

Hollen en stilstaan

Citation for published version (APA):

Verhaar, B. J. (2002). *Hollen en stilstaan*. Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/2002

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

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

[Link to publication](#)

General rights

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

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

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

www.tue.nl/taverne

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

TU/e

technische universiteit eindhoven

Afscheidscollege
21 juni 2002

prof.dr. B.J. Verhaar



hollen en stilstaan

/ faculteit technische natuurkunde

Afscheidscollege

Uitgesproken op 21 juni 2002
aan de Technische Universiteit Eindhoven

hollen en stilstaan

prof.dr. B.J. Verhaar

Inleiding

Mijnheer de Rector Magnificus, dames en heren,

Op zondagmiddag 7 oktober 1900 legde de Berlijnse experimenteel fysicus Rubens met zijn echtgenote een bezoek af ten huize van zijn collega in de theoretische-fysica, Max Planck [1]. Zoals niet geheel ongebruikelijk onder fysici kon Rubens het niet nalaten tijdens het bezoek aan het echtpaar Planck een opvallend resultaat te melden uit zijn laboratorium. Dit met een nieuw ontwikkelde techniek gevonden resultaat betrof het infrarode deel van het licht dat bij verhitting wordt uitgezonden door een zwart oppervlak. Zoals eveneens niet ongebruikelijk in kringen van natuurkundigen toog Planck na het vertrek van zijn bezoekers aan het werk en vond nog dezelfde zondagavond de naar hem genoemde beroemde stralingsformule. Op 14 december presenteerde Planck een voorlopige interpretatie van zijn formule op een zitting van de Physikalische Gesellschaft in Berlijn. Eind 2000 werd op diverse plaatsen in de wereld deze gebeurtenis herdacht als het begin van de *quantummechanica*, de revolutionaire nieuwe theorie die, meer nog dan de relativiteitstheorie, de wereld van de klassieke fysica op zijn kop zou zetten. In 1924 zouden Bose en Einstein de lijn van Planck doortrekken met een nieuwe interpretatie van Plancks formule, die op haar beurt zou leiden tot de voorspelling van het verschijnsel van *Bose-Einstein* condensatie.

Gedurende mijn loopbaan aan deze universiteit heb ik jarenlang het onderwijs in de quantummechanica verzorgd. Ook heb ik op basis van die theorie met mijn promovendi en studenten theoretisch onderzoek gedaan dat heeft bijgedragen aan de eerste, ondubbelzinnige, experimentele waarneming van het verschijnsel Bose-Einstein condensatie door drie Amerikaanse experimentatoren enkele jaren terug. Over beide bijdragen, aan het onderwijs en aan het onderzoek, wil ik u in dit afscheidscollege iets vertellen. Maar eerst iets over de periode voorafgaande aan mijn verblijf aan deze instelling.

Voorgeschiedenis

Ik ben geboren op een kleine boerderij in Leimuider, hemelsbreed een paar kilometer van het drieprovinciepunt van Noord-Holland, Zuid-Holland en Utrecht. In mijn levensloop heeft het toeval op bepaalde momenten een cruciale rol gespeeld.

In het begin van de oorlog verhuisden wij naar een boerderij in Uithoorn, aan de Amstel en ongeveer 20 kilometer onder Amsterdam. We hadden het thuis bepaald niet ruim. Een brand in 1942, halverwege de oorlog, waarbij door toedoen van een broertje en van mijzelf de boerderij bijna helemaal in vlammen opging, zal daar ook geen goed aan hebben gedaan. De omstandigheden waren in ieder geval niet van dien aard dat het logisch was om een van de kinderen te laten studeren. Het was dan ook geheel te danken aan een toevallige en gelukkige samenloop van omstandigheden dat ik na de lagere school de kans kreeg verder onderwijs te volgen. De onderwijzer van mijn zesde klas, meester Eerden, had namelijk voor zijn oudste zoon die in dezelfde klas zat, een onderwijzersopleiding op het oog. Daarvoor was allereerst een MULO-diploma nodig. De keuze viel op een school in het centrum van Amsterdam: de Spuistraat. Omdat meester Eerden het onverstandig vond om een jongetje van twaalf elke dag alleen naar Amsterdam te sturen, zocht hij een klasgenoot om zijn zoon te vergezellen. Eén bovendien die hij ook wel in staat achtte de MULO-opleiding af te ronden. De keuze viel op mij. Toen hij mijn ouders ervan overtuigd had dat dit voor hun zoon eveneens een goede zaak zou zijn, werd het plan uitgevoerd.

De aansluiting met de school in de stad was niet makkelijk. Zo verliepen de wiskundelessen in de eerste weken moeizaam om redenen die ik alleen achteraf gemakkelijk kan vinden. Onder mijn eerste ingeleverde huiswerk voor wiskunde verscheen bijvoorbeeld een onvoldoende en, alsof dat nog niet genoeg was, een aantekening van de leraar: "Leert het nooit!". De mentale uitwerking was aanzienlijk. Gelukkig bleef het toeval mij goed gezind. Mijn carrière zou na de MULO mogelijk voortgezet zijn op een kweekschool voor onderwijzers of op een kantoor, als de leraar van de eindexamenklas geen goede connecties had gehad met de Jezuïeten van het Amsterdamse



Ignatiuscollege aan de Hobbemakade. De uiterst gedegen en vooral praktische opleiding in de moderne talen op de MULO was een uitstekende vooropleiding voor de laatste twee jaren van de HBS. In het algemeen heb ik het verblijf op de HBS, na het zwoegen op de MULO, als één grote vakantie ervaren.

Op een dag maakte één van de paters me duidelijk, dat hij voor mij wel een toekomst als Jezuïet weggelegd zag. Zelf had ik een wat andere invulling van mijn leven voor ogen; ik wist zijn suggestie uitstekend te pareren door erop te wijzen, dat mijn opvattingen voor een toegewijd Jezuïet te veel naar het pantheïsme neigden. Ik weet nog steeds niet of hij van verdere pogingen afzag, omdat hij geen idee had wat ik daarmee bedoelde of omdat hij me vanwege mijn opvattingen geen goede aanwinst vond voor de Jezuïetenorde. Verder waren er enkele paters met een typische alpha-oriëntatie die mijn besluit om wis- en natuurkunde te gaan studeren met enig *dédain* tegemoet traden. Allerm minst daardoor afgeschrikt begon ik na het eindexamen aan een studie in die vakken, met scheikunde als bijvak, aan de Amsterdamse Gemeentelijke Universiteit, de latere Universiteit van Amsterdam. Aanvankelijk voelde ik me aangetrokken tot de elegantie van de wiskunde, onder andere dankzij de didactisch knappe colleges van de hoogleraren De Bruijn en De Groot. Na enkele jaren vond ik echter dat er van de natuurkunde een grotere uitdaging en meer avontuur uitgingen dankzij de extra dimensie van het fysische *experiment*, waardoor het geheel minder rechtlijnig wordt. Bovendien was de theoretische natuurkunde een aardig compromis en dat werd feitelijk mijn keuze. Sindsdien heb ik die speciale relatie met de wiskunde, die je bij vrijwel alle theoretisch natuurkundigen aantreft, en die ik treffend verwoord vond in het voorwoord van het boek van Goldberger en Watson over de quantummechanica van deeltjesbotsingen [2]: *"Since it is our purpose to talk about problems of real physical interest, we make no pretense of strict mathematical rigor. Instead we have substituted mathematical reasonableness and physical rigor. Mathematics is an interesting intellectual sport, but it should not be allowed to stand in the way of obtaining sensible information about physical processes. This attitude may offend some purists, who should feel free to consult the mathematical literature whenever the mood strikes them."*

Het kan nog treffender gezegd worden en dat vinden we in hoofdstuk 5 van dit uitstekende boek: *"We shall make no pretense at mathematical*

rigor. Any formal manipulations that are not obviously wrong will be assumed to be correct."

Het was professor Jan de Boer van het Instituut voor Theoretische Fysica in Amsterdam die mijn richting van onderzoek voor de eerste vijf jaar vastlegde door mij aan een afstudeeronderwerp en later aan een promotieonderwerp te zetten in de theoretische kernfysica. Het afstudeerverslag in 1960 en het proefschrift in 1962 hadden beide betrekking op de collectieve bewegingen van deeltjes binnen een atoomkern.

Een half jaar voor mijn promotie, op 1 januari 1962, kreeg ik een aanstelling als theoretisch fysicus aan de toenmalige Technische Hogeschool Eindhoven in de groep Experimentele Kernfysica onder leiding van professor Okko Poppema. De kernfysica werd in die tijd overigens beschouwd als één van de speerpunten van onze jonge onderafdeling Natuurkunde.

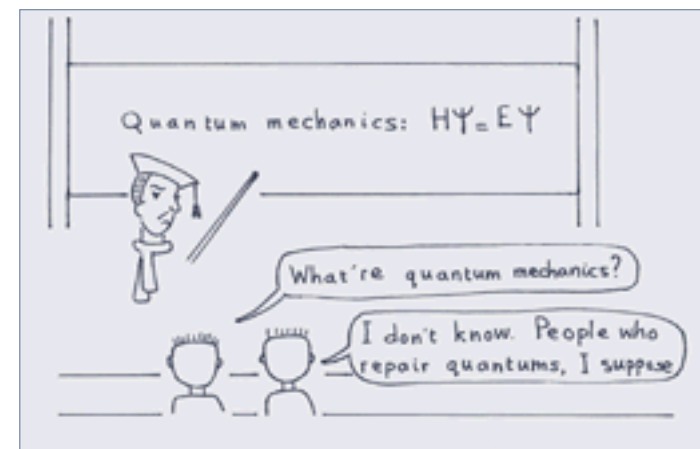
Ik herinner me als de dag van gisteren, dat ik me vroeg in de ochtend van de tweede januari voor mijn eerste werkdag op de fiets naar het paviljoen begaf, langs een donkere rondweg waarop zelfs in de spits nauwelijks verkeer te bekennen was. In het paviljoen was toen nog bijna de hele universiteit gehuisvest. De eerste tijd was het de bedoeling, dat ik voor mijn experimentele collega's wekelijks een soort cursus verzorgde in de theorie van kernreacties. Zoals ik al snel ondervond, leerde ik als docent het meest van de cursus. Het is echter niet uitgesloten dat mijn experimentele collega's er eveneens veel van opgestoken hebben. Ik heb aan die eerste jaren, die ik doorbracht in een experimentele groep, een voorliefde overgehouden voor samenwerking met experimentele groepen. Zo heb ik in Eindhoven vele jaren samengewerkt met de groep van Herman Beijerinck, in Amsterdam met Jook Walravens groep, maar ook met diverse buitenlandse, vooral Amerikaanse groepen. Door mijn wekelijkse cursus over kernreacties leerde ik veel over hoe je op basis van de quantummechanica kunt aankijken tegen de zeer diverse verschijnselen die zich voordoen als deeltjes die botsen met atoomkernen, na versneld te zijn in een versneller zoals het Eindhovense cyclotron. Ik heb van die ervaring later veel profijt gehad in het onderzoek, evenals indirect enkele promovendi die vervolgens elders hun vleugels uitsloegen in het fundamentele onderzoek.

Onderwijs en onderzoek

Quantummechanica

Toen ik in 1965 met een brief van de Koningin tot lector werd benoemd, het equivalent van de huidige hoogleraar-A rang, kreeg ik een onderwijsopdracht op een breder terrein: de theoretische natuurkunde in het algemeen. Uit de stukken van de hooglerarenvergadering waarin mijn benoeming werd voorbereid, kwam echter naar voren dat de quantummechanica een belangrijk onderdeel diende te zijn van mijn onderwijs en onderzoek. Dat lijkt misschien een nogal esoterisch onderwerp om aan een technische universiteit te doceren. Veel mensen denken bij techniek en technologie inderdaad uitsluitend aan grofstoffelijke, macroscopische objecten als vliegtuigmotoren en windturbines, aan klassieke fysica dus. Men bedenke echter, dat volgens een recente publicatie [3] bijvoorbeeld in de VS een geschatte 30 procent van het nationaal inkomen gebaseerd is op uitvindingen die mogelijk gemaakt zijn door de quantummechanica: uitvindingen variërend van halfgeleiders in computerchips tot lasers in cd-spelers en MRI-scanners in ziekenhuizen.

figuur 1





Het is daarom naar mijn mening een misvatting te denken dat de opgeleide natuurkundig ingenieur alleen zou kunnen leven met klassieke fysica. Als de quantummechanica doordringt in de technologie, wordt het tijd dat de ingenieur zich ermee gaat bemoeien. Aan enkele gerenommeerde technische universiteiten in de Verenigde Staten, zoals Massachusetts Institute of Technology, MIT, en California Institute of Technology, Caltech, realiseert men zich dit terdege en is het vak 'quantum mechanics' één van de hoekstenen van het studieprogramma voor natuurkundigen.

Het was overigens Murray Gell-Mann van Caltech, die de quantummechanica eens beschreven heeft als "that mysterious, confusing discipline which none of us really understands but which we know how to use." Van zijn collega daar, Richard Feynman, is een soortgelijk citaat bekend: "I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics." Beide citaten maken duidelijk, dat de quantummechanica niet alleen een duidelijke relatie heeft met toepassingen en technologie maar tegelijkertijd ook fundamentele vragen oproept die in de literatuur nog steeds tot discussies en nieuwe opvattingen leiden [4,5,6].

Over één punt bestaat onder fysici in elk geval wel overeenstemming: de quantummechanica betekent een radicale breuk met de klassieke theorie. Daarmee is zelfs de aard van de fysische werkelijkheid in het geding. De quantummechanica heeft als zodanig een belangrijke culturele betekenis. Juist vanwege dit soort kwesties beschouw ik het als een groot voorrecht dat ik gedurende mijn leven als fysicus van dit vak kennis heb mogen nemen. En ik heb mijn best gedaan ditzelfde gevoel in de collegezaal ook op mijn studenten over te brengen.

Het hoofdonderwerp van dit afscheidscollege zal echter geen betrekking hebben op het onderwijs maar op het onderzoek waaraan ik me samen met promovendi, afstudeerders en stagiairs 40 jaar heb gewijd. Ik wil dat belichten aan de hand van twee voorbeelden, afgewisseld door een intermezzo over een ander onderwerp waarmee u wat op verhaal kan laten komen.

Onderzoek I: Bose-Einstein condensatie

De eerste 15 jaar na mijn lectorsbenoeming legde ik me met mijn theoriegroep toe op onderzoek op het gebied van de kernfysica.

Toen gaf het toeval mijn loopbaan wederom een radicale draai. Dat gebeurde via een voordracht in onze faculteit door de Amsterdamse hoogleraar Silvera over zijn pogingen om Bose-Einstein condensatie te bereiken door afkoeling van een gas van waterstofatomen. Vooral een boeiend gesprek met hem tijdens de lunch deed mij besluiten de sprong te wagen van de kernfysica naar het totaal nieuwe en onontgonnen gebied dat tegenwoordig met 'Cold atoms' wordt aangeduid. Dat was in 1980. Vooral het feit dat ik toen juist een promovendus had aangesteld die het avontuur samen met mij aandurfde, vergemakkelijkte de stap. De typische energieën van de theoretisch onderzochte processen veranderden aanzienlijk. In feite moest de komma over ruwweg 12 decimalen worden verschoven. Dit om van de deeltjes versneld door het Eindhovense cyclotron, die voortsnelen met een snelheid van 70.000 km per seconde, naar de bijna stilstaande waterstofatomen in koud waterstofgas te gaan. Uiterst aantrekkelijke aspecten van het nieuwe gebied waren de fantastische manipuleerbaarheid van de atomen met bijvoorbeeld magneetvelden en lasers, en het avontuur van de nog vrijwel onbekende theorie over de vele verschijnselen. De switch van voorthollende naar bijna stilstaande deeltjes ging aldus gepaard met een ware stroomversnelling in het onderzoek.

We ervoeren de overstap ook als een interessant sociologisch verschijnsel: we werden met open armen ontvangen in een geheel nieuwe kring van fysici die pionierden op het gebied van koude atomen. Een totaal andere context dan de veel grotere internationale gemeenschap van gesettelde kernfysici die ik gewend was. In feite waren nu drie à vier experimentele groepen ondersteund door maar enkele theoretische fysici bezig met een uiterst ambitieuze onderneming: het realiseren van Bose-Einstein condensatie in een ijl en ultrakoud gas van atomen, het in 1924 door Einstein voorspelde verschijnsel dat ik in het begin al kort noemde. Zijn theorie had betrekking op een ideaal gas van atomen waarin de deeltjes geen krachten op elkaar uitoefenen. Het merkwaardige van Einsteins theorie, in feite één van de eerste revolutionaire gezichtspunten van de nieuwe quantummechanica, was dat de atomen in zo'n gas, ondanks de afwezigheid van krachten, onderling gecorreleerd zouden moeten zijn. Als die atomen zich tenminste in dit opzicht hetzelfde zouden gedragen als Bose kort daarvoor had laten zien voor de deeltjes waaruit licht is opgebouwd, de fotonen.

De onderlinge correlatie bestaat eruit, dat de deeltjes bij voorkeur in dezelfde toestand verkeren. In extreme vorm zou deze neiging zich moeten voordoen beneden een bepaalde kritische temperatuur, waar Einstein een fase-overgang voorspelde naar een nieuwe materievorm, waarin een groot aantal atomen in precies dezelfde toestand verkeert. Dit verschijnsel van Bose-Einstein condensatie vertoont bepaalde overeenkomsten met het fysische systeem van een laser, waarin een groot aantal fotonen zich eveneens in een gemeenschappelijke toestand bevindt.

Mogelijkheden om Bose-Einstein condensatie in een gas van atomen waar te nemen waren noodzakelijkerwijs beperkt. Feitelijke gassen bevatten nu eenmaal wisselwerkende deeltjes en hebben dus bij de vereiste lage temperaturen in het algemeen al lang een *gewone* condensatiefase-overgang ondergaan naar de vloeibare en zelfs vaste vorm.

In de eerste helft van de jaren vijftig leverde mijn afstudeerhoogleraar en promotor De Boer een belangrijke bijdrage waarmee men de meest kansrijke atoomsoorten kon selecteren. Daarin paste marginaal helium, waarvan reeds in 1938 experimenteel was vastgesteld dat het bij enkele graden boven het absolute nulpunt een overgang ondergaat naar een supervloeibare toestand met uiterst merkwaardige eigenschappen [7]. De theoretisch fysisicus Fritz London was de eerste die opperde, dat die eigenschappen een afspiegeling zouden kunnen zijn van Bose-Einstein condensatie [8]. Toen ik in 1958 als afstudeerder op De Boers Instituut voor Theoretische Fysica werkte, trof ik daar een 28-jarige Amerikaanse postdoc, Charles Hecht, die op het idee kwam dat een volledig spingepolariseerd gas van waterstofatomen het verschijnsel Bose-Einstein condensatie in een veel zuiverder vorm zou kunnen vertonen [9]. En dit was wat Silvera en Walraven in Amsterdam probeerden te realiseren.

Zoals gezegd was de groep fysici die zich aanvankelijk, van 1980 tot zeg 1990, als doel stelde Bose-Einstein condensatie in een ijl gas te realiseren, betrekkelijk klein. Dat blijkt onder andere uit een door onze experimentele collega van MIT, Wolfgang Ketterle, opgestelde grafiek waarin vanaf 1985 het aantal publicaties per jaar staat weergegeven over Bose-Einstein condensatie. Blijkbaar was dat aantal heel beperkt. Vóór 1985 zullen het er zelfs nog minder zijn geweest.

Vanaf die begintijd en tot op de dag van vandaag vullen wij met onze onderneming een niche in: we onderzoeken de rol van de wissel-



werkingskrachten tussen de atomen. In tegenstelling tot de atomen in het door Einstein beschouwde ideale gas, en in tegenstelling tot de fotonen in een laser, oefenen echte atomen namelijk niet-verwaarloosbare, onderlinge krachten op elkaar uit. Met één uitzondering waarover straks meer.

Het succes van de experimentele pioniers was op diverse manieren afhankelijk van de interactieprocessen. Niet alleen speelden die een beslissende rol in de *vorming* van het Bose-Einstein condensaat bij het afkoelen van een gas vanuit kamertemperatuur, maar ook bij alle eigenschappen van dit condensaat zoals de stabiliteit en de levensduur. Nu waren de interactiekrachten tussen waterstofatomen reeds enige jaren eerder zo goed als exact berekend. Door die berekeningen te gebruiken konden we in het voorjaar van 1985 alle mogelijke interactieprocessen tussen paren koude waterstofatomen volledig in kaart brengen op basis van de quantummechanica. Deels kwam hier de eerder opgebouwde knowhow uit mijn vorige kernfysica-leven goed van pas, al leverde de over 12 decimalen verlaagde botsingsenergie typische problemen op en moesten we een gevoel voor grootte-orde in een geheel nieuw regime opbouwen. Daarnaast moesten we pioniersarbeid verrichten om de link te kunnen leggen tussen wat er volgens de quantummechanica in botsingen tussen twee atomen gebeurt en wat de gevolgen hiervan zijn voor het gas als geheel. Dit inzicht stelde ons later ook in staat onze bijdragen te leveren aan ontwikkelingen op het gebied van atoomklokken, het tweede onderzoeksgebied waarover ik straks iets ga vertellen.

Een geheel nieuw perspectief in het ultrakoude-atomenonderzoek ontstond omstreeks '89-'90 toen de laser zijn intrede deed. De mogelijkheid om een wolkje gasatomen met laserbundels af te koelen tot temperaturen van ruwweg een miljoenste graad boven het absolute nulpunt, de zogenaamde *laserkoeling*, opende geheel nieuwe perspectieven. Een omstandigheid met nogal ingrijpende consequenties voor de betrokken experimentatoren was overigens dat er voor het laserkoelen van atomair waterstof geen laser beschikbaar is in het vereiste golflengtegebied. Die zijn wel beschikbaar voor het koelen van gaswolkjes van alkaliatomen. De hamvraag werd dus: kan Bose-Einstein condensatie gerealiseerd worden met alkaliatomen zoals lithium, natrium, kalium, rubidium, cesium? Het idee ontmoette veel scepsis, omdat het gevoel bestond dat in zo'n gas de atomen heel snel

zouden 'samenklonteren' in twee-atomige moleculen. Dit als eerste stap naar de evenwichtstoestand die bij lage temperaturen natuurlijk de vaste-stoftoestand is. In een publicatie van de Fransman Jacques Vigué in 1986 was dat reeds gesuggereerd.

Er was dus een hele dosis moed nodig om aan zo'n waagstuk te beginnen. Slechts drie experimentele groepen deden mee aan de onderneming: de groep onderzoekers onder leiding van Carl Wieman en Eric Cornell in Boulder (Colorado), de groep van Wolfgang Ketterle op MIT en de groep van Randy Hulet van de Rice-universiteit in Houston.

U ziet de opleving die deze ontwikkeling omstreeks 1990 tot gevolg had weerspiegeld in de grafiek. Om inzicht te krijgen in de succesansen van alkali-atomen verlegden wij in Eindhoven opnieuw onze koers. Dankzij de knowhow uit de kernfysicatijd waren wij heel lang de enige theoriegroep die voorspellingen kon doen voor de parameters die de kans op succes bepaalden voor de diverse alkali-atoomsoorten. De eerste concurrentie ontstond pas rond 1996 vanuit Amerika. De switch van waterstofatomen naar alkaliatomen bij temperaturen van één miljoenste graad boven het absolute nulpunt en lager betekende een extra verschuiving van de komma over ruwweg zes decimalen voor de typische energieën van de bestudeerde processen. In totaal dus 18 à 19 decimalen ten opzichte van de vertrouwde kernfysische botsingsenergieën van lang geleden. Met recht kun je dan spreken van bijna stilstaande atomen. Probeer u zelf maar eens te bewegen met een snelheid van 2 centimeter per seconde.

We hadden echter te maken met een grotere handicap dan deze 'fase-overgang' van hollen naar stilstaan. Al gauw bleek, dat de krachten tussen de meeste alkaliatomen onvoldoende bekend waren om er zinnige voorspellingen op te baseren. Dit was een geheel nieuwe uitdaging voor de theorie, waarvoor we in '93-'94 een oplossing vonden. Het bleek mogelijk om het verloop van de quantumbotsing tussen twee atomen effectief te beschrijven met slechts een paar parameters, gebruikmakend van de speciale omstandigheid dat het om ultrakoude atomen gaat. Het succes van de aanpak bestond erin, dat we in staat waren het kleine aantal benodigde parameters volledig uit experimenten te bepalen. Zo onstonden er samenwerkingsverbanden met de belangrijkste experimentele groepen op dit gebied, waaronder die in Boulder, op MIT, op de Stanford- en Yale-universiteiten en de universiteit van Texas in Austin. Op die manier volgden uit het

theoretische werk, gedragen door de enthousiaste inspanningen van promovendi, afstudeerders en stagiairs, veel aanwijzingen voor kansrijke en minder kansrijke wegen naar Bose-Einstein condensatie. In de grafiek ziet u tot slot de gigantische explosie in de belangstelling voor dit onderzoeksgebied na 1995, toen Bose-Einstein condensatie in een ijl gas voor het eerst werd gerealiseerd door Cornell, Wieman en Ketterle. Afgelopen december werd de Nobelprijs voor Natuurkunde uitgereikt aan deze drie fysici. In ons vakgebied werd allerwegen enthousiast gereageerd op deze toekenning, zowel uit waardering voor hun prestatie als vanwege de opsteker die de toekenning van deze Nobelprijs betekende voor het hele vakgebied.

Intermezzo: rekenen

Rekenen is al die jaren een belangrijke activiteit in ons theoretisch werk. Het zal u niet verbazen als ik u zeg, dat zich op dit gebied de afgelopen 40 jaar een gigantische ontwikkeling heeft voorgedaan. Toen ik in 1957 als student met mijn afstudeerwerk begon in het Amsterdamse Instituut voor Theoretische Fysica, hoorde ik van enkele medestudenten die daar al wat langer zaten dat ze onder leiding van professor De Boer nog met een hele groep tegelijk op zuiver mechanische rekenmachines hadden zitten te rekenen aan een probleem dat met vloeibaar helium samenhangt. Trouwens, als ik bij de Amsterdamse Gemeentegiro mijn salaris als student-assistent ging ophalen, zaten de ambtenaren achter hun loketten ook te draaien aan dergelijke knarsende rekenmachines. In de volksmond heetten ze 'koffiemolens' en zo zagen ze er ook uit.

Tijdens mijn afstudeerwerk genoten we in het instituut al van de luxe van een elektromechanische rekenmachine van het merk Monroe. Dit apparaat stond in een aparte rekenkamer opgesteld, omdat het anders lawaai zou veroorzaken in het klaslokaal waarin alle studenten en bijna alle medewerkers aan bureaus zaten die langs drie muren stonden opgesteld. Tussen twee haakjes: wel een omgeving waarin je leerde je te concentreren. Langs de vierde muur stond als uiterst belangrijk object een lange koffietafel, want voor theoretisch natuurkundigen geldt hetzelfde als voor wiskundigen: het zijn machines die koffie omzetten in formules [10].

Omstreeks 1965, ik werkte toen inmiddels enkele jaren in Eindhoven, deden de eerste elektronische tafelrekenmachines hun intrede, in ons geval van het merk Friden. Zo'n machine had afmetingen die ruwweg



een kwart van een bureaublad besloegen en beheerste de voor die tijd opzienbarende combinatie van bewerkingen: optellen, aftrekken, vermenigvuldigen en delen. De prijs lag rond de 10.000 gulden. Rekenen was in die tijd een minder gebruikelijke bezigheid onder Eindhovense theoretische fysici. Een medewerker vertelde me eens, dat hij de Friden uitsluitend gebruikte om eens per jaar zijn Etos-bonnen op te tellen. Toen er voor 5000 gulden extra Friden-apparaten op de markt kwamen die ook konden worteltrekken, een bewerking die zich overigens bij het optellen van Etos-bonnen niet gauw zou voordoen, vormden wij een pressiegroep die in de faculteit een dergelijke 'super-Friden' claimde. Als immers ergens in de faculteit een rekenmachine nodig was die ook kon worteltrekken, dan was dat toch wel de groep Theoretische Natuurkunde. De worteltrek-Friden kwam er inderdaad. Als een student dit apparaat van mijn kamer haalde voor wat rekenwerk in de studentenkamer, maande ik hem tot voorzichtigheid door er op te wijzen dat hij een waarde van vier 2cv's aan het versjouwen was. Ik reed in die tijd 2cv, dus ik wist waarover ik sprak.

In Amsterdam volgde ik in de jaren vijftig reeds een cursus programmeren op een mainframe computer bij professor Arie van Wijngaarden. Deze werd bijgestaan door zijn jonge assistent Edsger Dijkstra, bij velen van u welbekend, die opvallend veel gallicismen in zijn zinnen stopte. Het rekenen op mainframe computers is in ons werk van meet af aan een fantastische inspiratiebron geweest. Het is nu zelfs zo'n gemeengoed in kringen van fysici dat 'computational physics' de 'derde weg' is geworden naast experimentele en theoretische fysica. Meerdere malen hebben we in een 'computer-experiment' verschijnselen ontdekt die moeilijk met alleen papier en potlood te bedenken zouden zijn geweest.

Een illustratieve gebeurtenis deed zich voor in 1992, toen een promovendus mij een grafiek liet zien met het resultaat van een computerberekening voor de botsing tussen twee ultrakoude cesiumatomen in een magneetveld. U merkt, dat ik dit intermezzo nu toch met wat fysica ga afsluiten. De figuur vertoonde bij bepaalde veldsterkten een karakteristiek verschijnsel dat onmiddellijk deed denken aan een zogenaamde Feshbach-resonantie, een verschijnsel dat ik in de kernfysica-tijd uitgebreid met studenten en promovendi

had onderzocht. Een telefoontje naar onze experimentele collega Eric Cornell in Amerika maakte me nog dezelfde dag duidelijk, dat er muziek zou kunnen zitten in de toepassing van zo'n Feshbach-resonantie voor het veranderen van de krachten tussen ultrakoude atomen. Kort samengevat bleek het mogelijk de wisselwerking tussen de ultrakoude atomen in een gaswolkje te variëren door het wolkje te plaatsen in een magneetveld en de sterkte daarvan te veranderen. Er kwam dus als het ware een 'knop' beschikbaar waarmee een experimentator naar believen de interactie kan instellen. In het bijzonder kunnen nu desgewenst de krachten tussen de deeltjes geheel uitgeschakeld worden, waardoor de Bose-Einstein condensatie in de geïdealiseerde vorm van Einsteins publicatie zou kunnen worden gerealiseerd.

Het is natuurlijk fantastisch, dat de moderne fysica verrijkt is met een extra route naar beter begrip, naast die van de theorie en het experiment. Het is echter van belang je te realiseren dat een computereperiment inderdaad veel weg heeft van een experiment, in die zin dat het vinden van een uitkomst nog niet betekent dat je ook de fysica begrijpt die erachter schuilgaat. Het avontuur zit meestal juist in het combineren van theorie, experiment en deze derde weg.

Onderzoek II: atoomklokken

In 1985 bracht -alweer- een toevallige ontmoeting met Stuart Crampton, één van de pioniers op het gebied van atoomklokken, ons in Eindhoven ertoe om ons ook in dit gebied te begeven. De directe aanleiding was dat koude atomen niet alleen voor Bose-Einstein condensatie belangrijk bleken te zijn, maar eveneens voor het vergaand verbeteren van atoomklokken. Ook in dit geval werkten we aanvankelijk aan devices die van koude waterstofatomen gebruikmaken, maar door de revolutionaire mogelijkheden verschoven we de aandacht van laserkoeling naar klokken gebaseerd op koude alkaliatomen.

Eén van de belangrijkste consequenties van de quantummechanica is dat fysische systemen zoals atomen onderling exact identiek kunnen zijn. De klassieke theorie leert daarentegen dat systemen altijd wel een beetje van elkaar verschillen, als je maar nauwkeurig genoeg kijkt. Als je nu probeert klokken te verbeteren, betekent dit dat je die beter kunt baseren op periodieke verschijnselen binnen een atoom dan op macroscopische periodieke verschijnselen van huis-, tuin- en keukenobjecten, zoals de beweging van de slinger van een uurwerk.

Dat is namelijk wat er feitelijk gebeurt in een cesiumatoomklok. Er wordt gebruikgemaakt van een klok die van nature is ingebouwd in een cesiumatoom, namelijk een inwendige trilling in dit atoom, om een van zichzelf al heel precies lopende laboratoriumklok bij te sturen en te synchroniseren.

Om uit te leggen hoe dat synchroniseren werkt wil ik graag opnieuw de onvolprezen 2cv ten tonele voeren, om precies te zijn het gedrag van mijn eigen eerste, tweedehands 2cv op een hobbelweg. Bij het passeren van een eerste hobbel kon de auto uitbundig in trilling raken. Als vervolgens op het 'goede' moment een tweede hobbel gepasseerd werd, juist als de auto bezig was toch al omhoog te bewegen, kon die trilling nog aanzienlijk versterkt worden. Vervang nu in dit voorbeeld de auto door een cesiumatoom en de hobbels door een opeenvolging van twee gepulste invloeden op het atoom met een tussenpoos T , bepaald door een gegeven aantal tikken van de te synchroniseren laboratoriumklok. Dan is duidelijk dat je aan de hand van het totale effect op het atoom kunt zien, hoe nauwkeurig dat aantal tikken past bij de inwendige trillingen in het atoom. Met andere woorden: hoe precies de laboratoriumklok loopt.

Dit bijsturen van de laboratoriumklok vindt overigens plaats met een groot aantal atomen tegelijk. Dat is onvermijdelijk en heeft te maken met het feit dat het signaal van alle atomen samen sterk genoeg moet zijn om de laboratoriumklok voldoende nauwkeurig aan te sturen. Niet alleen het aantal atomen speelt voor de nauwkeurigheid een rol, maar ook de tijdsduur tussen de hobbels. Het spreekt immers vanzelf, dat de door mij geschetste procedure voor het bijregelen van de frequentie van de tikken van de laboratoriumklok nauwkeuriger werkt naarmate de atomaire trillingen en de tikken van de laboratoriumklok langer de kans krijgen uit elkaar te lopen. Ofwel, naarmate tijd T groter is. In de conventionele cesiumatoomklokken wordt gebruikgemaakt van een bundel cesiumatomen afkomstig uit een oven, die ruwweg met een snelheid van 200 meter per seconde een afstand van 1 meter afleggen, zodat je uitkomt op een tijd T in de orde van 0.005 seconde.

Al in de jaren vijftig kwam Jerrold Zacharias van MIT op het idee om die tijd T drastisch te vergroten door de cesiumatomen niet horizontaal vanuit een oven te laten bewegen, maar ze verticaal te lanceren als water uit een fontein. Het idee was dat de atomen, als ze verticaal uit een oven komen, afgeremd zouden worden door de zwaartekracht

om vervolgens weer omlaag te vallen. Ze zouden dan één en dezelfde hobbel tweemaal kunnen passeren, op zowel de heen- als de terugweg. Als alleen de langzaamste atomen uit de oven gebruikt zouden worden, zouden ze naar schatting wel een seconde kunnen doen over hun fonteinbaan tussen de twee passages van de hobbel, ongeveer tweehonderd maal langer dus dan mogelijk was in de conventionele cesiumklok.

Op basis van deze ideeën begon Zacharias een vijf meter hoge machine te bouwen, die hij vindingrijk als altijd het 'Fallotron' noemde. Toen ik in het voorjaar van 1992, dus lang nadien, een voordracht hield op de jaarvergadering van de American Physical Society over het werk dat onze groep ondertussen aan de cesiumfontein had gedaan, werd ik na afloop benaderd door een gepensioneerde hoogleraar, Dean Edmonds. Hij vertelde me en schreef dat later ook nog in een lange brief, dat hij in zijn jonge jaren als promovendus in de groep van Zacharias aan het fonteinexperiment had meegewerkt. Het experiment werd vanuit MIT financieel sterk gesteund in de hoop dat Zacharias voor een Nobelprijs in aanmerking zou komen als hij erin zou slagen met de recordnauwkeurigheid van de nieuwe klok de invloed te meten van de zwaartekracht op een klok, een invloed die Einstein in 1916 voorspeld had met zijn algemene relativiteitstheorie. Zacharias nam zich voor één exemplaar van de nieuwe klok in een onderzoeksstation op de Jungfrau te zetten en een ander aan de voet van de Jungfrau. Hij hoopte zo te zien of de hogere klok in het zwaartekrachtsveld van de aarde inderdaad sneller loopt. Tot grote frustratie van Zacharias en zijn hele groep werkte het Fallotron echter niet volgens de verwachtingen, doordat de langzame atomen die essentieel waren voor de nauwkeurigheid uit hun fonteinbaan werden weggeketst door achteropkomende snellere atomen.

De laserkoelingstechnieken, die pas tientallen jaren later beschikbaar kwamen, zorgden voor een herleving van het idee van Zacharias, omdat daarmee aan *alle* atomen een lage snelheid gegeven kan worden. De grootste foutenbronnen die bepalend zijn voor de nauwkeurigheid van de *conventionele* atoomklokken blijken met deze technieken inderdaad belangrijk gereduceerd te kunnen worden.

Voor ons was er des te meer aanleiding na te gaan of er wellicht een aanvankelijk ondergeschikte foutenbron op de voorgrond zou kunnen treden: de invloed van de wisselwerking tussen de atomen.



Berekeningen op basis van de quantummechanica lieten inderdaad al gauw zien, dat de meest ernstige foutenbron voor de fontein klok gelegen is in de onderlinge beïnvloeding van de inwendige oscillatoren in de cesiumatomen terwijl ze gezamenlijk in een atoomwolkje hun fonteinbaan doorlopen. Daardoor loopt de klok feitelijk wat te langzaam en niet geheel controleerbaar. Niettemin slaat dit type klok dat berust op koude atomen sinds een aantal jaren alle records. In 1995 werd een in Parijs gebouwde cesiumfontein de nauwkeurigste klok ter wereld. Ook op andere plaatsen in de wereld zijn cesiumfonteinen momenteel in gebruik om de tijdstandaard te definiëren. De huidige relatieve nauwkeurigheid in de klokfrequentie is 10⁻¹⁵, wat in gewone mensentaal betekent dat ze minder dan 1 seconde verkeerd lopen in 30 miljoen jaar, oftewel 6 minuten sinds de big bang.

Op basis van klassieke intuïtie zou je verwachten, dat verdere koeling de invloed van interacties tussen de atomen moet verminderen. Immers, bij lagere temperaturen bewegen de atomen nog langzamer en ontmoeten ze elkaar dus nog minder vaak. De wetten van de quantummechanica blijken er echter toe te leiden, dat het effect per botsing toeneemt bij een lagere temperatuur. Per saldo compenseren deze afname en toename elkaar. Verder koelen heeft dus geen zin en dat was een andere voorspelling die uit ons werk volgde.

Nog niet zo lang geleden voorspelden wij op basis van de ondertussen verworven kennis uit een experiment met Bose-Einstein condensaten dat rubidiumatomen van het isotoop aangeduid als ⁸⁷Rb elkaars oscillatoren veel minder vertragen dan cesiumatomen. Ze hebben dus veel gunstiger eigenschappen voor een atoomklok. Op dat idee kwamen we door een experiment kort tevoren in het Amerikaanse Boulder. Het totaal onverwachte resultaat daar was, dat twee Bose-Einstein condensaten bestaande uit atomen in verschillende interne toestanden elkaar betrekkelijk lang konden overlappen zonder elkaar af te breken. Op basis van die voorspelling zijn er ondertussen rubidiumfonteinklokken gerealiseerd in Parijs en door Kurt Gibble's groep aan Yale University. Experimenten ermee hebben inderdaad laten zien, dat met deze klokken een grote verbetering is te bereiken.

Nauwkeurige atoomklokken worden gebruikt voor zo veel toepassingen dat een opsomming daarvan niet doenlijk is. Een bijzonder fascinerende prestatie op het gebied van *navigatie* die mogelijk was

dankzij de nauwkeurige klokken waren de Voyager-ruimtevluchten; daarbij werden verschillende buitenplaneten van ons zonnestelsel op relatief korte afstand gepasseerd. Het succes van de missie hing af van precieze kennis bij Mission Control over de positie van de Voyager. Die werd verkregen door middel van drie grote radiotelescopieën op verschillende locaties op aarde. Deze zonden alle drie een gecodeerd signaal naar de Voyager die op zijn beurt het signaal terugzond naar de telescopen. De afstand van elke telescoop naar de Voyager kon worden afgeleid uit de tijdsintervallen nodig voor het heen en weer gaan van het signaal. Op deze manier werd de positie van het ruimteschip bepaald. Om de vereiste nauwkeurigheid van de timing te bereiken werden bij iedere telescoop twee atoomklokken geïnstalleerd. Met het oog op de draaiing van de aarde tijdens de acht uur die een signaal nodig had om met lichtsnelheid vanaf de aarde naar de Voyager te gaan en terug, was het soms nodig dat de telescoop die een signaal verstuurtte een andere was dan de telescoop die het teruggekeerde signaal opving. Dat legde een extra strenge conditie op aan de precisie van de klokken. Zo werd het mogelijk de positie van de Voyager vast te stellen tot op 300 meter nauwkeurig qua afstand tot de aarde en tot op 300 kilometer in zijdelingse richtingen. Dit was een cruciaal gegeven bij het op betrekkelijk korte afstand passeren van een maan van Neptunus.

Daarnaast zijn atoomklokken ook gebruikt bij zeer succesvolle metingen die een aantal voorspellingen van de relativiteitstheorie met ongekend grote nauwkeurigheid bevestigden. Deze metingen borduurden in zekere zin voort op het door Zacharias voorgenomen experiment om klokken op verschillende hoogten in een zwaartekrachtsveld te vergelijken. Het gaat daarbij namelijk om tweelingparadoxachtige metingen die met ongeëvenaarde precisie de voorspelling van de speciale relativiteitstheorie geverifieerd hebben dat bewegende klokken langzamer lopen en de voorspelling van de algemene relativiteitstheorie dat een hogere klok in een zwaartekrachtsveld sneller loopt. Bij één van deze experimenten is een atoomklok in een raket meegestuurd die tot op grote hoogte geschoten is, bij andere experimenten zijn atoomklokken meegegeven met vluchten van straalvliegtuigen rond de aarde. In beide gevallen zijn deze klokken vergeleken met op aarde achtergebleven atoomklokken.

Slot- en dankwoord

Zeer gewaardeerde toehoorders,

Ik hoop, dat ik u via mijn uiteenzetting enigszins heb laten delen in het enthousiasme dat ik in deze jaren bij herhaling heb gevoeld bij het beoefenen van dit prachtige vak. U kunt zich misschien voorstellen dat ik terugkijkend naar de onderwijzer van mijn lagere school, meester Eerden, oprecht dankbaar ben voor zijn initiatief dat voor mij zo cruciaal zou blijken te zijn.

Dames en heren collega's van de faculteit Technische Natuurkunde,

Door het toeval in mijn jeugd en schooltijd en dankzij toevallige ontmoetingen met inspirerende mensen tijdens mijn loopbaan heb ik mijn weg naar de theoretische natuurkunde en de quantummechanica gevonden, een vakgebied met grote intellectuele uitdagingen. Veertig jaar heb ik dit vak aan deze instelling, in uw midden en met uw steun mogen beoefenen en doceren. Halverwege mijn loopbaan hier ben ik in de gelukkige gelegenheid geweest mijn onderzoeksgebied te verleggen vanuit de kernfysica naar de koude-atomenfysica en daarin heb ik nieuwe inspiratie gevonden. Het is fijn, dat de faculteit mij de ruimte geboden heeft om zo in te spelen op nieuwe ontwikkelingen. Ik ben daar dankbaar voor.

Vrienden en collega's in den lande dank ik voor hun belangstelling, vriendschap en aanwezigheid vandaag. Ik dank mijn studenten en promovendi van de TU/e. Ik prijs me gelukkig, dat ik met jullie allemaal heb mogen samenwerken. Bijna al het onderzoek in die afgelopen 40 jaar betreft jullie afstudeer- en promotiewerk, in het bijzonder de onderwerpen die ik voor dit afscheidscollege heb uitgekozen. Het was een fantastische ervaring. Ik ben er trots op, dat twee van jullie ondertussen een hoogleraarspositie bekleden en aldus mijn wetenschappelijke kleinkinderen voortbrengen, zij het dat er ongetwijfeld sprake is van een aanzienlijke verdunning van de genen. Ten slotte een woord van dank aan Corry en onze kinderen Vincent, Ida, Cilia en Boudewijn. Terugkijkend constateer ik dat ik in mijn vrije tijd in ogenblikken van inspiratie te vaak nog even snel een ideeetje heb



willen uitwerken, een berekening heb willen doen of de laatste hand heb willen leggen aan een college, hoewel ik me vlei met de gedachte dat ik me met dit gedrag in goed gezelschap bevindt. Het lijkt me niet eenvoudig de vrouw of het kind te zijn van een fysicus die gegrepen is door zijn vak. Ik zinspeelde daar al even op, toen ik begon met het bezoek van de Rubensen aan de Plancks. Ik wil jullie en de echtgenoten en kleinkinderen die er ondertussen bij gekomen zijn bedanken voor het begrip dat jullie al die jaren opgebracht hebben en voor de steun en het warme thuis dat jullie me geboden hebben.

En hiermee wil ik, met een zekere weemoed, mijn afscheidscollege besluiten.

Ik heb gezegd.

Referenties



- 1 A. Pais, *“Subtle is the Lord, The science and the life of Albert Einstein”* (Clarendon Press, Oxford, 1982).
- 2 M.L. Goldberger en K.M. Watson, *“Collision theory”* (Wiley, New York, 1964).
- 3 M. Tegmark en J.A. Wheeler, *“100 Years of quantum mysteries”*, *Scient. Amer.* 284, 54 (2001).
- 4 N.D. Mermin, *“What is quantum mechanics trying to tell us?”*, *Am. J. Phys.* 66, 753 (1998).
- 5 C. Rovelli, *“Relational quantum mechanics”*, *Int. J. Theor. Phys.* 35, 1637 (1996).
- 6 J. Bub, *“Interpreting the quantum world”* (Cambridge University Press, 1997).
- 7 P.L. Kapitza, *“Superfluidity observed”*, *Nature* 141, 74 (1938); J.F. Allen en H. Jones, *“The fountain effect”*, *Nature* 141, 243 (1938).
- 8 F. London, *“On the Bose-Einstein condensation”*, *Phys. Rev.* 54, 947 (1938).
- 9 C.E. Hecht, *“The possible superfluid behaviour of hydrogen atom gases and liquids”*, *Physica* 25, 1159 (1959).
- 10 Vrij naar Paul Erdős, wiskundige (1913-1996)

Curriculum Vitae

Prof.dr. B.J. Verhaar was van 1 januari 1962 tot 1 maart 2002 verbonden aan de faculteit Technische Natuurkunde van de Technische Universiteit Eindhoven, aanvankelijk als wetenschappelijk medewerker en vanaf 1965 als hoogleraar.

Boudewijn Verhaar (Leimuiden, 1937) studeerde natuurkunde aan de Universiteit van Amsterdam. Als medewerker van de Stichting Fundamenteel Onderzoek der Materie (FOM) verrichtte hij vanaf 1960 in het Instituut voor Theoretische Physica te Amsterdam onderzoek naar collectieve deeltjesbewegingen in atoomkernen. Dit onderzoek sloot hij in 1962 af met een promotie aan dezelfde universiteit. Ondertussen trad hij op 1 januari 1962 als wetenschappelijk medewerker in dienst van de Technische Hogeschool Eindhoven, nu de TU/e. Bij Koninklijk Besluit nummer 31 van 21 augustus 1965 werd hij benoemd tot lector. In 1980 veranderde dit lectoraat in een hoogleraarschap.

De leeropdracht van Boudewijn Verhaar betrof de theoretische natuurkunde. Zijn onderwijs had voornamelijk betrekking op de quantummechanica. Tot omstreeks 1980 was zijn onderzoek gericht op de kernfysica, daarna op de fysica van ultrakoude atomen. Hij verrichtte onderzoek in samenwerking met experimentele groepen aan de eigen instelling, de Universiteit van Amsterdam, aan Harvard University (ondersteund door de NATO Scientific Affairs Division), MIT, de University of Texas in Austin en de Stanford- en Yale-universiteiten, met enige regelmaat ook ter plaatse. Boudewijn Verhaar was vice-decaan van de faculteit Technische Natuurkunde en gedurende verschillende perioden voorzitter van de vakgroepen Deeltjesfysica en Theoretische Natuurkunde. Hij was voorzitter c.q. lid van diverse interne TU/e-commissies en -raden, lid van het College van Beroep voor de Examens aan de TU/e en vertrouwensman van het Wetenschappelijk Corps en van het Technisch en Administratief Personeel van de faculteit. Hij nam deel aan de organisatie van een internationale conferentie



en van diverse zomerscholen op het gebied van de kernfysica. Hij was bestuurslid van de Sectie Kernfysica van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging, van de Landelijke Onderzoekschool Theoretische Natuurkunde en van de Stichting Physica en hij was lid van de Landelijke Koepelcommissie voor Computational Physics en Chemistry. Gedurende 33 jaar participeerde hij onafgebroken in het werk van Commissies van Werkgemeenschappen van FOM (voor kernfysica, voor theoretische natuurkunde en voor atoomfysica en quantumelektronica), in het bijzonder als lid van het Dagelijks Bestuur.

Colofon

Productie:
Communicatie Service
Centrum TU/e

Fotografie cover:
Rob Stork, Eindhoven

Ontwerp:
Plaza ontwerpers,
Eindhoven

Druk:
Drukkerij Lecturis,
Eindhoven

ISBN: