

Uitzonderlijk hoge oplichthoogten en een onbekend stralingsmechanisme bij de Leoniden 1998 (2)

Hans Betlem¹ en Pavel Spurny²

1. Lederkarper 4, 2318 NB Leiden

2. Astronomical Institute CAS, 251 65 Ondřejov, Czech Republic

Inleiding

In een vorig nummer van Radiant [1] beschreven we de ontdekking van uitzonderlijk hoge oplichthoogten, gedetecteerd bij de Leoniden van 1998 door middel van simultane video opnamen.

De beginhoogten voor fotografische opnamen bij Leoniden liggen maximaal op zo'n 130 km. De afhankelijkheid van de beginhoogten van de helderheid van de meteor en de massa van de meteor bleek gering, in tegenstelling tot de eindhoogten, die wel in sterke mate van deze factoren afhangen. De eindhoogten variëren van zo'n 98 km voor een -5 Leonide, tot ongeveer 75 km voor een -15 Leonide.

In dit artikel beschrijven we fenomenen, die ontdekt zijn in de op zeer grote hoogten (150 – 200 km) uitgezonden straling die mogelijk een inzicht kunnen geven in de tot nu toe onbekende stralingsprocessen op deze hoogten.

In de thans gangbare theorieën wordt licht, dat uitgezonden wordt door meteoren, veroorzaakt door de interactie van een meteoroïde met de atmosfeer van de aarde. De meteoroïde verliest massa in de vorm van vaste deeltjes of een heet gas. Meteoroiden die de dichtere delen van de atmosfeer raken, worden zeer snel verhit. Zodra de oppervlakte van de meteoroïde een temperatuur van zo'n 2200 K heeft bereikt, begint het sublimatieproces aan de oppervlakte en wordt de omgeving van de meteoroïde gevuld met heet, geïoniseerd gas. Aangeslagen atomen van dit gas vallen geleidelijk terug onder uitzending van straling. Het licht dat wordt uitgezonden bestaat uit emissielijnen van voornamelijk ijzer. Daarnaast vertonen de Leoniden atmosferische lijnen van O, N en N₂. De meteoroïde verliest geleidelijk massa en vertraagt. De Leoniden behoren tot de meest fragiele meteoren met een zeer hoge intreesnelheid van 71 km/s. Deze beide factoren veroorzaken een zeer hoge oplichthoogte in de atmosfeer en een snelle desintegratie in de atmosfeer. De hoogste fotografische oplichthoogten liggen rond de 130 km voor de Leoniden. Japanse videowaarnemingen [2] toonden oplichthoogten van zo'n 160 km en dit werd beves-

tigd door resultaten van de Sino-Dutch Leonid expedition [3,4] die oplichthoogten in het video gebied liet zien tot zo'n 200 km. Op deze grote hoogten zijn de atmosferische condities echter zodanig, dat in het geheel geen straling geproduceerd kan worden, als we uitgaan van het boven gegeven model. De gemiddelde vrije weglengte (= de afstand die een deeltje kan bewegen zonder een botsing te krijgen met een ander deeltje) voor een neutraal deeltje is 3 meter op een hoogte van 130 km, 25 km op 160 km en meer dan 500 m op 200 km [5]. Op deze extreme hoogten zijn niet voldoende luchtmoleculen om een meteoroïde te verhitten en te verdampen. Echter, de straling bestaat. We hebben hem waargenomen en wel met bijzonder details!

Onze waarnemingen vragen om een verklaring die totaal verschillend is van de gebruikelijke klassieke verklaringen voor het ontstaan van straling bij meteoren. Mogelijk leiden onze publicaties tot initiatieven bij theoretici om mechanismen te verzinnen die kunnen leiden tot het optreden van diffuse straling bij meteoren op zeer grote hoogten.

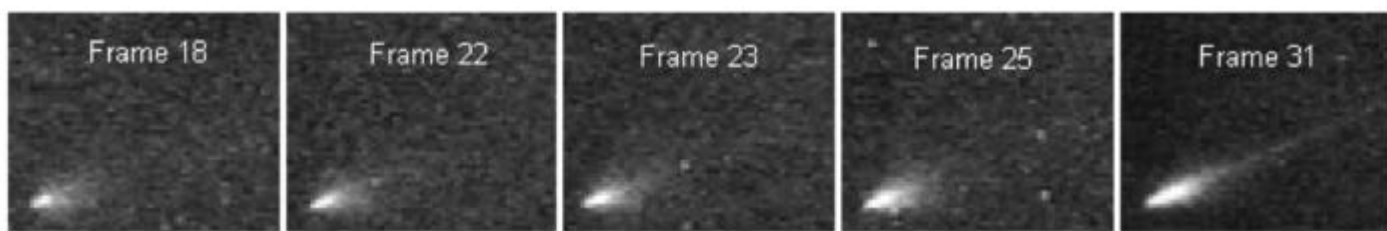
Structuren in video beelden op zeer grote hoogten.

Op zeer grote hoogten vertonen de beginpunten van vuurbollen een merkwaardige structuur. De video opnamen van de Sino-Dutch Leonid expedition in 1998 beginnen rond de grensmagnituden van de gebruikte video systemen. Dit is ongeveer magnitude +6. De afbeeldingen van de meteoroiden vertonen daqn een wazige, diffuse vlek.

Tijdens de afdaling wordt deze vlek snel wijder en gaat over in een wel gedefinieerde V-vorm, die een treffende gelijkenis vertoont met een goed ontwikkelde komeet met kop en staart. De kop is omgeven door een soort schokgolf onder een hoek van ongeveer 40 graden.

Zodra de meteor helderder wordt, worden opvallende structuren zichtbaar in de diffuse V-staart achter de meteoroïde.

In alle waargenomen gevallen zijn duidelijk zichtbare jets- en streamers waargenomen. Vuurbol 98023 laat in de uitstromende materie een boog zien die te vergelijken is met een loop van een protuberans op de zon.



Figuur 1 : Diffuse structuren in vuurbol 98023, opgenomen met het beeldversterker-video systeem.

Figuur 1 laat een set video beeldjes zien die duidelijk de bovenvermelde structuren laten zien, hoewel bij reproductie mogelijk veel detail verloren gaat. Figuur 2 toont een uitvergroting van een van de laatste beeldjes van vuurbol 98023.

Alle onderzochte gevallen betreffen fotografisch simultaan opgenomen vuurbollen, zodat posities, afstanden en snelheden zeer nauwkeurig bekend zijn. De afzonderlijke punten van het vuurboltraject zijn bepaald met een nauwkeurigheid van enkele tientallen meters. Hieruit is het mogelijk om de minimum verplaatsingen en uitstroomsnelheden te berekenen voor de meest in het oog springende details.

De langste jet werd gezien bij de 98023. De jet was zichtbaar tot op een afstand van 7 km van het helderste deel van de kop van de meteor. De jet is gevormd uit de kop van de meteor binnen één enkel videobeeldje (0,04 s) hetgeen duidt op een uitstroomsnelheid van minimaal 100 km/s, afhankelijk van de originele positie op de meteoroïde. Goed ontwikkelde jets werden ook gezien bij de andere meteoren met een afstand van 2.5 km voor de 98011, 6.5 km voor de 98036 en 3.2 km voor de 98043.

De verschijningsvorm van meteoren op zeer grote hoogten hebben we onderscheiden in drie verschillende fasen : Diffuus, intermediair en scherp. De "diffuse" afbeelding is een zeer verspreide afbeelding zonder enige lichtconcentratie en zonder duidelijke begrenzingen. De "scherpe" afbeelding is druppelvormig met scherpe begrenzingen en een zeer opvallende lichtconcentratie die we de "kop" van de meteor noemen. De "intermediaire" fase zit tussen deze beide gevallen in en is maar zeer kort zichtbaar zo

rond een hoogte van 130 km, waar de diffuse fase op grote hoogte zeer snel overgaat in de bekende druppelvorm van de "normale" meteor.

In drie van de zeven onderzochte gevallen was deze intermediaire fase in zijn geheel zichtbaar. Bij de 98023 is ook het begin van de intermediaire fase waargenomen. Deze fase is niet langer dan 0,1 à 0,2 s zichtbaar. Gedurende deze korte periode klapt de V-vorm in elkaar en ontstaat de klassieke druppelvorm. In alle gevallen is ook waargenomen, dat gedurende deze intermediaire fase een spoor achter de meteor begint te ontstaan.

Omdat alle structuren opgenomen zijn vanuit één post, kunnen alleen de snelheden loodrecht op de gezichtslijn bepaald worden. De berekende snelheden zijn dus minimumwaarden.

De mogelijkheid van instrumentele effecten is ook nog bekeken. Echter, even heldere meteoren lager in de atmosfeer tonen deze structuren niet. Deze laten scherpe, druppelvormige afbeeldingen zien ongeacht hun positie in het beeldveld.

98023. Een gedetailleerd onderzoek aan de waargenomen effecten.

LN98023 is de helderste van alle vuurbollen, waarvan de beginpunten zijn opgenomen met videocamera's. Deze vuurbol bereikte een maximale absolute magnitude van $-12,5$. Deze vuurbol laat alle beschreven typen van structuren zien. Hij werd opgenomen met een 85 mm LLTV camera te Lin Ting Kou.

Het bijzondere van deze vuurbol is de uitzonderlijke range aan hoogten en magnituden die is waargenomen. We beschikken over gegevens van deze vuurbol vanaf een hoogte van 195 km tot een eindhoogte van 73 km met een

range in absolute magnituden van $+6,3$ tot $-12,5$, een totaal interval van bijna 19 magnituden!

Tabel 1 geeft de atmosferische gegevens voor deze vuurbol. NF is het framenummer, T is de bijbehorende tijd, H en R zijn de waargenomen hoogte en afstand, M_{app} is de schijnbare magnitude. In de laatste kolom zijn de waargenomen structuren aangegeven met verschillende letters. D=diffuse verschijning, C=komeet-achtige verschijning, J en A duiden op waarnemingen van jets en bogen, T betekent de formatie van een nalichtend spoor en I duidt op de waarneming van de intermediaire fase.

De totale lengte van het TV spoor bedraagt 1,20 seconden wat overeenkomst met 31 video frames. De vuurbol verschijnt in het midden van het video beeld als een diffuus object met een helderheid van $+6,3$.

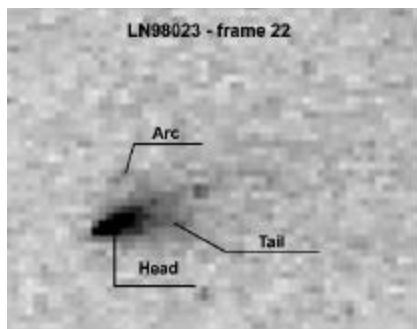
Na een korte relatief snelle toename van de helderheid viel deze gedurende 0,1 seconde een volle magnitude terug. Na dit korte maar significante minimum, dat ook bij andere vuurbollen werd waargenomen, nam de helderheid van de vuurbol geleidelijk aan toe en het eerste begin van een komeet-achtige verschijning werd gesignaleerd op een hoogte van 167 km. Een snel veranderende structuur met kop en staart is zichtbaar tot op een hoogte van 135 km, waar het nalichtend spoor zich begint te vormen en de diffuse structuur geleidelijk verdwijnt. Op het laatste beeldje (nr.31) is de diffuse structuur niet dominant meer.

De komeetachtige structuur (figuur 1) is het best ontwikkeld in de beeldjes 18 tot 27 en een boog is zichtbaar op beeldje 23 met een minimale afstand

tot de kop van de meteor van 5,9 en 5,3 km. Indien we een coördinatenstelsel XY definiëren met de X-as toenemend in de richting van de radiant en de Y-as positief boven het vlak dat de meteorbaan en de waarnemingsplaats bepaalt, vinden we het verst weg gelegen punt op een eerste jet op coördinaten $x=4,8$ km en $y=3,5$ km. Voor de tweede jet vinden we $x=4,8$ km en $Y=2,3$ km. Deze jets moeten waarschijnlijk in verband worden gebracht met de boog, die op het voorgaande beeldje is waargenomen. Ook op andere frames zijn verschillende jets waargenomen. De langste jet werd gezien op frame 25 met een minimale afstand van 7 km tot het helderste deel van de meteor en met een loodrechte component van 5 km. Het is bijzonder moeilijk deze verschijnselen goed te verklaren en om een sluitend mechanisme te vinden. Hoe kan materiaal van een meteoroïde op zo'n grote afstand loodrecht op de bewegingsrichting, terecht komen?

Lichtcurven van video meteoren

Het programma voor de berekeningen van de schijnbare magnituden van meteoren uit video opnamen is ontwikkeld door Pavel Koten en bestaat uit twee delen. Tijdens de eerste stap wordt een calibratiecurve geconstrueerd en in de tweede stap worden de helderheden van de meteor gemeten voor elk frame en met behulp van de calibratiecurve omgerekend naar magnituden. De achtergrondverlichting en de afbeeldingsfouten van de beeldversterker worden gecorrigeerd zodat de video opname er op het beeldscherm als een fotografische opname uitziet. Het programma scant vervolgens de hele afbeelding en bepaalt automatisch de posities van een honderdtal sterren en haalt hun helderheden uit de catalogus. Dit deel van het programma kan ook gebruikt worden voor astrometrische metingen. De helderheid van een ster wordt bepaald door sommatie van de pixel intensiteiten binnen een bepaald gedefinieerd gebiedje waarvan de achtergrond is afgetrokken. De calibratiecurve wordt geconstrueerd uit de logaritme van deze waarde en de cata-



Figuur 2 : Beeldje 22 van vuurbol 98023 met kenmerkende diffuse structuren.

loguswaarde van de helderheden van de sterren. Vervolgens wordt de signaalsterkte langs het meteorspoor op dezelfde wijze gemeten en wordt de magnitude van de meteor van beeldje tot beeldje bepaald met behulp van de calibratiecurve.

De lichtcurven, gebaseerd op de video waarnemingen zijn gegeven in figuur 3. In vrijwel alle gevallen zien we een afname in helderheid, kort na het begin.

De drie vuurbollen 98013, 98035 en 98036, allen met ongeveer dezelfde absolute magnitude van -7 , tonen eenzelfde gedrag. Zij laten een kleine afname in helderheid van ongeveer een halve magnitude zien op een hoogte van ongeveer 145 km. Iets dergelijks zien we eveneens bij de veel helderder 98023 vuurbol (absolute magnitude $-12,5$) die een dip van een volle magnitude vertoont op een hoogte van 180 km.

In alle gevallen heeft de helderheidsafname plaats ongeveer 15 km lager in de atmosfeer dan het eerste punt waarop de meteor is waargenomen.

Nadat beneden de 125 km de klassieke verdampingsmechanismen het proces hebben overgenomen, neemt de helderheid vrijwel lineair toe met de tijd. Het allereerste begin van deze klassieke verdamping komt vrijwel overeen met de detectielimiet van de fotografische systemen.

Slechts drie van de hierboven gegeven vuurbollen laten zowel de diffuse als de "scherpe" klassieke fase zien. De intermediaire fase laat steeds een geleidelijke toename van de helderheid zien zonder verdere onregelmatigheden.

De klassieke verdamping is een zeer bekend en goed begrepen proces, maar de diffuse fase is in het geheel nog niet begrepen.

Discussie en slot

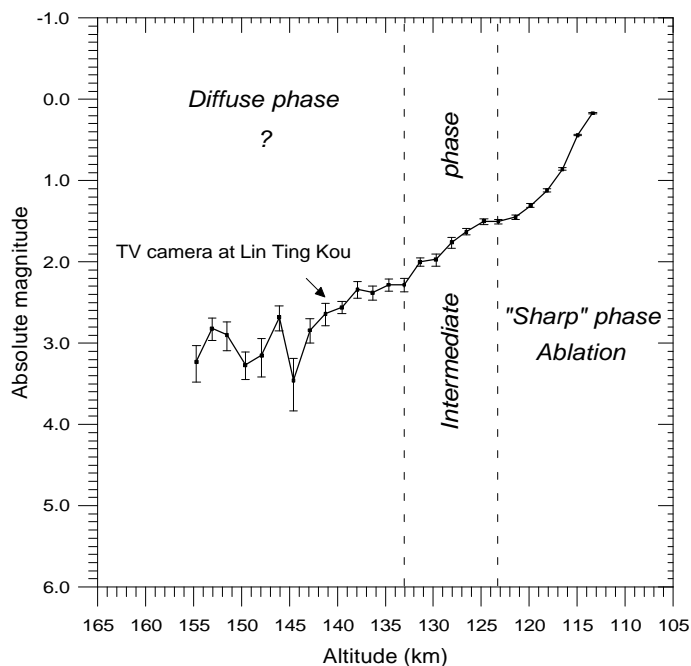
In dit artikel bevestigen we de extreme beginhoogten van Leoniden tot een hoogte van 200 km. Deze hoogtes zijn slechts zichtbaar met behulp van LLTV video systemen. Gedetailleerde afbeeldingen laten diffuse, komeetachtige structuren zien met jets. In een geval hebben we ook een boog waargenomen van minimaal 2 km groot. Materiaal in de jets wordt met hoge snelheid uitgestoten en bereikt afstanden tot op kilometers van de meteoroïde.

De intermediaire fase is goed bestudeerd in drie gevallen. Tijdens deze fase gaat de V-vormige diffuse fase over in een druppelvormige klassieke verdamping. De waargenomen fenomenen in de diffuse fase moeten waarschijnlijk verklaard worden met elektromagnetische processen hoog in de atmosfeer en met een ingewikkelder structuur van kometaire deeltjes dan tot heden toe werd aangenomen. Een nader onderzoek is nodig, maar het zal niet gemakkelijk zijn om meer materiaal te verkrijgen. Video beelden van de beginpunten van zeer heldere vuurbollen kunnen slechts in uitzonderlijke situaties worden verkregen. De Leoniden 1998 beloonden de Sino-Dutch Leonid expedition met zeven van zulke "lucky shots".

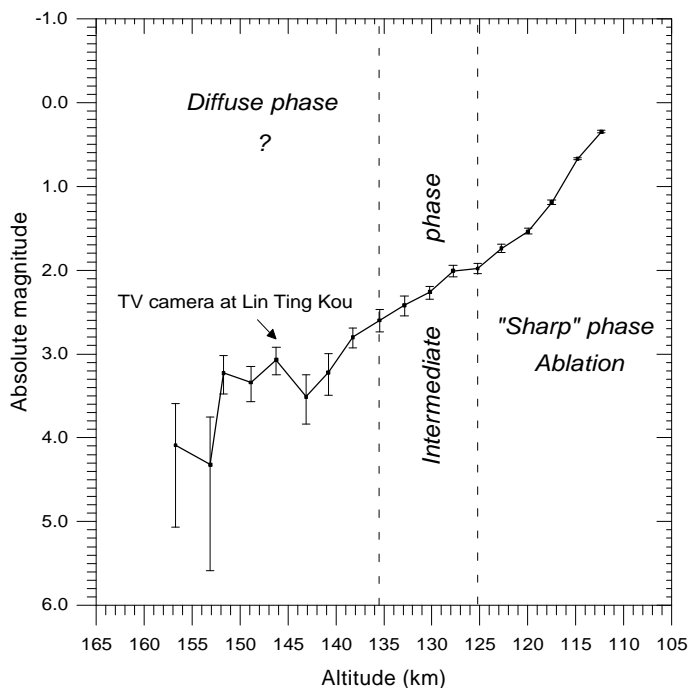
NF	T (s)	H (km)	M _{app}	Observed structure	NF	T (s)	H (km)	M _{app}	Observed structure
1	0.00	195.0	6.3	D	17	0.64	160.9	2.1	D,C
2	0.04	192.8	4.9	D	18	0.68	158.6	2.1	D,C
3	0.08	190.7	4.9	D	19	0.72	156.7	2.0	D,C
4	0.12	188.7	3.9	D	20	0.76	154.2	1.9	D,C
5	0.16	186.6	4.2	D	21	0.80	152.4	1.9	D,C,J
6	0.20	184.2	4.1	D	22	0.84	150.4	1.8	D,C,J,A
7	0.24	182.3	4.8	D	23	0.88	148.2	1.7	D,C,J
8	0.28	180.2	4.9	D	24	0.92	146.1	1.5	D,C,J
9	0.32	177.9	4.7	D	25	0.96	144.0	1.4	D,C,J
10	0.36	176.0	4.1	D	26	1.00	142.0	1.3	D,C,J
11	0.40	173.8	3.5	D	27	1.04	139.7	1.2	D,C,J
12	0.44	171.5	3.4	D	28	1.08	137.7	1.0	D,C,T?
13	0.48	169.4	3.1	D	29	1.12	135.6	1.0	C,T
14	0.52	167.3	2.8	D	30	1.16	133.6	0.9	C,I,T
15	0.56	165.1	2.6	D,C	31	1.20	131.7	0.8	I,T
16	0.60	163.1	2.4	D,C	32*	-	130.5	-	-

Referenties

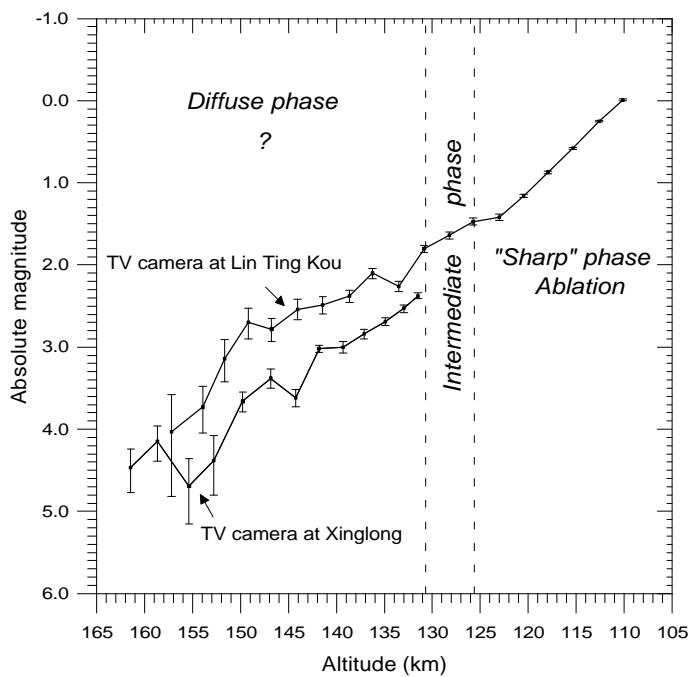
- 1] BETLEM H., JENNISKENS P., VAN'T LEVEN J., TER KUILE C., JOHANNINK C., HAIBIN Z., CHENMING L., GUANYOU L., JIN Z., EVANS S., AND SPURNÝ P. (1999) Very precise orbits of 1998 Leonid meteors. *Meteorit. Planet. Sci.* **34**, 979-986.
- 2] BOROVIČKA J., STORK R., AND BOCEK J. (1999) First results from video spectroscopy of 1998 Leonid meteors. *Meteorit. Planet. Sci.* **34**, 987-994.
- 3] CEPLECHA Z., BOROVIČKA J., ELFORD G.W., REVELLE D.O., HAWKES R.L., PORUBCAN V. AND SIMEK M. (1998) Meteor Phenomena and bodies. *Space Sci. Rev.* **84**, 327-471.
- 4] Fujiwara Y., Ueda M., Shiba Y., Sugimoto M., Kinoshita M., Shimoda Ch. and Nakamura T. (1998) Meteor luminosity at 160 km altitude from TV observations for bright Leonid meteors. *Geophys.Res.Lett.* **25**, 285-288.
- 5] JENNISKENS P., AND BUTOW S. (1999) The 1998 Leonid multi-instrument aircraft campaign. *Meteorit. Planet. Sci.* **34**, 987-994.
- 6] JONES A. S. (1985) Handbook of geophysics and the space environment. *Air force geophysics laboratory* 14-4.
- 7] MURRAY I. S., HAWKES R. L., AND JENNISKENS P. (1999) Airborne intensified charge-coupled device observations of the 1998 Leonid shower. *Meteorit. Planet. Sci.* **34**, 949-958.
- 8] SPURNÝ P., BETLEM H., VAN'T LEVEN J., AND JENNISKENS P. (2000) Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic Leonid meteors from the ground-based expedition to China. *Meteorit. Planet. Sci.* **35**, 243-249.



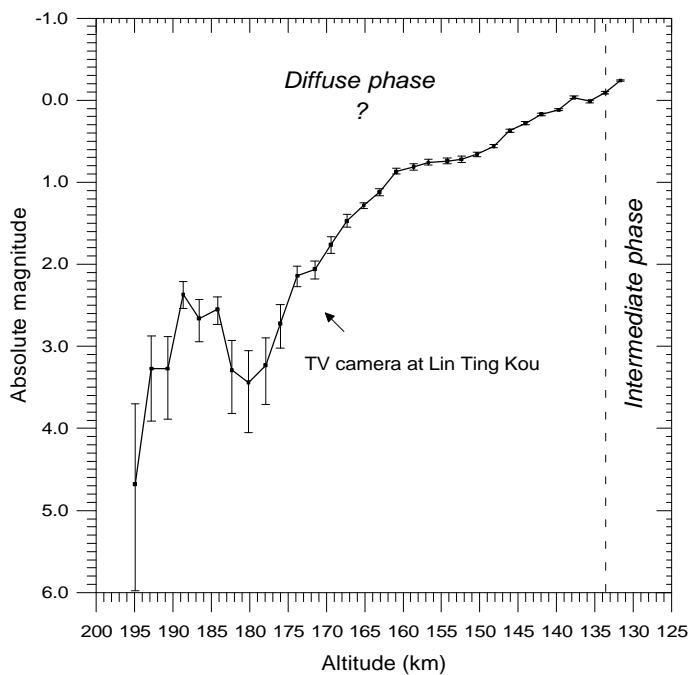
Figuur 3a. Lichtcurve van vuurbol 98013



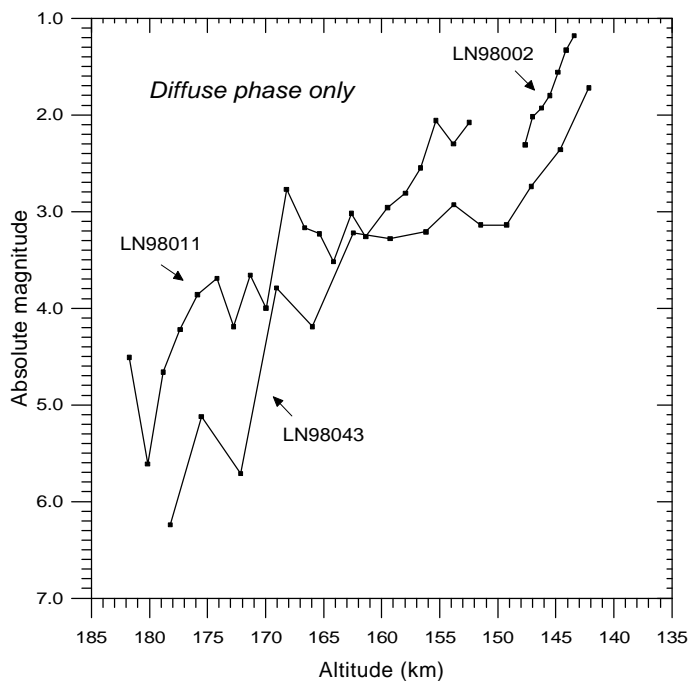
Figuur 3b : Lichtcurve van vuurbol 98035



Figuur 3c : Lichtcurve van vuurbol 98036



Figuur 3d : Lichtcurve van vuurbol 98023



Figuur 3e : Lichtcurven van vuurbollen 98002, 98011 en 98043 98023