Experimentelle Bestimmung der Hubble-Konstante und das Alter des Universums

Joachim Mnich

Aachen

24. Mai 1995

Inhalt:

- Der Hubble-Parameter und die zeitliche Entwicklung des Universums
- Bestimmung der Hubble-Konstante
  - Messung von Radialgeschwindigkeiten
  - Messung astronomischer Entfernungen
- Neue Resultate zur Hubble-Konstante
- Das Alter des Universums
  - Die Expansionszeit
  - Das Alter von Galaxien
- Die kosmologische Konstante

Dynamische Entwicklung des Universums:

Homogenes und isotropes Universum,
(Kosmologisches Prinzip)

Gravitation ist einzige weitreichende Wechselwirkung

Friedmann-Gleichung:

$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi}{3}\,G\rho - k\,\frac{c^2}{R^2}$$

H	Hubble – Parameter
R	Größe des Universums
G	Gravitationskonstante
ρ	mittlere Massendichte
k	Krümmung des Raumes :

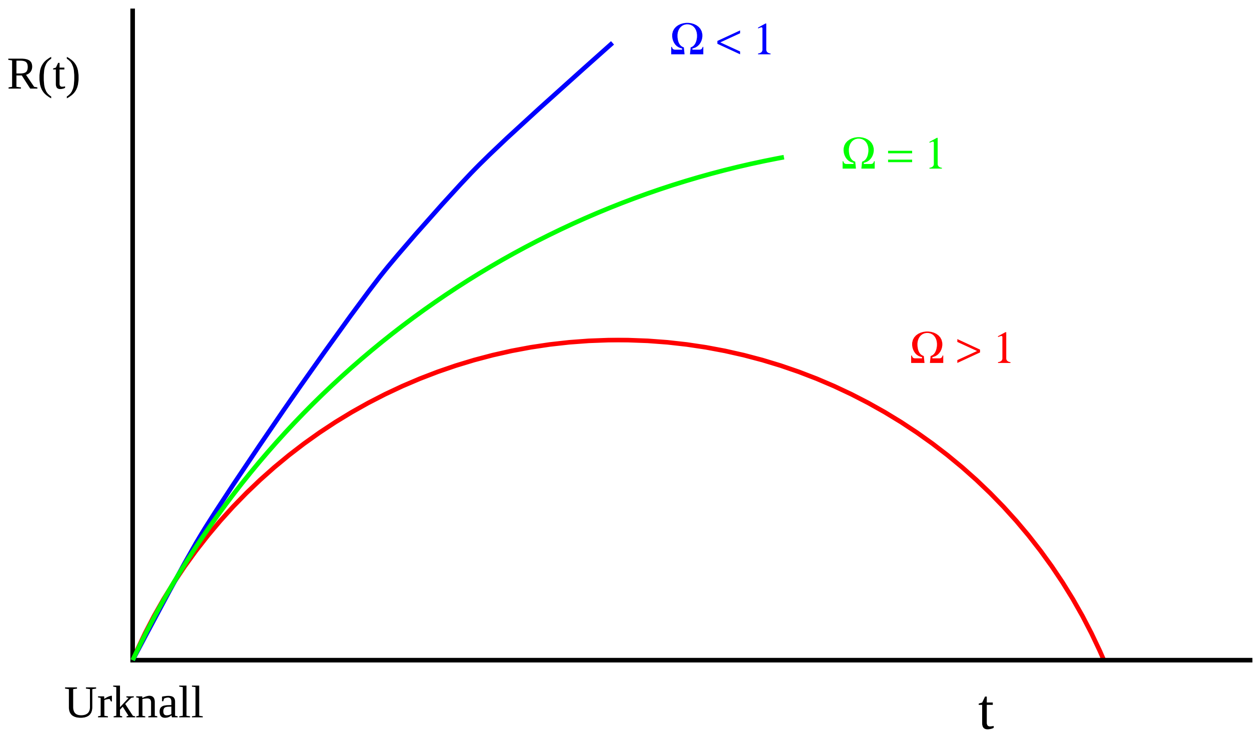
$$k = -1,\ 0,\ +1$$

Kritische Dichte ρ_c und Dichteparameter Ω:

$$\rho_c \equiv \frac{3\,H^2}{8\pi\,G} \qquad \Omega \equiv \frac{\rho}{\rho_c}$$

$$H^2\,(\Omega - 1) = k\frac{c^2}{R^2}$$

$\Omega < 1$	$\Rightarrow$	$k = -1$	**offenes Universum**
$= 1$	$\Rightarrow$	$k = 0$	**flaches Universum**
> 1	$\Rightarrow$	$k = +1$	**geschlossenes Universum**



Der heute beobachtbare Wert des Hubble-Parameters ist die Hubble-Konstante H_0:

$$H_0 \equiv \frac{\dot{R}_0}{R_0}$$

H_0 und Ω_0 sind fundamentale kosmologische Observable
bestimmen die Entwicklung des Weltalls

Heutiger Wert der kritischen Dichte

$$\approx 10\, m_{\rm p}/\mathrm{m}^3$$

Experimentelle Ergebnisse:

$0.1 < \Omega_0 < 2$
davon sichtbare Materie: $\Omega_0 \approx 0.01$

$40 < H_0 < 90$ km/s/Mpc
1 pc = 3.26 Ly (Lichtjahr)

Die Expansion des Universums:

Edwin Hubble (1929)

$$\frac{v}{D} = \text{const}$$

Interpretiert als uniforme Ausdehnung des Weltalls

Hubble-Konstante mißt das Alter des Universums:

$$H_0 = h \cdot 100 \text{ km/s/Mpc} \qquad 0.4 \leq \text{h} \leq 0.9$$

$$= h \frac{1}{10^{10} \text{ y}}$$

Alter eines sich ausdehnenden Universums:

$$\Omega_0 = 0 \rightarrow t = \frac{1}{H_0} \qquad (\text{Hubble} - \text{Zeit})$$

$$\Omega_0 = 1 \rightarrow t = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

Materie bremst die Ausdehnung des Universums

$\Longrightarrow$ Hubble-Zeit ist eine obere Schranke für das Alter des Universums:

$$t \leq \frac{1}{H_0} = \frac{1}{h} 10^{10} \text{ y}$$

NB: kosmologische Konstante $\Lambda = 0$

Experimentelle Bestimmung der Hubble-Konstante:

- Messung der Expansion, oder H_0, nur von einem Punkt aus möglich (Sonnensystem)
- Fluchtgeschwindigkeit v und Abstand D von weit entfernten Galaxien(haufen), d.h. Abstände, bei denen die Annahmen der Homogenität und Isotropie erfüllt sind

$$H_0 = \frac{v}{D}$$

Messung von Radialgeschwindigkeiten

Rotverschiebung z der Spektren von Galaxien
Dopplereffekt

$$z = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1$$
$$= \frac{v}{c} + \frac{1}{4}\left(\frac{v}{c}\right)^2 + \ldots$$

λ	emittierte Wellenlänge
λ'	beobachtete Wellenlänge

Experimentelle Genauigkeit: $\Delta v/v \approx 1\%$

Eigenbewegung der Galaxien(haufen) ist dem Hubble-Fluß überlagert, z.B.:

250 km/s Sonne um Zentrum der Milchstraße

270 km/s Andromeda-Nebel in Richtung Milchstraße

Messung von H_0 bei hohen Fluchtgeschwindigkeiten, d.h. großen Abständen

Messung kosmischer Entfernungen

Distanzen von Sternen, Galaxien und Galaxienhaufen
Verschiedene Verfahren für steigende Entfernungen, die gegeneinander kalibriert werden müssen

Kosmische Leiter

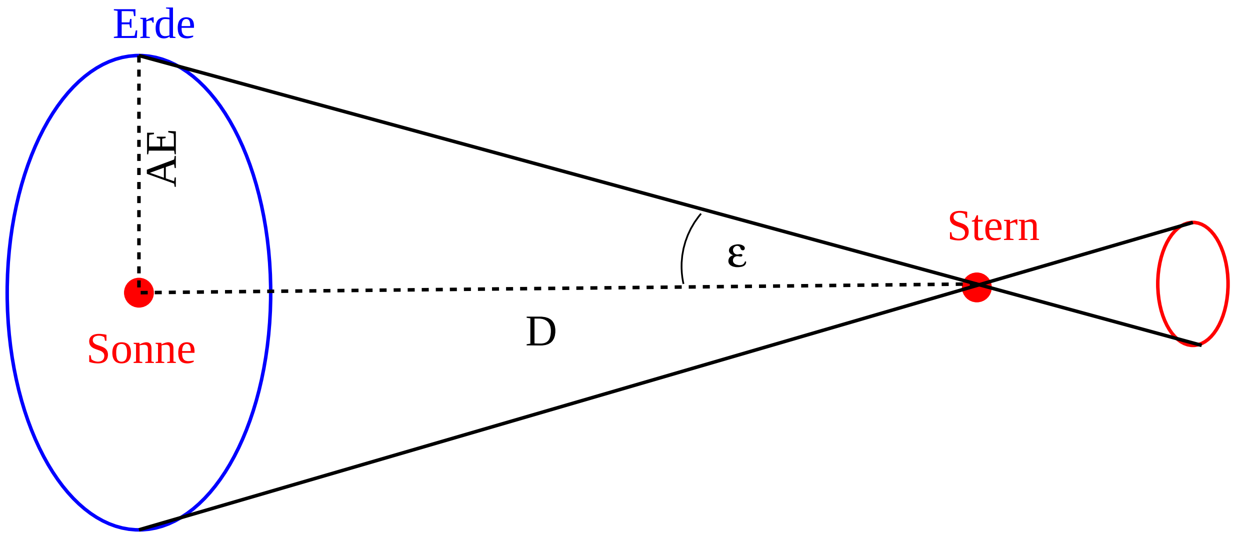
Standardkerzen:
Objekte bekannter absoluter Leuchtkraft L
Scheinbare Leuchtkraft l

$$L = 4\pi \, l \, D^2$$

$$\mu = m - M \; = \; 5 \log_{10} \left(\frac{D}{10 \text{ pc}} \right)$$

m	scheinbare Größenklasse
M	absolute Größenklasse

Trigonometrische Parallaxe



Abstand Erde-Sonne: $150 \cdot 10^6$ km (1 AE)

1 pc entspricht einer Parallaxe ε von 1 Bogensekunde:

$$1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AE}}{1''} = 3.1 \cdot 10^{13} \text{ km} = 3.26 \text{ Ly}$$

Nächster Stern α-Centauri:

$$\varepsilon = 0.754''$$
$$D = 4.3 \text{ Ly}$$

Parallaxen von ≈ 10 000 Sternen der näheren Umgebung bekannt
bis einige hundert pc Entfernung
(Mittelung über mehrere Jahre)

Durchmesser der Milchstraße ≈ 30 kpc

Veränderliche Sterne

Cepheiden:
Pulsierende Riesensterne mit

Leuchtkraft $L = 1\,000 - 100\,000\ L_\odot$
Masse $M = 6 - 20\ M_\odot$

$He^+ \rightleftharpoons He^{++}$ Oszillation in Sternatmosphäre
Schwankungen des Radius, der Oberflächentemperatur ($\Delta T = 1000$ K) und der absoluten Leuchtkraft

Perioden – Leuchtkraft Relation:

1908 entdeckt von H. Leavitt bei Cepheiden in der Großen Magellanschen Wolke (LMC)

1923 Hubble: Entdeckung von Cepheiden im Andromeda-Nebel (M31)
$\Longrightarrow$ außerhalb der Milchstraße

1929 Hubble-Gesetz

Problem der Cepheiden:

Keine absolute Kalibration,
es gibt keine nahen Cepheiden

RR-Lyrae Sterne:

- kurze Periode (< 1 Tag)
- $L \approx 100\ L_\odot$
- häufiger als Cepheiden
  z.B. in Pleiaden, Hyaden

$\Longrightarrow$ Vermessung der lokalen Gruppe bis 1 Mpc

Entfernung der Großen Magellanschen Wolke:

$$D_{\mathrm{LMC}} = 50 \pm 3 \text{ kpc}$$

4 unabhängige Methoden, u.a. SN 1987a

Sekundäre Entfernungsindikatoren

Empirisch gefundene Relationen
Kalibrierung mittels Cepheiden in nahen Galaxien

- **Tully–Fisher (TF)**
  Schnell rotierende Spiralgalaxien sind massiver und deshalb leuchtstärker
  (Faber–Jackson für elliptische Galaxien)
- **Fluktuationen der Oberflächenhelligkeit von Galaxien (SBF)**
  Entferntere Galaxien haben mehr Sterne pro Raumwinkeleinheit, d.h. kleinere Pixel-Pixel Fluktuationen in CCD Kamera
- **Luminositätsfunktion planetarischer Nebel (PNLF)**
  Abgestoßene Hüllen ausgebrannter Sterne
  Scharfe obere Grenze der absoluten Leuchtkraft (UV)

20 – 30% Übereinstimmung der verschiedenen Methoden

Anwendbar bis 30 – 100 Mpc
(Virgo und Coma Galaxienhaufen)

Supernovae

- **Hauptreihensterne (Sonne)**

$$4\,{}^1\mathrm{H} \;\longrightarrow\; {}^4\mathrm{He} + 2\,\nu_e + 27\ \mathrm{MeV}$$

Gravitationsdruck kompensiert durch thermischen Druck

$$T_\odot = 15 \cdot 10^6\ \mathrm{K}$$
$$R_\odot = 7 \cdot 10^5\ \mathrm{km}$$

- **Ausgebrannte Sterne (Weiße Zwerge)**

Bestehen aus Kohlenstoff, Sauerstoff

Stabilisiert durch Fermienergie der Elektronen

$$R \approx 10^4\ \mathrm{km} \qquad (\approx R_{\mathrm{Erde}})$$

Bis zur Chandrasekhar-Grenze:

$$M \;\leq\; M_C = \left(\frac{\hbar\, c}{G\, m_p^2}\right)^{3/2} m_p$$
$$\lesssim\; 1.4\, M_\odot$$

$\underline{M > M_\text{C}}$:

Fermidruck der Elektronen reicht nicht aus
Stern kollabiert zu einem Neutronenstern

Abstoßen der äußeren Hülle

Inverser β-Zerfall:

$$\mathrm{e}^- + \mathrm{p} \longrightarrow \mathrm{n} + \nu_\mathrm{e}$$

$$R \approx 10\ \mathrm{km}$$

2 Arten von Supernovae:

I Weißer Zwerg erreicht M_C, z.B. durch Massentransfer von Begleitstern
Supernova bei $M = M_\text{C}$

II Kollaps eines Sterns mit $M > M_\text{C}$

Supernova Ia

Kernfusion bis Fe ($\approx$ 1 s)
Luminosität durch Zerfall

$$^{56}_{28}\mathrm{Ni} \xrightarrow{6.1\mathrm{d}} {}^{56}_{27}\mathrm{Co} \xrightarrow{77.7\mathrm{d}} {}^{56}_{26}\mathrm{Fe}$$

Streuung der maximalen Luminosität $< 40\%$
Prinzipiell sichtbar $z = 0.5$, d.h. 1 000 Mpc

$\approx$ 30 beobachtete SN Ia
davon kleinste Distanz ($\approx$ 5 Mpc) zu der SN1937c in Galaxie IC4182

Kalibration der absoluten Luminosität:

- **Modellrechnung der Produktion und des Ausstoßes von $^{56}_{28}\mathrm{Ni}$**
- **Abstand zur Galaxie IC4182 mittels Cepheiden**

1994: Hubble Space Telescope

Ziel ist (u.a.) Messung von H_0 mit 10% Genauigkeit

Suche nach Cepheiden in Galaxien des Virgo Haufens

Frühjahr 1994:
20 Cepheiden in M100 gefunden

$$\Longrightarrow D_{\mathrm{M100}} = 17.1 \pm 1.8 \ \mathrm{Mpc}$$

1995/96 Fortsetzung der Suche nach Cepheiden in anderen Galaxien des Virgo Haufens

$$D_{\mathrm{M100}} = 17.1 \pm 1.8 \text{ Mpc}$$

Fehler bestimmt durch

LMC Abstand	± 0.8 Mpc
Lichtabsorption	± 1.4 Mpc

Hubble-Konstante:

Tiefe des Virgo Haufens	± 3 Mpc
Fluchtgeschwindigkeit	$1\,404 \pm 80$ km/s
	$(1\,200 - 1\,600$ km/s$)$

$$H_0 = 80 \pm 17 \text{ km/s/Mpc} \qquad \text{(Virgo)}$$

Coma Haufen

Fluchtgeschwindigkeit	$7\,200 \pm 100$ km/s
$D_{\mathrm{Coma}}/D_{\mathrm{Virgo}}$	5.5 ± 0.3

$$H_0 = 77 \pm 16 \text{ km/s/Mpc} \qquad \text{(Coma)}$$

Ist der Streit um die Hubble-Konstante entschieden?

Entdeckung von Cepheiden in IC4182 (SN1937c)

$$D_{\mathrm{IC4182}} = 4.9 \pm 0.2 \ \mathrm{Mpc}$$

Absolute Kalibration der SN Ia Luminosität
Übereinstimmung mit SN Ia Modellen

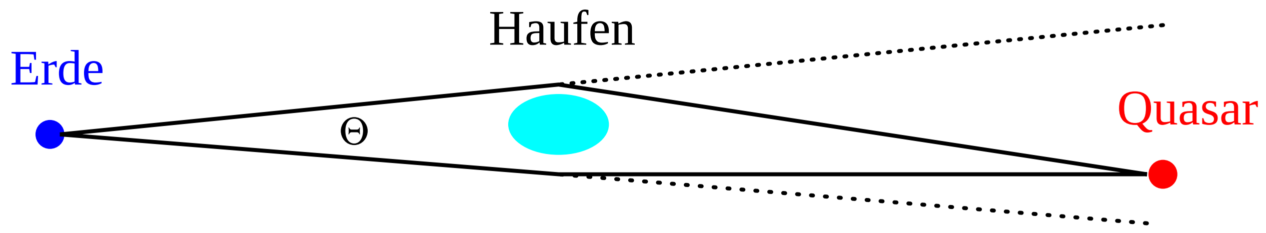
$$\Longrightarrow H_0 = 45 \pm 9 \ \mathrm{km/s/Mpc} \qquad \mathrm{(SN\ Ia)}$$

- **Ist M100 näher als das Zentrum des Virgo Haufens?**
- **War SN1937c heller als eine typische SN Ia?**

Globale Bestimmung von H_0

Unabhängig von Abstandsmessung

- **Gravitationslinsen**



Laufzeitdifferenz der beiden Bilder

$$\Delta t \approx \theta^2 / H_0$$

- **Abschwächung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Sunyaev-Zel'dovich Effekt)**

Compton-Streuung der Hintergrundstrahlung an Gas in Galaxienhaufen
$\Longrightarrow$ **absolute Größe des Haufens**

Beide Methoden stark modellabhängig
Verträglich mit $H_0 = v/D$ Messungen

Überprüfung des Hubble-Gesetz für sehr große Distanzen

Proportionalität von Fluchtgeschwindigkeit und Abstand

Entfernungsindikator:
Hellste Galaxie in einem Haufen

$$\Delta H_0 / H_0 < 10\%$$

Das Alter des Universums

Zeit seit dem Urknall:

$$t \leq \frac{1}{H_0} = \frac{1}{h} \cdot 10^{10}\ \mathrm{y}$$

$$\leq 20 \cdot 10^9\ \mathrm{y} \qquad (\mathrm{h} = 0.5)$$
$$\leq 13 \cdot 10^9\ \mathrm{y} \qquad (\mathrm{h} = 0.8)$$

Kosmologisches Standardmodell $\Omega_0 = 1$
(Einstein-de Sitter)

$$t = \frac{2}{3}\frac{1}{H_0}$$

$$= 13 \cdot 10^9\ \mathrm{y} \qquad (\mathrm{h} = 0.5)$$
$$= 9 \cdot 10^9\ \mathrm{y} \qquad (\mathrm{h} = 0.8)$$

Jedes Objekt im Universum muß jünger sein als das Universum selbst!

Altersbestimmung aus radioaktiven Zerfall

Sehr langlebige Nuklide, z.B.

$$^{238}\mathrm{U} \longrightarrow {}^{206}\mathrm{Pb} \qquad \tau_{1/2} = \ln 2/\lambda_{238} = 4.5 \cdot 10^9 \text{ y}$$

Aus dem Zerfallsgesetz:

$$[^{206}\mathrm{Pb}] = [^{238}\mathrm{U}]\ (e^{t\lambda_{238}} - 1) + [^{206}\mathrm{Pb}]_{t=0}$$

Gestein von Erde, Mond, Meteoriten
Alter des Sonnensystems

$$4.57 \pm 0.07 \cdot 10^9 \text{ y}$$

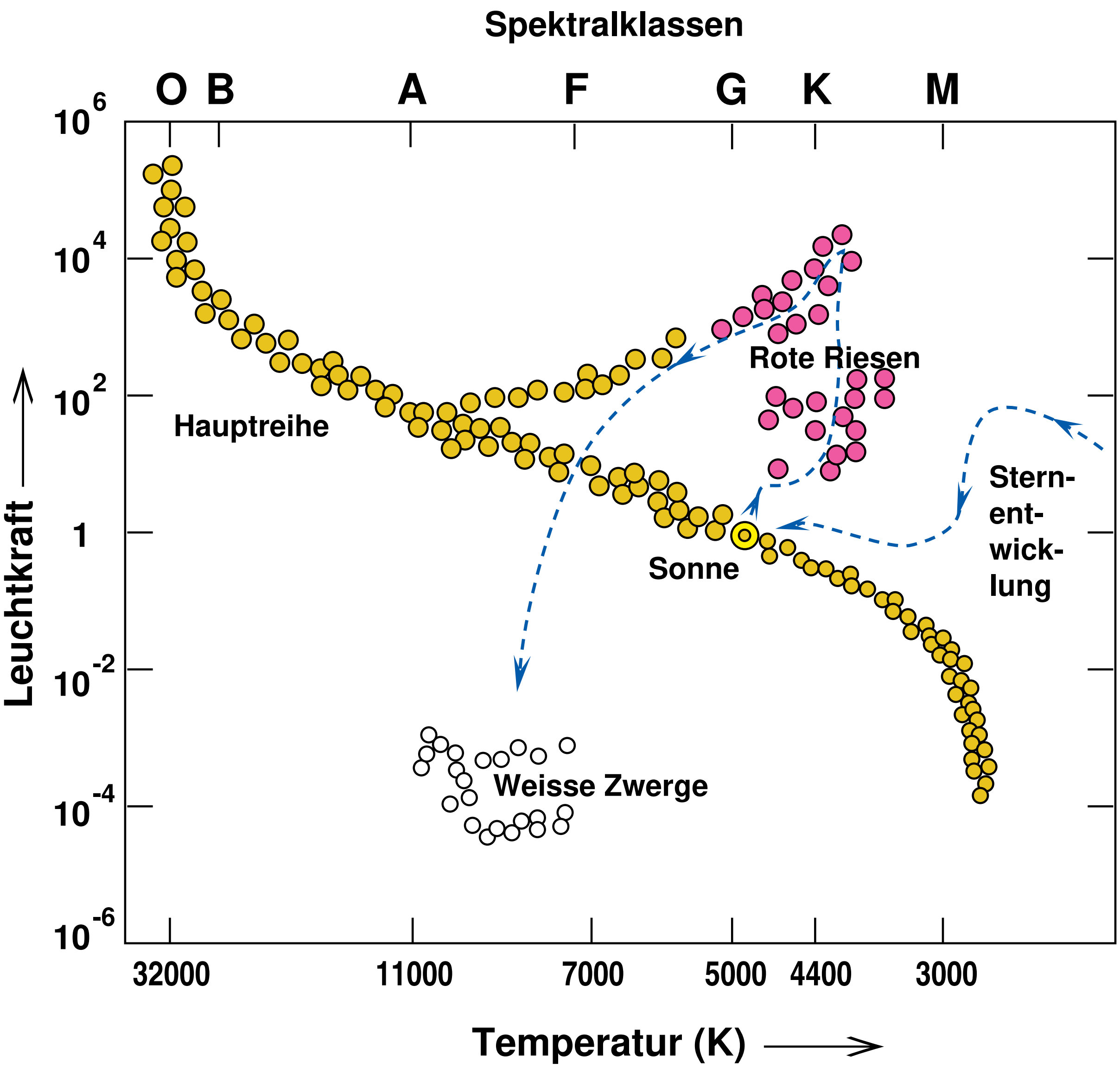
Milchstraße:

Langlebige Nuklidpaare, z.B. $^{238}\mathrm{U}, {}^{235}\mathrm{U}$
Modell für Anfangsverhältnis
$[^{238}\mathrm{U}]/[^{235}\mathrm{U}]_{(t=0)}$

$$10 - 20 \cdot 10^9 \text{ y}$$

Alter von Kugelsternhaufen

Hertzsprung-Russel-Diagramm:



$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^4 \qquad (M > M_\odot)$$

y95366Mnich

Stern verläßt Hauptreihe wenn 12% des H-Vorrates verbraucht sind

$$\Longrightarrow t = 11 \cdot 10^9 \text{ y} \frac{\mathrm{M}}{\mathrm{M}_\odot} \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{L}_\odot} \quad \propto \mathrm{M}^{-3}$$

Sterne eines Kugelsternhaufens enstehen gleichzeitig

Abknickpunkt im HR-Diagramm bestimmt Alter des Haufens

Unsicherheiten:

- **Zeit für Sternbildung**
- **modellabhängig, z.B. ursprünglicher He-Gehalt**

$$t = 13 - 15 \cdot 10^9 \text{ y}$$

$$(t > 10 \cdot 10^9 \text{ y})$$

Die kosmologische Konstante

Alter der Milchstraße steht offenbar im Widerspruch zu hohem H_0 und $\Omega_0 = 1$

Änderung des kosmologischen Modells
Kosmologische Konstante Λ:

$$H^2(t) \equiv \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} G\rho - k\,\frac{c^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3}\,c^2$$

Einstein: statisches Universum

Zusammenfassung und Ausblick

- Neue Instrumente und Methoden zur außergalaktischen Entfernungsmessung
(Hubble Space Telescope)

- Widersprüchliche Ergebnisse für die Hubble-Konstante

$$H_0 \approx 50 \text{ km/s/Mpc}$$
$$H_0 \approx 80 \text{ km/s/Mpc}$$

- Klärung des Widerspruchs und Messung der Hubble-Konstante

$$\Delta H_0 / H_0 \approx 10\%$$

in den nächsten Jahren zu erwarten

- Für $H_0 = 80$ km/s/Mpc und $\Omega_0 = 1$
Expansionszeit im Widerspruch zum Alter der Milchstraße
Kosmologische Konstante Λ?