

Die Macht der Gravitation – vom Leben und Sterben der Sterne

Franz Embacher

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

Fakultät für Physik
Universität Wien

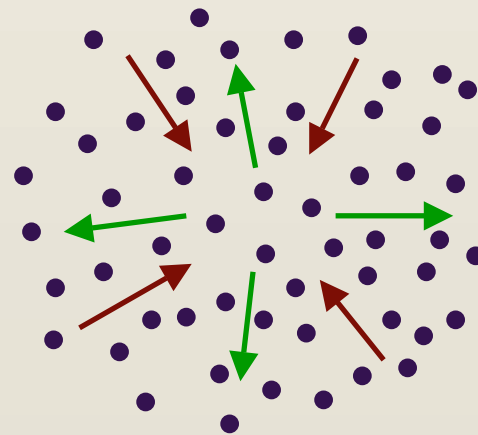
Vortrag am GRG17 Parhamerplatz
Wien, 30. 11. 2010

Sterne entstehen...

...aus einer Gaswolke:

- Hauptbestandteil: Wasserstoff
- Dichte: ungefähr 100 Atome pro Kubikzentimeter
- Temperatur: ungefähr 100 K ($= -170^{\circ}C$)

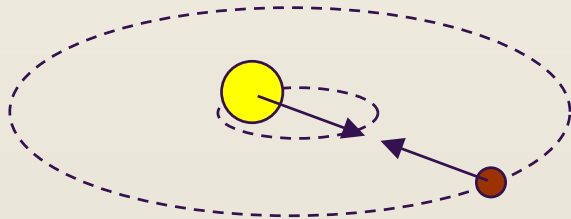
Kräftespiel:



Gravitation
thermischer Druck



Gravitation = Schwerkraft (nach Newton)



Gravitationskonstante

↓

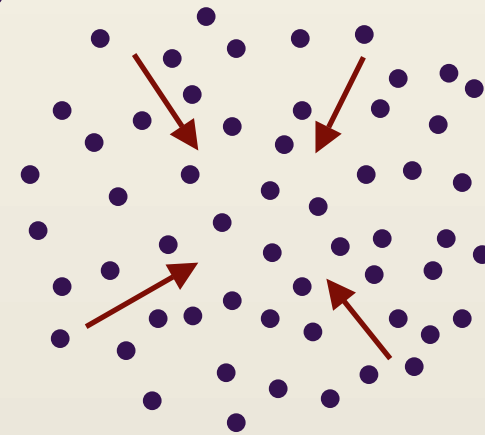
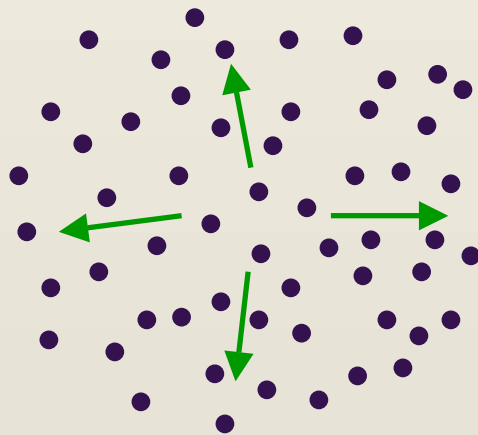
$$\text{Gravitationskraft} = \frac{G M m}{r^2}$$

Die Gravitation wirkt immer **anziehend**. Sie ist über große Distanzen die **dominierende Kraft** im Universum!



Gravitation

Die Gravitation versucht, alle Objekte – also auch die Himmelskörper – zusammenzuziehen (zu **kontrahieren**).

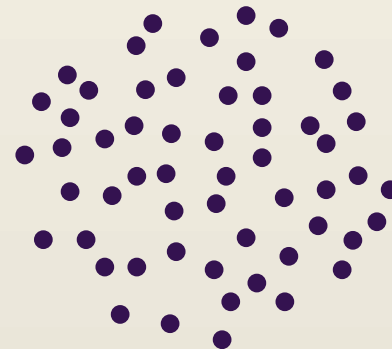
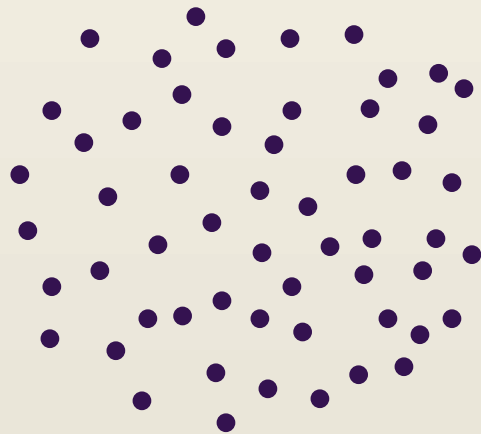


Wenn die Materie der Gravitation einen **Druck** entgegensetzen kann, entstehen **stabile** Objekte (→ **Gleichgewicht**).



Sterne entstehen...

Kommt die Gaswolke (z.B. durch Druck- oder Dichtewellen) aus dem Gleichgewicht, so **kontrahiert** sie:



Erwärmung ...
der thermische Druck steigt

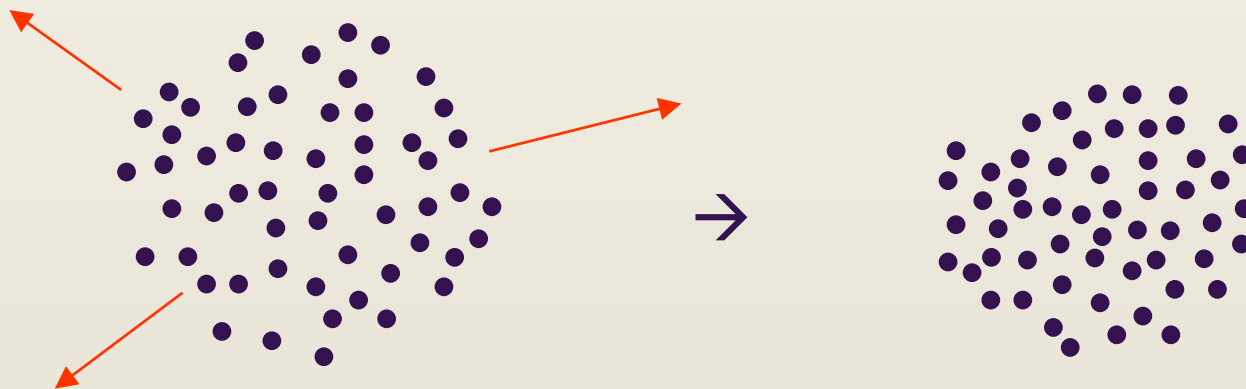


Stabilität?



Sterne entstehen...

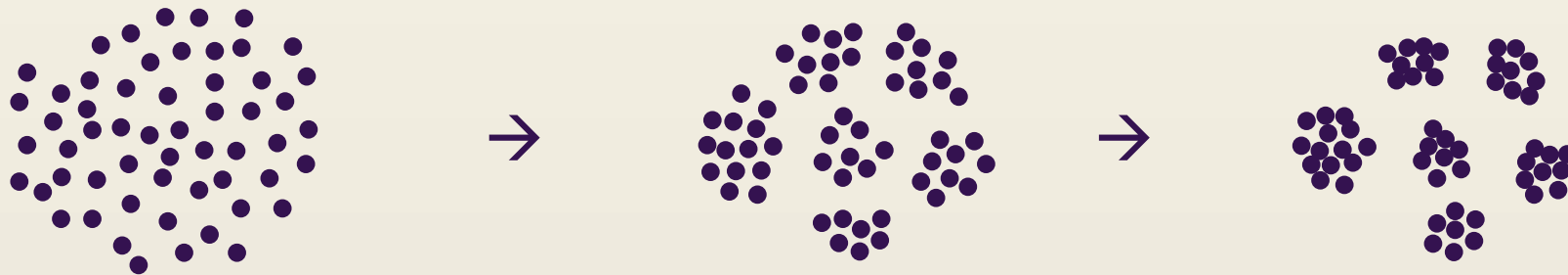
elektromagnetische
(UV-)Strahlung!



Abkühlung → die Kontraktion geht weiter,
die Wolke **kollabiert!**



Sterne entstehen...



Die Wolke zerfällt in kleinerer Teile,
die jeweils für sich kontrahieren
(Fraktionierung)

$$\frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

A dashed line points from the equation to the text below.

Die Gravitation wird immer **stärker**, je **kleiner** die Wolken werden. Die Temperatur steigt stark an, aber der thermische Druck reicht nicht aus, um die Wolken zu stabilisieren.

Was kann den Kollaps aufhalten?



Materie unter extremen Bedingungen

Wie verhält sich Materie bei hohen Temperaturen und hohen Drücken?

- Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einer Elektronenhülle

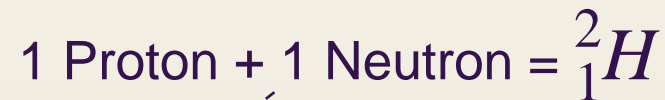


- Bei hohen Temperaturen und Drücken treffen Protonen aufeinander und reagieren miteinander
→ **Kernfusion!**

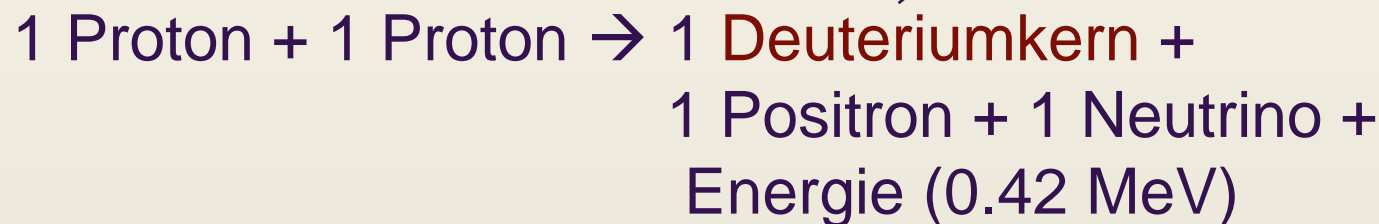


Kernfusion

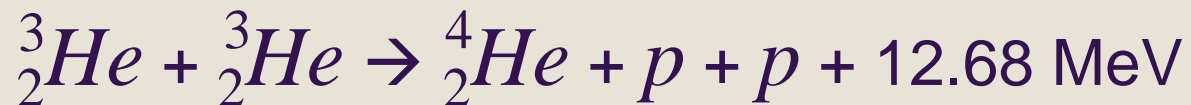
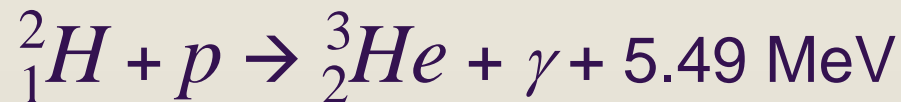
Kernreaktionen



- „Deuteriumbrennen“:



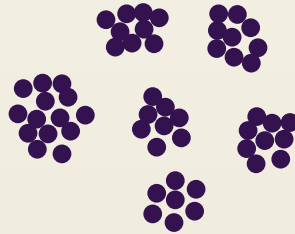
- „Wasserstoffbrennen“:



Wasserstoff \rightarrow Helium + Energie



Sterne entstehen...



Kontraktion der Teilwolken, bis (nach einigen Millionen Jahren) **Kernfusion** einsetzt („zündet“):

- ab $T = 600\,000\text{ K}$... Deuteriumbrennen
- ab $T = 3\text{ Millionen K}$... Wasserstoffbrennen

Die bei der Kernfusion frei werdende **Energie** erzeugt den Druck, der nötig ist, um der Gravitation entgegen zu wirken → aus jeder Teilwolke ist ein **stabiler Stern** entstanden.

[→ [Flash-Movie](#)]



Sterne

Steckbrief:

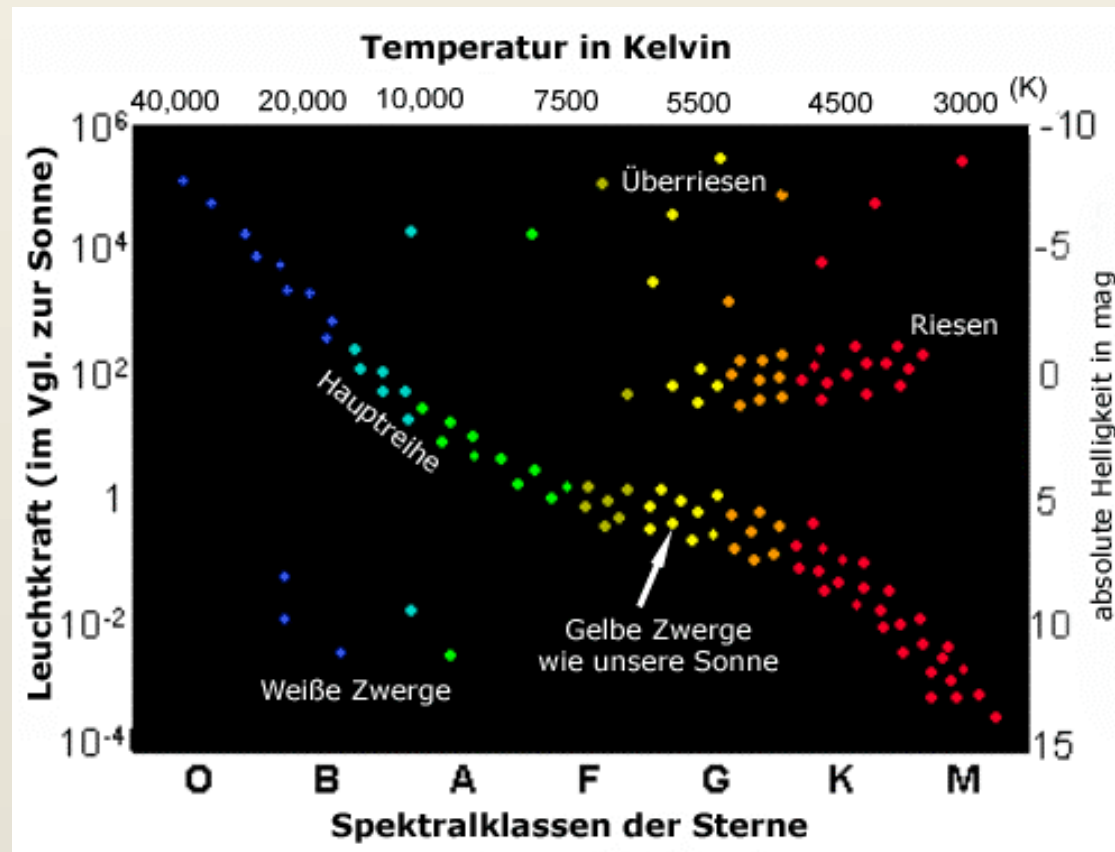
- **Masse:** zwischen 0.08 und 120 Sonnenmassen
- **Radius:** zwischen 0.1 und 100 Sonnenradien
- **Temperatur an der Oberfläche** („effektive Temperatur“): einige 1000 K
- **Temperatur im Kern:** einige Millionen K
- **Hauptsächliche Tätigkeit:** Wasserstoffbrennen (d.h. sie wandeln Wasserstoff in Helium um und gewinnen dadurch Energie)
- **Lebensdauer:** einige zehntausend bis einige hundert Milliarden Jahre

Aber – was heißt eigentlich „Lebensdauer“?
Kann ein Stern „sterben“?



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>



Das Leben der Sterne auf der „Hauptreihe“

Die **Gravitation** und der aus der Kernfusion resultierende **Druck** („Wasserstoffbombe“) – im Kern – halten einander die Waage. Hauptreihensterne befinden sich im **thermischen und hydrostatischen Gleichgewicht**. Im Laufe der Zeit

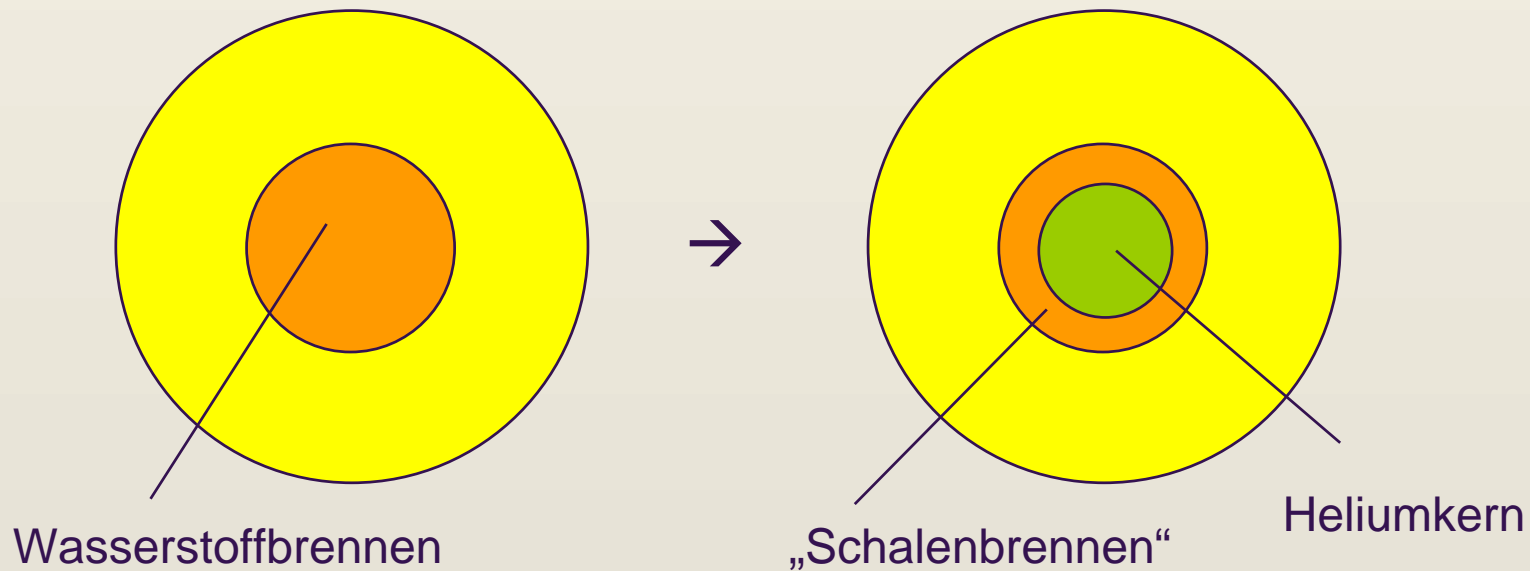
- werden sie heißer
- und größer.

Im Kern reichert sich Helium an, und der Brennstoff (Wasserstoff) wird immer weniger. Bis er schließlich **aufgebraucht** ist! Was passiert dann?

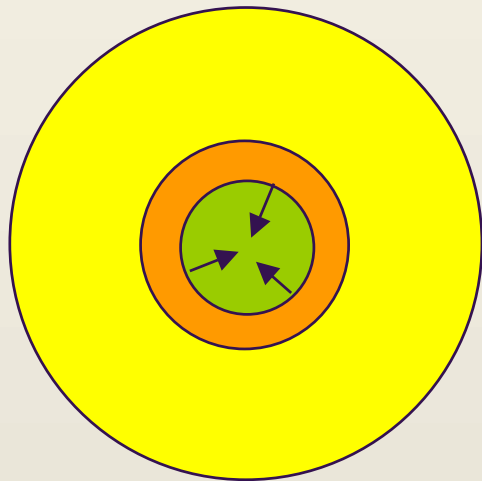


Wenn der Wasserstoff aufgebraucht ist...

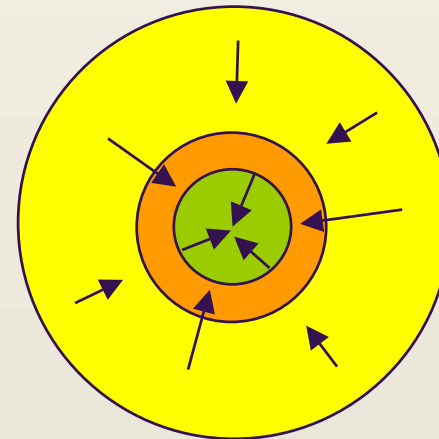
...erlischt das Wasserstoffbrennen! Die Gravitation überwindet den Druck – der Stern wird **instabil**:



Wenn der Wasserstoff aufgebraucht ist...



Der Kern kollabiert!



Die darüber liegende
Sternmaterie stürzt nach!
Der Druck im Kern wird
immer größer!



Was passiert danach?

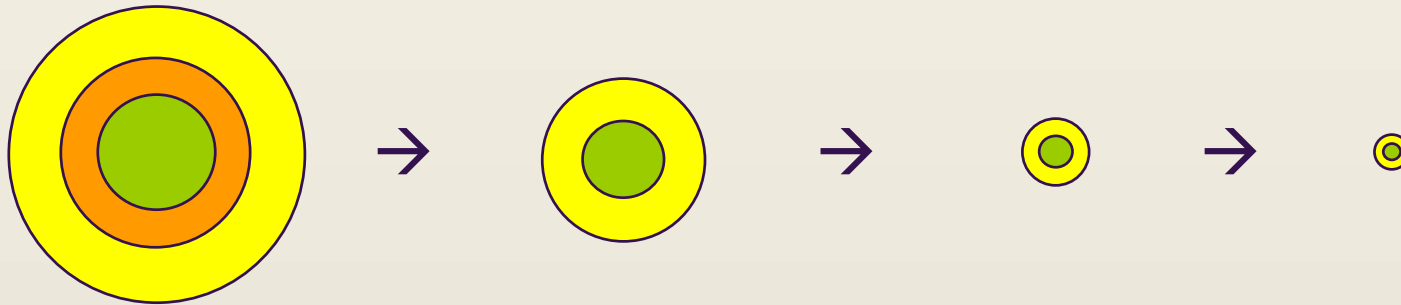
Kann die Materie den Kollaps des Kerns aufhalten?
Und **wenn** – dann wie?
Und **wenn nicht**?

Was nach dem Ende des Wasserstoffbrennens passiert, hängt vor allem von der **Masse** des Sterns ab!



Das Ende der Sterne

Sterne bis zu 0.3 Sonnenmassen:



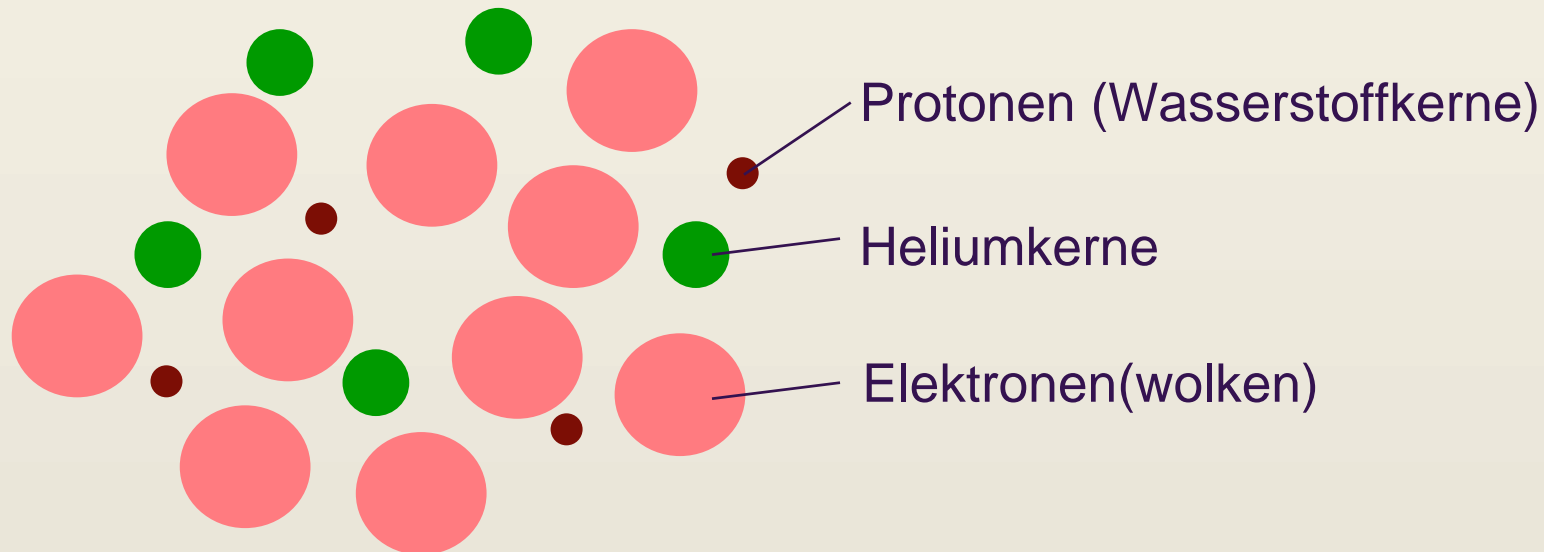
Das Schalenbrennen
erlischt

Kollaps, bis eine neue
Zustandsform der
Materie auftritt!



Ein bisschen Quantentheorie

Sternmaterie beim Kollaps:



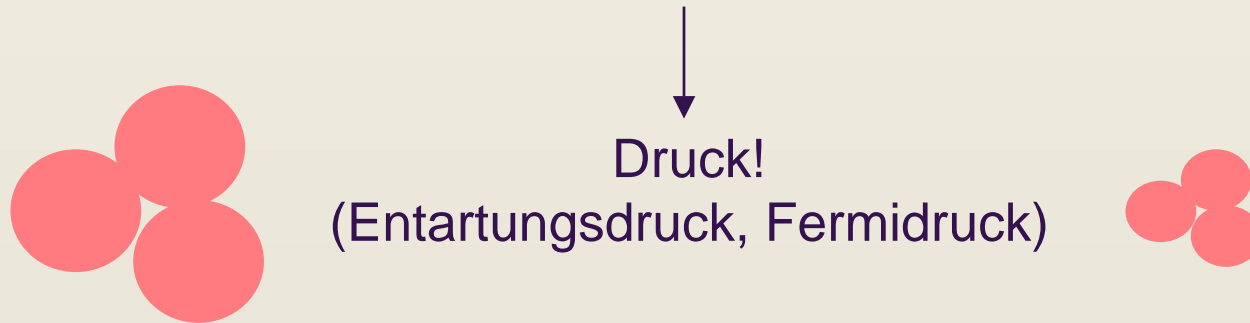
Elektronen sind „**Fermionen**“: Sie wollen sich den Platz nicht teilen (**Pauli-Prinzip**)!



Ein bisschen Quantentheorie

Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
(„Unschärferelation“):

Größe der Wolke * Impuls = Plancksche Konstante h



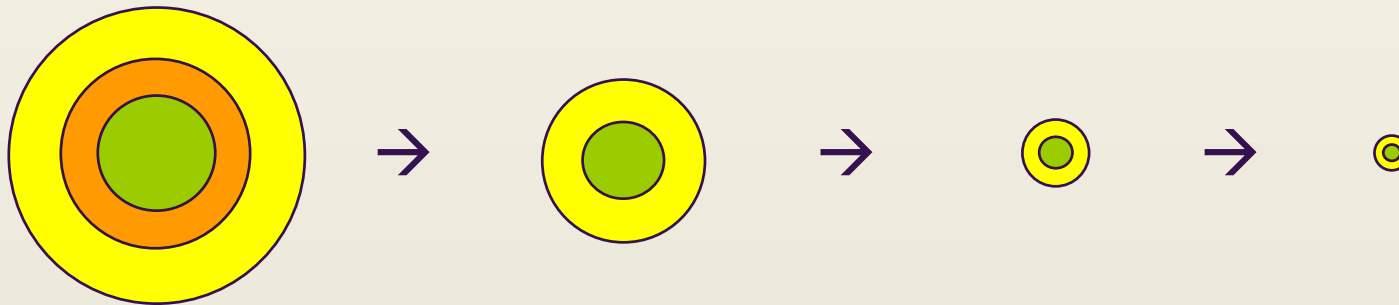
Die Elektronen „entarten“ → „entartete Materie“.

Je näher die Elektronen zueinander gedrückt werden, umso größer ist der Entartungsdruck.



Das Ende der Sterne

Sterne bis zu 0.3 Sonnenmassen:



Der **Entartungsdruck der Elektronen** kann den Gravitationskollaps aufhalten!

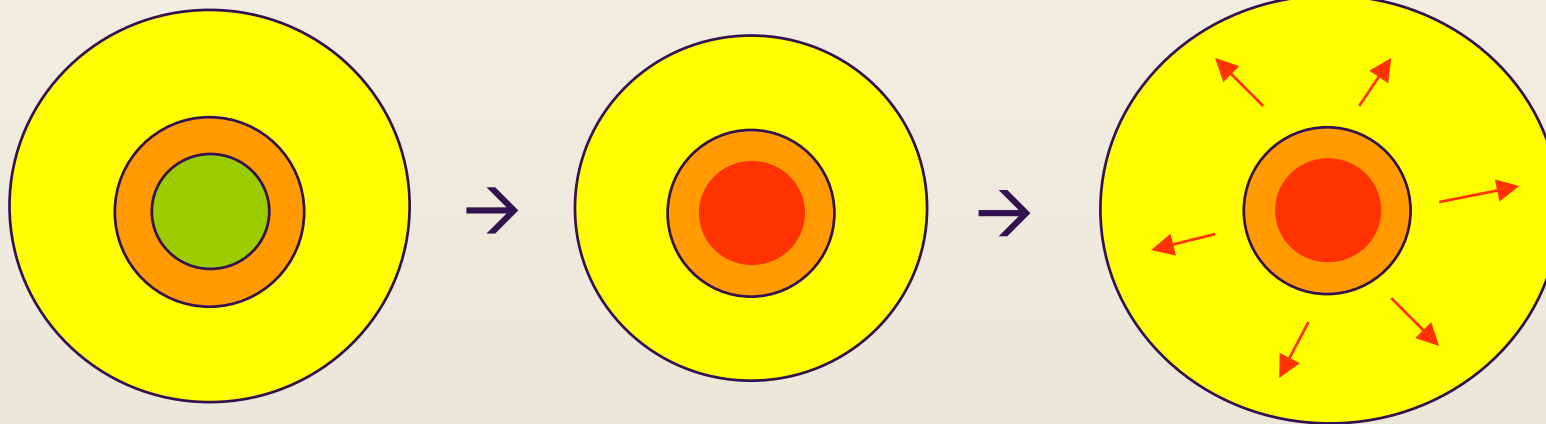
→ Es entsteht ein (vorwiegend aus Helium bestehender) **Weißer Zwerg**.

Ein **Weißer Zwerg** ist ein Stern, der durch den **Entartungsdruck der Elektronen** im Gleichgewicht gehalten wird.



Das Ende der Sterne

Sterne zwischen 0.3 und 2.3 Sonnenmassen:



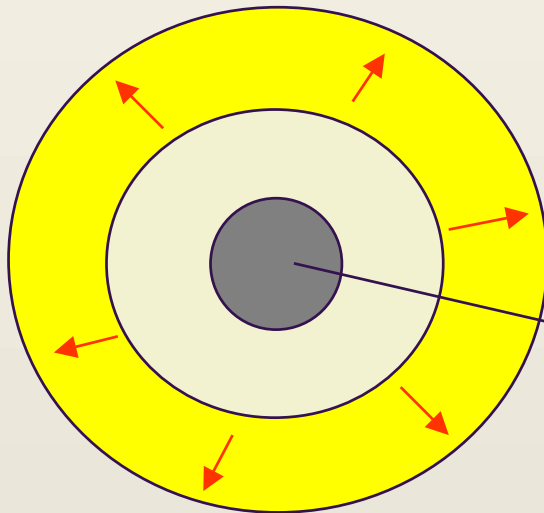
Druck- und
Temperaturanstieg!
Ab 200 Millionen K zündet
das „Heliumbrennen“:
 $He \rightarrow Be \rightarrow C$

Hülle dehnt sich aus
→ Roter Riese!
Wird bis zu 100 mal so
groß wie die heutige
Sonne!



Das Ende der Sterne

Sterne zwischen 0.3 und 2.3 Sonnenmassen:



Hülle wird abgestoßen
→ **Planetarischer Nebel!**

Helium aufgebraucht (nach
einigen Millionen Jahren)
→ Kollaps des Kerns bis zur
Entartung der Elektronen
→ **Weißer Zwerg** (vorwiegend
aus Kohlenstoff)



Planetarischer Nebel Messier M 57

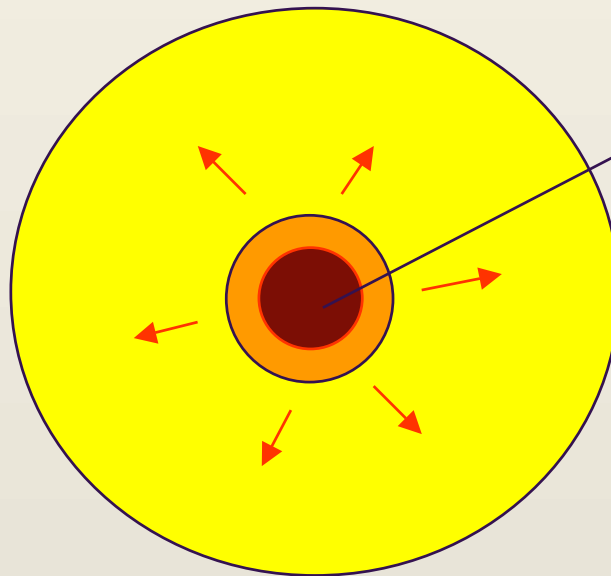


Quelle: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Ring_Nebula.jpg
<http://de.wikipedia.org/wiki/Ringnebel>



Das Ende der Sterne

Sterne zwischen 2.3 und 8 Sonnenmassen:



- Heliumbrennen
- wenn Helium aufgebraucht:
ab 800 Millionen K
„Kohlenstoffbrennen“
($C \rightarrow O, Mg, Na, Ne$)
- wenn C aufgebraucht:
Kollaps des Kerns bis zur
Entartung der Elektronen
- **Weißer Zwerg** (vorwiegend
aus O, Mg und Ne)

Hülle wird abgestoßen
→ Planetarischer Nebel!



Weißer Zwerge...

...halten der Gravitation durch den Entartungsdruck der Elektronen stand.

Steckbrief:

- **Masse:** ungefähr Sonnenmasse
- **Größe:** ungefähr Erdgröße!
- **Maximale Masse:** Chandrasekhar-Masse

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

- **Häufigkeit:** bis zu 10% aller Sterne könnten Weißer Zwerge sein!



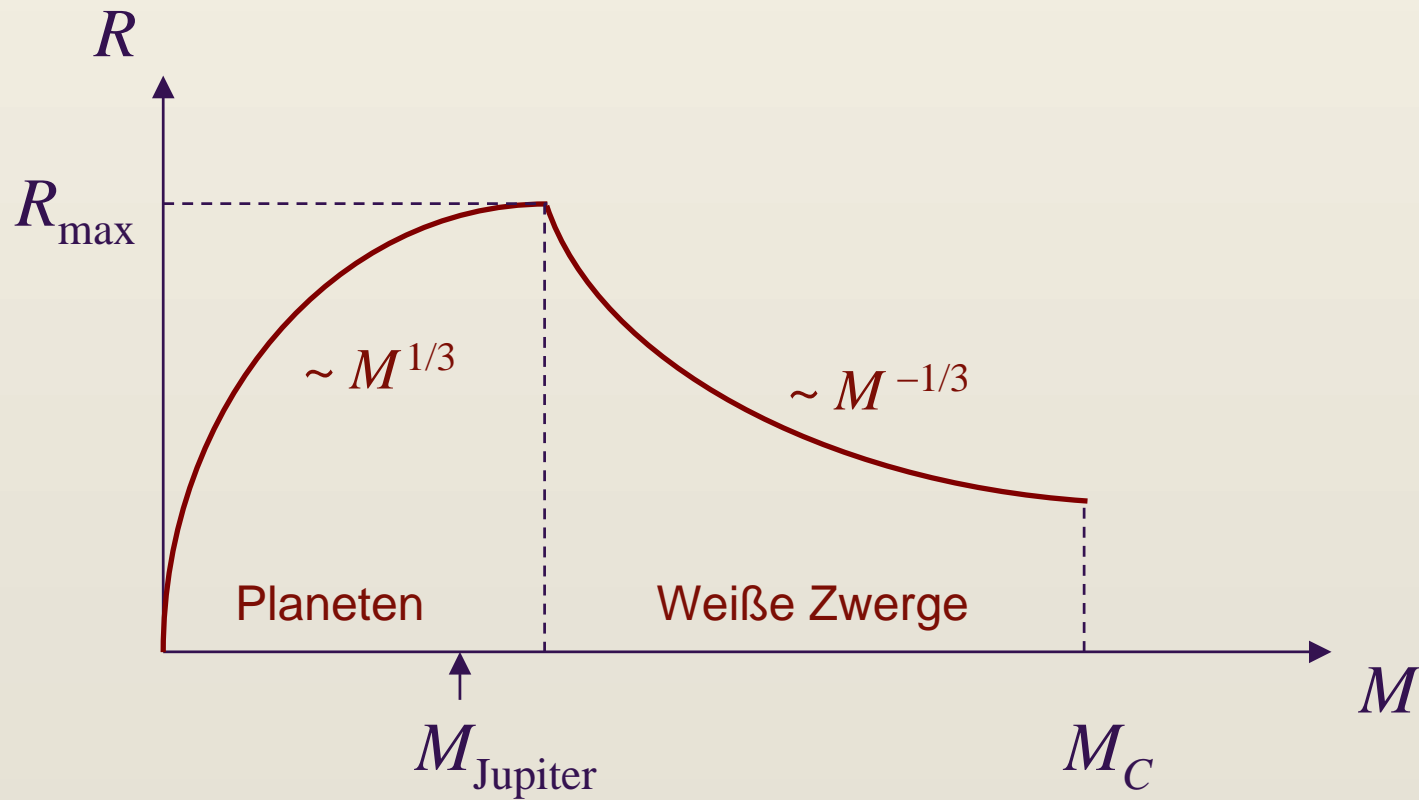
Weißer Zwerge...

- Dichte: einige Milliarden kg/m^3
(= einige Tonnen/ cm^3)!
- Schwerebeschleunigung: Um 1 Meter zu durchfallen, braucht ein Körper 1 Millisekunde und hat danach eine Geschwindigkeit von 5000 km/h!



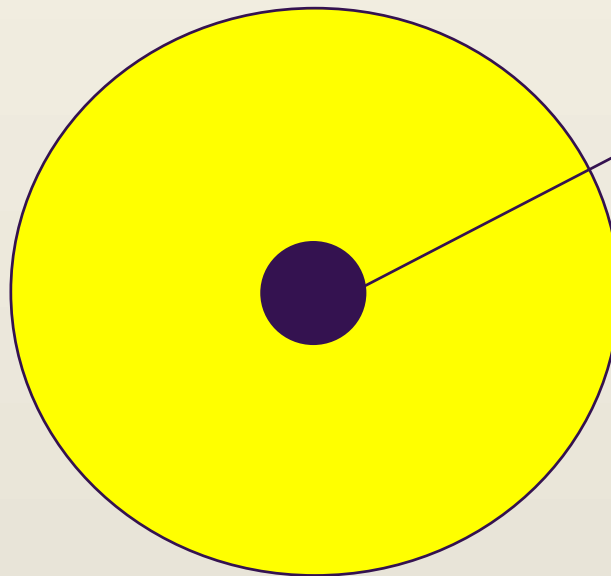
Eine gravitative Überraschung...

Verhalten von Materie bei Abwesenheit von Kernfusion:



Das Ende der Sterne

Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen:



- Heliumbrennen
- Kohlenstoffbrennen
- „Neonbrennen“
- „Sauerstoffbrennen“
- „Siliziumbrennen“
- Fusion schwerer Elemente bis zum Eisen

Wenn alle Kernfusionsprozesse erlöschen → Kollaps des Eisenkerns
→ Die Gravitation überwindet den Entartungsdruck der Elektronen!



Das Ende der Sterne

Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen:

„Inverser Beta-Zerfall“:



Anreicherung von Neutronen!

- Neutronenmaterie, Dichte von Atomkernen
(1 Milliarde Milliarden kg/m^3)!
- Entartung der Neutronen



Das Ende der Sterne

Sterne mit mehr als 8 Sonnenmassen:

- Entweder:
Der Entartungsdruck der Neutronen hält der Gravitation stand → **Supernova-Explosion** und Entstehung eines **Neutronensterns**.
In der Supernova werden **schwerste Elemente** gebildet. Ein Teil davon wird abgestoßen → Ausgangsmaterial für zukünftige Sterne (und Planeten)!
- Oder:
Der Entartungsdruck der Neutronen hält der Gravitation **nicht** stand → Kollaps zu einem **Schwarzen Loch** (→ ART).



Neutronensterne...

...halten der Gravitation durch den Entartungsdruck der Neutronen stand.

Steckbrief:

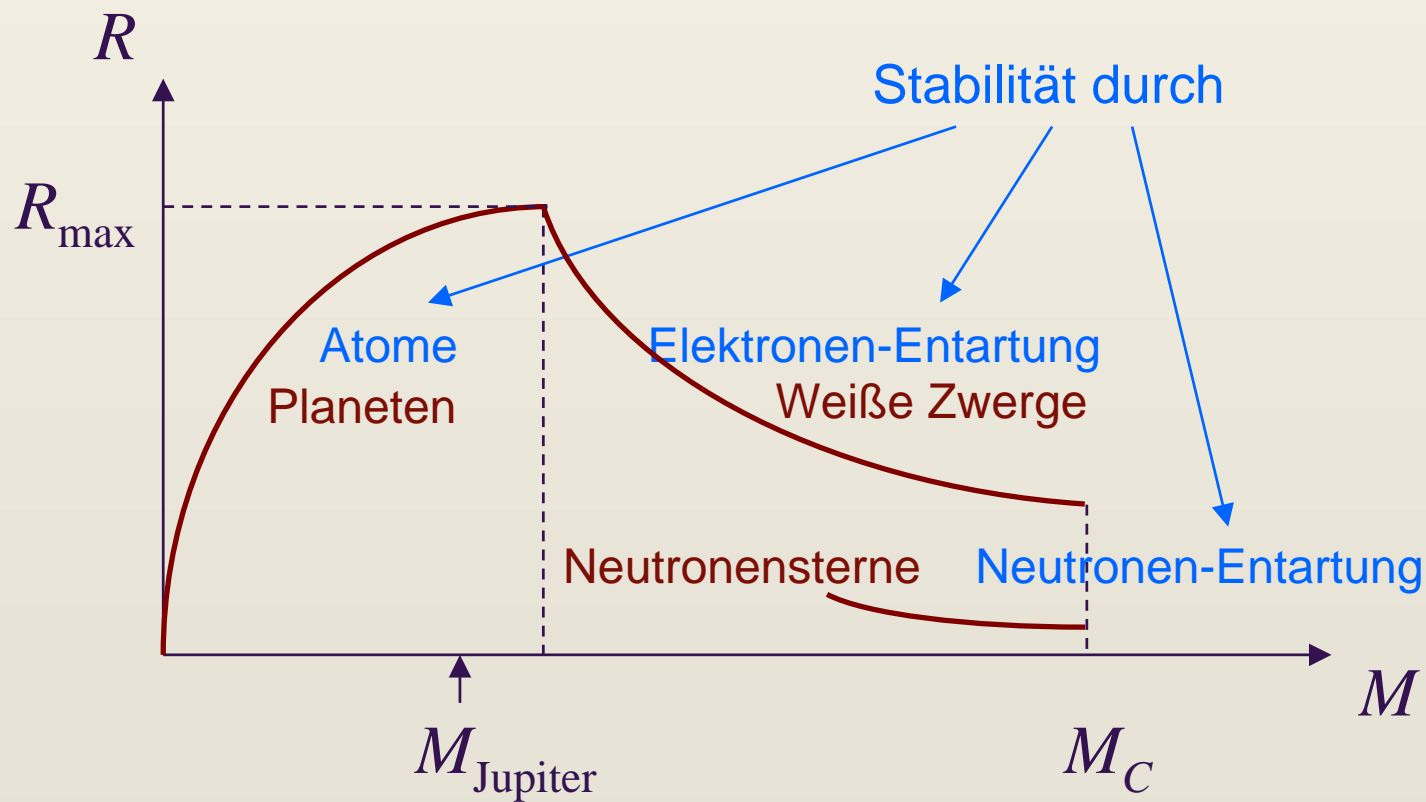
- **Masse:** ungefähr 1.5 * Sonnenmasse
- **Größe:** einige Kilometer!
- **Maximale Masse:** Chandrasekhar-Masse

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



Noch eine Überraschung

Objekte im Universum ohne Kernfusion:



Neutronensterne und Weiße Zwerge

Größenunterschied zwischen Weißen Zwergen und Neutronensterne:

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

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

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



Zusammenfassung

- Die Gravitation bewirkt eine **ständige Tendenz zum Kollaps**.
- Die Materie wehrt sich
 - durch die **Stabilität von Atomen** (Planeten, kleine Objekte)
 - durch **thermischen Druck** (Gaswolken)
 - durch **Kernfusion** (→ normale Sterne)
 - durch den **Entartungsdruck der Elektronen** (→ Weiße Zwerge)
 - durch den **Entartungsdruck der Neutronen** (→ Neutronensterne)
- Die Gravitation schafft extreme Bedingungen, in denen **schwere Elemente** entstehen.
- Ohne sie gäbe es keine Sterne (auch keine Galaxien), keine Planeten, praktisch keine Elemente außer Wasserstoff und Helium, kein Leben, keine Menschen...



Danke...

... für Ihr Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

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