

Gravitierende Kilometerkörper im Sonnensystem

Einschlagbehandlung und erster zeitbegrenzter Versuch

Forschungsprotokoll

17. September 2026

1 Fragestellung und Anfangsbedingungen

Untersucht werden 10^5 gleichmassige Körper mit Durchmesser $d = 1$ km und angenommener Gesteinsdichte $\rho = 3000 \text{ kg m}^{-3}$. Damit gilt

$$m = \frac{\pi}{6} \rho d^3 = 1.5707963268 \cdot 10^{12} \text{ kg}, \quad M_{\text{Wolke}} = 1.5707963268 \cdot 10^{17} \text{ kg}.$$

Die Rechnung ist zweidimensional. Sonne und acht planetare Systeme starten idealisiert auf Kreisbahnen, nicht mit einer astronomischen Ephemeride. Die Kleinkörper besitzen anfänglich konstante Flächendichte zwischen 0.3 und 35 AU und prograde Keplergeschwindigkeiten. Die Seeds sind 2026091711 für die Primärkörper und 2026091712 für die Wolke. Monde sind nicht einzeln aufgelöst. Alle Kleinkörper gravitieren untereinander; ihre Rückwirkung auf die Primärkörper ist enthalten.

Die internen Einheiten sind AU und julianisches Jahr. Das Massenfeld speichert GM in diesen Einheiten; zur Umrechnung wird $G = 6.67430 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ verwendet. Die Dichte ist eine Modellannahme. Ein Wechsel auf 10 bzw. 100 km würde die Einzelmassen um 10^3 bzw. 10^6 erhöhen; diese Fälle wurden hier noch nicht gestartet.

2 Kraftberechnung und Integration

Alle Wechselwirkungen mit Sonne oder Planeten werden direkt berechnet. Nur die gegenseitigen Kleinkörperkräfte werden durch den CFK-Baum mit Öffnungsparameter $\theta = 0.4$ approximiert. Es gibt keine Plummer-Glättung. Für den Baum werden die Koordinaten temporär isotrop in das Standarddreieck abgebildet; bei Längenskalierung L transformiert sich die Beschleunigung mit L^{-2} zurück.

Ein Makroschritt $h = 0.005$ Jahre besteht aus einem halben Impuls der Kleinkörperkraft, der adaptiven Integration der direkten Kräfte und einem zweiten halben Impuls. Der schnelle Integrator ist Boost DOPRI5 mit relativer Toleranz 10^{-13} , absoluter Toleranz 10^{-15} und maximaler Schrittweite 0.001 Jahre. Das Verfahren ist für glatte Kräfte eine Aufteilung zweiter Ordnung, aber wegen adaptiver RK-Integration und approximierter Baumkräfte nicht exakt symplektisch. Diese Ordnungsangabe ist kein Konvergenzbeweis über diskontinuierliche Einschlagereignisse.

3 Warum eine Einschlagbehandlung nötig wurde

ROCKS_G1 wurde nach 374.02 Sekunden bewusst beendet. Der letzte synchronisierte Zustand liegt bei 0.085 Jahren. Zwischen 0.080 und 0.085 Jahren stieg die kumulative Zeit der schnellen Kraftauswertung von 23.01 auf 149.65 Sekunden; die langsame Kraft benötigte kumulativ erst 11.87 Sekunden. Der Engpass lag damit bei der engen Begegnung und deren Integration, nicht hauptsächlich beim Baufaufbau.

Körper 55430 näherte sich Uranus. Ein oskulierendes Zweikörpermodell am letzten Kontrollpunkt ergab eine Periapsis von etwa 6.47 km vom Planetenzentrum. Das war zunächst nur eine lokale Bahnabschätzung. Eine separate reduzierte Rechnung mit den neun Primärkörpern und diesem Kleinkörper bestätigte danach einen Oberflächenkontakt. Die ursprünglichen Rohdaten bleiben unverändert; die veraltete Statusangabe `running` wird in `INTERVENTION.md` erklärt. Im neuen vollständigen Lauf wurde bereits bei 0.08008117 Jahren ein Einschlag auf Jupiter erfasst, gefolgt vom Uranus-Einschlag bei 0.08762986 Jahren. Es gab somit vor Uranus noch einen weiteren relevanten Kontakt.

4 Physikalisches und numerisches Einschlagmodell

Ein Kleinkörper wird beim Kontakt mit Sonne oder Planet absorbiert. Die Kontaktentfernung ist $R_j + d/2$. Die Sonne besitzt den nominalen IAU-Radius 695700 km; die Planeten verwenden die mittleren Radien aus der JPL-Tabelle. Beim nicht aufgelösten Erde-Mond-System wird der Erdradius benutzt. Das ist eine bewusste Näherung. Die Primärradien bleiben fest.

Für Ziel j und Kleinkörper i werden

$$m'_j = m_j + m_i, \quad \mathbf{v}'_j = \frac{m_j \mathbf{v}_j + m_i \mathbf{v}_i}{m_j + m_i}, \quad \mathbf{r}'_j = \frac{m_j \mathbf{r}_j + m_i \mathbf{r}_i}{m_j + m_i}$$

gesetzt. Anschließend entfällt i aus der aktiven Liste. Masse und linearer Impuls bleiben bis auf Rundung erhalten. Sehr kleine einzelne Massenzuwächse können unterhalb der darstellbaren Gleitkommaauflösung liegen. Mechanische Energie wird nicht erhalten: Der Stoß ist unelastisch. In Spin oder innere Energie übergehende Anteile werden nicht modelliert.

Der Integrator beschränkt die Schritte zusätzlich auf

$$\Delta t \leq \min_{i,j} \frac{0.2 r_{ij}}{|\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j| + \sqrt{(GM_i + GM_j)/r_{ij}}}.$$

Ein geometrischer Filter sucht mögliche Oberflächennähen entlang der Verbindungssehne eines akzeptierten Schritts. Auf ausgewählten kurzen Bahnabschnitten wird mit der dichten DOPRI5-Ausgabe das Distanzminimum gesucht, dann der erste Eintritt durch Bisektion lokalisiert. Dadurch werden auch streifende Durchgänge mit zwei außenliegenden Endpunkten erfasst. Die geometrische Kontakttoleranz ist 10^{-12} AU, etwa 0.15 m. Alle Körper werden auf denselben Ereigniszeitpunkt interpoliert, erst dann wird die Liste verändert und der Integrator neu initialisiert.

Die Annahme eines einzelnen Minimums auf dem kurzen Bogen und der Sehnfilter sind numerische Schutzmaßnahmen, kein mathematischer Nachweis für beliebige Mehrkörperbahnen. Ereigniskonvergenz muss deshalb weiter geprüft werden. Kleine Körper kollidieren hier noch nicht miteinander. Auch Fragmentation und Materialfestigkeit fehlen.

5 Prüfungen

Alle vier nativen Testsuiten bestehen. Zusätzlich geprüft wurden frontaler Kontakt, streifender Treffer, knapper Vorbeiflug, anfängliche Überlappung, radialer gravitativer Fall und Impulsübertragung. Im unabhängigen reduzierten Uranus-Test liefert der C++-Code $t = 0.0876298568134922$ Jahre. SciPy DOP853 mit maximalen Schritten 0.001 und 0.0005 Jahre unterscheidet sich um $2.34 \cdot 10^{-14}$ bzw. $1.60 \cdot 10^{-13}$ Jahre. Das entspricht wenigen Mikrosekunden, ist aber keine Genauigkeitsaussage für die ganze Wolke.

Vor der Produktion werden dieselben 10^5 Anfangskörper bis 0.01 Jahre mit Makroschritt 0.01, mit 0.005 und ohne Kraftaufteilung integriert. Vorab festgelegte Schranken sind 10^{-8} AU Positionsdifferenz und 10^{-6} AU/Jahr Geschwindigkeitsdifferenz. Diese kurzen Kontrollen testen Zeitintegration, nicht unabhängig den Fehler des CFK-Öffnungsparameters.

6 Ergebnisse und Einordnung

Der Produktionslauf endete regulär nach 1813.70 Sekunden bei 1.825000 Jahren (666.6 Tagen). Es verbleiben 99988 Kleinkörper. In diesem Abschnitt wurden 12 Einschlagereignisse und 0 entfernte Auswürfe protokolliert. Die maximale Positionsdifferenz der kurzen Kontrollen betrug 1.64×10^{-13} AU.

Ziel	Einschlagzahl
Jupiter	5
Saturn	2
Uranus	4
Neptun	1

Die mediane oskulierende heliozentrische Exzentrizität im Endzustand ist 0.00267812; das 99-Prozent-Quantil ist 0.00507653. 0 aktive Körper haben momentan positive heliozentrische Zweikörperenergie. Das ist nicht gleichbedeutend mit bereits entfernten oder dauerhaft ungebundenen Körpern. Die relative GM-Bilanzabweichung einschließlich protokollierter Auswürfe beträgt -4.39×10^{-19} ; sie wird bei diesen extrem kleinen Einzelmassen durch Gleitkommarundung begrenzt. Die CFK-Blattzahl schwankte zwischen 330668 und 337712. Die kumulierte direkte Kraftberechnung benötigte 765.4 Sekunden, die CFK-Kraftberechnung 255.2 Sekunden. Die übrige Zeit entfiel zusammen auf Integrator, Ereignisbehandlung, Zustandsverwaltung und Ausgaben; diese Restkategorien sind hier nicht einzeln instrumentiert.

Bei $t = 0.745$ Jahren wurde zusätzlich ein Zwischenstand gesichert. Körper 1578 befand sich etwa 27.25 Jupiterradien vom Jupiterzentrum entfernt und bewegte sich relativ zu Jupiter auswärts. Seine momentane oskulierende Zweikörperbahn hatte $e \simeq 0.99634$ und eine Periapsis von etwa 1.179 Jupiterradien. Das illustriert den hohen Aufwand enger Begegnungen auch ohne Einschlag; es beweist weder die tatsächliche vergangene Minimaldistanz noch eine dauerhafte Bindung. Die Diagnose ist in `encounter_diagnostic.json` reproduzierbar gespeichert.

Die anfänglich gleichmäßige Scheibe schließt die Umgebung der Planeten nicht aus. Frühe Kontakte und Umlenkungen sind deshalb auch eine Folge dieser idealisierten Initialisierung. Ihre Häufigkeit darf nicht als stationäre Einschlagrate des realen Sonnensystems interpretiert werden.

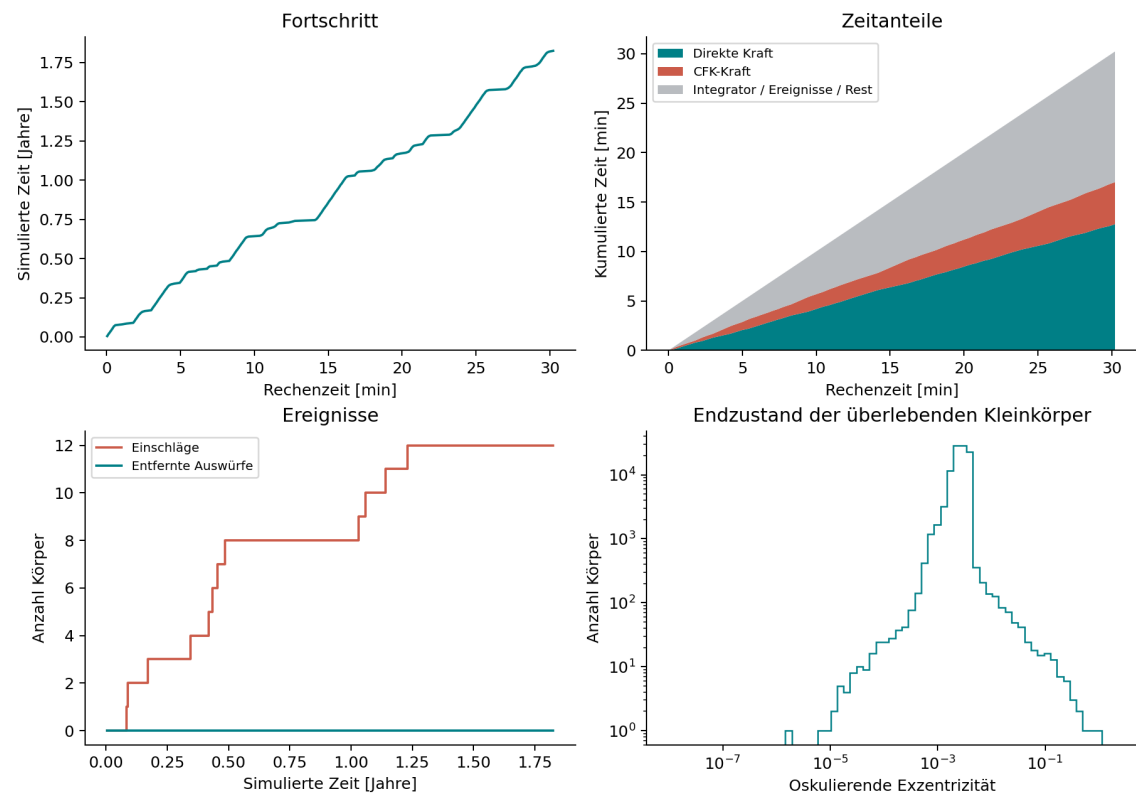


Abbildung 1: Fortschritt, kumulierte Zeitanteile, Ereignisse und oskulierende Exzentrizitäten. Der Restzeitanteil enthält auch Ereignissuche, Vektoroperationen und Dateiausgaben.

7 Reproduzierbarkeit und Grenzen

Die Datenauswertung des ersten Abschnitts wurde auf schmalzberg ausgeführt (NumPy 1.21.5, Matplotlib 3.5.1). Prüfsummen von Programm, Eingabe und Worker wurden kontrolliert; aktive IDs, Ereignislisten und Endzustand sind konsistent. Das erzeugende Analyseskript ist mit SHA-256 in `summary.json` identifiziert. Die Diagramme und Kennzahlen wurden anschließend in dieses Berichtsverzeichnis zurückübertragen.

Auf Wunsch wurde nach Abschluss eine zweite, ebenfalls auf 1800 Sekunden begrenzte Rechnung aus dem vollständigen Endzustand gestartet. Sie liegt auf dreihenden-2 separat im Ordner `rocks_g2_continuation_01`. Dieser Bericht beschreibt nur den abgeschlossenen ersten Abschnitt. Die Fortsetzung übernimmt Massen, Positionen, Geschwindigkeiten und IDs; ihre Ereignis- und Laufzeitähler beginnen neu. Es wird kein zusätzlicher dritter Abschnitt automatisch gestartet.

Das Laufbudget beträgt 1800 Sekunden auf dreihenden-2 mit zwölf OpenMP-Threads. Beendet wird an einer Makroschrittgrenze; dadurch kann das Budget leicht überschritten werden. Kompiliert wurde mit GCC 13.3, `-O3 -DNDEBUG -ffp-contract=off -fopenmp`, ohne Fast-Math. `source.tar.gz`, das ausführbare Programm und Eingabedaten liegen im Versuchsverzeichnis. Der Worker protokolliert SHA-256-Prüfsummen, Maschineninformationen, Befehle und Ressourcenverbrauch.

Vollständige Zustände liegen in `initial.json`, `checkpoint.json` und bei Erfolg `final.json`. Die Animationsstichprobe enthält nur jeden fünfzigsten stabilen Kleinkörper-ID; radiale Histogramme berücksichtigen hingegen alle. Einschläge stehen in `impacts.jsonl`, Auswürfe in `escapes.jsonl`. Entfernt werden nur auswärts fliegende Körper jenseits 350 AU mit positiver operativer monopolärer Fluchtenergie. Diese Regel beweist keinen dauerhaften Mehrkörperauswurf.

Vergleiche verschiedener Durchmesser müssen bei gemeinsamer physikalischer Zeit erfolgen, nicht bei jeweils unterschiedlichem Ende eines 30-Minuten-Budgets. Ein kurzer Versuch erlaubt noch keine Aussagen über das langfristige Aufräumen des Sonnensystems. Für größere Massen sind Schrittweite, Öffnungsparameter und Nahbegegnungen erneut zu untersuchen.

Quellen

- JPL: Planetary Physical Parameters.
- IAU 2015 Resolution B3, nominale Umrechnungsgrößen: <https://arxiv.org/abs/1510.07674>.
- JPL: Astronomical Constants, https://ssd.jpl.nasa.gov/astro_par.html.