

Über die Entstehung des magnetischen Sonnensystems (4)

von Ulrich von Kusserow

Der für die nahezu zeitgleich erfolgende Entstehung junger Sterne und Planeten in rotierenden protostellaren Systemen notwendige Drehimpulstransport findet, magnetisch vermittelt, in den Akkretionsscheiben und mit diesem in diesen Systemen abströmenden Materiewinden statt. Die in solchen Scheiben ablaufenden Akkretionsprozesse ermöglichen zum einen die Massezunahme der sich im Zentralbereich dieser Systeme entwickelnden Protosterne. Sie beeinflussen darin zum andern Migrationsbewegungen sowie die Verdichtung von Staub- und Gaspartikeln unter vorwiegend gravitativem, darüber hinaus aber auch magnetischem Einfluss, wodurch aufeinanderfolgend größere Gesteinspartikel, Planetesimalen, Planetenembryos und schließlich Protoplaneten entstehen können. Hochauflöste Beobachtungsdaten und Simulationsrechnungen ermöglichen heute eine verbesserte Modellierung der möglichen Entwicklungsgeschichte der entdeckten unterschiedlichsten Planetensysteme, insbesondere auch die des nach aktuellen Erkenntnissen sehr besonderen Sonnensystems.

Teil 1, 2 und 3 dieses Beitrages erschienen in ASTRONOMIE+RAUMFAHRT im Unterricht in Heft 1/2024 [21], Heft 2/2024 [22] und Heft 3/2024 [45].

Die Astrophysiker gehen heute davon aus, dass die Sternentstehung auch durch den Einfluss kosmischer Magnetfelder auf Kohärenzlängen gesteuert wird, die zwar kleiner als die Abmessungen riesiger Molekülwolken sind, die aber durchaus größere Längenabmessungen als die direkten Materieumhüllungen protostellarer Systeme aufweisen. So durchlaufen manche der wenige Lichtjahre langen, magnetisch beschleunigten und jetartig kollimierten protostellaren Materieausflüsse, die als universelle Signaturen früher Sternentwicklungsprozesse angesehen werden, ihre Geburtswolke unter Umständen sogar vollständig. Die Ausrichtung der Rotationsachsen und damit auch die Drehimpulsvektoren sehr junger Sterne, die häufiger angenähert senkrecht zu den Akkretionsscheiben orientiert sind, in denen die Protoplaneten u. a. auch unter magnetischem Einfluss entstehen, können anhand der Ausrichtung solcher Ausflüsse gut erkannt werden. **Bild 28** zeigt neuere Aufnahmen

des James-Webb-Weltraumteleskops, die im nahen bzw. mittleren Infrarotbereich hochauflöst tiefere Einblicke in die charakteristischen Strukturen protostellarer Systeme der frühen Entwicklungsklassen 0 beziehungsweise I (siehe **Bild 21**) ermöglichen.

Bild 28 a veranschaulicht nebeneinander die typischen, in Sternentstehungsgebieten zeitlich aufeinanderfolgend anzutreffenden unterschiedlichen Erscheinungsformen protostellarer Systeme. Zunächst in dunklen, verdichtenen Molekül- und Staubwolken noch verdeckt, dann durch komplexe Wechselwirkungsprozesse zwischen benachbarten protostellaren Systemen zwar noch nicht sichtbar, gibt sich die durch einen Protostern im Zentrum, die ihn umlaufende Akkretionsscheibe sowie bipolare Ausflüsse charakterisierte Struktur eines bereits entwickelten isolierten protostellaren Systems der Klasse I (oder sogar II) im nahen Infraroten schon sehr deutlich zu erkennen. Das ganz linke Objekt, dass bereits 2018 vom

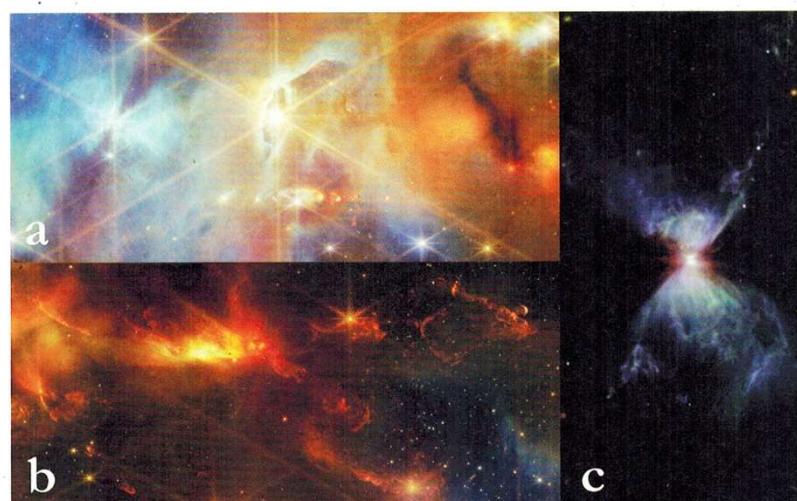
Hubble-Weltraumteleskop beobachtet worden war und mit dem Spitznamen „Fledermausschatten“ bezeichnet wurde, zeigt die ausgedehnte Struktur einer protoplanetaren Scheibe, die den Stern HBC 672 umläuft. **Bild 28a** zeigt eine benachbarte Gruppe von zwanzig protostellaren Systemen ebenfalls im Sternbild Schwan, in der jetartig ausgerichtete und in Schockfronten endende Abflüsse weitgehend parallel zueinander verlaufen. Sehr wahrscheinlich sind die diese strukturierenden kosmischen Magnetfelder im Bereich der nicht allzu großen Geburtswolke dieser jungen Himmelsobjekte sehr homogen verteilt [46]. Im Internet findet man unter <https://www.youtube.com/watch?v=2tUpqskwfAU&t=8s> einen beeindruckenden Videobeitrag mit dem Titel *A Tour of the Serpens Nebula*, in dem interessante Erläuterungen zu den vergrößert dargestellten, hochauflösten Abbildungsausschnitten aus diesen beiden Abbildungen gegeben werden.

Während **Bild 18 b** eine Aufnahme des Protosternsystems in der Dunkelwolke L 1527 im Sternbild Stier zeigt, die mit der Nahinfrarotkamera NIRCam gemacht wurde, die Photonen im Wellenlängenbereich zwischen 780 nm und 2500 nm registriert, ist in **Bild 28 c** eine Aufnahme des gleichen jungen Sternsystems dargestellt, die mit dem MIRI Instrument des James-Webb-Weltraumteleskops erstellt wurde. Dieses Instrument arbeitet im mittleren Infraroten bei 7,7 μm (blau), 12,8 μm (grün) sowie 18 μm (rot eingefärbte Bildanteile) und ermöglicht aufgrund der größeren Wellenlängen vergleichsweise tiefere Einblicke auf den leuchtenden Protostern, in die Akkretionsscheibe sowie durch die ausströmende Sternwindmaterie hindurch in deren stark verwirbelte innere Staub- und Gasverteilungen. Vermutlich führen hier bereits erste stärker verdichtete Planetenbausteine Migrationsbewegungen in der Akkretionsschei-

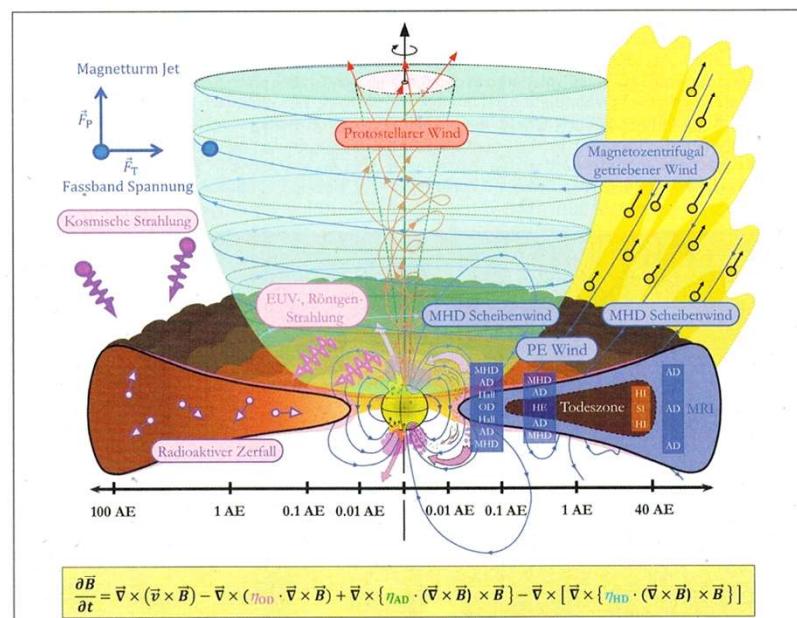
be, die jetzt bereits als protoplanetar bezeichnet wird, durch, die aufgrund des seitlichen Einblicks auf die Akkretions scheibe sowie des nicht ausreichenden Auflösungsvermögens durch dieses Teleskop nicht beobachtet werden können.

Bild 29 veranschaulicht eine Vielzahl magnetischer Einflussfaktoren auf den Transport von Materie, Energie und Drehimpuls in protostellaren Systemen, die letztlich erst die Entstehung sonnenähnlicher Sterne und Planetensysteme ermöglichen. In der protoplanetaren Scheibe kann der Transport von Staub- und Gasmaterie sowie des Drehimpulses, außer in deren Zentralbereich, der sogenannten Todeszone („dead zone“), vor allem aufgrund der Magnetorotationsinstabilität (MRI) erfolgen (**Bild 25**). Magnetisch beschleunigte und gelenkte, jetartig gebündelte protostellare Winde, durch magnetische Rekonnexion und Photoevaporation (PE) beeinflusste sogenannte X-Winde im Übergangsbereich zwischen der Akkretionsscheibe und der Magnetosphäre des Protosterns sowie magnetozentrifugal getriebene Scheibenwinde (**Bild 26**) transportieren Materie, damit auch Energie und Drehimpuls von der Scheibe hinaus in den interstellaren Raum. In Magnetturm Jets („magnetic tower jets“) können magnetische Spannungskräfte (\vec{F}_T) durch Zusammenziehen toroidaler magnetischer Feldkomponenten die Kollimation der Jetwinde bewirken, während magnetische Druckkräfte (F_p) die Beschleunigung der Materie unterstützen.

Vom Protostern ausgesandte hochenergetische EUV- und Röntgenstrahlung, galaktische Kosmische Strahlung sowie radioaktiver Zerfall bestimmen den Ionisationsgrad der Materie in den unterschiedlichen Bereichen der protoplanetaren Akkretionsscheibe. Mathematisch-physikalisch beschrieben durch die nicht-ideale MHD-Gleichung (**Einschub E3**) beeinflussen die Ohmsche Diffusion (OD), die Ambipolare Diffusion (AD) sowie der Hall-Effekt (HE) ortsabhängig je nach Stärke der Teilionisation den Transport des magnetischen Flusses in der Akkretionsscheibe (**Einschub E2**). In der Todeszone selbst bestimmen darüber hinaus weitere hydrodynamische Instabilitäten (HD), insbesondere auch Scherungsinstabilitäten den Transport und die Verdichtung der Materie bis hin zur Planetenentstehung.



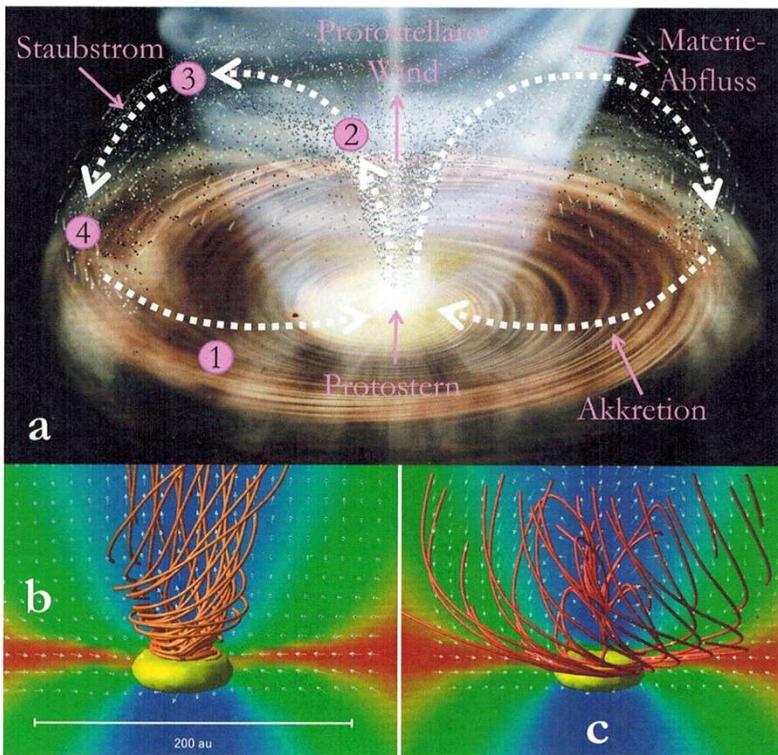
28 Mit dem James-Webb-Weltraumteleskop gemachte Infrarotaufnahmen protostellarer Scheibe-Jet-Strukturen. (a) Dunkle Molekülwolken (rechts), Interaktionen junger Sternsystems (mittig) und ein- etwas älteres protostellares System mit bereits weit aufgefächerten, bipolar von einer Akkretions scheibe um einen noch sehr jungen Zentralstern abströmende Scheibenwinde (links) repräsentieren charakteristische Strukturen eines Sternentstehungsgebietes im Sternbild Schwan. (b) Die ebenfalls dort, im nahen infraroten Spektralbereich, erstellte Aufnahme zeigt eine Vielzahl jetartiger, bipolarer Ausflüsse, die auffallend weitgehend parallel zu einander ausgerichtet sind. (c) Die im mittleren Infrarot gemachte Aufnahme des weiter entwickelten protostellaren Systems mit einem bereits leucht stark sichtbaren Protostern in der Dunkelwolke L1527 im Sternbild Stier ermöglicht tiefere Einblicke in die Auswirkungen protostellarer Ausflüsse auf die umgebenden dichten Staub- und Gasverteilungen. NASA/ESA/CSA/STScI/K. Pontoppidan (NASA-JPL)/J. Green (STScI) (2), NASA/ESA/CSA/STScI



29 Einfluss magnetischer Felder auf den Transport der Staub- und Gasmaterie sowie des Drehimpulses in protostellaren Systemen. „Die unten notierte nicht-ideale Induktionsgleichung beschreibt ortsabhängig die zeitliche Entwicklung des magnetischen Flussdichten-Vektors in Abhängigkeit auch von der Ohmschen Resistivität, der Ambipolaren Diffusion und vom Hall-Effekt. U. v. Kusserow

Im sternnahen Bereich der Akkretionsscheibe wird die Materie durch den Protostern stärker aufgeheizt. Der dort relativ hohe Ionisationsgrad bewirkt, dass Plasmamaterie und Magnetfelder, mehr oder weniger stark wie ineinan-

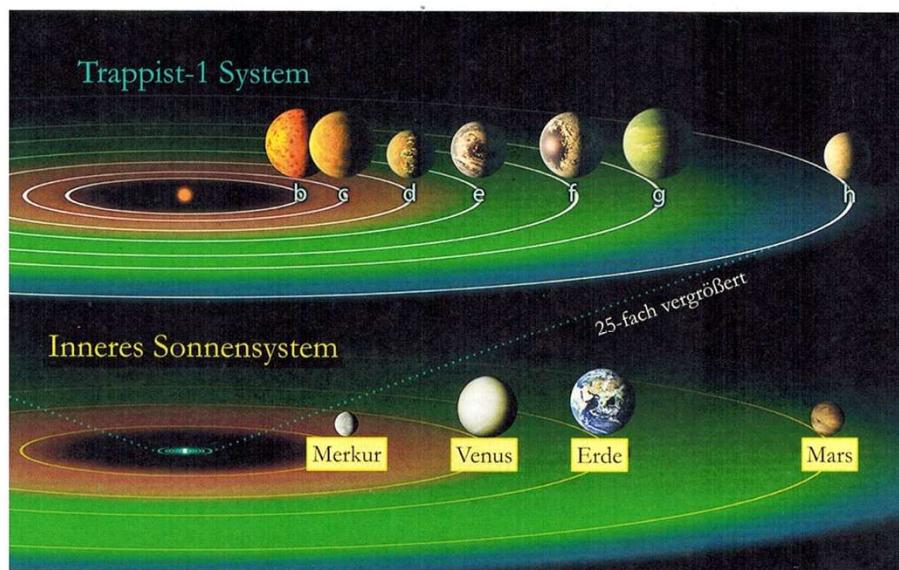
der eingefroren, aneinandergekoppelt transportiert werden. Aufgrund der hier effektiv wirksamen Magnetorotationsinstabilität (MRI) können in diesem Bereich verstärkt Turbulenzen entstehen, wodurch sowohl der Transport von



30 Über der Akkretionsscheibe nahe des Protosterns nach außen treibende „Ascheregen“, der durch Materieauswurf in protostellaren Winden getrieben wird. Die Akkretion von Materie in der Scheibe von außen nach innen (1), deren Auswurf in magnetisierten Jetströmen über den Polgebieten des Protosterns (2), der Staubstrom aufgrund von Diffusion vor allem neutraler Materie oberhalb der Akkretionsscheibe nach außen (3) sowie das Absinken der Materie zurück in die Akkretionsscheibe (4) beschreiben die Etappen eines konvektiven Kreislaufs, der den verstärkten Zustrom von Materie zur Ausbildung von Gas- und Eisplaneten in den äußeren Bereich der protostellaren Scheibe erklären könnte (a). Ergebnisse von Simulationsrechnungen bestätigen, dass elektrisch geladene Partikel aufgrund ihrer Bindung an die Magnetfelder in kollimierten protostellaren Jetströmen bevorzugt polwärts abtransportiert werden (b), dass neutrale Partikel demgegenüber aufgrund der Zentrifugalkräfte stärker nach außen driften und so den „Ascheregen“ speisen könnten (c). Y. Tsukamoto/Kagoshima University (Bearbeitung: U. v. Kusserow), Y. Tsukamoto, M. N. Machida, S. Inutsuka

Drehimpuls als auch die Generierung neuer Magnetfelder in Dynamoprozessen ermöglicht werden (**Bild 23**). Der in der nicht-idealnen magnetischen Induktionsgleichung (siehe **Bild 26** unten) durch die Größe der Koeffizienten η_{OD} für die Ohmsche Resistivität und η_{AD} für die Ambipolare Diffusion beschriebene Einfluss magnetischer Diffusionsprozesse sowie der durch η_{HE} gekennzeichnete Einfluss von Dissipationsprozessen aufgrund des Hall-Effekts müssen dabei berücksichtigt werden. Theoretisch kann ein starker Einfluss der magnetischen Lorentzkraft (Einschub E2) aufgrund des Hall-Effekts bewirken, dass die Ausbildung einer Akkretionsscheibe anfangs behindert wird, und dass diese schließlich sogar entgegengesetzt zum Protostern rotiert, wenn die Ausrichtung des prästellaren Eigendrehimpulsvektors \vec{L} in der Geburtswolke des protostellaren Systems anfangs etwa parallel zum Vektor der magnetischen Induktion \vec{B} orientiert ist. Wie schon **Bild 21** veranschaulicht, strömt die Materie aus dem nahen Scheibenbereich entlang trichterförmig strukturierter magnetosphärischer Feldlinien des Protosterns. Nahezu im freien Fall prallt sie auf die polnahen Oberflächenbereiche des jungen Sterns, heizt hier die Materie stark auf, die schließlich kollimiert in den stärker gebündelten magnetischen protostellaren Jetstrukturen bipolar nach außen abströmt.

Kosmische Strahlung und radioaktiver Zerfall sorgen dafür, dass die Materie auch in den weit vom Protostern entfernten äußeren sowie zumindest in den photosphärischen Oberflächen der mittleren Bereiche der Akkretionsscheiben in Abständen zwischen etwa 01 AE und 40 AE telionisiert ist und hier MRI wirksam werden kann. Die Materiedichten im äquatornahen mittleren Scheibenbereich ist dafür allerdings zu groß, so dass die kosmische Strahlung bis hierhin nur begrenzt vordringen und wirksam ionisieren kann. Hier können aber Konvektionsströmungen aufgrund stärkerer Temperaturgradienten, Scherungsinstabilitäten aufgrund differentieller Rotation sowie die sogenannte „Zombie-Wirbel-Instabilität“, die in rotierenden, stabil geschichteten Scherströmungsschichten durch vertikale Verwirbelungen entstehen kann, dafür sorgen, dass hier Turbulenzen generiert, Drehimpuls und Materie transportiert werden, und sich Materie unter Einfluss stärke-



31 Vergleichende schematische Darstellung der Orbits des Planetensystems von Trappist-1 mit denen der Sonne. Auffallend viele erdähnliche Planeten umkreisen den massearmen Roten Zwergstern Trappist-1 auf Orbits wesentlich näher als der Planet Merkur im Fall der Sonne. Die Planeten Trappist-1 e, f und g könnten dabei wie die Venus, die Erde und der Mars in einem habitablen Bereich (grünlche Hintergrunds-Einfärbung) dieses exoplanetaren Systems liegen. NASA/JPL-Caltech (Bearbeitung: U.v. Kusserow)

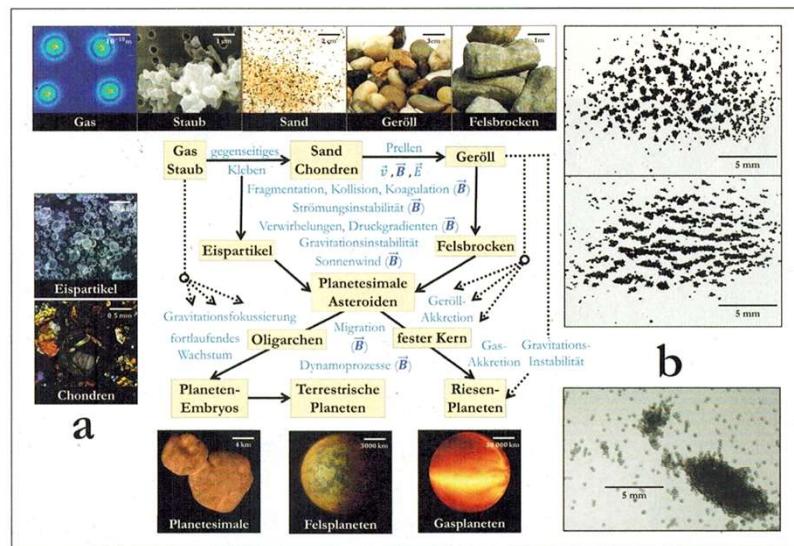
rer Druckgradienten zu protoplanetaren Objekten verdichten kann.

Planeten- und Mondentstehung aus Staub, Gas- und Eispartikeln

Vermutlich nur wenig zeitversetzt gegenüber der Entstehung der Protosternen im Zentrum bilden sich die Bausteine der Protoplaneten in den rotierenden protoplanetaren Scheiben junger stellarer Systeme aus Gas-, Staub-, in weiter außen gelegenen kühleren Bereichen auch aus Eispartikeln. Diese Partikel stammen aus den häufig filamentartig strukturierten und magnetisierten Materieverdichtungen größerer Molekül- und Staubwolken (**Bild 16**). Insbesondere durch Stoßprozesse ionisierte Teilchen, aber auch neutrale Partikel verdichten sich dabei, gelenkt durch poloidale magnetische Scheibenfelder zunehmend im Äquatorbereich dieser Scheiben. Wie häufiger beobachtet, können größere Materialmengen später aber auch von außerhalb der Geburtswolken mit typischen Abmessungen von mehr 10.000 AE in Form langgestreckter sogenannter „Streamer“ mehr oder weniger schräg in die protoplanetaren Scheiben einströmen.

Wie **Bild 30** veranschaulicht, sorgen zudem polnahe magnetisierte protostellare Winde möglicherweise dafür, dass die in der Scheibe zum Protostern strömende (akkretierende) Materie in Form des Materieabflusses insbesondere von Staubpartikeln in den äußeren Scheibenbereich transportiert wird, wodurch dort die Bildung massereicherer Gas- und Eisplaneten zu unterstützen.

Bild 30a veranschaulicht, wie die magnetisch vermittelte Materieakkretion sowie der magnetisierte Protosternwind einen zyklisch ablaufenden Materietransport antreiben könnte, der durch einen „Ascheregen“ das Wachstum präplanetarer Objekte in äußeren Bereichen der protoplanetaren Scheiben fördern würde. Die Ergebnisse von Simulationsrechnungen bestätigen dabei, dass es vor allem Staubpartikel sind, die nach außen transportiert werden. Während **Bild 30b** zeigt, dass die orangefarbenen Bewegungsspuren geladene Partikel enger an die protostellaren Magnetfelder gekoppelt bleiben, und diese Teilchen eher nach oben und unten abströmen, so erklären die rötlichen Bewegungsspuren der massereicheren Staubpartikel

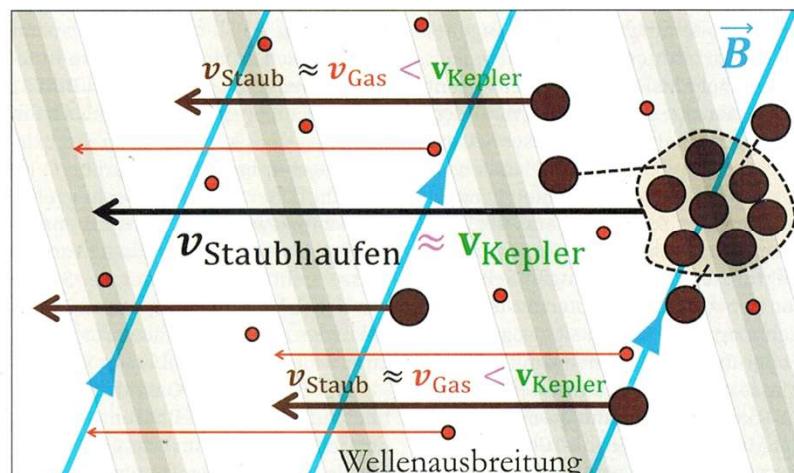


32 Zur Entstehung der Planeten aus Gas-, Staub- und Eispartikeln. Nach der Koagulationstheorie kollidieren diese kleinen Partikel miteinander, prallen voneinander ab oder kleben aneinander fest, wodurch selbstorganisiert zunehmend größere Partikel, Sand, Geröll, Felsbrocken und schließlich kilometer-große Planetesimalen entstehen können. In einer sich anschließenden „Run-Away“ Kollisionsphase vergrößern sich einige dieser Himmelsobjekte zunehmend unter gravitativem Einfluss, um schließlich nach verstärkter Gas-, Staub- oder Planetesimal-Akkretion als fester, gasförmiger oder Eisplanet zu enden. Nach einer alternativen Theorie können Gravitationsinstabilitäten in besonders kompakt verdichteten Bereichen der protoplanetaren Scheibe unter Umständen sehr viel direkter und wesentlich schneller zur Ausbildung solcher Planeten führen. Jeweils gekennzeichnet durch (–B) wird in Bild **a** die vielfältige mögliche Bedeutung magnetischer Prozesse im Verlauf der unterschiedlichen Selbstorganisationsprozesse bei der Planetenentstehung hervorgehoben. Die in Bild **b** oben gezeigten Ergebnisse von Experimenten zur Staubaggregation machen deutlich, dass sich unter Magnetfeldeinfluss (unten) wesentlich größere, länglich ausgerichtete Materieansammlungen ausbilden können als ohne Magnetfeld (oben). Bild **b** unten veranschaulicht die Ergebnisse von Laborexperimenten, die zeigen, dass wesentlich größere Staubpartikel auch entstehen können, wenn die aufeinander treffenden Teilchen elektrische Ladungen aufweisen. U. v. Kusserow/A. S. Stodolna et al./E. K. Jessberger et al./J. Kashuba/NASA/JHUAPL/Southwest Research Institute/R. Tkachenko/NASA/NASA, M. Kruss/G. Wurm, T. Steinpilz et al.

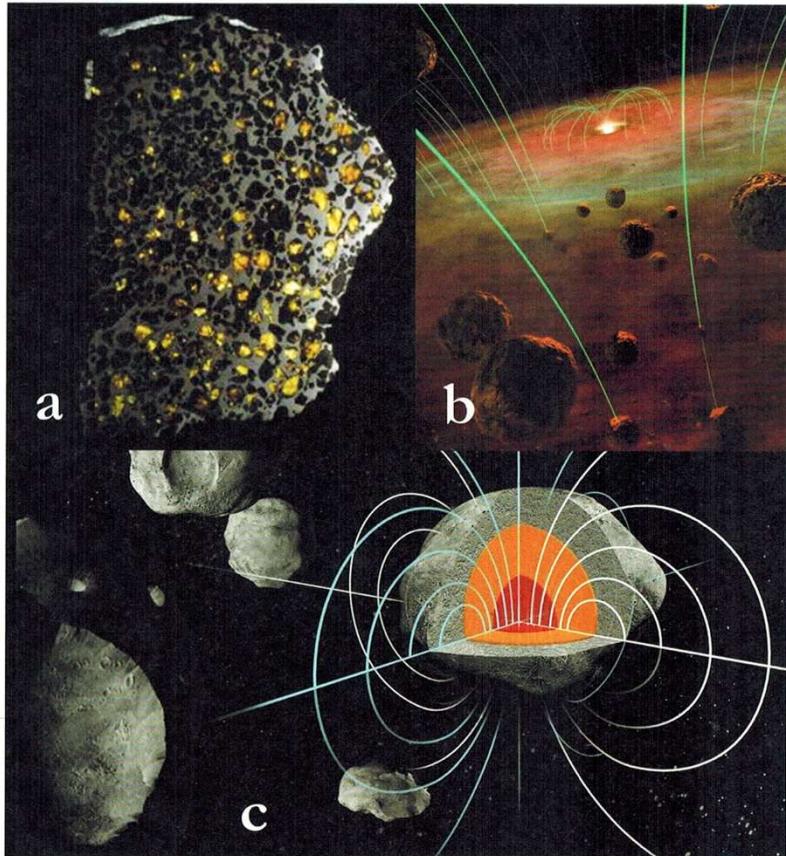
in **Bild 30c**, dass diese, weniger eng an die Magnetfelder gekoppelt, unter dem Einfluss stärkerer Zentrifugalkräfte eher nach außen transportiert werden. [47]

Dank der Vielfalt des mit modernen Teleskopen in protoplanetaren Schei-

ben sowie über verschiedenartigste Exoplaneten gewonnenen Datenmaterials, durch die Erkenntnisse aus hochauflösenden Simulationsrechnungen sowie anhand der Ergebnisse von Laborexperimenten, hat sich die Theorie der Pla-



33 Veranschaulichung der Strömungsinstabilität als möglichem Mechanismus für die Bildung von Planetesimalen. Geschwindigkeitsunterschiede zwischen größeren Staubpartikeln und den Gaspartikeln in einer protoplanetaren Scheibe auch unter Einfluss von Magnetfeldern und Wellenausbreitung führen danach zur Konzentration der Materie in zunehmend größer werdenden Klumpen, deren Anhäufung nach Überschreiten einer kritischen Gesamtmasse gravitativ kollabieren kann. U. v. Kusserow



34 Mögliche Magnetisierung von Planetesimalen und Asteroiden. Untersuchungen an Pallasiten wie dem Esquel-Meteoriten, der aus in Metall eingebetteten Kristallen in Edelsteinqualität besteht, zeigen, dass auch Asteroiden magnetische Eigenschaften aufweisen können (a). Schematische Darstellung, die veranschaulicht, dass sich Magnetfeldlinien (grünlich eingefärbt) durch die Staubgaswolke schlängeln und sich in abgekühlten Asteroiden verankern können (b). Mögliche Regenerierung von Magnetfeldern in Asteroiden durch Dynamoprozesse innerhalb ihrer anfangs noch flüssigen, turbulenten Kernbereiche (c). Natural History Museum London, H. Cañellas/MIT Paleomagnetism Laboratory, D. Gamulin/B. Weiss

netenentstehung in den vergangenen zwei Jahrzehnten schnell entwickelt, sich dabei hinsichtlich einiger wesentlicher Aspekte auch deutlich verändert. Die Eigenschaften vieler dieser neu entdeckten Exoplaneten und Planetensysteme weichen dabei auffallend von denen unseres Sonnensystems ab. Auch wenn die heutige Einschätzung an den begrenzten Beobachtungsmöglichkeiten der so weit entfernten Systeme liegen mag, so erweisen sich sogenannte Super-Erden (Felsplaneten mit größerer Masse als die Erde) sowie Mini-Neptune (Gas- oder Eisplaneten mit geringerer Masse als der Neptun) überraschenderweise als die wohl am häufigsten anzutreffenden Planetenarten. Dieser Sachverhalt lässt sich exemplarisch am Beispiel der Planetenkonstellation des Trappist-1-Systems in 40 Lichtjahren

Entfernung im Sternbild Wassermann im Vergleich zu der in unserem inneren Sonnensystem anhand von **Bild 31** veranschaulichen [48]. Anders als beim Sonnensystem kann oft auch die Existenz sogenannter „Heißer Jupiter“, jupiterähnlicher Planeten in sehr großer Nähe zum jeweiligen Protostern, nachgewiesen werden. Unabhängig von der Masse nicht allzu massereicher Sterne erweist sich die Ausbildung von Planeten in den sie umgebenden protoplanetaren Scheiben als ein üblicher Vorgang.

Die Staub- und Gasverteilung in hochauflösbaren protoplanetaren Scheiben ist recht unregelmäßig. Je nach Protosternsystem und in jeweils ganz unterschiedlichen Abständen vom jeweiligen Protostern zeigen Aufnahmen dieser Scheiben in den unterschiedlichsten Wellenlängen helle

Ringe, dunkle Lücken, Spiral- sowie lokale Teilestrukturen, die oft als Signaturen bereits früh ablaufender Planetenbildungsprozesse interpretiert werden. Früher als ursprünglich vermutet, starten diese Planetenentstehungsprozesse sehr wahrscheinlich bereits in den Phasen 0 und I (siehe **Bild 21**) der Vorhauptreihenentwicklung sonnenähnlicher Sterne, also in Zeiten, in denen Materie aus der umgebenden protostellaren Hülle noch verstärkt auf die Akretionsscheibe einfällt.

Das Kern-Akkretions-Szenario (**Bild 32 a**) wird weitgehend als das Standardmodell der Planetenbildung angesehen. Im ersten Schritt verdichten sich neutrale und geladene Gas- und Staubpartikel, wachsen submillimeter-große Staubkörner durch Kollisionen und Verschmelzungen zu zentimeter-großen Kieselsteinen („pebbles“) heran, die sich allmählich unter gravitativem Einfluss entlang der Scheibenmagnetfelder in der Mittelebene der Akretionsscheibe absetzen. Durch komplexe physikalische und chemische Prozesse, durch einsetzende Instabilitäten können danach kilometer-große Planetesimalen entstehen. Kieselstein-, Planetesimal- sowie Gasakkretion werden dafür verantwortlich gemacht, dass in einem „runaway“-Prozess unkontrolliertes, später geordneter als oligarchisch bezeichnetes Wachstum schließlich die Bildung marsgroßer Protoplaneten ermöglicht. Wenn Protoplaneten eine kritische Kernmasse überschritten haben, dann können sie gegebenenfalls größere Mengen an Gaspartikeln einfangen, wodurch jupiterähnliche Gasriesen, in weiter außen gelegenen kühleren Bereich der Akretionsscheibe auch uranusähnliche Eisplaneten entstehen. Während die typische Zeitskala für diese Entwicklungsprozesse insgesamt vermutlich Millionen Jahre beträgt, könnte möglicherweise einsetzende Gravitationsinstabilität wesentlich schneller größere Materieansammlungen verdichten, in denen die Gesamtmasse von Staub-, Eis- und Kieselstein-Partikeln die des Gases sehr deutlich übersteigt. ([49], [50])

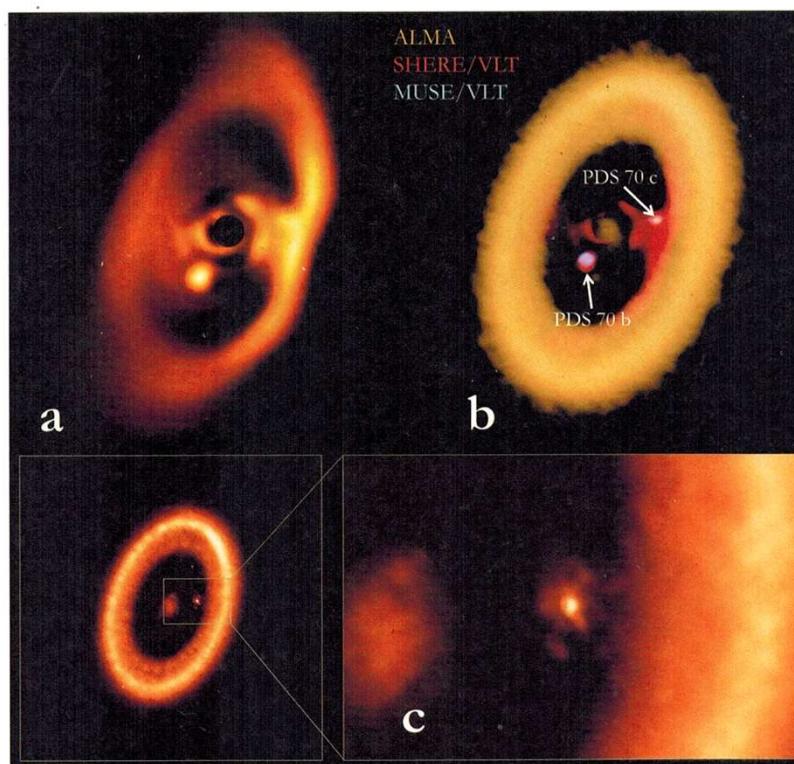
Basierend auf der Untersuchung realer kosmischer Staubpartikel, den Ergebnissen von Laborexperimenten, vor allem aber auch von Simulationsrechnungen, erweist es sich bereits als recht schwierig, die solide Verdichtung etwa ein Meter großer Materieansammlungen aus Staub, Sand, Eis und Geröll, die

Überwindung der sogenannten 1-m-Barriere, zu verstehen. Schon das Wachstum mikrometergroßer Körner durch Aneinanderkleben bis hin zu millimeter- oder zentimetergroßen Kieselsteinen wird offensichtlich durch Barrieren begrenzt, die darauf beruhen, dass die Staubteilchen beim Aufeinandertreffen reflektiert werden können, dabei unter Umständen sogar wieder zersplittern und zudem allzu schnelle Driftbewegungen nach innen durchführen. Letzteres lässt sich dadurch erklären, dass die Gaspartikel mit Geschwindigkeiten

$$v_g(r) = \sqrt{G \cdot m/r - r/m \cdot F_{sd}(r)}$$

aufgrund des radiusabhängigen Druckgradienten $F_{sd}(r)$ im Strahlungsfeld des prästellaren Kerns der Masse M etwas langsamer als mit der für größere Staubpartikel üblichen Keplergeschwindigkeit $v_k(r)$ (vergleiche dazu Bild 2a) umlaufen, wodurch die Staubpartikel in Stoßprozessen mit diesen Gasen abgebremst werden und nach innen migrieren können. ([51], [52], [53])

Eis-, poröse oder mit organischen Molekülen oberflächlich bedeckte Staubpartikel können den Koagulationsprozess unterstützen. Auch magnetische Einflüsse (Bild 32 b oben) [54] sowie elektrisch geladene Staub- und Gaspartikel (Bild 32 b unten) können die Verklumpung der Materie fördern. Turbulente Verwirbelungen oder Scherströmungen, Druckstöße in verdichteten Teilstrukturen der protoplanetaren Scheibe, vertikale Ablagerungen, Interaktion mit Schallwellen oder Inertialwellen im rotierenden System sowie die aufgrund von Resonanzen zwischen Wellen und der Staub-Teilchen-Drift einsetzende Strömungsinstabilität (SI) werden heute als relevante Prozesse für die Ausbildung der bis zu einigen Kilometer großen Planetesimalen verantwortlich gemacht. Diese SI-Instabilität (Bild 33) bewirkt den kollektiven, im Laufe der Entwicklung möglichen selbst-gravitativen Kollaps eines Partikelschwärms, wenn das Staub-Partikel-Massedichtenverhältnis darin von anfangs 0,01 in typischen Molekülwolken den Wert 1 in der Akkretionsscheibe übersteigt und in deren Äquatorialebene schließlich Werte größer als 100 annimmt. SI wird durch die Relativbewegung zwischen Staub- und Gaspartikeln angetrieben, wobei der Gegenwind der Gaspartikel auf immer größer wer-



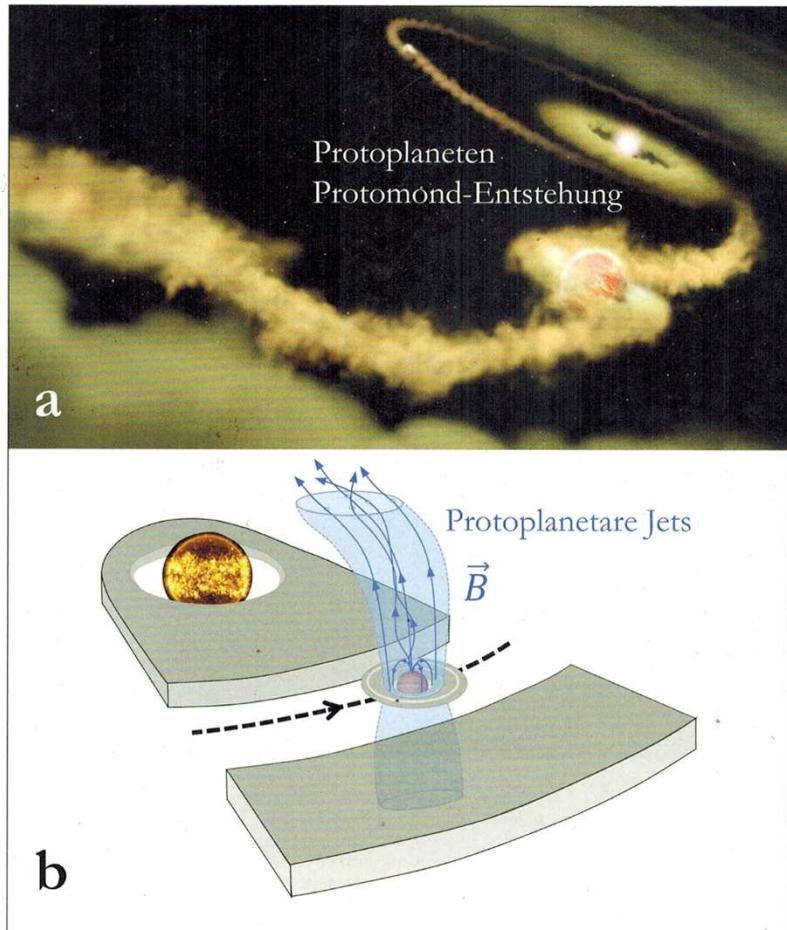
35 Aufnahmen des protostellaren Systems des Zwergsterns PDS 70 mit zwei jupiterähnlichen Planeten und einer erstmals beobachteten circumplanetaren Scheibe. Auf der vom Very Large Telescope (VLT) der ESO gemachten Aufnahme ist der zentrale T-Tauri-Stern selbst durch eine Blende verdeckt, so dass der Protoplanet PDS 70 b sich möglicherweise relativ leuchtstark zu erkennen gibt (a). Auf der Kompositaufnahme, die mithilfe der Daten von ALMA und des VLT erstellt wurde, ist auch der zweite Protoplanet PDS 70 c zu erkennen, der von einer circumplanetaren Wolke umgeben ist (b). Im Ausschnitt der ALMA-Aufnahme der circumplanetaren Scheibe von PDS 70 ist die unregelmäßige Struktur dieser circumplanetaren Scheibe um PDS 70 c deutlicher zu erkennen (c). ESO/A. Müller et al., ALMA (ESO NAJ/NRAO)/A. Isella /, ALMA(ESO/NAJ/NRAO) /M. Benisty et al.

dende Staubhaufen dazu führt, dass diese abgebremst werden, an Drehimpuls verlieren und nach innen driften, während die Gaspartikel Drehimpuls aufnehmen und nach außen driften.

Die Erklärung des sehr komplexen physikalischen Mechanismus der Strömungsinstabilität, durch den zunehmend größere Staubhaufen entstehen, die mit angenähert gleicher Geschwindigkeit interagieren und dabei miteinander verschmelzen können, erweist sich als recht kompliziert und erfordert die Berücksichtigung einer Vielzahl unterschiedlicher Einflussfaktoren [55]. Da die circumplanetaren Scheiben von Magnetfeldern durchsetzt sind, muss darin auch der Einfluss nicht-idealener magnetohydrodynamischer MHD-Effekte, der der Magnetorotationsinstabilität sowie magnetischer Turbulenzen auf die SI berücksichtigt werden. In numerischen Simulationsrechnungen zur Strömungsinstabilität werden heu-

te auch die Bedeutungen magnetisch vermittelten Akkretionsprozesse, magnetohydrodynamischer Alfvén-Wellen sowie die magnetischen Scheibenwinde für die Ausbildung von Planetesimalen in asymmetrischen Staubfallen innerhalb der ringförmigen Scheibenstrukturen durch Druckstöße erforscht. Ergebnisse von Modellrechnungen zur nicht-linearen Entwicklung der Strömungsinstabilität in den magnetisierten circumplanetaren Akkretionsscheiben lassen vermuten, dass selbst bei Abwesenheit radialer Gradienten des Strahlungsdrucks Materie verdichtet werden kann, wenn magnetische Drehmomente für eine azimutale relative Drift von Staub- und Gaspartikeln sorgen. [56], [57]

Nicht nur die Erde als Gesteins-, der Jupiter als Gas-, Uranus als Eisplanet sowie Ganymed als Jupitermond besitzen dynamogenerierte Magnetfelder. Darüber hinaus zeigt eine 2015 im *Nature* Journal veröffentlichte wissenschaftli-



36 Materielücken in protoplanetären Scheiben durch umlaufende Protoplaneten sowie die Entstehung möglicher Protomonde in magnetisierten zirkumplanetaren Scheiben. Veranschaulichung des möglichen Materiezstroms auf die Exoplaneten PDS 70 b und PDS 70 c zur Ausbildung einer zirkumplanetaren Scheibe (**a**). Protoplanetäre Dynamoprozesse und zirkumplanetare Magnetfelder können auch für den effektiven Abtransport von Drehimpuls in einem sich ausbildenden zirkumplanetaren Scheibensystem sorgen, in dem auch Protomonde entstehen könnten (**b**). NASA/ESA/STScI/J. Olmsted (STScI), U. v. Kusserow/C. Fendt/NASA

che Studie, dass in den ersten zehn Millionen Jahren des Sonnensystems auch zahlreiche kleine Körper Magnetfelder besessen haben müssen. In ihnen gab es sehr wahrscheinlich bis 100 Millionen Jahre nach Entstehung der protostellaren Akkretionsscheibe weitverbreitet eine relativ langlebige Epoche magnetischer Aktivität, bevor die heißere Materie darin schließlich erstarrte. **Bild 34 a** zeigt den Esquel-Meteoriten, für den bei Untersuchungen gezeigt werden konnte, dass auch kleine Asteroiden als Teilstücke früherer Planetesimalen magnetische Eigenschaften aufweisen können. **Bild 34 b** soll veranschaulichen, dass das sehr junge protostellare Sonnensystem und insbesondere auch die Planetoiden vermutlich überall von Magnetfeldern durchsetzt waren.

Solange die Materie noch relativ heiß und flüssig war, sie darin noch konvektiv und turbulent strömen konnte, wäre es durchaus möglich gewesen, dass Magnetfelder in größeren präplanetaren Objekten sogar durch Dynamoprozesse erzeugt wurden (**Bild 34 c**). Im Oktober 2023 startete die NASA die Raumsonde Psyche, die ab August 2029 den gleichnamigen Metallasteroiden Psyche in einer Entfernung von 3,5 Milliarden Kilometern in diesem Zusammenhang auf mögliche Restmagnetfelder untersuchen soll. [58]

Der mehr als 350 Lichtjahre von der Erde entfernte 5 Millionen Jahre alte T-Tauri-Stern PDS 70 im Sternbild Zentaur besitzt eine Masse von etwas weniger als dem 0,8-fachen der Sonne und ist von einer protoplanetaren Scheibe mit ei-

nem Radius von 130 AE, mit einer großen Lücke im Zentralbereich sowie einem leuchtenden äußeren Staubkranz umgeben (**Bild 35**). 1992 war die Existenz dieser Scheibe erstmals vermutet, 2006 zusammen mit der einer jetartigen Windstruktur bestätigt worden. Auf einer Nahinfrarotaufnahme des Very Large Telescope der ESO konnte 2018 innerhalb der Scheibenlücke dieses, durch eine Blende verdeckten Zwergsterns mit PDS 70 b erstmals ein Protoplanet direkt bei seiner Entstehung beobachtet werden (**Bild 35 a**). Die 2019 veröffentlichte Kompositaufnahme dieses Klasse-II-Systems (**Bild 35 b**) weist anhand der Daten des Atacama Large Millimeter/submillimeter Array mit PDS 70 c sogar auf die Existenz eines weiteren Protoplaneten hin. Und 2021 gelang ebenfalls mit ALMA schließlich erstmals der Nachweis einer unregelmäßigen zirkumplanetaren, potentiell mondbildenden Scheibe um einen der Exoplaneten (**Bild 35 c**). [59], [60]

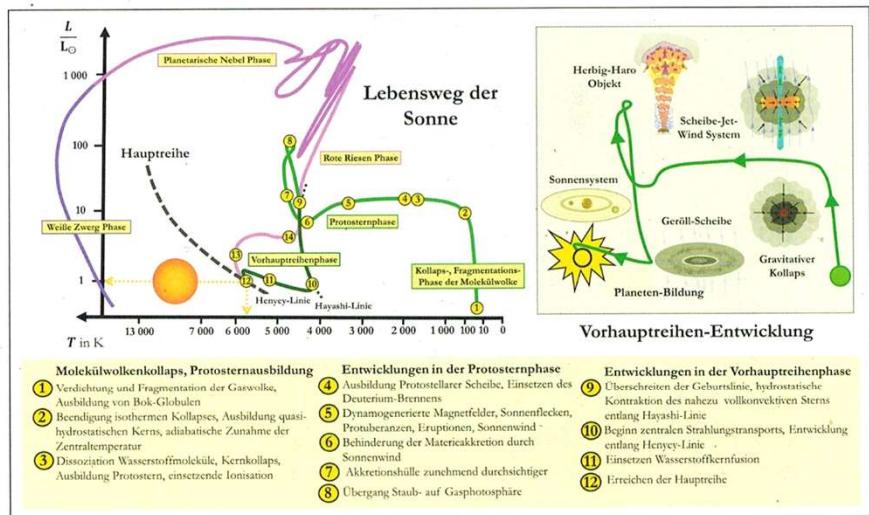
Offensichtlich können es danach präplanetare Objekte sein, die große Lücken in den protoplanetären Staubscheiben erschaffen. **Bild 36 a** veranschaulicht in einer Illustration, wie die Materiezufuhr auf die jungen Objekte PDS 70 b und PDS 70 c, die den jungen Zwergstern PDS 70 a umkreisen, insbesondere auch durch Drehimpulstransportprozesse erfolgen kann. In numerischen Simulationen wurde die Entstehung zirkumplanetarer Akkretionsscheiben um protoplanetare Kerne bereits als zu erwarteter Vorgang im Verlauf der Planetenentstehungsphase erkannt. Ebenso wie in Protosternen und Akkretionsscheiben (**Bild 23**) sowie Asteroiden (Bild 31) entstehen Magnetfelder sicherlich auch schon in Protoplaneten (siehe dazu **Bild 3**). Und die Magnetorotationsinstabilität sowie magnetisierte Materiewinde sorgen nicht nur in protostellaren Akkretionsscheiben, sondern vermutlich analog dazu auch in zirkumplanetaren Scheiben für den Drehimpulstransport zur Unterstützung von Akkretionsprozessen zur Verdichtung der Materie und Ausbildung junger kugelförmiger Himmelsobjekte. In diesem Zusammengang veranschaulicht **Bild 36 b**, wie magnetisierte protoplanetare Scheibenwinde für die Ausbildung möglicherweise auch von magnetisierten Protomonden sorgen könnten, die den Protoplaneten auf Orbits in den Lücken zirkumplanetarer Scheiben umlaufen. Berücksichtigt werden sollte dabei allerdings auch die stärkere Einflussnah-

me magnetisierter prostellarer Winde, die aufgrund ihrer wesentlich größeren Intensität das Ausströmen solcher protoplanetarer Winde unterdrücken könnten. [61]

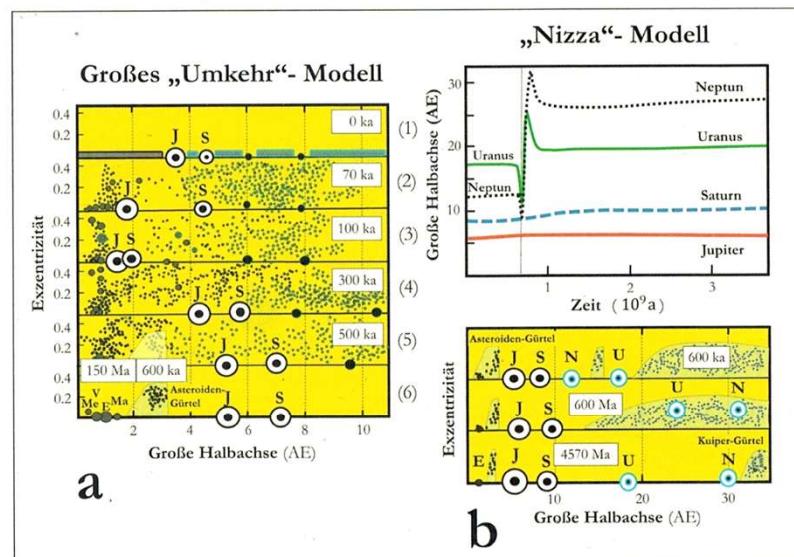
Modelle zur Entstehung unseres Sonnensystems

Basierend auf Arbeiten von Ejnar Hertzsprung (1873–1967) hatte Henry Norris Russell (1877–1957) 1913 das Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) entwickelt, in dem üblicherweise die Verteilung typischer Lebensphasen der Sterne mit unterschiedlichen Massen und chemischen Zusammensetzungen dargestellt wird (**Bild 37**, links oben). In einem Koordinatensystem, in dem die aktuelle Oberflächentemperatur T in Kelvin (K) eines Sterns auf der Horizontalachse, das Verhältnis L/L_{\odot} von dessen Leuchtkraft L zu der der heutigen Sonne L_{\odot} auf der Vertikalachse abgelesen werden kann, lässt sich der jeweilige Entwicklungszustand durch einen „Sternpunkt“ ($T; L/L_{\odot}$) beschreiben. Die meisten dieser Sternpunkte liegen in diesem Diagramm auf der sogenannten Hauptreihe in einem schräg verlaufenden Streifen, da die betreffenden Zustandsgrößen vieler Sterne hier im Verlauf des Wasserstoffbrennens über relativ lange Zeit im Wesentlichen unverändert bleiben. Rechts von der nach Chushiro Hayashi (1920–2010) benannten steilen Hayashi-Linie, entlang der das Innere der noch sehr jungen Protosterne sich als vollkonvektiv erweist, findet man dagegen aufgrund der relativ schnell ablaufenden frühen protostellaren Entwicklungsphasen nur sehr wenige Sternpunkte. Die sich anschließende Vorhauptreihenentwicklung der Sterne verläuft im HRD entlang der nach Louis George Henyey (1910–1970) benannten, angenähert horizontalen Linie.

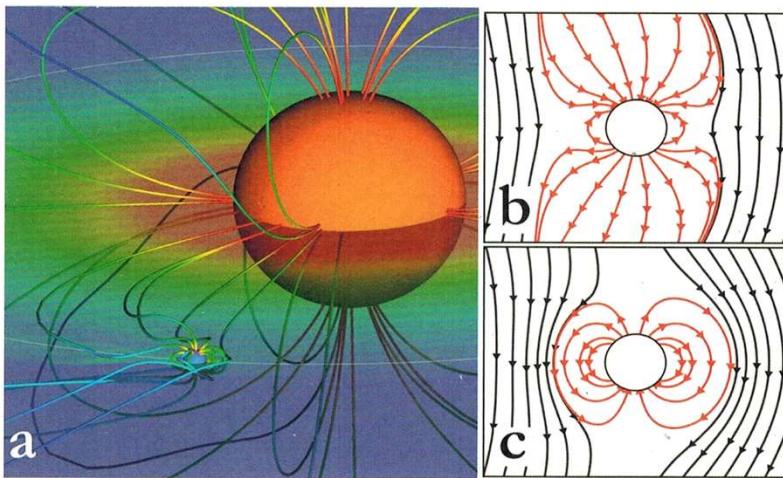
In **Bild 37** wird hier zum einen der mögliche Lebensweg unserer Sonne im HR-Diagramm dargestellt. Es wird aufgezeigt, wie sich die Sonne nach ihrer Vorhauptreihen- sowie ihrer durch zentrales Wasserstoffbrennen ausgezeichneten Hauptreihenentwicklung in wenigen Milliarden Jahren zu einem roten Riesenstern mit geringerer Oberflächentemperatur und starken Leuchtkräften entwickeln wird. Auf die unruhige Entwicklung nach dem Zünden des Heliumbrennens folgt eine Phase, in der



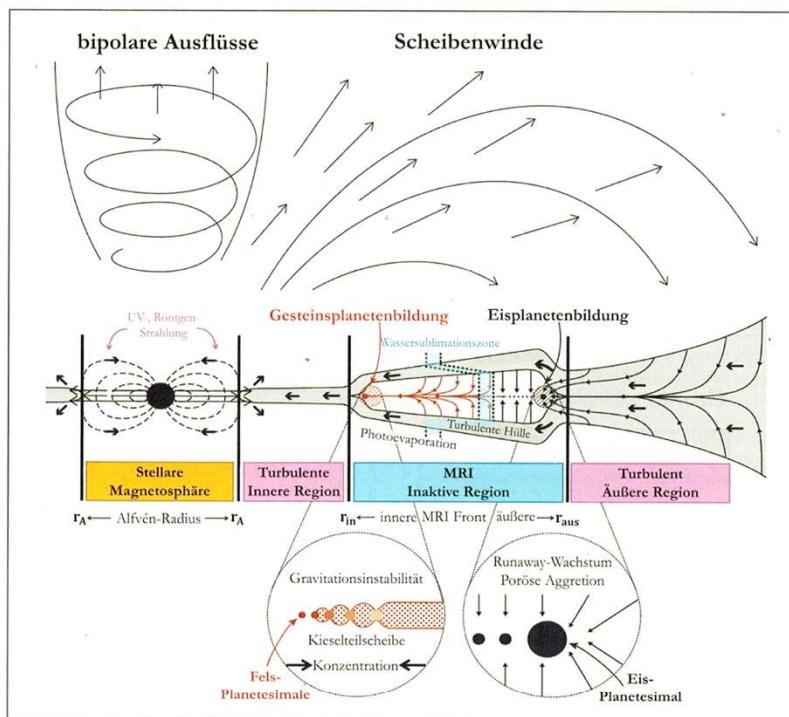
37 Entwicklungsweg der Sonne und ihres Planetensystems im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Im linken oben abgebildeten Koordinatensystem geben die zeitabhängigen Koordinaten der Punkte des Graphen, der im Lauf der Zeit von rechts unten nach links unten durchlaufen wird, die jeweilige Oberflächentemperatur $T(t)$ der Sonne in Kelvin bzw. das Verhältnis L/L_{\odot} der zeitabhängigen Leuchtkraft $L(t)$ zur heutigen Leuchtkraft L_{\odot} der Sonne an. Die Abschnitte des Graphen sind dabei für die unterschiedlichen typischen Entwicklungsphasen (Kollaps der Molekülwolke und Protosternphase, Vorhauptreihenphase, Rote-Riesen-Phase, Entwicklungsphase Planetarischer Nebel, Weiße-Zwerg-Phase) jeweils unterschiedlich eingefärbt. Auf der Hayashi-Linie ist das Sterninnere vollkonvektiv. Entlang der Henyey-Linie bildet sich im Sterninneren ein zunehmend größer werdender radiativer Kernbereich aus, in dem erste Deuterium-Fusionsprozesse starten. An der durch (12) in diesem Entwicklungsdiagramm markierten Stelle auf der Hauptreihe befindet sich die heutige Sonne mit einer Oberflächentemperatur von weniger als 6.000 K, in deren Inneren bereits seit über etwa vier Milliarden Jahre stabile Wasserstoff-Fusionsprozesse die Sonnenleuchtkraft erzeugen. Rechts oben sind die typischen physikalischen Prozesse und Erscheinungsformen des die Protonen umgebenden Scheibe-Jet-Systems bis hin zur Ausbildung des Planetensystems, bis zum Erreichen der Hauptreihe skizziert. Im unteren Teil des Bildes sind die aufeinanderfolgendenstellaren Prozesse notiert, die während des Molekülwolkenkollapses, der Ausbildung des Protosterns, während dessen Entwicklung sowie in der sich anschließenden Vorhauptreihenphase von Bedeutung sind. U. v. Kusserow/NASA



38 Modelle zu Migrationsbewegungen der Gas- und Eisplaneten im frühen Sonnensystem aufgrund von Drehimpulstransport-Prozessen. Nach dem „Grand Tack“ (Großen Umkehr-) Modell haben Jupiter und Saturn zunächst Migrationsbewegung nach innen durchgeführt, dabei die Entstehung des Asteroiden-Gürtels bewirkt sowie die Entwicklung der inneren Felsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars bestimmt, um anschließend zu ihrem heutigen Platz im Sonnensystem zurückzukehren (a). Nach dem „Nizza“-Modell, das auf einer Tagung an der französischen Küstenstadt entwickelt wurde, haben die Eisplaneten Uranus und Neptun starke Migrationsbewegungen durchgeführt, dabei ihre Positionen relativ zur Sonne ausgetauscht und die Entwicklung des Kuiper-Gürtels massiv beeinflusst (b). U. v. Kusserow



39 Interaktion stellarer und planetarer Magnetfelder (**a**). Basierend auf Ergebnissen von Computersimulation entstehen unterschiedliche Magnetfeld-Topologien im Umfeld Heißer Jupiter abhängig von der relativen Orientierung der stellaren und planetaren Magnetfelder zueinander (**b, c**). A. Strugarek u. a./Université de Montréal



40 Tandem-Modell zur Erzeugung von Gesteinsplaneten am inneren sowie Gas- und Eisplaneten am äußeren Rand der „Todeszone“, der äquatornahen MRI-inaktiven Region in der protoplanetaren Scheibe. Y. Imaeda/T. Ebisuzaki, Bearbeitung U. v. Kusserow

sie, im Vergleich zu heute, zunehmend kontrahiert, sehr viel heißer wird und eine mehr als tausendfach höhere Leuchtkraft aufweist. Sternwinde werden dabei vermutlich für die Ausbildung eines Planetarischen Nebels sorgen, bevor sich die Sonne schließlich als besonders kompakter und heißer Weißer Zwerg mit

stark abnehmender Leuchtkraft auf besonders langer Zeitskala wieder abkühlt.

Im rechten Teil dieses Bildes ist der Verlauf des Lebensweges der sehr jungen Sonne während der Vorhauptreihen-Entwicklung im Hertzsprung-Russell-Diagramm noch einmal dargestellt. An jeweils passender Stelle sind hier mit

dem gravitativen Kollaps, dem Herbig-Haro-Objekt im Scheibe-Jet-Wind System sowie mit der Planeten- und Gérolscheibenentwicklung zusätzlich die zeitlich aufeinanderfolgenden typischen Erscheinungsbilder des am Ende mehrere Millionen Jahre alten Sonnensystems skizziert. Im unteren Teil dieser Abbildung sind die nummerierten Entwicklungsschritte der zukünftigen Sonne während des Molekülwolken-Kollapses, der Ausbildung und Entwicklung des Protosterns sowie in der sich anschließenden Vorhauptreihenentwicklung detaillierter aufgelistet. [62]

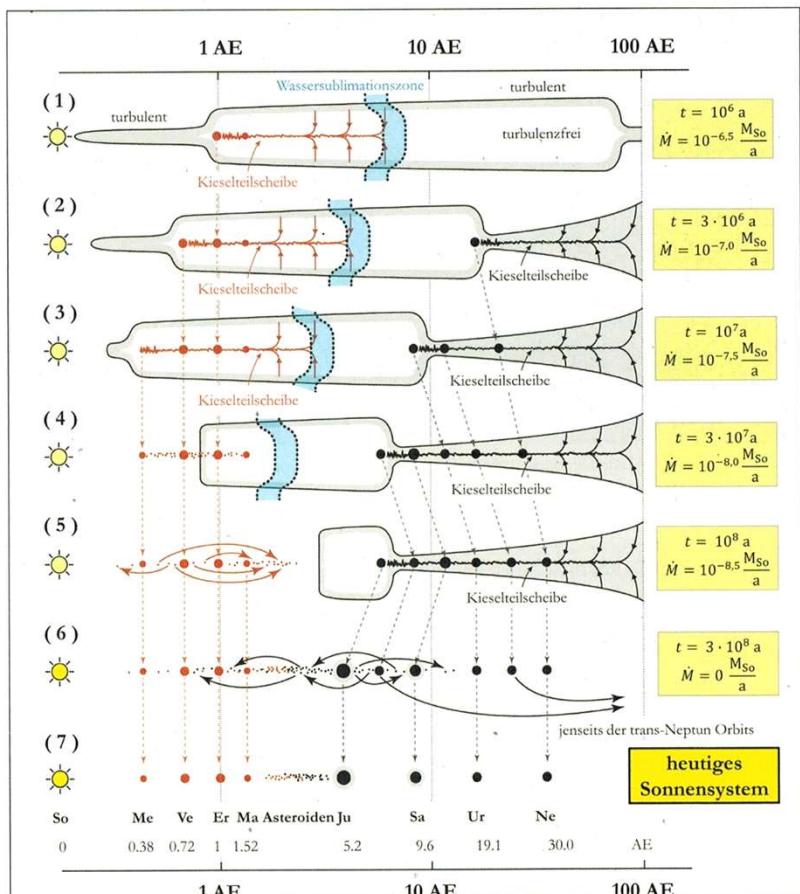
Vor der Entdeckung der ersten Exoplaneten im Jahre 1995 waren die Astrophysiker und Planetenforscher eher davon ausgegangen, dass alle extrasolaren Planetensysteme im Aufbau etwa unserem Planetensystem ähnlich müssten. Erdähnliche Felsplaneten im Inneren, wesentlich massereichere, jupiterähnliche Gasplaneten in etwa 5 bis 10 AE davon entfernt mit einem dazwischenliegenden Asteroidengürtel, neptunähnliche Eisplaneten in mehr als 20 AE Entfernung vom Zentralstern sowie einem noch weiter außen gelegenen Kuiper-ähnlichen Gürtel, so würde die typische Verteilung der Massen, Radien und physikalisch-chemischen Zusammensetzungen der Planetensysteme auch anderer Sternsysteme etwa aussehen müssen. Die Entdeckung der heißen jupiterähnlichen Exoplaneten in überraschend großer Nähe zu ihren jeweiligen Zentralsternen war einer der Beweggründe für die Entwicklung des 2011 publizierten „Grand Tack“-Modells (**Bild 38 a**) zur Erklärung der Entwicklung des inneren Sonnensystems. Nach diesem Modell könnte der frühe Protoplanet Jupiter zwar ursprünglich in etwa 4 AE von der Protoplane entstanden sein. Durch Drehimpulsaustausch mit der ihn umgebenden protoplanetaren Scheibe sowie durch den Abtransport von Drehimpuls in protoplanetaren Winden hätte er danach aber zunächst Migrationsbewegungen nach innen bis in die typische Position der heute entdeckten Heißen Jupiter in etwa 1,5 AE Entfernung von der Protoplane gemacht haben. Die bei heißen Jupitern beobachtete große Nähe zu ihren jeweiligen Zentralsternen könnte somit auch als typische frühe Entwicklungsphase unseres Sonnensystems interpretiert werden. ([63, Kapitel 5.3], [64])

Im Rahmen dieses „Großen Umkehrmodells“ hätte der junge Jupiter auf sei-

nem Weg nach innen durch gravitative Interaktionen mit Gas- und Staubpartikeln, Kieselsteinen und Planetesimalen Materie aufgesammelt, seine Masse dabei zunehmend vergrößert und massereiche Haufen von Planetesimalen vor sich her nach innen geschoben. Im Bereich der Eislinie, die den inneren vom äußeren Bereich des frühen Sonnensystems trennt, außerhalb derer aufgrund dort geringerer Temperaturen größere Eisparkel entstehen konnten, die die Protoplanetenbildung unterstützen, wäre etwas außerhalb von 4 AE Entfernung auch der Saturn entstanden. Nach dessen Migrationsbewegung nach innen könnten resonante Interaktionen der beiden jungen Gasplaneten untereinander sowie der Drehimpulsaustausch mit dem sie umgebenden Scheibenmaterial für eine „umgekehrte“ Migrationsbewegung nach außen bis zu ihrer heutigen Position im Sonnensystem geführt haben. Nach etwa 600.000 Jahren wäre dabei der Asteroidengürtel entstanden, und nach rund 150 Millionen Jahren könnten sich die Planeten Merkur, Venus, Erde und Mars aus den sich im Inneren zunehmend verdichtenden und mit abnehmender Exzentrizität umlaufenden Planetesimalhaufen gebildet haben.

Ein weiteres, bereits 2005 auf einer Konferenz in Nizza vorgestelltes Modell (**Bild 38 b**), erklärt die Entwicklung unseres Planetensystems vor rund 3,9 Milliarden Jahren. Danach haben die Eisplaneten Uranus und Neptun im Laufe der Entwicklung ihre Abstandspositionen ausgetauscht und dabei auch für die Ausbildung des heutigen Kuipergürtels gesorgt.

Vermutlich werden im Innern extrasolarer Heißer Jupiter als auch im frühen Jupiter unseres Sonnensystems Magnetfelder bereits in Dynamoprozessen erzeugt. Wenn sich solche jungen Protoplaneten mit den ausgedehnten Magnetosphären ihrem zentralen Protostern mit anfangs im Vergleich zur Sonne vermutlich extrem starken dipolaren und multipolaren Magnetfeldern sowie intensiven magnetisierten Sternwindströmen (siehe dazu **Bild 1**) sehr nahe kommen, dann kann es zwischen den Magnetfeldern beider Himmelsobjekte zu starken Wechselwirkungsprozessen kommen (**Bild 39 a**). Je nach Ausrichtung des protoplanetaren Feldes relativ zu dem des Zentralsterns bilden sich dabei ganz unterschiedliche magnetische Topologien aus (**Bild 39 b, c**). Wenn ein



41 Ein mögliches Szenario der Entstehung sonnensystemähnlicher Systeme nach dem Tandem-Modell in zeitlich aufeinanderfolgenden Entwicklungsphasen. (1) Die Entstehung von Gesteinsplaneten um die innere MRI-Front, (2) die Entstehung von Eisplaneten um die äußere MRI-Front. (3) In der Nähe der MRI-Fronten bilden sich nacheinander Planeten oder Planetenkerne aus, (4) die ionisierende Strahlung und der Sternwind des Zentralsterns zerstreuen das Gas im inneren Teil der Scheibe, (5) innere Planetesimalen werden von den Gesteinsplaneten zerstreut, (6) äußere Planetesimalen werden von den Gasriesen zerstreut, (7) so könnte das heutige Sonnensystem entstanden sein. Y. Imaeda/T. Ebisuzaki, Bearbeitung U. v. Kusserow

solches junges planetares Objekt seinem jungen Zentralstern allzu nahe kommt, können starke Gravitationskräfte dafür sorgen, dass es in diesen Stern hineinstürzt. Die Entwicklung von Leben auf so einem magnetisierten Planeten, der dabei die sogenannte Alfvén-Fläche durchläuft, innerhalb derer die besonders starkenstellaren Magnetfeldstrukturen weitgehend starr mit dem Stern umlaufen, wäre dabei allerdings wohl kaum möglich. [65]

Es gibt eine Vielzahl von Modellen und numerischen Simulationsrechnungen, mit Hilfe derer heute Detail- oder globale Aspekte der Entstehung und Entwicklung des Planetensystems der Sonne theoretisch erforscht werden. Während beim Grand-Tack- und Nizza-Modell der Einfluss magnetischer Prozesse

weitestgehend unberücksichtigt bleibt, spielt die Magnetorotationsinstabilität (**Bild 25**) beim sogenannten Tandem-Modell eine wichtige Rolle. In **Bild 40** ist veranschaulicht, wie die protoplanetare Akkretionsscheibe bei Rechnungen zu dem von Toshikazu Ebisuzaki und Yusuke Imaeda 2016 entwickelten Modell [66] in Abhängigkeit von dem dort jeweils anzutreffenden Ionisationsgrad in drei Regionen unterteilt wird. Während die innere und äußere Region, aufgrund des relativ hohen Ionisationsgrades MRI getrieben, jeweils turbulent verwirbelt ist, befindet sich dazwischen eine ruhige Region mit größerer Materiedichte (die sogenannte Todeszone), in der die MRI aufgrund des hier geringen Ionisationsgrades unterdrückt bleibt. „Gesandwiched“ wird letztere durch eine turbulen-



42 Versammlung der Teilnehmer der internationalen Konferenz *Protostars and Planets VII*, die 2023 in Kyoto, Japan stattfand. Y. Fujii u. a./Kyoto University

te Hülle, in die die Kosmische Strahlung von außen noch gut eindringen kann. Anders als beim Grand-Tack-Modell erfordert die Entstehung der inneren Felsplaneten keine Migrationsbewegungen eines jupiterähnlichen Planeten. Unabhängig voneinander können sich die erdähnlichen Planeten im Rahmen dieses Modells dabei am inneren, die Gas- und Eisplaneten davon entfernt am äußeren Randbereich der inaktiven Region ausbilden. Die Rechnungen belegen, dass die Aufteilung in solche Tandem-Planetenbildungs-Regionen allerdings nicht stattfinden würde, wenn die Scheibenmagnetfelder allzu schwach wären, da die äußere MRI-Front dann zu weit nach außen driftet würde, anders als beim Sonnensystem alle Planeten gehäuft nur im Bereich der inneren MRI-Front entstehen könnten.

Bild 41 veranschaulicht eine mögliche zeitliche Entwicklung des Planetensystems unserer Sonne, wie es die Ergebnisse von Modellrechnungen zum Tandem-Modell nahelegen. Danach könnte es durchaus sein, dass sich anfangs zunächst die Kieselsteine und felsartigen Planetesimalen zur Bildung der erdähnlichen inneren Planeten verdichten, dass sich die jupiter- und neptunähnlichen Gas- bzw. Eisplaneten erst etwas später ausbilden würden. Im Rahmen dieses Modells kann u. a. auch die Existenz der Planetenlücke, gefüllt mit Asteroiden, zwischen den inneren und äußeren Planeten konsistent erklärt werden. [67]

Im April 2023 fand in Kyoto die 7. Internationale Konferenz zum Thema *Protostars and Planets* statt, auf der eine Viel-

zahl von Wissenschaftlern (**Bild 42**) die unterschiedlichsten Aspekte der Entwicklung protostellarer Systeme und von Exoplaneten besonders ausführlich diskutiert haben. Dabei zeigte es sich, dass viele Fragestellungen trotz großer Fortschritte auch heute noch nicht zufriedenstellend beantwortet werden können, dass sich vermutlich immer wieder neue Grenzen der Erkenntnisgewinnung auftun werden [68]. Unser Planetensystem scheint dabei gesichert ein besonderes, relativ selten anzutreffendes System darzustellen.

Der Autor dieser Artikelserie plant zurzeit die Veröffentlichung eines Buches beim Springer Verlag Heidelberg, in dem insbesondere die Vielfalt der möglichen Einflussnahme magnetischer Prozesse bei der Entstehung sonnenähnlicher Sternsysteme noch detaillierter erläutert werden soll. [69]

Literatur:

- [45] von Kusserow, U.: Über die Entstehung des magnetischen Sonnensystems (3). 2024 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>
- [46] Green, J. D. et al.: Why are (almost) all the protostellar outflows aligned in Serpens Main? 2024 <https://arxiv.org/pdf/2406.13084>
- [47] Center for Computational Astrophysics (CfCA) Stellar "Ashfall" Could Help Distant Planets Grow. 2021 <https://www.cfca.nao.ac.jp/en/pr/20211214>
- [48] Thomas, C. M.: TRAPPIST-1 Star System, 2021 <https://vixra.org/pdf/2110.0177v1.pdf>
- [49] Simon, J. B. et al.: Comets and Planetesimal Formation. 2022 <https://arxiv.org/pdf/2212.04509>
- [50] Drążkowska, J. et al.: Planet Formation Theory in the Era of ALMA and Kepler: from Pebbles to Exoplanets. 2023 <https://arxiv.org/pdf/2203.09759>
- [51] Klahr, H., Henning T.: Planetenentstehung - Aus Staub geboren. 2013 https://application.wiley-vch.de/books/sample/3527412670_c01.pdf
- [52] von Kusserow, U.: Über die Entstehung junger Sterne und Planeten (Teil 3). Nachrichten der Olbers-Gesellschaft 244. 2014 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>
- [53] von Kusserow, U.: Über die Entstehung junger Sterne und Planeten (Teil 4). Nachrichten der Olbers-Gesellschaft 244. 2014 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/artikel>
- [54] Kruss, M., Wurm, G.: Seeding the Formation of Mercury: An Iron-sensitive Bouncing Barrier in Disk Magnetic Fields. ApJ 2018 December 10 <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aaec78/pdf>
- [55] Magnan, N., Heinemann T., Later, H. N.: The physical mechanism of the streaming instability. <https://arxiv.org/pdf/2408.07441>
- [56] Lin M.- K., Hsu, C.- Y.: Streaming Instability in Accreting and Magnetized Laminar Protoplanetary Disks. ApJ 926 14, 2022 <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac3bb9>
- [57] Hsu, C.- Y., Lin M.- K.: Nonlinear evolution of streaming instabilities in accreting protoplanetary disks. ApJ 937 55, 2022 <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ac8df9/meta>
- [58] Zhang, Z., Bercovici, D.: Generation of a measurable magnetic field in a metal asteroid with a rubble-pile core. PNAS 2023 <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2221696120>
- [59] MPIA: Erstmaliger eindeutiger Nachweis einer mondbildenden Scheibe um einen Exoplaneten - Junger, noch wachsender Jupiter-ähnlicher Exoplanet von Material umgeben, dessen Masse etwa drei Erdmonden entspricht, 2021 <https://www.mpia.de/aktuelles/wissenschaft/2021-11-pds70c-disk>
- [60] Christiaens, V. et al.: MINDS: JWST/NIRCam imaging of the protoplanetary disk PDS 70 - A spiral accretion. A&A, 2024 <https://arxiv.org/pdf/2403.04855>
- [61] Fendt, C.: Magnetically driven outflows from Jovian circum-planetary accretion disks. A&A, 2003 <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2003/46/aa0154/aa0154.html>
- [62] von Kusserow, U.: Vorhauptreihen-Entwicklung der Sonne im Hertzsprung-Russell-Diagramm. Olbers-Gesellschaft e. V. Bremen, 1995-97 https://ulrich-von-kusserow.de/images/Beitraege/Artikel/HRD_Vorhauptreihe_Sonne.pdf
- [63] von Kusserow, U.: Chaos, Turbulenzen und kosmische Selbstorganisationsprozesse (Kapitel 5.3). Springer-Verlag GmbH Deutschland 2018 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher/chaos-turbulenzen-und-kosmische-selbstorganisationsprozesse>
- [64] Griveaud, P. et al.: The Solar System could have formed in a low-viscosity disc: A dynamical study from giant planet migration to the Nice model. 2024 <https://arxiv.org/pdf/2406.20075>
- [65] Strugarek, A.: Models of Star-Planet Magnetic Interaction. 2017 <https://arxiv.org/pdf/1704.03254>
- [66] Ebisuzaki, T., Imaeda, Y.: United Theory of Planet Formation (I): Tandem Regime https://www.researchgate.net/publication/291436945_United_Theory_of_PlanetFormation_I_Tandem_Regime
- [67] Imaeda, Y., Ebisuzaki, T.: Tandem planet formation for solar system-like planetary systems. Elsevier 2016 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167497116300676>
- [68] Inutsuka, S. - i. et al.: Protostars and Planets VII. Astronomical Society of the Pacific Conference Series Vol. 534 - Monograph 9, 2023 https://arxiv.org/search/?query=Protostars+and+Planets+VII&searchtype=all&abstracts=show&order=-announced_date_first&size=50
- [69] von Kusserow, U.: Entstehung des magnetischen Sonnensystems <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher/magnetisches-sonnensystem-solare-eruptionen-sonnenwinde-und-weltraumwetter/entstehung-sonnensystem>

Ulrich von Kusserow

Besselstraße 32-34
28203 Bremen
E-Mail: uvkusserow@t-online.de