

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/49720> holds various files of this Leiden University dissertation

Author: Smiet, C.B.

Title: Knots in plasma

Issue Date: 2017-06-20

Nederlandstalige samenvatting

Plasma is naast vast, vloeibaar en gasvormig, de vierde toestand waarin materie zich kan bevinden. Hoewel we er in het dagelijks leven niet veel mee in aanraking komen, bevindt 95 procent van alle materie in het universum zich in deze toestand. Hier op aarde komt het voor in bliksemschichten, TL-buizen en spaarlampen, en andere energetische verschijnselen, maar in ons zonnestelsel bevindt bijna alle massa zich in de zon, een grote bol plasma. Zelfs de ijle materie tussen de planeten en sterren gedraagt zich als een plasma. Hier op aarde wordt hard gewerkt aan een machine die plasma op kan sluiten, om daarmee energie op te wekken op dezelfde manier als de zon dat doet, door middel van kernfusie.

Een plasma bestaat uit geladen deeltjes. De hoge energie zorgt er voor dat de negatief geladen elektronen los raken van hun positief geladen kernen. Hierdoor gedraagt een plasma zich als een vrij bewegende vloeistof, bestaande uit snel bewegende geladen deeltjes. Een elektrische stroom bestaat uit de netto beweging van geladen deeltjes, en daardoor kunnen de bewegende geladen deeltjes in een plasma sterke stromen opwekken, die op hun beurt weer een sterk magneetveld opwekken.

Een magneetveld heeft wederzijds weer een sterk effect op een plasma: de geladen deeltjes ondervinden een kracht als zij loodrecht op de magneetveldrichting bewegen. Door die kracht blijven de deeltjes gevangen op de magneetveldlijnen. Als het magneetveld beweegt, bewegen de deeltjes mee.

Hierin zit de kernvraag van het onderzoek in dit proefschrift besloten: bestaat er een magnetische structuur waar het door de stromen opgewekte magneetveld het plasma zelf op zijn plek houdt? Uit dit proefschrift blijkt dat dat kan, mits er een grote druk van buitenaf opgelegd wordt. Sterker nog: Het plasma vindt zelf deze structuur!

Van essentieel belang hiervoor is de geschakeldheid en geknooptheid van de magneetveldlijnen. Sinds het plasma gevangen zit op de magneetveldlijnen, sleept het plasma het magneetveld met zich mee als het een duwtje krijgt. Dat betekent dat een vloeistofstroming, opgezet door de magnetische krachten, de vorm van de magneetveldlijnen

verandert. Maar alleen de vorm kan op deze manier veranderen, andere eigenschappen blijven behouden. Als het magneetveld bijvoorbeeld uit twee geschakelde ringen bestaat, dan resulteert de stroming in twee vervormde ringen. Maar omdat het plasma niet door zichzelf heen kan stromen, zullen deze ringen altijd geschakeld blijven.

De mate van 'geschakeldheid' in een plasma kan berekend worden, en wordt helici-teit genoemd. De helici-teit kan in een perfect plasma niet veranderen. Als het plasma echter een klein beetje weerstand heeft, dan kunnen de stromen veranderen, en kan het magneetveld toch een andere vorm krijgen zonder dat de vloeistof mee beweegt. Deze herverbindingen in het plasma laten echter de helici-teit nagenoeg ongemoeid. Dit komt doordat helici-teit uit verschillende vormen bestaat: Geschakeldheid (en geknooptheid), gekronkeldheid, en gedraaidheid.

Als twee geschakelde ringen door een kleine aanpassing aan elkaar verbonden worden, dan is het resultaat een kronkelend pad. Deze kronkeling kan weer worden omgezet in draaiing als dit pad recht getrokken word. Deze overgang van verschillende vormen van helici-teit kunt u met eigen handen zien door de stappen in figuur 1.4 na te bootsen.

Een zelf organiserende geknoopte structuur

In hoofdstuk 2 van dit proefschrift beschrijven wij hoe dit proces zich afspeelt in een plasma. We beginnen met een magneetveldstructuur die ontegenzeggelijk geschakeld is, geschakelde magnetische ringen. Wanneer de simulatie start, worden door de mag-netische krachten de ringen sterk tegen elkaar aangetrokken, waardoor een chaotische magnetische structuur ontstaat met sterk kronkelende magneetveldlijnen. Snel ontstaat echter een stabiele en geordende structuur; de magneetveldlijnen liggen nu netjes ge-draaid op toroidale oppervlakken. De oorspronkelijke helici-teit manifesteert zich nu als deze gedraaidheid.

De mate van gedraaidheid van de veldlijnen kan je kwantificeren door te tellen hoe vaak ze zich om de torus wikkelen per rondgang. Als we dat in deze structuur bekijken, dan is dat voor alle veldlijnen nagenoeg constant. Dit is een heel interessante observatie, want dat maakt deze structuur goed wiskundig te beschrijven.

In 1931 ontdekte de wiskundige Heinz Hopf een hele mooie structuur, besloten in afbeeldingen tussen bollen in verschillende dimensies. Deze structuur bestaat volledig uit cirkels (de zogenaamde vezels van de afbeelding), die op het oppervlakte van torussen liggen. Met behulp van deze structuur kunnen we een magneetveld maken dat veldlijnen bevat die op dezelfde manier geschakeld en gedraaid zijn als in de structuur die we in de simulaties zien ontstaan.

Evenwicht in het Hopf-veld

Dat de veldlijnen op dezelfde manier geschakeld zijn, betekent nog niet dat de structuur precies hetzelfde is. Dit hebben wij onderzocht in hoofdstuk 3, waar we de uitdrukking van het Hopf veld gebruiken om magneetvelden met deze geschakeldheid te bestuderen. Wij hebben berekend hoe deze velden een evenwicht vinden tussen de verschillende krachten.

Een evenwicht blijkt alleen mogelijk als er een sterke druk van buitenaf is. Een magneetveld heeft namelijk de neiging om zo veel mogelijk uit te zetten. Een andere voorwaarde voor een magnetisch evenwicht is dat de vloeistofdruk constant is op magnetische veldlijnen. Deze veldlijnen liggen op toroidale oppervlakken, dus voor een evenwicht is het noodzakelijk dat de druk constant is op deze torussen.

Door het uitdijen van het magneetveld, wordt een lage druk gecreëerd, maar een evenwicht kan pas ontstaan als de druk constant is op iedere veldlijn. Hierdoor ontstaat een verlaging van de druk in de vorm van een torus. Het evenwicht is bereikt als de tendens van het plasma om uit te zetten gebalanceerd wordt door de druk van buitenaf om het torusvormige lagedrukgebied weer op te vullen.

Tijdsevolutie van de zelf organiserende structuur

Dat dit evenwicht vanzelf ontstaat is vrij bijzonder, maar als er weerstand is, dan zal het plasma altijd energie verliezen. In hoofdstuk 5 hebben wij onderzocht hoe de structuur daardoor langzaam verandert in de tijd. Als we naar de simulaties kijken zien we twee dingen gebeuren; de draaiing van de magneetveldlijnen neemt af in de tijd, en de gehele structuur wordt langzaam groter.

Deze twee waarnemingen kunnen we begrijpen door te kijken naar het effect van weerstand op een plasma. Ten eerste wordt de stroom steeds lager, waardoor de magneetveldsterkte afneemt, en ten tweede zit het plasma niet meer perfect vast op het magneetveld, maar kan de vloeistof langzaam langs de magneetveldlijnen glippen.

In de zelf-organiserende structuur zorgt het eerste effect ervoor dat het magneetveld steeds zwakker wordt. Het magneetveld kan je in twee delen uitsplitsen, de component die de hele torus rond gaat, en de component die de draaiing veroorzaakt. Deze laatste component wordt veroorzaakt door stromen die de gehele torus rondlopen, en dus een veel grotere weerstand ondervinden dan de stromen die de eerste component veroorzaken. Daardoor zal de draaiing van de magneetveldlijnen in de tijd altijd afnemen, en dit is precies wat we in de simulaties waarnemen.

Terwijl deze structuur bijna in evenwicht is, glipt er ook langzaam plasma vloeistof langs de magneetveldlijnen. Deze langzame stroming is in de richting van de druk, die in onze structuur naar binnen gericht is, de torussen in. Een dergelijke stroming is

veel bestudeerd, maar in een heel ander systeem: in een torusvormige fusiereactor (een tokamak), waar het een langzame stroom de torus uit veroorzaakt. Deze stroming heet een Pfirsch-Schlüter stroming. In onze structuur zorgt hij er voor dat er langzaam meer vloeistof de magnetische structuur in vloeit, waardoor hij langzaam expandeert.

Hiermee lijkt de tijdsevolutie van de zelf-organiserende magnetische structuur volledig begrepen. Als het initiële magneetveld een veel hogere waarde krijgt, zien we echter dat het veld zich anders gedraagt. Doordat de druk nu veel lager moet zijn om in evenwicht te zijn met de uitzetting van het magneetveld, zal de Pfirsch-Schlüter stroming ook veel groter zijn. Door de ophoping van vloeistof druk binnenin de torussen, kan het evenwicht niet langer bewaard worden. Omdat deze torussen meer ruimte nodig hebben, zullen ze gaan kronkelen. Vervolgens vertoont deze gekronkelde structuur precies dezelfde soort instabiliteiten die we ook uit torusvormige fusiereactoren kennen. Onder precies welke omstandigheden de structuur stabiel blijft moet nog in detail worden onderzocht.

Verval van plasma torus knopen

Tenslotte hebben we in hoofdstuk 4 van dit proefschrift bekeken wat het effect is van weerstand op een heel bijzondere structuur in plasma: een plasma torus knoop. Deze structuur is tot dusver alleen in theorie beschreven, als een oplossing van de vergelijkingen die een ideaal plasma beschrijven. Hoewel dit een oplossing van de vergelijkingen is, is een daadwerkelijk plasma niet ideaal. Daarom hebben wij gekeken wat er gebeurt met de magnetische structuur als we een klein beetje weerstand toevoegen.

De essentie van deze oplossing is dat overal de vloeistofstroming in de richting van het magneetveld staat. Op deze manier compenseert de middelpuntvliedende kracht van de stromende vloeistof de magnetische trekkracht in de veldlijnen. Ongeacht welk magneetveld hier aan ten grondslag ligt, kan je op deze manier de vergelijkingen oplossen. Om een plasma torus knoop te vormen, neem je een specifiek geknoopt magneetveld, dat geconstrueerd is uit het Hopf-veld, maar sterker geknoopte veldlijnen bevat.

Dit specifieke magneetveld wordt gekenschetst door twee getallen, n_t en n_p , die de geknooptheid van de magneetveldlijnen bepalen. Er zijn dan twee veldlijnen die op een torus te leggen zijn zodanig dat ze n_t keer de lange kant de torus om gaan (toroidale richting) terwijl ze n_p keer om de torus winden (poloidale richting). De rest van de veldlijnen winden zich rond een van deze twee zogenaamde kernveldlijnen.

Een kleine weerstand heeft al snel een groot effect op de structuur van de magnetische veldlijnen. Als je na een tijdje een enkele magneetveldlijn volgt, zie je dat deze een oppervlak langzaam helemaal opvult. Er is echter iets heel ongebruikelijks aan de nieuwe magnetische oppervlakten die we in de plasma torus knopen zien: Er zitten ook oppervlakten tussen die niet een torus zijn!

De vorm van de nieuwe oppervlakken is opmerkelijk vanwege het Poincaré-Hopf theorema. Deze zegt dat een vectorveld (wat een magneetveld is) dat in een oppervlakte ligt (wat het doet, want het oppervlakte wordt door de veldlijnen zelf gemaakt), noodzakelijk nulpunten moet hebben zodanig dat hun som gelijk is aan twee min twee keer het aantal gaten in het oppervlak. Een torus heeft één gat, en daarom moet de som van de nulpunten nul zijn; er hoeven dus helemaal geen nulpunten te zijn. Dit is de reden dat magnetische oppervlakken meestal torussen zijn.

De nieuwe magnetische oppervlakten in vervallende plasma torus knopen hebben soms meer gaten. Precies hoeveel gaten de nieuwe oppervlakken hebben hangt af van n_p . Als n_p één is, dan is het nieuwe oppervlakte een torus, maar als n_p twee is, dan heeft het nieuwe oppervlakte drie gaten, een tripel torus. Voor elke verhoging van n_p met 1, heeft het nieuwe oppervlak twee meer gaten.

Dit soort oppervlakken kunnen alleen bestaan als ergens op het oppervlak het magneetveld nul is. En dat is het inderdaad, als n_p twee of groter is, dan is het magneetveld nul op de gehele z -as, die de nieuwe oppervlakken vier keer doorsnijdt. Deze nullijn was al vanaf het begin aanwezig. We zien dat in de simulatie deze nullijn stabiel blijft, en het toelaat dat er magnetische oppervlakten ontstaan die niet een torus zijn.

Als n_t twee of groter is, dan is het magneetveld ook nul op een cirkel om de z -as heen. We zien echter dat dit weinig uitmaakt voor hoe de simulatie verder verloopt. Deze nullijn trekt zich namelijk snel samen tot een punt, en verdwijnt in zijn geheel.

Het is interessant om op te merken dat de situatie waarin de vloeistofstroming overal in de richting staat van het magneetveld tijdens de gehele simulatie behouden blijft. Zelfs als de weerstand en viscositeit de magnetische structuur sterk veranderen, blijft deze situatie, en het evenwicht dat daarbij hoort, in stand.

Vooruitzicht

In dit proefschrift zijn de eigenschappen onderzocht van gelokaliseerde geknoopte magnetische structuren in een plasma. Een kernresultaat is de identificatie van het zelf organiserende evenwicht, en de vinding dat de magnetische structuur erg lijkt op die van de Hopf vezeling.

Een belangrijk vooruitzicht is om te identificeren waar deze structuur in de natuur voor kan komen. Hierbij kan gekeken worden naar astrofysische fenomenen zoals radiobubbels en magnetische wolken. Ook zou deze structuur mogelijk een verklaring kunnen vormen voor het fenomeen bolbliksems, en zelf organiserende structuren in pinch-type fusie experimenten. Om deze vragen te beantwoorden is meer onderzoek nodig.

Een ander belangrijk vooruitzicht is om te onderzoeken of deze structuur gebruikt kan worden om fusie energie op te wekken. Alle energie die wij op aarde gebruiken

komt direct of indirect van de zon, waar zij door fuserende kernen opgewekt wordt. Het is een belangrijk doel van de plasmafysica om deze energie ook op aarde op te wekken, in andere woorden, de zon in een fles te stoppen. De flessen die tot nu toe geprobeerd zijn, zijn erg dure apparaten zoals de tokamak. Dit onderzoek toont aan dat het misschien ook anders kan, misschien hoeft de zon niet in een fles, maar kan hij in een zelf organiserende knoop!

Om deze vraag te beantwoorden is nog heel veel onderzoek nodig. Belangrijk is om precies te weten wanneer de instabiliteiten die in hoofdstuk 5 zijn geïdentificeerd optreden. Dan is het belangrijk om te onderzoeken of er in het stabiele regime een fusiereactie kan plaatsvinden. Ook heeft dit proefschrift enkel de simpelste beschrijving van een plasma bekeken. Dit evenwicht moet ook onderzocht worden in completere, maar ingewikkeldere beschrijvingen van een plasma zoals girokinetische MHD.