AVEC NOS ÉLÈVES

Mesures de distances : les Céphéides

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *Après avoir vu la méthode des parallaxes, applicable aux étoiles proches, nous découvrons ici la méthode photométrique utilisée avec les étoiles variables Céphéides. Après une application ludique, applicable avec des élèves, nous utilisons la méthode avec des données réelles, pour calculer la distance de la grande nébuleuse d'Andromède (M31).*

Introduction

Dans le précédent article de cette série, nous avons vu, à travers un exercice pratique, comment les astronomes calculaient la distance des étoiles les plus proches par la méthode des parallaxes. Nous avons réalisé à quel point ce travail était difficile.

Pour mesurer la distance de l'étoile la plus proche il faut être capable de mesurer des angles de l'ordre de une seconde d'angle (c'est-à-dire 1/3600 degré, soit environ 0,0003°). Regardez un rapporteur ; un degré c'est déjà tout petit, alors 0,0003°... Heureusement, l'observation depuis l'espace nous permet d'atteindre des précisions étonnantes. Pourquoi ? C'est facile à comprendre. Quand on observe depuis l'espace, il n'y a pas d'atmosphère entre l'étoile et le télescope. De ce fait, la qualité des images n'est pas détériorée par les fluctuations de l'indice de réfraction de l'air. Les images apparaissent alors mille fois plus piquées que depuis le sol. Cette finesse permet d'atteindre une précision mille fois plus grande, soit environ 0,001 seconde d'angle, c'est-à-dire, 0,0000003° (soit 3×10^{-7} degrés). Pour vous donner une image de la petitesse de cet angle, c'est à peu près l'angle sous lequel on voit, depuis Lyon, une pièce de 1 euro placée à Saint-Pierre et Miquelon[1] ! Et les astronomes espèrent faire encore mieux dans les années prochaines, avec le projet GAIA par exemple.

Malgré ces prouesses techniques, on ne peut mesurer précisément la parallaxe (comprenez, la distance) que pour des étoiles "proches", situées à moins de 3000 années lumière. C'est bien peu. Ce n'est qu'une petite région autour de notre Soleil (notre Galaxie a un diamètre d'environ 100 000 années lumière). Mais alors, comment mesurer les objets astronomiques plus lointains ? Comment, par exemple, avoir la distance des galaxies ?

Un petit exercice simple

Amusez-vous à faire calculer à quelle distance il faudrait placer une pièce de 1 euro pour la voir sous un angle de 1 seconde d'arc.

Le calcul est des plus simples. Le diamètre divisé par la distance est égal à l'angle de 1"=1/3600 degré, exprimé en radian. Une méthode simple pour convertir en radian les tout petits angles exprimés en degrés consiste à en prendre le sinus. Donc :

Diamètre Pièce / Distance Pièce = sin(1/3600)

Puisque le diamètre de la pièce est de 2,3 cm, la distance cherchée est de 2,3/sin(1/3600)=474 409 cm, c'est-à-dire 4,7 km.

Vous pouvez tester la finesse des élèves en leur demandant : «Si une pièce de 1 euro est vue sous un angle de 1" à 4,7 km, sous quel angle serait vue une pièce de 2 euro ?» Vous aurez certainement quelques élèves qui vous dirons 2". (La réponse est 1,13" car la pièce est plus grosse, en taille, mais pas deux fois plus).

La méthode photométrique

Il faudra faire appel à une méthode originale, la *méthode photométrique*. De quoi s'agit-il ? L'éclat apparent d'une source varie comme l'inverse du carré de la distance de la source. Cette loi exprime

[1] Pour les moins érudits, on peut presque dire entre Paris et New York.

simplement la conservation de l'énergie rayonnante à travers la surface de la sphère, centrée sur l'objet et de rayon la distance de l'objet à l'observateur. Si nous parvenons à connaître l'énergie totale effectivement rayonnée par l'étoile par unité de temps (ce qu'on appelle la luminosité), la simple mesure de l'énergie reçue sur Terre par unité de surface et par unité de temps, nous permettra d'avoir la distance (voir l'encadré). Nous allons voir des exemples concrets de cette méthode.

La relation Période-Luminosité est "*la*" méthode photométrique emblématique. Nous expliquerons donc cette méthode simplement et dans un prochain article nous verrons les difficultés qui peuvent conduire à des distances biaisées.

Étoiles Céphéides simulées

Nous allons faire une petite expérience qu'il sera possible de réaliser avec des élèves, pour leur faire comprendre, de manière ludique, le principe de la méthode photométrique. La seule différence avec l'utilisation réelle sera que nous ne mesurerons pas un flux lumineux mais une longueur apparente. Dans ce cas, la variation avec la distance suit une loi plus simple (1/d au lieu de $1/d^2$).

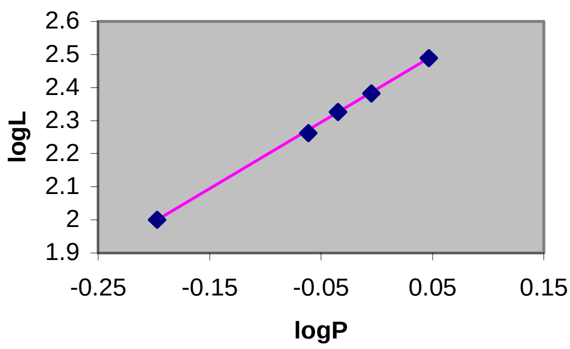
Nous fabriquons une dizaine de pendules : des grands, des petits, des moyens... Une baguette (10mm × 10mm) piquée dans un socle (10 cm × 10 cm), un boulon de 3 mm de diamètre pour la potence. On suspend un plomb de pêche fendu par un fil nylon de longueur quelconque (il suffit de pincer le fil dans le plomb, avec un étau, pour fixer le plomb). Chaque pendule ainsi constitué sera analogue à une Céphéide. Nous disposons quelques uns de ces pendules à des distances connues. Nous les faisons osciller et nous les observons (en fait, nous avons réalisé une vidéo et les mesures ont été faites en temps différé).

Nous sommes capables de mesurer la période d'oscillation des pendules et les longueurs apparentes des fils. Avec la distance, on peut déduire la longueur vraie. Ainsi, expérimentalement, nous pouvons représenter la relation donnant la Longueur *L* du fil en fonction de la Période *P*, sans avoir à approcher les pendules (comme c'est le cas pour les étoiles). Nous traçons en fait la courbe de la fonction $f: \log P \rightarrow \log L$ (les logarithmes donnent une relation affine, comme celle obtenue avec les magnitudes). Nous appellerons cette relation la relation PL.

L'observation des pendules de calibration nous a conduit aux résultats suivants :

pendule	Distance (cm)	Période (s)	Longueur apparente (degré)	Longueur réelle (mm)
1	315	1,114	5,58	308
2	226	0,635	2,55	100
3	375	0,923	3,23	212
4	287	0,989	4,80	241
5	251	0,868	4,16	183

logL en fonction de *logP* donne le graphique suivant[2] :



[2] On peut ne pas utiliser les logarithmes. Dans ce cas la relation n'est plus une droite.

Observons maintenant un pendule placé très loin, à une distance inconnue. Mesurons la longueur apparente du fil. Mesurons sa période d'oscillation. L'application de la relation P-L nous donne la longueur vraie. La comparaison avec la longueur apparente nous donne la distance. C'est ce que nous allons appliquer.

Dans notre expérience nous avons obtenu les résultat suivants (avec deux pendules A et B) :

Pendule	Période (s)	L apparente (degrés)	L réelle (mm)	Distance (m)
A	1,100	1,126	295	15,02 m
B	0.959	0,930	229	14,11m

Nous trouvons ainsi une distance moyenne de 14,6 m. En vérifiant sur le terrain nous avons trouvé 15,1 m, soit une incertitude de l'ordre de 3%.

Les deux pendules distants pour lesquels nous appliquons la méthode P-L.

Vous pourrez appliquer cette méthode avec vos élèves, par exemple au sein d'un club ou d'un atelier d'astronomie. Les élèves apprendront en s'amusant.

Application avec données réelles

Cette application simple, faite avec des données réelles pourra être faite en classe, car il s'agit d'un travail sur document pour obtenir la distance de la galaxie d'Andromède. On rappelle au préalable que le module de distance μ s'exprime en fonction de la magnitude apparente observée, m, et de la magnitude absolue, M, par l'expression simple :

$$\mu = m - M$$

Ce module exprime la distance dans une échelle logarithmique :

$$\mu = 5\log D + 25$$

D est la distance en Mégaparsecs.

Le Tableau 1 donne les valeurs des modules de distances observées par HIPPARCOS pour des Céphéides de notre galaxie. Les périodes P et les magnitudes apparentes m_c, corrigées de l'absorption lumineuse dans notre galaxie, sont connues. On peut donc déduire la magnitude absolue $M = m_c - \mu$ et tracer la relation Période-Luminosité :

$$M = a\log P + b$$

En appliquant cette relation aux Céphéides de M31 (Tableau 2) on trouve leurs magnitudes absolues, et donc la distance de M31.

TABLEAU 1 : Quelques Céphéides de notre Galaxie. Le module de distance μ a été obtenu par la méthode des parallaxes avec le satellite HIPPARCOS. Les magnitudes apparentes moyennes $\langle m\rangle_c$ *sont corrigées de l'extinction.*

Nom de la Céphéide	logP (P en jours)	μ	$\langle m\rangle_c$
BF Oph.	0,609	9,50	6,49
VY Car	1,277	11,42	6,59
T Mon	1,432	10,58	5,46
S Nor	0,989	9,92	5,86

L'application d'une régression linéaire entre $M = \langle m\rangle_c - \mu$ et $\log P$ conduit aux coefficients suivants :

a = –2,60 ; b= –1,45.

La relation Période-Luminosité est donc :

$$M = -2{,}60\log P - 1{,}45$$

TABLEAU 2 : Mesure d'une Céphéide de M31=NGC224 (Andromède), obtenue par le "Hubble Space Telescope".

Nom de la Céphéide	logP	$\langle m\rangle_c$
M31 : FIII-15	1,277	19,82

L'application de la relation période luminosité à une Céphéide de M31 donne la magnitude absolue moyenne de cette étoile variable : $\langle M\rangle = -4{,}77$ et donc au module de distance de M31 :

$$\mu(M31) = \langle m\rangle_c + 4{,}77 = 24{,}59,$$

ce qui correspond à une distance D=0,83 Mpc ou 2,7 millions d'années de lumière.

■