

# Vom Sterben der Sterne

Weiße Zwerge, Neutronensterne  
und Schwarze Löcher

Franz Embacher

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

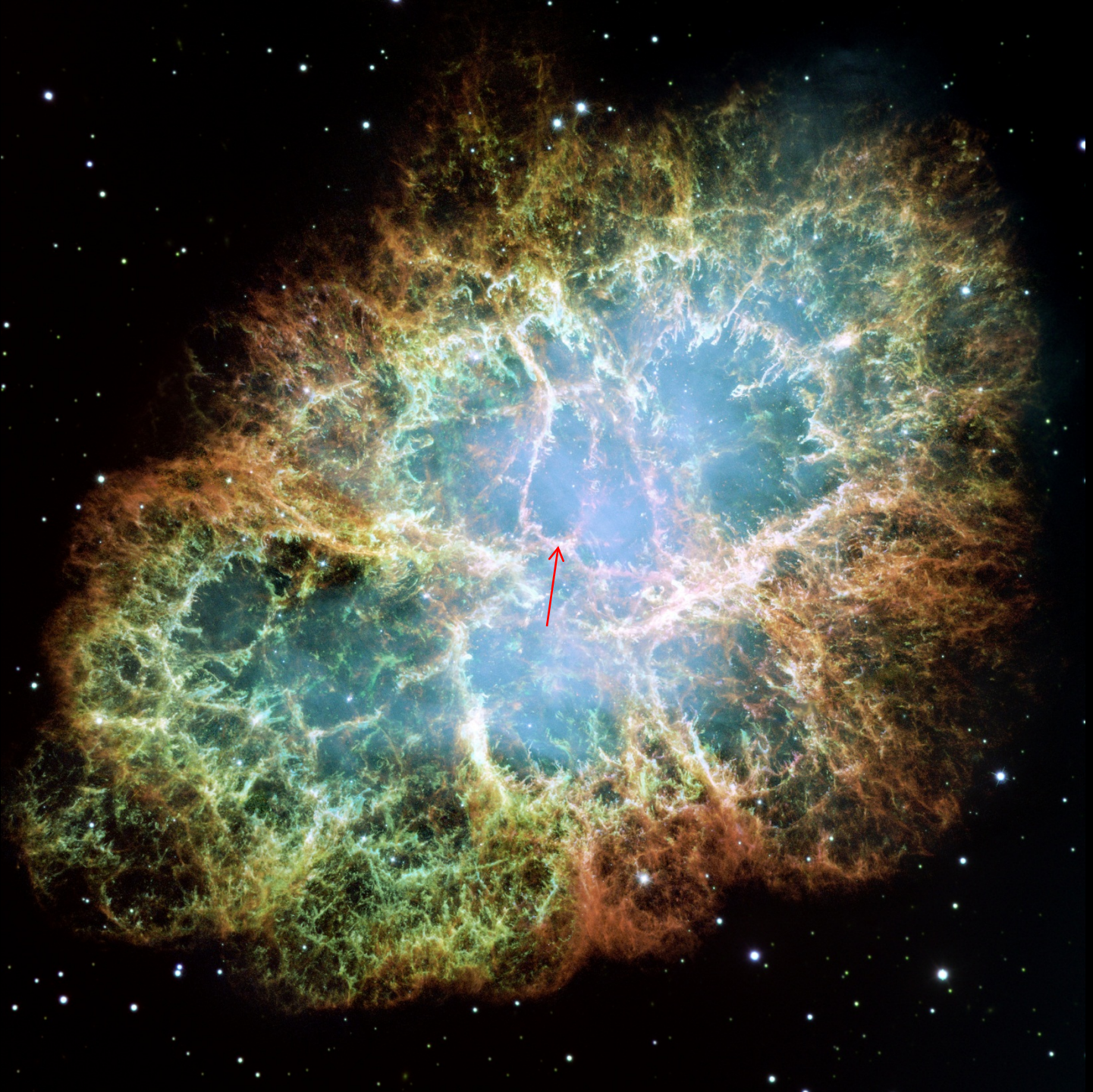
Fakultät für Physik  
Universität Wien

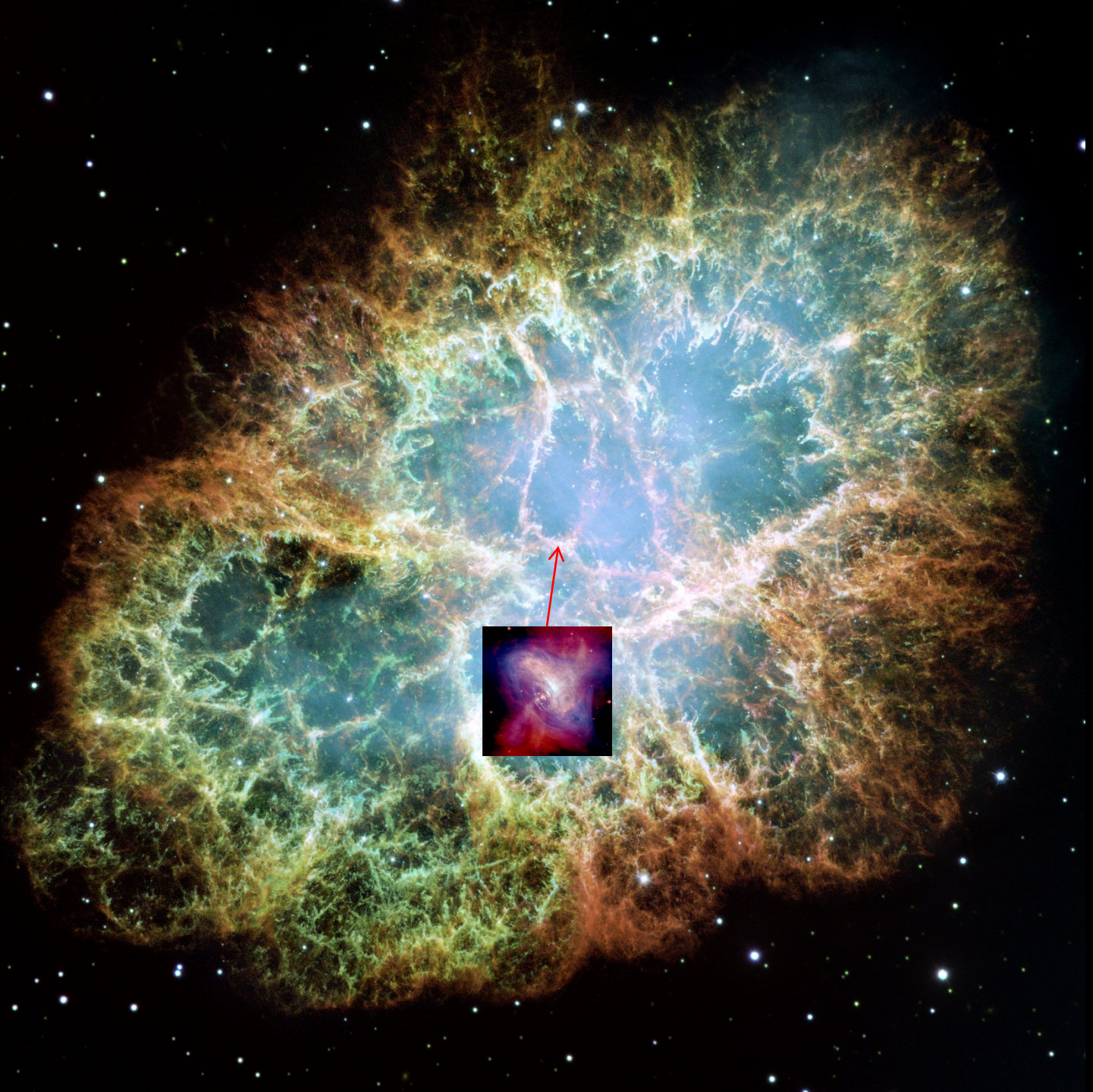
Vortrag an der VHS Wiener Urania  
Wien, 1. 12. 2012













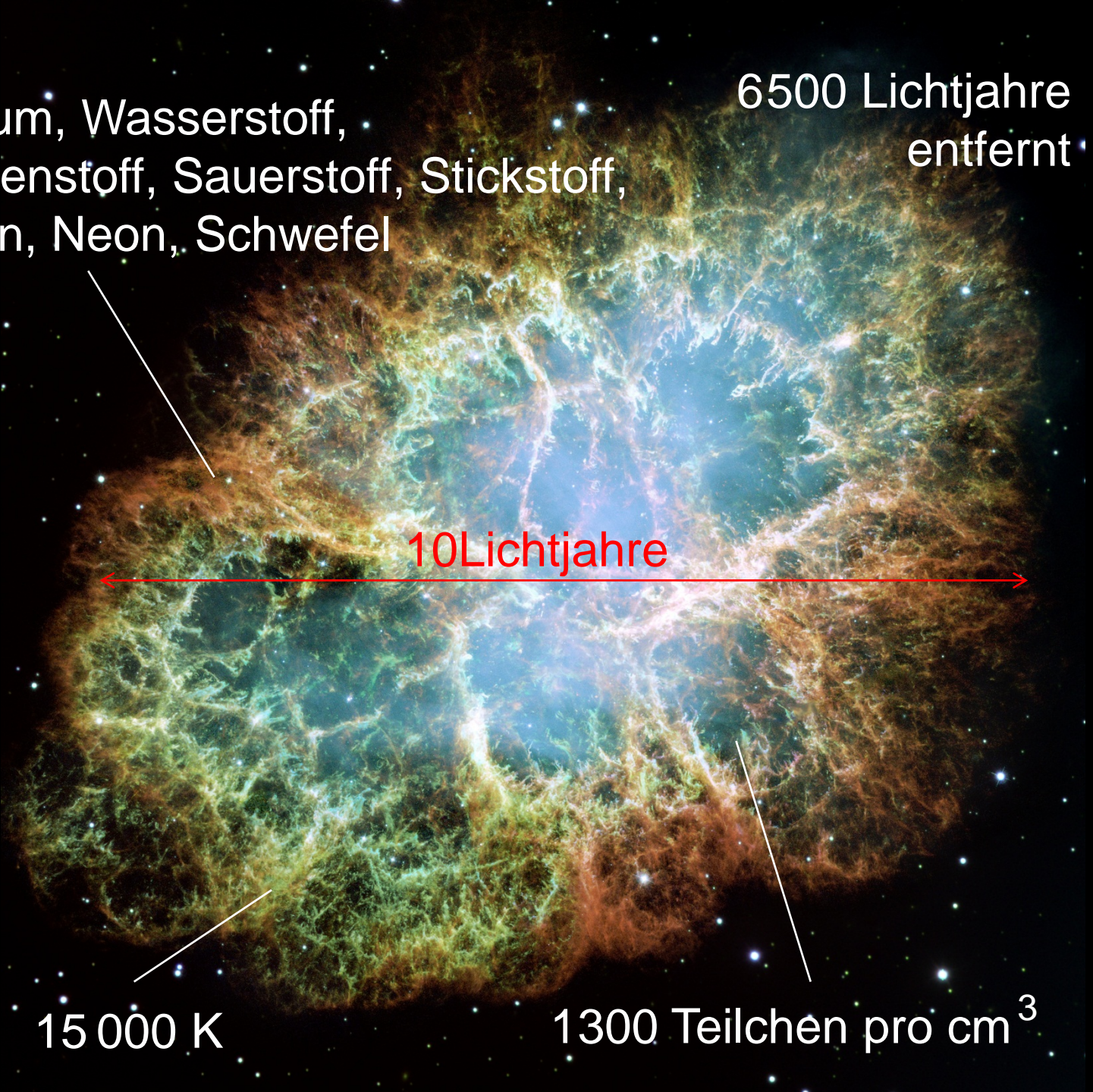
Helium, Wasserstoff,  
Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff,  
Eisen, Neon, Schwefel

6500 Lichtjahre  
entfernt

10 Lichtjahre

15 000 K

1300 Teilchen pro  $\text{cm}^3$

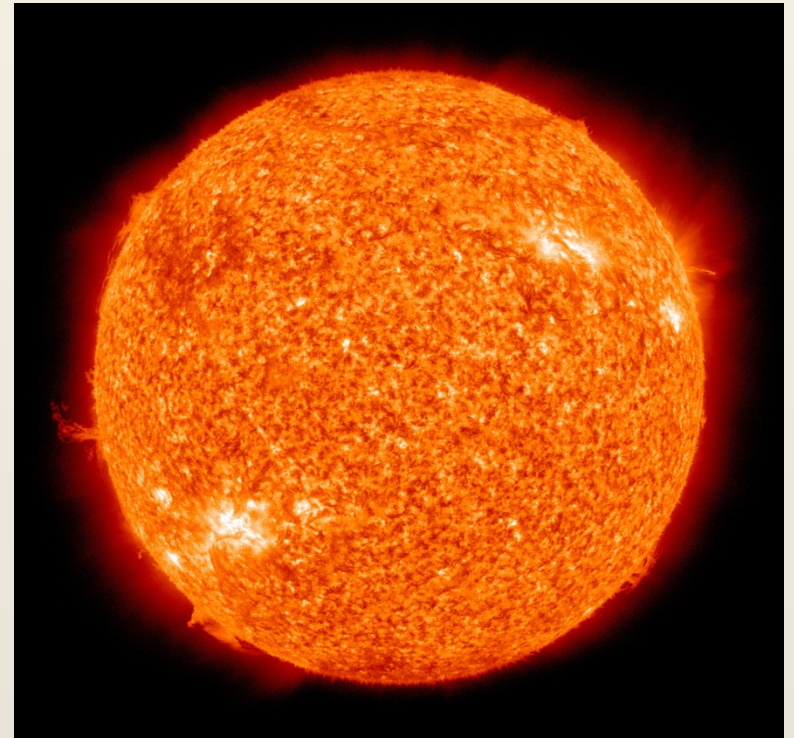




# Vom Sterben der Sterne

---

- Wie Sterne entstehen
- Was Sterne am Leben hält
- Wie Sterne sterben (und *warum*)
- Und was von ihnen übrig bleibt



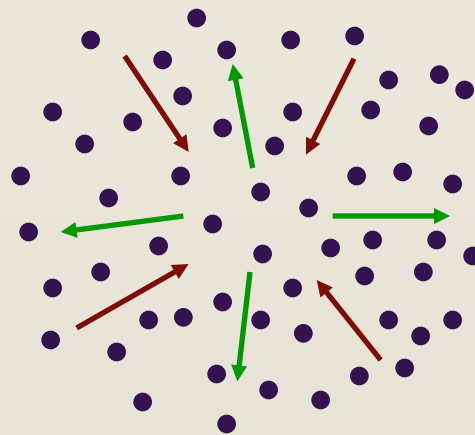
# Sterne entstehen ...

---

... aus einer Gaswolke:

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

Kräftespiel:

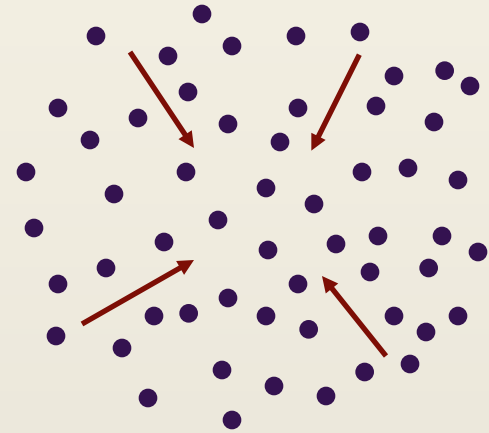
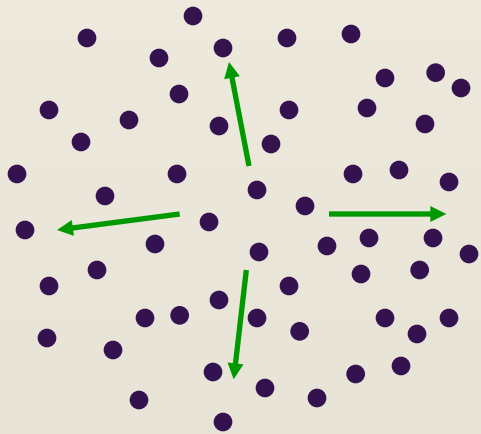


Gravitation  
thermischer Druck

# Gravitation

---

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

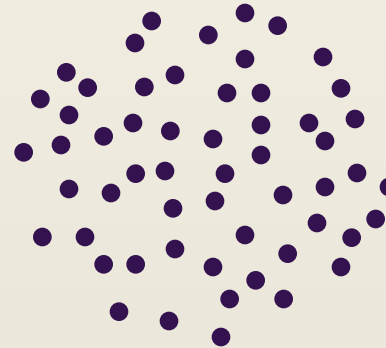
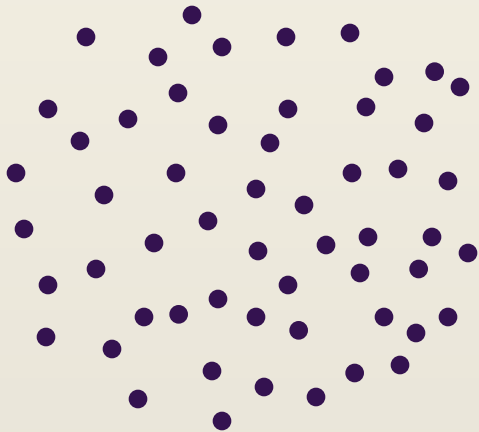


Wenn die Materie der Gravitation einen **Druck** entgegensetzen kann, entstehen **stabile** Objekte (→ **Gleichgewicht**).

# Sterne entstehen...

---

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



Erwärmung ...  
der thermische Druck steigt

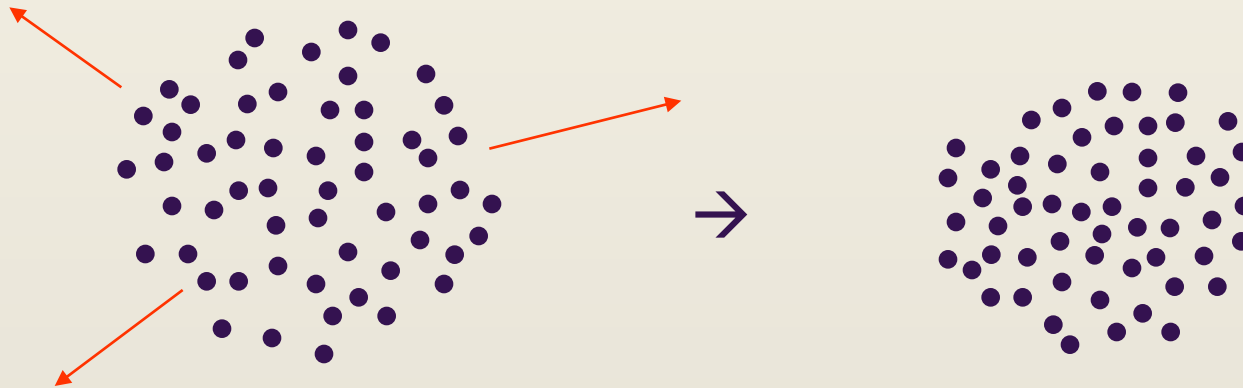


**Stabilität?**

# Sterne entstehen...

---

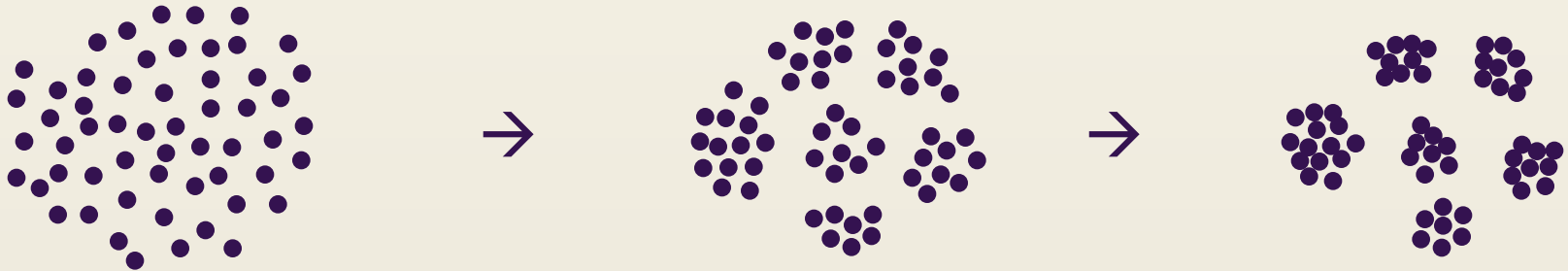
elektromagnetische  
(IR-)Strahlung!



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

# Sterne entstehen...

---



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

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

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!**

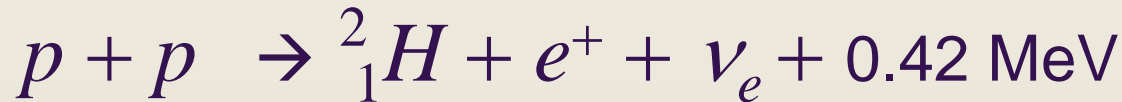
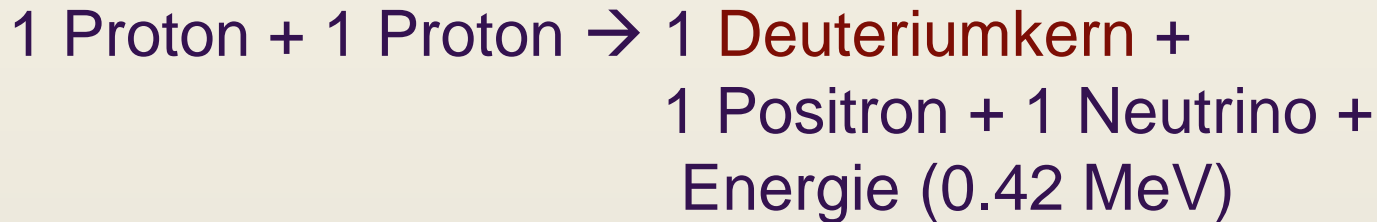
# Kernfusion

---

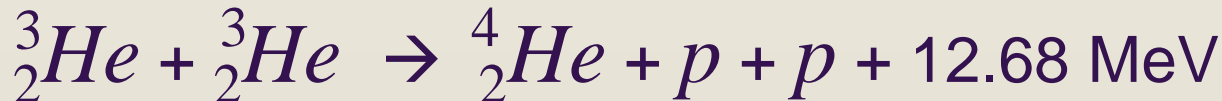
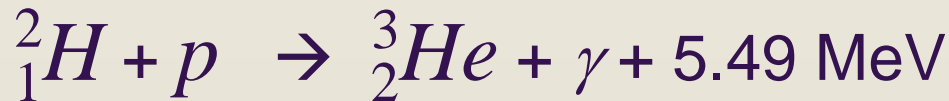
## Kernreaktionen



- „Deuteriumbrennen“:



- „Wasserstoffbrennen“:



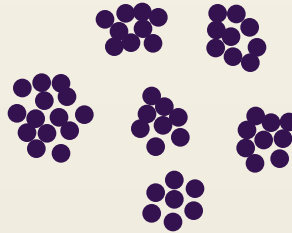
---

Wasserstoff  $\rightarrow$  Helium + Energie



# Sterne entstehen...

---

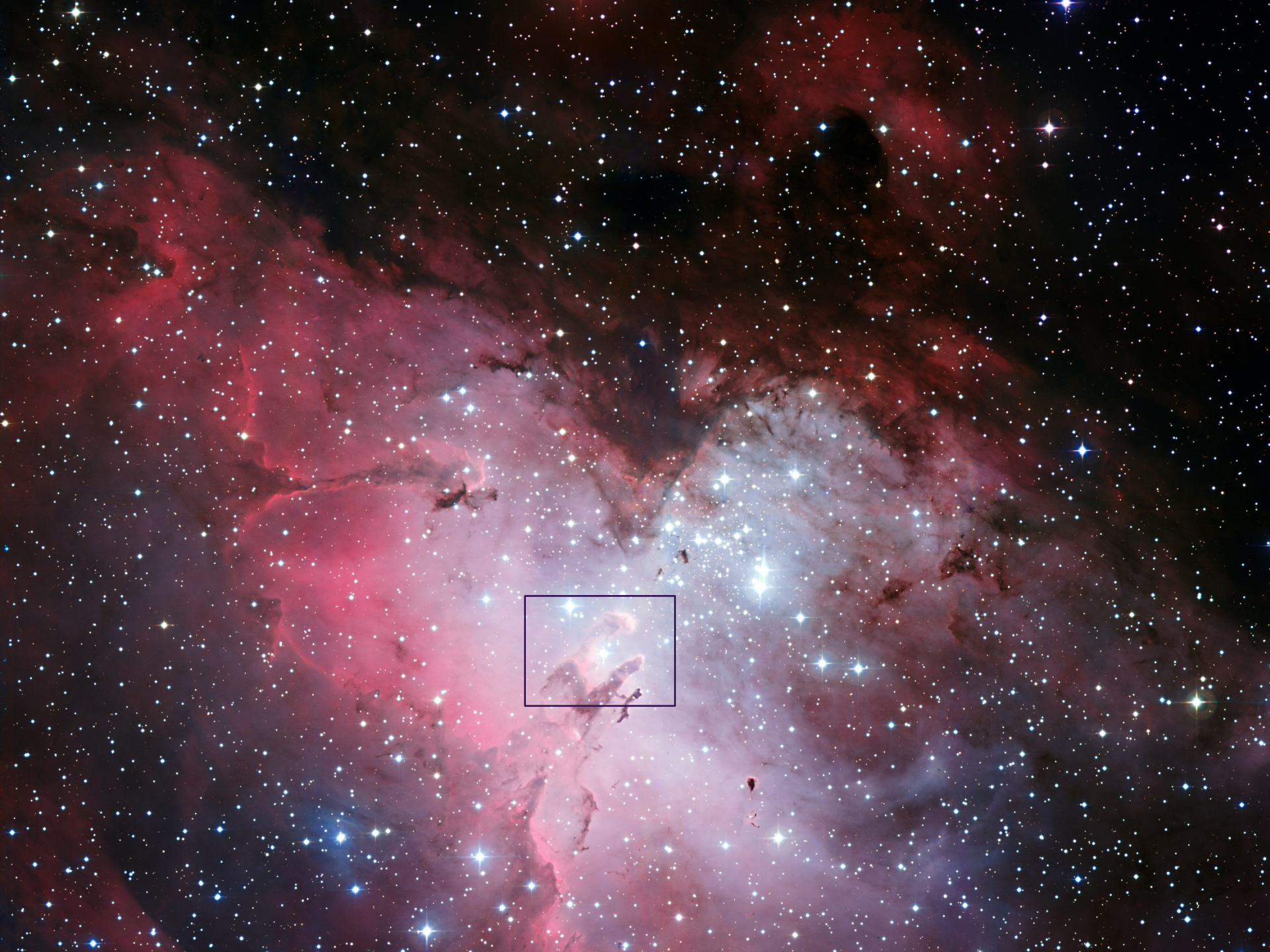


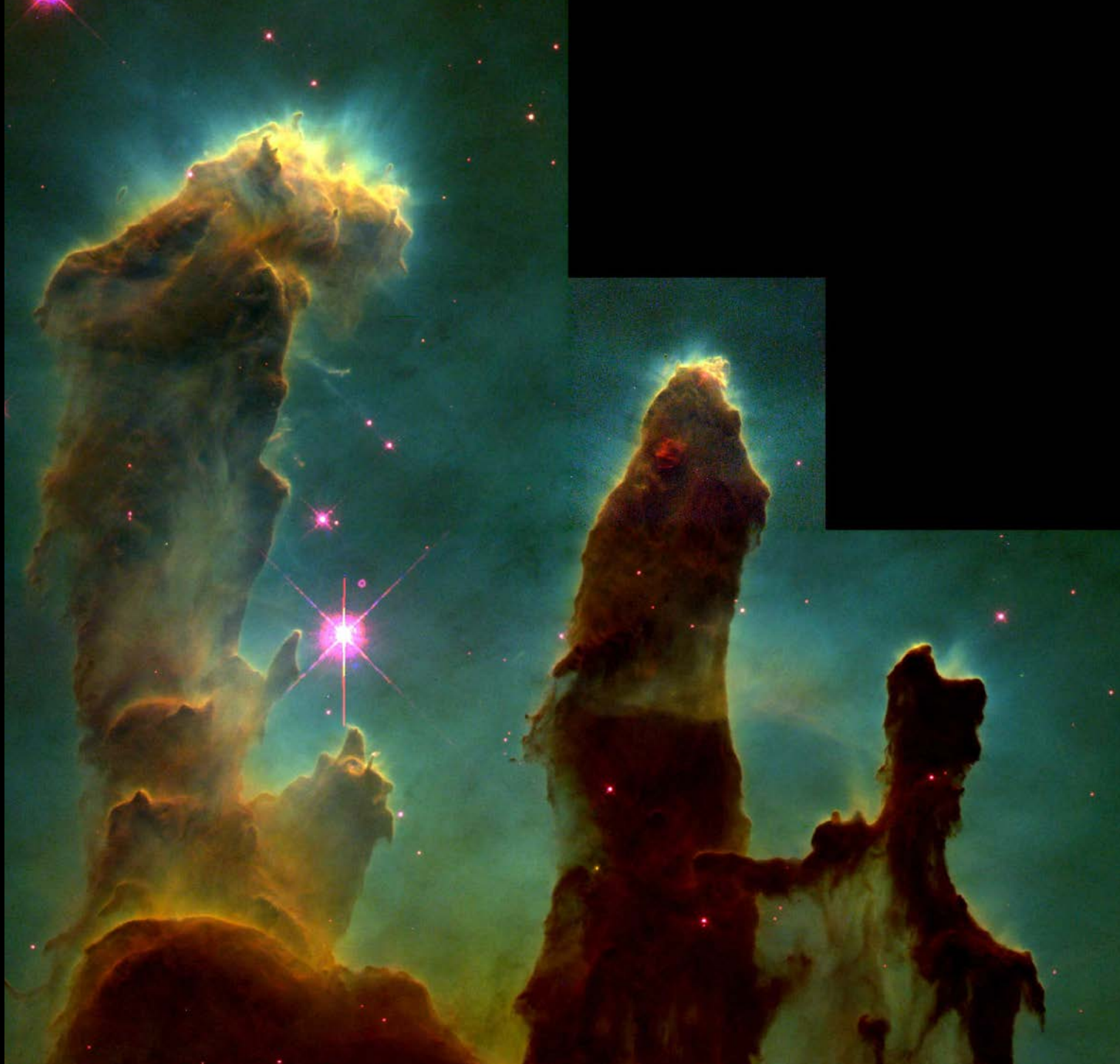
Kontraktion der Teilwolken, bis (nach einigen Millionen Jahren) **Kernfusion** einsetzt („zündet“):

- 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.







# Sterne

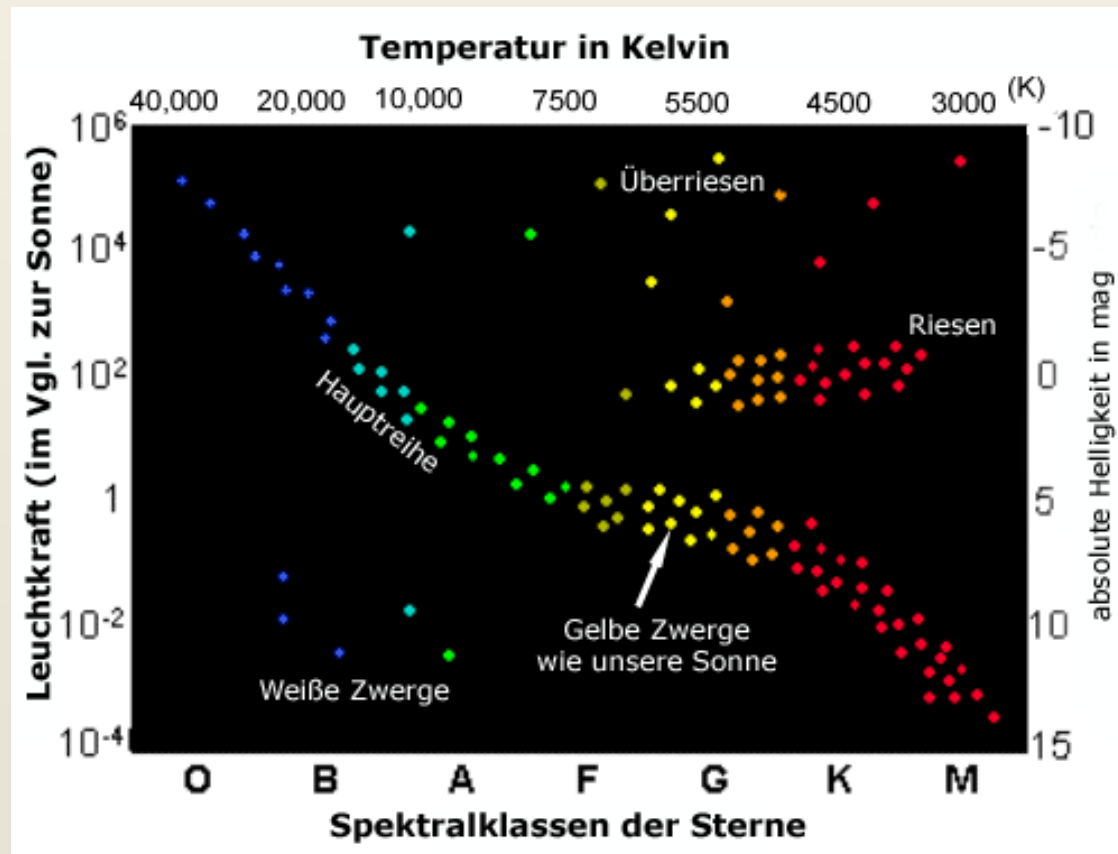
---

## 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 Jahre bis einige hundert Milliarden Jahre

# Das Leben der Sterne auf der „Hauptreihe“

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



## 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

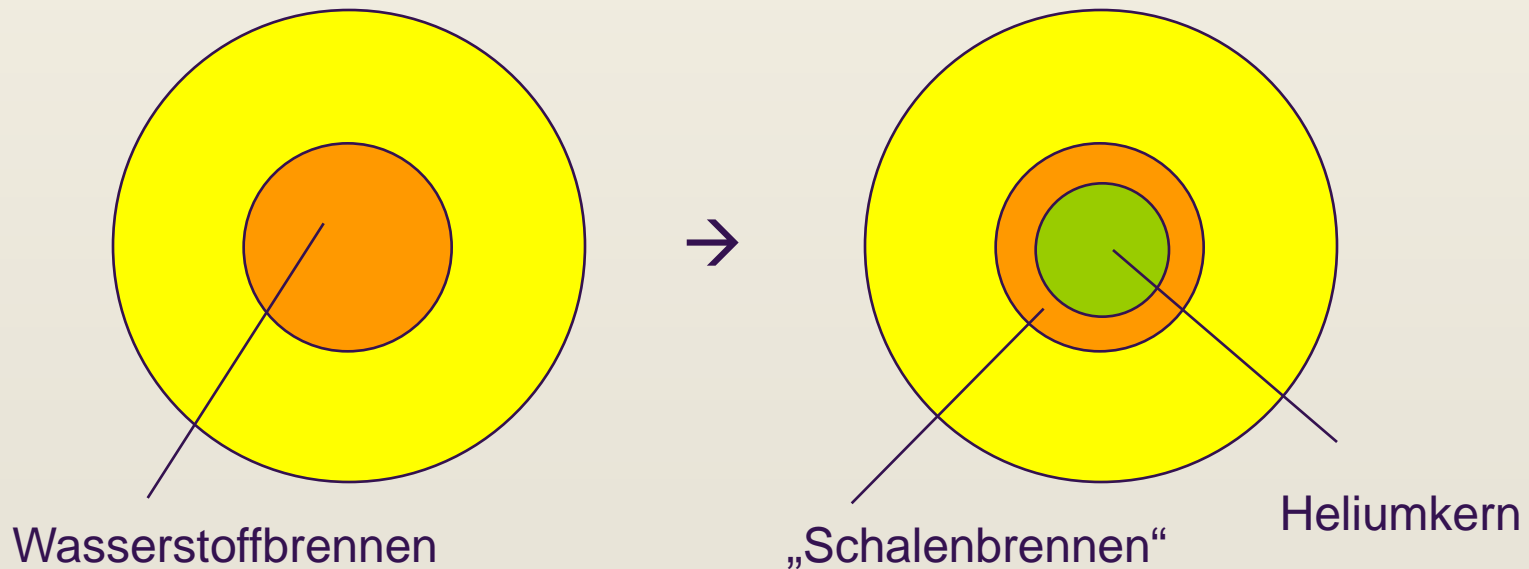
- werden sie heißer
- und größer.

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...

---

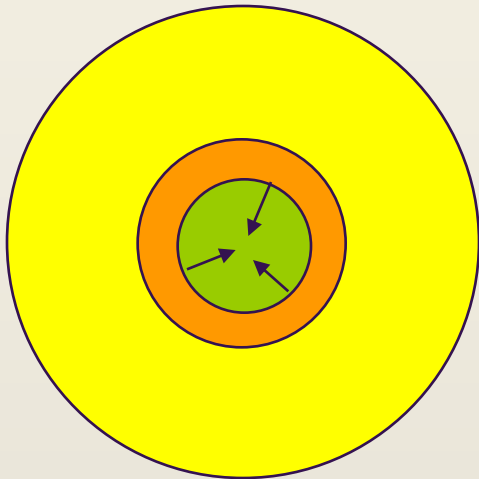
...erlischt das Wasserstoffbrennen! Die Gravitation überwindet den Druck – der Stern wird **instabil**:



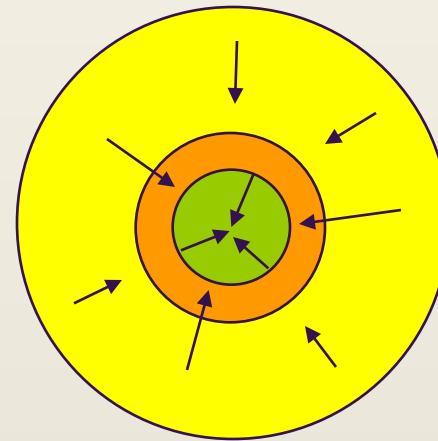


## Wenn der Wasserstoff aufgebraucht ist...

---



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?

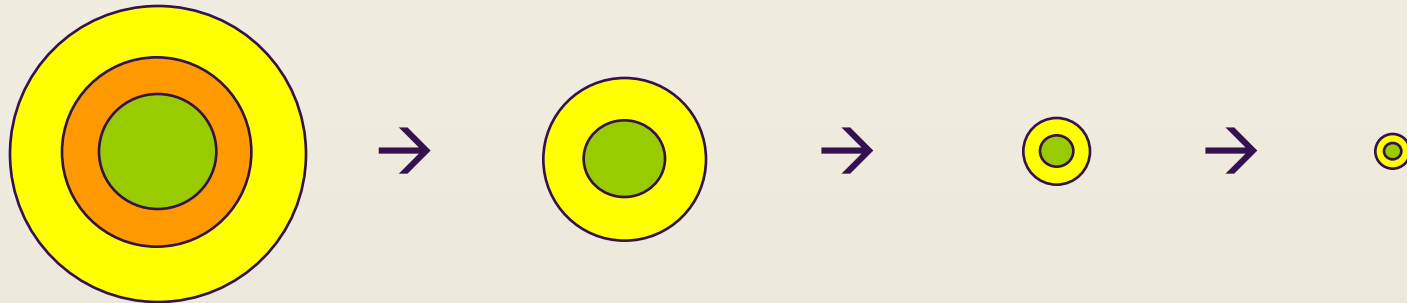
Und **wenn nicht**?

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:



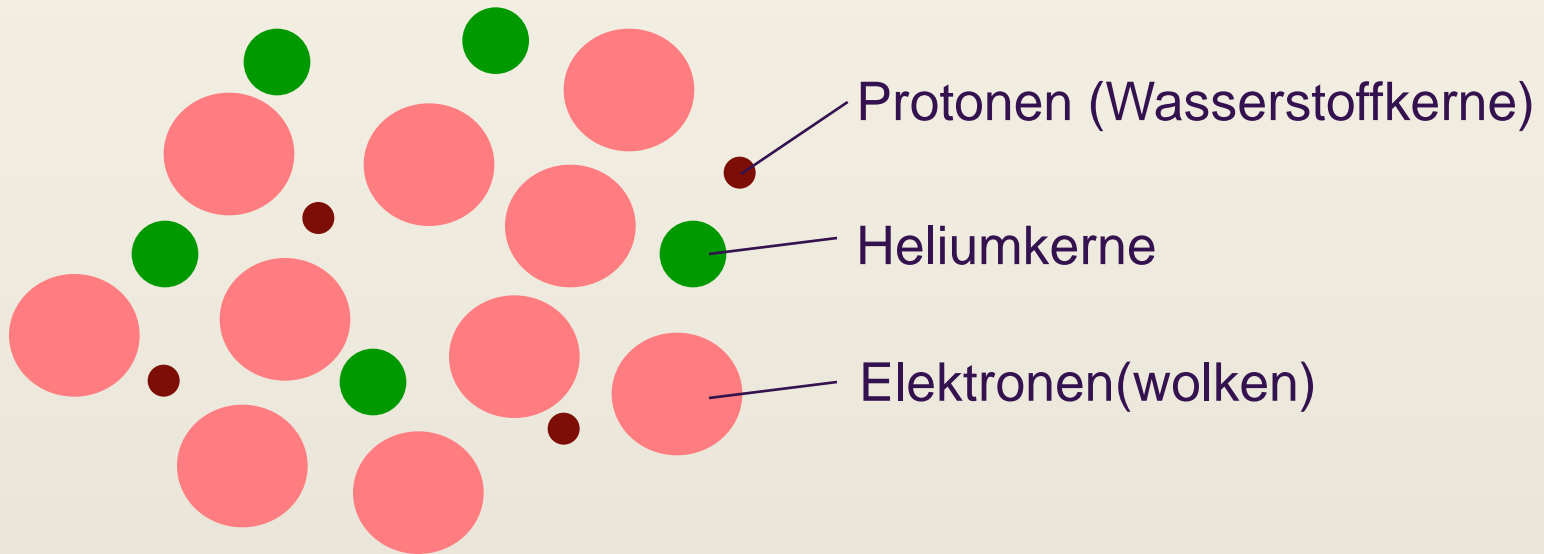
Das Schalenbrennen  
erlischt

Kollaps, bis eine neue  
Zustandsform der  
Materie auftritt!

# Ein bisschen Quantentheorie

---

Sternmaterie beim Kollaps:



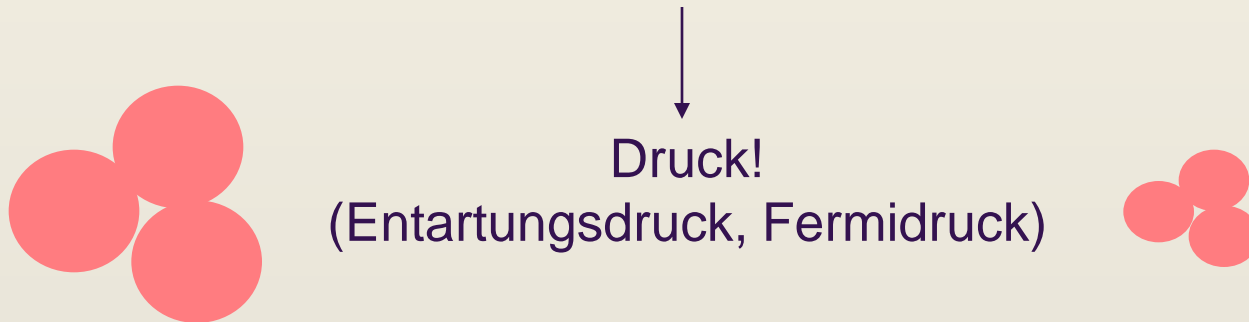
Elektronen sind „**Fermionen**“: Sie wollen sich den Platz nicht teilen (**Pauli-Prinzip**)!

## Ein bisschen Quantentheorie

---

Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation  
(„Unschärferelation“):

Größe der Wolke \* Impuls = Plancksche Konstante  $h$



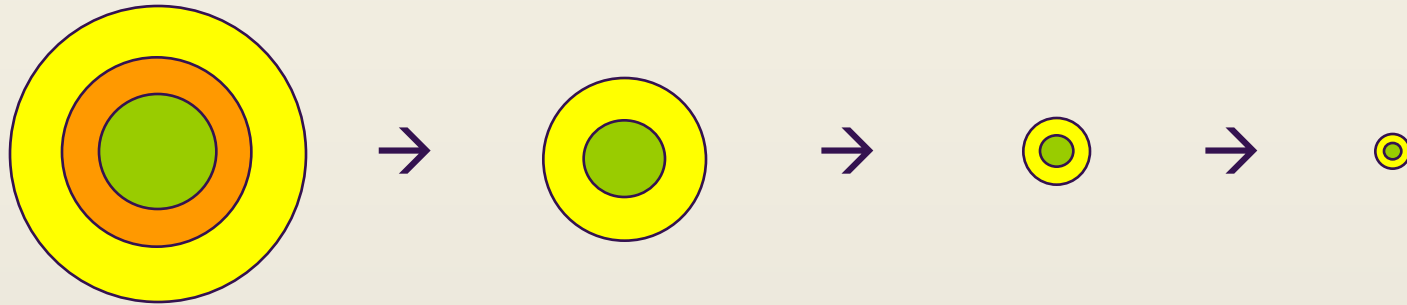
Die Elektronen „entarten“ → „entartete Materie“.

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!

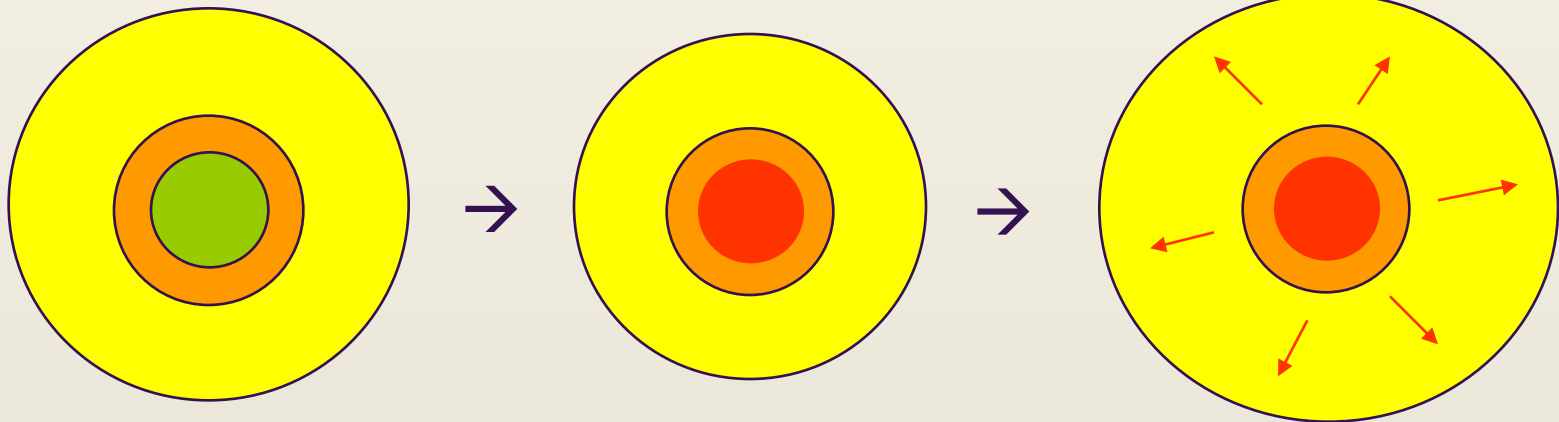
→ Es entsteht ein (vorwiegend aus Helium bestehender) **Weißer Zwerg**.

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:



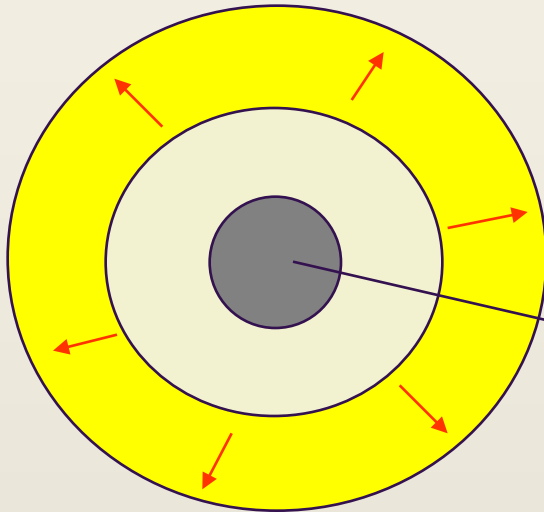
Druck- und  
Temperaturanstieg!  
Ab 200 Millionen  $K$  zündet  
das „Heliumbrennen“:  
 $He \rightarrow Be \rightarrow C$

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:



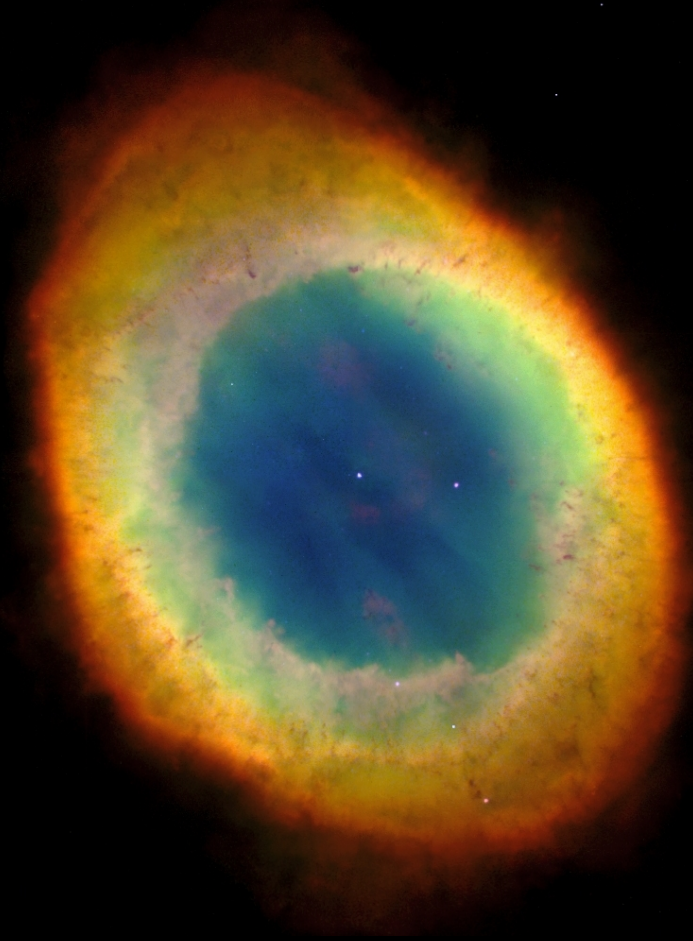
Hülle wird abgestoßen  
→ Planetarischer Nebel!

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



# Planetarischer Nebel Messier M 57

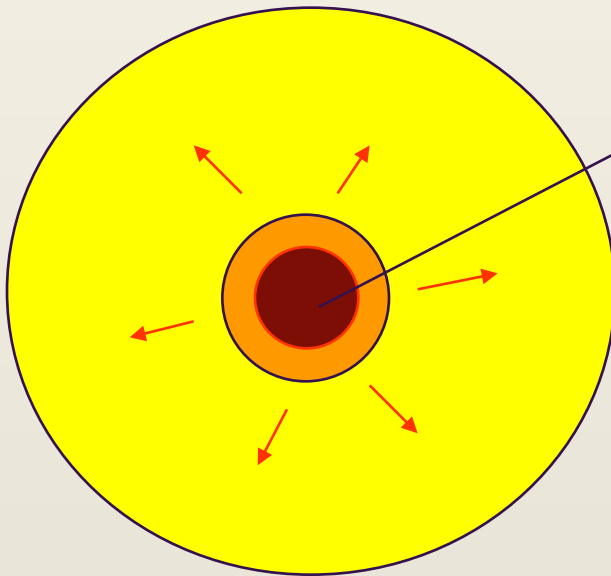
---



# Das Ende der Sterne

---

Sterne zwischen 2.3 und 8 Sonnenmassen:



Hülle wird abgestoßen  
→ Planetarischer Nebel!

- 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  $Ne$ )

## 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 Weiße Zwerge sein!

## Weißer Zwerge...

---

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

Weißer Zwerg...

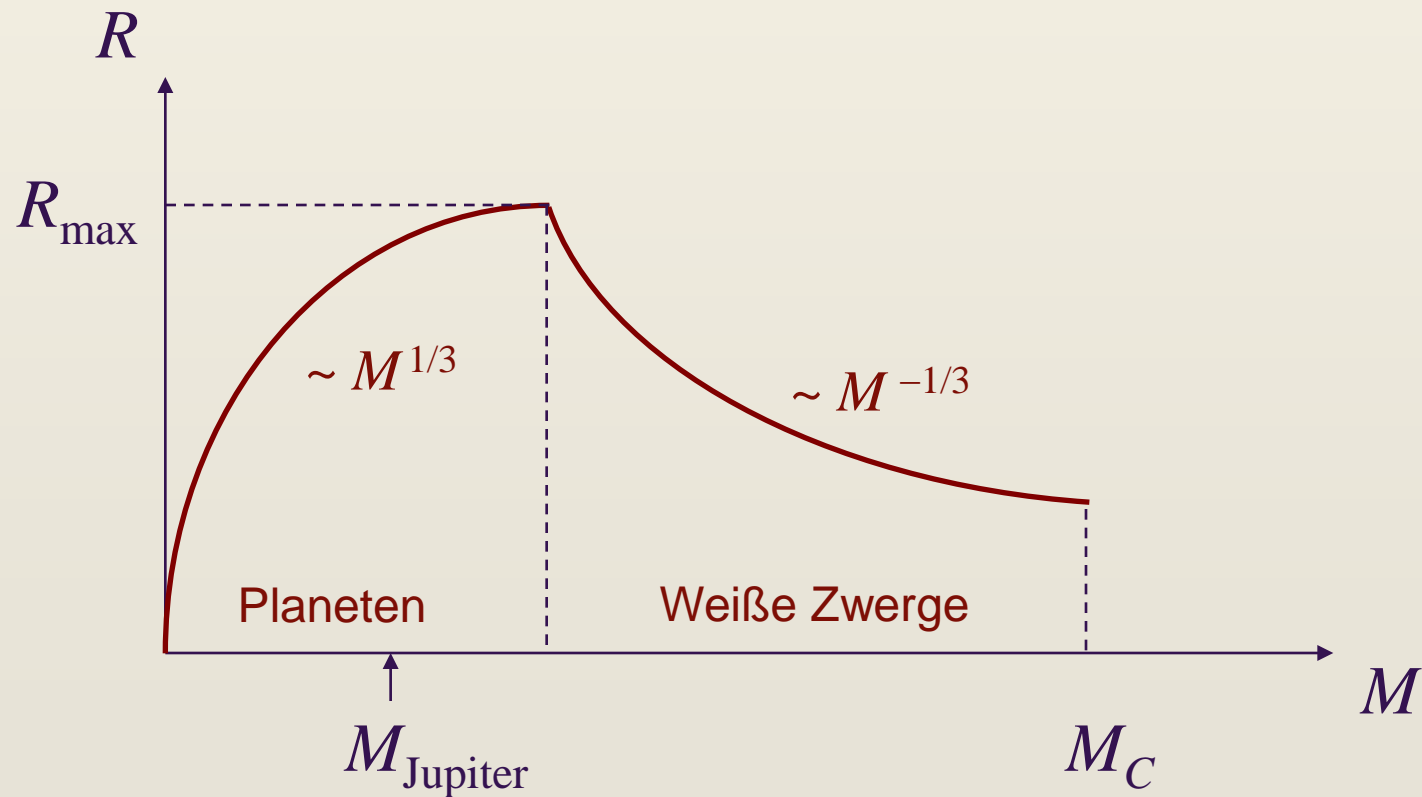
---

(künstlerische Darstellung)

# Eine gravitative Überraschung...

---

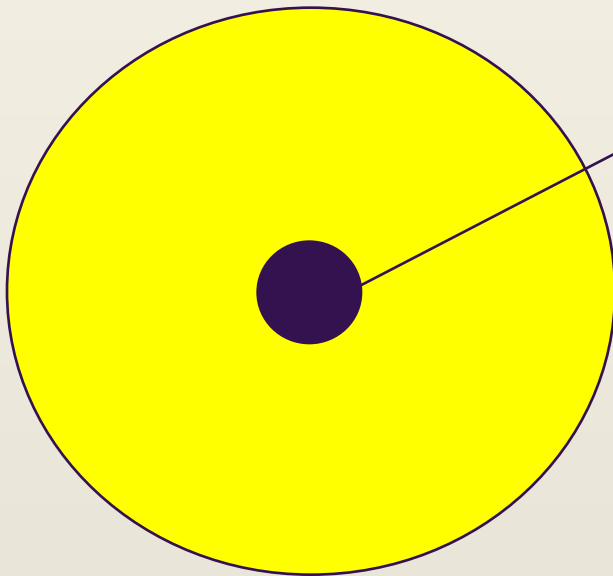
Verhalten von Materie bei Abwesenheit von Kernfusion:



# 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<sup>3</sup>)!

→ 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 (in der eine gigantische gravitative Bindungsenergie frei wird) 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 → **Supernova-Explosion** und Kollaps zu einem **Schwarzen Loch** (→ ART).

## Neutronensterne...

---

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

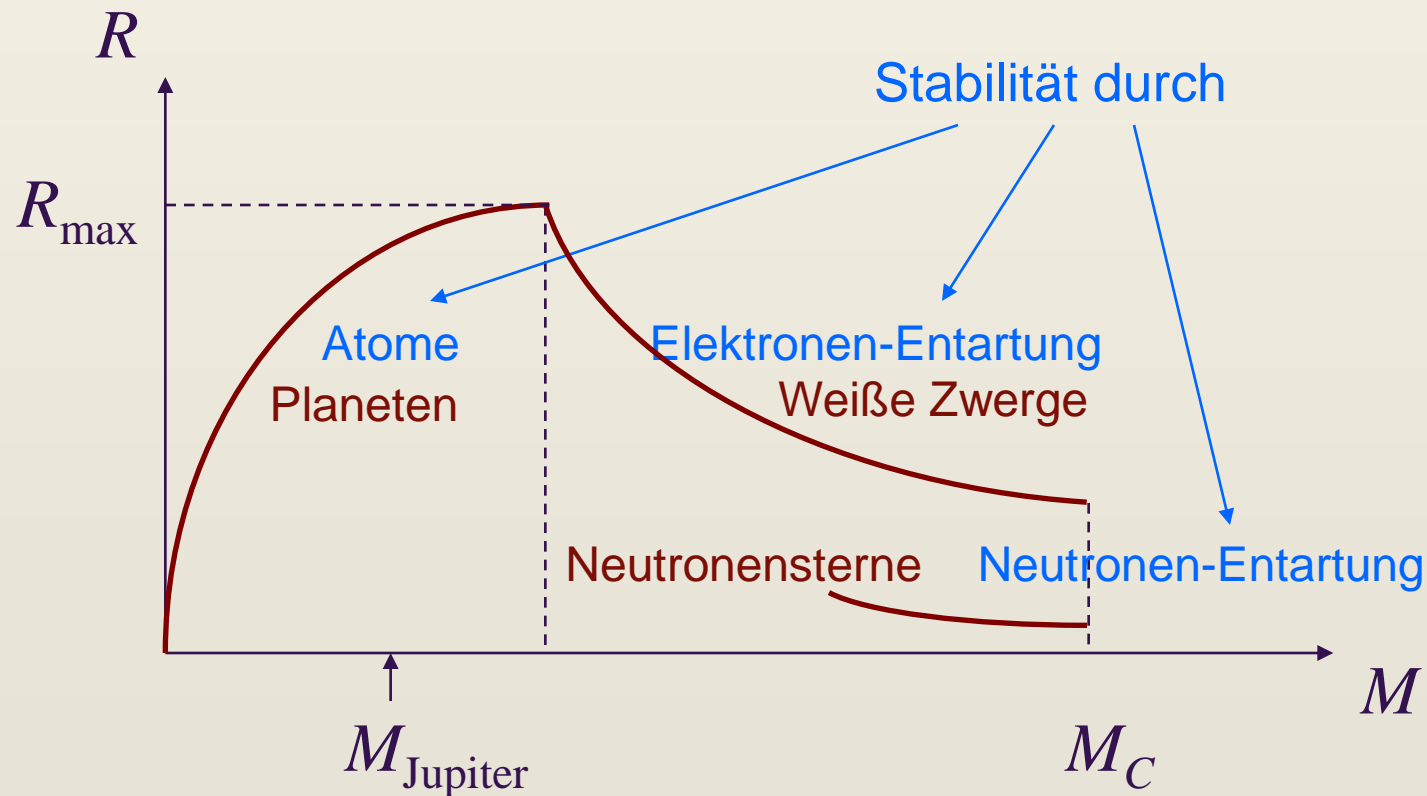
Steckbrief:

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

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

# Auch Neutronensterne...

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 des Bisherigen

---

- 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** (in Sternen und Supernovae) entstehen.
- Ohne sie gäbe es keine Sterne (auch keine Galaxien), keine Planeten, praktisch keine Elemente außer Wasserstoff und Helium, kein Leben, keine Menschen...

Helium, Wasserstoff,  
Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff,  
Eisen, Neon, Schwefel

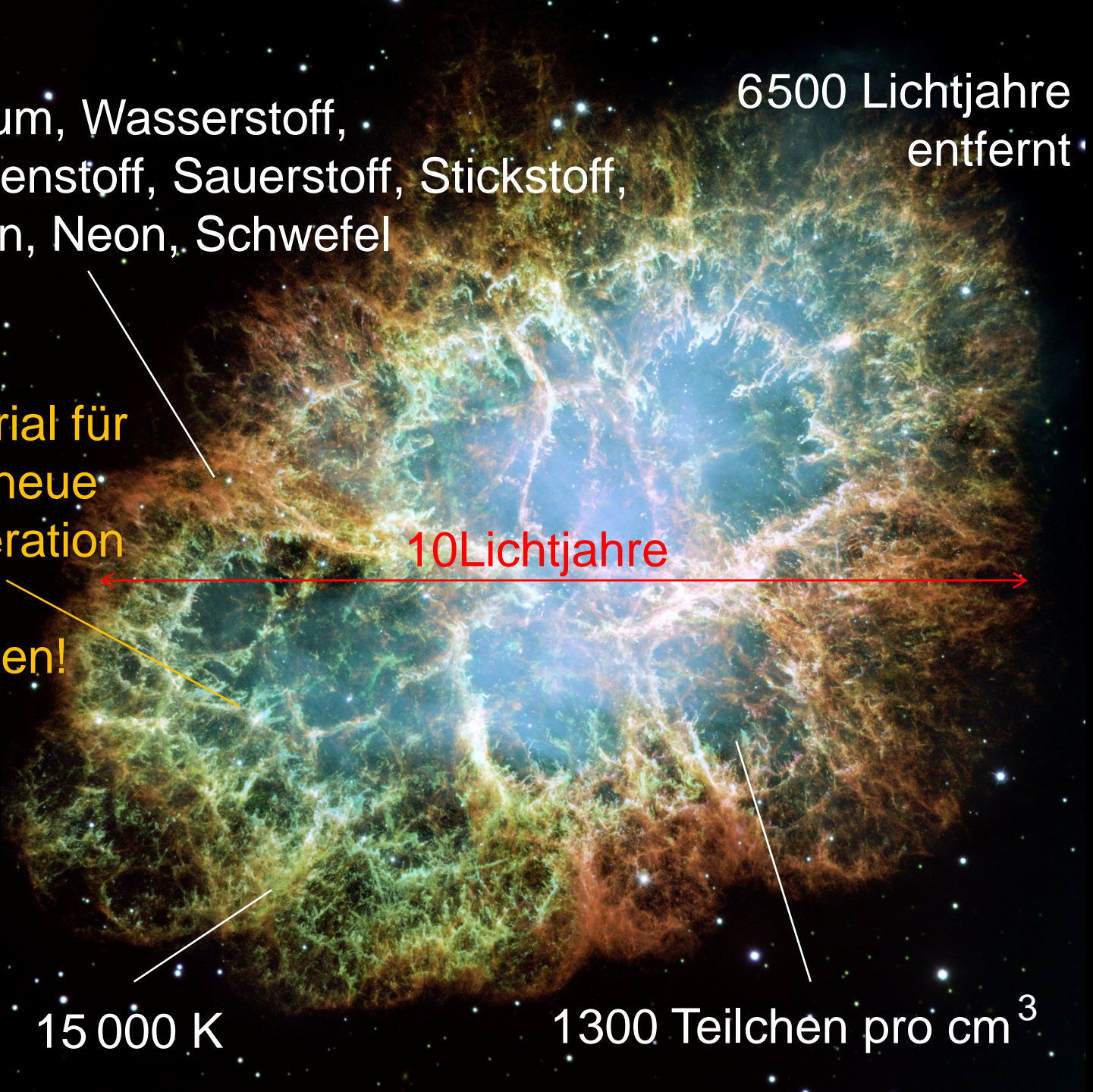
6500 Lichtjahre  
entfernt

Material für  
eine neue  
Generation  
von  
Sternen!

10 Lichtjahre

15 000 K

1300 Teilchen pro  $\text{cm}^3$



# Schwarze Löcher

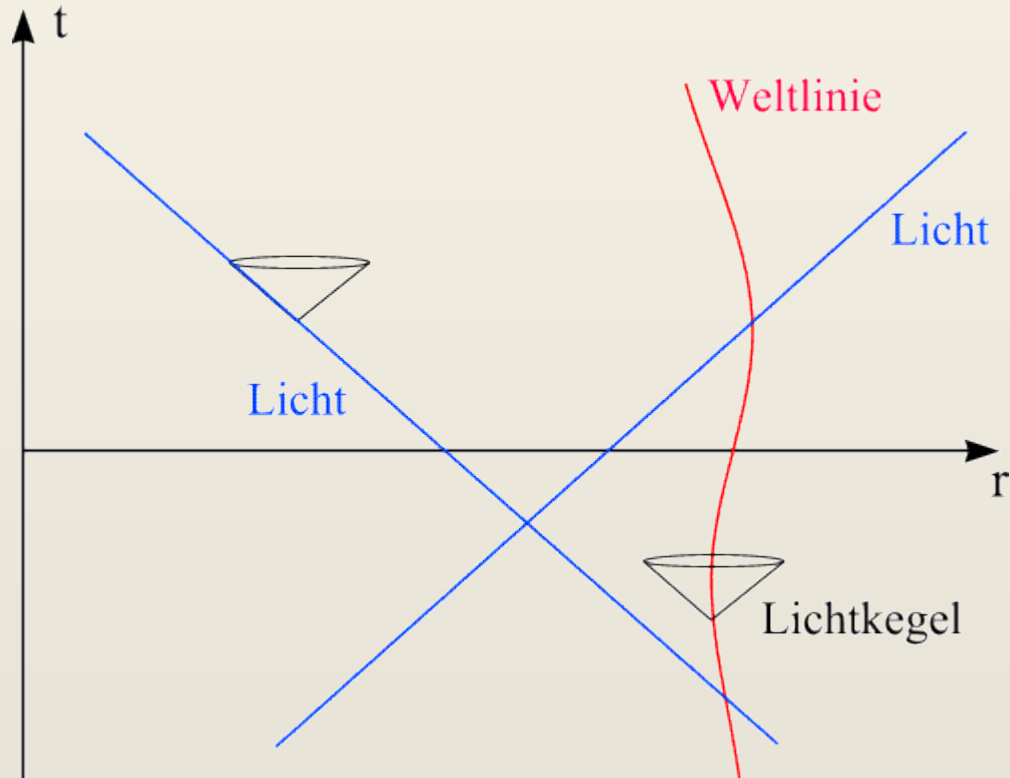
---

Falls auch der Entartungsdruck der Neutronen der Gravitation nicht standhält, so entsteht ein **Schwarzes Loch!**

- In einem Schwarzen Loch „kapselt“ sich die Raumzeit ab.
- Schwarze Löcher werden im Rahmen der **Allgemeinen Relativitätstheorie** beschrieben.

# Ein bisschen Relativitätstheorie: die Raumzeit

---

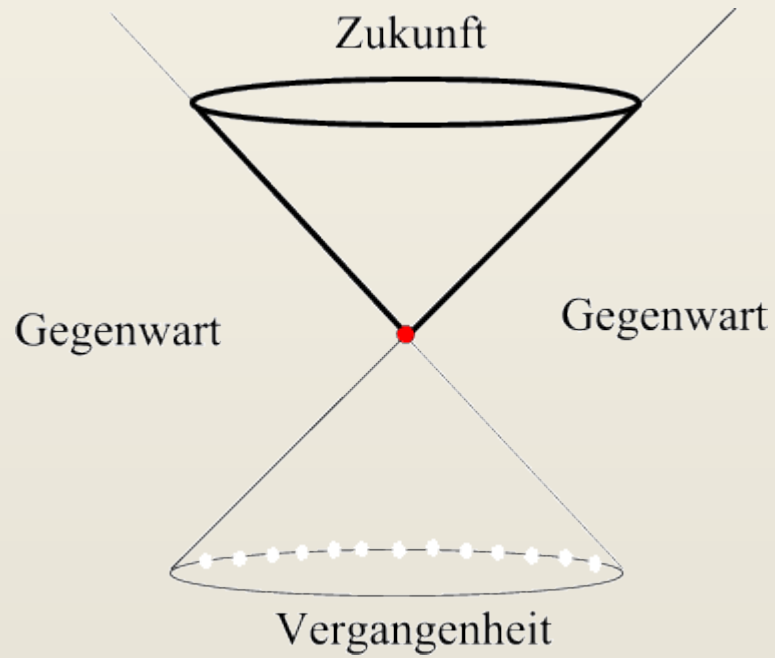


„Flache Raumzeit“



# Lichtkegel

---



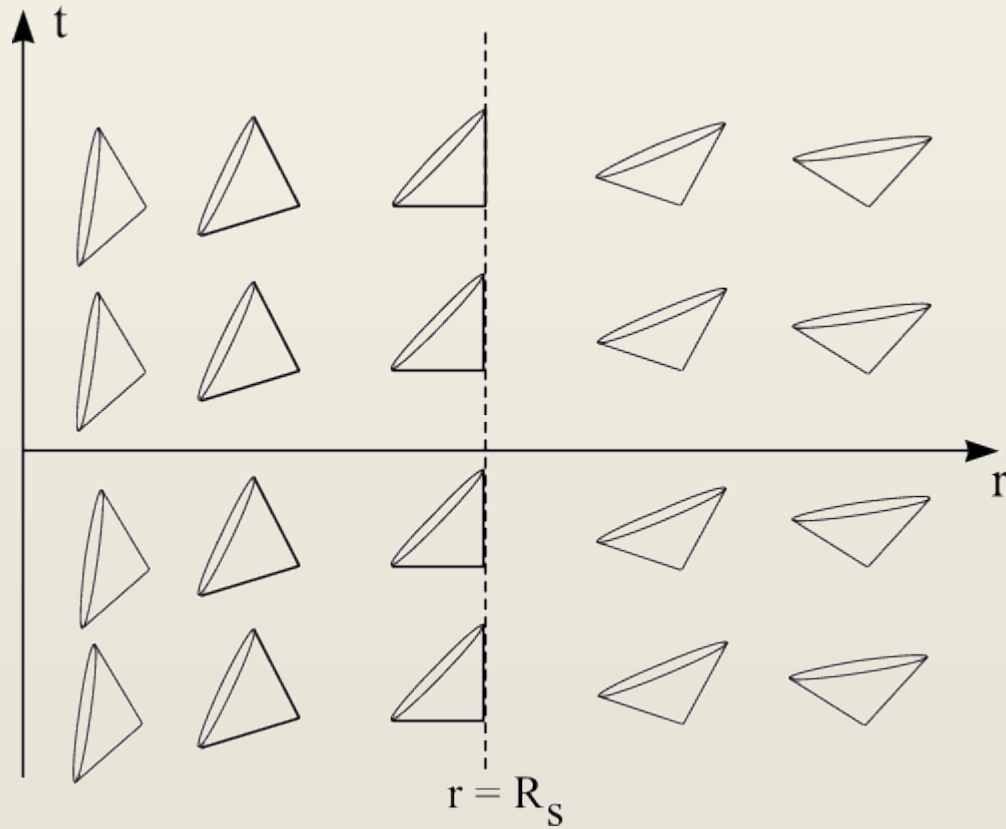
# Kausalstruktur der flachen Raumzeit

---



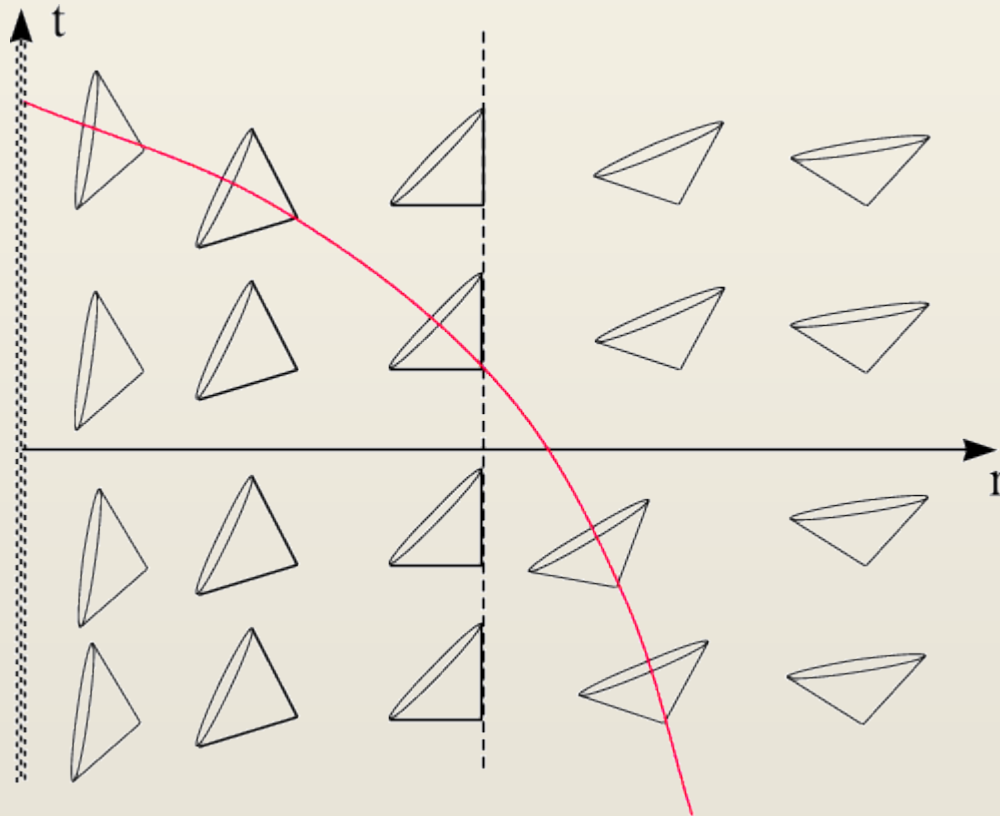
# Kausalstruktur eines Schwarzen Lochs

---



# Warum ist ein Schwarzes Loch schwarz?

---



Weil die Außenwelt nicht in der Zukunft des inneren Bereichs liegt!

# Schwarze Löcher

---

- Woher wissen wir von der Existenz Schwarzer Löcher, wenn sie doch schwarz sind?
  - Materie, die in ein (stellares) Schwarzes Loch fällt, sendet eine **charakteristische Röntgenstrahlung** aus, die wir beobachten.
- Hat die Gravitation bei der Entstehung eines Schwarzen Lochs also endgültig gewonnen?
  - Theorie: Schwarze Löcher strahlen auch von sich aus (**Hawking-Strahlung**), d.h. sie werden (*sehr langsam*) kleiner und „verdampfen“ schließlich!

Danke...

---

... für Ihre Aufmerksamkeit!

Diese Präsentation finden Sie im Web unter

<http://homepage.univie.ac.at/franz.embacher/Rel/UMPsterbenDerSterne2012/>