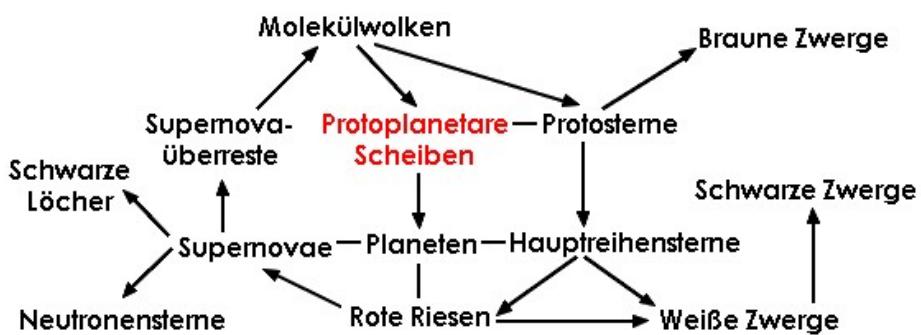


Materiekreislauf

Protoplanetare Scheiben

Grundlagen aus dem ersten Semester:
06-Sternarten und Sternentwicklung (Seite 11)



Im letzten Kapitel (über die Molekülwolken) sind unsere Berechnungen darauf hinausgelaufen, dass alle Teilchen der Molekülwolke gleichzeitig in diese stürzen. Das hat jedoch zu einigen Ergebnissen geführt, die nicht mit der Realität übereinstimmen, insbesondere beim Drehimpuls. Tatsächlich stürzen bei einem Kollaps nicht alle Teilchen gleich in die Molekülwolke, sondern bleiben zunächst als Hülle um den Stern bestehen. Durch die Fliehkräfte des rotierenden Sterns verformt sich diese Hülle zu einer Scheibe, der sogenannten „protostellaren Scheibe“. Durch die Gravitation wandern die Gasteilchen auf Keplerbahnen (sie kreisen wie Planeten um den Stern) und die Scheibe wird elliptisch. Ab diesem Zeitpunkt nennt man sie „protoplanetaren Scheibe“. In ihrer weiteren Entwicklung fällt sie teilweise in den Stern, fliegt teilweise in den Weltraum davon und bildet teilweise ein Planetensystem.

1 Temperatur

Die protoplanetaren Scheiben werden durch eine Vielzahl von Prozessen erwärmt. Der offensichtlichste ist die Wärmestrahlung des Sterns, um den die Scheibe kreist. Da die Scheibe vollständig mit Teilchen gefüllt ist, findet jedoch zusätzlich auch Wärmeleitung und Wärmeströmung statt. Diese Wärme nimmt mit der Entfernung zum Zentralstern ab.

Ähnlich wie die Planeten im Sonnensystem kreisen auch die Teilchen der protoplanetaren Scheibe nach den Kepler'schen Gesetzen um den Stern: Die äußeren Teilchen langsamer und die inneren schneller. Dabei reiben die Teilchen aneinander und auch dadurch entsteht Wärme. Diese Wärme ist in der Mitte der Scheibe am höchsten,

weil dort auf allen Seiten Teilchen reiben

Eine weitere Wärmequelle sind radioaktive Zerfälle, die in der Molekülwolke stattfinden. Diese finden in der Mitte am häufigsten statt, weil sich dort die meisten Teilchen befinden.

Insgesamt dominiert die Wärmestrahlung des Zentralsterns die Temperatur der Scheibe. Diese nimmt natürlich mit der Entfernung vom Stern ab, ist aber auch in der Mitte der Scheibe schwächer, weil dort die weiter außen liegenden Teilchen schon den Großteil der Wärmestrahlung aufgenommen hat.

In der Mitte der Scheibe und weit vom Stern entfernt ist die Molekülwolke mit nur 10K folglich am kühnst. In einem Radius von weniger als 1AU vom Zentralstern kann die Molekülwolke jedoch auch Temperaturen von mehr als 1000K erreichen. Insgesamt strahlt die Scheibe damit im infraroten Bereich.

2 Scheibenentwicklung

Die Temperatur der protoplanetaren Scheibe ändert sich im Laufe ihrer Entwicklung. Dadurch ändert sich auch das Spektrum der Scheibe und das kann man messen. Wenn man die Intensität des Spektrums im Vergleich zur Wellenlänge in einer Graphik aufträgt, und sich die Steigung des Graphen zwischen 2,2 und 10 μm anschaut, ist klar ersichtlich, in welcher Entwicklungsstufe sich die protoplanetare Scheibe befindet. Diesen Vorgang nennt man „Spectral Energy Distribution“

Klasse	Graph	Entwicklungsstufe	Alter
0	Graph beginnt erst nach $2.2\mu\text{m}$	Kollabierende Molekülwolke 	<10.000 Jahre
I		Stern mit Hülle und Scheibe 	10.000 - 40.000 Jahre
II		Stern mit protoplanetarer Scheibe 	ungefähr 3 Millionen Jahre
III		Stern mit Planetensystem 	20 - 100 Millionen Jahre (je nach Masse)

Das Alter kann man mit Hilfe der Häufigkeit der Sterne abschätzen. Je häufiger eine Sternklasse vorkommt, desto länger bleibt der Stern in dieser Klasse.

3 Beschreibung der Klassen

Klasse 0: Sobald die Molekülwolke anfängt zu kollabieren, handelt es sich um einen Stern der Klasse 0. Diese Klasse leuchtet ausschließlich im fernen Infrarotbereich, deshalb hat man sie auch als letztes entdeckt und erst im Nachhinein als Klasse 0 vor der Klasse I hinzugefügt. Der Stern hat sich in dieser Phase fast gar nicht gebildet, und hat deutlich weniger als die Hälfte der Endmasse.

Klasse I: Bei der Klasse I ist der Stern schon weiter entwickelt, sehen kann man ihn aber dennoch nicht, weil er noch zur Gänze von der Hülle umgeben ist. Im Laufe dieser Klasse wandern immer größere Teile der Hülle in die Scheibe, die mehrere

100 AU vom Stern wegreichen kann.

Klasse II: Bei der Klasse II hat sich die Hülle vollständig aufgelöst und es existiert nur noch die protoplanetare Scheibe. Die Scheibe strahlt im Infrarottbereich, der Stern hat Oberflächentemperaturen zwischen 3000 und 5000 Kelvin und ist damit im nahen Infrarot und im optischen Bereich bereits als Stern zu erkennen. Man nennt sie jetzt T-Tauri-Sterne. Die T-Tauri-Sterne sind 2 - 3 Sonnenradien groß.

Klasse III: Bei der Klasse III existiert auch keine Scheibe mehr, sondern nur noch der Stern und sein Planetensystem. Das Wasserstoffbrennen hat jedoch im Gegensatz zu einem Hauptreihenstern noch nicht begonnen. In dieser Phase nennt man den Stern „post-T-Tauri-Stern“ oder (weil im Unterschied zu T-Tauri-Sternen keine $H\alpha$ -Linie im Spektrum vorkommt) „weak lined T-Tauri-Stern“

4 Geschwindigkeiten

Damit die Teilchen in einer stabilen Umlaufbahn um den Stern bleiben, ist es notwendig, dass Gravitationskraft und Zentrifugalkraft gleich groß sind. Wäre die Gravitationskraft größer würden die Teilchen innerhalb kürzester Zeit in den Stern stürzen, wäre die Zentrifugalkraft größer, würden sie ins Weltall wegdriften. Wir können also die Formeln für beide Kräfte gleichsetzen:

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{v^2}{r} \quad (4.1)$$

Um die Geschwindigkeit eines Teilchens auszurechnen, muss man die Formel nach v umformen:

$$v = \sqrt{\frac{GMm}{r}} \quad (4.2)$$

Man erkennt, dass die Geschwindigkeit der Teilchen mit zunehmender Entfernung langsamer wird. Das bedeutet, dass die Teilchen aneinander reiben und sich dabei abbremsen. Deshalb fallen auch die Teilchen, die eine stabile Umlaufbahn in der protoplanetaren Scheibe haben, längerfristig in den Stern. Das ist einer der Gründe, warum die Scheibe nicht langfristig erhalten bleibt.

Um sich die Periodendauer auszurechnen, muss man die Länge der Umlaufbahn durch die Geschwindigkeit dividieren. Die Umlaufbahn wollen wir wieder als kreisförmig idealisieren.

$$P = \frac{l}{v} = \frac{2r\pi}{\sqrt{\frac{GMm}{r}}} \quad (4.3)$$

Diese Formel kann man quadrieren und oberhalb und unterhalb des Bruchstichs mit r multiplizieren

$$P^2 = \frac{4r^3\pi^2}{GMm} \quad (4.4)$$

Wurzel ziehen ergibt:

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{r^3}{GMm}} \quad (4.5)$$

Die Winkelgeschwindigkeit kann man ausrechnen, indem man die Dauer für den Umlauf des gesamten Kreises durch 2π dividiert

$$\omega = \sqrt{\frac{r^3}{GMm}} \quad (4.6)$$

Diese Berechnungen stimmen für die Gase in der Wolke nur näherungsweise, weil es in der Nähe des Sterns dichter und wärmer ist. Die wärmeren Gase versuchen aufzusteigen, außerdem üben die enger zusammengedrückten Teilchen eine stärkere Kraft nach außen aus. Beide Effekte führen dazu, dass neben der Zentrifugalkraft noch eine weitere Kraft, der Druckgradient, nach außen wirkt.

$$F_{\text{Gravitation}} = F_{\text{Zentrifugal}} + F_{\text{Druckgradient}} \quad (4.7)$$

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{v^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dr} \quad (4.8)$$

Das Minus kommt dadurch zustande, dass der Druck nach außen hin abnimmt und der Druckgradient damit negativ wäre. Die Kraft, die nach außen wirkt, ist jedoch positiv, weil sie den Druck ausgleicht und deshalb genau dagegen wirkt.

Da die Scheibe fast nur aus Wasserstoff besteht, kann man für die Dichte die Teilchenanzahl mal der Protonenmasse einsetzen (Wasserstoff besteht nur aus einem Proton und einem Elektron, wobei die Elektronenmasse im Vergleich zur Protonenmasse vernachlässigbar gering ist).

$$\rho = nm_p \quad (4.9)$$

Der Druck nach außen nimmt sowohl mit der Anzahl der Teilchen als auch mit der Temperatur linear zu, der Proportionalitätsfaktor ist die Boltzmannkonstante.

$$P = nkT \quad (4.10)$$

Einsetzen von 4.9 und 4.10 in 4.8 ergibt

$$\frac{GM}{r^2} = \frac{v^2}{r} + \frac{1}{nm_p} (n'kT + nkT') \quad (4.11)$$

wobei mit n' und T' jeweils die Ableitung nach dem Radius gemeint ist. Diese Formel kann man nach der Geschwindigkeit umformen und erhält so:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r} - \frac{rk}{m_p} \left(\frac{n' T}{n} + T' \right)} \quad (4.12)$$

Da Radius, Boltzmannkonstante, Protonenmasse, Teilchenanzahl und Temperatur positive Zahlen sind, bedeutet das, dass die genaue Geschwindigkeit etwas langsamer als jene aus 4.2 ist

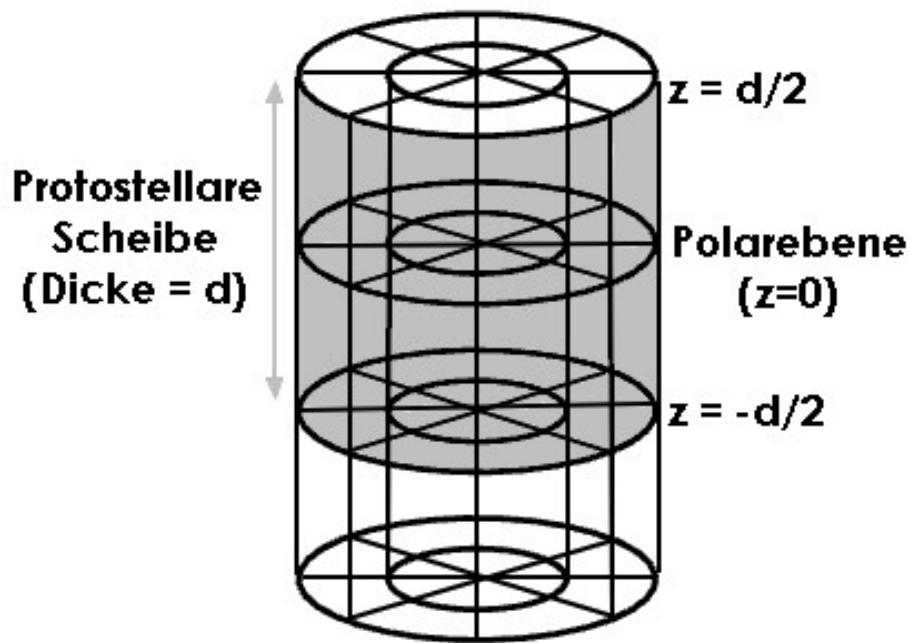
Interessant wird dieses Ergebnis dann, wenn sich die Planeten anfangen zu bilden. Die Kerne der Planeten bestehen aus Festkörpern, sodass sich diese mit der Geschwindigkeit aus Formel 4.2 durch die protoplanetare Scheibe bewegen. Da die Teilchen aus der protoplanetaren Scheibe langsamer sind, haben die Planeten ständig „Gegenwind“, der die Planeten bremst. Wenn die Planeten langsamer sind, wird aber auch die Zentrifugalkraft schwächer und die Planeten wandern weiter nach innen, wo sie noch mehr Gegenwind haben und dadurch noch langsamer werden.

In einer Entfernung von 1AU hätte dieser Gegenwind eine Geschwindigkeit von 700 - 1000km/h. Das bedeutet, dass der Planet in nur 100 Jahren in den Stern stürzen würde. Dass dennoch Planeten erhalten bleiben ist ein ungelöstes Problem in der Theorie der Planetenentstehung.

Eine mögliche Erklärung ist, dass die Planeten das Material so schnell anziehen, dass in ihrer Umgebung die Scheibe eine Lücke hat. Dann gibt es keine Teilchen, die den Planeten bremsen können und der Planet kann sich schneller um den Stern drehen und durch die damit gewonnene Zentrifugalkraft die zusätzliche Masse ausgleichen. Diese Theorie hat jedoch das Problem, dass der Planet am Anfang nur die schweren Elemente anziehen kann.

5 Kräfte

Da wir in diesem Kapitel auch die Dicke der protoplanetaren Scheibe benötigen, verwenden wir hier statt den Kugelkoordinaten Zylinderkoordinaten. Wir legen das Koordinatensystem so, dass die Polarebene genau in der Äquatorialebene liegt, sodass die z-Koordinate die halbe Dicke der protoplanetaren Scheibe darstellt. Den Radius in Zylinderkoordinaten nennen wir ρ um ihn vom Radius in Kugelkoordinaten zu unterscheiden.

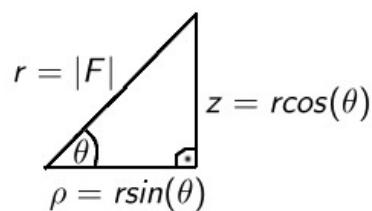


Die ϕ -Komponente fällt weg, weil die Kraft in dieser Richtung konstant bleibt. Die ρ -Komponente und die z -Komponente können wir gemeinsam mit der r -Komponente als rechtwinkeliges Dreieck betrachten. Dann können wir statt r laut Satz von Pythagoras $\sqrt{\rho^2 + z^2}$ einsetzen.

$$F_{\text{Zentrifugal}} = \frac{|v|}{\sqrt{\rho^2 + z^2}} \quad (5.1)$$

$$F_{\text{Gravitation}} = \frac{GMm}{\rho^2 + z^2} \quad (5.2)$$

In r -Richtung gleichen sich die Gravitationskraft nach innen und die Zentrifugalkraft nach außen genau aus, so dass die Teilchen in einer stabilen Umlaufbahn bleiben. (siehe voriges Kapitel). In ϕ -Richtung bleiben die Kräfte beide konstant. Wir interessieren uns also nur für die z -Komponente dieser Kräfte, die die Teilchen in die Äquatorialebene drückt. Um diese auszurechnen, verwenden wir wieder die Vorstellung der Koordinaten als rechtwinkeliges Dreieck



Daraus erkennen wir, dass die Beziehung

$$F_z = |F| \cos(\theta) \quad (5.3)$$

gilt. Um die gesamte Kraft, die in Richtung Scheibenmitte wirkt, auszurechnen, müssen wir die z-Komponenten von Gravitationskraft und Zentrifugalkraft zusammenzählen

$$F = \frac{(GMm + |v|\sqrt{\rho^2 + z^2})\cos(\theta)}{\rho^2 + z^2} \quad (5.4)$$

Dadurch wird auch klar, dass sich die Teilchen in der Äquatorebene anordnen: Dort ist der $\cos(\theta)$ und damit auch die ganze z-Komponente gleich Null. Die Kraft in Richtung Scheibenmitte nimmt mit der Nähe zum Stern und mit der Entfernung zur Scheibenmitte zu.

Da die Scheibe sehr dünn ist, kann man die Dicke z im Vergleich zum Radius vernachlässigen und erhält so die vereinfachte Formel:

$$F = \frac{(GMm + |v|r)\cos(\theta)}{r^2} \quad (5.5)$$

6 Folgerungen

Aus den Kräften, die die Teilchen nach innen drücken, kann man direkt auf einige andere Eigenschaften der Molekülwolke schließen:

Dichte: Je stärker die Kraft nach innen wirkt, desto dichter werden die Teilchen zusammengequetscht. Der Zusammenhang ist linear mit der Kompressibilität (κ) des Gases

$$\rho = \frac{\kappa(GMm + |v|r)\cos(\theta)}{r^2} \quad (6.1)$$

Dicke: Je stärker die Teilchen zusammengedrückt werden, desto dünner ist die Scheibe. Die Dicke hängt neben der Kompressibilität auch von der Teilchenzahl (n) ab

$$d = \frac{n\kappa(GMm + |v|r)\cos(\theta)}{r^2} \quad (6.2)$$

Die Teilchenzahl werden wir erst im Kapitel über das „Minimum Solar Nebula Model“ grob abschätzen können.

Druck: Die Teilchen werden immer so stark zusammengequetscht, dass der Druckgradient nach außen genau gleich groß, wie die Kraft nach innen ist

$$\frac{dp}{dz} = \frac{(GMm + |v|\sqrt{r^2 + z^2})\cos(\theta)}{\rho^2 + z^2} \quad (6.3)$$

Der Druck ist folglich das Integral nach z , wobei die Integrationskonstante 0 ist, weil ganz außen kein Druck herrscht.

$$p = \text{arsinh}\left(\frac{z}{r}\right) + \frac{\arctan\left(\frac{z}{r}\right)GMm}{r} \quad (6.4)$$

Schallgeschwindigkeit: Der Schall wird dadurch übertragen, dass sich die Teilchen gegenseitig anstupsen. Folglich ist die Schallgeschwindigkeit in dichteren Medien langsamer, weil sich mehr Teilchen anstupsen müssen, um den selben Weg zurückzulegen. In wärmeren Materialien ist die Schallgeschwindigkeit schneller, weil dort die Teilchen beweglicher sind und sich deshalb leichter anstupsen können. Die genaue Gleichung für die Schallgeschwindigkeit lautet:

$$c_s = \sqrt{\frac{kT}{\mu[m_p]}} \quad (6.5)$$

In dieser Gleichung ist c_s die Schallgeschwindigkeit und k die Boltzmannkonstante ($1,38 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$). $\mu[m_p]$ ist die mittlere Masse eines Gasteilchens in Protonenmasse, für die protoplanetare Scheibe kann man annehmen, dass aufgrund der noch nicht stattgefundenen Kernfusion hauptsächlich Wasserstoff in der Scheibe ist. Am schwierigsten ist das Einsetzen der Temperatur (T), weil sie aufgrund von Strahlungstransport und chemischen Reaktionen innerhalb der Scheibe sehr stark variieren kann. Die Temperatur kann man also nur numerisch nähern.

Die Schallgeschwindigkeit ist deshalb interessant, weil man mit ihr auch den Materiefluss abschätzen kann. Schall ist ein Auslöser dafür, dass sich Materie bewegt, den man leicht berechnen kann. Lässt sich die Materie leicht durch Schall bewegen, lässt sie sich auch leicht durch andere Kräfte wie zum Beispiel die Gravitationskraft bewegen. Das ist beispielsweise interessant, wenn man sich fragt, ob sich Planeten bilden können, bevor die Scheibe in den Stern fällt.

7 Scheibenstruktur

Um abzuschätzen, welche Struktur die protoplanetare Scheibe, aus der unser Sonnensystem entstanden ist, einmal gehabt hat, verwendet man das sogenannte „Minimum Solar Nebula Modell“. Das bedeutet, man betrachtet die Eigenschaften der heutigen Planeten und schließt so auf ihre Entwicklung.

Ursprünglich bestand unsere protoplanetare Scheibe, genauso wie alle anderen, hauptsächlich aus Wasserstoff. Die wenigen schweren Elemente, die aus ehemaligen Supernovaexplosionen in die Molekülwolke kamen, machten nur 1% der Materie aus. In den Gasplaneten, die hauptsächlich aus Wasserstoff bestehen, macht sich diese Zusammensetzung immer noch bemerkbar. Bei den inneren Planeten vermutet man, dass sie sich ursprünglich ebenso zusammengesetzt haben, aber die Sonne die

Wasserstoffatmosphäre abtragen konnte, sodass nur noch der Kern aus schweren Elementen übrig blieb.

In der Nähe der Gesteinsplaneten vermutet man deshalb, dass die Molekülwolke mindestens die 100-fache Menge an Atomen, wie die Gesteinsplaneten, gehabt hat. In der Nähe der Gasplaneten rechnet man nur mit mindestens der einfachen Menge. Mindestens deshalb, weil neben dem Material, das für die Planetenbildung aufgewendet wird, auch welches in den Stern fällt oder ins Weltall abdriftet. Das Minimum Solar Nebula Modell gibt also immer nur eine Mindestgröße der Wolke an.

Laut diesem Modell hat die protoplanetare Scheibe um die Sonne damals mindestens 1% der heutigen Sonnenmasse betragen. Das entspricht auch ungefähr den Beobachtungen von anderen protoplanetaren Scheiben in der Umgebung.

Die Menge der Gase dürfte nach außen linear abgenommen haben: Innerhalb des Asteroidengürtels sind die Planeten zwar kleiner, sie sind aber auch näher zusammen und bestehen fast nur aus schweren Elementen, weshalb man in diesem Bereich besonders viel Gas vermutet. Außerhalb des Asteroidengürtels nimmt der Abstand zwischen den Planeten zu und die Planetengröße ab, weshalb man vermutet, dass das Gas nach außen hin immer weniger wird. Der physikalische Grund dafür dürfte sein, dass die Gravitation des Sterns das Gas nach innen zieht.

Festkörper gibt es in der protoplanetaren Scheibe weit weniger, weil sie ausschließlich aus den seltenen schweren Elementen bestehen. (Wasserstoff ist überall gasförmig). Bei den Festkörpern ist die Abnahme an den meisten Stellen ebenfalls linear, es gibt nur zwei Ausnahmen:

In unmittelbarer Sonnennähe ist es so heiß, dass alle Festkörper verdampfen, die protoplanetare Scheibe besteht an dieser Stelle daher ausschließlich aus Gas. Aus diesem Grund können sich auch in unmittelbarer Sonnennähe keine Planeten bilden.

Bei der sogenannten „Snow line“, das ist die Stelle, bei der das Wassereis, dass einen sehr großen Anteil der Festkörper ausmacht, schmilzt, nimmt die Anzahl der Festkörper schlagartig zu. Sie liegt außerhalb der Marsbahn, weil der Treibhauseffekt in der protoplanetaren Scheibe aufgrund der zusätzlichen Gase größer als bei den derzeitigen Planeten war.

Bei den äußeren Planeten macht sich die Abnahme der Festkörper bemerkbar: Die meisten Festkörper befinden sich im Mondsystem des Jupiters, von dort weg hat jedes Planetensystem nach außen hin weniger Festkörper. Bei den inneren Planeten nimmt nur der Abstand zu.

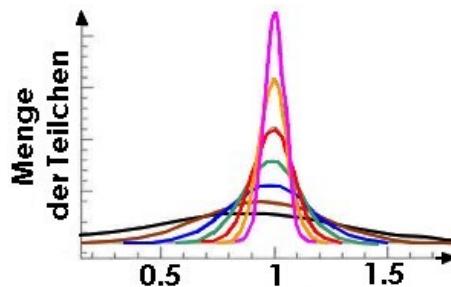
8 Auflösung der Scheiben

Die protoplanetaren Scheiben bleiben nach der Entstehung des Sterns durchschnittlich nur 3-Millionen Jahre lang erhalten. Spätestens nach 10-Millionen Jahren hat sich die Scheibe praktisch immer aufgelöst. Das hat mehrere Gründe

- Planetenbildung

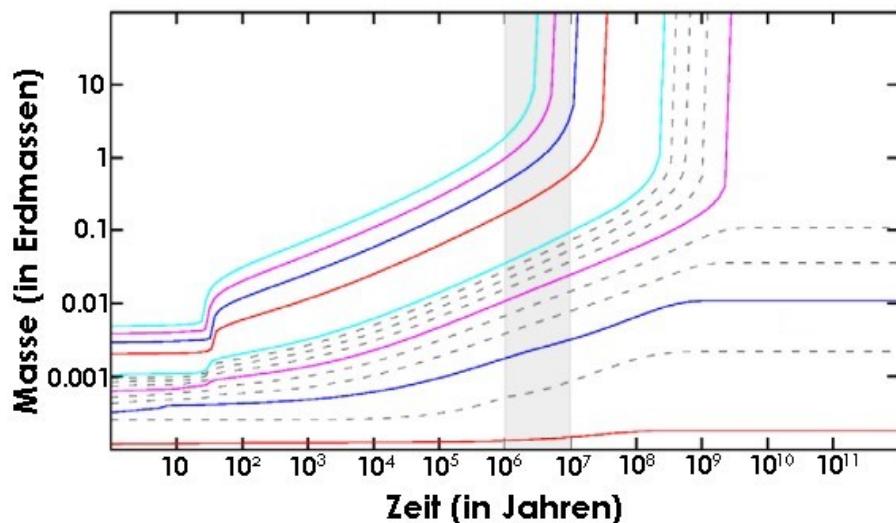
- Abdriften des Scheibenmaterials ins Weltall
- Akkretion des Scheibenmaterials in den Stern

Beim inneren Teil der Scheibe dominiert dabei die Akkretion des Scheibenmaterials in den Stern, beim äußeren Teil der Scheibe dominiert das abdriften des Scheibenmaterials ins Weltraum.



In dieser Grafik wird die Entwicklung des Materials betrachtet, dass sich an der Stelle befindet, wo das Abdriften des Scheibenmaterials in den Weltraum und die Akkretion des Scheibenmaterials in den Stern ungefähr gleich groß sind. (Diese Stelle ist mit der Entfernung 1 genormt). Die hellen Linien beschreiben die Verteilung des Materials nach einer kurzen Zeit, die dunklen Linien beschreiben die Verteilung des Materials nach einer längeren Zeit. Man erkennt, dass immer mehr Material nach außen und innen wegströmt, sodass langfristig kein Material in der Scheibe erhalten bleibt.

Planetenbildung: Dadurch, dass die Teilchen innerhalb der Scheibe näher als der Stern sind, üben diese mitunter eine stärkere Anziehungskraft als der Stern aus und verklumpen so mit anderen Teilchen. Zunächst ziehen sie nur die schweren Elemente an (deshalb besteht der Kern der Planeten auch immer aus schweren Elementen und erst die Atmosphäre aus Wasserstoff). Da es nur wenige schwere Elemente in der Scheibe gibt, ist das Wachstum noch langsam. Sobald der Planet jedoch ausreichend Masse hat, um auch Wasserstoff anzuziehen, beschleunigt sich das Wachstum stark und es entsteht ein Gasriese.



In dieser Grafik ist die Masse von Planeten im Vergleich zur Zeit, seit der Entstehung der Scheibe, aufgetragen. Man erkennt, dass die Planeten mit mehr als einer halben Erdmasse mit der Zeit einen Knick haben (je schwerer desto später) und der Graph danach fast senkrecht nach oben geht. Das ist der Punkt, an dem die Gravitation stark genug ist, um auch Wasserstoff anzuziehen. Die Graphik geht davon aus, dass die Scheibe endlos existiert. Allerdings ist sie durchschnittlich nur bis zum grauen Bereich vorhanden. Danach können die Planeten nicht mehr wachsen, weil es kein Scheibenmaterial zum Akkredieren gibt.

Die Zwergplaneten und Monde haben sich nicht zu Gasriesen entwickelt, weil sie weniger als eine halbe Erdmasse wiegen und deshalb nicht genug Gravitation ausüben, um auch den Wasserstoff anzuziehen. Die inneren Planeten konnten sich nicht zu Gasriesen entwickeln, weil dort die Sonne in der Nähe ist und die Atmosphäre abtragen konnte. Es ist also kein Zufall, dass sich in unserem Sonnensystem die Gesteinsplaneten alle innen und die Gasplaneten alle außen aufhalten.

In anderen Planetensystemen hat man schon Gasriesen entdeckt, die sehr nahe bei ihrem Stern sind. Bei diesen vermutet man, dass sie weiter außen entstanden und (zum Beispiel durch einen Zusammenstoß mit einem anderen Planeten) in die Mitte gewandert sind. Wieso sie nicht ganz in den Stern gefallen sind, ist jedoch noch unklar.

Abdriften des Scheibenmaterials ins Weltall: Die Oberfläche der Scheibe wird durch die hochenergetische Röntgenstrahlung des Sterns um 5.000 - 10.000K erhitzt. Durch die höhere Temperatur nimmt auch die Dichte ab: Das Material wird leichter und wandert nach außen. Weiter außen ist die Gravitationskraft schwächer, sodass das Material mit der gleichen Zentrifugalkraft eine höhere Chance hat zu entkommen.

In der Nähe des Sterns ist die Gravitationskraft sehr stark, so dass dort keine Teil-

chen ins Weltall abdriften. Allerdings nimmt weiter außen die Temperatur ab, sodass auch insgesamt nur ein sehr kleiner Teil der Scheibe auf diese Art verschwindet.

Die Energie die durch die Röntgenstrahlung erzeugt wird und die Teilchen nach außen bewegt, heißt mittlere Teilchenenergie. Sie ist linear von der Temperatur abhängig, die Proportionalitätskonstante ist die Boltzmannkonstante.

$$\text{mittlere kinetische Energie} = kT \quad (8.1)$$

Damit diese Energie die Teilchen nach außen befördert, muss sie größer als die Gravitationskraft sein, die sich durch das Newton'sche Gravitationsgesetz berechnet.

$$kT > \frac{GMm}{r} \quad (8.2)$$

Wenn man diese Gleichung nach r umformt, erhält man den sogenannten "gravitationellen Radius". Das ist der Abstand vom Stern, ab dem die Teilchen ins Weltall wegdriften.

$$r > \frac{GMm}{kT} \quad (8.3)$$

Wenn das Teilchen weiter weg ist, überwiegt die mittlere Teilchenenergie und die Teilchen driften ins Weltall ab. Wenn das Teilchen näher ist, ist die Gravitationskraft stärker und das Teilchen bleibt in der Scheibe.

Um diese Formel zu vereinfachen, bietet es sich an, die Formel für die Schallgeschwindigkeit

$$c_s = \sqrt{\frac{kT}{m}} \quad (8.4)$$

einzusetzen. Dann erhält man nämlich

$$r > \frac{GM}{c_s^2} \quad (8.5)$$

Wenn man durchschnittliche Werte für die Scheibe einsetzt, kommt man auf eine Entfernung von 10 - 30 AU, in der zwischen 100-Millionstel und 10-Milliardstel Sonnenmassen pro Jahr von der Scheibe ins All wegdriften.

Akkretion des Scheibenmaterials in den Stern: Dieser Prozess ist entscheidend für die weitere Sternentwicklung, weil der Stern dabei stark an Masse zulegt. Grund dafür ist die Reibung der Teilchen aneinander, die durch unterschiedliche Umlaufgeschwindigkeiten ausgelöst wird. Diese vom Radius abhängigen Geschwindigkeiten haben wir bereits in Formel 4.12. hergeleitet.

Die Reibung führt dazu, dass sich die Geschwindigkeiten der Bahnen aneinander anpassen. Da dabei jedoch auch Energie in Form von Wärme verloren geht, werden die Teilchen insgesamt gebremst. Diese langsameren Teilchen haben weniger Flieh- kraft und wandern nach innen. Dort werden sie noch weiter gebremst und wandern noch weiter nach innen. Langfristig wandern diese Teilchen in den Stern.