

Stabile Planetenbahnen in Dreisternsystemen?

Mika Ganachari, Peter Hoffmüller, Elias Rumpf

1. Das gravitative Dreikörperproblem

- Bewegung dreier Massen unter wechselseitiger Gravitation; Spezialfall des n -Körperproblems
- Bewegungsgleichungen: $\ddot{\vec{r}}_i = -G \sum_{j \neq i} m_j (\vec{r}_i - \vec{r}_j) / |\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3$ bzw. Hamiltonian $\mathcal{H} = \sum_i \frac{|\vec{p}_i|^2}{2m_i} - G \sum_{i < j} \frac{m_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|}$
- **Nicht integrabel** im allgemeinen Fall; hochgradig empfindlich gegenüber Anfangsbedingungen, positiver Lyapunov-Exponent $\Rightarrow$ chaotisch, jenseits der Lyapunov-Zeit unvorhersagbar

2. Analytische Spezialfälle

- Lineare Anordnung (Euler, 1767) und gleichseitiges Dreieck (Lagrange, 1772): periodische Lösungen, aber instabil bzw. nur L4/L5 bedingt stabil
- *Restringiertes* Problem (zirkulär/elliptisch): vernachlässigbare Testmasse, Lagrangeunkte im mitrotierenden Bezugssystem
- Weitere periodische Lösungen für sehr spezielle Anfangsbedingungen, gegenüber Störungen jedoch instabil

3. Numerische Methoden & Stabilitätsanalyse

- Allgemeiner Fall nur durch **numerische Integration**; Anforderungen: Stabilität, Diskretisierungsfehler, Erhaltung von Invarianten (Energie, Drehimpuls, Phasenraumvolumen) und Effizienz
- Klassische Verfahren: expl. Euler $\mathcal{O}(\Delta t)$, RK4 $\mathcal{O}(\Delta t^4)$ – gute Genauigkeit, aber kein langfristiger Energieerhalt
- **Symplektische Integratoren** (z.B. Leapfrog in KDK-Form) erhalten Phasenraumvolumen (Liouville-Theorem) und liefern stabiles Langzeitverhalten; Praxis: höhere Ordnungen, hierarchische Verfahren, adaptive Zeitschritte bei nahen Begegnungen
- **Stabilitätsstudien**: Ensemble-Simulationen über 10^4 – 10^6 Jahre, Kriterium z.B. max. Schwerpunktentfernung; Regressionsmodelle in Bahnparametern (Buseti et al. 2018)

4. Auswirkungen auf Planeten

- **Gezeitenkräfte** ($\propto 1/r^3$): innere Reibung $\rightarrow$ Aufheizung, Vulkanismus
- Unterschreiten der **Roche-Grenze**: Zerreißen zu glühendem Trümmerstrom
- **Rauswurf** (Slingshot): bei Überschreiten der Fluchtgeschwindigkeit $\rightarrow$ „Rogue Planet“
- Starke **Temperaturschwankungen** durch chaotisch variierenden Abstand zu den Sternen

5. Reale Mehrsternsysteme & Planetenbildung

- Multisternsysteme sind häufig: $\sim 50\%$ aller Sterne in der Milchstraße, Anteil steigt mit Sternmasse ($\geq 80\%$ bei $M \geq 16 M_\odot$); meist hierarchisch (verschachtelte Binärsysteme, z.B. α /Proxima Centauri)
- Entstehung: Gaswolke $\rightarrow$ Verdichtung zur Scheibe $\rightarrow$ Fragmentierung durch Turbulenz $\rightarrow$ Mehrfachsystem mit Circumbinary-, Circumprimary- und Circumsecondary-Scheiben (Beispiel: GW Ori, dreifach zerbrochene protoplanetare Scheibe)
- Zwei Bahntypen für Planeten in Doppelsternen:
 - **S-Typ** (um einen Stern): innen durch Roche-Grenze, außen durch Begleiter begrenzt; stabil ab Sternabstand $\gtrsim 5 \times$ Planetenbahn – der typisch beobachtete Fall
 - **P-Typ** (um beide Sterne): innen durch das Binärsystem destabilisiert, außen durch Galaxie „Roche-Grenze“ – bisher wenige Daten
- In 3+-Sternsystemen: P-Typ um alle Sterne sehr unwahrscheinlich, S-Typ um Einzelstern aber realistisch (Proxima Cen b)

Fazit

- Generisches Dreisternsystem ist chaotisch – langfristig stabile Planetenbahnen existieren nur in *hierarchischen* Konfigurationen (enges Binär + weit entfernter dritter Stern) und überwiegend als S-Typ
- Selbst dort schränken Gezeiten, Roche-Effekte und Temperaturschwankungen die Lebensfreundlichkeit stark ein – das Szenario von „3 Body Problem“ bleibt für die meisten Konfigurationen Science-Fiction