

Das Projekt ALMA Mater*

Teil 4: Eine Beobachtung, die es in sich hat: eine „Kinderstube“ für Planeten

*Wir verwenden die Bezeichnung Alma Mater als Synonym für eine Universität. Seinen Ursprung hat das Doppelwort im Lateinischen (alma: nähren, mater: Mutter). Im übertragenen Sinne ernährt die (mütterliche) Universität ihre Studenten mit Wissen. Und weiter gesponnen ernährt das Projekt ALMA auch die Schüler und Studenten mit Anreizen für das Lernen. (Zudem bedeutet das spanische Wort ‚Alma‘: Seele.)

In Bezug (Materie bei T-Tauri-Sternen) zum Beitrag „Der Staubring von GG Tauri“ von Wolfgang Brandner in der Zeitschrift „Sterne und Weltraum“ (SuW) 7/2015, S.30/31, WIS-ID: 1285836

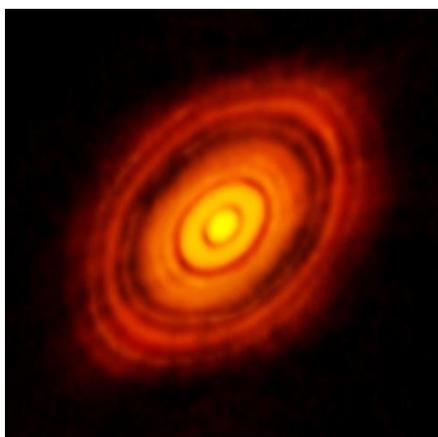
Olaf Fischer

Im folgenden WIS-Beitrag steht ein atemberaubendes Beobachtungsergebnis von ALMA im Brennpunkt – die detaillierte Abbildung einer protoplanetaren Scheibe um einen entstehenden Stern – die potentielle Geburtsstätte für Planeten.

Neben Beschreibungen und Erklärungen werden vor allem verschiedenartige Aktivitäten (Rechnungen zur Ma und Ph, Arbeit mit Karten, Bildauswertung, Diagramminterpretation, Papiermodell, Quartett) für Schüler angeboten, um diese Beobachtung und damit im Zusammenhang stehende Inhalte (insbesondere die Sternentstehung) besser zu verstehen, auch indem diese den Nutzen des Schulwissen entdecken. Der Wert von Kenntnissen auf verschiedenen Gebieten (Sprache, Mathematik, Naturwissenschaft, Technik) wird spürbar.

Der Beitrag eignet sich als Grundlage für Schülervorträge, die Arbeit in einer AG, wie auch für den Fachunterricht in der Oberstufe.

Übersicht der Bezüge im WIS-Beitrag		
Physik	Quantenphysik, Thermodynamik	Stefan-Boltzmann-Gesetz , thermische Energie eines Teilchens , Dissoziation , Ionisation , isotherm
Astronomie	Positionsastonomie, Sterne	Äquatorkoordinaten , Phasen der Sternentstehung , T-Tauri-Sterne , Leuchtkraft , Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)
Fächerverknüpfung	Astro - Sprache/Kommunikation Astro - Geografie Astro - Mathematik	Wissenschaftssprache Englisch , Umgang mit Karten , Verhältnisleichungen , Trigonometrie , Kreisringe , perspektivische Verkürzung , Maßstäbe
Lehre allgemein	Kompetenzen (Wissen und Erkenntnisgewinnung), Unterrichtsmittel	„Bilder lesen lernen“ , Diagramminterpretation , Kartonmodell herstellen , Aufgaben lösen , Vergleiche , Applikationen für das HRD , Quartettspiel zur Sternentstehung



Projekt „ALMA Mater“ (Teil 4: „Kinderstube“ für Planeten)

- [1. Was berichtet die BBC über die ALMA-Beobachtung der Scheibe rund um HL Tauri?](#)
- [2. Wo am Himmel befinden sich HL Tauri und ähnliche Sterne?](#)
- [3. Was ist in der näheren Umgebung von HL Tauri zu sehen?](#)
- [4. Wie entsteht ein Stern von der Masse einer Sonne – unterwegs im Hertzsprung-Russell-Diagramm?](#)
- [5. Welche Informationen lassen sich aus dem Bild der protoplanetaren Scheibe rund um HL Tauri gewinnen?](#)

Abbildung 1: Links: ALMA-Bild von der protoplanetaren Scheibe rund um den Stern HL Tauri, einer „Kinderstube“ für Planeten. © ALMA, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36639982>. Rechts: Fragen, die den Schüler hinsichtlich dieser Beobachtung lenken und deren Antworten er nachvollziehen können soll.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

1.) Blick in die Medien: Ein atemberaubendes Bild von der „Planetenkinderstube“ um den Stern HL Tauri (Astronomie und Sprache (Englisch, Deutsch))

Nachrichten aus der Wissenschaft haben für die Tagespresse einen enormen Wert, stillen sie doch oft das Verlangen nach Sensation. Und im Gegensatz zu vielen Meldungen über das Weltgeschehen handelt es sich um „gute“ Nachrichten.

Im Folgenden findest du einen kurzen Beitrag der BBC aus der Sparte „Science & Environment“ zu einem spektakulären Beobachtungsergebnis der Teleskopanlage ALMA.

Aktivität:

Lies den folgenden **BBC-Beitrag** „Planet formation captured in photo“ gründlich durch und beantworte die folgenden Fragen:

1. Erläutere, worin die Besonderheit der erzeugten Aufnahme besteht? (Erläutern heißt, einen Sachverhalt mit Hilfe eines Beispiels zu verdeutlichen.)
2. Was für ein Objekt wurde beobachtet?
Nenne alle dazu gegebenen Informationen!
3. Welche Informationen zur Beobachtung (Ort des Observatoriums, Methode, Wellenlänge, u. a. m.) werden gegeben?
4. Beschreibe, was in der Abbildung gezeigt wird!

W I S wissenschaft in die schulen! STERNE UND WELTRAUM

BBC News - Science & Environment

Planet formation captured in photo

By Jonathan Webb Science reporter, BBC News, 6 November 2014




Left: A protoplanetary disc has formed around the young star HL Tau. Right: The antennas that make up Alma are separated by up to 15 km, high in Chile's Atacama Desert.

The clearest ever image of planets forming around an infant star has been taken by the Alma radio telescope.

In a vast disc of dust and gas, dark rings are clearly visible: gaps in the cloud, swept clear by brand new planets in orbit.

The sun-like star at the centre, HL Tau, is less than a million years old and is 450 light years from Earth in the constellation Taurus.

The image was made possible by Alma's new high-resolution capabilities.

Because the process of planet formation takes place in the midst of such a huge dust cloud, it can't be observed using visible light.

Alma, the Atacama Large Millimeter / submillimeter Array, has snapped the impressive new image using much longer wavelengths, which it detects by comparing the signal from multiple antennas up to 15 km apart.

To test out its latest high-resolution capability, only in operation since September, Alma scientists pointed the antennas at HL Tau. They found themselves looking at a "protoplanetary disc" in more detail than ever before.

"When we first saw this image we were astounded at the spectacular level of detail," said Dr Catherine Vlahakis, a senior member of the Alma team.

"HL Tau is no more than a million years old, yet already its disc appears to be full of forming planets."

Prof Tim de Zeeuw is director general of the European Southern Observatory, one of several organisations involved in Alma. He said: "Most of what we know about planet formation today is based on theory. Images with this level of detail have up to now been relegated to computer simulations or artist's impressions."

Dr Aprajita Verma, an astrophysicist at the University of Oxford, said the picture was "phenomenal".

"This shows how exciting Alma is going to be - it's going to be an incredible instrument."

She said the new data was especially interesting because the star HL Tau is very young.

"I think the big result is that you might have expected just a smooth disc," Dr Verma told the BBC.

"But you're really seeing multiple rings - and where it's darker, that's where you've cleared the material already in the disc."

The whole process is happening faster than we would have predicted from existing data, Dr Verma explained.

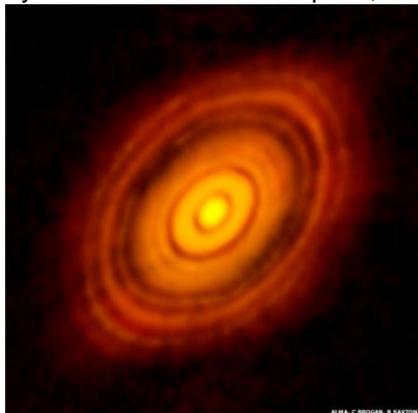
"It means that things are coagulating. It's really a planetary system, that you're seeing at a very early time.

"These rings will form planets, asteroids, comets... And eventually as the star evolves, this will cool and settle and there will be more clearing and more individual objects, just like we see in our solar system."

BBC News - Science & Environment

Planet formation captured in photo

By Jonathan Webb Science reporter, BBC News, 6 November 2014



Left: A protoplanetary disc has formed around the young star HL Tau. Right: The antennas that make up Alma are separated by up to 15 km, high in Chile's Atacama Desert.

The clearest ever image of planets forming around an infant star has been taken by the Alma radio telescope.

In a vast disc of dust and gas, dark rings are clearly visible: gaps in the cloud, swept clear by brand new planets in orbit.

The sun-like star at the centre, HL Tau, is less than a million years old and is 450 light years from Earth in the constellation Taurus.

The image was made possible by Alma's new high-resolution capabilities.

Because the process of planet formation takes place in the midst of such a huge dust cloud, it can't be observed using visible light.

Alma, the Atacama Large Millimeter / submillimeter Array, has snapped the impressive new image using much longer wavelengths, which it detects by comparing the signal from multiple antennas up to 15 km apart.

To test out its latest high-resolution capability, only in operation since September, Alma scientists pointed the antennas at HL Tau. They found themselves looking at a "protoplanetary disc" in more detail than ever before.

"When we first saw this image we were astounded at the spectacular level of detail," said Dr Catherine Vlahakis, a senior member of the Alma team.

"HL Tau is no more than a million years old, yet already its disc appears to be full of forming planets."

Prof Tim de Zeeuw is director general of the European Southern Observatory, one of several organisations involved in Alma. He said: "Most of what we know about planet formation today is based on theory. Images with this level of detail have up to now been relegated to computer simulations or artist's impressions."

Dr Aprajita Verma, an astrophysicist at the University of Oxford, said the picture was "phenomenal".

"This shows how exciting Alma is going to be - it's going to be an incredible instrument."

She said the new data was especially interesting because the star HL Tau is very young.

"I think the big result is that you might have expected just a smooth disc," Dr Verma told the BBC.

"But you're really seeing multiple rings - and where it's darker, that's where you've cleared the material already in the disc."

The whole process is happening faster than we would have predicted from existing data, Dr Verma explained.

"It means that things are coagulating. It's really a planetary system, that you're seeing at a very early time.

"These rings will form planets, asteroids, comets... And eventually as the star evolves, this will cool and settle and there will be more clearing and more individual objects, just like we see in our solar system."

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

2.) Wo am Himmel befinden sich HL Tauri (HL Tau) und ähnliche Vorhauptreihensterne? (Astronomie und Geografie: Arbeit mit Karten)

Name des T-Tauri-Sterns (Lateinischer Sternbildname im Genitiv)	Rektaszension α [h min] Deklination δ [° ']	Spektral-typ	Scheinbare visuelle Helligkeit m_v [mag] Entfernung
RY Tauri	04:18,8 +28:19	F8 V	10,21 150 pc
T Tauri	04:19,0 +19:24	G5 V	9,60 460 Lj
HL Tauri	04:28,7 +18:07	K9	14,56 140 pc
SU Aurigae	04:52,8 +30:29	G2 III	9,42 496 Lj
RW Aurigae	05:04,6 +30:20	G5Ve	10,32 140 pc
GW Orionis	05:26,3 +11:49	K0	9,92 400 pc
HD 290772	05:35,0 - 02:10	F5	9,93
DL Orionis	05:39,0 - 08:07	K1	13,07
SZ Chamaeleontis (Cha)	10:57,0 - 77:01	K0	11,99 165 pc
CV Cha	11:10,8 - 76:27	G8	10,98 160 pc
T Cha	11:54,7 - 79:04	F5	10,12 108 pc
CM Cha	12:58,4 - 76:21		13,36
V1121 Ophiuchi	16:46,4 - 14:16	K5	11,50 131 pc
AK Scorpii	16:51,4 - 36:48	F5V	9,14 145 pc
FK Serpentis	18:17,6 - 10:12	K6	10,59
V1331 Cygni	21:01,1 +50:22	G5	11,80 694 pc, 86 L_{Sonne}
DI Cephei	22:54,1 +58:23	G8	11,35 5,1 L_{Sonne}

Angaben zu den T-Tauri-Sternen als IR-Quellen stammen aus der unten angegebenen Quelle (außer Entfernungen).
http://www1.ynao.ac.cn/~jinhuahe/know_base/catalogues/soucelists/list_ttau.htm

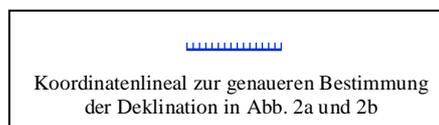
Die Kartierung der Oberflächen der Erde und auch anderer Himmelskörper erlaubt uns die Feststellung von Positionen und Lagebeziehungen der kartierten Oberflächendetails und ermöglicht uns damit unter anderem die räumliche Orientierung. So, wie Geografen die Oberfläche der Erdkugel kartieren, halten die Astronomen die Merkmale (vor allem Sterne) an der sogenannten scheinbaren Himmelskugel in Karten fest.

Die folgenden **Sternkarten** (Abb. 2a und 2b) zeigen die nördliche und die südliche Hemisphäre analog zur nördlichen und südlichen Hemisphäre der Erde.

Zum Kennenlernen des Vorhauptreihensterns HL Tau und anderer gleichartiger Objekte (T-Tauri-Sterne, 0,5 bis 2 M_{Sonne}) sollen ihre Positionen in einer Sternkarte markiert und dann mit „wachem Geist“ betrachtet werden.

Aktivität:

Markiere die Positionen der in der Tabelle aufgeführten Vorhauptreihensterne aus dem „Verwandtenkreis“ von HL Tau (T-Tauri-Sterne; in den Massebereich dieser Sterne fällt die Sonne) in den beiden folgenden Sternkarten. Nutze dazu ihre gegebenen **Äquatorkoordinaten** Rektaszension und Deklination (analog zu den geografischen Koordinaten Länge und Breite).

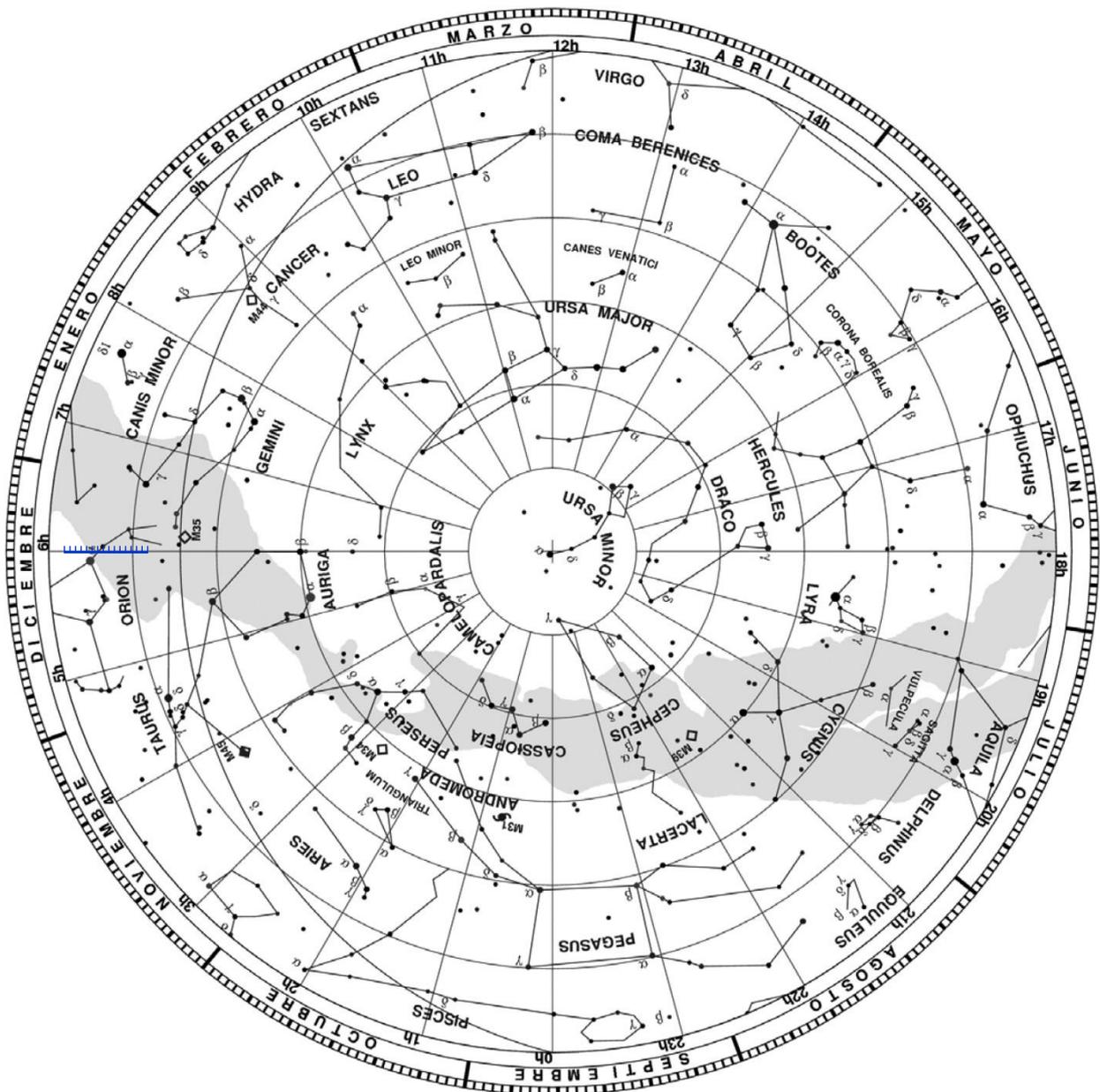


Zum Finden einer genauen Koordinatenposition zwischen zwei gegebenen Koordinatenlinien könnte ein selbst gemachtes „Koordinatenlineal“, wie es hier gezeigt wird, zur Anwendung kommen.

Fragen:

1. In welchen Sternbildern befinden sich die hier ausgewählten T-Tauri-Sterne? Nenne, soweit möglich, auch die deutschen Sternbildbezeichnungen!
2. Was fällt hinsichtlich ihrer Lage am Sternenhimmel auf?
3. In der Tabelle sind vor allem die hellen Objekte aufgeführt. Warum erscheinen alle T-Tauri-Sterne bei so geringer scheinbarer Helligkeit, so dass sie mit bloßem Auge nicht zu sehen sind? (Die Ursache hat etwas mit ihrer Position und ihrem Entwicklungszustand zu tun.)

PLANISFERIO NORTE



[\[Link\]](#)

Abbildung 2a: Kartenansicht der nördlichen Hemisphäre der scheinbaren Himmelkugel. Der äußerste Deklinationskreis auf der Karte (mit der Rektaszensionsskala) stellt den Himmelsäquator dar (Bildquelle: CIDA, cida.gob.ve).

PLANISFERIO SUR

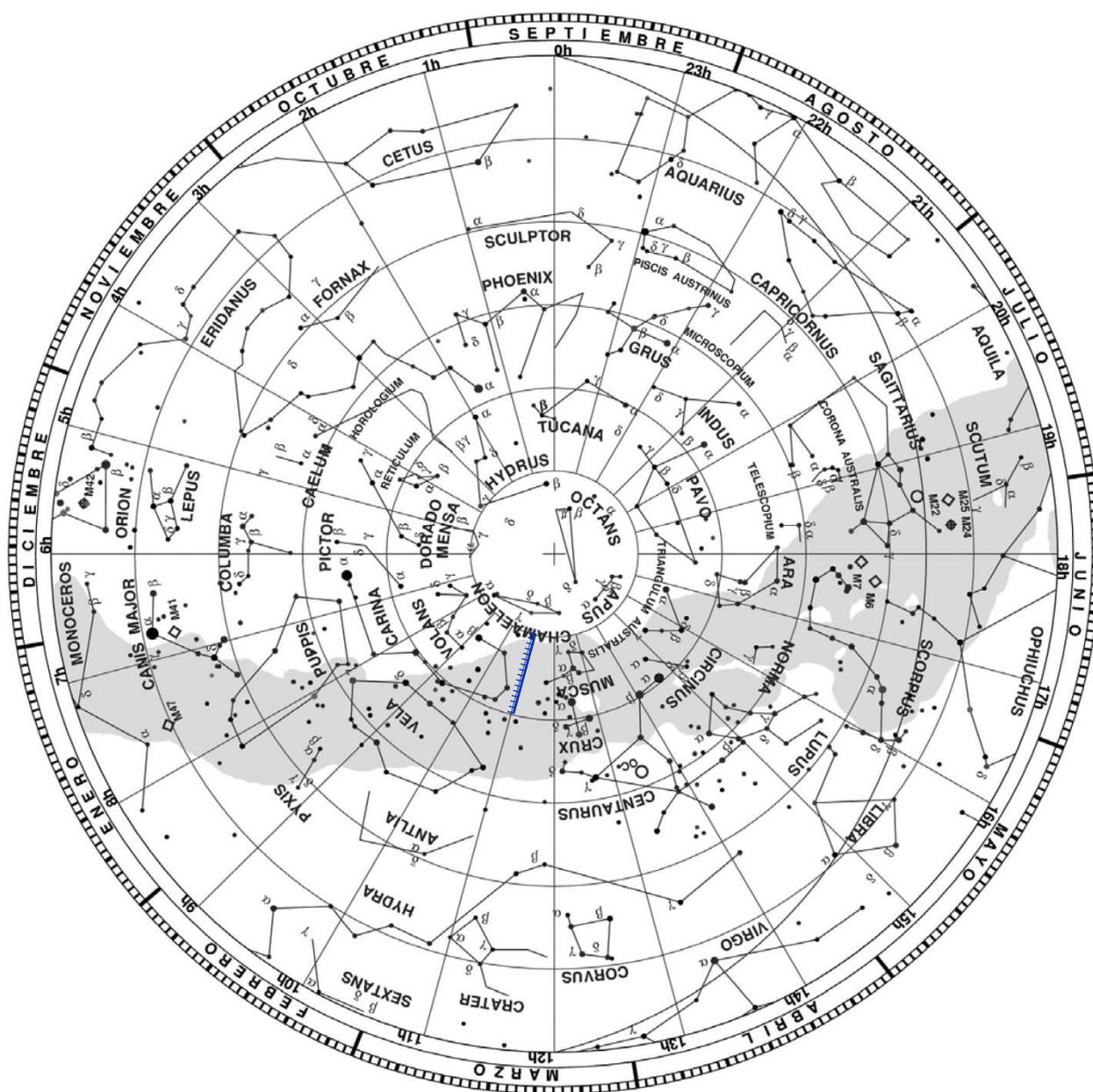


Abbildung 2b: Kartenansicht der südlichen Hemisphäre der scheinbaren Himmelkugel. Der äußerste Deklinationskreis auf der Karte (mit der Rektaszensionsskala) stellt den Himmelsäquator dar (Bildquelle: CIDA, cida.gob.ve).

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

3.) Beobachtungen der näheren Umgebung von HL Tau – „Bilder lesen lernen“ (Astronomie und Mathematik: Verhältnisse bilden)

Sterne entstehen dort, wo sich innerhalb eines bestimmten Raumgebiets genügend Baumaterial, sprich interstellare Materie, befindet. Im Milchstraßensystem trifft dies zu für die Spiralarme innerhalb der galaktischen Scheibe.

In Richtung zum Sternbild Stier befindet sich in einer Entfernung von etwa 140 pc (456 Lichtjahre) eines der uns am nächsten gelegenen Sternentstehungsgebiete für Sterne geringer Masse. Im Bild unten links ist die Sternbildregion des Stier (lat.: Taurus) in einer Sternkarte abgebildet. Der rote Kreis markiert ein Gebiet, in dem sich die entstehenden Sterne XZ Tau (ein Mehrfachsternsystem) und HL Tau befinden. Eine Aufnahme dieser Region (Abb. 3) zeigt deutlich die dort vorhandene interstellare Materie. Diese besteht vor allem aus Gas (ca. 70 % molekularer Wasserstoff). Ein Masseprozent wird durch Staubteilchen gebildet.

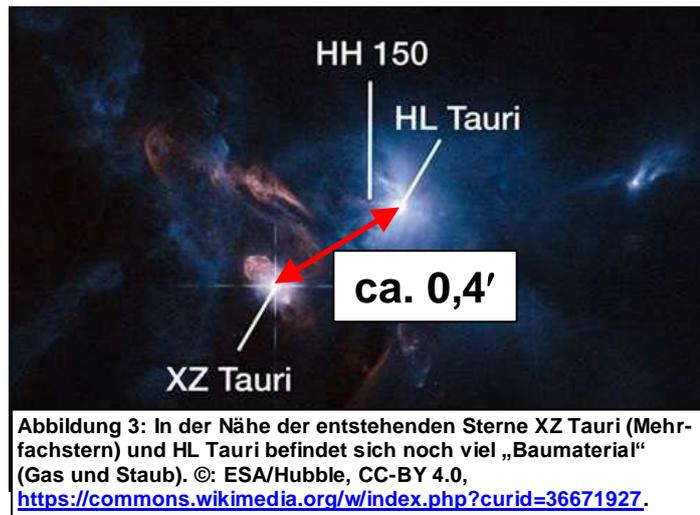
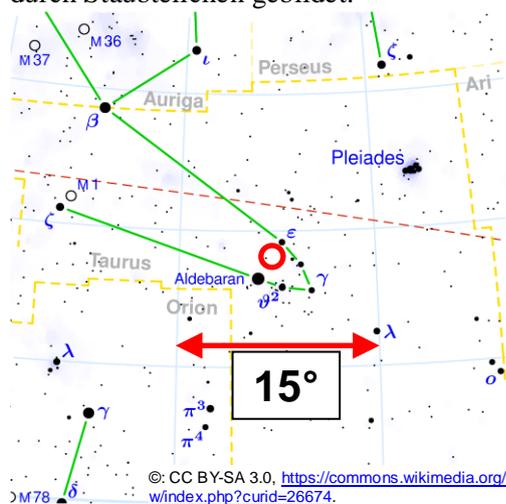


Abbildung 3: In der Nähe der entstehenden Sterne XZ Tauri (Mehrfachstern) und HL Tauri befindet sich noch viel „Baumaterial“ (Gas und Staub). ©: ESA/Hubble, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36671927>.

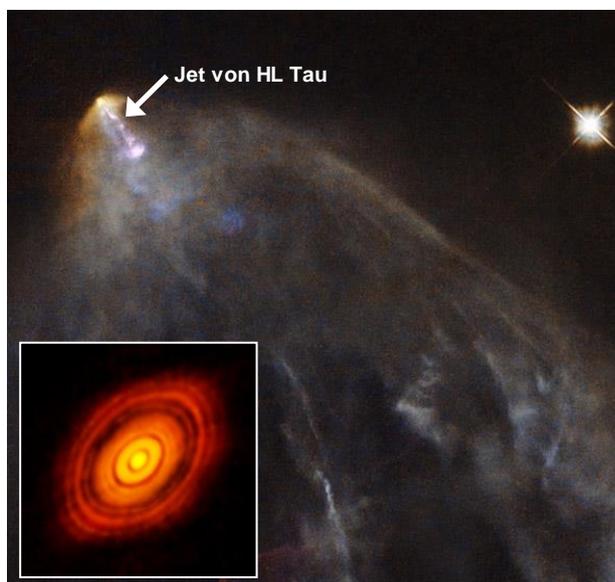


Abbildung 4: Bild der zirkumstellaren Umgebung des entstehenden Sterns HL Tau im sichtbaren Licht (Bildgröße: 1,72 × 1,76 Bogenminuten, 1033 × 1058 Pixel), aufgenommen vom Hubble Space Telescope (HST). Aus dem Zentrum der im Bild nicht sichtbaren Scheibe um HL Tau wird ein Jet ausgestoßen, welcher Gasballungen entlang seiner Bewegungsrichtung zum rötlichen Leuchten anregt. Von ESA/Hubble, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24745048>. Der Bildeinschub links unten zeigt die von ALMA bei 1,28 mm Wellenlänge aufgelöste Staubscheibe um HL Tau (Bildgröße: 0,03 × 0,03 Bogenminuten, Bildquelle: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)).

Die einfallende Materie führt zu einem Massezuwachs des entstehenden Sterns, der durch sein „Akkretionsleuchten“ (kinetische Energie → thermische Energie → Strahlungsenergie) sichtbar wird.

Desweiteren wird durch die einfallende Materie in Folge der sich einstellenden Rotation eine zirkumstellare Scheibe rund um den entstehenden Stern HL Tau gefüttert – die Heimstatt von Planeten.

Diese Scheibe wurde kürzlich bei HL Tau abgebildet (siehe Abb. 4 links unten).

Bei näherem Hinschauen entdecken wir bei HL Tau einen Jet (ein gebündelter, vom Stern weg in Richtung der Ringachse gerichteter Massenabfluss, welcher in Folge des Einsturzes von Materie aus einem ringförmigen Reservoir (Akkretionsscheibe) entsteht (siehe Abb. 4).

Aufgabe (Dreisatz)

Wie viele Pixel überdeckt der Durchmesser der Scheibe um den entstehenden Stern HL Tau im Bild seiner zirkumstellaren Umgebung (Abb. 4)? Welchen prozentualen Anteil der Bildbreite würde die Scheibe einnehmen, wenn diese in Richtung einer Pixelzeile läge?

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

4.) Sternentstehung – wie aus einer unförmigen Wolke ein Sonnensystem entsteht (Astronomie und Physik)

Wer die Entstehung von Planeten wie der Erde hinterfragt, muss sich zunächst mit der Entstehung der Sterne auseinandersetzen. Derartige Fragen nach den Ursprüngen gehören zu den großen Fragen, denen die Astronomen nachgehen und deren Beantwortung auf Grundlage von Beobachtungen und Computermodellierungen erfolgt. Die fotometrische und spektroskopische Beobachtung und Vermessung der Strahlung von entstehenden Sternen liefert uns Daten zur Leuchtkraft und zum Spektraltyp (oder Temperatur), die insbesondere für die Auswertung im **Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)** benötigt werden. Die abbildende Beobachtung bei möglichst hoher Winkelauflösung zeigt uns Strukturen, die mit der Sternentstehung verbunden sind.

Im Folgenden wird beschrieben, wie man sich derzeit die Entstehung eines Sterns von einer Sonnenmasse vorstellt. Dabei wird ein räumliches Bild zur Bildung von Strukturen und parallel dazu eine „**vorgeburtliche Lebenslinie**“ im HRD vorgestellt.

Das Wandern entlang der Lebenslinie beginnt mit dem Ende der Vorgeschichte der Sternentstehung und endet mit dem Start des Sternlebens im für lange Zeit stabilen Hauptreihenzustand. Die verschiedenen Etappen der Entstehung von Sternen werden qualitativ beschrieben und durch verschiedene Größenangaben und bildliche Darstellungen anschaulich gemacht.

Jeweils sich anschließende **Aufgaben** ermöglichen einen Umgang mit dem HRD sowie die Anwendung physikalischer und mathematischer Kenntnisse. **Vorlagen für Magnetapplikationen** zum HRD unterstützen die aktive Arbeit mit dem HRD.

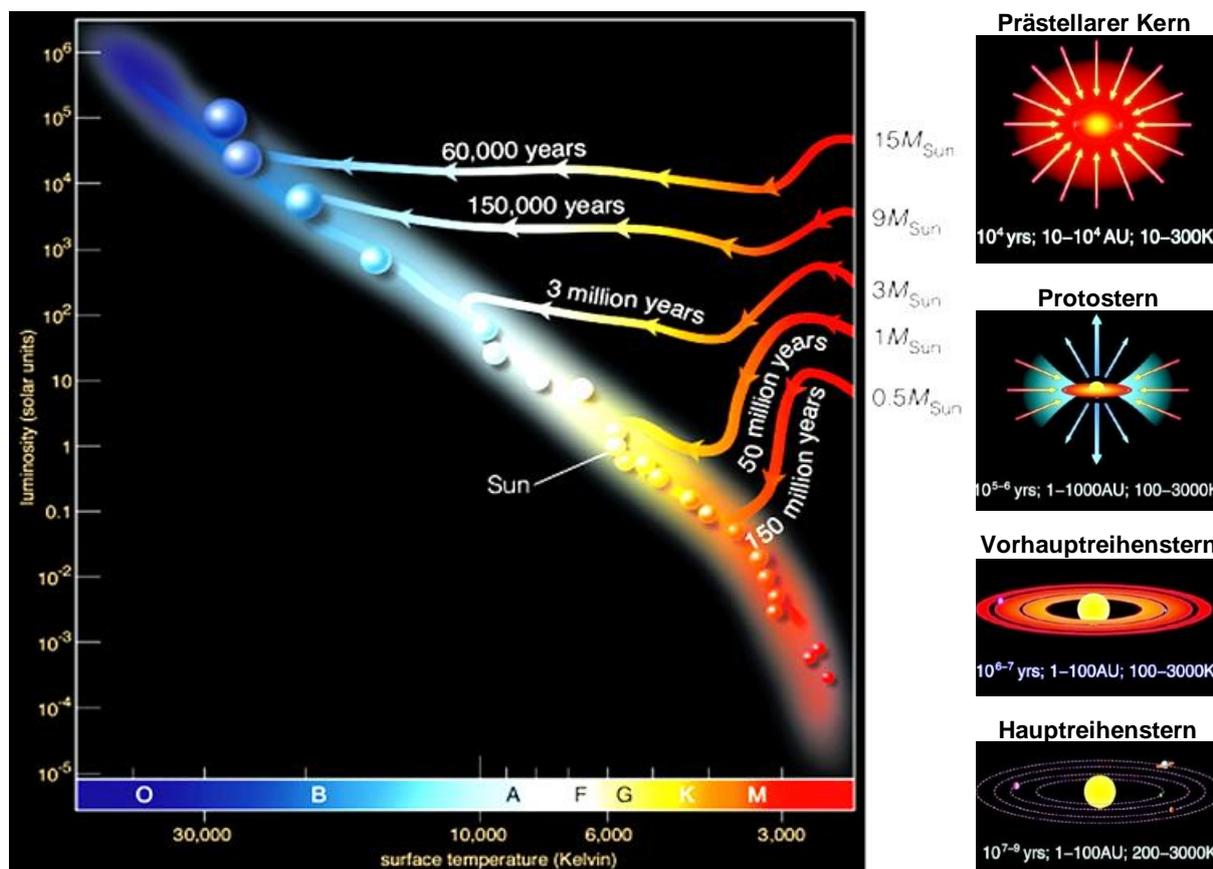


Abbildung 5: Links: Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) mit verschiedenen (von der Masse abhängenden) auf die Hauptreihe zuführenden Entwicklungswegen von entstehenden Sternen. In Abhängigkeit von der Sternmasse, die in Sonnenmassen angegeben wird, ist die Entwicklungszeit deutlich verschieden. ©: Prof. Dale E. Gary, NJIT, <https://web.njit.edu/~gary/202/Lecture18.html>.

Rechts: Etappen der Sternentstehung (Bildquelle: jwst.nasa.gov, Urheber: Shu et al. 1987).

(→ zurück zum Anfang)

Unterwegs im HRD: Auf der vorgeburtlichen Lebenslinie eines entstehenden Sterns

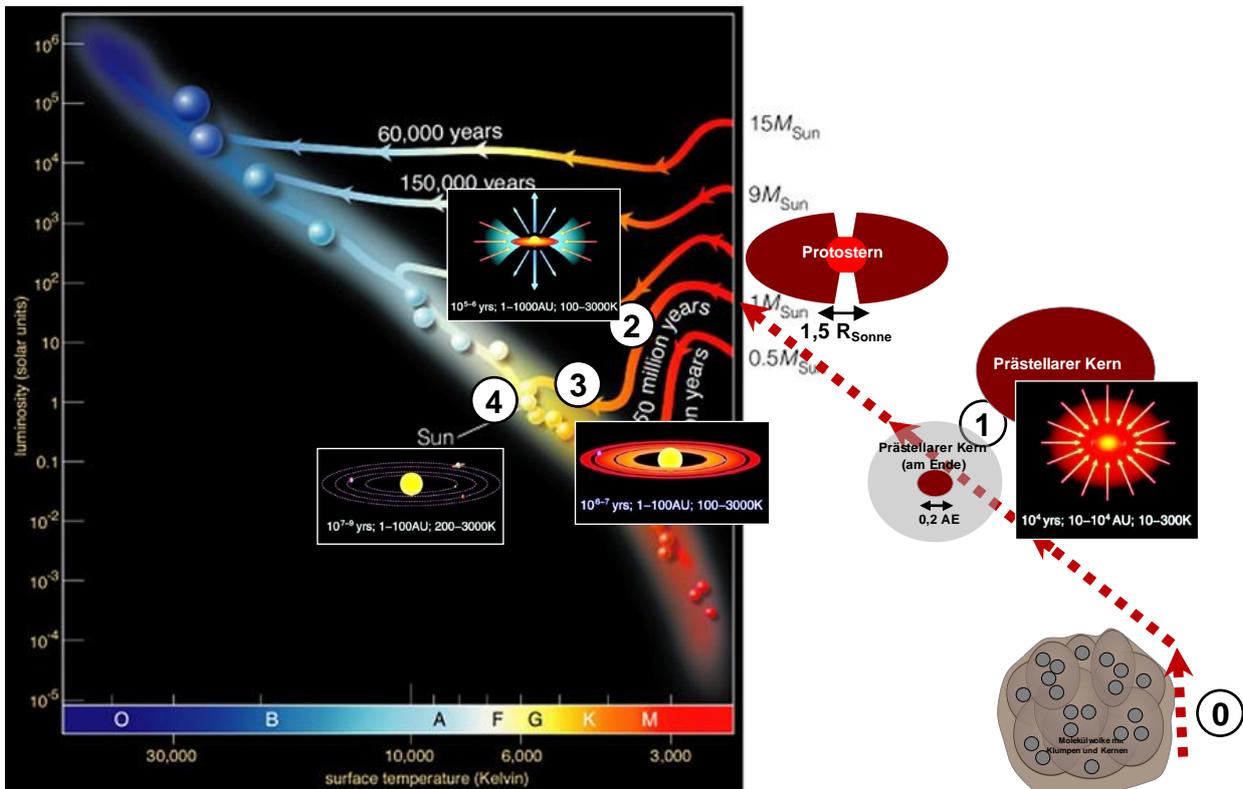
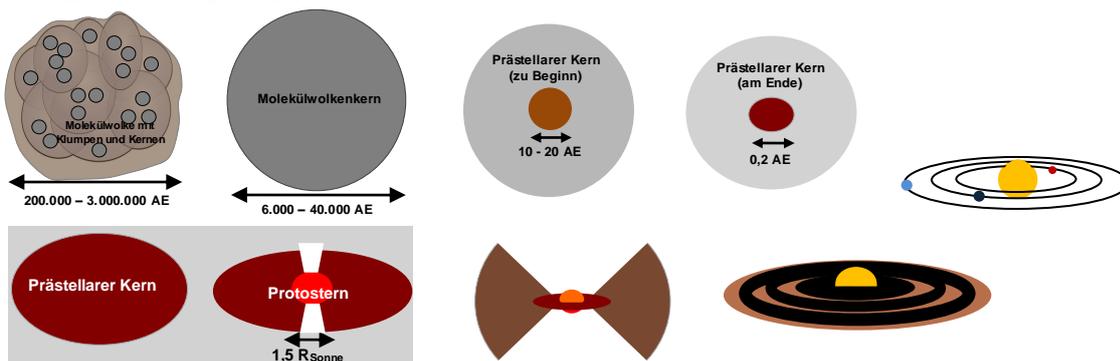


Abbildung 6: Etappen der Sternentstehung für ein Objekt, das bei seiner Geburt als Stern (auf der Alter-Null-Hauptreihe: Position 4 auf der „Lebenslinie“ im Diagramm) die Masse der Sonne hat.
 Bildquelle: http://www.ast.smith.edu/james/a111f06/lectures/figs/bt2lf1605_a.jpg, ergänzt durch Applikationsbilchen.

Im HRD wird der Lebensweg eines Sterns anschaulich sichtbar. Im vorliegenden Fall interessieren wir uns dabei für die vorgeburtlichen „Lebenslinien“ von entstehenden Sternen im Bereich einer Sonnenmasse (**T-Tauri-Sterne; 0,5 bis 2 M_{Sonne}**). **Magnetapplikationen** können die Arbeit mit dem HRD anschaulicher machen. Ein „magnetisches HRD“ zur Darstellung der Sternentwicklung existiert bereits als Element des Milchstraßenkoffers, der am Haus der Astronomie Heidelberg (www.haus-der-astronomie.de) entwickelt wurde (Autor: Cecilia Scorza). In Ergänzung dazu werden im Folgenden einige Vorlagen für solche Applikationen, welche die Sternentstehung verbildlichen, angeboten und nachfolgend auch beschrieben. Desweiteren werden zur Förderung der Diagramminterpretation einige **Aufgaben** vorgestellt.

Vorlagen für Magnetapplikationen für das HRD

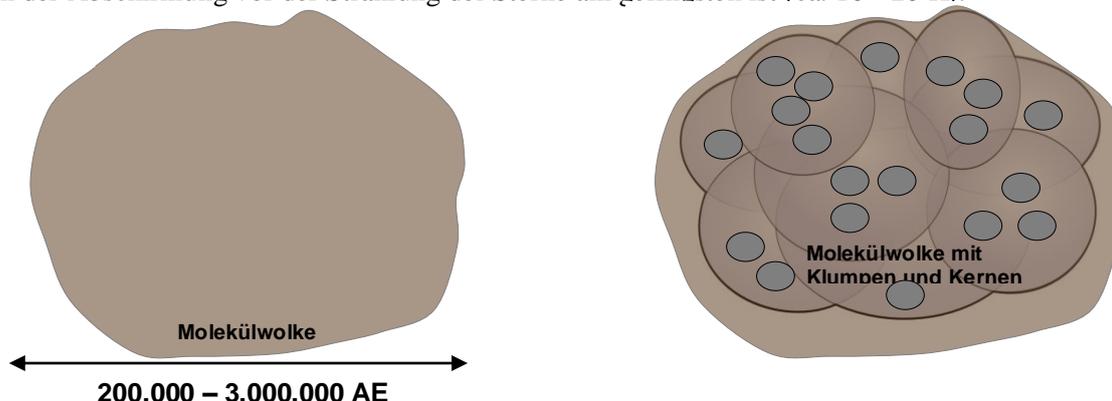


Etappe 0: Vorgeschichte

[\(→ zurück zum Anfang\)](#)

Sterne brauchen zu ihrer Entstehung große Mengen an Materie und die notwendigen Umstände, damit diese sich verdichten kann. Diese Materie finden wir in Molekülwolken mit Massen von bis zu 10.000 Sonnen. Ohne äußere Einflüsse bleiben die Wolken stabil, weil sich die Anziehung der Gasteilchen und deren „Abstoßung“ untereinander, sprich der Gasdruck, die Waage halten. Die Verdichtung setzt ein, sobald die Anziehung Oberhand gewinnt. Dies geschieht, wenn interstellares Material durch äußere Einflüsse (Sternwinde, Supernovastößfronten, Strahlungsdruck, ...) konzentriert wird. Die im Allgemeinen auftretende Turbulenz (Verwirbelung) führt dazu, dass sich in einer Molekülwolke viele Wolkenklumpen und schließlich Wolkenkerne bilden, die jeder für sich einen oder mehrere Sterne hervorbringen können. Diese Wolkenkerne haben anfangs eine Größe im Bereich von etwa 6.000 bis 40.000 AE.

Die Betrachtung der Sternentstehung beginnt beim Kollaps eines Molekülwolkenkerns (der im Wesentlichen aus Wasserstoffmolekülen besteht), welcher einsetzt, sobald die Eigengravitation den Eigendruck überwindet. Dieser startet im Kern, weil dort trotz des höheren Drucks die Temperatur wegen der Abschirmung vor der Strahlung der Sterne am geringsten ist (ca. 10 - 20 K).



Etappe 1: Prästellarer Kern

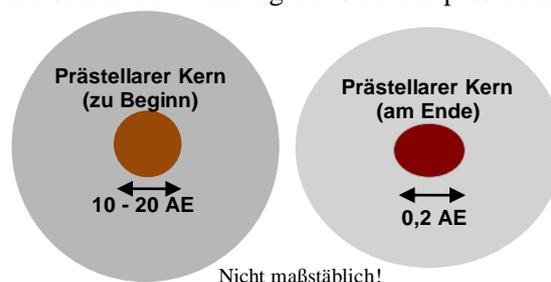
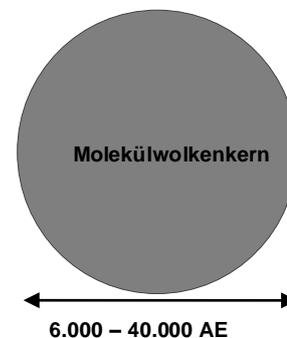
Der Kollaps verläuft zunächst isotherm, da die bei der Verdichtung entstehende Strahlung (IR-Strahlung des Kontinuums und Moleküllinienstrahlung) die Wolke nahezu ungehindert verlassen kann, da diese noch optisch dünn ist. Der isotherme Kollaps dauert etwa 10.000 Jahre (Freifallzeit) und endet mit der Bildung eines etwa 10 bis 20 AE durchmessenden **prästellaren Kerns** (lateinisch prae = voraus) aus (immer noch) Wasserstoffmolekülen, welcher sich im hydrostatischen Gleichgewicht von Gravitations- und thermischer Druckkraft (der mittlerweile aufgeheizten Kernmaterie) befindet.

Im Weiteren akkretiert (sammelt) der prästellare Kern Material aus dem Wolkenkern, wobei das hydrostatische Gleichgewicht erhalten bleibt: Das aufgesammelte Material führt zu wachsender Masse und Komprimierung, d. h. Gravitation und Druck steigen an, stabilisieren sich aber immer wieder.

Entlang der markierten „Lebenslinie“ im HRD (Abb. 6) könnte man ab der Position vom prästellaren Kern sprechen, ab der die Temperatur ansteigt. Am Ende seiner Entwicklung hat sich der prästellare Kern zu einem sehr leuchtkräftigen Objekt entwickelt. Dies liegt daran, dass er trotz der noch relativ geringen Oberflächentemperatur (etwa 3000 K) immer noch eine sehr große abstrahlende Oberfläche besitzt.

Da die Teilchen und deren Geschwindigkeiten in den Molekülwolkenkernen im Allgemeinen nicht sphärisch symmetrisch verteilt sind, bildet sich beim Kollaps infolge des durch den in der Regel anisotropen Massenfluss zum Zentrum eine Vorzugsrotationsrichtung aus. Mit zunehmender Rotation des prästellaren Kerns flacht dieser ab.

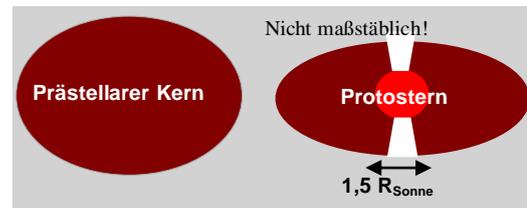
(siehe auch: <http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec13.html>)



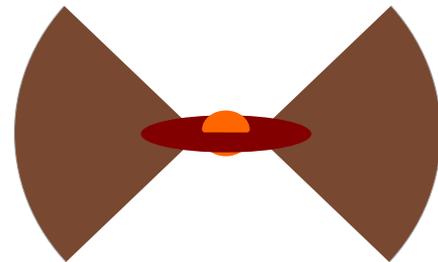
[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Etappe 2: Protostern

Diese Etappe startet, nachdem die thermische Energie der Wasserstoffmoleküle im Zentrum des prästellaren Kerns soweit angewachsen ist, dass diese in ihre Bestandteile (zunächst Wasserstoffatome und später Protonen und Elektronen) gespalten werden. Diese Prozesse (**Dissoziation und Ionisation**) entziehen dem Kern thermische Energie, wodurch das hydrostatische Gleichgewicht gestört und ein zweiter Kollaps ermöglicht wird. Dieser endet im sogenannten **Protostern** (griechisch *prōtos*: erster, Ur-), einem Objekt mit einem Radius von etwa 1,5 Sonnenradien und einer Oberflächentemperatur von etwa 3000 - 4000 K im (neuen) hydrostatischen Gleichgewicht von Gravitations- und thermischer Druckkraft.



Auf der Lebenslinie im HRD (siehe Abb. 6) erscheint diese Zustandsänderung als annähernd senkrecht nach unten verlaufend (die Astrophysiker nennen sie „Hayashi-Track“). Der Protostern enthält nun schon etwa 1 % der Masse des Molekülwolkenkerns. Er sammelt (akkretiert) aber weiterhin Masse. Die Akkretion ist zunehmend anisotrop; sie findet dabei zunehmend auf dem „Umweg“ über die Akkretionsscheibe statt und führt dabei auch zu bipolaren Ausflüssen und Jets in Richtung der Rotationsachse, wobei der (äußere) prästellare Kern in diesen Bereichen frei geräumt wird. Die bei der Akkretion frei werdende potentielle Energie speist neben diesen Ausströmungen auch die Leuchtkraft des entstehenden Sterns.

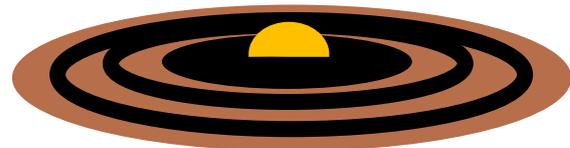


Die sich schon beim ersten Kollaps ausbildende bzw. verstärkende Rotation verstärkt sich noch durch die weitere Kontraktion (wegen der Drehimpulserhaltung), was einhergeht mit einer Abflachung des Wolkenkerns (Akkretionswolke) zu einer Scheibe (Akkretionsscheibe) bzw. zur Ausbildung einer **protoplanetaren Scheibe** rund um den Protostern.

Etappe 3: Vorhauptreihenstern

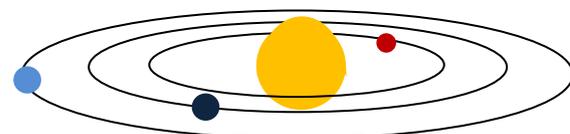
Solange das Zentralobjekt den Großteil seiner Leuchtkraft aus der Akkretion von Material aus der Hülle gewinnt, nennt man es Protostern. Sobald sich die Verhältnisse dahingehend geändert haben, dass nicht mehr die Akkretion, sondern die gleichzeitig auch ablaufende Eigengravitation maßgeblich ist für die Leuchtkraft, nennt man das Zentralobjekt **Vorhauptreihenstern**.

Vorhauptreihensterne mit Massen kleiner als 2 Sonnenmassen gehören zur Klasse der T-Tauri-Sterne. Nach der Ausdünnung der Hülle werden diese und ihre zirkumstellaren Scheiben direkt visuell sichtbar. Die Scheibe, die anfangs noch eine Masse von 0,5 % der Sternmasse besitzt und aus der heraus noch Materie akkretiert wird, wird nun zum Schauplatz der Entstehung von Planeten. Man nennt sie nun „**Trümmerscheibe**“ (engl.: planetary debris disk), weil zunehmend mehr Teilchen durch Zertrümmerung nach Kollisionen entstehen.



Etappe 4: Das Sternenleben beginnt

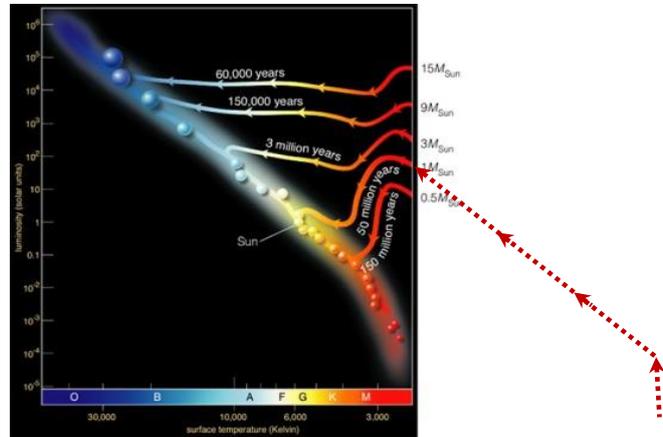
Die Temperatur im Inneren eines Vorhauptreihensterns wächst weiter und erreicht schließlich den Wert, bei dem die Wasserstofffusion startet. Damit endet die Sternentstehung und die erste und dauerhafteste Phase im Sternenleben, das Leben als Hauptreihenstern, beginnt. Die Strahlung und der einsetzende Sternwind des Hauptreihensterns drücken das verbliebene diffuse und „leichte“ Material der protoplanetaren Scheibe (Gas und Staub) weg. Die größeren Staubteilchen (1 μm bis 1 mm) werden durch den Strahlungsdruck gebremst und spiralen in Richtung Zentrum. Am Schluss bleiben nur die größeren Orbit-Objekte übrig.



[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Aufgaben - Unterwegs im HRD: Auf der Lebenslinie eines entstehenden Sterns

- 1.) Zeige im HRD in Abb. 6 den Abschnitt der Lebenslinie des Ein-Sonnenmassen-Sterns, während dem sein erster Kollaps zum prästellaren Kern **isotherm** verläuft und begründe deine Wahl!



- 2.) Um wie viele Größenordnungen steigt die Leuchtkraft während der Akkretion von Material aus dem Molekülwolkenkern auf den prästellaren Kern? Zeige in Abb. 6 den Abschnitt der Lebenslinie, in dem die **Leuchtkraft** so stark ansteigt!

- 3.) Zeige auf der Lebenslinie im HRD (Abb. 6) den Zustandspunkt mit der maximalen Leuchtkraft des prästellaren Kerns! Berechne aus den im HRD ablesbaren Werten für Leuchtkraft L und Oberflächentemperatur T den Radius R des prästellaren Kerns zu diesem Zeitpunkt seiner Entwicklung. Nutze dazu die folgende von dem Physiker Stefan im Jahre 1879 aus Messungen abgeleitete und 1884 durch den Physiker Boltzmann theoretisch hergeleitete **Stefan-Boltzmann-Gesetz** für Schwarzkörperstrahlung:

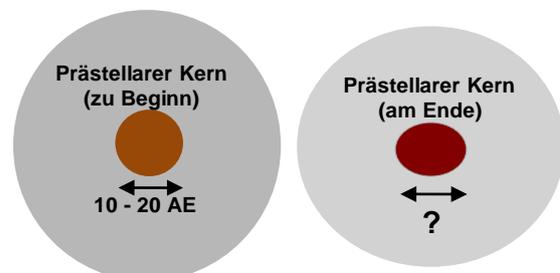
$$L = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante darstellt.

Die Leuchtkraft der Sonne beträgt $L_{\text{Sonne}} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

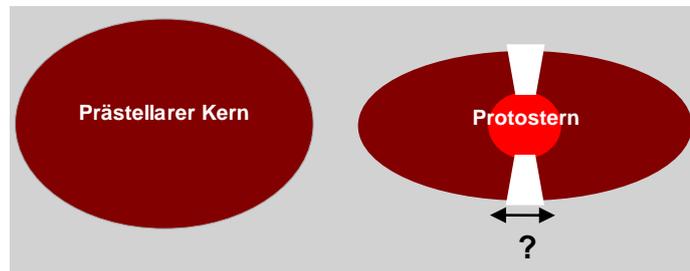
- 4.) Im Maximum seiner Leuchtkraft hat der prästellare Kern einen Radius von $R_2 \approx 0,2 \text{ AE}$.

Welchen Radius R_1 hatte der kugelförmig angenommene prästellare Kern zu Beginn des Leuchtkraftanstiegs, wenn man annimmt, dass sich die Temperatur seiner abstrahlenden Kugeloberfläche während der Akkretion von $T_1 = 15 \text{ K}$ auf die Temperatur von $T_2 = 3000 \text{ K}$ (siehe HRD) erhöhte?

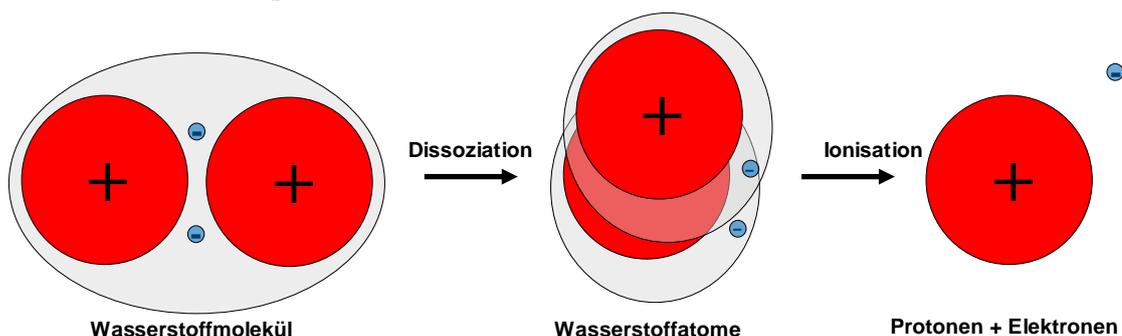


[\(→zurück zum Anfang\)](#)

- 5.) Während der Etappe 2 schrumpft der prästellare Kern und steigt in der Temperatur um etwa 1000 K, wird zum Protostern und schließlich (am unteren Ende des Hayashi-Tracks) zum Vorhauptreihenstern. Zeige im HRD den Abschnitt der Lebenslinie, der Hayashi-Track genannt wird! Zeige auch die Position, ab der wir von einem Vorhauptreihenstern sprechen! Berechne den Radius des Vorhauptreihensterns!



- 6.) Die zweite Kollapsphase der Entstehung eines Sterns mit einer Sonnenmasse (Schrumpfung des Zentralobjektradius von rund 21 Sonnenradien (0,1 AE) auf 1,5 Sonnenradien) startet, sobald Druck und Temperatur derartig angestiegen sind, dass die Wasserstoffmoleküle dissoziieren. Der Kollaps setzt sich fort, wenn die entstandenen Atome ionisieren.



Beide Prozesse starten wegen der benötigten Bedingungen im Zentrum des prästellaren Kerns und führen dort dazu, dass das hydrostatische Gleichgewicht von Gravitationskraft und thermisch erzeugter Druckkraft fast schlagartig zu Gunsten der Gravitation aufgehoben ist. Die Druckkraft wird kleiner, wenn die kinetische Energie der Gasteilchen „angezapft“ wird, um die Dissoziationsenergie (436,2 kJ/mol) und die Ionisationsenergie (1312 kJ/mol) für Wasserstoff aufzubringen (Daten: siehe <http://de.wikipedia.org/wiki/Wasserstoff>). Der innere Kollaps setzt sich nach außen fort, weil der stabilisierende Innendruck Schicht für Schicht stark abfällt.

- Bestimme die auf ein Gasteilchen des Wasserstoffs bezogenen Energien, die zur **Dissoziation** und zur **Ionisation** nötig sind.
- Die **thermische Energie eines Teilchens** mit 3 Freiheitsgraden (für die Speicherung von kinetischer Energie bei den Bewegungen in x-, y- und z-Richtung) berechnet sich aus:

$$E_{\text{th}} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T. \quad (T \dots \text{Temperatur, } k \dots \text{ Boltzmannkonstante)}$$

Verdeutliche dir das bei der Ionisation eintretende Ungleichgewicht zwischen Gravitation und Innendruck, indem du den (theoretischen) „Temperaturabfall“ für die Bestandteile des dissoziierten Wasserstoffatoms berechnest. Der sich ergebende Wert wird viel zu groß sein, was nahelegt, dass die Dissoziation nicht möglich ist (sofort wieder aufgehoben wird). Warum findet sie dennoch statt? (Was passiert noch?) Diskutiere das Ergebnis!

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

5) Astronomie/Beobachtung: Die Scheibe von HL Tau – der Geburtsort von Planeten

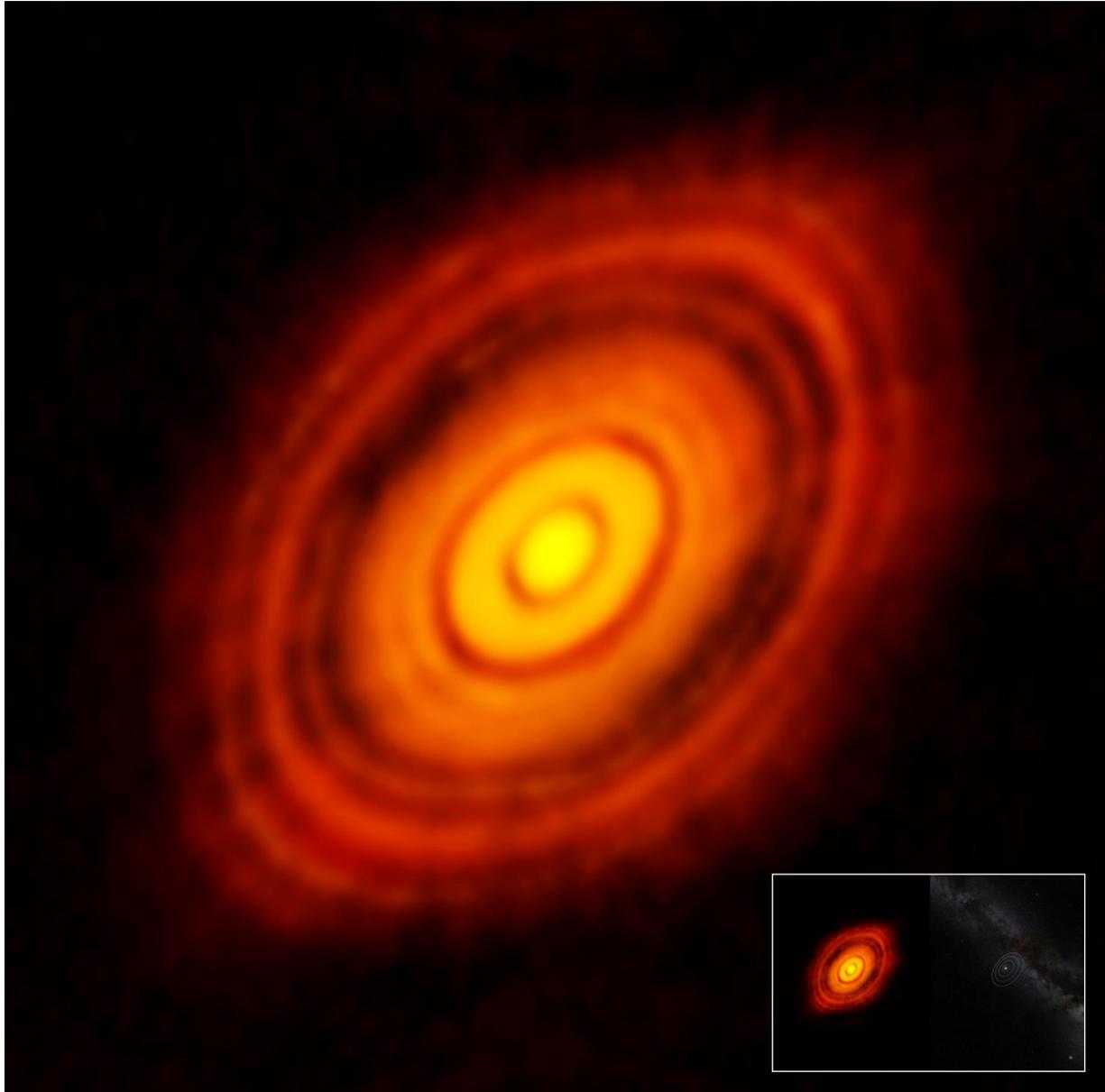


Abbildung 7: ALMA-Bild (bei 1,28 mm Wellenlänge) der Staubscheibe (Teil der protoplanetaren Scheibe) um HL Tau in einer bis dato (2015) nicht erreichten Winkelauflösung von 35 Millibogensekunden. Dazu waren Basislinien (Abstände zwischen den einzelnen ALMA-Teleskopen) bis zum 15 km Länge nötig. Das Bild hat eine Winkelgröße von $0,03' \times 0,03'$. ©: Von ALMA, CC-BY 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36639982>. Der rechts unten gezeigte Bildeinschub zeigt einen Vergleich der HL-Tau-Staubscheibe mit den Bahngrößen des Planetensystems der Sonne (bis hin zur Neptunbahn).

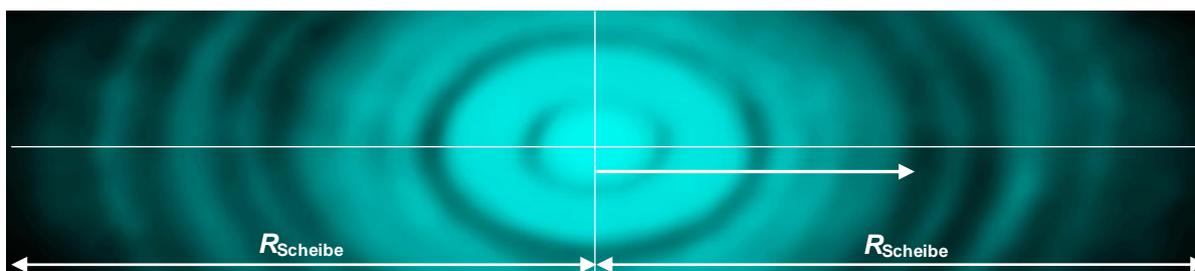
Während die Idee von einer zirkumstellaren Scheibe (einen Stern umgebende Scheibe aus Gas und Staub) als Ursprungsort für Planeten schon länger existiert und durch die indirekte Beobachtung auch untermauert wurde (z. B. Streulicht), gelang deren direkte Beobachtung erst mit dem Weltraumteleskop Hubble. Mit ALMA ist nun ein gewaltiger Schritt gelungen, indem eine solche Scheibe detailreich abgebildet werden konnte.

Um sich diesem Beobachtungsergebnis zu nähern, werden im Folgenden einige **Aufgaben** angeboten, welche das **räumliche Vorstellungsvermögen** fördern und mathematisches und physikalisches Grundwissen nutzen.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

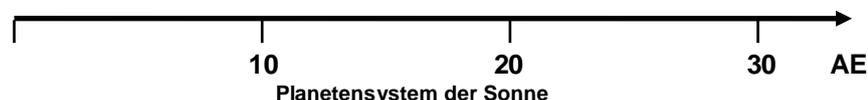
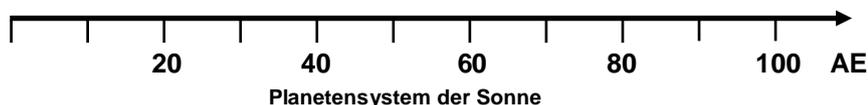
Aufgaben - „Bilder lesen lernen“

1. HL Tau hat einen Abstand von 140 pc. Bestimme mit Hilfe der **Trigonometrie** und auf Grundlage von Abb. 7 den linearen Radius R_{Scheibe} der Staubscheibe um HL Tau.
2. **Perspektivische Verkürzung:** Berechne (wieder trigonometrisch) den Neigungswinkel i der Scheibenachse relativ zur Sichtlinie unter der (groben) Annahme, dass die Scheibe eben ist, d. h. wie eine Platte betrachtet werden kann.
3. Vermesse* in untenstehender Abb. (Teil aus Abb. 7) die Abstände der (durch entstehende Planeten?) frei geräumten Scheibenbereiche (dunkle Ringe) und vergleiche diese mit den Planetenabständen im Sonnensystem. Markiere die Abstände auch am vorgegebenen Strahl! (*Der Mittelwert aus Innen- und Außenradius ergibt jeweils den Abstand der Ringmitte. Durch Messung links und rechts von der Scheibenmitte und folgende Mittelung wird die Genauigkeit erhöht.)



Ring	links [AE]			rechts [AE]			Radius [AE]
	Innenradius	Außenradius	Mittelwert	Innenradius	Außenradius	Mittelwert	
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

Planet	Abstand [AE]
Merkur	0,387
Venus	0,723
Erde	1
Mars	1,524
Jupiter	5,203
Saturn	9,539
Uranus	19,18
Neptun	30,06



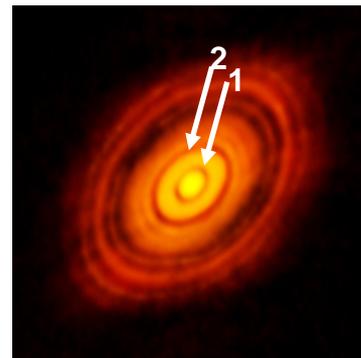
4. Kwon und Mitarbeiter (The Astrophysical Journal. 741, Nr. 1, November 2011, siehe Quellen) haben für die Scheibe von HL Tau eine Gesamtmasse von 0,13 Sonnenmassen (Masse der Sonne: $1,989 \cdot 10^{30}$ kg) abgeleitet.

Diese Masse steckt in den strahlenden (hellen) Ringen, die eine Fläche von ca. 40 % der Gesamtscheibenfläche ausmachen.

Welche Massen wurden in den im Bild markierten inneren 2 Ringen (evt. durch Planetenbildung) entfernt bzw. zusammengeballt?

Zur Beantwortung der Frage soll von der sehr groben Annahme ausgegangen werden, dass die Flächendichte der Scheibe konstant sei, d. h.. dass die Massen der Säulen gleichen Querschnitts in z-Richtung – das ist die Richtung der Symmetrieachse der Scheibe – gleich sind. Die Radien der **Kreisringe** (Außenradius minus Innenradius) wurden bereits in Aufgabe 3 ermittelt.

Vergleiche die Massen mit der von Jupiter (ca. $19 \cdot 10^{26}$ kg).



[\(→zurück zum Anfang\)](#)

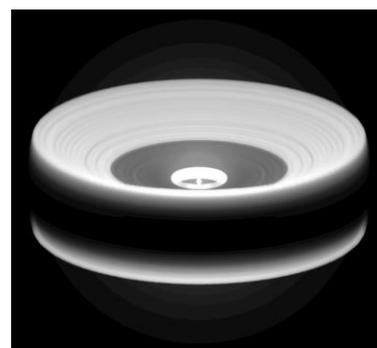
Die Scheibe von HL Tau im Kartonmodell

Auch in Zeiten des Computers ist die „direkte 3D-Erfahrung“ medial nicht völlig ersetzbar. Die Entwicklung des räumlichen Denkens basiert stark auf der Auge-Hand-Hirn-Kopplung. Entsprechend kann die händische Herstellung eines Modells von der zirkumstellaren Scheibe von HL Tau eine pädagogisch wertvolle Aktivität sein.

Das Modell ermöglicht es, die Schrägansicht der Scheibe zu simulieren und damit das mit ALMA gemachte (perspektivisch verkürzte) Bild der Scheibe von HL Tau richtig zu interpretieren.

Modelle erfordern oft auch die **Arbeit mit Maßstäben**. Hier soll die Scheibe von HL Tau mit dem Planetensystem der Sonne (genähert in einer Ebene) **verglichen** werden.

Theoretische Betrachtungen wie auch die Beobachtungen von jungen zirkumstellaren Scheiben legen nahe, dass diese nach außen hin dicker werden (siehe Bild rechts). Im Modell beträgt der Winkel der Verdickung ca. 6° .



Schematische Darstellung der proto-planetaren Scheibe um einen T-Tauri-Stern (Quelle: Jeffers, S. V. et al: Astronomy & Astrophysics manuscript, November 20, 2013).

$$\alpha = \arctan \frac{9 \text{ mm}}{160,9 \text{ mm}} \rightarrow \alpha \approx 3^\circ$$



Anleitung zum Basteln: Zunächst sind die Oberseiten, Unterseiten und Außenseiten für das Planetensystem der Sonne und die HL-Tau-Scheibe aus den Vorlagen auf den folgenden Seiten entlang der gestrichelten Linien bzw. der Außenkanten auszuschneiden. Zur Verstärkung werden die Teile auf Karton geklebt und erneut ausgeschnitten.

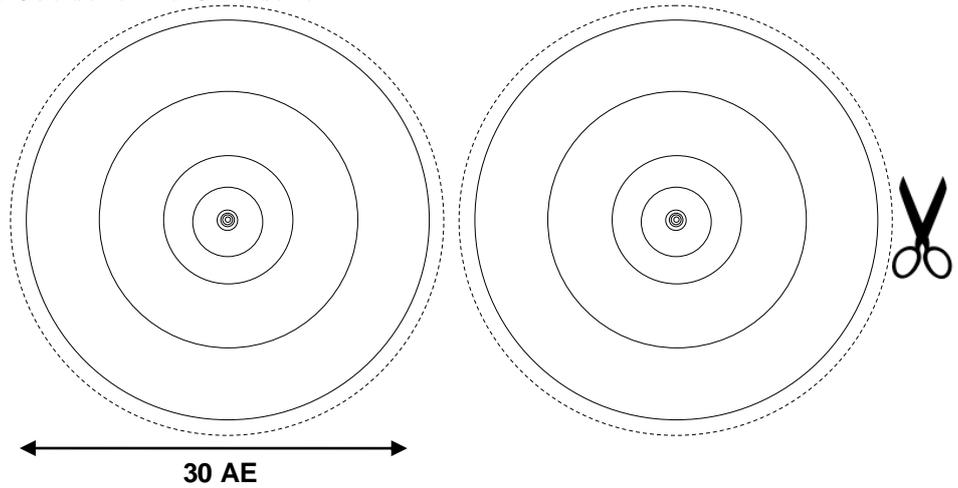
Jetzt wird die Unterseite des Planetensystems der Sonne passend zum Muster der Oberseite aufgeklebt.

Die Klebelaschen der drei Teile des Außenrings der HL-Tau-Scheibe werden leicht angerissen, eingeschnitten und gefalzt, bevor man die Teile zum Ring verklebt. Nun werden Ober- und Unterseite der Scheibe mit dem Ring passend zueinander verbunden. Die Mittelpunkte von Ober- und Unterseite werden schließlich evt. mittels einer Spreizklammer verbunden, so dass sich die HL-Tau-Scheibe nach außen hin verdickt.

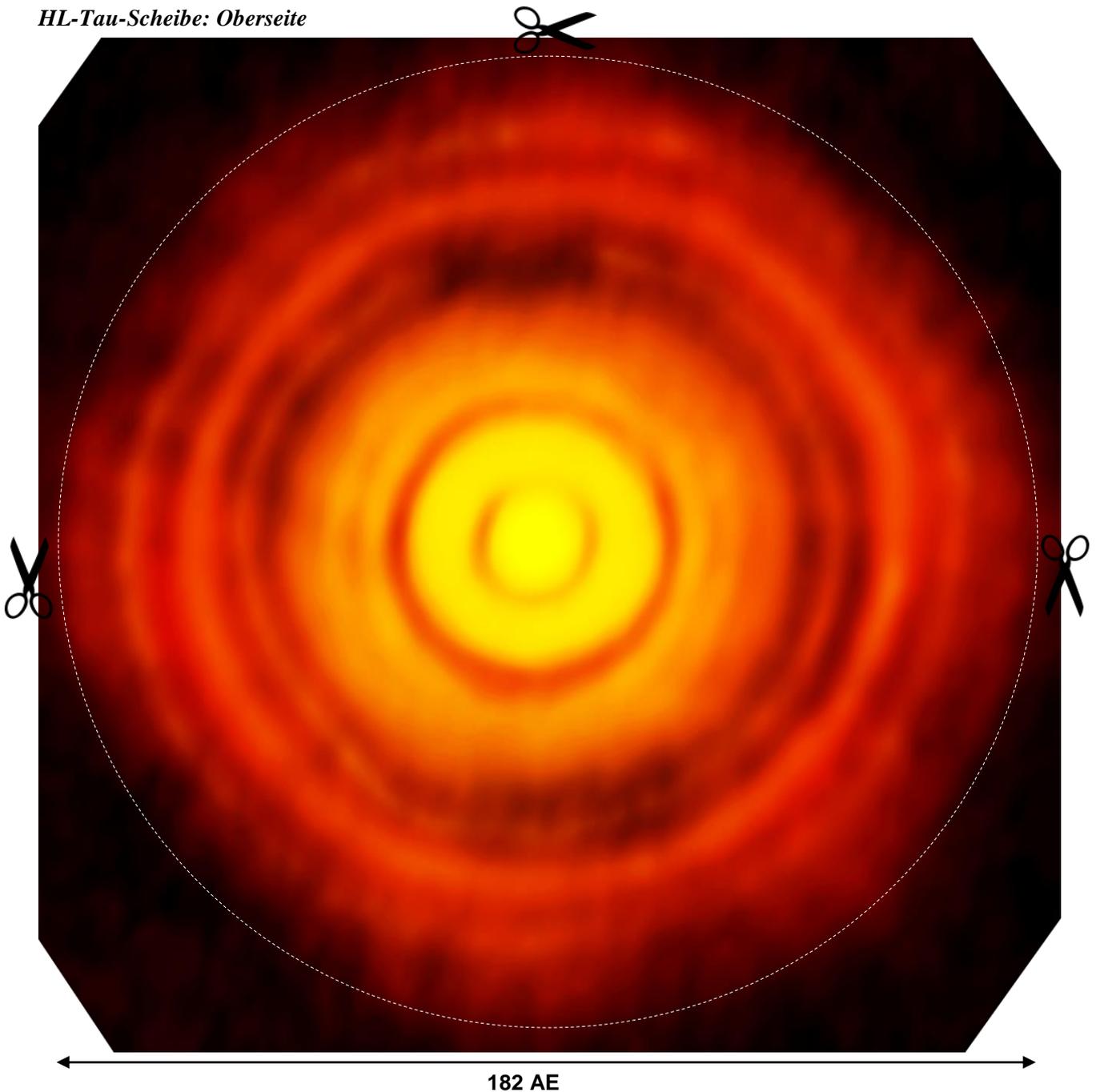
Die Modelle können mittels dünner Sehne oder Zwirnsfaden unter der Zimmerdecke aufgehängt werden.

Planetensystem der Sonne: Oberseite und Unterseite

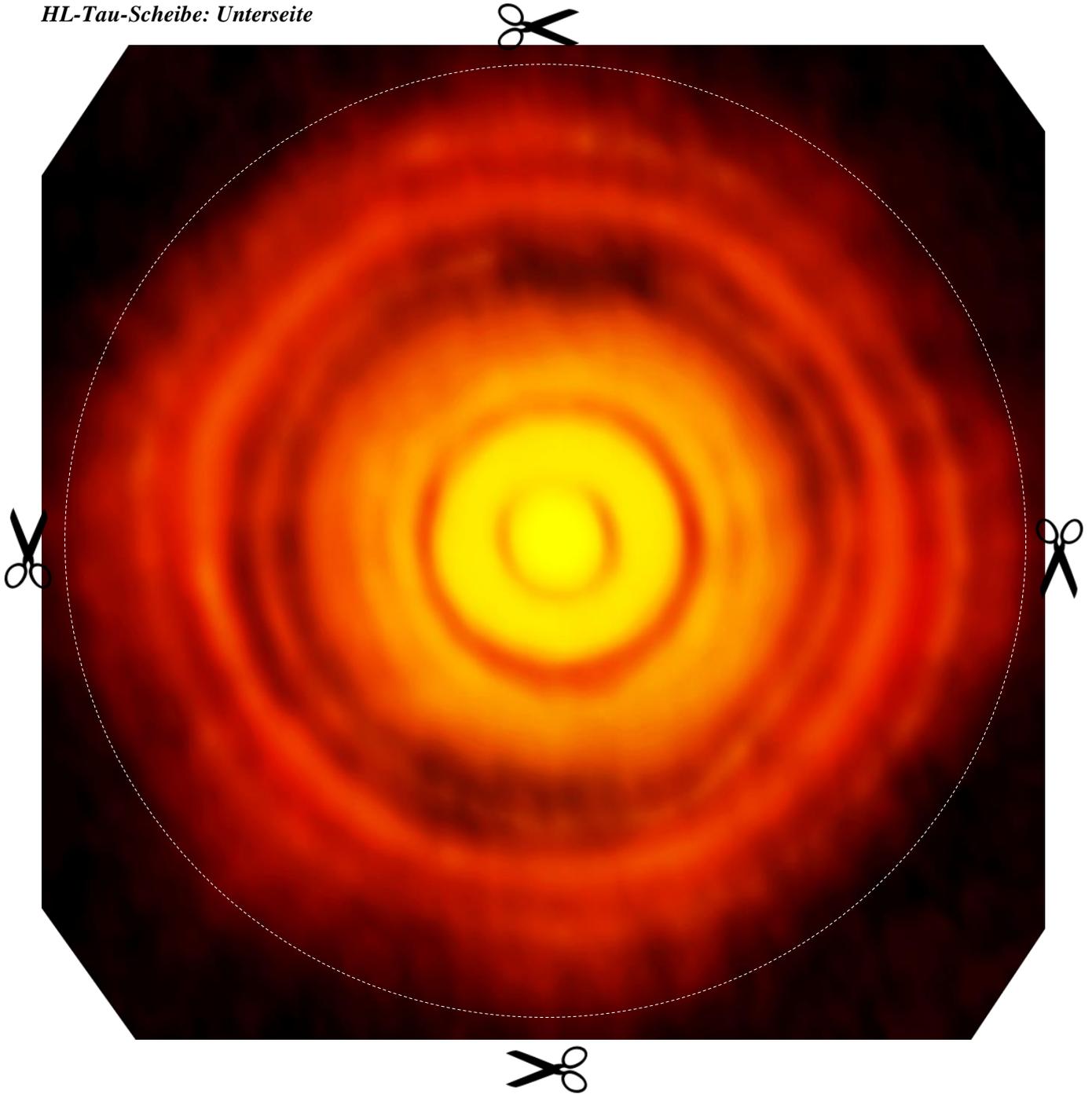
Planet	Abstand (Bahn- radius) [AE]	Modell [cm] Maßstab: 91 AE → 16,09 cm
Merkur	0,387	0,07
Venus	0,723	0,13
Erde	1	0,18
Mars	1,524	0,27
Jupiter	5,203	0,92
Saturn	9,539	1,7
Uranus	19,18	3,4
Neptun	30,06	5,3



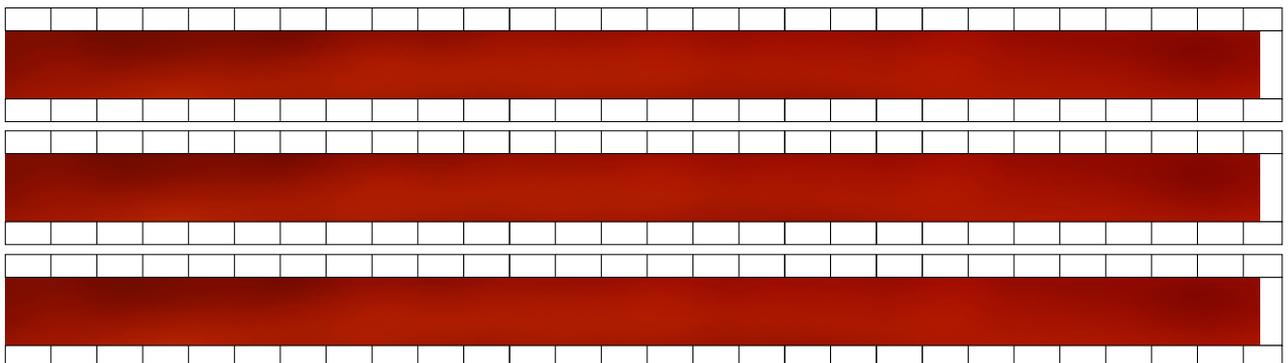
HL-Tau-Scheibe: Oberseite

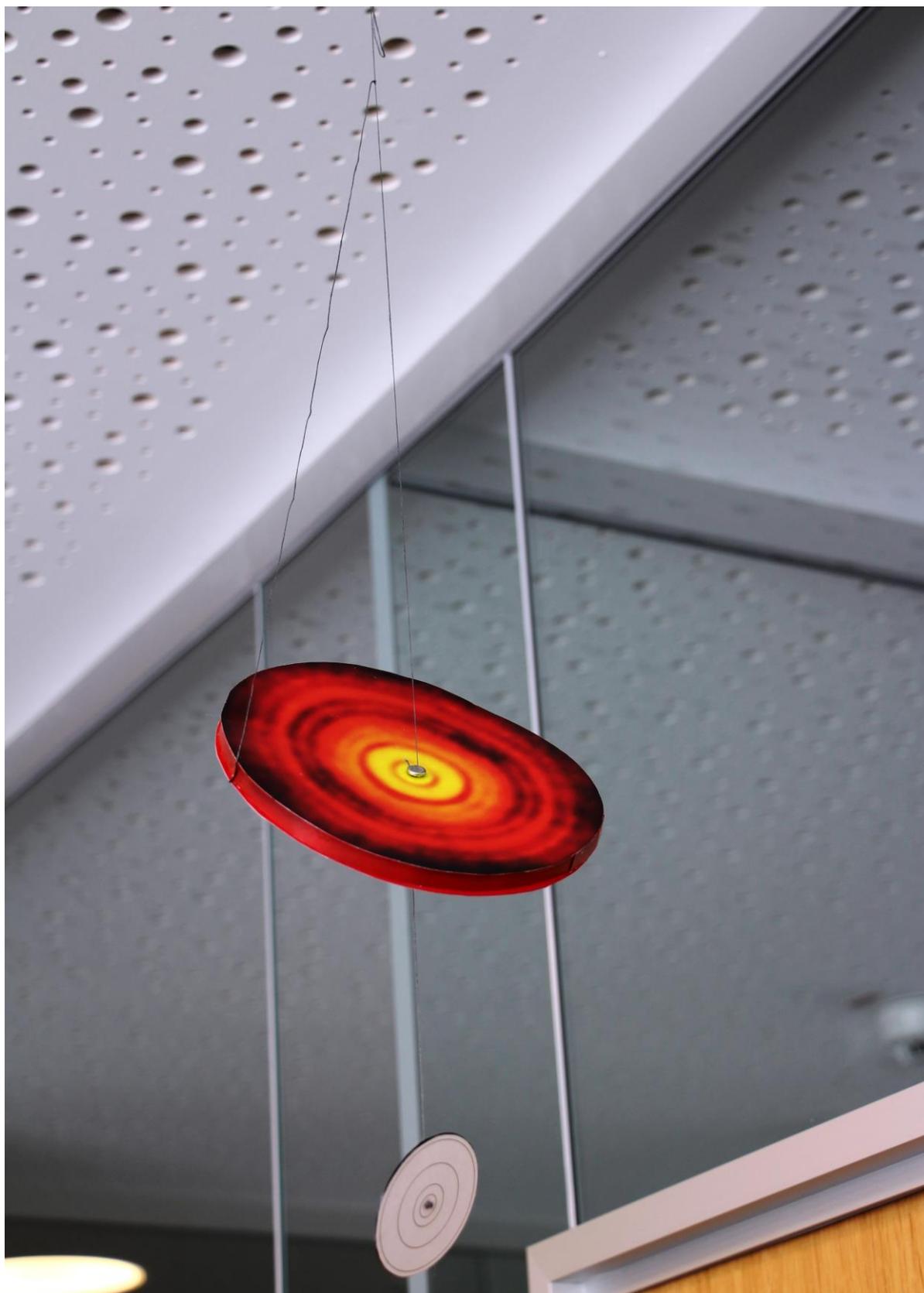


HL-Tau-Scheibe: Unterseite



HL-Tau-Scheibe: Außenseite (Ring)





Die Kartonmodelle der protoplanetaren Scheibe um der Vorhauptreihentstern HL Tau und von der Umlaufebene der Planeten des Sonnensystems (also bis zur Neptunbahn) bieten in Ergänzung zum 2D-Bild eine räumliche Vorstellung, ermöglichen einen Größenvergleich und schmücken den Physik-/Astronomieraum. ©: Olaf Fischer.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

6.) Die Entstehung sonnenähnlicher Sterne und deren Erforschung im Quartettspiel entdecken (Astronomie und Physik)

Die Verquickung von Lernen mit einem vergnüglichen Spiel ist sicherlich anzustreben. Im Folgenden wird ein **Quartett-Spiel** vorgestellt, welches Inhalte und Zusammenhänge zum Thema Sternentstehung zum Gegenstand hat.

Das Spiel besteht aus 32 Karten (8 Quartette mit je 4 thematisch zusammengehörigen Karten). Quartette zu den folgend genannten 8 Themen sind enthalten.

<p>Protoplanetare Scheiben</p>	<p>Hertzsprung-Russell-Diagramm</p>	<p>Region um den Stern HL Tauri</p>	<p>Sternbilder mit „Sterngeburten“</p>
<p>Vorhauptreihenstern HL Tauri</p>	<p>ALMA – Standort</p>	<p>ALMA – Observatorium</p>	<p>Etappen der Sternentstehung</p>

<p>Protoplanetare Scheiben</p> <p>Name des Problems: HH 130 Entfernung: 402 Lj, Sternbild: Orion Scheibendurchmesser: 420 AZ bei 0,5 µm (Blaquelle: WISE/NEA)</p>	<p>Protoplanetare Scheiben</p> <p>Name des Problems: CoKu Tau1 Entfernung: 402 Lj, Sternbild: Orion Scheibendurchmesser: 50 AZ bei 1,6 µm (Blaquelle: SPACEDISK/PI/MANDELA)</p>	<p>Protoplanetare Scheiben</p> <p>Name des Problems: DO Tauri Entfernung: 402 Lj, Sternbild: Orion Scheibendurchmesser: 95 AZ bei 2,3 mm (Blaquelle: SPACEDISK/PI/MANDELA)</p>	<p>Protoplanetare Scheiben</p> <p>Name des Problems: HL Tauri Entfernung: 402 Lj, Sternbild: Orion Scheibendurchmesser: 225 AZ bei 1,3 mm (Blaquelle: ALMA/ESO/NOVA/NAO)</p>
<p>Hertzsprung-Russell-Diagramm</p> <p>Für einen Stern mit einer kühlen Oberfläche, müsste dessen die Dämmzeit auf 100 Mio. Jahre. (Blaquelle: Prof. Carl Gary, New Jersey Institute of Technology)</p>	<p>Hertzsprung-Russell-Diagramm</p> <p>Für einen Stern mit einer dämmernasse dauert die Dämmzeit auf 10 Mio. Jahre. (Blaquelle: Prof. Carl Gary, New Jersey Institute of Technology)</p>	<p>Hertzsprung-Russell-Diagramm</p> <p>Für einen Stern mit 10 Sonnenmassen dauert die Dämmzeit auf 3 Mio. Jahre. (Blaquelle: Prof. Carl Gary, New Jersey Institute of Technology)</p>	<p>Hertzsprung-Russell-Diagramm</p> <p>Für einen Stern mit 100 Sonnenmassen dauert die Dämmzeit auf 100.000 Jahre. (Blaquelle: Prof. Carl Gary, New Jersey Institute of Technology)</p>
<p>Vorhauptreihenstern HL Tauri</p> <p>Sternart: Vorhauptsreihenstern HL Tauri (Blaquelle: ESO/MUSE & NAOS)</p>	<p>Vorhauptreihenstern HL Tauri</p> <p>Die Sternbild- Koordinaten: Rektaszension: RA 13 31 31h 30,44 s Deklination: -16° 15' 17" Entfernung: 402 Lj</p>	<p>Vorhauptreihenstern HL Tauri</p> <p>Lichtmenge: Scheinstärke (Blaquelle): $m_{\lambda, 0.8} = 15,1$ mag (zum Vergleich: $m_{\lambda, 0.8} = 1,97$ mag, $m_{\lambda, 0.8} = -26,73$ mag)</p>	<p>Vorhauptreihenstern HL Tauri</p> <p>Lichtzusammensetzung: Spektralklasse: F7 F6, Sonne: G2</p>
<p>ALMA - Standort</p> <p>Standortname ist der Abkürzung (Blaquelle: Wikipedia, Autor: coablog)</p>	<p>ALMA - Standort</p> <p>Das ALMA-Observatorium befindet sich in der Atacama-Wüste in Chile nahe dem Ort San Pedro de Atacama.</p>	<p>ALMA - Standort</p> <p>Selbstbeschrieben der röhrenförmigen Umgebung von ALMA (Blaquelle: ESO)</p>	<p>ALMA - Standort</p> <p>Einige Teleskope des Observatoriums ALMA vor dem Hintergrund des vulkanischen Licancabur (Blaquelle: ESO)</p>
<p>Region um den Stern HL Tauri</p> <p>Vorhauptreihenstern HL Tauri mit Jd 0911 V212 Traubergemüse in Gas und Staub ihrer Sternentstehungsregion (Blaquelle: ESA/MUSE & NAOS)</p>	<p>Region um den Stern HL Tauri</p> <p>Vorhauptreihenstern HL Tauri mit Jd 0911 V212 Traubergemüse in Gas und Staub ihrer Sternentstehungsregion (Blaquelle: ESA/MUSE & NAOS)</p>	<p>Region um den Stern HL Tauri</p> <p>Vorhauptreihenstern HL Tauri mit Jd 0911 V212 Traubergemüse in Gas und Staub ihrer Sternentstehungsregion (Blaquelle: APO 478 (1997), 766-777)</p>	<p>Region um den Stern HL Tauri</p> <p>Vorhauptreihenstern HL Tauri mit Jd 0911 V212 Traubergemüse in Gas und Staub ihrer Sternentstehungsregion (Blaquelle: ALMA/ESO/NOVA/NAO)</p>
<p>Sternbilder mit „Sterngeburten“</p> <p>Sternbild Orion (alt. Orion) (Blaquelle: © 2003 Tassan-Bongers)</p>	<p>Sternbilder mit „Sterngeburten“</p> <p>Sternbild Orion (alt. Orion) (Blaquelle: © 2003 Tassan-Bongers)</p>	<p>Sternbilder mit „Sterngeburten“</p> <p>Sternbild Fuhmann (alt. Fuhmann) (Blaquelle: © 2003 Tassan-Bongers)</p>	<p>Sternbilder mit „Sterngeburten“</p> <p>Sternbild Chamäleon (alt. Chamäleon) (Blaquelle: © 2003 Tassan-Bongers)</p>
<p>ALMA - Observatorium</p> <p>Das ALMA-Observatorium auf der Chagnoto-Plateau in Chile (im Bildhintergrund) besteht aus 66 Teleskopen, die in bis zu 13 km Abstand aufgestellt werden.</p>	<p>ALMA - Observatorium</p> <p>ALMA besteht aus 66 12-m-Antennen und 12 7-m-Antennen (Radioastronomie verwendet Antennen des Begriffs „Teleskop“ einer Antenne).</p>	<p>ALMA - Observatorium</p> <p>Um gute Bilder zu erzeugen, werden mehrere Antennen (Vorfahrerstütze) „aufeinander geschoben“. Durch die Anordnung in verschiedenen Abständen und Höhenlagen können die Bilder verbessert werden.</p>	<p>ALMA - Observatorium</p> <p>Die 66 ALMA-Antennen können an 132 Positionen aufgestellt werden, so lässt die Fundament-Struktur die noch verbleibende Struktur der Antennen und Plattformen anzuordnen.</p>
<p>Etappen der Sternentstehung</p> <p>In diesem Stadium von Molekülwolken kommt es zum Gravitationskollaps, in dem der Prozess in Zentren nach und nach ein Problem entsteht (Blaquelle: Shu et al. (Blaquelle: Shu et al. 1987))</p>	<p>Etappen der Sternentstehung</p> <p>In Folge der Rotation verflacht der Kollaps nicht kugelförmig, sondern eher – es entsteht eine Scheibe, die als protoplanetare Scheibe bekannt ist (Blaquelle: Shu et al. 1987)</p>	<p>Etappen der Sternentstehung</p> <p>Das zentrale Objekt wird zur dominierenden Masse – zum Vorhauptreihenstern (bis zu 3 Sonnenmassen zu einem T-Typ-Stern). Am Ende der Vorhauptreihensternentstehung existiert lediglich noch eine protoplanetare Scheibe, in der Planeten wachsen können (Blaquelle: Shu et al. 1987)</p>	<p>Etappen der Sternentstehung</p> <p>Wenn der Stern zum Hauptreihenstern wird (die Wasserstoffkerne stark), bildet der entstehende Stern die noch verbleibende circumstellare Materie aus der die Erde ist (Blaquelle: Shu et al. 1987)</p>

Die als Extramaterial angehängte Datei „Quartettkarten“ enthält die Abbildungen der zuvor gezeigten 32 Spielkarten. Diese sind auszudrucken, auf Papper zu kleben und schließlich auszuschneiden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Karten professionell ausdrucken zu lassen (z. B. bei <http://www.quartettbar.de/Quartettbar>). Dies ist nicht sehr teuer (weniger als 10 EURO).

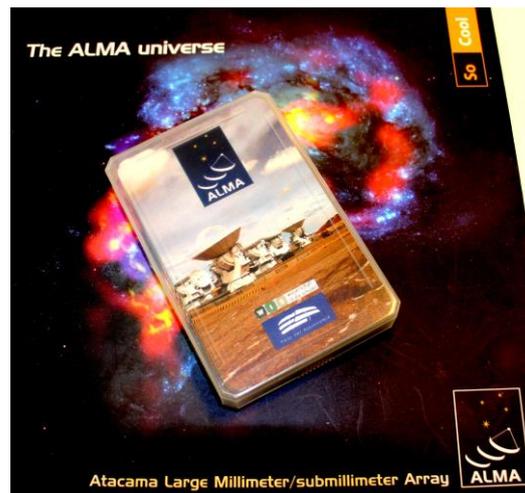
Verlauf und Regeln des Spiels

Die 32 Karten werden vollständig verteilt, d. h. bei 4 Mitspielern erhält jeder 8 Karten, bei nur 3 Mitspielern erhalten zwei jeweils 11 Karten und einer nur 10.

Ziel des Spiels ist es, die meisten vollständigen Quartette abzulegen. Das Sammeln noch fehlender Karten erfolgt dabei durch gezieltes Fragen der Mitspieler nach einer Karte mit einem bestimmten Quartettthema.

Der Spieler, der in der Runde links vom Kartengeber sitzt, beginnt das Spiel und fragt einen beliebigen Mitspieler nach einer eindeutig bezeichneten Karte, die ihm zur Bildung eines Quartetts fehlt. Er darf aber nur dann nach der Karte fragen, wenn er von dem betreffenden Quartett mindestens eine Karte in der Hand hält. Hat der befragte Mitspieler die gesuchte Karte, so muss er sie dem Fragenden herausgeben, und dieser darf weiterhin seine Mitspieler nach ihm fehlenden Karten fragen. Wenn ein Befragter die gewünschte Karte nicht besitzt, dann ist dieser an der Reihe, nach Karten zu fragen.

Sobald ein Spieler ein vollständiges Quartett besitzt, legt er dieses offen vor sich auf den Tisch. Hat ein Spieler keine Karten mehr in der Hand, so ist er aus dem Spiel und sein linker Nachbar darf als nächster nach Karten fragen. Wer bis Spielende die meisten Quartette sammeln kann, gewinnt.



Die Kartenspieler. ©: Paul Cézanne - Eigenes Werk, user:Rlbbberlin, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=748643>.

ERGEBNISSE

Zu 1.) Blick in die Medien:

Ein atemberaubendes Bild von der „Planetenkinderstube“ um den Stern HL Tauri (Astronomie und Sprache (Englisch, Deutsch))

Aktivität:

Lies den folgenden **BBC-Beitrag** „Planet formation captured in photo“ gründlich durch und beantworte die folgenden Fragen:

1. Erläutere, worin die Besonderheit der erzeugten Aufnahme besteht? (Erläutern heißt, einen Sachverhalt mit Hilfe eines Beispiels verdeutlichen.)

Antwort:

Es handelt sich um die bisher am besten aufgelöste Aufnahme einer protoplanetaren Scheibe. Erstmals können deutlich Strukturen (wie die dunklen Ringe) erkannt werden.

2. Was für ein Objekt wurde beobachtet? Nenne alle dazu gegebenen Informationen.

Antwort:

Beobachtet wurde der Vorhauptreihenstern HL Tauri. Sternbild Stier, 450 Lichtjahre entfernt, sonnenähnlich (bezogen auf Masse), weniger als 1 Mio Jahre alt

3. Welche Informationen zur Beobachtung (Ort des Observatoriums Methode, Wellenlänge, u. a. m.) werden gegeben?

Antwort:

ALMA ist ein Observatorium für Radioastronomie, genauer, ein Array zum Empfang von Millimeter-/Submillimeterstrahlung. Es befindet sich hoch in der Atacama-Wüste. Der Detailreichtum der Aufnahme wurde möglich, indem Signale von weit voneinander entfernten Radioantennen des Arrays (15 km) miteinander kombiniert wurden (Interferometrie).

4. Beschreibe, was in der Abbildung gezeigt wird!

Antwort:

Die Abbildung zeigt die protoplanetare Scheibe rund um HL Tau. In der Scheibe sind dunkle Ringe erkennbar, die vermutlich auf Planetenbildung zurückzuführen sind. Material aus diesen Ringen koaguliert (verklumpt) dann zu Planeten, Asteroiden, Kometen, ...



[\(→zurück zum Anfang\)](#)

**Zu 2.) Wo am Himmel befinden sich HL Tauri (HL Tau)
und ähnliche Vorhauptreihensterne?
(Astronomie und Geografie: Arbeit mit Karten)**

Aktivität:

Markiere die Positionen der in der Tabelle aufgeführten Vorhauptreihensterne aus dem „Verwandtenkreis“ von HL Tau (T-Tauri-Sterne) in den beiden folgenden Sternkarten. Nutze dazu ihre gegebenen **Äquatorkoordinaten** Rektaszension und Deklination.

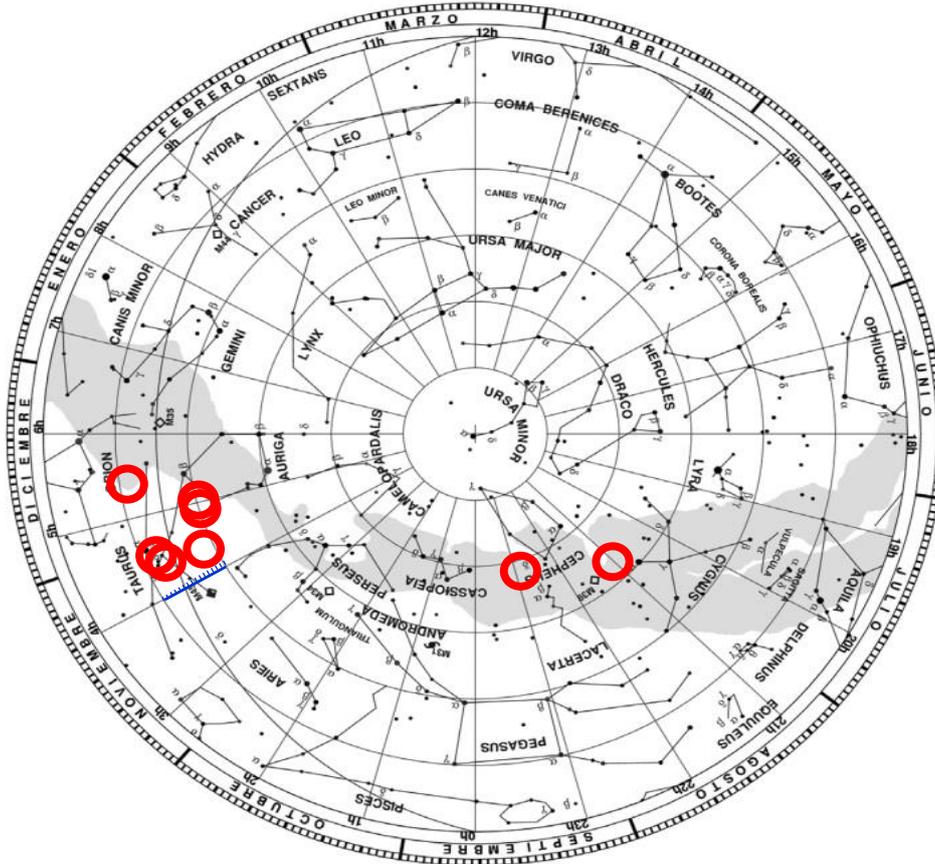
Zum Finden einer genauen Koordinaten-Position zwischen zwei gegebenen Koordinatenlinien könnte ein selbst gemachtes „Koordinatenlineal“, wie es hier gezeigt wird, zur Anwendung kommen.

1. In welchen Sternbildern befinden sich die hier ausgewählten T-Tauri-Sterne?
Nenne auch die deutschen Sternbildbezeichnungen!

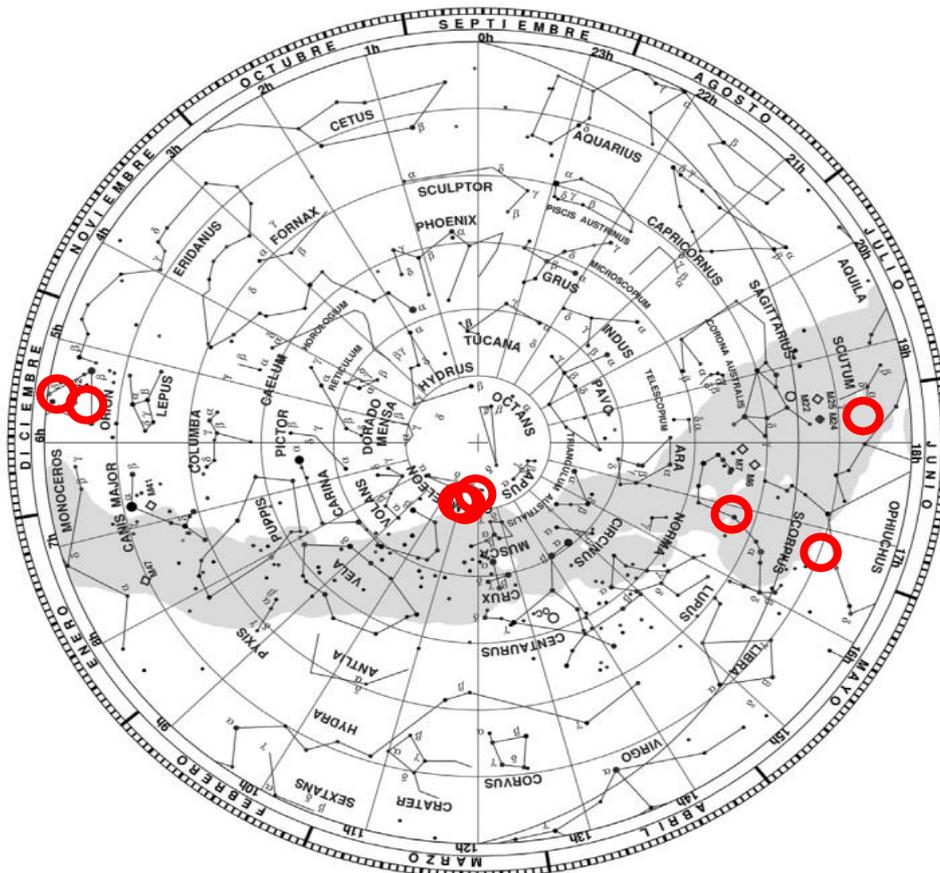
Name des T-Tauri-Sterns	Sternbildname (lateinisch/ deutsch)
RY Tauri (RY Tau)	Taurus / Stier
T Tauri (T Tau)	Taurus / Stier
HL Tauri (HL Tau)	Taurus / Stier
SU Aurigae (SU Aur)	Auriga / Fuhrmann
RW Aurigae (RW Aur)	Auriga / Fuhrmann
GW Orionis (GW Ori)	Orion / Orion
HD 290772	Orion / Orion
DL Orionis (DL Ori)	Orion / Orion
SZ Chamaeleontis (SZ Cha)	Chameleon / Chamäleon
CV Chamaeleontis (CV Cha)	Chameleon / Chamäleon
T Chamaeleontis (T Cha)	Chameleon / Chamäleon
CM Chamaeleontis (CM Cha)	Chameleon / Chamäleon
V1121 Ophiuchi (V1121 Oph)	Ophiuchus / Schlangenträger
AK Scorpii (AK Sco)	Scorpius / Skorpion
FK Serpentis (FK Ser)	Serpens / Schlange
V1331 Cygni (V13231 Cyg)	Cygnus / Schwan
DI Cephei (DI Cep)	Cepheus / Kepheus

2. Was fällt hinsichtlich ihrer Lage am Sternenhimmel auf?
- Es fällt auf, dass sich sämtliche T-Tauri-Sterne nahe oder innerhalb des Milchstraßenbandes befinden.
3. In der Tabelle sind vor allem die hellen Objekte aufgeführt. Warum erscheinen alle T-Tauri-Sterne bei so geringer scheinbarer Helligkeit, so dass sie mit bloßem Auge nicht zu sehen sind? (Die Ursache hat etwas mit ihrer Position und ihrem Entwicklungszustand zu tun.)
- Die Tabellendaten zeigen, dass die uns nächsten T-Tauri-Sterne mindestens einige hundert Lichtjahre entfernt sind. In diesen Entfernungen können wir aber nur noch Riesensterne mit bloßem Auge sehen.
 - Zum einen befinden sich die T-Tauri-Sterne in der Scheibe des Milchstraßensystems, also teils innerhalb des dort befindlichen interstellaren (zwischen den Sternen befindlichen) Staubs, der die Lichtausbreitung behindert. Auch der zirkumstellare (Rest-)Staub sorgt für Sichtbehinderung.

PLANISFERIO NORTE



PLANISFERIO SUR



[\(→zurück zum Anfang\)](#)

3.) Beobachtungen der näheren Umgebung von HL Tau – „Bilder lesen lernen“ (Astronomie und Mathematik: Verhältnisse bilden)

Bestimme den Durchmesser der Scheibe von HL Tau in Abb. 4 (HST-Bild) in Pixeln.

Lösung zur Aufgabe mit dem Dreisatz (Verhältnisse bilden)

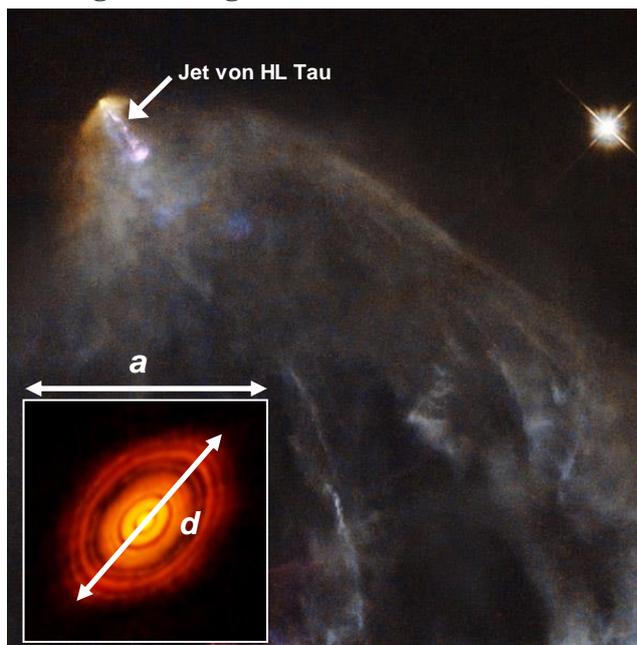


Abbildung 4: Zirkumstellare Materie des entstehenden Sterns HL Tau im sichtbaren Licht (Bildgröße: 1,72 × 1,76 Bogenminuten, 1033 × 1058 Pixel). Aus dem Zentrum der im Bild nicht sichtbaren Scheibe um HL Tau wird ein Jet ausgestoßen, welcher Gasballungen entlang seiner Bewegungsrichtung zum rötlichen Leuchten anregt (Bildquelle: ESA/Hubble & NASA). Der Bildeinschub zeigt die von ALMA bei 1,28 mm Wellenlänge aufgelöste Staubscheibe um HL Tau (Bildgröße: 0,03 × 0,03 Bogenminuten, Bildquelle: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)).

Da die Scheibe gekippt zu sehen ist (Kreis wird abgeflacht), entspricht die Längsausdehnung dem Durchmesser der Scheibe.

Nach Vermessen der Kantenlänge a des Scheibenbildes (ALMA) und der Längsausdehnung der Scheibe d erhält man ein Längenverhältnis von $d/a \approx 0,82$. Auf Grundlage der Winkelausdehnung von a (0,03 Bogenminuten) ergibt das für d eine Winkelausdehnung von rund 0,025 Bogenminuten (1,5 Bogensekunden).

Im HST-Bild der zirkumstellaren Umgebung von HL Tau erstrecken sich 1033 Pixel in x-Richtung und spannen damit einen Bildwinkel von 1,72 Bogenminuten (103,2 Bogensekunden) auf (siehe Untertext der Abb. 4). Damit deckt ein (quadratisches) Pixel des HST-Bildes ein Himmelsgebiet mit einer Winkelausdehnung von $1,72 \text{ Bogenminuten} / 1033 \approx 0,00167 \text{ Bogenminuten} \approx 0,1 \text{ Bogensekunden}$ ab.

Würde die Scheibe in Richtung einer Pixelkante liegen, so würde sie $1,5 / 0,1 = 15$ Pixel bedecken. Das sind ca. 1,5 % der Bildbreite. Bei Annahme einer Schräglage sind es etwas weniger.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

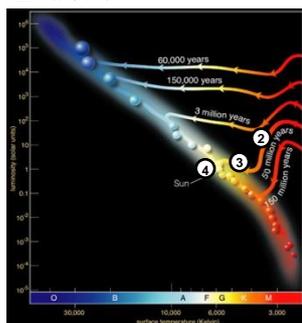
4.) Sternentstehung – wie aus einer unförmigen Wolke ein Sonnensystem entsteht (Astronomie und Physik)

Unterwegs im HRD: auf der Lebenslinie eines entstehenden Sterns

Aufgaben

- 1.) Zeige in Abb. 6 den Abschnitt der Lebenslinie des Ein-Sonnenmassen-Sterns, während dem sein erster Kollaps zum prästellaren Kern **isotherm** verläuft und begründe deine Wahl!

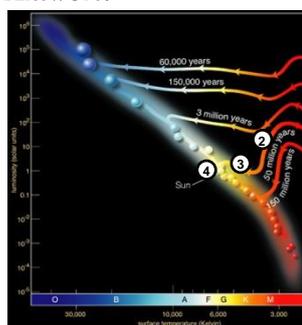
Antwort:



In diesem Abschnitt der „Lebenslinie“ bleibt die Temperatur (waagerechte Achse des HRD) konstant, d. h. der Wolkenkernkollaps verläuft isotherm.

- 2.) Um wie viele Größenordnungen steigt die **Leuchtkraft** während der Akkretion von Material aus dem Molekülwolkenkern auf den prästellaren Kern? Zeige in Abb. 6 den Abschnitt der Lebenslinie, in dem die Leuchtkraft so stark ansteigt!

Antwort:



In diesem Abschnitt der „Lebenslinie“ steigt die Leuchtkraft um den Faktor 10^6 (auf der Ordinate im Diagramm von 10^2 bis 10^4), d. h., um 6 Größenordnungen.

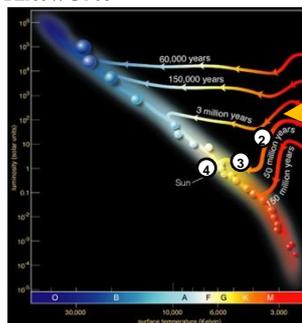
- 3.) Zeige auf der Lebenslinie im HRD (Abb. 6) den Zustandspunkt mit der maximalen Leuchtkraft des prästellaren Kerns! Berechne aus den im HRD ablesbaren Werten für Leuchtkraft L und Oberflächentemperatur T den Radius R des prästellaren Kerns zu diesem Zeitpunkt seiner Entwicklung. Nutze dazu die folgende von dem Physiker Stefan im Jahre 1879 aus Messungen abgeleitete und 1884 durch den Physiker Boltzmann theoretisch hergeleitete **Stefan-Boltzmann-Gesetz für** Schwarzkörperstrahlung:

$$L = \sigma \cdot 4\pi \cdot R^2 \cdot T^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante darstellt.

Die Leuchtkraft der Sonne beträgt $L_{\text{Sonne}} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Antwort:



An dieser Stelle der „Lebenslinie“ hat der prästellare Kern seine maximale Leuchtkraft (ca. 10^2 Sonnenleuchtkräfte) erreicht.

(→ zurück zum Anfang)

- 4.) Im Maximum seiner Leuchtkraft hat der prästellare Kern einen Radius von $R_2 \approx 0,2$ AE. Welchen Radius R_1 hatte der kugelförmig angenommene prästellare Kern zu Beginn des Leuchtkraftanstiegs, wenn man annimmt, dass sich die Temperatur seiner abstrahlenden Kugeloberfläche während der Akkretion von $T_1 = 15$ K auf die Temperatur von $T_2 = 3000$ K (siehe HRD) erhöhte?

Antwort:

$$L_2 / L_1 = 10^6, T_2 = 3000 \text{ K}, T_1 = 15 \text{ K}, R_2 = 0,2 \text{ AE}$$

Zu Beginn des Leuchtkraftanstiegs hatte der gerade etablierte prästellare Kern einen Radius von etwa 8 AE (siehe Rechnung).

$$L \propto T^4 \cdot R^2 \Rightarrow L = c \cdot T^4 \cdot R^2 \Rightarrow c = \frac{L_1}{T_1^4 \cdot R_1^2} = \frac{L_2}{T_2^4 \cdot R_2^2} \Rightarrow R_1 = \sqrt{\frac{L_1}{L_2} \cdot \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^4} \cdot R_2^2,$$

$$R_1 \approx \sqrt{10^{-6} \cdot \left(\frac{3000 \text{ K}}{15 \text{ K}}\right)^4} \cdot 0,2^2 \text{ AE}^2 \approx 8 \text{ AE}.$$

- 5.) Während der Etappe 2 schrumpft der prästellare Kern und steigt in der Temperatur um etwa 1000 K, wird zum Protostern und schließlich (am unteren Ende des Hayashi-Tracks, eines Teils der Lebenslinie entstehender massearmer Sterne im HRD) zum Vorhauptreihenstern. Zeige im HRD den Abschnitt der Lebenslinie, der Hayashi-Track genannt wird! Zeige auch die Position, ab der wir von einem Vorhauptreihenstern sprechen! Berechne den Radius des Vorhauptreihensterns!

Antwort:

In diesem Abschnitt der „Lebenslinie“ fällt die Leuchtkraft um den Faktor 10^2 , und die Temperatur steigt um etwa 1000 K. Ab hier sprechen wir von einem Vorhauptreihenstern.

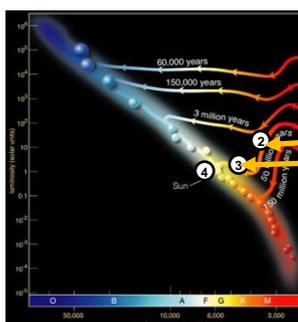
Rechnung:

$$L_2 / L_1 = 10^{-2}, T_1 = 3000 \text{ K}, T_2 = 4000 \text{ K}, R_1 = 0,2 \text{ AE}$$

Mit den Annahmen hätte der Vorhauptreihenstern einen Radius R_2 von etwa 1,7 Mio km, was hinsichtlich der Größenordnung der Realität (1,5 Sonnenradien) gut passt.

$$L \propto T^4 \cdot R^2 \Rightarrow L = c \cdot T^4 \cdot R^2 \Rightarrow c = \frac{L_1}{T_1^4 \cdot R_1^2} = \frac{L_2}{T_2^4 \cdot R_2^2} \Rightarrow R_2 = \sqrt{\frac{L_2}{L_1} \cdot \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^4} \cdot R_1^2,$$

$$R_2 \approx \sqrt{10^{-2} \cdot \left(\frac{3000 \text{ K}}{4000 \text{ K}}\right)^4} \cdot 0,2^2 \text{ AE}^2 = 0,01125 \text{ AE} \approx 1,7 \cdot 10^6 \text{ km}.$$



Hayashi-Track

Etappe als Vorhauptreihenstern

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

6.) Die zweite Kollapsphase der Entstehung eines Sterns mit einer Sonnenmasse (Schrumpfung des Zentralobjektradius von rund 21 Sonnenradien (0,1 AE) auf 1,5 Sonnenradien) startet, sobald Druck und Temperatur derartig angestiegen sind, dass die Wasserstoffmoleküle dissoziieren. Der Kollaps setzt sich fort, wenn die entstandenen Atome ionisieren.

- Bestimme die auf ein Gasteilchen des Wasserstoffs bezogenen Energien, die zur **Dissoziation** und zur **Ionisation** nötig sind.

Antwort:

$$E_{\text{ion}} = 1312 \text{ kJ/mol} \approx \frac{1312 \text{ kJ}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}} \approx 2,179 \cdot 10^{-18} \text{ J/Teilchen.}$$

- Die **thermische Energie eines Teilchen** mit 3 Freiheitsgraden berechnet sich aus:

$$E_{\text{th}} = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T. \quad (T \dots \text{Temperatur, } k \dots \text{ Boltzmannkonstante)}$$

Verdeutliche dir das bei der Ionisation eintretende Ungleichgewicht zwischen Gravitation und Innendruck, indem du den (theoretischen) „Temperaturabfall“ für die Bestandteile des dissoziierten Wasserstoffatoms berechnest. Der sich ergebende Wert wird viel so groß sein, was nahelegt, dass die Dissoziation nicht möglich ist (sofort wieder aufgehoben wird). Warum findet sie trotzdem statt? (Was passiert noch?) Diskutiere das Ergebnis!

Antwort:

$$E_{\text{th}} = 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot T \quad \rightarrow \quad \text{für 2 Teilchen: } \Delta E_{\text{th}} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} \cdot k \cdot \Delta T \quad \rightarrow \quad \Delta T = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta E_{\text{th}}}{k}$$

$$\text{mit } \Delta E_{\text{th}} = E_{\text{ion}}$$

$$\Delta T = \frac{1}{3} \cdot \frac{2,179 \cdot 10^{-18} \text{ J}}{1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}} \approx 50.000 \text{ K.}$$

Die gleichzeitig stattfindende Akkretion von Materie „heizt“ ständig die Teilchen auf (potentielle Energie wird in thermische Energie umgewandelt), so dass die Dissoziation möglich wird und zu einem Druckabfall und damit einem Ungleichgewicht führt, welches den Kollaps bewirkt.

[\(→ zurück zum Anfang\)](#)

5) Astronomie/Beobachtung: Die Scheibe von HL Tau – der Geburtsort von Planeten

- HL Tau hat einen Abstand von 140 pc. Bestimme mit Hilfe von Abb. 7 den linearen Radius der Staubscheibe um HL Tau.

Antwort:

Nach Ausmessen und Ins-Verhältnis-Setzen (Der im Bild mit dem Lineal gemessene Scheibendurchmesser verhält sich zur ebenso bestimmten Seitenlänge des Bildes wie der Winkeldurchmesser a der Scheibe zur Winkelgröße der Bildseite.) erhält man einen Scheibendurchmesser im Winkelmaß von $a \approx 1,3$ Bogensekunden. Bei einer Entfernung von $d = 140$ pc ($1 \text{ pc} \approx 206265 \text{ AE}$) ergibt sich ein Scheibendurchmesser D von etwa 182 AE.

$$\tan a = \frac{D}{d} \quad \rightarrow \quad D = \tan a \cdot d = \tan 1,3'' \cdot 140 \text{ pc} \approx 182 \text{ AE}.$$

Der gesuchte Scheibenradius beträgt also etwa 91 AE.

- Perspektivische Verkürzung:** Berechne den Neigungswinkel i der Scheibenachse relativ zur Sichtlinie unter der (groben) Annahme, dass die Scheibe eben ist, d. h. wie eine Platte betrachtet werden kann.

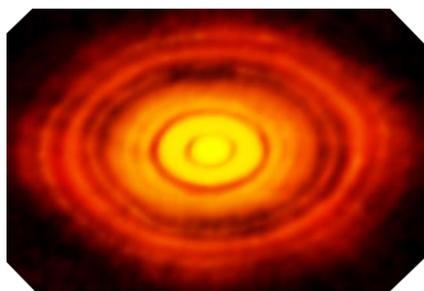
Antwort:

Für einen Neigungswinkel von $i = 0^\circ$ (Blick auf die Scheibenebene) erscheinen alle Scheibenradien gleich groß. Mit größer werdendem Winkel i verringert sich der in Projektion sichtbare „gekippte Radius“. Es gilt:

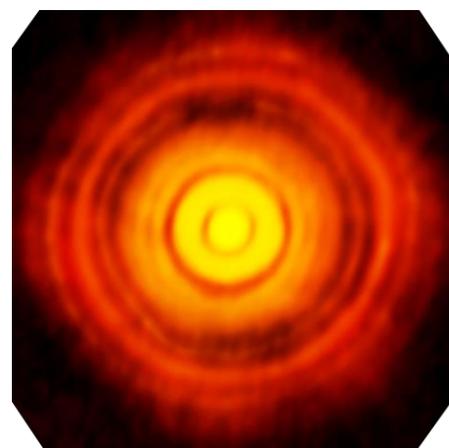
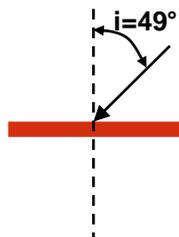
$$\cos i = \frac{R_{\text{gekippt}}}{R_{\text{in Bildebene}}}.$$

Nach Vermessen von $R_{\text{in-Bildebene}}$ und R_{gekippt} an verschiedenen Ringstrukturen konnte ein Neigungswinkel von rund 49° ermittelt werden.

z.B.: $\cos i \approx \frac{12,3}{18,7} \rightarrow i \approx 49^\circ.$



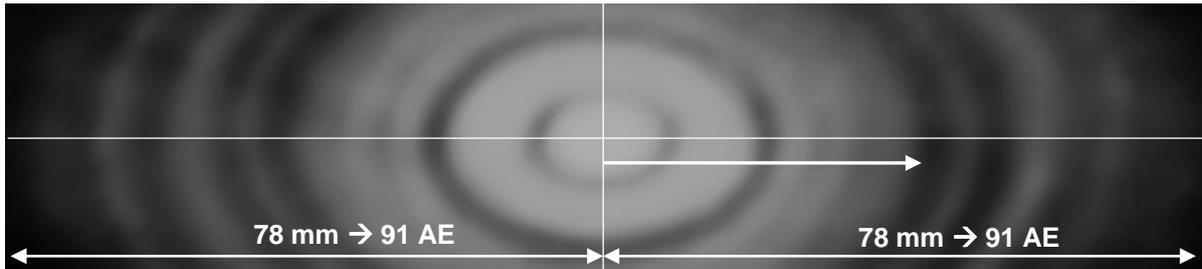
Blick auf gekippte Scheibe
(Ansicht mit perspektivischer Verkürzung
in Richtung der y-Achse)



senkrechter Blick auf die Scheibe

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

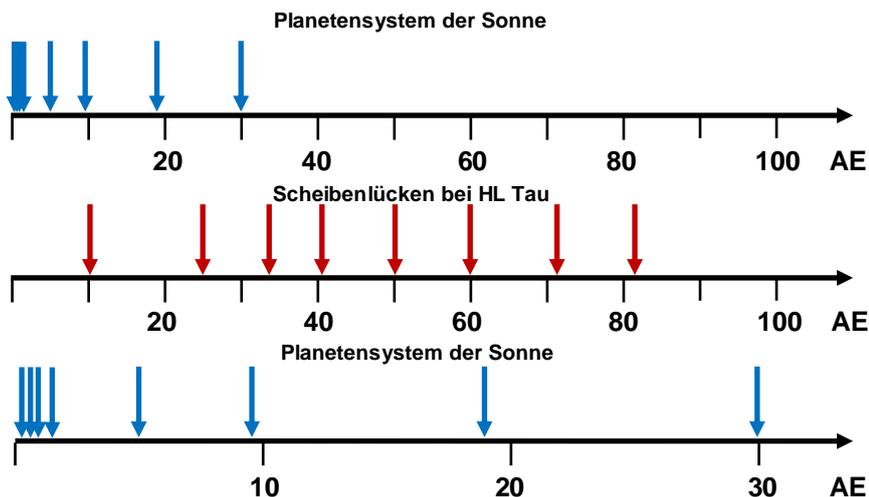
3. Vermesse* in untenstehender Abb. (Teil aus Abb. 7) die Abstände der (durch entstehende Planeten?) frei geräumten Scheibenbereiche und vergleiche diese mit den Planetenabständen im Sonnensystem. Markiere die Abstände auch am vorgegebenen Strahl!
 (*Der Mittelwert aus Innen- und Außenradius ergibt jeweils den Abstand der Ringmitte. Durch Messung links und rechts von der Scheibenmitte und folgende Mittelung wird die Genauigkeit erhöht.)



Ring	links mm → [AE]*			rechts mm → [AE]*			Radius [AE]
	Innenradius	Außenradius	Mitte	Innenradius	Außenradius	Mitte	
1	7,5 → 8,75	9,5 → 11,09	9,92	8 → 9,34	10 → 11,67	10,50	10,21
2	21 → 24,51	24 → 28,01	26,26	20 → 23,34	22,5 → 26,26	24,80	25,53
3	28 → 32,68	31 → 36,18	34,43	27,5 → 32,09	29,5 → 34,43	33,26	33,85
4	34 → 39,68	36 → 42,01	40,85	33 → 38,51	36 → 42,01	40,26	40,56
5	40 → 46,68	45 → 52,52	49,60	41 → 47,85	46 → 53,68	50,76	50,18
6	48 → 56,02	52 → 60,68	58,35	50 → 58,35	55,5 → 64,77	61,56	59,96
7	56 → 65,53	63 → 73,52	69,53	60 → 70,02	65,5 → 76,44	73,23	71,38
8	66,5 → 77,61	70,5 → 82,27	79,94	69 → 80,52	73 → 85,19	82,86	81,40

Planet	Abstand [AE]
Merkur	0,387
Venus	0,723
Erde	1
Mars	1,524
Jupiter	5,203
Saturn	9,539
Uranus	19,18
Neptun	30,06

(* 1 mm entspricht rund 1,167 AE)



[\(→zurück zum Anfang\)](#)

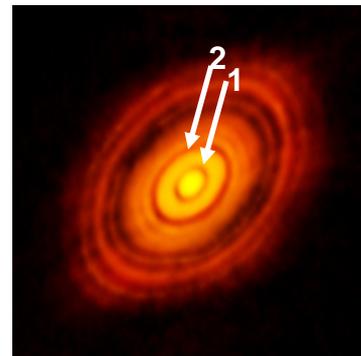
4. Kwon und Mitarbeiter (The Astrophysical Journal. 741, Nr. 1, November 2011, siehe Quellen) haben für die Scheibe von HL Tau eine Gesamtmasse von 0,13 Sonnenmassen (Masse der Sonne: $1,989 \cdot 10^{30}$ kg) abgeleitet.

Diese Masse steckt in den strahlenden (hellen) Ringen, die eine Fläche von ca. 40 % der Gesamtscheibenfläche ausmachen.

Welche Massen wurden in den im Bild markierten inneren 2 Ringen (evt. durch Planetenbildung) entfernt bzw. zusammengeballt?

Zur Beantwortung der Frage soll von der sehr groben Annahme ausgegangen werden, dass die Flächendichte der Scheibe konstant sei, d. h.. dass die Massen der Säulen gleichen Querschnitts in z-Richtung – das ist die Richtung der Symmetrieachse der Scheibe – gleich sind. Die Radien der **Kreisringe** (Außenradius minus Innenradius) wurden bereits in Aufgabe 3 ermittelt.

Vergleiche die Massen mit der von Jupiter (ca. $19 \cdot 10^{26}$ kg).



Antwort:

Zur Bestimmung der (fehlenden) Ringmassen müssen nur die Flächen der Ringquerschnitte ermittelt und zur Gesamtfläche in Relation gesetzt werden.

Da nur 40 % der Scheibe abstrahlen, gilt: $A_{\text{gesamt}} = 0,4 \cdot \pi \cdot R_{\text{Scheibe}}^2$

$$v_{\text{Ring}} = \frac{A_{\text{Ring}}}{A_{\text{gesamt}}} = \frac{\pi \cdot (R_{\text{außen}}^2 - R_{\text{innen}}^2)}{0,4 \cdot \pi \cdot R_{\text{Scheibe}}^2}$$

$$v_{\text{Ring 1}} = \frac{A_{\text{Ring 1}}}{A_{\text{gesamt}}} = \frac{\pi \cdot (11,38^2 - 9,05^2)}{0,4 \cdot \pi \cdot 91^2} \approx 0,0144,$$

$$v_{\text{Ring 2}} = \frac{A_{\text{Ring 2}}}{A_{\text{gesamt}}} = \frac{\pi \cdot (27,13^2 - 23,92^2)}{0,4 \cdot \pi \cdot 91^2} = 0,0495.$$

Die (fehlenden) Ringmassen ergeben sich dann aus dem jeweiligen Anteil der Gesamtmasse:

$$M_{\text{Ring}} = M_{\text{gesamt}} \cdot v_{\text{Ring}}$$

Für die markierten 2 Ringe ergeben sich folgende Werte:

$$M_{\text{Ring 1}} \approx 0,001872 M_{\text{Sonne}} \approx 2,0 M_{\text{Jupiter}},$$

$$M_{\text{Ring 2}} \approx 0,006435 M_{\text{Sonne}} \approx 6,7 M_{\text{Jupiter}},$$

Die ermittelten Massen liegen im Bereich der Masse von Jupiter.

(Viele bisher entdeckte extrasolare Planeten haben derartige Massen.)

Die vermeintlichen Umlaufbahnen (Ringe 1 und 2) liegen in dem Bereich, in dem sich in unserem Sonnensystem die Riesenplaneten befinden.

[\(→zurück zum Anfang\)](#)

Quellen

- Jeffers, S. V. et al: “Imaging the circumstellar environment of the young T Tauri star SU Aurigae”, Astronomy & Astrophysics manuscript no. aa c ESO 2013, November 20, 2013
- Webb, Jonathan (Science reporter): „Planet formation captured in photo”, BBC News, 6 November 2014
- Woojin, Kwon et al: “Resolving the Circumstellar Disk of HL Tauri at Millimeter Wavelengths”, Astrophysical Journal 741, Nr. 1, November 2011
- <http://www.peripatus.gen.nz/astronomy/ttausta.html>
- http://www1.yao.ac.cn/~jinhuahe/know_base/catalogues/sourcelists/list_ttau.htm
- http://www.astro.washington.edu/courses/astro421/star_formation_in-class_study.html

WIS-Beiträge zu den Themen ALMA und Radioastronomie

- Olaf Fischer: Wie die kosmischen Radiowellen in die Schule kommen (WIS 12/2006), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/wie-die-kosmischen-radiowellen-in-die-schule-kommen/1051494>
- Timo Stein: Radiowellen greifbar gemacht (WIS 7/2008), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/radiowellen-greifbar-gemacht/1051438>
- Michael Geffert: Mit ALMA zu neuen Horizonten der Astronomie (WIS 5/2009), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/mit-alma-zu-neuen-horizonten-der-astronomie/1051398>
- Olaf Fischer: Das Projekt ALMA Mater, Teil 1: Rendezvous mit einem der ALMA-Radioteleskope, (WIS 3/2013), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/das-projekt-alma-mater/1156171>
- Olaf Fischer: Das Projekt ALMA Mater, Teil 2: ALMA – ein Interferometer, (WIS 12/2013), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/das-projekt-alma-mater/1156164>
- Olaf Fischer: Das Projekt ALMA Mater, Teil 3: Eine Beobachtung, die es in sich hat: kosmischer Baustofftransport (WIS 3/2015), <http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/das-projekt-alma-mater/1285851>

ANHANG 1

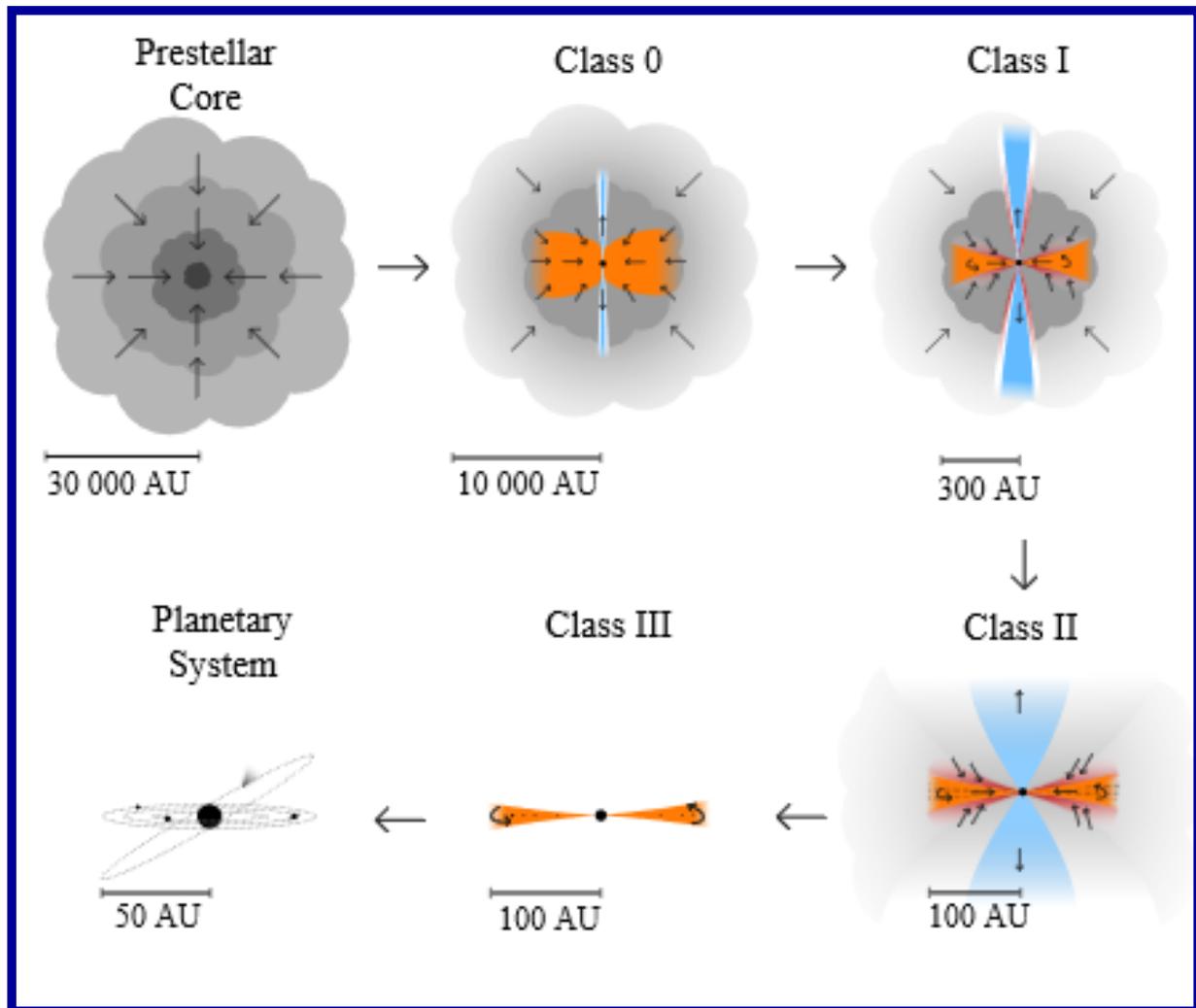
- Vorlage für Magnetapplikationen zur Sternentstehung für die Arbeit mit dem HRD:
Datei „Applikationen“
- Vorlage für Papiermodell der Scheibe von HL Tau und die Umlaufebene des Sonnensystems (als Vergleichsobjekt): im zentralen WIS-Dokument (hier)
- Vorlage für Quartettspiel „Die Entstehung sonnenähnlicher Sterne und deren Erforschung“:
Datei „Quartettkarten“

Danksagung

Ein herzlicher Dank gilt Frau Dr. Cecilia Scorze und Herrn Dr. Markus Nielbock für das kritische Durchlesen der Vorabfassungen.

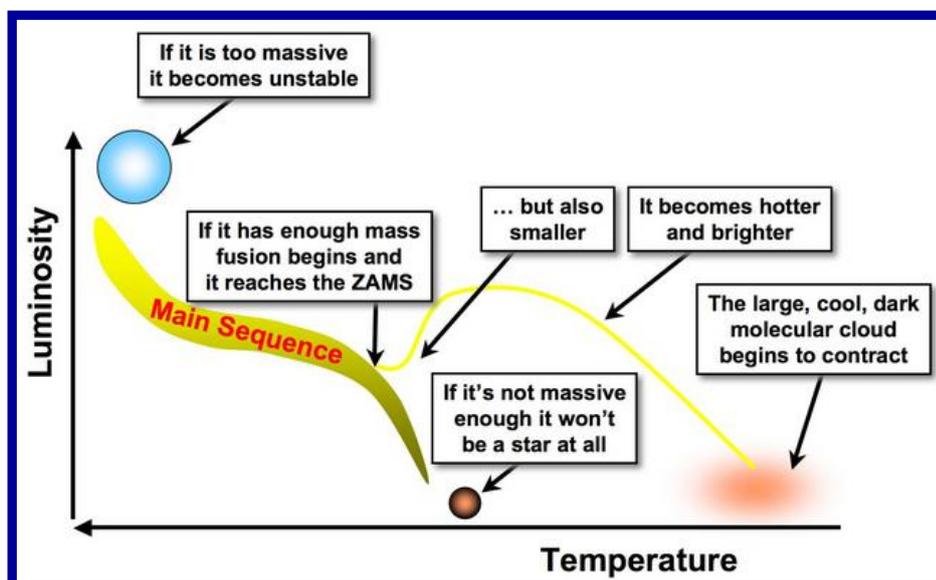
(→zurück zum Anfang)

Einige Bildquellen

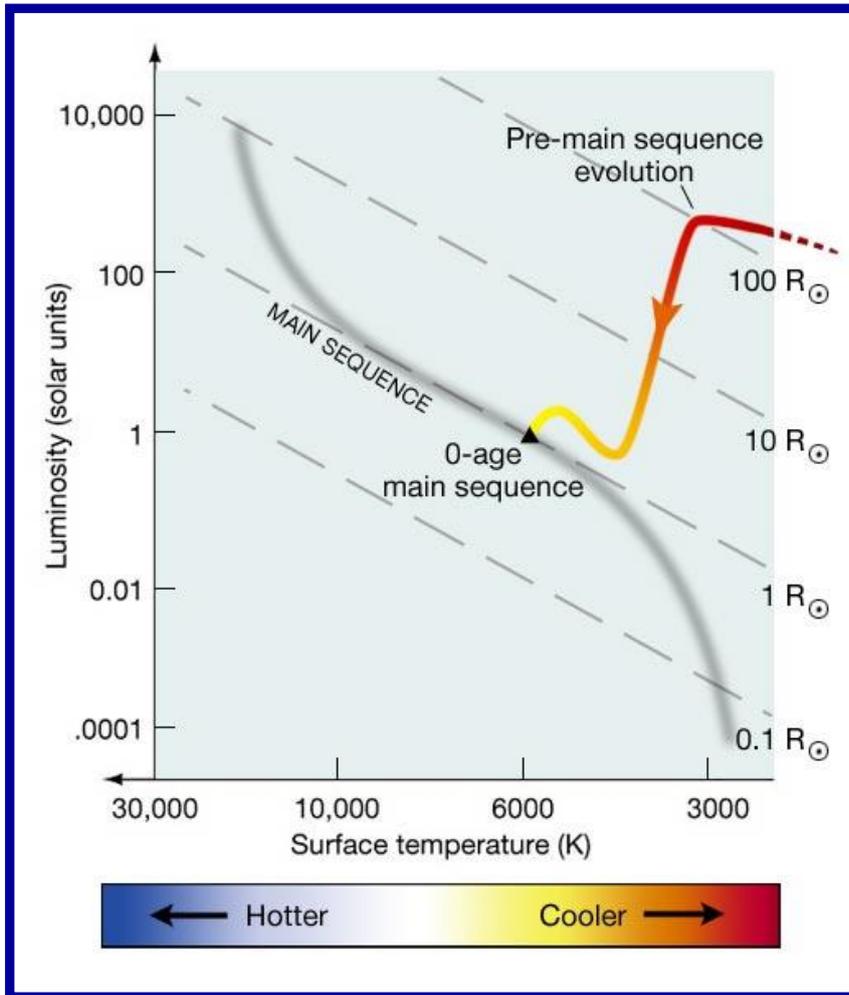


Konfigurationen der zirkumstellaren Materie im Laufe der protostellaren Entwicklung.

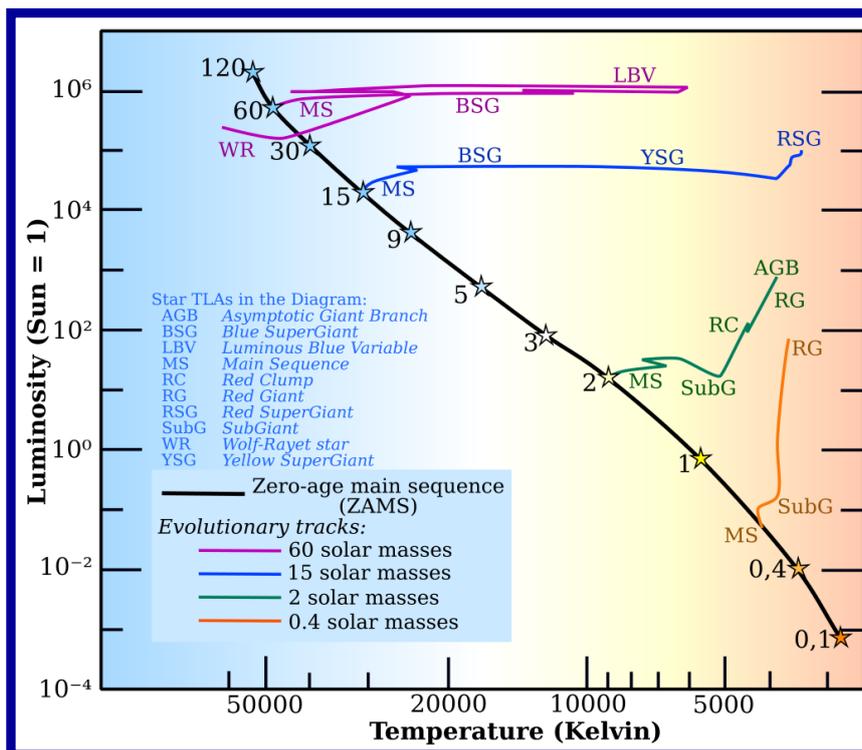
©: Magnus Vilhelm Persson, CC BY 4.0, https://figshare.com/articles/Current_view_of_protostellar_evolution/654555.



Vorgeburtlicher Lebensweg eines entstehenden Sterns etwa einer Sonnenmasse vom ersten Kollaps bis hin zur Hauptreihe im HRD. Quelle: © Swinburne University of Technology, http://astronomy.swin.edu.au/cms/cpg15x/albums/scaled_cache/m07a02-s31i01-640x391.jpg.



„Lebensweg“ eines entstehenden Sterns einer Sonnenmasse im HRD bis hin zur Hauptreihe.
 ©: Penn State Astronomy & Astrophysics,
https://www.e-education.psu.edu/astro801/content/l5_p5.html.



„Lebenswege“ der Sternentstehung im HRD für Sterne unterschiedlicher Masse.
 ©: derivative work: Rursus (talk) Stellar_evolutionary_tracks-en.PNG; *derivative work: G.A.SStellar_evolutionary_track s.gif; Jesusmaiz - Stellar_evolutionary_tracks-en.PNG, CC BY 3.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4259209>.