



*Diving Deep into Rocky Exoplanets*

K. Hakim

# Samenvatting

## DIVING DEEP INTO ROCKY EXOPLANETS

**Kaustubh Hakim**

In de derde eeuw voor Christus schreef de Griekse filosoof Epicurus een haast profetische stelling in zijn brief aan zijn discipel Herodotus: "Er is een oneindig aantal werelden, sommige zoals de onze, andere heel verschillend". In de afgelopen 25 jaar zijn er ongeveer vierduizend planeten buiten ons zonnestelsel (exoplaneten) ontdekt, en in de komende 25 jaar zullen er waarschijnlijk nog tienduizenden of meer ontdekkingen volgen. Een groot deel van deze exoplaneten heeft vermoedelijk een vast of rotsachtig oppervlakte, net zoals de planeten in het binnengebied van het zonnestelsel; Mercurius, Venus, de aarde, en Mars. Astronomische waarnemingen hebben aangetoond dat rotsachtige exoplaneten veel diverser zijn in hun natuur- en scheikundige eigenschappen dan de planeten in ons zonnestelsel. Echter, de enige informatie die op dit moment beschikbaar is over individuele rotsachtige exoplaneten is hun massa en/of radius, en er is geen directe manier om hun binnenste te bestuderen. Niettemin is het mogelijk om exoplaneten in algemene zin te karakteriseren. Enkele intrigerende vragen zijn: Wat is de samenstelling en structuur van deze verschillende rotsachtige exoplaneten? Hoe ziet hun oppervlakte eruit? Zou er leven kunnen bestaan?

Planeten zijn een bijproduct van de geboorte van de sterren waar ze omheen draaien. De vorming van rotsachtige planeten vindt plaats in de protoplanetaire schijf, een circumstellaire wolk die uit gas en vaste deeltjes (in de vorm van stofkorrels) bestaat. De stofkorrels komen uiteindelijk terecht in de rotsachtige planeten door accretieprocessen. De chemische samenstelling van stofkorrels varieert met tijd en met de afstand tot de pasgeboren ster. Deze samenstelling is sterk afhankelijk van de relatieve chemische abundantie van belangrijke rotsvormende elementen zoals magnesium en silicium, en ook van de hoeveelheid koolstof en zuurstof. De bulksamenstelling van een rotsachtige planeet hangt af van de chemische samenstellingen van de stofkorrels die de planeet heeft opgenomen tijdens haar vorming.

Omdat het binnenste van een rotsachtige planeet onder immense druk en temperatuur verkeert, ondergaan stofkorrels chemische reacties die tot een zekere evenwichtige combinatie van mineralen leiden. Vanwege de zwaartekracht en de hoge temperaturen die gepaard gaan met het planeetvormingsproces raken de planeten gedifferentieerd: zware mineralen zinken naar beneden terwijl lichtere mineralen naar boven komen. Dit proces leidt tot een gestratificeerde structuur in de planeet. In planeten zoals de aarde en Mars bestaat de binnenste laag, die we de kern noemen, uit ijzerrijk metaal. De buitenste laag bevat silicaten en wordt de mantel genoemd.

De hitte die een planeet verkrijgt tijdens haar vorming, en waar aan bijgedragen wordt door het natuurlijke verval van radioactieve elementen in haar binnenste, komt langzaam vrij tijdens de daaropvolgende evolutie. Het binnenste van een planeet kan miljarden jaren lang dynamisch actief blijven door deze interne hitte. De snelheid waarmee de planeet afkoelt hangt af van de natuur- en scheikundige eigenschappen van de verschillende lagen in de planeet, die de manier en kracht bepalen waarmee warmte naar het oppervlakte wordt getransporteerd. De mantel kan zich als een vloeistof gedragen op geologische tijdschalen, wat leidt tot de beweging van materiaal en

warmteoverdracht in de vorm van convectie, net zoals in een pan met kokend water gebeurt (maar dan veel langzamer; we hebben het over snelheden van millimeters per jaar). Het materiaal dat niet meedoet aan de convectie draagt warmte over via geleiding, waardoor het uiteinde van een metalen lepel in de pan dat het water niet raakt, toch heet wordt.

## **Aardwetenschappen voor exoplaneten**

In deze thesis bestudeer ik de mineralogie, structuur en evolutie van chemisch diverse rotsachtige exoplaneten, waarbij ik gebruik maak van methodes die ik hieronder beschrijf.

Het diepste gat dat door mensen op aarde is gemaakt reikt tot slechts 12 km onder het oppervlakte, terwijl de middellijn van de aarde 12742 km is. Niettemin slagen aardwetenschappers erin het binnenste van de aarde te bestuderen door verschillende methodes uit de geofysica en geochemie te gebruiken. Het is ook mogelijk om de binnensten van rotsachtige exoplaneten te onderzoeken met een paar van deze methodes. De omstandigheden binnenin planeten, hoge druk en hoge temperatuur, kunnen worden nagebootst in een hogedrukapparaat met synthetische chemische poeders om de bulksamenstelling van planeten te simuleren. Zulke experimenten leren ons over de mineralen die zich bevinden in de binnensten van rotsachtige exoplaneten (Hoofdstuk 3 en 4). Om de eigenschappen van deze mineralen te beschrijven gebruiken we de toestandsvergelijking, die beschrijft hoe de dichtheid van mineralen verandert als functie van druk en temperatuur. De toestandsvergelijking kan zowel direct gemeten worden in experimenten, als afgeleid worden van de beginselen van de quantummechanica, zoals we in Hoofdstuk 2 doen.

Met informatie over de mineraaleigenschappen en natuurkundige wetten kan de gelaagde structuur van rotsachtige exoplaneten berekend worden (Hoofdstuk 2, 3, en 5). Voor een algemene studie van rotsachtige exoplaneten worden theoretische massa-radiusrelaties bepaald uit de binnenstructuurberekeningen (Hoofdstuk 2). Het warmtetransport en de thermische evolutie in een rotsachtige exoplaneet kunnen worden berekend met Rayleigh-Bénardconvectie (Hoofdstuk 5).

## **Mineralogie**

Studies waarin de chemische evolutie van protoplanetaire schijven wordt gemodelleerd laten zien dat het koolstofgehalte in rotsachtige exoplaneten tot 50% van de planeetmassa kan zijn (ter vergelijking: de aarde bevat minder dan 0.01%). Echter, de fase waarin deze koolstof is geïncorporeerd is niet bekend. We hebben piston-cilinderexperimenten uitgevoerd op chemische mengsels die representatief zijn voor koolstofrijke rotsachtige exoplaneten. We stelden deze mengsels bloot aan 1–2 GPa (10000 keer de luchtdruk) en 1523–1823 K, hoog genoeg om rots te laten smelten (Hoofdstuk 3). Onze resultaten tonen aan dat zulke exoplaneten, als ze helemaal gedifferentieerd (gestratificeerd) zijn, een metalen kern hebben, een silicaat mantel, en een grafietlaag bovenop de silicaat mantel. Grafiet (of diamant onder hogere druk) is de dominante koolstofhoudende fase in deze exoplaneten. De silicaat mineralogie is vergelijkbaar met die in koolstofarme planeten zoals de aarde, en Mg/Si, Al/Si, Ca/Si verhoudingen en zuurstofvluchtigheid (welke in essentie het zuurstofgehalte bepaalt), bepalen de silicaat fases en hun samenstelling. Ijzerrijke metalen vertonen onmengbaarheid (wat suggereert dat er een dubbellaagse of enkellaagse kern zou zijn), afhankelijk van de verhouding tussen zwavel en ijzer en de kerndruk. Onze resultaten laten zien dat als een rotsachtige exoplaneet meer koolstof bevat dan ongeveer één procent, grafiet

een afzonderlijke laag vormt. Zulke exoplaneten zouden onherbergzaam voor leven kunnen zijn, omdat de oppervlaktes van deze exoplaneten andere essentiële elementen voor leven, zoals zuurstof, stikstof, waterstof, etc., missen.

Siliciumcarbide, een andere koolstofhoudende fase die wordt besproken in een aantal astronomische studies over koolstof-verrijkte rotsachtige exoplaneten, wat aanwezig was in het oorspronkelijke chemische mengsel, verdween aan het einde van onze experimenten. Om de reden voor de verdwijning van siliciumcarbide te begrijpen hebben we een experiment uitgevoerd waarin we een laag siliciumcarbide lieten reageren met een laag representatief voor koolstof-verrijkte rotsachtige exoplaneten (Hoofdstuk 3). Ons experiment bevatte een aanhoudende reactie die tot de oxidatie van siliciumcarbide in het binnenste van een exoplaneet leidt. We laten zien dat al het geoxideerde ijzer ( $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$ ) gereduceerd moet worden tot  $\text{Fe}^0$  om het siliciumcarbide in het binnenste van een planeet te stabiliseren, wat suggereert dat toekomstige spectroscopische ontdekkingen van  $\text{Fe}^{2+}$  of  $\text{Fe}^{3+}$  op de oppervlaktes van rotsachtige exoplaneten een afwezigheid van siliciumcarbide in hun binnensten indiceren.

## Structuur

Voor de berekening van de binnenstructuur van massieve rotsachtige exoplaneten zijn de toestandsvergelijkingen van ijzer, het belangrijkste bestanddeel van de kern, typisch geëxtrapoleerd tot waarden voor de druk die meer dan een orde van grootte groter zijn dan de hoogste waarde waarvoor de toestandsvergelijkingen geldig zijn. In Hoofdstuk 2 berekenen we een nieuwe ab initio toestandsvergelijking voor vast ijzer tot drukwaarden die meer dan twee orders van grootte hoger zijn dan nagebootst kan worden in het lab. De vergelijking tussen andere toestandsvergelijkingen en de onze laat zien dat extrapolaties tot fouten van ~20% kunnen leiden in de dichtheid van ijzer bij een druk van 10 TPa. Dit suggereert dat de implementatie van geëxtrapoleerde toestandsvergelijkingen resulteren in een discrepantie van ~20% in de massa's van de meest massieve rotsachtige exoplaneten.

Met behulp van binnenstructuur-berekeningen kwantificeren we de effecten van extreme kern- en mantelsamenstellingen en van het thermische profiel op de massa-radiusrelaties van massieve rotsachtige exoplaneten (Hoofdstuk 2). Onze resultaten tonen aan dat kern- en mantelsamenstellingen de afgeleide massa tot ~50% kunnen beïnvloeden, terwijl de temperatuur slechts een klein effect van een paar procent teweegbrengt. Onze toepassing op Kepler-36b laat zien dat haar maximale kernradius 64% van de totale radius is.

We voeren ook berekeningen van de binnenstructuur van rotsachtige exoplaneten met een ijzerrijke kern, een silicaat mantel en een grafiet buitenlaag uit (Hoofdstuk 3). Onze toepassing op Kepler-37b, een planeet met een bekende radius maar een onbekende massa, toont aan dat een model met 10% grafiet 7% minder massa heeft dan het model zonder grafiet. Dit betekent dat de aanwezigheid van grafiet, vanwege zijn lage dichtheid, een significant effect heeft op de massa van de planeet.

## Evolutie

Onze experimenten hebben de mogelijkheid aangetoond dat rotsachtige exoplaneten bestaan uit een ijzerrijke kern, een silicaat mantel en een grafiet buitenste laag (Hoofdstuk 3). Maar de thermische evolutie van zulke planeten is onbekend. We passen een geparametriseerd model van

mantelconvectie toe om het warmtetransport in de grafiet laag en de thermische evolutie van deze exoplaneten te bepalen (Hoofdstuk 5). We vinden dat geleiding het dominante warmtetransportmechanisme is in grafiet lagen. Onze resultaten tonen aan dat de buitenste grafiet laag een thermisch afschermingseffect produceert, dat de koelsnelheid van het binnenste van de planeet verlaagt. Dit thermische afschermingseffect wordt belangrijk voor de lange-termijn evolutie van planeten met een grafiet buitenlaag die dikker is dan 500 km. Onze toepassing op een bekende exoplaneet, Kepler 37b, aannemende dat deze bedekt is met een grafiet laag, laat zien dat het thermische afschermingseffect domineert over het effect van verminderde interne opwarming. Platen tektoniek en de aanwezigheid van water op deze exoplaneten zou de kans op leefbaarheid kunnen vergroten, in het bijzonder voor dunne grafiet lagen.

Het werk dat in deze thesis wordt gepresenteerd representeert een poging om rotsachtige exoplaneten te karakteriseren door experimentele en computationele technieken uit de aardwetenschappen te implementeren. Naar mijn mening is dit een eerste stap in de oprichting van exo-aardwetenschappen als een aparte discipline.