Technische Universität Berlin
Zentrum für Astronomie und Astrophysik

Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin
Tel: (030) 314 23783, Fax: (030) 314 24885

http://www-astro.physik.tu-berlin.de/Aktuelles/index.html

Sternenstaub und kosmischer Materiekreislauf

Prolog

Auszug eines Interviews des Wissenschaftsjournalisten
Alexander Moszkowski mit dem Physiker Albert Einstein

(aus A. Moszkowski – Einstein: Einblicke in seine Gedankenwelt,
1922, F. Fontane & Co., Berlin)

A. Moszkowski: *„Gesetzt, es wäre erreichbar, alle Eigenschaften eines Sandkorns zu ergründen, hätte man damit das gesamte Universum erforscht?"*

Einstein erklärte, daß diese Frage mit einem *unbedingten Ja* beantwortet werden müsse.

A. Einstein: *„Denn, würde man wissenschaftlich das Geschehen in dem Sandkörnchen vollständig beherrschen, so wäre dies nur möglich auf Grund der Erkenntnis der exakten Gesetze des zeiträumlichen Geschehens. Diese Gesetze ... wären überhaupt die allgemeinsten Weltgesetze, aus denen sich der Inbegriff alles anderen Geschehens müßte deduzieren lassen."*

Sternenstaub und Kosmischer Materiekreislauf

Im heutigen Universum existiert die beobachtbare Materie hauptsächlich in zwei gegensätzlichen Zuständen: Als heißes, dichtes Plasma in den Sternen oder als kaltes, hochverdünntes Gemisch von Gas und Staub in der Interstellaren Materie (ISM). Sternmaterie besteht aus einer strukturlosen Ansammlung geladener Atome und Elementarteilchen (Plasma), wobei aus den (Ur-) Elementen Wasserstoff und Helium sämtliche höheren Elemente aufgebaut werden. Interstellare Materie dagegen bietet die Bedingungen für Strukturbildung und die Entwicklung einer komplexen Chemie.

Zwischen diesen beiden entgegengesetzten Zuständen befindet sich die Materie in einem beständigen Kreislauf, dem **Kosmischen Materiekreislauf** (Bild S. 3). Er ist die Grundlage jeder Evolution der Materie bis hin zu der Komplexität, wie wir sie kennen: Sämtliche Materie, aus der wir und unsere Umwelt bestehen, hat die Stationen dieses Kreislaufs bereits mehrfach durchlaufen.

Sterne entstehen aus interstellarer Materie und geben im Laufe ihrer Entwicklung (Pfeile: 1, 4, 6, 9) den überwiegenden Teil ihrer Masse wieder an die ISM zurück (Pfeile: 5, 7, 11). Ein entscheidender Motor in diesem Kreislauf ist der **Sternenstaub**, der sich in den äußeren Schichten der Sterne bildet und der – getrieben von deren Strahlung – den Materieabfluß der Sterne und damit die chemische Evolution der Materie in Gang hält. In der Milchstraße gibt es 100 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 Tonnen Staub.

Sternenstaub ist das Baumaterial für Planeten wie z.B. unsere Erde. Zum ersten mal in der Geschichte des Universums tritt mit dem Staub eine Oberfläche in Erscheinung: Sie ermöglicht komplexe Strukturbildung und die Existenz von flüssigem Wasser. Ohne diese Grundvoraussetzungen wären die Erde und unser Leben undenkbar (Pfeile: 2, 3). Bei der Bildung des Staubes, die aus dem Gas schrittweise über chemische Reaktionen erfolgt, durchläuft die Materie nacheinander Stufen wachsender Komplexität (Bild S. 4):

PLASMA → ATOME → MOLEKÜLE → CLUSTER → STAUBTEILCHEN

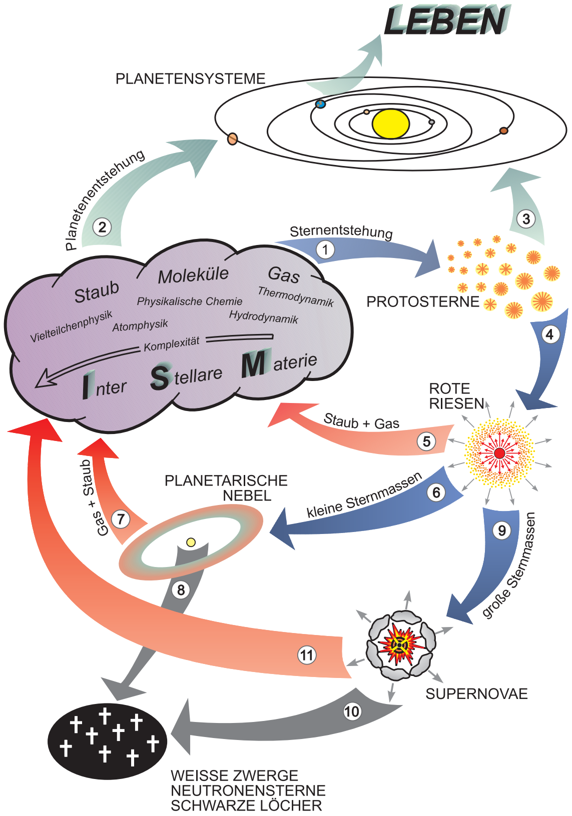
Je nach chemischer Zusammensetzung der äußeren Schichten eines staubbildenden Sternes entstehen grundlegend unterschiedliche Staubsorten: in kohlenstoffreichen Elementmischungen tragen hauptsächlich Kohlenstoff und Wasserstoff zur Staubbildung bei und es entsteht eine Art Ruß, in sauerstoffreichen Elementmischungen bilden sich im Gegensatz dazu die verschiedendsten Silikate, die einem äußerst feinen Sand ähnlich sind.

Sternenstaub kondensiert praktisch in allen Atmosphären oder Hüllen astronomischer Objekte, welche

1. kühl genug für einen Gas-Festkörperübergang sind, und zum anderen
2. noch warm und dicht genug sind, um hinreichend häufige chemische Reaktionen zu ermöglichen.

Diese Bedingungen sind besonders gut in den Hüllen kühler Roter Riesen- und Überriesensterne, bei langperiodischen Veränderlichen, aber auch bei den episodischen Verfinsterungen von R-Coronae-Borealis-Sternen, den inhomogenen Winden einiger heißer Wolf-Rayet Sterne sowie im Massenabstrom von Nova- und Supernova-Explosionen erfüllt.

Schematischer Materiekreislauf



Beschreibung der Stationen des Materiekreislaufs:

(1) Sternentstehung: Sterne entstehen in dichten Gas- und Staubwolken des Interstellaren Mediums. Durch gravitativen Kollaps von Fragmentwolken bilden sich Protosterne (früheste Phase der Sternentwicklung). Der Kollaps wird durch Zünden thermonuklearer Reaktionen des Wasserstoffs gestoppt. Es stellt sich ein stabiles Gleichgewicht zwischen Gravitation und thermischem Druck ein. Die Kernfusion im Sterninneren gleicht dabei den Energieverlust durch das Leuchten des Sterns aus.

(2), (3) Planetensystem, Entstehung von Leben: Sterne entstehen als Einzel- und Mehrfachsysteme. Die Ausbildung eines stabilen Planetensystems – damit auch die Entstehung von Leben – ist bei Einzelsternen wie unserer Sonne wahrscheinlicher als bei Doppelstern- und Mehrfachsystemen.

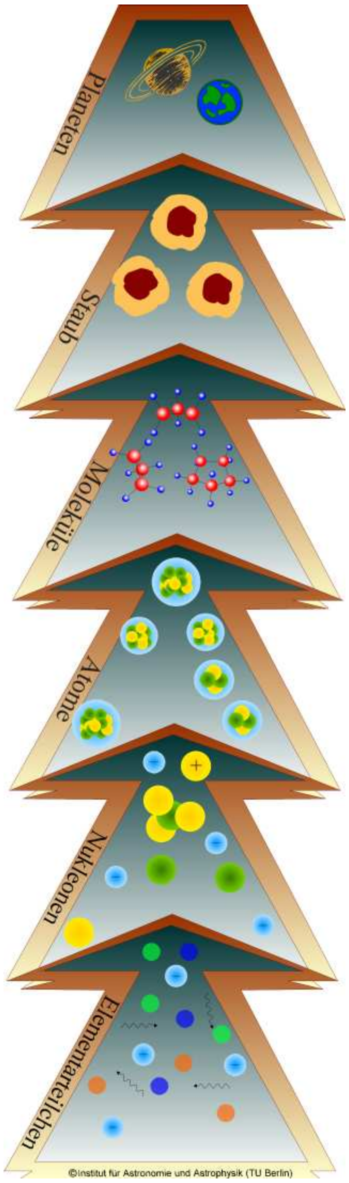
Voraussetzung für die Entstehung von Leben ist die Bildung von Planeten. Noch ungeklärt ist, ob Vorläufer von Eiweißmolekülen zur Entstehung von Leben direkt auf der Erde gebildet oder erst über Meteoriteneinschläge aus dem interstellaren Raum auf unseren Planeten übertragen wurden.

(4) Rote Riesensterne: Sterne wie die Sonne durchlaufen eine lange, ruhige Entwicklungsphase von mehreren Millionen Jahren, in denen sie Wasserstoff zu Helium fusionieren. Ist der Wasserstoffvorrat im Kern des Sterns verbraucht, expandieren die äußeren Bereiche und der Stern verwandelt sich in einen Roten Riesenstern, einem sehr ausgedehnten, leuchtkräftigen Objekt. Die Ausdehnung der Sonne wird in diesem Entwicklungsstadium dann weit über die Erdbahn hinaus reichen (Bild S. 7).

(5) Roter Riese – Gas und Staub: Durch die Ausdehnung der Hülle des Sterns kühlt diese stark aus und es bilden sich erste Moleküle und Festkörper. Als Sternwind werden Staub und Gas wieder an das interstellare Medium abgegeben.

(6) Planetarische Nebel: Aufgrund der Bildung großer Mengen an Staub und eines hohen Strahlungsdruckes wird die äußere Hülle der Roten Riesen abgestoßen und umgibt den Stern als Planetarischer Nebel. Das abgestoßene Gas wird durch die UV-Strahlung des Zentralgestirns ionisiert und zum Leuchten angeregt.

Wachsende Komplexität der Materie



(7) Planetarischer Nebel – Gas und Staub: Der Planetarische Nebel löst sich langsam auf und liefert dadurch einen großen Massenanteil des Sterns an die ISM zurück. Diese Materie nimmt wieder an den Prozessen des Materiezyklus teil.

(8) Planetarische Nebel – Weiße Zwerge: Massearme Objekte, wie etwa unsere Sonne, erreichen das Endstadium ihrer Entwicklung durch Abstoßen ihrer Hülle (vgl. (6)). Zurück bleibt ein Weißer Zwerg mit etwa der Hälfte einer Sonnenmasse und der ungefähren Größe der Erde. Diese lichtschwachen, nach und nach auskühlenden Objekte bestehen aus entarteter Materie mit einer Dichte von etwa einer Tonne pro cm^3. Sie sind für den Materiekreislauf verloren.

(9) Supernovae: In Sternen großer Masse (über acht Sonnenmassen) können durch Kernfusionsprozesse Elemente bis zum Eisen gebildet werden. Da Fusionsprozesse zu noch schweren Elementen keine Energie zur Stabilisierung des Sterns mehr liefern, implodiert der Stern, was zu einer gewaltigen, explosionsartigen Abstoßung der äußere Hülle führt.

(10) Supernovae – Neutronensterne, Schwarze Löcher: Nach Ausbruch einer Supernova bleibt als Zentralobjekt in Abhängigkeit von der Ausgangsmasse ein Neutronenstern bzw. ein Schwarzes Loch zurück. Neutronensterne bestehen aus dichtgepackten Neutronen mit einer Dichte, die 10^{10} mal der Dichte von Wasser entspricht. Objekte schwerer als Neutronensterne kollabieren zu Schwarzen Löchern, da es nach heutigen Erkenntnissen keine Kraft gibt, die der Eigengravitation dieser Objekte das Gleichgewicht halten kann. Auch diese Objekte scheiden aus dem Materiekreislauf aus.

(11) Supernovae – Gas und Staub: Während einer Supernovaexplosion können durch Neutroneneinfangreaktionen schwerere Elemente als Eisen (z.B. Gold) gebildet werden. Staub und Gas der Supernova-Überreste kehren wieder in das interstellare Medium zurück und reichern es mit den neugebildeten schweren Elementen an.

Literatur:

Meyers Handbuch Weltall, 1994, Meyers Lexikonverlag
Mensch · Nature · Technik: Vom Urknall zum Menschen, 1999, F.A. Brockhaus
Schöpfung ohne Ende, Sterne und Weltraum Special Nr. 2, 1997

Notizen:

Aktuelle Forschung

Die aktuelle Forschung des **Zentrum für Astronomie und Astrophysik** reicht von der **theoretischen Untersuchung** der Bildungsmechanismen interstellarer sowie zirkumstellarer Moleküle und deren Eigenschaften bis hin zur **numerischen Modellierung** staubbildender astrophysikalischer Objekte. Eine Schlüsselrolle spielen dabei Kondensationsprozesse von stellarem Gas zum Festkörper z.B. in den Hüllen von entwickelten Roten Riesensternen — **die Entstehung von Sternenstaub**.

Am Zentrum für Astronomie und Astrophysik stehen folgende Themenbereiche im Vordergrund der Forschung:

- **Staubbildungsprozesse**:

- Berechnung von Clustereigenschaften zur Klärung des Nukleationsphänomens (ab initio Theorie, Dichtefunktionaltheorie, semi–empirische Potentialmodelle)
- theoretische Beschreibung des Staubwachstums und der Verdampfungsprozesse

- **Astrochemie**:

- Berechnung und Analyse chemischer Ratennetzwerke zur Bestimmung der Häufigkeiten chemischer Verbindungen
- Entstehung Polyaromatischer Kohlenwasserstoffe (PAHs)
- Untersuchung von präbiotischen Molekülstrukturen im Hinblick auf die Entstehung von Leben (Biomoleküle)
- Kometeneinschlag (Shoemaker-Levy 9) auf Jupiter: Chemie in Stoßwellen

- **Sternwinde und Sternatmosphären**:

- numerische Modellierung hochgradig nichtlinearer, gekoppelter Systeme aus Hydrodynamik, Thermodynamik, Chemie, Staubbildung, Strahlungstransport (z.B. Pulsationsveränderliche, Braune Zwerge)
- Entwicklung von Objekten auf dem Asymptotischen Riesenast im Herzsprung–Russel Diagramm zum Planetarischen Nebel unter Einschluß staubgetriebener Sternwinde

- **Diagnostik**:

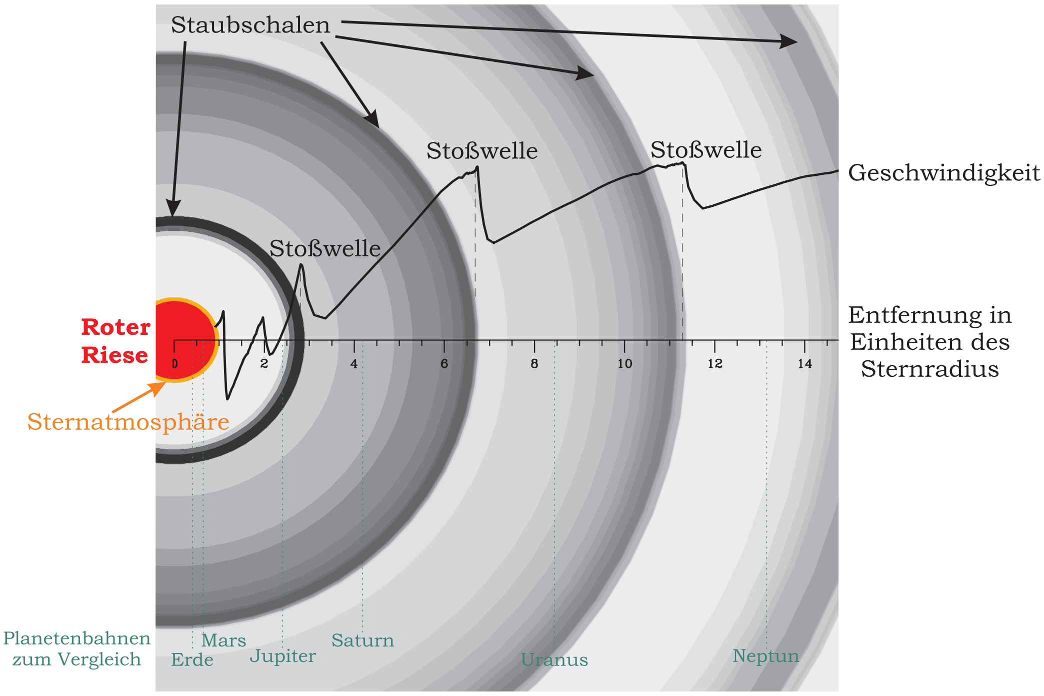
- Berechnung von Staub- und Gasopazitäten
- Strahlungstransportrechnungen zur Modellierung und Diagnostik (z.B. Linienprofile, Zweifrabdiagramme, Lichtkurven, Visibilitäten)

- **Spezielle Fragestellungen**:

- Untersuchung selbstorganisierter Strukturbildung durch strahlungsgesteuerte Phasenübergänge
- Staubbildung in turbulenten Medien

Numerisches Modell einer zirkumstellaren Staubhülle eines pulsierenden Roten Riesensterns (Film)

Rote Riesen sind kühle, sehr leuchtkräftige Sterne, die von einer ausgedehnten Staubhülle umgeben sein können. Bildet sich genügend Staub, wird der Stern für das menschliche Auge unsichtbar, da der Staub einen großen Anteil des sichtbaren Lichtes absorbiert und im Infraroten wieder abstrahlt. Die Bildung des Staubes bewirkt einen Massenabstrom (Sternwind), der Staub und Gas in das interstellare Medium transportiert.



Die Abbildung zeigt die Momentaufnahme der zirkumstellare Staubhülle eines pulsierenden Roten Riesensterns. Die radiale Ausdehnung ist in Einheiten des Sternradius angegeben. (Zum Vergleich sind die Abmessungen unseres Planetensystems dargestellt.) Neben der **Sternatmosphäre** des Roten Riesen ist die Hülle mit den **Stoßwellen** und den **Staubschalen** abgebildet. Die verschiedenen Graustufen spiegeln die Massendichte des gebildeten Staubes wider: „Dunkel“ bedeutet viel Staub, „hell“ bedeutet wenig Staub bei gleichem Volumen. Die durchgezogene Linie markiert die **Geschwindigkeit**, mit der die Staubhülle expandiert. Sie kann einen Maximalwert von bis zu 30 km/s (= 108.000 km/h) erreichen. (Die Modellparameter sind: $T_\star = 2600\,\mathrm{K}$, $L_\star = 10^4$ Sonnenleuchtkräfte, $M_\star = 1$ Sonnenmasse, C/O = 1.8, $\Delta u = 2\,\mathrm{km/s}$, $P = 650$ Tage, $R_0 = 3.25 \cdot 10^{13}\mathrm{cm}$.)

Der Film zeigt die Ergebnisse einer numerischen Simulation der zirkumstellaren Staubhülle eines pulsierenden Roten Riesensterns. Deutlich ist die Staubbildung und ihre Wirkung auf die zeitliche Entwicklung der Hülle zu sehen.

Derartige numerische Modelle führen zu folgenden interessanten Erkenntnissen:

- Staub und Sternwind bilden in Roten Riesensternen ein symbiotisches System; sie bedingen einander.
- Die Pulsation des Sterns zieht die Entstehung von Stoßwellen nach sich. Das Staub-Gas-Gemisch, aus dem die Hülle eines Roten Riesen besteht, bewegt sich daher nicht an allen Orten mit der gleicher Geschwindigkeit nach außen (gezackte Geschwindigkeitstruktur, Bild S. 7).
- Die Stoßwellen sind schlußendlich die Ursache für die Bildung der zwiebelähnlichen Staubschalenstruktur.
- Der Staub ist nicht gleichmäßig in der Hülle des Sterns verteilt. Die meisten Staubkörner befinden sich im Außenrand der Staubschale (in der Abb. die dunkelsten Schalenbereiche).
- Die Staubkörner in einer Staubschale haben verschiedene Größen.

Statistische Untersuchungen einer großen Anzahl solcher numerischer Modelle liefern Aussagen über die an das interstellare Medium zurückgeführte Staub- und Gas-Menge, die im weiteren an der Bildung von neuen Sternen und Planetensystemen teilnimmt.

Ein Größenvergleich mit den Abmessungen unseres Sonnensystems zeigt beispielsweise, daß Erd- und Mars-Bahn im Inneren des Roten Riesen liegen würden. Eine ähnliche Situation wird sich voraussichtlich für unser Planetensystem ergeben, wenn die Sonne in ca. fünf Milliarden Jahren in ihre späten Entwicklungsphasen eintritt.