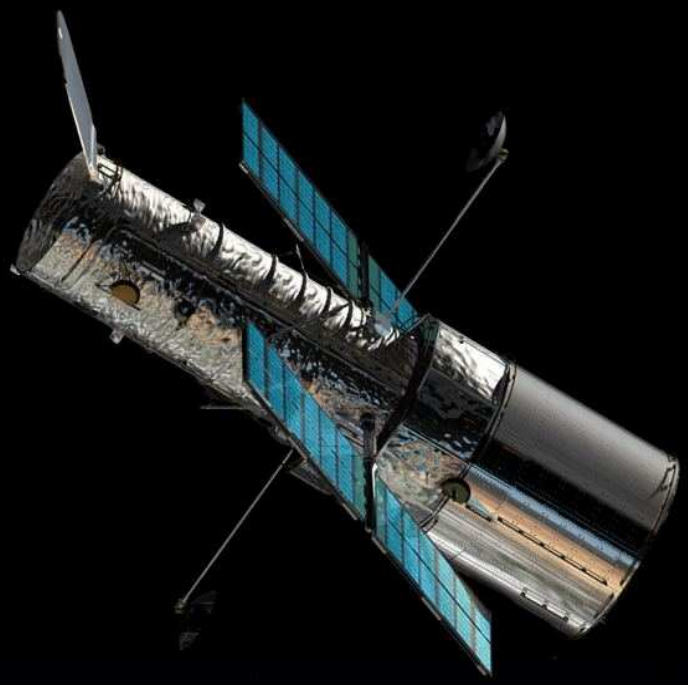
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

LES TP DU CEA



Détermination de la distance à M 100 à l'aide d'étoiles variables Céphéides en utilisant les observations du télescope spatial Hubble (NASA/ESA)

Table des matières

DÉTERMINATION DE LA DISTANCE À M 100 À L'AIDE DES ÉTOILES VARIABLES CÉPHÉIDES EN UTILISANT LES OBSERVATIONS DU TÉLESCOPE SPATIAL HUBBLE (NASA/ESA)

INTRODUCTION 4

- Les télescopes NASA/ESA/ESO 4
- Mesures de distances et cosmologie 5
- Comment mesurer la distance des étoiles 6
- Une révolution : Utiliser les Céphéides comme indicateurs de distance 8
- La découverte de l'expansion de l'Univers 9
- L'âge de l'Univers 10
- L'avenir de l'Univers 11
- Le télescope spatial Hubble 11
- Le ciel profond vu par le télescope spatial Hubble 12
- Mesurer la distance de la galaxie M 100 13
- Magnitudes 15
- Magnitude absolue d'une Céphéide 15

ACTIVITÉS 16

- Activité 1 : Magnitude absolue de 12 Céphéides de M 100 16
- Activité 2 : Magnitude apparente moyenne des Céphéides de M 100 16
- Activité 3 : Distance des Céphéides de M 100 18
- Activité 4 : Discussion 18
- Activité 5 : Distance à M 100 18
- Activité 6 : Calcul de la constante de Hubble H_0 19
- Activité 7 : Calcul de l'âge de l'Univers 19

POUR ALLER PLUS LOIN 20

- Article scientifique 20
- Liens 20
- Livres 20

À L'ATTENTION DU PROFESSEUR 21

Résumé 21

Réponses 21

- Activité 1, 2, 3 et 5 : 21
- Activité 4 : 22
- Activité 5 : 22
- Activité 6 : 23
- Activité 7 : 24

Les TP du CEA - Détermination de la distance à M 100 à l'aide des étoiles variables Céphéides en utilisant les observations du Télescope Spatial Hubble (NASA/ESA).

Coproduit par : ESA/ESO - CEA / Direction de la Communication / Service Édition Événements
Auteurs : Anne Værnholt Olesen, Lars Lindberg Christensen, Jean Marc Brauer, Arnaud Bacher – ESA/ESO
François Saint-Jalm, Professeur de Physique – Chimie à l'Éducation Nationale
Anne Rhodes – ESA/ESO, Roland Lehoucq – Astrophysicien au CEA
Conception graphique : Lucille Colombel, CEA / Direction de la Communication
Remerciements : Merci au Planétarium Tycho Brahé, Danemark, pour son inspiration, à Wendy Freedman pour avoir Fourni les données, et à Nina Troelsgaard Jensen, Frederiksberg Seminarium, pour ses commentaires.
Image couverture : ESA/NASA – **Composition :** François Saint-Jalm (CEA)

DÉTERMINATION DE LA DISTANCE À M 100 À L'AIDE DES ÉTOILES VARIABLES CÉPHÉIDES EN UTILISANT LES OBSERVATIONS DU TÉLESCOPE SPATIAL HUBBLE (NASA/ESA)

INTRODUCTION

■ Les télescopes ESA/ESO/NASA

L'astronomie est une science visuelle et accessible ; cela la rend idéale pour des activités éducatives. Depuis quelques années, le Télescope Spatial Hubble de la NASA/ESA et les Télescopes de l'ESO des Observatoires de La Silla et du Mont Paranal au Chili ont obtenu des images de l'Univers de plus en plus précises et spectaculaires. Cependant le télescope Hubble et ceux de l'ESO n'ont pas seulement permis d'obtenir de nouvelles images stupéfiantes, ce sont aussi des outils irremplaçables pour les astronomes. Ces télescopes ont une excellente résolution angulaire (grande finesse d'image) et permettent aux astronomes de scruter l'Univers comme jamais et de répondre à des questions longtemps restées sans réponse.

L'analyse de telles observations, bien que très sophistiquée dans le détail, est en même temps suffisamment simple dans le principe pour donner à des lycéens la possibilité de les reproduire par eux-mêmes.

Ce TP a été produit par l'ESA (Agence Spatiale Européenne), partenaire Européen du Projet Hubble – qui peut accéder à 15 % du temps d'observation sur Hubble – en partenariat avec l'ESO (L'Observatoire Européen Austral) et le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives).



Figure 1 *: Le Télescope spatial Hubble (NASA/ESA). Depuis son orbite autour de la Terre, le télescope spatial capture des vues spectaculaires de l'Univers. Image : NASA.*

Mesures de distance et cosmologie

L'objectif principal de la cosmologie est de donner une description complète et fidèle de notre Univers. La première question qu'il est raisonnable de se poser est : « À quelle distance se trouvent les objets que nous observons à l'œil nu ou que nous découvrons par le truchement d'instruments de plus en plus performants ? ». À cette question de nature spatiale s'ajoutent des questions d'ordre temporel : « L'Univers a-t-il une histoire ? » - « Et, dans ce cas, quel fut son passé, quel sera son avenir ? ».

Comment mesurer la distance des étoiles

Si les observateurs antiques ont réussi à mettre en œuvre des procédés permettant d'estimer la valeur du diamètre terrestre (Ératosthène) ou de la distance Terre-Lune (Aristarque de Samos), ils n'ont pas su évaluer la distance où se situent les étoiles les plus proches de nous et, pendant longtemps, on a pensé que ces étoiles se trouvaient toutes sur une sphère appelée « sphère des fixes ».



Figure 2 :
Mais qu'y a-t-il derrière la sphère des fixes ?
Image: Deutsche Museum Munchen.



Figure 3 :
Christiaan Huygens 1629-1695.
Image : Wikipédia.

La première mesure moderne de la distance des étoiles a été tentée par Christiaan Huygens. Il s'efforça de comparer l'éclat apparent de l'étoile Sirius avec celui du Soleil et en conclut qu'elle se situait à une distance 100 000 fois égale à celle du Soleil, ce qui fait à peu près 1,5 années-lumière (Pensées meslées – 1686). La distance réelle étant de 8,6 années-lumière, son résultat n'était pas si mauvais et présentait l'intérêt d'agrandir considérablement l'espace dans lequel les astronomes de l'époque s'imaginaient exister.

L'amélioration des instruments d'observation au XIX^{ème} siècle permit de développer la méthode dite des « parallaxes annuelles ». Elle consiste à observer le mouvement apparent des étoiles proches sur le fond du ciel contenant des objets bien plus lointains. Ce mouvement apparent est dû au fait que le lieu d'observation (la Terre) se déplace autour du Soleil. Il s'agit donc d'utiliser le diamètre de l'orbite terrestre comme étalon pour déterminer la distance des étoiles qui sont relativement proches de nous. Cette méthode n'est pas obsolète puisqu'elle a été récemment remise en œuvre par le satellite Hipparcos (lancé en 1989 et « décédé » en 1993). Ce satellite permit de mesurer la distance de 20 000 étoiles situées à moins de 500 années-lumière de nous avec une précision inégalée (mieux que 10 %). Son successeur, le satellite Gaïa, a été lancé le 19 décembre 2013 et observe les étoiles de notre galaxie depuis le deuxième point de Lagrange. Il devrait mesurer les caractéristiques de milliards d'objets en une douzaine d'années de fonctionnement.

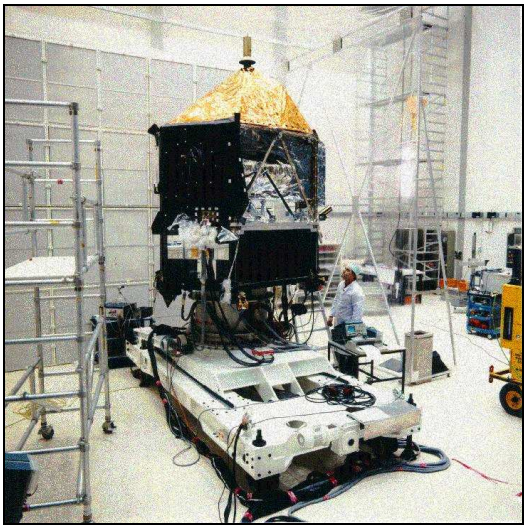


Figure 4 :
Satellite Hipparcos avant son lancement. Image : ESA.

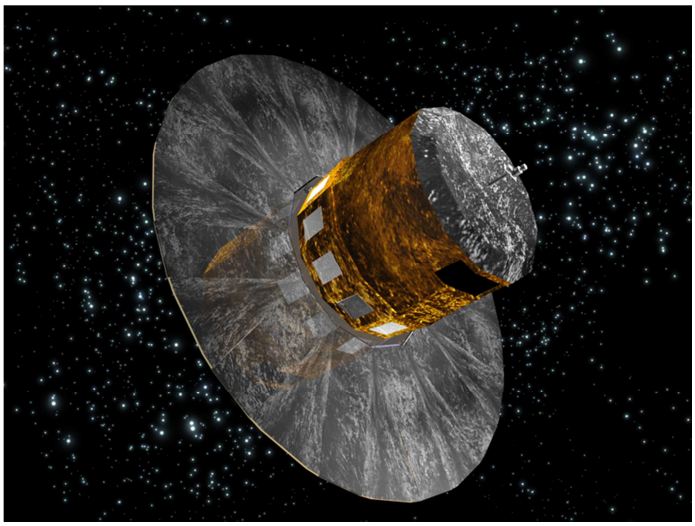


Figure 5 :
Satellite Gaïa. Image : CNES.

Pour les étoiles plus lointaines, d'autres méthodes ont été imaginées, la principale s'appuyant sur le fait que les étoiles fonctionnent toutes sur les mêmes processus physiques et qu'elles ont donc des propriétés communes. Un diagramme contenant les points représentatifs des étoiles de distances connues (le diagramme de Hertzsprung-Russel), relie la température de surface de ces étoiles à leur magnitude absolue. L'extension de la validité de ce diagramme aux étoiles lointaines permet de déterminer leur magnitude absolue par une simple mesure de température qu'il est possible de faire grâce à une analyse spectrale de leur lumière.

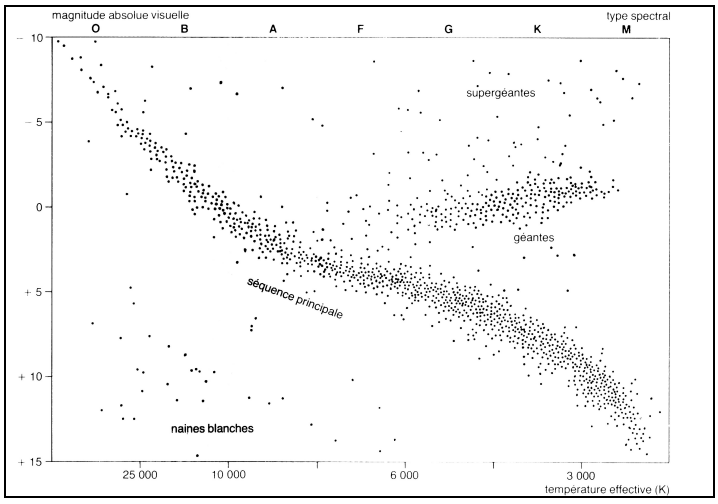


Figure 6 :
Diagramme de Hertzsprung-Russel des étoiles proches.
Image issue de l'Encyclopédia Universalis.

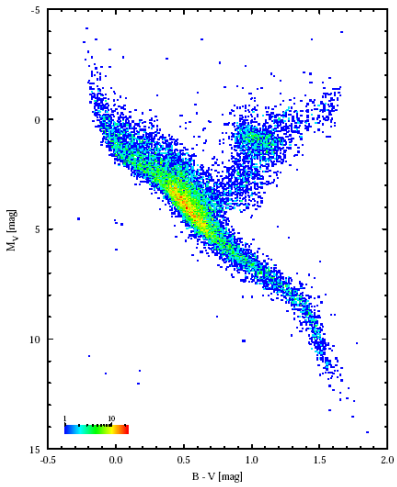


Figure 7 :
Diagramme H-R des étoiles observées par Hipparcos. Image : ESA.

Une révolution : Utiliser les Céphéïdes comme indicateurs de distance

Les Céphéides sont une catégorie d'étoiles variables qui doit son nom à l'étoile δ Cephei (de son vrai nom : Al Radif). Ces étoiles sont des géantes assez massives qui sont arrivées à un stade de leur évolution où, dans des couches de profondeur intermédiaire, leur hélium se transforme en carbone. Il s'installe alors un régime d'oscillations de relaxation dont la période dépend essentiellement de la masse de l'étoile. Comme il en est de même pour leur magnitude absolue, il existe une relation entre période d'oscillation et magnitude absolue moyenne. Ce cycle correspond à une phase d'emballement des réactions nucléaires qui chauffe et dilate la zone réactive et les couches externes (augmentation de leur luminosité). Puis ces couches dilatées se refroidissent et cela ralentit les réactions ayant lieu en profondeur. Les couches externes se compriment alors sur le centre et l'étoile perd en luminosité. Mais c'est le moment où la compression réchauffe la zone réactive et où les réactions nucléaires recommencent à s'emballer. Et le cycle reprend. La période de δ Cephei est de 5 j 8 h 47 min et 32 s.

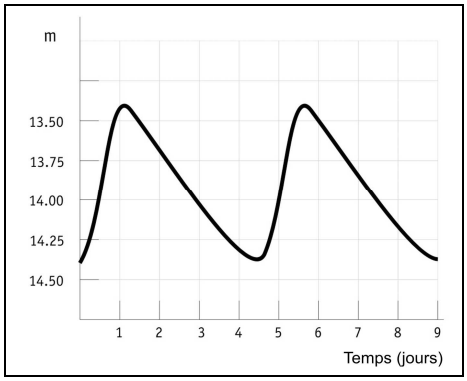


Figure 8 :
Courbe de luminosité caractéristique d'une Céphéide.
Il y a une rapide croissance de la luminosité suivie par une décroissance beaucoup plus douce.
L'amplitude des variations est typiquement de 1 à 2 magnitudes. Image : Wikipédia.

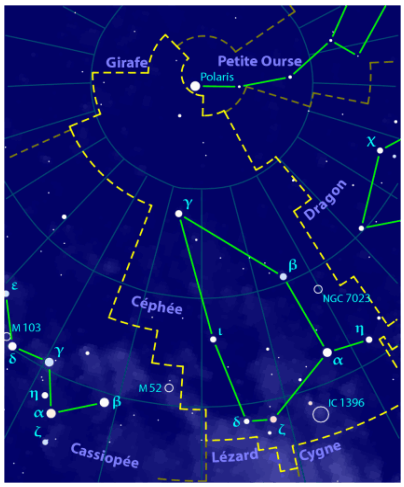


Figure 9 :
δ Cephei. Image : Wikipédia.

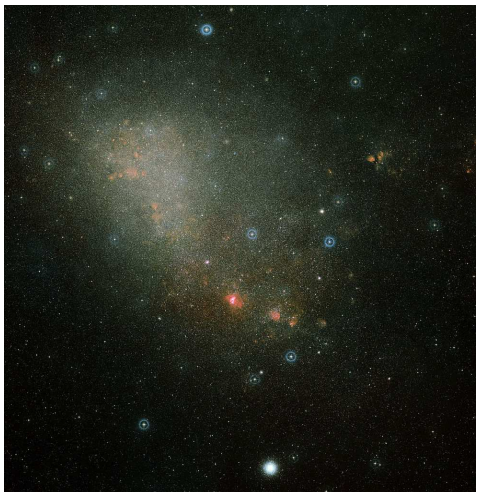


Figure 10 :
Petit Nuage de Magellan. Image : ESA.

L'astronome américaine Henrietta Swan Leavitt (1868 – 1921) a mesuré à l'Observatoire du Harvard College les magnitudes photographiques de 1500 étoiles variables dans les Nuages de Magellan (petites galaxies satellites de la Voie lactée), dont une vingtaine de Céphéides situées dans le Petit Nuage de Magellan (SMC) (Voir figure 10 page 8). Elle découvrit que les Céphéides les plus brillantes (donc les plus massives) avaient des variations de plus longue période (due à leur plus grande inertie), propriété utilisée aujourd'hui pour calibrer l'échelle des distances dans notre galaxie. Les Céphéides sont ce qu'on appelle des « bougies standard ».





Figures 11 et 12 : *Henrietta Swan Leavitt*
En 1925, le mathématicien suédois Gösta Mittag-Leffler lui écrivit pour lui annoncer qu'elle était nominée pour le prix Nobel 1926. Il apprit alors qu'elle était décédée quatre ans auparavant dans l'indifférence générale. Images : Wikipédia.

La petite taille du Nuage SMC, comparée à la distance qui le sépare de nous, fait qu'il est raisonnable de penser que les étoiles qui le constituent se trouvent toutes à la même distance de l'observateur. Ainsi, la comparaison de leurs magnitudes apparentes nous informe sur leur luminosité intrinsèque. Henrietta Swan Leavitt découvrit la relation existant entre cette luminosité intrinsèque et la période de leur pulsation. Il suffisait, après cela, de disposer de Céphéides proches (comme δ Cephei, située à 982 a.l. de la Terre) pour connaître la relation entre magnitude absolue et période de variation.
Désormais, la mesure de la période d'une Céphéide détectée dans une galaxie, dont on a réussi à former une image assez nette pour pouvoir distinguer cette étoile parmi les milliards qui l'entourent, permet de connaître sa magnitude absolue. La détermination photométrique de sa magnitude apparente et l'utilisation du « module de distance » (voir plus loin dans le paragraphe Magnitudes) autorisent le calcul de la distance de l'étoile et, par extension de la Galaxie qui l'abrite.

■ La découverte de « l'expansion de l'Univers »

Après avoir démontré que ce qui s'appelait encore des « nébuleuses » étaient d'autres galaxies situées à l'extérieur de notre Voie lactée, Edwin Hubble publia en 1929 le texte qui sert de fondement à la théorie de « l'expansion de l'Univers », également connue sous le nom de « Modèle du Big Bang ». Il utilisa les résultats des travaux de Henrietta Swan Leavitt en isolant des

Céphéides sur les images des galaxies et détermina leur distance. Il combina ensuite ces mesures avec celles de Vesto Slipher et Milton Humason qui portaient sur le décalage vers le rouge (redshift) de la lumière qui nous parvient de ces galaxies. Interprétant ce décalage comme étant dû à l'effet Doppler associé à la vitesse d'éloignement (ou vitesse de fuite) de ces galaxies par rapport à nous, il en déduisit la fameuse loi de Hubble : $v = H_0 \cdot D$.



Figure 14 :
Edwin Hubble à l'observatoire du Mont Wilson (1937). Image : Time Life.

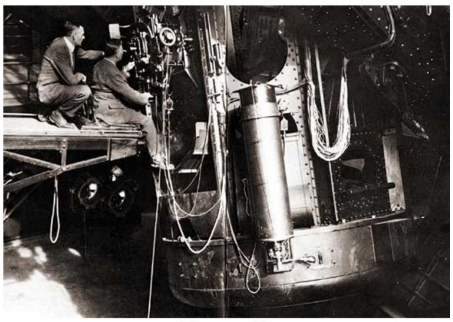


Figure 13 :
Edwin Hubble et James Jean. Image : Mont Wilson & Palomar.



Figure 15
Albert Einstein, Edwin Hubble et Walter Adams (1931) – Image : California Institut of Technology.

Bien que l'interprétation newtonienne du décalage vers le rouge de la lumière provenant d'objets lointains est inappropriée (il faut raisonner dans le cadre de la théorie relativiste de la gravitation), nous garderons ici cette façon de voir et continuerons à parler de « vitesse de fuite des galaxies ». Quelques lectures et liens seront proposés en fin d'exercice pour ceux qui veulent en savoir plus.

■ L'âge de l'Univers

Lorsque nous observons l'Univers à l'aide d'un puissant télescope, les objets qui apparaissent ne sont pas placés à la même distance de nous et ne sont donc pas contemporains les uns des autres. Ainsi, s'il est vrai que l'Univers a connu un « instant zéro », les objets que nous voyons sur la même image n'ont pas tous le même âge. Ce que l'on appelle « âge de l'Univers » est l'âge de notre point d'observation par rapport à notre « instant zéro », compté dans notre « temps propre », c'est-à-dire l'information que nous donnerait une horloge imaginaire, située là où nous sommes, et ayant été aimablement déclenchée à cet « instant zéro ». Cet âge T, est l'inverse de la constante

de Hubble H_o : $T = \frac{1}{H_0}$. Cette formule est une première approximation qui suppose que la constante H_o est véritablement constante. L'âge de l'Univers actuellement admis est : $T = 13{,}8 \cdot 10^9$ ans.

L'avenir de l'Univers

De récentes observations ont montré qu'après une période assez longue où « l'expansion de l'Univers » s'est ralentie, elle est maintenant en train de s'accélérer. Cela a conduit les astronomes à imaginer l'existence d'une composante jusqu'alors ignorée : « l'énergie noire ».

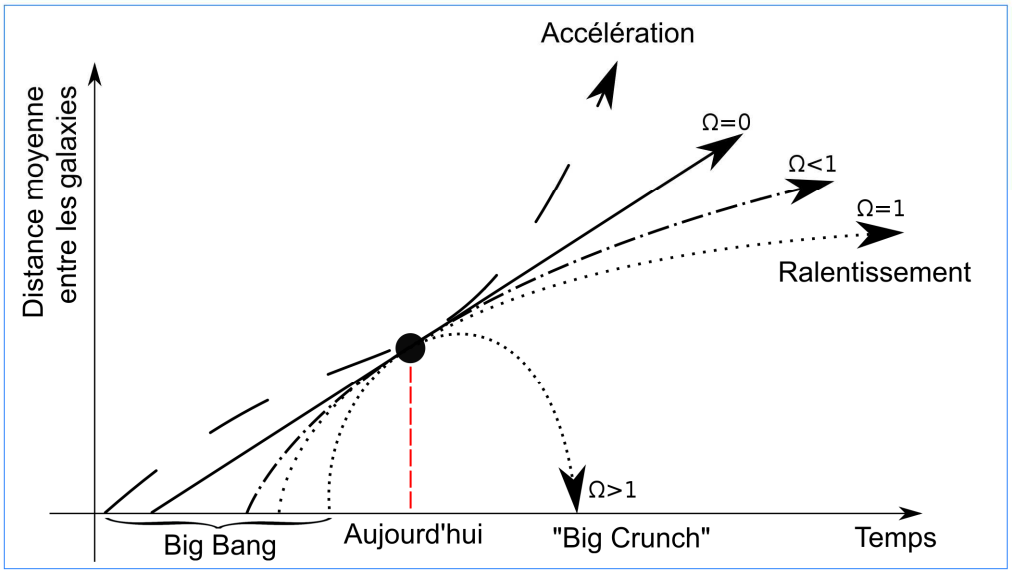


Figure 16 :
Différents scénarios pour l'avenir de l'Univers.
Ω représente ici la densité moyenne de matière.
Ce graphique ne tient pas compte de l'énergie noire.

Le télescope spatial Hubble

Lancé en 1990, ce télescope, dont le miroir principal a un diamètre de 2,4 mètres, est en orbite autour de la Terre à une altitude moyenne de 600 km. Affranchi des turbulences et des bandes d'absorption de l'atmosphère, sa résolution angulaire est meilleure que 0,1 seconde d'arc. Il produit des images dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge.

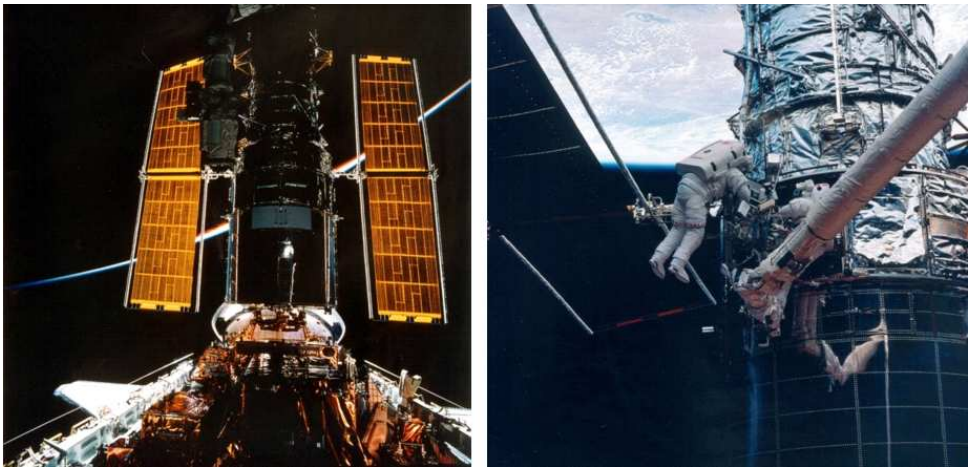


Figure 17 :

Le télescope spatial Hubble en cours d'entretien. Cinq missions d'entretien ont été effectuées(en 1993, 1997, 1999, 2002 et 2009) dans le but d'améliorer les performances de l'instrument ou d'y intégrer de nouveaux détecteurs (caméras ou spectrographes).

Images : NASA

Le ciel profond vu par le télescope spatial Hubble



Mesurer la distance de la galaxie M 100

Publié en 1774 par Charles Messier (1730 – 1817), le Catalogue Messier contient la liste de 110 objets diffus, alors appelés « nébuleuses ». M 100 est une galaxie spirale, que l'on voit de face, découverte par Pierre Méchain en 1781 et rajoutée ensuite au catalogue. On la trouve dans la constellation de la « Chevelure de Bérénice » que l'on peut observer toute l'année dans le ciel de France.

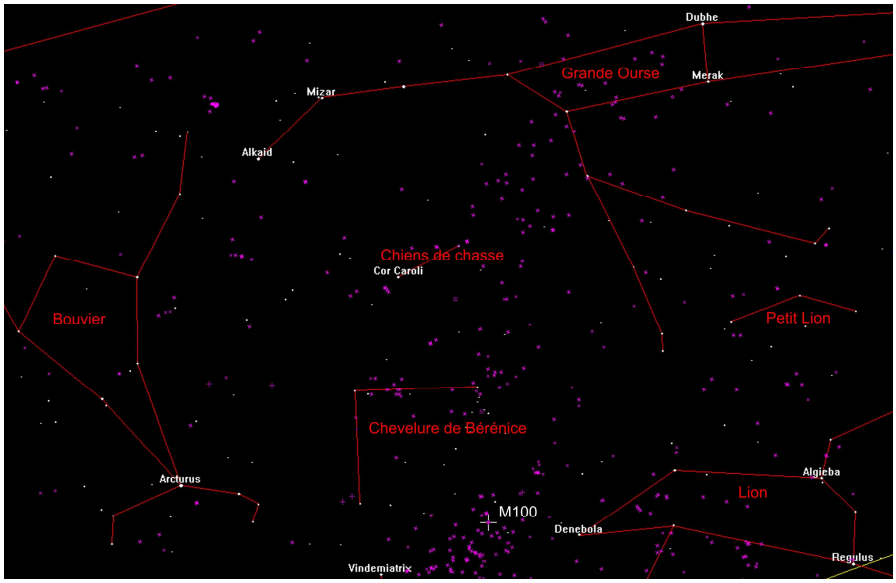


Figure 19 :
Comment observer M 100.
Arcturus, Denebola, Regulus et les étoiles
de la Grande Ourse sont faciles à trouver. Image : François Saint-Jalm (CEA).

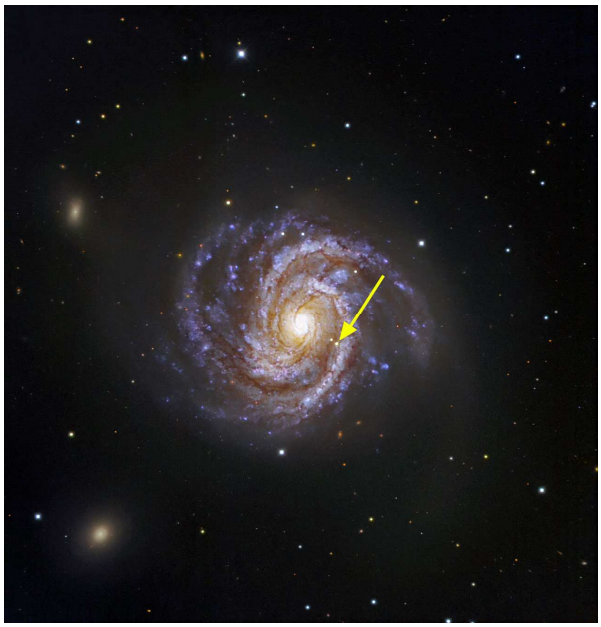


Figure 20
La galaxie spirale M 100 vue par le télescope spatial Hubble en 2006. La flèche indique la position de la supernova SN 2006X. Image : NASA/ESA.

Si nous pouvions observer notre galaxie, la Voie lactée, de face, depuis un vaisseau spatial extragalactique, sa forme ressemblerait à la galaxie spirale M 100. Les galaxies spirales sont riches en poussières et en gaz. La poussière apparaît dans cette image comme des lignes sombres, entre les majestueux bras spiraux. Les couleurs bleues correspondent aux régions riches en étoiles jeunes et chaudes.
En 1993, le Télescope spatial Hubble a réussi à distinguer 20 Céphéides parmi les étoiles de M100.

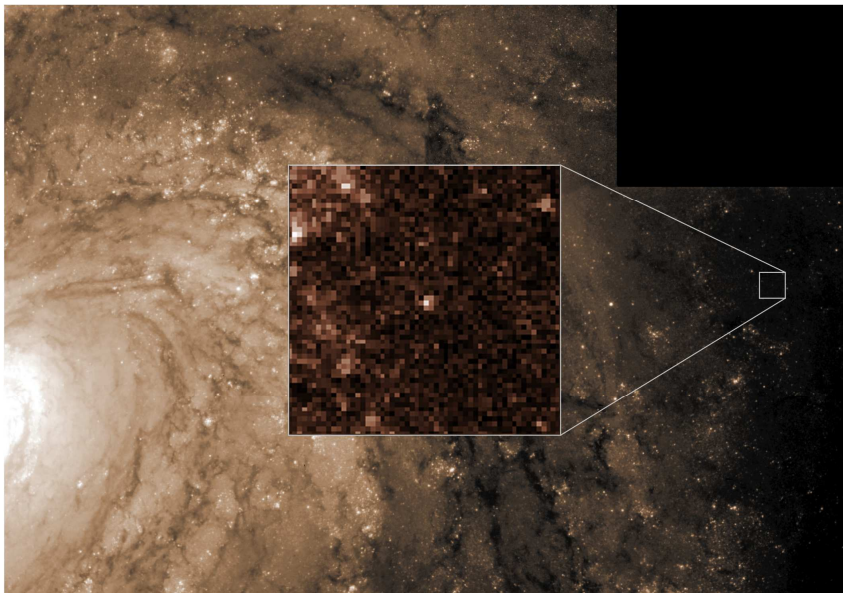


Figure 21 :
La caméra à haute résolution de Hubble a détecté et extrait l'une des Céphéides utilisées dans cet exercice. L'étoile est située dans une région d'étoiles en formation, dans un des bras spiraux de la galaxie (l'étoile est au centre du cadre). Image : NASA/ESA.

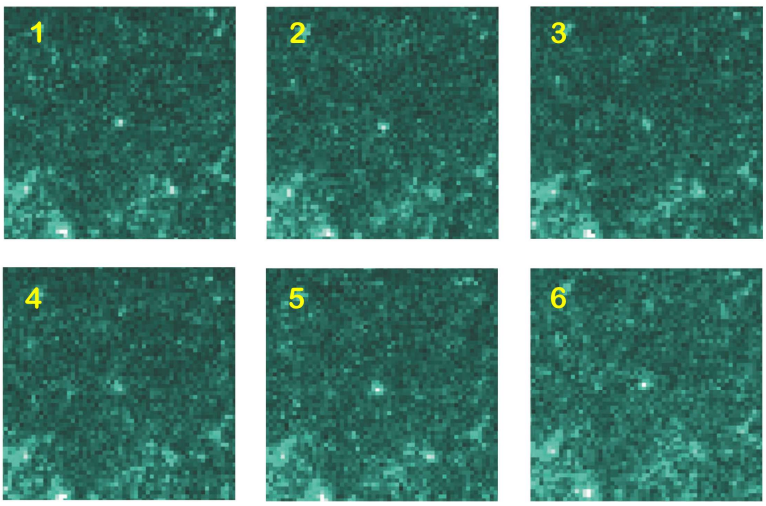


Figure 22 :
Une variable Céphéide dans M 100.
Voici six images de l'une des Céphéides de la galaxie M 100, prises à des dates différentes. La Céphéide est au centre de chaque cadre. Il apparaît clairement que la luminosité de l'étoile varie au cours du temps. Image : NASA/ESA.

Magnitudes

Les astronomes utilisent souvent la notion de « magnitude » à la place de la luminosité. Conçue pour donner des valeurs proches de celles qu'anciennement Hipparque de Samos avait attribuées aux étoiles visibles à l'œil nu, la *magnitude apparente* des astres est une grandeur sans dimension qui se calcule maintenant à partir de mesures photométriques. Certaines étoiles très stables sont prises comme « étoiles standard ».

Si le détecteur utilisé donne un signal E proportionnel à l'éclat d'une étoile donnée (dont on veut déterminer la magnitude apparente m) et si sa réponse est E_0 pour une étoile standard de magnitude apparente m_0, alors la magnitude de l'étoile étudiée est : $m = m_0 - 2{,}5 \log_{10}\left(\frac{E}{E_0}\right)$.

La magnitude apparente d'une étoile est d'autant plus **petite** que celle-ci est **brillante**. Les étoiles visibles à l'œil nu ont une magnitude apparente inférieure ou égale à 6.

L'éclat apparent d'une étoile dépend de sa luminosité propre et de la distance D à laquelle elle se trouve de l'observateur. On a donc défini la *magnitude absolue* des étoiles comme étant la magnitude apparente qu'elles auraient si elles étaient toutes situées à $D_0 = 10\,\text{pc}$ de l'observateur (1 pc = 1 parsec est la distance d'où l'on peut voir un segment de longueur égale à la distance moyenne Terre-Soleil (1 Unité Astronomique) sous un angle de 1″). On la calcule à partir de l'idée de conservation du flux lumineux à travers les sphères de rayon D et D_0 en l'absence d'absorption par la formule : $M = m - 5 \log_{10}\left(\frac{D}{D_0}\right) = m - 5 \log_{10}\left(\frac{D}{10\,\text{pc}}\right)$. La différence $m - M$ est parfois appelée « module de distance » de l'étoile.

Magnitude absolue d'une Céphéide

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

$$\langle M \rangle = -2{,}78 \times \log_{10}\left(\frac{P}{1\,\text{jour}}\right) - 1{,}35$$

■ **Activité 1 :** Magnitude absolue de 12 Céphéides de M 100

On a relevé, grâce au télescope spatial Hubble, la magnitude apparente de 12 étoiles Céphéides identifiées dans la galaxie M 100.

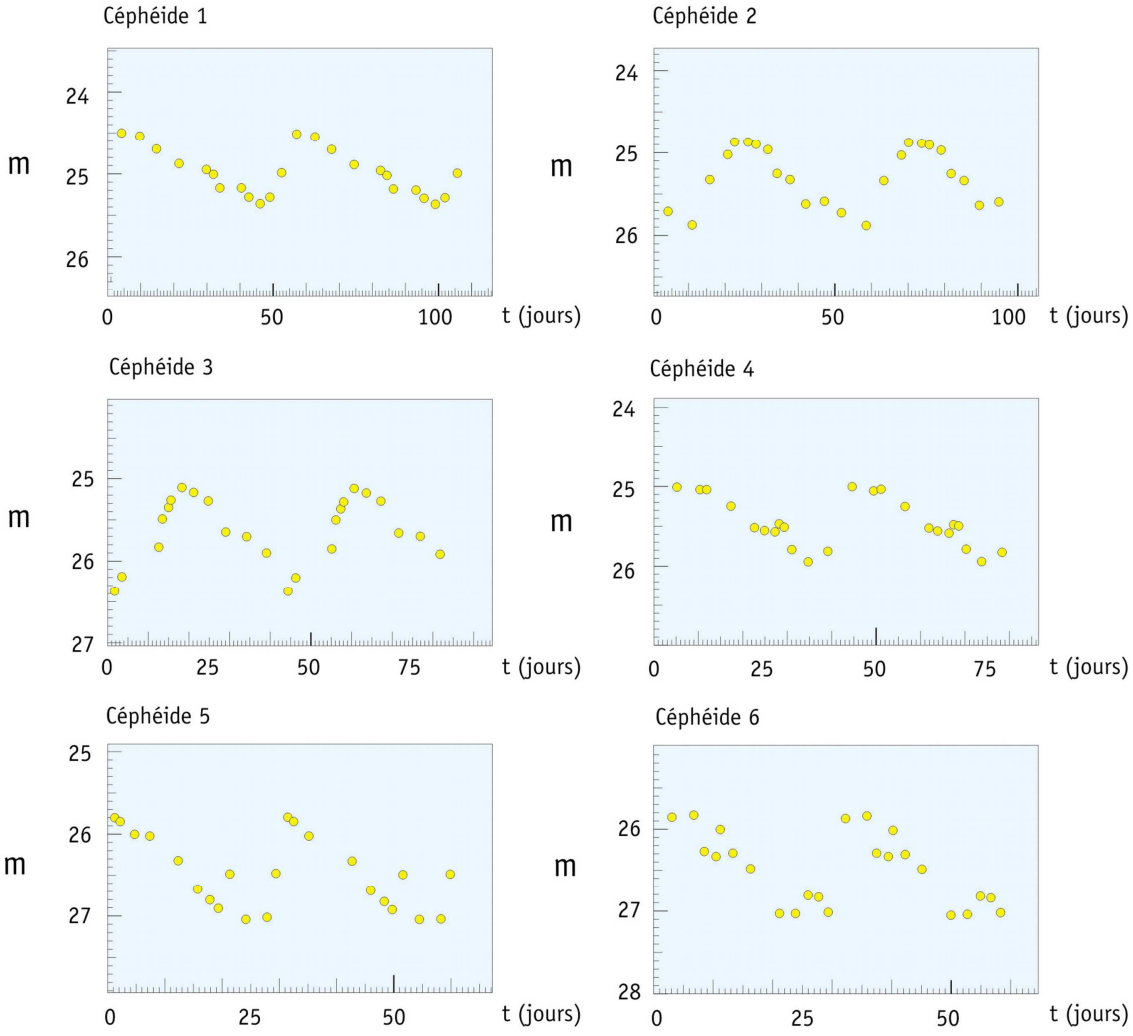


Figure 23 – 1 :
Courbes des magnitudes apparentes de 6 Céphéides de M100.
Image : ESA/ESO.

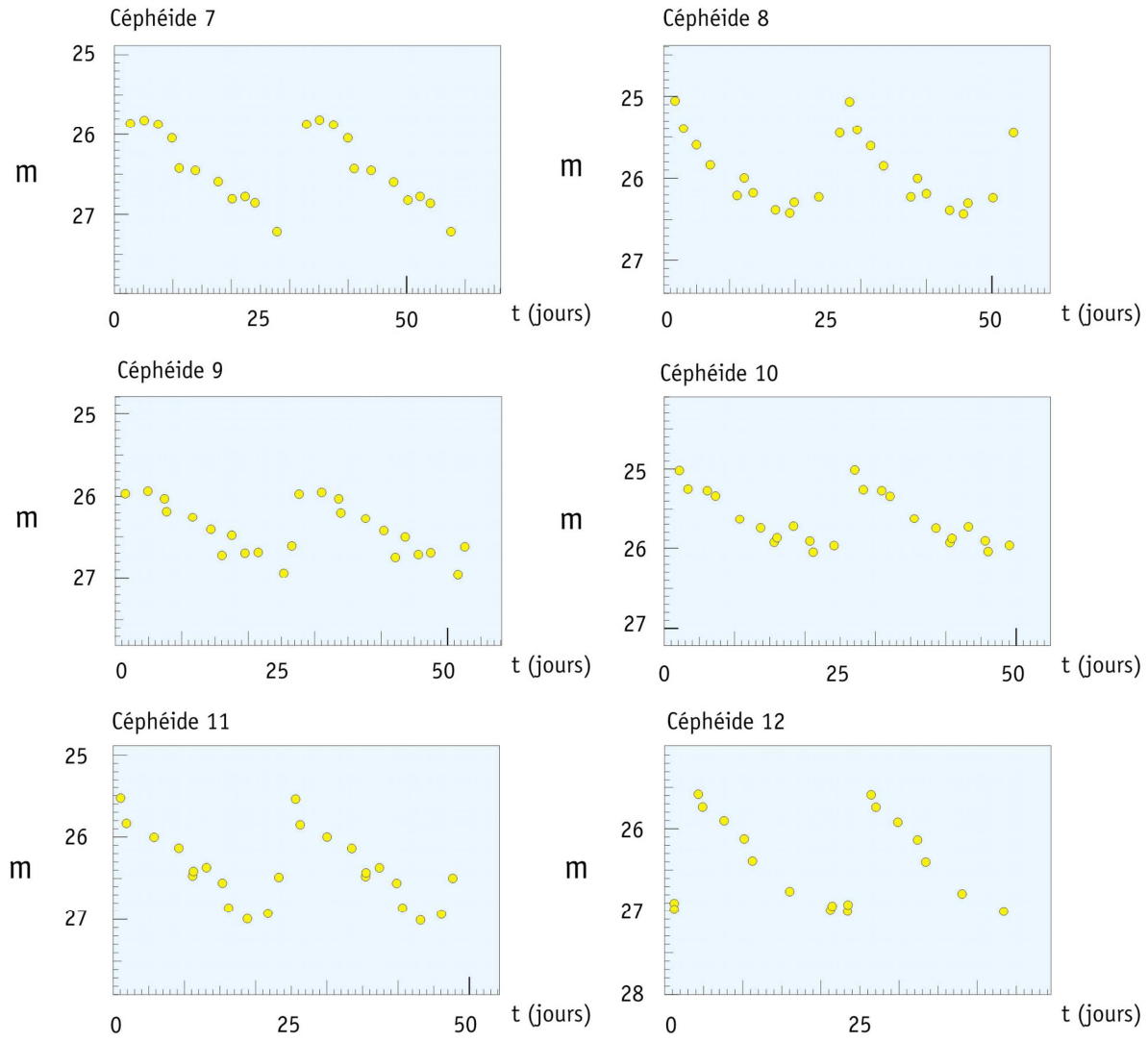


Figure 23 – 2 :
Courbes des magnitudes apparentes de 6 autres Céphéides de M100.
Image : ESA/ESO.

- Déterminer la période P de chacune des Céphéides.
- Utiliser ce résultat et la relation Période-Luminosité pour en déduire la magnitude absolue moyenne $\langle M \rangle$ de chacune de ces étoiles.

■ **Activité 2 :** Magnitude apparente moyenne des Céphéides de M 100

- Proposer une méthode pour estimer la magnitude apparente moyenne $\langle m \rangle$ à partir des courbes de la figure 23.

Au début du XX^{ème} siècle, les astronomes mesuraient la magnitude apparente minimum (m_{min}) et la magnitude apparente maximum (m_{max}) et en calculaient la moyenne $\langle m \rangle$.

- Avec cette méthode, ou toute autre, calculer la magnitude apparente moyenne $\langle m \rangle$ de chacune de ces Céphéides.

■ **Activité 3 :** Distance des Céphéides de M 100

- En utilisant les valeurs trouvées pour $\langle m \rangle$ et $\langle M \rangle$, calculer la distance D de chacune de ces Céphéides. Exprimer le résultat en Mégaparsecs (Mpc).

■ **Activité 4 :** Discussion

- Vous n'avez sans doute pas trouvé exactement les mêmes distances pour les différentes Céphéides. Pour quelles raisons selon vous ?

On donne les informations suivantes :

Diamètre de la voie lactée :	70000 à 100000 a.l.
Épaisseur de la Voie lactée au niveau de son bulbe central :	10000 a.l.
Épaisseur de la Voie lactée au niveau du Soleil :	1000 a.l.

- En considérant que M100 a la même taille que la Voie lactée (on vérifiera cela dans l'activité suivante) et en sachant que $1\,\text{pc} = 3{,}26\ \text{a.l.}$, peut-on les écarts entre les différentes distances calculées par le fait que les Céphéides étudiées ne sont pas au même endroit dans M100 ?

■ **Activité 5 :** Distance à M 100

- Calculez la valeur moyenne des distances aux 12 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 $17{,}1 \pm 1{,}8\,\text{Mpc}$. Cette étude tenait compte de la présence de poussières interstellaires. Comparer le résultat obtenu avec cette valeur.
- La galaxie M100 est vue sous un angle compris entre 6 et 7 minutes d'arc. Calculer son diamètre en considérant que cette galaxie se trouve à 17,1 Mpc de nous. Exprimer ce résultat en années-lumière. Comparer ce diamètre avec celui de la Voie lactée.

■ **Activité 6 :** Calcul de la constante de Hubble H_0

La galaxie M100 fait partie d'un amas de galaxies appelé « Amas de la Vierge ». On a mesuré le décalage vers le rouge de la lumière qui nous provient de cet amas et on en a déduit une « vitesse de fuite ». Cette vitesse est : $v = 1400\ km \cdot s^{-1}$.

- À l'aide de cette donnée et de la distance D qui vient d'être déterminée, calculer la valeur de la constante de Hubble H_0. Exprimer le résultat en $km \cdot s^{-1} \cdot Mpc^{-1}$.

■ **Activité 7 :** Calcul de l'âge de l'Univers

- Calculer maintenant l'âge de l'Univers (attention aux unités). Comparer ce résultat avec l'âge officiel de l'Univers puis avec celui qui est attribué à la Terre.

POUR ALLER PLUS LOIN : RÉFÉRENCES

Article scientifique

- Freedman, W.L., Madore, B.F., Mould, J.R., Ferrarese, L.; Hill, R., Kennicutt, R.C., Jr., Saha, A., Stetson, P.B., Graham, J.A., Ford, H., Hoessel, J.G., Huchra, J., Hughes, S.M., and Illingworth, G.D., 1994, Nature, 371, 757-762. : *Distance to the Virgo cluster galaxy M100 from Hubble Space Telescope observations of Cepheids.*

Liens

- http://www.rssd.esa.int/index.php?project=HIPPARCOS&page=HR_dia
- http://www.aavso.org/henrietta-leavitt-%E2%80%93-celebrating-forgotten-astronomer
- http://www.eso.org/public/images/eso-m100/

Livres

- Sous la direction de Pierre Léna : *Les Sciences du Ciel.* Flammarion.
- Françoise Combes, Patrick Boissé, Alain Mazure, Alain Blanchard : *Astrophysique – Galaxies et cosmologie.* Interéditions/Éditions du CNRS

À L'ATTENTION DU PROFESSEUR

Résumé

Dans cet exercice, la période et la magnitude apparente des étoiles Céphéides de la galaxie M 100 sont mesurées.

La magnitude absolue est tirée de la relation Période-Luminosité et la distance à M 100 se déduit ainsi de l'équation de la distance. On calcule enfin la constante de Hubble (en utilisant la vitesse de fuite de M 100, obtenue par d'autres scientifiques) et l'on estime l'âge de l'Univers.

Ce guide à l'attention du professeur donne les réponses aux diverses questions et ouvre une discussion sur les approximations et les simplifications effectuées dans cet exercice.

L'hypothèse d'une expansion de l'Univers à un taux constant depuis le Big Bang n'est correcte, à proprement parler, que pour certains modèles cosmologiques. Une telle expansion n'est en effet possible que si l'Univers contient très peu de matière, puisque toute matière, qu'elle soit visible ou obscure, doit ralentir l'expansion par le biais de l'interaction gravitationnelle. Les résultats récents n'ont pas donné de conclusions fermes sur ce problème de l'expansion de l'Univers, et nous pouvons encore considérer que l'expression utilisée dans l'exercice est une approximation simple mais raisonnable.
Il faut noter que, selon certains modèles cosmologiques récents, l'Univers a subi une phase de décroissance de son expansion (due aux effets gravitationnels de la matière noire ou ordinaire) qui s'est achevée environ 5 milliards d'années après le Big Bang. Depuis lors l'Univers semble avoir suivi une phase d'expansion accélérée où une mystérieuse « gravitation répulsive » aurait pris le dessus. Cette force est connue sous les noms « d'énergie noire » ou de « quintessence » (le cinquième élément).

Réponses

■ Activités 1, 2, 3 et 5

Nous avons obtenu les résultats suivants (les résultats intermédiaires sont dans le corrigé) :

Numéro de la céphéide	Période	Magnitude absolue	Magnitude apparente	Distance
1	53 j	-6,143	24,94	16,47 Mpc
2	47,5 j	-6,011	25,4	19,15 Mpc
3	42,75 j	-5,884	25,79	21,62 Mpc
4	39 j	-5,773	25,475	17,77 Mpc
5	30,25 j	-5,466	26,425	23,89 Mpc
6	29 j	-5,415	26,44	23,50 Mpc
7	30 j	-5,456	26,5	24,62 Mpc
8	26,5 j	-5,307	25,74	16,19 Mpc
9	26,25 j	-5,295	26,45	22,34 Mpc
10	25 j	-5,236	25,525	14,20 Mpc
11	24 j	-5,187	26,26	19,47 Mpc
12	22,25 j	-5,096	26,3	19,02 Mpc

Moyenne des distances calculées	19,85 Mpc
Écart type des distances calculées	3,22 Mpc

Comme M 100 est très lointaine, d'autres méthodes (utilisant, par exemple, la construction du graphe m(P)) ne fonctionnent pas bien. Nous avons préféré fournir la relation Période-Luminosité plutôt que de demander aux élèves de déduire eux-mêmes les deux coefficients qui apparaissent dans l'équation. L'accès à l'exercice est ainsi ouvert à un plus grand nombre d'élèves — ce que nous considérons comme un point positif (avec raison bien sûr :-)).

■ Activité 4

L'écart type des distances calculées est de 3,22 Mpc, c'est-à-dire à peu près 10^7 a.l.. C'est bien plus que le diamètre de notre Voie lactée (10^5 a.l.) et encore bien plus que son épaisseur au niveau des bras spiraux (10^3 a.l.). Ainsi, la dispersion des résultats obtenus provient de toutes les causes d'erreurs de mesure, depuis le processus de calcul des magnitudes apparentes jusqu'aux mesures que nous avons effectuées lors de l'exploitation des documents.

■ Activité 5

Nous avons trouvé $D = 19{,}85$ Mpc au lieu de la distance annoncée par les auteurs ayant utilisé les mêmes données que nous (17,1 Mpc). C'est qu'ils ont tenu compte du fait que la lumière émise par ces étoiles lointaines est partiellement absorbée et diffusée par les gaz et poussières qui se trouvent entre elles et nous. Ce phénomène rend les astres un peu moins lumineux que ce qu'ils sont en réalité, comme s'ils étaient un peu plus éloignés. Notre résultat est donc plutôt en bon accord avec le leur.

Le calcul du diamètre de M 100 en prenant 6,5' comme diamètre apparent donne :

$$d = \frac{6{,}5 \times \pi}{180 \times 60} \times 17{,}1 \cdot 10^6 \times 3{,}26 \text{ a.l.} \quad \Rightarrow \quad \underline{d = 105\,000 \text{ a.l.}}$$

Ce diamètre est à peu près égal à celui qui est attribué à notre Voie lactée (100 000 a.l.).

■ Activité 6

Il suffit d'utiliser la formule. On trouve : $H_0 = \dfrac{1400\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}}{19{,}85\ \text{Mpc}} \Rightarrow \underline{H_0 = 70{,}53\ \text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}}$.

■ Activité 7

Le détail du calcul est le suivant :

$$T = \frac{1\,\text{s}\times 1\,\text{Mpc}}{70{,}53\ \text{km}} = \frac{1\,\text{an}}{365{,}24\times 24\times 3600}\times\frac{3{,}26\times 10^6\times 300\,000\times 365{,}24\times 24\times 3600}{70{,}53\ \text{km}}$$

$$\Rightarrow \quad \underline{T = 13{,}87\cdot 10^9\ \text{ans}}.$$

C'est à peu près le triple de l'âge de la Terre qui est de $4{,}6\cdot 10^9$ ans .

www.cea.fr

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Direction de la Communication | Service Editions - Evènements
91191 Gif-sur-Yvette Cedex | T. +33 (0)1 64 50 16 09

Établissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019