AVEC NOS ELEVES

Mesures de distances : le biais de Malmquist

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *Dans le numéro précédent nous avions expliqué comment vous pouviez déterminer simplement la distance de quelques galaxies et en déduire la constante de Hubble qui mesure l'expansion de l'univers. Nous avions trouvé que cette constante de Hubble semblait augmenter avec la distance. Nous expliquons dans cet article le phénomène, souvent mal compris, qui rend compte de cette variation apparente.*

Bien que figurant dans la rubrique "Avec nos élèves", par continuité avec les articles précédents de cette série, cet article ne constitue pas une application à mettre en œuvre avec des élèves, mais il apporte une information importante pour éclairer les difficultés de la détermination des distances en astronomie.

Pour lire cet article vous aurez besoin de peu de connaissances, mais d'une bonne concentration. C'est un sujet que vous ne trouverez dans aucun livre de vulgarisation car il est encore sous-estimé.

Introduction

Les incertitudes sur la détermination des distances extragalactiques ont causé bien des soucis à bon nombre d'astrophysiciens. L'échelle des distances dans l'univers a été révisée très souvent. Pour comparer globalement les distances trouvées par deux astronomes, pour un échantillon de galaxies, sans être obligé de comparer individuellement les différentes détermination, il y a une façon très simple. Il suffit de comparer la constante de Hubble que trouvent ces deux astronomes. En effet, la constante de Hubble, pour une galaxie particulière, est simplement le rapport de sa vitesse de fuite et de sa distance. Or, il n'y a pas de grosses incertitudes sur les mesures de vitesses de fuite. Le désaccord sur la constante de Hubble ne provient alors que de celui les distances.

Pour vous donner une idée précise des incertitudes, il suffit de se rappeler que la première détermination de la constante de Hubble, faite par Edwin Hubble lui-même, était H≈500 (km/s)/Mpc, alors qu'aujourd'hui on pense que la valeur est comprise entre 75 et 50 (km/s)/Mpc.

Les désaccords ont même fait naître une querelle célèbre entre A. Sandage et G. de Vaucouleurs. Étant jeune, je ne comprenais pas que les protagonistes de cette querelle ne puissent pas se rencontrer pour se mettre d'accord, plutôt que de s'affronter par articles interposés. C'est ce que j'avais illustré par une petit dessin humoristique (sorry, it is in English !).

Un astronome remarquable va permettre de comprendre l'origine de ces désaccords. Il s'agit d'un Finlandais Pekka Teerikorpi. Il a compris que le problème venait de ce qu'on appelle le biais de Malmquist[1]. Pour la vérité historique, le biais a été découvert pour les étoiles en 1920 par un suédois, Gunnar Malmquist (1893-1982), qui voulait déterminer la luminosité moyenne des étoiles. Mais la théorie s'applique aussi aux galaxies. Nous ne ferons pas de calculs, mais nous expliquerons les faits en utilisant le concept des galaxies sosies, vu dans le précédent article de cette série. C'est la façon la plus simple de comprendre ce biais subtil.

---

[1] On a trouvé depuis d'autres biais que le biais de Malmquist. Nous n'en parlerons pas dans cet article.

Pekka Teerikorpi, visitant l'Observatoire de Lyon.

Le diagramme de Spaenhauer

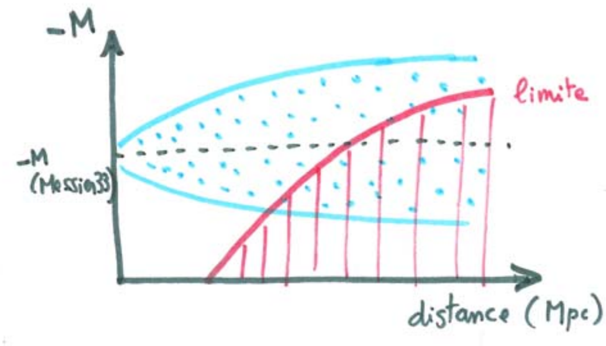
Vous vous rappelez que la méthode des sosies consistait à sélectionner les galaxies spirales, de même vitesse de rotation qu'une galaxie de distance connue (le calibrateur).
En vertu de la relation entre la vitesse de rotation et la luminosité (relation de Tully-Fisher), on s'attend donc à ne sélectionner que des galaxies de même luminosité (de même magnitude absolue).

Mais la réalité est un peu plus complexe. De même que tous les adultes de 50 ans ne mesurent pas tous exactement 1,75m, toutes les galaxies de même vitesse de rotation n'ont pas exactement la même luminosité. On peut même dire plus. Plus l'échantillon considéré est grand, plus il y a de chances que certains éléments s'écartent de la valeur moyenne normale. Pour continuer notre comparaison avec la taille des gens de 50 ans, on peut dire que dans un petit groupe, il y a peu de chance de trouver un adulte anormalement grand ou anormalement petit. En revanche, si nous considérons une population plus importante (par exemple dans notre famille), nous commencerons à trouver des tailles extrêmes (1,50m ou 1.90m). Si nous agrandissons l'échantillon en considérant les gens de notre commune nous commencerons sans doute à trouver des gens de 1,30m ou 2,00m. Pour la France entière nul doute que nous trouverons des gens mesurant 1,20m ou 2,20m. Pour le monde entier nous aurons des cas extrêmes de 1,00m ou 2,30m. Mais nous ne trouverons personne mesurant 0,20 m ou 5m. La distribution des tailles selon le volume de l'échantillon aura la forme de la courbe que nous avons tracée en bleu (Figure ci-après) et qui représente les luminosités des galaxies de même vitesse de rotation. Car, pour les galaxies, c'est la même chose. La taille de l'échantillon se mesure par la distance, puisque le nombre de galaxies augmente comme le cube de la distance (dans un espace peuplé uniformément de galaxies).

La magnitude apparente limite

Avec ce que nous avons dit, il n'y a pas encore de problème pour trouver la constante de Hubble moyenne correcte. En effet, quelle que soit la taille de l'échantillon (c'est-à-dire la profondeur de notre sondage), la valeur moyenne de la luminosité ne sera pas biaisée. Ce sera la valeur constante, $-M$, représentée par une ligne horizontale, en pointillés. Les grandes valeurs compenseront les petites.

Mais nous avons vu (CC116, p 5) qu'un échantillon est caractérisé par sa limite de complétude, m_c. Il s'agit de la magnitude apparente au-delà de laquelle nous n'avons pas toutes les galaxies de l'échantillon, les plus faibles pouvant avoir échappées à nos mesures.
Pour cette magnitude apparente limite, il est possible de tracer la courbe (en rouge sur le diagramme) donnant la limite de visibilité des galaxies en fonction de la distance ($M=m_c-5\log d-25$).



Le diagramme de Spaenhauer, magnitude absolue en fonction de la distance.
Soulignons deux points importants :
1) Nous avons porté –M en ordonnée pour que les galaxies les plus lumineuses soient vers le haut du diagramme (grandes valeurs de –M).
2) La distance n'est pas connue, puisque c'est ce que nous cherchons. Mais nous n'avons besoin que d'une distance relative estimée, par exemple, par la vitesse radiale et une valeur arbitraire de la constante de Hubble.

Les galaxies, en dessous de cette limite, ne seront pas observables. Notre échantillon général sera tronqué par la zone hachurée en rouge.

A votre avis, que va-t-il se passer pour la valeur moyenne de M en fonction de la distance ? Vous l'avez compris, la valeur moyenne de –M va augmenter avec la distance, quand notre échantillon commencera à perdre des objets, car ce seront les objets les moins lumineux (objets les plus bas dans le diagramme) qui disparaîtront en premier.

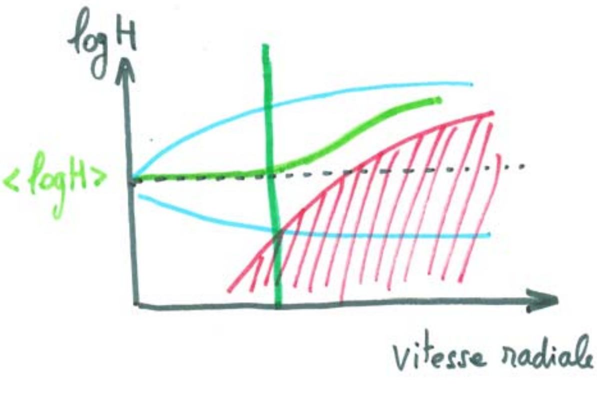
La constante de Hubble

Si, comme nous venons de le dire, la valeur moyenne de *–M* augmente à partir d'une certaine distance, comment va évoluer la constante de Hubble correspondante ?

Quand nous traitons les galaxies de notre échantillon, nous ne savons pas, a priori, si un objet donné est dans la région biaisée, région où *–M* est plus grand que la valeur moyenne vraie <*–M*> (valeur du calibrateur).

Si nous supposons, par ignorance, que toutes les galaxies ont la même magnitude <*–M*> alors que certaines galaxies sont intrinsèquement plus lumineuses (celles de la région biaisée), nous croirons ces galaxies biaisées plus proches qu'elles ne le sont en réalité. On peut le comprendre autrement à partir de l'expression donnant le module de distance (CC116, p 17) : $\mu = m - M$. Pour une même magnitude apparente, si on assigne à *–M* une valeur <*–M*> plus petite que la valeur réelle, la distance sera plus petite. D'une façon comme de l'autre on trouve que les galaxies auront une distance *d* trop petite dans la région biaisée (région hachurée en rouge). La constante de Hubble sera donc trop forte (rappelez-vous : *V=H.d)* dans la région biaisée.

Le diagramme de Spaenhauer construit de manière similaire, *–M* étant remplacé par *logH,* aurait l'aspect suivant pour nos galaxies sosies d'un calibrateur donné.

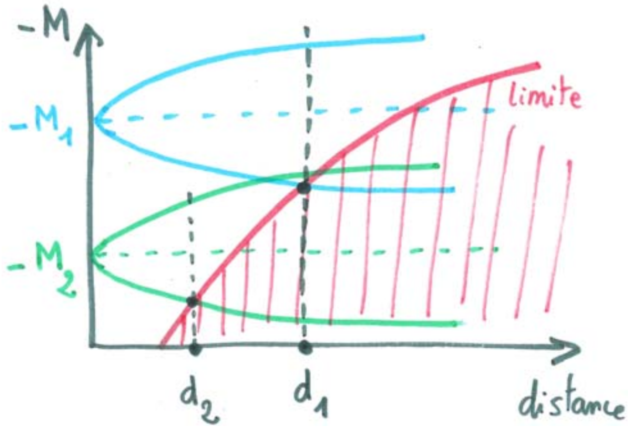


Jusqu'à la limite verticale verte, la moyenne des logH est conforme à la moyenne vraie non biaisée (en pointillés). Au-delà, la valeur moyenne de logH commence par augmenter de manière anormale. C'est bien ce que nous avions constaté sur nos calculs effectués dans le précédent article de cette série.

Il nous reste un dernier point à expliquer. Pourquoi le biais apparait plus tôt quand nous prenons les galaxies sosies d'un calibrateur peu lumineux ? C'est ce que nous avions constaté en utilisant M33 à la place de M31, c'est ce que nous allons expliquer maintenant.

Différence selon le calibrateur

Nous allons redessiner le même diagramme de Spaenhauer mais pour deux calibrateurs différents, l'un beaucoup moins lumineux que l'autre.



Vous voyez immédiatement que les galaxies sosies du calibrateur 2, le moins lumineux (en vert), seront biaisées très tôt, dès la distance d_2. En effet, la courbe (en rouge) donnant la limite des galaxies observables est toujours la même pour un échantillon donné, car elle ne dépend que de la magnitude apparente limite de l'échantillon, et cette courbe intercepte la distribution des galaxies sosies d'autant plus tôt que cette distribution est plus basse dans le diagramme.

A l'opposé, les galaxies sosies du calibrateur 1, le plus lumineux (en bleu), ne seront biaisées que bien plus loin, à la distance d_1.

En conclusion, pour repousser la distance à laquelle le biais commence, il y a tout intérêt à faire appel à des calibrateurs très lumineux, comme la galaxie d'Andromède. Il vaut mieux éviter les petites galaxies naines, comme les "Nuages de Magellan".

Nous parlerons ultérieurement d'autres biais qui peuvent affecter la détermination des distances en astronomie.

■