

Plasmafysica - een nieuwe positiebepaling

Citation for published version (APA):

Schram, D. C., Kuperus, M., & Sluifjer, F. W. (1982). Plasmafysica - een nieuwe positiebepaling. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde. A, A48(2)*, 48-55.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1982

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Plasmafysica — een nieuwe positiebepaling

D.C. Schram, M. Kuperus en F.W. Sluifster

Een aantal jaren geleden is in dit tijdschrift een beschrijving van de positie van de plasmafysica gegeven door C.M. Braams en J.C. Terlouw. Sindsdien heeft dit vakgebied zich krachtig ontwikkeld en is er alle aanleiding die positie opnieuw te bezien. De oudste bijdragen tot wat we nu plasmafysica noemen hadden betrekking op gasontladingen en golfvoortplanting in de ionosfeer. Belangrijke maar incidentele theoretische bijdragen dateren uit de jaren veertig (Vlasov, Landau). Pas de intensieve bestudering van plasma's in het licht van de mogelijkheden van energieproductie door middel van fusie van lichte kernen heeft een inspanning teweeggebracht waardoor de plasmafysica zich in een aantal jaren heeft ontwikkeld en is uitgegroeid tot een zelfstandige subdiscipline in de natuurkunde. Ook de stormachtige ontwikkelingen op astrofysisch gebied hebben hier het nodige toe bijgedragen. Wij zullen ons eerst bezighouden met de fusieperspectieven geïnspireerde plasmafysica.

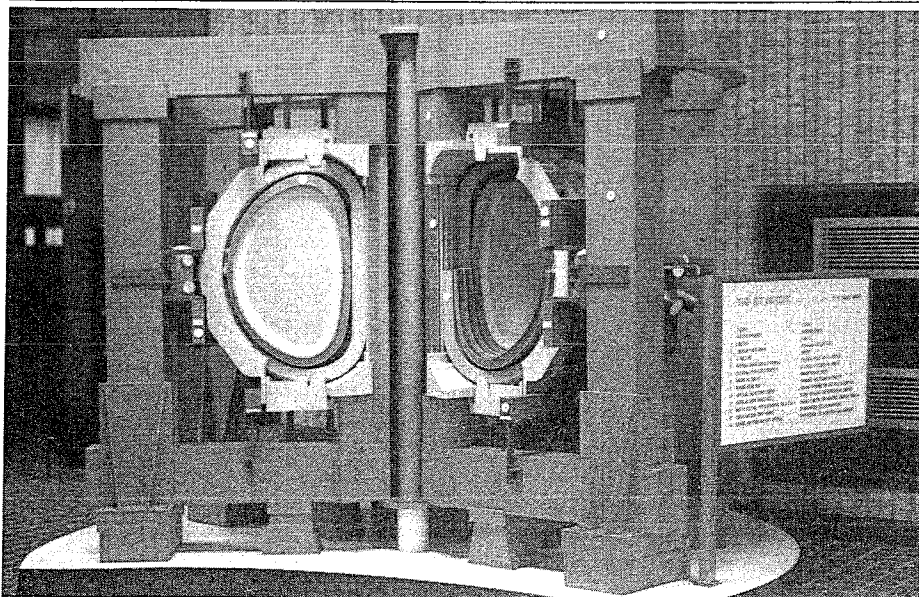
Leek het probleem van beheerste fusie aanvankelijk een kwestie van enkele jaren intensieve technologische ontwikkeling, al spoedig bleek dat de problemen zeer onderschat waren en wel door gebrek aan plasmafysisch inzicht. De ontwikkeling van het vakgebied bleek echter ten zeerste gestimuleerd door de uitdaging die uitging van allerlei onverwachte problemen waarbij vooral de stabiliteit sterk op de voorgrond trad. Ook de blijvende verwachting dat die problemen op den duur oplosbaar zouden blijken droeg bij tot een blijvende inspanning.

In vrijwel alle geïndustrialiseerde landen zijn er nu grote laboratoria waarin op fusie gericht onderzoek wordt gedaan. Er is een goede internationale coördinatie en uitwisseling van het onderzoek en er is een groot Europees project in uitvoering: Joint European Torus (JET). Bovendien bestaan er plannen voor een experiment op wereldschaal (INTOR). De wetenschappelijke vorderingen met

betrekking tot stabiliteit, behoudtijd en temperatuur zijn nu zo, dat er meer reden dan ooit is, te verwachten dat nog dit decennium het zogenoemde "scientific breakeven" zal worden bereikt. Dat wil zeggen dat de aan het plasma toegevoegde energie tenminste door de in dat plasma optredende fusiereacties wordt teruggeleverd. Intussen wordt ook aan de noodzakelijke technische ontwikkeling gedaan. Gepoogd wordt om in de jaren negentig een demonstratiereactor tot stand te brengen.

Het potentieel belang van dit onderzoek

Deze maquette van de Joint European Torus staat in de hal van het hoofgebouw van de JET Joint Undertaking, in Culham nabij Oxford, Engeland. Het JET-project beoogt nog dit decennium een plasma te verkrijgen en te bestuderen dat de condities benadert waaraan een fusie-energie leverend plasma moet voldoen.



Prof. dr. ir. D.C. Schram (42) promoveerde bij prof. dr. C.M. Braams aan de RU-U op een plasmafysisch onderwerp. Na 9 jaar werkzaam te zijn geweest op het FOM-Instituut voor Plasmafysica, werd hij in 1972 aan de TH-E benoemd tot lector en in 1978 tot hoogleraar in de technische natuurkunde.

is zo groot dat ook Nederland 'bij' zal moeten blijven ondermeer door deelneming in de internationale projecten. Het volgen van de technologische ontwikkelingen zal in nauwe samenwerking met en in het belang van de Nederlandse industrie dienen te geschieden.

Naast het thermonucleair georiënteerde werk vindt plasmafysica ook toepassingen in de energietechniek, de produktietechnologie en de verlichtingsindustrie. Van deze toepassingen gaat een belangrijke stimulans uit naar die delen van de fundamentele plasmafysica die voor het thermonucleaire werk minder belangrijk zijn. Deze aspecten zullen in dit artikel wat nader worden belicht.

Afbakening en onderverdeling van het vakgebied

Geïoniseerd gas, een verzameling elektronen, ionen, atomen en moleculen wordt een plasma genoemd indien de elektrostatische wisselwerkingen tussen de geladen deeltjes domineren. Met andere woorden: de thermische energie-inhoud van het plasma is klein ten opzichte van de energie welke nodig is om de positieve en negatieve deeltjes (ionen en elektronen) te scheiden. Men drukt dit uit in de eis, dat de Debye-lengte, λ_D (een soort afscherm-lengte) klein moet zijn ten opzichte van een karakteristieke afmeting van het plasma L . Een plasma is dus (quasi-)neutraal: de positieve ladingsdichtheid is nagenoeg gelijk aan de negatieve ladingsdichtheid. Alleen bij de wand zullen in een dunne grenslaag belangrijke afwijkingen van ladingsneutraliteit optreden hetgeen uiteraard van invloed zal zijn op het gedrag van de grenslaag en de wisselwerking met het oppervlak. Hier is dus sprake van een randgebied tussen plasmafysica en oppervlaktefysica. Een tweede eis die men gewoonlijk aan plasma's stelt als basis voor een kinetische theorie is, dat het aantal deeltjes in de Debye-bol veel groter dan één moet zijn. Plasma's die hier marginaal, of niet aan voldoen noemt men res-



Prof. dr. M. Kuperus (45) promoveerde op het proefschrift "The transfer of mechanical energy in the Sun and the heating of the corona" aan de RU-U. Promotor was prof. dr. C. de Jager. Na enkele werkverbanden buitenslands werd prof. Kuperus in 1971 tot lector en in 1974 tot hoogleraar astrofysica benoemd aan de RU-U. Op het Sterrekundig Instituut geeft hij leiding aan de werkgroep Plasma-astrofysica.

pectievelijk zwak-Debye- en niet-Debye-plasma's.

De definitie van een plasma $\lambda_D \ll L$ is zeer ruim en het is zinvol een verdere onderverdeling te maken. We zullen allereerst onderscheid maken tussen de zeer hete waterstofachtige thermonucleaire (TN-) plasma's en de plasma's van lagere temperaturen. Bij de plasma's van lagere temperaturen komt een grote variatie in de ionisatiegraad voor. We verdelen deze klasse dan ook in plasma's van een hoge ionisatiegraad en die van een lage ionisatiegraad. Bij de eerste overheersen de coulombinteracties tussen elektronen en ionen, bij de tweede de botsingen tussen elektronen en neutralen. De coulombinteractie domineert al bij een geringe ionisatiegraad. Deze indeling is hieronder aangegeven in tabelvorm. Verder zijn in tabel I nog enkele typische plasma's weergegeven. Daarbij zijn als karakteristieke parameters gekozen de ionisatiegraad en de elektronendichtheid. De elektronentemperatuur varieert niet veel en is in de meeste gevallen een fractie (ongeveer 1/3) van de ionisatie-energie van het gebruikte gas en is dus in het elektronvoltgebied. Bij

deze temperaturen ligt de grens tussen hoog- en laaggeïoniseerd volgens de hier gebruikte definitie bij ongeveer 1%.

Eigenschappen en modelvorming

Hoge-temperatuurplasma's; thermonucleaire plasma's

Een karakteristieke eigenschap van volledig geïoniseerde plasma's is, dat het belang van binaire botsingen sterk afneemt met toenemende temperatuur. De zeer hete thermonucleaire plasma's zijn dan ook te karakteriseren als 'botsingsloos'. De energieoverdracht door botsingen van de elektronen naar de ionen is uitermate langzaam. Vandaar dat het nodig kan zijn de ionen op andere wijze te verhitten. Ook de thermalisatietijden van de ionen en elektronen apart zijn, hoewel korter dan de energieuitwisselingstijden, betrekkelijk lang. De temperaturen van ionen en elektronen kunnen dus verschillend zijn en bovendien kunnen er belangrijke niet-thermische componenten in de snelheidsverdeling zijn. De gemiddelde vrije weglengte is groot en men kan deze hete plasma's dan ook alleen gedurende enige tijd handhaven in zeer lange of gesloten (toroïdale) magnetische opsluitsystemen. Men moet dan eisen dat de ionencyclotronstraal veel kleiner is dan de karakteristieke afmeting van dat systeem loodrecht op het opsluitende magnetische veld. De noodzaak van magnetische opsluiting brengt met zich mee, dat het gedrag van het plasma sterk afhangt van de geometrie van dat veld.

Deze plasma's zijn ver van thermodynamisch evenwicht en men moet met grote zorg zoeken naar geometrieën, waarin er een zodanig niveau van instabiliteiten is, dat het zo moeizaam bereikte plasma-evenwicht niet door anomaal turbulent transport wordt verstoord en ook anomaal energietransport wordt vermeden. Het macroscopische gedrag van het plasma is veelal nog te beschrijven met de zogenoemde magnetohydrodynamische (MHD-) theorie, waarbij lokaal ladingsneutraliteit wordt geëist. Voor een goed begrip van de dynamica, zijn de afwijkingen van de snelheidsverdeling door aniso-



Prof. dr. F.W. Sluiter (45) promoveerde bij prof. dr. L.J.F. Broer aan de TH-E op een theoretisch plasmafysisch onderwerp. Hij was werkzaam op het FOM-Instituut voor Plasmafysica tot 1970, waarna hij tot lector en later tot hoogleraar in de theoretische natuurkunde werd benoemd aan de TH-Eindhoven.

tropieën en gevangen deeltjes, echter essentieel en moet men een kinetische theorie hanteren.

De temperatuur van een TN-plasma kan alleen hoog worden indien het stralingsverlies beperkt blijft. Dit kan slechts voor plasma's van waterstof-, of eventueel heliumisotopen, daar anders alleen de remstraling reeds prohibitief zou zijn. Het bereiken van een hoge temperatuur vereist verder een grote zuiverheid van het plasma, omdat lijnstraling van de sterk gestripte verontreinigende ionen zeer veel stralingsverlies veroorzaakt.

Behalve als deeltjesbron spelen de neutralen in hete plasma's vrijwel geen rol; alleen nabij de wand kan ladingswisseling nog een extra energieverlies betekenen. Het is dan weer van groot belang dat deze snelle neutralen in de buitenste koele plasmagrenslaag worden gemodereerd. Dan wordt de kans op verontreinigingen aanzienlijk kleiner. Voor de problematiek van verontreinigingen zijn verder de fysica van "unipolar arcs" en de 'divertor systemen' interessante contactpunten tussen de lage-temperatuur- en plasmafysica. In de TN-plasmafysica staan voorlopig de problemen van ionenverhitting, door middel van neutraleninjectie, hoogfrequente verhitting en van opsluiting centraal. Daarnaast krijgt de reactortechnologie meer en meer aandacht. Voor wat betreft de bijdrage die het andere plasmafysische onderzoek aan het TN-onderzoek levert kunnen de volgende onderwerpen genoemd worden: de ontwikkeling van intense deeltjesbronnen en de fysica van de relatief koele grenslaag.

Daarnaast zijn botsings-stralingsmodellen van waterstofachtige en heliumachtige verontreinigingsionen en de ontwikkeling van nieuwe diagnostische methoden ook mogelijke contactpunten. Een blijvende relatie tussen het op fusie gerichte TN-werk en de andere plasmafysica is daarom van groot belang.

Tabel I. Overzicht en karakterisering van lage-temperatuurplasma's.

naam	elektronen temperatuur	ionisatiegraad	botsingen	elektronensnelheidsverdeling
hoge-temperatuurplasma's	100eV-10keV	zeer hoog ~ 100%	weinig botsingen 'botsingsloos'	— niet thermische componenten — anisotropieën
lage-temperatuurplasma's hoge ionisatiegraad	1-10eV	hoog > 1%	coulombotsingen	thermische (MB) verdelingen
lage-temperatuurplasma's lage ionisatiegraad	1-10eV	laag < 1%	elektron-neutraalbotsingen	— afwijkingen van MB-verdeling — staartontvolking

Plasma's van lage temperatuur en hoge ionisatiegraad

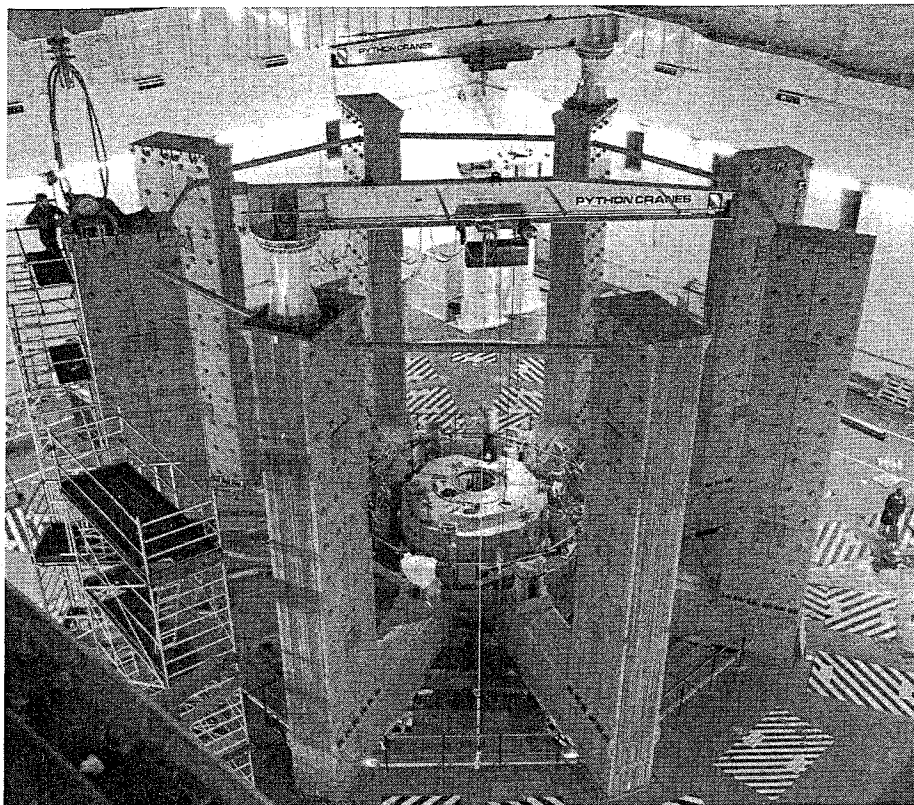
Stralende plasma's, thermische plasma's

Indien de temperatuur van het plasma lager is dan die bij de TN-plasma's is straling zeker belangrijk en vaak ook één van de gewenste 'produkten'. Lampen, lasers, maar ook plasmaspuiten, en chemie in thermische plasma's behoren tot deze categorie. Vanwege de lage temperatuur is de coulombrelaxatie relatief belangrijk en kunnen coulombinteracties zelfs bij vrij kleine ionisatiegraad (wel groter dan enige procenten) reeds het belangrijkste botsingsmechanisme zijn. Vanwege de sterke temperatuurafhankelijkheid van het stralingsverlies is de temperatuur meestal stralingsbepaald en in het eV-gebied enigszins afhankelijk van het gebruikte gas. Hoewel de coulombinteracties dominant zijn, zijn er nu zoveel neutralen dat deze meegenomen moeten worden in de analyse, met name in wrijvings- en brontermen. De snelheidsverdelingen kunnen echter in dit regime beschreven worden met de Maxwell-Boltzmann-verdeling en de transportgrootheden en reactiesnelheden kunnen berekend worden met behulp van thermische verdelingen. Bij lage dichtheden kunnen de temperaturen van ionen en elektronen ongelijk zijn; bij hogere dichtheden zijn zij gelijk. Het excitatie-evenwicht evolueert met toenemende dichtheid van corona naar (partieel) lokaal thermisch evenwicht (P)LTE. Met name bij hoge elektronendichtheden wordt het plasma via zwak-Debye, 'niet-Debye'. Dit wil zeggen, dat het aantal deeltjes in een bol met de Debye-lengte als straal, n_{AD} , niet meer groot is ten opzichte van 1, zoals wordt aangenomen in de gebruikte kinetische theorie, en zelfs kleiner dan 1 kan worden. Bij zeer hoge dichtheid kan de Debye-lengte kleiner worden dan de Bohr-radius en treedt er een 'fase-overgang' op. In deze laatste toestand heeft het plasma een enorme energiedichtheid en is het lastig zo'n plasma op aarde te maken.

Plasma's van lage temperatuur en lage ionisatiegraad

Corona-ontladingen en reactieve (chemische) plasma's

Bij veel toepassingen is het gewenst voldoende elektronen te hebben voor de vorming van bepaalde geëxciteerde deeltjes, ionen, moleculen en radicalen. De ionisatiegraad mag echter niet te hoog zijn, omdat dit tot deëxcitatie, dissociatie of andere afbraak zou leiden. De neutralen zijn dan verre in de meerderheid en dus veelal relatief koud ten opzichte van de elektronen. Tevens bepalen hier de botsingen met de neutralen de transport-eigenschappen van de geladen deeltjes. Dit houdt in, dat de snelheidsverdeling van de elektronen sterk kan afwijken van



De JET-opstelling in aanbouw (voorjaar 1982).

Foto JET Joint Undertaking.

de Maxwell-Boltzmann-verdeling, zoals bijvoorbeeld in de Druyvesteyn-verdeling, waarbij ook een belangrijke ontvolking van de actieve staart kan optreden. Bij veel toepassingen zoals stralingsbronnen is dit niet gewenst, omdat dit de excitatie vermindert, terwijl deëxcitatie door koude elektronen ongehinderd blijft. Onderzoek van speciale verhittingsmethoden is dus geboden.

Een tweede complicatie is, dat er vele soorten moleculen, molecuule-ionen en negatieve ionen kunnen voorkomen, met allerlei vormings- en afbraakprocessen. Veel kennis van de kinetiek van verschillende processen en het kennen van de elektronensnelheidsverdeling zijn nodig om een enigszins betrouwbaar beeld van de ontlading te verkrijgen. Mede daarom is zeker hier een nauw contact met de atoom- en moleculafysica gewenst. Anderzijds kunnen plasmatechnieken, zoals bijvoorbeeld "flowing afterglows", interessant zijn voor atoomfysische metingen. Corona-ontladingen hebben soms zo'n lage ionisatiegraad, dat zij niet meer gerekend kunnen worden tot de plasma's.

Raakvlakken met andere takken van fysica

Plasma-astrofysica

De studie van astrofysische plasma's richt zich vooral op de bewegingstoestand, de stabiliteit en de emissie van plasma's in en rond steratmosferen, in de magnetosferen van pulsars, en in actieve sterstelsels.

Van bijzonder belang is het onderzoek naar mechanismen om deeltjes te ver-

snellen en sterk gecollimeerde bundels deeltjes te vormen.

De zon

Van alle sterren is de zon de enige die in voldoende detail is waar te nemen om structuren in de atmosfeer te kunnen onderscheiden. Drie problemen zijn van sterk plasmafysische betekenis:

1. de magnetische cyclus;
2. de corona;
3. de zonnevlammen.

Ad. 1. Magnetische velden blijken sterk geconcentreerd in fluxbuizen over het gehele zonneoppervlak verspreid voor te komen. De wisselwerking tussen de convectieve bewegingen en het magnetische veld uit zich in de 22-jarige magnetische cyclus. Het is nu bekend dat vele andere sterren soortgelijke magnetische cycli vertonen. Het dynamomechanisme voor dit soort magnetische activiteit is nog steeds niet goed bekend.

Ad. 2. Door röntgen- en radiowaarnemingen weten we dat de zonnecorona sterk inhomogeen is, bestaande uit hete lussen die ingebed zijn in een koelere sterk uitstromende zonnewind. Het is vrijwel zeker dat elektrodynamische verhittingsmechanismen in deze lusvormige structuren heel belangrijk zijn. Men denkt hier vooral aan de dissipatie van de Alfvén-golven die in een gestructureerde corona veel efficiënter is dan in een homogene corona.

Ad. 3. Zonnevlammen zijn felle uitbarstingen in actieve gebieden waarbij een grote hoeveelheid opgeslagen magnetische energie in enkele minuten wordt in thermische straling, schokgolven en hoogenergetische deeltjes. De energie zit opgeslagen in een stroomstelsel dat ge-

karacteriseerd wordt door filamenten die in het actieve gebied als een vlamuitbarsting worden waargenomen. Zodra de totale energie een drempelwaarde overschrijdt ontploft het stroomstelsel en wordt het filament opgeblazen. Reconnectie van magnetische velden en resistiviteitsinstabiliteiten spelen een belangrijke rol bij de energieconversie. Dergelijke erupties zoals vlammen en opstijgende protuberansen veroorzaken sterke interplanetaire schokgolven die op aarde aanleiding geven tot het poollicht en zogenoemde magnetosferische substormen.

Pulsars

Pulsars zijn snelroterende neutronensterren met een extreem sterk magnetisch veld (10^{12} Oersted). Door de sterke elektrische velden, veroorzaakt door de rotatie, kunnen geladen deeltjes tot sterk relativistische snelheden versneld worden langs het magnetische veld. Tengevolge van de kromming van de veldlijnen emitteren deze snelle deeltjes γ -quanta van zo'n hoge energie dat de interactie van deze quanta met het veld van de pulsar-magnetosfeer aanleiding geeft tot paarvorming (elektronen en positronen). Deze deeltjes zullen eveneens worden versneld, γ -quanta produceren en tot een vernieuwde paarvorming aanleiding geven. Zo vermoedt men dat op bepaalde gunstige plaatsen rond de magnetische pool van de pulsar een paarvormingslawine ontstaat die resulteert in een bundel deeltjes die de radiostraling opwekt. Dit mechanisme is sterk afhankelijk van de rotatiesnelheid en vereist een coherent stralingsmechanisme om de zeer hoge radiohelderheidstemperaturen te kunnen verklaren.

Actieve sterstelsels

Actieve extragalactische sterstelsels zoals quasars en seyfert-stelsels worden gekarakteriseerd door een overvloed van straling uit de kern van het stelsel. Veel stelsels vertonen een dubbele structuur in de kern die dikwijls heel precies op één lijn ligt met de uitgebreide radiobronnen die zich op vele honderden kiloparsec afstand van de kern bevinden. De grote hoeveelheid straling en de sterke gerichtheid van de activiteit wordt toegeschreven aan de accretie van plasma rond een zwaar compact object, eventueel een zwaar zwart gat, waarbij sterk gerichte bundels plasma kunnen ontstaan. Synchrotron- en inverse Compton-straling vormen een belangrijk energieverlies voor de bundel. Men vermoedt dat de bundels alleen in stand kunnen worden gehouden als een continu versnellingsproces plaatsvindt.

Als in de accretieschijf een voldoende sterk magnetisch veld aanwezig is, is het mogelijk gebleken een grote hoeveelheid gravitationele energie rond een zwart gat op elektromagnetische wijze vrij te maken. De sterke elektrische velden die hierbij optreden kunnen via paarproductie aanleiding geven tot tegengesteld gerichte

bundels loodrecht op het vlak van de schijf.

Er is een eerste aanzet gemaakt tot een magnetohydrodynamische beschrijving van een accretieschijf met een consistente behandeling van de magnetische viscositeit en het impulstransport. Het ziet er naar uit dat rond accretieschijven gestructureerde corona's voorkomen, waarin net als bij de zon vlamachtige explosies optreden. De waarnemingen van tijdsvariaties van harde röntgenstraling van röntgenbronnen wijst in de richting van magnetische activiteiten in accretieschijven.

Snelle deeltjes

De waarnemingen van uitgebreide extragalactische radiobronnen en supernovashillen duiden erop dat relativistische elektronen, die verantwoordelijk zijn voor de waargenomen synchrotronstraling, continu moeten worden aangevuld om deze stralingsverliezen te compenseren. Daarnaast is in de interplanetaire ruimte en in de magnetosferen van de aarde en Jupiter het bestaan van snelle superthermische deeltjes die geassocieerd zijn met grote zonnevlammen aangetoond.

Naast de theorie van de stochastische versnelling van deeltjes door Langmuir-turbulentie is een nieuwe visie ontstaan over de versnelling door schokken in een magnetisch plasma. Magnetische fluctuaties voor en achter de schok functioneren als verstrooiingscentra voor snelle deeltjes. Omdat in een schok deze centra naar elkaar toe bewegen winnen deeltjes die tussen deze centra gevangen zijn energie op dezelfde manier als bij een eerste-orde-Fermi-versnelling. Dit mechanisme is met succes toegepast ter verklaring van de waargenomen spectra van supernovaresotten en extragalactische radiobronnen alsmede voor de verklaring van de versnelling van protonen in zonnevlammen.

Atoom- en moleculiefysica, bronnen voor de kernfysica

Allereerst is er vanuit de plasmafysica interesse in betrouwbare gegevens van botsingsdoorsneden en reactiesnelheden van processen die een rol spelen in plasma's. Dit kunnen zijn elastische processen als ionisatie, recombinatie, dissociatie, associatie, attachment en andere. Voor TN-plasmafysica betreft dit vooral processen met en tussen waterstofisotopen, helium en waterstofachtige en heliumachtige verontreinigingsionen. Niet alleen voor de diagnostiek zijn deze gegevens van belang, maar ook voor een goed begrip van het plasmatransport. In de koelere 'stralende plasma's' is de situatie zo mogelijk nog ingewikkelder en is bovendien een goede kennis van de botsingsprocessen essentieel, daar het hierbij vaak gaat om de atomaire processen als straling en omzetting. Mede in verband met ionosferisch onderzoek en andere toepassingen is er verder belangstelling voor moleculaire processen, de invloed van vibratie en de rol van negatieve

ionen.

De plasmafysische discipline kan ook behulpzaam zijn bij atoomfysisch onderzoek. Vooral bij drie-deeltjesprocessen, zoals bijvoorbeeld excimeervorming en bij processen waarbij hooggeëxciteerde deeltjes zijn betrokken zijn bundelexperimenten niet altijd mogelijk en vormen zowel zwermerexperimenten als flowing afterglows en Townsend-ontladingen alternatieven. Bovendien is bij deze experimenten absolute ijking vaak mogelijk en kunnen ze dienen als ijkexperiment, zonder zoveel details te geven als bundelexperimenten. De interactie van fotonen met deeltjes, straling en stralingsabsorptie, verstrooiing van licht, lijnverbreding, lijnsatellieten en remstraling kunnen worden opgevat als atomaire processen, ook al komen ze voor in een plasma. In feite dient bij meting van bijvoorbeeld sterkverbreding het atoom als sonde voor de meting van het microveld. Zowel kennis van plasmafysica als atoomfysica zijn hier nodig. Voor de beschrijving van plasma's buiten excitatie-evenwicht zijn botsings-stralingsmodellen in gebruik.

Tenslotte kan de plasmafysica nuttig zijn bij de ontwikkeling van deeltjes- en fotonbronnen voor atoomfysische experimenten. Ditzelfde geldt voor bronnen in gebruik bij versnellers als cyclotrons en Van de Graaf-generatoren. Een voorbeeld hiervan is de bron voor sterk geladen zware ionen, waarin het plasma met behulp van elektroncyclotronresonantie wordt gemaakt.

Oppervlaktefysica en fysica van de vaste stof

Het spreekt vanzelf, dat voor het begrijpen van de wisselwerking tussen een plasma en de wand de fysica van het oppervlak van groot belang is. Vanuit de plasmafysica is er altijd al belangstelling geweest voor het onderzoek van 'schone' oppervlakken onder hoog-vacuüm-omstandigheden. Doorslag in vacuüm en de problemen van veldemissie zijn hiervan voorbeelden. Het gedrag van een wand bij belasting met deeltjes uit een fusieplasma zoals in Tokamaks is een meer recent opgekomen belangstelling. Veel gegevens zijn nodig omtrent de sputtering, de absorptie en reflectie van neutrale deeltjes en van ionen aan de vacuümwand en andere materiële begrenzingen in een Tokamak. Met behulp van de nu bij het oppervlakteonderzoek ontwikkelde moderne technieken zijn vele nieuwe gegevens beschikbaar gekomen.

Ook vanuit de subdiscipline van de koude plasma's is er belangstelling, die veelal betrekking heeft op toepassingen. We denken hierbij aan elektrode-effecten, vacuümschakelaars, en oude en moderne technieken van conditioneren en bewerken van oppervlakken zoals bijvoorbeeld ionitreren van staal, plasma-etsen en plasmadepositie bij de IC-technologie. Vanuit fundamenteel oogpunt verdient de

plasma-wandscheidingslaag verdere aandacht. In deze laag behoeft er geen ladingsneutraliteit te zijn. Het is niet denkbeeldig, dat een oppervlaktebegrenzing door een plasma redelijk goed gedefinieerd kan zijn en wellicht geschikt is voor experimenteel onderzoek.

Een tweede contactpunt met de vastestoffysica vormen de halfgeleiderplasma's. Hierbij zijn er relatief lichte elektronen en spelen de eveneens relatief lichte gaten de rol van ionen. Veel verschijnselen, zoals bijvoorbeeld pincheffecten, golven en instabiliteiten vertonen parallelen met de gewone plasma's. Wel is de situatie wat betreft de botsingsprocessen vaak veel ingewikkelder onder andere door anisotrope massa's en is het vaak moeilijk om transportcoëfficiënten eenduidig te berekenen. De vaste-stofplasma's zijn van het zwak-Debye-karakter en vertonen de meeste overeenkomst met de dichte thermische plasma's van hoge elektronendichtheid en relatief lage temperatuur.

Theoretische natuurkunde

Omdat de wisselwerking tussen de geladen deeltjes in een plasma niet als binair kan worden beschouwd, dient zowel de thermodynamica als de kinetische theorie van plasma's op een andere dan de bij gasen gebruikelijk wijze vanuit de statistische mechanica te worden opgebouwd. Voor zwak- en niet-Debye-plasma's is deze theorie nog volop in ontwikkeling. Het grote belang van stabiliteit voor de verhitting van TN-plasma's heeft een sterk stimulerende invloed gehad op stabiliteitsonderzoek in het algemeen. Hetzelfde kan worden gezegd van het vaak niet-lineaire karakter ervan. Ook hiervan is een krachtige impuls uitgegaan naar andere algemene beschouwingen over niet-lineariteit. Met name de verschijning van solitonen als gevolg van wisselwerking tussen dispersie en niet-lineariteit heeft al vroeg in de plasmafysica de aandacht getrokken. Zonder volledig te zijn moet tenslotte ook de invloed op de ontwikkeling van numerieke methoden niet worden onderschat.

Plasma's in de techniek

Voordat wordt ingegaan op de verschillende deelttoepassingen van de plasmafysica (met inbegrip van de gasontladingsfysica), gaan we nog kort na de indirecte stimulansen die het thermonucleaire onderzoek heeft gegeven naast de sterke stimulansen ervan voor het vakgebied als zodanig. De eisen die gesteld moeten worden aan TN-plasma's voor een fusiereactor zijn dermate hoog, dat langs allerlei wegen pogingen zijn gedaan om betere en stabilere plasma's te maken. Deze plasma's varieerden zeer sterk in dichtheid: van 1000x gecomprimeerde vaste stof door comprimeren en verhitten met laser- of deeltjesbundels tot de relatief ijle plasma's van Tokamaks en Stellaratoren.

Dit experimenteren met een breed scala van plasma's en opsluitgeometrieën heeft

veel nieuwe mogelijkheden voor de andere toepassingen van zowel de zwak- als sterkgeïoniseerde plasma's.

Bij deze andere toepassingen spelen vrijwel zonder uitzondering naast plasmafysische de atomaire en chemische processen een rol en is het dus moeilijk de atoomfysische aspecten los te zien van de plasmafysische. In het hiervolgende zullen wij ons beperken tot die toepassingen waarbij plasmafysica een wezenlijke rol speelt.

Plasma's van hoge elektronendichtheid nabij thermisch evenwicht, thermische plasma's

Bij verschillende processen is een grote enthalpie- en vermogensdichtheid en een grote specifieke materiaalomzet nodig. Dan moet men atmosferische plasma's gebruiken die sterk verhit zijn en waar de afwijkingen van lokaal thermodynamisch evenwicht (LTE) meestal niet erg groot zijn.

Plasma-sputten

Sinds 1960 gebruikt men DC-plasma-“jets” om ingebracht poeder of draad te versmelten en/of te versnellen en met grote snelheid aan te brengen op een substraat. Zodoende kan een oppervlaktebedekkende laag worden verkregen met speciale en vaak andere eigenschappen dan die van het substraat. Op deze wijze kunnen slagvastheid, isolatie, slijtagevastheid, hittebestendigheid, corrosiebestendigheid enz. worden beïnvloed.

Sferoidisatie; verdamping en condensatie

Materialen met een hoog smeltpunt kan men laten smelten door het als korrels in te brengen in een plasma met een grote vermogensdichtheid. Deze techniek vindt toepassing bij UO_2 en kwarts. In veel gevallen treedt ook een zuivering van het materiaal op, hetgeen uiteraard van belang kan zijn. Verdamping wordt gebruikt als eerste stap voor omzetting van materiaal. Het belangrijkste materiaal is siliciumoxide; er worden ook experimenten met keramische materialen gedaan. De belangrijke volgende stap is condensatie, bijvoorbeeld van silicium of siliciumoxidestof tot zeer kleine deeltjes. De damp kan zowel door verdamping worden gemaakt als door reactie in het plasma tussen een gasvormige verbinding (bijvoorbeeld $SiCl_4$) en een ander gas (bijvoorbeeld O_2). Bij snelle condensatie kunnen interessante bijverschijnselen optreden zoals vorming van metastabiele toestanden.

Chemische reacties in thermische plasma's

In toenemende mate worden er experimenten gedaan om de relatief grote vermogensdichtheid van een thermisch atmosferisch plasma te benutten voor che-

mische omzetting van materiaal. Onderzocht worden vergassing van kolen, ontzwaveling van kolen, reductie van metaaloxides en -sulfides. De voor het plasma benodigde energie kan voor een zeer belangrijk deel chemisch zijn. Bij deze processen kan bij gebruik van vast materiaal, de warmtegeleiding een belangrijke beperking blijken. De voordelen van plasma-reactoren zijn, dat in verband met de hoge temperatuur en grote energiedichtheid de installatie klein kan zijn met lage investeringskosten, dat de reactor snel gestart en gestopt kan worden en dat er vermoedelijk minder verontreinigingsproblemen zijn. Een nadeel is, dat elektrische energie nodig is en voorlopig zal het onderzoek vooral gericht zijn op verhoging van rendement. Voor duurdere materialen kan deze techniek wegens de mogelijkheid van kleine omvang en snelle inzetbaarheid interessant blijken te zijn.

Elementenanalyse m.b.v. thermische plasma's en gebruik als stralingsbron

Door een sample te verstuiven in, of te mengen met, een stromend gas en deze door een hoogfrequent ontlading te leiden, zullen de moleculen worden gedissocieerd. Door analyse van het atomaire spectrum, veelal in het zichtbare gebied, kan men een kwantitatieve elementenanalyse verkrijgen.

Thermische plasma's zijn ook geschikt als stralingsbron. Met name cascadebogen hebben een zeer grote radiantie, ook in het ultraviolet. Bovendien kan men deze boven gebruiken als secundaire standaard en met minder precisie als primaire standaard.

Magnetohydrodynamische (MHD-)generatoren

Hier ontmoet men atmosferische plasma's met lagere ionisatiegraad. De toepassing is het winnen van elektrische energie uit stromend heet gas, in een voorschakeleendheid voor een thermische cyclus. Er zijn twee principes: open en gesloten systemen.

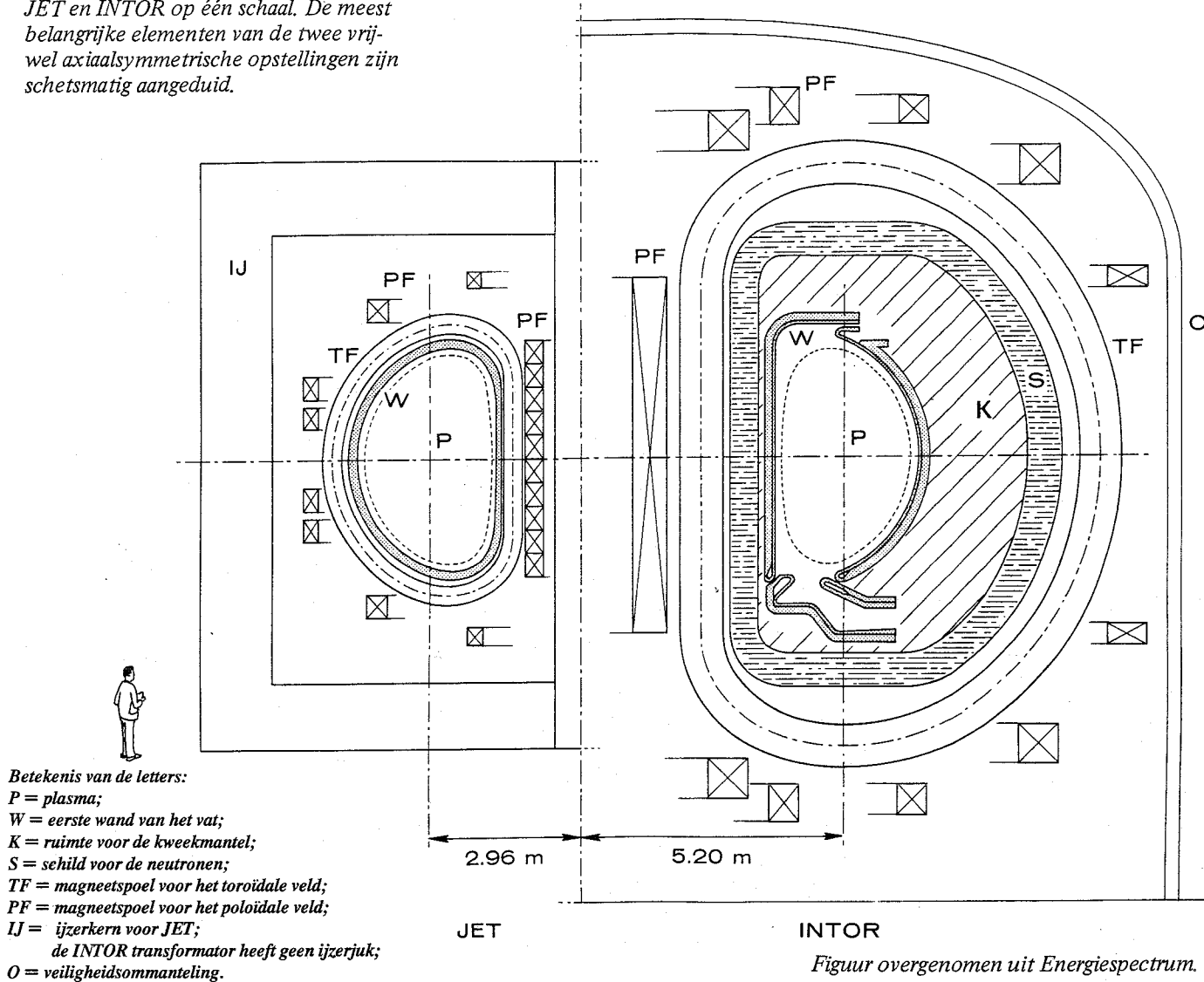
Open MHD-generatoren

In deze systemen wordt door een MHD-kanaal het hete verbrandingsgas van fossiele brandstoffen gevoerd. Door inzaai met alkali's als cesium of kalium wordt het geleidingsvermogen verhoogd en waar het gas door een transversaal magnetisch veld stroomt kan elektrisch vermogen worden afgenomen. Het totale rendement van een centrale bestaande uit een MHD-deel en een thermisch deel, kan in beginsel oplopen tot 60%.

Gesloten MHD-generatoren

Hierbij wordt de energie van de verhitting met een warmtewisselaar overgebracht naar een stromend edelgas. Ook dit wordt met inzaai van alkalimetalen door een

JET en INTOR op één schaal. De meest belangrijke elementen van de twee vrijwel axiaalsymmetrische opstellingen zijn schetsmatig aangeduid.



Figuur overgenomen uit Energiespectrum.

De Europese Gemeenschap, Japan, de Sovjet-Unie en de Verenigde Staten werken samen aan de voorbereiding van de volgende stap, een Internationale Tokamak-Reactor (INTOR).

MHD-kanaal geleid. Het voordeel van dit systeem is dat met een lagere plasmatemperatuur kan worden gewerkt, terwijl toch de elektronentemperatuur hoog is, met het daaraan verbonden goede geleidingsvermogen. Aan de andere kant leidt de twee-temperatuursituatie tot de ontwikkeling van instabiliteiten. Turbulentieonderzoek is hierbij dan ook zeer belangrijk.

Lichtbronnen

Incoherente bronnen

Algemeen bekend is het hoge rendement van TL-lampen (fluorescentielampen). Deze behoren tot de matig geïoniseerde plasma's met drukken van enkele Torr. Verbetering van kleurweergave en verkleining van de lamp zonder verlies van rendement zal een nog grotere toepassing van deze lampen tot gevolg hebben. Ook hf-

elektrodeloze excitatie zal na oplossing van vooral ook elektrotechnische problemen worden toegepast. Na het fundamentele werk van mensen als Penning en Druyvesteyn is lange tijd het onderzoek aan deze lampen empirisch geweest. Sinds enige tijd is er een hernieuwde belangstelling, die met name samenhangt met de mogelijkheden om in ingewikkelde situaties de snelheidsverdelingen van de elektronen te kunnen voorspellen door middel van numerieke oplossing van de boltzmannvergelijking. Dit is overigens een algemeen winstpunt voor die zwakgeïoniseerde plasma's, waarin de ontvolking van de actieve staart van de elektronenverdeling een belangrijke rol speelt.

Tot dezelfde klasse van lampen behoren ook de lage-druk-alkalilampen, met een slechte kleurweergave doch een zeer hoog rendement.

Meer recent is de verdere ontwikkeling van hoge-druk-lichtbronnen, vooral ook voor kleinere vermogens. Deze plasma's zijn goed geïoniseerd en atmosferisch (of hoger) van druk en behoren tot de klasse van de thermische plasma's. Hierbij zijn weer zeer grote vermogensdichtheden bereikbaar gepaard gaande aan een goed

rendement en een redelijke tot goede kleurweergave. Het meer geconcentreerd zijn van het licht als lichtbron is hierbij soms een voordeel.

Daarnaast zijn er nog de gepulste lichtbronnen, zowel voor flitsbuizen, als voor allerlei andere toepassingen.

Andere voorbeelden zijn de plasma displays. Dit zijn miniatuur-glimontladingen. Bij de verdere ontwikkeling hiervan is veel onderzoek nodig naar de transporteigenschappen van gasmengsels en de wisselwerking met de elektrodes.

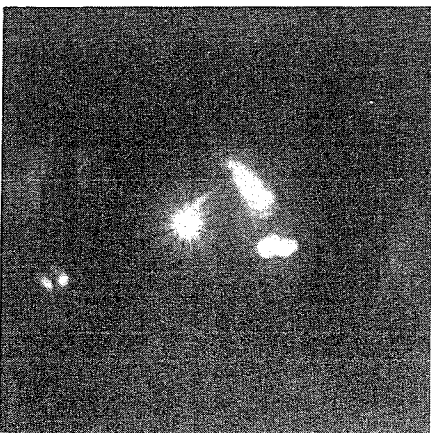
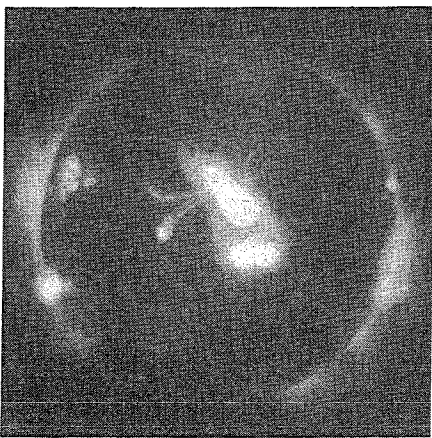
Coherente lichtbronnen, laserfysica

De ontwikkelingen op het gebied van de laserfysica en die van de plasmafysica hangen zeer nauw samen. Dankzij de kennis van de gasontladingsfysica was het mogelijk de eerste gaslaser (He-Ne) te realiseren. Dit geldt min of meer ook voor de eerste moleculaire gaslasers, zoals de CO₂, CO- en H₂O-laser. Het bleek echter al snel dat de plasmafysica van moleculaire systemen nog onvoldoende ontwikkeld was om direct te kunnen worden toegepast bij de verdere uitbouw van efficiënte moleculaire lasers van hoog vermogen. Van-

uit de laserfysica werden duidelijke vragen gesteld die zeer stimulerend hebben gewerkt op de ontwikkeling van deze gebieden van de plasmafysica. Vooral kennis van gepulste homogene ontladingen in atmosferische systemen met lasertrilholte-configuraties moest worden verworven.

Een dergelijke ontwikkeling deed zich ook voor bij het toepassen van excimeren als actieve media voor gaslasers. Voor het verkrijgen van excimeren en exciplexen werd het plasma-onderzoek aan multi-atmosferische edelgas-halogenemengsels bestudeerd. Het bijzondere van het plasmafysisch onderzoek ten behoeve van krachtige lasersystemen is niet alleen het werken met tot dusver ongebruikelijke gasmengsels, waarin naast ionen en elektronen ook nieuwe moleculerverbindingen, al of niet gewenst, voorkomen, maar vooral het toepassen van speciale technieken voor het conditioneren van het gezochte plasma. In deze vaak multi-atmosferische systemen worden homogene plasma's slechts verkregen via elektroden van speciale vorm en materiaal en het toevoegen van een geringe hoeveelheid van een extra gascomponent met lage ionisatiespanning ten behoeve van de initiële plasmavorming of het toepassen van twee

Heet plasma in coronale structuren in röntgenstraling. Opname gemaakt vanuit Skylab en ter beschikking gesteld door dr. Z. Svestka (Lab. voor Ruimteonderzoek te Utrecht).



externe stroomcircuits voor het afzonderlijk regelen van de plasmadichtheid en de elektronenenergie. De plasmafysica ten behoeve van het laseronderzoek heeft een opvallend technisch-fysisch aspect. Omgekeerd is de voortgang van de plasmafysica ook duidelijk gestimuleerd door de nieuwe mogelijkheden van de laserfysica. Verfijnde diagnostische technieken en vooral het spectroscopisch onderzoek maken gebruik van lasersystemen. Daarnaast bieden sterk geconcentreerde laserbundels unieke mogelijkheden voor energietransport en eventuele lokale plasmaverhitting. Het genereren van zeer hete plasma's voor thermonucleaire reacties met behulp van lasers heeft een sterke uitbreiding van de plasmafysische kennis mogelijk gemaakt.

Enkele andere toepassingen zijn te vinden bij: holografie, lengtemeting, diagnostiek (ook voor plasma's), fijnmechanische bewerkingen in de medische techniek en de geodesie.

Deeltjesbronnen

Voor verschillende andere takken van de fysica is het belangrijk te beschikken over deeltjesbundels met allerlei specifieke eigenschappen. In de atoom- en moleculerfysica gebruikt men bundelexperimenten. Bij de kernfysica heeft men voor de versnellers bronnen nodig. Voor onderzoek en bewerking van oppervlakken gebruikt men bundels (MBE). In het fusieonderzoek zijn voor verhitting van de plasma-ionen zeer intense bundels neutralen nodig. Met behulp van plasma's kan men zowel ionen- als meta-stabielen-bundels maken, terwijl het ook vaak van voordeel is om plasmabronnen te gebruiken voor de productie van bundels neutralen.

Gasontladingen in de elektriciteitsvoorziening Schakelaars

In de elektriciteitsvoorziening is het essentieel dat alle onderdelen van het net naar wens in- en uitgeschakeld kunnen worden. Bij storingen kunnen grote kortsluitstromen lopen. Dan moet het uitschakelen snel en betrouwbaar gebeuren. Men kan hierbij stellen dat in alle gevallen van stroomonderbreking een plasma wordt gevormd bij het scheiden van de contacten, niet alleen in perslucht- en SF₆-schakelaars maar ook in olie- en vacuümschakelaars.

Isolatie met gassen

In schakelstations en voor tot nu toe slechts korte verbindingen past men gesloten en met gas geïsoleerde systemen steeds meer toe. In deze CGIS (closed gas insulated systems) wordt vaak SF₆ toegepast. Als problemen met overslag langs isolerende afstand-stutten (spacers) meer afdoende kunnen worden opgelost zullen

ook spacerkabels kunnen worden toegepast. Voordelen hiervan zijn: de lagere verliezen en de geringere capaciteit ($\epsilon_r = 1$) waardoor er lagere capacatieve laadstromen hoeven te lopen.

Het zoeken naar goede isolerende gassen is een belangrijke zaak. Een groep in Oak Ridge zoekt systematisch naar gassen met sterke elastische verstrooiing van elektronen en met sterke negatieve ionenvorming (attachment) en zwakke detachment.

Gasontladingen in holtes en partiële ontladingen

Zowel in vaste stof als in vloeistofisolatie treden gasgevulde holtes en bellen op. Doorslag in de holte (een zogenoemde partiële doorslag) kan na korte of lange tijd tot doorslag van het gehele medium leiden. Deze interne partiële doorslagen lijken enigszins op de externe partiële ontladingen die in de vorm van corona lokaal ontstaan in inhomogene velden. Een langzame chemische aantasting van het isolatiemateriaal kan plaatsvinden. Het meten aan de soms zeer zwakke partiële ontladingen wordt in toenemende mate belangrijk als een niet-destructieve kwaliteitsstest van hoogspanningskabels, isolatoren en transformatoren.

Partiële ontladingen in de vaak zeer inhomogene veldstructuren van technische constructies zijn vaak moeilijk te vermijden. Bij storingen kunnen hoge spanninggolven optreden; de demping van deze golven door de corona is nuttig. In elektronegatieve gassen zijn de processen in inhomogene velden gecompliceerd, omdat de ionisatiecoëfficiënt, de attachment en de detachment op verschillende wijzen afhangen van de verhouding van veldsterkte en druk.

Opdampen, etsen, ionitreren en andere oppervlaktebehandelingen Opdampen en etsen

Bij de integrated-circuit-fabricage is het nauwkeurig en reproduceerbaar aanbrengen en afetsen van lagen en structuren van essentieel belang. Daar een en ander op micronschaal gebeurt, moet het etsen ook loodrecht op het oppervlak geschieden. Dit kan door dit in een plasma te doen plaatsvinden; dan zijn namelijk ionen de actieve deeltjes en deze hebben via de elektrische veldlijnen een voorkeursrichting. Deze anisotrope etsstechniek is sterk in ontwikkeling. De selectiviteit speelt ook een belangrijke rol, dat wil zeggen als de ene laag wordt weggeëtsd in een bepaald plasma, dan moet de daarop liggende laag niet geëtsd worden in datzelfde plasma. Ook het opbrengen van de diverse lagen speelt een grote rol bij deze processen. Dit is ook het geval bij de glasfiberfabricage. Hierbij worden voor het opbouwen van een fiber met een geleidelijk veranderende brekingsindex ook plasma's gebruikt, en wel met een tijdsafhankelijke

dosering van een 'dope' materiaal. Ten slotte wordt de mogelijkheid onderzocht om dunne (microns) lagen amorf silicium aan te brengen waarbij het geleidingsvermogen wordt verhoogd door doping. Dit is van groot belang voor zonnecellen.

Andere oppervlaktebehandelingen

Hieronder valt ondermeer (io)nitreren, waarbij het oppervlak van staal of roestvrij staal wordt gehard door het inbrengen van stikstof. Een ander voorbeeld is het conditioneren en schoon maken van de vacuümwand van bijvoorbeeld opstellingen voor fusie-experimenten met behulp van een glimontlading. Bij al deze processen wordt de ontlading gebruikt voor de produktie van de reagerende deeltjes: atomaire stikstof, of stikstofionen en bijvoorbeeld atomaire waterstof in het tweede geval.

Onderwijs in de plasmafysica in Nederland
Zoals reeds opgemerkt in eerder genoemde nota 'Plasmafysica - een positiebepa-

ling', is de plasmafysica een geschikt onderwerp van fysieke studie. Het onderwerp is relatief breed; de beoefening vereist kennis van vrijwel alle terreinen van de klassieke natuurkunde: mechanica, elektromagnetisme, statistische mechanica, (magneto)hydrodynamica, optica, zodat een brede opleiding gegarandeerd is. Bij veel toepassingen in de chemische en optische sfeer is ook de quantummechanica nodig. Plasma als object van onderzoek op aarde moet men vaak eerst maken, voordat men met het bestuderen ervan kan beginnen. Dit is een extra complicatie bij het onderzoek. Met name geldt dit voor de thermonucleaire plasmafysica. De eisen welke men moet stellen aan diagnostiek zijn hoog, waardoor men ook daar vele mogelijkheden heeft voor onderwijs.

De breedte van de opleiding, de noodzaak om in veel gevallen een keuze te maken uit verschillende mogelijke hypothesen, maakt de opleiding in de plasmafysica uitermate geschikt als basis voor een industriële loopbaan.

Conclusie

Uit het bovenstaande kan de conclusie worden getrokken dat de beoefening van de plasmafysica zowel uit zuiver-wetenschappelijk oogpunt als op grond van bestaande en mogelijke toepassingen bepaald de moeite waard is. Was aanvankelijk de motivering voor de beoefening ervan vrijwel uitsluitend gebaseerd op het potentieel van thermonucleaire fusie, nu kan worden gesteld dat de astrofysische en technische toepassingen buiten dit gebied het belang van de discipline aanzienlijk hebben vergroot.

Referenties

C.M. Braams en J.C. Terlouw, NTvN 39 (1973) 82.

Opmerking: Totstandkoming van dit artikel heeft zeer geprofiteerd van commentaren van P.C.T. van der Laan, L.H.Th. Rietjens, M.P.H. Weenink, P.P.J.M. Schram, C.M. Braams, F. Engelmann, H.J. Hopman, J. Kistemaker en W.J. Witteman op een nota t.b.v. de Commissie van de Werkgemeenschap Thermonucleair Onderzoek en Plasmafysica van de Stichting FOM van de hand van de eerste auteur. Voor de eindredactie van dit artikel kan alleen de laatste auteur aansprakelijk worden gesteld.

Boekrecensies

Barry Simon,

Functional Integration and Quantum Physics.

Academic Press, New York, 1979.

xii + 296 pp., \$ 37,50 gebonden.

Barry Simon heeft een fascinerend boek geschreven over functionaal-integratie. Fascinerend betekent echter nog niet elementair. Integendeel, een zeker niveau wordt bij de lezer verondersteld, doch wie zich met functionaal-integratie bezighoudt, zal zeker van de inhoud van dit boek kennis willen nemen. Bovendien, zoals vaker bij Simon¹ het geval is, vindt men hier verrassend heldere explicaties van tal van begrippen uit de mathematische fysica en de waarschijnlijkheidsrekening, die niet direct met het onderwerp te maken hebben. De stijl is helder en zakelijk, niet gespeend van enige humor, en de opzet van het boek is zodanig dat minder toegankelijke delen zonder bezwaar kunnen worden overgeslagen. Een breed scala van toepassingen wordt behandeld, waarbij Simons belangstelling voor de atoomfysica overduidelijk tot uiting komt. Alleen de statistische mechanica had wat meer aandacht kunnen krijgen. Samenvattend: dit is een boek van hoog niveau, dat ik aan de meer mathematisch geschoolde onderzoeker van harte kan aanbevelen. Door zijn rijke inhoud zal het, mijns inziens, vele jaren een standaardreferentie blijven. Rest mij nog een enkele opmerking te maken over de inhoud.

De eerste twee hoofdstukken voorzien de lezer van de benodigde informatie over in-

tegratie in en positief-definiëte functies op oneindig-dimensionale vectorruimten (Minlos' stelling, Gaussische processen), waarschijnlijkheidstheorie (Borel-Cantelli, ongelijkheden van Doob en Lévy), Brownse beweging en het Ornstein-Uhlenbeck-proces (hier vermomd als 'oscillator process'), alsmede de Brownse brug (wat moeilijker begaanbaar). Een diepgaande studie der (ir)regulariteitseigenschappen van deze processen en, uiteraard, de Feynman-Kac formule² ontbreken niet. Met name de korte behandeling van de waarschijnlijkheidstheorie is zeer elegant.

Na de inleidende hoofdstukken volgen als eerste toepassingen de klassieke limiet ($\hbar \rightarrow 0$) en klassieke bovengrenzen van de partitiefunctie en het aantal gebonden toestanden, inclusief een behandeling van de methode waarmee Lieb en Thirring de stabiliteit der materie³ bewezen. Een apart hoofdstuk is gewijd aan correlatie- en andere ongelijkheden.

De Brownse beweging $\{b(t); 0 \leq t < \infty\}$ is nergens differentieerbaar in t , en dus (!) bestaat een integraal à la $\int f(b(t)) db = \int f(b(t)) \frac{db}{dt} dt$ eenvoudig niet of, zo

men wil, niet eenvoudig. De constructie van deze *stochastische* integraal vereist een bepaald voorschrift. In de literatuur kent men twee niet-equivalente voorschriften, een van Itô (1944) en een van Stratonovich (1966), dus twee rivaliserende scholen⁴. Ik volsta met op te merken dat Simon voor de Itô-integraal kiest. Dit integraalbegrip vindt zijn toepassing *o.a.* in de oplossing van stochastische differentiaalvergelijkingen (bijvoorbeeld de Langevinvergelijking) en, via Itô's lemma bij diffusieprocessen.

Wat fysischer is het volgende.

Magnetisme bestaat niet volgens de klassieke statistische mechanica. Aldus een oud theorema van Van Leeuwen⁵. Precieser, indien $\underline{B} = \text{rot } \underline{A}$ het magneetveld \underline{B} representeert, geldt de gelijkheid $Z_{cl}(\underline{A}) = Z_{cl}(0)$, dat wil zeggen bij de berekening van de kanonieke toestandssom kan men $\underline{A} = 0$ stellen: het magneetveld verdwijnt eenvoudig uit de beschrijving. Simon laat nu zien hoe voor spinloze deeltjes, in een quantummechanische beschrijving, $Z_{qm}(\underline{A}) \leq Z_{qm}(0)$. Dit is een zogenaamde diamagnetische *ongelijkheid*. De 'Van Leeuwen-ongelijkheid' lijkt me echter beter op haar plaats, want ook in $Z_{qm}(0)$ is het magneetveld volledig uit de beschrijving verdwenen.

Jaren geleden produceerden Bender en Wu een asymptotische ontwikkeling, in de koppelingsconstante γ , van de quantummechanische grondtoestandenergie van een anharmonische oscillator met vierde-orde term γx^4 . Formeel kan men de termen van deze en analoge ontwikkelingen (Lipatov) verkrijgen door toepassing van de Laplace-methode op een functionaal-integraal. Voor gaussische maten geconcentreerd op de continue functies op een eindig interval (bijvoorbeeld $[0, \beta]$) geeft Simon een *exacte* behandeling. Behoedzaamheid is geboden, en dit verklaart ook waarom de formule van Bender en Wu, alhoewel formeel, nog niet exact bewezen is met behulp van functionaal-integratie.

In plaats van een parameter in de integraal, kan men ook de tijd t naar oneindig zenden (bijvoorbeeld in een Feynman-integraal met t vervangen door it). De theorie van Donsker en Varadhan doet dan uitspraken over het gedrag en de limiet