

Lebensweg der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Teil I

Ulrich v. Kusserow

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm

Oberflächentemperatur und Leuchtkraft sind zwei aus Beobachtungen und Berechnungen ermittelbare wichtige Parameter eines Sterns, die wesentliche Aussagen über seinen Aufbau und Entwicklungszustand ermöglichen. 1911 trug der dänische Astronom Ejnar Hertzsprung für Sterne einiger offener Sternhaufen die gemessene scheinbare visuelle Helligkeit als Funktion von der Farbe des jeweiligen Sterns in einem Diagramm auf und stellte dabei überrascht fest, daß sich die eingetragenen Punkte nicht wahllos über das Diagramm verteilen. Bestimmte Kombinationen der beiden Zustandsgrößen kamen bevorzugt vor, andere überhaupt nicht. Die meisten Sternpunkte lagen im Diagramm an einem entsprechend als *Hauptreihe* bezeichneten schräg liegenden Streifen. Rechts von einer steilen Linie, in deren Zusammenhang später der Begriff *Hayashi-Linie* geprägt wurde, traten überhaupt keine Punkte auf. Horizontal verlaufende Punktverdichtungen wurden als *Riesenäste* bezeichnet, weil sich die durch sie charakterisierten Sterne als sehr groß erwiesen. Zwei Jahre später fand der Amerikaner Henry N. Russell für andere Sterne ein ähnliches Ergebnis, verknüpfte mit der charakteristischen Punkteverteilung in diesem Diagramm bereits die Idee einer systematischen Sternentwicklung. 1913 wurde das Diagramm nach beiden Astronomen als *Hertzsprung-Russell-Diagramm* benannt. Es stellt heute für die Astrophysik ein wichtiges wissenschaftliches Handwerkzeug bei der Erforschung des Aufbaus und der Entwicklung von Sternen unterschiedlicher Masse und chemischer Zusammensetzung dar. Theoretiker tragen auf der Horizontalachse des Diagramms anstelle der Sternfarbe oder des Spektraltyps häufig die nach links zunehmende Oberflächentemperatur T_{eff} auf, an der vertikalen Achse wird anstelle der absoluten Helligkeit meist das Verhältnis L/L_{\odot} der Leuchtkraft L des Sterns im Vergleich zur Sonnenleuchtkraft L_{\odot} abgelesen.

Zur Darstellung des Entwicklungsweges der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Welcher interessierte Planetariumsbesucher hat nicht schon einmal ganz fasziniert von Weißen Zwergen, Roten Riesen und Planetarischen Nebeln gehört? Welcher Amateurastronom gebraucht nicht manchmal Begriffe wie Interstellare Materie, Protostern, T-Tauri-Stern, Herbig-Haro-Objekt, Blauer Überriese, wird vielleicht

unsicher, wenn er vom Heliumflash oder Schwarzen Zwerg hört? Wem ist aber wirklich bewußt, daß alle diese Begriffe auch eine wichtige Rolle im Leben unserer doch meist nur als gewöhnlicher Hauptreihenstern angesehenen Sonne gespielt haben, beziehungsweise noch spielen werden?

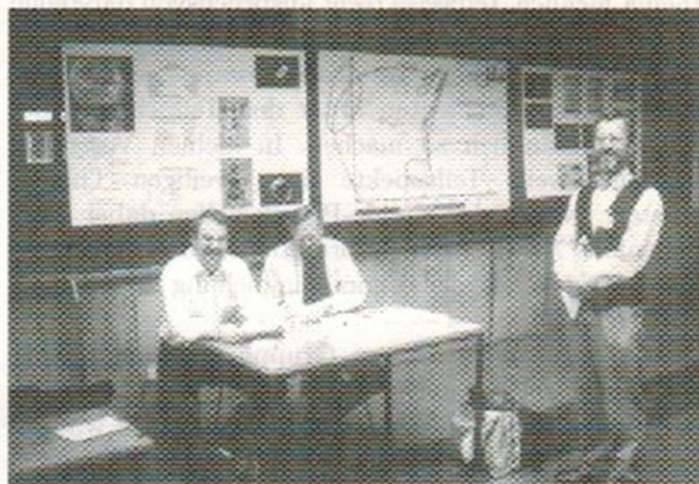


Abbildung 1: Informationsstand der ArGe Astrophysik auf dem 5. Norddeutschen Amateurastronomentreffen, 3. bis 4. Juli 1995 in der Universität Bremen mit Peter Richter (rechts).

Oft wird das Hertzsprung-Russell-Diagramm (im Folgenden HRD genannt) benutzt, um die Eigenschaften bestimmter Sterne von Sterntypen wie Weißen, Roten, Braunen, oder auch Schwarzen Zwergsternen, von Roten Riesen und Blauen Überriesen anhand der Lage ihrer Sternpunkte in diesem Zustandsdiagramm zu charakterisieren. Bei Sternhaufen fragt man nach dem Alter: handelt es sich um einen alten oder noch sehr jungen Sternhaufen? Die Menge der Sternpunkte eines solchen Haufens liegen entsprechend ihrer Masse nur noch bis zu einer bestimmten Höhe auf der Hauptreihe. Aus der Lage des Abknickpunktes läßt sich dann das Alter des Sternhaufens ermitteln. Manchmal wird, ausgehend von seiner Lage im HRD, danach gefragt, ob ein bestimmter Stern wohl als Neutronenstern oder Schwarzes Loch enden könnte. Nein, unsere Sonne wird nicht als Neutronenstern oder Schwarzes Loch enden, sie hat dafür eine zu kleine Masse. Das HRD ermöglicht also neben Aussagen über physikalische Zustände von Sternen auch die Darstellung ihrer Entwicklung. Selten aber wird in der Wissenschaft aufgrund einer fortschreitenden Spezialisierung der gesamte Entwicklungsweg eines Sterns im HRD von der Geburt bis zum Sterntod verfolgt. Abgesehen davon, daß man sich häufig nur eher für den Ablauf eines sehr speziellen Teilprozesses in seiner Abhängigkeit von der Sternmasse interessiert, werden selbst bei einmal festgelegter Sternmasse oft nur begrenzte Zeiträume der Entwicklung eines Sterns behandelt.

Unser Ziel war es dagegen, den *Entwicklungsweg* eines bestimmten Sterns, nämlich den *unserer Sonne*, mit genau vorgegebener Masse von $M = 2 \times 10^{30}$ kg und vorgegebener chemischer Zusammensetzung (70% Wasserstoff, 28,6% Helium und 1,4% schwerere Elemente) *durch alle Phasen seiner Entwicklung* hindurch, ausgehend von der Sterngeburt bis zum Sterntod, mit Hilfe des HRDs zu begleiten. Dazu war es erforderlich, Arbeitsergebnisse aus sehr unterschiedlichen Teilbereichen der Sternentwicklungstheorie zu sammeln, die die Sonne betreffenden Aussagen herauszufiltern und sie schließlich zur Erstellung eines Gesamtbildes vom Lebensweg der Sonne kompatibel aneinanderzureihen. Wir wollten dabei die nacheinander in ihrem Innern und ihrer Umgebung ablaufenden *physikalischen Prozesse* analysieren, sie uns immer wieder durch vereinfachende *Modellbetrachtungen* veranschaulichen und schließlich verstehen, mit welcher *Oberflächentemperatur* und *Leuchtkraft* als den zu beobachtenden charakteristischen Zustandsgrößen sich ein solcher Stern nach außen hin darstellen würde. Im HRD läßt sich für jeden Entwicklungszeitpunkt ein durch Eintrag der beiden Zustandsgrößen auf den Koordinatenachsen bestimmter *Entwicklungspunkt* eintragen. Die Aneinanderreihung all dieser Punkte ergibt dann eine *Entwicklungslinie im HRD*, entlang derer sich unsere Sonne bewegt. Natürlich handelt es sich hierbei nicht um eine wirklich räumliche Bewegung, vielmehr beschreibt diese Linie nur den Entwicklungsweg des nach außen durch Oberflächentemperatur und Leuchtkraft charakterisierten physikalischen Zustandes im Innern. Wir wollten nicht nur begreifen, welche verschiedenen elementaren physikalischen Prozesse im Sterninnern *ineinandergreifend* die Entwicklung vorantreiben, sondern dabei auch ein Gefühl und eine Vorstellung bekommen für die oft unfaßbaren Größenverhältnisse

in den sich ausbildenden Strukturen sowie zeitlichen Dimensionen in den sie bestimmenden Prozeßabläufen.

Die Entwicklungsphasen im Leben der Sonne

Erst zum Abschluß der Projektarbeit kristallisierte sich für uns die folgende grobe *Aufteilung des Lebensweges* der Sonne in *Teilabschnitte* als sinnvoll heraus:

1. Kollaps der Interstellaren Wolke und Ausbildung eines Protosterns
2. Entwicklungen in der Protosternphase
3. Entwicklungen in der Vorhauptreihenphase entlang der Hayashi-Linie und Henyey-Linie hin zur Hauptreihe
4. Entwicklungen in der Hauptreihenphase
5. Rote-Riesenphase und Entwicklungen hin zum Heliumflash (Nachhauptreihenphase I)
6. Entwicklungen in der Phase des Heliumbrennens bis hin zur Bildung eines Planetarischen Nebels (Nachhauptreihenphase II)
7. Entwicklungsphasen des Weißen Zwergs mit der abschließenden Bildung eines Schwarzen Zwergs (Nachhauptreihenphase III)

Im folgenden sollen die in den einzelnen Teilabschnitten ablaufenden, uns als wesentlich erscheinenden physikalischen Prozesse nacheinander kurz skizziert und dem ihm im HRD entsprechenden jeweiligen Abschnitt der Lebensentwicklungslinie zugeordnet, die dort eingetragenen Größen von Oberflächentemperatur und Leuchtkraft jeweils plausibel gemacht werden.

(Fortsetzung folgt)

Lebensweg der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Teil II

Ulrich v. Kusserow, Astrophysik AG

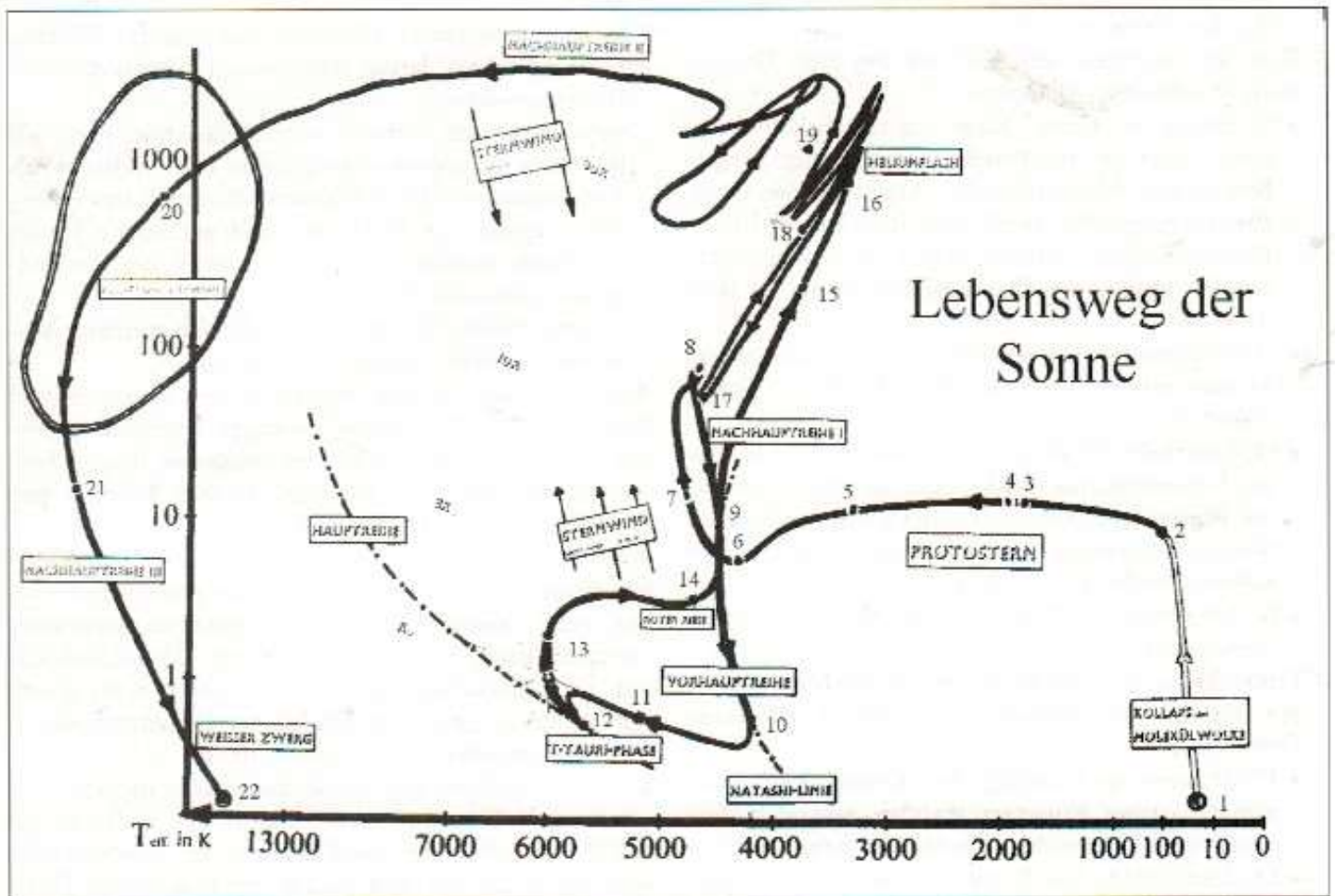


Abbildung 2: Darstellung des Lebensweges der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Jedem Entwicklungszeitpunkt des Sterns lässt sich durch Eintrag der Oberflächentemperatur T_{eff} auf der Horizontalachse und dem Größenverhältnis L/L_{\odot} seiner Leuchtkraft im Vergleich zur heutigen Leuchtkraft genau ein Punkt in diesem Diagramm zuordnen. Verschiedene Entwicklungsphasen sind durch Text und die in der folgenden Tabelle erläuterten Zahlen gekennzeichnet.

Lebensphasen der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

1. Kollaps der Interstellaren Wolke und Ausbildung eines Protosterns:

- 1) Verdichtung der Gaswolke, Fragmentation und Ausbildung von Bokglobulen.
- 2) Ende des isothermen Kollaps, Ausbildung eines hydrostatischen Kerns, adiabatisches Anwachsen der Zentraltemperatur.
- 3) Dissoziation der Wasserstoffmoleküle, Kernkollaps, Ausbildung des Protosterns, Einsetzen der Ionisation.

2. Entwicklungen in der Protosternphase:

- 4) Ausbildung einer Protostellaren Scheibe, Einsetzen des Deuteriumbrennens.
- 5) Magnetfelderzeugung durch Dynamowirkung, Ausbildung von Sonnenflecken, Protuberanzen, Flares, Einsetzen eines Sternwindes.
- 6) Sonnenwind behindert Materieakkretion.
- 7) Akkretionshülle wird zunehmend durchsichtiger.
- 8) Übergang von Staub- auf Gasphotosphäre, Durchblick auf die Protosternoberfläche.

3. Entwicklungen in der Vorhauptreihenphase entlang der Hayashi- und Henyey-Linie:

- 9) Überschreiten der Geburtslinie, Beginn der quasi-

hydrostatischen Kontraktion des nahezu vollkonvektiven Sterns entlang der Hayashilinie.

- 10) Einsetzen zentralen Strahlungstransportes, Beginn der Entwicklung entlang der Henyey-Linie zur Hauptreihe.
 - 11) Einsetzen der Wasserstoffkernfusion.
4. Entwicklungen in der Hauptreihenphase:
- 12) Stopp der Kontraktion, Ausbildung eines chemisch homogenen Gleichgewichtes mit zentralem Wasserstoffbrennen, Erreichen der Hauptreihe.
 - 13) Langsame Zunahme von Leuchtkraft und Temperatur, Erreichen des heutigen Entwicklungsstandes der Sonne.
5. Rote Riesen-Phase und Entwicklung zum Heliumflash (Nachhauptreihenphase I):
- 13) Stopp des Kern-, Einsetzen des Schalenbrennens, Ende der Hauptreihenentwicklung; Vergrößerung der Sternoberfläche, Abnahme der Oberflächentemperatur, Beginn der Rote Riesen-Phase; Einsetzen eines kontinuierlichen, langsamen Sternwindes; Beginn der Elektronentartung im Heliumkern.
 - 14) Einsetzen von Instabilitäten und Pulsationen, Massenverluste von etwa 30 % durch den Sternwind.
 - 15) Gleichzeitige Temperaturzunahme in der wasserstoffbrennenden Schale und im stark entarteten Heliumkern, Einsetzen einer abrupten, fortlaufenden Aufheizung (thermal runaway) der dazwischenliegenden Grenzschicht.
 - 16) Einsetzen von Instabilitäten, Heliumblitz (helium flash).
6. Entwicklungen in der Phase des Heliumbrennens bis zur Bildung eines Planetarischen Nebels (Hauptreihenphase II):
- 17) Temperaturerhöhung des Kerns, Aufhebung der Entartung, Einsetzen stabilen, zentralen Heliumbrennens, Erreichen der Heliumhauptreihe.
 - 18) Ausbildung eines Kohlenstoff-Kerns/Sauerstoff-Kerns, Einsetzen des Helium-Schalenbrennens, Koexistenz mit dem Wasserstoff-Schalenbrennen.
 - 19) Instabilitäten durch wechselseitige Beeinflussung der beiden Schalen, Heliumblitze, anschließendes Einsetzen eines schnellen Teilchenwindes, Massenverluste 20 %, Ausbildung eines Planetarischen Nebels.
7. Entwicklungsphasen des Weißen Zwergs, Bildung eines Schwarzen Zwergs (Hauptreihenphase III):
- 20) Freilegung des heißen Zentralsterns.
 - 21) Erlöschen der Fusionsprozesse, langsame Kontraktion des Weißen Zwergs, zunehmende Elektronentartung.
 - 22) Inverser β -Zerfall, Pyknonukleares Brennen, Ausbildung eines Kristallgitters, Entstehung schwererer Elemente, Beginn der Entwicklung zum Schwarzen Zwerg.

Kollaps der interstellaren Wolke und Ausbildung eines Protosterns

- 1) Geburtsort unserer Sonne, eines ganz gewöhnlichen Sterns, ist das interstellare Medium in einem etwas weiter als 30 Lichtjahre vom Zentrum unserer Galaxie entfernt gelegenen, als lokaler Arm bezeichneten Ausläufer eines Spiralarms der Milchstraße.
- 2) Die fünf zu unterscheidenden „Bestandteile“ der Materie zwischen den Sternen einer Galaxie sind
 - heiße koronale Gase in der direkten Umgebung der Sterne,
 - strahlungsionierte Regionen mit den für sie charakteristischen, farbig leuchtenden Emissions- und Reflexionsnebeln,
 - weiter von den Sternen entfernt liegende, mehr als 90 % des Volumens einnehmende kalte Materie mit vorwiegend neutralen Wasserstoffatomen sowie die
 - überwiegend mit Molekülen und geringerer Menge an Staub angefüllten, mehr als 95 % der Gesamtmasse tragenden Gebiete mit
 - diffusen Wolken mit noch zusätzlichem geringen Atomanteil beziehungsweise Molekülwolken.Allein in den beiden letztgenannten interstellaren Strukturen sind bei relativ niedriger Temperatur zwischen 10 und 100 Kelvin und genügend hohen Teilchendichten zwischen 100 und 10 000 Teilchen pro Kubikzentimeter die Sternentstehung möglich. Das Jeanskriterium, nachdem bei geeigneten Temperaturen innerhalb eines Raumbereiches das Kollabieren nur einer ausreichend großen Materieansammlung einsetzt, kann hier erfüllt werden. Molekülwolken mit im allgemeinen mehr als tausend Sonnenmassen beginnen unter dem Einfluß der Gravitationskraft zusammenzufallen (siehe Abbildung 3).
- 3) Die Anzahl möglicher Mechanismen, die den gravitativen Kollaps auslösen, ist groß. Die vielleicht als zufällig erscheinenden Verdichtungen der Materie können durch die die Spiralarme durchlaufenden Dichtewellen, durch den Zusammenstoß von Materiewolken, durch turbulente Strömungen innerhalb der Molekülwolke oder durch die von in der direkten Umgebung einer gerade ablaufenden Supernovaexplosion erzeugten Schockwellen erfolgen. Das Magnetfeld und der Drehimpuls der Galaxie, Sternwinde und die UV-Strahlung der Sterne sowie Besonderheiten in der chemischen Zusammensetzung der kollabierenden Materie bei Auskondensation von Staub und Anhäufung schwererer Elemente nach der Explosion einer Supernova sind wesentliche Faktoren des einsetzenden Prozesses (siehe Abbildung 4).

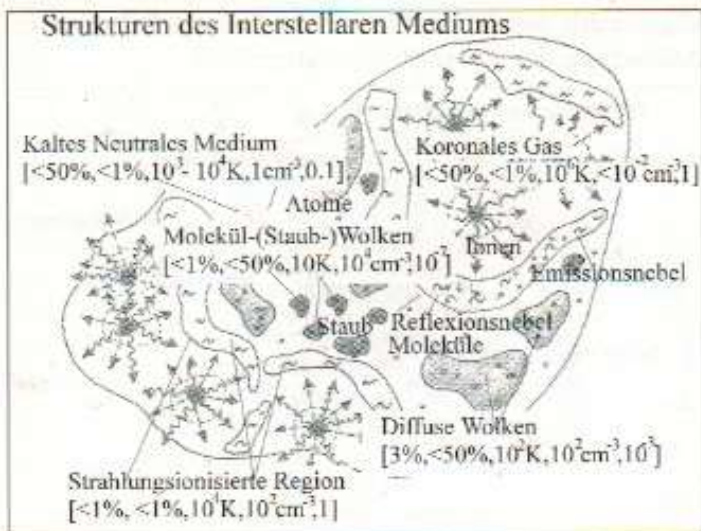


Abbildung 3: Charakterisierung unterschiedlicher Strukturen des Interstellaren Mediums, angegeben sind die Strukturnamen und die jeweils charakteristischen physikalischen Eigenschaften, [Volumenanteil, Masseanteil, Temperatur in Kelvin, Teilchendichte in Teilchen pro cm^3 , Ionisationsgrad zwischen nicht (0) und vollständig (1) ionisiert].



Abbildung 4: Verdichtung, Fragmentation und isothermer Kollaps von Molekülwolken, charakteristische Daten: Durchmesser $D = 10^{13} - 10^{15} \text{ km}$, Dichte $\rho = 10^{-19} - 10^{-16} \text{ kg m}^{-3}$, Temperatur $T = 10 \text{ K}$, Entwicklungszeitdauer $t = 10^7 \text{ a}$.

• 4) Es gibt mehrere Prozesse, die stabilisierend auf die Molekülwolke einwirken, den Kollaps also behindern. Zum Beispiel bewirkt dies das galaktische Magnetfeld, das in den ionisierten Anteil der kollabierenden Materie eingefroren ist, obwohl es mit zunächst weniger als etwa 30 Milligauß noch sehr schwach, im Vergleich zum Erdmagnetfeld um einen Faktor 10000 kleiner ist. Die relativ wenigen, durch tief in die Wolke eindringende kosmische Strahlung ionisierten Teilchen sind nämlich in ihrer Bewegung an den Verlauf der magnetischen Feldlinien gebunden, stoßen mit den in Vorzugsrich-

tung zum Gravitationszentrum durch das Magnetfeld diffundierenden, elektrisch neutralen Molekülen zusammen. Diese Teilchen werden so abgebremst, die hierbei freiwerdende Reibungswärme heizt die interstellare Materie auf mehr als 10 Kelvin auf. Magnetfelder als eine Art Korsett der Wolkenkerne behindern also zunächst einen raschen Kollaps. Das Bild eines in die ionisierte Materie eingefrorenen Magnetfeldes macht aber auch deutlich, daß das Magnetfeld bei später wachsendem und schließlich dominierendem Einfluß der Schwerkraft auf die Materiebewegung selbst in Richtung auf ein sich ausbildendes Wolkenzentrum hin gezogen und zusammengedrückt wird und dies zu einer starken Erhöhung der magnetischen Induktionsflußdichte führt. Hat also der dynamische Prozeß des freien Falls der Molekülwolke erst einmal effektiv eingesetzt, so verliert das Magnetfeld seinen ursprünglich behindernden Einfluß.

• 5) Neben dem Magnetfeld gibt es noch zwei weitere Prozesse im Zusammenhang mit den lokalen und globalen Geschwindigkeitsfeldern innerhalb der Gaswolke, die den Prozeß einer Sternentstehung behindern. Zum einen sind dies, durch Wirbelströmungen der Teilchen gebildete Mikroturbulenzstrukturen, die neben dem Gasdruck der Teilchen einen zusätzlichen inneren Druckanteil erzeugen, der der Gravitationswirkung entgegen wirkt. Zum andern erhöht sich beim einsetzenden Zusammenfall der Materie bei Abnahme des Wolkenradius nach dem Drehimpulserhaltungssatz gleichzeitig die Winkelgeschwindigkeit und somit auch die Rotationsgeschwindigkeit der Teilchen erheblich. Die so verstärkt wirkenden Fliehkräfte könnten nicht nur den weiteren Zusammenfall der Materie stoppen, die Wolke könnte sogar in Einzelteile zerreißen, auch wenn eingefrorene, jetzt stärkere Magnetfelder dies wiederum behindern würden.

• 6) Bei stetiger Zunahme der Massendichte findet tatsächlich bald eine Fragmentation der Urwolke, eine Aufteilung in kleinere Molekülwolken, als geeigneter Mechanismus zur Verteilung des Gesamtdrehimpulses des Systems auf die Einzeldrehimpulse, vor allem aber auch auf die Bahndrehimpulse der um den Schwerpunkt des Systems rotierenden Teilwolken statt. Ein solcher dabei entstandener solarer Urnebel mit erhöhter Materiedichte und eingelagerten galaktischen Drehimpuls- und Magnetfeldstrukturen erfüllt jetzt bereits für eine kleinere Gesamtmasse das Jeanskriterium und kollabiert im freien Fall mit Geschwindigkeiten von etwa 0,5 km/s unter Ausbildung einer nach seinem Entdecker benannten Bokglobule. Diese, vor dem hellen Hintergrundleuchten eines benachbarten Emissionsnebels dunkel erscheinende, kugelförmige Materieverdichtung mit einer Masse, die im allgemeinen kleiner als 100 Sonnenmassen ist, hat bei Temperaturen niedriger als 100 Kelvin eine Gesamtlichtkraft von kaum mehr als einige Zehntel der heutigen Sonnenleucht-

kraft erreicht. Der Durchmesser dieses sogenannten präsolaren Nebels wird zu Beginn seiner Entwicklung noch mehr als das fünf Millionenfache des heutigen Sonnendurchmessers betragen haben.

• 7) In der direkten Umgebung des präsolaren Nebels muß es damals mindestens eine Supernovaexplosion gegeben haben, die zusammen mit intergalaktischen Dichtewellen als Hauptauslöser der einsetzenden Verdichtung im solaren Urnebel angesehen werden kann. Nur so ist in unserem Sonnensystem das für die Entstehung von Leben auf dem Planeten Erde auch so wichtige Vorhandensein schwerer Atome bis hin zum Uran erklärbar. Untersuchungen von Meteoritenmaterial zeigen darüber hinaus auch die Notwendigkeit der Existenz eines älteren Roten Riesen in der Nähe der damaligen Urwolke, aus dessen Atmosphäre durch Sternwinde beobachtete charakteristische Isotope verschiedener Elemente in die Wolke eingebracht wurden.

• 8) Ausgangspunkt des Entwicklungsweges der Sonne im HRD ist die in Abbildung 2 mit (1) gekennzeichnete Stelle. Die Verdichtung der interstellaren Materie hat vorher bereits zur Fragmentation der großen Molekülwolke und Ausbildung der Bokglobule geführt. Im präsolaren Nebel findet man typische Temperaturen von etwa 10 K, die Leuchtkraft beträgt etwa 1/10 der heutigen Sonnenleuchtkraft.

• 9) Zu Beginn des nun einsetzenden freien Falls der Materie auf ein Zentrum der solaren Urwolke hin ist das Gas für die von den Molekülen und Staubteilchen abgegebene Radio- und Wärmestrahlung durchsichtig. Bei den noch sehr geringen Dichten von etwa $1/1016 \text{ kg m}^{-3}$ findet zumindest außerhalb des Zentralbereiches kaum Energieabsorption statt. Es tritt keine wesentliche Aufheizung der Gaswolke ein, der jetzt über einen Zeitraum von wenigen 100 000 Jahren ablaufende Prozeß wird deshalb als isothermer Kollaps bezeichnet. Der Lebensweg für diesen Entwicklungsbereich der Sonne läßt sich im HRD durch eine sehr steile, etwas nach links oben geneigte fast gerade Linie bis hin zu der mit (2) gekennzeichneten Stelle darstellen. Bei nur geringem Anstieg der Oberflächentemperatur auf etwa 100 K steigt dabei die Leuchtkraft durch Abstrahlung der verstärkt freiwerdenden Gravitationsenergie kontinuierlich auf das etwa Zehnfache der heutigen Sonnenleuchtkraft (siehe auch Abbildung 5).

• 10) Die Dichtezunahme innerhalb der näherungsweise kugelförmigen Molekülwolke erfolgt nicht überall gleichmäßig. Während in den äußeren Schalen bei fast gleichbleibendem Abstand vom Wolkenzentrum die Dichte nahezu konstant bleibt, führt der freie Fall in den inneren Bereichen zu einer schnellen Materieverdichtung. Hat sich hier erstmal eine Materiekonzentration ausgebildet, dann vergrößert sich diese auch schnell. Bei Zentraldichten ab etwa $1/1010 \text{ kg m}^{-3}$ wird dann die Materie optisch so dicht, daß die erzeugte Gravitationsenergie nicht mehr ungehindert nach außen

abgestrahlt werden kann, was zu einem adiabatischen Anwachsen der Zentraltemperatur führt.



Abbildung 5: Strukturen der präsolaren Wolke nach Ausbildung eines Protosterns im Inneren.

• 11) Bei weiterer Zunahme der Materiedichte auf mehr als $2/107 \text{ kg m}^{-3}$ bildet sich schließlich nach etwa einer halben Million Jahren im Innern ein zentraler Kern im quasi-hydrostatischen Gleichgewicht. Der durch erhöhte Dichte und Temperatur stark angewachsene Gasdruck stoppt hier jetzt den freien Fall der Materie, steht trotz andauernder langsamer Kontraktion des Kerns jeweils im Gleichgewicht mit dem Gravitationsdruck der Materie. Bei Temperaturen von etwa 170 K beträgt die Masse des so entstandenen Kerns zunächst nur etwa 0,5 % der heutigen Sonnenmasse, sein Radius hat noch die Größe der heutigen Jupiterbahn, beträgt etwa 1/500 des Radius des gesamten präsolaren Nebels. Der Kern ist von einer weiter einfallenden Materiehülle umgeben, aus der heraus Materie auf seine Oberfläche fällt und so seine Masse zunehmend vergrößert. Der gravitative Einfluß beider Gebiete auf die weiter außen gelegenen Randgebiete des Nebels ist sehr gering. Innerer Gasdruck und turbulente Strömungen bestimmen hier im wesentlichen die Bewegungsrichtung der Teilchen.

• 12) Beim Aufschlag der Materie auf den Kern bildet sich eine Schockfront aus, große Mengen an Akkretionsenergie werden innerhalb einer schmalen Oberflächenschicht frei. In Form eines kontinuierlichen Spektrums in einem mit zunehmender Oberflächentemperatur in Richtung zu kürzeren Wellenlängen größer werdenden Frequenzbereich wird diese Energie zum großen Teil nach außen in die Materiehülle hinein wieder abgestrahlt. Zusammen mit der durch Kontraktion des Kerns freiwerdenden Gravitationsenergie trägt sie aber auch zu einer Erhöhung der Kerntemperatur bei. Überschreitet diese Temperatur 2 000 K, so

beginnen im Zentrum Wasserstoffmoleküle in Wasserstoffatome zu dissoziieren. Die für diese Aufspaltung benötigte Dissoziationsenergie wird dabei der inneren Energie des Kerns entzogen, das hydrostatische Gleichgewicht kann nicht mehr aufrecht erhalten werden, der Kern wird dynamisch instabil und kollabiert erneut. Bei diesem als Kernkollaps bezeichneten Prozeß stürzt die gesamte nachfallende Kernmaterie in Richtung auf das Zentrum, wird erhitzt und dabei dissoziiert. Erst wenn die Wasserstoffdissoziation vollständig beendet ist, stellt sich ein neuer Gleichgewichtszustand ein. Dichte und Temperatur haben sich dabei soweit erhöht, daß zusätzlich die Ionisation der Atome einsetzt. Die sich getrennt voneinander bewegend Atomkerne und Elektronen bilden ein hochleitendes Plasma. Der sich jetzt (bei (3) in Abbildung 2) nach insgesamt etwa einer Million Jahren als Vorgänger des heutigen Sterns Sonne entwickelnde Kern im Zentrum des präsolaren Nebels wird im Folgenden als Protostern beziehungsweise Protosonne bezeichnet.

• 13) Die heutige Sonne ist ein Einzelstern. Ob sie es auch während der Protosternphase war, ist heute nicht mehr zu klären. Die Wahrscheinlichkeit, daß sich innerhalb der präsolaren Bokglobule eine erneute Fragmentation mit der Ausbildung eines Vielfachprotosternsystems ereignet hat, ist allerdings recht groß. Beobachtet man heute doch sehr viele Sterne in Doppel- und Mehrfachsystemen, zeigen auch neuere Modellrechnungen die Tendenz zur Ausbildung von kettenförmig angeordneten Sternansammlungen bestehend aus massereichen Randsternen mit mehreren dazwischen liegenden masseärmeren Sternen. Diese sonnenähnlichen Protosterne mit geringerer Masse könnten im Laufe ihrer Entwicklung beim Vorbeigang eines anderen Sternsystems soviel kinetische Energie gewinnen, daß sie aus ihrer Urwolke geschleudert würden. Möglicherweise wäre danach die Protosonne zwar noch

Mitglied eines engen Doppelsternsystems, sich ausbildende Akkretionsscheiben und einsetzende Gezeitenreibung würden schließlich jedoch zur Berührung und anschließendem Zusammensturz der beiden sich schnell und immer enger umkreisenden Partner führen. Neben der möglichen Ausbildung einer schon zu Beginn der Sternentstehungsentwicklung sehr kleinen präsolaren Molekülwolke bietet dieses Szenario eine weitere schlüssige Erklärung für die Entwicklung unserer Sonne als Einzelstern.

(Fortsetzung folgt)

Literatur

- [1] Der große JRO-Atlas der Astronomie, JRO Kartographische Verlagsgesellschaft mbH, München 1987
- [2] R. Mauersberger, Der Sternentstehung auf der Spur, Teil 1/2, *SuW* 11/12 1992
- [3] R. Mauersberger und Ch. Henkel, Der Sternentstehung auf der Spur, Teil 3, *SuW* 6/1993
- [4] St. W. Stahler, Die Entstehung der Sterne, Spektrum der Wissenschaft, September 1991
- [5] R. Kippenhahn, 100 Milliarden Sterne, Serie Piper 1984
- [6] R. Kippenhahn, A. Weigert, Stellar Structure and Evolution, Springer Verlag, 1991
- [7] Reviews in Modern Astronomy, 6: Stellar Evolution and Interstellar Matter, Astronomische Gesellschaft, Hamburg 1993
- [8] D. A. Williams, The Chemical Composition of the Interstellar Matter, in [7]
- [9] P. Bodenheimer, Theory of Protostars, in [7]
- [10] Ch. J. Lada, N. D. Kylafis, The Physics of Star Formation and Early Stellar Evolution, Kluwer Academic Publishers, 1991
- [11] B. G. Elmegreen, The Origin and Evolution of Giant Molecular Clouds, in [10]
- [12] Th. Henning, R. Sablotny, Kleiner Staub – ganz groß, *SuW* 3/1995
- [13] A. Burkart, Numerische Simulation der Sternentstehung in Molekülwolken, *SuW* 11/1993
- [14] K. Croswell, Dance of the Double Sun, *Astronomy*, Juli 1993

Lebensweg der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm

Teil III

Ulrich v. Kusserow, *Astrophysik ArGe*

Entwicklungen in der Protosternphase

1) Der erste Teil der solaren Protosternentwicklung ist durch einen nahezu horizontalen Verlauf der Lebenslinie im Hertzsprung-Russell-Diagramm gekennzeichnet (siehe hierzu im Folgenden Abbildung 2 aus den Olbers-Nachrichten Nr. 173). Während die Oberflächentemperatur des Protosterns dabei kontinuierlich von etwa 1000 K auf mehr als 4000 K ansteigt (Entwicklungspunkte (2) bis (5) in Abbildung 2), bleibt die Leuchtkraft nahezu konstant auf dem etwa Zehnfachen der heutigen Leuchtkraft. Im folgenden Teil der Entwicklung der im visuellen Spektralbereich noch nicht beobachtbaren Protosonne steigt die Leuchtkraft nach Durchlaufen eines ausgeprägten Minimums (Entwicklungspunkt (6)) bei geringer Oberflächentemperaturzunahme auf weniger als 5000 K zunächst noch einmal auf das etwa Zehnfache an (Entwicklungspunkt (8)). Während bisher die Staubphotosphäre als äußere Oberfläche der einfallenden Hülle (siehe Abbildung 5 in Nr. 173) die Ausstrahlung des Protosternsystems bestimmte, wird jetzt bei stark abnehmender Materieakkretion der Sternwind dominierend und schließlich der Blick auf die Gasphotosphäre frei. Nach starker Abnahme der Leuchtkraft durchläuft die Entwicklung bei (9) die sogenannte Geburtslinie der Sternentwicklung. Die Sonne wird jetzt mit einer Oberflächentemperatur von 4500 K und einer gegenüber heute etwa zehnfachen Sonnenleuchtkraft auch im Visuellen sichtbar. Obwohl der die Protosternentwicklung charakterisierende Abschnitt der Lebenslinie im HR-Diagramm recht lang ist, bleibt die Zeitdauer dieses Entwicklungsabschnittes mit nur etwa 200 000 Jahren im Vergleich zum insgesamt mehr als 12 Milliarden Jahre dauernden Leben der Sonne extrem kurz (siehe dazu Abbildung 6).

2) Abbildung 5 (siehe Olbers-Nachrichten Nr. 173) veranschaulicht modellhaft die charakteristischen räumlichen Strukturen innerhalb des protosolaren Nebels während der Protosternentwicklungsphase. Aus der sogenannten Akkretionshülle auf die Oberfläche des Protosterns einfallende Materie erzeugt hinter einer Schockfront große Mengen an Wärmeenergie. Dies führt zur Aufheizung des relativ kompakten hydrostatischen Kerns und bei Temperaturen von mehr als 1500 K zur Verdampfung von Staubpartikeln in der nach außen hin angrenzenden Schicht. Die von der heißen Protosternoberfläche ausgesandte kurzwellige elektromagnetische Strahlung kann diese ausgedünnte, sogenannte Opazitätslücke relativ ungehindert durchlaufen. In der optisch dichten Staubhüllenschicht wird

diese Strahlung wieder absorbiert, thermalisiert und schließlich in Form langwelligerer Radio- beziehungsweise Infrarotstrahlung von der als Staubphotosphäre bezeichneten äußeren Begrenzung der Staubhülle ausgesandt – diese Staubphotosphäre ist damit zumindest für Beobachtungen im Radio- und Infrarotbereich zugänglich. Die sich nach außen an die Akkretionshülle anschließende isotherme Randzone des protosolaren Nebels ist dabei optisch dünn und lässt die Strahlung in Beobachterichtung relativ ungehindert passieren.

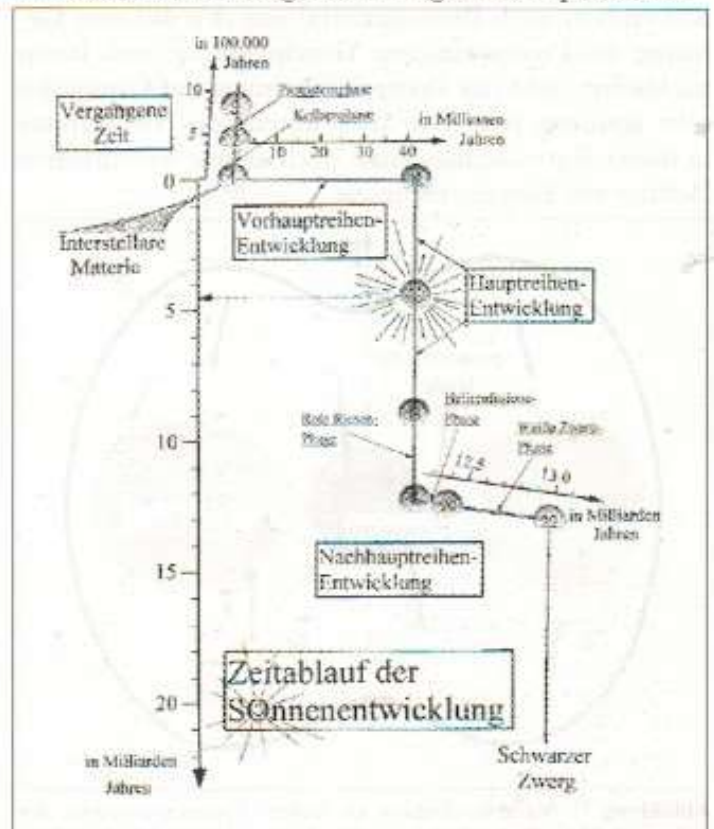


Abbildung 6: Chronik der Entwicklungsphasen eines sonnenähnlichen Sterns.

3) Die Abstrahlung des Protosternsystems wird zu Beginn der Protosternentwicklung bis zur Überschreitung eines Leuchtkraftmaximums entlang der Lebenslinie bei einer Oberflächentemperatur von etwa 2000 K (Entwicklungspunkt (4)) allein durch die beim Materieaufprall auf die Protosternoberfläche freiwerdende Akkretionsenergie gespeist. Solange dabei die Akkretion sehr heftig erfolgt, bleibt die Temperatur im gesamten Protosterninnern nahezu konstant. Erst wenn bei Verringerung der pro Zeiteinheit einströmenden Materiemenge auch die Leuchtkraft wieder abnimmt, trägt die bei der Kontraktion des Protosterns freiwerdende Kontraktionsenergie mehr und mehr zur Leuchtkraft bei. Bei stetiger Radiusabnahme erhöht sich zwar auch die Oberflächentemperatur, aber die einhergehende

Verkleinerung der Sternoberfläche führt insgesamt eher zu einer Leuchtkraftverringering. Im Protosterninnern bildet sich jetzt ein Temperaturgefälle aus. Während es im Zentrum zunehmend heißer wird, kühlt sich die Oberfläche ab. Eine sogenannte Konvektionszone, in der Konvektionsströmungen als effektiver Energietransportmechanismus wirken, wandert dabei im Laufe der Zeit weiter nach innen. Schon während der Akkretionsphase liefern auch erste sporadisch ablaufende nukleare Reaktionen Beiträge zur Leuchtkraft, die allerdings nur gering sind. So setzt im Zentrum des Protosterns bei Temperaturen von etwa 2 Millionen Kelvin Deuteriumbrennen ein, wobei durch das Verschmelzen schwerer Wasserstoffkerne zu Helium Fusionsenergie frei wird. Obwohl Materieaustausch durch Konvektion auch Brennmaterial aus den äußeren Gebieten des Protosterns zur Verschmelzung nach Innen nachliefert, gibt das Deuteriumbrennen auf Grund des sehr geringen relativen Masseanteils des Deuteriums in dieser Entwicklungsphase doch keinen wesentlichen Beitrag zur Energieerzeugung.

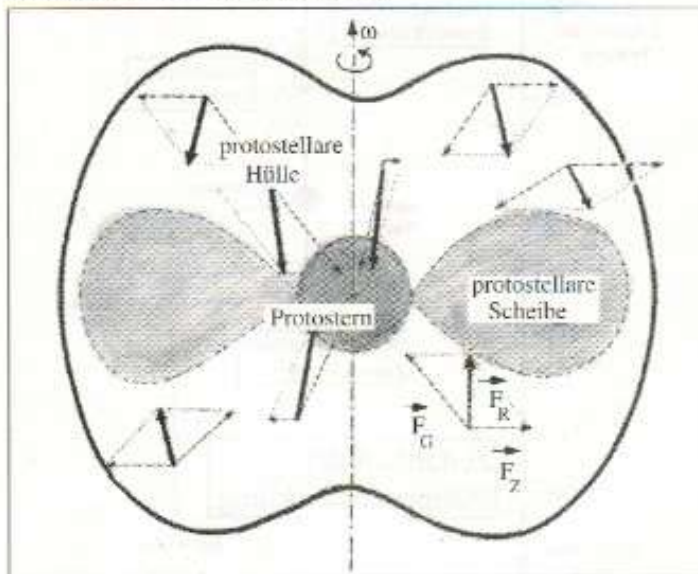


Abbildung 7: Materieakkretion im frühen Protosternsystem; die unterschiedliche Richtung der aus Gravitationskräften F_G und Zentrifugalkräften F_Z an verschiedenen Positionen im protostellaren System jeweils resultierenden Kräfte F_R machen die Einschnürung der Akkretionshülle oberhalb und unterhalb des Protosterns sowie äquatororientierte Materieverdichtungen mit der Ausbildung einer protostellaren Scheibe plausibel.

4) Das in der präsolaren Wolke aus der Protosonne und der Akkretionshülle bestehende Protosternsystem bleibt im Laufe seiner Entwicklung nicht kugelsymmetrisch. Die ursprüngliche protosolare Wolke trägt nämlich bereits einen von galaktischen Rotationsstrukturen eingeprägten Drehimpuls. Der Prozess der Materieakkretion bewirkt dann die Ausbildung einer eher scheibenartigen Struktur, die einen rotierenden ellipsoiden Protostern im Innern umgibt. Dadurch, daß Materie unter dem Gravitationseinfluß der zunehmenden zentralen Materieverdichtung nach innen wandert, kontrahiert das Protosternsystem. Aufgrund der Radi-

usabnahme verringert sich dabei das zum Quadrat des Radiusesses proportionale sogenannte Trägheitsmoment Θ des Systems noch sehr viel stärker. Nach dem Drehimpulserhaltungssatz muß sich dann bei konstantem Drehimpuls $\vec{J} = \Theta \vec{\omega}$ die Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$ und wegen $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ auch die Rotationsgeschwindigkeit \vec{v} jedes Materieelementes im Abstand $|\vec{r}|$ vom Zentrum deutlich vergrößern. Die Materieakkretion bewirkt also eine Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit des Systems. Einsetzende verstärkte Zentrifugalkräfte verformen so das Protosternsystem zu einem Rotationsellipsoid. Die auf Bestandteile des Systems wirkenden, aus Gravitations- und Zentrifugalkräften resultierenden Kräfte führen dabei an unterschiedlichen Orten des Systems zu sehr unterschiedlichen Bewegungen der Materie (siehe dazu Abbildungen 7 und 8). So fällt Materie nahe der Rotationsachse relativ direkt auf den zentralen Protostern. Das Rotationsellipsoid wird oben und unten (an den flachen Polen) durch Einbuchtungen verformt; die Akkretionshülle wird hier zunehmend dünner. In einer späteren Phase seiner Entwicklung öffnet sich der freie Blick auf den Protostern zuerst in der Richtung der Rotationsachse, die die Pole verbindet. In größerer Entfernung von der Rotationsachse strömt die akkretierende Materie zunächst bevorzugt zur Äquatorebene des Systems. Es bilden sich hier deshalb diskusartige äquatoriale Verdichtungen im Innern der Hülle aus. Modellrechnungen zur Strukturentwicklung rotierender Protosternsysteme bestätigen die Ausbildung solcher sogenannten protostellaren Scheiben als typische Strukturen um den zentralen Protostern herum.

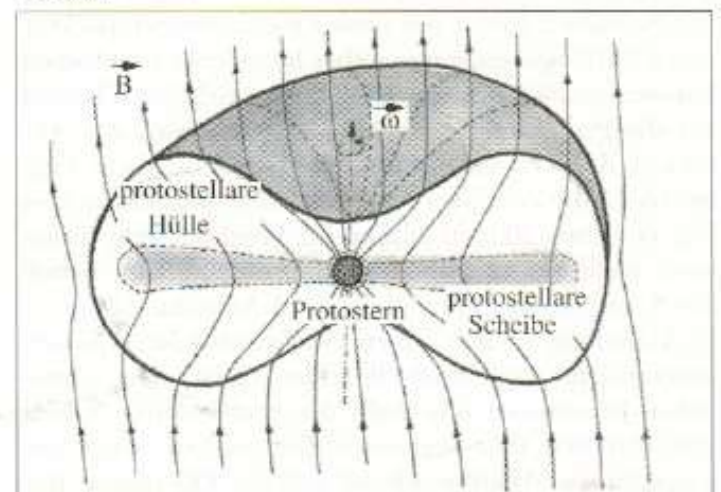


Abbildung 8: Verlauf fossiler Magnetfeldstrukturen im frühen Protosternsystem.

5) Die Ausbildung unterschiedlicher Magnetfeldstrukturen spielt bei der Entwicklung protostellarer Systeme in mehrfacher Hinsicht eine herausragende Rolle. Sowohl die anfängliche starke Kontraktion fossiler, interstellarer Magnetfelder galaktischen Ursprungs als auch die erst später einsetzende regenerative Erzeugung von Magnetfeldstrukturen durch sogenannte Dy-

namowirkung sind es, die schließlich die Ausbildung sehr komplexer Magnetfeldstrukturen bewirken können. Magnetohydrodynamische Prozesse sind für die Entstehung der Opazitätslücken, den Materieausfünungen zwischen dem zentralen Protostern und der ihn umgebenden Scheibe, verantwortlich. Sie vermitteln eine wesentliche Kopplung zwischen diesen beiden zentralen Bestandteilen des Protosternsystems und lenken die außerhalb der Äquatorebene einsetzenden Sternwinde, die mehr oder weniger gebündelten bipolaren Materieauswürfe und die Jets.

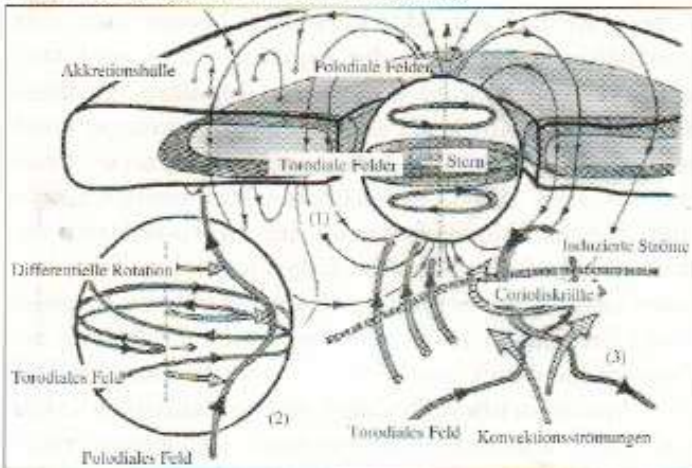


Abbildung 9: Veranschaulichung der Wirkung von differentieller Rotation und α -Effekt in einem Magnetfeldstrukturen regenerierenden $\alpha\omega$ -Dynamo. (1) Poloidale und toroidale Magnetfeldkomponenten in Sternen und Akkretionsscheiben. (2) Verformung von poloidalen zu toroidalen Feldkomponenten durch differentielle Rotation. (3) Verwirbelung toroidaler Feldkomponenten bei Einwirkung von Corioliskräften auf konvektive Strömungen. Der dabei induzierte Strom j ist der mittleren toroidalen Flußdichte B gemäß $j = \alpha B$ proportional (sogenannter „ α -Effekt“) und erzeugt poloidale Feldstrukturen.

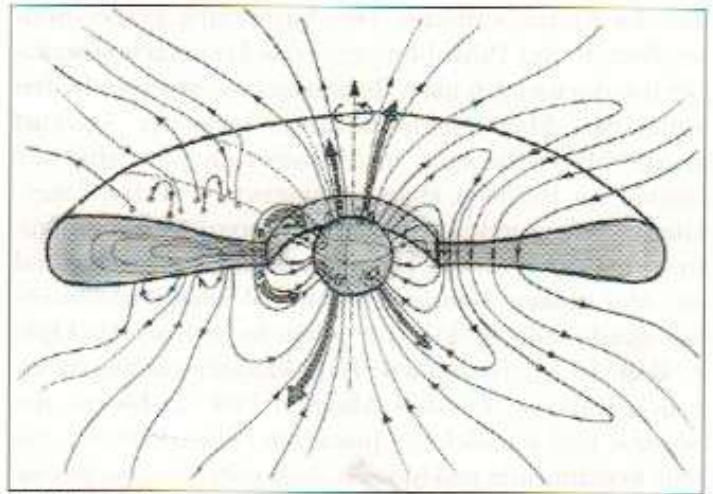


Abbildung 10: Die komplexe Magnetfeldstruktur eines jungen Sternsystems.

7) Sowohl in der Protosonne als auch in der sie umlaufenden Scheibe rotieren, bedingt durch einsetzende Drehimpulstransport-, Reibungs- und Turbulenzprozesse, unterschiedlich weit vom Zentrum entfernte Bereiche mit recht unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten ω ; das heißt es tritt sogenannte differentielle Rotation auf. Innerhalb beider Teile des protosolaren Systems bestehen zudem größere Temperaturgefälle, so daß konvektive Strömungen als effektive Energietransportmechanismen einsetzen. Sowohl die differentielle Rotation als auch die Konvektionsströmungen, die durch Corioliskräfte verdreht werden, verformen (sogenannter α -Effekt) immer wieder die ursprünglich fossilen, danach auch regenerierten „eingefrorenen“ Magnetfeldstrukturen. Dabei induzierte elektrische Ströme erzeugen ihrerseits neue Magnetfeldkomponenten. Modellrechnungen zeigen, daß beide Strömungsstrukturen geeignete Induktionseffekte aufweisen, die in einem als $\alpha\omega$ -Dynamo bezeichneten Szenario die Selbsterzeugung sowohl stationärer als auch zeitlich veränderlicher, mehr oder weniger periodischer Magnetfeldstrukturen bewirken können. Differentielle Rotation macht aus einer ursprünglich poloidalen Feldkomponente eine toroidale Feldstruktur, und der α -Effekt regeneriert seinerseits wieder das poloidale Feld (siehe dazu Abbildung 9).

8) Komplexe Wechselwirkungsprozesse zwischen fossilen und durch Dynamowirkung regenerierten Magnetfeldern in Protosternen und protostellaren Scheiben erzeugen vielfältige, recht verwickelte Magnetfeldstrukturen (siehe Abbildungen 10 und 11). Im Protostern selbst erwartet man die Ausbildung vorwiegend dipolartiger Magnetfelder mit magnetischen Flußdichten in Größenordnungen von bis zu tausend Gauß. Wegen der großen Rotationsgeschwindigkeiten der jungen Sonne brechen dabei vorwiegend in hohen protosolaren Breiten zeitlich periodisch immer wieder noch sehr viel stärkere torusförmige, sogenannte toroidale Flußröhren

6) In dem bei der frühen Gravitationskontraktion des protostellaren Systems zunehmend heißer werdenden Plasma müssen fossile Magnetfeldstrukturen galaktischen Ursprungs bei wachsender elektrischer Leitfähigkeit schließlich als in die kontrahierende Materie „eingefroren“ angesehen werden. Mit der kontrahierenden Materie werden die Magnetfelder im Protostern und in der Akkretionshülle in jeweils charakteristischer Weise zusammengedrängt. Wegen der Konstanz des magnetischen Induktionsflusses $\phi = \vec{B}\vec{A}$ durch jedes gerichtete Flächenelement \vec{A} muß bei dessen Verkleinerung gleichzeitig die magnetische Induktionsflußdichte B als Maß für die Magnetfeldstärke stetig zunehmen. So könnte sich die magnetische Flußdichte im Inneren eines Protosterns im Laufe von etwa 100 000 Jahren von dem Wert des interstellaren Magnetfeldes, der etwa 1/100 000 Gauß beträgt, auf 10 Gauß erhöhen, wenn sich der Radius des Protosterns um den Faktor 1000 verkleinert, da die Querschnittsfläche proportional zum Quadrat des Radiuses ist. Abbildung 8 veranschaulicht einen möglichen Verlauf zusammengedrängter fossiler magnetischer Feldlinien in einem relativ jungen protostellaren System.

aus der Sternoberfläche. Die Ausbildung großer Sonnenflecken und Protuberanzen, das Freisetzen gewaltiger Energiemengen nach Rekonnexionsprozessen in den komplexen Magnetfeldstrukturen sowie der Auswurf großer Materiemengen in Masseneruptionen sind die hierbei im Rahmen eines magnetischen Aktivitätszyklusses auftretenden typischen Phänomene. In der Protosternscheibe wirken Dynamomechanismen aufgrund der hier großen Temperatur- und Winkelgeschwindigkeitsgradienten effektiv vor allem in dem an die Opazitätslücke angrenzenden Teil. Modellrechnungen ergeben stärkere toroidale Magnetfelder im Innern der Scheibe und schwächere, poloidale Feldstrukturen, die teils bogenförmig geschlossen, teils offen sind, wobei sie vom Protostern weg nach außen verlaufen. In der Meridionalebene verlaufende, sogenannte poloidale Felder des Protosterns durchsetzen auch nahe Bereiche der protostellaren Scheibe.

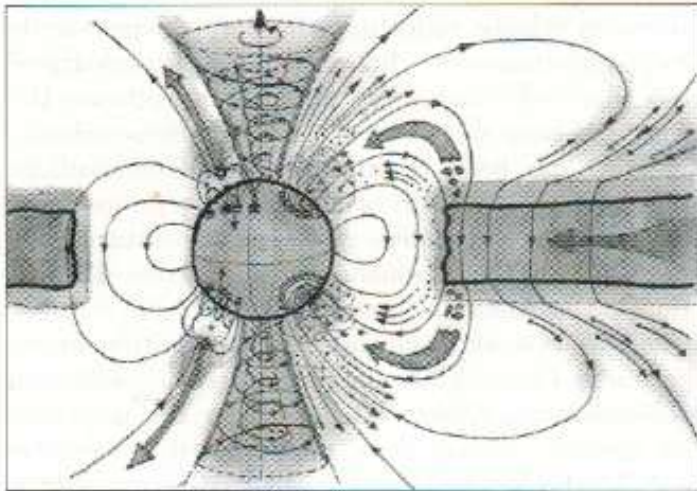


Abbildung 11: Die komplexen Materieströmungen innerhalb eines jungen Sternsystems; Materietransport in der Akkretionsscheibe, Konsistenz der Opazitätslücke, Ausbildung polarer heißer Flecken beim Materieaufschlag auf die Sternoberfläche, Rekonnexionsprozesse und Eruptionen mit Materieauswürfen in polnahen Aktivitätsgebieten, zentrifugalgetriebene Scheiben- und Sternwinde, bipolare Ausflüsse und Jets entlang magnetischer Oberflächen.

9) Eine der Ursachen für die Entstehung der Materielücke zwischen Protostern und protostellarer Scheibe, die bei Beobachtungen auch als Emissionslücke in Erscheinung tritt, liegt in der hier bei Temperaturen von mehr als etwa 1500 K erfolgenden Verdampfung von Staub. Vor allem auch die sich im Laufe der Protosternentwicklung ausbildende dipolartige Magnetosphäre des Protosterns mit ihren recht hohen magnetischen Flußdichten bildet schließlich eine wirkungsvolle Barriere gegen den ungehinderten Einsturz weiterer Materie aus der Akkretionshülle in den Äquatorbereich des jungen Sterns. Einige Sternradien vom Systemzentrum entfernt stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Druck der akkretierenden Materie und dem magnetischen Druck ein, womit der direkte Durchfluß und die Auffüllung der Opazitätslücke mit Ma-

terie verhindert wird. Ionisierte Materie bewegt sich aber entlang der gekrümmten, dipolartigen protosolaren Feldstrukturen polwärts und schlägt in höheren Breiten mit großer Energie unter Ausbildung extrem aufgeheizter Gebiete auf die Protosternoberfläche auf. Bei Protosternsystemen mit relativ geringem Gesamtdrehimpuls, ohne starke Magnetosphäre, mit relativ großem Gesamtmassenanteil in der Scheibe sowie hoher Akkretionsrate würde die Opazitätslücke nur sehr schmal sein oder sogar ganz wegfallen.

10) In der Umgebung von Sternentstehungsgebieten in dichten Kernen von Molekülwolken beobachtet man oberhalb und unterhalb der Äquatorscheibe protostellarer Systeme sowohl sogenannte bipolare Ausflüsse molekularer Materie als auch mehr oder weniger stark gebündelte sogenannte Jets ionisierter Materie. Ursache dieser als Winde bezeichneten Materieströmungen sind Beschleunigungsprozesse im protostellaren System. Thermische Prozesse aufgrund hoher Temperaturen oder durch Strahlungsdruck getriebene Prozesse sind hierfür nicht effektiv genug. In der Frühphase der Protosternentwicklung wird die Ausströmung der Teilchen fast ausschließlich durch starke Zentrifugalkräfte getrieben: ionisierte Materie wird im schnell rotierenden Protosternsystem entlang offener magnetischer Feldlinien oberhalb und unterhalb der Äquatorebene mehr oder weniger schräg vom Sternsystem weg nach außen beschleunigt. Durch Reibungskräfte vermittelt werden auch die neutralen Atome – weiter außen vorwiegend auch Moleküle – mitgezogen und bilden so die beobachteten ohrenförmigen bipolaren Ausflußwolken. Nach Ausbildung der dipolartigen Magnetosphäre und polnaher magnetischer Aktivitätsgebiete sowie bei schnell abnehmender Dicke der Akkretionshülle oberhalb beider Pole setzen verstärkt Jets mit dem Ausfluß stark ionisierter Materie ein. Ausgehend von den durch Materieeinsturz gebildeten heißen Flecken (beschleunigt auch in Flares und Masseneruptionen nach Rekonnexionsprozessen in magnetischen Strukturen mit eingelagerter Materie unter Freisetzung magnetischer Energien) schießt die Materie entlang der stark polnächsten orientierten Magnetfeldbündel nach außen. Abbildung 11 veranschaulicht, wie starke zentrifugalgetriebene Winde auch in Bereichen der Opazitätslücke Materie von der protostellaren Scheibe weg nach außen transportieren.

11) Modellrechnungen gehen davon aus, daß nach einer Entwicklungszeit von etwa 100 000 Jahren die Materie unseres protosolaren Systems noch etwa gleichmäßig auf die Protosonne und die protosolare Scheibe verteilt war, wobei auf beide Bestandteile mehr als 0,5 Sonnenmassen entfielen, und die darüber einfallende Hülle nur noch einen kleinen Bruchteil der Gesamtmasse des Systems enthielt. Während anfänglich ein Großteil der akkretierenden Materie eher auf die Scheibe als auf den zentralen Stern fiel, erfolgte anschließend verstärkt

der Massetransport von der Scheibe zum Protostern hin. Nach dem Drehimpulserhaltungssatz müßte dies eigentlich eine kontinuierliche Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der zentralen Protosonne zur Folge haben. Tatsächlich zeigen sonnenähnliche Vorhauptreihensterne, sogenannte T Tauri Sterne, aber relativ geringe Geschwindigkeiten. Ein Großteil des Drehimpulses des Protosterns muß also im Laufe der Entwicklung effektiv nach außen abgeführt worden sein. Tatsächlich transportieren die Sternwinde einen beträchtlichen Masseanteil des Systems mit erheblichen Geschwindigkeiten, also auch mit einem großen Drehimpulsanteil nach außen weg. Der Rotationsdrehimpuls des Protosterns kann, durch magnetische Kopplung und Reibungsprozesse vermittelt, nach außen abgeführt und in Bahndrehimpuls innerhalb der Scheibe, später auch in den Eigendrehimpuls kompakter Scheibenkörper (Planetsimale, Planetoiden, Planetenembryos und Planeten) verwandelt werden. Eine starke Magnetosphäre der Protosonne verhindert zudem eine weitere Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit des Zentralkörpers. Die von der Scheibe, die bald wesentlich schneller als der Protostern selbst rotiert, auf die Oberfläche einströmende Materie wird hier abrupt abgebremst, umgelenkt und entlang der polaren magnetischen Feldlinien nach oben beziehungsweise unten weg beschleunigt. Materiejets stellen so einen besonders effektiven Mechanismus zum Abtransport des Drehimpulses dar. Beim Auftreffen der Akkretionsmaterie auf die Magnetosphäre können zudem Schockwellen ausgelöst werden. In Form von spiralförmigen Schallwellen würde so zusätzlich Drehimpuls nach außen abgeführt.

12) Während sich im Laufe der Entwicklung immer mehr Masse im Protostern ansammelt, bleibt der Abstand der Akkretionsschockfront vom Sternzentrum (der sogenannte Schockradius) aber etwa konstant, und die Leuchtkraft des Protosterns steigt zunehmend an. Die Akkretionsrate der einströmenden Materie nimmt schließlich stark ab, die Aufheizung durch Materieeinstrich verringert sich, und die Leuchtkraft geht wieder zurück. Bald ist dann nur noch wenig Materie vorhanden, die oberhalb und unterhalb der Äquatorebene direkt auf den Protostern fallen kann. Der Druck des stark jetartig gebündelten ionisierten polaren Sternwindes ist schließlich stärker als der Akkretionsdruck

dieser Materie. Der Sternwind bläst dann den Protostern frei. Es erfolgt ein Übergang der Beobachtungsmöglichkeit von der Staub- zur Gasphotosphäre. Innerhalb einer protostellaren Scheibe ist jetzt auch im optischen Bereich der als T Tauri Stern bezeichnete Vorhauptreihenstern sichtbar geworden. Der Entwicklungsweg des Protosterns hat im Entwicklungspunkt (9) die sogenannte Geburtslinie durchstoßen.

Literatur

- [10] Ch. J. Lada, N. D. Kylafis, *The Physics of Star Formation and Early Stellar Evolution*, Kluwer Academic Publishers, 1991
- [15] F. H. Shu, *The Formation of Low Mass Stars: Theorie*, in [10]
- [16] L. Hartmann, *Episodic Phenomena in Early Stellar Evolution*, in [10]
- [17] W. Kley, D. N. C. Lin, *The Structure of the Boundary Layer in Protostellar Disks*, *ApJ*, 461, 1996
- [18] R. E. Pudritz, G. Pelletier, A. J. Gomez de Castro, *The Physics of Disk Winds*, in [10]
- [19] G. Paatz, M. Camenzind, *Wind and Accretion Flows around T-Tauri Stars*, *A&A* 308, 1996
- [20] M. Camenzind, *Magnetized Disk-Winds and the Origin of Bipolar Outflows*
- [21] R. Blandford, A. Königl, *The Disk-Jet Connection*, *Sky&Telescope*, 3/1993
- [22] A. Königl, *Accretion Disks and Jets in Protostellar Systems*
- [23] Th. Bührke, *Stellare Jets*, *Sterne & Weltraum*, 6/1995
- [24] H. Elsasset, *Circumstellar Disks and Rings – Observational Results*
- [25] H. J. Staudt, Th. Neckel, *Bipolar Nebulae driven by the Winds of Young Stars*
- [26] G. Rüdiger, D. Elstner, T. F. Stepinski, *The Standard-Accretion Disk Dynamo*, *A & A* 298, 1995
- [27] M. Schöller, K. Solanki, *Why Rapid Rotators have Polar Spots*, *A & A* 264, 1992
- [28] C. Bertout, G. Basri, S. Cabrit, *The Classical T-Tauri Star: Future Solar System?*
- [29] K. J. Fricke, R. Kippenhahn, *Evolution of Rotating Stars*, *Ann. Rev. A & A* Vol.10, 1972
- [30] G. Belvedere, *The Relevance of magnetic Fields to Stars and Accretion Disks*, in [10]
- [31] H. C. Spruit, *Accretion and Particle Acceleration by Spiral Shock Waves*
- [32] R. N. Henriksen, *Jets and Magnetic Fields*
- [33] A. C. Cameron, C. G. Campbell, *Rotational Evolution of Magnetic T-Tauri Stars with Accretion Disks*, *A & A* 274, 1993
- [34] T. Montmerle, *The Close Circumstellar Environment of Young Stellar Objects*