



Universiteit
Leiden
The Netherlands

From grains to planetesimals : the microphysics of dust coagulation

Krijt, S.

Citation

Krijt, S. (2015, April 29). *From grains to planetesimals : the microphysics of dust coagulation*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/32842>

Version: Not Applicable (or Unknown)

License: [Leiden University Non-exclusive license](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/32842>

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

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/32842> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Krijt, Sebastiaan

Title: From grains to planetesimals: the microphysics of dust coagulation

Issue Date: 2015-04-29

Nederlandse samenvatting

Overal Aardkloten

Aan het einde van de 17^e eeuw schreef Christiaan Huygens in zijn *Cosmotheoros*, zich richtend tot zijn broer Constantijn:

“Welk een wonderbaarlijke, welk een verbazende grootte en heerlijkheid van de Wereld moet men dan met het verstand bezeffen! Zoo vele Zonnen, zoo vele Aardkloten, en een yder van haar met zoo vele Kruiden, Boomen, Dieren, met zoo vele Zeen en Bergen verciert! Een verwondering, die nog zal vergroot worden, indien iemand in overweging neemt het gene wy van den afstand en de menigte der Vaste Starren gezegt hebben.”

Meer dan 300 jaar later blijkt de visie van Christiaan Huygens bijzonder accuraat. Missies naar planeten en manen in ons eigen zonnestelsel resulteren in spectaculaire beelden van Zeen (niet van water, maar toch) en Bergen, sommige vele malen hoger dan de hoogste bergen op Aarde. Planeten buiten ons zonnestelsel (exoplaneten) zijn vanwege hun afstand moeilijker te zien en te bestuderen, maar door slim gebruik te maken van geavanceerde telescopen zowel op Aarde als in de ruimte kunnen sterrenkundigen ze toch ontdekken. Bovendien kunnen we steeds meer zeggen over de eigenschappen van deze werelden. Sinds de ontdekking van de eerste exoplaneet door Mayor & Queloz in 1995, zijn er nu 1876 exoplaneten bekend en het aantal groeit vrijwel iedere dag¹. Planetenstelsels blijken de regel, niet de uitzondering: kies een willekeurige ster aan de (nachtelijke) hemel en je kunt ervan uitgaan dat er meerdere planeten omheen draaien. Bovendien denken we nu dat om één op de vijf zon-achtige sterren een aard-achtige planeet draait; een planeet die ongeveer even groot is als de Aarde, op een dusdanige afstand van zijn ster dat de temperatuur er de aanwezigheid van vloeibaar water toestaat. Als leven elders lijkt op het leven op Aarde, zijn deze planeten goede plaatsen om te zoeken naar Huygens' Kruiden, Boomen en Dieren.

¹De tussenstand wordt bijgehouden op <http://exoplanet.eu>.

De ontdekking dat het in de kosmos wemelt van de planeten brengt een aantal prangende vragen met zich mee: Hoe zijn al deze planeten gevormd en welke processen spelen een rol bij hun geboorte? Wat bepaalt de grootte van de planeet, zijn dichtheid, en de samenstelling van zijn atmosfeer? Vandaag de dag hebben astronomen een globaal beeld van ster- en planeetvorming. Dit beeld is opgebouwd uit kennis van ons eigen zonnestelsel en waarnemingen van sterren en planeten ver daarbuiten, aangevuld met experimenteel en theoretisch onderzoek.

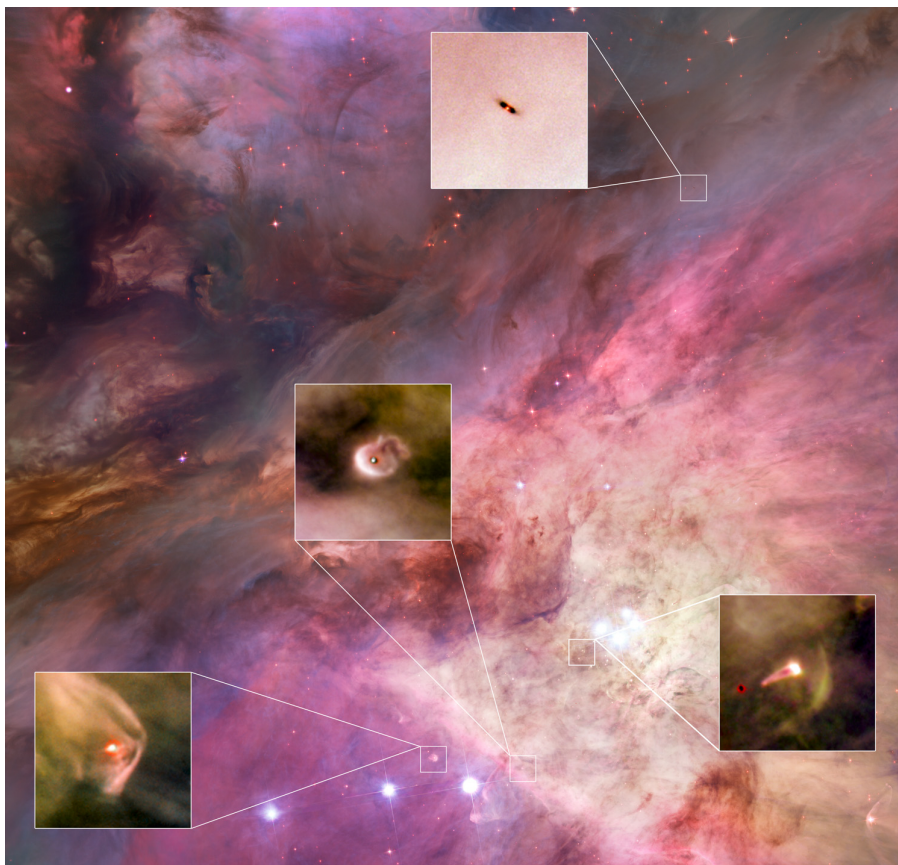
Ster- en planeetvorming

De ruimte tussen sterren is gevuld met een dun moleculair gas. Op de meeste plekken in de kosmos is dit gas extreem ijl, met doorgaans maar een paar atomen per kubieke centimeter. Op sommige plaatsen, in zogeheten moleculaire wolken, zijn de dichtheden echter hoger, met soms wel een miljoen atomen per kubieke centimeter. Sommige moleculaire wolken worden zo zwaar dat ze ineens storten onder hun eigen zwaartekracht. Wanneer dit gebeurt, vormt zich een nieuwe (proto)ster, met daaromheen een protoplanetaire schijf. Deze schijf is een noodzakelijk bijproduct van het stervormingsproces en is typisch zo'n 100 AU groot². De massa van de schijf is ongeveer 100 maal kleiner dan die van de jonge ster zelf. Figuur 7.1 laat een opname van de Orionnevel zien, met daarin een aantal pasgeboren sterren omringd door gas en stof. Uit het gas en stof in deze protoplanetaire schijven ontstaan planeten. In ons eigen zonnestelsel, nu ongeveer 4.567 miljard jaar oud, is de protoplanetaire gasschijf allang vervlogen, maar we zien er wel tekenen van terug. Zo liggen de banen van alle planeten nagenoeg in hetzelfde vlak en draaien de planeten in dezelfde richting rond de zon.

Protoplanetaire schijven bestaan voor 99% uit gas, voornamelijk waterstof, en voor 1% uit stof: kleine microscopische deeltjes van silicaten, koolstof, ijs, en een aantal andere elementen. Uit dit stof worden de kernen van planeten gevormd. De stofkorrels, aanvankelijk niet groter dan een micrometer, botsen en plakken aan elkaar, en vormen zo steeds grotere deeltjes. Pas als de deeltjes een aantal kilometer groot zijn begint hun zwaartekracht een rol te spelen en wordt hun groei versneld. Deze grote deeltjes noemen we *planetesimalen*, de bouwstenen van planeten. De planetesimalen botsen en groeien verder, totdat er planeetkernen zijn gevormd. Deze kernen hebben een sterke zwaartekracht en zijn hierdoor in staat gas uit de protoplanetaire schijf aan zich te binden; ze vormen een primitieve atmosfeer. Verreweg de meeste gasschijven worden waargenomen rond zeer jonge, pasgeboren sterren, niet ouder dan een paar miljoen jaar. De kernen van gasreuzen zoals Jupiter en Saturnus moeten gevormd zijn toen de schijf rijk aan gas was, wat ons vertelt dat het proces van planeetvorming hooguit een paar miljoen jaar kan duren. Figuur 7.2 laat zien hoe planeetvorming er uit zou kunnen zien in een protoplanetaire schijf.

Het bestuderen van de groei van een stofkorrel tot planeet is een uitdagende onderneming, bemoeilijkt door het feit dat we het proces niet direct kunnen waarnemen. Daar

²Een AU = 149597871 km is ongeveer de afstand tussen de Aarde en de Zon.

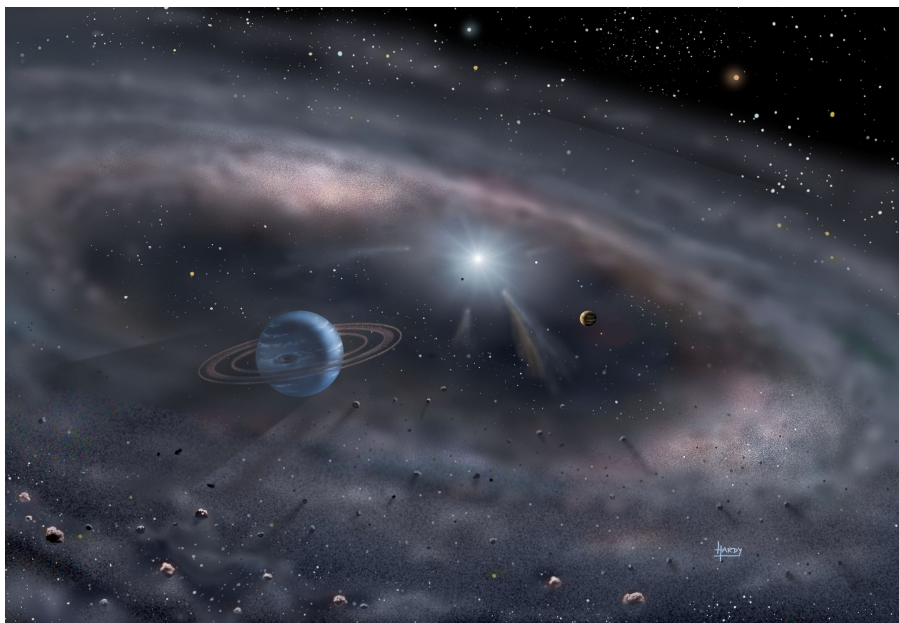


Figuur 7.1: Jonge sterren met protoplanetaire schijven in de Orionnevel. Zulke opnamen vormen een direct bewijs voor het bestaan van protoplanetaire schijven. Foto: NASA, ESA, M. Robberto (Space Telescope Science Institute/ESA), the Hubble Space Telescope Orion Treasury Project Team and L. Ricci (ESO).

waar we rond jonge sterren wel de kleinste stofkorrels kunnen zien (omdat ze het sterlicht op een efficiënte manier beïnvloeden) en de grootste planeten kunnen waarnemen (bijvoorbeeld omdat ze voor hun ster langs schuiven), zijn de tussenproducten vrijwel onzichtbaar. Onderzoek naar deze tussenliggende stappen gebeurt daarom vaak met theoretische modellen en computersimulaties.

Van stofkorrel tot planetesimaal

De eerste stap in het bouwen van planeten, die van stofkorrel tot planetesimaal, is misschien wel de minst begrepen stap. Computersimulaties en experimenten in laboratoria

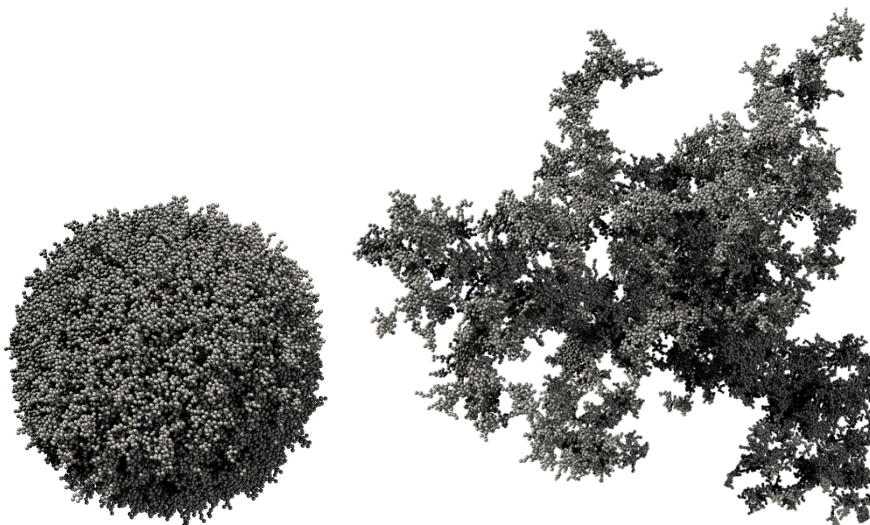


Figuur 7.2: Artistieke weergave van een protoplanetaire schijf. Kleine stofkorrels zijn samengeklonterd tot grotere lichamen en er heeft zich een planeet met een ringsysteem gevormd. Figuur: David A. Hardy/www.astroart.org.

leren ons dat stofdeeltjes, als ze groter zijn dan ongeveer een centimeter, maar moeizaam aan elkaar blijven plakken. In de protoplanetaire schijf wordt de onderlinge botsingssnelheid tussen deze deeltjes bepaald door interactie met het gas. Deze botsingssnelheden kunnen oplopen tot enkele tientallen meters per seconde. Als deeltjes willen groeien moeten ze, zelfs met deze hoge botsingssnelheden, aan elkaar zien te plakken. Een bijkomend probleem is dat deeltjes van ongeveer een meter last hebben van ‘wind tegen’. Ze vliegen rond met een snelheid die iets groter is dan die van het gas, en raken energie kwijt aan de tegenwind die ze daardoor ervaren. Als direct gevolg verliezen de deeltjes energie en vallen ze vrij snel richting de jonge ster. Hierdoor worden grote delen van de schijf schoongeveegd en stofvrij gemaakt. Geavanceerde computermodellen die de groei van grote ensembles deeltjes rond jonge sterren simuleren vinden dan ook dat, als gevolg van deze problemen, stofdeeltjes erg veel moeite hebben om groter te worden dan een centimeter of een meter.

En toch zien we overal om ons heen planeten. Kennelijk is de natuur in staat om in vrijwel elke protoplanetaire schijf, en binnen een paar miljoen jaar, meerdere planeten te vormen. Het lijkt er dus op dat er iets belangrijks ontbreekt in onze modellen.

Een relatief nieuw idee is het kijken naar de *porositeit* van groeiende stofdeeltjes. Voor het gemak werd vaak aangenomen dat stofdeeltjes compact en rond zijn, maar dit is lang niet altijd een nauwkeurige weergave van de werkelijkheid. Figuur 7.3 laat een com-



Figuur 7.3: Computermodellen van stofdeeltjes van $\sim 100\ \mu\text{m}$ groot, opgebouwd uit ongeveer honderdduizend balletjes. Verschillen in het groeiproces kunnen leiden tot heel verschillende structuren: het linker aggregaat is compact en sferisch, het rechter is veel poreuzer en heeft een complexere structuur. Figuren uit Seizinger et al. (2013).

pact en een poreus stofdeeltje zien die zijn gemaakt in verschillende computersimulaties. Als stofdeeltjes niet compact zijn maar poreus, met een lage interne dichtheid, heeft dit serieuze gevolgen voor hun toekomst in de protoplanetaire schijf. Neem als voorbeeld hagel en sneeuw: allebei gemaakt van water en allebei te vinden in de atmosfeer van de Aarde. De poreuze structuur van sneeuw maakt dat het heel andere eigenschappen heeft dan een korrel hagel. Ten eerste is sneeuw plakkeriger (probeer maar eens een sneeuwpop te maken uit hagelstenen). Ten tweede ondervindt een poreus sneeuwdeeltje een andere wrijving van het gas om zich heen. Zo komen hagelstenen met een veel hogere snelheid uit de hemel vallen dan sneeuwvlokken. Dit heeft alles te maken met het verschil in luchtweerstand die beide deeltjes ondervinden. In een protoplanetaire schijf gebeurt iets vergelijkbaars: poreuze deeltjes koppelen beter aan het turbulente gas dan compacte deeltjes. Dit heeft grote gevolgen voor de botsingssnelheden en voor het probleem van de tegenwind. Deze effecten samen hebben tot gevolg dat stofkorrels met een hoge porositeit beter lijken te zijn in het uitgroeien tot planetesimalen.

Dit proefschrift

De porositeit van groeiende stofdeeltjes is dus belangrijk voor de eerste stappen richting de vorming van nieuwe planeten. Maar wat bepaalt hoe poreus een deeltje daadwerkelijk

is? En hoe beïnvloedt de porositeit de toekomst van het deeltje? Dat zijn de kernvragen van dit proefschrift.

Hoofdstuk 1 geeft een algemene introductie over ster- en planeetvorming. In de hoofdstukken 2 en 3 kijken we naar de krachten die een rol spelen in het contact tussen twee balletjes met een grootte van ongeveer een micrometer. Een goed begrip van deze krachten is erg belangrijk voor het bestuderen van grotere stofkorrels, die kunnen worden beschreven als verzamelingen van vele miljoenen microscopische balletjes (figuur 7.3). Door een theoretisch model te ontwikkelen en voorspellingen van dit model te vergelijken met beschikbare experimentele data over stuiterende (hoofdstuk 2) en rollende (hoofdstuk 3) balletjes hebben we een beter begrip van de onderliggende fysica verkregen. Deze modellen worden nu gebruikt om simulaties tussen grotere stofkorrels realistischer te maken.

In de hoofdstukken 4 en 5 gebruiken we de opgedane kennis om stofgroei te simuleren in een protoplanetaire schijf. In hoofdstuk 4 richten we ons op een klein, lokaal stukje van de schijf, waarbinnen we proberen zo veel mogelijk van de aanwezige stofkorrels te volgen terwijl hun massa en porositeit evolueert door de vele botsingen. We gebruiken hiervoor een speciale methode (ontwikkeld door Ormel & Spaans 2008), die ons in staat stelt enorme aantallen deeltjes te volgen terwijl ze groeien van minder dan een micrometer tot meerdere kilometers in doorsnede, een massatoename van meer dan 30 ordes van grootte! We concluderen dat poreuze en ijzige stofdeeltjes inderdaad erg efficiënt kunnen groeien, maar dat erosie door kleinere deeltjes hierbij een probleem kan vormen. Toekomstig onderzoek, met name naar de botsingssnelheid die nodig is voor erosie, moet uitwijzen of dit proces inderdaad een onoverkomelijk obstakel vormt. In hoofdstuk 5 kijken we alleen naar de stofdeeltjes die de massa domineren, en ontwikkelen we een nieuwe methode om poreuze stofgroei te simuleren in een volledige schijf. Met het nieuwe model kunnen we laten zien in welke gebieden van de protoplanetaire schijf succesvolle vorming van planetesimalen mogelijk is. Bovendien is de methode erg flexibel, waardoor de invloed van verschillende eigenschappen van de schijf (zoals temperatuur, massa, etc.) op een snelle manier kan worden bestudeerd.

Tot slot kijken we in hoofdstuk 6 naar de deeltjesverdeling in zogeheten puinschijven. Deze schijven, vaak honderden miljoenen jaren oud, zijn de overblijfselen van protoplanetaire schijven, en hebben wel iets weg van de asteroïde-gordel in ons zonnestelsel. Het meeste gas is allang vervlogen, en de schijven bestaan voornamelijk uit oude planetesimalen die continu nieuwe kleine stofkorrels aanmaken in destructieve botsingen. Het bestuderen van deze puinschijven is interessant omdat de oude planetesimalen informatie bevatten over hun formatie.

In hoofdstuk 7 worden de belangrijkste resultaten van dit proefschrift samengevat en worden een aantal interessante mogelijkheden voor vervolgonderzoek besproken.