

## Vijftig jaar in de kou

**Citation for published version (APA):**

Waele, de, A. T. A. M. (2010). *Vijftig jaar in de kou*. Technische Universiteit Eindhoven.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/2010

**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](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

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

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Afscheidscollege  
prof.dr. Fons de Waele  
29 januari 2010

A portrait of an older man with glasses, wearing a grey jacket over a striped shirt, against a blue background. A thin red diagonal line runs from the top left towards the bottom left.

/ Faculteit  
Technische Natuurkunde

**TU** / **e** Technische Universiteit  
Eindhoven  
University of Technology

# Vijftig jaar in de kou

Where innovation starts

Afscheidscollege prof.dr. Fons de Waele

---

# Vijftig jaar in de kou

Uitgesproken op 29 januari 2010  
aan de Technische Universiteit Eindhoven



# Inleiding

Het Kamerlingh Onnes Laboratorium in Leiden is wereldberoemd geworden doordat daar voor het eerst helium vloeibaar werd gemaakt bij een temperatuur van  $-269^{\circ}\text{C}$  ofwel 4,2 kelvin, 4,2 graden boven het absolute nulpunt[1]. Dat gebeurde in 1908, nu dus ruim honderd jaar geleden. Deze gebeurtenis is in het jaar 2008 uitbundig herdacht. In het kader daarvan is mij bij verschillende gelegenheden gevraagd iets te vertellen over wat er op die historische dag is gebeurd en de gevolgen die dat heeft gehad. Tot mijn verwondering bleek dat ik veel van wat ik te vertellen had zelf had meegemaakt om mij vervolgens te realiseren dat ik ruwweg de helft van die 100 jaar zelf in het vak heb gezeten!

In mijn afscheidscollege wil ik nogmaals terugblikken op het verleden, maar nu meer vanuit het perspectief van het werk in de groep Lage Temperaturen in Eindhoven. In de groep is gewerkt aan tal van onderwerpen. Ik noem koeltechnieken, microcalorimetrie, tunneling in hoge-Tc supergeleiders en elektronen op helium. Ik moet mij in dit college helaas beperken en zal mij concentreren op koeltechnieken. Ik begin bij Kamerlingh Onnes en zal vervolgens de verdere ontwikkelingen schetsen van de groep en van het vakgebied in het algemeen. Het wordt dus een persoonlijk getint verhaal. Ik ga ervan uit dat u dat bij deze gelegenheid ook van mij verwacht. Als ex-opleidingsdirecteur zal ik uiteraard ook aandacht besteden aan enkele onderwijsperikelen.

# Onderzoek

## Voorgeschiedenis (1908 tot 1965)

Na het behalen zijn grote succes op 10 juli 1908 was Kamerlingh Onnes ingestort en zat aan huis gekluisterd. Een groot gevoel van euforie had zich van hem meester gemaakt. En toch was hij niet helemaal tevreden. Wat was het geval? Om half negen 's avonds van die 10<sup>e</sup> juli, toen er nog een klein beetje vloeibaar helium over was, had hij een poging ondernomen om helium vast te maken. Hij deed dat niet door het helium samen te persen, maar juist door de druk boven de vloeistof te verlagen, dus door de heliumdamp weg te pompen. Door de versnelde verdamping koelt de vloeistof zo ver af dat ze op een bepaald moment vast wordt, zo was het idee. Dat gaat bij alle stoffen goed, maar bij helium lukte het niet. En, zoals zo vaak, was die mislukking de voorbode van een grote ontdekking. Wat bleek namelijk? Helium wordt bij gewone drukken niet vast, maar blijft vloeibaar tot het absolute nulpunt. Als zodanig is helium uniek. Het wordt pas vast bij drukken boven 25 bar.

Kamerlingh Onnes bereikte bij het afpompen van het helium een temperatuur van 1,7 K. We weten nu dat het helium, bij deze lage temperatuur, niet alleen vloeibaar is maar bovendien, als vloeistof, in een unieke toestand verkeert. Helium, beneden 2,17 K (het zogenaamde lambdapunt), is supervloeibaar, is superfluïde. Het duurde tot 1938 vooraleer deze toestand als zodanig werd herkend[2]. Dat is dertig jaar later dan toen Kamerlingh Onnes, per ongeluk dus, het vloeibare helium in deze toestand had gebracht! Waarom duurde dat zo lang? Omdat de toestand van superfluïditeit zo vreemd, zo tegen onze intuïtie is, dat we hem niet willen zien, zelfs al drukken de experimenten ons met de neus op de feiten. Wat is er zo bijzonder aan deze toestand? Als helium superfluïde is kan het stromen door heel kleine poriën. Die poriën mogen zo nauw zijn dat gewone vloeistoffen er niet doorheen kunnen. Het blijkt dat superfluïde helium er dan juist heel goed doorheen kan. Als we een draaikolk maken in superfluïde helium blijft die bestaan zolang we het helium maar beneden 2,17 K houden.

Iets vlotter verliep de ontdekking van de supergeleiding. Dit verschijnsel, waarbij de elektrische weerstand van een metaal helemaal nul wordt als het beneden een bepaalde temperatuur (de zogenaamde kritische temperatuur) wordt afgekoeld, is bij toeval ontdekt door diezelfde Kamerlingh Onnes in het jaar 1911[3].

Het verschijnsel supergeleiding in geleiders lijkt in alles op superfluiditeit in helium. Ook hier kan een vloeistof, in dit geval gevormd door de elektronen in een geleidend materiaal, zonder weerstand door een draad stromen. Ook hier was, na de ontdekking van de supergeleiding, sprake van een zekere teleurstelling. Ik kan me voorstellen dat Kamerlingh Onnes moet hebben gefantaseerd over de mogelijkheden van supergeleiding: verliesloos energietransport, verliesloze motoren, verliesloze elektromagneten, enz. Nee dus. Het bleek al snel dat supergeleiders een tamelijk lage kritische stroom hebben. Als door de draad een stroom gestuurd wordt die hoger is dan de kritische stroom vertoont de draad weerstand en treden toch weer verliezen op. Bovendien is het natuurlijk lastig dat supergeleiding pas optreedt beneden ruwweg 10 K. Maar de optie van verliesloze machines is de wetenschap blijven uitdagen. Sinds 1911 is men blijven proberen zowel de kritische stroom als de kritische temperatuur hoger te maken. In de vijftiger jaren zijn grote successen geboekt in het verhogen van de kritische stroom waardoor het momenteel inderdaad mogelijk is verliesloze sterke magneten te bouwen zoals die nu worden toegepast in MRI-apparatuur. Ik kom daar later op terug en ook op de ontdekking van de hoge-Tc supergeleiding.

### **De zestiger jaren**

Dames en heren, ik ben in september 1961 gaan studeren in Leiden. De hele studie, colleges, practica, afstuderen, promotie, voltrok zich in het Kamerlingh Onnes Laboratorium. Wat ik mij als jongerejaars destijds niet realiseerde (voor een student, die niet beter weet, is alles normaal) was dat er, zo rond 1963-67, weer een aantal zeer vooruitstrevende experimenten, uniek in de wereld, aan de gang waren in het Kamerlingh Onnes Laboratorium. Ik denk hier aan de experimenten op het gebied van het Josephson-effect[4] en de mengkoeler[5]. Beide onderwerpen waren geïnitieerd door mijn latere promotor De Bruyn Ouboter. Het Josephson-effect was in 1962 voorspeld door Josephson, hoe kan het ook anders. Dat gebeurde in het kader van zijn promotieonderzoek. Josephson kreeg de Nobelprijs voor natuurkunde in 1973 op 33-jarige leeftijd. Hij was daarmee een van de jongste Nobelprijswinnaars. Het Josephson-effect treedt op als twee supergeleidende stukjes metaal zachtjes tegen elkaar worden gedrukt. De kritische stroom van zo'n contact is erg klein. Als door dat contact een elektrische stroom wordt gestuurd die groter is dan de kritische stroom dan treden er heel bijzondere verschijnselen op. Zo zendt het contact radiogolven uit met een frequentie die evenredig is met de spanning over het contact. Als de spanning verdubbelt dan verdubbelt dus ook de frequentie. De factor die de relatie geeft tussen spanning en frequentie is een universele constante en is zeer nauwkeurig bekend.

Op zich is het feit dat zo'n contact straling uitzendt al spectaculair, maar het wordt nog mooier als we de twee supergeleiders niet op slechts één punt contact laten maken, maar op twee. We krijgen dan een dubbelcontact, ook wel SQUID<sup>1</sup> genoemd. Door de supergeleiders en de contacten wordt een oppervlak omsloten waar we een magneetveld op kunnen zetten. Als we een stroom door het dubbelcontact sturen die groter is dan de kritische stroom ontstaat er een elektrische spanning over het dubbelcontact die een periodieke functie is van het magneetveld. De periode in het magneetveld is heel erg klein waardoor de SQUID een zeer gevoelige magneetvelddetector is. Er kunnen zeer kleine signalen mee gemeten worden, bijvoorbeeld van het hart of van de hersenen. Het Josephson-effect was mijn promotieonderwerp.

Ik had het over een tweede onderwerp dat in Leiden bestudeerd werd in de zestiger jaren, namelijk de mengkoeler. Als we een schepje suiker in hete koffie doen dan koelt de koffie af met een halve tot een hele graad omdat de suiker van zichzelf kouder was dan de koffie. Maar het geheel koelt ook nog verder af (met 0,1 tot 0,2 graad) omdat het oplossen van de suiker energie kost die onttrokken wordt aan de vloeistof. Van dit laatste effect wordt gebruik gemaakt in de mengkoeler. De naam deed dat al vermoeden. In een mengkoeler worden niet suiker en koffie gemengd maar <sup>3</sup>He en <sup>4</sup>He. Dit zijn de twee stabiele isotopen van helium: <sup>3</sup>He heeft een atoomgewicht van drie en <sup>4</sup>He van vier. Bij kamertemperatuur hebben de twee isotopen bijvoorbeeld een verschillende geluidssnelheid, maar verder verschillen ze niet zo veel. Dat wordt anders bij lage temperaturen. Zo wordt <sup>3</sup>He pas superfluïde bij 2 millikelvin en <sup>4</sup>He bij 2,17 K. Ook de thermische eigenschappen verschillen bij lage temperaturen aanzienlijk. En daar wordt nu gebruik van gemaakt bij mengkoelers. Door <sup>3</sup>He steeds maar rond te pompen en op een plaats te mengen met <sup>4</sup>He en op een andere plaats te ontmengen, wordt de temperatuur lager en lager en worden uiteindelijk temperaturen tot 2 mK behaald.

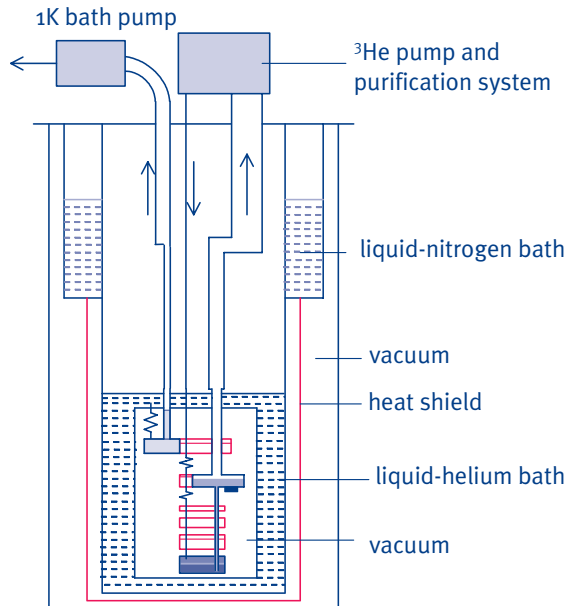
Ik heb destijds het onderzoek aan mengkoelers in het Kamerlingh Onnes Laboratorium van een afstandje gevolgd. En ik moet zeggen, ik benijdde de betrokken promovendus niet. Het was een buitengewoon lastig onderzoek, zeer tijdrovend en kleine successen moesten zwaar worden bevochten. Een groot probleem was onder meer de <sup>4</sup>He component die in deze machines superfluïde is en dus moeilijk door zeer kleine scheurtjes kan stromen: de beruchte superlekken. Keer op keer mislukten experimenten omdat het vacuüm, dat nodig is voor de thermische

---

<sup>1</sup> SQUID is formeel de afkorting van Superconducting QUantum Interference Device, maar het is ook een woordgrapje. Een squid is een inktvis.



isolatie, werd verknoeid door het optreden van deze superlekken. Ik had me destijds vast voorgenomen om onder geen voorwaarde ooit aan deze machines te gaan werken. Toen professor Gijsman me uitnodigde om, na mijn promotie, in Eindhoven aan mengkoelers te gaan werken heb ik geen moment gearzeld en ja gezegd.



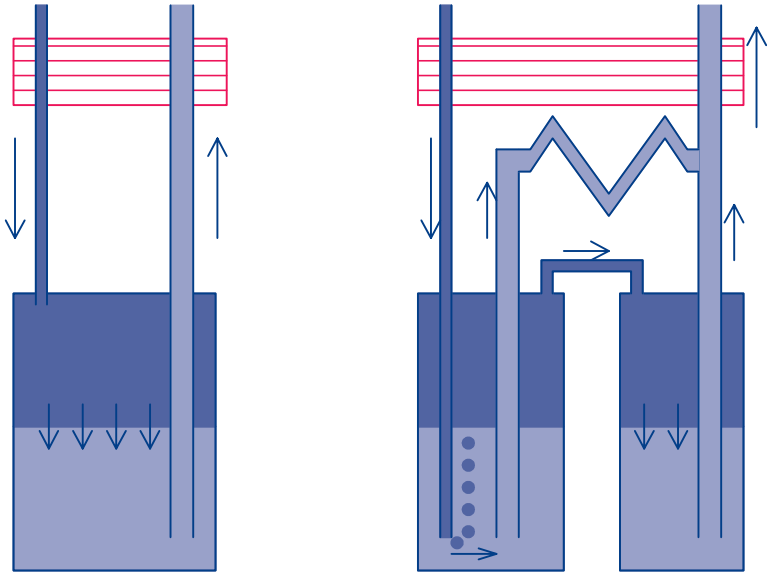
figuur 1

Schematische weergave van een mengkoeler. Hoe hoger in de machine hoe hoger de temperatuur. Het echte mengkoelgedeelte bevindt zich in de vacuümkamer. Donkerblauw is geconcentreerd  $^3\text{He}$  vloeistof, lichtblauw is  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mengsel. De mengkamer bevindt zich onderin de vacuümruimte en is in meer detail te zien in Fig.2 (links).

### Eindhoven I: 1973-1994

Mengkoelers zijn natuurlijk fantastische machines. Ze overbruggen momenteel een temperatuurtraject van 4,2 K naar 2 mK, dus een verhouding van 2100. En dat terwijl in het koude gedeelte geen enkel bewegend onderdeel voorkomt. Behalve dan natuurlijk de stromende vloeistoffen en gassen. Naast de simpele uitdaging om de machines betrouwbaar te construeren, dus met name zonder die gevreesde superlekken, was er destijds de technische uitdaging dat er een barrière voor deze koelers leek te liggen bij acht mK. Acht mK zal voor velen overkomen als best laag, maar voor de ware techneut is geen enkele barrière heilig, dus de vraag was of dat echt niet lager kon. Wij zijn toen op de proppen gekomen met de meervoudige

mengkamer waar het  $^3\text{He}$  in stappen met het  $^4\text{He}$  wordt gemengd en niet in één keer zoals te doen gebruikelijk. Hiermee haalden we (de groep Lage Temperaturen van de TU/e) in een klap 5,5 mK[6].



figuur 2

De rood gearceerde rechthoek stelt een warmtewisselaar voor. Donkerblauw is geconcentreerd  $^3\text{He}$ , lichtblauw is een  $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$  mengsel. In de enkele mengkamer (links) wordt al het  $^3\text{He}$  in één keer verdund. In de dubbele mengkamer (rechts) wordt in de eerste mengkamer slechts 50% verdund. De rest borrelt in de vorm van druppeltjes omhoog en stroomt door naar de tweede mengkamer.

Tegelijkertijd volgde Giorgio Frossati in Grenoble een andere lijn[7]. Hij perfectioneerde de warmtewisselaars en haalde daarmee uiteindelijk 2 mK. Momenteel is 2 mK de algemeen aanvaarde limiet van mengkoelers. Lager kan wel, maar is lastig. Naast het uitbreiden van het temperatuurgebied is het natuurlijk ook van belang de machines zo eenvoudig mogelijk te maken. In dat verband hebben we aangetoond dat mengkoelers ook kunnen opereren zonder een bepaalde voor-koeltrap, het zogenaamde eenkelvinbad[8].

Naast de technische aspecten van ‘Hoe komt het lager?’ en ‘Hoe kan het eenvoudiger?’ waren er de meer wetenschappelijke aspecten: ‘Hoe beweegt  $^3\text{He}$  door het superfluïde  $^4\text{He}$ ?’ en ‘Hoe zit de mengkoeler thermodynamisch in elkaar?’. Al die dingen werden destijds niet goed begrepen en daarin zijn wij actief geweest.

Richten we onze blik nu naar buiten dan zien we dat, in de periode dat de groep Lage Temperaturen aan mengkoelers werkte, de collega's elders in de wereld (Helsinki) de techniek van kern-demagnetisatie verder ontwikkelden[9]. Deze koeltechniek maakt gebruik van de opwarming en afkoeling van bepaalde materialen bij het aan- en uitzetten van een magneetveld. Hij is bijzonder krachtig en neemt bij 2 mK het stokje over van de mengkoeler. Men is momenteel in staat atoomkernen te koelen tot 0,28 nK, elektronen tot 1,5  $\mu$ K en  $^3\text{He}$  tot 80  $\mu$ K.

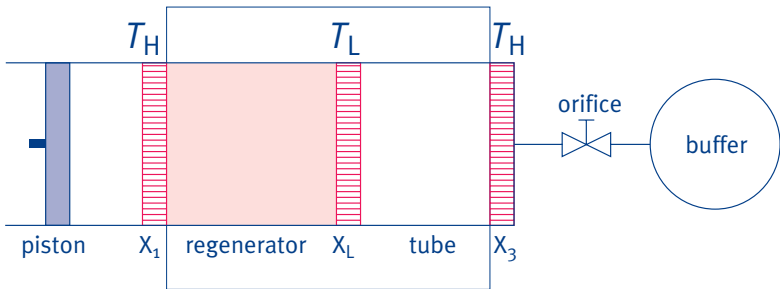
De studie van de superfluiditeit van  $^3\text{He}$ , die bij toeval is ontdekt door de groep in Cornell in 1972[10], kwam in deze periode tot volle bloei. En ten slotte valt in deze periode de ontdekking van de hoge-temperatuur supergeleiding in 1986[11]. Zoals u zich misschien kunt herinneren heeft die ontdekking destijds een golf van enthousiasme opgewekt. Immers, het ideaal van Kamerlingh Onnes van verliesloze machines leek nu wel erg dichtbij. Dat enthousiasme is inmiddels getemperd. Het is erg moeilijk gebleken draden te maken met een hoge kritische stroom. En dat is misschien niet zo gek, want de keramische materialen waar die hoge-Tc supergeleiders uit bestaan zijn in feite een soort baksteen. Een draad van dit materiaal is in wezen een langgerekte baksteen en stelt u zich eens voor dat u daarvan een spoel moet wikkelen zonder dat hij breekt! Maar de ontwikkelingen gaan gestaag door en ik ben ervan overtuigd dat de dagen van de hoge-Tc supergeleiding eens zullen komen.

Om terug te komen op mengkoelers: na dertig jaar onderzoek (van mid-zestigere jaren tot mid-negentiger jaren) waren de grote vragen wel beantwoord. De groep was toe aan nieuwe uitdagingen en heeft die gevonden in het onderzoeken van pulsbuskoelers en verwante koeltechnieken.

## Eindhoven II: 1994-2008

Pulsbuiscoolers zijn uitgevonden in 1984 door een geleerde uit Moskou: Mikulin[12]. Hij had een geniaal idee waarmee koelers voor het 70 K gebied eenvoudiger gemaakt kunnen worden en die bovendien minder trillen en slijten. Wij stapten pas in het onderzoek zo'n tien jaar later, in 1994. Toen was inmiddels al gebleken dat pulsbuiscoolers kunnen koelen tot ver beneden 70 K, zelfs tot beneden de magische grens van 4,2 K, het kookpunt van helium[13]. Dat betekent dat deze koelers het gebruikelijke vloeibaar-heliumbad kunnen vervangen met alle mogelijkheden van dien. Het voert te ver om hier in detail uit te leggen hoe deze koelers werken, maar de basisgedachte kan ik wel geven.

De koeling maakt gebruik van het feit dat een gas opwarmt als het wordt gecomprimeerd en afkoelt als het expandeert. Dat laatste kunnen we eenvoudig demonstreren. We brengen de lucht in een metalen vaatje op een druk van 5 bar. Daardoor warmt hij op. We wachten even tot de lucht weer is afgekoeld tot kamertemperatuur. Vervolgens laten we de lucht expanderen door een kraan naar buiten open te zetten. Hierdoor verlaagt de druk van 5 bar naar 1 bar en koelt het gas af van +20°C naar -88°C, dus met meer dan 100 graden. Dat het gas erg koud is, is te zien doordat bevroren waterdamp als een wolkje mist aan het vaatje ontsnapt.



figuur 3

Schematische weergave van de pulsbuiscooler. De dungetekende rechthoek is een vacuümruimte ter isolatie. De zuiger (piston) beweegt heen en weer en verricht arbeid. De regenerator is een poreus medium waarin periodiek warmte wordt opgeslagen en weer afgegeven. De uitvinding van Mikulin bestaat daarin dat zich rechts een kraantje (orifice) en een buffervolume bevinden. Door het samenspel van druk en stroming ontstaat koeling op de plaats die aangeduid is met  $T_L$ .

Hoe kunnen we dit principe gebruiken om een koeler te bouwen? We bekijken een afgesloten hoeveelheid gas. Bij de aanvang is het gas op lage druk en op kamertemperatuur.

Stap 1: we comprimeren het gas. Daardoor stijgt de temperatuur tot boven kamertemperatuur.

Stap 2: het gas is in warmtecontact met de omgeving en we wachten tot het gas weer is afgekoeld tot kamertemperatuur.

Stap 3: we verplaatsen het gas, terwijl het nog steeds op hoge druk is, naar een goedgeïsoleerde ruimte.

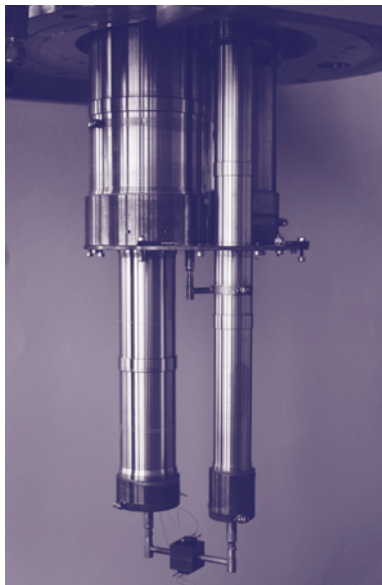
Stap 4: daar expanderen we het gas. Hierdoor zakt de temperatuur tot beneden kamertemperatuur.

Stap 5: we brengen het koude gas in thermisch contact met het te koelen object. Hierdoor koelt het object en warmt het gas op.

Stap 6: we verplaatsen het gas, terwijl het op lage druk is, terug naar de kamertemperaturomgeving.

Nu herhalen we de cyclus.

Tot voor 1984 werd het verplaatsen van het gas gedaan door een klomp metaal, de *verdringer*, periodiek in de ruimte te duwen waar het gas zich bevindt, zodat het gas wordt verdreven. Het heen en weer bewegen van die verdringer brengt trillingen en slijtage met zich mee. Mikulin heeft laten zien dat die verplaatsing van het gas ook op een listiger manier kan, namelijk zonder van een verdringer gebruik te maken.



figuur 4

Foto van een tweetraps pulsbuiskoeler. Het geheel is ongeveer 30 cm lang. De dikke en dunne buis links zijn regeneratoren. De dunnere buizen rechts op de voorgrond en achtergrond zijn buizen waar alleen maar gas in zit. Het koudst is het onderaan; in dit geval is de minimumtemperatuur 2,2 K.



figuur 5

Foto van een MRI-scanner (met dank aan Philips Medical Systems). In de twee horizontale cirkelvormige vaten boven en onder de (niet aanwezige) patiënt bevinden zich twee supergeleidende spoelen in een bad van vloeibaar helium op 4,2 K dat gekoeld wordt door een koeler die zich in de ruimte linksachter aan het plafond bevindt.

Vanaf 1994 is pulsbuskoeling, en de daaraan verwante thermoakoestiek (koeling met geluid), het centrale thema van de groep geweest. Ook hier hebben we ons geconcentreerd op het uitbreiden van het temperatuurgebied. Eerst tot beneden het lambdapunt van helium[14] en, samen met een groep uit Gießen, nog lager (voorlopig tot 1,19 K) door gebruik te maken van de superfluïde eigenschappen van  $^4\text{He}$ [15]. We hebben de techniek eenvoudiger trachten te maken door verbetering van roterende kranen en toepassing van de tegenstroompulsbuskoeler. Voorts hebben we het begrip van de werking aangescherpt.

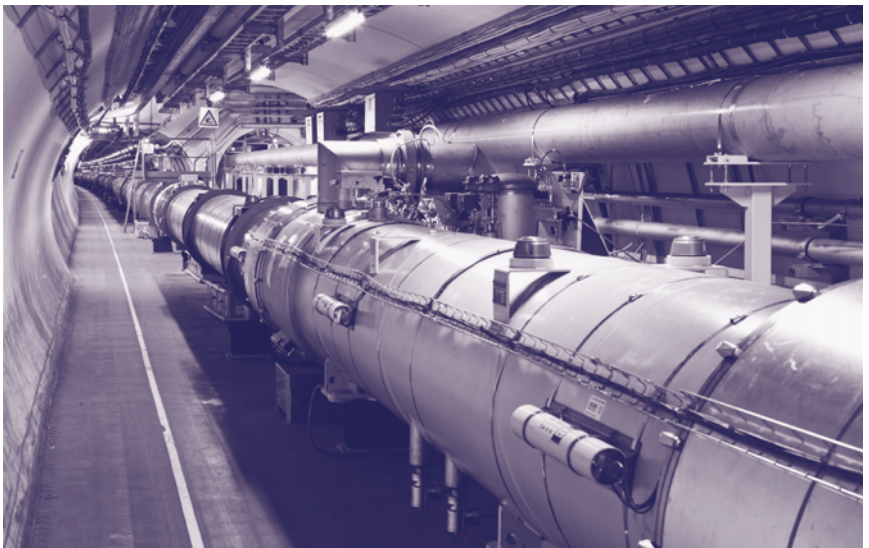
Aan de pulsbuskoeler en verwante koelers is in Eindhoven gewerkt tot mijn emeritaat. Ook in deze periode waren er natuurlijk weer interessante ontwikkelingen buiten de groep.

Daar is de perfectionering van MRI. Veel mensen weten niet dat het magneetveld in deze apparaten wordt opgewekt door supergeleidende magneten die zich in een bad van vloeibaar helium bevinden op een temperatuur van 4,2 K. Door een klein warmtelek, dat altijd aanwezig is, verdampt het vloeibare helium en het bad moet dus af en toe worden bijgevuld met vloeibaar helium. Meer en meer wordt

het verdampende helium echter ter plaatse gehercondenseerd door een koeler zodat bijvullen niet meer nodig is.

En dan was er de ontdekking van de Bose-Einstein Condensatie (BEC) in atomaire systemen[16,17]. Wat BEC precies is, hoef ik niet meer uit te leggen want dat heb ik al gedaan bij mijn intrede. Ik ben zelf niet in dit vakgebied werkzaam geweest, maar het was wel een genoegen dat van redelijk nabij te volgen, temeer ook omdat het aansluit op mijn promotieonderzoek van weleer. Door de ontdekking van BEC is het vakgebied van de lage temperaturen verrijkt met een geheel nieuwe manier om materie te bestuderen met een veelheid van prachtige macroscopische quantumverschijnselen. Van 1996 tot en met 2003, dus in acht jaar tijd, zijn maar liefst vier Nobelprijzen toegekend aan onderzoekers op dit terrein. Helaas zijn deze gassen instabiel als ze in aanraking komen met een vaste wand, dus ik zie niet hoe BEC-systemen zouden kunnen worden gebruikt om andere zaken te koelen.

Ten slotte wijs ik op de toepassingen van lage-temperatuurtechnologie op grote schaal zoals bij ITER[18] en CERN[19]. In CERN bijvoorbeeld worden elementaire deeltjes versneld in een 27 km lange cirkelvormige tunnel. De deeltjes worden in hun baan gehouden door supergeleidende magneten die worden gekoeld door superfluïde helium. Lage-temperatuurfysica ontmoet de hoge-energiefysica.



figuur 6

Foto van de LHC in CERN. Te zien is een gedeelte van de opslagring die bestaat uit een reeks van supergeleidende magneten die gekoeld worden door superfluïde helium. De thermische isolatie is zo goed dat aan de buitenkant niet te zien is dat het binnenin zo koud is.

# Onderzoekskader

Ik kom nu toe aan het schetsen van het kader waarin het onderzoek van de groep LT heeft plaatsgevonden. Ik heb, bij mijn komst op de TU/e in 1973, nog net meegemaakt dat geld voor onderzoek (instrumenten en personeelsplaatsen) bijna werd opgedrongen. Dat kon natuurlijk niet blijven duren. Meer en meer moest de onderzoeker zijn onderzoeksgelden aanvragen middels helder geformuleerde plannen die vervolgens tegen het licht werden gehouden en ten slotte in competitie met anderen werden toegekend. Dat lijkt een straf maar zo heb ik dat niet ervaren. Het gaf een nieuwe dimensie aan de wetenschapsbeoefening, en geen onaangename. Het was een stimulans om samenwerking te zoeken. Een gelukkige omstandigheid is dat de Technische Universiteit Eindhoven in Eindhoven ligt. In onze regio bevinden zich tal van bedrijven, die vaak hun oorsprong hebben bij Philips, met een hoog technologisch gehalte. In mijn geval betrof dat de firma's Stirling, Thales Cryogenics en Philips Medical Systems. Met name het pulsbusonderzoek leende zich voortreffelijk voor samenwerking met deze bedrijven. Een instantie die een grote rol speelt bij het stimuleren van onderzoek in de toegepaste gebieden in de natuurkunde is STW. STW is een stichting die kennisoverdracht realiseert tussen technische wetenschappen en gebruikers. Zij brengt onderzoekers en gebruikers bij elkaar en financiert excellent technisch-wetenschappelijk onderzoek. De manier waarop het een en ander in de praktijk is vormgegeven geeft de onderzoeker een ruime mate van vrijheid in gebondenheid, die ik als plezierig heb ervaren. Ik hoop dat het STW zal lukken om deze vorm van financiering in stand te houden.



# Onderwijs

Kom ik thans toe aan het onderwijs. Het onderwijs is op een universiteit als de lucht waarin wij leven. Onderwijs is zo verweven met alles wat op de universiteit gebeurt dat geen enkele activiteit daarvan is te scheiden. Studenten zijn nadrukkelijk aanwezig vanaf het eerste jaar, via de hogere jaren, stage, afstuderen, tot en met hun promotie en soms ook nog daarna.

Ik denk dat ik mag stellen dat de dagelijkse praktijk van het onderwijs in de faculteit goed geregeld is. Dat kunnen we met plezier constateren en dat moeten we zo houden. Ik wil bij deze gelegenheid een aantal dilemma's aan u voorleggen van meer beleidsmatige aard waar ik mee geconfronteerd ben geweest als opleidingsdirecteur. U zult merken dat ik er zelf niet helemaal uit ben. Maar misschien is een goede formulering van een dilemma de halve weg om eruit te komen.

## **Studierendement**

Het studierendement is het percentage van de aankomende studenten dat uiteindelijk zijn/haar diploma haalt. Het schommelt bij de universitaire natuurkundeopleidingen al sinds mensenheugenis rond de 55%. We weten dat een derde van de vertrekkende studenten naar aan andere opleiding van de TU/e gaat. Een ander derde deel gaat naar het hbo. En het overblijvende deel, we praten nu dus grofweg over 15 tot 20% van de aanmelders, is wat meer diffuus. Vaak weten we ook niet wat deze studenten zijn gaan doen. Al met al zou je dus kunnen zeggen dat tenminste 80 tot 85% van de studenten, die zich bij ons aanmelden, toch best goed terecht komen en dat een rendement van 55% niet zo dramatisch is als het op het eerste gezicht lijkt.

Maar toch: de maatschappij eist van ons dat we het rendement verhogen en ik ben het daar mee eens. Als opleidingsdirecteur heb ik mij dus ingespannen om het rendement te verhogen, met behoud van de kwaliteit van de opleiding, en gemerkt dat dat geen sinecure is. Tegelijk met de invoering van de bachelor-masterstructuur ging het eerstejaaronderwijs grondig op de schop; de beste docenten werden ingezet, en ze deden dat met enthousiasme; nieuwe onderwijsvormen werden

ingevoerd. En zowaar: het rendement in het eerste jaar ging omhoog van 51 naar 65%! Maar er kwam een verhoogde uitval in het tweede jaar van diezelfde studentengeneratie. En nu zijn we weer terug bij af want de laatste drie jaren is het aantal positieve studieadviezen om door te gaan naar het tweede jaar gedaald tot zelfs onder de 50%.

### Studentenaantallen

Naast de druk om het studierendement te verhogen is er de druk de studentenaantallen te vergroten. We willen graag veel studenten. Als de aanmeldingen lager uitvallen dan gehoopt, is de faculteit in paniek en heeft de voorlichter iets uit te leggen. We willen in geen geval dat vwo-leerlingen, die tot onze doelgroep behoren, kiezen voor een andere opleiding of, erger nog, natuurkunde gaan studeren op een andere universiteit. De voorlichting moet dus wervend zijn, maar ook weer niet zo wervend, dat studenten die te zwak zijn of ongemotiveerd en hier niet thuishoren, natuurkunde gaan studeren. Dan zakt het rendement weer in. Daarom staan verhoging van het rendement en verhoging van studentenaantallen op gespannen voet met elkaar.



figuur 7

Het Natuurkundecircus in actie. De dames bereiden de proef met het klosje garen (een beetje fors uitgevoerd) voor. De vraag is: naar welke kant beweegt de klos als ik aan het touw trek?

Een geheel eigen rol in dezen heeft het Natuurkuddecircus. Dat wil overbrengen dat natuurkunde en techniek leuk zijn, niet door te zeggen dat ze leuk zijn maar door te laten zien dat ze dat zijn. En dat voor leeftijdsgroepen die hun mening nog moeten vormen. Het blijft een uitdaging om ook komende generaties jongelui met steeds weer nieuwe demo's te verrassen. Ik heb persoonlijk altijd met plezier aan dit soort activiteiten meegedaan. Dat geldt ook voor het World Year of Physics in 2005 waarin op mondiale schaal de natuurkunde weer eens op de kaart is gezet.

### **De veranderende student**

Onze studenten komen in meerderheid van het vwo. Het is dus in ieders belang dat de universiteit gedetailleerd op de hoogte is van wat er op het vwo gebeurt. Het gemakkelijkste is nog om de formele programmatische ontwikkelingen te volgen en het onderwijs op het wo daarbij aan te passen al is dat in de praktijk al moeilijk genoeg. Weten alle eerstejaarsdocenten wat hun studenten op het vwo precies hebben geleerd? Minder gemakkelijk is het om sluipende veranderingen, die van meer maatschappelijke aard zijn, te signaleren. Er zijn bijvoorbeeld van jaar op jaar grote schommelingen van het instroomniveau, van gemiddeld vwo-cijfer 7,9 naar 7,3. Op zich zijn die goed meetbaar, maar erop inspelen met het onderwijs is lastig en misschien zelfs niet wenselijk. Fluctuaties in het gemiddelde vwo-cijfer hebben misschien te maken met de waarde die studenten/scholieren hechten aan hoge cijfers. Een andere ontwikkeling, waar op ingespeeld moet worden, is de afnemende waardering voor parate kennis. Er wordt tegenwoordig, zeker door de studenten, meer belang gehecht aan het vermogen efficiënt iets op te kunnen zoeken dan aan het hebben van parate kennis. Het aanleren van parate kennis (het leren van trucjes en feitjes) wordt als onaangenaam, demotiverend, ervaren. Een docent die te veel op de 'ouderwetse' onderwijstoer gaat, ziet zijn collegezaal leeglopen.

Ik wil mijn onderwijsparagraaf eindigen met enkele punten die niet zo toberig zijn.

Ik heb telkens weer ervaren dat onze studenten het in het buitenland uitstekend doen. Dus, erg slecht kan het niet zijn wat we hier doen. En verder: ik heb ervaren dat het geven van college en instructie een buitengewoon effectieve manier is om een vak te leren. Ook hier ontmoeten onderwijs en onderzoek elkaar. Degene die het meeste leert van een college is de docent zelf. Mijn inzichten op het gebied van de thermodynamica en de klassieke mechanica zijn gevormd doordat ik college heb gegeven, heb mogen geven, in deze vakken. Ik had het voor geen goud willen missen.

# Dankwoord

Ik heb, tot op de dag nauwkeurig, 36 jaar gewerkt aan de Technische Universiteit Eindhoven. Ik heb de TU/e, en in engere zin de faculteit Technische Natuurkunde, als een buitengewoon plezierige werkgever ervaren. Ik had leuk werk waarbij ik mij tot de grenzen van mijn intellect uitgedaagd voelde, had de kans om veel te reizen en ook daarbij interessante ervaringen op te doen en interessante collega's en vrienden te ontmoeten. Ik had het voorrecht op de thuisbasis met prettige collega's op te kunnen trekken. Ik noem de collega's binnen en buiten de faculteit en de medewerkers van het Opleidingsinstituut, maar toch vooral de leden van de groep Lage Temperaturen. Ik heb het verder als een voorrecht ervaren om intensief met studenten en promovendi te mogen werken, deze zich steeds vernieuwende groep van intelligente, ambitieuze, en vaak ook geestige, gekke lieden. Dames en heren, ik voel mij een bevoorrecht mens. Ik ben u allen buitengewoon erkentelijk dat u mij in staat heeft gesteld onder deze plezierige omstandigheden mijn beroep uit te oefenen.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Ik dank Sonja Feiner en Clemens Stolwijk voor hun hulp bij het tot stand komen van het manuscript.

# Referenties

1. Kamerlingh Onnes, H., "Het vloeibaar maken van helium", *Communications from the Physical laboratory at Leiden* N°.108, pp. 163-179 (1908).
2. Kapitza, P., "Viscosity of liquid helium below the  $\lambda$ -point" *Nature* Vol. 141, p. 74 (1938).
3. Kamerlingh Onnes, H., "Verdere proeven met vloeibaar helium. C. Over de verandering van den galvanischen weerstand van zuivere metalen bij zeer lage temperaturen enz. IV. De weerstand van zuiver kwik bij heliumtemperaturen", *Communications from the Physical laboratory at Leiden* N°. 120b, pp. 1479-1481 (1911).
4. Josephson, B.D., "Possible new effects in superconductive tunneling" *Phys.Lett.* Vol. 1, pp.251-253 (1962).
5. Das, P., De Bruyn Ouboter, R., and Taconis, K.W., "A realization of a London-Clarke-Mendoza type refrigerator" *Proc. LT9, Columbus Ohio (1964)*, (Plenum Press, New York, 1965) pp. 1253-1255.
6. De Waele, A.Th.A.M., Reekers, A.B., and Gijsman, H.M., "A  $^3\text{He}$  circulating dilution refrigerator with two mixing chambers" *Physica* Vol. 81B, pp. 323-324 (1976).
7. Frossati, G., and Thoulouze, D., "A dilution refrigerator with sintered silver power heat exchangers for use in the millikelvin range" *Proc. ICEC 6* (1976), pp. 89-91.
8. De Waele, A.Th.A.M., Reekers, A.B., and Gijsman, H.M., "A dilution refrigerator without pumped  $^4\text{He}$  bath" *Cryogenics* Vol. 17, pp.175-177 (1977).
9. Lounasmaa, O.V., "Experimental Principles and Methods Below 1 K" *Academic Press*, 1974.
10. Osheroff, D.D., Richardson, R.C., and Lee, D.M., "Evidence for a New Phase of Solid  $\text{He}^3$ " *Phys.Rev.Lett.* Vol. 28 pp. 885-888 (1972); "New Magnetic Phenomena in Liquid  $\text{He}^3$  below 3 mK" *Phys.Rev.Lett.* Vol. 29, pp. 920-923 (1972).
11. Bednorz, J.G., and Müller, K.A., "Possible highTc superconductivity in the Ba-La-Cu-O system" *Zeitschrift für Physik* Vol. B64, pp. 189-193 (1986).
12. Mikulin, E.I., Tarasov, A.A., and Shkrebyonock, M.P., "Low-Temperature expansion pulse tubes" *Adv. in Cryogenic Eng.* Vol. 31, pp. 629-637 (1984).
13. Matsubara, Y., and Gao, J.L., "Novel configuration of three-stage pulse tube refrigerator for temperatures below 4 K" *Cryogenics* Vol. 34, pp. 259-262 (1994).
14. Xu, M.Y., De Waele, A.T.A.M., and Ju, Y.L., "A pulse tube refrigerator below 2 K" *Cryogenics* Vol. 39, pp. 865-869 (1999).
15. Tanaeva, I.A., Lindemann, U., Jiang, N., De Waele, A.T.A.M., and Thummes, G., "Superfluid Vortex Cooler" *Adv. in Cryogenic Eng.* Vol. 49B, pp. 1906-1913 (2004).
16. Ensher, J.R., Matthews, M.R., Wieman, C.E., and Cornell, E.A., "Observation of Bose-Einstein Condensation in a Dilute Atomic Vapor" *Science*, New Series, Vol. 269, pp. 198-201 (1995).
17. Davis, K.B., Mewes, M.O., Andrews, M.R., Van Druten, N.J., Durfee, N.J., Kurn, D.M., and Ketterle, W., "Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms" *Phys.Rev.Lett.* Vol. 75, pp. 3969-3973 (1995).
18. <http://www.iter.org/>
19. <http://lh.web.cern.ch/lhc/>

# Curriculum Vitae

**Prof.dr. Fons de Waele was van 1 januari 1973 tot 1 januari 2009 verbonden aan de Technische Universiteit Eindhoven, vanaf 1994 als voltijdshoogleraar in het vakgebied Lage-temperatuurtechniek en -fysica.**

Prof.dr. Fons de Waele (1944) begon zijn studie aan de Rijksuniversiteit Leiden in 1961 en behaalde zijn doctoraal natuurkunde in de gemengd experimenteel/theoretische richting in 1968. In 1972 promoveerde hij cum laude aan dezelfde universiteit op twee onderwerpen uit de supergeleiding.

Hij trad meteen daarna in dienst van de Technische Universiteit Eindhoven. Zijn onderzoek daar ging over verschijnselen en technieken bij lage temperaturen. In het begin betrof het mengkoelers, die kunnen koelen tot enkele millikelvin. Later ging het over cryokoelers, met name pulsbuskoelers, die koelen bij hogere temperaturen. Ondertussen heeft hij wetenschappelijke uitstapjes gemaakt naar hoge-Tc supergeleiding, Bose-Einstein Condensatie (tijdens een kort sabbatical in Grenoble), het GRAIL-project en quantumturbulentie. Hij doceerde de vakken Thermodynamica, Klassieke Mechanica en Algemene Natuurkunde. Van 2004 tot 2007 was hij opleidingsdirecteur waar hij onder meer belast was met het implementeren van de bachelor-masterstructuur. Hij stond mede aan de wieg van het Natuurkuddecircus en was actief bij het World Year of Physics in 2005.

Professor De Waele is erelid van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging. In 2008 kreeg hij de Kamerlingh Onnes Medaille voor zijn onderzoek aan pulsbuskoelers. In mei 2009 werd hij benoemd tot Guest Professor aan de Southeast University, Nanjing, China.

## Colofon

### Productie

Communicatie Expertise  
Centrum TU/e  
Communicatiebureau  
Corine Legdeur

### Fotografie cover

Rob Stork, Eindhoven

### Ontwerp

Grefo Prepress,  
Sint-Oedenrode

### Druk

Drukkerij van  
Santvoort, Eindhoven

ISBN 978-90-386-2160-9  
NUR 925

Digitale versie:  
[www.tue.nl/bib/](http://www.tue.nl/bib/)

**Bezoekadres**

Den Dolech 2  
5612 AZ Eindhoven

**Postadres**

Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

Tel. (040) 247 91 11  
[www.tue.nl](http://www.tue.nl)