

# Von Weißen Zwergen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern

Was uns die Endstadien der Sterne  
über die Naturgesetze sagen

Franz Embacher

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/>  
[franz.embacher@univie.ac.at](mailto:franz.embacher@univie.ac.at)

Fakultät für Physik  
Universität Wien

Vortrag im Rahmen von University Meets Public  
[VHS Meidling](#), Wien, 15. 11. 2010

# Inhalt

---

## Naturgesetze:

- Die Physik des Großen:
  - Gravitation nach Newton
  - Gravitation nach Einstein (allgemeine Relativitätstheorie)
- Die Physik des Kleinen:
  - Elementarteilchen und Atomkerne
  - Kernfusion
  - Entartete Materie

## Sterne und ihre Endstadien:

- Sternentwicklung
- Weiße Zwerge
- Neutronensterne
- Schwarze Löcher



## Gravitation (Schwerkraft) nach Newton

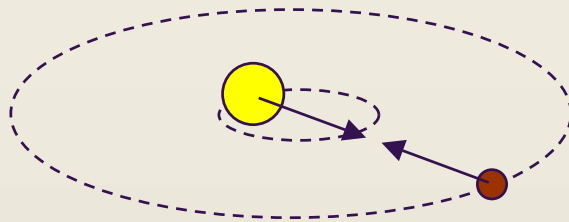
---

Das  $1/r^2$ -Gravitationsgesetz:



Gravitationskraft =  $\frac{G M m}{r^2}$

Gravitations-  
konstante



Die Gravitation ist auf **großen** Skalen die **dominierende** Kraft:

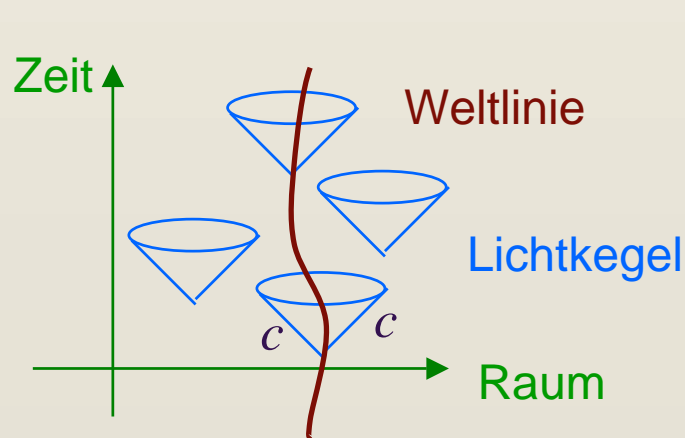
- Sie wirkt **immer anziehend!!!**
- Daher stellt sie eine ständige Tendenz zur **Kontraktion** („Zusammenklumpung“) der Materie dar!



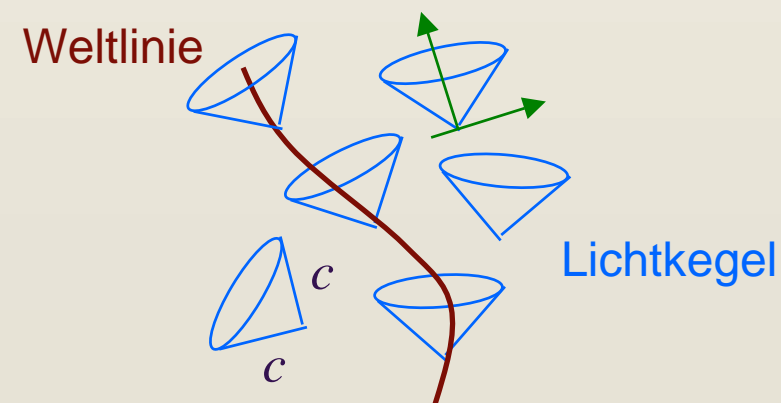
# Gravitation (Schwerkraft) nach Einstein

## Allgemeine Relativitätstheorie

- Raum und Zeit bilden ein 4-dimensionales Kontinuum (die **Raumzeit**).
- Gravitation ist eine Auswirkung der **Krümmung der Raumzeit**:
  - Materie krümmt die Raumzeit.
  - Materieteilchen „spüren“ die Krümmung der Raumzeit.



flache Raumzeit (SRT)



gekrümmte Raumzeit (ART)



# Elementarteilchen

---

Die wichtigsten Elementarteilchen:

Teilchen	Masse, Ladung	
Elektronen $e^-$	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, -e$	
Positronen $e^+$	$m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}, e$	
Quarks {	Protonen $p$	$m_p = 1.673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, e$
	Neutronen $n$	$m_n = 1.675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, 0$
Photonen (Lichtquanten) $\gamma$	(Ruhe-)Masse = 0, Energie abh. von der Frequenz (Farbe), 0	
Neutrinos $\nu$ (mehrere Sorten)	Masse: klein, 0	



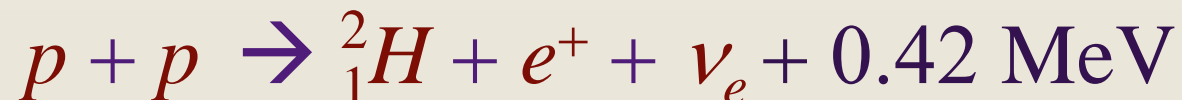
## Elementarteilchen

---

Beziehungen:

$$m_p \approx m_n \approx 2000 m_e$$

Reaktionen:



↑  
Deuteriumkern  
(1 Proton + 1 Neutron)

↑  
Energie  
(SRT!)

→ Atomkerne!



## Atomkerne

---

$p = {}^1_1\text{H}$  = Wasserstoffkern [1p]

${}^2_1\text{H}$  = Deuteriumkern (schwerer Wasserstoff) [1p,1n]

${}^3_2\text{He}$  = Helium-3 [2p,1n]

${}^4_2\text{He}$  = Helium-4 (normales Helium) [2p,2n]

$\text{Be}$  (Berillium),  $\text{C}$  (Kohlenstoff),  $\text{O}$  (Sauerstoff),

$\text{Mg}$  (Magnesium),  $\text{Na}$  (Natrium),  $\text{Ne}$  (Neon), ...

$\text{Fe}$  (Eisen), ...



# Kernfusion

---

Atomkerne entstehen in **Kernfusions-Prozessen**:

- ab  $T = 600\,000\text{ K}$  Deuteriumbrennen:  
 ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} \quad [1\text{p}, 1\text{n}] + [1\text{p}] \rightarrow [2\text{p}, 1\text{n}]$
- ab  $T = 3\text{ Mio K}$  Wasserstoffbrennen:  
 $\text{H} \rightarrow \text{He}$  (vereinfacht)
- ab  $T = 200\text{ Mio K}$  Heliumbrennen:  
 $\text{He} \rightarrow \text{Be} \rightarrow \text{C}$  (vereinfacht, „3-Alpha-Prozess“)
- ab  $T = 800\text{ Mio K}$  Kohlenstoffbrennen:  
 $\text{C} \rightarrow \text{O}, \text{Mg}, \text{Na}, \text{Ne}$
- **danach** Neonbrennen, Sauerstoffbrennen, Siliziumbrennen, Fusion von Elementen bis zum **Eisen**.





# Kernfusion

---

Wird Materie **komprimiert** und die entstehende **Wärme nicht abgeführt**, so setzt **Kernfusion** ein.  
Dabei

- werden immer **schwerere Atomkerne** („Elemente“, bis zum **Eisen**) erbrütet,
- und es wird **Energie frei**.

Woher kommt diese Energie?

- vom „Massendefekt“ ( $\Delta E = \Delta m c^2$ )  
→ ein von der **Speziellen Relativitätstheorie** vorhergesagter Effekt!

Schwerere Atomkerne als **Eisen** können nur **unter Energiezufuhr** erzeugt werden!

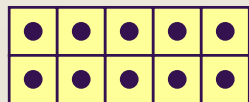


## Entartete Materie

---

Wird Materie ( $p, n, e^-$ ) komprimiert und die entstehende **Wärme** (theoretisch) **abgeführt**, so setzt ein **quantenphysikalischer Effekt** ein:

- Die Atomstruktur „zerbricht“.
- Die Elektronen „**entarten**“.  
Elektronen sind Fermionen. Pauli-Prinzip und Unschärferelation:



„Zellen“größe \* Impuls =  $h$   
→ **Entartungsdruck (Fermidruck)**

$p$  und  $n$  spielen dabei keine nennenswerte Rolle.

- Bei noch höherem Druck (und daher höherer Dichte) reichern sich durch den inversen Beta-Zerfall Neutronen an ( $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ ).
- Die Neutronen „**entarten**“.



## Sternentstehung

---

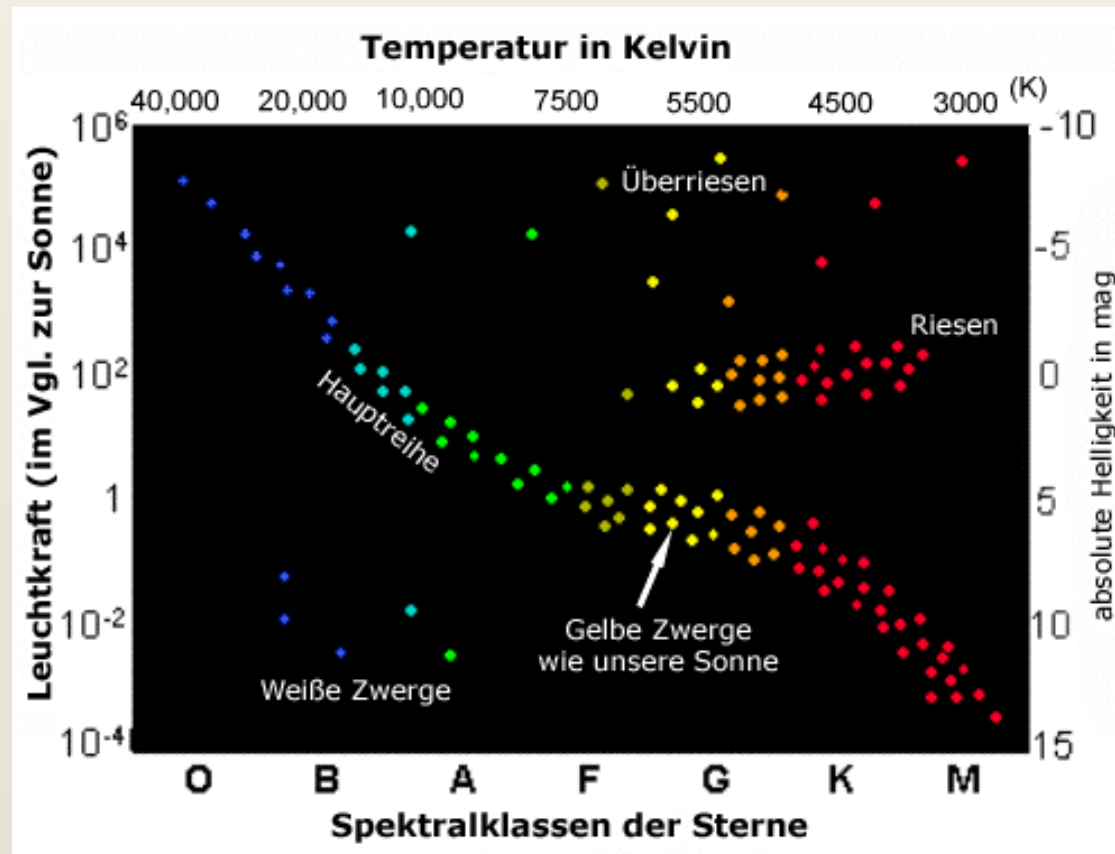
Sterne entstehen in **selbstgravitierenden Gaswolken**, deren Hauptbestandteil (neutrale) Wasserstoffatome sind.

- Dichte: ungefähr 100 Atome pro Kubikzentimeter, Temperatur: ungefähr 100 *K*.
  - Kräftespiel:
    - nach innen: die Schwerkraft
    - nach außen: der durch die Temperatur bewirkte Druck
- Überwiegt die Schwerkraft, so **kontrahiert** die Wolke.
- Erhitzung, Fraktionierung in kleinere Wolken, Einsetzen erster Kernfusions-Prozesse, Stabilisierung → „Protostern“ → Stern (ggf. mit Planeten) [→ [Flash-Movie](#)].



# Das Leben der Sterne auf der Hauptreihe

Die meiste Zeit seines Lebens verbringt ein Stern auf der „Hauptreihe“ im Hertzsprung-Russell-Diagramm:



Quelle: <http://www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/foto/hrd-sloan-digital-sky-surve.gif>



# Hauptreihensterne

---

Hauptreihensterne („normale Sterne“) sind vor allem mit **Wasserstoffbrennen** beschäftigt. Sie sind charakterisiert durch

- ihre Masse  $M$  (zwischen 0.08 und 120  $M_{\odot}$ )
- ihren Radius  $R$  (zwischen 0.1 und 100  $R_{\odot}$ )
- ihre Temperatur  $T$  (im Inneren, einige Mio K)
- ihre Temperatur  $T_{\text{eff}}$  (an der Oberfläche, einige 1000 K)
- und ihre chemische Zusammensetzung („Metallizität“).

Aufwändige **Sternmodelle** versuchen, die Beziehungen zwischen diesen Größen zu verstehen.

Im Laufe der Zeit werden Hauptreihensterne **heißer, größer** und wandeln durch Kernfusion etwa **1%** ihrer Masse in Energie um.

Diese Phase dauert zwischen **einigen zehntausend** bis zu **einigen hundert Milliarden Jahren**.



## Endstadien der Sterne

---

Das **Ende der Hauptreihenphase** ist erreicht, wenn der (Fusions-)Brennstoff im Kern eines Sterns zur Neige geht.

Was danach passiert, hängt vor allem von der **Masse** des Sterns ab!

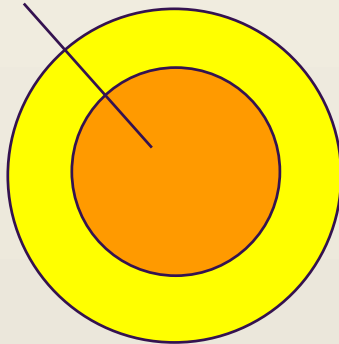


# Endstadien der Sterne

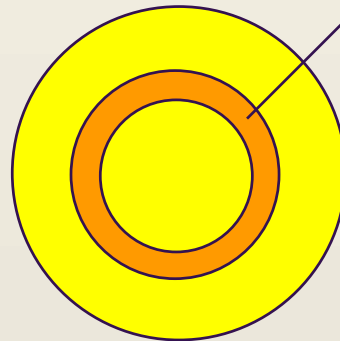
---

Sterne bis zu 0.3 Sonnenmassen:

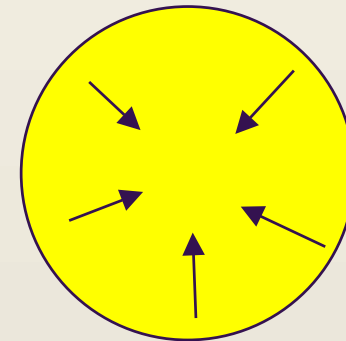
Wasserstoffbrennen



Wasserstoffbrennen



(„Schalenbrennen“)



Kernfusion erlischt  
→ Kontraktion  
unter der eigenen  
Schwerkraft!



Entartung der Elektronen  
→ **Weißer Zwerg**



Abkühlung  
→ **He-Aschehaufen**

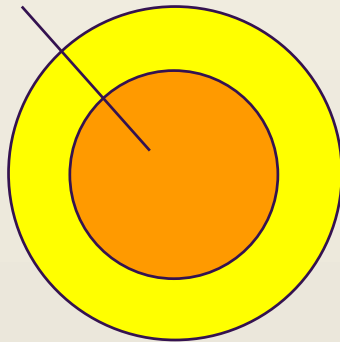


# Endstadien der Sterne

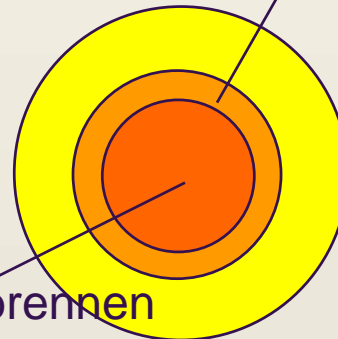
---

Sterne zwischen **0.3** und **2.3** Sonnenmassen:

Wasserstoffbrennen

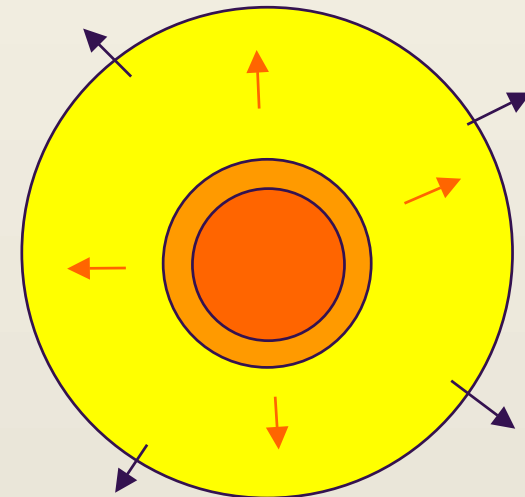


Wasserstoffbrennen



Heliumbrennen

- Temperaturanstieg
- Expansion des Sterns (Riesenstadium)



Expansion der Hülle (Riesenstadium)



Hülle wird abgestoßen (→ Planetarischer Nebel)  
+ **Weißer Zwerg** (vorwiegend aus *C* und *O*)





# Planetarischer Nebel Messier M 57

---



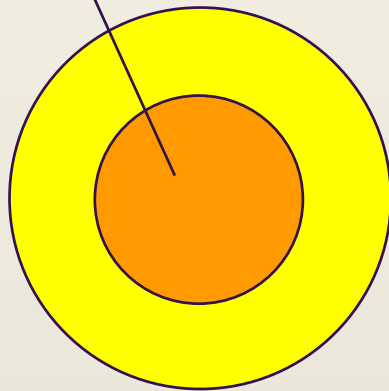
Quelle: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ring\\_Nebula.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ring_Nebula.jpg)  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ringnebel>



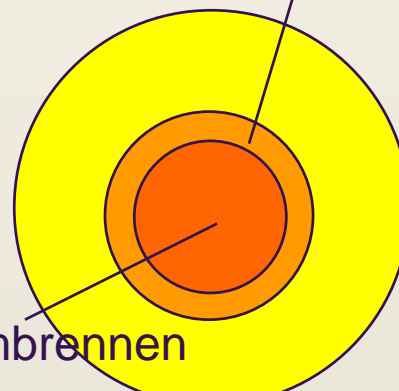
# Endstadien der Sterne

Sterne zwischen 2.3 und 8 Sonnenmassen:

Wasserstoffbrennen

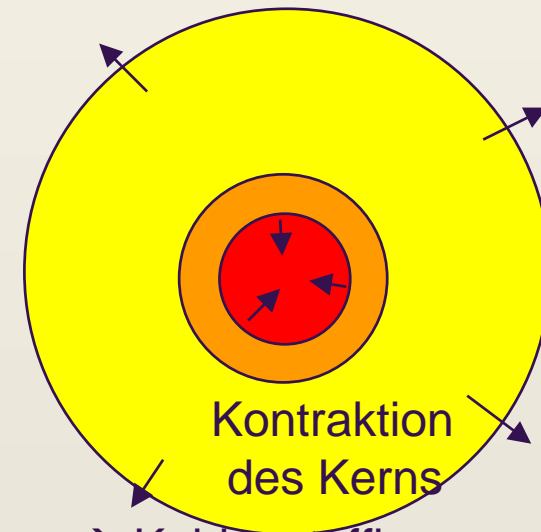


Wasserstoffbrennen



Heliumbrennen

- Temperaturanstieg
- Expansion des Sterns (Riesenstadium)



Kontraktion  
des Kerns

- Kohlenstoffbrennen, bis Vorräte erschöpft, dann  $e^-$ -Entartung



Planetarischer Nebel  
+ **Weißer Zwerg** (vorwiegend aus  $O$ ,  $Mg$  und  $Ne$ )



## Weißer Zwerge

---

Typische **Masse** Weißer Zwerge:

- Sonnenmasse

Typische **Größe** Weißer Zwerge:

- Erde!

**Maximale Masse** Weißer Zwerge:

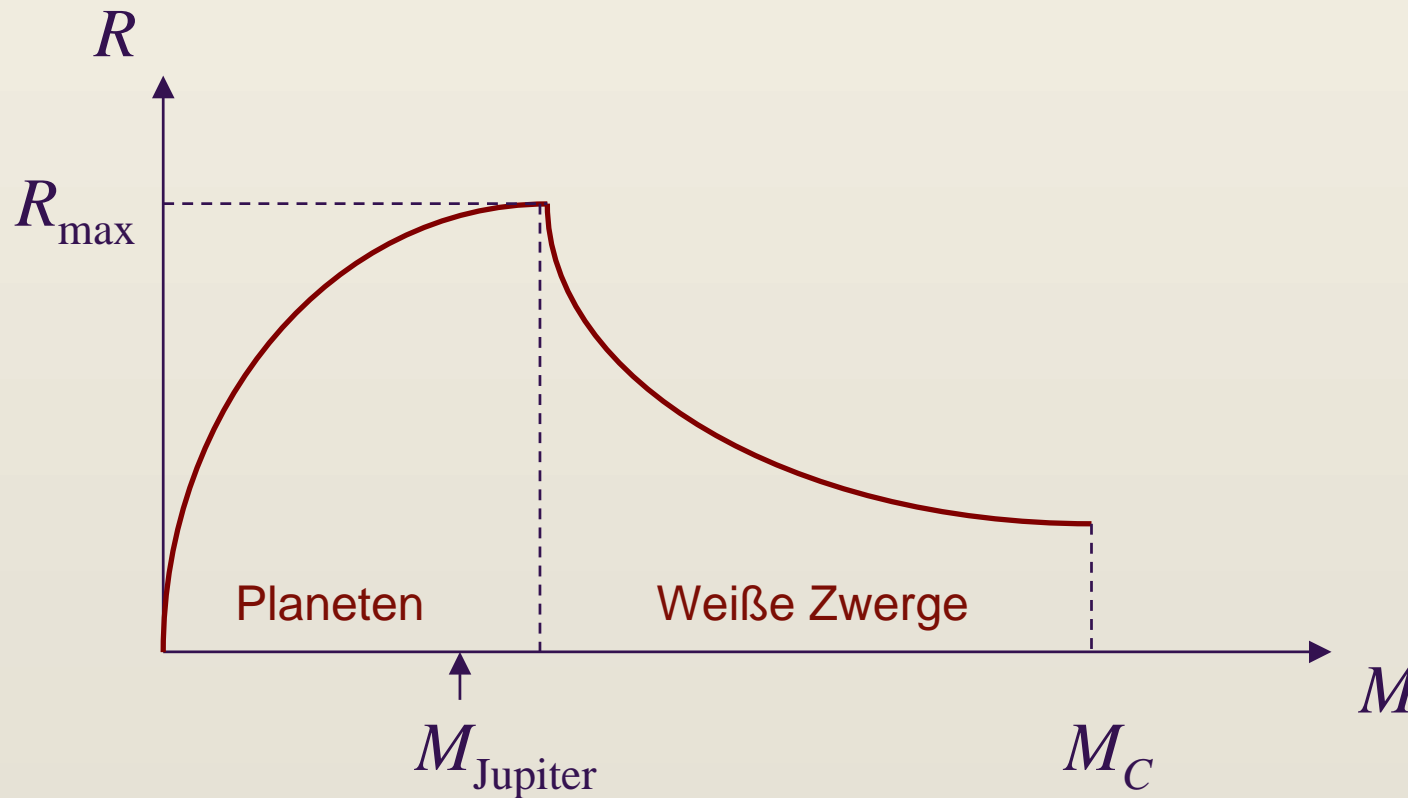
- Chandrasekhar-Masse (ca.  $1.5 M_{\odot}$ )

$$M_C = \frac{1}{m_p^2} \left( \frac{h c}{G} \right)^2 \quad !!!$$



## Weißer Zwerge versus Planeten

Wird Materie **angehäuft** und die entstehende **Wärme** (theoretisch) **abgeführt**, so passiert folgendes:



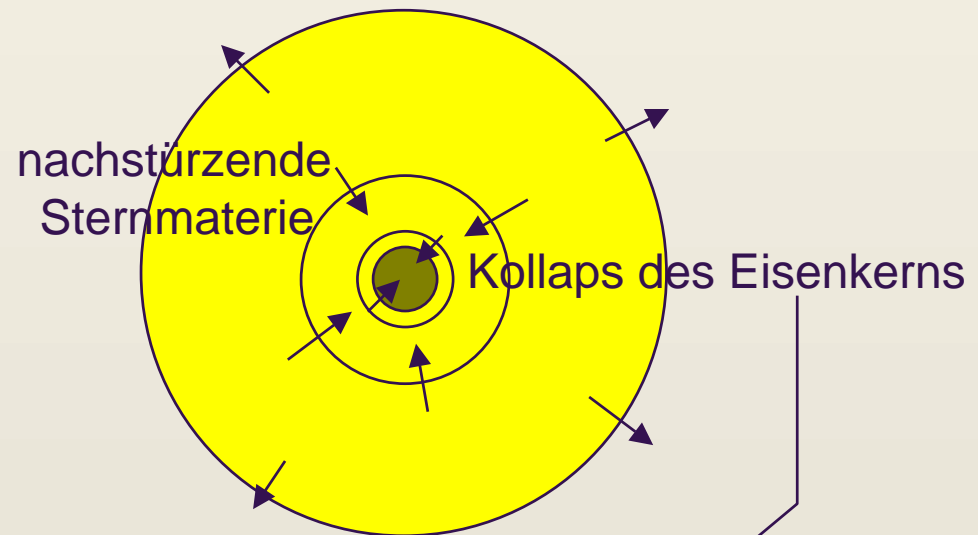
# Endstadien der Sterne

---

Sterne mit mehr 8 Sonnenmassen:



Kohlenstoffbrennen,  
Neonbrennen,  
Sauerstoffbrennen,  
Siliziumbrennen  
→ Elemente bis zum Eisen  
(so kommen die schweren  
Elemente bis zum Eisen  
ins Universum!!!)



Entartungsdruck der Elektronen  
wird überwunden → Verschwinden der  
Protonen und Elektronen (inverser Beta-  
Zerfall → Neutronen-Entartung)

schwerste Elemente

- Neutronenstern oder Schwarzes Loch, Supernova-Explosion



## Neutronensterne

---

Typische **Masse** von Neutronensternen:

- 1.5 fache Sonnenmasse

Typische **Größe** von Neutronensternen :

- einige Kilometer → Dichte von Atomkernen!

**Maximale Masse** von Neutronensternen:

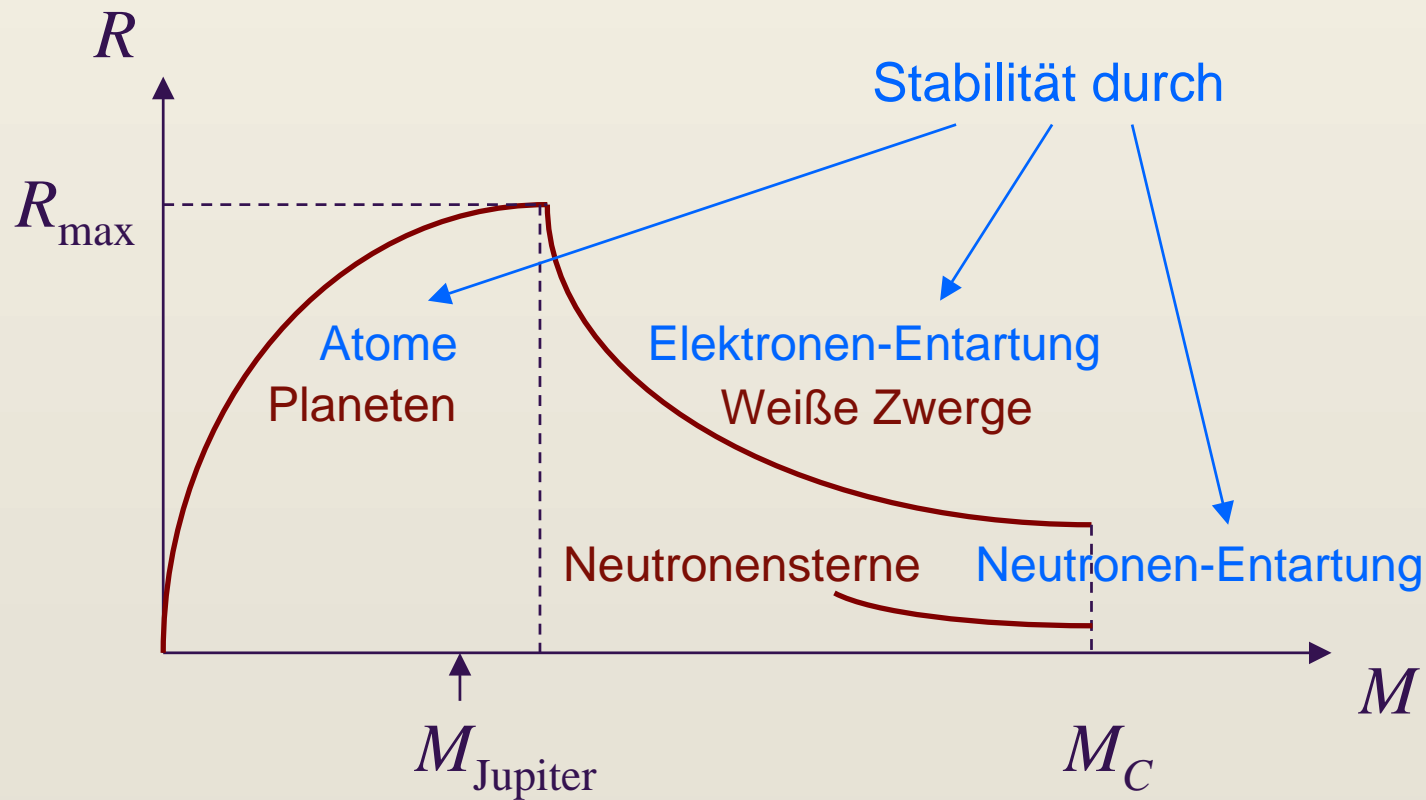
- Chandrasekhar-Masse (ca.  $1.5 M_{\odot}$ )

$$M_C = \frac{1}{m_p^2} \left( \frac{h c}{G} \right)^2 \quad !!!!!$$



# Planeten, Weiße Zwerge und Neutronensterne

Massen und Radien von Objekten ohne Kernfusion:



## Neutronensterne

---

Größenunterschied zwischen Weißen Zwergen und Neutronensterne:

- Weiße Zwerge sind etwa **2000** mal so groß wie Neutronensterne. Warum?

Die **theoretische Erklärung** (über den Entartungsdruck) liefert:

$$\frac{R_{WZ}}{R_{NS}} = \frac{m_p}{m_e} \quad !!!!!$$





## (Stellare) Schwarze Löcher

---

Wenn die nachstürzende Materie sogar den Entartungsdruck der Neutronen überwindet, kollabiert der Stern „vollends“. Das Endstadium („**Schwarzes Loch**“) kann nur mit Hilfe der Allgemeinen Relativitätstheorie verstanden werden.

[→ Raumzeit]

Wie machen sich Schwarze Löcher bemerkbar, wenn sie doch „schwarz“ sind?

- Hineinstürzende (geladene) Teilchen werden stark beschleunigt → charakteristische Röntgenstrahlung!  
→ Experimentelle Tests der ART!



## Bilanz

---

Was sagen uns die Endstadien der Sterne über die Naturgesetze?

- Die Endstadien der Sterne können durch die fundamentalen Naturgesetze der Quantentheorie, Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie sowie der Teilchen-, Atom und Kernphysik **erklärt werden**.
- Diese Naturgesetze gelten daher (im Rahmen der für unsere Vorhersagen/Erklärungen erreichbaren Genauigkeit) **von subatomaren bis zu stellaren Größenordnungen!**
- Erklärung der Existenz schwerer Elemente im Universum! → Beitrag zu einem konsistenten **Weltbild vom Urknall bis heute**.



Danke...

---

... für Ihr Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/UMP2010/>