

Magnetische valkuil voor waterstofatomen

R. van Roijen, Natuurkundig Laboratorium der Universiteit van Amsterdam.

Beschreven wordt de vervaardiging van een stelsel supergeleidende spoelen die gezamenlijk een magnetisch veld opwekken met een minimum veldsterkte in de kern van het veld. Dit stelsel maakt deel uit van een experimentele opstelling voor quantummechanische proeven op macroscopisch niveau.

Inleiding

Het waterstofatoom is in zijn eenvoud fascinerend. Ook een verzameling waterstofatomen, mits geschikt geconditioneerd, gedraagt zich in veel opzichten als een bijna ideaal systeem geschikt voor het testen van macroscopische quantum-eigenschappen [1]. Het waterstofatoom bestaat uit een elektron en een proton, maar in een gas verenigen zij zich tot moleculaire waterstof: H_2 . Door de atomen echter bij lage temperatuur in een sterk, statisch magnetisch veld te brengen worden zij gepolariseerd, waardoor hun stabiliteit wordt vergroot en hun neiging om moleculen te vormen sterk is verminderd.

Dit stabiliseren brengt een deel van de atomen in een energietoestand die men kenmerkt door "spin-up" ($H\uparrow$) en een deel in een toestand "spin-down" ($H\downarrow$). In een magnetisch veld trekken de $H\downarrow$ -atomen naar het sterkste deel van het veld, het zijn "hoogveld-zoekers". Het creëren van een stabiel magnetisch veldmaximum in de vrije ruimte, nodig om $H\downarrow$ te vangen is fysisch echter niet mogelijk, hetgeen blijkt uit de veldvergelijkingen van Maxwell. Daarentegen zijn de spin-up-atomen "laagveld-zoekers" en daar in de vrije ruimte wél een veldminimum kan worden gemaakt, is de weg vrij voor experimenten met een gas van spin-up-atomen. Bij temperaturen in de buurt van het absolute nulpunt, het

milli-kelvin gebied, vertoont een dergelijk gas eigenschappen die alleen met behulp van de quantummechanica kunnen worden verklaard. Van de gebruikte experimenteeropstelling wordt het cryogene spoelensysteem beschreven dat zorgt voor een geschikt veldminimum dat $H\downarrow$ vangt en kan vasthouden zonder dat het de wand van de meetcel raakt.

Valkuil

Het veld dat wordt gebruikt als magnetische valkuil is een combinatie van een quadrupoolveld (vierpool-) in het radiale- of XY-vlak van een experimenteelcel, en een dipoolveld (tweepool-) in zijn langs- of Z-richting; schematisch afgebeeld in *figuur 1*. Het quadrupoolveld heeft in het centrum een nul-minimum en het dipoolveld heeft op de Z-as tussen de opwekkende spoelen een niet-nul-minimum. In de Z-richting bevindt zich aan één zijde van de eigenlijke valkuil nog een gebied met een veel hogere veldsterkte.

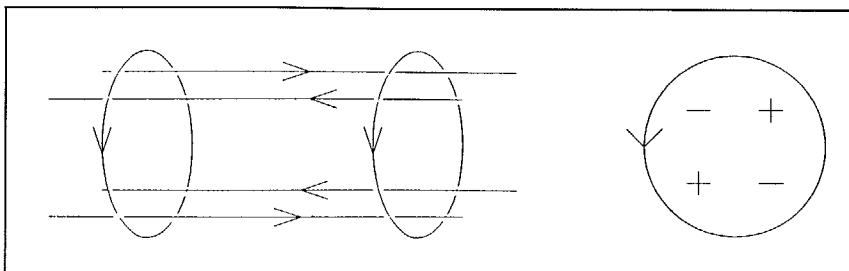
Het quadrupoolveld wordt opgewekt door vier, naar hun uiterlijke vorm zogenoemde, racetrack-spoelen, zie *figuur 2*.

Het rechte stuk van een racetrack is 150 mm lang, en de dradenbundels zijn 10 bij 10 mm. De binnenmaat tussen binnen- en buitenbeen is 25 mm. De spoelen zijn gewikkeld van multifila-

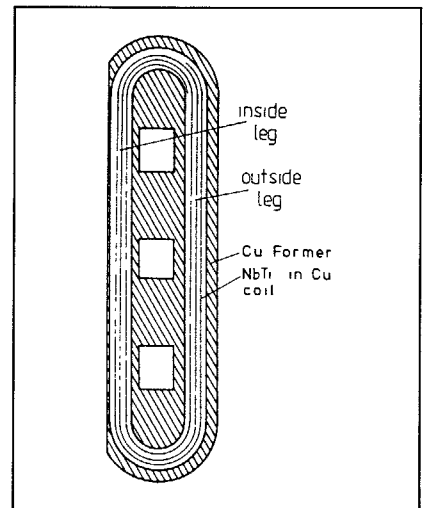
ment, niobium-titaan, supergeleidend draad in een kopermatrix (Vakuumschmelze F54, 0,2 mm) en de spoelhouders zijn geheel van zuiver, zuurstofvrij koper om mechanische spanningen door een verschil in uitzetting met de draad te vermijden. Tijdens het wikkelen wordt de draad onder een nogal hoge spanning gehouden, >10 N, omdat de supergeleider vrij stug is, waarbij de draad tevens langs een watje met 2-propanol wordt geleid om hem te ontvetten.

Na het wikkelen worden de spoelhouders gesloten met koperen strips met behulp van schroeven in de houderflenzen. De houders blijven aan één zijde open, namelijk de zijde die zal grenzen aan de experimenteelcel. Om de spoel te kunnen impregneren wordt ook die zijde met een hulpstrip lekdicht gesloten.

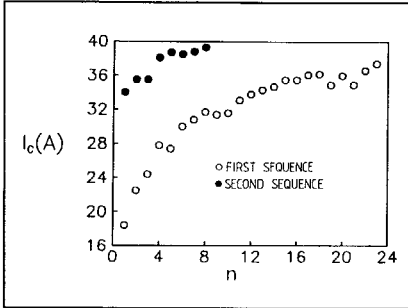
De gebruikte techniek is vacuüm-impregnatie, dat wil zeggen de spoel wordt leeggepompt waarna we er een vulmiddel laten inzuigen. Gekozen is voor Stycast 1266 epoxyhars omdat we goede ervaringen met dit materiaal hebben bij lage temperaturen. Gangbaar is hiervoor een "zacht" materiaal te gebruiken, zoals was [2]. Wij zagen daarvan af omdat de spoelhouder na het impregneren weer moest worden opengemaakt en gemonteerd en de vrees bestond voor beschadiging van een dergelijk zacht vulmiddel. Er zijn echter goede ervaringen bekend bij



Figuur 1 Schematisch het stromenpatroon voor het creëren van een niet-nul minimum magnetisch veld. Het arrangement van de vier parallelle geleiders staat bekend als de Joffe-bar geometrie.

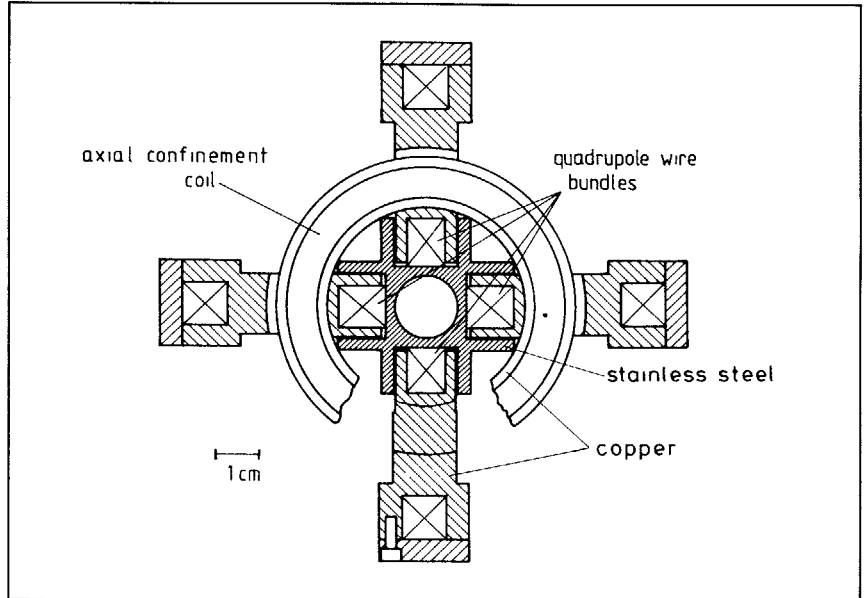


Figuur 2 Een "racetrack"-spoel met drie doorlaatopeningen voor de dipoolspoelen.

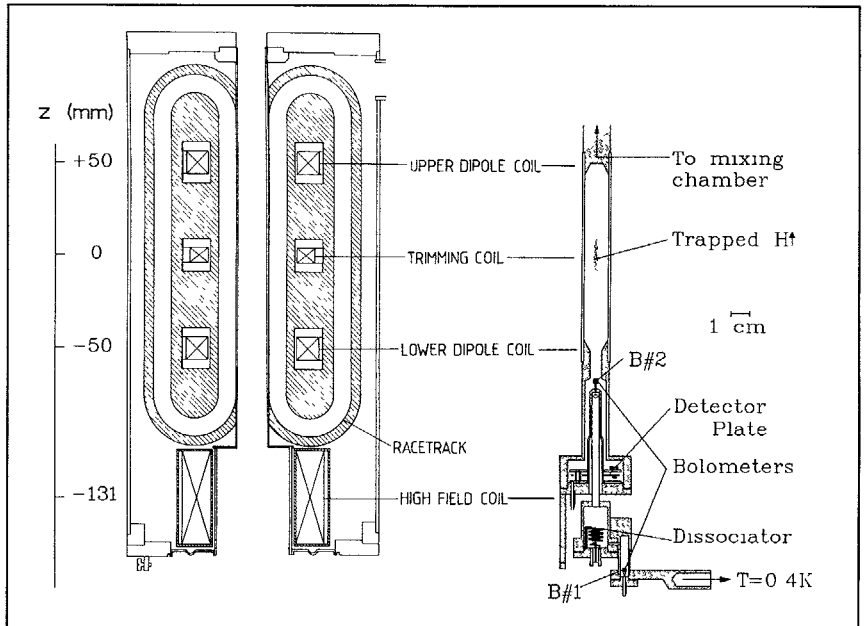


Figuur 3 De kritische stroomsterkte (verticaal), en daarmee het praktisch bruikbare magnetische veld loopt op na een aantal "quenches" (horizontaal), dat is het opvoeren van de stroomsterkte tot de supergeleiding verdwijnt

het wikkelen van spoelen met het veel hardere Stycast 2850 Deze methode laat echter niet toe dat de spoel eventueel gedeeltelijk wordt afgewikkeld en opnieuw gewikkeld zoals wij enige malen hebben gedaan Om te impregneren met een visceuse vloeistof, zoals Stycast, moet ervoor worden gezorgd dat er voldoende openingen zijn waar het kan doorstromen om alle ruimten tussen de wikkelingen op te vullen Door de Stycast onder atmosferische druk naar binnen te persen verkrijgen wij volledige impregnatie Na het vullen wordt de epoxy acht uur gehard op 60 °C en vervolgens twee uur nagehard op 90 °C Het naharden is essentieel gebleken voor het bereiken van een hoge kritische stroom Alvorens de racetracks in de magnetische valkuil te bouwen worden zij afgekoeld tot zij supergeleidend zijn en dan "getraind", wat inhoudt dat de stroom wordt opgevoerd tot de magneet "quenched", dat is normaal geleidend wordt en zijn energie dissipeert in ohmse warmte. Supergeleidende magneten, en vooral niet-sole-noiden zoals deze, quenchen vaak bij (veel) lagere stroomsterkte dan men verwacht op grond van de opgewekte veldsterkte en de door de fabrikant opgegeven "short sample" kritische stroom van de draad Een sluitende verklaring voor dit probleem is er nog niet, maar men denkt dat het heeft te maken met de energie die vrijkomt als een draad beweegt onder invloed van het veld. In *figuur 3* is te zien hoe de kritische stroom toeneemt bij opeenvolgende quenches. Na de tweede cyclus zien wij geen terugval van de kritische stroom onder het door ons gewenste niveau van 36 A. In alle racetracks hebben wij tenminste 85% van de door de fabrikant opgegeven kritische stroomwaarde bereikt. De vier racetracks, die zeer nauwkeurig identiek zijn vervaardigd, worden radiaal in een centraal juk geplaatst, zie *figuur 4* Wij kozen deze opstelling

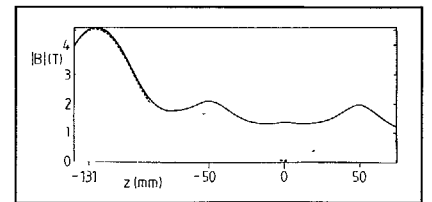


Figuur 4 Bovenaanzicht van de valkuilmagneten, gemonteerd in een roestvaststalen juk voorzien van een boring voor de experimenteer cel De vier binnenste draadbundels van de racetracks produceren het quadrupoolveld De bovenste axiale opsluitspoel is getekend



Figuur 5 Doorsnede van de valkuil in zijn vacuumbehuizing. Rechts de experimenteer cel die in de valkuil wordt geschoven Links is aangegeven de positie van de horizontale as van *figuur 6*

vanwege de radiale symmetrie en om niet-quadrupool velden te vermijden De kleinste afstand tussen twee tegenoverliggende racetracks is 18 mm, de boring in het juk is 16 mm De stroom loopt parallel in een diametraal paar en daaraan tegengesteld in het andere paar De racetracks staan elektrisch in serie Omdat zij, bij volledig veld, een kracht van 3200 N naar buiten onder vinden en ook de druk binnen een draadbundel groot is, is het centrale juk gemaakt van roestvaststaal waaraan zij zijn vastgezet met behulp van schroeven en messing segmenten. Het axiale opsluitingsveld wordt op-



Figuur 6 Verloop van de magnetische veldsterkte (verticaal) langs de Z-as van de cel (horizontaal). Bij -130 mm de piek van de stabilisatiespoel, bij -50 mm de piek van de onderste - en bij +50 mm de iets lagere piek van de bovenste opsluitspoel De streepjeslijn is het veld langs de as van de cel en de getrokken lijn is het laagste veld langs de wand

gewekt door twee dipoolspoelen met een inwendige diameter van 48 mm, op een onderlinge afstand van 100 mm. De spoelen lopen tussen het binnen- en buitenbeen van de racetracks door, en zijn gewikkeld van het supergeleidend Niomax A60/25 van Vakuumschmelze. Het wikkelen gebeurt met speciaal gereedschap, waarbij het juk en de racetracks stil staan en een dipoolspoelhouder met behulp van rollen de draad opwikkelt. De dichtingsstrip aan de omtrek bestaat uit segmenten vastgezet met schroeven in de spoelhouderflenzen. Het impregneren is hier gedaan tijdens het wikkelen, met Stycast 1266. De dipoolspoelen produceren velden ver beneden hun kritische veld, van respectievelijk 1,5 T op $Z = +50$ mm en 1,7 T op $Z = -50$ mm, aangegeven in *figuur 5* links. Het veld op $Z = -50$ mm is iets sterker op een kuil in het uiteindelijke veldprofiel te verkleinen; zie *figuur 6*.

Midden tussen de dipoolspoelen is nog een zwakkere spoel gewikkeld, ook met een diameter van 48 mm, om het veldminimum aldaar te kunnen variëren.

Onder dit geheel is een grotere solenoïde geplaatst, lengte 50 mm en diameter 44 mm, gewonden van Vakuumschmelze F54 0,3 mm draad, en vacuüm-geïmpregneerd met Stycast 1266. Met een stroom van 35 A wordt een veld van 4,5 T opgewekt.

Opstelling

Een doorsnede van het gehele stelsel, in een roestvaststalen tank, is te zien in *figuur 5*.

Op de plaats van de grote solenoïde bevindt zich in de experimenteer cel een zogenaamde dissociator, die door middel van een ontlading vast H_2 van de wand bij lage temperatuur ontleedt in atomen die vervolgens door het hoge veld als $H\downarrow$ en $H\uparrow$ worden gestabiliseerd.

De boring waarin de experimenteer cel – rechts in *figuur 5* – wordt geschoven is 16 mm. Om zoveel mogelijk van het quadropoolveld te benutten is de afstand tussen de racetracks en de boring zeer klein gehouden: 1 mm. Merk op dat de tank met slechts twee (indium) vacuumdichtingen is gesloten. Om het mogelijk te maken deze één voor één aan te draaien zonder ergens een scheur te veroorzaken, is de constructie flexibel gemaakt. De flens die de grote boring van de onderste magneet verbindt met het kleinere gedeelte van de valkuil is van zeer dunne roestvaststalen plaat gemaakt die bovendien over de buitenrand stulpt, waardoor een balgje wordt gevormd. De onderste flens van de tank is eveneens vrij dun en voorzien van een verende ril.

Gedurende het experiment zijn de spoelen met een supergeleidende schakelaar kortgesloten. Deze bestaat uit een supergeleidende kortsluitver-

binding die aanvankelijk met behulp van een verwarmingsspiraalte bovenkritisch wordt gehouden^[3]. Hierdoor vloeit er in de cryostaat alleen niet-dissiperende stroom, hetgeen de verdamping van helium uit het hoofdbad beperkt. Deze zelfgebouwde schakelaars leiden tot minder dan 3% stroomverlies in zestien uur, en overleefden herhaalde, opzettelijke magneet-quenches bij tests.

De absolute waarde van het quadropoolveld, gezien vanuit de as, neemt tot 5 mm lineair toe met 0,2 T/mm, daarna wordt de toename niet-lineair. In *figuur 6* is de absolute waarde van alle velden tezamen afgebeeld.

De beschreven valkuil voorkomt contact, en daardoor warmte-uitwisseling, met het wandmateriaal van de experimenteer cel.

Het betekent een nieuwe techniek om onderzoek te doen aan een gas in het milli-kelvin gebied. Mede met behulp van nieuwe koeltechnieken kan het mogelijk worden om bepaalde, voorspelde quantumverschijnselen waar te nemen.

Literatuur

- [1] R. van Royen, Proefschrift Nat. Lab. Universiteit van Amsterdam
- [2] P.F. Smith e a., Cryogenics 201, april 1975
- [3] J.S. Mosk, The design, building and testing of a superconducting switch, Nat. Lab. Universiteit van Amsterdam 1988.

Vervanger voor cadmium-geel als kleurstof

De vakgroep Polymeertechnologie van de Technische Universiteit Delft werkt aan een alternatieve kleurstof die het gebruik kan terugdringen van het schadelijke metaal cadmium als kleurstof in allerlei verpakkingen. Begin volgend jaar denken de onderzoekers het nieuwe pigment te hebben ontwikkeld. Voor cadmium-rood (cadmiumselenide $CdSe$) is de Delftse vakgroep Chemische technologie op zoek naar een vervangende kleurstof. In plaats van het huidige cadmiumsulfide (CdS), dat kunststoffen geel kleurt maar in het milieu zeer slecht afbreekt, werkt de Faculteit Scheikundige Technologie en Materiaalkunde aan een "gedoopt" zirkoonsilicaat

($ZrSiO_4$) Colorsil BV uit Schijndel ontwikkelde dit anorganisch pigment. Het is van nature wit. Door het te "dopen" verkreeg men een uitstekend geel pigment. Via deze techniek wordt een vreemd (in dit geval kleurend) element in het kristalrooster van het silicaat ingebouwd.

De ontwikkeling van de alternatieve kleurstof is gestimuleerd door de overeenkomst die Heineken in het recente verleden met de milieu-organisaties heeft gesloten over het gebruik van cadmium in zijn bierkratten. Met steun van het Ministerie van Economische Zaken laat Colorsil nu in Delft onderzoeken hoe het nieuwe pigment in kunststoffen kan worden verwerkt. De scheikundige technologiëen aan de universiteit hebben flink wat ervaring met het hechten van anorganische deeltjes in kunststoffen. Zo is bekend dat met de verwerking van pigment in

plastics doorgaans de stijfheid van het materiaal stijgt. Tegelijkertijd neemt de slagsterkte echter af. Dit wordt nu onderzocht voor met zirkoonsilicaat gekleurde kunststoffen. Ook wordt bij kunststoffen die met het nieuwe pigment zijn gekleurd de stabiliteit getest, onder invloed van vocht, licht en temperatuur.

Colorsil verwacht de pigmentvervanger voor cadmium-geel al in 1990 op commerciële basis op de markt te kunnen brengen. In dat jaar mag het zware metaal cadmium, dat sinds twee jaar op de zwarte lijst staat, niet meer worden toegepast.

Voor meer informatie over dit onderzoek of contact met de firma Colorsil BV kunnen persvertegenwoordigers contact opnemen met Ron Korevaar, wetenschapsvoorlichter bij de Dienst In- en Externe Communicatie TU Delft. Tel 015-785454.