

Sterne und Planeten

P. Ulmschneider, Vom Urknall zum modernen Menschen, DOI 10.1007/978-3-642-29926-1_2,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Leben ist nur auf Planeten und deren Monden denkbar. Die Bildung solcher Himmelskörper hängt eng mit der Entstehung von Sternen zusammen, wobei anders als bei der Bildung von Population-III-Sternen in der Frühphase des Universums, Staub vorhanden sein muss, d. h. chemische Elemente, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium.

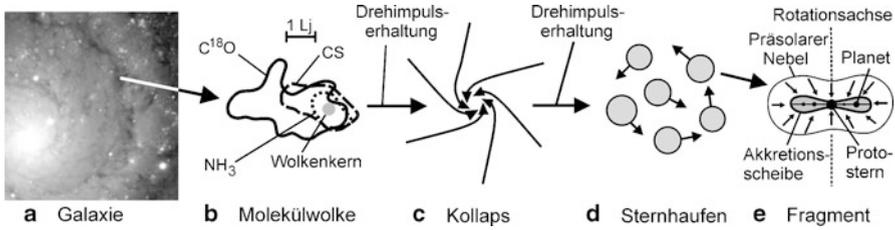
2.1 Sternentstehung

Sternentstehung findet statt, wenn eine Verdichtung in einer interstellaren Gas- und Staubwolke unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenfällt. Während der Kollaps im frühen Universum, bei den ersten, nur aus H und He gebildeten Population-III-Sternen (Abschn. 1.15.2) ziemlich lange dauerte, nimmt er in späteren Zeiten nur wenige 100.000 Jahre in Anspruch. Dies geschieht, weil die beim Kollaps freigesetzte Gravitationsenergie – in Wärme umgewandelt – durch den aus schweren Elementen bestehenden Staub effizient abgestrahlt werden kann.

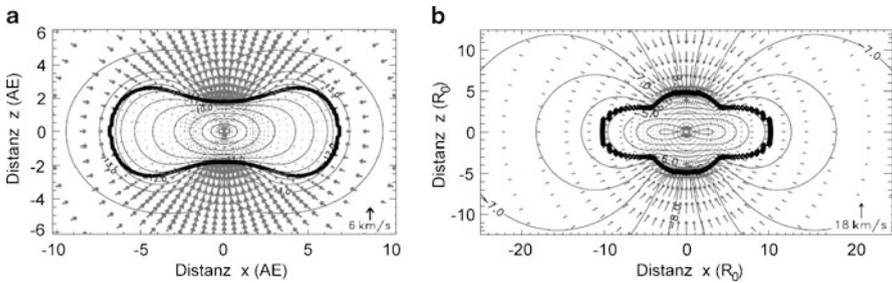
2.1.1 Molekülwolken und Staub

Galaxien besitzen sogenannte *Riesenmolekülwolken* mit Massen bis zu $10^6 M_0$. Diese bestehen hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff (H_2) und He, zusammen mit einer beträchtlichen Zahl weiterer Moleküle, wie z. B. OH, H_2O , CO, CS und NH_3 , sowie etwa 1 % Staub (Abb. 2.1a, b). Der Staub macht sich durch dunkle Absorptionsgebiete vor dem Hintergrund hell leuchtender Sterne und Emissionsnebel bemerkbar. Er bewirkt, dass das Innere der Wolken von einer Aufheizung durch die Strahlung der Umgebung abgeschirmt wird. Deshalb entwickeln sich dort kalte, dichte Gebiete mit Temperaturen von 5–10 K und Dichten von 10^3 – 10^5 Teilchen pro cm^3 . Solche Wolkenkerne werden schließlich so massereich, dass sie unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenfallen (Abb. 2.1c).

Da sich beim Kollaps der Durchmesser des Wolkenkerns von Lichtjahren zu dem eines präsolaren Nebels von einigen Hundert Astronomischen Einheiten ($1 \text{ AE} = 1,495 \times 10^8 \text{ km}$) unter Erhaltung des Drehimpulses um einen Faktor von etwa 1000 verkleinert, wird die geringe anfängliche Rotation, die alle ausgedehnten Gaswolken besitzen, erheblich verstärkt (Abb. 2.1c). Der inhomogene Wolkenkern zerbricht und die Rotation wird hauptsächlich in Bahnbewegungen von individuellen Bruchstücke umgewandelt (Abb. 2.1d). Aus solchen Wolkenfragmenten bilden sich *Protosterne*, die von *Akkretionsscheiben* umgeben sind (Abb. 2.1e). Beim Kollaps entsteht deshalb nicht nur ein einzelner Stern, sondern gleichzeitig ein ganzer Sternhaufen (Abb. 2.1d, 1.38). Die tellerförmige Gestalt einer Akkretionsscheibe rührt daher, dass der Kollaps parallel zur Rotationsachse praktisch ungestört verläuft, während er senkrecht dazu durch die Zentrifugalkräfte behindert wird. Die Rotationsrate bestimmt, ob das System als Vielfachsternsystem (70 % der Fälle) oder als Einzelsystem (30 %) endet.



■ **Abb. 2.1** Der Kollaps einer interstellaren Riesenmolekülwolke führt zu einem Sternhaufen mit Protosternen, die von Akkretionsscheiben umgeben sind

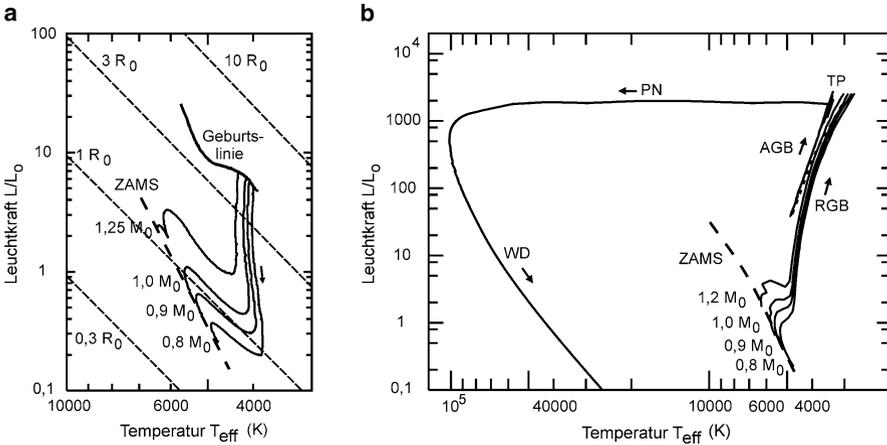


■ **Abb. 2.2** Kollaps eines Wolkenfragments von $1 M_0$. **a** erster Kern, nach 2300 Jahren, **b** Zentralgebiet mit zweitem Kern, nach 3700 Jahren (Tscharnuter et al. 2009)

2.1.2 Kollapssimulationen

Abbildung 2.2 zeigt eine Simulation der Endphasen einer Protosternbildung mit Akkretionsscheibe, die beim Kollaps eines rotierenden Wolkenfragments entstehen. In Abb. 2.2a ist ein Ausschnitt eines wesentlich größeren Rechengebiets dargestellt, 2300 Jahre nach dem Beginn der Protosternbildung. Konturlinien markieren Dichten, die zum Zentrum hin zunehmen, Pfeile geben Geschwindigkeiten und Richtungen der strömenden Materie an. Es hat sich eine Stoßwelle gebildet, auch erster Kern genannt (dicke Linie), bei der das einströmende Gas jäh abgebremst wird. Im Zentrum entsteht ein zweiter Kern. Das vergrößerte Zentralgebiet (Abb. 2.2b, in Einheiten des Sonnenradius $R_0 = 696.000 \text{ km}$) zeigt den zweiten Kern in höherer Auflösung. Hier wird das Material so verdichtet, dass sich hohe Temperaturen und Gasdrücke aufbauen weil die kühlende Strahlung blockiert wird. Nach 3700 Jahren entsteht aus dem zweiten Kern der Protostern, umgeben von seiner Akkretionsscheibe. Es treten nun (in der Rechnung noch nicht berücksichtigt) starke Magnetfelder auf, die den Stern mit der Scheibe verbinden. Kanalisiert durch diese Felder strömen von dort große Gasmengen auf den Stern zu und entlang der Rotationsachse in sogenannten *Jets* von ihm weg (Abb. 2.4).

2.2 · Vor-Hauptreihenentwicklung der Sterne



■ **Abb. 2.3** Sternentwicklung (Pfeile) im Hertzsprung-Russell-Diagramm. **a** Vor-Hauptreihenentwicklung von 0,8–1,25 M_0 -Sternen, **b** Nach-Hauptreihenentwicklung von 0,8–1,2 M_0 -Sternen bis zum Roten-Riesenast (RGB). Für einen 1 M_0 -Stern weiter zum Asymptotischen-Riesenast (AGB), den Thermischen-Puls- (TP) bzw. Planetarischen Nebel-(PN) Phasen bis zum Weißen-Zwerg (WD). ZAMS markiert die Hauptreihe. (Modifiziert nach Bernasconi 1996; Bloeker 1995; Bressan et al. 1993)

2.2 Vor-Hauptreihenentwicklung der Sterne

Das Innere des Protosterns besteht aus Kern und Hülle, deren Entwicklung weitgehend unabhängig vom Verhalten der Oberflächen- und Außenschichten verläuft. Es wird zunächst die innere Entwicklung des Protosterns beschrieben.

2.2.1 Innere Entwicklung

Üblicherweise wird die Entwicklung der Sterne mithilfe des sogenannten Hertzsprung-Russell-Diagramms (HR-Diagramm) dargestellt (Abb. 2.3a). Man trägt die Leuchtkraft L , d. h. die Energie, die der Stern pro Sekunde ausstrahlt (in Einheiten der Sonnenleuchtkraft $L_0 = 3,86 \cdot 10^{26}$ W), gegen die Effektivtemperatur T_{eff} auf, die grob der „Oberflächentemperatur“ des Sterns entspricht. In dem nach außen abfallenden Temperaturverlauf der Sternoberfläche repräsentiert die Effektivtemperatur ungefähr die Schicht, von der die aus dem Inneren kommende Strahlung ins Weltall entweicht. Zudem sind auch die Sternradien R (gestrichelt, in Einheiten des Sonnenradius R_0) angegeben. Leuchtkraft, Effektivtemperatur und Radius der Sterne hängen davon ab, wie viel Energie im Stern produziert wird und wie diese in der Sternhülle zur Oberfläche transportiert wird.

Nach dem Kollaps der präsolaren Wolke werden Protosterne auf der sogenannten *Geburtslinie* optisch sichtbar, nachdem sie vorher in Staubwolken verborgen waren (Abb. 2.3a). Die beim Kollaps freigesetzte Gravitationsenergie führt vor allem im Kern des Protosterns zu einem schnellen Temperaturanstieg. Wenn ungefähr 1 Mio. K erreicht wird, setzen Kernreaktionen ein und Deuterium ^2H beginnt mit Wasserstoff ^1H , zu ^3He zu fusionieren. Bei der Geburtslinie,