



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Laser-generated toroidal helium plasmas

Kooij, V.L.

Citation

Kooij, V. L. (2021, April 28). *Laser-generated toroidal helium plasmas*. *Casimir PhD Series*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/3161377>

Version: Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/3161377>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Cover Page



Universiteit Leiden



The handle <http://hdl.handle.net/1887/3161377> holds various files of this Leiden University dissertation.

Author: Kooij, V.L.

Title: Laser-generated toroidal helium plasmas

Issue date: 2021-04-28

Samenvatting

In slechts veertig minuten is de hoeveelheid energie die wij op aarde van de zon ontvangen meer dan het jaarlijkse energieverbruik van de gehele wereld. Deze simpele observatie is de belangrijkste motivatie geweest voor de wereldwijde inspanningen voor kernfusie. Een halve eeuw toegewijd onderzoek heeft echter niet geresulteerd in een betrouwbare en rendabele kernfusiecentrale.

Toch biedt kernfusie een mogelijk antwoord in de zoektocht naar duurzame energie, in het algemeen beschouwd als een van de grootste uitdagingen waarmee de mensheid in de komende decennia wordt geconfronteerd. Om de thermonucleaire reacties voor kernfusie te kunnen laten plaatsvinden zijn plasma's met een temperatuur van in de orde van 100 miljoen graden Celsius noodzakelijk. Om deze thermonucleaire reacties in stand te houden is het van belang dat het hete plasma voldoende lang en met voldoende hoge dichtheid wordt opgesloten. In hedendaags kernfusieonderzoek is magnetische opsluiting de meest gevolgde strategie hiervoor.

Al in de jaren vijftig bedachten fysici in de Sovjet-Unie de tokamak. Deze apparaten gebruiken sterke magnetische velden om het plasma met een hoge temperatuur in de vorm van een torus op te sluiten en vormen het leidende ontwerp voor een economisch levensvatbare kernfusiereactor.

Het begrijpen van de stabiliteit van magnetisch opgesloten plasma's is derhalve van fundamenteel belang voor een succesvolle kernfusiereactor op basis van magnetische opsluiting. De topologie van de gebruikte magnetische velden blijkt daarin een cruciale rol te spelen.

Het verband tussen stabiliteit en topologie werd in 1969 gelegd toen Moffatt ontdekte dat heliceiteit, een door Woltjer gevonden behouden grootheid in een plasma met oneindige geleidbaarheid, in feite een maat is in hoeverre magnetische veldlijnen geknoopt en geschakeld zijn.

Kamchatnov construeerde, uitgaande van de topologische aard van deze invariant, een magnetische veldconfiguratie die bestaat uit

gesloten magnetische veldlijnen die allemaal met elkaar geschakeld zijn. Daarmee verkreeg hij een analytische oplossing van de vergelijkingen van de magnetohydrodynamica voor een ideaal plasma.

Recent is het verband tussen stabiliteit en topologie bevestigd in magnetohydrodynamische simulaties die aantonen dat een magnetisch veld met heliceit zichzelf herconfigureert tot een structuur van gelaagde toroïdale oppervlakken. Deze zelforganiserende geknoopte magnetische structuren zijn intrinsiek stabiel en hun configuratie verschilt wezenlijk van die van de tokamak. Hun hydrostatische druk is namelijk minimaal op de centrale cirkel van de gelaagde toroïdale oppervlakken. De magnetische energiedichtheid van deze geknoopte plasmastructuren is sterk gelokaliseerd, waarbij de magnetische druk gecompenseerd wordt door de hydrostatische druk.

De door de wetenschappers uit de Sovjet-Unie bedachte tokamak zou theoretisch een stabiel plasma moeten opleveren, maar experimenteel is het evenwicht instabiel en leidt het tot chaotische plasmadynamica. Het beheersen van deze chaotische dynamica speelt een belangrijke rol in de hedendaagse experimenten met magnetische opsluiting van plasma's.

In plaats van proberen deze chaos te beheersen kunnen de zelforganiserende geknoopte magnetische structuren wellicht uitkomst bieden omdat zij uit zichzelf de gewenste stabiliteit bieden. Bovendien suggereert hun schijnbare universaliteit dat deze stabiele structuren eveneens in astrofysische omgevingen kunnen ontstaan, wat duidt op een meer fundamentele rol.

Toroïdale plasmastructuren zijn waargenomen in een breed scala van experimenten, variërend van krachtige elektrische bogen tot laser-geïnduceerde plasma's. Het onderzoek gepresenteerd in dit proefschrift vindt zijn oorsprong bij de waarneming van toroïdale plasmastructuren die veel symmetrischer zijn dan de eerder waargenomen structuren. Deze plasmastructuren werden gegenereerd met behulp van laser-geïnduceerde plasma's, gecreëerd in atmosferisch helium gas bij kamertemperatuur. De zelforganiserende toroïdale structuur, maar ook de atmosferische omgevingscondities van deze laser-gegenereerde toroïdale plasma's, bieden een interessante setting voor het onderzoeken van de numeriek voorspelde, en intrinsiek stabiele, zelforganiserende geknoopte magnetische structuren.

Het lange-termijn doel is de realisatie van zulke zelforganiserende geknoopte magnetische structuren in het laboratorium. Dit proefschrift is een verslag van de eerste stappen in die richting en bespreekt de belangrijkste kenmerken die verantwoordelijk zijn voor de ontwikkeling

van de laser-gegenereerde toroïdale heliumplasma's, tezamen met hun voornaamste plasmaparameters. Tevens wordt het onderzoek naar het tegengaan van hun tijdelijke aard besproken, een eigenschap die evident de realisatie van zelforganiserende magnetische structuren belemmert.

Het onderzoek vangt aan in hoofdstuk 2, waar voor de gehele evolutie van een toroïdaal plasma, tomografisch gereconstrueerde, poloidale, intensiteitsprofielen worden getoond die duidelijk de vormende gasstroom van de toroïdale structuur zichtbaar maken. De waarnemingen tonen tevens een nieuwe opsplitsing van het toroïdale plasma gedurende de laatste fase van de plasma evolutie. Op basis van elementaire thermodynamische principes wordt een model ontwikkeld dat een karakteristieke tijdschaal bepaalt waarmee structuur zich naar verwachting zal ontwikkelen. Deze tijdschaal wordt bevestigd door metingen van de dichtheid van de heliumatomen in het centrum van het toroïdale plasma. Door de symmetrie van de gasstroom die verantwoordelijk is voor de ontwikkeling van de toroïdale structuur opzettelijk te breken wordt het model voor de vorming van deze structuur bevestigd. De pulsaties die zijn waargenomen tijdens het ontsteken van een lasergeïnduceerd plasma worden als laatste besproken. Deze zich herhalende dynamiek draagt mogelijk bij aan de vorming van de dubbele structuur die zichtbaar is in de plasmakern.

In hoofdstuk 3 wordt een nieuwe interpretatie van snelle Schlierenafbeeldingen gepresenteerd, waarin een Mach-reflectie van schokgolven zichtbaar is die gevormd wordt door de dubbele structuur van de plasmakern van een lasergeïnduceerd plasma. De sterkte van deze Mach-reflectie wordt gerelateerd aan de asymmetrische gasstroming die noodzakelijk is voor de ontwikkeling van de toroïdale plasma's. De voortplanting van de schokgolf wordt gevisualiseerd met een nieuwe techniek waarbij een tweede lasergeïnduceerd plasma gebruikt wordt als een sonde. Hiermee wordt ook het bestaan van een holte met lage dichtheid bevestigd die in het kielzog van de schokgolf wordt gevormd.

Hoofdstuk 4 behandelt de plasmaparameters van de toroïdale plasma's. Door interferometrische metingen met 57 GHz microgolfstraling te combineren met gedetailleerde eindige-elementen berekeningen, wordt voor de gehele evolutie en met sub-microseconde temporele resolutie, de elektronendichtheid en de elektronen botsingsfrequentie van een toroïdaal plasma geschat. De microgolf interferometrische opstelling die gebruikt is om de complexe transmissiecoëfficiënt te bepalen wordt in detail besproken. Verder wordt er een methode besproken waarbij de eindige-elementen berekeningen gebruikt worden

om uit de gemeten transmissiecoëfficiënt de gezochte plasmaparameters te bepalen. Als ondersteuning worden er een aantal fundamentele concepten uit de plasmafysica behandeld.

Om de tijdelijke aard van de toroïdale heliumplasma's tegen te gaan is er een 1,75 kW gepulseerde magnetronbron met een stijgtijd van minder dan een microseconde ontworpen, waarvan in hoofdstuk 5 het ontwerp in detail wordt besproken. Deze magnetronbron is gebruikt in verkennende experimenten gericht op het verhitten van het plasma door de absorptie van microgolfstraling. Gedurende deze experimenten zijn de elektrische eigenschappen van de magnetronbron bepaald. In deze experimenten is het toroïdale plasma onderworpen aan een sterke microgolfpuls van 2,460 GHz, een frequentie die algemeen gebruikt wordt door industriële microgolfbronnen. Om het toroïdale plasma aan de microgolfpuls te onderwerpen is er een 2,465 GHz iris gekoppelde rechthoekige microgolf trilholtte ontworpen. De 5 MHz verschuiving anticipeert op een verstemming van de trilholtte als gevolg van de aanwezigheid van plasma. Het effect van de microgolfpuls op het toroïdale plasma, alsmede het donkere gebied dat waarneembaar is tussen het door de microgolven gegenereerde plasma en het toroïdale plasma, worden besproken. Als laatste wordt er een poloïdaal excitatie temperatuurprofiel gepresenteerd van het toroïdale plasma, inclusief de extra plasmastructuur gegenereerd door de microgolfpuls. Het temperatuurprofiel is bepaald door toepassing van een standaard Boltzmann analyse op twee tomografisch gereconstrueerde poloïdale intensiteitsprofielen, welke verkregen zijn uit afbeeldingen gemaakt bij twee verschillende golflengten.

De gepresenteerde resultaten geven aan dat microgolfverwarming van een gebied nabij het toroïdale heliumplasma met de ontwikkelde gepulste magnetronbron mogelijk is. Opwarming van het eigenlijke toroïdale plasma vindt echter niet plaats, waardoor de gezochte gelinkte magnetische structuren nog niet gerealiseerd kunnen worden. Momenteel worden er nieuwe ontwerpen voor microgolf trilholtes ontwikkeld om verwarming door inductie te onderzoeken. Dit soort plasmaconfiguraties, gecombineerd met toroïdale gasstroming, worden momenteel ook overwogen in samenwerking met het Dutch Institute for Fundamental Energy Research (DIFFER) om een chemische reactor te realiseren waarin het verbranden van brandstof wordt vervangen door een microgolfverwarmd plasma. In het geval deze chemische reactoren gevoed zouden worden uit hernieuwbare energiebronnen, dan wordt de CO₂-uitstoot van deze processen significant gereduceerd.