

AVEC NOS ÉLÈVES

Détermination de la distance à M100 à l'aide des étoiles variables Céphéides

D'après "Les Exos d'Astro de l'ESA/ESO"

Nous présentons ici une adaptation d'un exercice proposé par l'ESA (European Space Agency) et l'ESO (European Southern Observatory) à partir d'observations du télescope Hubble (NASA/ESA) et des télescopes de l'ESO situés à La Silla et à Paranal, au Chili.

L'ensemble de l'exercice est disponible sur le site internet du CLEA (www.ac-nice.fr/clea), dans la rubrique "Dans nos classes". Un lien direct avec le site "www.astroex.org" donne accès à de nombreuses photographies magnifiques et des commentaires

Nous en avons extrait l'essentiel, permettant de montrer l'intérêt de cet exercice et nous vous invitons à compléter les informations fournies ici, en consultant le site du CLEA.

Quelques notions utilisées, repérées par *, sont précisées en fin d'exposé dans la rubrique "outils".

La mesure de la distance d'un objet astronomique est très difficile et constitue l'un des plus grands défis lancés aux astronomes.

Au cours des siècles, on a utilisé divers indicateurs de distance. L'un d'eux est une famille d'étoiles variables connues sous le nom de Céphéides.

Les Céphéides sont des étoiles rares et très lumineuses dont l'éclat varie périodiquement. Leur nom provient de δ -Céphée, étoile de la constellation de Céphée, premier exemple connu de ce type particulier d'étoiles variables et particulièrement facile à observer à l'œil nu.



Henrietta Leavitt

Les travaux d'Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) ont révolutionné la compréhension des problèmes posés par l'éclat et la variabilité des étoiles.

A l'Observatoire du Harvard College, Leavitt a mesuré précisément les magnitudes* photographiques de 47 étoiles, destinées à servir de "bougies standard" pour la détermination des magnitudes de toutes les autres étoiles.

En 1912, elle observa 20 Céphéides dans le Petit Nuage de Magellan (SMC). Les faibles écarts de distance entre elles à l'intérieur du Nuage sont négligeables vis-à-vis de la distance beaucoup plus grande à laquelle se trouve le Nuage lui-même par rapport à nous.

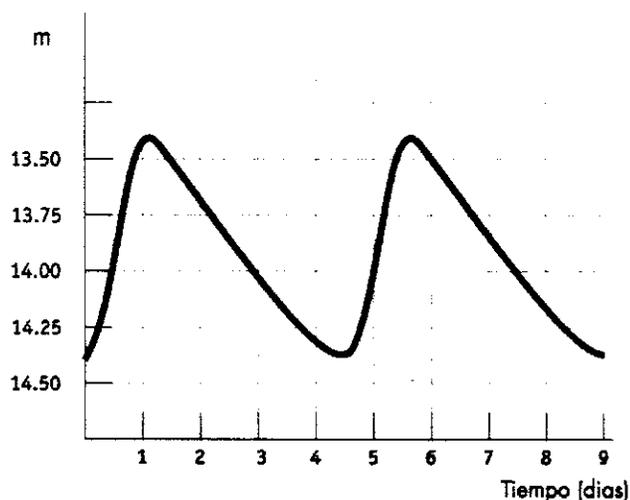
Les étoiles les plus brillantes* de ce groupe sont donc vraiment intrinsèquement plus brillantes. Ce n'est pas parce qu'elles sont plus proches de nous.

Elle découvrit une relation entre l'éclat intrinsèque des Céphéides et la période de leurs pulsations et montra que les Céphéides intrinsèquement les plus brillantes avaient les plus longues périodes.

Ce résultat fut conforté par l'étude qu'elle fit de plus de 1500 variables dans les Nuages de Magellan.

L'observation et la mesure de la période d'une Céphéide quelconque permet ainsi de déduire sa luminosité* intrinsèque et par comparaison avec la luminosité apparente, de calculer sa distance. C'est ainsi que les variables Céphéides servent de 'bougies standard' dans l'Univers et peuvent servir elles-mêmes d'étalon de distance pour calibrer (placer le point zéro) d'autres indicateurs de distance.

La distinction entre les Céphéides et d'autres étoiles variables se fait grâce à leur courbe de lumière, dont la forme est caractéristique.



La courbe de lumière caractéristique d'une Céphéide

La courbe de lumière d'une variable Céphéide a une forme caractéristique, avec une croissance rapide de l'éclat, suivie d'une décroissance beaucoup plus douce.

L'amplitude des variations est typiquement 1-2 magnitudes.

On obtient naturellement les mesures les plus précises de vitesse et de distance pour des objets relativement proches de notre Voie Lactée.

A l'aide du télescope Hubble et de ceux de La Silla et de Paranal, dix huit galaxies situées à différentes distances ont été examinées pour y détecter des Céphéides.

L'une d'elles s'appelle M100.

M100, une grande spirale.

La galaxie M100 est une magnifique galaxie spirale, située dans le grand amas de galaxies de la Vierge.

Cet amas abrite 2500 galaxies. M100 est un système en rotation, composé de gaz, de poussières et d'étoiles, assez semblable à notre Voie Lactée, et nous la voyons de face. (voir photos sur le site du CLEA).

Son nom vient du fait qu'elle porte le numéro 100 dans le catalogue Messier des objets non stellaires. M100 est l'une des plus lointaines galaxies où l'on ait pu effectuer des mesures sur des Céphéides.

Cet exercice est basé sur les images fournies par Hubble et sur quelques données concernant M100.

Mesures et calculs

La relation Période-Luminosité des Céphéides a été revue maintes fois depuis les premières mesures d'Henrietta Leavitt. La meilleure estimation actuelle donne :

$$M = -2,78 \cdot \log (P) - 1,35$$

Où M est la magnitude absolue de l'étoile et P sa période exprimée en jours.

Les courbes de lumière de 6 des 12 Céphéides repérées par Hubble dans M100 se trouvent page suivante.

Objectif 1

En exploitant ces courbes, calculez la magnitude absolue M de chacune des 6 étoiles. (Les courbes de lumière des 6 autres étoiles sont disponibles sur le site du CLEA).

Notre objectif est de calculer la distance à M100.

Souvenez-vous de l'équation de la distance : la seule magnitude absolue ne suffit pas pour le calcul de la distance ; il nous faut aussi la magnitude apparente*.

Si l'on fait abstraction des problèmes posés par la mesure précise des quantités de lumière reçue et l'étalonnage des magnitudes, les astronomes ont débattu pendant un siècle sur le choix de la valeur m qu'il fallait introduire dans l'équation de distance, puisque la luminosité d'une Céphéide ne cesse de varier.

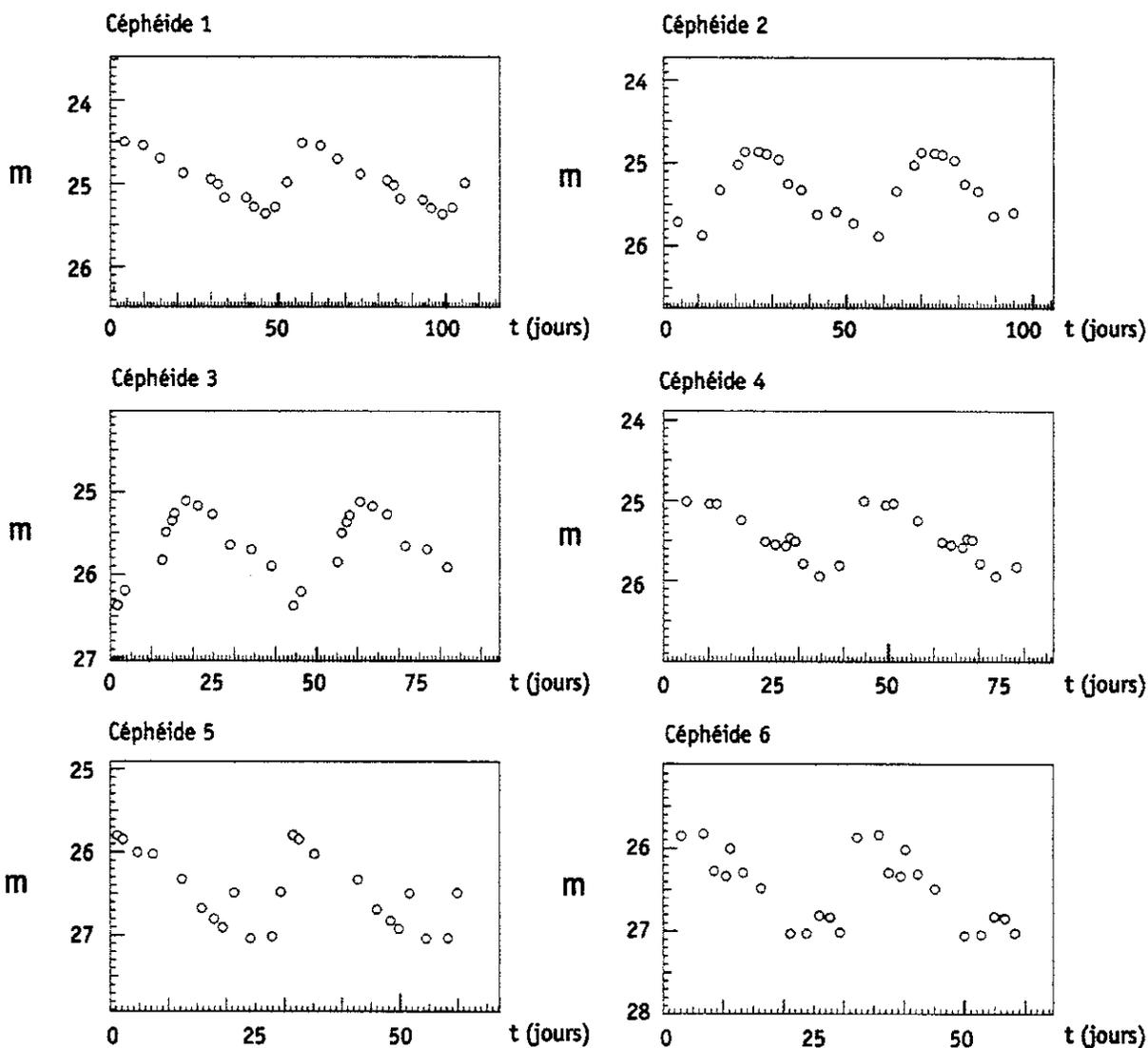
Objectif 2

Proposez une méthode pour estimer la magnitude apparente m à partir de l'étude des courbes.

Au début du XX^e siècle, les astronomes mesuraient la magnitude apparente minimum (m_{\min}), la magnitude appa-

rente maximum (m_{\max}), et calculaient la moyenne ($\langle m \rangle$) des deux.

Avec cette méthode, ou toute autre de votre choix, vous disposez maintenant des informations nécessaires pour déterminer la distance à M100.



Courbes de lumière des Céphéides

Ces courbes de lumière concernent six des douze Céphéides observées par Hubble dans M100. La magnitude absolue, M , est déterminée à partir de la période des Céphéides. Adapté de Freedman et al. (1994).

Objectif 3

Calculez $\langle m \rangle$ et d (en mégaparsecs)* pour chacune des 6 Céphéides.

Il n'est pas interdit de refaire le même calcul 6 fois. Vous pouvez cependant réduire votre travail en écrivant un court programme sur votre calculatrice ou utiliser un tableur.

Objectif 4

Vous n'avez sans doute pas trouvé exactement les mêmes distances pour les différentes Céphéides.

Pour quelles raisons selon vous ?

Objectif 5

Vous avez maintenant déterminé la distance aux 6 Céphéides de M100. Cela vous donne-t-il la distance à M100 ?

Les écarts trouvés entre les distances de ces 6 étoiles peuvent-ils être expliqués par le fait qu'elles occupent des positions différentes dans la galaxie M100 ?

Recherchez la valeur du diamètre de notre Galaxie (la Voie Lactée) dans une encyclopédie ou sur l'Internet.

En supposant que M100 est du même ordre de grandeur, revoyez votre réponse à la question précédente.

Objectif 6

Calculez la valeur moyenne des distances aux 6 Céphéides et considérez que c'est la distance à M100.

Dans la publication scientifique originale de cette étude des images de Hubble, la distance à M100 était estimée à $17,1 \pm 1,8$ Mpc. Cette étude tenait compte de la présence de poussières interstellaires.

Comparez votre propre résultat avec cette valeur.

Outils.

(compléments d'information sur www.astroex.org).

Le parsec (pc).

Unité de longueur égale à la distance à la Terre d'une étoile dont la parallaxe annuelle serait de 1 seconde d'arc.

Cela revient à dire que d'une étoile située à 1 parsec de la Terre on verrait le demi grand axe de l'orbite de la Terre autour du Soleil sous un angle de $1''$ d'arc.

$1 \text{ parsec} = 3,086 \cdot 10^{13} \text{ km} = 3,26 \text{ années de lumière}$.

La luminosité.

La luminosité L d'une étoile est l'énergie totale émise par cette étoile, dans toutes les longueurs d'onde et toutes les directions de l'espace pendant une seconde. C'est une puissance, donc exprimée en watt.

La "brillance" ou "l'intensité" ou l'éclat.

L'éclat est la portion d'énergie reçue chaque seconde d'une étoile, sur un récepteur de surface unité situé à la distance d de l'étoile. L'énergie diffusée par l'étoile se répartissant sur la surface d'une sphère de rayon d , l'éclat (apparent) s'exprime par la relation :

$$E = L / (4\pi d^2).$$

La magnitude apparente.

$$m = m_{\text{réf}} - 2,5 \cdot \log_{10}(E/E_{\text{réf}}).$$

m : magnitude apparente de l'étoile observée.

$m_{\text{réf}}$: magnitude apparente d'une étoile de référence.

E et $E_{\text{réf}}$: éclats des étoiles correspondantes.

Ces grandeurs apparentes dépendent de la distance des étoiles observées : une étoile proche et peu brillante peut avoir le même éclat apparent qu'une étoile très brillante mais lointaine.

La magnitude absolue.

La magnitude absolue M d'une étoile est celle qu'elle aurait si elle était placée à 10 parsec du Soleil.

Distance et magnitudes.

Par définition des magnitudes apparente et absolue d'une étoile et prenant comme étoile de référence l'étoile en question mais placée à 10 pc, quelques calculs avec les logarithmes permettent d'obtenir le "module de distance" $m - M$:

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

Prolongement possible :

Calcul de la constante de Hubble et évolution de l'Univers.

Quel est l'âge de l'Univers ? Quelle est sa vitesse d'expansion ? Va-t-il un jour se contracter ?

Ce sont là quelques unes des questions fondamentales de la cosmologie. Elles ont longtemps attendu des réponses satisfaisantes.

Le destin de l'Univers est étroitement lié à l'évolution future de son taux d'expansion. Si l'expansion se ralentit suffisamment, alors l'Univers commencera un jour à se contracter.

L'observation suggère actuellement qu'il est plus probable que l'Univers continue indéfiniment à se dilater.

L'expansion de l'Univers fait que toutes les galaxies s'éloignent d'un observateur donné (situé par exemple sur la Terre) et que leur vitesse de fuite est d'autant plus grande qu'elles sont plus éloignées.

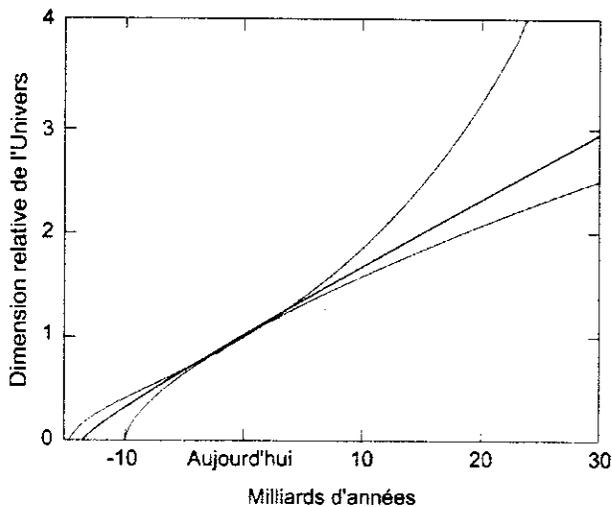
L'expression connue sous le nom de Loi de Hubble (formulée par Edwin Hubble en 1929) met en relation la distance d séparant l'objet de l'observateur et sa vitesse de fuite v . Cette loi s'écrit :

$$v = H_0 \cdot d$$

Elle établit que les galaxies de notre Univers s'éloignent toutes les unes des autres avec une vitesse, v , proportionnelle à la distance d qui les sépare. H_0 est une caractéristique de notre Univers, appelée constante de Hubble, très importante dans de nombreuses questions cosmologiques ; c'est un indicateur de l'actuelle vitesse d'expansion de l'Univers.

L'âge de l'Univers, t , peut en effet s'exprimer approximativement par l'inverse de la constante de Hubble H_0 :

$$t = 1/H_0$$



Le destin de l'Univers :

Ce graphique indique la taille de l'Univers en fonction du temps - en d'autres termes, il montre comment il se dilate et/ou se contracte au cours du temps.

Les différentes lignes "dans le futur" (dans la partie droite du diagramme) montrent le destin de l'Univers selon les différents modèles : en expansion indéfinie ou en contraction.

La connaissance de la valeur de H_0 est donc fondamentale pour l'estimation de l'âge de l'Univers. Mais comment la mesurer ?

Il "suffit" de mesurer la vitesse de fuite v et la distance d d'un objet, en général une galaxie, ou mieux encore, d'un ensemble de galaxies, pour trouver une valeur moyenne.

La vitesse de fuite est relativement facile à déterminer : nous savons en effet mesurer ce que l'on appelle le décalage vers le rouge de la lumière d'une galaxie, ou "redshift".

C'est une conséquence directe du déplacement d'un objet qui s'éloigne de nous. C'est un décalage Doppler de la lumière émise par chaque galaxie, et il en résulte une modification (vers l'extrémité rouge du spectre) des longueurs d'onde de la lumière qu'elles émettent.

Puisque la longueur d'onde de la lumière rouge est supérieure à celle de la lumière bleue, c'est que la longueur d'onde a augmenté pendant son voyage vers la Terre.

La variation relative de la longueur d'onde due à ce décalage Doppler est appelée "redshift" : les galaxies à haut "redshift" ont donc des vitesses de fuite élevées.

Objectif 7

La vitesse de fuite v d'une galaxie comme M100, associée à sa distance, vous permet de calculer la vitesse d'expansion de l'Univers comme l'exprime la loi de Hubble.

La constante de Hubble H_0 s'exprime en km/s/Mpc.

La vitesse de fuite de l'amas de la Vierge, dont M100 fait partie, a été mesurée : $v = 1400$ km/s. (Freedman et al., 1994).

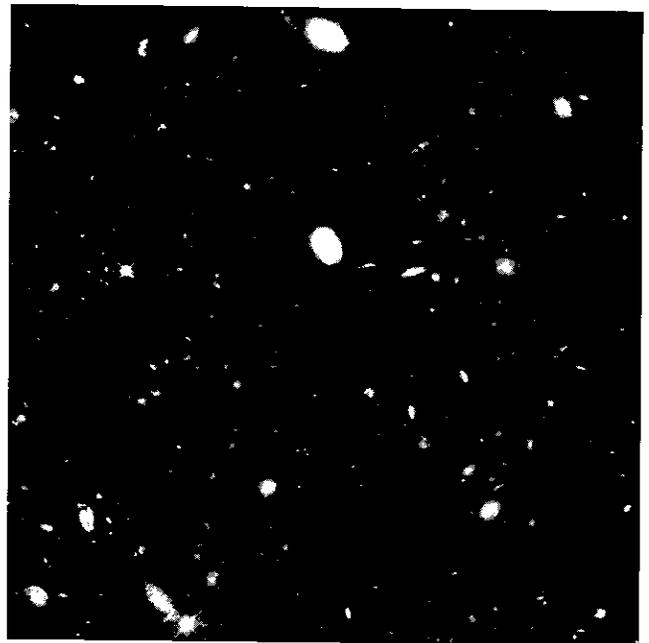
Calculez la constante de Hubble à partir de cette valeur de v et de votre estimation de la distance d .

Objectif 8

En admettant que l'âge de l'Univers est donné par

$$t = 1 / H_0,$$

calculez sa valeur, sans oublier de choisir les bonnes unités. Comparez-le avec l'âge de la Terre.



Des galaxies lointaines à haut "redshift"

Cette image, prise avec la Caméra Planétaire à Grand Champ (WFPC2) du télescope spatial HUBBLE, montre de nombreuses galaxies, situées à plusieurs milliards d'années-lumière. La plupart des taches floues sont des galaxies, contenant chacune des milliards d'étoiles. Ces galaxies s'éloignent de nous à de grandes vitesses.

L'exercice se termine avec les réponses aux questions posées et des commentaires à l'attention du professeur. Ils sont disponibles sur le site du CLEA. Trois autres exercices sont disponibles sur le site www.astroex.org ; leurs titres sont :
Mesure de la distance de la supernova 1987A
Mesure de la distance de la nébuleuse "Oeil de chat".
Mesure de l'âge et de la distance d'un amas globulaire.

Nous remercions vivement l'ESA et l'ESO de nous avoir autorisé à puiser dans leurs productions.