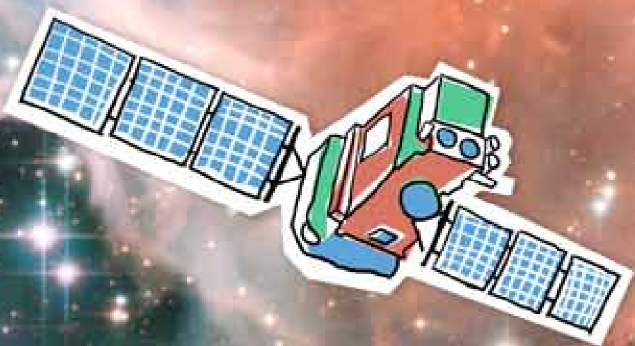
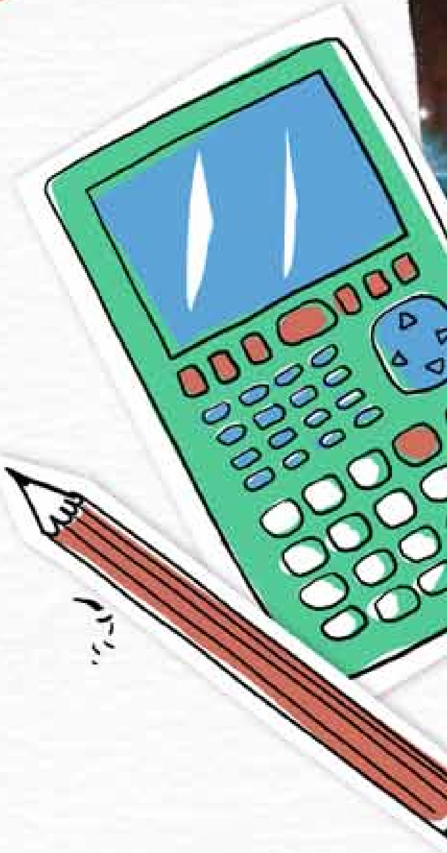
Astro Exos
- 2 -



MESURER LA DISTANCE DE LA GALAXIE M100

LE RÉSULTAT



îledeFrance

Résultats

Unités : 1 pc = 1 parsec est la distance d'où l'on peut voir la distance moyenne Terre-Soleil (1 Unité Astronomique UA = 150 millions de kilomètres) sous un angle de 1 seconde d'arc (1).

1 pc = 3.0857×10^{16} m = 2.0626×10^{5} AU = 3.26 années-lumière (a .l.)

Distance des Céphéides

Réponse 1 – Le profil des courbes , n'est pas parfaitement sinusoïdal et n'est pas centré sur une valeur moyenne clairement identifiable. On se contentera donc de chercher des points homologues apparemment séparés par la durée d'une période. Il est clair cependant que l'on gagnerait en précision en travaillant sur 10 périodes, par exemple.

On peut utiliser comme points significatifs, les maxima ou minima successifs et calculer leur séparation. On peut aussi tracer une droite horizontale à différentes hauteurs et calculer la séparation des points d'intersection avec la courbe.

Réponse 2 – La mesure de la période d'une Cépheide permet de calculer la magnitude absolue moyenne <M> à l'aide de la relation période-luminosité *(formule 3)*.

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

Réponse 3 – Pour estimer la magnitude apparente moyenne, on pourrait faire la moyenne de toutes les ordonnées, mais le résultat serait biaisé par la forme non sinusoïdale des courbes. On pourrait aussi tracer chaque courbe m(t) et calculer l'aire qui est entre cette courbe et l'axe du temps, puis calculer la hauteur du rectangle qui a la même aire.

Une autre méthode qui sera appliquée ici et qui semble un peu approximative mais qui a l'avantage d'être simple et l'intérêt d'avoir été historiquement utilisée par Henrietta Leavitt : on fait la moyenne du maximum et du minimum de magnitude.

Réponse 4 – Pour déduire la distance de l'étoile, on utilise la différence entre la magnitude apparente moyenne <m> affectée par la distance et mesurée sur la courbe de lumière et la magnitude absolue moyenne <M> calculée à partir de la période de la Céphéide.

Cette différence <m> - <M>, appelé aussi **module de distance** est une fonction unique de la distance D qui peut donc être calculée par la *(formule 2)*.

$$M = m - 5\log_{10}\left(\frac{D}{D_0}\right) = m - 5\log_{10}\left(\frac{D}{10\text{ pc}}\right)$$

On en déduit la formule de la distance :

$$D = 10\text{ pc} \times 10^{\frac{m-M}{5}}$$

Résultats des mesures

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

Réponse 5 – Les valeurs extrêmes des distances sont considérablement différentes (14,2 Mpc à 24,62 Mpc). Deux causes principales d'erreur peuvent être imaginées :

- en premier lieu la loi empirique donnant la relation entre période et magnitude absolue suppose que toutes les céphéides fonctionnent exactement de la même façon. Or pour les étoiles qui connaissent cette phase, il est possible que cette relation évolue sensiblement selon le stade d'évolution de l'étoile et que des différences sensibles de composition chimique soient à l'origine d'écarts au comportement moyen de ces étoiles.
- en second lieu, on voit bien que la courbe de lumière de ces étoiles n'a pas le même profil pour toutes et que par conséquent, la façon dont nous avons calculé la magnitude apparente moyenne s'applique plus ou moins bien.

Distance de la galaxie M100

Réponse 6 – Si l'on calcule l'écart type des résultats obtenus, on obtient 3,22 Mpc, c'est-à-dire des différences de distance de l'ordre de 10,5 millions années-lumière. C'est bien plus que l'épaisseur des bras spiraux (1 000 a.l.) où l'on a observé ces étoiles. C'est également bien plus que le diamètre que l'on peut attribuer à M100 (environ 100 000 a.l.).

Les écarts ne peuvent venir des positions différentes des Céphéides dans M100.

Ils viennent tout à la fois de l'imprécision des mesures et de l'usage d'une loi période-luminosité approximative. En conclusion, à défaut d'améliorer les mesures faites, on peut espérer que les erreurs faites par excès sur certaines étoiles soient compensées par celles qu'on a faites par défaut et cela justifie de calculer la moyenne des distances obtenues.

Réponse 7 – La valeur moyenne calculée pour les 12 Céphéides est de (19,85 ± 3,22) Mpc.

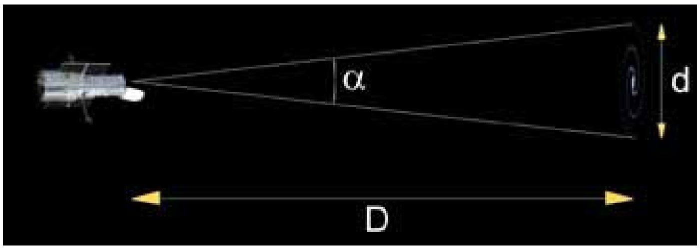
C'est plus que de la distance de M100 annoncée par les astronomes ayant mené cette étude qui donne :

$$D = (17{,}1 \pm 1{,}8)\ Mpc.$$

En effet, la présence de poussières entre M100 et le télescope spatial Hubble a pour conséquence une légère absorption de la lumière qui nous en parvient. Les étoiles apparaissent donc moins brillantes et nous les pensons plus loin. Leur magnitude apparente réelle est plus petite que ce que nous mesurons. L'estimation de l'absorption due aux poussières conduit bien à une diminution de la distance si l'on tient cet effet en compte.

Taille de la galaxie M100

Réponse 8 – Connaissant la distance de M100 et l'angle sous lequel on la voit de face, compris entre 6 et 7 minutes d'arc, il est possible de calculer son diamètre :



Si α est exprimé en radians, on a : $\alpha = d/D$

On obtient donc : $d = \alpha \times D$

Si l'on souhaite obtenir d en années-lumière, il faut que D le soit aussi :

L'expression de α, en prenant la valeur médiane du diamètre $\alpha = 6{,}5'$ est : $\alpha = (6{,}5 \times \pi)/(180\times60)\ rad.$

On obtient donc l'application numérique suivante :

$AN : d = [(6{,}5 \times \pi)/(180\times60)]\times17{,}1.10^6\times3{,}26\ a.l.$

$\Rightarrow d=105\,000\ a.l.$

Ce diamètre est donc tout à fait similaire à celui de la Voie lactée.

L'âge de l'Univers

Réponse 9 – Pour calculer le paramètre de Hubble, Ho, on utilise la relation :

$$V\ (km/s) = H_o\ .\ D\ (Mpc)$$

Pour la valeur mesurée D= 19,85 Mpc et V= 1400 km/s on obtient H_0=70,53 (km/s)/Mpc

Si l'on tient compte des incertitudes D= (19,85 ± 3,22) Mpc donne H_0= (70±11) km/s/Mpc

On remarque qu'avec la mesure publiée qui a été corrigée de l'absorption, D = (17,1±1,8) Mpc, on obtient H_0 = (80 ± 17) (km/s)/Mpc.

En réalité, la distance des galaxies, même avec les méthodes modernes, est encore très imprécise. Si l'on examine sur une base de données les estimations de distances actuelles pour la galaxie M100 selon différentes méthodes, l'écart des résultats est de 11 à 23,5 Mpc. [1]

Pour obtenir une meilleure évaluation, et en supposant que l'expansion est la même dans toutes les directions d'espace, il faut combiner les données de vitesse et de distance d'un grand nombre de galaxies différentes.

1. Voir la page Internet : *http://ned.ipac.caltech.edu/cgi-bin/nDistance?name=M100*

Réponse 10 – Une estimation approximative de l'âge de l'univers peut être obtenue en divisant la distance D par la vitesse V (cela suppose une vitesse fixe au cours du temps), on a alors :

$$\text{Âge Univers} = T = D / V = 1/H_0$$

Il faut auparavant harmoniser les différentes unités de distance utilisées en astronomie pour les distances (Mpc) et les vitesses (km/s). On peut convertir en utilisant :

$$1\ Mpc = 1\ Megaparsec = 10^6\ pc = 3{,}086 \times 10^{19}\ km$$

$$D = 19{,}85 \times 3{,}086 \times 10^{19}\ \text{km} = 61{,}27 \times 10^{19}\ \text{km}$$
$$V = 1400\ \text{km/s}$$

$$\text{Âge} = T = D/V = (61{,}27 \times 10^{19}\ \text{km}) / 1400\ \text{km/s}$$
$$= 4{,}37 \times 10^{17}\ \text{s} = 1{,}388 \times 10^{10}\ \text{ans}$$

Soit **T= 13,88 milliards d'années**

On peut aussi convertir en utilisant :

$$1\text{km/s/Mpc} = 1/(3{,}086 \times 10^{19}) = 3{,}240 \times 10^{-20}\ \text{s}^{-1}$$
$$1/H_o = 1/(70{,}53 * 3{,}240 \times 10^{-20}) = 4{,}37 \times 10^{17}\ \text{s}$$

= **13,88 milliards d'années**

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

Astro Exos

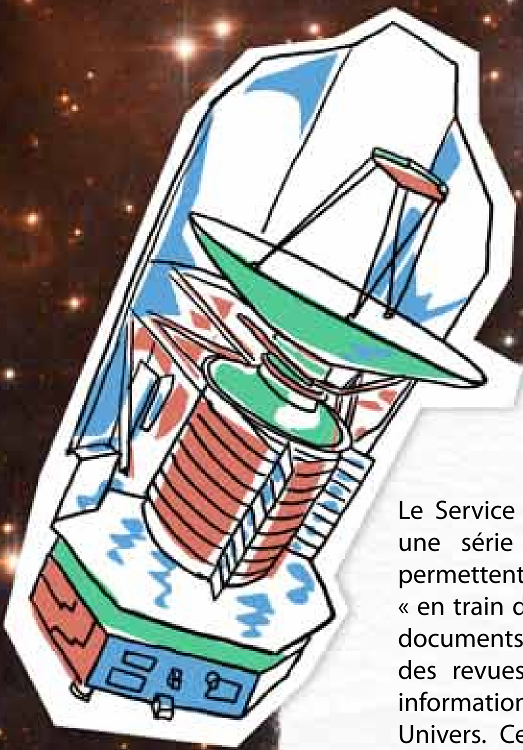
Responsables éditoriaux
Roland Lehoucq et Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Contributeurs
Jean-Marc Bonnet-Bidaud, François Saint Jalm

Conception graphique
Aurélie Bordenave, *aureliebordenave.fr*

Photo de couverture :
Image de la galaxie M100, *European Southern Observatory* (ESO)

Cet Astro Exo est librement adapté de l'exercice « Détermination de la distance à M100 à l'aide des étoiles variables Céphéides » de l'ESA/ESO avec l'accord de l'Observatoire Européen Austral (ESO).



Le Service d'Astrophysique du CEA propose une série d'exercices d'astrophysique qui permettent de se plonger dans la recherche « en train de se faire ». Il s'agit d'analyser des documents extraits d'articles publiés dans des revues scientifiques pour en tirer des informations sur les objets qui peuplent notre Univers. Cette activité peut être menée en classe ou en petit groupe d'élèves et permet d'illustrer différents points des programmes de physique-chimie de Première et de Terminale Scientifiques.

Cet exercice propose de déterminer la distance d'une galaxie à partir de l'observation de certaines étoiles variables, les Céphéides. En utilisant les variations de luminosité de Céphéides observées par le télescope spatial Hubble, la méthode utilise la relation période-luminosité pour calculer la distance de la galaxie M100.