

Quelques mesures de distances

2013-2014 : TD 2

Résumé du TD :

Ce TD a pour but l'étude de différents types de mesures de distances galactiques et extra-galactiques, basées sur :

- La parallaxe et le mouvement de la Terre sur son orbite
- La connaissance de la taille réelle d'un objet : la supernova SN1987A
- La connaissance de la luminosité intrinsèque d'un objet : les Céphéides

Objectifs du TD :

Comprendre ces méthodes et comment elles peuvent être inter-calibrées.

1 Mesure de distance grâce à la parallaxe astrophysique

- 1 – Rappeler ce qu'est la parallaxe astrophysique annuelle, et comment elle peut être utilisée pour déterminer les distances.
- 2 – Rappeler la définition du *parsec* (parallaxe-seconde), et montrer que $1 \text{ pc} = 3.1 \times 10^{16} \text{ m}$.
- 3 – Quelle est la distance (en pc) d'un objet dont la parallaxe est α (en seconde d'arc) ?
- 4 – La première mesure de parallaxe annuelle fut réalisée en 1837 par W. Bessel qui observa une parallaxe de $\alpha = 310 \text{ mas}$ (milli seconde d'arc) pour l'étoile 61-Cygni. À quelle distance (en pc) se trouve cette étoile ?
- 5 – Sachant que les meilleurs instruments actuels comme Hipparcos ont une résolution angulaire de l'ordre de $\alpha_{\min} = 1 \text{ mas}$, quelle distance maximale peut être mesurée par la méthode de la parallaxe annuelle ? Peut-on en particulier appliquer cette méthode pour des objets extra-galactiques ?

2 Mesure de la distance de la SN1987A et du LMC

Le 23 Février 1987, l'apparition subite d'une supernova de type II est observée dans le *Grand Nuage de Magellan* (LMC pour *Large Magellanic Cloud*). C'est ce que représente la Fig. 1 (à gauche). Sa magnitude pique alors à environ $m = 3$. Elle est la seule supernova visible à l'oeil nu depuis plus de 400 ans. Elle résulte de l'explosion d'une étoile d'environ 20 masses solaires : l'étoile Sanduleak -69° 202. Dans cette partie, nous allons essayer de déterminer la distance de cette supernova, et donc celle du LMC.

Des images fines obtenues avec le *Hubble Space Telescope* (HST) montrent l'existence de 3 anneaux (voir Fig. 1 droite). Ces anneaux sont trop éloignés de l'objet central pour pouvoir être issus de l'explosion de la supernova elle-même et doivent avoir été créés par l'étoile projécteur, bien avant son explosion. Ils sont a priori circulaires, mais apparaissent elliptiques du fait de l'inclinaison par rapport à la ligne de visée. Dans ce travail, nous allons nous concentrer sur l'anneau interne, le plus brillant.

Principe de la mesure

On appelle *taille angulaire* d'un objet la mesure de l'angle α qui sous-tend cet objet, vu depuis la Terre. Le plus souvent il se mesure en secondes d'arc.

- 1 – Quelle est la distance D d'un objet lointain observé avec une taille angulaire α , si l'on connaît sa taille réelle d ?

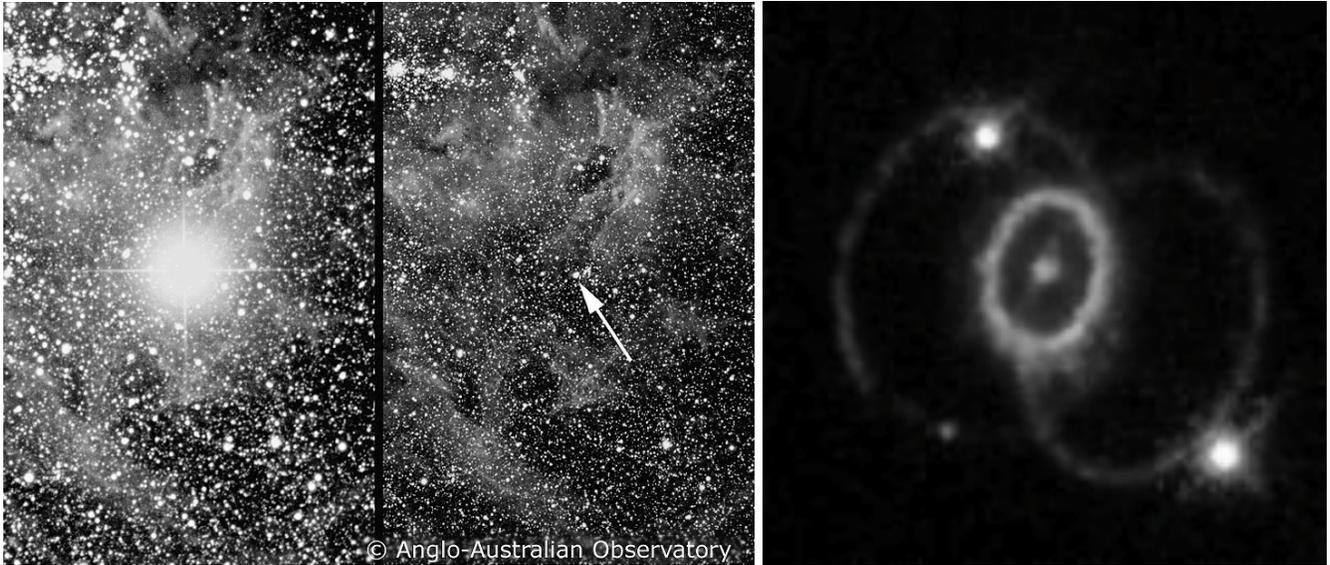


FIGURE 1 – *A gauche* : Observations d'une partie du *Grand Nuage de Magellan*, après et avant l'apparition de la supernova SN1987A. *A droite* : Observations fines de SN1987A avec le HST.

L'idée est d'appliquer cette méthode à l'anneau central, le plus brillant. Il nous faut donc mesurer sa taille angulaire et estimer sa taille réelle.

Mesure du diamètre angulaire

- 2 – Sachant que l'ellipse observée correspond à la projection de l'anneau circulaire sur le fond du ciel, exprimer l'angle d'inclinaison i avec lequel est vu l'anneau (angle entre la normale à l'anneau et la direction d'observation) en fonction du demi-grand axe a et du demi petit-axe b de l'ellipse observée. Grâce à la Fig. 1, calculer cet angle.
- 3 – Sachant que la distance entre les deux étoiles du champ sur la Fig. 1 (à droite) est de 4.3 secondes d'arc, mesurer sur cette figure le diamètre angulaire α_d de l'anneau, c'est à dire la diamètre sous lequel est vu le diamètre *réel* de l'anneau. Quelle est l'incertitude relative sur cette mesure ?

Mesure du diamètre réel

En fait, l'anneau n'est pas intrinsèquement très lumineux. Il n'est devenu vraiment brillant que lorsque que le flash UV de l'explosion de la supernova a excité les atomes et molécules qui le composent. Sa luminosité a ensuite diminué au fils de mois et des années.

La séquence d'événements s'est donc passé de la manière suivante :

- L'étoile projéniteur explose en une supernova, générant un puissant flash UV visible à l'oeil nu.
- Ce flash atteint l'anneau circulaire et l'éclaire de manière uniforme.
- L'anneau commence à réémettre cette lumière dans toutes les directions, y compris la nôtre.
- Du fait de l'inclinaison de l'anneau, les photons provenant des parties les plus proches de nous nous arrivent en premier, suivis uniquement dans un temps ultérieur des photons provenant des parties les plus lointaines.

Pour cette raison, la courbe de lumière de l'anneau (voir Fig. 2) ne croît instantanément mais met un temps T fini avant d'atteindre son maximum et de décroître ensuite.

- 4 – Exprimer, en fonction du diamètre réel d de l'anneau et de son inclinaison i , le temps T entre le moment où les photons provenant de la partie la plus proche de nous nous arrivent et celui où les photons de la partie

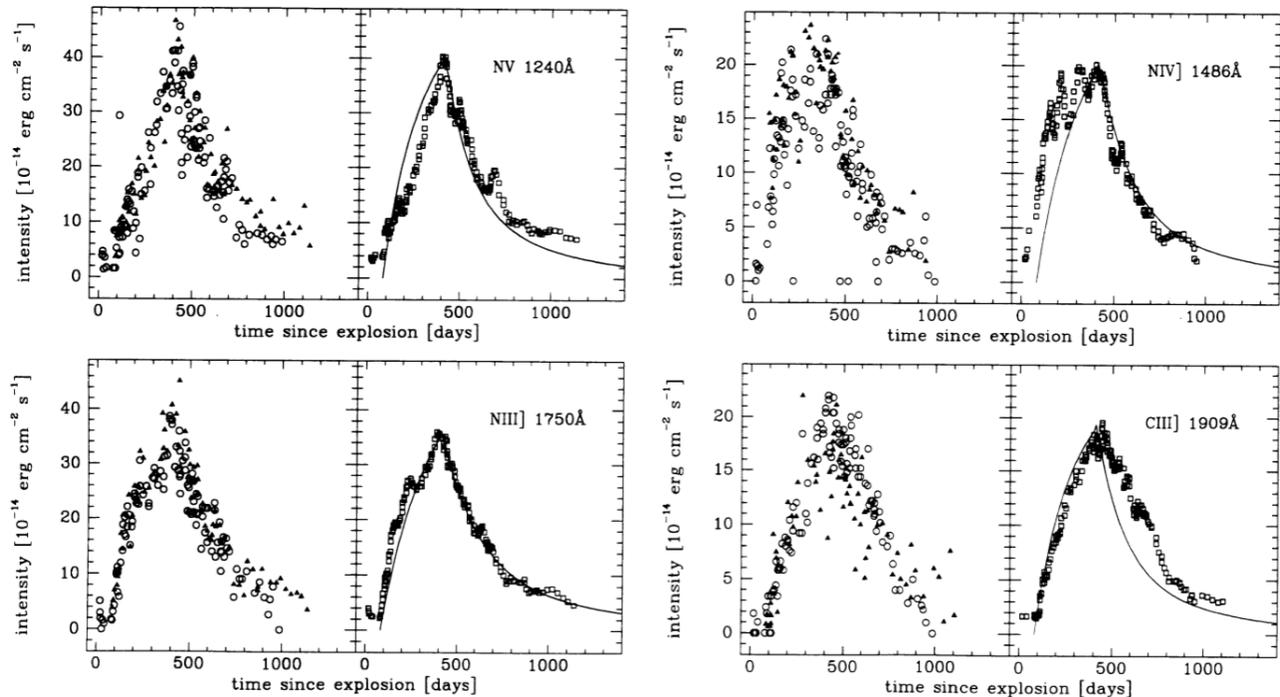


FIGURE 2 – Courbes de lumière de SN1987A obtenues avec la *International Ultraviolet Explorer* (IUE) et commençant environ 3 mois après l’explosion (Panagia et al. ApJ, 380 (1991)). Les quatre diagrammes correspondent à des observations à des longueurs d’onde différentes. Pour chacun, les points du graph de gauche correspondent aux données brutes, les points du graph de droite correspondent aux données *lissées*, et la courbe du graph de droite à un modèle d’illumination de l’anneau.

la plus éloignée nous arrivent.

- 5 – Mesurer T sur les courbes de lumière de la Fig. 2 et en déduire le diamètre réel de l’anneau (en parsecs). Quelle est l’incertitude relative sur cette mesure ?

Mesure de distance

- 6 – Calculer la distance D de la supernova (en kpc).
- 7 – Étant donnée la vitesse finie de propagation de la lumière, en déduire le moment réel de l’explosion de cette supernova ?
- 8 – Reprendre finalement l’expression de D en fonction de des paramètres directement mesurés et estimer ce qu’implique pour D l’incertitude sur ces paramètres.
- 9 – Les auteurs de la première mesure ont trouvé : $\alpha_D = 1.66'' \pm 0.03$, $i = 42.8^\circ \pm 2.6$ et $D = 51.2 \text{ kpc} \pm 3.1$. Ces résultats sont-ils compatibles avec vos incertitudes ?
- 10 – Les 4 longueurs d’onde utilisées sur la Fig. 2 correspondent à des raies particulières en émission. Pourquoi avoir utilisé ces raies et non pas la luminosité totale (ce qui aurait été beaucoup plus simple à réaliser) ?
- 11 – Sachant qu’à l’heure actuelle, la meilleure résolution angulaire obtenue avec le HST est d’environ $0.1''$, calculer la distance maximale où cette méthode aurait pu être appliquée. Quelles peuvent être les autres limitations d’une telle méthode ?

3 Mesures de la distance de M100 grâce aux Céphéides

Les Céphéides sont des étoiles très brillantes qui peuvent être observées jusque dans des galaxies éloignées (jusque environ 20 Mpc maintenant, avec les observations spatiales). Ce sont des étoiles fortement variables dont les courbes de lumière sont périodiques (voir par exemple Fig. 3).

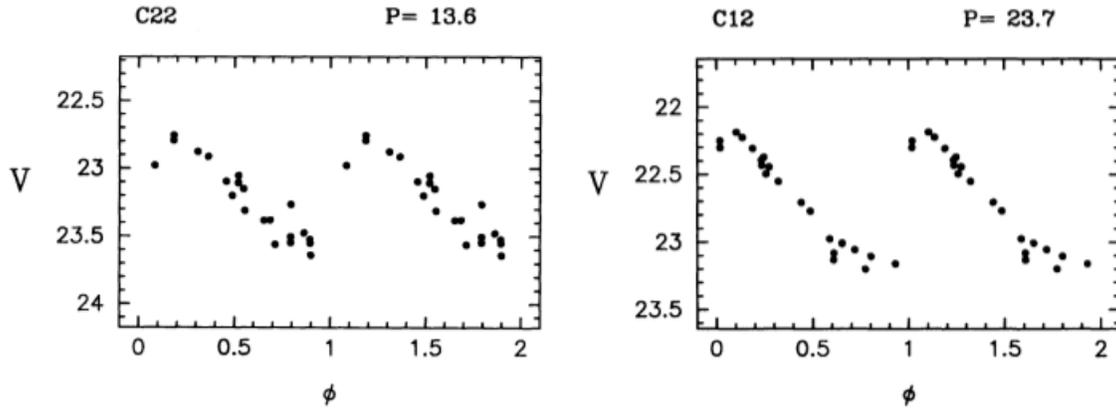


FIGURE 3 – Courbes de lumière de 2 Céphéides : magnitude apparente en fonction de la phase.

L'étude systématique de milliers de Céphéides a permis d'établir une relation très simple entre leur période et leur luminosité intrinsèque. Cette relation Période-Luminosité (PL) est calibrée de manière empirique et permet de déduire les distances d'autres objets.

Flux, Luminosité et Magnitudes

- 1– Quel est le lien entre la luminosité L d'un objet et le flux F mesuré à une distance D ?
- 2– Rappeler les définitions de magnitude apparente m , magnitude absolue M , module de distance μ ainsi que les liens entre ces quantités.
- 3– A partir de la Fig. 3, calculer le rapport L_{\max}/L_{\min} entre les luminosités maximale et minimale de ces céphéides présentées.

Principe de la mesure

- 4– Montrer que, si l'on connaît la magnitude absolue M d'un objet et sa magnitude apparente m mesurée depuis la Terre, alors, on peut calculer sa distance D . On exprimera D en fonction de m et M .

Le principe de la méthode est donc de mesurer d'une part la magnitude apparente, et d'estimer d'autre part la magnitude absolue grâce à la relation PL des céphéides.

Calibration des relations PL

La Fig. 4 montre des résultats obtenus sur un échantillon de 53 étoiles du *Grand Nuage de Magellan* dont on connaît la distance. On y voit clairement une corrélation entre la magnitude apparente $m_{V,I}$ des étoiles dans les bandes V et I et leur période de pulsation P (exprimée ici en jours). On peut constater qu'il s'agit d'une loi affine de coefficients $a_{V,I}$ et $b_{V,I}$, de la forme :

$$m_{V,I} = a_{V,I} \log(P) + b_{V,I} \quad (1)$$

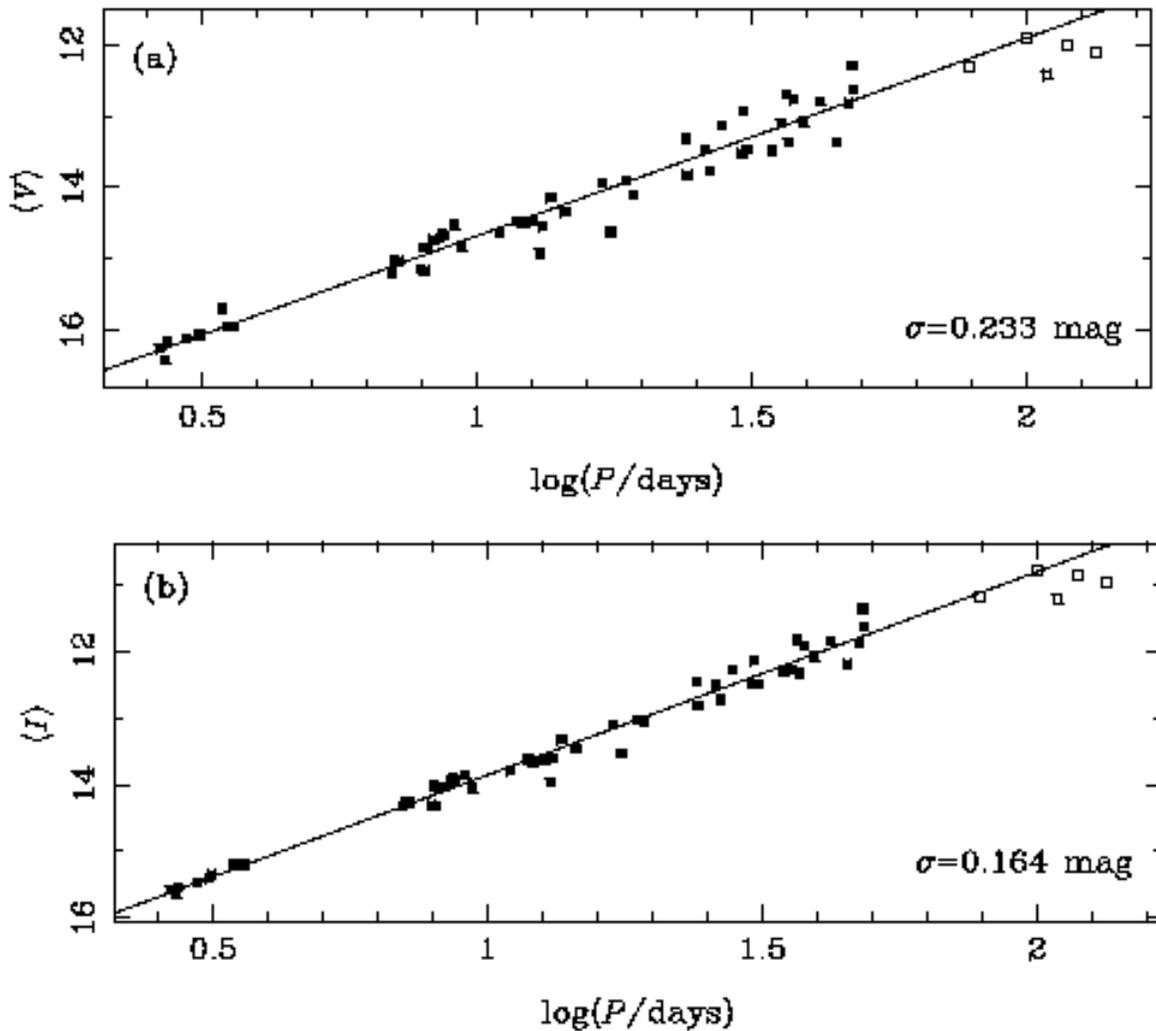


FIGURE 4 – Diagrammes magnitude apparente - période de pulsation dans la bande V (en haut) et I (en bas).

- 5– Pour chacune des deux bandes V et I , calculer les coefficients a et b et en déduire leurs valeurs moyennes. Les étoiles très brillantes oscillent-elles plus ou moins vite que les étoiles peu brillantes ?
- 6 – L'Eq. 1 donne la relation $m(P)$ entre magnitude apparente m et période. À partir de la distance de SN1987A, calculer le module de distance du LMC, et en déduire la relation $M(P)$ des Céphéides, entre leur magnitude absolue M et leur période P ?

Utilisation de la relation Période-Luminosité

Grâce à l'étude de ces 53 étoiles, on a maintenant une calibration de la relation PL. Et elle peut être utilisée pour déterminer la distance d'autres Céphéides. Des mesures sur davantage d'étoiles montrent en fait qu'une relation plus précise est : $M = -2.78 \log(P) - 1.35$ où P est exprimée en jours. C'est celle que nous allons utiliser.

On veut maintenant déterminer la distance de la galaxie M100. Il s'agit d'une galaxie de magnitude environ 10. Au moins 12 Céphéides y ont été observées. Leurs propriétés sont présentées dans la table 1.

Céphéide	P (jours)	$M(P)$?	m	D (Mpc) ?
1	53.3		24.90	
2	47.5		25.40	
3	42.5		25.75	
4	39.0		25.48	
5	31.0		26.43	
6	29.0		26.45	
7	30.5		26.50	
8	27.0		25.73	
9	26.0		26.45	
10	24.5		25.55	
11	24.0		26.28	
12	22.0		26.30	

TABLE 1 – Période (en jours), magnitude apparente, magnitude absolue et distance des 12 Céphéides observées.

- 7 – En utilisant la relation PL calibrée précédemment, calculer la distance de chaque Céphéide.
- 8 – Calculer la distance moyenne et en déduire la distance de M100.
- 9 – Estimer l'écart type de ces distances et en déduire si des positions différentes dans M100 peuvent expliquer ces distances différentes.
- 10 – Quels effets peuvent limiter l'efficacité de cette méthode à petites et grandes distances ?