veränderliche	P/L	20 Mpc	-7...-2
		Kugelsternhaufen	LKF	20 Mpc	-10...-5
	nahe Galaxien	hellste Sterne	M_V	20 Mpc	-9
		Novae	τ/L	20 Mpc	-9...-6
		hellste Sterne in Kugelsternhaufen	M_V	1 Mpc	-2.8...-1.9
	Lokale Gruppe	RR Lyrae-Veränderliche	M_V	1 Mpc	0.6
		Magellansche Wolken			
direkte Methoden	Sternhaufen	Hauptreihen Anpassung	m-M		
	Eichung der Hauptreihe	spektroskopische	π	100 kpc	
		Sternstrom-geometrische	π	5 kpc	
			π	500 pc	
	Astronomische Einheit	Himmelsmechanik	AE	500 AE	
	Radar	Laufzeiten	τ	100 AE	
	Urmeter	Sonnenparallaxe	π	1 AE	

4.2.14 Kugelsternhaufen

**Hellste Kugelsternhaufen
in den Galaxien haben
 $M_v = -9^m \dots -10^m$
mit überall gleicher
Leuchtkraftfunktion**

*Galaxis NGC 7049, umgeben von
Kugelsternhaufen, sichtbar als schwache
Lichtpunkte
(HST - NASA, esa, and W. Harris /
McMaster University, Ontario/CDN)*



4.2.15 Durchmesser von HII-Regionen

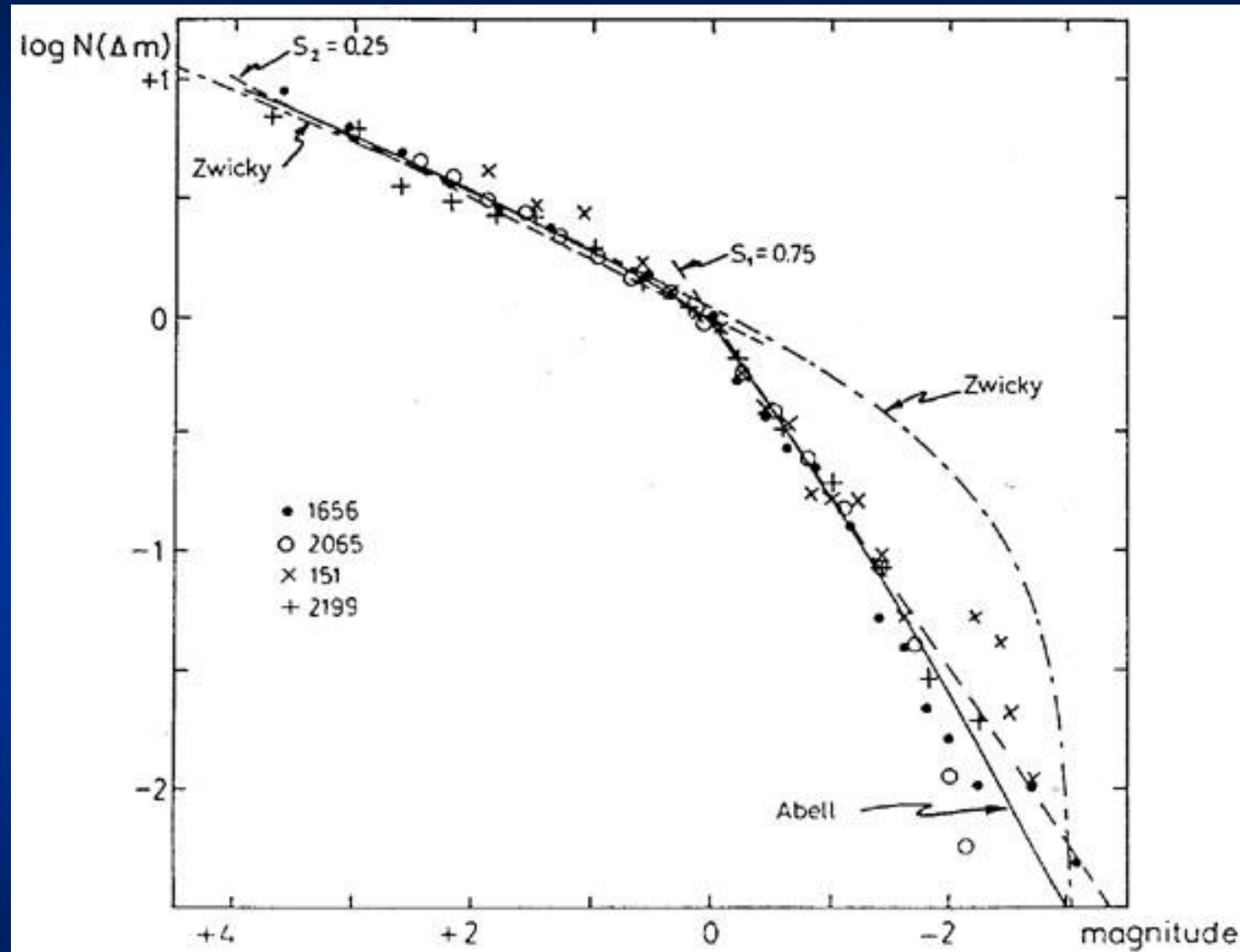
aus $H\alpha$ -Aufnahmen
Unsicherheit: 25-30 %

„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014



Galaxy NGC 1512
Hubble Space Telescope • FOC • NICMOS • WFPC2

4.2.16 Leuchtkraftfunktion von Galaxien

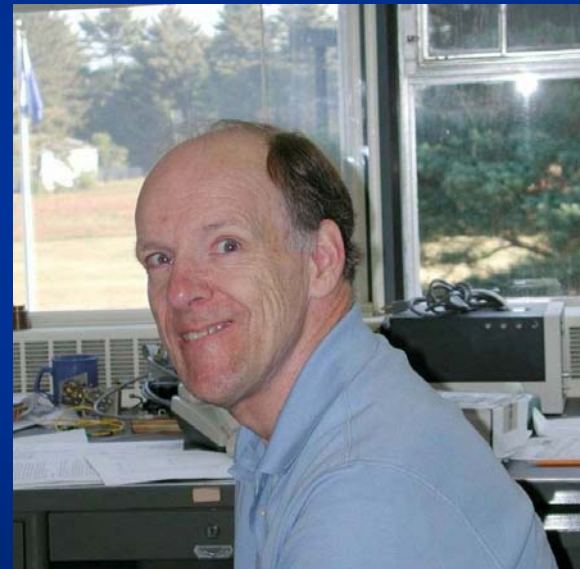
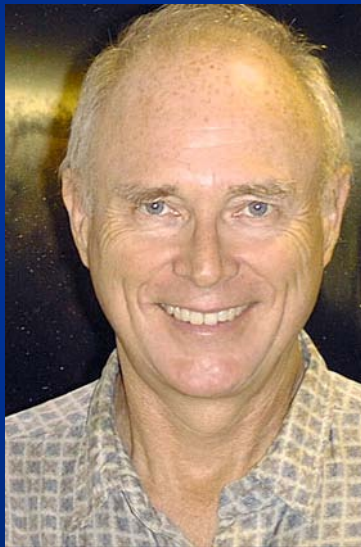


Verbindet die Leuchtkraft von Galaxien in Haufen mit ihrer Häufigkeit.
Relativ große Unsicherheit.

4.2.17 Tully-Fisher-Relation

**beschreibt den Zusammenhang der Rotationsgeschwindigkeit
von Spiralgalaxien mit ihrer Leuchtkraft**

entdeckt 1976 von Brent Tully und Richard Fisher



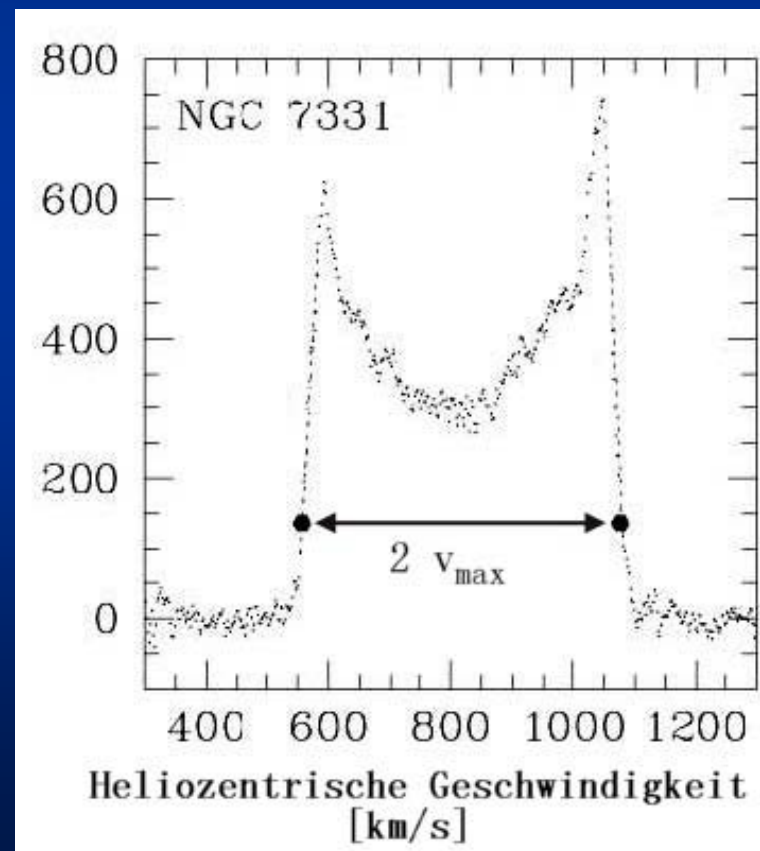
4.2.17 Tully-Fisher-Relation

beschreibt den Zusammenhang der Rotationsgeschwindigkeit von Spiralgalaxien mit ihrer Leuchtkraft

entdeckt 1976 von Brent Tully und Richard Fisher

„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Dopplerverbreiterung der
21 cm-Linie des neutralen
Wasserstoffs bei der
Galaxis NGC 7331



4.2.17 Tully-Fisher-Relation

beschreibt den Zusammenhang der Rotationsgeschwindigkeit von Spiralgalaxien mit ihrer Leuchtkraft

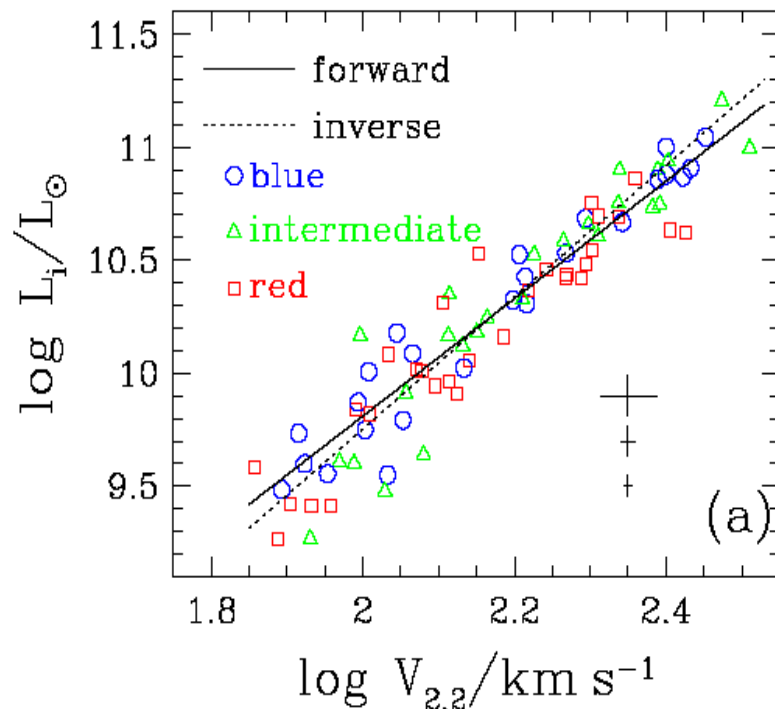
entdeckt 1976 von Brent Tully und Richard Fisher

$$L \propto v_{\max}^{\alpha} \quad \text{mit } \alpha \approx 4$$

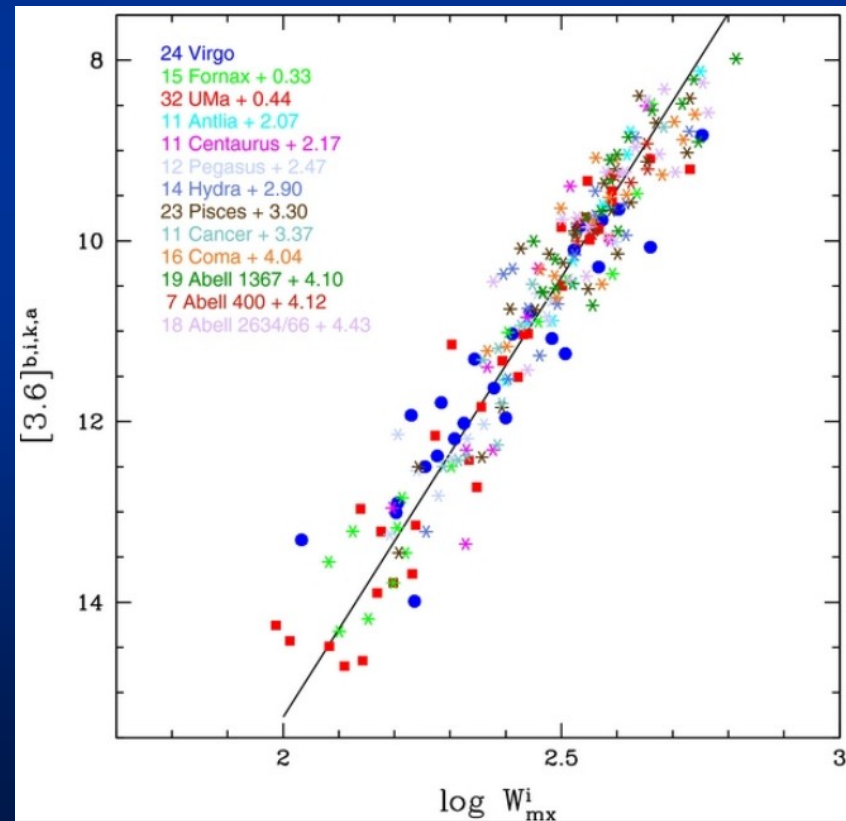
4.2.17 Tully-Fisher-Relation

beschreibt den Zusammenhang der Rotationsgeschwindigkeit von Spiralgalaxien mit ihrer Leuchtkraft

entdeckt 1976 von Brent Tully und Richard Fisher



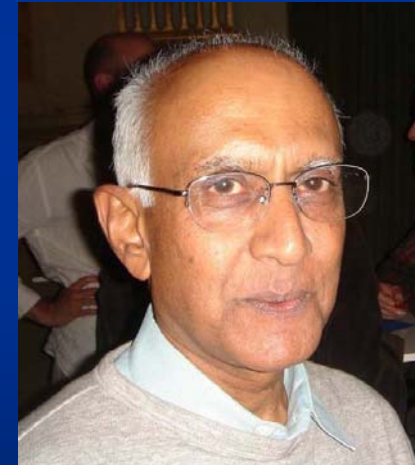
Pizagno, Weinberg, Rix, et al 2005



4.2.18 Faber-Jackson-Relation

beschreibt den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsdispersion und der Leuchtkraft elliptischer Galaxien

entdeckt 1976 von Sandra M. Faber und Robert E. Jackson

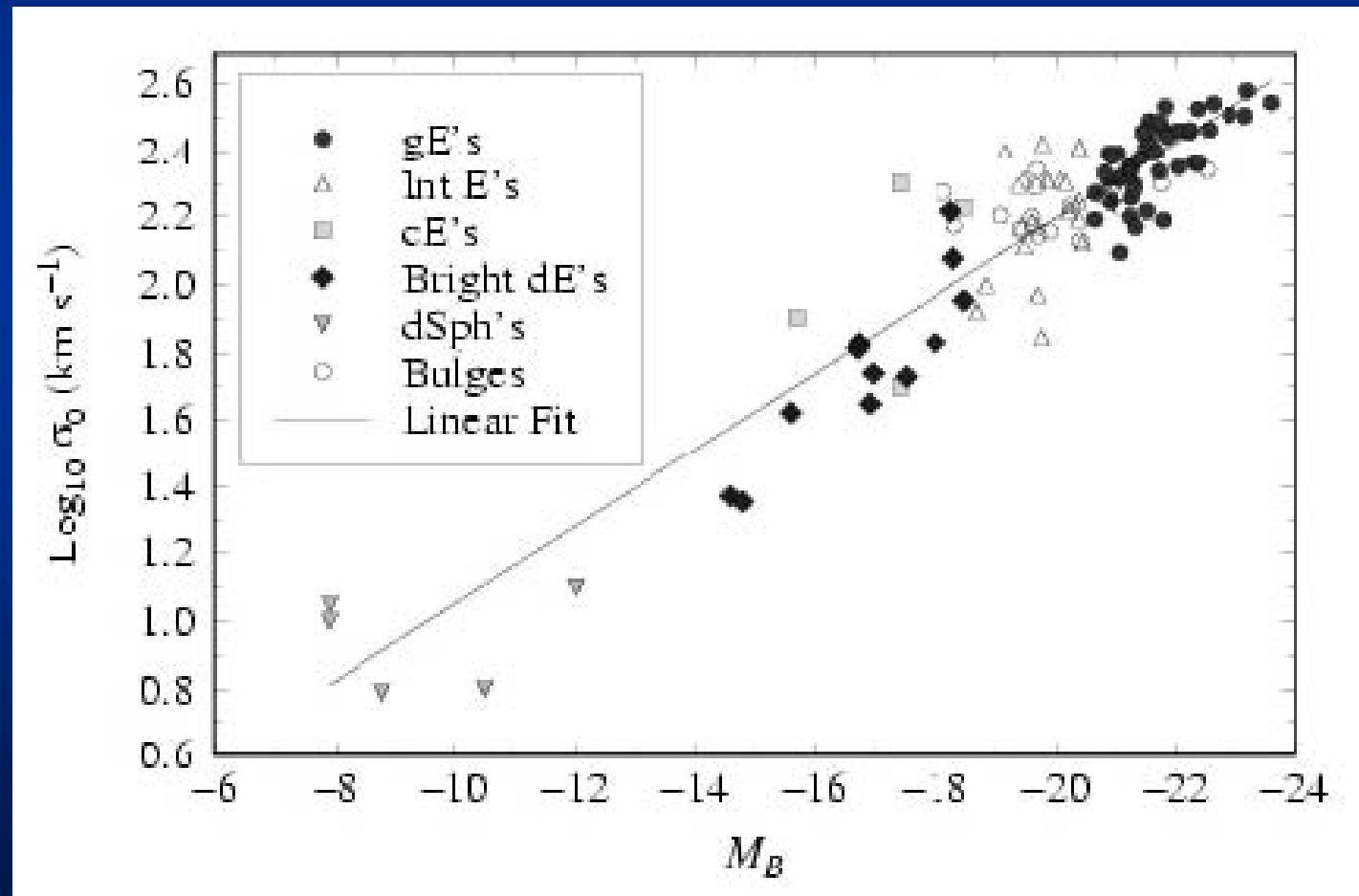


4.2.18 Faber-Jackson-Relation

beschreibt den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeitsdispersion und der Leuchtkraft elliptischer Galaxien

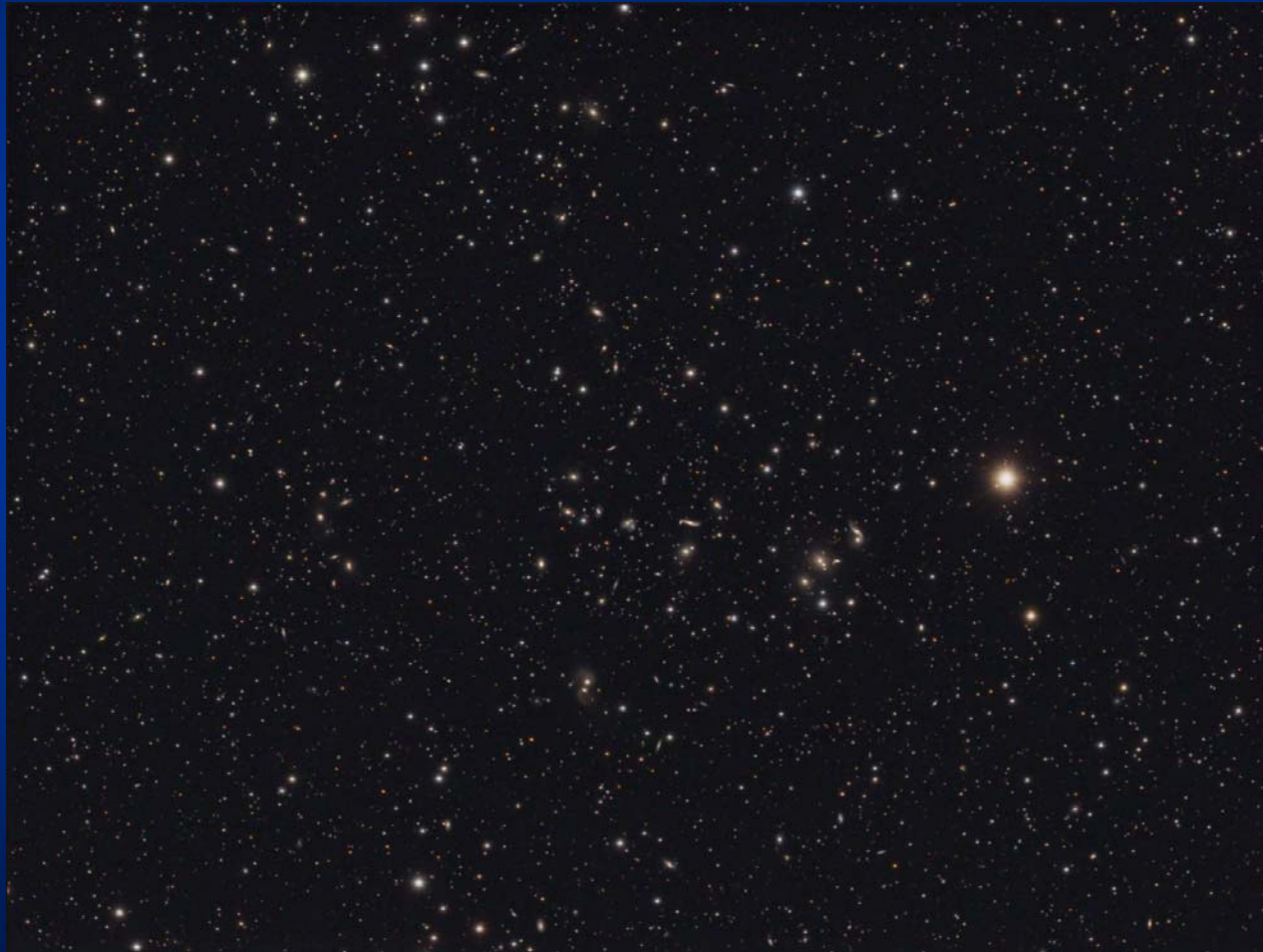
$$L \propto \sigma_0^\alpha$$

mit $\alpha \approx 4$



4.2.19 Hellste Galaxien in Haufen

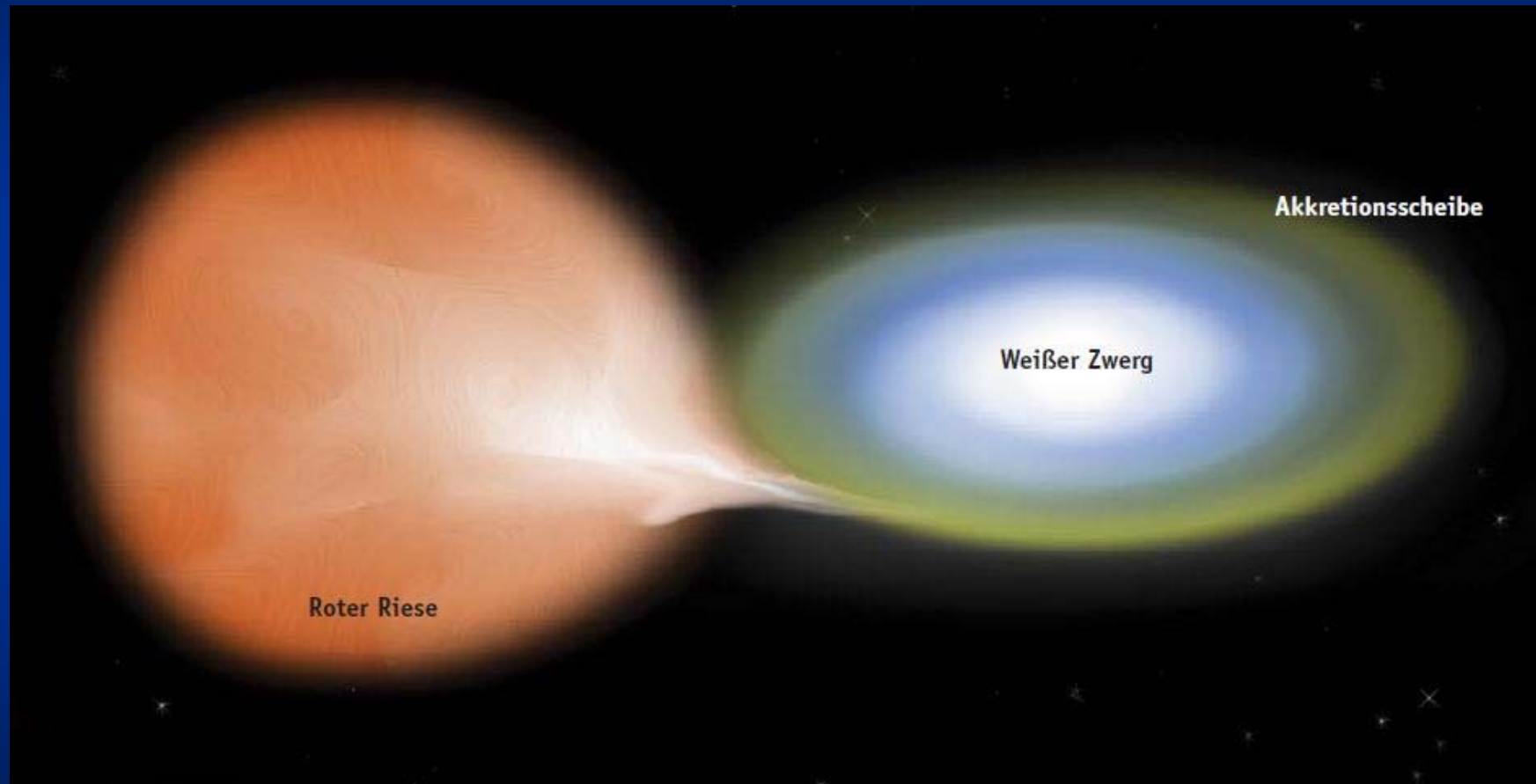
weitestreichende photometrische Methode
hellste: $M_v = -22.2^m$



Abell 2151, Galaxienhaufen im Hercules (Sternwarte Langenhain)

4.2.20 Entfernte Supernovae

SNe Ia: $M_v = -18^m$



**Massenüberströmen vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg –
Supernova-Explosion erfolgt genau dann, wenn der Weiße Zwerg
die Chandrasekhar-Grenze von 1.41 Sonnenmassen überschreitet**

4.2.20 Entfernte Supernovae



„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

SN 1994d vom Typ SNe Ia in der Galaxis NGC 4526 im Sternbild Virgo (HST)

4.2.20 Entfernte Supernovae



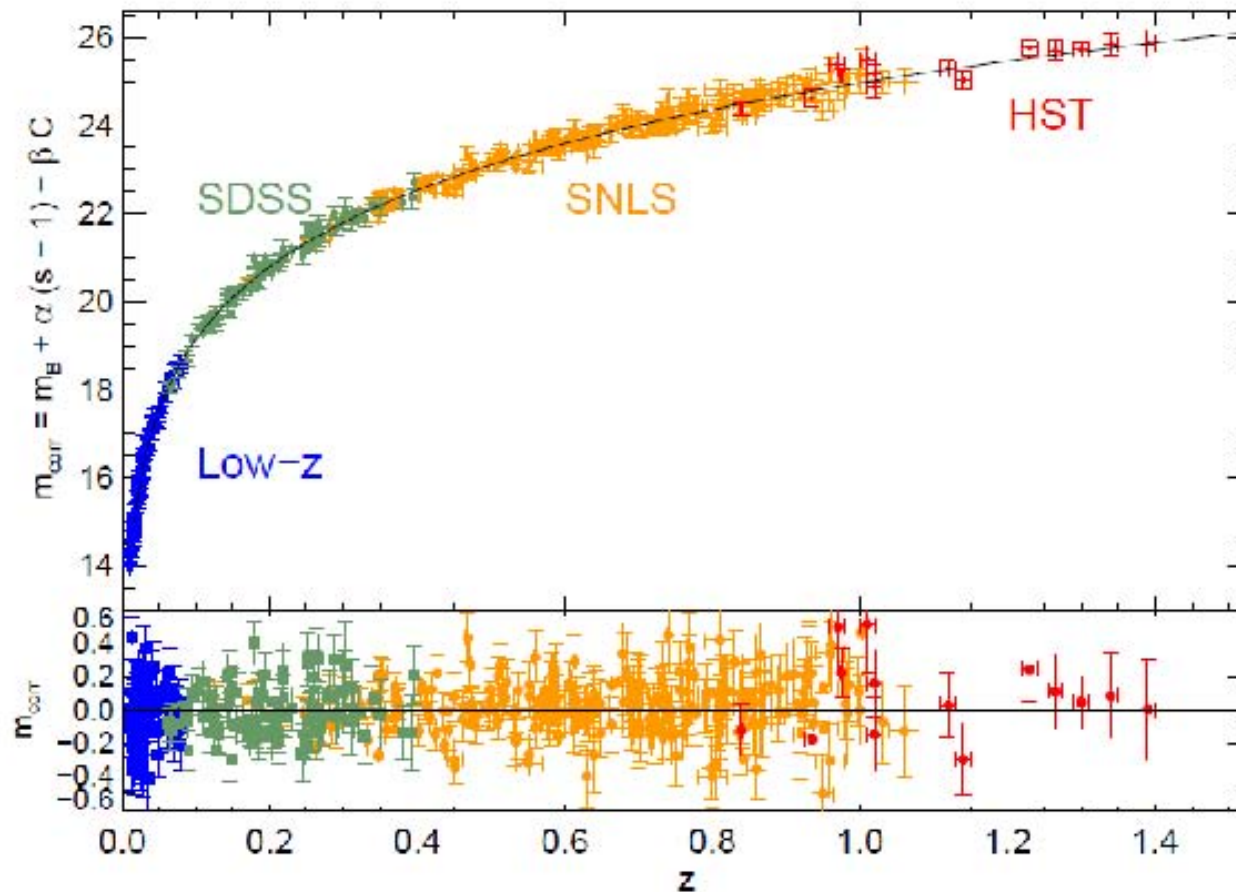
„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

8 von 500 spektroskopisch bestätigten Supernova-Beobachtungen SNe Ia (SDSS II)

4.2.20 Entfernte Supernovae

SNe Ia: $M_V = -18^m$

nutzbar für kosmologische Untersuchungen für $z < 2$



Quelle: Prof. Max Camenzind, Heidelberg

4.2.1 Grundlagen

	Kosmologie/Weltmodell	Methodik	Größe	Reichweite	M/m
statistische Methoden	Superhaufen	Hubble-Relation, Gravitationslinsen	z	< 4 Gpc	
	Galaxienhaufen	hellste Galaxien in Haufen	LKF	< 2.5 Gpc	-22...-20
	Virgo-Haufen	Supernovae SNe Ia, SN II	N/M _{pg}	< 2.5 Gpc	-20...-15
		H II-Regionen	∅	50 Mpc	–
Leuchtkraftfunktion		M _v	20 Mpc	-20...-15	
Delta Cephei-Veränderliche		P/L	20 Mpc	-7...-2	
Kugelsternhaufen		LKF	20 Mpc	-10...-5	
indirekte Methoden	nahe Galaxien	hellste Sterne	M _v	20 Mpc	-9
	Lokale Gruppe	Novae	τ/L	20 Mpc	-9...-6
	Magellansche Wolken	hellste Sterne in Kugelsternhaufen	M _v	1 Mpc	-2.8...-1.9
		RR Lyrae-Veränderliche	M _v	1 Mpc	0.6
	Sternhaufen	Hauptreihenanpassung	m-M		
direkte Methoden	Eichung der Hauptreihe	spektroskopische	} Parallaxen	π	100 kpc
		Sternstrom-		π	5 kpc
		geometrische		π	500 pc
	Astronomische Einheit	Himmelsmechanik	AE	500 AE	
		Radar	Laufzeiten	τ	100 AE
Urmeter	Winkelmessung	Sonnenparallaxe	π	1 AE	

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Ein wenig Geschichte

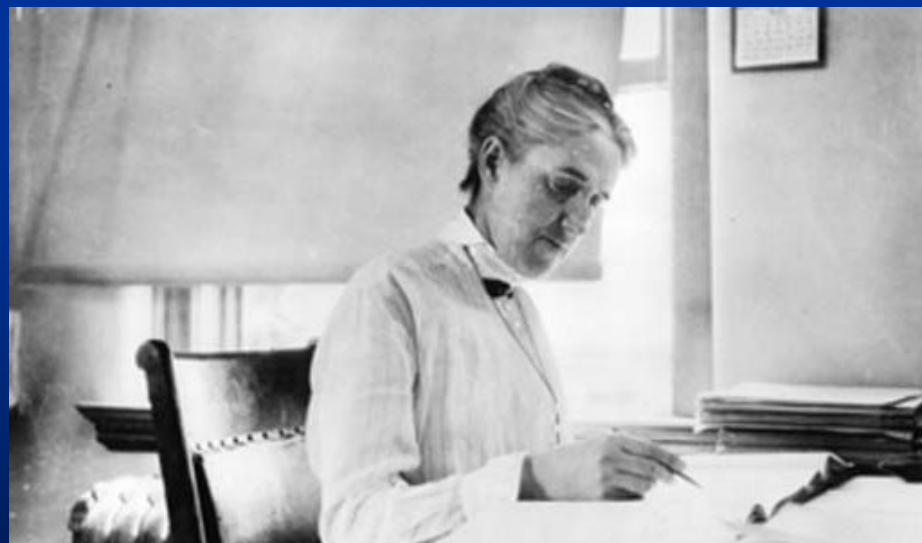
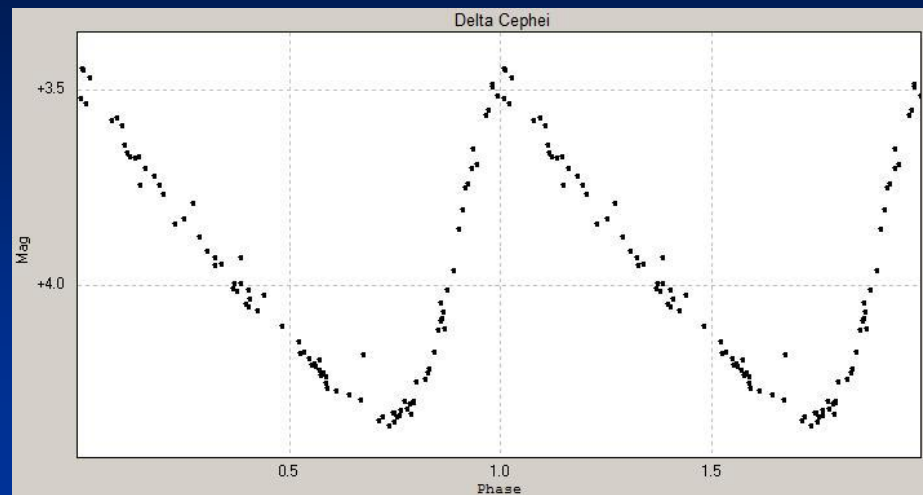
1905 **Albert Einstein: Relativitätstheorie**

1912 **Henrietta Leavitt entdeckt die Perioden-Leuchtkraft-
Beziehung der Cepheiden**

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz



(Quelle: Wikipedia / AAVSO)



(American Institute of Physics)

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921)

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Ein wenig Geschichte:

- 1905 Albert Einstein: Relativitätstheorie**
- 1912 Henrietta Leavitt entdeckt die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden**
- 1912 Vesto Slipher:
Rotverschiebung der Spektrallinien
weit entfernter Galaxien**

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz



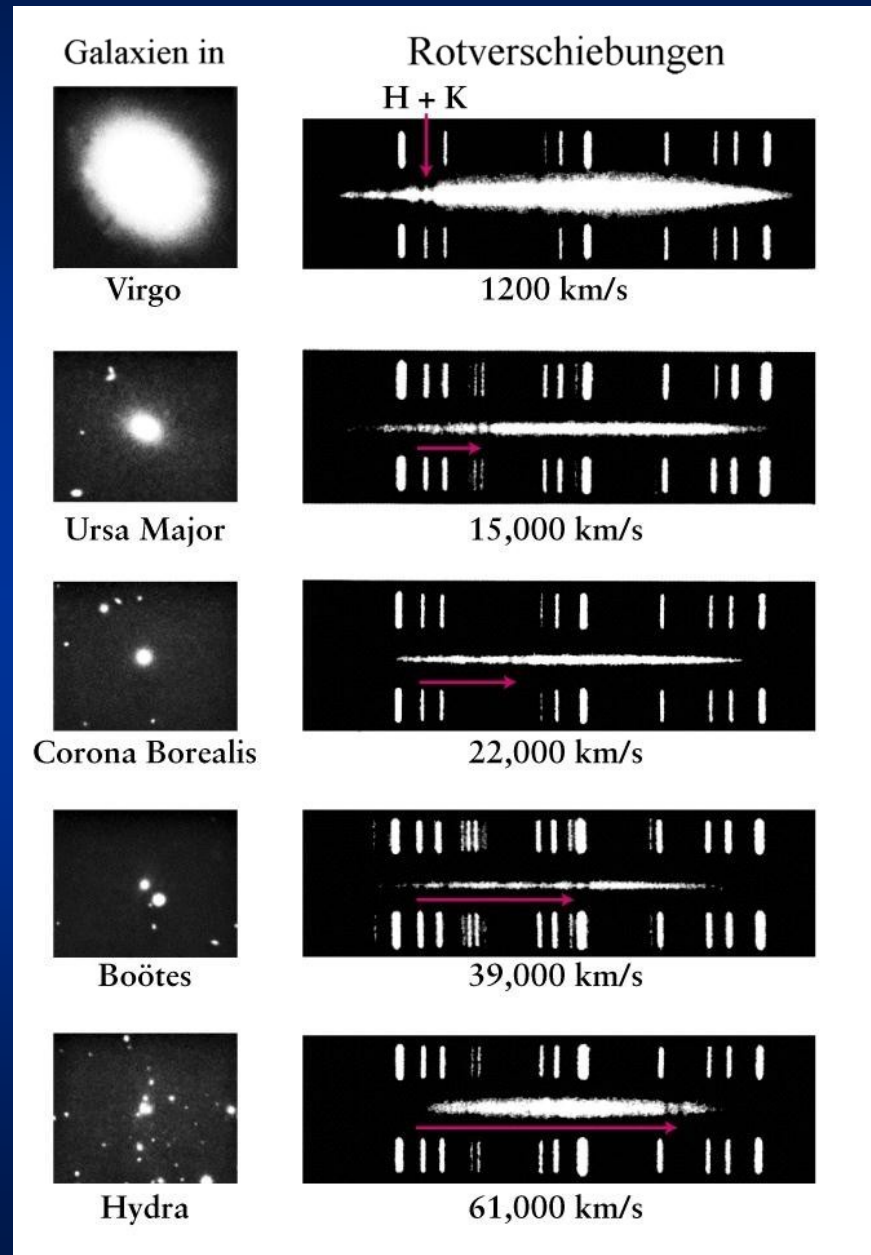
„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Vesto Slipher (1875-1969)

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Extragalaktische Rotverschiebungen

1912-1915 bestimmt Slipher
die Rotverschiebung des
Andromeda-Nebels M31 und
weiterer 14 Galaxien.

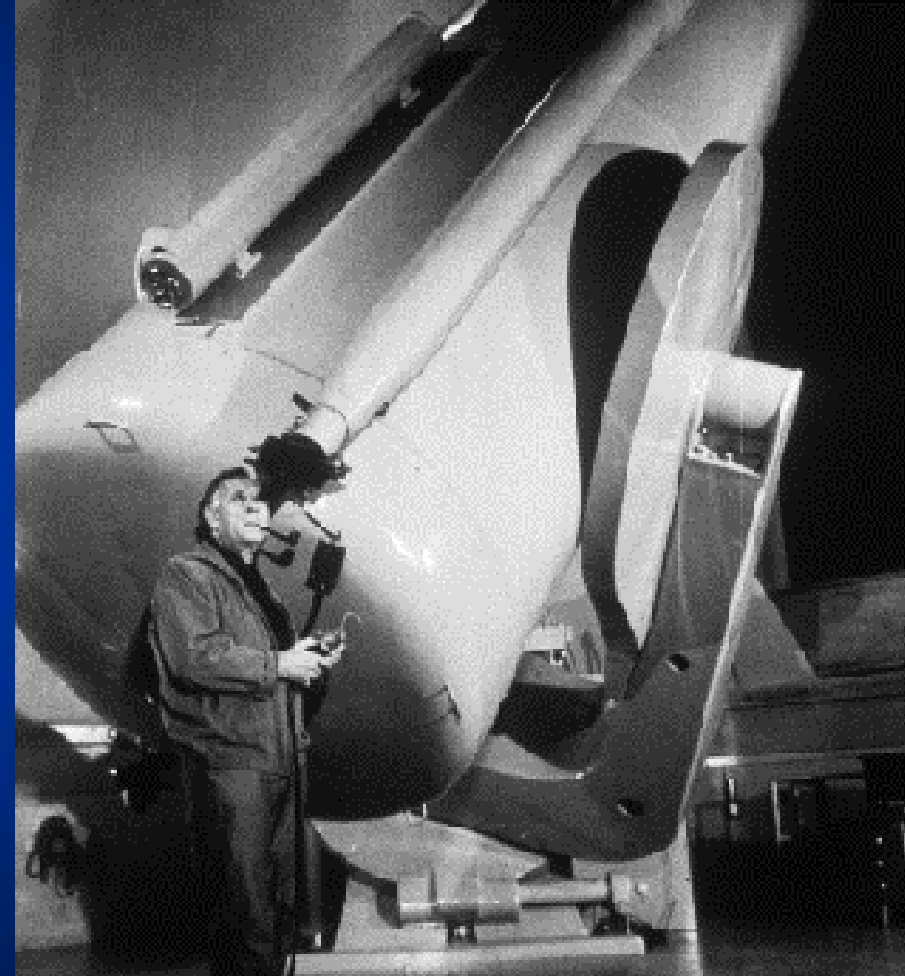
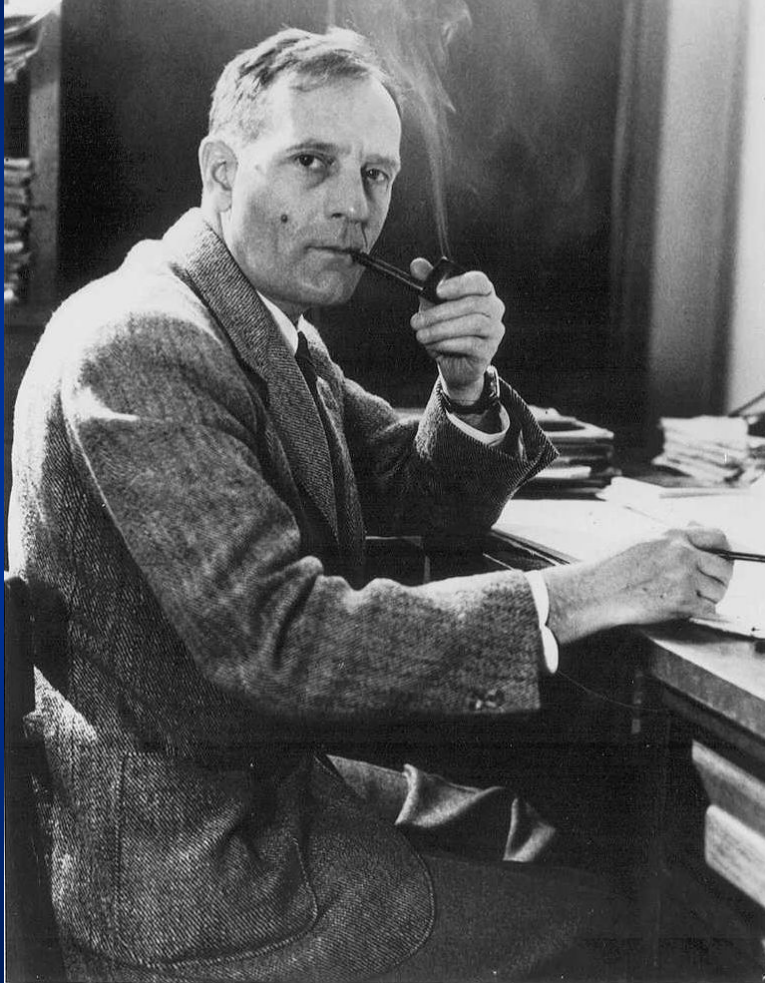


3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Ein wenig Geschichte:

- 1905 Albert Einstein: Relativitätstheorie**
- 1912 Henrietta Leavitt entdeckt die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden**
- 1912 Vesto Slipher:
Rotverschiebung der Spektrallinien
weit entfernter Galaxien**
- 1923 Edwin Hubble: Entfernung des Andromedanebels**

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

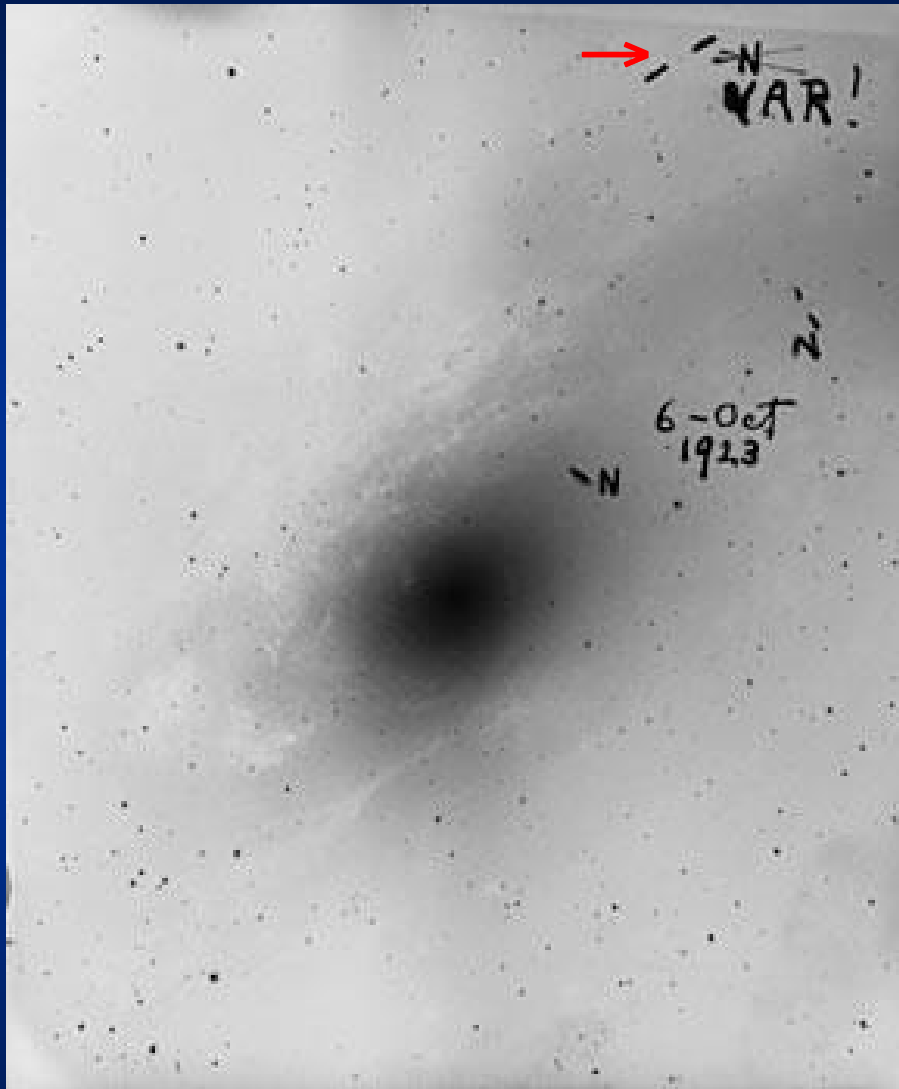


„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

(Quelle: Palomar-Observatories)

Edwin Hubble (1889-1953)

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz



252

American Astronomical Society

α Lyrae. All of these declinations had been corrected for variation of the latitude.

The same scheme of exhibiting these varying values of the latitude by hours was used in plotting this chart. Into each mean had been collected all those latitudes the values of which had been derived from observed declinations of stars where the meridian passage of the stars occurred between any two hours of mean time. A similar chart to the above with those data plotted on it will also be found in the volume.

A study of these latitudes thus plotted leads to a much stronger conclusion than in the case of those of the declination of α Lyrae, that stars when observed with a prime vertical transit with the sun above the horizon are strongly affected, not with an internal house temperature, but by an influence which exists in the strata of air immediately above the open shutters. The cause for that effect will be taken up in another paper to be read to the Society.

CEPHEIDS IN SPIRAL NEBULAE.

By EDWIN P. HUBBLE.

Messier 31 and 33, the only spirals that can be seen with the naked eye, have recently been made the subject of detailed investigations with the 100-inch and 60-inch reflectors of the Mount Wilson Observatory. Novae are a common phenomenon in M 31, and Duncan has reported three variables within the area covered by M 33.¹ With these exceptions there seems to have been no definite evidence of actual stars involved in spirals. Under good observing conditions, however, the outer regions of both spirals are resolved into dense swarms of images in no way differing from those of ordinary stars. A survey of the plates made with the blink-comparator has revealed many variables among the stars, a large proportion of which show the characteristic light-curve of the Cepheids.

Up to the present time some 47 variables, including Duncan's three, and one true nova have been found in M 33. For M 31, the numbers are 36 variables and 46 novae, including the 22 novae previously discovered by Mount Wilson observers. Periods and photographic magnitudes have been determined for 22 Cepheids in M 33 and 12 in M 31. Others of the variables are probably Cepheids, judging from their sharp rise and slow decline, but some are definitely not of this type. One in particular, Duncan's No. 2 in M 33, has been brightening fairly steadily with only minor fluctuations since about 1906. It has now reached the 15th magnitude and has a spectrum of the bright line B type.

For the determinations of periods and normal curves of the Cepheids, 65 plates are available for M 33, and 130 for M 31. The latter object is too large for the area of good definition on one plate, so attention has been concentrated on three regions: around B D

¹ *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 35, 290, 1922.

**Bestimmung der Entfernung des Andromedanebels mit dem Cepheiden V1:
929'000 Lichtjahre, also außerhalb der Milchstraße!
(PAAS 33, 252 (1925))**

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Ein wenig Geschichte:

- 1905 Albert Einstein: Relativitätstheorie**
- 1912 Henrietta Leavitt entdeckt die Perioden-Leuchtkraft-
Beziehung der Cepheiden**
- 1912 Vesto Slipher:
Rotverschiebung der Spektrallinien
weit entfernter Galaxien**
- 1923 Edwin Hubble: Entfernung des Andromedanebels**
- 1927 Georges Lemaître: Expansion des Universums**

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Albert Einstein und Georges Lemaître (1933)

1927 veröffentlicht Lemaître
die Theorie eines
expandierenden Universums
mit Rotverschiebung der
Galaxien und einer Expansions-
Konstanten.

(Annales de la Société Scientifique de Bruxelles)

- 49 -

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

Note de M. l'Abbé G. LEMAITRE

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).

Deux solutions ont été proposées. Celle de DE SITTER ignore la présence de la matière et suppose sa densité nulle. Elle conduit à certaines difficultés d'interprétation sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir, mais son grand intérêt est d'expliquer le fait que les nébuleuses extra-galactiques semblent nous fuir avec une énorme vitesse, comme une simple conséquence des propriétés du champ de gravitation, sans supposer que nous nous trouvons en un point de l'univers doué de propriétés spéciales.

L'autre solution est celle d'EINSTEIN. Elle tient compte du fait évident que la densité de la matière n'est pas nulle et elle conduit à une relation entre cette densité et le rayon de l'univers. Cette relation a fait prévoir l'existence de masses énormément supérieures à tout ce qui était connu lorsque la théorie a été pour la première fois comparée avec les faits. Ces masses ont été depuis découvertes lorsque les distances et les dimensions des nébuleuses extra-galactiques ont pu être établies. Le rayon de l'univers calculé par la formule d'Einstein est d'après les données récentes quelques

observées toutes deux : Il calcule les éléments de l'éclipse de lune (la date Phamenoth 9 donnée par l'éd. de Bâle est une dittographie de la dernière lettre du nom du mois. Tous les mss sont Phamenoth 6, an 1112) puis conclut : ... ἀκολουθῶς τοῖς κατὰ τὴν τήρησιν γεγενημένοις ἡμῖν τῶν τοιοῦτων χρόνων ἐπιλογισμοῖς. « conformément aux calculs des » temps exécutés par nous d'après l'observation » [éd. Bâle, p. 320, tous les mss sont d'accord]. Il est assez naturel de supposer que l'observation en question a été faite sous sa direction, surtout quand on rapproche le passage cité, de cet autre, relatif à l'éclipse de soleil du 16 juin de la même année : καὶ ἐπὶ τὸν μὲν τῆς ἀρχῆς τῆς ἐμπρώσεως χρόνον ἀσφαλῆστατα ἐτηρήσαμεν, « nous avons observé avec grande précision l'heure » du premier contact » [éd. Bâle, p. 332]. Il est inutile d'observer que tout ce qui peut se dire sur Thèon, a fatalement un caractère provisoire, tant que le travail d'édition ne sera pas terminé. Le texte de Pappus est établi ; on peut donc aborder les questions qui s'y rapportent avec quelque chance de les résoudre.

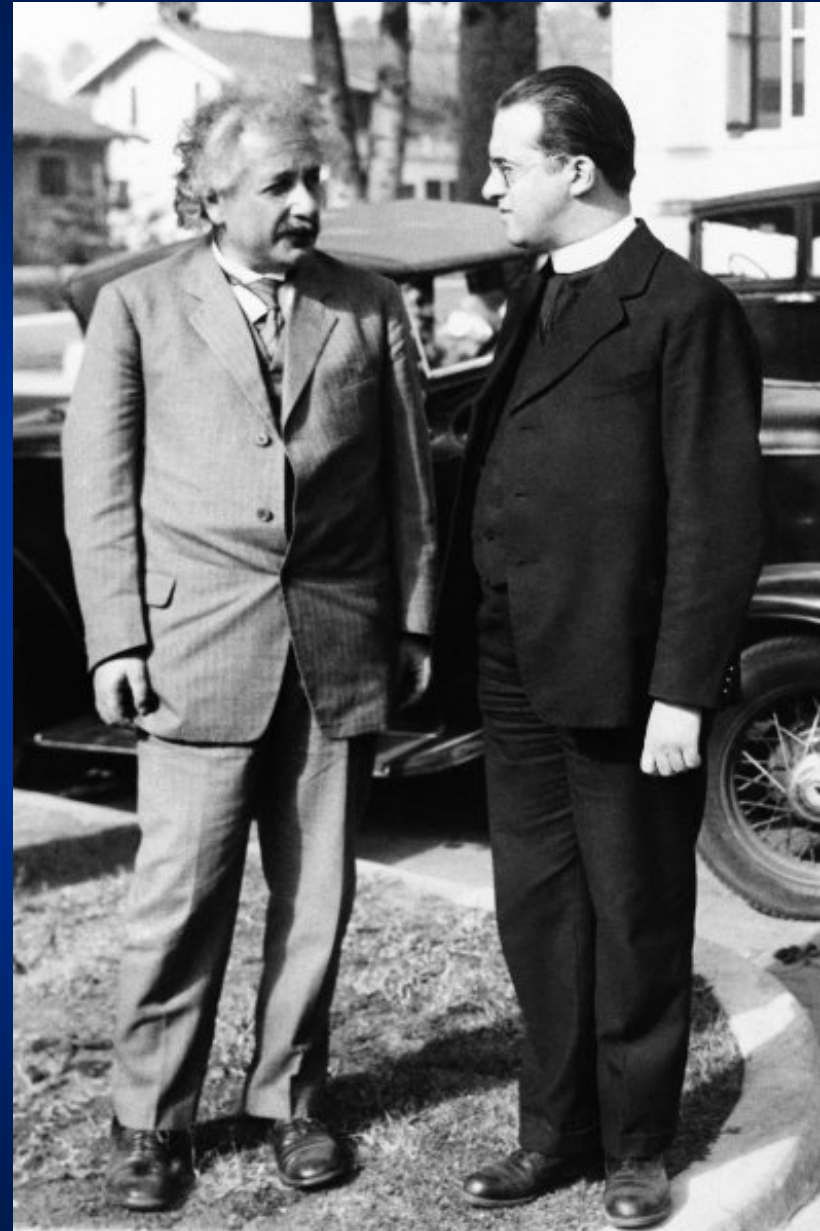
(¹) Nous considérons l'espace simplement elliptique, c'est-à-dire sans antipodes.

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Albert Einstein und
Georges Lemaître (1933)

1927 veröffentlicht Lemaître
die Theorie eines
expandierenden Universums
mit Rotverschiebung der
Galaxien und einer Expansions-
Konstanten.

Eigentlich müssten die Hubble-
Relation und der Parameter
„Lemaître-Relation“ und
„Lemaître-Parameter“ heißen!



3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Ein wenig Geschichte:

- 1905** Albert Einstein: Relativitätstheorie
- 1912** Henrietta Leavitt entdeckt die Perioden-Leuchtkraft-Beziehung der Cepheiden
- 1912** Vesto Slipher:
Rotverschiebung der Spektrallinien
weit entfernter Galaxien
- 1923** Edwin Hubble: Entfernung des Andromedanebels
- 1927** Georges Lemaître: Expansion des Universums
- 1929** Edwin Hubble: Allgemeine Rotverschiebung bei den
Galaxien – Hubble-Relation / „Hubble-Konstante“
- 1951** *Päpstliche Akademie der Wissenschaften
akzeptiert Lemaîtres Theorie*
- 1960** *Lemaître wird Präsident der Akademie*

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Edwin Hubble (1929)

(Proceedings of the National Academy of Sciences)

168

ASTRONOMY: E. HUBBLE

PROC. N. A. S.

appearance the spectrum is very much like spectra of the Milky Way clouds in Sagittarius and Cygnus, and is also similar to spectra of binary stars of the W Ursae Majoris type, where the widening and depth of the lines are affected by the rapid rotation of the stars involved.

The wide shallow absorption lines observed in the spectrum of N. G. C. 7619 have been noticed in the spectra of other extra-galactic nebulae, and may be due to a dispersion in velocity and a blending of the spectral types of the many stars which presumably exist in the central parts of these nebulae. The lack of depth in the absorption lines seems to be more pronounced among the smaller and fainter nebulae, and in N. G. C. 7619 the absorption is very weak.

It is hoped that velocities of more of these interesting objects will soon be available.

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 be recognized. These include, among others, Cepheid variables, novae, and blue stars involved in emission nebulae. Numerical values depend upon the zero point of the period-luminosity relation among Cepheids, the other criteria merely check the order of the distances. This method is restricted to the few nebulae which are well resolved by existing instruments. A study of these nebulae, together with those in which any stars at all can be recognized, indicates the probability of an approximately uniform upper limit to the absolute luminosity of stars, in the late-type spirals and irregular nebulae at least, of the order of M (photographic) = -6.3 .¹ The apparent luminosities of the brightest stars in such nebulae are thus criteria which, although rough and to be applied with caution,

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

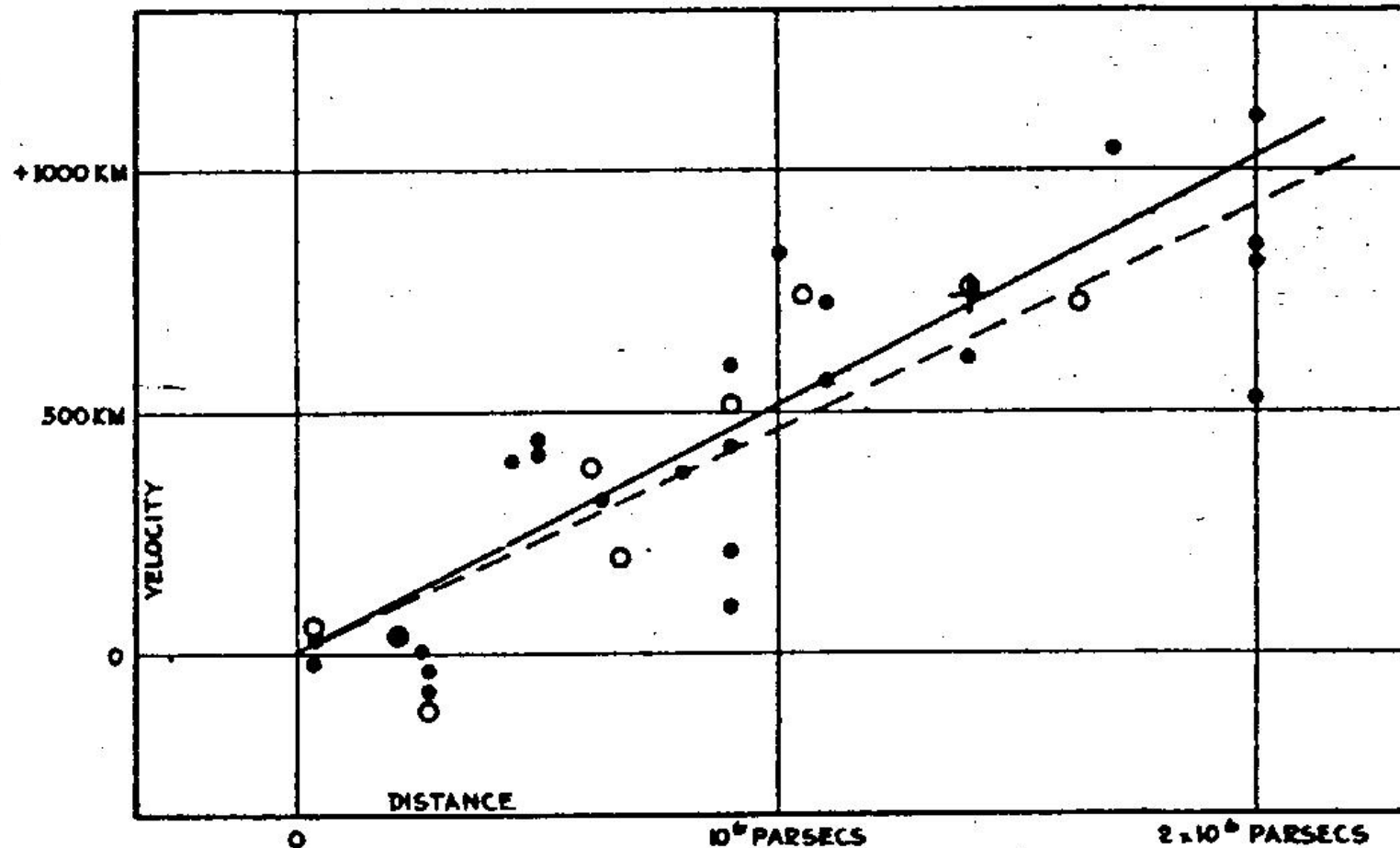


FIGURE 1

Hubble-Diagramm 1929 [$H_0 = 530 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$]

Hubble, E.: A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae
(Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 15, March 15, 1929, No. 3, pp. 168-173)

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Edwin Hubble (1931)

THE VELOCITY-DISTANCE RELATION AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE¹

BY EDWIN HUBBLE AND MILTON L. HUMASON

ABSTRACT

Methods of determining distances of extra-galactic nebulae are discussed, and the mean absolute magnitude is revised on the basis of (1) Shapley's revision of the zero-point of the period-luminosity curve for Cepheids, and (2) more extensive observations of stars involved in nebulae. The revised value is $M(\text{vis}) = -14.9$.

The mean color-index of the nearer extra-galactic nebulae appears to be of the order of $+1.1$ mag., hence $M(\text{pg}) = -13.8$. A color-excess is suggested which is independent of distance but shows some relation to galactic latitude.

The velocity-distance relation is re-examined with the aid of 40 new velocities, 26 of which refer to nebulae in 8 clusters or groups. Distances of the clusters, ranging out to about 3.2 million parsecs, have been derived from the most frequent apparent magnitudes. The velocity displacements reduce the apparent magnitudes by amounts which become appreciable for the more distant clusters.

The new data extend out to about eighteen times the distance available in the first formulation of the velocity-distance relation, but the form of the relation remains unchanged except for the revision of the unit of distance. The relation is

$$\text{Vel.} = \frac{\text{Dist. (parsecs)}}{1790},$$

and the uncertainty is estimated to be of the order of 10 per cent.

PART I. DISTANCES OF NEBULAE

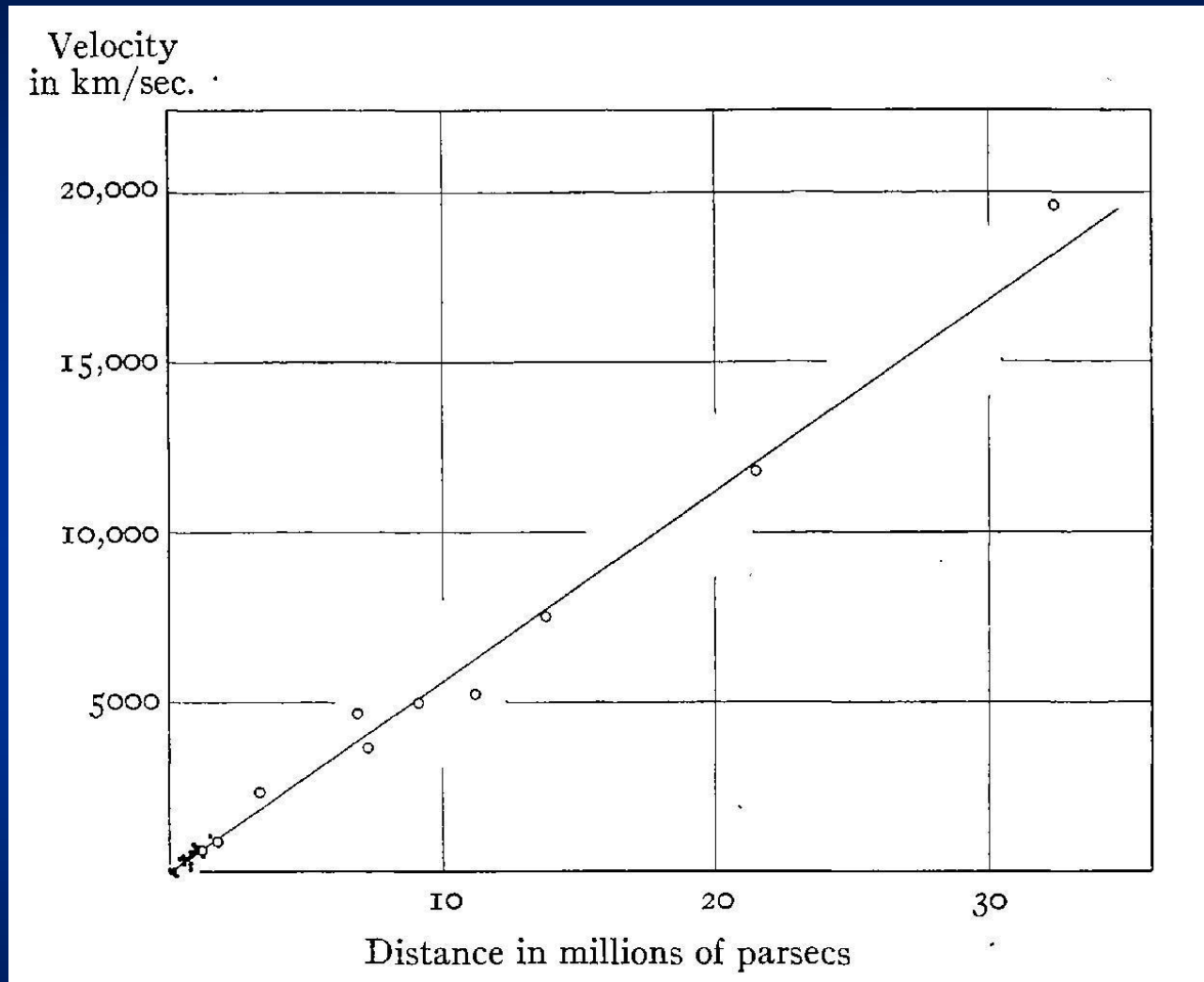
Distances of nebulae are derived from the application of absolute-magnitude criteria to stars involved in the nebulae. This is the only direct method available at present, and it plays the same rôle among the nebulae that micrometer measures play among the stars. All other methods are calibrated by means of the small sample collection of nebulae in which stars can be seen and studied. The assumption that this collection is a representative sample is a first approximation, supported in a general way by the consistency of the results to which it leads. The basic data will be materially increased only when larger telescopes and faster plates are available.

Absolute-magnitude criteria can be applied only when stars of familiar types can be identified. Such stars are by no means the brightest in the nebulae, hence the method is restricted to the very

¹ Contributions from the Mount Wilson Observatory, Carnegie Institution of Washington, No. 427.

(Astrophysical Journal (1931))

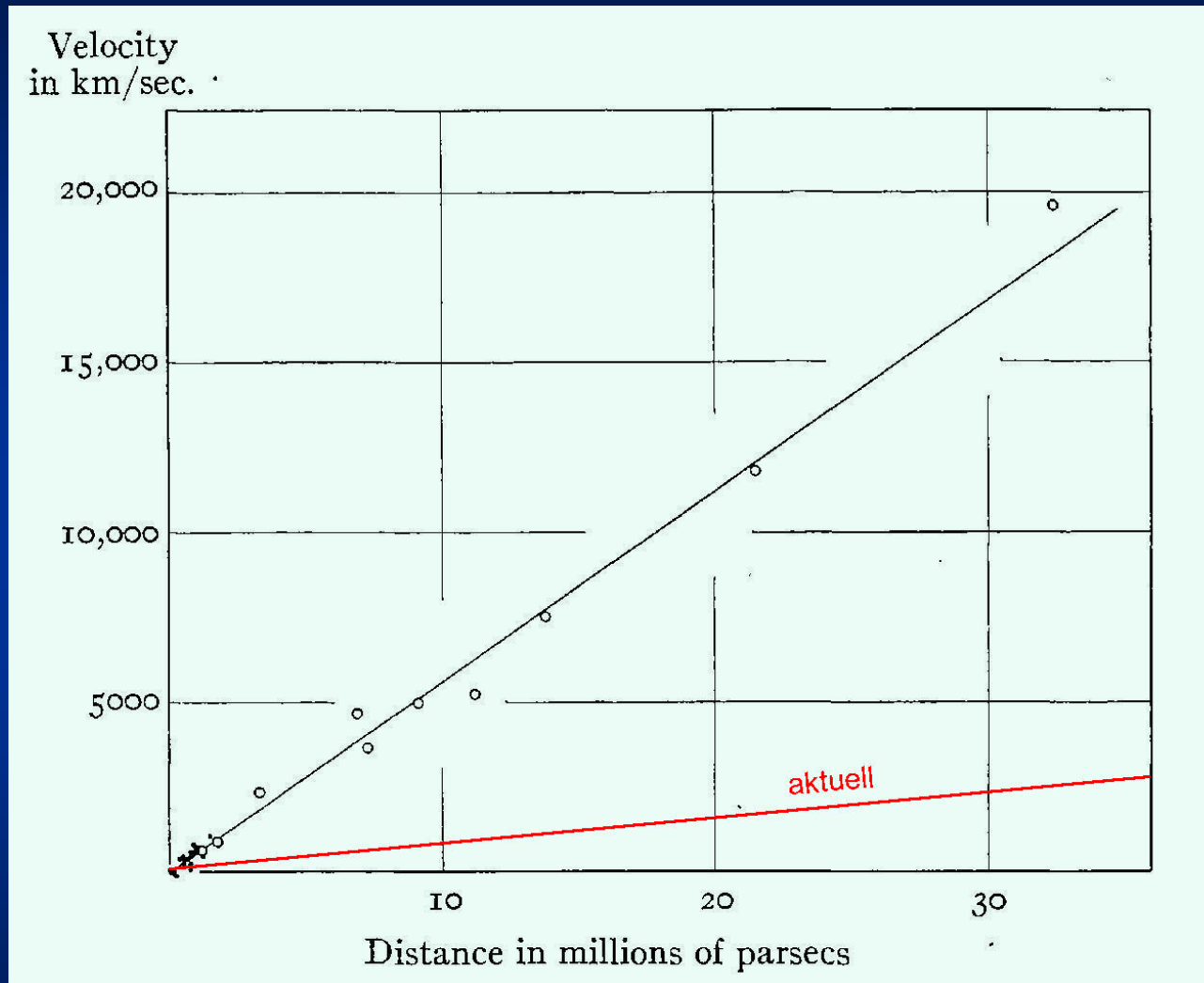
3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz



Hubble-Diagramm 1931

*Hubble, E.; Humason, M.L.: The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae
(The Astrophysical Journal, Vol. 74, 1931, pp. 43-80)*

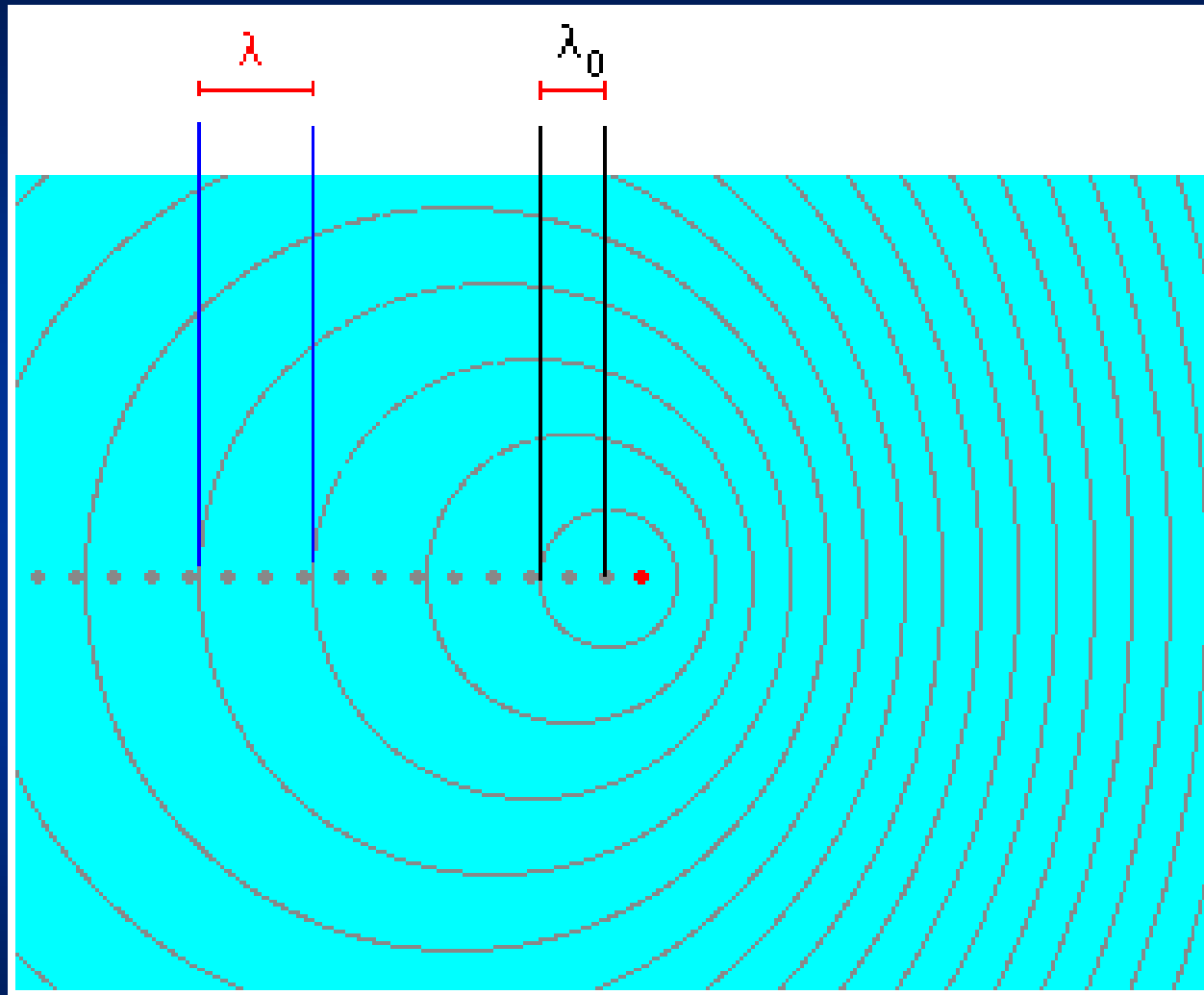
3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz



Hubble-Diagramm 1931

*Hubble, E.; Humason, M.L.: The Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae
(The Astrophysical Journal, Vol. 74, 1931, pp. 43-80)*

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz



Dopplereffekt

Quelle: Jürgen Giesen

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz

Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beob}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

„Fluchtgeschwindigkeit“

$$z \approx v/c \text{ (nicht-relativistisch)}$$

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz

Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beob}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

Das Hubble-Gesetz ist jedoch mit dem Doppler-Effekt nicht ausreichend beschrieben.

Beim Doppler-Effekt ist die Frequenzverschiebung nicht entfernungsabhängig.

**Beim Hubble-Gesetz wächst jedoch die Rotverschiebung mit der Entfernung, nach anfänglicher Vermutung: linear.
Man spricht von „kosmologischer Rotverschiebung“.**

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz

Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beob}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

„Fluchtgeschwindigkeit“

$$z \approx v/c \text{ (nicht-relativistisch)}$$

relativistisch:

$$z = \sqrt{(1+v/c) / (1-v/c)} - 1$$

Hubble-Gesetz:

$$c z = H_0 r$$

Hubble-Parameter:

$$H_0 = c z / r$$

Entfernung:

$$r = c z / H_0$$

c: Lichtgeschwindigkeit / Konstante; z: Messwert

→ H_0 ist somit die Eichgröße für die Entfernungsbestimmung!

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz

Entfernung:

$$r = c z / H_0$$

→ Gilt nur für geringe Rotverschiebungen / Entfernungen!
(nicht-relativistisch)

Für größere:

$$r \approx v / H_0$$

→ Hubble-Radius:

$$R_H = c / H_0 = 4'222 \text{ Mpc}$$

„Maximaler Radius des beobachtbaren Universums“

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz: Entfernungen

v km/s	v/c	z	r Mpc	r MLj
10'000	0.033	0.034	138	450
20'000	0.066	0.069	280	913
50'000	0.166	0.18	675	2'200
100'000	0.333	0.41	1'334	4'352
150'000	0.500	0.73	2'014	6'568
200'000	0.667	1.24	2'705	8'822
250'000	0.833	2.32	3'386	11'545
285'790	0.952	5.42	3'907	12'742
290'000	0.967	6.68	3'970	12'947

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Hubble-Gesetz

Rotverschiebung:

$$z = (\lambda_{\text{beob}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

„Fluchtgeschwindigkeit“

$$z \approx v/c \text{ (nicht-relativistisch)}$$

relativistisch:

$$z = \sqrt{(1+v/c) / (1-v/c)} - 1$$

Hubble-Gesetz:

$$c z = H_0 r$$

Hubble-Parameter:

$$H_0 = c z / r$$

Entfernung:

$$r = c z / H_0$$

Hubble-Zeit:

$$\tau = 1 / H_0$$

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Entwicklung des Hubble-Parameters

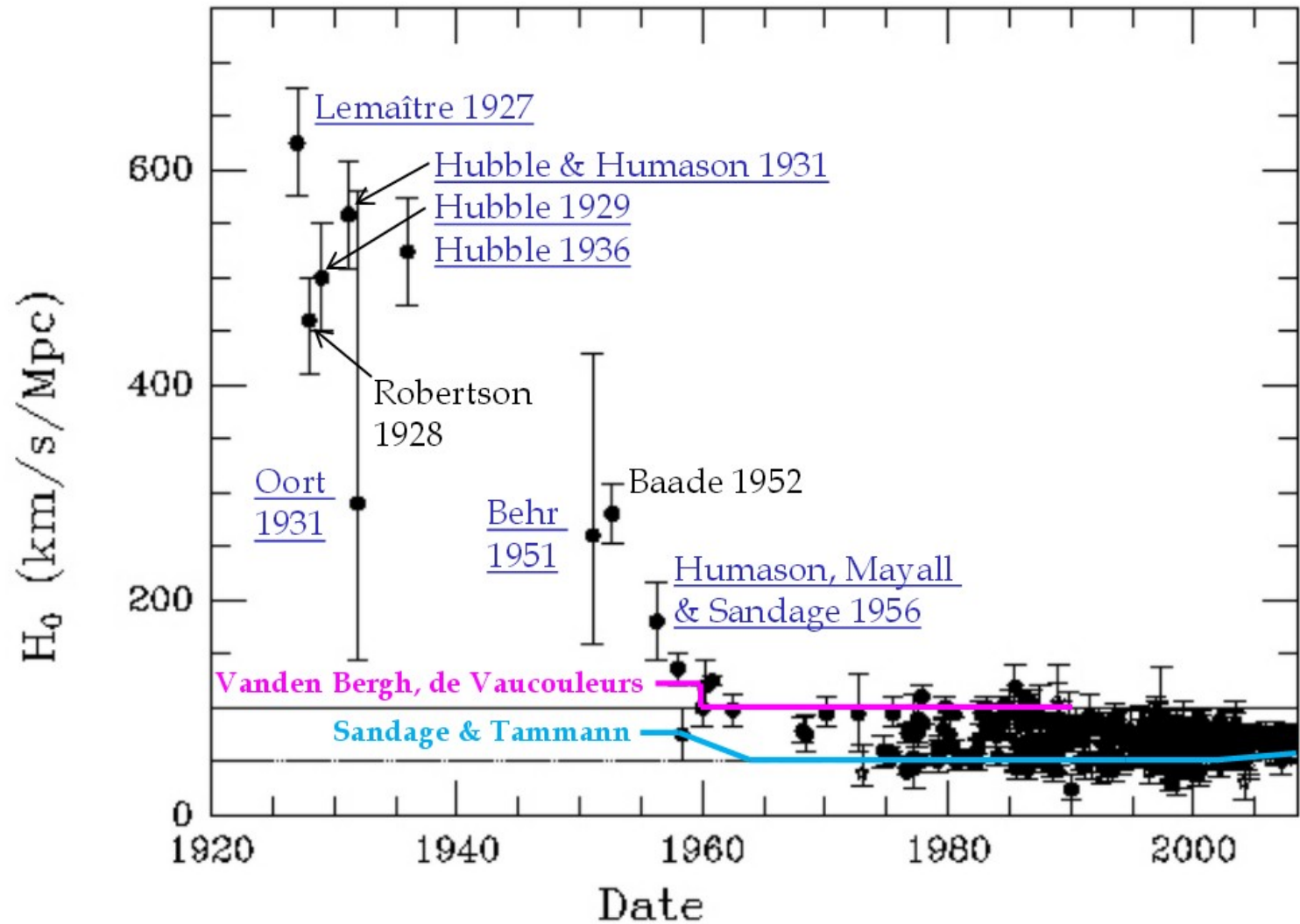
Table 1: Early measurements of the 'Hubble constant'

Author	year	value	Number of objects	comments
Wirtz	1922-24	840		
Lundmark	1925	71	43	Calculated on the basis of his data
Lemaitre	1927	625	42	Weighted
Lemaitre	1927	670	42	unweighted
Hubble	1929	530	24	
de Sitter	1930	460	54	
Eddington	1930	522		
Lundmark	1930	604	25	Spiral-formed PASP, 42, 23, 38, (1930)
Lundmark	1930	876	17	Elliptical PASP, 42, 23, 38, (1930)
Oort	1931	290	44	
Hubble & Humason	1931	558	68	Special treatment for clusters of galaxies

Quelle: Prof. Max Camenzind, Heidelberg

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Entwicklung des Hubble-Parameters

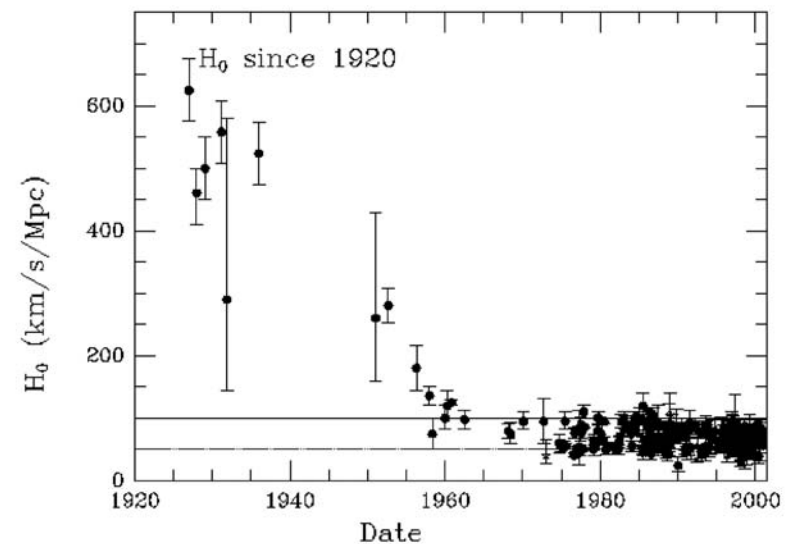


Quelle: John Huchra

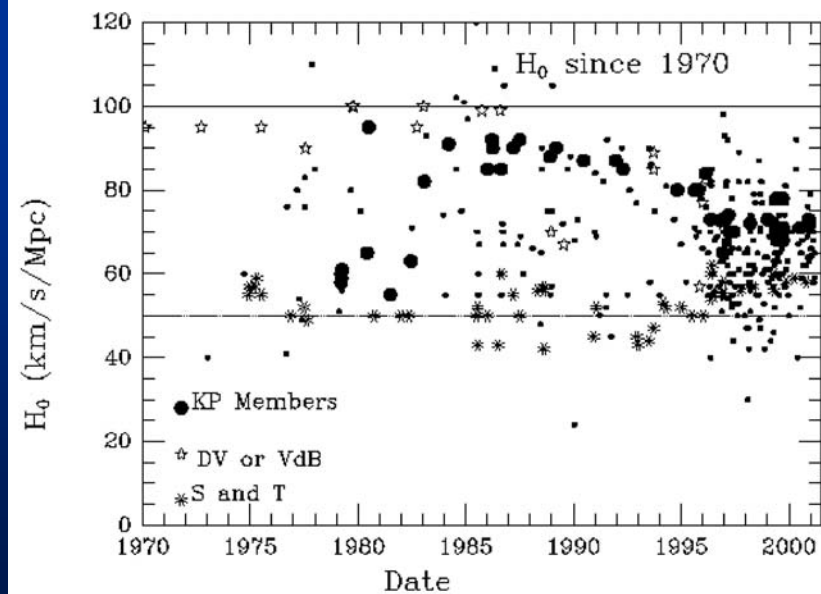
3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Entwicklung des Hubble-Parameters

KP: Hubble Key Project
DV: Gerard de Vaucouleur
VdB: Sidney van den Bergh
S and T: Alan Sandage and Gustav Tammann



Copyright SAO 2001



Copyright SAO 2001

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Bedeutung des Hubble-Parameters

Hubble-Parameter: $H_0 = c z / r$

↳ **hat die Dimension: 1/Zeit**

Hubble-Zeit: $\tau = 1 / H_0$

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Bedeutung des Hubble-Parameters

Hubble-Parameter: $H_0 = c \, z / r$

↳ **hat die Dimension: 1/Zeit**

Als Einheit wird benutzt: km /s · Mpc

Das sieht so aus wie:
Geschwindigkeitszunahme pro Entfernung.

Korrekt ist aber die Deutung:

Raumzuwachs in km pro Mpc Entfernungsintervall in jeder Sekunde.

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Bedeutung der Hubble-Zeit

Das Hubble-Gesetz beschreibt die gleichmäßige Expansion des Universums, ohne dass es dafür einen „Mittelpunkt“ gibt.

Die Expansion sieht von jedem Punkt im Universum gleich aus und genügt damit der speziellen Relativitätstheorie.

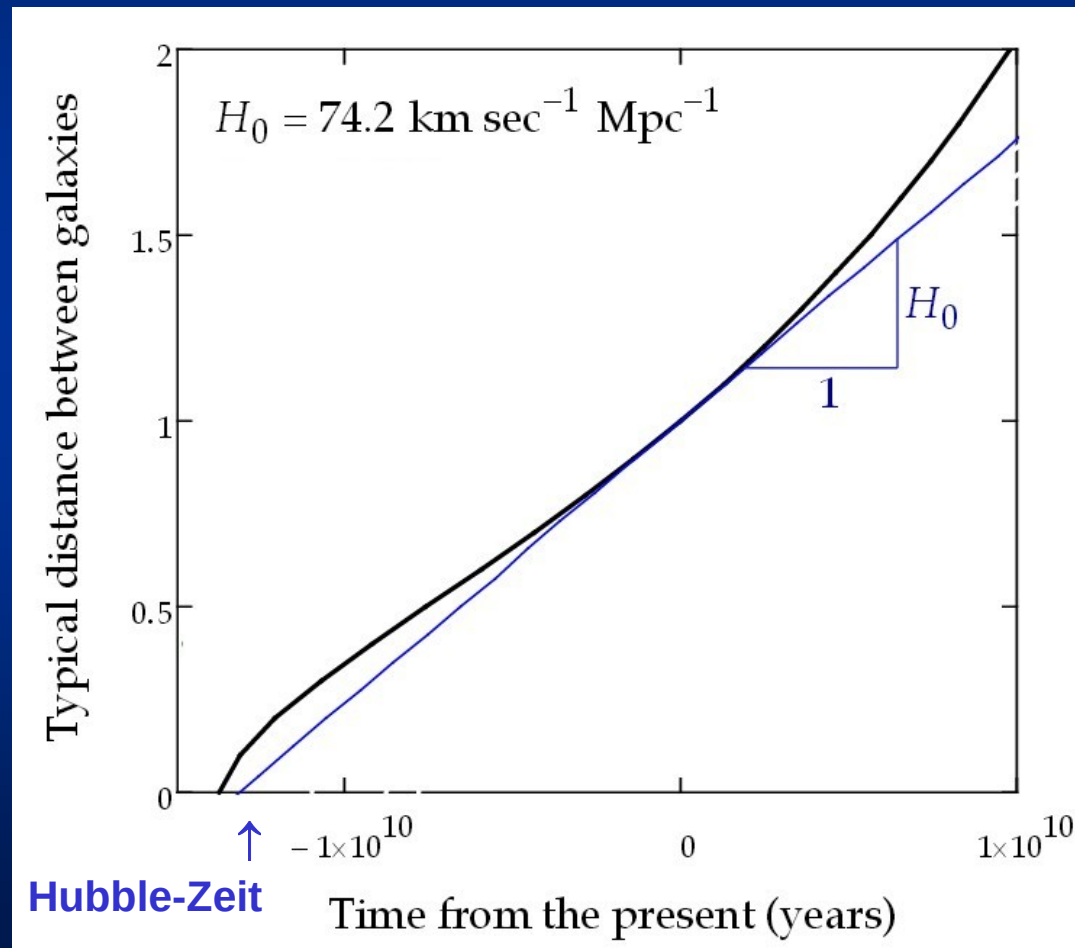
Die Hubble-Zeit beschreibt die Zeit, die vergangen wäre seit Beginn der Expansion bei 0, wäre die Geschwindigkeit der Expansion zu allen Zeiten so groß gewesen wie heute.

Sie ist damit ein Anhaltspunkt für das „Weltalter“.

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

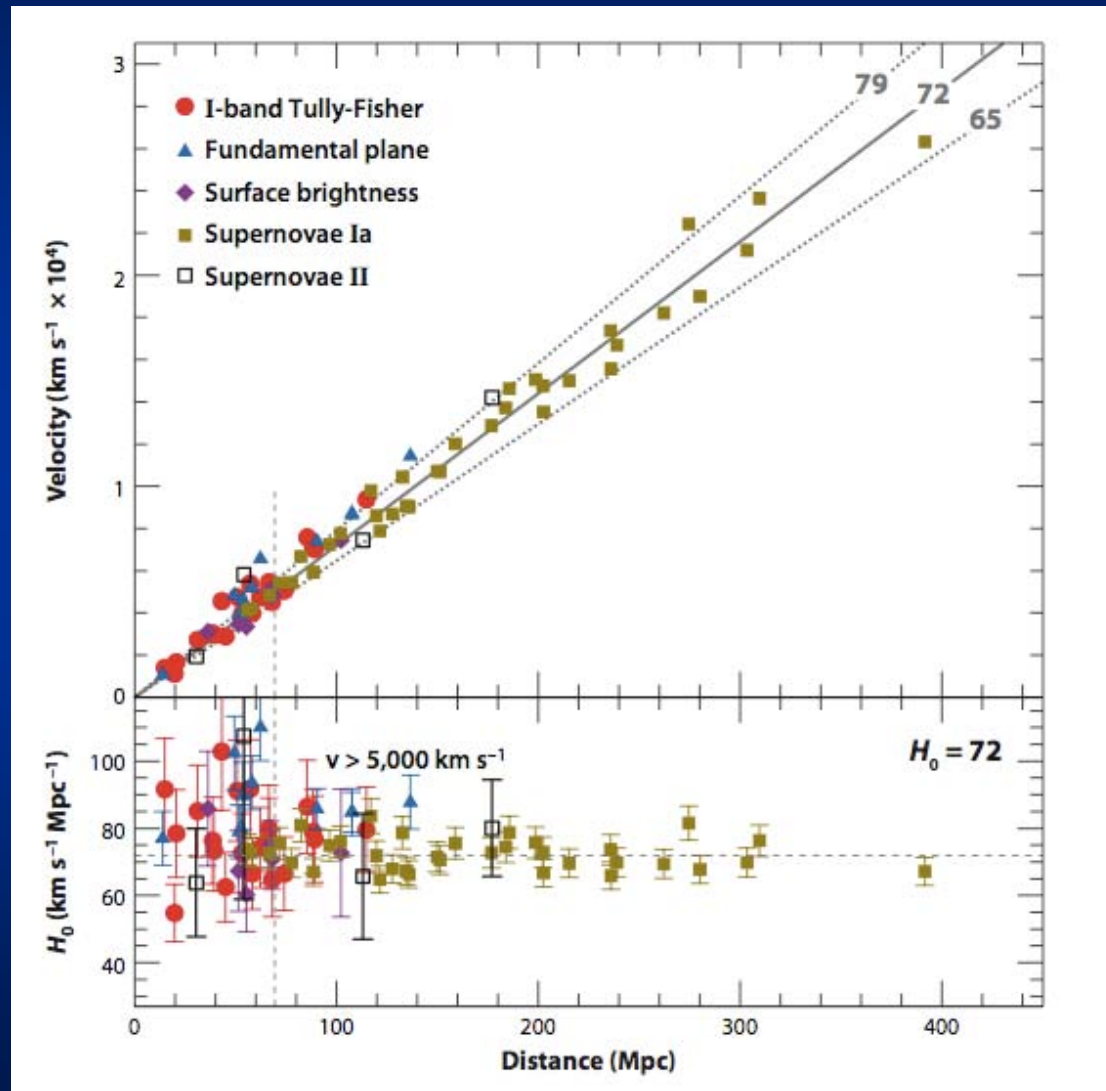
Bedeutung der Hubble-Zeit

Sie ist damit ein Anhaltspunkt für das „Weltalter“.



3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

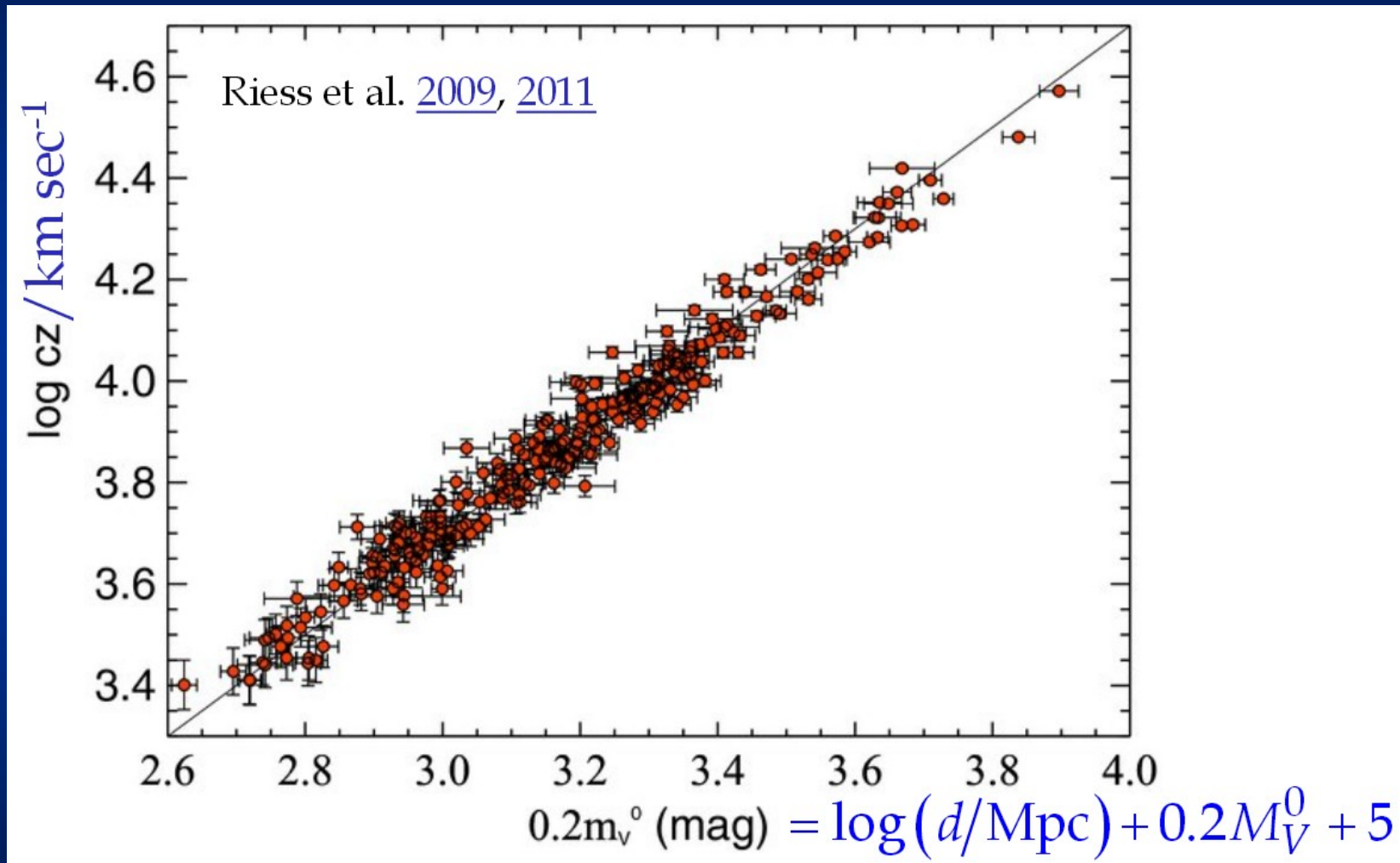
Entwicklung des Hubble-Parameters



Freedman, W.L. & Madore, B.F., *AnnRevA&A*, 48, 673 (2010) – Hubble Key Project

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

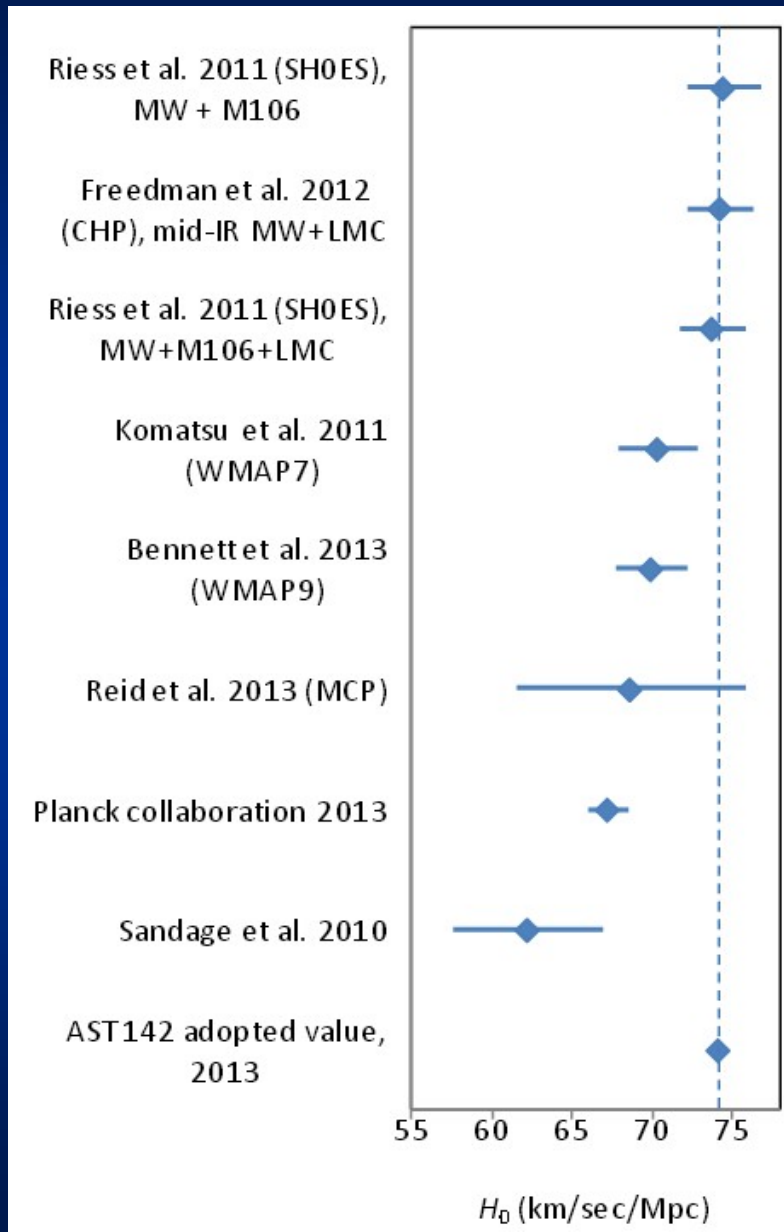
Bestimmung des Hubble-Parameters aus SNe Ia



Die Steigung der Ausgleichsgeraden bestimmt den Hubble-Parameter.

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Aktuelle Entwicklung des Hubble-Parameters



3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Zeitliche Entwicklung des Hubble-Parameters

Die Untersuchung entfernter Supernova-Ausbrüche des Typs SNe Ia gibt die Möglichkeit, die Veränderungen der Expansions-Geschwindigkeit und damit des Hubble-Parameters zu untersuchen.

Denn wir blicken ja nicht nur hinaus in den Raum, sondern auch zurück in die Vergangenheit.

Und damit aus einem „großen“ expandierten Universum in ein kleines „embryonales“ Universum ...

$$R_0 / R = z + 1$$

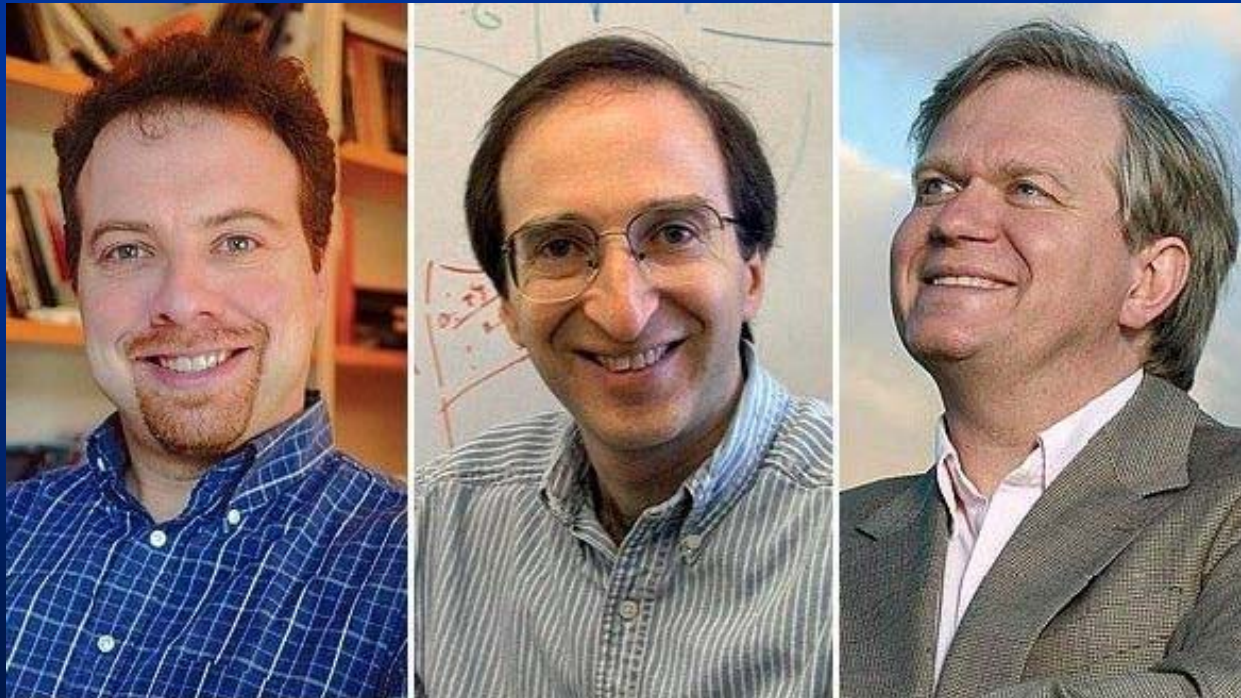
d.h. die heutige Größe des Universums (R_0) verhält sich zu einer früheren (R) wie $z+1$

3.5 *Alles flieht* – das Hubble-Gesetz

Zeitliche Entwicklung des Hubble-Parameters

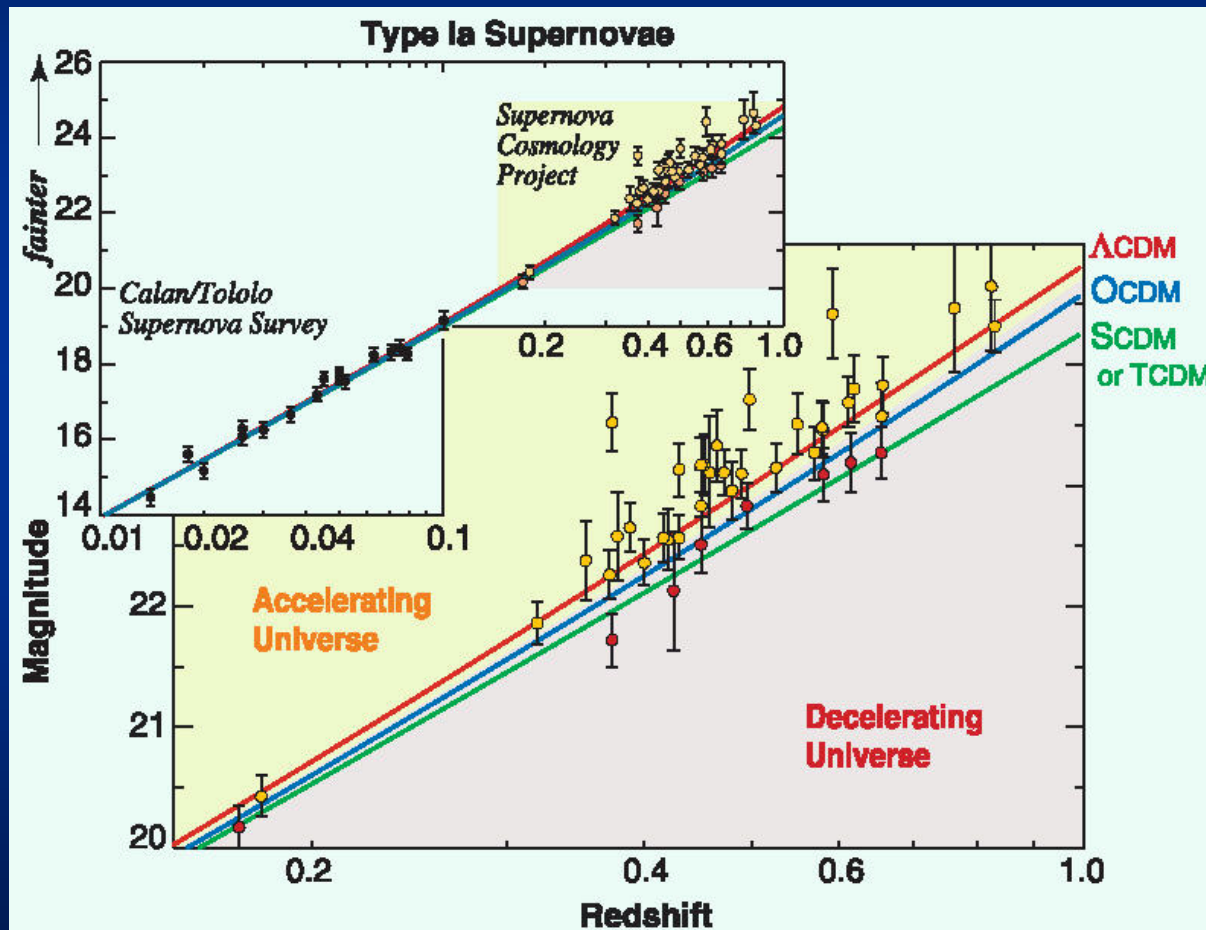
Nobelpreis 2011 für die Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch die Beobachtungen weit entfernter Supernovae an

Adam Riess, Saul Perlmutter und Brian P. Schmidt



3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

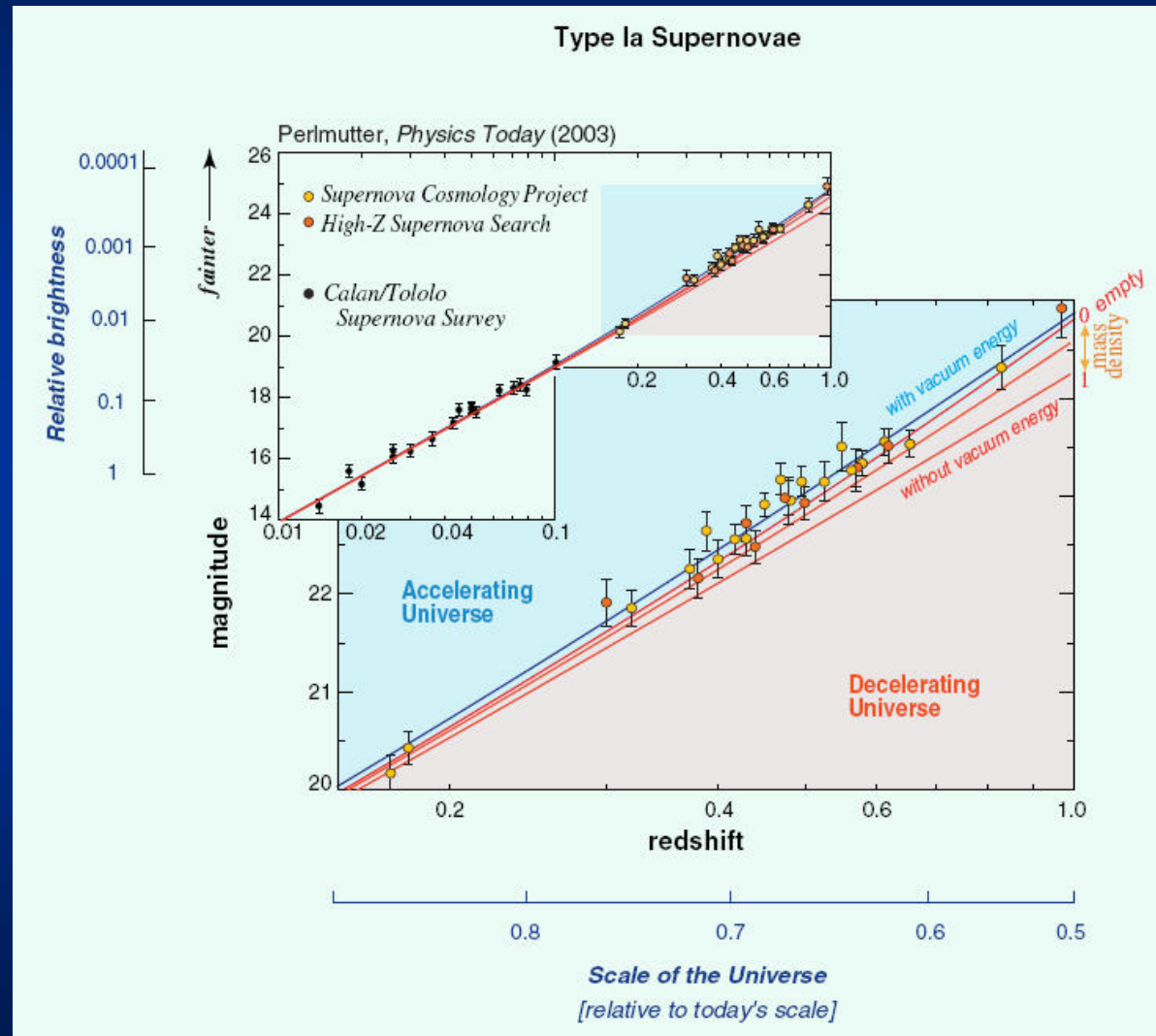
Zeitliche-räumliche Entwicklung des Hubble-Parameters



(Perlmutter et al., ApJ 517, 565 (1999))

3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

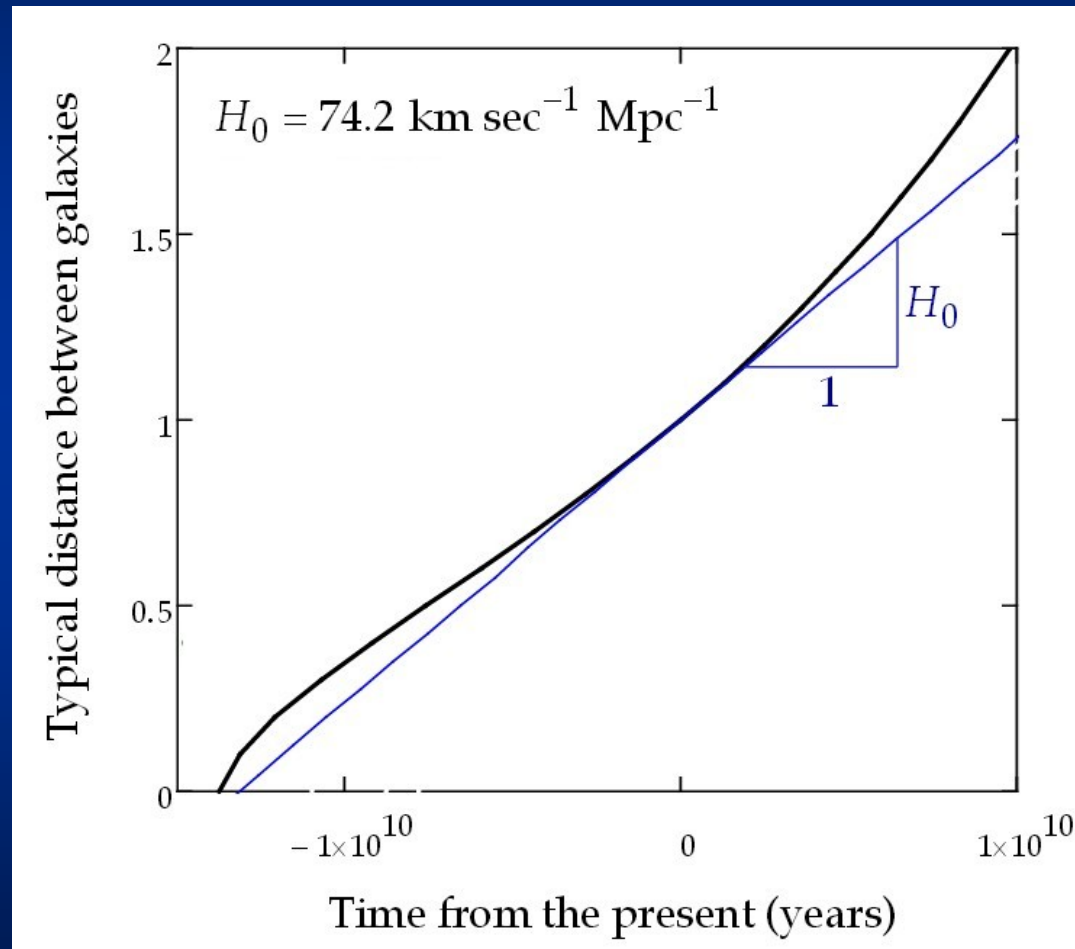
Zeitliche-räumliche Entwicklung des Hubble-Parameters



(nach: Perlmutter et al., *ApJ* 517, 565 (1999))

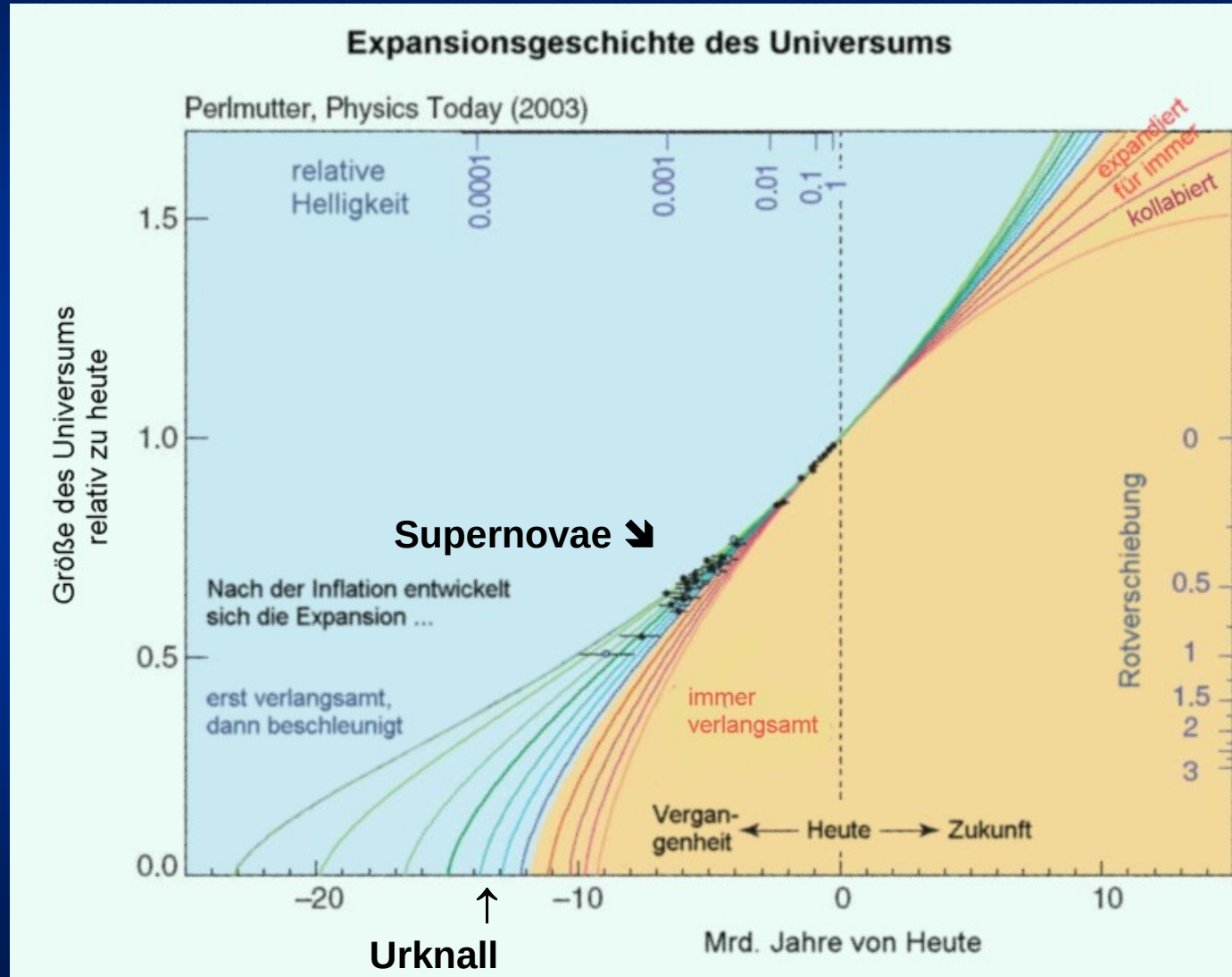
3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Zeitliche-räumliche Entwicklung des Hubble-Parameters



3.5 Alles flieht – das Hubble-Gesetz

Zeitliche-räumliche Entwicklung des Universums



Die Supernovae belegen eine beschleunigte Expansion des Universums.

3.9 Endlich unbegrenzt – Die Struktur des Universums

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1948 veröffentlicht George Gamow , Kernphysiker und Schüler von Niels Bohr und Ernest Rutherford, auf der Basis von Vorarbeiten mit Ralph Alpher und Robert Herman die Hypothese einer Elementenentstehung im frühen Universum.

(1948)



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1948 veröffentlicht George Gamow, Kernphysiker und Schüler von Niels Bohr und Ernest Rutherford, auf der Basis von Vorarbeiten mit Ralph Alpher und Robert Herman die Hypothese einer Elementenentstehung im frühen Universum: Das „ α - β - γ -Papier“.
(Gamow hat Hans Bethe nur als Scherz als Autor aufgeführt, er war daran gar nicht beteiligt.)

(Physical Reviews 73, S. 803, 1948)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*
Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland

AND
H. BETHE
Cornell University, Ithaca, New York

AND
G. GAMOW
The George Washington University, Washington, D. C.
February 18, 1948

AS pointed out by one of us,¹ various nuclear species must have originated not as the result of an equilibrium corresponding to a certain temperature and density, but rather as a consequence of a continuous building-up process arrested by a rapid expansion and cooling of the primordial matter. According to this picture, we must imagine the early stage of matter as a highly compressed neutron gas (overheated neutral nuclear fluid) which started decaying into protons and electrons when the gas pressure fell down as the result of universal expansion. The radiative capture of the still remaining neutrons by the newly formed protons must have led first to the formation of deuterium nuclei, and the subsequent neutron captures resulted in the building up of heavier and heavier nuclei. It must be remembered that, due to the comparatively short time allowed for this process,¹ the building up of heavier nuclei must have proceeded just above the upper fringe of the stable elements (short-lived Fermi elements), and the present frequency distribution of various atomic species was attained only somewhat later as the result of adjustment of their electric charges by β -decay.

Thus the observed slope of the abundance curve must not be related to the temperature of the original neutron gas, but rather to the time period permitted by the expansion process. Also, the individual abundances of various nuclear species must depend not so much on their intrinsic stabilities (mass defects) as on the values of their neutron capture cross sections. The equations governing such a building-up process apparently can be written in the form:

$$\frac{dn_i}{dt} = f(i)(\sigma_{i-1}n_{i-1} - \sigma_i n_i) \quad i = 1, 2, \dots, 238, \quad (1)$$

where n_i and σ_i are the relative numbers and capture cross sections for the nuclei of atomic weight i , and where $f(i)$ is a factor characterizing the decrease of the density with time.

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_0 dt$ during the building-up period is equal to 5×10^8 g sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \propto 10^9/\beta$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

$$\int_{t_0}^{\infty} (10^9/\beta) dt \approx 5 \times 10^8, \quad (2)$$

which gives us $t_0 \approx 20$ sec. and $\rho_0 \approx 2.5 \times 10^8$ g sec./cm³. This result may have two meanings: (a) for the higher densities existing prior to that time the temperature of the neutron gas was so high that no aggregation was taking place, (b) the density of the universe never exceeded the value 2.5×10^8 g sec./cm³ which can possibly be understood if we

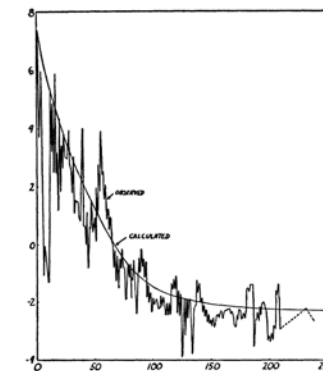


FIG. 1.
Log of relative abundance
Atomic weight

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1948 veröffentlicht George Gamow , Kernphysiker und Schüler von Niels Bohr und Ernest Rutherford, auf der Basis von Vorarbeiten mit Ralph Alpher und Robert Herman die Hypothese einer Elementenentstehung im frühen Universum.

(Nature 162, S. 680, 1948)

680

NATURE

October 30, 1948 Vol. 162

THE EVOLUTION OF THE UNIVERSE

By Dr. G. GAMOW

George Washington University, Washington, D.C.

THE discovery of the red shift in the spectra of distant stellar galaxies revealed the important fact that our universe is in the state of uniform expansion, and raised an interesting question as to whether the present features of the universe could be understood as the result of its evolutionary development, which must have started a few thousand million years ago from a homogeneous state of extremely high density and temperature. We conclude first of all that the relative abundances of various atomic species (which were found to be essentially the same all over the observed region of the universe) must represent the most ancient archaeological document pertaining to the history of the universe. These abundances must have been established during the earliest stages of expansion when the temperature of the primordial matter was still sufficiently high to permit nuclear transformations to run through the entire range of chemical elements. It is also interesting to notice that the observed relative amounts of natural radioactive elements suggest that their nuclei must have been formed (presumably along with all other stable nuclei) rather soon after the beginning of the universal expansion. In fact, we notice that natural radioactive isotopes with the decay periods of many thousand million years (such as uranium-238, thorium-232 and samarium-148) are comparatively abundant, whereas those with decay periods measuring only several hundred million years are extremely rare (as uranium-235 and potassium-40). If, using the known decay periods and natural abundances of these isotopes, we try to calculate the date when they have been about as abundant as the corresponding isotopes of longer life, we find that it must have been a few thousand million years ago, in general agreement with the astronomically determined age of the universe.

The early attempts to explain the observed relative abundances of the elements were based on the assumption that the present distribution represents a 'frozen equilibrium state' corresponding to some very high temperature and density in an early stage of universal expansion. Such equilibrium theories lead, however, to the result that the logarithm of the relative abundance must be a linear function of the nuclear binding energy, which in its turn is known to be a linear function of atomic weight. Thus, according to that picture, we would expect a rapid exponential decrease of relative abundances all the way from hydrogen to uranium, in direct contradiction to the observed distribution (circles in Fig. 1), which shows a rapid decrease for the first half of the natural sequence of elements, but levels up almost to a constant value in the second half.

As the result of this difficulty, I suggested that the observed abundances do not correspond to any equilibrium state at all, but, quite on the contrary, represent a dynamical building-up process which was arrested in a certain stage of its development by a rapid expansion of the universe. According to this point of view, one should imagine the original state of matter as a very dense over-heated neutron gas which could have originated (if one lets one's imagina-

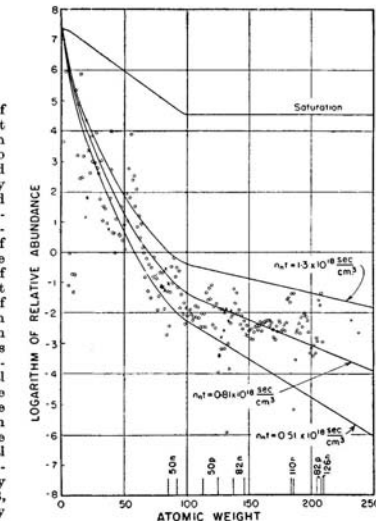


Fig. 1

tion fly beyond any limit) as the result of hypothetical universal collapse preceding the present expansion. In fact, the extremely high pressures obtaining near the point of complete collapse (singular point at $t = 0$) would have squeezed the free electrons into the protons, turning the matter into the state of over-heated neutron fluid. When the expansion began, and the density of neutron gas dropped, the neutrons would be expected to begin decaying again into protons, and more and more complex nuclear aggregates could be built up as the result of the union between the newly formed protons and the neutrons still remaining. Such a building-up process must have started when the temperature of the neutron-proton mixture dropped below a few times 10^{10}°K. , which corresponds to the mutual binding energies of these nuclear particles. The equations governing such a gradual building-up process can evidently be written in the form:

$$\frac{dn_i}{dt} = \lambda_{i-1} n_{i-1} - \lambda_i n_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots), \quad (1)$$

where n_i is the number of atomic nuclei of atomic weight i , and λ_i are the coefficients depending on the collision frequency, and the capture cross-sections for fast neutrons in the nuclei of various atomic weight.

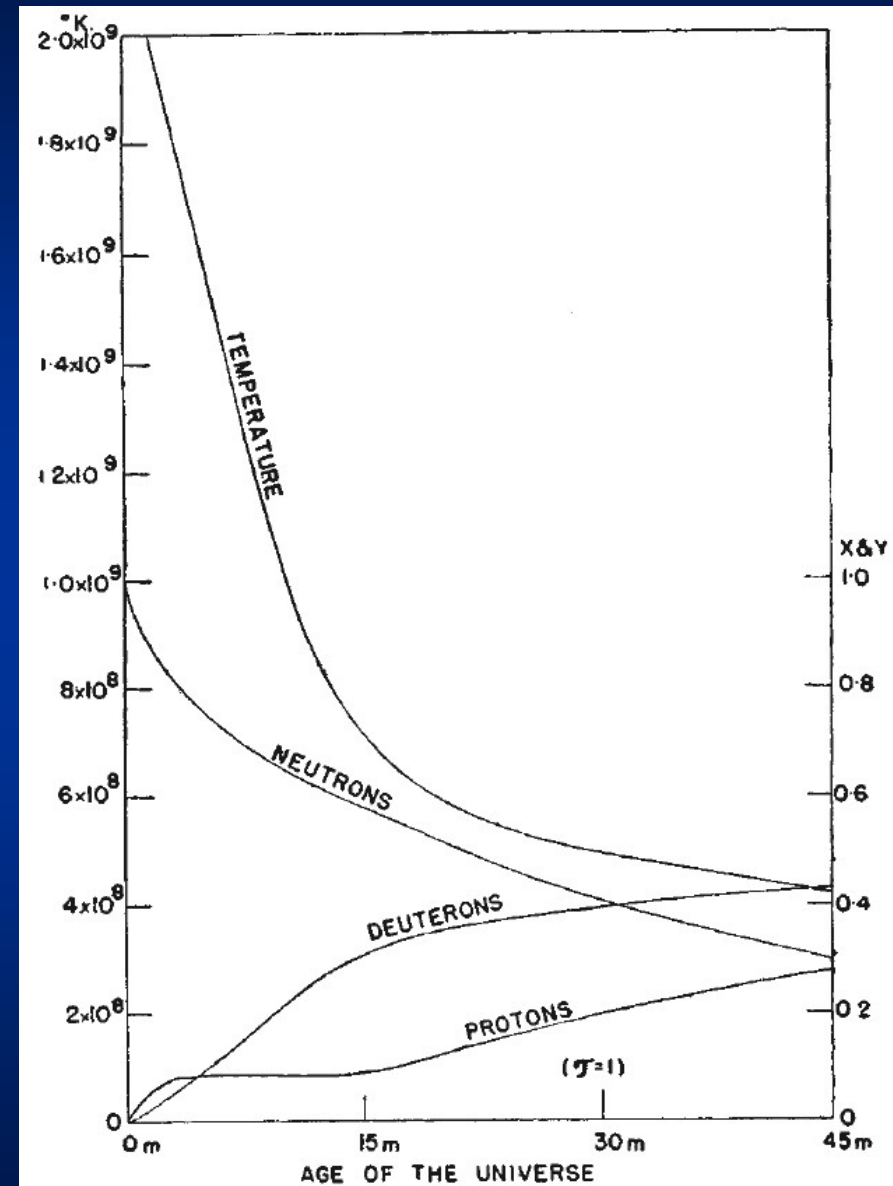
The numerical study of these equations was carried out by R. Alpher^{1,2}, who used the recent experimental data on the capture cross-sections of fast neutrons. These cross-sections are known to increase very rapidly by a factor of several hundred for the first half of the atomic weights, and to remain more or less constant for the second half; a fact which is

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1948 veröffentlicht George Gamow, Kernphysiker und Schüler von Niels Bohr und Ernest Rutherford, auf der Basis von Vorarbeiten mit Ralph Alpher und Robert Herman die Hypothese einer Elementenentstehung im frühen Universum.

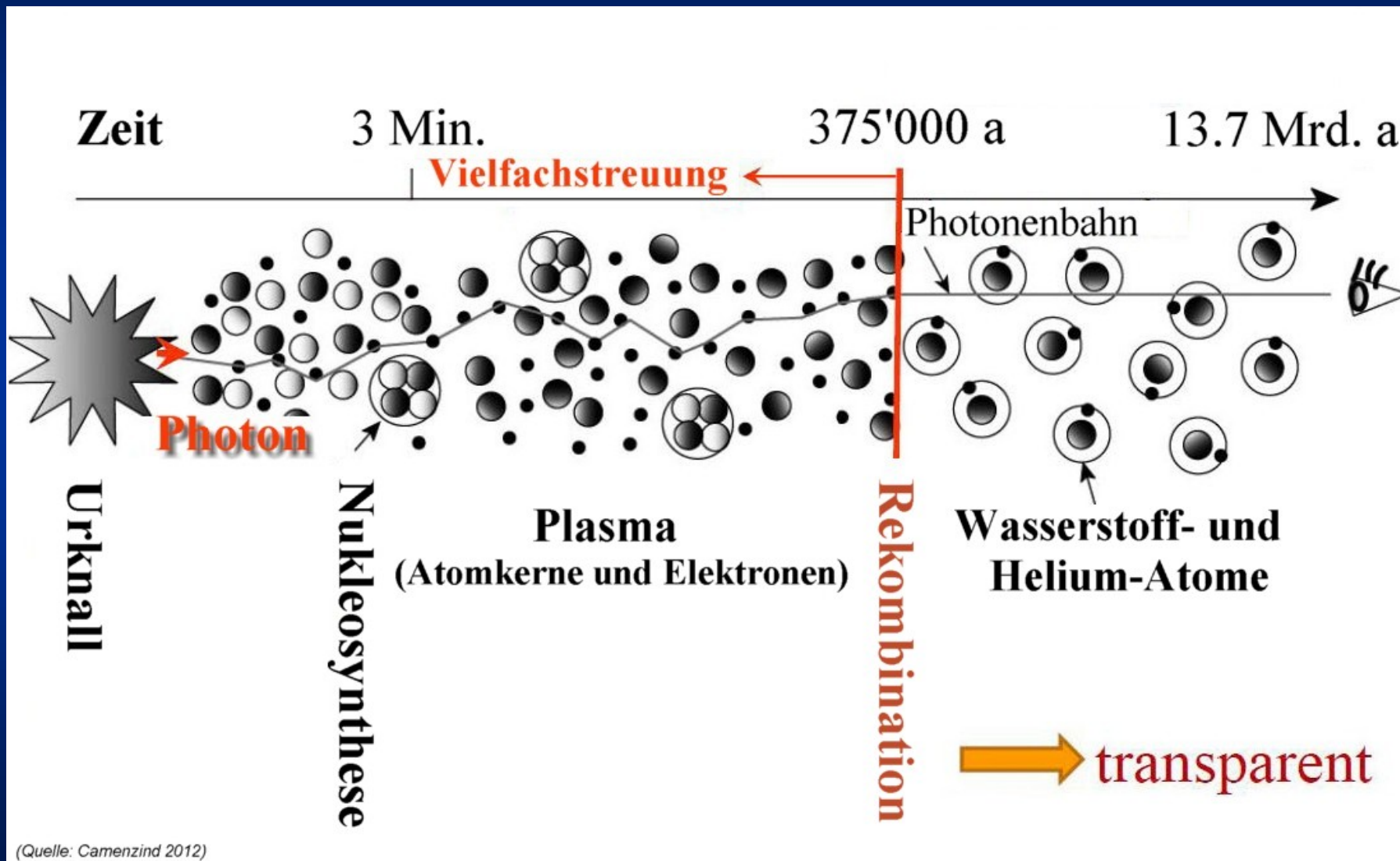
Sie postulierten die Entstehung einer Strahlung zum Zeitpunkt der Rekombination bei ca. 3'500 K, nach damaliger Annahme heute bei ca. 5 K.

(Nature 162, S. 681, Fig. 2, 1948)



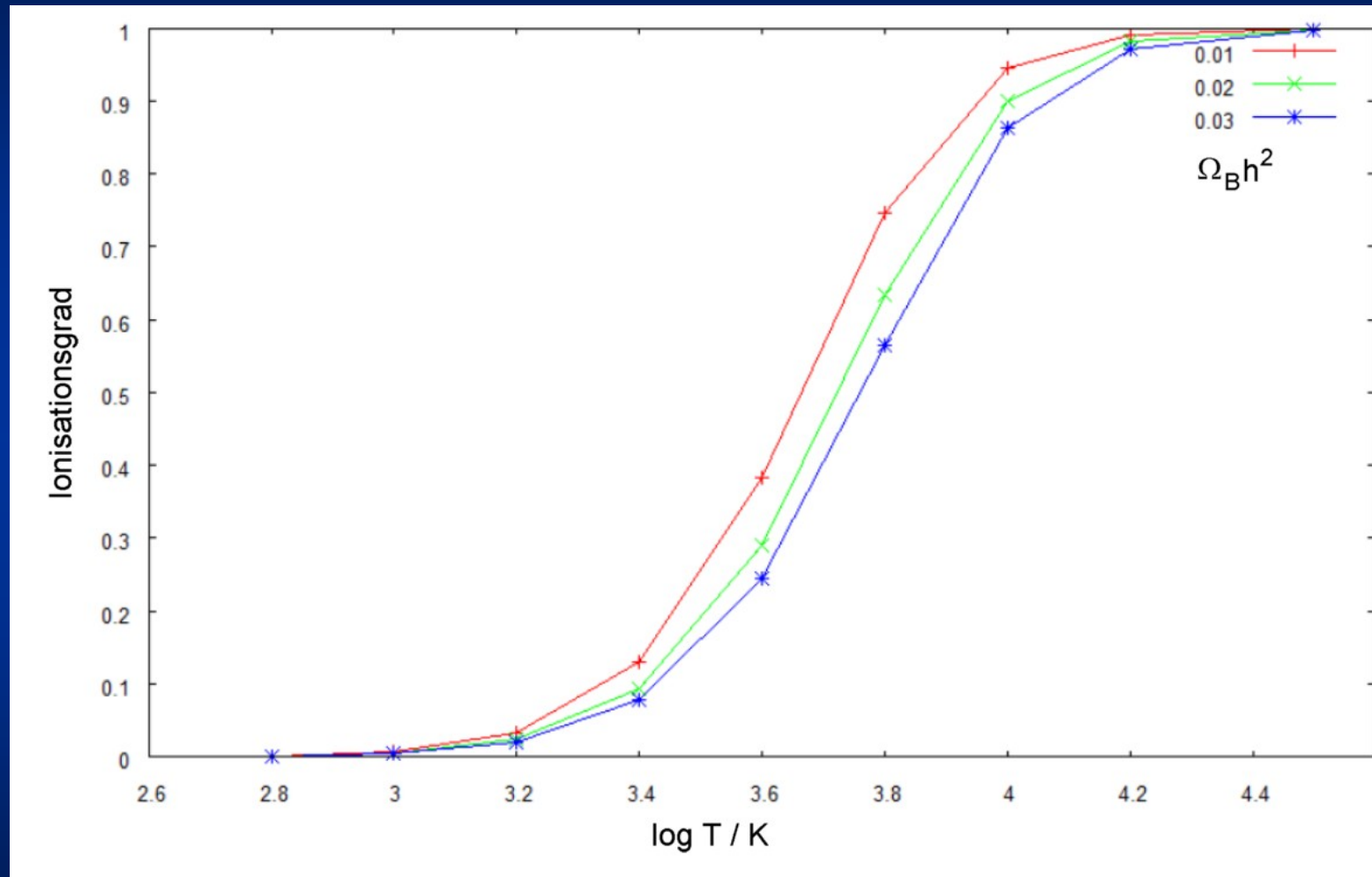
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Entstehung der Hintergrundstrahlung



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Entstehung der Hintergrundstrahlung

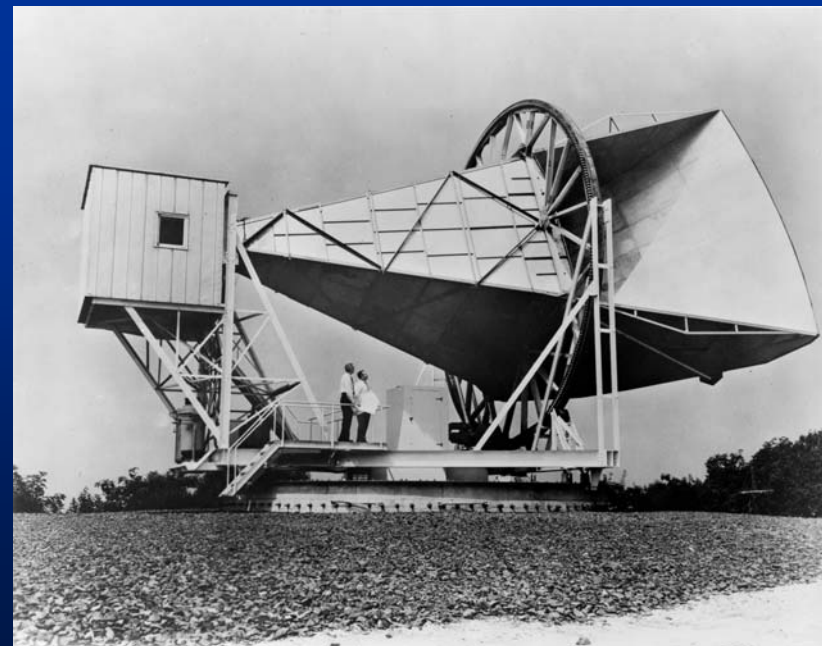


Ionisationsgrad und Temperatur:
Bei ca. 3'000 K geht der Ionisationsgrad gegen Null, die Streuung wird unbedeutend.
(Quelle: Lutsker (2008))

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1965 veröffentlichen Penzias und Wilson von den Bell Labs. Messungen einer Strahlung bei 7.35 cm mit dem 6 m-Horn in Holmdel/NJ bei einer Strahlungstemperatur von 3.5 K, isotrop und zeitunabhängig.

(ApJ 142, S. 419, 1965)

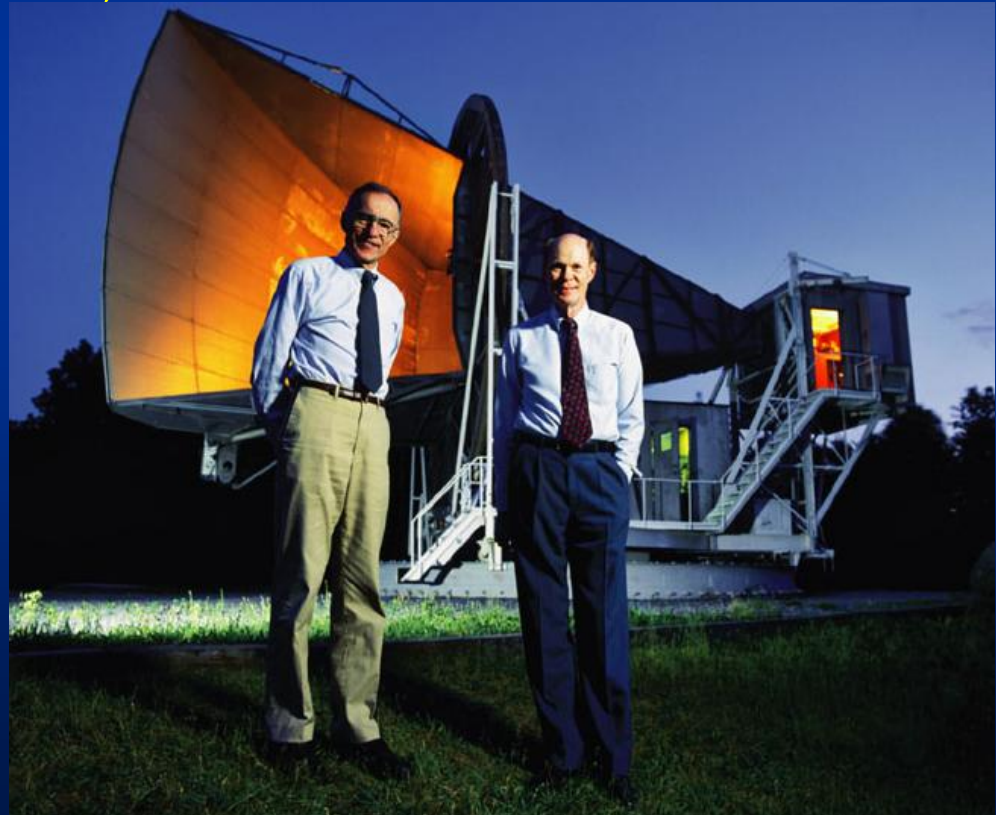


3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

1965 veröffentlichen Penzias und Wilson von den Bell Labs. Messungen einer Strahlung bei 7.35 cm mit dem 6 m-Horn in Holmdel/NJ bei einer Strahlungstemperatur von 3.5 K, isotrop und zeitunabhängig.

(ApJ 142, S. 419, 1965)

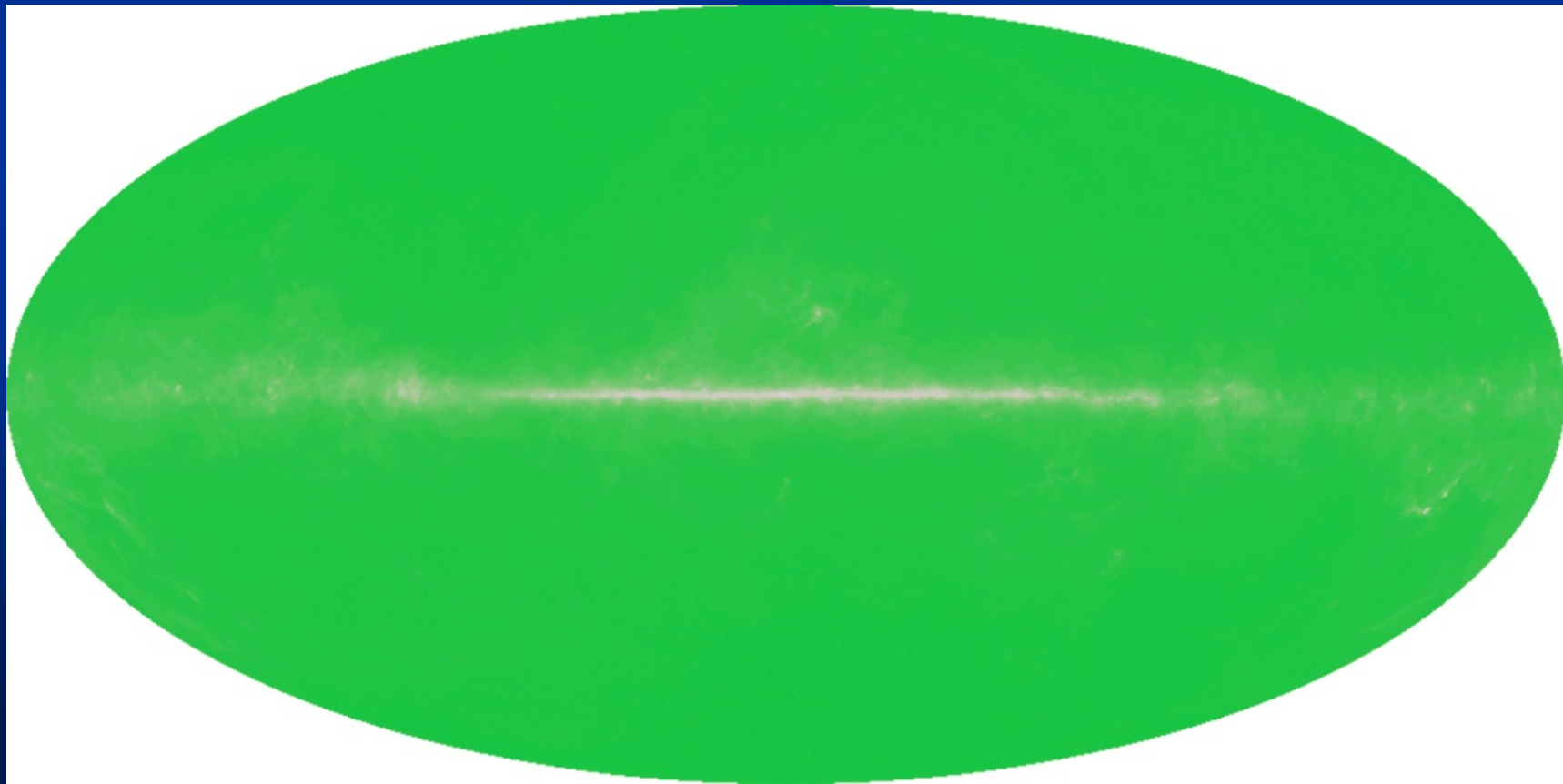
1978 erhalten sie dafür den Nobelpreis.



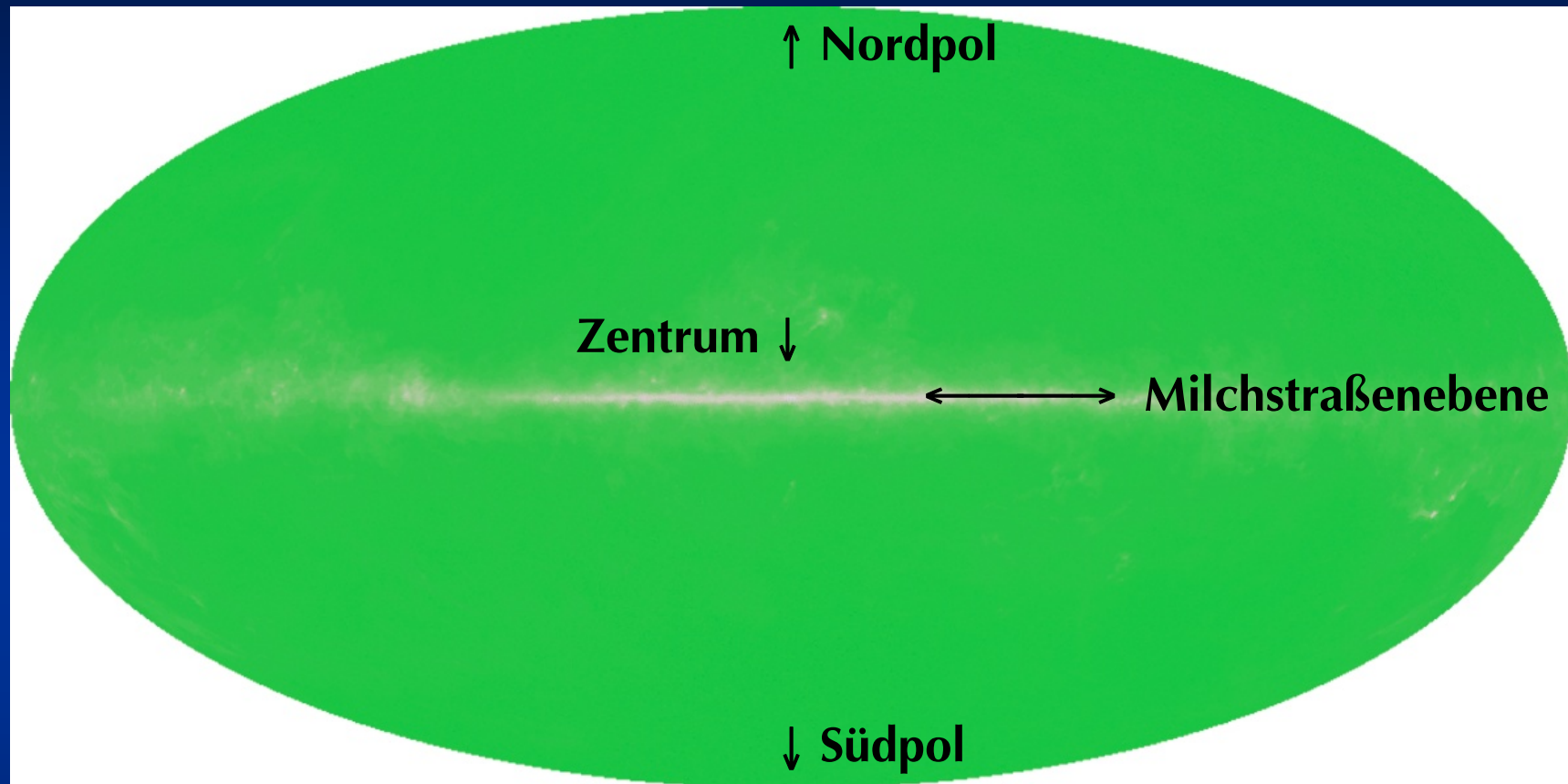
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

In der gleichen Ausgabe
beschreiben Dicke, Peebles, Roll
und Wilkinson diese Strahlung
als „Cosmic Black-Body
Radiation“

(ApJ 142, S. 414, 1965)

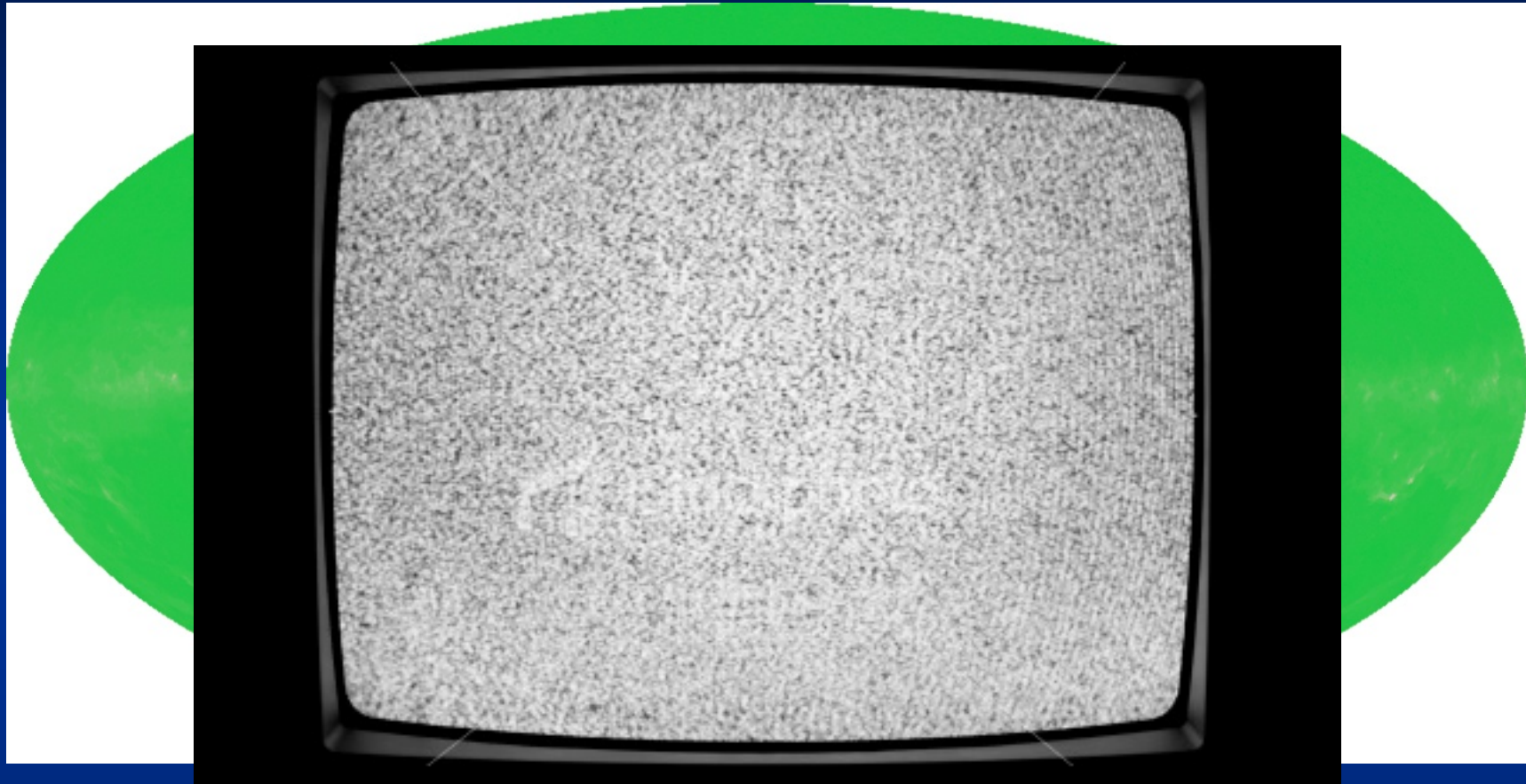


3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung



**Zu sehen ist hier außer der Milchstraße eine isotrope,
homogene Strahlung von 3.5 ± 1 K.**
(Darstellung in galaktischen Koordinaten)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

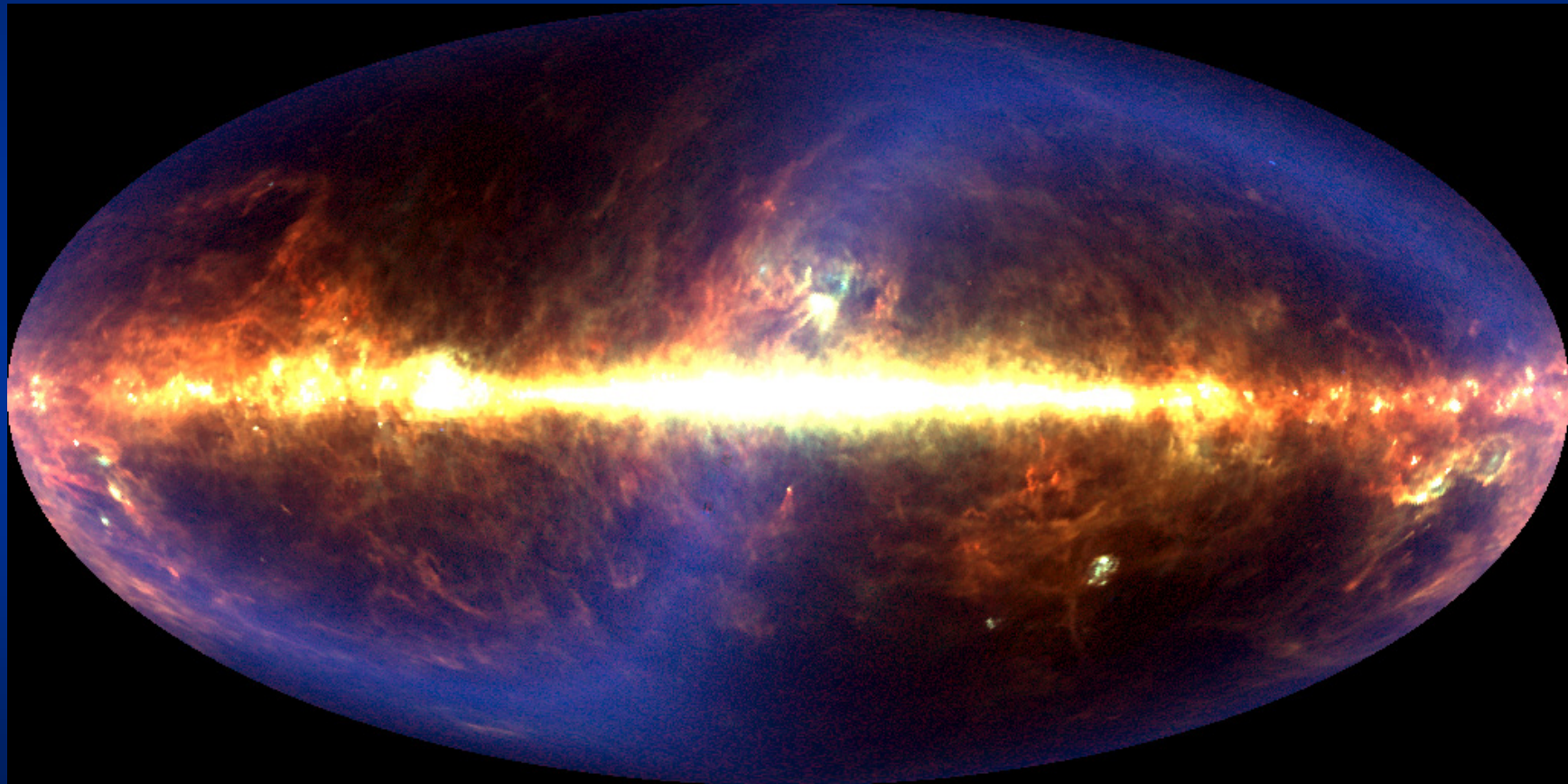


Zu sehen ist hier außer der Milchstraße eine isotrope, homogene Strahlung von 3.5 ± 1 K.
Das ist ähnlich dem Fernsehrauschen, das zu 0.1 % auf die CMBR (Cosmic Microwave Background Radiation) zurückgeht.

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DIRBE



COBE: Cosmic Background Explorer

Das Bild zeigt das Band der Milchstraße und die Ebene der Ekliptik (bläulich).

25, 60 und 100 μm (NASA)

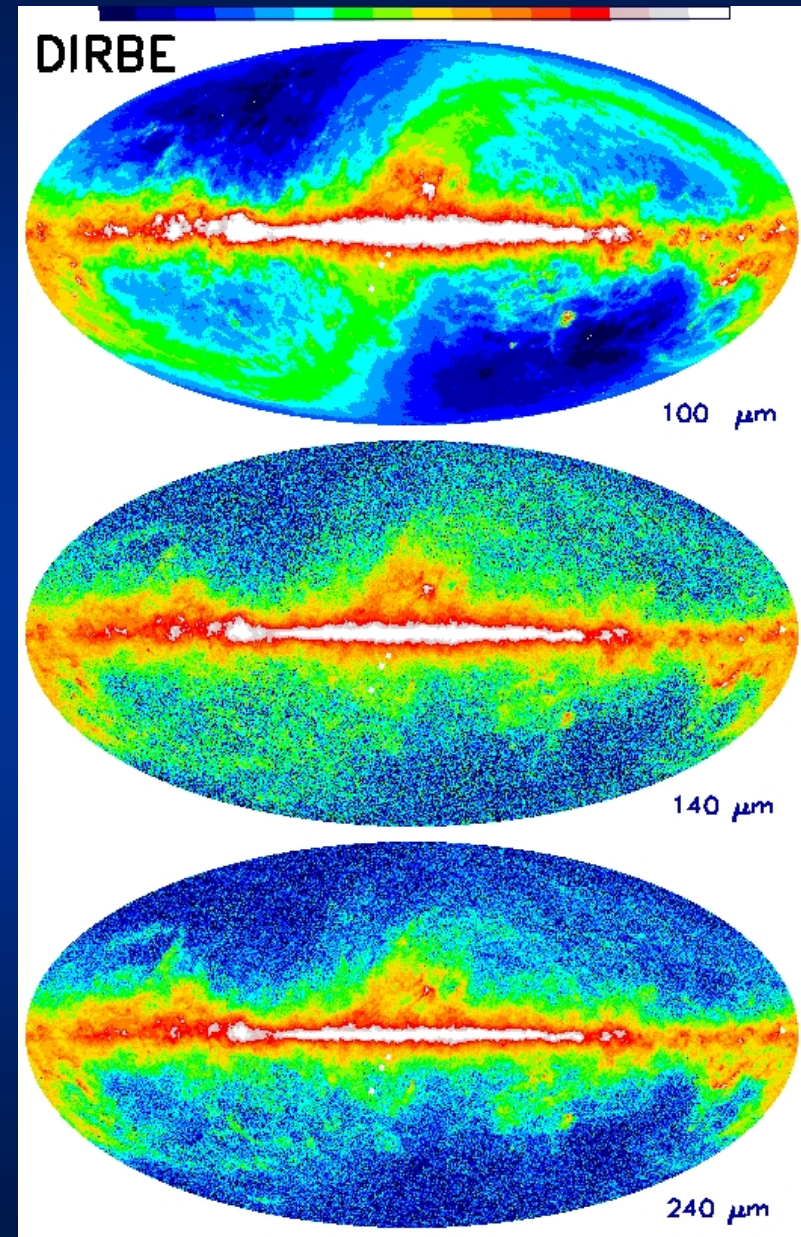
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DIRBE

Für die Messung der Hintergrundstrahlung müssen alle Vordergrundquellen herausgerechnet werden (Milchstraße, Ekliptik, Sterne, Planeten etc.)

100, 140 und 240 μm (NASA)



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DMR

Dipol-Asymmetrie: 3.353 mK

(oberes Bild)

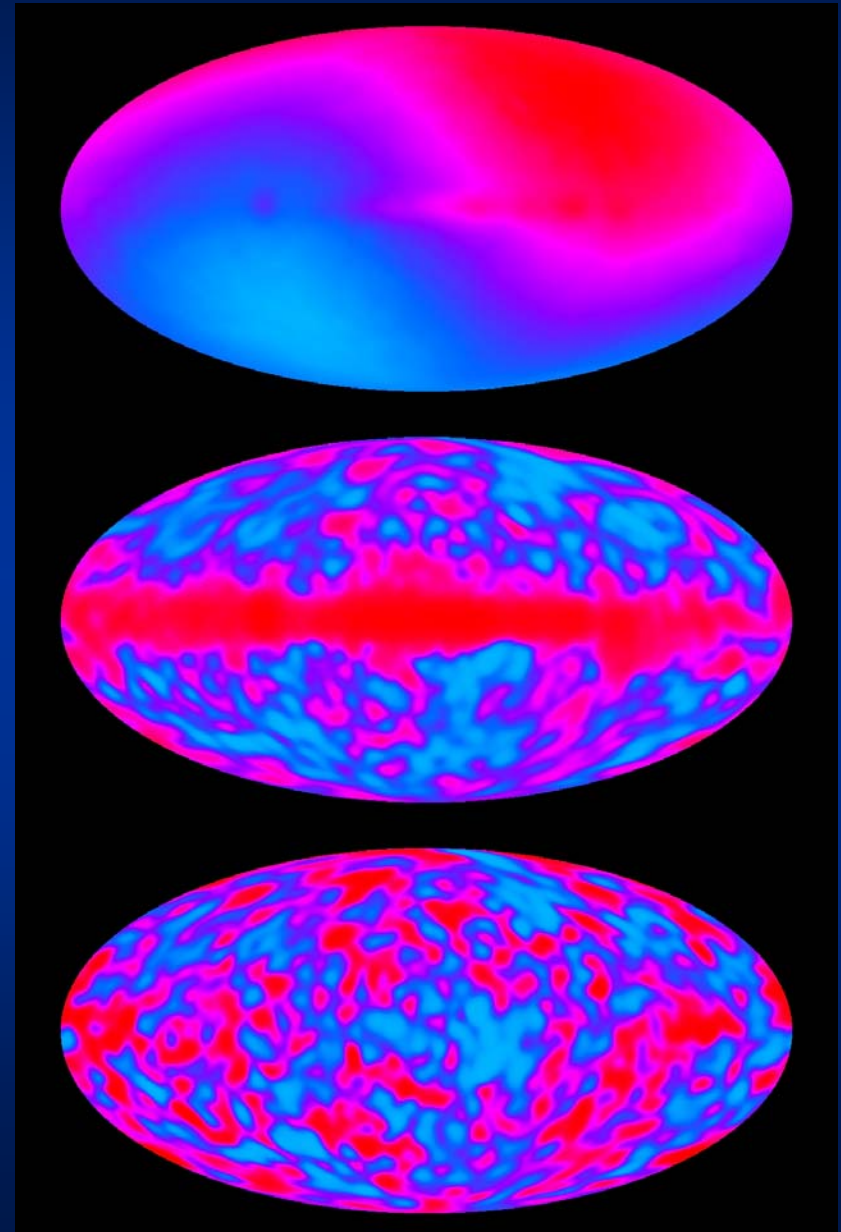
Anisotropien mit Milchstraße

(mittleres Bild)

**räumliche Anisotropien
(Milchstraße abgezogen)**

(unteres Bild)

(NASA)



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DMR

Die Dipolasymmetrie kommt dadurch zustande, dass die Erde sich relativ zum CMBR bewegt.

- Erde bewegt sich mit 30 km/s um die Sonne
- Sonnensystem mit 225 km/s um das Zentrum der Galaxis
- die Galaxis mit 100 km/s in Richtung der lokalen Gruppe
- Lokale Gruppe mit 220 km/s Richtung des Virgo-Superhaufen
- dieser mit 400 km/s Richtung Hydra/Centaurus

Es resultiert eine Bewegung von 350 km/s relativ zum CMBR, die für die Dipolasymmetrie sorgt.

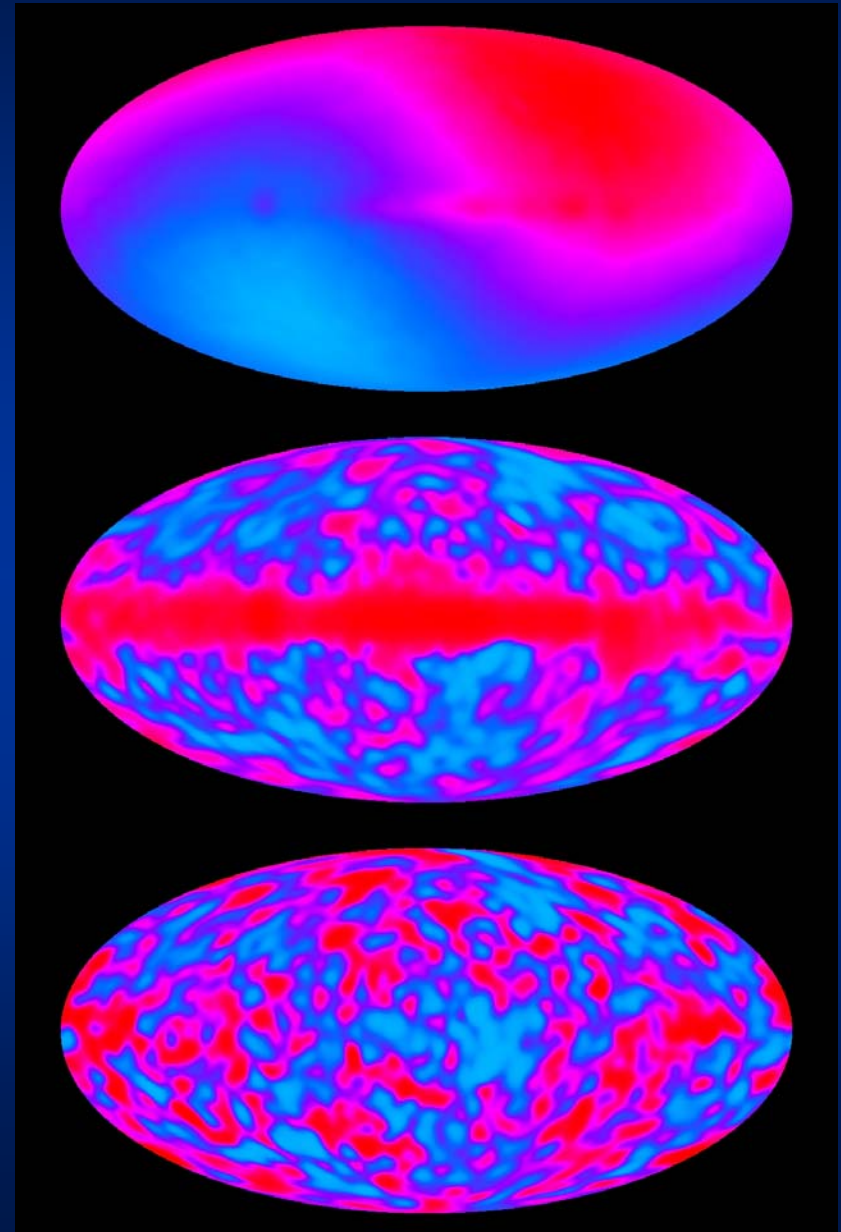
In Vorwärtsrichtung wird also eine Blauverschiebung (höhere Temperatur) gemessen, in Rückwärtsrichtung eine Rotverschiebung (niedrigere Temperatur).

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DMR

Dipol-Asymmetrie: 3.353 mK
($\approx 1/1000$ der Temperatur)

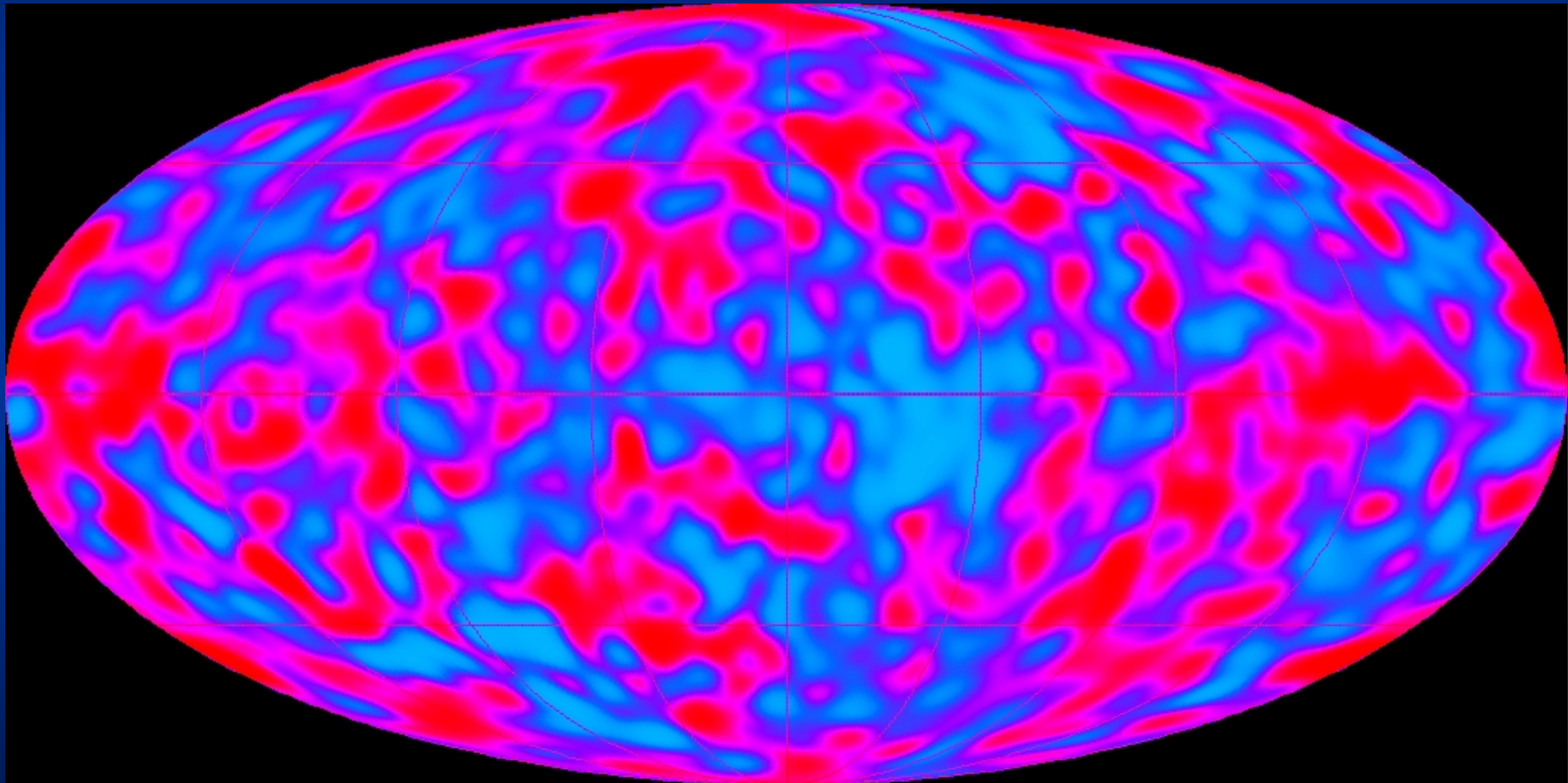


(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

DMR

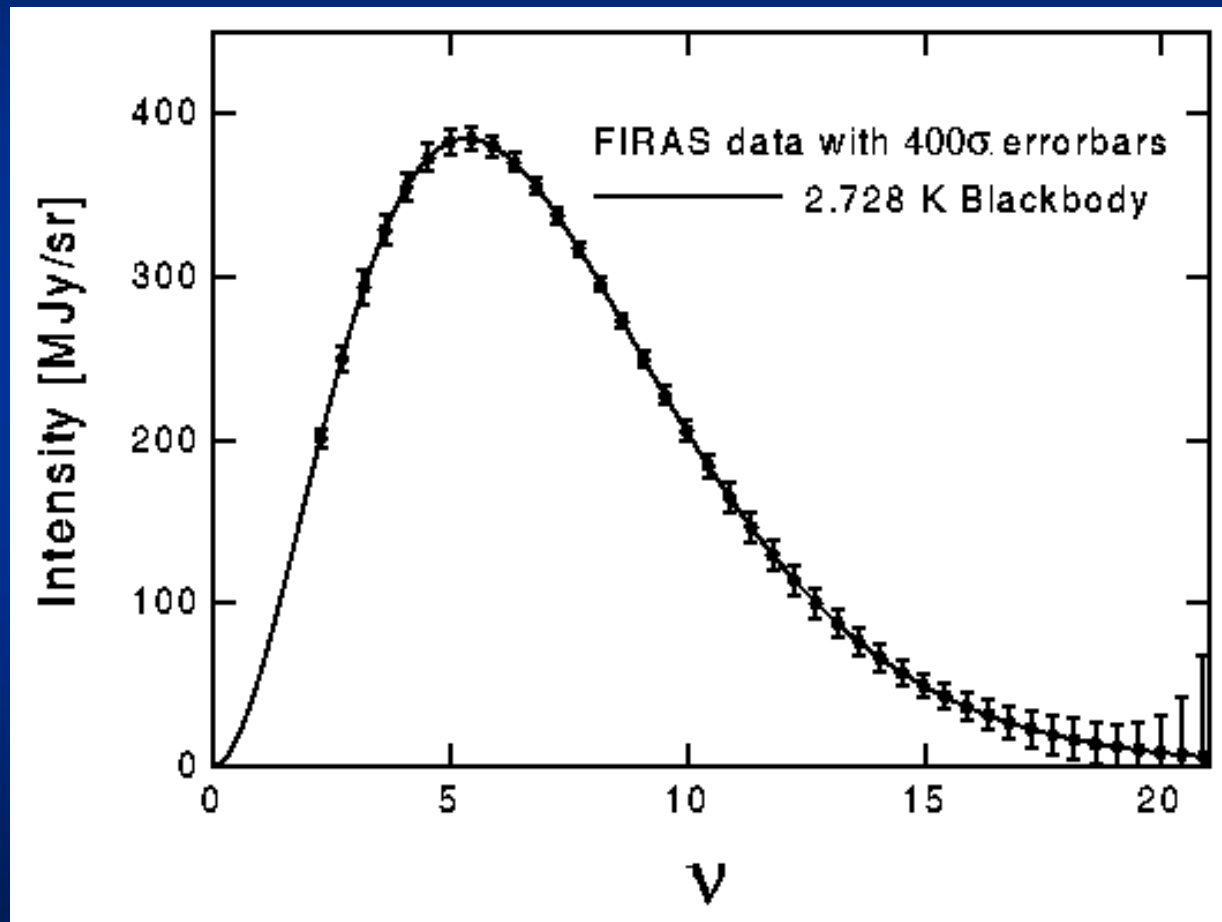


Fluktuationen: $18 \mu\text{K}$ / Winkelauflösung: $\approx 7^\circ$
(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten

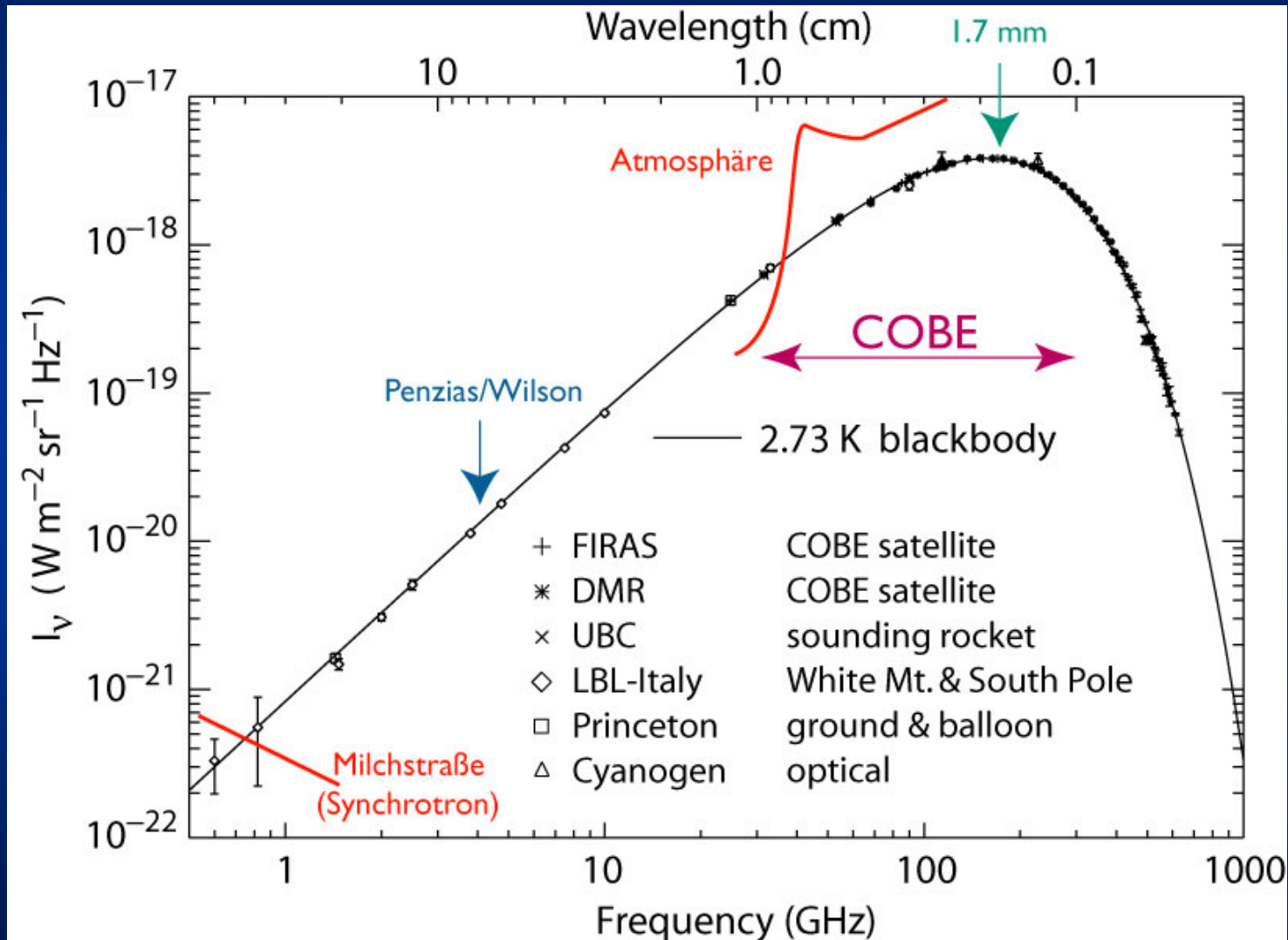
FIRAS



Maximum bei 1.7 mm Wellenlänge
(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des COBE-Satelliten



Schwarzkörper-Spektrum der CMBR: Zusammenfassung

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Beobachtungen nach COBE

- **ACBAR: Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver** (Ballon; seit 2001)
- **Archeops** (Boden; 1999-2002)
- **BOOMERANG: Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics** (Ballon; 1997, 1998, 2003)
- **CBI: Cosmic Background Imager** (Boden; seit 2002)
- **DASI: Degree Angular Scale Interferometer** (Boden; seit 1999)
- **Planck** (Satellit; seit 2010 am L2 Punkt)
- **QUIET: Q/U Imaging Experiment / Polarisationsmessungen** (Boden; seit 2008)
- **VSA: Very Small Array** (Boden; 2002)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Das BOOMERANG-Ballon-Experiment



Start des Stratosphären-Ballons in der Antarktis

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Das BOOMERANG-Ballon-Experiment

Das Balloninstrument

Flughöhe: 37 km

Missionszeitraum:

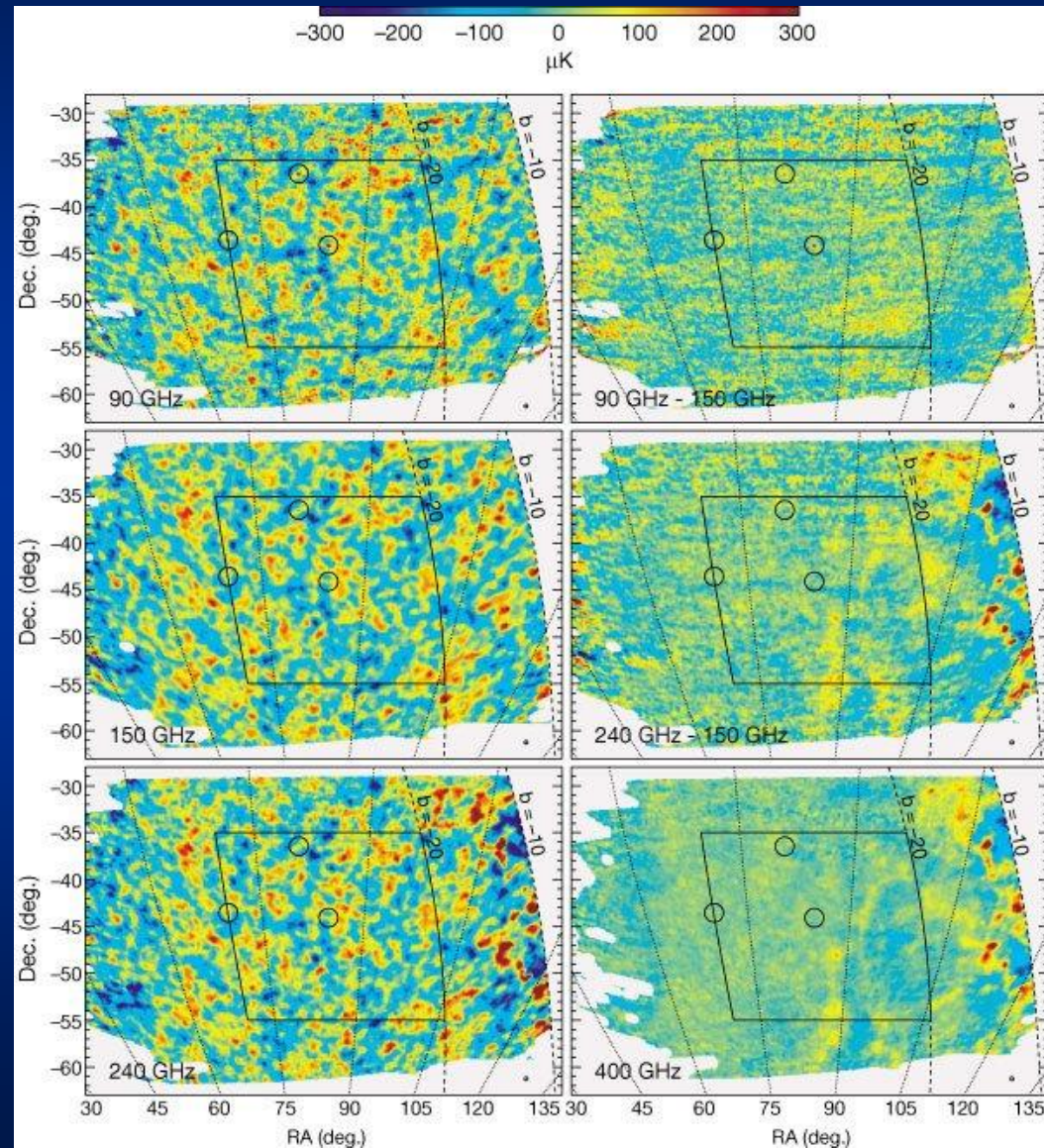
1998 Dezember 29 – 1999 Januar 9



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

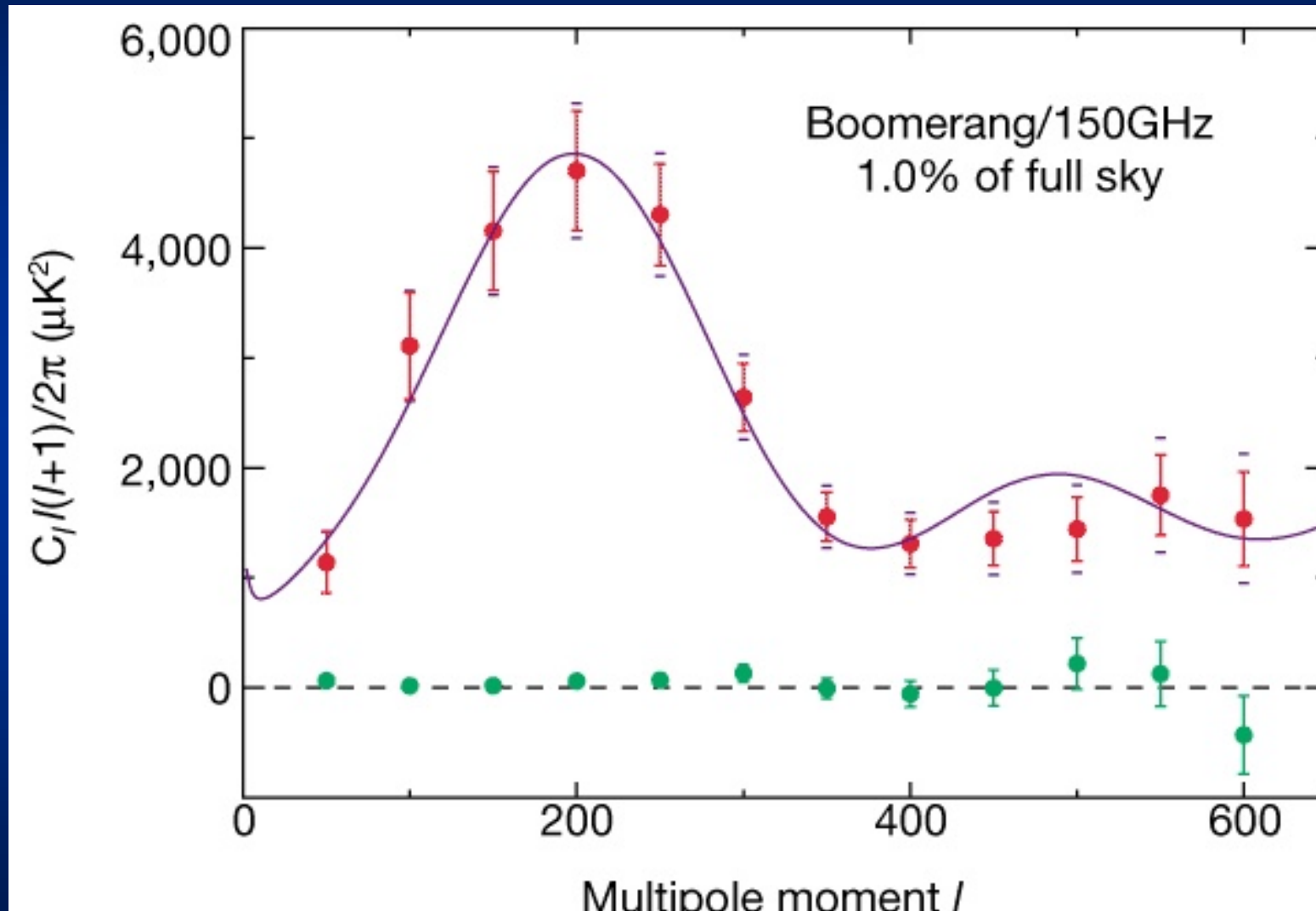
Ergebnisse des BOOMERANG-Ballon-Experiments

Himmelsausschnitt:
ca. $30^\circ \times 50^\circ$
Winkel-Auflösung: 0.17°
Fluktuation: ± 0.25 mK
(*Nature* 404, 956 (2000))



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

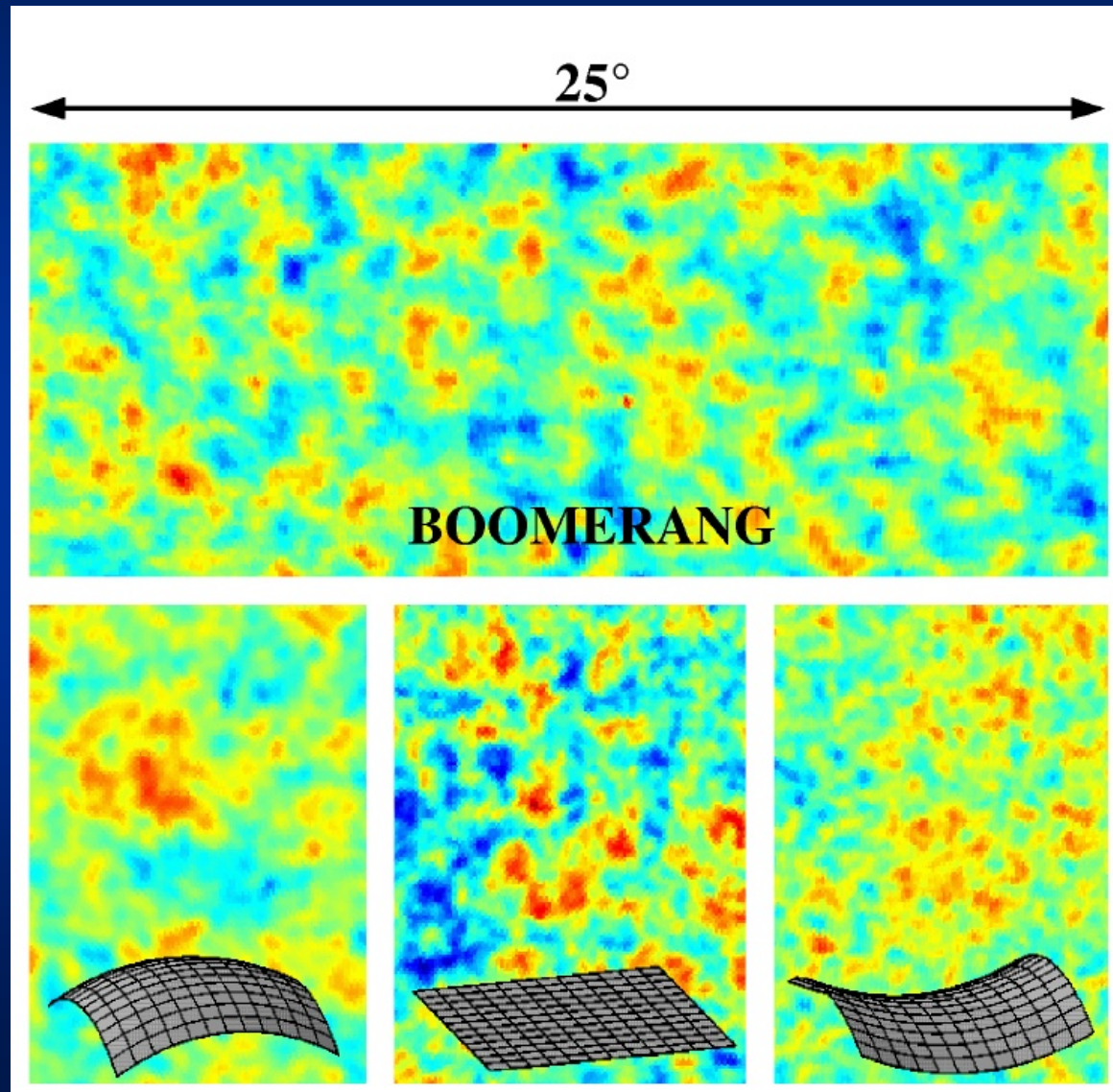
Ergebnisse des BOOMERANG-Ballon-Experiments



Power-Spektrum
(Nature 404, 956 (2000))

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des BOOMERANG-Ballon-Experiments

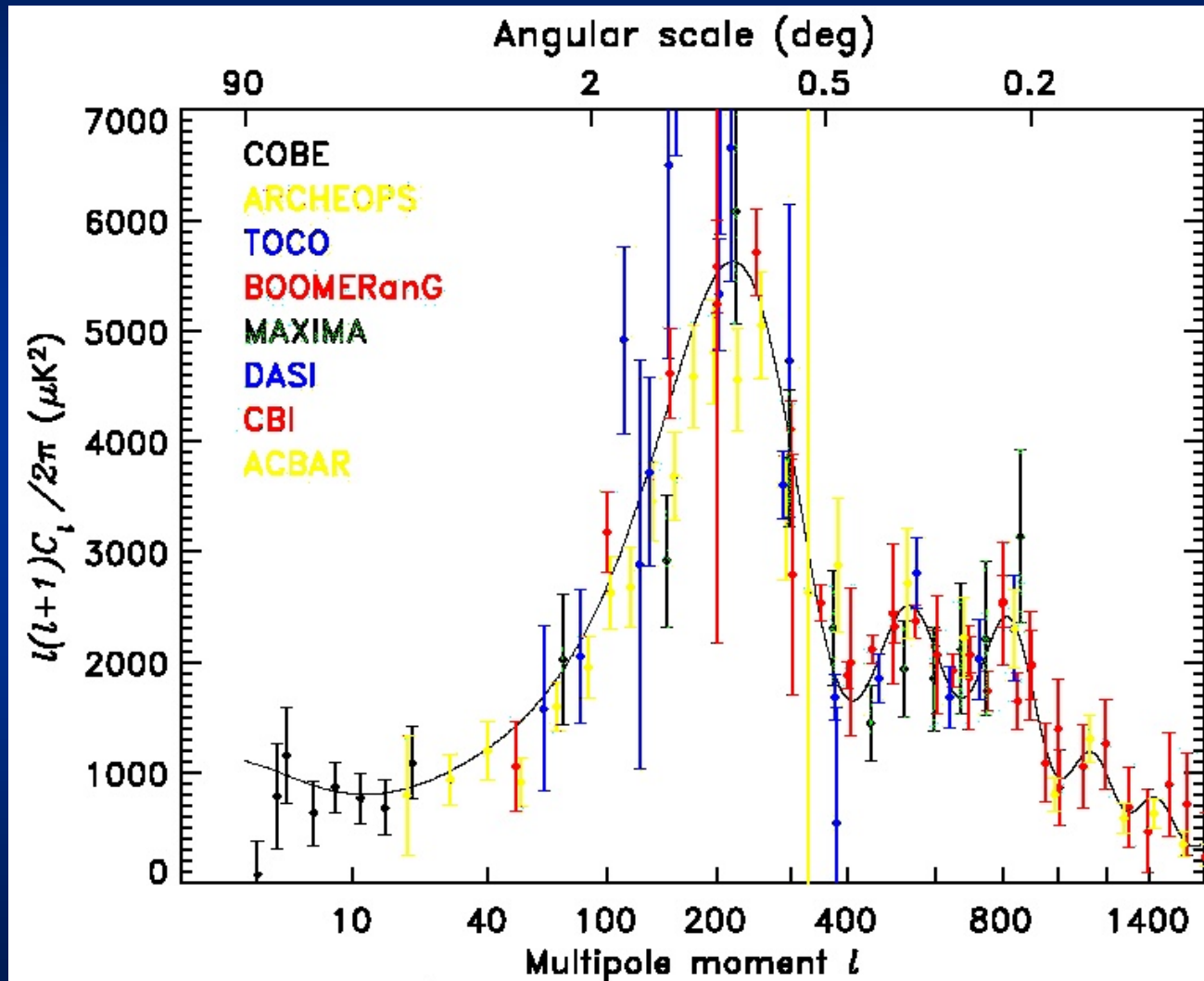


„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

Vergleich der Daten (oben)
mit Modellen der
Raumkrümmung
(*Nature* 404, 956 (2000))

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des BOOMERANG-Ballon-Experiments



Power-Spektren-Vergleich

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

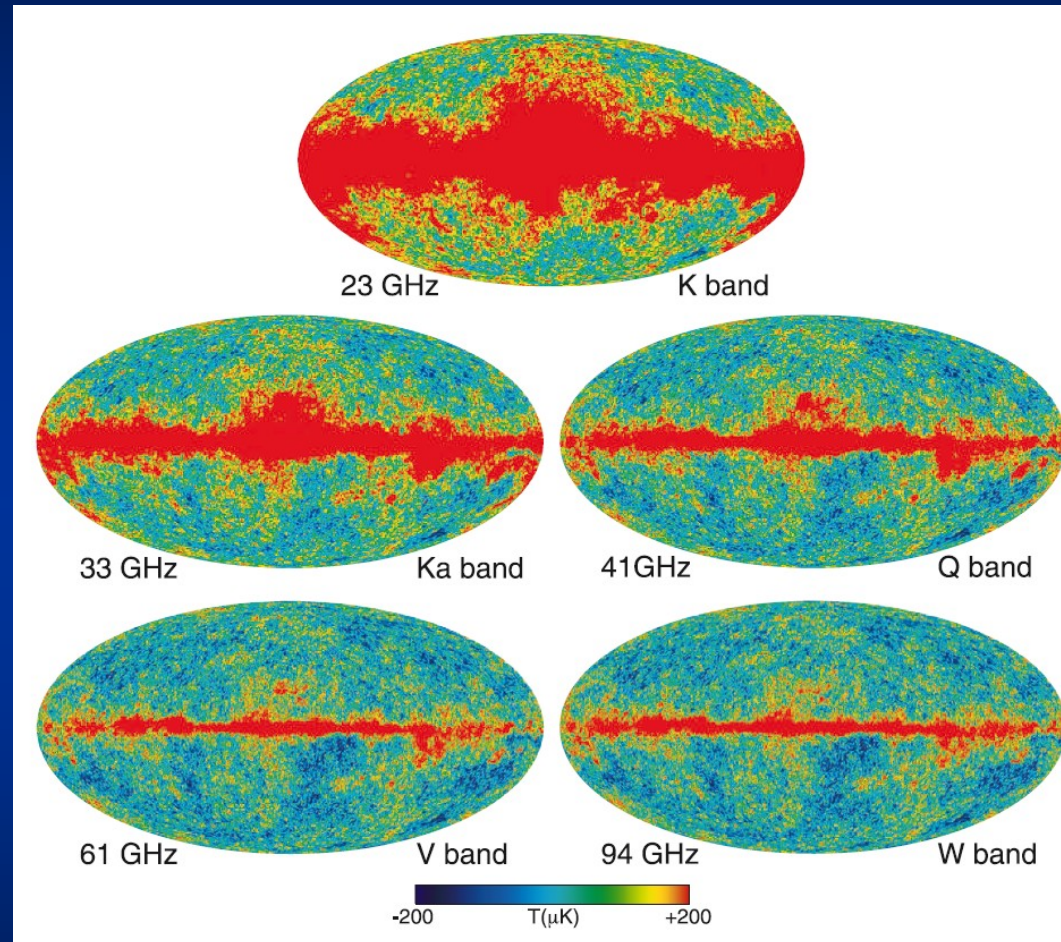
Ergebnisse des BOOMERANG-Ballon-Experiments

Power-Spektrum

Solch ein „Power-Spektrum“ zeigt auf der senkrechten Achse die Häufigkeit des Auftretens von Wellen bestimmter Wellenlängen in den Messdaten, dargestellt in Gestalt des „Multipol-Moments“, einer winkelbezogenen Größe, auf der waagerechten Achse. Bei bekannter Entfernung kann das in eine konkrete Wellenlänge umgerechnet werden.

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

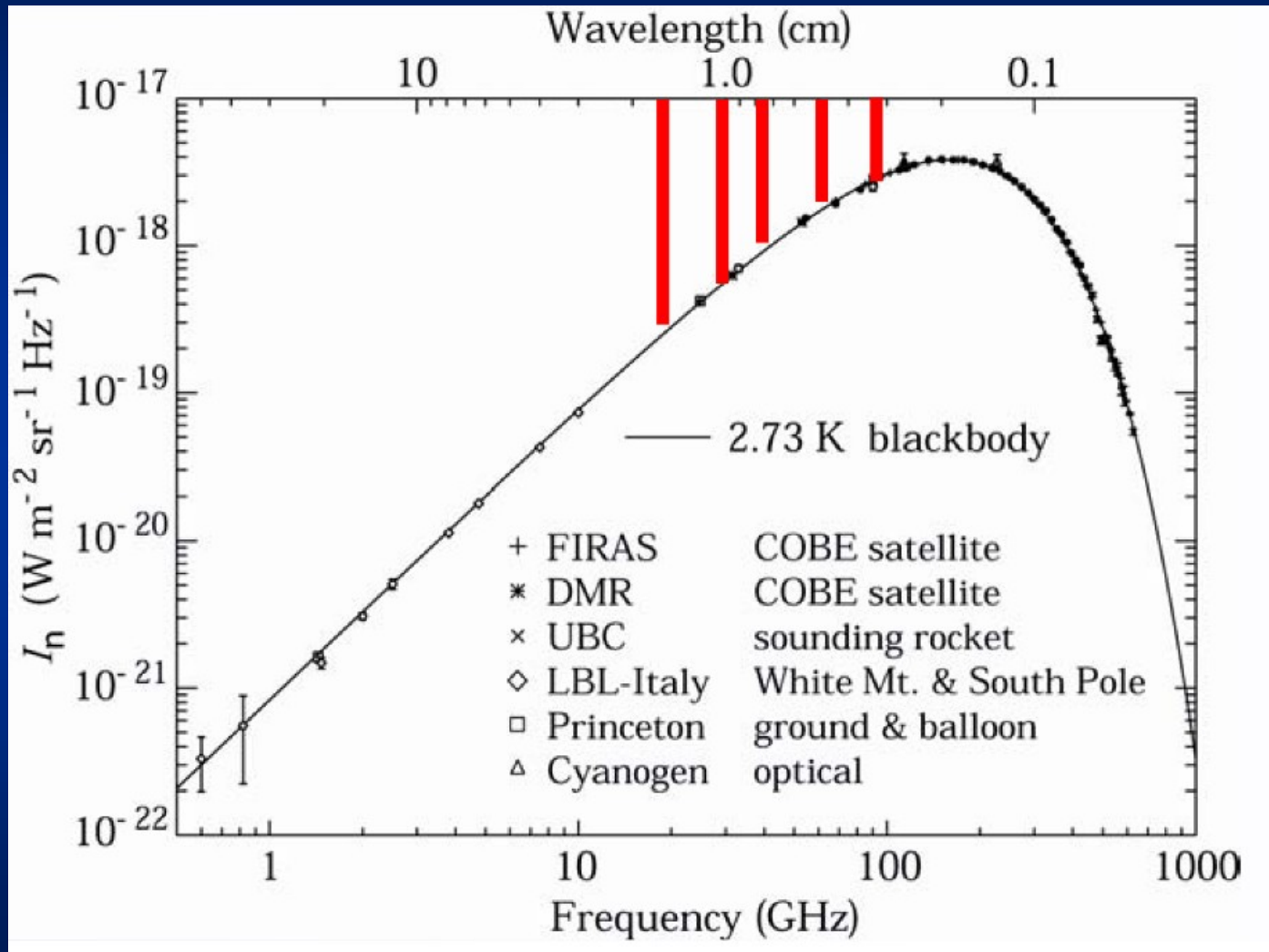
Ergebnisse des WMAP-Satelliten



WMAP = Wilkinson Microwave Anisotropy Probe:
am L2-Punkt - 45mal empfindlicher als COBE
Winkel-Auflösung: $0.2...0.8^\circ$ (<33-fache räumliche Auflösung)
(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

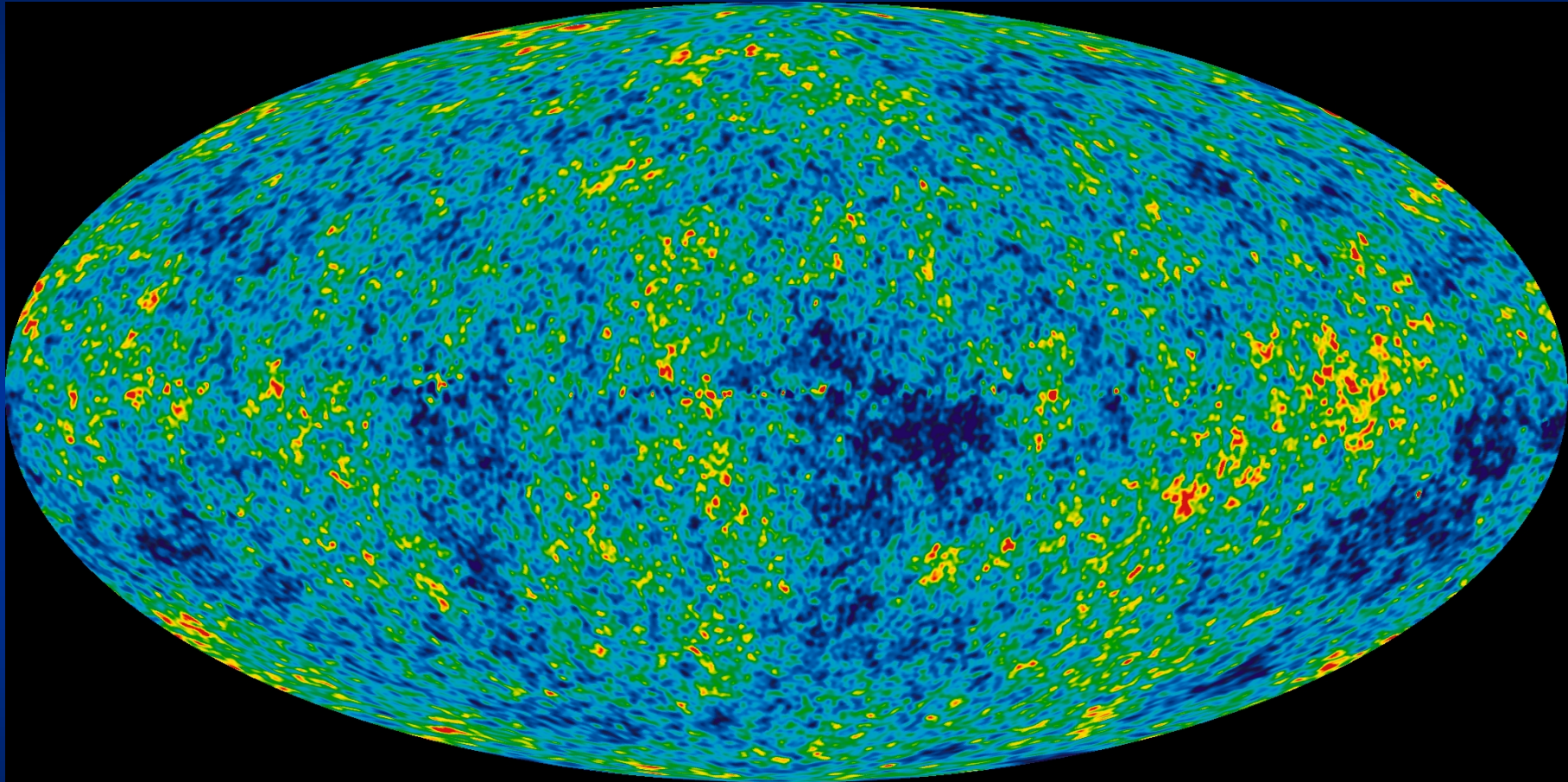
Ergebnisse des WMAP-Satelliten



WMAP-Frequenzbänder
(NASA)

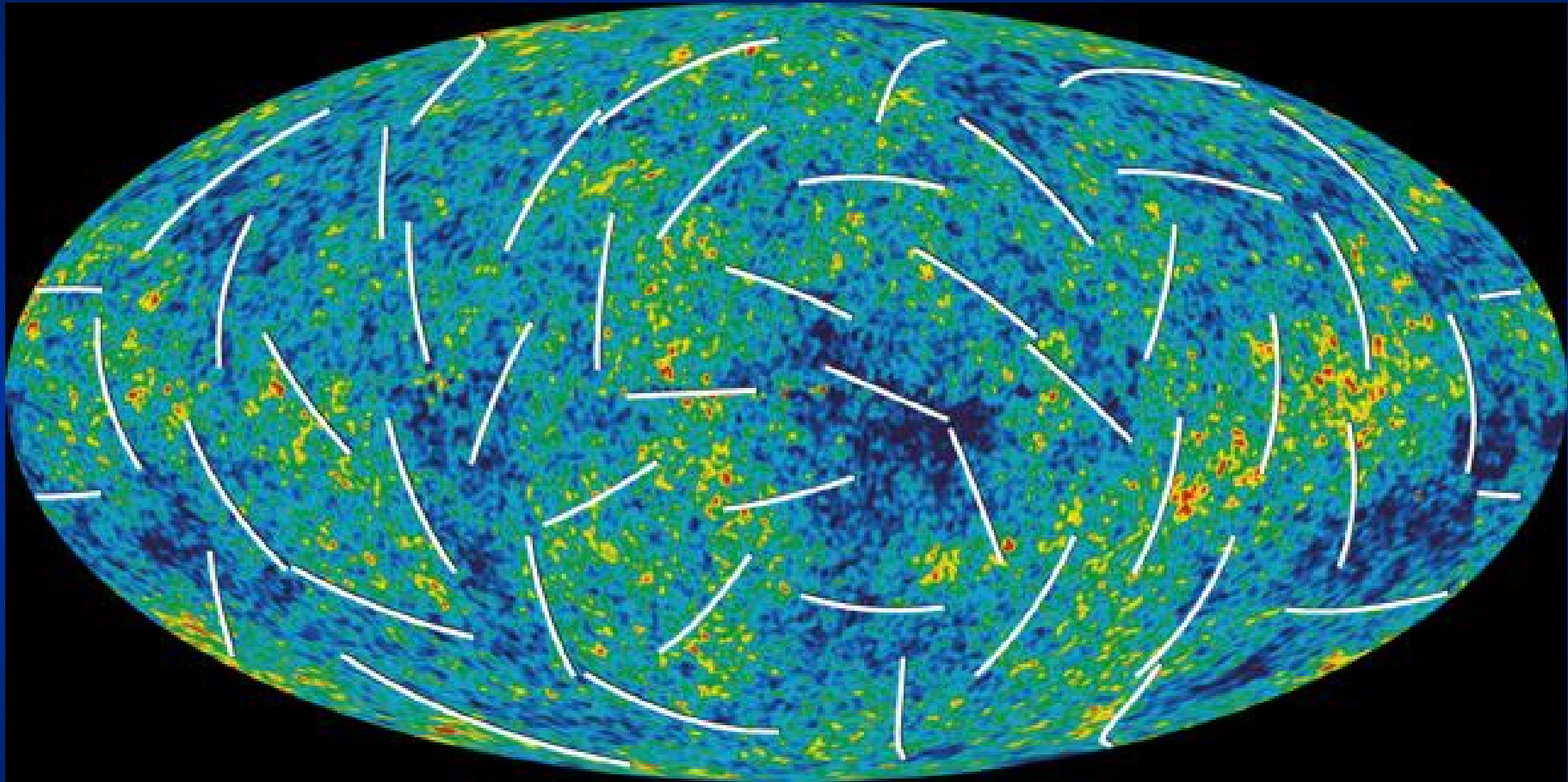
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des WMAP-Satelliten



CMBR-Temperatur: 2.725 ± 0.002 K
Fluktuationen: ± 0.2 mK
(NASA)

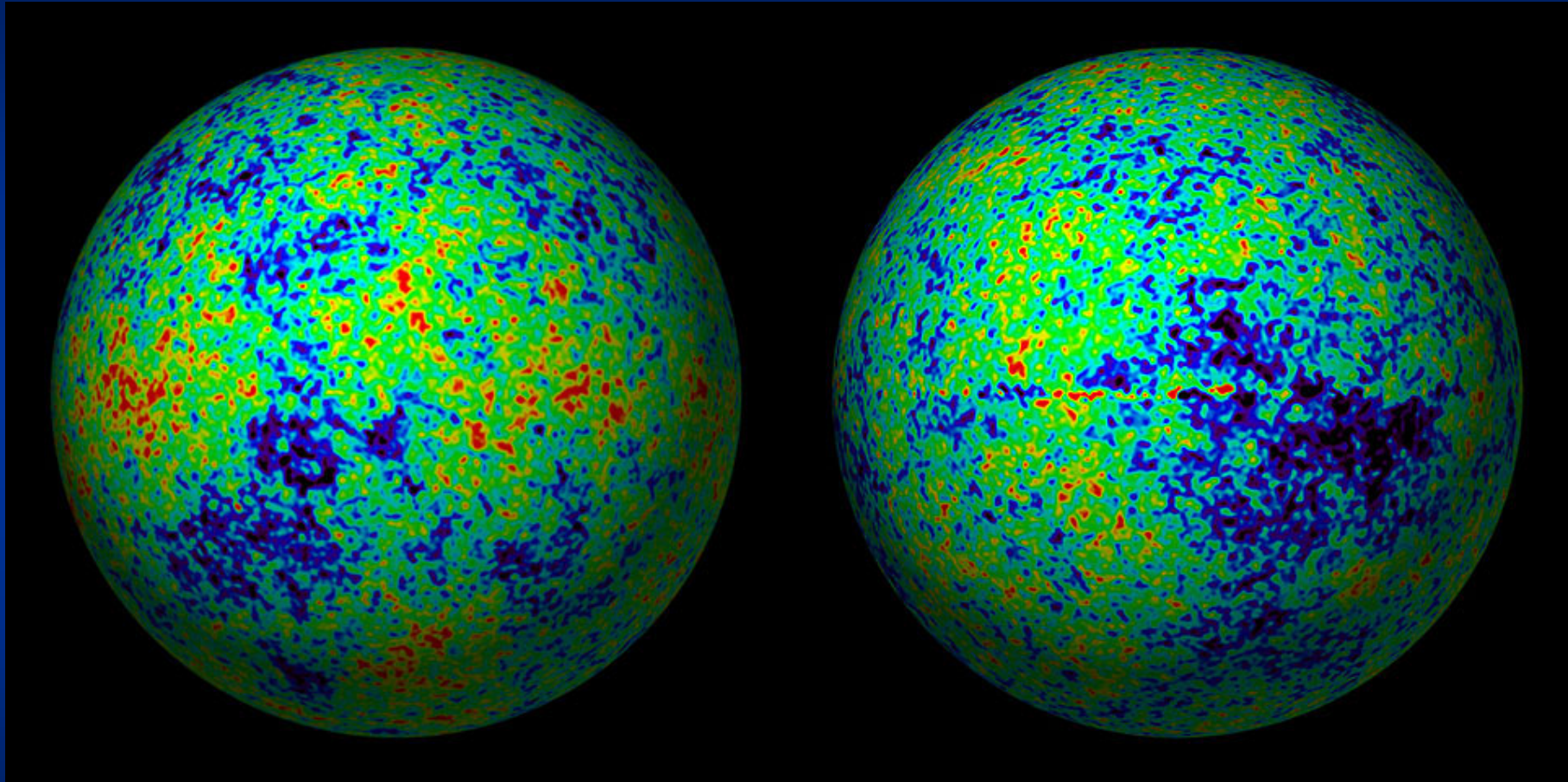
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung Ergebnisse des WMAP-Satelliten



Lineare Polarisation der CMBR durch Thompson-Streuung
(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

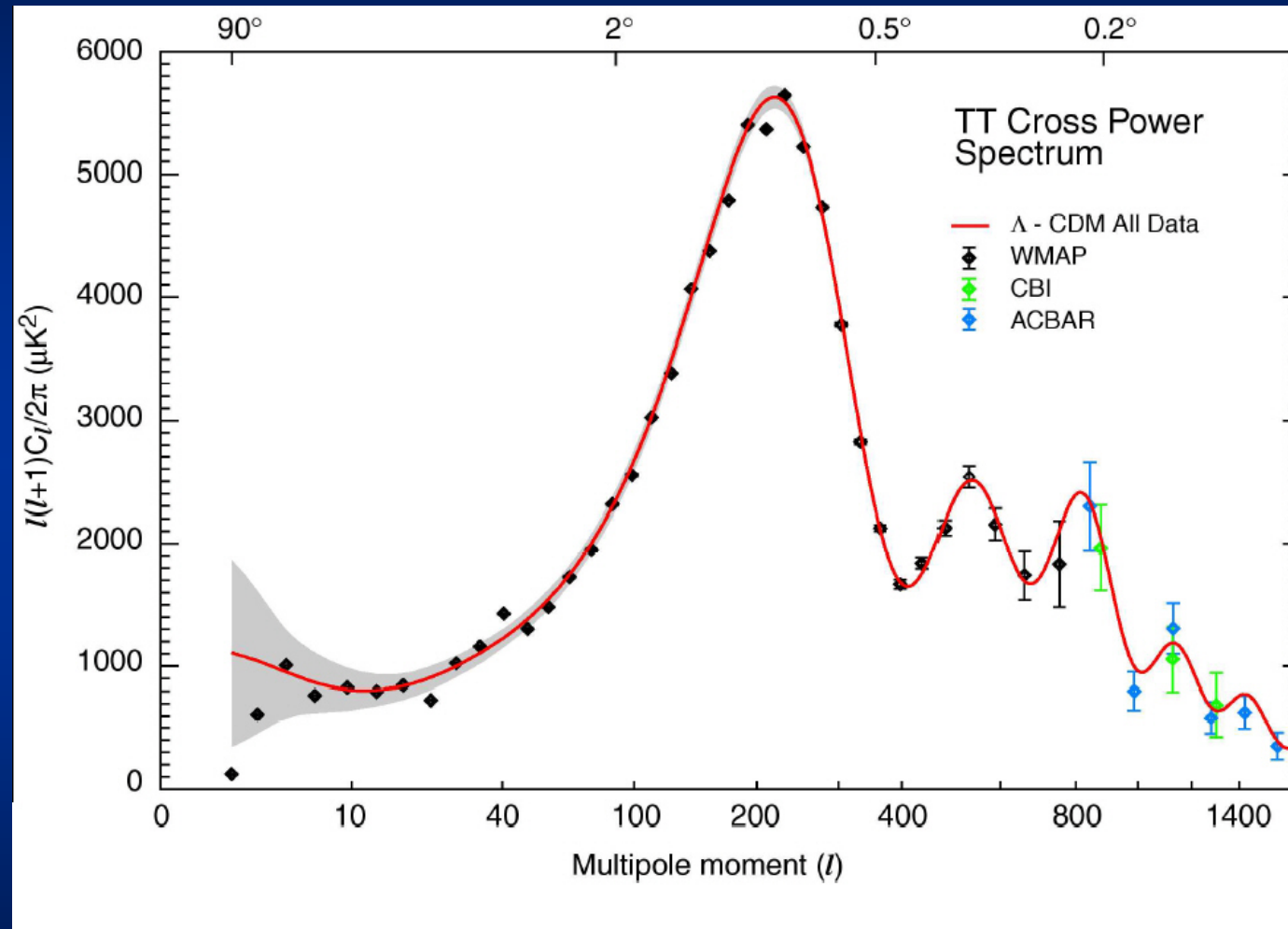
Ergebnisse des WMAP-Satelliten



Globus-Darstellung
(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnisse des WMAP-Satelliten

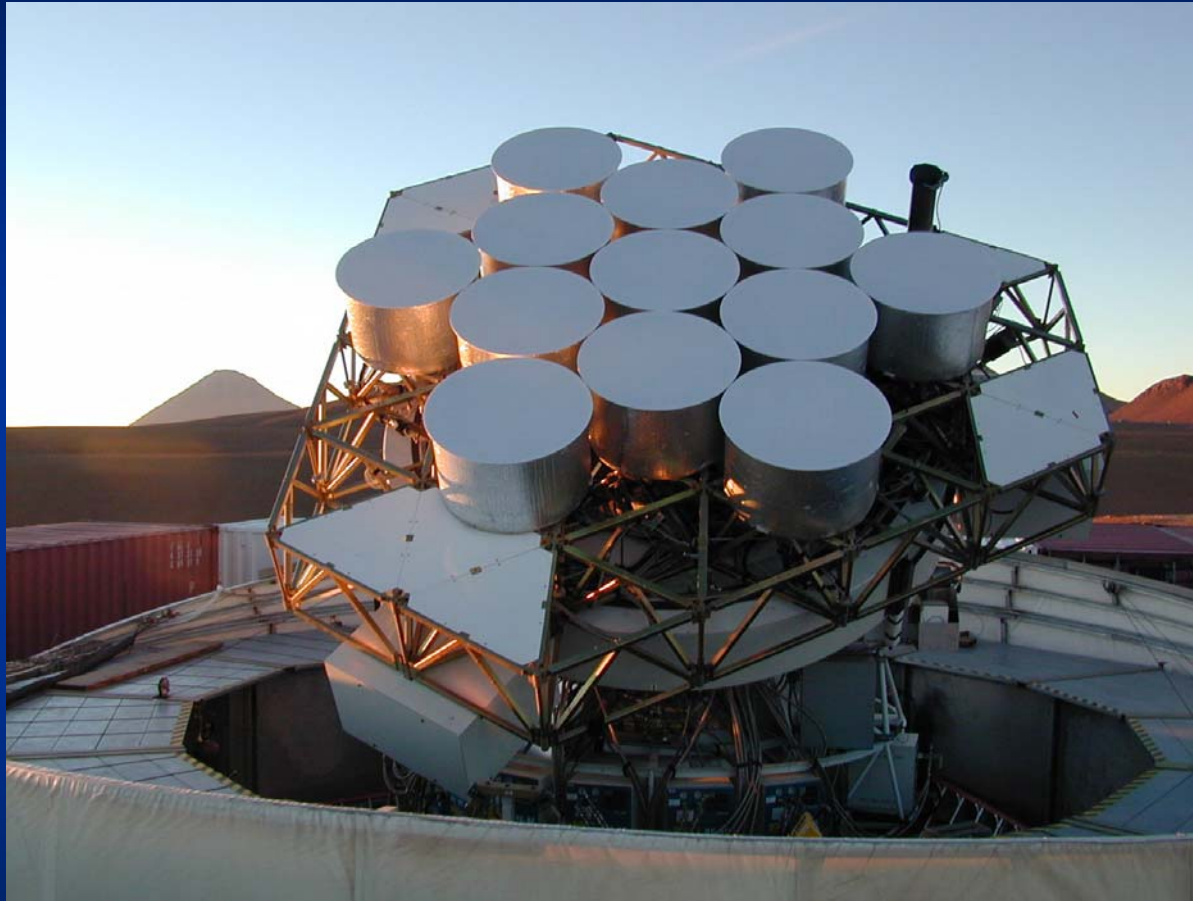


Power-Spektrum

Charakteristischer Winkel der Fluktuationen: $\theta_i = 180^\circ / l \Rightarrow$ knapp 1°

(NASA)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung Cosmic Background Imagers (CBI)



„Aktuelle Astronomie“-Kurs von Dr. Jürgen Wirth © 2014

**Dieses Interferometer steht auf 5'080 m Meereshöhe auf der
Llano de Chajnantor in den chilenischen Anden**
(CBI / Caltech / NSF)

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Ergebnis des Cosmic Background Imagers (CBI)

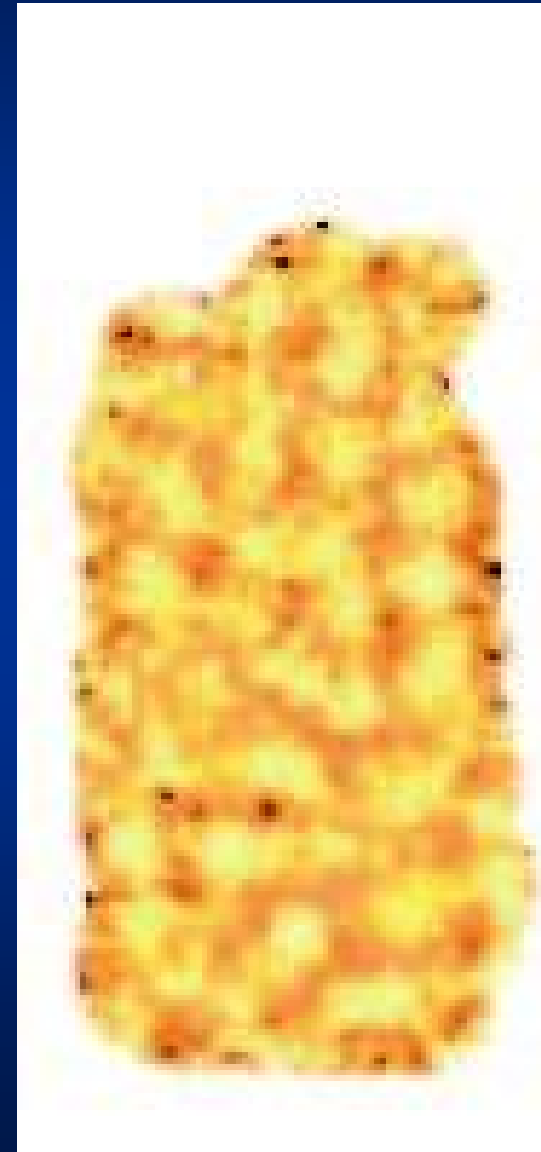
Fluktuationen der CMBR, die

- Verdichtungen von ca. $10'$ Größe zeigen (damals 40 kpc, heute auf 40 Mpc angewachsen) und
- Verdünnungen / Voids von ca. $20'$ Größe (damals 80 kpc, heute auf 80 Mpc angewachsen).

⇒ Keimzellen der heutigen „Blasenstruktur“!

(Winkelauflösung: $\approx 5'$)

(Readhead et al., *ApJ* 609, 498 (2004))



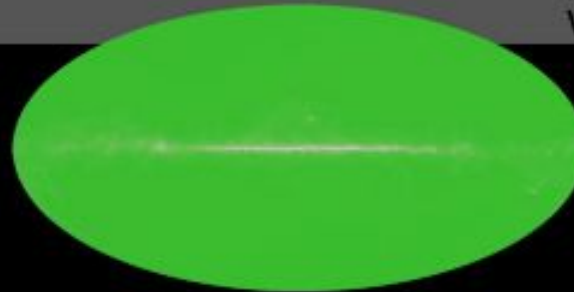
3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Beobachtungsergebnisse

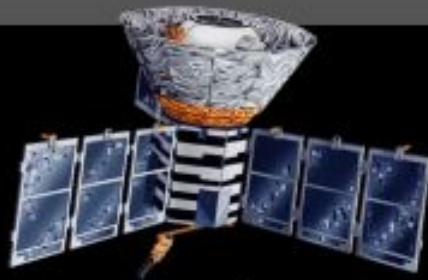
1965



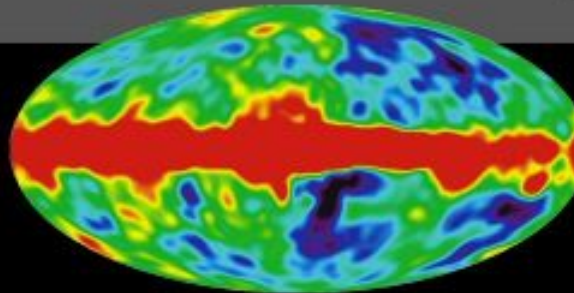
Penzias and
Wilson



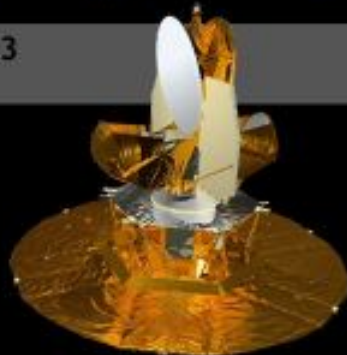
1992



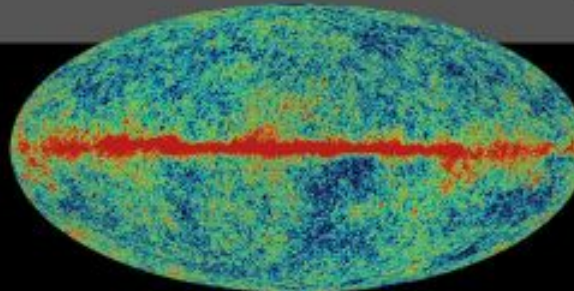
COBE



2003



WMAP



3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Beobachtungsergebnisse

- Asymmetrie durch Bewegung der Erde: ± 3.353 mK
- Strahlungsspektrum der CMBR ist das beste bekannte Schwarzkörper-/Planck-Spektrum mit $T = 2.725 \pm 0.002$ K
Maximum bei 1.063 μm Wellenlänge oder 160 GHz
($c = \lambda \cdot \nu$ ist hier wegen Integration des Spektrums nicht direkt anwendbar!)
- Fluktuationen im typischen Winkelbereich von knapp 1° mit einer Amplitude von ± 0.2 mK
- Heutige „Blasenstruktur“ und Voids in der CMBR erkennbar.
- Polarisation aufgrund von Thompson-Streuung

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Folgerungen

Zeitliche Veränderung der Mikrowellenhintergrundstrahlung

Weltalter τ a	Ereignis	Lichtlauf- zeit τ_0 a	Temperatur T_{CMBR} K	Rotver- schiebung z_{CMBR}	Spektrales Maximum $\lambda_{\text{max}} / \mu\text{m}$	Weltall Größe $R(t)/R_0$	Rotver- schiebung z_0
0	Urknall	13.77 Mrd.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
375'000	Rekom- bination	13.395 Mrd.	2'980	0	0.973	0.0009	1'092
700'000		13.394 Mrd.	1'000	2.98	2.9	0.0036	277
399 Mio.		13.371 Mrd.	100	29	29	0.027	36
1.91 Mrd.		11.86 Mrd.	10	299	290	0.274	2.65
11.57 Mrd.		2.2 Mrd.	5	599	580	0.549	0.82
13.77 Mrd.	Heute	0	2.725	1'092	1'063	1	0

z_0 : heutige Rotverschiebung des Ursprungsgebiets / $H_0 = 74.3 \text{ km /Mpc s}$

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung Folgerungen

- Es gab einen „heißen Urknall“ mit anschließender Expansion.
- Elementenentstehung / Nukleosynthese folgte dem Urknall.
- Gleichzeitige Freisetzung der Hintergrundstrahlung im gesamten Universum zum Zeitpunkt der Rekombination der Atomkerne mit den Elektronen (bei ca. 3'000 K) mit $T = 2.725 (1+z_{\text{CMBR}})$.
Maximum der Strahlung anfangs bei 973 nm (nahes IR)
- „Einfrieren“ der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Fluktuationen im Strahlungsfeld, großräumige Struktur damals bereits angelegt

3.9.1 Mikrowellenhintergrundstrahlung

Kosmologische Implikationen

- Entstehungszeitpunkt CMBR: $t_{\text{Rek}} = 374'935 \pm 1'731 \text{ a}$
- Rotverschiebung der CMBR: $z_{\text{CMBR}} = 1'091.6 \pm 0.47$
- Hubble-/Lemaître-Parameter: $H_0 = 69.32 \pm 0.8 \text{ km/Mpc s}$
(*Weicht von anders bestimmten Werten ab!*)
- Weltalter: $t_0 = 13.772 \pm 0.059 \text{ Mrd. a}$
- Horizont bei Rekombination: $2ct_{\text{Rek}} = 283.1 \pm 1.0 \text{ Mpc}$
- Dunkle Materie und „Dunkle Energie“ (Λ -Kraft) zwingend.
- Fluktuationen geben starken Hinweis auf inflationäre Phase.

Dimensionen des Weltalls

Nachbemerkung: Nobelpreise zum Thema

- 1921** **Albert Einstein**
(Physik / Gesetz des photoelektrischen Effekts)
- 1967** **Hans Bethe** (Physik / Energieumwandlung in Sternen)
- 1978** **Arno Penzias & Robert Woodrow Wilson**
(Physik / Entdeckung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung)
- 2006** **John Cromwell Mather & George Fitzgerald Smoot**
(Physik / Untersuchung der Mikrowellen-Hintergrundstrahlung)
- 2011** **Saul Perlmutter & Brian P. Schmidt & Adam Riess**
(Physik / Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums durch Beobachtungen weit entfernter Supernovae)