



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Hierarchical systems

Hamers, A.S.

Citation

Hamers, A. S. (2016, June 21). *Hierarchical systems*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/41202>

Version: Not Applicable (or Unknown)

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

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/41202>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/41202> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Hamers, Adrian Sven

Title: Hierarchical systems

Issue Date: 2016-06-21

Samenvatting

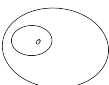
We hebben de gravitationele dynamische evolutie van hiërarchische systemen met verschillende hiërarchieën bestudeerd in verschillende astrofysische contexten. We begonnen met ‘multiplexsystemen’ met een supermassief zwart gat. Daarna hebben we ‘simplexsystemen’ bekeken, beginnend met de algemene dynamica van quadruplesystemen (Hoofdstuk 4), en later met een toepassing op planeten rondom dubbelsterren, ofwel *circumbinary planets* (Hoofdstuk 5). Ten slotte hebben wij onze methoden gegeneraliseerd naar hiërarchische simplexsystemen met een willekeurige structuur en willekeurig aantal lichamen (Hoofdstuk 6), en hebben wij deze toegepast op de vorming van *hot Jupiters* via migratie met hoge excentriciteit in multiplaneet-systemen (Hoofdstuk 7).

Hoofdstuk 2 – Relativistische dynamica rondom een supermassieve zwart gat

In dit hoofdstuk hebben we de gravitationele langetermijnevolutie bestudeerd van banen rondom een supermassief zwart gat. We hebben een specifieke N -bodycode ontwikkeld, TPI , welke ons in staat heeft gebracht om dergelijke banen efficiënt te integreren met meeneming van relativistische correcties, en interacties met een groot aantal ($\sim 10^3$) ‘veldsterren’, welke per aanname in (vrijwel) vaste Keplerbanen bewegen. We hebben laten zien dat de resultaten van TPI overeenkomen met andere meer nauwkeurige, tevens langzamere N -bodycodes.

Met behulp van TPI hebben we simulaties uitgevoerd van het Galactisch centrum (GC) om modellen van de oorsprong van de S-sterren te testen. Hierbij zijn 4800 veldsterren aangenomen, een aantal dat voorheen niet haalbaar was met andere N -bodycodes. We namen aan dat de S-sterren oorspronkelijk in sterk excentrische banen waren, consistent met de ontbinding van dubbelsterren door de getijdenkracht van het supermassieve zwarte gat. We hebben gevonden dat de cumulatieve excentriciteitsverdeling van de S-sterren evolueert tot $N(e) \sim e^{2.6}$ op een tijdschaal van 7 ± 0.1 Myr, wat consistent is met waarnemingen. Onze resultaten suggereren een onderlimiet van de typische leeftijd van de S-sterren van ~ 7 Myr en ~ 25 Myr, aangenomen dat de S-sterren respectievelijk in een korte tijdspanne, of geleidelijk zijn gevormd.

Verder hebben wij uit onze simulaties eerste- en tweede-orde diffusiecoëfficiënten bepaald in termen van de genormaliseerde impulsmomentvariable $\ell \equiv \sqrt{1 - e^2}$. Deze coëfficiënten beschrijven de langetermijnevolutie van het (baan)impulsmoment. We identificeerden drie impulsmomentregimes, waarin de diffusiecoëfficiënten verschillend afhangen van ℓ . Voor lage ℓ kunnen de diffusiecoëfficiënten goed beschreven worden in termen van *non-resonant re-*



laxation, dat wil zeggen dynamische relaxatie vanwege ontmoetingen tussen twee lichamen. Voor hoge ℓ kunnen de diffusiecoëfficiënten goed beschreven worden in termen van *resonant relaxation*, gerelateerd aan krachtmomenten werkend op de banen, welke afkomstig zijn van gecorreleerde ontmoetingen tussen lichamen. In het tussenregime is de zogenaamde ‘Schwarzschildbarrière’, waarin relativistische precessie van de banen belangrijk is. In dit regime hebben we een nieuwe vorm van relaxatie geïdentificeerd, namelijk *anomalous relaxation*, waarin diffusie wordt gedreven door een combinatie van *resonant relaxation* en snelle relativistische precessie. In het bijzonder hebben we laten zien dat de Schwarzschildbarrière geassocieerd kan worden met een sterke daling van de diffusiecoëfficiënten met afnemende ℓ . We hebben onze resultaten toegepast om de *steady-state*-verdeling (de verdeling geëxtrapoleerd tot het oneindige) van ℓ te bepalen.

Hoofdstuk 3 – Planetesimalen in het GC

Verdergaand met het vorige onderwerp van banen rondom een supermassief zwart gat, hebben we de dynamica van planetesimalen in het GC bestuurd. Hierbij hebben we onze aandacht gevestigd op de vernietiging van planetesimalen door de getijdenkracht van het supermassieve zwarte gat, welke mogelijk een waarneembare flits kan produceren in nabij-infrarood- en röntgengolflengtes. Dergelijke flitsen worden op ruwweg dagelijkse basis waargenomen vanuit het supermassieve zwarte gat in het GC, Sgr A*. We hebben aangenomen dat planetesimalen gevormd zijn ofwel in een grote-schaal wolk, en daarbij gebonden aan het supermassieve zwarte gat (scenario 1), ofwel in schijven rondom sterren (scenario 2). In het laatste scenario hebben we gevonden dat de getijdenkrachten van het supermassieve zwarte gat de planetesimalen van hun moederster wegtrekken op afstanden van $r \lesssim 0.5$ pc van het supermassieve zwarte gat. Planetesimalen worden ook van hun moederster ontbonden vanwege gravitationele interacties met andere sterren, en dit proces verwijdert bijna alle planetesimalen binnen de invloedssfeer van het supermassieve zwarte gat, ≈ 4 pc, na ~ 100 Myr.

We hebben de Fokker-Planckvergelijking in de energieruimte toegepast om de frequentie van vernietigingen van planetesimalen door het supermassieve zwarte gat uit te rekenen, en we hebben daarbij deze ontbindingseffecten van planetesimalen en andere potentieel belangrijke effecten meegenomen, zoals relaxatie vanwege interacties met zware objecten (bijvoorbeeld zware gaswolken). Onze vernietigingsfrequentie na $t = 10$ Gyr is ≈ 0.6 d⁻¹, en dit is ruwweg consistent met de waargenomen frequentie van flitsen van eenmaal per dag. Onze resultaten zijn ongevoelig voor de aannames van de modellen, in het bijzonder de beginverdeling van planetesimalen (dat wil zeggen scenario's 1 of 2). Voor scenario (2) is het aangenomen aantal planetesimalen per ster $N_{a/*} = 2 \times 10^7$ afgeleid van waarnemingen van schijven rondom sterren in de buurt van de Zon. Daarentegen impliceert ons resultaat dat in scenario (1) het aantal planetesimalen in de grote-schaal wolk rondom het supermassieve zwarte gat sterk gecorreleerd is met het aantal sterren, en dit vereist *finetuning* van $N_{a/*}$. Wij verkiezen de meer natuurlijke verklaring dat planetesimalen in galactische centra zoals het GC niet veel anders gevormd worden dan planetesimalen rondom sterren dichtbij de Zon.

Hoofdstuk 4 – Seculaire evolutie van hiërarchische quadruplesystemen

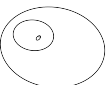
In de resterende hoofdstukken hebben we onze aandacht verlegd naar hiërarchische simplexsystemen, dat wil zeggen systemen welke bestaan uit geneste dubbelsterbanen. We hebben eerst hiërarchische quadruplesystemen in de ‘3+1’-configuratie bestudeerd, welke bestaan uit een hiërarchisch triplesysteem waaromheen een vierde lichaam beweegt. We namen aan dat het systeem voldoende hiërarchisch is, dat wil zeggen dat de verhoudingen x_i van de baanseparaties klein zijn, en we expandeerden de Hamiltoniaan in term van de x_i . Vervolgens hebben we de Hamiltoniaan gemiddeld over de banen, en hebben de bewegingsvergelijkingen geïmplementeerd in een computercode, `SECULARQUADRUPL`.

Daarna hebben we de seculaire evolutie van sterk hiërarchische systemen bestudeerd, welke goed beschreven worden door de laagste-orde termen in de Hamiltoniaan, en we hebben de evolutie van het systeem gekarakteriseerd in termen van de verhoudingen van Lidov-Kozai (LK) timeschalen, toegepast op verschillende baanparen. Laat de binnenste, middelste en buitenste banen aangeduid worden met respectievelijk A, B en C. Voor deze systemen hebben we gevonden dat de globale dynamica kwalitatief beschreven kan worden in termen van de initiële verhouding van de LK tijdschalen toegepast op de AB en BC baanparen, $\mathcal{R}_0 \equiv P_{LK,AB,0}/P_{LK,BC,0}$.

Als $\mathcal{R}_0 \ll 1$, dan domineert het krachtmoment van baan B op A ten opzichte van het krachtmoment van baan C op B. Als banen A en B initieel coplanair waren, dan blijven in dit geval deze banen coplanair. Als banen A en B initieel geïnclineerd ten opzichte van elkaar waren, dan zijn de LK-oscillaties in baan A niet veel veranderd door de aanwezigheid van het vierde lichaam. Excentriciteitsoscillaties in baan B vanwege het seculaire krachtmoment van baan C worden efficiënt uitgedoofd vanwege precessie op korte tijdschaal geïnduceerd door baan A op baan B.

Als $\mathcal{R}_0 \gg 1$, dan domineert het krachtmoment van baan C op baan B ten opzichte van het krachtmoment van baan B op baan A. Aanvankelijk verandert de inclinatie van baan B, terwijl dit niet het geval is voor baan A. Dit brengt een relatieve inclinatie tussen banen A en B teweeg, zelfs als deze aanvankelijk niet relatief geïnclineerd waren. Precessie van baan B, op een korte tijdschaal ten opzichte van de LK-tijdschaal toegepast op de AB banen, voorkomt echter significante excentriciteitsoscillaties in baan A, en dooft zelfs LK-oscillaties uit als banen A en B initieel geïnclineerd zijn.

Ten slotte, als $\mathcal{R}_0 \sim 1$, dan kunnen complexe LK-oscillaties voorkomen in baan A en welke sterk gekoppeld zijn met de LK-oscillaties in baan B. Deze laatste oscillaties zijn tevens anders ten opzichte van de situatie waarin baan A vervangen is met een puntdeeltje, hoewel dit typisch een minder sterk effect is. Zelfs als banen A en B initieel coplanair zijn, dan kan de geïnduceerde inclinatie resulteren in excentriciteitsoscillaties in baan A met grote amplitude. De extreem hoge excentriciteiten kunnen significante implicaties hebben voor sterke interacties zoals getijden, gravitatiegolven, en het botsen en/of samensmelten van sterren en compacte objecten.



Hoofdstuk 5 – Het verklaren van de afwezigheid van planeten rondom dubbelsterren met korte baanperiodes

In dit hoofdstuk hebben we SECULARQUADRUPLE toegepast om een recente curieuze eigenschap te verklaren in waarnemingen door *Kepler* van planeten rondom dubbelsterren, waargenomen door hun overgang over de sterren. Aangenomen dat het voorkomen van dergelijke planeten niet gerelateerd is aan de baanperiode van de dubbelster, dan zouden ongeveer tweemaal zoveel planeten ontdekt moeten zijn rondom dubbelsterren met korte baanperiodes ($\sim 3 - 6$ d), vergeleken met planeten rondom dubbelsterren met langere baanperiodes. Er zijn echter tot nu toe geen enkele planeten gevonden rondom deze dubbelsterren met korte baanperiodes, terwijl er 10 zijn ontdekt rondom dubbelsterren met langere baanperiodes. Het is daarom waarschijnlijk dat er een intrinsieke afwezigheid is van (waarneembare) planeten rondom dubbelsterren met korte baanperiodes.

We hebben laten zien dat deze afwezigheid verklaard kan worden door de seculaire invloed van een planeet rondom een dubbelster in hiërarchische *triplestersystemen*. Men denkt dat nauwe dubbelsterren in dergelijke triplestersystemen zijn gevormd via LK-oscillaties in de binnenste baan, veroorzaakt door de derde ster, gecombineerd met getijdenwerking. De baan van de binnenste dubbelster was in dit geval aanvankelijk wijder, met een baanperiode tot $\sim 10^4$ yr. We hebben laten zien dat met een planeet rondom de binnenste dubbelster, LK-oscillaties in de binnenste baan, veroorzaakt door de derde ster, uitgedoofd kunnen worden door additionele precessie geïnduceerd door de planeet. Dit betekent dat de binnenste dubbelster wordt ‘beschermd’ tegen het krachtmoment van de baan van de derde ster, en tengevolge krimpt de binnenste baan niet. Dit beschermende effect is echter alleen het geval als de planeet voldoende massief is, en als de baan voldoende dichtbij en geïnclineerd is ten opzichte van de binnenste dubbelster. In andere gevallen is ofwel de baan van de planeet stabiel maar kan de planeet de binnenste dubbelster niet beschermen, ofwel de baan van de planeet is instabiel, wat waarschijnlijk leidt tot een ontsnapping van de planeet van het systeem. In het bijzonder, als een lage-massaplaneet initieel geïnclineerd is van en sterk verwijderd is de binnenste dubbelster, dan is er typisch geen beschermingseffect, en kan de baan van de binnenste dubbelster krimpen tot een nauwe baan. Aan de andere kant, een meer massieve planeet in een initieel coplanaire en dichte baan ten opzichte van de binnenste dubbelster zorgt typisch voor een beschermend effect, waardoor de binnenste baan niet krimpt.

Dit impliceert dat nauwe dubbelsterren typisch geen massieve ($m_3 \sim M_J$) planeten hebben op nauwe en coplanaire banen ten opzichte van de dubbelster, welke krimp van de baan hadden voorkomen. Als in tegenstelling de planeet minder massief is ($m_3 \sim 10^{-2} M_J$) en initieel geïnclineerd ten opzichte van en ver verwijderd was van de dubbelster, dan is vernauwing van de baan van de dubbelster mogelijk. Deze trend is consistent met de huidige waarnemingen van *Kepler*, en suggereert dat er zich planeten kunnen bevinden rondom nauwe dubbelsterren, welke op het moment niet waargenomen kunnen worden.

Hoofdstuk 6 – Seculaire evolutie van hiërarchische multiplanestystemen

We hebben de methode en het algoritme van Hoofdstuk 4 gegeneraliseerd naar systemen bestaande uit geneste dubbelsterbanen (dat wil zeggen simplexbanen) met een willekeurig aantal lichamen, en een willekeurige configuratie. We hebben de Hamiltoniaan geëxpandeerd in termen van de verhoudingen van baanseparaties, welke per aanname klein zijn, en een middeling over de banen uitgevoerd. Het formalisme hebben we geïmplementeerd in een algoritme, `SECULARMULTIPLE`, waarmee langetermijnintegraties van hiërarchische systemen met complexe hiërarchieën mogelijk zijn, en we hebben eerste toepassingen gepresenteerd. In het bijzonder hebben wij onze methode toegepast op de hoge-multipliciteitssystemen Mizar en Alcor, en 30 Ari.

Hoofdstuk 7 – *Hot Jupiters* in multiplaneetsystemen

We hebben `SECULARMULTIPLE` toegepast op de vorming van *hot Jupiters* (HJs; Jupiterachtige planeten die zich bevinden in zeer nauwe banen ten opzichte van hun ster) via migratie met hoge-excentriciteit in multiplaneetsystemen (systemen met tenminste drie planeten). In dit scenario wordt aangenomen dat HJs gevormd zijn als Jupiterachtige planeten op ~ 1 AU afstand van de ster. Vervolgens werd de excentriciteit van de baan van de planeet geëxiteerd vanwege seculaire interacties met de andere planeten, waardoor de mate van getijdenwerking sterk toenam, en uiteindelijk een HJ gevormd is in een circulaire baan met een halve-lange as ~ 0.05 AU.

We hebben eerst geverifieerd dat ons seculaire algoritme statistisch gezien correcte resultaten geeft vergeleken met directe N -bodyintegraties. De laatste zijn computationeel gezien echter veel duurder om uit te voeren, en daarom stelt de seculaire methode ons in staat om efficiënt de grote parameter ruimte van multiplaneetsystemen te verkennen. We hebben de condities bestudeerd waarvoor hoge excentriciteiten opgewekt kunnen worden, en daarmee potentieel HJs gevormd kunnen worden. We hebben gevonden dat niet alleen de parameter de *angular momentum deficit* groot genoeg moet zijn, maar ook moet de verhouding van LK-tijdschalen $\mathcal{R}_0^{(ijk)}$, toegepast op naburige baanparen (i, j) and (j, k) , in de buurt van één moet zijn. De sterkste afhankelijkheid geldt voor $\mathcal{R}_0^{(123)}$, dat wil zeggen de verhouding toegepast op de binnenste banen.

Vervolgens hebben we een populatiesynthese uitgevoerd waarin we gebruik hebben gemaakt van een combinatie van grid en Monte Carlo sampling. We hebben gevonden dat het aantal gevormde HJs typisch klein is, en sterk afhankelijk is van de aangenomen sterkte van de getijdenwerkingen, dat wil zeggen de *viscous time-scale* (of, de equivalente *time lag*). Met de *viscous time-scale* van Socrates et al. (2012) hebben we geen enkele HJs gevonden, terwijl ten hoogste ~ 0.01 van de systemen tot HJs leiden als de aangenomen getijdenkracht 100 keer sterker is. Dit kan verklaard worden door de ‘gewelddadige’ eigenschap van de excitatie van de excentriciteit door seculaire evolutie, wat typisch leidt tot een snelle vernietiging van de planeet, in tegenstelling tot een langzamer proces van getijdenwerking waarbij de baan nauwer en meer cirkelvormig wordt. Onze resultaten impliceren dat migratie met hoge-excentriciteit in multiplaneetsystemen ten hoogste 0.01 van de waargenomen HJs kan verklaren, aangenomen dat de getijdenwerking in de planeet 100 maal sterker is ten opzichte van Socrates et al. (2012).

