

De Coma lenzen van Van Heel

C. Smorenburg

TNO TPD, Stieltjesweg 1, 2628 CK Delft

Op mijn werkkamer bij de TPD hangt een plaat aan de muur met vele (kleine) foto's van aberraties. Op de achterkant staat: waarnemingsboek N°41 – blz. 92-117-----1934. Deze prent is afkomstig van prof. Van Heel, de grondlegger van de geometrische optica in Delft. In 1933/1934 wilde hij voor zijn colleges demonstratiemateriaal hebben om studenten de 3^e orde aberraties duidelijk te kunnen maken en daartoe liet hij een speciale "coma lens" ontwerpen en maken. Met deze lens zijn 122(!) foto's van beeldvlekjes gemaakt, die vervolgens netjes opgeplakt en ingelijst zijn (figuur 1). Deze beeldvlekjes zijn gemaakt door, met gebruik van verschillende pupilmaskers bij de lens de afbeelding vòòr, in- en achter het paraxiale beeldvlak fotografisch vast te leggen.

Later, in 1949 heeft van Heel een 2^e "coma lens" ontworpen en vervaardigd, die nog steeds in mijn bezit is en gebruikt wordt voor demonstratie doeleinden. Zie hier de reden voor dit verhaal over de merkwaardige aberratie coma en deze demo-lenzen.

Inleiding

In de geometrische optica speelt optische afbeelding en afbeeldings kwaliteit een zeer grote rol. Naast de paraxiale theorie zijn er in de 19^e eeuw al formules ontwikkeld om optische aberraties te kunnen uitrekenen. Elke opticus leert over de 3^e orde beeldfouten zoals daar zijn: sferische aberratie, coma, astigmatisme, beeldkromming en vertekening. De meeste van deze beeldfouten zijn redelijk eenvoudig uit te leggen en te demonstreren. Derde orde coma is iets ingewikkelder uit te leggen en met "standaard" optiek meestal niet over-

tuigend te demonstreren, omdat de aanwezigheid van sferische aberratie en/of astigmatisme vaak overheersend is.

In de dertiger jaren verschenen er verscheidene artikelen over deze aberraties. Interessant te noemen is het verhaal van R. Kingslake en A.B. Simmons in J.O.S.A. getiteld:

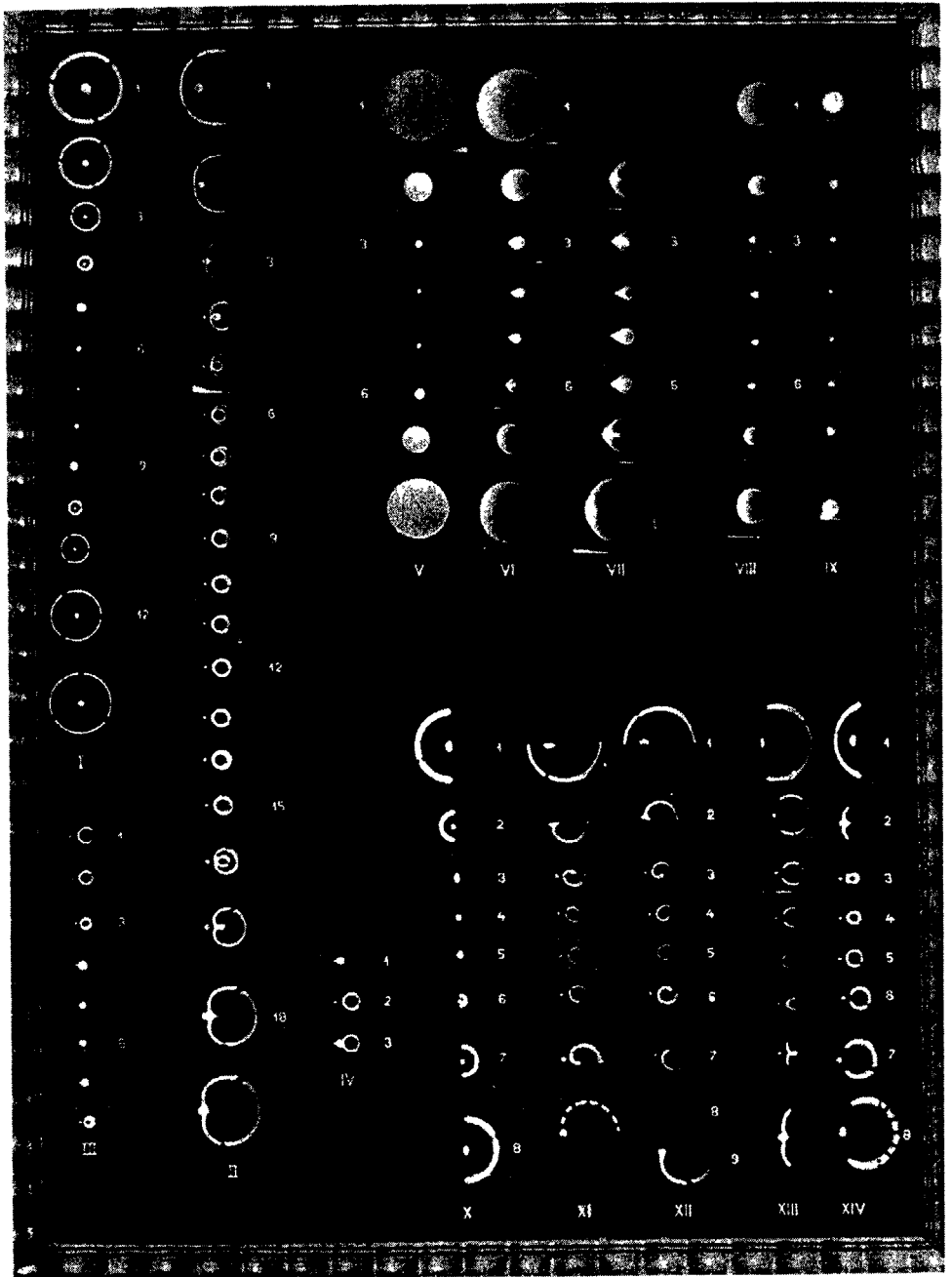
A Method of Projecting Star Images Having Coma and Astigmatism (ref. 1). Hierin worden theoretische dwarsdoorsnijdingen gegeven van een "beeldkegel" (imagecone) bij verschillende hoeveelheden coma en astigmatisme.

Van Heel ontwierp een aparte lens om coma te demonstreren. In 1935 verscheen een artikel hierover, waarin de afzonderlijke beeldjes van figuur 1 worden uitgelegd (ref. 2). De lens werd niet alleen gebruikt voor demonstratie van (de opbouw van) een coma beeldvlek, maar ook voor het aantonen van sferische aberratie en het effect van onscherpstellen vòòr en achter het focus bij verschillende pupilmaskers. In combinatie met een cilinderlens zijn er zelfs fraaie opnamen van astigmatisme mee gemaakt. Een kort verhaal over coma verscheen ook in het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde naar aanleiding van een voordracht, waarin van Heel de opnamen met de coma lens uitlegde (ref. 3).

COMA

Coma is een monochromatische 3^e orde aberratie. Voor de theorie van de optische aberraties wordt verwezen naar de optische handboeken (b.v. ref. 4).

De dwars afwijking van stralen in het paraxiale beeldvlak van een lens met alleen coma wordt gegeven door:



Figuur 1:
Plaat met aberraties (1934)

$$x' = -B \cdot \rho^2 h \sin 2\varnothing \quad (1)$$

$$y' = -B \rho^2 h (2 + \cos 2\varnothing) \quad (2)$$

Hierin is B de aberratie coëfficiënt, ρ en \varnothing de coördinaten van een straal in uitreepupil en h de paraxiale hoogte in het beeldvlak.

Eliminatie van \varnothing geeft

$$x'^2 + (y' - 2R)^2 = R^2$$

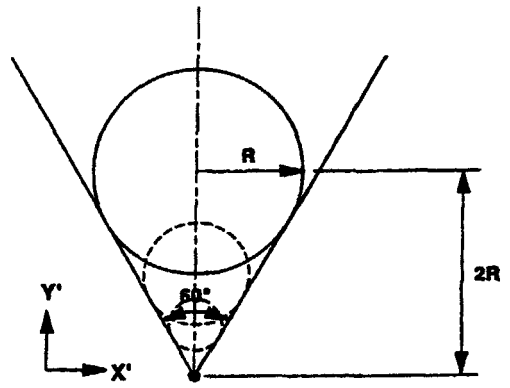
Waarbij $R = B \cdot \rho \cdot 2h$.

Uit deze vergelijking is duidelijk, dat coma opgebouwd is uit cirkels (met straal R).

De straal van de cirkel is lineair evenredig met de aberratie coëfficiënt B en met de veldhoek (hoogte in beeldvlak h) en kwadratisch evenredig met de opening (ρ).

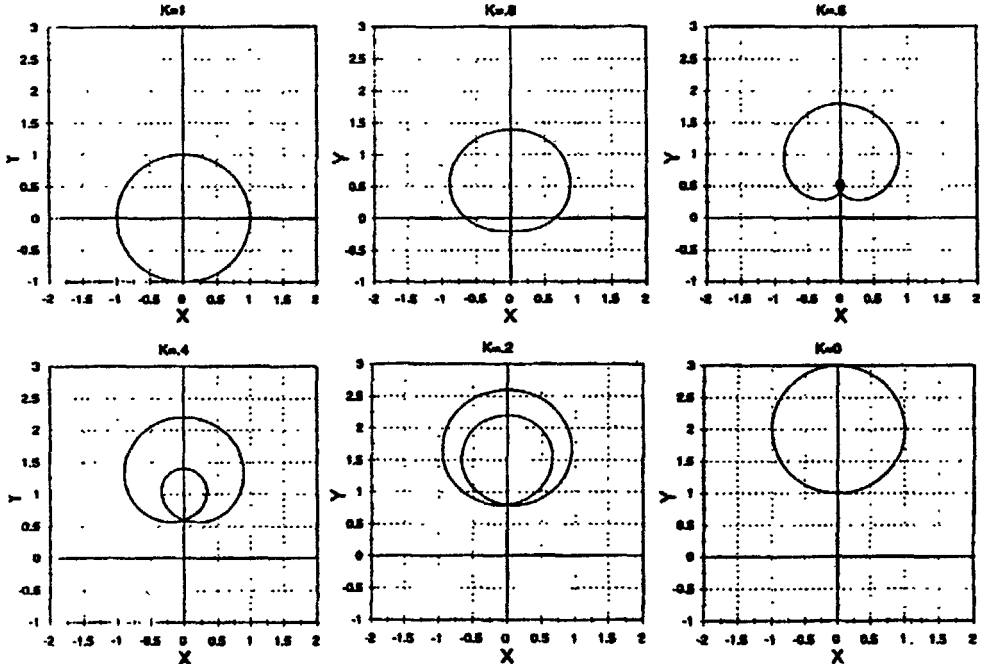
Daarnaast treedt er een verschuiving van de cirkel op over een afstand van $2R$.

In figuur 2 is de constructie hiermee van de coma beeldvlek weergegeven. Ook wordt hieruit de karakteristieke tophoek van 60° duidelijk



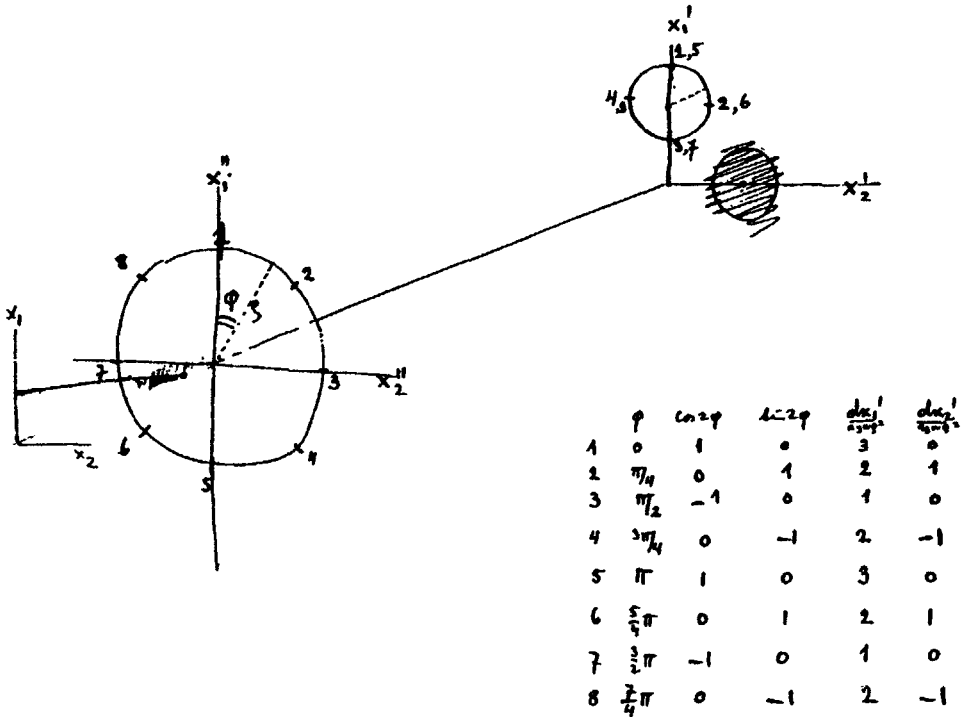
Figuur 2:
Constructie van het coma beeld

Het meest interessante bij coma is het verschijnsel van de **dubbele cirkel**. In vergelijking (1) en (2) komt de term $2\varnothing$ voor, hetgeen impliceert, dat een enkelvoudige cirkel in de uitreepupil tot een dubbele cirkel in het beeldvlak leidt.



Figuur 3:
De ontwikkeling van de dubbele coma cirkel

ζ κόμη le coma, haer, staart, lichtkring.
 $\tau\acute{o}$ κῶμῃ le coma, vaste sleep



Figuur 4:
 Passage uit waarnemingboek van Van Heel

In figuur 3 is de overgang van pupil naar beeldvlak weergegeven. De enkelvoudige cirkel bij de pupil ($K=1$) wordt ingestulpt ($K=0.8-0.6$), waarnaar dichter bij het beeldvlak de 2^e cirkel steeds duidelijker wordt ($K=0.4-0.2$). In het beeldvlak ($K=0$) zijn er idealiter 2 over elkaar vallende cirkels.

Van Heel behandelde in zijn college ook deze dubbele coma cirkel. In figuur 4 is een gedeelte uit zijn (handgeschreven) college dictaat weergegeven (ref. 4), waarbij en passant de Griekse herkomst van het woord coma wordt vermeld. Hier wordt ook

netjes dx' en dy' bij een 8-tal hoeken uitgerekend.

De eerste coma lens

Deze lens, die in 1933/34 ontworpen en vervaardigd is bestaat uit 2 componenten (kroon + flint)

De optische gegevens van de lens zijn.

Brekningsindex	Kromtestraal	Dikte
Nd	R(mm)	D(mm)
1.0	+ 247.16	4.53
1.5198	+ 367.34	0.12
1.0	+ 189.03	5.80
1.6213	+ 103.59	
1.0		

De lens is vrij lichtzwak (rel opening F/27).
Brandpuntsafstand: 1070 mm.

De grootte van de derde orde aberraties is het beeldvlak bij een voorwerpsafstand van 10 m, een diameter van de intreepupil van 30 mm en een veldhoek van 13.3° zijn:

- Spherische aberratie 0.06 mm
- Coma (diameter van de grootste cirkel): 1.5 mm
- Astigmatisme (lengte van de astigmatische lijn: 0.08 mm)

Hieruit blijkt, dat coma veruit de grootste beelfout is. Voor de opnamen in figuur 1 werd een ronde opening ($\varnothing = 2$ mm) op een afstand van 10 m verlicht met een Na lamp ($\lambda = 589$ nm.)

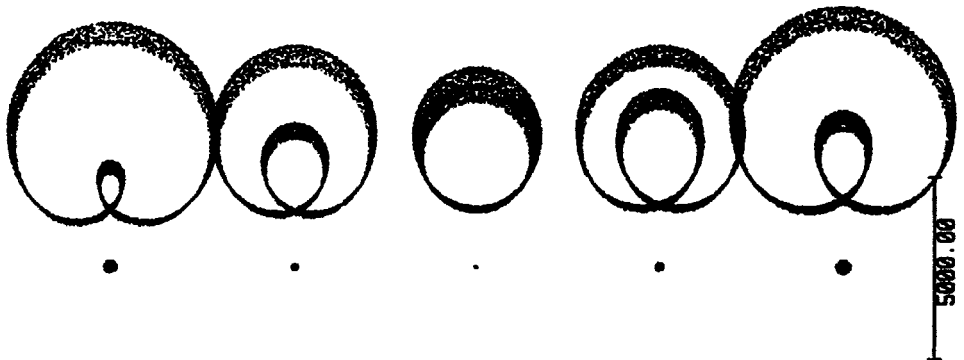
Als pupilmasker voor de lens werd een ringvormige opening ($\varnothing = 30$ mm, dikte = 2.5 mm.) gebruikt. De beelden werden opgenomen met een Kodak Super Pan film

en na ontwikkeling vergroot afgedrukt. De ontwikkeling van de dubbele cirkel van coma wordt getoond in kolom II van figuur 1. De beelden tonen de dwarsdoorsnede van de optische bundel in 19 vlakken voor-, in- en achter het paraxiale beeldvlak. De dubbele cirkel is ongeveer bij positie 12 en 13.

Uitleg van de beelden in de andere kolommen in figuur 1 vindt men in ref 2. Van deze lens zijn de coma cirkels uitgerekend met het optisch programma ZEMAX.

De resultaten van deze berekening zijn weergegeven in figuur 5, in de vorm van spotdiagrammen. Deze coma figuren komen overeen met positie II-4, II-5, II-12, II-16 en II-17 van figuur 1.

Voor de vergelijking geldt, dat figuur 5 gebaseerd is op zuivere stralen doorrekening en dat bij de werkelijke opnamen in figuur 1 ook buiging meespeelt.



Figuur 5:
Berekende coma patronen van de 1^e lens

De tweede coma lens

In 1949 heeft van Heel een tweede, lichtsterkere coma lens gemaakt, die nog steeds voor demonstratie doeleinden gebruikt wordt.

De lens heeft een inscriptie: "f = 40.5 cm, coma lens waarn. bk 12, 7-9-49" en bestaat uit 2 componenten van F8 en BK4.

Voor de volledigheid de optische data van deze lens:

Brekingsindex	Kromtestraal	Dikte
Nd	R(mm)	D(mm)
1.0	- 47.92	13.2
1.60281	- 91.16	7.07
1.0	- 821.5	12.3
1.49960	- 70.41	
1.0		

Opvallend is, dat alle kromtestralen een negatieve waarde hebben.

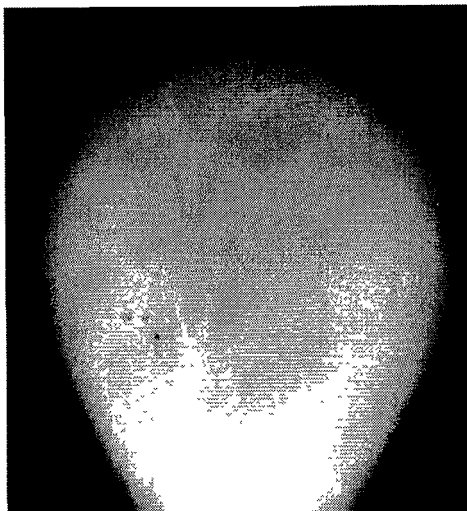
De relatieve opening is F/10.

Een met deze lens opgenomen coma beeldvlek is weergegeven in figuur 6.

Tenslotte

Van de derde orde aberraties is coma één van de meest intrigerende. De constructie, de vorm (tophoek van 60°) en de dubbele cirkel maken enige uitleg noodzakelijk. Van Heel merkte op (ref. 3), "dat men reeds vóór 1900 uitgerekende coma figuren had getekend, maar dat men deze aan de hand van te weinig uitgerekende punten juist verkeerd had getekend daar men niet wist, dat aan het éénmaal doorlopen van een zone het tweemaal doorlopen der

daarom eens op de reflectie van een lamp boven de tafel op de bodem van een kopje. Als je dan direkt aan coma denkt kun je spreken van een beroepsafwijking!



Referenties

1. R. Kingslake and A.B. Simmons
A method of projecting star images
having coma and astigmatism.
JOSA, vol 23, 1933 (p. 282-288).
2. A.C.S. van Heel
A lens producing pure coma.
Physical II, 1, 1935 (p.62-70).
3. A.C.S. van Heel
Coma
Nederlands Tijdschrift voor Na-
tuurkunde.
1935 (p.94-97).
4. A.C.S. van Heel
Inleiding in de Optica
Den Haag, 1958
5. C. Smorenburg
Van Heel coma lenses
Proceedings Education and Training
in Optics.
Delft, vol 3190, (1997), p.45-52