

Sternentstehung

von Rainer Rolffs



Der Orion-Nebel, ein Sternentstehungsgebiet (Foto von www.ricksastro.com)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	“Setting The Stage”	2
2	Energie	2
2.1	Energieformen und -quellen	2
2.2	Energietransport	3
3	Das interstellare Medium	4
3.1	Aufheizen und Kühlen	4
3.2	Gas	5
3.3	Staub	5
3.4	Molekülwolken	5
4	Stabilität und Kollaps	6
4.1	Gleichgewicht	6
4.2	Kollaps	7
5	Scheibe und Planeten	8
5.1	Drehimpuls	8
5.2	Planetenentstehung	9
6	Sternentwicklung	10
6.1	... für eine Sonnenmasse	10
6.2	Kleinere Massen	12
6.3	Größere Massen	12

1 Einleitung

Sonne und Erde entstanden vor etwa 4,6 Milliarden Jahren - die Voraussetzung für unsere Existenz. Auch heute noch bilden sich Sterne (und Planeten), in der Milchstraße jedes Jahr ein paar. Insgesamt gibt es in unserer Galaxie fast 300 Milliarden Sterne, im gesamten beobachtbaren Universum ungefähr $7 \cdot 10^{22}$.

Um zu verstehen, wie es zur Bildung von Sternen und Planeten kommt, stellen wir, nach einer Einleitung, zunächst einige Betrachtungen über Umwandlung von Energie an: Temperatur, Strahlung, Gravitations- und Bindungsenergie. Dann schauen wir uns die Umgebung an, in der sie entstehen: Das interstellare Medium, und dort besonders die Molekülwolken. Anschließend verfolgen wir den Prozess des Kollapses einer Wolke, mit dem möglichen Resultat eines Planetensystems. Schließlich geht es um die weitere Entwicklung eines Sterns.

1.1 "Setting The Stage"

Seit dem Urknall vor etwa 14 Milliarden Jahren dehnt sich das Universum aus, momentan wird eine Länge von 1 Mpc (3,26 Millionen Lichtjahre oder $3 \cdot 10^{19}$ km) um ca. 70 km in der Sekunde größer. Dabei nimmt die Materiedichte mit der dritten Potenz der Länge ab (der Volumenvergrößerung), die Strahlungsdichte mit der vierten Potenz, da sich zusätzlich zum Ausdünnen der Photonen ihre Wellenlänge λ linear mit der Länge vergrößert (Rotverschiebung) und damit die Energie eines Photons $\frac{hc}{\lambda}$ abnimmt. Die Dichte der Dunklen Energie, die die Expansion beschleunigt, bleibt konstant und liegt momentan bei 70 % der Gesamtenergiedichte, die normale Materie bei etwa 3 % und der Rest ist hauptsächlich Dunkle Materie. Diese wechselwirkt nicht mit Strahlung und konnte daher, Quantenfluktuationen verstärkend, sich unter ihrer eigenen Gravitation verdichten. Die normale Materie war zunächst im thermodynamischen Gleichgewicht mit der Strahlung. Da dann das Produkt aus Temperatur und Wellenlänge konstant ist, nahm ihre Temperatur dementsprechend linear mit der Länge ab. Bei den hohen Temperaturen am Anfang fanden Kernreaktionen statt, als dessen Resultat ein Viertel der Masse zu Helium (2 Protonen, 2 Neutronen) und drei Viertel zu Wasserstoff (Proton) wurde, außerdem etwas Deuterium (1p,1n), Lithium (3p,4n) und ${}^3\text{He}$ (2p,1n). Mit weiter abnehmender Temperatur kombinierten die Elektronen und die Atomkerne zu neutralen Atomen, die Strahlung breitete sich fast ungehindert aus und hat eine Planckverteilung von damals 3000 und heute 2,7 Kelvin (Mikrowellen-Hintergrund).

Die Atome fielen nun in die Regionen mit erhöhter Dichte der Dunklen Materie. Dieses Gas hatte keine Metalle (Elemente ab 6 Protonen im Kern) und daher Probleme zu kühlen, dennoch entstand die erste Generation von Sternen (Population III), die sehr massereich waren und schnell als Supernovae explodierten. Diese konnten das Gas wieder zerstreuen, wenn der Halo aus Dunkler Materie nicht massiv genug war. In jedem Fall erzeugten sie Metalle und reicherten das Gas damit an. Die nächste Generation von Sternen (Population II, metallarm) findet sich heute z.B. in alten Kugelsternhaufen. "Moderne" Sterne (Population I) schließlich haben etwa 2 % Metalle.

Die Materiekonzentrationen bildeten Galaxien, diese verschmolzen miteinander, wodurch auch Sternentstehung angeregt wurde (Starbursts), und gruppieren sich zu Galaxienhaufen, die in Filamentstrukturen mit großen leeren Zwischenräumen angeordnet sind (homogen auf Skalen über 100 Mpc, der beobachtbare Radius des Universums beträgt 4 Gpc). Eine große Menge Gas bildet das sehr heiße intergalaktische Medium in den Galaxienhaufen.

Unsere Galaxie, die Milchstraße, hat eine sichtbare Ausdehnung von etwa 30 kpc; die Sonne rotiert innerhalb einer Scheibe, die überall etwa dieselbe Bahngeschwindigkeit hat, in 8,5 kpc Entfernung um das Zentrum. Dieses besteht aus einem Schwarzen Loch und einem elliptischen Bulge aus Sternen, die es in unregelmäßigen Orbits umschwirren und dabei eine Balkenform ausbilden. Innerhalb der Scheibe entstehen durch Dichtewellen Spiralarme mit erhöhter Sternentstehung. Die Kugelsternhaufen sind sphärisch um den Bulge angeordnet.

2 Energie

Die Energieerhaltung ist grundlegend für ein Verständnis der Welt. Ein Großteil der Astrophysik besteht darin, die Prozesse der Energieumwandlung nachzuvollziehen.

2.1 Energieformen und -quellen

Masse m stellt eine Form von Energie E dar: $E = mc^2$ mit der Lichtgeschwindigkeit $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (ein Proton hat eine Masse von $1,67 \cdot 10^{-27} \text{kg}$ oder 938 MeV , ein Elektron 511 keV).

Dabei nimmt die Masse mit der Geschwindigkeit v des Körpers oder Teilchens zu: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ mit der Ruhemasse m_0 . Diese entspricht einer "Ruheenergie", die zusätzliche Energie ist Bewegungsenergie (bei kleinen Geschwindigkeiten ist diese $\frac{1}{2}mv^2$).

Wenn nun viele Teilchen aneinander stoßen, so verteilt sich deren Bewegungsenergie unter ihnen gemäß der Maxwell-Boltzmann-Verteilung, die mittlere Bewegungsenergie eines Teilchens ist dann ungefähr kT mit der Boltzmann-Konstante k (bei $T \approx 300K$ ist $kT = \frac{1}{40}eV$). Die Temperatur T ist also ein Maß für die kinetische (Bewegungs-) Energie der Moleküle bzw. Teilchen.

Ein Teilchen ohne Ruhemasse, das sich stets mit c bewegt, ist das Photon. Es hat eine Energie von $E = h\nu$, wobei $\nu = \frac{c}{\lambda}$ die Frequenz und h das Plancksche Wirkungsquantum ist (ein Photon mit Wellenlänge 500 nm hat $2,5\text{ eV}$).

Ein Photon ist ein Quant einer elektromagnetischen Welle. Auch elektromagnetische Felder selber haben eine Energiedichte, die proportional zum Quadrat ihrer Feldstärke ist.

Im elektrischen Feld einer Ladung hat eine andere Ladung eine potentielle Energie, die proportional zum Inversen des Abstands ist. Sie ist negativ, wenn die Ladungen unterschiedlich sind. Dadurch wird die Energie kleiner (stärker negativ), wenn ein Elektron einem Proton näher kommt (Das System kann jedoch nur bestimmte Zustände einnehmen, die durch Emission bzw. Absorption eines Photons ineinander übergehen können). Die Gesamtenergie des Systems ist niedriger als die Summe der Energien der getrennten Teilchen. Die Differenz ist die Bindungsenergie.

Durch die Gravitation besteht eine ähnliche potentielle Energie (nur daß es keine Ladungen gibt, die sich neutralisieren könnten): Wenn sich zwei Körper der Masse m_1 bzw. m_2 von weit weg bis auf den Abstand r nähern, könnten sie die Energie $-G\frac{m_1m_2}{r}$ freisetzen (in guter Näherung, exakt wäre gemäß der Allgemeinen Relativität). G ist die Gravitationskonstante: Bei je 1 kg Masse im Abstand von 1 m beträgt diese gravitative Bindungsenergie 417 MeV. Durch Verringerung des Abstandes wird also Energie in andere Formen umgewandelt. Dem setzen die Drehimpulserhaltung, der thermische Druck und die Abstoßung der Elektronen Grenzen.

Energieerzeugung ist Umwandlung von potentieller Energie in andere Formen. Mit verlorener Energie nimmt auch die Masse ab. Die effektivste Energieerzeugung ist der Einfall von Materie (Akkretion). Es kommt dabei auf das Verhältnis der Masse des zentralen Körpers zu dessen Radius (dem minimalen Abstand der einfallenden Materie zum Zentrum der Gravitation) $\frac{M}{R}$ an. Für ein Schwarzes Loch wird bis zum Schwarzschild-Radius $\frac{2GM}{c^2}$ die Hälfte der Ruheenergie eines einfallenden Teilchens freigesetzt. Damit davon bis zu einem Drittel als Strahlung entweichen kann, muß die potentielle Energie erst in Bewegungsenergie, diese in einer Akkretionsscheibe als Temperatur und diese dann in Strahlung umgewandelt werden. Es hängt dabei stark davon ab, wie nahe ans Schwarze Loch die Akkretionsscheibe reicht (bei einem schnell rotierenden näher). Ein Körper, der (von weit weg) auf die Oberfläche der Sonne fällt, hat nur $2 \cdot 10^{-6}$ seiner Masse an Bewegungsenergie gewonnen.

Die Energieerzeugung in Sternen erfolgt mittels Kernfusion. Atomkerne haben eine gewisse Bindungsenergie, sie wiegen weniger als die einzelnen Protonen und Neutronen. Der wichtigste Prozeß ist die Verschmelzung von vier Protonen zu einem Heliumkern, wobei zwei der Protonen durch Emission eines Positrons (Antiteilchen des Elektrons) und eines Neutrinos zu gebundenen Neutronen werden. Die Bindungsenergie von 0,7 % der Ausgangsmasse wird bei der Fusion freigesetzt. Weitere Verschmelzungen bis hin zum Eisen, dem am stärksten gebundenen Kern, setzen etwas weniger frei. Bei noch schwereren Elementen oder bei Isotopen mit vielen Neutronen kann durch Kernspaltung oder Emission von Heliumkernen oder Neutronen Energie wieder freigesetzt werden, die in Supernovae dort "gespeichert" wurde (maximal ein Tausendstel der Kernmasse z.B. bei der Uranspaltung). Chemische Bindungen enthalten Energien, die im Bereich von einem Milliardstel der Ruheenergie liegen.

2.2 Energietransport

Für die Astronomie am wichtigsten ist der Energietransport durch (elektromagnetische) Strahlung, denn sie liefert uns die Informationen. Zu unterscheiden ist zwischen Linien (bei bestimmten Wellenlängen) und Kontinuum.

Zu Kontinuumsemission können beschleunigte Ladungen führen, bspw. freie Elektronen in einem Magnetfeld (Synchrotronstrahlung) oder im Feld eines Atomkerns (Bremsstrahlung). Auch bei der Rekombination wird die Differenz zwischen der Bewegungsenergie des freien Elektrons und der Energie des gebundenen Zustands abgestrahlt. Außerdem sendet ein Körper allein aufgrund seiner Temperatur Strahlung aus. Deren Intensität pro Frequenzintervall ist $I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2}(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1)^{-1}$ (Planck-Verteilung), sie steigt also bei niedrigen Frequenzen quadratisch an (Rayleigh-Jeans-Näherung) und nimmt bei hohen Frequenzen exponentiell ab

(Wien-Näherung), dazwischen liegt ein Peak, der sich mit steigender Temperatur zu höheren Frequenzen verschiebt: Das Produkt $\lambda_{Peak} \cdot T$ ist konstant und beträgt $500nm \cdot 5780K$ (Sonne). Die gesamte abgestrahlte Leistung (Leuchtkraft) ist $L \propto R^2 T^4$. Für die Sonne mit Radius $R = 696000 km$ und eben erwähnter Temperatur der Photosphäre ist die Leuchtkraft $3,8 \cdot 10^{26} W$. Diese Strahlung breitet sich im Raum aus und nimmt daher quadratisch mit der Entfernung ab, bei der Erde kommt noch etwa $1 \frac{kW}{m^2}$ an.

Linienemission (und -absorption) entsteht durch Übergänge zwischen den diskreten Niveaus von Atomen und Molekülen. Ein Niveau kann durch Emission eines Photons (spontan) in ein niedrigeres übergehen, falls es die Drehimpulserhaltung erlaubt (Photonen haben einen Spin). Vorbeikommende passende Photonen können absorbiert werden oder die Emission eines weiteren induzieren. Bei Atomen/Ionen gibt es nur die elektronischen Niveaus, bei Molekülen außerdem ebenfalls gequantelte Vibrations- und Rotationszustände, die energieärmer sind (Übergänge der Rotation im (Sub)mm-Bereich, der Vibration im Infraroten und der Elektronenzustände im Optischen/UV). Dadurch können sie leichter angeregt werden als Atome und besser kühlen (Stoßenergie in entkommende Strahlung verwandeln).

Zudem kann sich Temperatur außer durch Strahlung auch durch Wärmeleitung ausgleichen, also durch Stoßen der Teilchen untereinander. Effektiver ist jedoch Bewegung warmer Materie in eine gemeinsame Richtung, z.B. in Sternen Konvektion: Heiße Gasblasen können aufsteigen und die Energie aus dem Inneren nach außen befördern. Bedingung für den Auftrieb ist, daß die Temperatur nach außen steiler abnimmt, wenn die Strahlung den Energietransport bewältigte, als wenn es die Konvektion tut. Dafür müssen Energieerzeugung und Absorptionsfähigkeit groß sein (die beide von der Temperatur abhängen).

Gravitationswellen deformieren periodisch die Raumzeit und können wohl bald detektiert werden. Natürlich können auch einzelne Teilchen (kosmische Strahlen) oder große, sich bewegende Körper Energie transportieren.

3 Das interstellare Medium

Es ist zwar weitaus mehr Masse in Sternen, aber das Volumen der Galaxie wird vom interstellaren Medium gefüllt. Daraus entstehen auch die Sterne und geben mit Metallen angereichertes Gas zurück. Es herrscht ungefähres Druckgleichgewicht zwischen verschiedenen Phasen. Die wichtige Gleichung hier ist das ideale Gas-Gesetz:

$$p = nkT$$

Der Druck p ist proportional zur Anzahldichte n (Teilchen pro Volumen) mal der Temperatur T . nT beträgt $2000 - 4000 cm^{-3}K$ (in Luft ist der entsprechende Wert $\frac{6 \cdot 10^{23}}{22,4 dm^3} 300K = 8 \cdot 10^{21} cm^{-3}K$, im Inneren der Sonne $2 \cdot 10^{33} cm^{-3}K$).

Je dichter das Medium ist, einen umso geringeren Teil des Gesamtvolumens nimmt es ein, umso kühler ist es, und umso stärker ist es durch die Gravitation in der Scheibe der Galaxis konzentriert. Sterne bewegen sich aufgrund ihrer Kompaktheit praktisch ohne Reibung durch das interstellare Medium, Wolken dagegen werden abgebremst.

3.1 Aufheizen und Kühlen

Welche Temperaturen und somit Phasen möglich sind, ergibt sich aus der Kühlfähigkeit und der Hitzezufuhr. Deren Gleichgewicht bestimmt die Temperatur; wenn eines überwiegt, ändert sie sich.

Ionisiertes Gas (bei hohen Temperaturen) kühlt durch Bremsstrahlung und Rekombination, bei tieferen Temperaturen durch atomare Linienemission und schließlich durch molekulare Linienemission. Da sich die Teilchen stets treffen müssen, meist um durch den Stoß ein höheres Level anzuregen, ist die Kühlfähigkeit proportional zum Quadrat der Dichte. Ist die Dichte jedoch zu hoch, können die ausgesandten Photonen andere Atome/Moleküle anregen und entkommen so nicht. Zudem kann dann ein angeregtes Level sich auch durch Stöße wieder abregen und die Besetzungszahl eines Levels mit Energie E über dem Grundzustand folgt der Boltzmann-Verteilung, ist also proportional zu $e^{-\frac{E}{kT}}$. Bei moderaten Dichten sind die Levels jedoch unterbesetzt, da eine Anregung zur Emission eines Photons führt, bevor der nächste Stoß passiert.

UV-Strahlung der Sterne heizt das interstellare Medium auf, indem Elektronen aus Atomen, Molekülen oder Staubkörnern herausgeschlagen werden, die ihre hohe kinetische Energie dann durch Stöße verteilen. Kosmische Strahlen (schnelle Atomkerne aus Supernovae) und Röntgenstrahlung (z.B. aus akkretierenden Neutronensternen) bewirken ähnliches. Moleküle und Atome können durch Strahlung angeregt und durch Kollisionen abgeregt werden. Gerichtete Bewegungen wie Turbulenz und Sternenwinde werden durch Reibung in Wärme umgewandelt. Bei Überschallgeschwindigkeiten entstehen Schocks, die ebenfalls zur Aufheizung führen. Bei einer Kontraktion erwärmen sich Molekülwolken durch die freigesetzte Gravitationsenergie und

durch ambipolare Diffusion, also die Reibung, die dadurch entsteht, daß die Ionen an den Magnetfeldlinien “gefangen” sind. Auch bei Molekülbildung entsteht zunächst Wärme, die jedoch dann effizient abgestrahlt werden kann. Bei hohen Dichten kommt nur noch kosmische Strahlung durch, bei noch höheren kann durch Zerfall radioaktiver Elemente wie ^{26}Al geheizt werden.

Staub absorbiert auch niederenergetischere Strahlung von Sternen, emittiert aber im Kontinuum. Durch Stöße mit Gasteilchen wird die Temperatur von Gas und Staub ähnlicher, ist jedoch nur bei hohen Dichten gleich. Staub kühlt meistens das Gas, bei starker Strahlung heizt er es auf.

3.2 Gas

Die heißeste Komponente des Gases hat etwa 10^6K , auch das Sonnensystem befindet sich innerhalb eines solchen Gebietes, das durch Supernovae entstanden ist. Das meiste Gas hat jedoch 8000K , da bei etwas höheren Temperaturen die Kühlung durch die Wasserstofflinien wie $\text{Ly}\alpha$ bei 121 nm effizient wird. Darin eingebettet befinden sich Wolken von $80 - 100\text{K}$, die durch Feinstrukturlinien wie die von ionisiertem Kohlenstoff bei $158\ \mu\text{m}$ kühlen. Durchkommende Strahlung kann absorbiert werden, wenn die Frequenz einem Linienübergang entspricht oder über der Ionisationsenergie liegt. So können Photonen mit einer Energie über $13,6\text{ eV}$ (Wellenlänge $91,6\text{ nm}$) Wasserstoff ionisieren und werden daher stark absorbiert, mit weiter steigender Energie wird dies weniger effizient.

Durch energiereiche Strahlung oder hohe Temperatur (energiereiche Stöße) wird das Gas ionisiert. Wasserstoff liegt entweder als HI (neutral) oder HII (ionisiert) oder als Molekül vor. Metalle sind auch in Gebieten neutralen Wasserstoffs (teilweise) ionisiert, da ihre Außenelektronen weniger stark gebunden sind. Heiße Sterne erzeugen um sich herum HII-Regionen, die sich aufgrund des Überdrucks durch die Aufheizung (auf 10^4K) zusätzlich ausdehnen.

Das Gas durchläuft mit der Zeit die verschiedenen Phasen. So kann es durch eine Supernova von der kältesten (Molekülform) in die heißeste übergehen, anschließend langsam auf 8000K kühlen, dann z.B. durch die Schockfront einer weiteren Supernova zu Wolken komprimiert werden, die sich durch das Durchlaufen eines Spiralarms mit seiner erhöhten Gravitation oder Eigengravitation zu Molekülwolken verdichten können, aus denen dann wiederum Sterne entstehen, deren Wirkung das Gas wieder erhitzt und verteilt.

3.3 Staub

Viele Metalle sind nicht in der Gasform, sondern bilden Staubkörner, deren Masse etwa 1 % der des Gases beträgt. Je kleiner, umso mehr davon gibt es. Sie sorgen für Absorption des durchgehenden Lichtes, wobei Wellenlängen größer als ihre Ausdehnung nicht beeinflusst werden. Daher ist die Absorptionsfähigkeit des Staubes ungefähr proportional zum Quadrat der Frequenz (bei insgesamt größeren Körnern weniger stark, bis $\propto \nu$, außerdem gilt das bei sehr hohen Frequenzen nicht mehr). Das Licht wird dadurch gerötet (längere Wellenlängen kommen besser durch). Es gibt dabei jedoch Maxima bei $10\ \mu\text{m}$ aufgrund der Absorption durch Silikate und bei 220nm durch Graphit. Man kann sich den Staub ungefähr wie Zigarettenrauch vorstellen (aber zum Glück müssen wir ihn nicht einatmen). An der Grenze zu den Molekülen liegen Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe, Verbindungen von Benzolringen. Bei tiefen Temperaturen gefriert molekulares Gas auf den Oberflächen der Staubkörner und bildet einen Eismantel.

Die emittierte Strahlung von Staub ist nicht die eines Schwarzen Körpers, sondern modifiziert durch die Emissionsfähigkeit, deren Frequenzabhängigkeit der der Absorptionsfähigkeit entspricht. Sie fällt also zu langen Wellenlängen hin stärker ab. Bei den typischen Temperaturen von Staub liegt das Strahlungsmaximum im fernen Infraroten/Submm (während die einfallende, aufheizende Strahlung Sternenlicht ist, das im Optischen und UV liegt).

3.4 Molekülwolken

In Molekülwolken ist die Dichte größer als durch das Druckgleichgewicht abgeschätzt, da hier die Gravitation (neben dem äußeren Druck) die Wolken zusammenhält. Typisch sind Temperaturen von $10 - 30\text{K}$ und Dichten von $10^2 - 10^6\text{ cm}^{-3}$. Diese Streuung rührt daher, daß es innerhalb der großen Molekülwolken dichtere Verklumpungen gibt, die wiederum dichtere Kernregionen enthalten. Wenn diese unter der Gravitationswirkung instabil werden, entstehen Sterne.

Das häufigste Molekül ist H_2 . Es kann jedoch nicht einfach durch den Zusammenstoß zweier Wasserstoffatome entstehen, da die frei gewordene Bindungsenergie auf einen dritten Körper übertragen werden muß (bei den geringen Dichten kommt es aber praktisch nie zu einem Treffen dreier Atome). So haften die H-Atome zunächst an einem Staubkorn und wandern auf der Oberfläche entlang. Wenn sie sich treffen, entsteht

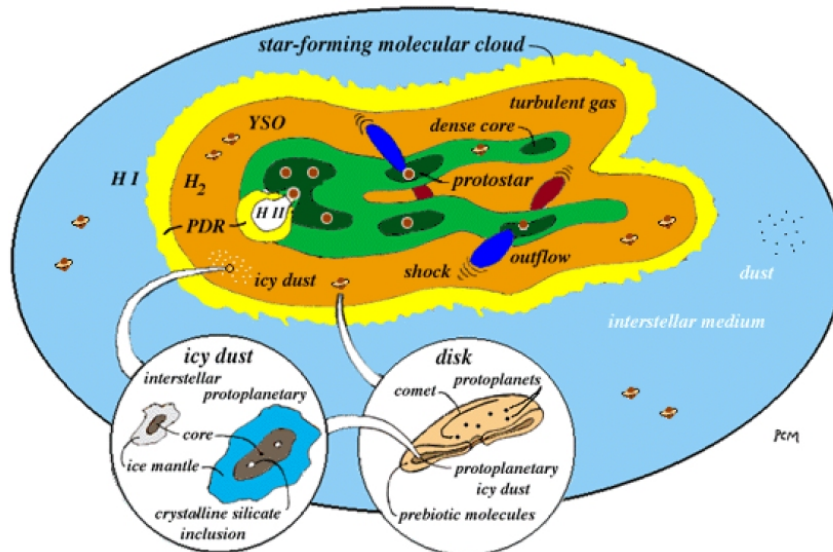
das Molekül. Auch sonst sind Reaktionen in den seltenen Begegnungen zweier Atome unwahrscheinlich, da bei den niedrigen Temperaturen die Aktivierungsenergie nicht erreicht wird. Für die Entstehung der anderen Moleküle spielen Ionen eine wichtige Rolle.

Ins Innere dringt keine UV-Strahlung (die die Moleküle zerstören würde), da sie von Staub und einer Außenschicht abgeschirmt wird, in der Moleküle die Strahlung absorbieren, davon zerstört werden und sich wieder neu bilden. Noch weiter außen gibt es eine Hülle aus neutralem Wasserstoff. Kosmische Strahlen (sehr schnelle Protonen) dringen jedoch ein und ionisieren (meistens) H_2 . Dies ist der Anfang von Reaktionsketten mit Austausch von Ladung und Atomen.

Das zweithäufigste Molekül ist Kohlenmonoxid (CO). Außerdem wurden bisher über 200 weitere Moleküle entdeckt (wie Wasser, H_2O , oder Methanol, CH_3OH), die meisten mit wenigen Atomen, aber auch recht komplizierte organische Moleküle. Es gibt viele Ionen, Radikale und Kohlenstoffketten.

Die Masse an molekularem Wasserstoff ist etwa so groß wie die von neutralem. Das meiste davon ist in den Riesenmolekülwolken, die bis zu einer Million Sonnenmassen haben, es gibt aber mehr kleinere, die weniger dicht sind. Je größer, umso turbulenter ist eine Wolke.

Aus einer Molekülwolke entsteht schließlich eine Gruppe von Sternen, viele massearme und wenige massereiche (Anzahl pro Massenintervall geht etwa wie $M^{-2,35}$, flacht sich unter 0,5 Sonnenmassen immer weiter ab). Durch deren Wirkung (Strahlung, Winde, Outflows, Supernovae) wird die Wolke schließlich zerrissen. Meistens verteilen sich dann auch die Sterne, wie bei einer T-Assoziation aus massearmen oder einer OB-Assoziation mit auch massereichen Sternen. Sternhaufen bleiben gravitativ gebunden, offene nur locker (lösen sich langsam auf) und Kugelsternhaufen dauerhaft. Diese vier Arten von Sterngruppen haben eine zunehmende Gesamtmasse.



Schema einer Molekülwolke mit Sternentstehung: *YSO* heißt Young Stellar Object, *PDR* Photo Dissociation Region (Moleküle werden durch einfallende Strahlung dissoziiert), *dense core* Dichter Kern, *dust* Staub. Die Outflows sind rot und blau wegen des Doppler-Effekts (Wellenlänge kürzer bei sich nähernder Materie). (Abb. aus den Folien zur Submm-Astronomie-Vorlesung von F. Bertoldi)

4 Stabilität und Kollaps

4.1 Gleichgewicht

Bei einer Wolke im Gleichgewicht sind die nach außen wirkenden Kräfte überall so groß wie die nach innen wirkenden. Dies kann man auch über die zu den Kräften gehörenden Energieformen ausdrücken. Die relevanten Energieformen, deren Summe die Gesamtenergie der Wolke bildet, sind die Gravitationsenergie $\mathcal{W} \propto -\frac{M^2}{R}$, die thermische (oder innere) Energie $\mathcal{U} \propto MT$ (bei gegebener Masse der einzelnen Teilchen), die kinetische Energie von gerichteter Bewegung $\mathcal{T} \propto Mv^2$ (wobei v die Relativgeschwindigkeit einzelner Komponenten der Wolke ist) und die magnetische Energie $\mathcal{M} \propto B^2 R^3$ mit der Magnetfeldstärke B . Gemäß dem Virialsatz gilt im Gleichgewicht

$$2\mathcal{T} + 2\mathcal{U} + \mathcal{M} + \mathcal{W} = 0$$

Wenn man nur \mathcal{U} und \mathcal{W} beachtet, folgt $T \propto \frac{M}{R}$. Uns interessiert die Gleichgewichtsmasse, bei deren Überschreitung die Wolke kontrahieren muß. Aus $M \propto nR^3 \propto n \frac{M^3}{T^3}$ folgt durch Division beider Seiten durch M und Multiplikation von $\frac{T^3}{n}$ die Jeans-Masse $M_J \propto \sqrt{\frac{T^3}{n}}$. Sie beträgt für $T = 10K$, $n = 10^5 \text{ cm}^{-3}$ und H_2 etwa 1 Sonnenmasse ($2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$). Eine äquivalente Rechnung kann man mit \mathcal{M} statt \mathcal{U} durchführen und kommt auf eine kritische magnetische Masse, die proportional zu $\frac{B^3}{n^2}$ ist. Um eine Sonnenmasse derselben Dichte wie eben zu stabilisieren, ist ein Magnetfeld von $15\mu G$ nötig. Für \mathcal{T} ist die kritische Masse $\propto \frac{v^3}{\sqrt{n}}$, eine Geschwindigkeit von etwa $250 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ würde eine Sonnenmasse derselben Dichte stabilisieren. Die wahre kritische Masse kann man sich als Summe dieser Komponenten vorstellen.

Da der magnetische Fluß (B mal Fläche) durch die Kopplung geladener Teilchen ans Magnetfeld erhalten bleibt, nimmt dieses bei einer Kontraktion zu. Diese Hürde wird schließlich durch ambipolare Diffusion überwunden: die neutralen Teilchen trennen sich von den geladenen, die zurückgehalten werden. Es sind zwar in den dichten Kernen nur etwa 10^{-7} der Teilchen durch kosmische Strahlung ionisiert, das reicht aber für die starke Verlangsamung des Kollapses (deren Zeitskala ist dieser Bruchteil mal 10^{14} Jahre). Die Rotationsgeschwindigkeit der Wolke nimmt ebenfalls mit einer Kontraktion zu (sie wird allerdings durch Magnetfelder wiederum gebremst). Wenn ein Stern entsteht, schleudert er Materie mit hoher Geschwindigkeit weg. Diese Outflows regulieren weiteren Kollaps, indem sie Turbulenz und in Schockfronten Wärme erzeugen (die aber recht schnell abgestrahlt wird).

In Sternen wirkt die Hitze aus der Kernfusion der Gravitation entgegen, oder, wenn das Brennmaterial verbraucht ist, der Elektronendruck: Gemäß der Quantenmechanik können Elektronen nicht im selben Zustand sein, der durch ihren (unscharfen) Ort und Impuls gegeben ist. Sie reagieren auf starken Druck, der das ihnen zustehende Volumen einengt, mit erhöhtem Impuls (Entartungsdruck). Dies kann die Gravitation ausgleichen. Wenn die Masse etwa 1,4 Sonnenmassen übersteigt, wird sie jedoch zu stark und die Elektronen verschmelzen mit den Protonen zu Neutronen. Die Kernkräfte halten dann der Gravitation entgegen. Bei noch höherer Masse nimmt diese jedoch erneut Überhand und verdichtet die Materie zu einem Schwarzen Loch.

4.2 Kollaps

Die Dichte muß sich um einen Faktor von knapp 10^{25} erhöhen, um von diffusem neutralem Gas zu einem Sterninneren zu gelangen. Fürs erstere beträgt die Jeansmasse einige 10^4 Sonnenmassen. Eine schwerere Wolke kontrahiert und hält ihre Temperatur, indem sie die freiwerdende Gravitationsenergie abstrahlt. Wenn Staub und versuchte Molekülbildung etwa die Hälfte der einfallenden UV-Strahlung absorbieren, reagieren die Atome zu Molekülen, die stärker kühlen. Die Jeansmasse sinkt durch die erhöhte Dichte und verringerte Temperatur und die Molekülwolken zerfallen in dichtere Bereiche (Klumpen), die weiter fragmentieren in Kerne mit einigen Sonnenmassen, was dann ungefähr die Jeansmasse ist.

Wie bereits erwähnt, wird jedoch der Kollaps außer vom thermischen Druck durch Magnetfelder und Turbulenz behindert, später auch durch Rotation. Die Zeitskala für einen Kollaps kann man unter Vernachlässigung aller Hürden, die sie erhöhen, als die Freifall-Zeit abschätzen: Die Strecke R entspricht etwa Beschleunigung mal Quadrat dieser Zeit: $R = \frac{GM}{R^2} t_f^2$, damit $t_f = (G\rho)^{-\frac{1}{2}}$ mit der Dichte ρ , die n mal der durchschnittlichen Masse eines Teilchens ist. Für die atomare Wolke beträgt die Freifall-Zeit etwa 10^7 Jahre, für einen dichten Kern einige 10^4 Jahre. Wenn letzterer wirklich kollabiert, muß erst durch die langsame ambipolare Diffusion der magnetische Druck überwunden werden. Da die Dichte zum Zentrum des Kerns hin zunimmt, wird die Freifall-Zeit entsprechend kleiner: Die inneren Bereiche kollabieren zuerst, die äußeren fallen nach (inside-out). Wenn sich das Zentrum recht schnell verdichtet, fällt der Druck auf die nächste Schicht weg, die daher herunterstürzt, der Druck auf die Schicht darüber verschwindet, und so weiter. Dieser frei fallende Bereich breitet sich mit der Schallgeschwindigkeit aus, die proportional zur Wurzel der Temperatur ist.

Wenn die zentrale Dichte etwa 10^{11} cm^{-3} erreicht, kann die Gravitationsenergie nicht mehr abgestrahlt werden, da Strahlung aus dem Inneren absorbiert wird, hauptsächlich von Staub. Die Temperatur steigt, der Druck hält der Gravitation entgegen und es bildet sich ein hydrostatischer Kern (im Gleichgewicht). Mit zunehmender Masse steigt auch die Temperatur, der Radius des Kerns steigt erst, sinkt dann aber. Bei einer Temperatur über $2000K$ wird H_2 dissoziiert, die dafür notwendige Energie lässt die Temperatur langsamer steigen, dadurch nimmt das Gewicht stärker als der Druck zu und der Kern wird instabil. Er kollabiert zu einem viel kleineren Kern mit einer Dichte von 10^{22} cm^{-3} , in dem die Atome ionisiert sind.

Die einfallende Materie bildet eine Schockfront, wenn sie auf die Oberfläche des Protosterns trifft. Dadurch wird diese aufgeheizt und strahlt. Um den Protostern herum ist eine Zone, in der der Staub durch die Hitze

bereits aufgelöst ist und in der die Photonen der Oberfläche daher passieren können. Sie werden jedoch weiter außen von Staub absorbiert, der sich dadurch erwärmt und mit etwa $300K$ strahlt.

Die Leuchtkraft ist gegeben durch die pro Zeit freigesetzte Energie des Aufpralls, also die potentielle Energie der einfallenden Materie: $L = \frac{GM}{R}\dot{M}$, wobei \dot{M} die einfallende Masse pro Zeit ist. Ihr Wert ergibt sich aus folgender Abschätzung: Er ist gleich der gesamten Masse M geteilt durch die Zeit, die sie zum Konzentrieren, also der Schall zum Ausbreiten braucht (Strecke durch Schallgeschwindigkeit), dann wendet man den Virialsatz an, also $\dot{M} \propto \frac{M\sqrt{T}}{R} \propto \sqrt{T^3}$ - nur abhängig von der Temperatur (alternative Herleitung: Jeansmasse durch Freifallzeit, die Dichte kürzt sich dann raus). Bei $15K$ beträgt \dot{M} etwa 10^{-5} Sonnenmassen pro Jahr. Bei M von einer Sonnenmasse und einem Radius von 5 Sonnenradien (5 mal 700 000 km) scheint der Protostern damit 60 mal so stark wie die Sonne (die Sonnenleuchtkraft ist $3,8 \cdot 10^{26}W$).

Nach einer Zeit von etwa $M/\dot{M} \approx 10^5$ Jahren fällt nur noch wenig Materie ein und die Leuchtkraft entsteht stattdessen durch Kontraktion, $L = \frac{GM^2}{R^2}\dot{R}$, wobei \dot{R} die Zeitableitung des Radius ist. Dies reicht für eine Zeit $t_{KH} = \frac{GM^2}{RL}$, die Kelvin-Helmholtz-Zeit, die für die Sonne $3 \cdot 10^7$ Jahre wäre.

5 Scheibe und Planeten

5.1 Drehimpuls

Wie Energie bleibt der gesamte Drehimpuls erhalten. Er ist definiert als $m\vec{v} \times \vec{r}$. Sein Betrag ist also der Impuls mv mal der Komponente von \vec{r} senkrecht zu \vec{v} . Dabei ist \vec{r} der Vektor, der das Teilchen mit einem beliebigen Punkt verbindet, der Drehimpuls ist dann relativ zu diesem Punkt, z.B. dem Schwerpunkt eines kollabierenden Wolkenkerns.

Der gesamte Drehimpuls des Universums ist null, allerdings haben seine Teile unweigerlich einen. Sobald Turbulenz auftritt (die die Bildung von Massenkonzentrationen fördert), wird auch Drehimpuls umverteilt (in Wirbeln). Durch Reibung oder Gezeitenkräfte bei Bewegungen aneinander vorbei werden die Partner in entgegengesetzte Rotation versetzt. Da der Drehimpuls ein Vektor ist (senkrecht zur Ebene der Rotation), bleibt er durch die unterschiedliche Richtung erhalten (bzw. null). Bildet sich eine Galaxie aus einer solchen leicht rotierenden Riesenwolke, so kann das Gas nur parallel zum Drehimpulsvektor ungestört kontrahieren, in der Rotationsebene wird schließlich die Zentrifugalkraft der Gravitation entgegenwirken, denn die Geschwindigkeit muß sich mit abnehmendem Abstand erhöhen (vr konstant).

Eine Molekülwolke hat schon aufgrund der galaktischen Rotation einen Drehimpuls: Die Winkelgeschwindigkeit des inneren Teils der Wolke ist größer als die des äußeren. Zusätzlich kann die Turbulenz innerhalb der Wolke den dichteren Teilen Drehimpulse geben. Wenn sie kollabieren und sich ein (entsprechend rotierender) Protostern gebildet hat, besitzt das einfallende Gas irgendwann zu viel Drehimpuls, um auf den Protostern zu fallen. Es bildet eine Scheibe um ihn herum. Wenn die Masse des zentralen Objekts dominiert, bewegen sich die Teilchen darin auf Keplerorbits (wie in unserem Sonnensystem) mit $v = \sqrt{G\frac{M}{r}}$.

Ein dichter Kern ist nicht kugelförmig, er kann während der Kontraktion fragmentieren in zwei (oder sogar mehr) Teile, die dann separat kollabieren. Mehr als die Hälfte der Sterne entsteht so als Mitglied eines Doppelsternsystems, in dem zwei Sterne umeinander rotieren.

Damit der Protostern weiter wachsen kann, muß der Drehimpuls in der Scheibe umverteilt werden. Die Masse unseres Sonnensystems ist fast vollständig in der Sonne konzentriert, während der Drehimpuls in den Planeten steckt (hauptsächlich Jupiter). Es wurde allerdings auch etwas an Masse und mit dieser recht viel Drehimpuls herausbefördert.

Ein Mechanismus dafür kann Reibung in der Scheibe sind (Viskosität), da sich die Teilchen weiter innen schneller bewegen als weiter außen. Bei Angleichung beider Geschwindigkeiten gelangen die inneren weiter nach innen und die äußeren weiter nach außen. Turbulenz kann ebenfalls bewirken, daß Materie einfällt, dafür eine andere größeren Abstand gewinnt. Es können auch gravitative Instabilitäten in der Scheibe entstehen und zu Spiralwellen führen, die Materie abbremsen und einfallen lassen können.

Magnetfelder spielen jedoch wohl die wichtigste Rolle bei diesem Prozeß. Da die Lorentzkraft senkrecht zu Bewegungsrichtung und Magnetfeld wirkt, kann die Bewegung umgeleitet werden und geladene Teilchen folgen schraubenförmig den Magnetfeldlinien. Ein Protostern erzeugt durch Konvektion und Rotation Magnetfelder, die sich mit ihm mitdrehen, dabei die Scheibe durchsetzen. Da sie sich unterschiedlich schnell als die Scheibe bewegen, entstehen Bremskräfte (auch auf den Stern). Zudem kann Materie aus der Scheibe senkrecht zu ihrer Ebene gebündelt mit hoher Geschwindigkeit hinausgeschleudert werden und dabei Drehimpuls mitnehmen. Diese Jets reißen umliegendes Gas mit (Outflows) und werden schließlich (in Entfernungen von bis zu einigen parsec) in Schockfronten gestoppt. Sie transportieren bis zu einem Zehntel des Einfalls wie-

der heraus, manchmal geklumpt. Jets treten auch bei akkretierenden Schwarzen Löchern auf, wo ebenfalls Magnetfelder und Rotation zusammenwirken.

5.2 Planetenentstehung

Der größte Teil der Akkretionsscheibe fällt in den Stern, ein Teil wird herausgeschleudert und ein anderer bleibt im Orbit, zunächst als protoplanetare Scheibe. Sie hat innen (zum Stern hin) eine Lücke und wird nach außen dicker, aber mit abnehmender Dichte. Ihre Oberfläche wird angestrahlt und ist daher warm. Die Temperatur nimmt nach außen und zur Mitte hin ab.

Aufgrund der eigenen Schwerkraft nimmt die Dichte zur Scheibenmitte hin zu und Staubkörner sedimentieren dorthin. Durch die Kälte kommt zu Eisbildung auf den Staubkörnern. Bei Zusammenstößen wachsen die Staubkörner durch Oberflächenhaftung und chemische Bindungen, von durchschnittlich 100 nm bis zu den Planetesimalen von etwa 1 km.

Strahlungseffekte des Sterns begrenzen die dafür mögliche Zeit. Sehr kleine Teilchen können durch den Strahlungsdruck und den Sternwind nach außen getrieben werden, größere werden davon abgebremst und so nach innen gezogen. Der Staub um ältere Sterne entsteht beim Zusammenprallen größerer Körper (Asteroiden).

Die Planetesimale wachsen durch ihre gegenseitige Gravitation zu Protoplaneten von etwa 1000 km heran. Mit anderen auf ähnlicher Umlaufbahn stoßen sie zusammen und bilden schließlich die (terrestrischen) Planeten. Beim letzten Zusammenstoß mit einem Protoplaneten entstand der Mond der Erde.

Jeder dieser Schritte braucht eine wachsende Zeit. Die Gravitationsenergie wird insgesamt in Wärme umgewandelt, die bei größeren Körpern schlechter abgestrahlt werden kann. Durch die Hitze eines neu entstandenen Planeten wird das Gestein flüssig und die Elemente differenzieren: Die schweren wie Eisen und Nickel bilden einen Kern, Sauerstoffverbindungen bilden einen Mantel und darüber eine Kruste. Die Wärme aus der Akkretion und dem Zerfall radioaktiver Elemente wird durch Konvektion im Mantel nach außen befördert, was zu Plattentektonik und Vulkanismus führen kann.

Bei abgekühlter Oberfläche kann durch Vulkanismus eine Atmosphäre und ein Ozean ausgedampft werden, allerdings konnten die Planetesimale fast alle flüchtigen Stoffe wie Wasser nicht halten, da die Strahlung des Sterns zu stark war. Erst weiter außen in der Scheibe bleibt das Eis gefroren, durch den späteren Einschlag von Kometen und Meteoriten kann so Wasser und andere flüchtigen Verbindungen auf die Oberfläche des Planeten gebracht werden. Aus der komplexen organischen Chemie im Ozean der jungen Erde entstanden sich selbst reproduzierende Moleküle und Reaktionsnetzwerke, die sich durch Umhüllung mit einer Membran zu Leben entwickelten.

Da sich weiter außen das Eis halten kann, sind die dort entstehenden Planeten massereicher und können so auch Wasserstoff und Helium gravitativ binden, wodurch sie das Gas in ihrer Umgebung aufsaugen und sich zu Gasriesen entwickeln. Schließlich löst sich die Scheibe durch die Strahlung des Sterns auf und ihr Wachstum wird gestoppt. Die meisten bekannten extrasolaren Planeten sind Gasriesen, die ihren Stern sehr nahe umrunden (solche Planeten sind einfacher zu entdecken), was durch Migration von weiter außen erklärt wird (sie müssen dafür Material innerhalb ihrer ursprünglichen Umlaufbahn herauschleudern).

Noch weiter außen ist die Dichte so gering, daß sich nur sehr kleine Planeten bilden können.

6 Sternentwicklung

Die Entwicklung eines Sterns wird durch seine Masse bestimmt. Diese ist verantwortlich für die nach innen wirkende Gravitationskraft, die im Gleichgewicht durch nach außen wirkende Kräfte ausgeglichen werden muß. Damit bestimmt die Masse die Bedingungen im Inneren des Sterns, somit auch die Energieerzeugung durch Kernfusion und Kontraktion.

6.1 ... für eine Sonnenmasse

Zu Beginn des Kollapses sieht man nur den kalten Staub, der schwach im submm-Bereich strahlt. Bald sieht man die warme Staubhülle des Protosterns und die sich bildende Scheibe, die nach außen hin kühler wird. Mit der Zeit wird der Staub akkretiert, weggeblasen oder sammelt sich in der Scheibe. Mit dem Ende des Einfalls wird die Geburtslinie (Birthline) überschritten und der Stern kontrahiert, während sich die Scheibe durch Planetenbildung oder Gravitations- und Strahlungseinflüsse auflöst. Solche jungen Sterne zeigen variable Linienemission und stärkere Infrarot-Strahlung, was von Material außerhalb des Sternes stammt. Sie werden als T-Tauri-Sterne bezeichnet (CTTS heißt Classical T-Tauri Stars, später WTTS, Weak-Lined T-Tauri Stars). Insgesamt nimmt der Beitrag des (Proto-)Sterns zur Gesamtstrahlung also mit der Zeit zu, der des Staubes ab, so daß sich die Strahlung zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Diese Entwicklung wird in Class 0 bis Class 3 eingeteilt:

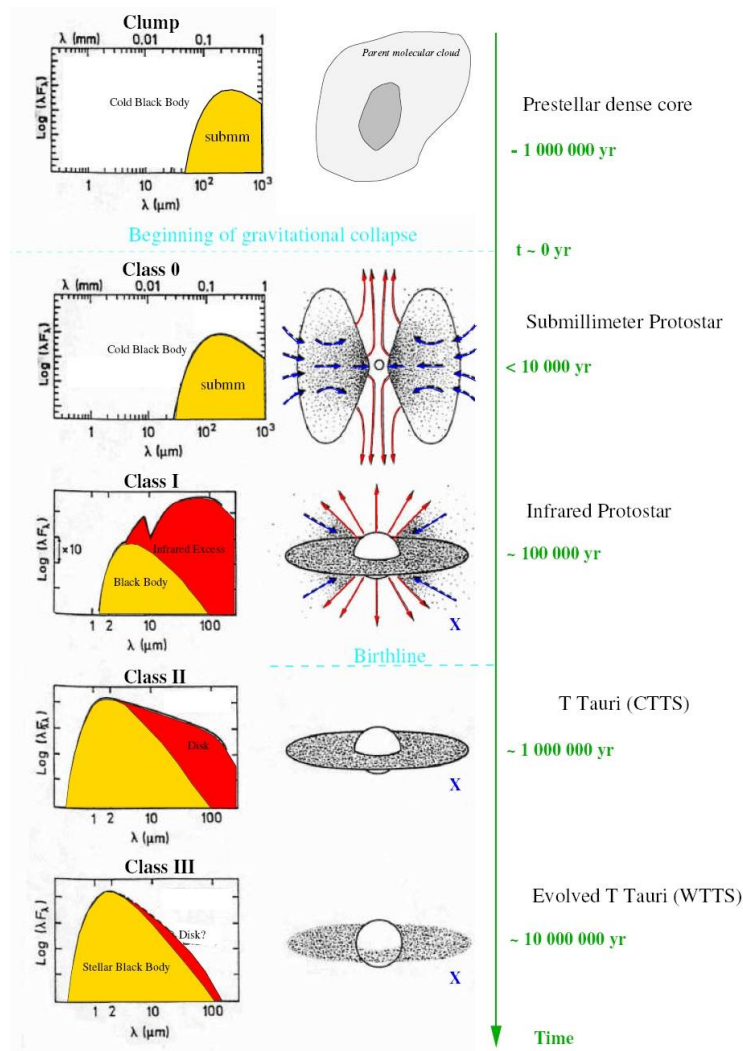
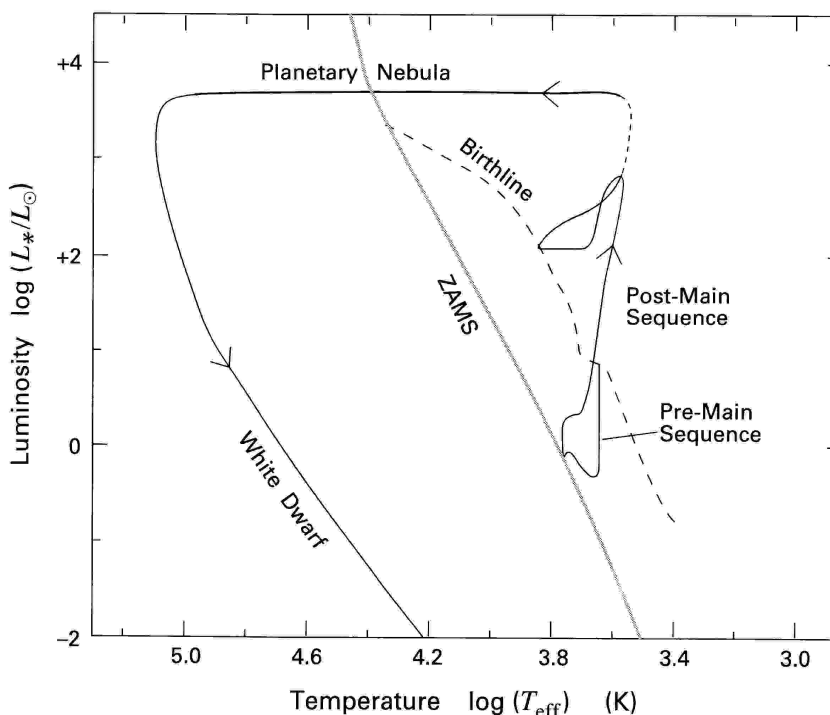


Abb. aus den Folien zur Sternentstehungs-Vorlesung von E. Krügel

Schon während der Akkretion wird die Temperatur im Inneren so hoch ($5 \cdot 10^5\text{ K}$), daß Deuterium mit einem Proton zu $^3\text{Helium}$ fusioniert. Dadurch setzt Konvektion ein, die auch das einfallende Deuterium ins Innere transportiert. Die erzeugte Energie führt zu einer Rückkopplung, die Temperatur und Radius reguliert

(erhöhte Temperatur führt zu stärkerem Druck, größerem Radius, niedrigerer Temperatur). Deuterium ist aber schnell verbrannt, Lithium verbrennt anschließend, ist jedoch energetisch unbedeutend.

Ab der Geburtslinie ist die Energieerzeugung zunächst ausschließlich die durch Kontraktion frei werdende Gravitationsenergie. Bei vollständiger Konvektion nimmt der Radius ab, ohne daß sich die Oberflächentemperatur verändert. Im Inneren wird es jedoch heißer, wodurch die Absorptionsfähigkeit abnimmt und die Konvektion teilweise aussetzt (die Energie kann dann auch durch Strahlung transportiert werden). Ab hier erhöht sich auch die Oberflächentemperatur. $3 \cdot 10^7$ Jahre nach Überschreiten der Geburtslinie erreicht die Temperatur im Inneren $10^7 K$, wodurch Wasserstoff zu Helium fusioniert. Dies stabilisiert den Stern, er hat die Hauptreihe erreicht.



Entwicklungsweg für einen Stern einer Sonnenmasse. Die graue Linie ist die Hauptreihe zu Beginn des stabilen Wasserstoffbrennens (Zero Age Main Sequence); mit zunehmender Masse liegt dort ein Stern weiter oben links. Leuchtkraft und (Oberflächen)temperatur sind über den Radius miteinander verbunden: $L \propto R^2 T^4$. (Abb. aus Stahler/Palla)

Außen findet nun Konvektion statt, im Inneren nicht (und daher kaum Materieaustausch). Die Sonne bleibt 10^{10} Jahre auf der Hauptreihe (etwa die Hälfte ist schon rum). Durch die Fusion ("pp-Kette": 2 Protonen zu Deuterium, dann zu $^3\text{Helium}$, schließlich zu $^4\text{Helium}$) nimmt die Teilchenzahl bei fast gleicher Masse allmählich ab, so daß die Gravitation gegenüber dem thermischen Druck an Gewicht gewinnt und dies durch einen kompakteren Kern mit höherer Temperatur ausgeglichen wird. Dies erhöht die Fusionrate und die Leuchtkraft nimmt während der Hauptreihenzeit etwas zu.

Im Zentrum wird der Wasserstoff am schnellsten verbrannt, so daß sich dort ein Helium-Kern bildet, in dem keine Fusion mehr stattfinden kann. Er wächst an Masse und kontrahiert unter seiner Schwerkraft, bis der Elektronendruck sie ausgleicht. Der Kern ist dann entartet und verhält sich nicht mehr wie ein ideales Gas. Mit größerer Masse wird er immer kompakter und heißer. Wasserstoff verbrennt in einer Schale um den Kern, die innen immer heißer wird und nach außen hin wächst. Die Leuchtkraft nimmt dadurch zu, denn mehr Materie nimmt an der Fusion teil und die höhere Temperatur am Rand zum Kern führt zu größerer Reaktionsrate und auch zum Ablauf der Wasserstoff-Fusion im effektiveren "CNO-Zyklus" (d.h. Kohlenstoff wird zu Stickstoff, dieser zu Sauerstoff und dieser durch Emission von Helium wieder zu Kohlenstoff). Durch die höhere Leuchtkraft und die Energieerzeugung näher an der Oberfläche wird die Konvektionszone tiefer (denn die Temperaturabnahme ist steiler), bis die gesamte Materie oberhalb der Fusionsschale konvektiv ist. Die äußeren Schichten dehnen sich dadurch aus, der Stern wird zum Roten Riesen (>100 facher Radius, niedrigere - röttere - Oberflächentemperatur) und verliert einen Teil der Masse durch seinen Wind.

Wenn der Helium-Kern etwa 10^9 Jahre nach Verlassen der Hauptreihe die Temperatur von $8 \cdot 10^7 K$ überschreitet, zündet Helium und verbrennt zu Kohlenstoff und Sauerstoff. Da der Kern jedoch entartet ist,

hängt der Druck nicht von der Temperatur ab und er reagiert nicht mit Expansion. Stattdessen steigt die Temperatur durch die Energieerzeugung weiter und die Fusionsreaktionen laufen schneller ab, bis schließlich die Entartung aufgehoben wird und der Kern expandiert. Die enorme Energie dieses nur einige Sekunden dauernden Helium-Blitzes geht hauptsächlich in die Expansion des Sterninneren.

Der neue Gleichgewichtszustand hat eine geringere Leuchtkraft und einen kleineren Radius, da der Kern nicht mehr so kompakt ist und die Temperatur durch Rückkopplung an der für die Fusion notwendigen Temperatur gehalten wird. Der Stern befindet sich nun auf dem Horizontalast und verbrennt Helium im Kern und weiterhin Wasserstoff in einer Schale.

Nach 10^8 Jahren ist das Helium im Zentrum verbraucht. Es bildet sich ein Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff, der von einer inneren Schale mit Helium-Fusion und einer äußeren mit Wasserstoff-Fusion umgeben ist. Durch die Temperaturzunahme steigen Leuchtkraft und Radius wieder an, der Stern entwickelt sich während 10^7 Jahren entlang des Asymptotischen Riesenastes.

Schließlich wird die Fusion instabil und es kommt zu einigen Pulsen im Abstand von 10^5 Jahren, wobei die gesamte Hülle abgestoßen wird (die aufgrund der tiefen Konvektion mit Kohlenstoff und Sauerstoff angereichert ist). Während sie sich entfernt, wird sie vom heißen Kern bestrahlt und leuchtet als Planetarischer Nebel für einige 10^4 Jahre. Der nackte, entartete Kern bleibt ein Weißer Zwerg, der vom Elektronendruck gegen die Schwerkraft stabilisiert wird. Er hat etwa eine halbe Sonnenmasse und die Größe der Erde, kann keine Fusion mehr zünden und kühlt allmählich aus.

6.2 Kleinere Massen

Für kleinere Sternmassen läuft die Entwicklung langsamer ab. Sie starten auf der Geburtslinie weiter unten rechts (bei niedrigeren Oberflächentemperaturen) und bleiben länger komplett konvektiv, wobei die Leuchtkraft ohne Zunahme der Oberflächentemperatur bei der Kontraktion abnimmt. Die Zeit auf der Hauptreihe ist $\propto M^{-2}$, so daß die meisten Sterne sie seit ihrer Entstehung noch gar nicht verlassen haben. Sie strahlen dort allerdings recht schwach, etwa wie $L \propto M^3$.

Falls die Gesamtmasse unter 8% der Sonnenmasse liegt, erreicht der kontrahierende Gasball nie die nötige Temperatur zur Fusion von Wasserstoff. Statt die Hauptreihe zu erreichen, wird er zum Braunen Zwerg, der Deuterium verbrennt, abkühlt und schrumpft (aufgrund der Entartung zu einem kleineren Radius bei größerer Masse).

Hauptreihensterne werden zu Roten Riesen, unter einer halben Sonnenmasse findet jedoch kein Helium-Blitz statt. Das Endstadium ist stets ein Weißer Zwerg.

6.3 Größere Massen

Sterne größerer Masse entwickeln sich schneller. Über 8 Sonnenmassen starten sie schon während der Akkretion mit der Wasserstoff-Fusion, es gibt für sie also keine Geburtslinie. Die hohe Leuchtkraft ist für das Einfallen von Materie hinderlich, da Strahlungsdruck und Sternwind dem entgegenwirken. Sie brauchen eine viel höhere Akkretionsrate, z.B. durch höhere Temperatur und geklumpten Einfall, sie zeigen auch Outflows mit bis zu 10^{-3} Sonnenmassen pro Jahr. Die größten Massen könnten auch durch Verschmelzung von Protosternen entstehen, es gibt sie auch nur im Zentrum einer Sternentstehungsregion.

Auf der Hauptreihe verbrennen sie im CNO-Zyklus, wegen der hohen Energieproduktion ist das Sterninnere konvektiv, aber nicht die äußeren Schichten. Aufgrund der Durchmischung (Helium wird in der Mitte schneller produziert), hört der Kern plötzlich mit der Energieproduktion auf (wenn der Wasserstoff verbraucht ist), kontrahiert und zündet das Schalenbrennen. Der Stern wird zum Roten Riesen (oder zum Überriesen bei sehr hohen Massen), wobei sich seine Leuchtkraft aber nicht stark verändert. Im Kern zündet das Helium, wird verbraucht und brennt in einer inneren Schale weiter. Bei Temperaturen über $6 \cdot 10^8 K$ (passiert ab 2,3 Sonnenmassen) zündet die Kohlenstoff-Fusion, der Prozeß wiederholt sich. Es können so bei hohen Massen unterschiedliche Fusions-Schalen entstehen, die alle Elemente bis zum Eisen erzeugen (ab dann kann keine weitere Energie durch Fusion gewonnen werden).

Unter 8 Sonnenmassen endet der Stern mit dem Abstoßen seiner Hülle als Weißer Zwerg. Dadrüber jedoch wird der Kern am Ende so massiv, daß der entartete Elektronendruck nicht ausreicht, um die Schwerkraft aufzuhalten. Er kollabiert, die freigesetzte Energie führt zur Explosion des restlichen Sterns. In dieser Supernova bilden sich durch Neutroneneinfang die Elemente schwerer als Eisen, die Hülle expandiert mit über $10^7 \frac{m}{s}$ und vermischt sich schließlich mit dem Interstellaren Medium.

Zurück bleibt ein Neutronenstern, der einen Radius von nur 10 km hat, oder ein Schwarzes Loch, wenn der Überrest zu schwer ist. Schnell rotierende Neutronensterne mit starkem Magnetfeld machen sich als Pulsare bemerkbar, die Akkretion von einem Nachbarstern als Röntgen-Doppelstern.

Literatur

Einige empfehlenswerte Bücher sind

- *Unsöld/Baschek: Der neue Kosmos* Eine Einführung in die Astronomie
- *Schneider: Einführung in die extragalaktische Astronomie* Was in der Einleitung angesprochen wurde
- *Stahler/Palla: The Formation of Stars* Der Wissensstand über Sternentstehung
- *Tielens: The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium* Das Interstellare Medium
- *Kippenhahn/Weigert: Stellar Structure and Evolution* Viele Rechnungen zum Inneren der Sterne