

Un Univers en expansion

La mesure des distances et des vitesses radiales des galaxies initiée, en particulier, par Edwin Hubble (1929) est à l'origine du concept d'Univers en expansion. Selon cette idée fondamentale, l'Univers résulterait d'un phénomène connu sous le nom de Big Bang, il y a 10 à 20 milliards d'années.

Le mouvement de *récession* (ou éloignement) des galaxies observé par Hubble est la manifestation de l'expansion de l'Univers. Les galaxies s'éloignent de nous (et les unes des autres) à des vitesses *proportionnelles* à leur distance. Le taux d'expansion de l'univers, ou constante de Hubble H_0 (en $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$), relie la vitesse d'expansion v (en km.s^{-1}) à la distance D (en Mpc^1) par la relation :

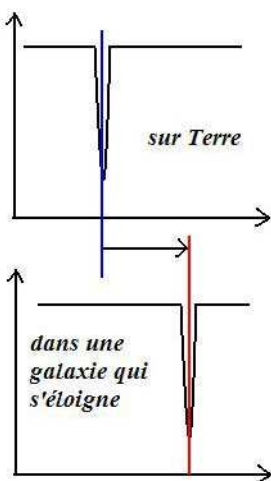
$$v = H_0 \times D$$

L'incertitude sur la valeur de la constante de Hubble est encore grande (H_0 se situe entre 50 et 100 $\text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$) et sa détermination précise constitue un objectif important car cette constante fixe les échelles de temps et de distances dans l'Univers. Par exemple, dans le cas d'une expansion linéaire (i.e. sans inflation), les valeurs extrêmes de H_0 correspondent respectivement à des âges de 20 ou 10 milliards d'années pour l'Univers.

L'objet est ici d'estimer (de manière « grossière ») la valeur de la constante de Hubble.

Mesure de la vitesse de récession des galaxies

Soit une source émettant une lumière de fréquence f et un observateur situé en un point O fixe. Si la source est fixe, l'observateur reçoit la lumière émise avec la même fréquence f . Si la source s'éloigne de l'observateur, la fréquence reçue est inférieure à f . Si la source s'en approche, la fréquence reçue est supérieure à f .



Ainsi pour une source qui s'éloigne en émettant de la lumière visible, les raies caractéristiques d'un élément connu (par exemple le calcium) seront décalées avec le spectre vers les courtes fréquences (le rouge) par rapport aux raies d'absorption de ce même élément mesurées sur Terre. C'est ce qu'on observe pour la grande majorité des galaxies. On peut donc mesurer directement le « décalage vers le rouge » ou « redshift », z , avec la relation

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_0}{\lambda_0}$$

où λ est la longueur d'onde, reliée à la fréquence f par la relation : $\lambda = c / f$ avec c la vitesse de la lumière ($c = 3.10^8 \text{m.s}^{-1}$). λ_{obs} est la longueur d'onde observée pour la galaxie et λ_0 est la longueur d'onde « vraie », c'est-à-dire celle mesurée sur Terre pour l'élément en question.

La vitesse radiale d'une galaxie est alors donnée par la relation $v = c \times z$.

¹ Le parsec (pc) est une unité de longueur adaptée à l'échelle de l'Univers : $1 \text{ pc} = 3.10^{16} \text{ m}$; $1 \text{ Mpc} = 3.10^{22} \text{ m}$.

Mesure de la distance des galaxies par photométrie

On peut mesurer la distance D des galaxies par diverses méthodes. Nous retenons ici la *méthode des supernovae* car les objets étudiés sont très éloignés et on doit donc choisir des sources brillantes. La luminosité maximum des supernovae (notées par la suite SN) de type Ia est la même pour toutes les SNIa, il est donc pratique d'utiliser ces objets. La luminosité absolue L d'une SNIa est, d'après *Allen's Astrophysical Quantities*,

$$L = (1,4 \pm 0,4) \times 10^{36} \text{ Watts}$$

Plus la supernova est loin, moins sa luminosité apparente est importante : on peut ainsi déterminer la distance d'une SNIa en comparant son éclat apparent à la luminosité. Plus précisément, à une distance D de l'étoile, la luminosité se répartit sur une sphère de rayon D et de surface $S = 4\pi D^2$. Par définition, l'éclat apparent E (en W/m^2) à la distance D vaut : $E = L/S$ où L est la luminosité en watts, soit

$$E = \frac{L}{S} = \frac{L}{4\pi D^2}$$

On en déduit donc la distance D de la galaxie,

$$D = \sqrt{\frac{L}{4\pi E}}$$

Echantillon de galaxies

	distance (Mpc)
NGC 34	84,0
NGC 1808	14,2
NGC 3511	15,8
NGC5427	37,4
NGC 691	-

On travaillera ici sur un échantillon de 5 galaxies. Pour déterminer la constante de Hubble H_0 , il faut connaître la distance D et la vitesse v d'éloignement de chaque galaxie.

Détermination de la distance de NGC 691 par photométrie

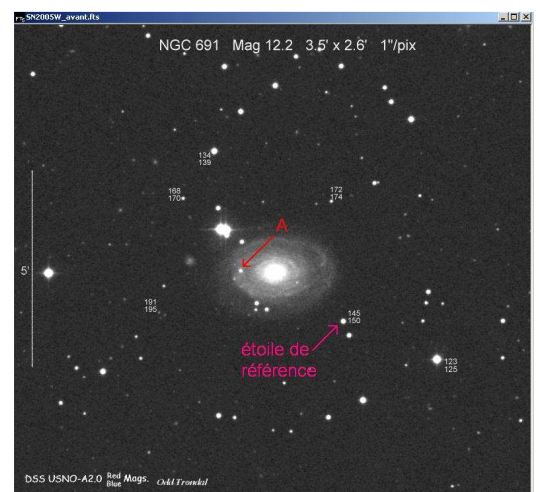
En 2005, une SN de type Ia est apparue dans la galaxie NGC 691. Son nom est SN2005W. Nous allons mesurer la distance de NGC 691 à l'aide de cette SN.

Sur l'image « NGC691_avant.fits », prise avant l'apparition de la SN, on remarque une étoile brillante A à gauche de la galaxie. On souhaite mesurer son éclat apparent.

L'éclat apparent de l'étoile de référence est connu,

$$E_{\text{réf}} = 5.24 \cdot 10^{-14} \text{ W/m}^2$$

→ En déduire l'éclat apparent de l'étoile A à l'aide de l'outil « Photométrie » de SalsaJ.



SN2005W est apparue à proximité de l'étoile A et ces deux étoiles se superposent sur l'image. On ne peut donc pas mesurer leurs intensités séparément.

→ A l'aide du cliché « NGC691_apres.fits », déterminer l'éclat apparent de E_{SN2005W} .

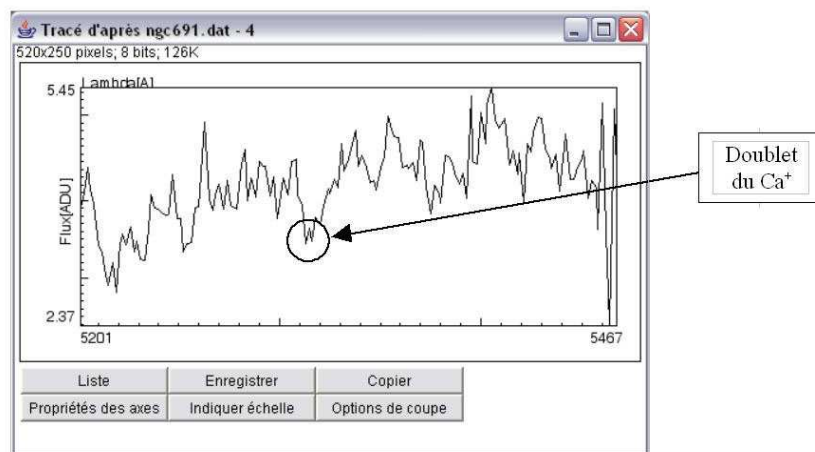
→ La luminosité absolue L de la SN étant donnée, en déduire sa distance.

→ Etant donné l'erreur sur L , en déduire l'erreur sur la distance de NGC 691, $\frac{\Delta D}{D} = \frac{1}{2} \times \frac{\Delta L}{L}$ (le facteur $\frac{1}{2}$ provenant de la racine carrée).

Mesure de la vitesse d'éloignement de NGC 691

Pour mesurer la vitesse d'éloignement de NGC 691, on utilise le décalage spectral de la raie du calcium ionisé une fois (Ca^+). Cette raie est en fait double (deux raies très voisines). Les deux pics de cette raie se situent à $5\,265,557\text{\AA}$ et $5\,270,27\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 1.10^{-10}\text{m}$) quand on les mesure sur Terre.

Pour afficher le spectre, utiliser le module d'analyse « Spectre optique » de SalsaJ et réaliser une coupe.



→ Cliquer sur la première raie (premier « puits ») et relever la longueur d'onde, première colonne du tableau « Résultats » : $\lambda_{\text{obs}} = \dots\dots\dots \text{\AA}$

→ En déduire le décalage vers le rouge z de la galaxie NGC 691 : $z_{\text{ngc691}} = \dots$

En déduire sa vitesse d'éloignement (attention aux unités) : $v_{\text{ngc691}} = \dots\dots\dots \text{km.s}^{-1}$

Mesure de la vitesse d'éloignement des autres galaxies

Pour mesurer la vitesse d'éloignement des galaxies NGC 34, NGC 1808, NGC 3511 et NGC 5427, on utilise une raie plus facilement identifiable qui est la raie $\text{H}\alpha$. Cette raie, quand on la mesure sur Terre, est située à $6\,562,8\text{\AA}$.

Le spectre de NGC 34 est donné par « ngc34.dat ».



On avait trois grandes raies. La raie $\text{H}\alpha$ est celle du milieu.

→ Relever sa position et, comme pour NGC 691, en déduire la vitesse d'éloignement de la galaxie NGC 34 : $v_{\text{ngc34}} = \dots\dots\dots \text{km.s}^{-1}$.

→ Répéter l'opération pour les trois dernières galaxies avec les fichiers « ngc1808.dat », « ngc3511.dat » et « ngc5427.dat ».



NGC 3511 (constellation de la Coupe)



NGC 1808 (constellation de la Colombe)



NGC 17/34 (constellation de la Baleine)



NGC 5427-5426 (constellation de la Vierge)

NB : Les deux galaxies spirales NGC 5426 et NGC 5427 sont de vraies jumelles. Situées toutes les deux à 90 millions d'années-lumière, elles sont aussi quasiment collées l'une à l'autre. Seulement 60000 années-lumière les séparent. Pourtant, elles ne semblent pas déformées par leur attraction mutuelle, comme c'est souvent le cas dans pareille configuration. L'explication, ce cliché obtenu avec le télescope de 8 m Gemini South la fournit aux astronomes : NGC 5427 et 5426 en sont à leur première rencontre. Il y a juste un petit pont de matière visible entre elles. Ce sont les prémices de déformations qui auront bien lieu, mais dans les millions d'années à venir.

Retour sur la loi de Hubble

→ Tracer la vitesse d'éloignement v (km.s^{-1}) des cinq galaxies en fonction de leur distance D (Mpc).

→ Chercher la droite qui s'ajuste le mieux à l'ensemble des points mesurés. La pente de cette droite donne la valeur de la constante de Hubble : $H_0 = \dots\dots\dots \text{km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$.

→ Quel serait l'âge de l'Univers si la vitesse d'expansion était toujours restée constante au cours du temps ? $T = 1/H_0 = \dots\dots\dots$ ans

→ Cette valeur est-elle correcte ? Commenter.

Sources : Hands on Universe² – Jean-Christophe Mauduit et Pacôme Delva

² <http://www.fr.euhou.net/>