

Fonkelende sterren: adaptieve optica⁽¹⁾

Alexis Merlaud en Romain Maggiolo

(Belgisch Instituut voor Ruimte-Aëronomie)

SINDS DE EERSTE OFFICIËLE voorstelling van de astronomische verrekijker in 1609 werden optische instrumenten voor het waarnemen van de hemel voortdurend geperfectioneerd. Het is voor een groot deel dankzij deze instrumenten dat wij vandaag een zo gedetailleerde kennis hebben van het universum en de sterren die het bevolken.

Technische vooruitgang heeft ertoe geleid dat de resolutie van optische instrumenten (de minimale afstand tussen twee nabijgelegen punten waarbij ze nog onderscheiden kunnen worden) en de gevoeligheid ervan (de minimale nog meetbare intensiteit van een lichtsignaal) steeds verbeterde. Nochtans zijn de intrinsieke capaciteiten van het instrument niet de enige factoren die de kwaliteit van de observaties beperken. Zoals we ter sprake brachten in een vorig nummer van *Heelal* (augustus 2012, blz.252), ondergaat het licht de effecten van atmosferische turbulentie. Dit vertroebelt de beelden en vermindert het contrast en de resolutie ervan. Adaptieve optiek staat toe die verstoringen te corrigeren. Het is een relatief recente tak van de astronomische instrumentatie die nog volop in ontwikkeling is.

Dit artikel heeft tot doel er een globale omschrijving van te geven zonder in te complexe technische details te treden.

Dit artikel verscheen eerder in *Ciel et Terre*, juli-augustus 2011, p. 105-108. Met dank aan Silke De Keyser voor de vertaling.

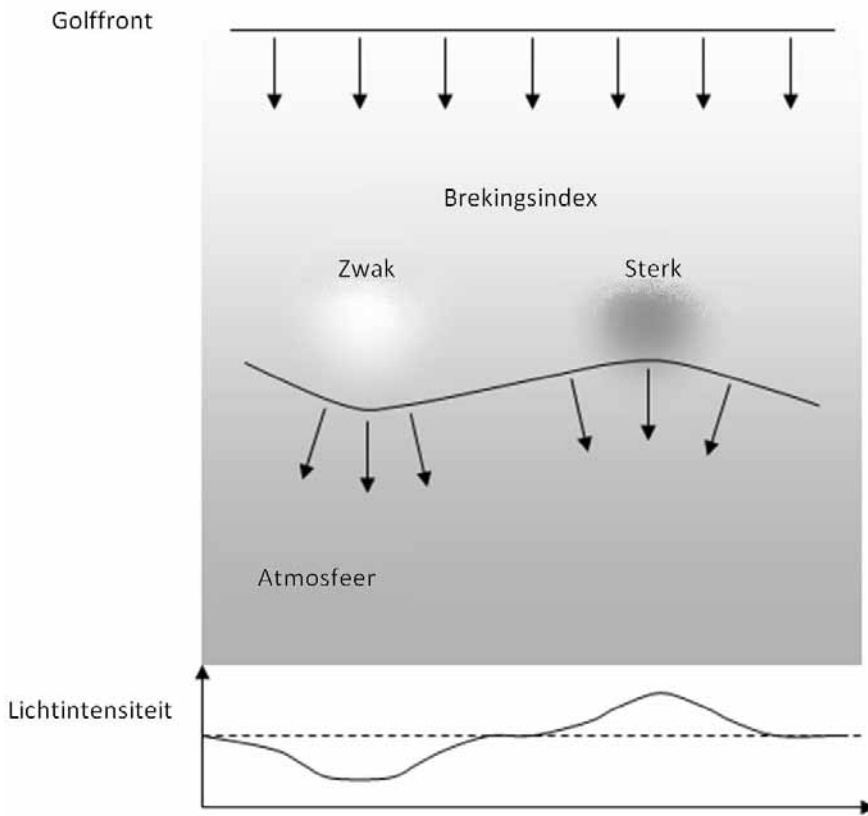
Aberratie veroorzaakt door atmosferische turbulentie

In 1666 bracht Isaac Newton het principe van de reflectortelecoop, drie jaar voordien voor het eerst beschreven door de Schot James Gregory, in de praktijk. Hij gebruikte toen een bronzen spiegel met een diameter van 2.5 cm. Heden ten dage bedraagt de diameter van de allergrootste telescopen meer dan 10 m. Deze toename in grootte heeft een eenvoudige reden: de maximale resolutie die een telescoop kan verkrijgen, hangt af van zijn opening. Hoe groter de telescoop, des te hoger is zijn resolutie. Zo heeft een telescoop van 10 meter diameter een theoretisch scheidend vermogen van ongeveer 0.015 boogseconden (dit is gelijk aan $4.16 \cdot 10^{-6}$ graden). Deze theoretische

limiet veronderstelt dat men over een 'perfect' instrument zou beschikken, zonder gebrek of afwijking dat zijn resolutie zou verminderen. Nochtans kan zelfs een ideaal instrument geen observaties met een maximale resolutie leveren omwille van de turbulentie in de atmosfeer die de beelden 'vervaagt'. De allergrootste telescopen, zoals de twee Keck telescopen op Hawaï met een diameter van 10 m (figuur 1), hebben een resolutie equivalent aan een telescoop van 20 cm als men de atmosferische turbulentie-effecten niet corrigeert. De waarnemers worden dus geconfronteerd met een groot probleem: welk nut heeft het om steeds grotere instrumenten te ontwikkelen als hun prestaties toch beperkt blijven door de atmosferische waarnemingsomstan-

Figuur 1. De twee Keck telescopen op Mauna Kea in Hawaï. Foto: *Xavier M. Jubier*.





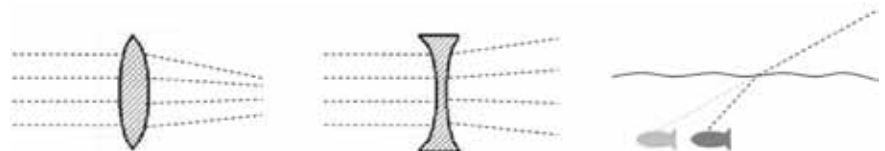
Figuur 2. Schematische voorstelling van de vervorming van het golffront wanneer het licht van een ster de atmosfeer doorkruist. De kromme onderaan stelt de variatie in lichtintensiteit voor die daar een gevolg van is.

digheden?

Het licht doorkruist de aardse atmosfeer vooraleer het de telescoop bereikt. De atmosfeer is echter niet homogeen. De luchtmassa's waaruit ze bestaat, hebben veranderlijke dichtheden en temperaturen. Deze inhomogeniteiten verstoren de afgelegde weg van het licht, wat de waarnemingen aan de grond verstoort. Luchtmassa's met verschillende dichtheden bezitten verschillende eigenschappen voor refractie (breking). De brekingsindex bepaalt de verhouding tussen de snelheid van het licht in vacuüm en de lichtsnelheid in het beschouwde milieu. We kunnen de analogie maken tussen de lichtgolven en de golven die gecreëerd worden aan het oppervlak van een meer waarin men een voorwerp gooit. Het golffront van een lichtgolf is dan het equivalent van de golftoppen. Wanneer het licht van een verafgelegen bron afkomstig is, zoals dat het geval is voor objecten die men observeert met een telescoop,

vormt het golffront een vlak. Zolang er geen verstoring is, verplaatsen de golffronten zich allemaal met dezelfde snelheid en blijven ze vlak. Bij het doorkruisen van de atmosfeer waarin de brekingsindex niet homogeen is, blijft de voortplantingssnelheid van het golffront niet meer uniform. Bepaalde delen van het golffront worden sterker vertraagd dan andere. Het golffront vervormt en wordt 'gerimpeld' (figuur 2). De informatie over de exacte positie en de intensiteit van de bron van de lichtgolf is dan gewijzigd. Men kan twee types verstoringen onderscheiden die verband houden met dit fenomeen: interferenties en geometrische effecten.

Figuur 3. Afbuiging van lichtstralen. Links: convergente lens. Midden: divergente lens. Rechts: refractie aan het oppervlak van een meer.



Interferenties liggen aan de basis van het fonkelen van sterren wanneer we ze observeren met het blote oog. De interferenties creëren nochtans verstoringen op kleine schaal (typisch de grootteorde van de grootte van het oog); de interferenties doen zich gemiddeld teniet voor grote telescopen. Dat is de reden waarom we ze achterwege laten in dit artikel. De geïnteresseerde lezer vindt meer informatie over scintillatie in een artikel over het fonkelen van sterren dat gepubliceerd werd in een vorig nummer van *Heelal* [1].

De wijzigingen in voortplantingsnelheid van het golffront door de inhomogeniteiten in de atmosfeer kunnen ook een verandering in haar voortplantingsrichting als gevolg hebben. Dit is wat men hier de geometrische effecten noemt. Wanneer de brekingsindex varieert, kunnen de lichtgevende stralen afgebogen worden. Het is op dit fenomeen dat het werkingsprincipe van lenzen steunt (figuur 3). Het glas van lenzen bezit een brekingsindex die groter is dan die van lucht. De kromming van de lens kan de lichtstralen concentreren (convergente lens) of divergeren (divergente lens). Als het scheidingsvlak tussen twee milieus met verschillende brekingsindex vlak is en de lichtstraal niet loodrecht op dat vlak invalt, dan zal de positie van de lichtbron gezien door de waarnemer anders lijken dan haar werkelijke positie. Dat is wat er gebeurt wanneer men doorheen het wateroppervlak naar een vis kijkt. Op dezelfde manier kunnen de verstoringen in de atmosfeer twee types effecten op het beeld van een ster veroorzaken. Het eerste type verstoring is de agitatie: de wijziging van de schijnbare positie van de ster. Het tweede type verstoring bestaat uit het variëren van de intensiteit van het sterrenlicht door het licht te concen-

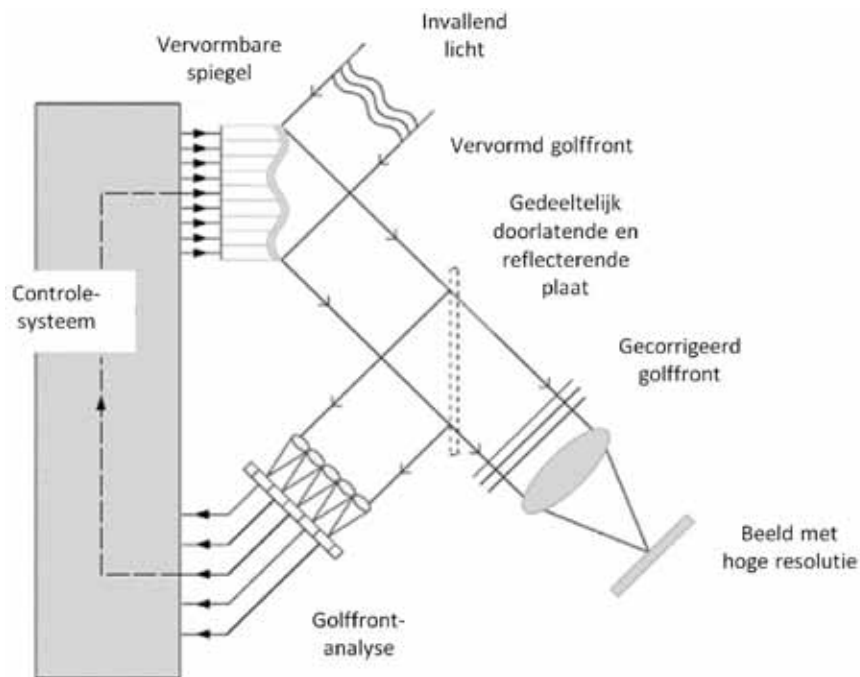
treren of te verdunnen (effect van een convergente of een divergente lens); dat is wat we het fonkelen noemen.

Het enige middel om te ontsnappen aan atmosferische storingen is het observeren vanuit de ruimte zoals de Hubble ruimtetelescoop dat al meer dan 20 jaar doet. De beperkingen qua budget, qua afmetingen, qua onderhoud (vijf vluchten met een ruimteveer werden gewijd aan het onderhoud van Hubble voor een... astronomische kost!), en het gebrek aan flexibiliteit eigen aan het observeren vanuit de ruimte, zorgen ervoor dat we toch niet zonder telescopen aan de grond kunnen.

Op Aarde zijn een aantal gebieden beter geschikt voor waarnemingen dan andere. Het gaat dan over hooggelegen gebieden, waar de atmosfeer zo dun mogelijk is en liefst waar deze zo rustig mogelijk is (geïsoleerde toppen, zeer droge gebieden ...). Newton had dat al begrepen toen hij in 1704 in *Opticks* voorstelde om telescopen te plaatsen in gebieden met een atmosfeer "kalm en sereen, zoals degene die we inademen op de toppen van hoge bergen boven het gebied van de smerige gassen". Zo is de sterrenwacht van Mauna Kea op Hawaï, gelegen op een hoogte van 4205 meter, één van de plaatsen met de beste waarnemingsomstandigheden. Ook de Atacama woestijn in Chili biedt uitzonderlijke waarnemingsomstandigheden. Talrijke sterrenwachten zijn er gebouwd, zoals de Europese sterrenwacht ESO (European Southern Observatory) met een site in La Silla op 2400 m hoogte en Cerro Paranal op 2635 m hoogte. Deze laatste herbergt de Very Large Telescope, een geheel van vier telescopen van 8.2 m diameter. Zelfs op deze plaatsen worden de observaties nog verstoord door atmosferische turbulentie, hoewel veel minder dan elders.

Adaptieve optiek

In 1953 stelde H.W. Babcock [2] een concept voor met als doel het effect van de turbulenties in de atmosfeer op een actieve manier in een telescoop te compenseren. Dit was het begin van een nieuwe techniek die de astron-



Figuur 4. Schematisch diagram van een adaptief optisch systeem. Figuur: Lawrence National Laboratory and NSF Center for Adaptive Optics.

mische instrumentatie radicaal zou veranderen: de adaptieve optiek. Men kan de adaptieve optiek definiëren als een opto-elektronische installatie, dat wil zeggen het combineren van optische en elektronische functies, gericht op het corrigeren van de effecten van de atmosferische turbulentie op beelden van aardse telescopen. Vanwege de complexiteit van deze techniek en de kost gekoppeld aan de uitvoering ervan, hebben de eerste echte toepassingen pas het daglicht gezien in het midden van de jaren 1970 met de verwezenlijkingen van Buffington en zijn medewerkers [3]. De adaptieve optiek bloeide op in de jaren 1980 toen men de noodzakelijke technologieën onder de knie kreeg (camera's, computers en snel vervormbare spiegels). Sinds de jaren 1990 werden alle grote telescopen ervan voorzien.

De spiegel van een telescoop weerkaatst de lichtgolven naar een detector waar zich een beeld vormt. Als ze verstoord worden tijdens het afleggen van hun weg, zal het niet mogelijk zijn om de exacte positie en intensiteit van de lichtbron weer te geven en het beeld zal van slechte kwaliteit zijn. Het principe van de adaptieve optiek

bestaat erin de verstoringen van het golffront veroorzaakt door atmosferische turbulentie te meten, en om dan de geometrie van de spiegel van de telescoop aan te passen teneinde de verstoringen te compenseren. Het golffront dat door de detector wordt gemeten, wordt dan gecorrigeerd voor het effect van de atmosferische turbulenties, wat ons toelaat de kwaliteit van de beelden te verbeteren. Figuur 4 toont een schematische voorstelling van een adaptief optisch systeem. Men onderscheidt drie belangrijke fases.

De eerste bestaat erin een referentielichtbron te kiezen waarvan de positie en de intensiteit perfect gekend zijn, om zo de verstoringen van het golffront te kunnen meten. Deze bron moet gelegen zijn in de buurt van het object dat men wenst te observeren, zodat het licht afkomstig van de referentie en het object hetzelfde stuk atmosfeer hebben doorkruist en dus dezelfde verstoring hebben onderhouden. Dit beperkt het gezichtsveld waar de correctie kan worden aangebracht tot hoogstens 2 boogseconden rond de referentie (dat is ongeveer $5.6 \cdot 10^{-4}$ graden). Als referentielicht-

Adaptieve optiek en oogheelkunde

De technieken van de adaptieve optiek zijn niet voorbehouden voor de sterrenkunde. Adaptieve optiek wordt ook gebruikt in de oogheelkunde om op een nauwkeurige wijze de achtergrond van het oog in beeld te brengen. Om het netvlies te observeren, moet men immers door twee min of meer transparante en homogene middelen (hoornvlies, lens, glasachtig lichaam, ...) kijken. Net als de atmosfeer de astrofysische waarnemingen verstoort, verminderen deze verschillende milieus de kwaliteit van de beelden van het netvlies.

De technieken van de adaptieve optiek, die eerst en vooral voor de astrofysica werden ontwikkeld, werden aangepast aan de oogheelkunde om dit probleem te verminderen. De traditionele achtergrond van het oog laat niet toe de verschillende cellen van het netvlies (de kegeltjes en de staafjes) te onderscheiden. Door de inhomogeniteiten in het oog in reële tijd te compenseren laat de adaptieve optiek toe om een dergelijke resolutie te behalen.

Op het einde van de jaren 1990 heeft de Amerikaan David Williams voor de eerste keer een beeld van een levend netvlies op cellulair niveau gemaakt door de techniek van de adaptieve optiek op het oog toe te passen. In 1998, werd het project OOG ('projet OEIL'), gecoördineerd door François Lacombe, astronoom aan de Sterrenwacht van Parijs, gelanceerd om een instrument te ontwikkelen dat door oogheelkundigen kon gebruikt worden. Momenteel beginnen de eerste toestellen die gebruik maken van deze techniek op de markt te komen. Dit zou op termijn moeten toestaan een groot aantal ziektes aan het netvlies vroegtijdig vast te stellen.

dat het front de detector bereikt. Daartoe bestuurt het controlesysteem de cilinders die de spiegel van de telescoop induwen zodat het spiegeloppervlak iets dichterbij de detector komt. Hierdoor verkleint men de optische weg tussen de detector en het gebied van de spiegel waar het deel van het golffront met vertraging weerkaatst. Omgekeerd kan men de cilinders ook gebruiken om het corresponderende deel van de spiegel verder van de detector vandaan te bewegen voor een deel van het golffront dat te vroeg is. Hoe meer cilinders er zijn, des te preciezer kan men corrigeren. De meest gevorderde adaptieve optische systemen bevatten tegenwoordig meer dan een miljoen cilinders.

Eén van de belangrijkste moeilijkheden van de adaptieve optiek hangt samen met het feit dat de turbulenties in de atmosfeer sterk variëren in de tijd. Het is daarom noodzakelijk de correctie op de spiegel voortdurend bij te regelen. Zoals men in figuur 4 kan opmerken, meet de golffront-analysator niet meteen het licht dat in de telescoop binnenkomt, maar eerder het licht dat teruggekaatst wordt door de vervormbare spiegel van de telescoop, na het corrigeren van het golffront. Wanneer de atmosferische turbulenties evolueren, detecteert hij de onvolmaaktheden in het gecorrigeerde golffront; het controlesysteem stuurt dan een bevel door om de geometrie van de spiegel bij te regelen om het golffront verder te verbeteren. Het systeem werkt dus in een lus; dat is wat men een terugkoppeling of feedback noemt. De eigenschappen van het golffront na het toepassen van de correctie bepalen de correctie die op het volgende ogenblik moet worden uitgevoerd. Deze terugkoppeling moet sneller uitgevoerd worden dan de tijd waarop de brekingsindex in de atmosfeer verandert (de tijdschaal van de variabiliteit van de turbulenties in de atmosfeer).

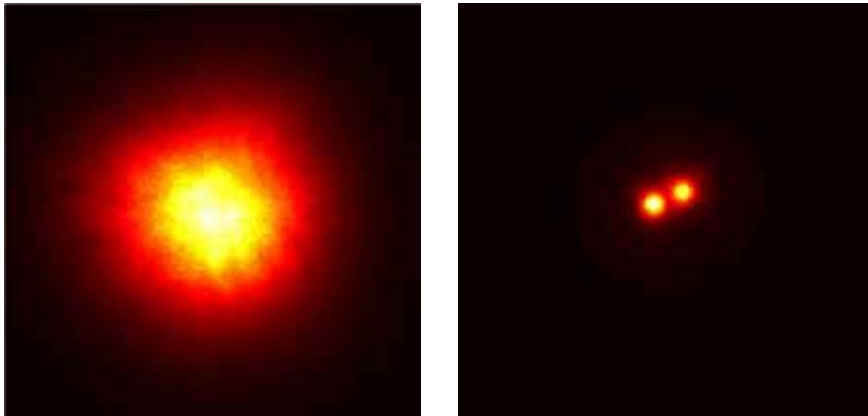
De adaptieve optiek is een domein in voortdurende ontwikkeling. Verbeteringen worden regelmatig voorgesteld. Laten we bijvoorbeeld de recente werken van een Frans-Brits

bron kan men sterren gebruiken waarvan men de exacte positie en helderheid kent. Men moet bovendien nog beschikken over een ster die zich op ongeveer dezelfde afstand bevindt als het studieobject, wat niet altijd mogelijk is. Een oplossing voor dit probleem werd voorgesteld in de jaren 1980: creëer heel eenvoudig een kunstmatige ster! Hiervoor gebruikt men een laser die men richt op een punt in de buurt van de ster die men wil observeren. De meest gebruikte lasers zijn de gele, omdat deze kleur geabsorbeerd wordt door natriumatomen. Er bestaat namelijk een dun laagje van natriumatomen in de hoge atmosfeer op een hoogte van 100 km. Wanneer de laserbundel natriumatomen tegenkomt, exciteert hij ze. Deze atomen zenden daarna licht uit en vormen een kunstmatige 'ster'. Aangezien we de richting van de laserbundel en de hoogte van de natriumlaag precies kennen, kennen we de positie en de intensiteit ervan.

De tweede fase bestaat erin de vervormingen van de golffronten van de referentielichtbron te analyseren. Hiervoor isoleert men een deel van

het lichtsignaal dat gereflecteerd werd door de spiegel van de telescoop met behulp van een bundelsplitser. Dit deel wordt naar een golffront-analysator verzonden, die de vervormingen van het golffront bepaalt. We zullen hier niet dieper op ingaan omdat het over een relatief complex systeem gaat.

De informatie over de vervormingen van het golffront wordt vervolgens naar het elektronische controlesysteem verzonden. Dit wijzigt de vorm van de spiegel van de telescoop om de vervormingen van het golffront te corrigeren. Het principe van het controlesysteem is eenvoudig genoeg. Laten we ons een deel van het golffront inbeelden dat een gebied van de atmosfeer heeft doorkruist waar de brekingsindex hoog is en waar dus de voortplantingssnelheid kleiner is. Dit deel van het golffront heeft vertraging ten opzichte van het vlakke golffront van het licht dat niet door die zone met hoge brekingsindex is gepasseerd. De vertraging van dat deel van het golffront moet dus ongedaan gemaakt worden om het golffront in zijn oorspronkelijke vorm te herstellen voor-



Figuur 5. Beeld van het binaire systeem HIC 59206 genomen door de VLT. Links: niet gecorrigeerd beeld, je kunt niet meer dan een wazige vlek onderscheiden. Rechts: beeld gecorrigeerd door een adaptief optisch systeem, we kunnen dan de twee sterren van de dubbelster onderscheiden. Foto's: ESO.

team aanhalen dat net een nieuwe techniek op punt gesteld heeft, multi-object adaptieve optiek genoemd [4]. Gewoonlijk gebruikt men één enkele ster als referentie. Men meet dan de verstoringen van het golffront in één richting. Met de nieuwe techniek

wordt het mogelijk meerdere sterren als referentie te gebruiken wat toelaat correcties toe te passen op een gezichtsveld dat 10 keer groter is dan vroeger.

De adaptieve optiek is een fundamenteel element in de huidige ster-

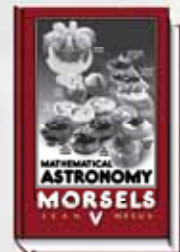
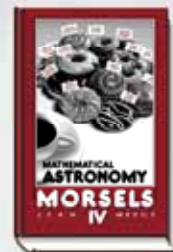
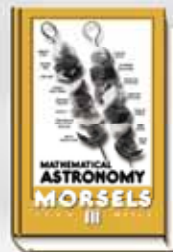
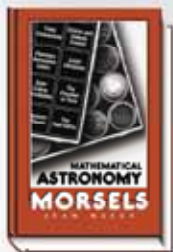
renkunde, die duidelijk heeft bijgedragen tot de verbetering van de capaciteit van aardse telescopen (zie figuur 5). Dankzij deze techniek kunnen aardse telescopen nu wedijveren met de ruimtetelescopen en dat voor een lagere kost en met een grotere flexibiliteit.

Bibliografie

- [1] A. Merlaud en R. Maggilo, *Fonkelende sterren met het blote oog: historische en fysische aspecten*, Heelal augustus 2012, blz.252.
- [2] Babcock H. W., Proc. Astron. Soc. Pac. 65: 229, 1953
- [3] Buffington, A.; Crawford, F. S.; Muller, R. A.; Scemin, A. J.; Sits, R. G.; J. Opt. Soc. Am. 67: 298-303, 1977.
- [4] A *Powerful Innovative Adaptive-Optics Technology To Survey the Early Universe*, Paris Observatory and CNRS Press Release, 17 december 2010.

MATHEMATICAL ASTRONOMY MORSELS

Jean Meeus



Vijf delen, meer dan 300 artikels

VVS-ledenprijs
34,50 euro per deel
verzending inbegrepen

- ★ Hoe dikwijls staan de planeten op één lijn?
- ★ Venus en de Pleiaden
- ★ Zonsverduisteringen aan de polen
- ★ Vijfvoudige planetaire conjuncties
- ★ De fasen van de Maan en het verlichte gedeelte van de maanschijs

Bestellingen: stort 34,50 euro per deel op rekening nummer BE04 7340 2146 8331 (BIC KREDBEBB) van de VVS met vermelding "Morsels" en de delen die u wenst (1, 2, 3, 4, 5)