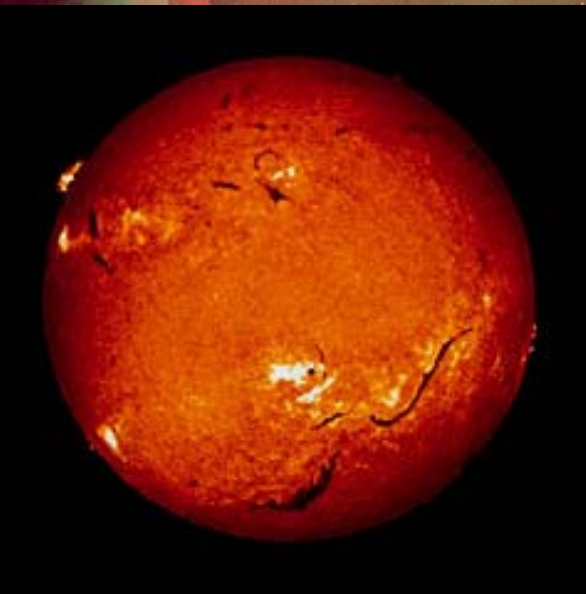




**Alles Gute für das Jahr 2010**

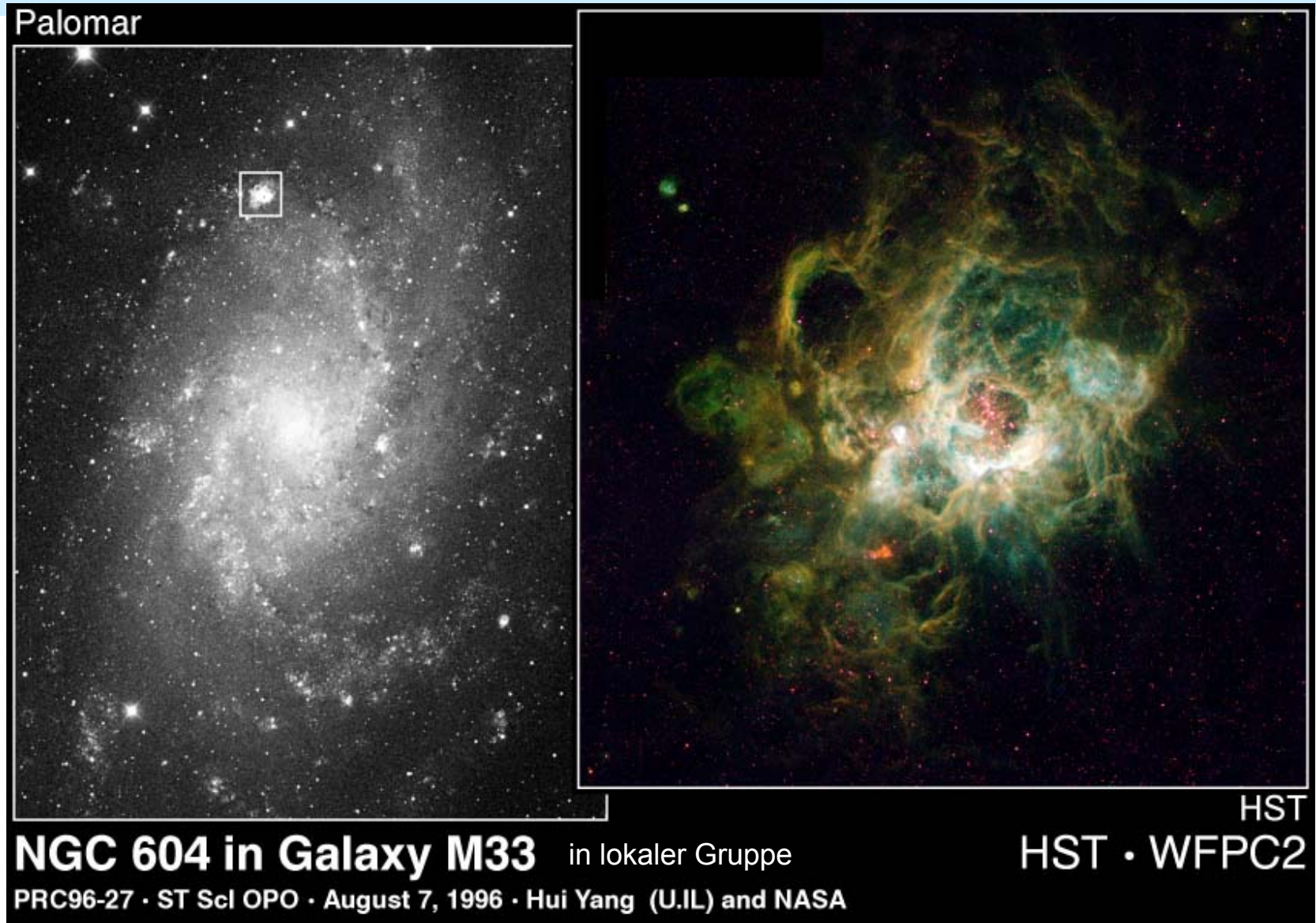
# 6. Sternentwicklung



# Fragen

- Unter welchen Bedingungen bilden sich Strukturen?
- Unter welchen Bedingungen bilden sich Sterne mit einer quasi-statischen Energieabstrahlung?
- Unter welchen Bedingungen kommt es zum katastrophalen Kollaps eines ausgebrannten Sterns?
- Welche Zustände werden unter welchen Bedingungen am Ende eines Sternlebens erreicht?

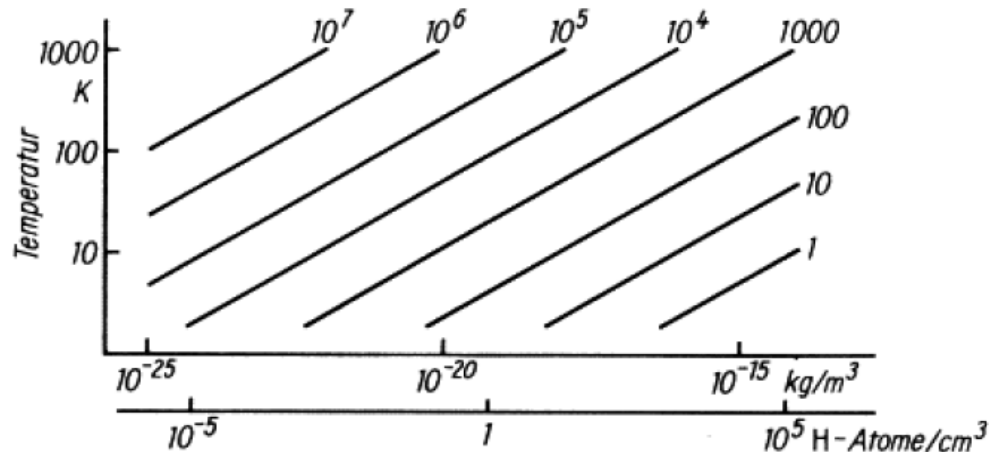
# Hubble-Aufnahme: Sternengeburt



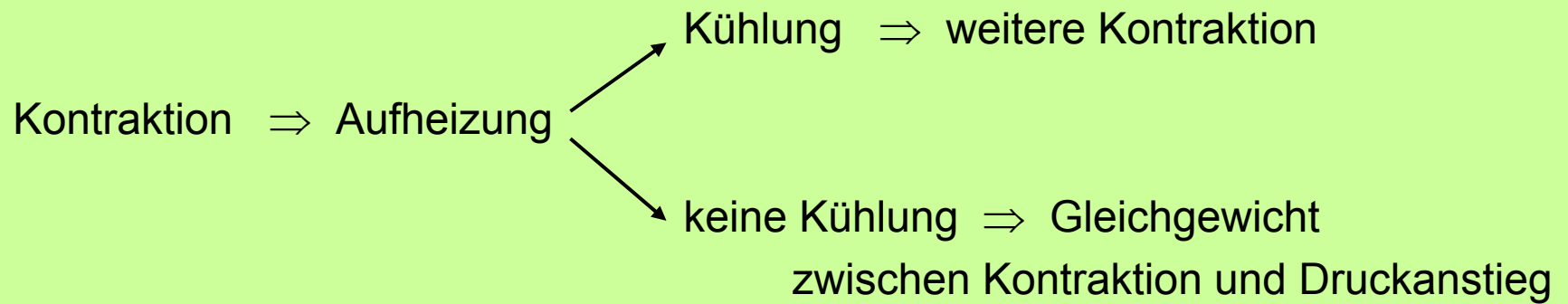
# Jeans-Kriterium

Mindestmasse zur Erfüllung des Jeans-Kriteriums (in Sonnenmassen)

H-Atome / cm <sup>3</sup> \ T in K	1	100	10000
5	270	27	2.7
10	750	75	7.5
100	25000	2500	250



# Aufheizung und Kühlung

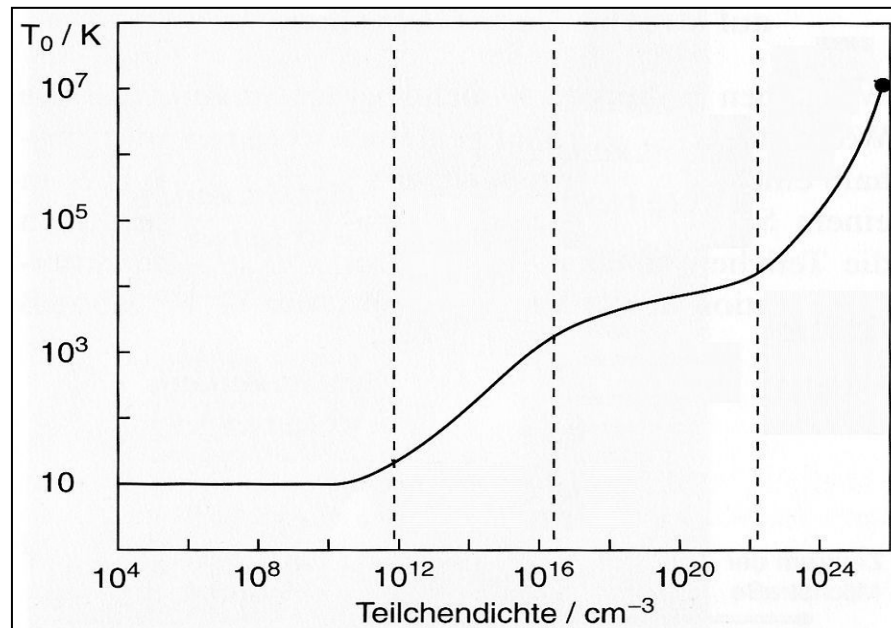


# Die Geburt: Protosterne

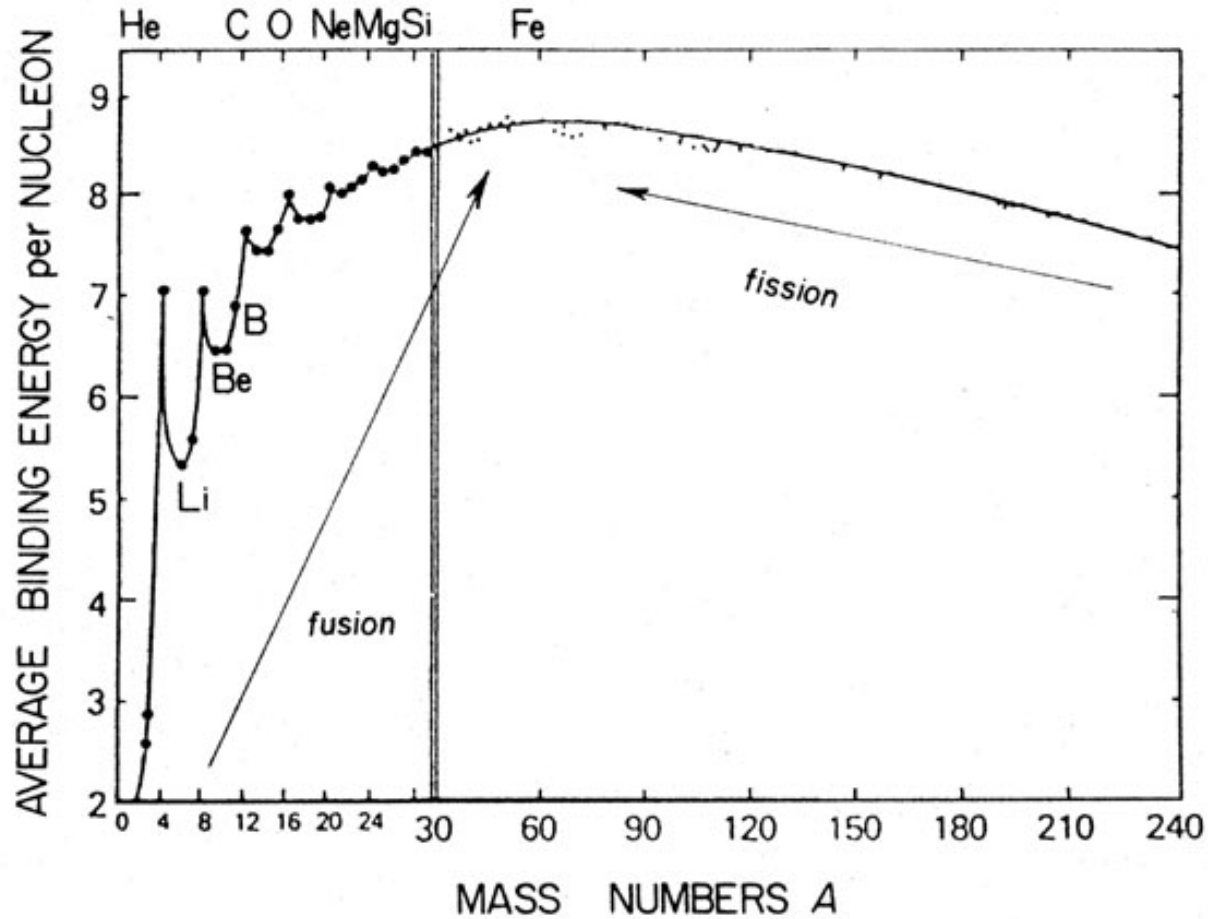
Jeans-Kriterium erfüllt  $\Rightarrow$  Materiewolke kollabiert

## Phasen des Kollaps:

- Erster dynamischer Kollaps  $\rightarrow$  Emission von Strahlungsenergie
- Erste quasistatische Phase  $\rightarrow$  Stern ist optisch dicht im IR: "Protostern"
- Zweiter dynamischer Kollaps  $\rightarrow$  Dissoziation von  $H_2$
- Zweite quasistatische Phase  $\rightarrow$  hydrostatisches Gleichgewicht im ionisierten Gas
- Weiteres Aufheizen  $\rightarrow$  Kernfusion, Hauptreihe

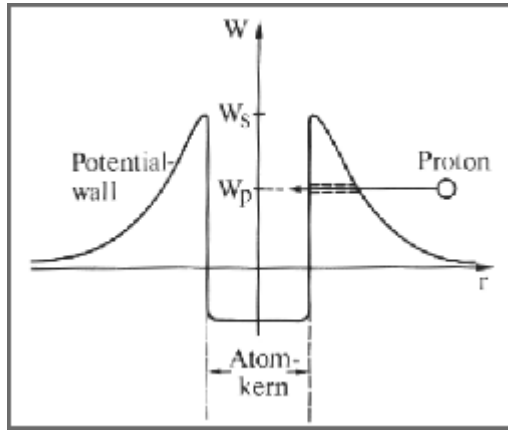


# Bindungsenergien $E(A)$

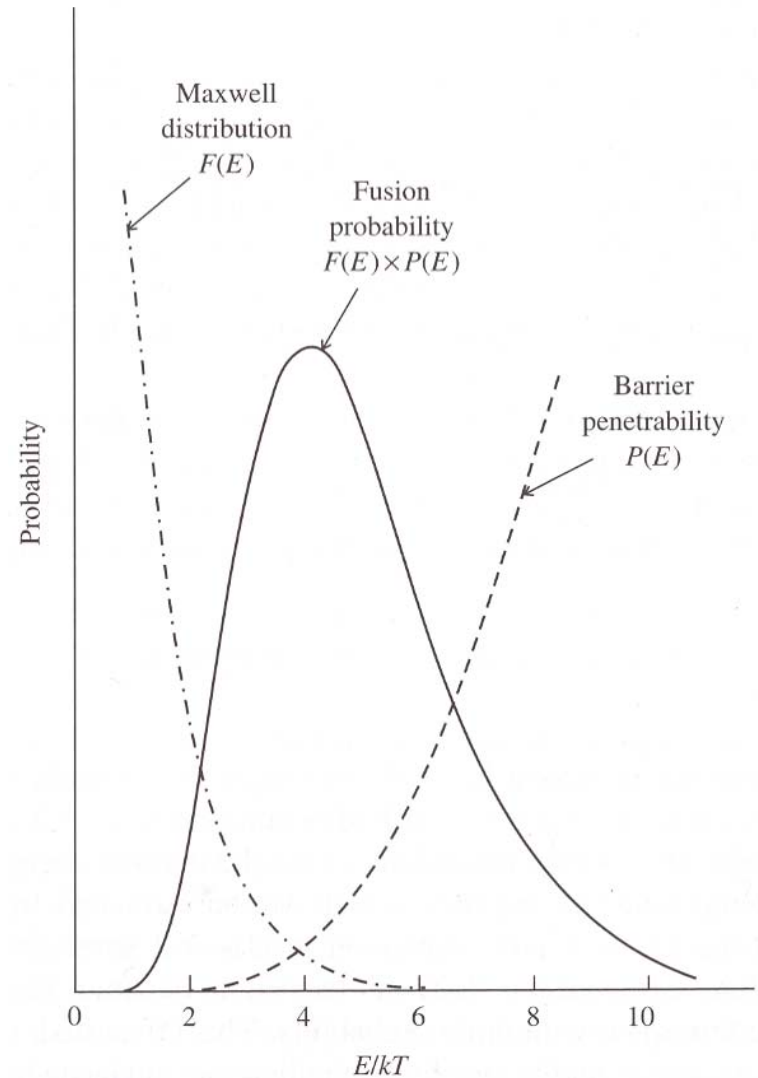




# Fusion und Coulombwall

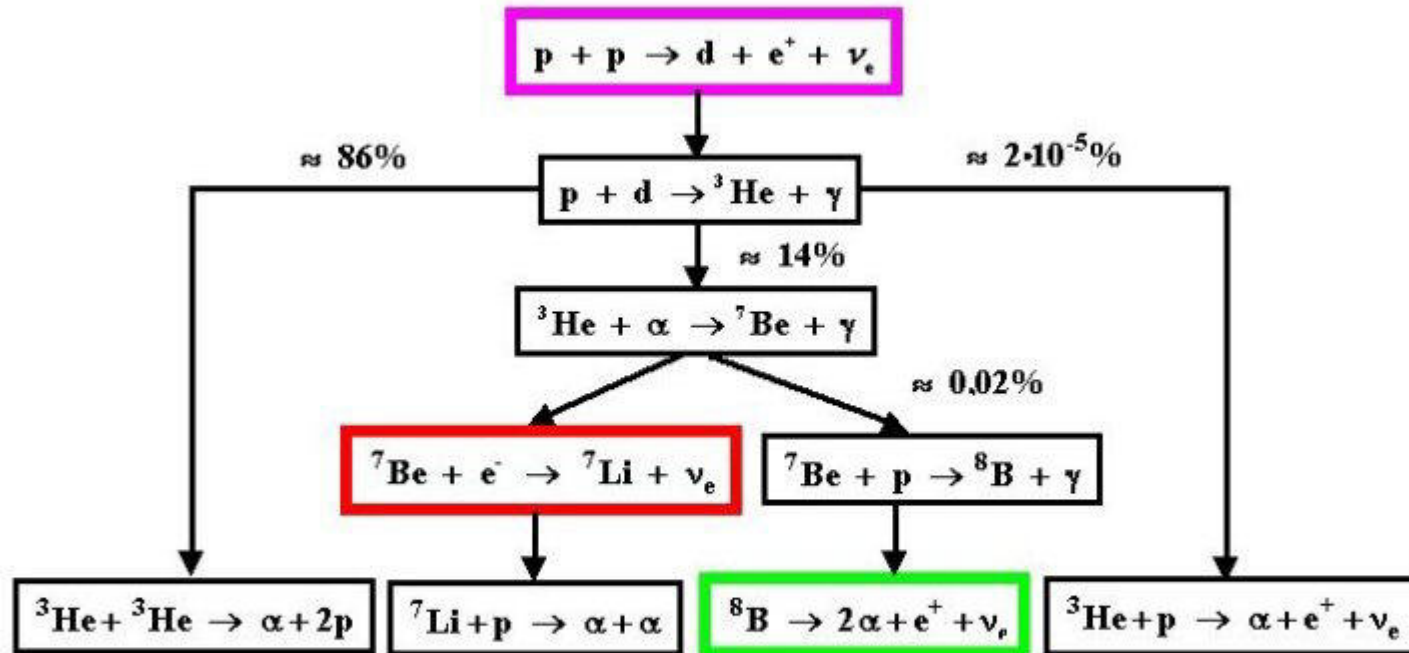


$$E_{\text{pot,coul}} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{r_1 + r_2}$$

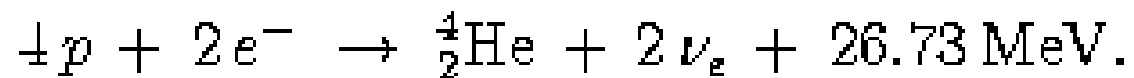


# pp-Zyklus

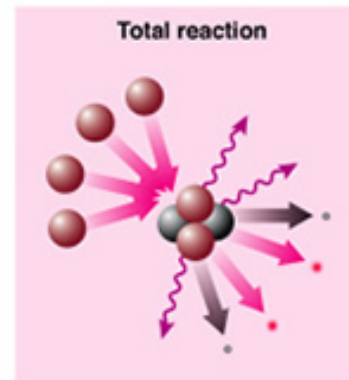
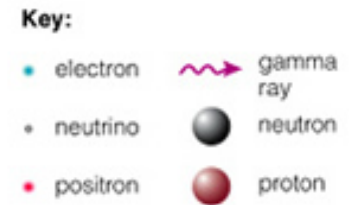
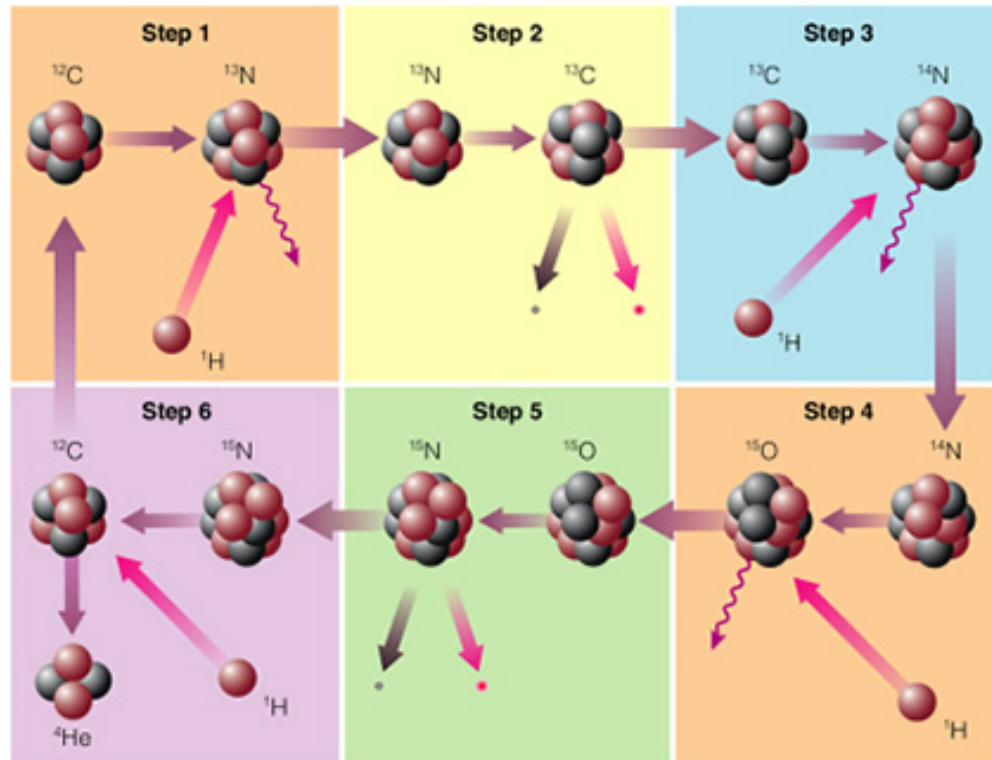
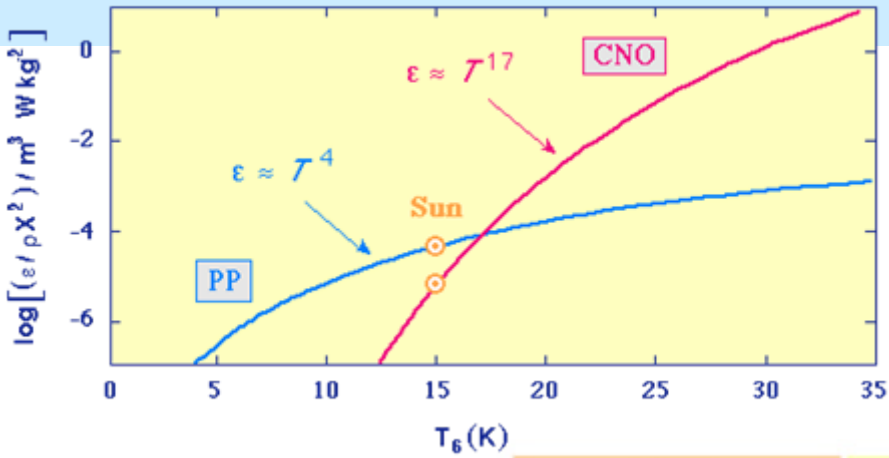
## Der Wasserstoff-Zyklus der Sonne



**Ergebnis:  $4p \rightarrow \alpha + 2e^+ + 2\nu_e$**



# CNO-Zyklus

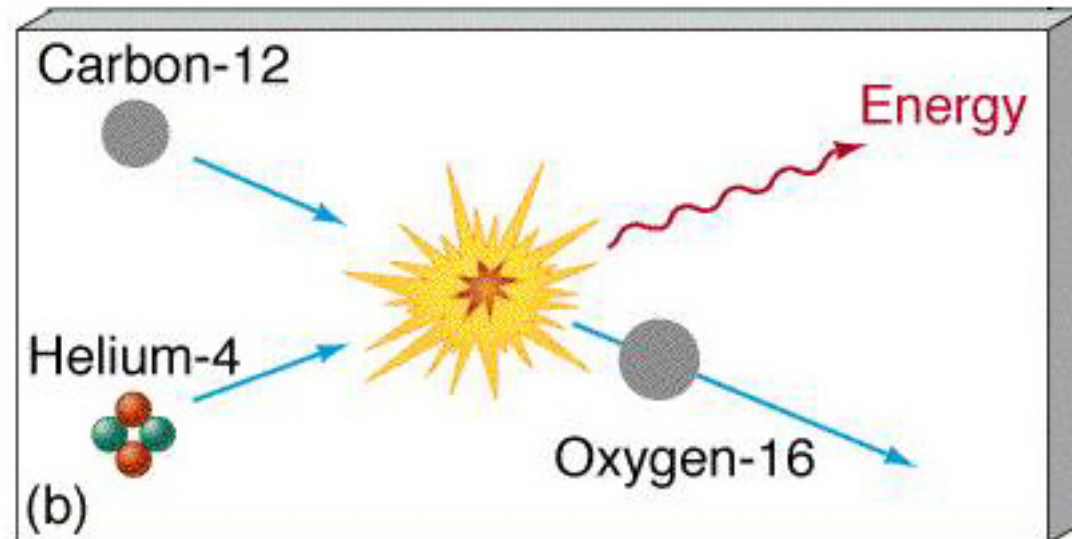
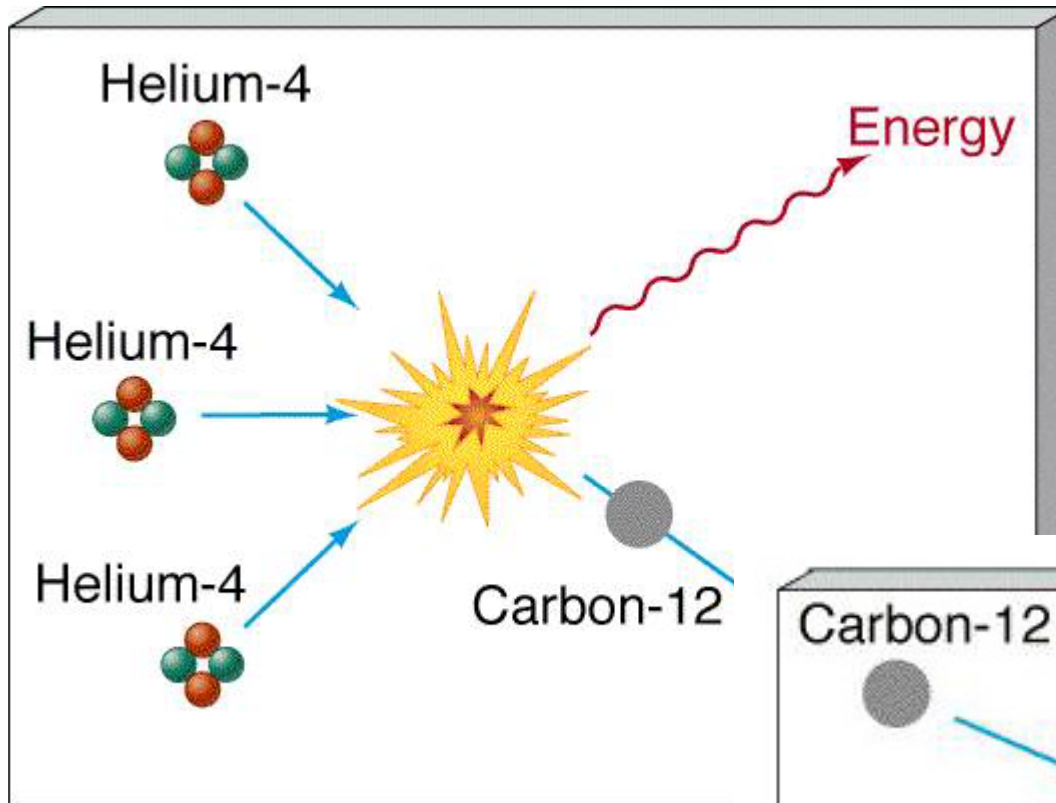


# keine stabilen A=8 Nuklide

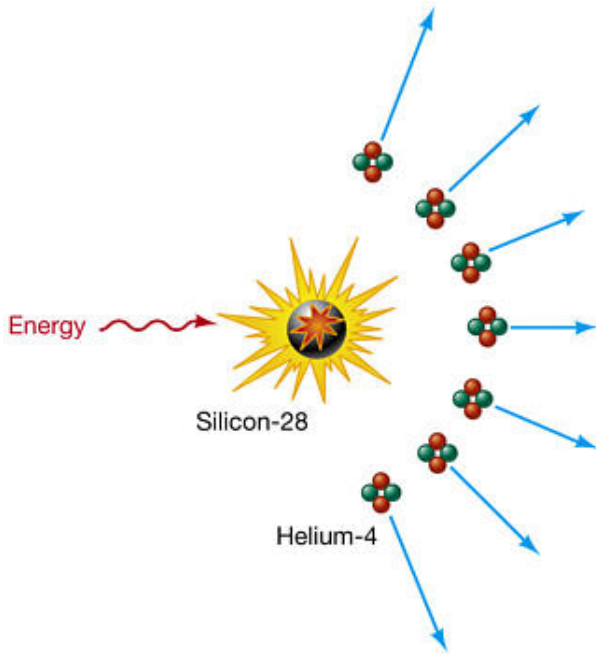
Halbwertszeit		p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
			H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si		
n																		
El	< 10 <sup>-10</sup> Sekunden	0		<sup>1</sup> H														
El	< 1 Minute	1	n	<sup>2</sup> H	<sup>3</sup> He	<sup>4</sup> Li												
El	1 Minute bis 1 Stunde	2		<sup>3</sup> H	<sup>4</sup> He	<sup>5</sup> Li	<sup>6</sup> Be	<sup>7</sup> B	<sup>8</sup> C									
El	1 Stunde bis 1 Tag	3		<sup>4</sup> H	<sup>5</sup> He	<sup>6</sup> Li	<sup>7</sup> Be	<sup>8</sup> B	<sup>9</sup> C	<sup>10</sup> N								
El	1 Tag bis 60 Tage	4			<sup>6</sup> He	<sup>7</sup> Li	<sup>8</sup> Be	<sup>9</sup> B	<sup>10</sup> C	<sup>11</sup> N	<sup>12</sup> O							
El	60 Tage bis 10 Jahre	5			<sup>7</sup> He	<sup>8</sup> Li	<sup>9</sup> Be	<sup>10</sup> B	<sup>11</sup> C	<sup>12</sup> N	<sup>13</sup> O	<sup>14</sup> F						
El	10 Jahre bis 1.000 Jahre	6			<sup>8</sup> He	<sup>9</sup> Li	<sup>10</sup> Be	<sup>11</sup> B	<sup>12</sup> C	<sup>13</sup> N	<sup>14</sup> O	<sup>15</sup> F	<sup>16</sup> Ne					
El	1.000 Jahre bis 100.000 Jahre	7				<sup>10</sup> Li	<sup>11</sup> Be	<sup>12</sup> B	<sup>13</sup> C	<sup>14</sup> N	<sup>15</sup> O	<sup>16</sup> F	<sup>17</sup> Ne	<sup>18</sup> Na				
El	100.000 Jahre bis 10.000.000 Jahre	8				<sup>11</sup> Li	<sup>12</sup> Be	<sup>13</sup> B	<sup>14</sup> C	<sup>15</sup> N	<sup>16</sup> O	<sup>17</sup> F	<sup>18</sup> Ne	<sup>19</sup> Na	<sup>20</sup> Mg			
El	10.000.000 bis 50.000.000 Jahre																	
El	primordiales Nuklid (> 50.000.000 Jahre)																	
El	Stabil																	

==> Triple-Helium-Prozesse

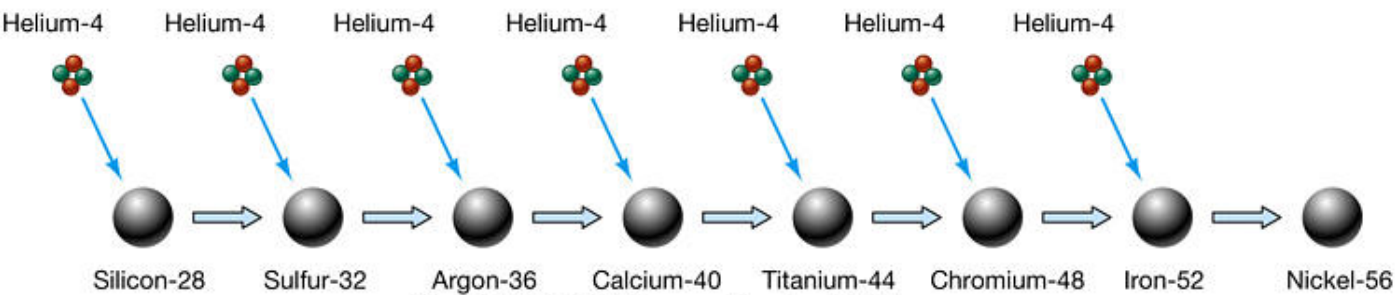
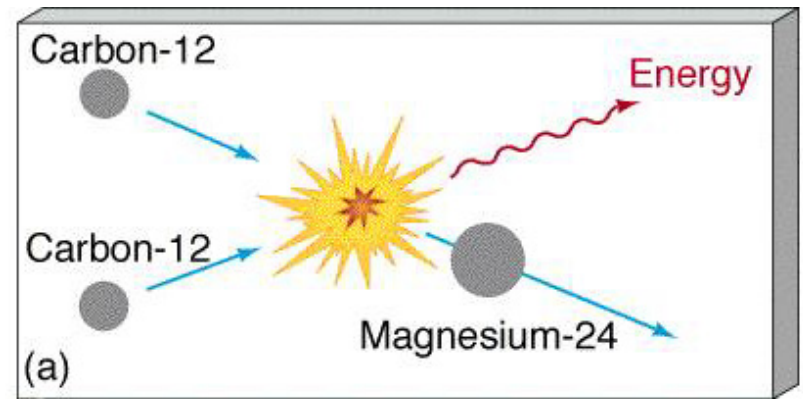
# Triple- $\alpha$ -Prozess und He-C-Brennen



# Produktion schwerer Elemente



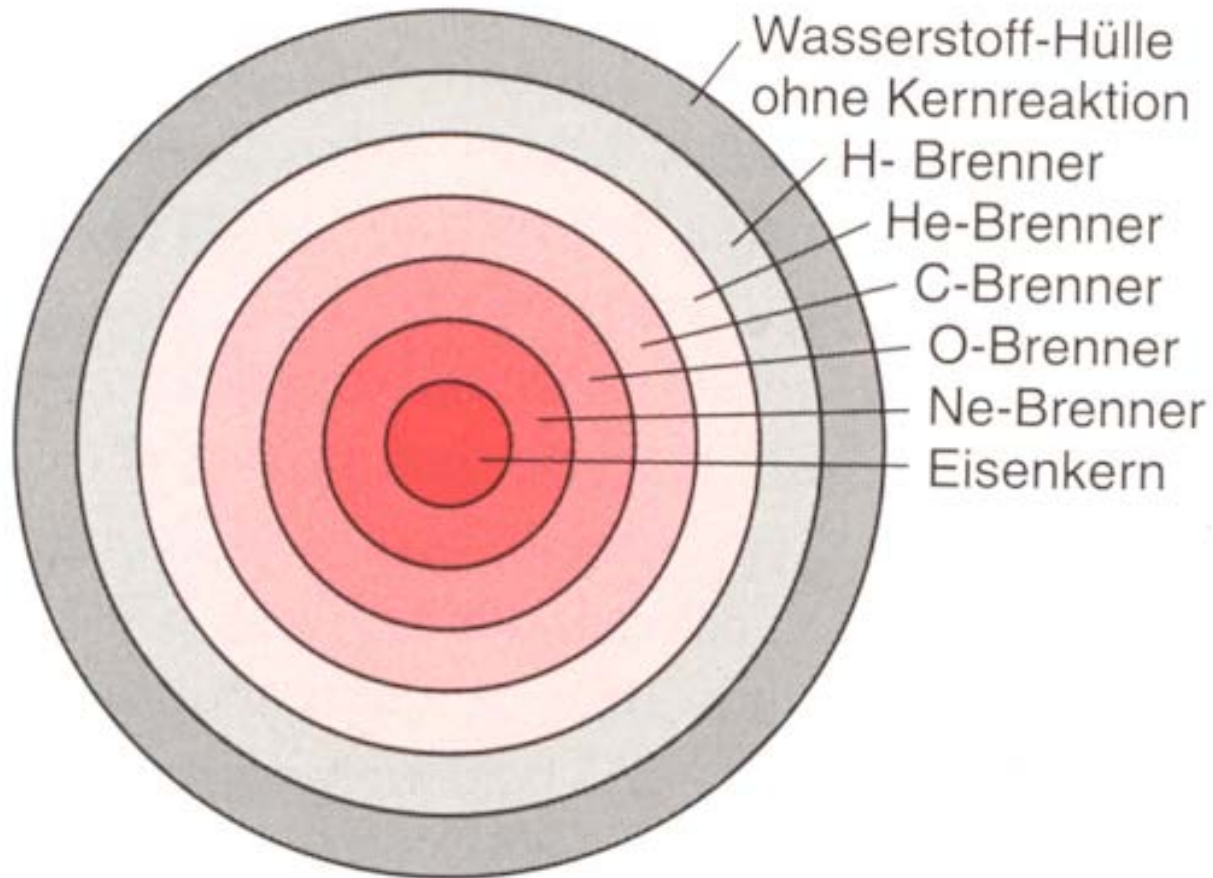
(a)



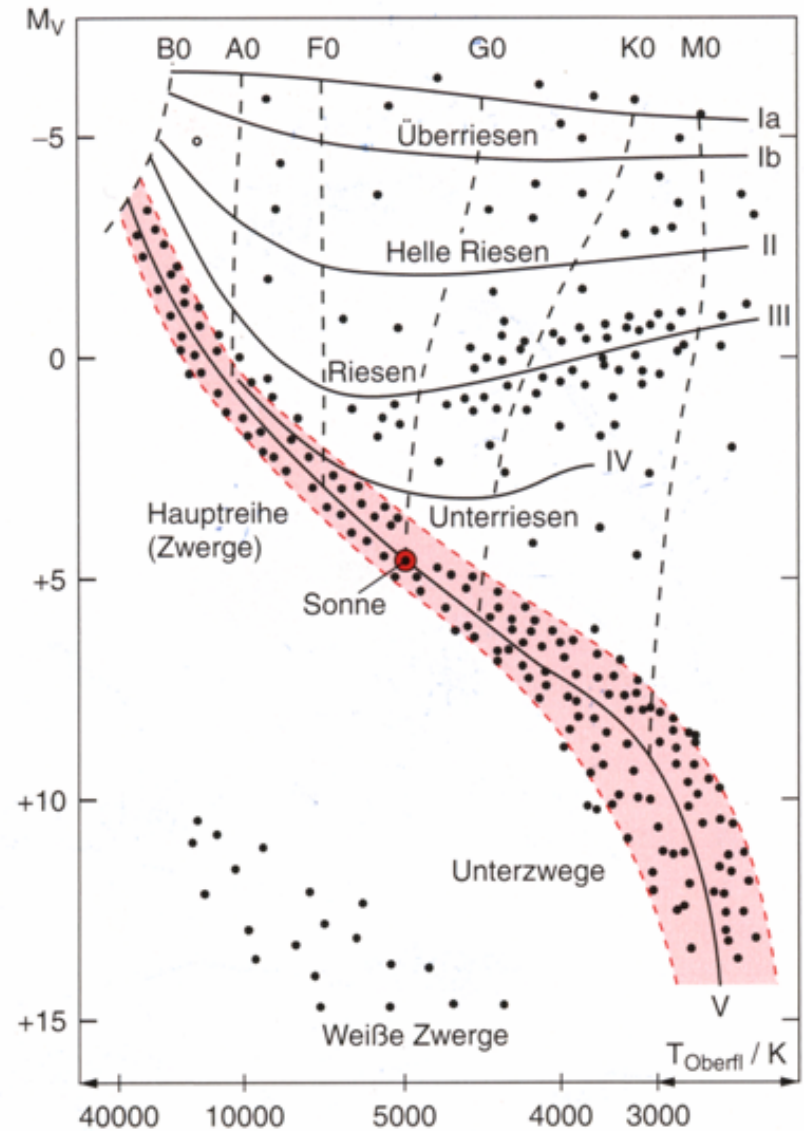
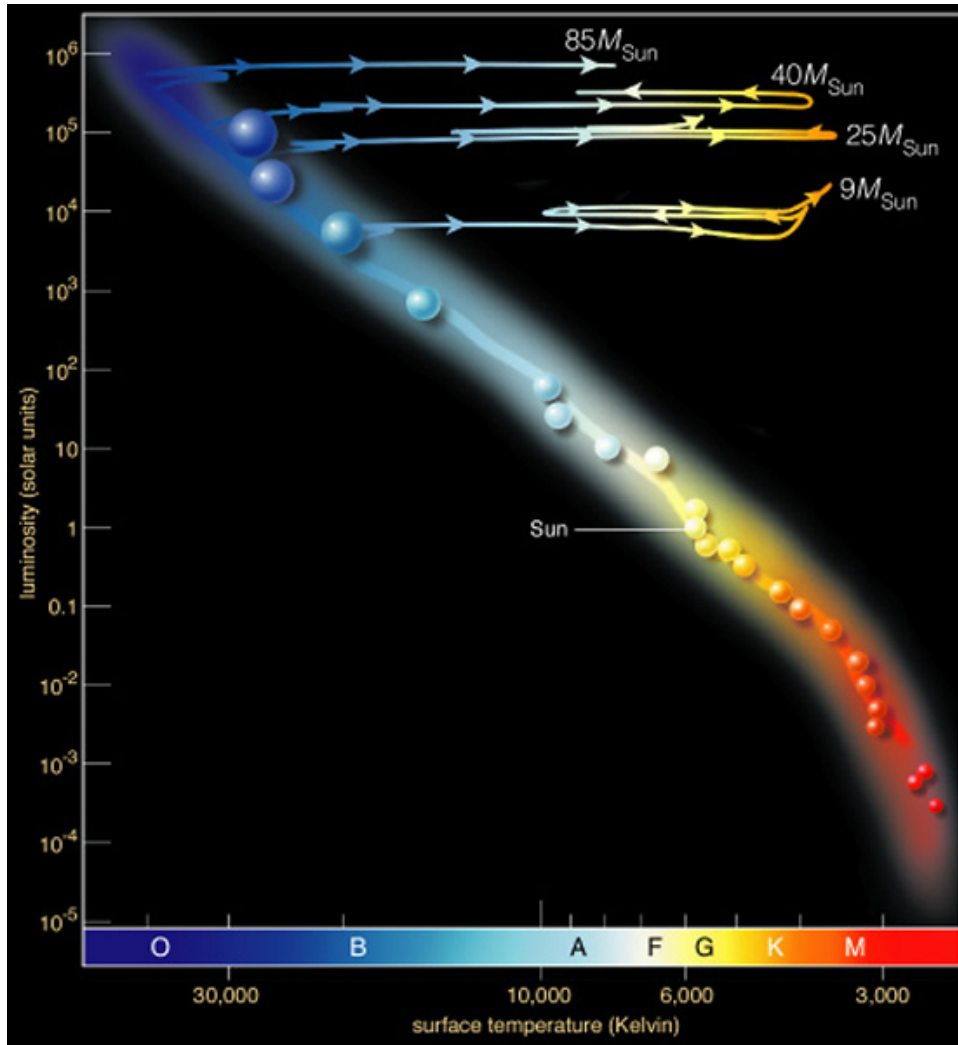
(b)

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

# Schalenstruktur des Brennens in Sternen



# Hertzprung-Russell-Diagramm





# Helligkeit, Leuchtkraft, Magnituden

- Helligkeit: Energiefluss des Lichtes (oder Teil des Spektrums), [ $\text{W m}^{-2}$ ]
- Magnituden: log. Maß für Helligkeit:

$$m = -2.5 \cdot \log F/F_0$$

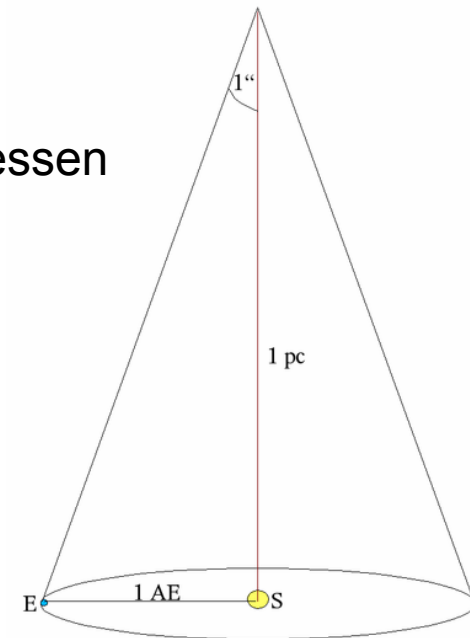
- scheinbare Helligkeit: auf der Erde (mit Korrekturen) gemessen
- absolute Helligkeit: auf Abstand 10 pc bezogen:
- absolute Magnituden:

$$M = m + 2.5 \cdot \log \left( \frac{(10 \text{ pc})^2}{r^2} \right)$$

- Leuchtkraft = Strahlungsleistung:

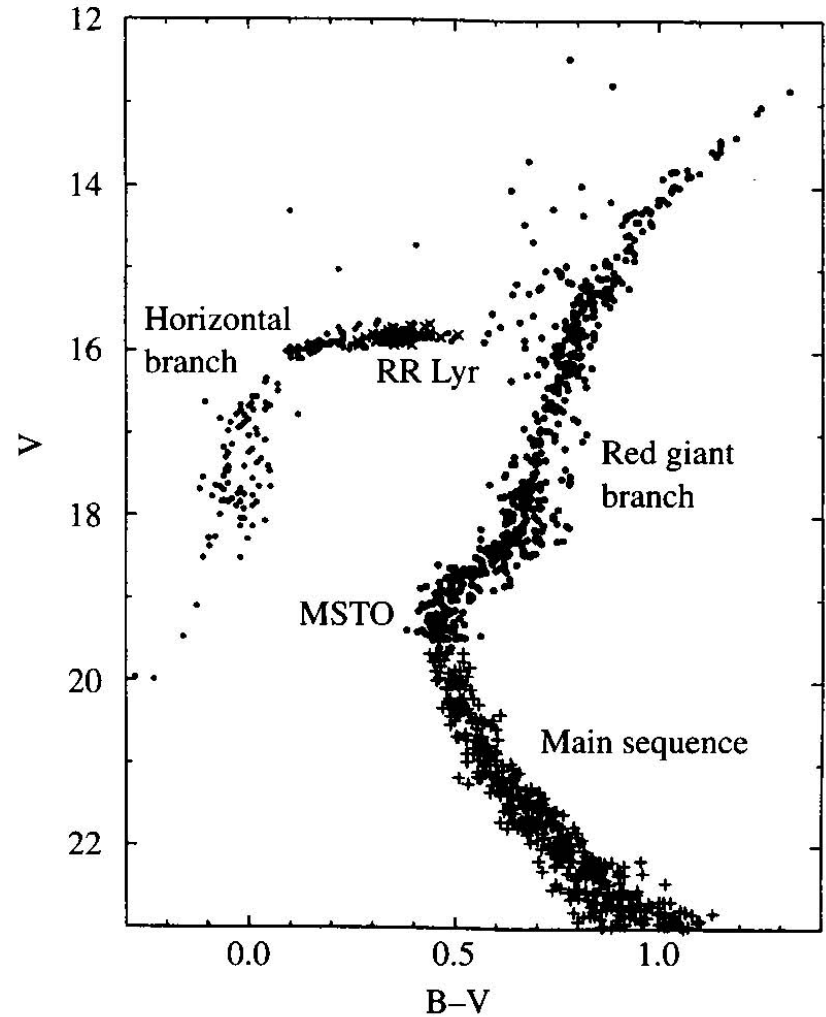
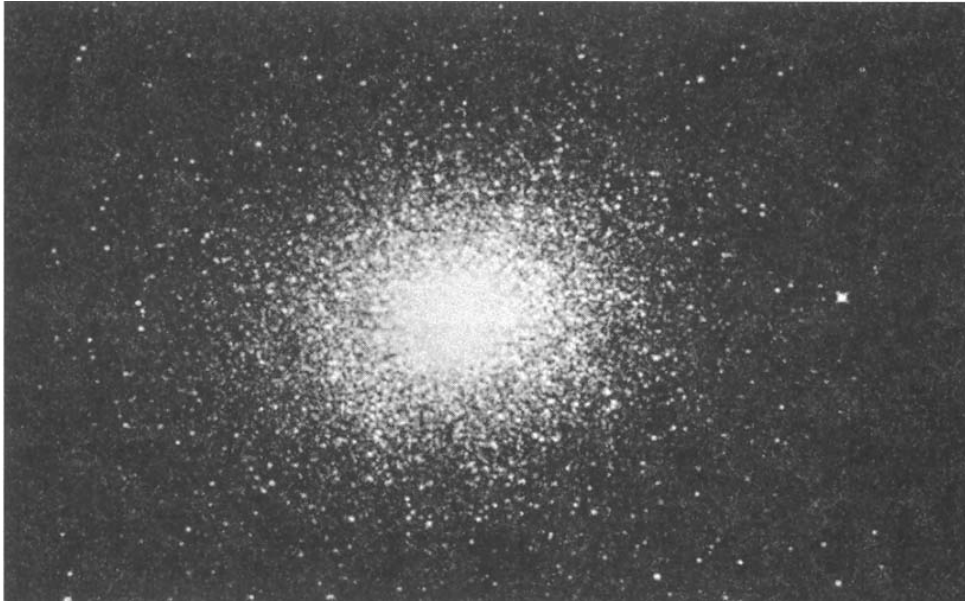
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

$$(\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$$

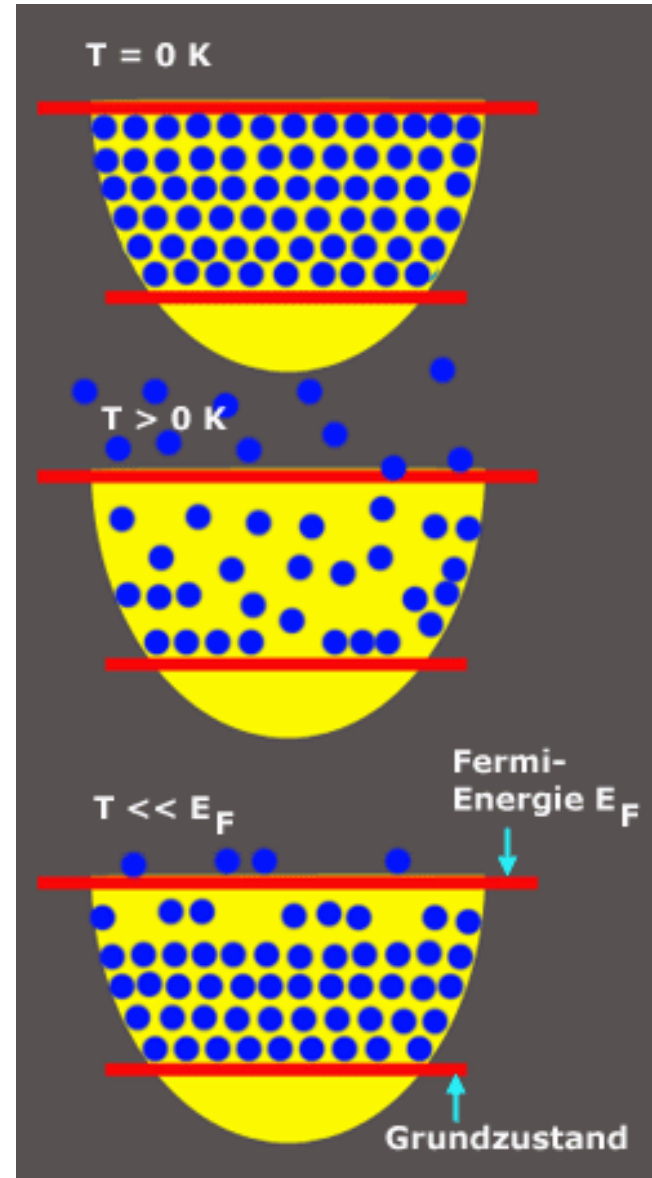
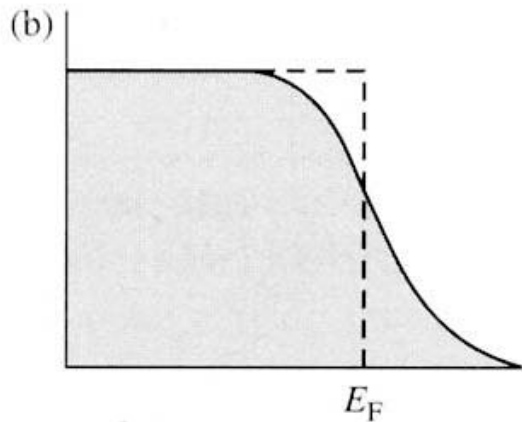
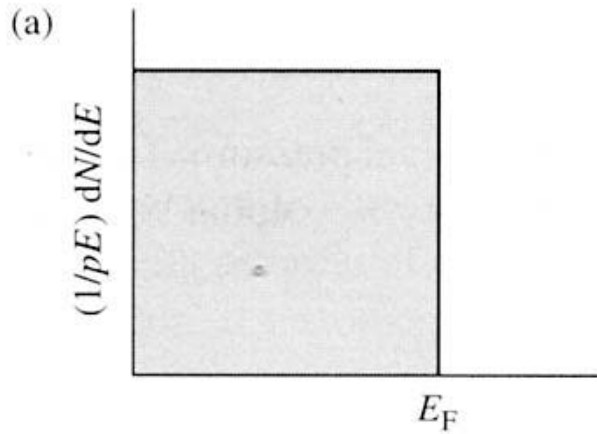


1 pc = 3.26 Lichtjahre

# H-R-Diagramm in Kugelsternhaufen



# Elektronenentartung



# Zeitskalen der Sternentwicklung

TABLE 20.1 Evolution of a Sun-like Star

Stage	Approximate Time to Next Stage (Yr)	Central Temperature ( $10^6$ K)	Surface Temperature (K)	Central Density ( $\text{kg/m}^3$ )	Radius (km)	Radius (solar radii)	Object
7	$10^{10}$	15	6000	$10^5$	$7 \times 10^5$	1	Main-sequence star
8	$10^8$	50	4000	$10^7$	$2 \times 10^6$	3	Subgiant branch
9	$10^5$	100	4000	$10^8$	$7 \times 10^7$	100	Helium flash
10	$5 \times 10^7$	200	5000	$10^7$	$7 \times 10^6$	10	Horizontal branch
11	$10^4$	250	4000	$10^8$	$4 \times 10^8$	500	Asymptotic-giant branch
12	$10^5$	300	100,000	$10^{10}$	$10^4$	0.01	Carbon core
		—	3000	$10^{-17}$	$7 \times 10^8$	1000	Planetary nebula*
13	—	100	50,000	$10^{10}$	$10^4$	0.01	White dwarf
14	—	Close to 0	Close to 0	$10^{10}$	$10^4$	0.01	Black dwarf

\*Values refer to the envelope.

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Table 7.1 Nuclear fusion timescales for a star of  $25M_{\odot}$  (after Rofls and Rodney 1988)

Fusion of	Time to complete	Core temperature (K)	Core density ( $\text{kg m}^{-3}$ )
H	$7 \times 10^6$ yr	$6 \times 10^7$	$5 \times 10^4$
He	$5 \times 10^5$ yr	$2 \times 10^8$	$7 \times 10^5$
C	600 yr	$9 \times 10^8$	$2 \times 10^8$
Ne	1 yr	$1.7 \times 10^9$	$4 \times 10^9$
O	0.5 yr	$2.3 \times 10^9$	$1 \times 10^{10}$
Si	1 day	$4.1 \times 10^9$	$3 \times 10^{10}$

# Entwicklungswege der Sterne

