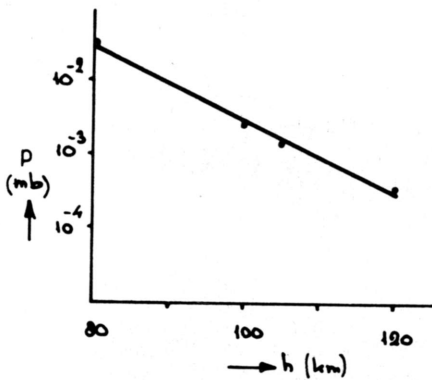


Summary: Discussion on the dependency of the length of a meteor path (LX) and the duration of the meteor (t), on its velocity v, its absolute magnitude M and the zenith distance X of its apparent radiant.

Vele waarnemers zullen zich afgevraagd hebben, of de lengte van een meteor afhangt van zijn helderheid.

Deze vraag is niet eenvoudig te beantwoorden; om hem op te kunnen lossen moeten wij teruggrijpen naar de door Hoppe opgestelde formules, die de beweging van een supersonisch deeltje door de dampkring beschrijven. Om deze formules uit te kunnen werken maken wij een drietal veronderstellingen, die het probleem enigszins vereenvoudigen.

Ten eerste nemen wij aan, dat op hoogten waar de deeltjes verbranden, de druk exponentieel afneemt met schaalhoogte $H = 9$ km. Volgens metingen van Warfield (zie fig. 1) is dit voor hoogten van 80 - 120 km. inderdaad juist. Metingen van het drukverloop op hoogten onder ongeveer 60 km, geven echter uitkomsten, die met een kleinere schaalhoogte overeenkomen.



Vervolgens veronderstellen wij, dat de meteoroiden alle van eenzelfde samenstelling zijn. Hoewel dit voor deeltjes van dezelfde zwerm waar kan zijn, hoeft dit beslist niet te gelden voor meteoroiden van verschillende zwermen.

Tenslotte nemen wij aan, dat de snelheid van de meteor tijdens het oplichten niet verandert.

7. Het verloop van de druk in de hogere atmosfeer bij nacht.

Nu is het mogelijk te bewijzen, dat voor niet heldere meteoren de volgende relatie tussen de lichtkracht I, de snelheid v en de oorspronkelijke massa m_{∞} van de meteor bestaat:

$$I \sim m_{\infty}^{2/3} v^5 \quad (1)$$

Uit de bewegingsvergelijkingen van de meteor is af te leiden, dat er een verband bestaat tussen m_{∞} , v, de zenitafstand van de schijnbare radiant X, en de lengte van het spoor L (in km), of de tijd die de meteor duurt, t. Deze relatie is als volgt:

$$m_{\infty}^{1/3} \sim \frac{v^2}{\cos X} \left[e^{\frac{L \cos X}{H}} - 1 \right] \quad (2a)$$

Indien wij deze relatie combineren met formule 1, en M de helderheid van de meteor op 100 km afstand is, dan vinden wij, daar geldt dat $M = -2,5 \log I + \text{const.}$:

$$M = -5 \log \frac{v^{4,5}}{\cos X} \left[e^{\frac{L \cos X}{H}} - 1 \right] + \text{constante.} \quad (2b)$$

Bovendien geldt natuurlijk $L = vt$, dus dat de lengte van het spoor evenredig is met de tijd van het spoor.

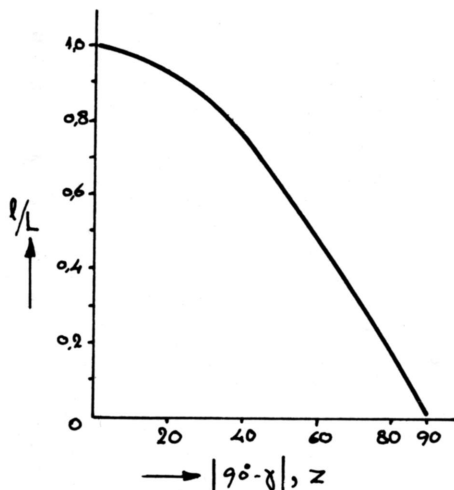
De schijnbare lengte van een meteor l zoals die door een waarnemer (in graden) wordt gemeten, is natuurlijk afhankelijk van de afstand tot radiant δ , en de zenitafstand z van de meteor. Voor niet al te grote l geldt dan:

$$l \sim L \cos z \cos |90 - \delta|. \quad (3)$$

Formule 2a en formule 2b staan natuurlijk los van dit soort schijnbare effecten. Om veranderingen in L te constateren dient men meteoren te vergelijken met dezelfde afstand tot radiant en horizon, of moet men met behulp van formule 3 de lengte van de sporen berekenen. Men moet dus een duidelijk onderscheid maken tussen de reële en de schijnbare lengteveranderingen van het spoor. Het zal duidelijk zijn, dat de tijdsduur van een meteorverschijning niet door schijnbare effecten wordt beïnvloed. In figuur 2 is weergegeven hoe de schijnbare lengte van een meteor afhangt van z en van δ .

Ook de schijnbare helderheid van een meteor hangt af van z . Indien het verschil tussen de schijnbare en de absolute helderheid ΔM is, en wij aannemen dat de meteoren op 100 km hoogte verbranden, dan geldt:

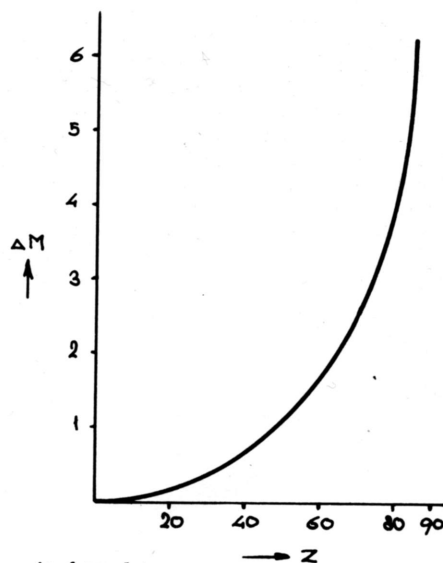
$$\Delta M = -5 \log \cos z + \frac{1}{4 \cos z}. \quad (4)$$



2. De schijnbare verandering in de lengte van een meteor bij verschillende zenitafstanden.

Figuur 3 geeft dit grafisch weer. Om de absolute helderheid van een meteor te bepalen, moet ΔM van de schijnbare helderheid worden afgetrokken.

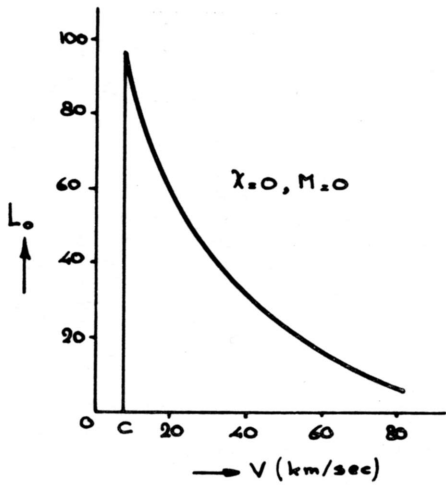
De constante in formule 2b, die o.a. van het atoomgewicht en de verdampingswarmte van de meteor en van H afhangt, kan men bepalen uit waarnemingen. Wij hebben hiervoor gegevens van Prentice gebruikt, volgens welke een Perseïde van $M = 0$, wiens radiant in het zenit staat, een lengte heeft van 17 km. Voor H hebben wij, zoals gezegd, 9 km aangenomen. In de praktijk kan men bovendien aannemen, dat de helderheid van een meteor in het zenit de absolute helderheid is. Het is duidelijk, dat nu uit formule (2b) conclusies zijn te trekken omtrent het gedrag van meteoren in verschillende omstandigheden. In de eerste instantie zullen wij twee gevallen onderscheiden, t.w. dat van meteoren die tot verschillende zwermen behoren (en dus verschillende snelheden hebben) en dat van meteoren die tot eenzelfde zwerm behoren.



3. Het verschil tussen de schijnbare en de absolute helderheid van een meteor voor verschillende zenitafstanden.

I METEOREN VAN VERSCHILLENDE ZWERMEN.

Uit (2b) kunnen wij bepalen hoe de lengte van een spoor afhangt van de snelheid van de meteor. Omdat langzame meteoren, die een helderheid nul hebben, hiervoor een grotere beginmassa gehad moeten hebben (zie formule 1), en omdat zij door de lagere snelheid minder wrijving van de lucht ondervinden, zullen zij minder snel verdampt zijn als snellere meteoren, en een langer spoor trekken. Figuur 4 geeft weer hoe groot dit effect is voor meteoren, wier schijnbare radiant in het zenit staat en die een absolute helderheid nul hebben.



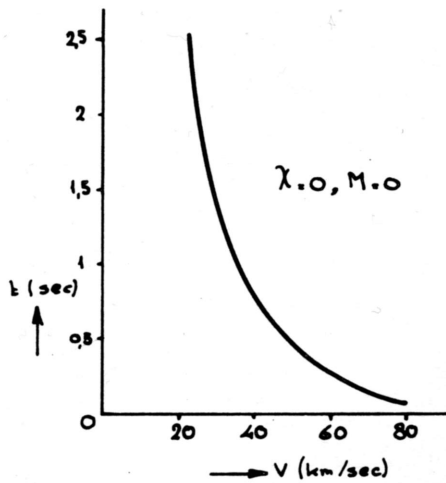
4. Het verband tussen de lengte (in km) en de snelheid van een meteor.

Voor andere meteoren geldt een dergelijke grafiek, alleen moet men dan de waarden voor L_0 opvatten als relatieve waarden. Dit betekent, dat onder gelijke omstandigheden een Perseïde gemiddeld een twee keer zo lang spoor vormt als een Leonide, en een twee keer zo kort spoor als een Quadrantide. De snelheden zijn hier resp. 60, 72 en 40 km/sec.

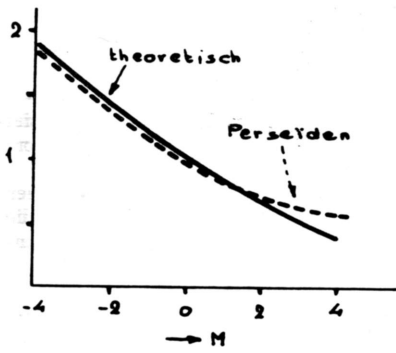
In de grafiek is C de circulaire snelheid van een lage aardsatelliet. Indien meteoren een lagere snelheid zouden hebben, dan kunnen zij slechts van Aardse oorsprong zijn. Een meteor die een snelheid heeft tussen C (7,9 km/sec) en 11,2 km/sec, moet voor hij in de dampkring terecht kwam, een aantal banen rond de Aarde hebben beschreven. Indien de meteor tenslotte een snelheid heeft die hoger is dan een bepaalde snelheid, die afhangt van de afstand van het radiant tot de Zon, dan moet hij van buiten het zonnestelsel komen. T.o.v. de Aarde is deze snelheid ten hoogste 72 km/sec.

Figuur 5 geeft het verloop aan van de tijd, die een meteor duurt (weer voor $\chi = 0$, $M = 0$), afhankelijk van zijn snelheid. Een Perseïde duurt iets korter dan 0,3 sec. Een Leonide duurt volgens de grafiek twee keer zo kort als een Perseïde, en Quadrantide $2\frac{1}{2}$ keer zo lang. Voor $M = 0$ en $\chi = 0$ zijn deze tijden resp. 0,1 en 0,8 sec.

Inderdaad duren Quadrantidensporen naar ervaringen van de schrijver aanzienlijk langer dandie der Perseïden, en Leonidesporen duidelijk korter. De α -Capricorniden lijken, naar uit een foto van Degewij, Ten Haaf en Naber en uit visuele waarnemingen volgt, wat korter dan de grafiek voorspelt. Dit zou er op kunnen wijzen dat de deeltjes van deze (langzame) zwerm een andere samenstelling hebben als de Perseïden, omdat de tijdsduur van een spoor ook afhangt van de verdampingswarmte en het atoomgewicht van het materiaal waaruit het oorspronkelijke deeltje is opgebouwd.



5. De invloed van de snelheid op de tijdsduur van een meteor.



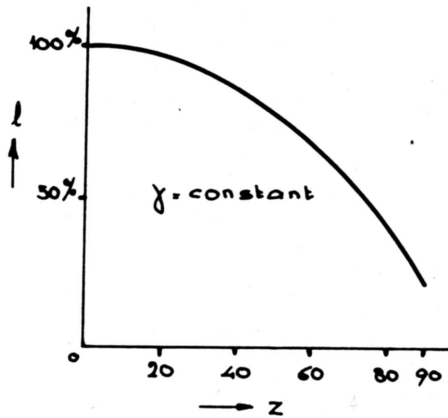
Voor zwermmeteoren ligt de snelheid vast. Dit geeft ons de mogelijkheid te onderzoeken hoe de lengte, en dus de tijdsduur volgens $t = \frac{L}{v}$, afhangt van de helderheid van de meteor M . Het resultaat is weergegeven in fig. 6. De waarden die door Prentice voor de Perseiden zijn gevonden zijn aangegeven met een stippellijn. Men ziet, dat zijn waarnemingen vooral voor helderder meteoren bijzonder goed overeen komen met theoretisch berekende waarden. Uit de grafiek volgt dus o.a. dat een meteor van magnitude nul een twee keer zo kort spoor heeft als een meteor van de -4e grootte, die dezelfde snelheid heeft.

6. Het theoretisch en waargenomen verband tussen de helderheid en de lengte van de meteor.

Indien wij fig. 2 en fig. 3 met fig. 6 combineren, dan vinden wij het verloop van de schijnbare lengte l met de zenitafstand van de meteor, voor dezelfde schijnbare helderheid. In fig. 7 is dit grafisch weergegeven, waarbij met de kromming van de Aarde rekening is gehouden. Het effect komt als volgt tot stand: Enerzijds lijkt de meteor korter, als hij op grotere afstand verschijnt, anderzijds is de meteor langer omdat hij, om dezelfde schijnbare helderheid te krijgen, een grotere absolute helderheid moet hebben.

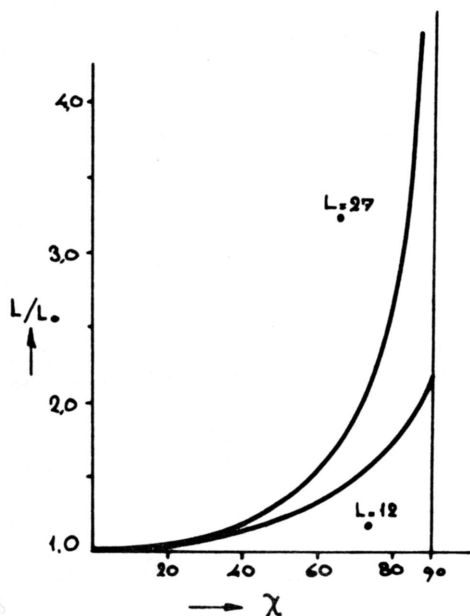
Het is duidelijk, dat een meteor die vlak boven de horizon verschijnt ondanks zijn geringere lengte langer zal duren dan een even heldere meteor die in het zenit verschijnt, omdat de tijdsduur van een meteor nu eenmaal niet beïnvloed wordt door de afstand tot de waarnemer. Om dit effect te berekenen moeten dus alleen fig. 3 en 6 gecombineerd worden (eerst de absolute helderheid berekenen uit fig. 3, vervolgens de tijdsduur uit fig. 6 en eventueel fig. 5).

7. De lengte van een meteor van dezelfde schijnbare helderheid op verschillende afstanden van het zenit (zie tekst)



Figuur 8 geeft een op het eerste gezicht merkwaardig effect weer, n.l. de afhankelijkheid van de lengte (en dus de tijdsduur) van de meteor van de zenitafstand van zijn schijnbare radiant. Omdat een meteor die in scheervlucht de atmosfeer binnendringt, minder snel in de dichtere lagen van de dampkring terecht komt dan een meteor wiens baan loodrecht op de dampkring staat, zal een meteor die een radiant nabij de horizon heeft, gemiddeld langer duren dan een meteor wiens radiant in het zenit staat. Dit betekent dat het, ondanks de lagere frequentie, de moeite waard is op meteorenjacht te gaan als de radiant nog laag boven de horizon staat, omdat de meteoren die verschijnen veel langer en mooier zullen zijn. De schrijver herinnert zich in dit verband de verschijning van een prachtige, lange Leonide in 1965, die verscheen toen de radiant nog maar ongeveer twaalf graden boven de horizon stond.

In figuur 8 is de afhankelijkheid van de relatieve verlenging en de zenitafstand van de radiant voor twee veelvoorkomende gevallen weergegeven. Uit figuur 6 en figuur 4 en 5 kan men de absolute waarden voor resp. de lengte en de tijd bepalen. Uit fig. 8 kan men concluderen, dat het verlengingseffect hier niet, zoals in b.v. fig. 5, onafhankelijk is van de helderheid van de meteor, maar bij heldere meteoren veel sterker optreedt dan bij zwakke.



Om dit te illustreren, is in figuur 9 weer-gegeven hoe lang een spoor van een meteoor die in scheervlucht de dampkring binnendringt wordt, als functie van de lengte die hij zou hebben indien hij loodrecht door de dampkring dringt. Deze lengte neemt zo snel toe, dat voor de duidelijkheid een logaritmische schaal voor L_{90} moest worden gekozen. Omdat voor grote L_0 de schaalhoogte niet meer als een constante mag worden opgevat, zal de grafiek in werkelijkheid nog steiler moeten zijn voor grotere L_0 .

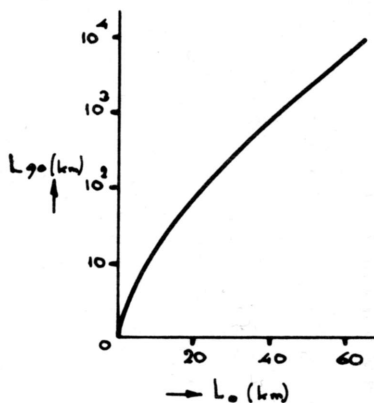
Het is duidelijk dat de kans op een extreem lang spoor minimaal is. Een meteoor zal n.l. niet alleen de atmosfeer in scheervlucht moeten binnendringen, maar ook nog een specifieke snelheid t.o.v. de Aarde moeten hebben om de kromming van de Aarde te kunnen volgen. Heeft hij een te grote snelheid, dan schiet hij weer uit de dampkring voor hij geheel verbrand is.

Het is interessant dat bovenstaande uiterst zeldzame geval zich inderdaad een keer heeft voorgedaan. Op 9 februari 1913 verscheen er namelijk boven Canada een stoet vuurbollen, die tot in Brazilië zijn waargenomen, d.w.z. over een afstand van

8. De invloed van de zenitafstand van de radiant op de lengte van een meteoor.

meer dan tienduizend kilometer. Alles wees er op, dat er een natuurlijke aardsatelliet verbrand was, die onder invloed van de luchtdeeltjes uiteen was gevallen. De lengte van de sporen van deze vuurbollen, die later Cyrilliden zijn genoemd, kan slechts worden verklaard als men aanneemt dat de oorspronkelijke meteoriet voordat hij verbrandde een nauwe baan rond de Aarde beschreef. De kans dat zoiets zou optreden is nog veel kleiner dan de kans op een meteorieteninslag.

Tegenwoordig is er door de kunstmatige satellieten verandering in de situatie gekomen. Deze voorwerpen voldoen aan de voorwaarde dat zij een baan rond de Aarde beschrijven en dat zij de dampkring onder een zeer kleine hoek moeten binnendringen, waardoor zij in staat zijn zeer lange verbrandingsporen achter te laten. Ook vallen zij tijdens het verbranden uiteen. Verbrandende kunstmanen zijn dus op te vatten als "kunstmatige Cyrilliden".



9. Het verband tussen de minimale en maximale lengte van een meteoor.

CONCLUSIE.

De lengte van een meteoor hangt op complexe wijze van een groot aantal factoren af. Omdat de processen die zich tijdens het verbranden van een meteoor afspelen nog slechts gedeeltelijk begrepen zijn, zullen de resultaten van dit artikel slechts een benadering van de werkelijkheid vormen.

Het zou interessant zijn de conclusies van dit artikel eens met de werkelijkheid

te vergelijken en lengtemetingen aan meteoren te verrichten. Wellicht zal zo een campagne een interessante uitbreiding kunnen betekenen van het waarnemingsprogramma van de Werkgroep Meteoren.

Literatuur:

P.M. Millman: "Meteors".

J.P.M. Prentice: "Meteors", een artikel verschenen in "Reports on progress in physics", vol. XI, p. 389, 1948.

P.M. Millman and D.W.R. Mc Kinley: The Moon, Meteorites and Comets, ed. G.P. Kuiper and B.M. Middlehurst, University of Chicago Press 1963, blz. 755

DE DYNAMISCHE EVOLUTIE VAN HET SATELLIETENSYSTEEM VAN NEPTUNUS.

Neptunus' manen volgen, in vergelijking met die van de meeste andere manen in het zonnestelsel, vreemde banen. Triton, die met een twee keer zo grote massa als onze Maan de grootste Neptunusmaan is, draait in een bijna cirkelvormige baan rond Neptunus in teruglopende zin. De afstand van Triton tot Neptunus is praktisch gelijk aan die van de Maan tot de Aarde.

De tweede maan, Nereïde, draait weliswaar in directe zin rond Neptunus, doch volgt een zeer excentrische baan met een halve grote as die bijna twintig keer zo groot is als die van Tritons baan.

The Astronomical Journal bericht, dat er onlangs baanberekeningen zijn verricht over deze manen, die hebben geleid tot verrassende conclusies omtrent de geschiedenis en de toekomst van dit stelsel.

Het is gebleken, dat Triton onder invloed van de getijdenwerking op Neptunus en doordat zijn draairichting rond Neptunus tegengesteld is aan de richting van de aswenteling van deze planeet, een steeds nauwere baan rond Neptunus moet gaan volgen. Berekening leert, dat Triton vroeger een zeer wijde baan om Neptunus heeft beschreven, die zelfs parabolisch geweest kan zijn binnen de leeftijd van het zonnestelsel. Dit zou betekenen dat Triton vroeger door Neptunus is ingevangen. Vervolgens is Triton langzaam naar Neptunus gaan spiralisieren, waardoor hij de baan van Nereïde steeds dichter naderde. Hij stoorde deze maan zo sterk, dat deze uiteindelijk de vreemdsoortige baan kreeg die hij nu volgt. Indien Pluto inderdaad tot het satellietensysteem van Neptunus heeft behoord, dan zou een zeer dichte nadering van Triton er de oorzaak van zijn dat hij nu een onafhankelijke baan om de zon beschrijft.

De invloed van de getijdenwerking is intussen zo sterk geworden, dat volgens de berekeningen de baanveranderingen aantoonbaar zijn geworden. In de toekomst zal dit proces zich voortzetten, en Triton Neptunus steeds sneller gaan naderen, totdat tenslotte de getijdenkrachten op Triton zo sterk zijn geworden dat hij vernietigd wordt. Dit zal over tien tot honderd miljoen jaar gebeuren, hetgeen in vergelijking met de leeftijd van het zonnestelsel een korte tijd is. Het is mogelijk dat Neptunus dan evenals Saturnus een ring krijgt, terwijl omgekeerd de ringen van Saturnus in het verleden zouden zijn ontstaan door het vernietigen van een retrograad draaiende sateliet.

Ook de andere manen in het zonnestelsel, die snel in retrograde zin banen rond planeten beschrijven wacht een dergelijk lot. De direct draaiende manen zullen