



Universiteit
Leiden

The Netherlands

Planet formation through the lens of dynamics

Huang, S.

Citation

Huang, S. (2026, June 19). *Planet formation through the lens of dynamics*.
Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/4306860>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/4306860>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

NEDERLANDSE SAMENVATTING

De ontdekking van de eerste exoplaneet, 51 Pegasi b, markeerde het begin van een snel groeiend onderzoeksveld. Inmiddels zijn bijna 6.000 exoplaneten ontdekt, wat een verbluffende diversiteit aan planetenstelsels heeft onthuld. Toch blijft de Aarde de enige bekende planeet waarop leven voorkomt. Dit contrast roept fundamentele vragen op over de vraag of leven algemeen voorkomt in het heelal en hoe planetenstelsels, inclusief het onze, ontstaan en evolueren.

In plaats van op zichzelf een volledig beeld te geven, werken waarnemingen en theorie nauw samen om ons begrip van exo-planetenstelsels (planetenstelsels buiten het zonnestelsel) te verdiepen. Verschillende detectiemethoden onderzoeken verschillende delen van de parameterruimte: transitfotometrie is gevoelig voor planeten dicht bij hun ster, radialsnelheidsmetingen voor massieve planeten, directe beeldvorming onthult jonge en ver verwijderde objecten, terwijl microlensing en astrometrie andere complementaire regimes bestrijken. Samen bieden deze technieken een gedeeltelijk maar steeds uitbreidend beeld van planetenpopulaties. In deze context spelen theoretische modellen van planeetvorming en -evolutie een cruciale rol bij het interpreteren van waarnemingen, het doen van voorspellingen en het sturen van toekomstige surveys. Tegelijkertijd dagen nieuwe waarnemingen bestaande theorieën voortdurend uit, waardoor deze verder worden verfijnd.

Planeetvorming begint met de zwaartekrachtininstorting van een dicht gebied binnen een moleculaire wolk, wat leidt tot de vorming van een protoster omgeven door een roterende protoplanetaire schijf. Deze schijven, die voornamelijk uit gas bestaan met een kleine fractie vaste deeltjes, vormen de omgeving waarin planeten ontstaan. Twee hoofdmechanismen worden onderscheiden: gravitatie-instabiliteit, die snel massieve objecten kan vormen, en kernaccretie, waarbij kleine stofdeeltjes uitgroeien tot planetesimalen, baby planeten's en uiteindelijk planeten. Waarnemingen met faciliteiten zoals ALMA hebben aangetoond dat deze schijven vaak ringen en openingen vertonen, wat kan wijzen op de aanwezigheid van zich vormende planeten.

Eenmaal gevormd blijven planeten niet op hun oorspronkelijke locatie. Door zwaartekrachtinteracties met de omringende gasschijf migreren hun banen. Lage-massaplaneten ondergaan zogenoemde type I-migratie, terwijl zwaardere planeten die openingen in de schijf creëren, langzamere type II-migratie ervaren. Dit migratieproces wordt bepaald door een evenwicht van krachten, met name Lindblad- en corotatiekoppels, evenals aanvullende effecten zoals verwarmings- en pebble-accretiekoppels. Deze processen kunnen planeten naar binnen drijven, hun migratie stoppen of zelfs omkeren, en bepalen daarmee in sterke mate de uiteindelijke architectuur van planetenstelsels.

Migratie leidt op natuurlijke wijze tot het ontstaan van baanresonanties, een concept dat voor het eerst werd bestudeerd in de context van de Galileïsche manen door Pierre-Simon Laplace. Wanneer planeten naar elkaar toe migreren, kunnen zij gevangen raken in baanconfiguraties waarbij hun omlooptijden eenvoudige gehele verhoudingen vormen. In zulke resonanties stapelen zwaartekrachtinteracties zich coherent op, wat het systeem

stabiliseert en nauwe ontmoetingen voorkomt. Resonanties kunnen ook meerdere planeten omvatten, wat leidt tot resonantieketens of drie-lichaamresonanties die een belangrijke rol spelen in compacte planetenstelsels.

Waarnemingen tonen aan dat de architecturen van exo-planetenstelsels zeer divers zijn. Sommige systemen, zoals TRAPPIST-1, vertonen resonantieketens, terwijl veel andere dat niet doen. Statistische studies laten zien dat slechts een klein deel van de planeetparen zich momenteel in resonantie bevindt, hoewel veel systemen zich net buiten resonante configuraties bevinden. Dit heeft geleid tot verschillende theorieën: planeten kunnen gevormd zijn in resonantieketens die later instabiel werden, in gasarme omgevingen met weinig migratie, of in situ na het verdwijnen van de gasschijf. Toenemend observationeel bewijs suggereert dat resonantieketens vaak vroeg ontstaan en later worden verbroken door dynamische instabiliteiten.

In het algemeen combineert het onderzoek naar planeetvorming en systeemarchitectuur waarnemingen, theorie en numerieke simulaties om te begrijpen hoe de grote diversiteit aan planetenstelsels ontstaat. Hoewel er aanzienlijke vooruitgang is geboekt, blijven veel fundamentele vragen open, met name over de oorsprong van deze diversiteit en de voorwaarden die leiden tot bewoonbare planeten.

Chapter 2: Wanneer, waar en hoeveel exoplaneten eindigen in baanresonanties?

Protoplanetaire schijven zijn de geboorteplaatsen van planeten. Terwijl protoplaneten impulsmoment uitwisselen met de omringende schijf, migreren zij. Migratie kan twee planeten vangen in een stabiele mean motion resonantie, zoals waargenomen in systemen zoals PDS70 (2:1 resonantie Bae et al. 2019) en TRAPPIST-1 (resonantieketen Luger et al. 2017). Te snelle migratie leidt echter tot het kruisen van resonanties in plaats van vangst. In dit werk heb ik de kritische migratiesnelheid afgeleid die de overgang tussen resonantievangst en kruising bepaalt, en zo een hulpmiddel geleverd om de massa van de oorspronkelijke schijf van perfecte resonantieketens te diagnosticeren. Omdat snelle migratie doorgaans wijst op een massieve schijf, heb ik ook berekend dat bijna-resonante exoplaneten zijn gevormd in schijven met massa's vergelijkbaar met de Minimum Mass Solar Nebula. Rond dezelfde tijd dat mijn artikel verscheen, leidde Batygin & Petit (2023a) onafhankelijk een vergelijkbaar criterium af via een andere methode.

Chapter 3: De dynamica van bijzondere resonantieketens en hun vorming: TRAPPIST-1

Resonantieketens van hogere orde stellen ons in staat om tijdschalen van planeetvorming te bepalen. In het TRAPPIST-1-systeem zijn de hoge orde 8:5- en 5:3-resonanties van de binnenste drie planeten bijvoorbeeld vrijwel onmogelijk te reproduceren indien de planeten binnen de schijf blijven (Teyssandier et al. 2022; Burn et al. 2021). Deze resonanties ontstaan alleen wanneer de binnenste planeten migreren naar een gasvrije magnetosferische holte, waar schijfkoppels hun oorspronkelijke 3:2-resonanties omzetten tot de waargenomen hogere orde. Daarnaast mogen de buitenste planeten d, e en f noch te snel, noch te langzaam gevormd worden, anders ontstaat een configuratie die niet overeenkomt met de waarnemingen. Op deze manier heb ik een methode voorgesteld om vormingstijdschalen af te leiden uit de huidige systeemarchitectuur. Recente magnetohydrodynamische simulaties (Romanova et al. 2025) bevestigen dit mechanisme. Deze vormingsroute is ook toepasbaar op andere resonantieketens, zoals TOI-178 en HD158259.

Chapter 4: De dynamica van gebroken resonantieketens en hun vorming: het Zonnestelsel

Terwijl veel systemen resonanties vertonen, doen andere systemen, waaronder ons Zonne-

stelsel, dat niet. Verschillende mechanismen, zoals het verdwijnen van de schijf (Izidoro et al. 2021), sterpassages (Maas et al. 2025) en botsingen tussen planetesimalen (Li et al. 2024; Yi et al. 2025a), kunnen oorspronkelijke resonanties verstoren. In het Zonnestelsel beïnvloedt de instabiliteit van de reuzenplaneten (Morbidelli et al. 2005) de binnenste planeten via seculaire interacties (Kaib & Chambers 2016). In dit werk laat ik zien dat de huidige dynamische structuur van de terrestrische planeten op natuurlijke wijze ontstaat wanneer zij begonnen in een resonantieketen die werd verstoord tijdens deze instabiliteit, wat uiteindelijk leidde tot de maanvormende botsing. Dit ondersteunt het idee dat de terrestrische planeten vroeg zijn gevormd in een gasrijke schijf, vergelijkbaar met exo-planetensystemen, en biedt een nieuwe toetsbare verklaring voor het verbreken van resonanties.

Chapter 5: Onderdrukking van reuzenplaneetvorming in sterclusteromgevingen

Waarnemingen tonen aan dat de geboortekomgeving van sterren een sterke invloed heeft op planeetvormende schijven, bijvoorbeeld in de proplyds van de Orionnevel (Berné et al. 2024) en in numerieke simulaties (Wilhelm et al. 2023). In dit werk wordt een vereenvoudigd populatiesynthesemodel geïntroduceerd om planeetvorming in dergelijke omgevingen te simuleren, inclusief kiezelopveging en de invloed van nabijgelegen sterrenstraling. De resultaten tonen aan dat clusteromgevingen de vorming van reuzenplaneten onderdrukken, vooral rond lichte sterren. In plaats daarvan ontstaan Neptunus-achtige planeten op wijde banen. De korte levensduur van de schijf stopt zowel gasaccretie als migratie. Dit komt overeen met recente microlensingwaarnemingen (Zang et al. 2025).

Chapter 6: Signaturen van dicht opeengepakte, kiezelopveging protoplaneten in ALMA-schijven

Hoewel exoplaneten op wijde banen relatief vaak voorkomen, zijn er nog maar weinig protoplaneten direct waargenomen. Studies tonen aan dat de frequentie van substructuren in schijven vergelijkbaar is met die van exoplaneten (van der Marel & Mulders 2021). Dit werk stelt dat veel protoplaneten te klein zijn om direct te detecteren. Overgangsschijven kunnen in twee groepen worden verdeeld: systemen met massieve gasreuzen die diepe gaten vormen, en systemen met meerdere kleinere Neptunus-achtige planeten die stofholtes creëren zonder duidelijke gasgaten. De eigenschappen van de stofringen bieden belangrijke aanwijzingen voor planeetvorming. Waarnemingen met hoge resolutie, met name met ALMA, kunnen deze modellen testen.

Outlook: Identificatie van gebroken resonantieketens

Hoewel intacte resonantieketens relatief eenvoudig te herkennen zijn, zijn gebroken ketens subtieler en moeilijker te detecteren. Toch bevatten zij cruciale informatie over de migratiegeschiedenis en dynamische evolutie van planetensystemen. Een veelbelovende aanpak is het zoeken naar bijna-integer periodeverhoudingen als overblijfselen van vroegere resonanties. Toekomstig werk kan analytische modellen en N-body-simulaties combineren om te testen of waargenomen systemen afkomstig zijn van instabiel geworden resonantieketens. Dit kan ook wijzen op onzichtbare buitenste planeten, te testen met toekomstige missies zoals Gaia.

Naast baanarchitectuur biedt ook de samenstelling van planeten een krachtige diagnose. Het verbreken van resonantieketens kan leiden tot dynamische instabiliteiten en catastrophale botsingen, die sporen achterlaten in massa, straal en atmosfeer van planeten. Door simulaties te combineren met botsingsmodellen kunnen kandidaten worden geïdentificeerd en vergeleken met waarnemingen via radiale snelheden en atmosferische studies met bijvoorbeeld JWST. Toekomstige telescopen zullen systematische studies mogelijk maken en ons dichterbij brengen bij het begrijpen van de oorsprong van bewoonbare werelden.