

DE STERRENKUNDEPRACTICA VAN ESA/ESO

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



Hulpmiddelen



Inhoudsopgave

Hulpmiddelen

Astronomische hulpmiddelen

- Magnitudes blz. 2
- Schijnbare magnitude blz. 2
- Absolute magnitude blz. 3
- Andere kleuren, andere magnitudes blz. 3
- Van B-V kleurindex tot temperatuur blz. 4
- De afstandsvergelijking blz. 5
- Korte oefentaken blz. 5
- Lichtkracht en intensiteit blz. 7

Wiskundige hulpmiddelen

- Kleine hoeken en grote afstanden blz. 8
- Eenheden en andere basisgegevens blz. 8

Voor de leerkracht

- Voor de leerkracht blz. 9

Astronomische hulpmiddelen

Magnitudes: een 2000 jaar oud idee

Als we op een heldere avond naar de hemel kijken, zien we sterren. Sommige lijken helder, andere zwak. Sommige van die zwakke sterren zijn van zichzelf erg helder, maar staan ver weg. Sommige heldere sterren zijn juist erg zwak, maar lijken helder doordat ze zo dichtbij zijn. Bij het waarnemen zijn we gebonden aan de aarde of de naaste omgeving en kunnen we alleen de intensiteit meten van het licht dat ons bereikt. Maar daarmee weten we nog niets over de *inwendige eigenschappen* van een ster. Als we meer over een ster willen weten, zijn afmetingen of werkelijke helderheid bijvoorbeeld, moeten we zijn *afstand* kennen.

Vroeger werden de sterren die met het blote oog zichtbaar zijn ingedeeld in zes helderheidsklassen die magnitudes worden genoemd. Dit systeem werd omstreeks 120 v. Chr. bedacht door de Griekse astronoom Hipparchus, en het wordt in aangepaste vorm ook nu nog gebruikt. Hipparchus deelde de helderste sterren in bij magnitude 1 en de zwakste bij magnitude 6.

Sinds de tijd van Hipparchus is er echter veel veranderd! We nemen sterren niet meer waar met het blote oog, maar met grote telescopen zoals de VLT of de Hubble-ruimtetelescoop. Het opgevangen licht wordt geanalyseerd met instrumenten die objecten kunnen detecteren die miljarden malen zwakker zijn dan de zwakste

objecten die het menselijk oog kan waarnemen.

Desondanks maken ook moderne sterrenkundigen gebruik van Hipparchus' magnitudeschaal, al spreekt men nu liever van *schijnbare magnitudes*. De moderne definitie van magnitude is zo gekozen dat de bestaande magnitudebepalingen niet veranderd behoeften te worden. Naast *schijnbare magnitudes* gebruiken sterrenkundigen ook *absolute magnitudes*.

Schijnbare magnitude

De schijnbare magnitude, m , van een ster is een maat voor de helderheid van een ster zoals we die vanaf de aarde waarnemen. Deze is niet gelijk bijvoorbeeld aan het aantal fotonen dat we per seconde ontvangen, maar wordt gemeten ten opzichte van de helderheid van een referentiester. Anders gezegd: de magnitude is niets anders dan een manier om de helderheden van sterren te vergelijken met die van enkele standaardsterren waarvan de helderheden goed bekend zijn.

De schijnbare magnitude, m , wordt gegeven door:

$$m = m_{\text{ref}} - 2,5 \log_{10} (I/I_{\text{ref}})$$

waarbij m_{ref} de schijnbare magnitude van een referentiester is, I de gemeten intensiteit van het licht van de ster, en I_{ref} de intensiteit van



Figuur 1: Hipparchus van Nicaea (ca. 190 – ca. 120 v. Chr.) aan het werk

Hipparchus, een Griekse astronoom, bedacht de eerste indeling voor de helderheden van sterren in te delen.

Astronomische hulpmiddelen

het licht van de referentiester. De schaalfactor 2,5 brengt de moderne definitie in overeenstemming met de oudere, meer subjectief bepaalde magnitudes. Een magnitudeverschil van 1 correspondeert dus met een factor 2,5 in helderheid. Hoe groter de magnitude, des te zwakker de ster.

Het is interessant om op te merken dat de schaal die Hipparchus op intuïtieve basis, met niets anders dan het blote oog, uitkoos al logaritmisch is door de manier waarop onze ogen op licht reageren.

De helderste ster die we 's nachts met het blote oog kunnen zien is Sirius, met magnitude $-1,4$. Dat is helderder dan de klasse 1 sterren die volgens Hipparchus het helderst waren — in die zin was de oorspronkelijke magnitudeschaal dus niet zo precies. De schijnbare helderheid van de volle maan is ongeveer $-12,7$, die van de planeet Venus -4 en die van de zon $-26,5$. Met andere woorden: de volle maan is een factor $2,5^{11,3}$ ($= 31.000$) helderder dan Sirius.

Absolute magnitude

We hebben nu dus een goede definitie voor de schijnbare helderheden van sterren. Dat is een nuttig hulpmiddel, maar het zegt niets over de werkelijke eigenschappen van deze objecten. We zullen een manier moeten bedenken om verschillende sterren met elkaar te kunnen vergelijken. Daartoe is het begrip absolute magnitude bedacht.

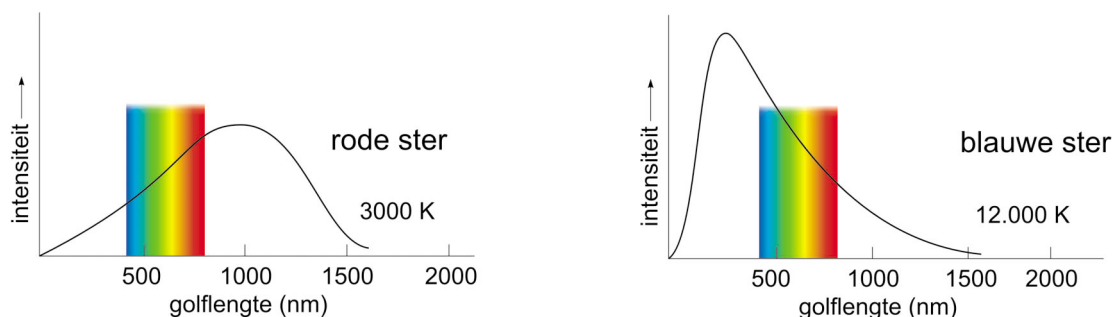
De absolute magnitude, M , van een ster is ge-

definieerd als de schijnbare magnitude die de ster zou hebben als deze zich op een afstand van 10 parsec (ongeveer 33 lichtjaar) van de zon bevindt. Omdat er maar weinig sterren precies op 10 parsec staan, moeten we een vergelijking gebruiken waarmee we de absolute helderheden van sterren op verschillende afstanden kunnen uitrekenen: de afstandsvergelijking. Deze vergelijking werkt natuurlijk ook de andere kant op: met behulp van de absolute magnitude kunnen we de afstand uitrekenen.

Andere kleuren, andere magnitudes

Tegen het einde van de 19de eeuw, toen astronomen foto's van de hemel gingen maken, ontstond een probleem. Sommige sterren die met het blote oog dezelfde helderheid leken te hebben, hadden op film heel verschillende helderheden, en omgekeerd. Dit kwam doordat de gebruikte fotografische emulsies van toen gevoeliger voor blauw licht en minder gevoelig voor rood licht waren dan het oog. Daarop werden twee aparte helderheidsschalen bedacht: de *visuele magnitude*, of m_{vis} , die beschrijft hoe de ster er met het blote oog uitziet en de *fotografische magnitude*, of m_{phot} , die verwijst naar de metingen met behulp van blauwgevoelige zwartwitfilm. Deze magnitudes worden nu afgekort als m_v en m_p .

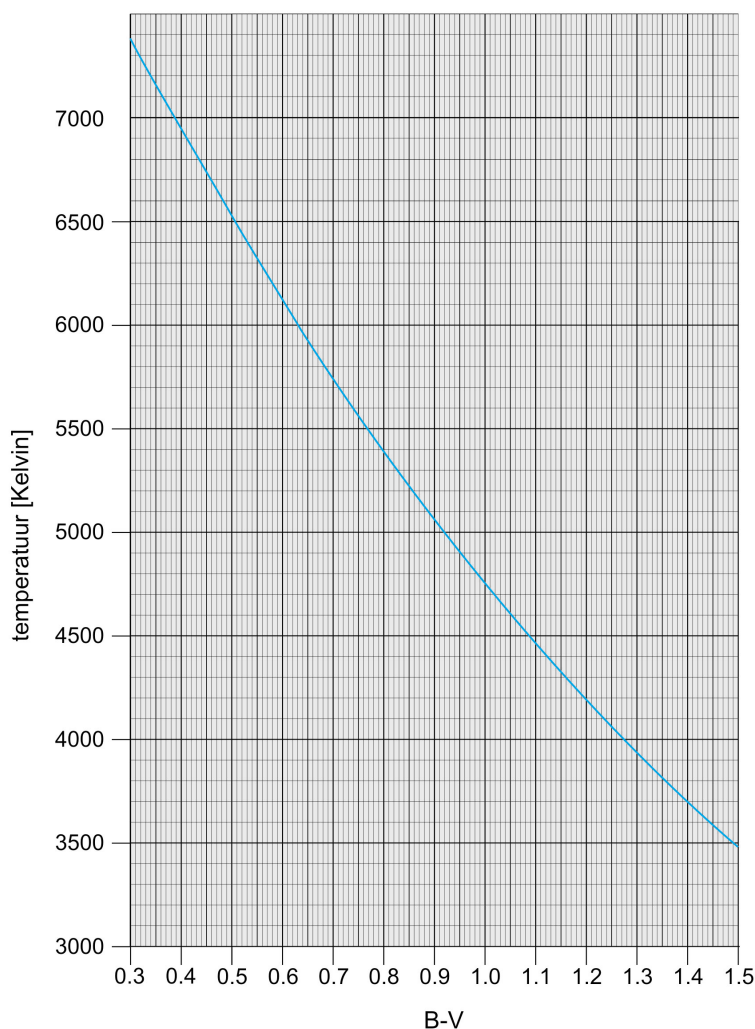
Andere soorten fotografische emulsies zijn weer gevoeliger voor andere kleuren, en ook is het ene oog het andere niet! Er was dus behoefte aan een betere kalibratie of ijking van magnitude-systemen voor verschillende golflengtegebieden. Tegenwoordig worden de magnitudes van sterren gemeten met behulp van een standaard foto-



Figuur 2: Temperatuur en kleur van sterren

Dit diagram laat het verband zien tussen de kleur van een ster en zijn oppervlaktetemperatuur. Hier is voor twee denkbeeldige sterren de intensiteit uitgezet tegen de golflengte. De kleurenband geeft het zichtbare deel van het spectrum weer. De kleur van de ster wordt bepaald door het punt waar de intensiteitskromme binnen het zichtbare deel van het spectrum de hoogste waarde bereikt.

Astronomische hulpmiddelen



Figuur 3: Oppervlaktetemperatuur versus B-V kleurindex

Deze grafiek toont het verband tussen de oppervlaktetemperatuur van een ster, T , en zijn B-V kleurindex. Als je ofwel de temperatuur ofwel de kleurindex van een ster kent, kun je de andere waarde uit deze grafiek aflezen. De blauwe lijn gaat veel verder naar linksboven door. Er zijn zelfs (zeer) hete sterren met een negatieve kleurindex.

elektrische fotometer en gestandaardiseerde kleurenfilters. Er zijn verschillende systemen bedacht, waarvan de meest gebruikte het zogeheten UBV-systeem is. Het U-filter laat voornamelijk nabij-ultraviolet licht door, het B-filter vooral blauw licht en het V-filter zo'n beetje al het licht dat we ook met het blote oog kunnen zien (de meeste doorlating zit hierbij in de geel-groene golflengteband, waar het menselijk oog de hoogste gevoeligheid heeft). De overeenkomstige magnitudes in dit systeem zijn m_U , m_B en m_V .

Van B-V kleurindex tot temperatuur

De term B-V kleurindex (door astronomen kortweg "B min V" genoemd) is gedefinieerd als het verschil tussen twee magnitudes van het UBV-systeem: $m_B - m_V$. Een zuiver witte ster heeft een B-V kleurindex van ongeveer 0,2, onze gele zon van 0,63, de oranje rode ster Betelgeuze van 1,85. De meest blauwe ster die denkbaar is zou uitkomen op -0,4. Hoe blauwer de ster des te kleiner is zijn B-magnitude en des te lager is dus de uitkomst van $m_B - m_V$.

Astronomische hulpmiddelen

Er is een eenvoudig verband tussen de oppervlaktetemperatuur T van een ster en zijn B-V kleurindex (zie Reed, C., 1998, *Journal of the Royal Society of Canada*, **92**, 36–37). We kunnen de oppervlaktetemperatuur van een ster dus vinden met behulp van een grafiek waarin T tegen $m_B - m_V$ is uitgezet (zie fig. 3). Ook kan de volgende formule worden gebruikt:

$$\log_{10} T = (14,551 - (m_B - m_V))/3,684$$

De afstandsvergelijking

De afstandsvergelijking ziet er als volgt uit:

$$m - M = 5 \log_{10} (D/10 \text{ pc}) = 5 \log D - 5$$

Deze vergelijking legt een verband tussen de schijnbare magnitude, m , de absolute magnitude, M , en de afstand, D , gemeten in parsec. Het getal $m - M$ wordt ook wel de *afstandsmodulus* genoemd; het kan worden gebruikt om de afstand van een object te bepalen.

Je kunt gemakkelijk zien dat voor een ster op 10 parsec m en M gelijk aan elkaar zijn. Met een

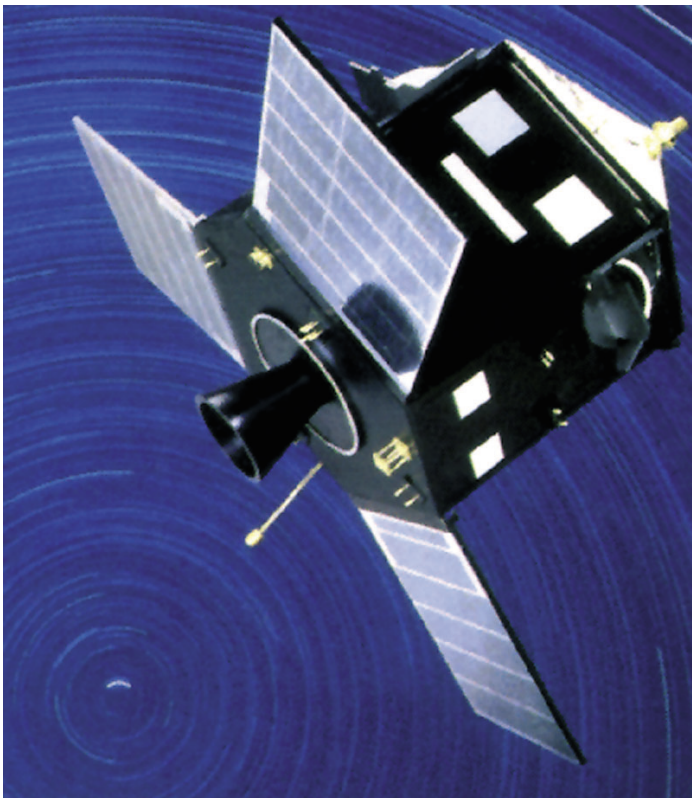
beetje rekenwerk (probeer dat zelf eens!) kunnen we bovenstaande vergelijking omvormen tot een formule die soms handiger in het gebruik is:

$$D = 10^{(m-M+5)/5}$$

Wanneer we de afstand van een hemelobject willen bepalen, moeten we allereerst zijn schijnbare helderheid m meten. Als we ook de intrinsieke helderheid van het object kennen (zijn absolute magnitude M), kunnen we vervolgens zijn afstand D bepalen. Het grote probleem bij het vinden van astronomische afstanden is de bepaling van de absolute helderheid van bepaalde soorten objecten. Met ESA's HIPPARCOS-satelliet zijn nauwkeurige afstandsmetingen gedaan, en met behulp daarvan zijn de absolute helderheden van grote aantallen nabije sterren berekend.

Korte oefenopdrachten

Met de volgende rekenopdrachten kun je jezelf een beetje vertrouwd maken met de grootheden die we zojuist hebben geïntroduceerd.



Figuur 4: ESA's HIPPARCOS-satelliet
De HIPPARCOS werd in de nacht van 8 augustus 1989 gelanceerd door een Europese Ariane-4 raket. De belangrijkste taak van de HIPPARCOS-missie was het samenstellen van een zeer nauwkeurige stercatalogus. Daartoe werden de hemelposities en afstanden van ongeveer 120.000 sterren tot schijnbare magnitude $m_B = 13$ met grote nauwkeurigheid gemeten. De HIPPARCOS-missie werd in 1993 voltooid en de uiteindelijke stercatalogus werd in 1997 gepubliceerd.

Astronomische hulpmiddelen



Foto 1: Betelgeuze (sterrenbeeld Orion – de Jager)



Foto 2: Wega (Lyra – de Lier)



Foto 3: De Zomerdriehoek. De drie helderste sterren heten (vanaf linksboven met de klok mee): Deneb (Cygnus – de Zwaan), Wega (Lyra – de Lier), Altair (Aquila – de Arend)



Foto 4: Sirius (Canis Major - de Grote Hond)

Opdracht AT1

De ster α Orionis (Betelgeuze) heeft een schijnbare magnitude van $m = 0,45$ en een absolute magnitude van $M = -5,14$.

? Bereken de afstand van Betelgeuze.

Betelgeuze is de rode ster bij de linker 'schouder' van het sterrenbeeld Orion. Het is een rode superreus. Met het blote oog heeft de ster een duidelijk oranje-rode tint.

Opdracht AT2

α Lyrae (Wega), met een absolute magnitude van $0,58$, heeft een afstand van $7,76$ parsec.

? Bereken de schijnbare magnitude van Wega.

Wega is de helderste ster van het sterrenbeeld Lier en maakt tevens deel uit van de zogeheten Zomerdriehoek.

Opdracht AT3

α Cygni (Deneb) is de helderste ster van het sterrenbeeld Zwaan. De ster heeft een schijnbare magnitude van $1,25$ en zijn afstand bedraagt 993 parsec.

? Bereken de absolute magnitude. Vergelijk deze met die van Betelgeuze en Wega.

Opdracht AT4

De ster α Canis Majoris (Sirius) is de helderste ster aan de hemel. Hij bevindt zich op een afstand van $2,64$ parsec en heeft een schijnbare magnitude van $-1,44$.

? Bereken de absolute helderheid van Sirius.
• Als je deze absolute magnitude vergelijkt met die van de drie andere sterren, wat is dan je inschatting van de fysische of intrinsieke helderheid van Sirius?

Opdracht AT5

? Als de sterren Wega, Sirius, Betelgeuze en Deneb op een afstand van 10 parsec zouden staan, wat zouden we dan zien?

Astronomische hulpmiddelen

Opdracht AT6

De absolute magnitude, M , is gedefinieerd als de schijnbare magnitude die een ster zou hebben als hij op een afstand van 10 parsec van de zon staat.

- ? Zou het niet juister zijn om deze afstanden opzichte van de aarde te meten?
• Waarom maakt het niet uit of we de afstanden opzichte van de zon of de aarde meten?

Lichtkracht en intensiteit

Tot nu toe hebben we het alleen over magnitudes gehad. Maar hoeveel lichtenergie zendt een ster nu werkelijk uit? De totale energie die een ster per seconde aan licht uitstraalt wordt de lichtkracht, L , genoemd en deze wordt gemeten in watt (W).

Lichtkracht en magnitude hebben veel met elkaar te maken. Een verre ster met een grote lichtkracht kan dezelfde schijnbare magnitude hebben als een nabije ster met een kleine lichtkracht. Als we de schijnbare magnitude en de afstand van een ster kennen, kunnen we ook zijn lichtkracht bepalen.

De ster straalt licht in alle richtingen uit: het licht wordt dus over een bol verspreid. Om de intensiteit, I , van het licht van een ster ter plaatse van de aarde te bepalen (de intensiteit is de lichtkracht per eenheid van oppervlakte), moeten we de lichtkracht delen door de oppervlakte van een bol met de ster als centrum en de afstand van de ster, D , als straal. Zie fig. 5.

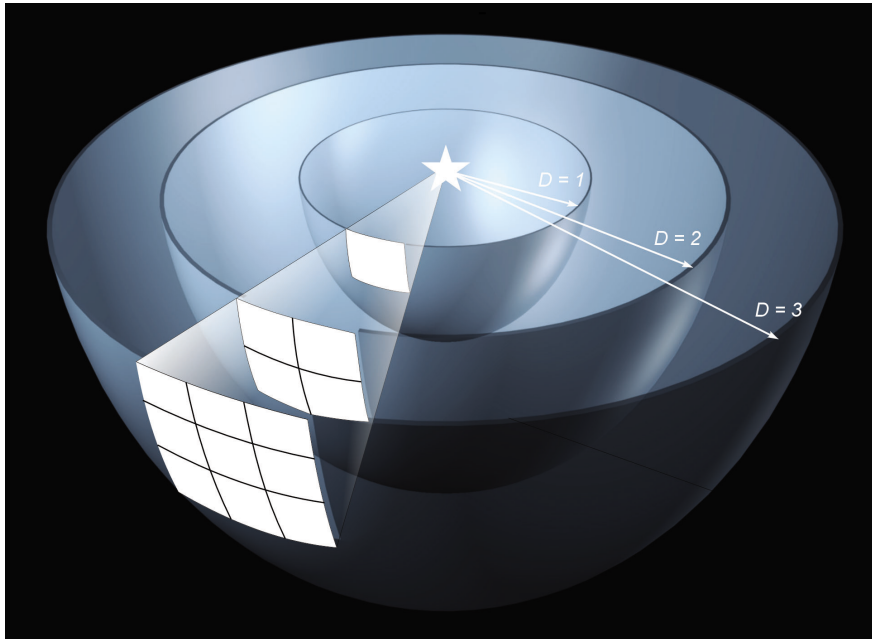
$$I = L / (4\pi D^2)$$

De lichtkracht van een ster kan ook worden gemeten als een veelvoud van de lichtkracht van de zon ($L_{\text{zon}} = 3,85 \times 10^{26}$ W). Omdat de zon 'onze' ster is, en tevens de ster die we het beste kennen, wordt hij vaak als referentiester gebruikt.

Met behulp van een beetje rekenwerk kunnen we een formule opstellen voor de lichtkracht van een ster, uitgedrukt in 'zonlichtkrachten':

$$L/L_{\text{zon}} = (D/D_{\text{zon}})^2 \cdot I/I_{\text{zon}}$$

De verhouding I/I_{zon} kan worden bepaald met behulp van de formule die gegeven is in het onderdeel 'Schijnbare magnitudes' ($m_{\text{zon}} = -26,5$).



Figuur 5: De intensiteit van licht

Deze tekening laat zien hoe dezelfde hoeveelheid straling van een lichtbron wordt uitgespreid over een steeds groter oppervlak, naarmate de afstand tot de lichtbron toeneemt. Dit oppervlak neemt toe met het kwadraat van de afstand, en dus neemt de intensiteit af met het kwadraat van de afstand.

Wiskundige hulpmiddelen

Kleine hoeken en grote afstanden

Kijk eens naar figuur 6.

Als b klein is ten opzichte van c , kunnen we aannemen dat de twee lange zijden van de driehoek bij benadering even lang zijn als de centrale lijn.

Met de gebruikelijke vergelijkingen voor een rechthoekige driehoek vinden we dan:

$$\sin(\beta/2) = (b/2)/c$$

Als we te maken hebben met heel kleine hoeken, en deze in radialen uitdrukken, kunnen we bij benadering zelfs gebruik maken van $\sin x = x$. Dat lijkt vreemd, maar het kan

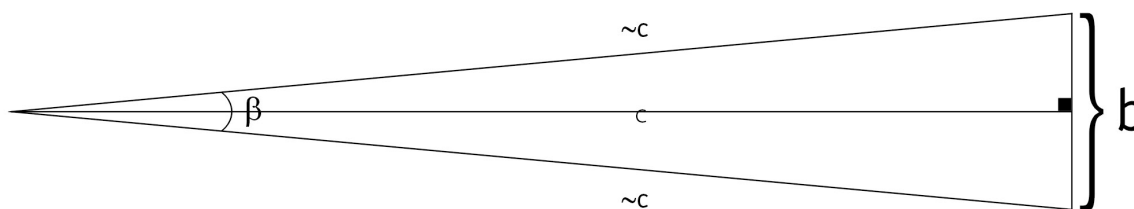
wiskundig gemakkelijk worden aangetoond (zie ook onderstaande opdracht). Het resultaat is een eenvoudige relatie tussen b , c , en β , zonder goniometrische functie:

$$\beta/2 = (b/2)/c$$

$$c = b/\beta$$

Opdracht MT1

- Controleer de benadering $\sin x = x$ voor de sinus van kleine hoeken door $\sin(1^\circ)$, $\sin(1')$ en $\sin(1'')$ uit te rekenen ($1^\circ = 60'$, $1' = 60''$). Vergelijk de uitkomsten met de overeenkomstige hoeken in radialen ($1 \text{ rad} = 360^\circ/2\pi$).



Figuur 6: Werken met kleine hoeken

Als b klein is ten opzichte van c , is β een kleine hoek. We kunnen dan gebruik maken van een eenvoudig verband tussen b , c en β , waar geen goniometrische functie aan te pas komt.

Eenheden en andere basisgegevens

- 1 boogminuut = $1' = 1/60$ graad = $2,9089 \times 10^{-4}$ radialen
- 1 boogseconde = $1'' = 1/3600$ graad = $4,8481 \times 10^{-6}$ radialen
- 1 milliboogseconde = $1/1000$ boogseconde
- lichtsnelheid (c) = $2,997 \times 10^8$ m/s
- 1 parsec (pc) = $3,086 \times 10^{13}$ km = 3,26 lichtjaar
- 1 kiloparsec (kpc) = 1000 parsec
- 1 Megaparsec (Mpc) = 10^6 parsec
- 1 nanometer (nm) = 10^{-9} m

Voor de leerkracht

Deze docentenhandleiding bevat de uitkomsten van de korte oefenopdrachten.

Opdracht AT1: $D = 131$ parsec

Opdracht AT2: $m = 0,03$

Opdracht AT3: $M = -8,73$

Deneb is een opmerkelijk heldere ster.

Opdracht AT4: $M = 1,45$

Vergeleken met Deneb ($M = -8,73$), Betelgeuze ($M = -5,14$), en Wega ($M = 0,58$) is Sirius eigenlijk een tamelijk zwakke ster.

Opdracht AT5:

Op een afstand van 10 pc zouden Wega en Sirius wat zwakker zijn, maar nog steeds tot de helderste sterren aan de hemel behoren. De sterren Deneb en Betelgeuze zouden beide juist veel helderder zijn dan de andere sterren die we nu aan onze nachthemel zien.

Opdracht AT6:

Er is geen reden om onderscheid te maken tussen de afstand tot de zon en die tot de aarde, omdat de afstand tussen zon en aarde verwaarloosbaar klein is in vergelijking met 10 parsec. Als we rekening zouden houden met het afstandsverschil tussen zon en aarde, zou dat slechts 10^{-6} magnitude schelen.

Opdracht MT1:

$$\sin(1^\circ) = \sin(0,017453292 \text{ rad}) = \mathbf{0,017452406}$$

$$\sin(1') = \sin(0,000290888 \text{ rad}) = \mathbf{0,000290888}$$

$$\sin(1'') = \sin(4,84814 \times 10^{-6} \text{ rad}) = \mathbf{4,84814 \times 10^{-6}}$$

www.astroex.org

