



© NASA/JPL, NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington, ESA/Y. Wei et al., NASA/GSFC/M. P. Hryb-Keith; NASA/Goddard Conceptual Image Lab/J. Masters, NASA/Goddard/MAVEN/CU Boulder/SVS, NASA/JPL, NASA/GSFC/D. Ladd, NASA/Scientific Visualization Studio/JPL NAI, L. Mejnertsen, Imperial College London, M. A. Wieczorek/B.P. Weiss/S.T. Stewart, X. Jia (University of Michigan)/M. Kivelson (UCLA), D. Gamulin/B. Weiss, Bill Saxton/NSF/AUI/NRAO, NASA, NASA/JPL-Caltech/R. Hurt, SOFIA/ESO, NRAO/AUI/NSF; D. Berry, SOFIA/ Y. Seo/ESO, U. v. Kusserow, ALMA/ESO, R. E. Pudritz/T. P. Ray, U. v. Kusserow/A. Strugarek, U. v. Kusserow u. a., U. v. Kusserow

## Entstehung des magnetischen Sonnensystems

Ulrich von Kusserow

*Seit der Antike haben Philosophen und Naturwissenschaftler, Astrophysiker und Planetenforscher eine Vielzahl unterschiedlicher Modellvorstellungen über die Entstehung unseres Sonnensystems entwickelt. Die Entdeckung und vergleichende Analyse extrasolarer Planetensysteme sonnenähnlicher Sterne, hochauflösende Abbildungen solcher extrem jungen Sternensysteme, die Auswertung umfangreichen Datenmaterials sowie gewonnene Erkenntnisse anhand der Ergebnisse analytischer Modellrechnungen und Numerischer Simulationen mit Hilfe besonders leistungsfähiger Computer haben heute die Entwicklung einer relativ verlässlichen Theorie ermöglicht. Danach entstand die Protosonne durch den gravitativen Kollaps einer riesigen Molekül- und Staubwolke, bildeten sich die Planeten in der diesen sehr jungen Stern umkreisenden Akkretions-scheibe durch Agglomeration von zunehmend größer werdenden Materieverdichtungen aus. Außer der oft dominierenden Gravitation, den Turbulenzen, Instabilitäten sowie dem effektiven Drehimpulstransport in solchen rotierenden Systemen müssen nachweislich insbesondere auch magnetische Prozesse eine zentrale Rolle gespielt haben.*

## Geschichtliches zur Erkenntnisgewinnung

Dass sowohl die Sonne, die Erde und der Mond als auch die Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter mit seinen Monden sowie Saturn neben vielen Sternen wichtige Himmelsobjekte im Universum darstellen, das war den Menschen spätestens seit 1610, seit den Entdeckungen durch Galileo Galilei (1564-1642) bzw. Simon Marius (1573-1624) bekannt. Erst Anfang des 18. Jahrhunderts waren kleinere planetare Objekte in der Planetenlücke zwischen den erdähnlichen inneren Planeten und den äußeren riesigen Gas- und Eisplaneten entdeckt worden. Johann Daniel Titius (1729-1796) hatte 1766 eine empirisch ermittelte algebraische Beziehung über den Abstand der Planeten von der Sonne aufgestellt, deren Formel, heute als Titius-Bode-Reihe bezeichnet, erst 1772 von Johann Elert Bode (1747-1826) veröffentlicht wurde. Während die Abstände des Merkur, der Venus, der Erde und des Mars bzw. des Jupiters und Saturns relativ zum Abstand der Erde durch Einsetzen der Werte  $-\infty$ , 0, 1, 2 bzw. 4 und 5, in eine 1787 von Johann Friedrich Wurm (1760-1833) abgewandelte Formel eingesetzt, angenähert recht gut ermittelt werden konnten, so fanden die Beobachter für den Zahlenwert 3 keinen Planeten. In der recht breiten Lücke zwischen dem erdähnlichen Planeten Mars und dem Gasplaneten Jupiter fanden Giuseppe Piazzi (1746-1826), Wilhelm Olbers (1758-1840) und Karl Ludwig Harding (1765-1834) dann zwischen 1801 und 1807 mit Vesta, Juno und Pallas erste sogenannte Asteroiden im dem als Asteroidengürtel bezeichneten Gebiet. Die Eisplaneten Uranus und Neptun wurden bereits 1781 bzw. wesentlich später 1846 gefunden. Und erst nachdem 1950 im Außenbereich des Sonnensystems die Existenz einer zirkumsolaren, als Oortsche Wolke bezeichneten Materieansammlung postuliert worden war, und 1992 die Entdeckung des Kuiper-Gürtels, einer flachen Scheibe aus Schutt und Eis außerhalb des Neptun-Orbits, gelang, war den Wissenschaftlern der vollständige Aufbau unseres Sonnensystems bekannt.

Neben der Erforschung der Entstehung unseres gesamten Universums sowie des Lebens auf der Erde gehört sicherlich auch die Erforschung des Ursprungs unseres Sonnensystems zu den Themenbereichen, die uns Menschen, insbesondere auch die Wissenschaftler immer schon besonders fasziniert haben. Bereits 1630 hatte der französische Philosoph und Naturwissenschaftler René Descartes (1596-1650) ein erstes Modell über den möglichen Ursprung des Sonnensystems entwickelt. Er ging davon aus, dass das Universum überall mit Materie gefüllten Wirbeln durchsetzt sein müsste, und dass die Sonne und die Planeten durch das Zusammenziehen und Auskondensieren solcher Wirbel entstanden sein könnten. Erst nachdem Nikolaus Kopernikus (1473-1543), Johannes Kepler (1571-1630) und schließlich Isaac Newton (1643-1727) im Jahre 1687 das heliozentrische Weltbild mit der Sonne im Zentrum und den sie umlaufenden Planeten verlässlich begründet hatten, waren es der schwedische Wissenschaftler Emanuel Swedenborg (1688-1772), der deutsche Philosoph Immanuel Kant (1724-1804) sowie der französische Mathematiker, Physiker und Astronom Pierre-Simon Laplace (1749-1827), die nacheinander zwischen 1734 und 1796 ihre unterschiedlichen „Nebularhypothesen“ über die Entstehung nicht nur unseres Sonnensystems ohne Angst vor Repressalien durch die kirchliche Inquisition entwickeln konnten. Bereits um 1704 wurde von den Naturforschern der Begriff „Sonnensystem“ verwandt.

Entsprechend der Laplace-Hypothese müsste sich nach erfolgtem gravitativem Kollaps eines solaren Urnebel in dessen Zentralbereich eine zunehmend schneller rotierende Sonne ausgebildet haben. Unter Einwirkung starker Zentrifugalkräfte müsste sich dabei die verbleibende Materie nach außen hin in Form einer flachen Scheibe organisiert haben, in der die Planeten entstehen konnten. Nach dieser Hypothese müsste die junge Sonne aufgrund des Drehimpulserhaltungsgesetzes bei zunehmender Kontraktion ohne Abfuhr von Drehimpuls immer

schneller rotieren, so dass sie unter Umständen zerreißen, also gar nicht erst entstehen könnte. Tatsächlich existiert aber die Sonne heute und enthält 99,9% der Masse, aber nur gerade einmal 1% des Drehimpulses des gesamten Sonnensystems. Diesen offensichtlichen Widerspruch erkannten danach eine Vielzahl auch sehr bekannter Wissenschaftler und entwickelten unterschiedlichste alternative Theorien zur Entstehung unseres Sonnensystems.

Eine Gruppe von Theorien ging davon aus, dass das frühe Sonnensystem ein offenes System gewesen sein müsste, in dem die Entstehung der Sonne und der Planeten unabhängig voneinander zum Beispiel durch Kollisionen mit umgebenden Gaswolken oder anderen Sternen unter Einwirkung von Gezeitenkräften erfolgt sein könnte. Eine zweite Gruppe bevorzugte Entstehungsmodelle für ein geschlossenes System, bei dem die Geschichte der Entstehung der Planeten eng mit der der Sonne verbunden stattgefunden haben müsste. So könnten Instabilitäten in der sich ausbildenden noch jungen Sonne für den Auswurf von Materie zur Planetenbildung gesorgt haben, könnten Planeten im gemeinsamen Urnebel durch Gravitationsinstabilitäten erzeugt von der Sonne angezogen worden sein. Schließlich war es 1987 aber der australische Astronom J. R. Prentice, der das Laplace'sche Nebelmodell wiederbelebte, indem er zur Lösung des Drehimpulsproblems vorschlug, dass die junge Sonne einen Teil ihres Drehimpulse aufgrund von Reibungswiderständen zwischen Staubkörner im Urnebel in die die Sonne umlaufende Materiescheibe übertragen könnte.

### **Entwicklungen im jungen Sonnensystem**

Die Modellvorstellung, dass die Entwicklung des jungen Sonnensystems, das aus der Protosonne und einer sie umgebenden Akkretionsscheibe besteht, in der sich nachfolgend, mehr oder weniger stark verzögert, auch junge Protoplaneten ausbilden können, in einer nebelartigen Materieverdichtung innerhalb einer riesigen Molekül- und Staubwolke in einem der Spiralarme der Milchstraßengalaxie ablief, wird heute von vielen Astrophysikern und Planetenforschern als weitgehend zutreffend akzeptiert. Unter dem Einfluss von Gravitationskräften, Turbulenzen und Magnetfeldern sowie durch Schockfronten in Materieströmen, die von benachbarten jungen oder bereits weit entwickelten Sternen ausgehen, verdichtet sich hier die Gasmaterie, durch Staubpartikel angereichert, zunächst in Form filamentartig geformter Teilbereiche solcher größeren Materiewolken. Nach weiterer Aufspaltung können sich in den Zentren dieser Teilbereiche wesentlich stärker verdichtete prästellare Wolkenkerne ausbilden, die möglicherweise bereits von kleineren sogenannten Pseudo-Scheiben umgeben sind. Unter gravitativem Einfluss, gelenkt durch Magnetfelder, behindert oder gefördert durch Turbulenzen findet darin bzw. in der dieses protostellare System umgebenden Materiehülle ein verstärkter Materietransport in Richtung zum Zentralbereich des jungen Sternsystems statt. Durch ausreichend starken Materiezufuhr können sich hier ein oder mehrere Protosterne ausbilden, in deren Zentralbereichen in einem späteren Entwicklungsstadium Kernfusionsprozesse zünden und stärkere, periodische variierende Magnetfelder in Dynamoprozessen erzeugt werden.

Im Verlaufe der Entwicklung dehnt sich die Akkretionsscheibe um die Protosonne aus. Dies liegt zum einen an den nach außen wirkenden starken Zentrifugalkräften des durch stetige Materiezufuhr zu dem jungen Vorgänger der heutigen Sonne, der anfangs zunehmend schneller rotierte. Zum anderen fällt Materie aus der Wolkenhülle herab und verdichtet sich im äquatorial gelegenen Scheibenbereich unter gravitativem Einfluss verstärkt auch in größeren Abständen von der Protosonne. Durch die in der Scheibe erzeugten Turbulenzen und dadurch vermittelte Reibungsprozesse sowie durch jetartig gebündelte bzw. kegelförmig stärker aufgefächert ausströmende, vom Protostern bzw. der Scheibe ausgehende Materiewinde wird der Drehimpuls besonders effektiv aus dem protostellaren System abgeführt. Erst dies

ermöglicht die notwendige Materieakkretion im Scheibenbereich nach innen, wodurch die Protosonne im Laufe der Zeit zunächst weiter an Masse gewinnt, und sich die Protoplanetare Scheibe um sie herum in mehreren Teilschritten entwickeln kann.

Durch Agglomeration von Staubpartikeln, durch nachfolgende Ausbildung von Kieselsteinen und schließlich größeren Gesteinsbrocken können sogenannte Planetesimale entstehen, die durch Verschmelzung unter gravitativem Einfluss Planetenembryos ausbilden, die sich durch Anlagerung von Gas- und Staubmaterial schließlich zu Vorgängern der heutigen Planeten in unserem Sonnensystem entwickeln. Viele dieser unterschiedlich großen Bausteine unseres Planetensystems haben dabei im Laufe ihrer Entwicklung diverse als Migration bezeichnete Wanderungen durch dieses System gemacht. Eine zu klärende Frage, die sich den Wissenschaftlern dabei auch heute noch stellt, ist die, warum die inneren erdähnlichen Planeten in unserem Sonnensystem in Form einer relativ großen Lücke im Bereich des Asteroidengürtel räumlich so deutlich von den äußeren vergleichsweise riesigen Gas- und Eisplaneten getrennt die Sonne umkreisen?

### **Entscheidende aktuelle Entwicklungen bei der Erkenntnisgewinnung**

Drei wesentliche positive Entwicklungen haben dazu geführt, dass die Wissenschaftler in den vergangenen Jahren wesentlich genauere Vorstellungen über Entwicklungszusammenhänge im jungen Sonnensystem gewinnen konnten. Zum einen ist es den Forschern erst seit kaum mehr als 50 Jahren möglich, umfangreichere analytische Modell- und numerische Simulationsrechnungen auf zunehmend leistungsfähigeren Computern durchzuführen und die dabei erhaltenen Ergebnisse mit Beobachtungsergebnisse zu vergleichen. Zum andern können die Forscher heute mit modernsten bodengestützten oder vom Weltraum aus beobachtenden Teleskopen und Messapparaturen eine wachsende Vielfalt räumlich, zeitlich oder spektral besonders hochaufgelöster, realistischer Daten gewinnen, die sie für ihre Computerrechnungen erfolgversprechend verwenden können. Besonders große Fortschritte im Erkenntnisprozess über die Entstehung unseres Sonnensystems haben die Astrophysiker und Planetenforscher schließlich vor allem aber auch dadurch gemacht, dass sie in den letzten 40 Jahren viele extrasolare junge Sternsysteme entdeckt haben und die in deren Molekülwolken-Protostern-Scheibe-Jet-Systemen ablaufenden physikalischen Prozesse erforschen konnten. Erst die dabei gewonnen Erkenntnisse ermöglichen es ihnen heute sehr viel verlässlicher, sicherere Aussagen auch über die frühen Entwicklungen in unserem Sonnensystem machen zu können.

### **Über die Bedeutung des Einflusses magnetischer Felder**

Eine Vielzahl der größeren Himmelsobjekte in unserem Sonnensystem sind nachweislich von dynamogenierten Magnetfeldern durchsetzt. Das gilt vor allem für die Sonne, bekannterweise auch für die Erde sowie die Gas- und Eisplaneten Jupiter und Saturn bzw. Uranus und Neptun. Darüber hinaus besitzen aber auch der innerste Planet Merkur sowie der Jupitermond Ganymed ein sich selbst regenerierendes Feld. In besonders frühen Entwicklungsphasen wirksame Dynamoprozesse erzeugten sehr wahrscheinlich auch Magnetfelder im Mars, möglicherweise sogar im Erdmond oder in größeren Asteroiden. In dem von der Sonne ausgehenden magnetisierten, turbulenten Teilchenwind bilden sich schweifseitig meist besonders langgestreckte Magnetosphären aus, was aufgrund der sie umgebenden Ionosphäre sogar auch für die Venus zutrifft, obwohl sie selbst kein eigenes Magnetfeld besitzt. Ebenso wie die planetaren Magnetosphären können auch die in großer Sonnennähe im Sonnenwind magnetisch ausgerichteten, eng kollimierten Plasmaschweife der Kometen nach starken magnetischen solaren Stürmen, nach der Freisetzung hochenergetischer Energien in sogenannten Flares sowie nach Auswurf großer Materiemengen aus der Sonnenkorona bei heftigem „Weltraumwetter“

stark verformt werden. Der Einfluss magnetischer Prozesse spielt heute noch eine große Rolle im Sonnensystem und spielte sie in vielfältiger Weise auch bei dessen Entstehung.

Nachdem vor mehr als 75 Jahren ein erster magnetischer Stern mit einem im Vergleich zur Sonne wesentlich stärkeren Oberflächenfeld entdeckt und vermessen werden konnte, wissen die Astrophysiker heute, dass insbesondere viele junge Sterne von solchen auffallend starken Magnetfeldern durchsetzt sind. Überall, sowohl in den Molekül- und Staubwolken, in den Akkretionsscheiben um sonnenähnliche Protosterne sowie in den, von solchen protostellaren Systemen ausgehenden, mehr oder weniger stark kollimierten Winden kann die Existenz und Formgebung unterschiedlich starker Magnetfelder inzwischen verlässlich nachgewiesen, die jeweilige Stärke dieser Felder grob ermittelt werden. Sicherlich gehen von den jungen Sternen auch magnetisierte Sternwinde aus, und vor kurzem konnte erstmals auch die Existenz einer sich darin ausbildenden Magnetosphäre um einen Exoplaneten dokumentiert werden.

Der Vergleich der Ergebnisse besonders leistungsfähiger Modell- und Simulationsrechnungen mit immer höher aufgelösten Beobachtungs- und Messergebnissen macht sehr deutlich, dass der Einfluss magnetischer Prozesse auf die Entwicklung sonnenähnlicher protostellarer neben den Einflüssen der Gravitation und Rotation, von Turbulenzen und thermischen Prozessen sehr wohl von zentraler Bedeutung sein kann. Magnetfelder beeinflussen die Kontraktion und Fragmentation der Molekülwolken und die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der sich darin ausbildenden Protosterne mit sie umgebenden Akkretionsscheiben. Vermittelt durch sie werden darin Turbulenzen erzeugt, und von ihnen ausströmenden Stern- und Scheibenwinde werden mit Materie gefüttert und beschleunigt, gelenkt und kollimiert. Magnetfelder sorgen dabei für den effektiven Abtransport des Drehimpulses, für die notwendige Abbremsung des Protosterns sowie für die Materieakkretion, den Zustrom von Materie aus der Wolkenhülle und innerhalb der Scheibe nach innen, wodurch der Protostern zunehmend massereicher werden kann, und schließlich auch die Protoplaneten entstehen können. Magnetische Kräfte können dabei die Agglomeration, die Verdichtung der Staubpartikel, unterstützen. Sie beeinflussen die Ausbildung von Spiralstrukturen sowie die Migrationsbewegungen in den Akkretionsscheiben. Die sich darin konzentrierenden Magnetfelder dienen als Saatfelder für die in Dynamoprozesse erzeugten Magnetfelder erdähnlicher und gasförmiger Planeten. Stärkere Magnetfelder der durch junge Sternsysteme wandernde Protoplaneten können mit denen der an ihnen vorbeiziehender Planeten oder mit dem des Protosterns selbst, zumindest sporadisch, durchaus stärker interagieren.

Den Forschern stellen sich die generellen Fragen, inwieweit unser Sonnensystem hinsichtlich der Eigenschaften und Konstellation ihrer Planeten tatsächlich ein sehr typisches „normales“ Sternsystem darstellt, und ob die Planetenforscher tatsächlich verlässliche Aussagen über die Entstehung auch unseres Sonnensystems anhand ihrer vielfältigen Erkenntnisse bei der Erforschung anderer extrasolarer magnetischer Systeme gewinnen können.

### **Zum Inhalt des Vortrags**

In diesem Vortrag wird die Vielfalt möglicher Einflussfaktoren kosmischer Magnetfelder auf die Entstehung und frühe Entwicklung unseres Sonnensystems als auch anderer sonnenähnlicher Sternsysteme anhand farbenprächtiger Abbildungen, Animationen und Videosequenzen möglichst anschaulich erläutert. Nach einer kurzen Einführung sollen zunächst einmal die zentralen Ereignisse im Verlauf der Geschichte der Erkenntnisgewinnung zu diesem Themenbereich etwas ausführlicher vorgestellt werden. Im folgenden Abschnitt geht es um die große aktuelle Bedeutung magnetischer Prozesse im Innern und in der Atmosphäre der Sonne, in der sie umgebenden, vom magnetischen Sonnenwind geformten Heliosphäre sowie um die faszinierenden Prozesse in den Magnetosphären der Planeten und Monde, Asteroiden und

Kometen in unserem Sonnensystem. Danach werden die charakteristischen Eigenschaften der in Molekül- und Staubwolken protostellarer extrasolarer Systeme ablaufenden magnetischen Prozesse beschrieben, die zur Entstehung junger sonnenähnlicher Protosterne führen können. Im vierten Abschnitt wird erklärt, wie sich sogenannte Akkretionsscheiben um solche Sterne ausbilden, in denen magnetische Turbulenzen und insbesondere auch von diesen Scheiben ausgehende magnetisierte Winde für den effektiven Abtransport von Drehimpuls und damit für den Materietransport zur Vergrößerung der Sternmasse und der Ausbildung der Planeten sorgen. Im letzten Abschnitt wird der mögliche magnetische Einfluss auf die zunehmende Verdichtung sowie die Migrationsbewegung von Staubpartikeln, von gesteinsartigen Objekten und Planetesimalen sowie schließlich auf die Entstehung der magnetischen Planeten unseres Sonnensystems betrachtet.

1. **Historisches zur Erkenntnisgewinnung** über die Entstehung der Sonne und ihres Planetensystems
2. Über die Vielfalt und Bedeutung **magnetischer Felder im Sonnensystem**
3. **Entstehung sonnenähnlicher Sterne** in magnetischen Molekül- und Staubwolken
4. Magnetisch vermittelter **Drehimpuls- und Materietransport in protostellaren Scheibe-Jet-Systemen**
5. **Entstehung der Planeten** im magnetischen Sonnensystem

Nähere **Informationen über diesen Vortrag** können Sie erhalten bei

Ulrich v. Kusserow

Besselstraße 32-34

28203 Bremen

Tel.: 0421 75160

E-mail: [uvkusserow@t-online.de](mailto:uvkusserow@t-online.de)

Internet: <https://ulrich-von-kusserow.de>