

Sonnensystems großskalige interstellare Magnetfelder existieren müssten. Nachdem *William Albert Hiltner* (1914–1991) im gleichen Jahr die Polarisierung von Sternenlicht beim Durchgang durch das Interstellare Medium entdeckt hatte, begründete er diese spezielle Ausrichtung von Lichtwellen mit der generellen Existenz interstellarer Magnetfelder, wodurch sich nach dem sogenannten Davis-Greenstein-Mechanismus abgeplattete Staubteilchen ausrichten und dadurch bevorzugte Schwingungsebenen elektrischer Feldkomponenten erzwingen könnten. 1964 erfolgen dann erste Messungen solcher Magnetfelder nach der bereits 1846 von *Michael Faraday* (1791–1867) entwickelten, als Faraday-Rotation bezeichneten Methode, die darauf beruht, dass sich die Polarisierungsebene einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle, die von einer entfernten starken Lichtquelle ausgesandt wird, um einen speziellen Winkel dreht. Die Größe dieses Winkels hängt unter anderem insbesondere auch von der Stärke der magnetischen, entlang der Beobachtungsrichtung gerichteten Komponente des Flussdichtenvektors ab. Durch Messungen der von einem extragalaktischen Pulsar ausgesandten stark polarisierten Radiostrahlung konnte damals erstmals eine mittlere Stärke interstellarer Magnetfelder in unserer Milchstraße zwischen 2 und 3  $\mu\text{G}$  ermittelt werden.

Auch wenn es für theoretische Astrophysiker schon mehr als 50 Jahren als gesichert erschien, dass kosmische Magnetfelder in den Akkretionsscheiben um junge Sterne von zentraler Bedeutung für den Materie- und effektiven Drehimpulstransport darin sein müssten, gelang die direkte Entdeckung und erste exakte Messung solcher Felder in einer der innersten Region solcher protostellarer Scheibe doch erst 2005. Mit Hilfe eines hochauflösenden Spektropolarimeters fanden *Jean-François Donati* (Bild 10) und Mitarbeiter im zirkular polarisierten Licht Zeeman-Signaturen aus dem direkten Umfeld des eruptiv veränderlichen Vorhauptreihensterns FU Ori, die auf die dortige Existenz filamentartig ausgerichteter, azimuthal aufgewickelter toroidaler magnetischer Feldstrukturen der Stärke  $32 \pm 8$  G schließen ließen. Solche Magnetfelder können Turbulenzen erzeugen, die das Scheibenplasma abbremsen und nach innen transportieren.



**10** Astronomen, die den Prototyp junger T-Tauri-Sterne sowie den ihn umgebenden Nebel entdeckten (Hind bzw. Burnham), nach denen die von ihnen entdeckten jetartig gebündelten Ausflüsse junger protostellarer Systeme benannt wurden (Herbig, Haro), die die ersten Proplyds im Orion mit Hilfe des Hubble Weltraumteleskops aufgenommen haben (O'Dell, McCaughrean), die die ersten Exoplaneten entdeckten und erstmals direkt beobachteten (Mayor, Queloz bzw. Chauvin) und die erstmals die Stärke von Magnetfeldern in T-Tauri-Sternen, Akkretionsscheiben und Jets gesichert vermessen haben (Basri, Donati bzw. Lee). *Glencairn Museum, Wikipedia (2), D. Young, Wikipedia (2), Karen Teramura/UH IFA, INAOE, Vanderbilt University, The University Times, Javier Soriano/AFP, ETH Zürich, Universidad de Chile, University of California, IRAP, ASIAA.*

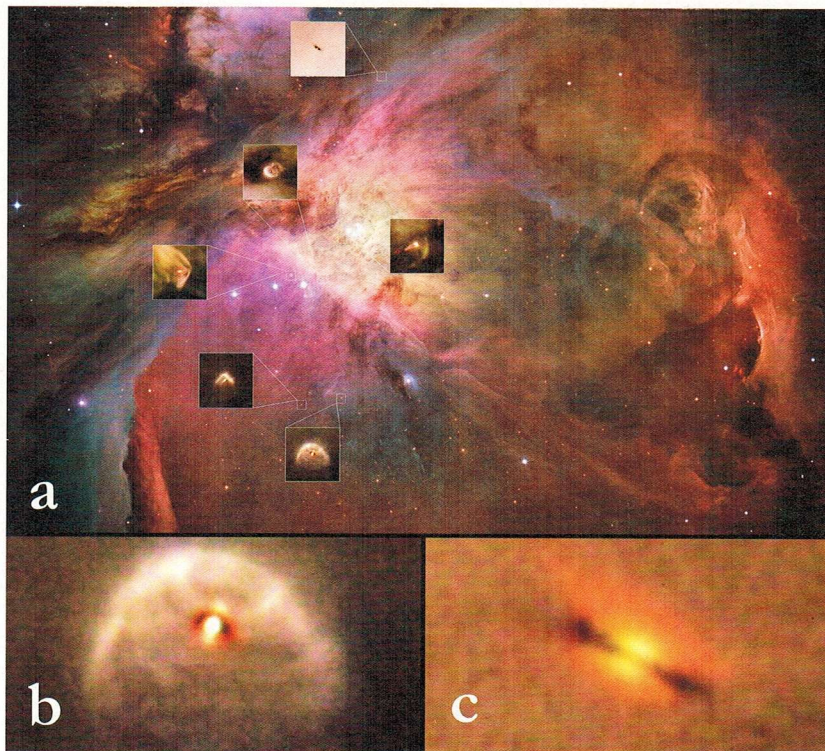
Erst 2018 gelang *Chin-Fei Lee* (Bild 10) und seinen Kollegen der zuverlässige Nachweis von Magnetfeldern durch die Analyse der Polarisierungssignale in Silicium-Oxid-Linien im protostellaren Jet des Herbig-Haro-Objektes HH 211. Sie entdeckten darin knotenförmige Jets und konnten die Existenz toroidaler Magnetfelder einer Stärke von etwa 15 mG nachweisen, die für die Kollimation dieser polwärts aus protostellaren Systemen austretenden Materieausströmungen verantwortlich ist. Und mit dem Hubble-Weltraumteleskop fand schließlich eine Forschergruppe um *Gilda E. Ballester* 2021 mit HAT-P-11 b sogar einen ersten Neptun-ähnlichen Exoplaneten, der von einer Magnetosphäre mit typischen Feldstärken von 1 bis 5 G umschlossen sein könnte. Im Licht von Kohlenstoffionen entdeckten sie als Indiz dafür eine im Vergleich zu der zum Stern zugewandten Seite eine wesentlich ausgedehntere, vermutlich vom Sternwind geformte, langgestreckt schweif-

ähnliche Magnetosphären-Struktur auf der vom Zentralstern abgewandten Seite dieses Planeten.

### Zur Erforschung protostellarer Systeme in magnetisierten Molekülwolken

Auch für die Theoretiker gehört die frühe Entwicklung stellarer, insbesondere auch sonnenähnlicher Systeme, zu den komplexesten und herausforderndsten Problemen in der Astrophysik. Es ist zwar gesichert, dass die Gravitation den dominierenden Einfluss auf den Kollaps und die Fragmentation galaktischer Molekül- und Staubwolken nimmt und dadurch unterschiedlichste Sterne mit den sie umlaufenden Planetensystemen entstehen. Hydrodynamische, Heizungs- und Strahlungsprozesse, Turbulenzen, der Transport von Drehimpuls aufgrund von Rotationsvorgängen und, seit Mitte des 19. Jahrhunderts erkannt, auch ma-





**11** Sogenannte Proplyds (Protoplanetare Disks) im Orionnebel (a). Proplyd 473-245 (b), Proplyd 181-825 (c). NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA), the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team and L. Ricci (ESO)  
 Proplyds in the Orion Nebula: <https://esahubble.org/videos/heic0917c/>  
 Fly-Through The Orion Nebula (M42): <https://www.youtube.com/watch?v=oS061G3cG6w>

gnetische Kräfte können dabei ebenfalls eine sehr wichtige Rolle spielen [16]. Theoretiker müssen heute erklären, warum die Sternbildung ein so ineffektiver Prozess ist, warum jedes Jahr offensichtlich nur etwa zwei neue Sterne in unserer Milchstraße entstehen, obwohl hier doch eigentlich so viel Baumaterial zur Verfügung steht. Sterne werden in der Regel nicht allein, sondern in Gruppen oder Sternhaufen, häufig als Teil eines Doppel- oder Mehrfachsternsystems geboren. Wie kam es dazu, dass sich unser Sonnensystem demgegenüber als Einzelsternsystem entwickelt hat?

Da viele Beobachtungsergebnisse dafür sprechen, dass die maximale Lebensdauer einzelner kompakter Gas- und Staubwolken kaum mehr als 10 Millionen Jahre betragen kann, müssen frühe Stern- und Planetenentstehungsprozesse verglichen mit der gesamten Lebensdauer unseres Sonnensystems von mehreren Milliarden Jahren extrem schnell ablaufen. Was entscheidet dabei eigentlich darüber, ob eine diffuse Wolke spontan kontrahieren kann oder nicht? Es war *James Jeans* (**Bild 6**), der

1930 diese Frage erstmals unter stark vereinfachten Voraussetzungen mithilfe mathematisch-physikalischer Überlegungen zu beantworten suchte. Er ging davon aus, dass eine unter Gravitationseinfluss kollabierende Wolke nicht rotiert, und dass in ihrem Innern keine Turbulenzen, aber auch keine Magnetfelder den Kollaps behindern. Allein der dabei im Innern der Wolke aufgrund zunehmender Verdichtung und Temperatur ansteigende Gasdruck sollte dafür einen Widerstand bieten. Er entwickelte in seinen Rechnungen ein heute nach ihm benanntes Kriterium, das besagt, dass eine kugelförmige kosmische Gaswolke mit überall konstanter Dichte unter Ausbildung eines Sterns nur kollabieren kann, wenn deren Masse größer ist als die von der Dichte  $\rho$  und Temperatur  $T$  abhängende sogenannte Jeans-Masse  $M_{\text{Jeans}} \sim \sqrt{T^3/\rho}$  (siehe Einschub E1). Danach erfahren Gaswolken einen Kollaps, wenn die Dichte ausreichend hoch und die Temperatur möglichst niedrig ist. Typische Temperaturen und Teilchendichten im Interstellaren Medium betragen nur etwa 10 K bzw. 10–30 Teil-

chen pro  $\text{cm}^3$ . Erst die ausreichende Verdichtung einer möglichst großen Molekülwolke ohne stärkere Aufheizung der Materie darin ermöglicht danach deren gravitativen Kollaps.

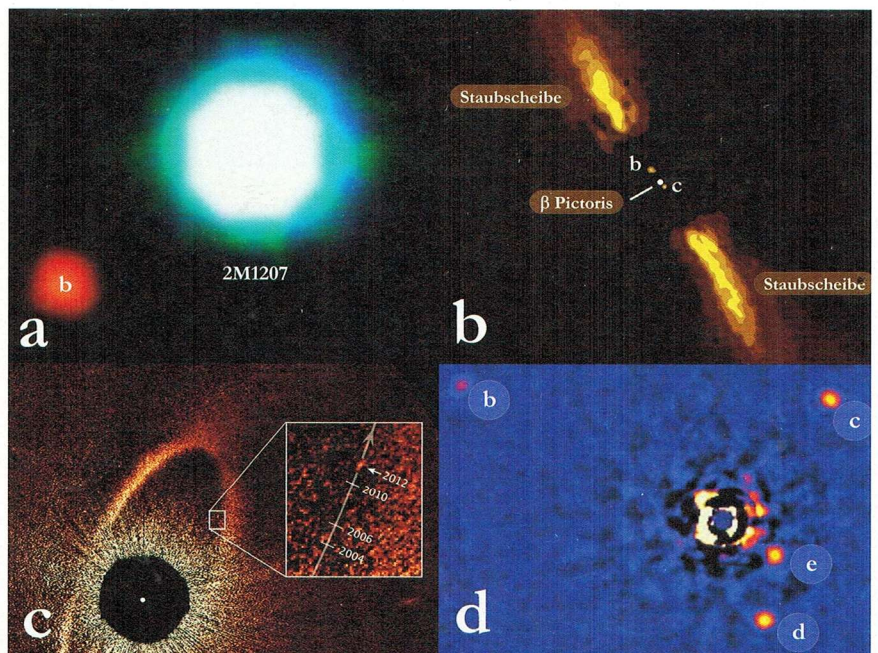
Die interstellare Materie in der Milchstraße besteht mengenmäßig zu knapp 90 % aus Wasserstoff, 10 % aus Helium sowie Spuren schwererer Elemente und zu etwa 1 % aus Staubpartikeln unterschiedlicher Abmessungen und Zusammensetzungen. In den im Wesentlichen aus neutralen Wasserstoffmolekülen bestehenden Molekülwolken betragen die Teilchendichten bei Temperaturen von 10–50 K zwischen  $10^3$ – $10^5 \text{ cm}^{-3}$ . Daneben gibt es mit Temperaturen von 50 bis 100 K wärmere H I-Gebiete mit geringerer Dichte zwischen 1 und  $10^3 \text{ pro cm}^3$ , in denen die Moleküle aufgrund höherer Temperaturen weitgehend dissoziiert sind, hier vor allem neutrale Wasserstoffatome existieren. In der Umgebung insbesondere heißer Sterne ist die mit deutlich weniger als 1 Teilchen pro  $\text{dm}^3$  extrem dünn verteilte Materie bei Temperaturen von mehr als  $10^5 \text{ K}$  vollständig ionisiert. Elektronen, Protonen und schwere Ionen bewegen sich hier nach außen hin als quasi-neutral betrachtbar, mehr oder weniger kollektiv als elektrisch extrem gut leitfähiges sogenanntes Plasma. In den als H II-Wolken bezeichneten Gebieten mit Temperaturen um  $10^4 \text{ K}$  und Dichten zwischen  $10^2$  und  $10^4$  Teilchen pro  $\text{cm}^3$  ist das Plasma noch fast vollständig ionisiert, in 50 % des Gesamtvolumens der interstellaren Materie allerdings nur teilweise. Selbst in diesem „warmen ionisierten Medium“ (WIM) kann der Einfluss existierender galaktischer Magnetfelder bei Temperaturen von  $10^3$ – $10^4 \text{ K}$  und typischen Dichten von 10 Teilchen pro  $\text{cm}^3$  merklich sein.

Mit Hilfe des Planck-Satelliten der Europäischen Weltraumagentur ESA haben Wissenschaftler die in der Milchstraße vom interstellaren Staub emittierte polarisierte elektromagnetische Strahlung vermessen. **Bild 13 a**, in dem die Intensität dieser Strahlung farbkodiert dargestellt ist, veranschaulicht auffallend stromlinienförmige Strukturen im Umfeld von Materiewolken im Bereich der galaktischen Scheibe sowie in angrenzenden Gebieten. Astrophysiker haben komplexe Theorien entwickelt, die erklären können, warum sich rotierende, abgeflachte Staubpartikel mit ihrer Längsachse bevorzugt senkrecht zur Richtung existierender



galaktischer Magnetfelder ausgerichtet (**Bild 14 b, 3. Umschlagseite**). Der elektrische Feldvektor  $\vec{E}$  der von diesen Staubpartikeln ausgesandten Mikrowellenstrahlung schwingt dadurch teilweise in Vorzugsrichtung angenähert parallel zur Längsachse der Teilchen, wodurch die von ihnen emittierte Strahlung teilpolarisiert ist. Da der magnetische Feldvektor  $\vec{B}$  der elektromagnetischen Strahlung stets senkrecht zu dessen elektrischem Feldvektor  $\vec{E}$  ausgerichtet ist, lässt sich die lokale Ausrichtung des galaktischen Magnetfeldes anhand der messbaren Vorzugsrichtung des elektrischen Feldvektors bestimmen. Von einer Hintergrundquelle ausgesandte, nicht polarisierte Strahlung wird dagegen beim Auftreffen auf Staubpartikel bevorzugt in dessen Längsrichtung absorbiert (**Bild 14 a, 3. Umschlagseite**). Daraus resultiert eher eine Teilpolarisation mit der Vorzugsrichtung des elektrischen Feldvektors  $\vec{E}$  parallel zu dem des magnetischen Feldvektors  $\vec{B}$ , die mit Antennen registriert werden kann.

Mit einem Detektor von Bord des fliegenden Observatoriums SOFIA der NASA wurde die von Staubpartikeln in der Orion-Molekülwolke OMC-1 im Infraroten ausgesandte polarisierte Strahlung vermessen, deren ortsabhängige Intensität farbkodiert in **Bild 13 b** dargestellt ist. Schwarze Striche kennzeichnen darin die ortsabhängigen Ausrichtungen der magnetischen Felder, die gemäß **Bild 14 b** weitgehend senkrecht zur Längsachse asymmetrischer Staubteilchen ausgerichtet sein müssten und mit Hilfe des senkrecht zu  $\vec{B}$  orientierten elektrischen Feldvektors  $\vec{E}$  der teilpolarisierten Strahlung bestimmt werden konnten. Die Länge dieser Striche stellt dabei ein ungefähres Maß für die Stärke der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  dar, die mit Hilfe der bereits 1951–1953 entwickelten sogenannten Davis-Chandrasekhar-Fermi-Technik (DCF) abgeschätzt wurde. Im dunkelrot eingefärbten, als Becklin-Neugebauer/Kleinmann-Low (BN/KL) bezeichneten aktiven Sternentstehungsgebiet weisen sehr kurze, radial zum Zentrum gerichtete Striche darauf hin, dass die hier stark verdichtete Materie von Magnetfeldern durchsetzt ist, die im Vergleich zu Feldern in der äußeren Umgebung relativ schwach sind. Erhaltene Messergebnisse der Intensität der magnetischen Flussdichten in diesem Umfeld



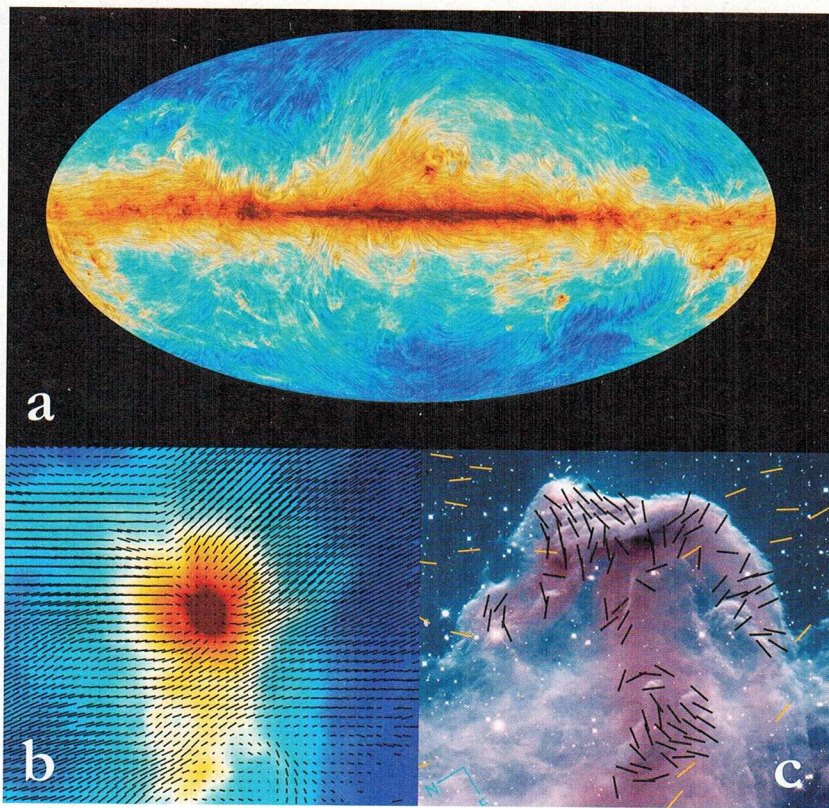
**12** Direkte Beobachtung extrasolarer Planeten. a Die erste Direktbeobachtung eines Exoplaneten (2M1207 b) um den Braunen Zwergstern 2M1207. b Das  $\beta$  Pictoris-System mit zwei seiner Exoplaneten (b, c) zwischen dem jungen Stern und der ihn umgebenden Staub- und Geröllscheibe. c Dieses Falschfarben-Kompositbild zeichnet die Bewegung der als Fomalhaut b bezeichneten Materiewolke nach, die von 2008 bis 2012 beobachtet wurde. d Vier Exoplaneten (b, c, d und e), die den Stern HR 8799 umkreisen. ESO, A. Quetz / MPIA Graphics Department, NASA/ESA/P. Kalas (University of California, Berkeley and SETI Institute), C. Marois u. a.  
Exoplanet Beta Pictoris b orbiting  $\beta$  Pictoris star – <https://www.youtube.com/watch?v=aO5hadBG1lo> : <https://www.youtube.com/watch?v=6hFH7jj633g>  
Die umlaufenden vier Planeten des Sterns HR8799  
[https://en.wikipedia.org/wiki/HR\\_8799#/media/File:HR\\_8799\\_Orbiting\\_Exoplanets.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/HR_8799#/media/File:HR_8799_Orbiting_Exoplanets.gif)

(wie z. B. =  $6,6 \pm 4,7$  mG mit sehr großer Fehlerabschätzung) machen deutlich, wie schwer es den Astronomen auch heute noch fällt, genaue Messungen der Magnetfelder im interstellaren Medium durchzuführen. Die in **Bild 14 c** abgebildete, im Submillimeterbereich mit dem James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) erstellte Aufnahme des Pferdekopfnebels zeigt, wie komplex verteilt die Ausrichtung der Magnetfelder in den von Staub durchsetzten Molekülwolken sein kann.

Nicht nur der Gas- oder Strahlungsdruck in aufgeheizter komprimierter Materie kann den Kollaps von Molekül- und Staubwolken effektiv behindern und dadurch die Sternentstehungsrate drastisch reduzieren. Auch Turbulenzen, allzu starker Drehimpuls und die dadurch wirksamen Zentrifugalkräften sowie magnetische Kraftfelder können dafür verantwortlich sein. Magnetischer Druck (siehe im Folgenden Einschub E2) behindert das Zusammenpressen der Materie quer zu anfangs homogenen strukturierten Magnetfeldern, die dieses teilweise ionisierte Medium durch-

setzen. Und wenn solche Felder, die sich zumindest im Zentralbereich kollabierender, teilweise ionisierter Wolken aufgrund ausreichend hoher elektrischer Leitfähigkeit ansatzweise wie eingefroren mit der Materie mitbewegen und sich dadurch verformen (**Bild 17**), dann erschwert die dabei erzeugte magnetische Feldspannung die weitere Verdichtung der Materie. Hohe elektrische Leitfähigkeit erfolgt durch Ionisierung der Materie unter Einfluss von Kosmischer Strahlung aus dem die Wolken umgebenden Medium, durch UV- und Röntgenstrahlung von benachbarten Sternen, beim Zerfall radioaktiver Elemente oder beim Aufeinandertreffen von Materie mit großen Geschwindigkeitsgradienten. Ein gravitativer Wolkenkollaps gegen den hemmenden magnetischen Einfluss ist erst möglich, wenn die gravitative Energiedichte „überkritisch“ die des Magnetfeldes deutlich übersteigt. Analog zum Jeans-Kriterium für die Überwindung des behindernden Strahlungsdrucks stellt in diesem Fall das Über- oder Unterschreiten des kritischen Masse-Magnetfluss-Verhältnis-





**13** Orientierung magnetischer Feldlinien in der Milchstraße. Polarisierte Emission des Staubs in der Milchstraße (a), Polarimetrische Beobachtung eines Ausschnitts der Orion-Molekülwolke OMC-1. Schwarze Linien dokumentieren die ermittelten ortsabhängigen Ausrichtungen der Magnetfelder darin, deren Länge ein Maß für die Stärke dieser Felder sein soll (b), Ausrichtung der Magnetfelder im Pferdekopfnebel (c), *ESA and the Planck Collaboration, HAWC+/SOFIA/D. T. Chuss u. a., J. Wang u. a. Marc-Antoine Miville-Deschenes: Planck Results on the Galactic Magnetic Field: <https://www.youtube.com/watch?v=wiaUK72i7gw>*  
Zoom-in on the Orion Nebula: <https://www.youtube.com/watch?v=2w8wwwUqC4Xc>  
Zooming in on the Horsehead Nebula (3D): <https://esahubble.org/videos/heic1307b/>

ses  $\lambda_{\text{krit}} = (M/\phi)_{\text{krit}} = 1/(6 \cdot \pi^2 \sqrt{G})$  mit  $\phi = B \cdot \pi \cdot R^2$  und der Gravitationskonstante  $G$  eine Entscheidungshilfe dafür dar, ob ein Kollaps gelingt oder nicht (siehe Einschub E1).

Erklärungen mithilfe des anschaulichen Bildes der „Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien“ (siehe E2 mit **Bild 15**, links oben) verlieren ihre Gültigkeit, wenn die Materie in magnetisierten Wolken nur einen geringen Ionisationsgrad aufweist, wenn die elektrische Leitfähigkeit aufgrund ohmscher Resistivität dabei deutlich reduziert ist. Dort, wo magnetische Feldkomponenten mit entgegengesetzter Orientierung lokal aufeinandertreffen, können sich diese Felder gegenseitig auslöschen, „zerreißen“ und sich in diesen, als magnetische Rekonnexion bezeichneten Prozessen instantan neu verbinden. Im Rahmen solcher mehr oder weniger abrupt bewirkten Veränderungen magnetischer Topologien kann es zu starken

Heizungs- und Beschleunigungsprozessen kommen (**Bild 15**, rechts oben). Neutrale Teilchen oder Staubpartikel können Magnetfelder mehr oder weniger ungehindert passieren. Allein Stoßprozesse, insbesondere auch mit geladenen Partikeln wie Elektronen, Protonen oder schwereren Ionen, erschweren allerdings dieses Durchströmen magnetischer Feldstrukturen. Unter Einwirkung der Lorentzkraft sind vor allem die Elektronen in Form von Gyrationbewegungen an die Magnetfelder gebunden, während dies für die deutlich massereicheren positiven Ladungsträger aufgrund ihrer im Vergleich dazu sehr großen Massenträgheit nicht so ausgeprägt der Fall ist. Stoßprozesse vor allem der Protonen und Ionen mit den durchs Magnetfeld hindurch diffundierenden neutralen Partikeln fördern schwächere Diffusionsprozesse auch dieser Teilchen. Dies kann allerdings nur gelingen, wenn die durch Coulomb-

sche Anziehungskräfte an die positiven Ladungsträger gekoppelten negativ geladenen Elektronen dies im Rahmen der sogenannten Ambipolaren Diffusion (**Bild 15**, links unten) auch tun.

Protostellare Systeme entstehen oft in Gruppen, vielfach in filamentartig langgestreckten Molekül- und Staubwolken, die im Laufe ihrer Entwicklung fragmentieren, sich in kleinere Wolkenstrukturen aufteilen. Sowohl die Dichte  $\rho$  und damit auch die kritische Jeans-Masse  $M_{\text{Jeans}}$  (siehe E1) sollten bei der Kontraktion zunehmen. Zumindest für adiabatisch (ohne Wärmeaustausch nach außen) erfolgende Verdichtungen idealer Gase mit vereinfachter Druck-Dichte-Relation lässt sich die Beziehung  $M_{\text{Jeans}} \sim \rho^{3/2 \cdot (\gamma-4/3)}$  herleiten, so dass für den adiabatischen Index  $\gamma = 5/3$  idealer einatomiger Gase der Exponent von  $\rho$  positiv wird und dadurch  $M_{\text{Jeans}}$  mit zunehmender Dichte ansteigt. In den hier betrachteten astrophysikalischen Zusammenhängen mit teilionisierter Materie bei niedrigen Temperaturen und Materiekühlung in Strahlungsprozessen kann diese Beziehung besser mit  $\gamma = 1$ , also eher isothermen Verhältnissen entsprechend, modelliert werden. Der Exponent von  $\rho$  ist dann negativ und die Jeans-Masse müsste beim Kollaps der Materie abnehmen. Dadurch können auch kleinere überdichtete Regionen kontrahieren, wodurch die Fragmentation einer Molekülwolke erleichtert wird. Auch Turbulenzen und durchlaufende Schockfronten unterstützen diese Teilungsprozesse. In dichten, filamentartigen Wolkenstrukturen können dadurch ausgelöste Instabilitäten die Teilfragmentierung in regelmäßigen Abständen wie „Perlen auf einer Schnur“ bewirken (**Bild 16a**). Auch der Einfluss mehr oder weniger homogen verteilter, häufig quer zu solchen langgestreckten Wolken verlaufender Magnetfeldstrukturen auf die Fragmentationsvorgänge wird heute intensiv diskutiert.

Die in **Bild 16a** dargestellte Aufnahme des im Millimeter- und Submillimeterbereich beobachtenden APEX-Teleskops zeigt das mehr als zehn Lichtjahre lange, fragmentierende Wolkenfilament Barnard 211/213 als Teil der Taurus-Molekülwolke. In dieser fadenförmig gewundenen Struktur aus Gasmolekülen und Staubpartikeln geben sich bereits erste junge Protosterne als kreisförmige Aufhellungen zu erkennen. In **Bild 16b** wird veranschaulicht, dass sich in

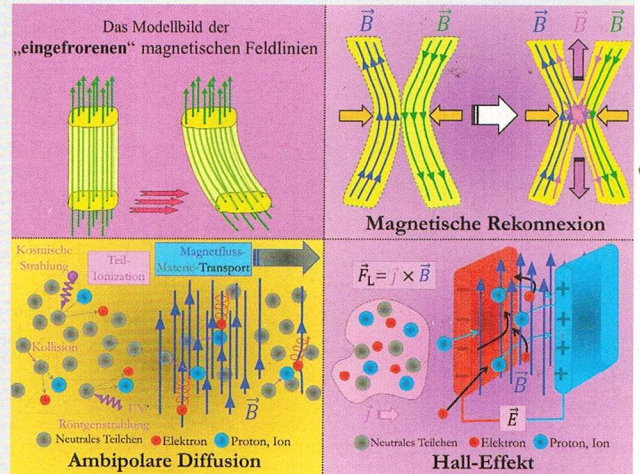


## E 2 Kosmische Magnetfeld in elektrisch leitfähigen Medien

Auf Teilchen mit der elektrischen Ladung  $q$ , die sich mit der Geschwindigkeit  $\vec{v}$  in einem Magnetfeld der Flussdichte  $\vec{B}$  bewegen, wirkt die magnetische Lorentzkraft  $\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} = \vec{j} \times \vec{B}$ . Für die Stromdichte  $\vec{j}$  gilt nach dem Ampèreschen Gesetz  $\vec{j} = 1/\mu_0 \cdot \nabla \times \vec{B}$ . Die magnetische Feldkonstante  $\mu_0$  bezeichnet dabei die Permeabilität des Vakuums. Der im vektoriellen Kreuzprodukt mit dem magnetischen Flussdichtenvektor notierte Nabla-Operator  $\nabla$ , der die räumlichen Änderungen physikalischer Messgrößen bezeichnet, wirkt hier als Differentialoperator für die Rotation des  $\vec{B}$  Vektors. Aufgrund der Vektoridentität  $1/2 \cdot \nabla \times (\vec{B} \cdot \vec{B}) = (\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B} + \mathbf{B} \times (\nabla \times \vec{B})$  gilt dann für die Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \cdot (\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} = \frac{(\vec{B} \cdot \nabla) \vec{B}}{\mu_0} - \nabla \left( \frac{\vec{B}^2}{2 \cdot \mu_0} \right)$$

Der erste Term auf der rechten Seite beschreibt dabei die magnetische Spannung als eine Rückstellkraft, die gebogene Magnetfeldlinien zu begradigen sucht. Und der zweite Term bezeichnet den magnetischen Druck, der als Gradientenkraft magnetische Feldlinien auseinandertreiben möchte. Es kann mathematisch gezeigt werden, dass sich Magnetfelder und Materie mit theoretisch unendlich guter elektrischer Leitfähigkeit wie ineinander eingefroren gemeinsam bewegen (Bild 15, links oben). Neutrale Partikel können aber durch Magnetfelder relativ ungehindert hindurch diffundieren (Bild 15, links unten). Allein Stoßprozesse, insbesondere auch mit Protonen, schwereren Ionen oder Elektronen, die durch Ionisationsprozesse unter Einfluss Kosmischer Strahlung oder stellarer Röntgenstrahlung als mehr oder weniger freie bzw. an die Magnetfelder enger gebundene Ladungsträger betrachtet werden können, behindern diesen Prozess. Obwohl Elektronen aufgrund geringerer Massenträgheit stärker als die wesentlich massereicheren Protonen oder Ionen an die Magnetfelder gebunden sind, sie aufgrund der Coulombkräfte aber an positive Ladungsträger elektrisch gebunden sind, kann nur eine langsame und gleichgerichtete Diffusion positiver und negativer Ladungsträger durch das Magnetfeld im



**Bild 15** Einfluss magnetischer Felder auf Materie- und Flusstransportvorgänge in unterschiedlich gut leitfähiger strömender Materie. U. v. Kusserow

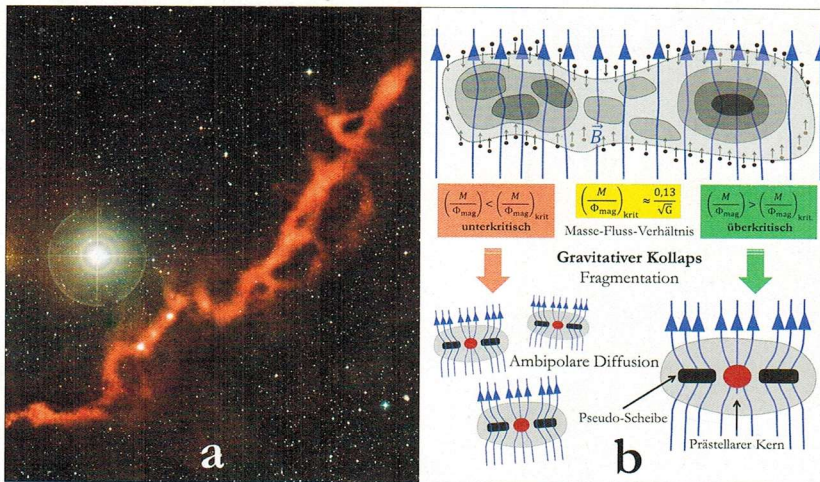
Rahmen der sogenannten Ambipolaren Diffusion stattfinden. Bei reduzierter elektrischer Leitfähigkeit gilt die totale „Eingefrorenheit“ magnetischer Feldlinien aufgrund ohmscher Resistivität nicht mehr. Im Rahmen magnetischer Rekonnexionsprozesse können entgegengesetzt orientierte magnetische Feldlinien sogar lokal miteinander verschmelzen, wodurch sich die magnetischen Feldtopologien entscheidend verändern (Bild 15, rechts oben). Dominiert der Transport negativer oder positiver freier Ladungsträger in Teilbereichen des magnetisierten Mediums, dann wird dieser Teilchenstrom durch die Einwirkung der magnetischen Lorentzkraft  $\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B}$  in eine Vorzugsrichtung umgelenkt, so dass sich zwischen der entstehenden Ladungskonzentration entsprechend dem Hall-Effekt ein elektrisches Feld  $\vec{E}$  ausbildet (Bild 15, rechts unten). In diesem Feld beschleunigte geladene Teilchen bewirken dabei einen elektrischen Stromfluss, der eine Magnetfeldkomponente erzeugt, die dem ursprünglichen Magnetfeld überlagert ist.

solchen langgestreckten, in charakteristischer Weise von Magnetfeldern durchsetzten Molekülwolken kleinere oder größere massereichere Teilwolken ausbilden können. Wolkenbereiche mit größerer Teilchendichte (rechts im Bild) sind „überkritisch“ und kollabieren früher, weil deren Gesamtmasse eher größer als die kritische Jeans-Masse  $M_{\text{Jeans}}$  ausfällt und deren Masse-Magnetfluss-Verhältnis  $(M/\phi)_{\text{krit}}$  übersteigt. Die kleineren, masseärmeren Wolken sind zunächst noch „unterkritisch“ (links im Bild) und kollabieren erst dann, wenn genügend neutrale Materie aufgrund Ambipolarer Diffusion durch die Magnetfelder hindurch geschlüpft ist.

Einhergehend mit dem gravitativen Kollaps der einzelnen Teilwolken fragmentiert die gesamte Wolke. Die in den Kernbereichen der einzelnen Wolken verdichtete und aufgeheizte Materie ist dabei teilionisiert, so dass sich die ursprünglich angenähert homogen verteilten Magnetfelder in den Zentralbereichen mitverdichten und dadurch sanduhrförmige Strukturen ausbilden können. Im Außenbereich dieser sich zusammenziehenden Wolken strömt ionisierte Materie bevorzugt entlang der magnetischen Felder in den Äquatorbereich dieser Wolkenhüllen und kann hier großskalige sogenannte „Pseudo-Scheiben“ ausbilden, die nicht auf-

grund stärkerer Rotationsbewegungen entstehen. Im Zentralbereich, der aufgrund der hier stärkeren Gravitationskräfte sehr viel schneller kontrahiert und wegen des Drehimpulserhaltungssatzes außerdem zunehmend schneller rotiert, verdichten und verstärken sich auch die Magnetfelder. Aufgrund dieser Magnetfelder, zunehmender Aufheizung und Strahlungsprozessen im Kernbereich sowie durch magnetisch vermittelte Drehimpulstransportprozesse bilden, sich schließlich durch eine Lücke vom prästellaren Kern getrennt rotierende, ebenfalls von Magnetfeldern durchsetzte Materiescheiben aus, in der die Materie zunehmend aus-





16 Entstehung junger Sternsysteme in filamentartig strukturierten und magnetisierten Molekül- und Staubwolken durch deren Fragmentation. a Aufnahme des besonders langgestreckten sternbildenden Filaments Barnard 211/213 im Sternbild des Stiers, b Schematische Darstellung des Kollapses und der Fragmentation unter- beziehungsweise überkritischer magnetisierter Wolken, unterstützt durch Ambipolare Diffusion. ESO/APEX (MPIfR/ESO/OSO)/A. Hacar et al./Digitized Sky Survey 2, U. v. Kusserow

geprägter mit Kepler-Geschwindigkeiten umläuft.

Die frühen Phasen der Ausbildung junger Protosterne und der sie umgebenden Akkretionsscheibe werden in **Bild 17** (3. Umschlagseite) detaillierter veranschaulicht. Unter Einfluss der Gravitationskraft  $\vec{F}_G$  verdichten sich insbesondere die neutralen Partikel im Kernbereich nur sehr langsam rotierender Molekülwolken (**Bild 17a**). Im Rahmen Ambipolarer Diffusion fällt die Materie anfangs nahezu im freien Fall fast ungehindert durch die magnetischen Feldstrukturen, die zurückbleiben und auch nach außen drückend einen „Magnetischen Wall“ ausbilden können. In den Außenbereichen der Wolke bewegen sich geladene Partikel dabei eher äquatorwärts bevorzugt entlang der magnetischen Feldstrukturen. Diese verdichten sich dort unter Ausbildung einer ausgedehnten „Pseudo-Scheibe“, die noch unter keinem starken Rotationsinfluss steht (**Bild 17b**). Aufgrund wesentlich stärkerer Gravitationskräfte ist der Betrag der Geschwindigkeit  $\vec{v}$ , der zum Zentralbereich strömenden Materie im Innenbereich wesentlich größer als der der Geschwindigkeit  $\vec{v}_a$  im Außenbereich der Wolke. Weil sich insbesondere der Kernbereich des protostellaren Systems immer stärker verdichtet, nimmt dessen Winkelgeschwindigkeit  $|\vec{\Omega}|$  aufgrund des Drehimpulserhaltungssatzes vergleichsweise zur Winkelgeschwindigkeit  $|\vec{\Omega}_a|$  in der umgebenden Wolkenhülle immer größere Werte

an. Die dadurch hier wirksamen Zentrifugalkräfte erzeugen äquatoriale Ausbuchtungen des prästellaren Kerns, die mit dem prästellaren Kern mitrotieren und von Magnetfeldern durchsetzt sind.

Im Laufe der Entwicklung verdichtet und erhitzt sich der prästellare Kern immer stärker. Nach einem anfänglich isothermen Kollaps im noch dünnen Medium bildet sich ein zunehmend verdichteter Kernbereich aus. Er entwickelt sich in einem quasi-hydrostatischen Gleichgewichtszustand, weil der aufgrund wachsender Temperaturen ansteigende auswärts gerichtete Strahlungsdruck dem nach innen gerichteten Gravitationsdruck gleichgesetzt etwa gleich stark ist. Es bildet sich ein sogenannter prästellare Larson 1-Kern aus. Für die bei Temperaturen von mehr als 2000 K einsetzenden Dissoziationsprozesse der Wasserstoffmoleküle und darauffolgenden Ionisationsprozesse wird Energie benötigt. Diese fehlt, um einen im tiefen Innern des hydrostatischen Kerns erfolgenden zweiten Kollaps zu verhindern. Weitere Temperaturerhöhung bewirkt danach die Ausbildung des relativ stabilen, sich im quasihydrostatischen Gleichgewicht verdichtenden sogenannten Larson 2-Kerns im Zentralbereich des Larson 1-Kerns. Schließlich steigen die Temperaturen im Innern sowie der von diesem Protostern ausgehende Strahlungsdruck so stark an, dass Staub- und Gaspertikel aus dessen direkten Umgebung herausgedrückt werden. Dadurch bildet sich eine Lücke zwischen

dem jungen Stern und der ihn umkreisenden Scheibe aus (**Bild 17c**). Diese könnte durch Vereinigung der sich nach innen verdichtenden Pseudo-Scheibe mit der sich aufgrund der Zentrifugalkräfte nach außen ausbreitenden, schließlich mit Kepler-Rotation umlaufenden inneren Scheibe entstehen.

Durch Dynamoprozesse können protostellare Magnetfelder  $\vec{B}_{PS}$  sowie vermutlich auch Magnetfeld  $\vec{B}_{AS}$  im inneren Bereich der Akkretionsscheibe immer wieder neu generiert werden (**Bild 17d**). Letztere unterstützen den effektiven Materietransport in der Scheibe und die damit einhergehende Ausbildung erster protoplanetarer Objekte. Vor allem die dipolartige Feldkomponenten der protostellaren Magnetosphäre lenken dabei den Materieeinstrom vom inneren Scheibenrand in den Polbereich des noch jungen Sterns.

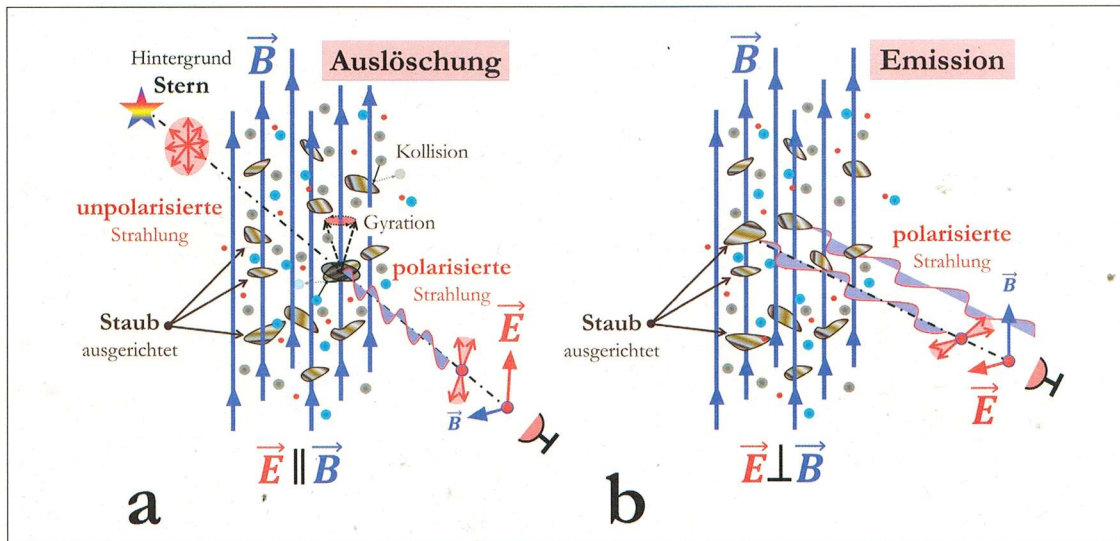
Im folgenden dritten Teil dieser Artikelserie wird die Erzeugung und der Transport von Magnetfeldstrukturen in diesen protostellaren Systemen ausführlicher diskutiert. Es wird detaillierter erläutert, wie die Drehimpulstransportprozesse unter Einfluss magnetischer Turbulenzen in den Akkretionsscheiben und der aus ihnen ausströmenden magnetisierten Winde die weitere Entwicklung junger sonnenähnlicher Sternsysteme entscheidend mitbestimmen.

#### Literatur:

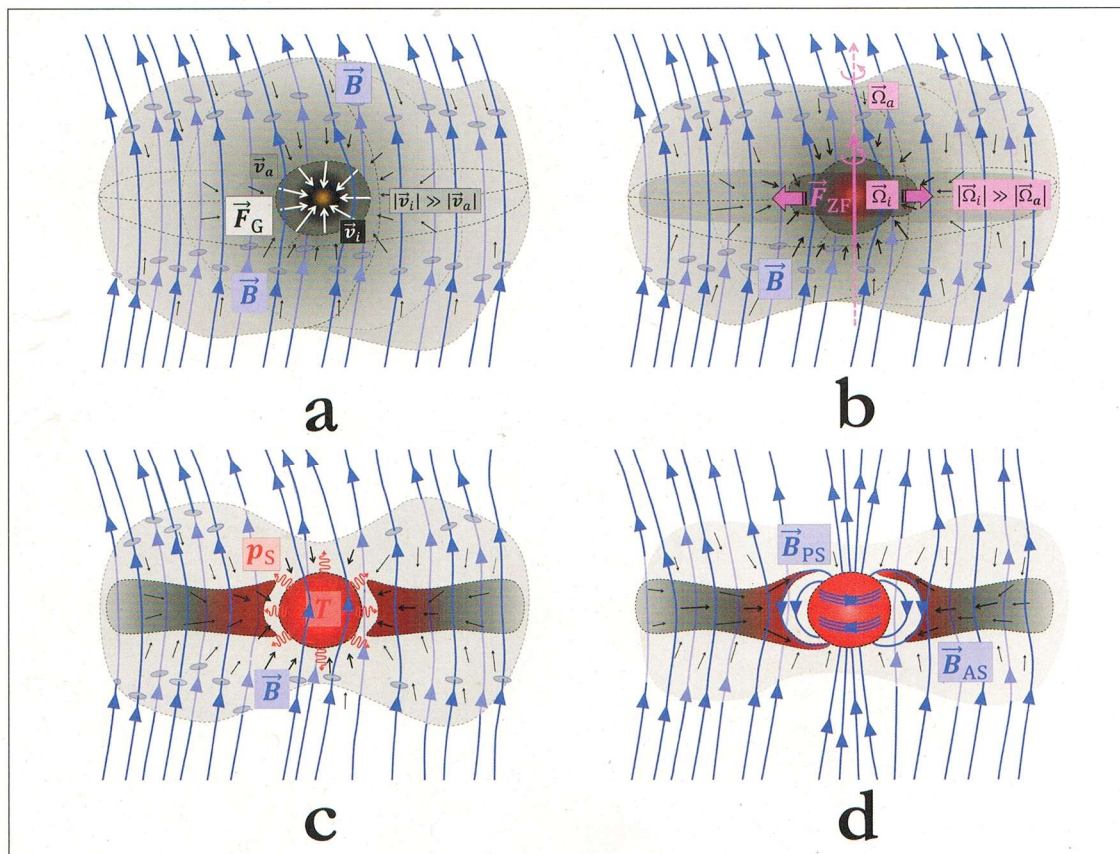
- [12] Reipurth, B., Heathcote, S.: 50 Years of Herbig-Haro Research - From discovery to HST. Herbig-Haro Flows and the Birth of Low Mass Stars, 1997, Volume 182. Springer Nature. <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1997IAUS...182...3R>
- [13] Physik-Schule - Herbig-Haro-Objekt <https://www.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Herbig-Haro-Objekt>
- [14] Hoger, B. (MPIfR): Sternentstehung - Von der Molekülwolke zum T-Tauri-Stern [https://www.mpifr-bonn.mpg.de/311266/benedict\\_hoeger.pdf](https://www.mpifr-bonn.mpg.de/311266/benedict_hoeger.pdf)
- [15] Bulow, M.: Exoplaneten, 2013 [https://www.researchgate.net/publication/259494497\\_Exoplaneten](https://www.researchgate.net/publication/259494497_Exoplaneten)
- [16] Wurster J., Li Z. - Y.: The role of magnetic fields in the formation of protostellar discs. Frontiers 2018 <https://arxiv.org/pdf/1812.06728.pdf>
- [17] Kippenhahn, R.: 100 Milliarden Sonnen - Geburt, Leben und Tod der Sterne (Kapitel 12, 13). R. Piper & Co. Verlag, München 1980
- [18] Lesch, H., Müller, J.: Weißt Du wieviel Sterne stehen? Wie das Licht in die Welt kommt (Kapitel 6). C. Bertelsmann Verlag, München 2008
- [19] Zirker, J. B.: The Magnetic Universe - The Elusive Traces of an Invisible Force (Kapitel 8). The Johns Hopkins University Press, Baltimore 2009
- [20] von Kusserow U.: Magnetischer Kosmos - To B or not to B (Kapitel 3). Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013



Zu unserem Beitrag auf S. 17



14 Zur Ermittlung der Ausrichtung interstellarer magnetischer Felder aufgrund der Staubkornausrichtung anhand der Polarisation der von einem dahinterliegenden Stern (a) bzw. von asymmetrischen Staubpartikeln (b) selbst ausgesandten Strahlung. U. v. Kusserow (nach A. Lazarian)  
Magnetism and morphology in the interstellar medium:  
<https://www.youtube.com/watch?v=80hYJ63yoF0>



17 Schematische Darstellung aufeinanderfolgender Entwicklungsphasen protostellarer Systeme (PSS) in magnetisierten Gas- und Staubwolken. a Zentraler gravitativer Kollaps, unterstützt durch Ambipolare Diffusion durch interstellare Magnetfelder hindurch, b äquatoriale Ausbuchtungen großer Pseudo-Scheiben durch Materietransport entlang magnetischer Feldlinien sowie zentrifugaltriebener Ausbuchtungen des prästellaren Kerns aufgrund dessen zunehmender Rotationsgeschwindigkeit, c Aufheizung des Protosterns bewirkt die Ausbildung einer Lücke zwischen jungem Stern und der Akkretionsscheibe, d protostellare Magnetfelder (zusätzlich aber auch mögliche Scheibenfelder) können in Dynamoprosessen erzeugt werden und lenken den Materietransport. U. v. Kusserow