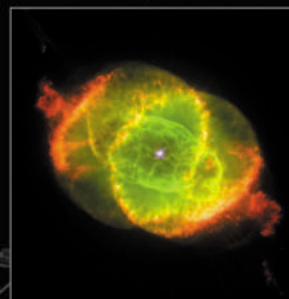


DE STERRENKUNDEPRACTICA VAN ESA/ESO

Sterrenkundige practica, gebaseerd
op waarnemingen met de Hubble-
ruimtetelescoop van NASA en ESA en
de telescopen van ESO



Practicum³

Het meten van de afstand van de Katteognevel
Gebaseerd op waarnemingen met NASA/ESA's Hubble-ruimtetelescoop



Inhoudsopgave

De sterrenkundepractica van ESA/ESO — 3

Voorwoord

- Voorwoord blz. 2

Inleiding

- Late levensfasen van lichte sterren blz. 3
- Afstanden tot planetaire nevels blz. 4
- De Katteognevel blz. 5

Opdrachten

- Opdracht 1 blz. 7
- Opdracht 2 blz. 7
- Opdracht 3 blz. 7
- De vergrotingsmethode blz. 8
- Opdracht 4 blz. 10
- Opdracht 5 blz. 10
- Opdracht 6 blz. 10
- Opdracht 7 blz. 10
- Opdracht 8 blz. 10
- De radiale pasmethode blz. 11
- Opdracht 9 blz. 13
- Opdracht 10 blz. 13
- Opdracht 11 blz. 13

Literatuurverwijzingen

- Wetenschappelijke artikelen blz. 14

Voor de leerkracht

- Docentenhandleiding blz. 16

Het meten van de afstand van de Katteognevel

Sterrenkunde is een boeiende wetenschap die vaak ook nog eens fraaie foto's oplevert: ideaal voor educatieve doeleinden. De afgelopen jaren hebben NASA, ESA, de Hubble-ruimtetelescoop en de telescopen van ESO op La Silla en Paranal in Chili steeds spectaculairdere afbeeldingen van het heelal gemaakt. De Hubble- en ESO-telescopen zijn waardevolle astronomische instrumenten, die echter niet alleen mooie nieuwe plaatjes hebben opgeleverd: ze stellen sterrenkundigen in staat om verder dan ooit tevoren het heelal in te turen en antwoorden te vinden op nog openstaande vragen.

De analyse van waarneemgegevens is in de details vaak nogal ingewikkeld. De grote lijnen zijn echter eenvoudig genoeg om door middelbare scholieren zelf uitgevoerd te kunnen worden.

Deze reeks astronomische practica is een coproductie van de Europese deelnemer aan het Hubble-project, ESA (de European Space Agency), die over 15% van de waarneemtijd met Hubble beschikt, en de ESO (de European Southern Observatory).



Figuur 1: De Hubble-ruimtetelescoop van NASA/ESA
De Hubble-ruimtetelescoop heeft vanuit zijn baan om de aarde spectaculaire opnamen van het heelal gemaakt.



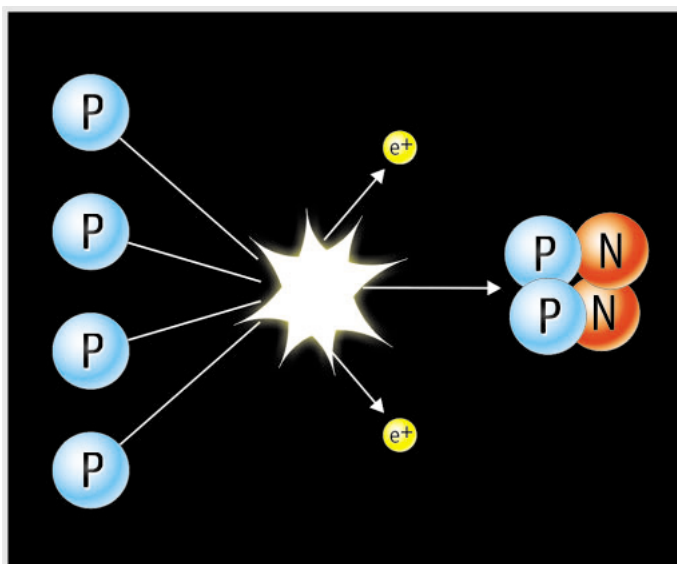
Inleiding

Late levensfasen van lichte sterren

De Katteogroef (NGC 6543) is een zogeheten planetaire nevel. Ondanks hun benaming hebben planetaire nevels niets met planeten te maken. De term is in de 19de eeuw bedacht, omdat deze objecten door de kleine telescopen van toen erg op planeten leken. Planetaire nevels ontstaan tijdens de laatste levensdagen van lichte sterren zoals de zon: zo'n ster blaast dan geleidelijk zijn buitenste gaslagen weg.

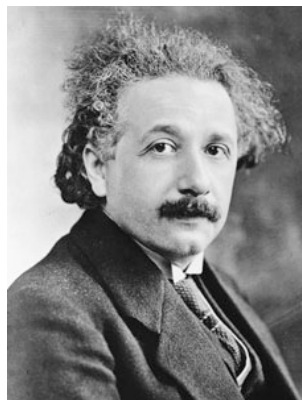
Het licht dat de meeste sterren uitzenden is een nevenproduct van het kernfusieproces — ook wel waterstofverbranding genoemd — dat in het inwendige van sterren plaatsvindt. Bij dit proces worden vier waterstofkernen samengesmolten tot één heliumkern.

Kernfusie kan alleen plaatsvinden in het inwendige van een ster, waar door de reusachtige gravitatiekracht de temperatuur is opgelopen tot ongeveer 10^7 K. Bij deze hoge temperaturen is de botsingsenergie groot genoeg om de afstotende elektrostatische krachten tussen de gelijk geladen protonen te overwinnen. Alleen daarvoor kunnen vier waterstofkernen (protonen) samensmelten tot een nieuwe kern (helium; zie



Figuur 2: Waterstofverbranding

Het meest eenvoudige mechanisme voor de energieproductie in sterren is de fusie van vier waterstofkernen tot één heliumkern. Dit proces verloopt in allerlei tussenstappen, maar het eindresultaat is zoals hier is afgebeeld.



Figuur 3: Albert Einstein

Einsteins beroemde vergelijking $E = mc^2$ beschrijft het verband tussen massa en energie.

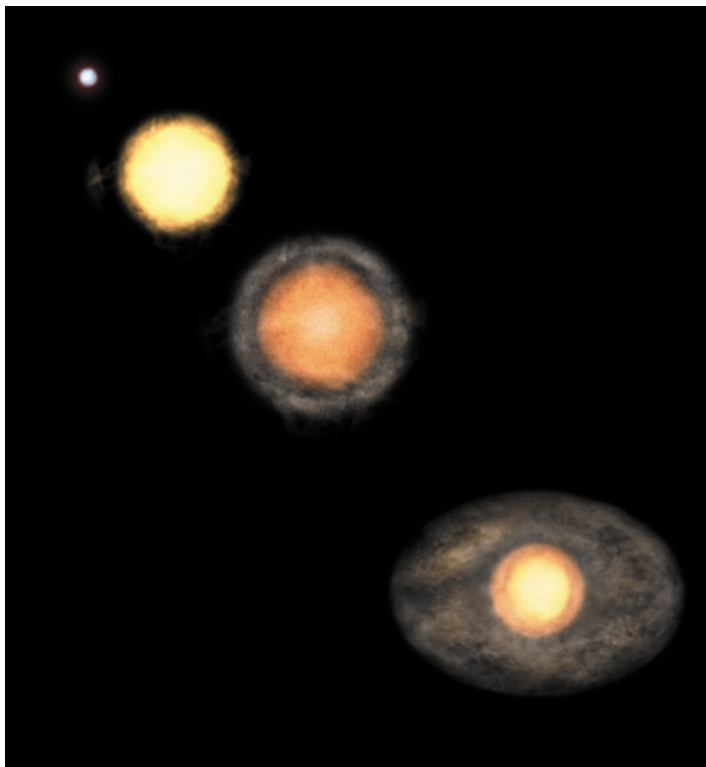
fig. 2) en op die manier energie produceren. De massa van een heliumkern is slechts 99,3% van de totale massa van de vier oorspronkelijke waterstofkernen. Bij het fusieproces wordt de resterende 0,7% van de massa in energie omgezet — grotendeels in de vorm van straling. De hoeveelheid energie die daarbij vrijkomt kan worden berekend met Einsteins beroemde formule: $E = Mc^2$. Omdat c^2 een groot getal is, levert een kleine hoeveelheid massa dus een grote hoeveelheid energie op. Als je het totale aantal fusiereacties in de zon in rekening brengt, gaat het alles bij elkaar om een aanzienlijke hoeveelheid massa (en dus energie).

De stralingsdruk van de energie die in het sterinwendige wordt geproduceerd is in evenwicht met de zwaartekracht van de buitenlagen, en hierdoor kan de ster gedurende 90% van zijn bestaan in een stabiele toestand verkeren. Onze zon zal waarschijnlijk nog vijf miljard jaar in zijn huidige stabiele toestand blijven.

Wanneer de waterstofvoorraad in de kern van een ster opraakt en waterstoffusie niet langer meer mogelijk is, stort de kern van de ster onder invloed van de zwaartekracht in. De temperatuur in het inwendige loopt dan op tot 100 miljoen graden, en vanaf dat moment beginnen de heliumkernen in de ster-kern te fuseeren tot zwaardere elementen zoals koolstof. Op dat moment beginnen de buitenlagen van de ster op te zwellen — onze zon zal daarbij opzwellen tot voorbij de baan van de planeet Venus.



Inleiding



Figuur 4: Late levensfasen van een lichte ster

Wanneer een ster in zijn laatste levensfase is, gaat hij steeds zwaardere elementen verbranden. Op dat moment begint de ster ook stof en gas weg te blazen, waardoor er een planetaire nevel ontstaat.

In deze eindfase van het leven van een lichte ster stijgt materie uit het binnenste omhoog, waarbij de buitenlagen worden verrijkt met elementen zwaarder dan waterstof. Deze buitenlagen worden ten slotte de ruimte in geblazen — soms als een sferische schil, maar vaak ook in een minder symmetrische structuur — waardoor er een cocon om de stervende ster ontstaat (zie fig. 4).

Het ultraviolette licht van de kern van de stervende ster verlicht het uitgestoten materiaal, waardoor de spectaculaire planetaire nevel oplicht die we met telescopen kunnen zien. Zo'n planetaire nevel bestaat overigens naar astronomische maatstaven maar erg kort. De leeftijd van sommige bekende planetaire nevels, waaronder de Katteognevel (NGC 6543), bedraagt slechts ongeveer duizend jaar. Andere zijn niet ouder dan een jaar of vijftigduizend. In de loop van hun bestaan vermengen deze nevels zich geleidelijk met het interstellair medium, waarbij dit laatste dus met zware elementen wordt verrijkt die weer bij de vorming van volgende generaties sterren kunnen worden gebruikt.

De zon is een gewone, lichte ster die zijn leven

waarschijnlijk met de vorming van een planetaire nevel zal beëindigen. De aarde zal vanaf dat moment niet meer leefbaar zijn, maar het zal nog vijf miljard jaar duren voordat dit ons belangrijkste milieuprobleem zal zijn.

Afstanden van planetaire nevels

In dit practicum zullen we de afstand tot de Katteognevel meten. Het onderzoek naar de fysische eigenschappen van een planetaire nevel, zoals zijn afmetingen, massa, helderheid en leeftijd, is nu eenmaal onmogelijk als we zijn afstand niet kennen. Eigenlijk geldt dat voor de hele sterrenkunde: zonder betrouwbare afstandsmetingen zijn we nergens.

Het meten van de afstand van een planetaire nevel is geen eenvoudige zaak. Hoewel we weten dat ze uit lichte sterren ontstaan, kan de beginmassa van zo'n ster nog met een factor tien uiteenlopen, waardoor er planetaire nevels met zeer verschillende eigenschappen kunnen ontstaan. Omdat niet alle planetaire nevels even groot of helder zijn, kunnen we hun schijnbare afmetingen of helderheid niet gebruiken om hun afstanden te bepalen. Maar soms zijn er waarne-



Inleiding

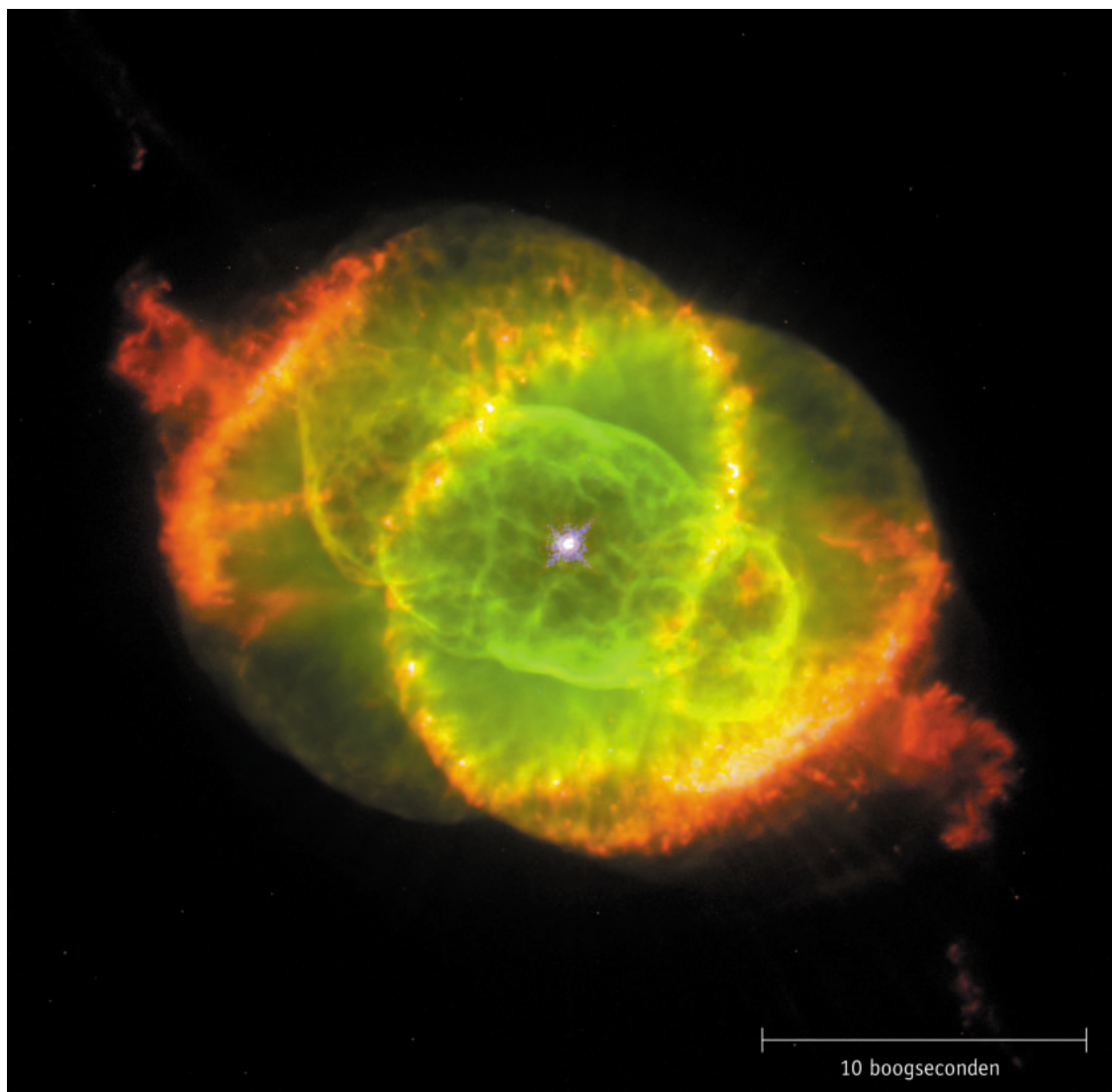
mingen mogelijk die ons in staat stellen de afstand van een planetaire nevel direct te meten.

De Katteognevel

De Katteognevel (fig. 5) bevindt zich in het sterrenbeeld Draak en is een van de meest complexe planetaire nevels die we kennen. Op opnamen die met de Hubble-telescoop zijn gemaakt zijn verrassend ingewikkelde structuren te zien, zoals concentrische gasschillen, straalstromen van gas en ongewone gasklontering. Men neemt aan dat de centrale ster in dit geval deel

uitmaakt van een dubbelster-systeem. De complexe structuur van de nevel laat zich namelijk het gemakkelijkst verklaren als hij is weggeblazen door een ster die met een andere ster om een gezamenlijk zwaartepunt draait.

Analyse van de structuren in de nevel heeft uitgewezen dat enkele van de meest opvallende delen niet even oud zijn als het centrale deel van de nevel. De metingen die we in dit practicum zullen doen zijn echter niet op deze structuren gericht, maar op de korte as van de centrale ellipsoïde, die E25 wordt genoemd (zie fig. 6).

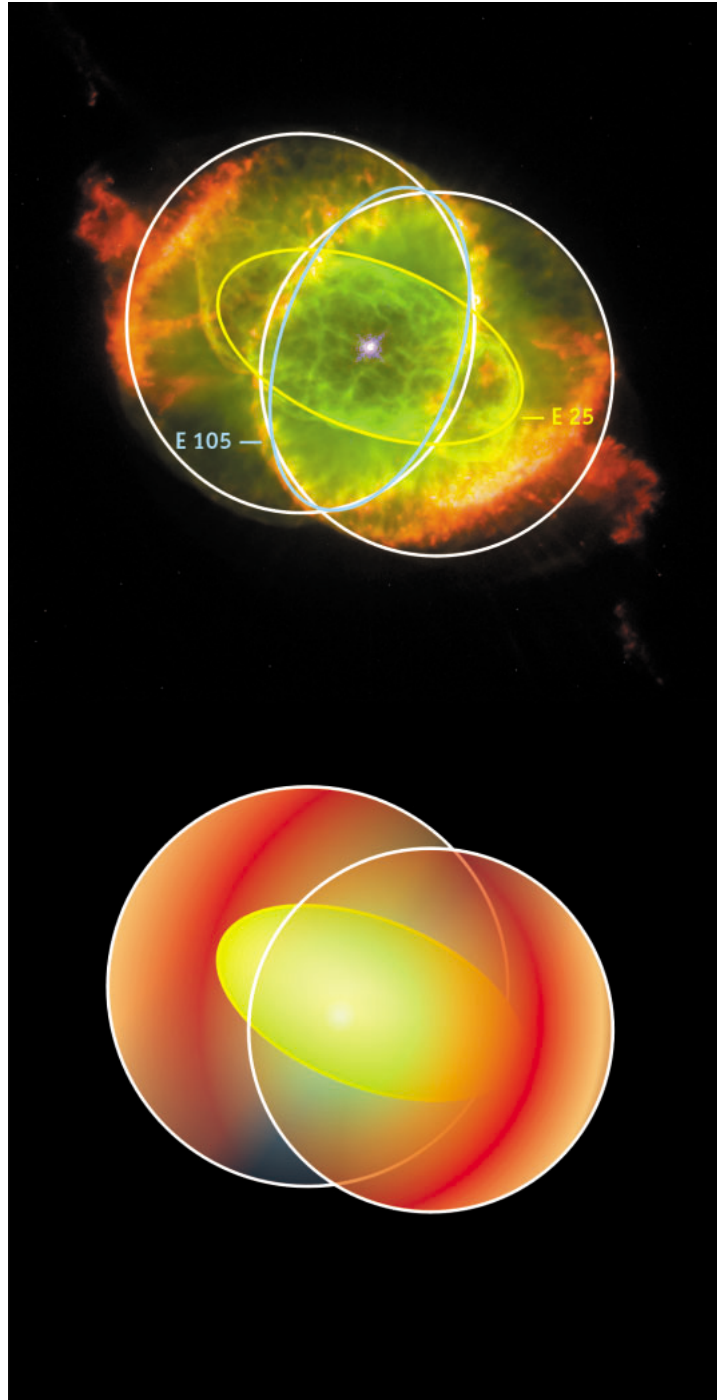


Figuur 5: De Katteognevel

Deze kleurenfoto van de Katteognevel (NGC 6543) is gemaakt met de Wide Field and Planetary Camera 2 van de Hubble-telescoop. Het is eigenlijk een combinatie van drie opnamen die bij verschillende golflengten zijn gemaakt. Geïoniseerde stikstof (658,4 nm) is rood afgebeeld, tweevoudig geïoniseerde zuurstof (500,7 nm) is groen en neutrale zuurstof (630,0 nm) is blauw. Het afgebeelde gebied is ongeveer 35 boogsec breed. Het centrale, ovale deel van de nevel wordt E25 genoemd (zie ook fig. 6).



Inleiding



Figuur 6: Geometrisch 3D-model van de Katteognevel
Hierboven is te zien dat de Katteognevel eigenlijk een tweelobbige structuur heeft. De binnenste ellipsoïde, E25 genaamd, is met geel aangegeven (illustratie naar Reed et al., 1999).



Opdrachten

In de volgende twee opdrachten is t de tijd die tussen de twee waarnemingen verstreken is.

Opdracht 1

- ?
- Wat is het verband tussen een hoekverplaatsing, $\phi(t)$, de tijd, t , en de hoeksnelheid van de verplaatsing, ω .

De hoeksnelheid wordt gemeten in radialen per seconde. Let er dus op dat je deze hoek in radialen uitdrukt.

Opdracht 2

- ?
- Wat is het verband tussen een verplaatsing loodrecht op de gezichtslijn, l , de tijd, t , en de snelheid in de richting van de verplaatsing, v_t . Deze snelheid wordt de tangentiële snelheid genoemd.

De tangentiële snelheid wordt gemeten in km/s.

Opdracht 3

Met behulp van de kleine-hoekbenadering in de 'Wiskundige hulpmiddelen' vinden we een verband tussen de afstand, D , de lineaire verplaatsing, l , en de hoekverplaatsing, $\phi(t)$.

$$D = l/\phi(t)$$

- ?
- Gebruik deze vergelijking om een verband te vinden tussen de afstand, D , de tangentiële snelheid, v_t , en de hoeksnelheid ω .

De Katteognevel is tweemaal met de Hubble-telescoop gefotografeerd: eerst op 18 september 1994 en nogmaals op 17 augustus 1997. Als we de twee opnamen om-en-om op een beeldscherm afbeelden (deze techniek wordt 'blinking' genoemd), kunnen we zien dat de Katteognevel in de tussentijd groter is geworden. De uitdijning is niet zo groot dat je duidelijk een verschil kunt zien tussen de twee foto's. Zoals we later zullen zien, is het echter wel degelijk mogelijk om de mate van uitdijning (in hoekeenheden per tijdseenheid) te bepalen.

Hierbij zullen we gebruik maken van een verschijnsel dat uitdijingsparallax wordt genoemd. Binnen de sterrenkunde wordt dit verschijnsel meestal toegepast op afbeeldingen die met radiotelescopie zijn gemaakt, maar de grote

beeldscherpte van de Hubble-telescoop stelt ons in staat om de techniek ook in het zichtbare golflengtegebied toe te passen op de structuren in een planetaire nevel als deze.

Het meten van de uitdijingsparallax langs de korte as van E25 komt overeen met het bepalen van de hoeksnelheid, ω , loodrecht op de gezichtslijn. Om de afstand van de nevel te kunnen bepalen is verder nog maar één stukje informatie nodig: de tangentiële snelheid langs de korte as van E25. Gelukkig is deze snelheid al eerder door sterrenkundigen bepaald (Miranda & Solf, 1992), door spectroscopische methoden¹ te combineren met een kinetisch model van de uitdijning van de nevel. De onderzoekers concludeerden daaruit dat de tangentiële snelheid langs de korte as van E25 16,4 km/s bedraagt, hetgeen ongeveer overeenkomt met 60.000 km/uur.

Omdat de tangentiële snelheid, v_t , gegeven is, hoeven we dus alleen de hoeksnelheid te bepalen. Je zult dit op twee manieren doen: de vergrotingsmethode en de radiale pasmethode.

¹Bij spectroscopische metingen wordt licht in zijn verschillende kleuren of golflengten opgesplitst (bijvoorbeeld met een prisma). Het licht kan vervolgens worden onderzocht op een mogelijke dopplerverschuiving ten gevolge van de beweging van de lichtbron, waaruit dan weer de bijbehorende radiale snelheid (naar ons toe of van ons af) kan worden afgeleid. In dit specifieke geval is de radiale snelheidscomponent gecombineerd met modellen van de algemene uitdijingssnelheden (in alle richtingen) om de tangentiële snelheid te kunnen bepalen.



Opdrachten

De vergrotingsmethode

De uitdijing op de Hubble-beelden bedraagt minder dan één pixel (beeldelement). Meting ervan vraagt dus om het nodige kunst- en vliegwerk.

Bij de vergrotingsmethode wordt de opname uit 1994 vergroot tot hij precies overeenkomt met de opname uit 1997. Figuur 7 laat zien wat er gebeurt als je twee soortgelijke foto's van elkaar aftrekt. Merk op dat de foto in 1994 in dit geval niet vergroot is.

In elk van de negen kleine afbeeldingen van figuur 8 is de foto uit 1994 met een verschillende factor, F , uitvergroot (dit is het getal dat steeds rechtsboven staat). Vervolgens is de foto uit 1997 van elk van de uitvergroete opnamen afgetrokken.

Hoe meer de beide opnamen op elkaar lijken, des te minder moet er op de resulterende afbeelding te zien zijn. We moeten dus bepalen welke afbeelding het meest gelijkmatig is. De bijbehorende vergrotingsfactor geeft dan aan hoe veel groter de Katteognevel van 1994 tot 1997 is geworden.

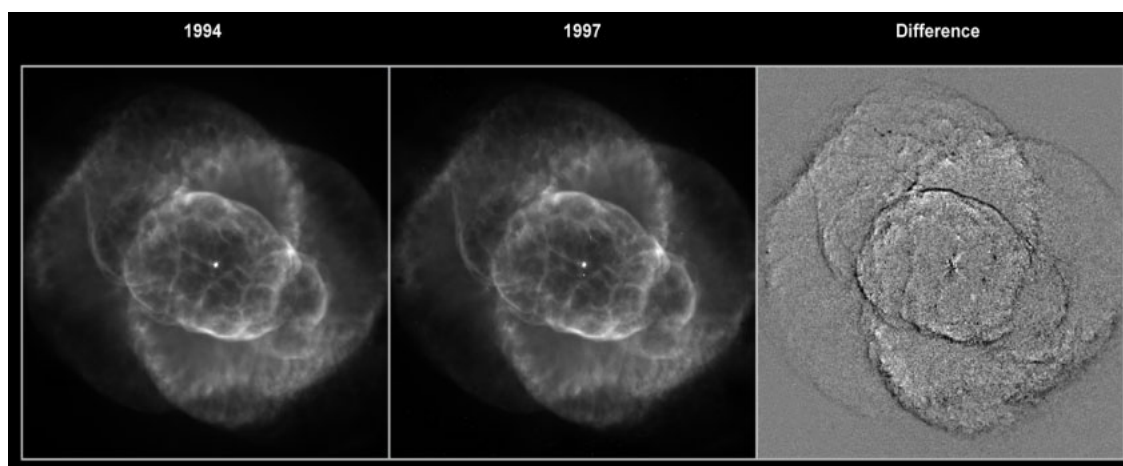
Merk op dat de uitdijingsparallax niet voor alle structuren op de foto even groot is. We moeten dus vooral letten op de verdwijning van 'onze' structuur — de korte as van E25.

Als de vergrotingsfactor, F , eenmaal bepaald is, kunnen we ω berekenen met behulp van de volgende vergelijking:

$$\omega = \frac{(F - 1)d}{t}$$

Hierin is t de tijd die tussen beide opnamen is verstreken en d de afstand (in radialen) tussen de centrale ster in de nevel en de structuur die we onderzoeken — in dit geval dus de korte as van E25. Zoals reeds gezegd, wordt ω gemeten in radialen per tijds-eenheid.

De volgende opdrachten helpen je de verschillende parameters van deze vergelijking uit te rekenen. Nadien ben je in staat om ω , en daarmee ook de afstand tot de Katteognevel, te berekenen.

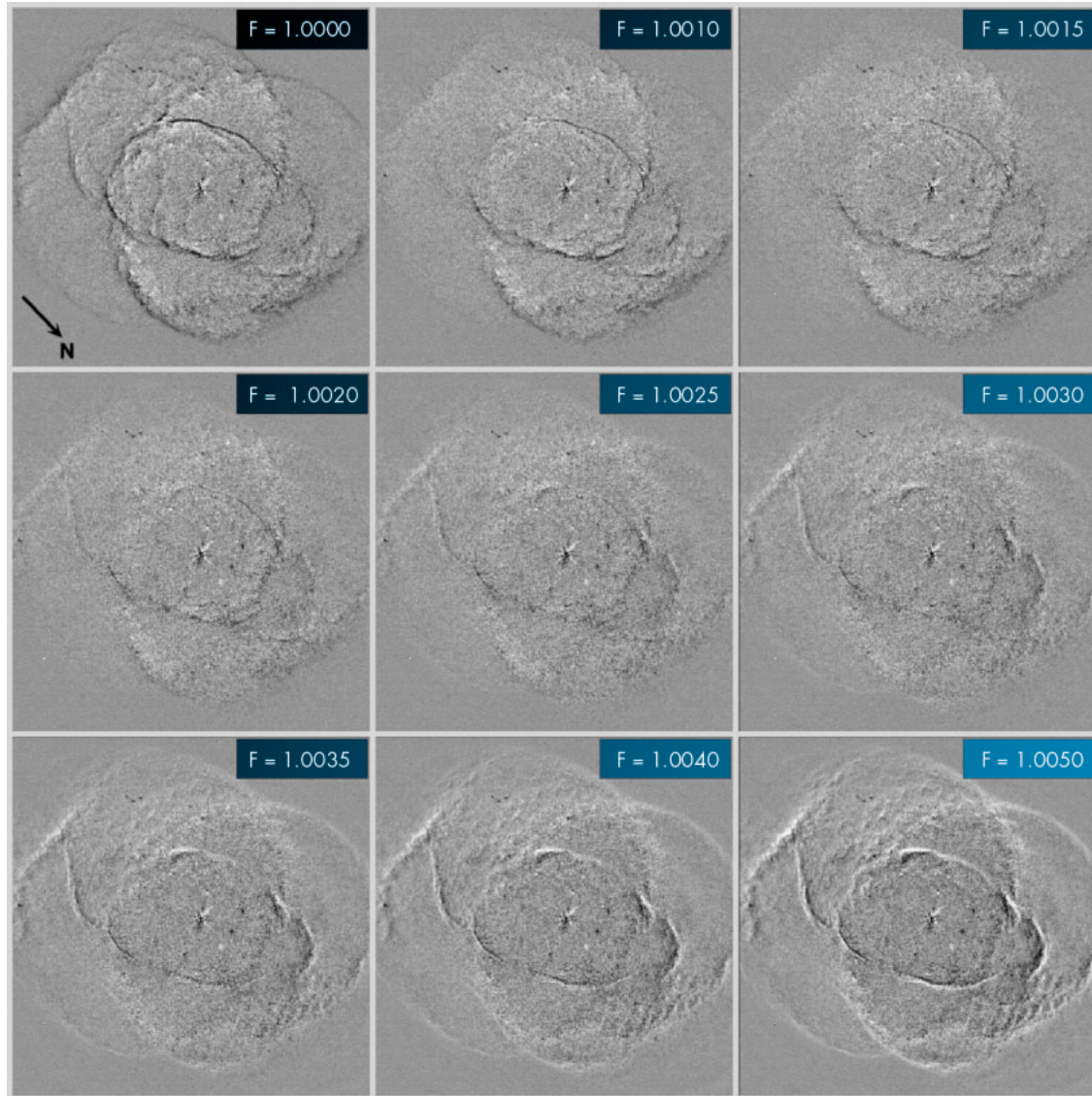


Figuur 7: Om de uitdijing zichtbaar te maken, moeten de beelden bewerkt worden

De eerste foto van de Katteognevel (fig. 7a) is gemaakt op 18 september 1994, de tweede (fig. 7b) op 17 augustus 1997. Zo op het oog is er geen verschil tussen beide foto's. Maar als je de beelden met behulp van een computer van elkaar aftrekt, blijkt er toch wel degelijk iets veranderd te zijn (fig. 7c).



Opdrachten



Figuur 8: De negen verschilafbeeldingen

Deze afbeeldingen tonen het resultaat van het aftrekken van de opname van 1997 van verschillende vergrotingen van de opname van 1994. De vergrotingsfactor, F , is op elke foto aangegeven (foto's uit Reed et al., 1999).



Opdrachten

Opdracht 4

- ? Bepaal op welke van de negen opnamen in fig. 8 de korte as van E25 (oftewel de boven- en onderzijde van de ovaal) het minst goed zichtbaar is. Als twee foto's net zo goed voldoen, neem dan het gemiddelde van beide als vergrotingsfactor.

Opdracht 5

- ? Bereken de tijd die tussen beide opnamen verstreken is, en reken dat om naar seconden.
Waarom is het niet erg dat je niet weet op welk tijdstip de opnamen precies gemaakt zijn?

Opdracht 6

- ? Bepaal de korte as van E25 in figuur 5. Meet de afstand, d , van de centrale ster van de nevel tot de korte as van E25 in van boogseconden. Reken deze afstand met behulp van de omzettingsfactor die in de 'Wiskundige hulpmiddelen' gegeven is om naar radialen.

Opdracht 7

- ? Nu heb je alles wat nodig is om de uitdijingsparallax, ω , te berekenen met behulp van de vergrotingsmethode. Doe dit.

Opdracht 8

Zoals eerder vermeld is de tangentiële snelheid van de korte as van E25, v_t , al eerder bepaald op 16,4 km/s.

- ? Bereken de afstand van de Katteognevel in km en in parsec.

Voordat je dit resultaat met dat van Reed et al. vergelijkt, moet je eerst de afstandsbepaling met behulp van de radiale pasmethode doen.



Opdrachten

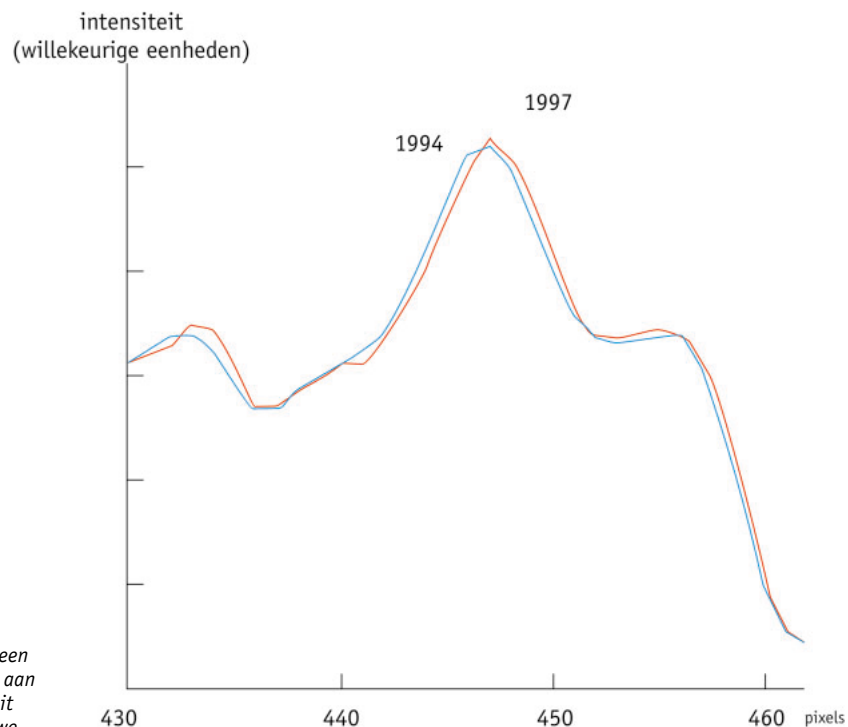
De radiale pasmethode

Als we in figuur 5 een lijn trekken die door de centrale ster gaat en van elke pixel op die lijn de helderheid meten, krijgen we de kromme van figuur 9. De pieken en dalen komen overeen met lichte en donkere gebieden in de nevel.

In figuur 9 is tweemaal dezelfde kromme te zien: de ene is gemaakt met behulp van de opname van 1994, de andere met die van 1997. Het verschil tussen beide krommen kan worden gebruikt om de uitdijng van de Katteognevel te meten.

Helaas zijn de verschillen in de posities van de verschillende structuren op beide opnamen zo klein (minder dan 1 pixel) dat we de meting hier niet na kunnen doen. Je zult moeten vertrouwen op de verschillende metingen van ω zoals die door wetenschappers zijn gedaan, en deze gebruiken om de afstand tot de Katteognevel nogmaals te bepalen. De wetenschappers hebben ω voor vele verschillende posities in E25 gemeten (en ook voor vele andere punten in de nevel). De resultaten van deze metingen zijn aangegeven in figuur 10.

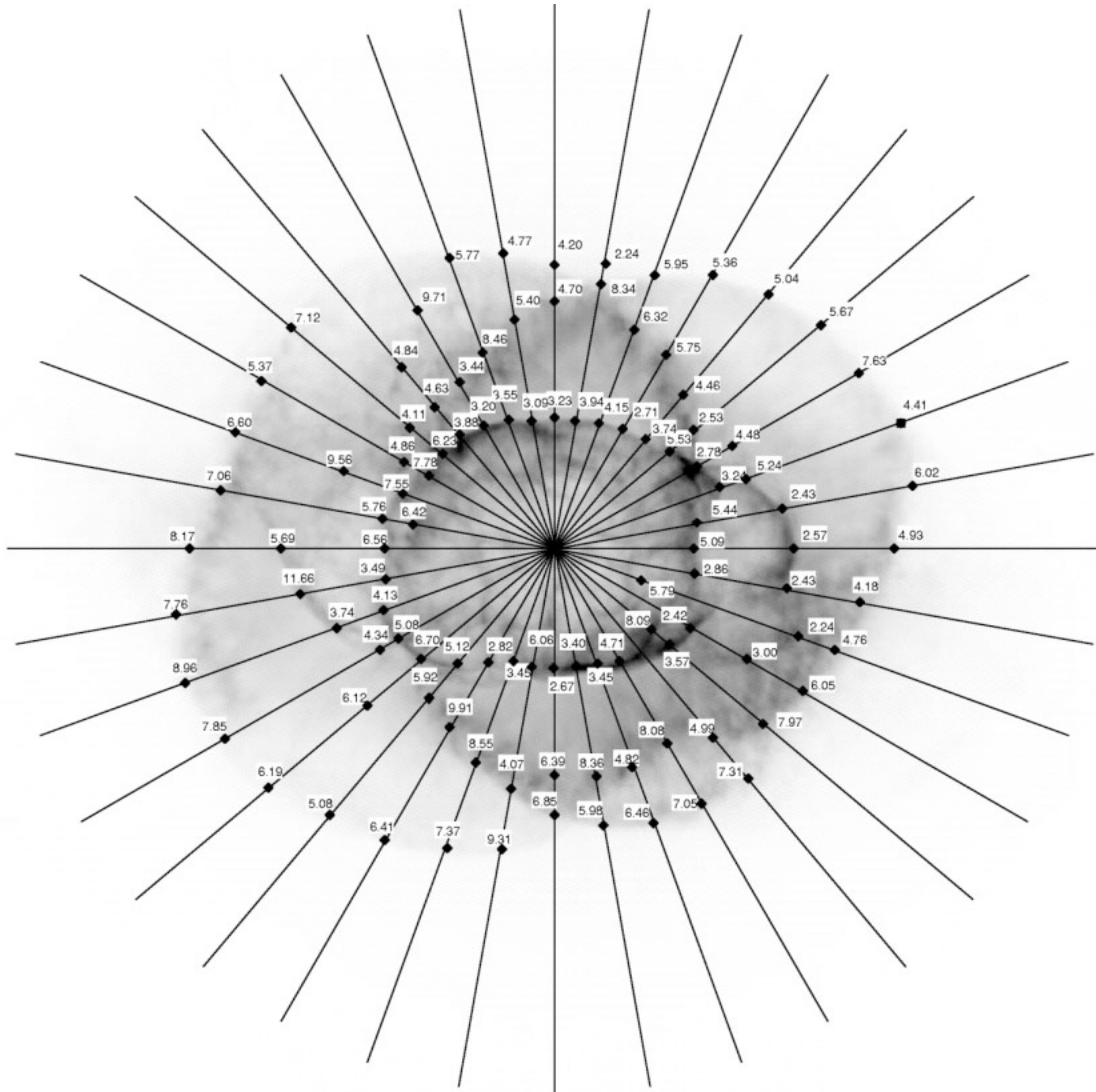
N.B.: De metingen zijn gedaan in milliseconden per jaar en moeten dus nog naar de juiste eenheden worden omgerekend.



Figuur 9:
Intensiteitsprofielen
Twee voorbeelden van de resultaten van een reeks intensiteitsmetingen langs een lijn door de Katteognevel, aan de hand van de opnamen uit 1994 en 1997. De lijn die we gebruikt hebben is die welke in fig. 10 recht omhoog gaat.



Opdrachten



Figuur 10: ω en de radiale intensiteitsprofielen

Het nauwkeurig passen van de radiale profielen langs de lijnen in deze figuur heeft de aangegeven waarden van ω opgeleverd. De waarden van ω zijn gemeten in milliboogseconden per jaar (uit: Reed et al., 1999).



Opdrachten

Opdracht 9

- ? Zoek in figuur 10 de korte as van E25. Lees de waarde van ω af bij de bijbehorende zwarte blokjes — let erop dat je de juiste getallen afleest!
Neem het gemiddelde van de verschillende waarden van ω die je in de figuur hebt afgelezen (dat kunnen er wel tien zijn, omdat de precieze ligging van de korte as moeilijk aan te geven is). Bereken opnieuw de afstand

Opdracht 10

Uit de hiervoor berekende waarden kan de kinematische leeftijd (de tijd die verstreken is sinds de uitdijning van de nevel begon), T , van het binnendeel van de nevel worden bepaald. (We gaan er daarbij van uit dat de uitdijings-snelheid van de nevel niet veranderd is.)

$$T = d/\omega$$

De waarde van d heb je in opdracht 6 al bepaald.

- ? Bereken de kinematische leeftijd, T , voor
- beide waarden van ω die je gevonden hebt.

Opdracht 11

Het resultaat van Reed et al. voor de afstand van de Katteognevel is 1001 ± 269 parsec. Dit resultaat is verkregen door niet alleen E25 te meten, maar ook door a) andere structuren met de vergrotingsmethode te meten, b) alle getallen van de radiale pasmethode te gebruiken en ten slotte ook door c) een derde methode te gebruiken, die de profielmethode wordt genoemd.

- ? Vergelijk je eigen resultaat met dat van Reed et al.
- ? Ga na of je resultaten merkbaar beïnvloed kunnen zijn door de keuzes die je hebt gemaakt. Herhaal de berekeningen van de afstand door de verschillende parameters een beetje te variëren. Je zou bijvoorbeeld een andere restopname kunnen kiezen bij de vergrotingsmethode of andere waarden van ω bij de radiale pasmethode. Als je deze getallen ook maar een beetje wijzigt, blijkt de uitkomst flink te kunnen veranderen.

Met dit practicum hebben we willen duidelijk maken hoe moeilijk het is om aan nauwkeurige afstandsmetingen te komen, en hoe veelzijdig de middelen zijn die de sterrenkundige daarbij gebruikt.



Literatuurverwijzingen

Wetenschappelijke artikelen

- Reed, Darren S., Balick, B., Hajian, Arsen R., Klayton, Tracy L., Giovanardi, S., Casertano, S., Panagia, N., Terzian, Y. 1999, *AJ*, **118**, 2430–2441: *Hubble Space Telescope Measurements of the Expansion of NGC 6543: Parallax Distance and Nebular Evolution*
- Miranda, L.F., Solf, J. 1992, *A&A*, **260**, 397–410: *Long-slit spectroscopy of the planetary nebula NGC 6543 - Collimated bipolar ejections from a precessing central source?*

Zie ook de links op:
<http://www.astroex.org/>



Colofon



EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY
Education and Public Relations Service

De sterrenkundepractica van ESA/ESO
Practicum 3: Het meten van de afstand van de
Katteognevel
Eerste uitgave (vertaling van de tweede Engelse
uitgave 23.05.2002)

Productie:

De Hubble European Space Agency Information
Centre en de European Southern Observatory:
<http://www.astroex.org>
(Hier vindt men pdf-versies van dit materiaal en
links naar relevante websites)

Postadres:

European Southern Observatory
Karl-Schwarzschild-Str. 2
D-85748 Garching bei München
Duitsland

Tel: +49 89 3200 6306 (of 3200 60)
Fax: +49 89 3200 64 80 (of 320 32 62)
E-mail: info@astroex.org

Tekst:

Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen,
Jean-Marc Brauer en Arntraud Bacher

Illustraties en opmaak:

Martin Kornmesser

Vertaling:

Eddy Echternach

Correcties en eindredactie:

Eddy Echternach, Robert Wielinga en Peter Barthel

Coördinatie:

Lars Lindberg Christensen en Richard West

Met dank aan Darren Reed en Arsen Hajian voor het
ter beschikking stellen van gegevens, en aan Nina
Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, voor
haar opmerkingen.

Deze Nederlandse uitgave verschijnt onder auspiciën
van NOVA, de Nederlandse Onderzoekschool voor
Astronomie, en de Nederlandse Astronomen Club,
NAC. Realisatie werd financieel mogelijk dankzij een
subsidie van de Gratama-stichting. Ook NOVA, NAC,
het Groninger Universiteitsfonds GUF en het Kapteyn
Instituut van de Rijksuniversiteit Groningen droegen
financieel bij.



Voor de leerkracht

Korte samenvatting

We meten de schijnbare uitdijingssnelheid van de Katteognevel door twee Hubble-opnamen uit 1994 en 1997 aan een nauwkeurig onderzoek te onderwerpen. Met behulp van de tangentiële snelheidsmetingen van een eerder wetenschappelijk onderzoek, is het vervolgens mogelijk om de afstand tot de nevel te bepalen. We bepalen die afstand nogmaals door te kijken naar veranderingen in de radiale intensiteits-profielen van herkenbare structuren in de beide opnamen.

In dit practicum voeren de leerlingen minder metingen uit dan in de opdrachten 1 en 2. In plaats daarvan maken ze kennis met twee methoden — een 'klassieke' en een 'minder klassieke' — om de afstand van een hemelobject te bepalen.

In het oorspronkelijke wetenschappelijke artikel maakten de sterrenkundigen gebruik van *drie* verschillende methoden. Voor de derde methode zijn echter geavanceerde computerprogramma's nodig — het is niet mogelijk om deze metingen en berekeningen hier te herhalen.

Opdrachten 1 en 2

Met behulp van de vergelijking "afstand = snelheid x tijd" vinden we:

$$\phi(t) = \omega \cdot t$$

$$l = v_t \cdot t$$

Opdracht 3

Met behulp van figuur 6 in de 'Wiskundige hulpmiddelen', met $b = l$ en $c = D$, vinden we:

$$D = l/\phi(t) = v_t \cdot t/\omega \cdot t = v_t/\omega$$

De bepaling van ω :

d is de hoekafstand tot de structuur in de opname van 1994. F is de vergrotingsfactor. $F \cdot d$ is de hoekafstand tot de structuur in de opname van 1997 en dus is $(F-1)d$ het hoekverschil tussen de opnamen van 1994 en 1997. Door dit door de verstreken tijd te delen, verkrijgen we de hoeksnelheid.

Opdracht 4

De juiste vergrotingsfactor ligt tussen 1,0025 en 1,0030. We nemen hiervan het gemiddelde: **1,00275**.

$F = 1,00275$ geeft het resultaat dat het dichtst bij dat van het wetenschappelijke artikel ligt.

Opdracht 5

De tijd die verstreken is tussen 18 september 1994 en 17 augustus 1997 (de data zijn te vinden op blz. 7) kan gemakkelijk worden berekend. Let erop dat 1996 een schrikkeljaar is, al maakt een dag meer of minder bij vier significante decimalen weinig uit.

$$t = 3 \text{ jaar} + 1 \text{ dag} - 31 \text{ dagen} = 1065 \text{ dagen} = \mathbf{9,2016 \times 10^7 \text{ s}}$$

Opdracht 6

Bij een afdruk van 145 mm x 138 mm:

44 mm komt overeen met 10 boogseconden; dus 1 boogseconde komt overeen met **4,4 mm**.

Directe meting van de afstand van de centrale ster tot de korte as van E25 geeft:

17,5 mm, wat overeenkomt met $d = 3,98$ boogseconde = **$1,9282 \times 10^{-5}$ radialen** (met behulp van de omzettingfactor die in de 'Wiskundige hulpmiddelen' is gegeven.)



Voor de leerkracht

Opdracht 7

Berekening van ω met behulp van de vergrotingsmethode:

$$\omega = (F-1) \times d/t = (1,00275 - 1) \times 1,93 \times 10^{-5} / (9,2016 \times 10^7) = 5,7628 \times 10^{-16} \text{ rad/s}$$

Opdracht 8

Dan is de afstand dus:

$$D = v_t/\omega = 16,4 / (5,7628 \times 10^{-16}) = 2,8459 \times 10^{16} \text{ km} = 922 \text{ pc}$$

Opdracht 9

Bij de berekening van ω en de afstand D tot de Katteognevel met de radiale pasmethode is er enige vrijheid bij het kiezen van de meetpunten. Derhalve is er ook de nodige speling bij het verkrijgen van het gewenste resultaat.

Een gemiddelde van twaalf meetpunten (aan boven- en onderzijde van de ellipsoïde) geeft:

bovenkant	3,55	3,09	3,23	3,94	4,15	2,71
onderkant	2,82	3,45	6,06	2,67	3,40	3,45
ω gemiddeld (milliboogsec/jaar)	3,54					
ω gemiddeld (rad/s)	$5,45 \times 10^{-16}$					
D (km)	$3,01 \times 10^{16}$					
D (parsec)	976					

$$\omega = 3,54 \times 10^{-3} \text{ boogsec/jaar} = 3,54 \times 10^{-3} \times 4,8481 \times 10^{-6} / (365 \times 24 \times 3600) \text{ rad/s} = 5,45 \times 10^{-16} \text{ rad/s.}$$

$$\text{En dus: } D = v_t/\omega = 16,4 / 5,45 \times 10^{-16} = 3,01 \times 10^{16} \text{ km} = 975 \text{ pc}$$

Opdracht 10

$$T = d/\omega = (1,9282 \times 10^{-5}) / (5,7628 \times 10^{-16}) = 3,3460 \times 10^{10} \text{ s} = 1061 \text{ jaar}$$

met de waarde van ω uit de radiale pasmethode:

$$T = 3,539 \times 10^{10} \text{ s} = 1123 \text{ jaar}$$

Opdracht 11

Het resultaat van Reed et al is: $D = 1001 \pm 269 \text{ pc}$, $T = 1039 \pm 259 \text{ jaar}$.

Merk op dat beide methoden nogal wat ruimte voor onbewuste aanpassingen laten. Het is wellicht een goed idee zijn om de leerlingen een meer formele foutenanalyse te laten maken. Hoewel er bij de metingen en berekeningen veel subjectieve beslissingen moeten worden genomen, is de kans echter klein dat de uitkomsten er volkomen naast zitten.

www.astroex.org

