

Betrachtungen zum Aufbau und zur Entstehung des Planetensystems

Eugen Willerding

Argelander Institut für Astronomie,
Universität Bonn, Auf dem Hügel 71, 53121 Bonn
Email: willerd@astro.uni-bonn.de

9. Januar 2007

1 Einleitung

Es gibt reichlich Intelligenz in der Welt, aber der Mut, Dinge anders zu machen, findet sich selten.

Marilyn vos Savant

Das Problem der Entstehung und Entwicklung unseres Sonnensystems gehört auch nach fast 400 Jahren, nachdem der Mensch zum erstenmal ein Teleskop gegen den Himmel gerichtet hat, zu den ungelösten Fragen der heutigen Naturwissenschaft. Grüblerische Geister wurden immer wieder von diesem kosmogonischen Rätsel angezogen, weil doch eine Lösung ihm wertvolle Hilfe bei seinen Bemühungen um eine Antwort auf die wichtige Frage nach der Häufigkeit von anderen Planeten im Universum versprach. Verdanken wir die Existenz unseres Sonnensystems und damit auch unsere eigene Existenz einem *Zufall* oder sind Planetensysteme und komplexe biologische Organismen einfach kosmologische *Notwendigkeiten*? Sind andere Planetensysteme genauso aufgebaut wie unser eigenes Sonnensystem oder ist es in seiner Art sehr selten im Universum anzutreffen. Und schließlich die Frage: „Sind wir allein im Universum?“

Naiv könnte man glauben, dass das Problem der Struktur und Entstehung des Planetensystems durch die Newtonsche Mechanik gelöst sei. Diese Mechanik sagt uns ja genau, wie sich einzelne oder mehrere Planeten um die Sonne bewegen und unter welchen Bedingungen ihre Bahnen für lange Zeiten stabil bleiben können. Doch diese Himmelsmechanik – die uns zwar erklären kann, warum sich in jungen Sternhaufen relativ häufig Doppelsterne durch gravitative Dreierstöße bilden – kann uns nichts darüber sagen, warum alle Planeten in unserem Sonnensystem sich nahezu in einer Ebene im gleichen Sinn um die

Sonne bewegen oder weshalb es nur wenige Großplaneten und nicht sehr viele Kleinplaneten in Kreisbahnen gibt. Das Problem wird nicht einfacher, wenn wir die Fakten von den neuentdeckten extrasolaren Planeten hinzunehmen. Hier bewegen sich – völlig unerwartet – gasförmige Riesenplaneten auf exzentrischen Bahnen – auch dann, wenn mehrere Planeten im System existieren.

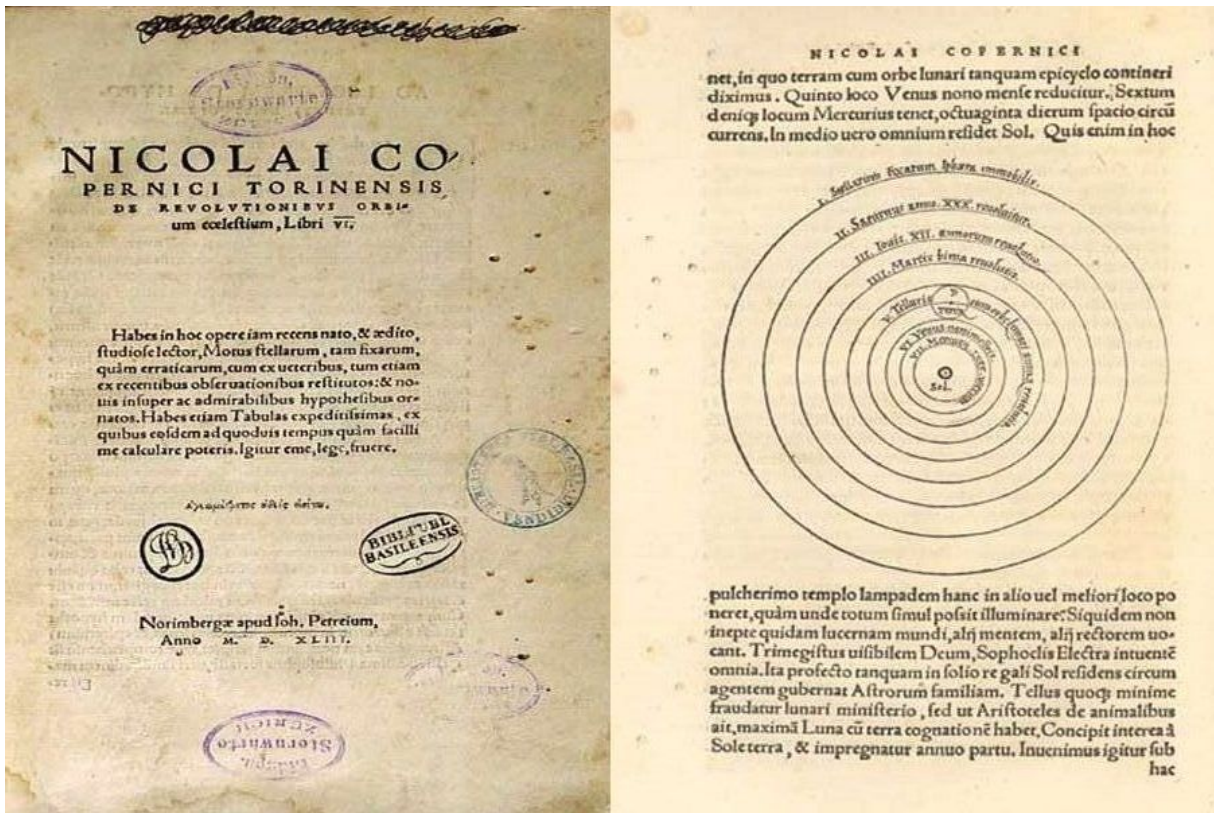
Dem denkenden Betrachter können folgende Fragen zu unserem und anderen Planetensystemen kommen:

- Warum gibt es nur wenige Großplaneten?
- Warum sind die Räume zwischen den Planeten so leer?
- Warum sind die Planetenbahnen im Sonnensystem so kreisförmig, aber viele Bahnen in extrasolaren Systemen so exzentrisch?
- Woher kommen die Kometen?
- Wurde der gegenwärtige Zustand des Systems schon in den ersten Millionen Jahren nach der Entstehung festgelegt?
- Welche Formen können extrasolare Planetensysteme überhaupt annehmen?
- Wie verhalten sich solche dynamischen Systeme über sehr lange Zeitperioden?
- Was ist das Schicksal des Erde-Mond Systems?
- Was ist entstehungsbedingt, was ist entwicklungsbedingt?
- Welche Bedeutung haben die Chondritischen Meteorite für die Planetenentstehung?

Auf alle diese Fragen gibt es bis heute keine endgültigen Antworten. Um Planetensysteme oder andere astrophysikalische Objekte in ihrer Struktur erklären zu können, bedarf es einer neuen Idee, die mit einer klassischen physikalischen Theorie nicht unmittelbar etwas zu tun hat: die Idee der Evolution, der *Geschichte unseres Universums*, der Kosmologie und Kosmogonie. Die Situation ist ähnlich wie zwischen der Chemie und der Physik (Quantenphysik). Die Entstehung der chemischen Elemente läßt sich nicht allein mir reiner Physik verstehen; wir brauchen auch hier die Geschichte des Universums, weil auch die schweren Elemente Ergebnis einer komplizierten kosmologischen Evolution sind. Ein ähnliches Problem haben die Physiker, wenn sie erklären sollen, warum im Universum die Materie gegenüber der Antimaterie überwiegt. Auch dies ist ein Problem kosmologischer Evolution zu sein. Das Verständnis der Entwicklung des Universums impliziert also das Verständnis der Elementarteilchenphysik bei sehr großen Energien oder sehr kleinen Abständen. Wir leben, wie es der Philosoph *Karl Popper* ([18]) einmal ausdrückte, in einer Welt der emergenten¹ Evolution, in einer Welt von Problemen, deren

¹Emergenz (lat.): Begriff der neueren Philosophie, wonach höhere Seinsstufen durch neu auftauchende Qualitäten aus niederen entstehen

Lösungen, sofern sie gelingen, neue und tiefere Probleme erzeugen. Wir leben demnach in einem Universum sich entwickelnder Neuheiten – von Neuheiten, die in der Regel auf keine der vorangehenden Zustände vollständig reduzierbar sind. Häufig wird hier eine



1: Kurz vor dem Tod seines Autors Nikolaus Kopernikus (1473-1543) erschien in Nürnberg das Werk „De Revolutionibus Orbium Coelestium“. Der Herausgeber Osiander hatte ein eigenes mißverständliches Vorwort hinzugefügt und den Titel erweitert.

Analogie zwischen kosmologischer Evolution und biologischer Evolution gezogen. Nicht das „Sein“ ist das eigentlich faszinierende in den Naturwissenschaften, sondern das „Werden“ und „Vergehen“. Dazu lesen wir bei Humboldt[8]: *Die genetische Entwicklung, die perpetuierliche Fortbildung, in welcher dieser Teil der Himmelsräume begriffen scheint, hat denkende Beobachter auf die Analogie organischer Erscheinungen geleitet. Wie wir in unseren Wäldern dieselbe Baumart gleichzeitig in allen Stufen des Wachstums sehen und aus diesem Anblick, aus dieser Koexistenz den Eindruck fortschreitender Lebensentwicklung schöpfen, so erkennen wir auch in dem großen Weltgarten die verschiedensten Stadien allmählicher Sternbildung. Der Prozeß der Verdichtung, den Anaximenes und die ganze ionische Schule lehrten, scheint hier gleichsam unter unseren Augen vorzugehen. Dieser Gegenstand des Forschens und Ahnens ist vorzugsweise anziehend für die Einbildungskraft. Was in den Kreisen des Lebens und aller inneren treibenden Kräfte des Weltalls so unaussprechlich fesselt, ist minder noch die Erkenntnis des Seins als die des Werdens; sei dies Werden auch nur (denn vom eigentlichen Schaffen als einer Tat-*

handlung, vom Entstehen, als “Anfang des Seins nach dem Nichtsein”, haben wir weder Begriff noch Erfahrung) ein neuer Zustand des schon materiell Vorhandenen.

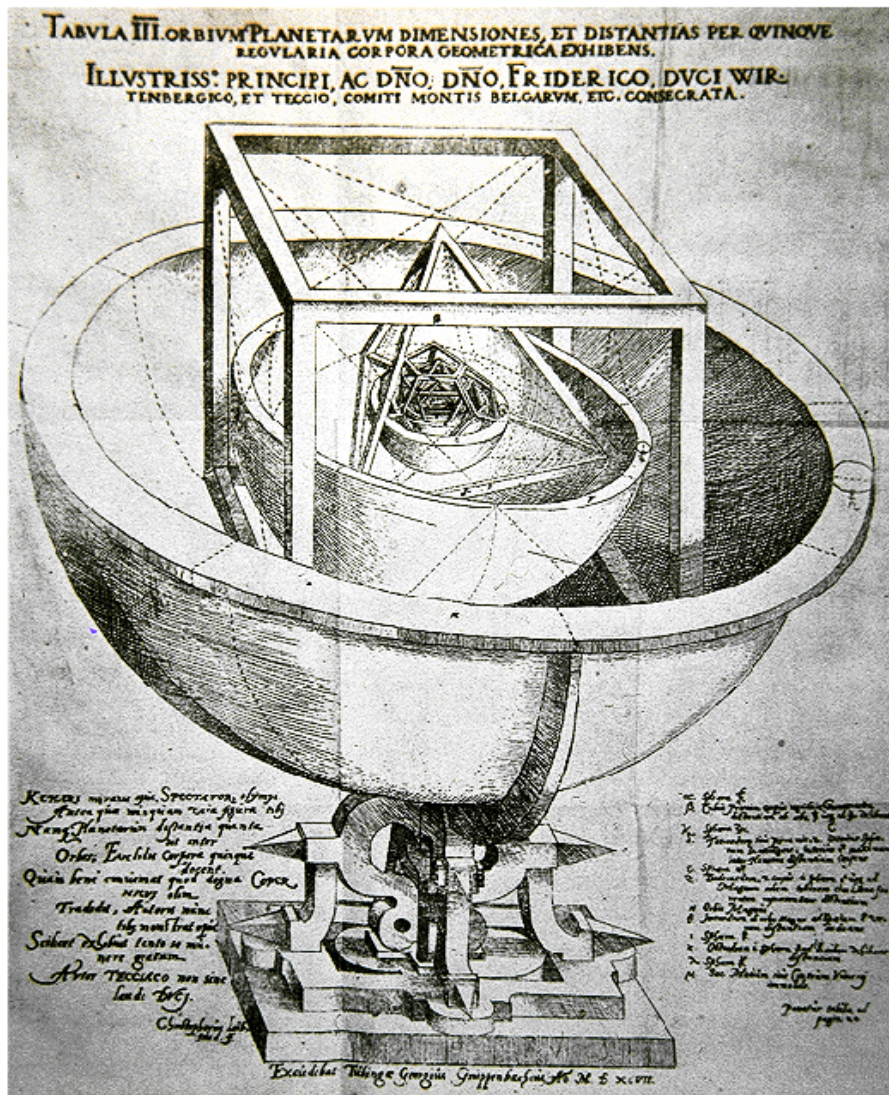
Will man in der Wissenschaft eine *hypothetische Wirklichkeit* für eine sinnliche Erscheinung konstruieren, so muß man letztendlich zu unterschiedlichen Lösungsversuchen schreiten. Diese sind nichts anderes als Hypothesen, Modelle oder Theorien. Im letzten kritischen Schritt müssen dann diese theoretischen Vorstellungen mit den Beobachtungen konfrontiert werden. Gibt es keine Übereinstimmungen, muß in den meisten Fällen die Hypothese als Irrtum verworfen werden und, wenn möglich, eine neue Idee gefunden werden. In der Wissenschaftsgeschichte kann man sich immer wieder die Frage stellen, wodurch es einzelnen ermöglicht wird, Entdeckungen zu machen oder Ideen zu entwickeln, die anderen entgangen waren? Aus welchem Grund werden herkömmliche Ideen abgelehnt und neue Erklärungen vorgeschlagen? Woher kommen die Inspirationen, um mit einem neuen Ansatz an das Problem heranzugehen?

Für das Problem der Entstehung unseres Sonnensystems hat sich nun die empirische Situation in den letzten Jahren grundlegend geändert: durch die Entdeckung extrasolarer Planetensysteme könnte es zukünftig möglich sein, einige der in der Vergangenheit diskutierten Modelle auszuschließen und mit Hilfe der Mineralogie, Kosmochemie und Planetologie (Raumsonden) neue und vielleicht der Wahrheit näher liegende Modelle zu konzipieren. ([1], [2], [3]).

2 Kepler's Metaphysik

Im Jahre 1543 wurde in Nürnberg ein epochales Buch veröffentlicht: „De Revolutionibus Orbium Coelestium“. Autor dieses gewagten Werkes war Nikolaus Kopernikus, der als Domherr im Dienste der Kirche stand². Nach etwa 2000 Jahren wurde wieder offen niedergeschrieben, dass nicht die Erde, sondern die Sonne im Mittelpunkt des Planetensystems steht. Das neue Modell hatte zunächst nur wenige außeruniversitäre Anhänger, unter ihnen aber Galilei und Kepler. Und Johannes Kepler gelang es 1619, die Kreisbahnen und Epizykel des Kopernicus durch einfachere Ellipsenbahnen zu ersetzen. Er hat damit eine sehr gute geometrische Approximation an die wahren Bahnen der Planeten um die Sonne gefunden. Doch Kepler wollte mehr. Er hatte schon 1595 in seinem Jugend-Werk, dem “Weltengeheimnis“ (Abb. 2), sehr gewagte spekulative Gedanken über die Struktur des Sonnensystems geäußert. Erfüllt von dem Gedanken einer das Welt-System durchwaltenden Ordnung und Harmonie glaubte Kepler die genaue *Anzahl* und die genaue *Anordnung* der Planeten aus einem rein mathematisch-geometrischen Prinzip ableiten zu können. Er war davon überzeugt, daß nur ein “Gott“ die Urbilder für die Erschaffung der Welt geliefert haben konnte. Wie alle echten Wissenschaftler

²Im Jahre 1611 setzte der Papst das Werk auf den Index der verbotenen Bücher. Erst im Jahre 1835 wurde es von der katholischen Kirche wieder freigegeben. Martin Luther, der angeblich bei einer Tischrede über Kopernikus sagte: „*Der Narr will mir die ganze Kunst der Astronomia umkehren, aber wie die Heilige Schrift anzeigt, so hieß Josua die Sonne still stehen und nicht das Erdreich!*“, veröffentlichte im gleichen Jahr 1543 sein extrem menschenverachtendes Machwerk: „*Von den Juden und ihren Lügen*“.



2: Das *Mysterium Cosmographicum* (Das Weltengeheimnis) des Johannes Kepler aus dem Jahre 1597. Der junge Kepler wollte nicht nur die Distanzen der Planeten erklären, sondern auch ihre genaue Anzahl – also ihre metaphysischen Existenznotwendigkeiten.

und Wahrheitssucher suchte Kepler die *hypothetische Wirklichkeit* hinter den *Erscheinungen*³. Er glaubte, dass die Welt von Wohlklang erfüllt ist, dass sie von Harmonie und Resonanz geleitet und zusammengehalten wird, aber auch von Dissonanz und deren Auflösung. Die Natur ist eine "göttliche" Symphonie; eine Architektonik von göttlicher, von himmlischer Schönheit. Kepler war ein unerbitterlicher Wahrheitssucher: Die Wahrheit muß schön sein, sie muß eine Wirklichkeit von kosmischer Schönheit enthüllen.

Seine im *Weltengeheimnis* geäußerten gewagten Hypothesen bezüglich Anzahl der

³nach einem Artikel von Sir Karl Raimund Popper: Wissenschaftstheoretiker, Gesellschaftstheoretiker, Philosoph, kritischer Rationalist, Humanist und Aufklärer

Planeten fanden ebenso begeisterte Zustimmung wie entschiedene Ablehnung. Tycho Brahe war der Meinung, dass die Astronomie mehr durch praktische Beobachtung als durch Spekulationen gefördert würde. Leider blieben ja auch Keplers Analogien mit den 5 regulären Körpern der Geometrie (Oktaeder, Ikosaeder, Dodekaeder, Tetraeder, Kubus) nur ein schöner Traum, denn 1781 wurde der Planet Uranus und 1846 der Planet Neptun entdeckt; also zusätzliche Gasriesen, welche Keplers Jugendtraum *falsifizierten*.

Heutzutage stellt sich natürlich die Frage, ob im Lichte der heute denkbaren Evolutionstheorien über Planetensysteme die Keplerschen Spekulationen über Anzahl und Anordnung der Planeten und ihrer Bahnexzentrizitäten überhaupt noch einen Sinn machen. Ist nicht insbesondere die Frage nach der möglichen Anzahl von Planeten oder deren Abstände von der Sonne völlig absurd? Haben sich die Abstände nicht mit den Jahrmilliarden verändert, so daß aus den heutigen Beobachtungen nicht mehr auf die ursprüngliche Struktur geschlossen werden kann? Und ist die Anzahl der Planeten nicht reiner Zufall, hat sich vielleicht im Laufe von Milliarden Jahren geändert und ist somit ohne jede physikalische Bedeutung? Und wie ist überhaupt die genaue Definition eines Planeten? Können wir Pluto mit seinem Begleiter Charon wirklich noch als einen Planeten bezeichnen oder ist dieses Paar einfach nur ein *Kuiper Gürtel* Objekt im äußeren Sonnensystem⁴. Die genaue Definition, was ein Planet ist, hängt nicht nur von seiner Umgebung, sondern letztendlich auch von seinem Entstehungsprozess ab. Bilden sich Planeten spontan selbst-regulativ in einem Staub-Gasmedium oder benötigen sie einen wie immer gearteten Anregungsprozeß zu ihrer Entstehung? Was ist im System *entstehungsbedingt*, was ist *entwicklungsbedingt*? Welche statistischen Aussagen kann man über ein *typisches* Planetensystem im Universum machen?

Letzendlich haben wir es hier mit dem Problem unserer Beziehungen zur Natur zu tun. Können wir mit einer reinen doch immer eng begrenzten empiristischen Auffassung die Natur erkennen? In welcher Wechselwirkung stehen unsere Sinneswahrnehmungen mit den abstrakten intuitiven Begriffen und Modellvorstellungen? Es soll hier noch ein kleiner Kommentar von Wolfgang Pauli eingefügt werden, der im Gespräch mit dem Tiefenpsychologen Carl Gustav Jung diese Problematik allgemeiner beleuchtet hat:⁵ *Im Gegensatz zur reinen empiristischen Auffassung, wonach die Naturgesetze aus dem Erfahrungsmaterial allein praktisch mit Sicherheit entnommen werden können, ist von vielen Physikern neuerdings die Rolle der Richtung der Aufmerksamkeit und der Intuition bei den im allgemeinen über die bloße Erfahrung weit hinausgehenden, zur Aufstellung eines Systems von Naturgesetzen (d.h. einer wissenschaftlichen Theorie) nötigen Begriffen und Ideen betont worden. Vom Standpunkt dieser nicht rein empiristischen Auffassung, der auch wir uns anschließen, entsteht nun die Frage, welches denn die Brücke sei, die zwischen den Sinneswahrnehmungen auf der einen Seite und den Begriffen auf der anderen Seite überhaupt eine Verbindung herstelle. Alle folgerichtigen Denker kamen zum Resultat, daß die reine Logik grundsätzlich nicht im Stande sei, eine solche Verbindung zu konstruieren. Es scheint am meisten befriedigend, an dieser Stelle das Postulat einer*

⁴2006 wurde auf der IAU Konferenz in Prag beschlossen, dass es nur noch 8 klassische Planeten im Sonnensystem gibt. Pluto wird nun als Zwergplanet eingeordnet.

⁵W. Pauli: *Der Einfluß archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler*. in *Natureklärung und Psyche*. Studien aus dem C.G. Jung-Institut Zürich 1952

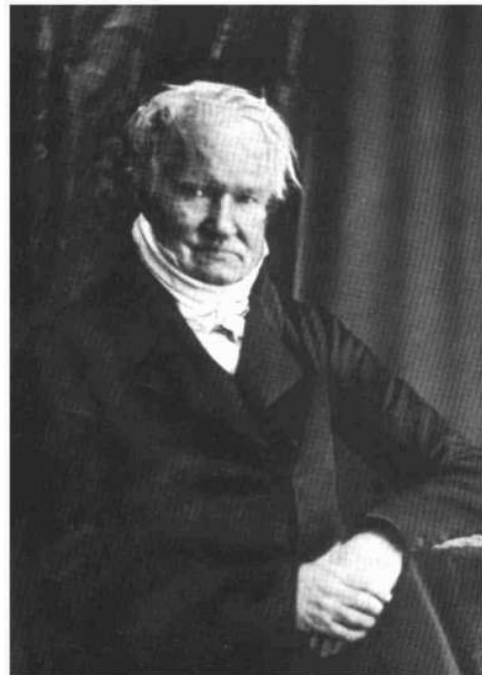
unserer Willkür entzogenen Ordnung des Kosmos einzuführen, die von der Welt der Erscheinungen verschieden ist. Ob man vom Teilhaben der Naturdinge an den Ideen oder von einem Verhalten der metaphysischen, d.h. an sich realen Dingen spricht, die Beziehung zwischen Sinneswahrnehmung und Idee bleibt eine Folge der Tatsache, daß sowohl die Seele des Erkennenden als auch das in der Wahrnehmung Erkannte einer objektiv gedachten Ordnung unterworfen sind.

Jede Teilkenntnis dieser Ordnung in der Natur führt zu einer Formulierung von Aussagen, welche einerseits die Phänomene betreffen, andererseits über diese hinausgehen, indem sie allgemeine logische Begriffe idealisierend verwenden. Der Vorgang des Verstehens der Natur sowie auch die Beglückung, die der Mensch beim Verstehen, d.h. beim Bewußtwerden einer neuen Erkenntnis empfindet, scheint demnach auf einer Entsprechung, einem Zur-Deckung-Kommen von präexistenten inneren Bildern der menschlichen Psyche mit äußeren Objekten und ihrem Verhalten zu beruhen.

3 Die Titius-Bodesche Regel

Aus historischer Sicht spielte ein empirisches Faktum im Sonnensystem eine ganz besondere Rolle: Die sogenannte Titius-Bodesche Regel der Planetenabstände. Gerade bei dieser Regel zeigt sich die Problematik zwischen empirischen Fakten und deren Interpretation. Auch Alexander von Humboldt bemerkte genau dieses 1845 in seinem Buch *Kosmos* ([8]):

Die Welt der Gestaltungen wird in dieser Aufzählung räumlicher Verhältnisse geschildert als etwas tatsächliches, als ein Daseiendes in der Natur, nicht als Gegenstand intellektueller Anschauung, innerer, ursächlich ergründeter Verkettungen. Das Planetensystem in seinen Verhältnissen von absoluter Größe und relativer Achsenstellung, von Dichtigkeit, Rotationszeit und verschiedenen Graden der Exzentrizität der Bahnen hat für uns nicht mehr Naturnotwendiges, als das Maß der Verteilung von Wasser und Land auf unserem Erdkörper, als der Umriß der Kontinente oder die Höhe der Bergketten. Kein allgemeines Gesetz ist in dieser Hinsicht in den Himmelsräumen oder in den Unebenheiten der Erdrinde aufzufinden. Es sind Tatsachen der Natur, hervorgegangen aus dem Konflikt vielfacher, einst unter unbekanntem Bedingungen wirkender Kräfte. Zufällig aber erscheint dem Menschen in der Planetenbildung, was er nicht genetisch zu erklären vermag. Haben sich die Planeten aus einzelnen um die Sonne kreisenden Ringen dunstförmig



3: Alexander von Humboldt (1847)

ger Stoffe gebildet, so können die verschiedene Dicke, die ungleichförmige Dichtigkeit, die Temperatur und die elektromagnetische Spannung dieser Ringe zu den verschiedensten Gestaltungen der geballten Materie, wie das Maß der Wurfgeschwindigkeit und kleine Abänderungen in der Richtung des Wurfs zu den mannigfaltigsten Formen und Neigungen der elliptischen Bahnen Anlaß gegeben haben. Massenanziehung und Gravitationskräfte haben gewiß hier, wie in den geognostischen Verhältnissen der Kontinentalerhebungen, gewirkt; aber aus der gegenwärtigen Form der Dinge ist nicht auf die ganze Reihe der Zustände zu schließen, welche sie bis zu ihrer Entstehung durchlaufen haben. Selbst das sogenannte Gesetz der Abstände der Planeten von der Sonne, die Progression, aus deren fehlendem Gliede schon Kepler die Existenz eines die Lücke ausfüllenden Planeten zwischen Mars und Jupiter ahnte, ist als numerisch ungenau für die Distanzen zwischen Merkur, Venus und Erde, und, wegen des supponierten ersten Gliedes, als gegen die Begriffe einer Reihe streitend befunden worden. Humboldt äußert hier die kritische Ansicht, daß die genäherte geometrische Progression der großen Bahnhalbachsen der Planeten, die sogenannte *Titius - Bodesche Regel* der Planetendistanzen, als ein zufälliges Ergebnis von vielen konkurrierenden Prozeßabläufen anzusehen ist, welches nicht näher quantitativ erklärt werden kann. Er könnte zu dieser Ansicht in Gesprächen mit Laplace oder auch Gauss gekommen sein. Die Laplacesche Kosmogonie, welche unter anderem behauptete, dass sich Planeten aus expandierenden Ringen gebildet haben, war ja keine physikalische Theorie, welche *quantitative* Voraussagen machen konnte. Ja, es war noch nicht einmal im Rahmen dieser Modellvorstellung möglich, die genäherte geometrische Progression der Planetendistanzen mit Faktor 2 in irgendeiner Form wahrscheinlich zu machen. Da diese Abstandsregel zu den umstrittensten Fakten im Sonnensystem gehört, soll auf den historischen Hintergrund hier etwas näher eingegangen werden .

Setzt man die Distanz der Erde zur Sonne gleich 10, so lautet die Zahlenregel für die Planetendistanzen

$$r(n) = 4 + 3 \times 2^n, \quad \text{mit} \quad \{n = -\infty, 0, 1, 2, 4, 5\},$$

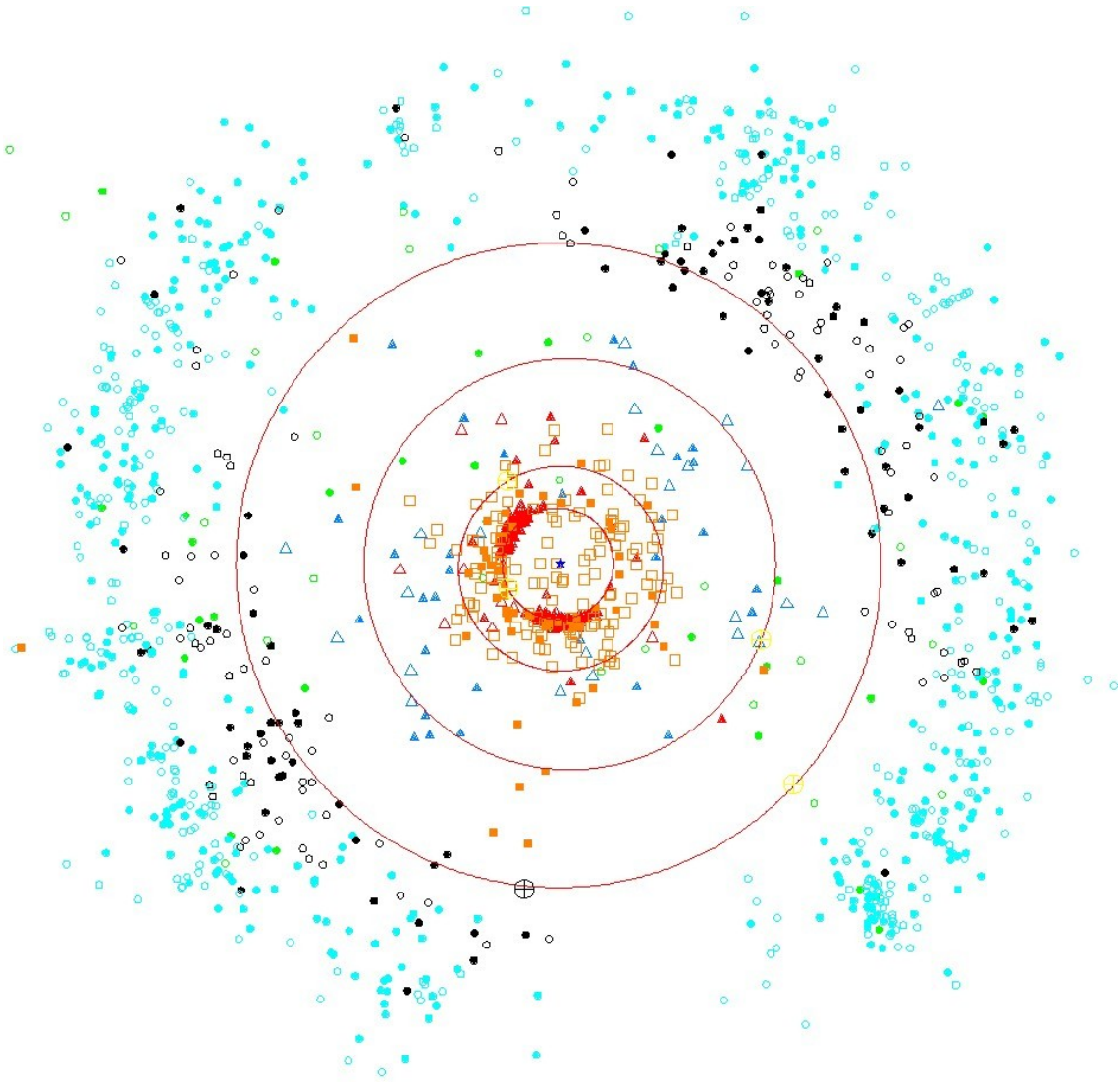
wobei sich der Reihe nach die Distanzen von Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter und Saturn ergeben. Alternativ kann die Reihe auch als Rekursion in der Form

$$r(n + 1) = 2r(n) - 4, \quad \text{mit} \quad \{r(-\infty) = 4, r(0) = 7\},$$

formuliert werden. Die Zahl 4 stellt dabei das von Humboldt erwähnte und kritisierte "supponierte erste Glied" dar. Entdeckt oder besser *erfunden* hat diese Zahlenreihe 1766 der Wittenberger Naturforscher Johann Daniel Titius⁶. Eigentlich bekannt wurde die Abstandsregel aber erst 1772, als der spätere Direktor der Berliner Sternwarte, Johann Elert Bode (1747- 1826), sie als Anhang zum Astronomischen Jahrbuch veröffentlichte.

Erstaunlich ist, dass man im 18. Jahrhundert der Reihe erkenntnistheoretisch einen theologischen-apriori Status zubilligte. So fragt Titius bezüglich der Lücke zwischen Mars und Jupiter: „*Und der Bauherr sollte diesen Raum ledig gelassen haben ?*“ oder Bode meint dazu: „*Kann man glauben, dass der Urheber der Welt diesen Raum freigelassen*

⁶Johann Daniel Tietz, lateinisiert Titius, 1729-1796. Professor für Astronomie, Physik und Biologie.



Plot prepared by the Minor Planet Center (2005 Sept.20).

4: Momentaufnahme des äußeren Sonnensystems mit den fast kreisförmigen Bahnen von Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun. Das Hauptproblem der Planetenforschung ist das Werden, nicht das Sein dieses Systems. Als himmelsmechanische Besonderheit sieht man hier, dass Jupiter von den sogenannten "Trojanern" begleitet wird.

hat ? Gewiss nicht.“. Und der Baron von Zach bemerkte bezüglich der Titius-Bodeschen Regel im Juni 1801: *“In keiner Wissenschaft hat der menschliche Geist bloß durch mathematische Logik und durch Schärfe des geometrischen Nachdenkens, mehr, gewissere, und reinere Wahrheiten als in der Sternkunde herausgebracht“*. Wegen dieses *“theologisch-metaphysischen Charakters“* wurde die Abstandsregel aber von anderen Astronomen wie W. Herschel, J.B.J. Delambre und J. Lalande abgelehnt ([16]).

Natürlich hat eine rein geometrische Reihe mathematisch bemerkenswerte Eigenschaften. Ohne das *“supponierte“* Glied gelten nämlich für die Titius-Bodesche Reihe lineare

wie nichtlineare Rekursionsformeln der Form

$$r(n+1) = 2r(n); \quad r(n) = r(n/k)^k. \quad (1)$$

Einen glänzenden phänomenologischen Erfolg konnte die Abstandsregel verbuchen, als 1781 der Planet Uranus durch William Herschel und seine Schwester Karoline entdeckt wurde. Seine Distanz zur Sonne paßt sehr gut in die obige Reihe mit $n = 6$. Dieses Ergebnis bestärkte dann wohl den Glauben, daß auch in der Lücke $n = 3$ noch ein Planet sein müsse. Die Entdeckung des ersten Asteroiden Ceres 1801 durch Piazzi in Palermo war eine scheinbar endgültige Bestätigung der Titius-Bodeschen Regel. Wie stark das Vertrauen in der ersten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts in diese “metaphysische“ Abstandsregel war, wird belegt durch die Tatsache, daß sowohl Adams als auch Leverrier 1845/1846 zur Berechnung der unbekannt Position von Neptun aus den Reststörungen bei Uranus für die unbekannte Distanz zur Sonne zunächst den Wert der Reihe für $n = 7$ genommen haben.

Ab dem Jahre 1820 hatte man nämlich festgestellt, dass die Bahnbewegung von Uranus erheblich von ihrer Sollbahn abwich, obwohl die Störungen von Jupiter und Saturn berücksichtigt wurden. Es kam die Hypothese auf, dass ein noch unbekannter Planet jenseits von Uranus die Bewegung stört. 1838 stellte Airy mit parallaktischen Methoden fest, daß der Radiusvektor des Uranus sich um 0.5% gegenüber seinem Sollwert erhöht hat; ein eindeutiger Hinweis auf eine äußere gravitative Störung. Gefragt waren nun „Simulationen“, welche die beobachtenden Abweichungen von Uranus in Länge mit unterschiedlichen Annahmen zur Bahn und Masse des unbekannt Planeten am besten darstellen konnten. Dies ist ein äußerst kompliziertes Problem der inversen Störungstheorie, welches man heute nur noch durch „Computersimulationen“ angehen würde ([10]). Nach dem Wiederauftauchen der „entwendeten“ englischen Originalakten zur Neptunentdeckung 1990 weiß man heute, dass die Vorausagen von Adams wesentlich „unsicherer“ und „schwankender“ waren als die von LeVerrier. Beide haben für Neptun eine zu große Masse und eine zu große Halbachse deduziert, was aber auf die unbekannte Position von Neptun trotz Nähe zur 2:1 Resonanz mit Uranus kaum Einfluß hatte. In jedem Falle versagte bei der Neptun-Halbachse die Titius-Bodesche Regel vollständig.



5: *Baron Freiherr von Zach*

Ein weiterer Kritiker der Titius-Bodeschen Regel zu Beginn des 19. Jahrhunderts war der Mathematiker Karl Friedrich Gauß⁷, dessen neue Methode der Bahnbestimmung eines Planeten aus nur wenigen Beobachtungen dazu beigetragen hatte, den Asteroiden (Zwergplaneten) Ceres 1801 wiederzuentdecken, nachdem dieser durch die scheinbare

⁷Karl Friedrich Gauß, 1777-1855. Mathematiker, Astronom, Geodät und Physiker

Nähe zur Sonne kurze Zeit nicht beobachtbar war. Wahrscheinlich bezieht sich Humboldt bei seinen oben zitierten Zweifeln auf Gauß, mit dem er im Briefwechsel war und ihn auch in Berlin und Göttingen persönlich getroffen hat. Gauß hat nämlich schon 1802 in einem Brief an den Baron von Zach⁸: *Sonderbar ist es, daß man das von Prof. Titius angegebene sogenannte Gesetz als ein Argument gegen die beiden Planeten⁹ gebrauchen wollte. Dieses Verhältnis trifft bei den übrigen Planeten gegen die Natur aller Wahrheiten, die den Namen Gesetze verdienen, nur ganz beiläufig, und, was man noch nicht einmal bemerkt zu haben scheint, beim Merkur gar nicht zu. Es scheint mir sehr einleuchtend, daß die Reihe 4, 4+3, 4+6, 4+12, 4+24, 4+48, 4+96, 4+192, womit die Abstände übereinstimmen sollen, gar nicht einmal eine kontinuierliche Reihe ist. Das Glied, was vor 4+3 hergeht, muß ja nicht 4, das ist 4+0, sondern $4 + 1\frac{1}{2}$ sein. Also zwischen 4 und 4+3 sollten noch unendlich viele dazwischen liegen.*

Gauß bemerkt dann noch: *Es ist gar nicht zu tadeln, wenn man dergleichen ungefähre Übereinstimmungen in der Natur aufsucht. Die größten Männer haben solchem lusus ingenii nachgehungen. Aber so viel sich auch Kepler auf seine mit den Planetendistanzen in Übereinstimmung gebrachten regulären Körper zu gute tat (er wollte, wie er sagte, die Ehre dieses Fundes nicht um das Kurfürstentum Sachsen geben): so hätte er doch gewiss den Planetismus des Uranus nicht damit angefochten (wenn diese Entdeckung zu seiner Zeit gemacht worden wäre), weil er nicht zu seinen Ideen paßte. Er hätte vielmehr ohne Zweifel diese sogleich aufgegeben. Ebenso hatten Sie es gemacht. Auch Sie haben über jenes Gesetz von Titius Betrachtungen angestellt; aber Sie haben sie nur Träume genannt, und sogleich fahren lassen, als sie anfangen, Tatsachen zu widersprechen. ([4])*

Großes Aufsehen erregte 1801 die Habilitationsschrift von Georg Wilhelm Friedrich Hegel mit dem Titel: *“Dissertatio Philosophica de Orbitis Planetarum”*¹⁰. Auf den letzten drei Seiten seiner Schrift versucht Hegel, eine alternative Zahlenreihe für die Planetenabstände aufzustellen. Er bezieht sich auf Platon, der bei kosmologischen Spekulationen in seinem *Timaios* die geometrischen Reihe 2^n und 3^n für $n = 1, \dots, \infty$ betrachtete. Platon vereinigte beide Reihen und sortierte sie nach ihrer Größe. Hegel geht genauso vor, betrachtet aber ohne Begründung die Reihen $2^{4n/3}$ und $3^{4n/3}$, streicht ohne Begründung die 16, nimmt als erstes Glied die Zahl $3^{1/3}$ und behauptet, so die Planetendistanzen dargestellt zu haben¹¹. Numerisch stimmen die Zahlenverhältnisse sehr schlecht mit der Wirklichkeit überein.

⁸Baron Franz Xaver Freiherr von Zach, 1754-1832, deutsch-ungarischer Astronom.

⁹Hier sind die damals neu entdeckten Asteroiden Ceres und Pallas gemeint. Ceres wird seit 2006 als „Zwergplanet“ bezeichnet, ebenso das System Pluto-Charon.

¹⁰Detaillierte Informationen über diese Schrift Hegels verdankt der Autor Herrn Prof. Wolfgang Neuser, Universität Kaiserslautern

¹¹Die numerische Berechnung dieser Zahlenreihe auf drei Dezimalstellen bereitete Hegel angesichts der Fehler offenbar Schwierigkeiten

Dann aber schreibt Hegel in seiner Schrift von 1801 den kritischen Satz: *“Falls diese Reihe die wahrhaftere Ordnung der Natur angibt als die arithmetische Reihe, dann ist klar, daß zwischen dem vierten und fünften Ort ein großer Raum liegt und dort kein Planet vermißt wird”*¹². Diese Äußerung hat zu scharfen Reaktionen bei einigen Astronomen geführt. Berühmt ist das vernichtende Urteil des Freiherrn von Zach, veröffentlicht am 2. April 1802: *“Den sichersten und traurigsten Beweis davon (von dem Fehlen gründlicher mathematischen Studien an Schulen) geben die überhand nehmende Menge unserer heutigen transzendentalen Physiker ... solche Leute, ... wollen Newton, dessen Schuhriemen aufzulösen sie höchst unwürdig sind, tadeln und meistern, dessen Lehren noch immer die glänzendsten Entdeckungen im Weltsystem veranlassen, indessen ihre Hyperphysik und ihre Träumereien nicht nur nicht die geringste Entdeckung hervorgebracht, sondern sie sogar verhindert haben würden, wenn man ihnen gefolgt wäre”*. ([16]) Hegel ist auch nach der Entdeckung mehrerer Asteroiden zwischen Mars und Jupiter von seiner Zahlenreihe überzeugt und preist in seiner *Vorlesung über die Geschichte der Philosophie* im Jahre 1816 die *grandiose Einsicht der Pythagoräer in die Struktur der planetaren Welt* ([9]). Später wird er aber kritischer und bemerkt: *“Was ich in einer früheren Dissertation hierüber gesagt habe, kann ich nicht mehr als befriedigend ansehen”*.



6: Georg Friedrich Hegel

Suche nach transneptunischen Planeten Nach der Entdeckung des Neptuns entstand natürlich im 19. Jahrhundert die Frage, ob es noch weitere Riesenplaneten in regelmäßigen Kreisbahnen um die Sonne existieren, deren Distanzen in mehr oder weniger geometrischen Progressionen zunehmen. Die teilweise *skurril – kuriose* Geschichte dieser Suche bis zur Entdeckung des Zwergplaneten Pluto sei hier kurz skizziert (unvollständig):

1879 glaubte Camille Flammarion einen seriösen Hinweis auf die Existenz eines Planeten jenseits von Neptun gefunden zu haben: die Aphelia von periodischen Kometen neigen dazu, sich um die Bahnen von Hauptplaneten zu bündeln. Jupiter hat die größte Ansammlung derartiger Kometen. Auch Saturn, Uranus und Neptun haben jeweils einige wenige. Flammarion fand zwei Kometen: 1862 III mit einer Periode von 120 Jahren und einer Aphelentfernung von 47,6 AE, sowie 1889 II, der mit einer Aphelentfernung von 49,8 AE eine etwas längere Periode hat. Flammarion vermutete, daß sich der hypothetische Planet wahrscheinlich in einer Entfernung von 45 AE befindet.

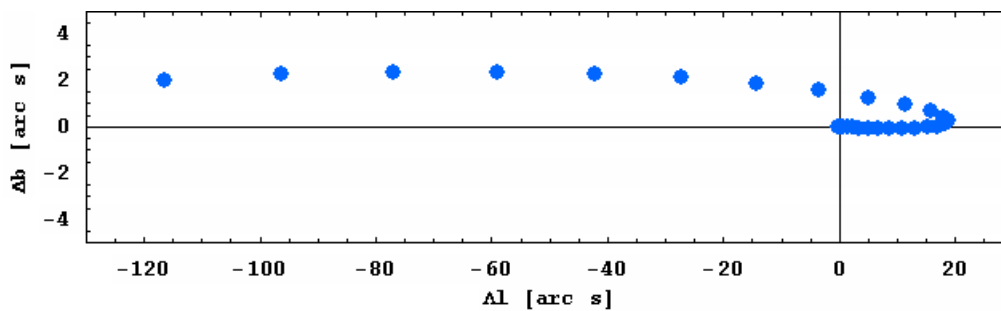
1880 veröffentlichte Forbes ein Memorandum über die Aphelia von Kometen und ihre Beziehung zu Planetenbahnen. Um 1900 waren fünf Kometen bekannt, deren Aphelia außerhalb Neptuns Bahn lagen. Forbes vermutete dann einen Transneptunier in einer Entfernung von ungefähr 100 AE und einen weiteren bei 300 AE, mit Umlaufperioden

¹²Quae series si verior naturae ordo sit, quam illa arithmetica progressio, inter quartum et quintum locum magnum esse spatium, neque ibi planetam desiderari apparet.

von etwa 1000 und 5000 Jahren.

Der Franzose Gaillot am Pariser Observatorium vermutete zwei transneptunische Planeten bei 45 und 60 AE. Der Amerikaner Thomas Jefferson Jackson See sagte drei transneptunische Planeten voraus: „Oceanus“ bei 41,25 AE und einer Periode von 272 Jahren, „Trans-Oceanus“ bei 56 AE und einer Periode von 420 Jahren und schließlich noch einen in einer Entfernung von 72 AE und mit einer Periode von 610 Jahren. Ein russischer General namens Alexander Garnowsky schlug vier hypothetische transneptunische Planeten vor, lieferte aber keine Details seiner „physikalischen Vorstellungen“.

1900 leitet der junge dänische Astronom Hans Emil Lau (1879 - 1918) in Kopenhagen aus den Ungleichheiten der Neptunbahn von 1690 bis 1895 die Bahnelemente von zwei transneptunischen Planeten bei Entfernungen von 46.6 und 70.7 AE ab¹³. 1902 widerrief er aber diese Arbeit und stellt anhand verbesserter Beobachtungsdaten und Planetenmassen fest, dass sich die Uranusbahn und die Neptunbahn *ohne die Annahme eines oder mehrerer transneptunischer Planeten* durch die Leverrierschen Tafeln innerhalb der Beobachtungsfehler darstellen lassen.¹⁴ Für die Massenverhältnisse der vier Riesenplaneten zur Sonne nahm er damals für Jupiter 1 : 1047.35 (1047.3486), Saturn 1 : 3502.2 (3497.898), Uranus 1 : 22869 (22902.98) und Neptun 1 : 19396 (19412.24) an. Die Zahlen in den Klammern bedeuten die heutigen modernen Werte nach den Voyager Missionen. Die am sorgfältigsten ausgearbeiteten Vorhersagen für einen „Transneptune“



7: Die Abweichung der wahren heliozentrischen Position des Uranusscheibchens von der oskulierenden Bahn ohne Neptunstörungen in ekliptikalen Koordinaten an der Himmelskugel von 1780 bis 1844 in Abständen von 2 Jahren. 1844 betrug die Abweichung schon 2 Bogenminuten. Um 1822 stand offenbar Uranus mit dem störenden Planeten Neptun in unterer Konjunktion (Computersimulation).

stammten aus USA: William Henry Pickering's „A search for a planet beyond Neptune“ (Annals Astron. Obs. Harvard Coll, vol **LXI** part II 1909) und Percival Lowells „Memoir on a trans-Neptunian planet“ (Lynn, Mass 1915). Sie waren mit dem gleichen Thema beschäftigt, verwendeten aber verschiedene Ansätze und kamen schließlich zu verschiedenen Ergebnissen.

William Henry Pickering (1858 – 1938) wendete eine „graphische Analyse“ auf die vermeintlichen Reststörungen von Uranus und Neptun an und schlug einen „Planeten

¹³Lau, H.E.: Planètes inconnues. Bulletin de la Societe astronomique de France **XIV**, 340 (1900)

¹⁴Lau, H.E.: Mémoires et observations. Sur la question des planètes transneptuniennes. Bulletin Astronomique, Serie I, vol. **20**, pp.251-256, (1902)

O“ bei 51,9 AE mit zweifacher Erdmasse vor. Alles in allem kündigte Pickering zwischen 1908 und 1932 sieben hypothetische Planeten an: O, P, Q, R, S, T und U. Die meisten von Pickerings Vorhersagen sind nur „Kuriositäten“ ohne strengen mathematisch – physikalischen Hintergrund. Im Jahre 1911 nahm Pickering zum Beispiel an, daß sein Planet „Q“ eine 63 – fache Jupitermasse hat, was nach heutigem Verständnis ein roter Zwergstern wäre. Sein Planet „Q“ sollte eine sehr elliptische Umlaufbahn haben. Die späteren Lebensjahre verbrachte er fast ausschließlich auf seinem Privatobservatorium auf Jamaika. Doch keiner von William Pickerings Planeten wurde entdeckt. Percival



8: Die größten bis jetzt bekannten Transneptun - Objekte einschließlich Pluto. Die Bahnen dieser „Zwergplaneten“ jenseits von Neptun sind wesentlich exotischer als sich dies Percival Lowell oder William Pickering je vorgestellt haben. Das Objekt (136199) Eris hat zum Beispiel eine Bahnneigung von über 44 Grad zur Ekliptik, besitzt eine Exzentrizität von 0.44 und hat eine große Halbachse von fast 68 AE.

Lowell (1855 – 1916), der als Geschäftsmann und Diplomat viel in Korea und Japan unterwegs gewesen war, lies sich schließlich 1894 in Flagstaff, Arizona, unter Mithilfe von William Pickering ein privates Observatorium bauen. Lowell war von der Struktur und den Phänomenen im Planetensystem fasziniert und glaubte an „höhere“ Lebensformen auf dem Mars („Marskanäle“). Er suchte aber auch nach einem weiteren Planeten jenseits von Neptun. Er führte mehrere Suchaktionen nach ihm durch, aber alle ohne Erfolg. Lowell und andere suchten in den Jahren 1913-1915 leidenschaftlich nach diesem Planeten X. Ironischerweise wurden vom Lowell Observatorium im selben Jahr 1915 zwei schwache Aufnahmen vom „Zwergplaneten“ Pluto gemacht, allerdings wurden sie

bis nach der Entdeckung Plutos im Jahre 1930 nie als solche bemerkt. Lowells Mißerfolg, den „Planet X“ zu finden, war die größte Enttäuschung seines Lebens.

Die dritte Suche nach dem Planeten X begann im April 1929. Im Dezember 1929 konnte man den jungen Farmerjungen und Amateurastronomen Clyde Tombaugh aus Kansas für die Suche nach dem Planet X begeistern. Tombaugh begann mit seiner Arbeit im April 1929. Am 23. und 29. Januar nahm Tombaugh sein Fotoplattenpaar auf, auf denen er während ihrer genauen Untersuchung Pluto am 18. Februar entdeckte. Bis dahin hatte Tombaugh hunderte von Fotoplatten mit Millionen von Sternen untersucht. Die Suche nach dem Planeten X hatte mit dem ersten „Kuiperergürtel – Objekt“ Pluto ihr vorläufiges Ende gefunden. Die bis jetzt genauesten optischen Beobachtungen der Bewegungen von Uranus und Neptun deuten darauf hin, dass ein weiterer etwa gleich großer „Planet X“ als gravitativer Störkörper nicht angenommen werden muß [22].

Die Distanz des Zwergplaneten Pluto jenseits von Neptun stimmt nicht mit der Titius-Bodeschen Regel für $n = 8$ überein. Heute wissen wir, daß Pluto, der neben Charon noch mindestens zwei weitere Kleinstmonde hat, nur eines von vielen größeren Körpern eines äußeren Asteroidengürtels darstellt, den man nach einem amerikanischen Planetenforscher Kuiper-Gürtel nennt.

Resonanzen in Satellitensystemen Auch in den Mondsystemen der großen Gasplaneten kann man genäherte geometrische Progressionen für die Bahnradien aufstellen. Heutzutage ist aber klar, dass sich hier sogenannte *Bahnresonanzen* zwischen benachbarten Monden gebildet haben, die mit großer Wahrscheinlichkeit *entwicklungsbedingt* sind. Auch unter den großen Gasplaneten gibt es solche Resonanzen. Zwischen Jupiter und Saturn die berühmte 5:2 Resonanz (Die große Ungleichheit von Laplace) und zwischen Uranus und Neptun eine genäherte 2:1 Resonanz mit einem Radienverhältnis von genähert $4^{1/3}$. Mit Pluto gibt es auch noch die sogenannten Plutinos, die eine 3:2 Resonanz mit Neptun haben. Auch hier müssen wir annehmen, dass diese Radienverhältnisse durch eine Wanderbewegung der Planeten mit einer noch vorhandenen Gasscheibe entstanden sind. Bei Neptun käme zum Beispiel eine Wanderbewegung nach außen in Frage. Stehen die Umlaufzeiten zweier Körper im Verhältnis $p : q$, so haben die Bahnradien nach dem dritten Keplerschen Gesetz das Verhältnis

$$r_p/r_q = (p/q)^{2/3}, \{(p, q) \text{ ganze positive Zahlen}\}$$

Häufig vorkommende Fälle sind $(p, q) = (2, 1), (3, 2), (5, 3), (5, 2), (8, 5)$ Nach über 200 Jahren muß man also sagen, dass die heutige moderne Astrophysik die Titius-Bodesche Regel der Planetendistanzen physikalisch *entzaubert* hat. Diese „Platonisch-Pythagoräisch“ Zahlenreihen sind nur *metaphysische Zahlenspekulationen*, die nicht dazu dienen können, Planeten irgendeine Existenz-Notwendigkeit zuzuschreiben oder abzustreiten. Die heutigen Abstände der Planeten sind nicht entstehungsbedingt, sondern entwicklungsbedingt. Es existiert daher auch kein ringförmiger Instabilitätsprozess oder Wachstumsprozess (z.B. Laplacesche Kosmogonie), welcher eine Gasscheibe in Ringe mit Abständen gemäß der Titius-Bodeschen Regel zerteilt. Weder läßt sich die planetare Bahnstruktur durch eine bestimmte „Eigenschwingung“ als Eigenwertproblem der

gesamten Gasscheibe auffassen noch durch eine "Resonanzkaskade" von angeregten Dichtewellen erklären, die einst von einem "ersten" Ur-Planeten ausgegangen sind. Denn im Gegensatz zu Planetenringen gibt es in Gasscheiben keine „diskreten“ Resonanzpositionen, sondern nur zwei „Bugwellen“ („wakes“), die vom störenden Planetenkern nach innen und nach außen angeregt werden.

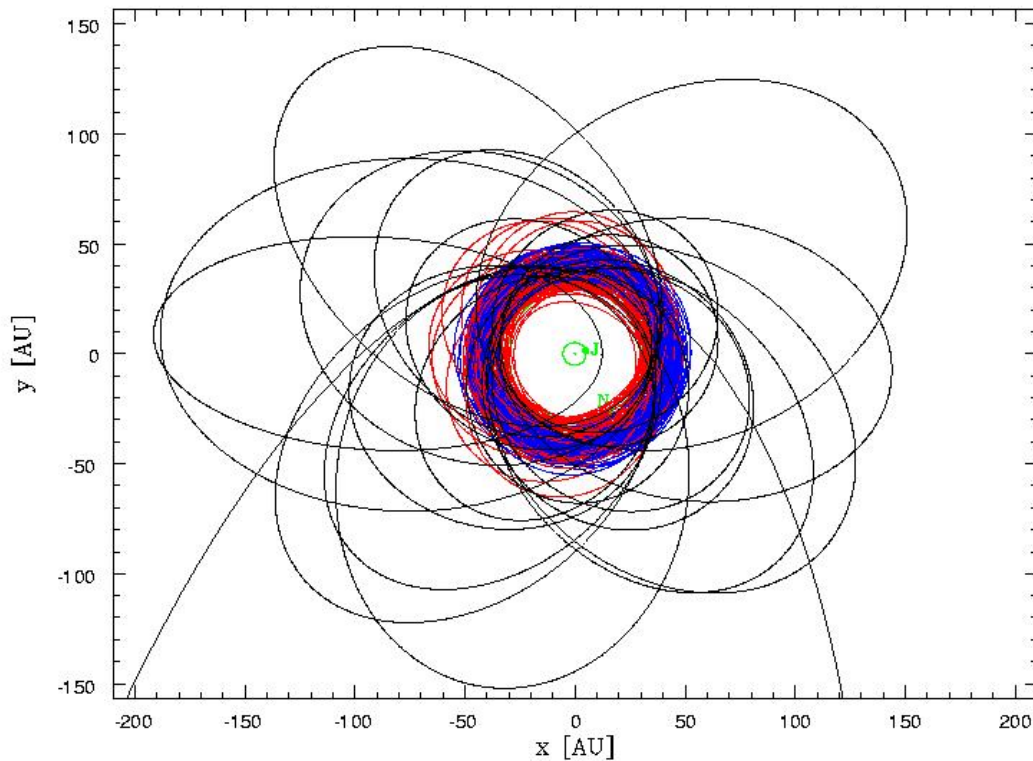
Die geometrisch-pythagoräische Abstandsregel der Planeten hat also *nicht* den „Zauber“, den die *Fibonacci*-Zahlenfolge [1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55,...] in der Biologie besitzt. So haben die meisten Sonnenblumen im Blütenstand zwei gegenläufige Spiralen, 55 laufen im Uhrzeigersinn, 34 gegen den Uhrzeigersinn. Und Gänseblümchen haben 34, 55 oder 89 Blütenblätter. Und dies ist kein Zufall, sondern eine *wachstumsbedingte Notwendigkeit* (*Phyllotaxis*). Ähnlich verhält es sich mit zwei Zikadenarten in Nordamerika, die sich nur alle **13** oder **17** Jahre (Primzahlen!) massenhaft über dem Erdboden vermehren. Auch dies ist keine Zahlenmystik, sondern macht Sinn und kann erklärt werden im Lichte evolutionärer Prozesse (Räuber - Beute Schema).

4 Das Rätsel der Planetenpaare

Neben der entzauberten Titius-Bodeschen Regel gibt es aber noch ein anderes viel weniger ausgeprägtes Phänomen unter den Riesenplaneten im Sonnensystem: Das Auftreten von sogenannten *Planetenpaaren* oder *Planetenzwillingen* mit ähnlichen Eigenschaften. Schon bei oberflächlicher Betrachtung des Planetensystems fällt auf (siehe Abbildung 10), daß man die planetaren Körper in zwei Gruppen einteilen muß: a) die kleinen terrestrischen Planeten und b) die gasförmigen Riesenplaneten. Und diese Riesenplaneten kann man wieder unterteilen in die zwei "Gasriesen" Jupiter/Saturn und in die zwei "Eisriesen" Uranus/Neptun. Die Gesamtmasse der Gasriesen beträgt etwa 445 Erdmassen, während die terrestrischen Planeten nur etwa 3 Erdmassen auf die Waage bringen. Geht man von den absoluten Massen aus, gibt es in unserem Sonnensystem in erster Näherung nur die Sonne mit ihren 4 Gasriesen Jupiter/Saturn und Uranus/Neptun. Die Gasriesen sind die eigentlichen Hauptplaneten in unserem Planetensystem. Ihre Bahnen sind fast kreisförmig und liegen nahezu in einer Ebene. Diese „binäre“ Strukturierung war auch schon dem amerikanischen Astronom Kirkwood¹⁵ um 1860 aufgefallen.

Und nun können wir, ganz im Geiste von Kepler, uns fragen, ob diese *binäre Struktur* bei den Riesenplaneten im Sonnensystem Zufall oder eine wie immer geartete ursächliche Notwendigkeit darstellt, die man physikalisch erklären muß oder kann. Warum gibt es nicht zum Beispiel **3** oder **5** Riesenplaneten im Sonnensystem, wie die Anzahl der Finger an unserer Hand? Ist die Anzahl der Riesenplaneten im Sonnensystem wirklich *entstehungsbedingt*, also Folge eines ganz speziellen Bildungsprozesses in den ersten zehn Millionen Jahren, wo es noch eine Gasscheibe um die Ursonne gab?

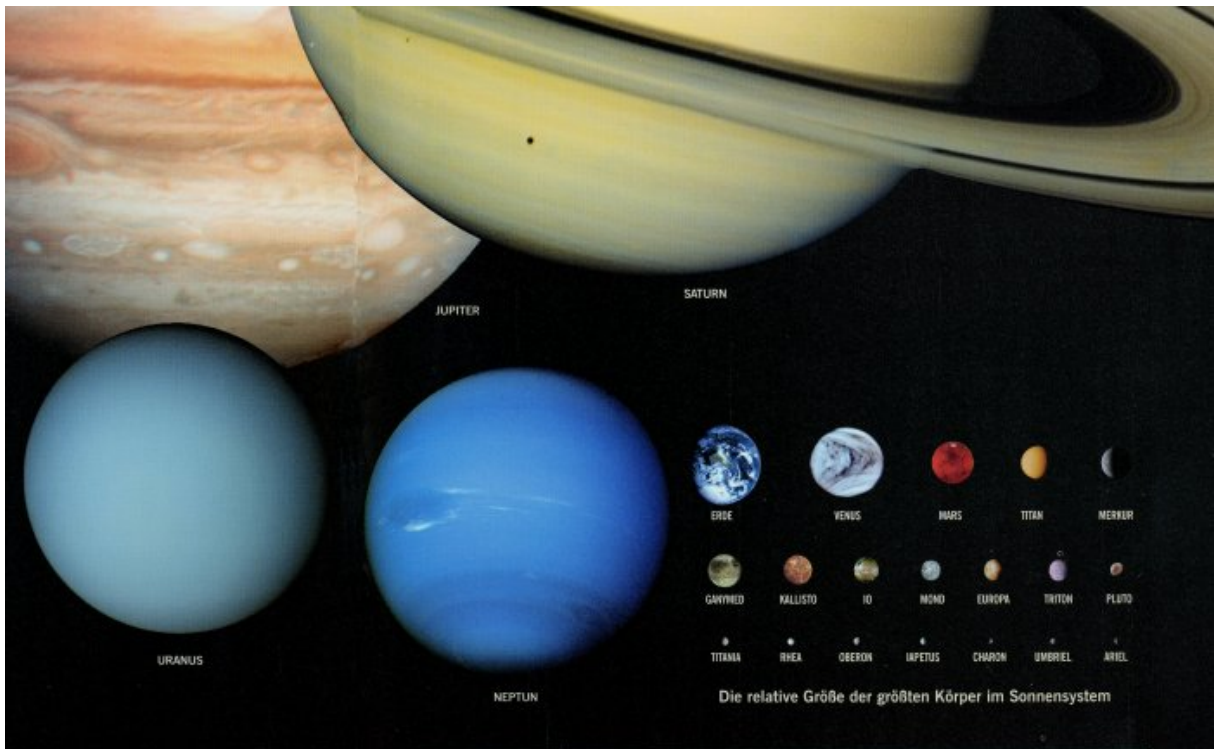
¹⁵Kirkwood, Daniel (1814-1895). US-amerikanischer Astronom. Stellte 1849 die berühmte Analogie zwischen Rotation der Planeten und ihren Abständen auf; eine Beziehung, die sich aber nicht auf ein physikalisches Gesetz reduzieren läßt. Bekannt wurde er besonders durch die Entdeckung von "Lücken" im Asteroidengürtel, die auf Resonanzen mit Jupiter zurückzuführen sind. Galt zu seiner Zeit als der *amerikanische Kepler*.



9: Der Kuipergürtel im äußeren Sonnensystem zwischen 35 AU und 50 AU. Deutlich ist zu erkennen, dass es reguläre und irreguläre Bahntypen gibt.

Aber ist dieser empirische Befund nicht wieder eine “metaphysische“ Täuschung wie die platonisch-pythagoräischen Zahlenreihen der Planetendistanzen? Realisieren wir hier die Fakten völlig falsch? Will die Natur uns vielleicht mit dieser empirischen Symmetrie-Schimäre in die Irre führen? Interpretieren wir hier mit Gewalt etwas in die Natur hinein, was es in *Wirklichkeit* gar nicht gibt? Nach der Entdeckung des Uranus 1781 hatte niemand daran gedacht, dass aus “Symmetriegründen“ noch *ein* weiterer Riesenplanet so ähnlich wie Uranus existieren müßte. Und zwar nur noch *ein Planet!* Selbst in neusten Monographien über das Sonnensystem wird diese *binäre Struktur* nur beiläufig im Falle von Uranus und Neptun erwähnt ([2]). Dabei könnte dieses Faktum viel weitreichendere Konsequenzen für die Theorie der Planetenentstehung in unserem Sonnensystem haben als die alte Titius-Bodesche Regel der Planetendistanzen, nach der ja strenggenommen beliebig weitere Riesen-Planeten jenseits von Neptun *existieren könnten*. Die Titius-Bodesche Regel oder andere empirischen Zahlenreihen machen keine notwendigen “Existenz“- Aussagen über fehlende Planeten innerhalb oder außerhalb des betrachteten Zahlenbereiches.¹⁶

¹⁶Kepler hat ja mit seinen platonischen Körpern die Anzahl der „Planeten“ im Sonnensystem auf genau



10: Die Planeten und einige Monde unseres Sonnensystems. Die Größen sind richtig skaliert. Der Saturn-Mond Titan ist größer als der Planet Merkur, was zu ersten Schwierigkeiten bei der Definition des Begriffes „Planet“ führt.

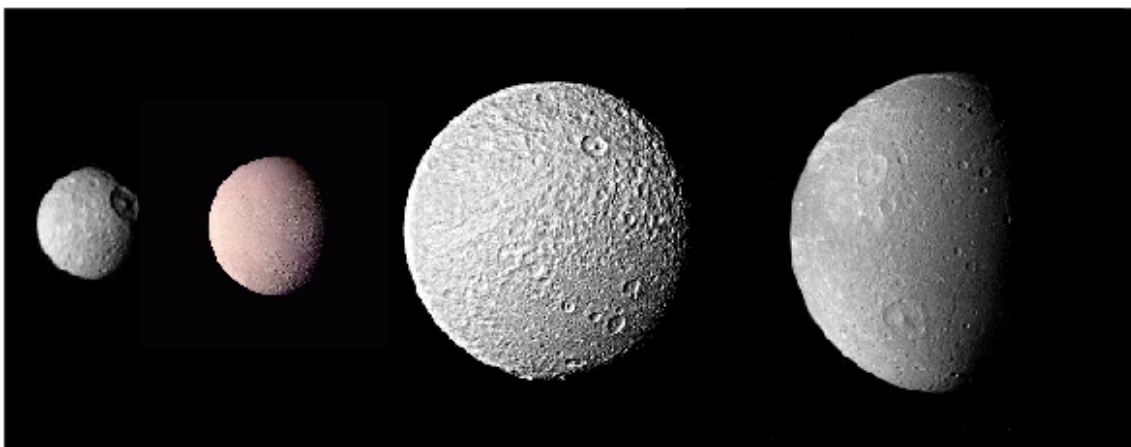
Diese rätselhafte planetare *Paar-Symmetrie* erinnert ein wenig an ein altes analoges geographisches Rätsel auf unserer Erde, welches schon von Alexander von Humboldt und anderen im 19. Jahrhundert bemerkt worden ist. Beim Anblick einer Weltkarte fällt nämlich auf, dass der Ostküstenverlauf von Südamerika und der Westküstenverlauf von Afrika sich einander ähnlich sind. 1910 stellte dann der Meteorologe und Geophysiker *Alfred Wegener* die gewagte und umstrittene Hypothese auf, dass vor vielen Millionen Jahren beide Kontinente einmal einen Superkontinent gebildet haben müssen, der irgendwann auseinandergebrochen ist. Erst ab etwa 1965 wurde diese These – nachdem Evidenzen aus ganz anderen wissenschaftlichen Gebieten kamen – in der Form der *Plattentektonik* akzeptiert und weiterentwickelt. Doch welches Geheimnis könnte hinter der rätselhaften Existenz von *Planetenpaaren* stecken?

Nun gibt es in unserem Sonnensystem ja noch die Satellitensysteme der großen Gasplaneten, wo vielleicht ähnliche Prozesse zur Entstehung von Monden geführt haben. Gibt es auch hier “Satellitenpaare”? Schon beim ersten Satellitensystem des Jupiters (siehe Abbildung 11) ist die Überraschung perfekt: Seit 1610 ist bekannt, dass es genau 4 große reguläre Jupitermonde gibt! Und wieder läßt sich dieses “Teilchen-Quartett“ in zwei physisch ähnliche Paare klassifizieren –Io/Europa und Ganymed/Callisto. Das innere Paar hat eine relativ hohe mittlere Dichte ($3.5/3.0 \text{ g/cm}^3$), das äußere dagegen eine

6 festlegen wollen.



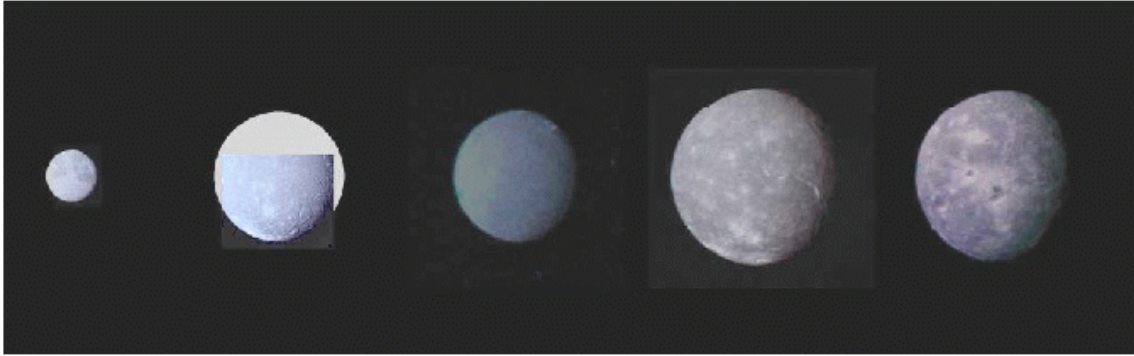
11: Die vier Hauptmonde des Jupitersystems. Von links nach rechts sind die „Paare“ Io/Europa und Ganymed/Callisto zu erkennen. Nur die relativen Größen sind richtig skaliert.



12: Die inneren Hauptmonde von Saturn. Von links nach rechts sind die Paare Mimas/Enceladus und Tethys/Dione abgebildet. Nur die relativen Größen sind richtig skaliert. Der weiter außen liegende Mond Rhea ist schon wesentlich größer als Dione, hat aber keinen Partner.

geringere Dichte von etwa $(1.9/1.8 \text{ g/cm}^3)$. Die abnehmende Dichte nach außen läßt sich allerdings auch als zwangslose Konsequenz einer Materiescheibe um den Proto-Jupiter erklären. Überraschender aber ist die Tatsache, dass in jedem „Paar“ der jeweils innen liegende Partner etwas massereicher als der weiter außen liegende ist. Hier erwartet man eher eine mit der Entfernung zunehmende Masse. Diese Struktur könnte natürlich auch ein Hinweis auf umgebungsbedingte zufällige Wachstumsprozesse sein.

Doch können wir dieses Mondsystem mit dem System der Gasriesen vergleichen? Waren die Entstehungsprozesse nicht doch sehr unterschiedlich? Unsere Zweifel werden bestätigt, wenn wir zum Saturnsystem übergehen. Der große Saturnmond Titan ist ein Einzelgänger und hat keinen symmetrischen „Partner“. Obwohl es auch hier benachbarte Monde mit ähnlichen Eigenschaften gibt – zu nennen wären hier Mimas/Enceladus und Tethys/Dione (siehe Abbildung 12) – so ist doch auf empirischer Grundlage eine klare



13: Die Hauptmonde des Uranussystems. Von links nach rechts sind zu erkennen der Kleinstmond Miranda und die Paare (?) Ariel/Umbriel und Titania/Oberon. Auch hier sind nur die relativen Größen richtig skaliert.

Strukturierung nicht zwangslos zu erkennen.

Im Uranussystem (siehe Abbildung 13) gibt es wieder eine Überraschung. Hier bilden wieder die beiden Mondpaare Ariel/Umbriel und Titania/Oberon ein fast perfektes Satelliten-Quartett. Die „Paarstruktur“ gilt hier nicht nur aufgrund ihrer ähnlichen Massen, sondern auch bezüglich der Bahnneigungen zum Uranusäquator. Doch auch hier gilt das Gleiche wie bei allen Mondsystemen: Eine *reine Paarstrukturierung* gibt es nicht. Ist dies schon ein Hinweis auf unterschiedliche Entstehungsprozesse? Im Neptunsystem scheint dies offensichtlich: Der Mond Triton bewegt sich *retrograd* um seinen Mutterplaneten, was auf einen interplanetaren Einfangprozess hindeutet!

Wir können also zusammenfassen: Von den 5 betrachteten Satellitensystemen besitzen *vielleicht* 3 Hinweise darauf, dass es unter bestimmten Bedingungen einen Entstehungsprozess geben könnte, der Satelliten *paarweise* erzeugt. Am deutlichsten ist dies allerdings nur bei den Gasriesen des Sonnensystems, insbesondere bei Uranus und Neptun, sehr auffällig. Wir haben also ein empirisches Dilemma: Die verwendete *Datenbasis* ist viel zu klein, um sichere statistische Aussagen über versteckte Zusammenhänge machen zu können. In der Elementarteilchenphysik werden heutzutage zur Auswertung experimenteller Ergebnisse von Proton - Antiproton Kollisionen Computerprogramme benutzt, die sich der Logik künstlicher *neuronaler Netzwerke* bedienen, um verborgene Zusammenhänge in großen Datenmengen aufzuspüren („Mustererkennung“). Hier spielt auch das *Bayes'sche Theorem über bedingte Wahrscheinlichkeiten* eine wichtige Rolle.¹⁷ Doch im Sonnensystem ist die Datenbasis zu dünn – vielleicht aber sind die Daten zahlreicher extrasolarer Planetensysteme in naher Zukunft hier vielversprechender. Die Frage, ob es eine „binäre Struktur“ im System gibt, kann also aus der dürftigen Empirie des

¹⁷Benannt ist das Theorem nach dem Mathematiker und Pfarrer Thomas Bayes (1702 - 1761) und seiner Schrift *Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances*. Sogenannte **Bayes'sche Netze** dienen der Repräsentation von unsicherem Wissen und daraus möglichen „abduktiven“ Schlussfolgerungen. Sie stellen eine spezielle Form der Formulierung von wahrscheinlichkeitstheoretischen Modellen dar. Berühmt ist im Zusammenhang des *Bayes Theorems* das sogenannte „Ziegenproblem“, auch als „Drei-Türen-Problem“, „Monty-Hall-Problem“ oder „Monty-Hall-Dilemma“ bekannt, welches 1990 durch die richtige Lösung von *Marilyn vos Savant* erhebliches Aufsehen erregt hat.

Sonnensystems allein nicht sicher gefolgert werden.

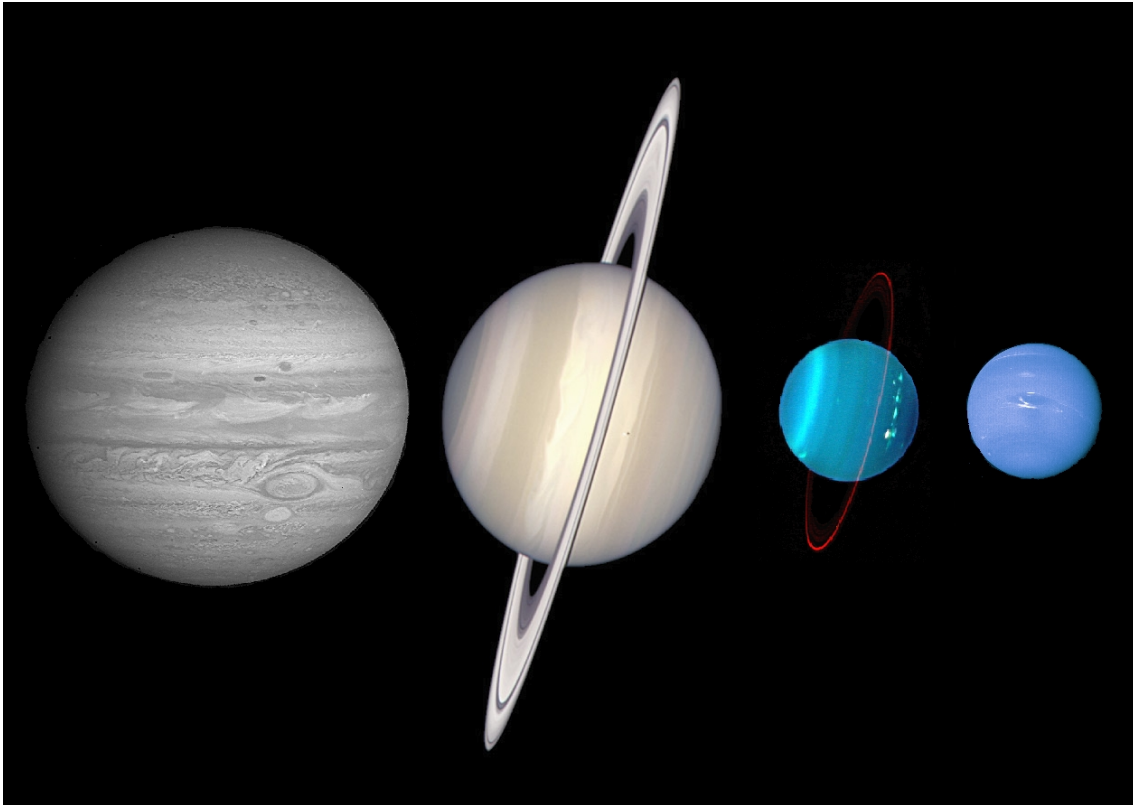
Der britische Astrophysiker Eddington hatte um 1930 die Ansicht ausgesprochen, dass die reine Empirie nicht ausreichend ist, das Gesehene auch wirklich wahrzunehmen und zu interpretieren. *Fakten müssen erst realisiert werden* – denn wir Menschen gehen in der Wissenschaft nicht direkt von reinen *Beobachtungen*, sondern von zuvor konstruierten *Theorien* oder *Modellvorstellungen* aus¹⁸. Entwicklungstheoretisch gesehen sind unsere Augen das Resultat von Lösungsversuchen, um einem Organismus sicheren Standortwechsel zu ermöglichen. Daraus folgt letztendlich, daß das Problem (theoretische Modellvorstellung) *vor* der visuellen Beobachtung (Sehen) kommt. Vieles, was von einigen “gesehen“ wird, wird von anderen “übersehen“ oder als irrelevant “angesehen“. Die eigentliche Erkenntnis beginnt also nicht mit der Sinneswahrnehmung, *sondern liegt immer hinter den Augen*. Man kann es auch mit den Worten eines Künstlers ausdrücken: *Plötzlich etwas zu sehen, was eigentlich schon immer da war; aber für das man bis jetzt völlig blind war. Nicht die Gestalt ist das wichtige, sondern die Gestaltung*

5 Die Paradigmen der Planeten-Kosmogonie

Zunächst muß man sagen, dass durch die astronomischen Entdeckungen von sogenannten extrasolaren Planetensystemen mit Hilfe hochpräziser Doppler-Technik in den letzten Jahren unsere Vorstellung darüber, wie zumindest gasförmige Riesenplaneten entstehen, stark erschüttert worden ist. Viele dieser Objekte bewegen sich sehr eng um ihren Zentralstern oder haben relativ hohe Bahnexzentrizitäten. Einiges deutet darauf hin, dass es mindestens zwei unterschiedliche Bildungsmechanismen für gasförmige Riesenplaneten geben könnte: Ein Prozess für die sehr engen Systeme und ein anderer Bildungsprozess für die “normalen“ Systeme. Die konservative Vorstellung, daß jenseits einer “Kondensationsgrenze“ für Eis (etwa 5 AU im Sonnensystem) die Riesenplaneten sich in Kreisbahnen bilden sollten, ist offensichtlich auch nicht mehr allgemein richtig. Einige theoretische Modelle prognostizieren eine Wanderbewegung von Riesenplaneten zum Zentralstern, ein Effekt, der die Existenz terrestrischer Klein-Planeten äußerst unwahrscheinlich machen würde...

Doch in unserem Sonnensystem scheint eine Wanderbewegung der Gasriesen wohl auf einen sehr engen Raum beschränkt gewesen zu sein. Unsere vier “Riesen“ bewegen sich in fast perfekten Kreisbahnen um die Sonne. Unser Planetensystem scheint somit *kein Normalfall* im Universum zu sein! Überträgt man nun das klassische Szenario von einem selbstregulativen Planetesimalen-Wachstums, welches sich ja für die Entstehung der terrestrischen Planeten so bewährt hat, auf die äußeren Regionen des Sonnensystems, so ergibt sich das Problem, dass die Zeitskalen für die Entstehung von Neptun einfach das Alter des Sonnensystems übersteigt (selbst unter Einbeziehung eines sogenannten *run-away* Prozesses), welches man aus Meteoriten zu etwa 4.56 Milliarden Jahren bestimmt hat. Wir wissen aber aus astronomischen Beobachtungen, daß eine protoplanetare Ak-

¹⁸Ein schönes Beispiel ist hier das Phänomen, daß viele Menschen *intuitiv* die Entstehung der Mondphasen auf den *Erdschatten* zurückführen. Das Problem wird also „*ab initio*“ in seiner Dreidimensionalität nicht richtig „realisiert“.



- 14: *Das Quadrupel der Gasriesen unseres Sonnensystems. Auch hier sind nur die relativen Größen richtig skaliert. Ist die „paarweise“ Strukturierung Zufall oder entstehungsbedingte Notwendigkeit? Wie sind diese Körper in relativ kurzer Zeitskala (≈ 10 Millionen Jahre) entstanden?*

ktionsscheibe, aus der ja die Planeten entstehen müssen, nur etwa 10 Millionen Jahre um einen werdenden Stern existiert. Riesenplaneten oder besser ihre festen Kerne müssen also sehr schnell entstehen, ihrer chemischen Zusammensetzung nach sogar schneller als die inneren terrestrischen Planeten. Doch welcher Mechanismus kommt dafür in Frage?

Der amerikanische Wissenschaftshistoriker Stephen Brush unterscheidet für die Entstehungsmodelle des Sonnensystems der letzten dreihundert Jahre zwei unterschiedliche Denkströmungen. Nach dem Wissenschaftshistoriker Thomas Samuel Kuhn nennt er sie auch „Paradigmen“. Nach dem *a) monistischen Paradigma* bilden sich die Planeten in einer Akkretionsscheibe aus Gas + Staub in selbstständig ablaufenden (selbstregulativen) internen Wachstumsprozessen. Im Zentrum dieser Scheibe befindet sich die werdende Sonne. Das System Sonne + Akkretionsscheibe ist dabei ein *abgeschlossenes System*. Es gibt keine Einflüsse von außerhalb. Nach dem *b) dualistischen Paradigma* können Planeten in einem schon vorhandenen Medium nur durch Einwirkung von außen entstehen. Man benötigt also einen „Triggermechanismus“ für die Entstehung von Planetenembryonen. Das betrachtete Untersystem wird dabei immer als ein *offenes System* angesehen. Das *Eine* kann also nicht ohne das *Ganze* verstanden werden.

Zum monistischen Paradigma gehören die sehr unterschiedlichen Modelle von Kant

(chaotisch rotierender Nebel) und von Laplace (Multi-Ring Abspaltmodell von der schnell rotierenden Sonne), welche irrtümlich von Schopenhauer 1851 in seiner Schrift *“Parerga und Paralipomena”*¹⁹ als “Kant - Laplacesche Kosmogonie“ zusammengefaßt wurden (auch von Helmholtz 1854 und von Ernst Haeckel in seinen *Die Welträtsel* 1899 wiederholt); zum dualistischen Paradigma zum Beispiel die Modelle von Buffon (1749; Komet oder Stern stürzt auf die Sonne), Jeans und Jeffreys (1916; enge Begegnung oder streifende Kollision zweier Sterne). Im weiteren Sinne gehört auch die 1977 vorgeschlagene Supernova-Trigger-Hypothese hierzu, die besagte, dass der Kollaps einer Molekülwolke zu Protosternen durch die Stoßwelle einer Supernova ausgelöst werden könnte. Und 1984 wurde auf einer Konferenz in Hawaii von mehreren Wissenschaftlern sogar die Hypothese aufgestellt, daß der Erdmond erst nach dem Aufschlag eines marsgroßen Körpers auf die Erde entstanden sein könnte. Dabei glaubte man noch bis etwa 1930, dass der Erdmond durch *Fission*, also durch Spaltung der schnell rotierenden Erde in zwei Teile, “geboren“ worden ist. Die gewagte Impakt - Hypothese zur Entstehung des Erdmondes beruht auf der alten Vorstellung, dass evolutionäre Prozesse auch durch „Katastrophen“ hervorgerufen werden könnten (*Katastrophismus*). Großes Aufsehen erregte zum Beispiel 1950 das Buch *Welten im Zusammenstoß* von dem Arzt und Psychoanalytiker Velikovsky²⁰ Er vertrat hier unter anderem himmelsmechanisch nicht nachvollziehbare Entwicklungsprozesse der Venusbahn in Zeitskalen von nur wenigen tausend Jahren, die von Harlow Shapley, Albert Einstein sowie später von Carl Sagan („*Venus and Dr. Velikovsky*“) kritisiert wurden. Die „Prognosen“ von Velikovsky über den Zustand der Venus (hohe Temperatur, Kohlendioxyd - Atmosphäre und anomale Rotation) sind Beispiele dafür, dass man mit falschen Modellvorstellungen und einer fragwürdigen Empirie trotzdem zu richtigen Aussagen kommen kann. Für Velikovsky waren wage Überlieferungen, bestehend aus zahlreichen uralten Mythenerzählungen, wichtiger als eine rechnerisch nachvollziehbare physikalische Modellvorstellung.

6 Planetenbildung im Standardmodell

Normale Agglomeration Wir nehmen eine Staub-Gasscheibe um die frühe Sonne an. Die räumliche Dichte des feinen Staubes in der Scheibe bezeichnen wir mit ρ . Die Wachstumsrate eines *schon existierenden* größeren Teilchens ($r \geq 10m$) *ohne Selbstgravitation* vom Radius r

¹⁹Schopenhauer (1788-1860) gab seiner Ergänzungsschrift zu seinem Hauptwerk *Die Welt als Wille und Vorstellung* (1819) den Titel *Parerga und Paralipomena* (1851), also auf Deutsch “Zutaten und Ergänzungen“.

²⁰Immanuel Velikovsky (1895 - 1979). Als Psychoanalytiker stellte er fest, dass viele der weltweiten Sagen, Märchen und Mythen starke Ähnlichkeiten aufweisen und führte dies auf eine gemeinsame Ursache zurück. Seine Thesen über plötzlich hereinbrechende „Naturkatastrophen“ in den letzten 5000 Jahren sowie deren psychologische Verdrängung wurden um 1950 in den USA kontrovers diskutiert. Auch wenn viele seiner Ideen nicht haltbar sind, so hat Velikovsky indirekt dazu beigetragen, dass ein Impaktmodell zur Mondentstehung heutzutage akzeptiert wird. Die Ähnlichkeit von Mythen unterschiedlicher Völker kann heute die moderne Säuglingsforschung im Rahmen evolutionärer Bewußtseinsbildung beim Menschen besser erklären. (Alison Gopnik [5])

und Masse m ist dann

$$\frac{dm}{dt} \approx \pi r^2 \varrho v, \quad (2)$$

wo v die mittlere Dispersionsgeschwindigkeit in der Staubscheibe oder die stochastische Abweichung von der Kreisbahngeschwindigkeit in der Akkretionsscheibe bezeichnet. In einer dünnen Staubscheibe gilt weiterhin $\varrho \approx \sigma/h$, wo h die Skalenhöhe der Staubscheibe und σ ihre Oberflächendichte bezeichnet. Für die Skalenhöhe gilt bei isotroper Geschwindigkeitsverteilung die Abschätzung $h \approx v/\Omega$, wo Ω die Umlauffrequenz der Teilchen ist. Damit gilt

$$\frac{dm}{dt} \approx \pi r^2 \sigma \Omega. \quad (3)$$

Wegen $m = 4/3\pi \varrho_p r^3$, wo ϱ_p die Dichte des silikatischen Staubes bezeichnet, folgt

$$\boxed{\frac{dr}{dt} \approx \frac{\sigma \Omega}{\varrho_p}}. \quad (4)$$

Für die mittlere Dichte ϱ_p nehmen wir $3g/cm^3$ und für die *minimale* Oberflächendichte der Staubkomponente der frühen Staub-Gasscheibe um die Sonne

$$\sigma(R) \approx 10 g cm^{-2} \left(\frac{1AE}{R} \right)^{3/2}. \quad (5)$$

Damit erhält man für die Wachstumsrate des Teilchenradius

$$\frac{dr}{dt} \approx 20 cm/Jahr \left(\frac{1AE}{R} \right)^3. \quad (6)$$

Damit bei $R = 1AE$ Körper vom Radius 2000 km anwachsen können, benötigt man nach der obigen Abschätzung Zeitskalen von $\approx 10^7$ Jahren. Um bei $5AE$ „Planetenkerne“ von etwa 3000km Radius zu erzeugen, benötigt man schon fast $\approx 10^9$ Jahre. In der Region von Uranus und Neptun sind die Wachstumszeitskalen über 10^{10} Jahre, länger als das durch Meteorite bestimmte Alter des Sonnensystems. Aus astronomischen Beobachtungen junger Sterne weiß man zudem, dass ihre Gasscheiben eine Lebensdauer von etwa 10^7 Jahren haben. Die Entstehung der äußeren Gasplaneten ist also mit einem ordentlichen *Agglomerationsprozess* nicht zu verstehen. Genau dies ist das *Zeitskalaproblem* der äußeren Planetenbildung in der Kant'schen Kosmogonie.

Nach der obigen Formel (4) müßten die inneren terrestrischen Planeten zuerst entstehen, obwohl die Chemie und der Aufbau der äußeren Riesenplaneten genau für den umgekehrten Fall spricht, nämlich dass die vier äußeren Gasriesen zuerst entstanden sind! Durch welchen sehr schnellen Prozess sind aber dann diese Gasriesen entstanden?

Planeten-Embryonen Betrachtet man einen Körper der Masse m , der sich in einer Kreisbahn vom Radius R um eine Zentralmasse M bewegt, so gibt es eine radiale Zone um diesen Körper, welche gravitativ unter seinem Einfluß steht. Geometrisch wird diese radiale Zone durch die Lagrangeschen Punkte L_1 und L_2 bestimmt. Grob kann man vom Hillschen Radius r_H der Einflußsphäre der Masse m sprechen. Für ihre radiale Ausdehnung gilt genähert

$$r_H \approx R \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3} \quad (7)$$

Wir nehmen an, dass alle Staubteilchen innerhalb dieser Zone von der „Saat-Masse“ m aufgesammelt werden. Gesättigt ist dieses Wachstum genau dann, wenn gilt

$$m \approx 4\pi \sigma R r_H \approx 4\pi \sigma R^2 \left(\frac{m}{3M} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

σ bedeutet hier die Oberflächendichte der Staubkomponente der protoplanetaren Scheibe. Die obige Gleichung definiert die „Embryonenmasse“ eines hypothetischen Planeten im Standardmodell gemäß

$$m \approx M \left(\frac{4\pi \sigma R^2}{M} \right)^{3/2} \quad (9)$$

Setzt man hier für M die Sonnenmasse und für σ

$$\sigma(R) \approx 10 \text{ g cm}^{-2} \left(\frac{1 \text{ AE}}{R} \right)^{3/2}, \quad (10)$$

so folgt für die Größenordnung der Planeten-Embryonenmasse

$$m \approx 10^{26} \text{ g} \left(\frac{R}{1 \text{ AE}} \right)^{3/4} \quad (11)$$

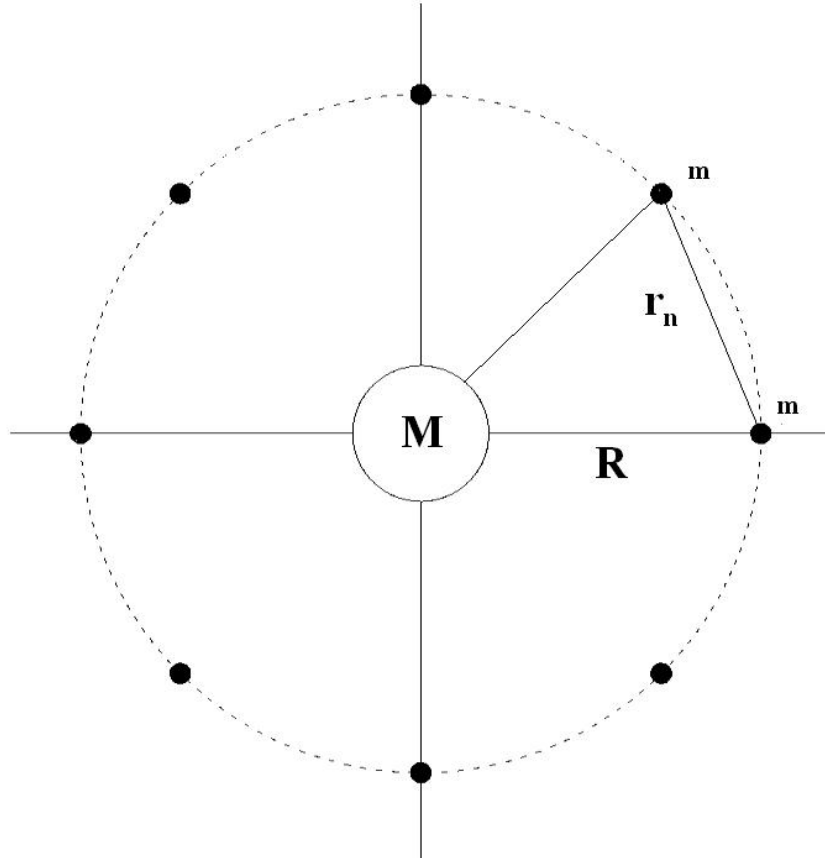
Bei 1 AE liegt die Masse hier in der Größenordnung des Erdmondes. Für den Radius r ergibt sich entsprechend

$$r \approx 2000 \text{ km} \left(\frac{R}{1 \text{ AE}} \right)^{1/4} \quad (12)$$

6.1 Nur ein Planet auf jedem Orbital?

Ein erstaunliches Faktum im Sonnensystem besteht darin, daß jede Bahn (Orbital) *nur mit einem Planeten besetzt ist*. Zwar wird zum Beispiel Jupiter von den sogenannten Trojanern in seiner Bahn begleitet, aber diese Asteroiden haben verschwindend kleine Massen gegenüber dem Hauptplaneten. Es gibt nicht den Fall, wo zwei „Saturnmassen“ oder zwei „Erdmassen“ auf der gleichen Bahn in einem oszillierenden Winkelabstand um die Sonne laufen. Die mögliche Existenz von 2 Körpern auf einer identischen Bahn hatte schon der Mathematiker Lagrange 1772 als Spezialfall des Dreikörperproblems entdeckt.

Heutzutage ist wenig bekannt, daß James Clerk Maxwell als erster im Jahre 1859 das Konzept von Dichtewellen in astrophysikalischen Materiescheiben (damals Saturnring) eingeführt hat ([1]). Eines seiner Modelle bestand aus einem N-Teilchen Ring, in dem die Massen in einem Polygon regelmäßig um den Planeten Saturn angeordnet waren. Er konnte zeigen, daß unter bestimmten Umständen ein solcher Teilchenring stabil sein konnte. Mit diesem Modell wurde gegen Ende des 19. Jahrhunderts klar, daß es keineswegs trivial ist, nur durch gravitative Wechselwirkungen eine Vielzahl von Körpern, die sich auf *nahezu* identischen Bahnen um einen Zentralkörper bewegen, zu einem *einzigen* Körper (Planeten oder Mond) zu vereinigen. Nicht nur aus diesem Grund geriet die Laplacesche Kosmogonie, die ja die Entstehung der Planeten aus ringförmigen oder torusartigen Strukturen forderte, um das Jahr 1900 in eine „Krise“.



15: *Ein rotierender Punktmassenring um eine dominierende Zentralmass. 1859 hat J. C. Maxwell die dynamischen Schwingungseigenschaften einen solchen Systems untersucht.*

6.1.1 Die Rotationsfrequenz

Nach der Abbildung 15 sei der Abstand der identischen Masseteilchen mit Masse m von dem Zentralkörper mit R bezeichnet. Der Zentralkörper M liege im Koordinatenursprung, der zugleich auch gemeinsamer Schwerpunkt des Systems ist. Da sich die Teilchen gegenseitig gravitativ anziehen, ist nur bei einer bestimmten Rotationsfrequenz Ω des Teilchenringes dynamisches Gleichgewicht zwischen der Gravitationskraft und der Zentrifugalkraft gegeben, bei der sich alle Massen in einer Kreisbahn um den Zentralkörper bewegen. Sind genau N Teilchen ringförmig in einem Polygon platziert, so wirkt auf ein Teilchen die rein radiale Gravitationsbeschleunigung

$$a_R = G \frac{M}{R^2} + G m \sum_{n=1}^{N-1} \frac{\sin(\pi n/N)}{4R^2 \sin^2(\pi n/N)}. \quad (13)$$

Durch Gleichsetzen mit der Zentrifugalbeschleunigung erhält man für das Quadrat der Rotationsfrequenz die Gleichung

$$\Omega^2 R^3 = G M + G m \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{4 \sin(\pi n/N)}. \quad (14)$$

Man kann die Rotationsfrequenz Ω auch mit dem Virialsatz der Mechanik

$$2 E_{kin} + E_g = 0 \quad (15)$$

berechnen, wobei E_{kin} die kinetische Energie des rotierenden Kettenringes und E_g die potentielle Gravitationsenergie des Systems bezeichnet. In unserem Fall gilt nun

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m N R^2 \Omega^2 \quad (16)$$

und

$$E_g = -G \frac{Mm}{R} N - \frac{1}{2} G m^2 N \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{r_n}. \quad (17)$$

Der gegenseitige Abstand r_n von zwei Masseteilchen ist nach Abbildung 15 durch $2R \sin(\varphi/2)$ gegeben, wobei φ den Winkel zwischen den beiden Radiusvektoren der Massenpunkte bezeichnet. Mit Hilfe von (15), (16) und (17) erhält man für die Rotationsfrequenz des Teilchenringes im dynamischen Gleichgewicht den Ausdruck

$$\Omega^2 = G \left(\frac{M + N m_e}{R^3} \right) \quad (18)$$

mit m_e als gravitative Effektivmasse der Kettenteilchen. Es ergibt sich dafür der Wert

$$m_e = m \frac{1}{4N} \sum_{n=1}^{N-1} \frac{1}{\sin(\pi n/N)}. \quad (19)$$

Nach (18) ist also die Rotationsfrequenz des Teilchenringes und damit auch seine Dynamik nicht allein durch die Gesamtmasse des Systems und seiner Geometrie (hier Radius R) gegeben, sondern auch von der Anzahl N der Teilchen abhängig. Für große N läßt sich die obige Summe asymptotisch berechnen. Es gilt einfach

$$m_e \approx m \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{2}{\pi} e^C N \right) \quad N \rightarrow \infty. \quad (20)$$

Hier bedeutet C die Eulersche Konstante ($C \approx 0.5772156 \dots$). Die Eigengravitation des Ringes ist somit logarithmisch divergent und ein Grenzübergang in ein fadenartiges Kontinuum mit $N \rightarrow \infty$ ist nicht möglich. Erst ab $N = 473$ gilt $m_e > m$. Bei $N = 10^6$ ist $m_e/m \approx 2.22$.

6.1.2 Struktur-Isomerien

Es muß hier betont werden, daß speziell regelmäßige N -Ecke mit gleichartigen Teilchenmassen nicht die einzigen möglichen Gleichgewichtsfiguren mit einer dominierenden Zentralmasse $M \gg mN$ darstellen. In den Fällen $N = 2, 3, 4, 5, 6, 7$ und 8 gibt es neben dem regulären Vieleck als Gleichgewichtsfigur auch noch Konfigurationen, in denen die Teilchen mehr auf der einen Hälfte des Ringes bei bestimmten Winkeln platziert sind. Der entscheidende Unterschied zu den regulären Fällen ist aber dann, daß der gemeinsame Schwerpunkt des Systems nicht mehr exakt mit dem Mittelpunkt der dominierenden Zentralmasse M übereinstimmt.

Wir nehmen wieder an, daß eine dominierende Zentralmasse M sich im Koordinatenursprung befindet. Die Positionen der kleinen Ringteilchen werden durch die Vektoren $\mathbf{r}(n)$ beschrieben. Der Schwerpunkt \mathbf{s} des Systems liegt dann bei

$$\mathbf{s} = \frac{m}{M + mN} \sum_{n=1}^N \mathbf{r}(n). \quad (21)$$

Eine erste Kraftbilanz kann nun für den Zentralkörper aufgestellt werden. Denn es muß im Gleichgewicht gelten

$$\Omega^2 \mathbf{s} = G m \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{r}(n)}{|\mathbf{r}(n)|^3}. \quad (22)$$

Einsetzen von \mathbf{s} führt schließlich zu

$$\Omega^2 \sum_{n=1}^N \mathbf{r}(n) = G (M + mN) \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{r}(n)}{|\mathbf{r}(n)|^3}. \quad (23)$$

Für jedes Ringteilchen mit der Marke $j = 1, 2, \dots, N$ gilt dann entsprechend die Gleichgewichtsbedingung

$$\Omega^2 [\mathbf{r}(j) - \mathbf{s}] = G M \frac{\mathbf{r}(j)}{|\mathbf{r}(j)|^3} + G m \sum_{n \neq j}^N \frac{\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)}{|\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)|^3}. \quad (24)$$

oder mit (22)

$$\left(\Omega^2 - \frac{GM}{|\mathbf{r}(j)|^3} \right) \mathbf{r}(j) = G m \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{r}(n)}{|\mathbf{r}(n)|^3} + G m \sum_{n \neq j}^N \frac{\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)}{|\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)|^3}. \quad (25)$$

Diese Gleichung multiplizieren wir zunächst vektoriell mit $\mathbf{r}(j)$ und erhalten die N Beziehungen ($j = 1, \dots, N$)

$$\sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{r}(n) \times \mathbf{r}(j)}{|\mathbf{r}(n)|^3} = \sum_{n \neq j}^N \frac{\mathbf{r}(n) \times \mathbf{r}(j)}{|\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)|^3}. \quad (26)$$

Skalare Multiplikation von (25) mit $\mathbf{r}(j)$ führt dagegen auf

$$\Omega^2 \mathbf{r}(j)^2 = \frac{GM}{|\mathbf{r}(j)|} + G m \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{r}(n) \circ \mathbf{r}(j)}{|\mathbf{r}(n)|^3} + G m \sum_{n \neq j}^N \frac{|\mathbf{r}(j)|^2 - \mathbf{r}(n) \circ \mathbf{r}(j)}{|\mathbf{r}(j) - \mathbf{r}(n)|^3}. \quad (27)$$

(26) und (29) sind $2N$ Bedingungsgleichungen für die $2N$ unbekanntten Vektorkomponenten von $\mathbf{r}(j)$ und die zusätzliche Unbekannte Ω . Diese Größe läßt sich aber dadurch bestimmen, daß wir uns auf ein bestimmtes Teilchen mit der Marke $j = \alpha$ setzen und auch den Vektor $\mathbf{r}(\alpha)$ vorgeben. Im Abschnitt über die Energiezustände gehen wir darauf noch näher ein. Hier nehmen wir zunächst an, daß alle Teilchen bei sehr kleinem Massenverhältnis $\mu = m/M \ll 1$ in nullter Ordnung auf einem Kreis liegen.

Wir machen also den Ansatz

$$\mathbf{r}(j) = (R(\alpha) + \mu \delta R(j)) \mathbf{e}(j) + \dots, \quad (28)$$

wo $\mathbf{e}(j)$ Einheitsvektoren darstellen und definitionsgemäß $\delta R(\alpha) = 0$ ist. Einsetzen von (28) in (26) führt in nullter Ordnung in μ auf die bemerkenswerten Beziehungen

$$\boxed{\sum_{n=1}^N [\mathbf{e}(n) \times \mathbf{e}(j)] = \sum_{n \neq j}^N \frac{\mathbf{e}(n) \times \mathbf{e}(j)}{|\mathbf{e}(n) - \mathbf{e}(j)|^3}. \quad (29)}$$

Dies sind genau N Gleichungen für die N unbekannt Winkel $\varphi(j)$ der Einheitsvektoren $\mathbf{e}(j) = (\cos(\varphi(j)), \sin(\varphi(j)))$. Für diese Winkel kann die obige Gleichung in die Form

$$8 \sum_{n=1}^N \sin[\varphi(n) - \varphi(j)] = \sum_{n \neq j}^N \frac{\sin[\varphi(n) - \varphi(j)]}{\left| \sin \left[\frac{\varphi(n) - \varphi(j)}{2} \right] \right|^3}, \quad \{j = 1, \dots, N\}. \quad (30)$$

gebracht werden.

Aus diesen N gekoppelten Gleichungen ist sofort zu entnehmen, daß man einen Winkel $\varphi(j)$ willkürlich festlegen muß. Denn wenn ein Satz von Lösungen $\varphi(j) : (j = 1, 2, \dots, N)$ bekannt ist, so ist auch

$$\varphi(j) \rightarrow \varphi(j) + \alpha \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (31)$$

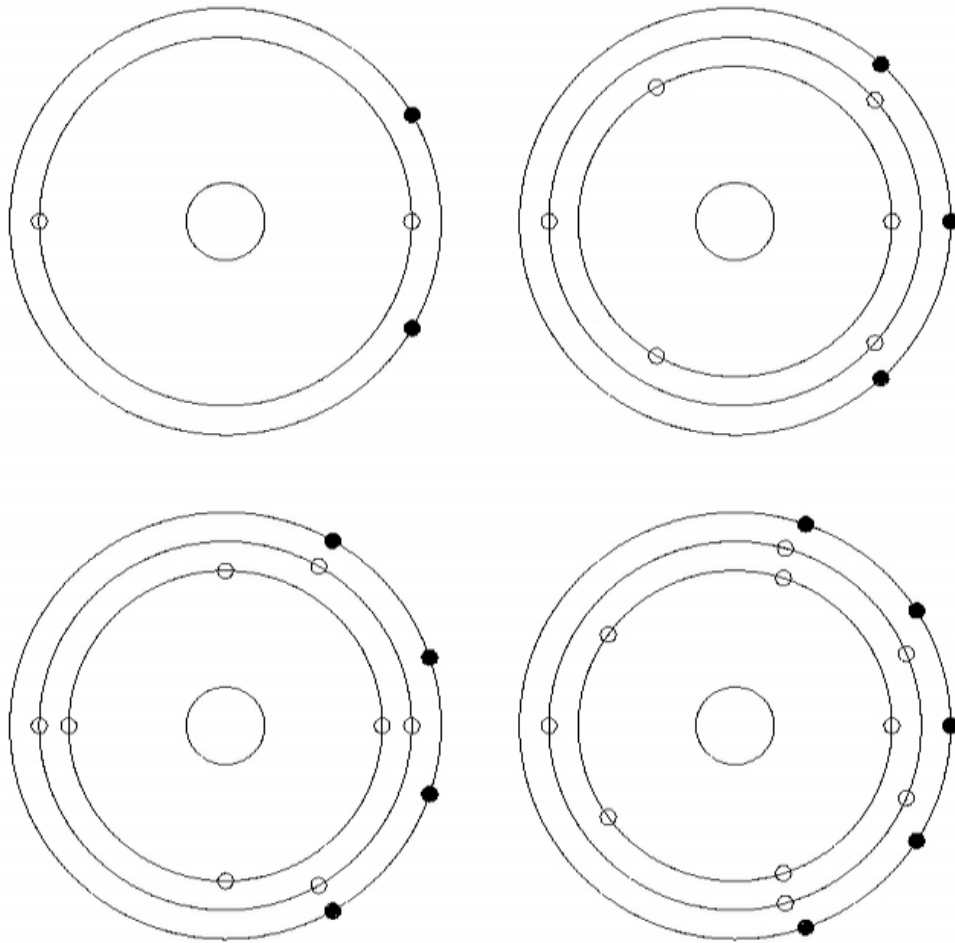
eine Lösung, wo α einen beliebigen Winkel darstellt. Es kommt also nicht auf die absoluten Werte, sondern nur auf die Winkeldifferenzen an. Die folgenden zwei Abbildungen (16) und (17) zeigen das Resultat. Außer bei der Lösung mit $N = 9$ (Polygonring) liegt der Schwerpunkt des rotierenden Systems nicht exakt im Mittelpunkt der großen Zentralmasse. Singulär ist der Fall $N = 7$, wo es 5 unterschiedliche Lösungen gibt. Dynamisch stabil sind aber meistens nur die „Hufeisenlösungen“, wo alle Ringmassen auf einer Seite konzentriert sind.

Im Sonnensystem wie auch in den anderen bis jetzt untersuchten Extrasolaren Planetensystemen sind solche Fälle von *coorbital planets* nicht bekannt. Selbst in den Mondsystemen der Gasriesen sind *coorbital satellites* sehr selten (z.B. Janus/Epimetheus im Saturnsystem). Was kann man daraus über die Entstehungsweise von Gasplaneten und vielleicht auch terrestrischen Kleinplaneten sagen? Es erscheint sehr unwahrscheinlich – wenn nicht ausgeschlossen –, dass eine Staubgasscheibe um einen jungen Protostern zunächst in einzelne „Ringe“ zerfällt, die dann ihrerseits sich zu einem Planeten zusammenziehen (Laplace'sche Kosmogonie). Nach den obigen Gleichgewichtsfiguren und ihrer Stabilität müßte man dann viel mehr *coorbital planets* erwarten! Aber genau dies wird nicht beobachtet.

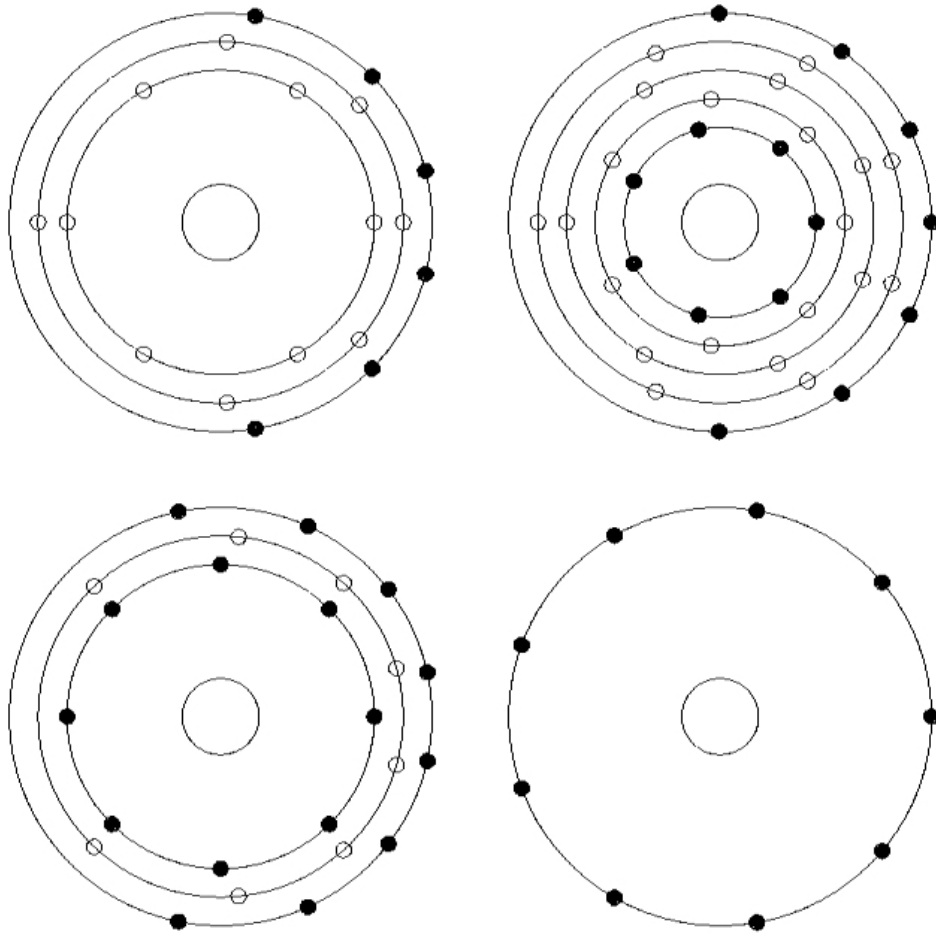
Die Entstehung von Gasriesen und Kleinstplaneten aus zuvor gebildeten ringförmigen Materiestrukturen ist somit ausgeschlossen. Gleichzeitig ist auch das Wirbelmodell von C.F. von Weizsäcker von 1943 widerlegt, wo angenommen wurde, dass sich eine Scheibe in regelmäßige Ringzonen zerlegt, wobei in jeder Ringzone 5 Wirbel sein sollten, um den Faktor einer Titius-Bodeschen Regel zu erklären. Nach den obigen Abbildungen ist aber im Falle $N = 5$ nur die „Hufeisenlösung“ stabil, nicht die reguläre Polygonstruktur. Im alten Wirbelmodell von Weizsäcker ist damit auch unklar, warum in diesem Modell nur ein Planet auf der Bahn entstehen soll.

6.2 Die Eigenrotation der Planeten

In der älteren Literatur wurde immer wieder das Problem diskutiert, warum bei fast allen Planeten der Rotationssinn um die Planetenachse mit dem Bahnbewegungssinn um die Sonne übereinstimmt. In einer Keplerscheibe sollte man doch das Gegenteil erwarten, da sich die inneren Teile einer Keplerscheibe doch schneller um die Sonne bewegen als die etwas weiter außen liegenden. Der amerikanische Geologe T.C. Chamberlin und der Astronom F.R. Moulton haben sich um 1906 mit diesem Problem der *prograden* Rotation der Planeten im Rahmen ihres *Planetesimalen Modelles* intensiv beschäftigt ([1]). Ihre Erklärung hat heute keine Relevanz mehr, da man mit Hilfe hydrodynamischer Lehrsätze die prograde Rotation von Planeten einfacher und genauer erklären kann.



16: *Geometrie-Isomere bei rotierenden selbstgravitierenden N -Teilchenringen im Grenzfall sehr kleiner identischer Massen um einen Zentralkörper für die Fälle $N = 2, 3, 4$ und 5 . Der äußere Ring stellt jeweils die “Hufeisenlösung” dar, der innere immer die Polygonlösung. Nur bei der Polygonlösung befindet sich der gemeinsame Schwerpunkt des Ringes und des Zentralkörper im Massenzentrum des letzteren. Obwohl in allen vier gezeigten Fällen jeweils 3 statische Gleichgewichtsfiguren möglich sind, kann nur die “Hufeisenlösung” auch dynamisch stabil sein. Dies ist durch Fettdruck der Teilchenmassen kenntlich gemacht.*



17: Geometrie-Isomere bei rotierenden selbstgravitierenden N -Teilchenringen im Grenzfall sehr kleiner identischer Massen um einen Zentralkörper für die Fälle $N = 6, 7, 8$ und 9 . Für die Fälle $N = 6, 7$ und 8 stellt der äußere Ring jeweils die "Hufeisenlösung" dar, der innere immer die Polygonlösung. Stabile Konfigurationen sind wieder durch Fettdruck kenntlich gemacht. Im Falle $N = 7$ gibt es seltsamerweise 5 mögliche Gleichgewichtsfiguren. Zudem sind für $N = 7$ und $N = 8$ zum erstenmal auch die Polygonlösungen mögliche stabile Lösungen. Ab $N=9$ gibt es nur noch das reguläre N -Eck als statische Gleichgewichtsfigur.

Ein entscheidender Schritt zur Deutung der Rotationsrichtung liegt im Satz begründet, dass die *physikalische Rotation gleich der halben mathematischen Rotation ist*. In der Sprache der Vektoranalysis heißt dies

$$\omega_p = \frac{1}{2} \nabla \times \mathbf{v} \equiv \frac{1}{2} \text{rot } \mathbf{v}. \quad (32)$$

Der Faktor 1/2 ist hier sehr wichtig, denn die Größe $\text{rot } \mathbf{v}$ wird in der Hydrodynamik als Wirbelstärke oder als *vorticity* bezeichnet, hat aber nur mit dem Faktor 1/2 mit der wirklichen Winkelgeschwindigkeit des Wirbelfadens zu tun. Zunächst berechnen wir das lokale Schergeschwindigkeitsfeld in einer differentiell rotierenden Scheibe. Bezüglich eines festen Radius R ergibt sich dann in erster Ordnung für das Geschwindigkeitsfeld

$$\begin{aligned} \Delta v &= (v'(R) - \Omega(R)) x \\ &= \Omega'(R) R x \end{aligned} \quad (33)$$

$$= \Omega(R) \left\{ \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right\} x \quad (34)$$

Für die lokale Wirbelstärke ergibt sich dann

$$\omega_z = \frac{1}{2} \Omega(R) \left\{ \frac{\partial \ln \Omega}{\partial \ln R} \right\} \quad (35)$$

Für eine Keplerscheibe folgt daraus

$$\omega_z = -\frac{3}{4} \Omega \quad (36)$$

Die Summe $\omega_z + \Omega$ ist daher $1/4\Omega$ und somit größer Null. Daraus folgt aber, dass die Wirbel in einer Keplerscheibe im Inertialsystem den gleichen Rotationssinn haben wie die allgemeine Rotation um den Zentralkörper. Die prograde Rotation der meisten Planeten im Sonnensystem scheint somit eine natürliche Folge der Wirbeldynamik zu sein.

Da es recht wahrscheinlich ist, dass in einem bestimmten Stadium der Bildung von Gasriesen spezielle hydrodynamischen Wirbel eine wichtige Rolle spielten, soll hier die Herleitung eines wichtigen Wirbelsatzes skizziert werden, der erst 1942 formuliert wurde. Unter der Bedingung, dass eine Flüssigkeitsströmung isentrop oder homentrop (Konstante Entropie) verläuft, kann man den Eulerschen Bewegungsgleichungen der Hydrodynamik eine andere Gestalt geben, welche nur noch das Geschwindigkeitsfeld enthält. Nach einer thermodynamischen Beziehung gilt

$$dw = T ds + V dp. \quad (37)$$

w ist hier die Enthalpie pro Masseneinheit, $V = 1/\rho$ das spezifische Volumen, T die Temperatur und s die Entropie. Da $s = \textit{konstant}$ gelten soll, gilt vereinfacht

$$dw = V dp = \frac{dp}{\rho}. \quad (38)$$

Speziell gilt dann für eine barotrope Flüssigkeit

$$\nabla w = \frac{1}{\rho} \nabla p. \quad (39)$$

Die Eulerschen Bewegungsgleichungen lauten nun

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho}. \quad (40)$$

Befindet sich das Medium in einem rotierenden System mit der Winkelgeschwindigkeit Ω und existiert aufgrund der Selbstgravitation oder internen Störungen zusätzlich noch ein Gravitationsfeld mit dem Potential Φ , so lautet die Bewegungsgleichung

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \left(\Phi - \frac{1}{2} |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}|^2 \right). \quad (41)$$

Mit Hilfe der aus der Vektoranalysis bekannten Formel

$$\frac{1}{2} \nabla(v^2) = \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} \quad (42)$$

kann man jetzt auch

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v} + 2\boldsymbol{\Omega}) = -\frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \left(\Phi - \frac{1}{2} |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}|^2 + \frac{v^2}{2} \right). \quad (43)$$

schreiben. Führen wir nun die Vorticity $\boldsymbol{\omega}$ nach

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{v} \quad (44)$$

ein, so folgt aus der Bewegungsgleichung durch Anwendung des Operators $(\nabla \times)$ oder rot für eine reibungsfrei adiabatische Flüssigkeit

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} - \nabla \times [\mathbf{v} \times (\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega})] = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \nabla p. \quad (45)$$

Der auf der rechten Seite stehende Vektor heißt der *barokline* Vektor. Es muß hier betont werden, dass die wirkliche *physikalische Rotation* gleich der *halben mathematischen Rotation* oder vorticity $\nabla \times \mathbf{v}$ ist.

Im Falle einer barotropen Flüssigkeit verschwindet der barokline Vektor und die Gleichung (45) reduziert sich auf

$$\frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} - \nabla \times [\mathbf{v} \times (\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega})] = 0. \quad (46)$$

Aus beiden Gleichungen kann man nun fundamentale Erhaltungssätze ableiten. In Gleichung (45) kann man die rechte Seite zum Verschwinden bringen. Dazu braucht man eine skalare Größe Ψ , die nur von p und ρ abhängig ist. Dann gilt

$$\nabla \Psi = \frac{\partial \Psi}{\partial p} \nabla p + \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} \nabla \rho \quad (47)$$

Wir fordern zusätzlich, dass Ψ eine materielle Erhaltungsgröße ist, so dass gilt

$$\frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla \Psi = 0. \quad (48)$$

Die Größe Ψ kann entweder die Entropie, die potentielle Temperatur (Meteorologie) oder auch eine Konzentration eines Stoffes (Ozeanographie) sein. Skalare Multiplikation der Gleichung (45) mit $\nabla \Psi$ führt zunächst auf

$$\nabla \Psi \circ \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} - \nabla \Psi \circ \nabla \times [\mathbf{v} \times (\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega})] = \frac{1}{\rho^2} [\nabla \Psi \nabla \rho \nabla p]. \quad (49)$$

Mit der Kontinuitätsgleichung für die Dichte

$$\frac{\partial \varrho}{\partial t} + \nabla \cdot (\varrho \mathbf{v}) = 0 \quad (50)$$

ergibt sich schließlich nach komplizierter Vektoralgebra das EPV-Theorem

$$\boxed{\frac{d}{dt} \left[\frac{(\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega}) \circ \nabla \Psi}{\varrho} \right]} = \frac{1}{\varrho^3} [\nabla \Psi \nabla \varrho \nabla p]. \quad (51)$$

in der allgemeinsten Form. Es ist ein verallgemeinerter Drehimpulserhaltungssatz für kompressible Wirbel. Hängt die thermodynamische Größe Ψ nur von p und ϱ ab, so vereinfacht sich der obige Erhaltungssatz für *barokline* Flüssigkeiten in

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{(\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega}) \circ \nabla \Psi}{\varrho} \right] = 0. \quad (52)$$

Dieser Erhaltungssatz ist in der dynamischen Meteorologie als das EPV-Theorem oder der Wirbelsatz von Ertel bekannt (die sogenannte *potential vorticity*)²¹. Bemerkenswert ist es, dass dieser Wirbelsatz in der Astrophysik so gut wie unbekannt ist.²²

Multipliziert man nun die barotrope Wirbelgleichung mit einem zunächst beliebigen Einheitsvektor \mathbf{e} , so erhält man zunächst

$$\mathbf{e} \circ \frac{\partial \boldsymbol{\omega}}{\partial t} - \mathbf{e} \circ \nabla \times [\mathbf{v} \times (\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega})] = 0 \quad (53)$$

Auch diese Gleichung läßt sich umformen und zusammenfassen zu

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{(\boldsymbol{\omega} + 2\boldsymbol{\Omega}) \circ \mathbf{e}}{\varrho} \right] = \frac{1}{\varrho} \boldsymbol{\omega} \circ \nabla (\mathbf{v} \circ \mathbf{e}). \quad (54)$$

Spezialisiert man diese Gleichung auf zwei Dimensionen und nimmt \mathbf{e} parallel zu $\boldsymbol{\Omega}$ und $\boldsymbol{\omega}$, aber senkrecht zu \mathbf{v} an, so reduziert sich die obige Beziehung auf

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \right) \left[\frac{\omega + 2\Omega}{\sigma} \right] = \frac{d}{dt} \left[\frac{\omega + 2\Omega}{\sigma} \right] = 0. \quad (55)$$

wobei σ nun die Oberflächendichte bezeichnet. Diese Gleichung ist ein Spezialfall des Ertelschen Wirbelsatzes und letztendlich die Bewegungsgleichung für Wirbel in einer 2-dimensionalen kompressiblen barotropen Flüssigkeitsströmung.

Aus der obigen Bewegungsgleichung folgen im Prinzip zwei Tatsachen:

- Gebiete hoher Dichte σ sind zugleich auch Gebiete hoher Wirbelstärke ω_z .
- Gebiete hoher Dichte haben den gleichen Rotationssinn wie die vorgegebene Rotation Ω . Daraus folgt im Prinzip eine Erklärung für den *prograden Rotationssinn* der meisten Planeten im Sonnensystem.

Wir kommen zu dem Schluß: *Die prograde Rotation der meisten Planeten im Sonnensystem ist eine natürliche Folge der allgemeinen Wirbeldynamik in der frühen Akkretionsscheibe.* Selbst die differentielle Scherung der Keplerscheibe erfolgt im *Inertialsystem* im *prograden Sinn*.

²¹Ertel H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor.Z.* **59**, 271-281

²²Bestes Beispiel ist das gute Lehrbuch von F. Shu: *The Physics of Astrophysics*. (1992). Hier zeigt sich deutlich, dass die drei Gebiete Astrophysik, Meteorologie und auch Ozeanographie völlig nebeneinander herlaufen und für identische physikalische Prozesse unterschiedliche Begriffsbildungen geschaffen wurden.

Hypothese: Eine sehr *gewagte* Hypothese ergibt sich aus folgender Betrachtung: Betrachtet man einen einzelnen Planeten als einen “Wirbel“ mit einer bestimmten Masse M und einem Spin-Drehimpuls L_s , so gilt für ω_z und σ genähert

$$\sigma \sim \frac{M}{R^2}; \quad (56)$$

$$\omega_z \sim \frac{L_s}{MR^2} \quad (57)$$

wo R einen charakteristischen Radius (Planetenradius) darstellt. Da nun nach der obigen Gleichung die **spezifische Wirbelstärke pro Fläche** eine konstante der Bewegung darstellt, folgt damit auch

$$\frac{\omega_z}{\sigma} \approx \frac{L_s}{M^2} \approx \text{Konstante?} \quad (58)$$

wobei L_s den Spin-Drehimpuls eines Planeten darstellt. Man kann auch eine dimensionslose Kennzahl κ der Form

$$\kappa = \frac{L_s c}{GM^2} \quad (59)$$

eingeführen, wo c die Lichtgeschwindigkeit und G die Gravitationskonstante bezeichnet. Die Größe κ spielt in der Relativitätstheorie (Kerr-Metrik, rotierende schwarze Löcher) eine wichtige Rolle. Insbesondere muß κ kleiner 1 sein, damit keine unphysikalischen Lösungen auftreten.

Gibt es nun universelle Drehimpuls-Masse Beziehungen im Kosmos für rotierende selbstgravitierende Systeme, wie es in der Literatur mehrfach behauptet wurde?²³ Empirische Untersuchungen zeigen tatsächlich, dass κ für fast alle Planeten (außer Merkur und Venus) in der Größenordnung 10^3 liegt!

Planet	$\kappa = (L_s c)/(GM^2)$
Erde	~ 900
Mars	~ 2000
Jupiter	~ 530
Saturn	~ 1200
Uranus	~ 860
Neptun	~ 730
Sonne	~ 0.2

Bei der Sonne liegt κ allerdings deutlich unter eins. Eine strenge Herleitung einer Drehimpuls - Masse Beziehung für rotierende kosmische Massen ist aber selbst mit dem allgemeinen Wirbelsatz nicht möglich, da zu viele Prämissen gemacht werden müssen. Die empirischen Daten sind trotzdem bemerkenswert. Die grobe Korrelation $\mathbf{L} \propto M^2$ kann als ein wage Korrelation in der Kosmologie angesehen werden, hat aber nicht die Stellung eines astrophysikalischen *Gesetzes*.

²³Brosche, P.: Zum Masse - Drehimpuls Diagramm von Doppel - und Einzelsternen. AN **286**, 241 (1962)

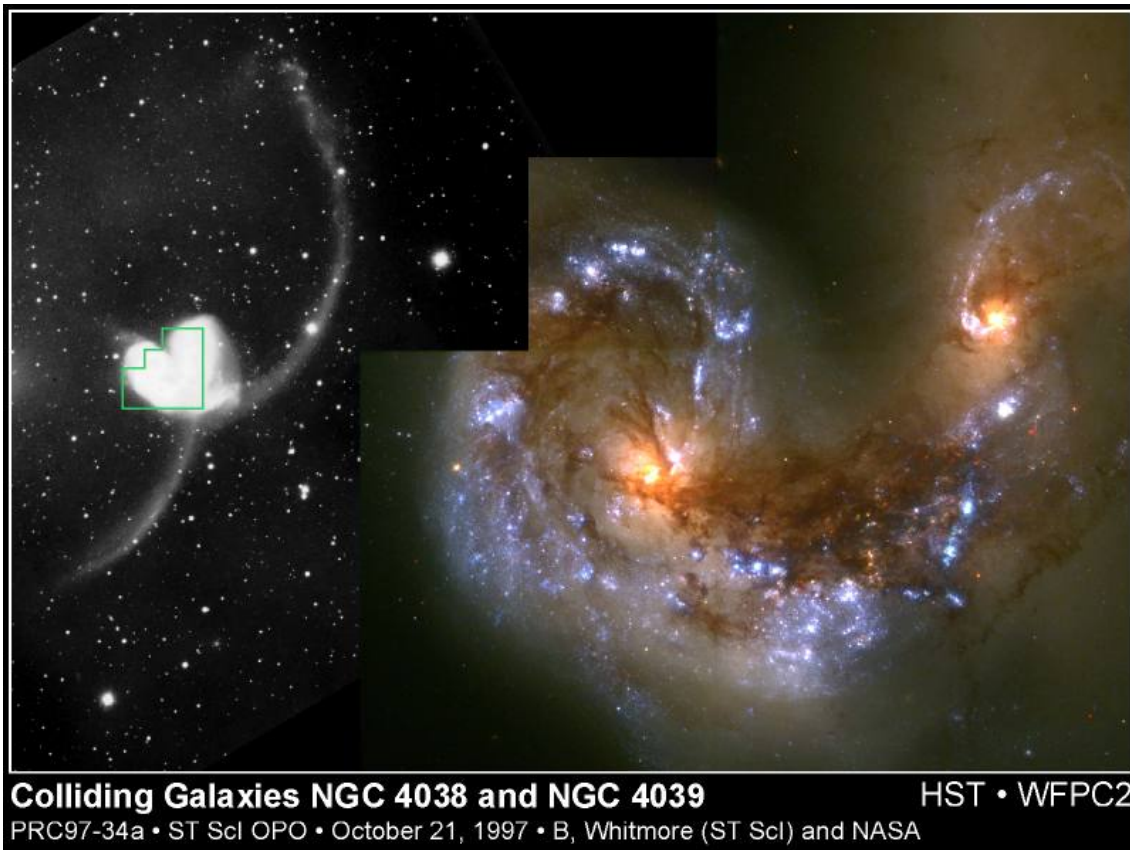
7 Die Bildung der Riesenplaneten im Sonnensystem

Das Standardmodell hat erhebliche Schwierigkeiten, die Entstehung der gasförmigen Riesenplaneten – insbesondere Uranus und Neptun – innerhalb von etwa 10 Millionen Jahren zu erklären. Selbst eine Gravitationsinstabilität, die letztendlich durch eine nahe Begegnung mit einem anderen Stern angeregt werden muß, ist für die Planeten Uranus und Neptun wenig überzeugend, die heute in fast exakten Kreisbahnen um die Sonne laufen. In der Geologie haben sich zum Beispiel zwei Begriffe für die Beschreibung zeitlicher Entwicklungen ausgebildet: *Aktualismus* und *Exzeptionalismus*.

Aktualismus Das Prinzip bedeutet Gleichförmigkeit der Prozesse. Es besagt, dass geologische Vorgänge, die heute zu beobachten sind, ebenso in der Vergangenheit gewirkt haben. Es sind also direkte Rückschlüsse von heutigen Abläufen auf Bildungsprozesse in der Vergangenheit möglich. Eng damit zusammen gehört der Begriff des *Gradualismus*, dass nämlich Entwicklungsprozesse „stetig“ ablaufen - ohne „Katastrophen“. Man will also keine zusätzlichen oder unbekannte Ursachen zur Erklärung eines Phänomens heran ziehen, solange bekannte Ursachen dafür ausreichen.

Exzeptionalismus Exzeptionalismus (oder Anaktualismus) ist ein Deutungsprinzip für geologische Prozesse, die durch außergewöhnliche Umstände in der Erdgeschichte zustande gekommen sind und in der Gegenwart keine Entsprechung haben. In die gleiche Kategorie gehört der Begriff *Katastrophismus*, der im Rahmen der Astronomie sowie der Geologie und Paläontologie eine Denkrichtung darstellt, die von der überragenden Bedeutung von „katastrophalen Ereignissen“ für die Geschichte unseres Sonnensystems, der Erde und der Entwicklung (Evolution) der Lebewesen ausgeht. Der Begriff „Katastrophismus“ wurde 1832 von dem britischen Philosophen und Naturwissenschaftler William Whewell (1794 - 1866) geprägt und bekam durch die umstrittenen Schriften von Velikovsky ab 1950 in den USA wieder neue Aktualität.

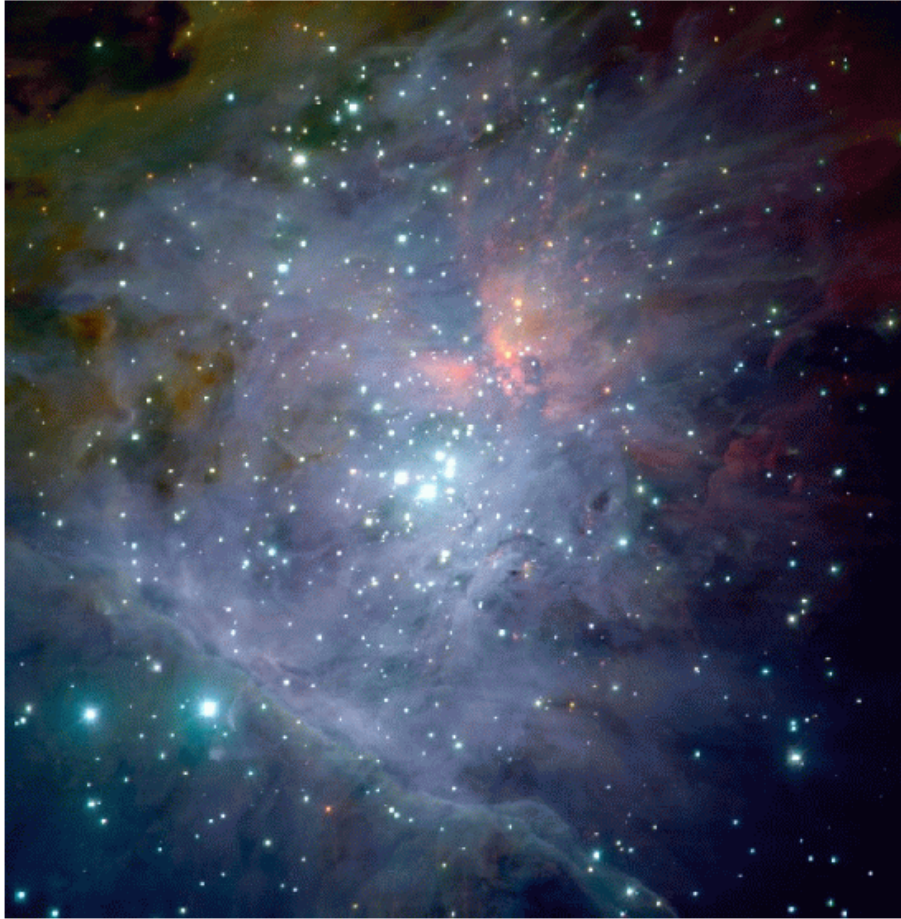
Heute muß man davon ausgehen, dass sich die „katastrophistischen“ und „aktualistischen“ Standpunkte zwar inhaltlich abgrenzen, aber beide zur Erklärung evolutionärer Vorgänge herangezogen werden müssen. *Generell gilt hier, dass mit zunehmendem Abstand von der Gegenwart eine aktualistische Deutung evolutionärer Befunde im Planetensystem immer unsicherer wird.* Wir wollen daher hier ein alternatives Szenario zur Entstehung von Gasriesen (nicht *terrestrischen Planeten*) in unserem Sonnensystem diskutieren, welches sowohl „exzeptionelle“ als auch „graduelle“ Züge enthält. Überträgt man in *Analogie* die Wechselwirkungen von Zwerggalaxien im frühen Universum auf junge Protosterne mit ihren protoplanetaren Scheiben in jungen Sternhaufen, so ist im Extremfall die Kollision eines braunen Zwergsternes mit dem noch jungen Sonnensystem ein zwar unwahrscheinlicher, aber doch möglicher physikalischer Vorgang. Wir stellen also jetzt die Hypothese auf, dass ein solcher Kollisionsvorgang – ganz in Analogie zu Galaxien – nicht zur Geburt neuer Sterne führt, sondern die „Geburtsstunde“ von genau zwei Riesenplaneten ist (siehe Abbildung 20). Es stellt also eine Synthese zwischen



18: *Im frühen Universum waren Kollisionen von Galaxien häufiger als heute, da ihre gegenseitigen Distanzen geringer waren. In Analogie können wir annehmen, dass auch in jungen gerade entstandenen Sternhaufen die Protosterne mit ihren Akkretionsscheiben noch sehr eng beisammen standen. Nahe Begegnungen oder Scheiben - Scheiben Kollisionen waren in diesem Stadium möglich. Heute hat sich der Sternhaufen, aus dem unsere Sonne hervorgegangen ist, vollständig aufgelöst (wieder eine Analogie zur kosmischen Expansion!)*

„Zufall“ und physikalischer „Notwendigkeit“ her.

Es wird angenommen, daß die Sonne mit anderen Sternen und “braunen“ Zwergsternen in einer kleinen interstellaren Molekülwolke entstanden ist. Mittlerer Abstand der unterschiedlich großen neugeborenen Sterne etwa 10000 AE. Ein brauner Zwergstern von etwa 15 Jupitermassen bewegt sich nun in der Frühphase, also vor etwa 4.56 Milliarden Jahren, rein zufällig so um die Sonne in einer nahen Parabelbahn, daß er zweimal die solare Akkretionsscheibe an diametral gegenüberliegenden Stellen durchstößt und dann das System für immer verläßt. Die erste Kollision fand vielleicht bei etwa 7 AE Entfernung statt, die zweite bei etwa 25 AE. In einem alternativen Szenario könnte man auch mit zwei Zwergsternen die zwei Kollisionen bewerkstelligen, aber das ist – gemäß Poisson-Statistik zeitlicher Ereignisse – wesentlich unwahrscheinlicher. Schon einfachste zweidimensionale hydrodynamische Modelle zeigen, daß bei jedem Durchgang durch die Scheibe *zwei* spiralförmige Dichtewellenfragmente oder langgestreckte Wirbel entstehen,

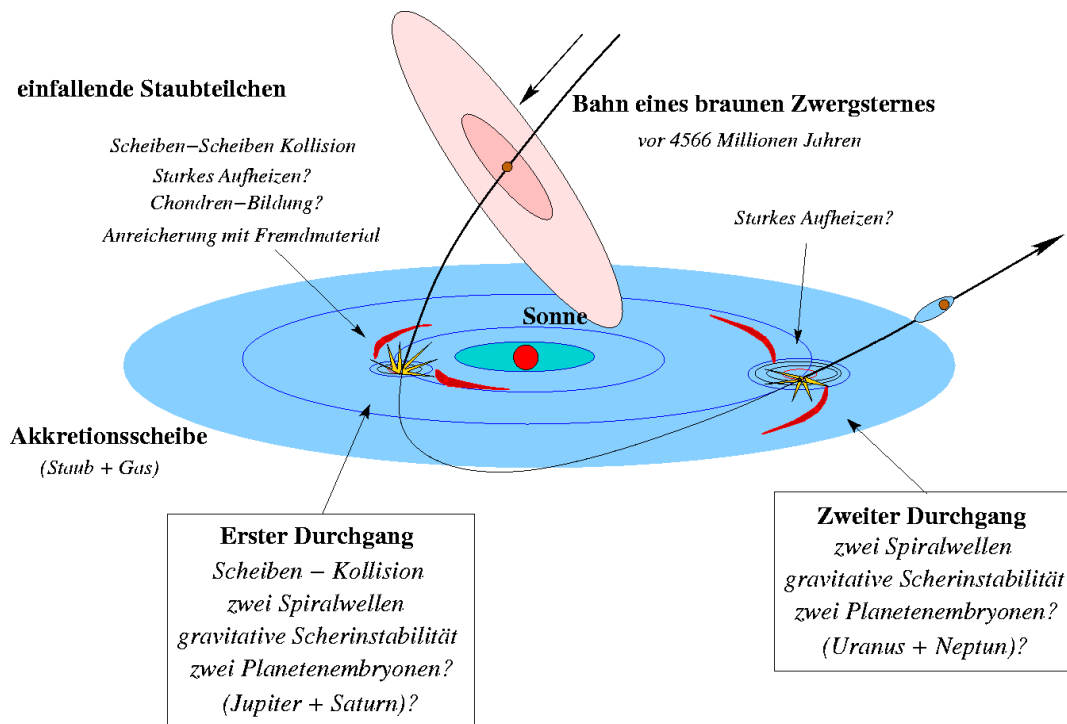


19: *Der junge Trapez-Sternhaufen im Sternbild Orion. Neben Jungsternen mit Akkretions-scheibe sind auch braune Zwergsterne auf dieser Aufnahme entdeckt worden (Aufnahme des 'Very Large Telescope der ESO). Enge Begegnungen zwischen den Haufenmitgliedern sollten in den ersten 10 Millionen Jahren nach ihrer Bildung relativ häufig vorkommen. (VLT ANTU + ISAAC)*

die zunächst den Charakter einer Stoßwelle haben sollten (siehe Abbildung (22)). Das eine durch die keplerische Scherströmung sich bildende Wellenfragment bewegt sich vom Einschlagort nach innen, das andere Wellenfragment nach außen. Hat der braune Zwergstern das System verlassen, befinden sich also vier spiralförmige Dichtestrukturen oder Wirbelstrukturen in der Scheibe.

Entscheidend ist nun, ob und wie diese verdichteten Schockfronten oder Wirbelstrukturen in der Lage sind, das Staubmaterial in der Scheibe so stark aufzusammeln, daß längerlebige lokale Verdichtungen (stabile Wirbelstrukturen ?) und somit letztendlich *embryonale* Planetenkerne in bestimmten radialen Abständen in der Scheibe entstehen können. Eine wichtige Rolle dürfte hier die gravitative Scherinstabilität in Materiescheiben spielen, die einmal erzeugte Spiralstrukturen weiter anwachsen läßt und auch für die Spiralstruktur von Galaxien verantwortlich ist. Die Wachstumsrate dieser Strukturen hängt insbesondere von den thermischen Bedingungen und den vorhandenen "Kühlpro-

zessen“ (thermische Abstrahlung im Staub-Gasmedium) ab.



20: Das vorgeschlagene Szenario für die Bildung von 2+2 Riesenplaneten (Jupiter & Saturn und Uranus & Neptun) im solaren Nebel. Ein im Sternhaufen in unmittelbarer Nachbarschaft (10000 AU) mit der Ursonne neugeborener brauner Zwergstern bewegt sich auf einer Parabel-Hyperbelbahn so um die Sonne, dass er die Akkretionsscheibe an zwei diametral gegenüberliegenden Stellen durchstößt und so die Bildung von vier Spiralwellen-Fragmenten (Wirbel) auslöst. Wenn diese Dichtewellen in der Lage sind, effektiv Staubmaterial in Stoßfronten für eine gewisse Zeit zu fokussieren, könnten 2+2 Planeten-Embryonen schneller als im Standardmodell entstehen.

Aus dem vorgeschlagenen Szenario²⁴ ergibt sich sofort die Folgerung, dass bei jedem Durchgang des Zwergsternes durch die Scheibe sofort zwei turbulente "Staublawinen" bilden könnten, welche Vorläufer für Gasplaneten-Embryonen mit mehr oder weniger ähnlichen Eigenschaften sein könnten. Bei einem doppelten Transit durch die solare Akkretionsscheibe in genügend radialem Abstand könnten sich so genau vier Planetenembryonen, aufgeteilt in zwei Paare, bilden! Natürlich ist die physikalische Deutung irgendwelcher Planetenabstände in Form einer *wachstumsbedingten* Titius-Bodeschen Regel eine reine Illusion. Spätere Entwicklungseffekte bevorzugen aber genäherte Resonanzstrukturen der Umlaufzeiten zwischen *gleichzeitig erzeugten* Planeten (Jupiter/Saturn 5:2; Uranus/Neptun 2:1). Das Vorhandensein der physischen Paarstruktur und der Resonanzstruktur spricht – *unabhängig von dem vorgeschlagenen Szenario* – zumindest für

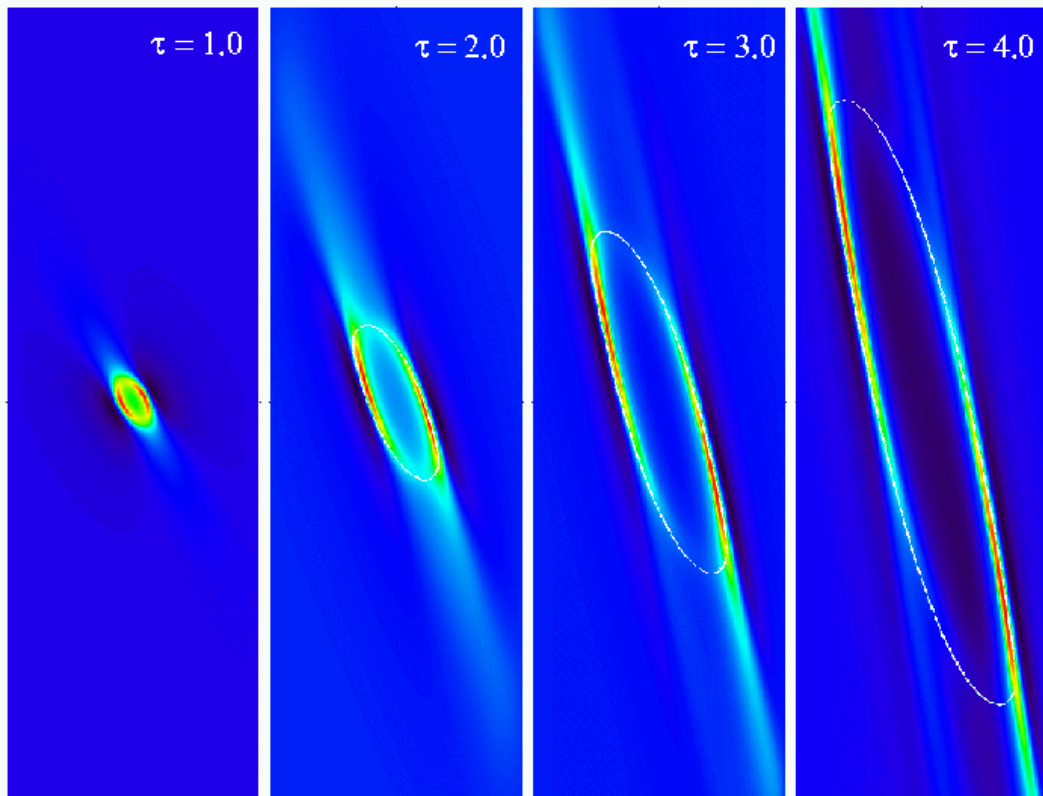
²⁴Es lassen sich natürliche mehrere Varianten denken - zum Beispiel die zeitlich getrennte Begegnung mit zwei verschiedenen braunen Zwergsternen oder mit einem braunen Doppel-Zwergstern.



21: In Dünnschliffen von chondritischen Meteoriten findet man millimetergroße kugelförmige Einschlüsse, sogenannte Chondren. Im rechten Teil sieht man drei davon. Im linken Bildteil sieht man eine Chondre, die zusätzlich von einem Mantel dünnen metallischen Materials umgeben ist. Bis heute ist unklar, welcher hochenergetische Prozeß in der noch jungen protoplanetaren Scheibe diese Gebilde geformt hat.

eine gemeinsame Entstehungsgeschichte der Paare Jupiter/Saturn und Uranus/Neptun sowie einer entwicklungsbedingten Entstehung der Bahn-Resonanzen.

Da der hypothetische braune Zwergstern wohl auch eine Akkretionsscheibe hatte, geht diese sicherlich beim ersten Durchgang durch die Scheibe dem Kern verloren. Wahrscheinlich ist diese Scheiben-Scheiben Kollision das spektakulärste energetische Ereignis. In einem großen Gebiet um die erste Einschlagstelle (Durchgangsstelle) wird also die solare Akkretionsscheibe (Gas und Staubteilchen) „schockartig“ aufgeheizt und mit „Fremdmaterial“ angereichert. Insbesondere in den heutigen Meteoriten sollte man noch Spuren dieses gigantischen und kurzfristigen Aufheizungsprozesses finden können. Ein vielversprechender Hinweis für einen derartigen hochenergetischen Prozeß sind vielleicht die kugelförmigen millimeter-großen Chondren in bestimmten chondritischen Meteoritenklassen. Geschmolzenes Material mit ihrer Zusammensetzung erfordert Temperaturen von 1500°-1800°C. Laborexperimente haben dann gezeigt, dass die sehr schnell aufgeheizten Chondren sich mit einer Rate von etwa 100-1000°C/Stunde im solaren Nebel abgekühlt haben müssen. Diese Rate ist etwa um den Faktor 100 *langsamer* als man von millimetergroßen Tröpfchen bei solch hohen Temperaturen erwartet, wenn sie frei in den Raum (Vakuum) abstrahlen können. Aus dieser Diskrepanz folgert man, dass die Regionen, in welcher die Chondren gebildet wurden, sehr ausgedehnt und sehr „staubig“ gewesen sein müssen. Doch viele Fragen zu diesen seit 200 Jahren bekannten meteoriti-

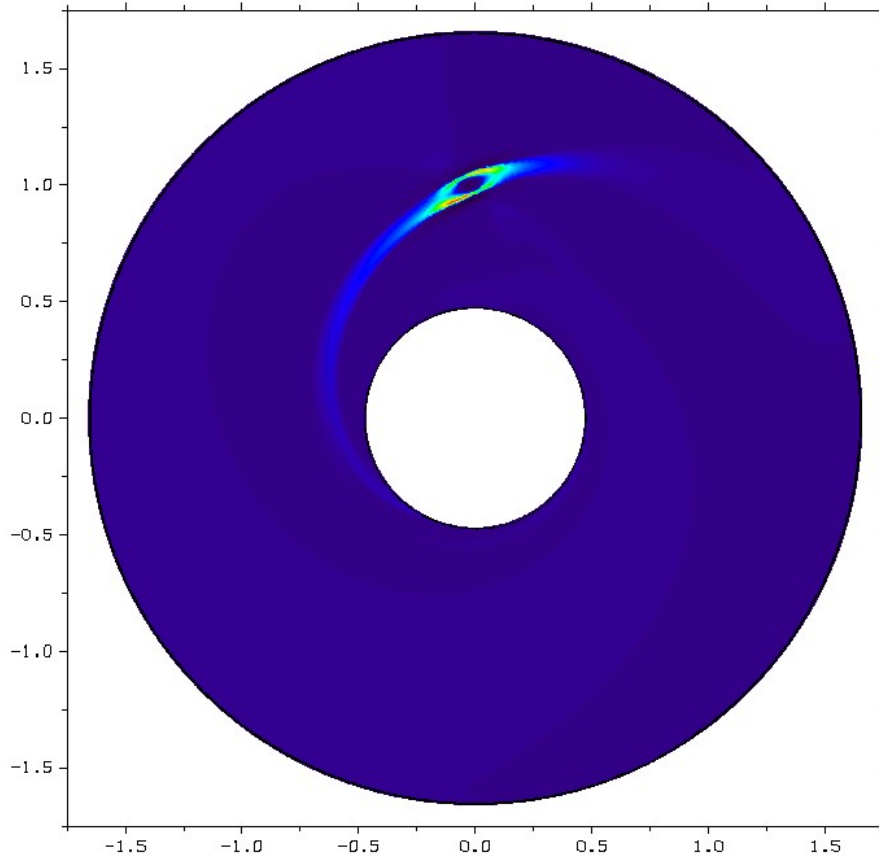


22: Diese Zeitsequenz von vier Bildern zeigt die Strukturänderung in einem gasförmigen zweidimensionalen Akkretionsscheibenmodell um den Einschlagort eines gravitierenden Körpers, der senkrecht durch die Scheibe gegangen ist. Jedes Bild stellt einen lokalen Ausschnitt aus der Scheibe von etwa der Größe 1×3 AE (Astronomischen Einheiten) dar. Die horizontale Achse ist dabei die radiale Richtung der Scheibe. In der dimensionslosen Zeitskala τ bedeutet dann $\tau = 1$ hier etwa 3 Jahre nach der Kollision, $\tau = 2$ etwa 6 Jahre nach dem Durchgang ($\tau = 2\pi$ bedeutet eine Umlaufperiode von etwa 20 Jahren). Die weiße Kurve stellt eine bestimmte analytische Lösung der erlaubten Wellenfront dar.

schen Einschlüssen sind unbeantwortet. Wann und wo in der Scheibe wurden sie geformt? Aus welchem Reservoir wurden sie gemacht und wie schnell wurden sie erhitzt und wieder abgekühlt? Welcher Prozeß lieferte die Energie, um Chondren zu schmelzen? Waren es Stoßwellen, blitzartige Entladungen in der Gasscheibe oder protostellare Jets? ([6]).

Das obige Modell der paarweisen Bildung von Planetenembryonen könnte einige Probleme des klassischen Planetesimal – Modelles überwinden. Einige der offenen Probleme im Standardmodell sind:

- Das Wachstum der Mikrometerteilchen zu Millimeterteilchen könnte allein durch diese Dichtestörung angeregt werden
- Metergroße Planetesimals haben die höchste nach innen gerichtete Driftgeschwindigkeit in der Gasscheibe. Durch entstehende „Stoßwellen“ könnten diese Teilchen eingefangen und somit an der Wanderbewegung gehindert werden.



23: *Impaktinduzierte Entstehung von spiralförmigen Dichtewellenpaaren in einer protoplanetaren Scheibe. Gezeigter Zeitpunkt ist hier $\tau = 1.6$, bezogen auf den Radius 1 mit einer Umlaufzeit von 2π . Deutlich haben sich hier schon zwei „hot spots“ gebildet. Die Machzahl, also das Verhältnis von Keplergeschwindigkeit zur Schallgeschwindigkeit, ist in dieser einfachen Hydro-Simulation 20. Sind diese Wellen Ursache für die Entstehung von Planetenpaaren?*

- Der schnelle Wachstumschub der Planetesimalen von Metergröße zu Kilometergröße könnte allein durch diese „Dichtewellen“ verursacht werden.

Die Chemie der Planetenpaare Jupiter/Saturn und deren Monde könnte somit zum Teil durch das Material des Zwergsternes und besonders seiner Scheibe bestimmt sein. Beim zweiten Durchgang sollte dieser Effekt nicht mehr so groß sein. Das erklärt vielleicht schon in erster Näherung die Verschiedenheit der Zwillingspaare Jupiter/Saturn und Uranus/Neptun und deren chemische Anomalien zur Sonne. Heutzutage wird nur noch wenig beachtet, dass der heutige Sonnenäquator im Mittel etwa 5 Grad zur heutigen Ebene der Bahnen der Riesenplaneten geneigt ist. Auch dieses Faktum könnte eine zwanglose Folge des obigen Szenarios sein, da beim Vorübergang des braunen Zwerges die solare Akkretionsscheibe ein wenig „verbogen“ und „gekippt“ wurde, so daß nach dem Ereignis die Bahnebenen der meisten nun anwachsenden Planetesimalen und späte-

ren Riesenplaneten nicht mehr mit dem Sonnenäquator übereinstimmen. Weiter gäbe es auch die Möglichkeit, dass Kuipergürtel-Objekte, die eine Bahnneigung von 45 Grad und mehr haben, *gar nicht in unserem Sonnensystem entstanden sind, sondern "Austauschobjekte" aus dem Scheibensystem des braunen Zwerges oder eines später erfolgten Ereignisses darstellen*. In unserem eigenen Sonnensystem kann es also versteckte *extrasolare Kleinstplaneten* geben, die „genetisch“ im kosmogonischen Sinn nichts mit unserem System zu tun haben. Selbst eine Begegnung mit einem anderen Stern in etwa 150 AU Distanz in der Frühphase unseres Planetensystems kann nicht ausgeschlossen werden. Die Folgen (kummulative Verteilung der Bahnneigungen und Bahnexzentrizitäten) sollte man noch heute im äußeren Kuipergürtel sehen können.

Drei wichtige Argumente sprechen für das vorgeschlagene Entstehungs – Szenarium:

- Die genäherte 5:2 Resonanz bei Jupiter & Saturn spricht für eine *gemeinsame* Entstehungsgeschichte der beiden Planeten Jupiter und Saturn. Das Gleiche gilt auch für das Paar Uranus & Neptun und ihre genäherte 2:1 Resonanz.
- Computersimulationen zeigen, daß ein einzelner Riesenplanet in einer Scheibe durch eine Art von „dynamischer Reibung“ zum Zentralstern wandert (Typ I/II/III Migration). Die Entstehung von kleinen terrestrischen Planeten wäre dann nicht mehr möglich. Bei gleichzeitig gebildeten Zwillingplaneten ist diese dynamische Wanderbewegung weniger stark ausgeprägt und geht manchmal auch in die entgegengesetzte Richtung.
- Die Neigung der invariablen Ebene des Planetensystems (im wesentlichen die der Jupiterbahn) zum Sonnenäquator beträgt etwa 5 - 7 Grad. Diese Diskrepanz kann eine natürliche Folge der gravitativen Störung des Zwergsterns oder eines weiter außen erfolgten Sternvorüberganges sein.

Argumente *gegen* die Existenz eines Prozesses der paarweisen Bildung von Riesenplaneten müßte man in den extrasolaren Planetensystemen suchen. Gäbe es zum Beispiel in unserem Sonnensystem neben Uranus und Neptun noch einen dritten etwa gleichgroßen Gasplaneten in einer Kreisbahn bei etwa 45 AE, so wäre das hier besprochene Modell der impaktinduzierten Paarbildung sofort hinfällig oder wenig glaubwürdig. Wichtig bleibt also die Frage: Wie häufig sind unter den über 200 extrasolaren Planeten Systeme mit genau *zwei* Gasriesen auf fast kreisförmigen Bahnen um den Zentralstern? Gibt es Systeme mit zum Beispiel exakt *nur* drei Gasriesen auf nahezu Kreisbahnen um den Zentralstern?

Auf theoretischer Seite müssen in der Zukunft die physikalischen Vorgänge der Scheiben - Scheiben Kollision und die angeregten Wellenfronten sehr genau diskutiert werden. Das Modell steht oder fällt mit dem Problem, ob die Störungen in der Lage sind, Staub sehr effektiv auf engem Raum zu fokussieren und zu größeren Körpern (Planetenkernen) zu formen.

Ein mathematisches Impakt-Modell Man kann das Grundprinzip dieser *nichttrivialen Wellenpaar - Erzeugung* in einer zweidimensionalen differentiell rotierenden Gasscheibe an einem einfachen *eindimensionalen hydrodynamischen Modell* versinnbildlichen. Betrachtet man

ein Gasmedium mit der Dichte ρ ohne Rotation und Gravitation und führt kleine Störungen der Dichte und der Geschwindigkeit ρ_1 und V_1 ein, so gelten die linearisierten Gleichungen

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \rho \frac{\partial V_1}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial V_1}{\partial t} = -\frac{c_s^2}{\rho} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} + A(x, t). \quad (60)$$

Dabei bedeuten c_s die Schallgeschwindigkeit des Mediums und $A(x, t)$ eine äußere Störung (z.B. Impakt). Aus beiden Gleichungen folgt für die Dichtestörungen die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - c_s^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial A(x, t)}{\partial x} = 0, \quad (61)$$

in der t die Zeit und x die Raumkoordinate bezeichnet. Eine ähnliche Gleichung gilt auch für die Transversal-Schwingungen einer Saite.

Als mathematisches Modell für die Störbeschleunigung $A(x, t)$ nehmen wir den Ausdruck

$$A(x, t) = K \delta'(x) \delta(t). \quad (62)$$

Hier ist K eine Konstante mit der Dimension Volumen/Zeit, welche für $K > 0$ eine Implusion und für $K < 0$ eine Explosion im Gasmedium am Ort $x = 0$ zum Zeitpunkt $t = 0$ beschreibt. $\delta(z)$ ist die Dirac'sche Deltafunktion. Die Wellengleichung für die Dichtefluktuationen lautet jetzt

$$\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} - c_s^2 \frac{\partial^2 \rho_1}{\partial x^2} + \rho K \delta''(x) \delta(t) = 0. \quad (63)$$

Bevor wir diese Gleichung lösen, betrachten wir die Ersatzgleichung

$$\frac{\partial^2 \rho_k}{\partial t^2} - c_s^2 \frac{\partial^2 \rho_k}{\partial x^2} + \rho K e^{i k x} \delta(t) = 0 \quad (64)$$

und machen den Ansatz

$$\rho_k(x, t) = f(t) e^{i k x}. \quad (65)$$

Für $f(t)$ gilt dann die Gleichung

$$\ddot{f}(t) + c_s^2 k^2 f(t) = -\rho K \delta(t). \quad (66)$$

Die Lösung ist eine spezielle Greensche Funktion des harmonischen Oszillators und lautet

$$f(t) = -\rho K \Theta(t) \frac{\sin(c_s k t)}{c_s k}. \quad (67)$$

$\Theta(t)$ bezeichnet die Heaviside-Funktion, welche für $t < 0$ verschwindet und für $t > 0$ den Wert eins hat. Zudem gilt $\Theta'(t) = \delta(t)$ und $\delta'(t) = -\delta(t)/t$. Die Ersatzgleichung besitzt somit die Lösung

$$\rho_k(x, t) = -\rho K \Theta(t) \frac{\sin(c_s k t)}{c_s k} e^{i k x}. \quad (68)$$

Nun gilt aber

$$\delta(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i k x} dk; \quad \delta''(x) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k^2 e^{i k x} dk. \quad (69)$$

Daher gilt durch Superposition auch

$$\varrho_1(x, t) = -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} k^2 \varrho_k(x, t) dk. \quad (70)$$

Damit ergibt sich die Darstellung

$$\varrho_1(x, t) = \frac{\varrho K}{2\pi c_s} \Theta(t) \int_{-\infty}^{+\infty} k \sin(c_s k t) \cos(k x) dk \quad (71)$$

oder

$$\varrho_1(x, t) = -\frac{\varrho K}{2\pi c_s^2} \Theta(t) \frac{\partial}{\partial t} \int_{-\infty}^{+\infty} \cos(c_s k t) \cos(k x) dk \quad (72)$$

Wegen

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \cos(c_s k t) \cos(k x) dk = \frac{1}{2} \delta(x + c_s t) + \frac{1}{2} \delta(x - c_s t) \quad (73)$$

folgt endgültig

$$\varrho_1(x, t) = \frac{\varrho K}{c_s} \Theta(t) \left[\frac{1}{2} \delta'(x - c_s t) - \frac{1}{2} \delta'(x + c_s t) \right]. \quad (74)$$

Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung folgt für die Geschwindigkeitsstörung $V_1(x, t)$ der Ausdruck („Tsunami-Wellen“)

$$V_1(x, t) = K \Theta(t) \left[\frac{1}{2} \delta'(x - c_s t) + \frac{1}{2} \delta'(x + c_s t) \right]. \quad (75)$$

Anhand der obigen Formeln sieht man schon sehr schön die *wellenmechanische Paarerzeugung* von zwei „Dichtefronten“ durch Aufspaltung einer singulären Impakt-Anregung zum Zeitpunkt $t = 0$. Diese *ursprüngliche Existenz von Wellenpaaren* könnte sich heute in der Existenz der „Zwillingsplaneten“ Uranus/Neptun oder auch Jupiter/Saturn manifestieren.

8 Über die Mehrheiten der Welten

Das Problem der Planetenentstehung führt in der populären Literatur immer zu einer anderen mehr philosophischen Frage, die mit der Entwicklung und der Wahrscheinlichkeit der Entstehung der Planeten einhergeht: das Problem der Entstehung des Lebens. Sind wir Menschen mit unserer Evolutionsgeschichte auf unserem blauen Planeten im Universum völlig allein?

Der Mensch hat wohl schon immer eine Neigung gehabt, andere Planeten und sogar andere Sterne als bewohnt anzusehen. So belehrte 1760 der Mathematiker Leonard Euler die brandenburgische Prinzessin Friedericke in seiner Schrift „Briefe an eine deutsche Prinzessin über verschiedene Gegenstände aus der Physik und Philosophie“ : *Jeder Fixstern scheint dazu bestimmt, eine gewisse Anzahl von Körpern zu erleuchten und zu wärmen, die unserer Erde ähnlich und ohne Zweifel so wie diese bewohnt sind.* Und

nachdem Euler ihr die damals bekannten Planeten bis Saturn erklärt hatte, bemerkte er abschließend: *Aus diesen Körpern also besteht unser Weltsystem; und es ist sehr wahrscheinlich, dass jeder Fixstern ein ähnliches habe.* Euler war stark von einem theologischen „Schöpferglauben“ geprägt und hatte scharfe Auseinandersetzungen mit dem Aufklärer und Enzyklopädisten Denis Diderot, der sich 1773 als Gast bei Katharina der Großen in Sankt Petersburg aufhielt.

Die gleichen Ansichten wie die von Euler kann man auch 1794 in der deutschen Übersetzung von Herrn von Fontenelle's *Unterredungen über die Mehrheiten der Welten (ein astronomisches Handbuch für das schöne Geschlecht)* lesen. Doch die Vorstellung, dass jeder Einzel-Stern ein ähnliches Planetensystem wie unsere Sonne hat, vielleicht ebenso mit einem bewohnten Planeten, wandelte sich im Laufe des 19. Jahrhunderts. Zu nennen wäre hier der schon im Zusammenhang mit dem Begriff „Katastrophismus“ erwähnte Philosoph und Gelehrte William Whewell (1794 - - 1866), Master des Trinity College, Cambridge. Er war einer der einflussreichsten Denker in Großbritannien des neunzehnten Jahrhunderts und schrieb über Mechanik, Mineralogie, Geologie, Astronomie, politische Ökonomie, Philosophie und Geschichte der Wissenschaften sowie Theologie. Von Interesse ist hier sein Buch „Of the Plurality of Worlds. An Essay“ aus dem Jahre 1853. Hatte er bis dahin die vorherrschende Meinung vertreten, daß das Universum voll von bewohnbaren Planetensystemen ist, präsentierte er nun einige Argumente dagegen. Vor 1850 schrieb er zum Beispiel: *Does not even science herself compel us to expand our notion of God's vivifying and cherishing care, when she ... shews us the myriads of animals that live in ... the drop of water?*; oder 1833: *[the stars] ... may ... have planets revolving around them; and these may, like our planet, be the seats of vegetable and animal and rational life: - we may thus have in the universe worlds, no one knows how many, no one can guess how varied*



24: William Whewell

Doch ab 1850 sieht Whewell Schwierigkeiten, die Häufigkeit von intelligentem Leben auf anderen Planeten im Universum mit monotheistischen abrahamitischen Mythologien in Einklang zu bringen. So schreibt er in „Astronomy and Religion“: *... God has interposed in the history of mankind in a special and personal manner; ... that one, having a special relation to God, came from God to men in the form of a man ... [Consequently] what are we to suppose concerning the other worlds which science discloses to us? Is there a like scheme of salvation provided for all of them? Our view of the saviour of man will not allow us to suppose that there can be more than one saviour. And the saviour coming as a man to men is so essential a part of the scheme ... that to endeavour to transfer it to other worlds and to imagine there something analogous as existing, is more repugnant to our feeling than to imagine those other worlds not to be provided with any divine scheme of salvation*

Whewell führt als weiteres Argument die „Verschwendung“ von Zeitperioden an, bis

der erste Mensch auf unserem Planeten auftrat. Wieviele Lebewesen mußten entstehen und vergehen, bis der Mensch auftrat? Ist diese Welt wirklich von einem „Gott“ nur für den Menschen gemacht? Und wenn, fragt Whewell, ein „Gott“ den Menschen nur für eine sehr kleine Zeitperiode in die Erdgeschichte gesetzt hat, wäre es dann nicht möglich, dass auch nur ein sehr kleiner Teil der möglichen Planeten im Universum überhaupt intelligentes Leben beherbergen kann? Um seine religiös motivierten Vorstellungen auch wissenschaftlich zu untermauern, suchte er nach Gründen, warum biologisches Leben im Universum selten sein könnte. So meint er, dass einige Sterne zu leuchtschwach seien oder zu starke Leuchtkraftfluktuationen hätten. In den zahlreichen Doppelsternsystemen wären stabile Planetenbahnen nicht möglich. Seine *astrobiologische* Sicht auf das Sonnensystem klingt aus heutiger Sicht sehr modern: Außer auf der Erde gibt es vielleicht nur auf dem Mars „primitives“ Leben. Whewell ist also einer der Ersten, der sich paradoxerweise wieder die „geozentrische“ Frage stellt: *Sind wir allein im Universum?*²⁵

Mit diesen neuen antipluralistischen Ansichten unterschied sich Whewell deutlich von seinen Zeitgenossen, zum Beispiel von seinem Landsmann und Physiker David Brewster. Sein Buch, *More Worlds than One: The Creed of the Philosopher and the Hope of the Christian* (1854), argumentiert kompromislos für einen Pluralismus, der geschaffen („designed“) wurde, um die kosmische Herrlichkeit „Gottes“ und seiner „Werke“ zu offenbaren. Nach Brewster hat jeder Stern ein Planetensystem, jeder Planet hat Leben, ja selbst die Sonne und der Mond sind bewohnt (was Whewell, gestützt auf Beobachtungen von Bessel, ablehnt)²⁶.

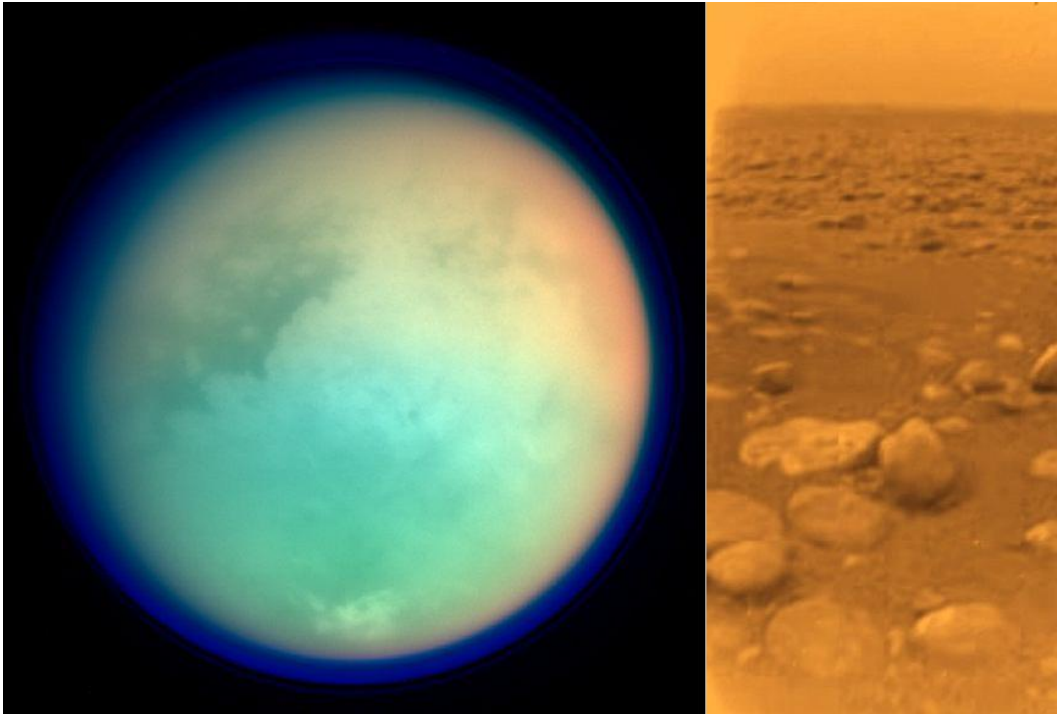
Die Frage nach möglichem Leben im Universum hängt natürlich entscheidend mit dem Problem zusammen, wie die ersten „Urbakterien“ entstanden sind. 1859 erschien das Buch *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* von Charles Darwin (1809 - 1882). Darwin vertritt hier ein Prinzip der Evolution durch graduelle Variation und Selektion der unterschiedlichen „Arten“. Das Konzept einer starren „Typologie“ von unveränderlichen Organismen wurde hier also aufgegeben. Die Evolutionstheorie wurde sofort begeistert aufgenommen, in Deutschland besonders von Ernst Haeckel (1834 - 1919), der schon 1868 mit seinem Buch „*Natürliche Schöpfungsgeschichte*“ sich deutlich zur Darwinschen Evolutionstheorie bekannte²⁷

1971 erschien in Frankreich das Buch *Zufall und Notwendigkeit (Le hasard et la necessite'* [13]), geschrieben von dem Molekularbiologen und Medizin-Nobelpreisträger Jacques Monod. Er stellte in seinem Buch die Hypothese auf, daß das Leben in all seinen Formen aus unbelebter Materie nur durch eine äußerst unwahrscheinliche Kombination von Zufallsumständen entstanden sein konnte. Und dieses Ereignis war seiner Meinung

²⁵Für den Astrophysiker Carl Sagan (1934 - 1996) war dies eine der wichtigsten Fragen der Menschheit. Das große Alter des Universums und die gigantische Zahl von Sternen macht es eigentlich wahrscheinlich, dass es „biotische“ Planeten sehr häufig geben sollte. Doch der Kernphysiker Enrico Fermi bemerkte 1950 zu diesem Problem nur: „Where are they?“ (Wo sind sie?“), was auf fehlende Radiosignale aus dem All hindeuten sollte (Fermi Paradoxon).

²⁶Das Buch von Brewster (Pluralismus) hat sich damals besser verkauft als das Buch von Whewell (Antipluralismus)

²⁷Ernst Haeckel (1834-1919), der Schöpfer des heutzutage modernen Wortes *Ökologie*, war emotional durchdrungen von Goethes Ideal des *Wahren, Guten* und *Schönen*, als Forscher, als Mensch und als Künstler.



25: *Der Saturnmond Titan im Infrarotlicht und ein Blick von der gelandeten Sonde Huygens (Januar 2005) auf die fremdartige Titanoberfläche. Organisches Leben scheint es hier wie auf dem Mars nicht zu geben und ist hier wohl auch nie entstanden.*

nach nicht nur sehr unwahrscheinlich, sondern hatte die Wahrscheinlichkeit Null – somit ein *einzigartiges* Ereignis (*Wir sind nur Zigeuner am Rande des Universums*). Monod, geprägt von der Geistesrichtung des *Existenzialismus*, begründet seine wissenschaftliche Hypothese (denn sie kann falsifiziert werden!) mit der logischen Schwierigkeit, die Entstehung und den Übersetzungsmechanismus des einzigartigen *genetischen DNA-Codes* zu verstehen. Wie kann Information aus Nicht-Information entstehen? Nach Monod ist das Leben auf unserem blauen Planeten Produkt eines extrem unwahrscheinlichen Zufalls, die Existenz des Menschen wie aller anderen Lebewesen auf der Erde eine evolutionäre „Einzigartigkeit“. Die DNA-Doppelhelix als Informationsträger ist ein reines Archiv des „Zufalls“. Monod schließt mit der Bemerkung: *Am Ende wird der Mensch vielleicht erkennen, daß er ganz allein in der gefühllosen Unermesslichkeit des Universums ist, aus der er nur durch „Zufall“ hervorgegangen ist. Nicht nur sein Los, auch seine Pflicht steht nirgendwo geschrieben.*

Um 1970 stellte die Biologin Lynn Margulis ihre zunächst umstrittene *Endosymbiontenhypothese* auf, die in Grundzügen schon von dem russischen Biologen Mereschkowski (1855-1920) 1905 vorgeschlagen wurde, nach der Teile der Zellkerne von Tieren und Pflanzen sich aus ursprünglich eigenständigen Cyanobakterien aufbauen, also sich gegenseitig einverleibt haben (unvollständiger Kannibalismus). Zuerst entstanden also die Bakterien und brachten durch Verzweigung eine immense Vielfalt hervor. Dann vereinigten sich Zweige durch Symbiogenese der Bakterien zu Protoctisten, die sich dann weiter

zu Pilzen, Tieren und Pflanzen weiterentwickelten. Ob eine solche biologische Entwicklung außer auf der Erde auch auf anderen Planeten im Universum stattgefunden hat oder gerade stattfindet, ist eine völlig offene Frage.²⁸

Mit dem Physiker und Planetologen James Lovelock ist Lynn Margulis auch Vertreterin der GAIA-Hypothese, die besagt, dass die Erde selbst ein gigantischer „lebender Super-Organismus“ ist. Begründet wird dies damit, dass die Gesamtheit aller lebenden Organismen und nichtlebendigen Teile der Erde Teil eines dynamischen Systems sind, welches die gesamte Biosphäre durch *negative* Rückkopplung mit der Geosphäre stabil hält. Evolution bezieht sich bei GAIA also nicht nur auf die biotische Welt, sondern Evolution heißt gekoppelte Entwicklung der biotischen und der abiotischen Umwelt. Zum Beispiel soll der Sauerstoffanteil in der Erdatmosphäre, ihre mittlere Temperatur oder der Salzgehalt der Weltmeere durch die Biomasse (unzählige Mikroben) auf einem konstanten Wert gehalten werden, der weit von einem chemischen Gleichgewicht entfernt ist. Berühmt wurde das Modell (*die unrealistische Karikatur eines Klima-Modelles!*) der „Gänseblümchen“ (daisyworld), in welchem es nur schwarze und weiße Blumen gibt. Erhöht sich die äußere Einstrahlung (Solarkonstante), wachsen mehr weiße Blümchen, ist die Einstrahlung geringer, mehr schwarze Blümchen, um so die Temperatur auf der Planetenoberfläche nahezu konstant zu halten (Albedovariationen). Mit Hilfe von Computern lassen sich heute realistischere und komplizierte Wechselwirkungen – Systeme als *zelluläre Automaten* simulieren. Aus der GAIA - These kann man zwei wichtige Konsequenzen ziehen:

- Das Ökosystem Geosphäre - Biosphäre ist gegenüber Störungen (Vulkanausbrüchen, Meteoriteneinschlägen, Schwankungen der Solarkonstanten) durch negative Rückkopplungsmechanismen weitgehend stabilisiert. Überschreiten die Störungen allerdings eine kritische Marke, bricht das System irreversibel zusammen (Hysterese - Response).
- Ist die GAIA-These richtig, so *muß* ein neu entdeckter terrestrischer Planet mit einer spektroskopisch nachgewiesenen Sauerstoffatmosphäre organisches Leben beherbergen !.

Jim Lovelock schreibt im Vorwort seines Buches: *Gaia – A new look at life on Earth (1979): Das Bild von „Mutter Erde“ oder, wie die Griechen sie vor langer Zeit nannten, von Gaia ist durch die Jahrhunderte weithin lebendig geblieben und zur Grundlage eines Glaubens geworden, der sich noch heute neben den großen Religionen behauptet. Aus den immer tieferen Einsichten in unsere natürliche Umwelt und dem Fortschritt der Ökologie sind jüngst Vermutungen erwachsen, wonach die Biosphäre mehr sein könnte als nur die Gesamtheit aller lebenden Wesen, die Land, Wasser und Luft als ihre natürlichen Lebensräume bevölkern. Alter Glaube und neuzeitliches Wissen, beides verschmolz gefühlsmäßig in jener Ehrfurcht, mit der die Astronauten mit ihren eigenen Augen und*

²⁸Hier bietet sich eine Analogie zur kosmologischen Evolution von Galaxien an: Erst entstehen Zwerggalaxien im Kosmos, die dann durch enge Begegnungen sich durchdringen oder sich vereinigen (Galaxien - Kanibalismus) und so immer größere Galaxien bilden („bottom - up“ Szenario, kein „top - down“ Szenarium)

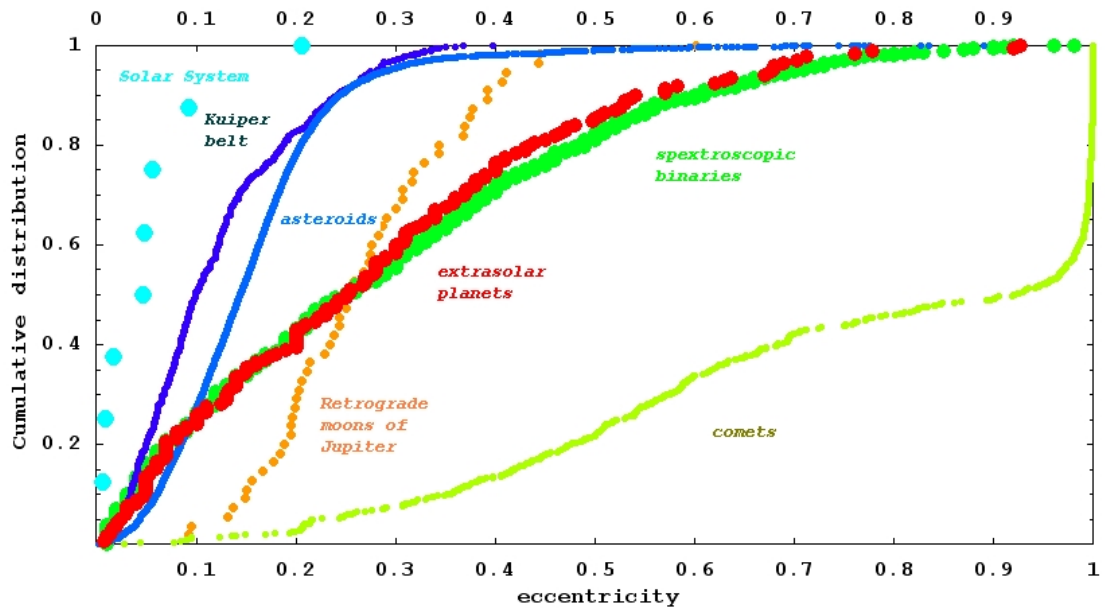
wir nur indirekt die Erde in all ihrer strahlenden Pracht vor dem tiefdunklen Hintergrund des Weltraums enthüllt sahen. Doch dieses Gefühl, so stark es sein mochte, beweist nicht, daß Mutter Erde lebt. Gleich einem religiösen Glauben läßt es sich nicht wissenschaftlich prüfen, ist es von seinem Wesen her dem Zugriff der Vernunft entzogen.

9 Resümee

Die letzten mehr philosophischen Diskussionen haben gezeigt, daß das Problem der Planetenentstehung ein über mehrere Wissenschaftsdisziplinen sehr vielschichtiges und multidisziplinäres Problem darstellt. Es berührt natürlich auch sehr stark Fragen nach der Entstehung von biologischem Leben und nach der allgemeinen Weltanschauung. Evolution, wie überhaupt die Geschichte vom Werden und Vergehen, leidet an einem großen "handicap: Man kann nicht experimentelle Methode benutzen wie in der Labor-Physik, weil man nicht hoffen kann, dass Geschichte sich genau so wiederholt. Geologie und Kosmologie sind wie die Biologie auch *historische Wissenschaften*. Wie in der „biologischen“ Gedankenwelt ist neben der Frage des „Wie“ auch hier die Frage des „Warum“ wichtig. Man kann also nicht nur physikalisch – reduktionistisch fragen: „Wie entstehen die gasförmigen Riesenplaneten?“, sondern auch „Warum gibt es nur die Planeten Uranus und Neptun im äußeren Sonnensystem?“ und „Warum haben diese beiden Riesenplaneten so ähnliche Eigenschaften?“. Auf eine Problemstellung kann es wie in der Evolutionsbiologie auch mehrere gültige Antworten geben ([12]). Als weiterer *biologischer* Aspekt kommt noch hinzu. Eine strenge Typologie (Klassifikation) extrasolarer Planetensysteme scheint wohl nicht mehr möglich zu sein, weil eben jedes komplexe System *individuelle historische* Eigenschaften hat – genauso wie Sterne und Galaxien.

Die Wissenschaft selber lebt von kühnen Hypothesen und ihren Falsifikationen. Das Impakt-Modell für die Bildung von Zwilling-Riesenplaneten in unserem Sonnensystem ist riskant: Da es Fakten nur durch zwei "Zufalls-Impakte" erklären will, birgt es die Gefahr, dass die Hypothese in der Zukunft widerlegt werden könnte. Doch diesem Risiko muß sich ein Wissenschaftler aussetzen. Modelle, mit denen man nicht rechnen kann, die keine Prognosen stellen oder die nicht falsifizierbar sind, vermehren nicht unser Wissen und gehören daher auch nicht in die Naturwissenschaft. Die Wissenschaftsgeschichte hat ja gezeigt, dass wir letztendlich nur an kühnen, riskanten Wahrheiten interessiert sind.

Die enge Begegnung eines braunen Zwergsternes mit der noch jungen Sonne mit Gas-scheibe in einem jungen Sternhaufen ist übrigens keineswegs so unwahrscheinlich, wie häufig angenommen wird. Mit plausiblen Annahmen (mittlerer Abstand der Protosterne etwa 10000 AE, Minimaldistanz zur Sonne etwa 10 AE und Lebensdauer der Scheibe 10 Millionen Jahre) kommt man zur Abschätzung, dass sehr grob etwa 5% der jungen Haufensterne ein solches Schicksal erleiden könnten. Trotzdem ist es ein seltener Vorgang und wir können nicht annehmen, dass alle heutzutage neu entdeckten extrasolaren Planetensysteme mit ihren Riesenplaneten so entstanden sind. Interessant sind natürlich diejenigen Systeme, wo genau zwei Riesenplaneten in fast Kreisbahnen und einer genäherten Resonanz um den Zentralstern laufen. Die relative Häufigkeit solcher Systeme innerhalb der Extrasolaren Planetensystems wäre für die Relevanz des Szena-



26: Die kummulative Statistik der Bahnexzentrizitäten von unterschiedlichen astrophysikalischen Objektklassen (Stand: 2006). Deutlich ist zu sehen, dass die Bahnstatistik der extrasolaren Planetensysteme kaum von spektroskopischen Doppelsternen zu unterscheiden ist. Ungestörte Kreibahnen von Riesenplaneten um Zentralsterne über Jahrmilliarden scheinen nicht so häufig zu sein. Die Kurven entstehen dadurch, daß eine Datenliste (e_i) nach steigender Größe sortiert wird und dann alle Punkte die Koordinaten $(e_i, i/N)$ bekommen, wo N die Anzahl der Daten ist

riums für die Bildung von „Zwillingsplaneten“ wichtig.

Das klassische Modell der sukzessiven Staubanlagerung zu immer größeren Körpern ist zumindest für die Entstehung der terrestrischen Planeten überzeugend. Aber im Hinblick auf die Daten der nun über 200 extrasolaren Planeten läßt sich aber schon sagen, dass unser Planetensystem mit seinen vier Riesenplaneten und ihren fast kreisförmigen Bahnen wohl schon eine recht *endemische Blume im unermesslichen Garten des Universums* ist.

Literatur

- [1] Brush, S.G. (1997). A History of Modern Planetary Physics. Vol. I-III. Cambridge University Press, New York 1997
- [2] Beatty, K.J., Petersen, C.C., Chaikin, A. (1999) *The New Solar System*. 4th Edition, Cambridge, Cambridge University Press 1999
- [3] Fahr, H.J., Willerding, E. *Die Entstehung von Sonnensystemen. Eine Einführung in das Problem der Planetenentstehung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 1998

- [4] Gauß, C.F. (1874): Werke Band **6**, p. 231. Königliche Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen 1874. Göttinger Digitalisierungs Zentrum. Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen. <http://dz-srv1.sub.uni-goettingen.de/cache/toc/D38910.html>
- [5] Gobnik, A. und A. Meltzoff. *Words, Thoughts, and Theories (Learning, Development, and Conceptual Change)* MIT - Press 1998.
- [6] Hewins, R., Jones, R. and Scott, E.: (1996) *Chondrules and the Protoplanetary Disk*. Cambridge (ISBN-10: 0521552885 ; ISBN-13: 9780521552882) (1996) pp. 360
- [7] Haeckel, E. (1899) *Die Welträtsel. Gemeinverständliche Studien über monistische Philosophie*. Nachdruck der 11. Ausgabe von 1919. Alfred Kröner Verlag Stuttgart 1984. ISBN: 352000111X
- [8] Humboldt, A.v. *Kosmos Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*. 1845. Vollständiger und erweiterter Nachdruck beim Eichborn VERLAG, Frankfurt am Main 2004. <http://www.humboldt-portal.de>
- [9] Jaki, L.S. 1978: *Planets and Planetarians. A History of Theories of the Origin of Planetary Systems*. Scottish Academic Press, Edinburgh
- [10] Lai, H.M., Lam, C.C. & K. Young (1990). Perturbation of Uranus by Neptune: A modern perspective. *Am.J.Phys* **58**,(10),1990
- [11] Margulis, L. (1999). *Die andere Evolution*. Spektrum Verlag.
- [12] Mayr, Ernst (2002): *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt. Vielfalt, Evolution und Vererbung*. Springer Verlag, Berlin 2002, 766 pp.
- [13] Monod, J. 1996. Zufall und Notwendigkeit. Philosophische Fragen der modernen Biologie. Serie Piper Bd. 2290, München
- [14] Nieto, M. M. (1972): *The Titius-Bode law of planetary distances: Its history and theory*. Oxford: Pergamon Press.
- [15] Nölke, F. (1947): *Zu C. F. v. Weizsäckers Hypothese über die Entstehung des Planetensystems*. In: *Zeitschrift für Astrophysik* **25**, 1-7.
- [16] Hegel, G.W.F. 1801. *Dissertatio Philosophica de Orbitis Planetarum*. In *Sämtliche Werke*, Band I, Frommans Verlag, Stuttgart 1927; Siehe auch „Philosophische Erörterung über die Planetenbahnen“. Übersetzt, eingeleitet und kommentiert von Wolfgang Neuser. Schriften zur Naturphilosophie, Band **2**. Weinheim: Acta humana d. VCH, 1986.[ISBN 3-527-17547-4]
- [17] Pauli, W. 1952: *Der Einfluß archetypischer Vorstellungen auf die Bildung naturwissenschaftlicher Theorien bei Kepler*. in *Naturerklärung und Psyche*. Studien aus dem C.G. Jung-Institut Zürich 1952

- [18] Popper, K.R. 1996. *Alles Leben ist Problemlösen*. Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. Serie Piper Bd. 2300, München
- [19] Popper, K.R. *Die Logik der Forschung*. Verlag Mohr Siebeck 2005. ISBN: 316148410X
- [20] **Protostars and Planets V**. Fünfte multidisziplinäre Konferenz über Sternentstehung, Planetenentstehung und Meteoritenforschung auf Hawaii im *Hilton Waikoloa Village* im Oktober 2005. Abstracts der mündlichen Konferenz-Vorträge sind einzusehen bei <http://www.lpi.usra.edu/meetings/ppv2005/oralprogramwithabstracts.pdf>
- [21] Stephen Schneider et al. (2004): *Scientists Debate Gaia : The Next Century*, MIT Press, 400 pages
- [22] Standish, E.M.: 1993, Planet X: No Dynamical Evidence in the Optical Observations, *Astronomical Journal*, **105**, no.5, 2000-2006.
- [23] Willerding, E. Wave propagation in protoplanetary disks: Formation of twin planets by 'disk - brown dwarf collisions? *Planetary and Space Science*, **50**/2, pp. 235-246, 2002