

DOPPLEREFFEKT

Goldstein vond een tegenargument tegen het deeltjesmodel van Crookes (ca. 1880). Hij liet zien dat er bij bewegende deeltjes een dopplereffekt zou moeten optreden bij het uitzenden van licht. Zijn redenering was als volgt: Stel dat het model van Crookes juist is. Dan moeten de kathodestraaldeeltjes snel bewegen en door hun snelheid licht gaan uitzenden. Dat licht wordt door een bewegende bron uitgezonden en zal het dopplereffekt moeten vertonen. Het uitgezonden licht vertoont spectraallijnen. Vergeleken met de oorspronkelijke spectraallijnen moeten die dus een beetje verschoven zijn. Golflengteverschillen in de orde van 0,5 nm kan je met een spectroscop waarnemen, dus ongeveer een golflengteverandering van $\frac{1}{1000}$ van de oorspronkelijke golflengte. De golflengteverandering van het dopplereffekt is ongeveer evenredig met $\frac{v}{c}$. Als de deeltjes dus sneller gaan dan $\frac{1}{1000}$ e deel van de lichtsnelheid, dan moet licht dat uitgezonden wordt door de bewegende deeltjes een waarneembaar dopplereffekt vertonen.

berekening

Goldstein berekende de snelheid van de deeltjes als volgt: de deeltjes worden versneld door de spanning V_{AK} en krijgen daardoor een kinetische energie $E_k = \frac{1}{2} m v^2$

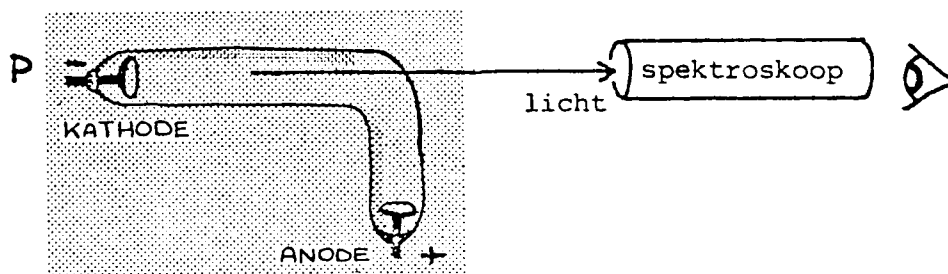
$$q V_{AK} = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{dus } v = \sqrt{2 \frac{q}{m} \cdot V_{AK}}$$

De verhouding $\frac{q}{m}$ voor lucht kon geschat worden uit elektrolyseproeven (zie blz. 29 van het themaboek) en de spanning van de buis kon tot 100.000 V opgevoerd worden. Goldstein toonde aan dat de snelheid van de deeltjes dan wel makkelijk boven 300 km/s kon komen. Dat is $\frac{1}{1000}$ deel van de lichtsnelheid. Er moest dus dopplereffekt waargenomen kunnen worden.

Goldsteins proef

Hieronder zie je een schema van Goldsteins opstelling bij zijn dopplereffekt onderzoek.

Als P de kathode is, komen de kathodestralen op de spectroscop af en zou je met de spectroscop een dopplereffekt moeten kunnen waarnemen.



Goldstein vond geen dopplereffekt.

Opdrachten bij kaart 1: DOPPLEREFFEKT

verwerking

- 1 Bereken de snelheid die Goldstein vond. Als $\frac{q}{m}$ -waarde nam hij $5 \cdot 10^7$ C/kg. De spanning schatte hij op 100.000 V.
- 2 Verwachtte Goldstein een rood- of een violet-verschuiving?

discussie

Goldstein heeft de 'deeltjesfysica' met eigen argumenten proberen te verslaan: hij heeft binnen de deeltjestheorie geargumenteerd.

De deeltjesfysici konden geen fout vinden in Goldsteins' redenering. Hun conclusie was echter *niet*: kathodestralen zijn geen deeltjes, *maar*: Crookes' deeltjesmodel moet worden aangepast.

Er werden twee voorstellen gedaan om Crookes' model aan te passen:

- a. niet de bewegende kathodestraaldeeltjes maar de (bijna) stilstaande restgasdeeltjes zenden de spektraallijnen uit als er kathodestraaldeeltjes tegenaan botsen.
 - b. De waarden die in de formule ingevuld werden zijn fout: de werkelijke snelheid is kleiner dan de berekende.
- 3 Laat zien dat aanpassing a. Goldsteins' bezwaren ondervangt.
 - 4 Welke van de in de formule ingevulde waarden zou volgens het voorstel b. fout kunnen zijn? Zou de waarde groter of kleiner moeten zijn?
 - 5 Welke van de twee aanpassingen ligt volgens jou het meest voor de hand? Waarom?
 - 6 Met welk experiment zou je aanpassingen a., danwel b. van het deeltjesmodel kunnen toetsen?

Ronde 1: Welk model is door deze discussie sterker komen te staan?

VRIJE WEGLENGTE

De deeltjesfysici stelden een gewijzigd deeltjesmodel op: (bijna) stilstaande restgasmolekulen zenden spektraallijnen uit als ze door kathodestraaldeeltjes getroffen worden.

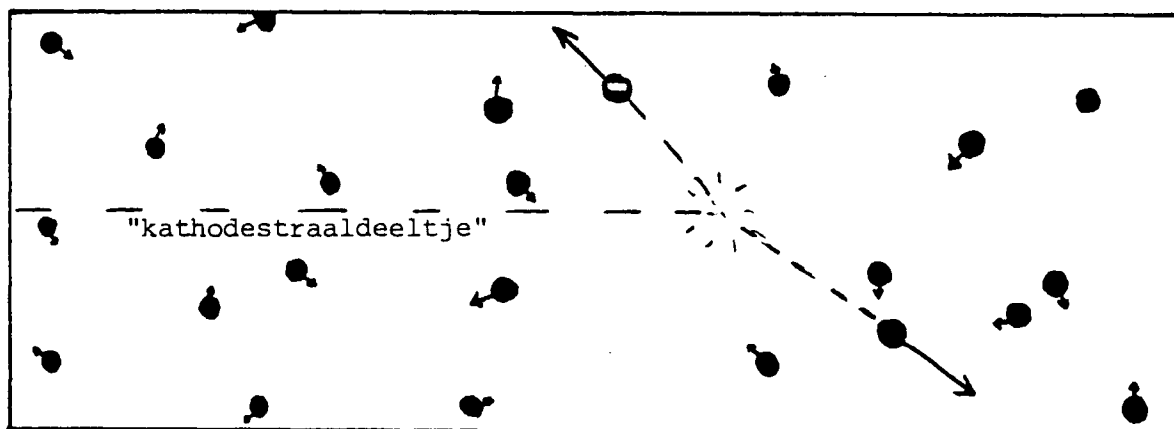
Goldstein kwam echter opnieuw met een bezwaar, dat op deze wijziging inhaakte. Voordat een kathodestraaldeeltje met een restgasmolekuul botst zal die eerst (gemiddeld) een vrije weglengte afgelegd hebben. De orde van grootte van de vrije weglengte kon hij schatten: bij lage druk ($p = 0,1$ mm kwikdruk) licht het gas in een kathodestraalbuis nauwelijks meer op, al is die enkele centimeters lang. De vrije weglengte is dus minstens enkele tientallen centimeters.

De vrije weglengte l kon hij ook berekenen met:

$$l = \frac{1}{n \cdot A}$$

Hij kon een schatting maken van n met behulp van de destijds bekende orde van grootte van het getal van Avogadro ($\cdot 10^{24}$ molekulen per mol) en het volume van 1 mol gas bij normale temperatuur en druk (22,5 l).

Voor $p = 0,1$ mm kwam hij op $n = 3 \cdot 10^{22}$ deeltjes/m³. De aanhangers van de kinetische gastheorie konden een schatting maken van de botsingsdoorsnede A van de betreffende gasmolekulen: ongeveer 10^{-19} m². Dat leidt tot een heel kleine vrije weglengte. Ongeveer $\frac{1}{1000}$ van de waargenomen vrije weglengte. Over de tientallen centimeters van de kathodestraalbuis zou een deeltje al vele malen hebben moeten botsen en dus zou er dan licht uitgezonden moeten zijn.



Opdrachten bij kaart 2: VRIJE WEGLENGTE

verwerking

- 1 Bereken de vrije weglengte die Goldstein vond.
- 2 Laat zien dat de vrije weglengte groter is naarmate de druk lager is. Klopt dat met de waarnemingen in kathodestraalbuizen?

discussie

Goldstein heeft zijn redenering en de gebruikte gegevens ontleend aan de deeltjesfysica waarin de aanhangers van Crookes zeker geloofden. De deeltjesfysici moesten weer constateren dat Goldstein een steekhoudend argument had gevonden. Crookes probeerde zijn gewijzigde model te redden met de volgende redenering:

Door de stortvloed van deeltjes wordt de baan die de kathodestrallen volgen 'schoongeveegd' van de nog aanwezige gasmolekulen. Sommige deeltjes botsen dus en maken de weg vrij voor anderen, die zonder te botsen het glas bereiken.

Goldstein vond deze redenering onwetenschappelijk 'omdat die niet experimenteel te onderzoeken valt'.

- 3 Ben je het eens met Goldstein? Geef een argument voor je standpunt.

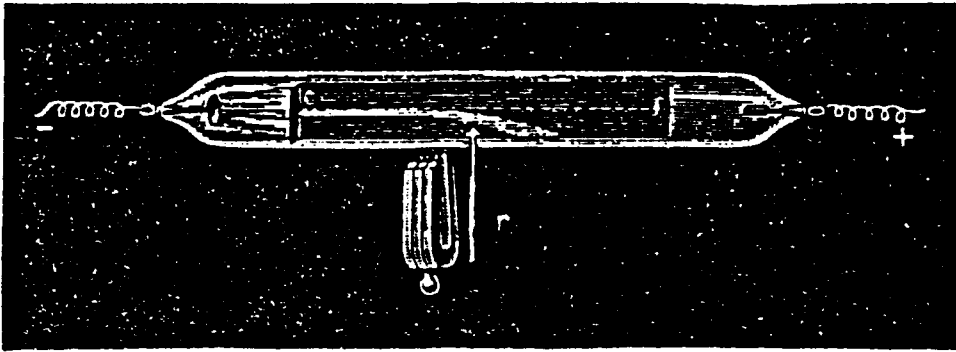
Andere deeltjesfysici zochten de oplossing bij de berekening van de vrije weglengte. Zij zagen drie mogelijke fouten:

- a. de waarde van n is niet juist;
 - b. de waarde van A is niet juist;
 - c. de formule zelf gaat niet op voor kathodestraaldeeltjes.
- 4
 - a. Als de waarde van n onjuist zou zijn, welke waarde zou die dan moeten hebben om de waargenomen l te voorspellen? Wat betekent dat voor het aantal molekulen in een gas.
 - b. Als de waarde van A onjuist zou zijn, welke waarde zou die dan moeten hebben om de waargenomen l te voorspellen? Wat betekent dat voor de 'grootte' van de gasmolekulen?
 - c. Laat zien dat Crookes' schoonveeg redenering ervan uitgaat dat de formule voor de vrije weglengte niet opgaat voor kathodestraaldeeltjes (fout c.)
 - 5 Welke experimenten zou je voorstellen naar aanleiding van het vrije-wegleengte-argument van Goldstein?

Ronde 2: Welk model is door deze discussie sterker komen te staan?

HET EXPERIMENT VAN SCHUSTER

In 1880 ontwierp de Engelsman Arthur Schuster een experiment om de verhouding tussen lading en massa, $\frac{q}{m}$ te bepalen. Hij bracht kathodestrallen in een homogeen magnetisch veld zodat ze een deel van een cirkelbaan beschreven, waarvan hij de straal schatte.



Hij redeneerde nu als volgt: als kathodestrallen geladen deeltjes zijn, werkt er een lorentzkracht op:

$$F_L = B q v$$

Deze zorgt voor de cirkelbaan en werkt dus als centripetale kracht F_c

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

dus geldt: $\frac{mv^2}{r} = B q v$

Verder geldt: $\frac{1}{2} m v^2 = q V_{AK}$

Door deze formules te combineren kreeg hij: $\frac{q}{m} = \frac{2 V_{AK}}{B^2 r^2}$

Voor V_{AK} nam hij 20.000V. De magnetische veldsterkte was ongeveer 10^{-3} T en als straal schatte hij ongeveer 50 cm. Hij rekende de waarde $\frac{q}{m}$ uit, maar vond een waarde die hij helemaal niet verwacht had. Hij geloofde zijn eigen uitkomst niet. Wat had hij fout gedaan? Ging de theorie, die hij ontwikkeld had, wel op voor kathodestraaldeeltjes?

Opdrachten bij kaart 3: HET EXPERIMENT VAN SCHUSTER

verwerking

- 1 Bereken de waarde die Schuster voor $\frac{q}{m}$ vond.
- 2 Met welke waarde voor $\frac{q}{m}$ zou hij zijn waarde vergelijken? Waarom?

discussie

Schuster wantrouwde zijn eigen resultaten. Ze pasten helemaal niet in de ideeën van 1880. Hij was bang dat hij zich belachelijk zou maken met deze uitkomsten. Daarom zocht hij naar fouten in de theorie:

- a. In de theorie wordt verondersteld dat de kathodestraaldeeltjes van de kathode vertrekken. Was dat wel waar?
- b. In de theorie wordt verondersteld dat de kathodestraaldeeltjes geen energie verliezen tijdens hun reis door de buis. Maar ze kunnen botsen met gasmolekulen en dus een deel van hun snelheid kwijtraken.

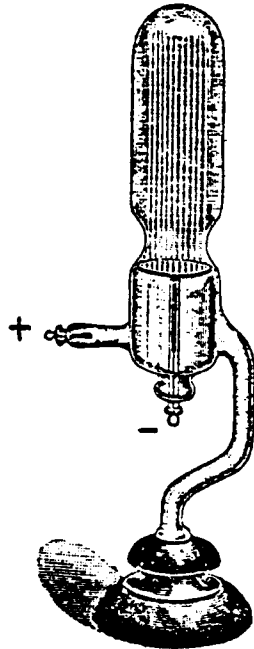
Schuster bedacht daarom een nieuw model: kathodestralen ontstaan niet (alleen) bij de kathode maar overal in de buis doordat een atoom gesplitst wordt in een positief en een negatief deel waarbij het negatieve deel een nieuw kathodestraaldeel wordt en het positieve deel ook.

- 3 Laat zien dat Schuster met zijn model wel zijn meetresultaat kan verklaren zonder de formules te veranderen.
- 4 Met welke van de tien eigenschappen lijkt het model van Schuster in strijd? Hoe zal hij met zijn model die eigenschap 'weg' verklaren?
- 5 Welk(e) nieuw(e) verschijnsel(en) kon Schuster met zijn model voorstellen? Welke proeven zou je daarvoor voorstellen?

Ronde 3: Als Schuster had doorgezet, zou dan het pleit al zijn beslecht?

KANAALSTRALLEN

Arthur Schuster, een Engelsman, veronderstelde dat kathodestralen niet bestaan uit gasmolekulen die op de kathode een negatieve lading opdoen. In zijn opvatting splitsen gasmolekulen zich overal in de buis in een positief deel en een negatief deel. Het negatieve deel zouden de kathodestraaldeeltjes zijn die bij botsing weer nieuwe splitsingen veroorzaken. Goldstein vatte ook deze nieuwe uitvlucht van de deeltjesfysici als een uitdaging aan. Hij redeneerde dat de positieve brokstukken, die naar de kathode zouden gaan bewegen, waargenomen moesten kunnen worden. Hij boorde gaatjes ('kanalen') in de kathode (zie de figuur) en zag tot zijn grote verrassing inderdaad stralen verschijnen die door deze gaatjes naar voren gaan. Hij noemde ze *kanaalstralen*. Bij nader onderzoek bleken deze kanaalstralen vooral te ontstaan op de plaatsen (tussen de anode en kathode) waar het gas veel licht uitzendt. Elektrische en magnetische afbuiging konden bij de kanaalstralen niet aangetoond worden, wel een chemische werking. Het optreden van kanaalstralen bleek vooral af te hangen van de druk (hoe lager de druk, hoe minder kanaalstralen). De kanaalstralen bleken de spektra uit te zenden die karakteristiek zijn voor het soort gasvulling in de buis.



Kanaalstralen.

Opdrachten bij kaart 4: KANAALSTRALEN

verwerking

- 1 Laat zien dat Schuster met zijn model de vergelijking tussen geleiding in vloeistoffen en in gassen verder doortrok.
- 2 Wijs in de figuur de anode en de kathode aan en wijs aan in welke richting de kathodestrallen en de kanaalstralen zich bewegen.
- 3 Maak een lijstje van eigenschappen van kanaalstralen en vergelijk die met de tien eigenschappen van kathodestrallen.

discussie

Deze kanaalstralen, die door de deeltjesfysici voorspeld waren, leverden voor beide groepen nieuwe problemen op, omdat ze andere eigenschappen bleken te hebben dan kathodestrallen.

- 4 Welke eigenschappen van kanaalstralen kun je met Schuster's model verklaren, welke niet? Welke andere eigenschappen zou je met behulp van Schuster's model kunnen voorspellen?
- 5 Aanhangers van het golfmodel moesten ook op zoek naar een verklaring voor de kanaalstralen. Zij overwogen twee mogelijkheden:
 - a. kanaalstralen zijn elektromagnetische golven die door de gasmolekulen uitgezonden worden als ze door kathodestraalgolven worden getroffen;
 - b. kathodestraalgolven zijn in staat gasmolekulen van een positieve lading te voorzien.Geef argumenten vóór en tegen deze verklaringen.
- 6 Welke proeven zou je voorstellen naar aanleiding van de ontdekking van kanaalstralen?

Ronde 4: Welk model is door het ontdekken van de kanaalstralen sterker komen te staan?

HET MODEL VAN HERTZ

Heinrich Hertz hield zich in ca. 1883 bezig met de vraag of elektrische stroom een zekere traagheid (dus massa) had en dus uit massa-deeltjes bestaat. Hij kon geen traagheidseffekten vinden.

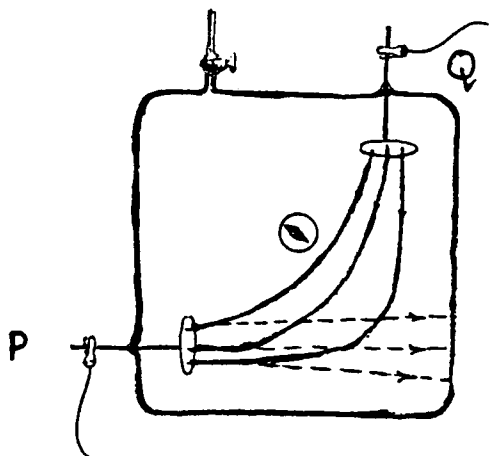
Voor kathodestralen kwam hij met een model waarin hij de massaloze elektrische stroom door de kathodestraalbuis wilde onderscheiden van de 'zuivere' kathodestralen.

Zijn model luidde:

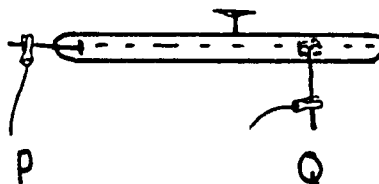
1. In een kathodestraalbuis gaat de stroom van de kathode naar de anode of omgekeerd. Deze stroom is imponderabel* en buigt dus met de elektrische veldlijnen mee naar de anode of kathode toe.
2. In een kathodestraalbuis ontstaan 'zuivere' kathodestralen die loodrecht op de kathode worden uitgezonden. Deze kathodestralen planten zich niet rechtlijnig voort en zijn ongeladen.

Hertz probeerde zijn model experimenteel aan te tonen.

Hieronder staat het schema van de platte vierkante kathodestraalbuis die hij zijn glasblazer liet maken. De elektrode Q is geplaatst langs de bovenrand van de figuur. Hertz zag, als P de kathode was, tegenover P een heldere blauwe fluorescentie oplichten, terwijl er rond de anode Q een paarse gloed zichtbaar was. Gevoelige naaldmagneten die hij opstelde tussen P en Q richtten zich alsof er een stroom liep van P naar Q. Hij concludeerde dat er sprake was van ladingstransport tussen P en Q.



bovenaanzicht van de
buis van Hertz



zijaanzicht

*inponderabel is letterlijk: zonder gewicht

Opdrachten bij kaart 5: HET MODEL VAN HERTZ

verwerking

- 1 Waarom is het, ook voor de golfphysici, noodzakelijk dat er lading tussen de anode en kathode uitgewisseld wordt?
- 2 Laat zien dat geladen deeltjes *met* massa wèl een elektrische kracht ondervinden, die volgens de elektrische veldlijnen is gericht, maar zich door hun traagheid niet precies langs die veldlijnen kunnen bewegen.
- 3 Neem de figuur over en teken de richting van de kompasnaalden die Hertz waargenomen moet hebben, op enkele plaatsen.

discussie

Hertz had zich grote faam verworven door aan te tonen dat er elektromagnetische golven bestaan die zich met de lichtsnelheid voortplanten, precies zoals de theorie van Maxwell voorspelde. Ook op het gebied van kathodestralen paste hij zijn kennis van magnetische velden toe. Zijn metingen waren van grote invloed op de verdere gang van zaken in het kathodestraaldebat.

- 4 Hoe gaat volgens de deeltjesaanhangers de ladingsuitwisseling tussen anode en kathode in zijn werk?
- 5 De stroom die in de kathodestraalbuizen van Hertz optrad was ongeveer 10^{-5} A. De afstand van de magneetjes tot het midden van de buis van Hertz (daar waar de stroom zou moeten lopen) was ongeveer 2 cm. Bereken hoe groot het magneetveld van de stroom ter plaatse van de opgestelde kompasnaalden ongeveer zou zijn. Vergelijk die met de orde van grootte van het aardmagneetveld ($2 \cdot 10^{-5}$ T). Denk je dat de kompasnaalden op een dergelijk veld overduidelijk reageren?
- 6 Deeltjesfysici zagen het gebrek aan afbuiging van de kathodestraaldeeltjes in een elektrisch veld juist als een bewijs van de traagheid van geladen deeltjes: 'door hun traagheid wijken de deeltjes nauwelijks af van hun rechte pad als er een (relatief kleine) elektrische kracht op werkt'. Als je die kracht maar voldoende groot kan maken zie je de afbuiging wel. Helaas zijn afbuig-velden boven ca. 100V niet mogelijk omdat er niet een voldoende vacuüm in de buis te verkrijgen is.
 - a. Waarom was het praktisch onmogelijk de kathodestralen in een veld tussen twee platen waartussen bijvoorbeeld 20.000 V staat, af te buigen?
 - b. Wat vind je van deze 'uitvlucht' van de deeltjesfysici?

Ronde 5: Welk model is door Hertz' experimenten sterker komen te staan?

LENARDS BUIS

Eenmaal overtuigd dat zuivere kathodestrallen geen lading vervoeren en geen deeltjes zijn, ging Hertz verder met proeven om aan te tonen dat kathodestrallen elektromagnetische golven zijn, net zoals licht. Hij meende dat de *doorlaatbaarheid* een belangrijke eigenschap was, die voor een golfkarakter pleit. Worden licht- en geluidsgolven niet door allerlei media doorgelaten, terwijl ze deeltjes tegenhouden.

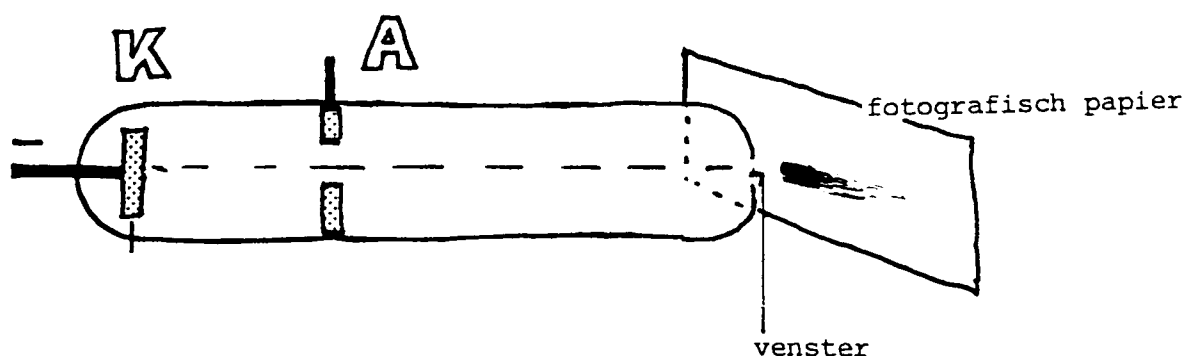
De eerste pogingen van Hertz en zijn leerling Lenard, liepen op niets uit. Ze maakten kathodestraalbuizen met 'vensters' van een speciaal glas, kwarts glas, maar de kathodestrallen verlieten de buis niet. Toen Hertz die mislukking overdacht, meende hij dat de proef mislukte door de grote dikte van het glas. Maar hij kon moeilijk kwarts glas van 0,01 mm dikte nemen, want dan zou er bij het vacuüm zuigen van de buis een implosie optreden.

Lenard kwam op het idee heel dun (0,001 mm) aluminium of goudfolie te gebruiken. Die zijn steviger en laten ook licht door, maar geen (gas-) deeltjes.

Hieronder zie je een schema van Lenards buis. Het materiaal in het venster is aluminium- of goudfolie.

Door fotografische platen in de lengterichting voor zijn venster te houden, slaagde Lenard erin te demonstreren dat kathodestrallen ongeveer 10 cm ver in lucht doordringen. Hij vergeleek dat met de doordringbaarheid van een stof als melk voor lichtstralen. Ook daar dringt lucht enkele cm door.

De vrije weglengte die voor de 'kathodestraaldeeltjes' van de deeltjesfysici berekend kan worden in gewone lucht onder normale druk, blijkt echter hoogstens 0,1 mm te zijn.



Opdrachten bij kaart 6: LENARDS BUIS

verwerking

- 1 Maak een ruwe schatting hoeveel atomen een aluminiumfolie van 0,001 mm dik is. Gebruik je BINAS-boekje.
- 2 Bereken de vrije weglengte van Crookes' kathodestraaldeeltjes in lucht bij normale druk, uitgaande van de gegevens bij kaart 2.
- 3 Hoe groot moet de vrije weglengte van de 'deeltjes' in aluminium minstens zijn, gezien de resultaten van Lenard?

discussie

Het vrije weglengte-argument van de golffysici tegen het deeltjesmodel wordt nu zeer sterk, nu de kathodestrallen aantoonbaar door aluminiumfolie en in 'normale' lucht kunnen doordringen.

- 4 Probeer het experiment van Lenard te verklaren met het idee van Crookes over het 'schoonvegen' van de baan voor kathodestraaldeeltjes. Wat is je conclusie?
- 5 Kijk nog eens naar de berekening van de vrije weglengte (zie kaart 2) en bedenk welke schatting of meting wellicht anders gedaan moet worden om het deeltjesmodel te 'redden'.
- 6 Geef een verklaring voor de proef van Lenard volgens de golftheorie.
- 7 Welke nieuwe experimenten zou je vanuit het golfmodel of vanuit het deeltjesmodel nu voorstellen?

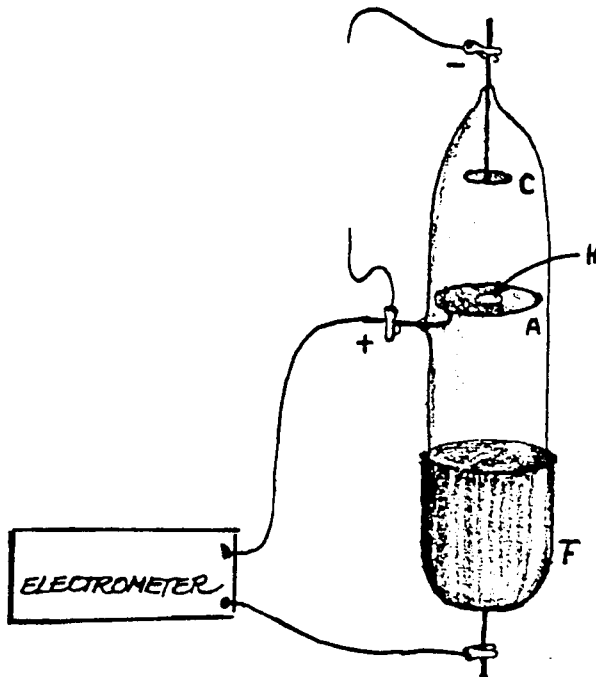
Ronde 6: Welk model is door de experimenten van Lenard sterker komen te staan?

kaart 7

HERTZ' LADINGSPROEF

Hertz wilde in 1883 op nóg een manier laten zien dat 'zuivere' kathodestralen geen lading bevatten. Hij redeneerde als volgt: als je kathodestralen door een gat H in de anode A laat gaan, komen ze achter de anode op het glas terecht. Als de kathodestralen nu geladen deeltjes zijn, zal het glas geladen worden en geladen blijven, omdat het een isolator is. Op een geleider F die rond de buis is aangebracht zal dan een positieve lading geïnduceerd worden. Die kun je met een elektrometer waarnemen.

Toen hij een heel klein beetje lading op glaswand, die in plaats van de kathodestraalbuis in de geleider gebracht (zie akt. 12 op blz. 28), aanbracht, sloeg de elektrometer onmiddellijk uit. Werd de kathodestraalbuis erin gebracht en aangezet, dan was er behalve een klein begineffekt, geen uitslag.



Opdrachten bij kaart 7: HERTZ' LADINGSPROEF

verwerking

- 1 Leg uit waarom negatieve kathodestraaldeeltjes een positieve lading op het geleidend omhulsel zouden moeten veroorzaken.
- 2 Waarom is de controleproef met het aanbrengen van een kleine lading noodzakelijk? Leg uit op welke punten niet helemaal 'eerlijk' vergeleken is. Wordt de controleproef daardoor onbetrouwbaar?

discussie

Het meten van kleine ladingen is uiterst moeilijk, vanwege de mogelijkheid dat een lading weglekt via allerlei bijna onnaspeurlijke wegen, bijvoorbeeld via vochtige lucht. Herhalingen van de proeven van Hertz door anderen leverden wel dezelfde resultaten: geen lading kon aangetoond worden. Maar over de oorzaak daarvan was men het niet zo eens....

- 3 Sommigen vonden het optreden van het beginneffekt onbelangrijk, anderen vonden dat essentieel. Wat zal het standpunt van de deeltjesfysici geweest zijn?
- 4 Volgens Schuster worden er overal in de buis positieve en negatieve ionen gevormd. Hoe kan met behulp van dat idee het weglekken van de lading verklaard worden?
- 5 Verwacht je dat het bereiken van een nog lagere druk in de kathodestraalbuis duidelijker resultaten zal geven betreffende deze proef van Hertz?

Ronde 7: Welk model is door Hertz' ladingsproef sterker komen te staan?

kaart 8

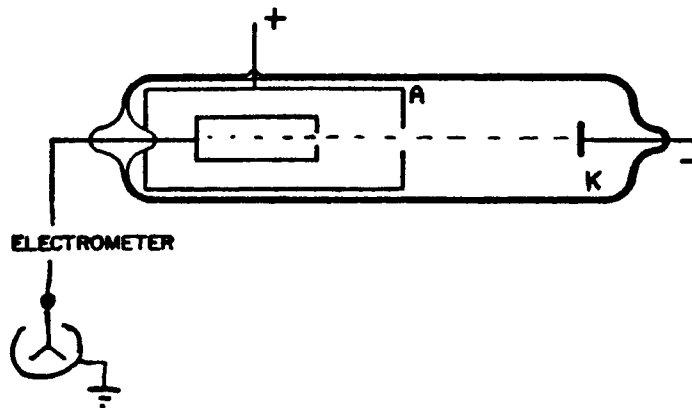
PERRIN'S LADINGSPROEF

In 1895 herhaalde de jonge Fransman Perrin de ladingsproeven van Hertz. Inmiddels waren de pompen sterk verbeterd, waardoor hij over een buis kon beschikken, waarin een veel lagere gasdruk bereikt was dan in die van Hertz. Hij veronderstelde dat de lading daardoor minder snel zou weglekken.

Bovendien verbeterde hij de proef door de kathodestralen *in* de buis in een geleider op te vangen en hij schonk veel aandacht aan een goede afscherming van de buis tegen elektrische ladingen van buitenaf door de gehele opstelling in een kooi van Faraday te plaatsen.

Hieronder zie je een schema van Perrins opstelling.

De elektrometer van Perrin sloeg inderdaad uit om op een zeker maximum te blijven steken. De opgevangen lading bleek negatief te zijn.



Opdrachten bij kaart 8: PERRIN'S LADINGSPROEF

verwerking

- 1 Toon aan dat de geleiders, waarin Perrin de kathodestrallen opving, niet van buitenaf door influentie een lading kunnen krijgen.
- 2 Waarom verhoogt het direkt meten van de lading *binnen* de geleider de betrouwbaarheid van de meting?

discussie

Perrin's proef keerde het tij: de argumenten tegen het deeltjesmodel waren wel erg zwaarwichtig geworden vanwege de vrije weglengte van de kathodestrallen in lucht, die Lenard ontdekt had. Golfaanhangers zochten daarom naar een verklaring binnen het golfmodel.

- 3 Een golfaanhanger veronderstelde dat de ladingsstroom, die door Hertz onderscheiden was, van de 'zuivere' kathodestrallen voor de lading zorgen. Ontwerp een proef om deze veronderstelling te onderzoeken.
- 4 Hertz had bij zijn beroemde proeven over het opwekken van elektromagnetische straling ontdekt dat licht het overspringen van vonken kan vergemakkelijken. Licht kan dus lading uit een metaal losmaken ('fotoelektrisch effect'). Het bleek dat metalen voorwerpen met UV-licht zelfs (positief) geladen kunnen worden. Kan zo'n soort effect de proef van Perrin verklaren?

Ronde 8: Zijn de argumenten voor het deeltjesmodel voor jou nu overtuigend genoeg?

THOMSON'S PROEVEN

Thomson herhaalde de proeven van Hertz en Perrin. Zijn stelling, als deeltjesaanhanger, was dat alle experimenten die niet met het deeltjesmodel verklaard kunnen worden, wel met het deeltjesmodel kloppende resultaten geven als de druk in de buis maar voldoende laag gemaakt kan worden. Om iedereen te kunnen overtuigen gebruikte hij een buis waarin de gasdruk gevarieerd kon worden.

1e experiment: Aantonen van lading.

De buis van fig. 1 voerde hij zo uit dat de bundel kathodestraalen op de met de elektrometer verbonden geleider in de kooi van Faraday gericht kon worden door een magneetveld aan te leggen.

De resultaten waren:

- a. bij enkele cm kwikdruk: geen lading vast te stellen, ongeacht de aanwezigheid van een magnetisch veld;
- b. bij 0,5 cm kwikdruk: als de kathodestraalbundel op de geleider gericht wordt is eerst een lading vast te stellen, maar de wijzer van de elektrometer loopt daarna terug;
- c. onder 1 mm kwikdruk is een permanente lading vast te stellen, mits de kathodestraalbundel op de geleider gericht wordt. Anders niet.

2e experiment: Aantonen van afbuiging.

Daarvoor gebruikte Thomson de buis van fig. 2. Bij heel lage druk bleek een afbuiging op te treden, als de platen D en E met een spanningsbron verbonden werden. Bij wat hogere druk trad er geen afbuiging op. We laten Thomson zelf aan het woord:

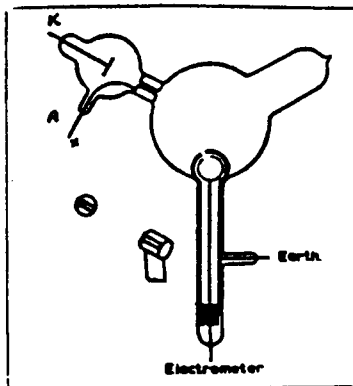
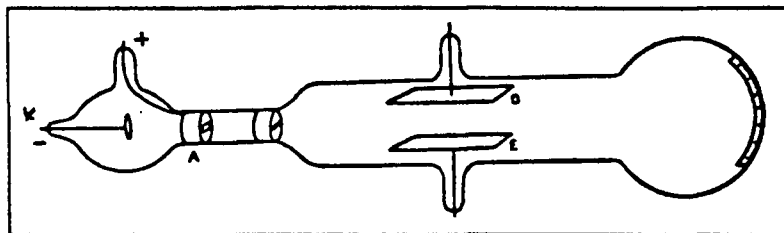


fig. 1



Twee tekeningen van buizen van Thomson.

fig. 2

"On repeating this experiment I at first got the same result (as Hertz), but subsequent experiments showed that the absence of deflexion is due to the conductivity conferred on the rarified gas by the cathode rays".
 Want: "It was only when the vacuum was a good one that the deflexion took place, but that the absence of deflexion is due to the conductivity of the medium is shown by what takes place when the vacuum has just arrived at the stage at which the deflexion begins. At this stage there is a deflexion of the rays when the plates are first connected with the terminals of the battery, but if this connection is maintained the path of phosphorescence gradually creeps back to its undeflected position".

Na dit resultaat was Thomson zeker van zijn zaak: "I can see no escape from the conclusion that they are charges of negative electricity carried by the particles of matter".

Opdrachten bij kaart 9: THOMSON'S PROEVEN

discussie

- 1 Welk argument onderving Thomson door de kathodestraal in de buis van fig. 1 al dan niet op de geleider te richten?
- 2 Waarom was het variëren van de druk in de buizen zo belangrijk in de proeven van Thomson?
- 3 Eén belangrijk bezwaar tegen het deeltjesmodel werd nog niet door de beschreven proeven ondervangen: de grote vrije weglengte van de kathodestraaldeeltjes. Leg dat uit!
- 4 Thomson toonde aan dat de metingen van Schuster over de $\frac{q}{m}$ verhouding juist waren geweest. Zijn conclusie was: de kathodestraaldeeltjes zijn géén gasionen, maar 'particles'. Noem een belangrijke eigenschap waardoor deze 'particles' van de tot dan bekende deeltjes afwijken.

Ronde 9: Er waren natuurkundigen die nog niet door Thomson's proeven overtuigd waren. Wat vind je daarvan?