

Entstehung von Planetensystemen

Kai Salm

11. Januar 2012

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung
- 2 Vom Staub zum Planeten
 - Die Scheibe
 - Vom Staub zum Protoplaneten
 - Vom Protoplaneten zum Gasriesen
 - Vom Protoplaneten zum terrestrischen Planeten
 - Simulation des Sonnensystems
- 3 Populationssynthese
 - Heiße Jupiter
 - Monte-Carlo-Simulation
- 4 Ausblick
- 5 Anhang

Ziel

- Wie entstehen Planeten?
- Wie ist unsere Erde entstanden?
- Ist die Erde außergewöhnlich?

Eine Lücke?

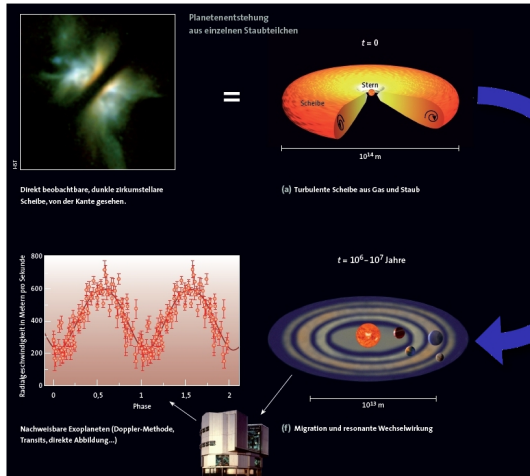


Abbildung: Planetenentstehung im Überblick (Quelle: Klahr)

Gravitations-Instabilitäten – Probleme

- Die Staubscheibe rotiert mit Keplerscher Frequenz

$$\Omega = \sqrt{\frac{GM_*}{a^3}}$$

Mit den Größen M_* : Masse des Zentralgestirns

a : Abstand zum Zentralgestirn

- Das Gas rotiert etwas langsamer als der Staub, was eine vertikale Scherung bedeutet
- Daraus entstehen Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten, also Turbulenzen
- Eine andere mögliche Quelle von Turbulenzen sind Magnetorotationsinstabilitäten (MRI)

Gravitations-Instabilitäten – Probleme

- Die Turbulenzen des Gases können die Verdichtungen des Staubes auflösen und so den Kollaps verhindern
- Daher dachte man lange, dass Gasturbulenzen und der Selbstkollaps des Staubes sich gegenseitig ausschließen

Gravitations-Instabilitäten – Fortschritt

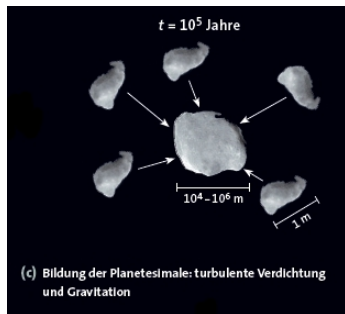


Abbildung:
Gravoturbulente
Planetenentstehung
(Quelle: Klahr)

- Johansen et. al.(2006), Cuzzi et. al. (2008) fanden einen Ausweg
- Turbulenz kann zu lokalen Dichtesteigerungen der metergroßen Objekte führen
- Je nach Skala zwischen 80 und 1000-fach höher als $f_{D/G}$
 - ⇒ Entstehung von gravitativ gebundenen Clustern

Vom Planetesimal zum Protoplaneten

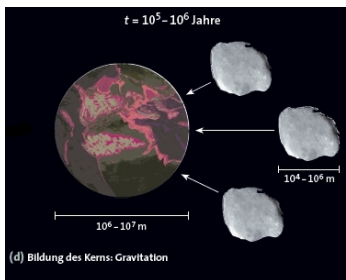


Abbildung: Gravitation
(Quelle: Klahr)

- Gravitation ist nun die dominierende Kraft
- Anfangsbedingungen unklar
- Mit ca. 10^7 30km-Planetesimalen pro Erdmasse ist eine numerische Behandlung aufwendig
- Nicht-lineares Wachstum
- Nicht-triviale Physik
 - ⇒ Behandlung zum Beispiel durch Monte-Carlo-Methoden

Wachstumsrate eines Oligarchen

- Die Änderung der Masse M eines im Verhältnis zur Umgebung großen Körpers mit der Zeit lässt sich nach Safronov berechnen:

$$\frac{dM}{dt} = \pi R^2 \Omega \Sigma_p F_G$$

- Mit den Größen:

πR^2 : geometrischer WQ des großen Körpers

$$\sqrt{\frac{GM_*}{a^3}} = \Omega \quad : \text{Keplersche Frequenz}$$

M_* : Masse des Zentralgestirns

a : Abstand zum Zentralgestirn

Σ_p : Oberflächendichte der umgebenden Planetisimale

F_G : Gravitativer Fokussierungsfaktor

Gravitativer Fokussierungsfaktor F_G

- WQ des großen Körpers ist größer als der geometrische WQ
- Gravitation fokussiert kleine Körper auf den großen
- Der Wert ist abhängig von:
 - Zufällige Geschwindigkeit v_{ran} der kleinen Körper
 - Exzentrizität und Inklination der Bahn der kleinen Körper
 - Wechselwirkung mit anderen schweren Körpern (erhöht die Geschwindigkeit)
 - Dämpfung durch das Gas (verringert die Geschwindigkeit)

Approximation des Fokussierungsfaktors

- Approximation mittels der Fluchtgeschwindigkeit v_{esc} des großen Körpers:

$$F_G = 1 + \frac{v_{esc}^2}{v_{ran}^2}$$

- Im Falle kleiner v_{ran} ist die Massenzunahme proportional zu R^4
 - ⇒ „Runaway growth regime“
 - Weiteres Wachstum erhöht v_{ran}
 - ⇒ „Oligarchic mode“

Grenzen des Wachstums

- Ohne Migration kann ein Protoplanet nur bis zur Isolationsmasse wachsen:

$$M_{iso} = \frac{(4\pi B_{Liss} a^2 \Sigma_p)^{3/2}}{(3M_*)^{1/2}}$$

Mit den Größen M_* : Masse des Zentralgestirns

a : Abstand zum Zentralgestirn

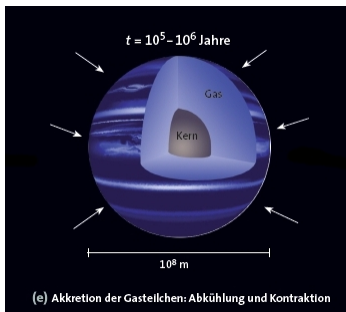
B_{Liss} : Verhältnis *feeding zone* zu Hill-Sphäre

Σ_p : Oberflächendichte der Planetesimale

Folgen

- Im inneren System bilden sich viele Oligarchen
- Gasriesen bilden sich bei geringer Oberflächendichte nicht „in-situ“
- Im äußeren System bilden sich Protoplaneten von einigen Erdmassen

Vom Protoplaneten zum Gasriesen



- Ab einer Masse von ca. 10 Erdmassen kann der Protoplanet Gas binden
- Der Kern wächst jedoch weiterhin!

Abbildung: Akkretion der Gasteilchen
(Quelle: Klahr)

Lösung der hydrostatischen Gleichungen

- Die Hülle kann durch 1D hydrostatische Gleichungen beschrieben werden:
 - Diese ähneln denen von Sternen
 - Kernfusion wird durch einschlagende Planetesimale ersetzt
 - Weiterhin Massenerhalt, hydrostatisches Gleichgewicht, Energieerhaltung, Energietransport
- Bei der Lösung der Gleichungen können 2 Bereiche unterschieden werden:
 - Bei niedrigen Massen ist die Hülle kontinuierlich an die Scheibe angeschlossen. Der Radius des Planeten ist durch den Radius der Hill-Sphäre gegeben
 - Bei hohen Massen entsteht eine Lücke

Simulation des Jupiter – Anfangsbedingungen

- Simulation von Jupiter „in-situ“
- Oberflächendichte $10\text{g}/\text{cm}^2$
- Entfernung zum Stern 5.2 AU
- Maximale Gasakkretionsrate von 0.001 Erdmassen pro Jahr

Simulation des Jupiter – Masse

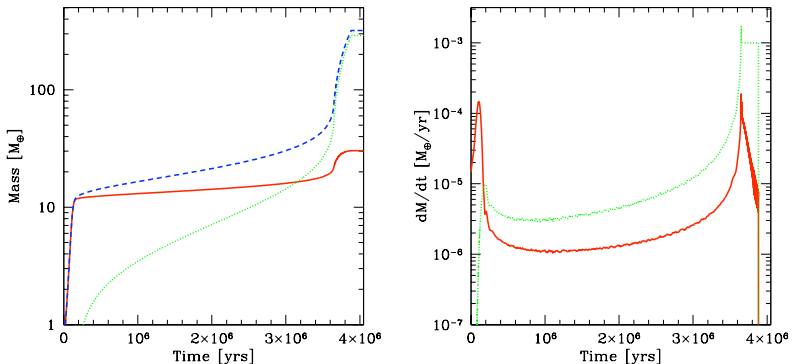


Abbildung: Wachstumsrate des Jupiter
(Quelle: ArXiv: 1012.5281v1)

Simulation des Jupiter – Leuchtkraft & Radius

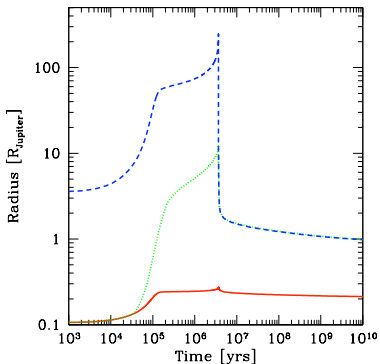
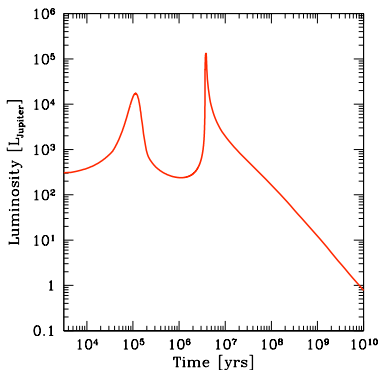


Abbildung: Leuchtkraft und Radius des Jupiter
(Quelle: ArXiv: 1012.5281v1)

Simulation des Jupiter – Ergebnis

- Prinzipiell gelingt die Erklärung der Entstehung des Jupiter
- Da die Anfangsbedingungen nicht dem MMSN entsprechend gewählt, wurden bleibt ein Zeitproblem
- Migration kann das Problem lösen

Migration

- Veränderung der Bahnachsen durch Interaktion mit der Scheibe
- Es gibt drei Typen von Migration
 - Typ I: Das Gas vollführt eine "Große Zahl Swing-Bys", wobei die äußeren überwiegen.
 - Typ II: Der Planet bewegt sich stets zu einem Punkt, in dem sich die Drehmomente aufheben.
 - Typ III: unwichtig

Vom Protoplaneten zum terrestrischen Planeten

- Bildung geschieht erst nach Verschwinden der Scheibe
- Gravitative Wechselwirkung bringt die Protoplaneten auf exzentrische Bahnen
- Häufige Stöße bis sich die verbleibenden Protoplaneten auf Bahnen bewegen die auf Gyr-Skala stabil sind

Simulation des Sonnensystems

- Simulationen unseres Sonnensystems müssen folgende Randbedingungen einhalten:
 - Die beobachteten Planetenorbi, insbesondere die geringen Exzentrizitäten
 - Die Planetenmassen, insb. die geringe Masse des Mars
 - Die Entstehungszeit der Erde von ca 50-100 Myr (bekannt aus Isotopendatierungen)
 - Den Asteroidengürtel ohne große Objekte
 - Den hohen Wassergehalt der Erde (10^{-3} Massenanteil)

Simulation des Sonnensystems

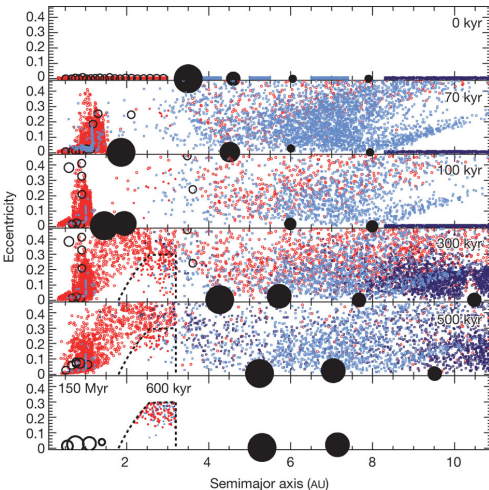


Abbildung: Die Entstehung der terrestrischen Planeten
(Quelle: Nature 475, 206–209 - K.J. Walsh)

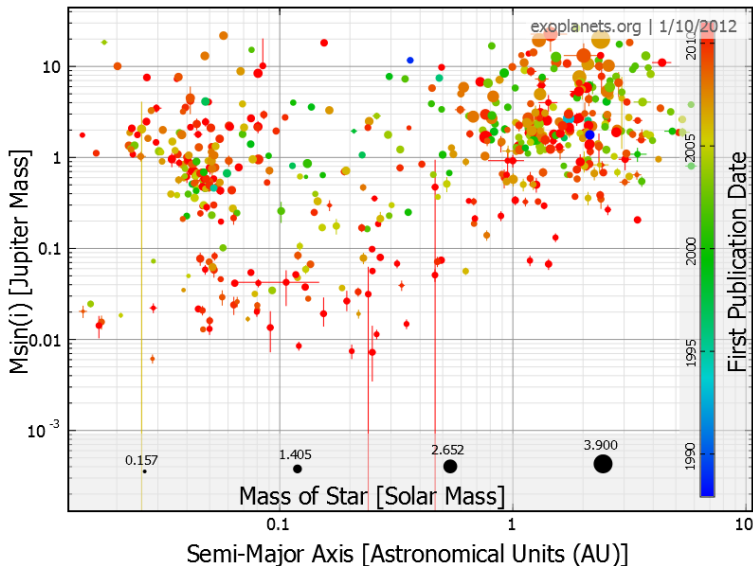
Simulation des Sonnensystems - Ergebnisse

- Die Simulation erfüllt die Erfordernisse sehr gut
- Aber entsprechen die Anfangsbedingungen den tatsächlichen?

Heiße Jupiter

- In jüngerer Vergangenheit wurden mit verbesserten Beobachtungsmethoden Exoplaneten entdeckt
- Dabei fällt die große Menge an heißen Jupitern auf

Heiße Jupiter



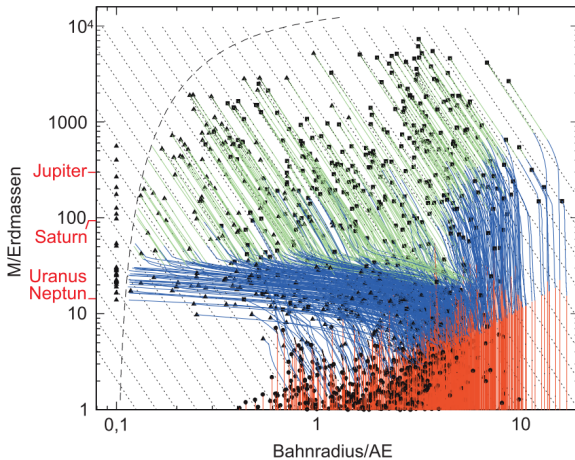
Populations synthese

- Versuch, die Entstehung der verschiedenen Planeten durch Simulationen zu erklären
- Kernakkreditationsmodell und Migration werden simuliert
- Variable Randbedingungen
- Vergleich bekannter Exoplaneten mit den Simulationen

Monte-Carlo-Simulation (1)

- 1 Identifizierung wichtiger Parameter ("Monte Carlo variables")
- 2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen für diese Parameter
- 3 Große Mengen an Parametersets bestimmen
- 4 Anwendung des Modells auf die Parameter
- 5 Korrektur der Daten auf die Beobachtungswahrscheinlichkeit
- 6 Vergleich realer Daten mit den korrigierten Daten

Monte-Carlo-Simulation (2)



Monte-Carlo-Simulationen der Entwicklung von Planetenkernen

(C. Mordasini,
W. Benz,
Y. Alibert,
Universität
Bern).

Abbildung: Monte-Carlo-Simulation (Quelle: SuW)

Monte-Carlo-Simulation - Ergebnisse

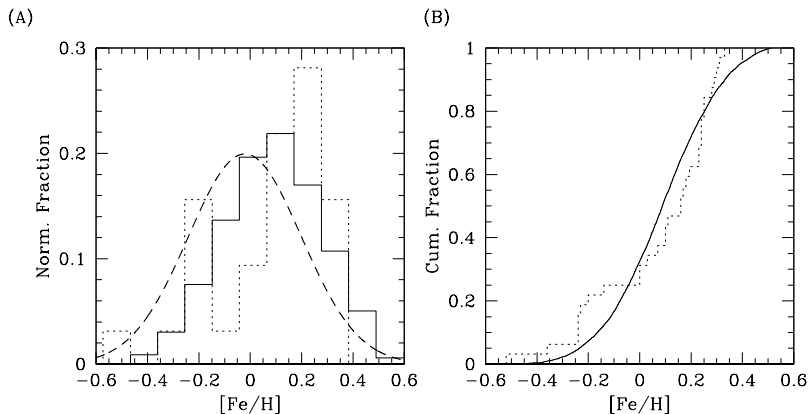
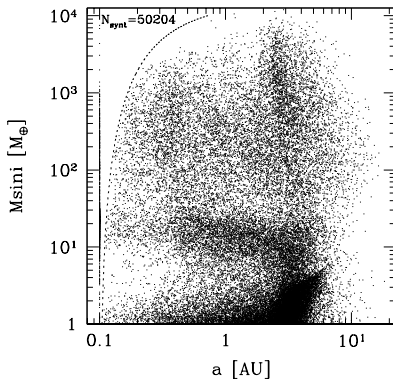


Abbildung: Metallizität (Quelle: ArXiv: 0904.2542v1)

Monte-Carlo-Simulation - Ergebnisse

(A)



(B)

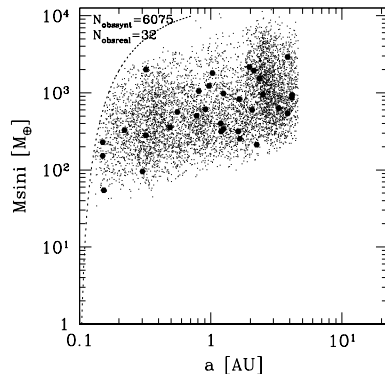


Abbildung: Monte-Carlo-Simulation (Quelle: ArXiv: 0904.2542v1)

Bemerkungen

- Direct collapse hats nicht in die Präsentation geschafft

Zusammenfassung

- Unser Verständnis der Planetenentstehung wächst
- Bisherige Modelle basieren zumeist auf den Beobachtungen in unserem Sonnensystem
- Überprüfung von Modellen schwierig

Quellen

- Allgemeines
 - SuW Juni 2009 Aufregende neue Planetenwelten
 - http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2011/01/epjconf_ohp2010_04001.pdf
 - <http://arxiv.org/pdf/1012.5281v1> (Zusammenfassung der bisherigen Theorien)
- A low mass for Mars (K.J. Walsh)
 - <http://www.nature.com/nature/journal/v475/n7355/full/nature10201.html>
- Populationssynthese (Mordasini et. al.)
 - <http://arxiv.org/pdf/0904.2524v1>
 - <http://arxiv.org/pdf/0904.2542v1>
 - <http://arxiv.org/pdf/1101.0513v1>
- <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0504628>

Direct Collaps

- Jeans Kriterium für den Kollaps einer Dichtefluktuation gilt trotz falscher Annahmen immer noch:

$$\lambda^2 > \frac{\pi c_s^2}{G\rho}$$

- Mit den Größen:

λ : Wellenlänge der Fluktuation

c_s : ungestörte Schallgeschwindigkeit

ρ : ungestörte Dichte

- Safronov (1960) und Toomre (1964) haben das Kriterium für spezifische Bedingungen erneut hergeleitet