

Über die Entstehung des magnetischen Sonnensystems (1)

von Ulrich von Kusserow

Seit der Antike haben Philosophen und Naturwissenschaftler, Astrophysiker und Planetenforscher eine Vielzahl unterschiedlicher Modellvorstellungen für die Entstehung unseres Sonnensystems entwickelt. Die Entdeckung und vergleichende Analyse extrasolarer Planetensysteme sonnenähnlicher Sterne, hochauflösende Abbildungen solcher extrem jungen Sternsysteme, 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 Akkretionsscheibe durch Agglomeration von zunehmend größer werdenden Materieverdichtungen aus. Neben der Gravitation, Turbulenzen, Instabilitäten und dem Drehimpulstransport in diesem rotierenden System spielten nachweislich insbesondere auch magnetische Prozesse eine zentrale Rolle.

Im ersten Teil dieser Artikelserie über die Entstehung des Sonnensystems geht es zunächst um den Aufbau unseres Planetensystems, die Entdeckung und die Gesetzmäßigkeiten der Bewegung dieser Himmelsobjekte sowie um den Nachweis der Existenz ihrer magnetischen Felder. Es werden wichtige Naturforscher und Wissenschaftler vorgestellt, die Wesentliches zur frühen Erkenntnisgewinnung über die Entstehung vor allem unseres Sonnensystems, aber auch junger sonnenähnlicher Sternsysteme beigetragen haben. Die Notwendigkeit des Transports von Drehimpuls für die Entwicklung dieser jungen Systeme erweist sich dabei von zentraler Bedeutung. (**Bild 1, 2. Umschlagseite**)

Physikalische Eigenschaften unseres Sonnensystems

Vermutlich vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstand unser Sonnensystem innerhalb eines Zeitraums von etwa 10 bis 100 Millionen Jahren in einer Molekül- und Staubwolke in einem der Spiralarme der Milchstraßen-Galaxie. Der Abstand dieses solaren Einzelsternsystems von dem uns am nächsten gelegenen extrasolaren Sternsystem Proxima Centauri beträgt dabei etwas mehr als 4,2 Lichtjahre. Auf Ellipsenbahnen umlaufen die Gesteinsplaneten Merkur, Venus, Erde und Mars, die Gasplaneten Jupiter und Saturn und die Eisplaneten Uranus und Neptun mit ihren Monden, weitere Kleinplaneten, Asteroiden sowie viele kleine Staub- und Gesteinspartikel die Sonne in einem Brennpunkt dieser Bahnen. Die heutige Sonne, ein sogenannter G-Stern mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6.000°C und einer etwa 333.000-fachen Erdmasse, bewegt sich selbst auf einer Art Rosettenbahn um den als Baryzentrum bezeichneten Schwerpunkt des Sonnensystems. ([1], [2])

Der Massenanteil aller Planeten zusammen beträgt nur etwa 0,14% der Gesamtmasse des Sonnensystems. Der gravitative Einfluss der Sonne mit ihrem Massenanteil von 99,86% ist deshalb dominierend. Aufgrund des in radialer Richtung wirkenden Gleichgewichts zwischen der zur Sonne gerichteten Gravitationskraft \vec{F}_G und der entgegengesetzt dazu nach außen gerichteten Zentrifugalkraft \vec{F}_Z bewegen sich die Planeten jeweils stabil auf sogenannten Kepler-Bahnen (**Bild 2a**). Die Geschwindigkeiten der Planeten sind dabei gemäß $v_k = \sqrt{G \cdot M/r}$ (G · Gravitationskonstante, M Masse der Sonne) umgekehrt proportional zur Wurzel aus dem Planetenabstand r von der Sonne. Ohne Einwirkung eines Drehmomentes $\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F}$ kann sich der Bahndrehimpuls $\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$ eines Planeten zeitlich nicht ändern (**Bild 2b**). Auf reinen Kepler-Orbits mit nur wirksamen Radialkräften $\vec{F}_r = f \cdot \vec{r}_0$ würde der Drehimpuls stets erhalten bleiben. Die Planeten müssen deshalb auf stabilen Bahnen umlaufen. Erst der Abtransport (bzw. die Zuführung) von Drehimpuls würde sogenannte Migrationsbewegungen planetarer Objekte, von Fels-, Eis-, Staub- oder Gaspartikeln nicht nur in unserem Sonnensystem nach innen (bzw. außen) ermöglichen. Der Eigen- und Bahndrehimpuls der Sonne beträgt heute nur etwa 0,5% des Gesamtdrehimpulses des Sonnensystems. Dessen Hauptanteil befindet sich in den Bahndrehimpulsen der Planeten.

Neben dem häufig dominierenden, weitreichenden Einfluss der Gravitationskraft spielen insbesondere auch magnetische Felder auf unterschiedlichsten Längen- und Zeitskalen eine zentrale Rolle im Zusammenhang mit Entwicklungen in unserem Sonnensystem. In der differenziell, räumlich (darüber hinaus sogar auch zeitlich) mit variabler Winkelgeschwindigkeit rotierenden, turbulent verwirbelten, elektrisch sehr gut leitfähigen Konvektionszone der Sonne werden solare Magnetfelder in Dynamoprozessen erzeugt. Aufnahmen und Filmsequenzen der Sonnenatmosphäre im UV-Licht (**Bild 3a**) veranschaulichen die

halb dominierend. Aufgrund des in radialer Richtung wirkenden Gleichgewichts zwischen der zur Sonne gerichteten Gravitationskraft \vec{F}_G und der entgegengesetzt dazu nach außen gerichteten Zentrifugalkraft \vec{F}_Z bewegen sich die Planeten jeweils stabil auf sogenannten Kepler-Bahnen (**Bild 2a**). Die Geschwindigkeiten der Planeten sind dabei gemäß $v_k = \sqrt{G \cdot M/r}$ (G · Gravitationskonstante, M Masse der Sonne) umgekehrt proportional zur Wurzel aus dem Planetenabstand r von der Sonne. Ohne Einwirkung eines Drehmomentes $\vec{D} = \vec{r} \times \vec{F}$ kann sich der Bahndrehimpuls $\vec{L} = m \cdot \vec{r} \times \vec{v}$ eines Planeten zeitlich nicht ändern (**Bild 2b**). Auf reinen Kepler-Orbits mit nur wirksamen Radialkräften $\vec{F}_r = f \cdot \vec{r}_0$ würde der Drehimpuls stets erhalten bleiben. Die Planeten müssen deshalb auf stabilen Bahnen umlaufen. Erst der Abtransport (bzw. die Zuführung) von Drehimpuls würde sogenannte Migrationsbewegungen planetarer Objekte, von Fels-, Eis-, Staub- oder Gaspartikeln nicht nur in unserem Sonnensystem nach innen (bzw. außen) ermöglichen. Der Eigen- und Bahndrehimpuls der Sonne beträgt heute nur etwa 0,5% des Gesamtdrehimpulses des Sonnensystems. Dessen Hauptanteil befindet sich in den Bahndrehimpulsen der Planeten.

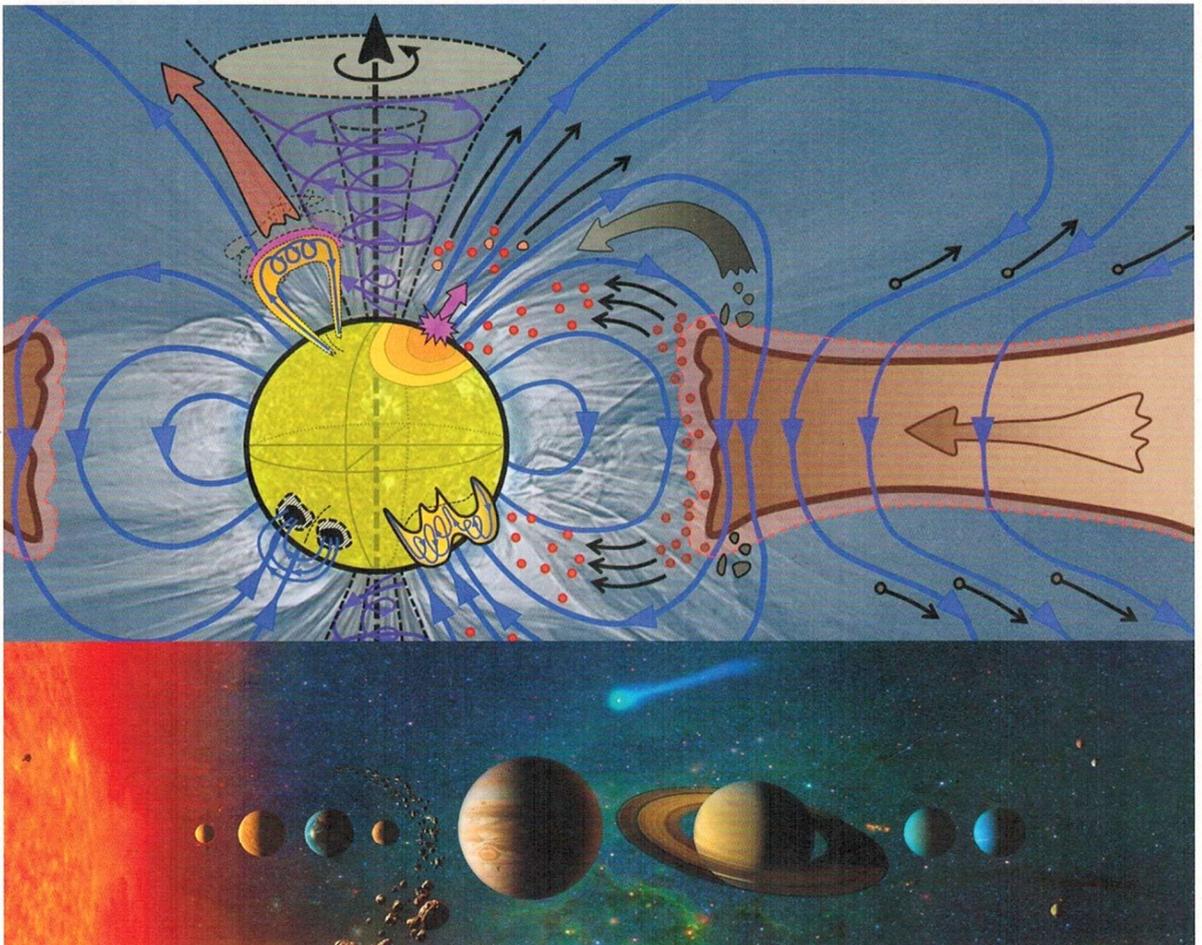
Neben dem häufig dominierenden, weitreichenden Einfluss der Gravitationskraft spielen insbesondere auch magnetische Felder auf unterschiedlichsten Längen- und Zeitskalen eine zentrale Rolle im Zusammenhang mit Entwicklungen in unserem Sonnensystem. In der differenziell, räumlich (darüber hinaus sogar auch zeitlich) mit variabler Winkelgeschwindigkeit rotierenden, turbulent verwirbelten, elektrisch sehr gut leitfähigen Konvektionszone der Sonne werden solare Magnetfelder in Dynamoprozessen erzeugt. Aufnahmen und Filmsequenzen der Sonnenatmosphäre im UV-Licht (**Bild 3a**) veranschaulichen die

Zu unserem Beitrag auf Seite 8



1 Der Ätna als Anregung zur Interpretation lunarer Ringgebirge, nach W. Hamilton [3].

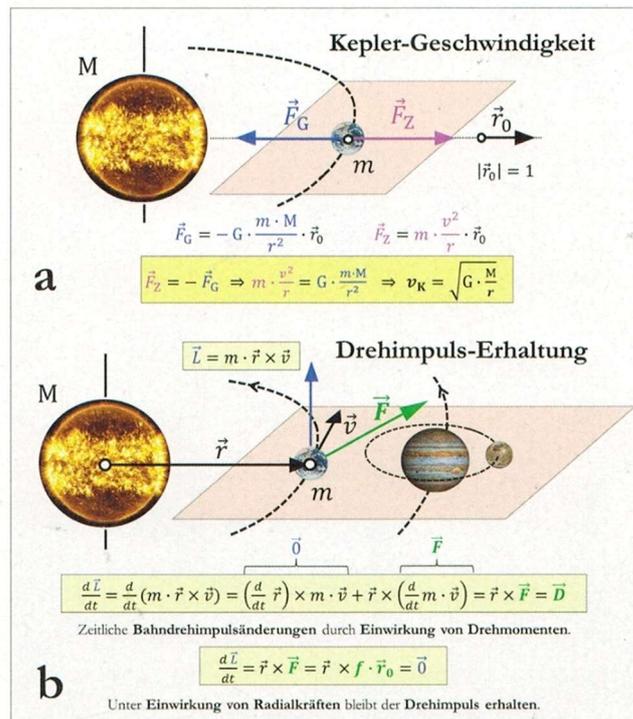
Zu unserem Beitrag auf Seite 18



1 Schematische Darstellungen des Aufbaus des Sonnensystems (unten) sowie nachgewiesener Magnetfelder und Magnetosphären der Planeten und Monde, Asteroiden und Kometen (oben). NASA; NASA/JPL, NASA/JHUAPL/Carnegie Institution of Washington, ESA/Y. Wei et al., NASA/GSFC/M. P. Hrybyk-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), U. v. Kusserow, D. Gamulin/B. Weiss (Bearbeitung: U. v. Kusserow)

Komplexität häufig sich sehr dynamisch entwickelnder topologischer Strukturen, die den Verlauf der sie gestaltenden solaren magnetischen Feldstrukturen eindrucksvoll nachzeichnen (siehe unter <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/SDO/Pm-nafe/Archive.htm>). Magnetfelder bewirken die relative Kühlung der von ihnen durchsetzten und dadurch dunkler erscheinenden Sonnenflecken in der Photosphäre der Sonne. Gegen den Einfluss der Gravitation stützen diese Felder die Einlagerung von Plasmamaterie, bestehend aus freien Ladungsträgern, in den als Protuberanzen bezeichneten solaren Gaswolken. Wenn diese instabil werden, lösen magnetische Neuverbindungs-, sogenannte Rekonnexionsprozesse, Eruptionen aus, die als Koronale Masseauswürfe bis in den Interplanetaren Raum hinausströmen können. Bei hochenergetischen Flare-Prozessen wird dabei magnetische Energie besonders effektiv in Wärme-, Strahlungs- und Bewegungsenergie umgewandelt. [3]

Die magnetische Sonne stellt eine Plasmakugel dar, in der ein hoher Ionsationsgrad für die freie Bewegung elektrisch geladener Ladungsträger sorgt. Magnetische Turbulenzen, Rekonnexionsprozesse und magnetohydrodynamische Wellen bewirken die Aufheizung der Sonnenatmosphäre, die der äußeren Sonnenkorona, dabei sogar auf Temperaturen von mehr als eine Millionen Grad. Die auf unterschiedlichen Zeitskalen periodisch oszillierende Sonnenaktivität, die Stärke der über den gesamten Spektralbereich ausgesandten elektromagnetischen Strahlung sowie die Beschleunigungsprozesse hochenergetischer Partikel werden entscheidend durch die Entwicklung solcher magnetischen Felder bestimmt. Magnetische Prozesse in der Chromosphäre oberhalb der Photosphäre, in der Millionen Grad heißen äußeren Sonnenkorona sowie der dazwischenliegenden Übergangszone, sorgen für die Aufheizung und Beschleunigung des von der Sonne stetig abströmenden Sonnenwindes, durch den Materie, aber auch Drehimpuls von der Sonne wegtransportiert wird. Während einer totalen Sonnenfinsternis lässt sich der komplexe Verlauf koronaler Magnetfeldstrukturen im Detail studieren (**Bild 3b**). Die Photonen des von der photosphärischen Sonnenoberfläche im Visuellen abgestrahlten Lichts werden dabei an geladenen Teilchen reflektiert, die auf helikalen Orbits



2 Herleitung der Kepler-Geschwindigkeit (a) und der Aussagen zur Erhaltung des Bahndrehimpulses auf Kepler-Bahnen (b). U. v. Kusserow

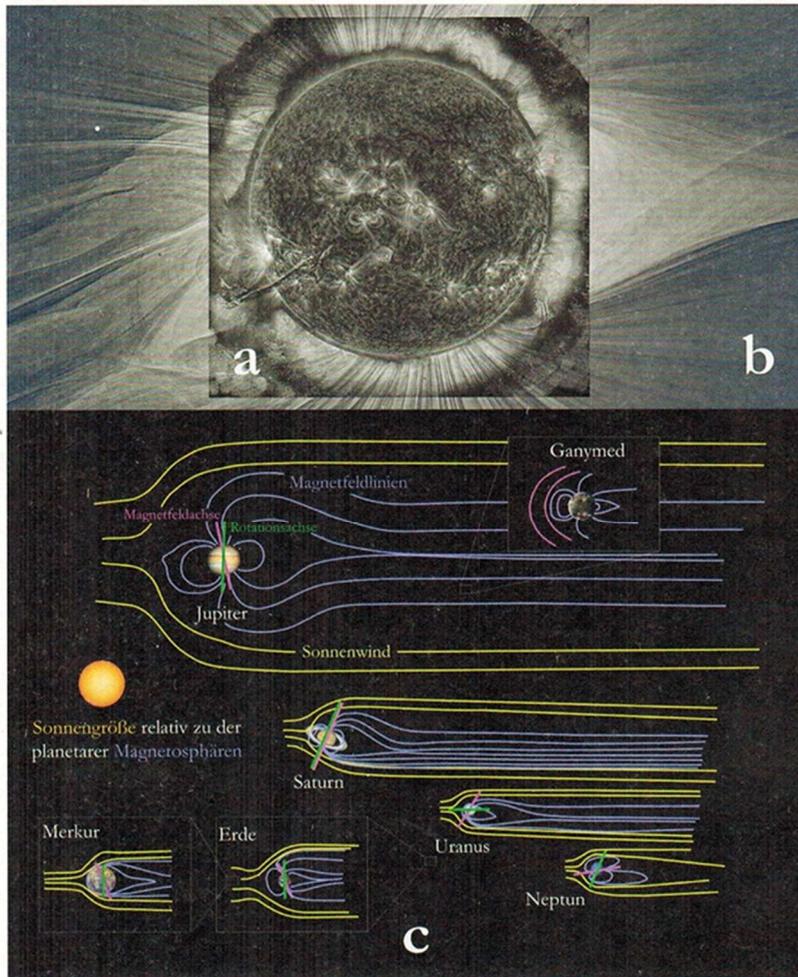
um die Flussröhren der Magnetfelder gyrieren und dadurch den Verlauf magnetischer Felder während totaler Sonnenfinsternisse besonders eindrucksvoll nachzeichnen können (siehe unter <http://www.zam.fme.vutbr.cz/~druck/Eclipse/index.htm>).

Magnetfelder existieren im Innern, in der Atmosphäre, zumindest aber in der Ionosphäre aller Planeten unseres Sonnensystems, sogar nachweislich bei einigen Monden, Asteroiden oder im Umfeld der Kometen in großer Sonnennähe (Bild 1 unten). Wie bei der Sonne werden diese Felder vor allem im metallisch fluiden Innern der Planeten Merkur, Erde, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun sowie des Jupitermondes Ganymed durch magnetische Induktionsprozesse dynamogeniert erzeugt. Die geordneten Strukturen der auf der Oberfläche des Mars entdeckten Krustenfelder lassen darauf schließen, dass Dynamoprozesse bei der Entstehung dieses Planeten auch in dessen Innerem wirksam gewesen sein könnten. Gleiches gilt möglicherweise auch für den Erdmond, vielleicht sogar auch für das in der Frühzeit des Sonnensystems fluide Innere großer Planetesimale, den Bausteinen junger Protoplaneten. Treffen der magnetisierte Sonnenwind sowie die Überreste Interplanetärer Koronaler Masseauswürfe auf solche magnetischen Feldstrukturen, so bilden sich hier charakteristische planetare Magnetosphären aus, die auf der sonnenzugewandten Seite zusammengedrückt wer-

den, auf der sonnenabgewandten Seite dagegen schweifartig besonders weit in die heliosphärische Umgebung der Sonne hinausreichen (**Bild 3c**). Die Magnetfelder im Sonnenwind falten sich außerdem sowohl um die Ionosphäre der Venus als auch um die ionisierten Atmosphären der Kometenköpfe, wodurch sich in großer Sonnennähe induzierte Magnetosphären mit ebenfalls langgestreckten Schweifstrukturen ausbilden können.

Historisches zur Erkenntnisgewinnung über den Aufbau des Sonnensystems

In der Antike verehrten die Menschen die göttliche Sonne, sie sahen den „Mann im Mond“. Des nachts bewunderten sie den prächtigen Sternenhimmel mit einer großen Vielzahl teilweise farbig blinkender stellarer Lichtpunkte. Sie verfolgten die Bahnbewegungen der Planeten Merkur, Mars, Jupiter, Saturn und des sogenannten „Abendsterns“ Venus. Regelmäßig konnten sie mehrfach im Jahr Sternschnuppenschwärme beobachten, sehr viel seltener dagegen die aufgefächerten bzw. langgestreckten Kometenschweife. Und nur in höheren geographischen Breiten bestaunten sie in der späten Herbst-, Winter- und frühen Frühlingszeit fasziniert, häufiger auch verängstigt, die farbenprächtigen und sich dynamisch entwickelnden Polarlichter.



3 Magnetfelder im Sonnensystem: Solar Dynamics Observatory UV-Aufnahme solarer Magnetfelder in der Sonnenatmosphäre (3a), Aufnahme koronaler Feldstrukturen während einer totalen Sonnenfinsternis (3b), Größenvergleich dynamogener magnetosphärischer Felder von Planeten des Sonnensystems sowie des Jupitermondes Ganymed (3c). NASA/M. Druckmüller, M. Druckmüller/P. Aniol/S. Habbal, NASA/U. v. Kusserow

Im Jahre 1543 beschrieb *Nicolaus Copernicus* (Bild 4) in seinem Hauptwerk *De revolutionibus orbium coelestium* 1543 das heliozentrische Weltbild, wonach die Erde ein Planet ist, der sich um seine eigene Achse dreht und sich wie alle anderen Planeten um die Sonne bewegt. Von 1609 bis 1619 entwickelte *Johannes Kepler* (Bild 4) die nach ihm benannten Gesetze. Danach bewegen sich die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne, die sich in einem Brennpunkt dieser Bahnen befindet. Der geradlinige Fahrstrahl zwischen den einzelnen Planeten und der Sonne überstreicht in gleichen Zeiten stets jeweils gleich große Flächen. Und die Quadrate der Umlaufzeiten verhalten sich wie die Kuben der großen Halbachsen der Planetenorbits. Schließlich war es *Isaac Newton* (Bild 4), der 1684 den mathematischen Beweis für die Gültigkeit dieser drei Keplerschen Gesetze erbrachte. In seinem Hauptwerk *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* veröffentlichte er 1687 die Grundlagen der klassischen

Mechanik sowie das universelle Gravitationsgesetz.

Johann Daniel Titius (Bild 4) stellte 1766 eine von ihm empirisch ermittelte Beziehung $d_n = 0,4 + 0,3 \cdot 2^n$ auf, mit Hilfe derer sich die Abstände (angegeben in Astronomischen Einheiten (AE)) der Planeten Merkur, Venus, Erde, Mars und Jupiter von der Sonne durch Einsetzen der Werte $n = -\infty, 0, 1, 2$ und 4 recht gut abschätzen ließen. Nach dieser 1772 von *Johann Elert Bode* (Bild 4) veröffentlichten Titius-Bode-Regel sollte sich für $n = 3$ in einem Abstand von etwa 2,8 AE von der Sonne ein weiterer Planet befinden, was allerdings nicht der Fall ist. Stattdessen fand *Giuseppe Piazzi* (Bild 4) 1801 in diesem Bereich mit Ceres einen erstmals von *Alexander von Humboldt* 1851 als Asteroiden bezeichneten Kleinkörper, von denen sehr viele im Asteroidengürtel zwischen den Planeten Mars und Jupiter umlaufen. Erste Entstehungstheorien gingen davon aus, dass hier ein Planet im Laufe

der Entwicklung zerbrochen sein könnte oder dass der so massereiche Jupiter dessen Entstehung aufgrund seiner Anziehungskraft verhindert haben könnte. 1781 bzw. 1846 entdeckten *Wilhelm Herschel* sowie *Johann Gottfried Galle* (Bild 4) zusammen mit *Heinrich Louis d'Arrest* (1822–1875) die Eisplaneten Uranus und Neptun. Erst danach war die Erkenntnis über den grundsätzlichen Aufbau unseres Sonnensystems vollständig.

Nachdem *Thomas Harriot* (1560–1621) und *Simon Marius* (1573–1624) bereits 1609 die heute als Galileischen Monde bezeichneten Jupitertrabanten Io, Europa, Ganymed und Kallisto unabhängig voneinander entdeckt und studiert hatten, war es Galileo Galilei (Bild 4), der im folgenden Jahr graphisch erstmals dokumentierte, dass sich diese Monde offensichtlich in zeitlich veränderten Konstellationen (Bild 5a) relativ zum Jupiter entlang einer Linie anordnen. Danach sprach einiges dafür, dass sie den Jupiter in einer gemeinsamen Ebene umkreisen müssten. 1797 war es *Johann Hieronymus Schroeter* (1745–1816), der einen solchen Umlauf auch für sieben der Monde des Saturns mit seiner Ringstruktur beobachtete und in einer Zeichnung festhielt (Bild 5b). Der Umlauf der Monde um die Gasplaneten könnte danach ähnliche Eigenschaften aufweisen wie der Umlauf der Planeten in der als Ekliptik bezeichneten Ebene um die Sonne.

In dem 1600 veröffentlichten ersten wissenschaftlichen Buch über den Magnetismus der Neuzeit mit dem Titel *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* ging *William Gilbert* (Bild 4) davon aus, dass die Erde als Ganzes selbst ein großer Magnet sein müsste. Im Rahmen seiner experimentellen Forschungsarbeiten baute er ein als „Terella“ bezeichnetes kleines Modell der Erde in Form eines kugelförmigen Magnetsteins. Anhand der breitenabhängigen Neigung von Magnetnadeln relativ zur Kugeloberfläche konnte er daran die bekannten erdmagnetischen Eigenschaften der Inklination, der Neigung des Erdmagnetfeldes relativ zur Erdoberfläche, veranschaulichen. Erst mehr als 300 Jahre später war es *George Ellery Hale* (Bild 4), dem 1908 der Nachweis besonders starker Magnetfelder in den dunklen Fleckengruppen auf der Sonnenoberfläche gelang. Dies konnte er mit Hilfe eines Spektrometer-basierten Magnetographen anhand der Aufspaltung magnetfeldempfindlicher

Spektrallinien aufgrund des Zeeman-Effektes zeigen. Dessen Existenz hatte *Pieter Zeeman* (1865–1943) bereits 1896 nachgewiesen. Dass nicht nur die Aktivität der Sonne und die Polarlichter auf der Erde durch magnetische Prozesse erzeugt und gesteuert werden, sondern dass diese Prozesse auch auf andere Planeten unseres Sonnensystems Einfluss nehmen, das konnte erstmals 1955 für den Jupiter gezeigt werden. Von Bord des Pioneer 10-Satelliten gelang der Nachweis der Existenz eines jovianischen Magnetfeldes indirekt durch die Registrierung von Synchrotronstrahlung im Radiobereich. Diese Strahlung wird von geladenen Teilchen ausgesandt, die Gyrationbewegungen um magnetische Feldlinien durchführen. Erste Vermessung des jovianischen Magnetfeldes gelang danach im Jahre 1973.

Eugen Newman Parker (Bild 4), der Namensgeber der 2019 gestarteten NASA-Raumsonde *Parker Solar Probe*, war einer der großen Pioniere der theoretischen Erforschung kosmischer Magnetfelder. 1955 erklärte er die Entstehung der Sonnenflecken durch den Auftrieb toroidaler (azimutal umlaufender) magnetischer Feldstrukturen durch die äußere Konvektionszone der Sonne. Er entwickelte ein einfaches, anschaulich interpretierbares Dynamomodell zur Erzeugung kosmischer Magnetfelder, bei dem aufsteigende toroidale Felder unter dem Einfluss der in rotierenden Systemen wirkenden Corioliskräfte in poloidale (polwärts orientierte) Felder zurückverwandelt werden können. 1957 entwickelte er eine erste einfache Theorie zur magnetischen Rekonnexion, einem Prozess der abrupten Strukturveränderung durch Neuverbindung magnetischer Felder, bei dem sich die Struktur eines Magnetfeldes abrupt ändert und große Energiemengen freigesetzt werden können. Diese Rekonnexionsprozesse bewirken unter anderem die Aufheizung der Sonnenkorona, die Beschleunigung des Sonnenwindes und lösen solare Eruptionen aus. Nachdem *Ludwig Franz Benedikt Biermann* (1907–1986) 1951 die Existenz kontinuierlich abströmender solarer Teilchenwinde aufgrund der Ausrichtung der Kometenschweife vorhergesagt hatte, entwickelte *Parker* 1957 eine erste hydrodynamische Theorie über die Ausströmung dieser korpuskularen Strahlung. 1959 führte er die Bezeichnung „solar wind“ ein und entwickelte eine



4 Naturforscher und Astronomen, die erste grundlegende Ideen über den Aufbau sowie die geltenden Gesetzmäßigkeiten in unserem Planetensystem entwickelten (*Kepler, Newton, Titius, Bode*), den ersten Asteroiden (*Piazzi*), die Jupitermonde (u. a. *Galilei*), die Eisplaneten Uranus und Neptun (*Herschel, Galle*) entdeckten, die erste Aussagen über die Natur des Erdmagnetfeldes (*Gilbert*) machten, erste Messungen solarer Magnetfelder (*Hale*) durchführten bzw. grundlegende Erkenntnisse über die Erzeugung kosmischer Magnetfelder in Dynamoprosessen entwickelten. Öffentliche Domäne (11), NASA/JPL (Bearbeitung: U. v. Kusserow)

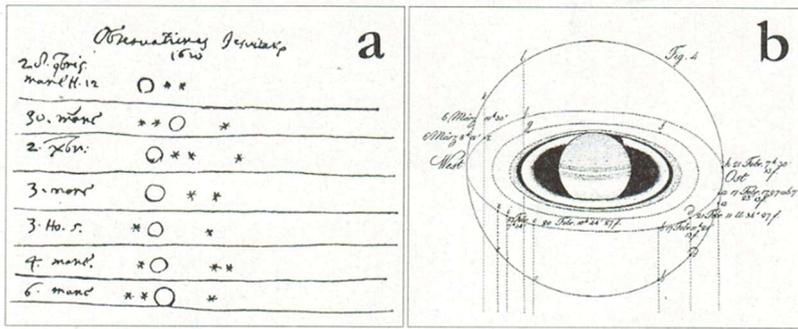
magneto-hydrodynamische Theorie zur Beschreibung dieses Sternwindes, der heliosphärischen Stromschichten sowie der nach ihm als *Parker-Spiralen* bezeichneten interplanetaren magnetischen Spiralstrukturen.

Historisches zur frühen Erkenntnisgewinnung über die Entwicklung des Sonnensystems ([4], [5], [6])

Es war der französische Philosoph und Naturwissenschaftler *René Descartes* (1596–1650), der 1630 ein erstes Modell über den möglichen Ursprung des Sonnensystems entwickelte, über das aber erst mehr als 30 Jahre später nach der copernicanischen Revolution mit der Entwicklung des heliozentrischen Weltbildes ohne Angst vor der Inquisition in Form eines Buches informiert werden konnte. *Descartes* ging davon aus, dass das Universum überall mit materiegefüllten Wirbeln durchsetzt sei, und dass die Sonne und die Planeten durch das Zusammenziehen und Auskondensieren solcher Wirbel entstanden sein könnten. 1704 wurde dabei zum ersten Mal der Begriff „Sonnensystem“ ver-

wendet. 1734 war es *Emanuel Swedenborg* (Bild 6), der bereits vor *Immanuel Kant* und *Pierre-Simon Laplace* eine erste Nebularhypothese zur Entstehung dieses Systems mit der Sonne im Zentrum und den sie umlaufenden Planeten, Monden, Asteroiden und Kometen entwickelte. Nach der Laplace-Hypothese müsste sich nach erfolgtem gravitativem Kollaps eines solaren Urnebels in dessen Zentralbereich eine zunehmend schneller rotierende Sonne ausgebildet haben. Unter Einwirkung starker Zentrifugalkräfte würde sich die verbleibende Materie dabei nach außen hin in Form einer flachen Scheibe organisieren, in der die Planeten entstehen könnten.

„Die Gestalt des Himmels der Fixsterne hat also keine andere Ursache, als eben eine dergleichen systematische Verfassung im Großen, als der planetarische Weltbau im Kleinen hat, indem alle Sonnen ein System ausmachen, dessen allgemeine Beziehungsfläche die Milchstraße ist ...“. Mit diesen Worten umriss *Immanuel Kant* (Bild 6) um 1755 die heute anerkannten Tatsachen, dass es in der Milchstraße viele Sterne gibt, und dass diese in der Regel von Planetensystemen umgeben sind. Er sah die Materie im Universum in einem Urnebel chaotisch ver-



5 Handschriftliche Aufzeichnungen der 1610 von Galileo Galilei ermittelten zeitlich veränderten Konstellationen der vier Galileischen Jupitermonde Io, Europa, Ganymed und Kallisto relativ zur Position des Jupiters (a), 1797 anhand der Beobachtung des Saturns, seiner Scheibe und von ihm umlaufenden sieben Saturnmonde von Johann Hieronymus Schroeter erstellte Zeichnung (b). G. Galilei, J. H. Schroeter/AVL Lilienthal (Bearbeitung U. v. Kusserow)

streut an, und ging davon aus, dass Anziehungs- und Zurückstoßkräfte für die Ausbildung von Ordnung in der Natur, insbesondere auch für die Entstehung der Planeten und deren stabilen Umlauf um die Sonne als Zentralstern verantwortlich sein müssten. Im Rahmen der von ihm entwickelten Nebularhypothese ging Pierre-Simon Laplace (Bild 6) 1796 davon aus, dass die Planeten im Außenbereich der von der Sonne erhitzten, diese umgebenden, von ihm als Sonnennebel bezeichneten linsenförmigen Atmosphäre entstanden sein müssten. Die in einem solchen rotierenden System wirkenden Zentrifugalkräfte, Abkühlungs- und Verdichtungsprozesse könnten für die Ausbildung und Ablösung konzentrischer Gasringe und schließlich darin auch für die Entstehung der Planeten gesorgt haben.

Nach der Laplace-Hypothese müsste sich nach dem gravitativen Kollaps im Zentralbereich des solaren Urnebels die junge Sonne als Protostern ausgebildet haben. Der Schweizer Mathematiker, Physiker und Astronom Leonhard Euler (1707–1783) hatte 1775 die Erhaltung des Drehimpulses bei fehlender Einwirkung eines Drehmomentes als ein fundamentales Prinzip in der Mechanik erkannt (Bild 2b). So konnte Laplace postulieren, dass der prästellare Sonnenkörper bei der Kontraktion der sie formenden Wolkenmaterie aufgrund der stetigen Verringerung seines Radius zunehmend schneller rotieren müsste. Zunehmend stärker werdende Zentrifugalkräfte sollten die im Außenbereich der Wolke verbleibende Materie unter Ausbildung einer flachen Scheibenstruktur nach außen treiben. Durch eine darin lokal erfolgende Verdichtung der Materie könnten sich dadurch die Planeten ausbilden. Diese Theorie fand in der Folgezeit allerdings kaum Anhänger. Da die heutige Sonne zwar 99,9% der Gesamt-

masse, aber nur gerade einmal 1% des Drehimpulses des Sonnensystems enthält, müsste sie gemäß der Laplace-Hypothese doch eigentlich im Laufe ihrer frühen Entwicklung zunehmend schneller rotieren. Ohne eine effiziente Abfuhr des Drehimpulses könnte sie unter dem Einfluss starker Zentrifugalkräfte sogar zerreißen, dadurch unter Umständen gar nicht erst entstanden sein.

Um dieses Drehimpuls-Problem zu lösen, um zu verstehen, wie der Drehimpuls innerhalb des protstellaren jungen Sonnensystems in geeigneter Weise im Lauf der Entwicklung transportiert und verteilt werden konnte, stellten recht bekannte Wissenschaftler unterschiedlichste Hypothesen auf. Nur in einem Teil der mehr oder weniger akzeptierten Modelle gingen sie davon aus, dass die Sonne und die Planeten, wie von Kant und Laplace vorgeschlagen, mehr oder weniger gleichzeitig, aber möglicherweise weitgehend unabhängig voneinander, in ein und derselben Gaswolke entstanden sein müssten. Eine Gruppe von Wissenschaftlern war dagegen überzeugt, dass die Planeten durch Auswurf aus der Sonne entstanden waren. Und eine größere Gruppe glaubte eher an Wechselwirkungsprozesse zwischen mehreren stellaren Himmelsobjekten, wodurch sich die heutige Verteilung des Drehimpulses im Sonnensystem erklären ließe. Eine Gruppe von Wissenschaftlern ging bereits davon aus, dass magnetische Prozesse dafür entscheidend verantwortlich gewesen sein müssten.

Bereits 1749 postulierte George-Louis Leclerc de Buffon (1707–1788), dass das Sonnensystem durch Zusammenstöße der Sonne mit Kometen entstanden wäre. Nachdem Henry Norris Russell (1877–1957) 1935 davon ausging, dass die Sonne in einem offenen Sternhaufen entstanden war, und sie darin häufiger Stoßprozesse mit anderen Sternen er-

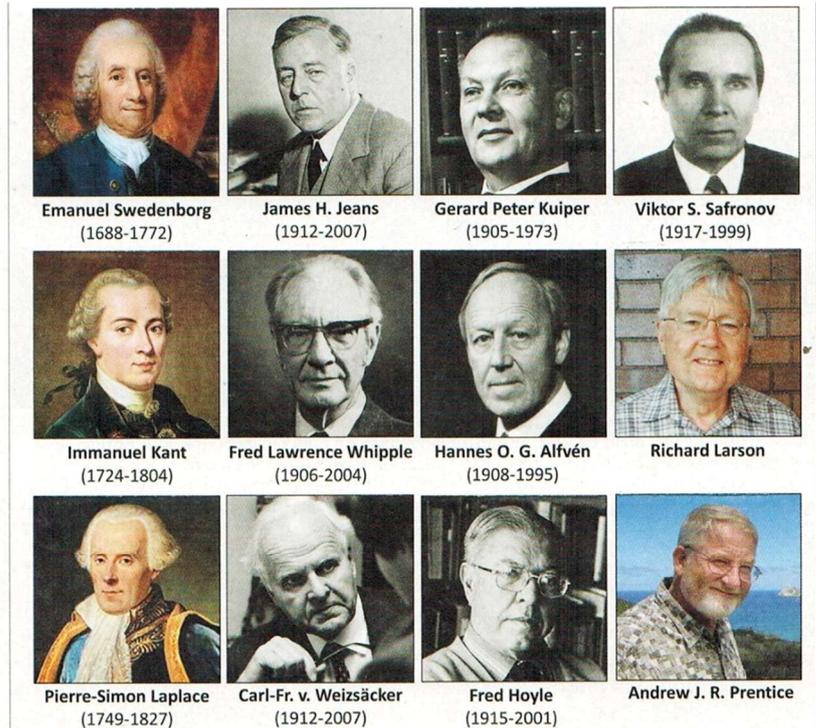
lebt haben müsste, vermutete Raymond Lyttleton (1911–1995) wenige Jahre später, dass sich dabei die Planeten gebildet haben könnten. Zunächst wäre dabei ein großer Protoplanet entstanden, der durch einsetzende Rotationsinstabilitäten unter Ausbildung eines Jupiter-Saturn-Systems zerbrochen wäre. In der zwischen diesen beiden Gasplaneten bestehenden Filamentstruktur hätten sich weitere kleinere Planeten ausformen können. In den 1944 und 1945 von Fred Hoyle (Bild 6) entwickelten Modellen würde eine Nova- bzw. Supernova-Explosion in einem Begleitstern der jungen Sonne das Material zur Ausbildung unseres Planetensystems zur Verfügung gestellt haben. Nach der „Einfang-Hypothese“ von Mark Woolfson (1927–2019) aus dem Jahre 1964 könnte das Sonnensystem durch Gezeiteninteraktionen zwischen der Sonne und einem jungen Protostern geringer Dichte entstanden sein, wonach sich die Planeten durch Kollisionen der dabei entstandenen Materieverdichtungen ausbilden würden. Bereits 1943 vermutete Otto F. Julius Schmidt (1891–1956), dass die Sonne in ihrer heutigen Form durch eine dichte interstellare Wolke gelaufen sein könnte und dabei Baumaterial zur Ausbildung der Planeten aufgesammelt hätte. Und 1948 hatte Fred Lawrence Whipple (Bild 6) ein Entwicklungsszenario entworfen, wonach die Sonne mit ihrer heutigen Masse aus einer größeren Materiewolke mit geringem Drehimpuls entstanden sein könnte. Im Laufe ihrer Entwicklung hätte sie dann eine kleinere Wolke mit großem Drehimpuls eingefangen, wobei sich die Planeten durch Verdichtung oder den Einfang weiterer Wolken hätten ausbilden können (Bild 7a). Im Rahmen der letzten beiden Modellvorstellungen ließe sich die heute im Sonnensystem bestehende Drehimpulsverteilung tatsächlich recht plausibel erklären.

1917 war es Sir James Hopwood Jeans (Bild 6), der in seiner „Beinahe-Kollision“-Hypothese davon ausging, dass sich die Planeten aus der Materie bildeten, die bei Annäherung anderer Sterne durch Gravitationswirkung aus der Sonne herausgezogen wurde. Bereits 1905 hatten Thomas C. Chamberlain (1843–1928) und Forest Ray Moulton (1872–1952) ihre „Planetesimal-Theorie“ entwickelt, bei der solche Gezeitenkräfte durch einen vorbeiziehenden Stern für die Ausströmung von Protuberanzen ähnelnden solaren Gaswolken sor-

gen könnten, die auskondensiert junge Planetesimale entstehen ließen.

Nachdem schon René Descartes 1633 davon ausgegangen war, dass sowohl die Sonne als auch die Planeten durch die Kondensation verwirbelter Materie in einer Gaswolke entstanden sein müssten, war es Carl Friedrich von Weizsäcker (Bild 6) im Jahre 1944, der dafür die Existenz geeigneter Muster turbulenzinduzierter Wirbel (Bild 7b) verantwortlich machte. Seiner Meinung nach könnten Wechselwirkungsprozesse zwischen inneren kleineren Teilwirbeln, die im Uhrzeigersinn rotieren, sowie dem Gesamtsystem, das nach seiner Modellvorstellung mit entgegengesetzter Orientierung umlaufen würde, dafür sorgen, dass sich an den Grenzflächen dieser Wirbel Turbulenzen ausbilden. Deren Verschmelzen in ringförmigen Kondensationsstreifen sollte danach die Ausbildung der Planeten bewirken, die um die Sonne im stärker verdichteten Zentrum der Molekül- und Staubwolke kreisen. 1948 modifizierte Dirk Ter Haar (1919–2002) dieses Modell, in dem er die großräumig geordneten Wirbel durch zufällige Turbulenzen ersetzte. Anstelle von Gravitationsinstabilitäten, die in Weizsäckers Modell für die Ausbildung planetarer Objekte verantwortlich zeichneten, unterstellte er stattdessen einsetzende Materieakkretion, bei der nach innen driftende und sich dort stärker auskondensierende Materie für die Ausbildung der Planeten sorgen könnten. Bedingt durch die Temperaturdifferenzen aufgrund unterschiedlicher Abstände von der jungen Protosonne konnten sich im inneren Bereich des Sonnensystems nur Planeten aus nicht-flüchtigen Bausteinen, im äußeren Bereich eher die Gas- und Eisplaneten ausbilden. Gerard Kuiper (Bild 6) glaubte bereits 1944 nicht an das Auftreten regulärer Verwirbelungen. Anders als Ter Haar ging er davon aus, dass starke gravitative Instabilitäten für die Planetenbildung im solaren Nebel verantwortlich gewesen sein könnten.

Schon 1937 war Hannes Alfvén (Bild 6) davon überzeugt, dass das ganze Universum von Plasma durchdrungen sein müsste und dass in der ionisierten Materie elektrische Ströme transportiert werden, die galaktische Magnetfelder erzeugen. 1939 schlug er eine Theorie für die Entstehung von Polarlichtern in magnetischen Stürmen innerhalb der Ionosphäre der Erde vor. 1942 postu-

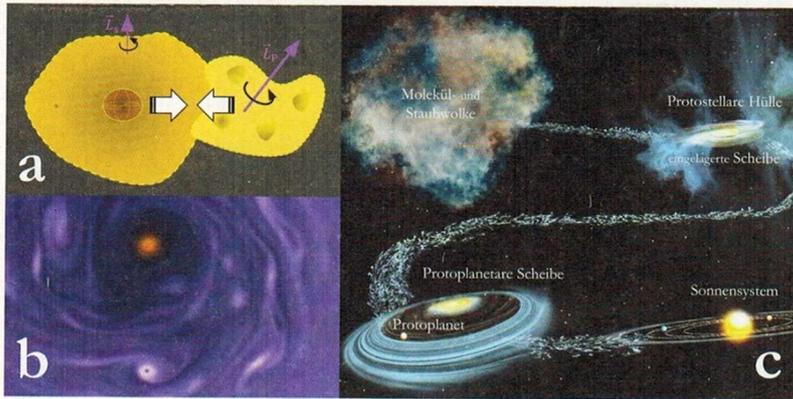


6 Naturforscher und Astronomen, die grundlegende Theorien zur Entstehung unseres Sonnensystems entwickelten. Swedenborg, Kant und Laplace legten den Grundstein für die heute weitgehend akzeptierte Nebularhypothese. Jeans und Whipple gehörten zu den Forschern, die Interaktionen der jungen Sonne mit anderen Himmelsobjekten für diese Systementstehung verantwortlich machten. V. Weizsäcker und Kuiper gingen davon aus, dass Turbulenzen bzw. Gravitationsinstabilitäten die Planetenbildung im Zusammenhang mit der Entstehung der Sonne in einer sich verdichteten Gaswolke bewirkten. Für Alfvén, Hoyle und Larson waren magnetische Prozesse vor allem auch für den notwendigen Drehimpuls transport im frühen Sonnensystem dabei mitentscheidend. Safronov und Prentice entwickelten die ursprüngliche Nebularhypothese weiter. Öffentliche Domäne (3), Huntington Digital Library, Sonoma State University, R. t Haas/Bridgeman, NASA, Welinder Jaeger Berge; Öffentliche Domäne, Slovaki.Yandex.RU, Monash University (Australia), Yale University (Bearbeitung: U. v. Kusserow)

lierte Alfvén die Existenz der nach ihm benannten magnetohydrodynamischen Wellen, die für den Transport von Drehimpuls von großer Bedeutung sein können. Und 1943 entwickelte er das nach ihm benannte Theorem zur „Eingefrorenheit magnetischer Feldlinien“, wonach elektrisch extrem gut leitfähige Materie und darin eingebettete Magnetfelder gezwungen sind, sich „gemeinsam zu bewegen“. Basierend auf seinen Ideen entwickelte Fred Hoyle (Bild 6) 1955 (bzw. 1960 mathematisch wesentlich entwickelter) sein Modell zur Entstehung des Sonnensystems, bei dem ein magnetisches Drehmoment zwischen der jungen Protosonne und der sie umgebenden Scheibe durch magnetische Kopplung den erforderlichen Transport von Drehimpuls bewirkt haben könnte. Nachdem Alfvén 1970 der Physik Nobelpreis für seine grundlegenden Arbeiten zur Magnetohydrodynamik verliehen wurde, veröffentlichte er 1976 auch seine gesammelten Ideen zum Ursprung des Sonnensystems. In dem von ihm entwickelten Bandstruktur-Modell berücksichtigte er auch elek-

tromagnetische Effekte in den Bewegungsgleichungen der Teilchen sowie beim Transport und der Verteilung des Drehimpulses, um die unterschiedlichen Zusammensetzungen der Planeten für verschiedene Abstände von der Sonne erklären zu können. [7] [8]

In seinem 1972 ins Englische übersetzten Buch *Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets* fasste Victor S. Safronov (Bild 6) seine umfangreichen, ohne größeren Computereinsatz erarbeiteten Erkenntnisse über die möglichen Akkretions- und Verdichtungsprozesse in der rotierenden Scheibe um die junge Sonne zusammen [9]. Staubteilchen kollidieren und kleben danach wie Schneeflocken aneinander, werden durch weitere Kollision mit anderen Partikeln, schließlich auch durch einsetzende Gravitationsinstabilitäten immer massereicher und bilden in komplexen Interaktionsprozessen schließlich zunehmend größer werdende planetare Objekte aus. Von 1969 an erforschte Richard B. Larson (Bild 6) die Entstehung junger Sternensysteme in fragmentierenden galaktischen



7 Einfache Modellvorstellungen zur Entstehung des Sonnensystems durch Kollisionsprozesse zweier interstellarer Wolken mit unterschiedlichen Drehimpulsen zur Bildung der Sonne im Zentrum (L_{\odot}) und des sie umlaufenden Planetensystems (L_p) (a), zur Entstehung des Planetensystems unter dem Einfluss von Turbulenzen und Gravitationsinstabilitäten (b) sowie im Rahmen der modernen Nebularhypothese, wonach sowohl die Sonne als auch die Planeten (in einer Akkretionsscheibe mit einer sie umgebenden protostellaren Hülle) gemeinsam in einer Molekül- und Staubwolke entstehen (c).
U. v. Kusserow, J. S. Wettlaufer, B. Saxton/NSF/AUI/NRAO

Molekülwolken, im Zusammenhang damit auch die frühe Entwicklung planetarischer Systeme. Neben dem Einfluss der Gravitation untersuchte er schwerpunktmäßig vor allem die Rolle turbulenter und magnetischer Prozesse. Letztere könnten danach eine wichtige Rolle während der frühen prästellaren Entwicklungsphase in der Molekülwolke sowie am Ende der Sternsystementstehung für die Materieakkretion und den Auswurf gebündelter protostellarer Winde spielen. [10]

Andrew J. R. Prentice (Bild 6) entwickelte 1978 eine moderne Laplace-Theorie, im Rahmen derer er vorschlug, dass das Drehimpulsproblem in der klassischen Theorie von Laplace dadurch gelöst werden könnte, dass der Drehimpuls durch Reibungswiderstände der Staubkörner in der die Protosonne umgebenden Scheibe abgeführt wird. Im Gegensatz zu den konventionellen Modellen, bei denen Materieakkretion zur Ausbildung planetarischer Objekte kontinuierlich durch die ganze Akkretionsscheibe erfolgen sollte, ging er in seinem Modell davon aus, dass die Protoplaneten Materiezuwachs durch Akkretion jeweils nur aus einem diskreten zirkumsolaren Gasring erfahren. Statt bereits anfangs zu einer flachen Scheibe zu kontrahieren, in der Materieakkretion stattfindet, könnte sich das Gas, unter Einfluss von Turbulenzen aufgebläht, in einer rotierenden, eher kugelförmigen Atmosphäre um den protosolaren Kern verdichtet haben. Aufgrund der Drehimpulserhaltung müsste diese, sich unter Gravitationseinfluss zusammenziehende Atmosphäre, dabei zunehmend schneller rotieren. Während Zentrifugalkräfte die Materiever-

dichtung scheibenförmig organisieren, könnte überschüssiger Drehimpuls abgeführt werden, in dem epochenartig nacheinander Gasringe im Äquatorbereich abgestoßen werden, in denen sich jeweils junge Planeten durch Materieansammlung nur aus ihrer direkten Umgebung ausbilden. [11]

Konsens besteht heute bei Astrophysikern und Planetenforschern darüber, dass unser Sonnensystem innerhalb mehrerer Millionen Jahre in einer Molekülwolke entstanden sein muss. In diesem rotierenden System bildete sich unter dem Einfluss von Gravitations-, Reibungs- und Trägheitskräften, Turbulenzen, Kernfusions-, Heizungs- und Strahlungsprozessen, magnetischen und elektrischen Feldern sowie unter Einfluss der von außen einwirkenden Kosmischen Partikelstrahlung im Zentralbereich ein junger Protostern aus, der anfangs von einer protostellaren Gas- und Staubscheibe umgeben war. Relativ früh bildete sich darin dann auch unser Planetensystem aus (Bild 7c).

Im zweiten Teil dieser Artikelserie werden die in den letzten Jahrzehnten gewonnenen neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Entstehung unseres Sonnensystems vorgestellt. Diese wurden insbesondere durch die Erforschung junger sonnenähnlicher protostellarer Systeme am Anfang ihrer Entwicklung durch den Einsatz hochauflösender Teleskope und Messinstrumente, analytischer Modellrechnungen und numerischer Simulationen mit Hilfe leistungsfähiger Computer ermöglicht. In dieser Artikelserie werden die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Entstehung unseres Sonnensystems vorgestellt. Dies wurde insbe-

sondere durch die Erforschung junger sonnenähnlicher protostellarer Systeme am Anfang ihrer Entwicklung, durch den Einsatz hochauflösender Teleskope und Messinstrumente, analytischer Modellrechnungen und numerischer Simulationen mit Hilfe leistungsfähiger Computer ermöglicht. Im zweiten Teil dieser Artikelserie wird zunächst die Entdeckungsgeschichte junger Protosterne, der in ihrem Umfeld abströmenden protostellaren Winde, der sie umgebenden Akkretionsscheiben sowie der Existenz von Exoplaneten als charakteristische Erscheinungsformen sonnenähnlicher protostellarer Systeme vorgestellt. Im Anschluss daran soll die besondere Bedeutung magnetischer Prozesse im Zusammenhang mit Drehimpulstransportprozessen bei der Entstehung besonders junger prästellarer Kerne und Akkretionsscheiben in turbulenten magnetischen Molekül- und Staubwolken detaillierter erklärt werden.

Literatur

- [1] Edinger, S.: Der Aufbau unseres Sonnensystems https://lehrerfortbildung-bw.de/u_matnatech/astronomie/gym/bp2016/fb1/5_praes/1_us/06_aufbau/06_us_ppt_unser_sonnensystem.pdf
- [2] DLR: Unser Sonnensystem. Lehrermaterialien und Mitmach-Experimente. 2018 https://www.dlr.de/next/Portaldata/69/Resources/downloads/UnserSonnensystem_04.pdf
- [3] Kusserow, U. v.; Marsch, E.: Magnetisches Sonnensystem – Solare Eruptionen, Sonnenwinde und Welt- raumwetter. Springer-Verlag GmbH Deutschland. 2022 <https://ulrich-von-kusserow.de/index.php/buecher>
- [4] Wikipedia. History of Solar System formation and evolution hypotheses. https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_Solar_System_formation_and_evolution_hypotheses#:~:text=The%20most%20widely%20accepted%20model,cloud%20spanning%20several%20light%20years.
- [5] Woolfson, M. M.: The Origin and Evolution of the Solar System. The Graduate Series in Astronomy, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia. 2000 http://www.physics.gov.au/book_O/Woolfson.pdf
- [6] Woolfson, M.: The Formation of The Solar System - Theories Old and New. Imperial College Press, London. 2015
- [7] Alfvén, H.: Origin of the Solar System. APL Technical Digest. 1975 <https://secwww.jhuapl.edu/techdigest/content/techdigest/pdf/APL-V15-N01/APL-15-01-Alfvén.pdf>
- [8] Alfvén, H.; Arrhenius G.: Evolution of the Solar System. University Press of the Pacific. Honolulu, Hawaii. 2005 <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19770006016/downloads/19770006016.pdf>
- [9] Safronov, V.: Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets. NASA. 1972 https://ia800306.us.archive.org/10/items/nasa_techdoc_19720019068/19720019068.pdf
- [10] Larson, R. B.: The physics of star formation. arXiv:astro-ph/0306595. 2003. <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0306595.pdf>
- [11] Prentice Origin of the Solar System. The Moon and the Planets 19 (1978) 341–398. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland. 1978 https://www.academia.edu/105379499/O_R_I_G_I_N_OF_T_H_E_S_O_L_A_R_S_Y_S_T_E_M