

STEM

The Structure and Evolution of Mercury's core

Tim Van Hoolst (Promotor, Royal Observatory of Belgium/KU Leuven) – Attilio Rivoldini (Royal Observatory of Belgium) – Jurriën Knibbe (Royal Observatory of Belgium) – Fleur Seuren (Royal Observatory of Belgium) – Jérémy Requier (Royal Observatory of Belgium) – Santiago Andres Triana (Royal Observatory of Belgium) – Marie-Hélène Deproost – Yue Zhao

SAMENVATTING

Context en objectieven

Mercurius, de kleinste en binnenste planeet van het zonnestelsel, heeft verschillende unieke kenmerken die kunnen bijdragen aan een beter begrip van de vorming, de structuur, de evolutie en de levensvatbaarheid van planeten. De eerste ruimtemissie die ooit langs Mercurius vloog, Mariner 10 in 1974, toonde aan dat Mercurius in vergelijking met de andere aardse planeten meer massa heeft dan zijn grootte doet vermoeden. Dit wijst op een ongewoon hoge metaal/silicaatverhouding en een ijzeren kern die in verhouding tot de grootte van de planeet veel groter is dan die van de Aarde, Mars en Venus. Mercurius heeft verreweg de meest elliptische baan om de zon van alle andere planeten in het zonnestelsel en is het enige lichaam in het zonnestelsel dat in een 3:2 spin-baanresonantie verkeert - wat betekent dat Mercurius gemiddeld precies drie keer ronddraait in de tijd die nodig is om twee volledige banen om de zon te voltooien. Deze unieke eigenschap leidt tot kleine periodieke variaties in de rotatiesnelheid van Mercurius, libraties, die kunnen worden gebruikt om het diepe binnenste van de planeet te onderzoeken, het centrale onderwerp van dit onderzoeksproject.

Waarnemingen van deze libraties, door radarmetingen op aarde en door radiotracking en laseraltimetermetingen met het NASA MESSENGER-ruimtevaartuig, hebben aangetoond dat de kern mechanisch is ontkoppeld van de vaste mantel en dus vloeibaar moet zijn aan het contactoppervlak met de mantel. Mercurius heeft ook een relatief zwak, globaal magnetisch veld dat hoogstwaarschijnlijk wordt gegenereerd door vloeistofstromen in zijn vloeibare en elektrisch geleidende kern zoals het aardmagnetisch veld. Mercurius is het enige andere voorbeeld van een aardse planeet met een zelfgegenereerd magnetisch veld, afgezien van de aarde, waardoor het van onschatbare waarde is om theorieën over planetair magnetisme te testen en te ontwikkelen.

Het doel van dit project was om ons begrip van de vorming en evolutie van het inwendige van Mercurius te verbeteren en te verfijnen op basis van huidige en toekomstige rotatiegegevens, aangevuld met andere geofysische gegevens, door twee afzonderlijke maar nauw verwante trajecten te ontwikkelen, voortbouwend op de expertise binnen de planetaire onderzoeksgroep van de Koninklijke Sterrenwacht van België. Ons doel was de libratietheorie uit te breiden door stromingen in de vloeibare kern in rekening te brengen en een nieuwe thermische modellering van de kern van Mercurius te ontwikkelen om de interpretatie van de geodetische gegevens in termen van inwendige eigenschappen te verbeteren. Planetaire geodesie - de studie van de rotatie, het zwaartekrachtsveld en de vorm van een planeet - vormt momenteel de belangrijkste bron van informatie over het inwendige van Mercurius.

Resultaten

We beschrijven de belangrijkste resultaten van het STEM-project, ingedeeld volgens de twee belangrijkste onderzoeksthema's.

Interne structuur en evolutie (WP1 en WP3)

We hebben twee methoden ontwikkeld om de evolutie van de kern van Mercurius te modelleren, en houden hierbij voor het eerst expliciet rekening met de groei van een vaste binnenkern en met de evolutie van een stabiele laag aan de top van de kern. We hebben de evolutie van de kern gekoppeld aan die van de mantel en ontdekt dat er een significante terugkoppeling is tussen de evolutie van de kern en die van de mantel, wat niet zo is bij de aarde. Omdat convectief energietransport wellicht niet tijdens de hele geschiedenis van Mercurius het dominante warmtetransportmechanisme in de mantel is geweest en de overgang van een convectieve naar een conductieve toestand niet goed wordt weergegeven in bestaande geparametriseerde modellen voor de evolutie van de mantel, hebben wij ook een nieuw geparametriseerd model voor de evolutie van de mantel ontwikkeld dat een vloeiende overgang beschrijft van convectie naar geleiding.

We hebben een groot aantal evolutiescenario's voor Mercurius berekend om na te gaan in welke mate de evolutie afhangt van de samenstelling van de kern en van de eigenschappen van de mantel. Deze studie maakte het mogelijk om eigenschappen van het inwendige van Mercurius te achterhalen. We hebben aangetoond dat een stabiele laag in de kern het einde van de mantelconvectie uitstelt en zowel een vroege als de huidige dynamo mogelijk maakt, in overeenstemming met de waarnemingen. We hebben aangetoond dat de kern van Mercurius waarschijnlijk andere lichte elementen dan silicium moet bevatten, anders zou Mercurius geen huidige dynamo kunnen hebben. Modellen met een kleine hoeveel zwavel als bijkomend licht element genereren voldoende Ohmse dissipatie om een vroegere en hedendaagse dynamo aan te drijven. Ze hebben een hedendaagse binnenkern met een straal van ~1000 km, en een stabiele randlaag met een dikte van ~600 km. Onze resultaten laten ook zien dat de overgang van convectie naar conductie in de mantel de stabiele laag minder dik maakt en de Ohmse dissipatie verhoogt.

Stromingen in de vloeibare kern

We hebben een methode ontwikkeld om de stromingen in de kern van Mercurius als gevolg van de libratie van de mantel te bepalen. De vergelijkingen en randvoorwaarden hebben we opgelost aan de hand van een analytische methode gekoppeld aan een numerieke berekening met de KORE-code. We hebben voor de koppeling tussen de kern en de mantel viskeuze en elektromagnetische krachtmomenten beschouwd. Deze bleken voor realistische parameterwaarden enkele orden van grootte kleiner te zijn dan het totale moment dat nodig is om de waargenomen libratie van de mantel van Mercurius te veroorzaken. Gezien de beperkte precisie van de waargenomen amplitude van de libratie van enkele procenten, kunnen we daarom concluderen dat de stromingen in de kern veroorzaakt door die koppelingen tussen kern en mantel kunnen worden verwaarloosd in studies die de waargenomen amplitude van de libratie van Mercurius interpreteren in termen van de inwendige structuur van de planeet.

Aangezien verwacht wordt dat Mercurius een stabiele laag heeft aan de top van de kern, hebben we specifiek onderzocht hoe een dergelijke laag stromingen in de kern kan beïnvloeden. We hebben aangetoond dat stabiele stratificatie de beweging in de radiale richting sterk onderdrukt en dat de stromingen in de kern daarom beperkt blijven tot de laag dicht bij de grens tussen de kern en de mantel wanneer de top van de kern stabiel gestratificeerd is. In dat geval leidt libratie tot een sterke tangentiële stroming in de top van de kern. Deze stroming veroorzaakt een niet-axisymmetrisch magnetisch veld dat bepaalde kenmerken van het waargenomen magnetisch veld van Mercurius zou kunnen verklaren.

Trefwoorden: aardse planeten, Mercurius, interne structuur, evolutie