

Langzaam, zo snel als wij kunnen

Lopes Cardozo, N.J.

Gepubliceerd: 01/01/1996

Document Version

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the author's 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](#)

Citation for published version (APA):

Lopes Cardozo, N. J. (1996). Langzaam, zo snel als wij kunnen. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.

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 ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Langzaam,
zo snel als wij
kunnen

INTREEREDE

Prof.dr. N.J. Lopes Cardozo

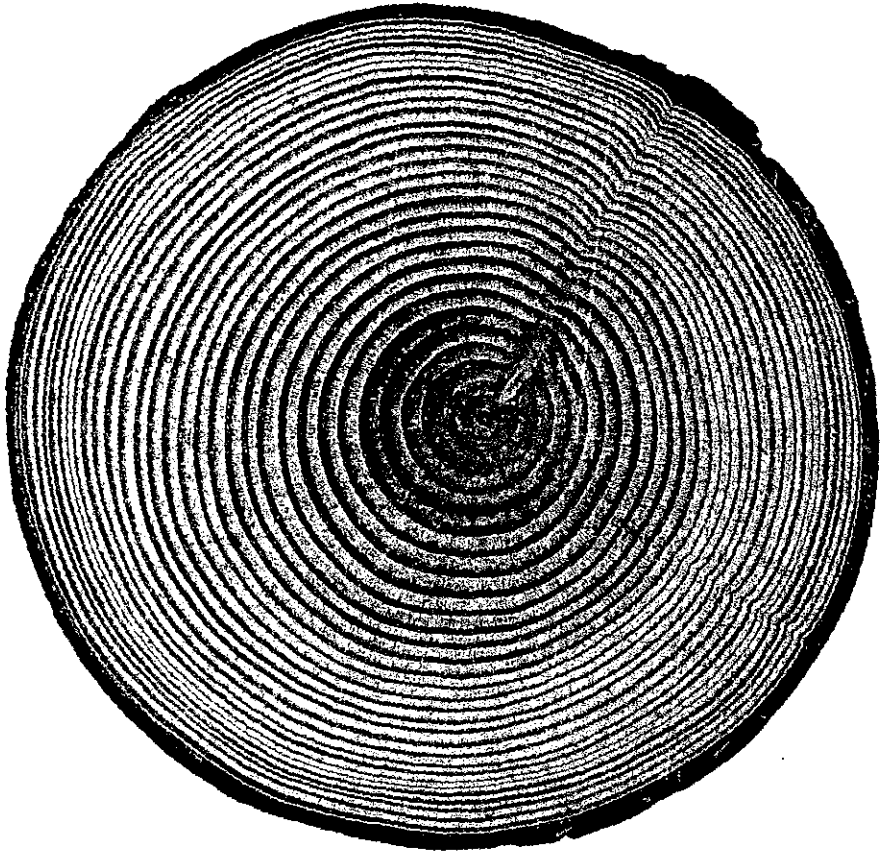


Technische Universiteit Eindhoven

INTREEREDE

Uitgesproken op 19 januari 1996
aan de
Technische Universiteit Eindhoven

Prof.dr. N.J. Lopes Cardozo



Mijnheer de Rector Magnificus,
Dames en heren,

Het natuurkundige verschijnsel waarover ik mij de afgelopen jaren het meest heb verbaasd is de ontstellende traagheid waarmee een dubbeltje valt. Ik bedoel: ook bij anderen.

Nu zult u tegenwerpen dat een fysisch laboratorium bij uitstek een plaats is waar dubbeltjes snel vallen. Vanzelfsprekend is het waar dat natuurkundigen erg intelligent zijn en vooral op het gebied van de natuurkunde tot de uitblinkers behoren. Dit kan leiden tot discussies die voor niet ingewijden moeten klinken als tovertaal. De typische vorm van zo'n discussie kan zijn:
A: Nu heb je zus berekend onder aanname van zo en het antwoord kwam wat laag uit, maar eigenlijk moet je nog in rekening brengen dat door de invloed van dittum dattum een andere ruimtelijke verdeling heeft dan je had aangenomen... enzovoort.

Waarop B in de lucht staart en antwoordt: hmmm mmmmm, nee, dat werkt juist de verkeerde kant op. Misschien is het flauw om u een nepvoorbeeld te geven. Als ik vaktermen invul gaat de conversatie als volgt:

A: Nu heb je de gemiddelde ion-lading van het plasma berekend uit

de elektrische weerstand, onder aanname dat de onzuiverheden homogeen over het plasma zijn verdeeld, en het antwoord kwam een beetje laag uit, maar eigenlijk moet je nog in rekening brengen dat onder invloed van de temperatuurverschillen de ionisatiegraad in het centrum van het plasma hoger is dan aan de rand, waardoor de stroomdichtheid iets minder gepiekt is dan jij had aangenomen.

Waarop B in de lucht staart en antwoordt: hmmm mmmmm, nee, dat werkt juist de verkeerde kant op. Om dit antwoord te kunnen geven heeft B moeten interpoleren en extrapoleren, differentiëren en integreren, schatten en schalen, induceren en deduceren, heeft hij gebruik gemaakt van symmetrie-eigenschappen, energieprincipes en intuïtie. Kortom, de gereedschapskist van de fysicus is wijd open geweest. Dat alles uit het hoofd, in een paar seconden.

Dames en heren, dit is het soort inzicht waar het mij *niet* om gaat. Het toont slechts aan wat we al wisten, namelijk dat natuurkundigen goed zijn in natuurkunde. Overigens is het resultaat van dit soort 'instant physics' niet zelden onjuist, zoals ook in het gekozen voorbeeld. Aan de opgetrokken wenkbrauwen heb ik de instant-fysici onder u herkend. Maar dit terzijde.

Inmiddels heb ik u nog steeds niet verteld onder welke omstandighe-

den dat dubbeltje wél opmerkelijk traag valt. Waar het mij om gaat wordt treffend tot uiting gebracht door de titel die ik - met welwillende medewerking van de uitgeverij Querido - heb ontleend aan een boek van de dichter Toon Tellegen: 'Langzaam, zo snel als zij konden'. Ik zal aanstonds aantonen dat deze dichtregel de situatie in wetenschappelijk onderzoek goed beschrijft, maar alvorens dat te doen wil ik u iets héél anders vertellen

U leest krant, u hoort radio, u ondergaat televisie, kortom u bent op de hoogte van het wel en wee van de wereld. U weet dat de wereldbevolking groeit. U weet ook dat het energiegebruik per hoofd van de bevolking groeit en dat voorlopig nog wel even zal blijven doen. Zo niet in West-Europa, waar wij allen van spaarlamp en dubbel glas zijn voorzien, dan toch zeker in de zich snel ontwikkelende delen van Azië, om maar een sprekend voorbeeld te nemen. U weet ook dat de voorraden olie niet onbeperkt zijn, en dat aan het verbranden van grote hoeveelheden steenkool bezwaren kleven. Kortom, u vraagt zich wel eens zorgelijk af hoe wij ervoor kunnen zorgen dat er over vijftig jaar nog stroom uit het stopcontact komt. Althans, ik hoop dat u zich daar zorgen over maakt, want het is werkelijk een heel groot probleem en er is alleen kans op een oplossing als het probleem door velen als zodanig wordt herkend.

In deze omstandigheden kan ik mij voorstellen dat de wens in u opkomt om een fusiereactor te bouwen. Dat is een reactor waarin water met water reageert waarbij zeer veel energie vrijkomt.

Hoeveel is veel? Wel, als u de kolen wilt aanvoeren waarmee u een middelgrote kolencentrale een jaar kunt stoken, hebt u een goederentrein nodig met een lengte van 350 km. Voor een fusiereactor kunt u de brandstof voor een jaar met de fiets afleveren.

Ik wil de fusiereactor verder niet romantiseren. Het is één van de vormen van energie-opwekking die een alternatief kunnen vormen voor de verbranding van fossiele brandstof. Windmolens en zonnecellen zijn andere voorbeelden, zoals kernreactoren dat ook zijn. Tezamen moeten deze opties de garantie geven dat er over vijftig jaar geen noodsituatie ontstaat. Wat deze opties gemeen hebben is dat ze allemaal producten van natuurkundig onderzoek zijn. Natuurkundigen zullen voor de oplossing van het energieprobleem moeten zorgen, en dat is geen geringe verantwoordelijkheid. Maar nu eerst: de fusiereactor.

In een fusiereactor reageert water met water, of preciezer: waterstof met waterstof. De brandstofvoorraad is vrijwel onbeperkt en de 'verbranding' is relatief schoon. Maar, deze verbranding is moeilijk

te beheersen, want de reactie verloopt pas bij een temperatuur van, schrik niet, 100 miljoen graden. Het principe van deze reactie is al decennia bekend. Sinds de jaren vijftig is ook bekend hoe je een bom kunt maken die is gebaseerd op deze reactie. Maar de *beheerste* kernfusie - dat is een hardere noot om te kraken. De reden is dat de natuurkunde van materie met een temperatuur van 100 miljoen graden nogal anders is - moeilijker, leuker - dan die van de koude wereld.

Het vak dat ik aan deze universiteit doceer is dan ook plasmafysica: de natuurkunde van hete gassen. Een gas bestaat uit door elkaar vliegende deeltjes - atomen, soms samengeklonterd tot moleculen - die geen elektrische lading hebben. Als ik een gas zo sterk verhit dat de atomen uit elkaar vallen, noem ik het een plasma. De ongeladen atomen vallen uiteen in twee bouwstenen die wél elektrisch geladen zijn: elektronen, die negatief, en kernen, die positief zijn. Plasma is dus een gas-achtig mengsel van positief en negatief geladen deeltjes.

Deze toestand treedt op bij hoge temperaturen. Een hete vlam is een heel koud plasma. Nu zult u zeggen: plasma komt dus vrijwel niet voor in de natuur. Maar dan vergist u zich. Het heelal bestaat voor meer dan 99% uit plasma. De sterren, de ruimte tussen de sterren: het is

allemaal plasma. Alleen op aarde is plasma zeldzaam: bliksem en noorderlicht zijn hier de natuurlijke verschijningsvormen. U mag het woord plasma gerust associëren met adjectieven als: indrukwekkend, fascinerend, van grote schoonheid. Maar ook: ongrijpbaar, onvoorspelbaar; en misschien wel ontembaar.

Laten we de blik richten op een bekend buitenaards plasma: de zon. Iedereen weet uit eigen waarneming dat de zon om de aarde draait. Dat kunt u eenvoudig met het blote oog vaststellen, maar het is niet correct. Sinds enige honderden jaren staat de zon stil en draait de aarde. Voor de doorsnee wereldburger maakt deze verandering niets uit, maar voor wie de beweging van de planeten wil beschrijven is het leven een stuk eenvoudiger geworden.

Ik noem dit voorbeeld met opzet, omdat het een treffende illustratie is van een 'verandering van paradigma'. Aanvankelijk was het paradigma: 'de aarde staat stil' (dus de zon draait daar omheen). Met de waarnemingen van de stand van de hemellichamen was niets mis en er waren succesvolle formules om de banen van planeten te beschrijven. Maar met het nieuwe paradigma - 'de zon staat stil' - konden de waarnemingen ineens binnen een eenvoudig kader geplaatst worden.

Hoelang heeft het geduurd voor dit bevrijdende inzicht doorbrak? Juist,

hier hebben we te maken met een traag vallend dubbeltje. Let wel, ik wil niets ten nadele zeggen van het werk van de astronomen in de eeuwen dat de wereld stilstond. De waarnemingen waren prima en er werd kundig aan geïnterpreteerd, maar de wetenschap stond op het verkeerde been en kon de stap naar een nieuw wereldbeeld daardoor moeilijk maken.

Verandering van paradigma: een sleutelbegrip in mijn verhaal.

De zon is een plasma. Op aarde maken we ook plasma's. In TL-buizen is het een plasma dat voor het licht zorgt, de chips die maken dat uw auto u gedag zegt als u instapt, zijn gemaakt met behulp van plasma's, plasma's zijn gebruikt om het kratje waar u bier in koopt een kleur te geven, met plasma's worden rookgassen in industriële schoorstenen gereinigd, vervuilde grond wordt schoongebreed in plasma-vlammen, wellicht heeft u een plasma in uw stereo-installatie om hoge tonen weer te geven, enz. enz. Als u per ongeluk een metalen voorwerp in de magnetron-oven zet en dat merkt doordat er vreemde lichtverschijnselen door het ruitje te bewonderen zijn, hebt u eigenhandig een plasma gemaakt.

Aan zulke plasma's wordt heel mooi onderzoek gedaan aan deze universiteit, maar voor mij zijn ze te koud. Ik wil het hebben over de

plasma's met een temperatuur van 100 miljoen graden Celcius, die worden gemaakt in het onderzoek ten behoeve van de fusiereactor. Let wel: 100 miljoen graden, dat is warmer dan de kern van de zon.

Voordat we over deze plasma's kunnen praten, zullen we ze eerst moeten maken. Daartoe nodig ik u uit samen met mij een fusiereactor te ontwerpen. Om de ontwerpcriteria te bepalen stel ik voor dat we een analogie maken met een gewone verbranding. Laten we een zakaansteker als voorbeeld nemen. Dit is een miniatuur- reactor. Er zit brandstof in. Om de verbranding op gang te brengen moet het gas tijdelijk boven de ontstekings-temperatuur worden gebracht met een vonk. Daarna onderhoudt de vlam zichzelf. Als we met de warmte water aan de kook zouden brengen en er een stoomturbine mee aan zouden drijven, konden we elektriciteit maken. Dit is allemaal simpel genoeg. Wat moet er nu ontworpen worden aan zo'n aansteker?

Ten eerste: keuze van de brandstof. Deze aansteker brandt op gas, maar dat had even goed wasbenzine kunnen zijn. Hout brandt ook, maar is minder geschikt voor een aansteker.

Ten tweede: de brandtemperatuur. Men kan vlammen maken van verschillende temperaturen, van zeg maar 1000 tot 2000 graden. Er is een minimale temperatuur nodig om

de verbranding te laten plaatsvinden. De temperatuur van de vlam is dus voor een goed deel voorgeschreven door de keuze van de brandstof: de natuur laat ons hier niet veel vrijheid.

Ten derde: als ik tegen de vlam blaas, gaat hij uit. Dit komt omdat ik de vlam afkoel tot onder de minimum-temperatuur van de verbranding. De snelheid waarmee de vlam afkoelt kunnen we karakteriseren met een tijd, de afkoeltijd. Een vlam met een lange afkoeltijd brandt makkelijker dan een met een korte afkoeltijd. Door de vlam niet te klein te maken en af te schermen van blazende mensen, kunnen we een goede werking van de aansteker garanderen.

Ten vierde: we moeten de druk kiezen van het brandende gasmengsel. Hoe hoger die druk is hoe meer warmte er vrijkomt per kubieke centimeter vlam. Voor een aansteker is 1 atmosfeer de enige praktische keuze, maar in het laboratorium kunnen we best verbranding bij een andere druk laten plaatsvinden.

Voor een fusiereactor gaan dezelfde overwegingen op.

De brandstof die het gemakkelijkste 'brandt', is een mengsel van twee variëteiten (isotopen) van het element waterstof: Deuterium en Tritium, zwaar en zeer zwaar waterstof.

De brandtemperatuur van dit mengsel is 100 miljoen graden

celcius of meer.

De druk en de afkoeltijd moeten we nu nog kiezen, maar om een zichzelf onderhoudende reactie te maken - een brandend plasma - moet het produkt DRUK maal AFKOEL-TIJD ruim groter zijn dan 1 seconde maal 1 atmosfeer, bijvoorbeeld 1 seconde maal 10 atmosfeer.

Hoe maken we een plasma met een temperatuur van 100 miljoen graden, een druk van 10 atmosfeer en een afkoeltijd van 1 seconde?

Laten we eerst proberen die temperatuur te halen. U bouwt om te beginnen een oven. Daarvoor kunt u een rechte buis nemen. Daar brengt u de brandstof (waterstofgas) in - bij een heel lage druk, want na verhitting tot 100 miljoen graden mag de druk nog altijd maar 10 atmosfeer zijn. In feite gebruikt u maar een vingerhoedje brandstofgas. Nu moet u het gas gaan verhitten. U laat daartoe een elektrische stroom lopen door het gas. U begint met vonk, een doorslag. Zo ontstaan er geladen deeltjes. Daardoor gaat het gas elektrisch geleiden. U kunt de stroom nu eenvoudig opvoeren, en daardoor wordt het gas - dat inmiddels is overgegaan in de plasma-toestand - heet. U moet niet de indruk krijgen dat dit moeilijk is. Integendeel, tot zover is het een koud kunstje.

Nu moet u iets ondernemen om te voorkomen dat het hete plasma

tegen de wand van de buis komt: als dit gebeurde zou het plasma direct afkoelen. Om dit te bereiken maken we gebruik van het natuurkundige gegeven dat geladen deeltjes langs magneetlijnen (dit zijn denkbeeldige lijnen die aangeven hoe een magnetisch veld loopt) lopen als runnertjes langs gordijnrail. Door de buis te vullen met gordijnrails die nergens de wand raken, is het grootste probleem dus opgelost: de runnertjes kunnen niet bij de wand komen. Dit noemt men magnetische opsluiting. Het is zeer effectief. Er is nog een probleem bij de uiteinden van de buis, maar dit kan worden opgelost door de buis krom te buigen zodat hij op zichzelf aansluit.

Onze reactor is nu af. Hij heeft de vorm van een autoband. Het apparaat dat we in gedachten gebouwd hebben wordt TOKAMAK genoemd, een Russisch acroniem waar u delen van de woorden Toroidale Kamer Magnetisch in herkent. Als hetzelfde ding in Nederland was uitgevonden had het TOMAKAM geheten. Van dit type apparaat staan er tientallen in diverse laboratoria verspreid over de wereld. Het is inderdaad mogelijk om plasma's te genereren met een temperatuur van tientallen tot honderden miljoenen graden. De temperatuur is het probleem niet meer. Ik praat daar nu luchtig over, maar er is wel dertig jaar gericht onderzoek gedaan om tot dit resultaat te komen. Niettemin:

bij de huidige stand van de techniek is het mogelijk om een buitengewoon schoon en stabiel waterstofplasma vast te houden bij een temperatuur van tientallen tot honderden miljoenen graden. Geen probleem.

De afkoeltijd van een seconde is wel een probleem. Als u een blok steen van één bij één bij één meter opwarmt en vervolgens laat afkoelen, kunt u de afkoeltijd eenvoudig meten. Die is bijvoorbeeld een dag. Een twee maal zo grote steen (twee bij twee bij twee meter) heeft een afkoeltijd van vier dagen. Grote dingen koelen langzamer af dan kleine. Naast de afmeting is ook de isolatiewaarde belangrijk. Een blok koper koelt sneller af dan een blok steen van dezelfde afmetingen. Dat komt doordat koper beter geleidt, waardoor de warmte uit het centrum van het blok sneller naar buiten kan komen. Hoe slechter de warmtegeleiding van het materiaal, hoe langer de afkoeltijd. Als u een blok wil maken met een lange afkoeltijd, moet u dus proberen de warmtegeleiding van het materiaal zo klein mogelijk te maken. Als dat niet gaat, moet u het blok groter maken.

Voor onze reactor is dus de vraag: wat is de warmtegeleiding van plasma? Als u dit weet, kunt u ook uitrekenen hoe groot de reactor moet worden. De warmtegeleiding van een plasma kunt u niet schatten, men moet fundamenteel

onderzoek der materie doen om daar achter te komen. Dat is inmiddels gebeurd, vooral in de laatste vijftien jaar is hier veel vooruitgang geboekt. Uit dit werk blijkt dat de buis met heet plasma een doorsnede van circa zes meter moet krijgen om te voldoen aan de eis dat de afkoeltijd langer dan een seconde is. De omtrek van de in zichzelf teruggebogen buis moet dan zo'n vijftig meter bedragen.

Nu hebt u de reactor ontworpen. Het is een forse machine geworden. Groot voor u, groot voor fundamentele onderzoekers en groot voor een wetenschapsbudget. Voor ingenieurs en het budget van een elektriciteitsmaatschappij is de reactor overigens helemaal niet groot.

Het gaat niettemin om een grote en complexe machine, waarvoor geen voorbeelden bestaan. Dat betekent dat hij niet zo een, twee, drie gebouwd kan worden. Reken ruwweg op zeven jaar ontwerpen, zeven jaar bouwen, en tenminste zeven jaar experimenteren - want het gaat hier nog altijd om een testreactor, een wetenschappelijke onderneming die wel netto energie kan leveren maar alleen op zon- en feestdagen. Pas als die werkt, kan er een prototype reactor komen en daarna pas kan de eerste generatie commerciële reactoren worden gebouwd. Elk van deze stappen vergt zo'n 20 jaar. U ziet, na de

onderzoeksfase komt het industrialisatie-traject, en men moet hier tientallen jaren voor uittrekken. Degenen onder u die in de industrie werken en betrokken zijn bij de ontwikkeling van nieuwe producten, weten dat allang. Als u terugkijkt op de ontwikkeling van de automobiel, of ziet hoeveel tijd er verstreken is tussen de idee-vorming van de CD en het als volwassen produkt op de markt komen daarvan, dan realiseert u zich dat complexe, nieuwe technologie tijd nodig heeft om te groeien. En dit geldt in versterkte mate indien er verschillende disciplines bijeen moeten komen om het produkt te maken.

Langzaam, zo snel als wij kunnen.

Overigens, als u vandaag een kerncentrale bestelt - en dat is een installatie waarvan er al tientallen gebouwd zijn - hebt u hem pas over tien jaar in huis. En als Chrysler een nieuw model auto introduceert - gewoon hetzelfde ding nog een keer - zijn daar jaren ontwikkeling aan voorafgegaan en een investering van miljarden dollars.

Nu weet u wat de ingrediënten zijn waarmee u een fusiereactor kunt bouwen. U weet dat een plasma verhit moet worden tot extreem hoge temperatuur, dat de warmtegeleiding van het plasma met behulp van magneetvelden geminimaliseerd kan worden en dat de verliezen die dan nog optreden

kunnen worden bestreden door het plasma maar flink groot te maken. Als u in de krant leest dat een fusiereactor groot, complex en duur wordt, weet u nu dus dat daar verder niets geheimzinnigs achter steekt. Nu u dit weet, wordt het tijd dat ik het over mijn vak ga hebben: fundamenteel onderzoek van plasma's. Maar eerst moet ik u iets héél anders vertellen.

Enige tijd geleden raakte ik op een avond verzeild in een ruige wijk in Utrecht, waar in een straat ruzie was uitgebroken. Een agent op een fiets trof een menigte vechtende mannen aan. In een moment van genialiteit deed hij het volgende. Hij zette zijn fiets op de kop en begon aan de trapper te draaien alsof er iets kapot was. Binnen korte tijd was het vechten gestopt en stonden de mannen in een kring om hem heen advies te geven.

Wat toont dit voorval aan? Het toont aan dat mannen te allen tijde voor een technisch probleem te interesseren zijn. Zij vinden techniek zo leuk dat ze zelfs het vechten ervoor laten. (Of hetzelfde voor vrouwen geldt, is een open vraag. Een belangrijke vraag, in het licht van de ondervetegenwoordiging van vrouwen in de technische wetenschappen. Maar vandaag ga ik er niet verder op in.)

Ik vertel u dit omdat niet iedereen gelukkig is met de gedachte dat

moeilijke technologie een sleutelrol vervult en zal vervullen in onze maatschappij. Ik kan mij wel in dat standpunt inleven, maar ik zie geen alternatief. Onze maatschappij is vormgegeven door technologen. Kijk om u heen, in uw eigen huishouden, in het verkeer, in de economie, en u kunt er niet omheen: overal speelt moderne techniek een bepalende rol. Daar kun je ongelukkig mee zijn, maar het is een historisch gegeven dat culturen die in technologisch opzicht achterblijven, zijn gedoemd het onderspit te delven. Ik meen echter dat de mens heel goed in staat is met techniek om te gaan. Zoals ik al zei: mannen vinden techniek zelfs leuker dan vechten, homo ludens heeft zich ontwikkeld tot homo technicus. Natuurlijk blijft het zo dat de modernste technologie slechts door enkelen gehanteerd kan worden, maar bijna iedereen bedient automobielen en computers en draadloze telefoons zonder te worden afgeschrikt door de moderne techniek die er in die apparaten schuilgaat.

Een fusiereactor is een berg fysische techniek, zoals mijn voorganger, de hooggeleerde Ornstein op deze plaats al heeft betoogd. In zekere zin is een fusiereactor een toppunt van toegepaste wetenschap. Vele fysische en technische disciplines werken samen aan een project dat de huidige grenzen van complexiteit verre overschrijdt. En

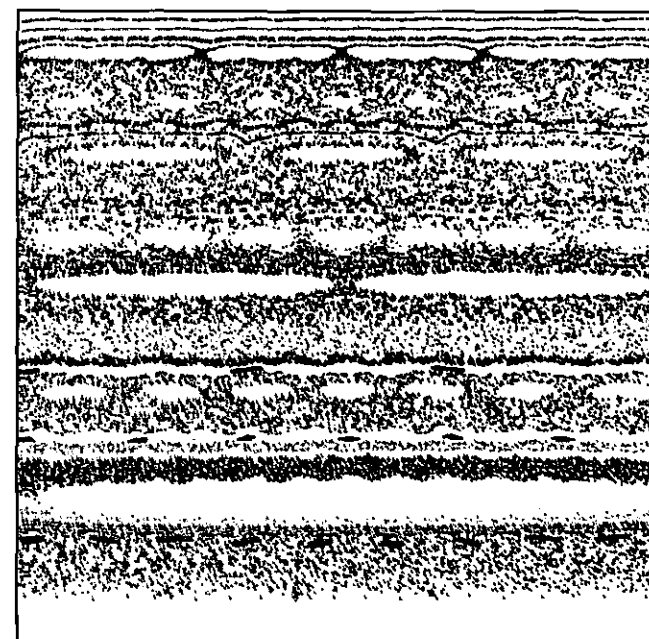
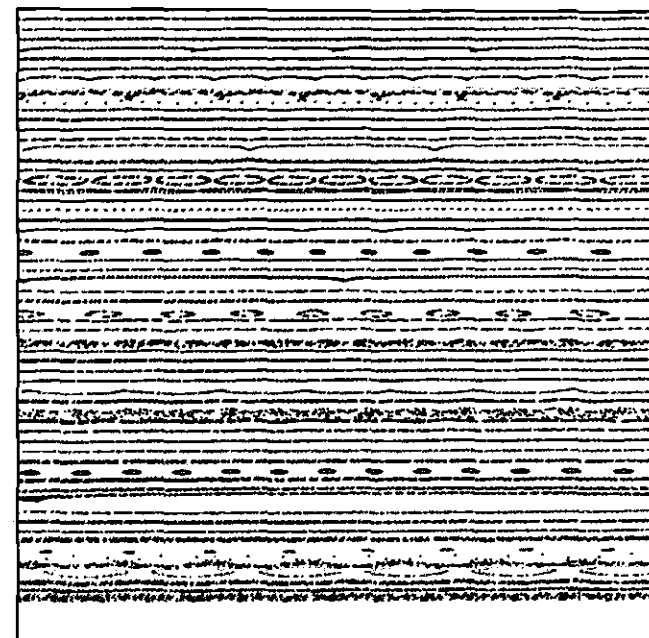
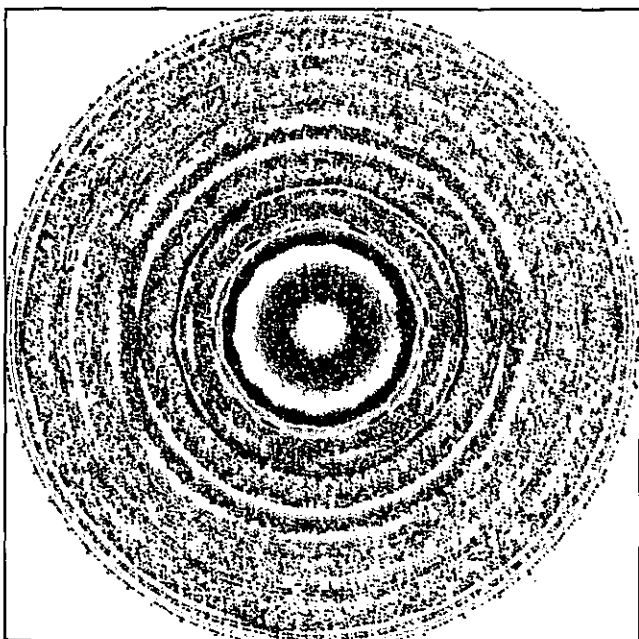
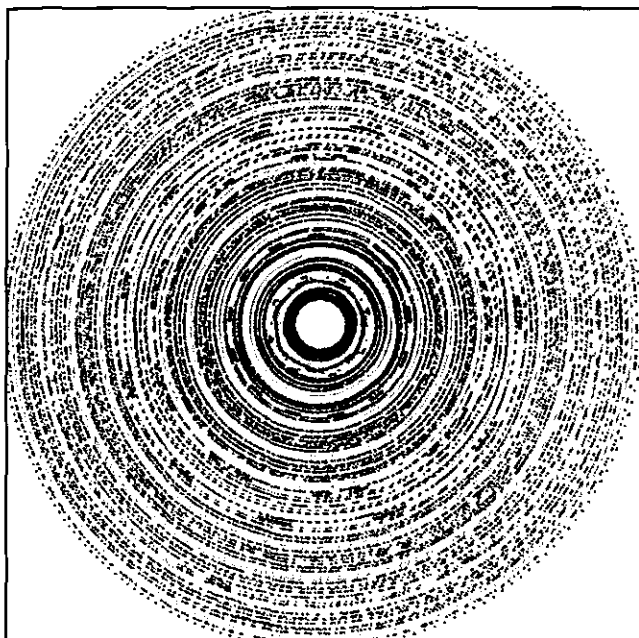
het produkt is iets alledaags. Geen man op de maan, elektronische snelweg of genetisch gemanipuleerd ei, maar gewoon: stroom uit het stopcontact.

Voor de onderzoeker heeft fusie een heel andere kant: die van puur wetenschappelijk onderzoek. Een fusieplasma bestaat uit de eenvoudigste deeltjes die we hebben, waterstofkernen en elektronen, en verder niets. Het krachtenspel tussen deze deeltjes en de magneetvelden levert een pracht van verschijnselen op. Wie zo'n plasma bestudeert, bouwt inzicht op dat noodzakelijk is voor de bouw van een fusiereactor, maar dat ook van toepassing is op het zonneplasma en heel andere verschijnselen, zoals stroming van vloeistof, om maar een voorbeeld te noemen. Fusie-onderzoek is ontgezeglijk een vorm van puur wetenschappelijk onderzoek. In Nederland is het dan ook ondergebracht bij de stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM). Veel van het werk aan fusie wordt gedaan omdat het uitmuntend en inspirerend natuurkundig onderzoek is. En vooral: omdat het leuk onderzoek is, van het type waarvan een collega die erover leest kan denken: 'daar zou ik ook wel aan willen werken'.

Over de toepassing hebben we het nu lang genoeg gehad, nu zal ik u op wat fundamentele gedachten brengen.

Ik zei zoëven: de warmtegeleiding van het plasma kunt u niet schatten, daar moet u fundamenteel onderzoek der materie voor doen. En ik zei: dat is inmiddels gebeurd. Dat is niet helemaal correct: dit onderzoek is nog in volle gang. De situatie is namelijk dat we de warmtegeleiding wel goed kunnen meten, en experimenteel hebben uitgevonden hoe we die warmtegeleiding zo klein mogelijk kunnen maken, maar er is geen theoretisch model op basis waarvan we de metingen ook echt begrijpen. Er is een simpele theorie, die overigens al erg ingewikkeld is, en die zit er een factor 10 tot 100 naast. Dat wil zeggen, die theorie voorspelt een waarde van de warmtegeleiding - we noemen dat de klassieke warmtegeleiding - die 100 keer kleiner is dan wat in het experiment wordt gemeten. Deze verhoogde warmtegeleiding wordt 'anomaal transport' genoemd - 'anomaal' omdat we er geen verklaring, dus geen naam voor hebben.

Het anormale transport wordt toegeschreven aan turbulentie. Nu is turbulentie een vlag waaronder een grote variëteit van verschijnselen vaart. Met het label 'turbulentie' hebben we nog niets verklaard en zeker nog geen theorie met voorspellende kracht verkregen. In feite zijn er twee hoofdvormen te onderscheiden in de plasmafysica: elektrische turbulentie en magnetische turbulentie. In het eerste geval zijn er plaatselijk wanordelijk



Figuur 2

(Zie tekst op pagina 17)

Deze figuren illustreren hoe gemakkelijk de loop van de magneetlijnen in een tokamak is te verstoren. De linker figuren stellen de doorsnede door een tokamakplasma voor, waarbij doorsnijdingen van magneetlijnen als gekleurde puntjes zijn weergegeven. De rechter figuren geven precies dezelfde informatie weer in poolcoördinaten.

De ideale situatie, waarin de magneetlijnen geordend zijn in een nest van perfecte oppervlakken, is niet weergegeven, maar zou in de linker figuur een verzameling concentrische cirkels te zien geven en in de rechter figuur een verzameling horizontale rechte lijnen.

Door in het plasma, waarin een elektrische stroom van 100 duizend Ampère loopt, enkele stroomdraden te plaatsen die ieder een stroom van slechts twee Ampère voeren, kan men de oppervlakken al flink aantasten, zoals in de bovenste figuren te zien is. Indien door dezelfde stroomdraden 20 Ampère wordt gestuurd blijft er van de gelaagde structuur niet veel meer over (onderste platen). Dit chaotische gedrag van magneetlijnen kan leiden tot een sterk verhoogd transport van plasmadeeltjes en energie.

(Deze platen zijn het resultaat van computerberekeningen, uitgevoerd door Drs Machiel de Rover in het kader van zijn promotie-onderzoek)

fluctuerende elektrische velden die voor anomale warmtegeleiding zorgen, terwijl het magneetveld onaangetaast blijft. In de tweede vorm zijn het juist de magneetvelden die lokale fluctuaties vertonen.

We zouden een stuk verder zijn als we wisten of de turbulentie in het plasma van elektrische of magnetische oorsprong is. Nu blijkt dat het heel moeilijk is om dit met behulp van proeven uit te vinden. Men verkrijgt slechts indirecte aanduidingen. Typerend voor deze situatie is dan ook het betoog van de bekende Amerikaanse theoreticus Rosenbluth, die zijn overtuiging dat de turbulentie van elektrische aard is, tijdens een lezing kracht bijzette met de stelling: 'If it looks like a duck, and it quacks like a duck, then it probably is a duck'. Ik laat deze zin maar onvertaald, omdat hij met veel popsongs gemeen heeft dat de poëtische kracht ervan bij vertaling verloren gaat.

'If it looks like a duck, and it quacks like a duck, then it probably is a duck'. Dit wordt wel de Duck Theory genoemd. Men hoeft geen Popper te heten om in te zien dat deze theorie maar geringe bewijskracht heeft.

Ik wil u een andere 'theorie' voorstellen, een 'Horse Theory' om de nomenclatuur consistent door te voeren. Het laboratorium is een

buitenpost van de beschaving, gelegen aan de rand van een oerwoud. Onpeilbaar is de diepte van het oerwoud, en er huizen vreemde dieren: eenhoorns, witte olifanten, rode haringen en zwarte schapen.

Er zijn sterke theoretische aanwijzingen dat er in dit woud paarden voorkomen. Niemand heeft ze ooit gezien, maar het biotoop is zo paard-vriendelijk dat het vreemd zou zijn als ze er niet leefden. Stel dat u in dit laboratorium komt te werken als onderzoeker in opleiding en de opdracht krijgt om de paarden te bestuderen. U weet niets van paarden, en weinig van oerwouden, maar vol goede moed gaat u aan de slag. U trekt het oerwoud in. De tocht is moeizaam maar fantastisch interessant, u ziet dingen waarvan u zelfs in uw dromen nog nooit gedroomd hebt. U raakt herhaaldelijk de weg kwijt, u moet improviseren, u lijdt honger, u raakt ondervoed, u slaapt niet, u krijgt koorts, maar dan opeens: tussen het loof vangt u een glimp op van een paard! U noteert snel wat u hebt gezien en maakt zich uit de voeten.

Aan uw supervisor rapporteert u: het paard is erg groot, het heeft enorme oren, en de poten zijn nogal fors. De supervisor hoort dit aan, trekt zijn wenkbrauwen op en stuurt u weer het bos in. De tweede tocht bevestigt de eerdere waarnemingen en deze keer ziet u nog iets bijzonders:

aan de neus van het paard hangt een merkwaardig groeisel. U rapporteert en uw supervisor publiceert een artikel in een vakblad: het voorspelde paard is inderdaad aangetroffen. Het is erg groot, het heeft enorme flaporen, uitzonderlijk dikke benen, en twee staarten. Een gewone staart aan de achterzijde en een anomale staart aan de voorzijde.

Weer bent u getuige van de trage val van een dubbeltje. Want ik kan u verzekeren dat terwijl het voor u in de zaal evident is dat het waargenomen dier geen paard is, het heel lang kan duren voor de wetenschap daar achter is. De theorie heeft een paard voorspeld, en dat maakt het buitengewoon moeilijk voor de onderzoekers om in te zien dat de waarnemingen niet met dit beeld overeenstemmen. Het dier schreeuwt als het ware: ik ben geen paard! Maar de trage geest van de onderzoeker kan niet verder van zijn pad afwijken dan: paard met dikke poten en anomale staart. Het ontwikkelen van een wezenlijk nieuw concept, het accepteren dat de natuur iets heeft voortgebracht dat niet in een bekend vak wil passen - dat zijn processen die veel langer duren dan het uitrekenen van een integraal of het meten van een spectraallijn.

Ik zie een niet gering aantal mensen denken: 'Ik weet best hoe 't zit. Dat paard met die dikke poten en

anomale staart is geen paard, dat is een olifant.' Als u dat denkt, bent u in een val gelopen die ik voor u heb opgezet. U hebt namelijk precies de fout gemaakt waar u zojuist nog smadelijk om moest lachen. Dat is een belangrijk aspect van de trage val van het dubbeltje: de waarneming wordt verminkt door de verwachting.

Want dit is het grote verschil tussen wetenschap beoefenen aan de rand van de kennis, en op safari gaan met een boekje 'Grote zoogdieren' in je tas: in het onderzoek we weten niet wat voor beest het is dat we op het spoor zijn. Als we het wel wisten, was het geen onderzoek wat we deden maar 'elephant spotting'. Daarvoor hoeft u niet naar het oerwoud, daarvoor kunt u naar de dierentuin. Nee, de beschrijving: 'paard met dikke poten en een anomale staart' is in zekere zin helemaal niet zo slecht. Er leven vele dieren in het bos die niemand ooit goed heeft kunnen zien, van vele bestaat slechts het vermoeden dat ze bestaan. Wat mij betreft was het dier in kwestie een eenhoorn en waren die dikke poten een meeftout.

Wat heeft dit met fusie te maken? Ik zal u hetzelfde verhaaltje nogmaals vertellen. Nu in technische termen. Ik begin met een beschrijving van de parallel van het paard.

Ik heb gesproken over magneetlijnen die als gordijnrails door de

reactor lopen. De geladen plasma-deeltjes lopen als runnertjes langs die gordijnrail, en zolang de gordijnrails maar niet tegen de wanden van de reactor aanbotsen, zullen de deeltjes dat dus ook niet doen.

Voordat ik verder ga, moet ik u eerst vertellen hoe die gordijnrail precies loopt: die is namelijk niet willekeurig in de autoband gepropt, maar heel systematisch opgehangen. Dat ziet er als volgt uit. Ik begin met een lijn op de as van de band. Die vormt de kern. Daaromheen wikkel ik een tweede laag. Daarbovenop wikkel ik weer een laag. Enzovoorts.

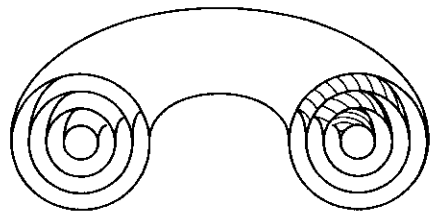
Zo ontstaat een systeem van lagen. Een runnertje kan op een laag overal komen door maar langs de rail te runnen, maar het kan nooit op een andere laag terecht komen. Dit is nu het geheim van de thermische isolatie door magneetvelden: de hete plasmadeeltjes die in het centrum van de kolom zitten, komen nooit aan de rand. Daardoor kan de hete kern zijn warmte niet afstaan aan de koude mantel.

Als u deze kolom doorsnijdt, krijgt u een beeld dat wel iets weg heeft van de doorsnede van een boom met jaarringen. Een soortgelijk plaatje van de doorsnede van het plasma in een tokamak is geschetst in Figuur 1.

Wat u hier ziet is wat ik zou willen noemen het huidige paradigma van de tokamak-kunde. De magneetlijnen liggen keurig gerangschikt op

oppervlakken. Ieder van die oppervlakken heeft zelf de vorm van een autoband. Magnetisch gezien is een tokamak dus een nest van in elkaar passende autobanden. In zo'n systeem is de uitwisseling tussen verschillende lagen minimaal. Deze perfecte oppervlakken zijn het paard in het oerwoud, het centrale paradigma van de tokamakologie.

Velen hebben het paard gesignaleerd, en het paard bleek vreemde eigenschappen te hebben. Een daarvan is: 'anomale warmtegeleiding'. De metingen wijzen uit dat de warmtegeleiding van het plasma de voorspelling met een factor honderd overtreft. De vraag is dus: hoe kan deze verhoogde - anomale - geleiding tussen de lagen optreden? Nu zijn er twee wezenlijk



Figuur 1

Een heet plasma kan worden opgesloten met behulp van een magnetisch veld. Om eindverliezen te voorkomen wordt hiervoor een autobandvormig vat (torus) gebruikt. De figuur geeft de situatie in een Tokamak weer. In het ideale geval ligt elke magneetlijn op een oppervlak dat ook weer een torus is. Zo ontstaat er een nest van in elkaar liggende magnetische tori. Geen enkele veldlijn komt bij de buitenwand van de torus en hierdoor wordt een goede isolatie tussen plasma en buitenwereld bereikt.

verschillende mogelijkheden. Ten eerste: de lagen zijn perfect geordend (dat wil zeggen: het paradigma geldt!) maar de runnetjes kunnen van de gordijnrail af: dit is het geval dat ik als elektrische turbulentie heb aangeduid. Ten tweede: door het optreden van magnetische turbulentie liggen de gordijnrails niet zo netjes op oppervlakken als wij gehoopt hadden: we zijn toe aan een nieuw paradigma!

Argumenten voor mogelijkheid één worden samengevat door de Duck Theory. Ik wil hier niets ten nadele daarvan zeggen. Er is aan dit model veel uitstekend werk gedaan, wat een belangrijk deel van het culturele erfgoed van het fusieonderzoek vertegenwoordigt. Maar ik wil er hier verder niet op in gaan.

De tweede mogelijkheid wil ik wel toelichten. De vraag is: kunnen de magneetlijnen in de war raken, zodat de doorsnede van het plasma in plaats van een doorsnijding van een nest van oppervlakken iets chaotisch te zien geeft? Deze vraag is van belang, want als het laatste het geval is, kunnen deeltjes overal komen zonder hun magneetlijn te verlaten. Met de isolatie is het dan niet best gesteld.

Nu is het zo dat de wiskundige vergelijkingen die de magneetlijnen in een tokamak beschrijven, een algemene vorm hebben waar wiskundigen lang en met succes op

hebben gestudeerd. Deze puur wiskundige studies, uitgevoerd voor de tokamak was uitgevonden, tonen aan dat de magneetlijnen heel gemakkelijk in de war raken. Zo gemakkelijk, dat het in de praktijk onmogelijk is om de goed georganiseerde oppervlakken in stand te houden.

Dat dit zo is kan ik u wel laten zien aan de hand van de kleurenplaten - figuur 2 - die zijn afgedrukt op de middenpagina van dit boekje. Deze zijn gebaseerd op computerberekeningen van magneetlijnen in een tokamak. De figuren op de linker bladzijde laten de doorsnede van een tokamakplasma zien. De gekleurde puntjes geven aan waar magneetlijnen door het oppervlak prikken. Een magneetlijn, die vele malen rond de torus wordt gevolgd, zet steeds een puntje van dezelfde kleur.

In de ideale situatie zou u in dit figuur slechts gekleurde cirkels zien. Wij hebben het plasma echter licht verstoord, door er enkele dunne stroomdraadjes in te zetten die parallel aan de magneetlijnen lopen. In deze draden lieten wij een klein beetje stroom lopen: circa twee Ampère per draad, heel weinig vergeleken met de honderdduizend Ampère die er in het totaal in het plasma loopt. Deze kleine stroompjes zijn voldoende om merkbare schade aan de oppervlakken toe te brengen. U kunt dit zien in de

bovenste figuur op de linker bladzijde. Nog duidelijker is het op de bovenste figuur op de rechter bladzijde, waar precies dezelfde informatie anders is weergegeven: de ideale situatie zou er in dit figuur uit zien als horizontale rechte lijnen.

Men kan uitrekenen dat deze minimale verstoring al voldoende is om een groot deel van de onbegrepen warmtegeleiding te verklaren. Ik wil u echter niet onthouden hoe de situatie wordt als we meer stroom door de draden sturen. Voeren we de gemiddelde stroomsterkte op tot twintig Ampère, nog steeds maar een schijntje van de totale stroom in het plasma, dan verkrijgen we de situatie die in de onderste figuren is weergegeven. Het opbreken van de oppervlakken en door elkaar lopen van verschillend gekleurde magneetlijnen is nu heel opvallend. Een plasma waarin een dergelijke chaos heerst is overigens ernstig ziek.

Wat deze plaatjes u hopelijk hebben laten zien is - behalve dat fysische berekeningen een lust voor het oog kunnen zijn - dat de ideale situatie verschrikkelijk gemakkelijk verstoord kan worden. En dit is precies wat de mathematici al in algemene zin bewezen hadden.

Dit is een goed moment om u te herinneren aan de zon, een grote plasmabol. Deze lijkt op het eerste gezicht misschien homogeen, maar

nadere beschouwing, bijvoorbeeld vanaf een satelliet, leert dat er vele structuren in het zonneplasma leven. Ditzelfde geldt voor vele andere plasma's, of het nu sterren betreft, of de ruimte tussen de sterren, of laboratoriumplasma's met de afmetingen van een speldeknoop: plasma's in een magneetveld hebben de neiging zich in flarden, in filamenten te manifesteren.

Als dit in zoveel plasma's het geval is, wat ligt dan meer voor de hand dan om ook in de tokamak naar filamenten op zoek te gaan? Maar nu komen de moeilijkheden. Ten eerste: de verstoring die nodig was om het magneetveld chaotisch te maken, was buitengewoon klein. Die is in feite niet te meten. Als men wil aantonen dat het veld chaotisch is, zal men een indirecte meting moeten verrichten. Dat kan: omdat het warmtetransport langs magneetlijnen zo snel gaat, zal de temperatuurverdeling in het plasma de loop van de magneetlijnen weerspiegelen. De temperatuurverdeling is wel goed te meten. We moeten dan zoeken naar kleinschalige structuren in de temperatuur. Maar nu komen we op de tweede moeilijkheid: de schaal van de structuren die wij zoeken bedraagt enkele millimeters. En dit moet gemeten worden in een plasma dat een temperatuur heeft van tientallen miljoenen graden. Met een thermometer gaat dit niet, maar men kan wel een dunne straal laserlicht naar

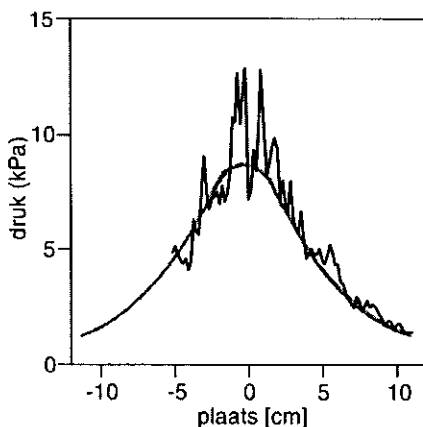
binnen sturen. Het licht dat wordt verstrooid, bevat dan informatie over de temperatuur op het punt van verstrooiing. Op deze manier is het mogelijk de temperatuur in het plasma te bepalen in een volume-elementje van enkele kubieke millimeter. Een dergelijke opstelling hebben we gebouwd op het FOM-Instituut voor plasmafysica Rijnhuizen, en de nauwkeurigheid die we daar halen is een wereldrecord in zowel de plaatsresolutie als de nauwkeurigheid van de temperatuurmeting. Dat wereldrecord, zeg maar een factor tien beter dan de tweede plaats, was nodig om de kleine structuren in de temperatuurverdeling te kunnen zien.

Zoiets kost geld en moeite, maar het was het waard. In figuur 3 is het resultaat weergegeven. Waar binnen het geldende paradigma een mooie gladde temperatuurverdeling zonder kleine structuren was verwacht, lieten de metingen een rijke schakering aan kleinschalige structuur zien. Als je als experimentator na lang ploeteren zo'n meting doet, dan weet je dat je een leuk vak hebt.

Op dit punt aangekomen kunnen we zeggen: dat paard, dat was helemaal geen paard, dat was een... Tja, wat is het wel? Dat is nu de vraag. Ik moet oppassen niet in mijn zelfgegraven kuil te vallen. Want hoewel ik er van overtuigd ben dat

het geldende paradigma van de tokamakologie - het nest van perfecte oppervlakken - niet correct is, heb ik geen kant en klaar alternatief. Wat ons nu te doen staat is: meten, theoretische modellen opstellen, beter meten, verschillende puzzelstukjes bij elkaar zoeken, en langzaam, zo snel als wij kunnen, proberen een nieuw paradigma te formuleren.

Dames en heren,
Aan het eind van mijn verhaal zijn we ook aan het eind van de eeuw



Figuur 3
Bij metingen van de verdeling van de druk in het plasma in de RTP tokamak op het FOM-instituut voor plasmafysica in Nieuwegein, werd voor het eerst voldoende nauwkeurigheid bereikt om aan te kunnen tonen dat het plasma geen homogeen medium is, maar een interessante kleinschalige structuur vertoont (gladde kromme). Deze metingen weerspreken het geldende paradigma in de tokamakologie, namelijk dat de magneetlijnen een nest van perfecte oppervlakken vormen.

aangekomen. Een eeuw geleden dacht men dat de natuurkunde af was - dat was een vergissing. Is de natuurkunde nu wel af? Aan de beleidsmakers zal het niet liggen: zij doen er alles aan om het vak nog deze eeuw tot een afronding te laten komen. Onderzoek moet toepasbaar zijn, de horizon van het onderzoek is kunstmatig vastgesteld op een jaar of vijf: in het jaar 2000 moet de natuurkunde af zijn.

Dames en heren, wat dit betreft heb ik goed nieuws voor u. De fysica van hete plasma's zal in het jaar 2000 niet af zijn. We weten wel heel veel, maar we weten vooral dat de rijke fenomenologie van plasma's moeilijk te doorgronden is en dat turbulentie moeilijk te beschrijven is. Maar het vakgebied heeft, behalve de intellectuele uitdagingen, de praktische toepassingen (energieproductie) en de spin-offs, een droom. Waar wij aan werken is een brandend plasma. En dit is een geheel nieuwe toestand van de materie, die op aarde nog nooit gerealiseerd is.

Is dit interessant? Laat ik die vraag beantwoorden met een vergelijking. Stelt u zich een primitieve mens voor die zit te rillen in zijn klamme grot. Voor hem ligt een grote stapel hout. Hij denkt: 'theoretische studies hebben aangetoond dat hout, na ontstoken te zijn, kan branden. Naar verwachting zal er dan warmte vrij komen. Daarmee zou ik mijn grot

kunnen verwarmen. Misschien zijn er nog toepassingen waar ik op dit moment niet aan denk, maar een garantie heb ik niet. Het kan jaren duren voor ik het stoken van een vuurtje goed onder de knie heb. Bovendien zal het wel een hoop rotzooi maken. Ik vraag me af of het alle moeite wel waard is.' Dit was geen homo ludens of homo technicus, maar een homo politicus. Hij zal blijven rillen.

Om mijn aanstekker erbij te nemen: we kunnen het gas laten stromen en dromen over wat er zou gebeuren als we een vonk in de gasstroom zouden laten springen. In plaats van dromen kunnen we de vlam ook daadwerkelijk aansteken. Ik denk dat dat laatste leuker is.

Dames en heren,
Het is leuk om professor te zijn. Hoe je het wordt, dat zou ik u niet precies kunnen vertellen, maar het is voor een groot deel het gevolg van de inspanning van anderen. Enkelen wil ik met name noemen.

Mijn hele werkzame leven heb ik al het gevoel dat een wielrenner op de baan moet hebben die een ronde voorsprong op de rest heeft: hij hoeft alleen maar ontspannen met de anderen mee te fietsen om alle prijzen te winnen. Die ronde voorsprong, die heb ik zonder twijfel aan mijn ouders te danken.

Mijn vak heb ik geleerd van velen, in binnen- en buitenland, en daaruit een selectie te maken is moeilijk. Ik heb het geluk twee bazen te hebben, beiden uitmuntende fysici, met stijlen van management die niet meer van elkaar hadden kunnen verschillen. Van beiden, de hooggeleerden Van der Wiel en Schüller heb ik veel geleerd. Marnix van der Wiel wil ik hier bedanken voor de sterke opwaartse druk die hij op mijn carrière heeft uitgeoefend. Hij heeft als het ware mijn interesse in wetenschappelijke competitie

gewekt, en zijn ontledende vragen naar de essentie van mijn onderzoek hebben mij vaak tot nieuwe inzichten geleid. Chris Schüller is in veel opzichten mijn leermeester, aan wie ik veel te danken heb. Ik bewonder de wijze waarop hij, met een diep gevoeld enthousiasme voor de natuurkunde in het algemeen en de plasmafysica in het bijzonder, telkens nieuwe lijnen van onderzoek initieert. Hij is zonder twijfel een van de vaders van het onderzoek naar de magnetische structuren in fusieplasma's waarover ik gesproken heb.

Tot die vaders reken ik ook de hooggeleerde Schram, Daan Schram, die al decennia geleden speelde met de gedachte dat een tokamakplasma als een bundel stroomvoerende plasmadraden kon worden beschreven. De nu frequenter geworden discussies met hem zijn voor mij een bron van inspiratie en ik zie uit naar nog vele jaren van samenwerking.

Werken op Rijnhuizen heeft altijd betekend: kunnen rekenen op maximale coöperatie. Tussen de groepen bestaat een gezonde rivaliteit, maar belangrijk is vooral de eensgezindheid om gezamenlijk het beste uit het lab te krijgen. Ik denk dat Rijnhuizen daarin uniek is. In mijn directe collega's, de zeer geleerde heren Oomens en Donné, Noud en Tony, groepseiders in de Fusie-afdeling, wil ik alle medewer-

kers van Rijnhuizen dank zeggen. Rijnhuizen is een fantastisch laboratorium, en ik hoop dat dat nog lang zo zal blijven.

Ik dank het bestuur van Stichting Universiteitsfonds Eindhoven, dat mij benoemd heeft, alsmede de hooggeleerden Sluijter en Hagedoorn, die mijn benoeming feitelijk tot stand brachten en de opduikende technische problemen adequaat uit de weg ruimden. Ook de heer Pasmans, directeur van de faculteit, wil ik hier bedanken voor de bijzonder prettige en open wijze waarop hij de zakelijke aspecten behandelt.

Mijn voorganger, de hooggeleerde Ornstein, heeft als eerste bekleder van deze leerstoel met zijn grote kennis, inzet en enthousiasme de toon gezet. Het was een groot voordeel om in het door hem gespreide bed te stappen, en het is een uitdaging voor mij om een college te verzorgen dat het zijne in aantrekkingskracht op studenten benadert.

Voorts dank ik alle collega's van de faculteit die mij betrokken hebben bij het onderzoek in de faculteit en behulpzaam zijn geweest bij het uitvoeren van de voor mij nieuwe taken, zoals het zitten in promotie- en examencommissies, het invullen van tentamenbriefjes, enzovoorts. Deze nieuwe contacten betekenen voor mij een horizonverbreding die

ik als een van de grote voordelen van mijn aanstelling ervaar.

Tenslotte richt ik een bijzonder woord van dank tot alle OIO's die onder mijn leiding werken of hebben gewerkt: zij doen het werkelijke onderzoek, zwerven hongerig en achter hun slaap door het oerwoud op zoek naar die eenhoorn van mij. Zij doen dat zo snel als zij kunnen. En dat is heel snel.

Ik heb gezegd.

Vormgeving en druk:
Reproductie en Fotografie van de CTD
Technische Universiteit Eindhoven

Informatie:
Academische en Protocollaire Zaken
Telefoon (040-247)2250/4676

ISBN 90 386 0307 X



Niek Lopes Cardozo (1957) studeerde experimentele natuurkunde in Utrecht. Na zijn afstuderen in 1981 ging hij werken op het FOM-Instituut voor plasmafysica Rijnhuizen, waar hij in 1985 promoveerde. Er volgde een postdoc-periode op het Europese project JET (Joint European Torus) in Culham (Engeland). In 1987 keerde hij terug op Rijnhuizen als leider van de transportfysica-groep. In de afgelopen jaren heeft de speurtocht naar magnetische structuren in hete plasma's in het centrum van zijn belangstelling gestaan. Behalve door FOM en Euratom wordt dit onderzoek ondersteund door NWO met een PIONIER subsidie en door de TUE. Sinds 1 januari 1994 is hij aan deze technische universiteit verbonden als bijzonder hoogleraar vanwege de Stichting Universiteitsfonds Eindhoven.