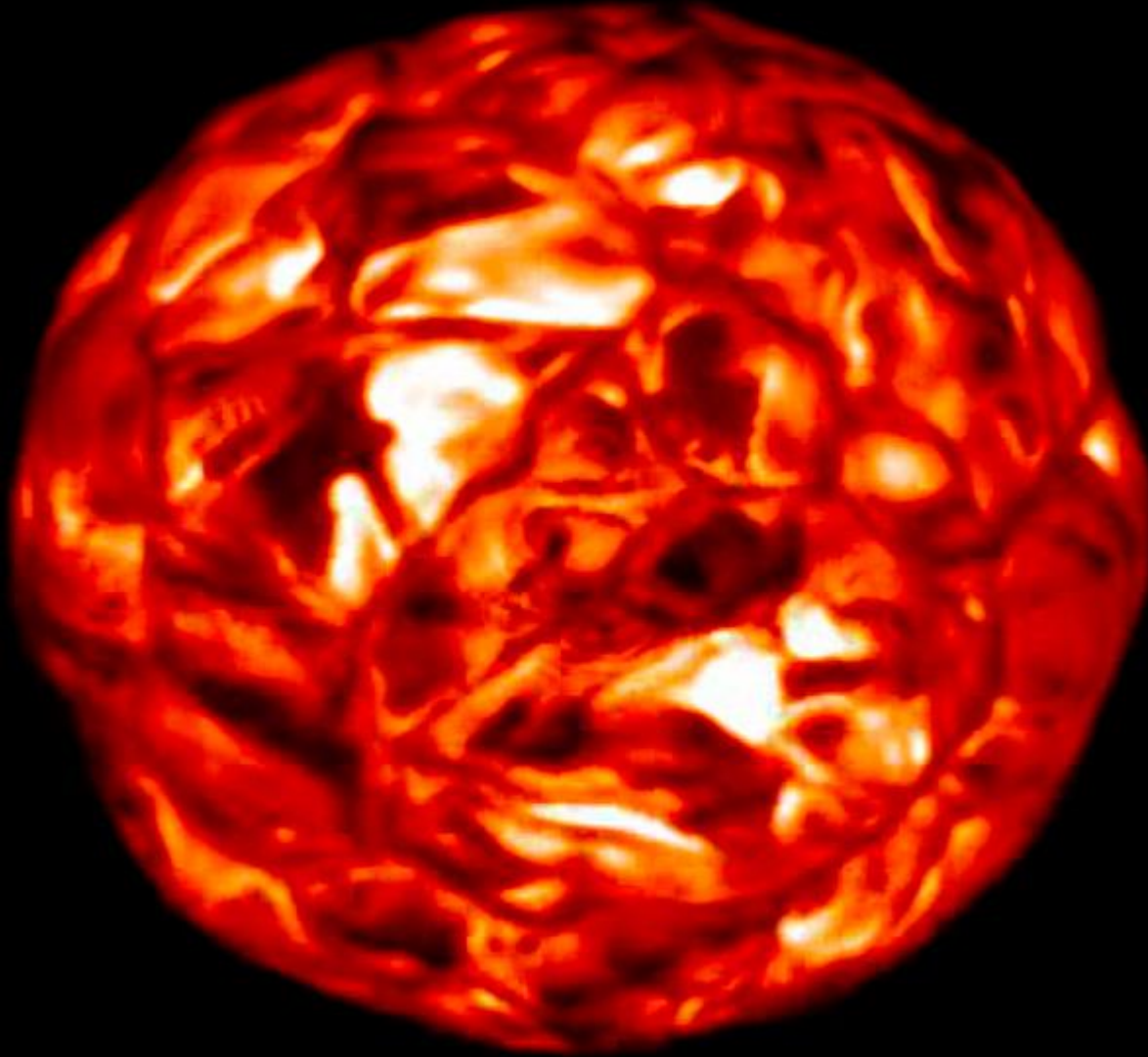
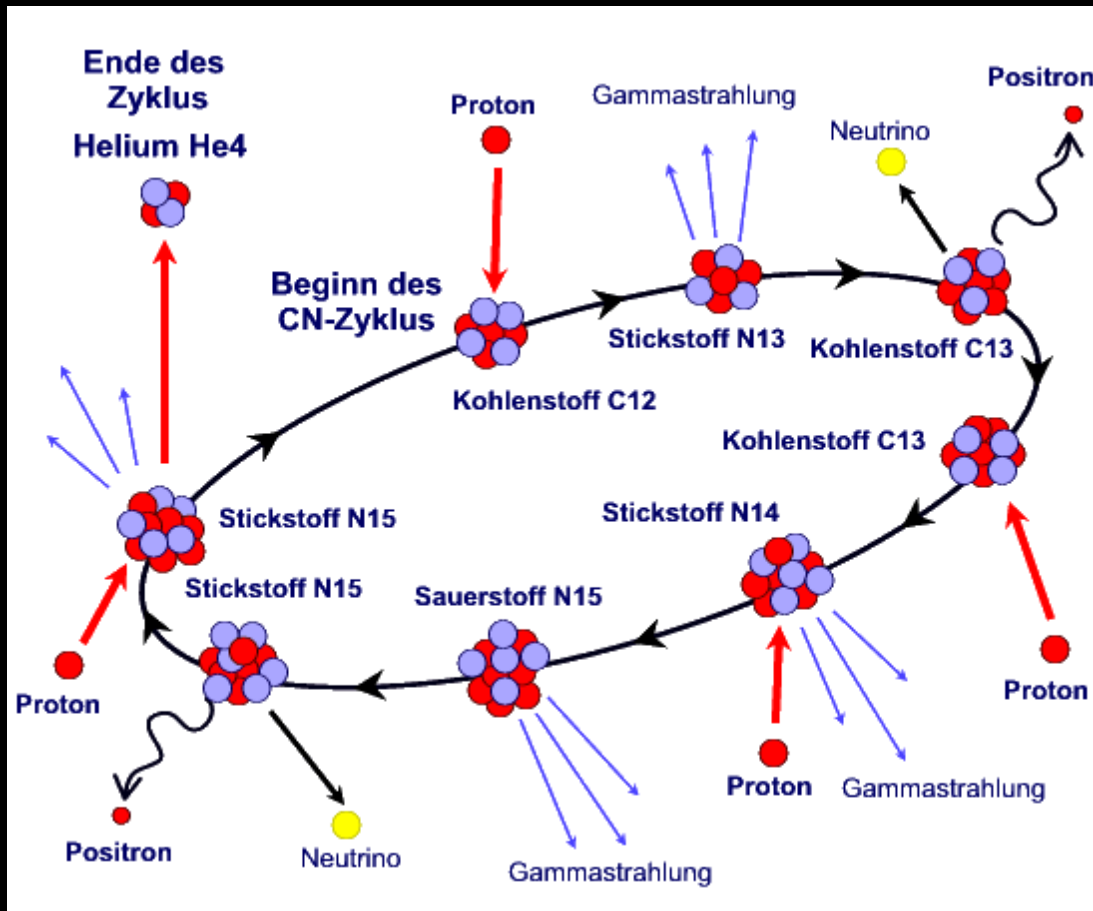


Sternentwicklung (4)

Wie Sterne Energie erzeugen – Energietransport – Triple-Alpha-Prozeß



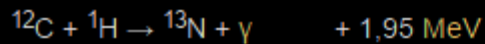
Wasserstoffbrennen – Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus



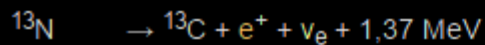
Synonym: CNO – Zyklus

H. Bethe, C.-F. von Weizsäcker 1939

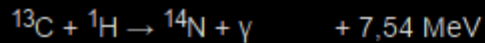
- Benötigt Kohlenstoff als Katalysator
- Sonne: 1.6% der Energieerzeugung aus
- Ist erst ab über 14 Millionen K effektiv
- Dominiert massereiche Hauptreihensterne
- War bei Population III Sternen nicht möglich
- Energieerzeugungsrate $\sim T^{17}$
(5% Erhöhung T \rightarrow 100% Energiefreisetzung)



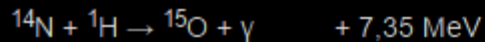
je nach Temperatur und Druck Millionen bis Billionen Jahre



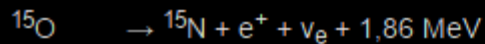
7 Minuten



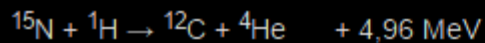
je nach Temperatur und Druck Millionen bis Billionen Jahre



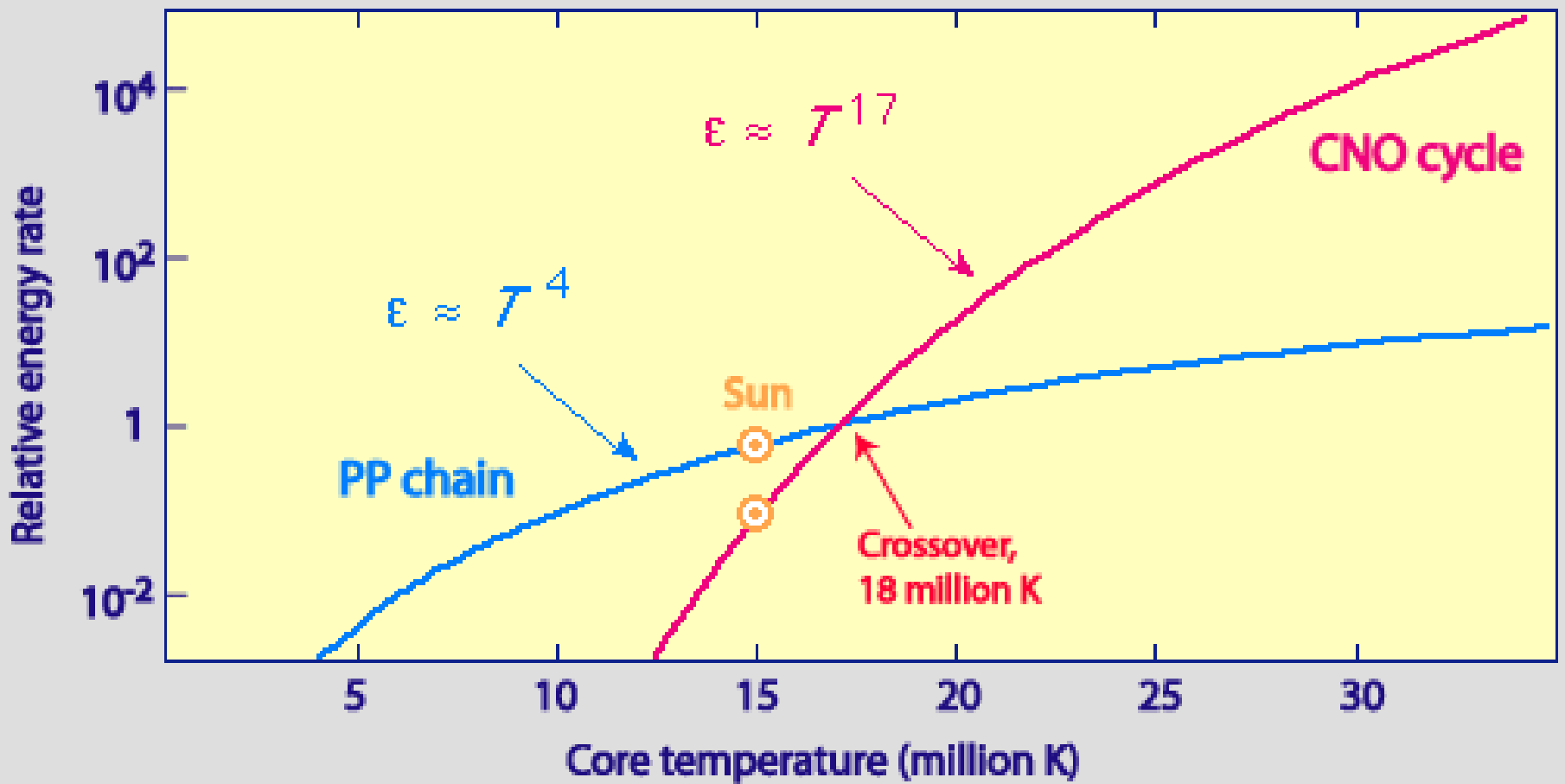
je nach Temperatur und Druck Millionen bis Billionen Jahre



82 Sekunden



je nach Temperatur und Druck Millionen bis Billionen Jahre



Ab einer Kerntemperatur von 18 Millionen K beginnt der CNO-Zyklus die Energieausbeute zu dominieren. Die langsame Leuchtkrafterhöhung der Sonne ist einer langsamen Zunahme der Temperatur in ihrem Kernbereich geschuldet, der den CNO-Zyklus immer effektiver werden lässt.

Energietransport

Wie gelangt die im Sterninnern durch Kernfusionsprozesse erzeugte Energie zur Sternoberfläche, von wo sie in den freien Weltraum abgestrahlt wird?

1. Die freigesetzte Energie wird als innere Energie (thermische Energie) im Plasma gespeichert → teilchenartabhängige Temperatur (Elektronentemperatur...)
2. Strahlung wiederfährt andauernde Absorptions- und Emissionsvorgänge

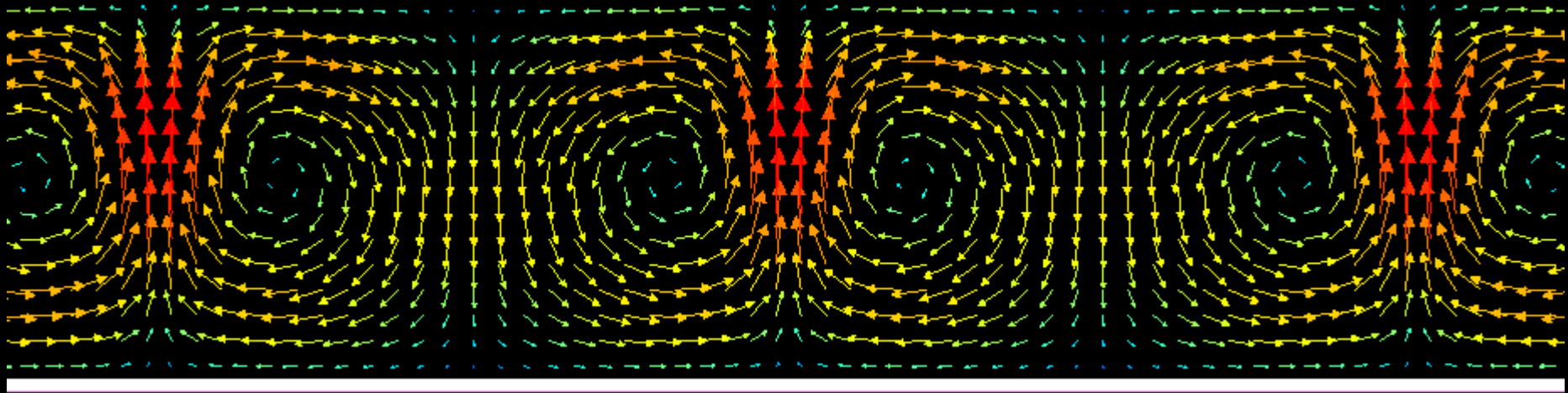
Es gibt in Sternen drei Arten des Energietransports:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Strahlungstransport

Wärmeleitung: Hier Wärmefluß durch ein ruhendes Fluid (oder einem Festkörper, Stichwort Wiedemann-Franz'sches Gesetz)

Konvektion: Übersteigt der Temperaturgradient eine bestimmte Größe (Schwarzschild-Kriterium), dann wird Konvektion in Bezug auf den Wärmetransport effektiver als Wärmeleitung.

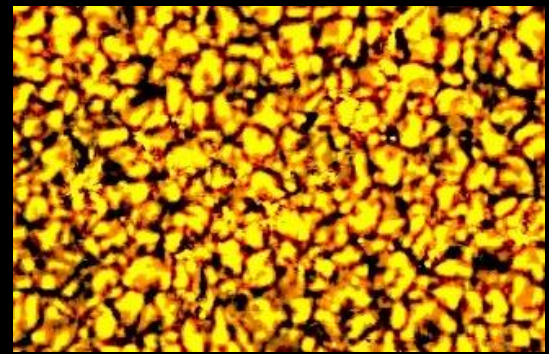
Benard-Konvektion



Ein Fluid dehnt sich an der warmen Unterseite aus und steigt aufgrund der geringeren Dichte nach oben, während die kältere, dichtere Flüssigkeit im oberen Bereich nach unten sinkt. Die Viskosität des Fluids begrenzt die Geschwindigkeit dieser Bewegungen.

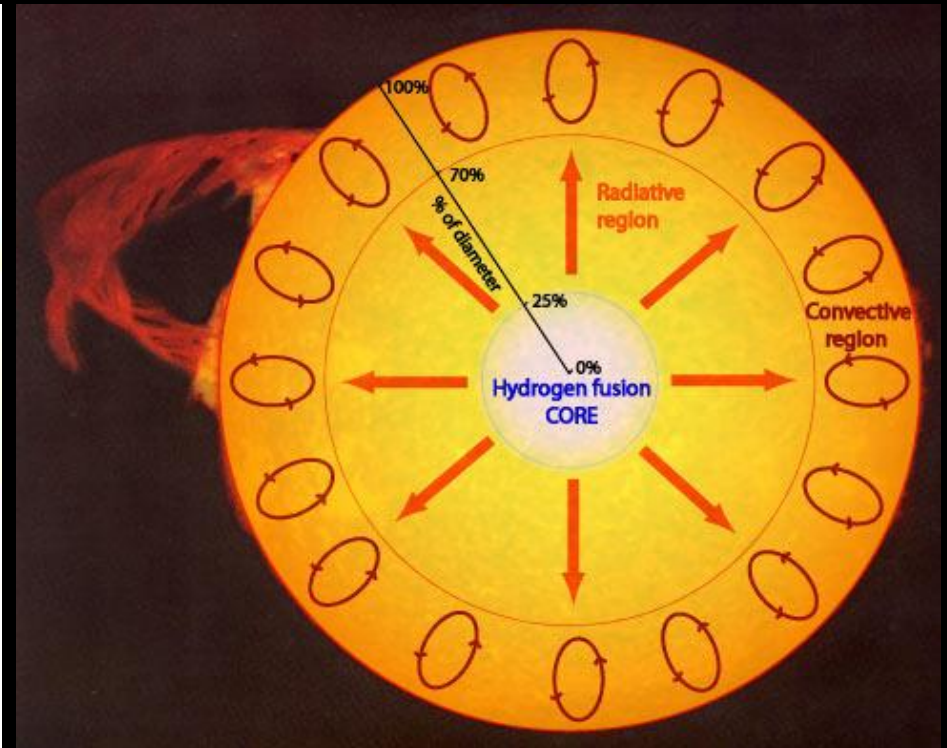
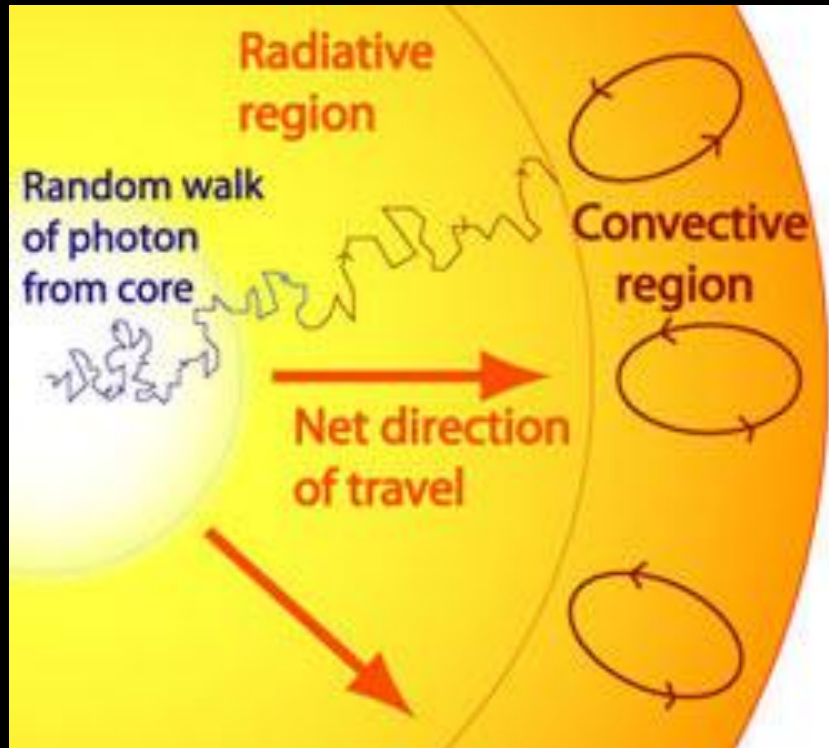
Die Ausbildung von Konvektionszellen ist ein Akt der Selbstorganisation

Die meisten Sterne sind teilweise konvektiv – z.B. die Sonne



Strahlungstransport

= Ausbreitung von Strahlung durch ein Medium



Photonen werden im Medium absorbiert und reemittiert und „diffundieren“ über einen Zufallsweg bis zur Untergrenze der stellaren Konvektionszone.

Typische Zeitskala: 25 000 Jahre

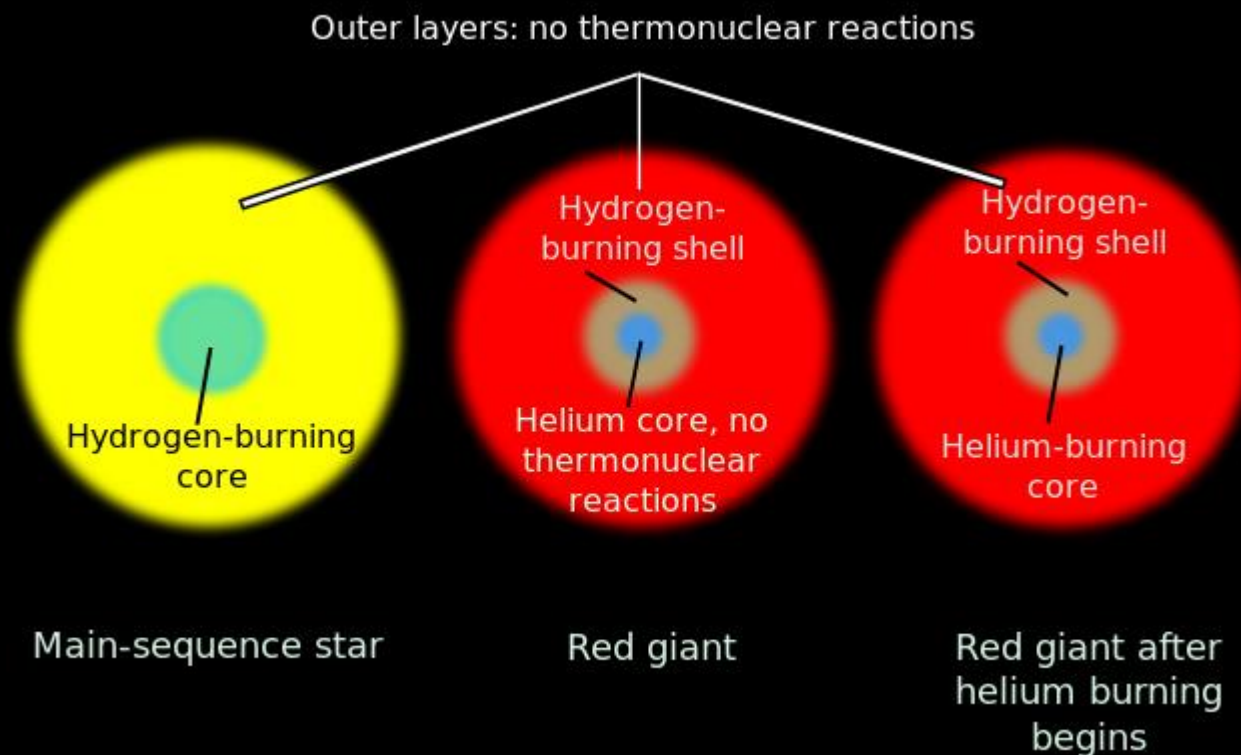
Die Strahlung in der **radiativen Zone** eines Sterns kann dabei einen Druck aufbauen, den „Strahlungsdruck“. Er ist bei massearmen Hauptreihensternen gegenüber dem Gasdruck vernachlässigbar. Je größer die Masse eines Sterns wird, desto größer ist sein Anteil am Gesamtdruck. Bei extrem massereichen Sternen kann er in die Größenordnung des Gasdrucks gelangen, was den Stern in Bezug auf eine hydrostatische Schichtung immer instabiler macht.

Es gibt eine **kritische Leuchtkraft**, welche die Masse eines Sterns begrenzt:

Eddington-Limit:
$$L_{\text{Eddington}} = 33.000 \frac{M}{M_{\odot}} L_{\odot}$$

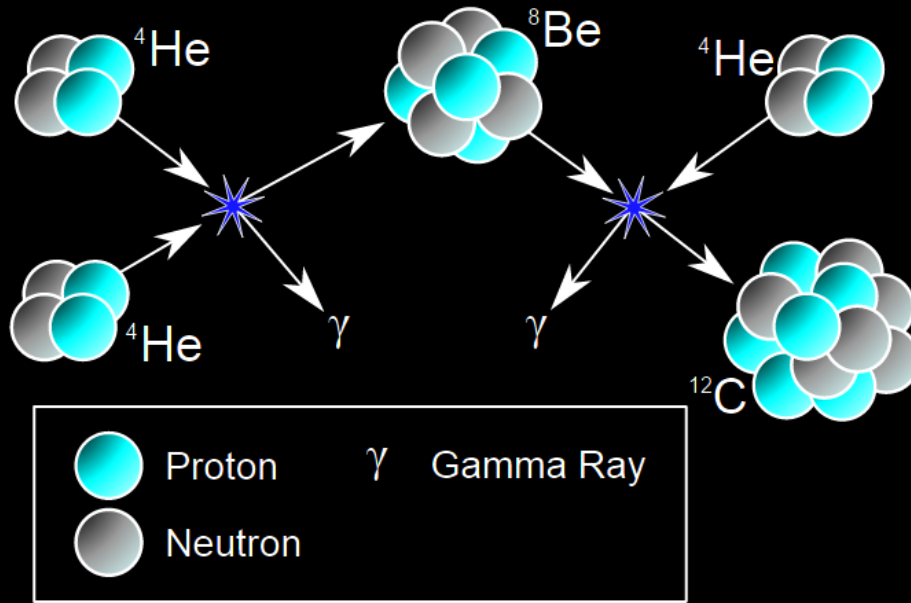
Die Eddington-Grenze legt den größten Energiefluß fest, welcher durch eine hydrostatische Gas-Schichtung mittels Strahlung hindurch transportiert werden kann, bevor der Strahlungsdruck den hydrostatischen Druck überwindet.

Was passiert, wenn in der Wasserstoff-brennenden Zone eines Sterns langsam der Wasserstoff knapp wird?



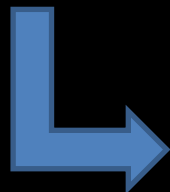
Reicht die Energie, die in der wasserstoffbrennenden Schale um den Heliumkern erzeugt wird, nicht mehr aus, um das hydrostatische Gleichgewicht des Sterns aufrecht zu erhalten, dann beginnt der Heliumkern im freien Fall zu kontrahieren → Temperatur erhöht sich bis auf einen Wert > 100 Millionen K → „Heliumbrennen“ setzt ein und stabilisiert den Sternkern bei gleichzeitiger Expansion seiner Hülle: Roter Riese

Das Helium-Brennen oder der 3-Alpha-Prozeß



Drei Alpha-Teilchen müssen innerhalb von $6,7 \cdot 10^{-17}$ s simultan zusammenstoßen, weil ansonsten der Be-Kern sofort wieder in zwei Alpha-Teilchen zerfällt.

→ **Resonanzreaktion** mit einer Resonanztemperatur von $1,2 \cdot 10^8$ K ermöglicht die Folgereaktion zu Kohlenstoff



Folgereaktion



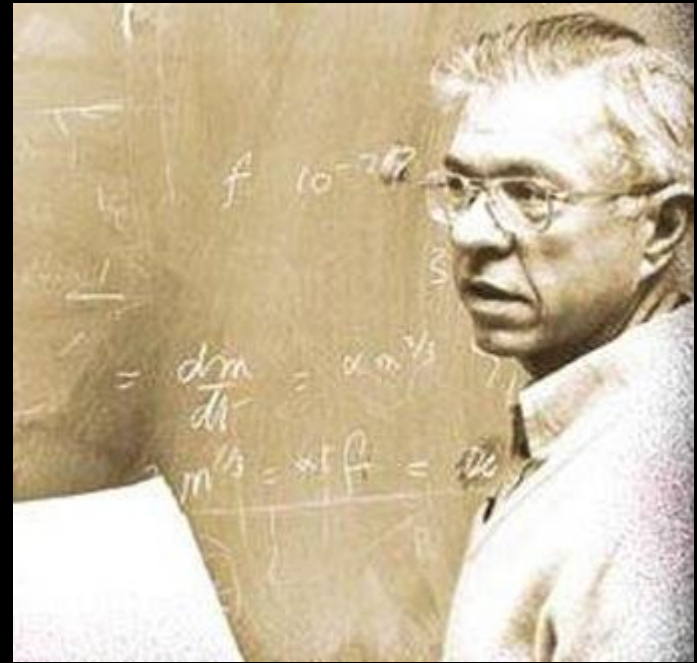
Der Kohlenstoffkern ist energetisch angeregt, und zwar mit einer Resonanzenergie von 7,656 MeV. Sie verhindert, daß der Kern nicht wieder sofort in drei Alphateilchen zerfällt.

„Leben“ beruht auf Kohlenstoffchemie

- Voraussage des englischen Astrophysiker Sir Fred Hoyle: Es muss eine Resonanz im Kohlenstoffkern existieren, da sonst nicht genug Kohlenstoff für das Leben in Roten Riesen erzeugt werden kann
- Diese Resonanz wurde im Labor tatsächlich nachgewiesen
- Einziger Fall, in dem ausgehend von unserer eigenen Existenz, der Ausgang eines Labor-Experiments richtig vorhergesagt wurde



Anthropisches Prinzip



Die Lage der **Hoyle-Resonanz** hängt nur von den fundamentalen Wechselwirkungskonstanten ab. Die Frage, die sich hier stellt ist: *Wie sehr kann man die numerischen Werte dieser Naturkonstanten variieren, daß beim Tripel-Alpha-Prozeß immer noch genügend für das Leben notwendige Kohlenstoff und Sauerstoff erzeugt wird?*

Antwort: Eine Veränderung der Wechselwirkungskonstante für die Kernkraft um ein halbes Prozent oder die der elektrischen Kräfte um 4 Prozent würde die Kohlenstoffproduktion im Kosmos völlig stoppen

Das Cambridge-Treffen von 2001:

Vom 29. August bis 1. September 2001 trafen sich an der Cambridger Universität etwa 30 führende Kosmologen, Astrophysiker, Kern- und Teilchenphysiker um zu diskutieren, inwieweit unser Universum für Leben maßgeschneidert ist.

Zwei entscheidende Fragen standen zur Diskussion:

1. Inwieweit ist unser Universum für die Existenz von Leben maßgeschneidert?
2. Kann die besondere Abstimmung unseres Universums für Leben durch eine noch zu findende endgültige „Theorie für alles“ erklärt werden? Oder ist das alternative Modell richtig, daß unser Universum nur eines von unendlich vielen Universen ist, in welchen die physikalischen Gesetze Leben zulassen?

Fakt ist jedenfalls: Die Naturkonstanten unseres „Universums“ besitzen offensichtlich eine Feinabstimmung, die „Leben“ möglich macht.

Erklärungsversuche für die Feinabstimmung der Naturkonstanten:

Hypothese des Zufalls

"Das Universum ist eben so und braucht keine weitere Erklärung."

Hypothese der logischen Notwendigkeit

"Es muß ja so gewesen sein, sonst würden wir nicht existieren."

Hypothese der Maßarbeit

"Es existiert eine endgültige fundamentale Theorie (TOE), welche die Feinabstimmung erklären kann. Wir kennen diese heute nur noch nicht."

Multiversum-Theorie

„Es gibt unendlich viele unterschiedliche Universen. Wir leben in einem Universum, das lebensfreundlich ist, während viele andere Universen steril sind.“

Intelligentes Design

"Es gibt einen Schöpfer."

Das Anthropische Prinzip:

Schwache Form:

Weil es in in diesem Universum Beobachter gibt, muß das Universum Eigenschaften besitzen, die die Existenz dieser Beobachter zulassen.

Starke Form:

Das Universum muß in seinen Gesetzen und in seinem speziellen Aufbau so beschaffen sein, daß es irgendwann unweigerlich einen Beobachter hervorbringt.

Über die „Banalität“ dieser Aussagen hinaus kann man dieses Prinzip in Form einer umgekehrten Beweisführung als heuristisches Hilfsmittel für Erklärungen und sogar für Vorhersagen (Beispiel Hoyle-Resonanz) verwenden.

→ als philosophisches Statement hat das Anthropische Prinzip aber stark an Bedeutung verloren und wird nur noch selten für Argumentationen genutzt.