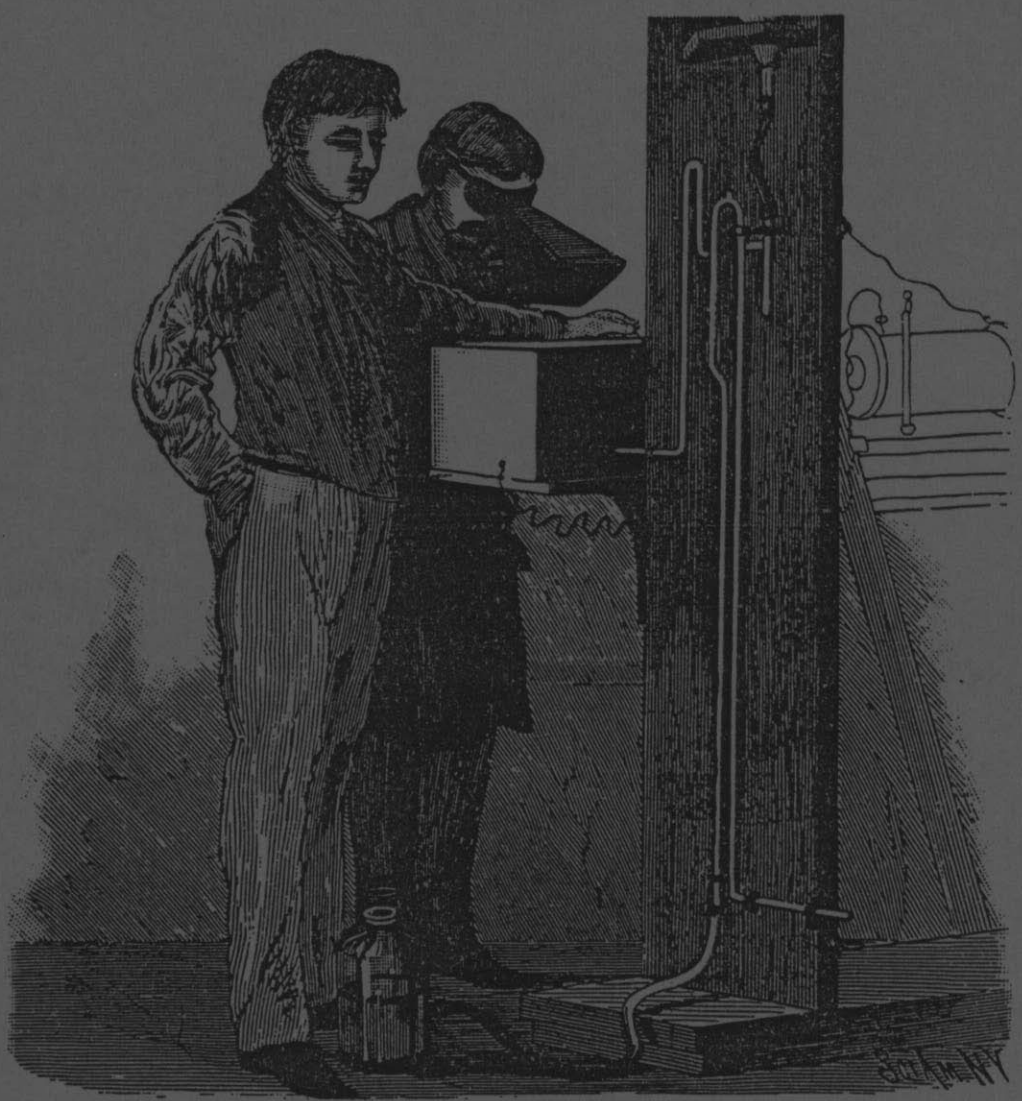
DE NATUURKUNDE VAN

ROND 1900



vwo bovenbouw

natuurkunde projekt

PLON UvA RUG

VWO-BOVENBOUW NATUURKUNDE PROJEKT

Het VWO-bovenbouw curriculum in wording bestaat uit thema's, blokken en onderzoekperiodes. In de thema's staat een thema-vraag uit de dagelijkse omgeving, de techniek, de samenleving of de wetenschap centraal.
In blokken worden belangrijke fysische onderwerpen in hun samenhang gegeneraliseerd.

OVERZICHT VAN HET EXPERIMENTELE CURRICULUM

4e klas	5e klas	6e klas
Lijfwerk	Sport	Satellieten
Muziek	Motoren	Blok Elektromagnetische Straling
Verkeer	Blok Arbeid	Hoe ontwikkelt de weten-schap zich?
Blok Bewegingen	Rond 1900	Open onderzoek
Het Weer	Automatisering	Blok Repeteren voor het Examen
Energie	Blok Potentiaal	
	Ioniserende Straling	
	Blok Deeltjesmodellen	
	Keuze-onderwerpen	

Experimenteel natuurkunde thema voor de 5e klas VWO. Samengesteld door medewerkers van het VWO-bovenbouwprojekt en projektleraren.

© 1985 Rijksuniversiteit Utrecht, Universiteit van Amsterdam, Rijksuniversiteit Groningen

PLON, Lab. voor Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA Utrecht
Didaktiek Natuurkunde UvA, Nieuwe Achtergracht 170, 1018 WV Amsterdam
Didaktiek Natuurkunde RUG, Landleven 12, 9747 AD Groningen

DE NATUURKUNDE VAN

ROND 1900

1 Oriëntatie 5

DEEL 1 GEVESTIGDE THEORIEEN 15

2 Deeltjestheorie 17

3 Golftheorie 37

DEEL 2 NIEUWE STRALEN 67

4 Kathodestralen 69

5 X-stralen 85

6 Radioaktieve stralen 101

DEEL 3 GOLVEN EN DEELTJES 109

7 Lichtdeeltjes 109

8 Elektronengolven 119

9 Vooruitblik naar de quantummechanica 123

1 ORIENTATIE

INHOUD:

1.1	De natuurkundigen rond 1880	5
1.2	Over dit thema	6
1.3	Zien wat je verwacht te zien?	7
1.4	Een middeleeuws document decoderen	10
1.5	Algemene regels	12

1.1 DE NATUURKUNDIGEN ROND 1880

Aan het einde van de 19e eeuw leek het of de natuurkunde bijna af was. De mechanica van Newton was tot in de details uitgewerkt; bewegingen, krachten, botsingen, dat alles kon men uitrekenen. Het vakgebied van de elektriciteit en het magnetisme was verkend door vooraanstaande fysici als Ampère en Faraday. Maxwell had alle verschijnselen die in hun experimenten gevonden waren in vier prachtige (maar moeilijke) vergelijkingen samengevat, van waaruit alle elektro-magnetische verschijnselen verklaard konden worden. De ruim een eeuw durende discussie of licht een golf- dan wel een deeltjesverschijnsel was, was opgelost. Young en Fresnel hadden overtuigende bewijzen gevonden dat licht een golfverschijnsel is.

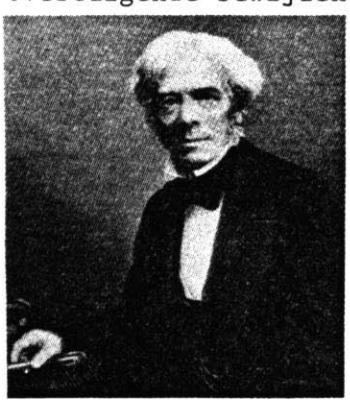


fig. 1.1 Michael Faraday (1791-1867) was een belangrijk experimentator op het gebied van het elektro-magnetisme.



fig. 1.2 James Clerk Maxwell (1831-1879) vatte alle elektro-magnetische verschijnselen samen in één theorie.



fig. 1.3 Ludwig Boltzmann (1844-1906) gaf de kinetische gastheorie een hechte, wiskundig-statistische basis.

De gaswetten waren verklaard door Boltzmann met nieuwe, statistische methoden en warmte was een vorm van energie gebleken. Wat was er al niet verklaard?
Als ze maar genoeg rekentijd hadden, konden ze alle fysische problemen oplossen. De rekenvaardigheid was echter een beperkende faktor. En er waren een paar kleinere verschijnselen die ze niet geheel begrepen. Ze waren er bijna, de fysici van rond 1900. Dachten ze .....
Tegen deze optimistische visie dat de natuurkunde wel alle wereldproblemen zou uitrekenen en oplossen kwam verzet. De natuurkunde werd als schuldige aangewezen voor een hoop misstanden die in die dagen vooral in de industrie heersten. Binnen de natuurkunde zelf richtte zich de kritiek op het atomisme, het idee dat alle materie uit atomen bestaat, waarvan je de beweging op basis van de wetten van Newton kunt voorspellen. In dat klimaat werd er plotseling een stroom nieuwe ontdekkingen gedaan. De aanhangers

van het idee dat alle materie uit deeltjes bestaat moesten het opnemen tegen natuurkundigen die in golven geloofden.

1.2 OVER DIT THEMA

de onderwerpen van dit thema

Het begon in 1895 met de ontdekking van *Röntgenstralen*, gevolgd in 1896 door de *ontdekking van het elektron* en de eerste kennismaking met *radioaktiviteit*. Wat was er aan de hand in de natuurkunde dat er ineens zoveel nieuwe ontdekkingen werden gedaan?

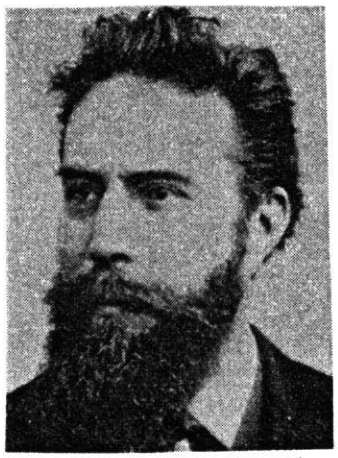
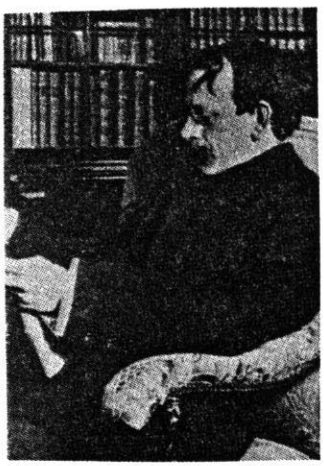


fig. 1.4 Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), de ontdekker van de X-stralen.



1.5 Henri Becquérel (1852-1908) ontdekte de radioaktiviteit van uraniumzouten.



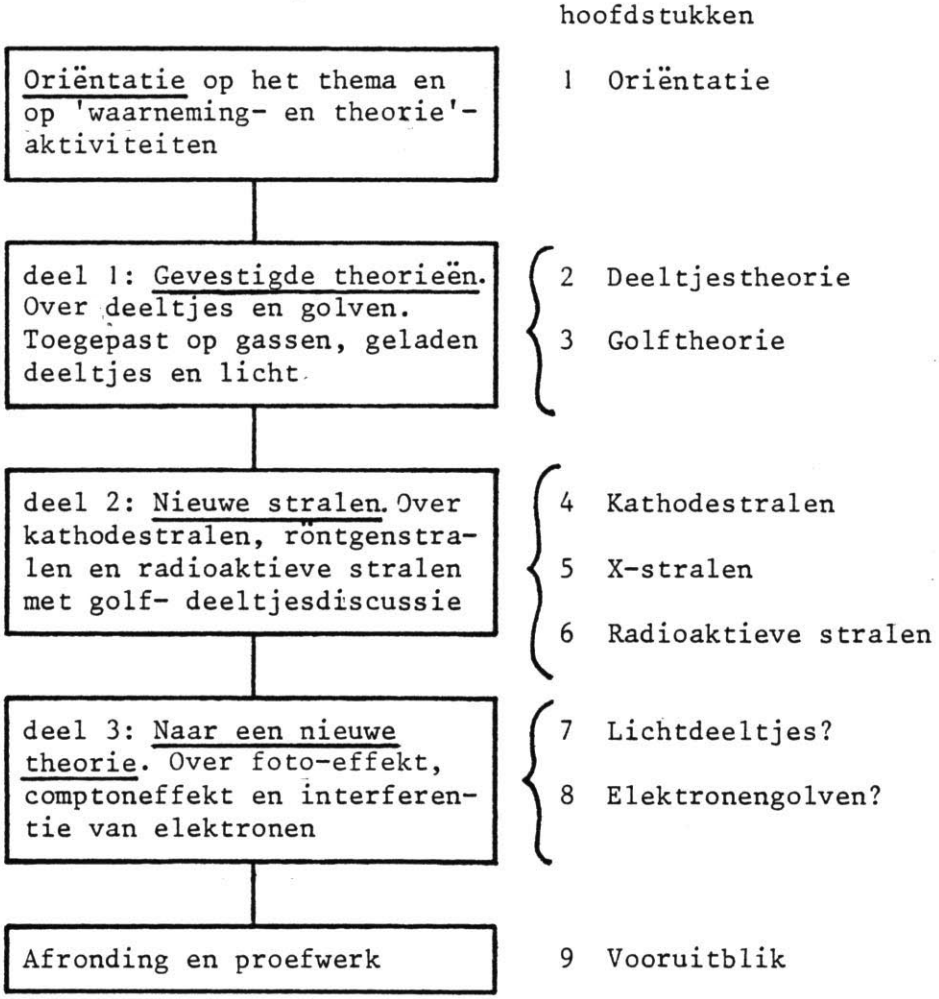
1.6 Joseph John Thomson (1856-1940) ontdekte het elektron.

In dit thema zullen we de ontwikkelingen op deze drie gebieden volgen vanuit een speciaal gezichtspunt.
Hoe vindt de ontwikkeling van nieuwe natuurkundige begrippen plaats? Wat is de rol van personen, van de wedloop tussen groepen of landen daarin? Wat is de rol van de techniek?
Bij het beantwoorden van die vragen zullen we niet alleen naar de natuurkundigen kijken, naar de oude theorieën, de nieuw ontdekte verschijnselen en de pogingen om die met nieuwe theorieën te beschrijven, we zullen ook enkele 'regels' over de ontwikkeling van de wetenschap (uit de *wetenschapsfilosofie*) aandragen waarmee je kunt kijken naar de mensen en de groepen die met de nieuwe verschijnselen bezig zijn. Hoewel in dit thema veel en soms moeilijke natuurkunde staat, gaat het dus niet alleen over de natuurkunde, maar ook over de natuurkundigen van rond 1900.
Het gevolg is wel dat je in dit thema conclusies van de natuurkundigen rond 1900 zult tegenkomen, die later in dit thema onjuist of onvolledig blijken te zijn. Dat ben je misschien niet gewend. Laat je er echter niet door in verwarring brengen. Op grond van de historie kun je immers nu al zeggen, dat een deel van onze huidige theorieën over misschien 10 jaar al onjuist blijkt te zijn. Maar ... daarmee zijn ze niet zinloos geweest. Ze zijn een onmisbare schakel om verder te komen in de natuurkundige theorie.

wat ga je in dit thema doen?

Het eerste hoofdstuk gaat over de 'regels' uit de wetenschapsfilosofie. Je gaat enkele aktiviteiten doen waarmee je enkele van die regels zelf ervaart.

In het tweede en derde hoofdstuk ga je de theorieën over golven en deeltjes leren. Die eindigen met een lijst van golf- en deeltjeseigenschappen. Het vierde hoofdstuk gaat over kathodestralen. Daarin staat een lijst met eigenschappen, waar zowel golf- als deeltjeseigenschappen in te herkennen zijn. Er kunnen echter nog fouten in die lijst zitten. In de klas ga je het debat over het golf- dan wel deeltjeskarakter van kathodestralen naspelen. Nieuwe proeven met de stralen geven argumenten voor zowel het ene als het andere model tot je de proef en de berekeningen van Thomson onder ogen krijgt.
In het vijfde hoofdstuk kom je de ontdekking van Röntgen tegen. Die ontdekking had tot gevolg dat er nog meer ontdekkingen volgden zoals die van Becquérel, die kort in het zesde hoofdstuk aan de orde komt.
Het zevende en achtste hoofdstuk maken de sprong van 1900 naar ca 1925. In die tijd worden nieuwe ontdekkingen gedaan die de zekerheden over licht, elektronen en röntgenstralen opnieuw ter discussie stellen. Een nieuwe theorie moet gevonden worden om deeltjes- en golfverschijnselen met elkaar te verzoenen: de quantumtheorie.



1.3 ZIEN WAT JE VERWACHT TE ZIEN?

Sommige ontdekkingen lijken een kwestie van geluk. Het ontdekken lijkt achteraf erg simpel. Een voorbeeld daarvan is Röntgens ontdekking van de X-stralen.
Andere ontdekkingen verlopen heel moeilijk en eisen jarenlang nadenken en

experimenteren. Thomsons ontdekking is er zo één. Hij had een idee in zijn kop en experimenteerde nèt zo lang tot hij het zag.
Waar zit nu de reden van het verschil tussen die twee? Laten we daartoe preciezer naar Röntgen en Thomson kijken.

Thomson: waarnemen vanuit een theorie

Thomson had een idee over de aard van kathodestralen. Om dat idee te controleren deed hij allerlei proeven, maar met nogal teleurstellende uitkomsten. Hij weet die uitkomsten niet aan onjuistheid van zijn idee, maar aan slechte experimentele omstandigheden, met name het feit dat de kathodestraalbuizen die hij gebruikte, niet een voldoende hoog vacuum hadden. Daaraan ontleende hij zijn drang om verder te experimenteren en zoals we in dit thema zullen zien, met succes.

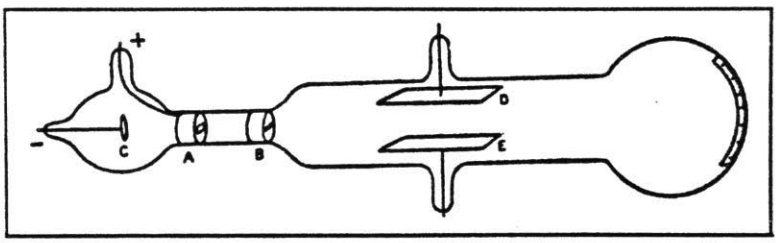


fig. 1.7 De speciale kathodestraalbuis van Thomson.

Röntgen: één flitsend idee

Röntgen beschikte in november 1895 over alle noodzakelijke apparatuur voor zijn ontdekking - een kathodestraalbuis en fotografische platen. Veel natuurkundigen waren op zoek naar de aard van de kathodestralen die *in* de buis ontstaan. Röntgen nam echter waar dat bariumplatinacyanaat oplichtte *buiten* de buis. In een flits bracht hij dat in verband met het zwarten van zijn fotografische platen. Fotografische platen, zo wist iedere natuurkundige uit de laatste jaren van de 19e eeuw, moet je niet in de buurt van kathodestraalbuizen houden. Röntgen besefte ineens dat er stralen uit de buis naar de fotografische plaat moesten gaan. Hij besloot de eigenschappen van die stralen te onderzoeken. Hij wendde zijn aandacht dus af van het verschijnsel waarop al zijn collega's gericht waren en keek met een frisse blik naar het verschijnsel dat de anderen niet hadden willen zien. Toen had hij maar 6 weken nodig om de belangrijkste eigenschappen van zijn X-stralen op te schrijven

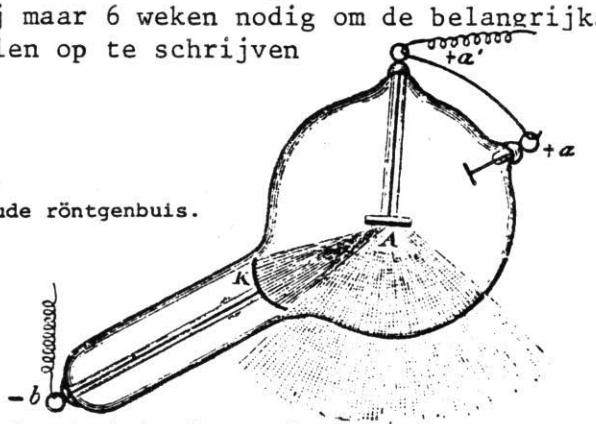


fig. 1.8 Een oude röntgenbuis.

In de volgende aktiviteit ga je naar speelkaarten kijken om na te gaan of je 'onbevangen' naar een verschijnsel kunt kijken of dat je vanuit 'oude kennis' iets (niet) ziet.

1 EEN EXPERIMENT MET KAARTEN

Je leraar laat je speelkaarten zien.
- schrijf op welke kaarten je gezien hebt
- hoe reageerden jij en de anderen toen jullie de kaarten nog eens zagen?
- schrijf op wat er precies aan de hand was met de kaarten
- wat is je conclusie ten aanzien van je waarnemen?

Uit dit experiment blijkt dat je de speelkaarten in grote lijnen snel herkent: vanuit wat je al van speelkaarten weet, ben je gaan kijken. Maar onverwachte wijzigingen zie je snel over het hoofd, als de dingen op het eerste gezicht in jouw 'theorie' passen. Pas als je weet waarop je moet letten, bijvoorbeeld: welke vorm moet bij welke kleur passen, dan kan je herkennen dat je niet alles zag van wat je dacht te zien.
Met de volgende aktiviteit kan je nog eens oefenen hoe je met een nieuw idee een probleempje kunt oplossen.

2 VIER LIJNEN DOOR NEGEN PUNTEN?

Waarschijnlijk kan je de puzzel onder a niet onmiddellijk oplossen. Besteed *minder dan een halve minuut* aan a en doe dan achtereenvolgens b en c.

a. Het is makkelijk om 9 punten door 5 lijnen te verbinden, zoals in fig. 1.9 aangegeven. Hoe kun je de 9 punten door slechts 4 lijnen verbinden zonder je pen van het papier te halen of dubbele lijnen te trekken? De oplossing van fig. 1.10 is dus fout.

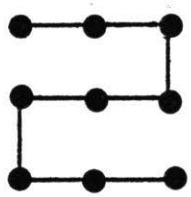


fig. 1.9 Negen punten verbonden met vijf lijnen.

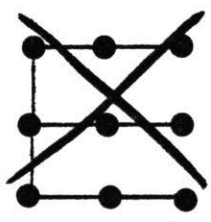


fig. 1.10

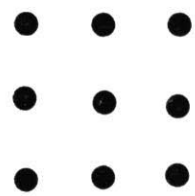


fig. 1.11 Met vier lijnen de negen punten verbinden?

b. Los nu eerst het volgende probleempje op:
Op de hoekpunten van een zwembad zijn bomen geplant. De bomen vormen een vierkant. De eigenaar wil nu het volgende: de bomen moeten blijven staan, maar het zwembad moet een twee keer zo groot oppervlak krijgen èn moet binnen de vier bomen blijven passen. Kan dat? Teken het!

c. Welk nieuw idee kan je uit de oplossing van b halen om ook in het probleempje a toe te passen? Probeer het maar!

3 WAARNEMINGSREGELS

Kun je in je ervaringen met de twee vorige aktiviteiten de volgende drie regels herkennen, die ontleend zijn aan de psychologie van het waarnemen?
- je waarnemen wordt gericht door wat je al denkt te weten
- je hebt de neiging om nieuwe verschijnselen die in strijd zijn met wat je al weet, te ontkennen
- een nieuwe verklaring maakt dat je beter gaat waarnemen.

Geef van deze drie regels elk een voorbeeld.

1.4 EEN MIDDELEEUWS DOCUMENT DECODEREN

We hebben gezien dat 'theorieën' je in staat stellen dingen waar te nemen. Maar, aan de andere kant kunnen ze ook een hinderpaal vormen bij het ontdekken van nieuwe verschijnselen. De onderstaande aktiviteiten rond het decoderen van een oud document ondersteunen dit idee nog eens.

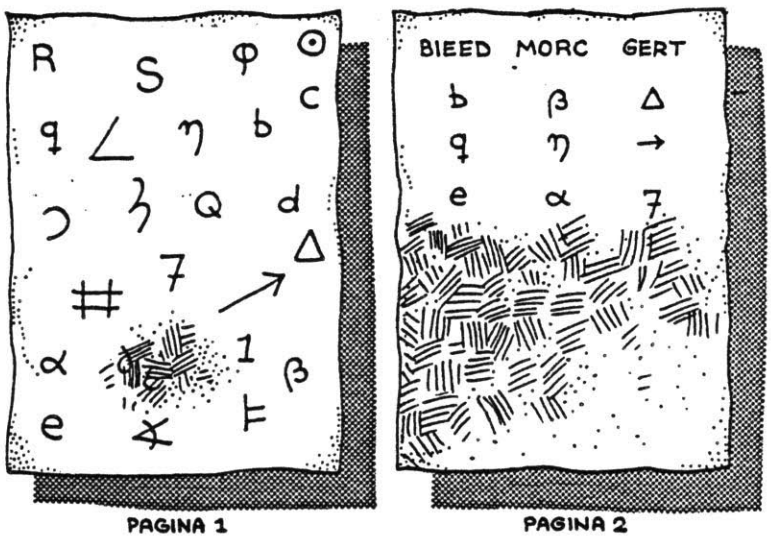


fig. 1.12 De twee bladzijden van het middeleeuwse document met raadsels. Door waterschade is een groot stuk van de tweede bladzijde onleesbaar.

In een oud middeleeuws document zijn de volgende twee tamelijk raadselachtige pagina's gevonden. Het document uit fig. 1.12 is onderdeel van een verzameling raadsels. De eerste pagina bevat een chaotische wirwar van symbolen, zoals je ziet is deze pagina vrij ongeschonden gebleven. Met de tweede pagina is dat niet het geval. Op de bovenste helft zijn drie kolommen te zien, maar de onderste helft is door waterschade onleesbaar geworden. Boven de kolommen staan drie raadselachtige woorden, te weten *bieed*, *morc* en *gert*.
Een schriftgeleerde wil deze pagina's ontcijferen. De schriftgeleerde weet al dat het om een spelletje of raadsel gaat. Misschien, zo redeneert hij, is het de bedoeling uit te vinden hoe de symbolen in de kolommen geordend zijn. De eerste pagina bevat dan alle mogelijke symbolen, terwijl op de tweede pagina de ordening staat. Hoe zou de ordening in elkaar zitten?

4 ORDENINGSTHEORIE

a. Wat is het gemeenschappelijke 'ordenings-principe' van de symbolen in de kolom *bieed*? En in *morc*? En in *gert*?
b. Teken, gebruik makend van de ordenings-principe, op een kopie van pagina 2 in welke rij de andere symbolen van pagina 1 van het document moeten staan.

Onze schriftgeleerde raakt nu zeer geïnteresseerd in dit raadsel. Hij besluit om het document in een laboratorium te laten onderzoeken. Hij meent dat uit de rafels en krassen op de onleesbare helft misschien wel wat symbolen te reconstrueren zijn. Dat blijkt inderdaad het geval, hoewel de opbrengst van de analyse tegenvalt.

Er worden twee symbolen van de eerste pagina uit de krassen opgediept. De R en de L. Het eerste symbool staat in de kolom *bieed*, het tweede in de kolom *gert*. Er verschijnen verder twee nieuwe symbolen, die niet op de eerste pagina staan. Het zijn de symbolen ⊃ en ⊢. Het symbool ⊃ staat in de kolom *morc* en ⊢ staat in de kolom *gert*.

5 ORDENINGS-PRINCIPE TOETSEN

a. Klopt je voorspelling betreffende de symbolen R en L?
b. Om de symbolen ⊃ en ⊢ in te passen moet je bedenken hoe beide symbolen afgemaakt moeten worden. Wat bedenk jij?

Onze schriftgeleerde is niet erg tevreden. Hij wil precies weten hoe de ordening is. Hij besluit een nieuw onderzoek te laten doen, ditmaal in een chemisch laboratorium.
Het resultaat is niet echt bemoedigend. Er ontstaan veel te veel donkere strepen op het document. Er verschijnt maar één nieuw symbool dat enigszins leesbaar is, het symbool ∢ in de *bieed*-kolom. Verder blijkt het symbool ⊃ uit de *morc*-kolom een Σ te zijn. De ⊢ uit de *gert*-kolom lijkt een H te zijn.

6 HOE VERDER?

a. Vergelijk het resultaat met de voorspelling die je in aktiviteit 5 hebt gedaan.
b. Zijn er voorbeelden van symbolen die niet met jouw ordeningsprincipe kloppen ('tegenvoorbeelden")?
c. Zijn er volgens jou symbolen die niet af zijn? Hoe zou jij ze afmaken?

Nog steeds is de schriftgeleerde niet tevreden. Hij heeft een 'interessant idee' over de ordening, dat het verdient om 'nader onderzocht te worden':
- de kolom *bieed* bevat volgens hem alleen maar latijnse letters,
- bij *morc* staan griekse letters,
- bij *gert* staan wiskundige symbolen.

Met deze simpele theorie kan hij alle symbolen verklaren. De schijnbare uitzonderingen ook. In de ∢ ziet hij bijvoorbeeld een Q die niet af is en om één of andere reden een beetje gedraaid is (het bovenste streepje moet een gevolg zijn van de chemische analyse). Het bieedsymbool H is géén hoofdletter H, maar een onaf symbool hekje, #, dat onze schriftgeleerde wel eens in een wiskundeboek heeft zien staan. Toen hij op een gegeven moment nog eens door een ander raadselboek bladerde, viel zijn oog ineens op een simpel zesregelig rijmpje. Dat rijmpje, zo viel hem op, was in het middelnederlands gesteld, en niet zoals de andere teksten uit het boek in het latijn:

maeckt regt wat crom is
maeckt sprekend wat stom is
ende laet u niet bedotten
door uw aller snelst idee
althoos alleen de sotten
syn daer en mee tevree.

Ineens ziet hij de echte oplossing van het probleem! Mogelijkerwijs, zo redeneerde hij, waren de woorden *bieed*, *morc* en *gert* zelf de nederlandstalige 'ordenings-principes'. Zou de lettervolgorde omgedraaid zijn? Zachtjes sprak de geleerde de drie raadselachtige woorden voor zich uit.

Hij husselde de letters uit de woorden door elkaar heen, draaide de woorden om ..., en daar had hij het!

7 GEVONDEN?

a. Welke (middeleeuws-)Nederlandse woorden kan je van *bieed*, *morc* en *gert* maken?
b. Wat zijn de ordenings-principes?
c. Plaats de overige symbolen uit het document in de juiste kolom.

1.5 ALGEMENE REGELS

Er bestaan massa's waarnemingsspelletjes en coderingstrucjes van het soort als jullie hierboven gezien hebben. Uit deze spelletjes, die natuurlijk wel een beetje gekunsteld zijn, volgen een aantal algemene regels. Het is goed die regels in gedachte te houden, als je straks gaat kijken naar de reaktie van natuurkundigen op nieuwe verschijnselen. Want, wat je bij deze spelletjes makkelijk ziet, is veel moeilijker te zien bij de natuurkunde.

1) *Veel verschijnselen kunnen op een aantal verschillende manieren verklaard worden.*
Soms zijn die verschillende verklaringen ook nog met elkaar in tegenspraak. Het middeleeuwse raadsel kon je verklaren met verschillende ordeningsprincipes. Juist door tegenspraken tussen de verschillende principes precies uit te zoeken (we noemen die tegenspraken de *criteria*) kwam je tot steeds betere, méér verklarende 'theorieën'. Zo ook in de natuurkunde. Voor talloze verschijnselen zijn verschillende elkaar weersprekende theorieën mogelijk. In dit boekje zul je zien hoe de natuurkundigen rond 1900 twee verschillende ideeën ontwikkelden over de zogenaamde 'nieuwe stralen' die pas ontdekt waren. De één zag in de stralen een stroom deeltjes, de ander zag in de stralen een golfverschijnsel. Door de tegenspraken tussen die theorieën, de *criteria* dus, precies uit te zoeken, heeft men gepoogd te beslissen welke theorie de juiste is. Overigens hadden allebei de theorieën achteraf een beetje gelijk.

2) *Waarneming zonder begrip (of: theorie) is zinloos.*
Je hebt gemerkt dat je altijd vanuit een idee naar de nieuwe verschijnselen kijkt. Dat idee - hetzij begrip voor de speelkaart, hetzij de hypothese over latijnse enz. letters -, dat idee gaf vreemde waarnemingen betekenis. Als iemand niet zou weten hoe een speelkaart er gewoonlijk uitziet, zou die ook niets bijzonders aan de getoonde speelkaarten kunnen ontdekken.

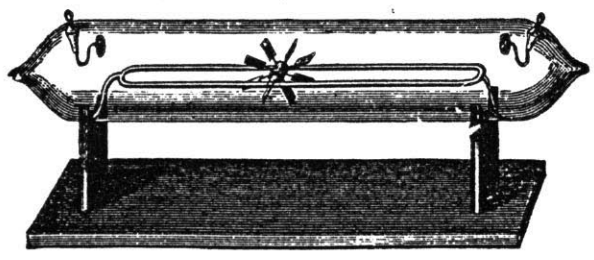


fig. 1.13 Een bijzondere kathodestraalbuis om het idee 'kathodestralen zijn deeltjes' te onderzoeken.

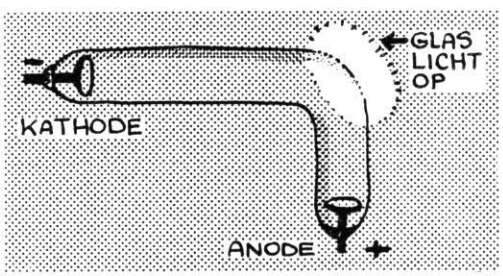


fig. 1.14 Een bijzondere kathodestraalbuis om het idee 'kathodestralen zijn golven' te onderzoeken.

Ook natuurkundigen van rond 1900 die naar de nieuwe stralen keken hadden verschillende ideeën in hun hoofd. Sommigen zagen deeltjes, anderen golven. Het zal blijken dat juist door het 'gevecht' over de vraag welke van die theorieën opgaat voor de nieuwe stralen nieuwe theorieën een kans krijgen.

3) *Nieuwe verschijnselen probeer je altijd te begrijpen met behulp van oude theorieën en begrippen.*
Waar zou je ze anders mee moeten begrijpen? Pas als je niet anders kan ga je nieuwe theorieën verzinnen.
De natuurkundigen rond 1900 hadden prachtige wiskundige theorieën over golven en deeltjes tot hun beschikking. Wat was voor de hand liggender dan door de bril van die theorieën naar de nieuwe stralen te kijken? Omdat die theorieën redelijk klopten, beide, ontstond er een situatie waarin twee theorieën één soort verschijnselen verklaarden. Net als bij onze twee spelletjes.

4) *Iemand die iets meent te begrijpen is sterk geneigd tegenvoorbeelden weg te verklaren.*
Daar zijn altijd wel mogelijkheden toe, zeker als je een beetje slim bent. De schriftgeleerde, met zijn hoofdletter Q, was zo'n slimmerd. Het is goed te beseffen dat het niet altijd dom is tegenvoorbeelden even opzij te zetten. Als je bij ieder tegenvoorbeeld je theorie of je begrip probeert door een nieuw te vervangen blijf je aan de gang. Natuurkundigen rond 1900 wisten dat heel goed. Ze probeerden eerst hun eigen ideeën uit te werken - golfideeën voor de één, deeltjesideeën voor de ander -, in plaats van in vruchteloze debatten verzeild te raken. Zo ontstond er een situatie met twee groepen onderzoekers. De ene groep had erg veel energie en denkwerk besteed aan de deeltjeshypothese (de Engelsen), een andere groep had evenveel energie en denkwerk besteed aan een golfhypothese (de Duitsers). Zo ontstond er een situatie waarin een debat tussen beide onderzoeksgroepen heel nieuwe ideeën en ontdekkingen opleverde.

5) *In de natuurkunde worden oude gevestigde theorieën doorgaans pas vervangen door nieuwe theorieën als:*
a) de tegenvoorbeelden bij de oude theorie zich ophopen,
b) de nieuwe theorie die tegenvoorbeelden wèl verklaart, en
c) als er een nieuwe generatie natuurkundigen opstaat die de nieuwe theorie uitwerkt.
Bij de spelletjes kan je makkelijk van het ene idee naar het andere overstappen. In de natuurkunde gaat dat niet zo makkelijk. De mensen die tientallen jaren van hun leven geïnvesteerd hadden in een golftheorie of een deeltjestheorie van de nieuwe stralen, waren niet bereid die theorie zonder slag of stoot te verlaten. Sommigen bleven dan ook hardnekkig hun oude theorie verkondigen. Dit verschijnsel is vrij algemeen in de geschiedenis, en staat bekend als de 'wet van Planck'. Planck was een topnatuurkundige uit de jaren rond 1900 en beschreef zijn 'wet' als volgt:
"Een belangrijke wetenschappelijke vernieuwing wordt zelden aanvaard, doordat de tegenstanders langzamerhand overwonnen zijn en overtuigd raken; het gebeurt praktisch nooit dat Saul verandert in Paul. Wat wèl gebeurt is dat de tegenstanders langzamerhand uitsterven en dat de nieuwe generatie van het begin af aan vertrouwd is met het idee".

8 Bedenk bij elk van de regels een voorbeeld.

ORIENTATIE

Een kwestie van geluk?

Een bekende engelse uitdrukking zegt: "Luck favours the prepared mind".
Deze uitdrukking past heel goed bij ontdekkingen uit de natuurkunde. De ontdekking van Röntgen lijkt zo'n kwestie van geluk. Maar, Röntgen had jaren onderzoek met kathodestraalbuizen achter de rug. Door dat onderzoek was hij gaan geloven dat er in de buizen een heleboel soorten straling voorkomen, en daardoor was hij voorbereid op het geluk. Lenard, een Duitser die aanhanger was van de golfhypothese en die de buis gemaakt had waarmee Röntgen zijn ontdekking deed, was niet voorbereid. Hij was veel te betrokken in het debat over golven en deeltjes om iets nieuws te zien.

Ook Thomson, de ontdekker van het elektron, was voorbereid om geluk te hebben. Op het moment van zijn ontdekking, 1896, werkte hij al 10 jaar aan kathodestraalbuizen. Vrijwel alle experimenten van golf- en deeltjestheoretici had hij herhaald, en zo was hij achter belangrijke fouten in een groot aantal experimenten gekomen. Dat juist hij ontdekte dat kathodestralen een stroom elektronen zijn, is dan ook niet vreemd en zeker niet alleen een kwestie van geluk.

Hetzelfde geldt voor Becquérel, de ontdekker van natuurlijke radioaktiviteit. Het geluk van Becquérel was dat hij kon beschikken over de verzameling uraniumzouten die zijn vader had opgebouwd. Die verzameling was uniek, want Becquérels vader was behalve professor in de mineralogie ook direkteur van een museum voor oude gesteenten. Maar hier houdt het geluk op. Het bijzondere van Becquérel was dat hij op zoek ging naar nieuwe straling. Nadat hij in 1896 het verslag van Röntgen gelezen had over diens X-stralen, schoot de verzameling van zijn vader hem te binnen. De uraniumzouten, zo wist hij, vertoonden net als kathodestralen fluorescentie. Ze lichtten onder sommige omstandigheden op! Zouden ze ook stralen uitzenden? Hij begon een onderzoek met fotografische platen, precies als Röntgen en ontdekte natuurlijke radioaktiviteit. Niet een kwestie van geluk: hij ging doelbewust op zoek naar nieuwe stralen en hij vond ze.

SAMENVATTING

De volgende regels zijn van belang voor de vraag hoe de wetenschap zich ontwikkelt.
1. Veel verschijnselen kunnen op een aantal verschillende manieren verklaard worden.
2. Waarnemen zonder begrip is zinloos.
3. Nieuwe verschijnselen probeer je - en proberen natuurkundigen - altijd te begrijpen met behulp van bekende theorieën en begrippen.
4. Iemand die meent iets te begrijpen, een natuurkundige niet uitgezonderd, is sterk geneigd tegenvoorbeelden weg te verklaren.
5. In de natuurkunde worden, evenals in andere wetenschappen, gevestigde begrippen en theorieën pas volledig verlaten als:
a) de tegenvoorbeelden zich ophopen,
b) er nieuwe theorieën zijn die de tegenvoorbeelden wèl verklaren, èn
c) de aanhangers van de oude ideeën zijn uitgestorven.
Deze regels gelden niet zo strikt als regels in de natuurkunde zelf, omdat ze over de wetenschappers, de mensen, gaan. Toch kun je ze in de geschiedenis van de natuurkunde vaak herkennen.

DEEL 1

GEVESTIGDE THEORIEEN



DEELTJESTHEORIE



GOLFTHEORIE

vooruitblik

Bestaan de nieuwe stralen die aan het eind van de 19e eeuw ontdekt werden uit *deeltjes* of is er sprake van een *golfverschijnsel*? Over die vraag werden rond 1900 felle discussies gevoerd. Om die discussie te kunnen begrijpen zul je eerst de golftheorie en de deeltjestheorie moeten leren kennen. Dat doen we in dit deel van het thema.
In hoofdstuk 3 wordt bovendien een soortgelijke discussie uit het begin van de 19e eeuw behandeld. Toen ging het om de vraag of licht een deeltjes- dan wel een golfkarakter heeft. Om dat uit te kunnen maken dienden er vanuit beide theorieën criteria ontwikkeld te worden: verschijnselen, die door de ene theorie wèl, door de andere theorie niet voorspeld worden.
Aan het einde van de hoofdstukken staat een samenvattende lijst van de eigenschappen van deeltjes en golven.
Op basis daarvan zullen we in deel 2 criteria formuleren waarmee beslist kan worden of nieuwe stralen bepaalde deeltjes dan wel elektromagnetische golven zijn.

INHOUD:

2.1 Drie principes van kracht en beweging 17
2.2 Krachtwerkingen 23
2.3 Velden 25
2.4 Geladen deeltjes 28
2.5 Banen van deeltjes 30
2.6 Vrije weglengte in gassen 34

2.1 DRIE PRINCIPES VAN KRACHT EN BEWEGING

Tot ca 1550 ging iedereen uit van de bewegingstheorie van Aristoteles. Die theorie zegt dat alle voorwerpen op *aarde* vroeg of laat tot rust moeten komen. Rust zou hun 'natuurlijke toestand' zijn. Voor *sterren en planeten* geldt dat niet. Hun 'natuurlijke toestand' is juist dat ze in cirkels blijven bewegen.



fig. 2.1 Aristoteles (Griekenland, 384-322 voor Chr.) vatte de opvattingen van de griekse natuurfilosofie samen in een theorie over de mechanica die 20 eeuwen stand hield.



fig. 2.2

In de loop van de 16e eeuw en in toenemende mate in de 17e eeuw werd deze theorie in twijfel getrokken. De astronomische waarnemingen van Copernicus en Kepler en later vooral Galilei die een kijker gebruikte (hij ontdekte de schijnstanden van Venus en de ringen van Saturnus, wat niet in het wereldbeeld van Aristoteles paste) gaven daartoe de aanzet. Galilei, Descartes en Huygens gingen bewegingen op aarde kritisch bekijken en kwamen tot nieuwe opvattingen over eindige en oneindige bewegingen, over krachtwerking en over botsingen. Hun achterliggende gedachte was *dat voor aardse en hemelse bewegingen dezelfde wetten moeten gelden.*



fig. 2.3 Copernicus (Polen, 1473-1543) brak met de aristoteliaanse opvatting dat de aarde het middelpunt van het heelal is. Hij verdedigde de opvatting dat de aarde om de zon draait.



fig. 2.4 Het wereldbeeld van Copernicus (1543). De aarde staat niet langer in het centrum.

Newton presenteerde als eerste een samenvattende theorie van de mechanica, gebaseerd op drie 'principes', ook wel de drie wetten van Newton genoemd. Bovendien stelde hij een formule op voor de zwaartekracht. Zo kon hij alle bewegingen verklaren, zowel de aardse als de hemelse.
De drie principes of wetten van Newton ben je al eerder tegengekomen.

1 HET TRAAGHEIDSPRINCIPE

Volgens dit principe (ook wel genoemd de eerste wet van Newton) zou een voorwerp met constante snelheid rechtdoor blijven bewegen, als er geen invloed van buitenaf op zou werken. *Verandering* van snelheid wordt dus altijd veroorzaakt door invloeden van buitenaf; zulke 'invloeden' noemen we *krachten*.
Het traagheidsprincipe 'slaat nergens op', omdat we in de praktijk nooit alle invloeden van buitenaf kunnen uitschakelen. Maar door een logische uitbreiding wordt het traagheidsprincipe heel bruikbaar: *als een voorwerp met constante snelheid rechtdoor beweegt, is de netto kracht nul.*
De netto kracht krijg je door krachten met dezelfde richting op te tellen en tegengesteld gerichte krachten van elkaar af te trekken.
Dit traagheidsprincipe kan worden toegepast op vallende appels, rijtuigen en schepen of - in onze tijd - auto's en fietsen, maar ook op hemellichamen zoals maan en planeten.

Deze regel werd in principe al door Galilei en Descartes opgesteld. Hun grote bijdrage is geweest dat zij aannamen dat er op aarde wrijvingskrachten zijn die ervoor zorgen dat in vrijwel alle gevallen de aardse bewegingen inderdaad stoppen. Door het afwezig zijn van wrijvingskrachten buiten de aardse konden zij met dit principe de eeuwige beweging van sterren en planeten - en van de draaiing van de aarde om zijn eigen as en om de zon, die toen pas ontdekt was - verklaren. Waarom planeten ellipsbanen beschrijven werd evenwel pas duidelijk na de ontdekking van Newton van de gravitatiekracht.



fig. 2.5 Galileo Galilei (Italië, 1564-1642) formuleerde als eerste het traagheidsprincipe. Wegens zijn opvattingen over het draaien van de aarde om de zon werd hij in de kerkelijke ban gedaan.



fig. 2.7 Isaac Newton (Engeland, 1642-1727) is de meest gezaghebbende natuurkundige van zijn tijd en de honderd jaar daarna. De door hem geformuleerde mechanica speelt nog altijd een belangrijke rol in de natuurkunde.



fig. 2.6 René Descartes (Frankrijk, 1596-1650), filosoof, wis- en natuurkundige, formuleerde als eerste het traagheidsprincipe en ontwikkelde een botsingstheorie.

1 Aristoteles had er wel aan gedacht dat je een heleboel astronomische verschijnselen kunt verklaren door aan te nemen dat de aarde om zijn as draait. Maar volgens hem kan dat niet. Dan zouden we met meer dan 1000 km/h rondrazen in de ruimte van West naar Oost. De wolken zouden dan van Oost naar West moeten bewegen. Dat doen ze niet.
a. Geef aan waar Aristoteles zijn eigen bewegingswet gebruikt in bovenstaande redenering.
b. Geef argumenten tegen de redenering van Aristoteles vanuit het traagheidsprincipe.
c. Ook met kennis van het weer (de wet van Buys Ballot) kun je argumenten tegen Aristoteles' redenering geven. Welke?

2 HET VERSNELLINGSPRINCIPE

Om te kunnen optrekken met fiets of auto heb je een netto kracht nodig in de bewegingsrichting. Bij afremmen moet de netto kracht tegen de beweging inwerken. De grootte van de benodigde netto kracht hangt af van twee factoren:
- de vereiste versnelling of vertraging;
- de massa die versneld of afgeremd wordt.

Het verband tussen versnelling, netto kracht en massa is te onderzoeken door middel van modelproeven, met behulp van wagentjes op een rijbaan of glijders op een luchtkussenbaan.
Bij zulke proeven is de kracht vrij nauwkeurig constant te houden. Dan blijkt: *een constante netto kracht veroorzaakt een constante versnelling.*

Bij verdubbeling van de kracht wordt ook de versnelling verdubbeld. Verdubbeling van de massa (bijv. door twee gelijke wagentjes op elkaar te zetten) heeft het tegengestelde effect: de versnelling wordt tweemaal zo klein bij gelijke trekkracht. De resultaten zijn kort samen te vatten in het *versnellingsprincipe* (tweede wet van Newton):

netto kracht = massa · versnelling
$F_{netto} = m \cdot a$

In Newtons geschriften is de wet $F = m.a$ overigens in deze vorm niet te vinden. Newton schreef deze wet, evenals Huygens, aan wie hij de wet ontleende, altijd als:

$$F.\Delta t = m.\Delta t$$

$F.\Delta t$ heet de *stoot* en $m.\Delta v$ de *impulsverandering* of de *verandering van de hoeveelheid beweging.*

2 Laat zelf zien dat $F = m.a$ en $F.\Delta t = m.\Delta v$ hetzelfde principe weergeven in een andere vorm. Bedenk daarbij goed wat je onder 'versnelling' verstaat en welke formule je gebruikt om deze uit te rekenen.

In de vorm $F = m.a$ is dit principe zeer geschikt om bewegingen, die onder invloed van krachten veranderen, te beschrijven. Als je niet zozeer geïnteresseerd bent in de beweging *tijdens* het veranderen onder invloed van de kracht, maar in het *resultaat* van de verandering, dan kun je beter de vorm $F.\Delta t = m.\Delta v$ gebruiken. Bijvoorbeeld bij botsingen of bij het testen van een bromfietshelm. Daarbij is het produkt van *massa en snelheid*, de *impuls*, een belangrijke grootheid die de beweging van het deeltje karakteriseert:

impuls = massa x snelheid
$p = m.v$
eenheid: kg.m/s

De stoot $F.\Delta t$ karakteriseert de invloed op het deeltje van buitenaf. Daarom zullen we in dit thema de impuls gebruiken als typerende grootheid voor een *deeltje* met massa.

3 Laat zien dat $\Delta p = F.\Delta t$.

4 a. Bereken de impuls van een fietser (80 kg) die met 5 m/s tegen een boom rijdt.
b. Bereken de impuls van een motorrijder (800 kg) die met 50 m/s tegen een boom rijdt.
c. Bereken de kracht die de boom ondervindt in beide gevallen als de botstijd 0,1 s is.

3 HET AKTIE-REAKTIEPRINCIPE

Bij een botsing van auto A met auto B lopen ze allebei schade op: de krachtwerking is wederkerig. Dat geldt ook als A een auto en B een boom is, al is vaak het effect van de ene kracht opvallender dan van de andere.



fig. 2.8

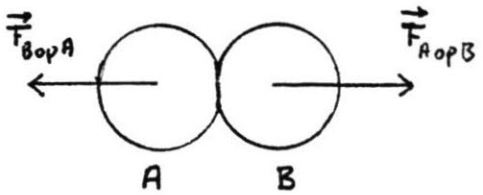


fig. 2.9 Deeltjes die botsen oefenen volgens het reaktieprincipe een gelijke, tegengesteld gerichte kracht op elkaar uit.

Dit is een algemeen kenmerk van krachten in de natuurkundige betekenis van het woord: *krachtwerking is altijd wederzijds*. Duidelijk kun je dat bijv. merken bij magneten. Afhankelijk van de manier waarop je ze tegenover elkaar houdt voel je aantrekking of afstoting, maar altijd van beide kanten. Breng je de magneten dichter bij elkaar, dan worden beide krachten groter. Die krachten zijn te meten: ze blijken even groot te zijn, ook wanneer je ongelijke magneten gebruikt. Wat voor magneten geldt, geldt ook bij alle andere soorten krachtwerking: *oefent A een kracht uit op B, dan oefent B een even grote, tegengesteld gerichte kracht uit op A.*
Dit is het *aktie-reaktieprincipe* (derde wet van Newton).

Dit derde principe is helemaal door Newton zelf gevonden. Volgens deze wet komen krachten dus *altijd in tweetallen* voor. In formulevorm kan je de wet schrijven als:

$$\vec{F}_{A \text{ op } B} = -\vec{F}_{B \text{ op } A}$$

als een voorwerp A een kracht op een ander voorwerp B uitoefent (en omgekeerd natuurlijk).
Houd bij deze belangrijke, maar moeilijke, wet altijd de volgende punten in de gaten:
a. de beide krachten van een krachtentweetal zijn even groot;
b. ze zijn tegengesteld gericht;
c. ze werken nooit beide op hetzelfde voorwerp;
d. alleen de voorwerpen die zelf een (aktie-)kracht uitoefenen, ondervinden de reaktiekracht.

Newton had deze regel nodig voor zijn berekeningen aan de maanbeweging. Omdat de maan door de aarde wordt aangetrokken, beschrijft de maan een cirkelbaan om de aarde. Maar: door de maan wordt met een reaktiekracht aan de aarde getrokken. Een gevolg hiervan is dat aarde en maan beide rondcirkelen, beide rond het gemeenschappelijk zwaartepunt Z (zie fig. 2.10). De aarde doet niet alleen de maan draaien, ook de maan doet de aarde draaien. Hoewel de krachten gelijk zijn (reaktiewet), heeft de reaktiekracht veel minder invloed. De aarde is tenslotte vele malen zwaarder dan de maan. Behalve bij planeetbewegingen kon Newton de reaktiewet ook goed gebruiken bij het afleiden van de botsingswetten die Huygens eerder gevonden had.

5 Geef voor de volgende situaties de krachtentweetallen aan:
- jij duwt tegen de muur;
- een magneet wordt door een ijzeren kast aangetrokken;
- een statisch geladen kam trekt je haar aan;
- Newton ziet een appel van de boom vallen;
- de vloer waarop je staat houdt je tegen.

6 Stel dat je op de fiets rijdt en van achter tegen een andere fietser botst. Beide weten jullie de botsing op te vangen. Jij ondervindt door de botsing een kracht van 200 N gedurende 0,5 s.

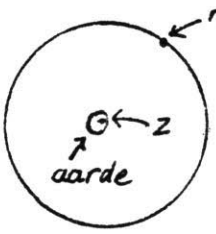
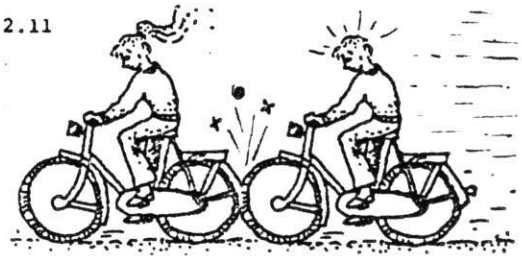


fig. 2.10
Door de werderzijdse reaktiekrachten draaien aarde en maan om hun gemeenschappelijke zwaartepunt.

fig. 2.11



a. Hoe groot is de kracht die de andere fietser ondervindt? Welke richting had die kracht?
b. Gedurende welke tijd werkt die kracht?
c. Hoe groot is de stoot die jij ondervindt? En die welke de andere fietser ondervindt?
d. Hoe groot is je impulsverandering? En die van de ander?
e. Kan je schatten hoeveel je snelheid zal veranderen als je met normale snelheid (ca 5 m/s) rijdt?

Onder andere uit sportsituaties weet je dat je een voorwerp of je eigen lichaam niet alleen met bewegingen langs een lijn ('translatie') kunt beschrijven. Er kunnen ook rotaties optreden. De theorie van Newton houdt daar echter geen rekening mee. Die handelt over bewegingen van voorwerpen op aarde en van planeten rondom de zon, op voorwaarde dat al die verschillende lichamen een verwaarloosbare afmeting hebben. De beweging van een steen door de lucht wordt beschreven alsof de steen een punt is. Volgens Newtons theoriebeweegt zo'n *puntmassa* volgens een parabool door de lucht. De beweging van de aarde rondom de zon wordt beschreven alsof de aarde een punt is, die zich dan volgens de theorie langs een ellips door de ruimte beweegt.

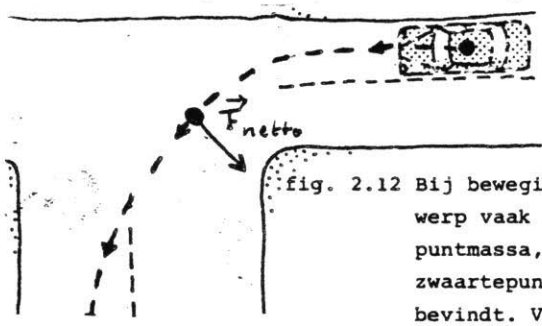


fig. 2.12 Bij bewegingen kun je een voorwerp vaak opvatten als een puntmassa, die zich in het zwaartepunt van het voorwerp bevindt. Voor een auto betekent dat, dat je afziet van de omvang van de auto en van bewegingen van onderdelen (zoals bijvoorbeeld de wielen).

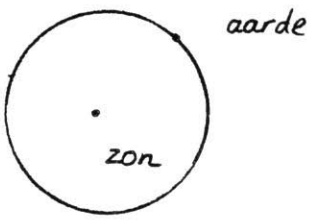


fig. 2.13
De aarde als een puntmassa in zijn ellipsbanen rond de zon.

In werkelijkheid heeft een steen natuurlijk wel afmetingen, en ook op planetaire schaal is het niet juist de aarde tot een punt ineengeschrompeld te denken.

2.2 KRACHTWERKINGEN

Uit de drie principes voor kracht en bewegingen van Newton volgt dat deeltjes alleen van snelheid (*grootte* en/of *richting*) kunnen veranderen, als ze een kracht ondervinden onder invloed van één of meer *andere* deeltjes. In deze paragraaf ga je kennis maken met drie soorten krachten die deeltjes op elkaar kunnen uitoefenen: de gravitatiekracht (zwaartekracht), de (elektrische) coulomb-kracht en de (magnetische) lorentz-kracht.

> Er waren in 1880 nog meer krachtsoorten bekend zoals de krachten van twee magneten op elkaar, de krachten die atomen samenbinden tot één molecuul, de van der waals-krachten tussen moleculen die een vaste stof of een vloeistof bij elkaar houden.
> Tegenwoordig zijn de natuurkundigen van mening dat er slechts vier soorten krachten bestaan, waaruit alle andere soorten afgeleid kunnen worden: de *gravitatiekracht*, de *elektro-magnetische kracht* (die omvat de elektrische kracht, de magnetische kracht, de lorentzkracht, de van der waals-kracht en de moleculaire kracht, en is de kracht die we met de zwaartekracht in het dagelijks leven het meest tegenkomen), de '*sterke wisselwerking*' die de atoomkern (protonen en neutronen) bij elkaar houdt en de *zwakke wisselwerking* die een neutron in een proton en een elektron kan doen overgaan. Inmiddels heeft men ontdekt dat de elektro-magnetische krachten de zwakke wisselwerking als één soort kracht beschreven kunnen worden: de 'elektro-zwakke kracht' (zie o.a. Natuur en Techniek, april 1984).

De beschreven krachten zullen we opvatten als krachten die *op een afstand* werken. Deeltjes behoeven dus geen 'lijfelijk contact' te maken om zo'n kracht te ondervinden.

Voor dit thema zijn de elektrische kracht en de lorentzkracht belangrijk. De zwaartekracht of gravitatiekracht op de kleine deeltjes, die in dit thema voorkomen, is zo zwak in vergelijking tot die twee krachten dat ze (meestal) verwaarloosbaar zijn. Daarom zullen we de aandacht vooral op de eerste twee krachten vestigen.

elektrische kracht

Als je een plastic staaf wrijft met een doek, wordt de staaf elektrisch geladen. Na het wrijven trekt de staaf allerlei voorwerpen aan. Dat is vooral duidelijk als die voorwerpen licht zijn, zoals papiersnippers, haren en dergelijke.
Ook andere staven van isolerend materiaal zijn met een doek op te laden. Onderzoek aan geladen voorwerpen toonde aan dat sommige elektrisch geladen voorwerpen elkaar aantrekken, terwijl andere elkaar afstoten. Gelijke staven, met gelijksoortige ladingen, stoten elkaar steeds af. Men veronderstelde dat er twee soorten lading zijn. Voor de elektrische kracht tussen ladingen geldt:
- gelijksoortige ladingen stoten elkaar af;
- ongelijksoortige ladingen trekken elkaar aan.

In 1784 onderzocht Charles Coulomb de grootte van de elektrische kracht tussen twee geladen bolletjes. In de beschrijving van zijn experiment gebruikte hij de woorden 'positieve en negatieve elektrische substantie', met als commentaar:
"Ik wil hiermee de resultaten van mijn experimenten en berekeningen zo eenvoudig mogelijk weergeven. Ik ga niet in op de werkelijke aard van elektriciteit".

De krachtmeting zelf was al moeilijk genoeg. Coulomb gebruikte de hiernaast afgebeelde *torsiebalans*. De *torsiehoek* (dat wil zeggen: de hoekverdraaiing van de uiteinden van de dunne draad) is een maat voor de kracht tussen de bolletjes A en B. Hij vond dat deze elektrische kracht F_e afneemt met het kwadraat van de afstand r tussen hun middelpunten. Verder nam hij aan dat de kracht evenredig was met de ladingen Q van de bolletjes.
Samengevat:

$$\left.\begin{array}{l} F_e \sim \frac{1}{r^2} \\ F_e \sim Q_A \\ F_e \sim Q_B \end{array}\right\} \Rightarrow F_e \sim \frac{Q_A \cdot Q_B}{r^2}$$

Pas veel later was men in staat alle grootheden in deze *wet van Coulomb* precies te meten. Als F wordt uitgedrukt in newton, de ladingen in *coulomb* (de eenheid van lading) en de afstand r in meter, dan ontstaat de volgende formule:

$$F_e = k.\frac{Q_A \cdot Q_B}{r^2}$$

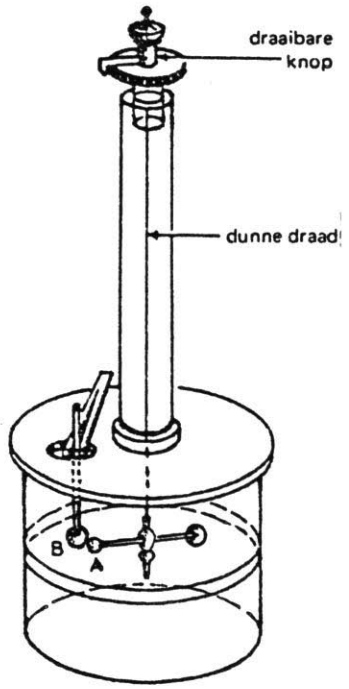


fig. 2.14

De torsiebalans van Coulomb.

Hierin is k een *evenredigheidsconstante* met een waarde $k = 9.10^9\,Nm^2/C^2$ (in vacuüm).
Het resultaat van Coulomb was verrassend. Het vertrouwen in de mechanica van Newton werd er verder door versterkt, omdat de coulombkracht met ongeveer dezelfde formule beschreven kan worden als de (hier verder niet behandelde) gravitatiekracht die door Newton is opgesteld ($F_g = 6{,}67.10^{-11}.\frac{m.M}{r^2}$).

8 a. Bereken de kracht tussen twee ladingen van 10^{-8} C en -10^{-7} C op 0,15 m afstand van elkaar (de lading van een plastic kam kan zo'n grootte hebben).
b. Bereken de kracht tussen een positieve en een negatieve lading van $1{,}6.10^{-19}$ C op 5.10^{-11} m (dit zijn de waarden voor afstand en ladingen binnen een waterstofatoom).

lorentzkracht

Zoals je weet ondervindt een stroomdraad in een magnetisch veld een lorentzkracht. Die is maximaal als de stroom $\vec{I}$ loodrecht op de richting van het magnetische veld $\vec{B}$ staat en nul als die twee richtingen evenwijdig lopen. De richting van de lorentzkracht kun je onthouden met de rechterhandregel (zie fig. 2.15). De grootte van de lorentzkracht wordt gegeven (als $\vec{I} \perp \vec{B}$) door:

$$F_L = B.I.l$$

met l de lengte van het stuk van de draad dat zich in het magneetveld bevindt. De sterkte van het magnetische veld B wordt in tesla (T) uitgedrukt. Met de stroomsterkte I in ampère (A) en de lengte l in meter geeft dit een kracht in newton.

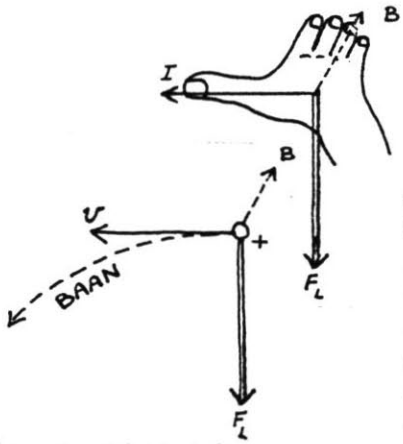


fig. 2.15
De rechterhandregel voor de lorentzkracht op een positief geladen deeltje.

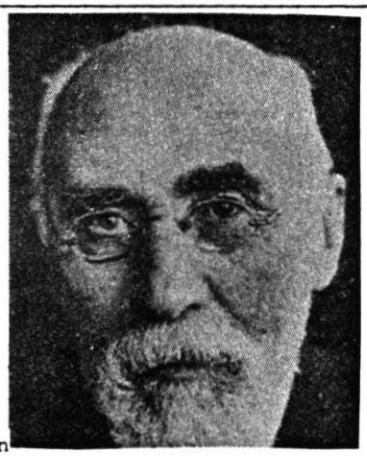


fig. 2.16
Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) was de meest bekende natuurkundige van zijn tijd in Nederland. Hij werkte aan een elektronentheorie en wordt als belangrijkste voorloper van de relativiteitstheorie gezien

Rond 1880 heeft Lorentz, professor in de theoretische natuurkunde in Leiden, uit het experimentele werk van Faraday en het ingewikkelde theoretische werk van Maxwell deze eenvoudige regel voor de naar hem genoemde kracht op een stroomdraad afgeleid. Hij heeft bovendien deze regel toegepast op elektrisch geladen deeltjes. Daarbij redeneerde hij als volgt: Stel dat een stroom bestaat uit elektrisch geladen deeltjes allemaal met lading q, die allemaal met een snelheid v bewegen. Nu gaan we naar de bijdrage van één geladen deeltje aan de lorentzkracht kijken. Het deeltje doorloopt de afstand l met zijn snelheid v in de tijd $t = \frac{l}{v}$. De lading vertegenwoordigt zelf een stroompje ter grootte van:

$$I = \frac{q}{t}$$

De stroom is immers de lading die per tijd door een draad stroomt.
Als we daarin $t = \frac{l}{v}$ invullen, krijgen we:

$$I = \frac{q\,v}{l}$$

Als we dit nu invullen in de formule voor de lorentzkracht krijgen we voor de lorentzkracht op één deeltje:

$$F_e = B\,(\frac{q.v}{l}).l$$
$$= B.q.v$$

onder voorwaarde dat $\vec{B}$ loodrecht op $\vec{v}$ staat.
Positief geladen deeltjes bewegen in dezelfde richting als de stroom in een draad, namelijk van + naar −. De richting van de lorentzkracht op een positief geladen deeltje kunnen we dan ook met de rechterhandregel bepalen. De lorentzkracht staat steeds loodrecht op de snelheid van het deeltje.

9 Bepaal zelf met behulp van de richtingsregel voor de lorentzkracht in welke richting negatieve deeltjes worden afgebogen als $\vec{v}$ en $\vec{B}$ dezelfde richting hebben als in fig. 2.7.

10 Teken en bereken de lorentzkracht op een lading van $1{,}6.10^{-19}$ C die een snelheid van 10^6 m/s naar rechts heeft in een magnetisch veld van 2 T loodrecht op de snelheid, het papier in gericht.

2.3 VELDEN

In de vorige paragraaf ben je drie krachten tegengekomen: de gravitatiekracht, de coulombkracht en de lorentzkracht. Deze krachten kunnen alle drie werken schijnbaar (?) zonder dat er zich 'iets' tussen de voorwerpen die op elkaar krachten uitoefenen, bevindt. Faraday heeft de ruimte om zo'n voorwerp (in zijn geval een magneet) proberen te beschrijven als een

veld. Dat is een bijzonder geslaagde poging geweest, want dat beeld wordt nog steeds gebruikt en is ook van groot belang gebleken voor de wiskundige struktuur van de natuurkunde een *veld* beschrijven. Een *veld* is daarbij een ruimte (vacuüm of met materie gevuld) om een deeltje heen die ten gevolge van een eigenschap (massa, lading, magnetische eigenschap) gewijzigd is. In de ruimte om het deeltje heen kun je *veldlijnen* trekken, die aangeven hoe de ruimte gewijzigd is. Bij magneten ken je de magnetische veldlijnen al.

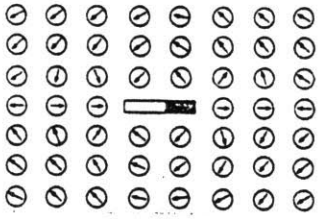


fig. 2.17a Veldlijnen in en rond een staaf-magneet.

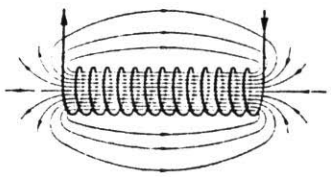


fig. 2.17b Veldlijnen in en rond een stroomspoel.

Elke veldlijn geeft daarbij aan in welke richting een magneet die je in een bepaald punt neerzet, gericht wordt.
Ook het *zwaartekrachtsveld* ken je van zeer nabij. Een voorwerp in het zwaartekrachtsveld van de aarde ondervindt een zwaartekracht naar beneden *ten gevolge van het veld*, dus van de ruimte die gewijzigd is door de aanwezigheid van de aarde. Om het zwaartekrachtsveld van de aarde te beschrijven zou je ook veldlijnen kunnen trekken. De veldlijnen geven dan aan in welke richting een voorwerp een kracht ondervindt. De veldlijnen om de aarde lopen uit elkaar (een radiaal veld). Wijzelf bevinden ons altijd dicht bij het aardoppervlak, zodat we maar een klein stukje van het veld meemaken. Daarom *lijkt* het voor ons of de veldlijnen evenwijdig lopen.

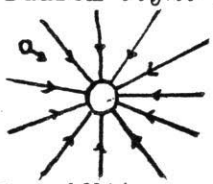


fig. 2.18a De veldlijnen van het zwaartekrachtsveld rond de aarde (radiaal veld).

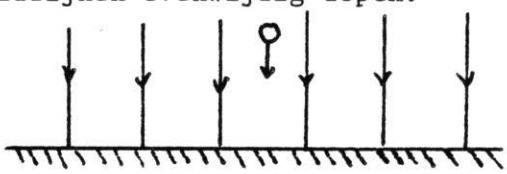


fig. 2.18b De veldlijnen van het zwaartekrachtsveld dicht bij de aarde lopen vrijwel evenwijdig (homogeen veld).

elektrisch veld

In dit hoofdstuk zullen we het meeste met een elektrisch veld te maken krijgen. Voor het elektrische veld gelden de volgende afspraken:
- de richting van het elektrisch veld in punt P is de richting waarin de kracht op een *positief* geladen deeltje in P wijst;
- een elektrische *veldlijn* is zó gericht dat de raaklijn in een punt de veldrichting in dat punt aangeeft.

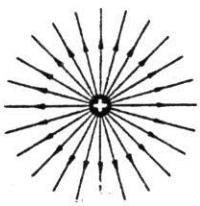


fig. 2.19a Het radiale veld rond een positief geladen bol.

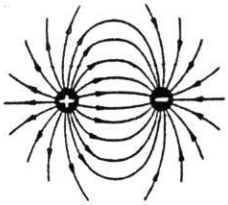


fig. 2.19b Het samengestelde veld tussen een positief en een negatief geladen bol.

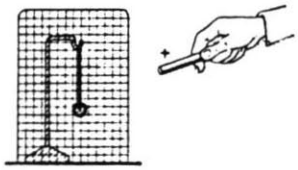


fig. 2.20 Binnen een kooi van Faraday is het elektrische veld 0.

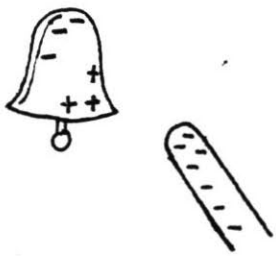


fig. 2.21 Ladingsscheiding door influentie in een geleider.

Bijzonder belangrijk voor dit thema is het elektrische veld van een *geleidend voorwerp*. Daarvoor geldt:
- de veldlijnen staan altijd loodrecht op het oppervlak;
- binnen een geleider is het elektrische veld nul. Zelfs binnen een geleider van metaalgas, een zogenaamde *kooi van Faraday* (zie fig. 2.20) is het elektrische veld nul (tenzij zich een geïsoleerde lading binnen de kooi bevindt).

Deze twee eigenschappen van het elektrische veld van een geleider zijn het gevolg van twee bijzondere eigenschappen van een geleider:
- de elektrische lading van een geladen geleider zit op de buitenkant;
- in een elektrisch veld vindt er op een geleider een ladingsscheiding plaats. We noemen dat *influentie*.

elektrische influentie

Als je bij een geleider een lading houdt, dan komt er aan de kant van de lading een tegengestelde lading. Zie fig. 2.21.

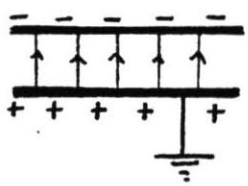


fig. 2.22 Tussen een geladen en geaarde plaat ontstaat een homogeen elektrisch veld.

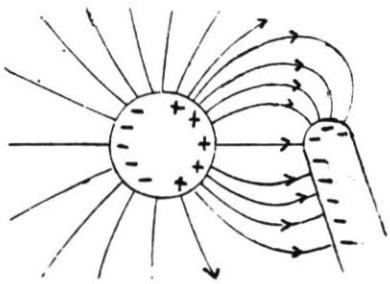


fig. 2.23 Door ladingsscheiding wordt het veld binnen een geleider 0.

Een geladen plaat die bij een andere geladen plaat gehouden wordt wordt ook geladen, en wel tegengesteld. Als die plaat geaard is kan het andere deel van de gescheiden lading zo ver mogelijk weg van de geladen plaat, dus in de aarde afgestoten worden (zie fig. 2.22).
Tussen de platen is dan een *homogeen elektrisch veld*.
Binnen een geleider of in een kooi van Faraday is geen elektrisch veld, omdat de ladingsverdeling op de buitenkant (door influentie ontstaan) een tegenveld heeft geproduceerd, dat het totale veld binnen nul maakt.

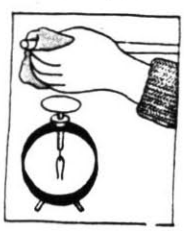
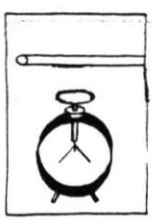
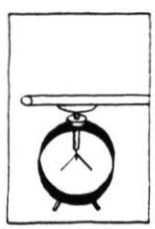


fig. 2.24 Ongeladen elektroscoop



elektroscoop die door influentie uitslaat



geladen elektroscoop

elektroscoop

Al in 1600 werd een 'ladingmeter' ontworpen, de zogenaamde *elektroscoop*. Een dun stripje metaalfolie hangt dubbelgevouwen onderaan een geïsoleerde metalen pen. Als je een geladen staaf tegen de pen houdt, wordt de elektroscoop óók geladen. De uiteinden van de strip verwijderen zich van elkaar. Men zegt dat de elektroscoop uitslaat. Des te groter de lading, des te groter de uitslag.
De elektroscoop geeft ook een uitslag als je die nadert met een geladen staaf zonder hem aan te raken. Door influentie vindt er een *ladingsscheiding* plaats tussen de bovenkant en de strip in de elektroscoop. Een elektroscoop is dus ook geschikt om er een *elektrisch veld* mee op te sporen.

11 Schets het verloop van de elektrische veldlijnen van een geïsoleerde negatief geladen metalen staaf, als die staaf zich
a. ver van andere geleiders bevindt;
b. dicht bij een metalen plaat bevindt.

12 Bij een belangrijke proef in het kathodestralendebat dat je in hoofdstuk 4 zult tegenkomen wilde Hertz lading aan de binnenkant van een niet geleidende glaswand aantonen door *influentie* aan de buitenkant. Hij maakte de volgende opstelling:

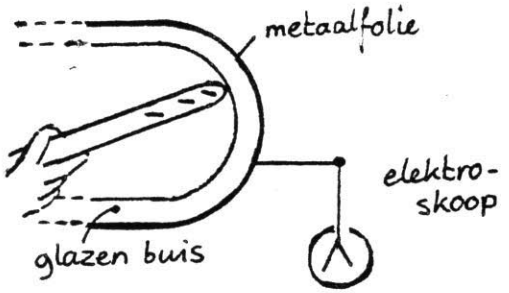


fig. 2.25 Opstelling van Hertz.

Als hij een klein beetje lading aan de binnenkant van het glas aanbracht, sloeg de elektroscoop onmiddellijk uit. Leg met een tekening uit waarom.

2.4 GELADEN DEELTJES IN VLOEISTOFFEN

Sommige vloeistoffen en oplossingen geleiden elektrische stroom. In de hieronder weergegeven opstelling zie je twee *elektroden* in de oplossing staan. In de vloeistof speelt zich een proces af dat *elektrolyse* wordt genoemd.
Als de vloeistof een kopersulfaat-oplossing is, worden bij de *anode A* (de positief geladen plaat) zuurstofbelletjes gevormd. Bij de *kathode K* (de negatieve plaat) wordt koper afgezet. Al vóór 1830 deed Michael Faraday onderzoek aan elektrolyse. Hij stelde vast dat de massa m van de gevormde stof evenredig is met de getransporteerde lading Q.

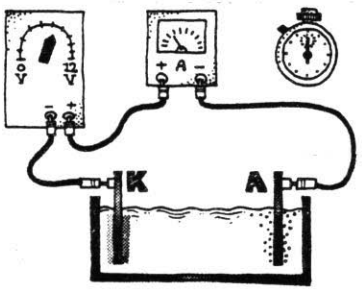


fig. 2.26a Elektrolyse van kopersulfaat.

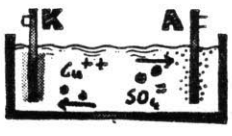


fig. 2.26b Ionenmodel van elektrolyse.

13 ELEKTROLYSE

In een elektrolyse-proef met een kopersulfaatoplossing wordt gedurende 5 minuten een stroom 0,4 A door de oplossing gestuurd. De kathode is voor de proef gewogen. Na de proef wordt de kathode met gedestilleerd water gespoeld en daarna gedroogd. Vervolgens wordt nog eens de massa bepaald. De massa van de kathode is toegenomen met 40,5 mg, doordat er koper op de kathode is afgezet.
a. Waarom is het nodig de kathode na de proef te spoelen en te drogen?
b. Bereken de lading Q die tijdens de proef door de oplossing is vervoerd.
c. Als je aanneemt dat deze lading door 40,5 mg koper is vervoerd, bereken dan de lading / massa - verhouding van koper in C/kg.

Bij elk experiment waarbij zich koper afzet op de kathode, blijkt de verhouding Q/m steeds gelijk te zijn.
Elke stof die zich afzet op een elektrode en elk gas dat vrij komt bij een elektrode levert een eigen waarde voor de *lading-massa-verhouding* Q/m.
Waterstof heeft de grootste: $\frac{Q}{m} = 10^8$ C/kg. Faraday trok de conclusie dat er een verband moet bestaan tussen materie en elektrische lading. Hij nam aan dat er geladen materiedeeltjes, die hij *ionen* noemde, door de vloeistof bewegen.

Faraday schreef in 1830:
"We weten niet wat een atoom is. Toch ontkomen we er niet aan ons een heel klein deeltje voor te stellen. We weten misschien nog wel minder van elektriciteit. Toch hebben we erg veel waargenomen dat ons sterkt in een vermoeden. Het vermoeden dat materiedeeltjes op de een of andere manier begiftigd zijn met elektrische machten en dat zij juist dááraan hun belangrijkste eigenschappen te danken hebben; daartoe behoort met name hun onderlinge chemische affiniteit".

14 ALUMINIUMPRODUKTIE

Voor het verkrijgen van aluminium uit erts wordt elektrolyse gebruikt. De waarde van Q/m van aluminium is $1{,}07.10^7$ C/kg.
a. Bereken de stroomsterkte die nodig is om in 1 uur 1 kg aluminium af te scheiden.
b. Verklaar waarom de aluminium-industrie pas aan het einde van de negentiende eeuw op gang is gekomen.

15 LORENTZKRACHT IN EEN VLOEISTOF

Neem een rond bakje, zet een elektrode in het midden en een elektrode langs de rand (zie fig. 2.27).

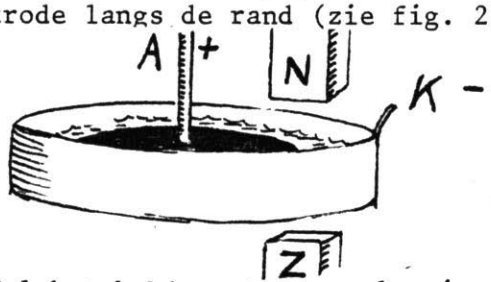


fig. 2.27 Lorentzkracht op ionen in de vloeistof.

Vul het bakje met een oplossing van kopersulfaat en houdt een magneet boven de plaats waar de stroom loopt. Wat zie je? Wat gebeurt er als de magneet omgekeerd wordt? En als de + en -pool verwisseld worden?

2.5 BANEN VAN DEELTJES

Onder invloed van een kracht verandert de snelheid van deeltjes volgens het tweede principe van Newton:
- de snelheid wordt *vergroot* door de (component van de) kracht die met de snelheid mee gericht is;
- de snelheid wordt *verkleind* door de (component van de) kracht die tegen de snelheid in gericht is;
- de snelheid wordt *van richting* veranderd door de (component van de) kracht die loodrecht op de snelheid staat.

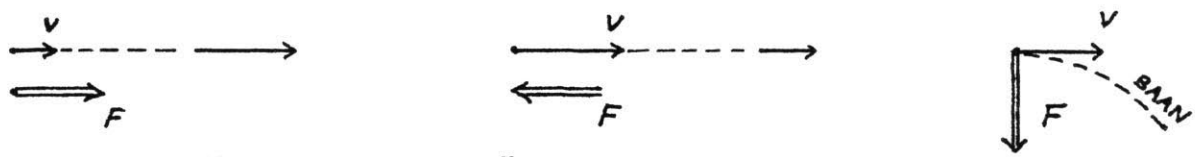


fig. 2.28 Versnellen Vertragen Afbuigen

In deze paragraaf gaan we naar de banen van deeltjes kijken in een zwaartekrachtsveld, in een elektrisch veld en in een magnetisch veld.

baan in een zwaartekrachtsveld

Uit het gooien met sneeuwballen of gewone ballen weet je ongeveer wel wat voor een soort baan een deeltje in het zwaartekrachtsveld beschrijft. Deze banen kun je vrij makkelijk uitrekenen, als je de vereenvoudiging maakt dat de luchtwrijving verwaarloosd kan worden. Het zijn dan paraboolbanen. Als je die wrijving niet mag verwaarlozen is het rekenwerk heel moeilijk.

Voor dit thema is alleen van belang in hoeverre snelle, kleine deeltjes in het zwaartekrachtsveld afgebogen worden. De invloed van de luchtwrijving (eigenlijk botsingen met de luchtmoleculen) komt in par. 2.6 apart aan de orde. Die deeltjes gaan meestal véél sneller dan 1000 m/s en leggen vaak niet meer dan 10 cm af voordat ze tegen een glaswand of metalen plaat botsen. Is er dan een waarneembare afbuiging in het zwaartekrachtsveld? Op eenvoudige wijze is te laten zien dat dat niet het geval is. Laten we een deeltje (een geweerskogel bijvoorbeeld) nemen die met 1000 m/s 1 m horizontaal aflegt en laten we de afbuiging Δy meten.

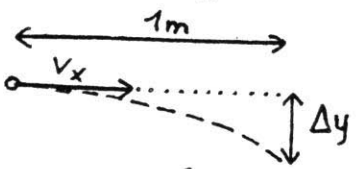


fig. 2.29 Afbuiging in een homogeen dwarsveld: de kogelbaan.

Voor de x-richting geldt: $\Delta x = v_x . \Delta t$; dus $1000 = 1 . \Delta t$; $\Delta t = 0{,}001$ s. Hoeveel 'valt' de kogel nu in die duizendste seconde? Voor de y-richting geldt: $\Delta y = \frac{1}{2} g . \Delta t^2$; dus $\Delta y = \frac{1}{2} . 9{,}8 . (0{,}001)^2 = 4{,}9 . 10^{-6}$ m. Dat merk je zéker niet.

16 Ga zelf na of de snelheid van de kogel wèl merkbaar verandert, als de kogel 1 m in vertikale richting (omhoog of omlaag) aflegt.

17 *Voor de liefhebber*

Laat zien dat $\Delta y = \frac{1}{2} g . (\frac{\Delta x}{v_x})^2$.
Hoe blijkt hieruit dat de kogelbaan een parabool is?

versnellen in een elektrisch veld

De toename van de snelheid van een geladen deeltje in een elektrisch veld kun je het makkelijkst berekenen uit de toename van de kinetische energie. Die kunnen we uit de elektrische energie berekenen, die we met een bekende situatie, omzetting van elektrische energie en warmte, kunnen berekenen. Een stroom I gaat door een draad. De spanning op de uiteinden van de draad is V. De proef duurt t seconde. In die tijd is elektrische energie omgezet in warmte. Je weet nog wel dat die hoeveelheid energie gegeven wordt door $E_e = V.I.t$.
De totale lading Q die in de tijd t gepasseert is, zoals we hiervoor bij de lorentzkracht af gezien hebben, $Q = I.t$.
Van de elektrische energie kunnen we dus ook zeggen:
elektrische energie = lading . spanning
$E_e = Q.V$.

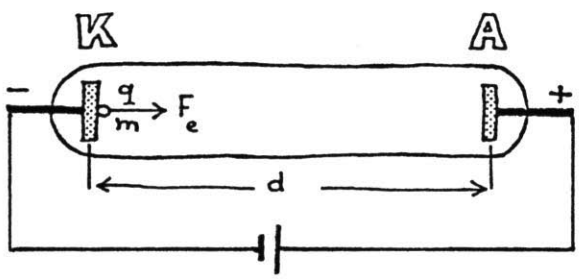


fig. 2.30 Een vacuümbuis waarin een elektrisch veld heerst. Net als bij vloeistoffen heet de positieve pool de anode A en de negatieve pool kathode K.

Stel nu dat in bovenstaande vacuümbuis zich op dit moment één deeltje met massa m en negatieve lading q juist tegen de kathode bevindt. Het deeltje ondervindt dan een elektrische kracht richting anode. Aangezien er in de buis vacuüm heerst, kan het deeltje ongehinderd van K naar A vliegen. Want in de buis heerst een elektrisch veld dat door het aanleggen van de spanning tussen A en K is ontstaan.
De elektrische lading Q, die door een draad stroomt, bezit een elektrische energie $E_e = Q.V$. Deze elektrische energie wordt tijdens het stromen omgezet in warmte. Op dezelfde manier heeft een *deeltje* met lading q een elektrische energie $E_e = q.V$, als het nog op de kathode is. Hierin is V de spanning tussen de kathode en de anode In een elektrisch veld wordt de *elektrische energie* echter omgezet in *kinetische energie*: $E_k = \frac{1}{2}\, m.v^2$. Het deeltje arriveert met een snelheid v_A bij de anode en botst daar tegen. De wet van behoud van energie geeft aan dat:

$$q.V = \tfrac{1}{2}\, m.v_A^2$$

Zoals je weet is voor verandering van snelheid een kracht nodig. De door de *netto kracht* F_{netto} geleverde *arbeid* is gelijk aan de *verandering van kinetische energie* E_k:

$$W_{netto} = F_{netto}.\Delta s = \Delta E_k$$

In het elektrische veld werkt alleen de elektrische kracht F_e op het deeltje (zwaartekracht is verwaarloosbaar). De weg waarover deze kracht werkt is de afstand d tussen de elektroden. De kinetische energie van het deeltje is bij het loskomen van de kathode verwaarloosbaar klein, zodat geldt:

$$F_e.d = \tfrac{1}{2}\, m.v_A^2$$

Samengenomen blijkt dus:

$$q.V = F_e.d = \tfrac{1}{2}\, m.v_A^2.$$

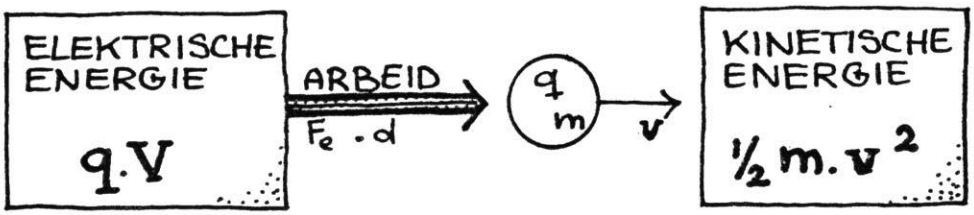


fig. 2.31

Om de eindsnelheid te berekenen is het voldoende de spanning V en de waarde van $\frac{q}{m}$ te weten. Immers: $q.V = \frac{1}{2}\, m\, v_A^2 \qquad v_A^2 = 2.\frac{q}{m}.V$

18 Bepaal de snelheid waarmee een negatief geladen deeltje de anode bereikt als de spanning tussen anode en kathode 10.000 V is en het geladen deeltje dat die kathode heeft verlaten een $\frac{q}{m}$-waarde heeft:
a. zoals aluminium $1{,}07.10^7$ C/kg;
b. zoals waterstof $0{,}96.10^8$ C/kg;
c. een geheel andere waarde: $1{,}8.10^{11}$ C/kg.

19 GELADEN DEELTJES AFREMMEN

Een negatief deeltje ($\frac{q}{m} = 1{,}8.10^{-11}$ C/kg) wordt op een metalen plaat vrijgemaakt en beweegt naar een tweede metalen plaat die een negatieve spanning van 10 V heeft ten opzichte van de eerste plaat. Het deeltje kan de plaat nèt bereiken, dat wil zeggen: zijn kinetische energie op de tweede plaat is juist 0. Bereken zijn beginsnelheid en maak een tekening van de situatie.

afbuiging in een homogeen elektrisch veld

Je kunt een negatief geladen deeltje eerst versnellen en daarna afbuigen in een homogeen dwarsveld. Zie fig. 2.32.
Tussen de twee platen is een afbuigspanning V_a gezet. Daardoor werkt er een elektrische kracht F_e op het deeltje, in dit geval naar boven. De baan van het deeltje buigt af naar boven.

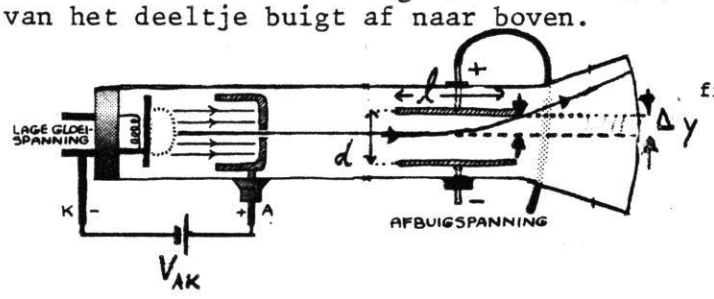


fig. 2.32 Een negatief geladen deeltje wordt versneld tussen K en A en schiet door een gat in de aarde in een ruimte waar een homogeen elektrisch veld heerst tussen twee platen. Daar wordt zijn baan afgebogen.

Aangezien $F_e \,.d = q.V_a$, zal de afbuigende kracht gelijk zijn aan:

$$F_e = \frac{q.V_a}{d}$$

Hierin is d de afstand tussen de twee afbuigplaten.
De afbuiging zal pas meetbaar worden als de afbuigspanning V_a niet al te klein is ten opzichte van de versnelspanning V_{AK}, bijvoorbeeld meer dan één duizendste daarvan.
De vorm van de baan tussen de platen is hetzelfde als de vorm van de baan van een steen die horizontaal wordt weggeworpen: een parabool. Dat komt omdat, net als in het zwaartekrachtsveld de kracht van het dwarsveld in alle punten even groot en gelijk gericht is.

20 Ga na of de afbuiging Δy groter of kleiner wordt als:
a. de afbuigingsspanning toeneemt;
b. de versnelspanning toeneemt;
c. de metalen platen korter worden gemaakt (l kleiner, zie fig. 2.32);
d. de afstand d tussen de platen verkleind wordt.

21 *Voor de liefhebber*

Ga na dat voor de afbuiging Δy geldt:
$\Delta y = \frac{l^2}{2d} \cdot \frac{V_a}{V_{AK}}$
aanwijzing gebruik $\Delta y = \frac{1}{2} a t^2$ en $t = \frac{l}{v_{begin}}$

afbuiging in een magnetisch veld

De lorentzkracht staat op elk moment loodrecht op de bewegingsrichting. Deze kracht kan nooit arbeid op het deeltje verrichten. Met een magnetisch veld kun je nooit de kinetische energie van een geladen deeltje veranderen en het deeltje versnellen of vertragen. De snelheid is constant van grootte, alleen de richting van die snelheid verandert voortdurend.
Voor een *cirkelbeweging* met constante snelheid (ook wel *eenparige cirkelbeweging* genoemd) is een kracht nodig die op elk moment naar het middelpunt van de cirkel is gericht. Deze kracht wordt de *centipetale kracht* genoemd.
Volgens de bewegingstheorie moet voor de grootte van de centipetale kracht F_c gelden:

$$F_c = \frac{m.v^2}{r}$$

Daarin is m de massa van het rondcirkelende voorwerp, v de (constante) snelheid van het voorwerp en r de straal van de cirkel.
Een kracht die naar het middelpunt van de cirkel is gericht, zal altijd loodrecht op de raaklijn aan de cirkel staan en dus ook loodrecht op de snelheid van het cirkelende voorwerp. De lorentzkracht voldoet aan die richtingsvoorwaarde. Om geladen deeltjes een cirkelbeweging uit te laten voeren is dus een constante lorentzkracht ($F_L = B.q.v$) nodig die als centripetale kracht werkt. Het magnetische veld moet dus op alle punten van de baan hetzelfde zijn. Dan geldt:

$$B.q.v = \frac{m.v^2}{r}$$

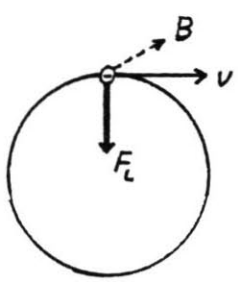


fig. 2.33 Een geladen deeltje die een snelheid bezit die loodrecht op een homogeen magnetisch veld is gericht voert een cirkelbeweging uit.

22 Een negatief en een positief geladen deeltje worden beide met een even grote tegengesteld gerichte snelheid in een homogeen magnetisch veld geschoten, loodrecht op de veldlijnen.
a. Maak een tekening en geef daarin aan welke baan de deeltjes gaan beschrijven.

b. Bereken van beide de straal van de baan als gegeven is dat hun lading $1{,}6.10^{-19}$ C is, hun massa $1{,}67.10^{-27}$ kg en hun snelheid 10^6 m/s. Het magnetisch veld is 0,15 T.

2.6 VRIJE WEGLENGTE IN GASSEN

Voor de discussie over de aard van kathodestralen is één aspekt van het gedrag van een deeltje in een veeldeeltjessysteem, een gas, van bijzonder groot belang geweest: de *vrije weglengte. Dat is de weg die een deeltje in een gas kan afleggen zonder te botsen met een ander deeltje*. Door te

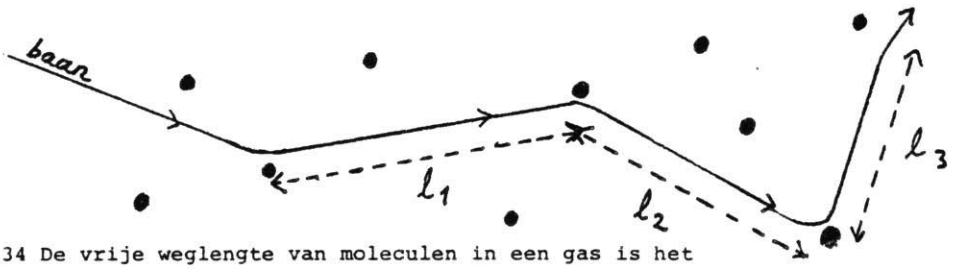


fig. 2.34 De vrije weglengte van moleculen in een gas is het gemiddelde van de afgelegde afstanden tussen opeenvolgende botsingen.

botsen verandert de snelheid van het deeltje van grootte en van richting. Is de vrije weglengte klein, dan zal een deeltje nooit diep in een gas kunnen doordringen, al is die nog zo snel gestart. Door de achtereenvolgende botsingen zal die zijn kinetische energie snel kwijt zijn. Als je deeltjes dus wèl diep in een gas ziet doordringen, dan weet je dat de vrije weglengte groot is. Een onbekend deeltje kun je dus onder andere op grond van zijn gedrag in een gas, zijn vrije weglengte, identificeren. Ook kun je op theoretische gronden de vrije weglengte aan deeltjes berekenen met een eenvoudige formule. Daarover gaat deze paragraaf.

kinetische gastheorie

De kinetische gastheorie beschrijft de eigenschappen van een gas met een geïdealiseerd model: het *ideale gasmodel*. In dat model bestaat een gas uit heel veel deeltjes (puntmassa's) die elk zo nu en dan tegen de wand botsen. De roffel van de botsingen nemen we waar als de *druk* op de wand. De gemiddelde kinetische energie van de deeltjes wordt bepaald door de temperatuur van het gas. De deeltjes zelf hebben geen invloed op elkaar, omdat het puntmassa's zijn en ze geen kracht op elkaar uitoefenen. Ze kunnen dus ook niet met elkaar botsen: geen onderlinge krachtwerking en punten 'komen elkaar niet tegen'. Voor ideaal gas geldt de algemene gaswet:

$$p\ V = n.R.T$$

met p de druk, V het volume, T de absolute temperatuur van het gas, n het aantal vol gas dat aanwezig is en R de algemene gasconstante ter grootte van 8,3 J $mol^{-1}.K^{-1}$.
De wetten van Boyle en Gay Lussac zijn op eenvoudige wijze uit deze algemene gaswet af te leiden.

reëel gas

Een reëel gas wijkt van het ideale gasmodel af, omdat het *geen* puntdeeltjes zijn, maar een omvang hebben, een zeker volume innemen, en omdat ze *wèl* een kracht op elkaar uitoefenen: aantrekkend als ze bij elkaar in de buurt komen en afstotend als ze heel dicht tegen elkaar aankomen: als ze botsen.

Voor de vrije weglengte is alleen de eigen omvang van de deeltjes en het onderling botsen van belang. We zien dus even af van de onderlinge aantrekkingskracht van de deeltjes.

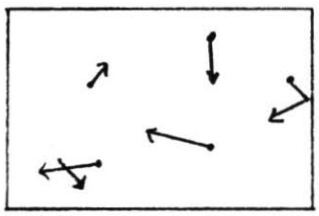


fig. 2.35a Het ideale gasmodel.

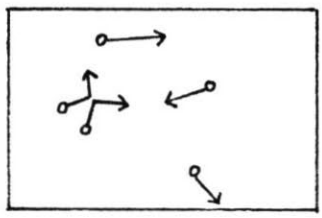


fig. 2.35b Model van een reëel gas.

Door de onderlinge botsingen wordt de vrije weglengte beperkt. Het aantal botsingen neemt toe als er meer deeltjes in hetzelfde volume komen, dus de vrije weglengte l neemt dan af:

$$l \sim \frac{1}{N}$$

met N het aantal deeltjes per m^3.
Verder hangt het aantal botsingen af van de grootte van de deeltjes zelf. Eigenlijk is niet zozeer de grootte maar de afstand waarbinnen ze elkaar gaan afstoten van belang. Een deeltje dat binnen die afstand een ander deeltje nadert, wordt afgestoten. Dat is eigenlijk wat we met een botsing bedoelen.

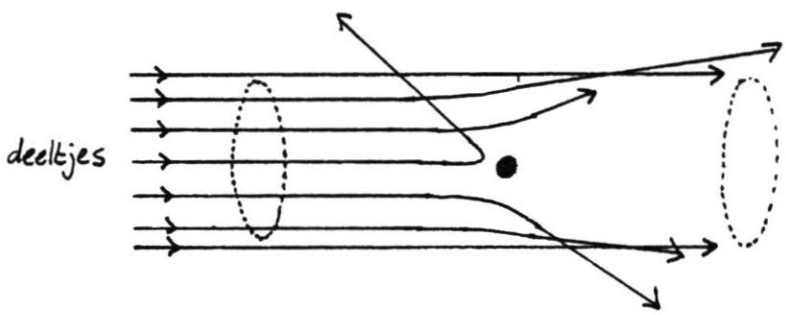


fig. 2.36 De botsingsdoorsnede van een gasdeeltje.

Zoals uit de tekening blijkt, doorloopt een deeltje een soort cilinder. Als een deeltje zich binnen die cilinder bevindt als het deeltje langskomt, dan botst die. Het oppervlak van de cirkel van die cilinder bepaalt de kans dat er een deeltje zal zijn om mee te botsen. Dat oppervlak noemen we de *botsingsdoorsnede* A. Bij grotere botsingsdoorsnede A zal de vrije weglengte l dus afnemen:

$$l \sim \frac{1}{A}$$

De gemiddelde grootte van de vrije weglengte wordt nu gegeven door de formule

$$l = \frac{1}{N.A}$$

De grootte van de botsingsdoorsnede kan geschat worden uit de afwijkingen van een gas van de ideale gaswet.

23 Beredeneer of de vrije weglengte van gasmoleculen verandert als:
a. het gas wordt samengeperst;
b. de temperatuur wordt verhoogd;
c. er gas ontsnapt.

24 Bereken de vrije weglengte (gemiddelde molecuulmassa 28,8) onder normale omstandigheden (p = 1,0.10^5 N/m^2 T = 293 K) als de botsingsdoorsnede 7.10^{-20} m^2 is.

25 SAMENVATTING

Maak een samenvatting van dit hoofdstuk. Zorg dat de volgende begrippen erin voorkomen:
- de drie principes van Newton;
- impuls, stoot;
- elektrische kracht, coulombkracht;
- lorentzkracht;
- elektrisch veld;
- influentie, elektroscoop, homogeen veld, kooi van Faraday;
- ionen in een vloeistof;
- paraboolbaan, cirkelbaan, centripetale kracht;
- versnelspanning, afbuigspanning;
- kinetische gastheorie, ideaal gas, reëel gas;
- botsingsdoorsnede, vrije weglengte.



3 GOLFTHEORIE

INHOUD:

3.1	Inleiding	37
3.2	Golfbeschrijving	38
3.3	Van het ene medium naar het andere	41
3.4	Buiging en interferentie	47
3.5	Polarisatie	55
3.6	Dopplereffekt	56
3.7	Experimenten rond het golfkarakter van licht	59

3.1 INLEIDING

In de eerste helft van de 19e eeuw hebben de natuurkundigen de golftheorie ontwikkeld. Zij hadden die nodig om een verklaring te geven voor die eigenschappen van *licht*, die niet met de deeltjestheorie verklaard kunnen worden. In dit hoofdstuk zullen we de golftheorie, die je voor het begrijpen van de discussie over de aard van de nieuwe stralen 'Rond 1900' nodig hebt, behandelen.
We maken daarbij gebruik van het beeld dat je uit 'Muziek' al kent. Geluid is immers ook een golfverschijnsel.

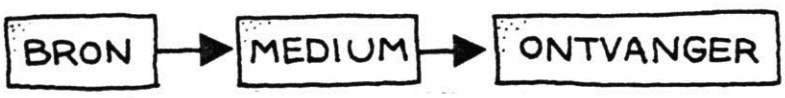


fig. 3.1

In de golftheorie nemen we meestal als voorbeeld een golf in een touw of golven op een wateroppervlak. Maar dan zien we af van 'storende' verschijnselen zoals wrijving, stroming van water en dergelijke. Dit is dus een theorie van 'ideale golven'.

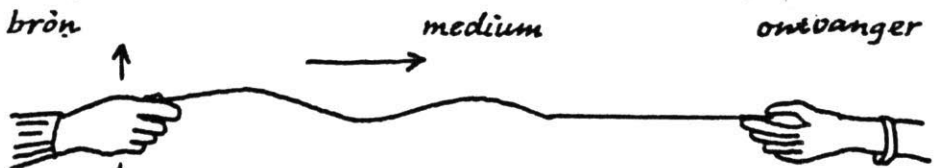
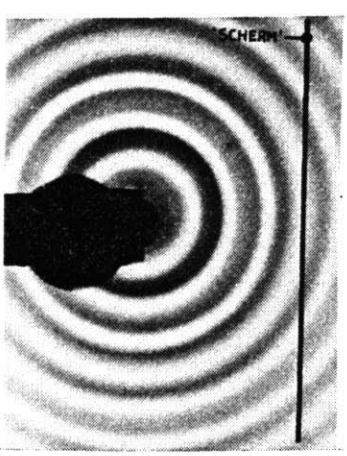


fig. 3.2 Bij een touw is de hand die het touw in beweging brengt de *bron*, het touw zelf is het *medium* waar de golf zich door voortplant en een andere persoon, die de golven op een bepaald moment aan voelt komen, zou je als ontvanger kunnen beschouwen.



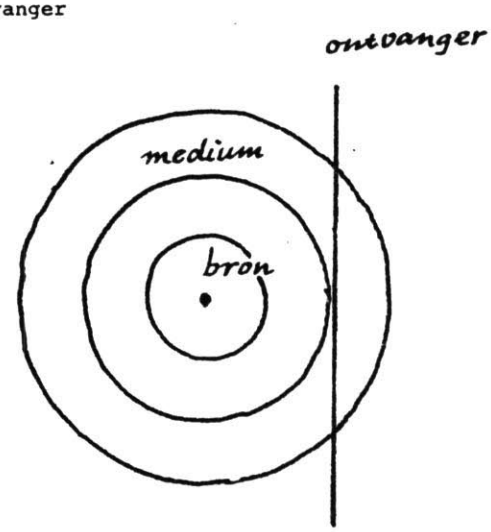


fig. 3.3 en 3.4
Op een wateroppervlak, bijv. de *golfbak*, waarvan we veel gebruik zullen maken, is het trilapparaat de bron, het wateroppervlak het medium en op de plaats waar je naar de golven gaat kijken, bevindt zich de ontvanger, op foto's vaak aangegeven door een lijn als 'scherm'.

1 Zoek een geluidsverschijnsel en wijs daarbij de bron, het medium en de ontvanger aan. Doe dat ook bij een lichtverschijnsel.

3.2 GOLFBESCHRIJVING

In deze paragraaf zullen we achtereenvolgens gaan kijken naar de eigenschappen van een golfbron, van media waardoor golven zich voortplanten en van de ontvangers van golven.

beschrijving van de bron

De bron voert een *trilling* uit met een bepaalde *frekwentie* f en *trillingstijd* T, die met elkaar samenhangen volgens:

$f = \frac{1}{T}$ eenheid hertz (Hz). 1 Hz = 1 s^{-1}

Zo'n trilling is een beweging rond een *evenwichtsstand*. De *maximale* afstand tot de evenwichtsstand (naar de ene of naar de andere kant) noemen we de *amplitude* A. De afstand tot de evenwichtsstand varieert dus steeds tussen $-A$ en $+A$. We zeggen dat voor de *uitwijking* $u(t)$ geldt:

$-A \leqslant u(t) \leqslant A$

We zullen in dit hoofdstuk steeds aannemen dat de bronnen die we gebruiken *harmonisch* trillen. Dat wil zeggen dat de uitwijking als funktie van de tijd sinusvormig is.

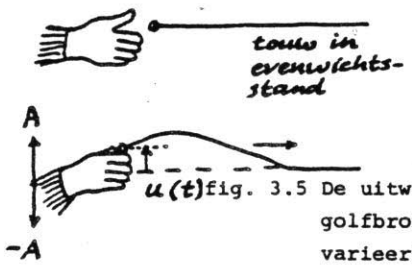


fig. 3.5 De uitwijking $u(t)$ van de golfbron (of trillingsbron) varieert tussen $+A$ en $-A$ met A de amplitude.

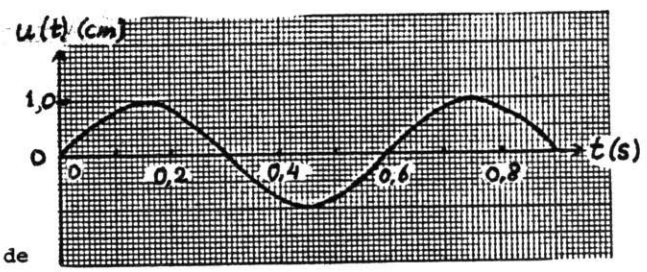


fig. 3.6 Een grafiek van de uitwijking van de golfbron als funktie van de tijd.

In werkelijkheid kunnen er veel meer soorten trillingen dan alleen de harmonische trilling optreden. Toch is de beperking tot de harmonische trilling niet erg, want alle trillingen kunt je zien als de som van een (soms heel groot) aantal harmonische trillingen.

2 Iemand maakt een golf in een touw door met zijn hand het begin van het touw vijf maal op en neer te bewegen in 2 seconde. De uitwijking is maximaal 3 cm.
Bereken de frekwentie en de trillingstijd.

3 Lees uit fig. 3.6 af:
a. de amplitude en de trillingstijd;
b. de uitwijking op de tijdstippen t = 0,15 s en t = 0,4 s.

beschrijving van het medium

De trilling van de bron wordt aan de punten van het medium doorgegeven. Die gaan meetrillen met *dezelfde frekwentie* als de bron. Zo gaat de golf zich voortplanten. De snelheid waarmee dat plaatsvindt noemen we de *voortplantingssnelheid* of de golfsnelheid v.

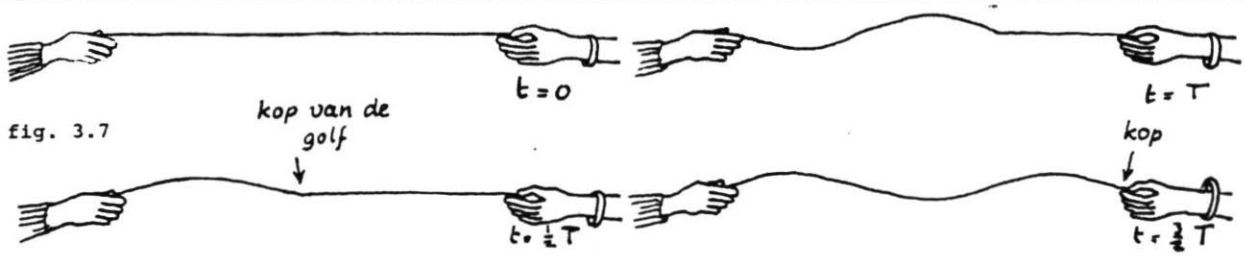
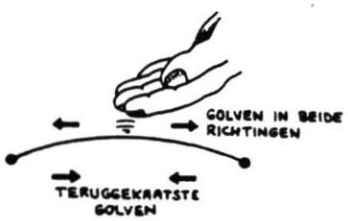


fig. 3.7

De *kop van de golf*, het punt dat juist in trilling gaat komen, komt dus steeds verder van de bron af te liggen. Op t = 1 T heeft zich precies één golfje tussen bron en de kop van de golf gevormd. De afstand die er dan tussen die twee punten is, noemen we de *golflengte* λ. Op t = 2 T is die afstand toegenomen tot 2 λ enz.

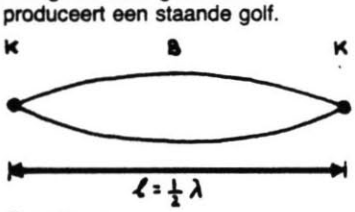
4 Laat zelf zien dat $\lambda = v.T$ of $\lambda = \frac{v}{f}$.

Deeltjes schieten zelf door de ruimte, die leeg kan zijn. Maar voor golven is een *medium* nodig. Een lopende golf plant zich wel door het medium voort, maar het medium zelf blijft (gemiddeld) op zijn plaats. Elk punt van het medium blijft trillen om zijn evenwichtsstand. Een lopende golf transporteert dus continu energie in de richting van de voortplantingssnelheid, maar hij transporteert géén impuls ($\vec{p} = m.\vec{v}$), omdat de massa van het medium gemiddeld op zijn plaats blijft en dus $< \vec{v} > = \vec{0}$ en $< \vec{p} > = \vec{0}$.
De grootte van het energietransport hangt af van de frekwentie en de amplitude van de golf en van de eigenschappen van het medium.
Behalve lopende golven bestaan er ook staande golven. Die ben je al in het thema 'Muziek' tegengekomen. Ter herinnering daaraan staat hieronder een stukje uit dat thema afgedrukt:



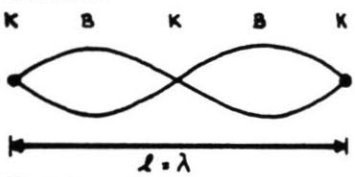
Een getokkelde gitaarsnaar produceert een staande golf.

Wanneer de voorkant van de golf bij het uiteinde is aangekomen wordt de golf teruggekaatst. De teruggekaatste golf ontmoet de heengaande. In sommige omstandigheden kan dan een staande golf optreden. In zo'n situatie doven heen en weer gaande golven elkaar uit op bepaalde plaatsen (de knopen) terwijl ze elkaar juist versterken in de buiken.
In gespannen snaren worden de staande golven niet gevormd door een van de uiteinden te bewegen. Die zitten vast omdat je anders de snaren moeilijk kunt spannen. Bij een gitaar wordt bijvoorbeeld een snaar 'getokkeld' op een bepaalde plaats. De trilling op die plaats plant zich voort in twee richtingen langs de snaar en zo ontstaat een staande golf. De frekwentie waarmee de snaar trilt (de *eigenfrekwentie*) hangt dan af van de *lengte*, de *spanning* en de *massa* van de snaar.



Grondtoon.

Net als het touw uit activiteit 1 kan een snaar op verschillende manieren trillen. De eenvoudigste manier is zoals bij het voorbeeld van het gespannen elastiek: er is één buik. De afstand tussen twee knopen noemen we ½λ, en in dit geval geldt dat de lengte van de snaar *l* gelijk is aan ½λ. We zeggen dat de toon die de snaar in dit geval produceert de *grondtoon* is.



Eerste boventoon.

Een tweede mogelijkheid is de staande golf zoals hiernaast getekend is. Dezelfde snaar trilt nu zó, dat twee buiken optreden en dat *l* = λ. Je hoort dan de zogenaamde *eerste boventoon*.
Volgende boventonen ontstaan wanneer de snaar nog meer buiken vertoont.

Ook voor staande golven geldt $\lambda = \frac{v}{f}$ of, zoals je de formule in 'Muziek' bent tegengekomen: $v = \lambda.f$.

5 Zoals je weet is geluid een golfverschijnsel.
a. Noem een proef waarmee je duidelijk aantoont dat geluid een golfverschijnsel is.
b. Hoe merk je dat geluid een golfsnelheid heeft? Hoe groot is die in de lucht? En in water?
c. De theorie voorspelt dat geluid een golflengte moet hebben. Bedenk een proef om de golflengte van geluid met één bepaalde frekwentie te meten. Maak je daarbij gebruik van lopende of staande golven?

6 De geluidssnelheid in lucht is 340 m/s, in water $1.48.10^3$ m/s en in steen $3{,}6.10^3$ m/s.
a. Bereken de golflengte van een geluidsgolf van 1000 Hz in die voortplantingsmedia.
b. Als gegeven is dat een geluidsgolf een golflengte van 23 cm heeft, weet je dan ongeveer hoe dat geluid zal klinken?

lichtbronnen

In de tijd dat de golftheorie werd ontwikkeld, waren er nog geen lichtbronnen die erg handig waren voor onderzoek. De onderzoekers moesten zich behelpen met het zonlicht, een kaars of een olielampje. Zonlicht werd het meest gebruikt: in een geheel verduisterde kamer kon het zonlicht door één gaatje naar binnen komen. Het feit dat de zon beweegt betekende wel dat ook de opstellingen (lenzen, prisma's enz.) steeds verschoven moesten worden.
In de 19e eeuw kwamen er veel lichtbronnen bij: allerlei soorten elektrische lampen (koolspitsenlamp, Edisons gloeilamp), gassen die oplichten en dergelijke. Een belangrijke nieuwe lichtbron voor onderzoek naar de aard van het licht in onze 20e eeuw is de laser.
De kleur licht die een bron uitstraalt wordt bepaald door de frekwentie van het uitgezonden licht.

Newton ontdekte in 1672 dat wit licht is opgebouwd uit alle kleuren van de regenboog. Dat was strijdig met de toen heersende opvatting dat kleuren bestaan uit bepaalde mengsels van zwart en wit. Newton verklaarde het bestaan van verschillende kleuren licht door aan te nemen dat er lichtdeeltjes van verschillende grootte bestaan. Elke kleur heeft zijn eigen grootte.
In het begin van de 19e eeuw deden o.a. Young en Fresnel proeven waardoor zij tot de overtuiging kwamen dat licht een golfverschijnsel is (zie ook blz. 52).

licht in een medium

Als licht als golfverschijnsel beschreven kan worden, dan moet licht zich met een eindige voortplantingssnelheid uitbreiden. Inderdaad heeft men gevonden dat de lichtsnelheid eindig is, maar wel heel groot: 300.000 km/s in vacuum. Meestal wordt de lichtsnelheid met de letter c aangegeven. Dus: c = 300.000 km/s.

De eindigheid van de lichtsnelheid werd in 1675 ontdekt door de deense astronoom Rømer, die zich toelegde op het voorspellen van de verduistering van één van de manen van Jupiter. Hij berekende uit het moment dat zo'n verduistering plaatsvond wanneer de volgende verduistering zou plaatsvinden. Op dat volgende moment zou Jupiter echter aan de andere kant van de zon staan (zie fig. 3.8).

Hij vond dat de verduistering 15 min. later plaatsvond dan hij berekend had. Hij verklaarde dat verschil door te wijzen op het feit dat het licht nu een veel grotere afstand moest afleggen om vanaf Jupiter bij de aarde te komen.
Op basis van toenmalige gegevens kwam men uit op ongeveer 200.000 km/s voor de lichtsnelheid.
Pas in 1850 kon Fiseau met een opstelling op aarde aantonen dat de lichtsnelheid eindig, maar zeer groot is. Hij en zijn navolgers kwamen op een lichtsnelheid van ongeveer 300.000 km/s.
Het besef, dat de lichtsnelheid eindig is, maakte het aan het einde van de 17e eeuw mogelijk om de eerste ideeën over de deeltjes- en golftheorie van het licht te ontwikkelen. Deze veronderstellen immers beide een eindige lichtsnelheid.



fig. 3.8 a) De verduistering van een maan van Jupiter als de aarde dicht bij Jupiter staat.



fig. 3.8 b) De verduistering van een maan van Jupiter als de aarde ver van Jupiter af staat.
N.B. De verhouding tussen de afstanden klopt niet!

ontvanger van licht

De onderzoekers van het begin van de 19e eeuw hadden als lichtontvanger alleen het oog. Weliswaar een nauwkeurig instrument om kwalitatieve verschillen te zien, maar onnauwkeurig als het om lichtmetingen gaat. In de loop van de 19e eeuw werd de fotografische plaat ontwikkeld. Die maakt het mogelijk om het ontvangen beeld vast te leggen. Aan het eind van de 19e eeuw wordt daarvan veelvuldig gebruik gemaakt.
In de 20e eeuw komen er een groot aantal lichtontvangers bij zoals een fotocel (van licht wordt een elektrisch signaal gemaakt), fotogevoelige halfgeleiders (fotodiodes, LDR) en dergelijke.

7 Geel licht heeft in vacuum een golflengte van ongeveer $5{,}8.10^{-7}$ m. De lichtsnelheid in lucht is $3{,}00.10^{8}$ m/s. Bereken de frekwentie van het licht. Vergelijk dat met de orde van grootte van de frekwentie van geluid en watergolven. Wat is je conclusie?

8 Rood licht heeft een frekwentie van ongeveer $4{,}5.10^{14}$ Hz. De lichtsnelheid in water is $2{,}3.10^{8}$ m/s. Bereken de golflengten in lucht en water.

9 Hoe lang doet licht erover om van de zon naar de aarde te komen (ca $1{,}5.10^{11}$ m)?

3.3 VAN HET ENE MEDIUM NAAR HET ANDERE

Golven die zich ongehinderd in een medium voortplanten veranderen niet van richting. Als ze echter aan het grensvlak tussen twee media komen, kaatsen ze terug of breken ze. Hoewel ze deze eigenschappen met deeltjes gemeen hebben, leiden de twee theorieën toch tot andere voorspellingen met be-

trekking tot terugkaatsing en breking.
Voorbeelden van terugkaatsing zijn: geluid dat door een muur wordt weerkaatst, licht dat op een spiegel valt en watergolven die tegen een kademuur aanlopen.
Voorbeelden van breking staan in fig. 3.9 en 3.10.

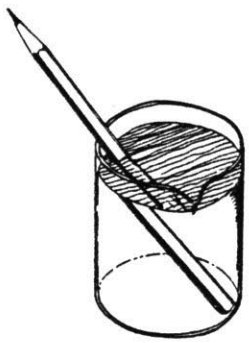


fig. 3.9

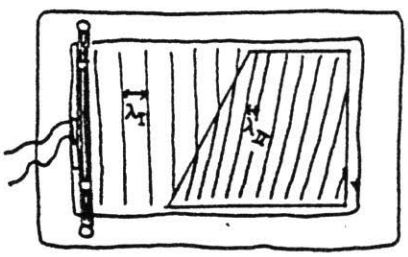


fig. 3.10

Om terugkaatsing en breking goed te beschrijven hebben we begrippen als golfstraal en golffront nodig.

golffront en golfstraal

Een druppel die in het water valt veroorzaakt *cirkelvormige golven* die zich naar alle kanten over het wateroppervlak uitbreiden. De cirkel met de punten die op een bepaald moment op het punt staan te gaan trillen vormen samen een *golffront*. Ook de punten die al één, twee, drie of meer *hele* trillingen hebben gemaakt zijn golffronten (fig. 3.11). Die liggen op 3, 2 of 1 golflengten afstand achter het begin-golffront. Ook *vlakke golven* (fig. 3.12) hebben golffronten. Die zijn echter niet cirkelvormig maar recht.

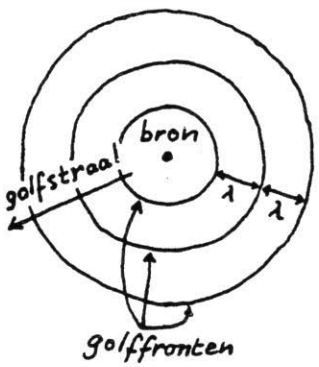


fig. 3.11 Cirkelvormige golffronten met golfstralen.

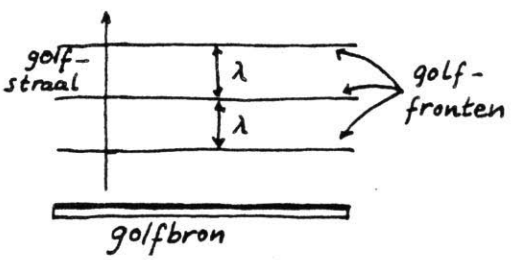


fig. 3.12 Vlakke golffronten met golfstralen.

Een golffront staat altijd loodrecht op de voortplantingsrichting van de golven. Een *golfstraal* geeft die voortplantingsrichting aan.

terugkaatsing

Als de golf tegen een medium botst waarin hij zich (nauwelijks) kan voortplanten, vindt er terugkaatsing plaats. Bij proeven met de golfbak blijkt dat, net als bij licht, de invalshoek i en de hoek van terugkaatsing t gelijk zijn. De spiegelwet $i = t$ geldt dus voor alle golfverschijnselen. Een cirkelvormig of een recht golffront blijft dus cirkelvormig of recht bij terugkaatsing tegen een recht obstakel.

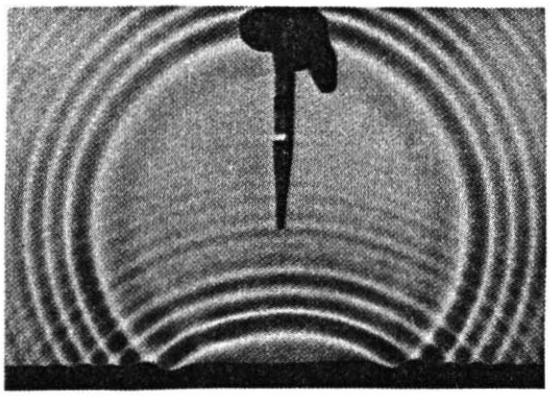


fig. 3.13 Terugkaatsing van een cirkelvormige golf.

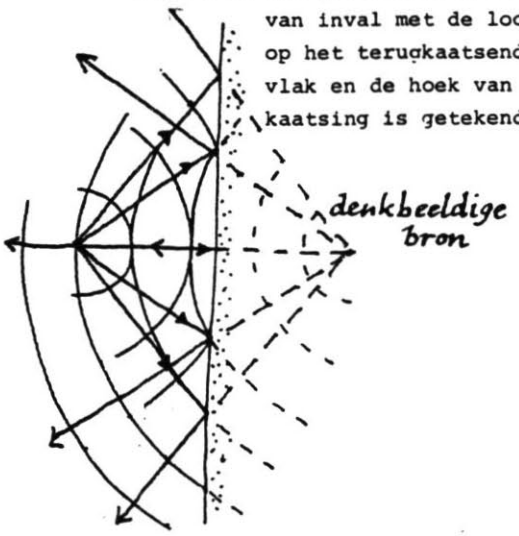


fig. 3.14 Een golfstraal met de hoek van inval met de loodlijn op het terugkaatsende oppervlak en de hoek van terugkaatsing is getekend.

breking

Bij licht vindt breking plaats als het licht van het ene medium (bijv. lucht) naar het andere medium (bijv. glas) overgaat (fig. 3.15).
Ook in de golfbak doet zich breking voor: golven breken aan de scheidingslijn tussen diep en ondiep water (fig. 3.16).

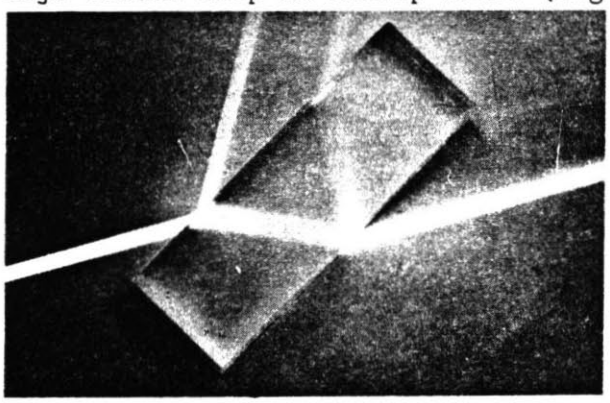


fig. 3.15 Breking van licht als het naar glas toe gaat en als het er weer uitkomt. Ook is terugkaatsing zichtbaar.

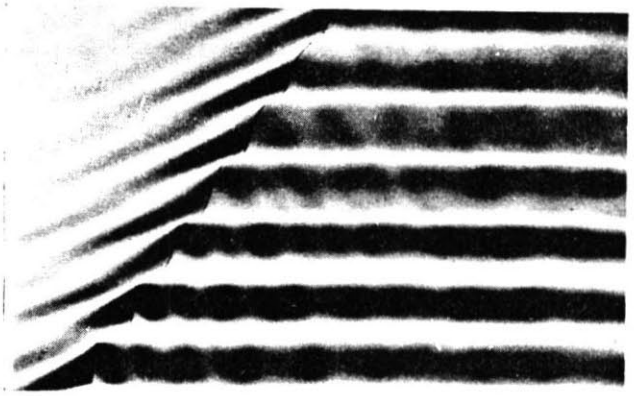


fig. 3.16 Breking in de golfbak. Het ondiepe deel is links. Ook zijn er teruggekaatste golven zwak zichtbaar.

De golffronten van fig. 3.17 kunnen op het grensvlak niet op elkaar aansluiten omdat de golflengte verandert. Als de golf dan van richting verandert, kunnen de golffronten aansluiten èn op een afstand λ_{II} van elkaar liggen.

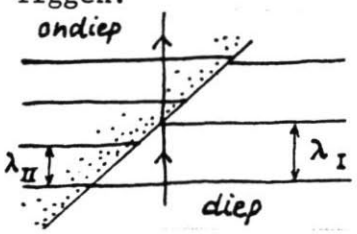


fig. 3.17 Een onmogelijke situatie: aan het grensvlak gaan de golven rechtdoor, maar sluiten niet meer aan.

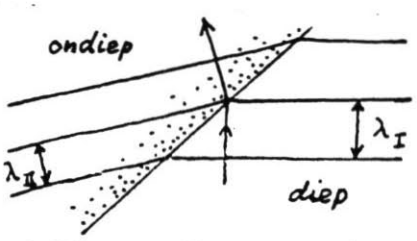


fig. 3.18 De werkelijke situatie: de golven veranderen van richting om aan te blijven sluiten.

10 a. Meet in fig. 3.16 de golflengten in het diepe en ondiepe gedeelte op (neem aan dat de foto de golven op ware grootte afbeeldt).
b. Bereken de verhouding tussen de golflengten.
c. In welk deel is de voortplantingssnelheid het grootst?

11 a. Maak een schets van de foto van fig. 3.16. Teken daarin de golffronten.
b. Geef de voortplantingsrichting aan.
c. Laat zien dat de breking van diep naar ondiep in dezelfde richting is als bij licht van lucht naar glas.
d. Als licht een golfverschijnsel is, in welk van de media lucht en glas is de voortplantingssnelheid dan het grootst?

Bij de inval van golven onder verschillende hoeken blijkt de verhouding tussen de golflengten in de media steeds hetzelfde te zijn. Vanwege $\lambda = \frac{v}{f}$ en het feit dat de frekwenties in de twee media gelijk zijn, is die verhouding gelijk aan de verhouding tussen de snelheden:

$$\frac{\lambda_I}{\lambda_{II}} = \frac{v_I}{v_{II}} = n$$

De constante n noemen we de *brekingsindex*. Deze is afhankelijk van de twee media en ook van de frekwentie van de golven.

12 In fig. 3.19 zie je een foto van golven in een golfbak. De golfbak heeft een diep en een ondiep gedeelte.
a. Wijs het ondiepe en het diepe gedeelte aan.
b. Bereken de brekingsindex van het ondiepe naar het diepe gedeelte. Moet de vergroting van de foto daarvoor gegeven zijn?
c. Waarom vindt er geen breking plaats aan de scheidingslijn tussen diep en ondiep?

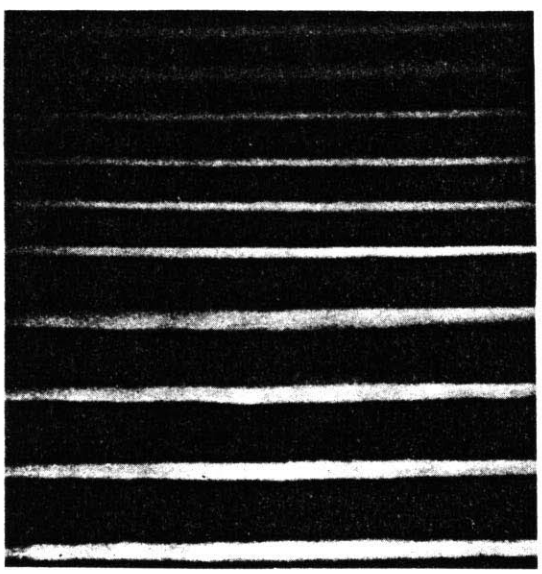


fig. 3.19

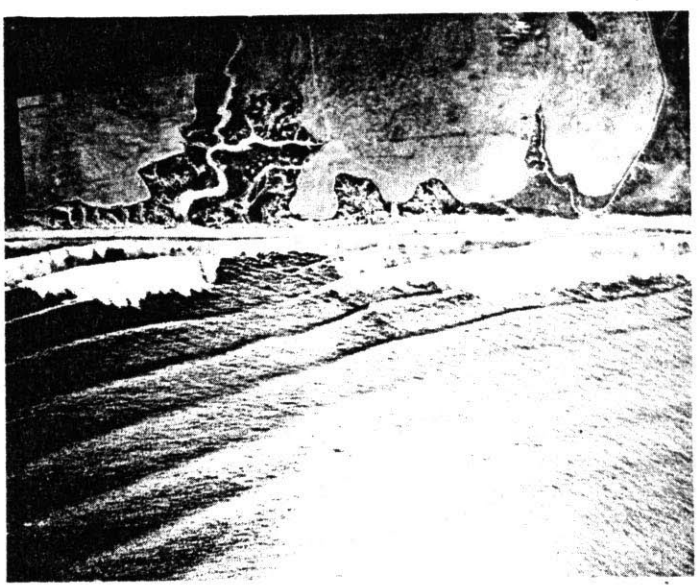


fig. 3.20

13 GOLVEN IN ZEE

In fig. 3.20 zie je een luchtopname van golven aan de kust.
a. Hoe kun je zien dat er (geleidelijke) breking plaatsvindt?
b. Probeer die breking te verklaren.

terugkaatsing van licht

Uit de spiegelwetten voor licht is bekend dat de hoek van inval en de hoek van terugkaatsing van een lichtbundel aan elkaar gelijk zijn. Dat is in overeenstemming met de golftheorie.

Ook de deeltjestheorie van het licht van Newton verklaart deze eigenschap bevredigend (zie fig. 3.21).

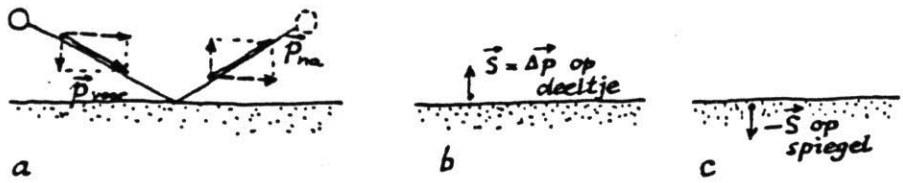


fig. 3.21

Volgens de deeltjestheorie van Newton geeft de spiegel ter plaatse O een omhoog gerichte stoot $\vec{S}$ aan het lichtdeeltje, waardoor de omlaag gerichte impuls-component verandert in een even grote omhoog gerichte. De impuls-component evenwijdig aan de spiegel wordt niet beïnvloed. Volgens het reaktieprincipe ontvangt de spiegel ook een stoot, omlaag gericht, even groot als de stoot die het lichtdeeltje krijgt.

Volgens de golftheorie ontvangt de spiegel geen stoot. In de golf-deeltjes-discussies speelt de kwestie rond stoot een belangrijke rol, zoals we verderop zullen zien.

lichtbreking

Zoals we al gezien hebben vertoont licht breking. De brekingsindex, bepaald door hoekmetingen bij breking van lucht naar bijvoorbeeld glas, blijkt groter dan 1 en wel 1,5 te zijn. De golftheorie voorspelt daarom dat de snelheid van licht in lucht groter is dan in glas vanwege $n_{l,gl} = \frac{c_l}{c_{gl}}$.

De metingen van de lichtsnelheid door Michelson in 1883 hebben de golftheorie volledig gelijk gegeven: in lucht is $c = 3{,}0.10^8$ m/s; in glas geldt: $c = 2{,}0.10^8$ m/s.

De deeltjestheorie heeft ook een verklaring voor de breking van het licht in glas naar de normaal toe, maar komt tot de voorspelling dat de lichtsnelheid in glas groter is dan in lucht, dus net omgekeerd. De metingen van de lichtsnelheid in lucht en glas werd dan ook als de nekslag gezien voor de deeltjestheorie, waarin toen maar weinig mensen overigens meer geloofden.
Newton moest de breking van lucht naar glas verklaren door aan te nemen dat zijn lichtdeeltjes aan het grensvlak een plotselinge *stoot* ondervonden door een soort zwaartekracht, waardoor de snelheid van de lichtdeeltjes *groter* wordt. Je kunt dat begrijpen door naar een knikker te kijken, die komend van een vlak stuk plotseling een versnelling ondervindt, omdat hij van een korte helling rolt en vervolgens weer op een vlak stuk verder gaat.
Volgens deze theorie zou de lichtsnelheid in glas dus groter zijn dan de lichtsnelheid in lucht en zou voor de brekingsindex moeten gelden:

$$n_{l,gl} = \frac{c_{gl}}{c_l}$$

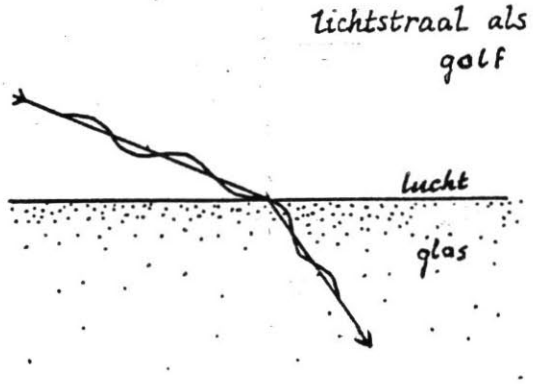


fig. 3.22

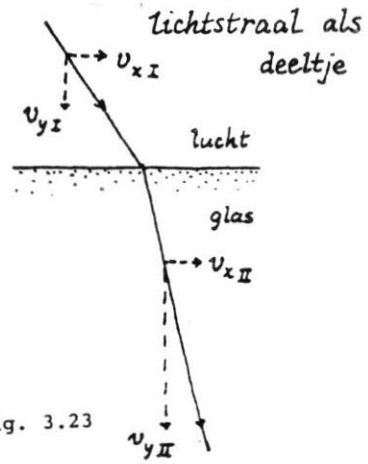


fig. 3.23

Het meten van de brekingsindex levert dus een *criterium* voor licht op om te beslissen of het een golf of een deeltjesverschijnsel is.

14 De brekingsindex van lucht naar glas is 1,5 en van lucht naar water is 1,33.
a. Hoe groot is de brekingsindex van glas naar lucht?
b. En hoe groot van glas naar water?
c. Leg uit dat de metingen van Michelson (zie hierboven) een 'bewijs' zijn voor de golftheorie van het licht.
d. Bereken de lichtsnelheid in water.

Breking en terugkaatsing treden meestal tegelijk op. Naarmate de lichtbundel schuiner invalt wordt er meer licht teruggekaatst. In de golftheorie levert dit verschijnsel geen problemen op. Zie fig. 3.15 en 3.16.

Newton ondervond wèl veel problemen toen hij dit verschijnsel probeerde te verklaren. Voor het terugkaatsen van lichtdeeltjes moest hij aannemen dat de deeltjes een stoot *omhoog* ondervinden (fig. 3.21). Voor breking moest hij aannemen dat de lichtdeeltjes een stoot *omlaag* ondervinden (zie fig. 3.23). Waren er twee soorten deeltjes? Hoe kon hij dan verklaren dat de teruggekaatste bundel groter wordt als i toeneemt?

breking en kleur

Newton nam waar dat verschillende kleuren licht door een prisma verschillend worden gebroken.

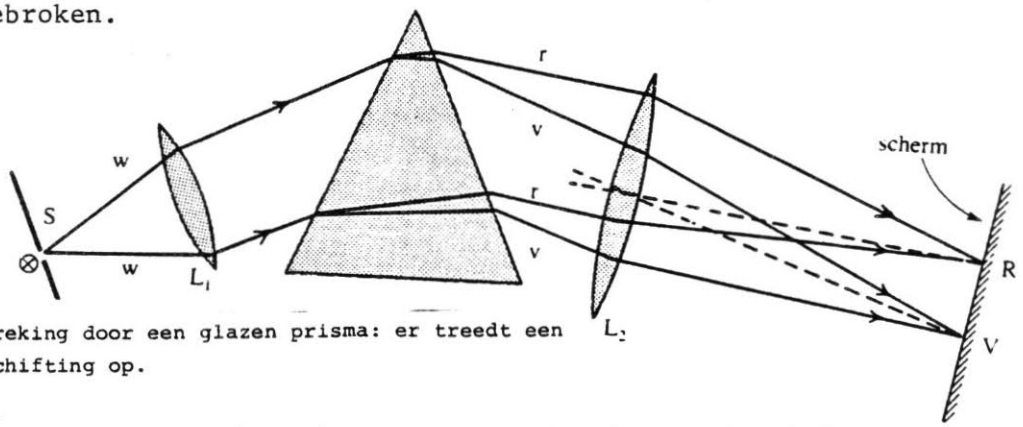


fig. 3.24 Lichtbreking door een glazen prisma: er treedt een kleurschifting op.

De brekingsindex van blauw licht is dus groter dan de brekingsindex van rood licht. In de golftheorie betekent dit dat de lichtsnelheid van blauw licht in glas kleiner is dan dat van rood licht. Breking is dus frekwentie-afhankelijk.

Newton zelf verklaarde dit door te veronderstellen dat de blauwe lichtdeeltjes daar meer worden versneld bij de overgang van lucht naar glas dan de rode lichtdeeltjes. Hij veronderstelde daarbij een verschil in grootte tussen de deeltjes.

15 Bereken de lichtsnelheid in (zeer zwaar) flintglas voor rood en violet licht. Gebruik je tabellenboekje.
Bereken ook de golflengte van violet licht (434 nm in vacuum) en rood licht (687 nm in vacuum) in (zeer zwaar) flintglas.

16 LICHTGOLVEN OF DEELTJES?

Welke argumenten ben je in deze paragraaf tegengekomen voor de golftheorie van het licht?

3.4 BUIGING EN INTERFERENTIE

Naast terugkaatsing en breking vertonen golven nog andere verschijnselen die zeer bruikbaar zijn om te bepalen of een onbekend verschijnsel een golf- dan wel een deeltjeskarakter heeft: buiging en interferentie.

buiging

Als we een golf laten vallen op een smalle opening, waardoor het grootste deel van de golf wordt tegengehouden, treedt een verrassend verschijnsel op. Er gaat niet een klein stukje golf rechtdoor, zoals je zou kunnen verwachten, maar er wordt een geheel nieuw cirkelvormig golffront gevormd. Het verschijnsel blijkt zich ook voor te doen als een cirkelvormige golf die op de opening valt. Dit wordt *buiging* genoemd.

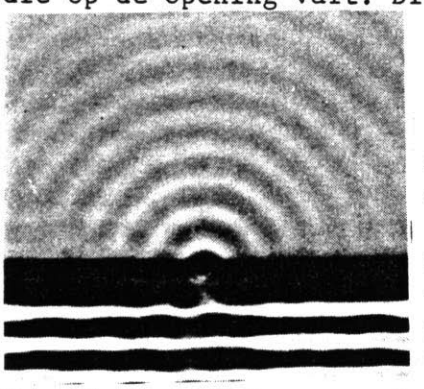


fig. 3.25
Buiging door een smalle opening.

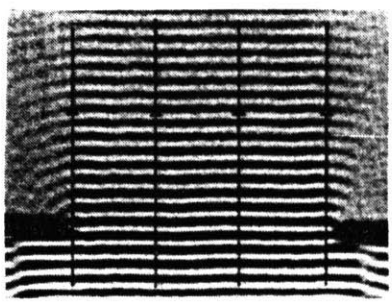


fig. 3.26
Bij een heel brede opening treedt nauwelijks meer buiging op: het golffront gaat ongestoord door.

Neem je een bredere opening (fig. 3.26), dan gaat het golffront vooral rechtdoor, maar krijg je een beetje buiging aan de zijkant (de 'schaduw').

17 a. Planten golven zich altijd rechtlijnig voort? En deeltjes?
b. Geef aan waarom het al dan niet optreden van buiging heel geschikt is om te beslissen of een verschijnsel een golf dan wel een deeltjeskarakter heeft.

18 BUIGING BIJ GELUID

Bedenk enkele situaties waarin je gebruik maakt van *buiging* om met elkaar te praten. Let op dat niet als tegenargument gebruikt kan worden dat er (ook) terugkaatsing optreedt.

interferentie

Een ander verschijnsel, dat alleen bij golven voorkomt, is interferentie. Dat komt voor bij een ontvanger waar twee golven met gelijke frekwentie tegelijkertijd aankomen. Die golven kunnen elkaar uitdoven of versterken, afhankelijk van de vraag of ze daar gelijk op of tegengesteld trillen.
In de golfbak kan je interferentie laten zien door een vlakke golf door *twee* openingen te laten gaan. Bij beide openingen treedt buiging op. Daardoor ontstaan er twee bronnen van cirkelvormige golven die gelijk op trillen met dezelfde amplitude. Dergelijke bronnen noemen we *coherente bronnen*. Bij elk punt van het 'scherm' van fig. 3.26 komen dus golven aan van beide trillingsbronnen. Op sommige punten van het scherm doven die elkaar uit, op andere punten versterken ze elkaar. De plaatsen op het scherm waar het wateroppervlak maximaal in trilling is noem je een (interferentie)*maximum*; en waar het wateroppervlak in rust is een (interferentie)*minimum*.

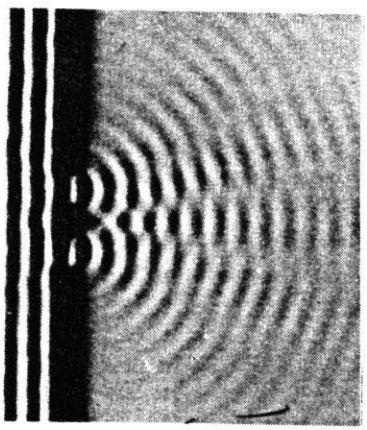


fig. 3.27 Interferentie door twee puntbronnen.

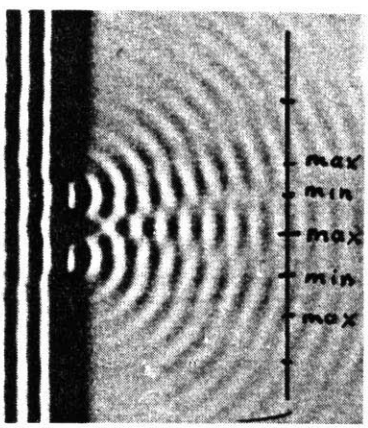


fig. 3.28 Op een denkbeeldig 'scherm' vind je maxima en minima.

19 a. Trek op de foto van fig. 3.27 denkbeeldige lijnen als 'scherm' (ontvanger) en wijs daarop aan in welke punten van dat 'scherm' versterking of uitdoving plaatsvindt.
b. Trek ook de (denkbeeldige)lijnen over het wateroppervlak die de maxima met elkaar verbinden. Hoeveel van dergelijke lijnen vind je in fig. 3.27?
c. Doe hetzelfde voor de minima.

de ligging van maxima en minima

Aan interferentie kan je niet alleen een verschijnsel als golfverschijnsel herkennen, je kunt ook de golflengte van de golven uitrekenen aan de hand van de ligging van de maxima (of minima). Op nevenstaande golfbakfoto's kan je nagaan welke afstanden daarbij van belang zijn.
De afstand tussen twee opeenvolgende maxima zullen we Δx noemen. Bij coherente trillingsbronnen is de middelloodlijn van de twee bronnen een lijn die maxima verbindt. Waar deze middelloodlijn een 'scherm' snijdt vinden we dus een maximum. Dat noemen we het *hoofdmaximum*. De denkbeeldige 'schermen' in de golfbak zullen we steeds evenwijdig aan de lijn door de trillingsbronnen nemen.

20 Gebruik je geodriehoek als 'scherm'. Leg de 0 van je geodriehoek in het hoofdmaximum van fig. 3.29 (of één van de andere foto's). Ga na dat de afstand Δx toeneemt als de afstand van het 'scherm' tot de twee bronnen toeneemt.

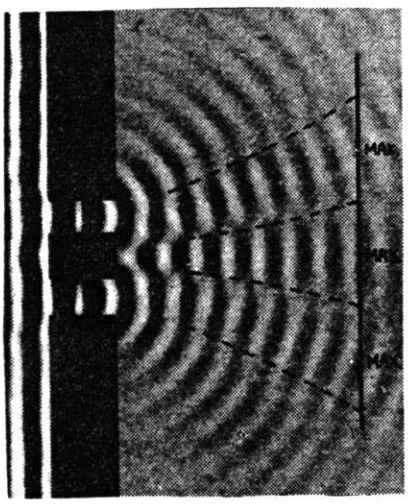


fig. 3.29

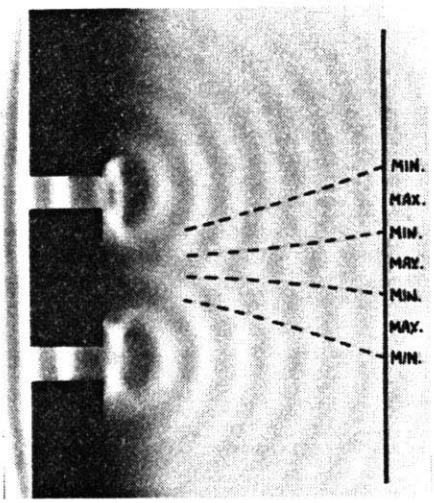


fig. 3.30

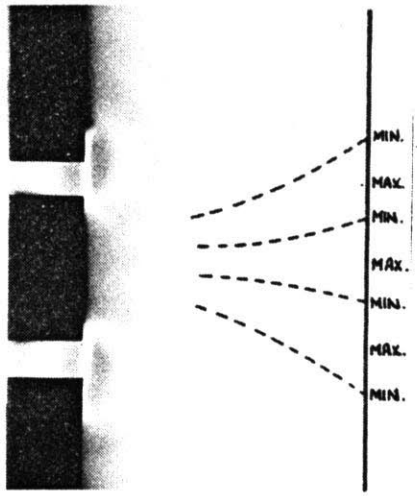


fig. 3.31

21 Hoe verandert Δx als de afstand tussen de bronnen toeneemt? Welke foto's gebruik je daarvoor? Hoe vergelijk je eerlijk?

22 Hoe verandert Δx als de golflengte van de golven toeneemt? Welke foto's gebruik je daarvoor? Hoe vergelijk je eerlijk?

23 Welke afstanden zijn volgens jou van belang om uit de ligging van de maxima de golflengte te kunnen berekenen?

berekening van de golflengte

Met behulp van de schematische tekeningen van fig. 3.32 en 3.33 zullen we een formule afleiden waarmee de golflengte berekend kan worden.

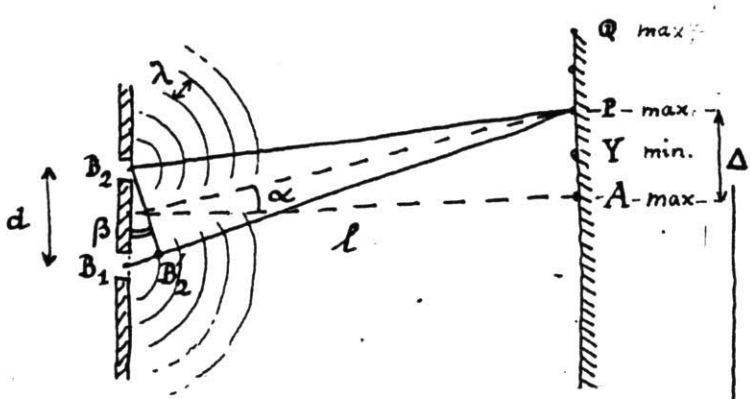


fig. 3.32 Schematische tekening, nodig om de golflengte uit de ligging van de interferentiemaxima af te leiden.

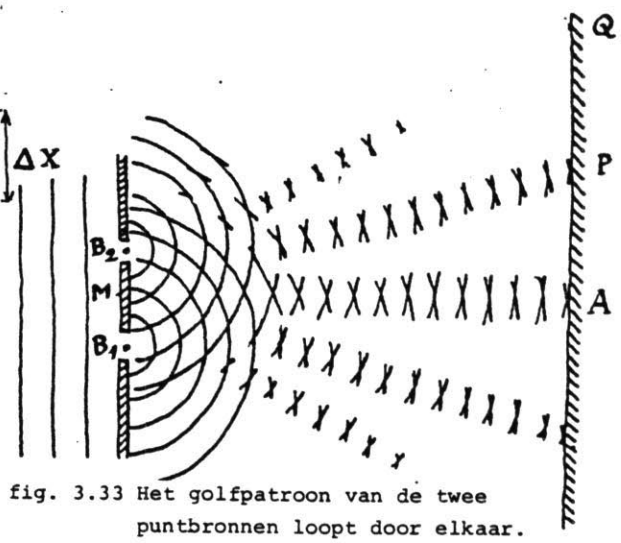


fig. 3.33 Het golfpatroon van de twee puntbronnen loopt door elkaar.

24 Vergelijk fig. 3.32 met één van de foto's ervoor, waarop je je geodriehoek als 'scherm' gelegd hebt.
a. Wijs op die foto de afstanden ℓ, d, Δx en λ aan.
b. Wijs ook de punten B_1, B_2, A, Y, P en Q aan.

Punt A ligt op de middelloodlijn van B_1B_2. A is dus het hoofdmaximum. In fig. 3.33 kan je zien dat A op 17 λ afstand van B_1 en op 17 λ afstand van B_2 ligt. Punt P ligt ook op 17 λ afstand van B_2, maar op 18 λ afstand van

B_1 . Als vanuit B_2 dus een golffront in P arriveert, arriveert er tegelijk een golffront vanuit B_1 in P. Die versterken elkaar. In P is dus een maximum omdat:

$$\Delta l = B_1P - B_2P = \lambda$$

Δl zullen we het *weglengteverschil* noemen. Voor A geldt dus: $\Delta l = 0$. Ergens tussen A en P, in Y zal het weglengteverschil $\frac{1}{2}\lambda$ zijn. Daar komen de golffronten dus nà elkaar aan, precies zo dat de golven elkaar daar uitdoven.
Als je vanuit A in fig. 3.32 langs het scherm naar boven (of naar onderen) gaat, neemt het weglengteverschil toe en vind je afwisselend een maximum ($\Delta l = \lambda,\ 2\lambda,\ \ldots$) of een minimum ($\Delta l = \frac{1}{2}\lambda,\ 1\frac{1}{2}\lambda,\ \ldots$).
In fig. 3.32 is $\Delta l = B_1B_2^1 = \lambda$. $B_1B_2^1$ is eigenlijk een cirkelboog, maar die hebben we als een rechte getrokken. In de driehoek $B_2B_2^1B_1$ die (vrijwel) rechthoekig is, geldt:

$$\sin\beta = \frac{\lambda}{d}$$

Maar omdat α vrijwel gelijk is aan β mag je ook zeggen:

$$\sin\alpha = \frac{\lambda}{d}$$

De hoek α kan je gemakkelijk bepalen omdat

$$\tan\alpha = \frac{\Delta x}{l}$$

Dus is de golflengte te bepalen als je Δx, l en d weet. Omdat $|\sin\alpha|$ altijd kleiner is dan 1, krijg je alleen interferentie (dus maxima en minima), als d groter is dan de golflengte λ.

25 a. Bereken voor één van de foto's van fig. 3.29 t/m 3.31 de golflengte via bovenstaande methode. Waar heb je het 'scherm' gekozen? Waarom?
b. Hoe kun je de golflengte direkt uit de foto aflezen? Klopt deze waarde met de in a gevonden waarde?

26 Wat wordt sin α voor het punt Q in fig. 3.32? Waarom kan het maximum Q alléén bestaan als d groter is dan 2λ?

27 Twee coherente trillingsbronnen staan op 2 cm afstand van elkaar in een golfbak waarin de golflengte 0,5 cm is.
a. Bereken sin α voor het eerste nevenmaximum.
b. Bereken ook de afstand Δx tussen het hoofdmaximum en het eerste nevenmaximum op een 'scherm' dat op afstand $l = 15$ cm van de trillingsbronnen staat. Gebruik dat $\tan\alpha = \frac{\Delta x}{l}$ (ga dat na!).
c. Bereken (zo mogelijk) de hoeken van het 2e, 3e, ... nevenmaximum.
d. Hoeveel nevenmaxima zijn er dus in totaal?

28 Laat aan de hand van de formule

$$\sin\alpha_n = \frac{n\lambda}{d}$$

met $n = 1, 2, 3, \ldots$ voor het 1e, 2e, 3e ... nevenmaximum zien dat:
a. de maxima dichter bij elkaar komen te liggen als je de opening breder maakt;
b. er meer maxima komen als je de opening breder maakt.

buiging, nauwkeuriger bekeken

We hebben al gezien (bij fig. 3.25 en 3.26) dat golven buigen, als ze door een hele smalle opening gaan en dat het golffront vrijwel ongehinderd doorgaat, als de opening heel breed is. Wat is nu heel smal en heel breed, welke vergelijkingsmaat heb je? De vergelijkingsmaat is de golflengte. Als de opening smaller is dan een golflengte, gaat de opening zich gedragen als een nieuwe bron van cirkelvormige golven. We spreken dan van volledige buiging.
Als de opening véél groter is dan λ zie je bijna geen buigingsverschijnselen meer. Voor openingen van enkele golflengten breedte krijg je nieuwe verschijnselen.

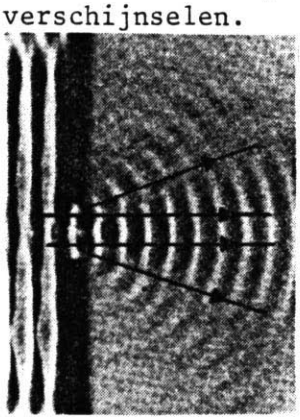


fig. 3.34 Dezelfde situatie als in fig. 3.25, maar met een iets bredere opening.

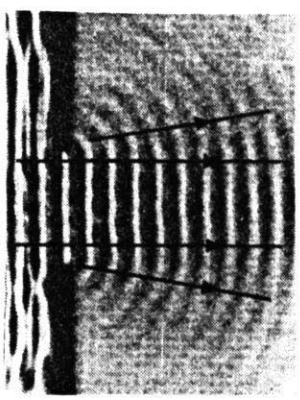


fig. 3.35 Idem, met een nóg bredere opening.

In de 'buigingsschaduw' zie je maxima en minima. Dat kan je verklaren door de opening te zien als een aantal bronnen van cirkelvormige golven die met elkaar interfereren.
De maxima en minima komen dichter bij elkaar, als je de opening breder maakt. Dat is te vergelijken met twee bronnen waartussen je de afstand vergroot. Dan komen de maxima en minima ook steeds dichter bij elkaar (zie aktiviteit 26).
Bij buiging betekent dat dat het hoofdgolffront steeds meer ongehinderd door kan gaan en dat de buigingsverschijnselen in de rand minder belangrijk worden.

29 Wat zou je gezien hebben, als je de spleet in de golfbak van fig. 3.35 steeds even breed had gehouden, maar je was de frekwentie gaan vergroten?

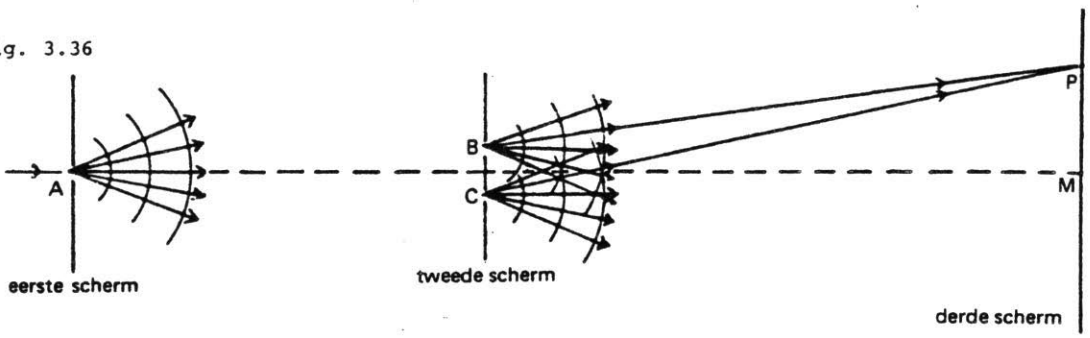
Buiging bij licht

Al in 1670 was buiging van het licht door Grimaldi opgemerkt. Hij merkte dat een klein gaatje in de verder geheel verduisterde kamer waar hij lichtproeven deed, een lichtvlek op de vloer veroorzaakte, die groter was dan het gaatje zelf. De verklaring dat de zon door dat gaatje op de vloer werd afgebeeld (zoals in een camera obscura) ging niet op, omdat de lichtvlek te groot was.
Grimaldi bracht het verschijnsel wel in verband met het golfkarakter van licht, maar de golftheorie was op dat moment te weinig ontwikkeld om een precieze verklaring te geven.
Newtons belangrijkste argument tegen de golftheorie van het licht was dat licht zich rechtlijnig uitbreidt en je niet 'de hoek om' kan zien, zoals je wel 'de hoek om' kan horen.
Nu weten we dat Newtons redenering fout is, omdat hij de relatie tussen de breedte van de opening en de golflengte niet kende. Daarom kwam men pas laat op het idee om hele smalle openingen te gebruiken om buiging te zien; de golflengte van het licht is immers zo klein.

In de 18e eeuw was de invloed van Newtons ideeën zó groot (vanwege zijn succesvolle theorie over de mechanica), dat niemand aan zijn lichttheorie kon twijfelen. Grimaldi's waarnemingen werden vergeten.

In 1801 pakte een Engelsman, Thomas Young, het idee van Grimaldi weer op: licht vertoont buiging. Als licht dan toch een golfverschijnsel is, redeneerde hij, dan moet het ook interferentie vertonen. Op de golfbak kan je interferentie makkelijk laten zien met twee coherente trillingsbronnen. Maar twee kaarsen, of twee zonnen, te vinden die coherent zijn is echt uitgesloten. Young verzon een truc om de natuur zijn geheim te ontfutselen: hij gebruikte het buigingsverschijnsel om twee coherente lichtbronnen te maken. Zie fig. 3.36.

fig. 3.36



Met behulp van een dubbele spleet die in de buigingsvlek van de eerste spleet werd geplaatst kon Young een interferentiepatroon op een scherm waarnemen. Heel zwak! want hij hield maar heel weinig lichtintensiteit over.
Young werd door zijn collega's uitgelachen: Newton kon toch geen ongelijk hebben.



fig. 3.37

Thomas Young (1773-1829) bewees dat licht een golfkarakter heeft. Toch bleven velen in de deeltjestheorie geloven.



fig. 3.38

Augustin Jean Fresnel (1788-1827) herhaalde de proeven van Young en verbeterde ze, zodat de interferentieverschijnselen beter zichtbaar werden.

De Fransman Fresnel herhaalde en verbeterde de proef van Young: hij splitste een lichtbundel in tweeën met een spiegel met een hele kleine knik erin. Daardoor hield hij meer licht over, zodat het verschijnsel

beter te zien was. Bovendien ontwierp hij een methode om de golflengte van het licht te bepalen: met behulp van de hiervóór afgeleide formule:

$$\sin \lambda_n = \frac{n\,\lambda}{d}$$

Pas toen allerlei voorspellingen, o.a. wat betreft de golflengte van verschillende kleuren, bleken niet uit te komen, werd de nieuwe lichttheorie geaccepteerd.

30 Met de proef van Young kan je de orde van grootte van de golflengten van licht bepalen. Als je de afstand tussen de twee spleten 0,02 cm neemt, krijg je dat de afstand tussen twee maxima ongeveer 0,3 cm is, als het scherm 130 cm achter de spleten staat.
a. Maak een tekening van de opstelling en zet de gegevens in de tekening.
b. Bepaal de tangens van α met behulp van de gegevens.
c. Bereken de (gemiddelde) golflengte.

31 Een rode lichtbron maakt een interferentiepatroon, als die door twee spleten valt, waarvan de maxima op ongeveer 0,3 cm afstand liggen. Hoe groot wordt die afstand ongeveer voor blauw licht? Gebruik zonodig je tabellenboekje.

32 POISSON's VOORSPELLING

Poisson, een Franse wiskundige, wilde in 1820 bewijzen dat Fresnel ongelijk had met zijn golftheorie van het licht. Hij liet theoretisch zien dat je achter een heel smal voorwerp in een lichtbundel buigingsinterferentie verwacht, zodanig dat er in het midden van de schaduw een lichte lijn te zien moet zijn.
a. Leg uit waarom je dat zou verwachten.
b. Fresnel deed de proef en vond de lichte lijn. Bedenk hoe jij die proef zou inrichten om zo'n resultaat te krijgen.

tralie

In 1840 kwam Rowland op het idee in plaats van twee spleten een heleboel openingen naast elkaar te gebruiken: een tralie.
Met een tralie worden de maxima heel scherp en tussen de maxima is bijna geen licht. Bovenstaande formule gaat ook voor een tralie op.
In de tekeningen hieronder zie je een schematische voorstelling van de werking van een tralie, als er licht op valt van één golflengte (van één kleur dus: *monochromatisch* licht).

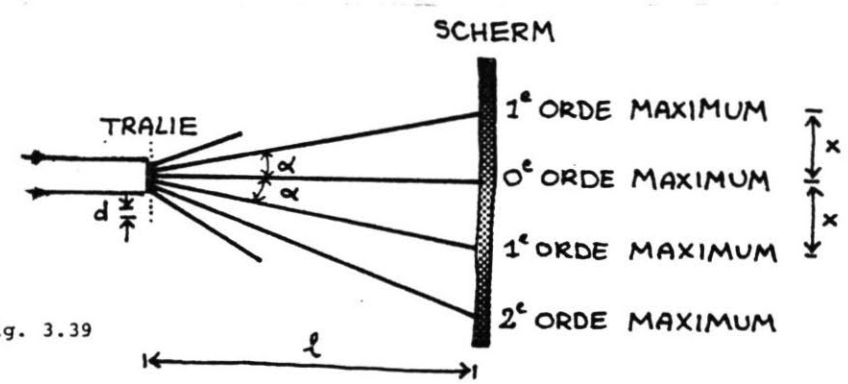


fig. 3.39

De invallende bundel splitst zich als het ware in een aantal uiteenlopende bundels. Op een scherm achter het tralie ontstaan lichtvlekken: maxima. Het rechtdoorgaande deel van de bundel geeft het *0e orde maximum*, en de schuin weglopende bundels het *1e*, *2e*, *3e enz. orde maximum*.
De golflengte λ van het invallende licht kan nu berekend worden met de volgende formule:

$\lambda = d \cdot \sin \alpha$

Daarin is d de *tralieconstante* (dat is de afstand tussen twee spleten op het tralie) en α de hoek tussen de lichtbundels die het 0e en 1e orde maximum geven.
De tralieconstante d bepaal je uit het (gegeven) aantal spleten per mm van het tralie. De hoek α kun je op twee manieren bepalen:
- door meting met een gradenboog: bij de plaats van het 1e orde maximum lees je de hoek α direkt af;
- door meting van de afstand x op het scherm tussen het 0e en 1e orde maximum en van de afstand l tussen scherm en tralie bepaal je α uit $\tan \alpha = x/l$.

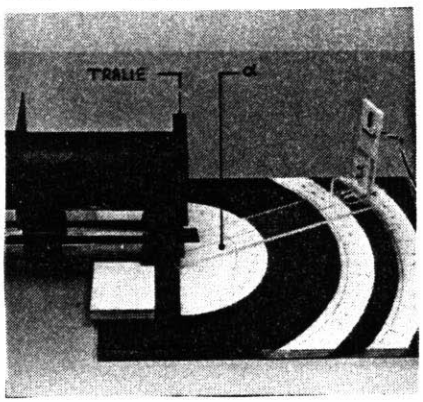


fig. 3.40 Een praktikumopstelling om met een tralie de golflengte te berekenen.

Bij monochromatisch licht bestaat het interferentiepatroon op het scherm uit een aantal lichtvlekken met alle dezelfde kleur. Bij monochromatisch licht van een andere kleur ontstaat een soortgelijk interferentiepatroon, maar de (anders gekleurde) lichtvlekken liggen op andere plaatsen. Want: uit de formule $\lambda = d \cdot \sin \alpha$ volgt dat bij licht van een andere kleur (andere λ) de hoek α een andere waarde heeft.
Als er wit licht op het tralie invalt (dus: een lichtbundel waarin alle golflengten uit het zichtbare *spectrum* aanwezig zijn), komen de maxima op het scherm bij de verschillende kleuren op verschillende plaatsen te liggen. Op het scherm zie je dan een aantal spectra (1e, 2e enz. orde spectrum). Op de plaats van het 0e orde maximum zie je geen spectrum maar een witte vlek.

33 a. Leg uit waarom het 0e orde maximum bij wit licht wit is.
b. Leg uit waarom het rood van het 2e orde maximum kan samenvallen met het blauw van het 3e orde maximum.

De formule voor het bepalen van de golflengte met een tralie kun je afleiden met het volgende model.
Hiernaast zie je (sterk vergroot) een deel van een tralie getekend. Elke spleet is een puntvormige lichtbron, die cirkelvormige lichtgolven uitzendt. Bij elke spleet zijn er twee getekend.
De golven op de golfstralen in richting 0 lopen netjes met elkaar 'in de pas'. Ze vormen samen het hoofdgolffront en bij aankomst op het scherm zullen ze een maximum geven (het 0e orde maximum). Maar er zijn meer

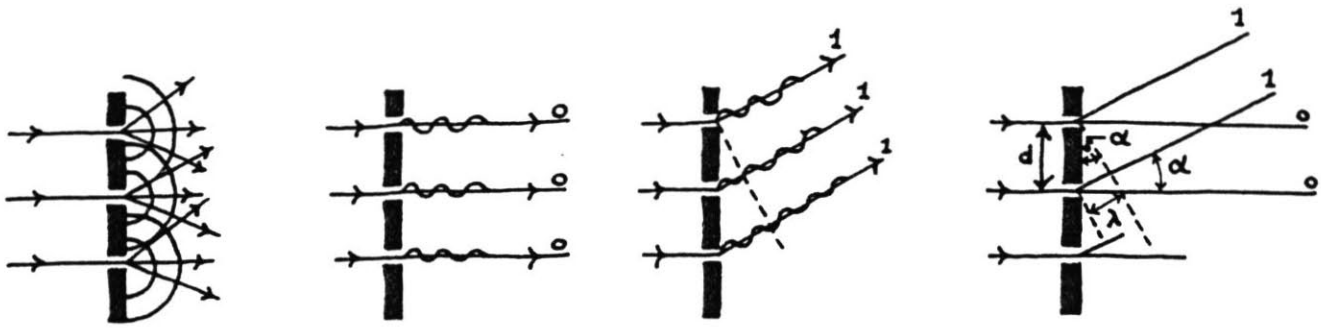


fig. 3.41 De verklaring van de werking van een tralie.

richtingen waarbij de golven in de pas lopen. Richting 1 bijvoorbeeld. Deze lichtgolven zullen op het scherm het 1e orde maximum geven. Uit de figuur rechtsboven volgt dan:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d} \rightarrow \lambda = d \cdot \sin \alpha$$

34 Een tralie heeft 4000 lijnen per cm. Er valt monochromatisch licht op van 457 nm (= 457.10^{-9} m).
Bereken de hoeken α voor de 1e, 2e en 3e orde maximum.

35 BREKINGSINDEX BEPALEN MET EEN TRALIE

Om de brekingsindex van een nieuwe stof Farelium te bepalen gebruik je dezelfde monochromatische lichtbron en dezelfde tralie als in aktiviteit 34. Je meet de hoek van het 1e orde maximum, als de tralie en het scherm in het Farelium ondergedompeld zijn. Die hoek blijkt 8,9° te zijn. Bereken de brekingsindex van Farelium.

36 LICHTGOLF OF DEELTJE?

Welke extra argumenten ontleen je aan deze paragraaf voor de stelling dat licht een golfbeweging is?

3.5 POLARISATIE

37 LICHT POLARISEREN

a. Neem twee polariserende plaatjes (bijv. de glazen van een polaroid zonnebril). Draai deze plaatjes ten opzichte van elkaar. Wat zie je? Waarom zou dat met één plaatje niet lukken?
b. Onderzoek allerlei 'lichtbronnen' en kijk of het licht ervan gepolariseerd is. Gebruik dus één polarisatieplaatje. Neem een lamp, weerkaatsing van licht door diverse spiegelende of gedeeltelijk spiegelende oppervlakken, de blauwe lucht, enz. Als je geluk hebt, kijk dan ook naar een regenboog!
Wat is je conclusie? Komt gepolariseerd licht veel voor?

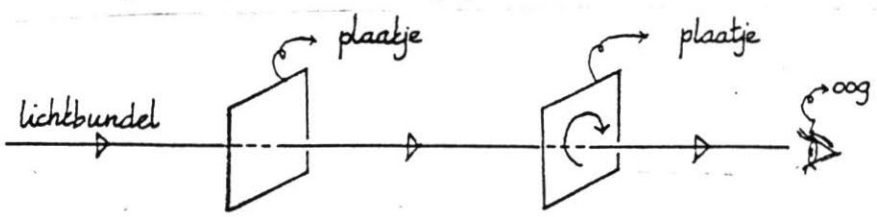


fig. 3.42 Polarisatie van licht.

In 1808 ontdekte Malus, een fransman, dat licht gepolariseerd kan worden. Golf- en deeltjesaanhangers probeerden dit nieuwe verschijnsel te gebruiken om hun theorie te 'bewijzen'. De golfaanhangers veronderstelden dat de lichtgolven hun trillingsrichting in het vlak *loodrecht* op de voortplantingsrichting hebben. Dat worden transversale trillingen genoemd. Transversale trillingen kun je ontbinden in twee onderling loodrechte trillingsrichtingen: de polarisatierichtingen. In een polarisatieplaatje wordt één van die richtingen geabsorbeerd, de andere doorgelaten.

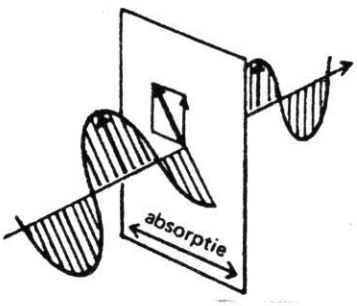


fig. 3.43 Verklaring van polarisatie met de aanname dat licht een transversale golf is.

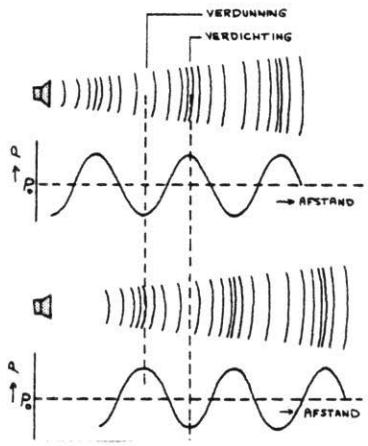


fig. 3.44

Longitudinale golven zijn niet polariseerbaar.

Een andere mogelijke golfbeweging is de *longitudinale* golf, die trilt evenwijdig aan de voortplantingstrilling. Die trillingsrichting ligt dus vast. Longitudinale golven zijn dus niet polariseerbaar.

de aether

Het transversale karakter van lichtgolven verklaart polarisatie goed. Maar transversale golven blijken alleen voor te komen in vaste stoffen of aan het oppervlak van vloeistoffen. Wat is het medium waardoor de lichtgolven zich voortplanten? Een belangrijke kwestie in de 19e eeuw.
Men nam aan dat de hele ruimte gevuld was met een *imponderabele* stof, een stof zonder gewicht, de *aether*. Deze stof moest dus de eigenschappen van een vaste stof hebben om het transversale karakter van licht te verklaren.

38 Zou je polarisatie van het licht met een deeltjestheorie kunnen verklaren?

3.6 DOPPLEREFFEKT

Je staat bij een overweg te wachten. Als de trein nadert en hij gaat toeteren, wat hoor je dan? Dan hoor je een hoge toon die plotseling laag wordt, als de trein voorbij gaat. Dat verschijnsel heet het dopplereffekt. Je kan het waarnemen bij allerlei *bewegende bronnen* zoals auto's, vliegtuigen enz. Het effekt is er ook, als de *waarnemer beweegt*, bijvoorbeeld als je in een trein langs rinkelende overwegbellen rijdt. Ook als het *medium beweegt* zoals lucht die t.g.v. de wind stroomt, kan je het effekt waarnemen, hoewel het wat moeilijker is hiervan praktijkvoorbeelden te geven.
Voor geluid geldt dus: als de bron en de ontvanger elkaar naderen, hoor je een hogere toon; als de bron en de ontvanger zich van elkaar verwijderen hoor je een lagere toon.
Het dopplereffekt doet zich bij alle golfbewegingen voor. Je kunt het op de golfbak laten zien.

39 DOPPLEREFFEKT OP DE GOLFBAK

Je kunt het dopplereffekt op de golfbak zien door een stroom waterdruppeltjes als golfbron te gebruiken. Als je de druppeltjes met een zekere snelheid over de golfbak beweegt zie je een golfpatroon zoals in fig. 3.68. Kun je ook andere golfpatronen krijgen bij verschillende snelheden?

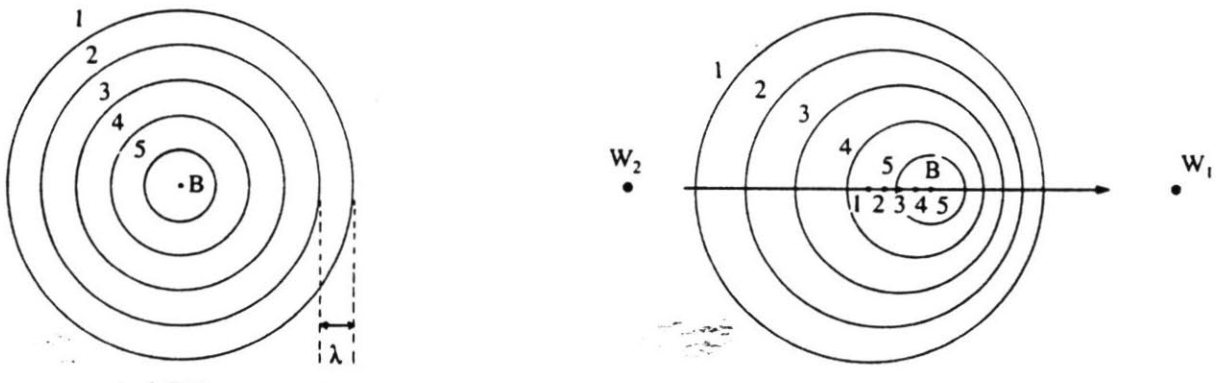


fig. 3.45 Het dopplereffekt

We gaan nu naar de verklaring van het dopplereffekt kijken. In fig. 3.46 zie je dat de golflengte van de golven die W_1 bereiken korter zijn geworden, omdat de golfbron naar W_1 toe beweegt. W_2 meet daarentegen langere golflengten. De golven planten zich echter met de normale golfsnelheid voort.

40 Laat zien dat W_1 een hogere en W_2 een lagere frekwentie waarneemt dan bij de stilstaande bron. Klopt dat met wat je bij geluid als dopplereffekt waarneemt?

Voor W_1 neemt de golflengte wat af, omdat de golfbron het golffront dat hij heeft uitgekozen een beetje heeft 'ingehaald', als die het volgende golffront uitzendt. Ten opzichte van de bron bewegen de golven zich dus niet met de golfsnelheid c in de richting BW_1, maar met een snelheid $c-v$ van de bron af, waarbij v de snelheid van de bron is. Voor de richting BW_2 is dat precies andersom: de golven bewegen zich met een snelheid $c+v$ van de bron af.
Je kunt dus alleen het dopplereffekt waarnemen als v niet verwaarloosbaar is ten opzichte van c. Bij lopen hoor je geen dopplereffekt. Op de fiets kan je het in sommige gevallen wel horen. Bij auto, trein en vliegtuig is het heel duidelijk. Ten opzichte van de geluidssnelheid van ca 340 m/s is de loopsnelheid (ca 1,5 m/s) te verwaarlozen. Maar de snelheid van een auto (ca 20 m/s) zeker niet.

dopplereffekt bij licht

Als licht een golfverschijnsel is, moet het ook dopplereffekt vertonen. Dat betekent dat licht dat door een naderende bron wordt uitgezonden een hogere frekwentie moet hebben gekregen. Dat betekent een verschuiving van alle zichtbare frekwenties in de richting van het (ultra-)violet. Voor een bron die zich verwijdert verschuiven de frekwenties naar het (infra-) rood.

Als je echter een lichtbron hebt, die alle zichtbare frekwenties (continu spectrum zoals een gloeilamp) uitzendt, dan merk je niet veel van die verschuivingen, omdat de ene frekwentie op de plaats van de andere is gekomen. Je kan het pas goed zien, als de lichtbron één of enkele afzonderlijke frekwenties uitzendt (discreet spectrum). Allerlei gassen die licht gaan uitzenden, omdat er een elektrische stroom doorheen gaat lopen, zenden een discreet spectrum uit, zoals een TL-buis bijvoorbeeld.
Je kunt de spectra van verschillende lichtbronnen bekijken door de frekwenties uit elkaar te halen met behulp van een tralie.

41 SPECTRA BEKIJKEN

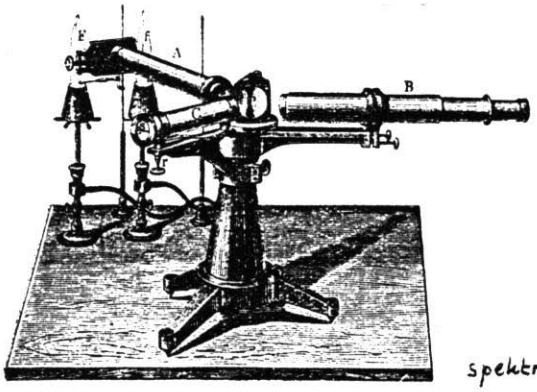
Bekijk het licht van verschillende lichtbronnen door een tralie of een speciale 'spectroscoop' (kan een tralie bevatten of een prisma).
Ga na met welke van de lichtbronnen je in principe zou kunnen nagaan of licht dopplereffekt vertoont. Bedenk wat er aan de kleur van de lichtbronnen zou veranderen, als de lichtbron zich van je zou verwijderen.

Om dopplereffekt waar te kunnen nemen moet de snelheid waarmee de bron zich beweegt niet al te klein zijn ten opzichte van de golfsnelheid. Voor licht betekent dat, dat je pas dopplereffekt gaat zien, als de snelheid flink groot is, bijvoorbeeld 100 km/s, omdat de lichtsnelheid zo groot is (300.000 km/s). De spectraallijn van de bewegende lichtbron is dan waarneembaar verschoven ten opzichte van een stilstaande bron die ook zo'n spectraallijn uitzendt.

42 SAMENVATTING

Maak een samenvatting van dit hoofdstuk. Zorg dat de volgende begrippen erin voorkomen:

- bron, medium, ontvanger
- frekwentie, trillingstijd
- evenwichtsstand, uitwijking, amplitude
- medium, voortplantingssnelheid
- golflengte
- golffront, golfstraal
- brekingsindex
- buiging
- interferentie, maxima en minima
- tralie
- polarisatie, longitudinaal, transversaal
- dopplereffekt
- spectra.



spektroskoop

3.7 EXPERIMENTEN ROND HET GOLFKARAKTER VAN LICHT

Hieronder staan proeven beschreven die enkele kenmerkende golfverschijnselen te zien geven. Dat zijn:
- breking aan een grensvlak,
- buiging en interferentie,
- polarisatie.

Je kunt kiezen uit:
onderzoek 1: geprojekteerd gloeilamplicht,
onderzoek 2: lamp- en zonlicht zonder projektie,
onderzoek 3: geprojekteerd laserlicht,
onderzoek 4: microgolven.

Het is de bedoeling, dat je na afloop van de onderzoekjes kunt vertellen:
- onder welke omstandigheden de genoemde verschijnselen optreden,
- waaraan je de genoemde verschijnselen herkent,
- welke faktoren van invloed zijn op wat je ziet (bijv. golflengte, voortplantingssnelheid, spleetafstand).

Ook bevat elk onderzoekje een gedeelte waarbij metingen moeten worden verricht waarmee de golflengte van de gebruikte golf kan worden bepaald.

1 GLOEILAMPLICHT

Bouw op een optische rail de volgende opstelling (bovenaanzicht).

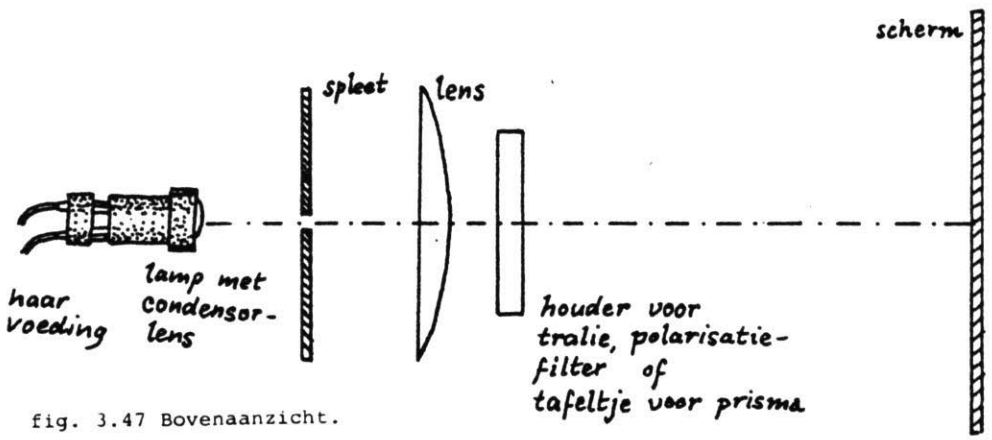


fig. 3.47 Bovenaanzicht.

Stel de afstanden zó in, dat de spleet scherp en vergroot op het scherm wordt afgebeeld.

a. In feite is er in deze opstelling al sprake van breking (waar?), maar we zullen er nog iets gedetaillerder naar kijken.
Plaats een prisma in de lichtweg. Beschrijf wat er met de afbeelding op het scherm gebeurt.
Noteer ook het effekt dat draaiing van het prisma heeft.
Welke kleur wordt het sterkst gebroken?
Je kunt dat nog wat preciezer zien door de spleet half met een rood, half met een blauw glaasje te bedekken.

b. Buiging en interferentie.
Plaats nu een tralie op de aangegeven plaats. Teken en beschrijf het patroon dat op het scherm verschijnt.

Wat gebeurt er met dit patroon, als je:
1) de spleet van boven met een rood, van onder met een blauw glaasje afdekt?
2) de tralie schuin in de lichtweg zet, zodat de lijnen dichter op elkaar komen?

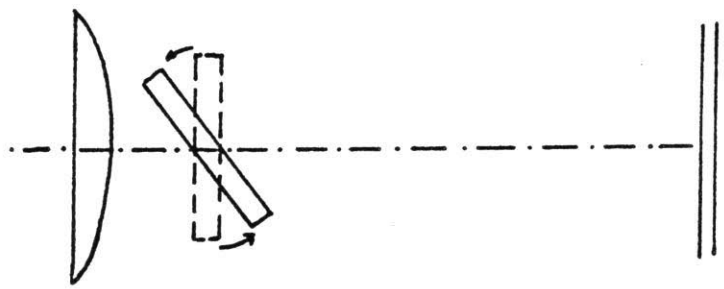


fig. 3.48 Bovenaanzicht.

3) de tralie gedeeltelijk afdekt, zodat alleen de middelste lijnen nog vrij zijn? (Dit effekt is moeilijk zichtbaar te maken.)
Beschrijf en teken steeds wat je ziet.

golflengtebepaling

Maak het licht monochromatisch door een rood filter tegen de spleet te zetten. De golflengte kan nu met de formule

$$\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d}$$

worden berekend, als je α_1 kunt meten en achter de waarde van d kunt komen. Deze laatste heet hier ook wel de tralieconstante. Soms staat hij op de tralie, vraag het anders de docent.
De bepaling van α_1 kan het beste door
• de afstand Δx tussen centraal maximum en eerst nevenmaximum te meten en
• de afstand l tussen lens en projektiescherm te meten (zorg ervoor dat de tralie zo dicht mogelijk bij de lens staat).

Dan geldt, dat $\tan \alpha_1 = \frac{\Delta x}{l}$ en daarmee kan α_1 berekend worden.
Bereken daarmee weer de golflengte.
Herhaal de proef, maar nu met een blauwfilter bij de spleet.

c. Polarisatie.
Vervang de tralie door een polarisatiefilter (polaroidplaatje). Verandert de helderheid van de afbeelding, als je het plaatje draait?
Houd ook twee filters achter elkaar in de lichtweg; draai ze zo ten opzichte van elkaar, dat er geen licht meer door de combinatie komt.

2 ZONLICHT EN LAMPLICHT

a. Breking aan een grensvlak.
Kijk naar een raamkozijn of naar een TL-buis. Houd dan een glazen prisma tussen het voorwerp en je oog (vlak voor je oog gaat het makkelijkst), en verplaats je hoofd zó, dat je het voorwerp opnieuw ziet, nu door het prisma.

Maak nu een schets waarin je de plaats van het voorwerp, van het prisma en van je oog aangeeft. Hoe lopen de lichtstralen dan in zo'n schets?
Aan contrasterende randen zie je kleurverschijnselen. Welke kleur wordt het sterkst gebroken?
Dit laatste kan je ook goed zien, als je het prisma half blauw, half rood afdekt.

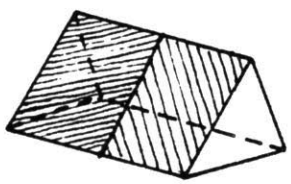


fig. 3.49

b. Buiging en interferentie.
Gebruik hier de zelfbouwspectroscoop: een PVC-buis waar diaraampjes ingeschoven kunnen worden.

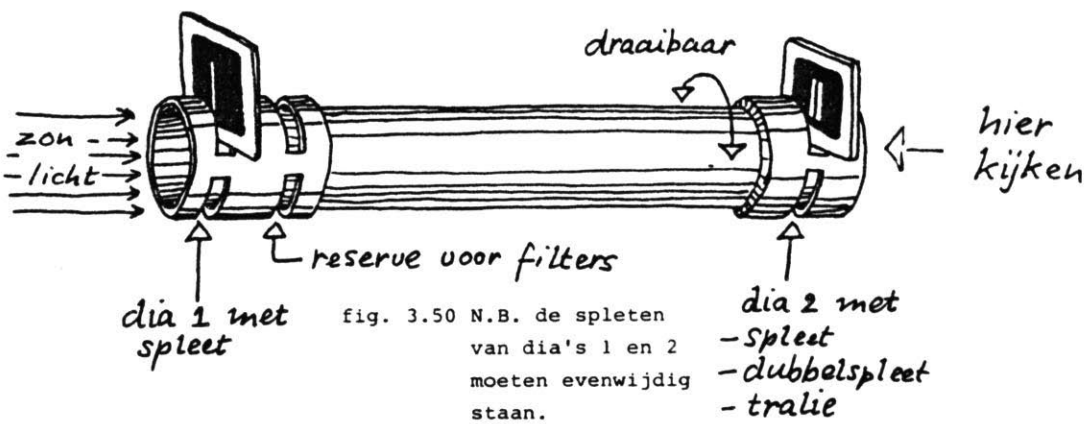


fig. 3.50 N.B. de spleten van dia's 1 en 2 moeten evenwijdig staan.

Richt de buis naar een helder stuk van de hemel en kijk erdoor, terwijl je één van de exemplaren van dia 2 in de houder geschoven hebt.
Beschrijf voor elke dia wat je ziet. Ga na wat de invloed is van:
1) de dikte van de spleet (ze zijn er in maten),
2) verdubbeling van de spleet,
3) de afstand tussen twee spleten,
4) vergroting van het aantal spleten, nl. door een tralie te gebruiken,
5) de afstand tussen de lijnen van een tralie (de tralieconstante); als er maar één tralie is, moet
6) de kleur van het invallende licht, door achter de beginspleet (dia 1) een kleurfilter te plaatsen; er is zelfs een dia met half een rood, half een blauw filter.

golflengtebepaling

De zakspectroscoop leent zich niet zo goed voor het verrichten van metingen. Met een losse tralie, een lampje, een muur, een helper en het blote oog gaat het echter ook. Als je door een tralie naar

een lichtpunt (lampje) op de muur kijkt, zie je op diezelfde muur nog meer lampjes verschijnen: de buigingsbeelden, een beetje uiteengetrokken in allerlei kleuren. Met een roodfilter voor de tralie kan je je tot één serie beelden beperken.
Ga nu op een afgemeten afstand l tot de muur staan, en kijk op de beschreven manier naar het lampje. Laat een medeleerling een stukje plakband plakken op de plaats waar jij het eerste buigingsbeeld ziet. Meet vervolgens de afstand tussen plakker en lampje: Δx.
Voor de hoek α_1 waaronder de eerste-orde lichtstralen afgebogen werden, geldt nu:

$$\tan \alpha_1 = \frac{\Delta x}{l}$$

De golflengte bereken je met $\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d}$. De tralieconstante d moet je aan je docent vragen (soms staat hij op de tralie).
Herhaal de proef met een blauwfilter.

c. Polarisatie.
Bekijk de hemel door een polarisatiefilter (polaroidplaatje). Verandert de helderheid, als je het plaatje draait?
Houd ook twee filters achter elkaar. Draai ze zó ten opzichte van elkaar, dat er geen licht meer door de combinatie komt.
Eventuele speciale effekten:
- kijk door een filter naar gereflecteerd licht en draai het filter (bij spiegelende metalen werkt het niet);
- plaats bij twee elkaar 'uitdovende' filters een derde ertussen (je hebt nu dus assistentie nodig, of een statief) en draai dat;
- onderzoek het verstrooide zonlicht uit een paar richtingen van de hemel met één filter. Je kunt zien, dat de mate waarin het door de reflectie gepolariseerd is, afhangt van de plaats op de hemel.

3 LASERLICHT

Bouw de volgende opstelling (bovenaanzicht).

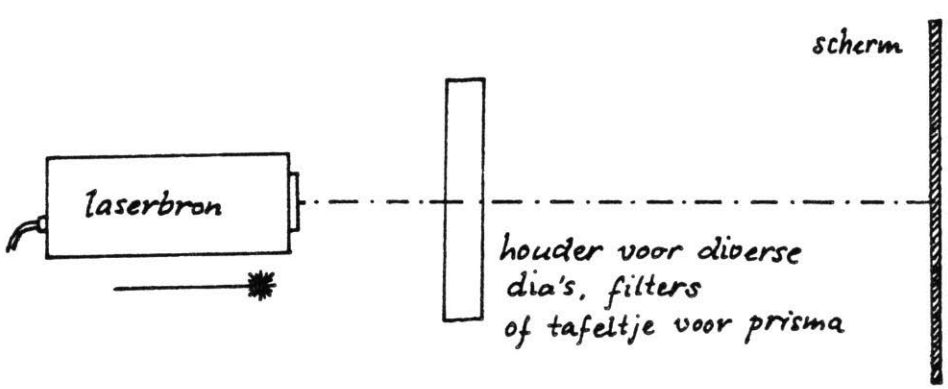


fig. 3.51 Bovenaanzicht.

WAARSCHUWING: Wees zuinig op eigen en andermans netvlies, kijk niet in de laserstraal of in reflecties aan spiegelende oppervlakken!

a. Breking aan een grensvlak.
Plaats een prisma in de lichtweg (pas op voor onverwacht rondslingerende laserstralen!).
Bekijk de plaats van de stip op het scherm, met en zonder prisma. Noteer je waarneming. Beschrijf ook de invloed van draaiing van het prisma op de stip.
Laserlicht bevat maar één kleur (golflengte), zodat het effekt van kleurschifting bij breking in deze proef niet zichtbaar is.

b. Buiging en interferentie.
Plaats dia's met verschillende afbeeldingen op de aangegeven plaats en teken of beschrijf de patronen die op het scherm verschijnen.
Gebruik de volgende obstakels:
1) een spleet. Wat is de invloed van de spleetbreedte op het patroon? Neem een aantal verschillende spleten, of varieer de spleetbreedte, als dat kan.
2) een dubbele spleet. Varieer indien mogelijk de spleetafstand en noteer het effekt.
3) een tralie. Draai deze ook schuin in de lichtbundel, zodat de lijnen dichter op elkaar komen.

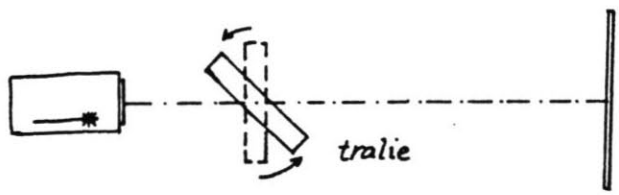


fig. 3.52 Bovenaanzicht.

Ook draden, haren en gaatjes in de laserbundel leveren interferentiepatronen op.

golflengtebepaling

De straal die van de tralie naar het eerste nevenmaximum loopt, maakt een hoek α_1 met de rechtdoorgaande straal. Die hoek hangt samen met de golflengte van het laserlicht volgens: $\sin \alpha_1 = \frac{\lambda}{d}$.
De tralieconstante d moet je aan de docent vragen. De bepaling van α verloopt langs een kleine omweg.
Meet daartoe zowel de afstand l van tralie tot scherm als de afstand Δx van eerste-orde-maximum tot hoofd-maximum op het scherm.
Dan geldt:

$$\tan \alpha_1 = \frac{\Delta x}{l}.$$

En hieruit vind je α_1.
Bereken dan λ en vergelijk je uitkomst met de waarde die de fabrikant heeft opgegeven.

c. Polarisatie.
Vervang de tralie door een polarisatiefilter (polaroidplaatje). Verandert de helderheid van de afbeelding, als je het plaatje draait?
Houd ook twee filters achter elkaar in de lichtweg; draai ze zo ten opzichte van elkaar, dat er geen licht meer door de combinatie komt.
Kijk uit voor reflekties!

4 MICROGOLVEN

Microgolven zijn evenals licht elektromagnetische golven, maar onzichtbaar. Met hulp van een microgolfontvanger kunnen we ze toch waarnemen.
Bouw de volgende opstelling:

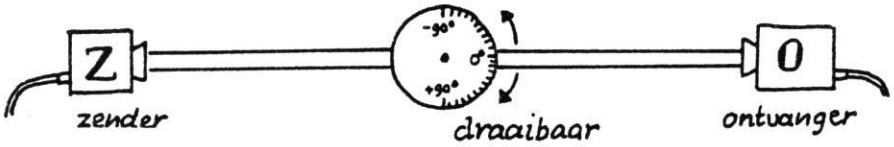


fig. 3.53 Bovenaanzicht.

Op de schijf waaromheen de stok met de ontvanger kan draaien, kunnen we een tralie of een paraffineprisma plaatsen.
Controleer eerst, dat de ontvanger in de stand 0° de golven opvangt, als er geen obstakels op de schijf staan.

a. Breking aan een grensvlak.
Plaats een prisma van paraffine op de schijf en zoek de plaats op, waar de straal terecht komt. Doe dit bij verschillende standen van het prisma.
Bij welke stand is de afwijking maximaal?

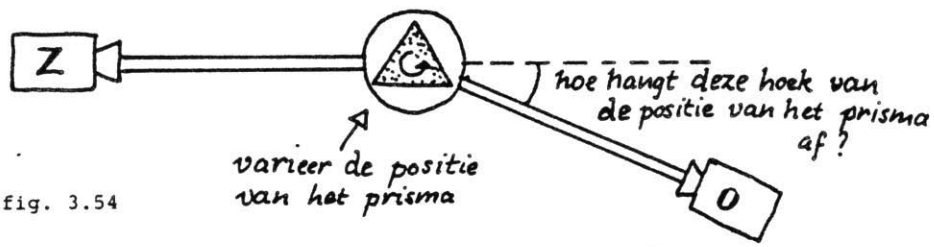


fig. 3.54

Noteer je waarnemingen.

b. Buiging en interferentie.
Vervang het prisma door een tralie. De lijnen zitten hier veel verder uit elkaar dan bij de tralies voor optische proeven. De golflengte van microgolven is dan ook zo'n vijftig duizend keer zo groot als van licht.
Zoek met de ontvanger de plaatsen op waar een verhoogde intensiteit van microgolfstralen ontvangen wordt.
Noteer de hoeken die de afgebogen stralen met de rechtdoorgaande richting maken.
Herhaal de proef met een fijnere of grovere tralie, indien voorradig.
De golflengte λ van deze straling kan met deze tralieproef bepaald worden. We maken daarbij gebruik van de relatie:

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}$$

waarin d de afstand tussen de traliespijlen is. Deze afstand kan gemeten worden. Ook α_1, de hoek die de straal naar het eerste-orde-maximum met de rechtdoorgaande richting maakt, kan gemeten worden.

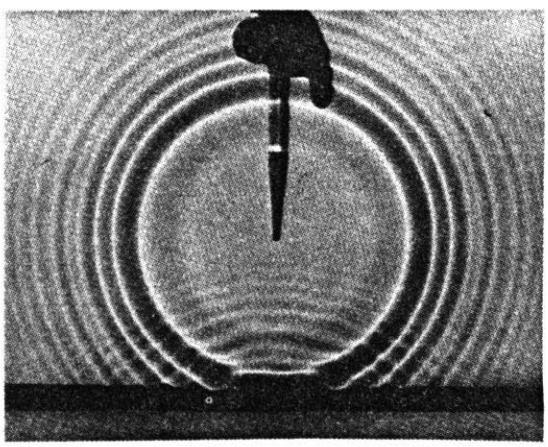
Noteer de waarde die je voor λ vindt en vergelijk deze met de waarde die de fabrikant van de zender opgeeft.

c. Polarisatie.
Draai de ontvanger ten opzichte van de zender met de verbindingslijn tussen zender en ontvanger als draaiingsas. Wat neem je waar?
Je kunt ook een soort hekwerk als polarisatiefilter gebruiken.

Slotopdracht voor deel 1 GEVESTIGDE THEORIEEN

Ga na welke van de onderstaande eigenschappen bij golven dan wel deeltjes (of beide) behoren en onder welke omstandigheden de genoemde eigenschappen waarneembaar zijn:

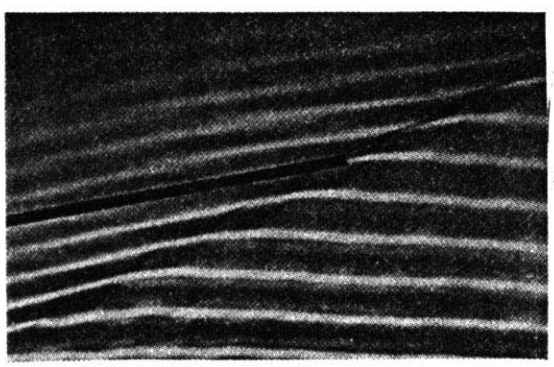
a. impulsoverdracht bij botsing;
b. polarisatie;
c. afbuiging in een elektrisch veld;
d. afbuiging in een magnetisch veld;
e. breking;
f. buiging;
g. vrije weglengte;
h. versnelling in een elektrisch veld;
i. dopplereffekt;
j. energieoverdracht;
k. terugkaatsing;
l. traagheid.



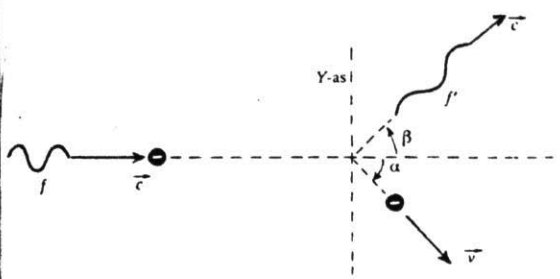
k. terugkaatsing



b. polarisatie



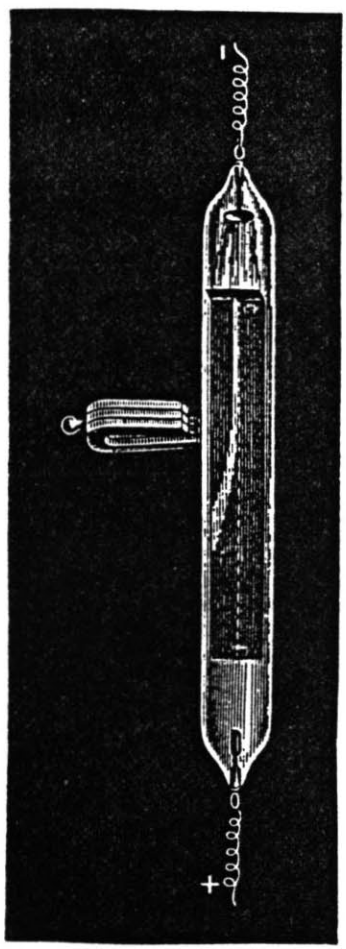
e. breking



a. impulsoverdracht

DEEL 2

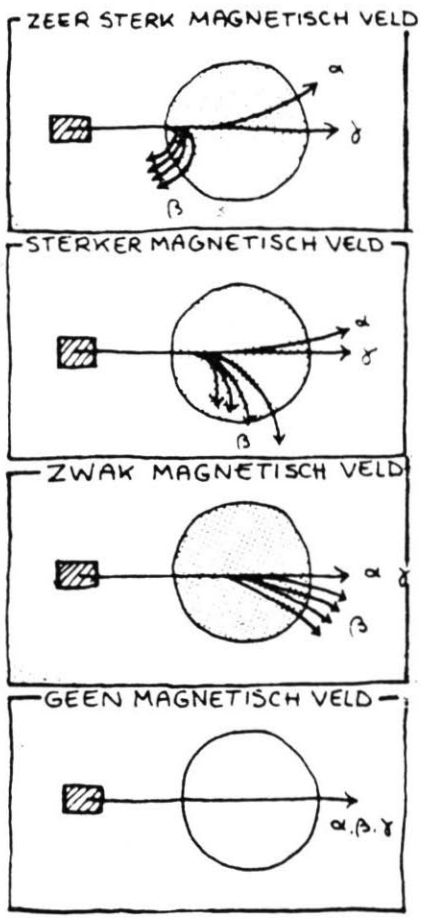
NIEUWE STRALEN



KATHODESTRALEN



X-STRALEN



RADIOAKTIEVE STRALEN

vooruitblik

Van de nieuwe stralen werden lijsten van eigenschappen opgeschreven. Uit die lijsten bleek echter niet onmiddellijk of het golf- dan wel deeltjesverschijnselen waren. Daarom maakte men 'modellen' van de nieuwe stralen binnen de golftheorie dan wel de deeltjestheorie. Daaruit konden eigenschappen verklaard of voorspeld worden. Waren de voorspelde verschijnselen voor de twee theorieën tegengesteld, dan was er een *criterium* gevonden om de theorieën te toetsen. Gelukkig lieten de onderzoekers zich niet onmiddellijk ontmoedigen, als zo'n toetsing negatief voor hun model uitviel. Zij waren zeer vindingrijk in het bedenken van mogelijke meetfouten of andere verklaringen waardoor ze in hun model bleven geloven. Mede daardoor is het raadsel van de nieuwe stralen opgelost.

4 KATHODESTRALEN

INHOUD:

4.1	Inleiding	69
4.2	Kathodestraalbuis	70
4.3	Technische hulpmiddelen	70
4.4	Op zoek naar eigenschappen	73
4.5	Het kathodestralendebat: de uitgangspunten	75
4.6	Het debat in de klas: nieuwe ontwikkelingen	79
4.7	Het model van Thomson	80

4.1 INLEIDING

In 1855 was Geissler in Duitsland bezig met het verkrijgen van een hoog vacuum in glazen buizen. Zijn vriend Plücker sloot in 1858 zo'n buis aan op een hoge spanning en zag daarin merkwaardige verschijnselen optreden. In die tijd was al bekend dat er bij verlaagde druk makkelijker vonken kunnen overspringen tussen de negatieve en de positieve pool dan bij normale druk. Plücker vond nu dat de vonken bij zeer lage druk niet van de ene naar de andere (niet tegenover elkaar staande) pool overspringen, maar dat er een groenig licht wordt uitgezonden, alsof het om een heel nieuw verschijnsel gaat.

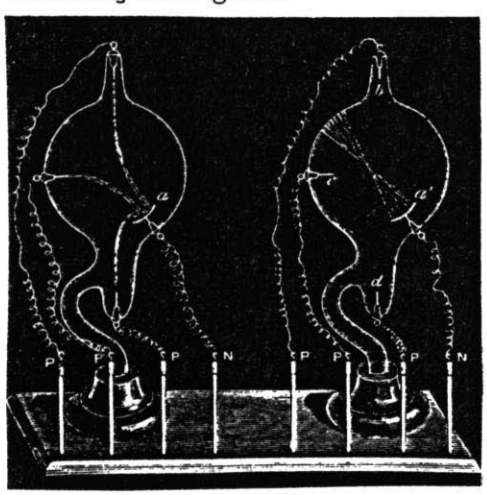


fig. 4.1

In de buis links zijn er lichtende banen tussen de anode P en de kathode N. In de rechterbuis, waar de luchtdruk verder verlaagd is, gaan de 'kathodestralen' rechtdoor. Goldstein vond dit het eerst. Deze opstelling is van Crookes.

Bij verdere verlaging van de gasdruk bleken er allerlei andere verschijnselen te gaan optreden: Hittorf en Goldstein, later gevolgd door Crookes in Engeland, onderzochten deze verschijnselen.
Goldstein vond dat er stralen door de negatieve pool werden uitgezonden. Net als bij stroomgeleiding in vloeistoffen werd de negatieve pool de kathode genoemd. Goldstein noemde de stralen daarom kathodestralen. Crookes vond dezelfde verschijnselen als Hittorf en Goldstein, alleen kreeg zijn publikatie erover veel meer aandacht. Vanaf dat moment werd het onderzoek naar kathodestralen steeds belangrijker. Het was echter bijzonder moeilijk onderzoek door de veelheid van verschijnselen die zich in de kathodestraalbuis voordoen. In het bijzonder is de invloed van de gasresten in de buis een belangrijke bron van verwarring over de aard van de kathodestralen geweest. Pas in 1895 kon men die gasresten zo goed verwijderen, dat de ware aard van de stralen waarneembaar werd.
Het werk aan kathodestralen is zowel voor de wetenschap als voor de techniek bijzonder belangrijk gebleken. De wereld van vandaag zou er totaal

anders uitzien wanneer dit onderzoek niet had plaats gevonden. Een televisietoestel is niets anders dan een ingewikkelde kathodestraalbuis, radiotoestellen van vóór het transistor-tijdperk bevatten grote aantallen kathodestraalbuizen. En aan kathodestraalonderzoek hebben we de ontdekking van het elektron, de röntgenstraling en in zekere zin ook de radioaktieve straling te danken.

4.2 KATHODESTRAALBUIS

Kathodestralen ontstaan in een *kathodestraalbuis* (fig. 4.2). In een glazen buis die allerlei vormen kan hebben, bevinden zich twee *elektroden* van metaal waartussen een spanning van enkele tot vele duizenden volt gezet kan worden. De buis is zo goed mogelijk luchtledig gemaakt. De *kathode* wordt met de negatieve pool, de *anode* met de positieve pool van de spanningsbron verbonden.

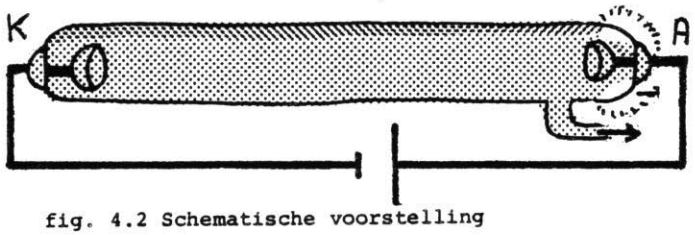


fig. 4.2 Schematische voorstelling van een kathodestraalbuis. K is de negatieve pool (kathode) en A de positieve pool (anode).

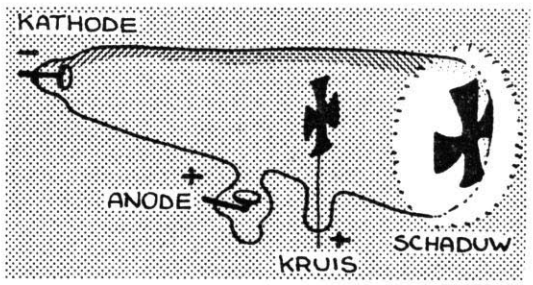


fig. 4.3 Een kathodestraalbuis om de rechtlijnige voortplanting van kathodestralen te laten zien.

Als een kathodestraalbuis op een spanningsbron wordt aangesloten, zijn er allerlei lichteffekten te zien. In de buis lichten de restanten van het gas op. Men noemt dat de *fluorescentie* van het gas. Ook het glas van de buis fluoresceert, het licht op tegenover de kathode.
Goldstein veronderstelde dat de kathode stralen (de *kathodestralen*) uitzendt die de fluorescentie veroorzaken. Vanaf die tijd was de grote vraag: *Wat is de aard van de kathodestralen*?

1 a. Wijs in fig. 4.3 de anode en de kathode aan.
b. Wat zou er gebeuren, als de aansluiting omgewisseld wordt?

4.3 TECHNISCHE HULPMIDDELEN

Voor het onderzoek naar kathodestralen zijn het ontwikkelen en verbeteren van twee soorten technische hulpmiddelen bepalend geweest: spanningsbronnen en vacuumpompen.

spanningsbronnen

Om kathodestralen te produceren is een spanning van 1000 à 2000 V nodig. Er werden twee principieel verschillende methoden gebruikt om op de hoge spanning uit te komen. De ene methode berustte op het in serie schakelen van een duizendtal (!) accu's, die een spanning van 1 à 2 V leveren. De andere methode berustte op het gebruik van een transformator om de spanning te verhogen. We bekijken eerst de accu's die men in de 19e eeuw gebruikte, toen Daniell-element geheten.

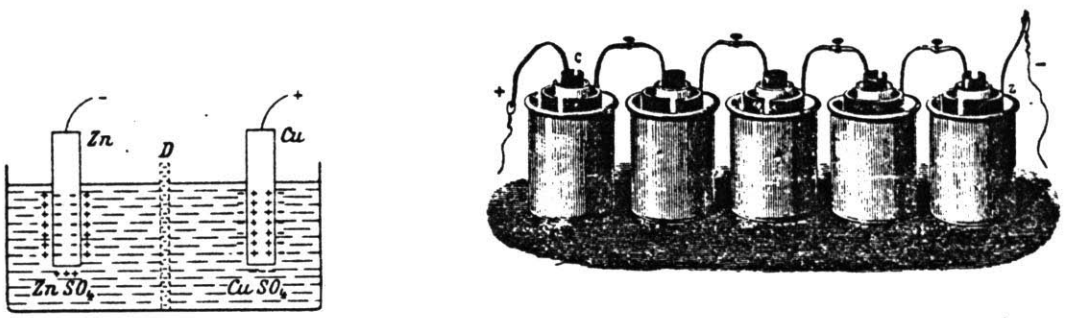


fig. 4.4 Daniell-element, schematisch en een aantal elementen in serie geschakeld.

Ieder Daniell-element levert een spanning van 1,1 V, die gedurende enige tijd constant is.

2 Heinrich Hertz produceerde een spanning van 2200 V met behulp van Daniell-elementen. Schets in een schema hoe hij dat kon doen.

Het bezwaar van Hertz' methode is duidelijk, er was een enorme hoeveelheid Daniell-elementen voor nodig. Het was eenvoudiger om met een grote transformator te werken. In fig. 4.5 staat een afbeelding van zo'n transformator, de in de 19e eeuw veel gebruikte Ruhmkorffspoel. Met een gewone batterij, een Daniell-element, werd een lage spanning op de primaire spoel met weinig windingen gezet. Bij het aanzetten (of uitzetten) ontstaat in de secundaire spoel met veel windingen (zie fig. 4.6) een hoge inductiespanning, omdat die spoel uit veel meer windingen bestaat.

Daarvoor geldt de formule $V_{ind} = N_{sec} \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ waarbij N_{sec} het aantal windindingen in de secundaire spoel is. Net als bij een elektrische bel schakelt de stroom in de Ruhmkorff-inductor zich (in de primaire spoel) mechanisch aan en uit. Daardoor is de Ruhmkorff-inductor in staat om gedurende langere tijd een hoge spanning te leveren die voor kathodestraalbuizen gebruikt kan worden. Deze spanning is echter niet constant.

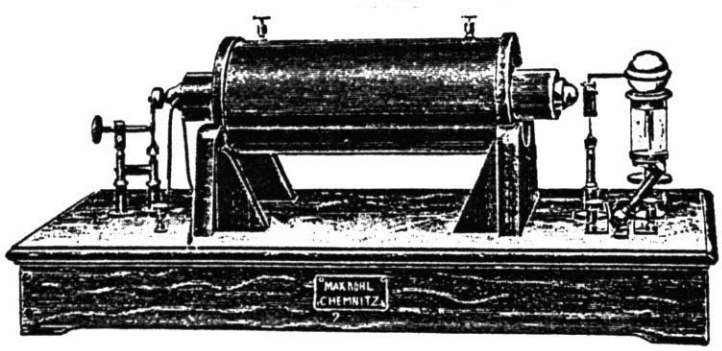


fig. 4.5 Ruhmkorff-inductor.

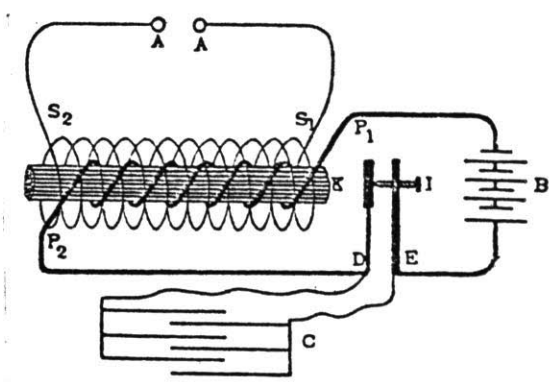


fig. 4.6 Schematische tekening van de Ruhmkorff-inductor. S_1 S_2 is de secundaire spoel.

3 Leg uit waarom het voor de werking van de Ruhmkorff-inductor nodig is dat:
a. de primaire stroom voortdurend onderbroken wordt,
b. er een weekijzeren kern in zit,
c. het aantal secundaire windingen veel groter is dan het aantal primaire windingen.

4 a. Wijs in fig. 4.5 of 4.6 aan op welke punten de kathodestraalbuis aangesloten moet worden.
b. In fig. 4.5 is rechts een gelijkrichter (een apparaatje dat de stroom maar naar één kant doorlaat) te zien. Leg uit waarom die nodig is voor het onderzoek naar kathodestralen.

Pas toen de techniek van generatoren, transformatoren en gelijkrichters goed ontwikkeld was (ongeveer vanaf 1890) werd het mogelijk spanningsbronnen te gebruiken bij het kathodestraalonderzoek, die een goede constante en regelbare spanning afgeven.

vacuumpompen

De voortgang in het kathodestraalonderzoek hangt ten nauwste samen met het verbeteren van de vacuumpomp. In de 17e eeuw had Otto van Guericke uit Maagdenburg een vacuumpomp met zuigers gemaakt. Door het onvermijdelijke lekken van de zuigers werd zelfs met de beste pompen de druk niet veel verder verlaagd dan 1 cm kwikdruk.
Een geheel nieuw pompprincipe kwam van de Duitse instrumentenmaker Geissler, die zich realiseerde dat de leren zuigers altijd zouden blijven lekken. Hoeveel vet je ook gebruikt, kleine lekken blijven met zulke zuigers aanwezig. Met welk materiaal zou dat niet zo zijn? zo vroeg Geissler zich af. Geissler kwam op het verrassende idee om zuigers van kwik te maken. In fig. 4.8 een afbeelding van een latere versie van Geisslers kwikpomp van 1857, die in de tweede helft van de 19e eeuw in alle natuurkundige laboratoria van enig belang te vinden was.



fig. 4.7 Het doorlichten van een hand met röntgenstralen. Aan de zijkant is de kwikpomp te zien, waarmee de röntgenbuis (een kathodestraalbuis) leeggepompt is.

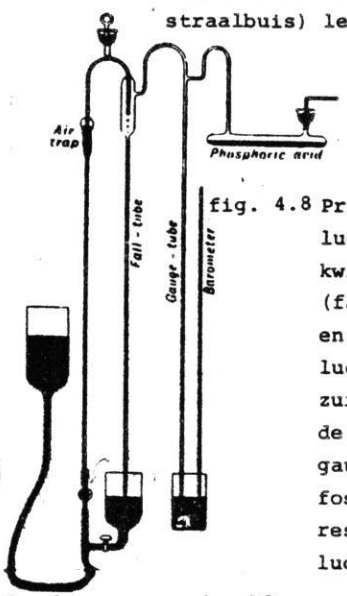


fig. 4.8 Principeschema van de kwikluchtpomp van Geissler. De kwikdruppels in de valbuis (falltube) nemen lucht mee en verlagen daardoor de luchtdruk in de leegste zuigerbuis (A). De verlaagde luchtdruk wordt in de gauge-tube gemeten. Het fosforig zuur dient om de restjes waterdamp uit de lucht te halen.

Het principe van Geissler werd in de loop van de 19e eeuw verder verbeterd, waardoor drukken van 0,01 mm kwikdruk konden worden gehaald.

5 De mm kwikdruk (of mm Hg) is een oude drukmaat die je tegenwoordig ook nog wel tegenkomt. De SI-eenheid van druk is de pascal (Pa) 1 Pa = 1 N/m^2. De mm kwikdruk is de druk die door een kolom van 1 mm kwik wordt uitgeoefend (op aarde). De druk van een vloeistof kun je uitrekenen met de formule $p = \rho.g.h$ met ρ de dichtheid

van de vloeistof, g de valversnelling en h de hoogte van de kolom.
a. Laat zien dat 1 mm Hg = 133 Pa.
b. Hoe groot is de druk in een kathodestraalbuis ongeveer vergeleken met de normale luchtdruk?

4.4. OP ZOEK NAAR EIGENSCHAPPEN

Tal van wonderbaarlijke buizen zijn in de loop van de tijd gebouwd om de eigenschappen van kathodestralen te onderzoeken.

invloed van drukvermindering

In fig. 4.9 zijn de lichtverschijnselen in een kathodestraalbuis bij verschillende drukken te zien. Let op de plaats van de anode en op het oplichten van het glas achter de anode. Bedenk dat het laatste plaatje pas na 1890 gezien kon worden!

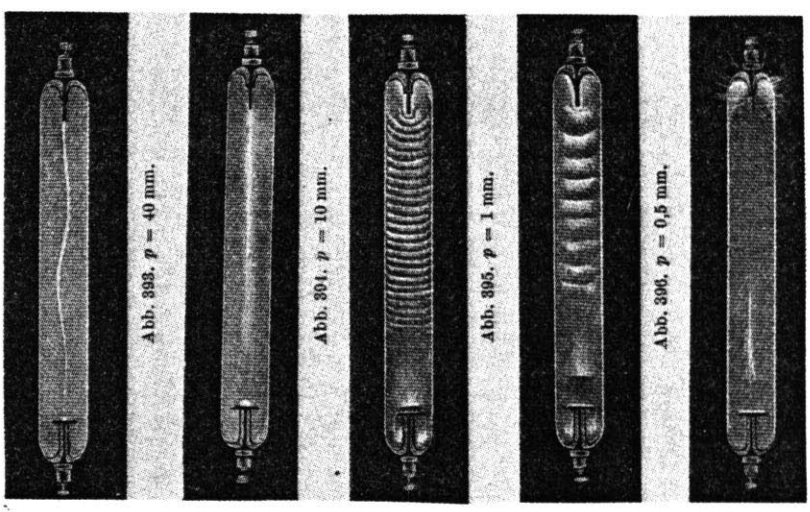


fig. 4.9

Lichteffecten in een kathodestraalbuis bij verschillende drukken:
a. 40 mm kwikdruk
b. 10 mm kwikdruk
c. 1 mm kwikdruk
d. 0,5 mm kwikdruk
e. 0,02 mm kwikdruk

De waargenomen lichtverschijnselen zijn niet zelf de kathodestralen, maar zijn er het gevolg van. Het oplichtende glas en de fluorescentie van het gas kan je dus zien als uitingen van de *ontvangers* van kathodestralen.
Bij het fluoresceren gaat het gas spectraallijnen uitzenden. Sommige onderzoekers (de deeltjesonderzoekers die in de kathodestralen snelbewegende gasionen zagen) dachten dat de kathodestraaldeeltjes zelf die spectraallijnen uitzenden, anderen dachten dat het de gasresten in de buis waren die door de kathodestralen getroffen werden.
De kathode is de bron van de kathodestralen en de ruimte in de buis (het vacuum of de aether?) is het medium.
De eigenschappen van kathodestralen zullen we aan de hand van het schema bron - medium - ontvanger nagaan.
We noemen hier de eigenschappen zoals die rond 1880 bekend waren. Let op! Later bleken er fouten in te zitten.

bron

Bij experimenten met de buizen van fig. 4.3, 4.10 en 4.11 kan je de volgende eigenschappen zien:
1) *De stralen ontstaan op de kathode.*
2) *De stralen worden altijd loodrecht op de kathode uitgezonden.*
Bovendien bleek:

3) *De eigenschappen van de stralen zijn altijd onafhankelijk van het kathodemateriaal.*



fig. 4.10 Welke twee eigenschappen kun je met deze buis laten zien?

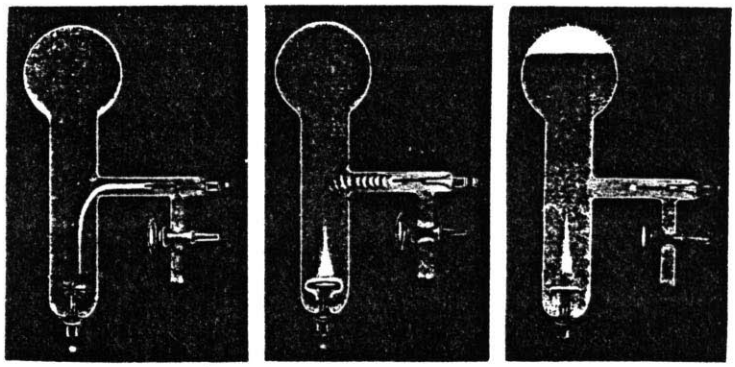


fig. 4.11 Kathodestraalbuis met vrij hoge luchtdruk.
Als de luchtdruk verlaagd wordt, gaan 'kathodestralen' rechtdoor.

6 a. Geef argumenten voor de eigenschappen 1 en 2.
b. Welke experimenten zou je doen om eigenschap 3 te onderzoeken?

medium

De kathodestralen bewegen zich tussen kathode en anode en eventueel achter de anode, als er een gaatje in is gemaakt. Als ze niet van buitenaf gestoord worden, planten ze zich rechtlijnig voort.

4) *De stralen planten zich rechtlijnig voort.*

Het medium kan van buitenaf gestoord worden: door een elektrisch of magnetisch veld. Proeven met zulke velden leverden twee nieuwe eigenschappen op:

5) *De stralen buigen in een uitwendig magnetisch veld af, alsof het negatief geladen deeltjes zijn.*
6) *In een uitwendig elektrisch veld buigen de stralen niet af.*

7 Met welke buizen kan je eigenschap 4 aantonen?

8 In onderstaande tekeningen geven de stippen aan dat er een magnetisch veld is dat naar de lezer toe gericht is. De kruizen geven de tegenovergestelde richting aan.
Neem onderstaande tekeningen in je schrift over en geef aan naar welke kant de kathodestralen afbuigen.

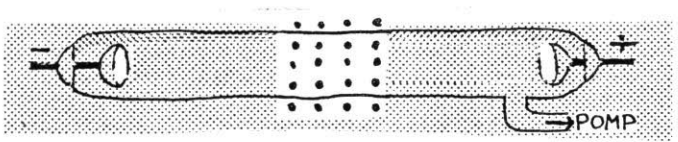


fig. 4.12 a

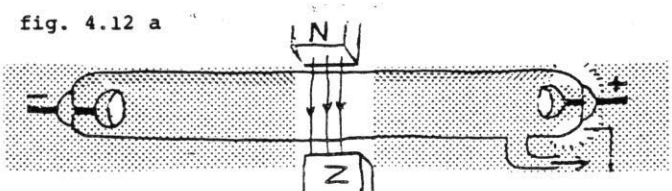


fig. 4.12 b

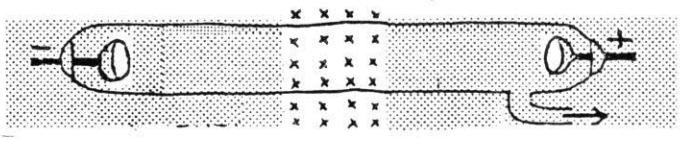


fig. 4.12 c

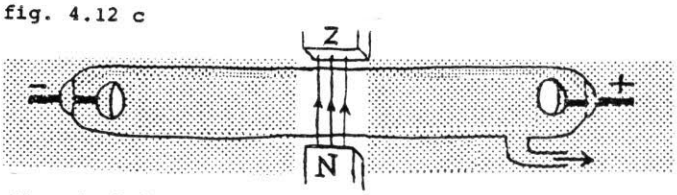


fig. 4.12 d

ontvanger

Wat betreft de ontvanger vond men de volgende eigenschappen:

7) *De stralen veroorzaken fluorescentie van het glas achter de kathode en van het gas in de buis. Dat laatste is wat betreft vorm en intensiteit sterk afhankelijk van de druk in de buis.*
8) *De stralen kunnen een molentje in de buis aan het draaien brengen.*
9) *De stralen kunnen de anode enorm heet maken.*
10) *De stralen geven zwarting op een fotografische plaat.*

9 Welke eigenschappen kun je met de buizen uit fig. 4.13 en 4.14 aantonen?

10 Welke proeven zou je doen om de andere eigenschappen aan te tonen?

11 In fig. 4.15 is de ontvanger een stuk metaalplaat met lichtgevende verf, die iets schuin in de buis gezet is.
Hoe moet je de magneet houden om de getekende afbuiging te krijgen?

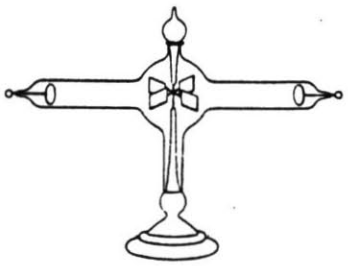


fig. 4.13



fig. 4.14

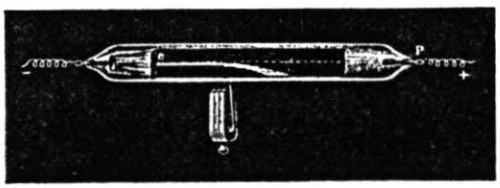


fig. 4.15 Afbuiging van kathodestralen door een magneet.

verdere eigenschappen

Er werden allerlei pogingen gedaan om meer eigenschappen op te sporen. Daar was genoeg aanleiding voor: er waren zoveel kleuren en vormen van fluorescentie in de buis te zien. Bovendien was het mogelijk spanning en stroom te gaan variëren. Maar geen van die experimenten had tot 1880 nieuwe eenvoudige en heldere eigenschappen opgeleverd. Integendeel, door de veelheid aan effekten in de buis bleken er later nog fouten in de lijst van 10 eigenschappen te schuilen.

12 Maak een samenvatting van paragraaf 4.1 tot 4.4. Zorg ervoor dat daarin de volgende begrippen voorkomen:
- kathodestraalbuis, anode, kathode
- spanningsbron, vacuumpomp
- eigenschappen van kathodestralen.

4.5 HET KATHODESTRALENDEBAT: DE UITGANGSPUNTEN

In de periode van ca 1875 tot 1896 speelde het debat tussen vooral Engelse en Duitse onderzoekers over de vraag of kathodestralen geladen deeltjes dan wel elektromagnetische golven zijn.
Voordat jullie zelf in de klas het debat gaan naspelen, moet je je inleven in de ideeën van de 19e eeuw over het (deeltjes?)karakter van lading en stroom en over elektromagnetische straling. Daarvoor dienen de volgende twee leesstukken.

KATHODESTRALEN

elektrische lading en stroom

Over elektrische lading en stroom waren in de 19e eeuw verschillende theorieën, waarvan de atomistische en de vloeistoftheorie de belangrijkste waren. De *atomistische theorie* ging ervan uit dat lading aan deeltjes gekoppeld is en dat die lading kan stromen door een draad. Een voornaam argument daarvoor was het optreden van elektrische stromen in vloeistoffen en de chemische werking van de stroom. Deze theorie verklaarde dat door te veronderstellen dat negatieve en positieve ionen in de vloeistof bewegen en hun lading bij de polen afgeven. Het leek er sterk op dat er in een vaste stof geen bewegende deeltjes waren, omdat de atomen daar op hun plaats vast zitten. Dus voor stroomgeleiding in vaste stoffen had de atomistische theorie geen goede verklaring.
De *vloeistof theorie* beschouwde lading als een soort vloeistof zonder massa, waarvan je twee soorten had: positieve en negatieve lading. Daarmee kan je voorwerpen positief dan wel negatief 'laden', wat gezien werd als een soort 'volgieten' met lading. Een stroom was dus te vergelijken met een waterstroom, alleen ging de positieve lading de ene kant op en de negatieve lading de andere kant op. Een variant op deze theorie zei dat er slechts één soort lading was en dat de andere soort een tekort aan lading moest zijn.
Voor de eenvoud zullen we aannemen dat de deeltjesaanhangers voor kathodestralen ook het deeltjesmodel van de stroom aanhangen en de golfaanhangers het 'vloeistof'model van de stroom.

elektromagnetische straling

Behalve het zichtbare licht was in de 19e eeuw bekend dat er ook infrarood en ultraviolet 'licht' is, onzichtbaar dus. Die soorten 'licht' zijn waar te nemen aan hun warmte-effekt en wat betreft het ultraviolette 'licht' ook aan de chemische werking. De golflengte en frekwentie van die lichtsoorten konden gemeten worden.
Het lag voor de hand te veronderstellen dat er nog meer soorten 'licht' met hogere en lagere frekwenties dan het zichtbare licht kunnen bestaan. Dat idee werd versterkt door de elektromagnetische theorie van Maxwell, die het bestaan van elektromagnetische golven voorspelde.
Faraday had aangetoond dat magneetvelden een effekt op licht kunnen hebben: hij had de polarisatierichting van licht kunnen veranderen door middel van magneetvelden en veronderstelde dat elektrische velden ook een effekt zouden kunnen hebben. Heinrich Hertz liet in 1888 (toen het kathodestralendebat al lang aan de gang was) zien dat het mogelijk is met behulp van met een hoge frekwentie overspringende vonken elektromagnetische golven op te wekken. Dat was een belangrijk succes voor de elektromagnetische theorie. Hertz kon staande golven maken en zo door de ligging en knopen en buiken te meten de golflengte bepalen. De snelheid van de elektromagnetische golven die daarmee berekend kon worden (ook de vonkfrekwentie was bekend) bleek gelijk aan de lichtsnelheid. Dat was geheel in overeenstemming met de theorie. Er moesten nog een heel spectrum van elektromagnetische golven zijn met frekwenties tussen 'Hertz-golven' en het zichtbare licht en groter. Kathodestralen waren een veelbelovende kandidaat.

Het debat begon ongeveer in 1875 toen Crookes zijn deeltjesmodel poneerde. Goldstein, die vóór Crookes al wat werk aan kathodestralen had verricht, reageerde daarop met een golfmodel. Beide modellen zullen we hier beschrijven.

het deeltjesmodel van Crookes

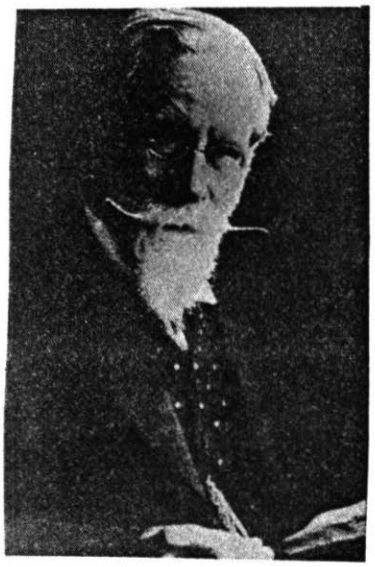


fig. 4.16 b Sir William Crookes (1832 - 1919), één van de Engelse onderzoekers die deeltjesopvatting onderzocht en verdedigde. Deze foto werd omstreeks 1910 genomen.

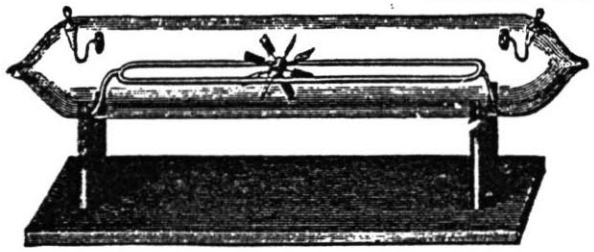


fig. 4.16 a Een buis van Crookes

Stroomgeleiding in vloeistoffen wordt uitstekend verklaard met een deeltjestheorie. Metaal-ionen gaan vanuit de anode in oplossing en slaan neer op de kathode. Het komt ook voor dat watermoleculen tegen de kathode botsen en positieve lading oppikken waardoor zuurstof aan de kathode ontwijkt en waterstof als ion in de oplossing gaat*. Zou zoïets ook niet in kathodestraalbuizen kunnen gebeuren? Zouden gasatomen niet tegen de kathode kunnen botsen, daar negatieve lading kunnen oppikken en vervolgens door het elektrische veld versneld kunnen worden? Erg veel gasmoleculen zijn er niet meer, dus ze kunnen vrijwel ongehinderd door botsingen door de buis schieten en tegen de glaswand botsen. Daar veroorzaken ze fluorescentie.
Crookes past het ionenmodel ook toe op gassen. Een belangrijk argument voor een deeltjesmodel vond Crookes het experiment met het molentje, dat hij speciaal ontworpen had om te kijken of kathodestralen bij botsen impuls overdragen.
Crookes' verklaring voor het oplichten van het resterende gas in de buis was vanuit de deeltjestheorie ook voor de hand liggend: deeltjes met hoge snelheid zenden licht uit: hete gassen in een vlam bijvoorbeeld. Volgens de kinetische gastheorie hebben de gasmoleculen bij hoge temperatuur een hoge snelheid. Kathodestralen hebben ook een hoge snelheid, omdat ze door de spanning versneld zijn.
Natuurlijk wist Crookes dat hij met zijn model niet alle verschijnselen in de buis kon verklaren. Maar hij en zijn aanhangers vonden wel dat ze genoeg argumenten hadden om te zeggen dat kathodestralen deeltjes zijn. Verder onderzoek zou de preciese aard van de deeltjes moeten onthullen.

13 Neem de lijst met eigenschappen van kathodestralen en ga na of je met het model van Crookes een verklaring kunt geven:
a. voor de eigenschappen van de bron;
b. voor de eigenschappen van het medium;
c. voor de eigenschappen van de ontvanger.

* Let op: bij de scheikunde heb je dat wellicht anders gehad. Crookes kon echter niet met elektronen redeneren, want die waren nog niet ontdekt.

14 Enkele eigenschappen van kathodestralen lijken in tegenspraak met Crookes' deeltjesmodel.
Verzin binnen het model een reden waarom de tegenspraak optreedt.
Je kunt daarbij denken aan:
- foute metingen
- effekten die zo klein zijn dat je ze niet kunt meten
- experimentele problemen waardoor de afwijkingen met de theorie optreden.

15 Neem de lijst met eigenschappen van deeltjes.
a. Welke verschijnselen zou je bij kathodestralen moeten kunnen waarnemen, als het model van Crookes juist is?
b. Welke experimenten zou jij voorstellen om het model van Crookes te toetsen?

het golfmodel van Goldstein

Goldstein had een ander model voor kathodestralen: het zijn volgens hem elektromagnetische golven. Niet voor niets wordt er geen afbuiging van kathodestralen in het elektrisch veld geconstateerd. Nog nooit was bewezen dat elektrische velden invloed hebben op elektromagnetische golven zoals licht. Faraday had laten zien dat magnetische velden wel invloed hebben op licht. Hij had geen afbuiging maar alleen een verandering in de polarisatierichting waargenomen. Maar elektromagnetische stralen met een veel hogere frekwentie zouden zo'n afbuiging misschien wel kunnen vertonen. Kathodestralen kunnen dan zo'n elektromagnetische golf zijn. De zwarting van een fotografische plaat kan volgens Goldstein ook alleen maar verklaard worden met elektromagnetische straling. Alleen bij licht was deze eigenschap nog waargenomen.
In het golfmodel produceert een (vlakke) kathode een recht golffront. Daarom treden er (anders dan bij niet-puntvormige lichtbronnen, bijv. de zon) scherpe schaduwen op zoals bij het metalen kruis, en geen halfschaduwen.

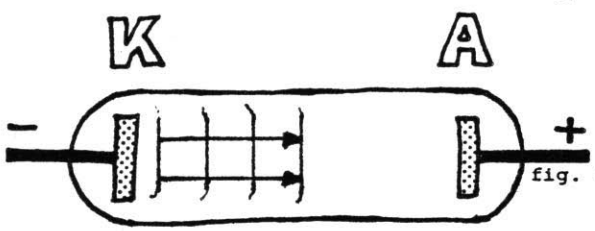


fig. 4.17 De kathode produceert volgens Goldstein een vlak golffront van kathodestralen.



fig. 4.18 De radiometer van Crookes bestaat uit een molentje in een 'vacuum'-buis. De ene kant van de molenwiekjes is zwart gemaakt. Als er licht op valt, gaat het molentje draaien.

Dat de stralen het molentje in beweging brengen is voor Goldstein een extra argument voor zijn theorie. Had Crookes zelf niet laten zien dat licht ook een molentje kan laten draaien (de radiometer van Crookes)?

16 Neem de lijst van eigenschappen van kathodestralen en ga na of je met het model van Goldstein een verklaring kunt geven
a. voor de eigenschappen van de bron;
b. voor de eigenschappen van het medium;
c. voor de eigenschappen van de ontvanger.

17 . Enkele eigenschappen lijken in tegenspraak met Goldsteins golfmodel. Verzin binnen het model een verklaring waarom de tegenspraak optreedt. Zijn er ook eigenschappen die weliswaar niet in tegenspraak zijn, maar waarvoor Goldsteins model geen verklaring geeft?

18 Neem de lijst met eigenschappen voor golven.
a. Welke verschijnselen kan je voorspellen, als het model van Goldstein juist is?
b. Welke experimenten zou jij voorstellen om het model van Goldstein te toetsen?

criteria in het debat

Crookes' aanhangers verklaarden het ontbreken van elektrische afbuiging van kathodestraal*deeltjes* uit het feit, dat er in de buis allerlei losse ladingen kunnen ontstaan door het uiteenvallen van gasmoleculen in positieve en negatieve ladingen, die in het uitwendig elektrisch veld uit elkaar getrokken worden en daardoor het veld verzwakken.

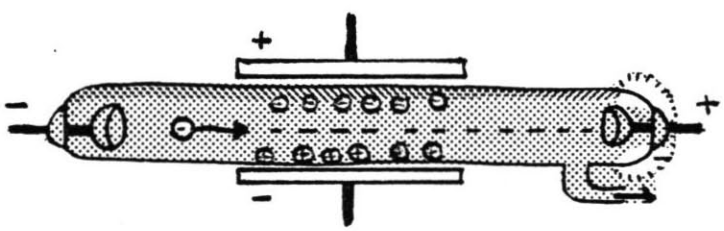


fig. 4.19 Verzwakking van een uitwendig elektrisch veld door positieve en negatieve deeltjes in de buis volgens de deeltjesaanhangers.

Als de buizen maar beter vacuum gemaakt konden worden, dan zou de afbuiging wèl optreden.
De aanhangers van Goldstein ontkenden dat kathodestraal*golven* ooit door een elektrisch veld afgebogen konden worden.
De elektrische afbuiging was dus een *criterium* voor het debat tussen de twee modellen.

19 Bedenk nog enkele andere criteria, verschijnselen die door het ene model wèl, en door het andere model niet verklaard zouden kunnen worden.

4.6 HET DEBAT IN DE KLAS: NIEUWE ONTWIKKELINGEN

Vanuit beide kampen werd het debat met alle inzet van vernuft, argumenten en nieuwe experimenten gevoerd.
Uitgaande van de modellen van Crookes en Goldstein ga je het debat in de klas voeren. Je krijgt nieuwe experimentele informatie en nieuwe modellen op losse kaarten in min of meer historische volgorde. Op de kaarten staan opdrachten, gescheiden in 'aanvallers'- en 'verdedigers'opdrachten. Als de kaart nieuwe informatie levert vanuit de golfkant, kiest de *golfgroep* de 'aanvallers'- en de *deeltjesgroep* de 'verdedigers'-opdrachten en omgekeerd. Een *jury* gaat de juistheid van de gebruikte argumenten na. De klas kan dus worden ingedeeld in:

- de *golfgroep*: zij spelen de rol van de golfaanhangers
- de deeltjesgroep: zij spelen de rol van de deeltjesaanhangers
- de *jury*: zij spelen de rol van de internationale fysische gemeenschap, die de gebruikte argumenten op hun waarde beoordeelt.

20 HET KATHODESTRAALDEBAT

Lees alle acht kaarten nauwkeurig door. Na elke kaart volgt een kort debat aan de hand van de opdrachten op de kaart.
Maak aantekeningen over de belangrijkste punten van het debat en over je eigen mening daarin. Aan het eind van het spel kan je dan nagaan hoe je gedachtenvorming is verlopen.
De kaarten zijn:

1. Dopplereffekt
2. Vrije weglengte
3. Kanaalstralen
4. Het model van Hertz
5. Lenard's buis
6. Hertz' ladingsproef
7. Perrin's ladingsproef
8. Thomson's proeven.



Een buis om het optreden van kanaalstralen te laten zien.

TERUGBLIK OP HET DEBAT

a. Kijk terug naar je aantekeningen in je schrift. Probeer aan de hand daarvan na te gaan hoe jullie debat is gelopen. Wat vond je ervan? Wat heb je ervan geleerd?
b. Kijk nog eens terug naar de regels van het eind van hoofdstuk 1. Kun je voorbeelden van enkele van die regels noemen uit jullie eigen discussies?

4.7 HET MODEL VAN THOMSON

Thomson kwam dus tot de overtuiging dat kathodestralen deeltjes zijn. Maar wat voor deeltjes? Thomson: "The question arises, what are these particles? Are they atoms, or molecules, or matter in a still finer state of subdivision?"
Hoe kunnen deze deeltjes zo'n grote vrije weglengte in lucht (ca 10 cm volgens Lenard) en in aluminium (ca 0,1 mm) hebben? Dat was het belangrijkste probleem dat Thomson moest oplossen. Goldstein had immers aangetoond dat geladen atomen nooit zo'n grote vrije weglengte konden hebben (zie kaart 2). Thomson redeneerde dat òf het aantal deeltjes n òf de botsingsdoorsnede A in de formule $l = 1/n.A$ niet juist was. Hij zocht verder in een richting die Schuster al gewezen had: gasmoleculen kunnen in kathodestraalbuizen gesplitst worden in een positief deel (de kanaalstralen) en een negatief deel (de kathodestralen) (zie kaart 3). De botsingsdoorsnede van het negatieve deel zou wel eens veel kleiner kunnen zijn dan de 10^{-19} m^2 die Goldstein gebruikte.
Een belangrijke grootheid waaraan je deeltjes kunt herkennen is de verhouding lading - massa. Voor het kathodestraaldeeltje zou die verhouding $\frac{q}{m}$ (die was o.a. nodig voor Goldsteins schatting van de snelheid van de deeltjes, zie kaart 1) anders kunnen zijn dan de tot dan toe gebruikte waarden, die aan geleiding in vloeistoffen ontleend waren.
Schuster had al aan de hand van de magnetische afbuiging kunnen berekenen dat die waarde voor kathodestralen ligt tussen:

$$5.10^6 < \frac{q}{m} < 10^{10} \text{ C/kg}$$

Dat was dus wel een heel groot gebied nog, waarin $\frac{q}{m}$ zou kunnen liggen. Thomson vond maar liefst twee methoden waarmee een nauwkeuriger waarde gevonden werd. In beide methoden gebruikte hij de lorentzkracht op de kathodestraaldeeltjes in een homogeen magnetisch veld: die lorentzkracht is:

$$F_L = q.v.B.$$

op een deeltje met lading q en snelheid v loodrecht op het magnetisch veld B.

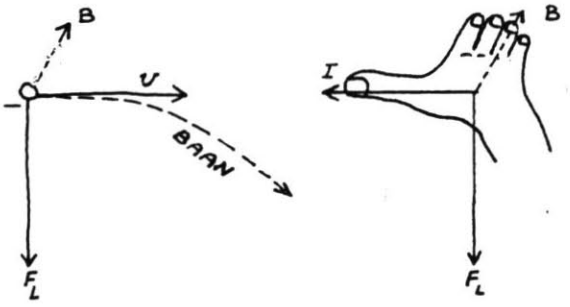


fig. 4.20 a De lorentz-kracht op bewegende geladen deeltjes in een magnetisch veld dat het papier in gericht is.

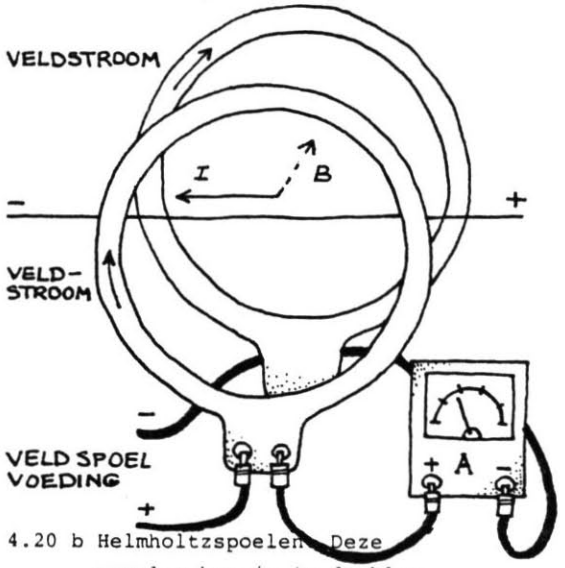


fig. 4.20 b Helmholtzspoelen. Deze spoelen kun je in de klas gebruiken om elektronen in een bolvormige buis af te buigen.

methode 1 *Thomsons methode van q/m via warmteontwikkeling*

De eerste methode maakt bovendien gebruik van het verhitten van de anode met kathodestralen. Laten we aannemen dat n deeltjes met lading q op de anode terecht komen. Dan is de totale lading Q:

$$Q = n.q$$

Op het plaatje wordt een hoeveelheid warmte W ontwikkeld. Die energie komt van de kinetische energie van de n deeltjes:

$$W = \tfrac{1}{2}\, n.m.v^2 \qquad (1)$$

De kathodestralen kun je ook afbuigen in een magnetisch veld: ze gaan een cirkelbaan beschrijven waarbij F_l als de centripetale kracht gaat werken:

$$F_l = F_{cp}$$

$$q.v.B = \frac{m\,v^2}{r} \qquad (2)$$

Door uit de vergelijkingen (1) en (2) de snelheid te elimineren krijg je:

$$\frac{q}{m} = \frac{2\,W}{B^2 r^2 Q}$$

21 Schrijf de afleiding van deze formule uit.

W kan Thomson bepalen uit de warmtecapaciteit en de temperatuurstijging van de anode, die met een thermokoppel werd gemeten. Hij had een bekend magnetisch veld B aangelegd en kon r opmeten. De totale lading Q tenslotte vond hij door de stroom door de buis te vermenigvuldigen met de tijd waarin

de anode was opgewarmd.
Uit deze metingen berekende Thomson de waarde van $\frac{q}{m}$. Vanwege alle onvermijdelijke onnauwkeurigheden in de metingen is alleen de orde van grootte van belang: 10^{11} C/kg.

22 Vergeleken met de waarden van q/m voor ionen in vloeistoffen (ca 10^{8} C/kg) is deze waarde erg groot! Wat is je conclusie?

Deze meetmethode rust op een enorme serie veronderstellingen en idealisaties, en is dus nogal bekritiseerbaar. Wie zegt dat de geladen deeltjes alle energie aan het trefplaatje afstaan? Wie zegt dat er geen warmte weglekt? Verder was de meting van temperatuurverschillen met een thermokoppel een bron van onzekerheid. Maar Thomson had nog een methode om q/m te bepalen tot zijn beschikking, en was dus niet uit het veld geslagen door de kritiek van o.a. Fitzgerald op zijn methode.

methode 2 Thomsons meting van q/m via compensatiemethode

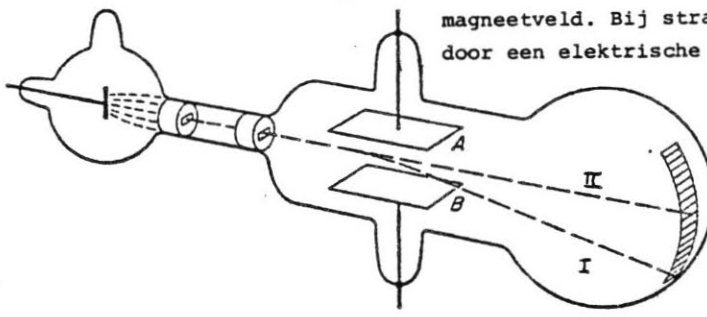
Thomsonstweede methode maakte gebruik van de elektrische afbuiging die hij ontdekt had. Loodrecht op de opstelling van fig. 4.2, loodrecht het papier in, bracht Thomson een uitwendig homogeen magneetveld aan. Het magneetveld oefent een kracht

$$F_l = q.v.B$$

uit, die Thomson compenseerde met de elektrische kracht die de condensatorplaten uitoefenen:

$$F_e = \frac{q.V}{d}$$

fig. 4.21 De buis van Thomson. Straal I is de afgebogen straal in het magneetveld. Bij straal II is de lorentzkracht gecompenseerd door een elektrische kracht.



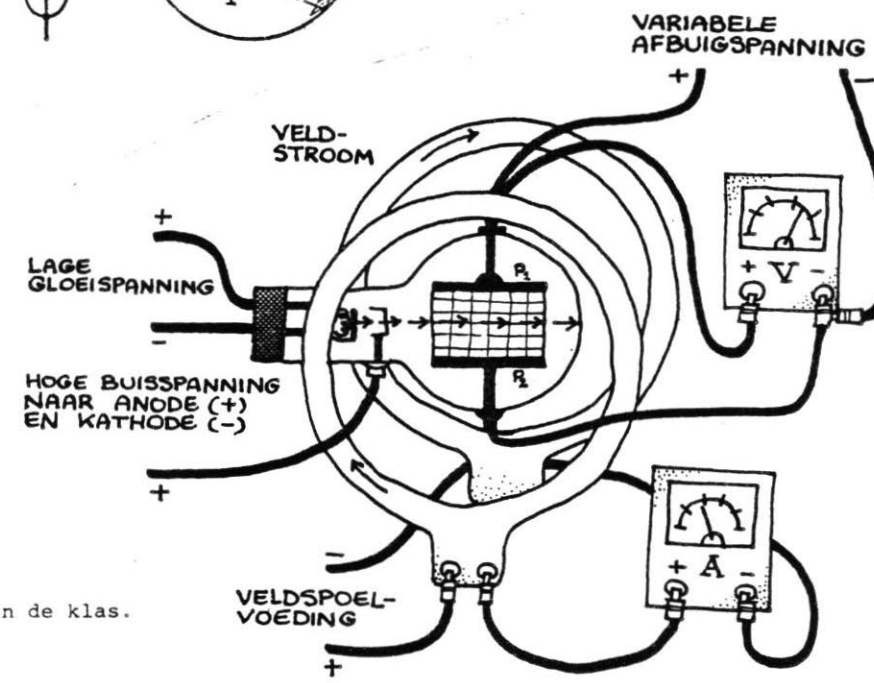


fig. 4.22 De Thomsonbuis in de klas.

Combinatie van deze twee vergelijkingen voor het geval de krachten elkaar opheffen levert de snelheid

$$v = \frac{V}{B.d} .$$

Als je met dezelfde opstelling, en dus dezelfde snelheid van de stralen, het elektrisch veld uitschakelt, beschrijven de stralen in het magneetveld een deel van een cirkel volgens

$$\frac{m.v^2}{r} = q.v.B \quad ,$$

zodat tot slot:

$$\frac{q}{m} = \frac{V}{r.B^2.d} .$$

23 Schrijf de afleiding van de formule uit.

Thomson kon V, d, B en r meten, zodat er nog een experimenteel bepaalde waarde voor q/m bekend was. Die kwam ook in de orde 10^{11} C/kg uit.
Thomson trok de conclusie: er bestaat een tot dan toe nog niet ontdekt deeltje ('corpuscle') met een $\frac{q}{m}$-waarde van ca 10^{11} C/kg. Thomson veronderstelde daarbij dat dat deeltje een kleinere botsingsdoorsnede heeft dan een waterstofatoom en de andere atomen.

Vergeleken met een waterstof ion (q/m = 10^{8} C/kg) moest de lading in verhouding tot de massa in de orde 1000 maal zo groot zijn.
Zeeman en Lorentz hadden in 1896 uit het *Zeemaneffekt* (splitsing van de natriumspectraallijnen in een sterk magnetisch veld) ook een waarde van $\frac{q}{m}$ berekend die ongeveer even groot was als de door Thomson bepaalde waarde. Zij namen daarbij aan dat een deeltje met een elektrische lading *binnen* het atoom voor het optreden van deze spectraallijnen zorgt. Thomson bewees dat deze *elektronen* ook vrij, buiten het atoom kunnen voorkomen.

wat zijn de kanaalstralen?

Het duurde nog tot even na 1900 voordat het ware karakter van de kanaalstralen bewezen werd: het zijn ionen die gevormd zijn, doordat de elektronen (kathodestraaldeeltjes) bij een botsing resterende gasmoleculen *ioniseren*, dat wil zeggen: van een elektron beroven. Dat vrijgemaakte elektron wordt in het elektrisch veld (ook) naar de anode toe versneld of het wordt ingevangen door een ander ion dat daarmee minder positief of zelfs neutraal wordt. Ook worden er wel negatieve ionen gevormd door het invangen van elektronen in neutrale atomen of moleculen.
Kanaalstralen blijken, zoals te verwachten was, ook elektrisch en magnetisch afgebogen te kunnen worden. Door hun hoge snelheid en hun relatief grote massa zijn de afbuigingen slechts klein. Er blijken zowel enkelvoudig als meervoudig geladen ionen voor te komen. Zij hebben dezelfde massa als de gasmoleculen of atomen in de buis.

24 SAMENVATTING

Maak een samenvatting van dit hoofdstuk.
Zorg dat daarin voorkomt:
- een lijst met (juiste) eigenschappen van kathodestralen
- argumenten voor het bestaan van 'elektronen', die kathodestralen vormen
- de principes (niet de preciese afleiding) volgens welke Thomson q/m voor de elektronen kon bepalen.

5 X-STRALEN

INHOUD:

5.1	Inleiding	85
5.2	Eigenschappen van X-stralen	86
5.3	Ontwikkelingen direkt na Röntgens ontdekking	93
5.4	Zijn X-stralen golven?	95

5.1 INLEIDING

In het najaar van 1895 gebeurde er in Würzberg iets bijzonders. Wilhelm Conrad Röntgen, direkteur van het natuurkundig instituut van de universiteit van Würzburg en schrijver van een groot aantal natuurkundige artikelen (meer dan 40) waarvan de inhoud totaal vergeten is geraakt, besteedde aandacht aan een alom bekend verschijnsel, dat al zijn collega's onbelangrijk vonden en negeerden: het zwarten van fotografische platen in de buurt van kathodestraalbuizen.

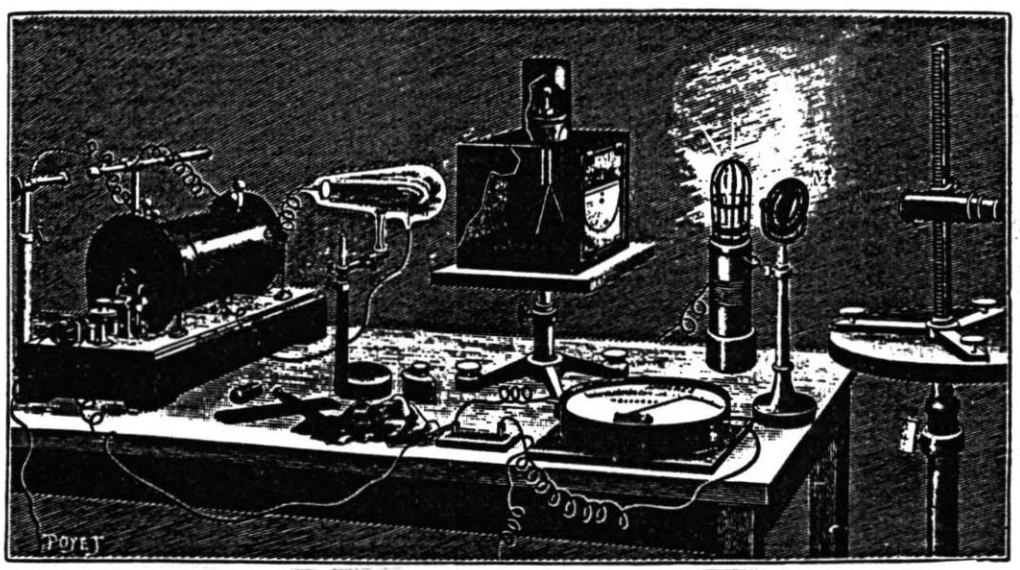


fig. 5.1 Apparatuur voor demonstratie van kathodestralen en X-stralen (1896).

De direkte aanleiding voor zijn ontdekking schijnt het volgende te zijn geweest. Bij het experimenteren met kathodestraalbuizen zag hij toevallig het oplichten van een scherm met fluorescerend materiaal, dat in zijn experimenteerruimte stond. Röntgen verbond dat onmiddellijk met het zwarten van de fotografische platen. Hij vroeg zich af wat het verband tussen die twee verschijnselen was. Zou er iets vanaf de kathodestraalbuizen dwars door de verpakking van het fotografisch materiaal heen naar de lichtgevoelige platen reizen? Hij sloot zich zes weken op in zijn instituut om de eigenschappen van wat hij X-stralen noemde te onderzoeken.

1 Wat zou een reden geweest kunnen zijn dat Hertz, Lenard, Thomson, het zwarten van de fotografische platen genegeerd hebben?

5.2 EIGENSCHAPPEN VAN X-STRALEN

In deze paragraaf ga je aan de hand van stukken tekst uit het (uit het Duits vertaalde) artikel, waarin Röntgen zijn ontdekking aankondigt, een lijst van eigenschappen van X-stralen halen. De getallen bij de stukken tekst zijn van Röntgen zelf: hij beschreef in 17 punten zijn ontdekking van de X-stralen. (...) betekent dat er stukken weggelaten zijn.

2 Neem de tabel die hieronder staat in je schrift over en ga voor alle eigenschappen die Röntgen onderzoekt na of ze in het golf- dan wel deeltjesmodel passen.

eigenschap	aangetoond ja/nee	deeltjesmodel	golfmodel
buiging			X

Houd deze tabel bij bij het lezen van onderstaande stukken uit het artikel van Röntgen.

OVER EEN NIEUW SOORT STRALEN
W.C. Röntgen

1) Een ontlading van een grote inductieklos wordt door een Hittorf vacuumbuis gestuurd, of door een goed leeggepompte Crookes' buis of Lenard buis. De buis wordt omgeven door een betrekkelijk nauw sluitende koker van zwart papier; het is dan mogelijk te zien hoe, in een volledig verduisterde kamer, papier dat eenzijdig met bariumplatinacyanaat is bedekt met een heldere fluorescentie oplicht, of de bedekte dan wel onbedekte kant van het papier naar de buis is gewend. De fluorescentie is op twee meter afstand nog steeds zichtbaar. Het is eenvoudig om aan te tonen dat de oorsprong van de fluorescentie in de vacuumbuis ligt.

3 EERSTE EIGENSCHAP

a. Hoe worden X-stralen opgewekt? Geef een tekening van de opstelling.
b. Aan welke eigenschap heeft Röntgen de X-stralen herkend?
c. Hoe zou hij aangetoond hebben dat de oorsprong van de fluorescentie in de vacuumbuis ligt?

2) Het is dus aantoonbaar dat één of andere drager in staat is door zwart karton te dringen, dat vrijwel ondoorschijnend is voor ultraviolet licht, zonlicht of licht afkomstig van een booglamp. Het is daarom interessant te onderzoeken hoe ver andere lichamen door dezelfde drager doordrongen kunnen worden. Het is eenvoudig aan te nemen dat alle lichamen deze zelfde doordringbaarheid bezitten,

hoewel in verschillende mate. Papier bijvoorbeeld is bijzonder transparant; het fluorescente scherm zal nog oplichten wanneer het achter een boek van zo'n duizend pagina's geplaatst wordt; drukinkt levert geen merkbare weerstand. (...)
Als de hand voor het fluorescente scherm gehouden wordt, laat de schaduw de botten donker zien, met slechts vage contouren van het omliggende weefsel.
Water en verschillende andere vloeistoffen zijn erg transparant. Waterstof is niet merkbaar meer permeabel dan lucht. Platen van koper, zilver, lood, goud en platina laten de stralen ook door, maar alleen wanneer het metaal dun is. Platina 0,2 mm dik laat enkele stralen door; zilver en koper zijn transparanter. Lood 1,5 mm dik is praktisch ondoordringbaar.
Als een houten kubus met ribbe 20 mm aan één kant met witte lood beschilderd wordt, levert het een heel geringe schaduw wanneer de beschilderde kant evenwijdig is met de X-stralen, maar een sterke schaduw wanneer de stralen door de beschilderde kant moeten dringen.

4 TWEEDE EIGENSCHAP

a. Welke eigenschap beschrijft Röntgen hier?
b. Eén van zijn voorbeelden veroorzaakte veel opschudding in de kranten. Welke zal dat geweest zijn?

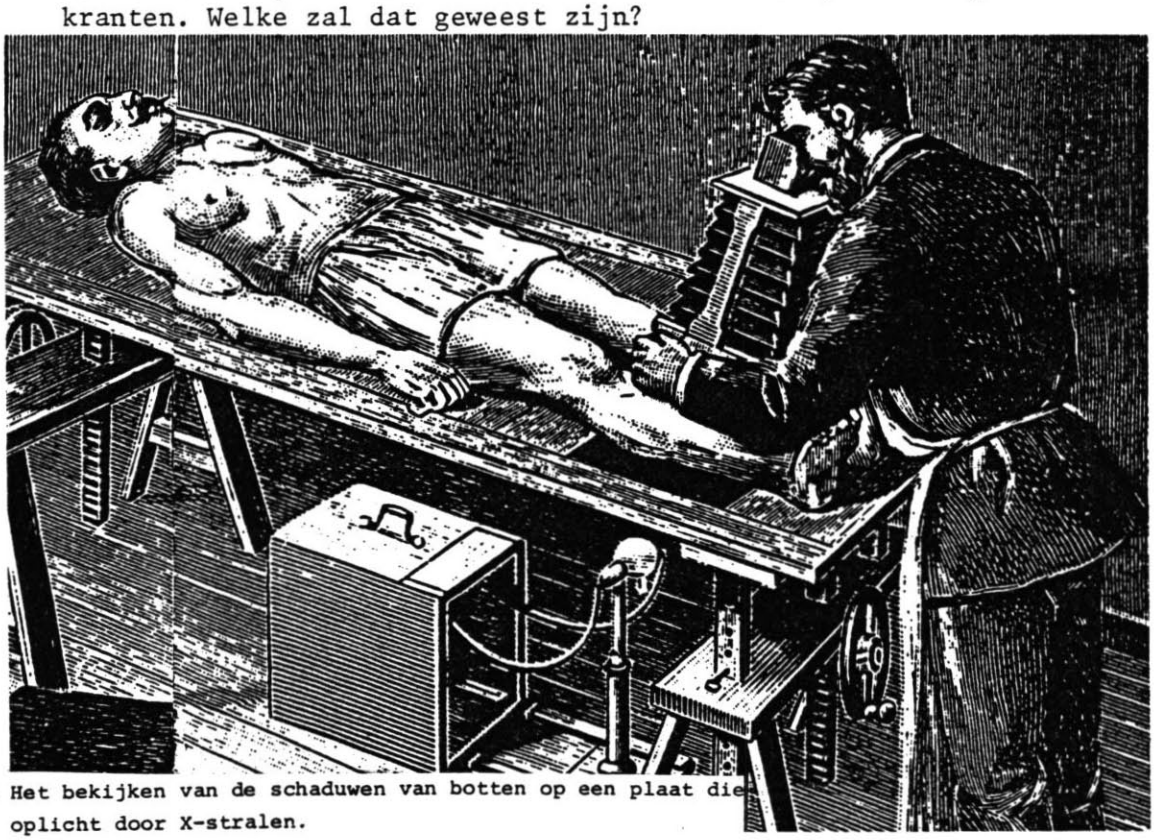


fig. 5.2 Het bekijken van de schaduwen van botten op een plaat die oplicht door X-stralen.

5 DIKTE en DICHTHEID

Röntgen signaleert in een (hier niet afgedrukt) deel van zijn artikel dat de doordringbaarheid van de dichtheid en dikte afhangt. Hoe blijkt dat al uit de voorbeelden die hij hierboven geeft?

(6) De fluorescentie van bariumplatinacyanide is niet de enige waarneembare werking van de X-stralen. Er moet opgemerkt worden dat ook

andere lichamen fluorescentie vertonen, bijv. calcium sulfide, uranium glas, IJslands spaat, klipzout, enz.
Van bijzonder belang in dit verband is het feit dat droge fotografische platen gevoelig zijn voor de X-stralen. Op deze manier is het mogelijk de verschijnselen zo te vertonen dat het gevaar van fouten uitgesloten wordt. Veel waarnemingen, oorspronkelijk met het blote oog aan het fluorescentie scherm gedaan, heb ik zo bevestigd. (...)
Het is overduidelijk dat onbelichte platen niet in hun doos in de buurt van de vacuumbuizen gelaten moeten worden.
Het lijkt betwistbaar of de werking op de plaat een direkt effekt is van de X-stralen, of een secundair gevolg opgewekt door de fluorescentie van het materiaal van de plaat. Zowel films als gewone droge platen geven een beeld.
Ik ben niet in staat geweest experimenteel aan te tonen dat de X-stralen leiden tot warmte-effekten. Deze mogen echter verondersteld worden, want het verschijnsel van fluorescentie laat zien dat de X-stralen in staat zijn tot (energie-)omzettingen. Het is ook zeker dat de X-stralen die op een lichaam vallen dat niet onveranderd achter laten.
De retina van het oog is tamelijk ongevoelig voor de stralen: vlak bij de apparatuur geplaatst ziet het oog niets. (...)

6 DERDE EIGENSCHAP

a. Welke derde eigenschap signaleert Röntgen hier?
b. Waarom is die ook maatschappelijk zo belangrijk (nog steeds)?

7 X-STRALEN IN HET LICHAAM

Nu klinkt het bijna cynisch om achter de opmerking dat "X-stralen die op een lichaam vallen dat niet onveranderd achter laten", een proef te beschrijven met het direkt *zien* van X-stralen. Was Röntgen onverantwoord onvoorzichtig, gezien zijn kennis, of was zijn kennis nog te beperkt?

7) Na mijn experimenten over de transparantie bij toenemende dikten van verschillende stoffen, ben ik verder gegaan om te onderzoeken of de X-stralen afgebogen konden worden met een prisma. Onderzoekingen met water en carbonbisulfide in mica prisma's van 30° vertoonden noch op de fotgrafische noch op de fluorescente plaat een afbuiging. Ter vergelijking werden lichtstralen door het prisma gestuurd, zodra de apparatuur klaar gezet was voor het onderzoek. Ze werden respectievelijk 10 en 20 mm afgebogen in het geval van de twee prisma's.
Met het oog op het belang van de kwestie is het wenselijk op andere manieren te proberen of de X-stralen afgebogen kunnen worden. Dikke lagen van fijn verpulverde lichamen laten maar weinig van het opvallende licht door, als gevolg van buiging en weerkaatsing. In het geval van X-stralen zijn zulke poederlagen echter even transparant als de gelijke massa van het oorspronkelijke lichaam. We kunnen dus niet besluiten tot een normale weerkaatsing of buiging van de X-stralen.

8 DE AARD VAN RONTGENSTRALEN

Uit dit stukje blijkt dat Röntgen denkt dat X-stralen golven zijn. Hoe blijkt dat?

8) De voorafgaande experimenten, en andere die ik buiten beschouwing laat, wijzen erop dat de stralen niet in staat zijn tot gewone weerkaatsing. (...)
Aangezien ik geen aanwijzingen voor breking aan het oppervlak van verschillende stoffen heb gevonden, lijkt het waarschijnlijk dat de X-stralen met dezelfde snelheid in alle lichamen bewegen, en door een medium dat alles doordringt, en waarin de moleculen zich bevinden. (Dit alles doordringende medium is de aether!) De moleculen hinderen de X-stralen effektiever naarmate de dichtheid van het beschouwde lichaam groter is.

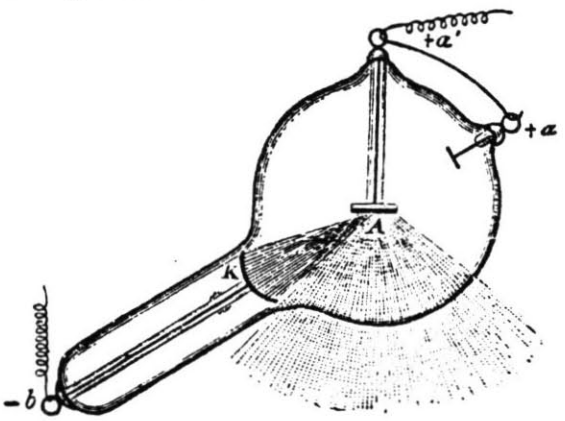


fig. 5.3 Röntgenbuis.

9 VOORTPLANTINGSSNELHEID

Leg uit via welke redenering Röntgen tot zijn uitspraak over de snelheid van X-stralen komt.

10) Het is bekend dat Lenard, in zijn onderzoekingen aan kathodestralen, heeft aangetoond dat ze tot de aether behoren, en alle lichamen kunnen doordringen. Over de X-stralen kan hetzelfde gezegd worden.
(...) Ik vind, gebruik makend van Webers fotometer, dat de intensiteit van het fluorescente licht vrijwel met het omgekeerde kwadraat van de afstand tussen scherm en ontladingsbuis afneemt. Dit resultaat is verkregen uit drie bijzondere consistente reeksen waarnemingen op afstanden van 100 en 200 mm. Blijkbaar absorbeert lucht de X-stralen veel minder dan de kathodestralen. Dit resultaat is in volledige overeenstemming met het eerder beschreven resultaat, dat het fluoresceren van het scherm op een afstand van 2 m van de vacuumbuis nog waargenomen kan worden. In het algemeen gedragen andere lichamen zich net als lucht; ze zijn meer transparant voor X-stralen dan voor kathodestralen.
11) Een verder onderscheid, zeer belangrijk, resulteert uit de werking van een magneet. Ik ben er niet in geslaagd zelfs in sterke magnetische velden enige afwijking van de X-stralen waar te nemen.
De afbuiging van kathodestralen door een magneet is één van de meest opvallende eigenschappen; door Hertz en Lenard is waargenomen dat er verschillende soorten kathodestralen bestaan, die (tegelijkertijd) verschillen in hun phosphorescente kracht, mate van absorptie en hun afbuiging door een magneet; maar in alle gevallen is een aanzienlijke afbuiging geconstateerd, en ik denk dat zo'n afbuiging een belangrijke karakteristiek vormt, die je niet gemakkelijk opzij mag schuiven.

15) Ik heb gezocht naar interferentie-effekten van de X-stralen, maar, mogelijk als gevolg van hun lage intensiteit, zonder resultaat.
16) Onderzoekingen om te bekijken of elektrostatische krachten op X-stralen werken zijn begonnen maar nog niet beëindigd.

10 ZIJN X-STRALEN GOLVEN?

a. Hoe blijkt uit het bovenstaande dat Röntgen een aanhanger van het golfmodel van kathodestralen is?
b. Hij gaat de relatie tussen intensiteit en afstand nauwkeurig meten. Aan welke discussie over kathodestralen denkt hij daarbij?
c. Onderstreept het resultaat Röntgens golfhypothese voor X-stralen?
d. Waarom vindt Röntgen de afwezigheid van magnetische afbuiging zo belangrijk?
e. Waarom gaat hij op zoek naar interferentie? En naar elektrostatische afbuiging?

12) Als resultaat van verschillende onderzoekingen blijkt dat de plaats van de meest heldere phosphorescentie op de wanden van de ontladingsbuis de voornaamste bron is van waar X-stralen ontstaan en zich in alle richtingen voortplanten; dat wil zeggen: de X-stralen komen uit het gebied waar de kathodestralen het glas raken. Als je de kathodestralen binnen de buis door middel van een magneet afbuigt, kun je de X-stralen uit een nieuw punt zien komen, wel weer uit het eindpunt van de kathodestralen.
Ook om deze reden kunnen X-stralen, die niet door een magneet afgebogen worden, niet beschouwd worden als kathodestralen die door het glas gedrongen zijn, want zo'n passage kan, volgens Lenard, niet de oorzaak zijn van de verschillende afbuiging van de stralen. Ik concludeer dus dat de X-stralen niet identiek zijn aan de kathodestralen, maar dat ze uit kathodestralen ontstaan bij het glasoppervlak van de buis.
13) De stralen ontstaan niet alleen in glas. Ik heb ze ook verkregen in een apparaat, dat met een 2 mm dikke alumiunium plaat was afgesloten. Ik ben van plan later het gedrag van andere stoffen te onderzoeken.

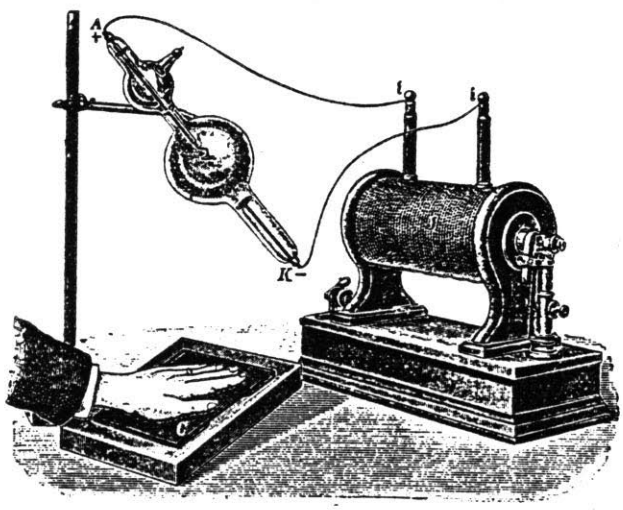


fig. 5.4 Het vervaardigen van een 'röntgenogram'. Onder de hand bevindt zich een fotografische plaat.

11 ZIJN X-STRALEN KATHODESTRALEN?

a. Geef tenminste vier argumenten waarom X-stralen *geen* kathodestralen zijn.
b. Er is wel een relatie tussen X-stralen en kathodestralen. Welke?

14) De rechtvaardiging een term als 'stralen' op de verschijnselen toe te passen, ligt gedeeltelijk in de regelmatige schaduw beelden die ontstaan wanneer een min of meer permeabel lichaam tussen de bron en de fotografische plaat of het fluorescente scherm geplaatst wordt. Ik heb veel van zulke schaduw beelden waargenomen en gefotografeerd. Zo heb ik een plaat van een deel van een deur beschilderd met loodverf; het beeld werd verkregen door de ontladingsbuis aan de ene kant van de deur te plaatsen, en de gevoelige plaat aan de andere kant. Ik heb ook een schaduw van de botten van de hand (fig. 1), van een draad gewonden om een klos, van een stel gewichten in een doos, van een kompas met schaalverdeling en naald volledig afgelosten in een metaal blik (fig. 2), van een stuk metaal waar de X-stralen een gebrek aan homogeniteit onthullen en van nog andere dingen.

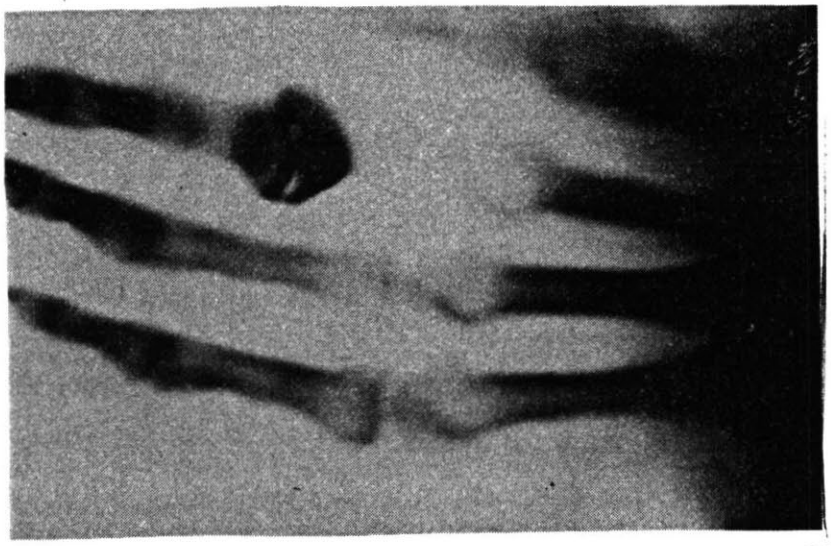


fig. 1 Foto van de botten in de vingers van een levende mensenhand. Aan de derde vinger zit een ring.

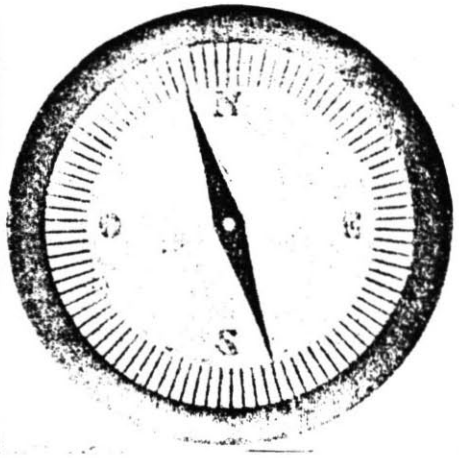


fig. 2 Foto van een kompas en een kompasnaald, geheel opgesloten in een blik.

12 SPOTPRENTEN

De foto van de hand schokte de publieke opinie in Röntgens dagen. Deze passage uit het artikel inspireerde ook tot het maken van spotprenten.
Spoor in deze spotprenten (zie volgende blz.) elk minstens twee fouten op, waaruit blijkt, dat de tijdgenoten van Röntgen nog niet veel begrepen van wat X-stralen zijn.



fig. 5.5 Cartoon uit *Punch*, 7 maart 1896.

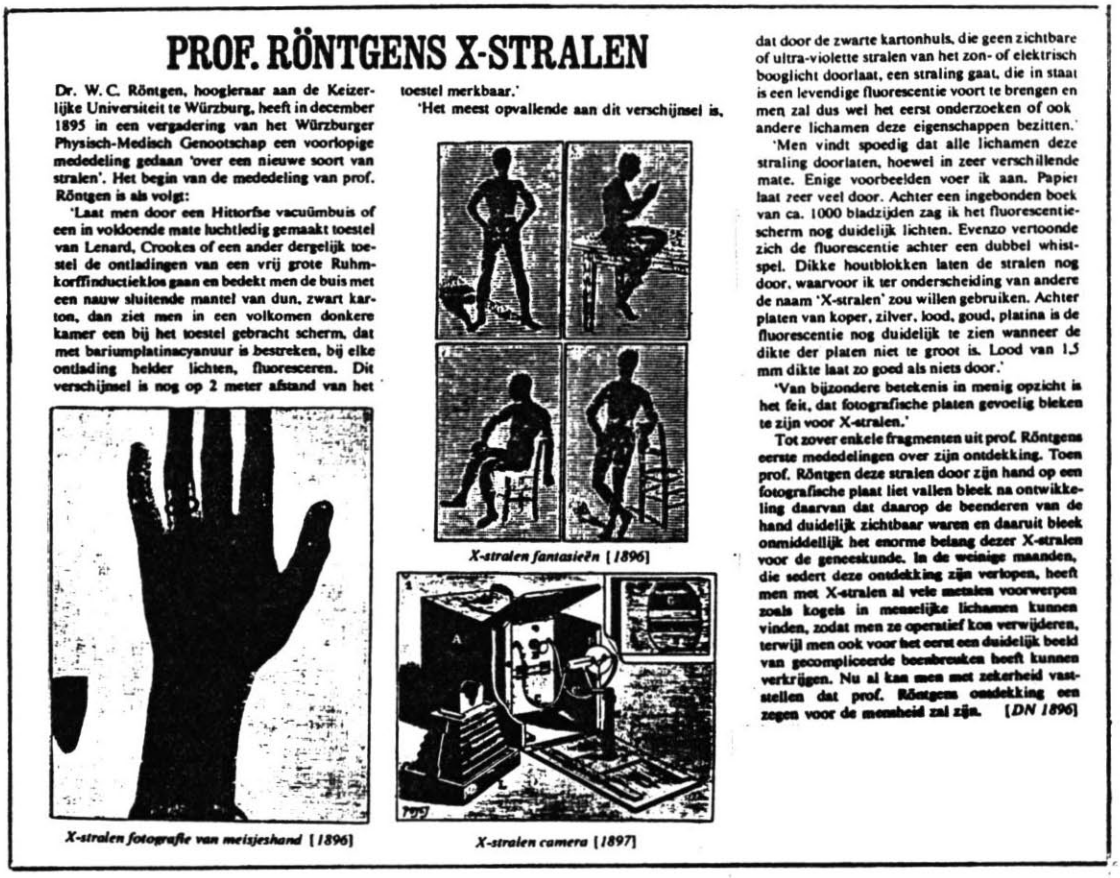


fig. 5.6 Cartoon uit *Life*, 27 februari 1896.

17) Als iemand vraagt waaruit de X-stralen bestaan, kan je, omdat het geen kathodestralen zijn, gezien hun fluorescerend vermogen en hun chemische werking, veronderstellen dat ze op ultraviolet licht lijken. Tegenover dit gezichtspunt staat een zwaarwegend stel bezwaren. Als X-stralen inderdaad ultraviolet licht zijn, dan moet dat licht de volgende eigenschappen bezitten:
a) Het wordt niet gebroken bij de passage van lucht naar water, koolstofbisulfide, aluminium, klipzout, glas of zink.
b) Het is niet in staat tot gewone weerkaatsing op het oppervlak van bovengenoemde lichamen.
c) Het kan niet gepolariseerd worden door een normaal polariserend lichaam.
d) De absorptie door verschillende lichamen moet voornamelijk afhangen van hun dichtheid.
Dat wil zeggen, deze ultraviolette stralen moeten zich totaal anders gedragen dan de zichtbare, infrarode en tot dusver bekende ultraviolette stralen.
Deze dingen lijken zo onwaarschijnlijk, dat ik naar een andere hypothese gezocht heb.
Er lijkt een soort verband te bestaan tussen de nieuwe stralen en lichtstralen; in ieder geval wijzen schaduwvorming, fluorescentie en chemische aktiviteit in die richting. Nu is het lange tijd bekend, dat naast transversale trillingen, die de verschijnselen van het licht verklaren, er mogelijkerwijs longitudinale trillingen in de aether kunnen bestaan, en in de ogen van sommige fysici, moeten bestaan. Toegegeven dat hun bestaan nog niet duidelijk is, en hun eigenschappen nog niet experimenteel vastgesteld. Zouden de nieuwe stralen niet toegeschreven kunnen worden aan longitudinale golven in de aether?
Ik moet bekennen dat ik mezelf in de loop van het onderzoek meer en meer op deze gedachte verlaten heb, en waag het deze mening naar voren te brengen, hoewel ik me er terdege van bewust ben, dat de voorgestelde hypothese nog steeds een betere fundering behoeft.

13 VERDER ONDERZOEK

Röntgen onthult hier de hypothese, van waaruit hij veel van het beschreven onderzoek heeft gedaan.
a. Noem enkele mogelijke experimenten die hij vanuit deze hypothese zeker moest doen.
b. Er zijn eigenschappen die deze hypothese tegenspreken. Welke?
c. Welke verklaring geeft Röntgen voor die tegenspraken in zijn artikel?



PROF. RÖNTGENS X-STRALEN

Dr. W.C. Röntgen, hoogleraar aan de Keizerlijke Universiteit te Würzburg, heeft in december 1895 in een vergadering van het Würzburger Physisch-Medisch Genootschap een voorlopige mededeling gedaan 'over een nieuwe soort van stralen'. Het begin van de mededeling van prof. Röntgen is als volgt:

'Laat men door een Hittorfse vacuümbuis of een in voldoende mate luchtledig gemaakt toestel van Lenard, Crookes of een ander dergelijk toestel de ontladingen van een vrij grote Ruhmkorffinductieklos gaan en bedekt men de buis met een nauw sluitende mantel van dun, zwart karton, dan ziet men in een volkomen donkere kamer een bij het toestel gebracht scherm, dat met bariumplatinacyanuur is bestreken, bij elke ontlading helder lichten, fluoresceren. Dit verschijnsel is nog op 2 meter afstand van het toestel merkbaar.'

'Het meest opvallende aan dit verschijnsel is, dat door de zwarte kartonhuls, die geen zichtbare of ultra-violette stralen van het zon- of elektrisch booglicht doorlaat, een straling gaat, die in staat is een levendige fluorescentie voort te brengen en men zal dus wel het eerst onderzoeken of ook andere lichamen deze eigenschappen bezitten.'

'Men vindt spoedig dat alle lichamen deze straling doorlaten, hoewel in zeer verschillende mate. Enige voorbeelden voer ik aan. Papier laat zeer veel door. Achter een ingebonden boek van ca. 1000 bladzijden zag ik het fluorescentiescherm nog duidelijk lichten. Evenzo vertoonde zich de fluorescentie achter een dubbel whistspel. Dikke houtblokken laten de stralen nog door, waarvoor ik ter onderscheiding van andere de naam 'X-stralen' zou willen gebruiken. Achter platen van koper, zilver, lood, goud, platina is de fluorescentie nog duidelijk te zien wanneer de dikte der platen niet te groot is. Lood van 1,5 mm dikte laat zo goed als niets door.'

'Van bijzondere betekenis in menig opzicht is het feit, dat fotografische platen gevoelig blieken te zijn voor X-stralen.'

Tot zover enkele fragmenten uit prof. Röntgens eerste mededelingen over zijn ontdekking. Toen prof. Röntgen deze stralen door zijn hand op een fotografische plaat liet vallen bleek na ontwikkeling daarvan dat daarop de beenderen van de hand duidelijk zichtbaar waren en daaruit bleek onmiddellijk het enorme belang dezer X-stralen voor de geneeskunde. In de weinige maanden, die sedert deze ontdekking zijn verlopen, heeft men met X-stralen al vele metalen voorwerpen zoals kogels in menselijke lichamen kunnen vinden, zodat men ze operatief kon verwijderen, terwijl men ook voor het eerst een duidelijk beeld van gecompliceerde beenbreuken heeft kunnen verkrijgen. Nu al kan men met zekerheid vaststellen dat prof. Röntgens ontdekking een zegen voor de mensheid zal zijn. [*DN 1896*]

X-stralen fantasieën [1896]

X-stralen fotografie van meisjeshand [1896]

X-stralen camera [1897]

fig. 5.7 Artikel uit *de Natuur* van 1896.

5.3 ONTWIKKELINGEN DIREKT NA RONTGENS ONTDEKKINGEN

in de wetenschap

De jaren na 1895 gaven op het gebied van X-stralen een stormachtige ontwikkeling te zien. In 1895 werd er geen enkel artikel over de nieuwe stralen gepubliceerd; na Röntgens aankondigingen van zijn ontdekking in januari 1896, werden er in dat jaar meer dan 1000 artikelen aan de X-stralen gewijd! En met deze 1000 artikelen bedoelen we de natuurkundige artikelen, niet de kranteartikelen die er ook waren, maar serieuze publikaties in officiële natuurkundige tijdschriften.
Een belangrijke eigenschap die al gauw ook werd gevonden was het geleidend maken van de lucht door X-stralen. Een geladen voorwerp (bijvoorbeeld een elektroscoop) wordt ontladen, als het in de buurt van een röntgenbron staat. De lucht wordt *geïoniseerd*, hetzelfde effekt als in kathodestraalbuizen optreedt en waar kanaalstralen door kunnen ontstaan.

In Röntgens artikel zijn nauwelijks verwijzingen te vinden naar het werk van andere natuurkundigen. Alleen in het begin is er sprake van Lenardbuizen, Crookesbuizen en van Hittorfvacuumbuizen. Rond 1900, net als nu overigens, was het in de natuurkunde gebruikelijk met behulp van voetnoten te verwijzen naar bijdragen van collega's die men in het onderzoek heeft gebruikt. Lenard, die het type buis waarmee Röntgen zijn ontdekking deed ontwikkeld had, wond zich enorm op over het ontbreken van verwijzingen naar zijn werk. Lenard vond dat de ontdekking met *zijn* buis gedaan was, en dat Röntgen hem *dus* in zijn artikel had behoren te bedanken middels een voetnoot.

14 a. Vind jij dat Lenard gelijk had?
b. In de natuurkunde geschiedenis zijn debatten als tussen Röntgen en Lenard eerder regel dan uitzondering, terwijl ze in de techniek vrijwel ontbreken. Kun jij verklaren waarom zulke oeverloze debatten in de techniek niet voorkomen?

in de techniek

Voor *technici* was er na Röntgen een hoop ontwikkelwerk te doen. In de eerste plaats was al uit Röntgens artikel duidelijk dat de X-stralen ontstaan bij het afremmen van kathodestralen op glas (zie de nummers 12 en 13). Blijkbaar ontstonden X-stralen als een soort remstraling bij het botsen van kathodestralen op materialen: de vraag was nu welke materialen het geschikst zouden zijn voor de produktie van X-stralen.
Edison zorgde voor een belangrijke verbetering. Hij ontdekte dat er veel meer elektronen vrijkomen door een gloeidraad als kathode te gebruiken. De opbrengst aan X-stralen werd daardoor veel groter.
Resultaat van dit ontwikkelwerk was de Coolidgebuis, waarvan je hieronder een afbeelding ziet.

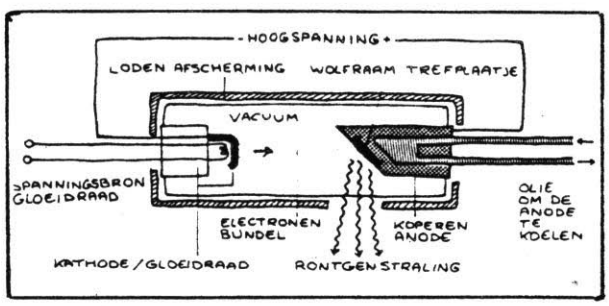


fig. 5.8 Schematische voorstelling van een Coolidge buis: deze buis zendt meer röntgenstralen uit dan de buis die Röntgen gebruikte, omdat de kathodestralen tegen een metaal in plaats van glas botsen en omdat er aan de gloeikathode veel meer elektronen vrijkomen.

Door het gebruik van de gloeikathode bleek ook dat er al bij lage spanning tussen de anode en kathode elektronen aan de kathode vrijkomen. Hun energie is dan echter niet groot genoeg om op de antikathode X-stralen vrij te maken. Pas bij zo'n 20 kV ontstaan X-stralen, 'zachte' stralen, omdat het doordringend vermogen niet zo groot is. Bij hogere spanningen krijg je 'hardere' straling.
Röntgenfotografie werd vrijwel onmiddellijk in de geneeskunde en de materiaalkunde toegepast. Op 20 januari 1896 werd de gebroken arm van ene Eddie McCarthy gezet, nadat zijn doktoren eerst röntgenfoto's van de breuk hadden bestudeerd. 20 januari: minder dan drie maanden na Röntgens ontdekking op 8 november 1895!
Meestal duurt het minstens 10 jaar voor men een voor een wetenschappelijke vinding een technische toepassing vindt.

15 Vergelijk deze technische toepassing van X-stralen met de ontwikkeling van de gloeilamp, en verklaar waarom het jaren duurde voor de gloeilamp ontwikkeld werd, terwijl het fysische principe sinds jaar en dag bekend was, n.l. dat verhitte draden licht uitzenden.



X RAY TUBES

15s. each.

fig. 5.9 X-stralen als handelswaar.

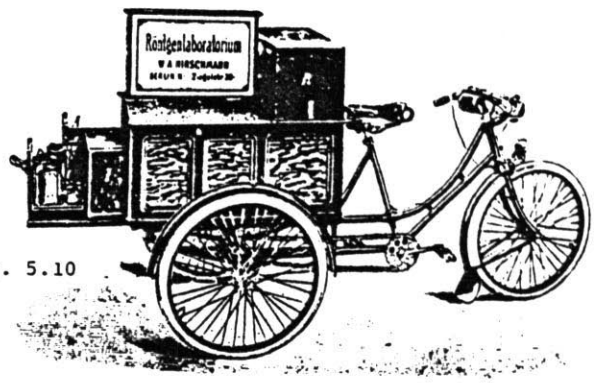


fig. 5.10

5.4 ZIJN X-STRALEN GOLVEN?

Van 1896 tot 1911 experimenteerden natuurkundigen en rekenden theoretici om de vraag te beantwoorden of X-stralen deeltjes of golven zijn. Sommige proeven leken op een deeltjeskarakter te wijzen, andere op een golfkarakter. Tot 1912 bleef de kwestie onbeslist. Toen ontstond er wel duidelijkheid: de Duitser Max von Laue en de Engelsen W.L. en W.H. Bragg (zoon en vader) deden proeven die definitief leken uit te wijzen dat X-stralen elektromagnetische golven zijn en geen deeltjes.

Hieronder vind je een stukje uit een oud natuurkundeboek daarover.

(Uit: "Leerboek der natuurkunde, deel III", dr. G.C. Gerrits, 1923.)

§ 184. Aard der röntgenstralen.

1. Omtrent den **aard der röntgenstralen** heeft men langen tijd in twijfel verkeerd. Wel was, ongeveer 10 jaren na de ontdekking van Röntgen, de (gedeeltelijke) polarisatie der röntgenstralen aangetoond, waardoor men tot de meening kwam, dat de stralen uit transversale aethertrillingen zouden bestaan. Men slaagde er evenwel niet in de buiging (diffractie, zie deel II, § 143) der stralen (door nauwe openingen) aan te toonen; dit was echter te wijten aan de moeilijkheid, de daarvoor noodige fijne spleten te bewerkstelligen.

In 1912 kwam **Von Laue** op het geniale denkbeeld, het benoodigde buigingsapparaat voor de röntgenstralen aan de natuur zelf te ontleenen en wel in den vorm der fijnste en meest regelmatige structuur, welke de natuur in staat is op te bouwen, n.l. in den vorm van kristallen. De ruimten tusschen de regelmatig gerangschikte atomen waren de openingen, waarvan hij gebruik maakte.

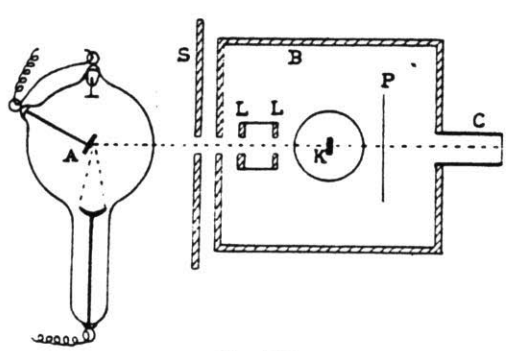


Fig. 244.
Onderzoek der röntgenstralen.

Van de anti-kathode A (fig. 244) van een röntgenbuis valt door de nauwe opening van een looden scherm S een fijne bundel röntgenstralen; vervolgens valt deze bundel door een opening in den looden wand B van de „camera" en door fijne openingen van de

looden platen L, op een kristal K (van $^1/_2$ mM. dikte ongeveer), dat op een tafeltje geplaatst is. Op de fotografische plaat P, enkele centimeters achter het kristal aangebracht, worden de stralen opgevangen. Deze plaat vertoont (nadat de röntgenbuis verscheidene uren, soms dagen lang gewerkt heeft) het „buigingsbeeld". Er blijken donkere vlekken op regelmatige wijze over de plaat verdeeld te zijn. Zoo geeft fig. 245 het röntgenogram weer, dat bij zinkblende (ZnS) verkregen werd.

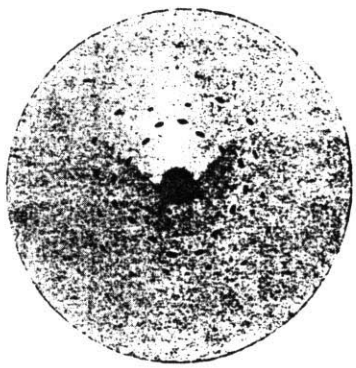


Fig. 245.
Röntgenogram van zinkblende.

Hieruit volgt, dat zonder twijfel **de röntgenstralen moeten opgevat worden als te bestaan uit transversale aethertrillingen of electromagnetische trillingen.**

Uit de schikking der vlekken kon men besluiten tot een golflengte van ongeveer 0,03 tot 0,04 $\mu\mu$ (1 $\mu\mu$, 1 millimicron, is 0,001 μ, dus een millioenste deel van een mM.), zoodat de golflengte der röntgenstralen veel kleiner is dan die van het ultraviolette licht. Ook kleinere golflengten dan de hier aangegevene zijn nog waargenomen. (Ga eens na, welke soorten aethertrillingen wij nu hebben leeren kennen).

2. Tengevolge van de nieuwe methode van onderzoek heeft men niet alleen zekerheid gekregen omtrent den aard der röntgenstralen, en belangrijke ontdekkingen betreffende die stralen gedaan, maar ook de scheikunde en in het bijzonder de kristallografie hebben daardoor een belangrijke schrede voorwaarts afgelegd.

De regelmatige schikking van de atomen in het kristal is nu geen hypothese meer, maar tengevolge van bovengenoemd onderzoek een feit geworden. Men heeft toch uit het röntgenbeeld tot de rangschikking der atomen kunnen besluiten. Zoo is in fig. 246 de structuur weergegeven van keukenzout (volgens de onderzoekingen van de Engelsche natuurkundigen *Bragg*, vader en zoon). De donkere cirkeltjes stellen natrium-atomen voor, de lichte chloor-atomen. De rangschikking der atomen is kubus-vormig; de beide soorten atomen wisselen elkaar steeds af. Dezelfde structuur komt voor, met eenigszins gewijzigde afstanden, bij chloorkalium, broomkalium, joodkalium, enz.

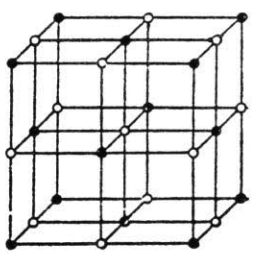


Fig. 246.
Rangschikking der atomen in keukenzout.

Ook van tal van andere kristallen heeft men met behulp van het röntgenogram de structuur gevonden. Al is deze dikwijls veel samengestelder dan de hier meegedeelde, toch is ze steeds regelmatig. Soms zijn zeer langdurige berekeningen noodig om tot den bouw van het kristal te komen.

Een blik op fig. 246 toont ons, dat ieder chloor-atoom in precies dezelfde betrekking staat tot de zes onmiddellijk er naast gelegen natrium-atomen. Uit dit regelmatig systeem een groep van één atoom natrium tezamen met één atoom chloor af te zonderen en deze dan tot een molecule te verklaren, lijkt wel wat zonderling.

Zoo wordt op de begrippen atoom en molecule bij de kristallen een geheel nieuw licht geworpen.

16 a. Geef alle argumenten waarom iedereen na Von Laue overtuigd was van het elektromagnetische karakter van X-stralen.
b. Waarom was het idee van Von Laue zo geniaal? Waarom zal het niet gelukt zijn buiging met een tralie aan te tonen?
c. Door de ontdekking van X-stralen kwam een heel ander gebied

van de natuurkunde, de kristallografie, tot ontwikkeling. Leg uit waarom.

bepaling van de golflengte van X-stralen

Max von Laue redeneerde in 1911 als volgt: Stel dat X-stralen elektromagnetische golven zijn, hoe is het dan te verklaren dat Röntgen geen buigingsverschijnselen zag? De enige verklaring die hij binnen een golfhypothese voor het ontbreken van duidelijke buigingsresultaten kon geven, was de veronderstelling dat X-stralen een extreem korte golflengte hadden. Misschien zouden er met bijzonder regelmatige kristallen wel succesvolle buigingsbeelden te verkrijgen zijn, zo redeneerde Von Laue, en hij zette twee jonge fysici aan het werk. Friedrich en Knipping moesten X-stralen door kristallen op een fotografische plaat laten vallen om te beslissen of er buiging kon optreden. Zij verkregen een resultaat als in onderstaande foto afgebeeld, hier en daar op de foto is een donkere ring te zien. Blijkbaar worden de X-stralen alleen onder bepaalde hoeken afgebogen.

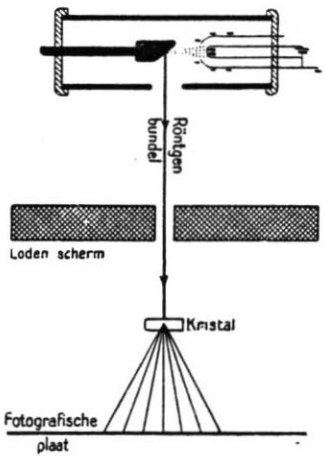


fig. 5.11 Opstelling voor röntgenbuigingsproeven.

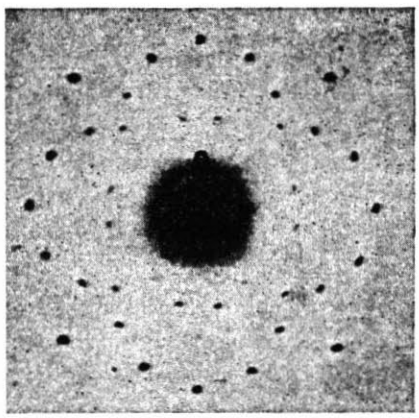


fig. 5.12 Buiging van röntgenstralen bij doorval door een NaCl-kristal.

De interpretatie van deze foto's was niet eenvoudig. Von Laue slaagde er niet in tot een goed resultaat te komen. De 22 jaar oude Bragg slaagde daar wel. Hij kwam met onderstaande theoretische analyse, die het mogelijk maakte de golflengte van de X-stralen te berekenen.

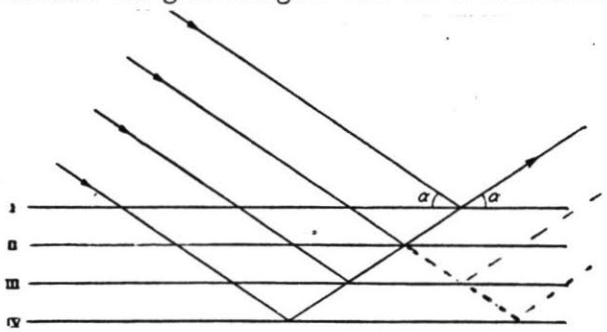


fig. 5.13 Terugkaatsing van röntgenstralen in een kristal aan verschillende roostervlakken.

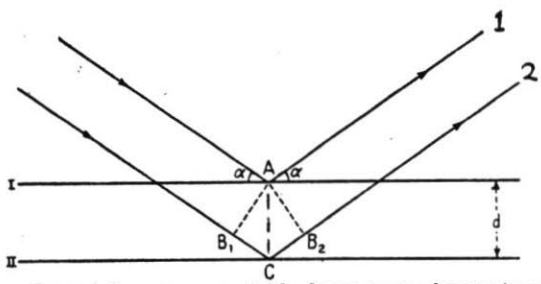


fig. 5.14 Weglengteverschil door terugkaatsing aan twee roostervlakken.

Stel dat de atomen van het kristal telkens op een afstand d van elkaar liggen. Stel verder dat X-stralen van richting veranderen als ze tegen atomen botsen. Een kristal kan dan opgevat worden als een serie spiegels

die op een afstand d van elkaar liggen. Het is weliswaar niet zo dat alle X-stralen met dezelfde hoek weerkaatst worden, als waarmee ze komen invallen (α), maar zoals uit de tekening blijkt is er alleen dan versterking tussen naburige stralen mogelijk, als de uitgaande straal dezelfde hoek maakt, als waarmee de eerdere straal op de 'spiegel' invalt.

Het *weglengteverschil* tussen straal 1 en 2 in fig. 5.14 is van belang om te beslissen of er versterking optreedt en er op de foto een vlek ontstaat. Straal 2 reist een beetje langer dan straal 1, namelijk over het pad B_1 C B_2. De lengte van dit pad is eenvoudig uit te rekenen uit de gegevens van Δ A B_1 C

$$\sin \alpha = \frac{B_1 C}{A C} = \frac{B_1 C}{d}$$

Dus $B_1 C\ B_2 = 2\ B_1 C = 2.d.\sin \alpha$.

Alleen als het weglengteverschil tussen straal 1 en straal 2 een geheel aantal golflengten is, kunnen de stralen elkaar versterken. Voorwaarde voor een vlek op de foto's is dus:

$$2\ d\ \sin \alpha = k\ \lambda, \text{ met: } k = 0,\ 1,\ 2,\ 3,\ \ldots.$$

17 Een $CaCl_2$ kristal heeft als afstand tussen de kristalvlakken $d = 3.0 \times 10^{-10}$ m, en voor een bepaalde golflengte van X-stralen wordt er een versterkte uittredende bundel waargenomen onder een hoek van 8° met de invallende bundel.
a. Maak een schetsje van invallende straal, kristal en uitgaande straal. Bepaal met behulp van dit schetsje de grootte van α.
b. Bereken uit de relatie van Bragg de golflengte van de X-straling. (Neem voor k = 1!)
c. Als k = 2 ontstaat een tweede orde maximum: het weglengteverschil tussen straal 1 en 2 is dan twee golflengten. Bepaal de hoek met de inkomende bundel, waaronder het tweede orde maximum te vinden is uit de golflengte, die je bij b. gevonden hebt.

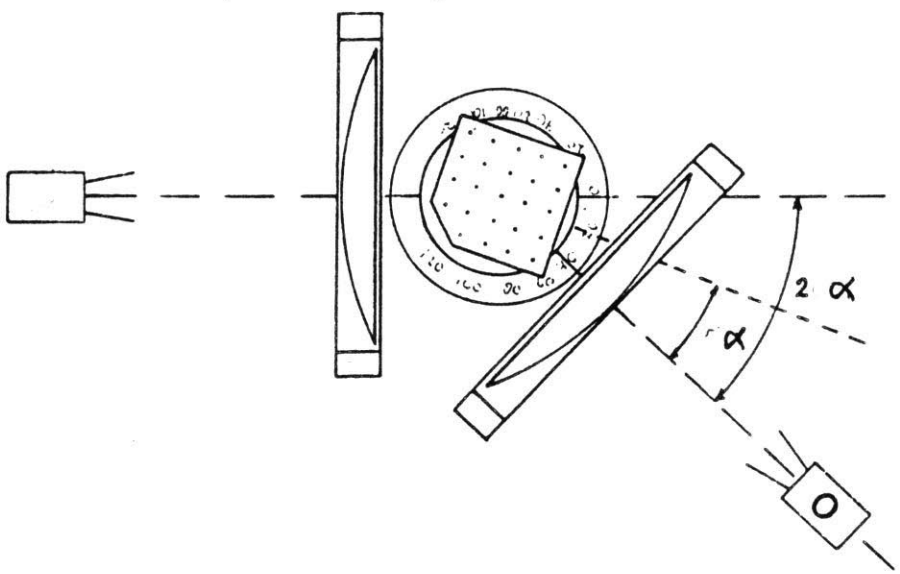
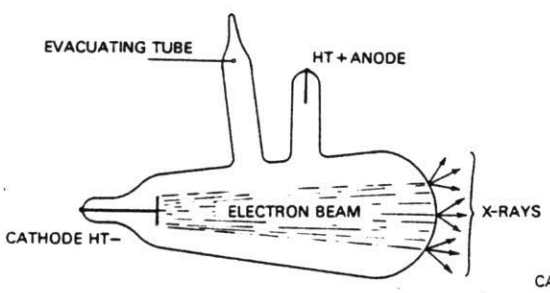
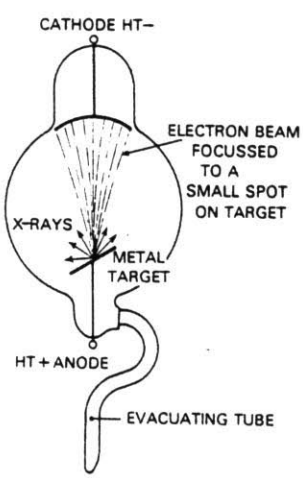


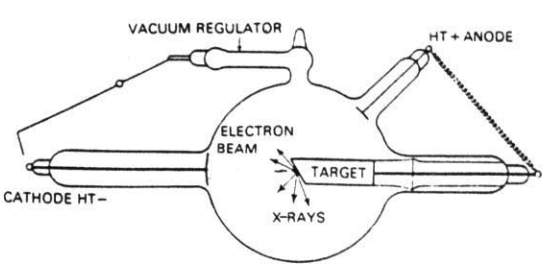
fig. 5.15 Schematische tekening van een opstelling waarmee Bragg reflectie met centimetergolven (elektromagnetische golven van circa 3,0 cm) in de klas getoond kan worden.

Na het werk van Von Laue en de beide Braggs is er een nieuw vak ontstaan, de kristallografie. Doelstelling van dat vak is uit de buigingsbeelden van bepaalde stoffen gegevens te halen over de afstanden d tussen de atomen van die stof. Om een idee te krijgen van de moeilijkheden uit dat vak de volgende opgave, die je eventueel zelf kunt uitproberen met een opstelling voor centimeter golven.
In fig. 5.15 is Z de bron van cmgolven met een golflengte van 3,0 cm. De golven vallen op een schuimrubberen 'kristal', waarin 'atomen' verstopt zijn, die zo groot zijn dat ze cmgolven verstrooien. De 'atomen' zijn aluminium kogels van iets minder dan 1 cm grootte. De bedoeling van deze proef is dat je uit de afstanden d tussen de 'atomen' kunt berekenen hoe de kristalstructuur' van het schuimrubberen kristal is. Gegeven is dat de kogels in een kubusvormig patroon liggen.
De hoeken waaronder versterking optreedt worden met een ontvanger O gemeten. Resultaat zijn de volgende vier hoeken, waarmee de invallende cmgolven worden afgebogen: 30°, 44°, 64° en 96°.

18 a. Begin met de afbuiging van 44°. Bepaal achtereenvolgens: α en d als je weet dat de golflengte 3,0 cm is en als je aanneemt dat deze afbuiging een eerste orde afbuiging is.
b. Bereken onder welke hoek de bijbehorende tweede orde afbuiging optreedt. Conclusie?
c. De overgebleven twee hoeken zullen ook bij een eerste en tweede orde buigingsmaximum horen. Neem aan dat de 30° bij een eerste orde maximum hoort en bereken daaruit α en d. Past deze d op de overgebleven hoek?
d. Hoe kun je uit deze twee afstanden d besluiten tot een kubische structuur voor de alumiunium bollen in het schuimrubber? Tekenen!







6 RADIOAKTIEVE STRALEN

INHOUD:

6.1 Inleiding 101
6.2 'Radioaktieve stralen' uit een oud leerboek 102

6.1 INLEIDING

Röntgen noemde in zijn artikel ook het fluoresceren van uraniumglas onder invloed van X-stralen. Henri Becquérel wist van de verzameling mineralen die zijn vader beheerde, dat uraniumzoutkristallen in het denken fluoresceren. Hij dacht dat zonnestraling misschien röntgenstraling kon opwekken in een uraniumzout. Inderdaad bleek in zonlicht geplaatst uraniumzout in staat een fotografische plaat te zwarten. Zijn theorie leek dus te kloppen. Tot er iets vreemds gebeurde. Becquérel schreef daarover:
"... van de voorgaande experimenten waren sommige gedaan op woensdag de 26e en donderdag de 27e februari (1896); en omdat op deze dagen de zon slechts af en toe scheen, hield ik mijn spullen allemaal gereed, maar opgeborgen in een donkere la, met de korreltjes uraniumzout nog steeds op hun plaats. Omdat de zon zich opnieuw enkele dagen niet liet zien, ontwikkelde ik op 1 maart de fotografische platen in de verwachting slechts erg zwakke afbeeldingen te vinden. Maar het tegendeel bleek waar te zijn, de silhouetten waren uitermate duidelijk zichtbaar. Onmiddellijk dacht ik dat het proces misschien ook in het donker zou kunnen doorgaan ..."
Dit geheimzinnige proces, dat "ook in het donker kon doorgaan", bleek de ontdekking van *radioaktieve stralen* in te houden.



fig. 6.1 Henri Becquérel (1852 - 1908), de ontdekker van de radioaktieve stralen.

In dit hoofdstuk vind je een deel uit een leerboek dat in 1916 geschreven werd. Daarin wordt de stand van zaken tot die tijd weergegeven. Dr. G.C. Gerrits, de schrijver van het leerboek en "leeraar aan de 1e H.B.S. 5-j.c. te Amsterdam", hield de ontwikkelingen in de natuurkunde dus goed bij, zoals ook blijkt uit het voorbericht bij de 5e druk van zijn boek:

> *In hoofdzaak is deze druk gelijk aan den vorigen. Alleen is het begrip positief electron in overeenstemming met de tegenwoordige beschouwingen vervallen en worden de verschijnselen — voor zoover hierbij de electronentheorie noodig is — verklaard door de aanname van uitsluitend negatieve electronen.*

Op enkele plaatsen staan aktiviteiten om de leerstof te verwerken in de oude tekst ingevoegd. Daaraan kun je zien wat je van dit hoofdstuk zeker moet kennen.

6.2 'RADIOAKTIEVE STRALEN' UIT EEN OUD LEERBOEK

Uit: "Leerboek der Natuurkunde deel III", Dr. G.C. Gerrits, 9e druk 1923.

RADIOACTIVITEIT.

§ 185. Eigenschappen der radioactieve stoffen.

1. In 1896 ontdekte **Becquerel** een bijzonder soort stralen, die uitgezonden worden door het metaal **uraan,** de **uraanzouten** en **uraanpekerts** (het mineraal, waaruit uraan bereid wordt en dat voornamelijk in Bohemen gevonden wordt). Deze stralen vertoonen de volgende eigenschappen:

1°. **Ze werken op een fotografische plaat.** Wordt op zoo'n plaat, in zwart papier gewikkeld, een kristal van uraannitraat of een stukje uraan gelegd, dan is na een paar dagen de vorm hiervan op de plaat (na ontwikkeling) duidelijk waar te nemen.

De stralen, door deze stoffen uitgezonden, gaan dus door zwart papier. Maar ook bleek, dat ze door verschillende andere stoffen heengaan, zelfs door dunne plaatjes metaal. Hieruit volgt de eigenschap:

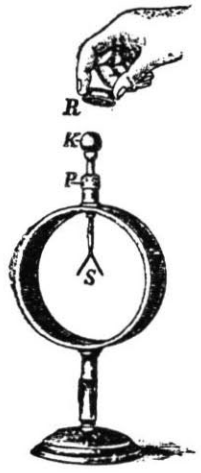


Fig. 248.
Radium bij een geladen electroscoop.

2°. **Deze stralen hebben een groot doordringingsvermogen.**

Een lichaam, dat deze stralen uitzendt, heet **radioactief.** Het eigenaardige is, dat de stralen door de stof spontaan worden uitgezonden. Wordt zoo'n radioactieve stof bij een geladen electroscoop gebracht (fig. 248), dan wordt deze ontladen.

3°. **Lucht, waardoor de stralen heen gaan, wordt geïoniseerd en daardoor geleidend.**

Hierdoor is het mogelijk **de mate van radioactiviteit te meten.** Deze wordt bepaald door den tijd, dien het radioactieve lichaam noodig heeft om een electroscoop, die een bepaalde lading ontvangen heeft, te ontladen.

1 OVEREENKOMSTEN EN VERSCHILLEN MET X-STRALEN

a. Noem drie overeenkomsten van radioaktieve stralen met X-stralen.
b. Noem ook een belangrijk verschil.

3. In 1898 vond **Mevrouw Curie,** dat uraanpekerts ongeveer 4 maal zoo sterk radioactief is als het metaal uraan, dat er uit bereid wordt. Hieruit leidde ze af, dat het erts een stof moet bevatten, die veel sterker radioactief is dan het metaal. Werkelijk vond ze twee stoffen, die ze **radium** en **polonium** noemde en die duizenden malen sterker radioactief zijn dan uraan. Bovendien werden nog andere radioactieve stoffen in het erts gevonden. Mevrouw Curie kon toen nog niet verder komen dan het zout **radiumbromide,** dat gewoonlijk in den handel voorkomt onder den naam radium. In 1910 heeft zij hieruit het metaal radium afgescheiden. Duizend KG. uraanpekerts leveren slechts een paar dG. radiumbromide, waardoor dit vele duizenden malen duurder is dan goud.



Fig. 250.
Radiumhulsje.

Het radium of eigenlijk de radiumverbinding (radiumbromide) wordt gewoonlijk in een doosje bewaard, dat den vorm heeft, die door fig. 250 is weergegeven. In een uitholling van een stukje eboniet bevindt zich de radiumverbinding, die door een dun plaatje mica overdekt is. Hierover heen is een

§ 186. De soorten van stralen.

1. Wordt een radioactieve stof in een magnetisch veld gebracht (fig. 251), dan blijken de uitgezonden stralen in 3 soorten gesplitst te worden, die α-, β- en γ-stralen genoemd worden.

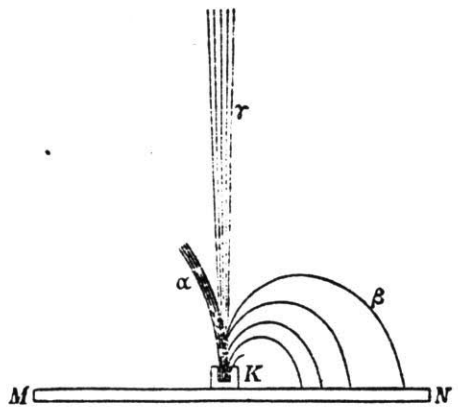


Fig. 251.
Splitsing der door radium uitgezonden stralen.

De stralen, die een zoodanige afwijking onder invloed van den magneet krijgen, dat hieruit besloten moet worden, dat ze uit **pos. geladen deeltjes** bestaan, heeten **α-stralen.**

Deze stralen hebben een zeer gering doordringingsvermogen, zoodat ze zelfs niet door een dun blaadje papier heengaan.

Het is den Engelschen natuurkundige **Rutherford** gelukt de positieve lading dezer deeltjes te bepalen. Deze bleek 2 maal zoo groot te zijn als de negatieve lading van een electron (§ 179).

Ook de massa van een α-straaldeeltje kon bepaald worden en hiervoor werd een 4 maal zoo groote massa gevonden als die van een waterstofatoom. Daar het atoomgewicht van helium 4 is, zijn **de deeltjes van de α-stralen positief geladen heliumatomen, waarvan de positieve lading 2 maal zoo groot is als die van een electron.**

2. De stralen, die, blijkens hun afwijking in het magnetisch veld in tegengestelde richting, uit **negatief geladen deeltjes** bestaan, heeten **β-stralen.**

Deze stralen bezitten een veel grooter doordringingsvermogen dan de α-stralen; de β-stralen, uitgezonden door radium in een radiumhulsje, dringen dan ook door het micaplaatje heen.

Ook van de deeltjes der β-stralen zijn de lading en de massa bepaald. De lading hiervan bleek even groot te zijn als die van een electron en de massa bleek eveneens gelijk te zijn aan de massa van het electron.

De β-stralen bestaan dus uit (negatief geladen) electronen.

3. En de stralen, die een zeer groot doordringingsvermogen hebben en in tegenstelling met de beide andere soorten geen afwijking vertoonen onder invloed van den magneet, heeten **γ-stralen.** Deze stralen vertoonen veel overeenkomst met de röntgenstralen. Ze hebben een grooter doordringingsvermogen dan de röntgenstralen, waardoor een radiogram (fig. 252) niet zoo scherp omlijnd is als

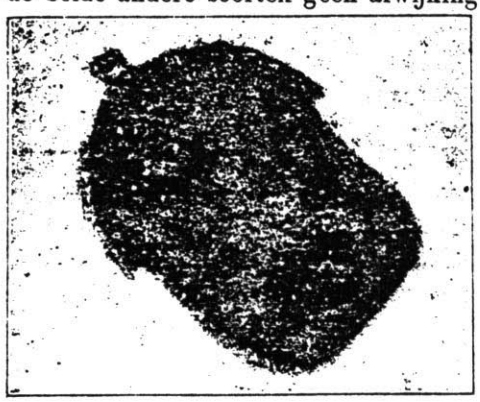


Fig. 252.
Radiogram.

een röntgen-foto. Zoo'n radiogram wordt weer verkregen door op een gevoelige plaat, in zwart papier gewikkeld, het voorwerp te leggen en dit gedurende eenigen tijd door radiumbromide te bestralen.

De γ-stralen bestaan dus uit electromagnetische trillingen.

De stralen oefenen ook een physiologische werking uit. Van de inwerking op de huid b.v. wordt gebruik gemaakt ter genezing van verschillende huidaandoeningen (en ook kanker).

2 DRIE SOORTEN STRALING

a. Noem twee eigenschappen waaraan α-stralen herkend kunnen worden.
b. Waaruit blijkt dat α-straling uit He^{2+} (heliumkernen zouden we nu zeggen) bestaat?
c. Noem twee eigenschappen waaraan β-stralen herkend kunnen worden.
d. Welke proeven zou je voorstellen om te controleren of β-stralen inderdaad elektronen zijn?
e. Noem twee eigenschappen waaraan γ-straling herkend kan worden.
f. Waaruit blijkt dat γ-straling van dezelfde soort straling is als röntgenstraling?

§ 187. **Transformatie der atomen.**

1. Bij hun ontdekking was het meest opzienbarende der radioactieve stoffen, dat zij voortdurend stralen uitzenden, dus arbeidsvermogen verliezen, zonder dat dit — tenminste schijnbaar — ten koste der stof gaat. Dit verlies van arbeidsvermogen is alleen begrijpelijk, wanneer de stof daarbij veranderingen ondergaat, zoodat de uitstraling, al is het misschien na zeer langen tijd, eens moet ophouden.

Inderdaad is aangetoond, dat zulke veranderingen plaats hebben.

Door **Rutherford** werd ontdekt, dat, wat wij gewoonlijk uraan noemen, uit twee bestanddeelen bestaat, die hij van elkaar wist te scheiden, het eigenlijke uraan, dat alleen α-stralen uitzendt en een stof, door Rutherford **uraan-X** genoemd, die β- en γ-stralen uitzendt. Na eenigen tijd blijkt dit uraan-X in een andere stof te zijn overgegaan, terwijl bij het uraan weer uraan-X gevonden wordt. Het uraan-X ontstaat dus uit het uraan en doet zelf weer een andere stof ontstaan. Bij thorium is iets dergelijks het geval.

Eveneens bij radium. Dit valt door het uitzenden van α-deeltjes uiteen in deze α-deeltjes en **radiumemanatie**, een radioactief gas, dat door afkoeling vloeibaar gemaakt kan worden. De α-deeltjes worden, na afgifte van hun positieve lading, **helium.** Men stelt zich nu voor, dat de atomen van de oorspronkelijke stof gesplitst worden in de uitgestooten deeltjes en achterblijvende gedeelten, die de atomen van de nieuwe zelfstandigheid zijn. Zoo laten dus de atomen van het radium, na uitzending der α-deeltjes, de atomen der radium-emanatie achter.

2. Al deze lichamen komen slechts in uiterst kleine hoeveelheden voor, zoodat het onmogelijk zou zijn, iets van hun aanwezigheid te bemerken, wanneer het niet juist was door hun radioactiviteit.

De mogelijkheid nu om het eene lichaam van het andere te onderscheiden, berust op de omstandigheid, dat het eene in korteren tijd verandert dan het andere, en dus ook de straling, waartoe het aanleiding geeft, spoediger verzwakt.

Men heeft voor al deze lichamen den tijd kunnen bepalen, waarin zij b.v. voor de helft verdwenen, d.w.z. in het volgende radioactieve

lichaam omgezet zijn. Deze tijd, dien men als kenmerkend voor elke stof beschouwen kan, wordt wel de **karakteristieke tijd** van het element genoemd.

5. Volgens sommige natuurkundigen zou de radioactiviteit een algemeene eigenschap der elementen zijn; bij de meeste elementen echter is ze uiterst gering. Alle elementen zouden dan een — zij het zeer langzame — omzetting of **transformatie** ondergaan. Het is te begrijpen, dat deze beschouwingen een keerpunt vormen in de scheikunde; een scheikundig element is niet meer als onveranderlijk te beschouwen.

6. De geneeskracht van bronwateren, zooals die van de bronnen te Gastein, Baden-Baden, Wiesbaden e. a., wordt toegeschreven aan de radioactiviteit van het bronwater. Dit bevat een geringe hoeveelheid radiumemanatie. Van de genezende werking bij inademen van emanatie bevattende lucht of bij het drinken van emanatie bevattend water wordt in de geneeskunde gebruik gemaakt.

Eveneens van de genezende werking van radioactieve modder, die vooral in Italië gevonden wordt. Maar ook in ons land (te Rockanje op Voorne) komt ze voor.

3 WAAR KOMT DE ENERGIE VANDAAN?

Er komt energie ('arbeidsvermogen') vrij uit een radioaktieve kern. Er is dus geen behoud van energie. Weet je hoe dat fundamentele probleem is opgelost? Noem twee maatschappelijke gevolgen van de ontdekking van het vrijkomen van energie uit radioaktieve stoffen.

4 HOE ZIT EEN ATOOM IN ELKAAR?

In de tijd dat dit leerboek werd geschreven had Bohr zijn atoommodel net opgesteld.

a. Hoe ziet dat atoommodel eruit? Hoe past het optreden van radioaktieve stralen daarin?

b. Waarom zou het juister zijn over 'kernstraling' te praten?

c. Zijn we het tegenwoordig eens met de veronderstelling onder 5 dat alle elementen een langzame *transformatie* ondergaan?

5 OMGAAN MET RADIOAKTIEVE STOFFEN IN 1915

Uit het leerboek blijkt dat men rond 1915 heel anders met radioaktieve stoffen omging dan nu. Zoek op welke in de tekst genoemde handelingen we nu *zeker* niet meer met radioaktieve stoffen zullen doen.

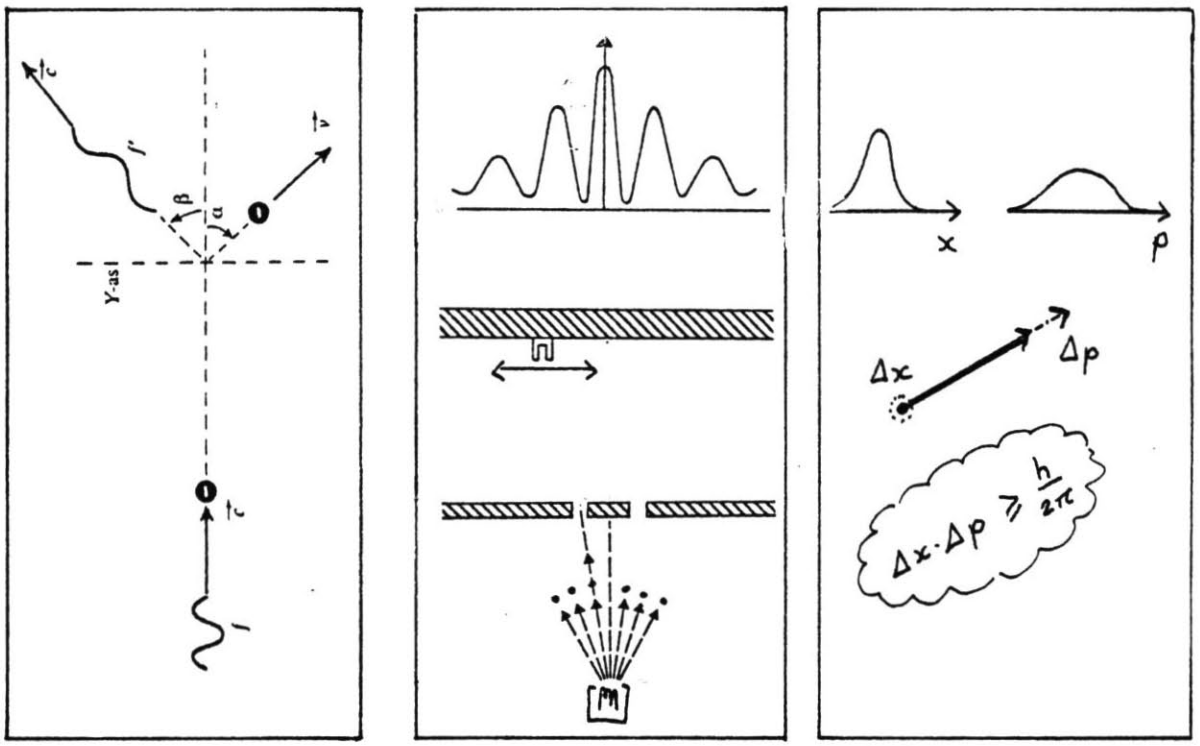
ROND 1900

Slotopdracht voor deel 2 NIEUWE STRALEN

De nieuwe stralen die rond 1900 ontdekt werden, zijn de kathodestralen, de röntgenstralen en de radioaktieve (α-, β-, γ-)stralen. Beschrijf voor elk van deze stralen de proef of proeven waaruit *beslissend* blijkt dat ze een golf- dan wel een deeltjeskarakter hebben.

DEEL 3

GOLVEN EN DEELTJES



LICHTDEELTJES ELEKTRONENGOLVEN QUANTUMMECHANICA

vooruitblik

Leek het in 1896 duidelijk dat kathodestralen deeltjes zijn, in 1900 bleek al een nieuw idee (over licht) nodig dat uiteindelijk dat beeld als te eenvoudig overboord zou zetten. Tussen 1900 en 1925 moest de discussie golven *of* deeltjes opnieuw gevoerd worden, maar nu als discussie over golven *èn* deeltjes. In de microwereld van elektronen bleken de golf- en deeltjesvoorstellingen, ontleend aan de direkt waarneembare wereld, niet meer op te gaan. Een nieuwe, meer omvattende theorie, de quantummechanica, werd ontwikkeld om de waargenomen verschijnselen te verklaren. De enige voorstellingen die daarin zinvol zijn gebleven, zijn wiskundige funkties, matrices en eigen waarden.

INHOUD:

7.1 Drie problemen 109
7.2 Planck en de zwarte straler 112
7.3 Einstein en het fotoelektrisch effekt 114
7.4 Nadere bevestiging van het 'bestaan' van fotonen 116
7.5 Overigens 118

7.1 DRIE PROBLEMEN

In 1896 leek de strijd over de aard van de kathodestralen beslecht te zijn in het voordeel van de deeltjestheorie. In de jaren daarna werd ook een aantal andere soorten stralen, zoals radioaktieve stralen, op hun golf- of deeltjeskarakter onderzocht. Aan de mogelijkheid dat het misschien toch nóg anders zou kunnen zijn dacht toen niemand.
Toch was er een aantal verschijnselen die noch met de deeltjes- noch met de golftheorie opgelost konden worden. De aanknopingspunten om tot een oplossing te komen schenen geheel te ontbreken. Dat waren de *spectraallijnen* van hete gassen de *zwarte straler* en het *fotoelektrisch effekt*.

spectra

In hoofdstuk 3 (blz. 58) ben je tegengekomen dat een gas *spectraallijnen* uitzendt als het heet is. Dat wil zeggen dat het licht dat die gassen uitzenden maar uit een beperkt aantal verschillende frekwenties bestaat. We noemen dat een *discreet* spectrum. Elke stof blijkt een eigen discreet spectrum te hebben, dat afwijkend is van elke andere. De golflengten van de lijnen in dat spectrum zijn in de loop van de 19e eeuw zeer nauwkeurig opgemeten.
Na geduldig puzzelen stelde Balmer, in 1885, vast dat voor de lijnen in het zichtbare waterstofspectrum moest gelden dat

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right) \quad n = 3,\ 4,\ 5\ \ldots$$

Door het invullen van de waarden van n in deze formules konden alle waarden van de golflengten van de lijnen in het gebied van het zichtbare licht berekend worden.

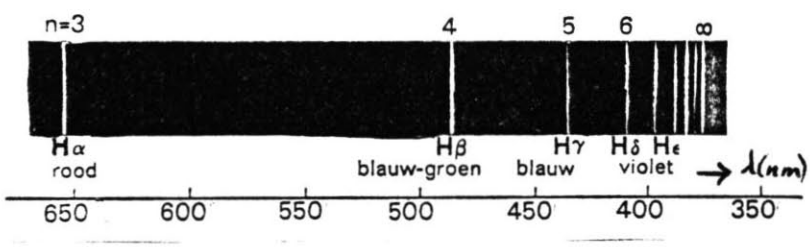


fig. 7.1 Het lijnenspectrum van atomair waterstof.

Rydberg en Ritz deden datzelfde gepuzzel ook voor de andere delen van het waterstofspectrum. Zij vonden dat bij alle 'series' van spectraallijnen (zoals in fig. 7.1, de anderen zitten in het infrarood) ongeveer dezelfde formule geldt met steeds dezelfde waarde van R de constante van Rydberg. Maar er kwam geen verklaring voor de aanwezigheid van de lijnen in het spectrum. Waarom zou een gas maar enkele frekwenties uitzenden en

niet allemaal?
Rond 1900 was er geen verklaring voor de gevonden samenhang tussen die lijnen.

zwarte straler

Elk voorwerp zendt straling uit. Hoe hoger de temperatuur, des te meer straling. Die straling noemen we temperatuurstraling. Dat kun je bijv. voelen bij een radiator. Bij een temperatuur boven ca 700 °C wordt er ook zichtbaar licht uitgezonden zoals bijv. bij een gloeilamp (3000 °C). Al in 1792 stelde de beroemde engelse porceleinmaker Wedgewood vast dat alle stoffen bij dezelfde temperatuur roodgloeiend werden. Dat was interessant, want het verschijnsel was in tegenstelling tot de spectraallijnen niet afhankelijk van het stralend materiaal. Bij later onderzoek werd het spectrum van de uitgezonden straling opgemeten voor verschillende temperaturen van het stralend voorwerp. Figuur 7.2 toont de intensiteit van de uitgezonden temperatuurstraling als funktie van de golflengte bij verschillende temperaturen van het stralende voorwerp.

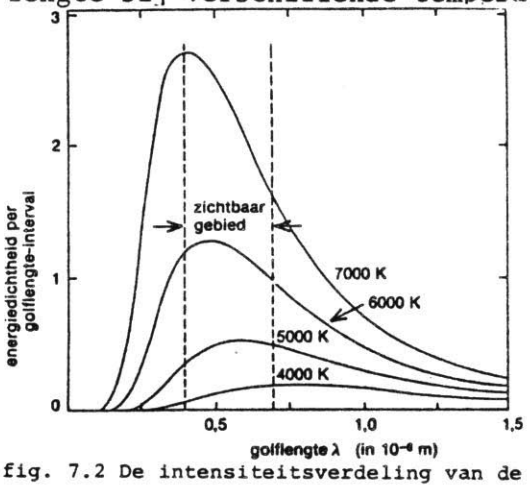


fig. 7.2 De intensiteitsverdeling van de straling zoals die door een ideaal zwart lichaam bij verschillende temperaturen wordt uitgezonden. Het zichtbare gebied vormt, zoals aangegeven, slechts een klein deel van het totaal uitgezonden spectrum.

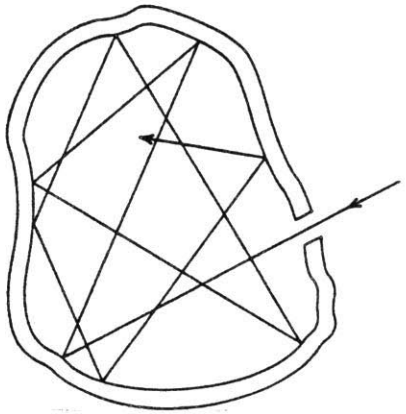


fig. 7.3 Een 'doos met gat' als model voor een ideaal zwart lichaam. Alle straling die door de opening naar binnen valt, blijft ook binnen. Of, anders gezegd, alle door het gat vallende straling wordt geabsorbeerd, zodat het gat ideaal zwart is.

Elk voorwerp zendt niet alleen van zichzelf straling uit, maar het vangt ook straling van buiten op en kan die weerkaatsen. Bij het opmeten van de spectra van temperatuurstraling wordt ook die teruggekaatste straling gemeten waardoor de metingen verstoord worden. Voor dergelijke metingen moeten dan ook voorwerpen gebruikt worden die opvallende straling geheel absorberen en dus niets terugkaatsen. Zo'n voorwerp zal er bij normale temperatuur zwart uitzien, omdat het dan alleen voor ons oog *onzichtbare* ('warmte')straling uitzendt. Maar bij een hogere temperatuur gaat het ook nog straling in het *zichtbaar* licht uitzenden. Een gloeiend stukje houtskool is een aardig voorbeeld: het is zwart maar straalt toch rood licht uit: een *zwarte straler*.
In fig. 7.2 is het stralingsvermogen per golflengtegebiedje uitgezet tegen de golflengte. Uit de vorm van die grafieken blijkt:
- het oppervlak onder de grafieken, dat wil zeggen het totaal uitgestraalde vermogen, neemt sterk toe met de temperatuur;
- als de temperatuur hoger wordt, verschuift de top van de grafiek in de

richting van de kleinere golflengten, dus naar het zichtbare licht of zelfs naar het ultraviolet en verder.
Een theoretisch natuurkundige die zoïets ziet gaat op zoek naar de formule die het verloop van de grafiek beschrijft en naar een verklarende theorie. Na lang uitproberen lukte het Wien in 1895 bij benadering de beschrijvende formule te vinden. Maar de verklarende theorie werd niet gevonden; integendeel, de gangbare theorie van rond 1900 leverde een geheel afwijkende lijn op (fig. 7.4 Rayleigh).

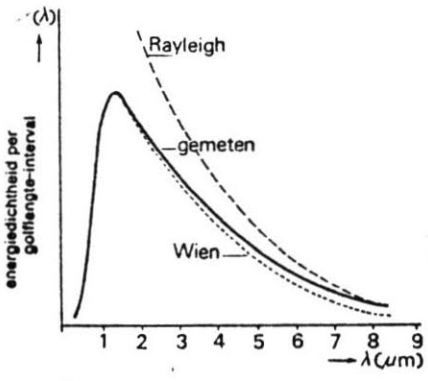


fig. 7.4

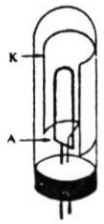


fig. 7.5 In een fotocel wordt gebruik gemaakt van het vrijkomen van elektronen bij het bestralen van de kathode K. De vrijkomende elektronen gaan naar A waardoor er een stroom kan gaan lopen. Fotocellen worden bijv. gebruikt bij lift- en andere automatisch opengaande deuren.

het fotoelektrisch effekt

Het fotoelektrisch effekt was rond 1886 ontdekt en beschreven door Hertz in Duitsland en Righi in Italië. Bij zijn experimenten met elektromagnetische golven liet Hertz vonken tussen twee elektroden overspringen. Het viel hem daarbij eens op dat dat aanzienlijk gemakkelijker ging als er licht op de elektroden viel. Het verbaasde hem zeer, maar hij had er geen verklaring voor. Bij nader onderzoek door Lenard tussen 1896 en 1900 bleek dat sommige materialen bij bestraling met ultraviolet licht 'kathodestralen' gingen uitzenden. Natuurlijk waren dat elektronen, maar Lenard noemde ze nog niet zo, omdat hij als golfaanhanger toen nog niet geheel overtuigd was van het bestaan van elektronen.
Lenard constateerde bij zijn experimenten:
- bij bestraling met verschillende soorten monochromatisch licht blijkt het effekt zich pas boven een bepaalde frekwentie, de zogenaamde grensfrekwentie, voor te doen. Zelfs bestraling met zeer intensief licht van een lagere frekwentie leidt niet tot het vrijkomen van elektronen. De waarde van de grensfrekwentie is voor elke stof verschillend.
- de energie van de kathodestralen (dat is de kinetische energie van de vrijkomende elektronen) is niet afhankelijk van de intensiteit van het opvallende licht. Een grotere intensiteit geeft veel meer elektronen, maar hun maximale kinetische energie blijft even groot.
Ook deze verschijnselen waren met de gangbare golf- en deeltjestheorieën van rond 1900 niet te verklaren.

oplossingen

Tussen 1900 en 1914 werden er bevredigende theoretische verklaringen voor deze drie verschijnselen gevonden. Dat ging niet zonder slag of stoot. De gevonden oplossingen deden de wereld van de fysici op haar grondvesten schudden en maakten ingrijpende wijzigingen nodig in de ideeën van de fysici over de bouw van de materie en de aard van het licht. In de volgende paragrafen komen de zwarte straler met fotoelektrisch effekt weer aan de orde. De verklaring van de discrete spectra kan echter niet in het korte bestek van dit hoofdstuk gegeven worden.

1 Bereken met de formule van Balmer de kleinste waarde van de golflengte van een spectraallijn van waterstof. Zoek de waarde van R op in het BINAS-boek. Vergelijk de waarde met die uit het BINAS-boek.

2 ULTRAVIOLET CATASTROFE

In fig. 7.4 staat een kromme voor de zwarte straler getekend, die volgens een theorie van rond 1900 is uitgerekend. Er zijn echter ook problemen mee.
a. Waarom is deze kromme uit energieoverwegingen echter onmogelijk?
b. Men zegt wel dat deze kromme tot 'ultravioletcatastrofe' leidt. Waarom zou men deze, erg plastische, naam gekozen hebben?

3 DE KLEUR VAN GLOEIEND IJZER

Een goede smid heeft geen thermometer nodig, hij leest de temperatuur af aan de hand van de kleur van het gloeiend ijzer. Bij verwarming zendt het ijzer eerst alleen infraroodstraling uit. Bij een hogere temperatuur wordt het eerst rood- en daarna witgloeiend.
Het gloeiend ijzer is wel geen *zwarte* straler, maar de krommen van fig. 7.2 vormen toch een redelijke benadering.
Geef met behulp van fig. 7.2 een verklaring van het gedrag van het gloeiende ijzer.

4 FOTOELEKTRISCH EFFEKT EN GOLFTHEORIE

Geef aan waarom beide constateringen van Lenard over het fotoelektrisch effekt niet met de golftheorie van het licht te verklaren zijn. Denk daarbij aan de energie van het licht en van de vrijgekomen elektronen.

5 MATERIE EN STRALING

De golf- en de deeltjestheorie zijn beide krachtige theorieën met een groot verklarend vermogen. Maar ze gaan niet op, als ze toegepast worden op situaties waarin er sprake is van een wisselwerking tussen materie en straling.
Laat zien dat de in deze paragraaf genoemde problemen tot deze categorie behoren.

7.2 VAN PLANCK EN DE ZWARTE STRALER

Max Planck, sinds 1889 werkzaam als hoogleraar in Berlijn, onderkende het belang van het zwarte straler probleem en begon in 1897 eraan te werken. In het laboratorium waar hij werkte werd de intensiteitsverdeling van de zwarte straler nog eens precies nagemeten en toen bleek dat de formule van Wien toch wel erg sterke afwijkingen vertoonde. Planck ging op zoek naar de juiste formule. Hij nam aan, gesteund door werk van vele andere fysici, o.a. Lorentz, dat de elektronen op het oppervlak van de zwarte straler trillen en daardoor straling uitzenden. Dat was niets nieuws. Nieuw was wel dat hij veronderstelde dat de energie E van zo'n trillend elektron alleen in stapjes kon veranderen. Elk stapje zou een grootte van $E = h.f$ hebben. Hierin was f de frekwentie van het elektron en h een constante. Hij deed dat omdat dat wiskundig handig was en hij

veronderstelde dat na de wiskundige bewerking de stapjes vanzelf wel onmeetbaar klein zouden worden zodat de energieverandering weer keurig continu zou worden.



fig. 7.6 Max Planck (1858-1947).

fig. 7.7

De titelpagina van het artikel van Max Planck waarin de constante h voor het eerst verschijnt. Het artikel wordt beschouwd als de geboorte van de quantumfysica.

9. *Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum; von Max Planck.*

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen 2. p. 202 und p. 237. 1900.)

Einleitung.

Die neueren Spectralmessungen von O. Lummer und E. Pringsheim[1]) und noch auffälliger diejenigen von H. Rubens und F. Kurlbaum[2]), welche zugleich ein früher von H. Beckmann[3]) erhaltenes Resultat bestätigten, haben gezeigt, dass das zuerst von W. Wien aus molecularkinetischen Betrachtungen und später von mir aus der Theorie der elektromagnetischen Strahlung abgeleitete Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum keine allgemeine Gültigkeit besitzt.

Die Theorie bedarf also in jedem Falle einer Verbesserung, und ich will im Folgenden den Versuch machen, eine solche auf der Grundlage der von mir entwickelten Theorie der elektromagnetischen Strahlung durchzuführen. Dazu wird es vor allem nötig sein, in der Reihe der Schlussfolgerungen, welche zum Wien'schen Energieverteilungsgesetz führten, dasjenige Glied ausfindig zu machen, welches einer Abänderung fähig ist; sodann aber wird es sich darum handeln, dieses Glied aus der Reihe zu entfernen und einen geeigneten Ersatz dafür zu schaffen.

Dass die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlungstheorie, einschliesslich der Hypothese der „natürlichen Strahlung", auch einer geschärften Kritik gegenüber Stand halten, habe ich in meinem letzten Aufsatz[4]) über diesen

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verhandl. der Deutsch. Physikal. Gesellsch. 2. p. 163. 1900.

2) H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929.

3) H. Beckmann, Inaug.-Dissertation, Tübingen 1898. Vgl. auch H. Rubens, Wied. Ann. 69. p. 582. 1899.

4) M. Planck, Ann. d. Phys. 1. p. 719. 1900.

Planck introduceerde zijn 'vondst' in twee achtereenvolgende voordrachten voor de Berliner Physikalischer Gesellschaft op 19 oktober en 14 december 1900. Na Plancks eerste lezing op 19 oktober bracht Lummer de hele nacht door om Plancks afgeleide formule voor de zwarte straler (zie fig. 7.6) te vergelijken met de experimentele waarden. De volgende ochtend deelde Lummer aan Planck mee dat er sprake was van zeer nauwkeurige overeenstemming, met name voor de langere golflengten. Dat was een groot succes. Maar in tegenstelling tot Plancks verwachtingen werden de energiestapjes in de wiskundige bewerking niet bijna nul. Er was nu een theorie die het verschijnsel nauwkeurig verklaart, maar daarbij moet annemen dat de energie in stapjes verandert. Zo'n stapsgewijze energieverandering gaat gepaard met opname of uitzending van een energiepakketje, ook quantum genoemd, ter grootte $h.f$. De constante h wordt de constante van Planck genoemd (zie BINAS-tabel 6). Zo'n schoksgewijze energieverandering was zeer revolutionair. Waarom zou het trillend elektron alleen bepaalde waarden van de energie kunnen hebben? De hypothese van Planck zou bekend worden onder de naam 'quantumhypothese'. Planck wist heel goed hoe groot de draagwijdte van zijn idee was.

In een vertrouwelijk gesprek heeft hij het geformuleerd als: "Vandaag heb ik een ontdekking gedaan die even belangrijk is als die van Newton".
Naar buiten toe deed hij heel bescheiden over zijn ontdekking (misschien mede op grond van andere ervaringen met collega professoren), zozeer dat buiten Duitsland fysici het idee kregen, dat Planck de draagwijdte van zijn idee niet besefte. Hoe Planck het zelf zag blijkt uit een gesprek in 1931 tussen de Amerikaanse natuurkundige Wood en Planck. Wood vroeg aan Planck hoe hij het toch ongelooflijke kwantum had kunnen bedenken. Planck antwoordde: "Het was een wanhoopsdaad. Ik worstelde al zes jaar met de theorie van de uitgezonden energie van zwarte straler. Ik wist dat het een kernprobleem was en ik wist dat ik daarin het antwoord had. Ik moest ten koste van alles een theoretische verklaring vinden, speciaal vanwege de onschendbaarheid van de wetten uit de kernfysische mechanica".
In 1920 ontving Planck voor dit idee de Nobelprijs voor natuurkunde.

6 Waarom was Planck zo voorzichtig in zijn publikaties over zijn quantumhypothese?

7 De energie van een vallend voorwerp is niet gequantiseerd. Wat zouden we moeten waarnemen als dat wel het geval was? Kun je uit een waarneming van een vallende bal wel met zekerheid de conclusie trekken dat de energie daarvan niet gequantiseerd is?

7.3 EINSTEIN EN HET FOTOELEKTRISCH EFFEKT

Terwijl de reikwijdte van de quantumhypothese in discussie was, trok Einstein de consekwenties van Plancks idee. Planck veronderstelde dat de energie van het trillende *elektron* alleen in stapjes verandert en dat absorptie en uitzenden van straling door zo'n trillend elektron ook alleen in diezelfde stapjes, de quanta met energie $h.f$, kan gebeuren. Einstein ging nog een stap verder. Hij veronderstelde dat *straling zelf* uit energiepakketjes, *fotonen*, bestaat. Einstein paste dat idee toe op het fotoelektrisch effekt. Hij ging bij zijn verklaring uit van twee veronderstellingen:
1) Bij absorptie van stralingsenergie vertoont de straling een deeltjeskarakter, een bundel straling moet dan opgevat worden als een bundel fotonen;
2) Een elektron kan alleen de energie van één foton tegelijk absorberen. Als een elektron stralingsenergie absorbeert, neemt het de energie $h.f$ van één foton op. Door die energie kan het elektron
a. uit het materiaal treden en
b. kinetische energie krijgen.
De energie van het foton wordt dan ook deels gebruikt voor het vergroten van de potentiële energie bij het uittreden en de rest wordt omgezet in de kinetische energie van het vrijkomende elektron. De toename van de potentiële energie (of de arbeid die op het elektron verricht moet worden om het te laten uittreden) hangt af van het soort materiaal.
De vergelijking van Einstein voor het fotoelektrisch effekt luidt:

$$h\,f = \Delta E + \Delta E_k$$



fig. 7.8 Albert Einstein getekend door Max Liebermann in Berlijn 1925.

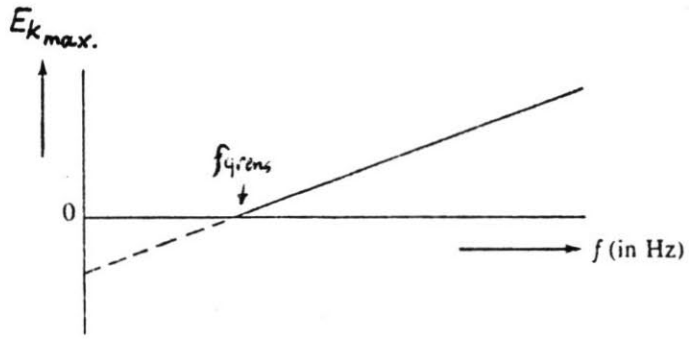


fig. 7.9 De grafiek van de kinetische energie van de fotoelektronen als funktie van de frekwentie van het opvallende licht is een rechte lijn.

De ΔE_{pot} wordt ook wel de *uittree-energie* of de *uittree-arbeid* W_u genoemd. Uit de uittree-energie kan de grensfrekwentie berekend worden. Als licht met de grensfrekwentie op een materiaal valt, kunnen de elektronen niet nog ontsnappen, maar blijft er geen kinetische energie over. Dus geldt:

$$h.f_{grens} = \Delta E$$

De kinetische energie van die elektronen kan experimenteel bepaald worden, de precieze werkwijze waarbij komt in het blok 'Veld en Potentiaal' aan de orde. Zo kan, als ook de frekwentie van de opvallende straling en de ΔE van het materiaal bekend zijn, de constante van Planck experimenteel bepaald worden.
De aldus gemeten waarde van h stemde nauwkeurig overeen met de door Planck berekende waarde. Dat was zowel een bevestiging van de hypothese van Planck als van de verklaring van Einstein.

8 Beneden een bepaalde frekwentie, de grensfrekwentie, komen er geen elektronen meer vrij. Geef daarvoor een verklaring met behulp van de twee aannamen van Einstein.

9 Bij bestraling met monochromatisch licht hebben alle vrijkomende elektronen een even grote kinetische energie. Welke verklaring geeft Einstein daarvoor?

10 Einstein veronderstelde dat een foton een deeltjeskarakter heeft. Welke grootheid of grootheden zou een foton dan nog meer moeten bezitten behalve energie?

11 Op de fotokathode van een fotocel (die vacuüm is gepompt) valt een bundel monochromatisch blauw licht. Het kathodemateriaal is zelfs voor rood licht gevoelig.
a. Waarom wordt in bovenstaande zin het woord 'zelfs' gebruikt? Raadpleeg zonodig de tabel over grensfrekwenties in je BINAS-boek.

De antwoorden op de volgende vragen dienen kort te worden toegelicht.

Bij onveranderde golflengte wordt de hoeveelheid stralingsenergie die per tijdseenheid op de fotokathode valt, groter gemaakt.
b. Verandert hierdoor het aantal elektronen dat per tijdseenheid uit de fotokathode wordt vrijgemaakt?
c. Verandert hierdoor de maximale kinetische energie waarmee elektronen de fotokathode kunnen verlaten?

De bundel monochromatisch blauw licht wordt vervangen door een bundel monochromatisch geel licht. Hierbij zorgt men er echter voor dat de hoeveelheid stralingsenergie die per tijdseenheid op de fotokathode valt, onveranderd blijft.
d. Verandert hierdoor het aantal elektronen dat per tijdseenheid uit de fotokathode wordt vrijgemaakt?
e. Verandert hierdoor de maximale kinetische energie waarmee elektronen de fotokathode kunnen verlaten?

12 Voor straatverlichting worden vaak natriumlampen gebruikt. Ze geven geel licht af met een golflengte van 589 nm. Zo'n lamp kan 50 W licht-energie uitstralen.
a. Bereken dan de frekwentie van het natriumlicht.
b. Hoeveel fotonen zendt de lamp per seconde uit?
c. Waarom merk je in het dagelijks leven niets van het fotonkarakter van het licht van de natriumlamp?

13 De uittree-energie van magnesium bedraagt 3,70 eV ($5{,}9.10^{-19}$ J). Bereken de grensgolflengte.

7.4 NADERE BEVESTIGING VAN HET 'BESTAAN' VAN FOTONEN

Er zijn nog meer aanwijzingen voor het 'bestaan' van fotonen. In deze paragraaf bekijken we er twee; het spectrum van röntgenstraling en het comptoneffekt.

het spectrum van röntgenstralen

Toen Bragg eenmaal zijn formule had opgesteld, kon de golflengte van röntgenstraling vastgesteld worden met een kristal waarvan de roosterafstand d via andere methoden was bepaald. Immers, de golflengte kun je uitrekenen met de formule van Bragg:

$$n.\lambda = 2\ d.\sin\alpha \quad (n = 1, 2, 3 \ldots)$$

waarbij α de richting is waarin de röntgenstraling versterkt wordt. Het spectrum van röntgenstraling dat met een wolfraamtrefplaatje opgewekt wordt (zie fig. 7.10) bestaat uit een continu spectrum met hier en daar pieken (lijnenspectrum).
Er blijkt een minimale golflengte te zijn. In het röntgenspectrum van een bepaalde buis blijken geen kleinere golflengten voor te komen, behalve als je de versnelspanning vergroot. De minimale golflengte is dus afhankelijk van de versnelspanning V_{AK}. De verklaring daarvoor ligt in het fotonkarakter van röntgenstraling.
Een versneld elektron dat op het wolfraamtrefplaatje botst, kan zijn energie geheel of gedeeltelijk afgeven als röntgenstraling, of beter gezegd als een röntgenfoton. Het foton kan dus maximaal de gehele energie van het elektron krijgen. De energie van het elektron is:

$$E = q.V_{AK}$$

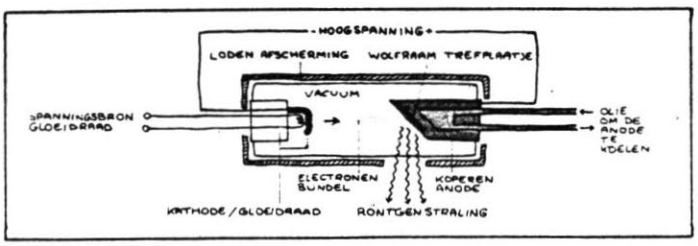


fig. 7.10 Schematische tekening van een röntgenbuis.

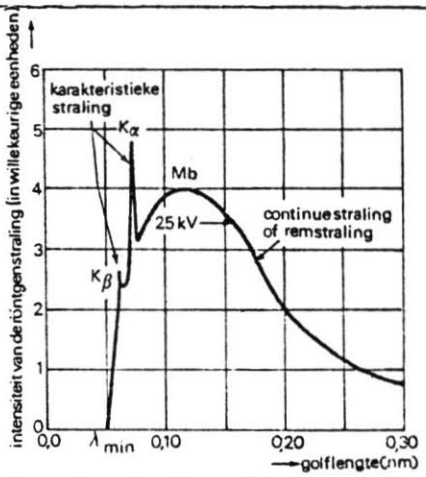


fig. 7.11 De intensiteitsverdeling van de röntgenstraling van een molybdeen trefplaatje. De pieken zijn karakteristiek voor molybdeen (lijnenspectrum).

De maximale energie $h.f_{max}$ van het foton is daaraan gelijk:

$$h.f_{max} = q.V_{AK}$$

ofwel:

$$\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}} = \frac{h.c}{q.V_{AK}}$$

het compton effekt

In 1923 bestudeerde Compton de verstrooiing van energierijke (kortgolvige) röntgenstraling in een ruimte gevuld met waterstofgas. De straling ioniseerde de waterstofatomen en Compton onderzocht zowel de uittredende elektronen als ook de verstrooide röntgenstraling. De frekwentie van de verstrooide straling bleek lager te zijn dan die van de invallende straling. Men noemt dit het comptoneffekt. Het bleek niet met de golftheorie maar heel goed met de fotonentheorie verklaard te kunnen worden. Compton concludeerde dat onder een afbuigingshoek θ (zie fig. 7.12) werd opgevangen ook een elektron behoorde dat onder een hoek naar buiten trad. Metingen van de frekwentie van het röntgenfoton en de energie van het elektron toonden aan dat de individuele botsing voldeed aan de wet van Behoud van Energie:

$$h.f = h.f' + \tfrac{1}{2}\, mv_{el}^2$$

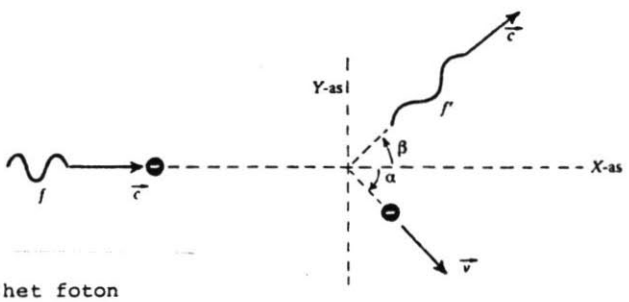


fig. 7.12 Comptonverstrooiing: het foton krijgt een andere *grootte* en *richting*.

Ook de wet van behoud van impuls bleek uitstekend te kloppen zodat een beschrijving van een botsing foton-deeltje dezelfde bleek te zijn als die van een botsing deeltje-deeltje. Einstein had eerder niet allen verondersteld dat de energie van het foton gelijk was aan $h.f$, maar ook dat de impuls gegeven werd door $h.f/c$. Ook de laatste veronderstelling werd door de experimenten van Compton bevestigd.

14 a. Verklaar het optreden van de minimale golflengte en het verband tussen die golflengte en de versnelspanning.
b. Waarom vormt dit een extra aanwijzing voor het bestaan van fotonen?

15 Welke versnelspanning is er in de buis nodig om een röntgenstraling met $\lambda = 10^{-11}$ m te verkrijgen?

16 a. Welke experimenten uit hoofdstuk 5 gebruiken de golftheorie om het gedrag van röntgenstraling te verklaren?
b. Men zegt vaak dat straling een dualistisch karakter heeft. Wat zou daarmee bedoeld worden?

17 Laat zien dat de impuls van een deeltje ($p = mv$) en die van een foton ($p = h.f/c$) dezelfde eenheid hebben.

7.5 OVERIGENS

Naast de hier in paragraaf 7.4 genoemde aspekten waren er meer ontwikkelingen die het idee van fotonen en de deeltjeseigenschappen van lichtgolven ondersteunden. Zo werd al in 1902 de stralingsdruk van het licht gemeten. En zo heeft ook Einsteins relativiteitstheorie veel bevestigd van wat werd vermoed.
Ten tijde van Compton (1923) was het foton eigenlijk al lang een aanvaard begrip.



fig. 7.13 De wieken van het molentje zijn aan de ene kant zwart en aan de andere kant glimmend. Fotonen die op de glimmende kant vallen worden teruggekaatst en leveren daardoor een twee maal zo grote impuls aan het molentje dan de fotonen die op de zwarte kant vallen en die daar geabsorbeerd worden. Door dat verschil in overgedragen impuls gaat het molentje draaien. Dit - heel goed vacuüm gezogen - molentje draait dus precies de andere kant op dan het molentje van Crookes (zie blz. 78) die gaat draaien, omdat de gasmoleculen die op de (warmere) zwarte kant botsen met een extra grote snelheid wegschieten.

INHOUD:

8.1 Hypothese van De Broglie 119

8.2 Bevestiging door Davisson en Germer 121

8.1 HYPOTHESE VAN DE BROGLIE

Zoals je al eerder hebt kunnen constateren in dit thema is er een mooie theorie, één die alle feitelijkheden bestrijkt en vooruit kijkt.
Ook al zal de Eerste Wereldoorlog voor stilstand en vertraging hebben gezorgd in de ontwikkeling van de wetenschap, het blijft opmerkelijk dat het tot 1923/1924 duurde voor iemand de paradox in de discussie over deeltjes en golven opmerkte.
Louis de Broglie was degene die het revolutionaire woord sprak.



fig. 8.1 Louis de Broglie.

In zijn Nobelprijsrede in 1929 zegt hij over deze paradox:
"De quantumtheorie van het licht is niet bevredigend: omdat de theorie slechts de energie van het foton definieert. De heersende pure deeltjestheorieën bevatten niets dat ons in staat stelt een frekwentie vast te leggen. Om die reden alleen al zijn we verplicht - zoals bij het licht - het idee van deeltje en dat van golf gelijktijdig te beschouwen. .....
..... De beweging van elektronen in een stabiele atoom wordt beschreven met behulp van natuurlijke getallen (o.a. de schillen 1, 2, ...enz.). Totdat Bohr zijn atoommodel opstelde waren interferentieverschijnselen de enige verschijnselen samen met staande golven, waarbij natuurlijke getallen voorkwamen. .....
..... Dit alles bracht me ertoe elektronen niet simpelweg als deeltjes te beschouwen, maar ze ook een periodiciteit te geven".

ELEKTRONENGOLVEN?

Gebruik makend van de formules voor het foton:

$$E = h.f$$

en

$$p = \frac{h.f}{c}$$

definieert De Broglie de frekwentie en de golflengte van een deeltje.
Met $\lambda.f = c$ krijgt hij voor de impuls van een *foton*:

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Als nu voor p de formule voor de impuls van een *deeltje* wordt ingevuld:

$$p = mv$$

wordt dat:

$$m.v = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ofwel} \quad \lambda = \frac{h}{m.v}$$

Deze golflengte beschouwde De Broglie nu als de golflengte van een materieel deeltje: de De Broglie-golflengte.
De golflengte van het deeltje wordt korter, als zijn impuls toeneemt. Een deeltje met grote impuls en energie heeft dan ook een kleine golflengte en een grote frekwentie.

1 Laat zien dat $h/m.v$ de eenheid van lengte heeft.

2 Een leerling fietst met een snelheid van 18 km/h van school naar huis. De gezamenlijke massa van de leerling, fiets en tas bedraagt 74 kg.
a. Bereken de golflengte van de leerling op zijn fiets.
b. Waarom is de De Broglie-golflengte voor verschijnselen uit de dagelijkse omgeving volstrekt onbelangrijk?

3 De middelbare snelheid van een waterstofatoom bij 20 °C bedraagt 1897 m/s. Zoek de overige benodigde gegevens op in het BINAS-boek (tabel 7).
a. Bereken de De Broglie-golflengte van dit waterstofatoom ($r = 5{,}3.10^{-11}$ m).
b. Vergelijk de golflengte met de afmetingen van het atoom. Kan de golflengte van belang zijn bij de beschrijving ban het gedrag van het atoom?

4 Een elektron in een röntgenbuis wordt versneld door een spanning van 70 kV. De snelheid van het elektron bedraagt dan ongeveer $1{,}5.10^{8}$ m/s (let op! in de buurt van de lichtsnelheid!).
a. Bereken de golflengte van het elektron.

Om binnen een atoom door te dringen moet de De Broglie-golflengte kleiner zijn dan de afmetingen van een atoom.
b. Bereken de omtrek van het waterstofatoom. Laten we veronderstellen dat het elektron om de kern draait met een straal die gelijk is aan die van het waterstofatoom.
c. Vergelijk de golflengte van het elektron met de grootte van de omtrek. Leg uit waarom de De Broglie-golflengte geen rol speelt in de gewone wereld maar wel in de microwereld van elektronen en protonen.

8.2 BEVESTIGING DOOR DAVISSON EN GERMER

In 1926/1927 waren Davisson en Germer bij de Bell Laboratories bezig aan een serie experimenten waarbij elektronen werden verstrooid aan het oppervlak van een vaste stof. Bij de proevenserie met nikkel werd het vacuüm van de opstelling door een ongeluk verbroken. De lucht oxideerde het nikkel. Om de oxide laag te verwijderen werd het nikkel in een oven uitgegloeid. Bij het hervatten van de proef realiseerden Davisson en Germer zich niet dat de kristalstruktuur van het nikkel grondig was gewijzigd. Het blok nikkel was veranderd van polykristallijn (veel kleine kristallen die ten opzichte van elkaar willekeurig zijn geordend) in één groot monokristal. De resultaten waren met het monokristal volledig anders.

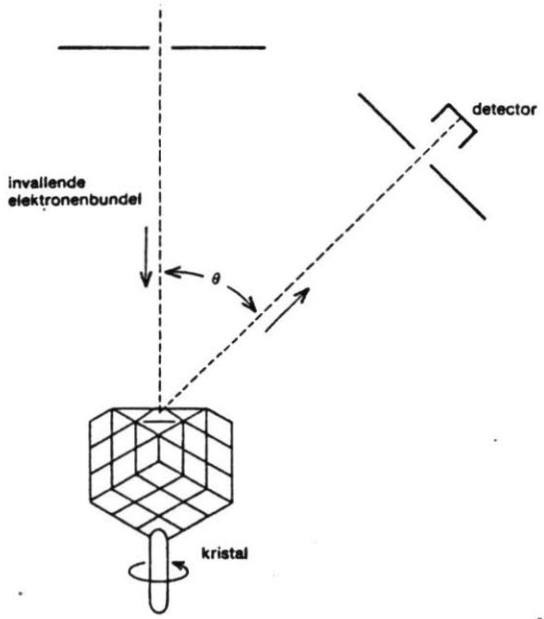


fig. 8.2 Experiment van Davisson en Germer.
Een elektronenbundel valt loodrecht op een nikkelkristal. Met een detector wordt gemeten hoeveel elektronen er in een bepaalde richting, gegeven door de hoek θ, verstrooid worden. Het geheel staat in een vacuüm ruimte.

Bij bepaalde hoeken traden scherpe maxima en minima op in de intensiteit van de verstrooide elektronen. Dat was een verrassende ontdekking, omdat maxima en minima in de intensiteit zich in het laboratorium tot dan toe alleen voorgedaan hadden bij golfverschijnselen. Verdere metingen toonden aan dat de hoeken afhankelijk zijn van de energie van de elektronenhendel. Dat was op Bragg-reflektie.
Bij een versnelspanning van 54 V bleek de hoek θ een waarde te hebben van 65°; de roosterconstante λ was bepaald op 0,91 x 10^{-10} m. Dat leverde met de Bragg-reflektie een waarde voor λ van 1,65.10^{-10} m.

5 a. Controleer deze waarde met behulp van de formule van Bragg.
b. Bereken de De Broglie-golflengte.
c. Vergelijk de twee waarden met elkaar. Wat is je conclusie?

Het jaar erop voerde G.P. Thomson (zoon van J.J. Thomson) de proef uit met dunne metaalfolies.
Debije en Scherrer deden het met tot poeder vermalen kristallen.
Vlak daarna toonde Stern aan dat ook α-deeltjes golfeigenschappen vertoonden met een golflengte van de voorspelde waarde.

ELEKTRONENGOLVEN?

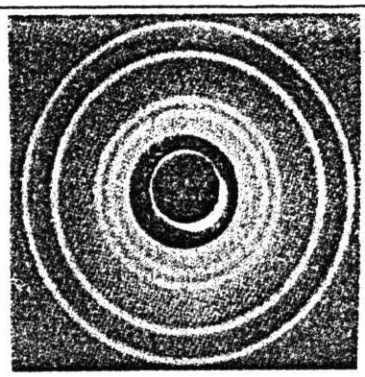


fig. 8.3 a. Interferentiepatroon van een smalle bundel röntgenstraling, die door zilver gaat.

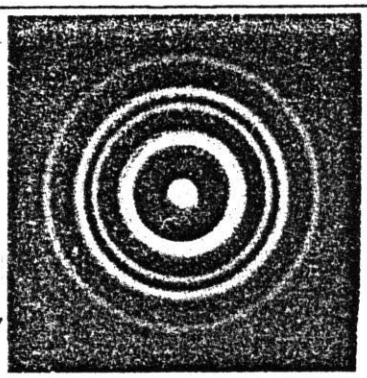


fig. 8.3 b. Interferentiepatroon van een smalle bundel elektronen, die door zilver gaat.

6 In hoofdstuk 3 (fig. 3.9 t/m 3.33) is gekeken naar interferentieverschijnselen van straling bij twee coherente trillingsbronnen. In onderstaande figuren wordt aangegeven hoe je, met een kunstgreep, twee coherente elektronenbronnen kunt maken. De lijnvormige elektronenbron C zendt elektronen uit met een energie van 20 keV (1 eV = $1{,}6.10^{-19}$ joule). Het omhulsel van C en de platen A en B zijn geaard. In het midden van A en B bevindt zich een dunne draad van zilver die op een potentiaal van +10 V gehouden wordt.

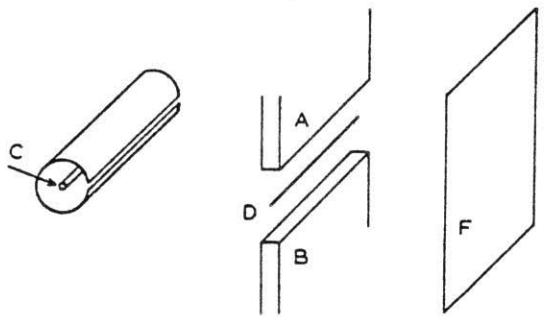


fig. 8.4

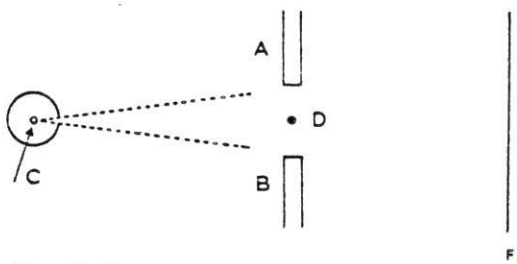


fig. 8.5

Door de afbuiging in het elektrische veld tussen A en B ontstaan er overlappende elektronenbundels op de fotografische plaat F. Deze bundels lijken te komen van twee denkbeeldige bronnen op een afstand van 0,1 mm van elkaar, elk op een afstand van 4 m van de fotografische plaat F. De overlappende bundels veroorzaken op de fotografische plaat een interferentiepatroon. Dit is 2500 keer vergroot afgebeeld in fig. 8.6.

a. Toon aan dat de afstand tussen twee opeenvolgende maxima gelijk is aan 360 nm.

b. Bereken met de interferentieformule de golflengte van de elektronen.

c. Controleer of de gevonden waarde overeenkomt met de De Broglie-golflengte van elektronen.

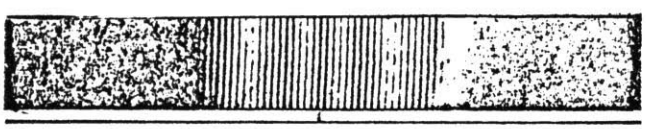


fig. 8.6 Het interferentiepatroon op de fotografische plaat (2500 x vergroot).

VOORUITBLIK NAAR DE QUANTUMMECHANICA

INHOUD:

9.1 Stand van zaken in 1925
9.2 Nogmaals de proef van Young
9.3 Door welk gat?
9.4 De aanpak van Schrödinger en Heisenberg

9.1 STAND VAN ZAKEN IN 1925

In 1925 had de natuurkunde de beschikking over wat we nu noemen de *klassieke natuurkunde*: de theorieën van het elektromagnetisme (golven) en van de mechanica (deeltjes) waarmee de gebeurtenissen in de macrowereld, zoals wij die zien, goed verklaard en voorspeld konden worden. Daarnaast waren er de hypotheses van De Broglie en Einstein voor de microwereld over de golf/deeltje dualiteit van materie en elektromagnetische straling. Men had toen, net als jij nu misschien ook, niet het gevoel werkelijk te begrijpen hoe de natuur in elkaar zit. Of zoals Lorentz het uitdrukte:
"Dit alles heeft een grote schoonheid, maar jammergenoeg begrijpen we het niet echt. We begrijpen de hypothese van Planck niet en evenmin waarom niet-stationaire elektronenbanen moeten worden uitgesloten".
Er moest een nieuwe theorie gevonden worden, die de fysici weer het gevoel moest geven de natuur te begrijpen. En ja, tussen 1925 en 1928 ontstond de quantummechanica, die de microwereld goed beschrijft. Deze nieuwe theorie is nog abstrakter en ligt nog verder van onze dagelijkse ervaringen af dan de toch al moeilijke klassieke theorieën. Bij het begrijpen van de quantummechanica dient zich een nieuw probleem aan. Als wij een verschijnsel willen begrijpen proberen we ons er een voorstelling van te maken wat er gebeurt.
Golf- en deeltjestheorieën gebruiken beelden uit onze gewone taal, aangevuld met wiskundige voorstellingen. Onze taal is ontstaan en uitgegroeid op basis van ervaringen uit het dagelijks leven. Maar die schieten hopeloos tekort als het gaat om microscopische processen. Om die te beschrijven blijft dus alleen nog die andere, nauwkeurige 'taal' voorhanden: de wiskunde.
Desondanks zullen we in de volgende paragrafen proberen in gewone taal en in deeltjes- en golfbeelden een tipje van de sluier van de quantummechanica op te lichten. Daartoe zullen we de interferentie-experimenten met een dubbele spleet met licht en elektronen proberen te beschrijven met lichtdeeltjes (fotonen) en elektronengolven.

9.2 NOGMAALS DE PROEF VAN YOUNG

probleemstelling

De proef van Young was in de 19e eeuw een experiment dat iedereen overtuigde van het golfkarakter van het licht. Volgens Planck en Einstein heeft licht óók een deeltjeskarakter: je kunt een lichtbundel opvatten als een stroom fotonen. In het begin van deze eeuw stond men voor de taak het deeltjes- en het golfkarakter van het licht met elkaar te verzoenen. Welke merkwaardige eigenschappen moeten fotonen hebben om er de proef van Young mee te verklaren? Wat is de fysische betekenis van het fotonenmodel bij deze proef? Laten we maar proberen tegen welk probleem

we oplopen, als we naar de proef van Young kijken vanuit een foton-opvatting, uiteraard zonder de experimentele resultaten die hier in eerste instantie op een golfkarakter duiden te ontkennen.

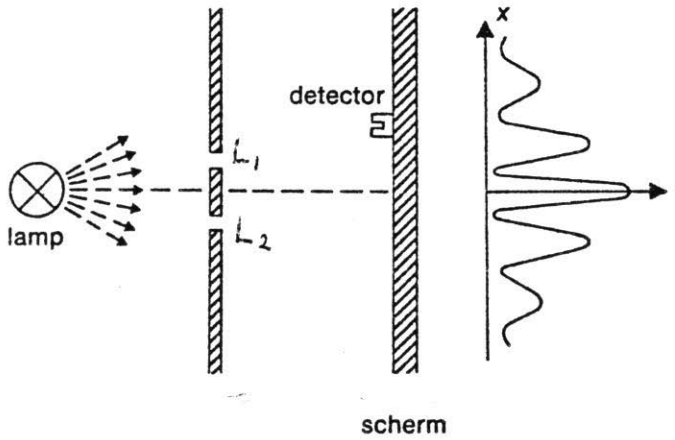


fig. 9.1 De proef van Young.

In fig. 9.1 staat de proef van Young nog eens getekend. De verklaring van de lichte en donkere strepen is met de golftheorie eenvoudig. Maar nu: stel nu eens dat de bron een hele zwakke is. Voor de golftheorie is dat geen probleem: er blijven golffronten uitgezonden worden (maar met een kleine amplitude) die *tegelijkertijd* door L_1 en L_2 gaan en daar de nieuwe bronnen vormen die voor het interferentiepatroon op het schema zorgen.
Maar nu met fotonen: de bron kan zó zwak zijn dat het de fotonen één voor één uitzendt. Je zou de fotonen kunnen nummeren: 1, 2, 3 enz.

fotonen door één opening

Eerst komt foton 1 op het scherm aan. Die zou dan door *één* van de openingen L_1 of L_2 gegaan moeten zijn. (Bedenk: volgens de golftheorie worden de openingen beide tegelijk gepasseerd!) Stel dat de fotonen 1, 2, 5, 8, ... door L_1 gegaan zijn en de fotonen 3, 4, 6, 7, ... door L_2 . Dan kun je je afvragen: welk beeld geven de fotonen 1, 2, 5, 8, ... op het scherm? Deze fotonen zijn allemaal door één opening gegaan. Een lichtbundel die op één opening valt, zal daarachter een *buigingspatroon* geven. Ten gevolge van de fotonen 1, 2, 5, 8, ... moet je dus een buigingspatroon verwachten (fig. 9.2).

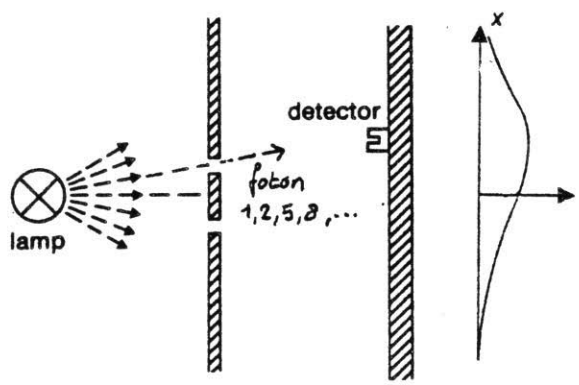


fig. 9.2 De fotonen die door één gat gaan.

Dat is op zich al heel merkwaardig! De fotonen gaan niet allemaal rechtdoor en komen niet op één plek terecht, maar worden een beetje gespreid: je kunt niet van *één foton* voorspellen waar die *precies* terecht komt, wel van een (groot) aantal fotonen: die geven een *statistische spreiding* te zien.

• De eerste *conclusie* is daarom: je kunt voor een foton alleen de *kans* of de *waarschijnlijkheid* voorspellen dat die ergens terecht komt. Daarom wordt een foton nu in de natuurkunde beschreven met behulp van een *waarschijnlijkheidsfunktie*.

fotonen door twee openingen

Ook de fotonen 3, 4, 6, 7, ... die door L_2 gegaan zijn, zouden een buigingspatroon moeten geven zoals in fig. 9.2, maar dan een stukje verschoven. En bij elkaar ... geven ze *niet* de som van die twee buigingspatronen maar een héél ander patroon: het interferentiepatroon van fig. 9.1! De kans om ergens op het scherm een foton aan te treffen bij een dubbele opening is dus *niet* gelijk aan de som van de kansen om een foton uit L_1 en een foton uit L_2 te krijgen. Dat is heel merkwaardig!

• De tweede *conclusie* is daarom: de kans om ergens een foton aan te treffen heeft een golfkarakter. Dat wordt beschreven door waarschijnlijkheisfunkties van fotonen, die wiskundig gezien hetzelfde uiterlijk hebben als de funkties waarmee je golven kunt beschrijven. Een groot aantal fotonen in de proef van Young geven dan bij elkaar een statistische verdeling zoals in fig. 9.1.

Samenvattend kan dus gezegd worden dat fotonen beschreven worden door waarschijnlijkheidsfunkties die er als een golffunktie uit zien. Men noemt dat wel 'waarschijnlijkheidsgolven'.

Wat moet je je daar nu bij voorstellen? Niet zo veel: de wiskundige voorstelling van fotonen is heel bevredigend: die leidt tot voorspelbare resultaten. Maar voorstellingen als golf of deeltje gaan niet meer op. Het beste is maar per verschijnsel na te gaan welk beeld het beste bij het verschijnsel past.

1 GOLF-DEELTJE DUALITEIT VAN HET ELEKTRON

Ook met elektronen kan je de proef van Young doen. Ondanks het grote verschil tussen fotonen (deeltjes met de lichtsnelheid) en elektronen (geladen deeltjes die allerlei snelheden kunnen hebben) krijg je toch ongeveer hetzelfde resultaat met de afstand tussen de twee openingen niet veel groter is dan de De Broglie-golflengte.

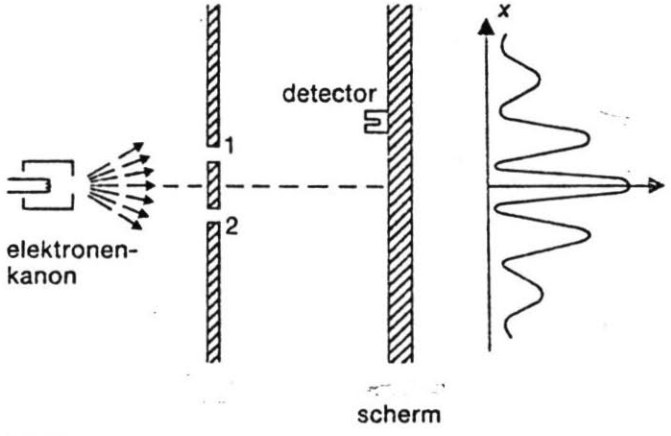


fig. 9.3 De proef van Young met elektronen.

a. Yvonne probeert het resultaat te verklaren door te zeggen: "Elektronen kunnen elkaar uitdoven".
Welk model van een elektron gebruikt zij? Vind je dat voor deze proef een juist model?
b. Marijke probeert het resultaat te verklaren door te zeggen dat de statistische verdeling van de elektronen op het scherm beschreven wordt door 'waarschijnlijkheidsgolven'. Wat bedoelt ze daarmee?

9.3 DOOR WELK GAT?

In de vorige paragraaf namen we aan dat een aantal fotonen door het ene, een aantal door het andere gat gaan bij de proef van Young. Stel je voor dat we een experiment willen doen waarin we willen *waarnemen* welke deeltjes door het ene en welke door het andere gat gaan. Let op dat onze vraagstelling uitgaat van een deeltjeskarakter: de proef die we gaan doen is dus een *deeltjesproef*, terwijl de 'gewone' proef van Young typisch een *golfproef* is.
Laten we nu maar eens met elektronen werken. Maar met fotonen gaat het in principe evenzo.
Er is wel een kleine moeilijkheid: de proef die we gaan voorstellen is in de praktijk niet echt uit te voeren. Toch hebben we wel wat aan de conclusies die we eruit zullen trekken, want die worden bevestigd door - veel moeilijker voorstelbare - proeven die echter wel uit te voeren zijn. Deze methode - het doen van een *gedachte-experiment* - is een belangrijk hulpmiddel gebleken in de natuurkunde van nà 1900. Einstein was er bijvoorbeeld meester in.
Hoe ziet deze gedachteproef er nu uit? Als we willen waarnemen door welke opening een elektron komt, moet er iets waarneembaars gebeuren als die door de opening gaat. Je kunt er dan bijvoorbeeld licht op laten vallen.

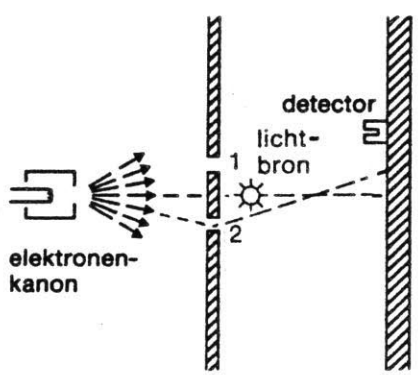


fig. 9.4 Een experiment om waar te nemen door welk gat een elektron gaat met behulp van een lichtbron.

Maar kunnen elektronen het licht verstrooien? Als je de golflengte van het licht groot neemt ten opzichte van de afmetingen van het elektron (waarvoor de De Broglie-golflengte een maat is), dan buigt het licht gewoon om de elektronen heen zonder dat het verstrooid wordt (zie par. 3.4).

2 a. Bereken de De Broglie-golflengte van elektronen die door een spanning van 30.000 V versneld worden. Bereken ook de kinetische energie van dat elektron.

b. Bereken de frekwentie en de energie van het foton met ongeveer dezelfde golflengte. Tot welk deel van het elektromagnetische spectrum behoort die?

We moeten dus een fotonenbron met grote frekwentie nemen. Een foton kan dan verstrooid worden door een elektron: dat zijn we al eerder tegengekomen als compton-verstrooiing.

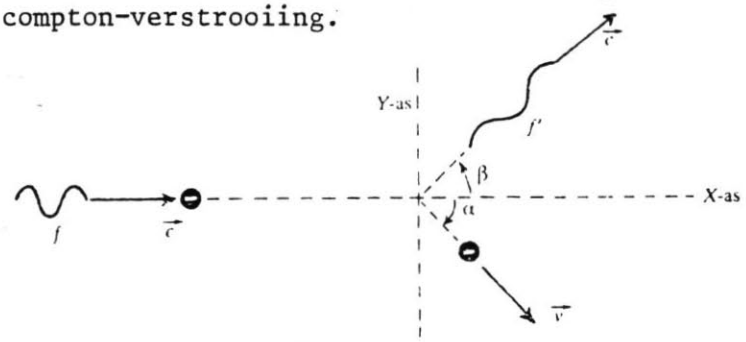


fig. 9.5 Comptonverstrooiing.

Aan de hand van het verstrooide foton $h.f'$ kan de plaats van het elektron 'teruggerekend' worden, met andere woorden: kan gezien worden door welk van de twee openingen het elektron passeerde.
Maar: er is nog iets gebeurd: het elektron is zelf ook verstrooid: zijn richting is veranderd, ook de grootte van zijn impuls is veranderd. Het elektron komt dus niet meer terecht op de plaats op het opvangscherm, waar die terecht moet komen! *Op het opvangscherm zullen we het interferentiepatroon dus niet meer waarnemen.*
Nu hadden we wel een kleinere frekwentie voor het foton kunnen nemen, dan was de impuls (richting en grootte) niet zo erg veranderd, maar dan hadden we de plaats (door welke opening?) van het elektron niet kunnen bepalen.
Uit dit gedachte-experiment zijn twee belangrijke conclusies te trekken, die heel algemeen gelden en de uitgangspunten van de quantummechanica vormen:
1. *Meten is verstoren*: doordat je meet, verander je de toestand zoals die was. Je dwingt een systeem in een toestand die je wilt meten: laat je elektronen of licht door 2 spleten vallen, dan dwing je de elektronen en het licht in hun 'golfjasje'; wil je weten door welk gat ze gaan, dan dwing je ze in hun 'deeltjejasje', omdat je van het comptoneffekt (botsingen) gebruik maakt.
2. Je kunt niet tegelijkertijd plaats en impuls van een elektron (of een foton) meten. Hoe nauwkeuriger je de één meet, des te meer verstoor je de andere. Heisenberg, een van de grondleggers van de quantummechanica, heeft dat in een formule, voor de impuls en de plaats van een individueel deeltje, vastgelegd:

$$\Delta p.\,\Delta x \geqslant \frac{h}{2\pi}$$ (onzekerheidsrelatie van Heisenberg)

met Δp de onzekerheid in de impuls, Δx de onzekerheid in de plaats en h de constante van Planck. Met onzekerheid wordt bedoeld de afwijking die een deeltje heeft van de gemiddelde waarde die je voor een groot aantal deeltjes meet. Hoe groter de onzekerheid in de plaats bijvoorbeeld is, des te meer wijken de gemeten plaatsen van de individuele deeltjes af van de gemiddelde plaats, dus zijn de gemeten plaatsen statistisch over een grotere ruimte verdeeld.

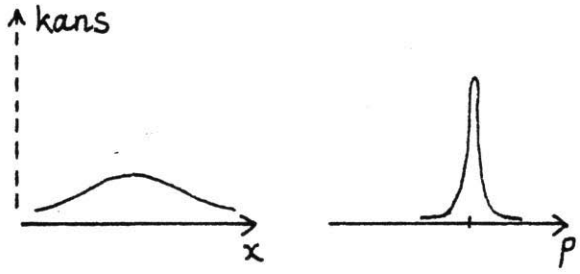


fig. 9.6 Grote onzekerheid in de plaats.
Kleine onzekerheid in de impuls.

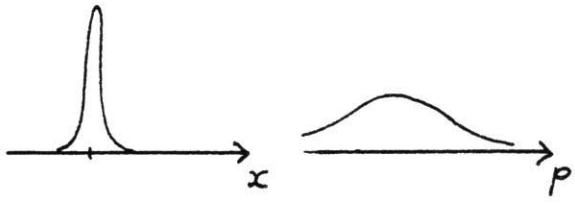


fig. 9.7 Kleine onzekerheid in de plaats.
Grote onzekerheid in de impuls.

3 DOOR WELKE OPENING GAAT EEN FOTON?

a. Hoe zou je fotonen kunnen waarnemen bij het passeren door één van de twee openingen?
b. Leidt het waarnemen van een foton tot dezelfde conclusies als hierboven voor het elektron zijn getrokken?

9.4 DE AANPAK VAN SCHRODINGER EN HEISENBERG

Na het publiceren van het werk van De Broglie zat de natuurkundewereld met een probleem, dat eigenlijk verrassend snel werd opgelost. Schrödinger en Heisenberg speelden daarin een belangrijke rol naast anderen zoals Pauli, Dirac, Debije, Bohr en Einstein. Heel kort staat hieronder de bijdrage van de eerste twee beschreven.

Allereerst is daar het werk van Schrödinger (gestimuleerd door Debije). Schrödinger las de ideeën van De Broglie en ging daarmee verder werken. Hij stelde wat nu de Schrödinger-vergelijking heet (gepubliceerd in 1926) op:

$$\nabla^2 \chi\ (x, y, z) + \frac{8\pi^2.m}{h^2}\ (E - V\ (x, y, z)\ \}\ \chi\ (x, y, z) = 0$$

Als je hierin voor een bepaald geval invult hoeveel energie E er is en hoe de potentiële energiefunktie $V\ (x\ , y, z)$ er precies uitziet, krijg je als oplossing een *golffunktie* $\chi\ (x, y, z)$, die zo'n waarschijnlijkheisfunktie is, zoals in de vorige paragraaf genoemd is. Met de waarschijnlijkheidsfunktie kun je de statistische verdeling van bijvoorbeeld de elektronen in een waterstofatoom voorspellen, als je de E en $V\ (x, y, z)$ van het waterstofatoom hebt ingevuld.

Onafhankelijk van Schrödinger kwam Heisenberg tot een heel andere benadering. Na contacten met Bohr, Kramers en Pauli was hij zeer geïnteresseerd in de echte voorstelling van elektronenbanen in atomen. Om die banen te kunnen beschrijven ontwikkelde hij een wiskundig model, waarin de meetbare grootheden zoals impuls, energie, plaats enz. met *matrices* beschreven worden. Tot zijn verrassing vond hij dat sommige van die matrices niet commutatief zijn. Bijvoorbeeld die van de plaats en van de impuls.

$$\begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \neq \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}$$

Max Born wees hem erop dat de matrixrekening in de wiskunde al ver ontwikkeld was. Daarmee kon Heisenberg bewijzen dat niet-commutatieve



fig. 9.8 Erwin Schrödinger (1887-1961).



fig. 9.9 Werner Heisenberg (1901-1976)

grootheden zoals de impuls en de plaats niet tegelijkertijd nauwkeurig gemeten konden worden. Dat was de achtergrond van zijn onzekerheidsrelatie, die hij daarmee afgeleid had.

$$\Delta p . \Delta x \geqslant \frac{h}{2\pi}$$

In de eerste jaren van de ontwikkeling van de quantummechanica was de Schrödinger-vergelijking favoriet, omdat die meer aansluit bij de 'klassieke' natuurkunde. De matrixwiskundige benadering won echter veel terrein.
Uiteindelijk bleek dat beide benaderingen wiskundig gezien gelijkwaardig zijn en in elkaar omgezet kunnen worden. Daarmee was de basis gelegd voor de quantummechanica die uiteindelijk verregaande consequenties zou hebben zoals de verdere ontwikkeling van kernenergie, de vaste stof fysica (o.a. transistor, chips, e.d.), de laser, en ook voor de wetenschappen buiten de fysica zoals scheikunde en biologie.
De samenleving zou zich zonder de quantummechanica niet hebben kunnen ontwikkelen tot wat het nu is. Veel nieuwe inzichten zijn er dus door gewonnen. Maar één ding is erdoor verloren gegaan: we kunnen niet meer beslissen of licht een golf of een deeltje is, of elektronen golven of deeltjes zijn. Maar daarmee moeten we leren leven.



BENJAMIN COUPRIE 28, Avenue Louise.

R. H. FOWLER

A. PICCARD E. HENRIOT ED. HERZEN TH. DE DONDER SCHROEDINGER W. PAULI W. HEISENBERG L. BRILLOUIN

P. EHRENFEST E. VERSCHAFFELT

DEBYE M. KNUDSEN W. L. BRAGG H. A. KRAMERS P. A. M. DIRAC A. H. COMPTON L. V. DE BROGLIE M. BORN N. BOHR

I. LANGMEIR M. PLANCK MADAME CURIE H. A. LORENTZ A. EINSTEIN P. LANGEVIN CH. E. GUYE C. T. R. WILSON

O. W. RICHARDSON

fig. 9.10 Deelnemers aan de Solvay Conferentie in 1927.