Samenvatting

Het onderwerp van deze thesis situeert zich in de numerische studie van schokfenomenen in magnetohydrodynamische (MHD) plasma's.

Schokken komen veelvuldig voor in gassen en kunnen ervaren worden in alledaagse verschijnselen — een bekend voorbeeld is de schok die veroorzaakt wordt door een vliegtuig dat voortbeweegt met supersonische snelheid. Schokken zijn discontinue sprongen in macroscopische grootheden als snelheid, druk en dichtheid.

Een plasma is een *geïoniseerd* gas, en vertoont een complexer gedrag dan een neutraal gas wegens electromagnetische effecten. Electrische en magnetische velden oefenen anisotropische krachten uit op de *geladen* deeltjes die het plasma vormen, en de lading en de stroom gedragen door de deeltjes beïnvloedt het electrische en magnetische veld. Zoals in neutrale gassen kunnen schokken ook gevormd worden in plasma's, maar schokfenomenen in plasma's vertonen een rijkere complexiteit en veelzijdigheid dan schokken in neutrale gassen. Schokfenomenen in plasma's zijn een actief onderzoeksdomein omdat de fundamentele fysische processen nog niet volledig gekend zijn.

Het grootste deel van de materie in ons zonnestelsel bevindt zich in de plasmatoestand, en plasmaschokken komen veelvuldig voor in ons zonnestelsel. Stroomopwaarts van planeten en kometen worden boogschokken gevormd door de supersonische zonnewind (Fig. 2.9). Snelle massa-ejecties vanuit de corona van de zon veroorzaken schokfronten die de massa-ejecties voorafgaan (Fig. 2.12). Deze ejecta met geassocieerde schokken kunnen zich voortbewegen in de richting van de aarde als magnetische wolken (Fig. 8.6). Magnetische wolken kunnen ernstige verstoringen veroorzaken van het magneetveld van de aarde. Schokfenomenen spelen ook een belangrijke rol in andere astrofysische plasma's (Fig. 2.14) en in laboratorium plasma's.

In de laatste tientallen jaren werden er vele wetenschappelijke ruimtetuigen gelanceerd met als doel het observeren van plasma's in ons zonnestelsel. Drie belangrijke voorbeelden zijn de Ulysses missie die planeten en het interplanetaire medium bestudeert, het Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) dat gewijd is aan de studie van de zon, en de

CLUSTER missie die midden-2000 zal galanceerd worden met als doel het observeren van de boogschok en de magnetosfeer van de aarde. Deze ruimtetuigen verschaffen een weelde aan observationele gegevens over schokfenomenen in de plasma's van ons zonnestelsel. Deze observaties tonen vele verschijnselen waarvoor nog geen verklaring voorhanden is. Een beter theoretisch begrip van schokfenomenen in plasma's is nodig voor de interpretatie van deze observationele gegevens.

Er bestaat een hiërarchie van theoretische modellen voor de beschrijving van plasmastromingen met verschillende niveaus van complexiteit. De MHD benadering beschrijft een plasma als een continu electrisch geleidend fluïdum. Deze aanpak houdt geen rekening met microscopische plasmaprocessen die belangrijk kunnen zijn voor de verklaring van sommige fysische fenomenen, maar MHD verschaft een consistente beschrijving met een beheersbare complexiteit van plasmastromingen met schokken. Het MHD model wordt aangenomen in deze thesis.

De resultaten voorgesteld in deze thesis hebben als doel bij te dragen to de algemene theorie van schokfenomenen in MHD plasma's. In het bijzonder wordt de invloed van intrinsiek magnetische effecten op the topologie van boogschokstromingen bestudeerd via numerische simulaties van MHD boogschokstromingen in twee en drie ruimtelijke dimensies. Het probleem wordt bestudeerd in de klassieke configuratie van stationaire boogschokstromingen rond perfect geleidende vaste obstakels — cylinders, bollen en paraboloïde objecten (Fig. 7.1). Deze abstracte context laat toe van de fundamentele fysische effecten te isoleren en illustreert de algemeenheid van de resultaten. Tegelijkertijd zijn echte toepassingen uit de ruimtefysica — bijvoorbeeld de stroming van de supersonische zonnewind rond een niet-gemagnetiseerde planeet — conceptueel nauw verwant aan deze abstracte configuraties. Het is dus niet moeilijk om de practische toepassingen van deze fundamentele abstracte stromingsproblemen voor ogen te houden.

De volgende specifieke onderwerpen worden behandeld in deze thesis.

In de eerste plaats wordt aangetoond dat wanneer het plasma stroomopwaarts van het obstakel magnetisch gedomineerd is, stationaire MHD boogschokstromingen een verrassend complexe topologie vertonen met verschillende interagerende schokken en schoksegmenten van verschillend MHD schok type (Fig. 7.1). We noemen het stroomopwaartse plasma magnetisch gedomineerd — in tegenstelling tot een druk-gedomineerd stroomopwaarts plasma — wanneer magnetische krachten domineren over effecten van thermische en dynamische druk zodanig dat het intrinsiek magnetische fenomeen van de *schakel-aan schok* voorkomt op het boogschokfront. De resulterende boogschock stroming en boogschoktopologie worden ook magnetisch gedomineerd genoemd. De complexe magnetisch gedomineerde boogschoktopologie was tot nog toe ongekend, maar kan verklaard worden met behulp van de geometrische eigenschap-

pen van MHD golven en schokken (Fig. 7.5). Dit resultaat draagt bij tot onze algemene kennis van de fenomenologie van MHD boogschokstromingen. Het toont aan dat er twee fundamentele topologieën bestaan voor MHD boogschok stromingen. Voor druk-gedomineerde stroomopwaartse plasma's de traditionele topologie met één schokfront treedt op die welgekend is van hydrodynamische boogschokstromingen (Fig. 7.3). Magnetisch gedomineerde MHD boogschokstromingen vertonen de nieuwe complexe topologie met verschillende interagerende schokfronten (Fig. 7.1).

Ten tweede wordt er een gedetailleerde analyse gegeven van de simulatieresultaten gebruikmakend van de analytische eigenschappen van de MHD vergelijkingen. Deze analyse bevestigt de aanwezigheid van specifieke niet-lineaire MHD golfverschijnselen — in het bijzonder *intermediaire schokken* (Fig. 7.8 en 7.10) en *samengestelde schokken* (Fig. 6.25 en 7.20) — in de twee-dimensionele (2D) en drie-dimensionele (3D) simulatieresultaten. Er is veel discussie in de literatuur over het bestaan van deze types van schokken. Tot nog toe werden deze types van schokken enkel bestudeerd in één-dimensionele systemen. Onze simulatieresultaten lijken de eerste duidelijke bevestiging te zijn van hun bestaan in 2D en in 3D.

Ten derde wordt er beschreven hoe een robuust en accuraat numeriek programma werd ontwikkeld voor de simulatie van MHD stromingen met schokken. Het PAR-MA (PARallelle MAgnetohydrodynamica) programma simuleert de mathematisch consistente MHD vergelijkingen op massief parallelle computers gebruikmakend van geavanceerde numerieke technieken. Het numerieke schema is afgeleid van beproefde methodes uit de computationele vloeistofmechanica. Via zorgvuldige valideringsstudies wordt aangetoond dat het uitgebreide numerieke schema betrouwbare resultaten berekent. Het gebruik van geavanceerde numerieke methodes en snelle parallelle computers was essentieel voor het verkrijgen van de nieuwe resultaten over magnetische effecten in 2D en 3D MHD boogschokstromingen.

In de vierde plaats wordt er aangetoond hoe de simulatieresultaten belangrijk zijn voor boogschokstromingen met magnetisch gedomineerd stroomopwaarts plasma in ons zonnestelsel. Twee voorbeelden worden besproken, namelijk schokken geïnduceerd door snelle coronale massa-ejecties die wegpropageren vanuit de corona van de zon (Fig. 8.3), en de boogschok gevormd door de interactie van de soms magnetisch gedomineerde zonnewind met de magnetosfeer van de aarde (Fig. 8.5).

Deze onderwerpen worden als volgt beschreven in de thesis.

Hoofdstuk 1 introduceert kort het algemene onderwerp en de resultaten van de thesis.

Hoofdstuk 2 geeft een breed maar intuïtief overzicht van de fysica van schokverschijnselen in neutrale en geïoniseerde gassen, en van het

wetenschappelijke domein van de ruimtefysica dat plasma's bestudeert in ons zonnestelsel. De nieuwe resultaten over MHD boogschokstromingen die besproken worden verderop in de thesis worden kort voorgesteld en er wordt aangegeven waar deze resultaten belangrijk kunnen zijn voor schokverschijnselen in ruimteplasma's.

In hoofdstuk 3 beschrijven we analytische eigenschappen van de ideale MHD vergelijkingen. We presenteren een nieuwe compacte afleiding van de karakteristieke eigenschappen van continue ideale MHD stromingen in twee onafhankelijke variabelen, zowel voor tijdsafhankelijke MHD in één ruimtelijke dimensie, als voor stationaire MHD in twee ruimtelijke dimensies. Deze eigenschappen worden gebruikt voor de analyse van roosterconvergentie van numerieke oplossingen in hoofdstuk 5, en voor de analyse van MHD golfverschijnselen in 2D boogschok stromingen in hoofdstuk 6. We bespreken de eigenschappen van MHD discontinuïteiten. MHD beschrijft drie soorten golven, de snelle golven, de Alfvén golven en de trage golven. Er zijn ook drie verschillende soorten schokken, de snelle, intermediaire en trage schokken. De MHD flux functie heeft de eigenschap van *niet-convexiteit*, waardoor *samengestelde schokken*, die bestaan uit een sonische intermediaire schok voorafgegaan of gevolgd door een rarefactie golf (Fig. 3.14), kunnen voorkomen in MHD stromingen.

In hoofdstuk 4 beschrijven we het PAR-MA programma dat ontwikkeld werd als onderdeel van het thesiswerk. De ruimtelijke discretisatie van de MHD vergelijkingen is gebaseerd op de eindige volume methode op gestructureerde roosters. De tijdsintegratie gebeurt met een expliciet Runge-Kutta algorithme. De $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ conditie wordt opgelegd via een bronterm in de MHD vergelijkingen. De implementatie op parallelle computers gebeurt door middel van de MPI bibliotheek. Het PAR-MA programma werd gebruikt voor al de simulaties van 2D en 3D MHD stromingen die voorgesteld worden in deze thesis.

Hoofdstuk 5 bevat een zorgvuldige valideringsstudie van de gebruikte numerieke technieken. Verscheidene 2D modelstromingen die fundamentele golfverschijnselen beschrijven worden gesimuleerd op roosters met verschillende resolutie (Fig. 5.7), en gebruik makend van de karakteristieke eigenschappen van 2D MHD stromingen wordt de convergentie van het numerieke schema in functie van de roosterresolutie aangetoond (Fig. 5.8).

In hoofdstuk 6 worden 2D boogschokstromingen rond perfect geleidende cylinders besproken. In deze 2D stromingen wordt het magneetveld overal parallel aan de plasmasnelheid genomen. Een parameterstudie toont aan dat intrinsiek magnetische effecten de topologie van de boogschokstromingen substantieel wijzigen wanneer het stroomopwaartse plasma magnetisch gedomineerd is (Fig. 6.16). In de nieuwe magnetisch gedomineerde topologie wordt het leidende schokfront met

segmenten van snel en intermediair type gevolgd door secundaire schokfronten van intermediair en traag type (Fig. 6.9). De aanwezigheid van stationaire samengestelde schokken in deze stromingen wordt aangetoond met behulp van de karakteristieke eigenschappen van de MHD vergelijkingen (Fig. 6.25).

In hoofdstuk 7 worden 3D MHD boogschokstromingen rond een sfeer besproken. Wanneer het stroomopwaartse plasma magnetisch gedomineerd is vertoont de boogschokstroming een nieuwe topologie met het leidende schokfront van snel en intermediair type gevolgd door een secundair schokfront van intermediair en traag type (Fig. 7.1).

In hoofdstuk 8 bespreken we hoe de nieuwe resultaten over boogschok stromingen met magnetisch gedomineerde stroomopwaartse plasma's belangrijk zijn voor twee voorbeelden van boogschokstromingen in ons zonnestelsel. Redenering volgens fundamentele fysische principes toont aan dat snelle coronale massa-ejecties voorafgegaan moeten worden door boogschokken die de nieuwe magnetisch gedomineerde boogschoktopologie kunnen aannemen. Coronagraaf observaties geven indirecte aanwijzingen dat dit inderdaad het geval is (Fig. 8.2), maar voor meer overtuigende observationele bewijzen moet gewacht worden op toekomstige stereoscopische waarnemingen uitgevoerd door twee satellieten. Zulke waarnemingen laten toe van 3D stromingen te reconstrueren via tomografische technieken. De zonnewind in de buurt van de aarde is meestal druk-gedomineerd, zodat een enkelvoudige boogschok wordt geobserveerd stroomopwaarts van de aarde (Fig. 8.5). De zonnewind kan echter ook magnetisch gedomineerd zijn, en de simulatieresultaten voor 3D magnetisch gedomineerde boogschokstromingen suggereren dat onder die omstandigheden de boogschok van de aarde kan gevolgd worden door een trage schok (Fig. 8.10). Trage schokken werden inderdaad geobserveerd na de leidende boogschok van de aarde, maar ook hier moeten toekomstige meer gedetailleerde observaties bevestigen of de nieuwe boogschoktopologie van de simulaties inderdaad optreedt.

Het onderwerp van het bestaan van intermediaire schokken wordt besproken in hoofdstuk 9. Er werd lang aangenomen dat intermediaire schokken niet kunnen voorkomen in MHD stromingen omdat ze voor ideale MHD onstabiel zijn tegen generische perturbaties. Recent werd echter ontdekt dat intermediaire schokken stabiel kunnen zijn tegen kleine perturbaties in dissipatieve MHD. Intermediaire schokken werden tevoren gevonden in 1D numerieke simulatieresultaten, maar de boogschokstromingen besproken in deze thesis zijn de eerste duidelijke bevestiging van het bestaan van intermediaire schokken in 2D (Fig. 6.13) en 3D (Fig. 7.8 en 7.10) MHD stromingen. We voorspellen dat een intermediair schoksegment kan geobserveerd worden in de boogschok van de aarde wanneer de zonnewind magnetisch gedomineerd is.

In hoofdstuk 10 formuleren we onze conclusies en beschrijven we mo-

gelijk toekomstig werk. Het belangrijkste resultaat voorgesteld in deze thesis is dat voor magnetisch gedomineerde MHD boogschokstromingen een nieuwe topologie optreedt met verschillende opeenvolgende schokken en segmenten van verschillenden MHD schoktypes (Fig. 7.1). De manier waarop deze verschillende schoktypes verschijnen op een schokfront en de aanwezigheid van verschillende opeenvolgende schokfronten zijn bepaald door de dynamica van de informatietransfer door de karakteristieke MHD golven om de supersone stroming rond het obstakel te leiden. Vanuit dit algemene gezichtspunt bekeken heeft het numerieke werk gepresenteerd in deze thesis ons fysisch denken verrijkt over boogschokstromingen in MHD in het bijzonder, en over hyperbolische systemen met meerdere karakteristieke golven in het algemeen.