

# Fonkelende sterren met het blote oog: historische en fysische aspecten<sup>(1)</sup>

Alexis Merlaud en Romain Maggiolo

(Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie)

**H**ET FONKELEN VAN STERREN (scintillatie) heeft veel inkt doen vloeien en diverse theorieën werden door de eeuwen heen naar voren gebracht om dit fenomeen, dat elke nachtelijke wandelaar kan waarnemen, uit te leggen. In dit artikel stellen we enkele van deze theorieën voor. We proberen te kijken hoe verschillende auteurs vanaf de Griekse oudheid tot vandaag hebben bijgedragen tot onze huidige kennis. Daarbij is het noodzakelijk om enkele optische begrippen te introduceren. Het is immers geen triviaal probleem, anders zouden Aristoteles, Galileo en Newton niet verschillende theorieën naar voor voren gebracht hebben. Dit artikel richt zich echter tot een breed publiek en benadrukt eerder de geschiedenis van de ideeën dan de fysische details.

Je moet niet noodzakelijk de sterrenbeelden kennen om aan de nachtelijke hemel een ster van een planeet te onderscheiden. Spica en Saturnus stonden bijvoorbeeld dicht bij elkaar in juli 2011 en waren zichtbaar boven de zuidwestelijke horizon bij het begin van de nacht. De helderheid van beide hemellichamen is min of meer gelijk, maar de ster Spica fonkelt, in tegenstelling tot de planeet Saturnus. Die afwezigheid van het fonkelen geldt voor alle planeten die met het blote oog zichtbaar zijn. Het fonkelen van sterren uit zich in een

snelle afwisseling in intensiteit. Voor de sterkst schitterende onder hen, zoals Sirius, onderscheidt men ook veranderingen in kleur. De Griekse etymologie voor planeet, dwaalster, onderstreept het tweede verschil met de sterren vanuit het standpunt van een waarnemer: terwijl de sterren onbeweeglijk lijken aan de hemel, veranderen de planeten van positie ten opzichte van de sterrenbeelden. De eerste astronomen moesten de combinatie van die twee fenomenen, de afwezigheid van het fonkelen en hun schijnbaar onregelmatige beweging, uitleggen zonder kennis over de aard van de hemellichamen. Bovendien wisten ze niets over het fonkelen op zich. Het fonkelen van de sterren en de afwezigheid ervan bij planeten is zonder twijfel één van de oudste sterrenkundige waarnemingen door de mens.

De oudste overlevende rationele interpretatie verscheen in de verhandeling *Over de Hemel* van Aristoteles in de vierde eeuw voor Christus. In die tijd werd de visuele waarneming door een aantal geleerden, waaronder Plato, beschouwd als een actief proces verwant aan het tasten: een *visuele straal* werd van het oog naar het object gezonden. Aristoteles verzette zich tegen deze theorie in verschillende van zijn boeken, door bijvoorbeeld op te merken dat ze niet kan uitleggen waarom het moeilijk is om te kunnen zien in het donker. Maar paradoxaal genoeg gebruikte hij het concept van de *visuele straal* om twee fenomenen uit te leggen: de regenboog en het fonkelen van sterren. In het tweede geval deed hij beroep op de grote afstand tussen de sterren en de waarnemer:

*“ons zicht, door een grote afstand af te leggen, flakkert en werfelt door haar zwakte”,* integendeel, *“de planeten zijn onze burens, en ons zicht heeft daarom voldoende kracht om tot bij hen te geraken”* [1].

De invloed van Aristoteles' ideeën, en dit op alle vlakken, was aanzienlijk in het Westen en de moslimwereld. Terwijl Europese filosofen de studie van oude teksten nog zagen als een manier om de natuur te begrijpen, ontwikkelden de Arabische filosofen een andere methode die zo kan samengevat worden: ervaring is de enige rechter. Zo was Alhazen (figuur 1), een wijze uit de 10<sup>de</sup> eeuw afkomstig uit Bassorah in het huidige Irak, één van de pioniers van de optica en van de wetenschappelijke methode in het algemeen. Hij weerlegde de theorie van de visuele straal, bestudeerde reflectie en refractie, en bewees onder andere de rechtlijnige voortplanting

Figuur 1. Alhazen (965-1040).



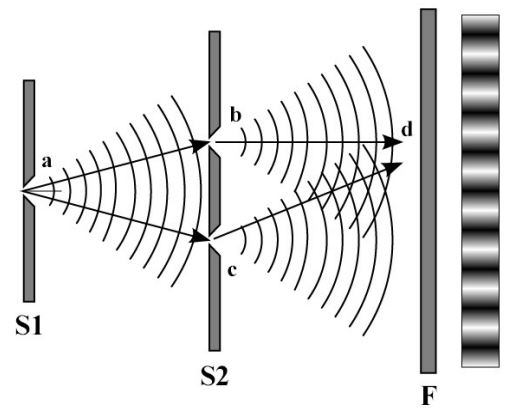
Dit artikel verscheen eerder in *Ciel et Terre*, mei-juni 2011, p. 72-76. Met dank aan Silke De Keyser voor de vertaling.

van het licht. Hij lijkt de eerste te zijn die op het idee kwam om het fonkelen van sterren door veranderingen van refractie in de atmosfeer uit te leggen [2]. Deze theorie werd bijna twee eeuwen later weer opgepikt door een Andaloesische opvolger van Alhazen, Averroes, in diens opmerkingen over het werk van Aristoteles. Veranderingen van refractie kunnen de voortplantingsrichting van het licht wijzigen, wat ook luchtspiegelingen verklaart. Hoewel refractie een rol speelt in ons huidige begrip van het verschijnsel, is het maar een deel van de verklaring en verklaart het niet waarom enkel sterren fonkelen.

De optische opvattingen van de Arabieren werden in de 13<sup>de</sup> eeuw doorgegeven en verdedigd door Roger Bacon [3] en Witelo [5]. Deze twee auteurs verenigden de Arabische opvattingen over het fonkelen van sterren met de verklaringen van Aristoteles. Eigenaardig genoeg werd de refractiehypothese afgewezen door diegenen die zelf aan de copernicaanse revolutie werkten, ten voordele van verklaringen die vandaag veel fantasierijker lijken. Zo legde Tycho Brahe het fonkelen uit door zich in te beelden dat de sterren bedekt zijn met facetten en rond zichzelf draaien, zoals weerkaatsende discobollen. Volgens hem draaien de planeten niet, met als gevolg dat ze ook niet fonkelen. In een brief aan Kepler op 26 maart 1611, uitte Galileo zijn visie op de kwestie: "Ik geloof dat wij eerbaar zullen filosoferen door het fonkelen van sterren toe te schrijven aan de trilling die zij aan hun eigen licht opleggen, wat wil zeggen aan een licht dat geboren wordt in hun eigen substantie terwijl aan het oppervlak van planeten het zonlicht stopt en teruggekaatst wordt" [4]. De stelling van de Toscaan is juist en hij was de eerste om het te verwoorden: de planeten produceren niet hun eigen licht, in tegenstelling tot de sterren. Maar zijn conclusie is fout: de planeten, zoals we zullen zien, kunnen fonkelen in bepaalde omstandigheden. Kepler stelde meerdere theorieën voor, waaronder ook die van Brahe en Galileo. Hij vermeldde een

mogelijk effect van de atmosfeer zonder er echter bij stil te staan. Voor Descartes, die vooral refractie vrij goed kende, was het fonkelen van sterren te verklaren door de aanwezigheid van maalstromen die de sterren omgeven. We zullen hier niet verder ingaan op de maalstromen van Descartes, maar zoals we zien, staat zijn verklaring dichter bij onze huidige opvatting dan die van Galileo. Eigenlijk waren het de Engelsen Hooke en Newton die het idee van de refractie door de atmosfeer weer opnamen in de tweede helft van de 17<sup>de</sup> eeuw. De eerste beeldde zich in dat de onregelmatigheden in de verdeling van de temperatuur in de atmosfeer "kleine convexe of concave lenzen van lucht" veroorzaken, die respectievelijk de grootte van het beeld van een ster zouden doen uitzetten of inkrimpen. Dit is een redelijk idee, maar vandaag weet men dat deze onregelmatigheden te uitgestrekt zijn om een merkbaar effect te kunnen hebben op een opening van de grootte van een oog. Newton, die de atmosferische oorsprong van het fonkelen van sterren in zijn *Optica* ter sprake bracht, stelde voor om telescopen op de top van hoge bergen te plaatsen, waar een "kalme en serene lucht [...] boven vuile dampen" heerst.

Een gemeenschappelijk trekje tussen alle hierboven beschreven verklaringen is de opvatting dat het licht uit atomen bestaat, toegelicht door Newton. Deze volgen de stralen, waarvan Alhazen bewezen heeft dat ze rechtlijnig zijn en afgebogen worden door refractie en reflectie. In 1801 echter, gooide Thomas Young de traditionele opvatting ondersteboven in één van de belangrijkste experimenten in de geschiedenis van de fysica, het 'tweespletenexperiment' (figuur 2). Daarbij werd een scherm belicht doorheen twee gaten die geboord werden in een zwarte plaat. Het resultaat was verassend: op het scherm kon men een afwisselend licht en donker golfachtig patroon zien. Dit kon echter vrij gemakkelijk geïnterpreteerd worden als men, zoals Huygens het had verondersteld, beschouwt dat het licht een golvend gedrag heeft en onder-



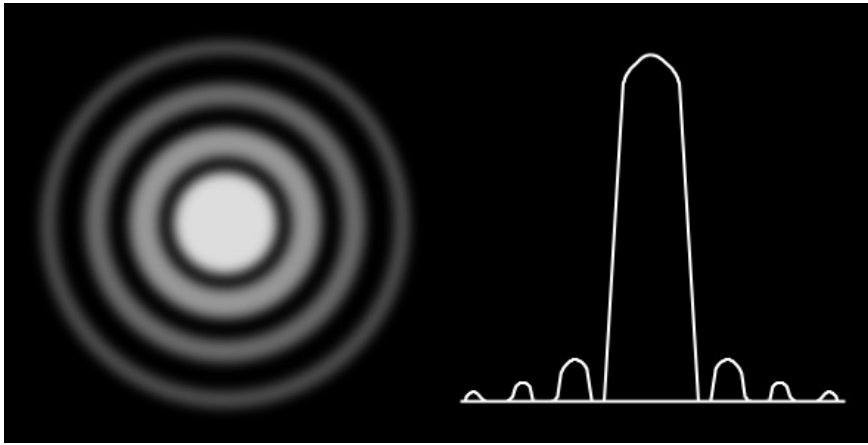
Figuur 2. Het tweespletenexperiment van Young. Figuur: *Physics of the Universe*.

worpen is aan interferentiefenomenen, zoals de golven aan het oppervlak van een meer. In deze theorie komt de kleur overeen met de golflengte van het licht. Deze ontdekking is fundamenteel voor de huidige verklaring van het fenomeen dat ons interesseert, maar Young zelf was zich daar niet van bewust, want hij bekende dat hij het fonkelen niet echt begreep.

Iets na het experiment van Young, en dankzij zijn kennis hierover, stuurde de Franse astronoom François Arago (figuur 3) een brief aan zijn vriend en wetenschappelijk onderzoeker, de Duitser Alexander Von Humboldt. Deze brief werd gepubliceerd in het boek van deze laatste, *Relation historique du Voyage aux Régions équinoxiales du Nouveau Continent, etc.*, in 1814. Arago gebruikte in zijn bericht de veronderstelling dat licht een golfverschijnsel is om het fonkelen van

Figuur 3. François Arago (1786-1853).





Figuur 4. Afbeelding van diffractie in een telescoop. Figuur: *Starizona*.

sterren uit te leggen: de interferentie-fenomenen kunnen net zo goed de snelle afwisseling in intensiteit als de kleurveranderingen verklaren. In een scriptie die in 1840 voorgesteld werd aan het Institut de France [5], beschrijft hij eerst de ontstaansgeschiedenis van zijn ideeën. Terwijl hij in zijn telescoop naar het beeld van een ster keek (figuur 4), nam hij soms een centrale lichtgevende schijf waar die omgeven werd door concentrische cirkels: dit diffractiepatroon leek sterk op de interferenties van Young. Door de positie van het oculair te laten variëren, werd het beeld van de ster minder scherp, maar de concentrische cirkels verplaatsten zich en de lichtgevende schijf in het centrum werd donker. De positie van het oculair bepaalt de optische weg binnenin de telescoop, die op zijn beurt de interferentiezones wijzigt. Voor het blote oog zijn het de onregelmatigheden van de refractie in de lagen van de atmosfeer, die zelf in beweging is als gevolg van winden, die de optische weg veranderen. In dezelfde tekst verwerpt Arago één na één de eerder naar voren gebrachte verklaringen van meer dan dertig auteurs na Aristoteles. Dan rest er nog de vraag over de afwezigheid van het fonkelen bij planeten. Arago antwoordt hierop door op te merken dat de hoek waaronder we een planeet zien (de schijnbare diameter) veel groter is dan die van eender welke ster, daar we de planeetschijf dikwijls al kunnen zien met een kleine verrekijker. In deze omstandigheden

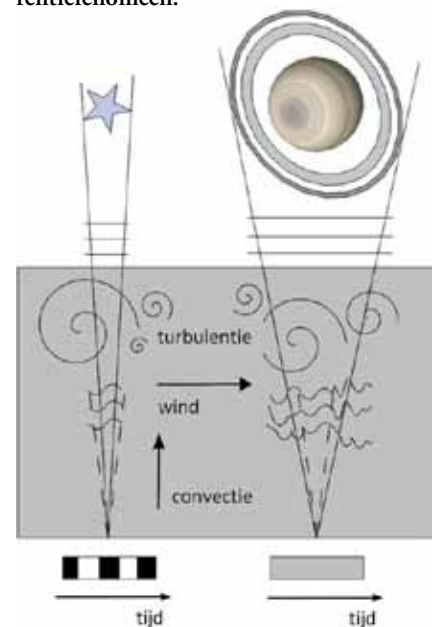
zijn de onregelmatigheden die het golffront van het licht ontmoeten, gewoon te 'onregelmatig', wat wil zeggen dat ze te talrijk zijn en verschillende effecten hebben. Bijgevolg doet het effect van de onregelmatigheden zich teniet (uitmiddelen van constructieve en destructieve interferentie) en komt het fonkelen niet voor.

Na Arago, die in zijn scriptie van 1840 meerdere concepten van een meetinstrument voor het fonkelen (scintillometer) voorstelde, werd door meerdere onderzoekers een systematische kwantificering van dit fenomeen uitgevoerd in de hoop de weersomstandigheden te voorspellen (zie kaderstuk). De Belg Montigny, net als bijvoorbeeld Lord Rayleigh, neemt de verklaring van Arago niet aan. Tijdens de 20<sup>ste</sup> eeuw liet de theoretische vooruitgang bij het modelleren van atmosferische turbulentie toe het effect van deze turbulentie op het licht te bestuderen. Meer en meer leek het erop dat interferentie-fenomenen aan de oorsprong liggen van het fonkelen, althans in het geval van het zicht met het blote oog.

Het ontbrak Arago echter aan een belangrijk concept om preciezer uit te leggen waarom planeten niet fonkelen, namelijk de idee van samenhang in ruimte of ruimtelijk coherentie. Dit concept werd voor het eerst door Fresnel geïntroduceerd. Young begreep dit echter niet, terwijl het nochtans aan de basis ligt van de interferenties die verantwoordelijk zijn voor het fonkelen. De ruimtelijke co-

herentie betekent dat in twee punten het golffront gecorreleerd moet zijn, wat wil zeggen dat het faseverschil (verschil in positie ten opzichte van de golftop) constant is doorheen de tijd. Dit is het geval voor een puntbron. In figuur 2 wordt de ruimtelijke correlatie gegarandeerd door het puntvormige gat in het eerste scherm, dat een klein deel selecteert van het licht uitgezonden door de bron, die een zekere grootte kan hebben zoals bijvoorbeeld een kaarsvlam. Lasers zijn ruimtelijk coherent, maar in de natuur zijn er zeer weinig van dit soort bronnen. Ruimtelijke coherentie kan zich vormen tijdens het traject van het licht in de ruimte tot bij ons. Dit resultaat werd in de jaren 1930 bewezen door twee Nederlandse fysici: Van Cittert en Zernike, onafhankelijk van elkaar. Het bewijs is nogal technisch, maar het is niet noodzakelijk het in detail te volgen om het resultaat te begrijpen: de ruimtelijke coherentie is het gevolg van met een puntbron te maken te hebben. De sterren of de planeten zijn uitgestrekte bronnen, maar van ver gezien lijken ze puntvormig en hun licht is coherent wanneer het aankomt in de top van de atmosfeer. Bij het binnengaan van de atmosfeer (figuur 5) verandert de vorm van de golf-

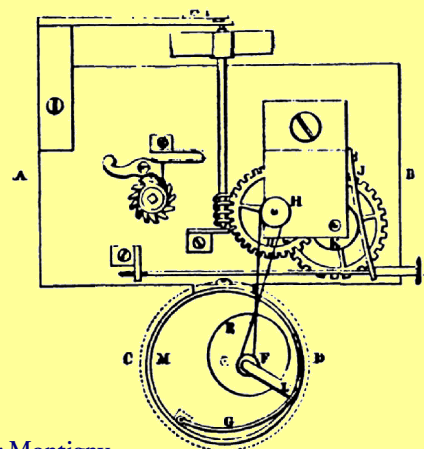
Figuur 5. Het fonkelen van sterren zoals we het vandaag begrijpen: een interferentie-fenomeen.



## 125 jaar geleden ...

Naarmate we de rol van de verschillende parameters van een fysisch verschijnsel beter begrijpen, kunnen we gebruik maken van deze kennis om voorspellingen te doen. In de tweede helft van de 19<sup>de</sup> eeuw was de dominante rol van de toestand van de atmosfeer bij het fonkelen van de sterren een onbetwist feit. De technologische ontwikkelingen stonden toe instrumenten te bouwen die de variaties in intensiteit en kleur konden kwantificeren.

De Belg Montigny (1819-1890) heeft zo scintillometers ontwikkeld en een behoorlijk aantal observaties gerealiseerd. Deze naaste medewerker van Quetelet en lid van de Academie was medewerker van de Sterrenwacht en heeft de relaties tussen de klimaatomstandigheden en de intensiteit van het fonkelen in detail bestudeerd. Hij nam de interferentietheorie om het fenomeen te verklaren niet aan en verkoos liever dispersiefenomenen [7]. In nummer 6 van [8] legt hij de correlaties tussen de luchttemperatuur, de aanwezigheid van water in diverse vormen in de atmosfeer, en het fonkelen van sterren uit. Hij beëindigt zijn artikel met de hoop dat fonkelen zal kunnen dienen om het weer te voorspellen. Hij was er zich niet echt van bewust, maar zijn werk wordt ruimschoots geciteerd in de wetenschappelijke literatuur, onder andere door de Nobelprijswinnaars Rayleigh et en Chandrasekhar, en heeft het mogelijk gemaakt om vooruitgang te boeken in het begrijpen van het fenomeen...



Figuur 6. Eén van de scintillometers gebouwd door Montigny

fronten door de onregelmatigheden in de brekingsindex van de lucht. Die worden veroorzaakt door variaties in de luchtdichtheid, die op hun beurt ontstaan door temperatuursveranderingen. Door convectie (verticale beweging van luchtmassa's door temperatuursverschillen) en winden (horizontale beweging van luchtmassa's), wervelen de luchtmassa's met verschillende brekingsindex voortdurend. Daardoor veranderen ze voortdurend de vorm van de golfvronten, zowel van sterren als van planeten. Maar er is een zekere afstand binnen dewelke de punten van een golfvront gecorreleerd blijven (correlatie-afstand). Deze afstand hangt af van de toestand van de atmosfeer: het is min of meer de grootte van de luchtmassa's met verschillende brekingsindex. Tevens spelen de verschillen in brekingsindex een rol. Men definieert een hoek, de hoek van isoplanatisme [8], binnen dewelke de punten van een golfvront gecorreleerd blijven. De schijnbare diameter van sterren is kleiner dan deze hoek, terwijl de situatie net omgekeerd is voor planeten. Dit brengt respectievelijk de aanwezigheid en de afwezigheid van het fonkelen met zich mee.

Een laatste bemerking: de hoek van isoplanatisme vermindert wanneer de turbulentie van de lucht toeneemt. Wanneer de atmosfeer daarentegen extreem kalm is, neemt deze hoek toe en kan men zich inbeelden dat hij groter wordt dan de schijnbare diameter van een planeet, zodat deze begint te fonkelen. Hiervoor moet de convectie teruggebracht worden tot een minimum. Omdat convectie ontstaat wanneer de grond overdag opgewarmd wordt door de Zon, zijn de beste omstandigheden dus de winter op Antarctica tijdens de poolnacht. Zo heeft Loyd [9] de kans gehad Jupiter te zien fonkelen tijdens een observatiecampagne op Antarctica in 1995 en 1996.

### Besluit

Men kan het fonkelen van sterren toeschrijven aan de bron, het traject of aan het oog. In feite zijn ze alle drie betrokken. De schijnbare diameter van de bron moet kleiner zijn dan een hoek die karakteristiek is voor de atmosfeer. Voor waarnemingen door een telescoop spelen naast scintillatie nog andere verschijnselen een rol. Dit zal het onderwerp zijn van een volgend artikel.

### Bibliografie

- [1] Aristoteles, Boek II, Hoofdstuk VIII, *Verhandeling over de Hemel*, 350 voor Christus.
- [2] Draper J. W., *History of the intellectual development of Europe*, Harper, 1865.
- [3] Roger Bacon, *Opus Majus*, Deel V, Hoofdstuk VII, 1267.
- [4] Palmieri P., *Galileo and the Discovery of the Phases of Venus*, *Journal for the History of Astronomy* 32, no. 2 (2001): 109-129.
- [5] Arago, *De la scintillation*, Mémoire à l'institut, 1840.
- [6] Montigny, *La scintillations des étoiles dans ses rapports avec les phénomènes météorologiques*, Ciel et Terre, 6, 1885.
- [7] Montigny, Mémoires de l'Académie de Bruxelles, *La cause de la scintillation ne dériverait-elle point de phénomènes de réfraction et de dispersion?*, 28, 1856.
- [8] Fried David L., *Anisoplanatism in adaptive optics*, *Journal of the Optical Society of America* 72, no. 1 (January 1, 1982): 52.
- [9] Loyd et al., *The Potential of Differential Astrometric Interferometry from the High Antarctic Plateau*, *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 2002, 19, 318-322.