

Astrometrisch en fotometrisch onderzoek aan de vuurbol van 13 augustus 1989, 2^h27^m40^s UT

Jean Paul van Oudheusden * en Mathijs van Dijk †

19 maart 1991

English Summary

On August 13, 1989 a perseid fireball was photographed from six Dutch stations. The results of the astrometrical and photometrical research on this meteor are presented in this article.

Inleiding

Tijdens ons sterrenkamp in Bussloo in de zomer van 1989 was de meest in het oog springende waarneming die van een schitterende Perseïdevuurbol om 2^h27^m40^s UT, die (door ons op -6^m á -10^m geschat) door zes posten fotografisch werd vastgelegd. Vol nieuwsgierigheid hebben wij ons daarna bezig gehouden met de baanberekening, de magnitudebepaling en hieruit de massabepaling. In dit artikel de resultaten.

Het astrometrisch onderzoek

Gezien het feit dat er op dit gebied al vaker wat gepubliceerd is, en op het gebied van de fotometrie nog maar zelden, zal op het fotometrische gedeelte van dit artikel de nadruk liggen. Toch willen we de belangrijkste resultaten van het uitmeten van de negatieven op de Jena meetmachine van het Huygenslaboratorium te Leiden wel even vermelden.

We zijn begonnen met zes foto's van de posten in *Bussloo*, *Meterik*, *Heesch*, *Oostkapelle*, *Elsloo* en *Loenen*. In Loenen zat de meteor op het negatief ver buiten de referentiesternen, waardoor we te ver moesten extrapoleren, zodat we dat negatief verder buiten beschouwing moeten laten. Met het Firbal programma hebben we de traject- en radiantgegevens van deze meteor berekend. Deze staan vermeld in tabel 2. Uit de geografische lengte en breedte blijkt dat de meteor boven Aken (Duitsland) verschenen moet zijn. In tabel 1 zijn de berekende baanelementen opgenomen. Deze worden vergeleken met de in het DMS visueel handboek van P. Jenniskens vermelde waarden [1] en die van DMS-89044 [2], ter vergelijking met een andere Perseïde, die ook met veel negatieven is berekend.

Het fotometrisch onderzoek

In de februari 1990 togen wij samen met Hans Betlem naar de KMA in Breda, alwaar wij de basis hebben gelegd voor de fotometrische resultaten. Het doel van een dergelijk fotometrisch onderzoek is in de eerste plaats het bepalen van de fotografische magnitude en die te vergelijken met de visuele magnitude en in de tweede plaats het bepalen van de massa aan de hand van de fotografische magnitude.

Orbitel elements	Perseids [1]	DMS-89046	DMS-89044 [2]
a (AU)	24.0	26.96	23.97
1/a (AU ⁻¹)	0.04	0.037±0.026	0.042±0.030
e	0.960	0.965±0.024	0.960±0.028
q (AU)	0.949	0.941±0.0016	0.949±0.002
i	113°.0	114°.07±0°.23	112°.69±0°.24
ω	150°.4	148°.67±0°.52	150°.43±0°.54
Ω	139°.0	140°.48±0°.00	140°.46±0°.00
π	289°.4	289°.15±0°.52	290°.89±0°.54
V _∞ (km/s)	60.5	60.7±0.3	60.3±0.4

Table 1: Baanelementen DMS-89046 (2000:0) tezamen met literatuurwaarden en gegevens van de al eerder gepubliceerde DMS-89044.

In Breda hadden wij een 'Joyce Loeble' microdensitometer tot onze beschikking, die de densiteit (zwarting) van een negatief kan meten. De sterren en de meteoromoten werden (3 keer, voor een betere nauwkeurigheid) gescand. Voor de wijze van scannen en registreren zie [3]. De zwartingen worden geregistreerd door een penschrijver, die krommen op papier zet, doordat het verder uitslaat naarmate de densiteit groter is. De oppervlakte van zo'n kromme is een maat voor de fotografische magnitude (m_{ph}). Met de computer hebben is een verband gezocht tussen m_{ph} en de hoogte en breedte van de krommen, aangezien de m_{ph} van de sterren te berekenen is :

$$m_{ph} = V + 0.62(B-V) - 0.52(V-R) \quad (1)$$

De sterren worden zo gecorrigeerd voor kleurindex. Er is omgerekend van de fotografische magnitude naar de ware helderheid in violet (V). De kleurindices (violet - rood) en (blauw - violet) zijn gevonden in [4].

We hebben drie negatieven (Meterik, Bussloo en Heesch) gebruikt voor het fotometrisch onderzoek. Figuur 1 toont enkele registraties van sterscans van de verschillende posten. Bij Meterik is duidelijk te zien dat de krommen symmetrisch zijn. Bij Bussloo daarentegen lopen de krommen naar een kant breder uit. De meteor zat hier meer aan de kant van het negatief. Er ontstaan zo afbeeldingsfouten zoals coma op het negatief. Er zijn verschillende methoden om een verband te vinden tussen de curve en m_{ph} . De gebruikelijke methode

*Weegbree 79, 2923 GK Krimpen a/d IJssel

†Toernooi 36, 2924 VJ Krimpen a/d IJssel

	HEESCH	METERIK	BUSSLOO	OOSTKAPELLE	ELSLOO
h begin (km)	107.1	107.3	108.1	91.1	105.8
h eind (km)	73.2	73.8	73.7	74.4	72.6
ϕ begin	50°.803	50°.802	50°.805	50°.764	50°.780
ϕ eind	50°.721	50°.723	50°.722	50°.724	50°.720
λ begin	6°.160	6°.161	6°.166	6°.062	6°.152
λ eind	5°.957	5°.961	5°.959	5°.964	5°.953
lengte (km)	38.1	37.5	38.5	18.7	37.2

Table 2: DMS 89046. Trajektgegevens vanuit vijf posten.

POST	M (max) moot	M (max) ster	ΔM (sterren)	M (max) - M (moot) (ster)	σ_m (extrapol.)
Meterik	-3.57	-0.15	4.2	5.52	± 0.59
Bussloo	-3.13	2.41	2.4	6.7	± 0.37
Heesch	-5.72	2.19	2.9	9.36	± 3.6

Table 3: Nauwkeurigheden in de extrapolatie.

is het verband [5]:

$$S = \sqrt[4]{a \cdot b} \quad (2)$$

Waarbij a de hoogte van de kromme is en b de breedte halverwege.

Omdat op het negatief van Meterik heldere sterren stonden, zodat we later, om de m_{ph} van de zeer heldere meteor te vinden, minder ver zouden hoeven te extrapoleren (zie tabel 3), begonnen we te rekenen met de registraties van dit negatief en wel volgens de hierboven gegeven methode. Het resultaat van deze berekening beschouwd we voorlopig dan ook als het betrouwbaarste. Ook bij Bussloo pasten we methode 1 toe maar mede door de andere vorm van de krommen (door de coma) weken de hierbij gevonden resultaten nogal af van die van Meterik. We gingen derhalve op zoek naar een andere methode. Als we de curven benaderden als driehoeken en de oppervlakte hiervan relateerden aan de m_{ph} bleken de resultaten van Bussloo veel beter aan te sluiten bij die van Meterik.

$$Opp = a \cdot b \quad (3)$$

Op het negatief van Heesch stonden alleen maar zwakke sterretjes, zodat er een veel te groot aantal magnituden geëxtrapoleerd moest worden om tot de m_{ph} van de meteor te komen (tabel 3). We hebben dit negatief wel gefotometreerd maar de metingen hebben we verder buiten beschouwing gelaten.

Correcties

De zo verkregen magnitude moet echter nog gecorrigeerd worden om tot de absolute M_{ph} van de meteor te komen. Achtereenvolgens zullen we bespreken de correctiemethoden voor de factoren *hoeksnelheid*, de *reciprociteit van de film*, de *sector* en de *afstand tot de waarnemer*.

De sterren hebben een lage snelheid, de meteor beweegt zich echter snel over de film. Hierdoor komen de sterren helderder op de foto en valt de m_{ph} van de meteor te hoog uit. In tabel 5 wordt met behulp van de berekende hoeksnelheid van de meteor het aantal magnituden berekend, dat

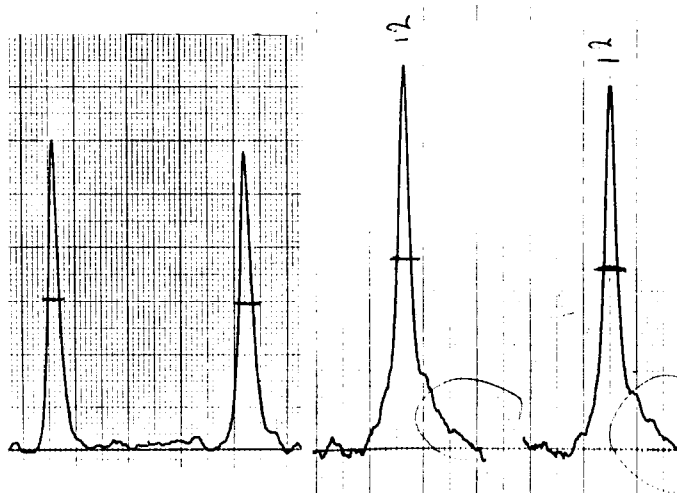


Figure 1: Een viertal ster-scans. Twee maal Meterik (links) en twee maal Bussloo (rechts). De laatste zijn iets asymmetrisch door coma.

de meteor moet worden gecorrigeerd t.o.v. de sterren op de equator. Ook alle sterren zijn naar declinatie 0° gecorrigeerd. De correctie bedraagt bij elk negatief ruim negen magnituden voor deze meteor.

De tweede correctie betreft die voor de reciprociteit van de film. De gebruikte films zijn namelijk gevoeliger voor korte, felle belichtingen zoals die van de meteor dan voor lange, zwakkere belichtingen, zoals die van de sterren. Dit werkt overigens in het voordeel van de meteorfotografie. Bij langere belichtingen wordt de invloed van het achtergrondlicht steeds kleiner. Een (snelle) meteor heeft daarnaast veel energie en zendt veel ultraviolette straling uit. De film is veel gevoeliger voor deze straling dan het oog. Er is dus ook nog een verschil tussen de visuele en de fotografische helderheid van de meteor. De correctie voor de reciprociteit bedraagt 1.5 magnitude voor de gebruikte film (Tri-X) [4].

Vervolgens corrigeren wij de m_{ph} voor de invloed van de sector. Doordat de sterren minder snel over de film bewegen dan de meteor heeft de afdekking van de sector invloed op

STER	V	B-V	V-R	m_{ph}	δ	m_{ph} corr. δ	s	a	b
γ Peg	2.86	-0.21	-0.08	2.77	15°.184	2.73	169.26	67.98	2.49
ζ Peg	3.39	-0.10	-0.03	3.34	10°.831	3.32	73.76	33.15	2.23
γ Psc	3.69	0.91	0.71	3.89	3°.282	3.88	51.25	23.14	2.22
ι Cet	3.55	1.22	0.85	3.86	-8°.824	3.85	55.46	21.66	2.56
ω Psc	4.01	0.41	0.38	4.07	6°.863	4.06	52.48	24.55	2.14
ϵ Psc	4.28	0.97	0.78	4.48	7°.890	4.47	39.98	17.58	2.28
33 Psc	4.61	1.04	0.77	4.85	-5°.708	4.85	25.06	10.40	2.41
α Peg	2.47	-0.03	0.01	2.45	15°.205	2.41	14.42	62.73	2.35

Br. no.	a (mm)	b (mm)	s	m_{ph}	m_{ph} corr. v	m_{ph} corr. recip.	m_{ph} corr. sektor	R (km)	h (km)	v (km/s)	M_{ph}	$\int I \cdot dt$	m (gram)
1	7.05	2.23	15.72	4.67	-4.37	-2.87	-2.43	189.59	106.87	61.01	-3.82	1.345	0.058
2	10.83	2.07	22.42	4.61	-4.43	-2.93	-2.49	188.88	104.85	61.00	-3.88	1.419	0.061
3	11.90	2.23	26.54	4.56	-4.48	-2.98	-2.54	188.12	102.61	61.00	-3.91	1.463	0.063
4	15.20	2.20	33.44	4.50	-4.54	-3.04	-2.60	187.47	100.60	60.99	-3.97	1.548	0.067
5	22.05	2.28	50.27	4.33	-4.71	-3.21	-2.77	186.77	98.39	60.98	-4.13	1.794	0.077
6	22.03	2.38	52.43	4.31	-4.73	-3.23	-2.79	186.10	96.13	60.96	-4.14	1.817	0.079
7	32.23	2.23	71.86	4.11	-4.93	-3.43	-2.99	185.49	94.00	60.93	-4.33	2.159	0.093
8	30.10	2.40	72.24	4.11	-4.93	-3.43	-2.99	184.92	91.91	60.89	-4.33	2.153	0.093
9	44.25	2.20	97.35	3.86	-5.18	-3.68	-3.24	184.31	89.57	60.83	-4.57	2.695	0.117
10	50.15	2.28	114.34	3.69	-5.35	-3.85	-3.41	183.80	87.45	60.74	-4.74	3.134	0.137
11	58.17	2.42	140.77	3.42	-5.62	-4.12	-3.68	183.31	85.31	60.60	-4.99	3.977	0.175
12	70.08	2.93	205.33	2.78	-6.26	-4.76	-4.32	182.83	83.10	60.39	-5.63	7.170	0.319
13	105.15	4.18	439.00	0.44	-8.60	-7.10	-6.66	182.40	80.95	60.09	-7.97	61.396	2.772
14	125.33	6.35	795.85	-3.13	-12.17	-10.67	-10.23	182.02	78.96	59.72	-11.53	1635.714	75.228
15	113.85	6.43	732.06	-2.49	-11.53	-10.03	-9.59	181.64	76.75	59.18	-10.89	905.174	42.780
16	58.43	2.85	166.53	3.16	-5.88	-4.38	-3.94	181.31	74.65	58.45	-5.23	4.932	0.242
17	31.90	2.38	75.92	4.07	-4.97	-3.47	-3.03	181.14	73.47	57.95	-4.32	2.137	0.108
													122.46

Table 4: Fotometrische gegevens van referentiesternen en sektoronderbrekingen voor opname BUSSLOO DMS-89046.

de densiteit van de sterren en niet op die van de meteor. Het sterlicht wordt nl. verzwakt door de sector; de meteor niet. De grootte van de correctie hangt af van de gebruikte sectorbladen en is dus afhankelijk van de post. De correcties zijn in de orde van 0.5 magnituden.

Als laatste vermelden wij de correctie voor de afstand van de waarnemer tot de meteor. De absolute magnitude (M_{ph}) van de sterren is gedefinieerd voor een standaardafstand van 100 km. Om deze M_{ph} met die van de meteor te vergelijken moet de afstand tot de meteor omgerekend worden naar de standaardafstand (volgens de kwadratenwet: meteor/ster 2x zo ver weg, 4x zo zwak).

$$M = m - 5 \log(100/R) \quad (4)$$

De massabepaling

De gevonden M_{ph} is een maat voor de werkelijke lichtsterkte (I_{ph}). We berekenen I_{ph} met de volgende formule:

$$I_{ph} = 10^{\frac{m_{ph}}{2.5}} \quad (5)$$

Nu is ook (steeds per moot gescand, dus per interval van 1/25 seconde) de I_{ph} van de Perseïde bekend. We gaan er van uit dat deze per moot constant is. Mogelijke fouten die hierbij gemaakt worden: de werkelijke lichtsterkte is

waarschijnlijk niet constant en bovendien is niet bekend of zich in de onderbrekingen nog afwijkingen in de lichtsterkte hebben voorgedaan. We hebben echter elke moot op drie verschillende plaatsen gescand en steeds het gemiddelde genomen van de drie metingen. De totale uitgestraalde energie is door ons dus berekend met formule (6a), terwijl eigenlijk formule (6b) een nog correcter resultaat gegeven zou hebben.

$$\sum_{allemoten} I \cdot \Delta t \quad \sum_{allemoten} \int I \cdot dt = \int_0^{t_{eind}} I \cdot dt \quad (6)$$

De I_{ph} wordt omgerekend naar de fotometrische massa. De I_{ph} is gerelateerd aan de massa. Ook zit er nog een snelheidsafhankelijke factor in, $\tau(v)$. De vertraging van de meteor hangt af van de luchtdichtheid, en dus van de hoogte. Hoe dichter bij het aardoppervlak, hoe groter de luchtdichtheid. Om de massa te bepalen moeten we allereerst de snelheid berekenen. Dit hebben we reeds bij het astrometrische onderzoek gedaan en wel met de volgende formule:

$$v(t)^2 = v_{\infty}^2 + k \cdot \rho \quad (7)$$

Omdat de snelheid kleiner wordt naarmate de luchtdichtheid ρ groter wordt, heeft de constante k een negatieve waarde. De al genoemde snelheidsafhankelijke factor $\tau(v)$ in de

STER	V	B-V	V-R	m _{ph}	δ	m _{ph} corr. δ	s	a	b
α Aur	0.06	0.81	0.61	0.25	45.998	-0.15	4.47	82.78	4.83
α Per	1.80	0.48	0.45	1.86	49.861	1.39	3.76	61.85	3.22
β Per	2.15	-0.06	0.07	2.08	40.956	1.77	3.50	56.46	2.66
γ And	2.10	1.21	0.94	2.36	42.331	2.03	3.48	57.19	2.56
δ Cas	2.69	0.13	0.15	2.69	60.235	1.93	3.54	50.90	3.10
β And	2.04	1.57	1.24	2.37	35.621	2.14	3.29	52.13	2.26
ο And	3.62	-0.09	0.01	3.56	42.326	3.23	2.94	33.95	2.20
μ And	3.87	0.12	0.15	3.87	38.499	3.60	2.79	26.13	2.33
ε Psc	3.62	0.97	0.71	3.85	7.890	3.84	2.48	19.45	1.93
ω Psc	4.01	0.41	0.38	4.07	6.863	4.06	2.49	15.66	2.44

Br. no.	a (mm)	b (mm)	s	m _{ph}	m _{ph} corr. v	m _{ph} corr. recip.	m _{ph} corr. sektor	R (km)	h (km)	v (km/s)	M _{ph}	∫ I.dt	m (gram)
1	4.30	2.20	1.75	5.57	-3.83	-2.33	-2.0	130.22	107.27	60.86	-2.59	0.435	0.019
2	7.70	2.30	2.05	4.94	-4.45	-2.95	-2.6	129.23	105.88	60.85	-3.20	0.762	0.033
3	10.63	2.48	2.27	4.49	-4.90	-3.40	-3.1	127.82	103.85	60.85	-3.63	1.129	0.049
4	13.18	2.28	2.34	4.33	-5.06	-3.56	-3.3	126.32	101.66	60.85	-3.76	1.276	0.055
5	19.80	2.23	2.58	3.84	-5.56	-4.06	-3.7	124.94	99.59	60.84	-4.23	1.971	0.086
6	20.70	2.40	2.65	3.67	-5.72	-4.22	-3.9	123.46	97.34	60.84	-4.37	2.235	0.097
7	26.23	2.38	2.81	3.35	-6.05	-4.55	-4.2	121.98	95.03	60.83	-4.67	2.950	0.128
8	33.55	2.28	2.96	3.04	-6.36	-4.86	-4.5	120.72	93.01	60.82	-4.95	3.835	0.167
9	35.95	2.58	3.10	2.73	-6.66	-5.16	-4.9	119.42	90.88	60.80	-5.24	4.978	0.217
10	47.07	3.07	3.47	1.97	-7.43	-5.93	-5.6	118.11	88.68	60.77	-5.98	9.841	0.430
11	49.63	3.48	3.63	1.64	-7.76	-6.26	-5.9	116.86	86.52	60.72	-6.29	13.078	0.572
12	72.80	4.40	4.23	0.37	-9.03	-7.53	-7.2	115.59	84.25	60.65	-7.53	41.262	1.812
13	88.65	4.70	4.52	-0.24	-9.63	-8.13	-7.8	114.42	82.10	60.54	-8.12	70.496	3.112
14	132.15	8.10	5.72	-2.76	-12.16	-10.66	-10.3	113.28	80.00	60.41	-10.62	706.444	31.389
15	138.62	10.03	6.11	-3.57	-12.97	-11.47	-11.2	112.19	77.80	60.23	-11.41	463.194	65.598
16	81.95	6.15	4.74	-0.70	-10.10	-8.60	-8.3	111.19	75.70	59.97	-8.52	101.909	4.628
17	58.52	4.75	4.08	0.68	-8.72	-7.22	-6.9	110.31	73.82	59.70	-7.12	28.260	1.301
													109.70

Table 5: Fotometrische gegevens van referentiesterren en sektoronderbrekingen voor opname METERIK DMS-89046.

massa is te vinden met de formules van tabel 6. Aangezien de meteor 89046 een snelheid had van circa 60 km/s is in dit geval de laatste formule van toepassing.

De omrekening van de werkelijke lichtsterkte naar de massa vindt nu als volgt plaats :

$$m = 2 \int_{t_{begin}}^{t_{eind}} \frac{I(t)dt}{r(v) \cdot v^2} \quad (8)$$

Foutenbeschouwing

De grootste fouten ontstaan bij het bepalen van de M_{ph} doordat er over een bepaald aantal magnituden geëxtrapoleerd moet worden. Hoe groter dit aantal is of hoe kleiner het verschil in magnituden tussen de helderste en de zwakste referentiester is, hoe groter de mogelijke fout in de einduitkomst. In tabel 3 zijn deze waarden reeds vermeld. Deze uiteindelijke afwijking is berekend met:

$$\sigma_{Y_P} = \sigma_a + |(x_P - \bar{x})| \sigma_b \quad \text{met} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

Voor een toelichting bij deze formule zie de appendix bij dit artikel, samengesteld door Marc de Lignie [7].

Conclusie

De afwijking die we op deze manier hebben berekend voor Heesch bleek zo groot te zijn (tabel 3), dat we Heesch niet meenemen in de eindbepaling van de massa. Een afwijking van ± 3.6^m. in de helderheid van de meteor zorgt voor zo'n grote afwijking in de massa dat het resultaat van Heesch niet relevant meer is. De afwijkingen in de helderheid berekend bij Meterik en Bussloo zijn van eenzelfde orde van grootte (0.6^m resp. 0.4^m), zodat we voor de uiteindelijke fotografische helderheid en de uiteindelijke massa een gewogen gemiddelde kunnen nemen van de resultaten van de beide posten. Uiteindelijk bleek de fotografische helderheid van de meteor -11.5^m te zijn. Onze schatting van de visuele helderheid was derhalve aan de voorzichtige kant, maar we moeten ons wel realiseren dat de vele UV-straling die de meteor uitzendt wel door de film maar niet door ons oog wordt waargenomen. Als resultaat voor de fotometrische massa van de meteor vinden we ongeveer 116 gram en dat is toch niet zo indrukwekkend als we hadden gedacht...

Met dank aan...

In de eerste plaats bedanken wij Hans Betlem, die ons heeft bijgestaan waar nodig. Verder noemen wij Annemarie

$v < 9.33$ km/s	$\log \tau = -12.75$
$9.33 \leq v \leq 12.5$	$\log \tau = -15.60 + 2.92 \log v$
$12.5 \leq v \leq 17$	$\log \tau = -13.24 + 0.77 \log v$
$17 \leq v \leq 27$	$\log \tau = -12.5 + 0.17 \log v$
$27 \leq v$	$\log \tau = -13.69 + \log v$

Table 6: Interpolatieformules voor τ . v is gegeven in km/s en er zijn gewone logaritmen toegepast.

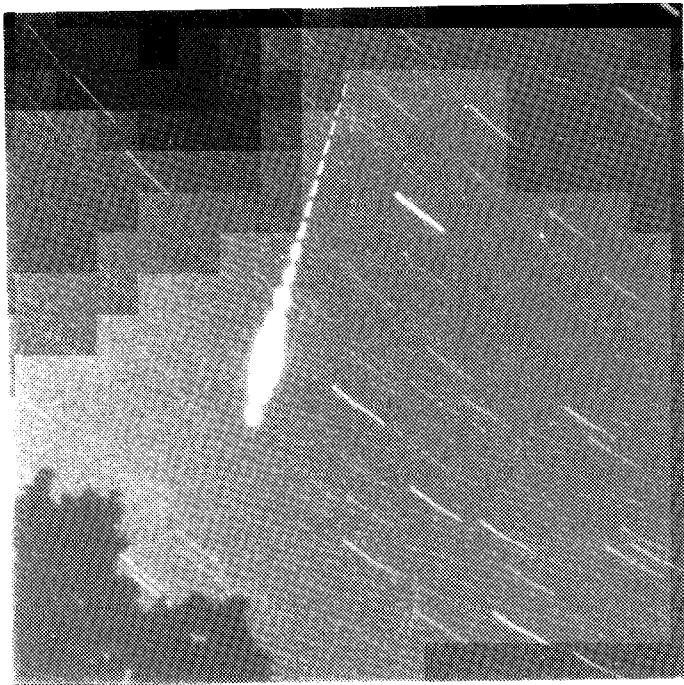


Figure 2: Opname Meterik met een $f/2.8-16$ mm objektief van meteor 89046.

Zoete, die enkele keren een maaltijd voor ons bereidde, Marc de Lignie, voor het aanleveren van de formules voor de nauwkeurigheid, en Huub Brosens van de KMA te Breda voor hulp en assistentie bij het fotometreeren. •

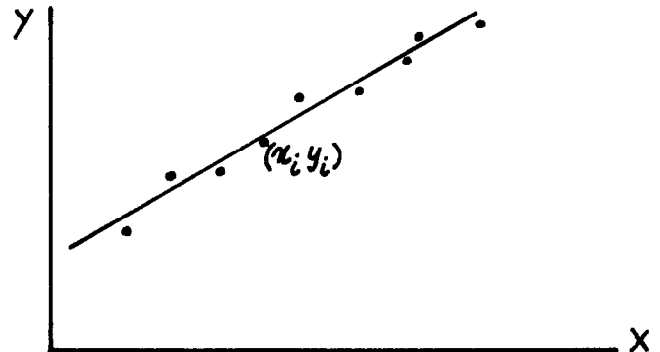
Referenties

- [1] Jenniskens, P.: *DMS Visueel Handboek*. Leiden, 1988
- [2] Schuurman, M.; Vettenburg, P.: *Radiant* 12 (1990), 144.
- [3] Betlem, H.: *Radiant* 4 (1982), 39.
- [4] Iriarte, B.; Johnson, H.L.; Mitchell, I.; Wisniewsky, W.K.: *Sky and Telescope* 30 (1965) 21-31.
- [5] Warner, B.: *Journ. Brit. Astron. Ass.* 74 (1964), 99
- [6] Ceplecha, Z.: *Private Comm.*
- [7] *Numerical Recipes in C* (Ch 14.2), W.H. Press et al, Cambridge University Press, New York 1988.

Appendix.

Het extrapoleren van een rechte lijn.

Marc de Lignie



We hebben n punten (x_i, y_i) en we fitten daar een lijn door:

$$y = a + b \cdot x \quad (1)$$

Elk punt heeft dan een geschatte standaarddeviatie in y_i van σ_i .

Er geldt dan volgens de kleinste kwadratenmethode :

$$b = \frac{1}{S_{tt}} \sum_{i=1}^n \frac{t_i \cdot y_i}{\sigma_i} \quad \text{en} \quad a = \frac{S_y - S_x \cdot b}{S} \quad (2)$$

met :

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i^2} \quad S_x = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{\sigma_i^2} \quad S_y = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{\sigma_i^2}$$

$$S_{tt} = \sum_{i=1}^n t_i^2 \quad t_i = \frac{1}{\sigma_i} \left(x_i - \frac{S_x}{S} \right)$$

De standaarddeviatie in de gevonden waarden a en b is :

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{S} \cdot \left(1 + \frac{S_x^2}{S \cdot S_{tt}} \right)} \quad \text{en} \quad \sigma_b = \sqrt{\frac{1}{S_{tt}}} \quad (3)$$

Voor een zekere x_p is de fout in de bijbehorende y_p waarde (bij benadering):

$$\sigma_{y_p} = \sigma_a + |x_p - \bar{x}| \sigma_b \quad \text{met} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

In eerste instantie kunnen alle $\sigma_i = 1$ genomen worden. σ_a en σ_b moeten dan nog met :

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - a - b \cdot x_i)^2}{n-2}}$$

vermenigvuldigd worden. •

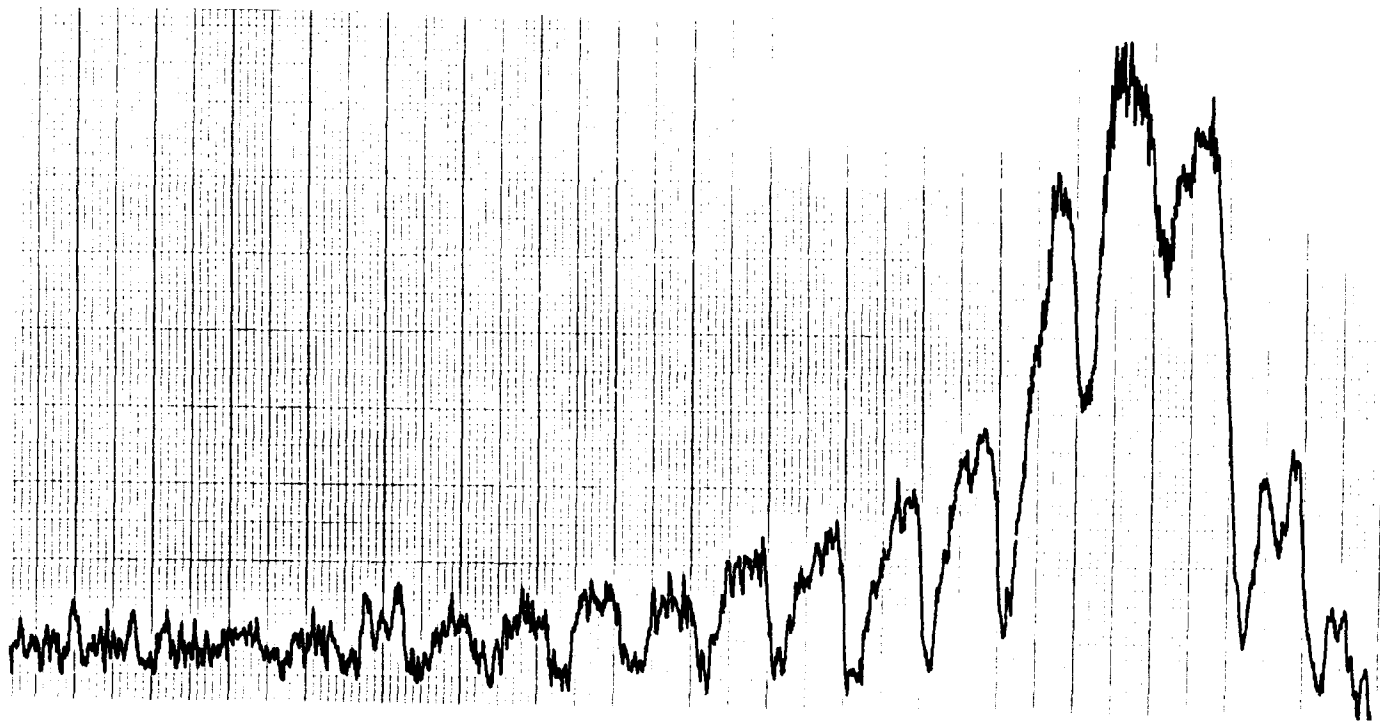


Figure 3: *Lengtescan van het meteorspoor van het negatief Bussloo.*
De lineaire vergroting ten opzichte van het negatief bedraagt 20 maal. Spleetgrootte $88 \times 4 \mu\text{m}$.

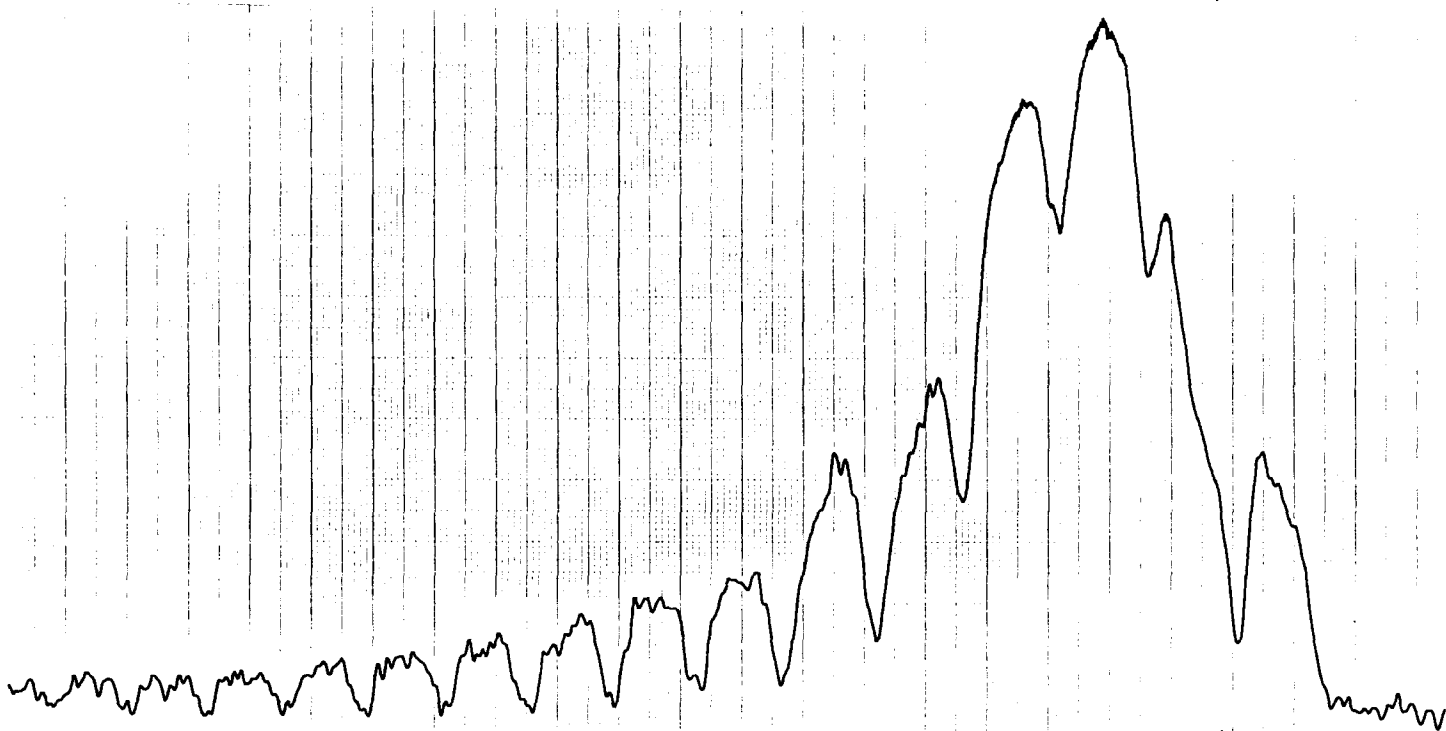


Figure 4: *Lengtescan van het meteorspoor van het negatief Meterik.*
Vergroting 40 maal bij een spleetgrootte van $88 \times 2 \mu\text{m}$.