



Abschließende Arbeit

Die Eisriesen: Ein Blick auf Uranus und Neptun

verfasst von

Bendeguz Borbely-Ipkovich

4B

Österreichische Schule Budapest

Orbánhegyi út 39-45, 1126 Budapest, Ungarn

Betreuungslehrer:

Christian Amberger

Budapest, 20.02.2026.

Abstract

Diese Arbeit analysiert das Nizza-Modell zur Erklärung der Migration von Riesenplaneten während der Entstehung des Sonnensystems. Methodisch ist der WHFast-Integrator durch eine Umwandlung in Jacobi-Koordinaten und hamiltonsche Spaltung hergeleitet, um präzise N-Körper-Simulationen zu ermöglichen. Basierend auf diesen Daten wird einen genauerer Blick auf Aufbau, Atmosphären, Monde und zonale Koeffizienten (Uranus: $J_2 = 3511 \times 10^{-6}$; Neptun: $J_2 = 626 \times 10^{-6}$) gewagt.

Der Fokus liegt dabei darauf, wie gut sich die beobachtbare heutige Struktur des Sonnensystems mit numerischen Methoden nachvollziehen lässt. Die Migrationseffekte und Anfangsbedingungen bilden die Grundlage aktueller Modelle, die am Ende en détail diskutiert werden, während bessere Wärmestrahlungszahlen zukünftige Raumsondenmissionen erfordern. Die wichtigste Erkenntnis ist die schwache Wärmeabgabe von Uranus im Vergleich zu Neptun sowie der hypothetische fünfte Planet im Nizza-5-Modell. Insgesamt zeigt sich, dass gerade die Eisriesen mit ihrer speziellen Dynamik und Energiebilanz ein guter Testfall für solche Modelle sind. Offen bleibt dabei, wie stark einzelne Annahmen die Interpretation der Ergebnisse prägen und wo die Grenzen der bisherigen Daten liegen.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	2
1 Einleitung	5
2 Nizza-Modell	6
2.1 Entstehung des Sonnensystems	6
2.2 Migrationsmodell	7
2.3 WHFast	8
2.3.1 Grundlagen	8
2.3.2 Umwandlung in Jacobi-Koordinaten	9
2.3.3 Hamiltonsche Spaltung	10
3 Aufbau	12
3.1 Uranus	12
3.1.1 Innerer Aufbau	12
3.1.2 Atmosphäre	14
3.1.3 Monde	14
3.2 Neptun	15
3.2.1 Innerer Aufbau	15
3.2.2 Atmosphäre	15
3.2.3 Monde	16
3.3 Zonale harmonische Koeffizienten	16
4 Wärmestrahlung	18
4.1 Kernkonzept	18
4.2 Uranus	19
4.3 Neptun	19
4.4 Unerklärter Mechanismus	19
5 Heutige Forschung	21
5.1 Nizza-2-Modell	21
5.1.1 Nizza-5	22
6 Zusammenfassung und Fazit	23

7	Literaturverzeichnis	24
8	Abbildungsverzeichnis	26
9	Hilfsmittelverzeichnis	27

1. Einleitung

Die Entstehung unseres Sonnensystems zählt zu den faszinierendsten Rätseln der modernen Astronomie und Astrophysik. Während die Gasriesen Jupiter und Saturn heutzutage gut erforscht sind, geben die Eisriesen Uranus und Neptun mit ihrer extremen Achsneigung, ihrer ungewöhnlichen Wärmeabgabe und ihrer komplexen inneren Dynamik weiterhin Rätsel auf. Ziel dieser Arbeit ist es, einen vertieften Einblick in die physikalischen und mathematischen Grundlagen dieser beiden Planeten zu erhalten. Mein Interesse an diesem Thema wurde vor drei Jahren geweckt, als ich mich auf den Astrophysik-Schülerwettbewerb „Athletica Galactica“ vorbereitete. In Gergely Dalyais Buch Einleitung zur Astronomie las ich, dass Neptun 2,6-mal und Uranus 1,1-mal so viel Energie abstrahlt, als sie von der Sonne erhalten und dass der genaue Mechanismus hinter diesem Phänomen bis heute nicht vollständig verstanden ist. Diese Entdeckung fasziinierte mich und da habe ich mich entschieden, in meiner abschließenden Arbeit (damals VWA) eingehend damit zu beschäftigen. Während des Schreibens dieser Arbeit habe ich erkannt, dass ich kein Mensch großer Worte bin und lieber kurz und bündig ein mathematisches Konzept herleite, als ausführlich über eine bereits oft diskutierte Thematik zu schreiben. Verschiedene Modelle zur Entstehung des Sonnensystems lassen sich anhand von N-Körper-Simulationen mathematisch nachvollziehen. Heute stellt sich aber die Frage, wie Computer die gravitativen Wechselwirkungen zwischen den Körpern berechnen, um die Entstehung des Sonnensystems nachzuvollziehen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt daher auf der mathematischen Einführung in diese Simulationsmethoden und den dabei verwendeten Konzepten. Abschließend werden der innere Aufbau und die Atmosphäre der Eisriesen analysiert. Anhand der Voyager-2-Daten werden ihre Gravitationsfelder sowie die Besonderheiten ihrer Wärmestrahlung diskutiert und mit theoretischen Modellen verglichen.

2. Nizza-Modell

Die dynamische Entwicklung des Sonnensystems ist seit Jahrhunderten ein ungeklärtes Problem. Astronomen versuchen bis heute, die Entstehung der heutigen Struktur unseres Sonnensystems ausgehend von seinen Anfangsbedingungen zu erklären. Im Jahr 2005 wurden drei Artikel von Rodrigo Gomes, Harold F. Levison, Alessandro Morbidelli und Kleomenis Tsiganis, die am Observatorium Côte d’Azur in Nizza, Frankreich, arbeiten, in Nature veröffentlicht (vgl. R. Gomes et al. 2005, K. Tsiganis et al. 2005, A. Morbidelli et al. 2005). Sie stellten das Nizza-Modell vor, benannt nach der französischen Stadt. Es geht davon aus, dass die Riesenplaneten (Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun) ursprünglich in einer kompakteren und kreisförmigeren Konfiguration als heute angeordnet waren und von einer Scheibe aus Planetesimalen außerhalb ihrer Bahnorbits umgeben waren. Über Hunderte von Millionen von Jahren führten gravitative Wechselwirkungen zwischen den Planeten und der Scheibe zu einer Orbitalmigration. Jupiter bewegte sich leicht nach innen, während die anderen Riesenplaneten nach außen wanderten. Dieser Prozess erklärt mehrere wichtige Merkmale des modernen Sonnensystems. Seit seiner Veröffentlichung wurde das Nizza-Modell mehrfach verbessert, beispielsweise durch das Nizza-2-Modell, das sich in den Ausgangsbedingungen unterscheidet.

2.1 Entstehung des Sonnensystems

Nach heutiger Lehrmeinung entstand das Sonnensystem vor etwa 4,6 Milliarden Jahren aus dem Gravitationskollaps einer riesigen Molekülwolke. Die Gaswolke bestand aus Wasserstoff und Helium und im geringen Anteil aus Metallen. Aufgrund der Drehimpulserhaltung begann die Wolke sich zunehmend zu drehen und flachte zu einer rotierenden Scheibe ab. In der Mitte sammelte sich der größte Teil der Materie und bildete die Sonne, während in der umgebenden Scheibe sich die Partikel zu größeren Körpern vergrößerten, aus denen später Planetesimalen und die Planeten entstanden (vgl. Dálya 2021: 307f).

Dieser Prozess dauerte Millionen von Jahren und war voller chaotischer Bewegungen, die alles formten. Die Riesenplaneten wie Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun wuchsen in der kühleren äußeren Zone, wo Eis und Gase reichlich vorhanden waren. Die inneren Planeten entstanden näher dran aus festem Gestein und schweren Metallen. Gravitative Wechselwirkungen zogen die Planeten lang-

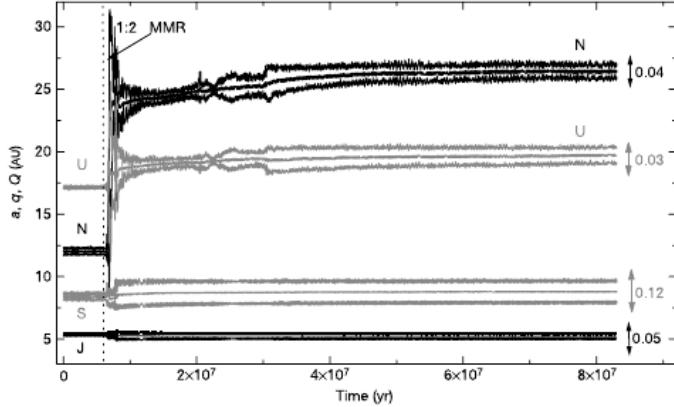


Abbildung 2.1: Entwicklung der Umlaufbahnen (Tsiganis et al. 2005)

sam hin und her. Die Planetesimal-Scheibe um sie herum war entscheidend, sie sorgte für den Druck und die Migration. Ohne sie gäbe es keine stabile Ordnung heute. Die kompakte Anordnung in der Frühphase hielt durch Resonanzen zusammen, bis Instabilitäten alles zerfallen ließen. Die Sonne war relativ jung, ihre starken Winde bliesen Material nach außen. Der Kuiper-Gürtel zeigt heute noch Reste dieser Scheibe mit eisigen Körpern. Akkretion hieß, dass Kollisionen die Körper größer machten. Große Kerne zogen Gas an und wurden zu Riesen. Für Eisriesen war der Eiskern der Anfang, der die Hülle band.

2.2 Migrationsmodell

Der Nizza-Plan besagt, dass die jetzige Konfiguration unseres Sonnensystems auf einer Planetenmigration aus einer früheren Konfiguration beruht. Durch gravitative Begegnungen zwischen den Planetesimalen und den Riesenplaneten befanden sich Jupiter und Saturn in einer 1:2-Resonanz, was bedeutet, dass Saturn doppelt so lange für eine Umlaufbahn benötigte wie Jupiter. Dies führte zu gravitativer Instabilität im System, und die Planeten begannen nach außen zu wandern, wobei schließlich Neptun und Uranus ihre Plätze getauscht haben. Genau das kann auf dem Abbildungen 2.1 und 2.2 gesehen werden. Dieser Prozess sagt vieles voraus, was im heutigen Sonnensystem zu sehen ist. Wenn sich die Resonanzbedingungen ändern, dann können kleine Störungen plötzlich groß werden und wird sich das ganze System in einer neuen Konfiguration befinden. Deswegen ist das Modell so interessant, weil es aus einzelnen Anfangsbedingungen am Ende viele beobachtbare Strukturen erklären kann. Man sieht dadurch auch, dass das heutige Sonnensystem eher das Ergebnis eines dynamischen Prozesses ist und mit präzisen Bedingungen.

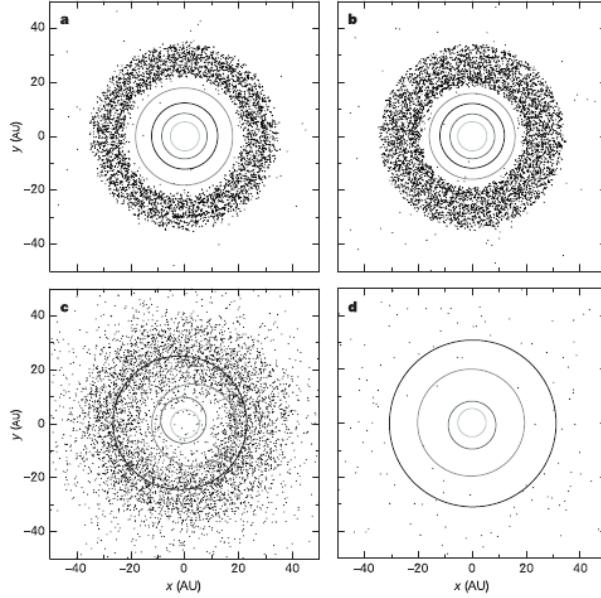


Abbildung 2.2: Entwicklung der Umlaufbahnen (R. Gomes et al. 2005)

2.3 WHFast

Die ursprüngliche Nizza-Modell-Simulation nutzte den sogenannten SyMBA-Integrator zur Berechnung der gravitativen Wechselwirkungen. Dieser stellt eine Weiterentwicklung des Wisdom-Holman-Integrators dar, der als einer der effizientesten Integratoren gilt. Im folgenden Abschnitt wird die moderne und heute allgemein akzeptierte Version des Wisdom-Holman-Integrators, den sogenannten WHFast, hergeleitet. Dabei wird auf der Arbeit von Tamayo & Rein (2015) aufgebaut.

2.3.1 Grundlagen

Die Hamilton-Funktion eines mechanischen Systems entspricht der Gesamtenergie. Jedes solche System entwickelt sich unter seinem Hamiltonian. Später wird in 2.3.3 gesehen, dass man verschiedene Hamiltonian-Funktionen innerhalb eines Hamiltonians identifizieren kann. Man arbeitet dadurch mit einer Beschreibung, die in der Himmelsmechanik sehr natürlich ist, weil sie die Symmetrien des Systems gut sichtbar macht. Gerade bei N-Körper-Systemen ist das ein Vorteil, weil die Wechselwirkungen rechnerisch gesehen komplex werden und man leicht den Überblick verliert.

Zuerst ist die Hamilton-Funktion eines mechanischen Systems zu formulieren:

$$\mathcal{H}(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = T(\mathbf{p}) + V(\mathbf{q}), \quad (2.1)$$

wo \mathbf{p} die generalisierten Impulse $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, \mathbf{q} die generalisierten Koordinaten $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ sind.

Es entwickelt sich zeitlich unter den folgenden sogenannten hamiltonschen Bewegungsgleichungen:

$$\dot{q}_k = \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial p_k}, \quad \dot{p}_k = -\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial q_k}. \quad (2.2)$$

In einem N-Körper-System lautet das Hamiltonian:

$$\mathcal{H} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\mathbf{p}_i^2}{2m_i} - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \frac{Gm_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}. \quad (2.3)$$

2.3.2 Umwandlung in Jacobi-Koordinaten

Die Jacobi-Koordinaten sind nützlich bei N-Körper-Systemen. Sie vereinfachen die mathematische Formulierung und werden häufig in der Himmelsmechanik verwendet. Die Jacobi-Koordinate eines Körpers mit Index i wird durch den Massenmittelpunkt \mathbf{R}_{i-1} der vorherigen Körper bestimmt. Die Idee hier ist, dass man damit die Bewegung jedes Körpers relativ zu einem Bezugspunkt beschreibt und nicht alles gleichzeitig im gleichen Ursprungssystem. So wird aus der komplizierten Mehrkörper-Geometrie eine Kette von Relativbewegungen, die rechnerisch einfacher sind. Gerade für Integratoren ist das hilfreich, weil die Terme im Hamiltonian dadurch eine Form bekommen, die sich später leichter spalten lässt. Man kann sich das auch so vorstellen, dass man Schritt für Schritt immer den nächsten Körper zum bisherigen Schwerpunkt hinzufügt.

Die neue Jacobi-Koordinate \mathbf{r}'_i ist:

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i - \mathbf{R}_{i-1}, \quad (2.4)$$

wobei

$$\mathbf{R}_i = \frac{1}{M_i} \sum_{j=0}^i m_j \mathbf{r}_j, \quad (2.5)$$

und

$$M_i = \sum_{j=0}^i m_j, \quad (2.6)$$

mit $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$.

Die $i=0$ -Koordinate wird anders eingesetzt:

$$\mathbf{r}'_0 = \mathbf{R}_{N-1}, \quad m'_0 = M_{N-1}, \quad \mathbf{p}'_0 = \sum_{j=0}^{N-1} \mathbf{p}_j. \quad (2.7)$$

2.3.3 Hamiltonsche Spaltung

Mit der Anwendung der Jacobi-Koordinaten können wir das Hamiltonian (2.3) umschreiben (vgl. Murray & Dermott 2000). Wir erhalten:

$$\mathcal{H} = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{\mathbf{p}'_i^2}{2m_i} - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \frac{Gm_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}, \quad (2.8)$$

wo wir den Impuls von kartesisch in Jacobi umgewandelt haben. Dadurch spart man sich damit unnötig komplizierte Terme.

Zunächst addieren und subtrahieren wir den folgenden Ausdruck:

$$\mathcal{H}_{\pm} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|}. \quad (2.9)$$

Daraus folgt:

$$\mathcal{H} = \frac{\mathbf{p}'_0^2}{2m'_0} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mathbf{p}'_i^2}{2m'_i} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|} - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N-1} \frac{Gm_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}. \quad (2.10)$$

Weswegen die folgenden Ausdrücke sich erkennen lassen:

$$\mathcal{H}_0 = \frac{\mathbf{p}'_0^2}{2m'_0}, \quad (2.11)$$

Dieser Ausdruck beschreibt die Bewegung des Sterns auf einer Geraden, deswegen ist er in anderen Methoden oft ausgelassen.

$$\mathcal{H}_{Kepler} = \sum_{i=1}^{N-1} \frac{\mathbf{p}'_i^2}{2m'_i} - \sum_{i=1}^{N-1} \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|} = \sum_{i=1}^{N-1} \left(\frac{\mathbf{p}'_i^2}{2m'_i} - \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|} \right), \quad (2.12)$$

$$(\mathcal{H}_{Kepler})_i = \frac{\mathbf{p}'_i^2}{2m'_i} - \frac{Gm'_i M_I}{|\mathbf{r}'_i|}. \quad (2.13)$$

$(\mathcal{H}_{Kepler})_i$ ist die Gesamtenergie eines Körpers m_i im Potenzialfeld vom M_i . Dieses System ist durch die Kepler-Gleichung charakterisiert, die mit Hilfe von numerischen Methoden lösbar ist, aber das würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Der Punkt liegt darin, dass dieser Teil den „Hauptanteil“ der Bewegung beschreibt, also die dominierende Bahnbewegung ohne die gravitativen Störungen.

$$\mathcal{H}_{Wechselwirkung} = \sum_{i=2}^{N-1} \frac{Gm'_i M_i}{|\mathbf{r}'_i|} - \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{\substack{j=i+1 \\ j \neq 1}}^{N-1} \frac{Gm_i m_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|} \quad (2.14)$$

Diese Gleichung beschreibt die gravitativen Wechselwirkungen zwischen den Planeten. Die Lösungsweise der Entwicklung dieses Systems ist mathematisch

in Rein & Tamayo (2015) diskutiert.

Die Hauptidee hier ist, dass man verschiedene Hamilton-Funktionen innerhalb des ursprünglichen Hamiltons erkennt, um zu sehen, unter welchen Bedingungen sich das System entwickelt. Das ist praktisch, weil man so Teile herauslösen kann, die man einzeln gut versteht und dann wieder sinnvoll zusammensetzt. Dadurch wird aus einem komplizierten Gesamtsystem eine Summe aus einfacheren Bausteinen, die man kontrolliert behandeln kann.

Es wurden drei verschiedene Hamilton-Funktionen identifiziert, die sowohl analytisch als auch exakt lösbar sind.

Da sich die ursprüngliche Hamilton-Funktion \mathcal{H} aus drei summierenden Termen zusammensetzt, ist ihre partielle Ableitung je nach Variable die Addition der partiellen Ableitungen der Terme:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial x} = \sum_{i=0}^2 \frac{\partial \mathcal{H}_i}{\partial x}. \quad (2.15)$$

Das ist im Grunde nur die Linearität der Ableitung, aber in diesem Kontext ist es extrem nützlich, weil man die einzelnen Terme getrennt interpretieren kann. In (2.2) wurde erwähnt, dass die partielle Ableitung der Hamilton-Funktion nach dem Impuls die Geschwindigkeit ergibt. Das bedeutet, dass zu der Geschwindigkeit die Geschwindigkeit vom Keplerschen Term und die Geschwindigkeit von den Wechselwirkungen zwischen den Planeten beitragen.

3. Aufbau

3.1 Uranus

Uranus ist einer der interessantesten Planeten im Sonnensystem. Er ist der siebte Planet von der Sonne und umkreist sie alle 84 Jahre mit einer durchschnittlichen Entfernung von 2,9 Milliarden Kilometern. Er wurde erstmals 1781 vom Astronomen und Komponisten Wilhelm Herschel als Planet entdeckt. Er ist nur in den dunkelsten Nächten mit bloßem Auge sichtbar, sonst ist ein Teleskop benötigt, in Städten ist dies unmöglich. Die früheste Aufnahme des Himmelsobjekts war aus dem Jahr 1690 von John Flamsteed, der das Objekt fälschlicherweise als Stern katalogisierte und als Tauri 34 nannte. Mit einem Durchmesser von 51 118 km ist Uranus der drittgrößte Planet im Sonnensystem. Die Rotationsachse verläuft fast parallel zur Ebene seiner Umlaufbahnen. Diese extreme Neigung (circa 97,8 Grad zur Bahnebene) führt dazu, dass Polewechsel ähnlich einem Kippen der Erde auftreten und die Jahreszeiten extrem unterschiedlich sind. Die Rotation um die eigene Achse dauert 17,2 Stunden, was eine kurze Tageslänge ergibt, obwohl die Umlaufzeit um die Sonne 84 Erdenjahre beträgt.

3.1.1 Innerer Aufbau

Der innere Aufbau von Uranus ist sehr interessant. Anders als bei der Erde besteht er nicht aus Gestein, sondern hauptsächlich aus Gasen und Eis. Die äußere Schicht besteht aus einer Atmosphäre aus Wasserstoff, Helium und Methan. Das Methan gibt dem Planeten seine bläuliche Farbe. Unter dieser Hülle liegt eine dicke Schicht aus Wasser, Ammoniak und Methaneis. Diese Schicht ist sehr heiß und fest zugleich, fast wie eine dicke, heiße Flüssigkeit. Noch tiefer im Inneren befindet sich wahrscheinlich ein fester Kern aus Gestein und Metallen. Er ist etwa so groß wie die Erde, aber wegen des hohen Drucks und der großen Hitze sehr kompakt.

Wissenschaftler vermuten, dass die Temperaturen im Inneren über 5000 Grad Celsius erreichen können. Trotzdem strahlt Uranus im Vergleich zu anderen Planeten wenig Wärme ab. Das ist ein Rätsel für Forscher, denn andere Riesenplaneten geben mehr Wärme aus ihrem Inneren ab. Der ungewöhnliche Aufbau und die seitliche Rotation könnten miteinander zusammenhängen, vielleicht wurde Uranus in seiner Entstehungszeit durch einen großen Einschlag umgeworfen.

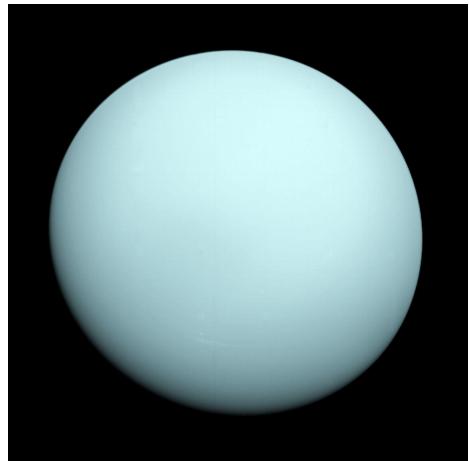


Abbildung 3.1: Uranus as seen by NASA Voyager 2, NASA, 1986

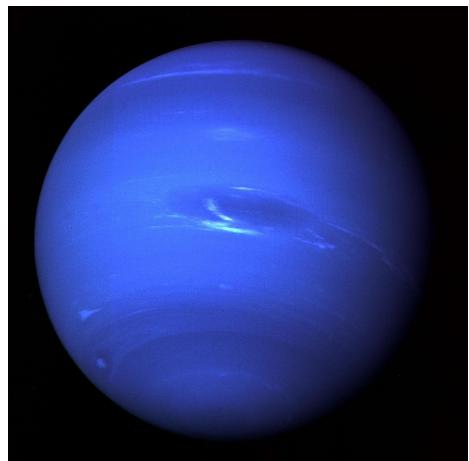


Abbildung 3.2: Neptune Full Disk View, NASA, 1989

3.1.2 Atmosphäre

Die Atmosphäre von Uranus ist relativ kalt und ruhig. Sie besteht hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, wie bei den meisten Gasplaneten. Dazu kommt eine kleine Menge Methan, die dem Planeten seine typische blaugrüne Farbe gibt. Das Methan in den oberen Schichten der Atmosphäre absorbiert das rote Licht der Sonne, wodurch nur das blaue und grüne Licht zurück reflektiert wird.

Die Temperaturen in der Atmosphäre sind extrem niedrig. Sie können auf bis zu minus 220 Grad Celsius sinken. Damit ist Uranus einer der kältesten Planeten im Sonnensystem. Der Grund könnte sein, dass er im Inneren nur sehr wenig Wärme abgibt. In den oberen Schichten herrschen starke Winde, die bis zu 900 Kilometer pro Stunde erreichen können. Diese Winde wehen meist in Richtung der Rotationsbewegung des Planeten.

Die Wolken auf Uranus bestehen vermutlich aus Eiskristallen von Methan, Ammoniak und Wasser. Sie bilden mehrere Schichten, die sich überlagern. Die oberen Wolken sind sehr blass und schwer zu erkennen, was den Planeten insgesamt gleichmäßig und farblich ruhig erscheinen lässt. Erst mit modernen Teleskopen und Raumsonden konnten Forscher feine Strukturen wie helle Wolkenfelder und schwache Wirbelstürme entdecken.

Interessant ist auch, dass die Atmosphäre sehr tief in den Planeten hineinreicht und dort in den flüssigen Mantel übergeht. Es gibt also keinen klaren Übergang zwischen Luft und innerem Aufbau wie auf der Erde. Alles scheint langsam ineinander überzugehen. Dadurch ist die Atmosphäre ein wichtiger Teil der Gesamtkonstruktion des Planeten und spielt auch bei der Entstehung des Magnetfelds eine wichtige Rolle.

3.1.3 Monde

Uranus hat heute 29 bekannte Monde, die meisten sind klein und dunkel. Fünf davon sind besonders wichtig: Miranda, Ariel, Umbriel, Titania und Oberon, die sind deutlich größer als die übrigen. Ihre Namen stammen nicht aus der griechischen Mythologie, sondern aus Figuren aus Theaterstücken von Shakespeare und einem Gedicht von Alexander Pope, was Uranus von den anderen Planeten unterscheidet.

Titania und Oberon sind die größten Monde des Uranus. Miranda ist der kleinste der fünf großen Monde, zeigt aber sehr ungewöhnliche Oberflächenformen mit hohen Klippen und zerbrochen wirkenden Landschaften. Viele der kleineren inneren Monde umkreisen den Planeten sehr nahe und bewegen sich zwischen den Ringen oder direkt neben ihnen.

Die äußeren, sogenannten „irregulären“ Monde haben weit entfernte und oft stark geneigte Bahnen. Einige von ihnen bewegen sich sogar rückläufig, also entgegen der Rotationsrichtung von Uranus. Diese weit entfernten Monde sind wahrscheinlich eingefangene Objekte aus dem äußeren Sonnensystem und erzählen etwas über die Entstehungsgeschichte des Planeten.

3.2 Neptun

3.2.1 Innerer Aufbau

Neptun ist der achte und äußerste Planet in unserem Sonnensystem. Er gehört wie Uranus zu den Eisriesen und ist etwas kleiner, aber schwerer als Uranus. Neptun wurde 1846 nicht zufällig mit einem Teleskop entdeckt, sondern auf Basis von Berechnungen seiner Schwerkraftwirkung auf Uranus. Mit einem mittleren Abstand von etwa 4,5 Milliarden km zur Sonne braucht er circa 165 Jahre für einen Umlauf. Mit einem Durchmesser von etwa 49 200 km ist er etwas kleiner als Uranus, aber immer noch der viertgrößte Planet im Sonnensystem.

Neptun ist mit bloßem Auge nicht sichtbar, da er zu weit weg von der Erde ist und zu lichtschwach. Schon kleine Amateurteleskope können ihn jedoch als schwaches, blaues Scheibchen zeigen. Seine blaue Farbe kommt wie bei Uranus hauptsächlich vom Methan in der Atmosphäre, das rotes Licht absorbiert und blaues Licht durchlässt. Insgesamt wirkt Neptun aber oft kräftiger blau, weil tiefere Schichten und Wolkenstrukturen stärker hervortreten.

Auch Neptun rotiert relativ schnell um seine eigene Achse. Ein Tag auf Neptun dauert etwa 16 Stunden, also noch etwas weniger als auf Uranus. Seine Rotationsachse ist um etwa 28 Grad gegen die Bahnebene geneigt, das ist vergleichbar mit der Achsenneigung der Erde. Dadurch gibt es auf Neptun zwar Jahreszeiten, aber sie sind bei weitem nicht so extrem wie die durch die seitliche Lage von Uranus.

3.2.2 Atmosphäre

Neptuns Atmosphäre ist wilder und dynamischer als die von Uranus. Sie besteht hauptsächlich aus Wasserstoff, Helium und Methan, genau wie bei Uranus. Das Methan gibt Neptun seine intensive blaue Farbe, weil es rotes Licht stark absorbiert. Die Temperaturen sind extrem kalt, bis zu minus 200 Grad Celsius in den oberen Schichten.

Anders als bei Uranus tobten auf Neptun starke Stürme und Winde. Die schnellsten Winde im Sonnensystem erreichen hier über 2000 Kilometer pro Stunde. Sie wehen oft gegen die Rotationsrichtung des Planeten, was sehr ungewöhnlich ist. Die berühmte Große Dunkle Fleck war ein riesiger Sturm, den die Voyager 2 1989 entdeckte. Sie war so groß wie die Erde, verschwand aber später wieder.

Wolken aus Methan- und Ammoniak-Eis bilden helle Bänder und dunkle Flecken. Diese Strukturen ändern sich schnell durch die starken Winde. Neptun strahlt mehr Wärme aus dem Inneren ab als er von der Sonne bekommt. Das treibt die wilden Wetterphänomene an und macht die Atmosphäre zu einem der aktivsten Orte im Sonnensystem.

3.2.3 Monde

Neptun hat 16 bekannte Monde, von denen die acht inneren die wichtigsten sind. Sie heißen Triton, Proteus, Nereid, Larissa, Galatea, Despina, Thalassa und Naiad. Triton ist der größte und beeindruckendste Mond. Er ist größer als unser Mond und hat eine sehr dünne Atmosphäre aus Stickstoff. Triton ist vulkanisch aktiv und speit Geysire aus Stickstoffeis in den Weltraum.

Triton umkreist Neptun rückläufig, also entgegen der Rotationsrichtung des Planeten. Wissenschaftler denken, dass er einst ein Objekt aus dem Kuipergürtel war und von Neptun eingefangen wurde. Die kleineren inneren Monde sind unregelmäßig geformt und bewegen sich sehr nahe am Planeten. Sie wirken wie kleine Kartoffeln und sind wahrscheinlich Bruchstücke größerer Monde.

Neptun besitzt auch ein Ringsystem, aber es ist sehr dünn und schwach. Es hat fünf HauptRinge, die aus feinem Staub und kleinen Partikeln bestehen. Der hellste Ring heißt Adams-Ring und enthält Arcs, also helle Bögen aus Material. Diese Ringe wurden erst 1989 von Voyager 2 entdeckt. Die inneren Monde halten die Ringe durch ihre Schwerkraft in Form, ähnlich wie bei Uranus.

3.3 Zonale harmonische Koeffizienten

Die zonalen harmonischen Koeffizienten beschreiben die Abweichungen des Gravitationspotentials von der idealen Kugelform eines Planeten. Sie entstehen durch Rotation, innere DichteVerteilung und atmosphärische Winde. Besonders für die Eisriesen Uranus und Neptun liefern sie wichtige Hinweise auf den inneren Aufbau, da direkte Messungen fehlen. Voyager 2 maß die ersten präzisen Werte 1986/1989 und ermöglichte Modelle zur Dichte, Rotationsperiode und Windtiefe. Der Vorteil von diesen Koeffizienten ist, dass sie messbar sind. Gera-de bei Uranus und Neptun ist es wertvoll, weil es kaum andere direkte Hinweise auf die innere Struktur gibt.

Beginnen wir mit dem Gaußschen Gesetz der Gravitation in differentieller Form:

$$\nabla \cdot \mathbf{g} = -4\pi G\rho, \quad (3.1)$$

da das Gravitationsfeld konservativ ist ($\nabla \times \mathbf{g} = 0$), kann es als Gradient eines Skalarpotentials " Φ " dargestellt werden:

$$\mathbf{g} = -\nabla\Phi. \quad (3.2)$$

Einsetzen in (3.1) ergibt die sogenannte Poisson-Gleichung:

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho. \quad (3.3)$$

In der Gleichung (3.3) ist die Dichte ρ nur vom Ort abhängig. Außerhalb des Planeten ist ρ entweder gleich null ($\rho(r \gg r_{\text{Planet}}) = 0$) oder vernachlässigbar ($\rho(r \gg r_{\text{Planet}}) \approx 0$). Deswegen lässt sich (3.3) zu der sogenannten Laplace-Gleichung reduzieren:

$$\nabla^2\Phi = 0. \quad (3.4)$$

Diese Gleichung hat eine bestimmte Lösung für unser Einzelplanetensystem:

$$\Phi(r, \theta) = V(r, \theta) + Q(r, \theta) = -\frac{GM}{r} \left(1 - \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^n J_n P_n(\cos \theta) \right) + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta, \quad (3.5)$$

wo r der Entfernung, θ der Kolatitude, J_{2n} den zonalen harmonischen Koeffizienten, $P_n(\cos \theta)$ den zonalen Kugelfunktionen, ω der Winkelgeschwindigkeit entspricht.

Die Koeffizienten J_{2n} beschreiben die Abweichung von einem sphärischen Gravitationspotenzial außerhalb des Planeten. Die amerikanische Raumsonde Voyager 2 maß 1986 bei Uranus und 1989 bei Neptun die wichtigsten Koeffizienten J_2 und J_4 . Für Uranus ergaben sich $J_2 = 3511 \times 10^{-6}$ und $J_4 = -34 \times 10^{-6}$, für Neptun $J_2 = 626 \times 10^{-6}$ und $J_4 = +41 \times 10^{-6}$. Der große J_2 -Wert bei Uranus zeigt eine starke Abplattung durch die schnelle Rotation, während Neptuns kleinerer J_2 auf eine gleichmäßigere Masseverteilung hinweist.

Die ToF-Methode (Theory of Figures) berücksichtigt nur gerade Koeffizienten J_{2n} , da sie symmetrische Rotation annimmt. Ungerade J_{2n+1} würden durch Winde oder hemisphärische Asymmetrie entstehen (vgl. Neuenschwander et Helled). Höhere Koeffizienten wie J_6 und J_8 können aus J_2 und J_4 vorhergesagt werden und verraten etwas über tiefe Winde, die bis 1100 km in die Atmosphäre reichen. Diese Werte helfen, den inneren Aufbau und die Rotationsperiode genauer zu modellieren, da Voyager-Daten Unsicherheiten in der genauen Rotationszeit aufweisen.

4. Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung ist ein fundamentales physikalisches Phänomen, das alle Körper betrifft, deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt 0 K liegt. Bei Planeten spricht man von einer Energiebilanz: Diese beschreibt das Verhältnis zwischen der Energie, die indem Fall ein Planet von der Sonne empfängt, und der Energie, die er durch thermische Strahlung wieder ins Weltall abstrahlt. Diese Bilanz ist wichtig, weil man damit schnell sieht, ob ein Planet nur durch die Sonne warm bleibt oder ob er zusätzlich eine interne Wärmequelle hat. Wenn ein Planet mehr abstrahlt als er erhält, dann muss diese zusätzliche Energie irgendwo aus seinem Inneren kommen. Man kann daher Wärmestrahlung nicht nur als „Temperatur“, sondern als Hinweis auf innere Prozesse verstehen.

4.1 Kernkonzept

Ein Planet befindet sich im thermischen Gleichgewicht, wenn die aufgenommene Sonnenenergie genau der abgestrahlten Wärmeenergie entspricht. Bei den meisten Planeten unseres Sonnensystems ist dies jedoch nicht der Fall, sondern zum Beispiel bei den Eisriesen, die mehr emittieren, als sie von der Sonne erhalten. Wenn ein Überschuss vorliegt, dann ist das ein klarer Hinweis darauf, dass im Inneren noch Prozesse laufen, die Energie liefern.

Die Hauptidee ist, dass alle warmen Körper hauptsächlich im Infrarotbereich strahlen. Ihre Leistung hängt von der Temperatur und der Oberfläche des Planeten ab. Dies beschreibt das Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P = A\epsilon\sigma T^4, \quad (4.1)$$

wobei P die Strahlungsleistung, A die Oberfläche, ϵ der Emissionsgrad, der bei idealen, sogenannten Schwarzen Körpern 1 ist, und σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur (in Kelvin gemessene Temperatur) sind. Der Emissionsgrad kann als die Durchlässigkeit der Atmosphäre betrachtet werden. Das heißt, eine dichte Atmosphäre kann Wärmestrahlung stärker zurückhalten, während eine durchlässigere Atmosphäre Energie leichter nach außen lässt. Man muss das schon merken, dass schon kleine Änderungen in T (Temperatur) große Auswirkungen auf P (Leistung) haben, weil die Temperatur in der vierten Potenz eingeht.

4.2 Uranus

Lange Zeit sah es so aus, dass Uranus im thermischen Gleichgewicht ist, er schien keine Wärmequelle zu haben. Dies war aber ungewöhnlich, da zum Beispiel nach der bisherigen Lehrmeinung Jupiter etwa 1,6 Mal so viel, Saturn 2,5 Mal so viel und Neptun 2,6 Mal so viel Energie abgibt als sie von der Sonne erhalten (Low, F.J. (1966)).

Im Juli 2025 bestätigten Wang & Li durch präzisere Infrarot-Analysen, dass Uranus circa 1,1 Mal mehr Energie emittiert als er empfängt. Dies ist zwar eine interne Wärmequelle, aber deutlich schwächer als bei den anderen Riesenplaneten.

4.3 Neptun

Im Gegensatz zu Uranus ist Neptun ein absoluter Wärmestrahl. Er emittiert zwar mehr Energie, als er von der Sonne erhält. Diese starke interne Wärmequelle treibt die atmosphärischen Phänomene wie die schnellsten Winde des Sonnensystems an.

Das macht Neptun nicht nur optisch auffällig, sondern auch physikalisch spannend, weil seine Atmosphäre dadurch viel aktiver wirkt. Die zusätzliche Energie aus dem Inneren sorgt dafür, dass sich Wolkenstrukturen vergleichsweise schnell verändern können. Man kann sich das so vorstellen, dass der Planet von innen heraus „arbeitet“ und diese Energie dann nach außen weitergibt. Dadurch entstehen starke Druckunterschiede, und genau das ist ein guter Motor für Wind und Wetter.

Außerdem ist es interessant, dass diese Wärmequelle über sehr lange Zeiten relevant bleibt und nicht einfach „ausgeht“. Das heißt, Neptun ist nicht nur ein kalter Planet, sondern ein Körper, der noch immer innere Prozesse hat, die man ernst nehmen muss. Gerade im Vergleich zu Uranus zeigt sich hier, dass ähnliche Planeten trotzdem sehr unterschiedlich funktionieren können. Neptun wirkt damit wie ein Beispiel dafür, wie stark innere Dynamik und Atmosphäre zusammenhängen.

4.4 Unerklärter Mechanismus

Trotz der präzisen Messungen der Wärmeabgabe bleiben die exakten Mechanismen der internen Energiequellen unerklärt. Forscherinnen und Forscher können zwar die beobachtete Energiebilanz bestätigen, wissen jedoch nicht genau, woher diese zusätzliche Energie stammt und warum sie bei Uranus und Neptun so unterschiedlich ausgeprägt ist.

Bei Uranus ist besonders interessant, dass seine interne Wärmequelle so schwach ist.

Auch bei Neptun ist unklar, warum die Wärmeabgabe so hoch bleibt. Die Gravitationskontraktion allein erklärt nicht vollständig die beobachtete Menge. Mögli-

cherweise spielen exotische Phasenübergänge im Hochdruckeis oder unbekannte chemische Prozesse eine Rolle, die noch nicht vollständig verstanden oder beobachtet sind. Nur zukünftige Raumsondenmissionen können diese Fragen klären. Das Problem ist auch, dass man nur indirekt in das Innere schauen kann und daher viele Annahmen nötig sind. Selbst wenn die Gesamtenergie passt, bleibt offen, wie genau die Wärme aus dem Inneren nach außen transportiert wird. Es ist möglich, dass bei Uranus vom Inneren weniger Wärme an die Oberfläche gelangt. Dann wäre die Energie zwar da, aber sie kommt nicht effizient nach außen.

Bei Neptun könnte es umgekehrt sein, dass der Wärmetransport leichter funktioniert und die innere Dynamik aktiver bleibt. Auch Unterschiede in der Zusammensetzung können eine Rolle spielen, weil andere Materialien bei hohem Druck anders reagieren. Zusätzlich ist zu bemerken, dass kleine Unterschiede zu Beginn später große Folgen haben und sich über lange Zeit verstärken. Dadurch wirkt es so, als wären die beiden Planeten ähnlich, aber im Detail verhalten sie sich komplett verschieden.

Man merkt hier auch, dass Messungen allein nicht reichen, wenn die Physik und die Chemie unter extremen Bedingungen noch nicht sauber verstanden sind. Modelle können vieles nachbilden, aber oft gibt es mehrere Erklärungen, die auf den ersten Blick gleich gut aussehen. Genau deswegen sind neue Daten wichtig, vor allem direkt vor Ort, nicht nur von der Erde aus. Eine Mission, die über längere Zeit misst, könnte zeigen, ob die Wärmeabgabe konstant ist oder ob sie sich langsam verändert.

5. Heutige Forschung

In der heutigen Planetenforschung stehen die beiden Eisriesen im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Trotz ihrer großen Entfernung von der Erde und der begrenzten Daten, die bisher gesammelt wurden, liegen neue Beobachtungen und Modelle vor, die neue Erkenntnisse über ihre Struktur, Wärmestrahlung und Entstehungsgeschichte liefern. Forscherinnen und Forscher versuchen anhand moderner Teleskope, Computersimulationen und theoretischer Modelle besser zu verstehen, wie sich die Eisriesen entwickelt haben und warum sie in bestimmten Bereichen unterschiedlich sind. Genau hier zeigt sich, dass schon kleine Unterschiede in den Ausgangsbedingungen später große Auswirkungen haben können.

Viele Fragen lassen sich heute zwar modellieren, aber ohne neue Messdaten bleibt vieles eine gut begründete, aber trotzdem nur modellbasierte Aussage.

5.1 Nizza-2-Modell

Obwohl das ursprüngliche Nizza-Modell viel über das heutige Sonnensystem vorhergesagt hat, konnte es noch einige Details nicht erklären, wie die Stabilität der terrestrischen Planetenbahnen oder die genaue Dynamik irregulärer Monde. Seit 2005 wurde es kontinuierlich verbessert, insbesondere durch das Nizza-2-Modell.

Dabei geht es nicht darum, das alte Modell komplett zu entwerfen, sondern eher darum, die Anfangsbedingungen realistischer zu wählen und die Instabilität im System besser einzugrenzen. Viele Ergebnisse hängen sehr stark davon ab, wie kompakt die Planeten am Anfang standen und wie massiv die Planetesimal-Scheibe gedacht wird. Kleine Unterschiede am Anfang können später große Unterschiede erzeugen, weshalb man bei solchen Modellen schnell an Grenzen stößt. Genau deshalb wurden mehrere Varianten entwickelt, die im Kern die gleiche Idee verfolgen, aber im Detail anders starten.

Ein weiterer Punkt ist, dass man nicht nur die großen Planetenbahnen erklären will, sondern auch Nebenprodukte wie die Verteilung kleiner Körper, eingefangene Objekte und die langfristige Stabilität. Wenn ein Modell zwar die Migration erklärt, dabei aber die inneren Planeten zu stark stört, dann ist es zwar interessant, aber noch nicht überzeugend. Das Nizza-2-Modell soll diese Balance besser treffen, also Migration ermöglichen, ohne dass das ganze System zu früh

auseinanderfällt.

5.1.1 Nizza-5

Das Nizza-5-Modell, auch als Fünf-Planet-Nizza-Modell aus dem Englischen bezeichnet, geht davon aus, dass es in der Frühphase des Sonnensystems einen fünften Riesenplaneten gab, der später aus dem System verbannt wurde. Dieses Modell wurde entwickelt, um die Schwächen der früheren Versionen zu verbessern.

Die Planeten standen ursprünglich in einer engen, resonanten Kette angeordnet: Jupiter, Saturn und die drei Eisriesen (inklusive Uranus und Neptun aber entfernt) waren durch Bahnresonanzen wie 3:2 und 2:1 miteinander verbunden. Durch Wechselwirkungen mit einer Planetesimal-Scheibe migrierten sie langsam auseinander, bis nach etwa 10 Millionen Jahren eine Instabilität ausbrach. Laut dem Modell gab es einen fünften Planeten, der der leichteste Eisriese war, etwa halb so massiv wie Uranus, er wurde nach einer Annäherung an Jupiter als sogenannter Rogue Planet aus dem Sonnensystem geschleudert.

Dieses Szenario erklärt die heutigen Positionen der Planeten deutlich besser als Modelle mit nur vier Riesenplaneten. Es erreicht in Simulationen eine gute Erfolgsquote. Es passt gleichzeitig zur Struktur des Kuiper-Gürtels und zur Entstehung irregulärer Monde. Die Instabilität wird weniger abhängig von Anfangsparametern, bleibt aber umstritten, da der fünfte Planet nie direkt beobachtet wurde.

6. Zusammenfassung und Fazit

Diese Arbeit beleuchtet die Eisriesen Uranus und Neptun unter dem Aspekt ihrer Entstehung, Struktur und Wärmestrahlung. Im Mittelpunkt steht die mathematische Grundlage von N-Körper-Simulationen am Beispiel des WHFast-Integrators, der durch Umwandlung in Jacobi-Koordinaten und hamiltonsche Spaltung die gravitativen Wechselwirkungen berechnet ($H = H_0 + H_{Kepler} + H_{Wechselwirkung}$).

Das Nizza-Modell erklärt die Planetenmigration aus einer kompakten Anordnung, ergänzt durch Nizza-5 mit einem hypothetischen fünften Planeten. Die Voyager-2-Daten zeigen offensichtliche Unterschiede: Uranus mit seiner schwachen internen Wärme (nur 1,1-facher Überschuss), Neptun starke (2,6-fach), deren Mechanismen bis heute ungeklärt bleiben.

Die Analyse bestätigt, dass N-Körper-Simulationen essenziell sind, um die Sonnensystementstehung nachzuvollziehen, doch offene Fragen zur Wärmeabgabe der Eisriesen erfordern zukünftige Missionen. Besonders Uranus' schwache Wärmeabgabe kontrastiert mit Neptuns dynamischer Atmosphäre und deutet auf unterschiedliche Kontraktions- oder chemische Prozesse hin.

Das Nizza-5-Modell verbessert die Vorhersagegenauigkeit, bleibt aber unbewiesen ohne direkte Beobachtung des „Rogue-Planeten“. Zukünftige Forschung sollte WHFast mit KI-optimierten Integratoren erweitern, um Migrationseffekte noch realistischer modellieren zu können.

7. Literaturverzeichnis

R. Gomes et al. (2005): Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. In: Nature, Mai 2005. [Online: <https://files.core.ac.uk/download/pdf/52744366.pdf>, Zugriff: September 2023]

K. Tsiganis et al. (2005): Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. In: Nature, Mai 2005. [Online: <https://www-n.oca.eu/morby/papers/nature-papers-5-26-05.pdf>, Zugriff: Dezember 2025]

A. Morbidelli et al. (2005): Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System. In: Nature, Mai 2005. [Online: <https://web.archive.org/web/20140221023210/https://www-n.oca.eu/michel/PubliGroupe/MorbyNature2005.pdf>, Zugriff: Januar 2026]

Dálya, Gergely (2021): Bevezetés a csillagászatba. Budapest: Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont.

Murray, Carl D; Dermott, Stanley F. (1999): Solar System Dynamics. In: Cambridge University Press, Februar 1999. [Zugriff: November 2025]

Neuenschwander Benno A., Ravit Helled (2022): Empirical Structure Models of Uranus and Neptune [Online: <https://arxiv.org/pdf/2203.02233.pdf>, Zugriff: November 2025]

Nesvorný et al. (2011): LATE ORBITAL INSTABILITIES IN THE OUTER PLANETS INDUCED BY INTERACTION WITH A SELF-GRAVITATING PLANETESIMAL DISK. In: The Astronomical Journal, November 2011. [Online: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-6256/142/5/152/pdf>, Zugriff: Januar 2026]

Dyrek et al. (2024): A High Internal Heat Flux and Large Core in a Warm Neptune Exoplanet. In: arxiv, Mai 2024. [Online: <https://arxiv.org/pdf/2405.11018.pdf>, Zugriff: November 2025]

Nesvorný, Morbidelli: STATISTICAL STUDY OF THE EARLY SOLAR SYSTEM'S INSTABILITY WITH 4, 5 AND 6 GIANT PLANETS. In: arxiv, August

2012. Online: <https://arxiv.org/pdf/1208.2957.pdf>, Zugriff: Januar 2026]

Nesvorný: Young Solar System's Fifth Giant Planet?. In: arxiv, September 2011.
[Online: <https://arxiv.org/pdf/1109.2949.pdf>, Zugriff: November 2025]

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Entwicklung der Umlaufbahnen (Tsiganis et al. 2005)

Abbildung 2.3: Entwicklung der Umlaufbahnen (R. Gomes et al. 2005)

Abbildung 3.1: Uranus as seen by NASA Voyager 2. [Online: <https://science.nasa.gov>, Zugriff: Dezember 2025]

Neptune Full Disk View, NASA, 1989. [Online: <https://science.nasa.gov>, Zugriff: Dezember 2025]

9. Hilfsmittelverzeichnis

Die Grammatik der Arbeit wurde mit Hilfe von Perplexity überprüft und korrigiert, ohne den Inhalt zu verändern. Einige der verwendeten Quellen wurden außerdem mit Perplexity recherchiert und anschließend manuell ausgewählt je nach Bedarf.