

# Het Zeeman-effect.

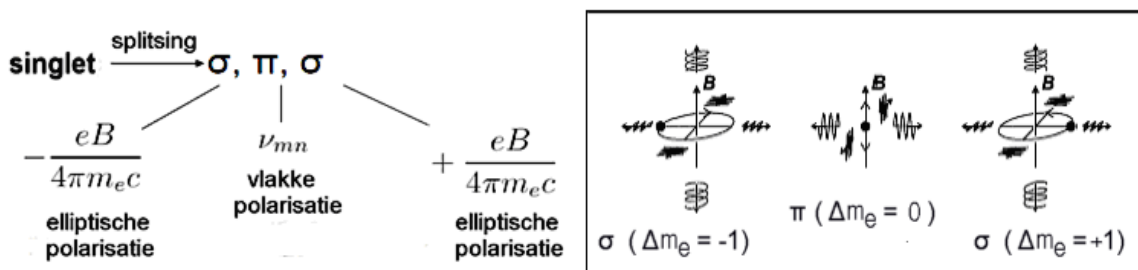
Door Willy Acke, ON4AW



Stelling van Lorentz: De trilling van ionen (=>bedoeld worden hier: elektronen) binnen een atoom zijn verantwoordelijk voor het door het atoom uitgezonden licht.

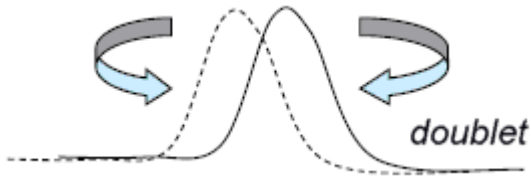
Het Zeeman-effect is genoemd naar de Nederlandse natuurkundige Pieter Zeeman. Het Zeeman-effect is het verschijnsel waarbij spectraallijnen van een atoom, dat vanuit een aangeslagen toestand licht uitzendt, worden opgesplitst in aanwezigheid van een sterk magnetisch veld. Het uitwendig magnetisch veld maakt dat de twee mogelijke spin-toestanden van het elektron binnen in het atoom, in energie gaan verschillen volgens de toestand waarbij het magnetisch veld ertegen of ermee gericht is. Het betreft hier de kwantisatie in de elektronenbanen rond het proton binnen een atoom, zoals vooropgesteld door de kwantummechanica.

In het najaar van 1896 deed de Leidse natuurkundige Pieter Zeeman een belangrijke ontdekking: hij toonde aan dat spectraallijnen zich verbreden onder invloed van een magnetisch veld. Vrijwel onmiddellijk na deze ontdekking slaagde Zeeman's Leidse collega Hendrik Antoon Lorentz erin een theoretische verklaring voor het verschijnsel te vinden. Lorentz' theorie (uit 1895) impliceerde dat de waargenomen verbredening in werkelijkheid een splitsing in twee (= 'doublet') of drie (= 'triplet') afzonderlijke lijnen was [1 enkele lijn heet 'singlet'].



Hierin is  $e$  de lading van het elektron,  $m_e$  de massa ervan, en  $B$  de sterkte van de magnetische inductie in het magnetisch veld.  $\nu$  is de frequentie waarop gemeten wordt,  $c$  is de lichtsnelheid 300000 km/s.  $\sigma$  en  $\pi$  zijn in dit geval benamingen voor de soort polarisatie.

Zeeman bekeek een lijn-triplet onder een rechte hoek t.o.v. een magnetisch veld en een lijn-doublet evenwijdig met een dergelijk veld. In een vervolggexperiment met betere apparatuur werd deze splitsing enige tijd later ook werkelijk in de praktijk waargenomen, en voor de ontdekking en verklaring van wat later het 'Zeeman-effect' werd genoemd, kregen Lorentz en Zeeman zes jaar later de Nobelprijs voor natuurkunde.



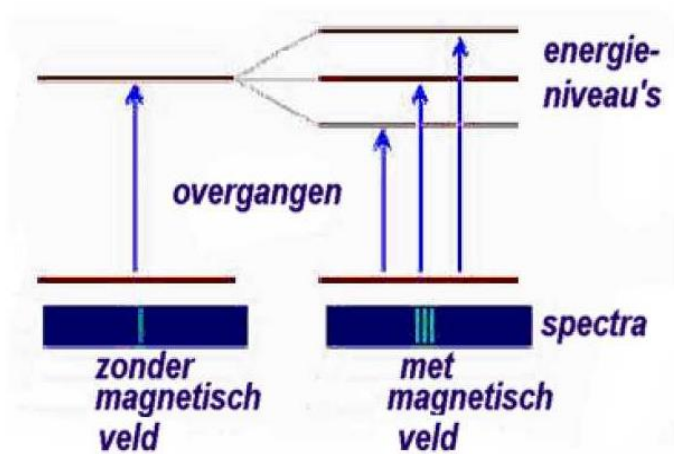
Op de 21 cm frequentie van het waterstofatoom in absorptie [in het bijzonder in HI wolken in de sterrenkunde], werd Zeeman-splitsing voor het eerst ontdekt in 1969 door de eveneens Nederlandse natuurkundige Verschuur, en weinig later ook in emissie. Men vond dat de splitsing zich ook voordeed op de OH- 18 cm lijn en op de 6 cm lijn bij H<sub>2</sub>CO, in interstellaire gassen.

**Samengevat** komt de Zeeman/Lorentz theorie op het volgende neer: Elk atoom bevat één enkel ion [lees: een negatief geladen electron] dat harmonisch trilt om zijn evenwichtsstand. Bij het erop toepassen van een magnetisch veld zal het deeltje een extra kracht ondervinden, loodrecht op zijn snelheid en op het veld. Uit de bewegingsvergelijking van het deeltje volgt in dit geval, dat in plaats van een enkele karakteristieke trillingsfrequentie er nu driefrequenties optreden: de oorspronkelijke, een hogere en een lagere. De middelste frequentie kan geïnterpreteerd worden als behorende bij een lineaire trilling in de richting van het veld, de andere, als twee in tegengestelde richting lopende cirkelvormige bewegingen in het vlak loodrecht op het veld. Voor het verschil tussen de frequentie van de nieuwe trillingen en de oorspronkelijke, vond Lorentz:  $\Delta\omega = \frac{eH}{2m}$  [dit is een variante op de bovenstaande, in andere dimensies:  $\frac{eB}{4\pi m_e c}$ ]. Hierin is e de lading van het ion, m de massa ervan, en H de sterkte van het magnetisch veld. Wat heeft dit voor gevolgen voor het door de atomen uitgezonden licht? De theorie van het elektromagnetisme leert dat een geladen oscillator, straling uitzendt in alle richtingen behalve in zijn eigen trillingsrichting.

Voor de straling uitgezonden in een magnetisch veld door een trillend elektron binnenin een atoom, betekent dit het volgende. Wanneer in de richting van het veld wordt gekeken, wordt alleen straling waargenomen afkomstig van de twee circulaire trillingen in het vlak loodrecht op het veld; de lineaire trilling draagt niets bij. De twee circulaire trillingen veroorzaken twee spectraallijnen aan weerszijden van de oorspronkelijke lijn, die niet langer zichtbaar is.

Bij dit zogenaamde 'longitudinaal' effect ontstaat dus een 'doublet'. Kijkt men loodrecht op het veld, dan is in de eerste plaats de trilling in de richting van het veld zichtbaar. Die produceert een spectraallijn met de oorspronkelijke, ongewijzigde frequentie. De twee circulaire trillingen dragen ook bij: van opzij bekeken lijken ze twee lineaire trillingen met verschillende frequenties. Bij dit 'transversale' effect ontstaat dus een stelsel van drie spectraallijnen: een 'triplet', met een lijn op de oorspronkelijke plaats en twee lijnen daar symmetrisch naast.

Uit het bovenstaande volgt ook dat de twee componenten van de longitudinale trilling, een circulaire polarisatie moeten vertonen (de ene links-circulair draaiend, de andere rechts-circulair), terwijl de drie componenten van het triplet allen lineair gepolariseerd zijn: de middelste in de richting van het veld, de andere loodrecht daarop.



*Voorbeeld van Zeeman-splitsing. Wanneer een atoom zich in een magnetisch veld bevindt, dan splitsen de verschillende energieniveau's van dit atoom zich in meerdere energieniveau's, en splitsen zelfs de spectraallijnen zich! Deze splitsing noemt men het Zeeman-effect.*

Verschiedene proeven hebben duidelijk gemaakt, dat de absorptie- en ook de emissielijnen van een gasvormige stof, door magnetische krachten verbreed worden. Men wist niet waarom duiven na een lange vlucht altijd terugkeerden naar hun woonkot, maar met het Zeeman-effect is men te weten gekomen dat ze vliegen op het aardmagnetisch veld, waardoor een proteïne in hun ogen zodanig wordt beïnvloed, dat ze zonder aarzelen de juiste richting kiezen om te vliegen.

#### **Voorbeeld uit de sterrenkunde.**

Een voorbeeld zijn de sterke magnetische velden van zonnevlekken. Wanneer men het spectrum van licht afkomstig van een zonnevlek bekijkt, dan merkt men de splitsing van bepaalde spectraallijnen op. Dit komt doordat er zich bijzonder sterke magneetvelden in een zonnevlek bevinden.

#### **Verdere commentaar:**

De waterstof-lijn vertoont een Zeemansplitsing in aanwezigheid van een magnetisch veld.

Als het magnetisch veld gericht is langs de lijn van het zicht, wordt de lijn opgesplitst in linker- en rechterhand circulair gepolariseerde componenten, gescheiden door een 2- tot 8 MHz per gauss [deze cgs is omzetbaar in MKS] magneetveld. Als het veld zich verwijderd van de waarnemer en de gezichtslijn kijkt naar de waarnemer, wordt de linker component verplaatst naar iets boven de 1420 MHz [=de 21 cm waterstof-frequentie] en de rechter component wordt evenveel verplaatst naar lagere frequenties. De verplaatsing wordt omgekeerd, wanneer de zin van de veldvector wordt omgekeerd of als de lijn wordt gezien in een opslorings-toestand, dus in absorptie, en niet meer in emissie zoals daarnet verondersteld.

Absorptie is de gevoeligste toestand, omdat dan de daadwerkelijke signaalsterkte van een individuele lijn versterkt wordt in de Melkweg als een silhouet tegen een achtergrond van individuele wolken. Deze worden doordrongen door relatief homogene magnetische velden, zodat de spectraallijnen een smal profiel behouden. (des te smaller naarmate het magnetisch veld zwakker is). De sterkte van de magnetische velden in de Melkweg bedraagt slechts een miljoenste van een gauss tot ongeveer 25 keer deze waarde, maar dit blijkt toch sterk genoeg te zijn om het Zeeman-effect te veroorzaken.

Metingen werden verricht op Melkweg- absorptielijnen van onder meer de sterren Cassiopeia, Stier A (Taurus A), Cygnus A en Sagittarius A, en een paar geïsoleerde wolken.

De resultaten zijn in overeenstemming met de toestand die heerst langs de spiraalarmen van sterrenstelsels, waarin een magnetisch veld bestaat met een sterkte van een paar miljoensten van een gauss.

In de Melkweg zijn de gesplitste lijnen gescheiden zijn door ongeveer 10 Hz, dat is niet veel omdat het magnetisch veld zwak is. De afstanden tussen de componenten neemt namelijk lineair toe met de sterkte van het magnetisch veld.

De breedte van de spectrale lijn van een individuele stof- of gaswolk kan daarentegen 100 tot 1000 Hz bedragen en dan wordt het moeilijk twee pieken gescheiden van elkaar waar te nemen door het slecht oplossend vermogen van een radiotelescoop of van een smalle band - spectrometer.

In de praktijk maakt men dan van de tegengestelde richting van de circulaire polarisatie gebruik om de twee componenten te scheiden in de ontvanger van de radiotelescoop die voorzien is van een circulair gepolariseerde antenne die voortdurend geschakeld wordt tussen de twee polarisatie-componenten op de gekozen frequentie waarop de ontvanger is afgestemd. De uitgangsspanning van de ontvanger in de twee geschakelde toestanden wordt continu synchroon omgekeerd, voorafgaand aan een integratiekring.

Als de spectraallijn wordt gesplitst door het Zeeman-effect, schommelt de middenfrequente spanning vóór de detector van de superheterodyne ontvanger van negatief naar positief rond de middenfrequentie, afhankelijk van de polarisatie. Een pen-recorder aan de uitgang van de ontvanger kan deze wisselingen, omgezet in een amplitude met een sterkte, afhankelijk van de polarisatie, in een grafiek omzetten.

### **Spectrometer.**

De detectie van de splitsing vereist de spreiding of ontleding van het uitgestraalde licht door het gebruik van bijvoorbeeld een prisma. De Zeemansplitsing is vrij klein, en dat is de reden waarom een hoge resolutie nodig is, die kan verwezenlijkt worden met een Fabry-Perot spectrometer door het analyseren van de eigenschappen van de uitgezonden fotonen, namelijk de golflengte en het type polarisatie.

Energie-splitsing door verandering van de grootte van het magnetisch veld kan gemeten worden door het sturen van licht met een golflengte van 546,07 nm doorheen een Fabry-Perot interferometer, en het meten van de interferentie die de structuur van een atoom toelaat op twee verschillende elektronische magnetische dipoolmomenten. Het eerste moment vindt plaats bij de spin die eigen is aan het elektron, terwijl de tweede een gevolg is van de baanbeweging van dat deeltje rond de protonkern, afgeleid van het impulsmoment.

### **Apparatuur: de Fabry-Perot interferometer.**

Dit toestel is gebaseerd op het vermogen om kleine veranderingen in de waarde van de energie van fotonen vast te stellen. In feite is interferometrie niet beperkt tot enkel fotonen, om hoge-resolutie interferentie patronen geschikt voor een meting te creëren.

Er wordt gemeten met een gevoelige Hall-effect sensor. [met Hall effect-plaatjes kan men een magnetische veldsterkte  $H$  of magnetische inductie  $B$  meten]. Het beeld van de interferometer wordt door twee lenzen en tenslotte een polarisatiefilter naar een CCD-camera geleid.

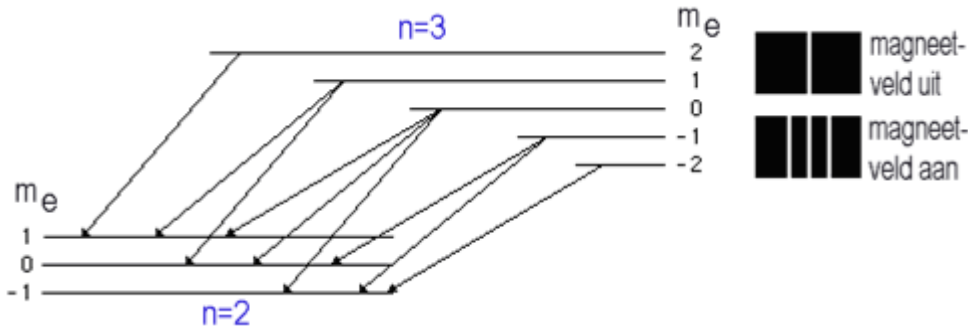
De interferentie-ringen, zoals vastgelegd door de CCD-camera, zijn kenmerkend voor de Zeemansplitsing die duidelijk zichtbaar is. De sterkte van het magnetische veld van een dergelijke meting is bv. 11880 gauss.



*Mogelijke opstelling om het Zeeman-effect te meten en zichtbaar te maken.  
(meer uitleg over de in deze opstelling toegepaste componenten volgt hieronder)*

Men vindt bv. negen overgangen die samen de 546,07 nm spectrale lijn vertegenwoordigen, waarvan er drie met  $\Delta m_e = 0$  en drie elk  $\Delta m_e = \pm 1$  overgangen voorstellen.

Lineair gepolariseerd licht in de as van het magnetisch veld selecteert alleen licht van  $\Delta m_e = 0$  overgangen, die lineair gepolariseerde fotonen uitzenden.

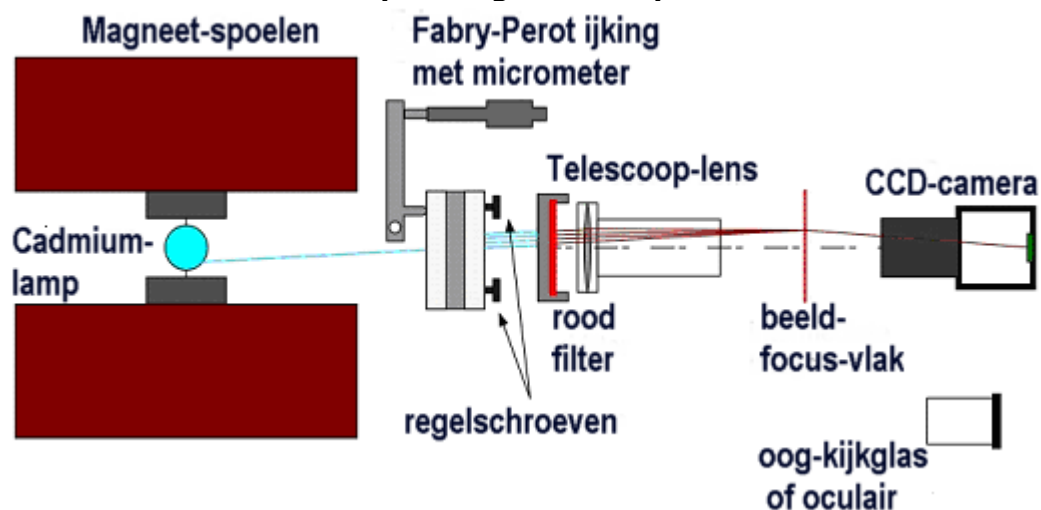


Op het ogenblik dat een uitwendig magnetisch veld wordt toegepast, splitsen de dunne spectrale lijnen die de overgang van baan  $n = 3 \rightarrow 2$  van het elektron (dat terugvalt van baan 3 naar baan 2, met uitstraling van een foton) in een waterstofatoom voorstellen, in meerdere dicht bij elkaar gelegen lijnen.

De Zeeman-splitsing is toe te schrijven aan de wederwerking tussen het magnetisch veld en het magnetisch dipoolmoment dat samengaat met het hoekmoment dat het elektron beschrijft op zijn baan. In afwezigheid van een magnetisch veld, hangt de energie die het atoom bezit enkel af van het kwantum-nummer  $n$ , en de straling heeft op 1 enkele golflengte plaats.

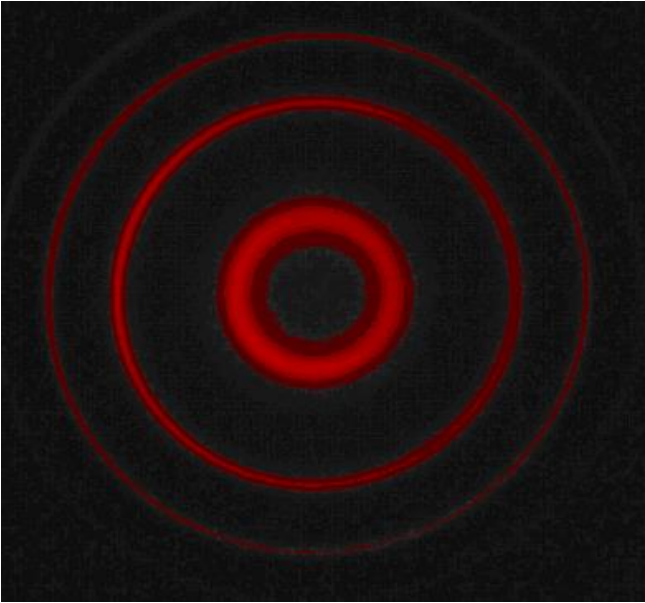
Een CCD-camera wordt gebruikt om gegevens te verzamelen over de interferentie-ringen. Vanwege de lage gevoeligheid van de CCD-camera kunnen 500 beelden voor elk stel ringen de ruis verminderen, een helderder beeld opleveren en de achtergrondruis verkleinen die inherent is aan de meeste CCD-camera's. De beelden werden vervolgens verwerkt en ontleed door een aangepast computerprogramma.

**Voorbeeld van een meetopstelling en meet-procedure:**



**Opstelling om het Zeeman-effect experimenteel te meten:**

Een cadmiumlamp wordt geplaatst tussen de polen van een elektromagneet. Het door de lamp uitgestraalde licht passeert een Fabry-Perot ijksysteem. Een rood filter dient voor het isoleren van de rode cadmiumlijn. In het focusvlak van een lens ( $f = 183 \text{ mm}$ ) zullen cirkelvormige ringen te zien zijn. Dit beeld kan ofwel weergegeven worden met behulp van een kijkglas of oculair of is te bekijken via een CCD-camera.



Om de proef te kunnen verwezenlijken en de gegevens te kunnen analyseren, is het nodig de volgende taken uit te voeren:

1. Bepaal het magneetveld op de plaats van de lamp.
2. Regel de Fabry-Pero ijking bij met de uitlijning-schroeven.
3. Regel de CCD camera voor het beste beeld.

### **1. Magnetische veldmeting.**

Schroef de cadmiumlamp uit de houder. Schakel de waterkoeling in voor de elektromagneet. Schakel de voeding van de magneet in en verhoog geleidelijk de stroom tot 10 A.

Gebruik een gauss-meter om een behoorlijke waarde van de magnetische inductie  $B$  in te stellen, halverwege tussen de polen. De juiste waarde is de maximale waarde, bij te regelen op het ogenblik dat de sonde loodrecht op de magnetische veldlijnen wordt gehouden.

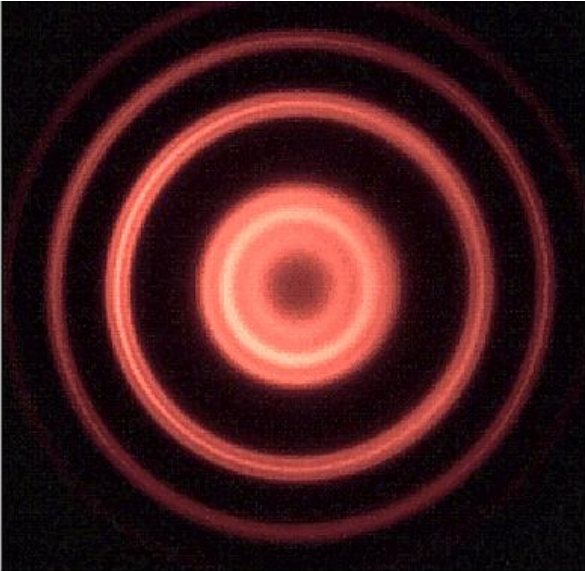
Schakel de voeding uit en Schroef de cadmiumlamp vast in haar houder, zonder de grootte van de spleet tussen de polen van de magneet te wijzigen, en breng de lamp onder spanning.

Het duurt ongeveer 5 tot 10 minuten om ze volledig op te warmen en ze trekt dan een stroom van 0,9 A.

### **2. Aanpassen van de ijking en registreren van de gegevens.**

De as van de interferometer uitlijnen met de cadmium-lamp. Zonder het rode filter en de telescooplens op hun plaats, verdraai de aanpassingsschroeven tot een duidelijk cirkelvormig beeld zichtbaar wordt. De micrometer-schroeven (grof en fijn) laten een goede aanpassing toe. Monteer de telescooplens. Zelfs zonder oculair of camera, moet men door deze lens een mooi cirkelvormig beeld zien. De afstand tussen het einde van de telescooplens en de cameralens moet ongeveer 11 cm bedragen. De focusering van de camera aanpassen om het scherpste beeld te verkrijgen. Op dat ogenblik het rode filter monteren op de telescooplens. Op dat ogenblik moet men het hierboven voorgestelde cirkelvormig patroon scherp kunnen zien. Dat is dus een weergave zonder toegepast magnetisch veld. Neem hiervan een foto, opgeslagen op de harde schijf van de computer.

**3. Schakel het magnetisch veld in**, door de stroom op te voeren tot de eindwaarde van 10 A. Op dat ogenblik verschijnen de franjes of interferentielijnen, die de splitsing van het beeld aangeven volgens het door Zeeman voorspelde effect:



Neem opnamen van dit beeld met de CCD-camera en ontleedt het resultaat volgens de maatstaven die Zeeman vooropgesteld had.

-----

***Geraadpleegde werken, referenties:***

- 1) Nobel price physics laureates 1902: Zeeman Peter, door Alex Povilus.
- 2) J. C. Kenj - Circular polarization of thermal radiation in a magnetic field. Ap. J. 162 (1970).
- 3) J. R. P. Angel - Magnetism in white dwarfs, Ap. J. 216 (1977) Mentor -A. Cader.
- 4) The discovery of the electron: The Zeeman effect door A.J. Kox, Institute of Theoretical Physics, University of Amsterdam, sept. 1996.
- 5) Zeeman Effect - Lab exercises Pieter Zeeman, door Franziska Beyer, Aug. 2010, in Physics 443.
- 6) De ontdekking van het Zeeman-effect, door A.J. Kox en W.P. Troelstra, uit het Zeeman Archief, dec. 2003.

=====