

Moles agit mentem : ontwikkelingen in de fysika van de vaste stof

Citation for published version (APA):

Devreese, J. T. (1979). *Moles agit mentem : ontwikkelingen in de fysika van de vaste stof*. Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1979

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.

MOLES AGITAT MENTEM

Ontwikkelingen in de
fysika van de vaste stof



Prof. Dr. J.T.L. Devreese

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt van buitengewoon hoogleraar in de fysica van de vaste stof, in het bijzonder de theorie van de vaste stof bij de afdeling der technische natuurkunde aan de Technische Hogeschool Eindhoven op 9 maart 1979 door prof. dr. J.T.L. Devreese.

*Mijne Heren leden van het College van Bestuur,
Mijnheer de Rector Magnificus,
Mijnheer de Voorzitter van de Hogeschoolraad,
Dames en Heren Hoogleraren, Lectoren en verdere leden van
de wetenschappelijke staf,
Dames en Heren leden van de technische en administratieve staf,
Dames en Heren studenten,
en voorts U allen, zeer gewaardeerde toehoorders,*

34 - Dirac's theory of the ^{free} electron ~~in the field~~
 Time dep. Schrodinger eq. for particle

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right)$$

treats t, x, y, z very non symmetrically.
 Search for relativistic equation for
 electron of first order in t, x, y, z .

Notation

$$(1) \begin{cases} x = x_1, & y = x_2, & z = x_3, & ict = x_4 \quad (ct = x_0) \\ p_x = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x} \quad \text{or} \quad p_i = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_i} \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} p_4 = \frac{\hbar}{i} \frac{\partial}{\partial x_4} = -\frac{\hbar}{c} \frac{\partial}{\partial t} = \frac{i}{c} E \\ \vec{x} \equiv (x_1, x_2, x_3) \quad \vec{p} \equiv (p_1, p_2, p_3) \end{cases}$$

use $E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$

$$(3) \begin{cases} \vec{x} \text{ Four vectors} \\ \underline{x} \equiv (x_1, x_2, x_3, x_4) \quad \text{or} \quad \underline{p} \equiv (p_1, p_2, p_3, p_4) \end{cases}$$

Sum over equal indices

③ Ref. [1]

COMMUNICATIE



①

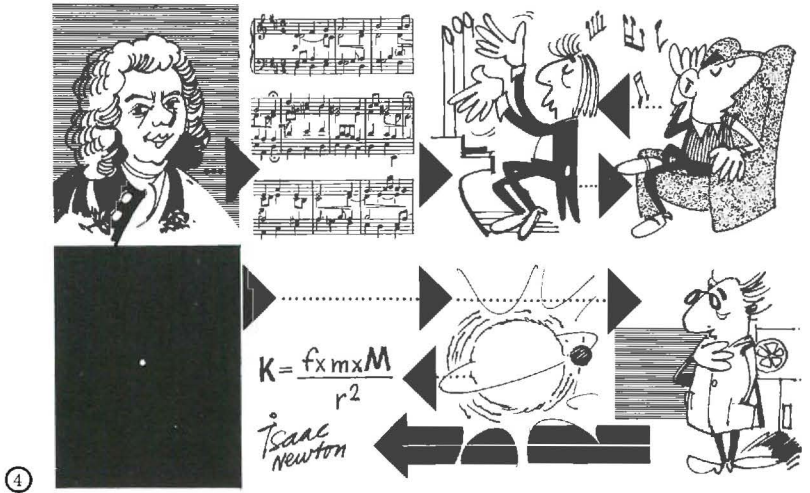
De aankondiging „Tocatta, Adagio en Fuga in do groot van Johann Sebastian Bach” heeft voor sommigen onder U informatie-waarde. De partituur (Fig. 1) is slechts herkenbaar voor diegenen die zijn ingewijd in de geheimenissen van de solfège. Er is evenwel een probaat middel om de informatie uit de partituur over te dragen. Men luistere.* Geen technische voorkennis is nodig. (Fig. 2).



②

De aankondiging „De vergelijking van Dirac” of een partituur van de theoretische natuurkundige hierover, nog wel van de hand van Enrico Fermi (Fig. 3) bevat geen informatie voor diegene die de taal van de fysika niet heeft bestudeerd. Het is wel mogelijk enige belangwekkende natuurverschijnselen rechtstreeks waar te nemen (zoals het vallen van een stuk krijt de gravitatiewet illustreert), doch de moderne observaties uit de fysika liggen buiten het rechtstreeks hoor- of zienbare. Daarenboven is het doel niet enkel observatie maar zoals Van der Waals het uitdrukte „van meten tot weten”. De fysikus wil namelijk de partituur die het gedrag van materie en straling voorschrijft, en die de grote Architect, „che muove il sole e l'altre stelle”, met wiskundige symbolen schijnt te hebben geschreven, reconstrueren (Fig. 4). Het tovermiddel van het orgelconcert vervalt als de fysikus zijn/haar werk wil toelichten aan een „breder publiek” (in hoge mate gaat het hem over de pijn van de onderzoeker naar de formule in Fig. 4). Er is geen koninklijke weg, ik kan U de formules uit de theoretische fysika niet laten beluisteren.

*) Tijdens de rede werden hier de eerste zes maten van de toccata ten gehore gebracht.



Zo een musicus zou worden aangesteld tot hoogleraar in de muziek, dan zou hij een concert kunnen geven als inaugurale. Of zo een kunstschilder hoogleraar in de schilderkunst wordt, dan zou hij zich kunnen beperken tot een tentoonstelling van zijn werken (conform het volksgezegde: „Een goed schilder spreekt niet over zijn schilderijen”). Waar ten opzichte van zijn collega’s de theoretische fysikus zich kan beperken tot het publiceren van zijn creaties in gespecialiseerde tijdschriften (met de bemoedigende opmerking van Schwinger: „Nobody reads the papers of others”) kan hij dat niet doorvoeren op het moment van een contact met de gemeenschap.

De oplossing die ik hier zal nastreven voor dit dilemma in verband met communicatie, is te werken met beelden. Naar de eerste passage van Alice’s Adventures in Wonderland: „and what is the use of a book”, thought Alice, „without pictures or conversation?”.

Dames en Heren,

Het is mijn bedoeling U te spreken over de fysika van de vaste materie, geplaatst in het algemeen kader van het fundamenteel onderzoek. Vooreerst volgt een situering van de vaste-stoffysika.

SITUERING VAN DE VASTE-STOFFYSIKA

Gecondenseerde materie en, onder andere, vaste stoffen ontstaan blijkbaar spontaan in het heelal. Het is voorzien in het groot draaiboek.

De prehistorie wordt ingedeeld met verwijzingen naar vaste stoffen: „stenen tijdperk”, „bronzen tijdperk” etc. . . Vanaf het bronzen tijdperk transformeren onze voorouders de vaste stoffen. „Mens agit at molem”; onvertaalbaar, maar iets als: „de geest drijft de materie aan” of „de geest zet de materie in beweging”. De oorsprong van de experimentele vaste-stoffysika (met inbegrip van het hanteren van faseovergangen) gaat dus zo gezien minstens terug tot het bronzen tijdperk.

Is het niet merkwaardig dat de alchemisten met behulp van „la pierre philosophale” – de steen der wijzen (dus wel een vaste stof) de basismetalen wilden transformeren tot goud? Van waar komt die – juist gebleken – intuïtie?

Inmiddels zijn we vanuit het stenen (lithos) tijdperk, via de X-stralenstudies van Bragg, de kwantumtheorie en de transistor aangeland in het decennium van de mikro-processoren en de synchrotronstraling-lithografie

De vraag die ik hier nu met U wil behandelen is vooreerst: Welke zijn de grote trends in de fysika van de vaste stof op dit ogenblik?

RECENTE TRENDS

Hoe riskant is het niet, zelfs in de fysika, de toekomst te voorspellen (zonder nader in te gaan op dit probleem voor de politieke geschiedschrijving, waar het volgens Paloczi-Horvath zelfs moeilijk is het verleden te voorspellen). Zei Rutherford niet in 1910: „The energy provided by the breaking down of the atom is a very poor kind of thing. Anyone who expects a source of power from the transformation of these atoms is talking moonshine”. Het is inderdaad niet a priori duidelijk welke ontwikkeling op lange termijn het meest zal bijdragen tot ons inzicht in de materie, noch wat kan bijdragen tot de belangrijkste toepassingen.

Uit het complexe labyrint van recente vooruitgang op het gebied van de vaste stof, heb ik vijf ontwikkelingen geselecteerd voor presentatie. Ze zijn aangeduid in het schema van deze lezing (Fig. 5).

COMMUNICATIE	(<i>toccata</i>)
SITUERING VAN DE VASTE-STOFFYSIKA.	(<i>adagio</i>)
RECENTE TRENDS.	(<i>fuga</i>)
1. SUPERGELEIDBAARHEID EN ELEKTRON-FONONINTERAKTIE.	
2. ELEKTRON-FONONINTERAKTIE EN DE STUDIE VAN POLAIRE HALFGELEIDERS.	
3. SCALING EN UNIVERSALITEIT.	
4. ANDERSON-LOKALISATIE (ORDE-WANORDE).	
5. COMPUTATIONAL PHYSICS EN ELEKTRONISCHE STRUKTUUR.	
⑤ UNIVERSALITEIT.	(<i>finale</i>)

Ik wil daarnaast nog even aanstippen: het gebruik van synchrotronstraling („the light of the future”), een nieuwe experimentele verrijking voor de spectroscopie (waar Nederland via PAMPUS een mooi initiatief neemt).

Supergeleidbaarheid en elektron-fononinteractie

De ontdekking van supergeleidbaarheid door Heike Kamerlingh Onnes te Leiden in 1911 is één der grote gebeurtenissen uit de geschiedenis van de natuurkunde.

Het kwam als een verrassing dat de elektrische weerstand van vele metalen en legeringen plots nul wordt als ze afgekoeld worden tot voldoende lage temperaturen, meestal in het vloeibaar-heliumgebied. Hoe is het inderdaad te verklaren dat een elektrische stroom gedurende jaren door een aan zichzelf overgelaten ring kan lopen zonder dat een meetbare verzwakking optreedt?

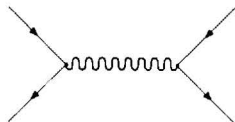
Pas in 1956 zijn de fysici, met de theorie van Bardeen, Cooper en Schrieffer (B.C.S.), als het ware van hun verrassing gekomen. De B.C.S.-theorie verklaart het verschijnsel supergeleiding op basis

van de fundamentele wetten van de natuurkunde (i.e. de kwantumtheorie) die het gedrag van het submicroscopische beschrijven. De B.C.S.-theorie is een culminerend oeuvre dat ondenkbaar is zonder de schitterende bijdragen tot theorie, respectievelijk experiment, van onder andere Meissner en Ochsenfeld in München, van C.J. Gorter te Haarlem en H.B.G. Casimir te Leiden, van Fritz en Heinz London in Oxford, van E. Maxwell in New York, van H. Fröhlich in Liverpool, van J. Bardeen in Illinois, van Pippard in Cambridge, van Ginzburg en Landau in Moskou, van Schafroth, J. Blatt en Butler in Sydney.

Een belangrijke creatieve bijdrage in deze estafette is te danken aan H. Fröhlich. Fröhlich merkte op dat juist de metalen die de hoogste elektrische weerstand hebben bij kamertemperatuur de „beste” supergeleiders zijn. Hij stelde daarom voorop dat de trillende atomen (waarvan de gekwantizeerde energieën *fononen* worden genoemd), die de hoofdoorzaak zijn van de elektrische weerstand bij kamertemperatuur, supergeleidbaarheid mogelijk maakten. Dit was een paradoxale suggestie.

Een tweede paradox is dat elektronen die *fermionen* zijn, zich bij supergeleiding eerder schijnen te gedragen als *bosonen*. Zoals bekend kunnen identieke fermionen niet met meerderen in dezelfde toestand (bijvoorbeeld met dezelfde snelheid) optreden; het zijn individualisten. Bosonen daarentegen willen graag allemaal hetzelfde doen; het zijn de ideale kommunisten. Als het de bosonen lukt om „alle hetzelfde te doen” is er Bose-condensatie. Gecondenseerde bosonen zijn, net als een grote massa betogers, moeilijk te remmen en de analogie met supergeleiding zou aantrekkelijk zijn, ware het niet dat elektronen geen bosonen, maar nu eenmaal fermionen zijn. De elektronen lossen deze paradox op door een truukje: ze paren twee aan twee en vermommen zich dus als bosonen (twee gepaarde fermionen vormen één boson). De elektronen kunnen paren tot een boson (een zogenaamd Cooper-paar) door een fonon (een eenheid van atoomtrilling) met elkaar uit te wisselen (zie Fig. 6). Bose-condensatie van Cooper-paren moet gezien worden als het ontstaan van makroskopische samenhang of coherentie tussen de elektronen (en dus niet als condensatie van vooraf bereide paren). Pas op dat subtiel niveau – en dat is B.C.S. – ontstaat inzicht in de supergeleiding.

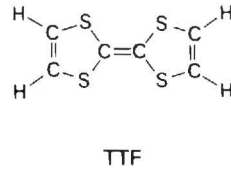
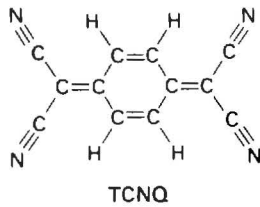
⑥
Dit „Feynman-
diagram” beschrijft de
interactie van twee
elektronen (pijltes) door
de uitwisseling van een
fonon (gegolfde lijn).



Toepassingen

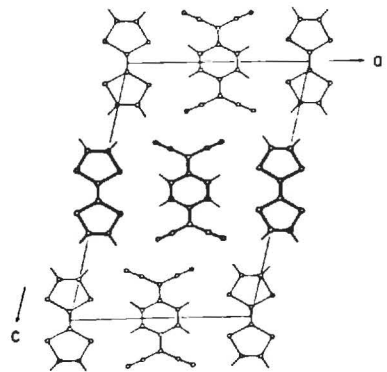
Supergeleiding heeft niet alleen geleid tot diep inzicht in fundamentele en onverwachte natuurfenomenen. Toepassingen zoals „supergeleidende magneten” zijn voldoende bekend. Ook zijn supergeleidende motoren en generatoren en magneto-hydrodynamische vermogensopwekking geprojecteerd voor het jaar 2000. Het Josephson-effekt, dat theoretisch voorspeld werd op grond van inzicht in de subtiele aspecten van de theorie van de supergeleiding, heeft geleid tot verfijnde apparatuur waardoor ondermeer een aantal natuurkonstanten uitermate precies kunnen worden gemeten. Een andere praktische toepassing van het Josephson-effekt is de ontwikkeling van „Josephson-junction” geheugen-chips voor computers. In 1978 hebben onder andere IBM Zürich en Bell Laboratories in Murray Hill nieuwe resultaten aangekondigd. Met deze supergeleidende chips kunnen schakelingssnelheden van één per 50 picoseconden worden bereikt.

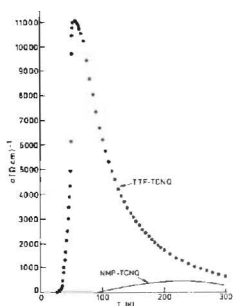
Een van de huidige trends van het onderzoek inzake supergeleiding betreft pogingen om materialen met hoge overgangs-



Crystal data:
 $a = 12.298 \text{ \AA}$
 $b = 3.819 \text{ \AA}$
 $c = 18.468 \text{ \AA}$
 $\beta = 104.46^\circ$
 $V = 839.9 \text{ \AA}^3$
 $Z = 2$
 $d = 1.62 \text{ g/cm}^3$

⑦ TTF-TCNQ heeft één-dimensionale karakteristieken. De componenten TTF en TCNQ zijn geordend, telkens volgens onderling evenwijdige rechten. ref. [2]





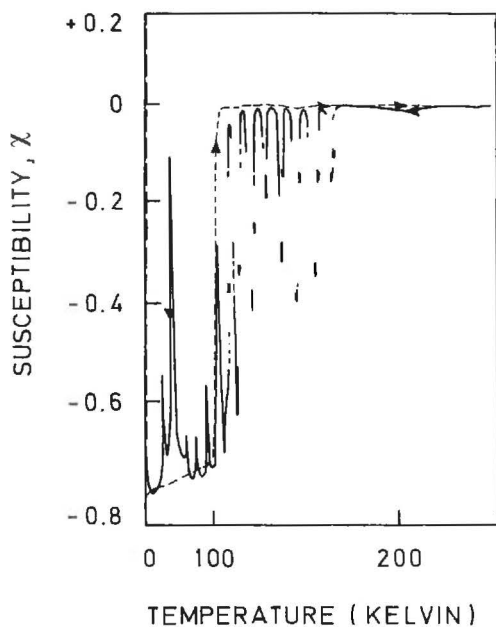
⑧

De piek in de elektrische geleidbaarheid van TTF-TCNQ nabij 60°K wordt toegeschreven aan het „één-dimensionaal” gedrag van de geleidingselektronen. De meting van deze piek ligt aan de basis van de huidige interesse in één-dimensionale systemen. ref. [2]

temperatuur (T_c) te maken waardoor energie economisch meer rendabel kan worden getransporteerd. Het rekord is hier Nb_3Ge waarvoor $T_c = 23,2$ K. De theoretische evaluatie van T_c voor deze materialen begint ook stilaan tot de mogelijkheden te behoren.

Bij het speuren naar materialen met hogere T_c werden zelfs beloftevolle nieuwe organische stoffen ontdekt. In het bijzonder TTF-TCNQ (Fig. 7) werd tijdens de laatste paar jaar grondig onderzocht nadat was gebleken dat de elektrische geleidbaarheid van deze organische stof die uit quasi-ééndimensionale ketens bestaat bij 60 K plots sterk toeneemt (Fig. 8).

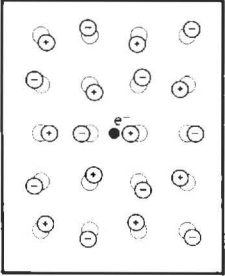
De meest besproken recente ontwikkeling is de observatie door experimentatoren in Moskou (1978) van diamagnetische signalen in koperchloride ($CuCl$) tot 150 K en bij zowat 5 kbar (Fig. 9). Deze diamagnetische signalen wijzen op de mogelijkheid van supergeleiding (onder druk) tot temperaturen circa vijf maal hoger dan tot hertoe bereikbaar. Talloze laboratoria hebben sinds 1978 hun inspanningen op $CuCl$ geconcentreerd.



⑨

Deze, in 1978 ontdekte, fluctuaties in de magnetische susceptibiliteit van $CuCl$ hangen mogelijk samen met supergeleidbaarheid. ref. [3]

Elektron-fononinteraktie en de studie van polaire halfgeleiders

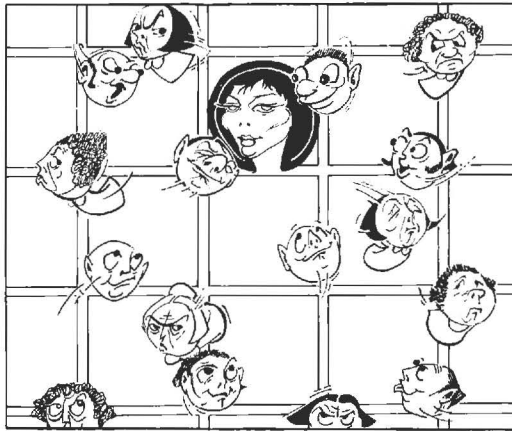


10

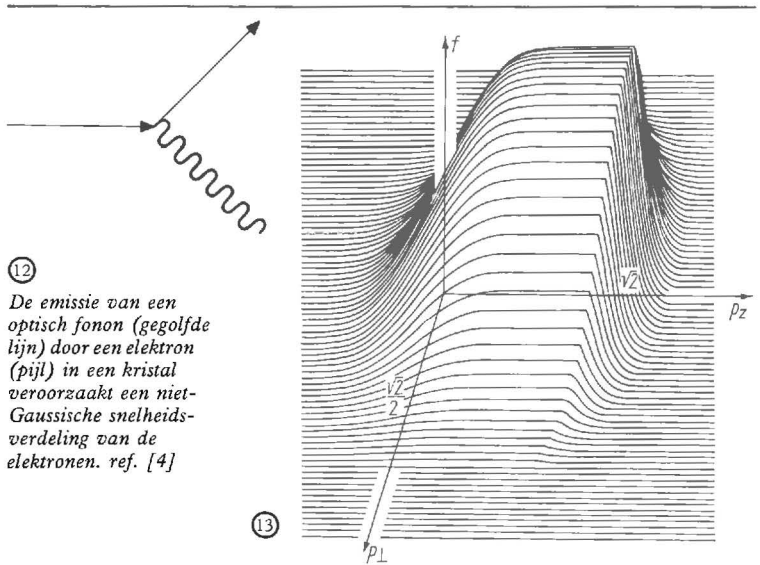
Een der recente trends in de fysika van de vaste stof is het gedetailleerd berekenen van het samenspel van de bewegingen van de elektronen en de atoomkernen in polaire en ionische halfgeleiders. De polaire halfgeleiders spelen een grote rol in de moderne elektronika en mikro-elektronika. Om hogervermelde berekening mogelijk te maken is een speciaal concept onmisbaar: het polaron-concept. Wat is nu dat polaron?

Als een geleidingselektron beweegt door een polaire halfgeleider, dan trekt het de positieve ionen aan en stoot de negatieve af. Er ontstaat een vervorming rond het elektron (Fig. 10). Het elektron samen met de vervorming er omheen wordt een „polaron” genoemd. De ionen trillen rondom – nu verplaatste – evenwichtsposities zodat het polaron een dynamisch geheel is. Het polaron is een model waar via één deeltje een geheel van complexe verschijnselen wordt opgevangen.

Sta me toe U dit concept ietwat lichtvoetiger (zoniet lichtvaardiger) voor te stellen. Stel U even voor het grote schaakbord geschilderd op het bekende plein te Marostica, Italië. Op de hoekpunten van elk der vakken „staan” jongelui, afwisselend jongens en meisjes, (modern) te dansen. Nu komt een verrukkelijk meisje aangewandeld door dit tafereel. Het effect – U kunt het zich voorstellen – is een zekere deining onder onze dansers (naar het



11



⑫
 De emissie van een optisch fonon (gegolfde lijn) door een elektron (pijl) in een kristal veroorzaakt een niet-Gaussische snelheidsverdeling van de elektronen. ref. [4]

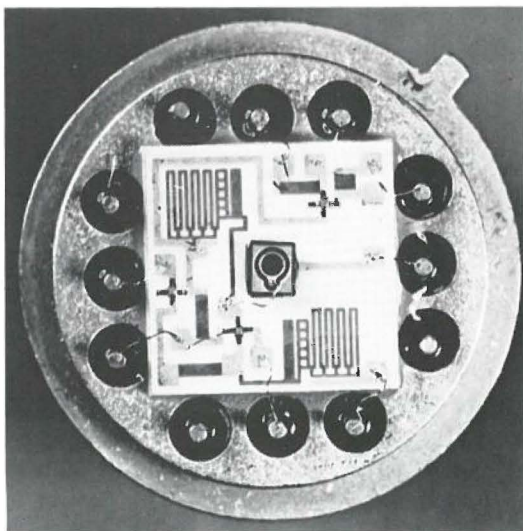
⑬

meisje toe, respectievelijk ervan weg). Het volgende beeld (Fig. 11) ontstaat. U ziet dat een polarisatie wordt geïnduceerd. Dit beeld illustreert het polaron-concept en toont daarenboven aan dat de fysici niet kunnen weerstaan aan hun neiging om de wetenschap een menselijke dimensie te geven.

Dit polaron heeft aparte eigenschappen: bij zijn tocht door het kristal onder invloed van een spanning voelt het de trillende atoomkernen (fononen) en als het voldoende snel beweegt, stuurt het steeds opnieuw een schokgolf door het kristal (het flikkert als het ware). Dit is te vergelijken met de supersonische knal die een vliegtuig uitstuurt bij Mach 1. (Fig. 12)

Het komt er nu op aan de snelheid van polaronen te berekenen. Dit kan rekentechnisch niet zonder dat één der basisvergelijkingen van de fysika, namelijk de Boltzmann-vergelijking, wordt opgelost. Daarbij wordt vooreerst het aantal polaronen dat een welbepaalde snelheid heeft, berekend. In Fig. 13 ziet U de resultaten die we daarvoor hebben bekommen. De „hoogte” van het oppervlak dat U ziet, is een maat voor het aantal elektronen met impuls p_z (in de richting van het aangelegde elektrisch veld) en p_L (in de richting loodrecht op het veld). U ziet dat deze verdeling verre van een normaalverdeling of „klokkencurve” is.

⑭ Het objekt in het middelpunt van deze gedrukte schakeling is een silicium avalanche-fotodiode. De diode is ongeveer een vierkante millimeter groot. Deze ontvanger wordt gebruikt voor optische tele-communicatie. ref. [5]



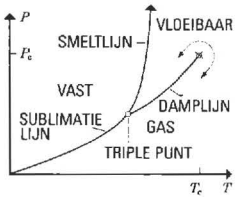
Toepassingen

De theoretische studie van elektron-fononinteractie vindt ondermeer toepassingen bij de avalanche-fotodiode. Deze fotodiodes (Fig. 14) zijn zeer gevoelige detectoren van elektromagnetische straling die in de hedendaagse fysika (ondermeer bij studies van elementaire deeltjes en astro-fysika) onmisbaar zijn. In de avalanche-fotodiode wordt de ruis minimaal gemaakt door elektronen te exciteren via scherp gedefinieerde energiesprongen. Processen zoals weergegeven in Fig. 12 spelen daarbij een grote rol. Onrechtstreeks: omdat de elektronen geremd worden door emissie van fononen. Rechtstreeks: als de fononlijn in Fig. 12 gedacht wordt een elektron-gat paar voor te stellen, beschrijft deze figuur avalanche.

Aan de Technische Hogeschool Eindhoven worden in de groep halfgeleiderfysika van de vakgroep Vaste Stof experimentele studies verricht over de beweeglijkheid van polaronen in polaire halfgeleiders, ook in het gebied van avalanche. In de projecten van de groep fysische materiaalkunde van de vakgroep Vaste Stof komen polaire en ionaire kristallen eveneens aan bod.

Het is de hoop dat samenwerking tussen theorie en experiment terzake zal leiden tot vooruitgang in het begrijpen van het „gewone” geleidingsmechanisme in vaste stoffen; een probleem dat verre van opgelost is ondanks de grote vooruitgang die in het verleden werd gemaakt.

Scaling en universaliteit



15

Fazeovergangen en kritisch punt. [6]

Een der realisaties in de theoretische fysika van de laatste 15 jaar, die men zonder aarzelen de kwalificatie groots kan toekennen, is gegroeid uit de studie van fazeovergangen nabij kritische punten. Het is de volgende trend waarover ik het wil hebben. De groep magnetische ordeningsverschijnselen van de vakgroep Vaste Stof is ondermeer op dit gebied werkzaam.

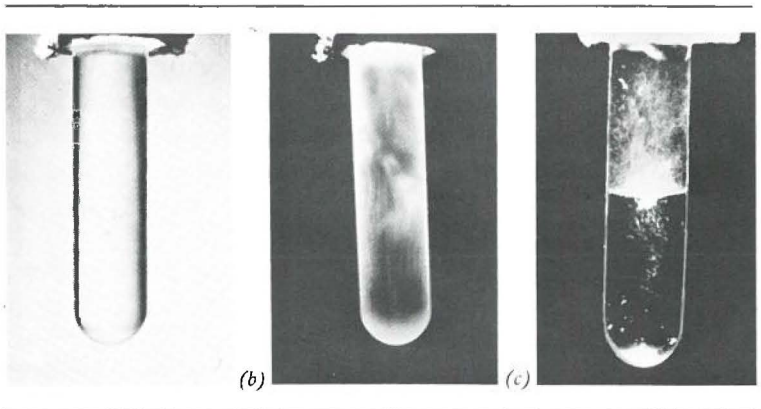
Fig. 15 toont de temperatuur en druk waarbij water, ijs, respectievelijk damp optreden. De fazeovergangen tussen damp en water eindigen in een punt (P_c , T_c). Dit is een „kritisch” punt. Voor temperaturen hoger dan T_c kan geen onderscheid meer gemaakt worden tussen water en damp. Van der Waals en Curie hebben gewezen op het gelijkaardig kritisch gedrag in ongelijkaardige systemen: magneten, binaire legeringen. Totaal verschillende specimens kunnen precies dezelfde fysische verschijnselen veroorzaken (Fig. 16).

Een fenomeen dat optreedt bij elk systeem in de nabijheid van een kritisch punt is het voorkomen van lange-afstandsfluctuaties, onder andere van de dichtheid in het geval van water – waterdamp. Deze lange-afstandsfluctuaties van de dichtheid veroorzaken het welbekend melkachtig uitzicht van vloeistoffen of vloeistofmengsels nabij het kritisch punt (Fig. 17).

De lange-afstandsfluctuaties „zien” de details van het systeem niet. Daarom kan het kritisch gedrag voor verschillende stoffen hetzelfde zijn. Dit inzicht heeft geleid tot de universaliteits-



16



17 Gedrag van een vloeistof bij verlaging van de temperatuur door de kritische temperatuur.

(a) $T \gg T_c$

(b) $T \approx T_c$

(c) $T \ll T_c$

ref. [6]

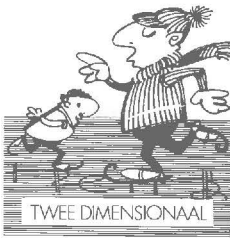
(a)

(b)

(c)



EEN DIMENSIONAAL



TWEE DIMENSIONAAL

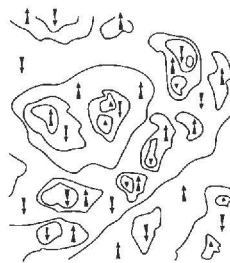


DRIE DIMENSIONAAL

18

19

Kadanoffs
druppeltjes, in
druppeltjes, . . .”
ref. [7]



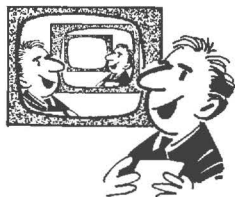
hypothese die ervan uitgaat dat het kritisch gedrag van elke materie enkel afhangt van een paar zeer algemene karakteristieken. Een dezer karakteristieken is de dimensionaliteit van een systeem. De fysika is heel verschillend in één dimensie, twee dimensies, of drie dimensies (Fig. 18). Universaliteit verschaft evenwel geen precieze wet voor het kritisch gedrag in een specifiek systeem. Het grote creatieve moment komt hier als Leo Kadanoff in 1966 een plastische, intuïtieve inval krijgt: hij realiseert zich plots, in een globaal beeld, hoe materie nabij een kritisch punt geometrisch, in de ruimte, gestructureerd is: nabij een kritisch punt ontstaan in het systeem geordende gebiedjes (denk aan magneetjes) van allerlei afmetingen kleiner dan een zekere correlatielengte L . Doch ieder gebiedje met lengte L is zelf bijna kritisch en daarom zijn er binnen zo'n gebiedje opnieuw kleinere geordende gebiedjes (Fig. 19). Kadanoff omschrijft dit beeld als „droplets, inside of droplets, inside of droplets, . . .”. Kadanoffs beeld is dat materie nabij een kritisch punt, onder een mikroskoop bestudeerd, binnen brede grenzen het zelfde patroon blijft vertonen wat de vergroting ook weze. Dit is dan het concept van scaling. Uit de scaling-hypothese volgt dat het fysisch gedrag van een systeem, nabij een kritisch punt, kan afgeleid worden uit een transformatie van de schaal der lengten (Fig. 20). Kadanoff was in staat met dit begrip verbanden te vinden tussen het kritisch gedrag van verschillende fysische grootheden.

Scaling is een zeer eenvoudige idee, zoals het past voor een groot idee. Het schilderij van Magritte „The Lost Jockey” evokeert het concept scaling (de bomen hebben de vorm van een blad). (Fig. 21)

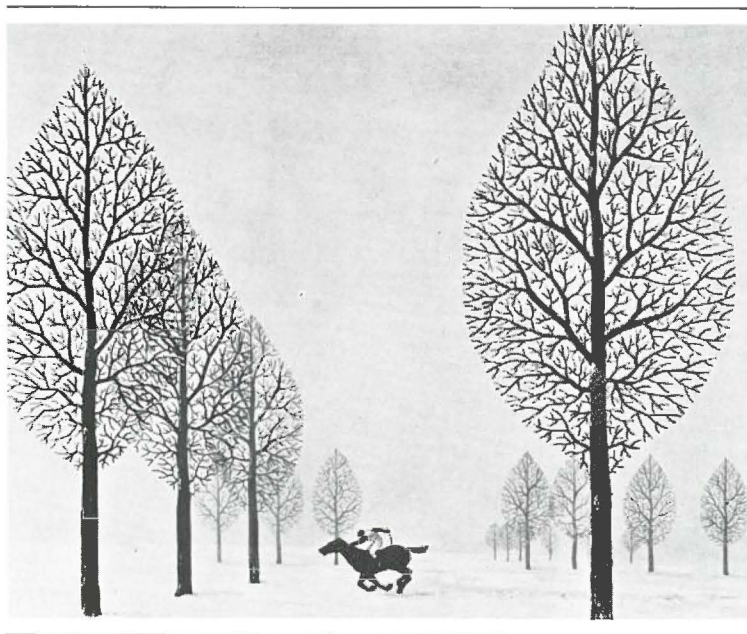
Scaling en universaliteit zijn tot vandaag hypothesen, maar dan visionaire hypothesen die het hebben mogelijk gemaakt orde te scheppen in een ganse fauna en flora van kritische fenomenen die in de loop van de laatste eeuw gemeten werden en tot voor 1966 een grote verzameling weinig samenhangende gegevens vormden.

Het verhaal stopt evenwel niet bij het inzicht van Kadanoff. Dit inzicht was het thema, het Leitmotiv. Toen kwam Wilson. In een werk van hoge virtuositeit slaagde hij erin een fuga te componeren, waardig aan Kadanoffs thema. Universaliteit en scaling werden omgezet in een praktisch hanteerbare wiskundige techniek. „Renormalisatiegroep” is het magisch woord voor de Kadanoff-Wilson-theorie.

Een verheugend aspect van de Kadanoff-Wilson-theorie is dat heel ingewikkelde fysische systemen en erg eenvoudige modellen



20



21

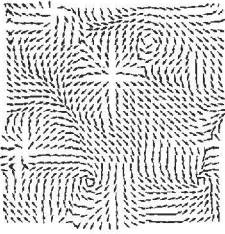
kunnen leiden tot precies hetzelfde kritische gedrag. De kunst bestaat er dan in een eenvoudig model te concipiëren dat, nabij een kritisch punt, nog hetzelfde gedrag vertoont als het oorspronkelijke fysische systeem.

De Kadanoff-Wilson-theorie is de „grote sprong voorwaarts” in de studie van systemen met veel deeltjes en zal wellicht van betekenis zijn bij de verdere studie van een onopgelost sleutelprobleem in de fysika: de beschrijving van de makrokosmos uitgaande van de mikrokosmos.

Toepassingen

Ik wil thans nog twee nieuwe ontwikkelingen op het gebied van de vaste-stoffysika vermelden waar de Kadanoff-Wilson-theorie een rol speelt.

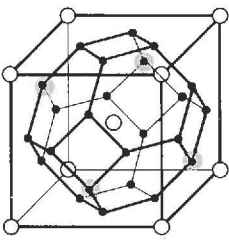
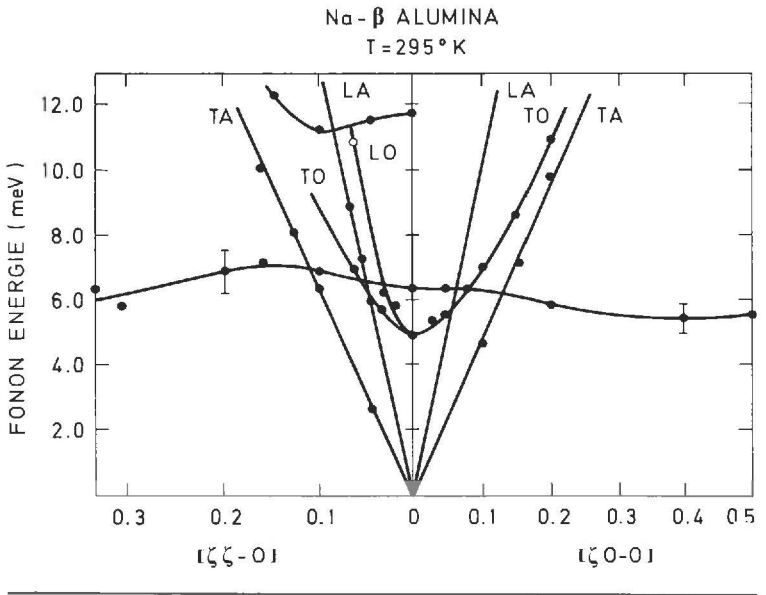
i) Vooreerst is er de voorspelling van M. Kosterlitz en D. Thouless dat voor zekere twee-dimensionale substanties (bijvoorbeeld dunne filmen van He) een nieuw type fase-overgang optreedt. Er is nu experimentele evidentie (1978) dat deze voorspelling juist is. De Kadanoff-Wilson-theorie heeft aldus geleid tot de theoretische voorspelling van een tevoren niet gekende toestand van de materie



22) Computersimulatie van het ontstaan van vortex-anti-vortex zones in twee-dimensionale (spin-)systemen. ref. [8]

23) Fononendispersie (frequentie als functie van de inverse golflengte) in Na- β -Alumina. Het vloeistofachtig gedrag van één der componenten volgt uit de vrijwel konstante frequentie van de trillingswijze bij ca. 6 eV. ref [9]

waarbij paren van vortices en anti-vortices worden gevormd in de geordende toestand (Fig. 22).



24) Interstitiële plaatsen ingenomen door waterstof in het metaal Ta. Open cirkels zijn Ta atomen. De kleine volle cirkels geven mogelijke posities aan voor H atomen. De grote volle cirkels geven de Ta structuur aan. ref. [10]

ii) Een tweede ontwikkeling betreft de studie van superionische geleiders (zoals AgI, PbCl₂, MgCl₂, etc. . . .). In deze materialen is één der ionen erg beweeglijk (Ag⁺ in AgI) zodat men wel spreekt van vaste elektrolyten. Daarbij treedt andermaal een nieuwsoortige toestand van de materie op: binnen bepaalde temperatuurgebieden vormen de Ag⁺ ionen een vloeistof terwijl de I⁻ ionen een rooster bepalen. Er ontstaat een vloeistof (cf. Fig. 23) opgesloten in een vaste stof en daarbij treden allerlei faseovergangen op. De superionische geleiders worden gebruikt bij studies van batterijen die enkel uit vaste stoffen zijn opgebouwd.

De analogie met waterstof opgelost in sommige transitie-metalen, die daarbij als spons fungeren, is hier eveneens treffend (Fig. 24).

Een technische opmerking zij hier nog aan toegevoegd. De verdere studie van het verband met pad-integralen, de studie van de Wigner-kondensatie en van de Fröhlich-run-away lijken interessante suggesties voor onderzoek met de Wilson-Kadanoff-theorie.

Anderson-lokalisatie (orde-wanorde)



25

De vierde trend in de moderne vaste-stoffysika, die ik met U wil bespreken, betreft de studie van de niet-geordende systemen.

De leerboeken over vaste stof zijn meestal voor 90 à 100% gewijd aan kristallijne vaste stoffen. Dit zal in de toekomst niet langer het geval zijn.

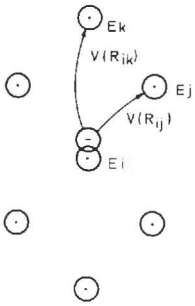
Vooreerst is, onder de vaste stoffen, de kristalvorm de uitzondering en niet de regel. Diamant en kwarts zijn eerder zeldzaam. De meest voorkomende vaste stoffen zijn polymeren (rubber, schuimrubber, plastics, hout, etc.). Maar ook amorfe materialen, bijvoorbeeld glas, worden veel aangetroffen. N. Mott drukt terecht zijn verbazing uit over het feit dat vragen zoals „hoe kan glas transparant zijn?” pas gedurende de laatste tien jaar theoretisch werden bestudeerd. De kunst om glas te maken gaat immers terug tot de prehistorische tijden. Daarenboven werden amorfe vaste stoffen sinds lange tijd gebruikt in de industrie, ondermeer als isolatoren of in de xerografie.

De reden voor de laattijdige studie van amorfe systemen ligt waarschijnlijk in een natuurlijke afkeer van de natuurkundige van „wanorde”. Amorfe vaste stoffen werden toch liever opgevat als een soort „slordige”, niet ordentelijke vaste stoffen. Het leek wel ongepast voor een fysikus onderzoek te verrichten over glas, daar waar er toch kwarts bestaat („Good order is the foundation of all good things”, zei Edmund Burke).

De recente opmars van de niet-geordende vaste stoffen (in het bijzonder de amorfe halfgeleiders) met o.m. hun greep op de toekomst van computergeheugens, wordt ingeleid met een magistraal, visionair theoretisch stuk van Phil Anderson over elektronen in niet-geordende systemen.

Ik zal pogen dit werk van Anderson toe te lichten. Twee stappen zijn cruciaal in dit werk: 1) het creëren van een model voor een amorfe vaste stof, 2) het wiskundig oplossen van dit model.

Bij de eerste stap, het creëren van het model, is de kunst het essentiële van het bijkomstige te scheiden. De schetsen van Rembrandt zijn daar staaltjes van; met enige trekken van een veer slaagt hij erin het karakter van een kind uit te beelden. (Fig. 25) De meer cerebrale trekken – waarmede Anderson een ongeordend systeem kenmerkt – zijn (Fig. 26):



- a) het karakteriseren van een systeem met behulp van de energie nodig opdat een elektron zou overspringen van één atoom naar een ander. Deze energie V hangt enkel af van de „toevallige” afstand R_{ij} tussen de atomen „nummer” i en „nummer” j ;
- b) het karakteriseren van de elektronen in het ongeordend systeem door een statistische verdeling van hun energie (E_i voor het atoom op de plaats „nummer” i).

○ Andersons abstracte schets van een ongeordend systeem geeft aan de fysikus hetzelfde soort informatie (en esthetische beleving) als de schets van Rembrandt.

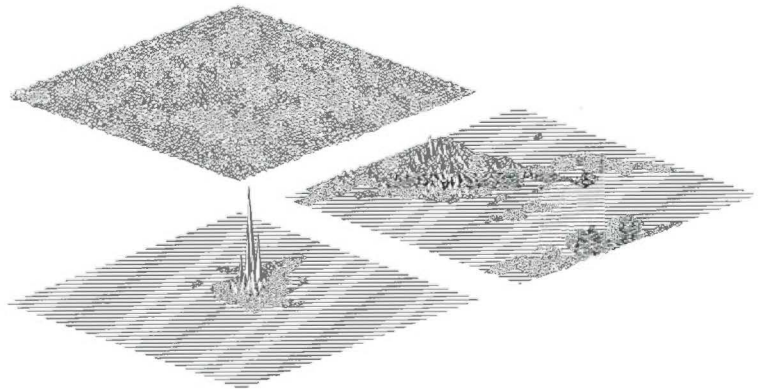
26
Andersons model voor diffusie in een „random” rooster. ref. [11]

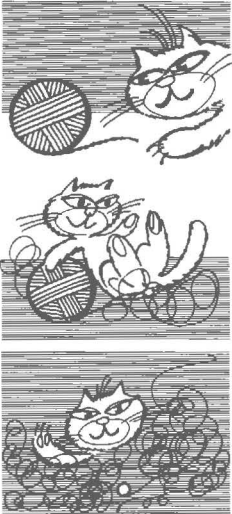
Bij de tweede stap, het wiskundig oplossen van het model, realiseert Anderson zich een evidente – maar voor niet-geordende systemen cruciale – hinderlaag: hij mag hier geen gemiddelde uitrekenen! Hij moet werken met waarschijnlijkheidsverdelingen en niet met gemiddelden omdat enkel iedere specifieke situatie ons interesseert. Tevoren had iedereen met gemiddelden gerekend. Hier is het penetrerende creatieve moment.

Na zijn model aldus opgelost te hebben komt Anderson tot de bevinding dat elektronen in niet-geordende systemen twee dingen kunnen doen:

- a) ofwel kunnen ze „rondlopen” in het ganse systeem (ze zijn als nomaden in „extended states”); dit verklaart waarom elektrische stroom kan lopen door sommige amorfe materialen;
- b) ofwel kunnen de elektronen in de buurt blijven van één bepaald

27 Computersimulatie van Anderson-lokalizatie in een niet-geordend systeem. ref. [12]





28

punt in de niet-geordende vaste stof. Ze zijn honkvast. Dit is Anderson-lokalisatie. Deze lokalisatie verklaart hoe in amorfe systemen metaal-isolatorovergangen mogelijk zijn.

Het concept Anderson-lokalisatie wordt dan resumerend geïllustreerd via Fig. 27 uit het werk van Yoshino en Okazaki die de waarschijnlijkheid hebben getekend dat een elektron ergens wordt aangetroffen in een twee-dimensionaal amorf medium. U kunt zich bij Fig. 27 „rotsen” in een „meer” voorstellen. Het elektron wordt dan het meest aangetroffen waar de „rotsen” het „hoogst” zijn en helemaal niet waar „water” te zien is. Wanneer het niet-geordend karakter toeneemt, ontstaat lokalisatie. (Fig. 28)

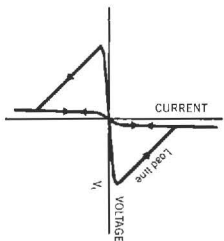
Het werk van Anderson toont dat een niet-geordend systeem niet een soort onvolmaakt geordend systeem is maar wel een fundamenteel verschillend systeem. Het gaat om een eigen „toestand van de materie”, die zijn aparte plaats inneemt in het geheel van de vaste-stoffysika. Met andere woorden, het „lelijke eendje” (van de niet-geordende vaste stoffen) is nu, door het sprookjesachtige werk van Anderson, uitgegroeid tot een „prachtige zwaan”. Anderson heeft orde geassocieerd aan intrinsieke wanorde.

Toepassingen

Alhoewel Andersons werk reeds in 1956 was voltooid, is het pas veel later, in het laatste decennium, mede onder impuls van N. Mott en na veel controverse, de basis geworden van de vooruitgang van de kennis en verfijnde toepassingen van de niet-geordende vaste stoffen.

Een belangrijke recente vooruitgang op gebied van amorfe halfgeleiders betreft de zogenaamde chalcogenide glazen (die S, Se of Te bevatten). De laatste 2 jaar is men, op theoretische gronden, gaan inzien waarom deze chalcogenide glazen ongevoelig leken voor chemische onzuiverheden en daarenboven geen magnetisme vertoonden. Uitgaande van dit theoretisch inzicht is Ovshinsky erin geslaagd de elektrische geleidbaarheid van chalcogenide glazen te „tunen” of regelbaar te maken. Deze nieuwe inzichten hebben bijgedragen tot ontwikkelingen op het gebied van de niet op zilver-gebaseerde fotografie en andere visualisatietechnieken.

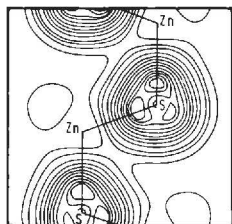
De amorfe halfgeleiders liggen tevens aan de basis van het OVONIC switching-device (Fig. 29).



29

Stroom-spanningskarakteristiek van een (amorfe) geheugen-switch, ref. [13]

„Computational Physics” en „Elektronische Structuur”



③⑩
Totale valentie-elektron-ladingsdichtheid voor hexagonaal ZnS in een bepaald vlak (110). De punten van gelijke lading zijn onderling verbonden. De lading is het grootst in de „binnenste” contours. ref. [14]

Een belangrijke trend, de laatste die ik behandel, in het recente onderzoek is het creëren van computerprogramma's voor de berekening van de elektronische structuur van de vaste stoffen, molekulen en atomen. Deze programma's zijn naar mijn mening voorbeelden van wat in het postindustriële tijdperk „grondstoffen” zullen zijn. Zij ontstaan uit computational physics, een kruising tussen theoretische natuurkunde en toegepaste wiskunde die in teamverband op ideale wijze tot stand kan komen. Meer en meer maken deze programma's het mogelijk de fysische eigenschappen van materialen in detail te berekenen. De dynamiek van de Amerikanen en hun neiging om initiatieven aan te moedigen, hebben ervoor gezorgd dat zij op dit gebied een aanzienlijke voorsprong hebben.

Het werk van Marvin Cohen illustreert de mogelijkheden van „computational physics”. In het bijzonder zijn berekeningen van de elektronische ladingsverdeling aan het oppervlak van halfgeleiders geven nieuwe inzichten in de oorsprong van de eigenschappen van vaste stoffen en het mechanisme van katalyse. (Fig. 30)

In het kader van het project ESIS (Electronic Structure in Solids, 1973-1978) werd een poging ondernomen om bij deze ontwikkeling aan te sluiten in samenwerking tussen de Universiteit Antwerpen en de Universiteit de l'Etat à Liège.

De onderzoekingen over Cd_3As_2 en InSb van de Technische Hogeschool Eindhoven kunnen in nuttige samenwerking met „computational physics” gebeuren.

Dames en Heren, ik wil U thans spreken over

UNIVERSALITEIT in het fundamenteel onderzoek

Bij het begin van deze rede is verwezen naar het bronzen tijdperk toen onze voorouders de vaste stof reeds transformeerden. „Mens agitatomem”. Deze kenspreuk van de T.H. heeft me steeds geïntrigeerd.

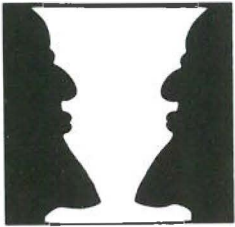
Laten we even, zij het schetsmatig, ingaan op deze wisselwerking tussen de geest en de materie.

Het onderzoek van de natuur is een interactie tussen de onderzoekers en de natuur. Dit geldt zowel voor de natuurkunde als voor de biowetenschappen. Ik zal evenwel het betoog formuleren

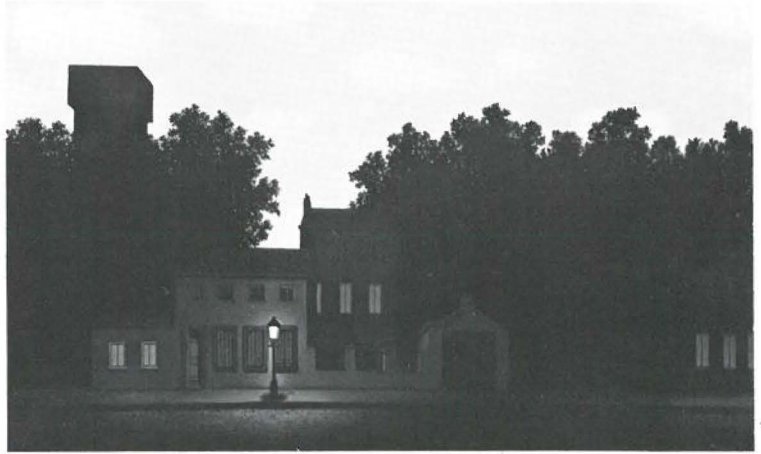
vanuit het belevingsveld van de natuurkundige omdat daarbij de eenvoudigste, wellicht best kwantiseerbare, fundamentele vraagstukken over de natuur worden opgeklaard. De natuurkundige observeert de natuur, induceert een wetmatigheid en deze wetmatigheid kan alleen getest worden door de natuur opnieuw (via het experiment) te ondervragen. Dit is de basismethode die illustreert dat theorie en experiment elkaar vooruitdrijven. In zijn manier van ondervragen wordt de navorser voortdurend beïnvloed door de manier waarop de materie antwoordt. Dit wil zeggen: door haar eigen aard induceert de materie een methodologie, een bepaald denkpatroon. Dit denkpatroon is ondermeer gekenmerkt door het inbouwen van de verrassingsverwachting, het ontleden van paradoxen, het creëren van modellen, het ernstig nemen van „creatieve-intuïtieve momenten”, etc.

Ik neem deze kenmerken nog even kort met U door:

1. In de eerste plaats „ingebouwde verrassingsverwachting”: De natuurkunde wordt vooral interessant als theorie en experiment niet kloppen. De kennis en het inzicht schijnen te ontstaan uit een soort „nevel”. Uit een dynamische interactie tussen verschillende visies op een fenomeen. Stelt Fig. 31 een vaas dan wel twee gezichten voor? Het concept van de Anderson-lokalisatie is gegroeid uit het falen van de bestaande theorie bij het verklaren van zekere elektronenspinresonantie-experimenten.
2. Ten tweede noemde ik de uitwerking van paradoxen: Men moest Newton zijn om te zien dat de maan valt als iedereen ziet dat ze niet valt (Paul Valéry). De theorie van de supergeleidbaarheid illustreert dit ook treffend. Iedereen „zag in” dat de fononen de supergeleidbaarheid beletten en men moest Fröhlich zijn om „in te zien” dat fononen supergeleidbaarheid juist mogelijk maken.
3. Ten derde: het creëren van modellen: De schets van Rembrandt. Jaren berekeningen met uitgekiende computerprogramma’s, met alle details die een niet-geordende materie beschrijven zoveel mogelijk meegerekend, zouden wellicht nooit het eenvoudige Anderson-model kunnen ontdekken.
4. En dan, tenslotte, is daar het creatieve moment, de intuïtie: het creatief moment is „magic without magic” (titel van een Festschrift voor John Wheeler). Het is alsof in de geest een symmetrieverandering optreedt, alsof zich in de hersenen een wanorde-orde-overgang afspeelt. Zoals bij Magritte’s „The Empire of Light II” als de waarnemer inziet dat hier „dag” en „nacht”



31



32

verschil is (Fig. 32). Het grote idee dat ontstaat uit het creatieve moment is bijna steeds eenvoudig. Kadanoffs visie van scaling is daar een voorbeeld van. Ondanks zijn eenvoud kan het grote idee lang op zich laten wachten. Een der sleutelideeën in de theorie van supergeleidbaarheid (namelijk het Cooper-paar) werd geconcipeerd in 1956, dit is 45 jaar na Kamerlingh Onnes' grote ontdekking.

Het merkwaardige is nu dat zowel het denkpatroon als een aantal concepten van de natuurkunde inherent een bredere toepasbaarheid blijken te bezitten dan die voor het object naar aanleiding waarvan ze ontstonden. Zo wordt de Kadanoff-Wilson-theorie, die ontstond bij de studie van kritische punten (bijvoorbeeld in vloeistoffen) nu toegepast bij studies van elementaire deeltjes en zelfs spekulatief bij scenario's over het ontstaan van de galaxieën. Daarenboven heeft Weidlich de Kadanoff-Wilson-theorie toegepast op de gedragingen van sociale groepen. Economie werkt met canonische variabelen net als de analytische mechanica. Deze lijst kan gemakkelijk uitgebreid worden, doch ik wou U slechts een schets tonen.

Het komt me voor dat deze uitbreidbaarheid van denkpatroon en concepten evenzeer geldt voor de scheikunde en de bio-wetenschappen waar de te bestuderen materie en de fenomenen evenwel een andere soort complexiteit vertonen.

De intentie van de onderzoeker was niet om een universele

onderzoeksmethode te maken. Toch heeft de materie (het onderzoeksobject) zijn geest ertoe gedreven. De materie heeft de geest van de onderzoeker gekneed. *Moles agit at mentem!*

Hoewel het niet de bedoeling van een *extraordinarius* kan zijn iets zo ingrijpends voor te stellen als het inverteren van deze trouwens indringende spreuk, komt het me toch voor dat de omgekeerde spreuk van de T.H. even verdedigbaar is. Daarenboven komt de evolutie van de materie in het heelal erop neer dat de materie zich zo gaat ordenen en dusdanig evolueert dat het bewustzijn ontstaat en groeit.

Mens agit at molem, jazekeer, maar ook moles agit at mentem (Fig. 33).

De oorspronkelijke tekst van de dichter gaf reeds een hint in de goede richting: „*mens agit at molem et magno se corpore miscet*” (Vergilius, *Aeneis*, 6de boek, 727ste vers). Naar Bohrs gezegd: „... two sorts of truth: trivialities, where opposites are obviously absurd and profound truths, recognized by the fact that the opposite is also a profound truth”.

Sta me toe even drie kanttekeningen te maken:

- a) Ten eerste: Er zijn er die wel eens beweren dat vakidiotie de onderzoeker bedreigt, zo al niet kenmerkt. Hoe triviaal wordt deze bedenking als men kennis maakt met de ware universele gedaante van het fundamenteel onderzoek. Het wereldbeeld waartoe de natuurwetenschappen bijdragen, uitgaande van onderzoeksdrang en gedreven door verwondering en nieuwsgierigheid, is onmiskenbaar een van de grote bijdragen van de menselijke cultuur.
- b) Tweede kanttekening: Bovendien wordt de vraag naar de relevantie van het fundamenteel onderzoek zo nu en dan tegenover de onderzoeker gesteld. Ook deze vraag wordt best vanuit het universeel karakter van het wetenschappelijk onderzoek benaderd. Casimirs uitspraak: „de irrelevantie van de relevantie” is hier het Leitmotiv. Het onderzoek op zichzelf naar het „Clockwork” van de natuur is één der meest fascinerende menselijke bedrijvigheden. Het menselijk denken ontwikkelt zich tot hogere vormen mede door de ontwikkeling van de denkpatronen in de natuurwetenschappen. Onrechtstreeks houdt dit tevens een pleidooi voor de geesteswetenschappen in.



34

c) Derde kanttekening: Het voorgaande brengt mij ertoe nog een bedenking te maken over het georiënteerd onderzoek. Naar mijn oordeel is het „beste georiënteerd onderzoek het fundamenteel onderzoek”. Zinvol georiënteerd onderzoek was wellicht het bedenken van methodes om vacuümbuizen te verbeteren, superb georiënteerd onderzoek is, achteraf gezien, het fundamenteel onderzoek dat leidt tot de transistor: „Het beste georiënteerd onderzoek is dus niet georiënteerd”.

Aan de intrinsieke universaliteit van het wetenschappelijk onderzoek voegt zich nog toe de universaliteit van het internationaal karakter eigen aan wetenschap, kunst, technologie, . . . Naar het woord van Weiskopf: „De fysika is een aparte taal maar eens aangeleerd is ze ook een instrument voor een meer verenigd mensdom”. (Fig. 34)

Thans wil ik graag enige woorden van erkentelijkheid uitspreken.

In de eerste plaats wil ik mijn eerbiedige dank betuigen aan *Hare Majesteit de Koningin* die mijn benoeming tot buitengewoon hoogleraar aan deze hogeschool heeft willen bekrachtigen.

Waarde Steenland. Toen ik jong student was te Leuven leerde ik je kennen via een lezing en hoorde van je leidinggevend werk op gebied van magnetisme bij zeer lage temperaturen. Ik heb het genoegen gehad je te leren kennen als een man met visie en persoonlijke stijl die je team weet te bezielen en te leiden naar internationaal niveau. Jij hebt je ingezet om mij aan de T.H.E. als theoreticus te verbinden. Dit vind ik een grote eer en ik ben je er erkentelijk voor.

Waarde Van der Maesen. Jij hebt me in 1964 uitgenodigd voor een der eerste lezingen die ik ooit gaf. Ondertussen heb ik het genoegen geregeld met jou te mogen discussiëren bijvoorbeeld over de Boltzmann-vergelijking of over allerhande penetrerende fysikavragen, die jij steeds weer bedenkt.

Waarde Gijsman. Je weet dat de gesprekken die wij hebben mij altijd de neiging geven iets meer te gaan nadenken over He. Ik hoop dat deze prettige kontakten, die ik zeer op prijs stel, zich verder zullen ontwikkelen.



③⑤ ③⑥ ref. [15]

Beste Frans Blom, Marijn Gelten, Rob van Welzenis, geregeld leveren wij open, spannende, wetenschappelijke discussies. Veelal samen met medewerkers van de groep halfgeleider-fysika. Moge dit dynamische samenspel tussen theorie en experiment zich verder uitbouwen.

Dames en Heren leden van de afdeling der technische natuurkunde, het is mij een genoegen in dezelfde afdeling te mogen werken en ik dank U voor de prettige wijze waarop ik in uw afdeling ben opgenomen.

Ik moge besluiten met de evokatie van een Rotterdams wereldburger (Fig. 35) die onder andere te Leuven werkzaam was en een Bruggeling (Fig. 36) die te Leiden adviseerde.

Hier stoppe ik.

Gewaardeerde toehoorders, ik dank U voor uw aandacht.

BRONVERMELDING

- [1] E. Fermi, „Notes on Quantum Mechanics”, The University of Chicago Press, Chicago (1961).
- [2] J.T. Devreese, R.P. Evrard, V.E. Van Doren, editors, „Highly Conducting One-Dimensional Solids”, Plenum Publishing Corp., New York (1978).
- [3] Physics Today 31, No. 9, 17 (1978).
- [4] J.T. Devreese en R. P. Evrard, Phys. Stat. Sol. (b) 78, 85 (1976).
- [5] Shemanski, Physics Today 30, No. 11, 1 (1977).
- [6] H.E. Stanley, „Introduction to Phase Transitions and Critical Phenomena”, Clarendon Press, Oxford (1971).
- [7] L.P. Kadanoff, in „Phase Transitions and Critical Phenomena” vol. 5A, C. Domb en M.S. Green, editors, Academic Press, New York (1972-77).
- [8] C. Kawabata en K. Binder, Solid State Comm. 22, 705 (1977).
- [9] S.M. Shapiro, in „Superionic Conductors”, G.D. Mahan and W.L. Roth, editors, Plenum, New York (1976).
- [10] D.G. Westlake, C.B. Satterthwaite en J.H. Weaver, Physics Today 31, No. 11, 32 (1978).
- [11] P.W. Anderson, Rev. Mod. Phys. 50, No. 2, 191 (1978).
- [12] S. Yoshino en M. Okazaki, J. Phys. Soc. Japan 43, 415 (1977).
- [13] S.R. Ovshinsky, H. Fritzsche, IEEE Trans. ED-20, 91 (1973).
Physics Today 29, No. 10, 30 (1976).
- [14] M.L. Cohen, Science 179, 1189 (1973).
- [15] P. Vanden Abeele en W. Boves, „Brugge, levende stad”, Orion, Brugge (1975).