AVEC NOS ÉLÈVES

Mesures de distances : les galaxies

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *La distance de la grande nébuleuse d'Andromède (M31) étant connue à partir des étoiles Céphéides (voir le Cahier précédent), nous allons calculer la distance de quelques galaxies lointaines en utilisant la base de données HYPERLEDA. Ce sera l'occasion de mettre en évidence les biais statistiques qui ont si longtemps conduit à des distances extragalactiques erronées. Nous calculerons ainsi la constante de Hubble, ce paramètre qui mesure l'expansion de l'Univers. Nous pourrons même en déduire l'âge approximatif de l'Univers.*

Introduction

Dans le précédent article de cette série, nous avons calculé la distance de M31, la grande galaxie d'Andromède. Nous allons utiliser le résultat obtenu pour aller plus loin encore. Il s'agira d'utiliser la relation dite de "Tully-Fisher" et la méthode des "galaxies sosies", pour mesurer les distances gigantesques que l'on rencontre dans l'univers extragalactique. Nous ferons quelques rappels de ces deux méthodes qui ont été présentées dans des articles précédents (CC 34 et CC 82, respectivement).

Quelques rappels de physique

Il existe un théorème de mécanique qui montre que l'énergie cinétique *T* (énergie interne de mouvement) et l'énergie potentielle *U* (énergie liée à la masse) d'un corps isolé sont étroitement liées. Ce théorème s'appelle le théorème du *viriel* (du latin vis qui signifie la force). Plus précisément, ce théorème s'écrit de la façon suivante (voir l'encadré):

$$2T+U=0$$

Il sera possible de mesurer l'énergie cinétique d'une galaxie par sa rotation ou son agitation interne. Nous en déduirons son énergie potentielle, c'est-à-dire sa masse. Qui dit masse importante, dit luminosité importante. Donc la luminosité sera connue. Il suffira de mesurer l'éclat apparent pour obtenir la distance. Nous allons voir le cas particulier de la relation dite de Tully-Fisher.

Le théorème du viriel

Amusons-nous à retrouver le théorème du viriel dans un cas très simple, celui de deux corps, l'un très petit, de masse *m"*, en orbite autour du plus gros de masse *m'*. Écrivons que la force gravitationnelle entre les deux corps est identique à la force d'inertie (voir le Cours élémentaire numéro XX) est :

$$G\frac{m'm''}{r^2}=m''\frac{V^2}{r}$$

G est la constante de la gravitation universelle qui vaut : (6,6742±0,010) 10^{-11} $m^3.k^{-1}s^{-2}$

En simplifiant par la distance (*r*) entre les deux corps, on fait apparaître : le double de l'énergie cinétique orbitale $m''V^2$; l'énergie potentielle du système des deux corps $-Gm'm''/r$. On a donc bien :

$$2T+U=0$$

La relation de Tully-Fisher

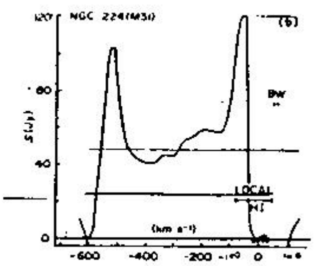
Les galaxies spirales tournent sur elles-mêmes. Leur simple forme le suggère fortement. Une mesure radio le révèle avec une extrême précision. Les galaxies spirales sont riches en hydrogène neutre qui rayonne sur la longueur d'onde 0,21 m, une longueur d'onde gigantesque par rapport aux longueurs d'onde rencontrées en optique classique (la lumière bleue par exemple rayonne à 0,000 000 5 m). Une galaxie spirale émet un flux important à cette longueur d'onde. On détecte ce type d'onde avec un radiotélescope.

Le radiotélescope de Nançay, en Sologne, l'un des plus grands au monde.

Le détecteur permet d'avoir une très grande précision sur la longueur d'onde que l'on observe. Imaginons une galaxie vue par la tranche.

Brent Tully consultant ses mails lors d'un colloque à Lyon, en 1994

La partie droite, par exemple, s'éloignera de nous tandis que la partie gauche se rapprochera de nous. Par effet Doppler-Fizeau, l'émission de la partie droite sera décalée vers les grandes longueurs d'onde tandis que l'émission de la partie gauche sera décalée vers les courtes longueurs d'onde. Notons que la partie centrale de la galaxie émet peu, car l'évolution stellaire y a déjà consommé une bonne partie des réserves d'hydrogène neutre. Le résultat sera donc une émission globale qui se présentera comme on le voit sur la figure ci-dessous, avec deux pics, correspondant à la vitesse maximum de rotation.



Aspect de la raie à 0,21 m pour la galaxie d'Andromède (NGC224). Notez que l'axe horizontal est gradué en vitesse (voir le texte).

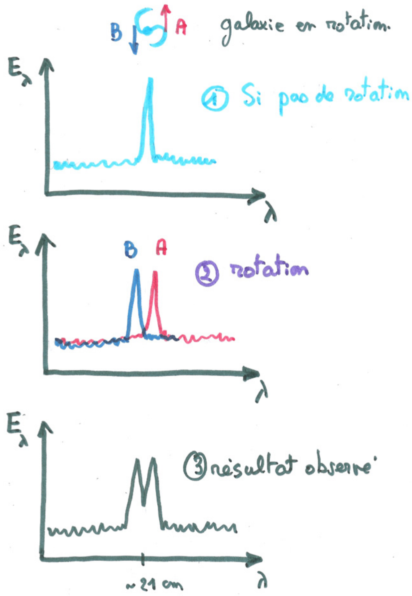


Schéma pour expliquer l'aspect de l'émission à 0,21 m de longueur d'onde d'une galaxie en rotation.

Sur cette figure réelle tirée d'une publication de B. Tully et R. Fisher, on peut noter que l'axe des abscisses est gradué, non pas en "longueur d'onde" mais en "vitesse". La raison est simple à comprendre : par la relation de Doppler-Fizeau, on peut convertir la longueur d'onde observée λ en une vitesse. La valeur λ_o est 0,21m. Ainsi, l'abscisse est plus parlante. La transformation s'écrit donc :

$$v = c\frac{\lambda - \lambda_o}{\lambda_o}$$

L'émission globale de l'hydrogène neutre d'une galaxie est centrée sur la vitesse de fuite de cette galaxie et la largeur du pic d'émission est corrélée à la vitesse de rotation de la galaxie (deux fois la vitesse maximale de rotation), donc à sa masse, en vertu du théorème du viriel. Les mesures atteignent une précision de quelques kilomètres par seconde, on devine l'extrême richesse d'information qu'il y a dans une simple mesure radio faite au radiotélescope.

Le théorème du viriel appliqué à une galaxie spirale donne la relation de Tully-Fisher. En effet, nous avons la possibilité de mesurer la vitesse de rotation par la demi-largeur de la raie d'émission de l'hydrogène neutre. Appelons V_m cette vitesse de rotation. On la désigne ainsi car c'est la vitesse maximale de rotation que l'on détecte. L'énergie de rotation d'une masse m'' à la rotation maximale est donc :

$$T = \frac{1}{2} m'' V_m{}^2$$

L'énergie potentielle de cette même masse *m"* soumise à l'attraction de la masse M_g de la galaxie depuis une distance R_m est :

$$U = -\frac{G M_g m''}{R_m}$$

Nous supposerons que la luminosité est proportionnelle à la masse totale de la galaxie :

$$L = K.M_g$$

On arrive alors à la relation :

$$L = K \frac{V_m^2 R_m}{G}$$

En appliquant la fonction $-2{,}5\log$ qui définit les magnitudes, on arrive alors à la relation de Tully-Fisher, entre la magnitude absolue M et la vitesse de rotation maximum :

$$M = -5 \log V_m + C$$

Si R_m et K sont constants pour une classe de galaxies, alors C est une constante. Cette dernière hypothèse a fait couler beaucoup d'encre. Des auteurs ont montré que C dépendait du type morphologique de la galaxie, du domaine spectrale considéré, de la luminosité totale de la galaxie. La pente de la relation $M=f(\log V_m)$ pouvait être différente de –5. Bref, la relation de Tully-Fisher, solidement établie empiriquement pouvait sembler suspecte. Mais nous allons voir que la méthode des galaxies sosies s'affranchit de toutes ces hypothèses.

La méthode des galaxies sosies

Cette méthode a l'avantage d'être très simple. Elle permet ainsi de mettre en lumière plus facilement les biais statistiques.

Le principe est le suivant. Si nous sélectionnons des galaxies "sosies" de même vitesse de rotation maximum qu'une galaxie de distance connue (galaxie étalon, comme M31=Andromède), ces galaxies auront la même magnitude absolue que M31 en vertu de la relation Tully-Fisher. L'écriture du module de distance pour M31 et pour n'importe quelle autre des galaxies de l'échantillon conduit à (voir l'encadré) :

$$\mu_{M31} = m_{M31} - M_{M31}$$

$$\mu = m - M$$

Nous en tirons le module de distance d'une des galaxies sosie de l'échantillon :

$$\mu = \mu_{M31} + m - m_{M31}$$

Le module de distance sera celui de M31 augmenté de la différence de magnitude apparente.

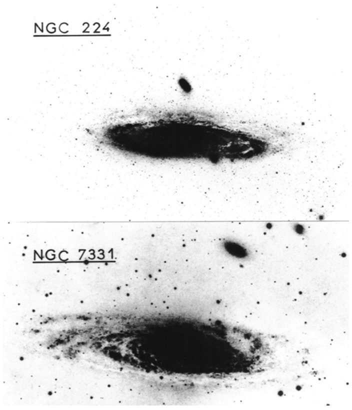
Pour améliorer la robustesse de la sélection on peut imposer que les galaxies sosies aient non seulement le même V_m, mais aussi le même type morphologique, la même inclinaison (ou le même aplatissement apparent). Les galaxies seront ainsi vraiment sosies, au sens visuel, puisqu'elles auront le même aspect sur le ciel.

Module de distance

L'éclat apparent se mesure par la magnitude apparente *m*. La luminosité se mesure par la magnitude absolue *M*. La distance s'exprime à travers le module de distance μ. Entre ces trois quantités on a la relation très simple :

$$\mu = m - M$$

La démonstration détaillée de cette relation est donnée dans le CC34, p4. Donc, la mesure de *m* et la connaissance de *M* (par exemple, par la relation de Tully-Fisher) permettent d'avoir μ, c'est-à-dire la distance.



Exemple de deux galaxies sosies : M31=NGC224 et NGC7331. Elles ont le même aplatissement apparent (inclinaison), le même type morphologique et la même vitesse de rotation.

Application pratique

Passons à l'exercice pratique à faire avec des élèves (niveau de classe terminale). Nous allons utiliser la méthode des galaxies sosies appliquée à la relation Tully-Fisher et pour cela nous allons nous servir d'une base de données en libre accès sur Internet.
Si vous n'avez pas l'adresse, cherchez HYPERLEDA avec un moteur de recherche comme Google. Vous trouverez le site. Là, vous vous orienterez vers le mode d'interrogation SQL (langage standard de questionnement).

Commencez par chercher, pour M31=NGC224, le logarithme de la vitesse de rotation log(vrot) ainsi que sa magnitude apparente (bleue, totale et corrigée) btc.

La requête est simple :

```
select log(vrot) and btc
where
galaxy_name=NGC224
```

Notez les valeurs sur un papier (respectivement btc=3,30 et vrot=245,68) et ensuite calculez directement la constante de Hubble avec la sélection suivante :

```
select
avg(vvir/10^((24.6+btc-3.3-25)/5))
as Ho
where
abs(log(vrot)-2.389)<0.01
and v>500
and v<4000
```

Traduisons ce charabia en français :

sélectionner la moyenne ("average" en anglais) **de : vvir** (vitesse corrigée du mouvement vers virgo) **divisée par la distance en mégaparsec**

$10^{\frac{\mu-25}{5}}$

avec $\mu = \mu_{M31} + m - m_{M31} =$ 24,6+btc–3,3 (méthode des galaxies sosies)

et appeler ce résultat Ho

dans les cas où (where)

- **log(vrot) ne diffère pas de 2,389 de plus de 0,01**

(en mathématiques on dit que : $|\log(vrot) - 2{,}389| < 0{,}01$)

- **et la vitesse radiale v est supérieure à 500 km/s**
- **et la vitesse radiale v est inférieure à 4000 km/s**

Que faut-il conclure des résultats trouvés pour différentes valeurs de la vitesse radiale maximale ?
Il semble que la valeur de la constante de Hubble Ho augmente légèrement.
Si nous recommençons avec une galaxie étalon comme M33=NGC598, l'effet est encore plus net. Simplement, il ne faut pas oublier de remplacer btc=3,3 par btc=5,76 et log(vrot)=2,389 par log(99,89)=2,000. Il faut aussi remplacer le module de distance de M31 par celui de M33, c'est-à-dire remplacer 24,6 par 24,9 (M33=NGC598 est un peu plus distante que M31).

Nous mettons en évidence ainsi ce qu'on appelle un biais statistique. Nous expliquerons l'origine de ce biais dans le prochain article de cette série. Vous comprendrez la subtilité de ce problème qui a fait trouver une constante de Hubble trop grande (et qui contribue très probablement encore à entacher d'erreur les déterminations de distance).

limite V	Ho(M31)	Ho(M33)
2000	53	65
4000	53	77
8000	65	85
12000	68	88
16000	69	89

Pour l'instant, amusez-vous à changer les limites, à imposer des conditions plus strictes, à choisir des galaxies encore moins lumineuses, comme par exemple le Grand Nuage de Magellan (LMC en anglais) dont le module de distance est μ=18,5 et le log de la vitesse de rotation log(vrot)=1,9. Vous devriez voir un biais encore plus évident.

Attention : Pour saisir une valeur décimale dans une requête sur HYPERLEDA, il faut utiliser le point décimal et non pas la virgule.

■