

Gebarsten spiegel, verhelderd beeld

Citation for published version (APA):

Poppema, O. J. (1960). *Gebarsten spiegel, verhelderd beeld*. Waltman.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1960

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.

**GEBARSTEN SPIEGEL,
VERHELDERD BEELD**

Dr. O. J. POPPEMA

GEBARSTEN SPIEGEL, VERHELDERD BEELD

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET AMBT VAN GEWOON HOOGLERAAR
IN DE ALGEMENE NATUURKUNDE
AAN DE TECHNISCHE HOGESCHOOL TE EINDHOVEN
OP VRIJDAG 14 OKTOBER 1960

DOOR

DR. O. J. POPPEMA

*Mijne Heren Curatoren,
Mijne Heren Hoogleraren en Adviseurs,
Dames en Heren leden van de Wetenschappelijke, de
Technische en de Administratieve staf,
Dames en Heren Studenten,
en voorts Gij allen die door Uw aanwezigheid van Uw
belangstelling blijk geeft,*

Zeer gewaardeerde toehoorders,

In het jaar 1842 formuleerde JULIUS ROBERT MAYER de wet van behoud van energie, die zoals bekend, inhoudt dat de totale hoeveelheid energie van een afgesloten systeem onveranderlijk is. Aan de belangrijke publikaties van deze Duitse arts werd aanvankelijk weinig aandacht geschonken. Zo kon het gebeuren, dat onafhankelijk van hem enkele jaren later hetzelfde beginsel nog eens ontdekt werd door de Engelse bierbrouwer JOULE en ook nog door de Deense ingenieur COLDING. Later, in 1878, bleek uit voordien niet gepubliceerde geschriften van de Franse ingenieur CARNOT, dat deze het beginsel al eerder op het spoor was geweest: reeds omstreeks 1830 had hij de juiste verhouding tussen mechanisch arbeidsvermogen en warmte gevonden. Dit energiebeginsel is van verstrekkende betekenis gebleken voor de ontwikkeling der natuurwetenschappen. Langzamerhand heeft het zelfs een algemene bekendheid verkregen, wat echter niet verhindert dat een bepaald soort uitvinders zich met meer energie dan inzicht blijft wijden aan het droombeeld van het perpetuum mobile.

Naast het energieprincipe zijn een aantal andere behoudswetten ontdekt, die eveneens een fundamentele rol spelen bij de verklaring der natuurverschijnselen. LAVOISIER had reeds omstreeks 1780 de op chemische reacties betrekking hebbende wet van behoud van stof opgesteld. Voorts kunnen de wetten van behoud van impuls en van impulsmoment en ook die van behoud van elektrische lading als bekende en belangrijke voorbeelden genoemd worden.

Allengs is duidelijk geworden, dat deze behoudswetten nauw

samenhangen met meer algemene invariantie- en symmetrieprincipes, waaraan de natuurwetten blijken te gehoorzamen. Zij vormen voor de natuuronderzoeker leidende beginselen die telkenmale opnieuw zijn bevestigd, zodat het vertrouwen in de algemene geldigheid ervan tenslotte uitgebreid is gegrondvest.

Soms echter blijkt een bepaalde ontwikkelingsgang aanleiding te geven tot een verruiming in de interpretatie van een behoudswet. Zo had ten tijde van MAYER het energieprincipe nog slechts betrekking op warmte en op mechanisch arbeidsvermogen als twee equivalenten vormen van energie. Toen naderhand werd ontdekt dat energie ook in een elektrische of zelfs elektromagnetische vorm kan voorkomen, kreeg het principe een ruimere inhoud. In 1905 onderging het nog eens een uiterst belangrijke uitbreiding toen de relativiteitstheorie van EINSTEIN leerde, dat ook massa opgevat kan worden als energie en wel als een gecondenseerde, sterk geconcentreerde vorm daarvan. Hiermee werd de wet van LAVOISIER betreffende het behoud van massa als het ware in het energieprincipe opgenomen.

Hoe groot het vertrouwen is dat de fysici stellen in de geldigheid van de behoudswetten of invariantieprincipes wordt wel zeer treffend geïllustreerd door de neutrinohypothese van PAULI. In 1914 ontdekte CHADWICK namelijk een verschijnsel, dat op onloochenbare wijze in strijd scheen te zijn met het energiebeginsel. Dat verschijnsel heeft betrekking op de betaradioactiviteit, dat is dus de uitzending van betadeeltjes ofwel snelle elektronen door bepaalde atoomkernen. Zo'n kern heeft voor de uitzending van het deeltje een wel gedefinieerde massa, evenals de kern die na de emissie overblijft. Het energieprincipe zegt dan, dat het betadeeltje een energie moet afvoeren die precies correspondeert met het massaverschil tussen begin- en eindkern. Inplaats van deze ene scherp bepaalde waarde constateert men echter alle mogelijke waarden van de energie der betadeeltjes tussen nul en een maximale waarde. Die maximale waarde is dan wel in overeenstemming met het genoemde massaverschil. Het energiespectrum der betadeeltjes is dus continu en dit lijkt in strijd met het energieprincipe.

Ondanks deze impasse, die gedurende 19 jaren heeft bestaan, werd het energiebeginsel niet prijs gegeven, al maakte niemand minder dan NIELS BOHR in 1930 nog eens de nadrukkelijke opmerking, dat het continue betaspectrum aanleiding zou kunnen geven

tot verwerping van de gehele idee van de energiebalans. Tot overmaat van ramp bleek bovendien bij de betavervalprocessen de wet van behoud van impulsmoment al evenmin op te gaan. PAULI wist nu in 1933 op meesterlijke wijze in één slag beide behoudswetten veilig te stellen. Hij postuleerde eenvoudig, dat tegelijk met het betadeeltje door de radioactieve kern een neutraal deeltje wordt uitgezonden met een verwaarloosbaar kleine rustmassa. Dit deeltje, dat op voorstel van FERMI al spoedig neutrino genoemd werd, zou dan de ontbrekende energie met zich meevoeren. Daar het noch elektrische lading noch massa van betekenis zou bezitten, moest het wel aan de waarneming ontsnappen. Het energieprincipe was hiermee – althans theoretisch – gered; de wet van behoud van impulsmoment eveneens, doordat aan het neutrino bovendien een intrinsieke hoeveelheid van draaibeweging werd toegekend.

Spoedig daarna, in 1934, stelde FERMI zijn op deze neutrino-hypothese gebaseerde theorie op voor het betavervalproces. Naarmate de tijd voortschreed, werd de nauwkeurigheid van de experimentele gegevens opgevoerd en daar de overeenstemming van deze gegevens met FERMI's theorie steeds beter werd, kon tot op grote hoogte van een bevredigende situatie worden gesproken. Niettemin bleef aan de elegante oplossing van PAULI een zekere kunstmatigheid kleven zolang het werkelijke bestaan van het neutrino niet was aangetoond. Ongeveer 30 jaren lang is dit vruchteloos gepoogd. REINES en COWAN met hun medewerkers vonden in 1953 de eerste aanduidingen die wezen op het bestaan van het mysterieuze neutrinodeeltje. ¹⁾ Zij gebruikten voor hun proeven een kernreactor als intensieve bron van neutrino's. In 1956 gelukte het hun het neutrino definitief aan te tonen. ²⁾ "The neutrino exists" luidde de korte inhoud van het telegram waarin zij hun belangrijke ontdekking aan de geestelijke vader van het neutrino mededeelden. Naar men zegt was het uiterst laconieke antwoord van PAULI: "I know."

De reeds vermelde behoudswetten kunnen met recht klassiek genoemd worden. Maar daarnaast en vooral ook daarna heeft het recente onderzoek op het gebied van atomen, atoomkernen en elementaire deeltjes nog een aantal andere behoudswetten opgeleverd, die – ofschoon zij niet klassiek genoemd kunnen worden – toch van even fundamenteel belang zijn. Als goede natuurwetten geven ook zij zekerheid, maar . . . zij blijken niet alle vrij van avontuur. Laat ik U hiervan iets tonen, zij het onder het voor-

behoud, dat U mij de verdenking bespaart een avonturier te zijn. Trouwens die gedachte zal terstond wijken wanneer ik U de bedoelde wet noem: zij betreft de pariteit, dus een begrip dat verstaat van iedere onevenwichtigheid. Inderdaad, dit is ook in de natuurkunde het geval. Wat verstaan wij dan daaronder?

Het klinkt misschien wat vreemd, maar ik ga U dat niet precies vertellen, omdat ik vrees dat de correcte definitie van dit begrip pariteit, dat van quantummechanische aard is, voor de vele niet-vakgenoten onder U moeilijk verteerbaar zou zijn. Het wezenlijke van de wet van behoud van pariteit kan gelukkig aanmerkelijk verhelderd worden met beschouwingen over klassieke systemen.³⁾ Daarbij komt dan de invariantie der natuurwetten voor ruimtelijke spiegeling ter sprake. Dit invariantieprincipe houdt in dat elk fysisch verschijnsel dat in de natuur optreedt, ook kan optreden in gespiegelde vorm. Daarmee wordt dus bedoeld, dat wanneer zich in de reële wereld voor een spiegel een verschijnsel afspeelt, de gang van zaken die wij in de spiegel waarnemen ook in de natuur kan plaats vinden als reëel verschijnsel. De gang van zaken in het spiegelbeeld zal niet in conflict zijn met de bekende natuurwetten.

Laat ik dit met enige eenvoudige voorbeelden mogen toelichten. Stelt U zich een klok voor, een doodgewone koekoeksklok, die voor een spiegel hangt. De klok in de spiegel loopt precies gelijk met de andere, de echte. Niemand zal moeite hebben om te begrijpen, dat die klok in de spiegel ook reëel zou kunnen bestaan, als een echte gelijklopende klok. Dat de cijfers in spiegelschrift staan, dat de wijzers andersom lopen is niet belangrijk. Wat wij hier opmerken is, dat de wetten waaraan die klok gehoorzaamt volkomen onverschillig staan tegenover de kwestie van links of rechts. Dit lijkt triviaal maar dat is het niet.

Stelt U zich nu een elektrische klok voor. De werking, althans de aandrijving ervan, berust op elektromagnetische krachten. Laten wij het gedrag van deze krachten beschouwen aan de hand van een stelsel, bestaande uit een rechte stroomdraad, met verticaal daarboven een magneetnaald zodanig opgehangen, dat zij evenwijdig aan de draad is gericht zolang er nog geen stroom vloeit. Schakelen wij nu de stroom in, dan wijkt de naald uit en wel zó, dat in de stroomrichting gezien de noordpool naar rechts en de zuidpool naar links beweegt. Indien nu een spiegel is opgesteld met zijn vlak loodrecht op de stroomdraad, dan zien wij dat in het spiegelbeeld in de stroomrichting gezien de noordpool naar links en de

zuidpool naar rechts uitwijkt. * Maar kan er nu ook een werkelijke magneetnaald gemaakt worden die zou vertonen wat dit spiegelbeeld laat zien? Dit blijkt niet te kunnen. Wat wij in de spiegel waarnemen lijkt dus niet overeen te stemmen met de bekende natuurwetten.

De oplossing van deze paradox, die ons leert op onze hoede te zijn bij het spiegelen, ligt in het verschillende spiegelskarakter van polaire en axiale vectoren. De elektrische stroom heeft een zekere grootte en een bepaalde richting in de ruimte en kan dus gekarakteriseerd worden door een polaire vector. In onze opstelling is de richting van deze polaire vector tegengesteld aan die van zijn spiegelbeeld. Het magnetisme van de naald vindt zijn oorsprong in de atomaire kringstroompjes, die gedeeltelijk gelijkgericht zijn. Het magnetische moment van de magneetnaald wordt dus behalve door een zekere grootte gekenmerkt door een draaiingszin of omloopszin om de lengteas van de naald en derhalve gekarakteriseerd door een axiale vector. In ons voorbeeld is in het spiegelbeeld deze omloopszin niet van richting omgekeerd, met andere woorden: de richting van de axiale vector die het magnetische moment aangeeft, is in de reële situatie dezelfde als in de gespiegelde. Het komt er dus op neer, dat het spiegelbeeld van de noordpool opgevat moet worden als zuidpool en omgekeerd, zodat de gang van zaken in het spiegelbeeld toch in overeenstemming is met de bekende natuurwetten.

Zo blijkt in de gehele macroscopische fysica deze spiegelsymmetrie te bestaan: beeld en tegenbeeld gehoorzamen aan en manifesteren dezelfde wetten. Maar hoe moeten wij deze gedachte hanteren in dat gebied der natuur waar zelfs een microscoop ons niets meer onthult? Wij komen dan op het terrein van de sub-microscopische fysica, waar men zich bezig houdt met de bestudering van atomen, atoomkernen en elementaire deeltjes. De verschijnselen die bij deze sub-microscopische systemen optreden, kunnen evenwel niet afdoende beschreven worden met begrippen die uitsluitend aan de macrofysica zijn ontleend. Er moest hiervoor als het ware een nieuwe taal ingevoerd worden, een taal die quantummechanica heet. Het principe van de invariantie der natuurwetten voor ruimtelijke spiegeling, zoals dat in de macrofysica bekend staat, treedt ook op in de microfysica. In de taal van de quantummechanica wordt dit beginsel dan het pariteitsprincipe of ook de wet van

* Dit werd tijdens het uitspreken van de rede gedemonstreerd.

behoud van pariteit genoemd, een wet die in 1927 door WIGNER voor het eerst werd geformuleerd.⁴⁾ Tot ongeveer 1957 was er geen enkel verschijnsel bekend, dat niet in overeenstemming was met dit pariteitsbeginsel.

Geachte toehoorders, wellicht maken de voorafgaande bespiegelingen een enigszins schoolse indruk, maar naar ik hoop bewijzen zij U aanstonds een goede dienst wanneer ik zal trachten U iets te schetsen van de ontwikkeling die zich enkele jaren geleden ten aanzien van het pariteitsprincipe heeft voltrokken.

Deze ontwikkeling kwam voort uit een moeilijkheid, die was gerezen bij het vervalproces der K -mesonen, een moeilijkheid die in de betreffende literatuur bekend staat als de „ τ - θ -puzzel”. De K -mesonen zijn instabiele elementaire deeltjes, die optreden in de processen der kosmische straling, maar die tegenwoordig ook kunstmatig geproduceerd kunnen worden met behulp van gigantische deeltjesversnellers. Gemiddeld ongeveer 12 miljardste seconde na hun ontstaan vallen deze deeltjes uiteen in andere elementaire deeltjes en dit kan op een aantal verschillende manieren gebeuren. Op twee van deze verschillende vervalwijzen heeft de τ - θ -puzzel betrekking. Sommige K -mesonen, de zogenaamde τ -mesonen, vallen uiteen in drie π -mesonen, andere echter, die θ -mesonen zijn genoemd, vallen uiteen in twee π -mesonen. Behalve in de vervalwijze blijken het τ - en het θ -meson zich in geen enkel opzicht van elkaar te onderscheiden en men is daarom geneigd aan beide deeltjes dezelfde identiteit toe te kennen. Indien echter op de twee verschillende vervalprocessen het pariteitsprincipe wordt toegepast, moet geconcludeerd worden dat τ - en θ -meson een verschillende intrinsieke pariteit hebben, waaruit volgt dat zij niet identiek zouden zijn.

In de loop van 1955 en 1956 werden diverse suggesties gedaan om tot een oplossing van deze τ - θ -puzzel te geraken. Op de bijzonderheden daarvan kan ik hier moeilijk ingaan; vermeld zij slechts dat al deze pogingen schipbreuk leden op experimentele gronden, omdat bepaalde effecten die uit de voorgestelde mechanismen moesten voortvloeien, niet aangetoond konden worden. Zo werd onder meer zonder succes getracht een zekere gammastraling te vinden waarmee men hoopte een gering massaverschil tussen τ - en θ -meson te kunnen aantonen. Wij kunnen hierin een zekere analogie zien met de vruchteloze pogingen die indertijd gedaan

waren om bij het betavervalproces de ontbrekende energie calorimetrisch aan te tonen. Zoals toen toch wel getwijfeld werd aan het energieprincipe, rees nu, in de loop van 1956, de achterdocht jegens het pariteitsprincipe. Immers indien dit zo fundamentele principe ongeldig verklaard werd voor het K -mesonenverval, zou het hele τ - θ -probleem niet meer bestaan. De consequentie van deze stoutmoedige stap zou evenwel van verstrekkende betekenis zijn. Aan het beginsel van de spiegelinginvariantie der natuurwetten zou hier niet voldaan zijn; de natuur zou dus, met andere woorden gezegd, toch ergens een essentieel onderscheid maken tussen links en rechts. Een waarlijk revolutionaire hypothese als men bedenkt hoe diep de idee geworteld was – en nog is – dat aan de gehele natuur een bilaterale symmetrie ten grondslag ligt.

De Amerikaanse theoretici LEE en YANG stelden nu een systematisch onderzoek in betreffende de fundering van het beginsel van pariteitsbehoud. Dit moest worden nagegaan voor drie soorten van wisselwerkingen, namelijk de sterke wisselwerkingen die de sterke kernkrachten tussen de nucleonen in de atoomkernen veroorzaken, de aanzienlijk zwakkere elektromagnetische wisselwerkingen die in het spel zijn in elk proces waarbij elektromagnetische straling is betrokken en tenslotte de nog zeer veel zwakkere wisselwerkingen die verantwoordelijk zijn voor het betaverval en het verval van mesonen en hyperonen en die als zwakke wisselwerkingen bekend staan.

Het onderzoek van LEE en YANG bracht aan het licht dat de geldigheid van het pariteitsbeginsel moest worden aanvaard voor de elektromagnetische en voor de sterke wisselwerkingen, maar dat op het gebied der zwakke wisselwerkingen tot op dat ogenblik nog geen enkel experiment was verricht, dat enig uitsluitsel kon geven omtrent het al of niet behouden blijven der pariteit. Deze constatering was wel enigszins verbijsterend, gezien de indrukwekkende omvang die het onderzoek in de loop der jaren had aangenomen op dit gebied, dat dus de bestudering van de betaradioactiviteit en het verval van mesonen en hyperonen omvat. Het vertrouwen der fysici in de spiegelsymmetrie was blijkbaar steeds zo groot geweest, dat het denkbeeld om het beginsel voor deze soort van wisselwerkingen uitdrukkelijk te toetsen, nooit geopperd was.

LEE en YANG stelden vervolgens een aantal experimenten voor, waarmee deze toetsing kon geschieden. ⁵⁾ Het eerste dat werd uit-

gevoerd en dat meteen een sprekend resultaat opleverde, heeft betrekking op de betaradioactiviteit van ^{60}Co -kernen. Dit experiment werd verricht in december 1956 in het National Bureau of Standards te Washington door mevrouw C. S. Wu van de Columbia University en een groep natuurkundigen van het National Bureau of Standards. ⁶⁾ Hoewel naderhand in diverse laboratoria vele en evenzeer belangrijke onderzoeken van gelijke strekking hebben plaats gevonden, is de proef van Wu en haar medewerkers dermate illustratief en ongetwijfeld reeds nu van zodanige historische waarde, dat ik meen een iets nadere omschrijving ervan U niet te mogen onthouden.

De opzet van dit experiment berust op de volgende overwegingen. De grondtoestand van de ^{60}Co -kern is niet stabiel: onder gelijktijdige uitzending van een betadeeltje – een negatief elektron dus – en een neutrino vindt een omzetting plaats in ^{60}Ni . Deze nikkelkern wordt daarbij gevormd in een aangeslagen toestand en gaat door achtereenvolgende uitzending van twee gammastralen over in zijn stabiele grondtoestand.

De betaradioactieve ^{60}Co -kern bezit een intrinsieke hoeveelheid van draaibeweging ofwel een impulsmoment. Dit wordt de spin van de kern genoemd. Tevens bezit de kern een magnetisch moment, dat met de spin ten nauwste samenhangt. De spin en het magnetisch moment kunnen wij ons voorgesteld denken door axiale vectoren, die gericht zijn langs de draaiingsas van de kern in een richting die volgens een rechtse schroefbeweging past bij de draaiingsrichting.

Men kan zich nu afvragen in welke richting ten opzichte van deze door de impulsmomentvector vastgelegde asrichting het betadeeltje door de ^{60}Co -kern bij voorkeur zal worden gelanceerd. Experimenteel kan dit natuurlijk niet bepaald worden aan een afzonderlijke kern, maar zullen wij moeten uitgaan van een proefmonster dat zeer veel van deze ^{60}Co -kernen bevat. De spins van deze kernen zullen in het algemeen echter in alle mogelijke richtingen georiënteerd staan en dus zullen er, zolang er over het gehele monster gemiddeld geen enkele voorkeursrichting bestaat, gemiddeld ook in alle mogelijke richtingen evenveel betadeeltjes wegvliegen. Het intensiteitspatroon der betastraling zal dan isotroop zijn.

De mogelijkheid bestaat evenwel om de spins van de ^{60}Co -kernen

voor een aanzienlijk deel evenwijdig aan elkaar te richten. De zeer zwakke magnetische momenten van deze kernen kunnen slechts gericht worden door een zeer sterk magnetisch veld, maar het richteffect zal ook alleen dan nog maar merkbaar optreden, indien de temperatuur van het proefmonster lager is dan $0,1 \text{ } ^\circ\text{K}$. De proef moet dus dicht bij het absolute nulpunt worden uitgevoerd. Dit brengt weliswaar aanzienlijke, doch geen onoverkomelijke complicaties met zich mee.

Veronderstellen wij, terwille van de eenvoud, dan thans voor een ogenblik, dat alle ^{60}Co -kernen in ons monster dezelfde draaiingszin vertonen of, anders gezegd, dat alle kernspins in dezelfde richting staan, en herhalen wij nu de vraag betreffende de richtingen waarin de betadeeltjes zullen wegvliegen. Hoewel het volledige antwoord hierop natuurlijk niet eenvoudig is te geven, is het wel mogelijk, door toepassing van het pariteitsbeginsel iets te voorspellen omtrent de te verwachten symmetrie van het ruimtelijke stralingspatroon. Denken wij ons proefmonster daartoe opgesteld voor een spiegel die loodrecht is geplaatst op de oriëntatierichting der kernspins* en veronderstellen wij eens, dat in de richting van de axiale vector die de oriëntatie der kernen definieert, minder betadeeltjes worden uitgezonden dan in de tegengestelde richting. Deze axiale vector keert, bij deze keuze van het spiegelvlak, na spiegeling niet van richting om. De polaire vectoren, die de bewegingsrichtingen der uittredende betadeeltjes aangeven, keren echter wel van richting om voor zover de bewegingsrichting loodrecht op het spiegelvlak staat. In het spiegelbeeld treden dus juist meer deeltjes uit in de richting der kernspins dan in de tegengestelde richting. Deze situatie is dus in conflict met het principe van de invariantie voor spiegeling in de ruimte. Indien dit principe wel van kracht is, met andere woorden als er pariteitsbehoud is, dan valt te verwachten dat in de richting der kernspins evenveel betadeeltjes zullen worden uitgezonden als in de tegengestelde richting. De ruimtelijke hoekverdeling der deeltjes zal in dat geval symmetrisch moeten zijn ten opzichte van het vlak dat loodrecht op de oriëntatierichting der kernspins staat. Indien evenwel uit de meting blijkt, dat dit niet het geval is, dan volgt daaruit onvermijdelijk, dat bij het beschouwde proces de pariteit niet behouden blijft.

Het experiment van mevrouw Wu en haar medewerkers berustte dus op een meting van de intensiteit van de betastraling die wordt

* Dit werd tijdens het uitspreken van de rede met een model toegelicht.

uitgezonden door georiënteerde ^{60}Co -kernen. Het ging er daarbij om de stralingsintensiteit in de oriëntatierichting te vergelijken met die in de tegenovergestelde richting. Het gericht zijn der ^{60}Co -kernen werd geconstateerd door behalve de uitgezonden betadeeltjes tevens de gammastraling te registreren die volgt op de beta-emissie. Indien de kernen gericht zijn, zal de ruimtelijke intensiteitsverdeling van deze gammastraling een anisotropie vertonen, uit de grootte waarvan de oriëntatiegraad der kernen bepaald kan worden. Deze methode was reeds bekend sinds in 1951 in Oxford en in Leiden voor het eerst atoomkernen werden gericht bij extreem lage temperaturen.

Het resultaat van het experiment van Wu was opzienbarend. Bij de grootst bereikbare oriëntatiegraad der kobaltkernen bleek de intensiteit van de betastraling in de richting der kernspins ongeveer 40 procent kleiner te zijn dan die in de tegenovergestelde richting. Een opvallend asymmetrie-effect dus, waarvan op overtuigende wijze kon worden aangetoond, dat het niet veroorzaakt werd door eventuele bijkomstige verschijnselen. Het eerste bewijs dat het pariteitsprincipe bij zwakke wisselwerkingen faalt, was daarmee geleverd. De wijze van publikatie van het sensationele resultaat was al even merkwaardig als de ontdekking zelf. Het werd wereldkundig gemaakt in de New York Times van 16 januari 1957.

Voor verschillende laboratoria was dit het begin van een enerverende periode. Uit de pariteitskwestie volgde een hele reeks van experimenten, die zouden leiden tot belangrijke nieuwe gegevens, vooral over het betavervalproces. ⁷⁾ Deze onderzoeken vonden aanvankelijk plaats in een sfeer van koortsachtige activiteit en grote gespannenheid. Het tempo waarin gewerkt werd, was dermate hoog, dat het fysieke uithoudingsvermogen der onderzoekers soms nauwelijks toereikend bleek.

Een intensieve uitwisseling der resultaten vond plaats. Doordat een aantal van deze nieuwe gegevens onderlinge tegenstrijdigheden bevatten en tevens discrepanties vertoonden met reeds vroeger gevonden resultaten, ontstond aanvankelijk een verwarde situatie. Nadat echter verschillende metingen met meer zorg waren herhaald en door een analyse van de oudere experimenten ernstige onvolkomenheden daarvan aan het licht waren gekomen, was het al vrij spoedig mogelijk tot een overzichtelijker beeld te geraken. ⁸⁾ Van deze op het Wu-experiment gevolgde ontwikkeling kunnen

in dit korte bestek slechts enkele punten aangestipt worden en uit de zoëven genoemde reeks van experimenten doe ik hier dan ook slechts een greep.

Het was al spoedig duidelijk, dat er met betastraling ook pariteitsproeven gedaan kunnen worden waarbij het niet nodig is de kernen te richten. FRAUENFELDER verrichtte – met een groep medewerkers – als eerste een dergelijk experiment. ⁹⁾ Zelf noemde hij het een "poor man's parity experiment", omdat daarbij de speciale apparatuur en ervaring, nodig voor het richten van atoomkernen, waarover slechts weinig laboratoria beschikken, gemist kan worden. Wat nu is bij dit type van experiment de grondgedachte? Bij nadere overweging blijkt uit het falen van het pariteitsbeginsel dat er niet slechts een bepaalde voorkeur bestaat ten aanzien van de richting waarin een kern het betadeeltje zal afvuren, maar dat bovendien het betadeeltje een zogenaamde longitudinale polarisatie zal vertonen. Anders gezegd: de spin van het elektron zal bij voorkeur langs de bewegingsrichting zijn georiënteerd. U moogt zich ter verduidelijking zo'n elektron voorstellen als een door de ruimte voortvliegend tolletje, waarvan de draaiingsas ongeveer samenvalt met de voortbewegingsrichting. Om deze longitudinale polarisatie te meten moet zij eerst worden omgezet in een transversale polarisatie; dan staat de draaiingsas van het tolletje dus loodrecht op de richting waarin het voortvliegt. Deze transversaal gepolariseerde deeltjes worden dan verstrooid aan een uiterst dun folie van een zwaar element, bijvoorbeeld goud. Bij deze verstrooiing treedt een links-rechts-asymmetrie op, waarvan de grootte afhangt van de polarisatiegraad der elektronen. Deze methode werd ook in ons land reeds in het voorjaar van 1957 met succes toegepast in het Natuurkundig Laboratorium van de Universiteit te Groningen. ¹⁰⁾ Uit het teken van de bij dergelijke verstrooiingsproeven gevonden asymmetrieën kon geconcludeerd worden, dat de polarisatie-richting van de door de kernen uitgezonden negatieve betadeeltjes zodanig is, dat hun spin bij voorkeur tegengesteld gericht is aan de voortbewegingsrichting. Anders gezegd: de negatief geladen betadeeltjes vertonen een linkse of negatieve schroefzin.

Het Leidse Kamerlingh Onnes Laboratorium, dat mede als bakermat der kernoriëntatie had gefungeerd, kon zich de weelde van een "rich man's parity experiment" veroorloven. De proef die

hier in februari 1957 werd uitgevoerd, vertoont sterke analogie met het experiment van Wu en heeft eveneens grote bekendheid verkregen.¹¹⁾ Inplaats van ^{60}Co gebruikte men in Leiden het isotoop ^{66}Co , dat positonen, positieve elektronen dus, uitzendt inplaats van negatieve elektronen. Deze ^{66}Co -kernen kunnen overigens op dezelfde wijze gericht worden als de ^{60}Co -kernen. Het resultaat was, dat de positonen ook een asymmetrische intensiteitsverdeling vertoonden. Treden bij ^{60}Co de negatieve elektronen echter bij voorkeur uit in de richting tegengesteld aan die der kernspins, bij ^{66}Co blijken de positonen juist bij voorkeur uit te treden in de richting van de kernspins. De schroefzin der positonen kon met deze proef echter niet bepaald worden. Uit speciaal op dit doel gerichte experimenten van PAGE en HEINBERG¹²⁾ zowel als van HANNA en PRESTON¹³⁾ is echter komen vast te staan, dat de bij radioactief verval uitgezonden positonen een rechtse of positieve schroefzin hebben.

Om de nieuw gevonden verschijnselen te kunnen verklaren hebben LEE en YANG, en onafhankelijk van hen de Rus LANDAU en de Engelsman SALAM, de zogenaamde 2-componenten-neutrinotheorie opgesteld.¹⁴⁾ Deze theorie impliceert het niet behouden blijven van de pariteit bij die zwakke wisselwerkingen waarbij neutrino's optreden, zoals het betaverval. Een dergelijke theorie was reeds vroeger, in 1929, door WEYL opgesteld, maar toen niet aanvaard, juist omdat het niet behouden blijven der pariteit er uit volgde! Was het vertrouwen in de universele geldigheid van het spiegelsymmetriebeginsel in die tijd minder sterk geweest, wellicht was men dan eerder gekomen tot de belangrijke ontdekkingen waarvan hier sprake is. Bij nadere beschouwing ontkomt men niet geheel aan de indruk, dat dit absolute vertrouwen in belangrijke mate gebaseerd is geweest op de visie van enkele der meest eminente leidende figuren. Zo is vermoedelijk de autoriteit van PAULI ook in dit opzicht van grote invloed geweest. Uit de bekend geworden briefwisseling die hij in januari 1957 met WEISSKOPF voerde, blijkt duidelijk hoe vast PAULI overtuigd was van de geldigheid van het pariteitsprincipe. Betreffende de uitslag van het experiment van mevrouw Wu voorspelde hij: "I do not believe that the Lord is a weak left-hander, and I am ready to bet a very high sum that the experiment will give symmetric angular distribution of the electrons." Kort daarop vernam hij dat mevrouw Wu de asymmetrie

had aangetoond. In een volgende brief, tien dagen na de zojuist geciteerde, schreef PAULI: "I am shocked not so much by the fact that God is a left-hander, but by the fact that He still appears to be left-right symmetric when He expresses Himself strongly."

Laten wij echter nog even stilstaan bij de 2-componenten-neutrinotheorie. De massa van het neutrino wordt in deze theorie exact gelijk aan nul gesteld en er is slechts één instellingsmogelijkheid voor de spin van het neutrino toegestaan, namelijk langs de voortbewegingsrichting. Het neutrino blijkt dus een schroefzin te bezitten. LEE en YANG kenden in hun theorie aan het neutrino nu de rechtse schroefzin toe. Iets later konden argumenten worden aangevoerd om het neutrino juist de linkse schroefzin te geven. Deze linkse schroefzin van het neutrino werd in 1958 op een waarlijk schitterende wijze experimenteel bevestigd door GOLDHABER, GRODZINS en SUNYAR.¹⁵⁾ Het essentiële van de 2-componententheorie van LEE en YANG is echter, dat de schroefzin die de ruimte vertoont tengevolge van het ontbreken van de volkomen spiegelsymmetrie, wordt toegeschreven aan het neutrino. De pariteitschending zou dus veroorzaakt worden door de merkwaardige eigenschappen van het neutrino, dat toch al zo'n wonderlijk deeltje is.

Toch bleek deze gedachtengang niet geheel houdbaar te zijn. Om dit in te zien keren wij even terug naar het uitgangspunt, de τ - θ -puzzel, die de hele ontwikkeling van de pariteitskwestie aan het rollen bracht. Weliswaar ontstond tengevolge van de τ - θ -puzzel het wantrouwen jegens het pariteitsbeginsel, maar bij de vervalprocessen van de τ - en de θ -mesonen treden in het geheel geen neutrino's op! De 2-componententheorie blijkt geen rekenschap te kunnen geven van de pariteitsschending bij het verval van de τ - en de θ -mesonen. Was het pariteitsbeginsel dan wel ooit ongeldig bij deze processen? Er bestond niettemin een zeer sterk vermoeden in die richting en het werd nog gesteund door een nieuwe ontdekking. Men vond namelijk dat ook bij het vervalproces van Λ -hyperonen de pariteit niet behouden blijft en ook dit proces vloeit voort uit zwakke wisselwerkingen waarbij geen neutrino's optreden. Voor de verklaring hiervan bleek de 2-componententheorie dus niet toereikend.

Door verschillende theoretici is nu in de loop van 1958 een meer omvattende theorie opgesteld die bedoeld is als beschrijvings-

raam voor alle zwakke wisselwerkingen; zij staat bekend als de „universele V-A-theorie”.¹⁶⁾ Evenals de 2-componententheorie voorspelt deze nieuwe theorie pariteitsschending voor die processen waarin neutrino's optreden, maar bovendien ook voor processen waarbij geen neutrino's voorkomen. Een ander belangrijk aspect van deze universele V-A-theorie is, dat zij rekenschap geeft van een nieuwe behoudswet: de wet van behoud van leptonen, die zegt dat het totale aantal leptonen verminderd met het totale aantal anti-leptonen constant is. Het ziet er nu naar uit dat de diepere grond van de pariteitsschending bij zwakke wisselwerkingen niet zozeer gezocht moet worden in de speciale eigenschappen van het massaloze neutrino, maar dat de fundamentele oorzaak daarvan veeleer is gelegen in deze wet van leptonenbehoud. Daarop zullen wij thans echter niet meer ingaan. Laat ik volstaan met op te merken dat de universele V-A-theorie in staat schijnt om van alle bekende, op zwakke wisselwerkingen berustende verschijnselen op bevredigende wijze rekenschap te geven.

Geachte toehoorders,

Grote ontdekkingen komen vaak voort uit situaties waarin de twijfel rijst aan beginselen waarvan de geldigheid voordien vanzelfsprekend scheen. De geschiedenis van het pariteitsbeginsel demonstreert dit wel zeer duidelijk. Het behoort tot de grote verdiensten van LEE en YANG, dat zij op de uitvoering aandrongen van experimenten die altijd als zinloos en overbodig waren beschouwd omdat de resultaten ervan, zo dacht men, uit symmetrieoverwegingen van te voren vast stonden. Uit het toewijzen van de Nobelprijs voor natuurkunde aan LEE en YANG in 1957 is de officiële erkenning van hun prestaties duidelijk gebleken.

Laat ik, tenslotte samenvattend, mij mogen bezondigen aan de volgende metafoor. Uit de grote synchrotrons, waarin de protonen met duizelingwekkende toerentallen worden rondgejaagd, vloeit een wassende stroom van nieuwe gegevens en inzichten omtrent de elementaire deeltjes: leptonen, mesonen, nucleonen, hyperonen. De stroom wordt echter gedeeltelijk in zijn vaart gestuit door een zwaar rotsblok, de τ - θ -puzzel. Hierdoor ontstaat een krachtige stroomversnelling, een bruisende cataract van flitsend samenspel tussen theorie en experiment, aan het eind waarvan de stroom nog nakolkt. Daarna, voorlopig tot rust gekomen in een ruimere

bedding, vloeit hij voort naar een einder die zich nog aan onze gezichtskring onttrekt. In het nu weer spiegelende oppervlak ontwaren wij tot onze verbazing echter een merkwaardige barst, die toch stellig spot met enkele van onze vroeger zo vaststaande opvattingen over de natuurwetten. Een barst echter, die ons tevens toestaat door de spiegel heen te kijken en een beter beeld te krijgen van wat zich onder het oppervlak bevindt. De beeldspraak is, ik geef het gaarne toe, wel wat gezocht en niet in alle opzichten juist, maar toch: gebarsten spiegel, verhelderd beeld . . .

Aan *Hare Majesteit de Koningin* moge ik thans mijn eerbiedige dank betuigen voor Haar besluit mij te benoemen tot hoogleraar aan deze Technische Hogeschool, om onderwijs te geven in de algemene natuurkunde.

Mijne Heren Curatoren,

Dat U mij hebt willen voordragen voor deze benoeming maakt, dat ik aan U veel dank verschuldigd ben. Ik kan U verzekeren, dat ik ernaar zal streven het door U in mij gestelde vertrouwen niet te beschamen.

Reeds in een vroegtijdig stadium mocht ik met U van gedachten wisselen omtrent de wijze waarop en de richting waarin kernfysisch onderzoek aan deze Hogeschool zou kunnen worden begonnen. Uit mijn woorden van hedenmiddag zult U geen onderzoekprogramma hebben vernomen; zij weerspiegelen slechts de sfeer van mijn interesse. Toch mag ik misschien nog even Uw aandacht vestigen op het feit dat het "poor man's nuclear experiment" een steeds zeldzamer uitzondering is geworden. Juist in deze situatie zal ik Uw steun niet kunnen ontberen.

Mijnheer de Secretaris van de Technische Hogeschool,

Gaarne maak ik gewag van de welwillende medewerking die ik reeds van U mocht ondervinden.

Mijnheer de Rector Magnificus, mijne Heren Leden van de Senaat en Adviseurs,

De verleiding is te groot om hier niet een bekende vorstin te citeren en de spiegel te raadplegen met de vraag: „Wie krijgt er de

mooiste T.H. in het land?" Natuurlijk blijft de spiegel op deze vraag het antwoord wijselijk schuldig. Hoe dit ook zij, de wijze waarop U tracht de Eindhovense technische hogeschool te maken tot een instituut waar onderwijs en wetenschappelijk onderzoek op hoog niveau staan, maakt op mij diepe indruk. Ik beschouw het dan ook als een groot voorrecht om hierin voortaan met U mee te mogen werken.

Met verschillenden van U is mijn wisselwerking tot dusver nog wat zwak en U heeft zojuist kunnen vernemen hoe argwanend de fysicus is geworden ten aanzien van de zwakke wisselwerkingen. Zo gaat het dus ook mij. Maar ten aanzien van U staat mij ook een ander dan een vervalproces voor ogen. Veel zal ik van U kunnen leren. Een voorlopige verkenning leerde mij reeds, dat sommigen Uwer een onmiskenbare neiging tot schroefzin vertonen. Daaruit zou ik echter allerminst willen concluderen dat in Uw, misschien mag ik thans zeggen onze, gelederen het pariteitsprincipe zou falen.

Mijne Heren Hoogleraren van de Afdeling der Algemene Wetenschappen,

Als ik de beeldspraak nog even mag voortzetten dan kunnen de wisselwerkingen tussen U en mij alreeds vergeleken worden met de elektromagnetische. Als mijn waarnemingen juist zijn ontwikkelt zich in onze afdeling het boeiende spel van aantrekkende krachten tussen ongelijknamige ladingen of polen en het is niet overdreven om te spreken van een op hoog niveau geëxciteerd systeem dat opvallende stralingsverschijnselen vertoont. De schroom waarmee ik in Uw midden treed, komt voort uit het gevoel, dat ik mij nog wat dicht bij de grondtoestand bevind en derhalve vrees voorlopig veeleer Uw schijnsel ten dele te zullen absorberen inplaats van de intensiteit ervan te vergroten.

Mijne Heren Hoogleraren en Medewerkers van de Onderafdeling der Technische Natuurkunde,

In onze beperktere kring zijn de ladingen meer gelijknamig. Een afstotende werking valt echter nauwelijks te vrezen, want – U vermoedt het reeds – ten aanzien van U moet ik spreken in termen van alles overheersende sterke wisselwerkingen die onze zojuist geformeerde kern een hechte binding geven. De innemende

wijze waarop U mij tegemoet bent getreden, heeft gemaakt dat ik mij hier spoedig thuis ben gaan voelen. Ik ben U allen daarvoor zeer erkentelijk.

Medewerkers en Oudmedewerkers van het Natuurkundig Laboratorium der Rijksuniversiteit te Groningen, Beste vrienden,

De vele jaren die ik in Uw midden mocht doorbrengen, hebben voor mij een gelukkige tijd betekend. Want niet slechts heb ik van U geleerd, ik heb Uw vriendschap mogen delen. Ik beschouw het daarom als een waardevolle omstandigheid, dat ik een aantal van U hier in het zuiden geregeld zal mogen ontmoeten.

Waarde, Hooggeleerde Brinkman,

U ben ik in het bijzonder veel dank verschuldigd, voor de royale wijze waarop U als mijn promotor bent opgetreden, maar ook voor de manier waarop U mij hebt betrokken bij zaken, die wat buiten de sfeer van het gespecialiseerde fysische detailwerk liggen en die toch voor het floreren daarvan uiterst belangrijk zijn.

Het is toevalligerwijze op dit ogenblik exact tien jaren geleden, dat U in Groningen Uw oratie hield. Van deze vertraagde coincidentie maak ik gaarne gebruik om U te complimenteren met de volledige metamorfose die het Groningse laboratorium in deze 10 jaren onder Uw directoraat heeft ondergaan. Van het scheepje waarover U sprak in Uw oratie, is weinig meer terug te vinden in het grote, modern geoutilleerde schip, waarvan U de bouwer zowel als de kapitein bent. Vanuit de notedop, die de Eindhovense sectie kernfysica nu nog is, roep ik U en Uw bemanning een succesvolle vaart toe op de vele avontuurlijke reizen die U nog zult ondernemen.

Waarde, Hooggeleerde De Waard,

Sta mij toe, dat ik nu eens zwart op wit laat drukken hoe dankbaar ik ben voor de talloze praktische raadgevingen, die jij mij altijd even bereidwillig hebt verstrekt. Mijn lust tot experimenteren en improviseren is door jouw voorbeeld wel zeer gestimuleerd. Bijzonder goede herinneringen zullen wij, dunkt mij, met VAN KLINKEN, behouden aan de tijd waarin wij onze eerste pariteits-experimenten uitvoerden.

Waarde, Hooggeleerde Gorter,

Ik beschouw het als een voorrecht, dat ik onder Uw bezielende leiding op het Kamerlingh Onnes Laboratorium heb mogen meewerken aan het onderzoek betreffende de kernspiniërentatie. Mijn blik is in die periode aanzienlijk verruimd.

Waarde, Hooggeleerde Steenland,

Geruime tijd werkten wij in Leiden samen aan het zojuist genoemde onderzoek. Dat onze wegen hier in deze technische hogeschool nu weer samenkomen, verheugt mij bijzonder.

Mijne Heren Directeuren en Medewerkers van het Koninklijke/Shell Laboratorium te Amsterdam,

Mijn verblijftijd in Uw laboratorium is weliswaar aanzienlijk korter geweest dan die in de zojuist genoemde universitaire laboratoria, maar daarom voor mij niet minder waardevol. De ervaringen en indrukken bij U opgedaan zullen mij zeker goede diensten bewijzen in mijn nieuwe functie. Voor de aangename wijze waarop U, zeer gewaardeerde VAN DRIEL met de medeleden van Uw directie, mij de overgang naar Eindhoven hebt willen vergemakkelijken, ben ik U zeer erkentelijk. Hoe gaarne ik ook velen van U een persoonlijk woord zou toevoegen, in het bijzonder U, beste vrienden uit afdeling FR, U zult begrijpen dat de hieraan verbonden problemen van ruimte en tijd mij dit beletten.

Het is vooral aan U te danken, waarde zeergeleerde VAN DER WAALS, dat ik iets begrepen heb van de problematiek die zich voordoet in een zo groot industrieel researchlaboratorium. Het blijft voor mij echter onbegrijpelijk hoe U kans ziet naast de veel van U eisende functie van mede-directeur zulke voortreffelijke wetenschappelijke prestaties te verrichten. Van mijn grote achting daarvoor wil ik hier gaarne blijk geven.

Dames en Heren Studenten,

Ben ik ten opzichte van U hedenmiddag niet te kort geschoten? Ik heb het gevoel U in elk geval een verklaring schuldig te zijn. Immers ik heb begripen als leptonen, mesonen, hyperonen over Uw hoofden uitgestrooid, terwijl ik ze nauwelijks of niet heb omschreven. En ik sprak over het pariteitsbeginsel, dat U vermoedelijk onbekend was, zonder het behoorlijk te definiëren. Maar wat U

zich als technische studenten en toekomstige ingenieurs misschien wel het meest afvraagt: Wat is het nut van deze en dergelijke zaken? Is het niet onwaarschijnlijk dat de ontdekking van het falen van het pariteitsbeginsel en alles wat daaruit gevolgd is enige invloed zal hebben op techniek en technologie? Toegegeven, indien wij het zo stellen lijkt de zuivere, niet op toepassingen gerichte natuurkunde weinig meer dan een luxueus spel. Er komen uit dit spel zo nu en dan verrassende vondsten voort, die niet zelden spectaculaire technische ontwikkelingen tengevolge hebben. Maar hierop alleen kunnen techniek en technologie bij lange na niet drijven. Zij steunen veelmeer op de toegepaste natuurkunde.

In een pleidooi voor de beoefening van de zuivere natuurkunde, ook op de technische hogeschool, mag U daarom een ander argument verwachten. Welnu, er is nog een nuttig rendement van geheel andere aard dan het zojuist bedoelde. De zuivere natuurkunde is een fundamentele exacte wetenschap en als zodanig bezit zij een grote culturele waarde. Dit blijkt onder meer uit haar invloed op ons wijsgerig denken en op de theologie; zij heeft door de eeuwen heen het wereldbeeld bepaald.

Het wil mij voorkomen, en gelukkig weet ik mij met deze opvatting in goed gezelschap, dat de zuivere natuurkunde in het onderwijs aan de technische hogeschool als wel in het onderzoek haar plaats verdient. Het met name in de moderne kernfysica zo zeer gewenste contact tussen de zuivere en de meer technisch georiënteerde fysici, de elektrotechnici en de werktuigbouwkundigen kan hierdoor slechts bevorderd worden.

U tenslotte herinnerend aan de zinspreuk "Mens agitat molem", die onze technische hogeschool siert, laat ik het gaarne aan Uw oordeel over of ik op een enigszins zinvolle wijze heb gehoorzaamd aan een invariantieprincipe dat nog niet werd geformuleerd: de wet van behoud van traditie van het houden van een oratie door een nieuw benoemde hoogleraar.

Ik dank U allen voor Uw aandacht.

LITERATUUR

1. F. REINES and C. L. COWAN, *Phys. Rev.* **92** (1953) 830.
2. F. REINES and C. L. COWAN, *Nature* **178** (1956) 446.
3. B. R. A. NIJBOER, *Ned. T. Natuurk.* **23** (1957) 173.
4. E. P. WIGNER, *Zeit. Phys.* **43** (1927) 624.
5. T. D. LEE and C. N. YANG, *Phys. Rev.* **104** (1956) 254.
6. C. S. WU, E. AMBLER, R. W. HAYWARD, D. D. HOPPES and R. P. HUDSON, *Phys. Rev.* **105** (1957) 1413.
7. R. L. GARWIN, L. M. LEDERMAN and M. WEINRICH, *Phys. Rev.* **105** (1957) 1415.
G. CULLIGAN, S. G. F. FRANCK, J. R. HOLT, J. C. KLUYVER and T. MASSAM, *Nature* **180** (1957) 751.
F. BOEHM and A. H. WAPSTRA, *Phys. Rev.* **107** (1957) 1202; **109** (1958) 456.
J. J. SAKURAI, *Progr. Nucl. Phys.* (O. R. FRISCH, ed.) **7** (1959) 243.
8. H. DE WAARD, *Ned. T. Natuurk.*, **24** (1958) 229.
9. H. FRAUENFELDER, R. BOBONE, E. VON GOELER, N. LEVINE, H. R. LEWIS, R. N. PEACOCK, A. ROSSI and G. DE PASQUALI, *Phys. Rev.*, **106** (1957) 386.
10. H. DE WAARD and O. J. POPPEMA, *Physica* **23** (1957) 597.
H. DE WAARD, O. J. POPPEMA and J. VAN KLINKEN, *Proc. Rehovoth Conf. Nucl. Structure* (1957) 388.
11. H. POSTMA, W. J. HUISKAMP, A. R. MIEDEMA, M. J. STEENLAND, H. A. TOLHOEK and G. J. CORTER, *Physica* **23** (1957) 259.
12. L. A. PAGE and M. HEINBERG, *Phys. Rev.* **106** (1957) 1220.
13. H. HANNA and R. S. PRESTON, *Phys. Rev.* **106** (1957) 1363; **108** (1957) 160; **109** (1958) 716.
14. T. D. LEE and C. N. YANG, *Phys. Rev.* **105** (1957) 1671.
R. LANDAU, *Nuclear Physics* **3** (1957) 127.
A. SALAM, *Nuovo Cimento* **5** (1957) 299.
15. M. GOLDBABER, L. GRODZINS and A. W. SUNYAR, *Phys. Rev.* **109** (1958) 1015.
16. E. C. G. SUDARSHAN and R. E. MARSHAK, *Phys. Rev.* **109** (1958) 1860.
R. P. FEYNMAN and M. GELL-MANN, *Phys. Rev.* **109** (1958) 193.
J. J. SAKURAI, *Nuovo Cimento* **7** (1958) 649.