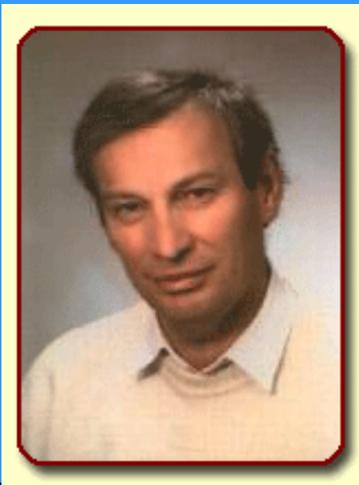


Elemententstehung

Inhalt:

1. Der Ursprung der Elemente
2. Natürliche Kernprozesse



Heinz Oberhummer ist Professor an der Technischen Universität Wien und Partner der E-Learning Firma Behacker & Partner GmbH. Er ist Autor und Koautor von über 160 wissenschaftlichen Publikationen zu Themen aus der Physik und zum E-Learning, von 4 Büchern und zahlreichen populärwissenschaftlichen Artikeln. Erhielt mehr als 330 wissenschaftliche Vorträge, Multimedia – Präsentationen und Posters, betreute über 70 Diplomarbeiten und 20 Dissertationen. Er koordinierte über 25 nationale und internationale Forschungsprojekte über Astrophysik und über E-Learning - Systeme.

Nukleosynthese: der Ursprung der Elemente

Für die Entstehung der Elemente (Nukleosynthese) gibt es drei verschiedene Szenarien:

- Die primordiale Nukleosynthese: die Entstehung der leichten Elemente Wasserstoff (H), Helium (He) und Lithium (Li) in ungefähr drei Minuten nach dem Urknall.
- Die interstellare Nukleosynthese: Die Entstehung der leichten Elemente Lithium (Li), Beryllium (Be) und Bor (B) im interstellaren Raum
- Die stellare Nukleosynthese: Die Entstehung von Elementen mittlerer Masse und der schweren Elemente von Kohlenstoff (C) bis zum Uran (U) in den Sternen



Die primordiale Nukleosynthese: ein Flaschenhals für das Deuteriums

Nachdem sich ungefähr eine Millisekunde nach dem Urknall aus den Quarks freie Protonen und Neutronen gebildet hatten, entstanden laufend Deuteriumkerne (1 Proton und 1 Neutron) durch den Neutronenfang der Protonen. Allerdings werden die soeben gebildeten Deuteriumkerne zumeist durch Photodesintegration wieder zerstört, da die Bindungsenergien noch sehr gering sind, solange die (Photonen-) Temperatur über 10^9 Kelvin liegt. Unter dieser Temperatur verschwindet die Photodesintegration und es können durch weitere Reaktionen mit dem Deuterium mehr schwere Kerne gebildet werden. Allerdings wurde auf diese Weise die weitere primordiale Nukleosynthese bis zirka 2 Sekunden nach dem Urknall verzögert, obwohl schon vorher freie Protonen und Neutronen in ausreichender Zahl existierten. Der Effekt wirkt wie ein Flaschenhals für die Bildung von Deuterium.

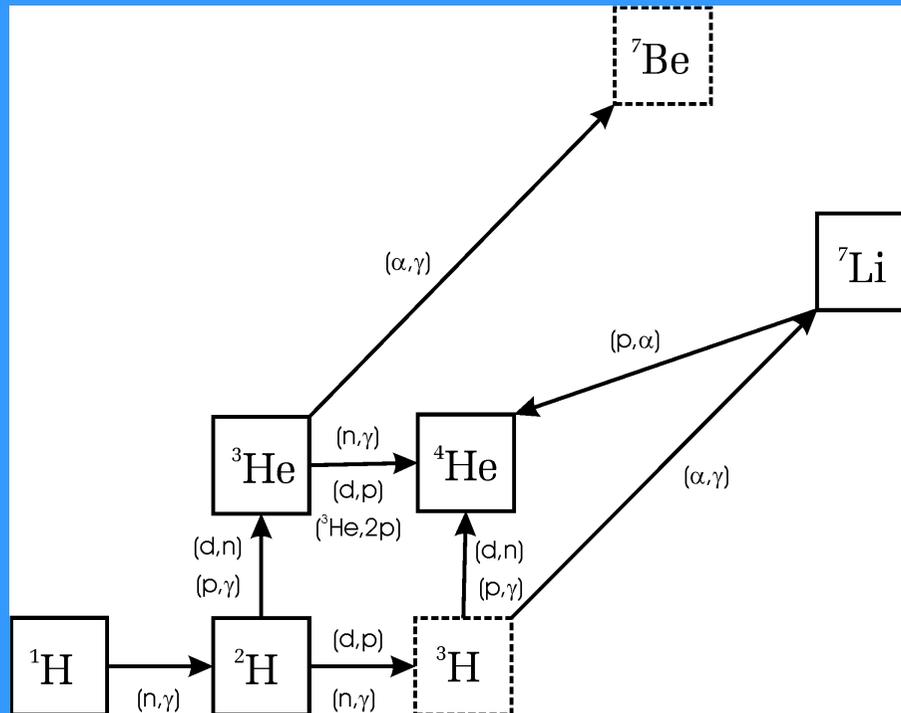


Die primordiale Nukleosynthese I I

Praktisch gibt es in den ersten zwei Sekunden und bei Temperaturen über 10^{10}K keine Nukleosynthese. Nachdem es tatsächlich zur Bildung von Deuterium kommt, entstehen ${}^3\text{H}$ und ${}^3\text{He}$, rasch gefolgt von ${}^4\text{He}$. Der Überfluss an Neutronen in dieser frühen Phase wird durch einen langsamen Beta-Zerfall hervorgerufen. Bei der Bildung von ${}^4\text{He}$ sinkt der Überschuss an Neutronen plötzlich, weil die meisten Neutronen in diese Teilchen eingebunden werden. Mit einer kleinen Verzögerung bilden sich Spuren von ${}^7\text{Li}$ und ${}^7\text{Be}$. Während des Temperaturabfalls frieren die Reaktionen mit geladenen Teilchen rasch ein und nach 15 bis 30 Minuten kommt die Nukleosynthese zum Stillstand. Die jetzt sehr seltenen Neutronen zerfallen in Protonen, ebenso wie bisweilen ${}^3\text{H}$ und das ${}^7\text{Be}$, das später zu ${}^7\text{Li}$ wird. Schließlich bleiben als die bei weitem häufigsten Elemente der Wasserstoff (Protonen) mit 75% und das Helium (${}^4\text{He}$) mit ca. 24% zurück. Das ergibt zusammen 99% des normalen Materials unseres Universums (der Baryonen). Alle anderen Elemente, die nicht in der primordialen Nukleosynthese, sondern hauptsächlich in den Sternen gebildet wurden, machen zusammen gerade einmal einen Anteil von 1% unseres Universum.



Die primordiale Nukleosynthese II



Der Reaktionsablauf der normalen Nukleosynthese beim Urknall. Instabile Kerne sind durch gepunktete Rahmen gekennzeichnet. Nachdem alle Reaktionen zum Stillstand gekommen sind, zerfällt das instabile ^7Be in ^7Li und ^3H in ^3He .

Interstellare Nukleosynthese

Die leichten und unbeständigen Elemente Lithium, Beryllium, und Bor (LiBeB) werden nicht vor allem in der primordialen oder in der interstellaren Nukleosynthese erzeugt. Die großen Mengen an LiBeB-Kernen entstammen mit größter Wahrscheinlichkeit aus dem Zusammenstoß von Wasserstoff und von Heliumkernen aus Galaktischen Kosmischen Strahlen (GCRs) mit Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoffkernen (CNO – Kernen) aus interstellaren Wolken und deren darauf folgender Spaltung. Die hochenergetischen GCRs, die wahrscheinlich aus Super Novae stammen, bestehen hauptsächlich aus sehr schnellen freien Wasserstoff- und Heliumkernen und zu einem geringeren Anteil aus CNO- Kernen.

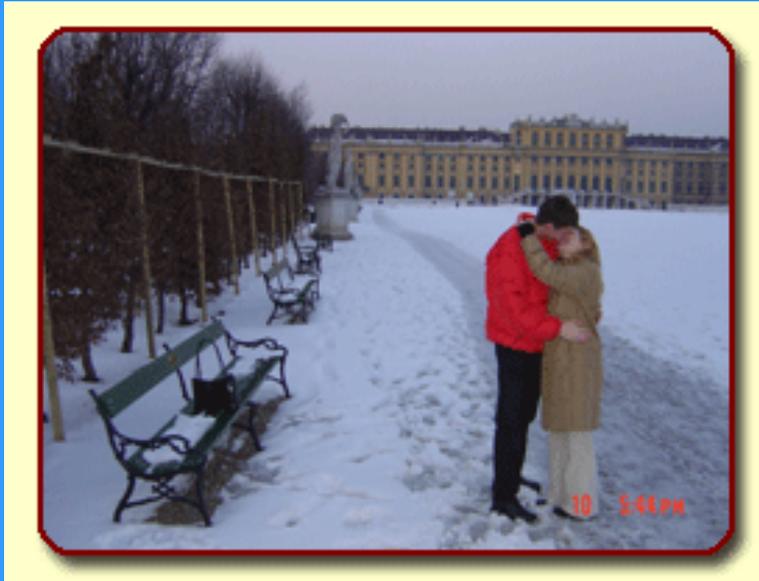


Warum die Sterne für uns so wichtig sind

- Viele Leute wundern sich, warum die Sterne für uns so wichtig sind. Die Antwort ist, dass es ohne die Sterne in unserem Universum kein Leben gäbe, uns selbst eingeschlossen. Das hat freilich nichts mit irgend welcher pseudowissenschaftlicher Astrologie zu tun. Es gibt keinen wissenschaftliche Hinweis dafür, dass die Sterne einen wie auch immer gearteten astrologischen Einfluss auf unser Leben hätten.
- Warum also, sind sie dann so lebensnotwendig für uns? Erstens, produzieren die Sterne durch das nukleare Brennen die notwendige Energie für das Leben. In unserem Fall erwärmt die Sonnenenergie unseren Planeten Erde. Stell dir vor, es würde die Sonne und die Sterne nicht geben: Es wäre in alle Ewigkeit dunkel und die Temperaturen würden auf der Erde sehr nahe bei -273°C liegen. Unter solchen Bedingungen kann es kein Leben geben.



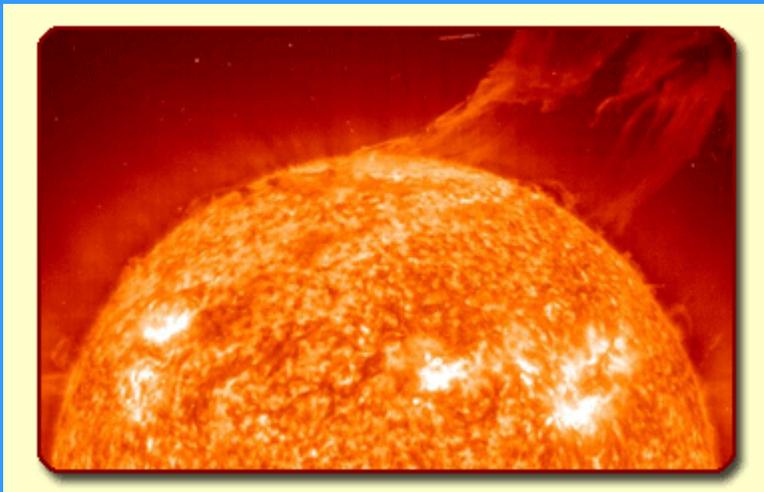
Die Elemente des Lebens entstehen in den Sternen



Die für das Leben wichtigsten Elemente entstehen in den Sternen. Auf dem Kohlenstoff sind die wichtigsten Moleküle für unseren Körper aufgebaut, der Sauerstoff ist ein Teil des lebensnotwendigen Wassers, das Kalzium in unseren Knochen, das Eisen in unserem Blut, alle diese für uns unentbehrlichen Elemente sind in den Sternen entstanden.

Wenn du zu deiner oder deinem Liebsten sagst: "Du bist mein Stern!" dann ist das ganz richtig, da alle für unseren Körper notwendigen Elemente aus einem Material zusammengesetzt sind, das in den Sternen entstanden ist. Wir sind alle Kinder der Sterne Ohne diese würden wir schlicht und einfach nicht hier sein.
[Quelle: Behacker & Partner]

Das Wasserstoffbrennen: die normale Art der Verbrennung in den Sternen



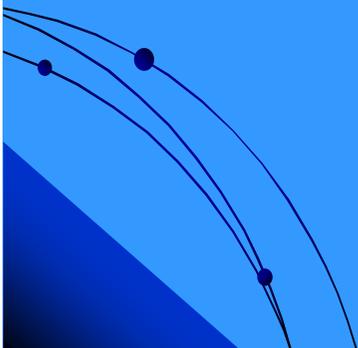
Unsere Sonne ist ein sehr aktiver Ort und keineswegs so ruhig, wie man denkt. Das Bild zeigt, bei ultraviolettem Licht gesehen, einen gigantischen Ausbruch an Energie. [Quelle: NASA]

Die meiste Zeit ihres Lebens brennen die Sterne in Form des so genannten Wasserstoffbrennens. Dabei werden tief in ihrem Inneren Wasserstoffkerne durch eine Reihe von Kernreaktionen in Heliumkerne umgewandelt. Sterne in dieser Phase werden Hauptreihensterne genannt, die bereits im vorigen Kapitel besprochen wurden. Auch unserer Sonne verbrennt Wasserstoff zu Helium und produziert dabei so viel Energie, dass sie ungefähr 10 Billionen Jahre scheinen kann. Zur Zeit hat unsere Sonne zirka die Hälfte ihres Wasserstoffvorrates in ihrem Innern verbraucht und ist ungefähr 4,5 Billionen Jahre alt. Das bedeutet, dass sie fast die Hälfte ihrer Lebenszeit erreicht hat.

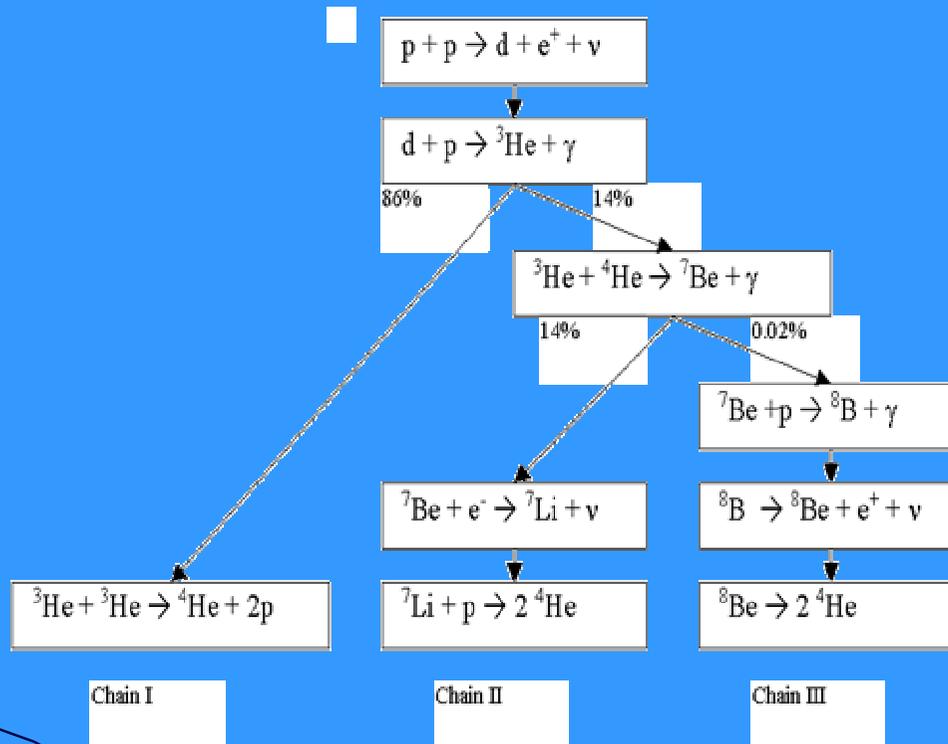
Wasserstoffbrennen: die pp-Kette und der CNO-Zyklus

Beim Wasserstoffbrennen gibt es zwei verschiedene Abfolgen von Kernreaktionen. Die erste ist die so genannte pp-Kette und die zweite der so genannte CNO -Zyklus.

In unserer Sonne werden ungefähr 98.5% der Energie durch die pp-Kette und nur 1.5% durch den CNO-Zyklus erzeugt. Für Sterne mit weniger als der doppelten Masse der Sonne ist die pp-Kette der dominierende Prozess beim Wasserstoffbrennen, bei Sternen mit mehr als der doppelten Sonnenmasse hingegen der CNO-Zyklus.

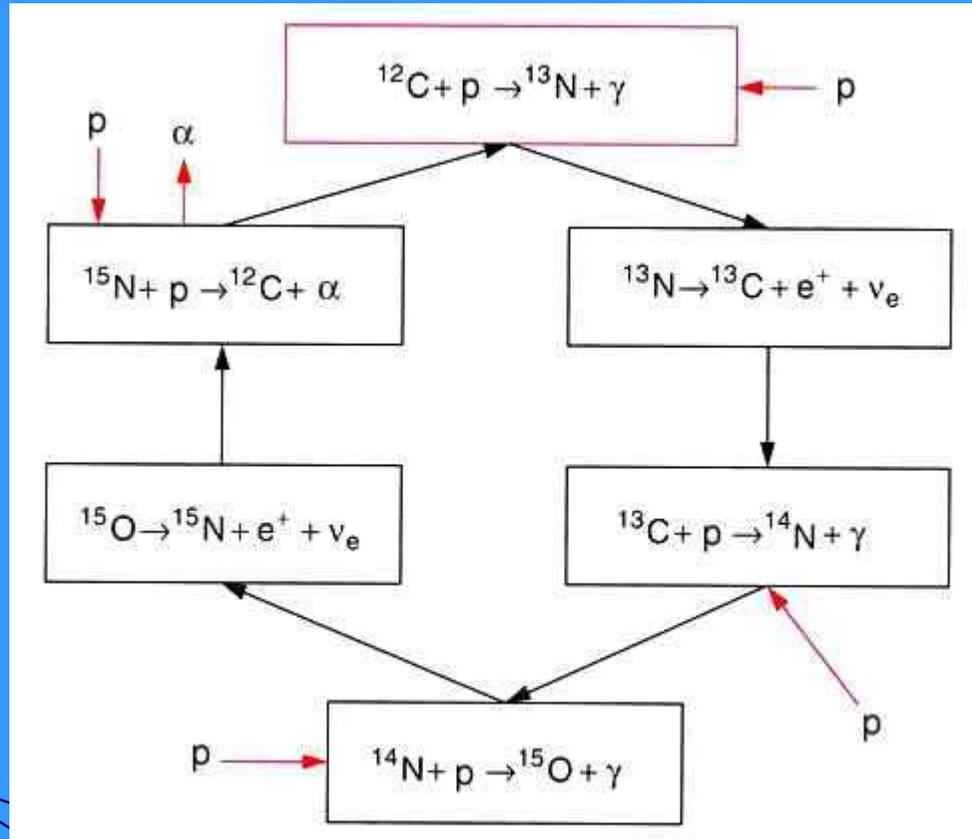


Die pp-Kette



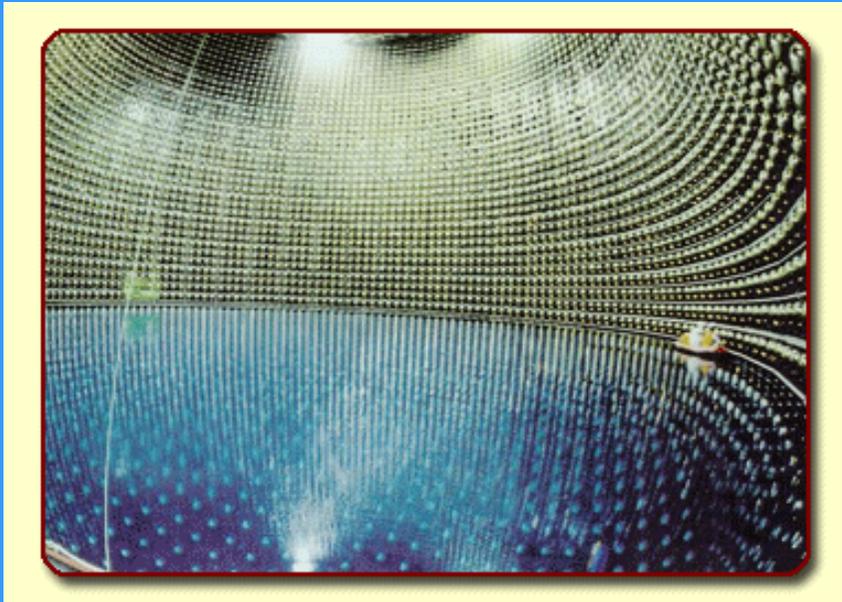
Die pp-Kette geht in drei verschiedenen Abfolgen nuklearer Reaktionen vor sich. In unserer Sonne ist die erste Kette mit 86% der Energieproduktion vorherrschend (die ppI-Kette, links), während die zweite ppII-Kette (Mitte) nur mit 14% und die dritte Kette (ppIII-Kette, rechts) gar nur mit 0,02% an der Energieproduktion beteiligt sind. Der nukleare Brennstoff, der in den pp-Ketten verbrannt wird, sind Wasserstoffkerne, also Protonen, wie durch das "p" in der Graphik angezeigt wird. Die "Asche", die in den pp-Ketten produziert wird, besteht aus Heliumkernen, also α -Teilchen (in der Graphik mit „a“ bezeichnet).

Der CNO-Zyklus



Der CNO-Zyklus entwickelt sich ebenfalls in einer Folge von Kernreaktionen, wobei wiederum als Brennstoff Protonen (p) verbrannt werden. (In der Graphik durch die roten, nach innen weisenden Pfeile angezeigt.) Auch hier besteht die entstehende "Asche" aus Heliumkernen, also α-Teilchen. (In der Graphik durch die roten, nach außen weisenden Pfeile angezeigt.) Die Elemente C, N und O wirken nur als Katalysatoren.

Solar Neutrinos: Wie kann man in das Innere der Sonne schauen?



Die Wand des Wassertanks des Super-Kamiokande Neutrino Detektors in Japan ist mit Tausenden von Photonen-Detektoren bestückt, jeder davon von der Größe eines Wasserballs. Gelegentlich tritt ein von der Sonne kommendes Neutrino in Wechselwirkung mit einem Wassermolekül und erzeugt dabei Photonen, die von einem oder mehreren dieser Detektoren registriert werden. [Quelle: Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo]

Bei den Kernprozessen, die die Sonnenenergie erzeugen und tief im Inneren der Sonne stattfinden, entstehen auch Neutrinos. Neutrinos sind ganz besondere Elementarteilchen, die eine Menge an Energie transportieren können, aber kaum mit normaler Materie wechselwirken. Deshalb ist für Neutrinos fast alles so transparent wie Glasfenster für Licht. So können sie auch nahezu ungehindert durch die Oberfläche der Sonne hindurch und treffen nach ca. 8 Minuten auf der Erde ein.

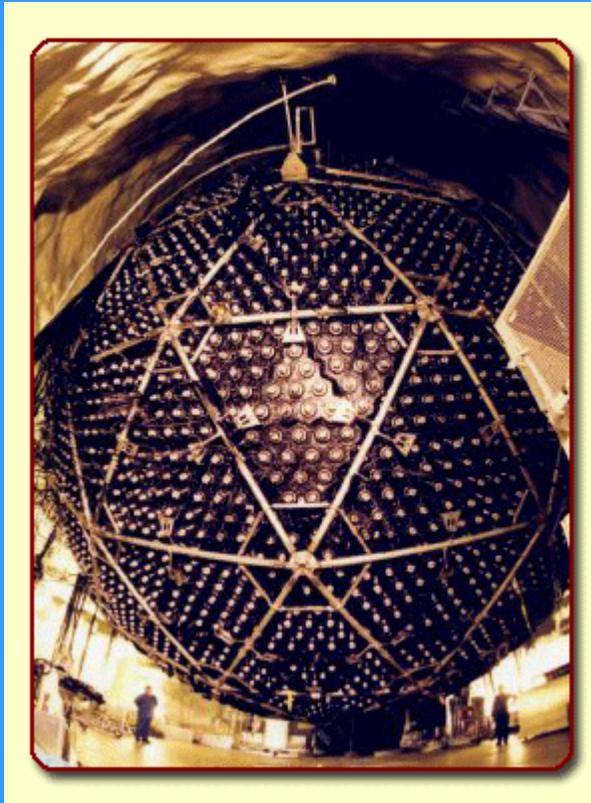
Das Solarneutrino­problem

Viele Jahre lang haben die Wissenschaftler gedacht, dass mit unserem Modell von der Sonne etwas nicht stimmen könne, weil nur ungefähr ein Drittel bis zur Hälfte der berechneten Neutrinos auch wirklich von den Detektoren auf der Erde registriert werden konnte. Diese Diskrepanz nannte man das Solarneutrino­problem.

Um die Lösung des Problems verstehen zu können, muss man wissen, dass es drei verschiedene Arten von Neutrinos gibt: die Elektronen-Neutrinos, die Muonen- und die Tau-Neutrinos. Die Kernreaktionen im Zentrum der Sonne erzeugen nur Elektronen-Neutrinos. Wenn man allerdings annimmt, dass sich die Elektronen-Neutrinos auf ihrem Weg vom Zentrum der Sonne zur Erde irgendwie in Muonen- oder Tau-Neutrinos verwandeln können, gäbe das eine Erklärung für die fehlenden Neutrinos. Bis 2002 konnten man mit den verfügbaren Detektoren auf der Erde nur Elektronen-Neutrinos nachweisen und bis heute ist die Registrierung von Muonen-Neutrinos mit den seit 1960 in Verwendung stehenden Detektoren nicht möglich.



Das Solarneutrino­problem: die Lösung



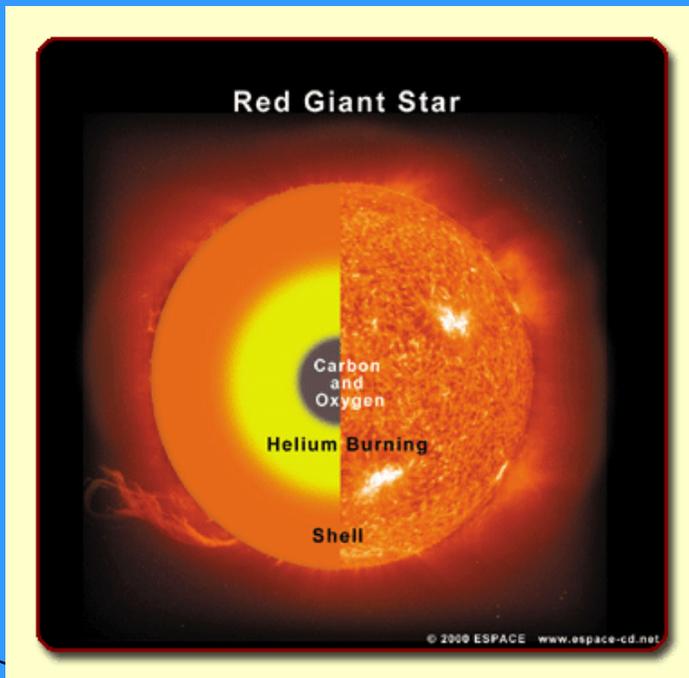
Allerdings ist es 2002 ist es gelungen mit einem neuen Detektor, dem Sudbury Neutrino Observatory (SNO) neben den Elektronen-Neutrinos auch Muonen-Neutrinos zu registrieren.

Es konnte dabei auch nachgewiesen werden, dass Neutrinos ihren Typ verändern können. So wurde dadurch auch das Solarneutrino­problem gelöst, weil die Summe der registrierten Elektronen - Neutrinos plus der Anzahl der registrierten Muonen-Neutrinos genau mit den, mit Hilfe des Sonnenmodells berechneten Werten übereinstimmte.

Das Foto zeigt das große, mit schwerem Wasser gefüllte Gefäß in den unterirdischen Laboratorien des SNO (Sudbury Neutrino Observatory) in Kanada. Das Experiment ermöglichte es, Elektronen- und auch Muonen-Neutrinos zu registrieren und so das Solarneutrino­problem zu lösen. [Quelle: Sudbury Neutrino Observatory]

Heliumbrennen: die Entstehung der Elemente des Lebens

Gegen Ende des Lebens eines Sterns erschöpft sich der Vorrat an Wasserstoff in seinem Inneren. Wenn dann kein Wasserstoff mehr als Brennstoff vorhanden ist, endet das Wasserstoffbrennen. Obwohl sich die äußeren Bereiche des Sterns



Kohlenstoff und Sauerstoff werden beim Heliumbrennen im Zentrum der Roten Riesen produziert.

[Quelle: Behacker & Partner]

ausdehnen und er ein Roter Riese wird, zieht sich sein Inneres zusammen. Schließlich wird die Dichte und die Temperatur im Inneren des Sterns so hoch, dass sich die Heliumkerne vereinigen und eine neue Phase der Verbrennung einsetzt, das Heliumbrennen.

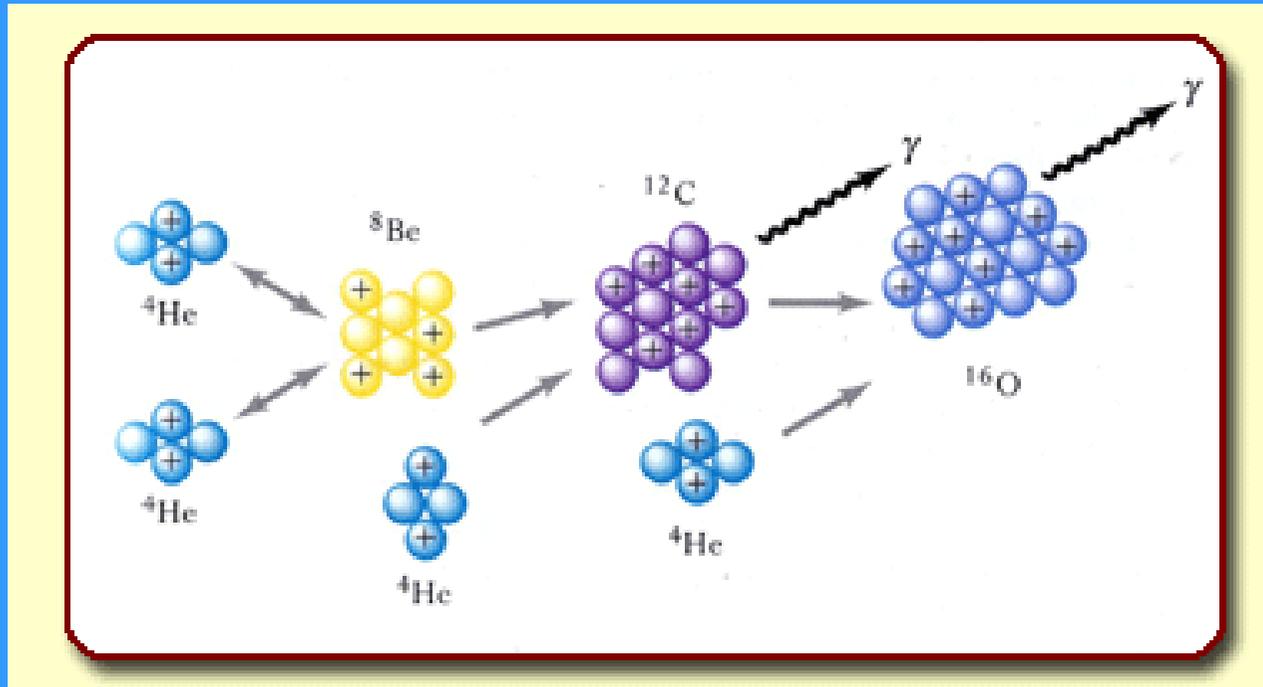
Beim Heliumbrennen entstehen bei den Kernprozessen die zwei Elemente, die für das Leben am wichtigsten sind: der Kohlenstoff und der Sauerstoff. Kohlenstoff ist für das Leben so wichtig, weil er die sehr komplexen, lebenswichtigen Moleküle bilden kann, wie die DNA und die Proteine. Dasselbe gilt auch für den Sauerstoff, denn zum Leben sind Wassermoleküle notwendig, und die enthalten Sauerstoff (H_2O). Man kann das leicht feststellen, denn überall dort, wo wenig Wasser vorhanden ist, gibt es auch kaum Leben, wie in den Wüsten oder am Mars.

Wie der Kohlenstoff und der Sauerstoff entstehen

Kohlenstoff entsteht beim Heliumbrennen durch einen einmaligen Kernprozess, der so genannten Tripel-Alpha-Reaktion. Das ist ein Prozess in zwei Schritten, bei dem zuerst zwei Heliumkerne (α -Teilchen) zu Beryllium ${}^8\text{Be}$ fusionieren. Im zweiten Schritt wird ein weiteres α -Teilchen vom Beryllium ${}^8\text{Be}$ eingefangen, wodurch der Kohlestoffkern ${}^{12}\text{C}$ entsteht. Allerdings ist die Bindung zwischen den α -Teilchen, die das ${}^8\text{Be}$ bilden, extrem schwach, weswegen sie rasch wieder auseinander fallen. Der Einfang des dritten α -Teilchens durch das ${}^8\text{Be}$ ist überhaupt nur deshalb möglich, weil der Einfang durch die so genannte ${}^{12}\text{C}$ - Resonanz unterstützt wird, die den Wirkungsquerschnitt beim Einfang des dritten α -Teilchens enorm erhöht.



Die Tripel-Alpha Reaktion



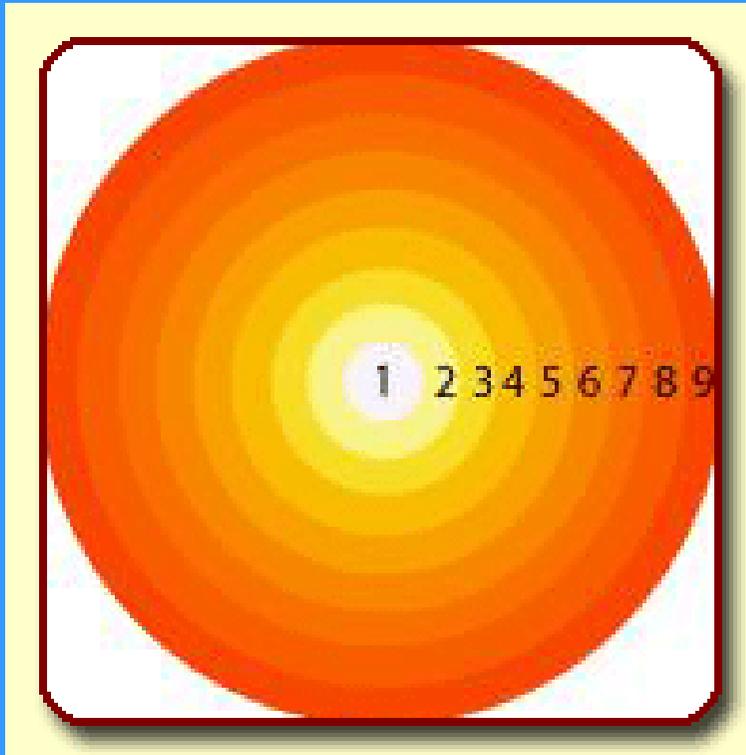
Die Tripel-Alpha Reaktion ist ein nuklearer Prozess in zwei Schritten. Im erste Schritt bilden zwei Alpha-Teilchen (${}^4\text{He}$ -Kerne) einen Berylliumkern ${}^8\text{Be}$. Der Kern hat allerdings eine sehr kurze Lebenszeit von nur ungefähr 10^{-16} Sekunden (0.000 000 000 000 000 1 Sekunden), bevor er wieder in zwei Alpha-Teilchen zerfällt. In dieser kurzen Zeit muss ein drittes Alpha-Teilchen vom ${}^8\text{Be}$ -Kern eingefangen werden, um einen ${}^{12}\text{C}$ -Kern bilden zu können. [Quelle: Behacker & Partner]

Fortgeschrittenes Brennen

Nachdem das Helium im Zentrum der Sterne verbraucht ist, zieht sich ihr Inneres noch weiter zusammen, wobei die Temperatur und die Dichte so stark zunehmen, dass der Kohlenstoff selbst zu brennen beginnt. Dieser Mechanismus des Zusammenziehens und der Entzündung eines anderen Brennstoffs, sobald ein Brennstoff im Inneren verbraucht ist, wiederholt sich und führt zu immer neuen Verbrennungsphasen, wobei die Asche des vorangegangenen Prozesses als neuer Brennstoff dient. Diese fortgeschrittenen Verbrennungsprozess erzeugen immer mehr schwere Elemente: Kohlenstoff, Sauerstoff, Neon und Silikon. Silikonbrennen, bei dem vor allem Eisen erzeugt wird, ist die letzte Brennphase eines Sterns. Danach kann das nukleare Brennen keine Energie mehr erzeugen, weil die Fusion von Eisenkernen keine Energie freisetzt.



Schalenbrennen



Ab der Phase des Heliumbrennens wird das nukleare Brennen im Zentrum der Sterne von dem so genannten Schalenbrennen begleitet. Die Prozesse des Schalenbrennens sind den vorhergegangenen zentralen Brennphasen sehr ähnlich und verlaufen parallel zu den fortgeschrittenen inneren Brennphasen um das Zentrum herum in Form von Schalen, wo die Temperaturen und die Dichte nicht so hoch sind, aber wo leichter nuklearer Brennstoff noch zur Verfügung steht.

Schalenbrennen in Sternen:

- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1 ... Eisenkern | 5 ... Kohlenstoffbrennen |
| 2 ... Silikonbrennen | 6 ... Heliumbrennen |
| 3 ... Sauerstoffbrennen | 7 ... Wasserstoffbrennen |
| 4 ... Neonbrennen | |

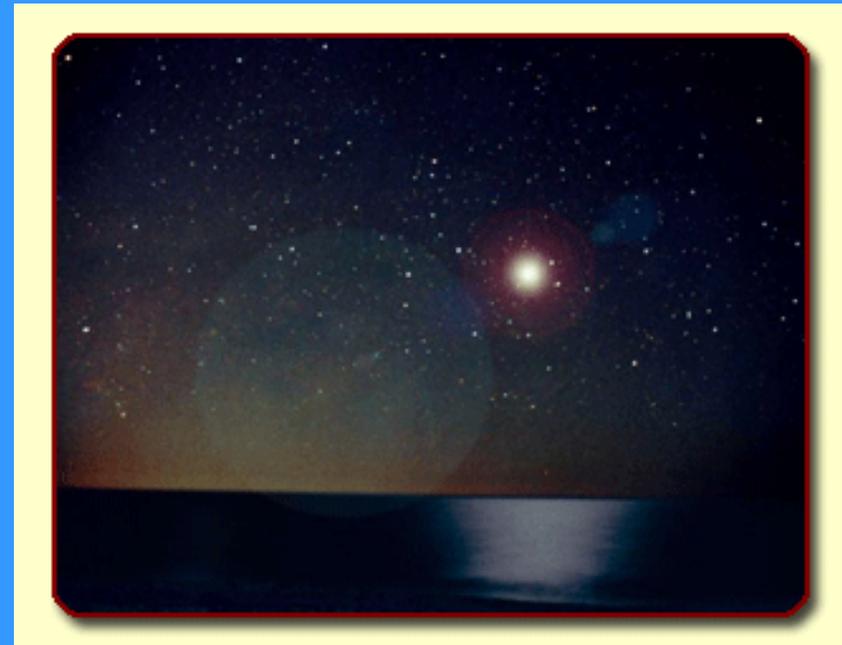
[Quelle: Behacker & Partner]

Der Tod der Sterne: Die erzeugten Elemente werden im Weltraum verteilt

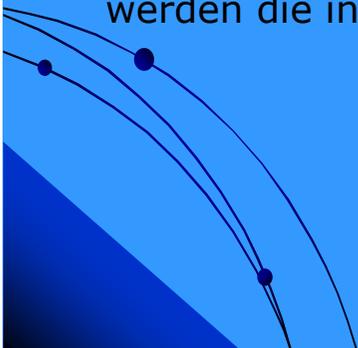
Für Sterne mit weniger als 8 Sonnenmassen kommt nur das Wasserstoff- und das Heliumbrennen in Frage, denn das Zentrum dieser Sterne erreicht niemals die nötige Temperatur und Dichte, um andere Brennphasen zu entzünden. Nach dem Heliumbrennen werden die äußeren Schichten der Sterne von den starken Winden weg geblasen. Es entstehen die planetarischen Nebel und die Weißen Zwerge. In Sternen, die mehr als das 8-fache der Sonnenmasse haben, laufen alle Brennphasen bis zum Silikonbrennen ab. Dann kommt das nukleare Brennen zum Stillstand und der Stern explodiert in einer Super Nova vom Typ II und hinterlässt einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, wie schon im letzten Kapitel besprochen. Die in den Sternen neu entstandenen Elemente werden sowohl durch die starken Winde als auch durch die Explosionen als Gas – und Staubwolken im Weltraum verteilt. So sind die Sterne so etwas wie Fabriken, die Elemente erzeugen und die Staub- und Gaswolken im All immer mehr mit den von ihnen produzierten Elementen anreichern.



Planetarische Nebel und Super Novae Typ

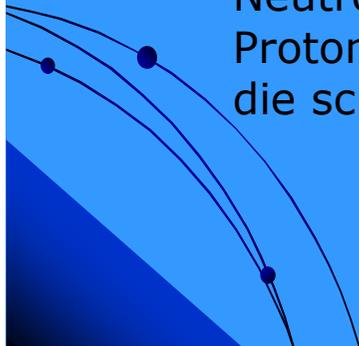


Durch planetarische Nebel (links) und durch Super Novae von Typ II (Fotomontage rechts) werden die in den Sternen erzeugten Elemente im all verteilt. [Quelle: NASA]



Neutronfang und Beta-Zerfall

Die Kernfusion in den Sternen endet mit dem Silikonbrennen und hinterlässt überwiegend Eisen. Wie aber wurden schwere Elemente wie Gold und Uran erzeugt? Das geschah auch in den Sternen, aber nicht in den Reaktionen, die die meiste Energie erzeugen. Die Schwierigkeit liegt darin, dass zwei Objekte, die negativ bzw. positiv geladen sind, wie die Atomkerne, einander abstoßen. Man braucht daher immer höhere Temperaturen, um die elektrische Abstoßung der schweren Elemente zu überwinden. Bei den Temperaturen, die in den Sternen erreicht werden, kann es nur zu wenigen solcher Reaktionen kommen, wenn überhaupt. Das Problem kann nur dann gelöst werden, wenn man mit neutralen Teilchen arbeitet, die keine elektrische Ladung tragen und in der Lage sind, in den Kern einzudringen ohne die elektrische Abstoßung überwinden zu müssen. Neutronen sind ein Beispiel für solche neutrale Teilchen. Durch den Einfang von Neutronen werden immer mehr Kerne, die sehr viele Neutronen haben, erzeugt. Schließlich sind diese Kerne so mit Neutronen überladen, dass sich ein Neutron im Kern in ein Proton umwandelt (β -Zerfall). Da die Anzahl der Protonen das Element bestimmt, entstehen auf diese Weise neue Elemente, die schwerer sind als Eisen und mehr Protonen und Neutronen enthalten.



Der s- und der r-Prozess: Wie Gold und Uran entstanden

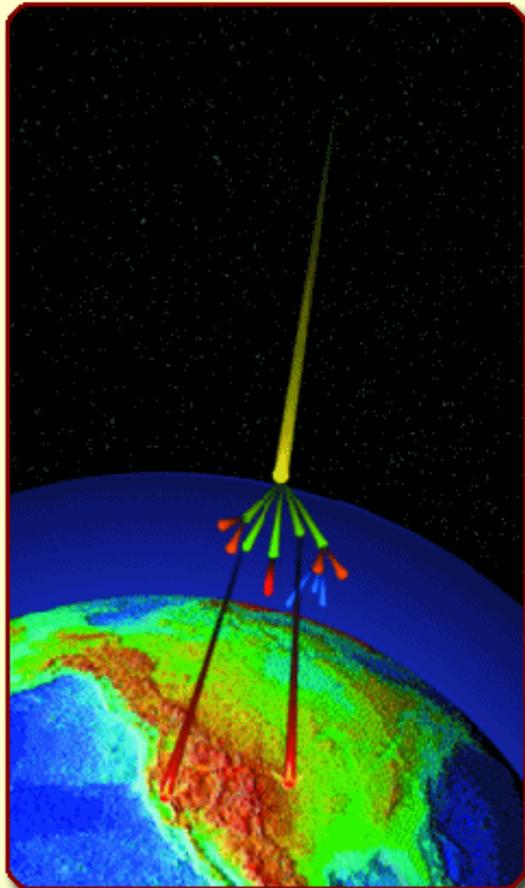
Wo aber finden diese Prozesse genau statt, und woher komme die dazu notwendigen Neutronen? Man unterscheidet zwei Fälle:

Der langsame oder s-Prozess: Dieser Prozess findet während des Heliumbrennens in den Roten Riesen statt. Neutronen werden bei bestimmten Kernreaktionen freigesetzt. Dieser Prozess wird langsamer oder s-Prozess genannt, weil er relativ wenige Neutronen erzeugt und es Millionen von Jahren dauert, bis sich eine bemerkenswerte Menge an schweren Elementen bilden kann. Auf diese Weise entsteht zum Beispiel Zirkon, der als Schmuckstein oder als Katalysator verwendet wird.

Der schnelle oder der r-Prozess: Dieser Prozess findet in der Nähe der Zentren von Super Novae II statt. In diesem Fall werden die Neutronen durch das Verschmelzen von Protonen und Elektronen erzeugt (Elektronenfang durch Protonen.) Er wird schneller oder r-Prozess genannt, da auf diese Weise eine große Anzahl an Neutronen gebildet wird und es nur wenige Sekunden braucht, bis eine nennenswerte Menge an schweren Elementen gebildet wurde. So wurde z.B. Das gesamte Uran in unseren Felsen gebildet, und auch das Gold, aus dem der Ring an unserem Finger besteht.



Kosmische Strahlen: Energieteilchen aus dem All



Ein weiteres interessantes Phänomen, das in der Natur vorkommt, sind die kosmischen Strahlen, die aus den fernen Regionen des Alls zu uns kommen. Sie waren die ersten Hochenergie-Teilchen, die man studieren konnte. Einige wenige kosmische Teilchen gehen jede Sekunde auch durch deinen Körper, ganz egal, wo du bist. Es ist schwierig den genauen Ursprung der kosmischen Strahlen festzustellen, denn sie kommen aus allen Richtungen. Viele stammen von der Sonne, andere wurden wahrscheinlich bei einer Super Nova, einer der enormen Explosionen der sterbenden Sterne, ins All hinausgeschleudert. Die meisten kosmischen Strahlen, die auf die obere Atmosphäre auftreffen sind sehr schnelle, hochenergetische Protonen.

Wenn die kosmischen Strahlen auf die Erdatmosphäre auftreffen, stoßen sie mit den Atomen in der Luft zusammen. Dabei erzeugen sie zahlreiche neue Teilchen, was dazu führt, dass ein Teilchenschauer auf die Erdoberfläche trifft. [Quelle: Stanford Linear Accelerator Center]

