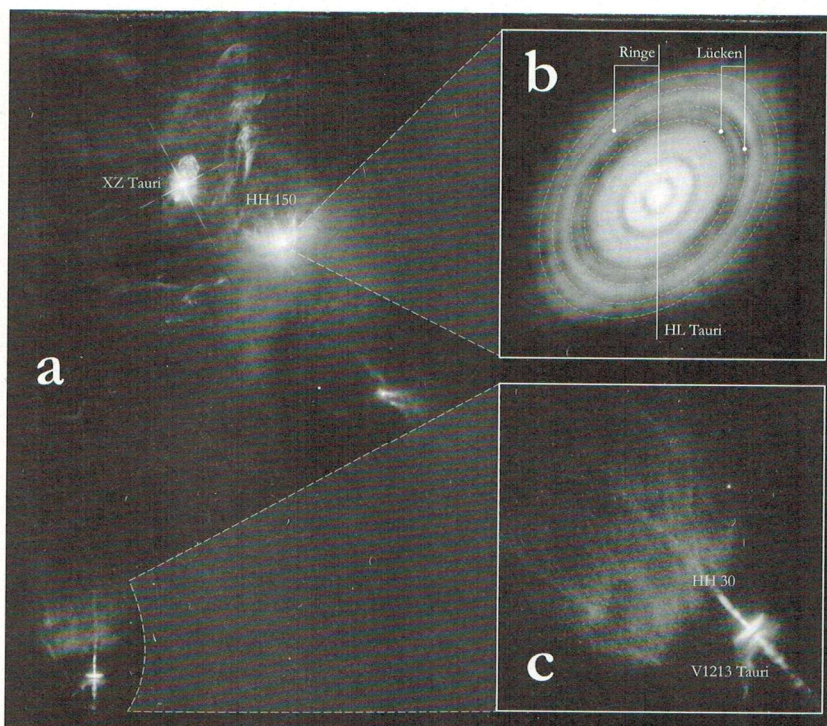


Über die Entstehung des magnetischen Sonnensystems (2)

von Ulrich von Kusserow

Durch die Entdeckung und Erforschung besonders junger, sonnenähnlicher Sternsysteme haben die Astrophysiker und Planetenforscher in den vergangenen 170 Jahren wesentliche Erkenntnisse über die Entstehung auch unseres Sonnensystems gewonnen. Nachweislich hat sich heute der Einfluss magnetischer Prozesse auf die Sternentstehung in interstellaren Molekül- und Staubwolken, auf komplexe Entwicklungen in den Akkretionsscheiben um massearme Protosterne sowie auf den Drehimpulstransport auch in den von diesen ausgehenden Materiewinden als bedeutsam erwiesen. In diesem zweiten Teil der Artikelserie wird zum einen die Geschichte der Entdeckung charakteristischer Eigenschaften masseärmerer protostellarer Systeme vorgestellt. Zum anderen werden hier wichtige physikalische Prozesse anschaulich erläutert, die in deren frühen Entwicklungsphasen von offensichtlich entscheidender Bedeutung sein können; Teil 1 der Artikelserie siehe ASTRONOMIE + RAUMFAHRT 2024, Heft 1, S. 18 bis 24.



8 Gaswolken und Strahlungsausbrüche jetartig gebündelter Winde sowie Akkretionsscheiben im Umfeld der jungen Sterne XZ Tauri, HL Tauri und V1213 Tauri im Sternbild Stier (a). Ringe und Lücken in der Gas- und Staubscheibe um den jungen Stern HL Tauri, dessen leuchtendes Herbig-Haro-Objekt HH 150 in Bild a zu erkennen ist (b). Ausschnittvergrößerung der Scheibe-Jet Struktur mit dem Herbig-Haro-Objekt HH 30 um den verdeckten jungen Stern V1213 Tauri (c). ESA/Hubble und NASA, ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), (Bearbeitung: U. v. Kusserow)

Natürlich gab es keine menschlichen Zeitzeugen der frühen Entwicklungsgeschichte unseres Sonnensystems vor mehreren Milliarden Jahren. Und ein einziges Menschenleben hätte auch überhaupt nicht ausreichen können, um die unterschiedlichen Entstehungsphasen der jungen Protosonne und der Protoplaneten durch gravitative Materieverdichtung in einer schwach rotierenden, turbulent verwirbelten und magnetisierten Molekül- und Staubwolke (Bild 7c) in einem Spiralarm unserer Milchstraßengalaxie über einige Millionen Jahre hinweg zu verfolgen. Eine glaubwürdige Entstehungstheorie sollte heute plausibel erklären können, wie die junge Sonne als Einzelstern entstand, und wie der Transport des Drehimpulses (Bild 2) für die Akkretion von Materie in der sie umgebenden Wolke gesorgt hat. Wie konnten sich die darin umlaufenden jungen protosolaren Planeten und Monde (Bild 5) mit ihren ganz unterschiedlichen Massen, chemischen Zusammensetzungen und inneren Strukturen in charakteristischen Abständen von der Protosonne im Laufe der Zeit ausbilden (Bild 1)? Und welche spezielle Rolle haben die nachweislich existierenden Magnetfelder (Bild 3) bei der Ausbildung dieses frühen Sonnensystems gespielt?

Schon Immanuel Kant (Bild 6) hatte Mitte des 18. Jahrhunderts vermutet, dass es in unserer Milchstraße sehr viele Sterne gibt, die in der Regel von Planetensystemen umgeben sein müssten. Und nach der von Pierre-Simon Laplace (Bild 6) entwickelten Nebularhypothese entstehen die Planeten dieses Systems in einem die Sonne umgebenden „atmosphärischen Sonnennebel“. Tatsächlich gibt es in unserer „Heimatgalaxie“ Milliarden sonnenähnlicher Sterne, und bis heute konnte hier auch die Existenz von mehr als 5500 extrasolarer Planeten mit Hilfe unterschiedlicher Methoden, mehr oder weniger direkt, nachgewiesen werden. Immer wieder werden

dabei auch besonders junge, sonnenähnliche protostellare Sternsysteme entdeckt, die sich durch die Existenz ihrer Akkretionsscheiben, vor allem aber auch durch die von diesen ausgehenden, mehr oder weniger stark gebündelten Materiewinde zu erkennen geben (Bild 8). Die frühen Protosterne im Zentralbereich der Akkretionsscheiben bleiben durch allzu dichte Staubwolken meist noch verdeckt und geben sich erst in späteren Entwicklungsphasen zu erkennen. Die Wissenschaftler erforschen heute die Eigenschaften solcher sonnenähnlichen, zeitlich unterschiedlich weit entwickelten protostellaren Systeme mit modernsten wissenschaftlichen Methoden, um auch verlässlichere Erkenntnisse über die frühen Entwicklungsphasen unseres Sonnensystems zu gewinnen.

Charakteristische Erscheinungsformen protostellarer Systeme

John Russell Hind (1823-1895) (Bild 10) entdeckte 1852 den recht leuchtschwachen, auffallend irregulär veränderlichen Stern T Tauri (Nord) in einer zwischen den Plejaden und Hyaden gelegenen dunklen Staubwolke im Sternbild des Stiers. Dieser, mit einem nahen Doppelsternsystem (T Tauri Süd a, b) wechselwirkende junge Vorhauptreihen-Stern, in dessen Inneren Wasserstoffusionsprozesse noch nicht gezündet haben, wird unter anderem von einem als *Hind Nebel* (NGC 1555) bezeichneten Reflexionsnebel umgeben (**Bild 9a**), dessen Helligkeit extrem stark schwankt, in den Jahrzehnten nach seiner Entdeckung wiederholt sogar nicht beobachtet werden konnte. Beim direkten Durchblick durch das 91,44-cm-Teleskop des Lick-Observatoriums beobachtete *George Ellery Burnham* (**Bild 10**) 1890 einen sehr kleinen und nur schwach schimmernden Emissionsnebel (Burnham Nebel) in direkter Umgebung des T-Tauri Sternsystems. Wie komplex dieses aus jungen Sternen zusammengesetzte Sternsystem tatsächlich strukturiert ist, lässt sich anhand der Infrarotaufnahme des 3,6 m Canada-France-Hawaii Teleskops (**Bild 9b**) veranschaulichen. Man erkennt darauf die drei T-Tauri Sterne, zirkumstellares Material in einem ausgedehnten Halo bestehend aus Staubpartikeln, die das Sternenlicht streuen, sowie

drei mehr oder weniger stark kollimierte jetartig gebündelte Materiewinde, die ganz offensichtlich von den Sternsystemen ausgehen.

Während die typischen Längenabmessungen solcher protostellaren, in späteren Entwicklungsphasen auch als „protoplanetar“ bezeichneten Scheiben zeitlich deutlich variierend, zwischen einigen zehn bis zu wenigen hundert Astronomische Einheiten (AU) liegen, betragen deren typische Dicken nur etwa ein Zehntel ihres Durchmessers.

Classroom Aid - T Tauri Stars:

Unter <https://www.youtube.com/watch?v=BeB2fPqtM4> lässt sich die zeitliche Veränderung der Durchmesser, Teilchendichten und Oberflächentemperaturen von T-Tauri Sternen verfolgen, werden einige der in Bild 8 und Bild 9 abgebildeten jungen Sternsysteme noch einmal vorgestellt.

Dass es sich bei T-Tauri-ähnlichen Systemen um noch sehr junge Sternsysteme handeln könnte, dafür sprachen zum einen deren Existenz im dichten Inneren einer interstellaren Wolke, dass diese Sterne zum andern von unscharfen Kleckschen umgeben sind, sehr auffallende Spektraleigenschaften zeigen und sich dabei als irreguläre Veränderliche erweisen. Auf der Suche nach T-Tauri-ähnlichen Sternsystemen im Orion beobachtete *George Howard Herbig* (Bild 10) erstmals 1946 die Umgebung des staubhaltigen Schlüsselloch-Reflexionsnebels NGC 1999, der von dem veränderlichen Stern V380 Ori beleuchtet wird, der von seltsamen kleinen, flauschigen Wolken umrahmt ist. Nachdem *Guillermo Haro* (Bild 10) 1949 auf das spezielle Emissionslinien-Spektrum dieses Himmelsobjektes aufmerksam gemacht hatte, untersuchte und verglich *Herbig* es mit dem des Burnham-Nebels. Er fand 1950 übereinstimmend ausgeprägte Emissionslinien des einfach ionisierten Schwefels und des Sauerstoffs. Er entdeckte in der Folgezeit weitere solcher nebulösen Objekte, die *Viktor H. Ambartsumian* (1908-1996) wenige Jahre später als Herbig-Haro-Objekte bezeichnete ([12], [13]). Seiner Meinung nach könnten sie die frühen Entwicklungsphasen junger Sterne charakterisieren, die *Alfred Harrison Joy* (1882-1973) erst 1945 der als T-Tauri-Sterne bezeichneten Sternklasse zuordnete. Diese hauptsächlich aus Wasserstoff, etwas Helium

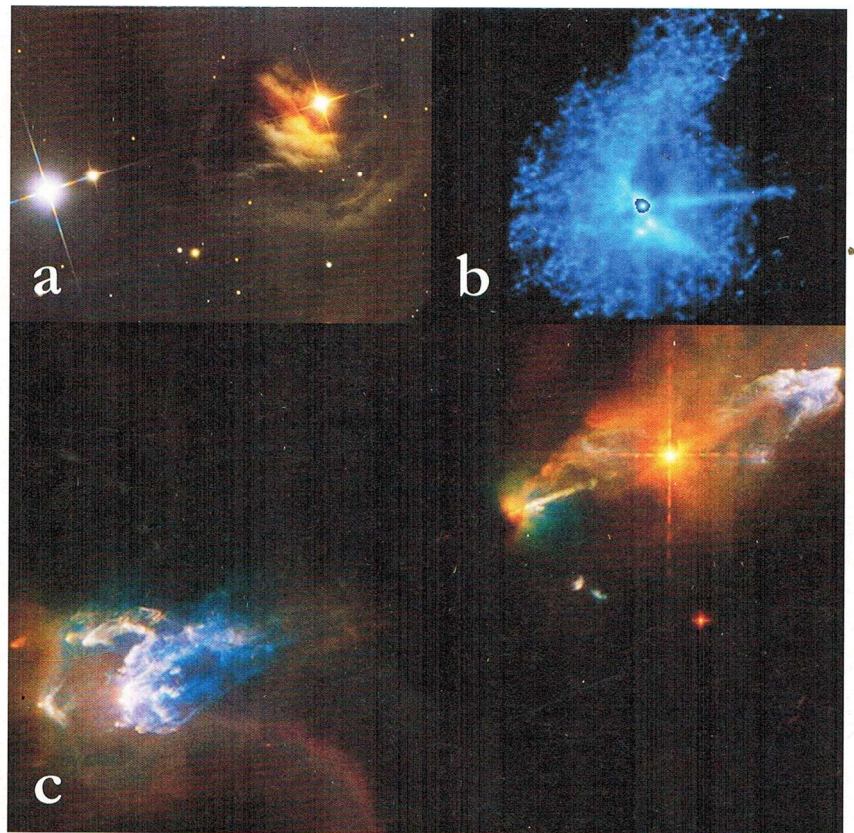
und anderen Spurengasen zusammengesetzten filigranen Wolken enthalten darüber hinaus auch geringe Mengen an Lithium. Dies ist ein deutlicher Indikator für die Jugend der diese Objekte beeinflussenden Sterne, denn im Innern von Hauptreihensternen (sowie unserer heute wasserstoffbrennenden Sonne) kann dieses Element ab Zentraltemperaturen von mehr als 2,5 Mio. K nach Ablauf sogenannten Lithiumbrennens gar nicht mehr nachgewiesen werden.

Aktuell sind mehr als tausend solcher, als Herbig-Haro-Objekte bezeichneten hellen Nebelflecken bekannt, die eng mit neugeborenen Sternen verbunden sind. Folgend dem Präfix „HH“ benennt dabei eine natürliche Zahl das jeweilige Objekt. Die auf der 1998 mit dem Canada-France-Hawaii Telescope erstellten Infrarotaufnahme des T-Tauri-Gebietes NGC 1555 (Bild 9b) sichtbaren jetartig gebündelten schmalen Gaswolken werden heute mit HH 155, HH 255 (Burnham Nebel) bzw. HH 355 bezeichnet. Und die flauschigen Gaswolken, die von *Herbig* erstmals 1946 im Umfeld des veränderlichen Sterns V380 Ori spektroskopiert worden waren, bekamen die Namen HH 1, HH 2 bzw. HH 3. Die mit dem Hubble-Weltraumteleskop erstmals 1995 erstellte hochaufgelöste Aufnahme (Bild 9c) zweier dieser Herbig-Haro-Objekte veranschaulicht die besondere Komplexität der langgestreckten, bipolar von dem jungen, weitgehend noch verdeckten Protostern ausgehenden Gas- und Staubwolkenstrukturen. Bild 8 zeigt die im Umfeld von V1213 Tauri und HL Tauri nachweisbaren Herbig-Haro-Objekte HH 30 bzw. HH 150. Ganz offensichtlich gehen von den noch sehr jungen T-Tauri-Sternen jeweils stark kollimierte Sternwinde aus, die epochenartig bugförmige, turbulent verwirbelte Schockfronten beim Auftreffen auf das sie umgebende interstellare Medium erzeugen, die sich bei der Beobachtung in unterschiedlichen Wellenlängen intensiv leuchtend zu erkennen geben.

Über die Existenz und zeitliche Entwicklung sogenannter Akkretionsscheiben, die von dünnen Molekül- und Staubwolken umhüllt sind, und in deren Zentralbereich besonders junge Sterne für den Beobachter anfangs noch verborgen bleiben, wurde in der Zeit nach *Kant* sehr viel spekuliert. Seit den 1950er Jahren erstellten theoretische Astrophysiker dafür detaillierte Modellbilder. Sie entwickelten leistungsfähige physika-

liche Theorien (siehe folgendes Kapitel) und führten bereits, zunächst weitgehend nur algebraisch ohne größeren Einsatz von Computern, beeindruckende analytische Modellrechnungen durch. Der Existenznachweis solcher Scheiben, in denen Planeten entstehen können, gelang den Beobachtern aber erst durch den Einsatz des Hubble-Weltraumteleskops. Beginnend 1994 entdeckten *Robert O'Dell*, *Mark McCaughrean* und andere im Orionnebel sogenannte Proplyds (protoplanetary disks) (**Bild 11a**). Protoplanetare Scheiben junger protostellarer Systeme werden durch massereiche, besonders heiße Sterne des Trapezhaufens im Zentralbereich des Orionnebels von außen intensiv beleuchtet, durch energiereiche Photonen ionisiert und dadurch teilweise verdampft. Im quallenartig strukturierten Proplyd 473-245 (**Bild 11b**) ist ein junges Sternsystem noch von einem beleuchteten, großräumigen Materieko- kon umgeben, in dessen Außenbereich Stoßwellen durch Auftreffen des Materiewindes des nahegelegenen Sterns Theta 1 Ori C erzeugt werden. **Bild 11c** veranschaulicht die schmale, sich zum Außenbereich hin aufweitende Akkretionsscheibe des jungen Sterns im Proplyd 181-825, der durch die Scheibe zwar noch verborgen bleibt, der die direkt darüber und darunter liegende interstellare Materie aber intensiv beleuchtet.

Typische Radiusabmessungen dieser Akkretionsscheiben liegen zeitlich variierend zwischen einigen 10 AE und wenigen 100 AE und besitzen typische Höhenabmessungen, die demgegenüber nur etwa ein Zehntel so groß sind. Die bipolar daraus abströmenden, jetartig gebündelten Winde (**Bild 8c**) bzw. die Abstände zwischen dem jungen Vorhauptreihenstern und den, durch solche Materiewinde im interstellaren Medium erzeugten Schockfronten können mit mehr als 1000 AE zehnmal so groß sein wie die typischen Längenabmessungen der Akkretionsscheiben. Die mit dem Teleskopfeld des Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) erstellte interferometrische Aufnahme einer solchen Scheibe in **Bild 8b** veranschaulicht hochaufgelöst, wie komplex die Scheibenstruktur des weniger als 100.000 Jahre alten HL-Tauri-Systems ist. Die Masse dieser Scheibe mit einem Radius von etwa 200 AE könnte etwas mehr als 1/10 der Sonnenmasse betragen. Die Staubkontinuums-Emis-



9 Der junge, sich irregulär verändernde junge Stern T Tauri in dem ihn umgebenden, beleuchteten Hindnebel NGC 1555 im Sternbild Stier (a), Infrarotaufnahme des T-Tauri-Trinär Systems mit deutlich sichtbaren protostellaren Winden und den jetartigen Materieauswürfen HH 155, HH 255 (Burnham Nebel) und HH 355 (b), mit dem Hubble Weltraumteleskop gemachte Aufnahme des Herbig-Haro Objekts HH 1/2, das bereits 1947 als solches erkannt worden war (c). A. Block/Mount Lemmon SkyCenter/University of Arizona, C. u. F. Roddier, Institute for Astronomy, Honolulu, Hawaii, ESA / Hubble & NASA, B. Reipurth, B. Nisini

sion dieser, wenn nicht aller protoplanetaren, aus Gas, Staub und Geröll bestehenden Scheiben besteht aus Ringen und Lücken. In letzteren könnten sich bereits protoplanetare Kerne ausgebildet haben, die den umlaufenden Staub in diesen Bereichen verstärkt gravitativ aufgesaugt haben.

Tatsächlich wurden bereits in den 1980er Jahren erste extrasolare Planeten entdeckt [15], die wie Osiris und HD 114762 b anfangs fälschlicherweise als Braune Zwerge identifiziert, bzw. deren planetare Existenzen wegen fehlender Messgenauigkeiten vorübergehend noch verworfen worden waren. Im Jahre 1995 waren es dann *Didier Queloz* und *Michel Mayor* (**Bild 10**), denen mit 51 Pegasi b die erste definitive Entdeckung eines Exoplaneten im Orbit um einen sonnenähnlichen Stern gelang. Nicht nur mittels der Radialgeschwindigkeitsmethode, die sie dabei erfolgreich anwendeten, und bei der der Dopplereffekt aufgrund von Bewegun-

gen des Sterns auf den Beobachter zu bzw. von ihm weg ausgenutzt wird, wurden inzwischen mehr als 5500 solcher Planeten in mehr als 4100 exoplanetaren Systemen mit teilweise sehr unterschiedlichen Eigenschaften entdeckt. Auch beim Einsatz der astrometrischen Methode lassen minimale Sternbewegungen um das, durch die Lage von Planeten bestimmte Baryzentrum des betreffenden Systems auf die Existenz von Exoplaneten schließen. Im Rahmen der Transitmethode ermöglicht die vorübergehende Reduzierung der stellaren Strahlungsintensität beim Vorbeizug eines Planeten vor dem Stern detailliertere Aussagen über die Eigenschaften solcher Planeten. Bei der Entdeckung von Exoplaneten mit Hilfe des Mikrolinseneffekts wird die Tatsache ausgenutzt, dass der Gravitationseinfluss eines insbesondere massereichen Planeten beim Vorbeizug eines Sternsystems vor einer intensiven kosmischen Lichtquelle spezifizizierte Schwankun-

gen von dessen Lichtintensität aufgrund des Gravitationslinseneffekts bewirken kann. Direkte Beobachtung auch junger Exoplaneten gelingen heute, wenn der sehr helle Zentralstern effektiv verdeckt werden kann.

Die erste direkte Beobachtung eines als Exoplanet identifizierten Himmelsobjekts gelang *Gaël Chauvin* (Bild 10) im Infraroten mit einem der 8,2-m-Teleskope des VLT im Jahre 2005. 2M1207 b (Bild 12a) erwies sich dabei als ein Planet mit etwa 5 Jupitermassen, der einen Braunen Zwerg mit 25 Jupitermassen in einem Abstand von 55 AE in etwa 2500 Jahren umkreist. Solche extrem massereichen Sterne können ihre Ausstrahlung nur durch Fusionsprozesse des schweren Wasserstoffs (Deuterium) ermöglichen, denn in ihrem Inneren ist es für normales Wasserstoffbrennen wie in unserer Sonne noch zu kalt. Anstelle des Strahlungstransports findet der Energietransport hier im Wesentlichen in Form von Konvektionsströmungen statt. Die Europäische Südsternwarte (ESO) hat 2008 bzw. 2019 die Existenz zweier Planeten (b und c) bestätigt, die den jungen Stern β Pictoris in einer Ebene mit einer weiter außen gelegenen staubigen Trümmerscheibe umkreisen (Bild 12b). Von den direkt beobachtbaren Exoplaneten ist Beta Pictoris c dabei derjenige, der in einem Abstand, dem des Asteroidengürtels von der Sonne entsprechend, zu seinem Stern am nächsten gelegen ist.

Das leuchtende Objekt Formalhaut b, das den Stern α Piscis Austrini (Formalhaut) im Sternbild Südlicher Fisch nachweislich von 2006 bis 2012 umkreiste (Bild 12c), wurde zunächst als erster Exoplanet angesehen, der im Visuellen direkt beobachtbar war. Anhand von Messungen im Abstand weniger Jahre konnte sein ungefährender Orbit nachgezeichnet werden, bis er, in Wirklichkeit möglicherweise nur eine leuchtende Staubwolke nach Kollision zweier kleinerer Materiekörper, beginnend 2014 langsam verschwand. Bild 12 d und eine dazu verlinkte Videodatei veranschaulichen, dass das Planetensystem um den Stern HR 8799, vergleichbar mit dem des Sonnensystems, aus mehreren Planeten (b, c, d und e) besteht, die in unterschiedlichen Abständen vom Stern auf typischen Keplerorbits mit Geschwindigkeiten umgekehrt proportional zur Quadratwurzel des Radius umlaufen (siehe beigefügten Videolink).

E1 Die Jeans-Masse und das Masse-Magnetfluss-Verhältnis

Für das Gleichgewicht zwischen dem Gas- und dem Gravitationsdruck im Zentrum einer kugelförmigen Gaswolke gilt die Beziehung

$$\frac{\rho}{\mu} \cdot k \cdot T = \frac{3 \cdot G \cdot M^2}{8 \cdot \pi \cdot R^2}$$

zwischen deren Masse M , Dichte ρ und Temperatur T , wobei R den Radius, μ die mittlere Masse eines einzelnen Gasmoleküls darin, k die Boltzmann- und G die Gravitationskonstante angibt. Wegen $\rho = M/(4/3 \cdot \pi R^3)$ lässt sich die kritische Jeans-Masse, oberhalb der eine nicht-rotierende, nicht turbulent durchmischte und auch nicht magnetisierte Wolke kollabiert, mit $\alpha = \sqrt{6/\pi} \approx 1,4$ gemäß

$$M_{\text{Jeans}} = \alpha \cdot \sqrt{\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{k \cdot T}{G \cdot \mu}\right)^3}$$

bestimmen.

Ursprünglich hatte James Jeans eine strukturell identische Formel auf ganz anderem Wege hergeleitet, wobei er für α abweichend einen Wert von rund 6,3 erhielt. Bei dieser Ableitung verwendete er unter anderem den Begriff der Schallgeschwindigkeit im einatomigen Gas sowie den der Jeans-Länge, des kritischen Radius einer Molekül- und Staubwolke, bei dem die thermische Energie, die die Expansion der Wolke unterstützt, genau der Schwerkraft entgegenwirkt, die den Wolkenkollaps fördert.

Für das Gleichgewicht zwischen der gravitativen und der magnetischen Energiedichte in einer kugelförmigen Gaswolke mit dem Radius R gilt die Beziehung

$$G \cdot \frac{M \cdot \rho}{R} = \frac{B^2}{8 \cdot \pi} \cdot \frac{(\pi \cdot R^2)^2}{(\pi \cdot R)^2}$$

mit B als magnetischer Flussdichte. Wegen $\rho = M/(4/3 \cdot \pi R^3)$ und der Definition des magnetischen Flusses gemäß $\Phi = B \cdot \pi \cdot R^2$ ergibt sich daraus das sogenannte kritische Masse-Magnetfluss-Verhältnis zu

$$\lambda_{\text{krit}} = \left(\frac{M}{\Phi}\right)_{\text{krit}} = \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot \sqrt{G}}$$

Eine solche, nicht rotierende Wolke ohne Strahlungsdruck und Turbulenzen könnte „überkritisch“ kollabieren, wenn das Masse-Magnetfluss-Verhältnis $(M/\Phi) > \lambda_{\text{krit}}$ ist. In einer magnetisch unterkritischen Wolke mit $(M/\Phi) < \lambda_{\text{krit}}$ sollte dies nicht gelingen.

Magnetische Kraftfelder, die in vielfältiger und teilweise dominierender Weise Einfluss auf die Strukturbildungsprozesse und dynamische Entwicklungen protostellarer Systeme nehmen, können natürlich als typische Erscheinungsformen nicht direkt visualisiert werden. Dass sie aber auch außerhalb unseres magnetischen Sonnensystems (siehe Teil 1 dieser Serie) tatsächlich existieren, konnte erstmals *Horace Wellescome Babcock* (1912–2003) 1947 zeigen, der für 78 Virginis als ersten Stern außer der Sonne die Existenz eines weitgehend dipolaren Oberflächenmagnetfeldes der hohen magnetischen Flussdichte von etwa 3,3 Kilogauss (kG) mit Hilfe eines

von ihm und seinem Sohn entwickelten Magnetometers vermessen hatte. Durch Anwendung einer neuen Zeeman-Technik zur Analyse magnetisch sensibler Spektrallinien war es 1992 *Gibor Basri* (Bild 10), der zusammen mit anderen Wissenschaftlern auch die Existenz dipolarer Felder bei jungen T-Tauri-Sternen nachweisen konnte, deren globale Stärken etwa hundert Mal so groß wie die der heutigen Sonne sind und zwischen 1 kG und 3 kG liegen sollten.

Es war *Enrico Fermi* (1901–1954), der 1949 vorschlug, dass aufgrund vermutter kosmischer Strahlung und dadurch bedingter elektrischer Leitfähigkeit in unserer Galaxie auch außerhalb des