

COME-IN

Inwendige structuur en evolutie van Mercurius

Tim Van Hoolst (Koninklijke Sterrenwacht van België/KU Leuven) - Bernard Charlier (Université de Liège) - Stefaan Cottenier (Universiteit Gent) - Wim van Westrenen (VU Amsterdam, NL) - Olivier Namur (KU Leuven) - Attilio Rivoldini (Koninklijke Sterrenwacht van België) - Jurriën Knibbe (KU Leuven/ Koninklijke Sterrenwacht van België) - Marie-Hélène Deproost (Koninklijke Sterrenwacht van België) - Jan Jaeken (Universiteit Gent)

SAMENVATTING

Context en objectieven

Mercurius was lang de minst gekende terrestrische planeet. Slechts twee ruimtesondes hebben een bezoek aan Mercurius gebracht. Mariner10 vloog drie keer langs Mercurius in 1974-1975 en het NASA ruimtetuig MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEOchemistry and Ranging) bevond zich in een baan rond Mercurius van 18 maart 2011 tot 30 april 2015. Met de grote hoeveelheid data van MESSENGER en de recente lancering van de ESA/JAXA BepiColombo missie op 20 oktober 2018, gepland voor aankomst bij Mercurius in december 2025, is de aandacht van de planetaire wetenschappelijke gemeenschap voor Mercurius sterker dan ooit. Een van de belangrijkste doelen van deze ruimtemissies en van vele theoretische, observationele, en experimentele studies is om een dieper inzicht te verwerven in de interne structuur en evolutie van de kleinste aardse planeet.

Observaties met ruimtesondes alleen zijn niet voldoende om dit doel te bereiken. Het gebrek aan kennis over het gedrag van mogelijke bouwstenen van Mercurius bij de hoge drukken binnen Mercurius is een obstakel om de observaties te interpreteren. Studies over het Mercurius inwendige maakten daardoor gebruik van vereenvoudigde structuurmodellen of van thermodynamische modellen om de interne mineralogie te bepalen op basis van experimenten bij drukken, temperaturen, samenstellingen, en zuurstof fugaciteiten ver buiten de waarden voor Mercurius. Bijkomende data over en inzicht in het gedrag van planetaire materialen zijn daarom nodig.

Doel van COME-IN was een stap voorwaarts te zetten in onze kennis over Mercurius door complementaire methoden uit petrologie, hoge-druk fysica, computationele materiaalwetenschap, geodesie, en geodynamica te integreren in de analyse van de recente observationele data. Om ons doel te bereiken, werd een reeks specifieke doelstellingen vastgesteld op basis van de complementaire expertise van de vijf partners. Ze zijn gerelateerd aan de oorspronkelijke structuur van Mercurius na accretie, magmatische processen die relevant zijn voor de differentiatie en evolutie van Mercurius, de karakterisering van de fysische eigenschappen en structuur van de ijzerrijke kern, en aan de globale interne structuur en thermische evolutie van Mercurius.

Resultaten

We beschrijven de belangrijkste resultaten van het COME-IN-project georganiseerd volgens de vier hoofdonderzoeksthema's.

Silicaat-metaal evenwicht tijdens planeetvorming

We onderzochten experimenteel de partitionering van spoorelementen tussen metaal-silicaat en sulfide-silicaat bij het smelten van silicaat in gereduceerde toestand voor een ruim bereik aan zwavelconcentraties en redoxtoestanden bij een druk van 1 GPa en temperaturen van 1833 K tot 1883 K. Er werd vastgesteld dat bij meer reducerende omstandigheden dan $\Delta W = -3$ tot -4 , het metaal-silicaatverdelingsgedrag van de meerderheid van de siderofiele elementen aanzienlijk afwijkt van het gedrag bij de meer gebruikelijke valentie(s) in meer oxiderende omstandigheden. Deze nieuwe resultaten bieden een uitgebreide experimentele basis voor studies naar de differentiatie van Mercurius onder (sterk) reducerende omstandigheden.

We onderzochten ook de waarschijnlijkheid van het bestaan van een ijzersulfidelag aan de kern-mantelgrens van Mercurius door nieuwe chemische gegevens van het oppervlak, verkregen door de röntgenspectrometer aan boord van het MESSENGER-ruimtevaartuig, te

vergelijken met geochemische modellen ondersteund door hogedruk-experimenten onder reducerende omstandigheden. We hebben een nieuwe dataset gebouwd die bestaat uit 233 Ti / Si-metingen. Meerfasenevenwichtsexperimenten toonden aan dat onder de omstandigheden van de kernvorming van Mercurius Ti chalcofiel is, maar niet siderofiel, waardoor Ti een nuttige indicator is voor de vorming van sulfidesmelt. Door de modelresultaten te vergelijken met gegevens over de chemische elementen aan het oppervlak, hebben we aangetoond dat Mercurius hoogstwaarschijnlijk geen of slechts een dunne (< 13 km) FeS-laag heeft. We hebben ook aangetoond dat de metalen Fe(Si) -kern van Mercurius niet meer dan ~ 1,5 gew.% zwavel kan bevatten en dat de vorming van de kern onder reducerende omstandigheden verantwoordelijk is voor de slechts licht subchondritische Ti/Al-verhouding van het oppervlak van Mercurius.

Mantel-korstevolutie

Dankzij de ruimtesonde MESSENGER beschikken we over geochemische gegevens over oppervlaktestenen op Mercurius. We hebben de samenstelling in de belangrijkste elementen van deze lava's gebruikt om smeltomstandigheden en mantelbronnen op Mercurius te onderzoeken. Onze resultaten tonen aan dat oppervlaktebasalt wordt geproduceerd door 10 tot 50% partieel smelten van verrijkte Iherzolitische mantelbronnen. De gemiddelde smeltgraad is lager voor de jonge noordelijke vulkanische vlaktes (NVP, $0,27 \pm 0,04$) dan voor de oudere ' Intercrater Plains and Heavily Cratered Terranes' ICP-HCT ($0,46 \pm 0,02$), wat aangeeft dat de smeltproductiviteit met de tijd afnam. De potentiële manteltemperatuur die nodig is om lava's in Mercurius te vormen en de initiële smeltdiepte nemen af van het oudere Hoge-Mg ICP-HCT gebied ($1650 \text{ }^\circ\text{C}$ en 360 km) tot de jongere lava's die de NVP-regio's bedekken ($1410 \text{ }^\circ\text{C}$ en 160 km). Deze evolutie is een indicatie voor een sterke koeling van de mantel van Mercurius tussen 4,2 en 3,7 miljard geleden en verklaart waarom zeer weinig magmatische activiteit plaatsvond nadien.

We hebben ook experimenteel de fase-evenwichten van vijf S-vrije samenstellingen onderzocht. De experimenten werden uitgevoerd bij temperaturen van $1.480 \text{ }^\circ\text{C}$ tot $1.100 \text{ }^\circ\text{C}$ een druk van 1 kbar onder reducerende omstandigheden vergelijkbaar met die van de mantel van Mercurius. We vonden een gemeenschappelijke kristallisatiesequentie bestaande uit olivijn, plagioclase, pyroxenen en tridymiet voor alle geteste magma's. Door de experimentele resultaten te combineren met geochemische kaarten van Mercurius, hebben we verschillende mineralogische provincies geïdentificeerd: de noordelijke vulkanische vlaktes en gladde vlaktes, gedomineerd door plagioclase, de Hoge-Mg-provincie, sterk gedomineerd door forsteriet, en de tussenliggende vlaktes, bestaande uit forsteriet, plagioclase en enstatite. Deze evolutie van de mineralogie, gaande van de oudste lava's gedomineerd door mafische mineralen tot de jongste lava's gedomineerd door plagioclase, is consistent met het idee dat de mate van partiële smelt afneemt in de tijd en dat het gebied in de mantel waar smelt voorkomt zich met de tijd meer beperkt tot de bovenste lagen van de mantel.

We hebben de dikte van de korst berekend rekening houdend met laterale variaties in de dichtheid van de korst. Onze resultaten tonen aan dat de lokale korstdikte gecorreleerd is met de mate van smelten van de mantel die nodig is om oppervlaktestenen te produceren. Laag partieel smelten van de mantel onder de noordelijke vulkanische vlaktes produceerde een dunne korst ($19 \pm 3 \text{ km}$), terwijl de hoogste smeltgraad in het oude gebied met hoge Mg de dikste korst produceerde ($50 \pm 12 \text{ km}$). Dit laatste resultaat weerlegt de gangbare hypothese dat het hoge-Mg gebied het resultaat is van een grote impact die de mantel dichter bij het oppervlak bracht.

Structuur van de kern

De seismische snelheid (VP) en dichtheid van Fe-Si vloeibare metalen bij hoge temperaturen (1400-1900 K) en hoge druk (2-6 GPa), relevant voor de kern van Mercurius, zijn gemeten in twee afzonderlijke experimentele sessies in Chicago, Illinois, VS en Grenoble, Frankrijk. De dichtheidsmetingen tonen aan dat Si de dichtheid van Fe-rijke metaalvloeistoffen aanzienlijk vermindert. De VP-metingen tonen aan dat Si de VP van Fe-rijk vloeibaar metaal aanzienlijk

verhoogt. Dit staat in sterk contrast met het vertragende effect van S op de VP van Fe-rijke vloeistoffen in het onderzochte drukbereik (2-6 GPa). Voorlopige resultaten geven aan dat seismische gegevens kunnen helpen om een onderscheid te maken tussen een Fe-S en een Fe-Si samenstelling in de kern van Mercurius.

Een model gebaseerd op energie- en entropiebudgetten werd ontwikkeld om te onderzoeken onder welke omstandigheden de kern van Mercurius een dynamo kan handhaven tot heden. Silicium in de kern resulteert in aanzienlijk grotere hoeveelheden latente warmte die wordt gegenereerd bij bevriezing van Fe-Si in vergelijking tot Fe-S en maakt dynamo-actie mogelijk tijdens de hele evolutie van de kern. Ook zonder de latente warmte kan dynamo-actie duren tot op de dag van vandaag, bijvoorbeeld als radioactieve elementen aanwezig zijn in de kern met een abundantie die minstens ongeveer een tiende van de abundantie in de korst bedraagt of als exsolutie van lichte elementen uit de kern een continu doorlopend proces is.

We hebben drie verschillende thermische evolutiemodellen voor de kern ontwikkeld die rekening houden met de mogelijke aanwezigheid van een laag aan de bovenkant van de kern die stabiel is voor convectie. Het bestaan van een dergelijke laag wordt gesuggereerd door thermische evolutiemodellen en kan helpen het waargenomen magnetische veld te verklaren. We hebben aangetoond dat het bestaan van een niet-convectieve laag meer entropie beschikbaar maakt voor de dynamo.

We hebben een thermodynamisch consistent model voor Fe-Ni-S-vloeistoffen ontwikkeld dat rekening houdt met het niet-ideaal mengen van Fe-S-legeringen en in overeenstemming is met resultaten van recente laboratoriumexperimenten van de dichtheid en akoestische snelheid van deze legeringen. Deze beter modellering toont aan dat Mercurius, uitgaande van een Fe-S-kern, meer zwavel in de kern nodig zou hebben dan in eerdere modellen.

We hebben ab initio-berekeningen uitgevoerd van de akoestische anisotropie bij hoge drukken en hoge temperaturen voor hcp-kristallen met stapelfouten. De resultaten laten zien dat een aggregaat van dichtst gestapelde ijzerkristallen met willekeurige stapelvolgorde, overwegend noord-zuid uitgelijnd, consistent is met de waargenomen seismische anisotropie in de binnenkern van de aarde.

Modellen van de interne structuur en evolutie

We hebben een model ontwikkeld voor de helling van Mercurius dat rekening houdt met variaties in de helling en met afwijkingen ten opzichte van coplanariteit veroorzaakt door de trage precessie van het pericenter. We hebben aangetoond dat die effecten van belang zijn bij het bepalen van het polaire traagheidsmoment op basis van de waargenomen helling met de verwachte BepiColombo-precisie en dat getijdeneffecten een ondergrens geven voor de getijdendissipatie.

We hebben de recente (2019) nieuwe schattingen van het traagheidsmoment en de getijden geïnterpreteerd in termen van de interne structuur van Mercurius op basis van onze Mercuriusmodellen. Onze resultaten tonen aan dat Fe-S-modellen een kernstraal hebben tussen 1972 km en 2000 km (bij 1 sigma), en dat voor Fe-Si-modellen de kern ongeveer 20 km groter kan zijn. De straal van de vaste binnenkern is kleiner dan 1500 km (bij 3 sigma) voor Fe-S-modellen en tussen 1306 km en 2007 km voor een Fe-Si-kern.

We hebben aangetoond dat het bestaan van een stabiele buitenste kernlaag leidt tot hogere temperaturen in de mantel en de bovenkant van de kern van Mercurius in vergelijking met wanneer de kern vereenvoudigd wordt als een convectieve regio met een energieverdeling die vastligt door een adiabaat. Als gevolg daarvan is zwavel, dat de smeltemperatuur van de kern sterker verlaagt dan silicium, geen noodzakelijk ingrediënt van de Fe-rijke kern van Mercurius om deze tot op heden gedeeltelijk vloeibaar te houden. We hebben aangetoond dat kernconvectie en hedendaagse dynamo-actie kunnen worden aangedreven door stolling van een Fe-Si-kern vanaf het centrum, terwijl een bovenste vloeibare laag van de kern thermisch gestratificeerd en niet in convectie is.

We hebben impactberekeningen uitgevoerd en aangetoond dat de hemisferische asymmetrie van oude grote kraters op Mercurius kan worden geproduceerd door inslagen als Mercurius

zich toen bevond in een 1:1 of 2:1 spin-baanresonantie. Deze asymmetrie kan niet worden geproduceerd in de hedendaagse 3: 2 spin-baan resonantie. Dit suggereert dat Mercurius een andere stabiele rotatietoestand had ten tijde van de grote kraterinslagen. De inslag die het Calorisebekken veroorzaakte, en het einde kenmerkt van een periode van een intensief bombardement van inslagen, is mogelijk de oorzaak geweest van de overgang naar de huidige rotatietoestand.

Sleutelwoorden: aardse planeten, Mercurius, interne structuur, petrologie, geofysica