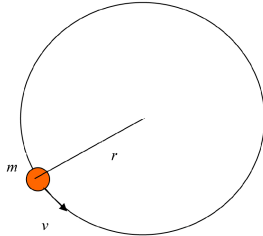


1. Physikalische Grundlagen

Bei der Planetenentstehung nach der Nebulartheorie spielen Drehimpulse und Drehimpulsübertragungen eine große Rolle.

Drehimpuls

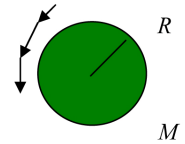


Der Drehimpuls beträgt bei einem um einen Punkt kreisenden Körper mit der Masse m , dem Radius r und der Geschwindigkeit v (s. Bild links):

$$L = r \cdot m \cdot v \quad (1) \text{ und für eine rotierende homogene}$$

$$\text{Kugel (s. Bild rechts): } L = \frac{2}{5} \cdot M \cdot R^2 \cdot \omega \quad (2),$$

wobei ω die Winkelgeschwindigkeit, M die Masse und R der Radius des Körpers ist. (rechts)

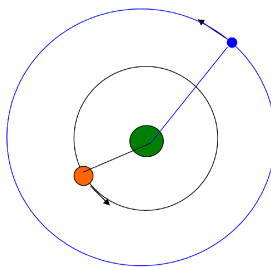


Folge:

Sind Masse und Abmessungen eines Körpers fest vorgegeben, dann erhöht sich sein Drehimpuls

- bei einer rotierenden Kugel mit der Drehzahl,
- bei einem kreisförmigen um einen Punkt umlaufenden Körper mit seiner Geschwindigkeit und dem Radius (Abstand zum Drehpunkt).

Drehimpulserhaltungssatz



Die Summe der Drehimpulse (bzw. Gesamtdrehimpuls) in einem System bleibt erhalten, wenn keine Kräfte von außen wirken. Bei gleicher Impulsrichtung gilt für nebenstehende Skizze:

$$L_{\text{ges}} = \frac{2}{5} M_{\text{grün}} \cdot R_{\text{grün}}^2 \cdot \omega_{\text{grün}} + m_{\text{rot}} \cdot r_{\text{rot}} \cdot v_{\text{rot}} + m_{\text{blau}} \cdot r_{\text{blau}} \cdot v_{\text{blau}} \quad (3)$$

Folge: Wird ein Drehimpulsanteil eines Körpers auf einen anderen übertragen, dann muss der abgegebene Anteil genau so groß sein wie der aufgenommene.

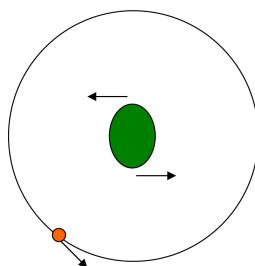
Drehimpuls und Keplersche Gesetze

Setzt man in die Drehimpulsgleichung (1) für v die Geschwindigkeit nach dem Keplersgesetz bzw. nach Newton ein, dann erhält man z. B. für den rot umlaufenden Körper in obiger Zeichnung:

$$L_{\text{rot}} = m_{\text{rot}} \cdot \sqrt{G \cdot M} \cdot \sqrt{r_{\text{rot}}} \quad (4)$$

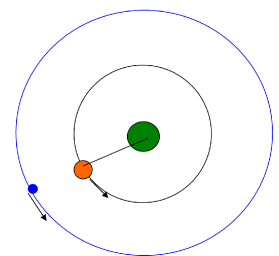
Folge: Gibt ein planetenähnlicher um ein Zentrum kreisender Körper Drehimpuls ab, dann verringert sich sein Abstand zum Zentrum, nimmt er Drehimpuls auf, vergrößert sich der Abstand.

Übertragung von Drehimpulsen



Direkt durch Anstoß oder Annäherung
Gezeiteneffekt (links): Grüner Zentralkörper dreht sich schneller als der rote Körper kreist., wodurch Drehimpuls vom grünen auf den roten übertragen wird. Grüner dreht langsamer, roter wandert nach außen (vgl. Erde-Mond)

Resonanzeffekt (rechts): Umlaufende Körper befinden sich in Resonanz (z. B. 2:1), d. h., wenn der blaue eine Umdrehung macht, macht der rote zwei. Sie stehen folglich regelmäßig an gleicher Stelle dicht beieinander, was zu stark elliptischen Bahnen und zur Drehimpulsübertragung führen kann.

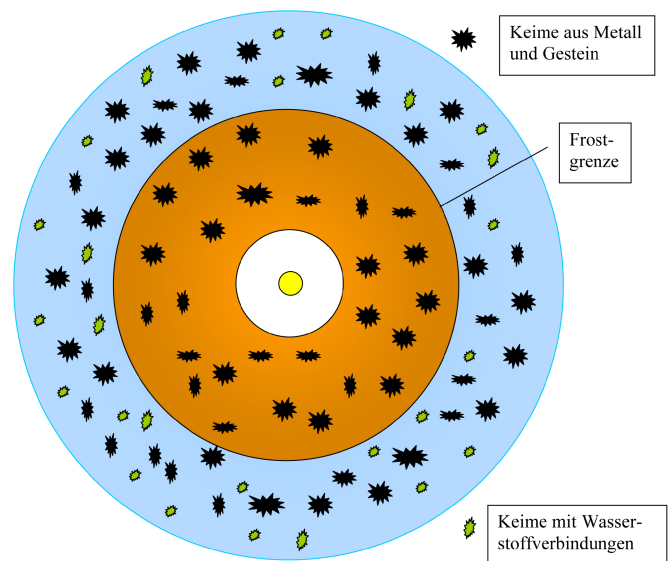


2. Nebulartheorie, Version 1

Eine riesige Gaswolke fällt unter ihrer Schwerkraft zusammen. Innerhalb dieser Wolke bilden sich Zonen mit erhöhter Dichte. Diese Zonen bilden wiederum eigene Gaswolken, die sich während der Kontraktion aufheizen. Die Wolken rotieren und es entstehen rotierende Scheiben aus Staub (ca. 1%) und Gas.

In einer dieser Scheiben ist unser Planetensystem entstanden. Der Ablauf war folgender:

- Im Zentrum entsteht die Sonne.
- Um die Sonne rotiert eine protoplanetare Scheibe aus Gas (Wasserstoff, Helium) und Staub (Metall, Gestein).
- In der Nähe der Sonne (Abstand 0,3 AE) findet aufgrund der hohen Temperatur ($> 1300\text{ K}$) keine Kondensation statt.
- Von dort bis zur Frostgrenze (Abstand 3,5 AE bei 150 K) bilden sich Keime aus Metall und Gestein. Für Wasserstoffverbindungen ist die Temperatur zu hoch.
- Außerhalb der Frostgrenze bilden sich zusätzlich Keime mit Wasserstoffverbindungen (z. B. Eis)
- Aus den Keimen entstehen Planetesimale (Abmessungen im Bereich von einigen zehn bis hundert Kilometern) und schließlich Planeten, innerhalb der Frostgrenze die terrestrischen, außerhalb die Gasplaneten, die durch ihre Größe auch das Wasserstoff- und Heliumgas anziehen.
- Der Sonnenwind fegt das restliche Gas in den interstellaren Raum, die Überreste des Entstehungsprozesses werden zu Asteroiden und Planeten.



Diese Version war bis Ende des 20. Jahrhunderts gültig und wurde durch folgende Beobachtungen bestätigt:

- Die Planetenbahnen liegen in etwa in einer Ebene, sie kreisen alle in eine Richtung.
- Die Planeten rotieren, abgesehen von Ausnahmen, in eine Richtung.
- Gasplaneten sind außen, terrestrische innen.

Allerdings konnte damit noch nicht verstanden werden, wie Neptun entstanden ist, da an dieser Stelle die Dichte und Zeit zur Bildung nicht ausreichte. Außerdem konnte die Bildung von Zentimeter-Klumpen in Meter – Brocken noch nicht erklärt werden (Meter – Hürde).

Nach der Entdeckung der ersten Exoplaneten (1995) trat dann ein weiteres Problem auf: Dort befinden sich Gasplaneten dicht am Stern innerhalb der Frostgrenze. Die Nebulartheorie musste überarbeitet werden.

3. Nebulartheorie, Version 2: Migration durch Gezeiten effekt

Da die Gasplaneten nur außerhalb der Frostgrenze entstanden sein konnten, mussten sie bei den beobachteten Exoplanetensystemen anschließend nach innen gewandert sein (Migration). Dieses führte zu folgender Theorie:

- Bei der Planetenbildung wirkt die Planetenmasse auf den inneren Teil der Scheibe und auf den äußeren. Das führt in beiden Scheibenteilen zu Verdichtungen.
- Durch den Gezeiten effekt in der inneren Scheibe wird Drehimpuls von der Scheibe auf den Planeten übertragen, da sich der innere Teil der Scheibe schneller dreht als der Planet (vergl. Erde-Mond).
- Durch den Gezeiten effekt in der äußeren Scheibe wird Drehimpuls vom Planeten auf die Scheibe übertragen, da sich der äußere Teil der Scheibe langsamer dreht als der Planet.
- Ist der Gezeiten effekt der inneren Scheibe größer als der äußeren, wird der Drehimpuls des Planeten größer und er entfernt sich, er spiralt nach außen.
- Ist der Gezeiten effekt der äußeren Scheibe größer als der inneren, wird der Drehimpuls des Planeten kleiner und er bewegt sich nach innen, er spiralt nach innen. Die Bewegung nach innen kann durch das Fortblasen des Scheibengases durch die Sonne beendet werden. Es kann auch sein, dass der Planet in die Sonne stürzt. Ansonsten gibt es noch keine zufriedenstellende Erklärung.
- Die Bewegung nach innen ist der häufigere Fall, damit ist die Erscheinung bei Exoplaneten erklärt.

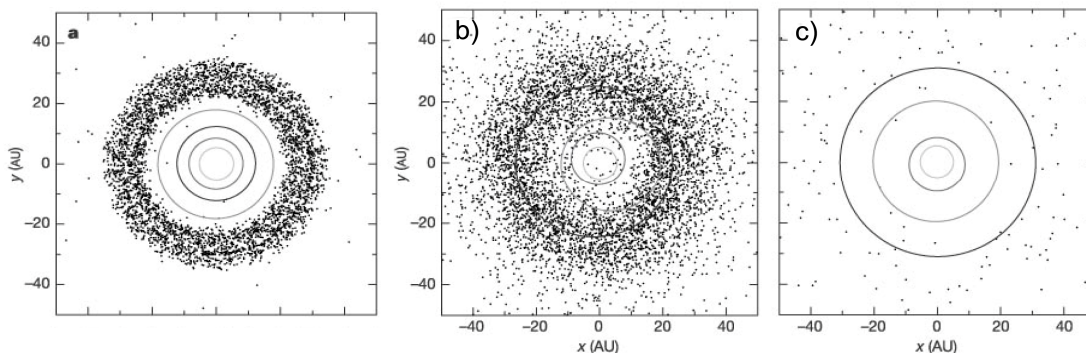
4. Nebulartheorie, Version 3: Nizza-Modell

Mit der Version 2 konnte noch nicht erklärt werden, wie Neptun auf seiner Bahn entstanden ist und warum die Exzentrizität der Gasplaneten und die Neigung der Bahnebene verhältnismäßig groß sind. Planetenentstehungssimulationen sagen kreisförmige Umlaufbahnen mit geringer Inklination voraus.

2005 wurden in Nizza mit folgenden Annahmen Computersimulationen durchgeführt:

- Gestartet wird mit einem kompakten System, in dem sich die großen Planeten mit kreisförmigen Umlaufbahnen in 5 bis 17 AE Abstand bewegen.
- Die Gesamtmasse der äußeren Planetesimalscheibe wird mit 30 bis 50 Erdmassen angenommen.
- Der Radius der äußeren Planetesimalscheibe erstreckt sich von 18 bis ca. 30 AE.

Diese Annahmen lieferten als Ergebnis das Nizza Modell, bei dem sich durch Gezeitenmigration Saturn und Jupiter nähern und schließlich eine 2:1 Resonanz bilden. Dadurch finden Drehimpulsübertragungen vor allen Dingen zwischen den Planetesimalen und Neptun statt. Die Planetesimale geben Drehimpuls an Neptun ab. Dieser wird daher nach außen gestreut und die Planetesimale nach innen, wo sie die inneren Planeten und die Sonne bombardieren. Der Vorgang ist auf nachfolgenden Bildern zu sehen: a) Nach 800 Millionen Jahren (vor den Resonanzen), b) nach 880 Millionen Jahren beim Bombardement und c) nach 1 Milliarde Jahren. Es sind nur 3% der Planetesimale übrig geblieben.



Quelle:
Wikipedia

Mit diesem Modell werden die Exzentrizitäten und die Inklination der großen Planeten bestätigt, das Problem von Neptun ist gelöst und das große Bombardement (LHB) konnte für diesen Zeitpunkt durch Untersuchung der Mondkrater nachgewiesen werden. Auch die Asteroidendichte entspricht diesem Modell. Es ist zur Zeit ein anerkanntes und konkurrenzloses Modell.

5. Nebulartheorie, Version 4: Meter – Hürde

Die Entwicklung vom Staub und vom Gas zu den Planeten kann heute in 5 Phasen aufgeteilt werden. Die zweite Phase entspricht der Überwindung der Meter – Hürde und konnte bis vor einigen Jahren noch nicht erklärt werden. Inzwischen gibt es zwei Theorien (Johansen 2007 und Cuzzi 2008), die diesen Vorgang erklären und erfolgreich simuliert haben. Es spielen Gasturbulenzen eine Rolle, der Vorgang ist sehr komplex.

5 Phasen

1. Protoplanetarer Staub (ca. $1\mu\text{m}$) wird durch Van-der-Waals-Kräfte zu ca. 1 cm Teilchen (Agglomeration)
2. 1 cm – Teilchen werden durch kollektive Gravitation cm – großer Staubagglomerate zu Planetesimalen (10 km bis 100 km)
3. Planetesimale werden durch individuelle Gravitationskraft zu erdähnlichen Planeten (ca. 10 000 km)
4. Erdähnliche Planeten werden durch Gasakkretion zu Gasplaneten (ca. 100 000 km)
5. Gasplaneten migrieren

6. Ausblick

Mit dem Nizza- und dem 5 Phasenmodell besteht erstmalig eine vollständige Theorie zur Planetenentstehung. Trotzdem ergeben sich weitere Fragen. Hier vielleicht die Wichtigsten:

- Warum sind in unserem Planetensystem die Gasplaneten nicht nach innen gewandert?
- Ist unser System eine Ausnahme oder gibt es noch mehr Systeme dieser Art?