# Elektronenversnellers in Amsterdam M. W. van der Heijden, L. Lapikás, H. de Vries

# Elektronenversnellers in Amsterdam

M.W. van der Heijden, L. Lapikás, H. de Vries



Ter herinnering aan het werk met de elektronenversnellers EVA, MEA en AmPS van het Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energiefysica te Amsterdam

# Colofon

Redactie	Margriet van der Heijden Louk Lapikás Hans de Vries
Vormgeving	Kees Huyser
Druk	Ponsen & Looijen BV, Wageningen gezet uit Stone Sans Serif
Omslag Fotomateriaal	Luchtfoto van NIKHEF © KLM Aerocarto, Arnhem beschikbaar gesteld door NIKHEF en (ex-)NIKHEF-medewerkers
Uitgave	NIKHEF Kruislaan 409, 1098 SJ Amsterdam Postbus 41882, 1009 DB Amsterdam Telefoon : 020-5922000 Fax : 020-5925155 http://www.nikhef.nl
ISBN	90 6488 011 5

Copyright © 1999 NIKHEF, Amsterdam, Nederland

Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of op enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever en de auteur(s).

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher and of the author(s).



Werk aan het detectorsysteem van de QDQ-spectrometer in de EMIN-hal

# Inhoud

Voorwoord	7
Ten geleide	
Ger van Middelkoop	)
Drie decennia elektronenverstrooiing, een interview met prof. dr. C. de Vries	
Margriet van der Heijden11	I
EVA, de ElektronenVersneller Amsterdam	
Jaap Noomen15	5
Elektronenverstrooiing met EVA	
Hans de Vries & Louk Lapikás19	)
Versnellers en het Science Park, een interview met prof. dr. R. van Lieshout	
Margriet van der Heijden25	5
De MEA-versneller	
Ber Kuijer	)
Elektronenverstrooiing met MEA	_
Louk Lapikás & Gerard van der Steenhoven	1
Radiochemie met EVA en MEA	_
L. Lindner	3
Veranderingen en constanten, een interview met prof. dr. A. H. Wapstra	_
Margriet van der Heijden	1
Experimenten met de PIMU-faciliteit	
Joop Konijn & Tjeerd Ketel	l
MEA-Amps	_
Peter de Witt Huberts & Guy Luijckx	/
Heftige botsingen tussen nucleonen	_
Willem Hesselink & Eddy Jans	3
Verstrooling van gepolariseerde elektronen aan gepolariseerde kernen	-
Jo van den Brand & Kees de Jager	/
Stralingsbescherming rond EVA en MEA/AmPS	<b>`</b>
Piet Louwrier	5
Een tweede leven voor AMPS	-
Peter de Witt Huberts	/
Proefschriften	)
Publicaties over werk uitgevoerd bij de versnellers EVA, MEA en AmPS85	5
Acronymen93	3
Auteurs en geïnterviewden94	1

# Voorwoord

Bij het naderende einde van het tijdperk waarin onderzoek met elektronenversnellers in Amsterdam werd uitgevoerd, kwam de gedachte op herinneringen aan deze periode in een boek vast te leggen. De directeur van NIKHEF verzocht ons in mei 1998 een dergelijk boekwerk samen te stellen. Het resultaat heeft u hier in handen.

Aangezien de wetenschappelijke resultaten van het onderzoek met de versnellers EVA, MEA en AmPS uitvoerig in de vakliteratuur beschreven zijn, wilden wij bij de samenstelling van dit boek juist ook aandacht geven aan de technische en bestuurlijke aspecten van vijfendertig jaar versnellers bouwen en bedrijven. Over iedere versneller is daarom een stuk te vinden met technische achtergronden naast een stuk waarin de belangrijkste experimenten bij de versneller worden beschreven. Daarnaast zijn er artikelen over veiligheidsaspecten, het radiochemisch onderzoek en het onderzoek met pionen en muonen. Al deze artikelen zijn van de hand van de meest betrokken medewerkers: zonder uitzondering hebben zij gehoor gegeven aan ons verzoek een stuk te schrijven en daarvoor zijn we hen zeer erkentelijk. Om een globaal overzicht te geven van het onderzoek dat met de versnellers EVA, MEA en AmPS is verricht, hebben wij tot slot een lijst met publicaties en proefschriften toegevoegd.

Achtergronden van het versnellerwerk worden belicht in een drietal interviews met de hoofdrolspelers uit de beginperiode: de toenmalige directeuren prof. dr. R. van Lieshout en prof. dr. A.H. Wapstra, en de initiator van het elektronenverstrooiingswerk prof. dr. C. de Vries. Ook hen zijn we erkentelijk voor hun bereidwillige medewerking. Om de couleur locale te illustreren hebben wij huidige en oud-medewerkers (voor zover traceerbaar) gevraagd fotomateriaal en korte stukjes in te zenden. Een zo uitvoerige respons was het gevolg dat wij een selectie moesten maken; wij danken alle inzenders hartelijk voor hun bijdrage.

Tot slot willen wij Kees Huyser bedanken voor de wijze waarop hij het materiaal in zeer korte tijd vorm wist te geven.

Amsterdam, november 1998

De redactie Margriet van der Heijden Louk Lapikás Hans de Vries







# Ten geleide Ger van Middelkoop

Het is niet de eerste keer dat ons Instituut, of een voorloper ervan, een versneller sluit. Het vermaarde Philips synchrocyclotron - het eerste in Europa! - werd gesloten in 1976 toen MEA, onze *Medium Energy Accelerator*, inmiddels in aanbouw was (zie figuur 1). De eerste, kleine, elektronenversneller in Amsterdam, EVA, werd kort daarop gedemonteerd. Gebeurtenissen waarbij het kernfysisch experimenteel wetenschappelijk programma van het IKO en later NIKHEF-K zich verder kon ontwikkelen, maar - het moet gezegd - niet van harte ondersteund door de radiochemici in die tijd.

Rond de jaarwisseling 1998-1999 wordt de versneller MEA, met zijn strekker- en opslagring AmPS (*Amsterdam Pulse Stretcher*) gesloten. Deze sluiting is niet geïnspireerd door onze fysici; integendeel, het was de belangrijkste subsidiegever, de Stichting FOM, die reeds tijdens de bouw van de AmPS-ring besliste dat het leven van MEA-AmPS in Amsterdam in 1998 zou worden beëindigd. Een besluit dat een bijzonder zware druk heeft gelegd op de medewerkers van ons Instituut. Teneinde de wetenschappelijke levensduur van de combinatie van een lineaire versneller met een strekker- en opslagring - toen uniek in de wereld - zo lang mogelijk te maken, moest de bouw ervan binnen het daartoe opgestelde krappe tijdschema worden gerealiseerd. Dat lukte; hulde aan de technische staf! Daarna waren het de fysici, uiteraard samen met hun technische medewerkers, die in zes jaar tijd wilden laten zien dat met AmPS fantastische resultaten konden worden behaald. Ook dat is uitstekend voor elkaar gekomen. Door hard werken is AmPS tot het laatst toe een unieke installatie gebleven; in de afgelopen jaren met bundels gepolariseerde elektronen - een technisch-fysisch hoogstandje.

Er is alle reden trots te zijn op de resultaten behaald met de elektronenbundels die de laatste dertig jaar op ons Instituut beschikbaar waren. In figuur 2 is compact aangegeven hoe de evolutie in specificaties van de versnellers - de elektronenergie ging omhoog met één orde van grootte van zo'n 100 tot bijna 1000 MeV, het tijdsrendement van minder dan ééntiende tot vrijwel honderd procent - een steeds rijker wetenschappelijk programma mogelijk maakte. Werden in de jaren 1967 tot 1975 'slechts' ladings- en magnetisatieverdelingen gemeten, in de jaren tachtig konden ook dynamische aspecten worden bestudeerd, zoals de snelheid van een proton in de atoomkern. Dat werd mogelijk door het betere tijdsrendement en de hogere energie. Het bijbehorende pictogram in figuur 2 geeft aan dat het verstrooide elektron tevens een proton uit de kern stoot. Dit onderzoek leverde een schat aan informatie en een verrassing op.

De verrassing was het geconstateerde tekort aan protonen in de kern. Een verklaring hiervoor zou kunnen zijn dat een fractie van deze deeltjes zo'n grote snelheid heeft dat ze in eerste instantie aan waarneming ontsnapten. Dit zou impliceren dat protonen op korte afstand van elkaar heftige afstoting ondervinden. Dit zou je pas goed kunnen bekijken als beide botsende protonen konden worden gezien. En dat is precies wat mogelijk werd met de AmPS-ring waarin de korte pulsen elektronen worden uitgesmeerd tot een vrijwel continue bundel. Het bijbehorende pictogram in figuur 2 toont nu dan ook twee uitgestoten protonen. Uit dit onderzoek dat onlangs veel

#### FIG.1. Overzicht van de versnellers die op IKO/NIKHEF in gebruik zijn geweest



FIG. 2. Werkgebied van de elektronenversnellers EVA, MEA en AmPS. Uitgezet zijn het energiebereik en het tijdsrendement van de elektronenbundels. In de pictogrammen worden de voornaamste bestudeerde reacties weergegeven, waarbij de zwarte pijlen de (inkomende en verstrooide) elektronen voorstellen en de gekleurde pijlen uitgestoten deeltjes.



#### Koeling

De bouw van de allereerste versneller, onder leiding van ir. Koolhof, begon met een kleine groep onervaren technici. Dit groepje werd uitgebreid met een wat oudere constructeur die de koeling van het nieuwe apparaat onder handen zou nemen. Het was een heer en zijn naam was Willy Smit. Hij sprak zeven vreemde talen en kon daardoor een verdwaalde Russische of Braziliaanse fysicus de weg wijzen. Bovendien componeerde hij Portugese muziek en algauw zong de hele afdeling zijn liederen mee, tot groot ongenoegen van Koolhof die meer geïnteresseerd was in snelle bouw van de machine.

Oligenoegen van keen not die machine. Hoewel hij alle diploma's op constructiegebied bezat, bleek heer Smit een zeer onpraktisch man. Maanden en maanden was hij bezig de regelapparaten voor de proefopstelling schots en scheef in een rek te monteren. Alle gleuven van de koppen van de bouten in zijn rek moesten naar beneden wijzen, een montage die hij in treinen had gezien. Toen Koolhof eens merkte dat een apparaat ondersteboven was gemonteerd, zodat een meter op zijn kop moest worden afgelezen, had Smit meteen een oplossing: hij nam een scheerspiegel mee van huis en monteerde die voorop het rek.

Eindelijk was de proefopstelling klaar en zou een demonstratie worden gegeven. 's Morgens werden de twee trechters van het apparaat alvast bij een warm- en een koudwaterkraan geplaatst en de uitlaat boven een rioolbuis. Die morgen liep ook één van de technici, Klinkert, Piet Bakker

langs het apparaat en zag bij de kranen wat schoonmaakartikelen staan. Klinkert, die erg kon plagen, zeg maar pesten, pakte een flacon met schoonmaakmiddel en kneep die boven de trechters leeg.

also borden de demonstratie. De kranen werden opengedraaid en iedereen wachtte in spanning tot het water, tot op een tiende graad nauwkeurig afgekoeld, uit de uitlaat zou stromen. En ja, er kwam water tevoorschijn, dat vervolgens wit kleurde, waarna steeds grotere zeepbellen verschenen. Koolhof stond perplex en vroeg meneer Smit wat dit te betekenen had. Tot grote verbazing van alle ingewijden, stak Smit heel kalm een sigaar op en sprak: 'Dit had ik al verwacht. Ik heb twee avonden in bed liggen denken dat zoiets zou gebeuren. Door de langdurige montage, de opslag van de apparaten en door de apparaten verbindingen aangegaan met zuurstof. Dat geeft een reactie tussen aluminium en zuurstof enzovoorts, enzovoorts... Er zal dan witte vloeistof uitvloeien en ...'

Even was het stil, toen brak een daverend gelach uit

aandacht kreeg in de wetenschappelijke pers, blijkt inderdaad een sterke 'correlatie' tussen protonen op zeer kleine onderlinge afstand.

Met de versnellers EVA en MEA werden ook radiochemische experimenten uitgevoerd. Dat onderzoek kende een grote bloei - werd in feite ontwikkeld - bij het cyclotron. Nog steeds aantrekkelijk, maar met aanzienlijk minder mogelijkheden was het werk bij EVA. Na de komst van MEA met zijn hogere energieën en een sterkere concurrentie van de fysica, en vooral vanwege de komst van AmPS, werd eind 1988 het besluit genomen met het radiochemisch onderzoek te stoppen.

Eerder was ook al besloten de experimenten met pionenbundels bij MEA af te sluiten. Als gevolg van de lage intensiteit van deze bundels was het vrijwel onmogelijk een groot deel van de voorgenomen experimenten uit te voeren. Toch werden op zeer creatieve wijze fraaie resultaten geboekt met onderzoek aan pionische atomen. Hieruit werd iets geleerd over de sterke kracht tussen een pion en de atoomkern, een resultaat dat veel aandacht trok.

Tenslotte enkele woorden over de laatste fase van het bedrijf van MEA-AmPS. In de figuur ontbreekt een indicatie van onderzoek waarin de draairichting (polarisatie) van kernen en deeltjes een rol speelt. Terwijl ik dit schrijf is zulk onderzoek - met zeer hooggespannen verwachtingen over de resultaten - nog in volle gang. MEA-AmPS is voor dit soort onderzoek nu een unieke installatie, en er wordt met spanning uitgekeken naar de metingen van de elektrische ladingsverdeling van het netto ongeladen neutron. We kunnen in elk geval zeggen - zij het met pijn in het hart - dat het bedrijf van MEA-AmPS zal worden stilgelegd tijdens een van de hoogtepunten in zijn bestaan.

# Drie decennia elektronenverstrooiing Een interview met prof. dr. C. de Vries Margriet van der Heijden

Na zijn pensionering in 1989 liet Coen de Vries de elektronenverstrooiing in Amsterdam, waar hij bijna dertig jaar van zijn leven aan had gewijd, voor wat het was. Hij legde zich toe op fotografie en het was pas in 1998 dat hij weer een bezoek bracht aan het NIKHEF. 'Je moet dingen uit handen geven', vertelt hij in zijn grote en lichte appartement in Utrecht. 'Dat begon natuurlijk al eerder, in de jaren voor mijn pensioen. De ideeën over interne *target* fysica bij de AmPS-ring bijvoorbeeld, kwamen grotendeels uit de koker van mensen zoals Kees de Jager, Peter de Witt Huberts en Hans de Vries. Kees de Jager haalde de contacten aan met de Russen in Novosibirsk, die een grote bijdrage aan de opslag van gepolariseerde elektronen in de AmPS-ring geleverd hebben.' De genoemde fysici en veel anderen begonnen ooit als student of promovendus in de groep van De Vries, die de stuwende kracht achter elektronenverstrooiing in Nederland was.

### Bakermat

Het begon in 1960 toen De Vries door toenmalig IKO-directeur Gugelot naar Stanford werd gestuurd. Hier werkte hij op het *Stanford High Energy Physics Laboratory* (HEPL), de bakermat van de elektronenverstrooiing, in de groep van de latere Nobelprijswinnaar Robert Hofstadter. Op Stanford was toen al de drie kilometer lange lineaire elektronenversneller van het *Stanford Linear Accelerator Center* ontworpen, waarmee bij veel hogere energie experimenten konden worden uitgevoerd om de structuur van atoomkernen te ontrafelen. De Vries: 'Gugelot, die bevriend was met Hofstadter, raakte geïnteresseerd in dit soort experimenten en stuurde mij naar Stanford om de kneepjes van het vak van elektronenverstrooiing te leren.' De Vries bleef er bijna drie jaar. Hij legde veel contacten en raakte zeer enthousiast over de mogelijkheden die elektronenverstrooiing bood.

Bij zijn terugkeer in Nederland wist hij ook de IKO-staf te overtuigen van het belang van elektronenverstrooiing en hij werd aangesteld om een onderzoeksgroep te vormen, experimenten te bedenken en instrumentarium te ontwikkelen. Voor de bouw van een elektronenversneller was al in 1961 een samenwerkingsverband aangegaan met Philips. Dit bedrijf had in 1946 ook het synchrocyclotron van het IKO, het eerste in Europa, gebouwd. Nu wilde het ervaring opdoen met de bouw van lineaire versnellers, een terrein dat in Europa nauwelijks ontgonnen was en waarover men bij Philips ambitieuze ideeën had. De Vries: 'Ook hier speelden natuurlijk de contacten van Gugelot een belangrijke rol, in dit geval met het hoofd van Philips Natlab, professor Casimir, die curator van het IKO was.' Ir. Koolhof van Philips kreeg de leiding over het project.

### Versnellersecties te leen

Het werk aan de nieuwe versneller vlotte echter minder goed dan gehoopt en toen rond 1965 de eerste detectoren waren gebouwd, kampte de versneller nog met allerlei problemen. De Vries: 'Ik was bang dat er eindeloze vertragingen zouden ontstaan, en



Blauwe vingers

Op een avond, tijdens het inrichten van de afbuigbunker van EVA, bleek dat de deksels van de kabelgoten die in de vloer waren aangebracht, niet goed pasten. Er was tijdens de bouw wat cement tussen geraakt. Ik was net bezig om één van de deksels op zijn plaats te krijgen door er met een andere tegen aan te stoten toen Coen, die ook nog laat aan het werk was, kwam kijken en besloot om te helpen. Juist op het moment dat ik met de deksel, die zeker 25 kilo woog, een stoot wilde geven, stak Coen zijn beide handen naar voren. Het was meteen het einde van zijn goed bedoelde hulp. hij heeft nog twee weken met blauwe vingers rondgelopen... Abe Bloemsma

Pagina uit het EVA-logboek van woensdag 29 november 1967: eerste bundel uit EVA genoteerd door Coen de Vries.

Beam ! according to redistion 17.45 meters Kl. voltage 21 KV helector to raise the vadiation messured as wavequidehole and first (P. & double+ ( wind Tiv In the machine in the 10"T scale Woensdag 1830 29 Nov 1967 The night shut down for

Tuinieren op kantoor

Mijn kamer was groot, zonnig en met uitzicht op een volkstuin-complex. Dat nodigde uit om zelf aan het tuinieren te slaan en na gebleken succes met kamerplanten, besloot ik over te gaan tot het ruigere werk. De vensterbank leende zich daar uitstekend voor. Als leek op dit gebied werd ik geholpen door Bart Heutenik, die zelf een tuintje bijhield op het complex. Hij voorzag mij van stekjes en ik ging enthousiast aan de slag. Ik gaf de plantjes water, kunstmest en veel liefde. Elke ochtend keek ik eerst of de tomaten al wat gegroeid waren, maar helaas, ze bleven op formaat druif en met de komkommers en paprika's werd het al helemaal niets. Het hele instituut leefde mee. Maar op een goede dag kwam ik op kantoor en hingen alle planten vol met het mooiste fruit. Mijn schreeuw is overal

te horen geweest en opvallend veel mensen moesten die dag in mijn kamer zijn. De schuldige(n) heb ik helaas nooit kunnen vinden. Marja Schmersel-Hettema

heb een beroep gedaan op mijn collega's in Stanford.' De eerder gelegde contacten bleken waardevol: in 1966 gaf de *U.S. Atomic Energy Commission* toestemming om twee versnellersecties uit Stanford naar Nederland te sturen, officieel 'te leen', maar dan wel voorgoed. Het ging om twee van de vijfentwintig reservesecties voor de versneller van SLAC, die uit duizend van deze drie meter lange secties bestond. De Vries: 'Ze waren met een enorm perfectionisme gebouwd; het is nooit nodig geweest om één van de duizend secties door een reservesectie te vervangen.'

De komst van de twee nieuwe versnellersecties in Amsterdam betekende dat de eerder gebouwde versneller moest verdwijnen en De Vries moest dit samen met toenmalig directeur Van Lieshout tegenover Casimir verdedigen. 'Casimir vond dit natuurlijk niet leuk, maar wel reëel. En als je ziet hoe snel het onderzoek hierna op gang kwam, wordt duidelijk dat het een verstandig besluit was.' In 1967 arriveerden de twee Amerikaanse versnellersecties in een 8 meter lange kist op Schiphol en een week later leverde de nieuwe elektronenversneller Amsterdam (EVA) al de eerste elektronen bij een energie van 80 MeV. 'In tegenstelling tot nu was er in die tijd voldoende geld om nieuwe jonge mensen aan te trekken', vertelt hij met enige weemoed, 'en er ontstond een hele groep met promovendi zoals Gerrit van Niftrik, Peter de Witt Huberts, Kees de Jager, Hans de Vries, Louk Lapikás, Johan Jansen en met versnellerman Pieter-Hans Bruinsma, die in 1968 met de eerste experimenten van start gingen.'

De Vries had besloten om zich voornamelijk op precisiemetingen te richten en de eerste meetresultaten bezorgden het instituut meteen een zeer goede naam op het gebied van elektronenverstrooiing. Bekend zijn de metingen aan de ladingsverdeling in de atoomkern van koolstof-12, die door Johan Jansen werden uitgevoerd en die ook nu, dertig jaar later, nog steeds als de meest precieze gelden. Daarnaast werd onder leiding van Van Niftrik bijvoorbeeld de ruimtelijke verdeling van de magnetisatie in een groot aantal atoomkernen in kaart gebracht.

### MEA-perikelen

Hoewel de metingen met EVA succesvol waren was van meet af aan duidelijk dat om het onderzoek voort te zetten, een grotere versneller nodig was die elektronen leverde bij hogere energieën. De plannen voor zo'n versneller, waarmee meer detail in de atoomkernen zichtbaar gemaakt zou kunnen worden, lagen al op tafel toen de experimenten bij EVA net begonnen waren. De Vries: 'In feite zijn alle ideeën op het terrein van elektronenverstrooiing al ontstaan in die eerste periode in Stanford. Je vindt ze terug in een overzichtsartikel van mij uit 1967, waarin bijvoorbeeld ook het belang van een zo hoog mogelijk tijdsrendement wordt benadrukt.' Een lineaire elektronenversneller levert namelijk geen continue elektronenbundel maar door korte tijdsintervallen gescheiden elektronenpulsen. Het tijdsrendement is de fractie van de tijd waarin de versneller daadwerkelijk bundel levert. Een hoog tijdsrendement biedt voordelen bij het uitvoeren van experimenten en in de nieuwe versneller zou het rendement flink opgeschroefd moeten worden ten opzichte van de 0,02 procent van EVA. Het waren voornamelijk financiële perikelen, meent De Vries, waardoor het uiteindelijk rendement van de nieuwe Medium Energy Accelerator (MEA) op 2 procent uitkwam in plaats van de beoogde 10 procent - overigens nog steeds voldoende hoog voor precieze verstrooiingsexperimenten.

De plannen voor MEA, die elektronen zou leveren bij een energie van 500 MeV, werden pas in 1972 goedgekeurd. De Vries: 'Natuurlijk was niet iedereen het er zonder slag of stoot mee eens dat elektronenverstrooiing de beste toekomstperspectieven bood. Er was in Nederland veel onderzoek met cyclotrons en wetenschappelijk onderdirecteur Koerts bijvoorbeeld, wilde graag een groter cyclotron op het IKO hebben.' Ook op landelijk niveau moesten de plannen van verschillende instituten tegen elkaar worden afgewogen. De Vries: 'Om daarbij te adviseren werd een internationale commissie samengesteld. De EVA-resultaten waren voor die commissie een aanbeveling. Het was voor ons waarschijnlijk ook gunstig dat voormalig IKO-directeur Van Lieshout inmiddels directeur van de organisatie voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek (tegenwoordig NWO) was.' Aan opgeven heeft De Vries tijdens de lange procedures nooit gedacht: 'Je moet ergens in geloven, je ergens in vastbijten, al word je natuurlijk wel eens moedeloos. Maar vergeet niet dat het uitvoeren van experimenten altijd een kwestie van lange adem is: je moet instrumenten bouwen, metingen uitvoeren, meetgegevens analyseren en dat alles vergt nu eenmaal veel tijd.'

### Nieuwe precisiemetingen

De bouw van de MEA-versneller ging in 1973 van start. De versnellersecties werden geleverd door de firma *Varian Associates* in de Verenigde Staten, onder leiding van dezelfde man, Eldridge, die ooit de versnellersecties voor de drie kilometer lange versneller in Stanford met zoveel perfectionisme gebouwd had. Een tegenslag voor het instituut was dat het cyclotron en de EVA-versneller gesloten moesten worden in 1977, halverwege de bouw van de MEA-versneller en de bijbehorende experimenteer-hallen. Er was niet genoeg geld om ook deze twee versnellers te blijven exploiteren. Door deze gang van zaken kwam de wetenschappelijk productiviteit noodgedwongen op een laag pitje te staan. Vertraging ontstond ondermeer bij de bouw van de twee - honderden tonnen zware - spectrometers, die onder verschillende hoeken ten opzichte van de trefplaat gepositioneerd konden worden en waarmee een nieuwe generatie precisiemetingen zou worden uitgevoerd. 'Een vervelende tijd', herinnert De Vries zich. 'We moesten ieder jaar verantwoording afleggen en keer op keer moest ik vertellen dat het nog niet zover was. Dat werd - zacht uitgedrukt - wel eens tegen je gebruikt.'

Nadat in 1981 de eerste experimenten waren uitgevoerd bleek de bouw van zeer nauwkeurig meetinstrumentarium de moeite waard te zijn geweest. Met de grote spectrometers in de EMIN-hal werden ondermeer zogenaamde coïncidentiemetingen verricht, waarbij de verdeling van protonen in de atoomkern bestudeerd wordt door een proton uit de kern te stoten. Het verstrooide elektron en het uitgestoten proton werden in de spectrometers gedetecteerd en hun impuls werd met een nauwkeurigheid van één op tienduizend bepaald. Met de resultaten maakte het instituut, dat inmiddels NIKHEF heette, zijn reputatie opnieuw waar. De Vries: 'Maar natuurlijk was niet alleen de precisie van het meetinstrumentarium van belang. Eenzelfde precisie was vereist bij de bouw en het bedrijf van de MEA-versneller.'

### Strekkerring in Amsterdam

Met de plannen voor de Amsterdamse PulsStrekker AmPS, begin jaren tachtig, zette

### Pagina uit het EVA-logboek 17 februari 1970.



#### Snertmaaltijd op de blokken

Vanaf het begin van het werk met elektronenversnellers hamerde Coen de Vries erop dat een goede samenwerking tussen fysici en technici noodzakelijk is voor het succesvol uitvoeren van experimenten. Dit ondanks de vaak tegengestelde belangen: fysici willen zo snel mogelijk zoveel mogelijk gegevens verzamelen, technici weten dat een versneller ook onderhoud nodig heeft. Om het begrip tussen beide groepen te vergroten, werd een groot aantal sociale activiteiten georganiseerd: sportdagen, schaatswedstrijden, schaak- en biljarttoernooien, een jaarlijks uitje - zoals een bezoek aan het Zuiderzeemuseum, of zeilen met Cocky Nooteboom - en de jaarlijkse feesten van de personeels-vereniging (met roulette en pornofilms!). Een hoogtepunt was ieder jaar de feestelijke lunch voor alle fysici en technici die bij het werk met de elektronenversnellers betrokken waren: er werd een maaltijd georganiseerd op vijf december om twaalf uur met snert, kaas, wijn, paté en een ijsje toe. De secretaresse en het hoofd van de keuken maakten de snert en de verdere aankleding van het geheel werd afwisselend door de technici en de fysici verzorgd. De eerste jären lunchten we op het dak van de afbugbunker van EVA, dat was opgebouwd uit betonblokken van een kwart kuub elk en daarom ook wel 'de blokken' werd genoemd. Nadat EVA was afgebroken, werd de traditie voortgezet in de collegezaal (die dan werd 'omgebouwd' tot eetcafé), maar we bleven spreken over de 'snertmaaltijd op de blokken'. Het gevolg van al deze activiteiten was dat de streng-hiërarchische structuur die op veel andere laboratoria

Hans de Vries

heerste, hier afwezig was. Dit gold niet alleen voor de EVAgroep, maar ook voor de cyclotron-, de betagamma- en de radiochemie-afdeling. Deze ongedwongen en collegiale sfeer was ongetwijfeld een belangrijke factor bij het succesvol uitvoeren van vele experimenten bij EVA, MEA en AmPS.

Aankomst bij de EMIN-hal van de tweede dipoolmagneet van de QDD-spectrometer



#### Student

Als kandidaat natuurkunde mocht ik vanaf 1968 mijn stage op het IKO doorbrengen. Ik had hoge verwachtingen van het werken op een wetenschappelijke instituut, waar naar mijn idee verschillen van mening slechts werden uitgevochten op grond van puur wetenschappelijke argumenten. Had ik immers niet, tijdens mijn schooltijd, mijn in het bedrijfsleven werkzame vader talloze ruzies en scheldpartijen horen voeren, die volgens mij inherent waren aan niet-wetenschappelijk werk? Dus ik ging niet het bedrijfsleven in, maar de wetenschap.

Mijn interessante stage-opdracht bestond uit het uitvoeren van berekeningen aan het magneetsysteem voor de 180°opstelling bij EVA. Daarbij werd een Monroe-rekenmachine (met een toetsenmatrix van zo'n tien bij tien) gebruikt, en na tienduizend vermenig-vuldigingen mocht ik twee maanden later de resultaten laten zien aan mijn begeleiders Gerrit van Niftrik en Coen de Vries. Deze hadden voor mijn presentatie slechts matige belangstelling doch kregen al na vijf minuten ruzie over de aanschaf van magneten; wie daarvoor verantwoordelijk was, wiens idee het eigenlijk was, enzovoorts. Er werd zelfs met vuisten op tafel geslagen. Ik zat erbij en keek ernaar. Weg illusie! Louk Lapikás

De Vries de lijn van zijn eerdere werk voort. In deze strekkerring worden de elektronenpakketjes uit de MEA-versneller opgerekt tot een continue elektronenstroom die vervolgens langzaam geëxtraheerd wordt en naar de experimentele opstellingen wordt geleid. Zo ontstaat een elektronenbundel met een tijdsrendement van bijna 100 procent, die zeer precieze metingen aan bijvoorbeeld de dynamica van nucleonen in de atoomkern mogelijk maakt. Een tweede functie van AmPS, waar De Vries minder bij betrokken was, is die van opslagring voor gepolariseerde elektronen. Hiermee kunnen de magnetische eigenschappen van atoomkernen bestudeerd worden. Weer duurde het lang voordat een besluit over de plannen werd genomen. NIKHEF was in competitie met het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) in Groningen, dat samen met het Franse Orsay Instituut een cyclotron wilde bouwen. De Vries: 'Het MEA-project was duur geweest en het KVI had al lange tijd geen geld gekregen; het was dus aan de beurt. Bovendien was in de KVI-plannen sprake van internationale samenwerking.' In het najaar van '87 werden de plannen voor AmPS afgekeurd. 'Een zwarte dag', vond De Vries, 'Wat het voor NIKHEF extra zuur maakte, was dat de plannen voor AmPS allemaal in eigen huis waren ontwikkeld, terwiil in Groningen een cyclotron werd neergezet dat was ontworpen in Frankrijk en daar ook voor een groot deel werd gebouwd.' Kort voor zijn pensionering werden de plannen voor AmPS alsnog goedgekeurd.

Laatst was De Vries toch even op het instituut. Er liepen nog veel mensen rond waarmee hij samenwerkte in de beginjaren op het IKO. 'Ik was ouder dan veel andere medewerkers. Na de oorlog had ik namelijk geen HBS-diploma en ging daarom eerst naar de HTS terwijl ik tegelijkertijd HBS-staatsexamen deed', vertelt De Vries. Hij studeerde natuurkunde terwijl hij werkte op het lab van professor Kistemaker op de Hoogte Kadijk in Amsterdam en studeerde op zijn tweeëndertigste met een studiebeurs van Philips af. Daarna volgde zijn promotie-onderzoek en zijn jaren als post-doc. 'Toen ik in 1963 uit Stanford naar Amsterdam terugkeerde, was ik dus al tegen de veertig en moest het eigenlijke werk nog beginnen.'

Op het NIKHEF bezocht De Vries MEA en AmPS en de gedeeltelijk ontruimde EMINhal. De spectrometerhal, waar zulke mooie experimenten werden uitgevoerd, maakte een desolate indruk, maar de versneller zag er picobello uit. 'Goed onderhouden en geen kruimeltje te vinden rondom de installatie. En zo was het altijd op het instituut.' En hij voegt daar aan toe: 'Mijns inziens is het een wetenschappelijke kapitaalvernietiging dat de faciliteit, werkelijk wereldwijd erkend als uniek, nu gesloten wordt.'

# EVA, de ElektronenVersneller Amsterdam Jaap Noomen

In 1961 werd besloten om bij het IKO, naast het reeds aanwezige cyclotron, een lineaire elektronenversneller te bouwen. Met een dergelijke machine kon kernfysisch onderzoek met behulp van elektronenverstrooiing worden uitgevoerd en werden nieuwe mogelijkheden geopend voor het tot dan toe met het cyclotron uitgevoerde radiochemisch onderzoek.

Voor dit nieuwe project werd een samenwerkingsverband aangegaan tussen het IKO en Philips, waar ook het cyclotron gebouwd was. Hieruit kwam in 1965 een lineaire versneller voort waarmee een bescheiden begin met het onderzoek werd gemaakt. Het nieuwe terrein van elektronenversnellers en elektronenverstrooiing maakte in die eerste jaren echter een sterke ontwikkeling door en al snel bleek dat het, om op wereldniveau mee te kunnen doen, nodig was de eigenschappen van de versneller aanzienlijk te verbeteren. In 1966 werd daarom besloten de versneller te vervangen. Dat dit besluit zo snel genomen kon worden, kwam ondermeer doordat de *U.S. Atomic Energy Commission* goedkeuring verleende aan een plan van het *Stanford Linear Accelerator Center* (SLAC) in Californië om twee versnellersecties aan het IKO te lenen. Het ging om twee reservesecties voor de drie kilometer lange versneller bij SLAC die in totaal uit duizend van deze drie meter lange versnellersecties bestond. Halverwege 1967 arriveerden de twee versnellersecties in Amsterdam en ging de installatie van EVA, de ElektronenVersneller Amsterdam, van start. Eind 1967 werd EVA in bedrijf gesteld en in 1968 begon men met het wetenschappelijk programma.

### Surfende elektronen

Een elektron kan tot een energie van bijvoorbeeld 25 keV, zoals in een kleuren-televisie, versneld worden door een spanningsverschil van 25000 volt aan te brengen tussen twee condensatorplaten A en B en het elektron vervolgens bij plaat A los te laten. Wanneer het plaat B bereikt, heeft het elektron een energie van 25 keV. In elektronenversnellers voor kernfysische experimenten zijn echter veel hogere energieën vereist - van tenminste 40 MeV. Om deze energie met twee condensatorplaten op te wekken, zou een spanningsverschil moeten bestaan van 40 miljoen volt en dit is technisch onmogelijk. In elektronenversnellers wordt daarom gebruik gemaakt van een ander principe, het zogeheten microgolf-principe. In EVA werden de versnellersecties gevoed met een microgolf-vermogen van 21 megawatt bij een frequentie van 2856 megahertz, waarmee de elektronen versneld werden tot een energie van 45 MeV. Door secties toe te voegen kan de energie steeds verder worden verhoogd met eenzelfde bedrag: bij EVA werd met twee secties een energie van 90 MeV bereikt.

Versnelsecties zoals in EVA, zijn ontworpen voor het versnellen van 'relativistische elektronen' die zoveel energie - meer dan 1 MeV - hebben, dat hun snelheid bijna gelijk is aan de lichtsnelheid. De secties bestaan uit trilholten waarin een elektromagnetische golf trilt (figuur 1). De elektrische veldsterktecomponent van deze golf is langs de as van de sectie gericht en het elektron wordt in dit elektrisch veld

FIG. 1. Een versnellersectie bestaat uit een koperen buis waarin om de 5 centimeter koperen schijven met een gat in het midden zijn aangebracht. Aan het begin van de sectie wordt een elektromagnetische golf met een frequentie van 2856 MHz aangeboden. Deze elektromagnetische golf plant zich zodanig door de versnelsectie voort, dat de elektrische veldsterkte in de lengterichting ligt (blauwe pijlen). Elektronen die op het tijdstip van de maximale veldsterkte de sectie binnenkomen, worden op de elektromagnetische golf meegesleurd. Aangezien zowel de elektronen als de elektromagnetische golf zich met de lichtsnelheid voortplanten, zullen de elektronen gedurende hun hele reis de maximale veldsterkte blijven voelen, en zo optimaal versneld worden.

# DOORSNEDE VERSNELSECTIE



### Schoppen

Net als tegenwoordig werden in de jaren zestig, toen ik enige tijd operator van EVA was, veel van de experimenten 's nachts uitgevoerd. De bemanning bestond dan uit een student en de operator. Lui als ik destijds al was, had ik zeer veel tijd en moeite gestoken in de bouw van een soort automatische piloot die de bundelstroom van EVA stabiliseerde. Dankzij dit stukje meet-en-regeltechniek kon ik, nadat de versneller volgens de wensen van de student was ingesteld, op mijn stretcher gaan slapen. Het systeem werkte over het algemeen zo goed dat geen verdere interventie nodig was, behalve bij één student: Peter de Witt Huberts.

Veelvuldig schopte hij me midden in de nacht met een nijdige trap tegen mijn stretcher wakker. 'Hij doet 't niet goed', was dan zijn onduidelijke klacht. Met dikke slaapogen controleerde ik de instellingen van de machine. 'Wat is er dan?' vroeg ik. 'Weet ik veel, 't is niet goed.' Wanneer ik na enige tijd vragend en met opgetrokken schouders naar hem toe kwam, gaf hij geen antwoord, draaide stuurs aan knoppen, keek naar tellers en maakte aantekeningen.

knoppen, keek naar tellers en maakte aantekeningen. Pas bij mijn afscheid biechte hij op wat die problemen 's nachts waren: hij was jaloers dat hij niet kon slapen en gaf als de experimenten tegenvielen af een toe uit pure nijd een schop tegen mijn stretcher. Veel later zag ik een tvuitzending van Teleac/NOT met daarin Peter de Witt Huberts, nu als directeur. Hij had het dus uiteindelijk ver geschopt. Bart Hakkaart

FIG. 2. Schematisch overzicht van de EVA-versneller. De modulator wekt in het klystron een hoogfrequente elektromagnetische golf op, die via een rechthoekige golfpijp naar de versnelsectie wordt gevoerd. De elektronen worden in de injector opgewekt en versneld tot 140 keV. Een belangrijk onderdeel is het systeem, dat ervoor moet zorgen dat de elektronen op de top van de elektromagnetische golf worden aeïniecteerd.

### PRINCIPESCHEMA EVA



#### Coulance

Het is 1965 en de allereerste elektronenversneller in Amsterdam wordt gebouwd. Voor ons als studenten een enerverende tijd. Veel moet nog vorm krijgen en meten gebeurt vooral 's nachts. Na zo'n nacht rijden Peter de Witt Huberts en ik op onze fiets naar huis. Het is vier uur in de ochtend en Amsterdam ligt in diepe rust. We bereiken een kruispunt en slaan, zonder op de verkeerslichten te letten, linksaf. De '5x8-kever' hebben wij niet gezien, maar de agenten zagen ons wel. Twee overtredingen hebben we begaan: we zijn niet alleen door rood gereden, ook linksaf slaan is hier verboden. Na deze constatering volgt een onderzoek van het rollend materieel. Het is minder goed in orde dan onze versneller: de rechtsdienaren ontdekken vier onvolkomenheden bij mij, zes bij Peter. We zijn al aan het optellen maar de afloop is verrassend. Vaag horen we iets over rood, linksaf, een fietsenmaker en krijgen nog wat goed bedoelde adviezen. Peter en ik rijden alweer en kijken niet meer achterom - ze moesten zich eens bedenken.

versneld. Tussen de verschillende trilholten bestaat juist zoveel faseverschil dat, wanneer een elektron een trilholte doorlopen heeft, de veldsterktecomponent in de volgende trilholte maximaal in de goede richting staat. Het elektron 'ziet' hierdoor in de versnelsectie een lopende golf waarmee het in fase - op de top voor maximale versnelling - meeloopt. Het wordt als het ware versneld zoals een surfer op de top van een watergolf wordt meegenomen.

Om alle elektronen nagenoeg evenveel en maximaal te versnellen, worden ze aan het begin van de versneller in pakketjes op de top van de lopende golf geïnjecteerd. De pakketies moeten kort zijn ten opzichte van de lengte van de trilholte - bij EVA waren zij minder dan 7 procent van deze lengte. Tegelijkertijd zijn de elektronenpakketies natuurlijk niet oneindig kort: het gevolg hiervan is dat de versneller niet één energie levert, maar een spectrum van waarden dat breder wordt, naarmate het pakketie langer is. Behalve door de lengte van een elektronenpakketje wordt de spreiding in de bundelenergie ook door onvolkomenheden van de machine bepaald. De microgolfuitgangspuls, die uit het voedingssysteem van de secties komt, is bijvoorbeeld nooit helemaal constant.

Om ervoor te zorgen dat de elektronen, die zich met de lichtsnelheid voortbewegen. op het hele traject door de versnellersectie op de top van de elektromagnetische golf blijven 'surfen', moet de snelheid van de elektromagnetische golf gelijk gehouden worden aan de lichtsnelheid. Hiertoe moest bij EVA de stabiliteit van de microgolffrequentie beter zijn dan één op milioen, terwijl de temperatuur van de versnellersecties stabiel werd gehouden op 0,1° Celsius.

### De eigenschappen van EVA

De belangrijkste onderdelen van EVA zijn in een principeschema aangegeven (figuur 2). De klystrons zijn met trilholten uitgeruste versterkerbuizen, die tot 200 maal per seconde een microgolfpuls met een vermogen van 21 megawatt aan de versnellersecties leveren. Dit microgolfvermogen wordt van de klystrons naar de versnellersecties overgebracht door vierkante golfpijpen, die werden gefabriceerd bij SLAC. Ook bij de installatie van de versnellersecties en de vierkante golfpijpen, hebben experts van SLAC een zeer belangrijke bijdrage geleverd. Het injectiesysteem dat pakketjes elektronen leverde met een energie van 140 keV, werd compleet gekocht bij een commercieel bedrijf. Het overige instrumentarium werd op het IKO ontwikkeld en gefabriceerd of in onderdelen gespecificeerd en bij leveranciers besteld. De belangrijkste van deze systemen zijn:

- de modulatoren die hoogspanningspulsen van 250 kilovolt aan de klystrons leveren,
- het systeem dat het microgolf-ingangsvermogen voor de klystrons levert en dat bestaat uit een master oscillator met een stabiliteit beter dan een op milioen en een traveling wave tube versterkereenheid (TWT) met een vermogen van 2 kilowatt,
- het timing-systeem, dat tijdens het gepulste bedrijf van de versneller alle componenten op tijd start en stopt,
- het koelingsysteem, dat onder andere een stabiele temperatuur van de versnellersecties garandeert.
- het bundel *monitoring*-systeem, waarmee stroom, positie, afmeting en energiespectrum van de bundel wordt gemeten,

- het besturingspaneel, waar de machineparameters worden ingesteld aan de hand van informatie over de bundel,
- het vacuümsysteem.

De uiteindelijke prestaties van de versneller worden samengevat in de tabel.

FIG 3. Overzichtstekening van de Elektronen-Versneller Amsterdam (EVA). Rechts de versneller, midden het 90°-afbuigsysteem, links de elektronenverstrooiingshal met 180°-afbuigsysteem en spectrometer.

Tabel 1: Eigenschappen van EVA.

 Energie (E):
 15 - 95 MeV

 Piekstroom (I):
 maximaal 150 mA

 Energie spectrum:
 0.3% (E > 80 MeV en I < 50 mA)</td>

 0.8-2% (E < 80 MeV en I > 100 mA)

 Tijdsrendement:
 maximaal 0,02%

### Energiespectrum

De EVA-versneller leverde een bundel die geschikt was voor radiochemie maar nog niet direct voor elektronenverstrooiing: voor elektronenverstrooiings-experimenten was het energiespectrum van de bundel nog te breed. Daarom werd een afbuigsysteem ontworpen, waarmee een - van te voren gekozen - gedeelte van het energiespectrum kon worden geselecteerd. Het systeem bestond ondermeer uit twee magneten, die elk de bundel over 45° afbogen (zie figuur 3). Tussen deze buigmagneten werd een watergekoelde en in breedte instelbare spleet gemonteerd. Omdat in een magneetveld elektronen sterker worden afgebogen naarmate hun energie afneemt, ontstond bij de spleet na de eerste buigmagneet een 'afbeelding' van de bundel, waarin elektronen met verschillende energie ruimtelijk van elkaar gescheiden waren. De spleet kon nu zo worden ingesteld dat uitsluitend dat deel van het versnellerspectrum passeerde, dat nodig was voor het elektronenverstrooiingsexperiment. Met de tweede bujamagneet werden de doorgelaten elektronen vervolgens afgebogen naar de ruimte waar het elektronenverstrooijngsexperiment plaatsvond. Deze laatste stap was nodig om de elektronen met het gewenste energiespectrum te scheiden van de aan de spleet verstrooide elektronen met een te lage energie, en van de door de spleet gegenereerde fotonenbundel.

EVA heeft acht jaar dienst gedaan bij het uitvoeren van tal van experimenten (zie de bijdrage van De Vries en Lapikás). Bovendien werd met EVA een schat aan ervaring en expertise opgebouwd, waardoor het instituut in staat was de bouw en het bedrijf van de veel grotere MEA-versneller succesvol te kunnen verwezenlijken.



#### Vacuümlek

Bij één van de revisies van de elektronenverstrooiingsapparatuur van EVA, werd ook een nieuwe bundeldump gemaakt. Deze zou tevens dienst doen als zogeheten *faradaycup* om de resterende bundelstroom te meten. Na montage van de dump en de bundelpijpen werden de vacuümpompen gestart en onder de leus 'vacuüm is wachten', keken we naar de meters die tergend langzaam de zakkende onderdruk aangaven.

Er leek geen vulltje aan de lucht en dus keerden we huiswaarts om de pompen 's nachts hun werk te laten doen. De volgende ochtend stonden de meters er echter treurig bij en het zoeken naar het lek begon. Maar hoe we ook testten, een lek werd niet gevonden. Er leek dus maar één conclusie mogelijk: er was een inwendig lek, de schrik van iedere vacuümtechnicus.

Om zo'n lek te vinden ga je tamelijk ruw te werk: je hakt het systeem in twee stukken en kijkt in welk stuk de druk niet verbetert. Zo vonden we dat het lek in de bundeldump moest zitten. Dat werd slopen, want om lekken uit te sluiten, waren alle verbindingen dicht gelast. Nadat de dump volledig uit elkaar was gehaald, vonden we het inwendig lek: het was een spin die zich op slinkse wijze in de dump had weten te nestelen. Berekeningen achteraf leerden ons dat we een paar honderd jaar hadden moeten pompen om het spinnen-kadaver volledig te laten verdampen! Alphons Vogel

Driemagneetsysteem voor 180°-verstrooiingsexperimenten bij EVA

# Elektronenverstrooiing met EVA

Hans de Vries & Louk Lapikás

Vanaf de jaren dertig zijn versnellers gebruikt voor onderzoek naar eigenschappen van atoomkernen. In eerste instantie ging het vooral om protonenversnellers, maar na de oorlog zijn ook elektronenversnellers steeds vaker toegepast. Het belang van elektronenversnellers werd duidelijk door het pionierswerk van Robert Hofstadter op het SLAC in Stanford (Californië) en het enthousiasme van Wolfgang Panofsky, die daar directeur was. Wanneer men met versnelde elektronen een trefplaat beschiet, worden de elektronen afgebogen (ofwel verstrooid) door de elektrische lading van de atoomkernen in de trefplaat. Uit de gemeten hoek- en intensiteitsverdeling van de verstrooide elektronen kunnen vervolgens eigenschappen van de kernen bepaald worden. Een groot voordeel van het gebruik van elektronen is dat de kracht tussen het elektron en de kern elektromagnetisch van aard is: de theorie van elektromagnetische velden is zeer nauwkeurig bekend.

## Ladingsverdelingen

In de beginperiode van het werk met elektronenversnellers was de meting van ladingsverdelingen in de atoomkern een belangrijke hoeksteen in het onderzoek. Het verstrooiingspatroon is exact te berekenen voor het geval waarbij de gehele elektrische lading van de kern in één punt is geconcentreerd. Gemeten afwijkingen van dit patroon geven directe aanwijzingen over de werkelijke ladingsverdeling van de kern. Naarmate de energie van de elektronen hoger is, kunnen kleinere details worden waargenomen. Met elektronen van 200 MeV zijn details ter grootte van de afmeting van een proton zichtbaar. Uit metingen met elektronen van 90 MeV, zoals geleverd door de EVAversneller, kan de globale grootte en vorm van de ladingsverdeling van kernen worden bepaald.

De verhouding tussen het aantal waargenomen verstrooide elektronen en het aantal dat op grond van een puntlading wordt verwacht, wordt de vormfactor genoemd. Door deze vormfactor bij verschillende energieën van de elektronenbundel en voor meerdere strooihoeken te meten, kan de ladingsverdeling worden berekend. Het is belangrijk dat een groot aantal experimentele variabelen, zoals de energie van de inkomende elektronenbundel, de intensiteit van de bundel, de dikte van de trefplaat, de strooihoek, de openingshoek en het rendement van de detectoren, nauwkeurig bekend zijn. En dat is lastig!

Om te corrigeren voor meetonzekerheden in de experimentele variabelen werd, naast de meting aan de kern waarvan men de ladingsverdeling wilde bepalen, meestal ook een meting aan koolstof uitgevoerd. De ladingsverdeling van de koolstofkern was in verschillende laboratoria uiterst nauwkeurig bepaald waardoor de meting aan koolstof als ijkpunt kon worden gebruikt. Toch bleken de meetgegevens die bij hoge en lage energie waren verkregen, niet met elkaar in overeenstemming. Theoretici konden dit verschil verklaren door aan te nemen dat de ladingsverdeling van het proton een halo had waardoor een kleine fractie van de lading zich ver buiten het proton zou bevinden,

FIG 1. Schematische werking van de verliesmonitor. Nadat de bundel de trefplaat gepasseerd is, worden de elektronen gedumpt in een Faraday-kooi. De stroom die hiermee gepaard gaat wordt teruggevoerd door de toroïde. Indien er geen verlies in bundelstroom zou optreden zouden bundelstroom en teruggevoerde stroom elkaar compenseren, zodat er geen signaal in de wikkelingen van de toroïde wordt opgewekt. Door verstrooiing in de trefplaat is de uit de Faraday kooi teruggevoerde stroom echter lager. Om dit te compenseren wordt een deel van deze stroom nogmaals door de verliesmonitor gevoerd. De fractie die nodig is, om uiteindelijk géén signaal in de windingen op te wekken kan heel nauwkeurig uit de waarden van de weerstanden R1 en R2 bepaald worden.



### Automatisering

Metingen met de EVA-versneller waren opwindend maar ook vermoeiend. Tijdens de nachtshifts bevonden zich in de gemeenschappelijke controleruimte een operatortechnicus en een 'meetaap-fysicus'. De laatste stelde magneetvelden in en moest ellenlange reeksen detectortikken opschrijven, de eerste moest er voornamelijk voor zorgen dat de stroom uit de versneller min of meer constant en op acceptabel niveau bleef. Beide activiteiten waren eentonig en al snel werd er gezocht naar automatisering, zodat beide heren zich rustig konden wijden aan het toen populaire schaken. Het werk van de fysicus werd door Leon Oostrijk eenvoudig geautomatiseerd: hij zette de hele nacht de ponsfunctie van de *teletype*<sup>3</sup> aan, zodat de gegevens op honderden meters geolied ponsband terecht kwamen. Voor de versneller werd door Jan Spelt, zelf als operator geregeld met het probleem geconfronteerd, een geniaal stukje elektronica ontwikkeld waarmee de stroom continu bewaakt werd, en dat in de wandeling 'de stroomfiets' werd genoemd. De eerste automatisering was een feit en er is daarna veel geschaakt.

\*) De teletype was de voorloper van de computerterminal. Er was een toetsenbord op aangesloten, maar geen beeldscherm: (ingetypte) gegevens werden uitgeprint op papier of ponsband. Louk Lapikás

FIG. 2. Principe van 180°-verstrooiing. De ingaande elektronenbundel en de 180° verstrooide elektronen worden door het magneetveld van elkaar gescheiden.

# Spectrometer



Spookpieken

Tijdens metingen met de EVA-versneller in 1970 werden herhaldelijk pieken waargenomen in de opgenomen spectra, die met geen enkele kernfysische theorie konden worden verklaard. De spectra werden opgebouwd uit de tikken van de tellers in de spectrometermagneet en de stabiliteit van het magneetveld was uiteraard cruciaal voor het verrichten van goede waarnemingen. We konden aan het instrument echter niets bijzonders vinden en meenden reeds uit de 'spookpieken' nieuwe fysica, zoals dit tegenwoordig heet, te kunnen afleiden. Dit bleef zo tot onze Amerikaanse gasthoogleraar, Lee Lidofsky, ontdekte dat het verschijnen van de spookpieken in hoge mate correleerde met toiletbezoek van de operator of de fysicus. Nader onderzoek bracht aan het licht dat het koelwater van de spectrometervoeding uit dezelfde leiding kwam als het spoelwater van de sanitaire voorzieningen. Aldus bracht eenmaal doortrekken een koelwaterdip teweeg. Daardoor verschoof het magneetveld in de spectrometer iets, met als experimenteel gevolg de "extra" pieken. Lidofsky kon onze hemelschokkende publicatie nog juist verhinderen.

Louk Lapikás

maar de meeste fysici vonden deze verklaring niet bevredigend. Er was dus behoefte aan een nieuwe verificatie van de koolstofgegevens.

# Koolstofstandaard

Coen de Vries stelde zich al bij de bouw van EVA ten doel een 'absolute' meting aan koolstof uit te voeren. Daartoe moesten alle boven vermelde experimentele variabelen zeer nauwkeurig bekend zijn. De bundelenergie werd bepaald door middel van een nauwkeurige calibratie van de afbuigmagneten met een zogeheten zwevendedraadmethode. Ook de meeste andere variabelen waren goed te bepalen. Het grootste probleem vormde de meting van de bundelstroom. Tot dan waren er twee methoden voor stroommeting in gebruik: enerziids met een toroïde-monitor en anderziids met een zogeheten Faradav-kooi. Een toroïde is eigenliik een soort transformator: rond de bundelpijp is een ring van hoogwaardig ijzer aangebracht, waarop een aantal koperen windingen zijn aangelegd. Wanneer de bundel passeert wordt in de wikkelingen een signaal geïnduceerd, dat een directe maat is voor de bundelstroom. Helaas zorgt de hoogfrequente structuur van de bundelpuls voor allerlei verzadigingseffecten in de izeren transformatorkern, die leiden tot een verlies aan rendement. De nauwkeurigheid van toroïde-monitoren is daardoor niet erg hoog. Bij een Faraday-kooi worden de bundelelektronen en de verstrooide elektronen achter de meetopstelling gestopt in een geïsoleerd opgesteld loodblok. Meting van de lading die aan het loodblok is overgedragen, geeft de sterkte van de oorspronkelijke bundelstroom. In principe is dit een zeer nauwkeurige methode, maar helaas worden de laag-energetische elektronen in het trefplaatje onder zulke grote hoeken verstrooid dat slechts zo'n 70 procent van de elektronen op de Faraday-kooi terecht komt.

Op het IKO werd een nieuw systeem ontwikkeld waarin beide systemen op ingenieuze wijze waren gecombineerd. Deze zogeheten verliesmonitor bestond dus uit zowel een toroïde als uit een Faraday-kooi. De stroom uit de Faraday-kooi werd in tegengestelde richting door de toroïde teruggevoerd. Wanneer er geen elektronen-verlies optreedt, zijn de bundelstroom en de teruggevoerde stroom even groot en compenseren de signalen die zij opwekken in de wikkelingen, elkaar precies. Dit kan nauwkeurig afgeregeld worden door de trefplaat uit de bundel te halen. Er is dan geen verstrooiing en alle bundelelektronen vallen op de Faraday-kooi. Wanneer de trefplaat in de bundel staat, treedt wel elektronenverlies op en wordt een signaal in de wikkelingen gevonden. Door nu een extra fractie van de stroom uit de Faraday-kooi door de toroïde te sturen, kon het signaal weer op nul worden afgeregeld. Aan de hand van deze compensatiestroom werd vervolgens de fractie elektronen die na het trefplaatje verloren ging, nauwkeurig bepaald (figuur 1).

De resultaten die met EVA werden verkregen, waren van een grote precisie. De theorie van de proton-halo kon bij het oud vuil worden gezet en er was een nieuwe verbeterde koolstofstandaard. Het IKO vestigde hiermee direct een uitstekende naam in de wereld van elektronenversnellers.

# Schillen

Door de grote precisie van het instrumentarium voor absolute calibratie, was de opstelling ook uitstekend geschikt voor andere zeer nauwkeurige experimenten. Zo

werd een onderzoek gedaan naar loodisotopen. Isotopen zijn kernen die evenveel protonen bevatten (waardoor de chemische eigenschappen gelijk zijn), maar verschillende aantallen neutronen. Zo heeft iedere loodkern 82 protonen, maar het lood dat in de natuur voorkomt is een mengsel van isotopen met 122, 124, 125 en 126 neutronen. Een belangrijke vraag was wat er met de kern gebeurt als deze extra neutronen worden toegevoegd. Wanneer protonen en neutronen harde bollen in een kern zijn, verwacht je dat het kernvolume evenredig is met het aantal kerndeeltjes zodat de kernstraal toeneemt met de derdemachtswortel uit het totale aantal kerndeeltjes. Hoewel neutronen geen elektrische lading dragen, kunnen zij op deze manier toch de ladingsverdeling beïnvloeden.

Er waren verschillende redenen om juist loodkernen te onderzoeken. In de eerste plaats was er een aantal theoretische voorspellingen voor de afmetingen van de loodkern. Deze waren gebaseerd op schillenmodelberekeningen. Vele experimentele gegevens tonen aan dat zowel de protonen als de neutronen in verschillende schillen in de kern zitten. In één schil passen steeds een bepaald aantal deeltjes, daarna moet de volgende schil gevuld worden. In het zwaarste loodisotoop, lood-208 met 126 neutronen, zijn zowel een protonen- als een neutronenschil volledig bezet. De meting van de grootte van deze en van de lichtere loodisotopen verschaft dus informatie over het vullen van de laatste neutronenschil.

Voor zware kernen als lood waren bovendien gegevens over de ladingsverdeling bekend uit experimenten met muonische atomen. In deze experimenten wordt één van de elektronen die rond de kern draaien, vervangen door een muon, een deeltje met precies dezelfde eigenschappen als een elektron, behalve dat het ruim 200 maal zo zwaar is. Door deze grote massa beweegt een muon veel dichter rond de atoomkern dan een elektron en daardoor is het gevoelig voor de uitgebreidheid van de ladingsverdeling in de kern. De resultaten die op deze manier verkregen waren, weken echter af van de resultaten van elektronenverstrooiing. Ook nu werden uitgebreide theoretische verklaringen gezocht voor de gevonden verschillen en gedeeltelijk waren zij inderdaad het gevolg van allerlei processen die aanvankelijk niet in de berekening waren meegenomen. Een belangrijke oorzaak van de verschillen was echter het feit dat bij bestaande elektronenopstellingen nog veel problemen waren met de normering van de experimentele gegevens. De bij EVA verkregen resultaten lieten zien dat de gegevens van elektronenverstrooiing en muonische atomen wel degelijk met elkaar in overeenstemming waren.

### Magnetische eigenschappen

Tot nu toe hebben we gesproken over elastische verstrooiing, waarbij het elektron verstrooid wordt door de elektrische lading van de kern. De ladingsverdeling van de kern wordt opgebouwd uit alle protonen in een kern samen en we leren zo dus weinig of niets over de individuele protonen en neutronen (tezamen nucleonen genoemd). Informatie hierover kan wel verkregen worden door reacties te bestuderen waarbij de elektronen over 180° worden verstrooid. Speciaal hiervoor werd bij EVA een, bekend geworden, 180°-opstelling gebouwd.

Met de 180°-opstelling werden de magnetische eigenschappen van kernen bestudeerd. De elektromagnetische wisselwerking omvat immers niet alleen de zogeheten

FIG. 3. De 180°-opstelling die op het IKO werd gebouwd. Door gebruik te maken van een systeem van drie magneten wordt de richting van de inkomende bundel voor de trefplaat dusdanig veranderd, dat de richting van de doorgaande bundel samenvalt met de richting van de bundel in elektronenverstrooiingsexperimenten bij conventionele hoeken. De magneet B3 scheidt vervolgens verstrooide elektronen van de elektronenbundel. Het draaipunt van de spectrometer valt samen met het middelpunt van deze magneet.



FIG. 4. Overzicht van de sterkte van elektronenverstrooiing ten gevolge van de magnetisatieverdeling in atoomkernen. De gestippelde lijn geeft de bijdrage van de ladingsverstrooiing bij elektronenverstrooiing over 180° voor elektronen met 50 MeV inkomende energie. De getoonde punten corresponderen met de kernen waarvoor de magnetisatieverdeling werd gemeten met EVA, in het 140 MeV station (LEF) bij MEA en met de elektronenversneller ALS in Saclay.



Coulomb-wisselwerking tussen ladingen, maar ook de kracht tussen stromen en magnetische velden. De protonen en neutronen in de kern hebben ten gevolge van de draaibeweging om hun as een magnetisch moment: het zijn zeer kleine magneetjes. Daarnaast zijn de protonen in de kern in beweging, en bewegende ladingen leveren ook een magnetische component op. Terwijl de ladingsverdeling in de kern echter wordt bepaald door alle protonen tezamen, wordt het magnetisch veld van een kern vrijwel volledig door één enkel nucleon bepaald. De reden hiervoor is dat de individuele bijdragen van de meeste kerndeeltjes elkaar opheffen doordat twee protonen of twee neutronen met tegengesteld magnetisch moment steeds samen een paar vormen. Kernen met een even aantal protonen en een even aantal neutronen hebben dan ook geen magnetisch moment. Verstrooiing aan het magneetveld van een kern verschaft dus informatie over het laatste ongepaarde nucleon.

Maar hoe kun je nu de magnetische van de ladingsbijdrage scheiden? De magnetische verstrooiing heeft een ander hoekpatroon dan ladingsverstrooiing. In principe kunnen beide componenten daarom worden gescheiden door metingen uit te voeren bij verschillende hoeken en energieën, maar aangezien de magnetische component - vooral bij lagere energieën - veel kleiner is dan de ladingsverstrooiing, is dit toch uiterst lastig. Gelukkig levert het verschil in hoekgedrag een speciaal geval op bij 180°: bij deze hoek treedt alleen magnetische verstrooiing op. Minder gelukkig is dat over 180° verstrooide elektronen, zonder speciale maatregelen, weer stroomopwaarts de bundelpijp in duiken, en aldus aan waarneming dreigen te ontsnappen. Hier is dus een speciale techniek vereist.

De eerste 180°-opstelling werd in 1963 door Barber en Peterson in Stanford gebouwd. In deze opstelling werd de elektronenbundel eerst door een magneet gevoerd waarna de bundel op de trefplaat belandde. In de magneet wordt de bundel afgebogen tengevolge van de Lorentz-kracht, die loodrecht op de bewegingsrichting van de elektronen en loodrecht op de richting van het magneetveld staat. Elektronen die in de trefplaat over een hoek van 180° zijn verstrooid, gaan nogmaals, maar nu in tegengestelde richting, door de magneet. De Lorentz-kracht werkt nu in tegenovergestelde richting: de elektronen worden de andere kant afgebogen en zo gescheiden van de inkomende bundel (figuur 2).

Een probleem bij het gebruik van een magneet vlak voor de trefplaat is dat de richting van de uitgaande bundel verandert, waardoor een nieuw bundeldump-kanaal (inclusief bijbehorende afscherming) noodzakelijk is. Bij EVA werd daarom een 180°-systeem gebouwd dat niet uit één maar uit drie magneten bestond. In de eerste twee magneten werd de oorspronkelijke bundelrichting alvast zodanig veranderd, dat de bundel na het passeren van de laatste magneet (in feite de enige echte '180°-magneet') weer door hetzelfde bundelkanaal ging als bij experimenten met verstrooiing over 'normale hoeken' (figuur 3).

Natuurlijk hebben de magneten invloed op het gedrag van de elektronenbundel. Deze invloeden werden met de hand uitgerekend op een elektrische Monroerekenmachine. Maandenlang klonk het geratel van dit naar hedendaagse maatstaven prehistorische apparaat, maar we slaagden erin een goed ontwerp te maken en met de 180°-opstelling vele succesvolle experimenten uit te voeren.

### Multipolen

De eerste resultaten met de 180°-opstelling werden verkregen voor lithium-isotopen (lithium-6 en lithium-7). Lithium is een atoom met een kleine kernlading (Z=3) en een hoog magnetisch moment. Bij exact 180° treedt geen ladingsverstrooiing op, maar om een voldoende meetgegevens te verzamelen moet je een hoekbereik van enkele graden rondom 180° gebruiken, en dat leidt toch weer tot een ladingsbijdrage. De ladingsverstrooiing is evenredig met de kernlading in het kwadraat: voor lithium is deze ladingsbijdrage dus een tamelijk kleine correctie, die goed te berekenen is. Voor zwaardere kernen is de ladingbijdrage groter. Voor metingen aan zulke kernen moesten we een betrouwbare procedure ontwikkelen om deze bijdrage af te trekken. Dit werd gedaan door telkens te meten aan een nabuurkern, een kern met nagenoeg dezelfde elektrische lading (één proton meer of minder) en met een even aantal protonen en neutronen. Zo'n kern vertoont immers alleen ladingsverstrooiing. Op deze manier hebben we magnetische verstrooiing voor een groot aantal kernen gemeten, variërend van lithium-6 tot indium-115 (figuur 4).

De eenvoudigste vorm van de magnetische verdeling van een kern is die van een magnetisch dipoolmoment. Dit is de gewone magneet met een noord- en een zuidpool. Daarnaast kunnen kernen, afhankelijk van de totale draai-impuls van de kern, ook hogere multipoolmomenten bevatten. Zo heeft niobium-93 naast het dipoolmoment (M1) ook een magnetisch octupoolmoment (M3), en zelfs een M5-, M7- en M9moment. Figuur 5 laat zien wat we ons bij dat laatste, het pentakosiadodekapoolmoment, moeten voorstellen. De bepaling van de grootte en de ruimtelijke verdeling van deze multipoolmomenten geeft informatie over de wisselwerking tussen het laatste ongepaarde nucleon en andere nucleonen. Bij EVA werden vooral de laagste orde multipolen, de M1- en M3-verdeling, gemeten. De meting van de hogere multipolen vereist een hogere energie, maar heeft als voordeel dat de magnetische component en de ladingbijdrage gewoon bij 'normale hoeken' gescheiden kunnen worden. Dergelijke metingen werden door NIKHEF-fysici uitgevoerd bij Saclay waar een lineaire versneller stond, die elektronen tot 600 MeV kon versnellen. Tezamen leverden onze 180°-metingen en de resultaten van Saclay een volledig beeld van de magnetisatieverdeling van een groot aantal kernen. Figuur 4 geeft een overzicht van alle kernen, waarvan de magnetisatieverdeling door fysici van het NIKHEF is bestudeerd. Deze metingen bij EVA vormden een eerste stap om niet alleen de collectieve kerneigenschappen (de bijdrage van alle protonen in de ladingsverdeling) maar ook de bijdrage van individuele protonen en neutronen te bestuderen. De bouw van MEA en later AmPS is een logische voortzetting van dit onderzoek naar de eigenschappen van individuele kerndeeltjes.

FIG. 5. De ruimtelijke verdeling van het magnetische M9 moment, het pentakosiadodekapool-moment, in de niobium-93 atoomkern.



Deelnemers aan de workshop *Electromagnetic Interaction Studies with high duty-factor Electron Linacs* op het IKO in 1973. Van links naar rechts : Wim Hermans, Taber de Forest, Hans Arnold, Lex Dieperink, Karel Mulder, René van Dantzig, Bill Donnelly, Ingo Sick, Sam Penner, Hans de Vries, Coen de Vries, Peter de Witt Huberts, Kees de Jager, Giorgio Cortelessa, Jean Mougey, Jim Friar, Jochen Heisenberg, Dieter Schüll, Jörg Friedrich, Rainer Neuhausen

The state of the s

And a second sec

A second s

COLUMN STREET, STREET,

ALC: NOT BEETINGS

I STREET, BURGLESS CONTRACT, CONTRAC

# Versnellers in de Watergaafsmeer Een interview met prof. dr. R. van Lieshout Margriet van der Heijden

Het huis van professor van Lieshout ligt aan een lommerrijke laan. Buiten regent het en blazen rukwinden de bladeren van de bomen, maar binnen is daarvan niets te merken. In een grote kamer met uitzicht op de tuin haalt Van Lieshout herinneringen op aan de eerste jaren die hij, nadat hij als post-doc in de Verenigde Staten had gewerkt, op het IKO doorbracht. In die periode was professor Gugelot net directeur van het IKO geworden terwijl voormalig directeur Bakker naar het CERN in Genève was vertrokken. 'Toen al werd er uitgebreid, en door een grote groep mensen, gepraat over de toekomst van het instituut. Verschillende mogelijkheden passeerden de revue. Gugelot wilde een 1 GeV protonenversneller bouwen, maar dat was financieel en organisatorisch onhaalbaar. Er werd natuurlijk gedacht over een groter cyclotron en een andere mogelijkheid was dat de kernreactor die op de tentoonstelling "Het Atoom" (in het kader van *Peaceful Uses of Nuclear Energy*) op Schiphol stond, naar het IKO zou komen.'

Er was in die periode nog geen sprake van dat het instituut zich zou richten op het werk met elektronenversnellers, maar Van Lieshout herinnert zich scherp een voorval, waarvan hij achteraf het idee heeft dat toen een allereerste kiem voor dit werk werd gelegd. 'Gugelot had veel Amerikaanse kennissen en er kwam een bevriende hoogleraar uit Stanford op bezoek. Tijdens een rondleiding op het IKO toonde Coen de Vries hem een natrium-jodide detector en begon de werking ervan uit te leggen. "That's not quite necessary; I invented it", sprak de gast, Robert Hofstadter. Hij had er veel plezier om. Een paar jaar later is Coen de Vries gaan werken in de groep van Hofstadter, die in Stanford elektronenverstrooiings-experimenten uitvoerde.' Bij zijn terugkeer in Amsterdam droeg De Vries zijn enthousiasme voor elektronenverstrooiing over. Van Lieshout: 'Toen pas zijn wij serieus over deze mogelijkheid gaan denken.'

De contacten met Stanford waren inmiddels zo goed dat het IKO in 1966 twee versnellersecties kreeg - reservesecties van de drie kilometer lange versneller bij het Stanford Linear Accelerator Center. Hieruit werd de 90 MeV ElektronenVersneller Amsterdam, EVA, geconstrueerd. 'We kregen de secties "te leen", want tijdens de Koude Oorlog mochten de Verenigde Staten geen strategische kennis verkopen. En lenen mochten we de secties alleen op voorwaarde dat wij ze niet zouden doorverkopen of uitlenen', vertelt Van Lieshout, die zich nog goed herinnert hoe hij op een vroege zaterdagochtend met De Vries op Schiphol stond, waar de secties zouden aankomen.

### Toekomstpersectieven

Voordat in 1968 de eerste experimenten bij de EVA-versneller werden uitgevoerd, was het nodige gebeurd. Van Lieshout was in 1963 directeur van het IKO geworden. Van Lieshout: 'Rond de jaren '62-'63 bereikten de discussies over de toekomst van het instituut een hoogtepunt. Onderdirecteur Koerts had intensief met het synchrocyclotron op het IKO gewerkt. Zijn onderzoek had een zeer goede naam, maar dit

### Prof. dr. R. van Lieshout



Vooruitziende blik

In het vooriaar van 1968 had de Amsterdamse Vereniging van Natuurkunde Studenten een excursie georganiseerd naar Moskou, Serpukhov en Novosibirsk. Men zou daar een aantal versneller-instituten bezoeken, waaronder het befaamde instituut in Moskou waar de latere Nobelprijswinnaar Pjotr Kapitza bechikte over de kleinste versneller ter wereld, een 30 MeV *table-top* microtron. De belangstelling van de studenten was dus groot, temeer daar de gehele tweeweekse reis voor slechts driehonderd gulden kon worden ondernomen. Voor het IKO waren zes plaatsen beschikbaar, twee voor studenten van de afdeling beta-gamma, twee voor de cyclotron-afdeling en twee voor de EVA-afdeling. Er waren echter driemaal zoveel gegegadigden en die kwamen er onderling niet uit wie de uitverkorenen zouden moeten zijn. Er werd dus besloten de toenmalige directeur Prof. Dr. R. van Lieshout om een salomons-oordeel te vragen. Let wel, een dergelijke besluitvorming was geheel in strijd met de toentertijd vigerende democratiseringsbeweging onder studenten. Op een middag verzamelden wij ons in Van Lieshout's kamer in de verwachting dat hij zes namen zou noemen en dat we na vijf minuten weer buiten zouden staan. Dit bleek een onterecht idee. Van Lieshout, wiens college kernfysica wij volgden en die ons dus allemaal goed kende, begon een weldoordachte motivering van zijn keuze. Hij behandelde van elke aanwezige niet alleen diens studieprestaties maar vooral ook het belang van deelname voor diens latere carrière-mogelijkheden! Aldus werd het een sessie van minstens een uur waarna iedereen tevreden

#### Louk Lapikás

wegging in het besef dat een weloverwogen keuze was gemaakt. Niet in de overweging betrokken was de voetbaltechniek van de betrokkenen want de in Novosibirsk door ons gespeelde uitwedstijd Siberië-Nederland eindigde in een magere 1-1. Wel werden de deelnemers Roel Kramer en Lex Ropke later respectievelijk directeur bij Philips en diolomaat te Moskou! De EVA-versneller



tijdperk begon af te lopen. Het instituut moest zich nauwkeuriger bezinnen. Op verschillende plaatsen in Nederland waren cyclotrons te vinden: de Vrije Universiteit had er één, de Technische Universiteit Eindhoven - deze was geschonken door Philips - en ook in Groningen was net een groot cyclotron gebouwd. Moesten wij een groter cyclotron aanschaffen, in competitie met Groningen? Of een Van de Graaff-versneller, in competitie met Utrecht? Of zouden wij ons richten op elektronenverstrooiing?' Bij die discussies werd ook rekening gehouden met het bedrijfsleven. Van Lieshout: 'Nederland was in zekere zin een vreemd land. Op het gebied van research waren we in Europa natuurliik een kleintie, maar van de kleine research-landen waren wij het grootst. Maar liefst vier grote multinationals (Philips, Shell, Unilever, Akzo) hadden onderzoekslaboratoria in ons land en voor jonge academici in de betawetenschappen waren de beroepsperspectieven uitstekend. Ook waren er nauwe banden tussen onderzoeksinstituten en universiteiten enerzijds en het bedrijfsleven anderzijds. Hoogleraren waren dus - een uitzondering daargelaten - beslist geen kamergeleerden, zoals men nu wel eens denkt. Op het IKO bijvoorbeeld, hielden we sterk rekening met de ideeën die bij Philips leefden en het besluit om ons te richten op elektronenversnellers, werd ondermeer genomen omdat professor Casimir (Philips Natlab en curator van IKO) van harte met deze keuze instemde.'

Aan het begin van de jaren zestig ontstond op dit gebied een samenwerkingsverband met Philips. Onder leiding van ir. Koolhof werd gewerkt aan de bouw van een lineaire elektronenversneller van 50 MeV. Hoewel met deze versneller geen experimenten zijn uitgevoerd, moeten de werkzaamheden niet worden uitgevlakt, meent Van Lieshout. 'Philips wilde niet alleen een nieuwe versneller leveren, maar ook de versnellertechnologie een stap vooruit brengen door supergeleiding toe te passen. Door deze weg te bewandelen ontstond natuurlijk het risico op vertragingen bij onderzoek en ontwikkeling. De Vries had een heel andere strategie en stelde "pak wat je kunt krijgen en ga daar mee aan de slag." Overigens is het verstandig geweest dat we hem daarin zijn gevolgd, zeker als je ziet wat een ontzaglijke problemen er nog geweest zijn met supergeleiding bij versnellers.'

### Plannen en adviezen

Toen Van Lieshout met De Vries op Schiphol op de versnelsecties voor EVA stond te wachten, was al duidelijk dat voor het echte werk een veel grotere versneller nodig was. De eerste plannen voor zo'n versneller werden ingediend toen de experimenten met EVA van start gingen, maar het zou tot 1973 duren voordat de bouwwerkzaamheden aanvingen. Van Lieshout: 'Het plan moest, via FOM en ZWO, naar de regering. Eerst werd het door FOM getoetst op de wetenschappelijke merites en financiële onderbouwing en FOM gaf er zijn zegen aan. Maar in diezelfde tijd dienden de hoge-energiefysici een plan in voor een nationaal instituut voor hoge-energiefysica; zij wilden vanuit Nederland intensiever aan het CERN deelnemen. Daarbij werd vanuit Genève druk uitgeoefend want voor een goed functioneren van CERN was een stevige basis in elk van de deelnemende landen nodig. Twee raden - de Wetenschappelijke Raad voor de Kernenergie (WRK) en de Raad van Advies voor WetenschapsBeleid (RAWB) - bogen zich vervolgens over de voorstellen. De RAWB meende dat er voor beiden plaats was en de WRK koos voor de plannen van de hoge-energiefysici. Uiteindelijk kregen zowel de hoge-energiefysici als het IKO het groene licht, maar werden de IKO-plannen op wat langere baan geschoven.'

### Begin Wetenschappelijk Centrum Watergraafsmeer

Voor de bouw van een grotere versneller - in eerste instantie werd gedacht aan 300 MeV - zou ook ruimte nodig zijn. Van Lieshout: 'Rondom het IKO waren volkstuinen en om hier grond te verwerven moest het bestemmingsplan gewijzigd worden. Dat was een taak van de gemeente Amsterdam. De Universiteit van Amsterdam, die was vertegenwoordigd in het curatorium van het IKO, raakte bij onze plannen betrokken. De universiteit zocht een nieuwe behuizing voor de Stichting Mathematisch Centrum (SMC) en het terrein in de Watergraafsmeer bood niet alleen ruimte aan deze uitstekende en enthousiaste club mathematici, maar ook aan de grote nieuwe computer van de Stichting Academisch Rekencentrum Amsterdam (SARA), die zij wilden gebruiken. Het IKO zou van de aanwezigheid van zo'n computer kunnen profiteren, we zouden technische werkplaatsen en kantinediensten gezamenlijk kunnen gebruiken. Kortom, het plan bood allerlei voordelen en de Universiteit van Amsterdam zette erg veel druk achter de wijziging van het bestemmingsplan. En daarmee werd natuurlijk ook een signaal aan de regering gegeven.'

Dit alles speelde in de laatste jaren van Van Lieshout's directeurschap. In die tijd werden de onderzoeksbudgetten krapper. Van Lieshout: 'Midden jaren zestig ging men er bij FOM nog van uit dat het budget een aantal jaren met 6 procent per jaar zou toenemen. Dat zat er ineens niet meer in en veel plannen moesten bijgesteld worden. Voor wat betreft het terrein in Watergraafsmeer was er echter behoorlijk wat druk op de regering om alles nu toch in één keer goed te regelen.'

Op 1 april 1970 werd Van Lieshout directeur bij ZWO. Over de plannen voor de nieuwe versneller, die hij als IKO-directeur steeds verdedigd had, zou hij nu een afgewogen advies aan de regering moeten geven. Was men bij ZWO niet bang voor een zekere vooringenomenheid bij Van Lieshout ten opzichte van de plannen van het IKO? Van Lieshout: 'Ik kwam natuurlijk ineens aan de andere kant te zitten. Maar toen men mij bij ZWO vroeg directeur te worden, kende men mij al en kennelijk was er geen vrees voor een zekere parti-pris mijnerzijds. Ik had geen formele bemoeienis meer met het IKO en zaken tussen ZWO en FOM werden in de eerste jaren nog door mijn voorganger Bannier afgehandeld.'

In 1971 werd het terrein voor het Wetenschappelijk Centrum Watergraafsmeer (WCW, later WTCW) door ZWO aangekocht. 'Het was een koopje, en dat paste ook bij ZWO, dat altijd graag voor een dubbeltje op de eerste rang zat', glimlacht Van Lieshout. Met de aanschaf van het terrein was aan een belangrijke voorwaarde voor de bouw van de versneller voldaan. Het groene licht voor de versnellerplannen kwam twee jaar later en nog in hetzelfde jaar ging de bouw van de *Medium Energy Accelerator* MEA van start.

Nog steeds doet het Van Lieshout plezier de gebouwen van de verschillende onderzoeksinstituten te zien, die toen met 'zoveel zwier en fantasie zijn neergezet.' Van Lieshout: 'Er werd energiek en met enthousiasme gewerkt. En hoewel ZWO geen enkele compensatie voor prijsstijgingen verleende, slaagde men erin bij de bouw - zowel van de versneller als van de gebouwen - binnen de budgetten te blijven. Dat zie je niet vaak meer.'

## Sluiting EVA en cyclotron

Dat de budgetten, ook die voor onderzoek, krapper waren geworden, bleef voor het IKO niet helemaal zonder consequenties. Van Lieshout: 'De regering had misschien toch teveel toezeggingen gedaan, die ze in het veranderende financiële beeld niet kon waarmaken. Hoewel de begroting van MEA steeds duidelijk was geweest, was er op een gegeven moment geen geld en kwam de vraag: moeten we stoppen met de bouw? Is er een andere oplossing? Toen is besloten om de exploitatiekosten van de versneller te absorberen in het totale budget van IKO-FOM.'

Het gevolg was dat het cyclotron en de EVA-versneller moesten sluiten, vier jaar voordat de experimenten bij de MEA-versneller konden beginnen. Noodgedwongen stagneerde de publicatiestroom. Van Lieshout: 'Dat wisten we en we hebben daar lang over gepraat. Je neemt zo natuurlijk de stimulans van resultaten weg. En het is heel gemakkelijk om dingen uit handen te laten lopen, maar verduveld moeilijk om ze daarna weer in handen te krijgen. Op het IKO heeft men gelukkig de juiste balans weten te behouden'

In 1975 werd vanuit het IKO een studie ondernomen om bij MEA een elektronenopslagring te bouwen, waarmee synchrotronstraling in een breed golflengte-gebied kon worden opgewekt (het acronym was PAMPUS). De aanvraag werd echter in 1980 door de minister van O&W afgewezen.

Van Lieshout bleef tot 1986 directeur bij ZWO. Daarnaast werkte hij, tot zijn emeritaat in 1984 bij de Universiteit van Amsterdam, één dag in de week als hoogleraar op het IKO, dat vanaf 1981 samen met de werkgemeenschap van hoge-energiefysici in het NIKHEF opging. Hij begeleidde er studenten en promovendi en hoewel hij zich formeel op een afstand hield, bleef hij zo op de hoogte van het onderzoek. Ook nu volgt hij het wel en wee van het instituut. Van Lieshout: 'Uit wat ik lees en hoor, maak ik op dat er wereldwijd grote belangstelling is voor de experimenten die op dit moment bij de AmPS-strekkerring worden uitgevoerd. Het is jammer dat deze installatie nu moet sluiten - een beetje als een primadonna die weggaat op het toppunt van haar roem.'



De MEA-versneller in de 200 meter lange tunnel, gezien vanaf de injector

# De MEA-versneller Ber Kuijer

In het begin van de jaren zeventig werden koffiedrinkende IKO-medewerkers - in de wandelgangen IKO-janen genoemd - een paar keer per jaar opgeschrikt door de directeur, die in de koffiekamer vertelde dat hij ieder moment een telefoontje kon krijgen van het ministerie van Onderwijs en Wetenschappen. Dat telefoontje moest uitsluitsel geven over de bouw van de nieuwe MEA-elektronenversneller: we konden beginnen of het zou helemaal niet door gaan. IKO-technici zaten ondertussen niet stil en bereidden 'in het geheim' allerlei experimenten voor op het gebied van pulstechniek zodat zij, wanneer er goedkeuring zou komen, zo snel mogelijk van start konden gaan. Andere technici kregen al vast een opvoeding in 'versnellerdenken'. Coen de Vries had een expert op wereldniveau gevonden, Jacob Haimson, om ons dit te leren. 'Nu moeten wij het nog gaan doen ook', zei Coen de Vries, toen in 1972 de toestemming uiteindelijk kwam en het gevraagde budget ter beschikking werd gesteld. Van de randvoorwaarden bij het budget zouden tegenwoordig je oren gaan klapperen: er werd weliswaar een streefdatum genoemd voor het afronden van het project, maar omdat het budget voor inflatie gecorrigeerd zou worden, was het geen probleem als er wat vertraging zou ontstaan. Gelukkig wisten wij toen nog niet hoe lang wij over de bouw van de nieuwe versneller zouden gaan doen!

De nieuwe versneller kreeg de naam Medium Energy Accelerator ofwel MEA, en moest elektronen leveren bij een energie van 500 MeV. Het tijdsrendement van de gepulste bundel, bij andere versnellers in de wereld hoogstens een paar promille, zou bij MEA verhoogd worden tot 10 procent. (In een gepulste elektronenbundel worden de elektronen in afzonderlijke, door korte tijdsintervallen gescheiden, pakketjes geleverd en het tijdsrendement is de fractie van de tijd dat er daadwerkelijk versnelde elektronen geproduceerd worden. Een hoog rendement biedt voordelen bij het uitvoeren van experimenten.) Nieuw aan de MEA-versneller zou ook zijn dat de stroom elektronen in zeer korte tijd, 1/10 seconde, van het ene experiment naar het andere experiment kon worden afgebogen - en daarbij zouden zelfs de bundelcondities (de energie bijvoorbeeld) gewijzigd kunnen worden. De lengte van de versneller zou 200 meter worden en het vermogen in de elektronenbundel zou kunnen oplopen tot 250 kilowatt. In Nederland was niet eerder zo'n grote versneller gebouwd en de overheid stond al snel op de stoep om zich te bemoeien met de (radioactieve) veiligheid. MEA werd onderworpen aan de wettelijke bepalingen voor apparaten die ioniserende straling voortbrengen, en de arbeidsinspectie moest akkoord gaan met het ontwerp van het MEA-gebouw. Voor de afscherming was vooral de dikte van de muren belangrijk: zelfs wanneer het complete bundelvermogen ergens in de wanden zou worden gedumpt, moest de straling buiten het gebouw binnen de daarvoor geldende limieten blijven. Een en ander had tot gevolg dat er ondergronds gebouwd moest worden, met wanden die hier en daar drie meter dik waren. Het gebouw bleek uiteindelijk een van de weinige onderdelen uit het ambitieuze MEA-programma dat vanaf het begin aan de specificaties voldeed. Het behalen van de voor de versneller op papier gestelde specificaties bleek een zware opgave te zijn, zoals uit het volgende zal blijken.

Inwendige van de MEA injector





#### Pizza

Ik herinner me nog levendig één van mijn nachtshifts uit de MEA-tijd, ergens rond 1985. Het was zo'n operatorloze nachtshift die allesbehalve relaxed uitgezeten kon worden. Dit keer moest ik naar het MEA-console omdat het niet lukte de bundel terug te krijgen door aan lens 2 te draaien - de 'gewone manier'. Nu was er die weken wel eens een instabiliteit in de injector') geconstateerd en ach, je hoort eens wat en leest eens iets in het MEA-logboek, dus maakte ik me verder geen zorgen. Bij het *console* a00 selekteren op het *touch panel*, DRIFTH en DRIFTV aan de wielen *linke*n, voorzichtig een tikkie draaien, en... de puike bundel was weer terug."') Weer teruggefietst naar de EMIN-hal en verder gemeten.

Totdat om een uur of zes de bundel, zonder aantoonbare redenen, plotseling kompleet verdwenen was. Ik fietste weer naar het MEA-console over de natte vloer die door de kort daarvoor gearriveerde schoonmaker netjes was gedweild. Bij het console was echter ook niks te vinden en na een uurtje ging ik naar bed: dit was duidelijk een probleem voor experts.

Wie schetst mijn verbazing toen ik de volgende dag hoorde dat er absoluut geen bundel meer uit de injector had kunnen komen omdat een paar sturingen compleet verkeerd stonden! Wat was er namelijk gebeurd? DRIFTH en DRIFTV waren nog aan de wielen *gelinked* toen de schoonmaker het console poetste. En ja, op die wielen zaten wel erg veel

#### Eddy Jans

pizza-vette vingerafdrukken dus die had hij extra goed afgeveegd, daarbij de wielen talloze malen ronddraaiend...

\*) Bij de injector worden tot 400 kilovolt voorversnelde elektronen in de versneller geïnjecteerd.

\*\*) Via het *touch-panel* kun je de elektronenbundel uit de injector, met behulp van de de magneten DRIFTH en DRIFTV, bijsturen. Dat doe je door de magneten iets te verplaatsen en dat gebeurt weer via draaiwielen die je eerst aan de magneten moet koppelen (*linken*).

## De belangrijkste onderdelen van MEA

### Elektronenbron

Onze leidsman, Jacob Haimson, ontwierp, fabriceerde, installeerde en beproefde de elektronenbron, die tot in lengte van dagen dienst moest blijven doen. Met indrukwekkende meetresultaten en computer-uitdraaien bewees hij wat een prachtige bron wij bij zijn bedrijf, *Haimson Research Corporation*, hadden aangeschaft. In het gebruik kwamen echter enige schoonheidsfoutjes aan het licht, al durfden wij dat zelf eerst niet te geloven.

### Versnellersecties

In de versnellersecties, 3 stuks van 3,65 meter en 22 stuks van 7,35 meter lang, vindt de energietoename van de elektronen plaats. Een elektromagnetisch veld, dat in een zeer snel ritme van polariteit wisselt (2856 miljoen keer per seconde), loopt met de lichtsnelheid van het begin naar het einde van jedere sectie. Op de top van jedere periode van het elektromagnetische veld bevindt zich een plukie elektronen, dat als het ware met het veld 'meesurft' en zo versneld wordt. Als de elektronen alle secties doorlopen hebben is hun energie opgelopen tot 500 MeV. Het is belangrijk dat de elektronen, die met de lichtsnelheid voortbewegen, en het elektromagnetisch veld 'in de pas' bliven lopen en deze zogeheten fasestabiliteit is erg gevoelig voor mechanische afwijkingen van het inwendige van de secties. Vandaar dat de secties heel nauwkeurig defabriceerd zijn, op een slimme manier worden ondersteund en de temperatuur tot op een honderdste graad nauwkeurig op 45° Celsius wordt gehouden. Voorts moeten de secties op zeer goed vacuüm gebracht zijn, zodat de hoge elektrische veldsterkte geen kans krijgt om gas te ioniseren - dit veroorzaakt zogeheten 'doorslag' - en de elektronen geen gelegenheid krijgen om tijdens botsingen met luchtmoleculen van richting te veranderen of afgeremd te worden. De versnellersecties werden vervaardigd door Varian Associates in Californië en per Boeing 707 naar Schiphol gebracht. Na aankomst op het IKO moesten wij ze controleren op transportschade, daarna testen en vervolgens installeren - een proces waarbij een aanzienlijke hoeveelheid menskracht nodig was.

### Klystrons

De elektromagnetische velden in de versnellersecties worden opgewekt in grote zendbuizen, klystrons genaamd, die elk twee secties voeden. De zendbuizen staan slechts een gedeelte van de tijd aan - ze worden 'gepulst' gebruikt - zodat maximaal 10 procent van de tijd vermogen wordt geleverd. Het piekvermogen is daarbij 4 megawatt, maar daartoe is eerst 12 megawatt toegevoerd. Het verschil tussen in- en uitgangsvermogen wordt in warmte omgezet en gedeeltelijk gebruikt om de versnellersecties op de vereiste 45° Celsius te houden. De anode/kathodespanning voor de zendbuizen bedraagt 130 kilovolt, die geleverd wordt door een voedingsapparaat dat modulator heet. De spanning moet stabiel en zo veel mogelijk vrij van rimpel zijn om de fasestabiliteit van het uitgangssignaal, en daardoor van de bundel, constant te houden.

### Modulatoren

De modulator is één van de apparaten die in het geniep zijn ontwikkeld, lang voordat de toestemming van de bouw van de versneller binnen was. Hij maakt van gelijkspanning een gepulste hoogspanning, die aangeboden wordt aan de zendbuis. Het ritme waarmee dat laatste gebeurt moest kunnen oplopen tot 2000 keer per seconde. De modulator bevat veertig modules, die gezamenlijk de hoogspanning tot stand brengen. Deze modules bestaan uit een tamelijk grote hoeveelheid elektronische onderdelen, die tijdens gebruik warm worden en daarom geforceerd gekoeld moesten worden. Wij gebruikten daarvoor freon omdat het zo milieuvriendelijk was! De dertien modulatoren zijn door IKO-medewerkers helemaal ontworpen, gebouwd en later verbouwd.

### Rechthoekige golfpijpsystemen

Het transport van het elektromagnetische veld van de klystrons naar de versnellersecties vindt plaats in rechthoekige golfpijpen van zuurstofarm koper. De golfpijpen moeten precies op de juiste lengte worden gemaakt en gehouden, om een goede fasestabiliteit van de bundel te garanderen. Er zijn kleine leidingen op gesoldeerd waardoor water stroomde dat op constante temperatuur werd gehouden. De golfpijpen zelf worden op zeer goed vacuüm gehouden.

## Besturingssysteem

De experts kozen met vooruitziende blik voor een zogenaamd gedistribueerd besturingssysteem. Elke te besturen eenheid, een zendbuis of een modulator bijvoorbeeld, werd verbonden met een lokale computer (ALPHA's met maar liefst 4 kilobyte(!) ringkerngeheugen) en alle lokale computers werden op een centrale computer aangesloten. De opdrachten werden gegeven aan de centrale computer, die er vervolgens voor zorgde dat ze op de juiste plek terecht kwamen. Met dit primitieve systeem werd het fundament gelegd voor de besturing van de duizenden parameters van MEA en later AmPS. Een gebruikersvriendelijke bediening van de centrale computer bleef lang een illusie: om bijvoorbeeld een modulator aan te zetten moesten grote hoeveelheden nullen en enen worden ingetypt. Gelukkig hadden we toen nog maar enkele modulatoren in bedrijf, maar het bleef arbeidsintensief werk, vooral wanneer de centrale besturing door een storing werd getroffen. Magneten werden, net als de bundelmonitoren, met de hand bediend.

# MEA in de praktijk

Dit was 't begin, maar hoe ging 't verder? Het is niet mogelijk om hier alle details te beschrijven, die ertoe bijdroegen dat de apparatuur die je nu aantreft bij MEA, niet dezelfde meer is als die waarmee wij indertijd begonnen. Aan de hand van een paar markante gebeurtenissen zullen wij toch proberen een beeld te schetsen van de ontwikkelingen bij MEA.

# Bundeltransport

De eerste twee jaar dat MEA in bedrijf was, waren er slechts vier modulatoren. Dat was weinig voor een optimaal transport van de bundel - modulatoren spelen hierbij

Travelling Wave Monitor, waarmee de positie van de elektronenbundel wordt bepaald



Inwendige van het spleetsysteem waarmee, in het begin van het afbuigsysteem, de energie van de elektronenbundel nauwkeurig gedefinieerd wordt



### De gevolgen van corrosie

Uit het verslag MEA-bedrijf, week 38, 1987: "Het vacuüm in de 400-lijn gaf aanleiding te besluiten, dat de fysica nog niet kon beginnen en dat eerst onderzocht zou worden of het slechte vacuüm in de 400-lijn verbeterd kon worden, desnoods door de spletenbox te openen. Er is eerst straling gemeten en alhoewel het niveau tussen de kaken bedenkelijk hoog was, bleek het rondom de spleet aanvaardbaar. De reparatie werd gestart. Dit hield in dat de spleetopstelling in zijn geheel buiten de ketel moest worden opgesteld. De oorzaak van het slechte vacuüm is een stel lekkende pakkingen van het koelsysteem, die zich in de vacuümketel bevinden. De pakkingen zijn opgeschoond en aan het eind van de week was de reparatie zover gevorderd, dat er met de montage kon worden begonnen."

Hiĕrbij kwam heel wat kijken. Zoals het hoort bij radiologische werkzaamheden, werd samen met de Veiligheidsdienst een draaiboek opgesteld met daarin de taken en de namen van personen die ze moesten uitvoeren. Om te voorkomen dat medewerkers een te hoge stralingsdosis zouden oplopen, moest de tijd waarin zij bij de ketel werkten, kort gehouden worden. De taken werden dus steeds over verschillende medewerkers verdeeld. Uit het verslag MEA-bedriif, week 39, 1987:

Uit het verslag MEA-bedrijf, week 39, 1987: "De reparatie van de koelwaterverbindingen in de spletenbox was inmiddels afgerond en er werd begonnen met het in de oorspronkelijke staat brengen van de onderdelen. Het afdichten van het front van de vacuümketel was een probleem. De eerste zogenaamde C-ring dichtte

#### Gert-Jan Nooren

niet af en de tweede eigenlijk ook niet. De inlek bij de tweede ring was zodanig laag, dat het niet moeilijk was om dit te accepteren."

Tijdens de werkzaamheden was in het aluminium- en roestvrijstalen koelwatersysteem oxidatie (corrosie) waargenomen. Naar aanleiding hiervan werd besloten om ook de bundeldumps AFBU en EMIN, waarin de elektronenbundel na het passeren van de meetopstelling geabsorbeerd werd, te inspecteren. Deze bundeldumps bestonden immers uit een mengsel van alumium bolletjes en water; eenzelfde combinatie van materialen als in het koelsysteem. In de EMIN-dump werd inderdaad melkwater aangetroffen, voornamelijk aluminium-hydroxide dat was verontreinigd met radioactieve isotopen. Dit betekende dat er veel aluminium was opgelost. De dump zou dus tijdens de winterstop vervangen moeten worden.

Nu konden de sterk radioactieve aluminium bolletjes in de daarvoor bestemde zogeheten ORO-opbergplaats bijgezet worden, maar wat te doen met het melkwater? Omdat het afvoeren van honderden liters radio-actief water zeer kostbaar is, ontstond het idee om het water ter plekke in te dampen. Cocky Noteboom, André Stoffelen en Herman Boer Rookhuizen improviseerden een destilleerinstallatie uit oude freonvaten, een autoradiator en andere onderdelen. Het geheel werd opgebouwd in een hoek van de EMIN-hal achter een drempeltje dat speciaal tegen eventueel lekwater was aangelegd. Aan het eind van de winterstop resteerden slechts enige tientallen liters drab, die netjes werden afdevoerd.

een cruciale rol - en maakte de bundel zeer gevoelig voor de stabiliteit van allerlei randapparatuur. Voor een correct transport van de bundel moeten de locaties van buiken, waar de diameter van de bundel maximaal is, en van knopen, waar de bundelafmeting minimaal is, zeer precies worden ingesteld. Dit gebeurde met behulp van focusserende magneten en kostte erg veel tijd. Het werd bemoeilijkt door de zogeheten collimatoren die aan het begin en einde van iedere versnellersectie zitten. In de collimatoren zit een cirkelvormige opening waar de bundel doorheen gaat en waarvan de diameter dus de maximale afmeting van de bundel bepaalt. De bundel was hier en daar te dik en schraapte langs de collimatoren; jedere verandering in de richting van de bundel leidde daardoor tot een verlies van elektronen en tot een instabiele bundelenergie. Door de diameters van de collimatoren te vergroten van 8 naar 12 millimeter, verliep het bundeltransport ineens een stuk gemakkelijker. De buiken en knopen konden op de juiste plek worden gelegd en na enig experimenteren met de focusserende elementen bleek ook de diameter van de bundel weer ruimschoots binnen de collimatoren te passen. Alle elektronen, die aan het begin van de versneller geïniecteerd werden, kwamen aan het einde terecht. Omdat geen van de elektronen onderweg tegen een collimator of de wanden botste, werd geen straling geproduceerd en kon je enige minuten nadat de versneller was uitgezet de versnellertunnel alweer betreden. Zo'n 'schone versneller' is uniek in de wereld.

### Elektronenbron

De elektronenbron van Haimson Research Corporation (HRC) had in Californië alle tests ruimschoots doorstaan en na installatie in de versnellertunnel werden wij verblind door de intensiteit van het licht, dat de elektronenbundel op een aluminiumoxide schermpje produceerde. Ook de stroommonitor gaf een ongelooflijk strakke puls te zien. Het begin was dus veelbelovend, maar het transport van de bundel naar het einde van de versneller bleek lastiger. Voor een goed transport moet de diameter van de elektronenbundel niet te groot zijn en moet er weinig spreiding zijn in de hoeken waaronder de elektronen de injector verlaten: ze moeten zoveel mogelijk rechtuit - en dat deden ze in het begin niet. Ook is van belang dat de elektronen precies op het juiste moment - op de top van een elektromagnetische golf - in de eerste versnellersectie terecht komen. Dit alles stelt hoge eisen aan de stabiliteit van de 400 kilovolt hoogspanningsbron en van de focusserende magneten in de elektronenbron. In de loop van de tijd zijn de voedingen in drie rondes verbeterd om uiteindelijk de stabiliteit van de bundel te krijgen, die ons door HRC was toegezegd. Terloops heeft NIKHEF de elektronica rondom het elektronenkanon (waarin elektronen van 400 kilovolt geproduceerd worden) volledig vervangen en de elektronica die de gloeidraad en het rooster in het kanon van spanning voorziet, totaal vernieuwd. Onze elektronica liet de prestaties van de oorspronkelijk meegeleverde apparatuur verbleken. De voor- en achterflank van de bundelpuls waren nu superkort, de gloeidraad van de kathode werd met gelijkstroom gevoed, en de diagnostiek was vereenvoudigd. De lichtgeleiders die zorgden voor signaaloverdracht van buiten de tank (aardniveau) naar binnenin de tank (hoogspanningsniveau), gingen zo vaak stuk dat we moesten uitkijken naar betere. Monofibers bleken de oplossing en ze functioneren nog steeds.

### Klystrons

De oorspronkelijke, door VARIAN geleverde klystrons, hadden een onverwacht lange levensduur: tijdens bedrijf zijn maar drie van deze zendbuizen stuk gegaan. Toch zijn ze, op één na, allemaal vervangen. Toen de MEA-versneller werd uitgebreid met de AmPS-ring, mochten de elektronenpulsen - de pakketies elektronen die uit de versneller kwamen - veel korter zijn. In plaats van 50 microseconde was 2,1 microseconde al genoeg terwijl het aantal pulsen per seconde niet boven de 400 zou komen (een herhalingsfrequentie van 400 hertz). De nieuwe eisen waren reden om nieuwe klystrons uit te zoeken, die overlaens een hoaere hooafrequente energie moesten opbrengen. wat weer een hogere bundelenergie oplevert. Tegelijkertijd moesten de nieuwe klystrons op de bestaande modulatoren passen. Ze werden uiteindelijk besteld bij het Franse bedrijf Thomson CSF. Het eerste exemplaar is heel lang in bedrijf geweest, maar de buizen uit de serieproductie vielen als rotte peren uit de boom: er waren problemen met de gloeidraad. Nadat de fabrikant de problemen voor een groot deel had opgelost, werd de levensduur een stuk opgerekt. Toch hadden de klystrons nog iets van een deux cheveaux; onderling verschilden ze in afmetingen, de aansluitingen zaten niet allemaal op dezelfde plaats en om een nieuwe zendbuis te kunnen aansluiten, moest de omgeving wel eens wat verbogen worden. Maar verder functioneerden ze goed.

### Modulatoren

Aan de modulatoren, waarvan het ontwerp uit begin jaren '70 stamt, is veel veranderd. De specificaties waaraan de modulator oorspronkelijk moest voldoen, bleken wel erg ambitieus. Er zijn inderdaad wel eens 2000 pulsen per seconde geweest, maar de warmteontwikkeling van de elektronische componenten liep toen zo uit de hand dat er defecten optraden. Dientengevolge is de hoogste frequentie waarmee experimenten zijn uitgevoerd 400 pulsen per seconde. Ook de gevolgen van het gebruik van freon als koelmiddel waren niet gering. Het freon werd eerst verwarmd tot 47,8° Celsius (kooktemperatuur) en dan onder druk door sproeiers op de elektronische componenten gespoten. Om het freon op te warmen waren verwarmingselementen in het buizensysteem gemonteerd. Een uitgebreid bewakingssysteem hield de doorstroom en temperatuur van het freon in de gaten, maar dat was niet altijd succesvol. Het is voorgekomen dat een verwarmingselement droog stond en uit elkaar sprong. Dit veroorzaakte een ravage in het koelsysteem: sproeiers verstopten, pompen vermaalden onderdelen enzovoorts...

Het freon leidde ook tot problemen met de afdichting van de modulatorkasten: de kunstrubberen afdichtingen bevatten weekmaker dat door het freon van binnenuit werd opgelost. Dit werd aan de buitenkant zichtbaar doordat bruine drab uit de afdichtingen zakte. Het was vervolgens vreselijk veel werk om de 480 afdichtingen van alle modulatorkasten te vervangen. Dat de modulatoren toch heel wat jaren, met freon, in bedrijf zijn geweest, komt doordat er veel tijd en aandacht aan is gegeven. Toen freon als koelmiddel op de zwarte lijst kwam en vervangen moest worden, passeerden allerlei vloeistoffen de revue. Uiteindelijk viel de keuze op het - vermaledijde - perchloorethyleen (per). Eén modulator werd omgebouwd en een jaar lang met per gekoeld. Toen alle zwakke punten, naar het zich liet aanzien, waren opgelost, begonnen

Geautomatiseerd bedienings- en bewakingssysteem van vacuüm en koeling van MEA en AmPS



Bert Kaan (I) en Jacob Haimson installeren de injector van MEA



we met het ombouwen van de andere modulatoren. Helaas bleken diverse leidingen en afdichtingen na langdurig gebruik toch niet bestand tegen de verwoester de werking van per en waren meer aanpassingen nodig. Het meest essentieel b eek om te voorkomen dat de per zich op een of andere manier uit het systeem werkt. Om dit permanent te bewaken nam de veiligheidsdienst een per-s nuffelaar in bedrijf die, wanneer er een te hoge per-concentratie in de lucht was, alle modulatoren afschakelde. Dit systeem reageert overigens ook op allerlei andere koolwa erstoffen in de lucht dus toen de schilder bij ons bezig was, werden alle modulatorer uitgezet.

### Het besturingssysteem

De ALPHA-computers werden aan het begin van de jaren '80 vervangen door op de Motorola 68000 serie gebaseerde computers en nieuwe software werd geschreven in de programmeertaal C. Rond diezelfde tijd werd op het NIKHEF de intergente interpretator i3 ontwikkeld, waarmee de besturing van MEA en AmPS to eo in er ker werd. Het i3-interface is altijd blijven bestaan naast de draaiknoppen, het outoparel en de later in gebruik genomen grafische interfaces. Onmiskenbaar zijn e in de jare '70 beslissingen omtrent het besturingssysteem genomen, die controver maar die in de loop van de jaren de juiste bleken te zijn. Zo werd op een conferentie in Tokyo in 1991 een nieuw 'standaardmodel' versnellerbesturing gepresenteerd, dat precies hetzelfde was als het systeem dat wij vanaf het begin gebruikten.

### Nieuw tijdperk met AmPS

Nadat MEA was omgebouwd van een elektronenversneller met hoog tijds rendement naar een machine die bundel leverde ten behoeve van de AmPS-strekker ing, begon er voor MEA een nieuw tijdperk dat zich kenmerkte door een duidelijk lagere consumptie van elektrische energie en de daarmee gepaard gaande verm indering in benodigde koelcapaciteit. Oude koeltorens hadden ineens een veel langere levensduur in het vooruitzicht. Slimme technici lieten hun gedachten gaan over de installatie en kwamen tot de slotsom, dat heel wat aan slijtage onderhevige apparaten net rustiger aan konden doen. Zo konden we de pompen van het koelsysteem op ha ve snelheid zetten.

In deze laatste fase van het bedrijf van MEA werd het steeds gemakkelijker. Was voor het bedrijf van AmPS als strekkerring nog een herhalingsfrequentie van de MEAversneller van minimaal 50 hertz nodig (50 maal per seconde een elektronenpuls), voor het bedrijf van AmPS als opslagring was een nog lagere frequentie voldoende. Een herhalingsfrequentie van 1 hertz bleek toereikend om de opslagring met voldoende stroom te vullen; de herhalingsfrequentie van de modulatoren kon daardoor omlaag naar 10 hertz. Nu konden de modules hun warmte zelfs gewoon afstaan aan de lucht.

Wat hier is opgeschreven, is maar een greep uit alles wat tussen 1970 en 1998 met de MEA-versneller gebeurde. Het is een verhaal over apparaten. Het verhaal over de mensen die bij MEA werkten, wordt hier niet verteld, maar zij hebben het mogelijk gemaakt dat deze unieke versneller ruim twintig jaar lang betrouwbare elektronenbundels heeft geleverd voor kernfysische experimenten.

Met dank aan Wim Heubers voor zijn bijdrage aan het stuk over het besturingssysteem.



QDD-spectrometer in de EMIN-hal. De detectorkar is uit de afscherming gereden

# Elektronenverstrooiing met MEA Louk Lapikás & Gerard van der Steenhoven

Met de *Medium Energy Accelerator* (MEA) zijn in de periode 1980-1990 vele experimenten uitgevoerd. In het Lage Energie Fysica (LEF) station werden de magnetische eigenschappen van atoomkernen bestudeerd; in het Lage Energie Chemie (LECH) station werden chemische structuren onderzocht met behulp van activeringstechnieken en aan het einde van de versneller (PIMU) werden pionen en muonen geproduceerd, ondermeer om zogeheten pionische atomen te bestuderen. Het meest succesvolle onderzoek - waarbij ook het grootste aantal fysici en technici betrokken was - werd echter uitgevoerd in de EMIN-hal. In deze hal werd de beweging van protonen in de atoomkern gemeten met een precisie die voordien ongeëvenaard was en die dat ook nadien is gebleven. Om die reden wijden wij dit stuk aan de metingen aan zogeheten coïncidentiereacties, die bij EMIN werden uitgevoerd.

Uit de experimenten met EVA en andere elektronenversnellers die rond de jaren zestig in bedrijf waren, waren de straal en globale vorm van atoomkernen bepaald. Dunne trefplaatjes van zuivere (atomaire) samenstelling waren daartoe beschoten met elektronen die een energie van zo'n 90 MeV bezaten. Uit het patroon van verstrooide elektronen was afgeleid dat de kern een bol is met een diffuus oppervlak (figuur 1), en een volume dat vrij precies evenredig is met het aantal samenstellende deeltjes, de protonen en de neutronen, tezamen nucleonen genoemd. Deze metingen konden echter geen informatie verschaffen over de beweging van de nucleonen in de kern, of - om in quantummechanische termen te spreken - over hun individuele golffuncties. De voorspellingen voor de beweging van nucleonen in de atoomkern waren tegenstrijdig - geheel vrij versus sterk gekoppeld aan elkaar - en metingen moesten hier uitsluitsel geven.

### EMIN-hal

In het begin van de jaren zestig suggereerden de fysici Jacob en Maris al dat de beweging van nucleonen kon worden afgeleid uit experimenten waarin een bundel elektronen (e) op een trefplaat wordt geschoten waarna niet alleen het verstrooide elektron (e') maar ook het uit de atoomkern gestoten proton (p) wordt waargenomen. De reacties waarbij een proton uit de atoomkern wordt gestoten, worden aangeven met de notatie (e,e'p). Om experimenten van dit type op NIKHEF uit te voeren moest de apparatuur aan een aantal eisen voldoen. Ten eerste moest de energie van de elektronenbundel omhoog, hoger dan de toenmalige 90 MeV, om aan het proton voldoende energie te geven om de kern te verlaten. Ten tweede moest het tijdsrendement van de bundel verbeterd worden: deze grootheid is direct van invloed op de kans om het verstrooide elektron en het uitgestoten proton tegelijkertijd (in coïncidentie) waar te nemen tussen allerlei rondvliegende elektronen en protonen, die niets met elkaar te maken hebben. Ten derde moest, omdat de reactie (e,e'p) een geringe trefkans heeft, de bundelstroom worden verhoogd om een acceptabele hoeveelheid gebeurtenissen in een redelijke meettijd te kunnen verzamelen. Tenslotte





#### Donderslag

Op een avond in 1982 had ik samen met een medestudent avonddienst in het EMIN-meetstation. Het was één van de eerste keren dat de besturing van de meetopstelling in handen van twee studenten werd gegeven, en dan moesten er die avond ook nog ingewikkelde dingen gedaan worden, zoals het verrijden van de ODD-spectrometer naar een sterk voorwaartse hoek dichtbij de bundelpijp. Geen wonder dat onze begeleiders regelmatig aan de telefoon hingen. Net na het verplaatsen van de spectrometer belde één van hen weer. Nu was er kort daarvoor een stevig onweer losgebarsten en juist toen ik verslag wilde uitbrengen, klonk er een harde donderslag die ook door de telefoon goed hoorbaar was. 'Dat was de spectrometer!', liet ik me ontvallen. Aan de andere kant van de lijn bleef het even doodstil. In werkelijkheid stond het gevaarte natuurlijk keurig op zijn plaats en konden we verder gaan met meten. André Burghardt
FIG 2. Schematische weergave van de QDD- (links) en QDQ-spectrometer (rechts) in de EMIN-hal. De spectrometers zijn opgebouwd uit dipool- (D) en quadrupoolmagneten (Q). De bundel valt loodrecht op het vlak van de tekening in.



Lijk

Tijdens een nachtdienst in 1985 waren we aan het werk in het EMIN-meetstation. Op de achtergrond klonk een radioprogramma over paranormale verschijnselen. Om even iets uit mijn kamer te halen, verliet ik het gebouw en fietste naar de 'oudbouw'. Het was mysterieus weer: vanaf de Oosterringdijk kwam mist opzetten die een aantal meters boven de polder bleef hangen. Ik fietste onder de mist door en mijn stemming werd onwillekeurig beïnvloed. Terug bij de nieuwbouw liep ik eerst nog even naar het MEA-console, maar net toen ik de hoek omging, sloeg de schrik me om het hart: er lag een levenloos lichaam op tafel! Bij nadere inspectie bleek het een etalagepop voor een demonstratie op de open dag, die kort daarop plaats zou vinden. Nog bevend begaf ik me naar de EMIN-hal. André Burghardt

moest de detectie-apparatuur een hoog scheidend vermogen hebben om dubbelzinnigheden bij de interpretatie van de metingen te voorkomen.

Deze eisen tezamen lagen ten grondslag aan het ontwerp van de MEA-versneller en van de meetinstrumenten. De versneller werd in de jaren 1975-1980 gebouwd (zie de bijdrage van Kuijer), de meetinstrumenten werden ondergebracht in de experimenteerhal EMIN, een kolos van 30 x 15 x 10 kubieke meter met twee meter dikke betonnen muren.

## Honderden tonnen meetapparatuur

Om de verstrooide elektronen en uitgestoten protonen met de vereiste precisie te kunnen meten, was het nodig meetinstrumenten te bouwen van niet eerder gerealiseerde kwaliteit. Energie en positie van de elektronenbundel uit de MEA-versneller moesten heel precies bekend zijn, wat ook gevolgen had voor het ontwerp van het afbuigstation (AFBU). Ook de twee magnetische spectrometers, die de elektronen en protonen zouden detecteren, moesten van hoge kwaliteit zijn. In de magneten in deze spectrometers worden de deelties die uit de trefplaat komen, door de Lorentzkracht afgebogen. Als je nu maar precies het magneetveld kent en de positie van de deeltjes meet, kun je hun snelheid (of impuls) met een nauwkeurigheid van beter dan één op tienduizend meten. Een dergelijke precieze meting is alleen mogelijk met een magneetveld van vrij geringe afmeting en dus voor een klein hoekbereik. Om de elektronen en protonen uit de trefplaat toch onder alle mogelijke - relatieve hoeken te kunnen waarnemen, was het nodig dat de spectrometers met een precisie van een honderdste graad onder een groot aantal hoeken ten opzichte van de bundel - en van elkaar - konden worden opgesteld. Positie en richting van de deeltjes die weer uit de spectrometermagneet komen, moesten vervolgens met een precisie van een kwart millimeter en een tiende graad worden gemeten. Er werd een ontwerpteam geformeerd om instrumenten te ontwerpen, die aan al deze eisen zouden voldoen. Vanwege het gewicht van de magneten en de vereiste afscherming zouden de spectrometers - zo was al meteen duidelijk - enkele honderden tonnen gaan wegen. De uiteindelijke spectrometers (zie figuur 2) bestonden uit in Duitsland gebouwde magneten, een in Nederland gefabriceerd draaibaar onderstel en een detectiesysteem dat door NIKHEF in eigen beheer werd gemaakt.

## Precisiemetingen

Aangezien we metingen wilden verrichten aan allerlei soorten atoomkernen, variërend van waterstof tot lood, was een flexibele opstelling, de 'verstrooiingsdoos', nodig die de trefplaten zou bevatten. Onderdelen van de verstrooiingsdoos werd naar een ontwerp van NIKHEF in Zwitserland en de Verenigde Staten geconstrueerd. De doos had als groot voordeel dat hij door middel van glijdende folies aan de spectrometer kon worden bevestigd. Zo konden de gewenste hoekverdelingen worden gemeten zonder dat het vacuüm verbroken hoefde te worden. De trefplaten zelf waren soms simpele dunne folies van materiaal zoals aluminium of zirkoon, terwijl voor andere kernen meer exotische oplossingen gevonden werden. Zo werden er in samenwerking met Delft cryogene trefplaten gebouwd waarin bijvoorbeeld helium tot de

supergeleidende temperatuur kon worden afgekoeld. Uit Duitsland kwam een 'waterval-trefplaat', waarin een dunne film (soms zwaar) water werd rondgepompt, en voor makkelijk smeltende materialen als lood werd een roterende trefplaat ontworpen, die werd aangedreven door een mini-motortje in het vacuüm. Tot slot werden gassen zoals stikstof onder hoge druk in dunwandige metalen cylindertjes opgesloten.

Met deze nauwkeurige apparatuur konden de coïncidentiemetingen beginnen. Een unieke - niet in het oorspronkelijke ontwerp voorziene mogelijkheid - deed zich voor doordat de relatie tussen de positie en energie van de elektronenbundel op de trefplaat zodanig kon worden aangepast dat een energiescheidend vermogen werd bereikt van 100 keV (zie figuur 3), een factor tien beter dan het toenmalige wereldrecord van Saclay. Met deze techniek werden de in de versneller altijd aanwezige schommelingen in bundelenergie en -positie automatisch gecompenseerd. Daarnaast bleken de detectiesystemen en de spectrometers in staat het tijdsverschil tussen protonen en elektronen met een onnauwkeurigheid van slechts een miliardste seconde te meten. Samen met het tijdsrendement van de versneller leidde dit ertoe dat de verhouding tussen echte coïncidenties (waarbij het verstrooide elektron en het uitgestoten proton gemeten worden) en toevallige coïncidenties (die optreden tussen alom rondvliegende protonen en elektronen, die niets met elkaar te maken hebben) wederom een factor tien nauwkeuriger bepaald kon worden dan in eerdere experimenten. Hiermee werd het mogelijk de kleine hoeveelheid interessante (e,e'p)-gebeurtenissen ondubbelzinnig te onderscheiden van onbelangrijke ruis.

### Tekort?

In de periode 1982-1990 werden (e,e'p)-experimenten uitgevoerd aan een groot aantal kernen. In eerste instantie werd de beweging van protonen bestudeerd. De resultaten van dergelijke metingen worden uitgedrukt in zogenaamde impulsverdelingen die de waarschijnlijkheid aangeven dat het proton zich met een bepaalde impuls (snelheid) in de kern voortbeweegt. De impuls van het proton wordt uit de metingen afgeleid door simpelweg de wet van behoud van impuls toe te passen. De impulsen van het (verstrooide) elektron en het uitgestoten proton, e, e' en p, zijn bekend, dus de ontbrekende grootheid  $p_m$ , die de impuls van het proton voor de botsing voorstelt, kun je terugrekenen via:  $p_m = e - e' - p$ . In figuur 4 zijn de impulsverdelingen voor de elementen zuurstof-16, calcium-40, zirkonium-90 en lood-208 weergegeven voor protonen die het zwakst gebonden zijn aan de kern. In dit geval was er dus relatief weinig energie (minimaal 8 MeV, zie ook figuur 3) nodig om ze uit de kern te schieten.

In figuur 4 is ook een aantal curven getekend die aangeven hoe deze verdelingen er volgens een theoretische berekening uitzien. De vorm van de curven klopt in alle gevallen prima met de metingen, maar er moet wel bij worden verteld dat de hoogte van de curven met een factor 0,6 moest worden vermenigvuldigd om op de gemeten waarden uit te komen. Hoe kan dit worden verklaard? Om dat te begrijpen moet iets meer over de berekeningen gezegd worden.

FIG 3. Het spectrum van de bindingsenergie van protonen in een aluminium-27-kern. De bindingsenergie werd gemeten tijdens een reactie waarbij aluminium-27 door uitstoot van een proton werd omgezet in magnesium-26 (<sup>27</sup>Al(e,e,p)<sup>26</sup>Mg). De pieken representeren protonen die zich in verschillende banen in de aluminium-27-kern bevinden. Het energiescheidend vermogen is 100 keV.



### Kat in 't bakkie

ledere experimentele opstelling en alle detectoren hebben kinderziektes, dus ook die van EMIN. Het vervelende van de detectoren van de QDD- en QDQ-spectrometers in de EMIN-hal was echter dat je er zo moeilijk bij kon. Je moest eerst beide spectrometers, vaak met handbediening, naar bordesstand draaien, vervolgens het bordes laten zakken en dan pas kon je bij de detectoren. Op een nacht waren Peter de Witt Huberts en Peter Dunn

Op een nacht waren Peter de Witt Huberts en Peter Dunn met de Aerogel-detector in de QDQ-spectrometer aan het meten toen er beslist iets in de focal plane-detector veranderd moest worden. Peter kende een snellere methode om dat te doen dan de wat omslachtige officiële methode van hierboven: met het bakkie (voor nietingewijden: dat bakkie was een met de kraan hijsbaar kooitje met een vloeroppervlak van een halve bij één meter). Toen Peter om een uur of zes 's ochtends halverwege de begane grond en de QDQ-detector hing, bleek echter de kraanbediening ook niet helemaal vrij van kinderziektes. Hij heeft in het bakkie, een meter of 5 boven de grond, lijdzaam een uur of twee staan wachten tot iemand met Eddy Jans





## Snelle protonen

In de theoretische berekening wordt de kracht die tussen twee nucleonen werkt, zo ongeveer beschreven als de kracht tussen twee deeltjes die zijn verbonden door een veer. Deze veer heeft de speciale eigenschap dat de aantrekkende kracht het grootst is als de nucleonen zich op een afstand van ongeveer hun diameter bevinden. Als ze verder van elkaar weg zitten wordt de kracht snel zwakker (in tegenstelling dus tot een echte veer!). Het samenspel van alle veertjes leidt ertoe dat de verzameling van (zo'n tien tot honderd) nucleonen zich gedraagt alsof ze allemaal met eenzelfde soort gemiddelde kracht naar een denkbeeldig zwaartepunt worden getrokken. Reken je vervolgens uit hoe de deeltjes in zo'n theorie bewegen (ja inderdaad, bewegen want er stelt zich geen echt statisch evenwicht in; de onderlinge veren blijven als het ware trillen) dan krijg je de curven van figuur 4.

De vorm van de curven - die voornamelijk afhangt van de veerconstante - klopt heel aardig met de theorie maar de sterkte niet. Dit laatste komt doordat in het boven beschreven model één ingrediënt niet werd meegenomen: namelijk de eigenschap van de deeltjes dat ze elkaar sterk afstoten wanneer ze te dicht (op een afstand kleiner dan hun straal) bij elkaar komen. De afstotende kracht is dan zelfs honderden malen sterker dan de aantrekkende kracht met als gevolg dat er geregeld binnen de kern heftige botsingen tussen nucleonen optreden. Ze vliegen dan met grote snelheid uit elkaar maar blijven toch binnen de kern, een situatie die derhalve een grote hoeveelheid potentiële energie vertegenwoordigt.

In onze (e,e'p)-experimenten met MEA waren dergelijke hoge snelheden en energieën van de protonen niet meetbaar en derhalve zagen wij alleen een fractie van de protonen. In modernere berekeningen dan hierboven besproken worden de effecten van dergelijke heftige botsingen wèl in rekening gebracht. De resultaten hangen af van de keuze van de afstotende kracht tussen de nucleonen, maar de meest geavanceerde berekeningen - van het zelfde soort als waarmee aan neutronensterren wordt gerekend! - voorspellen dat we in onze experimenten maar 60-70 procent van de protonen zullen zien. Dat klopt prachtig met het overzicht in figuur 5 waarin de totale fractie door ons waargenomen protonen op circa 65 procent uitkomt.

## Van MEA naar AmPS

De met de MEA-versneller en de EMIN-opstelling uitgevoerde coïncidentieexperimenten hebben wereldwijd de aandacht getrokken omdat daarmee voor het eerst onomstotelijk is vastgesteld dat slechts zo'n 65 procent van de protonen de verwachte snelheidsverdeling heeft in de atoomkern. Moderne berekeningen van de kernstructuur laten zien dat de resterende 35 procent protonen zeer hoge snelheden en bindingsenergieën hebben ten gevolge van de sterke krachten tussen nucleonen op korte afstand. De snelheden en energieën van deze deeltjes zijn echter over een zeer groot gebied verdeeld waardoor bij een gegeven energie en snelheid het signaal (de echte coïncidenties) klein is ten opzichte van de ruis (de toevallige coïncidenties). Met de toenmalige apparatuur was de kans om werkelijk gebeurtenissen te zien erg klein: de MEA-bundel was wel intens maar had toch nog te weinig tijdsrendement om voldoende meetgegevens te verzamelen, en de twee spectrometers in EMIN waren wel nauwkeurig maar hadden juist een klein hoek- en energiebereik. Dit waren dan ook de voornaamste argumenten om de AmPS-ring - met zijn vrijwel continue bundel en de grootbereik HADRON-detectoren te bouwen (zie de bijdrage van Hesselink en Jans), waarmee een nieuwe generatie coïncidentie-experimenten kon worden uitgevoerd.

FIG. 5. Tijdens (e,e'p)-reacties, waarbij een proton door het elektron uit de kern wordt gestoten, werden niet alle protonen teruggevonden, die zich op grond van de standaardtheorie in de buitenste kernschillen moesten bevinden. We vonden slechts zo'n 60 tot 70 procent. Meer geavanceerde theorieën zijn met de gevonden fractie van 0,6-0,7 uitstekend in overeenstemming.





## Radiochemie met EVA en MEA L. Lindner

De plannen van de fysici, eind vijftiger jaren, om bij het IKO (oh, zaliger nagedachtenis) een elektronenversneller te bouwen, werden door de radiochemici met argusogen gevolgd. Wat moesten zij hiermee aan? Kernreactoren en cyclotrons, daar draaide het in die tijd om. Met name cyclotrons kwamen meer en meer in de belangstelling te staan vanwege toepassingen zoals de productie van kortlevende radioactieve atomen (radionucliden) voor medische diagnostiek. Het cyclotron op het IKO, het eerste dat door Philips gebouwd was, stond voorlopig dus nog in hoog aanzien.

Na jaren wikken en wegen door voor- en tegenstanders, werd begin zestiger jaren toch besloten tot de bouw van de ElektronenVersneller Amsterdam, EVA. In deze versneller bereikten de elektronen geen energie van 3 GeV, zoals aanvankelijk was voorgesteld, maar een energie van 90 MeV.

## Remstraling

Intussen hadden de radiochemici zich met het idee vertrouwd gemaakt en was door prof. dr. A.H.W. Aten Jr., die een fijne neus had voor de nieuwe mogelijkheden, een onderzoeksprogramma opgesteld. Zogeheten fotonucleaire reacties, die door middel van remstraling worden opgewekt, vormden hiervan de basis. Remstraling is een voorwaarts gerichte bundel fotonen die ontstaat als elektronen in een zwaar materiaal worden afgeremd en daarbij (een deel van) hun energie afgeven. De fotonbundel heeft dus een energiespectrum, waarbij de maximum energie gelijk is aan de energie van de elektronen.

Om remstraling te produceren was een 'conversie-trefplaat' van zwaar materiaal nodig. Er waren toen nog niet zoveel elektronenversnellers, laat staan één waarmee radiochemie werd bedreven en veel zaken moesten daarom zelf worden uitgedokterd. Dat gold ook voor de conversietrefplaat die de werkplaats leverde - een knap staaltje van haar kunnen. Deze trefplaat bestond uit een dunne plaat tantaal, waarin de fotonen werden geproduceerd, met daarachter platen van grafiet. In het lichte grafiet werden de elektronen verder *gestopt* zonder dat daarbij veel zachte (laag-energetische) en ongewenste remstraling werd opgewekt. Om de grote hoeveelheid warmte, die ook vrijkwam, af te voeren werd het geheel met water gekoeld (figuur 1).

## Meteorieten

Activeringsanalyses met de zo geproduceerde fotonen leek het meest aangewezen onderzoek bij EVA. Deze techniek biedt perspectieven voor het bepalen van concentraties van elementen die met andere methoden moeilijk vast te stellen zijn. Hierbij wordt gebruik gemaakt van reacties waarin een remstralingsfoton een neutron uit een atoomkern verwijdert. Zo ontstaan neutron-arme isotopen<sup>\*</sup>), dit in tegenstelling tot activeringsanalyse met (langzame) neutronen bij kernreactoren waar door neutroninvangst juist neutronrijke kernen worden gevormd.

Een schoolvoorbeeld van zo'n activeringsanalyse is de bepaling van sporen fluor en chloor in meteorieten en prehistorische botten - toentertijd nog innovatief onderzoek

FIG. 1. Conversietrefplaat gebruikt voor productie van fotonen bij de EVA-faciliteit. De elektronenbundel (intredend van links) produceert fotonen in de tantaalfolies. De elektronen worden gestopt in watergekoelde grafietplaten. De fotonen treden rechts uit en vallen op de te bestralen trefplaat.



### STRAFAP

In de zeventiger jaren werden door de fysici en chemici op het IKO steeds meer metingen gedaan aan kortlevende radionucliden die geproduceerd werden met behulp van het cyclotron en de EVA-versneller. Omdat de meetopstellingen en laboratoria niet in de directe nabijheid van de versnellers waren gesitueerd, werd er gebruik gemaakt van het snelle, zogeheten STRAFAP transportsysteem.

STRAFAP? Dat staat voor STudents Running As Fast As Possible!

Cees Leurs

### Dunne conversietrefplaat in LECH



te noemen. Hierbij wordt fluor-19 door het verwijderen van een neutron omgezet in fluor-18. Dit isotoop zendt met een halveringstijd van 110 minuten een positron (B<sup>+</sup>) uit, dat onmiddellijk annihileert onder uitzending van twee fotonen van 0,511 MeV, een energie die uitstekend is te meten. Het moeilijkst was nog de chemische scheiding van het gevormde fluor-18 van de overmaat van silicaat in de meteorieten en de daarin gevormde andere radioactieve elementen. De resultaten toonden aan dat eerdere bepalingen op de klassieke manier vele malen te hoog waren! Op een analoge manier werden chloorconcentraties vastgesteld. Chloor-37 werd hierbij omgezet in chloor-36, dat een halveringstijd heeft van 32 minuten. Ook in dit geval maten we lagere concentraties dan voorheen waren gevonden. Tegelijkertijd bleek dat chloorbesmetting van de monsters door de in een chemisch laboratorium vaak rondhangende sporen van zoutzuurdampen, fataal kunnen zijn!

Naast het bepalen van sporenelementen werden op deze manier ook hoofdbestanddelen van meteorieten bepaald zoals ijzer, nikkel en zuurstof. In dit geval was (de zeer lastige!) chemische scheiding niet nodig en werd de voor het element karakteristieke gammastraling direct aan de bestraalde meteoriet gemeten. Overigens was er eigenlijk geen geld om meteorieten aan te schaffen: aan het eind van het jaar kwam het bedrag ten laste van het chemicaliënbudget - uiteraard alleen als er wat over was!

Naast dit onderzoek werden ook een aantal 'exotische' isotopen gemaakt zoals zwavel-38, dat met een halveringstijd van 2,8 uur het langst levende gammaemitterende isotoop van zwavel is. Het zwavel-38 werd gevormd door met een remstralingsfoton twee protonen te verwijderen uit de atoomkern van argon-40. Om de opbrengst op te schroeven werd argongas bevroren tot een ijsklompje zo groot als een duivenei. Dit werk gaf aanleiding tot amusant *spin-off: En passant* toonden we aan dat een eerder gepubliceerd vervalschema van zwavel-38, dat was opgesteld door fysici met minder adequate chemische ondersteuning, niet deugde. Later hoorden wij dat de *IAEA-fellow* die hieraan had gewerkt, zijn eerste zoon de naam Argon had toebedacht!

### Natte elektronen

Het meest ambitieuze en complexe project met EVA was ongetwijfeld het pulsradiolyse onderzoek. Hierbij maten we reacties tussen complexen van overgangsmetalen in waterige oplossingen en gehydrateerde ofwel 'natte' elektronen. (Het elektron is het meest reactieve reducerende agens dat we kennen; een nat elektron ligt ingebed tussen de watermoleculen.) De zeer snelle reacties werden gemeten aan de hand van de afname in intensiteit van het karakteristieke absorptiespectrum van het natte elektron. De metingen vonden telkens plaats tussen twee pulsen van de elektronenbundel, die met een frequentie van 25 pulsen per seconde en met een lengte van 1 microseconde per puls werd geleverd!

## LECH en HECH

Was EVA aanvankelijk niet meer dan een dankbare aanvulling op het cyclotron, dit veranderde toen duidelijk werd dat EVA door de veel krachtiger MEA zou worden opgevolgd en het cyclotron zou worden gesloten. Meer dan voorheen werd EVA het oefenterrein voor MEA. Radiochemie met EVA was al een betrekkelijk unieke zaak, maar radiochemie met een veel krachtiger versneller als MEA was in feite ongehoord. De overschakeling vereiste allereerst een studie naar de nieuwe mogelijkheden, met name voor wat betreft de productie van potentieel interessante radionucliden. Dat hield ondermeer in dat we de werkzame doorsneden en opbrengsten van tal van fotonucleaire reacties voor energieën tot aan circa 1 GeV moesten meten dan wel afschatten. De uitkomsten gaven aan dat voortzetting van een radiochemisch programma in aangepaste vorm twee experimenteerhallen vereiste: één voor lage energie (LECH/140 MeV) en één voor hoge energie (HECH/600 MeV). LECH zou de rol van het cyclotron en EVA overnemen terwijl HECH geschikt was voor de productie van radionucliden voor medisch-biologische toepassingen, een terrein waarop met het cyclotron al een schat aan ervaring was opgedaan.

### Hete atomen

Een sterk punt van de afdeling radiochemie was de zogeheten 'hete atoom' of *recoilchemie*. Hierbij bestudeert men de processen in hoog-energetische, radioactieve atomen, die ontstaan wanneer bijvoorbeeld een neutron door een remstralingsfoton uit de atoomkern wordt verwijderd. De terugstoot van het uitgezonden neutron draagt aan de kern een energie over, die veel hoger is dan de enkele elektronvolts die een chemische binding sterk is. Speciaal voor dit onderzoek werd in LECH een nieuwe conversietrefplaat-opstelling gebouwd, waarmee een 'schone fotonenbundel' geproduceerd kon worden. Net als voorheen werd een dunne plaat van zwaar materiaal gebruikt voor de productie van remstralingsfotonen. De resterende elektronen werden nu niet *gestopt* in dikke lagen licht materiaal, maar in een magneet weggebogen van de rechtdoorgaande fotonenbundel (zie foto). Met deze 'dunne conversietrefplaat' werd de stralingsschade in de trefplaat ten gevolge van ongewenste laag-energetische remstraling tot een minimum beperkt.

De hoofdmoot van het *recoilchemie*-onderzoek bij LECH werd verricht aan hete koolstofatomen. Gewoonlijk is het, wegens de enorm grote reactiviteit, bijzonder moeilijk om atomair koolstof te maken, laat staan om er onder gecontroleerde omstandigheden chemie mee te bedrijven. In de radiochemie is het echter een koud kunstje een heet koolstofatoom te maken, bijvoorbeeld via een kernreactie waarbij koolstof-12 door verwijdering van een neutron in koolstof-11 wordt omgezet. Het radioactieve koolstof-11 heeft een halveringstijd van twintig minuten en in de praktijk kun je er, als je opschiet, wel een uurtje plezier aan beleven, dat wil zeggen: de chemische scheiding uitvoeren van met koolstof-11 gemerkte - momentaan gevormde - verbindingen en de hoeveelheid radioactiviteit hierin meten.

Op deze manier werden bijvoorbeeld de reacties tussen koolstof-11 en benzeen  $(C_6H_6)$ , het meest eenvoudige aromatisch molecule, onderzocht. We konden tenminste 25 verschillende verbindingen aantonen en een belangrijk deel hiervan ook identificeren. Daardoor kon het complete reactieschema redelijk ontrafeld worden. In dat schema leiden primaire reacties (zie figuur 2) tot zeer reactieve met koolstof-11 gemerkte intermediaire radicalen zoals CH, dat ontstaat doordat een waterstofatoom aan het benzeen wordt onttrokken, en carbenen  $C_7H_6$ , die ontstaan doordat een koolstofatoom aan het aromatische  $\pi$ -elektronensysteem wordt toegevoegd of doordat het in een

## FIG. 2. De drie basisreacties tussen een radioactief koolstof-11 atoom en benzeen. Valentie-elektronen worden aangegeven met rode stippen.



Tekening van IKO-medewerker Willem van der Veen, verschenen in het personeelsblad IKOscoop in november 1972 ter gelegenheid van de goedkeuring van de bouw van MEA



### HECH

Radiochemie moest met de komst van MEA overschakelen op bestralingen bij hoge energie. Daartoe werd speciaal voor ons wetenschappelijk onderzoek een bestralingsfaciliteit gebouwd, de Hoge Energie Chemie ofwel HECHhal. Ik was in het begin van de jaren tachtig betrokken bij voorbereidende bestralingen onder andere in Saclay (Frankrijk), Max Planck Institut (Duitsland) en Dubna (Sovjet Unie).

Na twee weken werken in Dubna heb ik een bezoek gebracht aan Leningrad. Ik sliep en at in hotel Astoria. Veel pluche en een eetzaal met orkest en dansende vrouwen. Ik werd daar aan een tafeltje gezet bij een gigantische kerel, dezelfde stem als generaal Lebed, maar qua gestalte nog een slag groter. Het eten was heel slecht en de wodka kwam per karaf. Onze conversatie verliep levendig, weliswaar uitsluitend met tekeningetjes op papier, want wij verstonden elkaar niet. Hij was ingenieur, werkte in een mijn in Siberië en had twee zonen. Ik twee dochters. Ik probeerde zijn wodka consumptie bij te houden, maar dat lukte niet echt. Wel waren we binnen het uur chowaritsch (toen kameraden in de USSR, tegenwoordig zou je vrienden zeggen).

De stemming steeg, onze kameraadschap werd heviger. Opeens zette het orkest een lied in dat ik kende, weliswaar met Nederlandse tekst. Ik dacht, ik zing mee. Had ik nooit moeten doen.

De Siberische beer keek mij verbaasd aan, pakte mij, na anderhalve regel te hebben gezongen, bij de schouders en zette mij in één beweging midden op ons eettafeltje. Ik Jacques Visser

kon niet meer terug, ik moest doorzingen. Na drie regels begon uit de hoek van de zaal zo'n mooie iele slavische vrouwenstem mee te zingen. Spoedig gevolgd door meer vrouwen. Ook een aantal mannen zetten met hun zware bassen in. Mijn eetpartner had tranen in de ogen, ik een brok in de keel. Een golf van geluk en ontroering ging door mij heen. Wat is het bedrijven van wetenschap toch fantastisch. Na afloop een denderend applaus. Ik werd weer als een veertje van tafel geplukt en door de Siberiër gezoend, op z'n Russisch, plat op de bek. De tafel stond vol met karafjes wodka. De rest weet ik niet meer. Wel dat ik de volgende dag had afgesproken om samen naar de Hermitage te gaan. Onze Siberische beer kwam niet opdagen. HECH is later ook niet doorgegaan. C-H binding in het benzeen wordt ingevoegd. De  $C_7H_6$ -carbenen leiden voor circa 70 procent tot polymeren - tot en met tetrameren van benzeen - en verder, via fragmentatie van het geëxciteerde intermediair, tot kleinere gemerkte producten. Het CH-radicaal leidt tot derivaten van benzeen.

### Interdisciplinair

Naast het fundamenteel onderzoek werd, geheel in de lijn der traditie, ook toepassingsgericht onderzoek verricht in multidisciplinair verband. Hiermee vormde de afdeling in wezen het venster van het instituut op de wereld. De nadruk lag op met versnellers geproduceerde kortlevende isotopen. Al in de tijd van het cyclotron werden kortlevende radionucliden als fluor-18 en jodium-123 gemaakt met het oog op diagnostische technieken in de nucleaire geneeskunde. (Het IKO was het eerste Nederlandse instituut dat deze isotopen, die intussen niet meer uit de branche zijn weg te denken, produceerde.) Ook met koolstof-11 was jarenlang ervaring opgedaan. Deze expertise werd nu gebruikt voor onderzoek naar de opname van (gemerkt) CO door bonenplanten, in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam. In de experimenten werd gemerkt CO<sub>2</sub>-gas continu toegevoerd aan de wortels van levende bonenplanten terwijl de opname met een gammadetector werd gemeten. Meer exotisch was het gebruik van koper-67, met een halveringstijd van 62 uur, voor onderzoek naar het metabolisme van melkkoeien dat samen met de Landbouw Hogeschool Wageningen werd uitgevoerd. Magnesium-28, met een halveringstijd van 21 uur, werd aangewend voor onderzoek aan vissen (samen met IRI, Delft). En passant werden technieken ontwikkeld om in een later stadium grotere hoeveelheden van deze en soortgelijke isotopen te maken bij hogere energieën in HECH.

Een bundelfaciliteit in HECH kwam er echter nooit. De plannen om in plaats hiervan de *waste*-bundel van MEA te benutten, kwamen evenmin van de grond. Allemaal voorboden van het droeve feit dat de chemische afdeling van het IKO begin 1988 werd opgeheven. Hiermee werd een roemrucht hoofdstuk afgesloten, dat begonnen was toen een aantal wetenschappers met de nodige visie en durf kort na de tweede wereldoorlog besloten om naast fysici ook chemici bij het onderzoek op het IKO te betrekken.

Al met al waren het 'goede tijden, slechte tijden' en wel in die volgorde, maar soms is er ook een geluk bij een ongeluk. Wat op het IKO schoorvoetend was begonnen met de bepaling van door kosmische straling gevormd aluminium-26 (halveringstijd 740.000 jaar; foton van 1,8 MeV) in meteorieten, werd later voortgezet in Utrecht en uitgebreid tot een zeer succesvol dateringsonderzoek aan voornamelijk Antarctische meteorieten. Zo keerde de schrijver van dit stuk ongewild en via een lange omweg terug tot zijn eerste liefde, de astronomie, een vak dat hij ooit had willen studeren.

\*) Isotopen zijn kernen die evenveel protonen bevatten (waardoor de chemische eigenschappen gelijk zijn), maar verschillende aantallen neutronen.

## Veranderingen en constanten Een interview met prof. dr. A. H. Wapstra Margriet van der Heijden

Professor Aaldert Wapstra is nog altijd een aantal dagen per week te vinden in zijn werkkamer op de tweede etage van het NIKHEF. Hier houdt hij de vakliteratuur bij, verricht hij werkzaamheden voor de IUPAP, en volgt hij de laatste ontwikkelingen op het NIKHEF. 'Ik begrijp dat er in het buitenland een groot aantal gegadigden zijn, die onderdelen van de MEA-versneller en de AmPS-strekkerring willen overnemen en hergebruiken, nadat de installatie aan het einde van dit jaar gesloten wordt. Dat geeft aan hoeveel waardering er internationaal voor onze apparatuur is. Tegelijkertijd wordt daardoor de voortijdige sluiting van de installatie nog betreurenswaardiger.' Om dit kracht bij te zetten, toont Wapstra een recent artikel in *Science* over onderzoek bij de Amsterdamse pulsstrekker.

## Spectroscopie

In het leven van Wapstra neemt het NIKHEF - voorheen het IKO - een grote plaats in; in het jaar waarin MEA-AmPS sluit is het een halve eeuw geleden dat hij in dienst van het instituut trad. Hij hield zich hier bezig met bèta-gammaspectroscopie. Bij dit onderzoek worden de tijdens radioactief verval uitgezonden beta-deeltjes en hoogenergetische gammastraling gedetecteerd. Tijdens het radioactief verval gaan atoomkernen van het ene element - stapsgewijs - over in atoomkernen van een ander element. Aan de hand van de metingen kunnen de, vaak ingewikkelde, vervalschema's opgesteld worden, waarmee informatie over eigenschappen van atoomkernen, zoals massa en de bindingsenergie, wordt verkregen. Om de radio-actieve atoomkernen te produceren gebruikte Wapstra het cyclotron waarover het IKO sinds 1946 beschikte. De bèta-gammaspectroscopie bleef ook in later jaren Wapstra's grote liefde op onderzoeksgebied. In 1955 breidde hij zijn werkzaamheden uit naar Delft waar hij voor een dag in de week hoogleraar werd bij de vakgroep experimentele kernfysica. Op het IKO gaf hij vanaf de vijftiger jaren leiding aan de onderzoeksgroep die zich met bèta-gammaspectroscopie bezig hield en begeleidde tal van studenten en promovendi, waaronder ook Coen de Vries, die later het elektronenverstrooiingsonderzoek in Amsterdam zou initiëren.

## Directiezaken

In 1961 trad Wapstra toe tot de directie van het IKO. Hij werd onderdirecteur naast Aten, die hoofd was van de afdeling radiochemie, terwijl Koerts het onderzoek bij het cyclotron leidde. Professor Gugelot, de directeur, werd in 1963 na zijn vertrek naar de Verenigde Staten opgevolgd door Van Lieshout. Het waren jaren waarin intensief gediscussieerd werd over de toekomst van het instituut. De keuze viel uiteindelijk op elektronenverstrooiing en met de 90 MeV versneller EVA begon het eerste, deels voorbereidende, werk op dit terrein.

Toen Van Lieshout in januari 1971 naar de stichting voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek (ZWO, later NWO) vertrok, volgde Wapstra hem op. In die jaren wachtte





De kantoorgebouwen van het IKO aan de Oosterringdijk



### Vergadertechniek

In de tachtiger jaren moesten, op last van FOM, de vergadervaardigheden van de NIKHEF-staf aanzienlijk verbeterd worden. De staf werd hiertoe op meerdaagse trainingen gestuurd, waar zij werd onderworpen aan allerhande vooren opdrachten. Zo waren wij een keer in Noordwijkerhout, waar de trainer een opdracht verstrekte in het kader van vergader- en overlegtechnieken. Het betrof een 'onmogelijke' opdracht en het was natuurlijk de bedoeling dat wij daarover onenigheid zouden krijgen, zodat de trainer leermomenten kon inbouwen. De opdracht bestond eruit een dichte cylinder te ontwerpen die, eenmaal op tafel gezet, plotsklaps op zou springen en 180 graden zou omdraaien. Wij keken even rond en terwijl Wim Hermans over zijn solo-zeiltocht over de Noordzee begon te vertellen, togen Herman Akkerman, destijds chef van de werkplaats, en een paar andere technici aan het werk. Zonder verdere discussie was de opdracht na vijf minuten afgerond en lag er een kant-en-klare werktekening met vernuftige veren, pallen en nokken voor de neus van de verblufte trainer. Enige weken later liep een vergadering van de weten-schappelijke raad - niet over techniek maar over de verdeling van geld - zo lang uit, dat toenmalig directeur Aaldert Wapstra wanhopig de handen ten hemel hief: 'Maar heren, we gaan dit onderwerp toch niet weer ab ovo bespreken! Desalniettemin zijn de trainingen erg leerzaam geweest.

Louk Lapikás

iedereen op het instituut op een beslissing van de overheid over de nieuw te bouwen MEA-versneller. Deze versneller zou elektronen leveren bij een energie van 300 MeV en het 'echte onderzoekswerk' mogelijk maken. Wapstra: 'Zoals ook nu nog gebeurt, hield ik op de eerste werkdag van het nieuwe jaar altijd een toespraak. Een aantal jaren achtereen heb ik moeten vertellen dat ik verwachtte dat dit jaar toch wel een besluit genomen zou worden en op het laatst was natuurlijk niet te vermijden dat mensen gingen lachen. Het was geen aangename situatie, want de toekomst van het instituut hing er van af en uiteindelijk werden we toch wel zenuwachtig.' In 1973 viel dan toch het besluit en aan het einde van datzelfde jaar werd de grond, die in 1971 door ZWO was aangekocht, bouwrijp gemaakt. 'Dat de besluitvorming rondom MEA zo traag verliep, kwam enerzijds omdat het zo'n groot en duur project - 30 à 40 miljoen gulden - was en anderzijds omdat de hoge-energiefysici gelijktijdig plannen indienden. De combinatie van beide plannen vereiste de nodige organisatie.'

De eerder op het IKO gemaakte keuze voor elektronenverstrooiing betekende het einde van het werk met het cyclotron. Dat was natuurlijk jammer voor de onderzoeksgroep bij het cyclotron, maar was het dat ook niet voor Wapstra? Hij gebruikte immers het cyclotron voor de productie van radioactieve atoomkernen. Wapstra: 'Toen ik directeur was, moest ik natuurlijk de belangen van het instituut ondersteunen en afwegen wat voor het instituut als geheel het beste was. Maar ook daarvóór heb ik de plannen voor elektronenverstrooiingsexperimenten altijd van harte ondersteund. Wanneer je in een fabriek werkt, is het meestal niet prettig als er grote veranderingen worden doorgevoerd, maar in de wetenschap moet je veranderen, anders blijf je niet bij.' De bèta-gamma groep ging in de jaren zeventig goeddeels over in de PIMU-groep. Deze groep bereidde in die jaren experimenten voor met pionen- en muonenbundels, die met de MEA-versneller geproduceerd konden worden.

### Geldgebrek

Wat Wapstra wel heeft betreurd is de sluiting in 1977, tijdens de bouw van de MEAversneller, van het cyclotron en de EVA-versneller. 'Er zijn toen van hogerhand een aantal besluiten genomen die er op neer kwamen dat het instituut de exploitatiekosten van de MEA-versneller voor eigen rekening zou moeten nemen. Deze kosten, samen met de kosten voor de bouw van MEA, konden alleen opgebracht worden door EVA en het cyclotron vroegtijdig te sluiten. Het gevolg was dat er twee jaar lang geen onderzoeksresultaten gepubliceerd werden. Dat werd door sommigen gezien als een falen van het instituut, terwijl ik er heilig van overtuigd ben dat dit geheel buiten onze schuld was. Het heeft me altijd dwarsgezeten.'

Geldgebrek was er ook een belangrijke oorzaak van dat het tijdsrendement van de MEA-versneller 2 procent bedroeg in plaats van de beoogde 10 procent. Het tijdsrendement is de fractie van de tijd dat de versneller, die geen continue stroom maar pakketjes elektronen levert, daadwerkelijk elektronen produceert. Een hoog tijdsrendement was voor de PIMU-experimenten essentieel. In de jaren daarna kwam dit onderzoek dan ook minder goed uit de verf dan aanvankelijk was gehoopt. Wapstra: 'Met een aantal experimentele opstellingen is op het Paul Scherrer Instituut (destijds SIN) in Villigen in Zwitserland verder gemeten en een deel van de groep, die onder leiding stond van Joop Konijn, is gaan deelnemen in experimenten op het CERN met

muonen. Dat bood nieuwe uitdagingen en deze wending in het onderzoek verliep dan ook soepel.'

'Ik herinner me de hele periode rondom de bouw en oplevering van MEA dus zeker niet als een nare tijd. De medewerkers bekeken de nieuwe ontwikkelingen met enthousiasme en er werd hard gewerkt. Alleen voor de de radiochemici liep het minder goed af', vertelt Wapstra, Voor hen zouden er bij de MEA-versneller twee experimenteerhallen komen. In de ene hal, halverwege de versneller, konden experimenten met laag-energetische elektronen worden uitgevoerd, die de plaats in zouden nemen van het eerder werk bij het cyclotron en de EVA-versneller. De andere hal zou aan het einde van de versneller komen en hier zouden radionucliden (radioactieve atoomkernen) voor medisch-biologische toepassingen geproduceerd worden. Deze laatste hal werd wel gebouwd, maar niet ingericht met meet-instrumentarium. Het radiochemisch onderzoek, dat na de sluiting van het cyclotron twee jaar noodgedwongen had stil gelegen, kwam ook met laag-energetische elektronen niet meer helemaal van de grond, gedeeltelijk vanwege geldgebrek en ook omdat het overgrote deel van de bundeltijd gereserveerd was voor de elektronenverstrooiingsexperimenten in de EMIN-hal. De radiochemie-afdeling werd uiteindelijk in 1988 opgeheven.

### NIKHEF

In 1981 ging het IKO op in het NIKHEF, waarvan het de sectie K vormde. De plannen daarvoor dateerden al uit 1975. In dat jaar kromp de werkgemeenschap van hogeenergie fysici in tot de werkgemeenschap van theoretische hoge-energiefysica. De experimentele hoge-energiefysici vormden een aparte afdeling, die de latere sectie H van het NIKHEF zou worden. Ze betrokken de nieuwbouw op het Wetenschappelijk Centrum Watergraafsmeer. Wapstra: 'In 1981 ontstond een nieuwe situatie met drie directeuren: één voor de sectie K, dat was ikzelf, één voor de sectie H, dat was professor Diddens, en daarnaast zakelijk directeur Schutten. Ik heb dat altijd een goede constructie gevonden. Overigens werd er in die jaren nog weinig samengewerkt door de fysici bij beide secties. Pas de laatste jaren zie ik een veel nauwere samenwerking ontstaan en dat doet me plezier.' Het heeft er misschien mee maken dat de beide secties - tegenwoordig onder leiding van één wetenschappelijk directeur - nu beide in het gebouw aan de Kruislaan gehuisvest zijn, terwijl de sectie K vroeger aan de andere kant van het terrein, bij de Molukkenstraat zat. 'En in de loop van de jaren zijn de mensen natuurlijk naar elkaar toe gegroeid.'

In 1982, toen hij werd opgevolgd door Van Middelkoop, keerde Wapstra terug tot het onderzoek en zette zijn werkzaamheden aan de beta-gammaspectroscopie in Delft voort. Via het zijn eerdere werk aan de massa-analyse van atoomkernen, was hij betrokken geraakt bij de *Nuclear Data Tables.* Ook na zijn emeritaat in 1987, hield Wapstra zich bezig met massa-evaluaties voor de *Nuclear Data Group* - een voorbeeld is de *'Atomic Mass Evaluation'* uit 1995 samen met G. Audi. Zijn hart ligt bij het onderzoek. 'Ik werd directeur omdat iemand dat werk moet doen. Ik vond dat jonge mensen zich beter aan onderzoek kunnen wijden, en ik behoorde tenslotte ook toen al tot de ouderen. Maar het echte onderzoekswerk vond ik veel leuker. Ik kan er nog steeds niet mee ophouden.'

Reprinted from NUCLEAR DATA TABLES, Volume 9, Numbers 4-5, July 1971 Copyright (2) 1971 by Academic Press, Inc. Printed in U.S.A.

NUCLEAR DATA TABLES 9, 265-468 (1971)

### THE 1971 ATOMIC MASS EVALUATION

### in

### **Five Parts**

### A. H. WAPSTRA

Instituut voor Kemphysisch Onderzoek, Amsterdam, and Nuclear Data Project, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. 37830

### and

#### N. B. GOVE

Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn. 37830

### IN THIS ISSUE

PART L	ATOMIC MASS TABLE . Adjusted Values of Mass Excesses, Binding Energies, Beta-Decay Energies, and Masses	267
PART II.	NUCLEAR-REACTION AND SEPARATION ENERGIES.	303
PART III.	EVALUATION OF INPUT VALUES: ADJUSTMENT PROCEDURES Accepted and Rejected Experimental Data Compared to Adjusted Values	357
PART IV.	SYSTEMATICS OF SEPARATION AND DECAY ENERGIES Graphs of 2p- and 2n-Separation Energies and of n- and p-Decay Energies	457

IN LATER ISSUE

PART V. NUCLEAR REACTIONS Q-VALUES Extended Table for Stable and Long-Lived Targets

This work has been undertaken with the encouragement of the IUPAP Commission on Atomic Masses and Related Constants. By special arrangement with this Commission copies of PART I and PART II may be obtained at the price of \$1.00 each. Orders, directed to IKO, Ooster Ringdijk 18, Amsterdam, The Netherlands, should be accompanied by payment.

265

Copyright @ 1971 by Academic Press, Inc.

Een exemplaar van de Atomic Mass Evaluation uit 1971

Supergeleidende spoel van het muonenkanaal in de PIMU-faciliteit

## Experimenten met de PIMU-faciliteit Joop Konijn & Tjeerd Ketel

Met de elektronen uit de MEA-versneller werd een groot aantal verstrooiingsexperimenten uitgevoerd, maar de elektronen werden ook gebruikt om secundaire bundels van muonen en pionen te maken. Bij de productie van pionen werd een elektronenbundel met een energie van 400 MeV gericht op een wiel van koper van ongeveer 1 centimeter dik. Om te voorkomen dat het koper plaatselijk oververhit zou raken, draaide het wiel rond: het werd via een fietsketting door een motor aangedreven. De pionen die bij de botsingen tussen elektronen en koperatoomkernen ontstonden, werden via twee transportkanalen (PI en MU) naar de experimenten geleid.

Pionen hebben een eindige levensduur en vervallen na gemiddeld 27 nanoseconden (een nanoseconde is een miljardste seconde) naar muonen. Aan het einde van het MU-kanaal bestond de bundel dus niet alleen uit pionen, maar ook uit muonen en voor een vrij groot deel uit elektronen, die door het koper waren gereisd. De deeltjes konden van elkaar onderscheiden worden aan de hand van hun vluchttijden. Het lichte elektron beweegt met praktisch de lichtsnelheid, terwijl het zwaardere pion met een impuls van 140 MeV/c de afstand tussen twee detectoren met 70 procent van de lichtsnelheid aflegt. Het muon beweegt met een snelheid die hier ongeveer tussenin ligt. In november 1982 werden tijdens metingen aan de vluchttijd van de deeltjes bij PIMU voor het eerst pionen en muonen waargenomen (figuur 1). De meeste experimenten werden uitgevoerd met de pionen. In de beginperiode was de intensiteit van de pionenbundel vrij laag. Er werden toen experimenten uitgevoerd met pionische atomen; atomen waarbij één van de elektronen die om de kern draaien vervangen is door een pion. Later kon de intensiteit van de bundel worden opgevoerd

en konden ook verstrooiingsexperimenten met pionen worden uitgevoerd.

## Pionische atomen

Om de experimenten met pionische atomen te verduidelijken gebruiken we vaak de analogie met ruimtesatellieten, die ons planetenstelsel verkennen. De Voyagers scheren langs de buitenplaneten van ons zonnestelsel en als ze een planeet passeren zenden ze signalen naar de aarde, die informatie geven over de samenstelling van de dampkring, het magneetveld van de planeet enzovoorts. Hoe dichter de Voyagers een planeet naderen, hoe nauwkeuriger de informatie die ze verschaffen. In onderzoek met pionen in banen rond de atoomkern gebeurt iets dergelijks. Het pion, dat één van de elektronen rondom de atoomkern vervangt, scheert veel dichter langs de atoomkern verkrijgen. In de korte tijdsspanne dat het pion om de kern cirkelt, zendt het deeltje straling uit, die ons iets vertelt over de wisselwerking tussen atoomkern en pion en over de opbouw van de betreffende kern.

Een pionisch atoom wordt gevormd wanneer een negatief geladen pion wordt afgeremd en tot rust komt in materie (tijdsduur ongeveer 1 nanoseconde). Een atoom kan men, volgens het eenvoudige atoommodel van Bohr, opgebouwd denken uit een kern waaromheen elektronen draaien in verschillende 'schillen', die een vast aantal

FIG. 1. Met behulp van de elektronenbundel uit MEA werden pionen geproduceerd. In het transportkanaal vervalt onderweg een deel van de pionen naar muonen, zodat de bundel uiteindelijk bestaat uit elektronen, pionen en muonen. Hieronder is de gemeten vluchttijd van deze deeltjes weergegeven. De elektronen, die met de lichtsnelheid bewegen, leggen de afstand tussen de twee tellers (3,2 meter) in 11 nanoseconde af, muonen doen er tweemaal en pionen twee-en-een-half maal zo lang over.



FIG. 2. Door de pionenbundel op een trefplaat te richten, werden pionische atomen geproduceerd. Een signaal in de tellers S1, S2 en S3 gaf aan dat een pion op de trefplaat inviel. Wanneer S4 geen signaal gaf, moest dit pion in de trefplaat gestopt zijn: dit duidde op het ontstaan van een pionisch atoom. Germanium (Ge) tellers registreren de door het pionisch atoom uitgezonden röntgenstraling. Met de bismuthgermanaat (BGO) en natrium-jodide (Nal) tellers werd ongewenste gammastraling onderdrukt.



elektronen kunnen bevatten. Elke schil correspondeert met een bepaald energieniveau - eigenlijk met een bepaald impulsmoment - van de elektronen. Het pion komt terecht in de binnenste schil van het atoom (de zogeheten K-schil) en in Bohr's model heeft de baan van het ingevangen pion een straal die omgekeerd evenredig is met zijn massa. De pionmassa is 275 maal zo groot als die van het elektron en de straal van de pionbaan is dus evenzovele malen kleiner.

Hoewel het pion meestal wordt ingevangen in de binnenste elektron-schil, is dit voor het pion relatief ver van de kern (het is voor het pion ongeveer de zeventiende Bohrse baan). Het is voor het pion energetisch ongunstig om zich op deze afstand van de atoomkern te bevinden en het gevolg is dat het pion via een cascade van overgangen naar steeds dieper gebonden banen, dichter bij de atoomkern, 'vervalt'. Dit hele proces verloopt in ongeveer 1 picoseconde (een picoseconde is een duizendste van een miljardste seconde). Daarbij raakt het pion energie kwijt, die bij iedere overgang wordt uitgezonden in de vorm van röntgenstraling. Naarmate het proces vordert, komt het pion dichter in de buurt van de atoomkern en het is met name tijdens de overgangen naar diep-gebonden banen dat het pion een uiterst nauwkeurige sonde vormt voor de studie van de structuur van de kern.

## Eerste experimenten

In de eerste experimenten kregen we, met een stroom in de MEA-versneller van 25 micro-ampère en 400 MeV elektronen (ofwel een bundelvermogen van 10 kilowatt), ongeveer twintig duizend pionen per seconde op een trefplaat in het experiment. In ongeveer 75 procent van de gevallen werden de pionen in atomen ingevangen. Het onderzoek richtte zich hoofdzakelijk op wat er vervolgens tijdens het cascadeproces van het pion gebeurde. Doordat de pioncascade zich helemaal binnen de resterende elektronenwolk van het atoom afspeelt, hebben we in eerste benadering te maken met een atoom waarvan de structuur sterk lijkt op die van waterstof: een atoomkern waaromheen een enkel deeltje cirkelt. Zo'n atoom is quantummechanisch eenvoudig te behandelen.

De metingen aan het cascadeproces verschaften ons informatie over de vervorming van de atoomkern; de vorm van veel kernen wijkt af van een perfecte bol. Deze afwijking is een gevolg van de deformatie van de atoomkern - de atoomkern heeft een zogeheten elektrisch guadrupoolmoment en dit veroorzaakt guadrupoolvervorming. Het pion cirkelt veel dichter bij de kern dan een elektron en de effecten van vorm en magneetveld van de kern op de pionbanen zijn navenant groter. Zo zijn energieverschillen tussen de verschillende componenten van de röntgenstraling, die het pionische atoom uitzendt wanneer het pion in diep gelegen banen overspringt, veel groter dan die van het zichtbare licht dat wordt uitgezonden wanneer elektronen tussen soortgelijke banen overspringen. Door de intensiteit en energie van deze pionische röntgenstralen te meten voor de overgang van de zogenaamde 5g- naar een 4f-schil - deze speelt zich af binnen een tijdsbestek van een femtoseconde (een femtoseconde is een miljoenste van een miljardste seconde) - konden we de guadrupool-vervorming van atoomkernen nauwkeurig vaststellen. Bij de PIMU-faciliteit zijn dergelijke metingen uitgevoerd aan tantaal, rhenium en neptunium, allemaal elementen met een grote deformatie van de atoomkern.

Het pion is niet alleen gevoelig voor de elektromagnetische wisselwerking, ook de sterke wisselwerking tussen atoomkern en pion speelt een rol. Deze laatste resulteert in een sterke absorptie van het pion door de atoomkern zodra deze twee voldoende dicht bij elkaar komen. Ook de absorptie van pionen hebben wij tijdens de metingen onderzocht en dit onderzoek heeft uiteindelijk geleid tot een nieuwe en meer nauwkeurige bepaling van het krachtveld tussen een pion en een atoomkern. Daarmee kon bijvoorbeeld worden aangetoond dat de afstoting tussen de atoomkern en een pion van lage energie aanzienlijk groter is dan door de destijds vigerende theorie werd aangenomen.

### Goud, platina en tantaal

Het eerste onderzoek met MEA aan absorptie in pionische atomen in platina en goud werd in februari 1984 gepubliceerd. De meetopstelling is schematisch weergegeven in figuur 2. Voor het trefplaatje T zijn drie plastic scintillatoren - S1, S2 en S3 - opgesteld en achter het trefplaatie een vierde. S4. Een geladen deeltie dat het plastic passeert. produceert een lichtflitsje dat vervolgens versterkt wordt en omgezet in een elektrisch signaal. Een nagenoeg gelijktijdig verkregen signaal in de scintillatoren S1, S2 en S3 duidde op een inkomend deeltje. Om vervolgens alleen gebeurtenissen te selecteren waarbij het deeltje in het trefplaatje werd geabsorbeerd, vereisten we dat in S4 geen signaal geproduceerd werd. Om de uitgezonden röntgenstralen te detecteren, werden vier germanium-diodes opgesteld rondom het trefplaatje. Wanneer röntgenstralen verstrooien aan elektronen in de atomen in het trefplaatje, verliezen zij energie. Tengevolge van dit zogeheten Compton-effect wordt dan, in plaats van de röntgenstraling die ons informatie over de atoomkern verschaft, lager energetische gammastraling gedetecteerd. Deze ongewenste achtergrond van straling werd geregistreerd in een schild van bismuthgermanaat (BGO) scintillatiedetectoren, dat elke germaniumdiode omgaf. Aan de hand hiervan werden de meetgegevens gecorrigeerd: de achtergrond werd zo met een factor zes onderdrukt.

In figuur 3 geven we een voorbeeld van een spectrum van pionisch tantaal-181 gemeten in een van de germanium-diodes. Het bovenste spectrum werd gemeten direct nadat het pion op de trefplaat inviel, in een tijdvenster van 40 nanoseconden. In dit spectrum is de röntgenstraling geregistreerd, die wordt uitgezonden tijdens het cascade-proces wanneer het pion naar steeds dichter bij de atoomkern gelegen banen overspringt.

Wanneer het pion de atoomkern zeer dicht nadert, kan het door de atoomkern geabsorbeerd worden. Daarbij wordt een neutron uit de atoomkern verwijderd. Dit neutron kan op zijn beurt weer in andere kernen worden ingevangen. Zo ontstaan in de trefplaat radioactieve kernen en de door deze kernen uitgezonden straling werd gemeten gedurende een tweede tijdsinterval, ongeveer 50 nanoseconden later (het onderste spectrum in figuur 3). Dergelijke metingen, die informatie geven over de sterke wisselwerking tussen pion en atoomkern, werden ook uitgevoerd voor goud en platina.

In figuur 4 tenslotte, worden resultaten getoond van metingen aan de pion-overgang van de 5g- naar de 4f-schil in pionisch tantaal-181. In deze diep gebonden schillen is de invloed van de atoomkern voelbaar en het elektrisch quadrupoolveld van de

FIG. 3. Het energiespectrum van de röntgenstraling uitgezonden door pionisch tantaal-181. Het bovenste spectrum werd gemeten direct nadat het pion de plaats had ingenomen van een van de elektronen rondom de atoomkern. De pieken corresponderen met straling die wordt uitgezonden wanneer het pion springt tussen de verschillende banen om de atoomkern.

Wanneer het pion de kern dicht nadert, wordt het in de kern geabsorbeerd. Er onstaan radioactieve atoomkernen en de door deze kernen uitgezonden straling werd 50 nanoseconden later vastgelegd in het onderste spectrum. Dit geeft informatie over de sterke wisselwerking tussen pion en atoomkern.



FIG. 4. Het gemeten energiespectrum van de röntgenstraling die door pionisch tantaal-181 wordt uitgezonden, wannneer het pion, dat om de atoomkern cirkelt, overspringt van de zogeheten 5g- naar de 4f-baan. De twee sterkste componenten van deze overgang zijn duidelijk zichtbaar (rode kromme). Uit de energieverschillen en de relatieve sterkte van de twee pieken werd het elektrisch quadrupoolmoment van tantaal-181 met een nauwkeurigheid van 2 procent bepaald. In de inzet worden de theoretisch berekende relatieve posities en sterkten van alle componenten in deze overgang getoond.



atoomkern leidt tot een opsplitsing - vergelijkbaar met de fijnsplitsing van het Zeemaneffect - van de energieniveaus in de schillen. Uit deze meting is het quadrupoolmoment van tantaal-181 met een nauwkeurigheid van 2 procent bepaald.

### Pionverstrooiing

Eind 1984 kon de intensiteit van de bundels worden verhoogd dankzij een nieuwe pionproductietrefplaat en een bundelstop met een vermogen tot 250 kilowatt. Deze bundelstop was noodzakelijk voor het absorberen van een hoger vermogen van de elektronenbundel, waarmee de pionen geproduceerd werden. Het werd nu mogelijk elastische verstrooiingsproeven uit te voeren met pionen met energieën van 15 tot 45 MeV. Voor deze experimenten werd een tot lage temperaturen gekoelde trefplaat, gevuld met helium-3 of helium-4, in een grote strooikamer gemonteerd. De verstrooide pionen werden geregistreerd met silicium- en germanium-detectoren. Uit de hoekverdeling van de verstrooide pionen kon het krachtveld gereconstrueerd worden, dat een heliumkern op een passerend pion uitoefent.

Behalve deze pionverstrooiing werd ook pionabsorptie in vlucht waargenomen. Hierbij wordt de energie van het in de atoomkern geabsorbeerde pion overgedragen op protonparen die tijdens het absorptieproces uit de kern gezonden worden. Het gemeten aantal gebeurtenissen in deze technisch ingewikkelde experimenten bleef echter marginaal vanwege de lage intensiteit en lage energie van de elektronenbundel waarmee de pionen werden geproduceerd. Voorts was de ruimtehoek van de gebruikte detectortelescopen aan de lage kant met zo'n 10 millisteradialen, ofwel bijna een duizendste van een boloppervlak. Twee drachttelescopen met een twintig maal grotere ruimtehoek voor de detectie van pionen brachten de gewenste verbetering van de statische nauwkeurigheid. Bij voorwaartse strooihoeken, waar theoretische berekeningen de meest interessante effecten voorspelden, bleek het echter moeilijk muonen afkomstig van het verval van de pionen, afdoende te onderdrukken.

Ten slotte werd een multi-detector systeem met een ruimtehoek van 1500 millisteradialen (ruim een tiende van een boloppervlak) met succes ingezet voor metingen aan de protonen en deuteriumkernen die werden uitgezonden tijdens de absorptie van een pion in een zuurstofkern. Om voldoende zuurstof op te sluiten in een klein volume, werd gebruik gemaakt van een watertrefplaat. Het waterstof in deze trefplaat speelde geen rol: bij pionabsorptie zijn tenminste twee nucleonen betrokken en absorptie kan niet plaatsvinden in de waterstofkern, die immers uit een enkel proton bestaat. Hoeveel nucleonen precies uitgezonden werden tijdens het absorptieproces, was in het begin van de jaren tachtig niet bekend. Uit de metingen bleek dat zelfs bij de relatief lage pionenergie van 65 MeV vaak drie en zelfs vier nucleonen aan het absorptieproces deelnemen. Veel van deze deeltjes werden waargenomen als vrije nucleonen, maar daarnaast ook in de vorm van deuteriumkernen (gebonden neutron en proton). Wat dit aspect betreft leek de pionabsorptie in zuurstof sterk op die in helium.

Later verhuisde de detector naar het Paul Scherrer Instituut (vroeger SIN geheten) in Zwitserland, waar weer aan helium werd gemeten maar nu met pionenergieën tot 300 MeV. In deze experimenten werd het multi-nucleon karakter van het absorptieproces nog eens bevestigd. Ondanks de interessante fysica, die met pionen en muonen kon worden onderzocht, werd al snel besloten de PIMU-faciliteit te sluiten. De bundelintensiteiten in PIMU konden niet concurreren met die van andere instituten in de wereld en met de sluiting kon meer van de kostbare bundeltijd aan elektronenverstrooiingsexperimenten besteed worden.

FIG. 5. Schematische weergave van de detectoropstelling zoals gebruikt bij metingen aan pionabsorptie in vlucht in de atoomkern. Geabsorbeerde pionen geven een signaal in de plastic scintillatoren S1 en S3, in een van de kleine trefplaat-tellers T1, T2, en T3, en geen signaal in de veto-teller. Uit de signalen van de tellers TOF en S1 wordt de pion-muon-elektron samenstelling van de bundel bepaald. De teller HOEK geeft via de vluchttijd de energie van de pionen met 0,5 MeV nauwkeurigheid. Protonen en deuteronen, die tijdens het absorptie-proces uit de atoomkern worden gezonden, worden waargenomen in de plastic tellers 1 tot en met 16.





# MEA-AmPS

## *De versneller, de technologie en de experimenten* Peter de Witt Huberts & Guy Luijckx

In de jaren tachtig verrichtten kernfysici met de Amsterdamse elektronenversneller MEA onderzoek naar de precieze beweging van protonen in atoomkernen. Met hun onderzoek namen zij een vooraanstaande positie in op dit gebied van wetenschap waarin een wereldwijde concurrentieslag woedde. De voornaamste concurrenten waren teams van onderzoekers bij de BATES lineaire elektronenversneller van het vermaarde *Massachusettes Institute of Technology* te Boston en bij de Franse *Accélérateur Linéaire de Saclay* (ALS) gelegen in de buurt van Parijs. Hierbij moet opgemerkt worden dat, waar het de (terechte) gewoonte van vandaag de dag is om het belang van internationale samenwerking te benadrukken, vrijwel al het onderzoek met MEA toen al door internationaal samengestelde teams werd uitgevoerd.

Het succes van MEA was vooral te danken aan de toepassing van een geraffineerde magneto-optische techniek, een vinding van NIKHEF-fysici. Deze techniek stelde hen in staat om haarscherp te meten hoe de intense bundels van elektronen - die je kunt opvatten als de lichtbron van de 'subatomaire microscoop MEA' - aan de snel bewegende protonen in atoomkernen verstrooid werden. Het resultaat was een precies vastgelegde kansverdeling van bindingsenergie en snelheid van de protonen. Het spectrum van de bindingsenergieën van de protonen bleek sterk af te hangen van de atoomkern waarin de deeltjes zitten - in helium bijvoorbeeld is het totaal anders dan in lood.

Goed wetenschappelijk onderzoek stuit altijd op nieuwe raadsels - zo ook in dit geval. Een zeer raadselachtige waarneming was dat 40 procent van de protonen zoek leek: ze hadden ofwel een andere bindingsenergie of een veel hogere snelheid dan toentertijd gemeten kon worden (zie de bijdrage van Lapikás en Van der Steenhoven). Volgens de gangbare theorie hoorden zulke hoge snelheden helemaal niet voor te komen, maar betrouwbare metingen waren niet beschikbaar; met MEA was de grens van het waarneembare voorlopig bereikt.

## Waarom AmPS?

Protonen met spectaculair hoge snelheden - meer dan 100.000 kilometer per seconde bleven bij MEA onzichtbaar omdat de elektronen in korte, felle flitsen worden afgevuurd. Stel je een kamer voor waarin personen van diverse pluimage rondlopen waarvan enkelen van tijd tot tijd een heel snelle sprint trekken. Om deze sprinters te identificeren moeten binnen een korte tijdspanne foto's gemaakt worden. Daarbij kun je kiezen tussen honderd of tienduizend flitsopnamen, waarbij de hoeveelheid licht, opgeteld over honderd dan wel tienduizend flitsen, gelijk is. Wanneer nu blijkt dat de opnamen overbelicht zijn in het geval van honderd flitsen, is het natuurlijk veel slimmer om tienduizend opnamen te maken. Dit is precies waarom de Amsterdamse pulsstrekker (*Pulse Stretcher* in het Engels) AmPS werd bedacht: AmPS levert een continue bundel elektronen (tienduizend aaneengesloten flitsen) in plaats van felle elektronenpulsen (honderd flitsen) zoals MEA (zie ook figuur 1). FIG. 1. Deze figuur illustreert welk voordeel een continue elektronenbundel biedt in een experimentele opstelling. Tijdens een korte, intense elektronenpuls (boven) valt een zeer groot aantal (geproduceerde) deeltjes vrijwel gelijktijdig op de detectoren die een zo groot aanbod niet kunnen verwerken. Wanneer de pulsen zijn uitgesmeerd tot een continue stroom elektronen (onder), arriveren de (geproduceerde) deeltjes gespreid in de tijd bij de detectoren, die de interessante gevens nu beter uit de gegevensstroom kunnen filteren.



### Marionet

Voor de laatste meetweek van 1987 stonden metingen met het eerste exemplaar van de zogenaamde Hadrondetectoren op de rol. Zoals gebruikelijk bij een prototype was de detector pas op het laatste moment klaar. Toen hij vervolgens na de nodige moeilijkheden op zijn plaats stond, werd het verplaatsingsmechanisme beproefd. Dit bleek niet berekend op de grote massa van 800 kilo, en na enige keren heen en weer rijden begaven de tandwielen het. Goede raad was duur: een nieuw aandrijfmechaniek was niet in een paar dagen te maken, anderzijds was het voor de metingen essentieel dat de detector verplaatst kon worden via afstandsbediening buiten de hal.

Wie het bedacht heeft is niet meer te achterhalen, maar op donderdag werden bij Watersport Oost grote hoeveelheden touw en katrollen gekocht. Het touw werd vakkundig door de hal geschoren en uiteindelijk kwamen uit de kabelgaten in de muur van de hal twee touwen tevoorschijn, gemerkt: 'voorwaarts' en 'achterwaarts'. Eddy Jans raakte tijdens het weekeinde zo bedreven in het touwtrekken, dat de detector tot op een graad nauwkeurig geplaatst kon worden. GertJan Nooren

FIG. 2. De werking van de Amsterdamse Puls Strekker, AmPS, aan de hand van een koffiefilter. Water (elektronen) wordt met forse scheuten (pulsen) in het filter (AmPS-ring) gegoten om er als vrijwel continue stroom koffie (geëxtraheerde elektronen) weer uit te komen. De koffiekan correspondeert met de trefplaat in de EMIN-hal.



### Kortsluiting van 3,6 megawatt

Om een meer stabiele spanning op te wekken voor de modulatoren bij MEA werd besloten de gelijkrichters uit te voeren met een extra regelaar. Bij het inbouwen van de nieuwe besturingsprint in gelijkrichter 1, vond een ongelukje plaats. Tijdens het werken moet een apparaat waar normaal noogspanning op staat, altijd uitgeschakeld zijn en moeten spanningvoerende delen geaard worden met een aardhaak. Per abuis was zo'n aardhaak in de gelijkrichter blijven hangen nadat de inbouwwerkzaamheden waren afgerond. Dat had gevolgen tijdens de test.

Ooggetuige: na het inschakelen van de gelijkrichter volgde een explosie, de aardhaak werd uit de kast gelanceerd en de koperen aardkabel verdampte. Nadat de rook van verbrand isolatiemateriaal was opgetrokken, kon men de schade opnemen. Het viel mee: 16 zekeringen van 450 ampère defect. Maar op de verbindingsstrippen waren haren van koper ontstaan door elektromagnetische stress. Een tweede reden om AmPS te bouwen kwam, in een later stadium, voort uit de wetenschappelijke wens om gepolariseerde elektronen op gepolariseerde atoomkernen te schieten.

De elektronen, maar ook de protonen en neutronen in de atoomkern (tezamen nucleonen genoemd), zijn minuscule magneetjes. Dit is een gevolg van het feit dat deze deeltjes, net als de aarde, om hun as draaien. Ook de atoomkern, waarvan de eigenschappen door alle nucleonen tezamen bepaald worden, heeft een magnetisch veld. In het eenvoudigste geval is de kern op te vatten als een dipoolmagneet met een noord- en een zuidpool. De verdeling van de proton- en neutron-magneetjes in de atoomkern hangt af van hun richting: naar de noordpool van de kern gerichte nucleonen gedragen zich anders dan naar de zuidpool gerichte. Willen we nu het verschil van die verdelingen meten, dan moeten zowel de elektronen als de atoomkernen worden gepolariseerd; hierbij wordt hun draaias (ofwel de richting van het magneetveld) in de ruimte vastgelegd. De innovaties in het instrumentarium die nodig waren voor het polariseren van elektronen en atoomkernen, werden op het NIKHEF al na korte tijd met succes bekroond (zie de bijdrage van Van den Brand en De Jager).

Tijdens de polarisatie-experimenten is onder andere de atoomkern van het element deuterium onderzocht. Deze atoomkern heeft een vorm die in geringe mate afwijkt van een perfecte bol, namelijk een vorm die hoort bij een 'quadrupoolmoment'. De afwijking wordt veroorzaakt door een nog onbekend krachtenspel tussen de twee deeltjes in de deuteriumkern. De aard hiervan kunnen we afleiden uit metingen aan de afwijking van de bolvorm. Er is hierbij echter een venijnig probleem: tenzij speciale maatregelen genomen worden, is de stand in de ruimte van een deuteriumkern willekeurig. Het komt er op neer dat de kern effectief in alle richtingen even snel ronddraait en zo'n snel ronddraaiend niet-bolvormig voorwerp ziet er weer uit als een bol! Om een afwijking van de bolvorm te kunnen waarnemen moet de deuteriumkern dus gericht - gepolariseerd - worden, en dat is tijdens experimenten bij AmPS gebeurd.

### Van idee tot realiteit

René Pirovano

Rond 1984, vier jaar nadat MEA in bedrijf was gesteld, nam de wetenschappelijke productiviteit van het NIKHEF met een sprong toe tot een aansprekend niveau. Daarvoor, tijdens de vijf jaar durende constructie van de versneller en het wetenschappelijke instrumentarium, was de publicatiestroom afgenomen - een onvermijdelijk gevolg van het niveau en de omvang van het MEA-project, dat beslag legde op vrijwel de gehele intellectuele- en productiecapaciteit van het instituut. Juist omdat het verwezenlijken van nieuwe wetenschappelijke plannen een kwestie van lange adem is, werd het projectvoorstel *'Update MEA'* al medio 1985, ruim een jaar na de opening van MEA, bij FOM/NWO neergelegd. De kern van dit plan was om, met behulp van een zogeheten strekker-ring, een continue bundel elektronen te maken met een energie van zo'n 700 MeV en een grote intensiteit. (Polarisatie kwam toen nog niet op het menu voor).

De werking van zo'n instrument is aardig te illustreren met het alledaagse voorbeeld van een koffiefilter. Als je met een flink aantal scheuten per minuut de inhoud van een keteltje heet water in een koffiefilter schenkt, zal een vrijwel constant stroompje koffie geproduceerd worden - uiteindelijk komt er nagenoeg evenveel vocht uit als er werd opgeschonken. Zo gebeurt het ook met de pulsen - scheuten elektronen - die door MEA in de strekker-ring geschoten worden: zij komen er als een continue stroom elektronen weer uit (figuur 2). De kunst is om op een nette manier evenveel elektronen uit de ring te tappen als er in geschoten werden - gezien het enorme bundelvermogen (maximaal 10 kilowatt) mag er onderweg vrijwel niets verloren gaan. Het streven hierbij was om honderd maal meer stroom uit de ring te krijgen dan ooit eerder in de wereld gelukt was - ambitieus, maar zonder grote ambities ontstaat geen grensverleggende wetenschap. Het zou spannend worden: we hadden immers van FOM slechts zes jaar de tijd gekregen om, nadat de laatste bout van AmPS aangedraaid was (als alles goed ging medio 1992), onze wetenschappelijke plannen waar te maken.

Medio 1987 werd het projectvoorstel gefinancierd in het kader van het zogenaamde Institutionele Apparatuur Schema (IAS), opgezet door toenmalig Minister van Onderwijs en Wetenschappen, Deetman. Inmiddels waren de plannen inhoudelijk ingrijpend veranderd - en zo hoort het ook in een intens-levendig vakgebied. Vooruitlopend op toekomstige ontwikkelingen bij de concurrerende instituten was het ontwerp van de strekker-ring sterk uitgebreid om er voor te zorgen dat ook een intense stroom gepolariseerde elektronen gedurende tientallen minuten in de ring opgeslagen kon worden. De strekker-ring moest dus tevens opslagring worden - twee functies in één instrument, dat was nog niet eerder vertoond. Het betekende ook dat een nieuw ontwerp en bestek voor het gebouw nodig waren. Hoe ingrijpend de wijzigingen waren, wordt duidelijk na vergelijking van de plattegrond van de installatie in de oorspronkelijk voorziene gedaante (figuur 3) en in uiteindelijke vorm (figuur 4).

## De bouw van AmPS - technische details

De lineaire elektronenversneller MEA produceerde 250 maal per seconde een puls, 'een pakketje elektronen', van 40 microseconde lengte. Het tijdsrendement van MEA, dat wil zeggen de fractie van de tijd waarin elektronen geleverd worden, was daarmee ongeveer 1 procent. De AmPS-ring had tot voornaamste doel het tijdsrendement van de elektronenbundel te verhogen tot vrijwel 100 procent. Aan de hand van figuur 4 kan de werking van AmPS worden uitgelegd. In de nieuwe configuratie injecteert de MEA-versneller 100 maal per seconde een korte puls, met een duur van 0,7 à 2,1 microseconde en met circa 10<sup>12</sup> elektronen, in de strekker-ring. De omtrek van de ring is 212 meter en het kost een elektron 0,7 microseconde om éénmaal de ring rond te gaan. De geïnjecteerde puls wordt derhalve één tot driemaal uitgesmeerd over de volle lengte van de ring. Via een zogeheten elektrostatisch septum wordt deze uitgesmeerde bundel langzaam geëxtraheerd, dat wil zeggen dat per omwenteling slechts een zeer kleine fractie van de elektronen uit de ring wordt gehaald. In het ideale geval worden de laatste elektronen weggehaald na 10 milliseconden, wanneer een nieuwe elektronenpuls in de ring geïnjecteerd wordt. Zo wordt een continue elektronenbundel gerealiseerd die via het speciaal daarvoor aangelegde extractiekanaal naar de experimentele opstellingen wordt gevoerd.

De bouw van AmPS startte op 14 juli 1989 en werd in april 1992 afgerond. De ongeveer tweehonderd elektromagneten van de ring en de injectie- en extractiekanalen stonden

FIG. 3. Oorspronkelijk ontwerp van de AmPS-ring. De elektronenbundel uit de MEA-versneller wordt in een ring geschoten die gedeeltelijk (de noord-sectie) in de bestaande MEA-tunnel ligt (boven de MEA-versnellerbuis) en verder (zuid-sectie) in een nieuw te bouwen tunnel.



FIG. 4. Schematisch overzicht van de uiteindelijke AmPS-faciliteit. De elektronenbundel uit de MEA-versneller wordt in de AmPS-ring (omtrek 212 meter) geschoten. In strekkerbedrijf wordt een vrijwel continue elektronenbundel in de noord-sectie uit de ring geëxtraheerd en via een afbuigsysteem naar de bestaande EMIN-experimenteerhal geleid. Wanneer AmPS als opslagring wordt gebruikt kunnen experimenten worden uitgevoerd in de nieuw gebouwde Interne Trefplaat Faciliteit (ITF) in de west-sectie. Het is ook mogelijk gepolariseerde elektronen in de ring te injecteren en op te slaan. In de oost-sectie bevindt zich een *Siberian Snake*, die de polarisatie van de elektronen in de ring in stand houdt.

## Uiteindelijke uitvoering AmPS

Gepolariseerde Elektronenbron



toen, uitgelijnd en met nauwkeurig bepaalde magneetvelden, op hun plaats en bijna driehonderd meter bundeltransportkanaal, met daarin ondermeer een vijftigtal bundelmonitoren, was geïnstalleerd en op vacuüm gebracht (tot een vacuümdruk van minder dan een tien miljardste atmosfeer). Aan dit alles waren natuurlijk de nodige stroomvoorzieningen en computerbesturingssystemen gekoppeld.

De bundeloptica en andere hardware van de AmPS-ring werden op het NIKHEF ontworpen. De eigen werkplaatsen bouwden prototypes van kritische systemen zoals magneten, septa, snelle vermogenselektronica en bundelmonitoren. De Nederlandse industrie was nauw betrokken bij de seriefabrikage van magneten, de grote hoeveelheden stralingsbestendige kabels, de stabiele ondersteuningen voor de ringsectoren en, niet te vergeten, bij de bouw van de ringtunnel. De vacuümcomponenten in de bundellijn werden, op de pompen na, op het NIKHEF gebouwd. Voor de polarisatie-experimenten was extra instrumentarium nodig. De bron van gepolariseerde elektronen werd vervaardigd op het Budker Instituut in Novosibirsk, waarmee sinds 1986 een nauwe samenwerking bestond. Dit instituut, gelegen nabii de Trans-Siberië-spoorlijn halverwege het traject Amsterdam-Wladiwostok, leverde ook de zogeheten Siberian Snake (figuur 5), om de polarisatie van de elektronen in de AmPS-ring in stand te houden, en de Big Bite detector, om de verstrooide elektronen te detecteren. Het instrumentarium werd geïnstalleerd door Russische wetenschappers en ingenieurs en een NIKHEF-team. De plannen uit het projectvoorstel SPITFIRE dat in 1992 bij FOM ter financiering werd ingediend, maar dat niet gehonoreerd werd, werden aldus toch nog verwezenlijkt.

Na de bouw en de installatie begon een spannende periode waarin de ring in bedrijf werd gesteld. In minder dan drie maanden tijd lukte het om elektronenbundels ruim zeven minuten op te slaan in de ring, om geëxtraheerde bundels te produceren met een tijdsrendement van 10 tot 15 procent, en om een eerste fysisch experiment uit te voeren. In de tijd daarna is het tijdsrendement verder verbeterd tot boven de 90 procent. Daarnaast is de intensiteit van de geëxtraheerde elektronenbundels tot 10 micro-ampère (gemiddeld !) opgevoerd. Vanaf 1995 zijn experimenten met interne gasjet *targets* en de in de ring opgeslagen bundel uitgevoerd.

Alle ambities moesten binnen het toegekende budget en binnen de oorspronkelijke tijdplanning gerealiseerd worden. Bij grote en ingewikkelde projecten als deze kan het projectmanagement er natuurlijk voor kiezen om de 'projectplanning aan de werkelijkheid aan te passen' en de tijdslimiet op te rekken wanneer het project vertraging oploopt - een managementstijl die in natuurkundig Nederland niet onbekend is. NIKHEF heeft, getrouw aan zijn professionele traditie, bij de uitvoering van het AmPS-project steeds 'de werkelijkheid aan de projectplanning aangepast'. Het tekent de klasse van de betrokken teams van fysici en technici dat de AmPS-faciliteit binnen het budget en op tijd werd neergezet.

## De oogst van AmPS

Zonder op deze plek in details te treden, willen we hier toch iets over de oogst aan nieuwe wetenschappelijke kennis zeggen en een paar van de meest opmerkelijke resultaten toelichten. Protonen met zeer hoge snelheden, tot dicht bij de lichtsnelheid, zijn inderdaad waargenomen. Dit gaf aanleiding tot een fundamentele herziening van de theoretische beschrijving van de beweging van protonen in atoomkernen. Van de 40 procent protonen die 'zoek' waren, is inmiddels een derde deel gevonden; ze hebben een andere bindingsenergie in de atoomkern dan we voorheen dachten. De speurtocht naar de ontbrekende rest is op dit moment nog gaande.

De van een bolvorm afwijkende gedaante van de deuteriumkern is met de experimenten met gepolariseerd deuterium in AmPS in grote lijnen vastgelegd. Gecombineerd met metingen verricht met de grote nieuwe elektronenversneller op *Jefferson Lab*, USA (ook een continue, gepolariseerde elektronbundel!) kan die vorm nu precies vastgelegd worden en zijn we daarmee details van een tot nu toe vrijwel onbekend krachtenspel tussen de twee deeltjes in deuterium op het spoor gekomen. Het werken met gepolariseerde elektronen en gepolariseerde kernen opent een nauwelijks ontgonnen, zeer rijk gebied van wetenschappelijk onderzoek. Conform de opdracht van de Raad van Bestuur van FOM - en aanvaard door het NIKHEF - moet de exploitatie van de springlevende faciliteit AmPS nu echter stopgezet worden. Een gemiste kans voor de natuurkunde, tenzij er voor AmPS een 'tweede leven' mogelijk is.

fig. 5. Schematische tekening van de *Siberian Snake*, die de polarisatie van de elektronen in de AmPS-ring in stand houdt. De gepolariseerde elektronen passeren (komend van rechts) een stelsel quadrupoolmagneten en supergeleidende spoelen. Bij elke passage wordt de polarisatierichting van de elektronen (die in het vlak van de AmPS-ring ligt) gespiegeld om de bundelas. Het nettoresultaat is dat de polarisatie bij de interne trefplaat hal steeds hetzelfde is. Voor de koeling van de magneten is vloeibaar helium nodig dat van buiten de tunnel wordt toegevoerd aan een vooraadvat. De opstelling is gebouwd door het Budker Instituut in Novosibirsk. Rusland.





12.

-

1

## Heftige botsingen tussen nucleonen Drievoudige coïncidentiemetingen bij AmPS Willem Hesselink & Eddy Jans

De geschiedenis van de experimentele kernfysica en deeltjesfysica leert dat onderzoek met een nieuwe deeltjesversneller enerzijds nieuwe inzichten geeft in de structuur van atoomkernen en de nucleonen (protonen en neutronen) waaruit ze zijn opgebouwd, maar anderzijds vragen oproept die alleen met een betere versneller kunnen worden beantwoord. Meestal betekent dat een versneller die geladen deeltjes tot een hogere energie kan versnellen. Soms was echter een andere eigenschap de beperkende factor voor het onderzoek. Bij MEA was dat in de eerste plaats het relatief lage tijdsrendement van de bundel: de elektronenbundel kwam hier in korte felle flitsen (pulsen) met relatief lange tijdsintervallen daartussen.

## Heftige botsingen

Bij de bestudering met MEA van zogenaamde (e,e'p)-reacties, waarbij een proton door een versneld elektron uit de kern wordt gestoten, waren al aanwijzingen gevonden voor heftige botsingen tussen nucleonen. Deze heftige botsingen hangen samen met de sterk afstotende kracht die nucleonen op elkaar uitoefenen wanneer ze heel dicht bij elkaar komen (zie de bijdrage van Lapikás en Van der Steenhoven). Doordat protonen en neutronen in een atoomkern met grote snelheid in een klein volume bewegen, komen zulke botsingen veelvuldig voor. Het bestuderen van de heftige onderlinge botsingen, die nucleoncorrelaties worden genoemd, is daarom van groot belang voor het beschrijven van de dynamica van nucleonen in atoomkernen.

De beste en meest directe manier om nucleoncorrelaties te onderzoeken is om met één elektron gelijktijdig twee nucleonen uit een atoomkern te schieten. Zo'n gebeurtenis is weergegeven in figuur 1 en wordt aangeduid als een (e,e'NN)-reactie of, waneer het om twee uitgestoten protonen gaat, als een (e,e'pp)-reactie. De kans hierop is echter heel klein: van de ongeveer 10<sup>15</sup> elektronen die op een koolstofplaatje van een millimeter dikte worden geschoten, veroorzaakt er maar één zo'n reactie. Om deze reacties waar te nemen, moet je dus veel elektronen op een trefplaat schieten en grote detectoren gebruiken. Van de gemeten gebeurtenissen moet steeds worden nagegaan of het verstrooide elektron en de twee uitgezonden nucleonen gelijktijdig in de drie detectoren zijn aangekomen.

## Continue stroom

Om twee redenen is voor dit soort experimenten een hoog tijdsrendement van de bundel, waardoor de elektronen regelmatig in de tijd verdeeld op de trefplaat aankomen en niet in lawines, van eminent belang. In de eerste plaats is er een bepaalde tijd nodig om de signalen die deeltjes in een detector produceren, te verwerken. Deze situatie is vergelijkbaar met de landingsbaan van een vliegveld waar voor de landing van elk vliegtuig een bepaalde tijd nodig is. Als er tijdens piekuren veel vliegtuigen tegelijk aankomen, moeten ze op elkaar wachten. Dit laatste is bij deeltjes die een detector passeren niet mogelijk: wanneer de elektronische apparatuur bezig is de

FIG 1. Twee (gecorreleerde) protonen bewegen vóór de reactie met impuls (snelheid)  $p_1$  en  $p_2$ . De resterende nucleonen, A-2, bewegen met een totale impuls van  $p_{A-2} = -(p_1 + p_2)$  (links). Tijdens de (e,e'pp)-reactie worden de twee protonen door een elektron uit de kern geschoten. Proton-2 wordt gedetecteerd in de HADRON3-detector (H3) en proton-1 in de HADRON4-detector (H4). Het verstrooide elektron wordt geregistreerd in de QDQ-spectrometer. De (A-2)-restkern wordt niet waargenomen, maar de impuls ervan kan volledig worden afgeleid uit de gemeten impulsen van de overige deeltjes.



### Bommetje

Tijdens een experiment van Antonio Pellegrino werd voor het eerst een door Gert-Jan Nooren en mij ontwikkelde trefplaat van vloeibaar deuterium gebruikt. De trefplaat bestond uit een gesloten buis die aan eén kant door de bundel werd verhit om zo de vloeistof stromend te houden. Vanwege zijn vorm stond het ding bekend als 'de pijp'. Ik had avondshift met Gail Dodge en het werk verliep routinematig, wat op zich een unicum was; meestal waren er problemen met de bundel, de detectoren of de dataacquisitie.

Plotseling viel de bundel weg. Nu gebeurde dat wel vaker, maar we werden een beetje ongerust toen onmiddelijk daarna ook alle kleppen van het bundelsysteem dichtvielen. De druk in de bundelbuis bleek tot 0,2 bar te zijn gestegen. Meteen daarop gingen alle alarmsystemen van de trefplaat af en tot mijn verbazing gaven de meters aan dat 'de pijp' geheel leeg was! De enige verklaring was dat het ding ontploft was...

Achteraf bezien had de ramp veel groter kunnen zijn. De trefplaat huisde in de zogeheten Diabolo, een behuizing met een aluminium wandje van slechts een kwart millimeter dikte. Als de druk binnen verder was opgelopen, was de Diabolo naar buiten geklapt en had daarbij de Hadron4en QDQ-detectoren meegenomen.

Wat was er nu precies gebeurd? De voeding van één van de stuurmagneten had het begeven waardoor de elektronenbundel niet op het deuterium terechtkwam, maar rechtstreeks in de koperen warmtegeleider van de trefplaat Willem Kasdorp

werd gedumpt. En dat met een vermogen van een kilowatt... voldoende om een deciliter deuterium snel aan de kook te brengen! In plaats van 'de pijp' heet de trefplaat sinds die tijd 'het bommetje'. Op de meetgrafiek die Antonio bijhield, heeft een onbekend kunstenaar een prachtige paddestoelwolk getekend. FIG. 2. Schematisch overzicht van een HADRON detector. Het scintillatorgedeelte (rechts) is hier uit zijn loden afscherming getrokken. Duidelijk zichtbaar zijn de eerste hodoscooplaag, enkele scintillatoren en fotomultiplicatorbuizen.



#### Prioriteiten

Een aantal Italiaanse fysici in Catania had rond 1990 een instrument gebouwd voor de detectie van ongeladen pionen. Dat gebeurde door de vervalgamma's van de pionen te meten. Om het instrument te ijken wilden ze het in de QDQ-spectrometer achter onze detectoren opstellen, waar ze met elektronen van verschillende energieën de eigenschappen van hun detector konden bepalen. Alles was keurig afgesproken, en de Italianen zouden de detector installeren. Eerst kwamen de (per vliegtuig reizende) heren fysici op het NIKHEF aan, en niet veel later volgden de technici met detector, computersysteem en alles wat erbij hoort in een bestelbus.

Allereerst werden een paar grote dozen uitgeladen. De eerste doos werd geopend, en bevatte...een espressoapparaat! In de tweede doos zaten de kopjes, en de eerste technische vraag was hoe de (Italiaanse) stekker kon worden aangesloten. Nadat de Italiaanse technici hun apparaat geinstalleerd hadden, werd een ritueel rondje koffie gezet, en pas daarna werd de detector uitgeladen en geinstalleerd.

Tijdens het experiment hebben de fysici op NIKHEF een aantal lessen 'koffie-cultuur' gekregen. Een kopje koffie drink je niet zomaar tussendoor, nee, dit is een gewijd moment van de dag. En inderdaad onderga je zo'n koffiesessie dan heel anders!

Helaas was het experiment na een week voorbij. Ik had nog hoop dat ze het espresso-apparaat zouden vergeten, maar het was het eerste dat werd ingepakt. Wij konden weer aan de Roodmerk uit Melitta-filters... signalen van een deeltje te verwerken worden deeltjes die in de tussentijd passeren, niet waargenomen. Het rendement van een landingsbaan is het hoogst als de vliegtuigen met regelmatige tussenpozen aankomen en dat geldt ook voor een detector. Om een zo hoog mogelijk rendement van de detector te behalen - opdat zoveel mogelijk zeldzame (e,e'pp)-reacties worden waargenomen - wordt daarom een elektronenbundel gebruikt waarin de korte, felle flitsen zijn uitgesmeerd tot een continue stroom elektronen.

De tweede reden waarom een continue stroom elektronen noodzakelijk is voor (e,e'pp)experimenten, is de onderdrukking van zogeheten toevallige coïncidenties, gebeurtenissen waarbij geheel toevallig, gelijktijdig in elk van de detectoren een deeltje wordt waargenomen. De kans hierop is aanzienlijk, omdat er veel reacties zijn waarbij protonen worden uitgezonden. Het aantal toevallige coïncidenties neemt echter sterk af als het tijdsrendement van de bundel toeneemt. Dit komt doordat de kans om in een klein tijdsinterval van bijvoorbeeld 0,1 microseconde toevallig een elektron en twee protonen te detecteren evenredig is met het product van het aantal deeltjes dat in dit interval in de drie detectoren aankomt; dus met  $N_e$ , x  $N_{p1}$  x  $N_{p2}$  (het aantal verstrooide elektronen en het aantal protonen in elk van de twee detectoren, respectievelijk). Deze kans is weer evenredig met  $(N_e)^3$ , waarin  $N_e$  het aantal elektronen is dat per tijdseenheid op de trefplaat wordt geschoten. Het aantal echte gebeurtenissen is evenredig met  $N_e$  en de verhouding tussen echte en toevallige coïncidenties is dus evenredig met  $N_a/N_a^3 = 1/N_a^2$ .

In de AmPS-ring op het NIKHEF worden de elektronenpulsen uit de MEA-versneller uitgesmeerd tot een continue elektronenbundel met een tijdsrendement van bijna 100 procent. De MEA-versneller had (voor de bouw van AmPS) bij dezelfde gemiddelde elektronenstroom een tijdsrendement van 1 procent: tijdens de korte pulsen werd de trefplaat per tijdseenheid dus met honderd keer zoveel elektronen (100 N<sub>e</sub>) gebombardeerd. Dit resulteerde in een tienduizend keer zo kleine verhouding tussen echte gebeurtenissen en toevallige gebeurtenissen, waardoor het meestal onmogelijk was de echte van de toevallige coïncidenties te onderscheiden.

### Detectoren

Hans de Vries

Naast een geschikte versneller zijn geavanceerde detectoren nodig om drievoudige coïncidentiemetingen met elektronen uit te voeren. Om zoveel mogelijk van de zeldzame (e,e'pp)-gebeurtenissen waar te nemen, moesten de detectoren een grote ruimtehoek omspannen. In drievoudige coïncidentiemetingen in de EMIN-hal met de uit AmPS geëxtraheerde bundel werd de energie van de elektronen gemeten met de QDQ-spectrometer, die ook al gebruikt werd voor experimenten met MEA. Voor de detectie van protonen zijn twee HADRON-detectoren gebouwd (figuur 2). Om de vele deeltjes die per seconde passeren, te kunnen verwerken, zijn deze detectoren opgesplitst in een groot aantal segmenten die min of meer als afzonderlijke detectoren kunnen worden beschouwd. Beide HADRON-detectoren, die zijn gebouwd in samenwerking tussen de Vrije Universiteit en NIKHEF, bestaan uit respectievelijk 94 en 128 scintillatoren. Elke scintillator is verbonden met een lichtgeleider, die op zijn beurt weer verbonden is met een *photomultiplier*. Hierin worden de lichtflitsen die worden geproduceerd wanneer geladen deeltjes het scintillatormateriaal passeren, omgezet

in elektrische pulsen en vervolgens versterkt. De grootte van de puls is een maat voor de energie die het deeltje in de scintillator heeft afgegeven. De hoeveelheid afgegeven energie in twee opeenvolgende lagen vertoont voor elektronen, protonen en andere deeltjes een karakteristiek patroon dat gebruikt wordt om deze deeltjes van elkaar te onderscheiden. De hoek waaronder de protonen worden uitgezonden, wordt gemeten met twee zogenaamde hodoscopen. Een hodoscoop is een vlak dat is opgebouwd uit smalle tellers. De positie van een teller in het vlak correspondeert met de hoek waaronder een deeltje de detector is binnen gekomen. Met twee evenwijdige lagen, waarin de tellers loodrecht op elkaar staan, kan van een deeltje dus zowel de hoek in horizontale als in verticale richting worden bepaald.

Voor de verwerking van de signalen is zeer geavanceerde elektronica ontwikkeld, die het mogelijk maakt om per detector tien miljoen signalen per seconde te verwerken en uit deze gebeurtenissen de drievoudige coïncidenties te selecteren. Dit wordt gedaan door de tijdstippen waarop de deeltjes gedetecteerd werden te vergelijken. Alleen als binnen 0,1 microseconde in alledrie de detectoren deeltjes zijn aangetroffen, worden de signalen uit de detectoren geaccepteerd en verder verwerkt. Daarna wordt alle informatie van zo'n gebeurtenis opgeslagen. In de analyse wordt voor elk van de gedetecteerde deeltjes de identiteit (elektron, pion, proton enzovoorts) vastgesteld en vervolgens wordt het tijdsinterval waarbinnen ze alledrie moeten zijn uitgezonden, aangescherpt tot een miljardste seconde.

Figuur 3 laat zien hoe het spectrum van tijdsverschillen van een drievoudige coïncidentiemeting er uit ziet. Het spectrum werd gemeten in een experiment waarbij door elektronen gelijktijdig twee protonen uit de helium-3-kern werden geschoten. De piek in het midden van de figuur bevat de echte drievoudige coïncidenties. De telsnelheid van dit proces bedraagt gemiddeld één per vijf minuten. De rest van het spectrum bevat de eerder genoemde toevallige coïncidenties. Uiteindelijk wordt van de gebeurtenissen de energie van het verstrooide elektron en van de uitgestoten protonen bepaald, alsmede de hoeken waaronder de deeltjes zijn uitgezonden.

### Protonparen

Als een elektron botst met twee protonen die zo dicht bij elkaar zijn dat ze tegelijkertijd uit een kern worden geschoten, en als de andere kerndeeltjes niet bij de botsing betrokken zijn, spreken we over directe uitstoot van het protonpaar. In zo'n botsing draagt het elektron alleen energie en impuls over aan de twee protonen. De beweging van de andere nucleonen in de kern, die samen de restkern vormen, verandert dus niet. Hoewel de restkern niet aan de botsing heeft meegedaan, heeft hij na de uitstoot van het protonpaar wel een impuls. Deze is gelijk en tegengesteld gericht aan de impuls die het protonpaar in de kern voor de botsing had (figuur 1), en kan worden gereconstrueerd uit de gemeten impulsen van het verstrooide elektron en de uitgestoten protonen. Verder zegt de wet van behoud van energie dat de door het elektron aan de kern overgedragen energie gelijk moet zijn aan de som van de kinetische energieën van de protonen en de restkern na de botsing, plus de energie die het gekost heeft om de twee protonen uit de kern te verwijderen. Deze zogenaamde separatie-energie hangt weer samen met de toestand waarin de restkern achterblijft.

FIG 3. Tijdens verstrooiingsexperimenten met helium-3 werden gebeurtenissen geregistreerd waarbij binnen een kort tijdsinterval twee protonen en een verstrooid elektron werden gemeten. Dit drie-dimensionaal spectrum geeft de tijdsverschillen tussen het verstrooid elektron en elk van de protonen weer. De piek in het midden correspondeert met echte coïncidenties: reacties waarbij twee protonen door het verstrooide elektron uit de helium-3-kern zijn gestoten. De drie ruggen representeren echte coïncidenties van twee deeltjes en een toevallige derde. De rest van het spectrum betaat uit toevallige coïncidenties van drie deeltjes.



FIG 4. Wanneer een protonpaar uit de atoomkern gestoten wordt tijdens (e,e'pp)-reacties, kan de impulsverdeling van het protonpaar in de atoomkern voor uitstoot bepaald worden. Links de resultaten voor helium-3; als restkern blijft een neutron achter. De curve is een geschaalde theoretische berekening. Rechts de resultaten voor zuurstof-16; de restkern is een koolstof-14-kern in de grondtoestand. Vorm en hoogte van de curve zijn theoretisch berekend.



Dit kan de grondtoestand zijn, dat is de toestand met de minste energie, of een aangeslagen toestand.

Dus, door in een (e,e'pp)-reactie de impulsen van het verstrooide elektron en de twee uitgestoten protonen te bepalen, kunnen we herleiden hoe groot de impuls van het protonpaar voor de botsing in de kern was en bovendien hoe groot de excitatieenergie van de restkern is. Figuur 4a toont de gereconstrueerde impulsverdeling van twee protonen in een helium-3-kern, voordat ze door het elektron werden uitgestoten. Na uitstoot van twee protonen uit een helium-3-kern blijft er slechts een neutron als 'restkern' over. Dit betekent dat de verdeling van figuur 4a gelijk moet zijn aan de impulsverdeling van het neutron in een helium-3-kern. De curve in figuur 4a, die het resultaat is van een geschaalde theoretische berekening, toont aan dat dit inderdaad het geval is.

In een zwaardere kern als zuurstof-16, die uit acht protonen en acht neutronen bestaat, is de situatie gecompliceerder. Na uitstoot van twee protonen blijft een koolstof-14kern over die, zoals eerder gezegd, verschillende energieën kan hebben. Figuur 4b toont de gereconstrueerde impulsverdeling van gebeurtenissen waarbij de koolstof-14-kern achterblijft in de grondtoestand. De statistische nauwkeurigheid is in deze meting minder groot dan in die voor helium-3 omdat de koolstof-14-kern slechts in een klein deel van alle reacties in de grondtoestand achter blijft. Van deze verdeling wordt niet alleen de vorm maar ook het aantal gebeurtenissen per inkomend elektron, differentiële werkzame doorsnede genoemd, goed gereproduceerd door theoretische berekeningen.

Dankzij de unieke combinatie van een bundel met een hoog tijdsrendement en detectoren met een grote ruimtehoek, hebben we voor het eerst de uitstoot van twee protonen op het moment van een heftige onderlinge botsing kunnen meten. Verder blijkt uit een vergelijking van onze resultaten met theoretische berekeningen dat de dynamica van nucleonen op kleine onderlinge afstand in de gebruikte kernmodellen redelijk goed wordt beschreven. Het is jammer dat we dit programma met AmPS niet konden uitbouwen na deze eerste zeer succesvolle (e,e'pp)-metingen. Gelukkig wordt het onderzoek aan nucleoncorrelaties op beperkte schaal bij andere versnellers voortgezet. Zo zullen we, in samenwerking met enkele buitenlandse groepen, de uitstoot van een proton-neutronpaar uit helium-3-kernen en zuurstof-16-kernen bestuderen met de elektronenversneller MAMI in Mainz, waarbij ook één van de HADRON-detectoren zal worden gebruikt.

# Verstrooiing van gepolariseerde elektronen aan gepolariseerde kernen Jo van den Brand & Kees de Jager

In de laatste twee jaar van zijn bedrijfsperiode is de AmPS-ring voornamelijk gebruikt als opslagring voor gepolariseerde elektronen. Net als veel andere elementaire deeltjes zijn elektronen kleine magneetjes: ze hebben een magnetisch dipoolmoment met een noord- en een zuidpool. Wanneer deze magneetjes allemaal in een willekeurige richting wijzen, in een elektronenbundel bijvoorbeeld, is het gemiddelde magnetisch veld nul: de bundel is ongepolariseerd. Wanneer elektronen met een magnetisch veld in een bepaalde richting oververtegenwoordigd zijn, is de elektronenbundel gepolariseerd. Deze polarisatie kan alle waarden tussen nul en honderd procent aannemen.

## Polarisatie in AmPS

De elektronen voor AmPS worden geproduceerd en voorversneld in een elektroneninjector, vervolgens in de MEA-versneller geïnjecteerd, en dan in de AmPS-ring geschoten. De bestaande injector leverde alleen ongepolariseerde elektronen. Voor de productie van gepolariseerde elektronen werd daarom naast deze injector een nieuwe bron (zie figuur 1) geïnstalleerd, de *Polarized Electron Source* (PES), die werd gebouwd op het Budker Instituut in Novosibirsk in Rusland. Hierin schiet een hoogvermogen laser gepolariseerde fotonen op een halfgeleiderkristal (indium-galliumarsenicum-fosfor). Door foto-emissie worden gepolariseerde elektronen vrijgemaakt, die in een elektrisch veld tot 100 keV worden versneld. De elektronen passeren vervolgens een Z-vormig magneetsysteem, waarmee hun polarisatierichting kan worden bijgesteld. In een zogeheten Mott-polarimeter wordt de bundelpolarisatie gemeten. Na verdere versnelling tot 400 keV in de zogeheten post-accelerator worden de elektronen via een speciale magneet - vanwege zijn buighoek van 270° alfa-magneet genoemd - in de eerste sectie van MEA geschoten.

## Siberische Slang

Wanneer de gepolariseerde elektronen in de AmPS-ring worden geschoten, ligt hun polarisatierichting in het vlak van de AmPS-ring. Deze polarisatierichting roteert vervolgens rond de (verticale) velden van de buigmagneten van de ring, een effect dat precessie genoemd wordt. Omdat de experimenten een constante longitudinale polarisatie vereisen, dat wil zeggen dat de polarisatierichting parallel of anti-parallel moet zijn aan de bundelrichting, moet dit effect gecompenseerd worden. Dat gebeurt met behulp van een zogeheten *Siberian Snake*, in wezen een stelsel van quadrupoolmagneten en supergeleidende solenoïdes, dat ook op het Budker Instituut werd gebouwd (zie de bijdrage van De Witt Huberts en Luijckx). Elke keer wanneer de elektronen de *Siberian Snake* passeren, wordt hun polarisatierichting gespiegeld om de bundelas. Het nettoresultaat is dat de polarisatie op de trefplaat in de experimenten steeds hetzelfde is. Dit principe wordt geïllustreerd in figuur 2.

FIG. 1. Schematisch overzicht van de *Polarised Electron Source* (PES) naast de injector voor ongepolariseerde elektronen. Het systeem is gebouwd door het Budker Instituut te Novosibirsk - Rusland. De hoog-vermogen laser schiet een gepulste bundel gepolariseerd licht op een indium-gallium-arsenicum-fosfor kristal. De geproduceerde elektronen (energie 100 keV) zijn gepolariseerd en worden via een Z-vormig magneetsysteem, waarmee de polarisatierichting wordt ingesteld, naar de Mott Polarimeter geleid waar hun polarisatie wordt gemeten. Na verdere versnelling tot 400 keV (Post-accelerator) worden de elektronen via een alfa-magneet (zo genoemd vanwege zijn buighoek van 270° de eerste sectie van MEA geschoten.



FIG 2. De polarisatierichting van de in MEA geïnjecteerde elektronen wordt bij de bron (PES) zo ingesteld dat deze, na injectie in AmPS,  $2\alpha$  is in het vlak van de ring. De *Siberian Snake* spiegelt de polarisatie om de bundelas tot  $-2\alpha$ . Bij elke bocht van 90 graden draait de polarisatie over een hoek  $\alpha$  terug zodat de polarisatie bij de interne trefplaat weer parallel is aan de bundelrichting. Vóór de *Siberian Snake* - twee bochten verder - is de polarisatie weer  $2\alpha$  en herhaalt het proces zich. De polarisatiegraad van de opgeslagen elektronenbundel wordt in de ITF gemeten door links- of rechtsom gepolariseerd licht uit een argon-laser frontaal aan de elektronen te verstrooiien en het aantal teruggestrooide fotonen te meten.



Voor het uitvoeren van de experimenten moet de gepolariseerde bundel een intensiteit van tenminste 100 milli-ampère hebben, maar PES levert slechts elektronenpulsen bij een stroom van 4 milli-ampère. Door nu om de paar seconden elektronenpulsen uit de MEA-versneller in de AmPS-ring te 'stapelen' wordt uiteindelijk een stroom in de ring bereikt van 150 milli-ampère, en met een levensduur van maximaal 45 minuten. De AmPS-ring was de eerste opslagring ter wereld waarin gepolariseerde elektronen werden geïnjecteerd en voor langere tijd, met behoud van longitudinale polarisatie, opgeslagen werden. De polarisatie in de AmPS-ring werd gemeten door bij de trefplaat fotonen uit een argon-laser frontaal te verstrooien aan de in de ring opgeslagen elektronen. In figuur 3 wordt de zo gemeten polarisatie getoond van elektronen met een energie van 442 MeV. Deze waarde is dicht bij de zogenaamde magische energie van 440,65 MeV gekozen. Bij de magische energie is de rotatiesnelheid tijdens de precessie dusdanig dat de polarisatierichting twee maal roteert wanneer de elektronen éénmaal door de ring reizen. In dit geval is de polarisatierichting bij de trefplaat constant. Bij een energie van 442 MeV is slechts een kleine bijsturing van de Siberische Slang nodig, die dan bij een fractie van zijn nominale sterkte bedreven wordt. De gemeten polarisatie wordt in figuur 3 getoond als functie van de hoek van de polarisatierichting die in de elektroneninjector is ingesteld. Bij de injector werd een polarisatie van ongeveer 70 procent gemeten, terwijl de maximale longitudinale polarisatie van de opgeslagen elektronen zo'n 61 procent bedraagt. Een deel van het verlies kan verklaard worden door de beperkte levensduur van de polarisatie.

### Interne trefplaten

Gedurende de laatste jaren van het programma met AmPS zijn vooral metingen uitgevoerd waarbij gepolariseerde elektronen werden verstrooid aan gepolariseerde kernen. De experimenten werden uitgevoerd bij de Interne Trefplaat Faciliteit (ITF) en daarbij werd - zoals de naam al zegt - gebruik gemaakt van interne trefplaten. Deze trefplaten bestaan uit een T-vormige cel die in de bundelpijp gemonteerd is, en waardoor een ijl gas wordt gepompt (figuur 4). De atoomkernen in dit gas worden van tevoren gepolariseerd in de *Atomic Beam Source* (ABS). Het cylindervormige gedeelte van de cel in de bundelpijp heeft een lengte van 60 centimeter en een doorsnede van 15 millimeter. De gepolariseerde elektronenbundel reist door deze cylinder waarin vervolgens botsingen tussen elektronen en kernen plaatsvinden. De cel heeft open uiteinden (het aanbrengen van folies zou verhinderen dat er een elektronenbundel in AmPS kan worden opgeslagen), zodat het gas aan de zijkanten weglekt (figuur 4).

Het werken met interne trefplaten en een opslagring heeft een aantal voordelen. Ten eerste kan men de elektronen verstrooien aan zuiver trefplaatmateriaal met een hoge polarisatiegraad. Ten tweede kan men in de ABS de polarisatierichting van de geproduceerde elektronen heel snel laten omklappen en dit is essentieel bij het reduceren van systematische fouten. Ten derde kunnen de laag-energetische deeltjes - zoals teruggestoten atoomkernen - die bij een reactie geproduceerd worden, gemakkelijk ontsnappen aan de ultra-dunne gaswolk in de cel. Daardoor is detectie van deze deeltjes mogelijk.

Bij AmPS zijn gepolariseerde elektronen verstrooid aan gepolariseerd waterstof, gepolariseerd deuterium, en gepolariseerd helium-3. Tijdens de metingen hebben we

ondermeer de polarisatie van de kerndeeltjes in de atoomkern bestudeerd. Ook de protonen en neutronen in atoomkernen (tezamen nucleonen genoemd) gedragen zich namelijk als kleine magneetjes. In het vervolg zullen wij hun polarisatierichting, en ook de polarisatierichting van elektronen en atoomkernen, ook wel als 'spin' aanduiden. We zullen twee hoogtepunten uit het meetprogramma bespreken: de studie van de spinstructuur van de deuteriumkern en de meting van de ladingsverdeling van het neutron.

## Wisselwerkende kerndeeltjes

De wisselwerking tussen twee kerndeeltjes (ofwel nucleonen) speelt een centrale rol in theoretische berekeningen van de structuur van systemen met veel kerndeeltjes. Dit geldt zowel voor atoomkernen (2 tot 200 deeltjes) als voor neutronensterren (oneindig veel deeltjes). Ondanks een langdurige en grootschalige experimentele inspanning zijn twee componenten van deze wisselwerking niet goed bepaald. Dit zijn de afstoting tussen de nucleonen wanneer ze zich op korte afstand van elkaar bevinden, en de zogenaamde tensorkracht die samenhangt met de relatieve polarisatierichting van de protonen en neutronen in de atoomkern. De tensorkracht lijkt op de kracht tussen twee staafmagneten.

Meer inzicht in deze twee onbekende componenten van de nucleon-nucleonwisselwerking wordt verkregen door studie van het deuteron, de deuterium-atoomkern, die uit een enkel proton en een enkel neutron bestaat. Het deuteron kan verschillende verschijningsvormen aannemen die samenhangen met het magnetisch veld in de deuteriumkern. Het totale magnetische veld wordt bepaald door de spins van het proton en het neutron (die samenhangen met de tensorkracht) en door de bijdrage ten gevolge van de beweging van de nucleonen (die wordt beïnvloed door afstoting op korte afstand) : een bewegende lading wekt immers ook een magnetisch veld op. Deze laatste component maakt dat het deuteron niet bolvormig is, maar enigszins vervormd.

De deformatie wordt zichtbaar wanneer de deuteriumkern gepolariseerd wordt in een extern magneetveld (zoals in de ABS). Volgens de wetten van de quantummechanica kan de kern in dit veld drie oriëntaties aannemen : het magnetisch moment van de kern kan in dezelfde of tegengestelde richting wijzen als het externe magneetveld - in dit geval heeft de atoomkern een haltervorm - of het kan loodrecht staan op het externe magneetveld - de atoomkern ziet er uit als een torus. Het magnetisch veld in het deuteron - en daarmee de deformatie - hangt ook af van de *relatieve* snelheid van het proton en neutron in het deuteron. Als deze relatieve snelheid afneemt tot nul, zijn de spins van de beide nucleonen gericht langs de polarisatierichting van het deuteron. Wanneer de relatieve snelheid toeneemt, wordt echter de bijdrage van de tensorkracht groter. Bij hoge snelheden leidt dit zelfs tot een situatie waarbij de spins van de nucleonen tegengesteld gericht zijn aan de kernspin.

Met de opstelling in ITF zijn metingen uitgevoerd (zie figuur 5) waarbij een proton door een gepolariseerd elektron uit de gepolariseerde deuteriumkern wordt geschoten. De relatieve trefkans werd bepaald voor het geval waarbij het elektron en de deuteriumkern in dezelfde richting en voor het geval waarin zij in tegengestelde richting gepolariseerd waren. Daarbij werd een asymmetrie gevonden. Als de impuls - en

FIG 3. Door een lichtbundel uit een argon-laser frontaal te verstrooien aan de in AmPS opgeslagen gepolariseerde elektronen, kon de polarisatiegraad ter hoogte van de interne trefplaat faciliteit bepaald worden. Horizontaal uitgezet zijn de twee hoeken die de polarisatie bij de bron van gepolariseerde elektronen definiëren. De krommen representeren de verwachte polarisatie in de ring als functie van deze hoeken bij de bron.



FIG. 4. Opslagcel voor elektronenverstrooiingsexperimenten met de opgeslagen bundel van AmPS. Een bundel gepolariseerde deuterium atomen wordt van bovenaf in de 60 centimeter lange dunwandige cel geschoten. Omdat de cel aan de korte kanten open is lekt het deuterium naar weerszijden weg en ontstaat de driehoekige dichtheidsverdeling binnen de cel. Door nauwkeurige afregeling van AmPS kan de bundel (eventueel gepolariseerde) elektronen door de cel (doorsnede 15 millimeter) worden gestuurd. Hier vinden dan de elektron-deuterium botsingen plaats.



daarmee de snelheid - van het proton in de kern gelijk is aan nul, zijn de meetgegevens in goede overeenstemming met de asymmetrie die wordt gevonden bij elektronenverstrooiing aan gepolariseerde protonen. Dit geeft aan dat de spin van het proton gericht is langs die van het deuteron. Bij grote impulsen - en dus snelheden - verandert de asymmetrie van teken, hetgeen betekent dat de protonspin nu tegengesteld gericht is aan die van de kern, zoals men verwacht wanneer de tensorkracht domineert. In de figuur worden de meetgegevens vergeleken met theoretische berekeningen op basis van een nucleon-nucleonwisselwerking die door Nijmeegse collega's is afgeleid uit nucleon-nucleonverstrooiing. De groene kromme is het resultaat van een eenvoudige berekening, terwijl bij het berekenen van de blauwe kromme ook meer subtiele effecten meegenomen zijn.

## Vormfactoren

Bij AmPS is ook gemeten aan het proces van elastische elektronenverstrooiing, waarbij de atoomkern tijdens het verstrooiingsproces intact blijft. In het algemeen wordt elastische elektronenverstrooiing beschreven met behulp van zogeheten vormfactoren. In het geval van verstrooiing aan deuteriumkernen zijn het er drie: twee vormfactoren (de elektrische monopool-vormfactor en de elektrische quadrupool-vormfactor) beschrijven verstrooiing aan de ladingsverdeling van de deuteriumkern, de derde vormfactor beschrijft de verstrooiing aan het magnetisch dipoolmoment van de kern. Door in de verstrooiingsexperimenten gebruik te maken van tensor-gepolariseerde deuteronen, konden we de drie vormfactoren voor het eerst bij deze intermediaire energie van elkaar scheiden. Ook leverden de metingen de meest nauwkeurige gegevens voor de quadrupool vormfactor in het intermediaire energiegebied.

## Ladingsverdeling neutron

Hoewel het neutron geen netto elektrische lading heeft, heeft het wel een magnetisch moment. Het bestaan van zo'n intrinsiek magnetisch moment impliceert dat het neutron een ladingsverdeling heeft. Verder bewijs hiervoor werd al in 1947 geleverd toen Enrico Fermi en Isidor Rabi elektronen bombardeerden met thermische neutronen uit een kernreactor: het neutron bleek een enigszins positieve 'pit' te bevatten, die was omringd door een gebied van negatieve lading. Sinds die tijd zijn verschillende verstrooiingsexperimenten uitgevoerd om de ladingsverdeling in het neutron te bepalen. Omdat een stabiele trefplaat van vrije neutronen niet bestaat, gebruikten fysici bij deze metingen tot voor kort ongepolariseerd deuterium. De werkzame doorsnede voor elektronenverstrooiing wordt dan echter gedomineerd door verstroojing aan de elektrische lading van het proton. Daarnaast is het proces gevoelig voor onzekerheden in de binding van het proton en het neutron in de deuteriumkern. Al deze effecten maken de meting van de minuscule ladingsverdeling van het neutron op zijn best marginaal; de beste metingen, uitgevoerd bij het Stanford Linear Accelerator Center in de Verenigde Staten en bij Saclay bij Parijs, leverden meetresultaten met systematische onzekerheden van ongeveer 50 procent.

Met AmPS is het mogelijk de ladingsverdeling van het neutron te meten door gebruik te maken van een alternatieve techniek. Hierbij worden gepolariseerde elektronen verstrooid aan neutronen die gebonden zijn in gepolariseerde deuterium- en helium-3kernen. Ten gevolge van interferentie-effecten wordt de kleine ladingsvormfactor van het neutron in dit geval versterkt door de veel grotere magnetische vormfactor. Wanneer wordt gemeten bij tegengestelde polarisatie, wordt een asymmetrie gevonden waaruit de ladingsvormfactor - en dientengevolge de ladingsverdeling - kan worden afgeleid. In figuur 6 wordt het voorlopige resultaat voor de neutron vormfactor getoond, zoals bepaald uit verstrooiing van gepolariseerd deuterium met de opstelling in ITF.

We hebben hier slechts enkele voorbeelden uit het rijke programma met gepolariseerde elektronen bij AmPS beschreven. Het doek valt rond het einde van 1998 en de fysici van het NIKHEF (veertig) en uit het buitenland (zestig), die bij de experimenten betrokken waren, zien uit naar een rijke oogst van nieuwe en in veel gevallen unieke gegevens over de nucleonspin en weinig-deeltjessystemen.

0.15 Elektrische Neutron Vormfactor preliminar NIKHEF Bates 0.1 Mainz Galster vormfactor 0.05 0 -0.05 0.2 0.4 0.6 0 impulsoverdracht [(GeV/c)<sup>2</sup>]

FIG 5. In een verstrooiingsexperiment waarin gepolariseerde elektronen een proton stoten uit een gepolariseerde deuteriumkern werd een asymmetrie gemeten. Deze asymmetrie representeert het verschil tussen de aantallen gebeurtenissen veroorzaakt door elektronen met hun polarisatie parallel aan de bundelrichting en antiparallel aan de bundelrichting. De gegevens zijn verkregen met de opstelling in ITF en uitgezet tegen de impuls van het proton in de deuteriumkern. De krommen (groen: eenvoudig, blauw: met hogere orde effecten erbij) zijn gebaseerd op berekeningen met een proton-neutron kracht zoals bepaald door de theoriegroep van Nijmegen.



FIG. 6. Elektrische vormfactor van het neutron. Omdat de totale elektrische lading van het neutron nul is moet de vormfactor bij impulsoverdracht nul gelijk zijn aan nul. Is er verder geen verdeling van lading binnen het neutron dan blijft de vormfactor nul (rechte lijn). Voor verdelingen met een postieve pit en negatieve lading daarbuiten verkrijgt men de getekende kromme, die een voorspelling weergeeft op basis van metingen van andere nucleon vormfactoren. Met verstrooiing van gepolariseerde elektronen aan gepolariseerd deuterium is een eerste voorlopig resultaat verkregen bij NIKHEF (cirkel symbool). De vierkante en driehoekige symbolen geven resultaten weer die zijn verkregen met de faciliteiten van MIT/Bates in de VS en Mainz in Duitsland. De gele band beschrijft de onzekerheid in de elektrische vormfactor van het neutron als gevolg van verschilende aannames voor de proton-neutron kracht in de analyse van een eerder experiment met ongepolariseerd deuterium.

Uit het verslag MEA-bedrijf, week 10, 1988: "In het weekeinde, voorafgaand aan deze week, heeft zich in de *target*doos een implosie voorgedaan. Het BeO-*target* is daarbij gebroken. Het opruimen van de brokstukken heeft tot donderdag geduurd."

Over de implosie van de trefplaatdoos en de gebroken trefplaat van (het zeer giftige) berylliumoxide, hier steeds het Beo-*target* genoemd, schreef ook het hoofd van de Veiligheidsdienst, Jaap Post. In zijn rond 15 maart geschreven verslag zijn alle gebeurtenissen in chronologisch voldorde vastdelead.

#### Uit het verslag van Jaap Post:

### zondag 6 maart

"Omstreeks 05.00 uur zondagochtend 6 maart 1988 wordt de spectrometer gedraaid om de targetdoos in de EMINhal. Hierbij wordt het sliding-foil van de targetdoos door de magneet op onjuiste wijze weggeschoven. Er ontstaat dan een groot lek en er stroomt lucht in de kamer. Na enige tijd meldt de opstelling een storing en operator E. Jans gaat kijken wat er aan de hand is. Hij kon nu ongehinderd door een flink gat direct in de targetdoos kijken. Hij ziet drie targets zitten, onder andere een heel bros en dun koolstofplaatje. Hij concludeert hieruit dat alle andere targets dan ook wel heel gebleven zullen zijn."

#### maandag 7 maart

"Maandagmorgen vroeg ontdekte Boer Rookhuizen dat het sliding-foil defect was. Hij begon op eigen initiatief aan de reparatie. Kort daarop werd zijn werk overgenomen door Noteboom. Deze monteerde een nieuw folie en een nieuwe aansluitbalg. Dit werk was om 13.00 uur gereed. Daarna bleek er een vacuümlek te ontstaan. Het folie werd weer gedemonteerd en er werden witte korrels op de afsluit-Oring gevonden. Alles werd schoongepoetst. Er kwamen witte korrels op de poetsdoek en ook iets op de handen van Noteboom. Na montage werd er met succes vacuum verkregen in de *target*doos. Noteboom vermoedde dat de korrels BeO zouden zijn en informeerde hiernaar bij de fysici. Zij bevestigden niet dat er een BeO-target in de doos zat. Na enige tijd werd echter toch bevestigd dat er een BeOtarget in de doos gemonteerd was. Daaruit concludeerde Noteboom dat dit *target* dan gebroken was en de witte korrels dus BeO zouden zijn. Hij meldde dit om 16.00 uur aan Post. Post neemt de suggestie van Noteboom serieus en bespreekt deze met de groepsleider van EMIN, C. de Vries "

### dinsdag 8 maart

"Na overleg met de bedrijsarts komt de arbeidshygiënist op bezoek en adviseert tijdens acties aan of in de doos adembescherming met P3-filters, handschoenen en overalls te gebruiken.(...)Het volgende werkschema wordt opgesteld..."

#### woensdag 9 maart

"Er wordt gewerkt volgens bovenstaand schema. De decontaminatie van verpakte onderdelen wordt uitgesteld tot donderdag..."

#### donderdag 10 maart

"Noteboom monteert alle schoongepoetste onderdelen weer in en aan de *target*doos. Om 17.00 uur heeft de doos weer vacuüm."

"Conclusies betreffende blootstelling:

Ik meen dat iedereen die bij de *target*doos is geweest maar een uiterst kleine kans op daadwerkelijke blootstelling aan BeO heeft gehad.(...)" "Vervulingsstatus EMIN-vacuümsysteem dd. 12 maart 1988:

"Vervuilingsstatus EMIN-vacuümsysteem dd. 12 maart 1988: Mogelijk vervuild is het gehele vacuümsysteem tussen de kleppen IV506,507,504,505, inclusief de binnenkant van deze kleppen. Hiervan is zeker schoon: de verstrooiingsdoos inclusief *sliding foils* en balgen."

Uit het verslag van de vergadering van de Mechanische Technologie Groep op 16 maart: "BeO-incident: deel vacuümsysteem vervuild: aangegeven met gifstickers, wordt gereinigd in zomerstop."

Op 8 apri I worden weer witte korrels gevonden. Jaap Post schrijft een verslag, "Vervolg van de BeO-tar get misèr e", waarin citaten staan van een crisisberaad tussen Coen de Vries, Kees de Jager, Jaap Post en Gert-Jan Nooren. Zij geven een aardige indruk van het spanningsveld tussen de veiligheid en de voortgang van het experiment:

"Jaap Post stelde dat we twee weken terug besloten hadden alles in een keer schoon te maken op alle bereikbare plekken en aan te nemen dat deze plaatsen schoon zouden blijven tot de zomerstop."

"C. de Vries meende dat er maar ten dele schoongemaakt moest worden. Daarna moesten de experimenten worden voortgezet. (Hij meende dat...) het risico voor de medewerkers zo gering zou zijn dat hierdoor de voortgang van de experimenten niet mocht worden geblokkeerd. Grondige schoonmaak zal één tot drie maanden vergen en dat is onaanvaardbaar."

"Jaap Post stelde dat het sleutelen aan de apparatuur in de praktijk enige keren per week gebeurt en dat dit dus steeds weer een terugkomend risico met zich meebrengt, ook al gebeurt het onder gecontroleerde omstandigheden."

Er werd besloten om de strooikamer en de ingebouwde apparatuur te reinigen volgens de eerder gevolgde procedure en in de zomer een grote schoonmaak te houden. Verder werden nieuwe voorschriften voor het werken met berylliumoxide uitgevaardigd. Het liep anders...

Notitie van Jaap Post, dinsdag 19 april: "Happy end van het BeO-incident"

"Vrijdäg 15 april meldde de EMIN-groep bij monde van C.W. de Jager dat uit metingen van week 9 gebleken was dat het veronderstelde BeO-*target* alleen elektronenverstrooiings-pieken gaf met massa's van 18 en ongeveer 70. Hieruit werd de conclusie getrokken dat het gebruikte *target* niet BeO was geweest, maar wel Ga.O.<sub>3</sub>[galliumoxide, red.]. (...) De resten van het gebruikte *target* zijn onderzocht door de chemische afdeling. In deze resten is alleen Ga [gallium, red.] aangetoond. (...) Vooralsnog is de conclusie gewettigd dat het gebroken *target* uit Ga.O., bestond."

Het gebruik van berylliumoxide-trefplaten is echter sinds deze tijd omgeven met strenge veiligheidsvoorschriften...

In het *weekreport* van week 13 van de fysici staat slechts droogjes:

"At the end of the week a beam test of a Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-target was performed successfully."

# Stralingsbescherming rond EVA en MEA/AmPS

Piet Louwrier

Straling kan tot gezondheidsschade leiden en dat was al bekend toen op het IKO het werk met het eerste, door Philips gebouwde, cyclotron begon. In die tijd, de vijftiger jaren, was echter niet duidelijk welke hoeveelheden straling schadelijk waren. Wel was bekend dat er op korte termijn waarneembare schade kon ontstaan zoals roodkleuring van de huid en veranderingen in het bloedbeeld. De maximale stralingsdosis van 5 röntgen die medewerkers per jaar mochten oplopen, was hiervan afgeleid: het is ongeveer één tiende van de dosis die bij eenmalige blootstelling tot roodkleuring van de huid leidt. Dat ook tientallen jaren na de blootstelling schade kan optreden was niet algemeen bekend, ondermeer omdat onderzoeksresultaten lang geheim werden gehouden vanwege het militaire aspect.

De stralingsdoses die medewerkers van het IKO opliepen, werden gemeten met persoonsgebonden dosimeters. Ook kregen de zogeheten radiologische medewerkers (de medewerkers die aan straling blootstonden) uitgebreide medische begeleiding vanuit het Onze Lieve Vrouwe Gasthuis. Voor het toezicht op de stralingsbescherming was een stralingscommissie samengesteld, maar het valt niet meer te achterhalen hoe effectief deze commissie was.

## EVA

Voor de bouw van de afscherming rond de eerste Amsterdamse elektronenversneller, EVA, werd geput uit eerdere ervaringen met het cyclotron. In tegenstelling tot bij het cyclotron, werden de bunkers rond de versneller en de experimenteerhal praktisch naadloos gebouwd. Alle betonblokken werden met de hand op maat geslepen en alle openingen zo goed mogelijk gedicht om te voorkomen dat neutronen zouden weglekken. Helaas vergat men om ook het primaire koelsysteem binnen de afscherming te plaatsen. In het water werd een radioactief zuurstofisotoop gevormd en dit bleek een niet te verwaarlozen stralingsbron buiten de afscherming.

In de tijd dat EVA in bedrijf werd gesteld, kwam langzamerhand informatie beschikbaar over de risico's van straling op lange termijn. Daarbij werd duidelijk dat sommige organen gevoeliger zijn voor straling dan andere. Daarom werd per orgaan een maximale stralingsdosis vastgesteld. Dit, en het feit dat verschillende typen straling verschillende effecten hebben in biologische weefsels, werd vervolgens verdisconteerd in een nieuwe eenheid voor stralingsbelasting, de rem (röntgen equivalent men). Op het IKO werd de limiet van 5 röntgen per jaar vervangen door een limiet van 5 rem per jaar. Verder had men nog steeds het idee dat er niets aan de hand was, mits je maar beneden de vastgestelde limieten bleef.

Ook de wetgeving was in die periode zeer beperkt. Weliswaar was er een systeem van vergunningen voor het hebben en maken van radioactieve stoffen, maar voor de EVA-versneller is er nooit zo'n vergunning geweest. De veiligheid rond EVA was dus voornamelijk een zaak van de medewerkers, die daarbij ondersteund werden door de

Toegangssluis en betondeur bij MEA



Uitslag

In 1983 had ik samen met een andere fysicus avonddienst in het LEF-meetstation. De twee stralingsmonitoren daar stonden de hele avond geruststellend op nul, maar mijn collega vertrouwde dat op een gegeven moment niet meer. Hij schakelde de meters even aan en uit en tot onze grote schrik sloegen de meters nu vol uit. Via de intercom vroeg ik de operator om de elektronenbundel diret 'uit te gooien' terwijl mijn collega al met de telefoon in de hand stond om de Veiligheidsdienst te bellen. Toen viel het ons op dat de uitslag van de meters, ook nu de bundel uit was, maximaal was. We waren, nadat we de monitoren hadden aangezet, vergeten om ook nog even op het knopje *measure* te drukken! Dat de meters vol uitsloegen was gewoon een inschakeltest van het apparaat; met deze kennis gewapend hadden we verder een vrij rustige avond. André Burghardt
FIG. 1. Variatie van de achtergrondstraling uit de aardbodem in Nederland. De gekleurde schaal geeft waarden aan van 100 (lichtgeel) tot 700 (donkerrood) microsievert per jaar. Er is een duidelijke correlatie tussen stralingsniveau en grondsoort: op kleigronden is de straling aanzienlijk hoger dan op zandgronden. [Bron: R.O. Blaauboer en R.C.G.M. Smetsers, '*Variations in outdoor radiation levels in The Netherlands*', proefschrift RUG, 1996]



op het terrein werkzame stralingsarts Van Steeden en zijn medewerkers. Om de stralingsdoses vast te stellen, kreeg iedere werknemer een dosimeter. Het beheer van de dosimeters was eerst in handen van het IKO, maar later werd dit alles uitbesteed aan de erkende dosimetriedienst van TNO.

## MEA en AmPS

Bij de inrichting van de experimentele hallen rond de MEA-versneller, in het midden van de jaren tachtig, werden de ervaringen met EVA gebruikt. Bij EVA waren alle experimenten in één hal geplaatst wat tot accumulatie van radio-activiteit leidde. Bij MEA werd voor ieder experiment een eigen bunker gebouwd. De koelsystemen werden binnen de bunkers geplaatst en de toegang tot de bunkers verliep via een geautomatiseerd en beveiligd systeem.

In diezelfde periode veranderde ook de regelgeving op het gebied van stralingsbescherming. Studies onder Japanse atoombomslachtoffers en met straling behandelde patiënten hadden duidelijk uitgewezen dat een grote stralingsdosis na vele jaren tot een toename van sterfte door kanker leidt, maar het duurde tot de jaren zeventig voordat algemeen bekend werd dat ook geringere blootstellingen met een zeker risico gepaard gaan. Vervolgens duurde het nog een tijd voordat deze kennis werd verwerkt in Europese richtlijnen en daarna, in 1984, in de Nederlandse wetgeving.

Bij de nieuwe Nederlandse wetgeving hoorde een uitgebreid systeem van vergunningen met daaraan verbonden voorwaarden en er trad een accentverschuiving op: naast de bescherming van de medewerkers werd ook de bescherming van het milieu een steeds belangrijker factor. In verband hiermee werden aan de rand van het terrein grote neutronendetectoren geplaatst om de radioactiviteit op de terreingrens te meten.

Dit alles leidde ertoe dat stralingsbescherming niet langer aan medewerkers werd overgelaten, maar aan deskundigen. Daarnaast vereisten ook de afmetingen en complexiteit van de MEA-versneller een professionelere opzet van de stralingsbescherming en er kwam een veiligheidsdienst onder leiding van Jaap Post. In diezelfde tijd kwam het beheer van de dosimeters juist weer in handen van het instituut: de opgelopen stralingsdoses waren zo klein dat er formeel geen sprake was van radiologische medewerkers. Dit maakte het beheer van dosimeters door de erkende dosimetriedienst van TNO overbodig.

Het besluit tot de bouw van de AmPS-opslagring viel ongeveer in de periode waarin duidelijk werd dat het genereren van zo min mogelijk straling voordeliger is dan het achteraf plaatsen van zeer zware afschermingen. Om de straling te beperken werd het beheren en beheersen van de bundel belangrijk; een goed beheersbare bundel komt minder vaak met bijvoorbeeld de versneller-componenten in aanraking. Die laatste worden bovendien minder radioactief en dat leidt tot een kleiner afvalprobleem.

## Demontage en toekomst

De sluiting van MEA en AmPS betekent niet dat de stralingsbescherming meteen tot een einde komt. Bij het demonteren worden de, tot nu toe afgeschermde, geactiveerde onderdelen van bijvoorbeeld de bundellijn weggehaald en daarbij bestaat de kans op blootstelling aan stralingsdoses. Daarom moeten maatregelen genomen worden, die overbodig waren tijdens het bedrijf van de versneller. Ons eigen dosimetriesysteem zal worden vervangen door een erkend systeem en we moeten enkele medewerkers benoemen tot radiologische werkers. Dit laatste lijkt ingrijpender dan het is: de blootstellingslimieten voor radiologische werkers zijn inmiddels, alhoewel nog niet officieel, een factor drie kleiner geworden.

Het demonteren levert ook roestvrij staal, koper, aluminium en andere materialen op, waarvan een deel is geactiveerd. Voor deze stoffen moeten maatschappelijk en economisch aanvaardbare bestemmingen worden gevonden en daarbij lopen we noodgedwongen vooruit op de regelgeving.

Net nu overal - bij de regelgevers, de stralingsdeskundigen en bij de buitenwereld het idee is doorgedrongen dat iedere blootstelling, hoe gering ook, bijdraagt aan het gezondheidsrisico, is er tussen epidemiologen een discussie ontstaan waarin dit weer in twijfel wordt getrokken. Een aantal epidemiologen vraagt zich af of er misschien toch een drempeldosis is waarbeneden straling geen gevolgen voor de gezondheid heeft. Sommige menen zelfs dat kleine beetjes straling gezond kunnen zijn. Overigens zijn de blootstellingen waarover dan wordt gesproken vele malen kleiner dan de oude limiet van 5 röntgen.

Bij alle veranderingen in kennis, organisatie en wetgeving is er één element dat niet is veranderd, en dat zijn de kikkers met vijf poten. Ruim veertig jaar geleden werden enkele vijfpotige kikkers in slootjes in de buurt waargenomen. In datzelfde jaar werden ook in Frankrijk zulke kikkers aangetroffen. De oorzaak van dit fenomeen - radioactiviteit, chemicaliën, een virusziekte? - is nooit opgehelderd, maar de kikkers duiken met enige regelmaat in de pers op. In de slootjes zijn zij de laatste veertig jaar niet meer gezien.

Tabel 1. Gegevens over straling						
Gemiddelde straling ontvangen door de Nederlandse bevolking			Dosislimieten voor blootstelling aan straling (extra t.o.v. de 2500 µSv/jaar)			
Bron	Dosis in µSv∕jaar		Groep	Dosislimiet in µSv/jaar		
Kosmische straling	300		Bevolking	1000		
Aardbodem, bouwmaterialen Inwendig (vooral kalium-40)	350 400		Niet-radiologisch werker	2000		
Radon	950					
Kunstmatige straling (voornamelijk medisch)	500		Radiologisch werker B (#)	6000		
Totaal	2500		Radiologisch werker A (#)	20000		

(#) NIKHEF kent thans geen radiologische werkers A of B.

De vroeger gebruikte eenheid m<br/>rem (millirem) kan worden omgezet in de nieuwe eenheid <br/>  $\mu Sv$  (microsievert) volgens 1 m<br/>rem = 10  $\mu Sv$ 

Hoog bezoek aan de MEA-versneller in september 1990. Van rechts naar links : Z.K.H. Prins Claus der Nederlanden, Luitenant-Kolonel C.J. van Vliet (adjudant van H.M. de Koningin), Dr. J. Langelaar (beherend directeur NIKHEF), Dr. Ir. S. van der Meer (CERN, Nobelprijswinnaar natuurkunde 1984), Prof. Dr. P.K.A. de Witt Huberts (wetenschappelijk directeur NIKHEF sectie K)

NICHEF

NICHEF

**B502** 

ME

HEF

## Een tweede leven voor AmPS Peter de Witt Huberts

In het Engels bestaat de uitspraak: 'An accelerator is a living thing', en inderdaad kun je zeggen dat een zo complex instrument een levenscyclus doorloopt, net als een mens, van zuigeling via de jeugdjaren tot volwassenheid. Zuigeling was AmPS in 1992, toen de opstartfase begon. Met het wetenschappelijk programma met de intense bundel van gepolariseerde elektronen en gepolariseerde interne trefplaten stond AmPS in 1998 in het volle, produktieve leven. En toch stopt de wetenschappelijke exploitatie in Amsterdam aan het einde van 1998.

In 1995 deed NIKHEF samen met het FOM-Instituut Rijnhuizen nog een uiterste poging om deze desinvestering ten goede te keren. Er werd een projectvoorstel ingediend bij FOM om de AmPS-ring te verbouwen tot een *Free Electron Laser* - een in intensiteit ongeëvenaarde lichtbron in het verre ultraviolet. Dit zou een gebruikersfaciliteit leveren voor multidisciplinair gericht onderzoek, maar het bleek te hoog gegrepen - het sterk innovatieve karakter van het beoogde instrument ging de verbeeldingskracht van betrokken Nederlandse wetenschappers te boven.

## MEA-AmPS te koop

Het kon toch niet zo zijn dat MEA-AmPS onterecht en onopgemerkt op de schroothoop gedumpt zou worden? In de overtuiging dat een zo vitaal instrument elders in de wetenschappelijke wereld een tweede leven zou kunnen leiden, ging in september 1997 een projectgroep, onder leiding van schrijver dezes, aan de slag. Het doel was klanten te vinden in binnen- en buitenland, die de gehele installatie, dan wel samenhangende delen ervan, voor wetenschappelijk hergebruik wilden verwerven. Die klanten zouden, volgens het draagkrachtbeginsel, de kosten moeten opbrengen van de demontage van MEA-AmPS. Het buiten bedrijf stellen van een versnellerfaciliteit is immers een ingewikkelde, tijdrovende en daardoor kostbare operatie.

De wervingscampagne verliep voorspoedig. Het bericht 'MEA-AmPS te koop' ging de wereld rond dankzij persoonlijke netwerken en moderne informatietechnologie zoals *Email* en *World Wide Web*. Uiteindelijk meldden zich elf klanten met een serieuze '*Expression of Interest'* - een intentieverklaring met opgave van doelen en tijdloop van de projecten waarvoor zij de MEA-AmPS apparatuur wilden inzetten (zie de tabel). De projectgroep 'AmPS-hergebruik' voerde niet alleen wervingsacties uit maar reisde ook de wereld af om de (mogelijke) klanten te bezoeken en de kwaliteit te beoordelen van de omgeving waarin de gevraagde MEA-AmPS apparatuur terecht zou komen. Dit alles resulteerde uiteindelijk in een advies, dat in september 1998 aan de NIKHEF-directie werd uitgebracht. Hierin werd beschreven welke prioriteit de commissie, na zorgvuldige afweging van kansen en ontplooiingsmogelijkheden, aan de verschillende klanten toekende.

## Sprookje

De onderhandelingsronde om de prijs van de apparatuur te bepalen werd eind november 1998 met succes afgerond. Dreigende versnippering van functioneel

#### Herbestemming van MEA-AmPS onderdelen



#### De opstelling met de *Atomic Beam Source* in de Interne Trefplaat Faciliteit. Onderdelen van deze opstelling zullen worden hergebruikt bij het MIT/Bates laboratorium in de USA.



samenhangende apparatuur kon daarbij vermeden worden en het eindresultaat lijkt op een sprookje: de gehele MEA-AmPS versneller installatie wordt gedemonteerd en weer opgebouwd in het *Joint Institute for Nuclear Research* (JINR) gelegen bij Dubna, in de buurt van Moskou. JINR is een gigantisch en gerenommeerd instituut, dat voor de ineenstorting van de Sovjet Unie de tegenvoeter van CERN was. Het doel van JINR is om AmPS als een synchrotron lichtbron te gaan exploiteren, een fraaie bestemming waarmee een breed samengesteld gezelschap van wetenschappers - natuurkundigen, chemici en biologen - nieuwe en uitdagende ontplooiingsmogelijkheden zal krijgen. Ook voor de andere apparatuur zijn, zoals aangegeven in de figuur, bestemmingen gevonden. NIKHEF kan tevreden zijn: na zes jaar intensieve exploitatie, waarin de creatieve kaars aan twee kanten tegelijk brandde, gaat MEA-AmPS elders een tweede wetenschappelijke leven leiden. PROFICIAT!

Voorstellen tot overname van MEA-AmPS apparatuur werden ingediend door:

Het MIT/Bates *Electron Scattering Laboratory* te Boston - USA. Een gerenommeerde elektronenversneller-faciliteit en een ons welbekende mededinger in de hadronenfysica.

Het *Jefferson Laboratory* (TJNAF, voorheen CEBAF) te Newport News - USA. De nieuwe elektronenfaciliteit in de Verenigde Staten, met als meest kenmerkende eigenschappen: gepolariseerde elektronen en gepolariseerde trefplaten. Een geduchte concurrent van de NIKHEF-AmPS teams door de hogere bundelenergie.

Het *Joint Institute for Nuclear Research* (JINR) te Dubna - Rusland. Een Russische gigant - 4000 medewerkers - op zoek naar een nieuwe missie op het gebied van geavanceerde lichtbronnen.

Het *Institute of Accelerator Systems and Applications* (IASA) te Athene - Griekenland. Een nieuwe elektronenfaciliteit in opbouw, bedoeld voor toepassingen van elektronen- en fotonenbundels in onder meer de medische diagnostiek.

Het *Paul Scherrer Institute* (PSI) te Villigen - Zwitserland. Een derde generatie synchrotron-lichtbron is hier in opbouw en er is interesse in quadrupoolmagneten.

Het *Rutherford Appleton Laboratory* - Engeland. Vanwege het onderzoek met een gepulste neutronenbron is hier interesse in enkele MEA-AmPS-varia.

Het FOM Instituut voor quantumoptica en plasmafysica te Rijnhuizen.

De MAMI-faciliteit bij de *Universität Mainz* - Duitsland. Elektronenverstrooiing bij een elektronenergie, vergelijkbaar met AmPS. De Europese tegenvoeter van de MEA-AmPS faciliteit.

De DELTA-opslagring van de *Universität Dortmund* - Duitsland. Een universitaire versneller voor onderzoek naar *Free Electron Laser*-technieken met elektron-opslagringen.

Het Kernfysisch Versneller Instituut te Groningen, ons welbekend. Enkele speciale kernfysische instrumenten.

De Technische Universiteit Eindhoven. *Free Electron Laser*-ontwikkeling en onderzoek. Injector/ versneller onderdelen van MEA-AmPS zouden bijzonder van pas komen om een snelle start te maken op dit terrein van onderzoek.

# Proefschriften

Proefschriften gebaseerd op experimenteel werk met de faciliteiten van de versnellers EVA, MEA en AmPS.

Voor de universiteiten zijn de volgende afkortingen gebruikt :

ETH	Eidgenössiche Technische Hochschule, Zürich, Schweiz
RUG	Rijksuniversiteit Groningen
TUD	Technische Universiteit Delft
TUE	Technische Universiteit Eindhoven
UBa	Universität Basel, Schweiz
UG	Universiteit Gent, Belgie
UNH	University of New Hampshire, Durham, USA
UU	Universiteit Utrecht
UvA	Universiteit van Amsterdam
UVi	University of Virginia, Charlottesville, USA
UWM	University of Wisconsin, Madison, USA
VUA	Vrije Universiteit Amsterdam

EVA / MEA / AmPS Elektronenverstrooiing

Bever, Laurentius J. de *A comparison of real and virtual photon reactions on* <sup>10</sup>*B*. UU (1993)

Bie, Jan E.P. de Inelastic electron scattering from <sup>52</sup>Cr and <sup>54</sup>Fe. UvA (1975)

Bijl, Leendert T. van der Nuclear structure of <sup>88</sup>Sr and <sup>90</sup>Zr by (e,e') and (p,p') reactions. VUA (1982)

Blok, Hans Core polarisation and configuration mixing in <sup>58</sup>Ni studied by high resolution electron scattering. VUA (1986)

Bobeldijk, Irene *High-momentum protons in <sup>208</sup>Pb.* UU (1995)

# DISPERSION EFFECTS IN ELASTIC ELECTRON SCATTERING FROM <sup>12</sup>C





# Electrodisintegration of <sup>4</sup>He Studied with the Reaction ${}^{4}\text{He}(e,e'\tau)n$

## M.A. Daman



Bouwhuis, Maurice *Tensor polarization observables in electron deuteron scattering.* UU (1998)

Box, Gijsbert Elastic electron scattering from the magnetization distributions of <sup>93</sup>Nb and <sup>115</sup>In. Elastic charge scattering from Zr, Nb, Mo, Cd, In and Sn. UvA (1976)

Brand, Johannes F.J. van den *The two-body electrodisintegration of* <sup>4</sup>*He studied through the (e, e'X) reaction.* UvA (1988)

Brink, Hendrikus B. van den *Pion production on the proton and* <sup>13</sup>*C.* VUA (1995)

Bulten, Hendrik Jan Study of the (e,e'p) reaction mechanism on <sup>40</sup>Ca and <sup>90</sup>Zr. UU (1992)

Burghardt, André J.C. The influence of the shell closure on the microscopic structure of even-even Hg isotopes. A study with electron and muon beams. UvA (1989)

Daman, Marcel A. Electrodisintegration of <sup>4</sup>He studied with the reaction <sup>4</sup>He( $e,e'\tau$ )n. UvA (1991)

Donné, Antonius J.H. *Transverse excitations of <sup>19</sup>F.* VUA (1985)

Ent, Rolf Investigation of correlations in nuclei with the (e,e'X) reaction. VUA (1989)

Ferro-Luzzi, Massimiliano M.E.

Development of a polarized deuterium target and measurement of the tensor analyzing power  $T_{20}$  in elastic electron scattering. ETH (1995) Fritschi, Daniel L. *Precision measurement of the neutron magnetic form factor.* UBa (1993)

Herder, Jan-Willem A. den Single-particle properties of <sup>51</sup>V and <sup>90</sup>Zr studied with the (e,e'p) reaction. Towards absolute spectroscopic factors. UvA (1987)

Hofstee, Marriët A. Inelastic scattering to 1ħω excitations. RUG (1992)

Jager, Cornelis W. de *Nuclear charge distribution parameters of*<sup>206,207,208</sup>Pb. UvA (1973)

Jans, Eddy Determination of the proton spectral function of <sup>3</sup>He with the (e,e'p) reaction. UvA (1982)

Jansen, Johan A. Determination of nuclear charge radii by means of absolute electron scattering cross section measurements between 20 and 80 MeV. UvA (1971)

Joosse, Frederic C.P. *The magnetic form factor of the neutron.* UU (1993)

Karen, Pierre H. Neutron and proton transition densities for <sup>42,44</sup>Ca from electron and proton scattering. UVi (1993)

Kasdorp, Willem-Jan Deuteron electrodisintegration at large momentum values. UU (1997)

Keizer, Paul The electrodisintegration of <sup>3</sup>He studied with the <sup>3</sup>He(e,e'p)<sup>2</sup>H and <sup>3</sup>He(e,e'd)<sup>1</sup>H reactions. UvA (1986)

Kester, Leon Investigation of short range correlations in <sup>12</sup>C with the (e,e'p) and (e,e'pp) reactions. VUA (1993) Klaasse, Anna A.C. Excited states in <sup>63</sup>Cu and <sup>62</sup>Ni. Electron-scattering and decay studies. UvA (1976)

Kramer, Gerrit J. The proton spectral function of <sup>40</sup>Ca and <sup>48</sup>Ca studied with the (e,e'p) reaction. An investigation of ground-state correlations. UvA (1990)

Laan, Jan B. van der Electron scattering off Palladium isotopes. An investigation of the equivalence of the anharmonic vibrator model and the interacting Boson model. UvA (1986)

Lác, Ján Electron scattering: study of internal target effects and of the  ${}^{209}Bi(e,e'p)$  reaction. VUA (1993)

Laksanaboonsong, Jarungsaeng *Electron scattering from <sup>198</sup>Hg and <sup>204</sup>Hg.* UVi (1986)

Lanen, Johannes B.J.M. *The <sup>6</sup>Li(e,e'p) and <sup>142,146</sup>Nd(e,e'p) reactions: deformation effects and unbound final states in proton-knockout reactions.* UU (1990)

Lange, Dirk-Jan J. de A study of collective aspects of <sup>4</sup>He electrodisintegration with the BigBite spectrometer. UU (1998)

Lapikás, Louis Elastic electron scattering from the magnetization distributions of <sup>9</sup>Be, <sup>13</sup>C and <sup>27</sup>Al. UvA (1974)

Leeuwe, Jacobus J. van Investigation of nucleon-nucleon correlations in <sup>4</sup>He. UU (1996)

Leuschner, Mark B. Nuclear structure studies of the <sup>16</sup>O nucleus observed with the quasielastic (e,e'p) reaction. UNH (1992) Electron scattering off an internal tensor-polarized deuterium target



Lorenzon, Wolfgang Search for an isotensor electromagnetic interaction. UBa (1988)

Maas, Rob Elastic and inelastic electron scattering from <sup>142,146,150</sup>Nd. UvA (1974)

Meyer, Gert De Cluster structure of light nuclei studied with the (e,e' $\alpha$ ) reaction. UG (1997)

Misiejuk, Andrzej Electron-induced neutron knock-out from the <sup>4</sup>He nucleus. UU (1997)

Niftrik, Gerrit J.C. van Charge and magnetization distributions of some nuclei measured by electron scattering at energies below 100 MeV. UvA (1971)

Offermann, Edmond A.J.M. Dispersion effects in elastic electron scattering from <sup>12</sup>C. UvA (1988)

Onderwater, Cornelis J.G. Investigations of short-range correlations using the <sup>16</sup>O(e,e'pp) reaction. VUA (1998)

Passchier, Erik Electron scattering off an internal tensor-polarized deuterium target. UU (1996)

Pellegrino, Antonio R. Deuteron electrodisintegration in the  $\Delta$ -resonance region. VUA (1996)

Quint, Edwin N.M. Limitations of the mean-field description for nuclei in the Pb-region, observed with the (e,e'p) reaction. UvA (1988)

Riedeman, Dirk E.J. *Quasi-particle excitations in the fp-shell nuclei* <sup>65</sup>*Cu and* <sup>71</sup>*Ga.* VUA (1991) Sambeek, Martinus J.M. van Study of coherent  $\pi^{0}$  electroproduction on <sup>4</sup>He with recoil detection. VUA (1997)

Sandor, Robert K.J. Shape transition in the Nd-isotopes. An electron scattering study. VUA (1991)

Schaar, Maurits van der *A study of deuteron (e,e'p) response functions*. UU (1991)

Selig, Avri M. Effective electro-magnetic operators in the 1f2p shell investigated with (e,e') reactions. UvA (1985)

Spaltro, Chiara M. Study of electron-induced deuteron knockout from <sup>3</sup>He and <sup>4</sup>He. VUA (1997)

Steenhoven, Gerard van der Ground-state correlations in  ${}^{12}C$  and the mechanism of the (e,e'p) reaction. VUA (1987)

Theunissen, Jean A.P. *Tensor analyzing power in the deuteron electro-disintegration reaction.* UU (1995)

Uden, Mattheus A. van The HARP liquid hydrogen system and a high resolution <sup>16</sup>O( $\gamma$ ,  $\pi^-p$ ) experiment. UU (1997)

Unal, Orhan The proton spectral function of <sup>4</sup>He measured at high-missing energies and momenta. UWM (1995)

Vries, Hans de *Electron scattering from the magnetization distribution of* <sup>45</sup>Sc, <sup>51</sup>V, <sup>55</sup>Mn, <sup>59</sup>Co. UvA (1973)

Vries, Johannes W. de An electron-scattering study of <sup>15</sup>N. UU (1987) Vries, Robert de Investigation of nucleon-nucleon correlations in <sup>4</sup>He with the reactions (e,e'p) and (e,e'pp). UU (1995)

Welch, Terrance P. *Electroproduction of*  $\pi^{o}$ 's at threshold. UVi (1992)

Wesseling, Joost Electron-scattering studies of nuclear structure in light and medium-heavy nuclei. VUA (1992)

Witt, Huberts Peter K.A. de Electron scattering from <sup>51</sup>V below 100 MeV. UvA (1973)

Zhou, Zi Lu A study of the spin dependence of electron scattering from a tensor polarized deuterium internal target. UWM (1996)

Zondervan, Albert *Two-nucleon correlation processes studied with the reactions*  ${}^{12}C(e,e'p)$  *and*  ${}^{12}C(e,e'pp)$ . UvA (1992)

AmPS Techniek

Meer, Robert van der *Studies on a gas jet from a slit nozzle.* UvA (1995)

Militsyn, Boris Pulsed polarized electrons for nuclear physics experiments at NIKHEF. TUE (1998)

Wu, Yunyan The optical design of AmPS. Elements of the design of a pulse stretcher. TUE (1991)

## MEA/PIMU faciliteit

Hamers, Ronald Nucleon multiplicities after pion absorption in <sup>16</sup>O. VUA (1989) Laat, C.T.A.M. de (Cornelius) Strong and electromagnetic interactions in heavy exotic atoms. TUD (1988)

Taal, Arie Deeply bound orbits in pionic atoms and the optical potential. TUD (1989)

EVA/MEA Radiochemie

## Buitenhuis, R.

A pulse radiolysis of the formation and reactions of reduced metal EDTA complexes. UvA (1977)

Teeling, M.T.A.

Chemical fate of a recoil atom as a function of the lattice conditions. UvA (1980)

Zelst, L. van

Instrumental photon and proton activation analysis of some elements in stony meteorites. UvA (1971)

## Korsse, J.

Kinetics of the reactions of hydrated electrons with metal complexes. Pulse radiolysis experiments and theoretical considerations. UvA (1983) Aantallen proefschriften en publicaties (in tijdschriften met *referees*) over experimenteel werk uitgevoerd bij EVA, MEA en AmPS. De lichte kleuren in de laatste vijfjaarsperiode representeren proefschriften en publicaties in voorbereiding voor 1999.



# Publicaties over werk uitgevoerd bij de versnellers EVA, MEA en AmPS

Alleen fysica publicaties in internationale tijdschriften met *referees* zijn opgenomen. Van publicaties met meer dan drie auteurs is de auteurslijst bekort tot de eerste auteur.

[1] H.A.L. Piceni, C. de Vries *A ten-channel secundary emission monitor for electron beam analyzing purposes.* Nucl. Inst. 51 (1967) 87.

[2] P.J.T. Bruinsma, J.G. Noomen, C. de Vries *EVA, the 85 MeV linear Electron accelerator at Amsterdam.* Nucl. Inst. 74 (1969) 1.

[3] C. de Vries, P.J.T. Bruinsma *The 100 MeV electron scattering facility at Amsterdam.* Nucl. Inst. 74 (1969) 5.

[4] C.W. de Jager *et al. The magic-angle electron spectrometer at Amsterdam.* Nucl. Inst. 74 (1969) 13.

[5] J.A. Jansen, G.J. Veenhof, C. de Vries *High precision electron current monitoring system.* Nucl. Inst. 74 (1969) 20.

[6] P.K.A. de Witt Huberts *et al. An overlapping scintillator detection system for scattering.* Nucl. Inst. 74 (1969) 27.

[7] P.K.A. de Witt Huberts, L.J. Oostrijk, G.A. Peterson *Electroexcitation of*  $f_{7/2}$  *proton states in* <sup>51</sup>*V.* Phys. Lett. 23B (1970) 599.

[8] H. de Vries, G.J.C. van Niftrik, L. Lapikás
 Elastic electron scattering through 180° from the magnetization distribution of the 1f<sub>7/2</sub>—shell nuclei Sc, V and Co.
 Phys. Lett. 33B (1970) 403.

[9] G.J.C. van Niftrik *et al. A three-magnet system for measurement of electron scattering through 180°.* Nucl. Inst. 93 (1971) 301. [10] G.J.C. van Niftrik *et al.* Magnetization distribution of the <sup>7</sup>Li nucleus as obtained from electron scattering through 180°. The electric quadrupole moment of <sup>7</sup>Li. Nucl. Phys. A174 (1971) 173.

[11] C.W. de Jager, R. Maas, C. de Vries *Electric scattering of 30-90 MeV electrons from*<sup>206,207,208</sup>*Pb.* Phys. Lett. 39B (1972) 188.

[12] J.A. Jansen, R.Th. Peerdeman, C. de Vries *Nuclear charge radii of* <sup>12</sup>*C and* <sup>9</sup>*Be.* Nucl. Phys. A188 (1972) 337.

[13] L. Lapikás, A.E.L. Dieperink, G. Box *Elastic electron scattering from the magnetization distribution of* <sup>27</sup>*Al.* Nucl. Phys. A203 (1973) 609.

[14] R. Maas, C.W. de Jager *Elastic electron scattering at 30-80 MeV from*<sup>142,146,150</sup>Nd. Phys. Lett. 48B (1974) 212.

[15] C.W. de Jager, H. de Vries, C. de Vries Nuclear charge-and magnetization-density-distribution parameters from elastic electron scattering. At. Data Tables 14 (1974) 479.

[16] L. Lapikás, G. Box, H. de Vries *Magnetic elastic electron scattering from <sup>9</sup>Be and* <sup>13</sup>*C*. Nucl. Phys. A253 (1975) 324.

[17] P.K.A. de Witt Huberts *et al. Elastic electron scattering from the magnetization distribution of* <sup>93</sup>*Nb.* Phys. Lett. 60B (1976) 157.

[18] P.K.A. de Witt Huberts *et al.* On the radial distribution of the  $1f_{7/2}$  proton orbit. Phys. Lett. 71B (1977) 317.

[19] H. Euteneuer *et al. Elastic electron scattering from the multipole moment distributions of* <sup>25</sup>*Mg.* Phys. Rev. C16 (1977) 1703.

[20] I. Sick *et al. Radial distribution of valence neutrons from elastic electron scattering* Phys. Rev. Lett. 38 (1977) 1259. [21] R.P. Singhal, M.W.S. Macauley, P.K.A. de Witt Huberts *Folding of proton size in nuclear structure calculations*. Nucl. Inst. 148 (1978) 113.

[22] S.K. Platchkov *et al. Radial distribution of the*  $1f_{7/2}$  *neutron orbit.* Phys. Lett. 86B (1979) 1.

[23] S. K. Platchkov *et al. Magnetic electron scattering and valence nucleon radial wave functions.* Phys. Rev. C25 (1982) 2318.

[24] L.T. van der Bijl et al.
Quenching of the electron scattering form factor of the 1<sup>+</sup> state at 3.48 MeV in <sup>88</sup>Sr and the influence of the Delta(1232)-isobar.
Z. Physik A305 (1982) 231.

[25] A.M. Selig *et al. Quenching of the M3 strength in the ground state of <sup>65</sup>Cu.*Z. Physik A307 (1982) 247.

[26] J.W. Lightbody Jr. *et al. Elastic and inelastic electron scattering from* <sup>50,52,54</sup>*Cr.* Phys. Rev. C27 (1983) 113.

[27] S.K. Platchkov *et al. The magnetic form factor of* <sup>51</sup>*V at very high momentum transfer.* Phys. Lett. 131B (1983) 301.

[28] J.F.M.d' Achard van Enschut *et al. Anomalous strong interaction shifts and widths of the 3d state in pionic Pt and Au.* Phys. Lett. 136B (1984) 24.

[29] H. Postma *et al. A higher power liquid* <sup>3,4</sup>*He target system for electron scattering experiments.* Nucl. Inst. A219 (1984) 292.

[30] J.H.J. Distelbrink *et al. A fast and flexible focal-plane detection system for electron scattering experiments.* Nucl. Inst. A220 (1984) 433.

[31] C. de Vries *et al. The 500 MeV electron-scattering facility at NIKHEF-K.* Nucl. Inst. A223 (1984) 1. [32] L.T. van der Bijl *et al. Electro-excitations of the*  $1^+$  *state at*  $E_x = 3.486$  *MeV in* <sup>88</sup>*Sr.* Nucl. Phys. A423 (1984) 365.

[33] A.J.H. Donné *et al. The 180° electron-scattering facility at NIKHEF-K.* Nucl. Inst. A224 (1984) 97.

[34] P.C. Dunn *A charged-pion detection system with large electron suppression.* Nucl. Inst. A224 (1984) 105.

[35] P. Stoler *et al.* A measurement of the photopion reaction  ${}^{13}C(\gamma,\pi^-){}^{13}N_{gs}$  at a pion kinetic energy of 48 *MeV.* Phys. Lett. 143B (1984) 69.

[36] H. Blok et al.
 Contribution of 2hω transitions to the excitation of 0<sup>+</sup> states in <sup>58</sup>Ni and <sup>26</sup>Mg in inelastic electron scattering.
 Phys. Lett. 149B (1984) 441.

[37] C.W. de Jager *et al. Electroexcitation of the first excited state in* <sup>39</sup>*K.* Phys. Lett. 150B (1985) 421.

[38] A.M. Selig *et al. Quenching of the elastic magnetic response function of*<sup>49</sup>*Ti.* Phys. Lett. 151B (1985) 330.

[39] W.T.A. Borghols *et al. Excitation of hexadecapole transitions in*<sup>196</sup>*Pt via electron scattering and their interpretation in the interacting Boson approximation.* Phys. Lett. 152B (1985) 330.

[40] J.B. van der Laan *et al. Electron scattering off*<sup>110</sup>*Pd. A test of the interacting Boson approximation.* Phys. Lett. 153B (1985) 130.

[41] S. Müller *et al. High-resolution inelastic electron scattering and the isoscalar nature of the M1 transitions to the J*<sup>r</sup> = 1<sup>+</sup> *state at E*<sub>x</sub> = 5.846 *MeV in* <sup>208</sup>*Pb.* Phys. Rev. Lett. 54 (1985) 293. [42] G. van der Steenhoven *et al. High-resolution (e,e'p) study of the*  $1/2^+$  *state at 6.79 MeV in* <sup>11</sup>*B* Phys. Lett. 156B (1985) 151.

[43] A. Taal *et al. Anomalous strong interaction in pionic Mg.* Phys. Lett. 156B (1985) 296.

[44] P.H.M. Keizer *et al.* Deuteron knockout from <sup>3</sup>He with the (e,e'd) reaction. Phys. Lett. 157B (1985) 255.

[45] J.W.A. den Herder *et al. Fragmentation of the 1f-hole strength in* <sup>90</sup>*Zr studied with the (e,e'p) reaction.* Phys. Lett. 161B (1985) 65.

[46] R. De Leo *et al. Quadrupole Boson structure form factors for proton scattering from the IBA model and electron scattering.* Phys. Lett. 162B (1985) 1.

[47] A.M. Selig *et al. Comparison of the size of the*  $1f_{7/2}$  *orbit deduced from C6 and M7 form factors.* Phys. Lett. 162B (1985) 251.

[48] G. van der Steenhoven *et al. Two-step processes in the quasi-free (e,e'p) reactions.* Phys. Rev. C32 (1985) 1787.

[49] S.Y. van der Werf *et al.* High spin 1p-1h configuration in <sup>116</sup>Sn and their fragmentations as seen in the reactions <sup>116</sup>Sn(p,p), <sup>116</sup>Sn(e,e'), <sup>115</sup>In(<sup>3</sup>He,d) and <sup>115</sup>In( $\alpha$ ,t). Phys. Lett. 166B (1986) 372.

[50] A.J.H. Donné *et al. Elastic magnetic electron scattering from* <sup>19</sup>*F.* Nucl. Phys. A455 (1986) 453.

[51] G. van der Steenhoven *et al.* Effect of the nuclear medium on the proton investigated with the reaction  ${}^{12}C(e,e'p){}^{11}B$ . Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 182.

[52] E.N.M. Quint *et al. Relative 3s spectroscopic strength in*<sup>206</sup>*Pb and*<sup>208</sup>*Pb studied with the (e,e'p) knock-out reaction.* Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 186. [53] E.A.J.M. Offermann *et al.* Search for dispersive effects in elastic electron scattering from <sup>12</sup>C. Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 1546.

[54] J.W.A. den Herder *et al.* Spectroscopic strength of  $1f_{7/2}$  transitions deduced from the reaction  ${}^{51}V(e,e'p){}^{50}Ti$ . Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 1843 and 60 (1988) 1343.

[55] A.J.H. Donné, J. de la Mar, H. Schwebke A refrigerated gas system for use in 180° electron scattering experiments. Nucl. Inst. A244 (1986) 343.

[56] N. Voegler *et al.* Selfconsistent determination of the focussing properties of a magnetic spectrometer. Nucl. Inst. A249 (1986) 337.

[57] R. Ent *et al.* Reaction  ${}^{\circ}Li(e,e'd){}^{4}He$  and the  $\alpha$  - *d* momentum distribution in the ground state of  ${}^{\circ}Li$ . Phys. Rev. Lett. 57 (1986) 2367.

[58] J.W.A. den Herder *et al. Knock-out of 2p protons from the interior of* <sup>90</sup>*Zr.* Phys. Lett. 184B (1987) 11.

[59] E.N.M. Quint *et al. Evidence for partial occupancy of the 3s*<sub>1/2</sub> *proton orbit in <sup>208</sup>Pb.*Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1088.

[60] G. van der Steenhoven *et al. Nuclear-density dependence of the electron-proton coupling.* Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1727 and 59 (1987) 1376.

[61] H. de Vries, C.W. de Jager, C. de Vries *Nuclear charge-density-distribution parameters from elastic electron scattering.* At. Data Tables 36 (1987) 495.

[62] G. van der Steenhoven *et al. Charge-exchange processes in the quasi-elastic (e,e'p) and (e,e'n) reactions.* Phys. Lett. 191B (1987) 227.

[63] A.J.H. Donné *et al. Transverse electroexcitation of positive- and negative-parity states in* <sup>19</sup>*F.* Nucl. Phys. A469 (1987) 518. [64] P.C. Dunn *et al.* A study of the role of the Delta-resonance in the reaction  ${}^{13}C(\gamma,\pi^{-}){}^{13}N_{gc}$ . Phys. Lett. 196B (1987) 434.

[65] P.H.M. Keizer *et al. Two-body electrodisintegration of* <sup>3</sup>*He at large recoil momentum.* Phys. Lett. 197B (1987) 29.

[66] H.P. Blok *et al. The proton optical-model potential in the interior of the nucleus.* Phys. Lett. 198B (1987) 4.

[67] J.F.J. van den Brand *et al. A thin-walled cryogenic gas target for electron-scattering experiments.* Nucl. Inst. A261 (1987) 373.

[68] H.P. Blok, G. van der Steenhoven *Calculation of two-step processes in the (e,e'p) reaction.* Phys. Rev. C35 (1987) 2347.

[69] S.Y. van der Werf *et al.* Core polarization and quenching in stretched spin states: Case study of the 9<sup>-</sup>  $E_x = 3.522$ MeV state in <sup>116</sup>Sn. Phys. Rev. C36 (1987) 1796.

[70] H. Blok *et al. Path reconstruction and resolution improvement in magnetic spectrometers.* Nucl. Inst. A262 (1987) 291.

[71] E.A.J.M. Offermann, C.W. de Jager, H. de Vries *The optical properties of the QDD magnetic spectrometer at NIKHEF-K.* Nucl. Inst. A262 (1987) 298.

[72] D. Bohle *et al.*Search for collective M3 excitations to low lying states in <sup>164</sup>Dy.
Z. Physik A328 (1987) 463.

[73] A.M. Selig *et al.* Effective electro-magnetic operators of <sup>50</sup>Ti investigated with the (e,e') reaction. Nucl. Phys. A476 (1988) 413

[74] G. van der Steenhoven *et al. Knockout of 1p protons from* <sup>12</sup>*C induced by the (e,e'p) reaction.* Nucl. Phys. A480 (1988) 547. [75] J.W. Vries *et al. The* <sup>15</sup>*N ground state studied with elastic electron scattering.* Phys. Lett. 205B (1988) 22.

[76] J.F.J. van den Brand *et al. Electrodisintegration of* <sup>4</sup>*He studied with the reaction* <sup>4</sup>*He(e,e'p)*<sup>3</sup>*H.* Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 2006.

[77] M.R. Braunstein *et al. Inelastic electron scattering from* <sup>64</sup>*Ni.* Phys. Rev. C37 (1988) 1870.

[78] G. van der Steenhoven *et al. Weak transitions in the quasi-elastic reaction* <sup>12</sup>*C*(*e*,*e'p*)<sup>11</sup>*B.* Nucl. Phys. A484 (1988) 445.

[79] J.F.J. van den Brand, A.P. Kaan *A low-mass vacuüm exit foil for high energy electrons and hadrons.* Nucl. Inst. A268 (1988) 186.

[80] D.I. Sober et al.
Electroexcitation of 8<sup>-</sup> states in <sup>52</sup>Cr.
Phys. Rev. C38 (1988) 654.

[81] R. Soundranayagam *et al. Ground state charge distribution of <sup>26</sup>Mg.* Phys. Lett. 212B (1988) 13.

[82] J.W.A. den Herder *et al.* Single-particle properties of <sup>51</sup>V and <sup>90</sup>Zr studied with the (e,e'p) reaction. Nucl. Phys. A490 (1988) 507.

[83] G. van der Steenhoven *et al. Comment on "Medium-modified form factors, relativistic dynamics, and the (e,e'p) reaction"*. Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 1427.

[84] G. van der Steenhoven *et al. Comment on 'Missing-energy dependence of the separated response functions for the reaction* <sup>12</sup>*C (e,e'p)'.*Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 2000.

[85] D.J. Millener *et al. Inelastic electron scattering from* <sup>13</sup>*C.*Phys. Rev. C39 (1989) 14

[86] T. Guhr et al.

On the nature of low-lying electric dipole excitations in light and heavy deformed nuclei. Nucl. Phys. A501 (1989) 95.

[87] G. Hartung *et al.* Inelastic electron scattering off mixed symmetry  $J^{t} = 2^{+}$  states in <sup>56</sup>Fe. Phys. Lett. 221B (1989) 109.

[88] R. Ent *et al.* Deuteron formation in the reaction  ${}^{12}C$  (*e*,*e'd*) ${}^{10}B_{T=1}$ . Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 24.

[89] J.B.J.M. Lanen *et al. Electrodisintegration of* <sup>6</sup>*Li studied with the reaction* <sup>6</sup>*Li(e,e'p).* Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 2925.

[90] G.J. Kramer *et al. Proton ground-state correlations in <sup>40</sup>Ca studied with the reaction <sup>40</sup>Ca(e,e'p)<sup>39</sup>K.* Phys. Lett. 227B (1989) 199.

[91] J.B.J.M. Lanen *et al.* (*e*,*e'p*) study of triton + deuteron + proton clustering in <sup>6</sup>Li. Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 2793.

[92] N. Kalantar-Nayestanaki *et al. Energy dependence of dispersive effects in* <sup>12</sup>*C.* Phys. Rev. Lett. 63 (1989) 2032.

[93] R.K.J. Sandor *et al.* Interplay between single-particle and collective degrees of freedom in the excitation of the low-lying quadrupole states in <sup>142</sup>Nd. Phys. Lett. 233B (1989) 54.

[94] P.K.A. de Witt Huberts
Proton spectral functions and momentum distributions in nuclei from high-resolution (e,e'p) experiments.
J. Phys. G16 (1990) 507.

[95] J.B.J.M. Lanen *et al. Two-body mechanisms in the <sup>6</sup>Li(e,e'p) reaction.* Phys. Rev. Lett. 64 (1990) 2250.

[96] T. Guhr *et al. Electroexcitation of magnetic dipole and other modes in <sup>46</sup>Ti and <sup>48</sup>Ti.*Z. Physik A336 (1990) 159.

[97] B.L. Clausen *et al. Electroexcitation of 6*- *states in* <sup>32</sup>*S.* Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 547.

[98] G.F. Wu, J.L. Visschers, P.U. ten Kate *A fast second-level trigger processor for the hadron detector at NIKHEF-K.* Nucl. Inst. A292 (1990) 135.

[99] L. de Vries *et al. The optical properties of the QDQ magnetic spectrometer at NIKHEF.* Nucl. Inst. A292 (1990) 629.

[100] J. Wesseling *et al. The interacting boson approximation tested against quadrupole excitations of* <sup>110</sup>Cd. Phys. Lett. 245B (1990) 338.

[101] J.J.M. Steijger *et al. A low-pressure position- and angle-sensitive gas detector.* Nucl. Inst. A295 (1990) 123.

[102] R. Fonte *et al. Calibration of lead glass detectors by electrons up to 350 MeV.* Nucl. Inst. A297 (1990) 410.

[103] G. van der Steenhoven, H.P. Blok *Two-step processes and short-range correlations in the reaction*  ${}^{12}C(\gamma,p)$ . Phys. Rev. C42 (1990) 2597.

[104] A.E.L. Dieperink, P.K.A. de Witt Huberts On high resolution (e,e'p) reactions. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 40 (1990) 239

[105] G. van der Steenhoven, P.K.A. de Witt Huberts *Quasi-elastic electron scattering: single-particle motion and correlations in nuclei.* Modern Topics in Electron Scattering, B. Frois and I. Sick (ed.)

[106] J.F.J. van den Brand *et al.* Study of the mechanisms of the reaction  ${}^{4}He(e,e'p){}^{3}H$ . Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 409.

[107] R.K.J. Sandor *et al. Electron scattering off the ground-state band and the gamma band in* <sup>150</sup>Nd. Phys. Rev. C43 (1991) R2040. [108] N. Voegler et al.
 Measurement of magnetic monopole transition in electron scattering from <sup>16</sup>O as direct test of dispersive effects.
 Phys. Rev. C43 (1991) 2172.

[109] M. van der Schaar *et al. Longitudinal-transverse separation of the deuterium (e,e'p) response functions.* Phys. Rev. Lett. 66 (1991) 2855

[110] R. Ent *et al. The mechanism of the reaction*  ${}^{4}He(e,e'd){}^{2}H$ . Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 18.

[111] R. Fonte *et al. Response function of a*  $BaF_2$  *detector to electrons.* Nucl. Inst. A307 (1991) 80.

[112] D.E.J. Riedeman *et al.* Study of the proton  $2p_{3/2} \rightarrow 2p_{1/2}$  transition in <sup>65</sup>Cu and <sup>71</sup>Ga. Phys. Rev. C44 (1991) R939.

[113] E.A.J.M. Offermann *et al. Energy dependence of the form factor for elastic electron scattering from* <sup>12</sup>*C.* Phys. Rev. C44 (1991) 1096.

[114] J.F.J. van den Brand *et al. The two-body electrodisintegration of* <sup>4</sup>*He studied through the* (*e*,*e'p*) *reaction.* Nucl. Phys. A534 (1991) 637.

[115] J.H. Mitchell *et al. The mechanism of the*  ${}^{\circ}Li$  (*e*,*e*' $\alpha$ ) *reaction.* Phys. Rev. C44 (1991) 2002.

[116] J. Steijger *et al. A fast readout system for scintillation detectors.* Nucl. Inst. A310 (1991) 509.

[117] J. Steijger *et al. A scintillator detector system for electron scattering experiments.* Nucl. Inst. A310 (1991) 513.

[118] J. Wesseling *et al. IBA g-boson properties in*<sup>110</sup>*Cd and Pd isotopes studied with electron scattering.* Nucl. Phys. A535 (1991) 285. [119] R.K.J. Sandor *et al.* Interplay between single-particle and collective degrees of freedom in the excitation of the low-lying states in <sup>142</sup>Nd. Nucl. Phys. A535 (1991) 669.

[120] M. van der Schaar *et al. Longitudinal-transverse interference structure function of* <sup>2</sup>*H.* Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 776.

[121] I. Bobeldijk, H.P. Blok, G. van der Steenhoven *Observation of two-step processes in the quasi-elastic reaction* <sup>12</sup>C(e,e'p)<sup>11</sup>B.
Phys. Lett. 281B (1992) 25.

[122] J. Wesseling *et al. Electron-induced proton knock-out from* <sup>30</sup>*Si*, <sup>31</sup>*P and* <sup>32</sup>*S.* Nucl. Phys. A457 (1992) 519.

[123] T.P. Welch *et al. Electroproduction of*  $\pi^{\circ}$  *on the proton near threshold.* Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2761.

[124] V.Yu. Ponomarev *et al. Transition charge densities of low-lying collective states in* <sup>196</sup>*Pt from inelastic electron scattering.* Nucl. Phys. A549 (1992) 180.

[125] R.K.J. Sandor *et al. Electron-scattering investigation of the low-lying states in* <sup>150</sup>Nd. Nucl. Phys. A551 (1993) 349.

[126] R.K.J. Sandor *et al.* Shape transition of <sup>146</sup>Nd deduced from an inelastic electron-scattering experiment. Nucl. Phys. A551 (1993) 378.

[127] R. Perrino *et al. Hexadecapole interacting boson approximation structure functions in neodymium isotopes.* Phys. Rev. C47 (1993) R1347.

[128] J.B.J.M. Lanen *et al. The* (*e*,*e'p*) *reaction on*  $^{142}$ *Nd and*  $^{146}$ *Nd: a search for deformation effects.* Nucl. Phys. A560 (1993) 811.

[129] R. Perrino *et al. Excitation of low-lying states in*<sup>144</sup>Nd by means of (*e*,*e'*) scattering. Nucl. Phys. A561 (1993) 343. [130] Y. Jin, H.P. Blok, L. Lapikás *e-p off-shell cross section in quasielastic (e,e'p) reactions.* Phys. Rev. C48 (1993) R964.

[131] C.M. Spaltro *et al.* Separated structure functions for the proton-knockout reaction <sup>16</sup>O(e,e'p). Phys. Rev. C48 (1993) 2385.

[132] M. Leuschner *et al. Quasielastic proton knockout from* <sup>16</sup>*O.* Phys. Rev. C49 (1994) 955.

[133] A. Zondervan *et al. A large-acceptance proton scintillator detection system for electron scattering experiments.* Nucl. Inst. A342 (1994) 436.

[134] D.G. Ireland, G. van der Steenhoven Comparison of the quasielastic (e,e'p) and the ( $\gamma$ ,p) reactions. Phys. Rev. C49 (1994) 2182.

[135] D.E.J. Riedeman *et al. Electron scattering off* <sup>65</sup>*Cu and* <sup>71</sup>*Ga.* Nucl. Phys. A573 (1994) 173.

[136] J.A.P. Theunissen *et al. Design and performance of two CsI/Nal(Tl) calorimeters in an internal target detector setup.* Nucl. Inst. A348 (1994) 61.

[137] D.G. Ireland, L. Lapikás, G. van der Steenhoven *Nuclear transparency in (e,e'p) reactions*. Phys. Rev. C50 (1994) 1626.

[138] J. Rykebusch *et al. Two-nucleon knockout contributions to the*  ${}^{12}C(e,e'p)$  *reaction in the dip and*  $\Delta(1232)$  *regions.* Phys. Lett. 333B (1994) 310.

[139] R. Ent *et al. The (e,e'd) reaction on <sup>4</sup>He*, <sup>6</sup>Li and <sup>12</sup>C. Nucl. Phys. A578 (1994) 93.

[140] L.J. de Bever *et al.* Proton scattering off <sup>o</sup>Be and the final-state interaction in the (e,e'p) and ( $\gamma$ ,p) reactions on <sup>10</sup>B. Nucl. Phys. A579 (1994) 13. [141] I. Bobeldijk *et al. High-momentum protons in <sup>208</sup>Pb.* Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 2684.

[142] R.J. Bakker *et al. Expected performance of FELINA, the Dutch VUV-FEL in Amsterdam.* Nucl. Inst. A358 (1995) 358.

[143] Kamal K. Seth *et al. Absence of M3 quenching in <sup>26</sup>Mg.* Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 642 and 3306.

[144] H.B. van den Brink *et al. Neutral-pion electroproduction on the proton near threshold.* Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 3561.

[145] L.J.H.M. Kester *et al. Short-range nucleon-nucleon correlations investigated with the reaction* <sup>12</sup>*C*(*e*,*e'pp*). Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 1712.

[146] L.J.H.M. Kester *et al. Two-nucleon knock-out investigated with the semi-exclusive* <sup>12</sup>*C* (*e*,*e'p*) *reaction.* Phys. Lett. 344B (1995) 79.

[147] A. Chichocki et al. *Electron scattering from* <sup>10</sup>*B.* Phys. Rev. C51 (1995) 2406.

[148] A. Zondervan *et al.* The  ${}^{12}C(e,e'p)$  and  ${}^{12}C(e,e'pp)$  reactions in the  $\Delta$ -resonance region. Nucl. Phys. A587 (1995) 697.

[149] M.A. Hofstee *et al. Localized* 1ħω particle-hole strength in nuclei. Nucl. Phys. A588 (1995) 729.

[150] I. Bobeldijk *et al.* Search for nucleon-nucleon correlations in the proton spectral function of <sup>208</sup>Pb. Phys. Lett. 353B (1995) 32.

[151] T. Botto *et al.* Supersonic gas jets as internal targets at NIKHEF. Nucl. Inst. A362 (1995) 26. [152] I. Bobeldijk *et al. Photon-induced proton knockout from*<sup>208</sup>*Pb.* Phys. Lett. 356B (1995) 13.

[153] G. Fricke *et al. Nuclear ground state charge radii from electromagnetic interactions.* At. Data Tables 60 (1995) 177.

[154] L.J.H.M. Kester *et al. Two-body currents in the reaction*  ${}^{12}C(e,e'p){}^{11}B$  *at high missing momenta.* Phys. Lett. 366B (1996) 44.

[155] Z.-L. Zhou *et al. Performance of a polarized deuterium internal target in a medium-energy electron storage ring.* Nucl. Inst. A378 (1996) 40.

[156] Z.-L. Zhou *et al. Ion-extraction polarimetry for polarized internal targets.* Nucl. Inst. A379 (1996) 212.

[157] M. Ferro-Luzzi *et al. Measurement of tensor analyzing powers for elastic electron scattering from a polarized* <sup>2</sup>*H target internal to a storage ring.* Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 2630.

[158] E.C. Aschenauer *et al. The mass-dependence of meson-exchange currents in the reaction* ( $\gamma$ ,p). Phys. Lett. 389B (1996) 470.

[159] W.-J. Kasdorp *et al. Relativistic effects in the electrodisintegration of deuterium.* Phys. Lett. 393B (1997) 42.

[160] J. van den Brand *et al. Evidence for nuclear tensor polarization of deuterium molecules in storage cells.* Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 1235.

[161] E. Passchier *et al. A large-acceptance detector system for electron scattering from polarized internal targets.* Nucl. Inst. A387 (1997) 471.

[162] A. Pellegrino *et al.* Deuteron electrodisintegration in the  $\Delta$ -resonance region. Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4011. [163] J. Wesseling *et al.* 2s<sub>1/2</sub> occupancies in <sup>30</sup>Si, <sup>31</sup>P, and <sup>32</sup>S. Phys. Rev. C55 (1997) 2773.

[164] C.J.G. Onderwater *et al.* Dominance of the  ${}^{1}S_{o}$  proton pair emission in the  ${}^{16}O(e,e'pp)$  reaction. Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 4893.

[165] H.B. van den Brink *et al. Electroproduction of neutral pions on the proton.* Nucl. Phys. A612 (1997) 391.

[166] E.C. Aschenauer *et al. Photon-induced proton knockout from*<sup>208</sup>*Pb and*<sup>12</sup>*C.* Nucl. Phys. A615 (1997)33.

[167] G. van der Steenhoven *et al.* Instrumentation for  $\Delta$  photoproduction experiments on nuclei with high energy resolution. Nucl. Instr. A399 (1997) 160.

[168] V.R. Pandharipande, I. Sick, and P.K.A. de Witt Huberts Independent particle motion and correlations in fermion systems. Rev. Mod. Phys. 69 (1997) 981.

[169] J.F.J. van den Brand *et al. Spin effects in medium-energy electron-<sup>3</sup>He scattering.* Nucl. Inst. A402 (1998) 268.

[170] J.J. van Leeuwe *et al. High missing-momentum components in the*  ${}^{4}He(e,e'p){}^{3}H$  *reaction.* Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 2543.

[171] D.J.J. de Lange *et al. A large acceptance spectrometer for the internal target facility at NIKHEF.* Nucl. Inst. A406 (1998) 182.

[172] L.J. de Bever *et al. Radial dependence of the nucleon effective mass in <sup>10</sup>B.* Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 3924.

[173] J.P. Connelly *et al. Trinucleon cluster knockout from <sup>6</sup>Li.* Phys. Rev. C57 (1998) 57. [174] D.J.J. de Lange *et al. The optical properties of the BigBite spectrometer at NIKHEF.* Nucl. Inst. A412 (1998) 254.

[175] C.J.G. Onderwater et al.

Signatures for short-range correlations in <sup>16</sup>O observed in the reaction <sup>16</sup>O(e,e'pp)<sup>14</sup>C. Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 2213.

[176] C.M. Spaltro et al.

The q and  $p_m$  dependence of the <sup>3</sup>He(e,e'd)p reaction. Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 2870.

# Acronymen

Veelgebruikte afkortingen van instellingen, gebouwen en apparatuur

ABS	Atomic Beam Source
AFBU	Hal met afbuigsysteem bij MEA/AmPS
ALS	Accélérateur Linéaire de Saclay
AmPS	Amsterdam Pulse Stretcher
CHORUS	CERN Hybrid Oscillation Research Apparatus
EMIN	Elektronenverstroojingshal bij MEA/AmP
EVA	Elektronen Versneller Amsterdam
FOM	Stichting voor Fundamenteel Onderzoek der Materie
HECH	Hoge Energie Chemie hal bij MEA
IAEA	International Atomic Energy Commission
IKO	Instituut voor Kernphysisch Onderzoek
IRI	Interfacultair Reactor Instituut te Delft
IUPAP	International Union of Pure and Applied Physics
ITF	Interne Trefplaat Faciliteit bij AmPS
KVI	Kernfysisch Versneller Instituut te Groningen
LECH	Lage Energie Chemie hal bij MEA
LEF	Lage Energie Fysica hal bij MEA
MEA	Medium Energy Accelerator
NIKHEF	Nationaal Instituut voor Kernfysica en Hoge-Energie Fysica
NMC/SMC	New/Spin Muon Collaboration bij CERN
NWO	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
PES	Polarized Electron Source
PIMU	Pion Muon faciliteit bij MEA
PSI	Paul Scherrer Institut (voorheen SIN) te Villigen, Zwitserland
QDD	Quadrupole-Dipole-Dipole spectrometer in EMIN
QDQ	Quadrupole-Dipole-Quadrupole spectrometer in EMIN
RAWB	Raad van Advies voor het WetenschapsBeleid
SLAC	Stanford Linear Accelerator Center
SPITFIRE	Spin Physics with Internal Target Facility for International REsearch
UvA	Universiteit van Amsterdam
VUA	Vrije Universiteit Amsterdam
WCW	Wetenschappelijk Centrum Watergaafsmeer
WTCW	Wetenschappelijk Technisch Centrum Watergraafsmeer
WINS	Faculteit Wiskunde, Informatica, Natuurkunde en Sterrenkunde van de UvA
WRK	Wetenschappelijke Raad voor de Kernenergie
ZWO	Stichting voor Zuiver Wetenschappelijk Onderzoek

# Auteurs en geïnterviewden

- P. Bakker, technisch medewerker (gedetacheerd door Philips Natuurkundig Laboratorium) bij EVA 1960-1966
- Ing. J.H.M. Bijleveld, hoofd tekenkamer bij IKO/NIKHEF 1958-1992
- A.P. Bloemsma, technisch medewerker bij EVA 1962-1974
- Prof. dr. J.F.J. van den Brand, promoveerde in 1988 op onderzoek bij MEA, hoogleraar Univ. Wisconsin, UvA en VUA, programmaleider Hadronfysica
- Dr. A.J.C. Burghardt, promoveerde in 1989 op onderzoek bij MEA, thans senior researcher bij Hoogovens R&D
- B. Hakkaart, technisch medewerker bij EVA 1965-1975, thans service manager bij DEAC Techniek BV
- Dr. I.A. van Haneghem, studeerde af in 1965 op onderzoek bij EVA, thans universitair hoofddocent Landbouw Universiteit Wageningen
- Dr. M.W. van der Heijden, promoveerde in 1991 op onderzoek bij NMC, thans wetenschapsjournalist
- Dr. Ir. W.H.A. Hesselink, universitair hoofddocent VUA, wetenschappelijk onderzoeker bij MEA en AmPS
- M. A. Hettema, secretaresse van de afdeling EMIN 1976-1979, thans Human Resources Officer bij Compuware
- Prof. dr. C.W. de Jager, promoveerde in 1973 op onderzoek bij EVA, leider van de programmalijn ITF bij AmPS 1989-1996, thans hoogleraar Univ. Virginia, programmaleider Jefferson Lab. Hall A
- Dr. E. Jans, promoveerde in 1982 op onderzoek bij ALS te Saclay, wetenschappelijk onderzoeker bij MEA en AmPS
- Dr. ir. J. Konijn, wetenschappelijk onderzoeker bij MEA en AmPS, projectleider van CHORUS 1992-1996
- Dr. W.J. Kasdorp, promoveerde in 1997 op onderzoek bij AmPS, thans consultant bij Computer Management Group
- Ing. L.H. Kuijer, technisch medewerker bij EVA, MEA en AmPS 1967-1993, hoofd bedrijf MEA en AmPS 1994 tot heden
- Dr. L. Lapikás, promoveerde in 1974 op onderzoek bij EVA, leider van de programmalijn EMIN bij AmPS
- Dr. C.J. Leurs, promoveerde in 1978 op radiochemisch onderzoek, thans manager Stralingsbescherming, Chemie en Reactorfysica bij de Kernenergiecentrale te Borssele

- Prof. dr. R. van Lieshout, emeritus hoogleraar UvA, directeur IKO 1963-1970, directeur ZWO 1970-1986
- Dr. L. Lindner, werkgroepleider Radiochemie 1970-1988
- Dr. P.W.F. Louwrier, wetenschappelijk onderzoeker bij Radiochemie 1961-1988, hoofd NIKHEF veiligheidsdienst 1989 tot heden
- Ir. G. Luijckx, technisch projectleider bij AFBU en EMIN 1976-1983, projectcoördinator van AmPS 1989-1994
- Prof. dr. G. van Middelkoop, hoogleraar VUA, directeur NIKHEF sectie K 1983-1988, en NIKHEF 1996 tot heden
- Ir. J.G. Noomen, technisch wetenschappelijk medewerker bij EVA, MEA en AmPS 1966 tot heden
- Dr. ir. G.J.L. Nooren, technisch projectleider EMIN en ITF 1986 tot heden
- R.C.M. Pirovano, technisch medewerker bij MEA 1986-1992, thans medisch technicus bij Medisch Centrum Alkmaar/Radiotherapie
- Dr. G. van der Steenhoven, promoveerde in 1987 op onderzoek bij MEA, thans leider van de programmalijn HERMES bij NIKHEF
- Dr. T. Ketel, universitair docent VUA, wetenschappelijk onderzoeker bij MEA, AmPS en NMC/SMC
- J. Visser, hoofdanalist en stralingsdeskundige bij Radiochemie, thans wetenschapsvoorlichter NIKHEF en communicatie adviseur faculteit WINS, UvA
- Ing. A.G.C. Vogel, hoofd mechanische groep EVA en MEA 1968-1986, thans docent productieautomatisering en ontwerpen bij de Hogeschool Haarlem
- Prof. dr. C. de Vries, emeritus hoogleraar UvA, werkgroepleider bij EVA en MEA, en planning AmPS 1962-1989
- Dr. H. de Vries, promoveerde in 1973 op onderzoek bij EVA, thans wetenschappelijk onderzoeker bij AmPS
- Prof. dr. A.H. Wapstra, emeritus hoogleraar TUD, directeur IKO 1970-1980, directeur NIKHEF sectie K 1981-1982
- Prof. dr. P.K.A. de Witt Huberts, promoveerde in 1973 op onderzoek bij EVA, hoogleraar UU, directeur NIKHEF sectie K 1989-1995

## Erratum

Door een samenloop van omstandigheden zijn de volgende publicaties van de voormalige afdeling Radiochemie niet in het boek opgenomen.

[1] L. van Zelst Non-destructive activation analysis of some elements in stony meteorites by proton and Bremsstrahlen irradiation.
J. Radioanal. Chem. 12 (1972) 129.

[2] J. Visser, L. Lindner
 On the decay of <sup>38</sup>S.
 Radiochim. Acta17 (1972) 212

[3] L. Lindner, J. Visser, H. Drost-Wildschut A novel way of producing <sup>38</sup>S. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **24** (1973) 121.

[4] L. Lindner, G.A. Brinkman, J. Visser *Linear electron accelerators for production of radionuclides.*J. of Labelled Compound Radiopharm. 13 (1977) 242

[5] K.G. Bueno de Mesquita, J.A. Bijl, L. Lindner Experiments on the possible use of the 2.31 MeV gamma ray of 71 second <sup>14</sup>O for activation analysis of oxygen. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **26** (1975) 551.

[6] P.W.F. Louwrier *et al. Computerized pulse-radiolysis system.* Nucl. Instr. Meth. **151** (1978) 381.

[7] L. Lindner, J.C. Kapteyn  ${}^{54}Fe(\gamma, 2n) {}^{52}Fe$  induced Szilard-Chalmers effect in ferrocene and ferricinium picrate. Radiochim. Acta **26** (1979) 97.

[8] G.A. Brinkman, J. Visser
 Production of <sup>34m</sup>C<sup>1</sup>/<sub>-</sub>.
 Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **30** (1979) 515.

[9] J. Visser, G.A. Brinkman, C.N.M. Bakker Production of astatine and radon isotopes by photospallation of <sup>232</sup>Th and <sup>238</sup>U. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **30** (1979) 745. [10] R. Buitenhuis et al.
 Pulse radiolysis study of Cd EDTA2- and Pb EDTA2- in alkaline solutions in the presence of alcohols.
 Radiochim. Acta 27 (1980) 15.

[11] G.A. Brinkman Isotope production with Bremsstrahlung beams in comparison with proton beams. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **31** (1980) 85.

[12] G.A. Brinkman et al. The low energy (140 MeV) chemistry facility at the 500 MeV electron accelerator at Amsterdam. Nucl. Instr. Meth. **169** (1980) 231.

[13] L. Lindner, J. Visser, M. de Vos Determination of magnesium by photon activation analysis. Radiochim. Radioanal. Lett. **42** (1980) 271.

[14] G.A. Brinkman, J. Visser Terms used in the production of radioisotopes with electron accelerators. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **31** (1980) 254.

[15] G.A. Brinkman *et al. The* <sup>s8</sup>Ni(*e*,*e'n/*γ, *n*)<sup>s7</sup>Ni reaction. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **32** (1980) 13.

[16] J. Visser, G.A. Brinkman Treshold detectors as monitors for Bremsstrahlung beams. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **32** (1981) 113.

[17] G.A. BrinkmanDoserates during isotope production.Int. J. Appl. Radiat. Isotop. 33 (1982) 109.

[18] G.A. Brinkman In-beam production of labeled compounds. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **33** (1982) 525.

[19] J. Visser et al. Cross sections per equivalent quantum for  $(\gamma, n)$  reactions on C, N, O, F and Cl. Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **33** (1982) 1381. [20] C.N.M. Bakker et al.Cross sections for photon induced nuclear reactions.I. of Labelled Compound Radiopharm. 19 (1982) 1329

[21] M. van der Leij, B.W. van Halteren, G.A. Brinkman *Photonuclear production of <sup>18</sup>F from F, Ne and (metallic) Na.* Int. J. Appl. Radiat. Isotop. **36** (1985) 717.

[22] P. Polak et al. Photonuclear production of <sup>67</sup>Cu from ZnO targets. Radiochim. Acta **40** (1986) 169.

[23] W.T. Binnerts *et al. Kinetics of copper absorption and excretion in cows.* Eur. J. Nucl. Med. **13** (3) A6 (1987).

[24] P. Kuipers et al. Reactions of <sup>11</sup>C atoms with benzene. I. Formation of <sup>11</sup>C labelled benzaldehyde. Res. de Traveaux de Chim. de Pays Bas **107** (1988) 596.

[25] P. Kuipers et al.
Reactions of <sup>11</sup>C atoms with benzene. II. Formation of <sup>11</sup>C labelled toluene and cycloheptatriene.
Res. de Traveaux de Chim. de Pays Bas 108 (1989) 99.

[26] L. Lindner, P. Polak, J. Visser Radiochemical research with the linear accelerator MEA. Radiochim. Acta 43 (1988) 68

[27] G.A. Brinkman, A. Wyand Production of [<sup>18</sup>F]Fluoride from fluorocarbons by the <sup>19</sup>F(g, n)<sup>18</sup>F reaction. Appl. Rad. Isot. **39** (1988) 1141.

[28] H. Frits Bienfait *et al. Rhizosphere acidification by iron deficient bean plants: the role of trace amounts of divalent metal ions.* Plant Physiol. **90** (1989) 359

[29] G.A. Brinkman *et al.* Reactions of recoil <sup>11</sup>C atoms with  $c-C_6H_{125}C_6H_6$ ,  $C_6(CH_3)_6$ . Appl. Rad. Isot. **42** (1991) 1123.

[30] P. Kuipers et al. Reactions of recoil <sup>11</sup>C atoms with benzene. Radiochim. Acta **77** (1997) 45-58.

## Proefschriften

Meyers. P. Some applications of non-destructive activation analysis. UvA (1968)

Leurs. C. J. Chemical aspects of the radioactive decay <sup>38</sup>S - <sup>38</sup>Cl. UvA (1978)

de Jong. D. Chemical effects of the radioactive decay <sup>76,77</sup>Kr - <sup>76,77</sup>Br reactions of recoil Bromine in the gas fase. UvA (1982)

> mean electromatics endant for projection of radionuclides, of Laheled Compound Radiopharm N3 (1977),242

31 K. L. Borcho de Mesquita, LA, Ski, C. Uniterel Experiments on the possible use of the 2.31 Artry genema ray of 71 second \*\*0 for addition analysis of action tion analysis of across for 1975) 531.

P.W.E. Louwrier et al.
 Empirierung austern
 Empirierung austern
 Empirierung Methy 157 (1978) 381.