

Weißer Zwerg

Abschätzung der Masse und Dichte am Beispiel von Sirius B.

In 1838 hat Friedrich Wilhelm Bessel die Parallaxe von Sirius A, dem hellsten Stern am Himmel, bestimmt.

Aus der Parallaxe von 0.377" folgt eine Entfernung von 2.65 pc. Aber Bessel fand auch, dass der Stern am Himmel oszilliert. Er folgerte in 1844, dass Sirius Teil eines Doppelsternsystems ist (Periode ~50 Jahre).

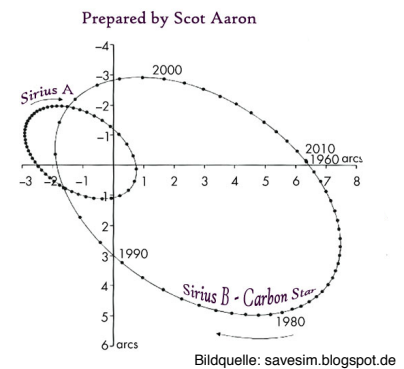
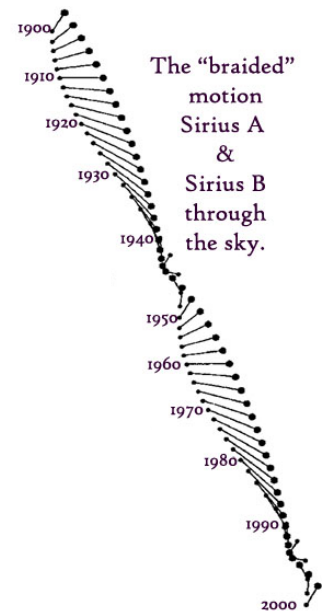
Der Begleiter war für ihn unsichtbar. Er konnte aber die Masse abschätzen: Sirius A ~ 2.2 M_{\odot} , Sirius B ~ 1.0 M_{\odot}

In 1846 wurde Sirius B an der vorhergesagten Position entdeckt, mit $L_A \sim 25 L_{\odot}$ und $L_B \sim 0.03 L_{\odot}$.

Aber, bei $L_A/L_B \sim 883$ erwartet man einen massearmen Begleiter, und nicht einen Stern von etwa einer Sonnenmasse!

Außerdem: Spektroskopische Beobachtungen ergeben eine Oberflächentemperatur von 25.000 K!

Wie passt das zusammen?



Weißer Zwerg

Sirius B: $M_B \sim 1.0 M_{\odot}$, $L_B \sim 0.03 L_{\odot}$, $T_B \sim 25.000$ K
Wie passt das zusammen?

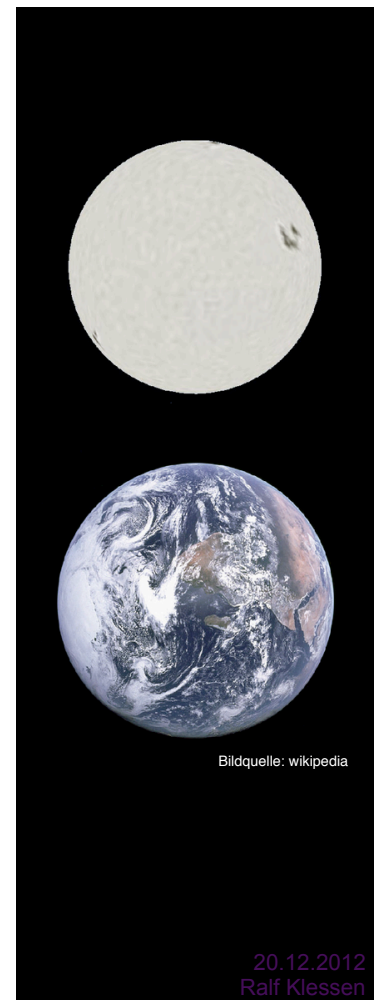
Abschätzung des Radius:

$$R = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T^4} \right)^{1/2} = 5.5 \times 10^8 \text{ cm} = 0.86 R_{\text{Earth}}$$

Die Dichte beträgt:

$$\rho = 3 \times 10^6 \text{ g cm}^{-3}$$

Ein Kubikzentimeter dieses Materials wiegt 3 Tonnen!



Weißer Zwerg

Sirius B: $M_B \sim 1.0 M_\odot$, $L_B \sim 0.03 L_\odot$, $T_B \sim 25.000 \text{ K}$

Masse-Radius-Beziehung:

Für entartetes Elektronengas gilt $P \propto \rho^{5/3}$.

Wir wissen, dass folgende Relationen gelten (siehe Hausaufgabe):

$$P \propto \frac{M^2}{R^4} \quad \text{und} \quad \rho \propto \frac{M}{R^3}$$

Zusammen:

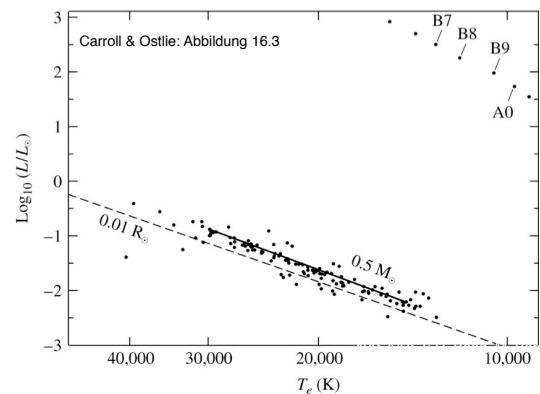
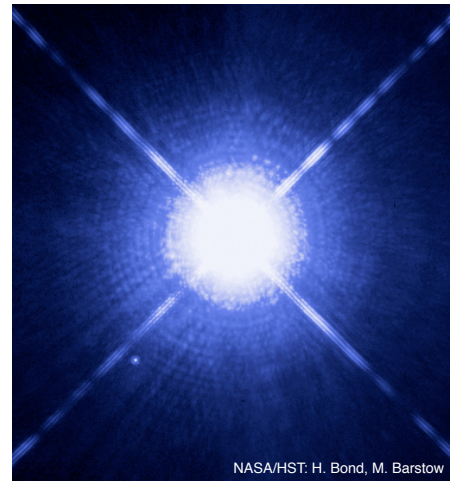
$$P \propto \frac{M^4}{R^4} \propto \frac{M^{5/3}}{R^5} \propto \rho^{5/3}$$

Und damit:

$$R \propto M^{-1/3}$$

Wenn die Masse steigt, dann sinkt der Radius unabhängig von der Temperatur!

Die Zentraltemperatur beträgt $T \sim 10^8 \text{ K}$. Weiße Zwerge kühlen langsam aus.



20.12.2012
Ralf Klessen

Weißer Zwerg

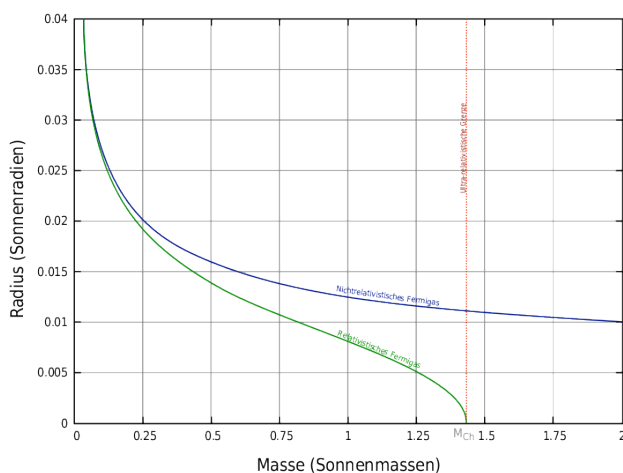
Sirius B: $M_B \sim 1.0 M_\odot$, $L_B \sim 0.03 L_\odot$, $T_B \sim 25.000 \text{ K}$

Und damit: $R \propto M^{-1/3}$

Wenn die Zentraltemperatur mit steigender Masse anwächst, dann Übergang zur relativistischen Entartung! \Rightarrow Anderer Masse-Radius-Zusammenhang!

\Rightarrow Kritische Grenzmasse:

$$M_{\text{crit}} \approx N^2 \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2}$$



Wird diese Grenzmasse überschritten kommt es zum Kollaps und zur anschließenden Explosion:

Typ Ia Supernova

Neutronenstern

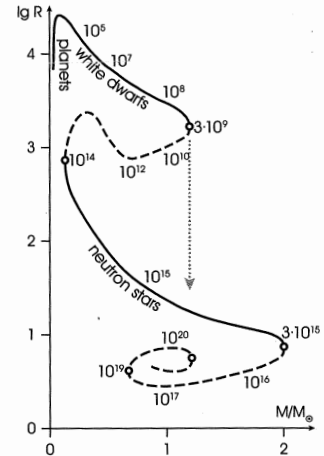
Im Core Collapse eines massereichen Sternes werden Elektronen in die Protonen “gedrückt” (inverser Beta-Zerfall) \Rightarrow Neutronenstern

Ist im Prinzip ein riesiger Atomkern!

Stabilisierung durch Neutronenentartung. Da $M_n \gg M_e$, bleiben die

Neutronen noch weiter nicht-relativistisch $\Rightarrow R \sim M^{-1/3}$

Fig. 38.3 Schematic mass-radius relation (R in km) for configurations of cold catalysed matter, from the planetary regime to ultra-dense neutron stars. Some values of ρ_c (in g cm^{-3}) are indicated along the curve. At the extrema of M (open circles) the stability problem has a zero eigenvalue. Solid branches are stable, dashed branches are unstable. The grey, vertical arrow indicates the collapse of a white dwarf exceeding the maximum stable mass to a neutron star



Kippenhahn, Weigert, Weiss: Abbildung 38.3

20.12.2012
Ralf Klessen

Neutronenstern

Im Core Collapse eines massereichen Sternes werden Elektronen in die Protonen “gedrückt” (inverser Beta-Zerfall) \Rightarrow Neutronenstern

Ist im Prinzip ein riesiger Atomkern!

Stabilisierung durch Neutronenentartung. Da $M_n \gg M_e$, bleiben die

Neutronen noch weiter nicht-relativistisch $\Rightarrow R \sim M^{-1/3}$

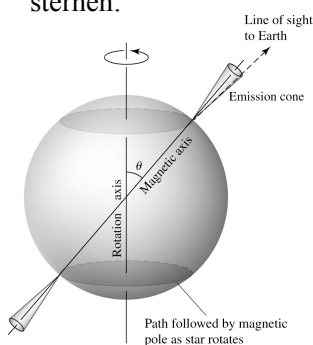
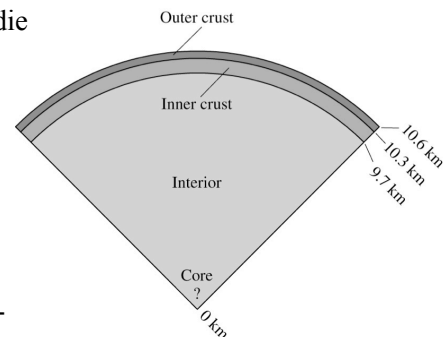
Ein Neutronenstern mit Chandrasekhar-Masse hat

einen Radius von 10 km!

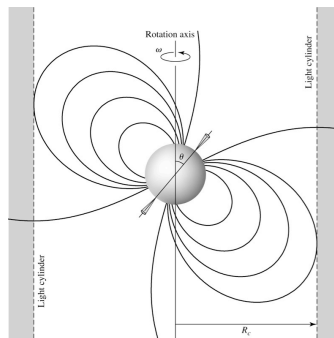
Maximalmasse nicht gut bekannt, da Unsicherheiten

in der Zustandsgleichung: $M_{\text{crit}} \sim 3 - 4 M_{\odot}$

Pulsare: Synchrotronstrahlung von Gyration von Elektronen entlang von Magnetfeldlinien in stark magnetisierten Neutronensternen:



Carroll & Ostlie: Abbildung 16.25



Carroll & Ostlie: Abbildung 16.26



<http://spaceart1.ning.com/>

20.12.2012
Ralf Klessen

Schwarzes Loch

Wird die Chandrasekhar-Grenzmasse überschritten, dass kann den Kollaps nichts mehr aufhalten. Es entsteht ein Schwarzes Loch.

Schwarzschild-Radius: Entweichgeschwindigkeit = Lichtgeschwindigkeit!

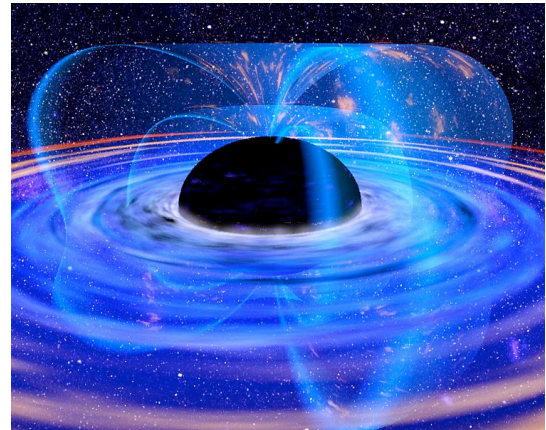
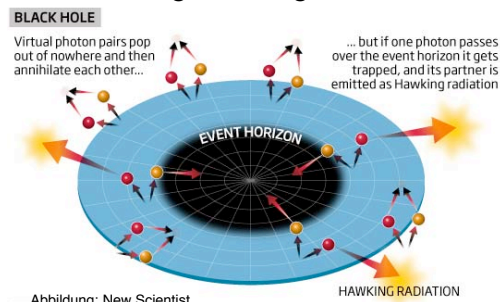
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv^2 \iff E_{\text{pot}} = -\frac{GMm}{R}$$

Damit: $R_S = \frac{2GM}{c^2}$

für $1 M_{\odot}$: $R_S \approx 3 \text{ km}$

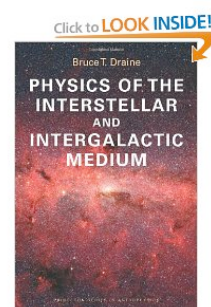
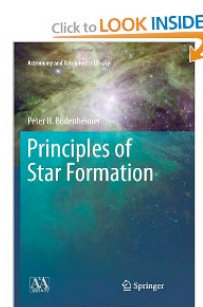
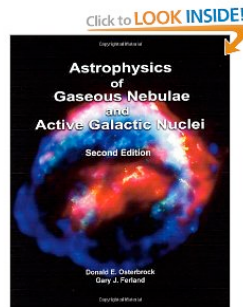
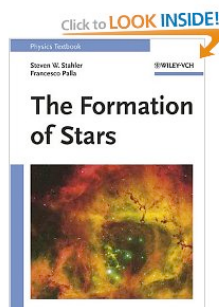
Singularität im Raum-Zeit-Gefüge.
Von innerhalb des Ereignishorizonts
kann keine Information nach außen
dringen.

Aber: Hawking-Strahlung



Schwarzes Loch: Visualisierung der NASA (wikipedia)

20.12.2012
Ralf Klessen

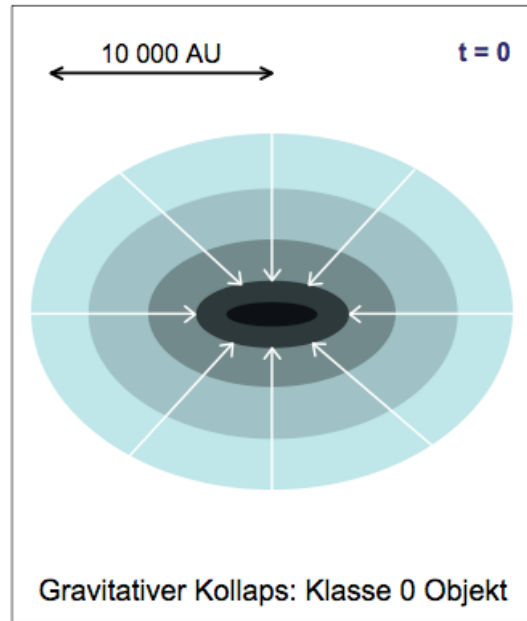
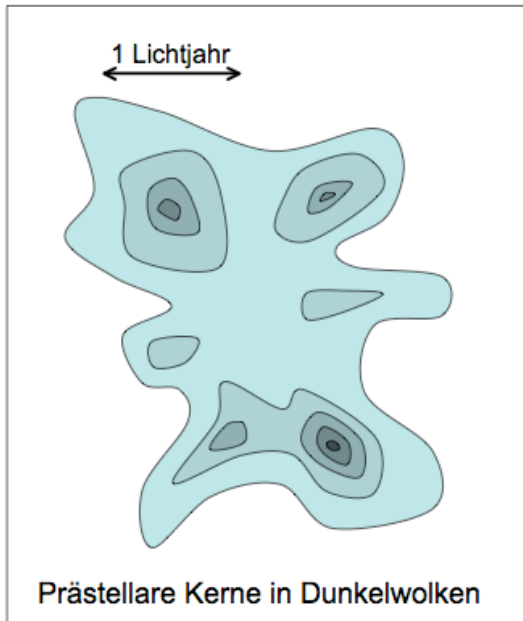


• Bücher zur Sternentstehung

- Stahler, S., & Palla, F., 2004, "The Formation of Stars" (Weinheim: Wiley-VCH)
- Osterbrock, D., & Farland, G., 2006, "Astrophysics of Gaseous Nebulae & Active Galactic Nuclei, 2nd ed. (Sausalito: Univ. Science Books)
- Bodenheimer, P. 2012, "Principles of Star Formation" (Springer Verlag)
- Draine, B. 2011, "Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium" (Princeton Series in Astrophysics)

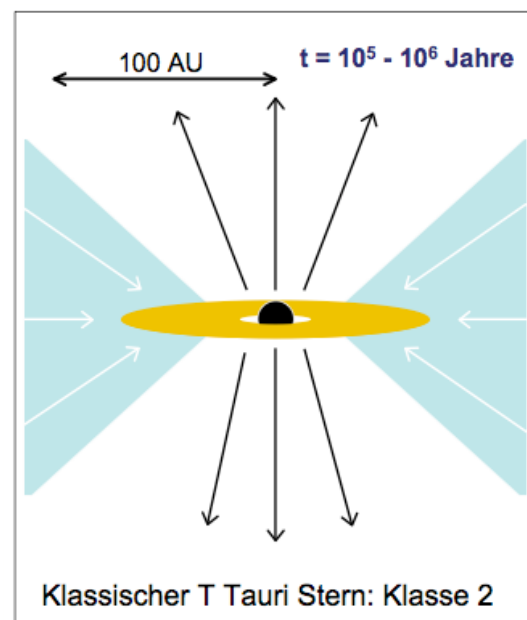
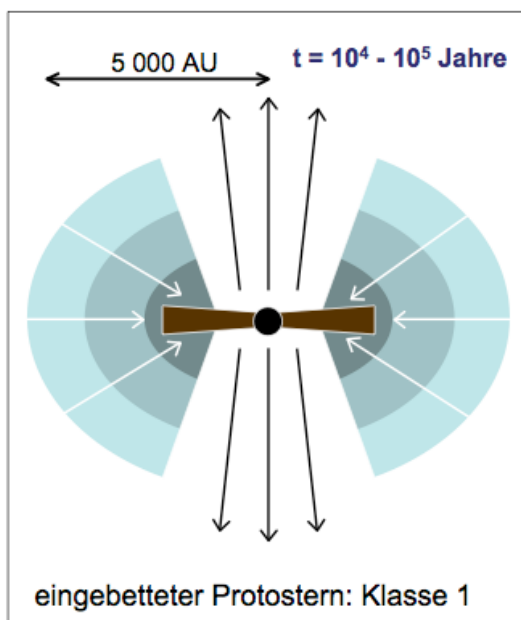
20.12.2012
Ralf Klessen

Stadien der Sternbildung 1



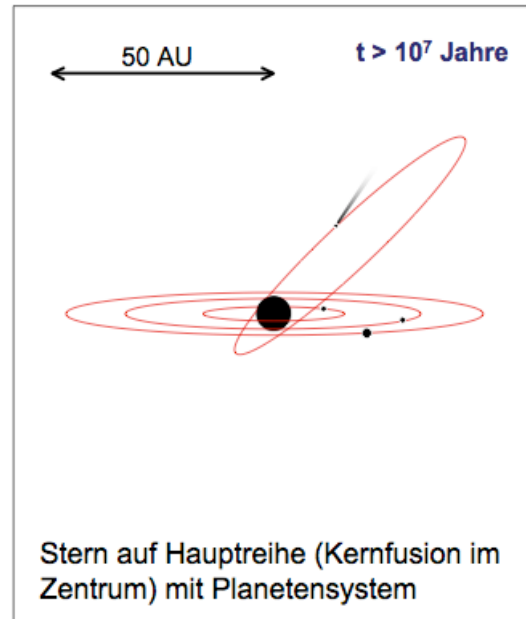
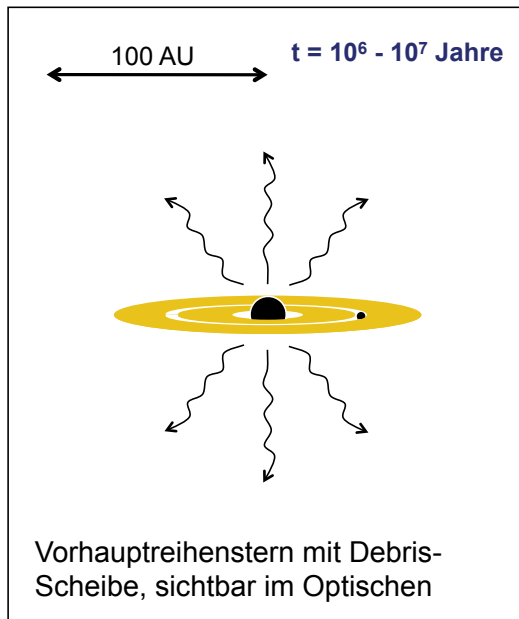
20.12.2012
Ralf Klessen

Stadien der Sternbildung 2



20.12.2012
Ralf Klessen

Stadien der Sternbildung 3

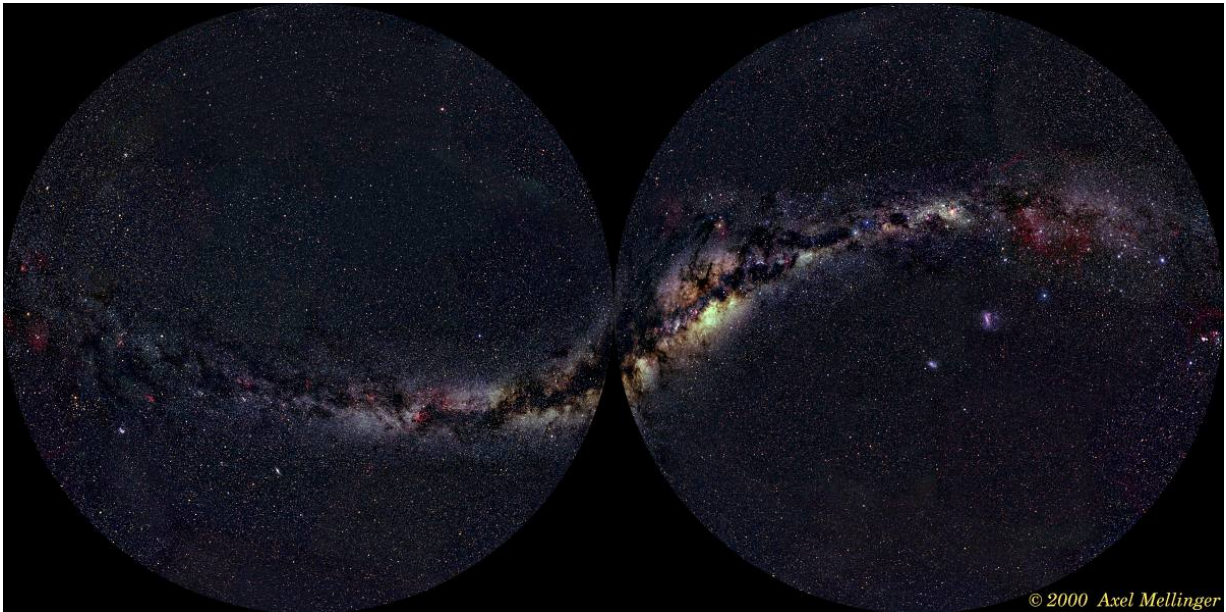


20.12.2012
Ralf Klessen

Ableitung des Jeans Kriteriums für gravitativen Kollaps einer homogenen sphärischen Überdichte in isothermen Gas.

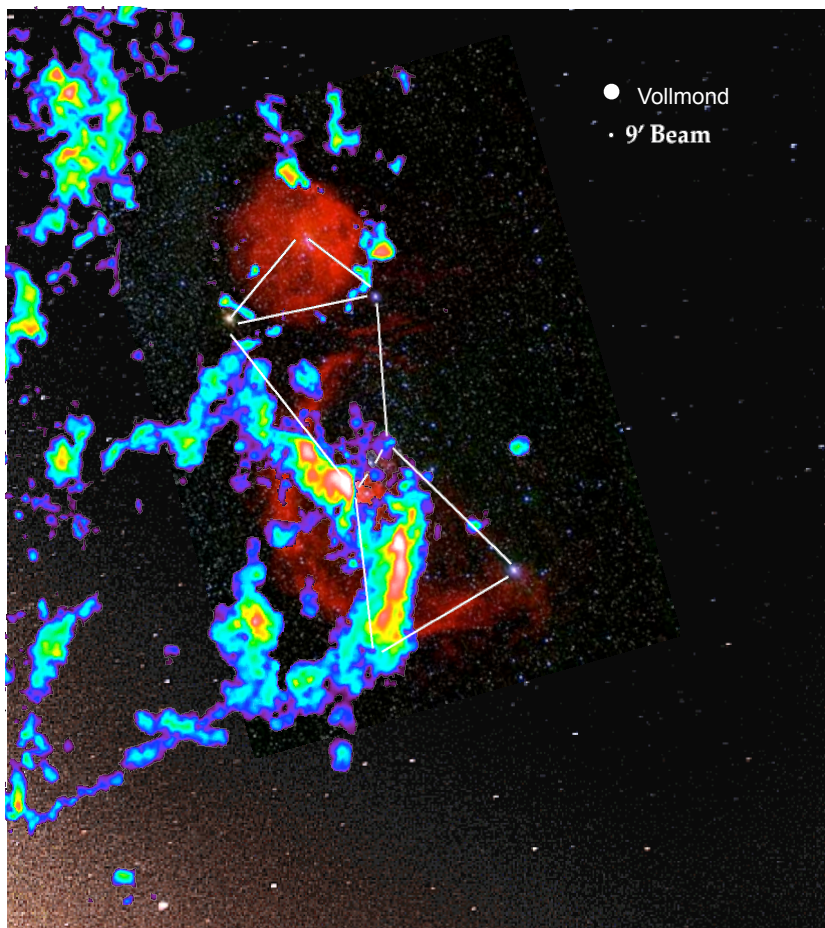
20.12.2012
Ralf Klessen

Sternentstehung in der Milchstraße



Am Nachthimmel sieht man **Dunkelwolken** und **Sterne**:
Die hellsten Sterne sind *massereich* und daher *jung*.
→ Sternentstehung ist wichtig um beobachtete Struktur
der Milchstraße zu verstehen.

20.12.2012
Ralf Klessen

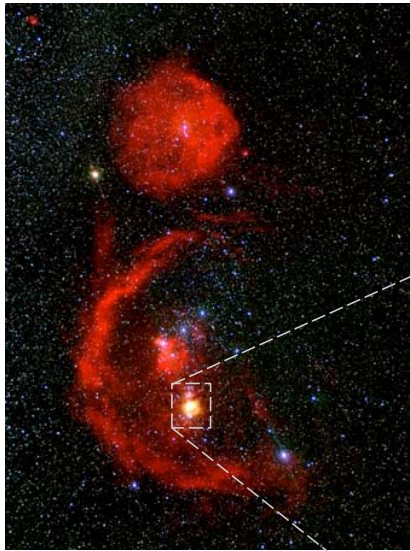


Stern- entstehung in Orion

Wir sehen

- **Sterne** (im sichtbaren Licht)
- **Atomaren Wasserstoff** (in $H\alpha$ -- rot)
- **Molekularen Wasserstoff H_2** (Radiostrahlung von Tracermolekül CO farbcodiert)

Lokales SE Gebiet: Trapezhaufen in Orion



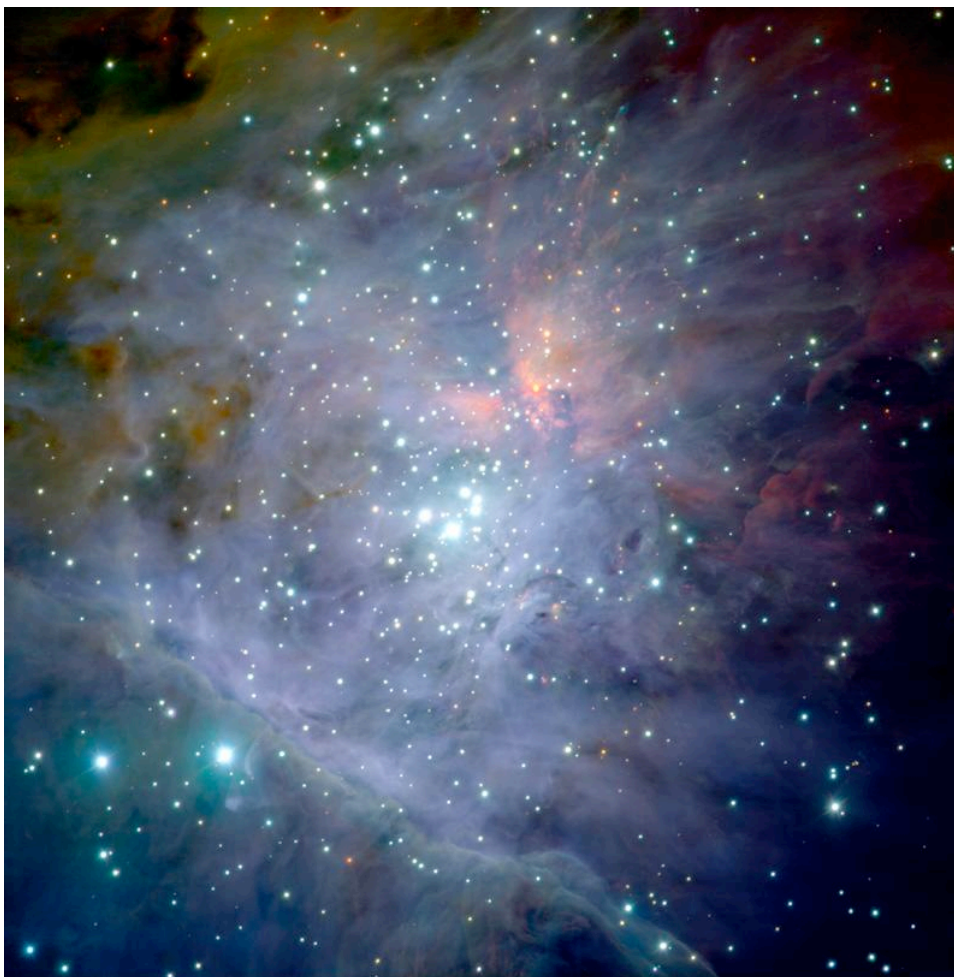
Sternbild Orion

Die Orionmolekülwolke ist die Geburtsstätte mehrerer junger Sternhaufen.
Der Trapezhaufen ist noch "eingebettet" und nur im IR Wellenbereich sichtbar. Der Haufen besteht aus ~2000 jungen Sternen.



Trapezhaufen

20.12.2012
Ralf Klessen



Trapezhaufen (Detail)

- Sterne entstehen in **Haufen**
- Sterne entstehen in **Molekülwolken**
- **Rückkopplungseffekte** sind wichtig

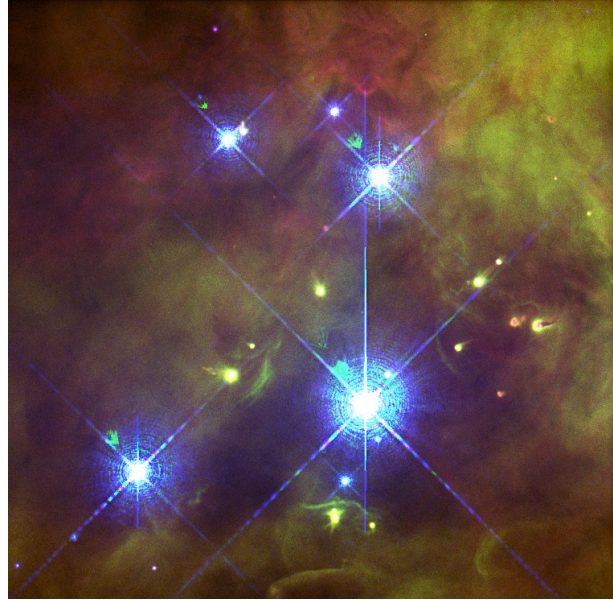
(Mehrfarbenaufnahme in J,H,K: McCaughrean, VLT, Paranal, Chile)

20.12.2012
Ralf Klessen

Trapezhaufen: Zentralgebiet



Der Großteil der ionisierenden Strahlung kommt vom Zentralstern $\theta 1C$ Orionis

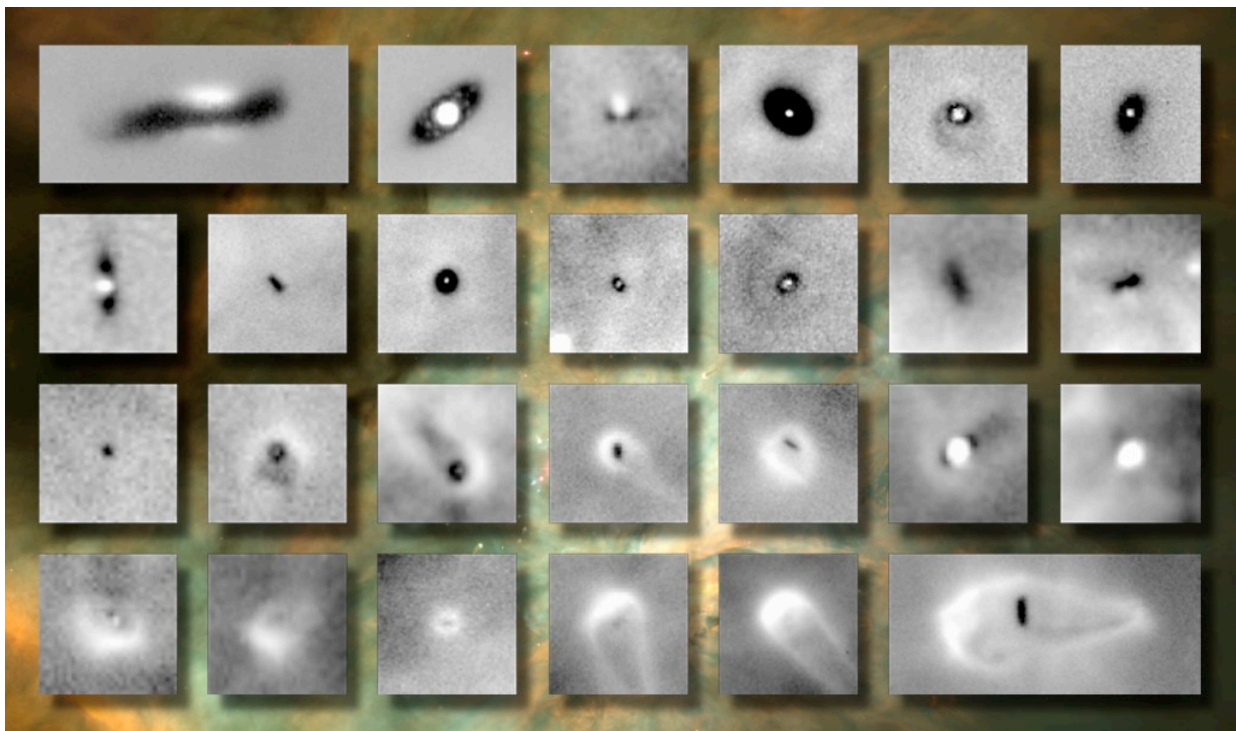


Proplyds: Verdampfende ``protoplanetare`` Scheiben um junge massearme Protosterne

(Abbildung Doug Johnstone et al.)

20.12.2012
Ralf Klessen

Weitere Details: Siluett-Scheiben in Orion

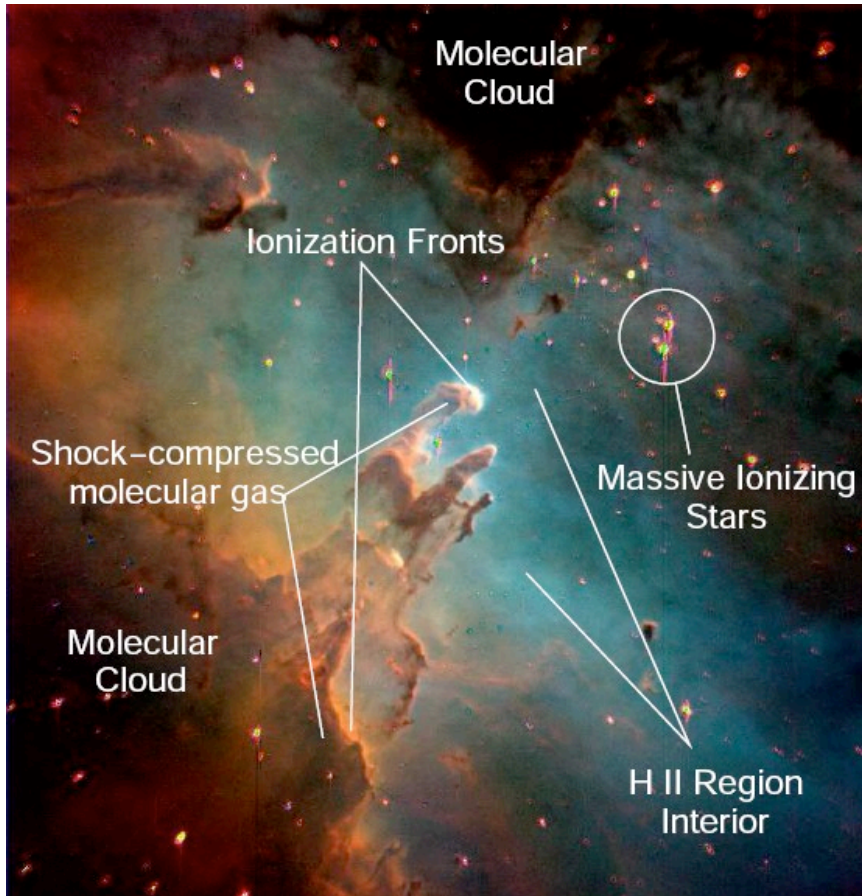


Protostellare Scheiben schatten die Photodissoziationsregion im Hintergrund ab. Jedes Bild ist 750 AU x 750 AU groß.

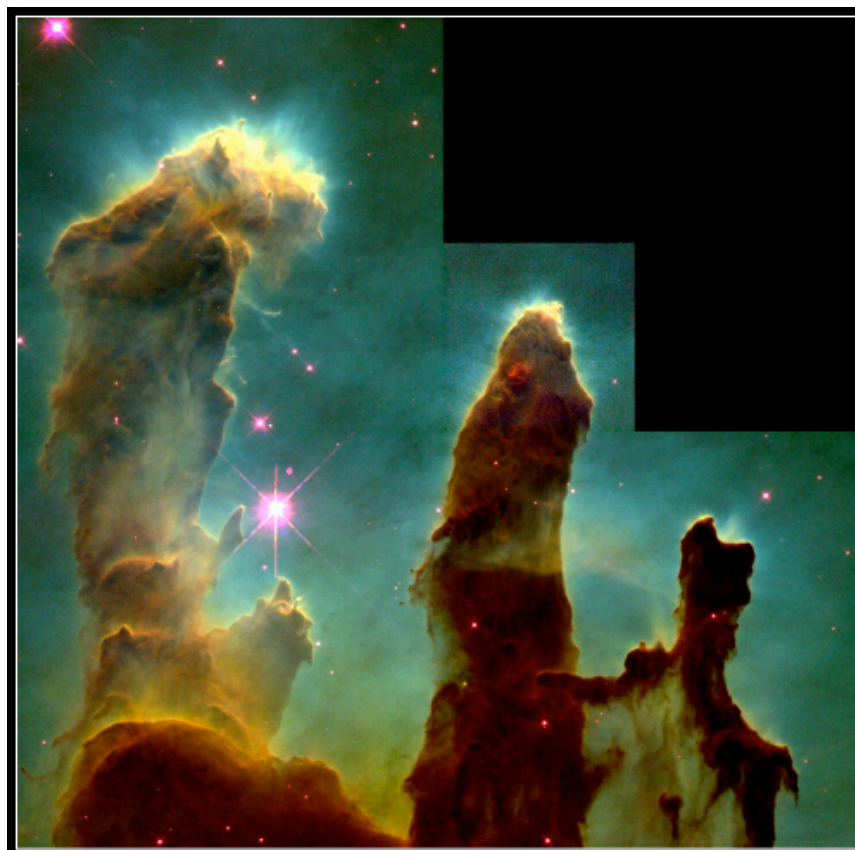
(Daten von Mark McCaughrean)

20.12.2012
Ralf Klessen

alles in einem Bild



20.12.2012
Ralf Klessen



HST Aufnahme

Pillars of God (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den "Spitzen" der Gas- und Staubsäulen....

20.12.2012
Ralf Klessen

Aufnahme im Infraroten.



(Andersen et al 2005)



Head of Column No.1 in Eagle Nabula (IR-View)
(VLT ANTU + ISAAC)

ESO PR Photo 37C/01 (20 December 2001)

© European Southern Observatory



mit Radius 0.1, Sp6.
mit Radius 0.1, Sp6.

IR Aufnahme mit dem ESO-VLT

Pillars of God (im Adlernebel): Entstehung kleiner Gruppen junger Sterne in den "Spitzen" der Gas- und Staubsäulen....