2 LA DISTANCE ET LA LUMINOSITÉ DES ÉTOILES

La magnitude visuelle moyenne de Delta de Céphée est de 4,07 et elle varie avec une période de 5,366 jours. Sachant que la différence entre la magnitude visuelle et la magnitude bolométrique de cette étoile est de 0,15, déterminez la distance de cette étoile ?

cs.astronomy.com/asy/m/starclusters/434452.aspx

Découvrez comment résoudre ce problème dans ce chapitre.

2.1 LA DISTANCE DES ÉTOILES

La distance du Soleil

La distance entre la Terre et le Soleil est 149 597 870,7 km (du centre de la Terre au centre du Soleil). Cette distance porte le nom d'*unité astronomique*. Après bien des années de controverses sur la définition exacte (parce que la Terre s'éloigne très lentement du Soleil), on a défini l'unité astronomique, lors de la 28e assemblée générale de l'union astronomique internationale en aout 2012, comme valant exactement

L'unité astronomique (UA)

$$1UA = 1,495\,978\,707 \times 10^{11} m$$
$$1UA \approx 1,496 \times 10^{11} m$$

Aujourd'hui, on mesure cette distance à l'aide de radar. En mesurant le temps que prend l'onde pour aller et revenir au Soleil (environ 16 minutes), on peut facilement trouver, avec la vitesse de la lumière, la distance du Soleil.

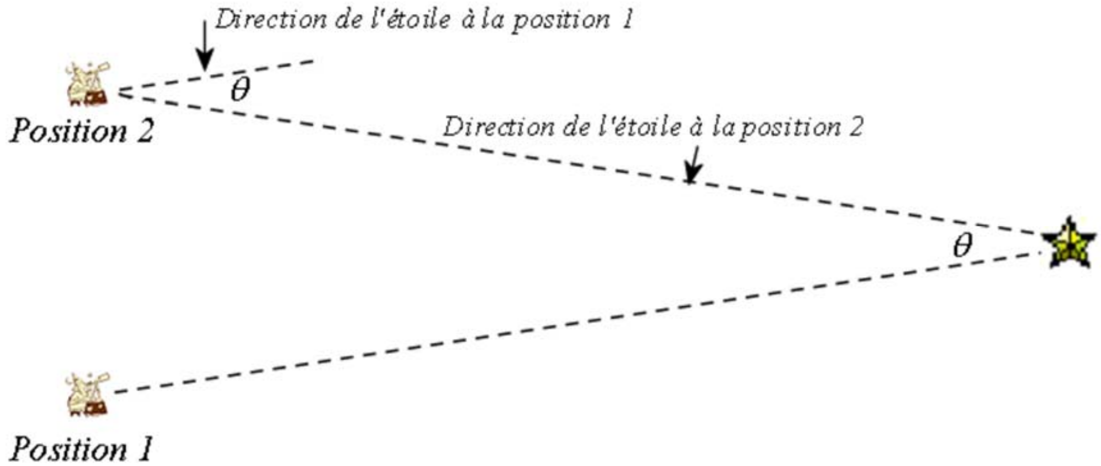
On verra, au cours des chapitres suivants comment on tenta de déterminer cette distance du Soleil avant qu'on ne puisse utiliser les ondes radars.

On ne peut toutefois pas utiliser cette méthode pour déterminer la distance des autres étoiles parce qu'elles sont beaucoup trop loin. Il faudrait des dizaines d'années pour que le signal radar revienne sur Terre, et de toute façon, il serait beaucoup trop faible quand il reviendrait sur Terre pour qu'on puisse le détecter.

La parallaxe

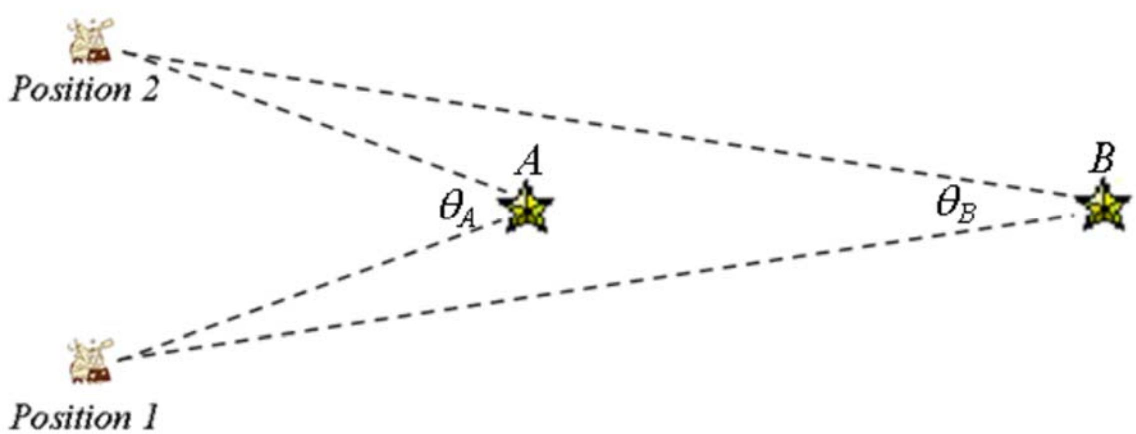
Pour des étoiles relativement près de la Terre, on peut déterminer la distance à partir de la parallaxe. La parallaxe est le changement de position apparente d'une étoile pendant l'année.

Pour comprendre ce que cela veut dire, regardons comment change la position angulaire d'un objet, ici une étoile, quand on observe un objet à partir de différentes positions.

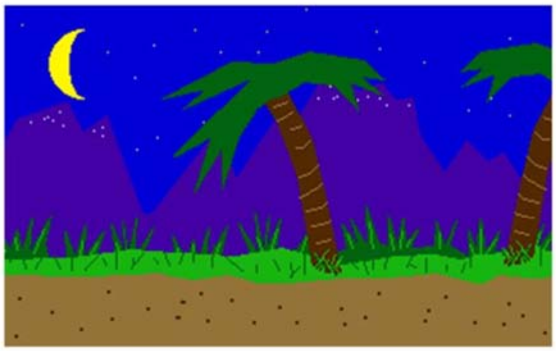


À la position 1, on observe l'objet dans une certaine direction. À la position 2, on observe l'objet dans une autre direction. La position angulaire de l'objet a donc changé. Remarquez l'égalité entre les deux angles θ indiqués sur la figure. Le changement de position angulaire est la *parallaxe*.

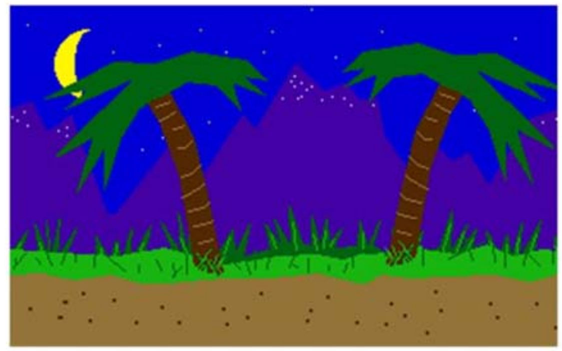
Si on observe deux objets à des distances différentes, le changement d'angle sera plus grand pour l'objet le plus proche.



Ainsi, quand on se déplace, le changement de direction est plus important si l'objet est plus près. Voici comment change ce paysage quand on se déplace un peu.



Position 1



Position 2
un peu à droite de la position 1

/www.youtube.com/watch?v=bDm6unk1pqI

On voit que le changement de direction des palmiers, relativement près, est important, alors que le changement de direction des montagnes, plus lointaines, est plus petit. Quant à la Lune, elle est si loin qu'elle n'a pratiquement pas changé de direction.

Voici la même scène, mais animée. (L'observateur change constamment de position.) On voit le paysage le plus près défilé plus rapidement puisque sa position angulaire change rapidement, alors que les objets lointains défilent plus lentement.
http://www.youtube.com/watch?v=bDm6unk1pqI

La parallaxe est la clé de la mesure de la distance des étoiles.

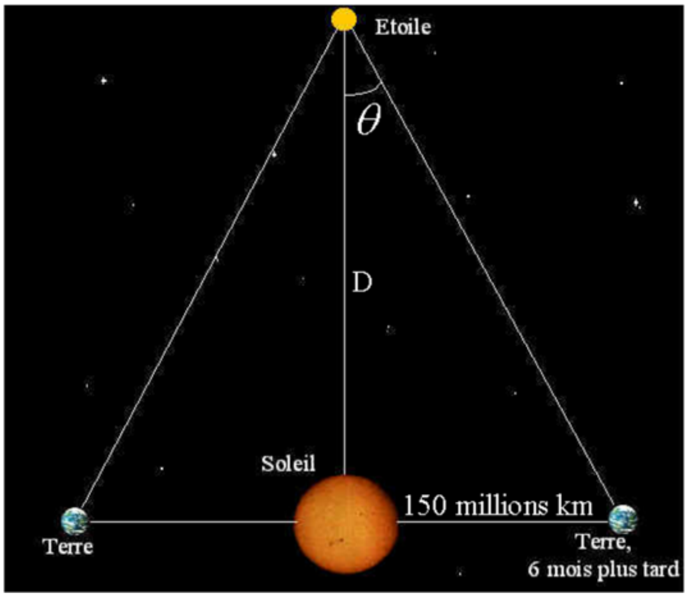
Le calcul de la distance

Quand la Terre tourne autour du Soleil, on change de position et cela se traduit par un changement de direction de la position des étoiles. Plus les étoiles sont près, plus le changement de direction est important. Avec la Terre qui se déplace continuellement autour du Soleil, le changement de direction se fait de façon continue, ce qui fait que les étoiles changent continuellement de direction vue de la Terre en faisant un mouvement d'oscillation. Cette animation montre que l'amplitude d'oscillation de l'étoile diminue avec la distance.
http://www.youtube.com/watch?v=LflQM8NOaB0
La période de cette oscillation est de un an.

Voici ce qu'on obtient si on regarde plusieurs étoiles à différentes distances en même temps.
http://www.youtube.com/watch?v=HjjE4nzcKdk
Les étoiles les plus près font un mouvement d'oscillation important alors que les étoiles plus loin font un mouvement d'oscillation plus petit. Les étoiles très loin restent toujours dans la même direction et ne semblent pas osciller du tout. Dans cette animation, l'amplitude d'oscillation est fortement exagérée et la période du mouvement est grandement diminuée puisqu'il faut un an pour que l'étoile fasse une oscillation.

La trajectoire peut être un mouvement d'oscillation de gauche à droite (étoiles à 90° de l'Étoile polaire), un ovale ou un cercle (pour les étoiles près de l'Étoile polaire par exemple). On peut voir dans l'animation précédente que les étoiles au milieu de l'image font une oscillation de gauche à droite alors qu'elles font un petit ovale dans le haut de l'image.

Avec la grandeur de l'angle donnant le changement de direction de l'étoile, on peut trouver la distance de l'étoile. En fait, la parallaxe d'une étoile correspond à la moitié du changement de direction. On a donc



www.astrosurf.com/voyager3/astro/unites.htm

$$\tan\theta = \frac{1,496\times 10^{11} m}{D}$$

(La distance entre le Soleil et la Terre est de 149,6 millions km.)

En général, l'angle est très petit (le plus grand dépasse à peine 0,0002°). On peut donc utiliser l'approximation des petits angles

$$\tan\theta \approx \theta$$

où l'angle est en radian. On a donc

$$\theta_{(rad)} = \frac{1,496\times 10^{11} m}{D}$$

$$D = \frac{1,496\times 10^{11} m}{\theta_{(rad)}}$$

Généralement, on mesure l'angle en seconde d'arc, qui vaut 1/3600 degré (chaque degré est divisé en 60 minutes d'arc et chaque minute d'arc est divisé en 60 secondes d'arc). Aussi, on veut obtenir une réponse en année-lumière. On va donc transformer cette équation pour qu'on puisse utiliser les angles en secondes pour obtenir une distance en année-lumière.

Le lien entre l'angle en seconde et l'angle en radian est

$$\theta_{(rad)} = \theta_{(\sec)} \times \frac{1}{3600}\frac{\deg}{\sec} \times \frac{\pi}{180}\frac{rad}{\deg}$$

On divise l'angle en seconde par 3600 pour obtenir les degrés, puis on transforme les degrés en radian avec la fraction de droite dans l'équation.

Le lien entre la distance en mètres et la distance en années-lumière est

$$D_{(m)} = D_{(al)} \times 9,46 \times 10^{15} \tfrac{m}{al}$$

On a donc

$$D_{(m)} = \frac{1,496 \times 10^{11} m}{\theta_{(rad)}}$$

$$D_{(al)} \times 9,46 \times 10^{15} \tfrac{m}{al} = \frac{1,496 \times 10^{11} m}{\theta_{(\sec)} \times \frac{1}{3600} \frac{\deg}{\sec} \times \frac{\pi}{180} \frac{rad}{\deg}}$$

$$D_{(al)} = \frac{1}{\theta_{(\sec)}} \times \frac{1,496 \times 10^{11} m}{9,46 \times 10^{15} \tfrac{m}{al} \times \frac{1}{3600} \frac{\deg}{\sec} \times \frac{\pi}{180} \frac{rad}{\deg}}$$

En calculant la valeur du terme de droite, on obtient

$$D_{(al)} = \frac{3,262 al}{\theta_{(\sec)}}$$

Cette valeur de 3,262 al est en fait une autre unité de distance appelée le parsec (qui vient de *par seconde*).

Le parsec (pc)

$$1 pc = 3,262 al = 3,086 \times 10^{16} m$$

Cette unité a tendance à prendre lentement la place de l'année-lumière en astronomie.

La formule de la distance des étoiles à partir de la parallaxe est donc

Distance des étoiles (en al ou en pc) à partir de la parallaxe (en seconde)

$$D_{(al)} = \frac{3,262 al}{\theta_{(\sec)}}$$

$$D_{(pc)} = \frac{1 pc}{\theta_{(\sec)}}$$

Exemple 2.1.1

L'étoile alpha du Centaure a une parallaxe de 0,773″ (″ est le symbole de la seconde d'arc). Quelle est la distance de cette étoile ?

Selon notre équation, on a

$$\begin{aligned} D_{(al)} &= \frac{3,262al}{\theta_{(\text{sec})}} \\ &= \frac{3,262al}{0,773"} \\ &= 4,22al = 1,29\,pc \end{aligned}$$

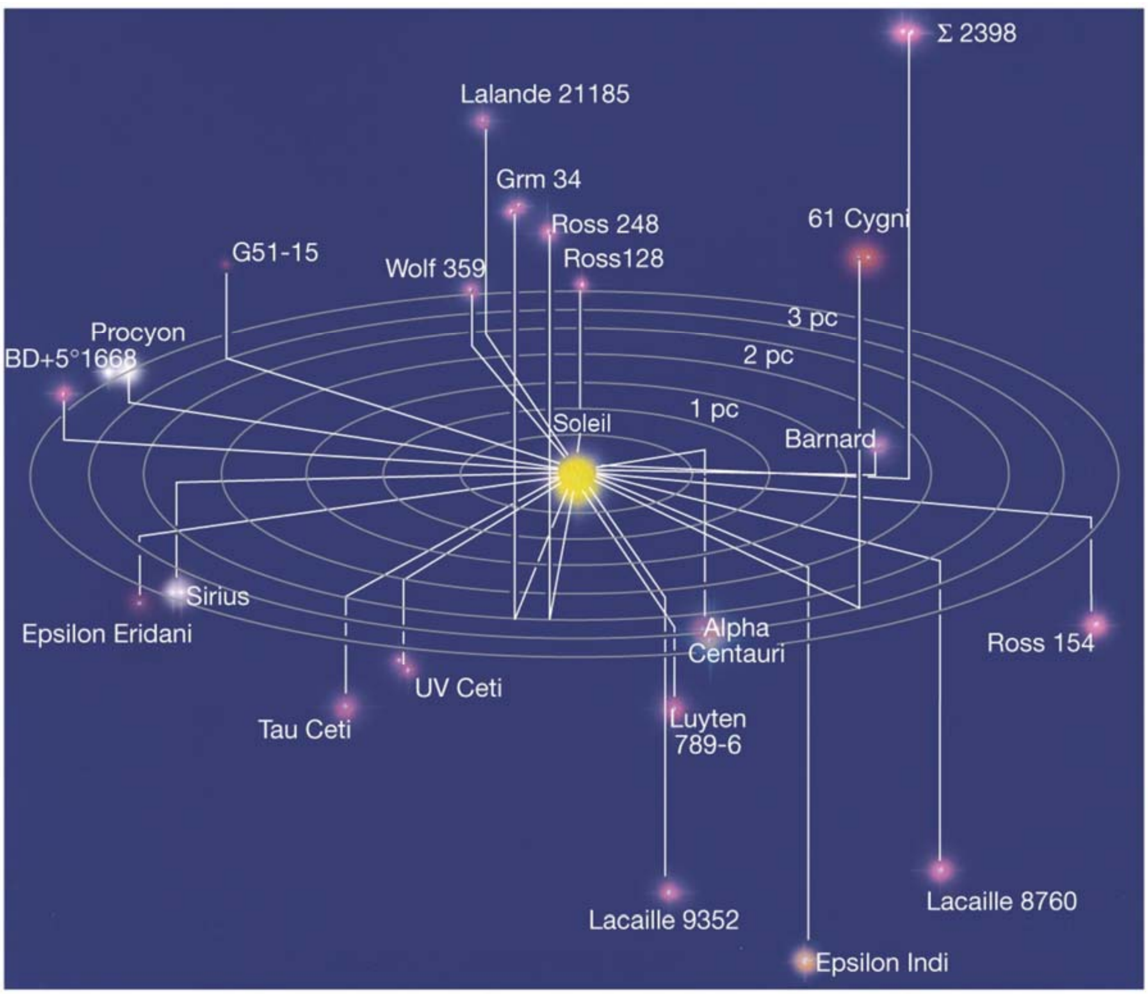
Cette dernière étoile est la deuxième étoile la plus proche du Soleil après Proxima du Centaure. C'est donc une des étoiles qui a la plus grande parallaxe et elle n'atteint même pas de 1 seconde d'arc. Pour vous donner une idée de la petitesse d'un angle d'une seconde, dites-vous qu'il correspond à l'angle entre deux objets séparés de 5 mm situé à 1 km d'un observateur. Les angles des parallaxes sont tellement petits qu'on ne parvint à mesurer la première qu'en 1838 (Friedrich Wilhelm Bessel mesura alors la parallaxe de l'étoile 61 du cygne, suivit de peu par Friedrich Struve qui mesura celle de Véga), alors qu'on tentait de les mesurer depuis 1543 (on verra pourquoi au chapitre 13).

Pour trouver la distance de l'étoile, il faut être capable de mesurer l'angle de la parallaxe. Pour les étoiles assez près, on peut le faire, mais c'est plus difficile pour les étoiles éloignées, car l'angle est trop petit. Avant 1989, on mesurait la parallaxe à partir du sol avec une précision qui ne dépassait pas 0,05″. On pouvait donc seulement connaitre la distance des étoiles se situant à moins de 65 al du Soleil. Cela veut dire qu'on connaissait la distance de seulement quelques douzaines d'étoiles avec une incertitude inférieure à 1 % et d'environ une centaine d'étoiles avec une incertitude inférieure à 5 %. En 1989, on lança le satellite Hipparcos qui pouvait mesurer les angles de parallaxe avec une précision de 0,001″. On a pu ainsi mesurer la parallaxe, et donc la distance, d'un peu plus de 2,5 millions d'étoiles se situant à moins de 3000 al de la Terre. Cela représente 99 % de toutes les étoiles ayant une magnitude de 11 ou moins. On connait maintenant la distance de 400 étoiles avec une incertitude inférieure 1 % et de 7000 étoiles avec une incertitude inférieure 5 %. On peut dire que la mesure des distances est précise pour toutes les étoiles se situant à moins de 500 al du Soleil. Les distances mesurées entre 500 al et 3000 al sont un peu plus incertaines. On lancera bientôt le satellite GAIA qui pourra mesurer la parallaxe avec encore plus de précision (0,0001″). On pourra ainsi mesurer la distance de 50 millions d'étoiles.

Voici ce qu'on obtient pour la distance de quelques étoiles.

Étoile	Parallaxe (″)	Distance (al)
Sirius (étoile la plus brillante)	0,3792 ± 0,0016	8,60 ± 0,03
Véga (5e étoile la plus brillante)	0,12893 ± 0,00055	25,3 ± 0,1
Bételgeuse (9e étoile la plus brillante)	0,0051 ± 0,0011	640 ± 130
Fomalhaut (18e étoile la plus brillante)	0,13058 ± 0,00065	25,0 ± 0,1
Polaire (48e étoile la plus brillante)	0,00754±0,00011	433 ± 6
Étoile de Barnard (5e étoile la plus près)	0,5454 ± 0,0003	5,980 ± 0,003

Voici aussi une image montrant les étoiles à moins de 4 pc (environ 13 al) du Soleil.



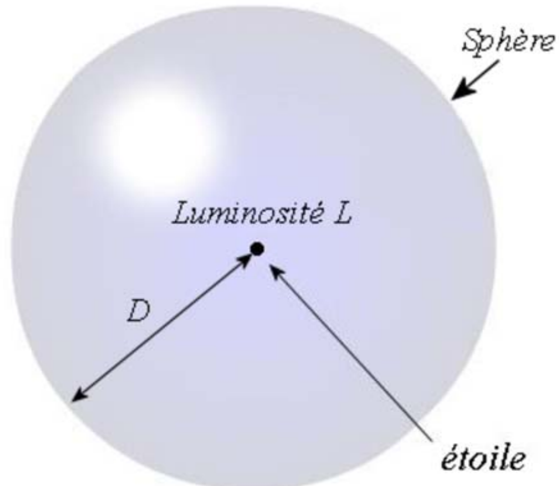
www.uh.edu/~jclarage/astr3131/lectures/9/9.html

2.2 LA LUMINOSITÉ DES ÉTOILES

Luminosité selon la distance et l'intensité

Sachant maintenant la distance des étoiles, on peut trouver la puissance de l'étoile à partir de l'intensité de la lumière reçue. Cette puissance est l'énergie rayonnée par l'étoile par seconde et elle est donc en watts. Cette puissance est la luminosité de l'étoile.

Calculons l'intensité de la lumière à une distance D de l'étoile. Pour y arriver, on va imaginer une sphère entourant l'étoile se situant à une distance D de l'étoile. La lumière de l'étoile est émise dans toutes les directions et elle se répartit uniformément sur toute la surface de la sphère. La puissance reçue par unité de surface (qui est l'intensité de la lumière) sur cette sphère est



www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/waves_power.htm

$$I = \frac{L}{A}$$

La situation est similaire dans le cas des étoiles. La lumière est émise dans toutes les directions (on dit alors qu'elle est isotrope) et la puissance de l'étoile est répartie sur une sphère entourant l'étoile (comme dans la figure). Comme l'aire d'une sphère est $4\pi D^2$, on a

Intensité de la lumière d'une étoile (*I*)

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

Cette équation nous indique que l'intensité de la lumière reçue dépend de la luminosité de l'étoile et de sa distance. Si deux étoiles sont à la même distance, celle qui a le plus de luminosité sera la plus brillante. Si deux étoiles ont la même luminosité, la plus près des deux sera la plus brillante. Tout cela semble bien logique.

Une étoile brillante dans le ciel pourrait donc être peu lumineuse, mais assez près de la Terre, ou elle pourrait aussi être très éloignée de la Terre et extrêmement lumineuse.

La luminosité du Soleil

Avec cette équation, nous pouvons trouver la luminosité du Soleil. Puisque l'intensité de la lumière reçue est de 1361 W/m², la luminosité est

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$$1361\tfrac{W}{m^2} = \frac{L}{4\pi\left(1,496\times10^{11}m\right)^2}$$

$$L = 3,828\times10^{26}W$$

C'est une puissance quand même assez grande. Le Soleil rayonne 3,828 x 10^{26} Joules chaque seconde. Si on pouvait capter et emmagasiner toute cette énergie émise en 1 seconde, on aurait de l'énergie pour fournir de l'énergie à tous les habitants de la Terre pendant le prochain million d'années en maintenant notre consommation au niveau actuel. La quantité d'énergie produite par les étoiles est donc prodigieuse.

On mesure souvent la luminosité des étoiles en la comparant avec la luminosité du Soleil.

Autre unité de luminosité : la luminosité solaire ($L_\odot$)

$$1L_\odot = 3,828\times10^{26}W$$

Remarquez le symbole utilisé en astronomie pour représenter le Soleil : ⊙

La luminosité des autres étoiles

Exemple 2.2.1

L'intensité de la lumière reçue de Sirius est 1,207 x 10^{-7} W/m². Sachant que la parallaxe de cette étoile est de 0,3792″, quelle est la luminosité de cette étoile ?

Trouvons premièrement la distance de Sirius à partir de la parallaxe. La distance est

$$D_{(al)} = \frac{3,262al}{\theta_{(\sec)}}$$

$$D_{(al)} = \frac{3,262al}{0,3792''}$$

$$D_{(al)} = 8,60al$$

$$D = 8,14\times10^{16}m$$

On peut alors trouver la luminosité avec notre formule de l'intensité.

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$$1,207 \times 10^{-7} \tfrac{W}{m^2} = \frac{L}{4\pi \left(8,14 \times 10^{16} m\right)^2}$$

$$L = 1,005 \times 10^{28} W$$

La luminosité de Sirius est de

$$L = 1,005 \times 10^{28} W \times \frac{1 L_\odot}{3,828 \times 10^{26} W} = 26,2 L_\odot$$

Les luminosités des étoiles sont très variables, allant de 0,0005 $L_\odot$ à 8 700 000 $L_\odot$. Voici les luminosités de quelques étoiles.

Étoile	Luminosité visuelle	Luminosité bolométrique
Sirius (étoile la plus brillante)	21,2 $L_\odot$	26,2 $L_\odot$
Véga (5e étoile la plus brillante)	46,1 $L_\odot$	60,7 $L_\odot$
Bételgeuse (9e étoile la plus brillante)	19 100 $L_\odot$	84 900 $L_\odot$
Fomalhaut (18e étoile la plus brillante)	15,9 $L_\odot$	18,6 $L_\odot$
Polaire (48e étoile la plus brillante)	2170 $L_\odot$	2360 $L_\odot$
Étoile de Barnard (5e étoile la plus près)	0,000404 $L_\odot$	0,0034 $L_\odot$

2.3 LA MAGNITUDE ABSOLUE DES ÉTOILES

On mesure aussi la luminosité des étoiles avec la magnitude absolue, qu'on définit comme étant la magnitude qu'aurait l'étoile si elle était à une distance de 10 pc (32,62 al).

La brillance, donc l'intensité de la lumière reçue de l'étoile, dépend de la luminosité et de la distance selon la formule

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

Si on imagine que toutes les étoiles sont à la même distance de 10 pc, on voit que l'intensité de la lumière reçue me dépendrait plus que de la luminosité de l'étoile. L'intensité de la lumière reçue serait donc une mesure de la luminosité de l'étoile. Cette intensité peut également se mesurer en magnitude.

Quand on mesure la magnitude de l'étoile comme si elle était à 10 pc, on parle de *magnitude absolue M*. Si l'étoile est à 10 pc, l'intensité de la lumière est

$$I = \frac{L}{4\pi\left(32,62al\right)^2}$$

La magnitude serait alors donnée par

$$\begin{aligned} I &= 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2}\cdot10^{-0,4M} \\ \frac{L}{4\pi\left(32,62al\right)^2} &= 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2}\cdot10^{-0,4M} \end{aligned}$$

Cette formule montre bien qu'il y a un lien direct entre la luminosité et la magnitude absolue puisque ce sont les deux seules variables dans cette équation. Si on isole la magnitude *M*, on obtient

$$\begin{aligned} \frac{L}{4\pi\left(32,62al\right)^2} &= 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2}\cdot10^{-0,4M} \\ \frac{L}{4\pi\left(32,62al\right)^2 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2}} &= 10^{-0,4M} \end{aligned}$$

Au dénominateur, on a

$$\begin{aligned} 4\pi\left(32,62al\right)^2 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2} &= 4\pi\left(32,62\times9,46\times10^{15}m\right)^2 2,52\times10^{-8} \tfrac{W}{m^2} \\ &= 3,015\times10^{28}W \\ &= 78,8L_\odot \end{aligned}$$

On a donc

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{L}{78,8L_\odot}\right) &= -0,4M \\ M &= -2,5\log\left(\frac{L}{78,8L_\odot}\right) \\ M &= 2,5\log\left(\frac{L}{78,8L_\odot}\right)^{-1} \end{aligned}$$

On arrive donc à la formule suivante

Magnitude absolue à partir de la luminosité de l'étoile

$$M = 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{L}\right)$$

$$M = 2,5\log\left(\frac{3,015\times10^{28}W}{L}\right)$$

Exemple 2.3.1

Sirius a une luminosité de 26,2 $L_\odot$. Quelle est sa magnitude absolue ?

La magnitude absolue est

$$\begin{aligned} M &= 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{26,2L_\odot}\right) \\ &= 1,20 \end{aligned}$$

On remarque que la magnitude de Sirius est de -1,70 et que sa magnitude absolue est de 1,20, Cela signifie qu'elle serait moins brillante vu de la Terre si elle était à 10 pc. C'est normal, car il faut éloigner Sirius (qui est à 8,60 al) pour la placer à 32,62 al, ce qui la rend moins brillante.

On peut aussi trouver la magnitude absolue M à partir de la distance de l'étoile D et de sa magnitude m. Reprenons la formule du rapport des intensités à partir des magnitudes

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0,4(m_2-m_1)}$$

Ici, I_1 sera l'intensité de la lumière de l'étoile quand elle est à sa vraie distance et m_1 est donc la magnitude m de l'étoile. I_2 sera l'intensité de la lumière de l'étoile si elle est à 10 pc, ce qui signifie que m_2 est la magnitude absolue M de l'étoile. On a donc

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{0,4(M-m)}$$

$$I_1 = I_2 \cdot 10^{0,4(M-m)}$$

$$\frac{L}{4\pi D^2} = \frac{L}{4\pi\left(32,62al\right)^2} 10^{0,4(M-m)}$$

$$\frac{1}{D^2} = \frac{1}{\left(32,62al\right)^2} 10^{0,4(M-m)}$$

$$\frac{\left(32,62al\right)^2}{D^2} = 10^{0,4(M-m)}$$

$$\log\frac{\left(32,62al\right)^2}{D^2} = 0,4\left(M-m\right)$$

$$M - m = 2,5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)^2$$

(En passant *M* – *m* porte le nom de *module de distance* en astrophysique, mais nous n'emploierons pas ce terme ici.)

En isolant *M*, on arrive finalement à la formule suivante.

Magnitude absolue à partir de la distance et de la magnitude

$$M = m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)$$

Remarquez que cette relation entre les magnitudes bolométrique est aussi valide pour les magnitudes visuelles. En effet, l'écart entre la magnitude visuelle et la magnitude bolométrique s'appelle la correction bolométrique (noté *BC*). Or, cette correction est la même pour les magnitudes et les magnitudes absolues

$$M_{vis} = M_{bol} + BC$$
$$m_{vis} = m_{bol} + BC$$

Notre relation entre les magnitudes bolométriques devient donc

$$M_{bol} = m_{bol} + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)$$

$$M_v + BC = m_v + BC + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)$$

$$M_v = m_v + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)$$

On voit donc que la relation est également bonne si on considère les magnitude visuelle.

Exemple 2.3.2

Sirius a une magnitude de -1,70 et elle est à 8,60 al de la Terre. Quelle est sa magnitude absolue ?

La magnitude absolue est

$$\begin{aligned} M &= m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ &= -1,70 + 5\log\left(\frac{32,62al}{8,60al}\right) \\ &= 1,20 \end{aligned}$$

Exemple 2.3.3

Sirius a une magnitude visuelle de -1,47 et elle est à 8,60 al de la Terre. Quelle est sa magnitude visuelle absolue ?

La magnitude visuelle absolue est

$$\begin{aligned} M_v &= m_v + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ &= -1,47 + 5\log\left(\frac{32,62al}{8,60al}\right) \\ &= 1,42 \end{aligned}$$

Voici la magnitude absolue (visuelle et bolométrique) de quelques étoiles.

Étoile	$M_{visuelle}$	$M_{bolométrique}$
Soleil	4,82	4,74
Sirius (étoile la plus brillante)	1,42	1,20
Véga (5e étoile la plus brillante)	0,6	0,3
Bételgeuse (9e étoile la plus brillante)	-6,0	-7,6
Fomalhaut (18e étoile la plus brillante)	1,7	1,6
Polaire (48e étoile la plus brillante)	-3,6	-3,7
Étoile de Barnard (5e étoile la plus près)	9,5	7,2

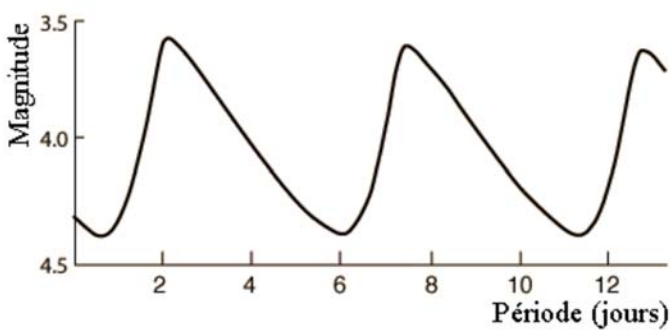
Ainsi, si toutes les étoiles étaient à 10 pc, Bételgeuse serait, de loin, la plus brillante de ces étoiles.

L'étoile la plus brillante connue (R136a1) a une luminosité de 8 700 000 $L_\odot$, ce qui lui donne une magnitude absolue de $M = -12{,}6$. Cette magnitude absolue est exactement celle de la pleine Lune, ce qui signifie que cette étoile, si elle était à 10 pc de la Terre, brillerait autant que la pleine Lune…

2.4 LES MESURES DE DISTANCE AVEC DES ÉTOILES VARIABLES

Les céphéides

Les étoiles variables sont des étoiles dont la luminosité change de façon périodique. (Nous verrons dans un autre chapitre pourquoi certaines étoiles changent ainsi de luminosité.) Par exemple, voici le graphique de la magnitude de l'étoile δ de Céphée.

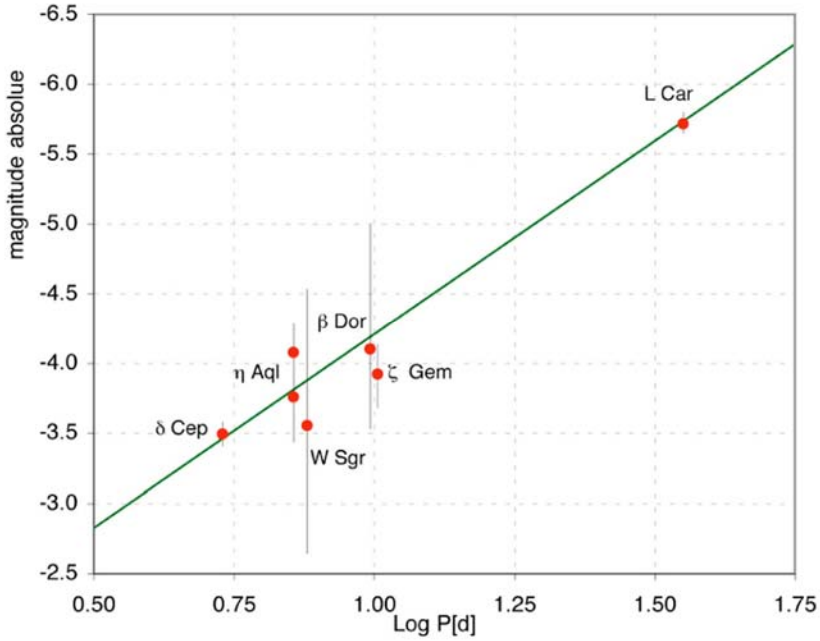


hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/cepheid.html

On peut voir que la luminosité de l'étoile varie avec une période de 5,4 jours.

Il existe plusieurs types d'étoiles variables. Les étoiles variables très brillantes qui ont des caractéristiques identiques à δ de Céphée font partie de groupe des **céphéides**.

En classant différentes céphéides dans un groupe d'étoiles appelé le nuage de Magellan, Henrietta Lewitt découvre en 1912 qu'il existe un lien entre la période de la variation et la luminosité moyenne de l'étoile. Le graphique suivant montre à qui ressemble cette relation.



www.planetastronomy.com/astronews/astronews-net-17nov04.htm

Il semble donc y avoir une droite et l'équation de cette droite va nous donner la relation entre la période et la magnitude visuelle absolue moyenne des céphéides.

Relation entre la magnitude visuelle absolue moyenne et la période des céphéides

$$M_{visuelle} = -2,54\log(P) - 1,67$$

où P est en jours

(Quand on observe bien, cette équation n'est pas exactement celle représentée sur le graphique. C'est que l'équation est la dernière version des études sur les céphéides alors que le graphique est celui d'une version un peu plus ancienne.)

Notez que les points ne sont pas tous exactement sur la droite, ce qui signifie qu'il y a une incertitude d'environ 0,3 sur la magnitude visuelle absolue obtenue avec la période des céphéides. On peut montrer qu'une incertitude de 0,3 sur la magnitude visuelle absolue amène toujours une incertitude d'environ 10 % sur la distance.

Ainsi, en mesurant la période de variation, on peut facilement obtenir la magnitude visuelle absolue de l'étoile. On peut ensuite trouver leur distance à partir de l'intensité de la lumière reçue.

Exemple 2.4.1

La magnitude visuelle moyenne de Delta de Céphée est de 4,07 et elle varie avec une période de 5,366 jours. Quelle est la distance de cette étoile ?

La magnitude visuelle absolue de cette étoile est

$$\begin{aligned} M_{visuelle} &= -2,54\log\left(P\right)-1,67 \\ &= -2,54\log\left(5,366\right)-1,67 \\ &= -3,52 \end{aligned}$$

On trouve finalement la distance avec la formule

$$\begin{aligned} M_v &= m_v + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ -3,52 &= 4,07 + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ D &= 1077al \end{aligned}$$

Notez qu'à partir de la parallaxe, on obtient une distance de 887 ± 26 al pour Delta de Céphée. Il semble donc un avoir un problème. Premièrement, il faut savoir qu'il y a un écart parce que de la poussière entre nous et l'étoile absorbe une partie de la lumière de l'étoile. Cette perte d'intensité lumineuse fait augmenter la magnitude visuelle de Delta de Céphée de 0,23 Sans cette poussière, la magnitude serait de 3,84 et le calcul de la distance nous donnerait 967 al. Ce n'est pas encore tout à fait la bonne valeur, mais il ne faut pas oublier que la relation pour les céphéides n'est pas exacte, ce qui fait que la distance a une incertitude d'environ 10%. La distance de Delta de Céphée obtenue à partir de sa période est donc de 967 ± 97 al, qui est en accord avec la valeur obtenue avec la parallaxe. (Ce paragraphe montre qu'en astrophysique, il y a souvent plusieurs éléments qui peuvent modifier notre réponse et qu'on obtient rarement une réponse exacte.)

Les céphéides ont une importance particulière parce qu'elles sont très brillantes. Avec une luminosité pouvant atteindre 40 000 $L_\odot$, on peut les voir même si elles sont très éloignées. Cela permet de déterminer la distance de ces étoiles quand il est impossible de la faire avec la parallaxe. Ainsi, quand on observe un objet lointain formé de plusieurs étoiles, on cherche donc une céphéide parmi les étoiles formant l'objet, ce qui permettra de trouver la distance de cet objet.

Les mesures de distances avec les céphéides furent à l'origine de bien des problèmes en astrophysique durant la première moitié du 20^e siècle. En effet, il y a plusieurs types d'étoiles variables et il faut s'assurer que l'étoile est bien une céphéide avant de faire le calcul de la distance. Il existe une autre classe d'étoiles (les céphéides de type II) ayant des caractéristiques assez semblables aux céphéides dont il est question dans cette section (qui sont les céphéides de type I), mais dont la relation entre la luminosité et la période est différente. Nous verrons plus tard que la confusion entre ces céphéides fut à l'origine de quelques erreurs en astrophysique, notamment concernant l'âge de l'univers.

Les RR de la Lyre

Il existe aussi un autre type d'étoiles variables appelé RR de la Lyre (*RR lyrae* en anglais). Dans ce cas, il est encore plus facile de trouver la luminosité de l'étoile puisque toutes les RR de la Lyre ont toutes une luminosité se situant entre 40 $L_\odot$ et 50 $L_\odot$. Étant moins lumineuses que les Céphéides, elles sont plus difficiles à voir. Par contre, elles sont tellement plus nombreuses que les céphéides qu'elles sont souvent plus utiles que les céphéides pour mesurer les distances.

Exemple 2.4.2

Dans un amas d'étoiles, on détecte une étoile RR de la Lyre qui a une magnitude bolométrique de 16,33. Quelle est la distance de l'amas d'étoile ?

Puisque toutes les RR de la Lyre ont toutes une luminosité se situant entre 40 $L_\odot$ et 50 $L_\odot$, on va prendre une luminosité de 45 $L_\odot$. Avec une telle luminosité, la magnitude bolométrique absolue est

$$\begin{aligned} M &= 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{L}\right) \\ &= 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{45L_\odot}\right) \\ &= 0,61 \end{aligned}$$

On trouve finalement la distance avec la formule

$$\begin{aligned} M &= m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ 0,61 &= 16,33 + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right) \\ D &= 45,5\ kal \end{aligned}$$

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

L'unité astronomique (UA)

$$1UA = 1,495\,978\,707 \times 10^{11} m$$
$$1UA \approx 1,496 \times 10^{11} m$$

Le parsec (pc)

$$1pc = 3,262al = 3,086 \times 10^{16} m$$

Distance des étoiles (en al ou en pc) à partir de la parallaxe (en seconde)

$$D_{(al)} = \frac{3,262al}{\theta_{(\sec)}}$$
$$D_{(pc)} = \frac{1pc}{\theta_{(\sec)}}$$

Intensité de la lumière d'une étoile (*I*)

$$I = \frac{L}{4\pi D^2}$$

Autre unité de luminosité : la luminosité solaire ($L_\odot$)

$$1L_\odot = 3,828 \times 10^{26} W$$

Magnitude absolue à partir de la luminosité de l'étoile

$$M = 2,5\log\left(\frac{78,8L_\odot}{L}\right)$$
$$M = 2,5\log\left(\frac{3,015 \times 10^{28} W}{L}\right)$$

Magnitude absolue à partir de la distance et de la magnitude

$$M = m + 5\log\left(\frac{32,62al}{D}\right)$$

Relation entre la magnitude visuelle absolue moyenne et la période des céphéides

$$M_{visuelle} = -2,54\log(P) - 1,67$$

où P est en jours

EXERCICES

2.1 La distance des étoiles

1. Un signal radar envoyé sur la Lune revient 2,56 s plus tard. Quelle est la distance entre la Terre et la Lune ?

2. Jupiter est à une distance de 778 000 000 km du Soleil. Donnez cette distance en unité astronomique.

3. Quelle est la distance de l'étoile Mizar (dans la Grande Ourse) si sa parallaxe est de 0,0394″ ?

4. L'étoile Bellatrix (dans Orion) est à une distance de 240 al de la Terre. Quelle est sa parallaxe ?

5. Combien y aurait-il d'années-lumière par parsec si on vivait sur Mars, dont l'orbite autour du Soleil a un rayon de 228 millions de km ?

   Rappel : Le parsec est la distance d'une étoile qui a une parallaxe de 1″ et l'année-lumière est la distance faite par la lumière en 1 an. Comme on serait sur Mars, l'année aurait une durée de 686,971 jours terrestres, ce qui change la longueur de l'année-lumière.

2.2 La luminosité des étoiles

6. L'étoile Altaïr est située à une distance de 16,7 al. Quelle est la luminosité de l'étoile (en luminosité solaire) si l'intensité de la lumière reçue est de $1,29 \times 10^{-8}$ W/m² ?

7. L'étoile Rigel est située à une distance de 863 al. Quelle est la luminosité de l'étoile si cette étoile a une magnitude bolométrique de -0,90 ?

8. L'étoile Arcturus est située à une parallaxe de 0,089″. Quelle est la luminosité de l'étoile si cette étoile a une magnitude de -0,58 ?

9. Une supernova est une explosion d'étoile libérant beaucoup d'énergie. La luminosité maximale de ces explosions peut atteindre 10^{11} $L_\odot$. Jusqu'à quelle distance peut-on voir ces explosions d'étoiles à l'œil nu ? (Rappelez-vous qu'à l'œil nu, on ne voit pas les étoiles dont la magnitude est supérieure à 6.)

2.3 La magnitude absolue

10. Quelle est la magnitude absolue de l'étoile Procyon si elle a une luminosité de 6,93 $L_\odot$?

11. Quelle est la luminosité de l'étoile Aldébaran si elle a une magnitude absolue de -2,04 ?

12. Quelle est la magnitude d'une étoile située à 100 pc de la Terre et ayant une magnitude absolue de 4,7 ?

13. L'étoile Achernar a une magnitude bolométrique de -0,851 et est située à une distance de 139 années-lumière.

    a) Quelle est la magnitude absolue ?
    b) Quelle est sa luminosité ?

2.4 Les mesures de distances avec les étoiles variables

14. Une céphéide a une période de 48 jours. Quelle est sa magnitude visuelle absolue ?

15. Une céphéide ayant une période de 8 jours et une magnitude visuelle moyenne de 2,72. Quelle est sa distance ?

RÉPONSES

2.1 La distance des étoiles

1. 384 000 km
2. 5,2 UA
3. 25,4 pc = 82,8 al
4. 0,0136″
5. 2,641 al

2.2 La luminosité des étoiles

6. 10,6 $L_\odot$
7. 126 000 $L_\odot$
8. 170 $L_\odot$
9. 18,4 millions d'années-lumière

2.3 La magnitude absolue

10. 2,64
11. 516 $L_\odot$
12. 9,7
13. a) -4,0 b) 3130 $L_\odot$

2.4 Les mesures de distances avec les étoiles variables

14. -5,94
15. 707 al