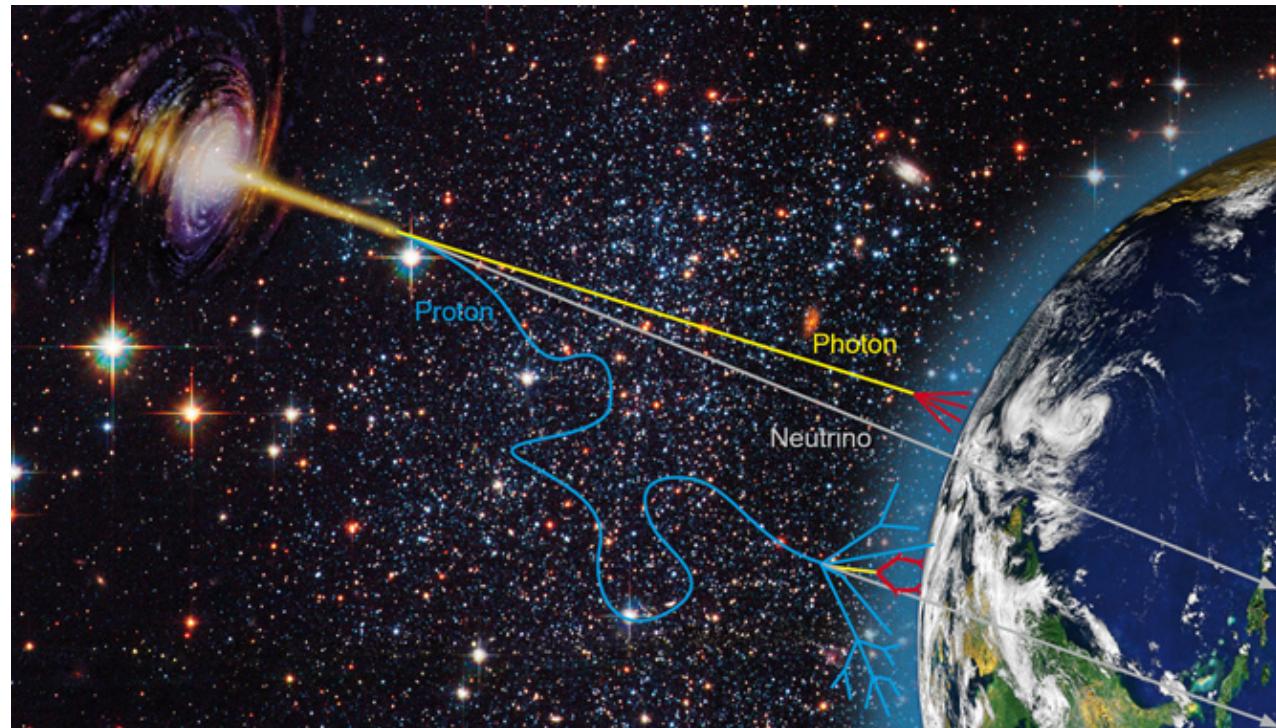
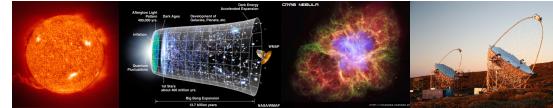


# Einführung in die Astroteilchenphysik





# Astroteilchenphysik

## Übersicht der Vorlesung

### Grundlagen der Astronomie:

Historie, Sternentwicklung, Abstandsbestimmungen, ...

### Grundlagen der Kosmologie

Kosmische Expansion, Modelle des Universums, das frühe Universum, der Mikrowellenhintergrund, Bestimmung der Modellparameter, ...

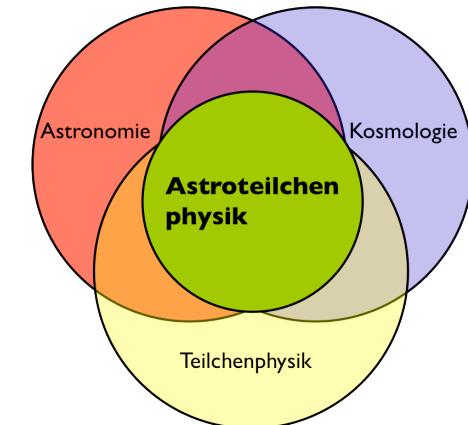
**Astroteilchenphysik:** Die Botenteilchen, kosmische Magnetfelder, Beschleunigungs- und Strahlungsmechanismen

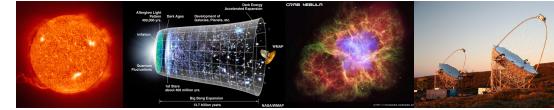
### Quellen in der Astroteilchenphysik

### Exotika: Dunkle Materie u. Co.

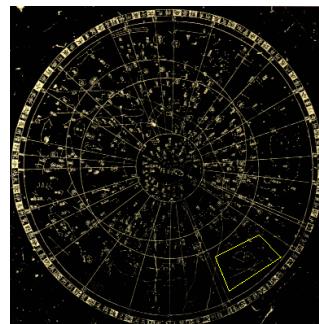
### Nachweismethoden und Experimente

### Aktuelle Forschung

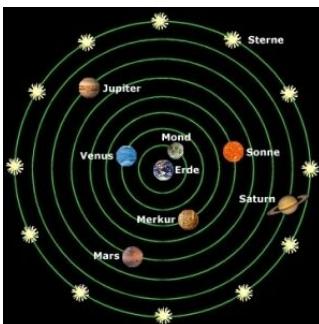




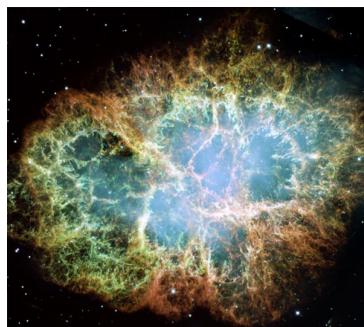
# Entwicklung der Astronomie



[2.1]



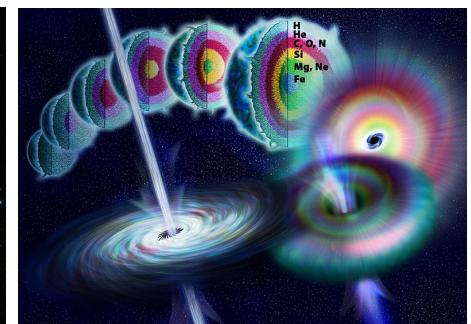
[2.2]



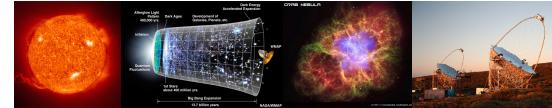
[2.3]



[2.4]



[2.5]



# Erde und Sonne

etwa 3000 v. Chr

Markierung von  
Winter- und Sommer-  
sonnenwende

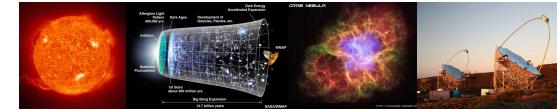


[3.1]

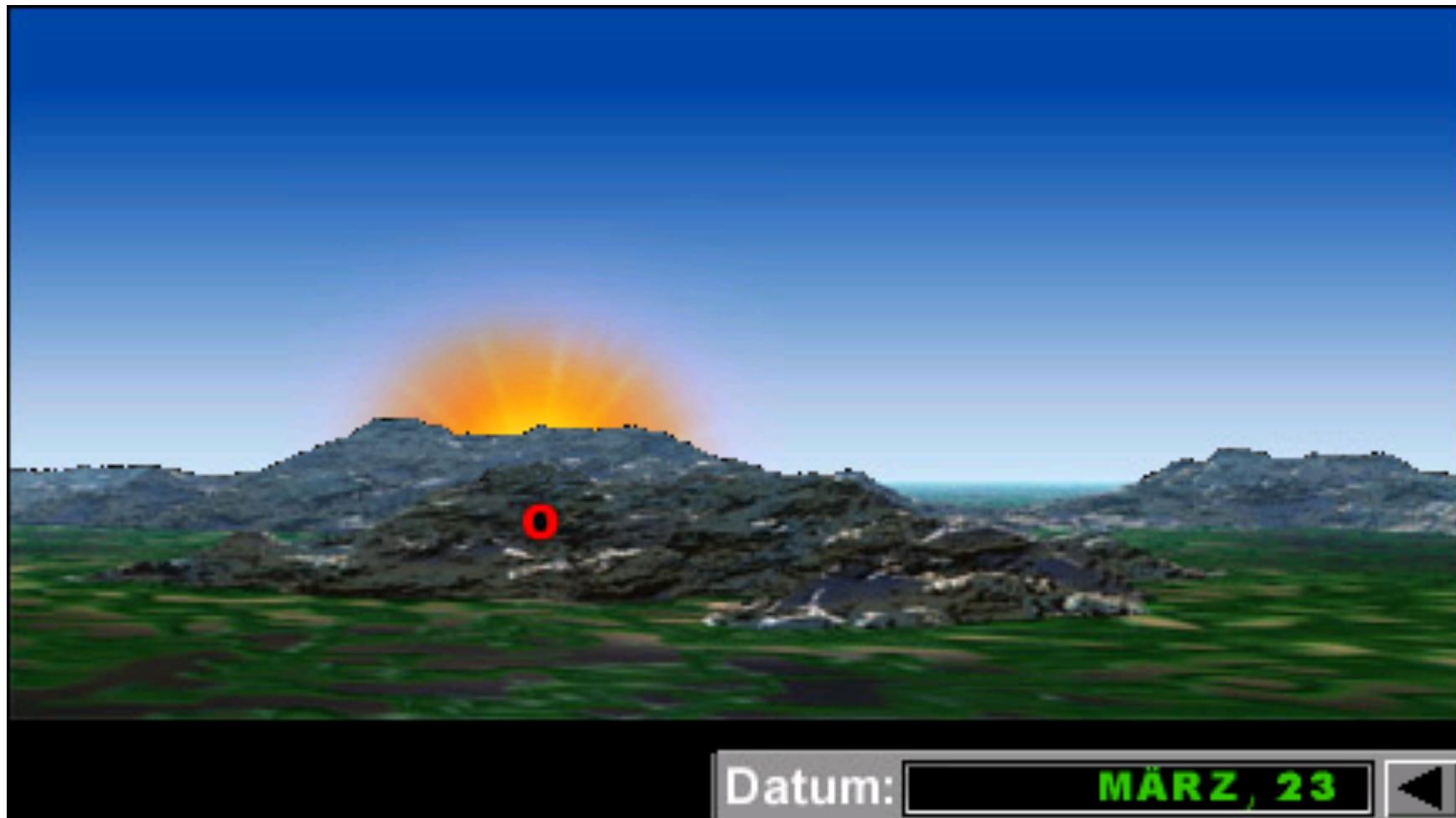
Abb. aus  
„Redshift  
Sternenkunde“



[3.2]

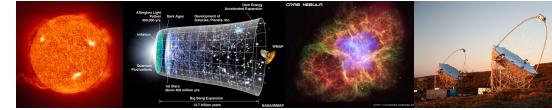


# Sonnenaufgang



Nord<-Ost->Süd

[4.1]

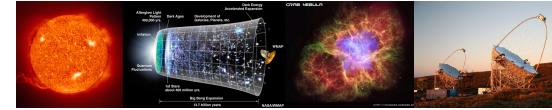


# Sonnenaufgang



Nord<-Ost->Süd

[4.1]

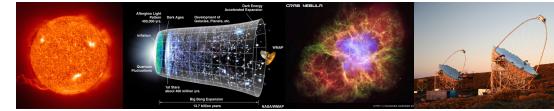


# Sonnenaufgang



Nord<-Ost->Süd

[4.1]

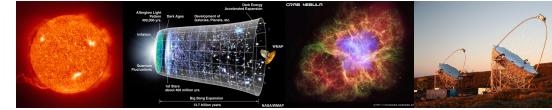


# Sonnenaufgang

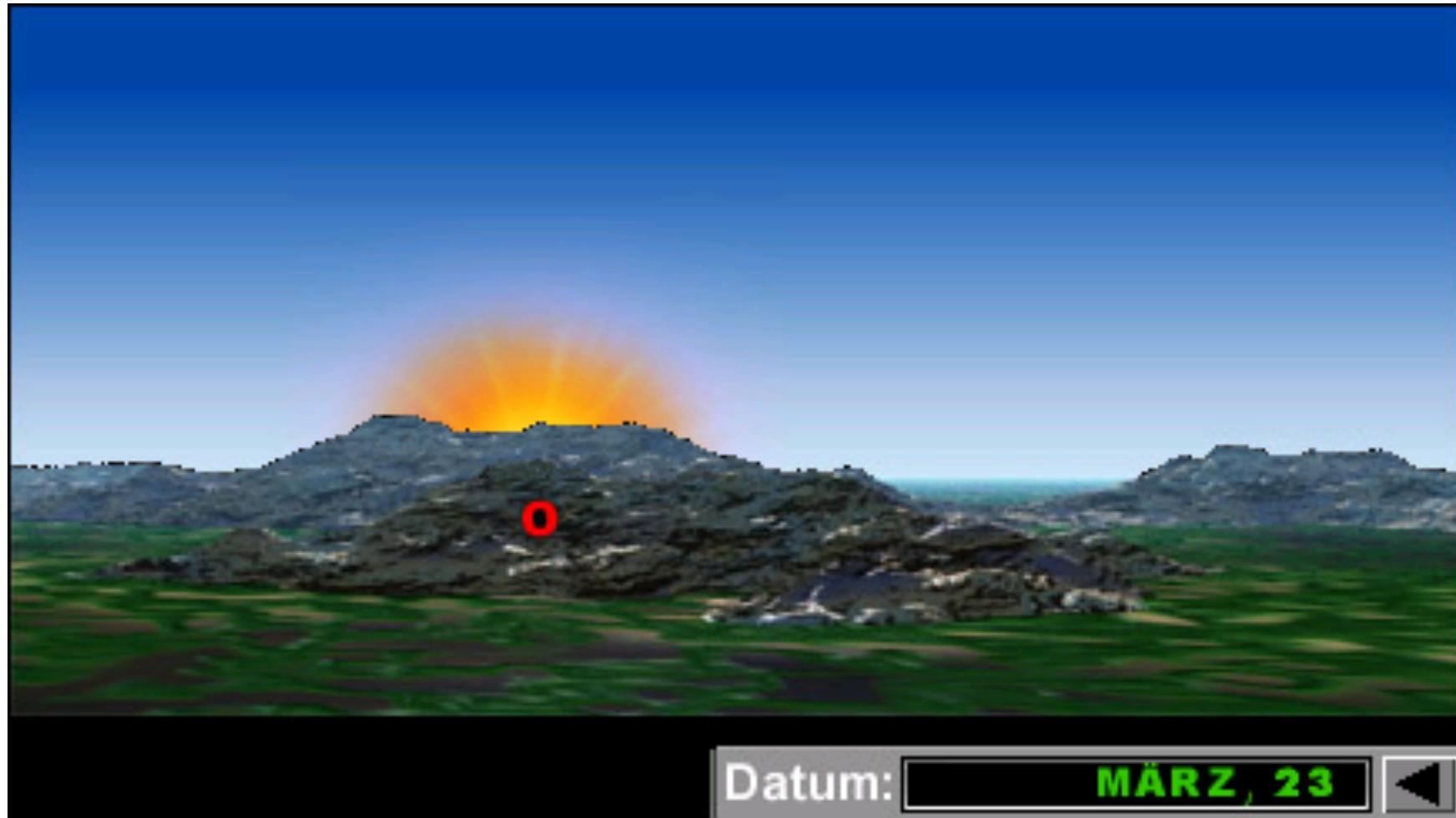


Nord<-Ost->Süd

[4.1]



# Sonnenaufgang

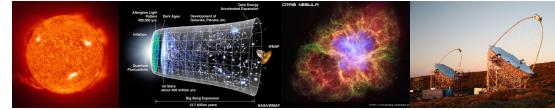


Datum: MÄRZ, 23

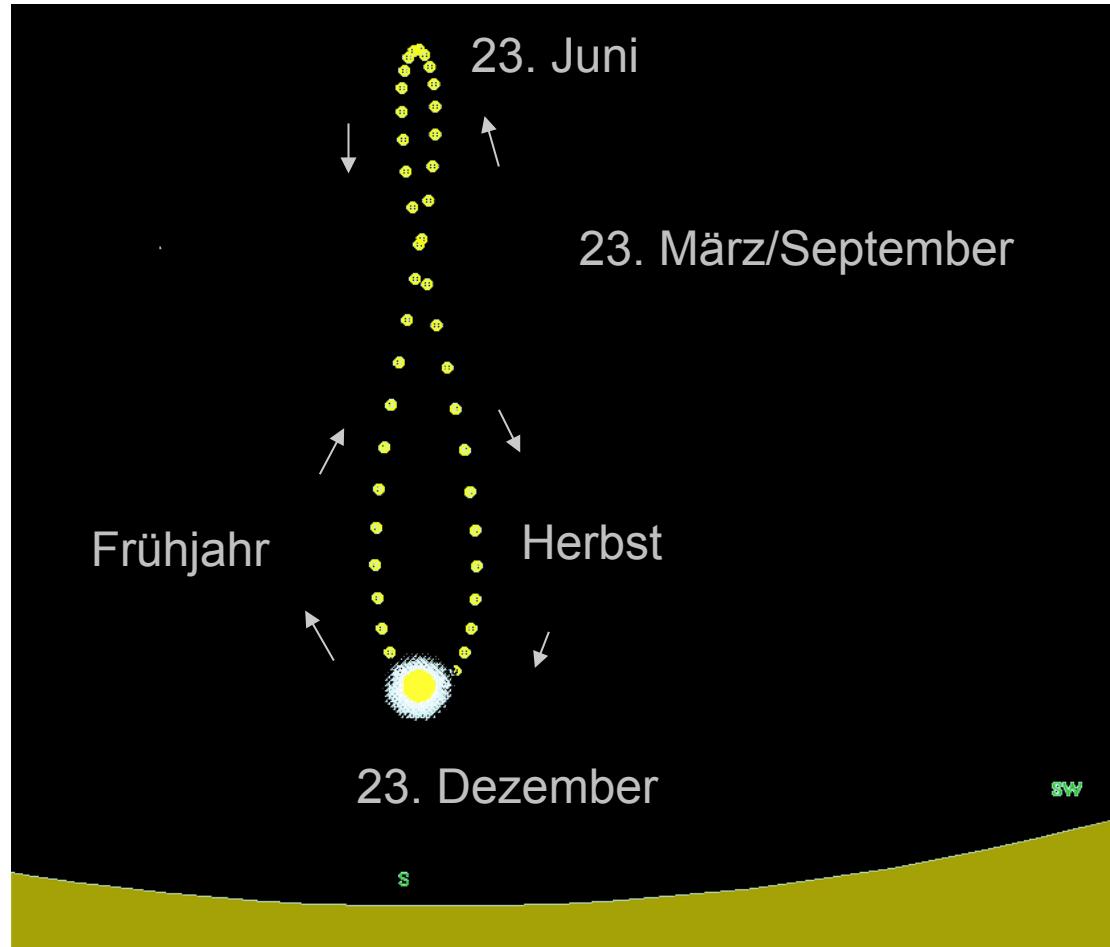


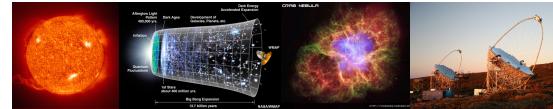
Nord<-Ost->Süd

[4.1]



# Analemma: Sonnenhöhe um 12 Uhr





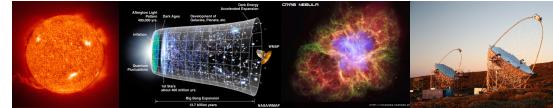
## ~2000 v.Chr.: Himmelscheibe von Nebra



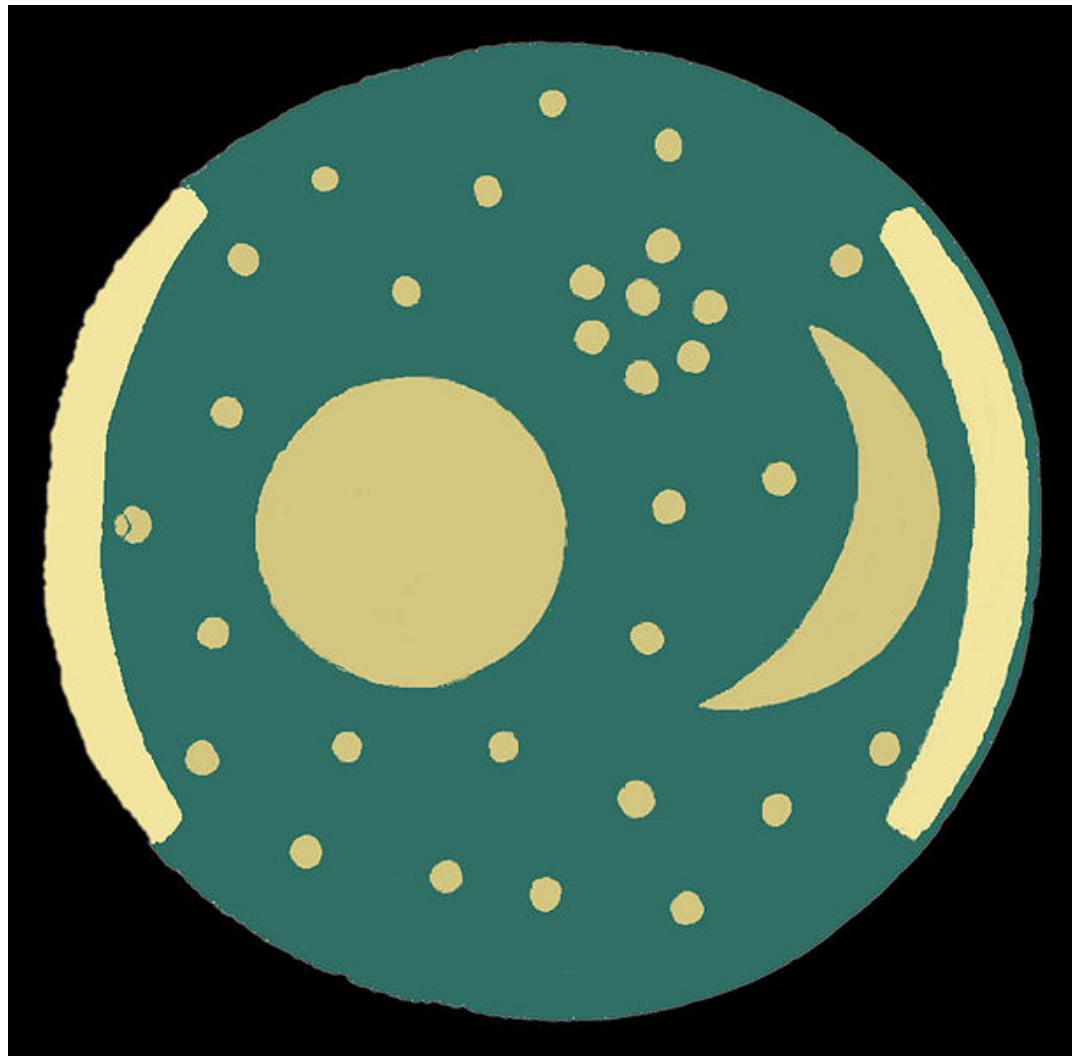
Herstellungsdatum:  
**2100 bis 1700 v. Chr**  
um 1600 v. Chr.  
vergraben

Durchmesser ~32 cm  
Gewicht ~ 2 kg  
Bronze + Kupfer/Zinn-Legierung

[6.1]

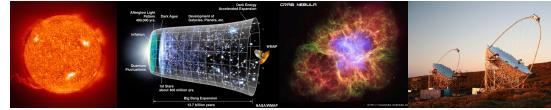


## ~2000 v.Chr.: Himmelscheibe von Nebra

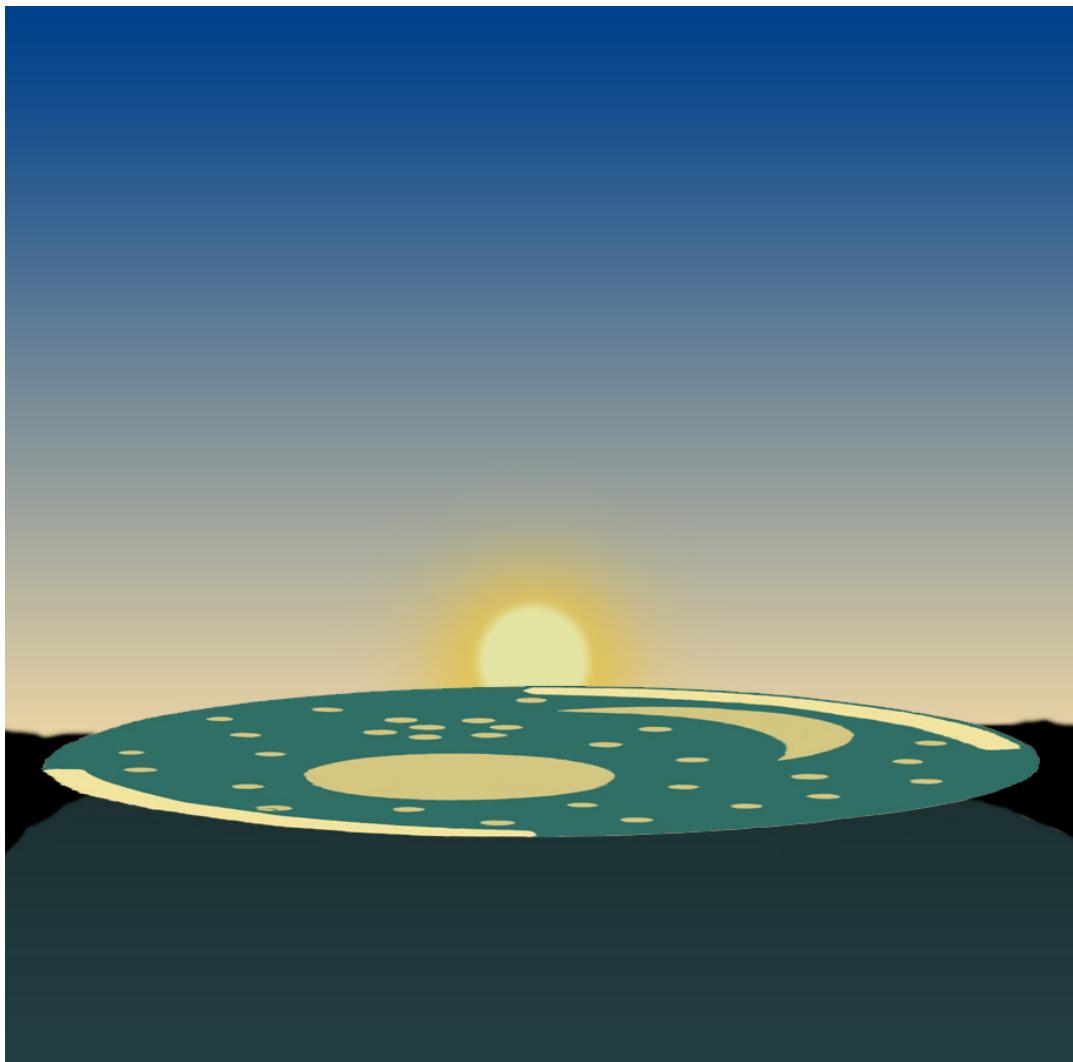


Ziersterne  
zunehmender Mond  
Vollmond  
Plejaden im Stier

[7.1] Horizontbögen:  
Winkel  $82^\circ$   
Markierung von  
Winter- und Sommer-  
sonnenwende  
(am Fundort)



## ~2000 v.Chr.: Himmelscheibe von Nebra



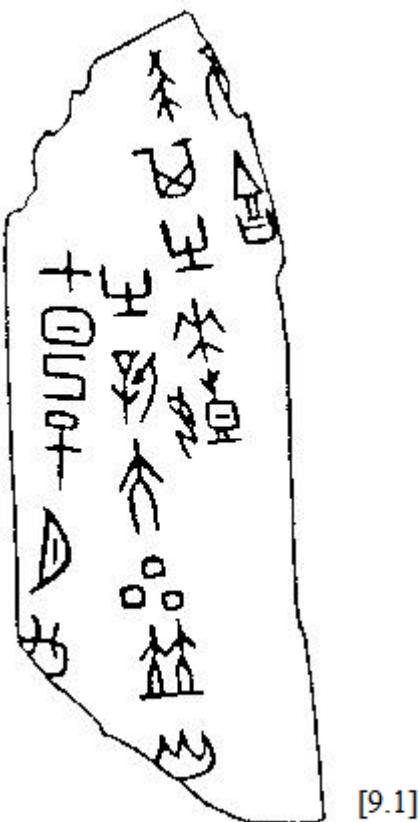
Justage durch  
Ausrichtung  
von Mittelberg  
auf den  
Brocken

[8.1]

# Historische Supernovae: 1400 v. Chr.

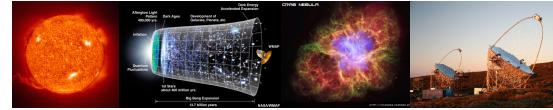
Inschriften auf Knochen oder Schildkrötenpanzern (14. Jhd. v. Chr.)

Am Jisi Tag, dem siebten Tag  
des Monats erschien ein  
Großer neuer Stern in der  
Nähe des Ho Sterns.

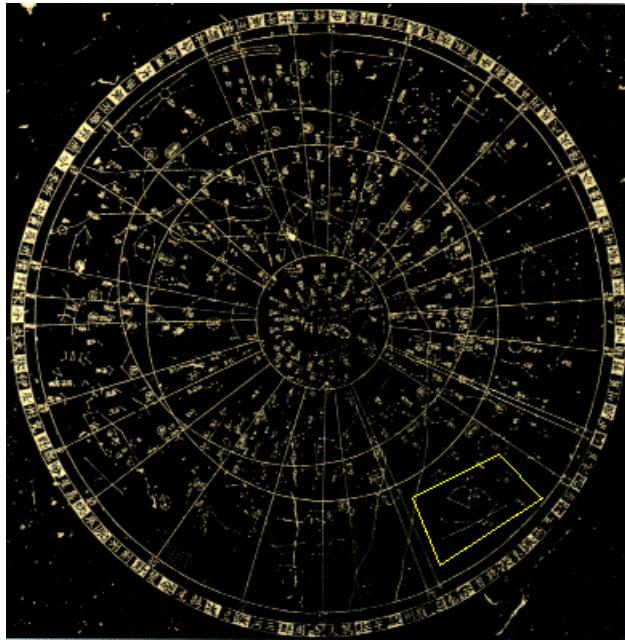


Am Xinwei Tag wurde der  
neue Stern schwächer.

Ho Stern = Antares; Nahe ROSAT Quelle ist **J1714-3939**  
-> SN vor 3000-5000 Jahren  
-> möglicherweise älteste beobachtete bekannte SN

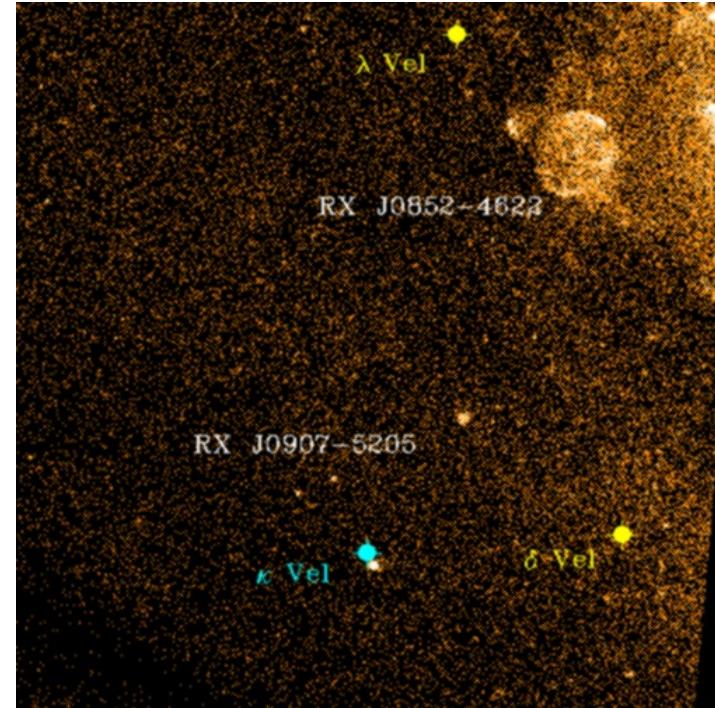


# Historische Supernovae: ~300 v. Chr.



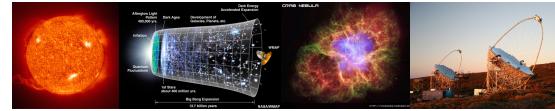
[10.1]

Sternkarte aus dem Jahre 1191.  
Die interessante "Tianshe" Region ist markiert. Sie enthält 5 helle Sterne.  
In einem antiken Sternkatalog des Astronomen Gande aus dem Staate Qi (etwa 300 v.Chr.) besteht diese Konstellation aber aus 6 Sternen.  
Interpretation verschiedener antiker Textstellen: heller Stern zwischen Delta Vel und Kappa Vel, zwischen 300 v.Chr. und 600 AD verschwunden.



[10.2]

Eine ROSAT Röntgenkarte des Vela Gebiets. Die Sterne Kappa, Delta, Lambda Vel sind markiert. Zwei von ROSAT entdeckte Supernova Überreste sind auf dem Bild. RX J0907-5205 könnte der Überrest sein, der von dem verschwundenen Stern geblieben ist. Oben rechts sind von oben nach unten zwei normale Sterne im Röntgenlicht, sowie der Synchrotronnebel um den Vela Pulsar zu sehen.



# Historische Supernovae: 1054 n. Chr.

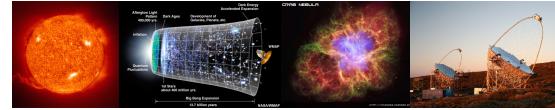
## SN in 1054 (Krebsnebel, M1)

Beobachtet in China,  
Nordamerika



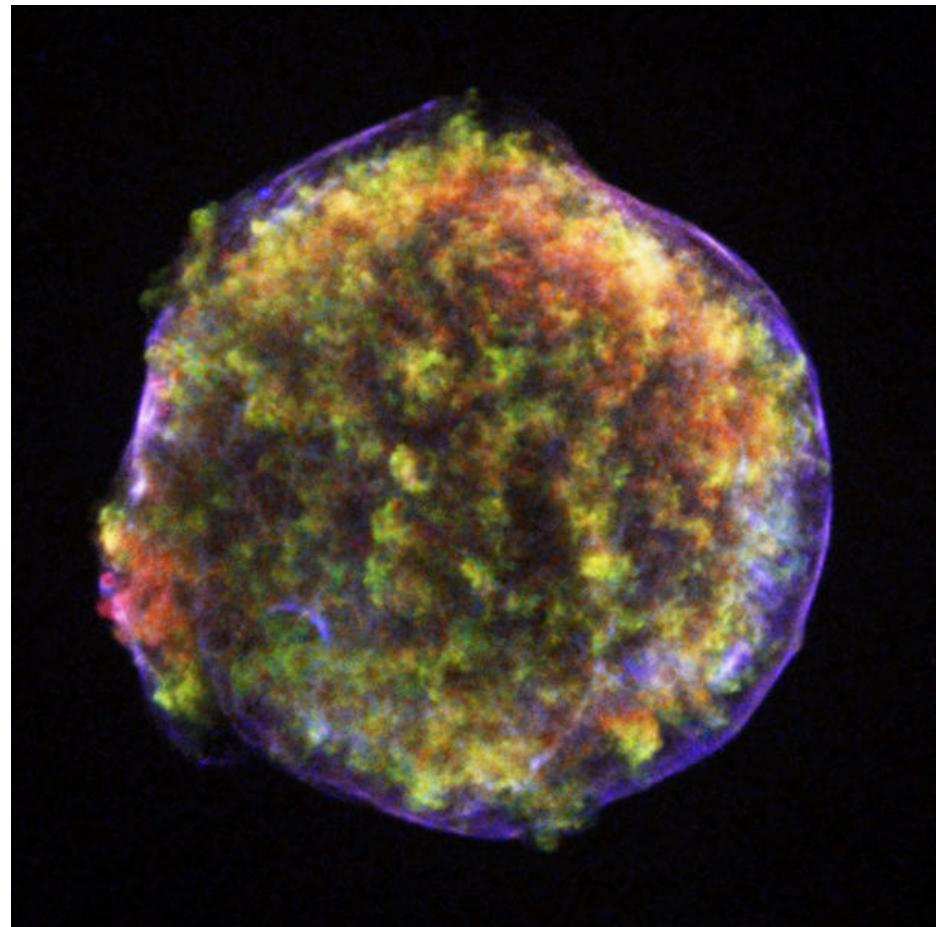
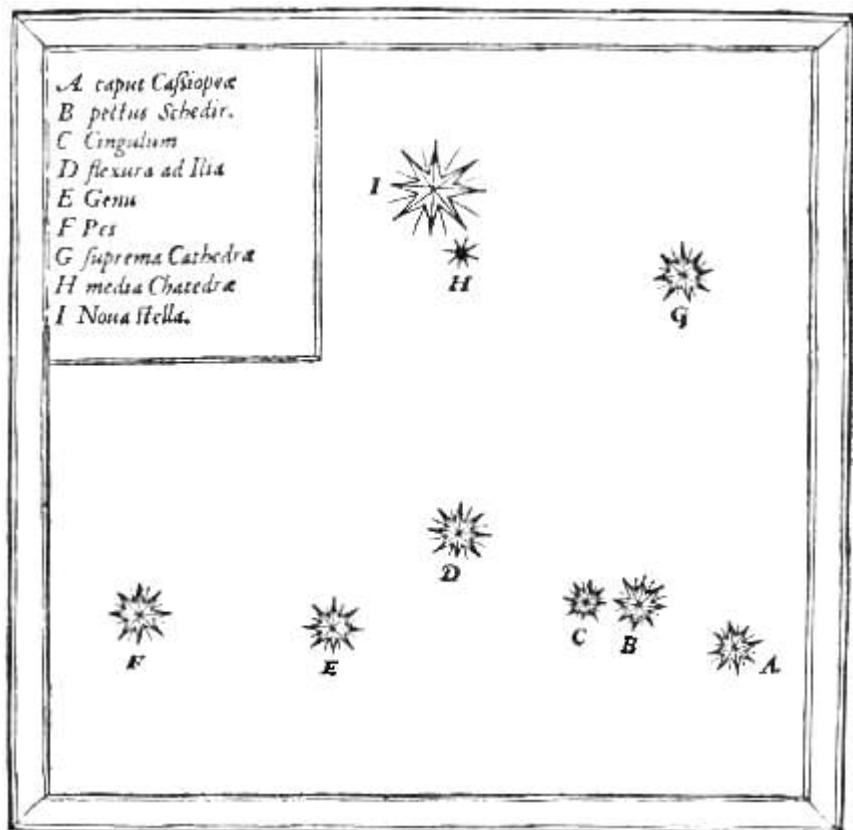
[11.2]

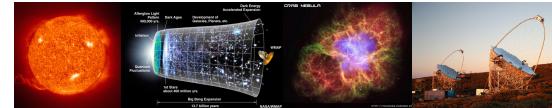
[11.1]



# Historische Supernovae: 1572 n. Chr.

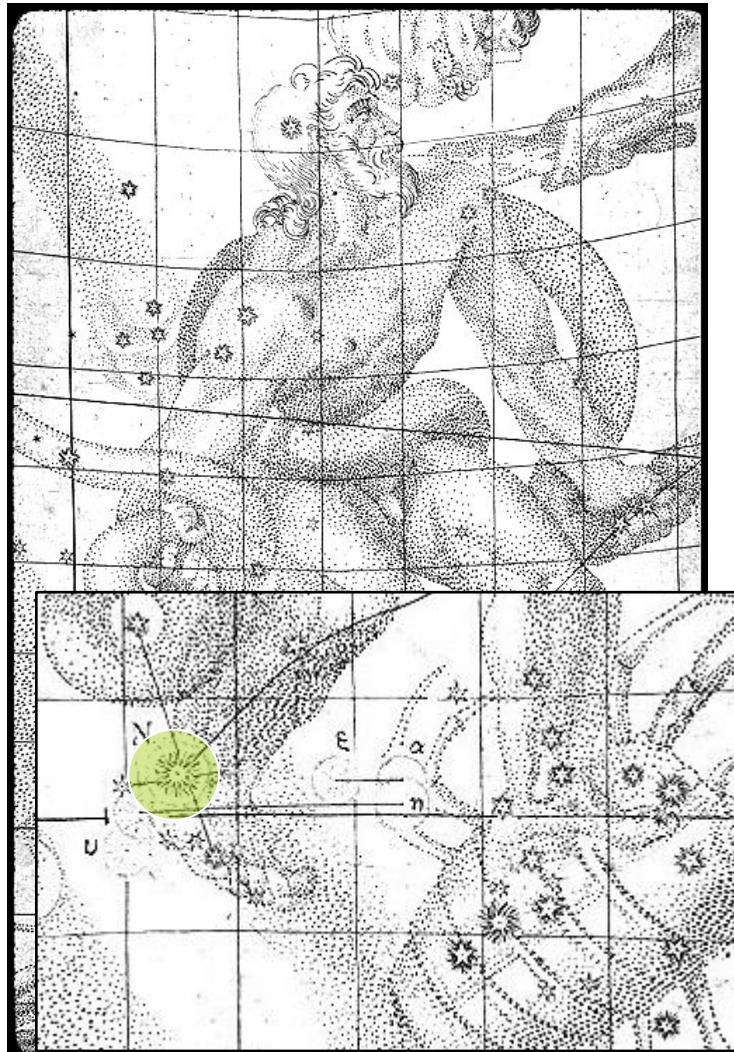
1572 Brahe,  
Cassiopeia B



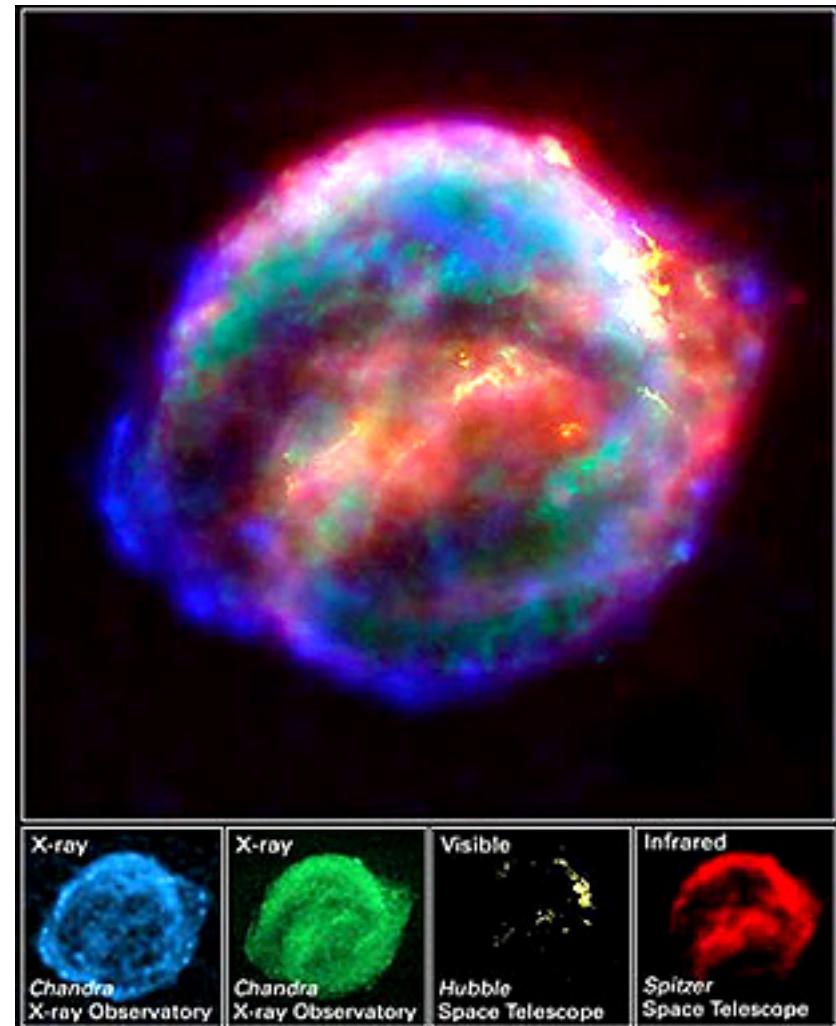


# Historische Supernovae: 1604 n. Chr. 1604 Kepler

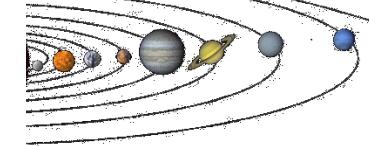
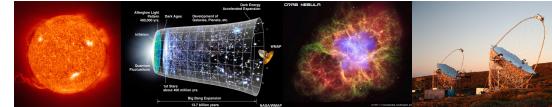
[13.1]



[13.2]



[13.3]



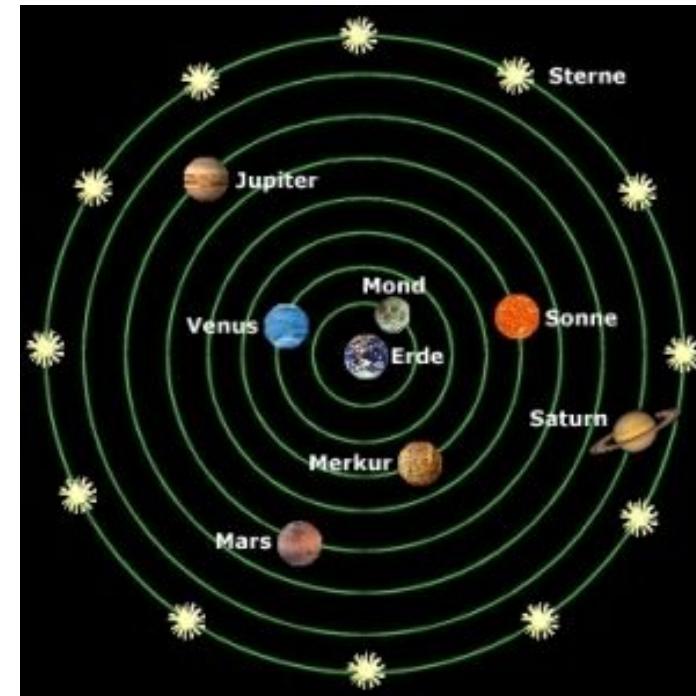
# “Wandelsterne”: Die Planeten

Griechisch: *planētēs* von *planáomai*: „umherirren, umherschweifen“

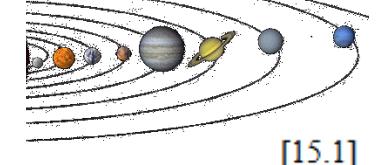
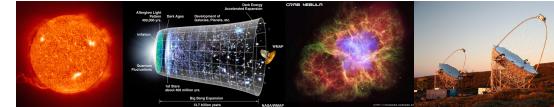
Ptolemäus ~ 130 n. Chr.



[14.1]



[14.2]



[15.1]

# “Wandelsterne”: Die Planeten Das Problem

[15.2]

Alljährliche Planeten-  
schleife (z.B. Jupiter)

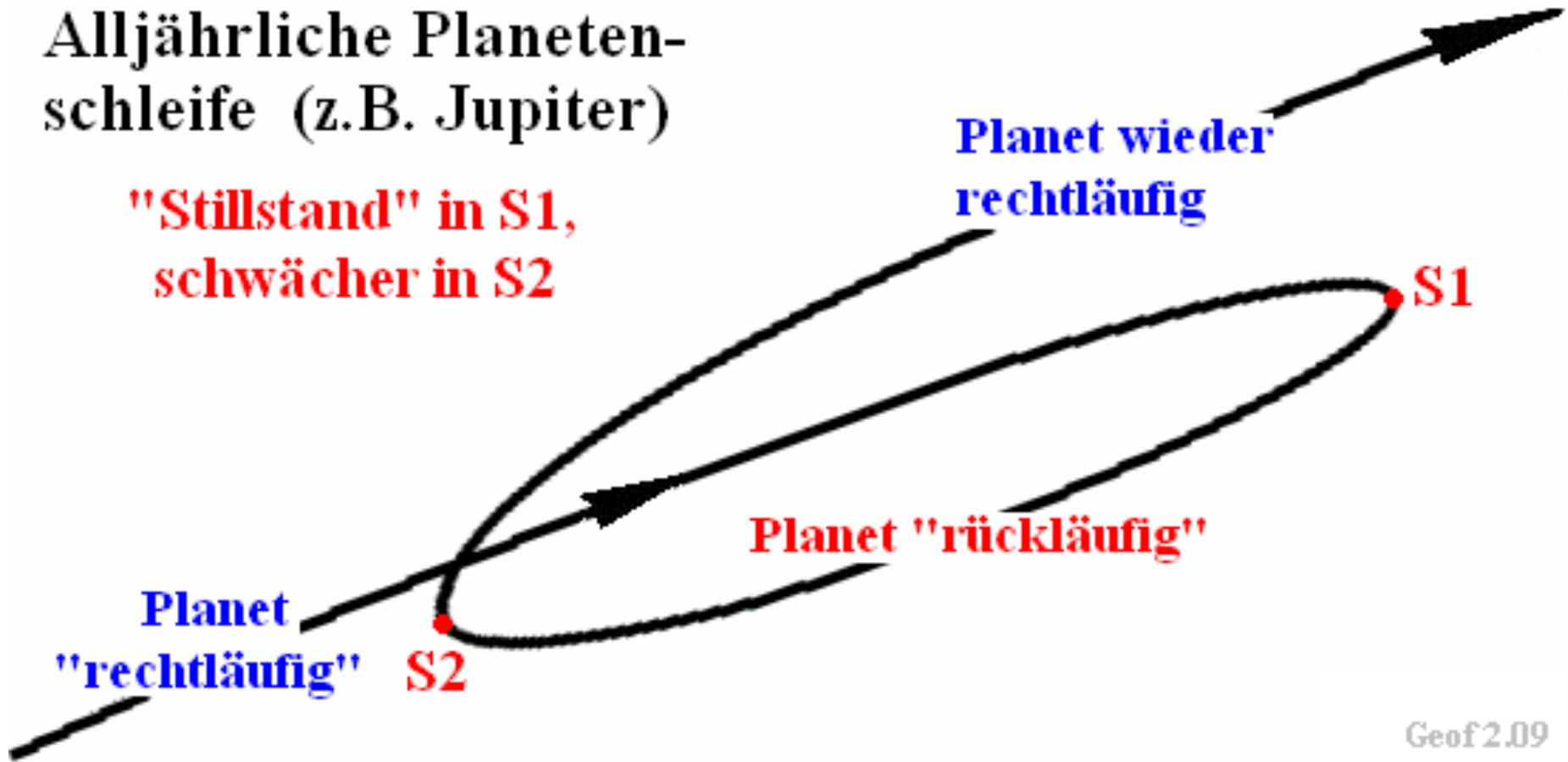
"Stillstand" in S1,  
schwächer in S2

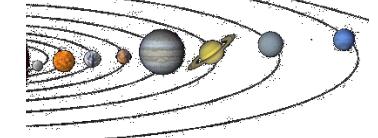
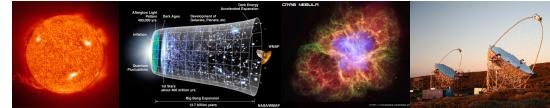
Planet wieder  
rechtläufig

Planet "rückläufig"

Planet  
"rechtläufig"

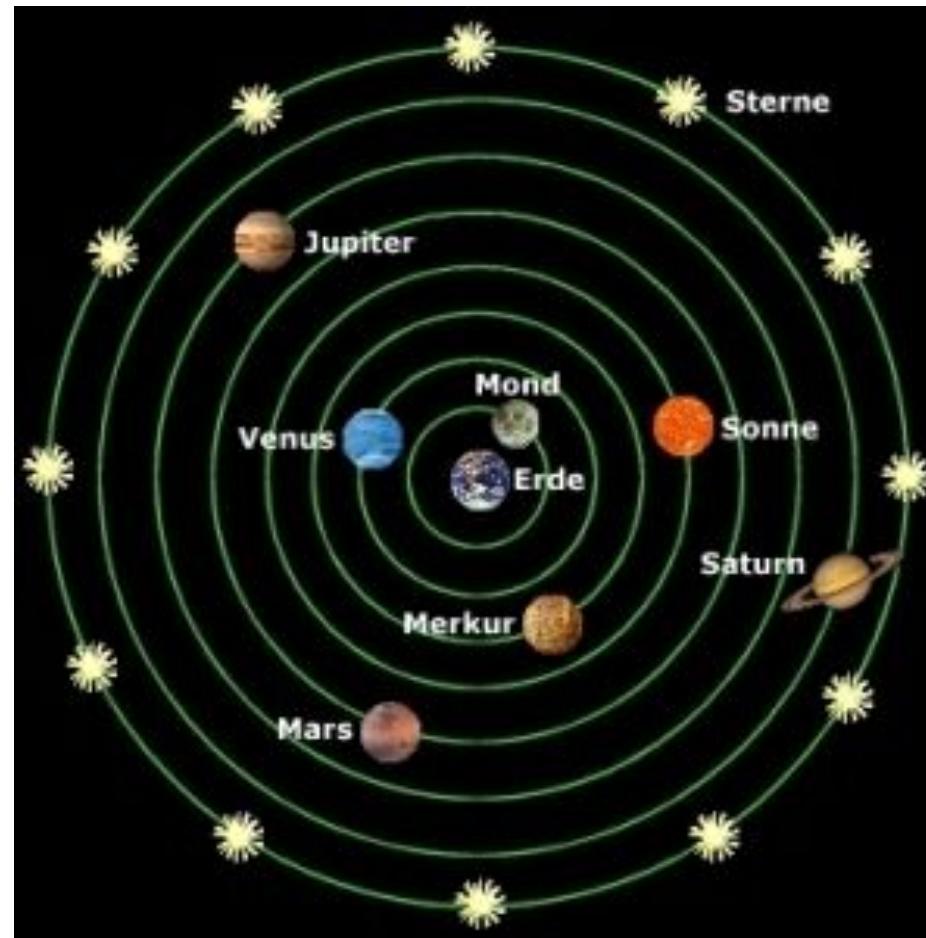
S2



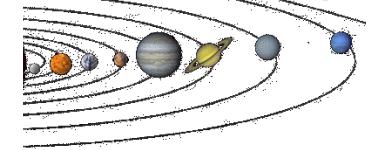
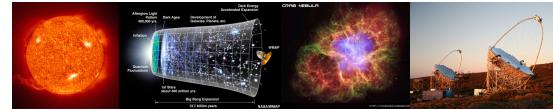


[15.1]

# “Wandelsterne”: Die Planeten Das Problem



[15.3]



# “Wandelsterne”: Die Planeten Die Lösung



[16.1]

- **Nikolaus Kopernikus (1473–1543)**
  - Die Planeten bewegen sich auf Kreisbahnen sich um die Sonne



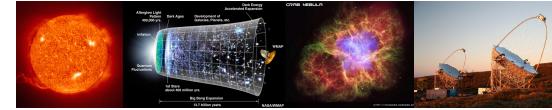
[16.2]

- **Johannes Kepler (1571–1630)**
  - Planetenbahnen sind Ellipsen.
  - Die Sonne befindet sich in einem Brennpunkt.

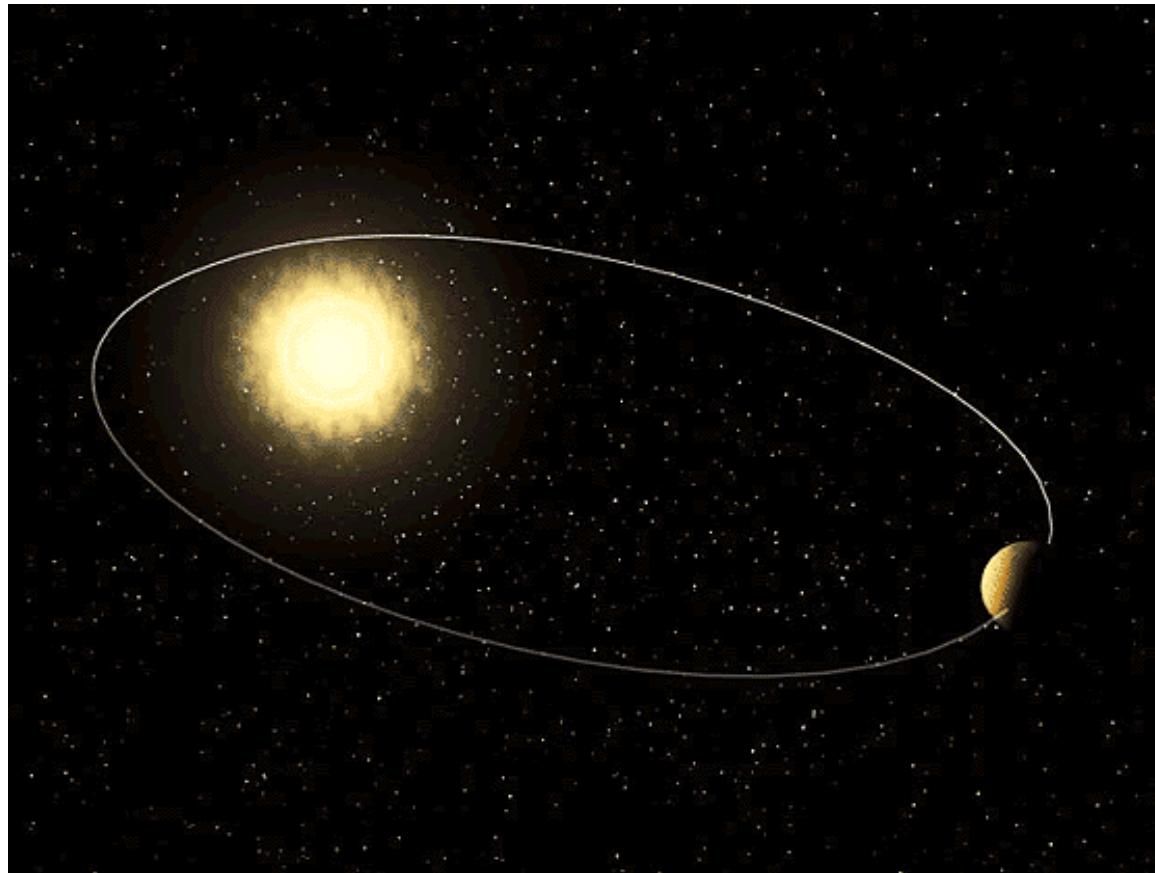


[16.3]

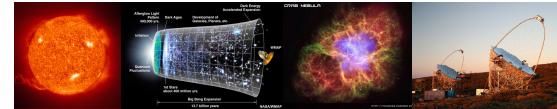
- **Isaac Newton (1643–1727)**
  - Die Planeten sind (wie alle Körper) bestrebt, sich gradlinig zu bewegen,
  - werden aber durch die Gravitation auf einer elliptischen Bahn gehalten



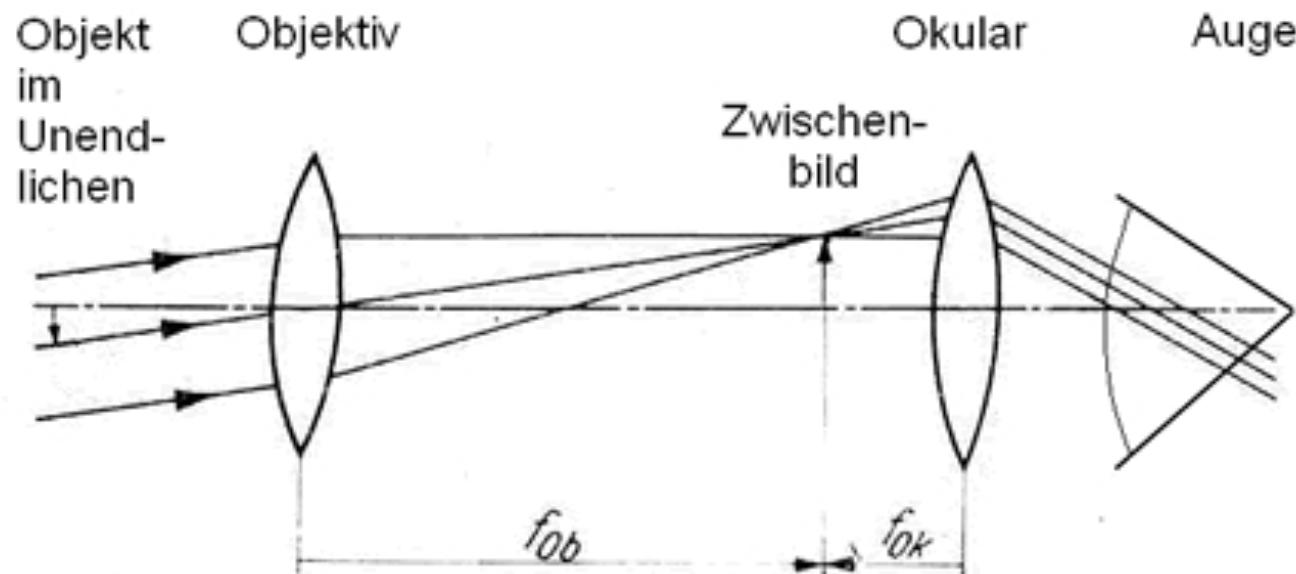
# Kopernikus-Kepler-Newton



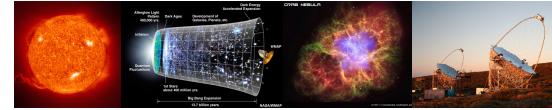
[17.1]



# 1608: Das Fernrohr, ein neues Instrument: Die Welt steht Kopf...

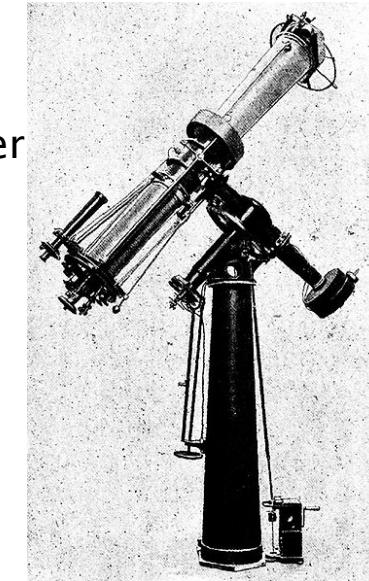


[18.1]



# 1743/1748: Heliometer

- 1743 von Servington Savary in England und 1748 von Pierre Bouguer in Frankreich gebaut, später auch von Joseph von Fraunhofer.
- Präzise Messung sehr kleiner Winkel.
- Bestimmung des Sonnendurchmessers
  - zeitliche Schwankungen? (Protuberanzen)
  - Sonnenabplattung? (nein, langsame Rotation)?
- Durchmesser anderer Himmelskörper
- Abstands- und Positionsinkel von Doppelsternen
- Friedrich Bessel 1838: erster Nachweis einer Fixsternparallaxe an 61 Cygni (gehört zu den 20 nächsten Sternen).



[19.1]

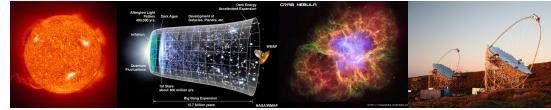
[19.2] Königsberg, Pr. Sternwarte



[19.4]



[19.3]



# 1743/1748: Heliometer und Parallaxen-Bestimmung

ASTRONOMISCHE NACHRICHTEN.  
Nr. 1411—1416.

---

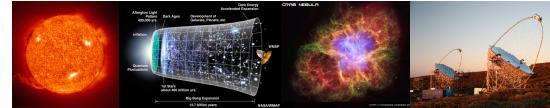
## Parallaxen-Bestimmungen mit dem Königsberger Heliometer.

Von Herrn Dr. A. Auters.

---

Das Königsberger Heliometer ist von *Bessel*, *Schlüter* und *Wickmann* zur Ermittelung der Parallaxen der Sterne 61 Cygni und 1830 Girombridge benutzt worden. Aus den vom Aug. 1837 bis zum März 1840 gemessenen Entfernung des ersten Sterns von zwei andern, deren Coordinaten, bezogen auf die Mitte des Doppelsterns 61 Cygni, für 1839  $d = 7'6$ ,  $p = 201''8$  und  $d = 11'7$ ,  $p = 109''8$  waren, hat *Bessel* den Ueberschuss der Parallaxe desselben über das Mittel der Parallaxen des Vergleichsterns, dessen wahrscheinlicher Werth nach den Untersuchungen von *Peters*  $0''006$  ist,  $= 0''3483 - 0''0533k$  gefunden, wenn  $1+k$  der Correctionsfaktor des in *Bessel's* Rechnung  $= 0,00000740$  für  $1^{\circ} F.$  angenommenen Thermometercoeffizienten für das Heliometer ist. Den wahrscheinl.

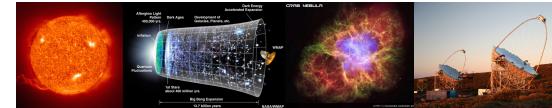
könnte. In derselben Hypothese berechnete *Peters* die Beobachtungen von 61 Cygni aufs Neue und erhielt die relative Parallaxe  $= 0''3602 \pm 0''0121$ , in so naher Uebereinstimmung mit dem Werthe von *Bessel* und dem 1843 von *Peters* selbst am Polkowaer Verticalkreise gefundenen  $0''349 \pm 0''080$ , dass die unbekannten Fehler in diesem Fall nur einen sehr geringen Einfluss ausgeübt zu haben schienen. Eine neue Beobachtungsreihe über 61 Cygni, welche *Johuson* 1852 und 1853 mit dem Oxfordter Heliometer anstellte, und bei welcher er zwei neue Vergleichsterne, in  $d = 34'8$ ,  $p = 274''9$  und  $d = 24'6$ ,  $p = 102''9$  für 1853, benutzte, gab die relative Parallaxe  $= 0''42$ , also eine ziemlich nahe Bestätigung des *Bessel'schen* Werthes. Gleichzeitig hatte aber *O. Struve* eine Bestimmung



# 1764–1782: Messierkatalog

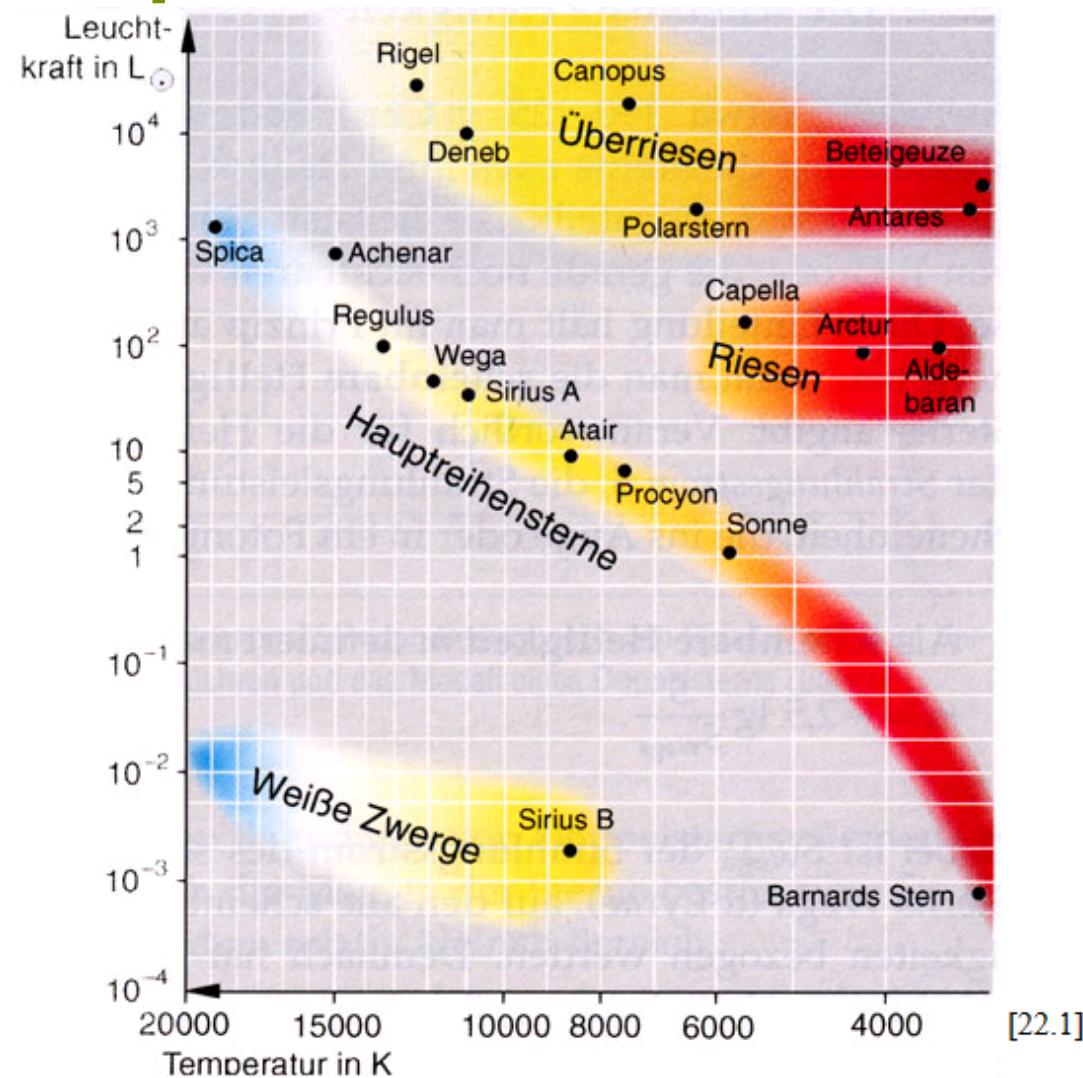
- Charles Messier: Jagd nach Kometen
- Gestört durch ähnlich aussehende, diffuse, aber örtlich unveränderliche Objekte am Himmel
- Katalogisierung von 110 Objekten, um sie bei der Suche auszuschließen
- Messierkatalog: Sammlung von Galaxien, Nebel, Sternhaufen
- Interessante, bis dahin unbekannte Objekte

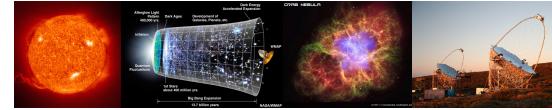




# 1911: Hertzsprung–Russell–Diagramm und die Hauptreihe der Sterne

- Hertzsprung sortiert Sterne nach Temperatur/Farbe und Leuchtkraft
  - entdeckt die “Hauptreihe”: die Linie, auf der Sterne während der längsten Zeit ihrer Existenz zu finden sind
- mehr dazu später





## 1920–1925: Die Shapley–Curtis–Debatte und der Abstand zu Andromeda

- 1920: Debatte zwischen Harlow Shapley und Heber Curtis bzgl. der Natur von “Spiralnebeln”
- Shapley: Nebel innerhalb unserer Galaxie (Größe der Milchstraße um Faktor 3 überschätzt), vllt. Sonnensysteme in Entstehung
- Curtis: Nebel sind “Inselwelten” außerhalb der Milchstraße (deren Durchmesser er um einen Faktor 3 unterschätzt)

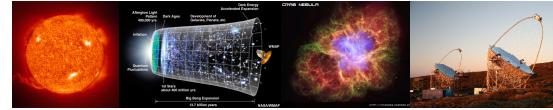
1923: Edwin Hubble misst Abstand zum Andromedanebel mit Hilfe von Cepheiden auf 900.000 Ly

-> extragalaktisches Objekt!  
(Durchmesser der Milchstraße ~100.000 Ly)

- 1952: Baade korrigiert einen Fehler Hubbles (unterschiedliche Cepheiden-Klassen)  
-> Entfernung zu Andromeda: ~2,5 Mio Ly

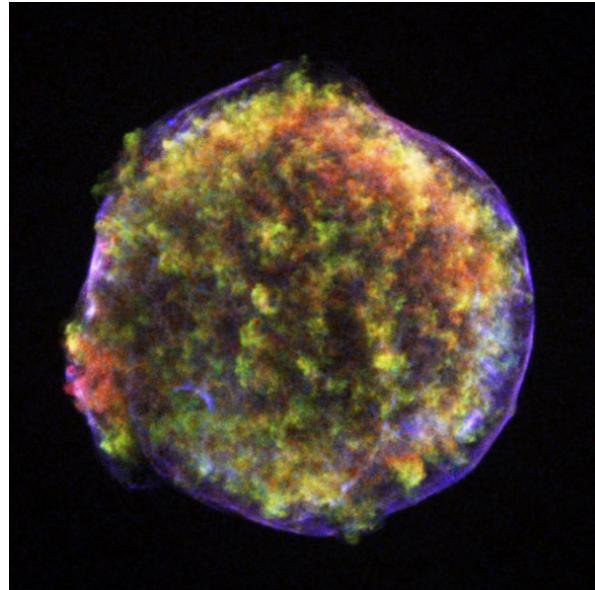


[23.1]



# Supernovae

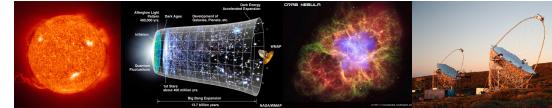
1934: Zwicky und Baade etablieren die Bezeichnung „Supernova“ und zeigen, dass sie eine Quelle kosmischer Strahlung sein können



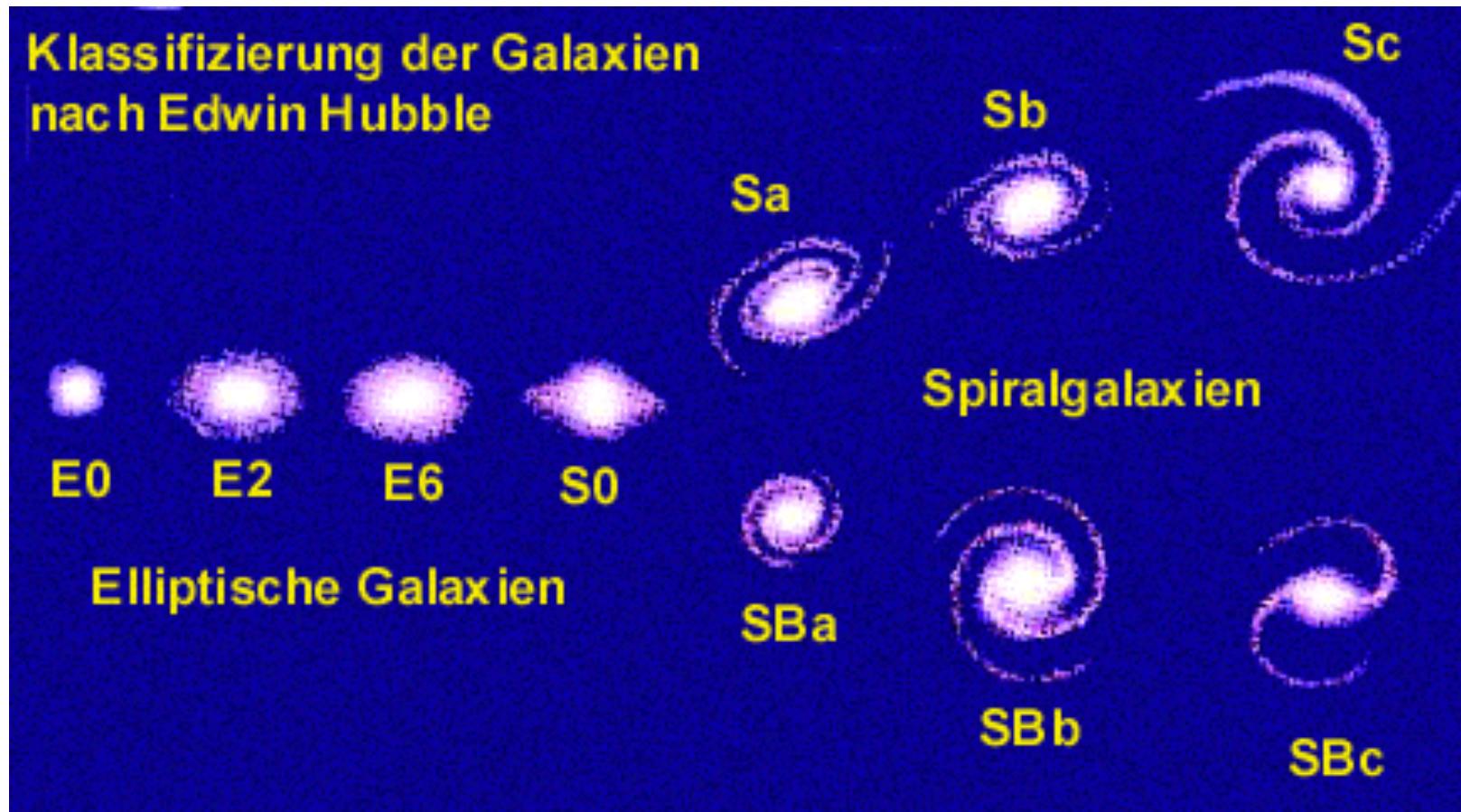
[24.1]

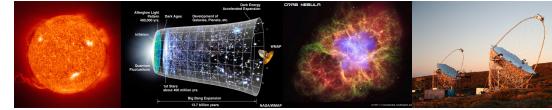


[24.2]



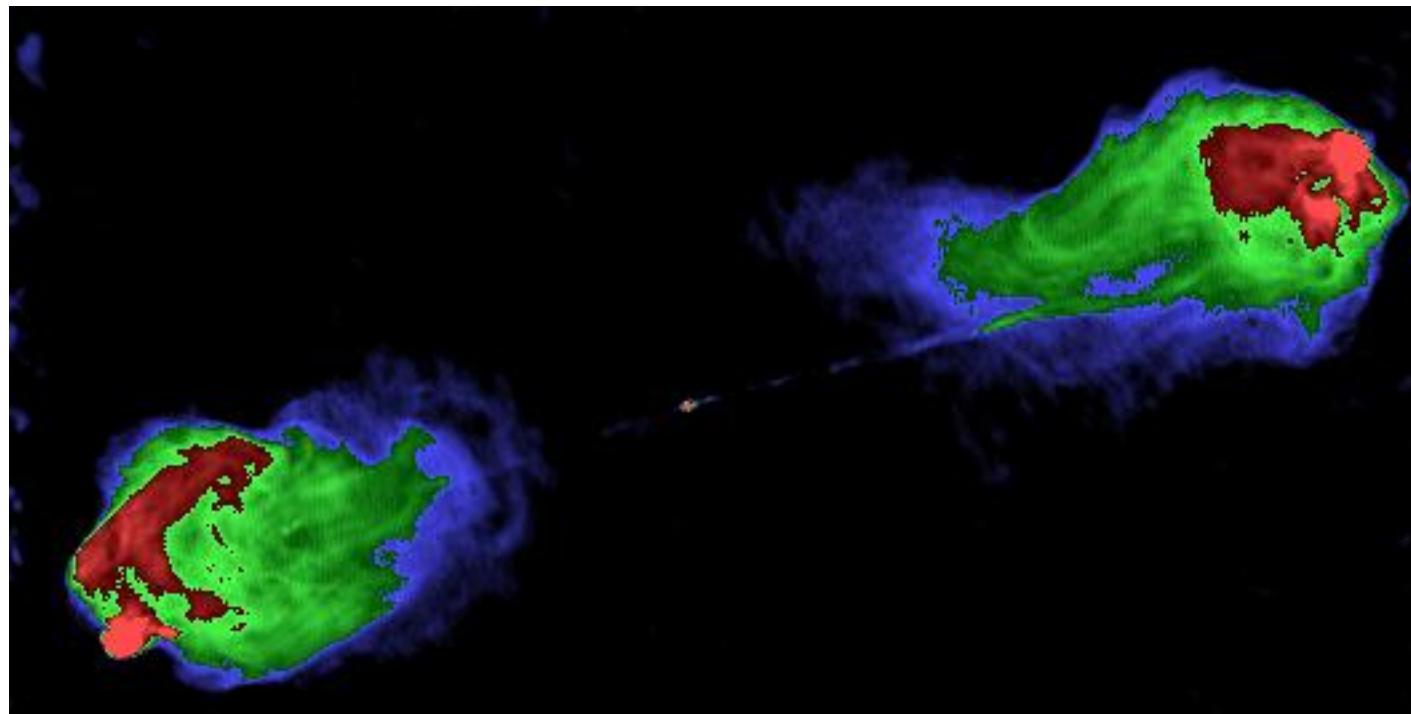
# 1936: Hubbles Galaxienordnung

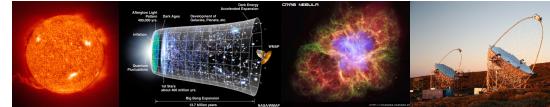




# 1939: Cygnus A

Entdeckung der Radioquelle Cygnus A, die später als Radiogalaxie identifiziert wurde  
(Radiogalaxie: eine „Unterkategorie“ von aktiven galaktischen Kernen - AGN)

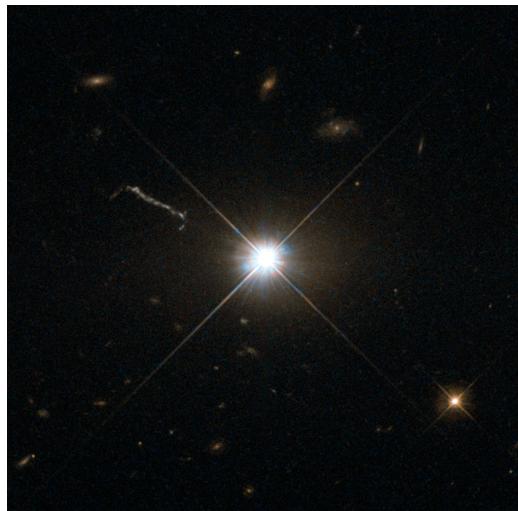




# 1963: Der erste Quasar (AGN)

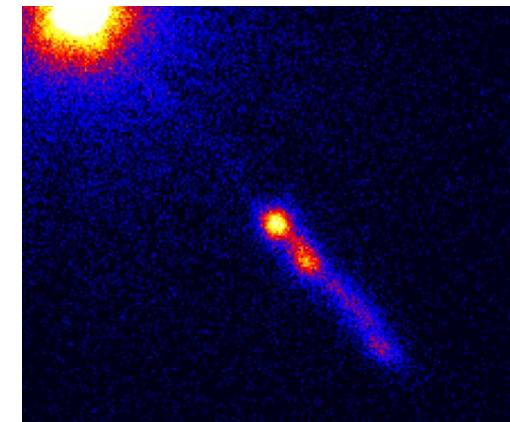
- Maarten Schmidt studiert das Spektrum der Radioquelle 3C 273
- sternähnliches Objekt (quasi-stellar radio source – quasar),  
aber Spektrallinien nicht an erwarteter Stelle
- Wasserstofflinie gefunden, bei sehr großer Rotverschiebung  
-> Objekt sehr sehr hell, sehr weit entfernt  
(Rotverschiebung  $z=0.158$ , Luminositätsabstand  $d=2,4$  Gly)

Hubble  
Space  
Telescope

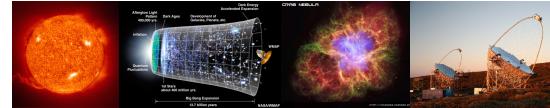


[27.1]

Chandra  
X-ray  
Observatory



[27.2]

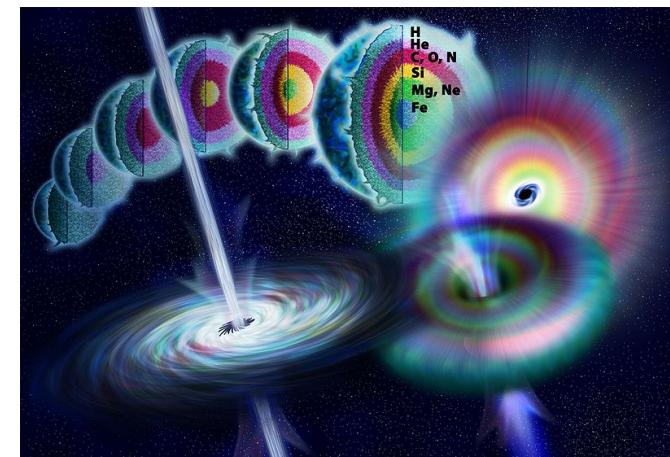


# 1967: Der erste Gamma Ray Burst (GRB)

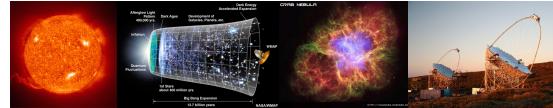
- Vela-Satelliten: Serie von Satelliten zur Überwachung heimlicher Atomtests
- Zufällig Entdeckung von Klebesadal, Strong und Olson mit Vela-Satelliten:
- kurze (~Sekunden) Ausbrüche im Energiebereich 100 keV – wenige MeV.
- Über die Entdeckung wurde erst 1973 berichtet.
- Gamma-Blitze:
  - 1) Supernova/Hypernova: Kollaps eines sehr massiven Sterns zu einem Neutronenstern oder schwarzen Loch
  - 2) Verschmelzende Neutronensterne



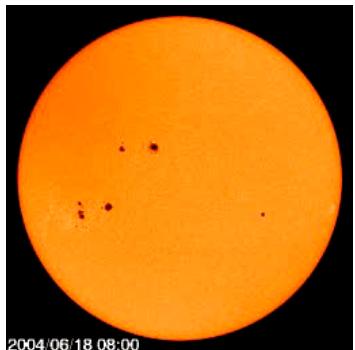
[28.1]



[28.2]



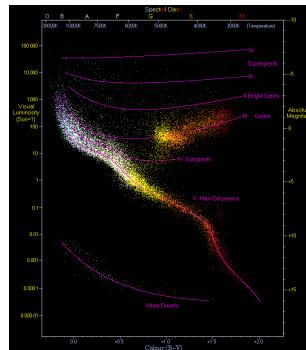
# Grundlagen der Astronomie: Sonne, Sterne, Galaxien



[29.1]



[29.2]



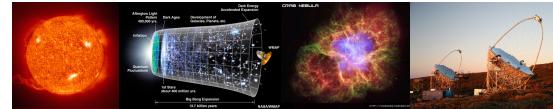
[29.3]



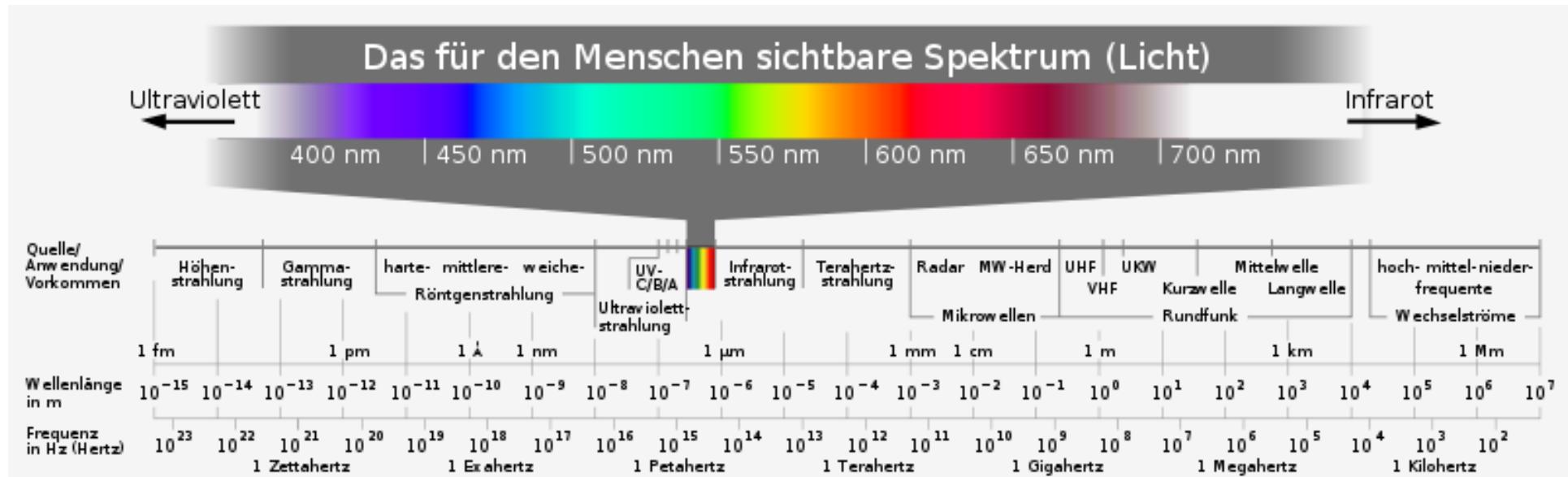
[29.4]



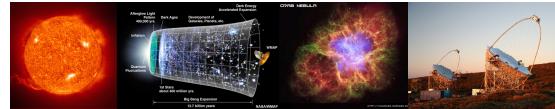
[29.5]



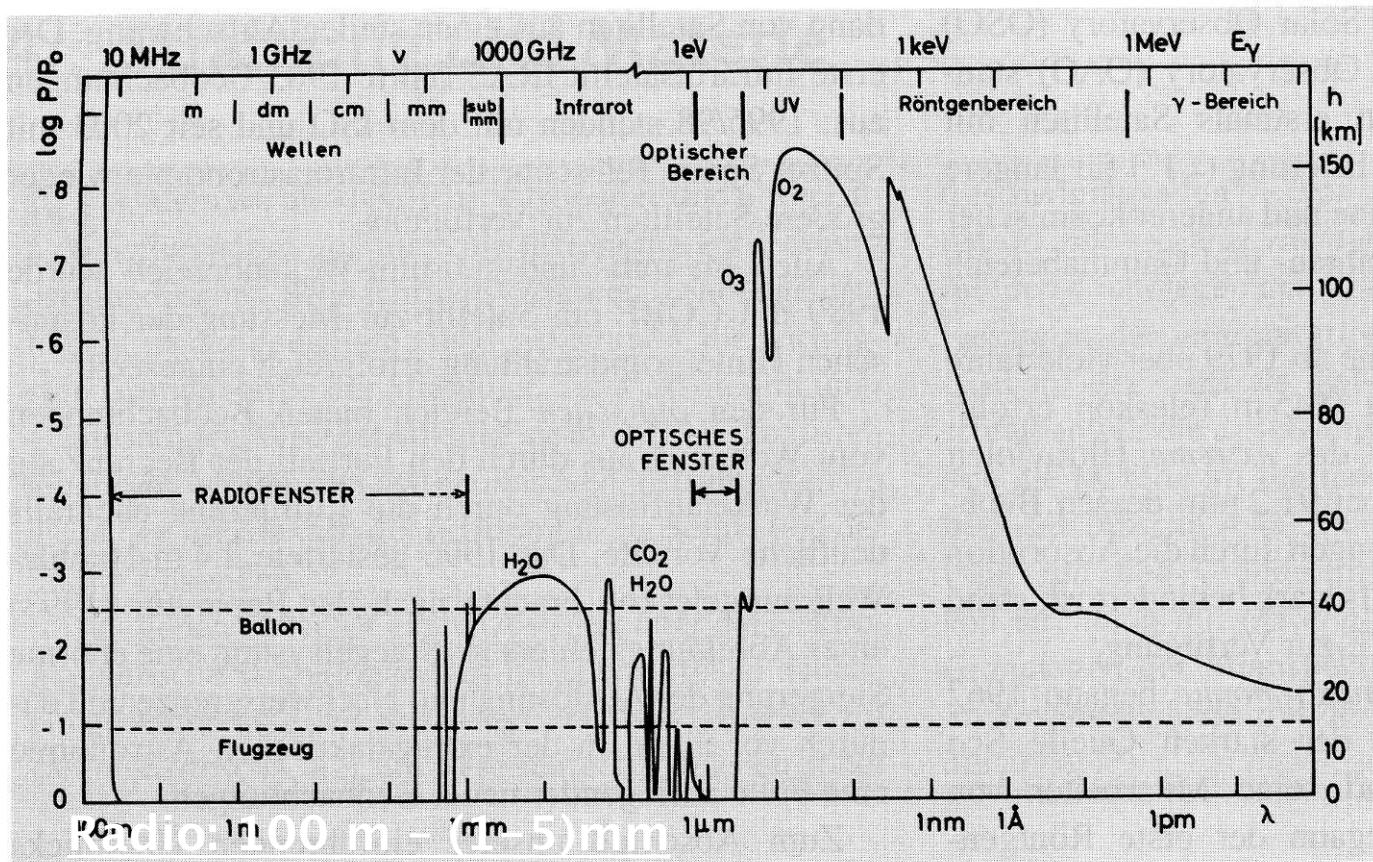
# Das elektromagnetische Spektrum



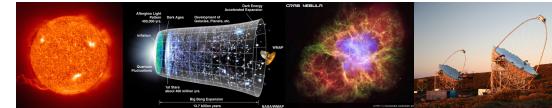
[30.1]



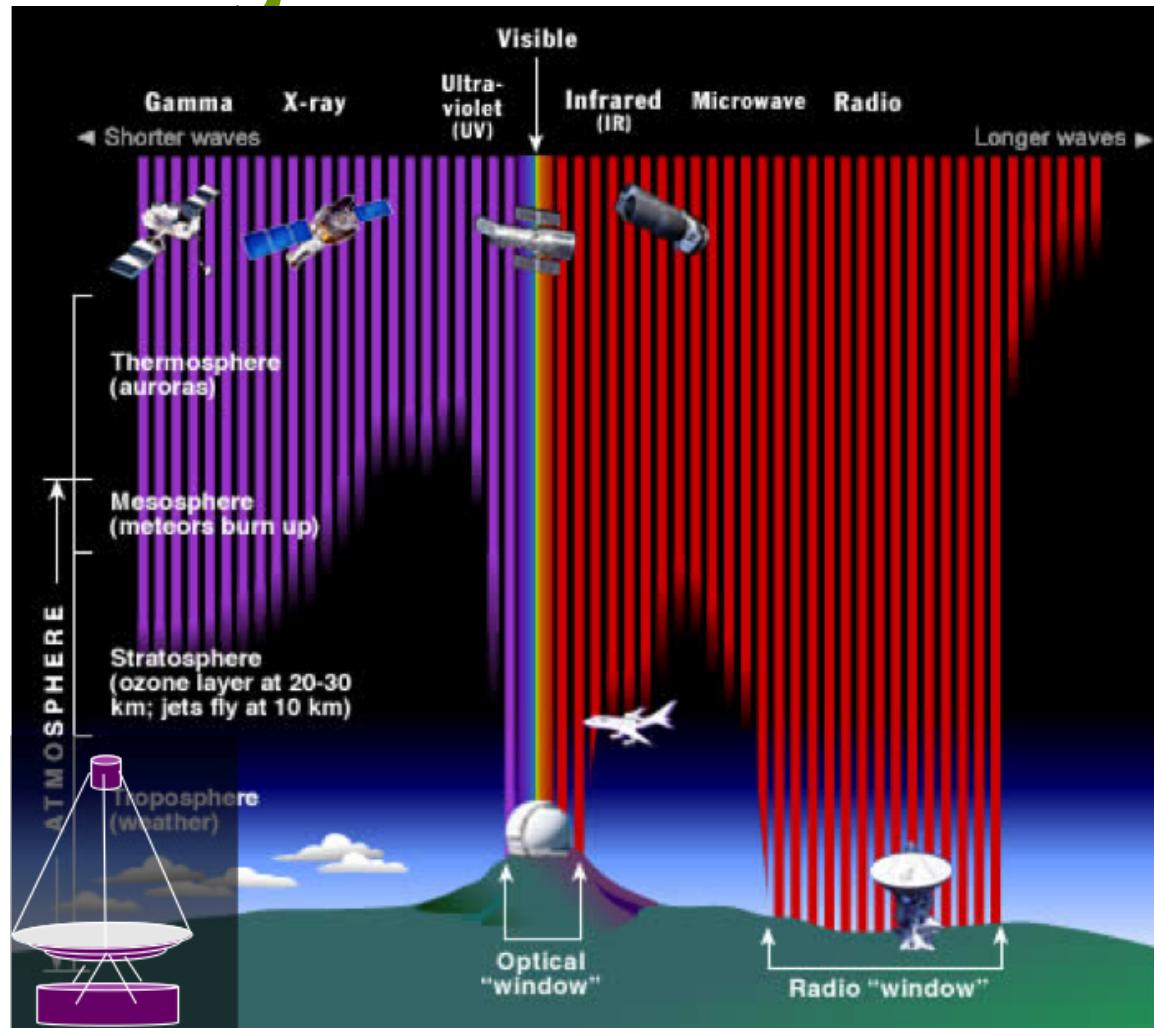
# Durchlässigkeit der Erdatmosphäre



**Abb. II.1.** Durchlässigkeit der Erdatmosphäre gegenüber elektromagnetischer Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  (untere Skala) und der Frequenz  $\nu$  bzw. der Photonenenergie  $E_\gamma = h\nu$  (obere Skala). Eingezeichnet ist die Höhe  $h$  [km] (bzw. der entsprechende Druck  $P$  in Einheiten des Bodendrucks  $P_0 \simeq 1$  bar), bei welcher die ein treffende Strahlung um die Hälfte geschwächt wird, sowie die ungefähre Maximalhöhe für die Beobachtung von Flugzeugen und Ballonen aus.



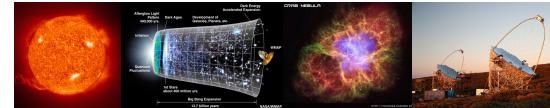
# Durchlässigkeit der Erdatmosphäre



Gamma:  
Indirekte Messung  
über Luftschauer

Optisch:  
1000–300nm

Radio: 100 m – (1–5)mm  
100 m: Refl. an der Ionosphäre,  
21 cm Atomarer Wasserstoff



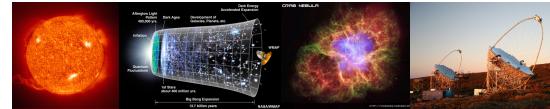
## Messinstrumente



[33.2]

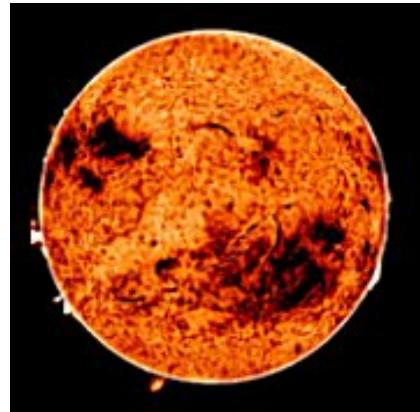


[33.5]

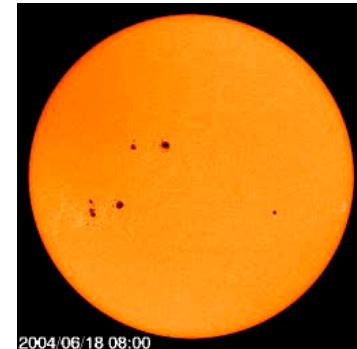


# Bilder der Sonne

Infrarot

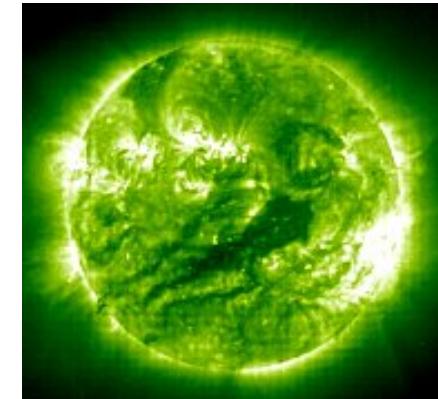


[34.1]



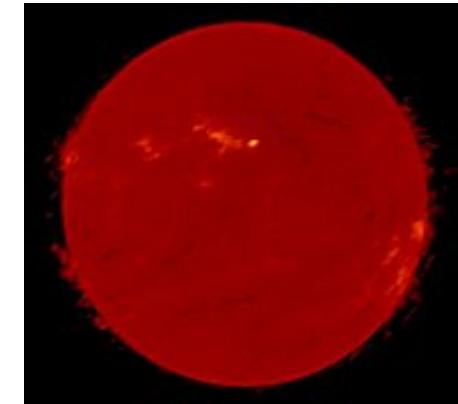
2004/06/18 08:00

[34.2]



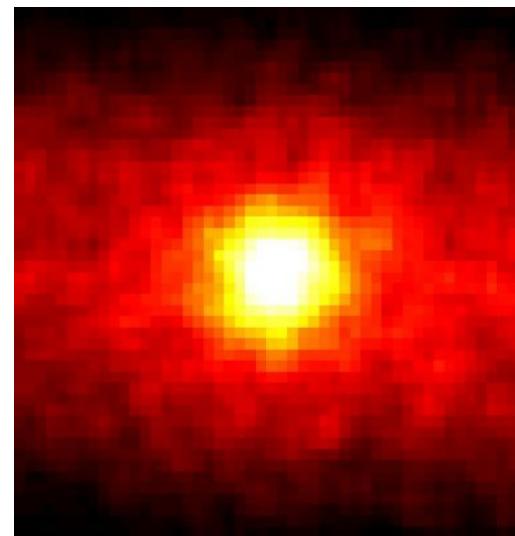
UV

[34.3]



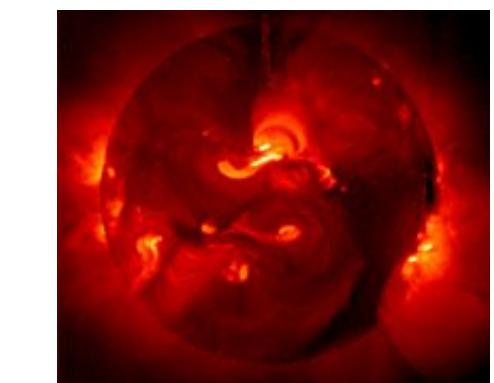
Radio

[34.4]



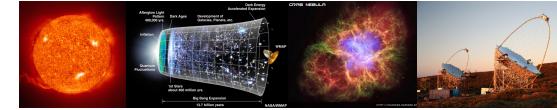
Neutrinos

[34.5]

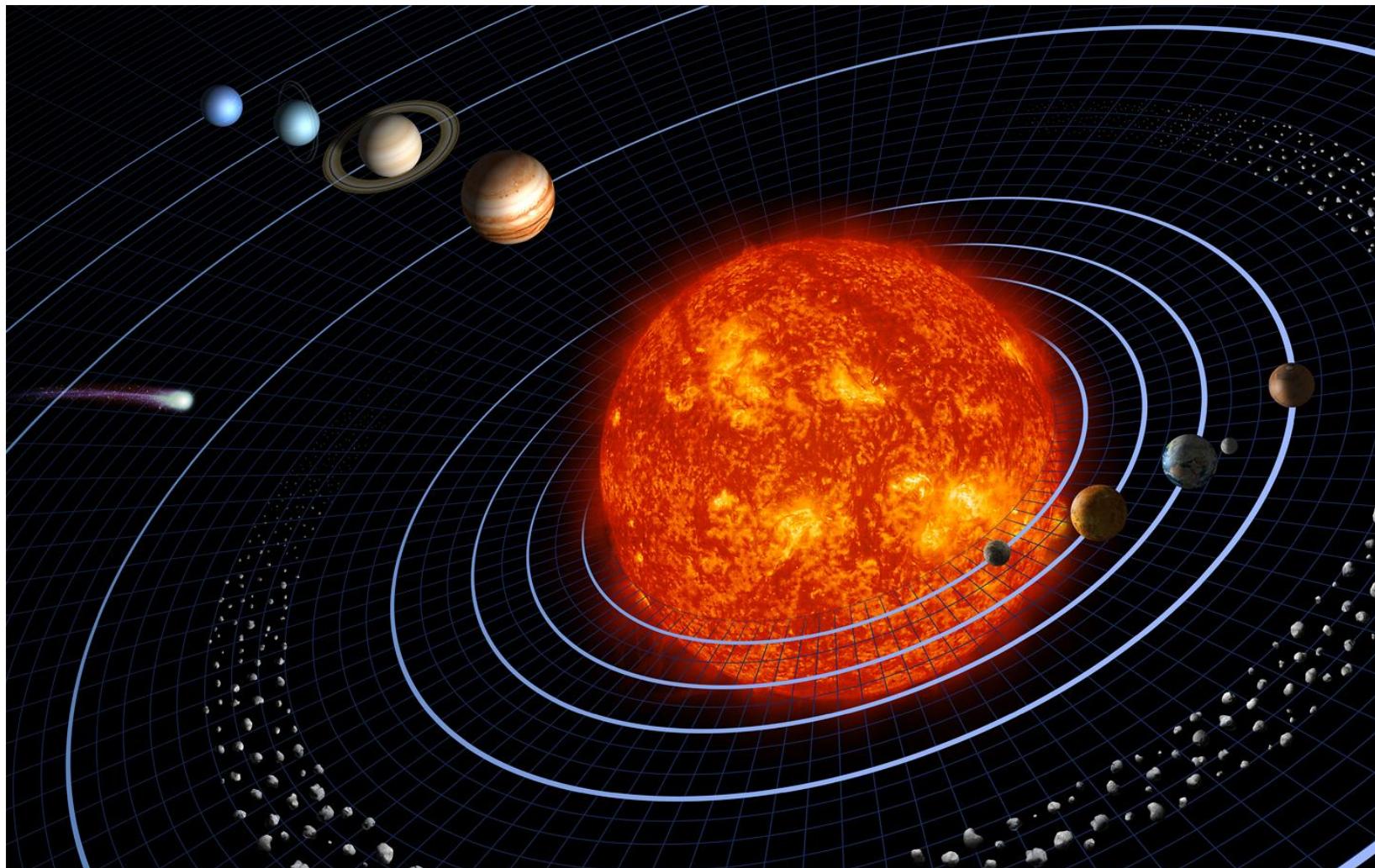


Röntgen

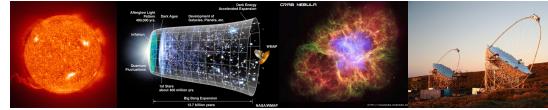
[34.5]



# Unser Sonnensystem



[35.1]

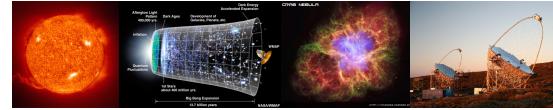


# Erde

<b>Massen [kg]</b>	$6 \cdot 10^{24}$
<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>	5.52
<b>Durchmesser [km]</b>	12700
<b>Abstand zur Sonne [km]</b>	$150 \cdot 10^6$
<b>Umlaufzeit [J]</b>	1.0



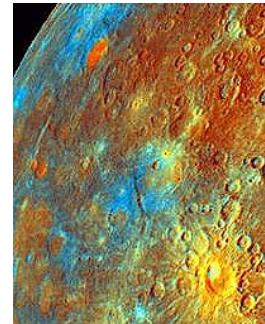
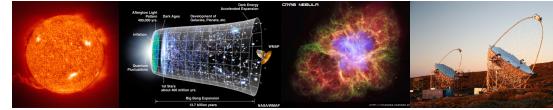
[36.1]



# Mond

<b>Mass [ME]</b>	0.0126
<b>Dichte [<math>\rho_E</math>]</b>	0.6
<b>Durchmesser [DE]</b>	0.27
<b>Abstand zur Erde [km]</b>	400 000
<b>Umlaufzeit [d]</b>	27.3

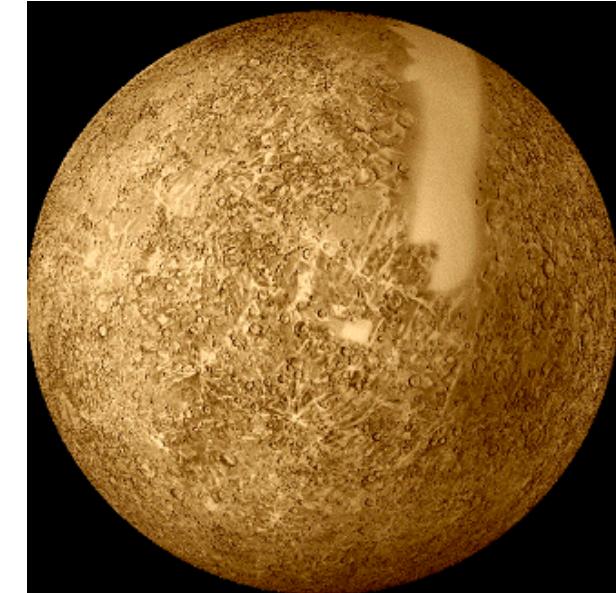




# Merkur

[38.1]

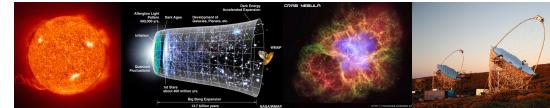
<b>Masse [ME]</b>	0.055
<b>Dichte [<math>\rho E</math>]</b>	0.99
<b>Durchmesser RE</b>	0.38
<b>Abstand [AE]</b>	0.39
<b>Umlaufzeit [J]</b>	0.24



[38.2]

**Keine  
Atmosphäre**

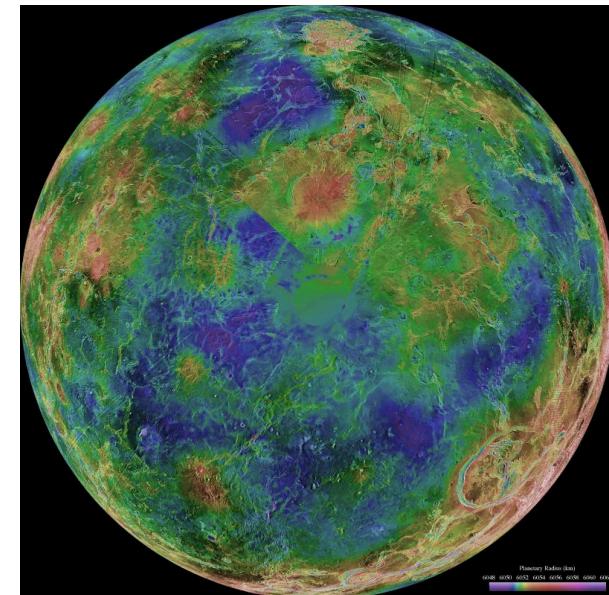
AE: Astronomische Einheit (auch AU: astronomical unit)  
1 AE: mittlerer Abstand zwischen Erde und Sonne



[39.1]

# Venus

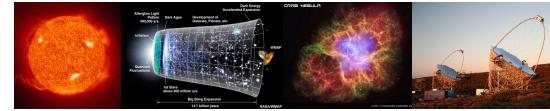
<b>Masse [ME]</b>	0.815
<b>Dichte [<math>\rho E</math>]</b>	0.95
<b>Durchmesser [DE]</b>	0.95
<b>Abstand [AE]</b>	0.72
<b>Umlaufzeit [J]</b>	0.62



[39.2]

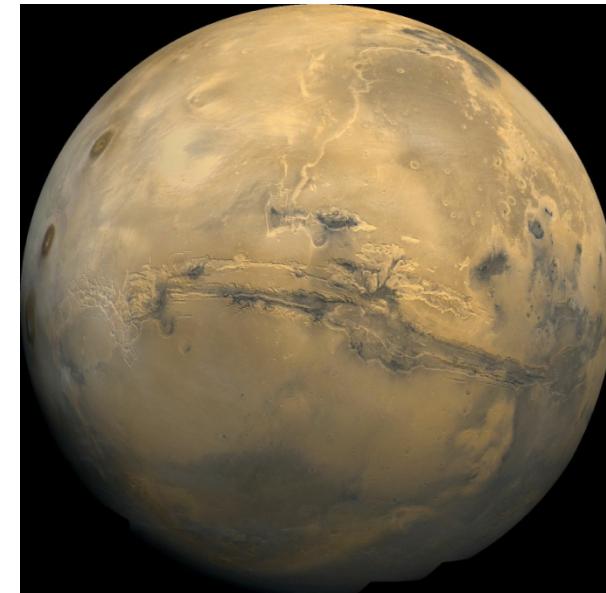
$\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  
Spuren:  $\text{SO}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,

AE: Astronomische Einheit (auch AU: astronomical unit)  
1 AE: mittlerer Abstand zwischen Erde und Sonne



[40.1]

# Mars

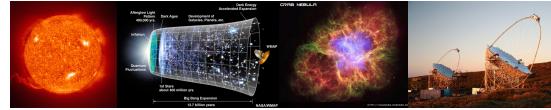


[40.2]

<b>Masse [ME]</b>	0.11
<b>Dichte [<math>\rho E</math>]</b>	0.72
<b>Durchmesser [km]</b>	0.53
<b>Abstand [AE]</b>	1.52
<b>Umlaufzeit [J]</b>	1.88

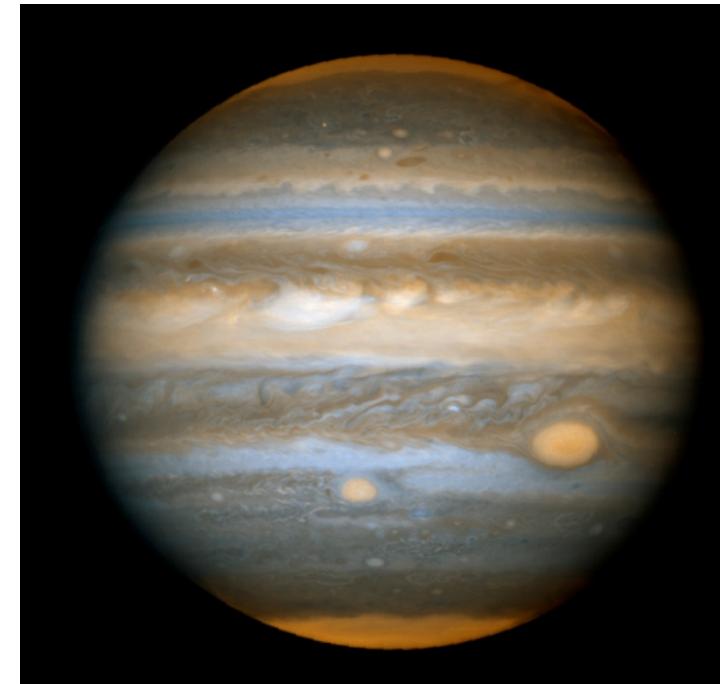
CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, Ar

AE: Astronomische Einheit (auch AU: astronomical unit)  
1 AE: mittlerer Abstand zwischen Erde und Sonne

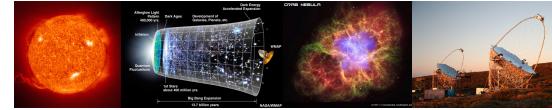


# Jupiter

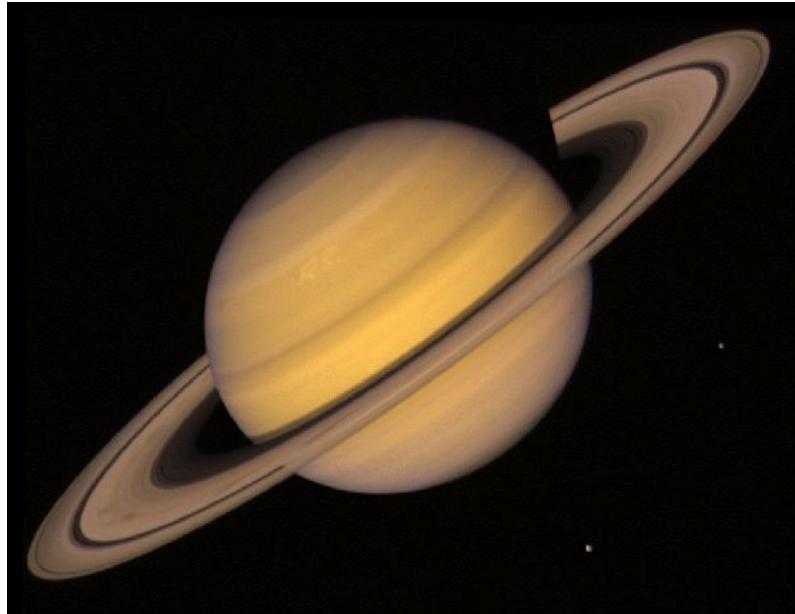
<b>Masse [ME]</b>	318
<b>Dichte [<math>\rho_E</math>]</b>	0.24
<b>Durchmesser [DE]</b>	11
<b>Abstand [AE]</b>	5.2
<b>Umlaufzeit [J]</b>	11.86



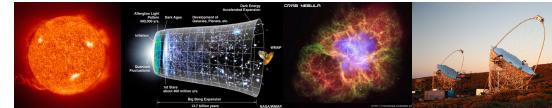
[41.1]



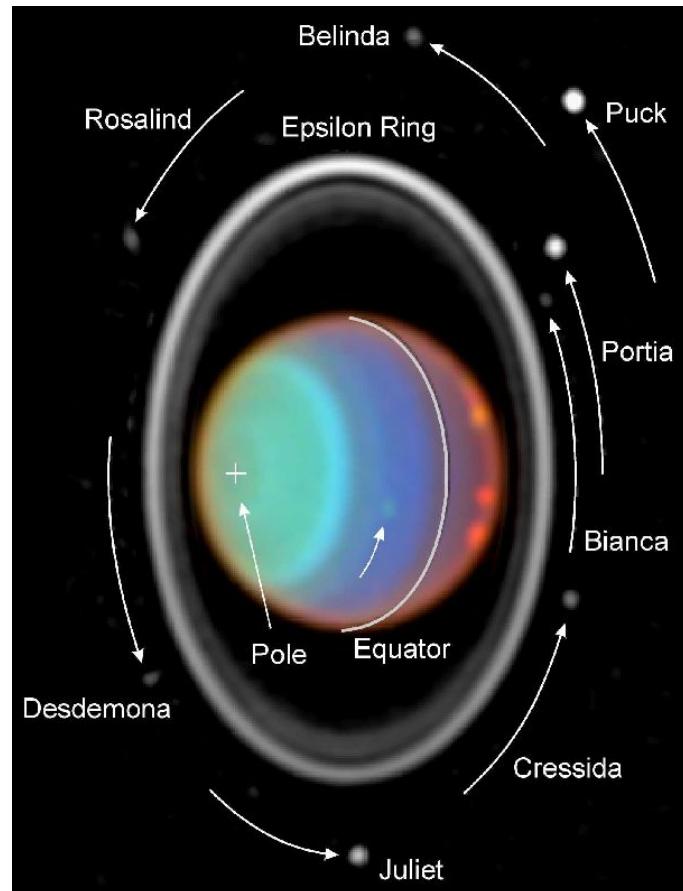
# Saturn



<b>Masse [ME]</b>	95.2
<b>Dichte [<math>\rho E</math>]</b>	0.13
<b>Durchmesser [DE]</b>	9
<b>Abstand [AE]</b>	9.54
<b>Umlaufzeit [J]</b>	29.42

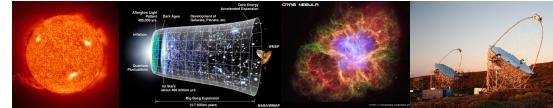


# Uranus



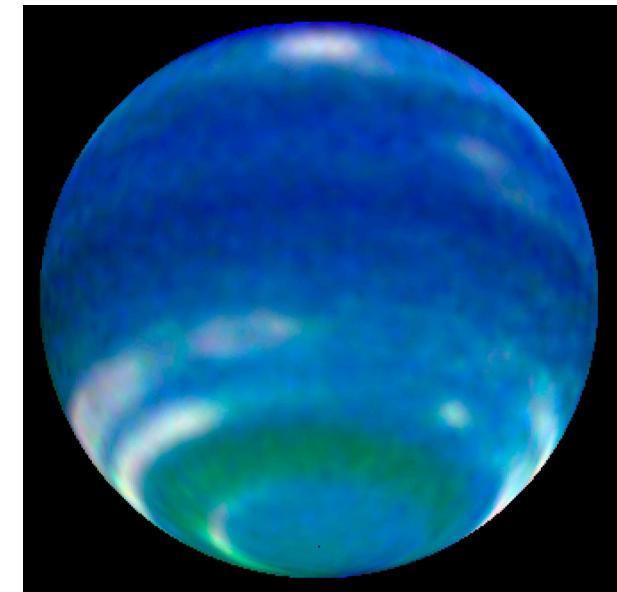
[43.1]

<b>Masse [ME]</b>	14.5
<b>Dichte [<math>\rho E</math>]</b>	0.24
<b>Durchmesser [DE]</b>	4
<b>Abstand [AE]</b>	19.3
<b>Umlaufzeit [J]</b>	83.75

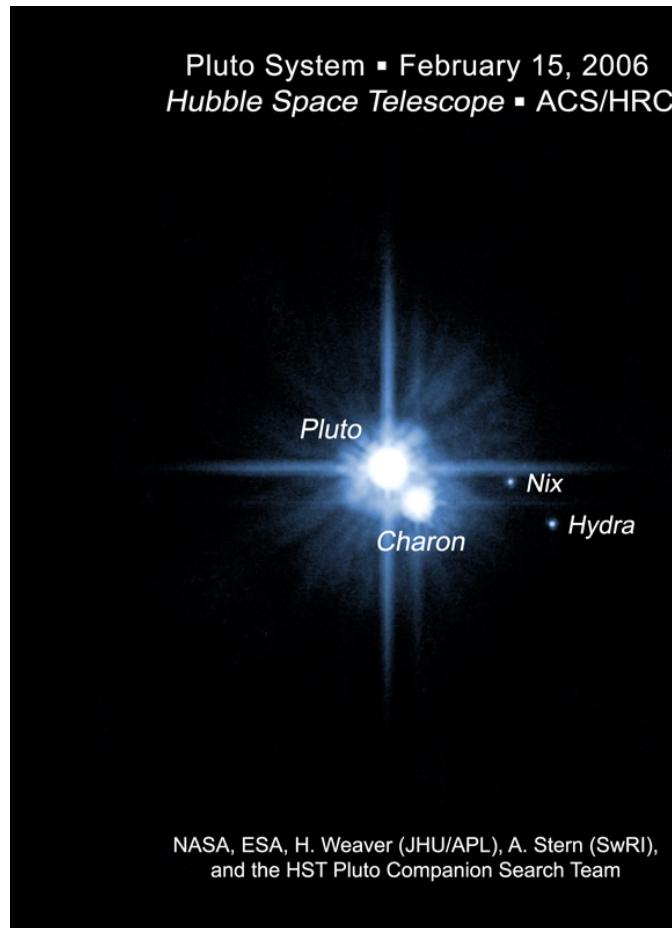
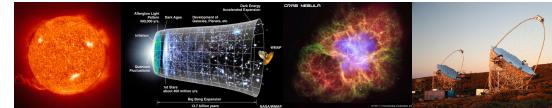


# Neptun

<b>Masse [ME]</b>	17.2
<b>Dichte [<math>\rho</math>E]</b>	0.32
<b>Durchmesser [DE]</b>	3.8
<b>Abstand [AE]</b>	30.2
<b>Umlaufzeit [J]</b>	163.7



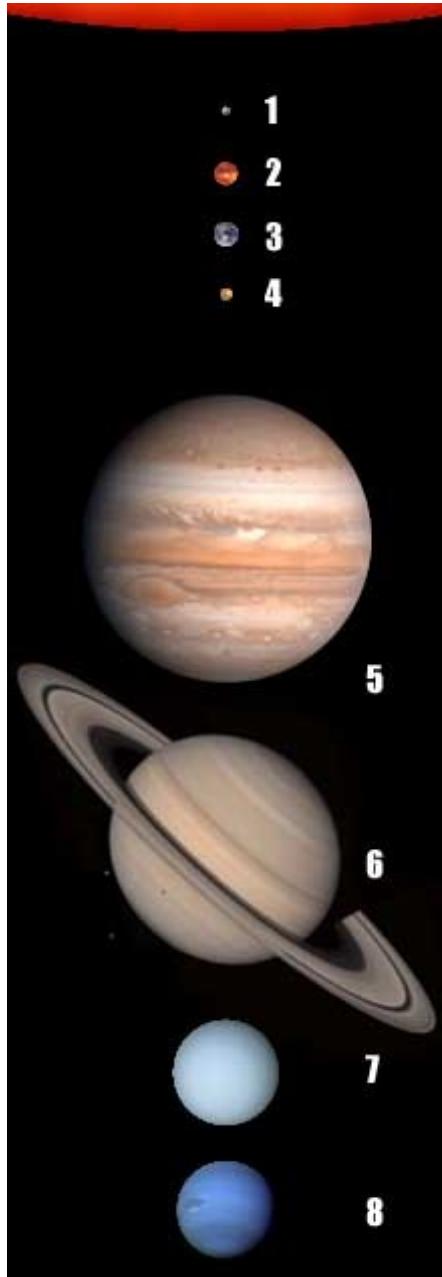
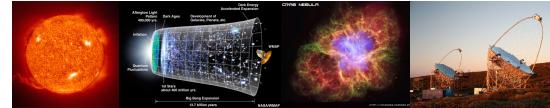
[44.1]



[45.1]

# Pluto

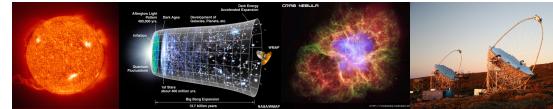
<b>Masse [ME]</b>	0.002
<b>Dichte [<math>\rho_E</math>]</b>	0.32
<b>Durchmesser [DE]</b>	0.19
<b>Abstand [AE]</b>	39.84
<b>Umlaufzeit [J]</b>	248



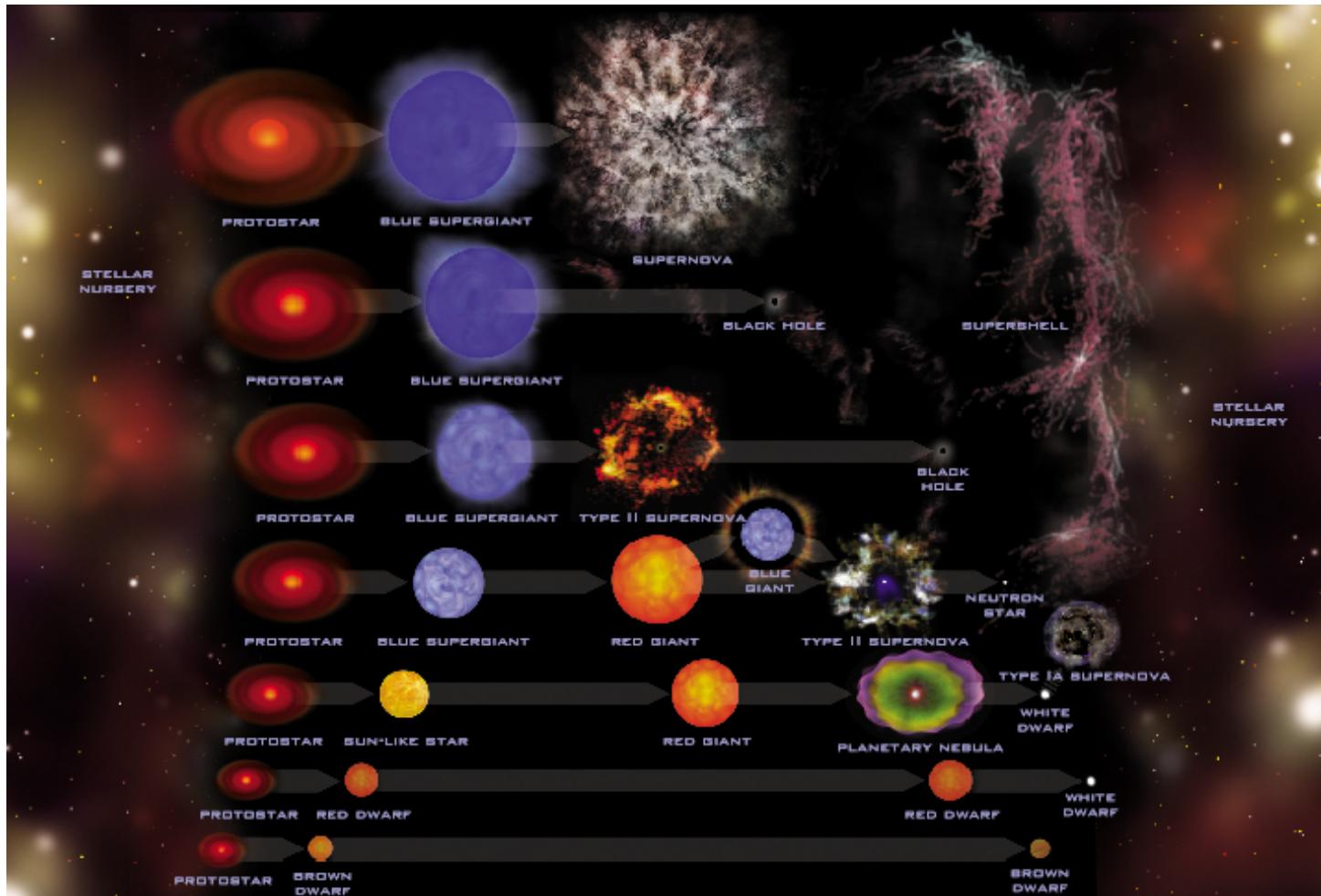
# Planeten im Vergleich

- Erdähnliche Planeten:  
**Merkur Venus Erde Mars**
- Gasriesen:  
**Jupiter Saturn Uranus Neptun**

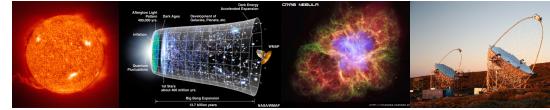




# Sterne - Aufbau und Entwicklung

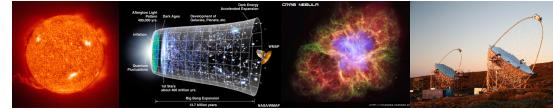


[48.1]



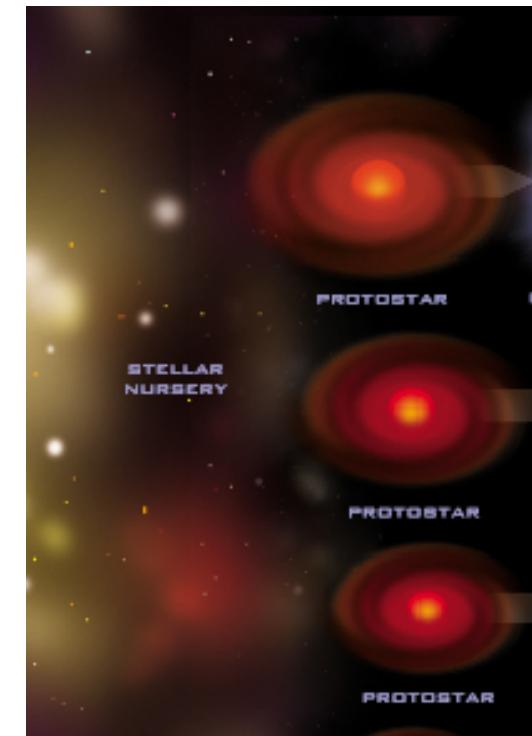
# Sterne

- Kernfusionsreaktor:  
Im Zentrum lassen der hohe Druck und die hohe Temperatur z.B. Wasserstoffkerne zu Helium verschmelzen.
- Energietransport nach außen:  
Die entstehende Wärme wird in Form von Photonen nach außen transportiert (Strahlungsdruck)
- In stabilen Sternen bilden Gravitation und Strahlungsdruck das “Hydrostatische Gleichgewicht”

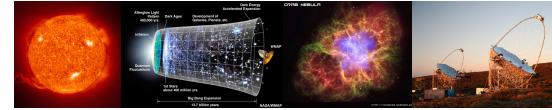


# Entstehung von Sternen: Interstellare Materie

- Raum aus Gas- und Staubwolken
- Zusammensetzung:  $\sim 76\%$  H;  $23\%$  He
- Es befindet sich 10x mehr Masse in der IM als in allen Sternen zusammen

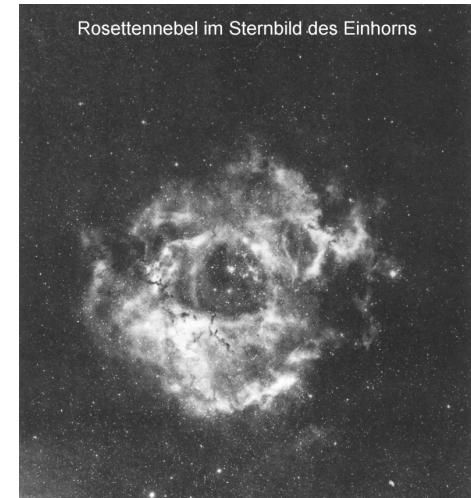


[49.1]



# Interstellare Materie

- Eigenschaften:
  - Sehr geringe Dichte  
(besser als jedes herstellbare Vakuum)
  - Sehr großes Volumen  
(→ riesige Ausdehnung der Wolken)



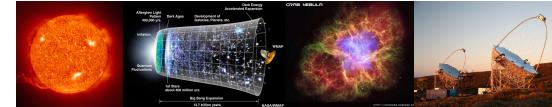
[50.1]

- Besondere Beispiele der interstellaren Materie
  - Helle Wolken (durch benachbarte Sterne zum Leuchten angeregt)
  - Dunklen Wolken (weitgehende Absorption des Lichts von Sternen hinter den Wolken)



Pferdekopfnebel im Sternbild des Orion

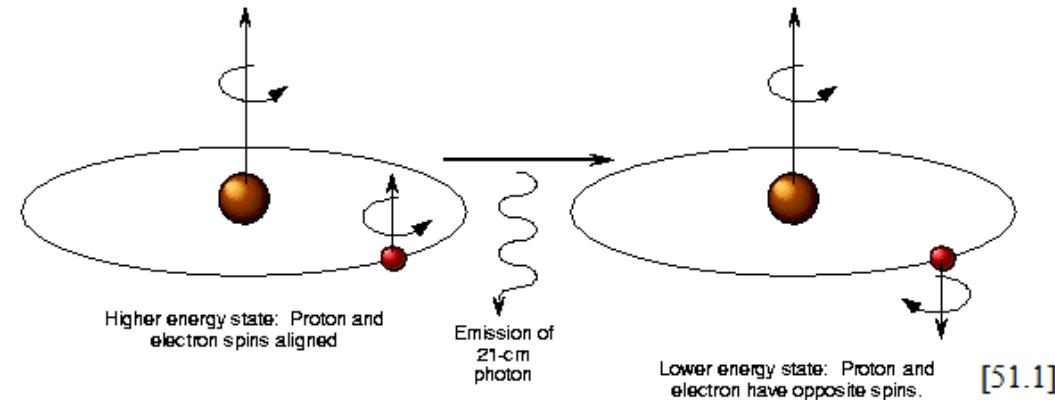
[50.2]



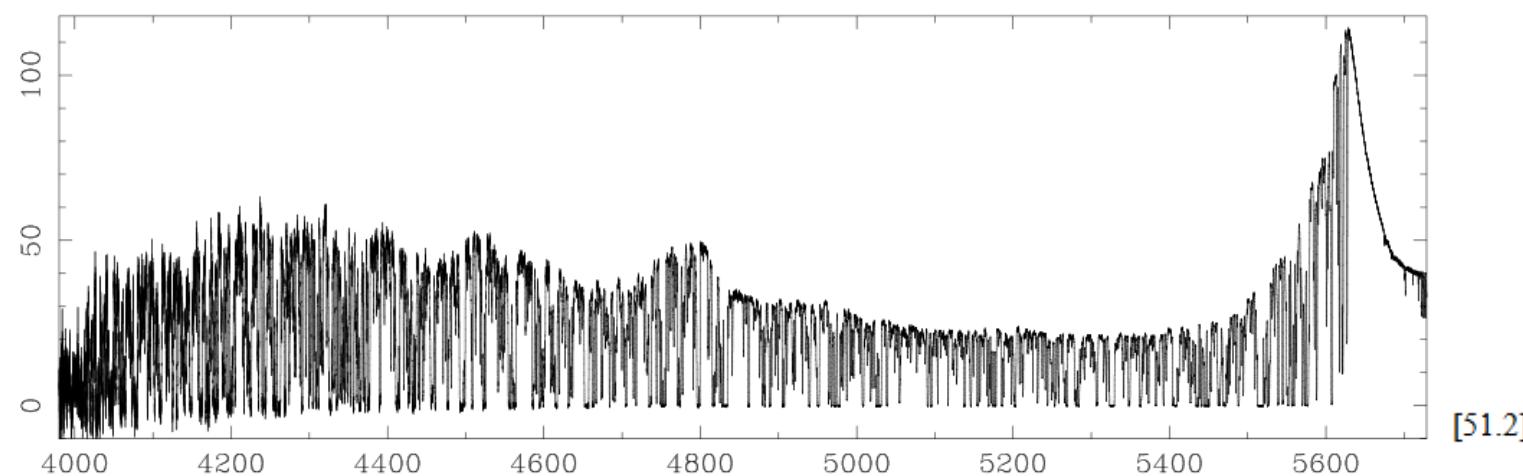
# Interstellare Materie

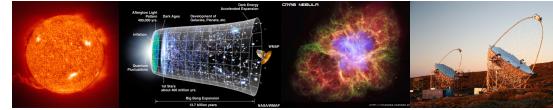
- Direkter Nachweis:  
21 cm Wasserstoff–Linie

Formation of the 21-cm Line of Neutral Hydrogen

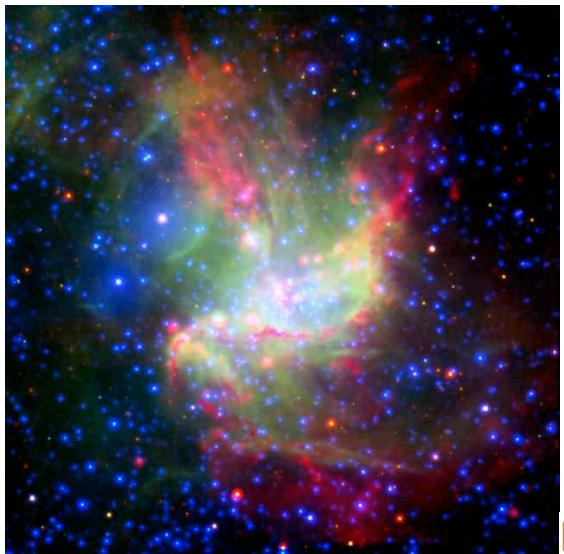


- Indirekter Nachweis:  
Lyman–Alpha–Wald (Absorptionslinien in Quasarspektren)





# Entstehung von Sternen



Dichte- und Schockwellen  
in der interstellaren Materie können  
einen Kollaps der Materie verursachen

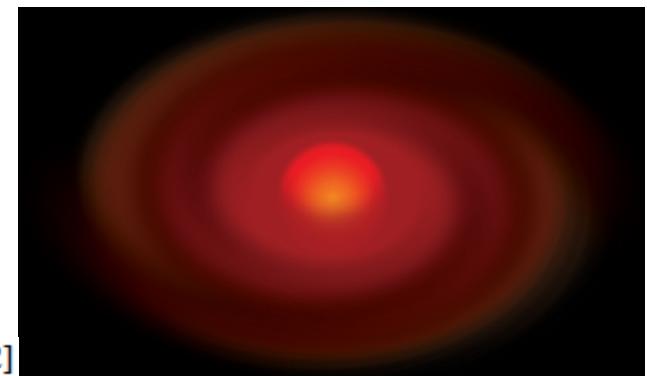
- ⇒ Anstieg des Drucks
- und damit der Temperatur
- ... Strahlungsverluste
- ... Kollaps zum **Protostern**

[52.1]

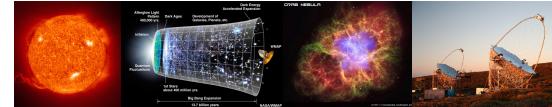
Sobald  $p$  und  $T$  groß genug und Masse ausreichend groß  
(Energie größer als Coulomb-Abstoßung zwischen den H-Kernen)

⇒ Zündung des H-Brennens

⇒ Phase der Einstellung des Gleichgewichts  
von Gravitation, Temperatur und Strahlung



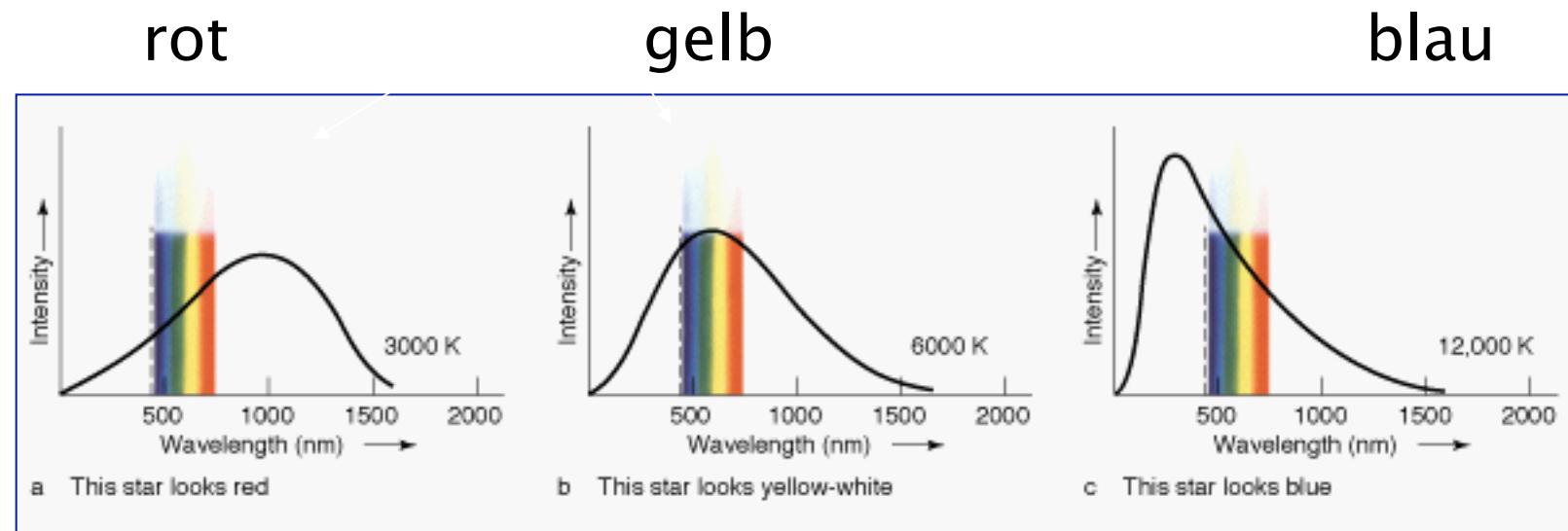
[52.2]

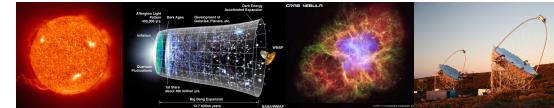


# Sterne als Strahler

- Schwarzkörper-Spektrum
- Wiensches Verschiebungsgesetz:  $\lambda_{\max} \sim \frac{1}{T}$
- Sternfarbe hängt von der Temperatur ab
- Farbmessung durch Farbfilter

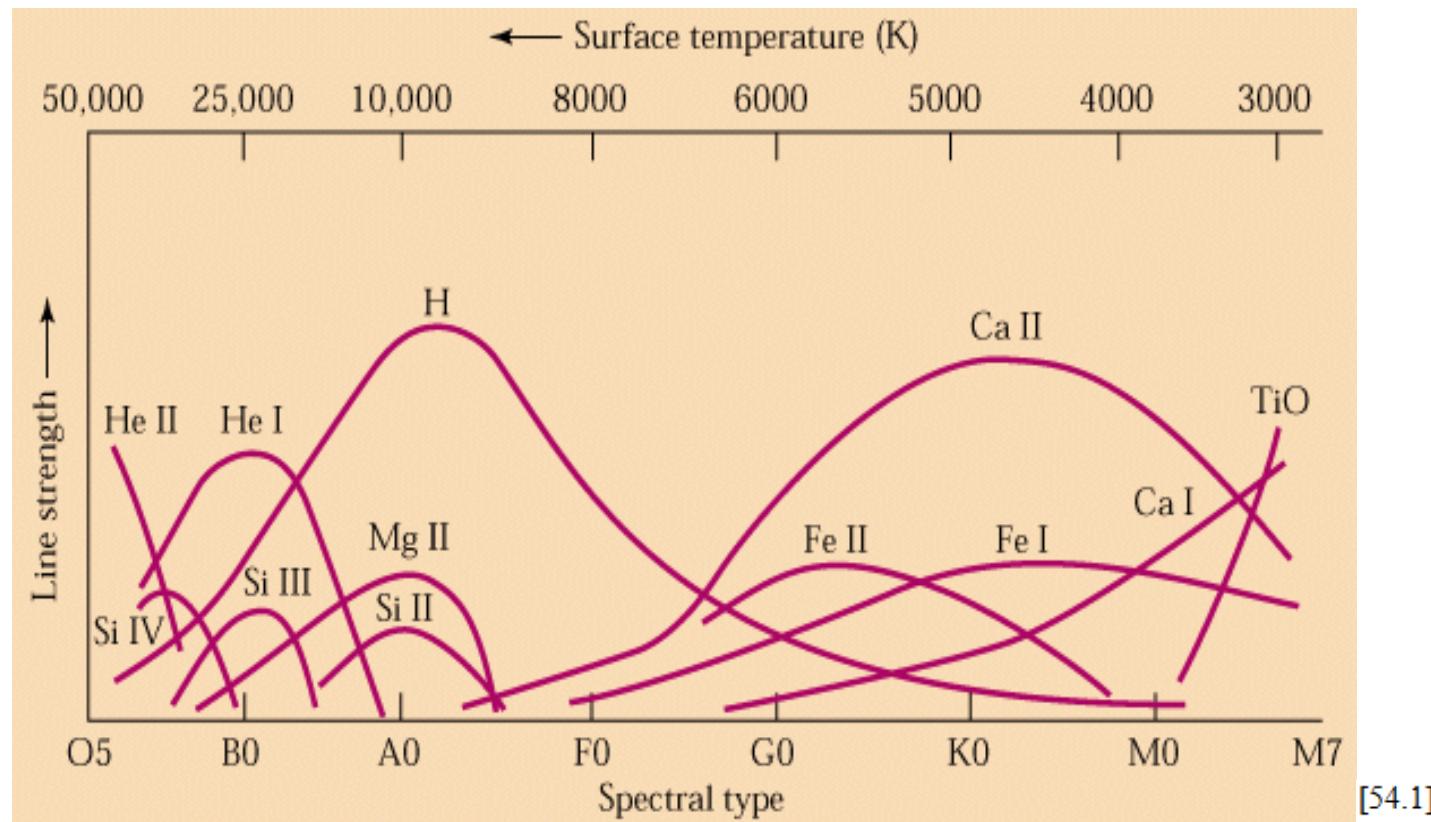
## Sternspektrum



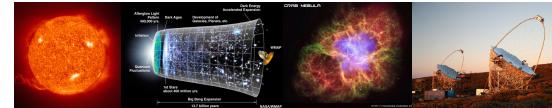


# Sterneigenschaften: Spektren

Temperatur (und chemische Zusammensetzung) beeinflussen welche Linien in welcher Stärke optisch sichtbar sind.

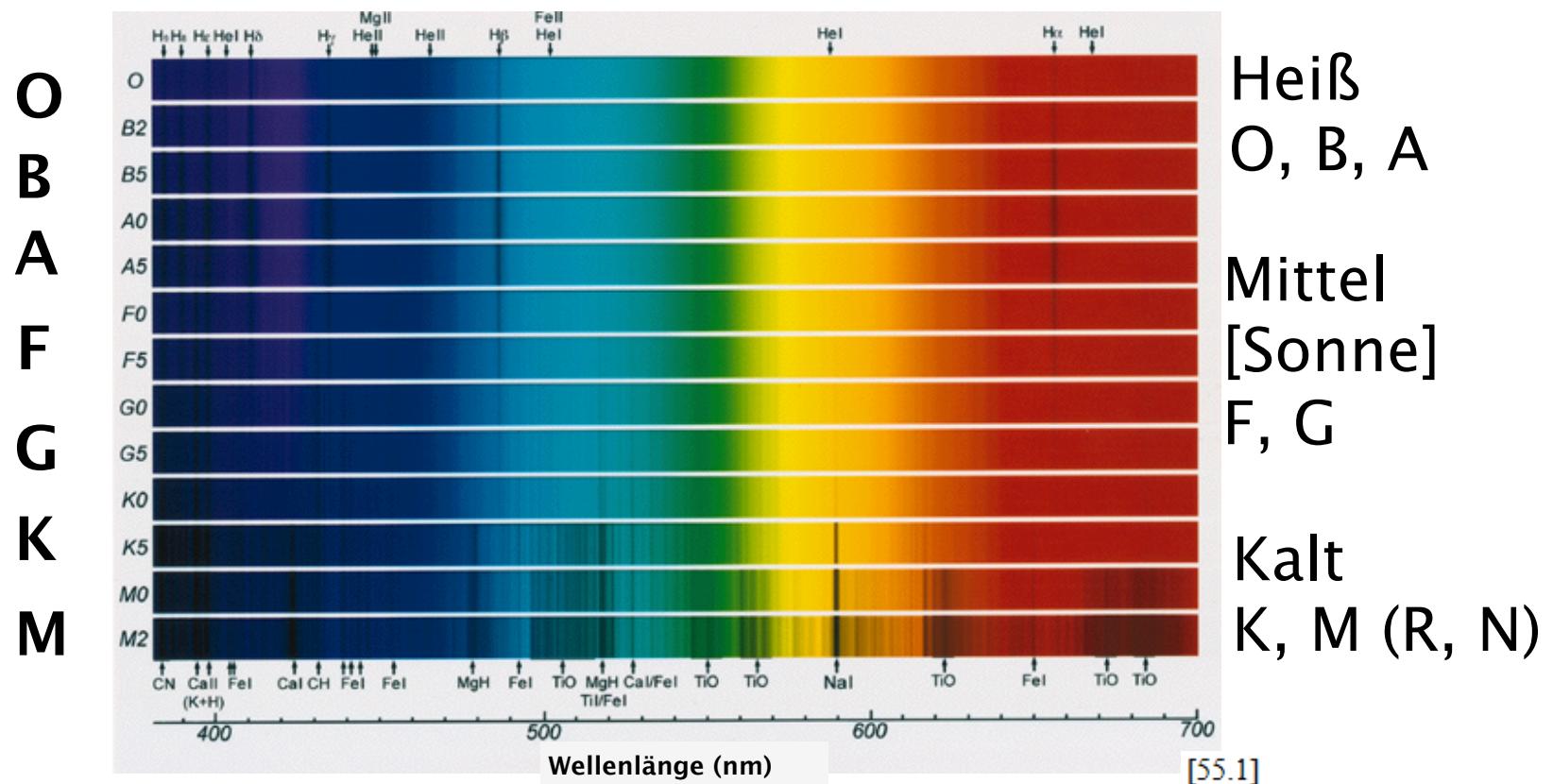


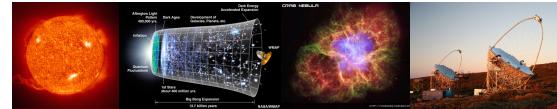
[54.1]



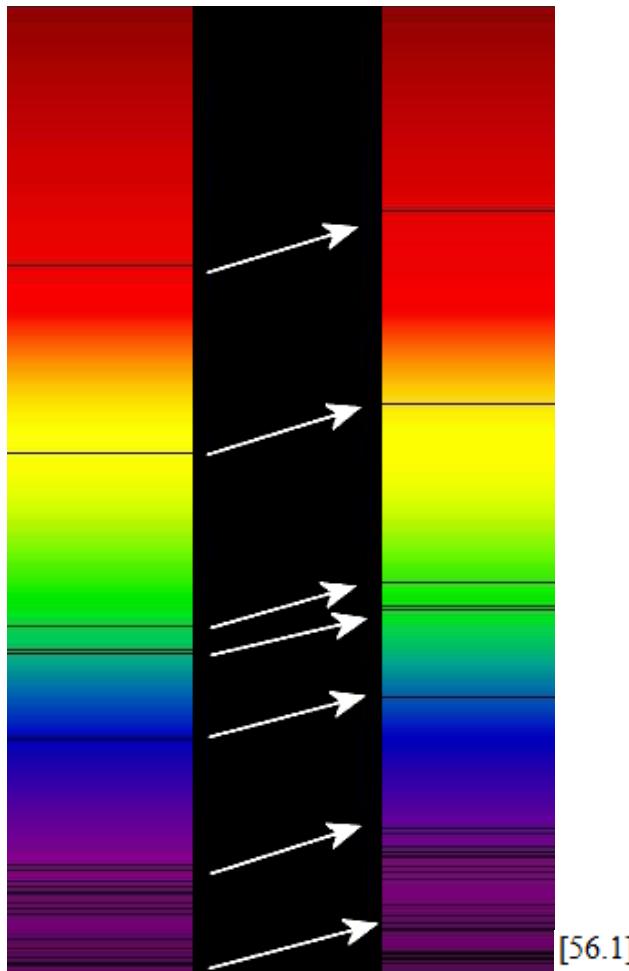
# Sterneigenschaften: Spektren

Oberflächentemperatur (und chemische Zusammensetzung) beeinflussen welche Linien in welcher Stärke optisch sichtbar sind.





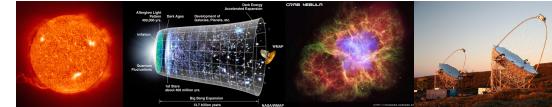
# Sterneigenschaften: Spektren



-> Geschwindigkeitsmessung  
durch Rotverschiebung z:

$$z = \frac{\lambda_{beob} - \lambda_{ruhe}}{\lambda_{ruhe}}$$
$$= \sqrt{\frac{1 + v_{rad} / c}{1 - v_{rad} / c}} - 1$$

**Sonne – Galaxienhaufen BAS11**



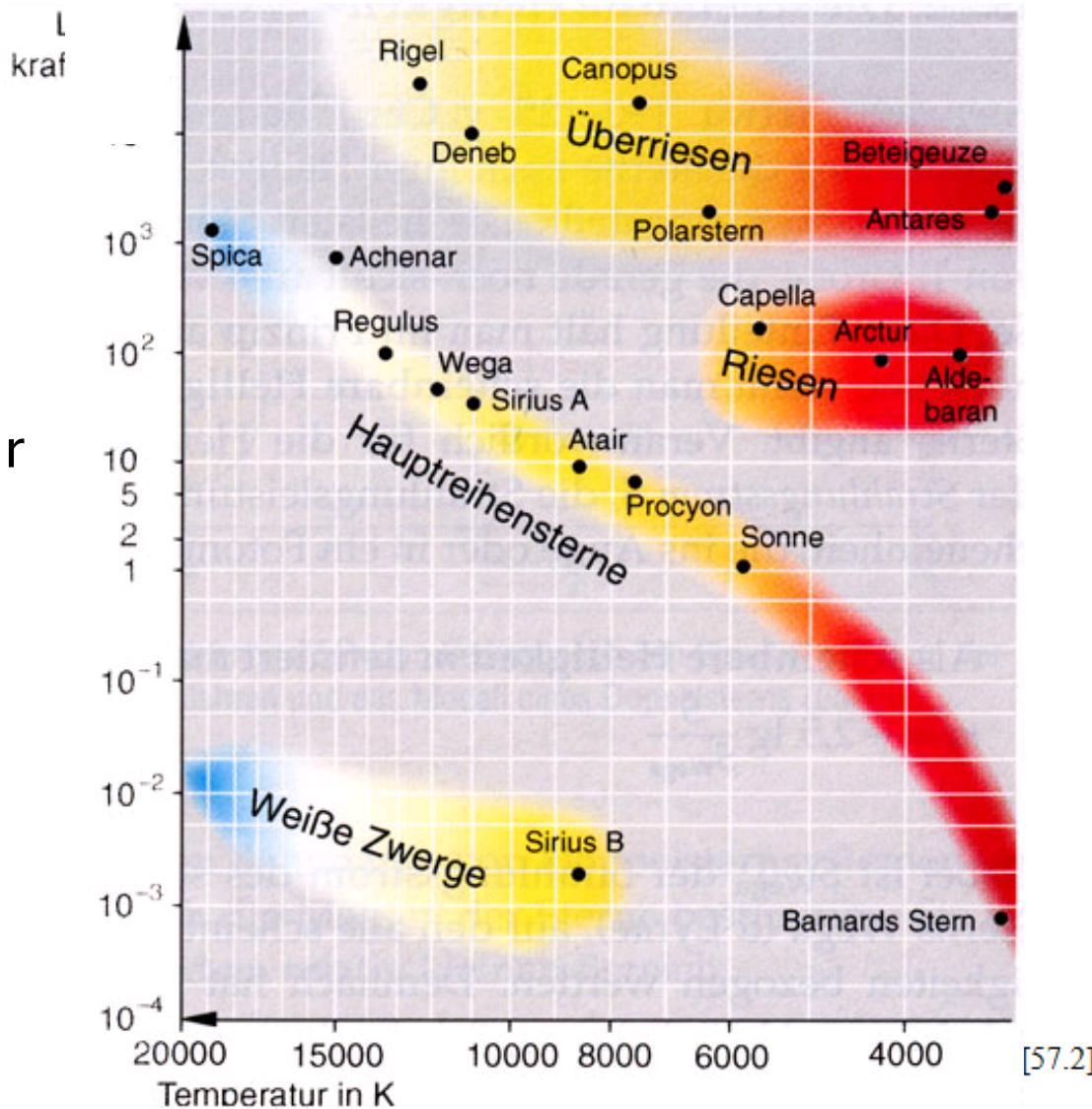
# Hertzsprung-Russell Diagramm

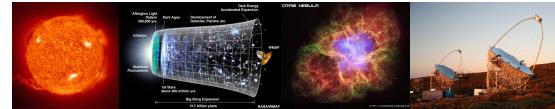
Klassifizierung  
der Sterne:

Luminosität gegen  
Farbe bzw.  
Oberflächentemperatur  
(Farbe ~ Temperatur)

L vs. T

Temperatur/Farbe  
-> Spektralklassen





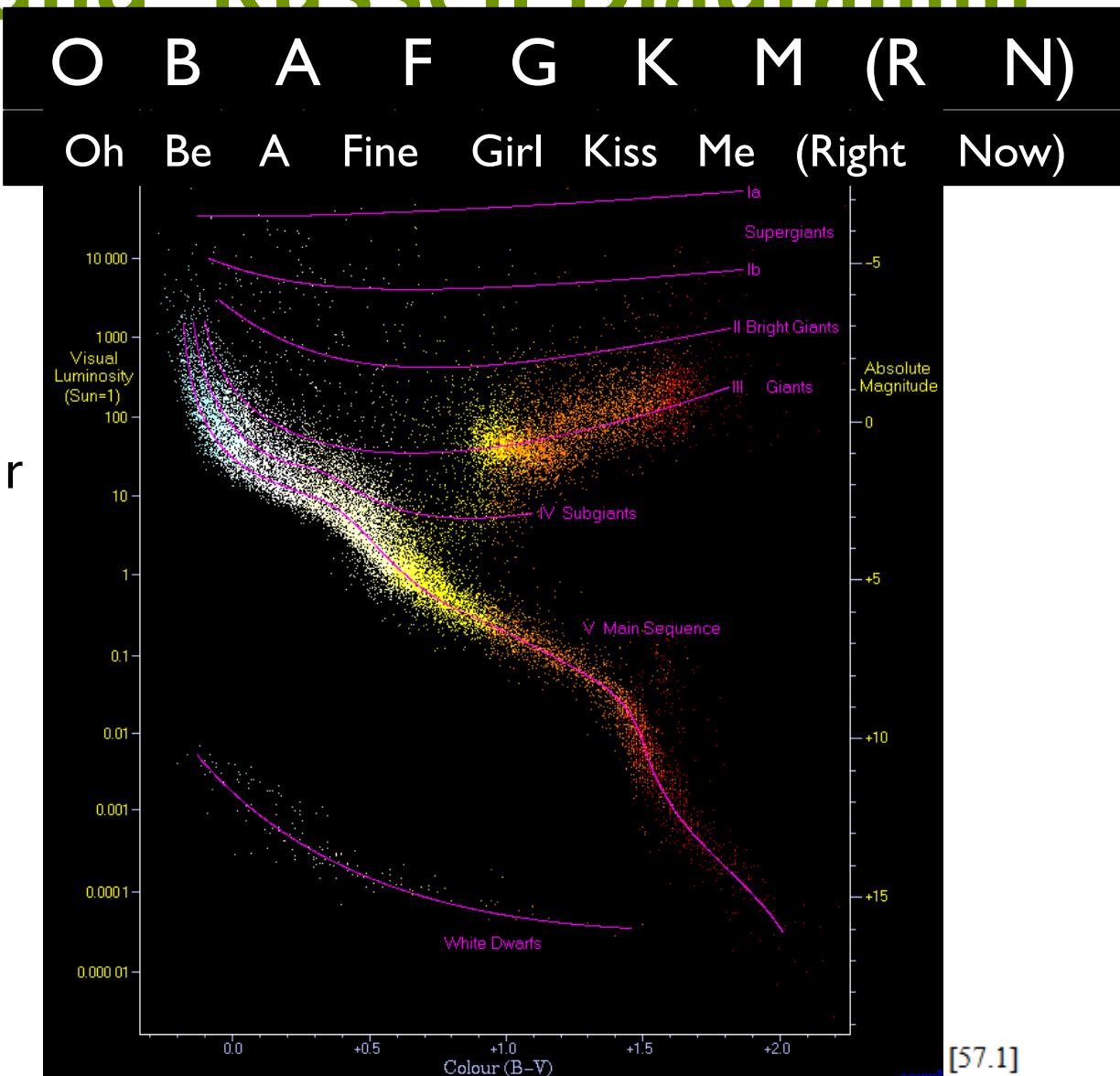
# Hertzsprung-Russell Diagramm

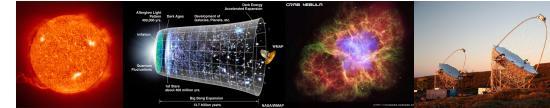
Klassifizierung  
der Sterne:

Luminosität gegen  
Farbe bzw.  
Oberflächentemperatur  
(Farbe  $\sim$  Temperatur)

$L$  vs.  $T$

Temperatur/Farbe  
-> Spektralklassen





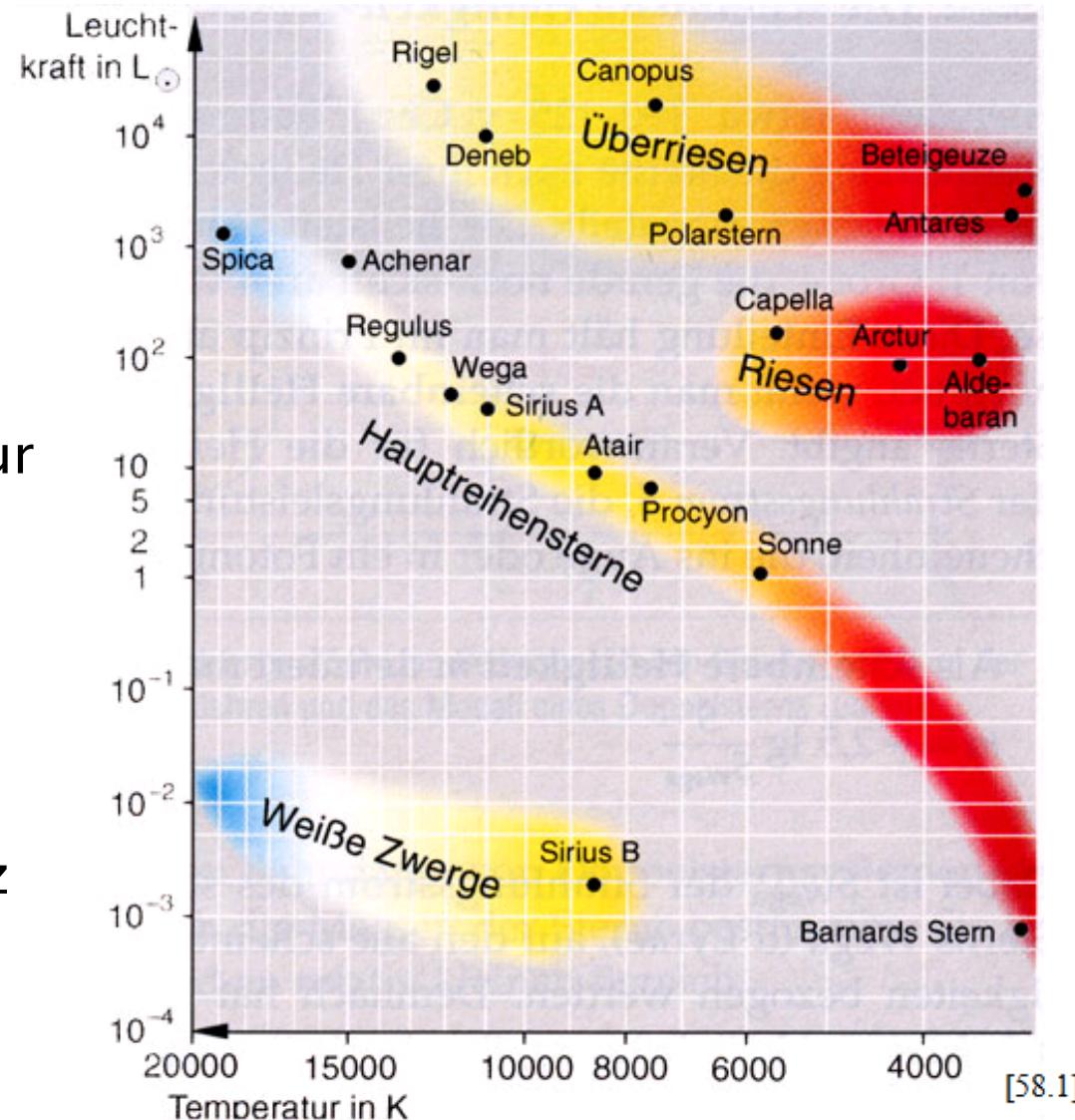
# Hertzsprung-Russell Diagramm

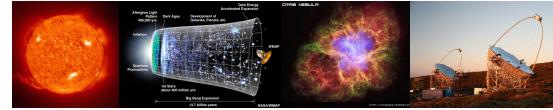
Klassifizierung  
der Sterne:

Luminosität gegen  
Farbe bzw.  
Oberflächentemperatur  
(Farbe  $\sim$  Temperatur)

$L$  vs.  $T$

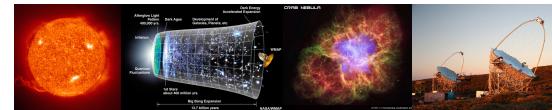
Sterne verbringen den  
Großteil ihrer Existenz  
auf der “Hauptreihe”





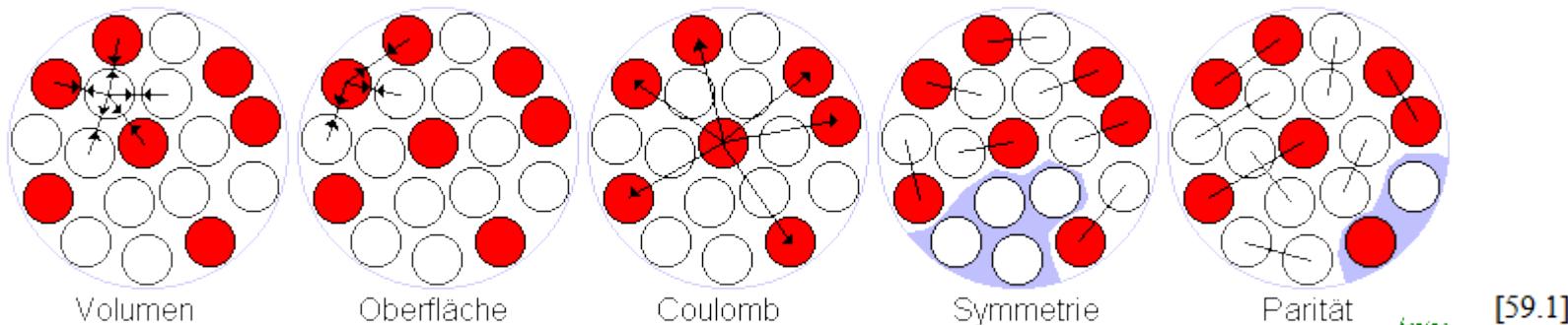
# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

Energiegewinnung: Fusionsprozess im Zentrum des Sterns:  $\rightarrow$  He  
("Wasserstoffbrennen")



# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

## Bindungsenergie: Bethe–Weizsäcker–Formel

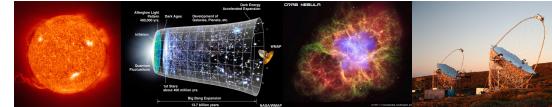


$$E_{\text{Bindung}} = E_{\text{Volumen}} - E_{\text{Oberfläche}} - E_{\text{Coulomb}} - E_{\text{Symmetrie}} \pm E_{\text{Paarbildung}}$$

$$E_{\text{Bindung}} = a_V \cdot A - a_O \cdot A^{\frac{2}{3}} - a_C \cdot Z(Z-1)A^{-\frac{1}{3}} - a_S \cdot \frac{(N-Z)^2}{4}A^{-1} + \begin{cases} +a_P \cdot A^{-\frac{1}{2}} & \text{für gg – Kerne} \\ 0 & \text{für ug und gu – Kerne} \\ -a_P \cdot A^{-\frac{1}{2}} & \text{für uu – Kerne} \end{cases}$$

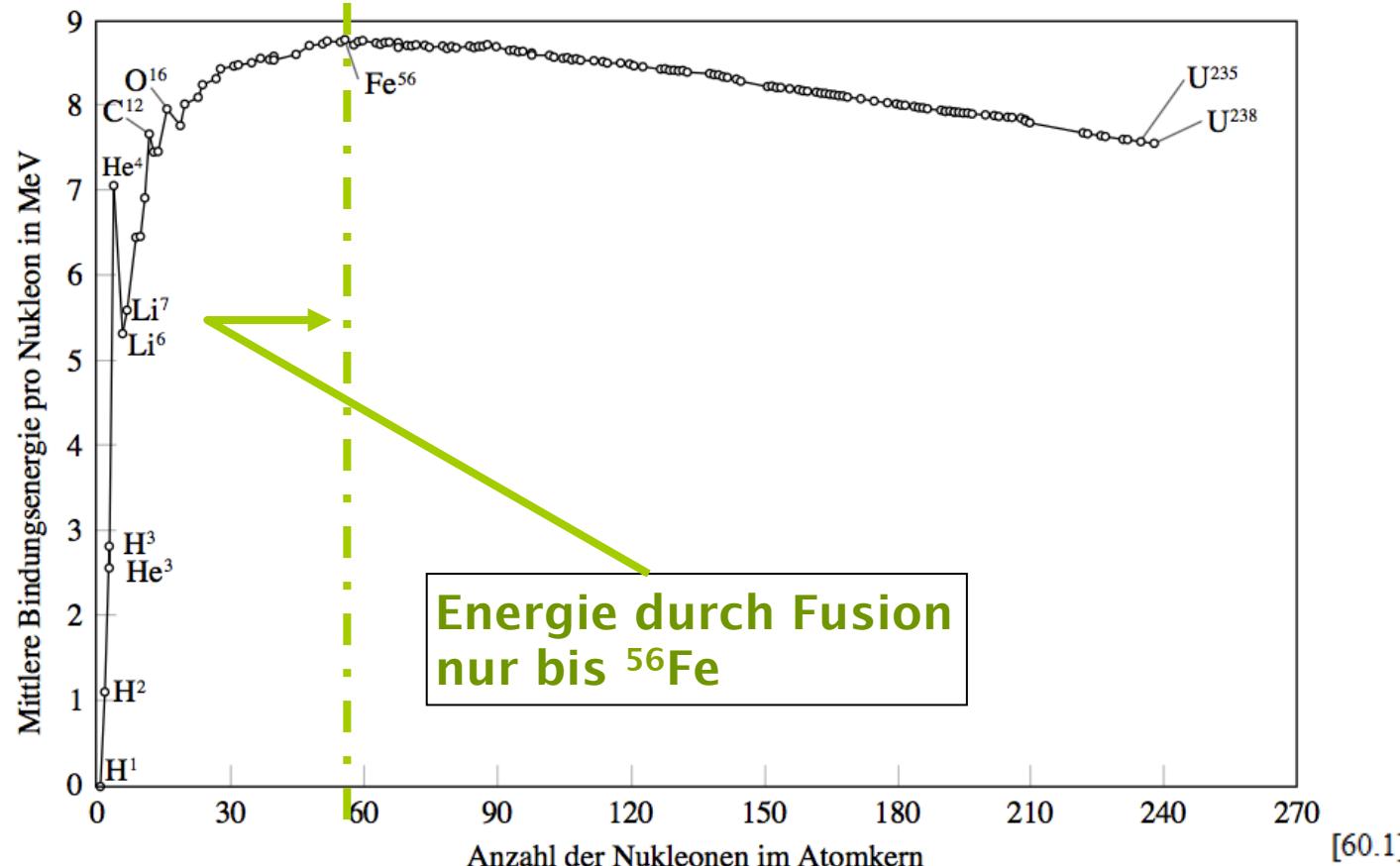
Durch Paarbildung von Nukleonen unterschiedlicher Spins sind Kerne mit geraden Nukleonenzahlen stabiler als mit ungeraden.

- gerade Protonenzahl Z und Neutronenzahl N (gg-Kerne): Bindung fest
- ungerades Z und N (uu-Kerne) : Bindung schwach
- restliche Kerne (ug-Kerne) : Bindung mittel

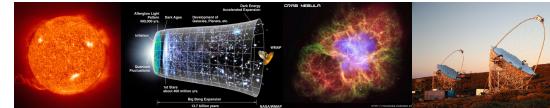


# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

Bindungsenergie der Elemente



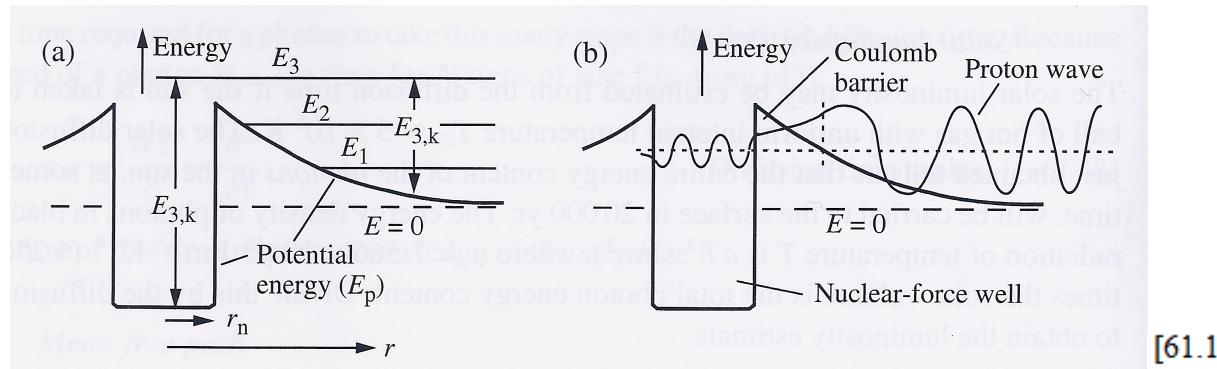
Fusion schwererer Elemente energetisch deutlich  
ineffizienter als Wasserstoffbrennen  $\Rightarrow$  kürzere Lebensphasen



# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

Energiegewinnung: Fusionsprozess im Zentrum des Sterns:  $\rightarrow$  He  
("Wasserstoffbrennen")

Protonen müssen Coulomb-Barriere überwinden:

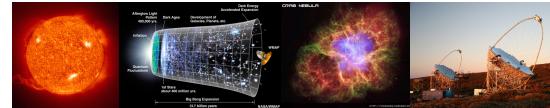


[61.1]

-> Energiegewinn durch frei werdende Bindungsenergie

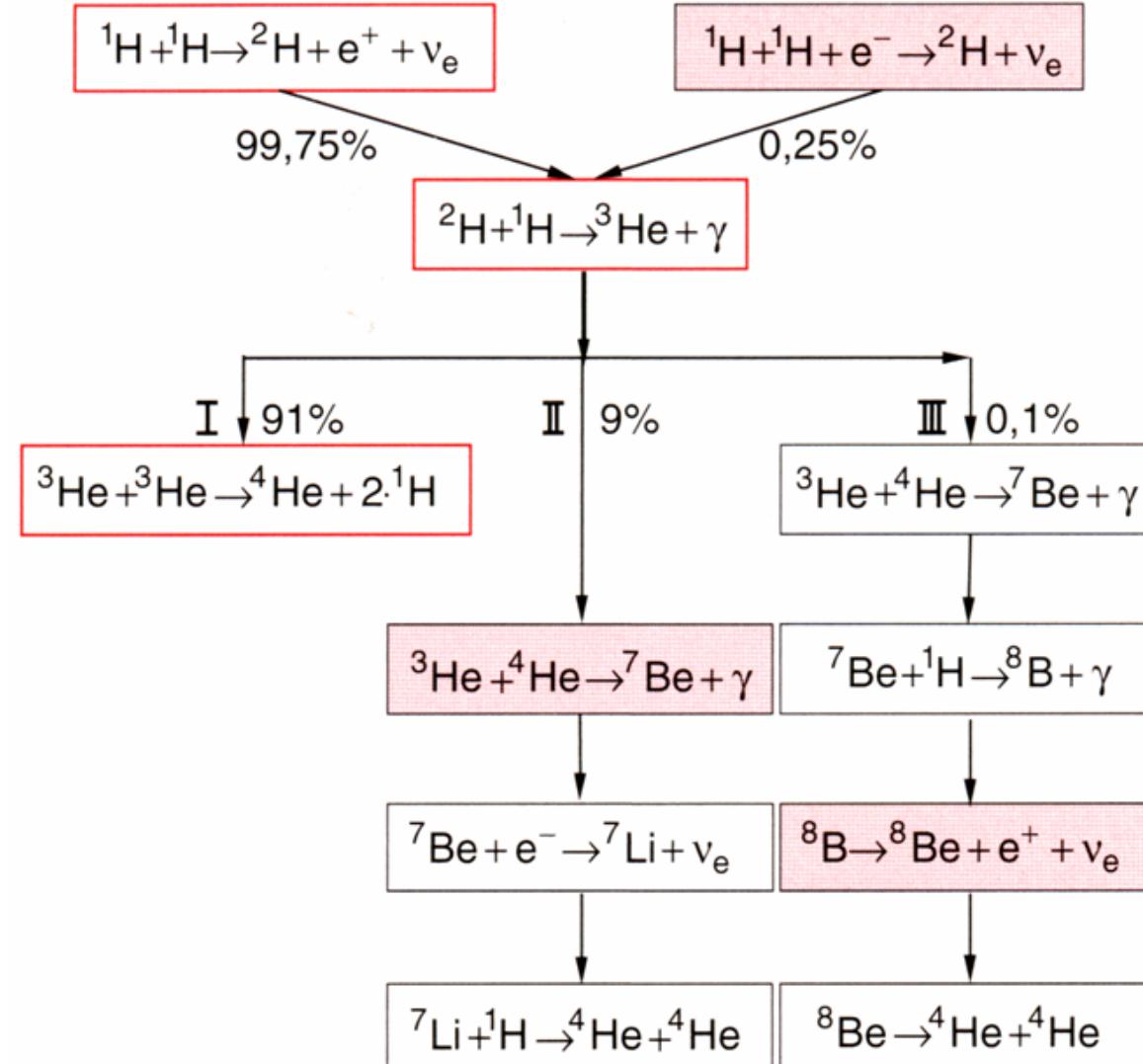
Reaktionsabläufe:

- pp Kette
- CNO Zyklus



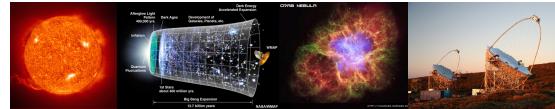
# Fusionsprozess:

## pp-Kette

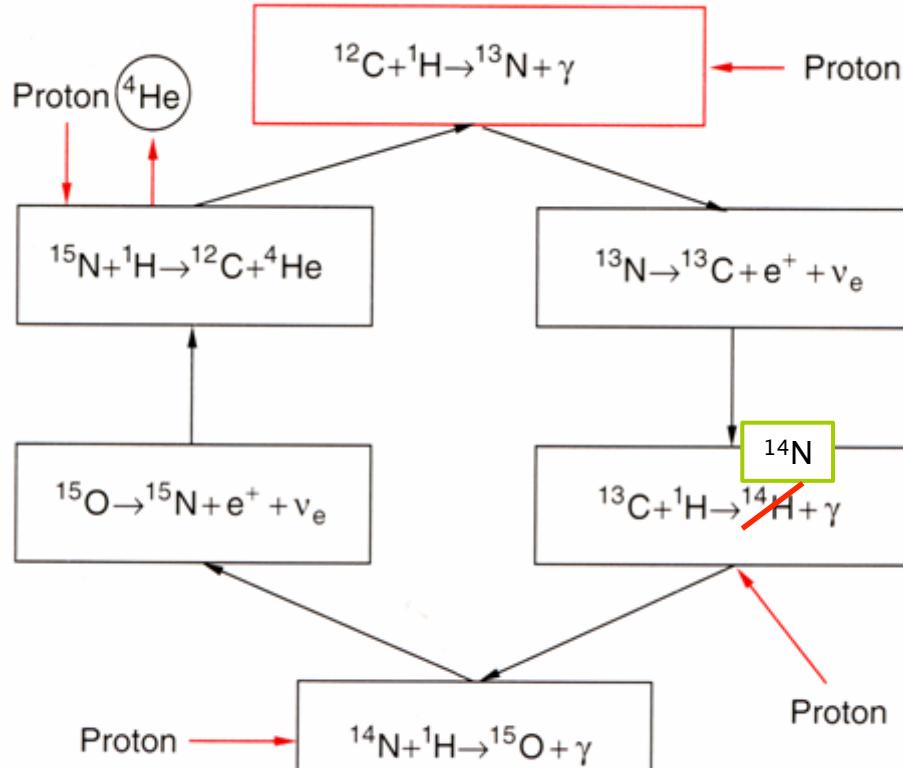


Die p-p-Fusionskette. Alle Reaktionsschritte, bei denen Neutrinos entstehen, sind rot hervorgehoben

[62.1]

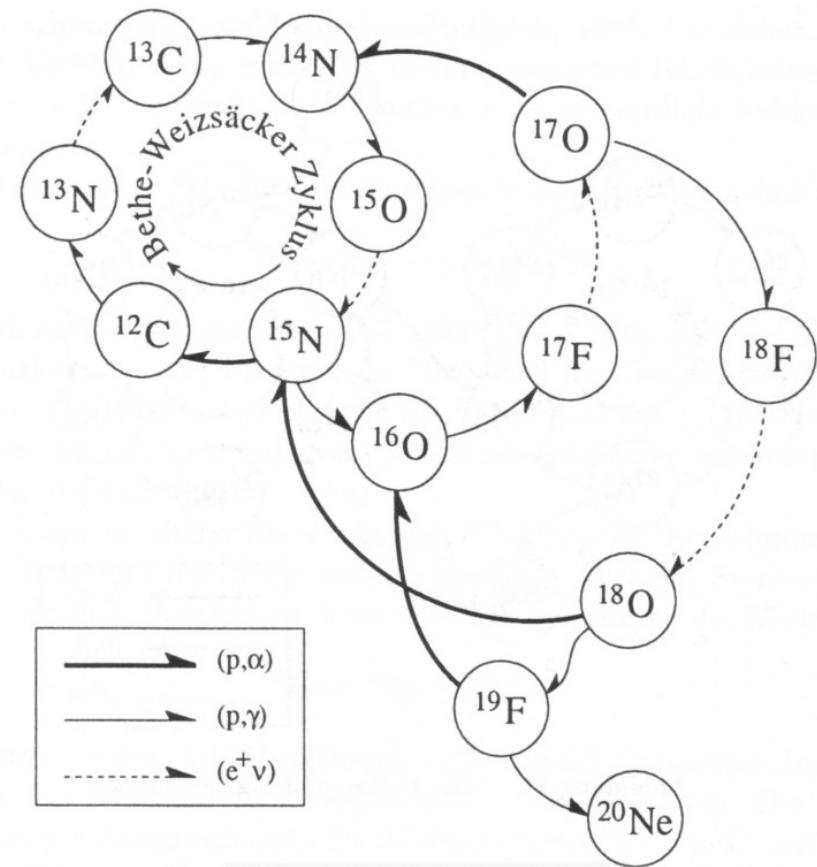


# CNO-Zyklus



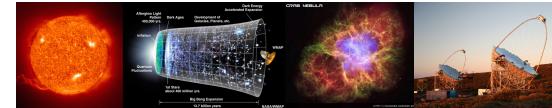
Der CNO-Zyklus

[63.1]



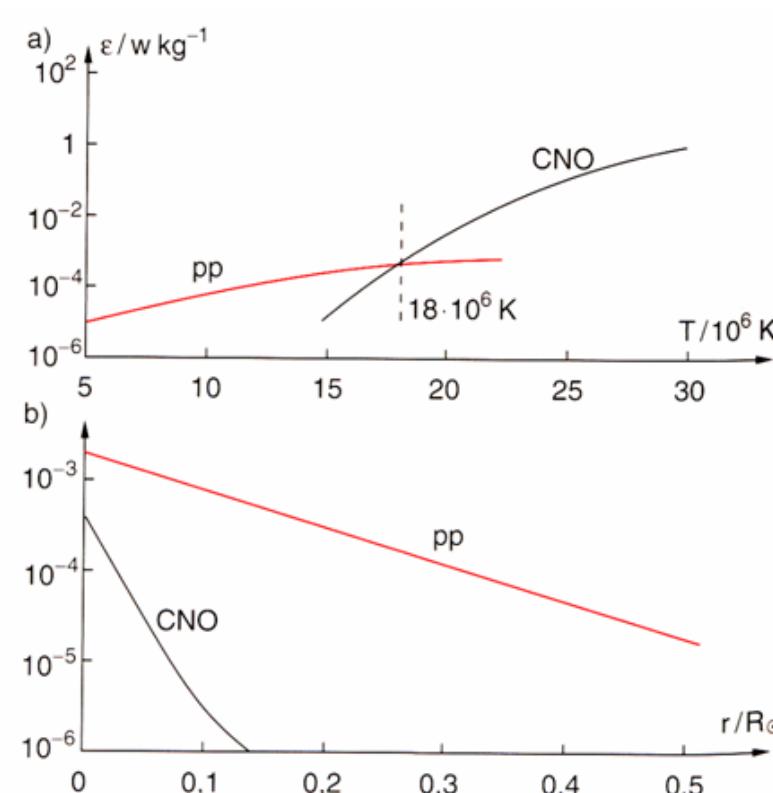
Der CNO-Zyklus

[63.2]

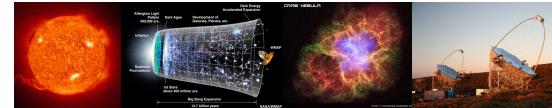


# Massenabhängigkeit der Energiegewinnung von Hauptreihensternen

pp-Kette vs. CNO-Zyklus



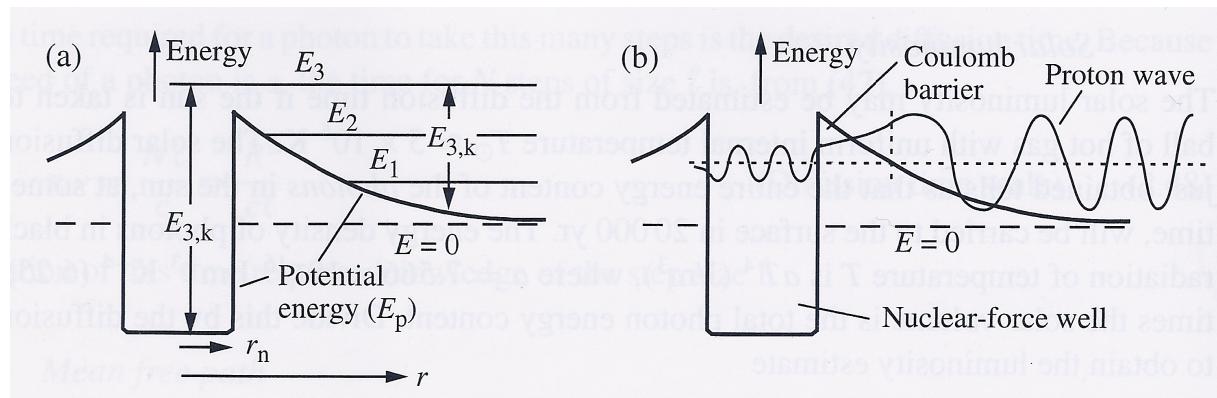
(a) Temperaturabhängigkeit der spezifischen Energieerzeugung bei der p-p-Fusionskette und dem CNO-Zyklus. (b) Spezifische Energieerzeugung in der Sonne durch beide Prozesse als Funktion des Mittelpunktabstandes  $r/R_\odot$  [64.1]



# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

Energiegewinnung: Fusionsprozess im Zentrum des Sterns:  $\rightarrow$  He  
("Wasserstoffbrennen")

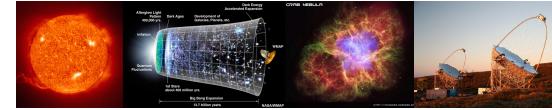
Protonen müssen Coulomb-Barriere überwinden:



-> Energiegewinn durch frei werdende Bindungsenergie

Reaktionsabläufe:

- pp Kette
- CNO Zyklus

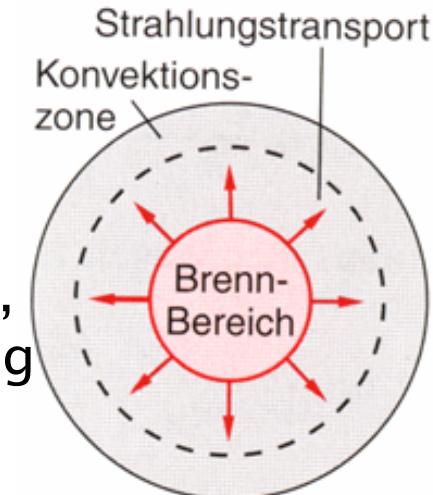


# Energiegewinnung und -transport in Hauptreihensternen

Energiegewinnung: Fusionsprozess im Zentrum des Sterns:  $H \rightarrow He$   
("Wasserstoffbrennen")

Energietransport nach außen:

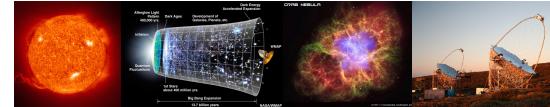
- radiativ: Absorption und (Re-)Emission von Photonen auf dem Weg durch das Sterninnere nach außen ( $\sim 1$  Mio y)
- konvektiv: Aufstieg von Blasen aus heißem Gas, die nach Abkühlen durch Abstrahlung an der Oberfläche wieder sinken



$0,25 M_{\odot} < M < 1,5 M_{\odot}$

[66.1]

Bedingung für Konvektion:  
Hoher Temperaturgradient  $\frac{dT}{dr}$  im Sterninneren



## Massenabhängigkeit der Energiegewinnung von Hauptreihensternen

### 0,08–0,25 Sonnenmassen:

Zündtemperatur für **pp-Kette** in kleinem Zentralgebiet erreicht

→ großer Temperaturgradient

→ **vollständig konvektiv** (gesamter H-Vorrat wird verbraucht!)



$0,08 M_{\odot} < M < 0,25 M_{\odot}$

[67.1]

### 0,25–1,5 Sonnenmassen: ( $r \leq 0,3R$ )

Energieerzeugung durch **pp-Kette** in ausgedehntem Bereich

→ Im Innern: Kleiner Temperaturgradient

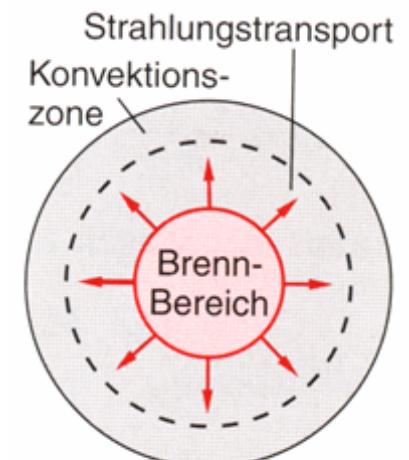
Energietransport dort durch Strahlung

→ Außen: Zunahme der Strahlungsabsorption

(wegen geringer Temperatur)

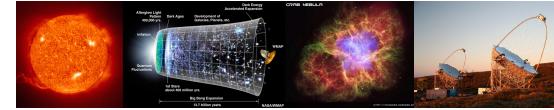
→ Konvektion übernimmt Energietransport

→ **Zentrum radiativ, Hülle konvektiv**



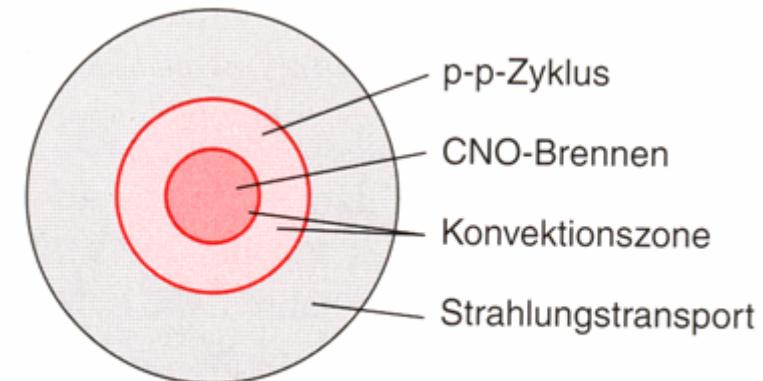
$0,25 M_{\odot} < M < 1,5 M_{\odot}$

[68.1]



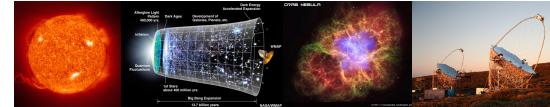
## Massenabhängigkeit der Energiegewinnung von Hauptreihensternen

Sterne mit **mehr als 1,5-facher Sonnenmasse**:  
**CNO-Zyklus** wichtig (große T-Abhängigkeit)



$M > 1.5 M_{\odot}$

[69.1]



## Massenabhängigkeit der Energiegewinnung von Hauptreihensternen

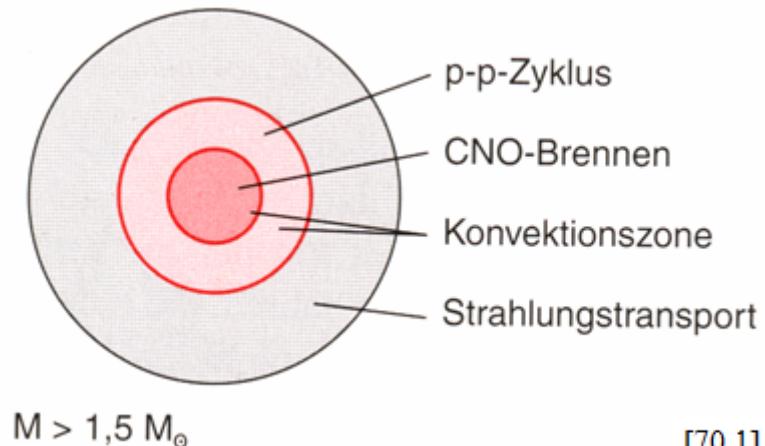
Sterne mit **mehr als 1,5-facher Sonnenmasse**:  
**CNO-Zyklus** wichtig (große T-Abhängigkeit)

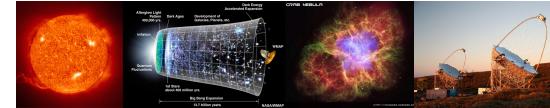
In kleinem Kerngebiet: CNO-Energieproduktion →Sehr hohe  
Energieflussdichte

- Hoher Temperaturgradient
- Konvektion übernimmt Energietransport
- Gute Durchmischung der Materie

Weiter außen: pp-Kette dominant

In der Hülle keine Kernreaktion  
→ Temperaturgradient dort sehr klein  
→ Energietransport durch Strahlung  
→ **Zentrum konvektiv, Hülle radiativ**





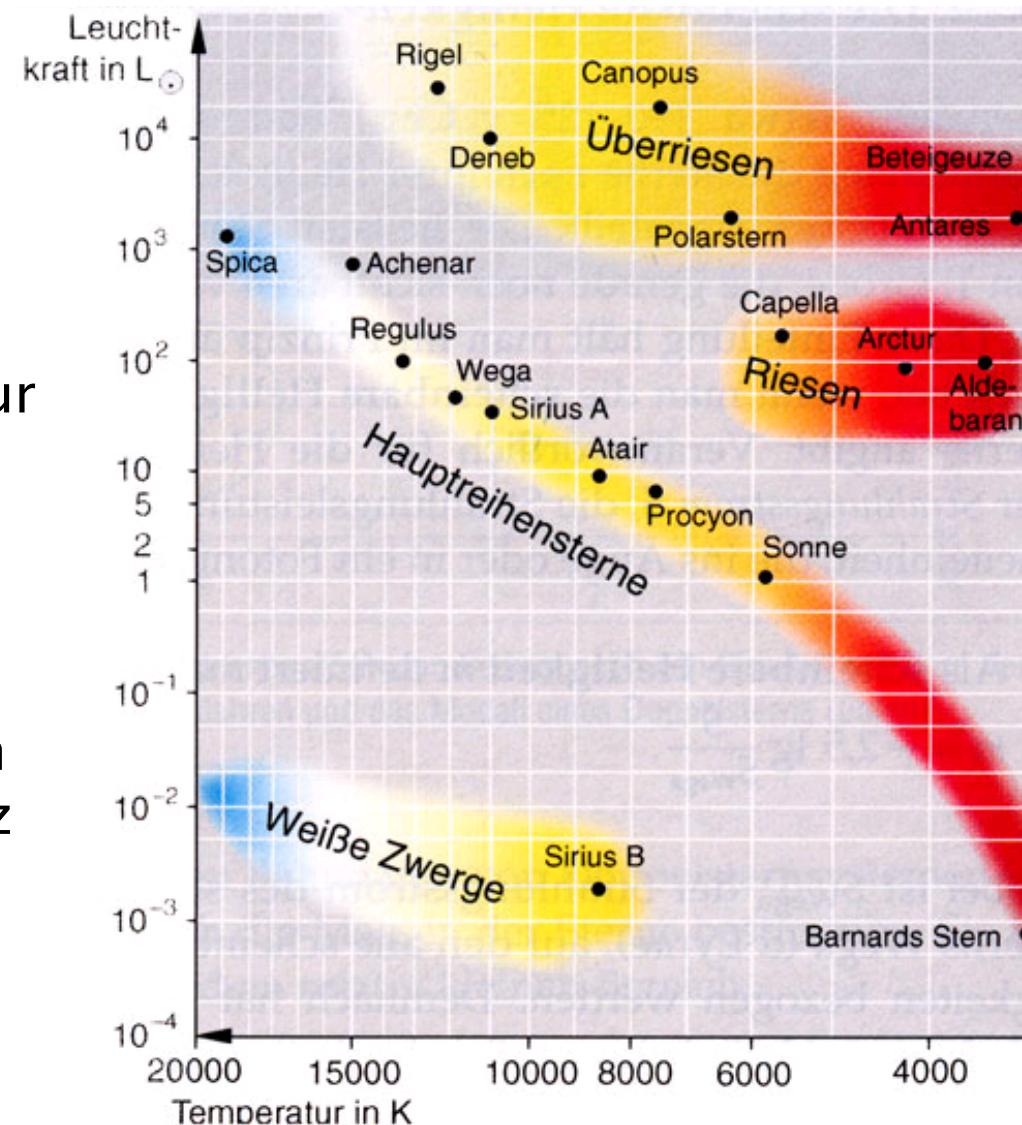
# Entwicklung von Sternen

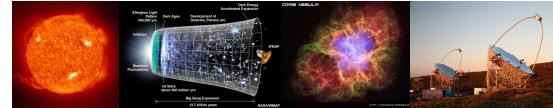
Klassifizierung  
der Sterne:

Luminosität gegen  
Farbe bzw. Temperatur  
(Farbe ~ Temperatur)

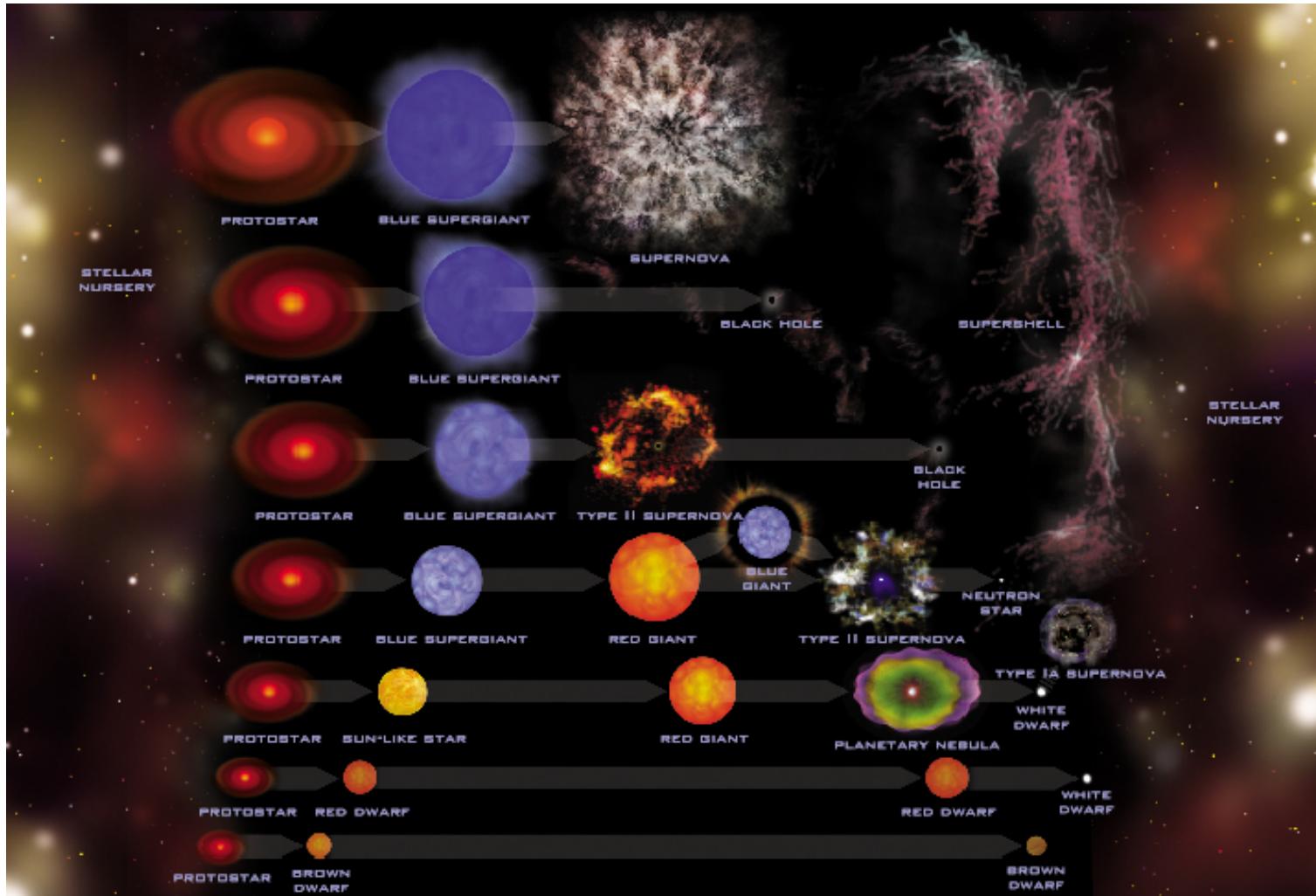
L vs. T

Sterne verbringen den  
Großteil ihrer Existenz  
auf der “Hauptreihe”

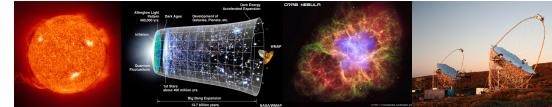




# Entwicklungszeit auf der Hauptreihe: Massenabhängigkeit



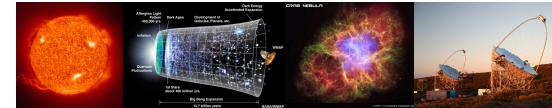
[72.1]



# Entwicklungszeit auf der Hauptreihe: Massenabhängigkeit

$$\frac{\tau_{\text{Stern}}}{\tau_{\text{Sonne}}} = \left( \frac{m_{\text{Stern}}}{m_{\text{Sonne}}} \right)^{-2} = (m^*)^{-2} \quad \text{mit dem Massenverhältnis } m^*$$

0,5 $m_{\odot}$	40 000 000 000 Jahre
1 $m_{\odot}$	10 000 000 000 Jahre
5 $m_{\odot}$	400 000 000 Jahre
10 $m_{\odot}$	100 000 000 Jahre
20 $m_{\odot}$	25 000 000 Jahre



## Nicht jeder Stern schafft es zur Hauptreihe...

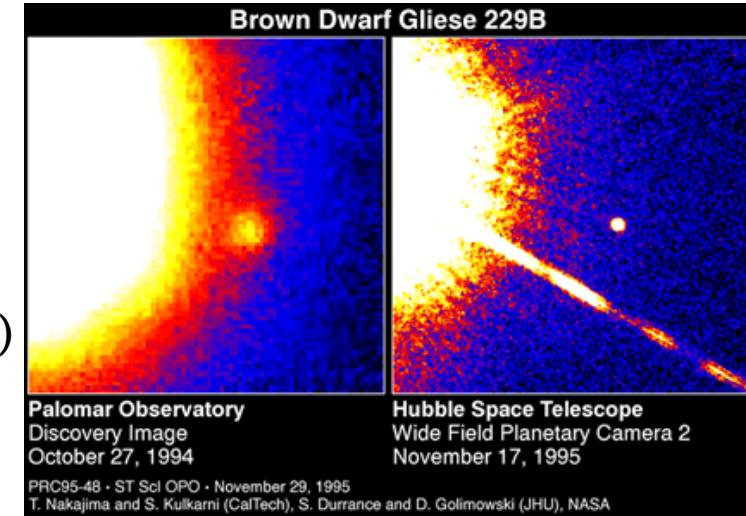
Sterne mit  $m < 0,008 m_{\odot}$

Kerntemperatur zu gering für Zündung der Fusion

→ Abstrahlung der Gravitationsenergie (Wärme)

→ Gravitationsdruck = Gasdruck  $\propto T^4$

→ „brauner Zwergstern“



[73.1]

Sterne mit  $m > 150 m_{\odot}$

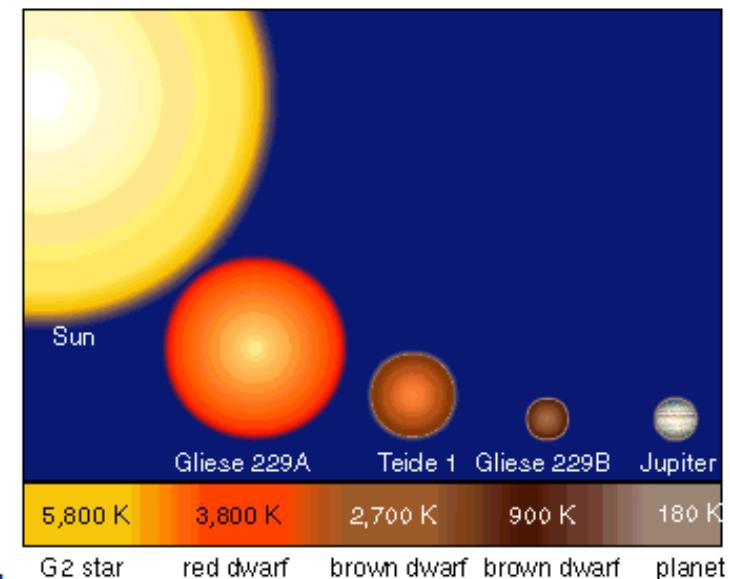
Kerntemperatur extrem hoch

→ Strahlungsdruck spielt nun wesentliche Rolle

→ Treibt die Materie nach außen

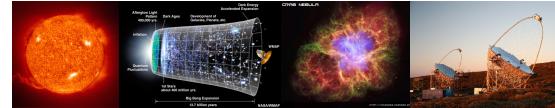
→ Protostern instabil

“Eddington Limit”



Hauptreihensterne:  $m$  von  $0,008-150 m_{\odot}$

Massivster nachgewiesener HR-Stern:  $265 m_{\odot}$  [73.2]



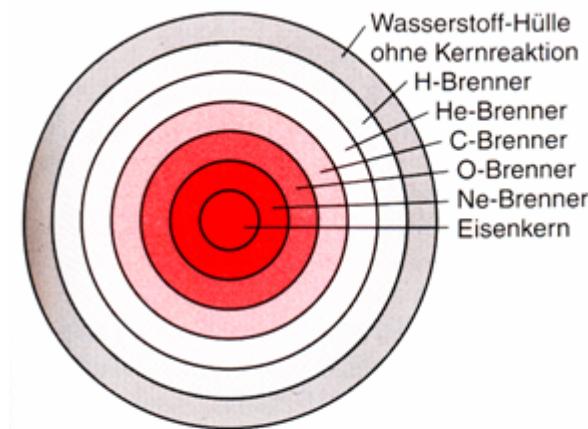
## Entwicklung nach der Hauptreihe

### Allgemein:

Nach Aufbrauchen des H-Vorrats im Innern werden He und schwerere Elemente als "Brennstoff" verwendet  
-> Zwiebelschalenstruktur

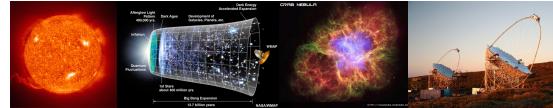
Fusion schwererer Elemente benötigt höhere Temperaturen im Kern

-> Verlauf der Entwicklung stark abhängig von der Sternmasse



Zwiebelschalenstruktur eines massereichen Sterns nach Erlöschen der letzten Fusionsenergiequelle im Kern. Nach H. Scheffler, H. Elsässer: *Physik der Sterne und der Sonne* (Spektrum, Heidelberg 1990)

[74.1]



## Entwicklung nach der Hauptreihe [75.1]

Sterne mit  $0,08 \text{ m}_\odot < m < 0,26 \text{ m}_\odot$

Stern war in Brennphase vollständig konvektiv  
→ H-Vorrat vollständig verbraucht

Stern besteht überwiegend aus Helium

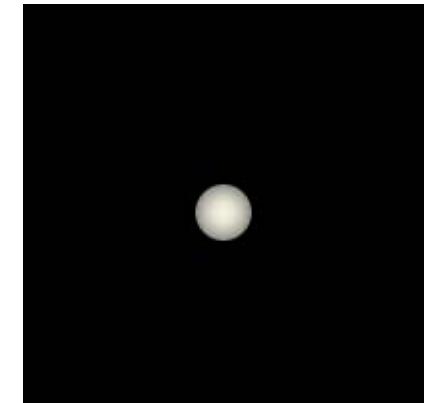
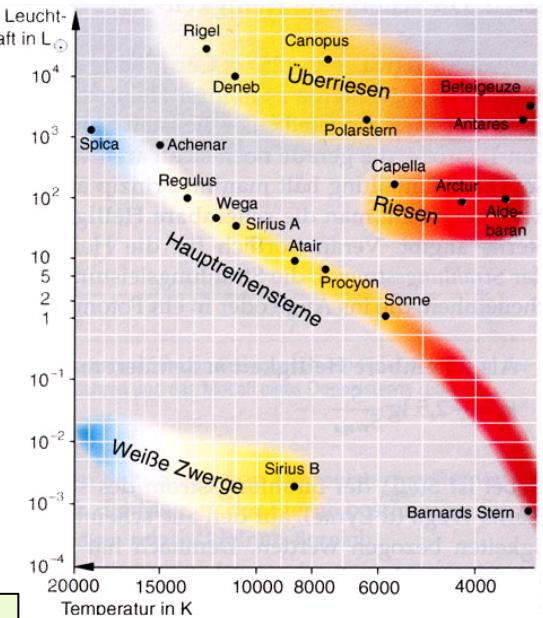
Zündtemperatur von He-Brennen wird nicht erreicht  
→ Gravitation nicht durch Strahlungsdruck kompensiert  
→ Kontraktion des Sterns bis...:

**Elektronen bilden ein “Fermigas”:**

Als Fermionen unterliegen sie dem Pauli-Prinzip:

Fermionen in begrenztem Raum können nur diskrete Quantenzustände einnehmen.

→ Entartungsdruck (oder Fermidruck) der Elektronen wirkt Gravitation entgegen

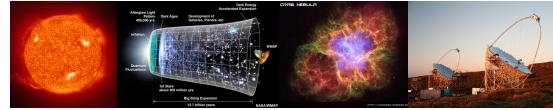


[75.3]

Nach Durchlauf einer instabilen Phase → „weißer Zwerg“

Nach Abstrahlung der verbleibender Energie

→ „schwarzer Zwerg“



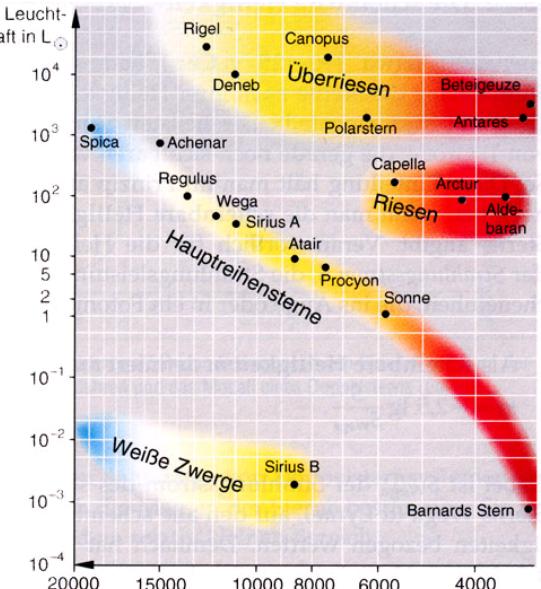
## Entwicklung nach der Hauptreihe [75.1]

**Sterne mit  $0,08 \text{ m}_\odot < m < 0,26 \text{ m}_\odot$**

Stern war in Brennphase vollständig konvektiv  
→ H-Vorrat vollständig verbraucht

Stern besteht überwiegend aus Helium

Zündtemperatur von He-Brennen wird nicht erreicht  
→ Gravitation nicht durch Strahlungsdruck kompensiert  
→ Kontraktion des Sterns bis...:



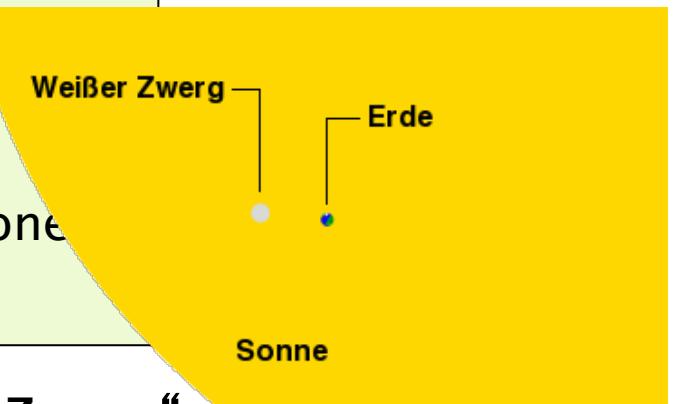
[75.2]

### Elektronen bilden ein "Fermigas":

Als Fermionen unterliegen sie dem Pauli-Prinzip.

Fermionen in begrenztem Raum können nur diskrete Quantenzustände einnehmen.

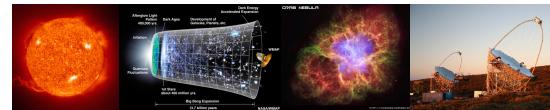
→ Entartungsdruck (oder Fermidruck) der Elektronen wirkt Gravitation entgegen



Nach Durchlauf einer instabilen Phase → „weißer Zwerg“

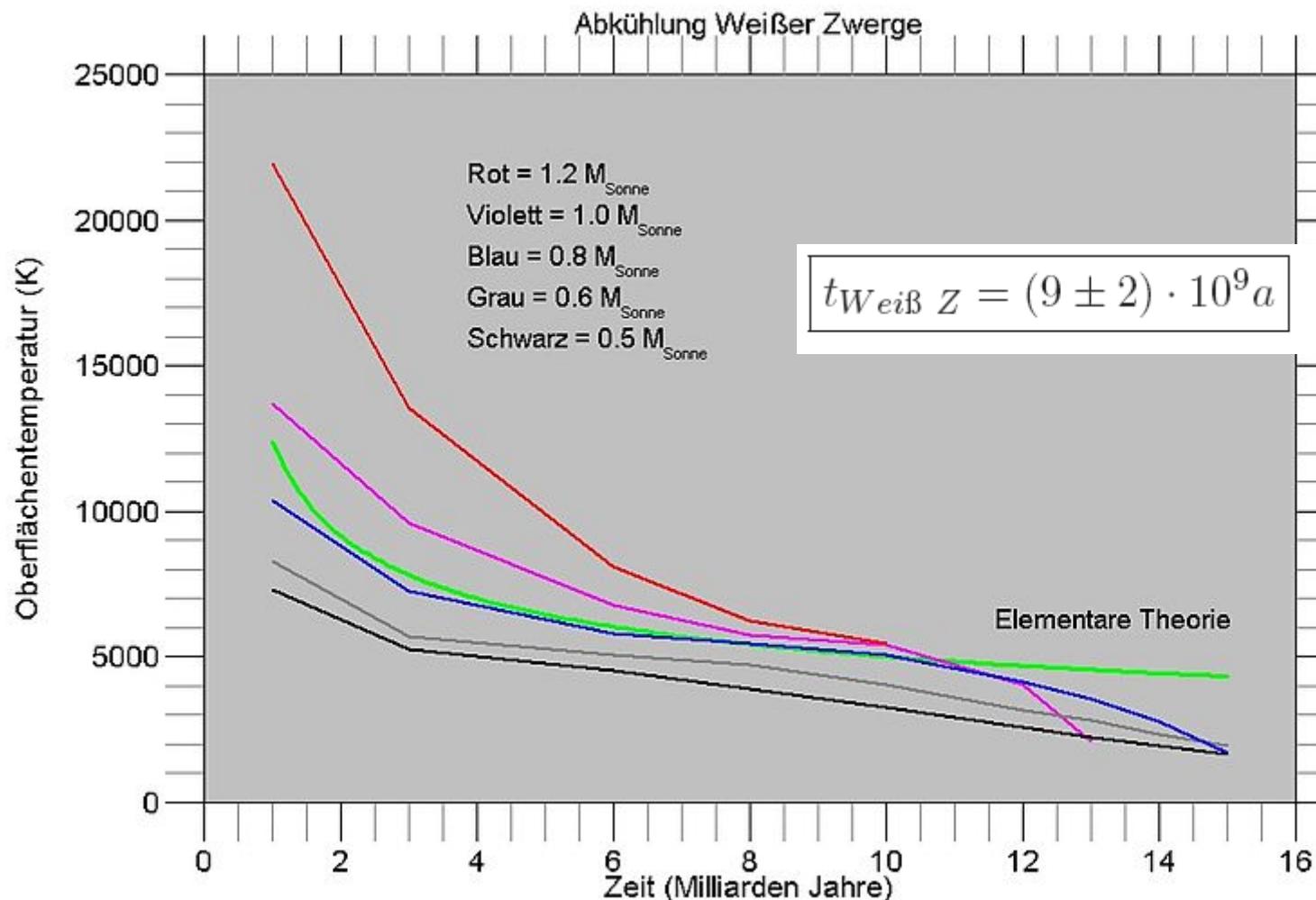
Nach Abstrahlung der verbleibender Energie

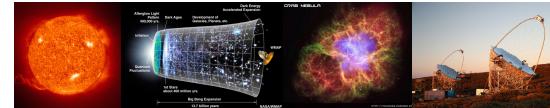
→ „schwarzer Zwerg“



# Kühlkurve weißer Zwergs

Je älter ein weißer Zwerg desto kühler





[77.1]

## Entwicklung nach der Hauptreihe

### Sterne mit $0,26 \text{ m}_\odot < m < 3 \text{ m}_\odot$

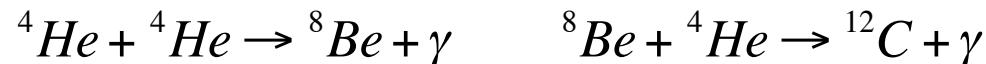
H-Vorrat im Kern aufgebraucht:

- Kontraktion des Kerns
- Potentielle Energie wird thermische Energie
- Aufheizung der Schale bis zur Zündtemperatur
- H-Schalenbrennen
- Expansion zum **Roten Riesen**

Für Sterne mit  $m > 0,5 \text{ m}_\odot$ :

$T$  im Kern erreicht  $10^8 K$

→ **He-Brennen = 3- $\alpha$ -Prozess ( $\text{He} \rightarrow \text{C}$ ):**

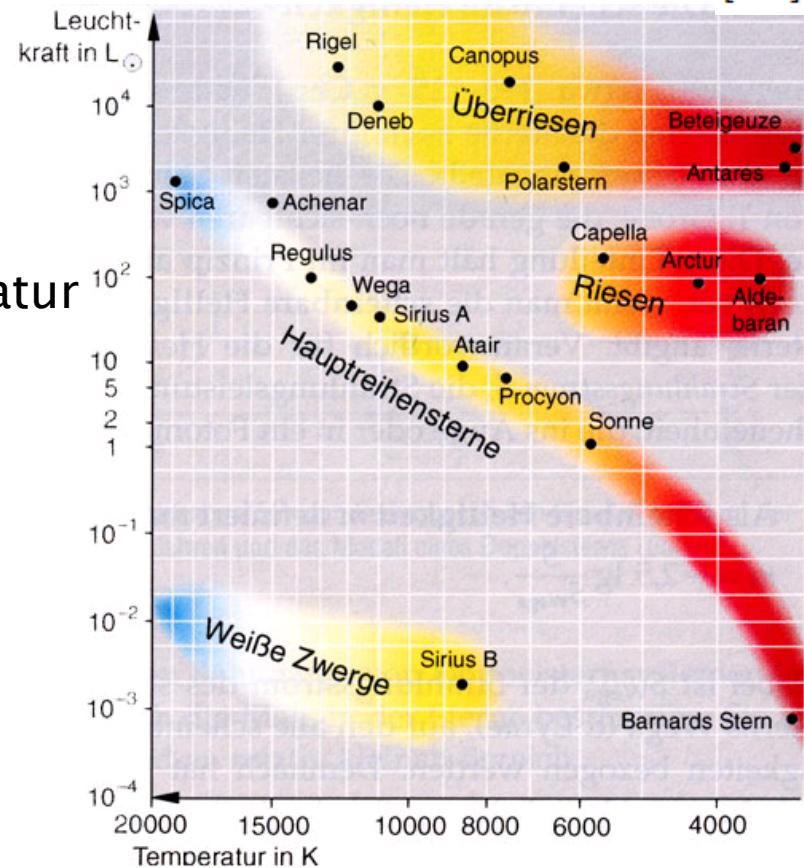


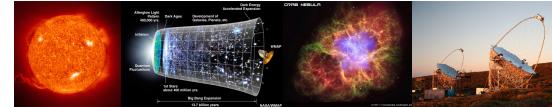
$$\Delta E = -0,1 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = +7,4 \text{ MeV}$$

${}^8\text{Be}$  instabil:  $\tau \approx 2,5 \times 10^{-16} \text{ s}$

- Beide Reaktionen müssen fast gleichzeitig ablaufen
- 3  $\alpha$ -Teilchen müssen fast gleichzeitig zusammentreffen





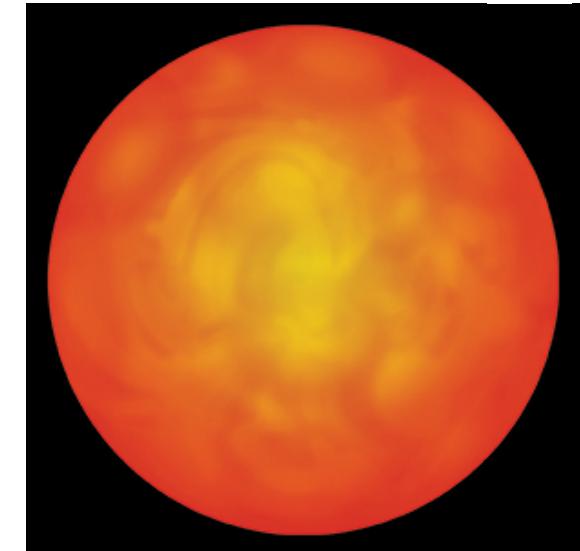
## Entwicklung nach der Hauptreihe

[77.2]

**Sterne mit  $0,26 \text{ m}_\odot < m < 3 \text{ m}_\odot$**

H-Vorrat im Kern aufgebraucht:

- Kontraktion des Kerns
- Potentielle Energie wird thermische Energie
- Aufheizung der Schale bis zur Zündtemperatur
- H-Schalenbrennen
- Expansion zum **Roten Riesen**



Für Sterne mit  $m > 0,5 \text{ m}_\odot$ :

T im Kern erreicht  $10^8 K$

→ **He-Brennen = 3- $\alpha$ -Prozess ( $\text{He} \rightarrow \text{C}$ ):**



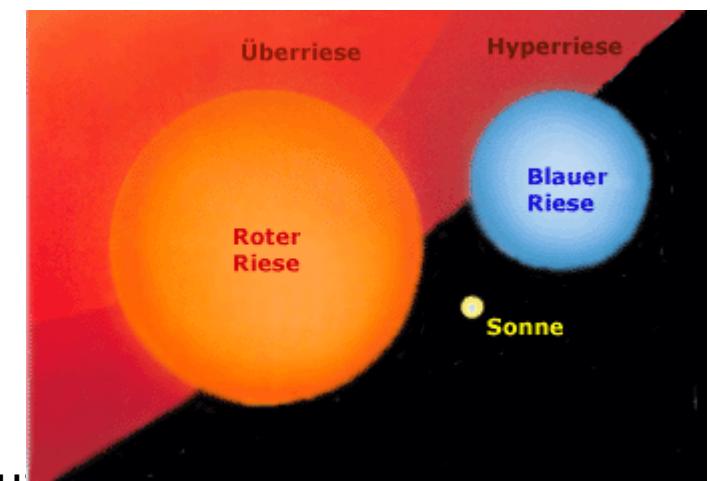
$$\Delta E = -0,1 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = +7,4 \text{ MeV}$$

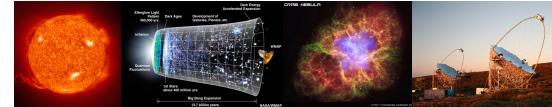
${}^8\text{Be}$  instabil:  $\tau \approx 2,5 \times 10^{-16} \text{ s}$

→ Beide Reaktionen müssen fast gleichzeitig ablaufen

→ 3  $\alpha$ -Teilchen müssen fast gleichzeitig zusammentreffen



[77.3]



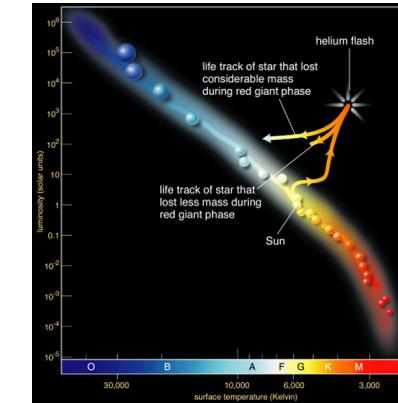
## Entwicklung nach der Hauptreihe

Sterne mit  $0,5 \text{ m}_\odot < m < 1,4 \text{ m}_\odot$ :

He-Kern vor He-Zündung enthält entartete Elektronen

→ Entartungsdruck des Elektronengases kompensiert Gravitationsdruck

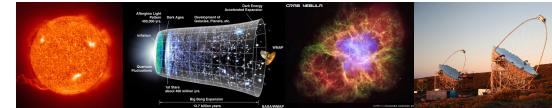
- zum Zeitpunkt der He-Zündung keine Expansion des Kernvolumens nur Temperaturanstieg, da der Entartungsdruck des Elektronengases nicht temperaturabhängig
- beschleunigte Reaktionsrate bei Fusionsprozessen



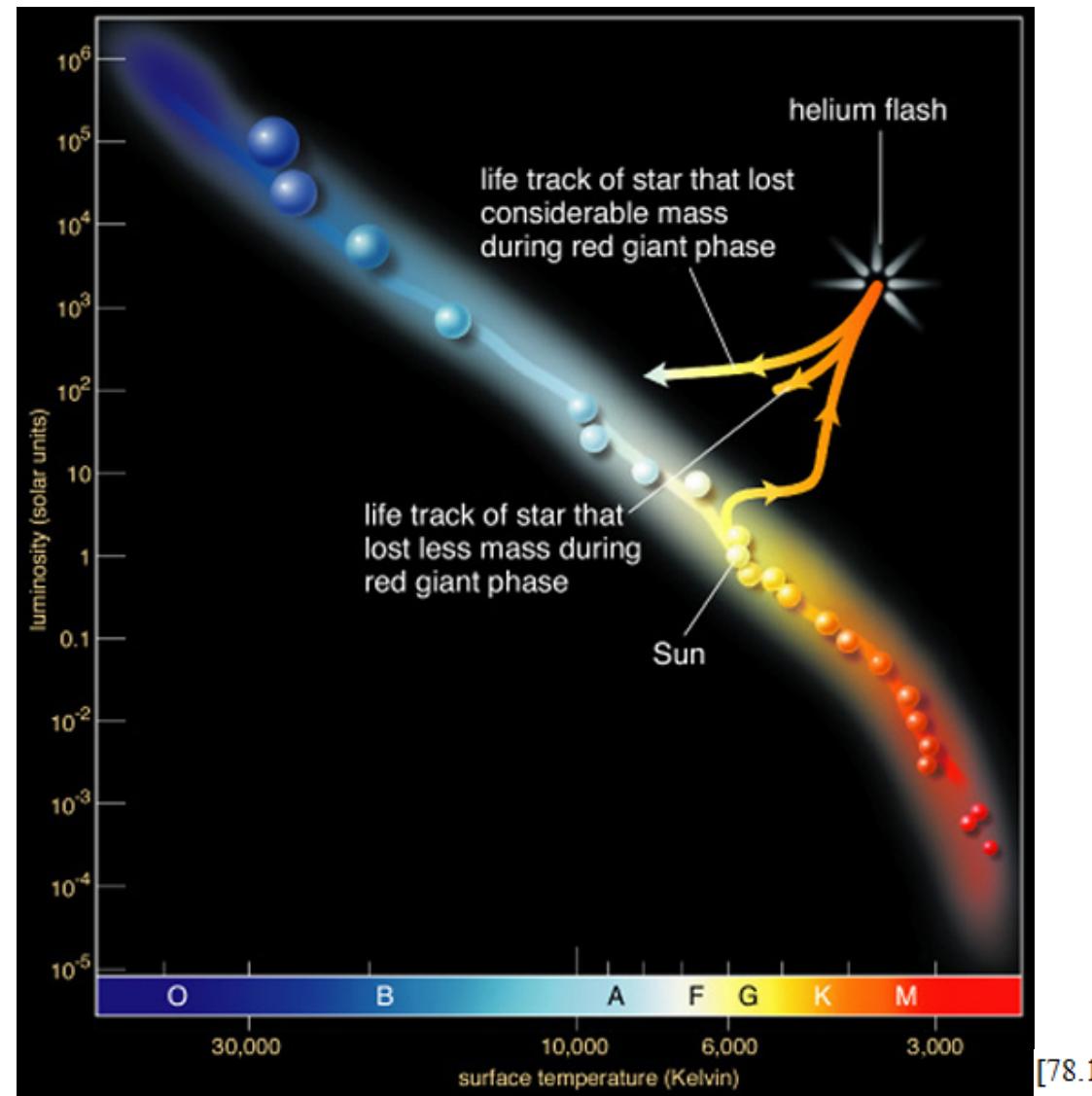
[78.1]

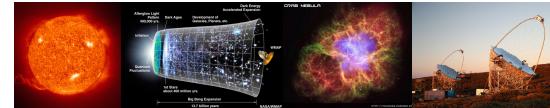
Erst wenn Gasdruck > Entartungsdruck hebt sich Entartung auf

- Stern nicht mehr im Gleichgewicht
- Strahlung und gewaltige Druckwelle wird von Hülle absorbiert
- Leuchtkraft des Sterns steigt für  $\sim 100\text{s}$  auf das  $10^4 - 10^6$  -fache
- **Helium-Flash**



## Entwicklung nach der Hauptreihe





## Entwicklung nach der Hauptreihe

Sterne mit  $1,4m_{\odot} < m < 3m_{\odot}$ :

He-Fusion läuft kontinuierlich ab

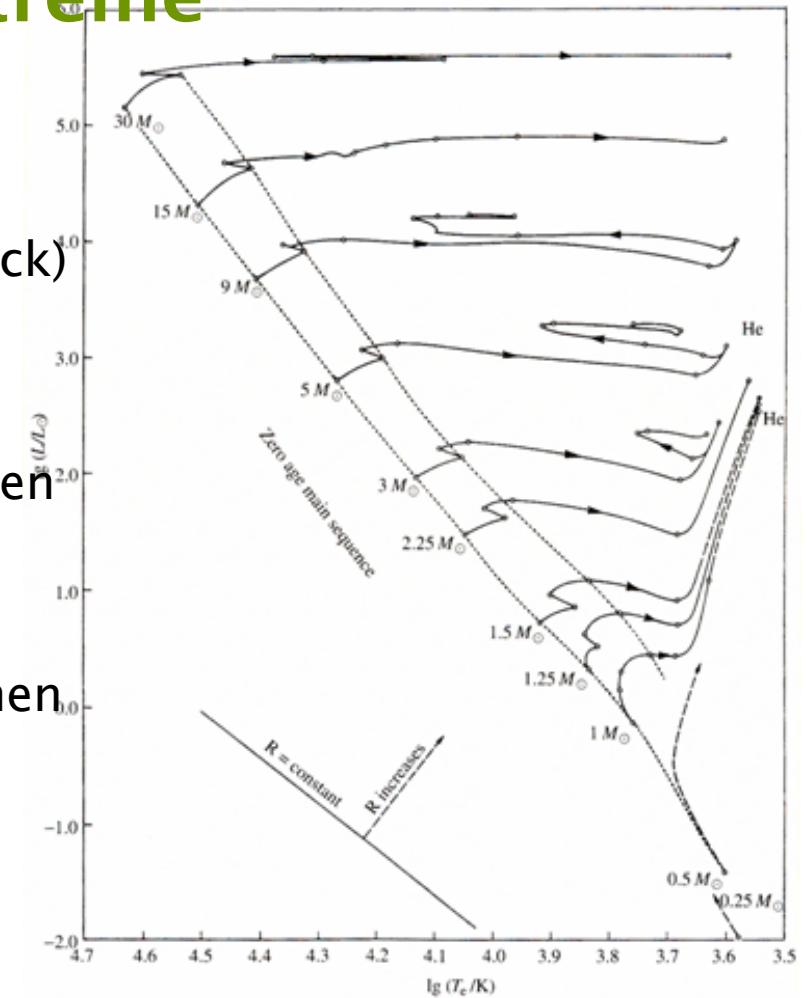
Kernmaterie nicht entartet (kein Entartungsdruck)

Danach mehrere instabile Phasen

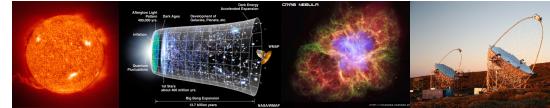
(Oszillationen im HRD) zum Ast der roten Riesen

Wenn Heliumvorrat im Kern aufgebraucht ist:

- He beginnt in der H-Brennschale zu brennen
- H-Brennschale wandert nach außen
- 2 Schalen expandieren, Kern kontrahiert
- Kern stößt größere Teile der Hülle ab
- **planetarischer Nebel**



[79.1]



## Entwicklung nach der Hauptreihe

Sterne mit  $1,4m_{\odot} < m < 3m_{\odot}$ :

He-Fusion läuft kontinuierlich ab

[79.2]

Kernmaterie nicht entartet (kein Entartungsdruck)

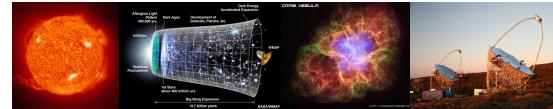
Danach mehrere instabile Phasen

(Oszillationen im HRD) zum Ast der roten Riesen



Wenn Heliumvorrat im Kern aufgebraucht ist:

- He beginnt in der H-Brennschale zu brennen
- H-Brennschale wandert nach außen
- 2 Schalen expandieren, Kern kontrahiert
- Kern stößt größere Teile der Hülle ab
- **planetarischer Nebel**



## Entwicklung nach der Hauptreihe

Sterne mit  $1,4m_{\odot} < m < 3m_{\odot}$ :

Überreste des Kerns:

→ weißer Zwerg

→ schwarzer Zwerg

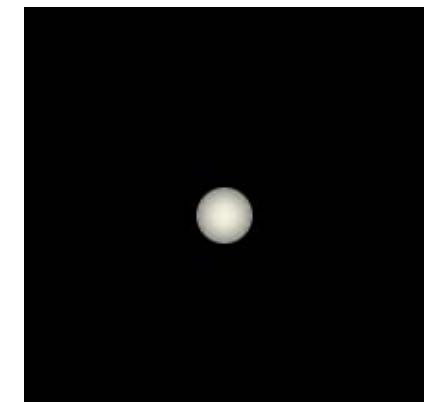
wenn restliche Masse kleiner ist als  
**Chandrasekhar-Grenzmasse**  $M_C \approx 1,44M_{\text{Sonne}}$

Gleichgewichtsbedingung nach  
Subrahmanyan Chandrasekhar  
(1920–1994)

für Sterne mit:  $M_C \approx 1,44M_{\text{Sonne}}$   
Entartungsdruck  $e^- = \text{Gravitationsdruck}$



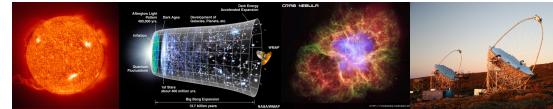
[80.1]



[80.2]

Für die Radien gilt dabei:  $R \propto M^{-1/3}$

Mit  $M_C$  ergibt sich:  $R_C \approx 10^4 \text{ km}$



## Entwicklung nach der Hauptreihe

### Sterne mit $m > 3m_{\odot}$

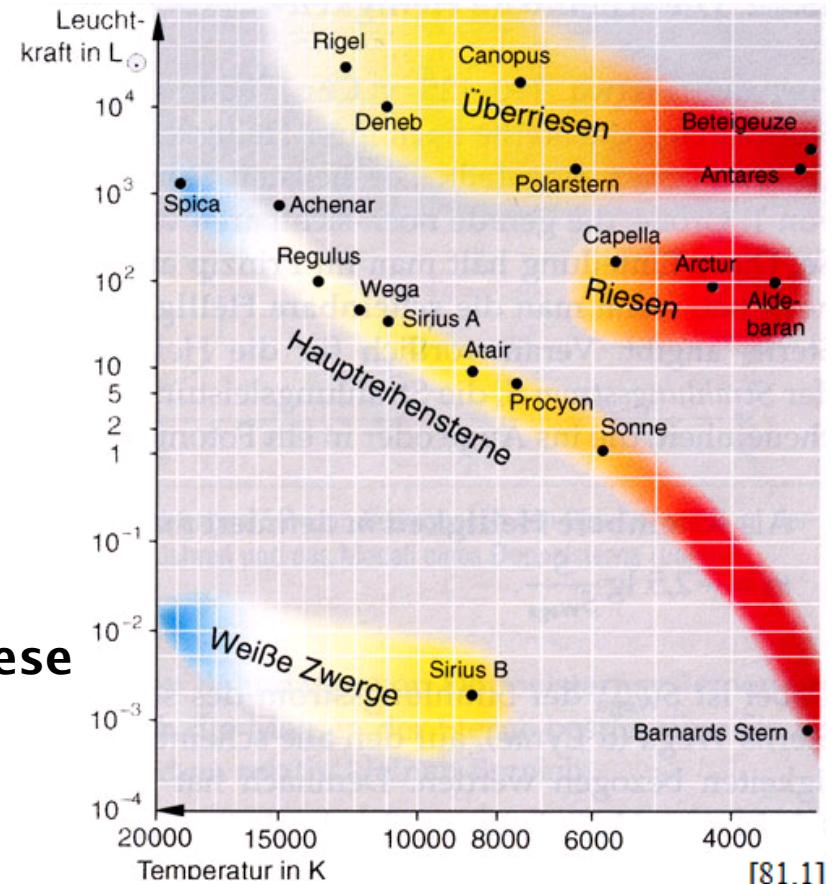
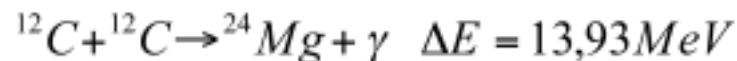
H-Brennen ähnlich wie bei  $1,4-3m_{\odot}$

Kein He-Flash

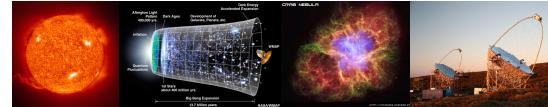
Wenn He-Vorrat im Kern aufgebraucht

- Kern kontrahiert
- He-Schalenbrennen
- T im Kern steigt an
- die seltenen  $\alpha$ -Reaktionen gewinnen an Bedeutung
- neue Reaktionen kommen hinzu
- Sternradius wächst nochmals → **Überriese**

**C-Brennen** ab  $5 \times 10^8 K$



[81.1]

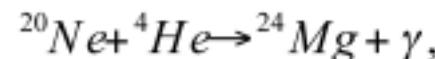
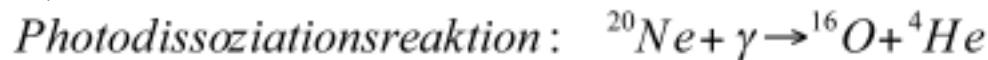


## Entwicklung nach der Hauptreihe

### Sterne mit $m > 3m_{\odot}$

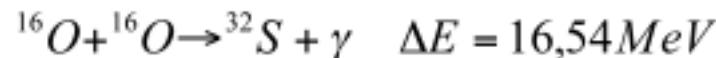
Brennprozesse nach ca. 100 Jahren im Kern beendet  
→ Verlagerung in die He-Brennschale

**Ne-Brennen** für mehr als 13 Sonnenmassen ab  $T > 1,5 \times 10^9 K$   
T so hoch, dass Photodissoziation der Ne-Kerne einsetzt

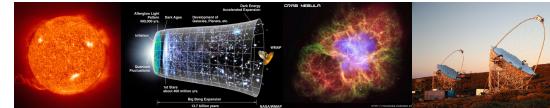


Brenndauer: ca. 1 Jahr

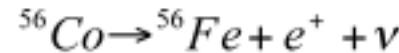
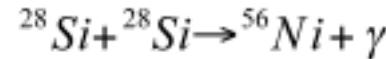
**O-Brennen** für Sterne mit genügend Masse ab  $2 \times 10^9 K$



Brenndauer: einige Monate

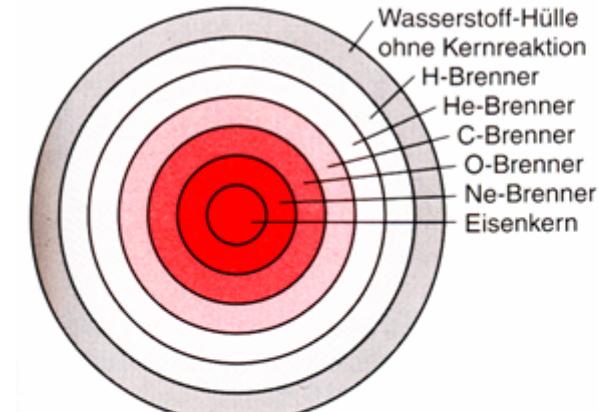
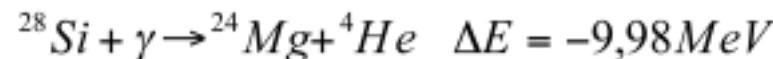
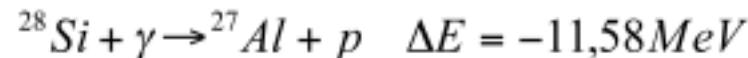


## Letzte energieerzeugende Brennstufe: **Si-Brennen** bei $T \approx 4 \times 10^9 K$



**Brenndauer:** etwa einen Tag

Durch freigesetzten Photonen Entstehung anderer Elemente durch Photodissoziation:



Zwiebelschalenstruktur eines massereichen Sterns nach Erlöschen der letzten Fusionsenergiequelle im Kern. Nach H. Scheffler, H. Elsässer: *Physik der Sterne und der Sonne* (Spektrum, Heidelberg 1990)

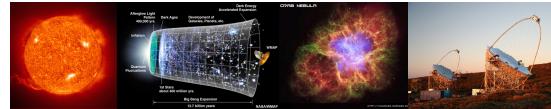
[82.1]

Aufbau des Sterns im Si-Brennstadium nach dem Zwiebelschalenmodell  
Si-Vorrat aufgebraucht

Im (Eisen-)Kern: Photodesintegration  $Fe \rightarrow He, n$

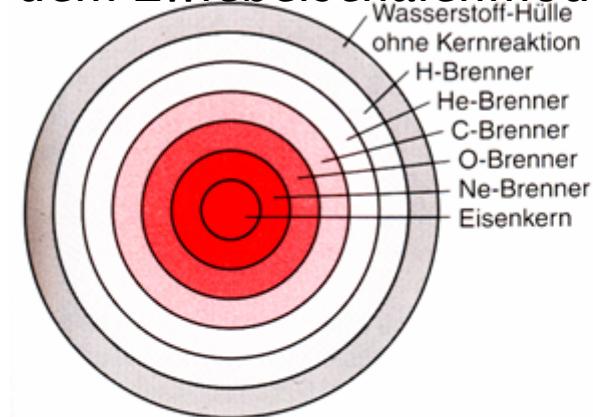


→ Kern aus hochverdichteten Neutronen, stabilisiert durch Entartungsdruck



## Aufbau des Sterns im Si-Brennstadium nach dem Zwiebelschalenmodell

Im Kern: Photodesintegration  $\text{Fe} \rightarrow \text{He}, n$   
 $\text{He} \rightarrow p, n$   
inverser  $\beta$ -Zerfall:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$



[83.1]

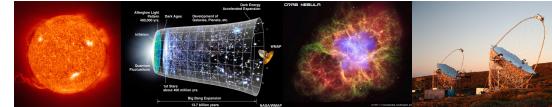
→ Kern aus Neutronen, stabilisiert durch Ent

Si-Vorrat aufgebraucht

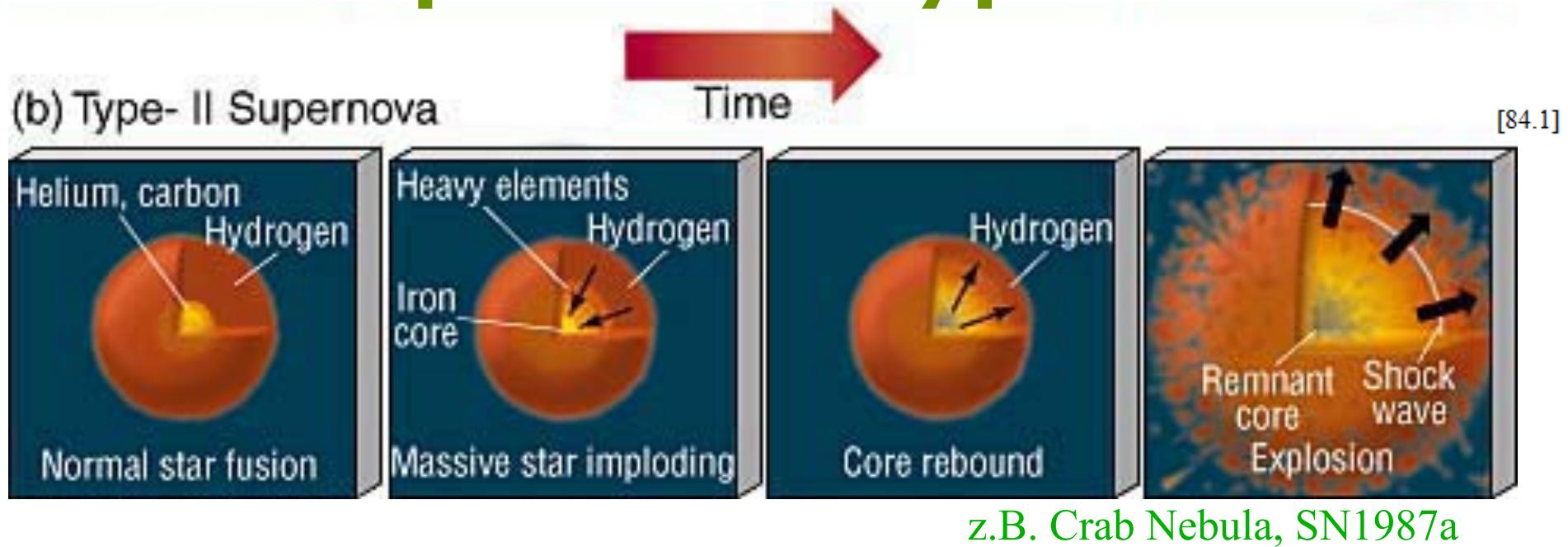
- alle Energiequellen erschöpft
- Gravitativer Kollaps im fast freien Fall

- Hüllematerie prallt mit hoher Geschwindigkeit auf hochverdichteten Kern aus Neutronen.  
Dabei wird sie als Stoßwelle in den Raum zurückgeschleudert

→ **Supernova Typ II**



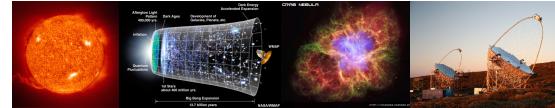
# Supernova Typ II



Großteil der Energie wird in Form von Neutrinos emittiert

-> "Frühwarnsystem" für auftretende Supernovae

In den heißen Gasschichten einer Supernova können im rapid (r)-process schwerere Elemente als Eisen erbrütet werden

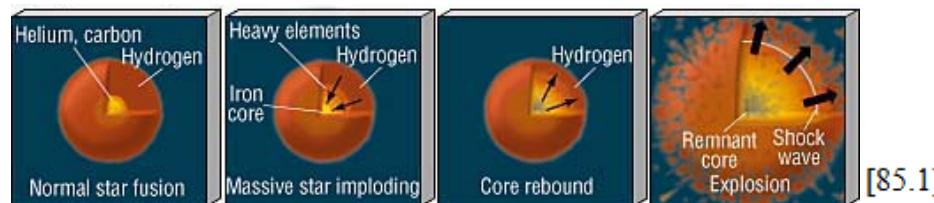


Leichtere Sterne erreichen Si-Brennstufe nicht

Sie werden bei einem **Carbon\***- oder **Oxygenflash\*** zerrissen

\* laufen analog zum He-Flash sind aber gewaltiger!

→ Explosion: ebenfalls **Supernova Typ II**



Verbleibender Kern: **Neutronenstern**

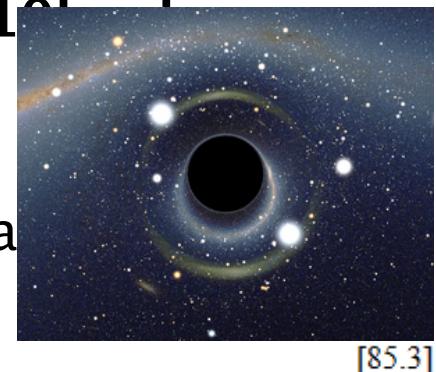
Mit Masse  $1,44 m_{\odot} \approx m_{Ch} < m < m_{ov} \approx 3,2 m_{\odot}$

**Oppenheimer-Volkov-Grenze**

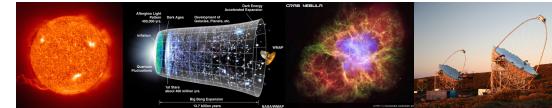
Stern stabilisiert durch Fermidruck der Neutronen

→ Neutronengas mit Dichte von Kernmaterie   **Radius  $\approx 10^8$  cm**

Wenn Oppenheimer-Volkov-Grenze überschritten:  
Fermidruck hält dem Gravitationsdruck nicht mehr stand  
→ Kollaps in ein **schwarzes Loch**



[85.3]

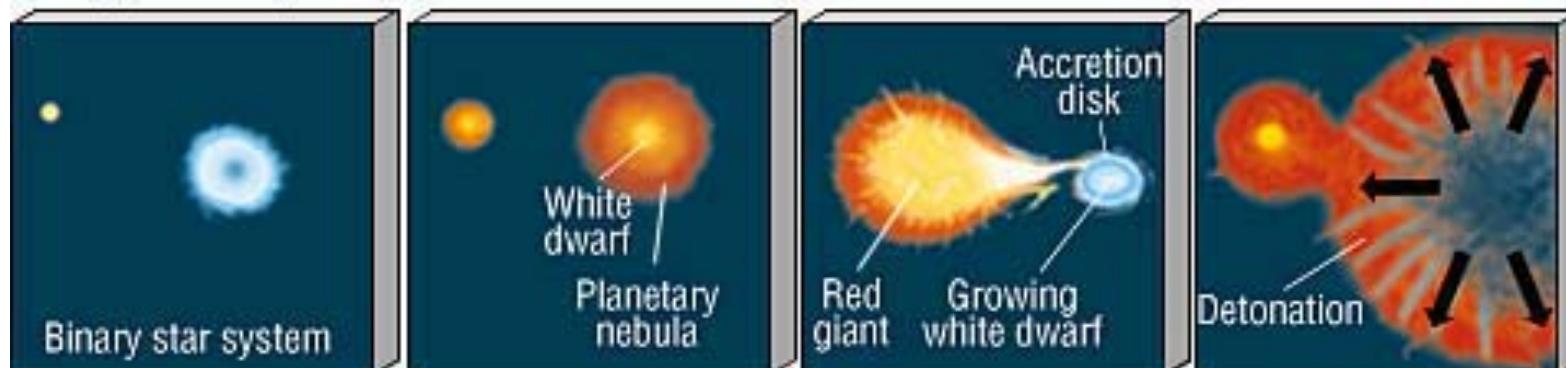


# Supernova Typ Ia

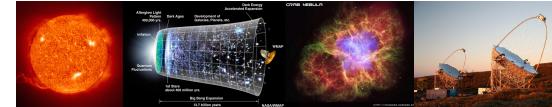
- Doppelsternsystem
- Ein massearmer Stern "stirbt", stößt Hülle ab (planetarischer Nebel)
- Kern bleibt als weißer Zwerg zurück
- Später:  
Begleitstern wird roter Riese, füllt Roche-Volumen und transferiert Masse.
- Der weiße Zwerg erreicht Chandrasekar-Limit von  $1,4 m_{\odot}$ :  
C und O werden innerhalb von Sekunden zu Nickel fusioniert -> Supernova
- Da alle Sterne mit der (Kern-)Masse von  $1,4m_{\odot}$  starten-> Standardkerze.

(a) Type- I Supernova

z.B. Tycho 1006, Kepler 1604



=>Typ Ia: Explosion bei reproduzierbaren Massen  
und Luminositäten der weißen Zwerge !!

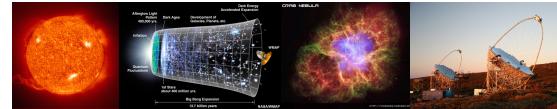


# Supernova Typ Ia

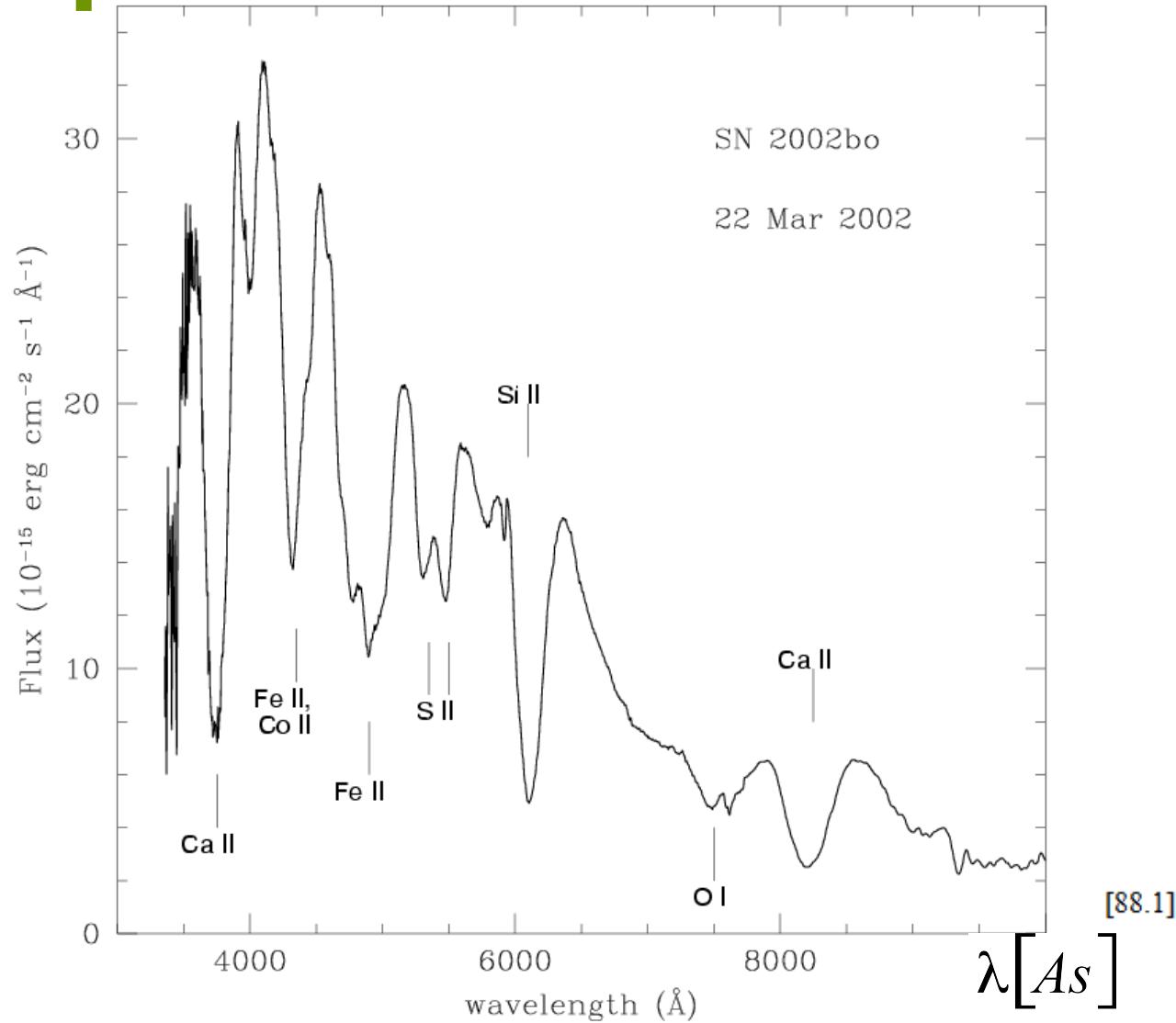
Künstlerische Darstellung eines Vorläufer-Binärsystems

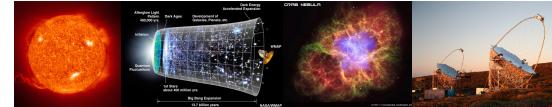


[87.1]



# Spektrum einer SN Ia

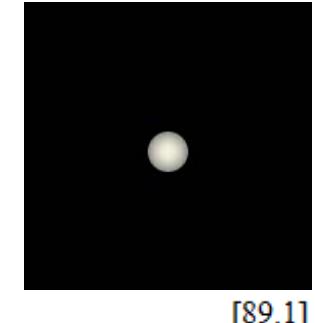




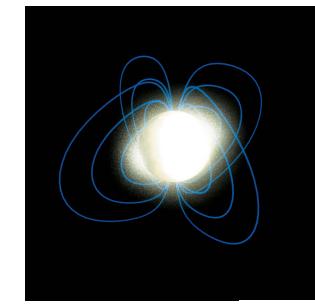
# Entstadien von Sternen

## Weißen Zwerg:

- Ursprünglich weniger als  $8 m_{\odot}$
- Nun weniger als  $1,44 m_{\odot}$  („Chandrasekhar-Grenze“)
- Stern wird durch den Fermidruck der Elektronen stabilisiert.
- Stern hat nun Größe der Erde



[89.1]



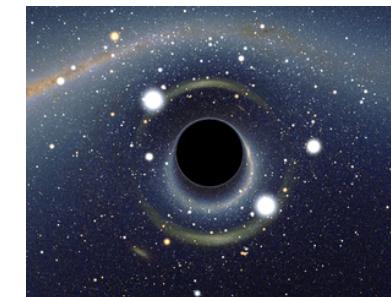
[89.2]

## Neutronenstern:

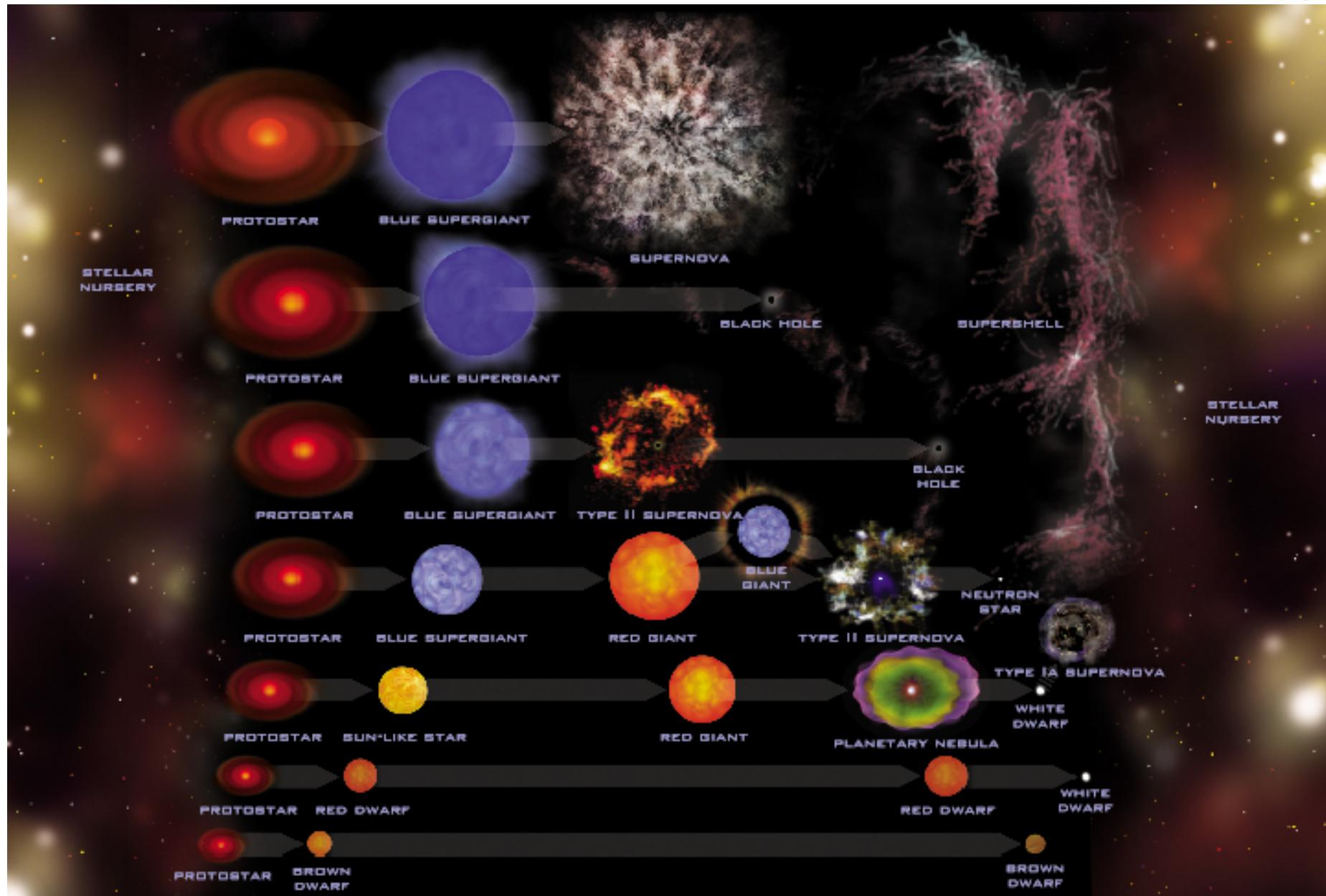
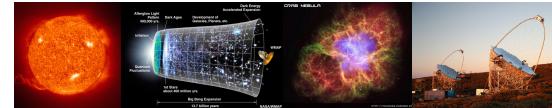
- Ursprünglich mehr als  $8 m_{\odot}$
- Nun weniger als  $3 m_{\odot}$  (“Oppenheimer-Volkov-Grenze”)
- Stern wird durch den Fermidruck der Neutronen stabilisiert.
- Durchmesser 10 km

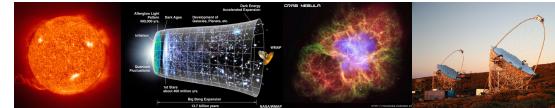
## Schwarzes Loch:

- Ursprünglich mehr als  $8 m_{\odot}$
- Nun mehr als  $3 m_{\odot}$
- Brennvorräte sind verbraucht
- Auch Fermidruck kann den Stern nicht mehr stabilisieren
- Die Geschwindigkeit, die ein Körper braucht um dem schwarzen Loch zu entkommen liegt über der Lichtgeschwindigkeit...

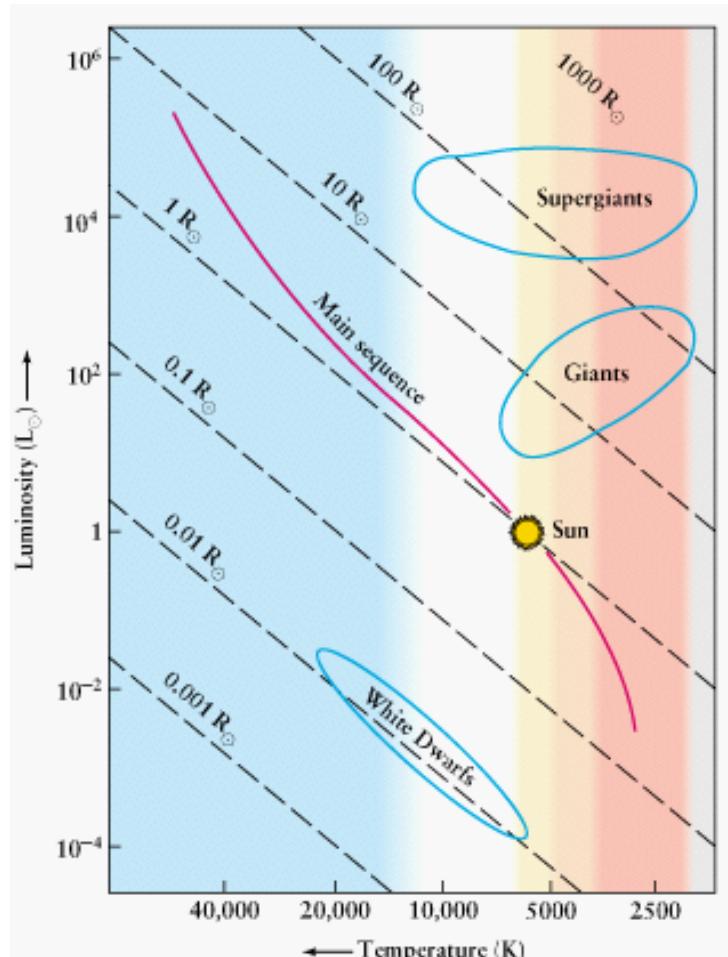


[89.3]

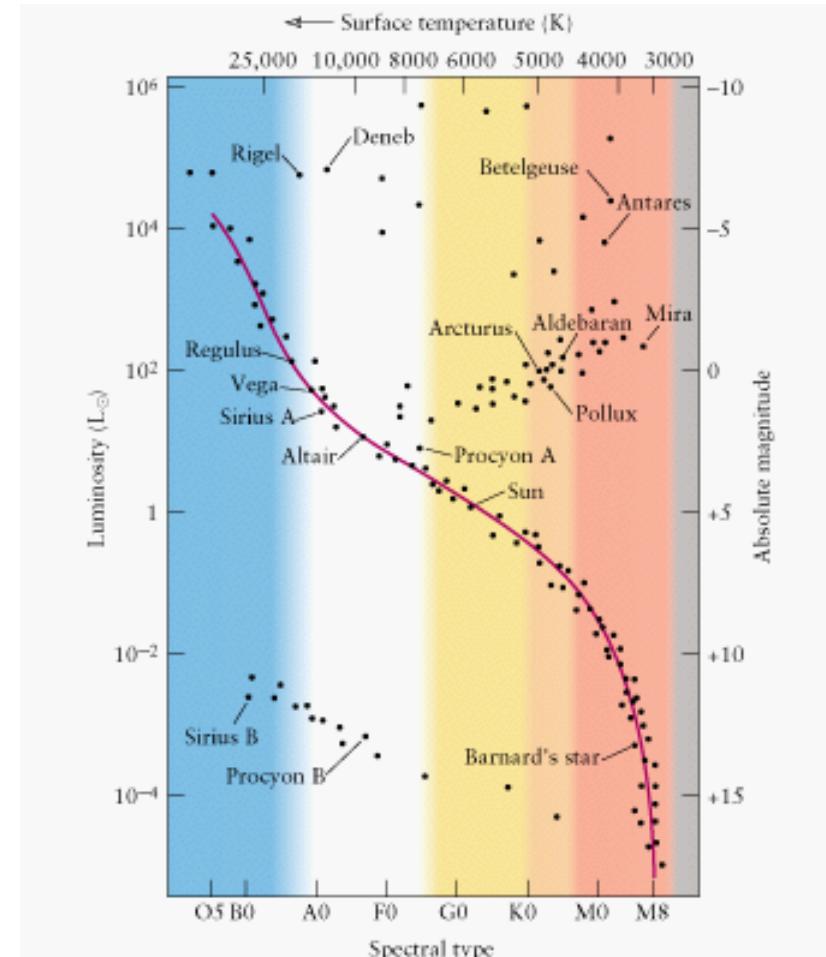




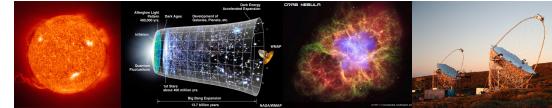
# Die Entwicklung unserer Sonne



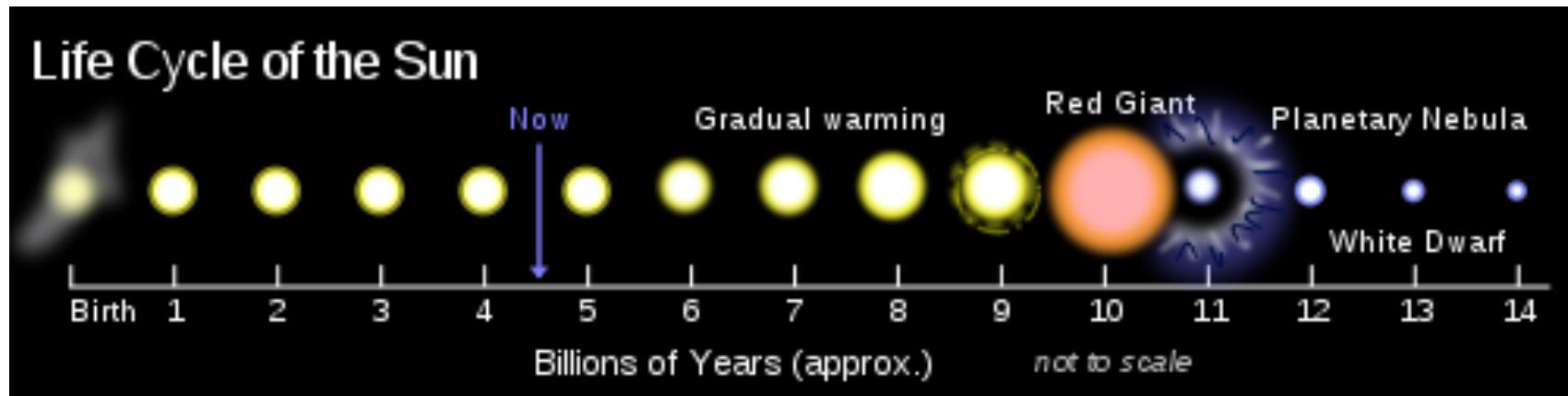
[91.1]



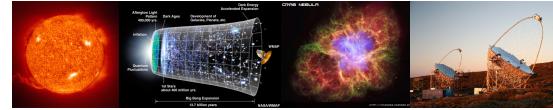
[91.2]



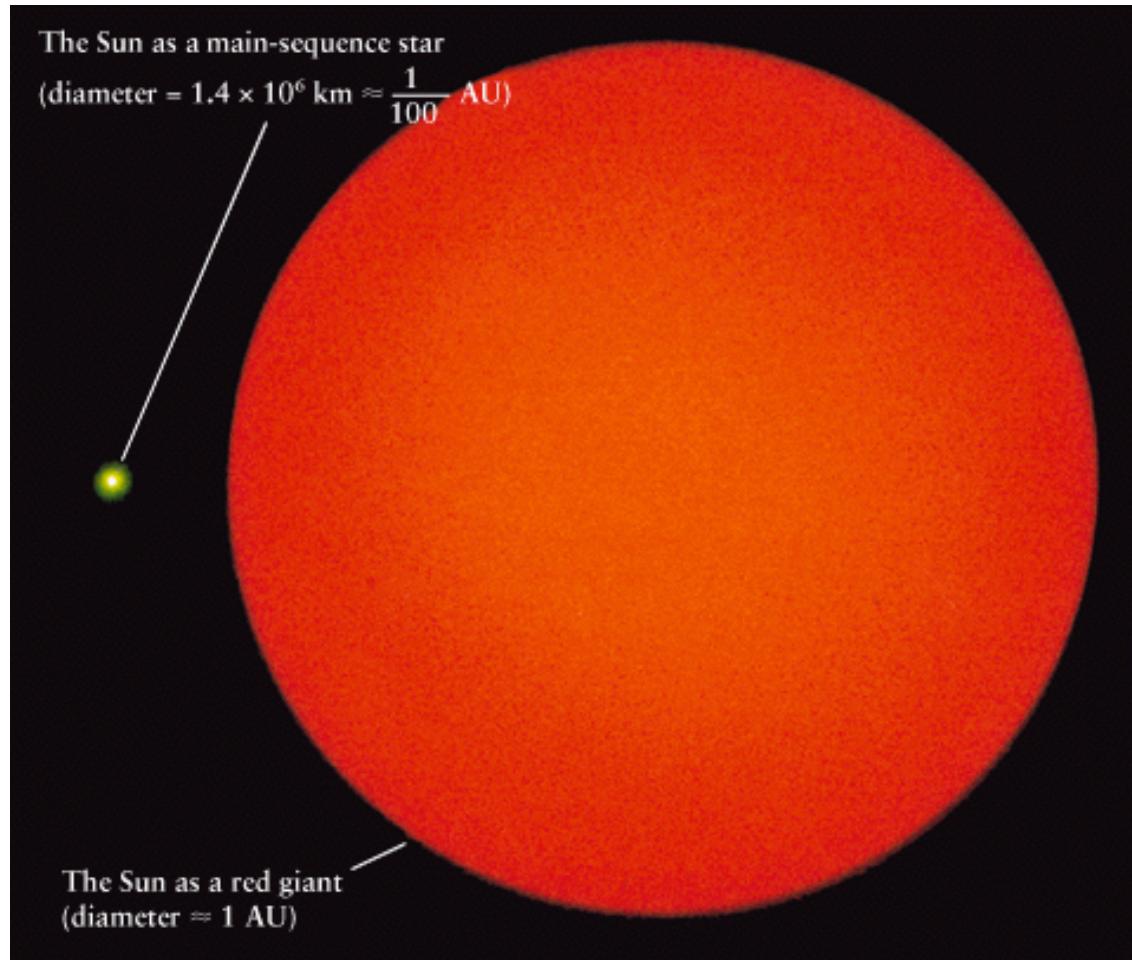
# Die Entwicklung unserer Sonne



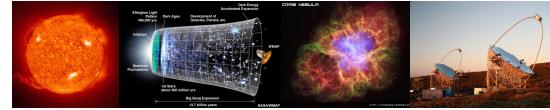
[92.1]



# Die Entwicklung unserer Sonne



[93.1]



# Sternpopulationen

## Pop I Sterne

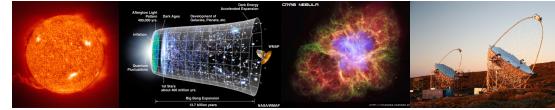
- Zu finden in Spiralarmen von Galaxien / galaktische Ebene
- Metallreich
- Stabil leuchtend
- Junge Sterne

## Pop II Sterne

- Arm an schweren Elementen (“metallarm”) (aber kleine Mengen vorhanden)
- Älter als 6 Mrd. Jahre
- Angesiedelt in Kugelsternhaufen, Elliptischen Galaxien und galaktischen Halos

## Pop III Sterne

- Sehr frühe Population von Sternen, entstanden kurz nach dem Urknall
- Bildung der ersten Metalle in SN Explosionen sehr massereicher Sterne (Pop II weisen auch Metalle auf)
- Falls massearme Sterne gebildet wurden: hypothetische Population kalter Zwerge



# Kugelsternhaufen

Sterne der Population II

alt, massearm,  
Sternbildung findet nicht  
mehr statt.

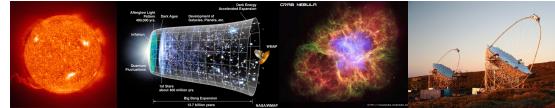
Gleichzeitig gebildet

Gleiche chemische  
Zusammensetzung

The globular cluster Messier 30



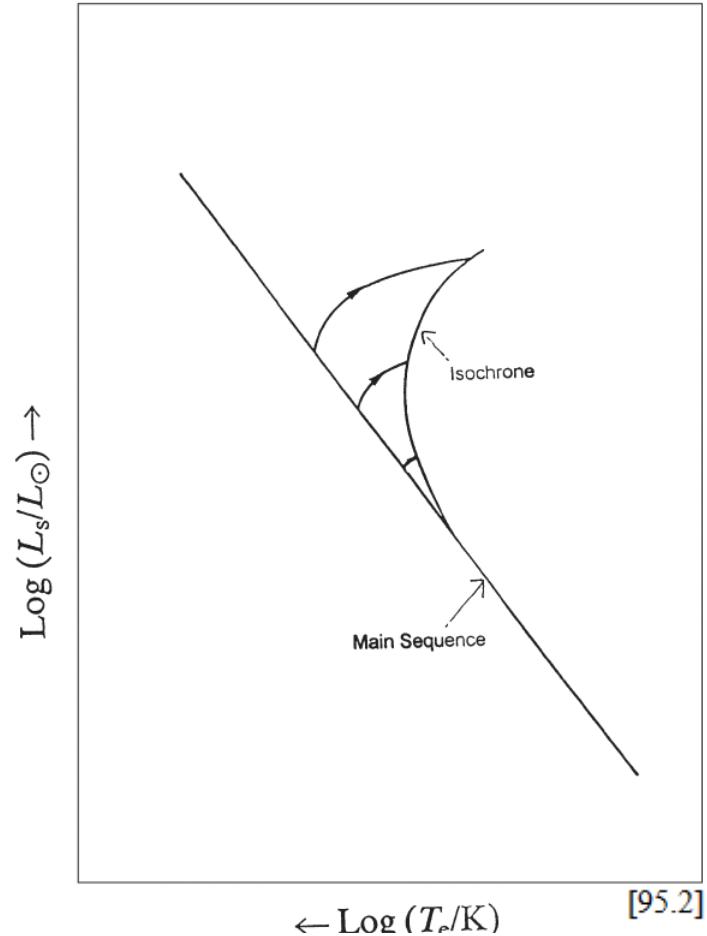
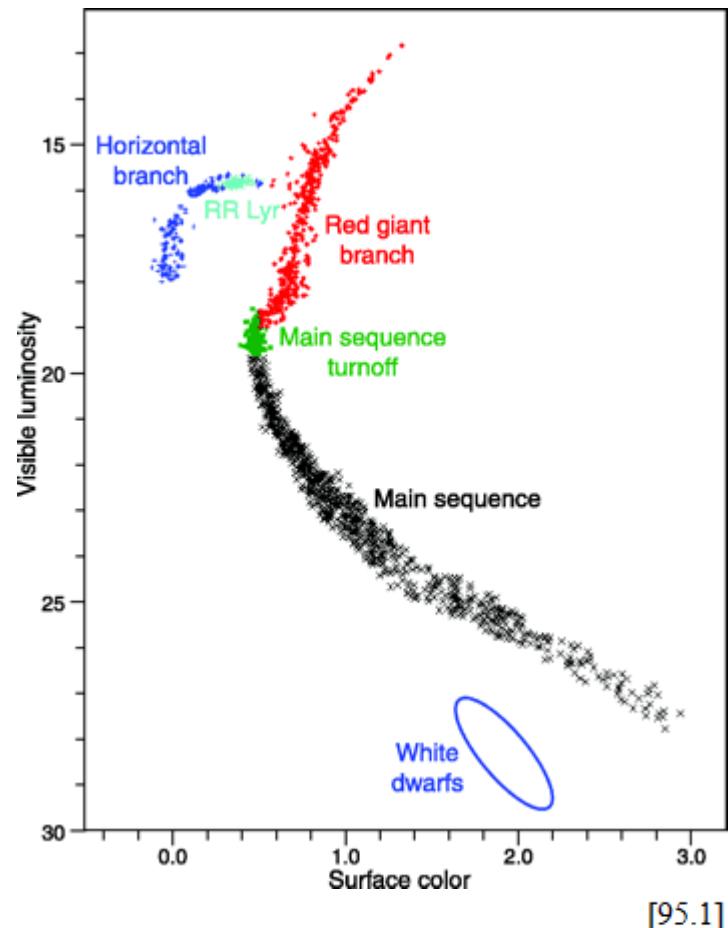
Two Micron All Sky Survey  
- Southern Facility -  
2MASS Atlas Image Mosaic  
Infrared Processing and Analysis Center & University of Massachusetts



# HR Diagramm für Kugelsternhaufen

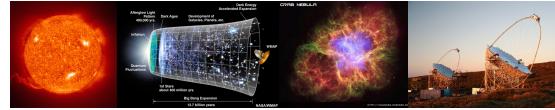
Massereiche,  
heiße Sterne  
verlassen die  
HR früher

-> Alter von  
Haufen kann  
Anhand  
des HRD der  
Stern-  
Population  
bestimmt  
werden



$$t = \geq 10^{10} a$$

$$t_{Glob\ C\ell} = (11 \dots 17) 10^9 a$$



# Pulsationsveränderliche Sterne

Sterne im “Instabilitätsstreifen” des H–R Diagramms

Periodendauer:

Mira-Sterne  
(Rote Riesen)

80 – 1000 Tage

$\delta$ -Cepheiden  
(Überriesen)

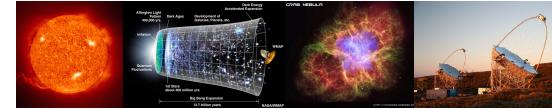
3 – 50 Tage

RR-Lyrae-Sterne  
(Rote Riesen)

< 1 Tag



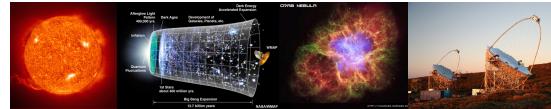
[96.1]



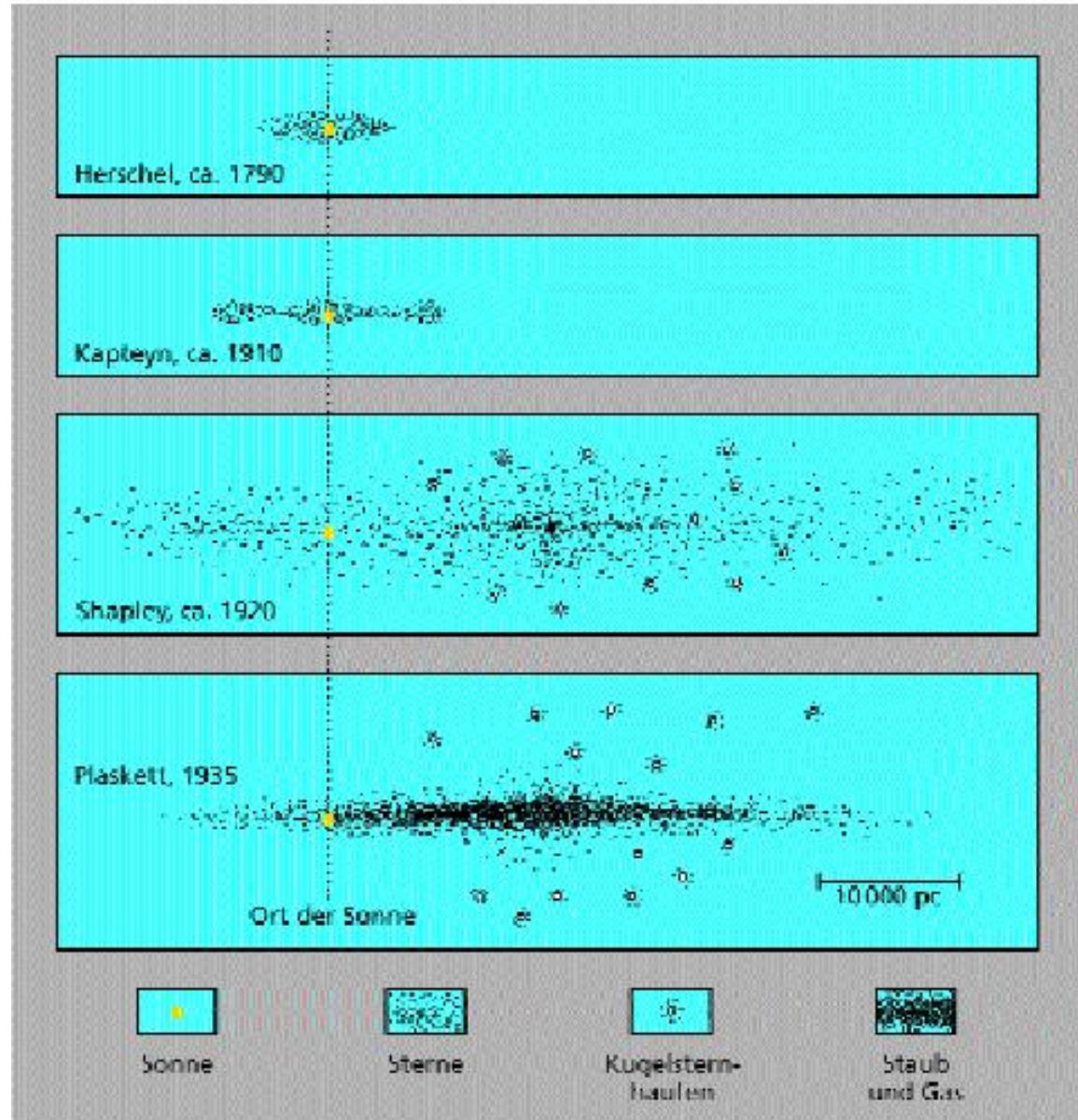
# Galaxien

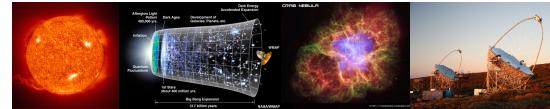


[97.1]

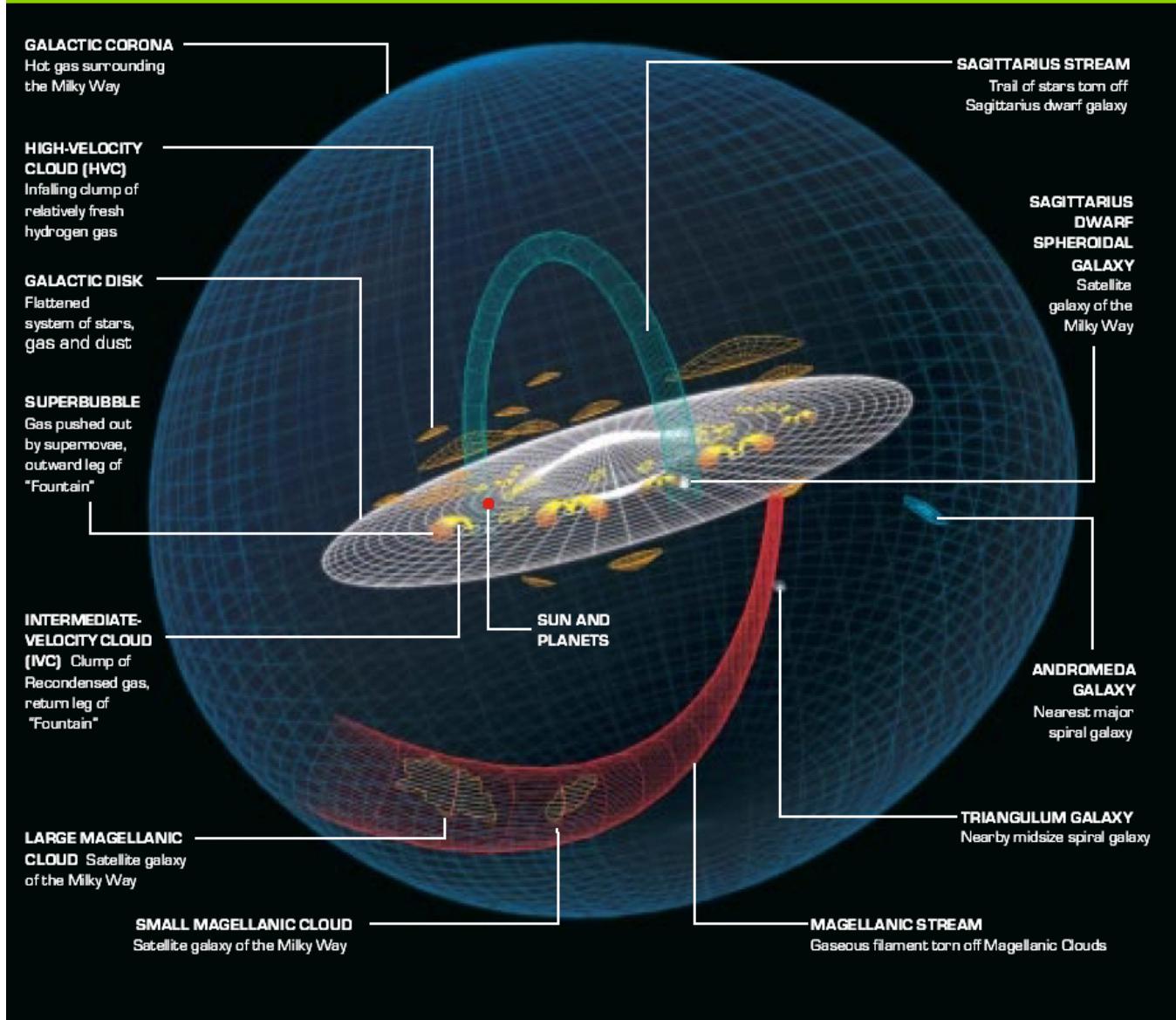


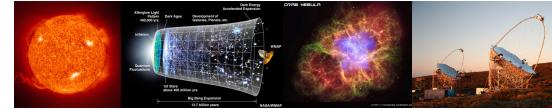
## Entwicklung der menschlichen Vorstellung von unserer Rolle in der Galaxie





## OUR GALAXY AND ITS NEIGHBORHOOD





# Galaxienkataloge

Messier-Katalog: 1764–1782;  
109 diffuse Objekte, die keine Kometen sind

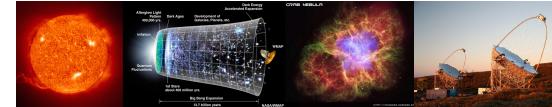
New General Catalogue: 1880er

7840 Objekte; Johan Ludvig Emil Dreyer nach  
Beobachtungen von Herschel

1895 und 1908 erweitert um die Index-Kataloge IC I und  
IC II um insges. 5500 Objekte.

Principal Galaxies Catalogue (PGC)

Astr. aus Lyon + Meudon, 1989 ; 73.197 Objekte  
2003 auf 983261 Obj. erweitert  
> HYPERLEDA- Datenbank

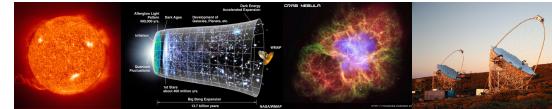


# 1764–1782: Messierkatalog

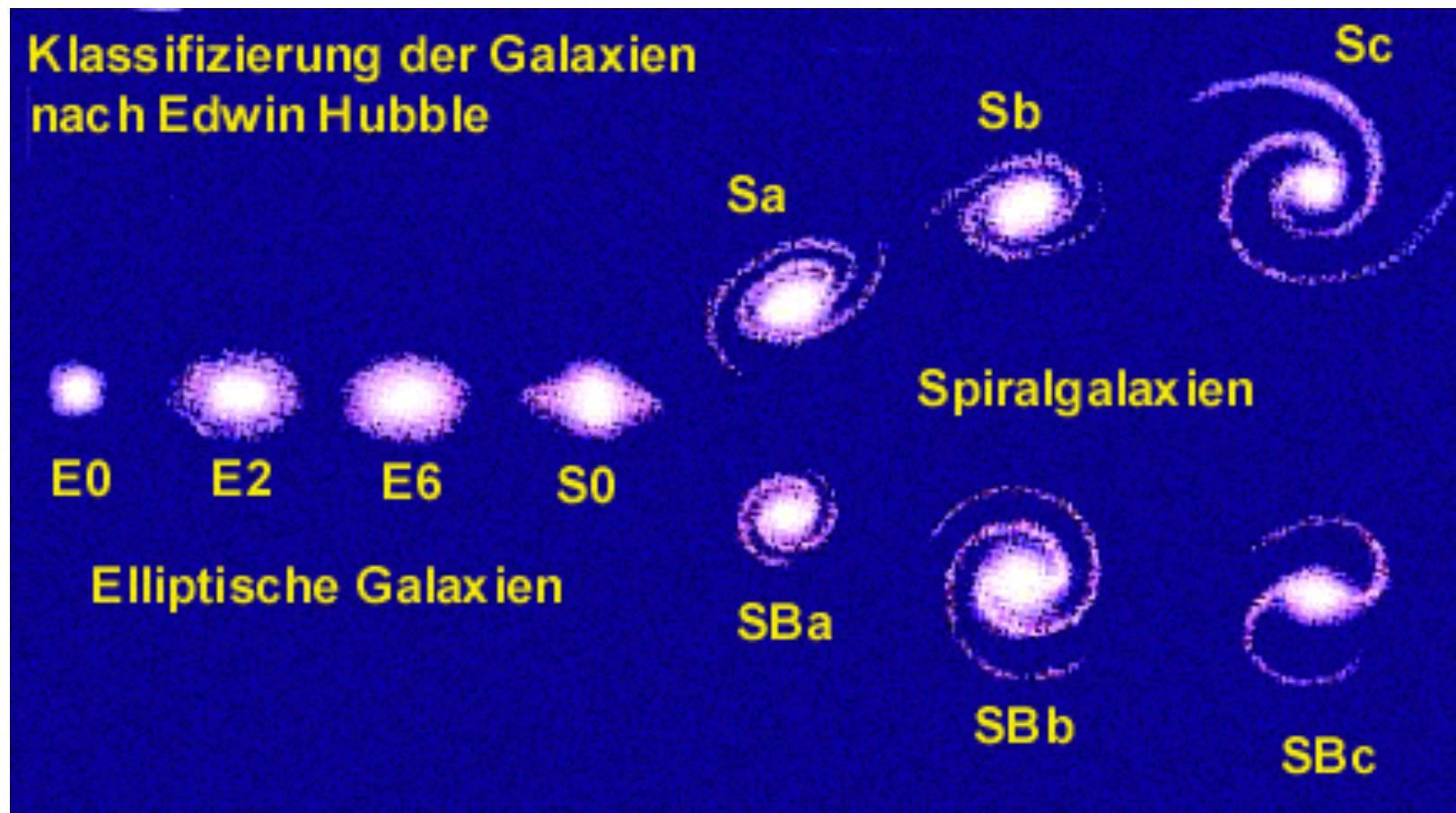
[100.1]

- Charles Messier: Jagd nach Kometen
- Gestört durch ähnlich aussehende, diffuse, aber örtlich unveränderliche Objekte am Himmel
- Katalogisierung von 110 Objekten, um sie bei der Suche auszuschließen
- Messierkatalog: Sammlung von Galaxien, Nebel, Sternhaufen
- Interessante, bis dahin unbekannte Objekte

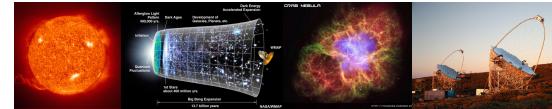




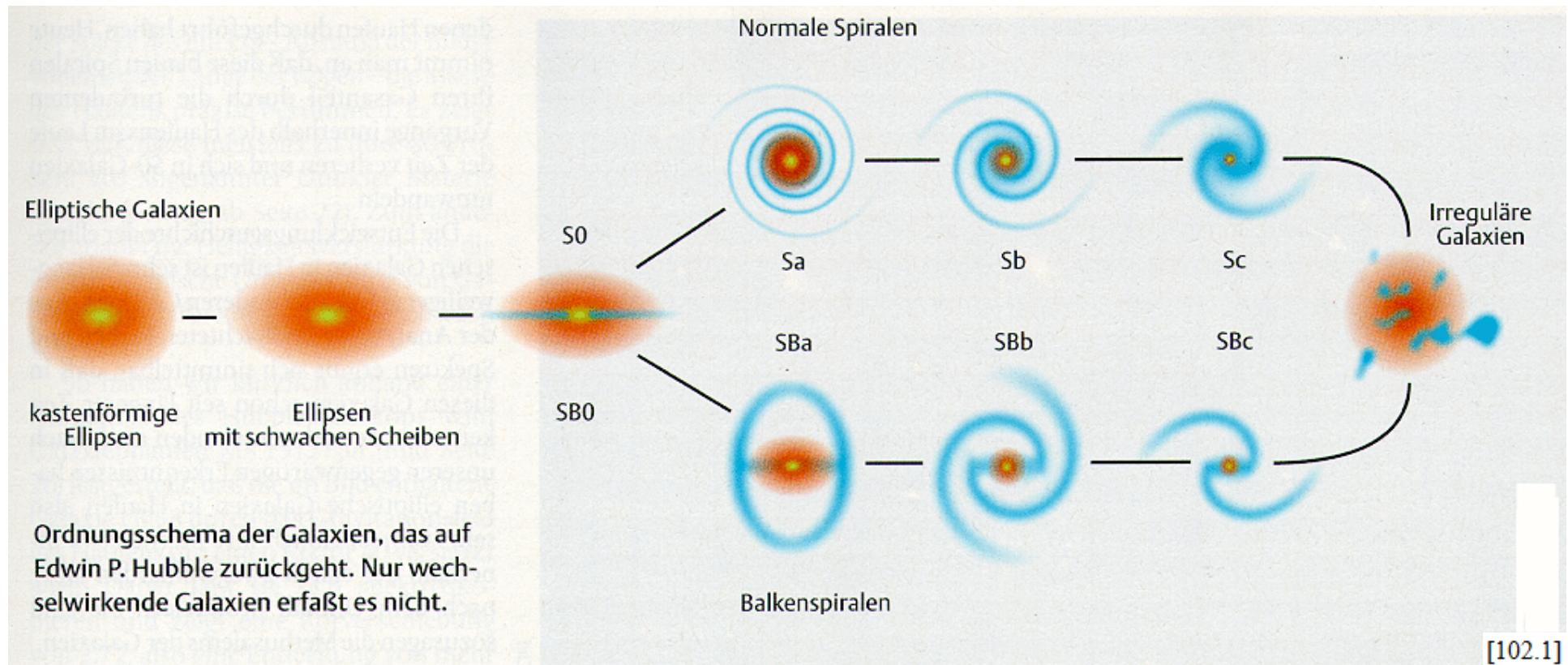
# Galaxien-Klassifizierung



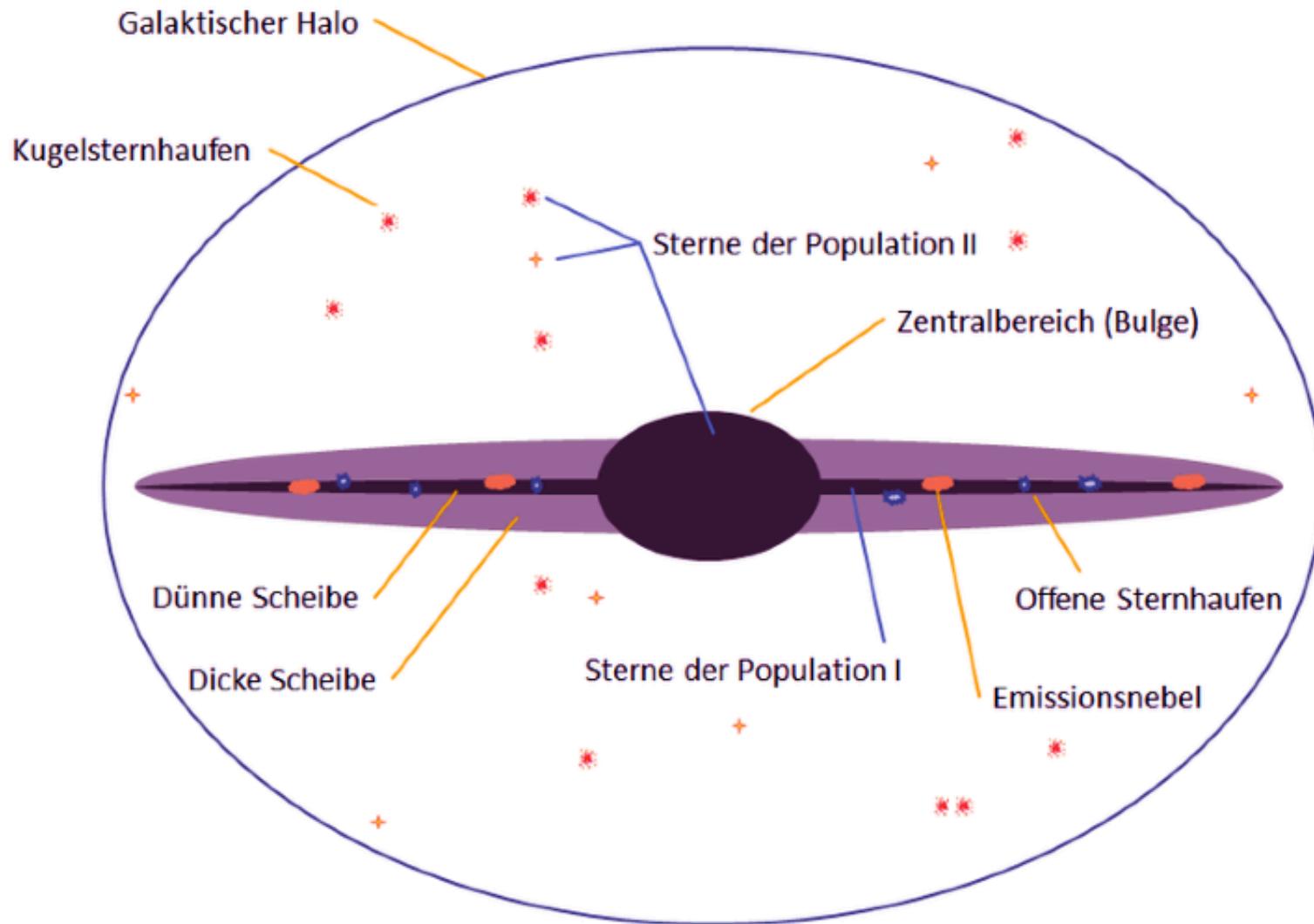
[101.1]

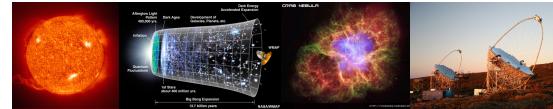


# Galaxien-Klassifizierung

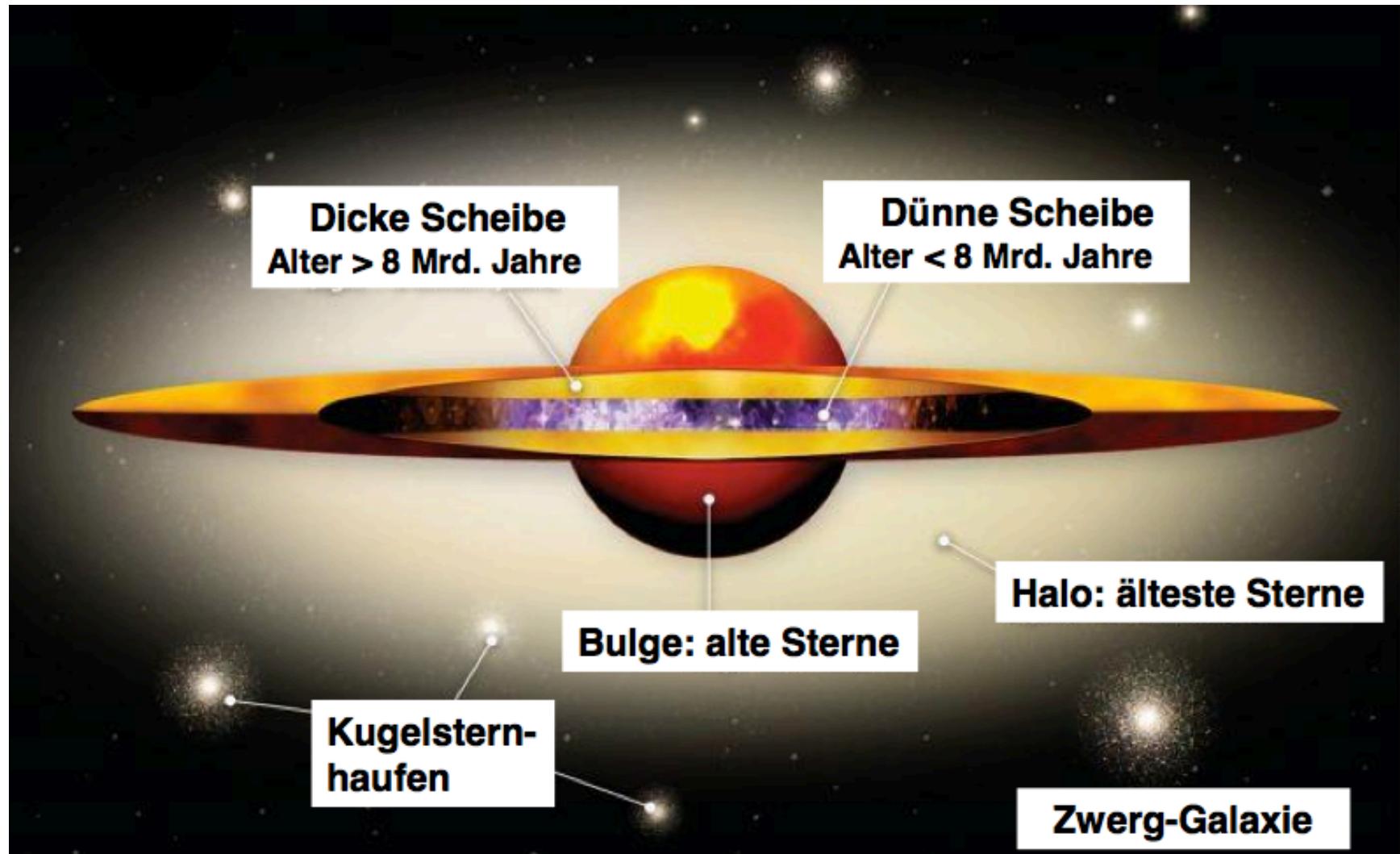


# Struktur Scheibengalaxie

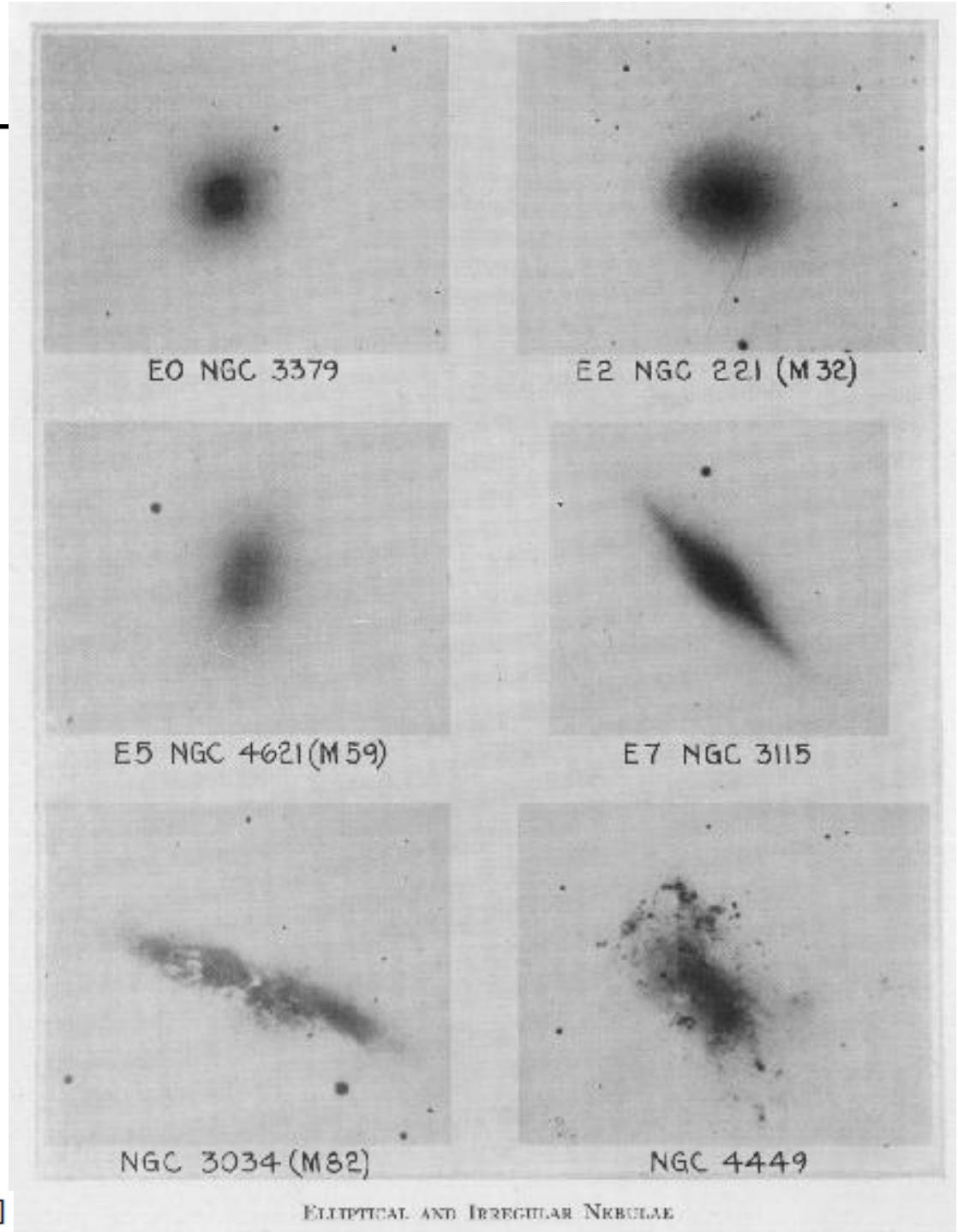




# Aufbau Milchstraße



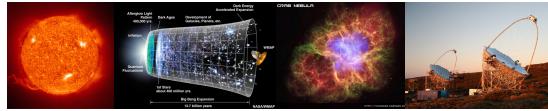
# Übersicht Elliptische Galaxien



# E0: M87

© Anglo-Australian Observatory

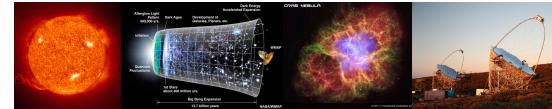




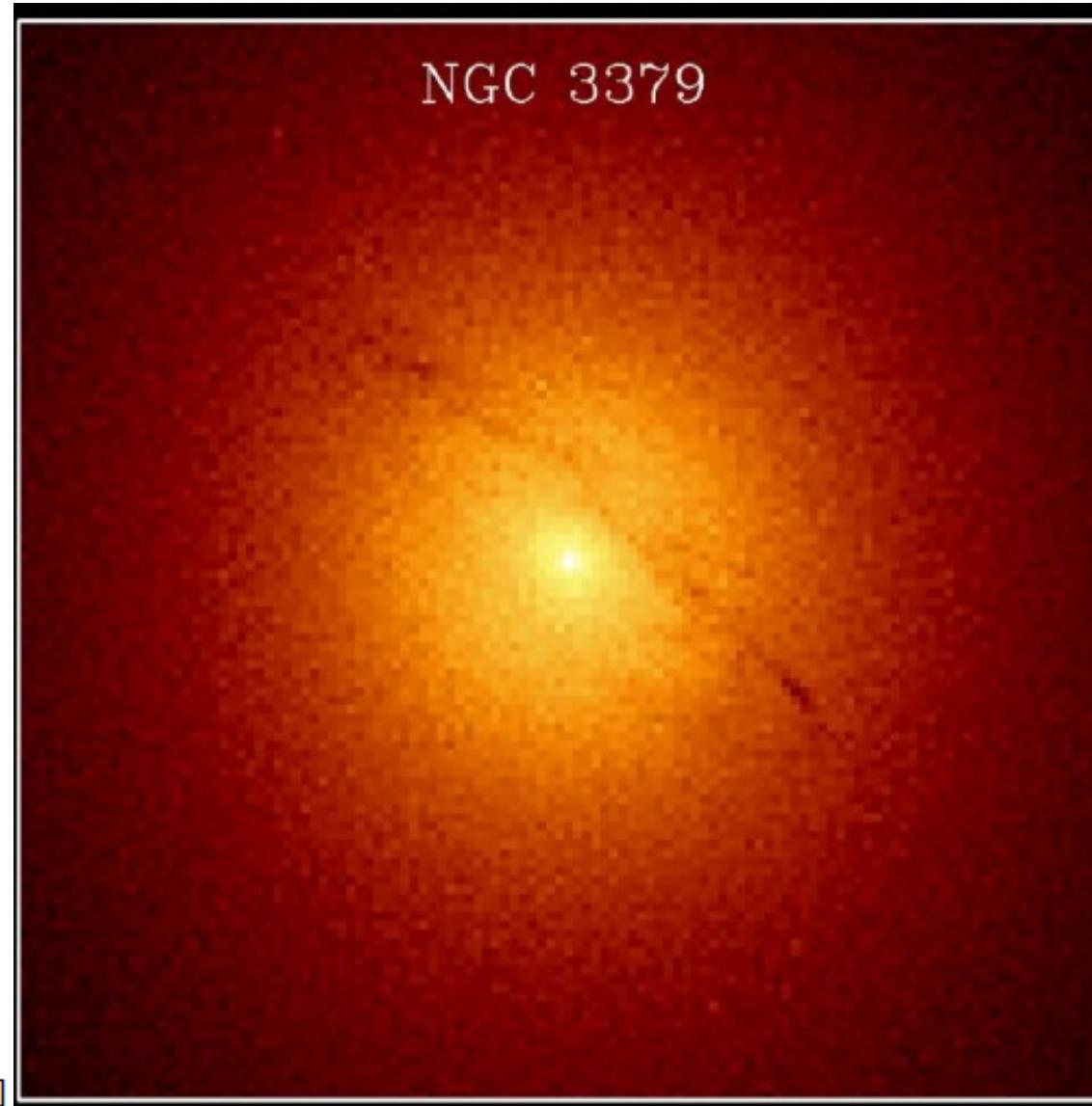
E1: M105

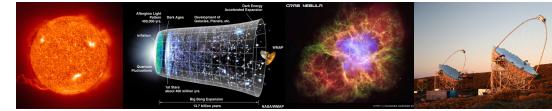


[107.1]

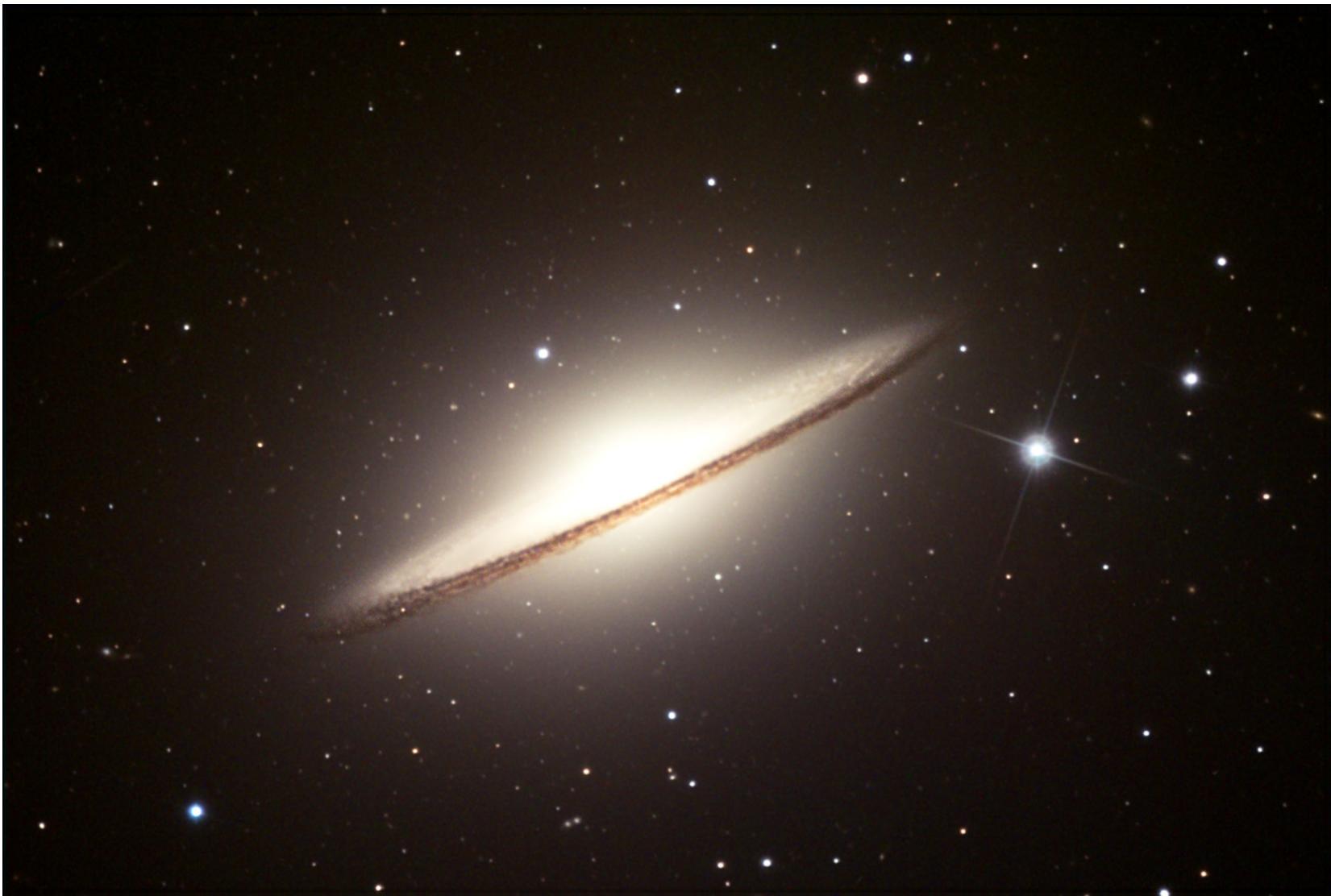


# E1: M105

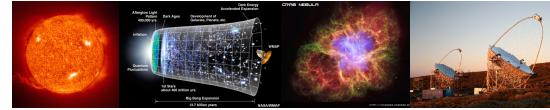




# Sa: M104

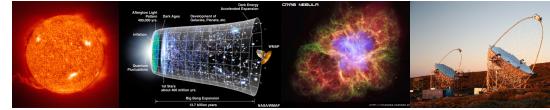


[109.1]

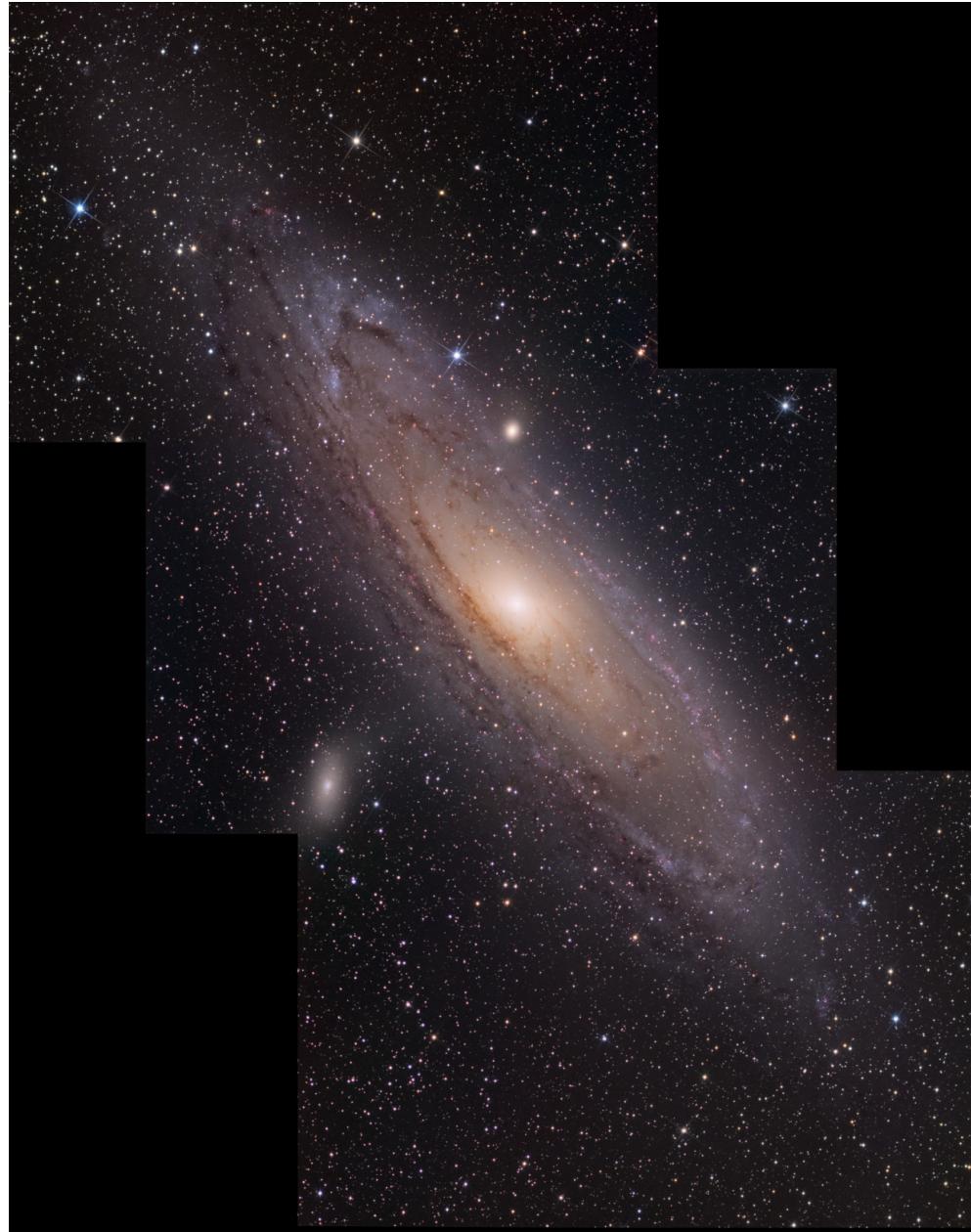


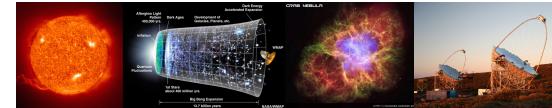
# Sab: M64





# Sb: M31 Andromeda

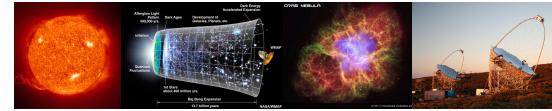




# Sb: M81, Bodes Nebel

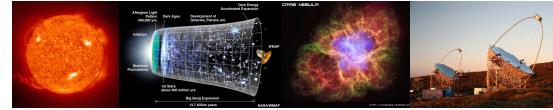


[112.1]



# Sc: M33

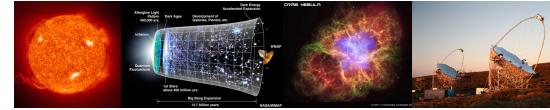




# SBa: M83

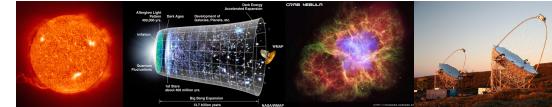
[114.1]





# SBb: M95

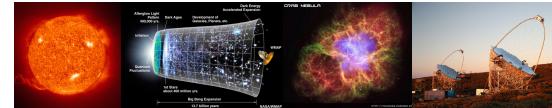




# Offener Sternhaufen: M11

Der  
wilde-Enten-  
Haufen





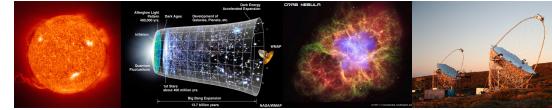
# Offener Sternhaufen: M16 [117.2]



[117.3]

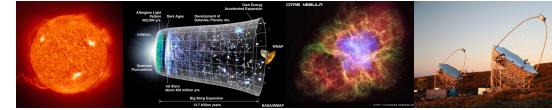
[117.4]

[117.5]



# Kugelsternhaufen: M2

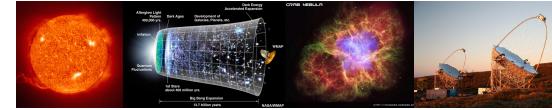




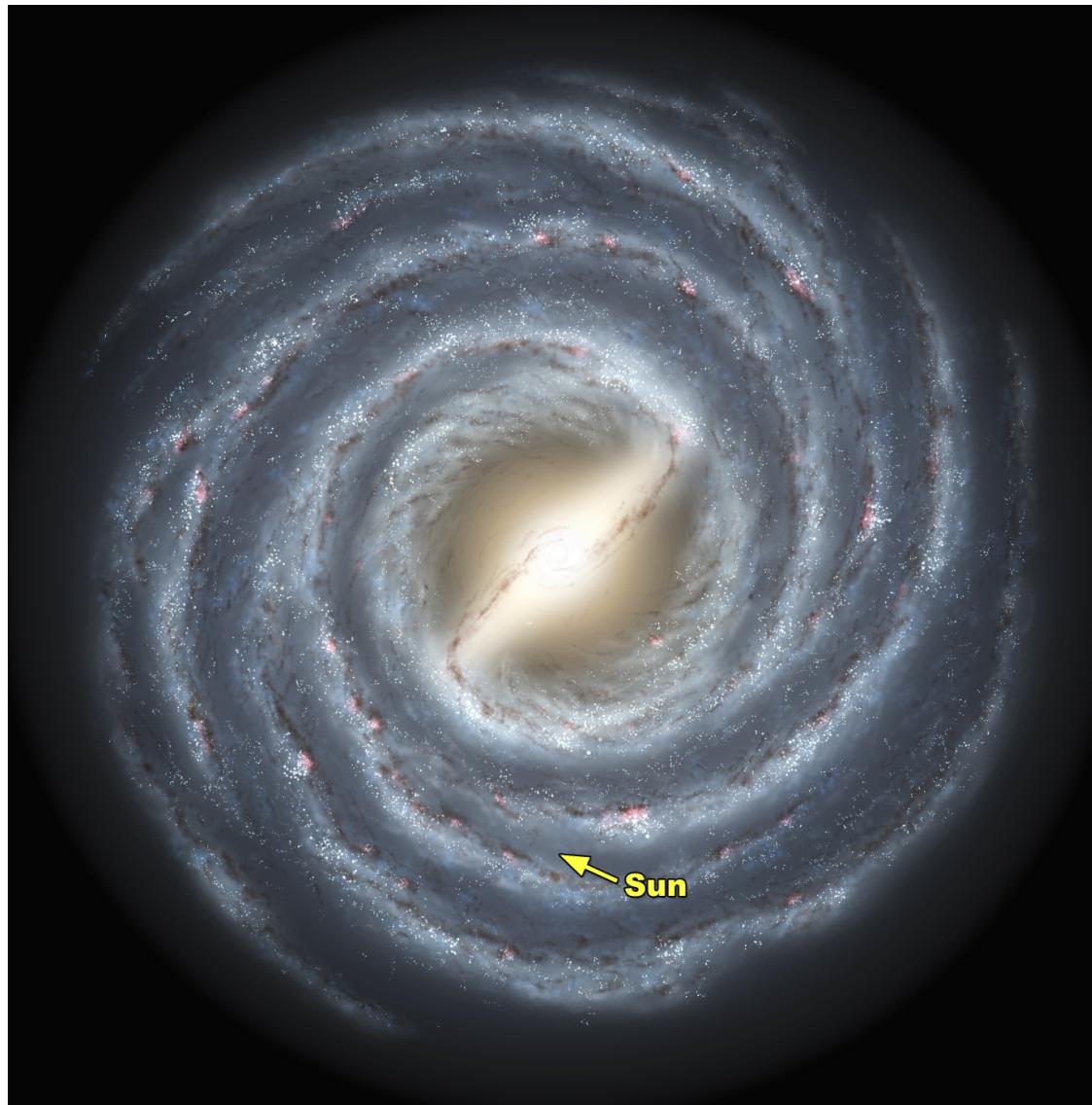
# Irreguläre Galaxie, M82

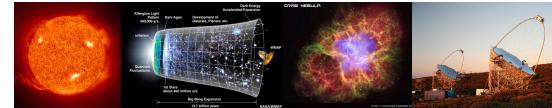
[119.1]



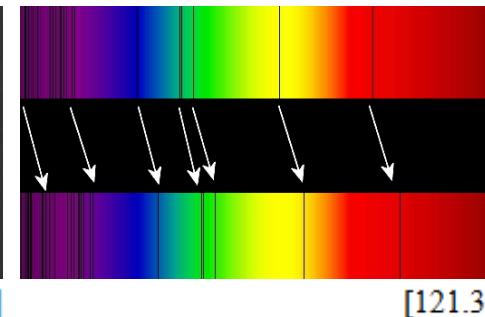
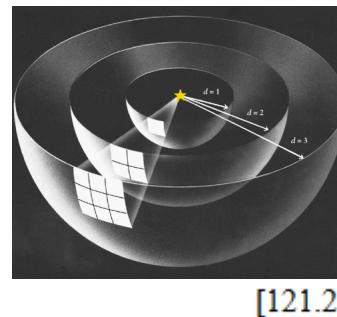
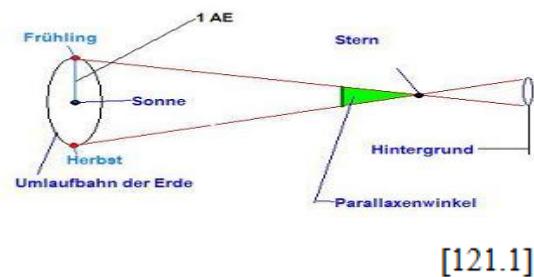


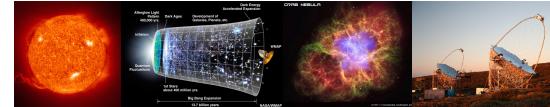
# SB: Milchstraße





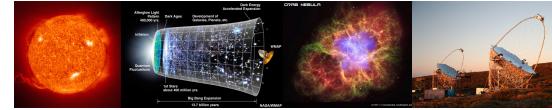
# Astronomische Abstandsbestimmung





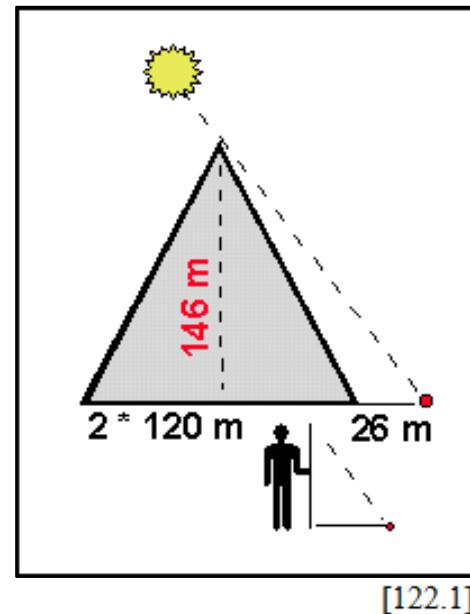
# Die kosmische Abstandsleiter

Objekte	Methode	Abstand
Galaxien, Einzelobjekte	Rotverschiebung	$z=10$
Entfernte Galaxien	Supernovae	$10^{10}$ Lichtjahre
Entfernte Sternhaufen	Hellster Stern im Haufen	$10^9$ Lichtjahre
Spiral-Galaxien	Rotationsgeschwindigkeit	$10^8$ Lichtjahre
Cepheiden (variable Sterne)	Periode-Leuchtkraft- Relation	$5 \cdot 10^7$ Lichtjahre
Sternhaufen	HR-Diagramm	$10^6$ Lichtjahre
Hyaden (Sternhaufen)	Parallaxe	120 Lichtjahre
Planeten & Sterne	Radar	100 Lichtjahre
Nahe Planeten		Lichtminuten

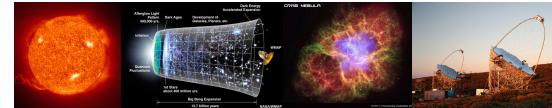


# Astronomische Abstandsbestimmung

Abstandsbestimmung mit geometrischen Methoden ...

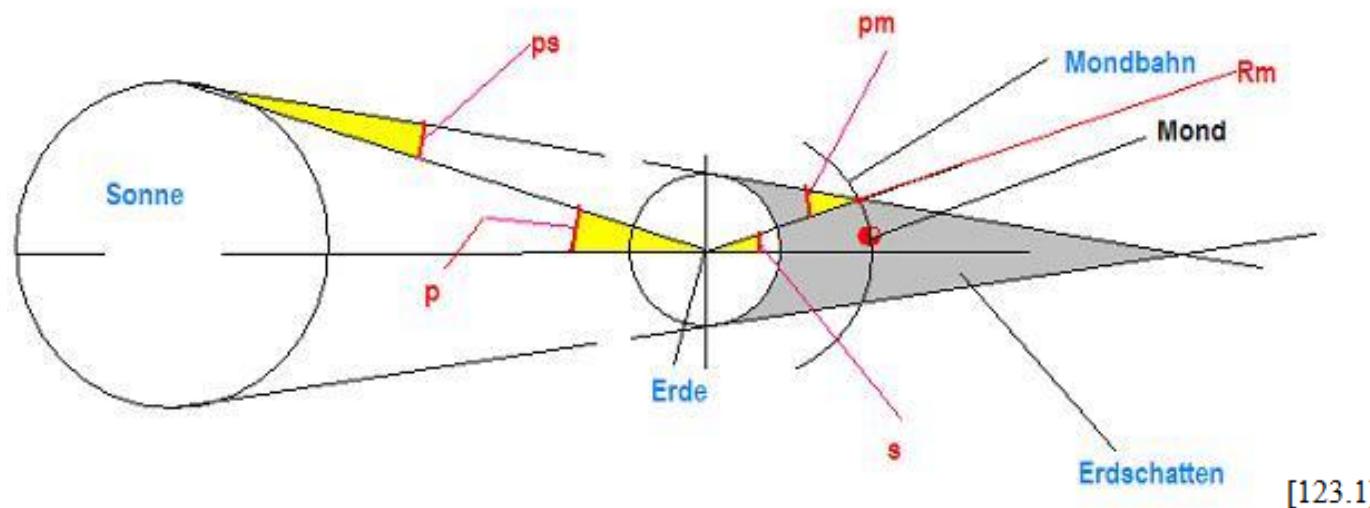


[122.1]



# Aristarch von Samos 310 – 230 v.Chr.

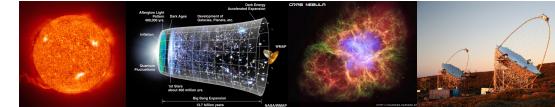
## Mondfinsternis



[123.1]



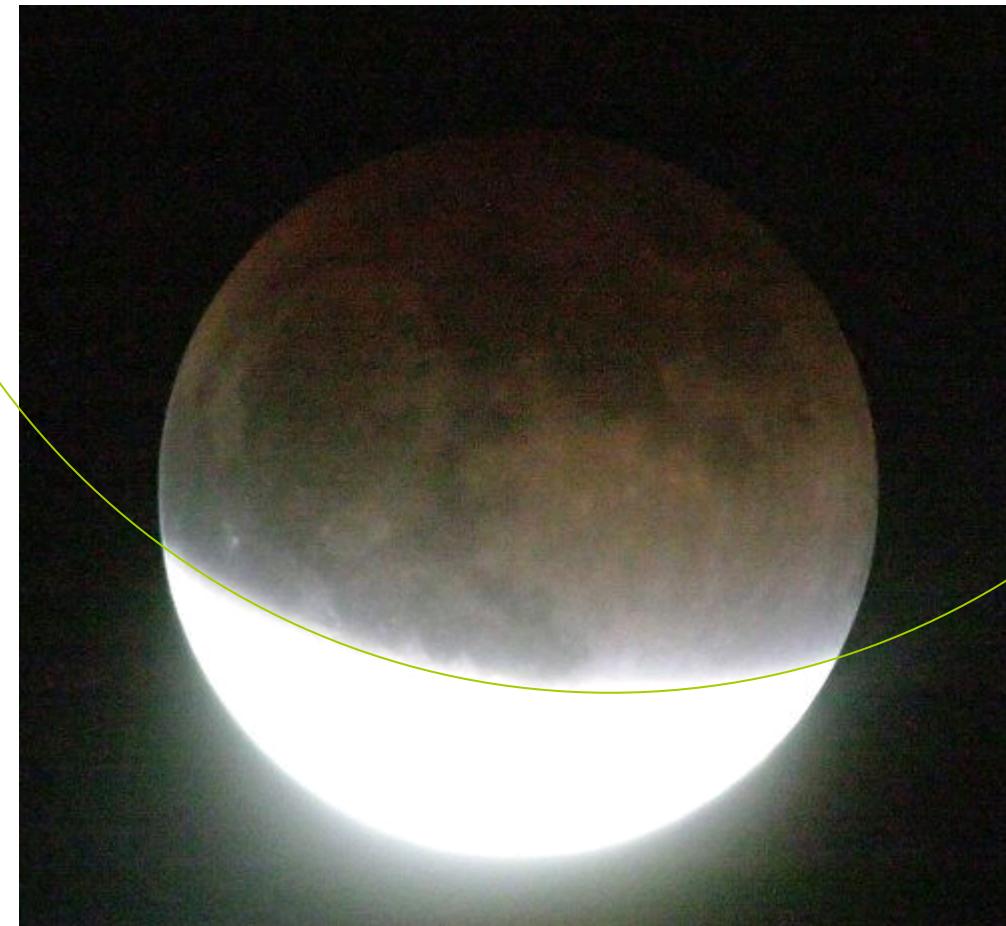
[125.3]



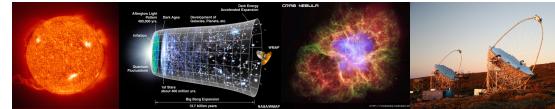
# Aristarch von Samos 310 – 230 v.Chr.

Ist die Erde eine Kugel?

Verhältnis der  
Durchmesser von  
Erde und Mond

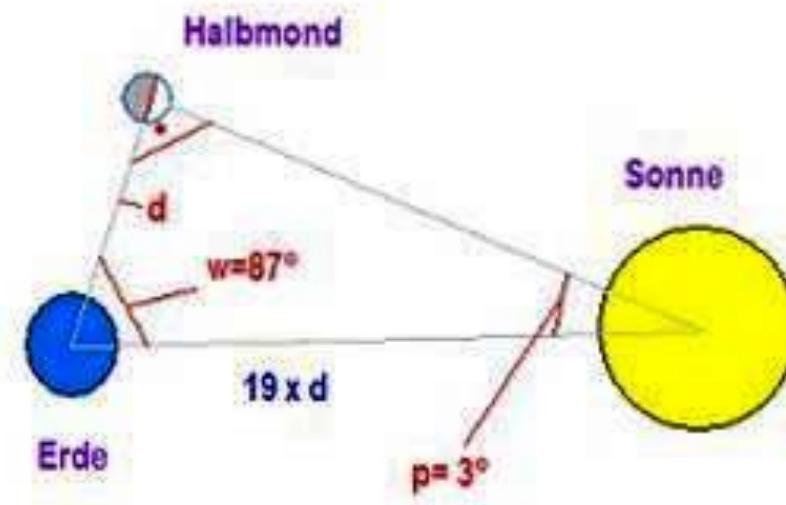


[124.1]



# Aristarch von Samos 310 – 230 v.Chr.

Wie weit ist es bis zur Sonne?



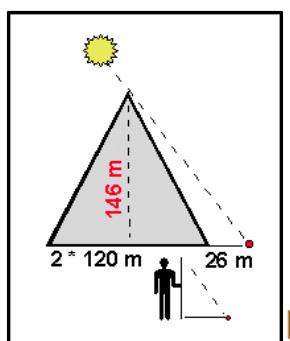
[125.2]

Gemessen:  $\theta = 87^\circ \rightarrow A = 20 \cdot B$

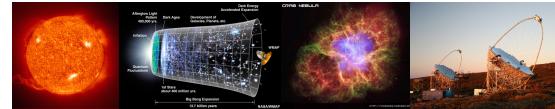
Heute:  $\theta = 89.5^\circ \rightarrow A = 400 \cdot B$



[125.3]

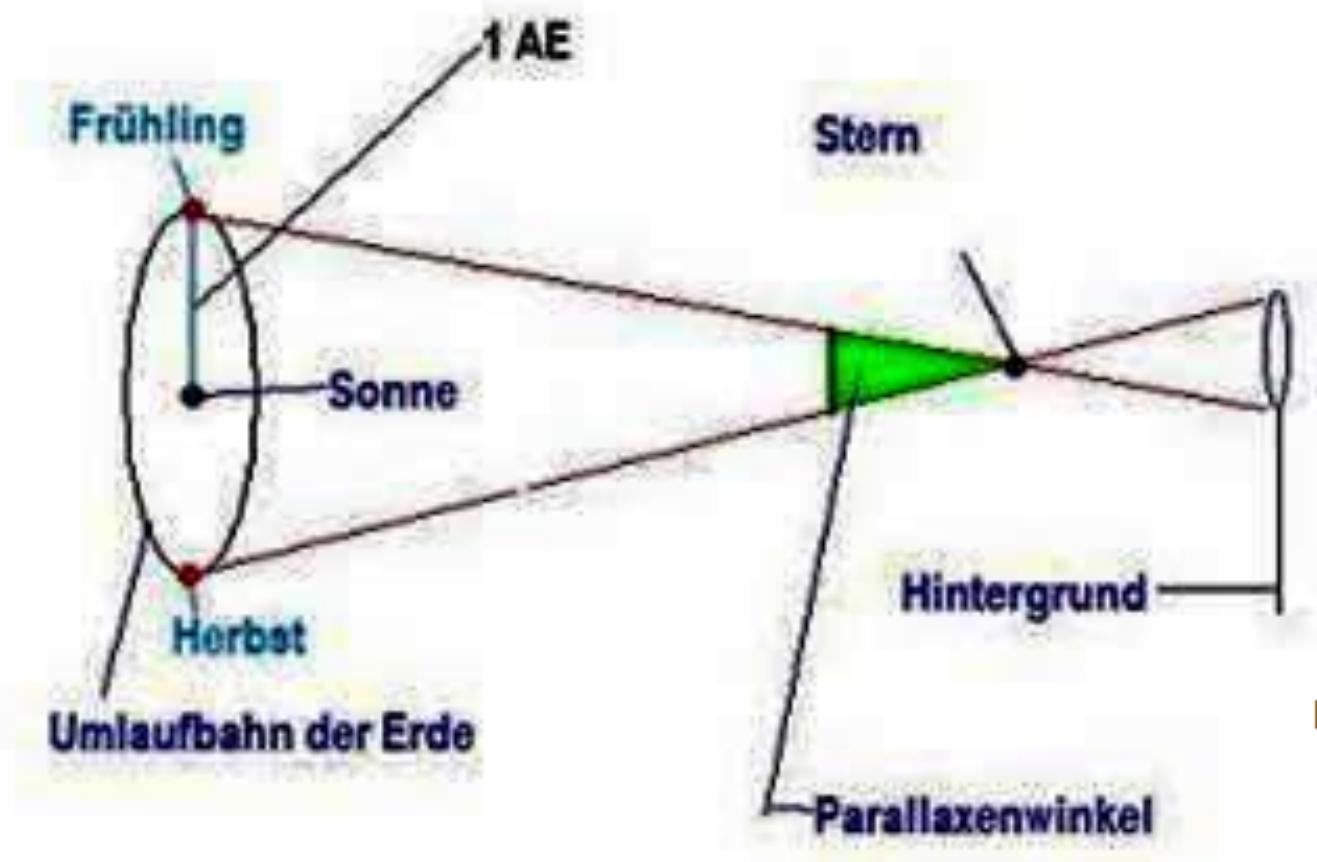


[125.1]

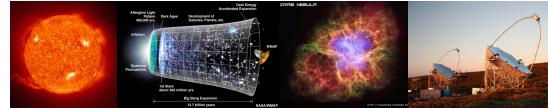


# Aristarch von Samos 310 – 230 v.Chr.

## Parallaxenmethode

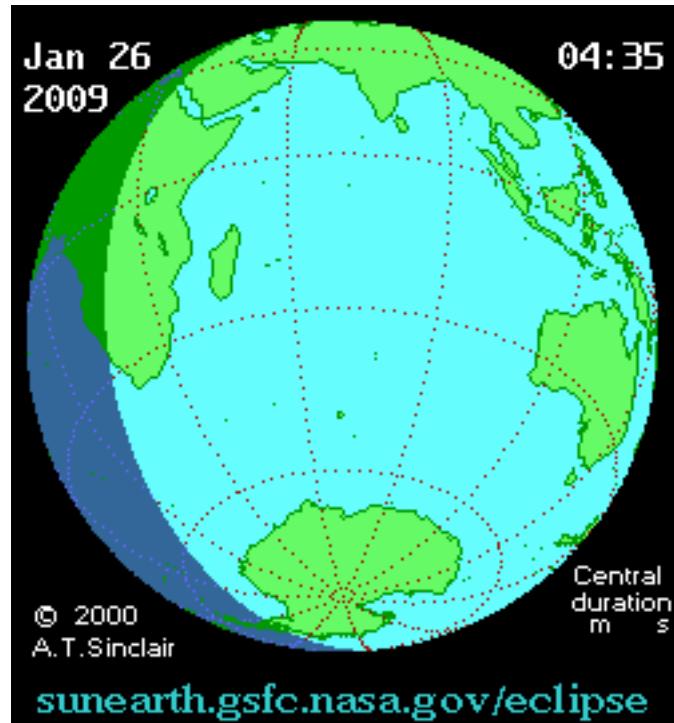


[126.1]



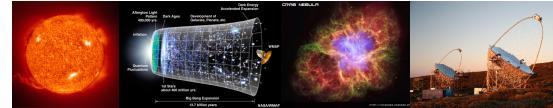
# Sonnenfinsternis

[127.1]

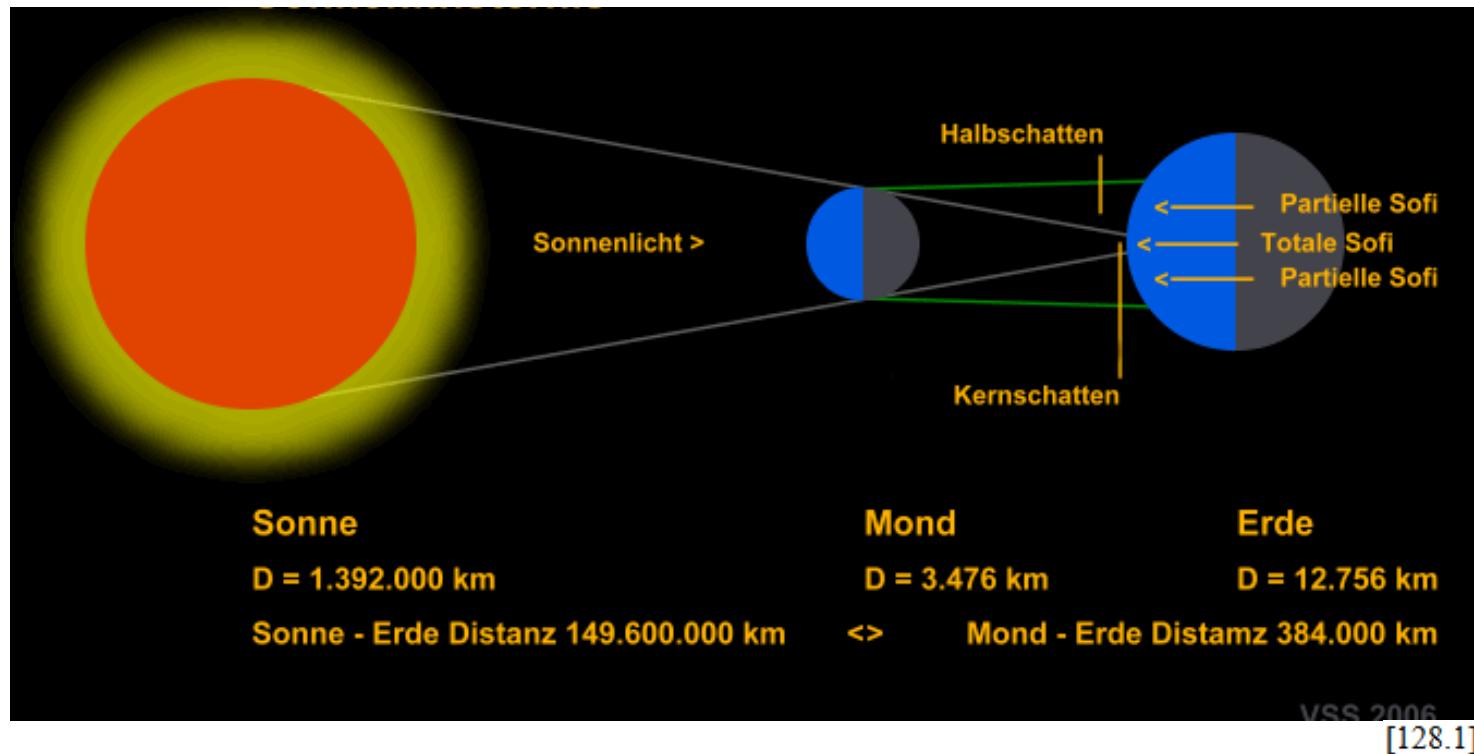


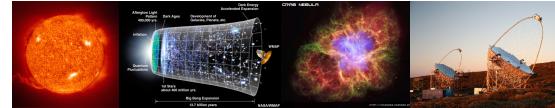
[127.2]

Größenverhältnis Sonne – Mond



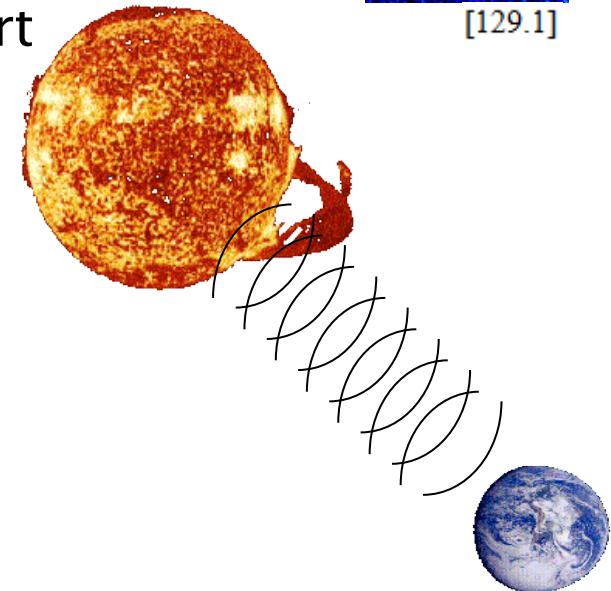
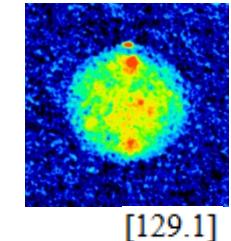
# Sonnenfinsternis



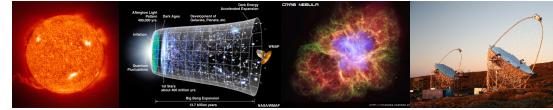


# Radarmessungen

Radarsignale werden von der Erde zu der Sonne oder anderen Planeten gesandt, dort reflektiert und auf der Erde wieder aufgefangen.  
Aus der Laufzeit wird der Abstand berechnet.  
Z.B. Erde-Sonne: 8 Minuten.



Der Abstand von 150 Millionen km kann mit einem Fehler von wenigen cm gemessen werden.



# Größenklasse (magnitudo)

Hipparchus (190–125 v. Chr.):

Einteilung der sichtbaren Sterne nach Helligkeit  
 $m=1$  hell;  $m=6$  schwach

Modern:

logarithmische Skala  
5 Größenklassen = Faktor 100 in Helligkeit

$m$ : Scheinbare Größenklasse

$M$ : Absolute Größenklasse, normiert auf Abstand  $d=10$  pc

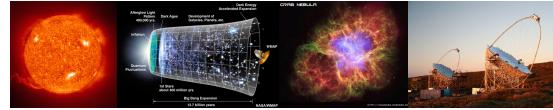
$$M = m - 5 \log(d / 10 \text{ pc}) + 5$$

$m-M$  = Distanz-Modulus

Bolometrische Größenklasse: Gemessen über alle Wellenbereiche

UBV Größenklasse gemessen bei:

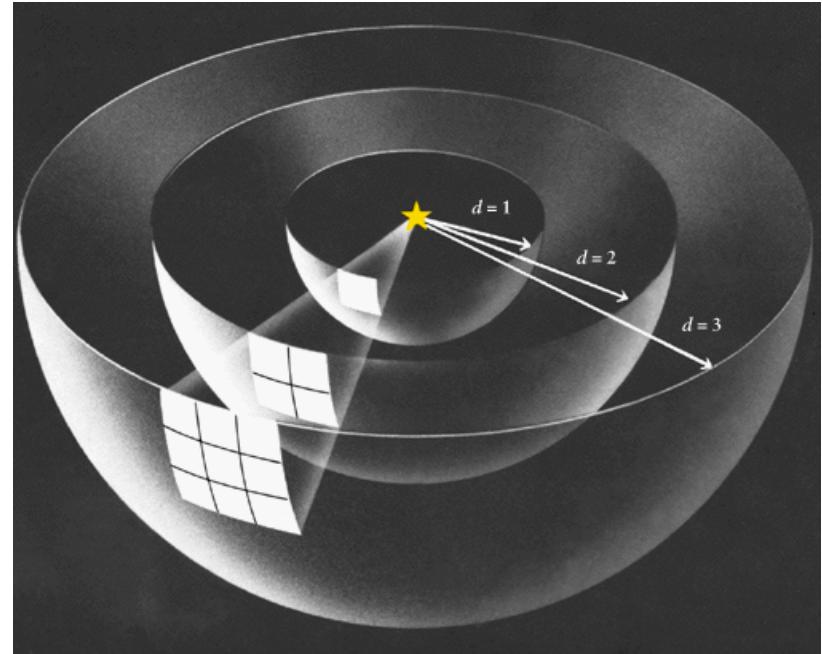
3650 Å, ultraviolet  
4400 Å, blau  
5500 Å, sichtbar



# Fluss & Luminositätsabstand:

$$F = \frac{L}{4\pi d^2}$$

$$\begin{aligned} F &= \text{Fluß} & [ \text{erg}/(\text{s cm}^2) ] \\ L &= \text{Luminosität} & [ \text{erg/s} ] \\ d &= \text{Luminositätsabstand} [ \text{cm} ] \end{aligned}$$

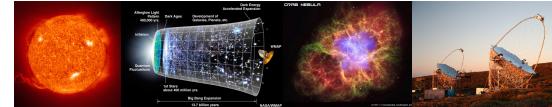


[130.1]

Verbindung zur Definition der Größenklasse:

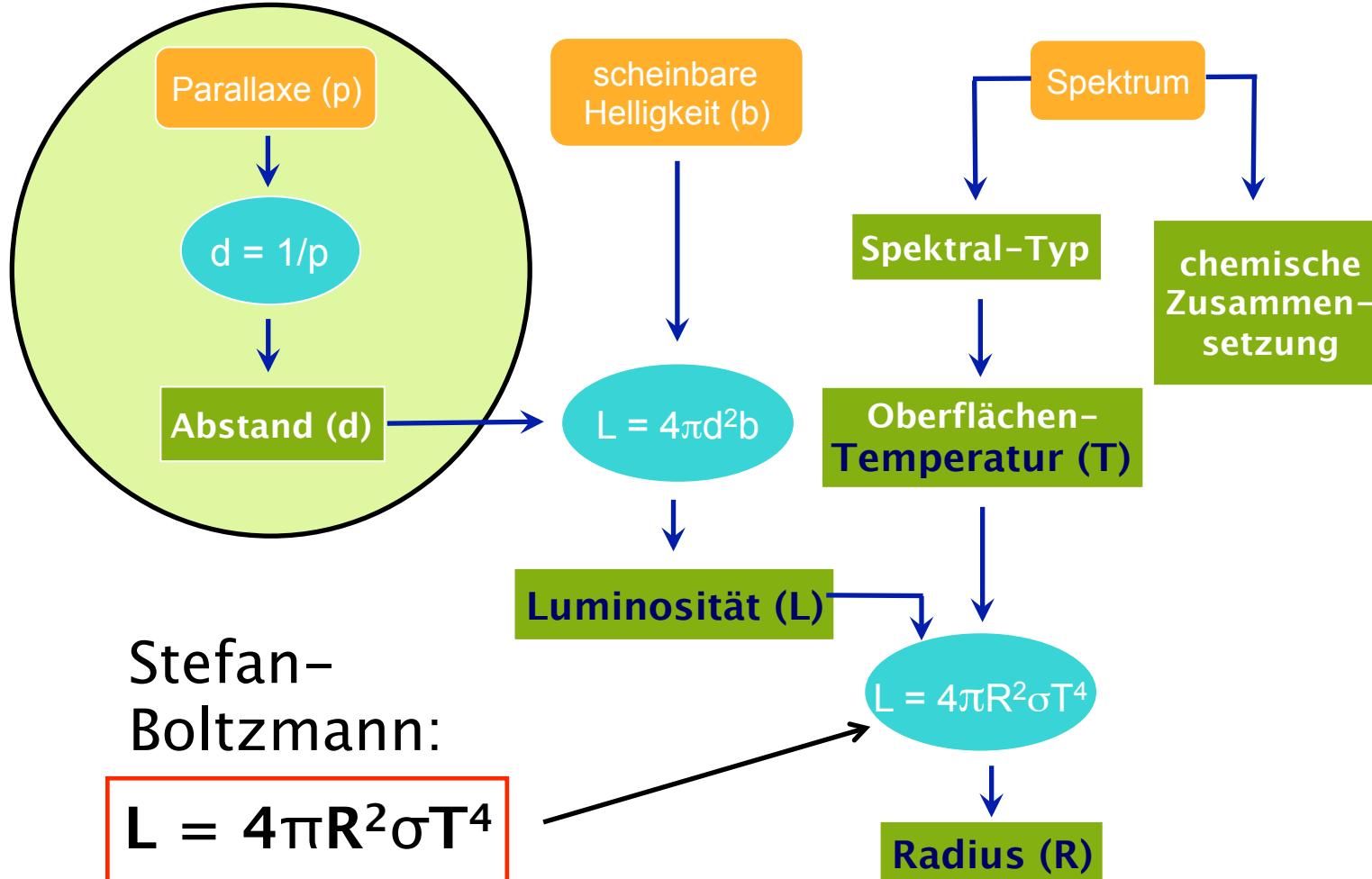
$$F = \frac{F_{10}}{100^{(m-M)/5}} = F_{10} \left( \frac{d}{10 \text{ pc}} \right)^{\frac{2}{5}}$$

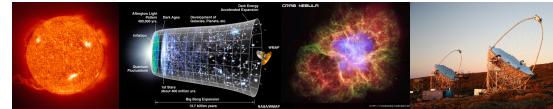
$F_{10}$  = Fluß, normiert auf eine Entfernung von 10 pc



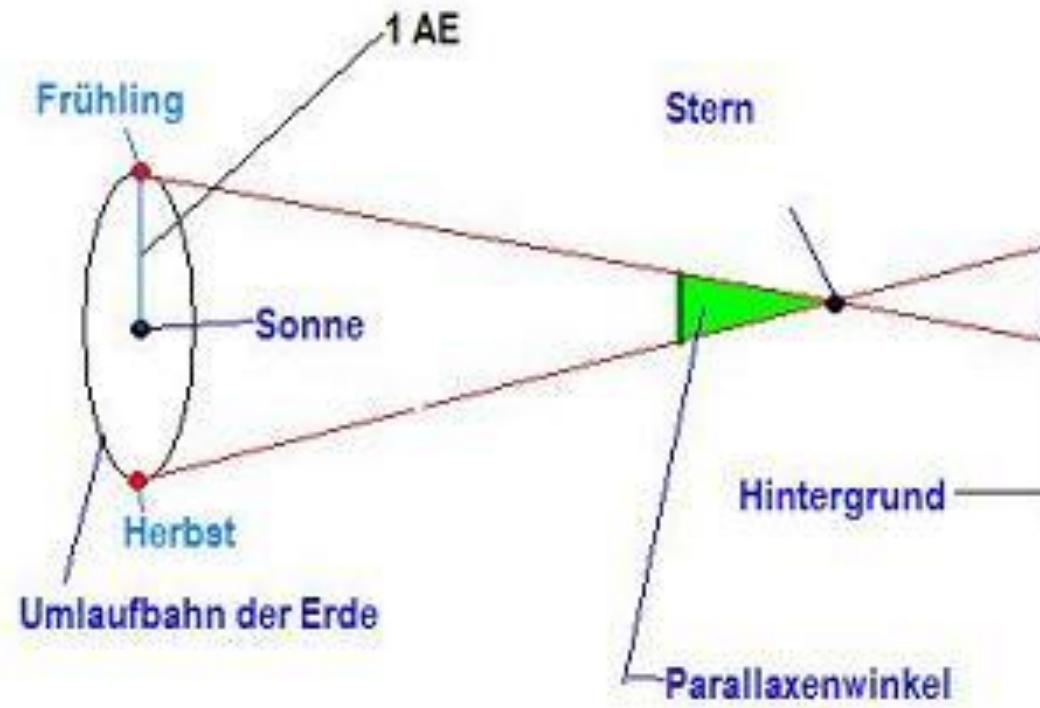
# Fluss & Luminositätsabstand:

Sterne nach Typ sortieren: Zwergen, Riesen, Überriesen

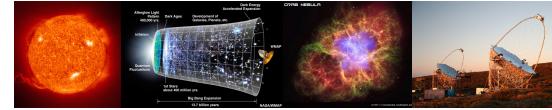




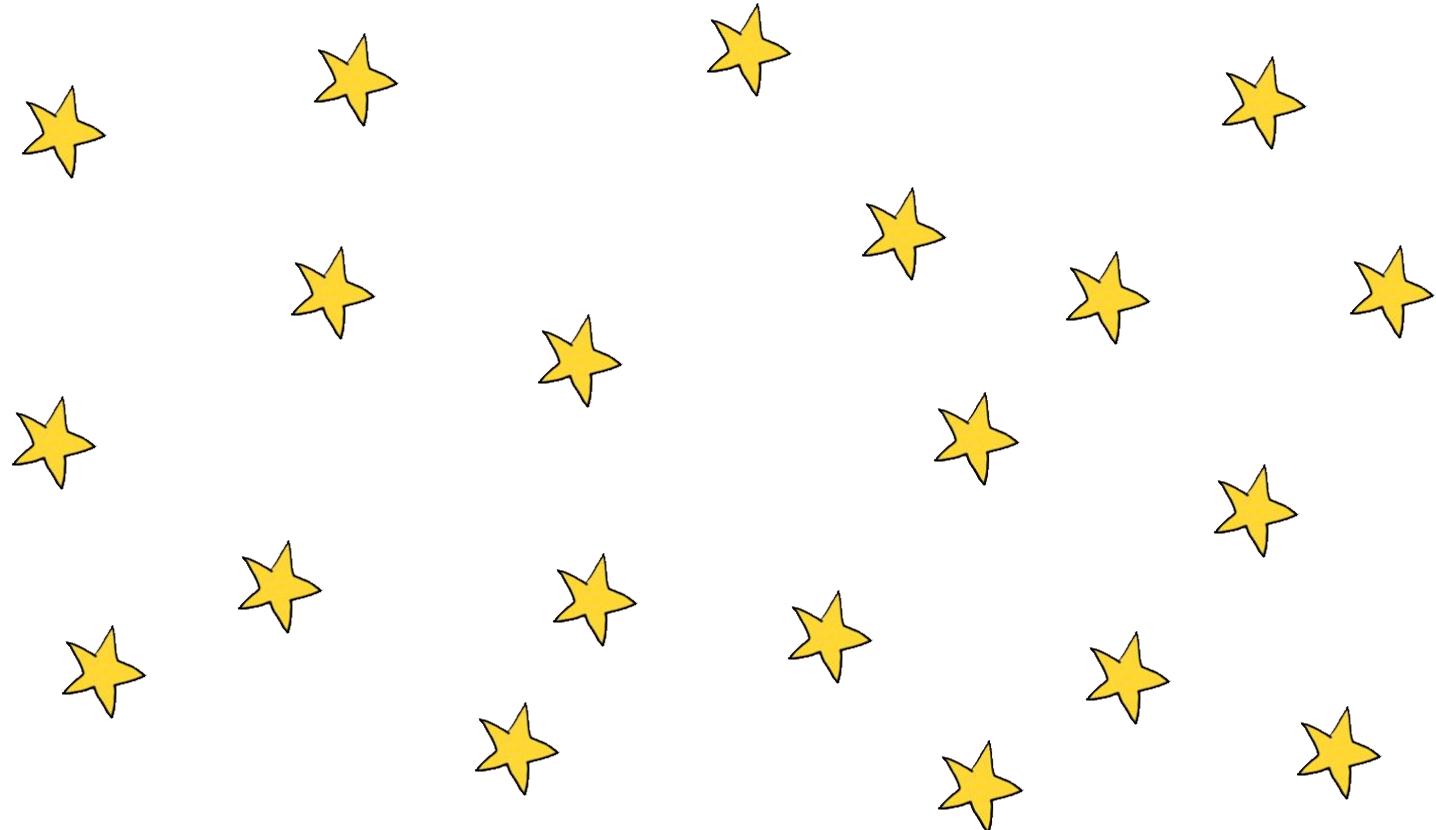
## Parallaxenmethode

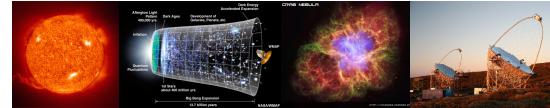


[131.1]



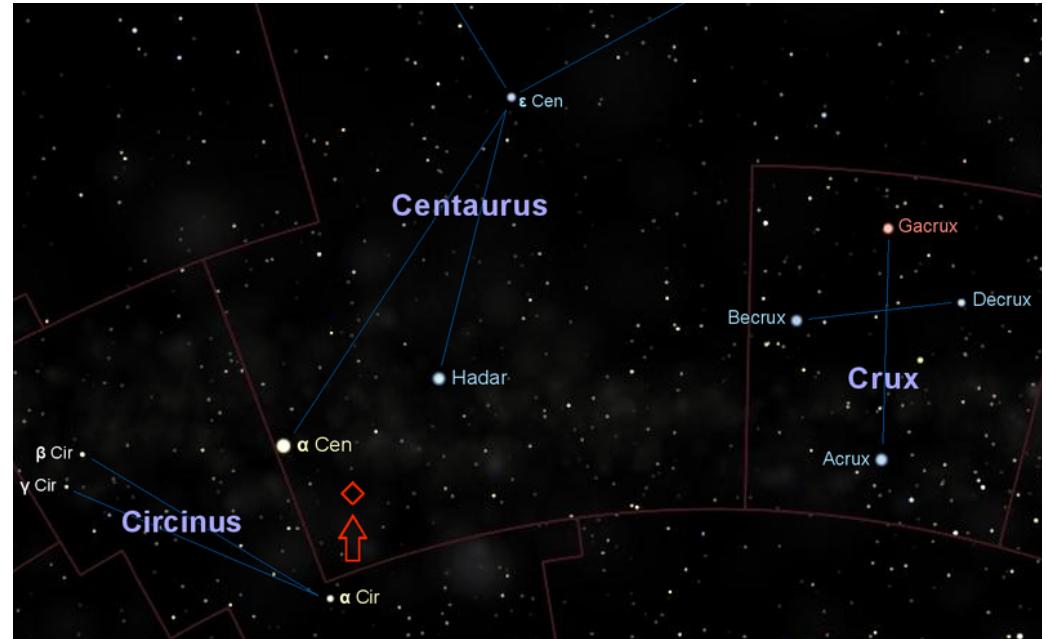
# Selbstversuch





# Proxima Centauri

- Sonnennächster Stern
- Abstand:  $43 * 10^{12}$  km  
 $= 4,22$  Lichtjahre  
 $= 1,3$  pc
- Scheinbare Helligkeit: 11,05 Mag

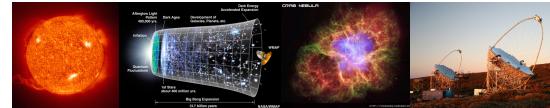


⇒ Teleskop mit 8 cm Spiegel und  
Auflösung von 1 Bogensekunde =  $1^\circ/3600$   
nötig

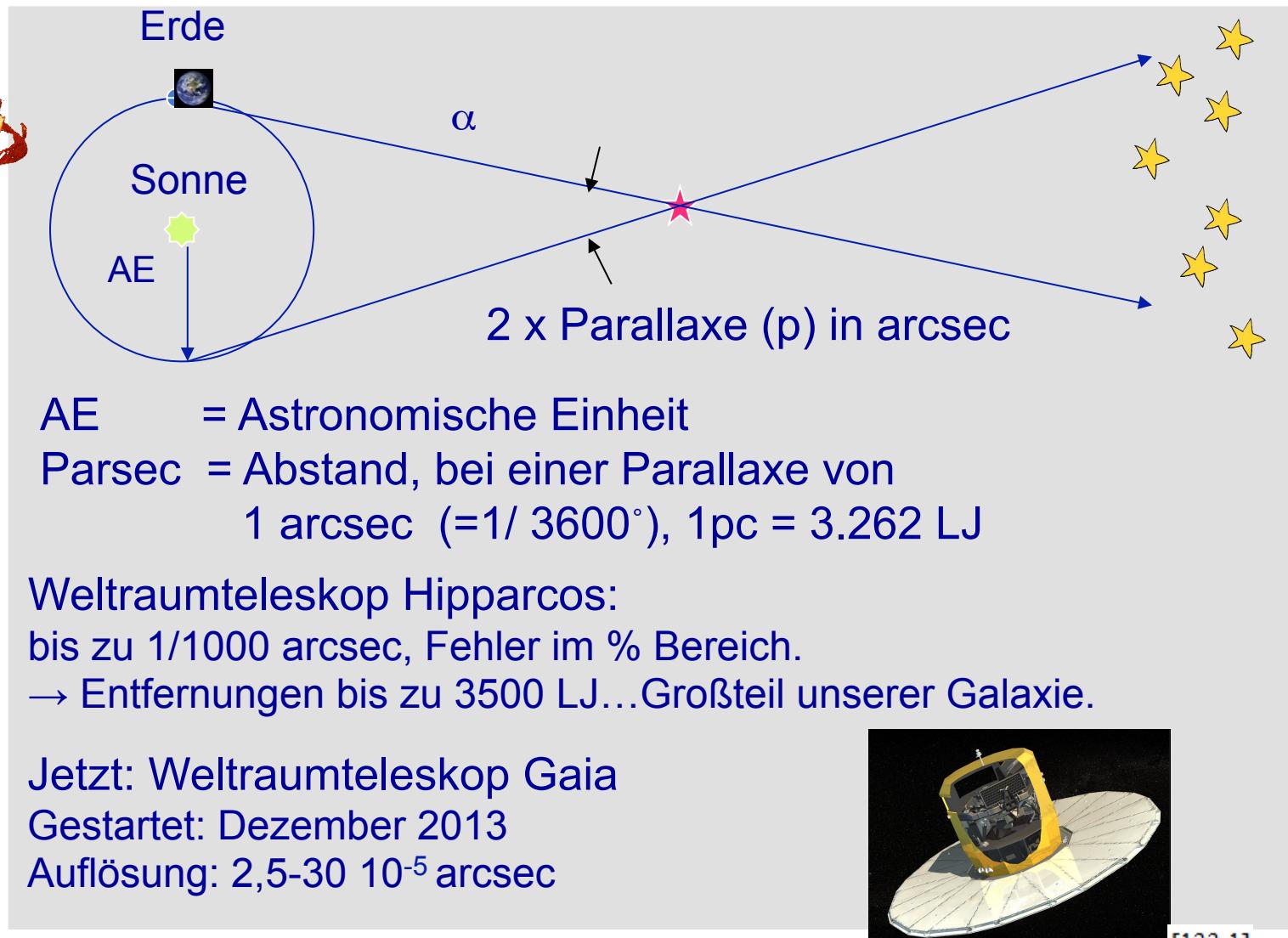
(Entdeckung 1915)



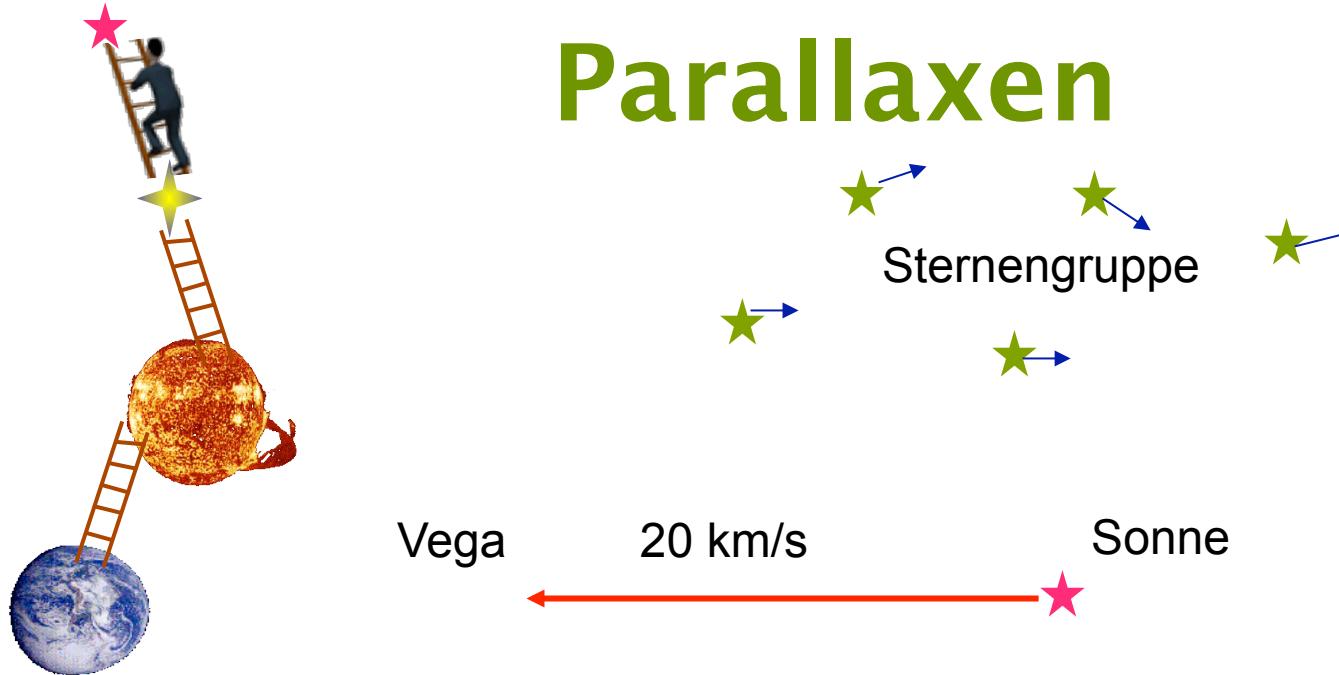
[132.2]



# Parallaxe

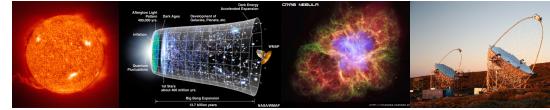


# Methode der statistischen Parallaxen

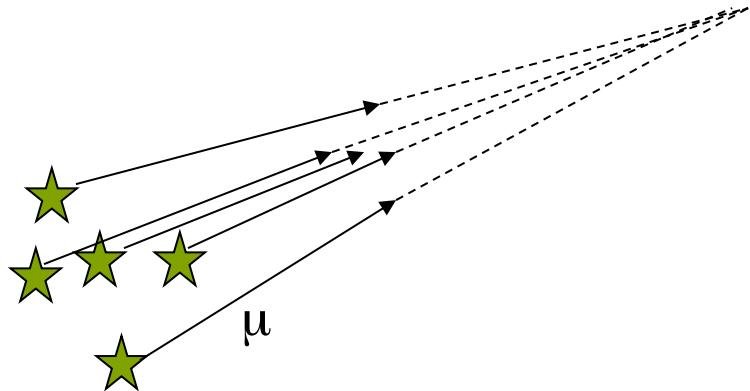


Die Sonne bewegt sich  $\sim 4$  AE pro Jahr;  
nach 20 Jahren beträgt die Basislinie der Parallaxe  $\sim 80$  AE

Messungen bis 1000 LJ.



# Sternstromparallaxen: Die Hyaden



Offener Sternhaufen

-> Parallelle Bewegung mit gleicher Geschwindigkeit

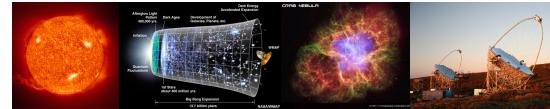
Konvergenzpunkt aus der Fortsetzung der Eigenbewegung  $\mu$

Zwei Messungen:

40 pc,  
130 Lj

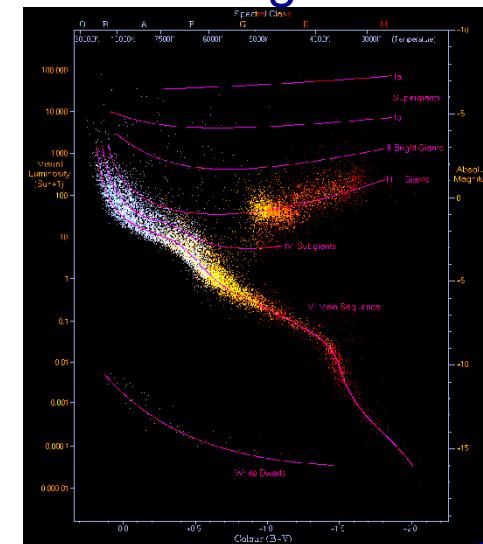
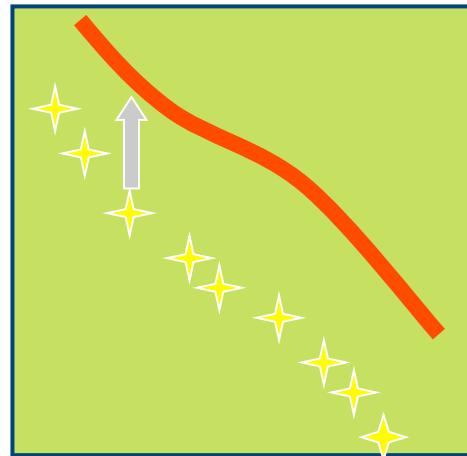
1. Photographische Aufnahmen über Jahre:  
=>Transversalgeschwindigkeit,  
perspektivischer Fluchtpunkt
2. Spektrale Verschiebung (Dopplereffekt):  
Radialgeschwindigkeit

Mit geometrischen Betrachtungen ist Abstandsbestimmung möglich



# Entfernung eines Sternhaufens? “Hauptreihen-Fitting”

H-R Diagramm



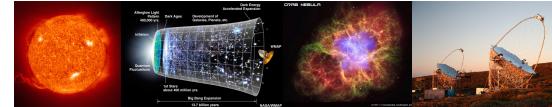
[134.1]



Vergleich der H-R-Diagramme des zu bestimmenden Sternhaufens und eines Sternhaufens mit messbarer Parallaxe

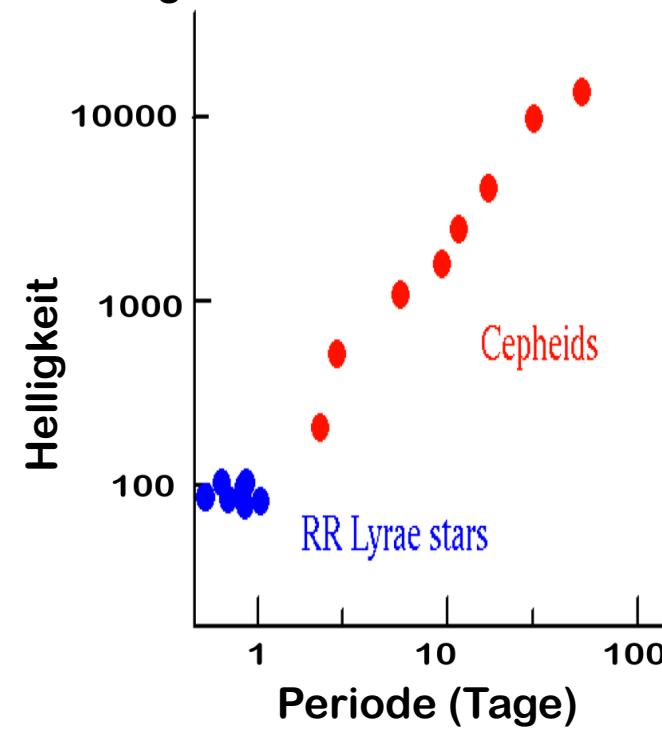
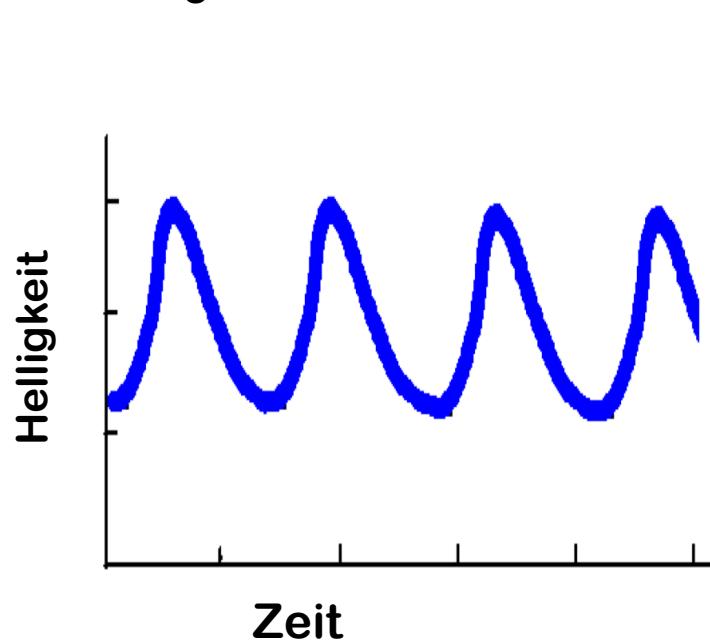
Verschiebung in der scheinbaren Helligkeit messen → Abstand

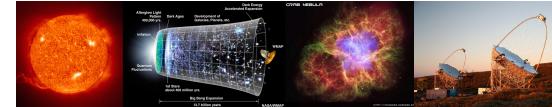
Messbare Entfernungen: bis 100.000 LJ;  
Genauigkeit zwischen 5% und 10%.



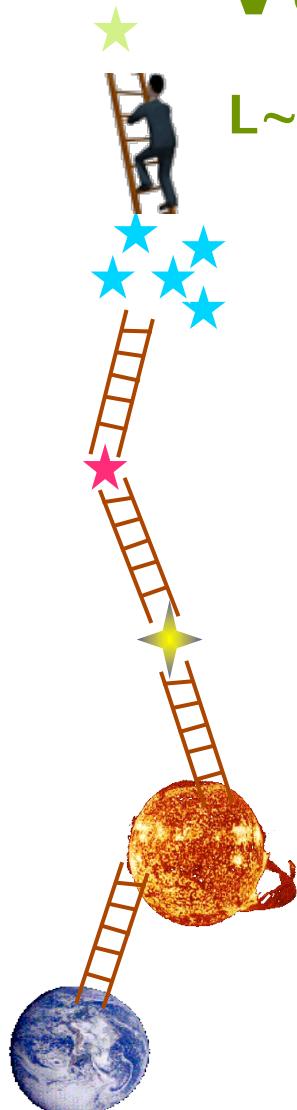
# Variable Sterne: Cepheiden

- Variabler Sterntyp, häufig in Sternhaufen vorhanden
- Luminosität  $L$  variiert periodisch mit der Zeit.
- Periodendauer  $T$ : zwischen einigen und 100 Tagen
- Luminosität variiert zwischen  $100 L_{\odot}$  -  $10000 L_{\odot}$
- **$L \sim T$** : Je größer die Luminosität, desto länger die Periode.





# Variable Sterne: Cepheiden

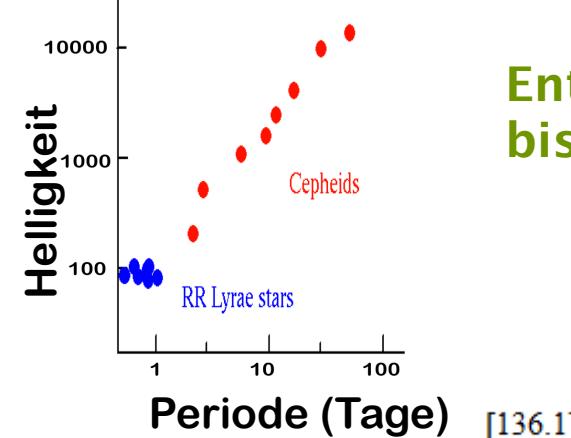
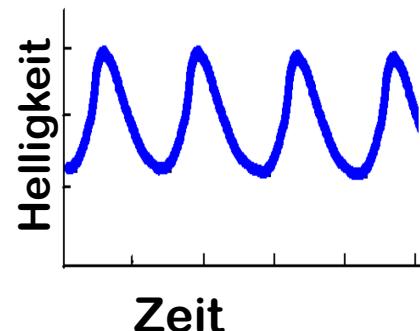


**L~T:** Je größer die Luminosität, desto länger die Periode.

→ Aus Periodendauer lässt sich wahre Luminosität berechnen.

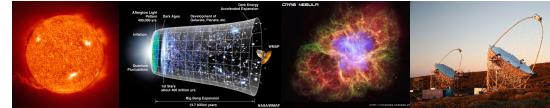
**Methode:** Kalibration an Cepheiden mit bekanntem Abstand und bekannter Periode

Abstand zu neuen Cepheiden aus dem Vergleich scheinbarer und wahrer Luminosität.



**Entfernungsmessung  
bis  $10^7$  LJ**

[136.1]



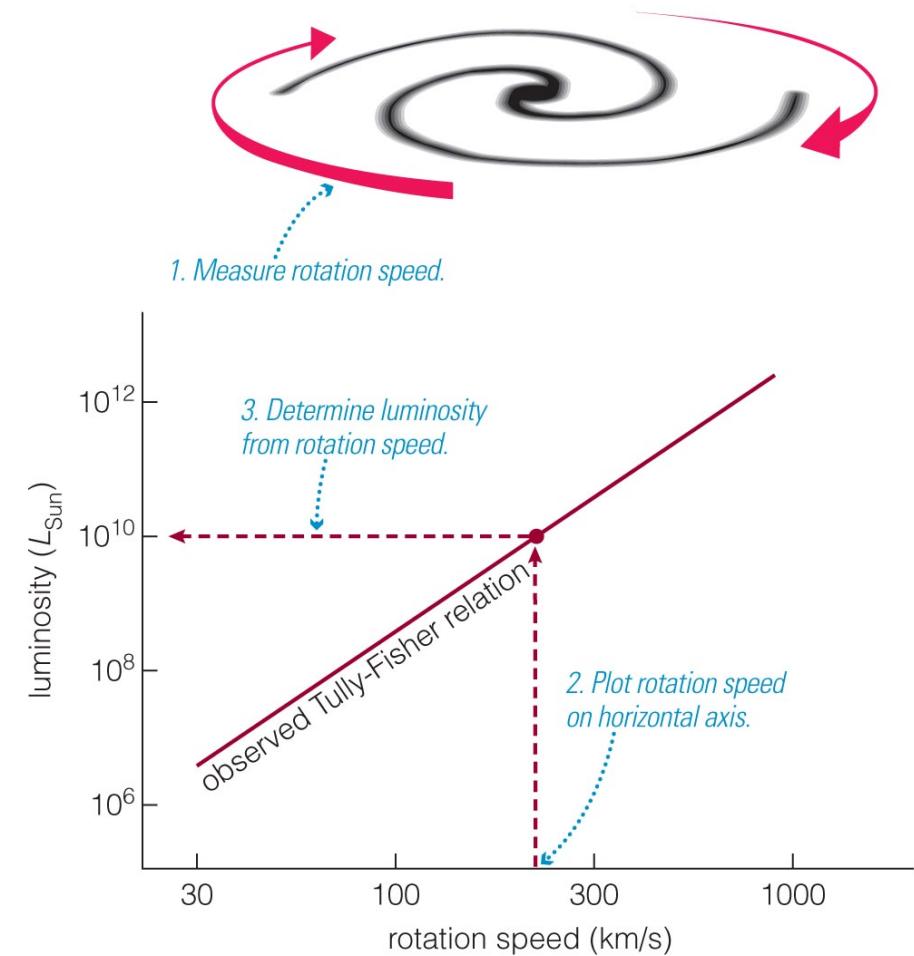
# Entfernung von Galaxien

## Tully–Fisher–Relation

Empirische Relation zwischen wahrer Luminosität und der Breite der Geschwindigkeitsverteilungen der Sterne (Geschwindigkeitsdispersion) in Spiralgalaxien

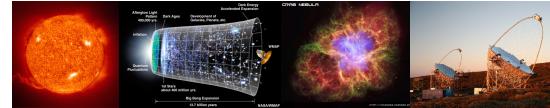
## Faber–Jackson–Relation

Analogon für elliptische Galaxien



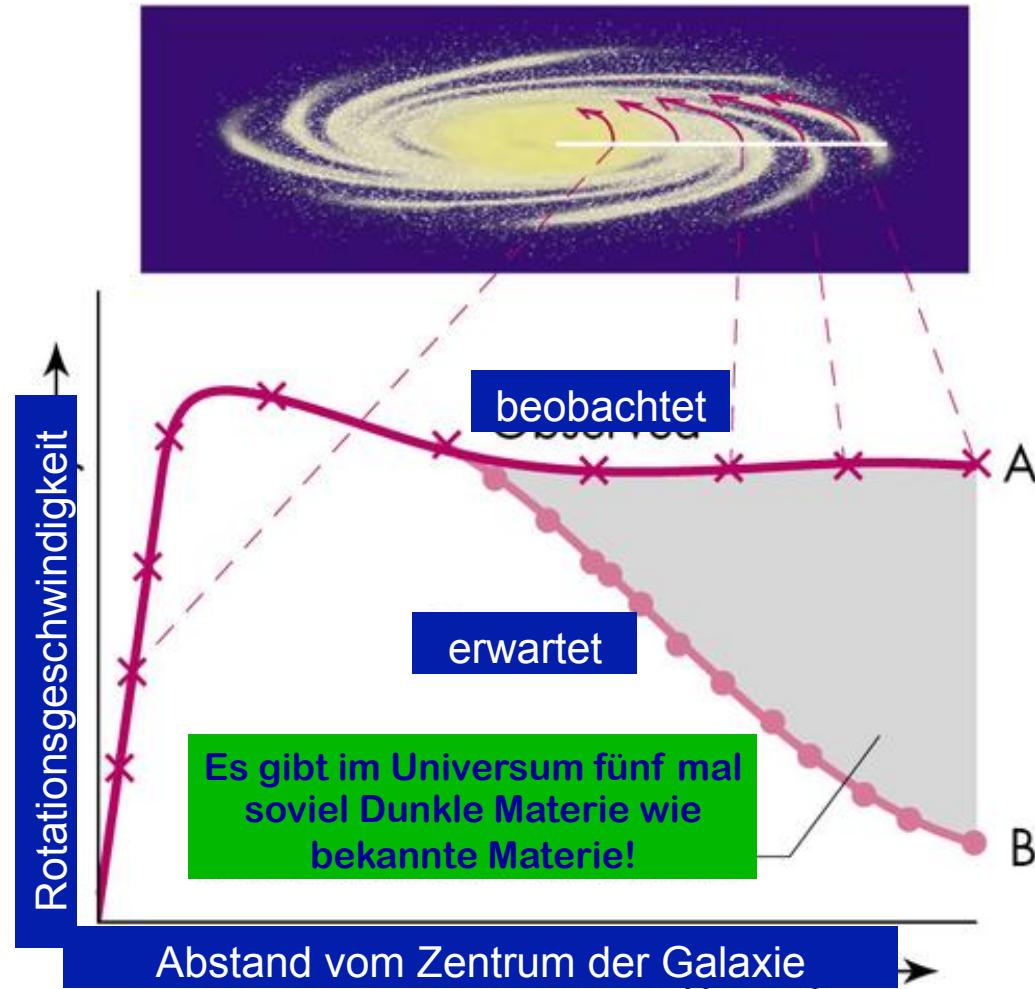
© 2010 Pearson Education, Inc.

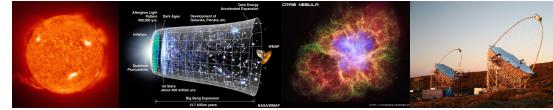
[137.1]



# Rotationskurven von Galaxien

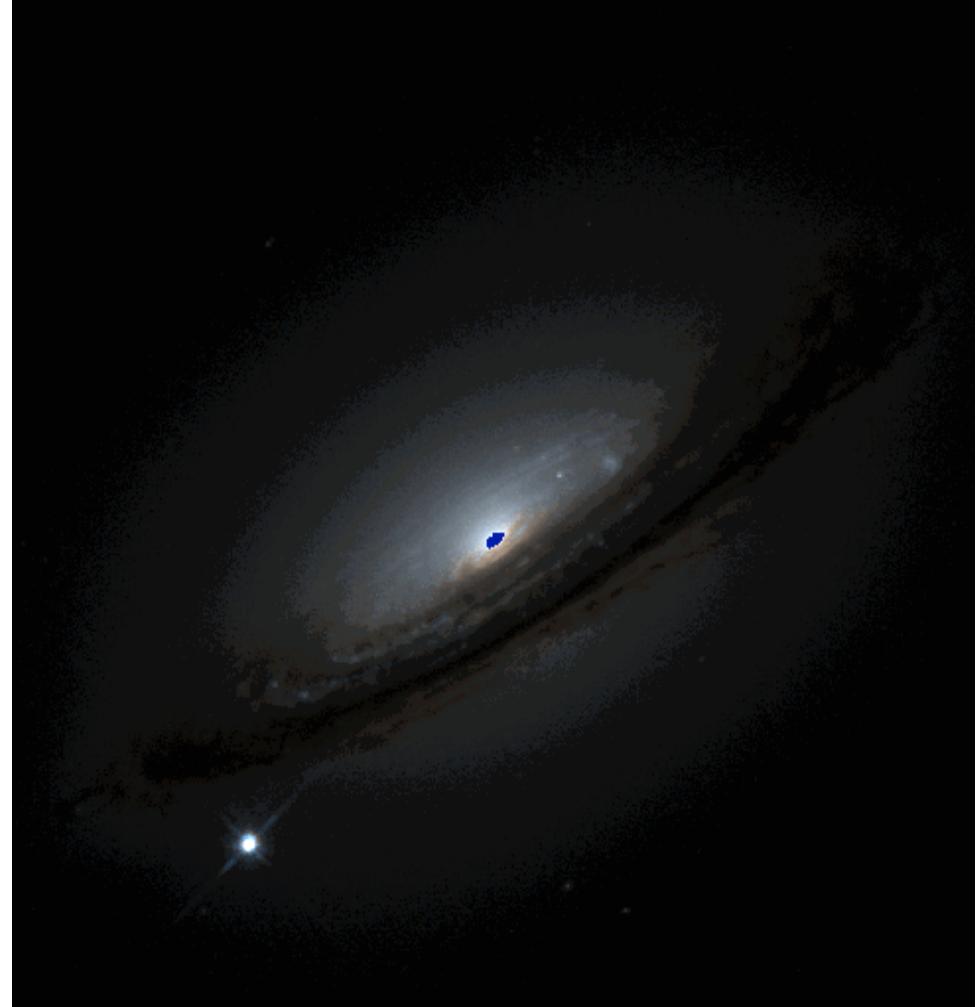
**Vorgriff:**  
*Hinweis auf  
Dunkle Materie*





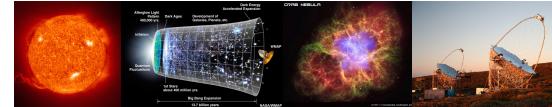
# Abstandsmessung mit Standardkerzen: **Supernovae Ia**

Supernova Typ Ia haben definierte  
Relation zwischen Luminosität  
und Breite der Lichtkurve



Eine Supernova Typ Ia gesehen vom HST.

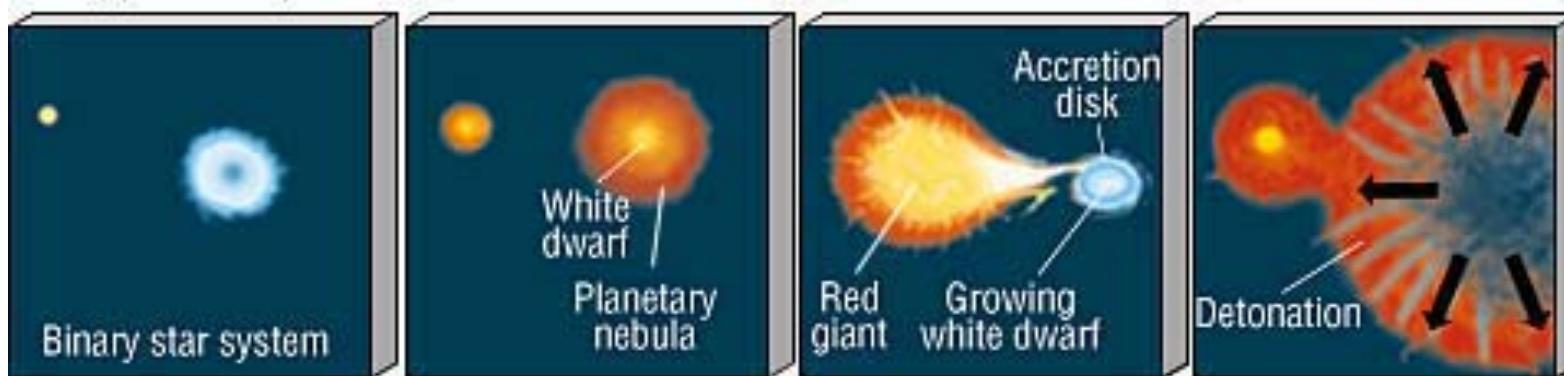
[139.1]



## Erinnerung: Supernova Typ Ia

- Doppelsternsystem
- Ein massearmer Stern “stirbt”, stößt Hülle ab (planetarischer Nebel)
- Kern bleibt als weißer Zwerg zurück
- Begleitstern wird roter Riese, füllt Roche-Volumen und transferiert Masse.
- Chandrasekar-Limit von  $1,4 m_{\odot}$  wird erreicht: C und O werden innerhalb von Sekunden zu Nickel fusioniert.
- Da alle Sterne mit der (Kern-)Masse von  $1,4m_{\odot}$  starten-> Standardkerze.

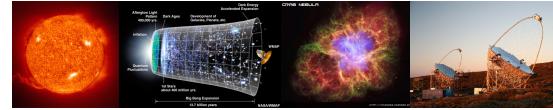
(a) Type- I Supernova



z.B. Tycho 1006, Kepler 1604

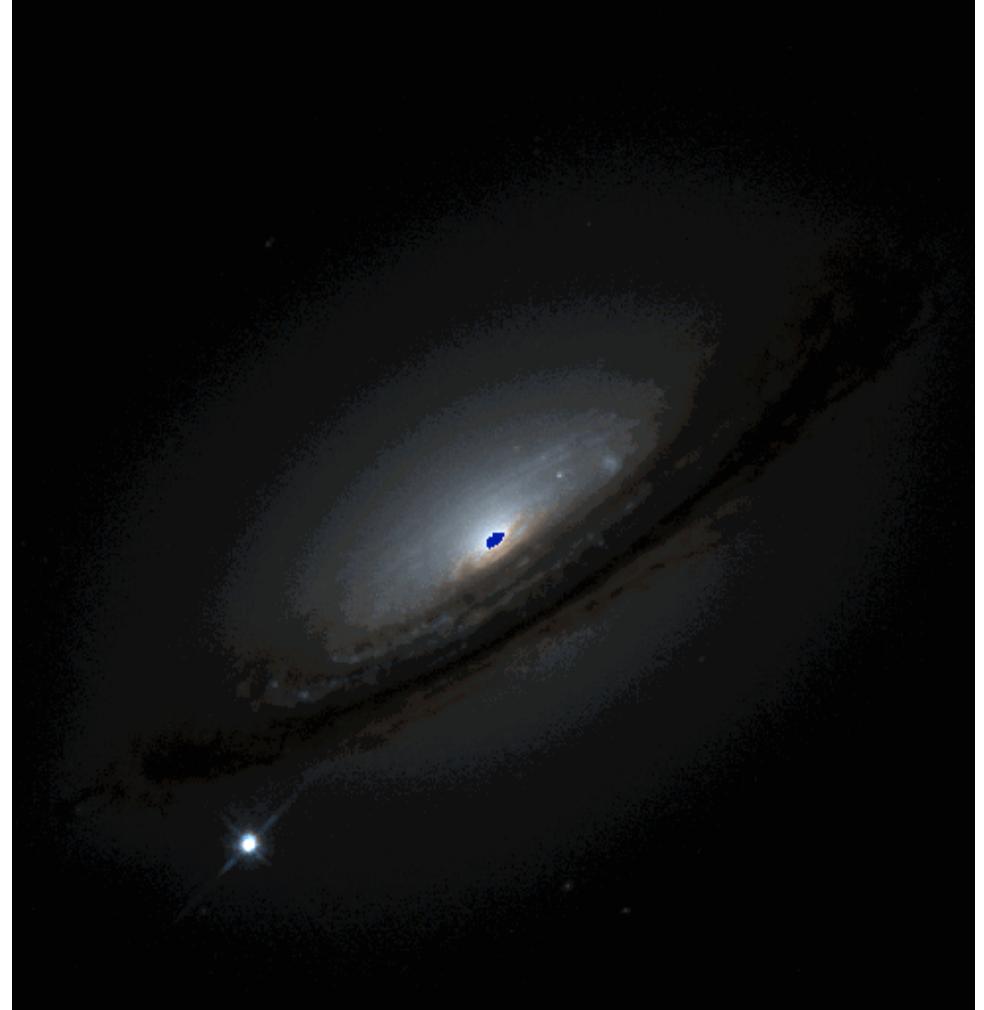
[140.1]

=>Typ Ia: Explosion bei reproduzierbaren Massen  
und Luminositäten der weißen Zwerge !!



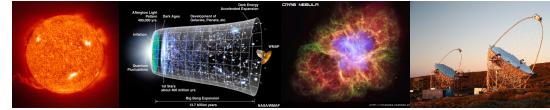
# Abstandsmessung mit Standardkerzen: Supernovae Ia

Supernova Typ Ia haben definierte  
Relation zwischen Luminosität  
und Breite der Lichtkurve



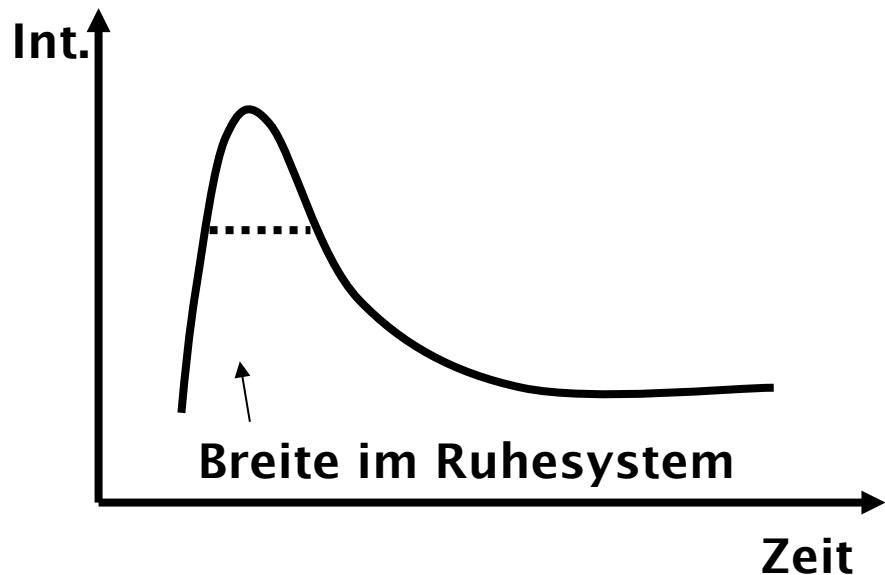
Eine Supernova Typ Ia gesehen vom HST.

[141.1]



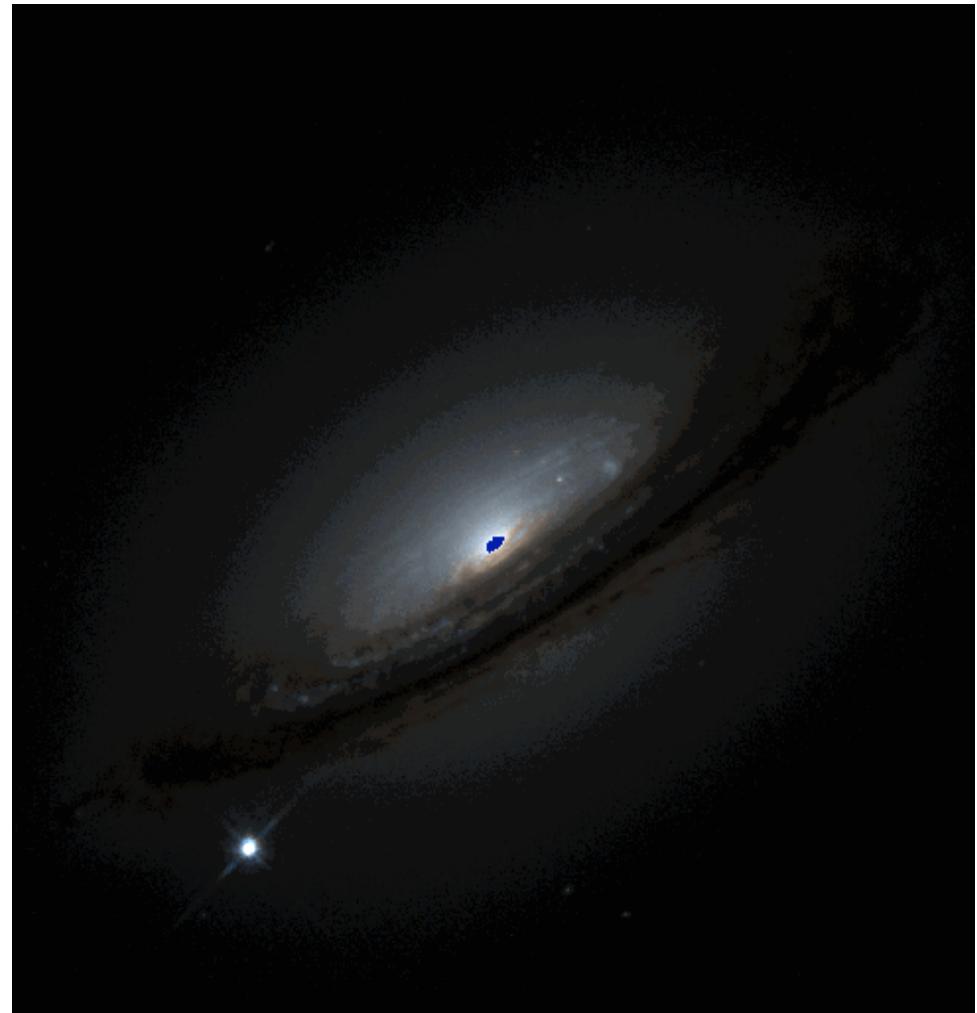
## Abstandsmessung mit Standardkerzen: Supernovae Ia

Supernova Typ Ia haben definierte  
Relation zwischen Luminosität  
und Breite der Lichtkurve

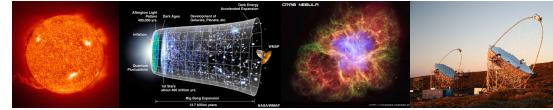


-> Messung der Entfernung zu  
Galaxien mit SN Typ Ia.

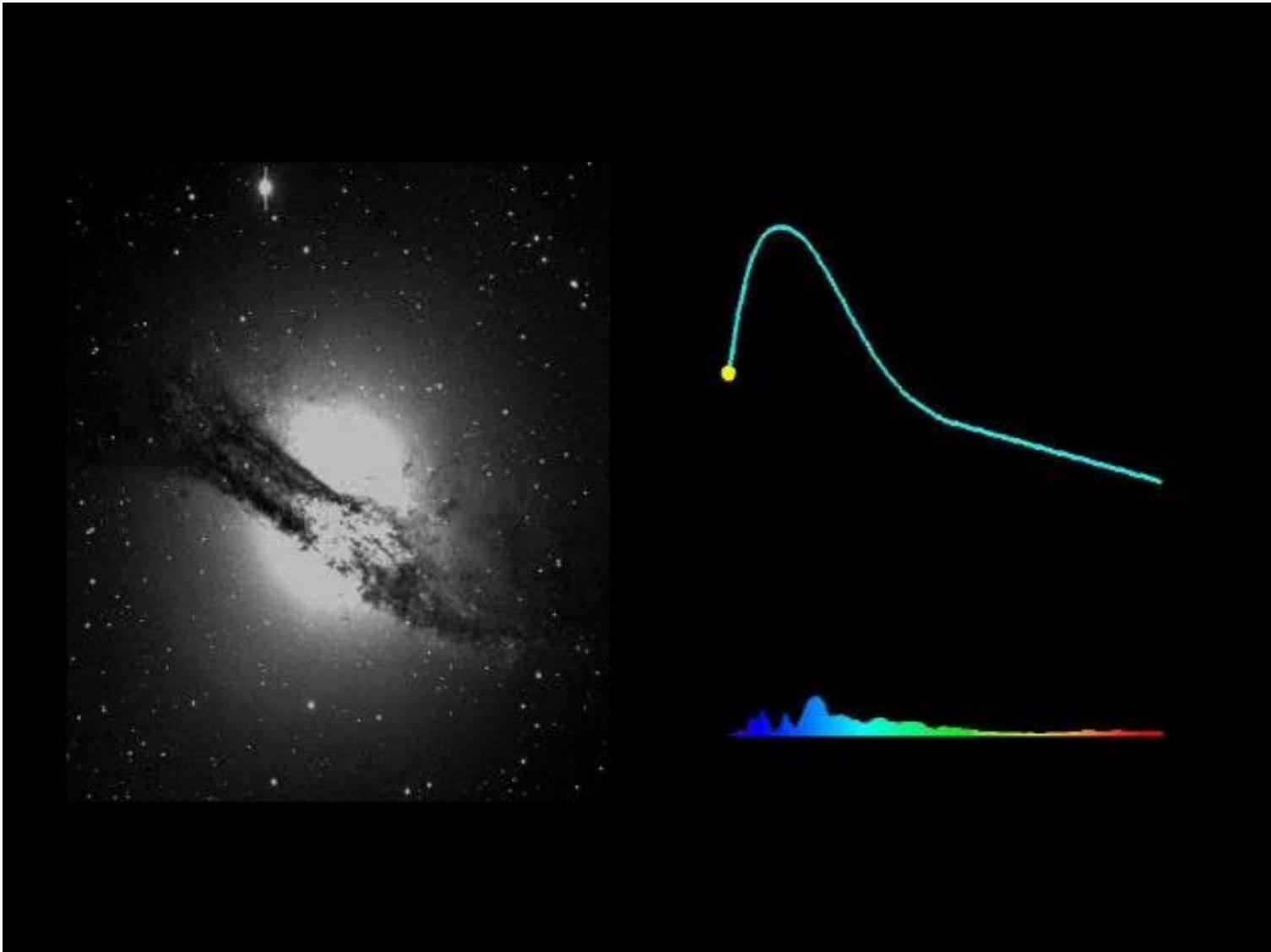
Eine Supernova Typ Ia gesehen vom HST.



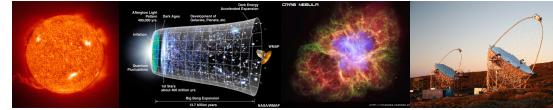
[142.1]



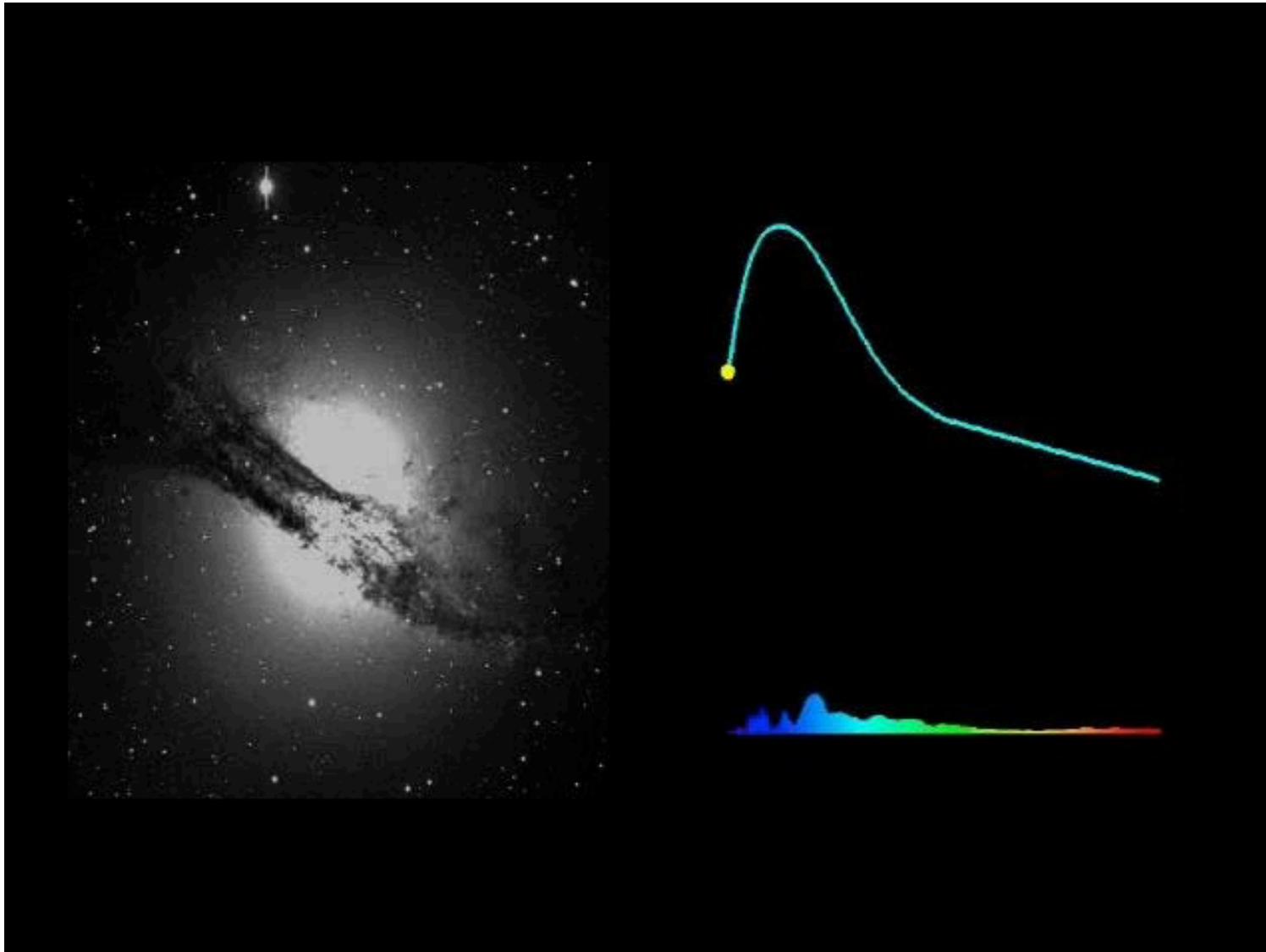
# Lichtkurve von Supernovae Typ Ia



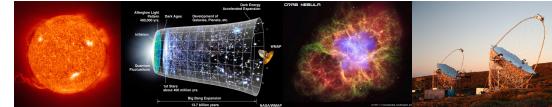
[143.1]



# Lichtkurve von Supernovae Typ Ia

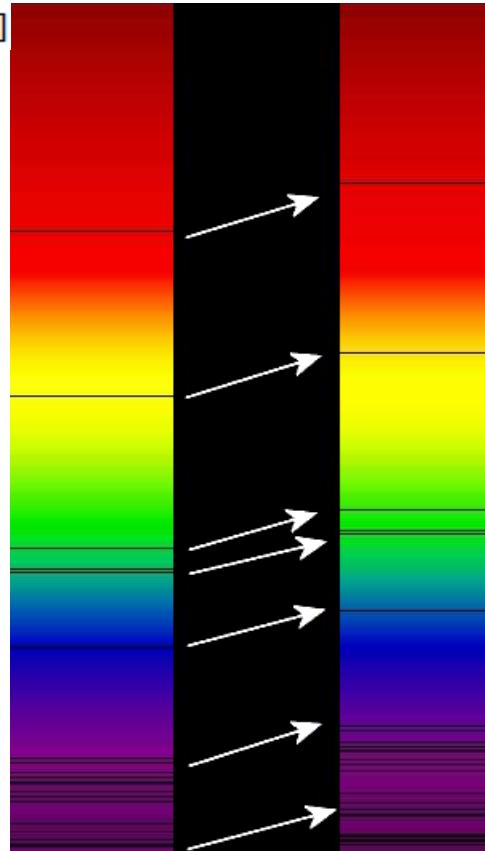


[144.1]



# Bestimmung der Entfernung von Einzelobjekten mit der Rotverschiebung

[145.1]



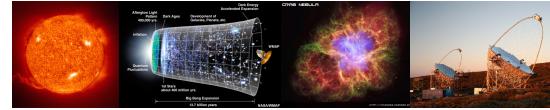
- Dopplereffekt
- Geschwindigkeitsmessung

$$z = \frac{\lambda_{beob} - \lambda_{ruhe}}{\lambda_{ruhe}} = \sqrt{\frac{1 + v_{rad} / c}{1 - v_{rad} / c}} - 1$$

- Hubble: Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Entfernung von Objekten
- $d \sim v$        $\Rightarrow$  Entfernungsmessung

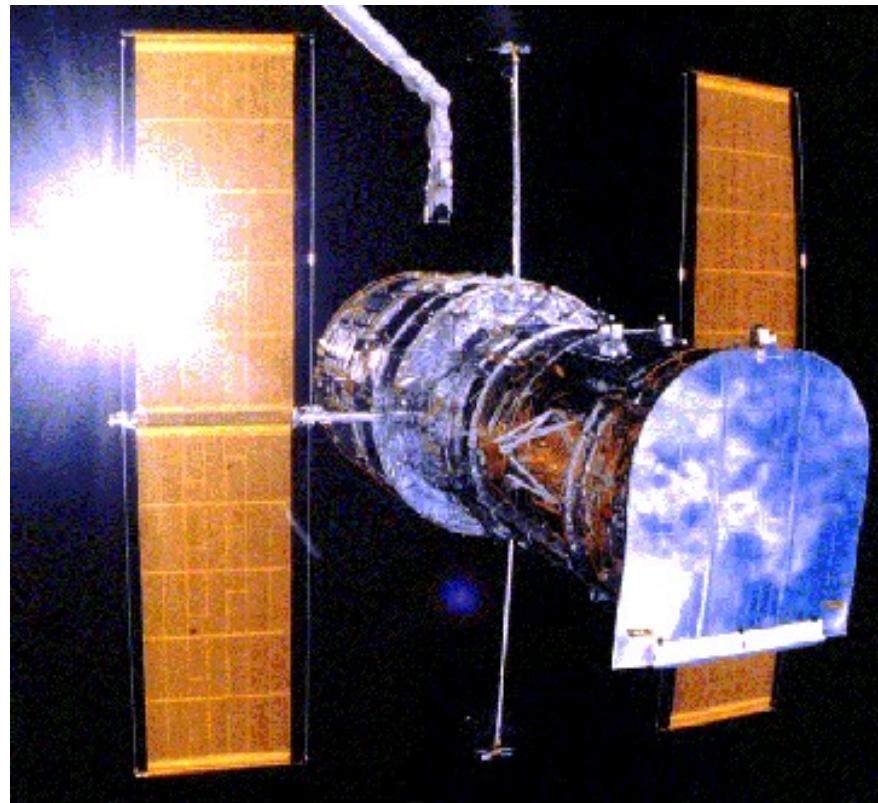
Sonne – Galaxienhaufen BAS11

-> Mehr dazu im  
Kosmologie-Kapitel

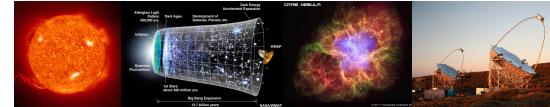


# Bestimmung der Entfernung von Einzelobjekten mit der Rotverschiebung

Messung der Rotverschiebung von Cepheiden mit dem HST

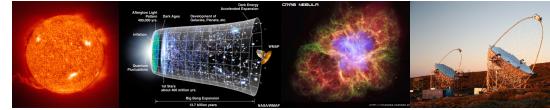


The Hubble Space Telescope

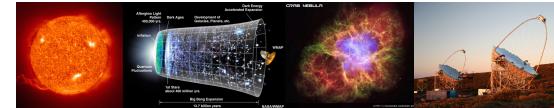


# Die kosmische Abstandsleiter

Objekte	Methode	Abstand
Galaxien, Einzelobjekte	Rotverschiebung	$z=10$
Entfernte Galaxien	Supernovae	$10^{10}$ Lichtjahre
Entfernte Sternhaufen	Hellster Stern im Haufen	$10^9$ Lichtjahre
Spiral-Galaxien	Rotationsgeschwindigkeit	$10^8$ Lichtjahre
Cepheiden (variable Sterne)	Periode-Leuchtkraft- Relation	$5 \cdot 10^7$ Lichtjahre
Sternhaufen	HR-Diagramm	$10^6$ Lichtjahre
Hyaden (Sternhaufen)	Parallaxe	120 Lichtjahre
Planeten & Sterne	Radar	100 Lichtjahre
Nahe Planeten		Lichtminuten



# Astronomische Grundlagen ✓

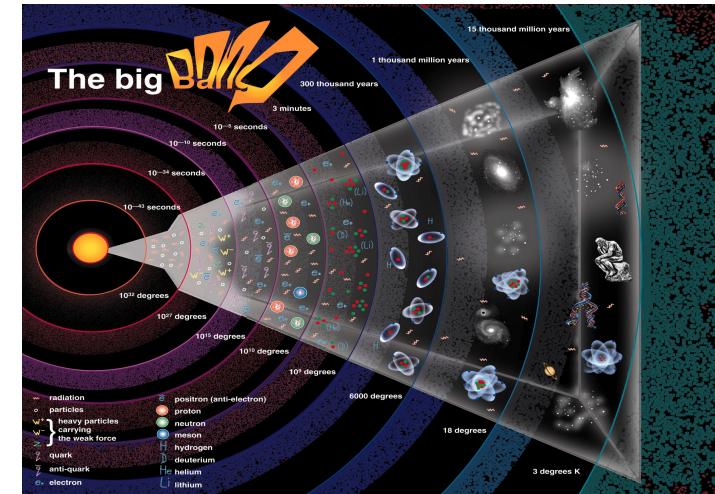


# Astronomische Grundlagen ✓

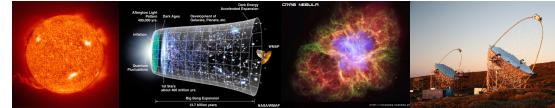
über Abstandsmessungen lässt sich  
→Kosmologie betreiben



[147.1]



[147.2]



# Astroteilchenphysik

## Übersicht der Vorlesung

**Grundlagen der Astronomie:**

Historie, Sternentwicklung, Abstandsbestimmungen, ...

**Grundlagen der Kosmologie**

Kosmische Expansion, Modelle des Universums, das frühe Universum, der Mikrowellenhintergrund, Bestimmung der Modellparameter, ...

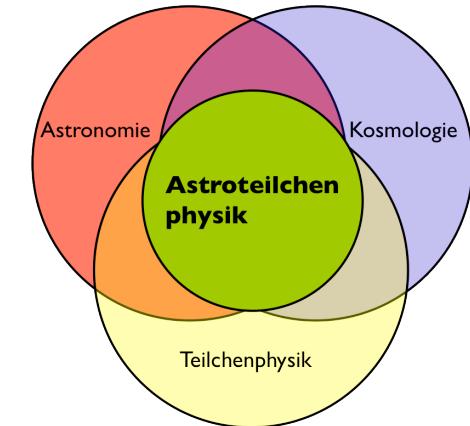
**Astroteilchenphysik:** Die Botenteilchen, kosmische Magnetfelder, Beschleunigungs- und Strahlungsmechanismen

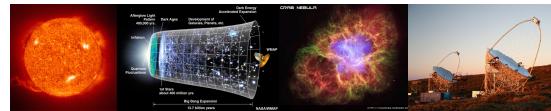
**Quellen in der Astroteilchenphysik**

**Exotika:** Dunkle Materie u. Co.

**Nachweismethoden und Experimente**

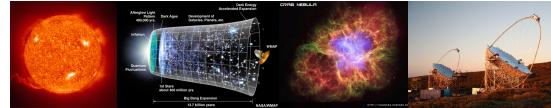
**Aktuelle Forschung**





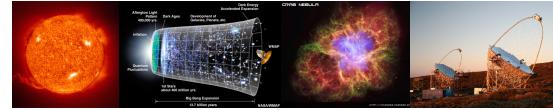
# Literaturangaben

- [1.1] Desy.Astroteilchenphysik. [https://astro.desy.de/index\\_ger.html](https://astro.desy.de/index_ger.html), 31.03.2014
- [2.1], [9.1], [9.2], [10.1], [10.2] BI MPA-Garching. Historische Supernovae. [http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2000/highlight0005\\_d.html](http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2000/highlight0005_d.html), 10.04.2014
- [2.2], [14.2], [15.3] Astronomie-Projekt 6B.Aristoteles. <http://planeten6b.jimdo.com/weltbild-der-griechen/geozentrisches-weltbild/>, 10.04.2014
- [2.3], [11.1], [11.2] DeepBlueHome. ILLUSTRATED:THE CRAB NEBULA THROUGH TIME. [http://deepbluehome.blogspot.de/2011\\_02\\_01\\_archive.html](http://deepbluehome.blogspot.de/2011_02_01_archive.html), 11.04.2014
- [2.4] Stern.de. Moleküle des Lebens, Lichtjahre entfernt. <http://www.stern.de/wissen/kosmos/astronomie-molekuele-des-lebens-lichtjahre-entfernt-517925.html>, 10.04.2014
- [2.5], [28.2] LaPalma. MAGIC-Teleskope La Palma: Insider geben Einblicke. <http://www.la-palma24.info/neuigkeiten/2013/09/29/magic-teleskope-la-palma/>, 10.04.2014
- [3.1], [3.2] Aus Redshift Sternenkunde
- [4.1] Simuliert mit dem Programm: Redshift Sternenkunde
- [5.1] mit Paint selbst erstellt
- [6.1], [7.1], [8.1] Wikipedia. Die Himmelsschreibe von Nebra. [http://de.wikipedia.org/wiki/Himmelsscheibe\\_von\\_Nebra](http://de.wikipedia.org/wiki/Himmelsscheibe_von_Nebra), 10.04.2014
- [12.1] NCAR UCAR NAO.The 1572 Novae. <http://www.hao.ucar.edu/education/bios/tycho1.php>, 12.04.2014
- [12.2], [24.1] Chandra X-Ray Observatory.Tycho's Supernova Remnant. <http://chandra.harvard.edu/photo/2005/tycho/>, 12.04.2014
- [13.1] SN 1604, Kepler's Supernova. [spider.seds.org/spider/Vars/sn1604.html](http://spider.seds.org/spider/Vars/sn1604.html), 12.04.2014
- [13.2] Wikipedia. Der Schlangenträger. <http://de.wikipedia.org/wiki/Schlangentr%C3%A4ger>, 12.04.2014
- [13.3] B2 NASA Mission Science. De Stella Nova: Birth of a Star. [http://missionscience.nasa.gov/nasascience/de\\_stella\\_nova.html](http://missionscience.nasa.gov/nasascience/de_stella_nova.html), 12.04.2014
- [14.1] AstroWiki. Clausius Ptolemäus. [http://wiki.astro.com/astrowiki/de/Claudius\\_Ptolem%C3%A4us](http://wiki.astro.com/astrowiki/de/Claudius_Ptolem%C3%A4us), 12.04.2014
- [15.1] De tiende planeet. <http://www.pentahof.nl/Brochures/245-tiendeplaneet.pdf>, 18.04.2014
- [15.2] Wikipedia. Planetenschleife. <http://de.wikipedia.org/wiki/Planetenschleife>, 22.04.2014



# Literaturangaben

- [16.1] Wikipedia. Geschichte der Astronomie. [http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte\\_der\\_Astronomie](http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Astronomie), 12.04.2014
- [16.2] DerWeg. Johannes Kepler, der Begründer der modernen Astronomie. <http://www.derweg.org/personen/forschung/kepler.html>, 12.04.2014
- [16.3] Isaac Newton. <http://www.crystalinks.com/newton.html>, 12.04.2014
- [17.1] Imangui. Gif animados al sistema solar. <http://www.imgur.com/a/gif-animados-sistema-solar-T85a746EE>, 12.04.2014
- [18.1] Sternwarte Eberfing. Historische Übersicht Fernrohre. <http://www.sternwarte-eberfing.de/Fuehrung/Objekbeschreibung/Fernrohr.html>, 22.04.2014
- [19.1] Wikipedia. Heliometer. <http://de.wikipedia.org/wiki/Heliometer>, 12.04.2014
- [19.2], [19.3], [19.4] Astrolehrbuch. Sterne. <http://www.astrolehrbuch.de/Sterne/Sterne4.pdf>, 12.04.2014
- [20.1] Buch Astronomische Nachrichten, verschiedene Bände
- [21.1], [100.1] Wikipedia. Messier-Katalog. <http://de.wikipedia.org/wiki/Messier-Katalog>, 12.04.2014  
Ergänzend: <http://www.astronomia.de/index.htm>; <http://www.astronomia.de/bildef.htm>, 12.04.2014
- [22.1], [57.2], [58.1], [71.1], [75.1], [77.1], [81.1] MFG Kulmbach. Das Hertzsprung-Russell-Diagramm. <http://www.mgf-kulmbach.de/material/gk/sterne/hertz.htm>, 12.04.2014
- [23.1] NASA. Swift Makes Best-ever Ultraviolet Portrait of Andromeda Galaxy [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/swift/bursts/uv\\_andromeda.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/swift/bursts/uv_andromeda.html), 22.04.2014
- [24.2] siehe [48.1] vergrößert
- [25.1], [101.1] Abenteuer Universum. Galaxien. <http://abenteuer-universum.de/galaxien/galax.html>, 12.04.2014
- [26.1] Wikipedia. Cygnus A. [http://de.wikipedia.org/wiki/Cygnus\\_A](http://de.wikipedia.org/wiki/Cygnus_A), 12.04.2014
- [27.1] Wikipedia. 3C 273. [http://de.wikipedia.org/wiki/3C\\_273](http://de.wikipedia.org/wiki/3C_273), 12.04.2014
- [27.2] Chandra X-Ray Observatory. Chandra Observes Cosmic Traffic Pile-Up In Energetic Quasar Jet. [http://chandra.harvard.edu/press/00\\_releases/press\\_110600\\_3c273.html](http://chandra.harvard.edu/press/00_releases/press_110600_3c273.html), 12.04.2014
- [28.1] Max Planck Institut Bonn. Brennpunkte extragalaktischer Forschung. [http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/wi09\\_grb.pdf](http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/wi09_grb.pdf), 12.04.2014
- [29.1], [34.2], [57.1], [134.1] Astronomie.de. Die Sonne vom 18.06.2004. [http://forum.astronomie.de/phpapps/ubbthreads/ubbthreads.php/topics/148094/Sonne\\_vom\\_18\\_06\\_2004](http://forum.astronomie.de/phpapps/ubbthreads/ubbthreads.php/topics/148094/Sonne_vom_18_06_2004), 18.04.2014



# Literaturangaben

**[29.2]** Max Planck Institut für Astronomie Heidelberg.

Vom Wind gezeugt, aus Wolken geboren. [http://www.mpia.de/Public/menu\\_q2.php?Aktuelles/PR/2008/PR081022/PR\\_081022\\_de.html](http://www.mpia.de/Public/menu_q2.php?Aktuelles/PR/2008/PR081022/PR_081022_de.html), 12.04.2014

**[29.3]** Wikipedia. Hauptreihe. <http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptreihe>, 12.04.2014

**[29.4], [79.2], [80.1]** Welt der Physik. Die Entwicklung sonnenähnlicher Sterne <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/sterne/sonnenaeahnliche-sterne/>, 12.04.2014

**[29.5], [87.1], [121.4], [147.1]** Sozialphy.The great art of Bob Eggleton. Part three. [http://www.socialphy.com/posts/images-pics/15140/The-great-art-of-Bob-Eggleton\\_-Part-three\\_.html](http://www.socialphy.com/posts/images-pics/15140/The-great-art-of-Bob-Eggleton_-Part-three_.html), 18.04.2014

**[30.1]** Fachhochschule Aachen.Theoretische Grundlagen. [http://www.physik.fh-aachen.de/startseite/physik\\_fuer\\_informatik/praktikum/wirkungsquantum/2/](http://www.physik.fh-aachen.de/startseite/physik_fuer_informatik/praktikum/wirkungsquantum/2/), 18.04.2014

**[31.1]** Unsöld/Baschek. Der neue Kosmos. Springer. 2005. Seite 101

**[32.1]** (Hintergrund) Amazing Space.Absorption of electromagnetic radiation by the atmosphere. <http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/groundup/lesson/basics/g17b/>, 12.04.2014

**[33.1]** La Palma Island. Snow and ice. <http://lapalma-island.com/category/observatory/>, 12.04.2014

**[33.2]** Astronomie.de. We reserve the right to get smarter!. <http://www.astronomie.de/bibliothek/interviews/jill-tarter-2011/>, 12.04.2014

**[33.3]** NASA.The Rossi X-ray Timing Explorer Mission (1995 - 2012). [http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/xte\\_1st.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xte/xte_1st.html), 12.04.2014

**[33.4]** Desy. Kosmische Teilchen im Praktikum. <http://www.physikalische-praktika.de/dpgschule/2013/Programm/Vortraege/schwerdt.pdf>, 12.04.2014

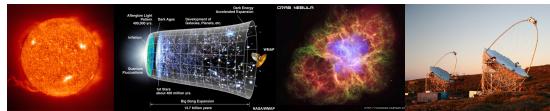
**[33.5]** Max-Planck-Gesellschaft.The MAGIC-II Telescope is ready to team up. [http://www.mpg.de/593689/pressRelease20090415?filter\\_order=L](http://www.mpg.de/593689/pressRelease20090415?filter_order=L), 31.03.2014

**[34.1], [34.3], [34.4], [34.6]** IPAC. Our Solar System. <http://www.ipac.caltech.edu/outreach/Multiwave/gallery.html>, 12.04.2014

**[34.5]** Desy. Neutrinoastronomie. [http://www.desy.de/~troms/teaching/WiSe1011/talks/Ziemann\\_neutrinos.pdf](http://www.desy.de/~troms/teaching/WiSe1011/talks/Ziemann_neutrinos.pdf), 12.04.2014

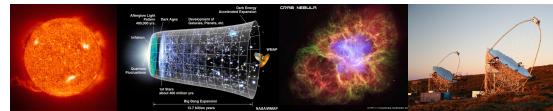
**[35.1]** IceStar. Das Sonnensystem. <http://icestar.funpic.de/sonnensystem.html>, 12.04.2014

**[36.1], [46.1]** Sozialverband VdK. Planeten-Lehrpfad Engen. <http://www.vdk.de/kv-konstanz/ID64403>, 12.04.2014



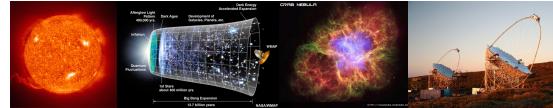
# Literaturangaben

- [37.1] Astrolimages. Der Mond am 9 Oktober 2006. <http://www.astroimages.de/de/gallery/Mond-20061009.html>, 18.04.2014
- [38.1], [38.2] Wikipedia. Merkur(Planet). [http://de.wikipedia.org/wiki/Merkur\\_%28Planet%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Merkur_%28Planet%29), 12.04.2014
- [39.1] Ellerbruch. Venus. <http://ellerbruch.nmu.edu/classes/cs255f03/cs255students/drack/P4/Venus.html>, 12.04.2014
- [39.2] NASA Jet Propulsion Laboratory. Hemispheric View of Venus Centered at the South Pole. <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA00008>, 12.04.2014
- [40.1] National Geographic Sulfur-Rich Rocks on Mars. [http://science.nationalgeographic.com/science/photos/mars/#/mars-spirit\\_1075\\_600x450.jpg](http://science.nationalgeographic.com/science/photos/mars/#/mars-spirit_1075_600x450.jpg), 12.04.2014
- [40.2] Wikipedia. Mars(Planet). [http://de.wikipedia.org/wiki/Mars\\_%28Planet%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Mars_%28Planet%29), 12.04.2014
- [41.1] MissionJuno. Jupiter. <http://missionjuno.swri.edu/media-gallery/jupiter>, 12.04.2014
- [42.1] Astronomie.de. Der Saturn. <http://www.astronomie.de/das-sonnensystem/planeten-und-monde/der-saturn/>, 12.04.2014
- [43.1] Exploring the Planets. Chapter 11: The Uranus System. <http://exoplanet.info/Chapter11.htm>, 12.04.2014
- [44.1] NASA. Astronomy Picture of the Day. <http://apod.nasa.gov/apod/ap030613.html>, 12.04.2014
- [45.1] Regional Professional Development Programm. Students know characteristics of the planets in our solar system. I/S [http://www.rpdp.net/scientetips\\_v3/E8B3.htm](http://www.rpdp.net/scientetips_v3/E8B3.htm), 12.04.2014
- [47.1] Institut für Planetenforschung. Das neue Sonnensystem. <http://solarsystem.dlr.de/HofW/nr/325/>, 12.04.2014
- [48.1], [71.1], [90.1] Cosmos Portal. Stellar Evolution - A History of Disco very. <http://www.cosmosportal.org/view/blog/138356/>, 12.04.2014
- [49.1] siehe [48.1] vergrößert
- [50.1] Astrochonum. NGC2237, Rosette Nebula SHO. [http://astrochonum.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=102:ngc2237-la-rosette-en-ha&catid=10:nebuleuse&Itemid=21&lang=en](http://astrochonum.com/index.php?option=com_content&view=article&id=102:ngc2237-la-rosette-en-ha&catid=10:nebuleuse&Itemid=21&lang=en), 22.04.2014
- [50.2] Sternwarte Rotheul. Pferdekopfnebel im Orion. <http://sternwarte-rotheul.blogspot.de/>, 22.04.2014
- [51.1] AstronomyOnline. Basics of Radio Astronomy for the Goldstone-Apple Valley Radio Telescope. <http://astronomyonline.org/Science/RadioAstronomy.asp>, 18.04.2014



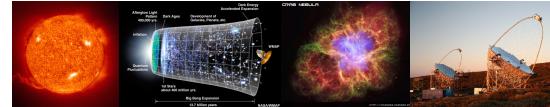
# Literaturangaben

- [51.2] THE LYMAN ALPHA FOREST IN THE SPECTRA OF QSOS. Rauch. <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/9806286v1.pdf>, 18.04.2014
- [52.1] NASA Jet Propulsion. Stellar Work of Art. <http://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA11227>, 12.04.2014
- [52.2] siehe [48.1] vergrößert
- [53.1], [54.1], [55.1] Uni Hamburg. Physikalische Eigenschaften der Sterne. <http://hobbes.hs.uni-hamburg.de/SolarSystem/PDFs/part14.pdf>, 12.04.2014
- [56.1], [121.3], [145.1] Wikipedia. Rotverschiebung. <http://de.wikipedia.org/wiki/Rotverschiebung>, 18.04.2014
- [59.1] Wikipedia. Bethe-Weizäcker-Formel. <http://de.wikipedia.org/wiki/Bethe-Weiz%C3%A4cker-Formel>, 12.04.2014
- [60.1] SciLogs. Kernspaltung und Kernfusion... <http://www.scilogs.de/formbar/kernspaltung-und-kernfusion/>, 12.04.2014
- [61.1], [65.1] Hale Bradt: Astrophysics Processes
- [62.1], [63.1] Demtröder. Experimentalphysik 4. Springer. 2005. Seite 307/308
- [63.2] Radiochemie.de. Astrophysikseminar. <http://www.radiochemie.de/Astrophysikseminar%20Jan%20Stehr.pdf>, 12.04.2014
- [64.1] Demtröder. Experimentalphysik 4. Springer. 2005. Seite 308
- [66.1], [67.1], [68.1], [69.1], [70.1] Demtröder. Experimentalphysik 4. Springer. 2005. Seite 344
- [73.1] esa Hubble. Brown Dwarf Gliese 299B. <http://www.spacetelescope.org/images/opo9548a/>, 12.04.2014
- [73.2] NASA. Brown Dwarf Detectives. [http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/brown\\_dwarf\\_detectives.html](http://www.nasa.gov/vision/universe/starsgalaxies/brown_dwarf_detectives.html), 12.04.2014
- [74.1], [82.1], [83.1] Demtröder. Experimentalphysik 4. Springer. 2005. Seite 349
- [75.2] Einstein Online. Weiße Zwerge und Gravitations-Rotverschiebung <http://www.einstein-online.info/vertiefung/rotverschiebung-weisse-zwerge>, 22.04.2014
- [75.3], [80.2], [89.1] Astrokramkiste. Sonne Entstehung. <http://astrokramkiste.de/sonne-entstehung>, 12.04.2014
- [76.1] Wikipedia. Weißer Zwerg. [http://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fer\\_Zwerg](http://de.wikipedia.org/wiki/Wei%C3%9Fer_Zwerg), 22.04.2014
- [77.2] BI Chandra X-Ray Observatory. Stellar Evolution Illustrations . [http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/stellar\\_evolution.html](http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/stellar_evolution.html), 12.04.2014



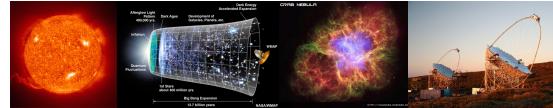
# Literaturangaben

- [77.3] Abenteuer Universum. Entstehung und Entwicklung der Sterne. <http://abenteuer-universum.de/sterne-sternentwick.html>, 22.04.2014
- [78.1] Helium and Stuff. Research of the Element Helium. <http://heliumandstuff.blogspot.de/>, 12.04.2014
- [79.1] Sternwarte Uni Erlangen. 3-D Kinematik von unterleuchtkräftigen B-Sternen. [http://www.sternwarte.uni-erlangen.de/Arbeiten/2005-10\\_Loeb.pdf](http://www.sternwarte.uni-erlangen.de/Arbeiten/2005-10_Loeb.pdf), 22.04.2014
- [84.1], [85.1], [86.1], [140.1] Uni Tübingen. Veränderliche Sterne. <http://www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~kley/lehre/astromanie/script1/kap12>, 12.04.2014
- [85.2] From Quarks to Quasars. Alien Stars: Surviving the Death of Your Sun <http://www.fromquarkstoquasars.com/alien-stars-surviving-the-death-of-your-sun/>, 22.04.2014
- [85.3], [89.3] Wikipedia. Hawking radiation. [http://en.wikipedia.org/wiki/Hawking\\_radiation](http://en.wikipedia.org/wiki/Hawking_radiation), 22.04.2014
- [88.1] Max-Planck Institut für Astrophysik. Die Physik der Typ Ia Supernova-Explosionen: Ein neues europäisches Forschungs- und Ausbildungsnetzwerk. [http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2002/highlight0212\\_d.html](http://www.mpa-garching.mpg.de/HIGHLIGHT/2002/highlight0212_d.html), 22.04.2014
- [89.2] Hiper. Image Gallery. <http://www.hiper-laser.org/News%20and%20events/100imagegallery.html>, 15.04.2014
- [91.1], [91.2] Universität Oslo. Lecture notes 9: Stellar evolution I. <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/astro/AST1100/h06/undervisningsmateriale/lecture-9.pdf>, 15.04.2014
- [92.1] Order of Planets. Life cycle of the sun. <http://www.orderoftheplanets.org/life-cycle-of-the-sun.html>, 15.04.2014
- [93.1] RWTH Aachen. [http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/astroph0607/lecture8\\_071206.pdf](http://www.physik.unizh.ch/~lbaudis/astroph0607/lecture8_071206.pdf) 18.04.2014
- [94.1] IPAC. 2MASS Atlas Image Gallery: Globular Clusters. [http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/images\\_globs.html](http://www.ipac.caltech.edu/2mass/gallery/images_globs.html), 15.04.2014
- [95.1] Universität Bonn. Kugelsternhaufen. <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/sbritzen/kugelsternhaufen.pdf>, 15.04.2014
- [95.2] aus älteren Vorlesungen entnommen, Quelle unbekannt
- [96.1] Astronomische Arbeitsgruppe Laufen. Der Sternenhimmel im Februar 2007 [http://astronomy.meta.org/monatlich/0702\\_sternenhimmel.html](http://astronomy.meta.org/monatlich/0702_sternenhimmel.html), 22.04.2014
- [97.1] Galaxies M81 and M82 in Ursa Major. <http://www.astropix.nl/images/M81/M81.html>, 22.04.2014
- [98.1] aus älteren Vorlesungen entnommen, Quelle unbekannt



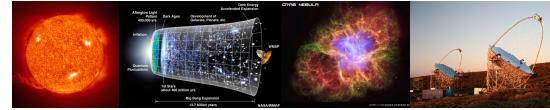
# Literaturangaben

- [99.1] New Mexiko State University.Astronomy. Simulating the Gaseous Halos of Galaxies. <http://astronomy.nmsu.edu/aklypin/SocTalks/kaufmann.pdf>, 20.04.2014
- [102.1] Universität München. Die Hubble Sequenz. <http://www.usm.uni-muenchen.de/people/saglia/dm/galaxien/allt/node13.html>, 15.04.2014
- [103.1], [104.1] Uni Heidelberg. Galaxien - Bausteine des Universums [http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/mcamenzi/W\\_Universum3D.pdf](http://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/mcamenzi/W_Universum3D.pdf), 20.04.2014
- [105.1] Universität Bonn.Wie konnte Hubble zeigen, dass das Universum expandiert? <http://www.astro.uni-bonn.de/~deboer/hubble/hubble.html>, 15.04.2014
- [106.1] The Messier Catalog. Giant elliptical galaxy M87. [http://messier.seds.org/more/m087\\_aat.html](http://messier.seds.org/more/m087_aat.html), 15.04.2014
- [107.1] [http://messier.seds.org/more/m105\\_more.html](http://messier.seds.org/more/m105_more.html), 22.04.2014
- [108.1] Свидетельства Существования темной массы [http://www.sai.msu.ru/dept/zasovotd/extragalactic\\_course/L7\\_vrashenie\\_spirali.pdf](http://www.sai.msu.ru/dept/zasovotd/extragalactic_course/L7_vrashenie_spirali.pdf), 15.04.2014
- [109.1] National Optical Astronomy Observatory. M104(Sombrero). <http://www.noao.edu/outreach/aop/observers/m104.html>, 15.05.2014
- [110.1] Caelum Observatory. B1 M64:The Blackeye Galaxy. <http://www.caelumobservatory.com/obs/m64.html>, 15.04.2014
- [111.1] Caelum Observatory. M31:The Andromeda Galaxy. <http://www.caelumobservatory.com/obs/m31.html>, 15.04.2014
- [112.1] Spitzer Wallpapers. <http://legacy.spitzer.caltech.edu/features/downloads/wallpaper.shtml>, 15.04.2014
- [113.1] Centauri Dream. Rethinking SETI's Targets. <http://www.centauri-dreams.org/?p=21462>, 15.04.2014
- [114.1] University of Louisville. Milky Way Galaxy,A view from Earth <http://prancer.physics.louisville.edu/classes/107/topics/milkyway/>, 15.04.2014
- [115.1] Paginas Sueltas y de Colores. Universo Hoy (Marzo). <http://paginassueltasycolores.wordpress.com/2012/03/24/universo-hoy-marzo/>, 22.04.2014
- [116.1] Stellar Neophyte Astronomy Blog. M11 Wild Duck Cluster. <http://www.ericteske.com/2013/08/m11-wild-duck-cluster.html>, 22.04.2014
- [117] Gesamtbild aus: Geocities. Galerie. <http://www.geocities.ws/rolobter/diplom/astro/galerie.html> ,20.04.2014



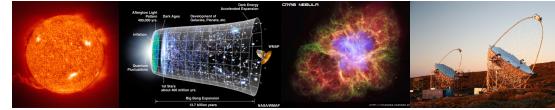
# Literaturangaben

- [I17.2] The King's Centre for visualisation science. The Birth of Stars. [http://www.kcvs.ca/martin/astro/au/unit4/91/chp9\\_1.htm](http://www.kcvs.ca/martin/astro/au/unit4/91/chp9_1.htm), 20.04.2014
- [I17.3], [I17.4], [I17.5] HubbleSite. Picture Album - Search: M16, Eagle Nebula, NGC 6611. <http://hubblesite.org/gallery/album/objects-from/pr1995044c>, 20.04.2014
- [I18.1] absoluteaxarquia. DEEP SKY OBJECTS M1 TO M5. [http://www.absoluteaxarquia.com/nightsky/deep\\_sky\\_1.html](http://www.absoluteaxarquia.com/nightsky/deep_sky_1.html), 16.04.2014
- [I19.1] A Messier Gallery. <http://www.jastrow.net/messier/>, 20.04.2014
- [I20.1] Frankfuter Allgemeine Wissen. Die Autobahn am Rande der Milchstraße. <http://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/astronomie-die-autobahn-am-rande-der-milchstrasse-1331148.html>, 16.04.2014
- [I21.1], [I23.1], [I25.2], [I26.1], [I31.1] Geschichte der Entfernungsmessung in der Astronomie. [http://www.sternwarte-hoefingen.de/sternwarte\\_alt/astroeinfuehrung/geschichteentfernungsmessung.html](http://www.sternwarte-hoefingen.de/sternwarte_alt/astroeinfuehrung/geschichteentfernungsmessung.html), 22.04.2014
- [I21.2], [I30.1] NASA. The Inverse Square Law of Light. [http://www.nasa.gov/pdf/583137main\\_Inverse\\_Square\\_Law\\_of\\_Light.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/583137main_Inverse_Square_Law_of_Light.pdf), 16.04.2014
- [I22.1], [I25.1] selbst mit Paint erstellt
- [I24.1] Photo.net. Shooting the Lunar Eclipse tonite! <http://photo.net/nature-photography-forum/006Sgv>, 16.04.2014
- [I25.3] Astrowiki. Aristarch. <http://wiki.astro.com/astrowiki/de/Aristarch>, 16.04.2014
- [I27.1] NASA Eclipse WebSite. Solar Eclipses. <http://eclipse.gsfc.nasa.gov/SEpath/SEpath.html>, 16.04.2015
- [I27.2] Wikipedia. Sonnenfinsternis. <http://de.wikipedia.org/wiki/Sonnenfinsternis>, 16.04.2014
- [I28.1] Cosmiq. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Sonnenfinsternis und Mondphase? <http://www.cosmiq.de/qa/show/611959/Welchen-Zusammenhang-gibt-es-zwischen-Sonnenfinsternis-und-Mondphase/>, 16.04.2014
- [I29.1] df5ai. Amateur Long Baseline Interferometry Experiment. <http://www.df5ai.net/Material/articles4.html>, 16.04.2014
- [I32.1] Wikipedia. Proxima Centauri. [http://de.wikipedia.org/wiki/Proxima\\_Centauri](http://de.wikipedia.org/wiki/Proxima_Centauri), 16.04.2014

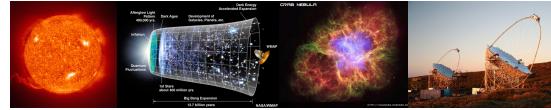


# Literaturangaben

- [132.2] Planetenweg Kapfenberg. Universum. <http://planetenweg.hiway.at/index.php?id=universum>, 16.04.2014
- [133.1] Airbus Defence and Space. Gaia. <http://www.astrium.eads.net/de/programme/gaia.html>, 16.04.2014
- [135.1], [136.1] selbst mit Graphikprogramm erstellt
- [137.1] University of Toledo. Other Galaxies. <http://astro1.panet.utoledo.edu/~megeath/A2020/lecture14.pdf>, 16.04.2014
- [138.1] Desy. Moderne Physik:Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie. [http://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2008\\_ss/moderne\\_physik/skript/moderne\\_physik\\_9.pdf](http://www-zeuthen.desy.de/~husemann/teaching/2008_ss/moderne_physik/skript/moderne_physik_9.pdf), 16.04.2014
- [139.1], [141.1], [142.1] Abenteuer Universum.Supernovae. <http://abenteuer-universum.de/stersterne/supernova.html>, 16.04.2014
- [143.1], [144.1] Uni Freiburg. Reise zum Urknall. [http://hep.uni-freiburg.de/Lehre/GH\\_ReisezumUrknall.pdf](http://hep.uni-freiburg.de/Lehre/GH_ReisezumUrknall.pdf), 16.04.2014
- [146.1] HyperPhysics. Hubble Space Telescope. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solar/hst.html>, 16.04.2014
- [147.2] Uni Heidelberg. Urknall und Quarks. [http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~schaffne/Schule/vortrag\\_schule.pdf](http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~schaffne/Schule/vortrag_schule.pdf), 16.04.2014

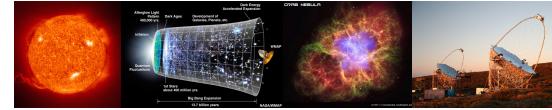


# Anhang



## Historische Einführung: Astronomie

- ~3000 v Chr. Steinkreise – astronomische Zeitbestimmung
- ~2000 v. Chr. Himmelsscheibe von Nebra
- 1054 Aufzeichnung einer Supernova-Explosion in China
- 1572 Brahe entdeckt Supernova SN 1572
- 1604 Kepler entdeckt Supernova SN 1604
- 1609 Galilei verwendet als erster optische Instrumente für astronomische Beobachtungen  
Kepler entdeckt die fundamentalen Regeln der Planetenbewegungen
- 1781 Messier-Katalog der astronomischen „Nebel“
- 1911 Hertzsprung entdeckt die Hauptreihe der Sterne
- 1920 Debatte zwischen Shapley und Curtis über die Natur der Nebel
- 1925 Bothe & Geiger messen Abstand zum Andromeda-Nebel  
-> Entdeckung anderer Galaxien
- 1934 Zwicky und Baade etablieren die Bezeichnung „Supernova“ und zeigen dass sie eine Quelle kosmischer Strahlung sein können
- 1936 Hubble stellt ein Schema zur Klassifikation von Galaxien auf



## Historische Einführung: Astronomie

- 1939 Entdeckung der Radioquelle Cygnus A (erste Radioquelle)
- 1944 Entdeckung der Seyfert Galaxien
- 1949 Entdeckung der extragalaktischen Radioquellen M87 und Centaurus A
  
- 1963 Entdeckung des ersten Quasars und Bestimmung des Linienspektrums
- 1967 Entdeckung des ersten GRBs mit Vela-Satelliten
- 1972 Bestätigung der Existenz Schwarzer Löchern (Cygnus X1)
- 1987 Beobachtung der Supernova 1987A