



Precisie en gevoeligheid bij intensiteitsmetingen : meting van de constante C_1 van Planck

<https://hdl.handle.net/1874/323005>

A. qu. 192, 1936

A. qu. 192. 69

PRECISIE EN GEVOELIGHEID
BIJ INTENSITEITSMETINGEN
METING VAN DE CONSTATE C, VAN PLANCK

J. J. ZAALBERG VAN ZELST

s.
cht

16

PRECISIE EN GEVOELIGHEID BIJ
INTENSITEITSMETINGEN
METING VAN DE CONSTATE C₁ VAN PLANCK



Diss. Utrecht 1936

PRECISIE EN GEVOELIGHEID BIJ INTENSITEITS-
METINGEN

METING VAN DE CONSTATE C_1 VAN PLANCK

PROEFSCHRIFT TER VERKRIJGING VAN DEN GRAAD VAN
DOCTOR IN DE WIS- EN NATUURKUNDE AAN DE RIJKS-
UNIVERSITEIT TE UTRECHT OP GEZAG VAN DEN RECTOR
MAGNIFICUS DR. C. W. VOLLGRAFF, HOOGLEERAAR IN DE
FACULTEIT DER LETTEREN EN WIJSBEGEERTE, VOLGENS
BESLUIT VAN DEN SENAAT DER UNIVERSITEIT TEGEN
DE BEDENKINGEN VAN DE FACULTEIT DER WIS- EN
NATUURKUNDE TE VERDEDIGEN OP DINSDAG 7 JULI 1936,
DES NAMIDDAGS TE 4 UUR, DOOR

JOHANNES JACOBUS ZAALBERG VAN ZELST

GEBOREN TE AMSTERDAM



1936

DRUKKERIJ Fa. SCHOTANUS & JENS, UTRECHT

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK UTRECHT



3900 5305



Aan mijn Ouders.

Ik wil hier mijn dank betuigen aan allen, die medewerkten aan het tot stand komen van dit proefschrift, in het bijzonder aan mijn promotor den hoogleeraar Dr. L. S. ORNSTEIN en aan mijn medewerkers Dr. D. VERMEULEN en J. G. HAGEDOORN.

EERSTE DEEL

OVER EIGENSCHAPPEN VAN INTENSITEIT- MEETMETHODES.

De algemeenheid van den wensch, stralingsenergie te kunnen meten, wordt duidelijk gedemonstreerd door het groote aantal methodes, dat op het oogenblik voor dit doel kan worden gebezigd. Deze laatste eigenschap is echter ook vrijwel de eenige, die zij allen gemeen hebben, want de grondslagen, waarop zij berusten en hunne instrumentale uitvoering zijn zoo verschillend, dat zij, in plaats van met elkaar te wedijveren, elkander aanvullen en steunen, zoodat het thans mogelijk is, de aanwezigheid van welhaast elken vorm van straling vast te stellen en haar energie vrij nauwkeurig te bepalen.

De hoedanigheden, waarin de verschillen tusschen deze meetmethodes zich in hoofdzaak uiten, en door welker beschouwing men zich dus bij de keuze van een voor een bepaalde straling geschikt instrumentarium moet laten leiden, zijn wel: de sterkte, de frequentie(s) en de ruimtelijke eigenschappen, die de straling, waarvan de energie met een bepaald apparaat kan worden gemeten, moet bezitten, de nauwkeurigheid, waarmede dit mogelijk, en de tijd, die ervoor noodig is. Hierbij dient opgemerkt te worden, dat deze eigenschappen in de meeste gevallen met elkaar in nauw verband staan, zoodat het niet mogelijk is, de mate, waarin een bepaalde meetmethode hen bezit, zonder meer in getallen weer te geven. Vaak is het mogelijk, deze van de eene eigenschap te verhoo-gen ten koste van die van een andere. Toch willen wij beproe-ven, in het volgende een kort overzicht te geven van eenige methodes voor intensiteitsmeting en daarbij zullen wij niet

zoozeer deze zelf, als wel de verschillende bijzonderheden, die zij ten aanzien van de met hen meetbare straling bezitten, in het oog vatten.

Wij wijden hierbij in 't bijzonder een beschouwing aan gevoeligheid en nauwkeurigheid.

Van de eigenschappen, die van belang zijn, zouden wij een aantal bij iedere meetmethode weer ontmoeten. Om het overzicht te vergemakkelijken, zullen wij eerst deze, en daarna de voor ieder instrument karakteristieke bijzonderheden bespreken.

Een eerste algemeene eigenschap is de selectiviteit ten aanzien van verschillende golflengten, d.w.z., dat voor verschillende golflengten het verband tusschen opgevallen energie en aanwijzing anders is. Hiervoor zijn vele oorzaken aan te geven. Bij ieder instrument, dat om eenigerlei reden moet worden ingesmolten, treedt reeds selectiviteit op door de selectieve doorlating van het venster. Bij de thermische instrumenten komt hierbij de selectieve absorbtie van den ontvanger, bij de photographische plaat die van de emulsie. Ook kan het effect, waarop het principe der methode berust, selectief zijn.

Belangrijk is het, een onderscheid te maken tusschen de (meestal geringe) selectiviteit van de thermische en die van de overige instrumenten. De eerste kan n.l. uit zuiver monochromatische, relatieve metingen worden bepaald (men behoeft slechts de doorlating van het gebruikte venster, en de absorbtie van den ontvanger voor iedere golflengte te bepalen), terwijl de tweede slechts bekend kan worden, indien men een straling heeft, waarvan men de spectrale verdeeling kent.

De selectiviteit beperkt het golflengtegebied, waar het apparaat met voordeel kan worden gebruikt. Een verdere beperking kan worden opgelegd, doordat de fouten, storingen of nuleffecten in bepaalde gebieden een grootere rol kunnen gaan spelen (b.v. Geigerteller, photographische plaat).

Indien van een apparaat de ontvanger, of althans een deel ervan, homogeen gevoelig is, d.w.z. als de aanwijzing niet

afhangt van de wijze, waarop de intensiteit van de dit deel treffende straling hierover is verdeeld, kan het worden gebruikt om totale energiestroomen te meten. De inhomogeniteiten, welke slechts in technische onvolkomenheden hun oorsprong vinden, laten wij buiten beschouwing.

De aanwijstijd van de meeste instrumenten is van de orde van enkele seconden. Bij den Geigerteller en de photographische plaat kan men niet van aanwijstijd spreken. Deze zijn z.g. cumulatief in den tijd, hun aanwijzing is hiervan afhankelijk. Bij de visueele methodes speelt de geoefendheid van den waarnemer een belangrijke rol.

Ten slotte kunnen de instrumenten onderworpen zijn aan storingen van allerlei aard, waarvoor zij meer of minder gevoeligheid vertoonen. De het meest voorkomende zijn wel: mechanische, thermische en electriche storingen en storingen door vreemd licht. Men kan deze in vele gevallen hun invloed ontnemen door bijzondere opstelling (ophanging volgens *Julius*), warmteisolatie, afscherming of compensatie met eenzelfde instrument; zoo is de bolometer in zichzelf gecompenseerd.

Wij geven thans de gedragingen van de verschillende methoden ten aanzien van vorengenoemde hoedanigheden in tabel verzameld.

Sterker dan deze tamelijk algemeene eigenschappen spreken bij de keuze der meetmethode de kwaliteiten mede, die voor deze karakteristiek zijn, en die wij thans zullen gaan noemen.

De thermische instrumenten: radiometer, thermoelement, thermozuil en bolometer hebben allen dit gemeen, dat de stralingsmeting wordt teruggebracht tot een temperatuurmeting. De straling wordt opgevangen door een ontvanger, welke meestal gezwart is, waardoor deze instrumenten binnen wijde grenzen practisch geen selectiviteit bezitten en zij in staat zijn de totale energie te meten van een uit verschillende golflengten samengestelde straling. Om de temperatuursverhooging, welke de ontvanger door de absorbtie van de stralingsenergie krijgt,

zoo groot mogelijk te doen zijn, den aanwinstijd te verkorten en de thermische storingen te verminderen, worden thermo-element en bolometer vaak vacuum ingesmolten; dit insmelten gebeurt ook bij den radiometer om den gunstigen gasdruk te verkrijgen.

Instrument	Golfengtegebied	Selectiviteit	Homogeen gevoelig	Mechanische storingen	Thermische storingen	Electricische storingen
Radiometer	niet ingesmolten: $\overset{\circ}{\text{overall}}$ in glas: $3800 \overset{\circ}{\text{Å}} - 2 \mu$ in kwarts: $2000 \overset{\circ}{\text{Å}} - 2,5 \mu$ in fluoriet: $1400 \overset{\circ}{\text{Å}} - 10 \mu$ in steenzout: -20μ in sylvin: $-ca. 30 \mu$	weinig en door monochromatische relatieve metingen te bepalen	-	+	+	-
Thermoelement			-	-	+	+
Thermozuul			-	-	+	+
Bolometer			+	-	wei- nig	wei- nig
			+	-	-	+
Photospanningscel	$4000 \overset{\circ}{\text{Å}} - 9000 \overset{\circ}{\text{Å}}$	veel en niet door monochromatische relatieve metingen te bepalen	+	-	-	+
Photocel + gelijkstroomversterker	onder $1,2 \mu$		+	-	-	+
Photocel + wisselstroomversterker	onder $1,2 \mu$		+	-	-	+
Geigerteller	onder $2500 \overset{\circ}{\text{Å}}$		+	-	-	+
Photographische plaat	onder $1,3 \mu$		+	-	-	-
Visuele methodes	Zichtbare gebied en ultraviol. (fluor)	-	-	-	-	

Indien bij de thermische instrumenten de stationnaire toestand is bereikt, moet de ontvanger evenveel energie verliezen als hij ontvangt. De warmteafvoer geschiedt door geleiding,

straling, en event. convectie. Deze zijn niet alleen afhankelijk van de bereikte temperatuursverhoging, maar ook van de absolute temperatuur (vooral de straling), zoodat de gevoeligheid van deze instrumenten vrij sterk met de temperatuur kan variëren.

Van de genoemde instrumenten is de radiometer wel het eenvoudigste: in één systeem zijn zoowel de ontvanger als het aanwijzend mechanisme ondergebracht. Deze eenvoud brengt echter als nadeelen mede:

1. dat de registrering altijd ter plaatse moet geschieden,
2. dat de straling wordt opgevangen door een bewegend deel, en
3. dat mechanische storingen op de meetplaats grooten invloed kunnen hebben.

Hiertegenover staat, dat het apparaat geen elektrische storingen kent. (Een voordeel bij bestudeering van verschijnselen, waarbij sterke elektrische ontladingen optreden). Om thermische storingen te weren, kan het worden uitgevoerd met 2 vleugeltjes, echter ten koste van de snelheid.

De radiometer is een betrekkelijk weinig gebruikt instrument. Van een, geconstrueerd door *Moll* en *Burger*, deelen wij hier, met vriendelijke toestemming van de constructeurs, iets omtrent de gevoeligheid mede. De essentiele storingen komen overeen met een energiestroom van ca. $0,01 \text{ erg/cm}^2 \text{ sec.}$ bij een aanwijstijd van enkele seconden. De oppervlakte van den ontvanger is van de orde van 1 mm^2 .

Aan het thermoelement eigen is het bezit van een gevoelige plaats: de zône, waar de metalen, waaruit het is samengesteld, contact maken. Deze eigenschap kan alweer ten voordeele worden benut, en als nadeel optreden. Een voorbeeld van het eerste is de thermorelaisversterker volgens *Moll* en *Burger* (hoewel een dergelijke versterker zich ook met een homogeen gevoelig apparaat laat construeeren), van het tweede de microphotometer volgens *Moll* (daar aan de verschillende

punten van de spleet een verschillend gewicht wordt toegerekend).

De thermoziuil bestaat uit een aantal achter elkaar geschakelde thermoelementen. Men verkrijgt hierdoor bij eenzelfde energiestroom een hogere spanning. Daar de essentiële storingen (Brownsche beweging) weinig veranderen, is bij gelijken waarnemingstijd de fout kleiner dan bij 1 element. Men kan hierin een voorbeeld zien van de vervanging van het tijd-gemiddelde van één systeem door een gemiddelde van vele systemen in overeenkomstig korteren tijd.

Thermoziulen worden geconstrueerd met de actieve contactplaatsen in lijn, zoowel als over het vlak verspreid.

In tegenstelling met de voorgaande instrumenten is de bolometer praktisch homogeen gevoelig, waardoor hij, mede door zijn eenvoudigheid te bepalen selectiviteit, in combinatie met monochromator het aangewezen instrumentarium vormt voor primaire spectraalphotometrische precisieingen. Dat men over een hulpenergiebron (accu) moet kunnen beschikken is nauwelijks een bezwaar te noemen, gezien de geringe eischen, die hieraan worden gesteld.

De gevoeligheid van de fotospanningscel schijnt van vele slecht-controleerbare omstandigheden af te hangen en kan daardoor van oogenblik tot oogenblik wisselen. Behalve deze kan zij nog eenige onaangename eigenschappen bezitten, zooals het „kruipen naar de eindaanwijzing” bij kleinere intensiteiten, „Eberhard-effect” (analoog aan de photographische plaat) en gevoeligheid voor vocht, verschillende dampen, hooge temperaturen en sterke bestraling. Volgens veler ervaring zijn de cellen met koperoxydulelaag te dien opzichte te verkiezen boven die met seleenlaag. Een en ander is echter in hooge mate afhankelijk van de kwaliteit der cel. Kan men door keuze van omstandigheden of wijze van werken de invloed van genoemde eigenaardigheden te niet doen, dan bezit

men in de photospanningscel een snel en gevoelig instrument van eenvoudigen bouw. Een voorbeeld van gunstig gebruik is b.v. de meting van absorbties van sterk strooiende stoffen, waar men, door de cel tegen de stof aan te leggen, nog aanzienlijke winst aan gevoeligheid kan boeken.

Aanverwant aan de photospanningscel, maar van minder eenvoudigen bouw en niet behept met de vele eigenschappen, die deze onbetrouwbaar kunnen maken, is de photocel. Door het feit, dat zelfs bij zeer kleine intensiteiten nog geen bijzondere eigenaardigheden optreden en de Brownsche stroomstoringen door den hoogen weerstand der cel zeer klein zijn, loont het, de photostroomen met behulp van lampversterkers vele malen te versterken. Naar het type der versterkingsmethode kan men twee soorten onderscheiden, die met gelijken die met wisselstroomversterking. Beide hebben het voordeel van groote gevoeligheid, de tweede heeft echter nog de bijzonderheid, alleen straling, waarvan de intensiteit met bepaalde periode wisselt, aan te wijzen. (Alleen wisselingen in den photostroom, waarvan de frequentie nagenoeg samenvalt met de frequentie van den versterker, worden n.l. versterkt.) Door gebruik te maken van deze eigenschap is het b.v. mogelijk, de absorbtie te meten van lichtende gaslagen, zonder door dezer eigen emissie te worden gestoord. (Men behoeft slechts de lichtbron, waarvan men de straling wil laten absorbeeren, met dezelfde frequentie te laten wisselen, als waarmede de versterker werkt.) Een merkwaardigheid is verder, dat men dit instrument met zichzelf kan compenseeren (door twee lichtbronnen te nemen en deze zoo in lichtsterkte te laten wisselen, dat de op de cel vallende straling een constante intensiteit heeft).

Een vierde photoelectrische methode is die met den Geiger-teller. Tusschen dit en de voorgaande instrumenten van deze klasse bestaat een essentieel verschil in de wijze, waarop de photostroom wordt bepaald. Bij de cellen wordt deze n.l. „als

continuum" gemeten, terwijl hij hier wordt vastgelegd door de electronen te tellen, die in zekeren tijd worden vrijgemaakt. Ieder electron geeft aanleiding tot het ontladen van een condensator (de ontvanger zelf), waardoor het registreerend mechanisme in werking wordt gesteld. Wil een volgend electron worden meegeteld, dan moet intijds deze condensator weer voldoende worden opgeladen. De tijdsduur, die tusschen het vrijmaken van twee electronen verloopt, moet dus zoo groot zijn, dat dit opladen hierin kan geschieden, d.w.z. de intensiteit van de opvallende straling mag een bepaalde waarde niet overschrijden. Gebeurt dit toch, dan „slaat de teller dicht", het aantal geregistreerde electronen is geen maat meer voor het aantal vrijgemaakte, maar hangt slechts af van de oplaadsnelheid van genoemde condensator, d.i. een apparaatconstante. Bij de constructie van den teller heeft men deze, en dus de maximale meetbare energie, door de keuze van verschillende grootheden binnen wijde grenzen in de hand.

Behalve door de te meten straling kunnen ook door andere oorzaken (b.v. thermische emissie) electronen aanwezig zijn. Deze veroorzaken een aanwijzing, zonder dat licht op den teller valt, het z.g. nuleffect. Men kan hun aantal hieruit bepalen.

De voordeelen van den teller beginnen op den voorgrond te treden bij golflengten, kleiner dan ca. 2500 Å. Bij grotere gaat het nuleffect een belangrijke rol spelen, omdat de materialen, waarvan de gevoeligheidsgrens hooger ligt, ook een grotere thermische emissie vertoonen.

Door de hooge weerstanden, die in de electriche schakeling van den Geigerteller zijn verwerkt, is hij bijzonder gevoelig voor vocht wegens de hierdoor veroorzaakte lekstroomen, die moeilijk te stuiten zijn.

De photographische plaat heeft met den Geigerteller gemeen, dat de aanwijzing van den meettijd afhangt. De wijze, waarop dit het geval is, is echter bij de plaat gecompliceerder dan bij den teller, waar de aanwijzing in doorsnee evenredig met den

tijd toeneemt. Daar zij bovendien bij iedere plaat weer anders kan zijn, is de photographische methode slechts als nulmethode te gebruiken.

Ten aanzien van de eigenschappen der stralingen, die als object kunnen dienen, biedt zij eenige buitengewoon groote voordeelen:

1. Het oplossend vermogen kan zeer groot zijn. Zelfs van de gevoeligste emulsie bedraagt dit reeds enkele honderdsten milimeter en ten koste van de gevoeligheid is dit zoover op te voeren, dat met een microscoop geen gekorreldeheid meer is waar te nemen ($< 0,1 \mu$).

2. Het is op eenvoudige wijze mogelijk, een groot aantal intensiteiten en constellaties gelijktijdig vast te leggen.

3. De methode is niet onderhevig aan storingen.

Het zijn deze eigenschappen, die tezamen met de groote gevoeligheid het groote succes van deze methode in de atoomphysica hebben verzekerd.

Er staan echter een paar nadeelen tegenover:

1. Iedere plaat moet geijkt worden; de metingen worden daardoor vrij bewerkelijk.

2. De aanwijzing, door een straling van verschillende frequenties veroorzaakt, hangt op gecompliceerde wijze samen met die, welke door ieder van deze frequenties apart zou worden teweeggebracht; hiervoor geldt de z.g. somwet van Van Kreveld.

3. De aanwijzing moet welhaast met een der andere methodes verwerkbaar worden gemaakt.

Ten slotte wijden wij nog enkele woorden aan de visuele methodes.

Allereerst willen wij ons kanten tegen de bewering, dat deze subjectief zouden zijn, tenzij hiermede het geven van een definitie voor dit laatste begrip bedoeld is. Wil men echter onder subjectiviteit verstaan de eigenschap, dat de persoon van den waarnemer invloed kan hebben op de resultaten, dan mag men de visuele physische methodes niet subjectief

noemen, als men het b.v. de thermoelectrische niet ook doet.

De visueele methodes zijn te verdeelen in twee klassen, die met simultane en die met successieve waarneming. Het volmaaktste instrument van de eerste klasse is de spectraalpyrometer. Deze wijkt van alle vorige instrumenten daardoor af, dat er noodzakelijk reeds een spectraalapparaat aan is verbonden. Dit veroorzaakt de volgende bijzonderheden:

1. De metingen geschieden spectraal.
2. Men meet de spectrale oppervlaktehelderheid, d.i. de energie, die per cm^2 , per sec., per \AA en per eenheid van ruimtehoek door het meetvlak stroomt.
3. Men meet deze hoofdzakelijk van het licht, dat loodrecht op de dispersierichting van het apparaat trilt (doordat dit polariseerend werkt).

Bijzondere vermelding verdient hier de volgende wijze van gebruik van het instrument: op de plaats van het meetvlak brengt men een scherm aan, dat berookt is met magnesiumoxyde of magnesiumcarbonaat en meet hiervan met den spectraalpyrometer op de gewone wijze de helderheid. Men bereikt dan 2 dingen tegelijk:

1. Uit de gemeten helderheid kan men besluiten tot de energiestroom door het meetvlak.
2. Door de volkomen depolariseerende werking van het witte scherm verliest een eventueel gepolariseerd zijn van het opvallende licht zijn invloed.

Het apparaat biedt verder als voordeelen:

1. Door het groote aanpassingsvermogen van het oog en de ongeveer logarithmische aanwijzing bestrijkt men snel een groot intensiteitsgebied (meting van kleine doorlatingen).
2. het heeft geen storingen.

Wij willen hier in verband met de toepassing in het tweede deel wijzen op een mogelijke bron van fouten. De grondslag, waarop het instrument is gebaseerd, is deze, dat men den gloeistroom van een lampje een zoodanige waarde geeft, dat men, den draad hiervan in een bepaalde golflengte beschouwende tegen het meetvlak als achtergrond, geen verschil in

helderheid kan constateeren. In de practijk is het natuurlijk niet mogelijk, één enkele golflengte te gebruiken. Men moet zich bepalen tot het waarnemen van een grooter of kleiner golflengtegebied. Hierdoor ziet men in het spectraalapparaat (het oog bevindt zich tegen de uittreespleet en het pyrometerlampje wordt afgebeeld in de nabijheid van het prisma) een reeks monochromatische beelden van den gloeidraad en van den achtergrond. Indien de spectrale verdeelingen van beiden weinig verschillen, is dit geen bezwaar, daar dan in alle beelden gelijk de draad nagenoeg verdwijnt. Anders wordt dit, als de twee energieverdeelingen sterk verschillen. Men ziet dan over elkaar een reeks beelden van den gloeidraad met zekere intensiteitsverdeling en een reeks beelden van den achtergrond met een sterk afwijkende verdeling, waardoor men den draad niet tot verdwijnen kan brengen. Slechts in één geval ontstaat deze moeilijkheid niet: Indien de gloeidraad van het pyrometerlampje een rechte, in de dispersierichting gespannen draad is. Er treedt dan geen overdekking van de beelden van den draad door die van den achtergrond op.

Een tweede punt is, dat men bij het pyrometreeren van kleine objecten bedacht moet zijn op de physiologische (en ev. psychologische) effecten, die daarbij kunnen optreden. Wil men de sterkte van het door kleine (of ver verwijderde) objecten uitgezonden licht visueel bepalen, dan kan men veiliger het object in het oog afbeelden. Dit neemt de afbeeldende lens dan als een egaal lichtend vlak waar, en hiervan kan men de helderheid bepalen (Maxwellian view).

Over het algemeen is het noodig, om, als men met de simultane waarneming groote nauwkeurigheid wil bereiken, de grens tusschen meetvlak en vergelijkingsvlak zoo scherp mogelijk te doen zijn. Dit brengt mede, dat de lichtbundels, waarmede wordt gewerkt, nauw zijn. Hierin ligt hoofdzakelijk de oorzaak van de groote winst, die men behaalt bij successieve waarneming. Doordat men hier object en vergelijkingsobject na elkaar waarneemt, worden aan de optische eigenschappen geen groote eischen gesteld. De verkregen gevoeligheids-

toename kan men b.v. gebruiken om het lichtverlies bij het gebruik van fluoresceerende schermen te compenseeren, waardoor het ultraviolette gebied voor de visueele methodes toegankelijk is gemaakt. Men verwarre het principe van successieve waarneming niet met dat van den flikkerphotometer, welke nooit als physisch instrument wordt gebruikt. De periode der wisselingen bij de successieve waarneming is vrij groot (ca. $\frac{1}{3}$ sec.), zoodat men zich nog in het gebied van normaal zien bevindt. Bij den flikkerphotometer wordt de frequentie juist zoo gekozen, dat dit niet het geval is.

NAUWKEURIGHEID EN GEVOELIGHEID.

De in het dagelijksch leven gebruikte begrippen zijn in 't algemeen niet gedefinieerd met die scherpte en exactheid, die men van een wetenschappelijke definitie eischt. Indien men dan ook in de wetenschap een uitdrukking overneemt, met de bedoeling, hierdoor het begrip over te nemen, is het gewoonlijk noodig scherp vast te stellen, wat met de overgenomen uitdrukking zal worden bedoeld. Deze bezit echter een zekere gevoelswaarde, die zich niet in enkele woorden laat weergeven. Aan den anderen kant wil men ook niet teveel hiervan afwijken. Het geven van een juiste definitie is daarom vaak moeilijk en in vele gevallen wordt dit dan ook achterwege gelaten. Zoo ongeveer is ook de toestand, waarin de begrippen „nauwkeurigheid” en „gevoeligheid” verkeeren. Het bezwaar hiervan is, dat zij daardoor geen absolute waarde bezitten. Wij allen voelen, wat de woorden „nauwkeurig” en „gevoelig” tot uiting moeten brengen: het eerste zegt iets omtrent de fout, waarmede kan worden gemeten, het tweede over de grootte van een effect, dat kan worden aangetoond. Maar men noemt eenzelfde meetmethode nauwkeurig of onnauwkeurig, gevoelig of ongevoelig, al naar het geval, waarin men verkeert.

Na deze inleiding zal de lezer allicht verwachten dat hierthans voor beide begrippen juiste definities zullen volgen. Hij

zal echter in deze verwachting worden teleurgesteld. Wij zullen betoogen, waarom.

Het is duidelijk, waarom men de genoemde begrippen in de natuurkunde wil invoeren. Men wenscht de meetmethodes, die tot eenzelfde doel gebruikt kunnen worden, te vergelijken in hun economie (de zaak is dus niet wezenlijk, doch slechts practisch physisch).

Bezien wij eerst de (niet systematisch veronderstelde) fout, die wij te verwachten hebben, indien wij met een instrument een grootheid gaan meten. Deze zal afhangen van den tijd, dien wij beschikbaar hebben en kleiner zijn, naarmate deze langer is. Wij kunnen haar zoo klein maken, als wij willen, door slechts lang genoeg waar te nemen. Indien wij ons met een bepaalde fout tevreden stellen, zal de tijd, noodig om deze te bereiken, echter bepaald zijn. (Men kan hierbij een waarneming met één instrument gedurende eenigen tijd vervangen door een met vele instrumenten gedurende een overeenkomstig korteren tijd). Wij zien, dat er een samenhang is tusschen instrument, te meten effect, meettijd en te verwachten fout.

Bezien wij thans de grootte, die een effect moet hebben, om met een instrument te kunnen worden aangetoond. Een eerste vraag is, wat hieronder verstaan moet worden. Spreken wij af, dat het effect als aangetoond zal worden beschouwd, als de te verwachten fout een bepaald bedrag niet meer overschrijdt. Zooals wij hebben gezien, kan zij echter zoo klein worden gemaakt, als men wenscht, door lang genoeg waar te nemen, d.w.z. de kleinheid van een effect kan nooit de oorzaak zijn, dat het met een bepaald instrument niet kan worden aangetoond, maar de tijd, dien wij voor dit aantoonen noodig zouden hebben, kan voor verschillende instrumenten anders zijn. Hij is echter door de verstrekte gegevens volkomen bepaald. Wij komen terecht op denzelfden samenhang tusschen instrument, effect, meettijd en te verwachten fout.

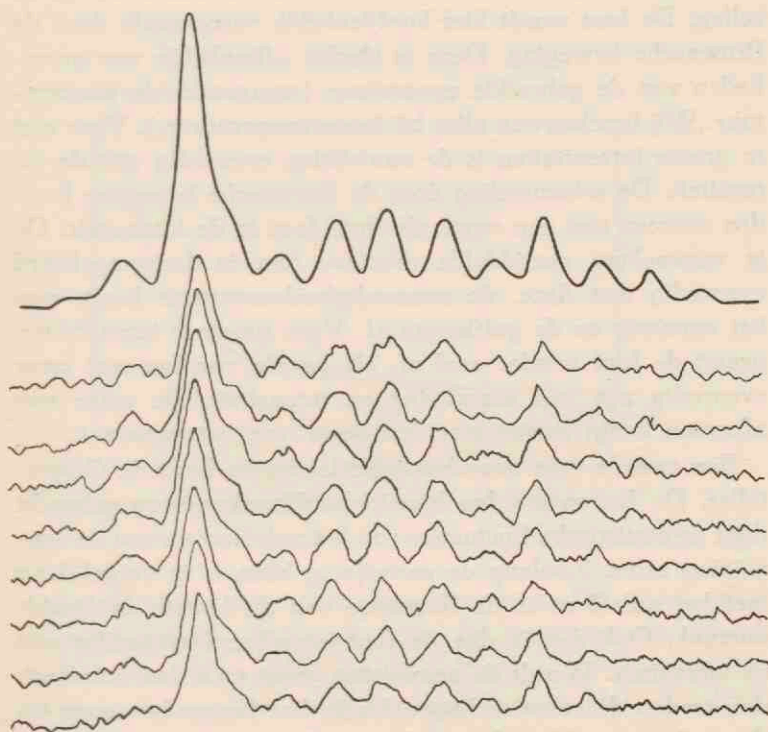
Wij kunnen dus zeggen:

De fout, die men bij meting van stralingsenergie in bepaalde tijd moet verwachten, is voor ieder apparaat een eenduidige functie van de grootten van deze energie en tijdsduur. Slechts door de geheele functie (of een daarmede gelijkwaardig gegeven) zijn de prestaties van het apparaat volkomen gekarakteriseerd. Waar deze „nauwkeurighedsfuncties” voor verschillende instrumenten van geheel anderen aard kunnen zijn, heeft een poging, de „gevoeligheid” of „nauwkeurigheid” in een enkel getal vast te leggen, naar onze meening geen zin. Op deze wijze kan slechts een valsch beeld van de beschikbare meetmethodes worden verkregen.

Alvorens ertoe over te gaan, voor eenige hiervan de bovenbedoelde functie kort te bespreken, willen wij eerst nog even den nadruk leggen op een enkel punt. De fouten, die wij hier beschouwen, zijn die, welke voor het instrument essentieel zijn, welke het noodzakelijk moet maken. Systematische en door verandering van de omstandigheden veroorzaakte fouten kunnen hierin niet worden betrokken. Het zij den waarnemer toevertrouwd, hen onschadelijk te maken. Iedere precisie-meting komt neer op het vermijden van systematische fouten en het beheerschen van de omstandigheden.

Zooals wij hebben gezien, is de te verwachten fout een functie van de grootte van de te meten energie, zoowel als van die van den duur der waarneming. (Hieronder verstaan wij slechts den tijdsduur, gedurende welke men het object ter beschikking moet hebben.) Van deze afhankelijkheden is de laatste de eenvoudigste. Bij alle meetmethodes toch kan men de fout laten afnemen met den wortel uit den tijd (omdat zij van toevalligen aard is). Slechts bij de photographische methode is, zooals blijken zal, soms een sterkere afname mogelijk. Indien dus de waarden van onze functie voor één tijd bekend zijn, zijn zij voor alle andere tijden vastgelegd. De in dezen tijd te verwachten relatieve fout stijgt voor alle instrumenten, als men de intensiteit tot 0 vermindert, onbegrensd. Al

overtreft zij echter het te meten effect in grootte, zoo kan men dit toch met slechts geringe fout vastleggen, als men weer lang genoeg waarneemt. Een voorbeeld, waar door vele registraties de toevallige fouten hun invloed verliezen, is gegeven in fig. 1.



Figuur 1.

Voorbeeld van verhooging van de nauwkeurigheid door vele waarnemingen. Men ziet hoe de structuren, die in de registraties (de onderste krommen) door de storingen worden vertekend, in de gemiddelde kromme (de bovenste) tot uiting komen. (Ontleend aan L. S. Ornstein en W. Dekkers, Zeeman-gedenkboek.)

Om van een instrument de nauwkeurighedsfunctie op te maken, moeten wij allereerst opsporen, wat de essentiele foutenbronnen zijn, en hun invloed op de aanwijzing nagaan.

Vervolgens bepalen wij, welke fout in de intensiteit door deze onbepaaldheid in de aanwijzing wordt veroorzaakt.

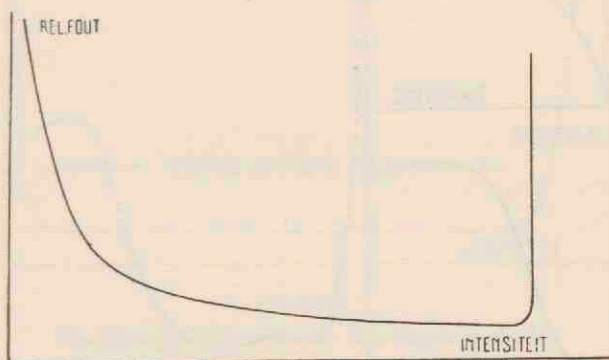
Wij kunnen dan naar de algemeene trekken van de nauwkeurighedsfunctie de hier besproken methodes in vier klassen onderbrengen.

De eerste klasse omvat de thermische instrumenten en de cellen. De fout wordt hier hoofdzakelijk veroorzaakt door de Brownsche beweging. Deze is slechts afhankelijk van grootheden van de gebruikte apparatuur (waaronder de temperatuur. Wij beschouwen alles bij kamertemperatuur.). Voor niet te groote intensiteiten is de aanwijzing evenredig met de intensiteit. De schommeling door de Brownsche beweging komt dus overeen met een vaste absolute fout in de intensiteit. De te verwachten gemiddelde relatieve fout is dus omgekeerd evenredig met deze, de evenredigheidsconstante hangt van het apparaat en de golflengte af. Voor grootere intensiteiten neemt de fout minder snel af, als gevolg van het niet meer evenredig zijn van aanwijzing en intensiteit. De wijze van afnemen hangt samen met den bouw van het apparaat.

Een tweede type nauwkeurighedskromme bezit de Geiger-teller. De fouten worden hier in hoofdzaak teweeg gebracht door de statistische fluctuaties van het nuleffect en van de aanwijzing zelve. Zoolang de aanwijzing klein is in vergelijking met het nuleffect, is de fluctuatie van dit laatste de hoofdoorzaak. Ook dan is dus de fout omgekeerd evenredig met de intensiteit. Wordt de aanwijzing groot t.o.v. het nuleffect, dan treden de schommelingen hierin hoe langer hoe meer op den achtergrond en die in de aanwijzing worden bepalend. De theorie leert, dat dan de relatieve fout omgekeerd evenredig met den wortel uit de intensiteit zal zijn. Dit blijft zoo, tot de teller dicht gaat slaan. Een toename van de intensiteit doet dan de aanwijzing niet meer toenemen: in de buurt van de critische intensiteit stijgt de fout snel en onbegrensd (fig. 2).

De photographische plaat levert ons het derde type functie. De omstandigheden zijn hier ingewikkelder, wat te wijten is aan

het feit, dat de gemiddelde fluctuatie in de zwarting afhangt van de gebruikte oppervlakte. Zij is omgekeerd evenredig met den wortel hieruit, zoolang deze groot is in vergelijking met de correlatieoppervlakte der gekorreldeheid. (Deze is volgens nog niet gepubliceerde metingen van *Van Kreveld* zeer klein.) Wij beschouwen dus een bepaalde oppervlakte.

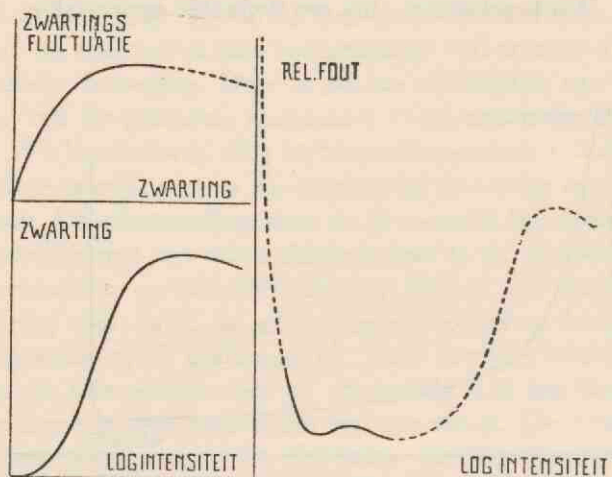


Figuur 2.

Nauwkeurighedsfunctie van een Geigerteller.

Er zijn hier weer twee foutenbronnen. De eerste is de reeds genoemde fluctuatie van de zwarting, de tweede is die van den sluier (= nuleffect). Wij zouden hier analoog met onze vorige redeneering kunnen handelen, indien wij wisten, hoe de samenhang tusschen de zwarting en haar wisselingen is. Liever geven wij in fig. 3 als voorbeeld een graphische voorstelling van een photographische nauwkeurighedsfunctie, waarvan het getrokken deel (dat voor de practijk van belang is) ontleend is aan ongepubliceerde metingen van *Van Kreveld*, terwijl het verder is geschematiseerd. Het eigenaardige verloop is het gevolg van de samenwerking van twee factoren, n.l. de samenhang van de zwarting en haar fluctuaties, en die van zwarting en intensiteit

(Het eerste minimum treedt niet bij alle platen op). Bij zeer kleine intensiteiten is de fluctuatie in den sluier de grootste foutenbron. De absolute fout blijft constant; de relatieve is dus weer omgekeerd evenredig met de intensiteit.

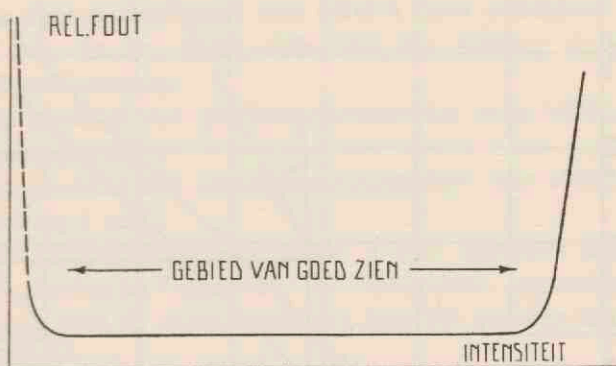


Figuur 3.

Nauwkeurighedsfunctie van een photographische plaat.

De vierde klasse wordt gevormd door de visuele methodes. Het veranderlijk zijn van de beperktheid van het onderscheidingsvermogen van het oog geeft hier de onbepaaldheid. De relatieve fout blijkt in het gebied van goed zien praktisch constant te zijn. Bij de kleinere en grotere intensiteiten neemt zij snel en onbegrensd toe. (fig. 4). Bij de intensiteiten onder de drempelwaarde van het oog doet zich nog het volgende voor. Het instrument is daar natuurlijk niet meer te gebruiken. Toch is de absolute fout, die men moet verwachten, kleiner dan de drempelwaarde van het oog, en onafhankelijk van de intensiteit. De relatieve fout is dus weer omgekeerd evenredig met deze. Niettegenstaande het feit, dat de functie dus volkomen bepaald is, wil het ons toeschijnen, dat dit deel der

kromme (het gestippelde) geen zin heeft. De kans op een bepaalde aanwijzing hangt b.v. niet van de intensiteit af, en men zal door meer waarnemingen geen betrouwbaarder resultaat kunnen verkrijgen.

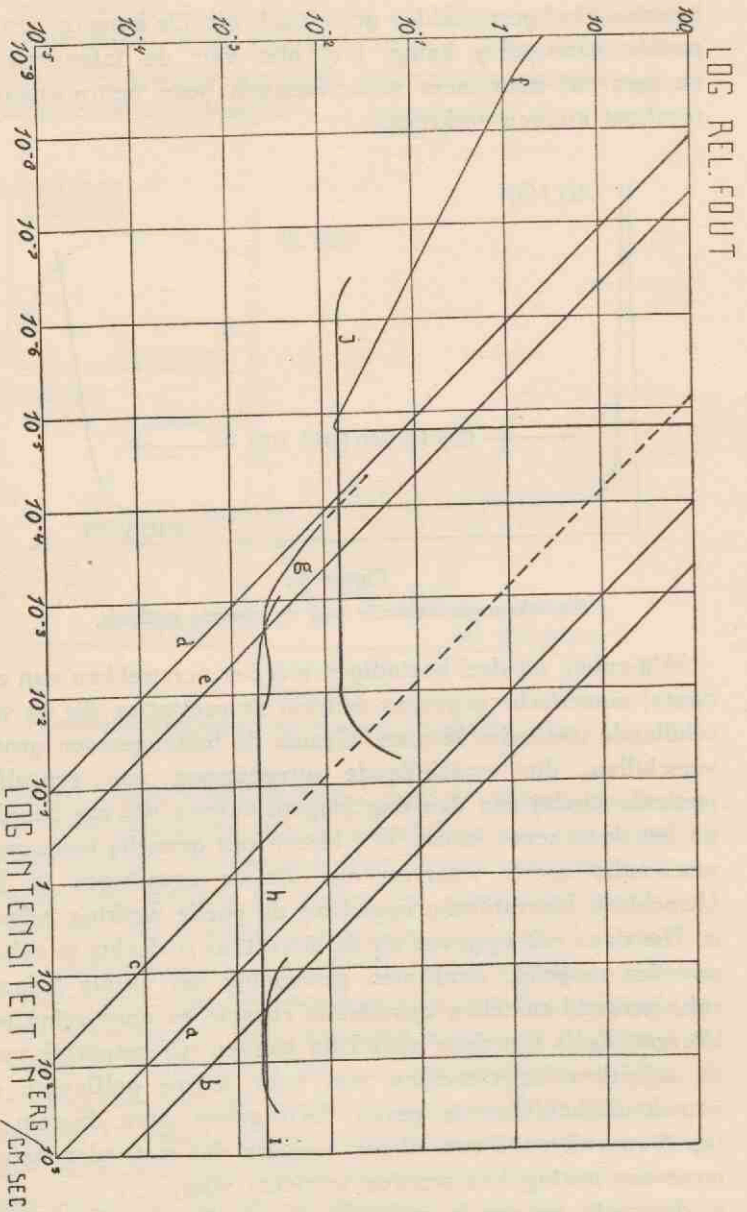


Figuur 4.

Nauwkeurighedsfunctie van de visuele methode.

Wij zullen dit deel beëindigen met het verstrekken van een aantal numerische gegevens omtrent de prestaties, die de verschillende methodes leveren. Gezien de buitengewoon grote verschillen, die verschillende uitvoeringen van eenzelfde methode hierbij aan den dag leggen, moeten wij ons bepalen tot het doen eener keuze. Wij kiezen een gevoelig instrument van ieder soort, waarvan ons uit de ervaringen in het Utrechtsch laboratorium opgedaan de goede werking bekend is. Het doen van opgaven uit de litteratuur is slechts in enkele gevallen mogelijk, daar men gewoonlijk het weinig belangrijke verband tusschen opvallende energie en aanwijzing publiceert. Zelfs met deze beperking kunnen wij natuurlijk voor de selectieve instrumenten niet voor iedere golflengte de nauwkeurighedsfunctie geven. Wij geven deze daarom in fig. 5 voor den tijd van 10 sec. (waarin dus met ieder instrument een meting kan worden verricht) voor:

a. de reeds genoemde radiometer, een thermozuil in lucht,



Figuur 5.

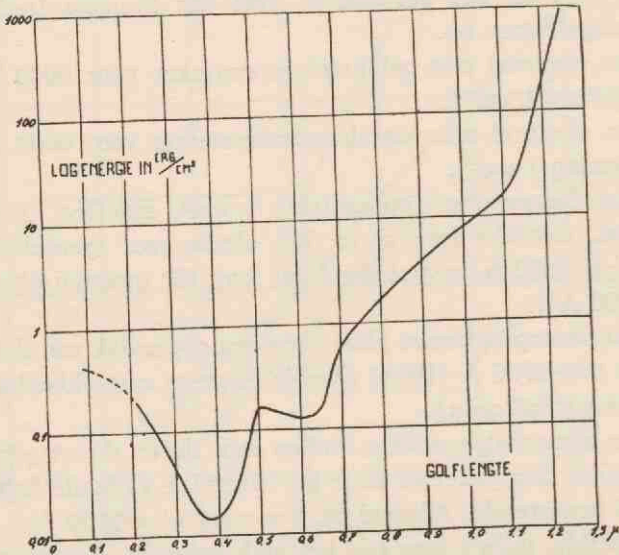
Nauwkeurigheidfunctie voor verschillende methodes (verklaring zie tekst).

- (bestaande uit 18 elementen met contactplaatsen in lijn, ieder element lang ca. 8 mm, breed ca. 0,5 mm, dik ca. $0,7 \mu$) en een vacuumbolometer (bandje lang 1 cm, breed 1 mm, dik $0,7 \mu$).
- b. een thermoelement (lang 1 cm, breed 0,6 mm, dik $0,7 \mu$).
 - c. een fotospanningscel voor 6000 \AA (met seleenlaag, diam. 3 cm). In het gestippelde deel der kromme treden de kruipeffecten op.
 - d. een photocel met gelijkstroomversterker voor 6000 \AA (K, opening 1 cm^2).
 - e. een photocel met wisselstroomversterker voor 6000 \AA (K, opening 1 cm^2).
 - f. een Geigerteller (oppervlakte 3 cm^2 , nuleffect 2 elect./min., kritische frequentie 500 electr./sec., gevoeligheids-grens 2600 \AA , gevoeligheid der laag 10^4 quanten/electr. bij 2200 \AA).
 - g. een photographische plaat voor een oppervlak van $0,3 \text{ mm}^2$ en $\lambda = 3700 \text{ \AA}$ (Ilford Double-X-press, ontwikkeld 6 min. met metholborax).
 - h. den spectraalpyrometer, indien men dezen direct gebruikt, daarbij den geheelen door het meetvlak vallende lichtbundel benuttende. Afstand ca. 1 m voor $\lambda = 5600 \text{ \AA}$.
 - i. dezelfde, indien men een wit vlak gebruikt, eveneens voor 5600 \AA .
 - j. de successieve waarneming $\lambda = 5600 \text{ \AA}$.

In fig. 6 is voor de photographische methode weergegeven de totale energie, die men (bij een belichtingstijd van enkele seconden) noodig heeft om het gunstige zwartingsgebied (d.i. kort voor 't eerste minimum in de nauwkeurigheidskromme) te bereiken. De plaatsoorten, waarvoor deze gegevens gelden zijn:

- < 2000 \AA Schumannplaten (ev. „Q” platen)
- $2000 - 2500 \text{ \AA}$ Ilford „Q” (gevoeligste: „Q” 3)
- $2500 - 4900 \text{ \AA}$ Ilford Double-X-press
- $4900 - 6500 \text{ \AA}$ Ilford hypersensitive panchromatic

om 7000 Å	Agfa infrarood	„700”
„ 7500 Å	„	„750”
„ 8000 Å	„	„800”
„ 8500 Å	„	„850”
„ 9500 Å	„	„950”
10000—13000 Å	„	„1050”



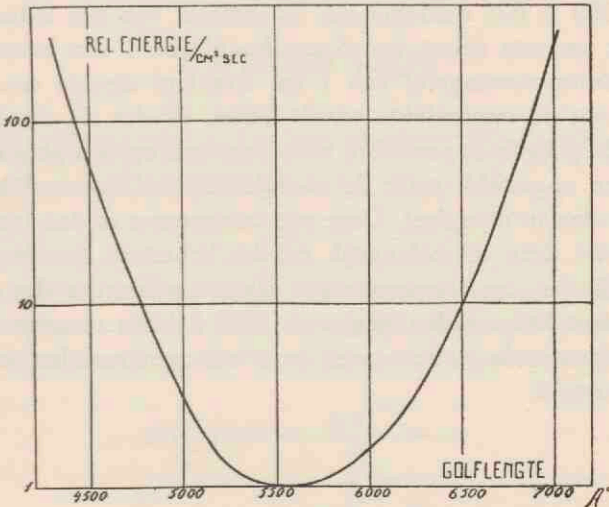
Figuur 6.

Energie, noodig voor het bereiken van de gunstige zwarting bij de photographische plaat in enkele seconden.

Bij het samenstellen van deze gegevens is gebruik gemaakt van publicaties van Agfa (deel 4, bl. 103) voor het infrarode en van *Van Kreveld* (Photogr. Journal Juli 1934) voor het nabije ultraviolette gebied. Het gestippelde deel der kromme achten wij minder betrouwbaar.

Voor de visuele methodes geven wij in fig. 7 de energieverhouding, waarmede men rekening moet houden, indien men de nauwkeurighedsfunctie voor andere golflengten wensch te kennen.

Wij geven geen spectrale gevoeligheden van de cellen, daar deze van verschillende cellen (zelfs van eenzelfde type) nogal uiteen kunnen lopen. De weergegeven kromme in fig. 5 geeft een indruk van de gevoeligheid.



Figuur 7.

Energie, noodig om de visuele methodes te kunnen gebruiken (relatief).

Tot slot willen wij nog een paar opmerkingen maken.

Met de thermische instrumenten, de photocellen, den Geiger-teller, en de visuele methodes kan men de aangegeven nauwkeurigheid zonder veel moeite bereiken. Met de photospanningscel is dit slechts in enkele gevallen mogelijk, wegens de genoemde slechte eigenschappen. De aangegeven nauwkeurigheid bij de photographische plaat kan men bereiken, als men twee objecten vlak naast elkaar op de plaat vergelijkt. Bij den huidige stand der techniek heeft het geen zin, een veel grootter oppervlak dan het genoemde te gebruiken, daar men de hierdoor verkregen winst in de zwartingsfluctuaties verliest door de inhomogeniteiten der plaat. Vergelijkt men geen dicht bijeen op de plaat gelegen velden, dan kan men zelfs bij

goede platen niet rekenen, een fout kleiner dan 2 % te bereiken.

De tweede opmerking betreft het eventueel te gebruiken spectraalapparaat. Bij de keuze van het meetinstrument dient men met de eigenschappen hiervan terdege rekening te houden. Het is b.v. duidelijk dat bij gebruik van een monochromator met een spleet van 6 mm hoogte en 1 mm breedte en een fotospanningscel van 1 cm straal of slechts een klein deel van de oppervlakte wordt benut, òf dat de cel, indien men de geheele oppervlakte wil gebruiken, op een plaats moet worden opgesteld, waar de energiedichtheid aanzienlijk kleiner is dan in de spleet. Deze monochromator is dan ten aanzien van deze cel belangrijk minder lichtsterk dan ten aanzien van b.v. een thermoelement van 1 mm breedte, dat dus in de spleet kan worden geplaatst. Wij hebben daarom bij de bovengenoemde instrumenten de afmetingen van den ontvanger vermeld.

TWEEDE DEEL

EEN BEPALING VAN DE EERSTE STRALINGS- CONSTANTE VAN PLANCK.

Inleiding.

De straling, welke wordt uitgezonden door een volkomen zwart lichaam, d.i. een lichaam, dat alle er opvallende straling absorbeert, wordt beschreven door de stralingswet van *Planck*:

$$E(\lambda, T) = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1}.$$

Hierin stelt $E(\lambda, T)$ de energie voor, die, indien T de temperatuur van het lichaam is, in de golflengte λ wordt uitgezonden per eenheid van oppervlakte, ruimtehoek, golflengte en tijd in de richting loodrecht op het stralend oppervlak, en c_1 en c_2 zijn van de keuze der eenheden afhankende constanten.

De constante c_2 werd op velerlei wijze bepaald; c_1 daarentegen is slechts door zijn samenhang met andere constanten bekend en voor zoover wij weten nooit, althans niet nauwkeurig, door metingen van de spectrale helderheid van de zwarte straling bepaald. Het leek ons daarom dienstig, met de thans bereikbare nauwkeurigheid (0,1 %) een bepaling van deze constante uit metingen van de spectrale helderheid der zwarte straling te ondernemen. Wij brengen in het volgende een kort verslag van onze metingen uit.

Synthese der meetmethode.

Voor een directe bepaling van c_1 uit de wet van *Planck* heeft men in de eerste plaats noodig:

1. een straling, die met voldoende nauwkeurigheid door deze wet beschreven wordt of er op bekende wijze mede samenhangt. (Bijv. temperatuurstraler van bekend absorbtievermogen).

2. een instrument, waarmede met voldoende nauwkeurigheid stralings-energie in absolute maat kan worden gemeten.

De eenvoudigste, zoo niet eenige wijze, om de vereischte zwarte straling te verkrijgen, is gebruik te maken van een holte in een lichaam van gelijkmatige temperatuur. De in een gesloten holte vervatte straling voldoet exact aan genoemde wet; om haar echter te kunnen meten, is het welhaast noodzakelijk, een opening aan te brengen, waardoor zij naar buiten kan treden. Door het aanbrengen van deze opening ontstaan afwijkingen, die echter tegenover de meetfouten te verwaarloozen zijn, als het lichaam goed geconstrueerd is. Om de temperatuur op eenvoudige wijze te kennen, brengt men in de holte een hoeveelheid stof, waarvan de smeltemperatuur langs gasthermometrischen weg bepaald is. Men verhoogt nu langzaam de temperatuur van het geheel, tot genoemde stof begint te smelten; het is technisch moeilijk, de dan bereikte temperatuur te handhaven.

De op deze wijze verkregen straling heeft dus de volgende eigenschappen:

1. Zij is afkomstig van een betrekkelijk kleine opening in een omgeving, die zelf vrij sterk straalt, en treedt daar in een nauwe bundel uit (tengevolge van de constructie van het lichaam).

2. Zij is continu over alle golflengten verdeeld.

3. Zij wordt met een vrij lage temperatuur beschreven, daar met den gasthermometer slechts vrij lage smeltemperaturen kunnen worden gemeten.

4. Deze temperatuur verandert in den loop van den tijd en is slechts gedurende korten tijd nauwkeurig bekend. Als ge-

volg hiervan verandert ook de straling in den loop van den tijd.

Het meetinstrument, waarmede het nauwkeurigst straling in absolute maat kan worden gemeten, is de door *Wouda* geconstrueerde bolometer, waarmede zeker een nauwkeurigheid van 0,085 % bereikt kan worden. Dit wil natuurlijk niet zeggen, dat deze nauwkeurigheid ook altijd bereikt wordt. De straling, welke gemeten moet worden, zal daartoe vrijwel aan de volgende voorwaarden moeten voldoen.

1. Zij moet over een bepaald oppervlak groot ca. $5 \times 1 \text{ cm}^2$ gelijkmatig zijn, en hier ongeveer loodrecht opvallen. De dit oppervlak treffende straling wordt n.l., vergeleken met electrisch toegevoerde energie. Om de stralingsdichtheid te kennen moet dus de oppervlakte bekend en daarom niet te klein zijn.

Gemeten wordt verder de geabsorbeerde energie. De absorptie is slechts bij loodrechten inval bekend, en voor golflengten tusschen 5000 en 7000 Å. Een volgende eisch is dus:

2. Zij moet in een bepaald golflengtegebied vallen. Bovendien moet haar spectrale samenstelling bekend zijn, omdat de absorptiecoëfficiënt tusschen 5000 en 7000 Å niet constant is.

3. Zij moet van voldoende intensiteit zijn. $\frac{1}{1000}$ van de energie toch moet een uitslag geven, die boven storingen in redelijken tijd vast te stellen is.

4. Zij mag gedurende eenigen tijd niet te veel in intensiteit wisselen. Bij de constructie van het instrument is n.l. het gebruik van glas e.d. vermeden. Dientengevolge is de aanwijstijd vrij groot, daar geen vacuum kan worden gebruikt.

Het schijnt ons toe, dat men na vergelijking van bovenstaande eigenschappen van de straling, die gemeten moet en de straling, die gemeten kan worden tot de conclusie moet komen, dat de absolute bolometer van *Wouda* niet het aangewezen instrument is om *direct* dienst te doen om deze straling te meten. (De sterkte en de constantheid hiervan zijn onvoldoende.)

Laat ons zien, welke methode wij zouden verkiezen, om de energie pro Ångström van de zwarte straling vast te leggen.

Er komen dan, wegens de lage intensiteit, drie methodes in aanmerking: die met de combinatie monochromator — photocel — versterker, die met spectrograaf en photographische plaat, en de spectraalpyrometrische. De photographische methode moet verworpen worden wegens haar bewerkelijkheid en het feit, dat men de omstandigheden moeilijk zoo kan kiezen, dat men op een fout, kleiner dan 2 % per meting, kan rekenen. De andere methodes zijn goed bruikbaar; de photo-electrische is verder in het violette gebied te gebruiken, maar aanzienlijk gecompliceerder. Wij kozen de spectraalpyrometrische.

Welke men ook kiest, de gebruikte opstelling zal in ieder geval moeten worden geijkt, uiteindelijk op den absoluten bolometer. Deze ijking kan op twee wijzen geschieden, die van elkaar verschillen in de plaats, waar men uit een gemeten energie tot de energie pro Ångström besluit. Dit verschil brengt echter een paar consequenties mede. Wij zullen toelichten, hoe men zich dit alles in ons geval moet voorstellen.

Wat wij wenschen te kennen, is de energie, die per cm^2 , sec., Å en eenheid van ruimtewinkel uit de opening in het zwarte lichaam treedt. Deze wordt afgebeeld op den gloeidraad van het pyrometerlampje en gezamenlijk hiermede door den monochromator heen beschouwd. Men geeft den pyrometerstroom een zoodanige waarde, dat bij zekere golflengte-instelling van den pyrometer de draad in den achtergrond verdwijnt. Verplaatst men den pyrometer in dezen toestand en zet men haar zoo, dat thans een ander lichtend (doordat het verlicht wordt) vlak meetvlak wordt, en neemt men aan, dat dit zoodanig licht, dat ook hier de draad verdwijnt, dan geldt, als $I(\lambda)$ van dit laatste vlak de intensiteitsverdeling, $D(\lambda)$ de doorlating van de monochromatoropstelling, en $O(\lambda)$ de ooggevoeligheid voorstellen,

$$\int E(\lambda, T) D(\lambda) O(\lambda) d\lambda = \int I(\lambda) D(\lambda) O(\lambda) d\lambda$$

In twee gevallen levert ons deze vergelijking snel het ge-

wenschte. Wij bespreken achtereenvolgens de methodes, die uit deze gevallen voortkomen.

Het eerste geval is, als $I(\lambda)$ ($:$) $E(\lambda, T)$. Dan is n.l. $I(\lambda) = E(\lambda, T)$.

Men heeft dan dit bereikt, dat men uit het reflectievermogen van het hulpvlak en de opvallende energie/ $\text{\AA cm}^2 \text{ sec}$ de teruggestraalde energie/ $\text{\AA cm}^2 \text{ sec}$ eenheid van ruimtehoek kan berekenen.

Men moet dan dus nog de energie/ $\text{\AA cm}^2 \text{ sec}$, die op het hulpvlak valt, bepalen. Theoretisch zou men dit moeten doen, door uit $I(\lambda)$ een infinitesimaal klein gebiedje $d\lambda$ te nemen en de daarin vervatte energie/ $\text{cm}^2 \text{ sec}$ te meten. Deze is $I(\lambda)d\lambda$, waaruit $I(\lambda)$ volgt. Practisch is dit niet uit te voeren. Wij moeten een eindig gebied nemen en corrigeeren voor de fout, die hierdoor gemaakt wordt. Dit gebied moet door middel van een kleurenfilter uit $I(\lambda)$ worden genomen. De filter, die men het best in de hand heeft, is de monochromator. Men werkt het eenvoudigst op de volgende wijze. Men neemt een dubbelmonochromator en verlicht hier doorheen het hulpvlak zoodanig, dat de energieverdeeling $I(\lambda)$ bereikt wordt, als geen middenspleet aanwezig is. Nu schuift men de middenspleet in. Hierdoor wordt een gebied uitgefiltreerd. De mechanische (d.i. door de begrenzende werking der spleten veroorzaakte) doorlating van den monochromator wordt nu $D'(\lambda)$. Meet men nu de energie/ $\text{cm}^2 \text{ sec}$ E , die op het hulpvlak valt, dan geldt:

$$\int I(\lambda)D'(\lambda)d\lambda = E, \text{ d.w.z.}$$

uit $D'(\lambda)$ en E kan men besluiten tot $I(\lambda)$.

Een complicatie, die nog optreedt, is, dat de op het hulpvlak vallende energie/ $\text{cm}^2 \text{ sec}$ E niet direct kan worden gemeten met den absoluten bolometer. Om toch het grootte oppervlak hiervan door een monochromator heen voldoende te verlichten, zou men moeten beschikken over een constante continue hulplamp van grootere oppervlaktehelderheid dan de thans bestaande. Men moet dus hier de energie/ $\text{cm}^2 \text{ sec}$ meten

met een willekeurig instrument, dat dan met behulp van een geschikte straling op den absoluten bolometer kan worden geijkt.

Bij deze methode komen dus de volgende metingen voor:

1. de bepaling van het reflectievermogen van het hulpvlak.
2. de bepaling van de mechanische doorlating van den monochromator.
3. de meting van de energie/cm² sec, die op het hulpvlak valt.
4. de ijking van het hulpmeeinstrument op den absoluten bolometer,

De andere methode berust op het tweede geval, dat onze vergelijking eenvoudig wordt. Dit treedt op, als het hulpvlak wordt bestraald met monochromatisch licht van de golflengte λ_0 , waar juist de spectraal-pyrometer op is ingesteld. Dan is $D(\lambda_0) = 1$ (bij definitie), en dus

$$\int E(\lambda, T) D(\lambda) O(\lambda) d\lambda = I(\lambda_0) O(\lambda_0),$$

waarin nu dus $I(\lambda_0)$ de totale energie/cm² sec eenheid van ruimtehoek voorstelt.

Deze kan worden berekend uit het reflectievermogen van het hulpvlak en de hierop vallende energie/cm² sec. Indien men de wijze van verlichten gunstig kiest, kan deze worden gemeten met den absoluten bolometer. Het is dus in dit geval noodig, de doorlating $D(\lambda)$ van den spectraalpyrometer te bepalen.

Bij deze tweede methode moet men dus meten:

1. het reflectievermogen van het hulpvlak.
2. de doorlating van den spectraalpyrometer. (Men kan zich hier bepalen tot de mechanische doorlating. De selectiviteit van de absorbties en reflecties van prisma's en lenzen kan in de gebieden, waarmede wordt gewerkt, gevoeglijk worden verwaarloosd.)
3. De op het hulpvlak vallende energie/cm² sec.

Deze laatste methode is dus eenvoudiger dan de eerste, maar hiertegenover staat, dat zij in den waren zin des woords subjectief kan worden genoemd: een eigenschap van den

waarnemer (zijn ooggevoeligheid) kan hier invloed hebben op de resultaten. Ter geruststelling kunnen wij er echter bijvoegen, dat door de kleine gebieden, die hier gebruikt worden de correctie door deze ooggevoeligheid zoo klein is, dat de fouten, die hier zouden kunnen ontstaan, volkomen te verwaarloozen zijn.

Tevens treedt bij deze methode de in het eerste deel genoemde omstandigheid op, dat een energieverdeeling, die sterk van die van het pyrometerlampje afwijkt, hiermede wordt vergeleken. Er moet dus hier een lampje met in de dispersierichting gespannen gloeidraad worden gebruikt.

Wij hebben dus thans (zelfs langs twee wegen) het vereischte verband tusschen de zwarte straling en den absoluten bolometer gelegd en zullen nu overgaan tot een nadere beschouwing van de verschillende onderdeelen der meting.

Metingen en aansluitingen.

De metingen en aansluitingen, die, naar uit het voorgaande volgt, moeten worden gedaan, zijn de volgende:

1. Het vastleggen van de sterkte van den gloeistroom, noodig om in den spectraalpyrometer den gloeidraad van het lampje even helder te zien als de opening in het zwarte lichaam.
2. Het meten van de energie/cm² sec, die monochromatisch in de golflengte, waarop de pyrometer is ingesteld, op het hulpvlak moet vallen, om ook dit in den pyrometer even helder te zien als den gloeidraad.
3. Het vastleggen van de energie/cm² sec, die door den monochromator heen bij juiste instelling van deze op het hulpvlak moet vallen, wil dit, indien men de middenspleet verwijdert, in den pyrometer weer even helder worden gezien als den gloeidraad.
4. De bepaling van de mechanische doorlating van den spectraalpyrometer.
5. De bepaling van de mechanische doorlating van den monochromator.

6. De meting van het reflectievermogen van het hulpvlak.
7. De ijking van het hulpinstrument voor de energiemeting achter den monochromator op den absoluten bolometer.

Bezien wij deze punten achtereenvolgens nader.

1. Het zwarte lichaam bestond uit een cilindrische nikkelen buis (lang 12 cm, diameter uitwendig ruim 4 cm, inwendig ca. 1,5 cm). Hier in sloot aan de achterzijde een massieve staaf, welke over een afstand van 5 cm in de buis kon worden geschoven. Dit ingeschoven einde was scheef op de as afgesneden (ter vermijding van verkeerde reflecties). Verder waren in deze staaf een paar door kwarts geïsoleerde doorvoeren voor thermo-elementen. Vóór deze staaf was de eigenlijke holte, lang ongeveer 2 cm. Het overige deel der buis was bezet met diaphragma's met 2 à 3 mm opening. In de holte werden twee thermo-elementen geplaatst (*Pt* en 90 % *Pt*, 10 % *Rh*), in den keten van één waarvan een staafje goud was ingeklemd. (Wij kozen als temperatuuraangevende stof goud,¹⁾ omdat dit de stof is met het hoogste nauwkeurig en zeker genoeg vastgelegde smeltpunt: 1336,4°K.)

Dit lichaam werd in een electrischen oven verhit, aanvankelijk snel, in de buurt van het smeltpunt zeer langzaam (0,1°K per minuut) en de stroom, noodig om den gloeidraad tot verdwijnen te brengen, en de *E.M.K.* der thermo-elementen van tijd tot tijd gemeten met behulp van een thermokrachtvrije compensator. Uit het verband tusschen den pyrometerstroom en de *E.M.K.* van het thermo-element zonder goud kan men den gewenschten gloeistroom afleiden, als men weet, bij welke *E.M.K.* de smeltemperatuur van goud bereikt wordt. Het oogenblik, waarop dit het geval is, volgt uit de waarneming van het andere thermo-element. De *E.M.K.* hiervan wordt n.l. dan constant, maar het smelt nog niet door. Dit duurt nog eenige minuten. Indien men het doorsmelten als index zou kiezen, zou men dus een fout van bijna 1° K kunnen maken.

2. Om de monochromatische energie/cm² sec te meten, die

¹⁾ Goud van de Rijksmunt afkomstig, zuiverheid 0,999996.

op het hulpvlak moet vallen, om denzelfden pyrometerstroom te verkrijgen als bij het zwarte lichaam, gingen wij als volgt te werk. Een Na-lamp, waarvan met behulp van filters de gele lijn was uitgefiltreerd, bescheen van een afstand van 60 cm het hulpvlak. Bij verschillende verlichtingssterkten, (die door diaphragmeeren en verzwakkers werden bereikt) hiervan werd de pyrometerstroom bepaald en door interpolatie de juiste verlichtingssterkte gevonden. De respectievelijke verlichtingssterkten werden gemeten met den absoluten bolometer, door dezen nauwkeurig op de plaats van het vlak te zetten (met behulp van een fijn schietlood). Zie voor het meetschema en nadere bijzonderheden van den absoluten bolometer *J. Wouda*, Dissertatie Utrecht 1935.

3. De verlichting van het hulpvlak door den monochromator heen werd op de volgende wijze tot stand gebracht. Een wolfraambandlamp werd op de intredespleet afgebeeld, zoodanig, dat de lenzen van den monochromator homogeen gevuld waren. De achterste van deze lenzen werd door middel van een achter de uittredespleet geplaatst lenzenstelsel op het hulpvlak afgebeeld, zoodat ook dit homogeen werd verlicht.

Daar de temperatuur van den wolfraamband vrij hoog ($2900^{\circ} K$) moet zijn om een voldoende sterke verlichting te bereiken, valt de aldus van het hulpvlak komende energieverdeeling $I(\lambda)$ niet volkomen samen met $E(\lambda, T)$. Voor de hierdoor ontstaande fout kan men echter een correctie aanbrenge. (Zie *D. Vermeulen*, dissertatie Utrecht 1935.)

De energie E , die na inschuiven van de middenspleet per cm^2 en per sec op het hulpvlak viel, werd door ons ter controle met twee verschillende instrumenten gemeten, die daartoe op de plaats van het hulpvlak werden gezet. Het eerste was een vacuumbolometer; deze was oorspronkelijk voor relatieve metingen geconstrueerd en moest daarom, zooals bij de metingen bleek, sterk worden gediaphragmeerd om fouten, die door reflecties van het langs het bandje vallende (overtollige) licht konden ontstaan, te vermijden. Daar zijn gevoeligheid afhankelijk is van de temperatuur, werd deze met behulp van een

thermometer gemeten, zoodat voor eventueele veranderingen hierin kon worden gecorrigeerd. Het weerstandensysteem van den bolometer was afgeregeld voor gebruik bij een meetstroom, die iets kleiner was dan dien, waarvoor de gevoeligheid maximaal is, d.w.z. dat de gevoeligheid nog eenigszins van den stroom afhing; deze moest dus constant worden gehouden. De storingen bij dit instrument waren echter aanzienlijk kleiner dan bij het andere gebruikte, een thermozuil. Daar deze niet vacuum was ingesmolten konden wij hier de reflecties door overtollig licht door het zwarten van den achtergrond onschadelijk maken. Ook haar gevoeligheid hing van de temperatuur af. Van beide instrumenten werd de door het opvallende licht veroorzaakte spanning in compensatie gemeten.

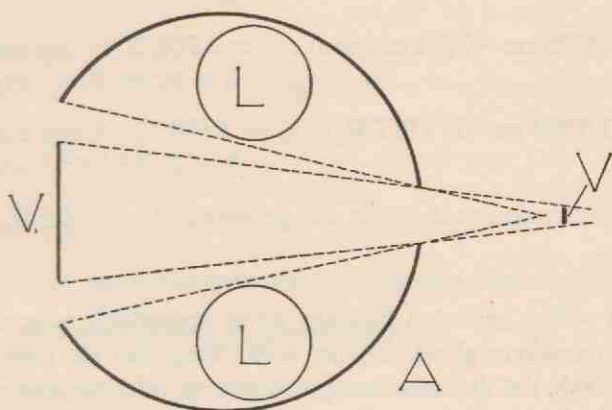
4 en 5. Deze bepalingen werden gedaan met de methode der gekruiste prisma's. Voor een uitvoerige bespreking van deze methode en de daarbij optredende doorlatings- en gebiedsquesties verwijzen wij naar *D. Vermeulen*, dissertatie Utrecht 1935.

6. Als hulpvlak fungeerde een scherm, beroekt met magnesiumcarbonaat. Wat wij bij deze metingen moesten weten, is de energie/cm² sec. eenheid van ruimtehoek, die onder den hoek, waarbij wij hebben gemeten, wordt teruggestraald, als de op het vlak in normaalrichting vallende energie/cm² sec bekend is.

Bij de bepaling van deze grootheid maakten wij gebruik van een opstelling, waarvan in fig. 8 een doorsnede is weergegeven.

Een aantal in een inwendig gewitten bol A gemonteerde gloeilampjes L verlicht een wit vlak V_1 homogeen. Uit de met den spectraalpyrometer gemeten helderheid van V_1 in de richting V_1V , de oppervlakte van V_1 en de afstand V_1V tusschen V_1 en ons hulpvlak V kan men de op V vallende energie berekenen. (Zooals men in de figuur kan zien, wordt V slechts door V_1 verlicht.) De energie, die onder den gebruikten hoek van V terugkomt, kan weer met den spectraalpyro-

meter worden gemeten (alle energieën hoeven slechts in relatieve maat bekend te zijn).



Figuur 8.

7. De ijking van den vacuumbolometer resp. de thermoziil werd ter contrôle met twee verschillende lichtbronnen uitgevoerd, n.l. met de reeds genoemde *Na*-lamp en met een projectielamp, waaruit met behulp van eenige filters het zichtbare gebied was gefiltreerd. Nadat de stralingsdichtheid op de plaats der meting met den absoluten bolometer was bepaald, werd het instrument, dat geijkt moest worden, daar geplaatst en de door deze straling veroorzaakte spanning in compensatie gemeten. Om te weten te komen, hoe de gevoeligheid van de temperatuur afhing, werd deze ijking bij verschillende temperaturen van de omgeving herhaald.

Resultaten.

Uit de tot nu toe door ons volgens de hier beschreven methode verrichte metingen berekenen wij met de formule van Planck de waarde van c_1 .

Wij vinden, als wij hierin substitueeren (c_1 per halve bol, λ in cm)

$$c_2 = 1,4320 \text{ cm } ^\circ\text{K (Internat.): } c_1 = 3,779 \cdot 10^{-13} \text{ erg/cm}^2 \text{ sec.}$$

$$h = 6,692 \cdot 10^{-27} \text{ erg sec.}$$

$$c_2 = 1,4306 \text{ cm } ^\circ\text{K (Vermeulen) : } c_1 = 3,708 \cdot 10^{-13} \text{ erg/cm}^2 \text{ sec.}$$

$$h = 6,566 \cdot 10^{-27} \text{ erg sec.}$$

$$c_2 = 1,4300 \text{ cm } ^\circ\text{K (P.T.R.): } c_1 = 3,678 \cdot 10^{-13} \text{ erg/cm}^2 \text{ sec.}$$

$$h = 6,513 \cdot 10^{-27} \text{ erg sec.}$$

terwijl internationaal wordt aangenomen $h = 6,547 \cdot 10^{-27}$ erg/sec.

Wij willen besluiten met een korte opmerking over de bereikte nauwkeurigheid. Bij de verwerking van de meetresultaten bleek, dat de nauwkeurigheid van de reflectie-meting aan het hulpvlak door de minder gunstige dimensie van de apparatuur achterblijft bij die van de overige metingen. De fout in deze laatste is kleiner dan 0,1 %.

INHOUD

Eerste deel.

BLADZ.

- Over eigenschappen van intensiteitmeetmethodes 1
Nauwkeurigheid en gevoeligheid. 12

Tweede deel.

- Een bepaling van de eerste stralingsconstante van
Planck. 25
-

STELLINGEN

I.

Voor de z.g. kleine stelling van Fermat: „Zij n priem en niet $a \equiv 0 \pmod{n}$, dan is $a^{n-1} \equiv 1 \pmod{n}$ ”, welke men pleegt te bewijzen door beschouwing van de resten, door verschillende machten van a bij deeling door n nagelaten, is een bewijs mogelijk, dat beter dan het aangeduide met den stijl van de bewering in overeenstemming is.

II.

Er bestaat geen regelmaat zoals die, waarvan door von Mises' definitie van „Regellosigkeit” (*R. von Mises, Wahrsch., Statistik und Wahrheit, blz. 25*) het bestaan impliciet wordt verondersteld.

III.

Qua constructie kan de uitvoering van vele fysieke instrumenten op eenvoudige wijze aanzienlijk worden verbeterd.

IV.

„Scherpe visuele heterochrome helderheid” is een in zichzelf inconsequent begrip.

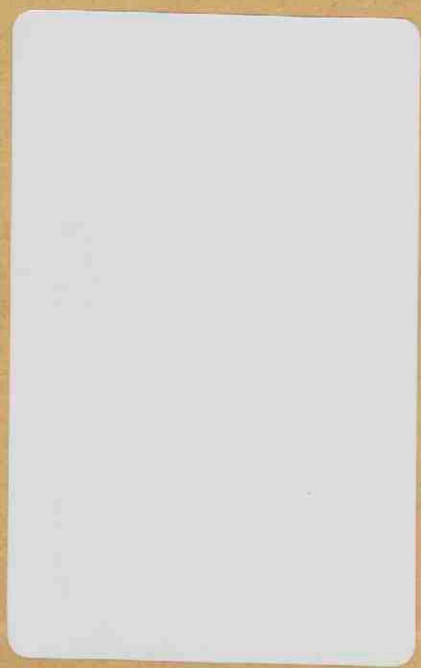
V.

De interpretatie van de experimenten van *O. Warburg* en *E. Negelein* en van die van *R. Emerson* en *W. Arnold* door *H. Gaffron* en *K. Wohl* (*Die Naturwissenschaften*, 1936, Jaargang 24, blz. 86) is in hooge mate aanvechtbaar.

VI.

Door meting van de sterkte van het daglicht kan men belangrijke gegevens verkrijgen omtrent den toestand van de atmosfeer.

K6722



D
Ut
19