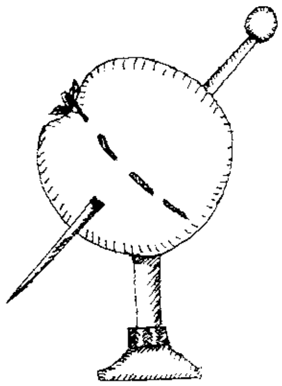


TRAVAUX PRATIQUES

la méthode des galaxies sosies

Georges Paturel *Observatoire de Lyon*

En 1986 nous avions rédigé un article dans le numéro 34 des CC sur la méthode de Tully-Fisher, une méthode puissante pour mesurer la distance des galaxies. Cet article était présenté sous la forme d'un travail pratique. Nous nous proposons de récidiver dans ce genre. Cependant pour rajeunir notre article nous utiliserons les résultats récents qui viennent de « tomber » de l'espace et les outils modernes qui font le régal de tous les jeunes surfeurs d'internet.

Nous rappellerons brièvement ce qu'est la relation de Tully-Fisher et nous présenterons la méthode que nous allons appliquer : la méthode des galaxies sosies[1]. Nous donnerons ensuite le moyen d'extraire les données par INTERNET et nous conclurons par le calcul de la constante de Hubble, histoire d'estimer l'âge de notre univers.

Magnitudes et module de distance

Avant de vous parler de la relation de Tully-Fisher je voudrais introduire les notations utilisées par les astronomes. Ces notations nous seront utiles. Faisons donc le petit détour. Les astronomes du temps jadis avaient classé les étoiles en différentes « grandeurs ». Une étoile de première grandeur était une étoile d'éclat très important, une étoile de sixième grandeur était à peine visible. La grandeur d'une étoile était estimée à l'œil (mais aussi gratuitement). Les astronomes du temps présent possèdent de puissants instruments capables de mesurer l'éclat vrai en unités physique sonnantes et trébuchantes (c'est-à-dire en $W.m^{-2}$). Par respect pour les anciens, ces astronomes modernes ont voulu retrouver la gradation des anciens et ils ont défini les magnitudes apparentes comme :

$$m = -2{,}5 \log_{10} E + k$$

où k est une constante fixée par convention. Le signe moins sert à traduire le fait que la « grandeur » varie en sens opposé de l'éclat (je ris en pensant au Roi Soleil). Quant au logarithme, il résulte d'une loi d'un physiologiste allemand, K. Fechner qui a énoncé : nos sensations varient comme les logarithmes des excitations. C'est la raison pour laquelle la plupart des sensations sont mesurées en échelle logarithmique : la puissance d'un son en décibels, la puissance d'un tremblement de terre en « force sur l'échelle de Richter », l'acidité en pH etc...

Je me permets de glisser un commentaire personnel : heureusement que nous ne percevons que le logarithme des bruits sinon ce serait assourdissant...

La magnitude apparente ne nous renseigne qu'imparfaitement sur la distance de la source lumineuse (étoile ou galaxie). Certes l'éclat E varie bien comme l'inverse du carré de la distance (une étoile donnée placée deux fois plus loin par une main divine aurait un éclat quatre fois moindre) mais toutes les sources lumineuses n'ont pas la même luminosité intrinsèque. Dans le noir, vous ne pourriez pas dire si une source lumineuse est proche ou non. Vous devez savoir si la source est une lampe de poche ou un projecteur de DCA placé très loin. Pour caractériser la luminosité intrinsèque, les mêmes astronomes ont inventé la magnitude absolue M qui n'est autre que la magnitude apparente qu'aurait la source si elle était placée à une distance donnée de 10 parsecs (1parsec = 3,26 années-lumière = 3×10^{13} km). Si la magnitude absolue est connue alors la distance nous est donnée par la magnitude apparente.

La relation est simple :

$$\mathbf{m - M = 5 \log_{10} r + 25}$$

ou inversement

$$\mathbf{r = 10^{0.2\,(m\ -M\ -\ 25)}} \quad \mathbf{(1)}$$

où r est la distance exprimée en millions de parsecs ou mégaparsecs (Mpc). Cette relation est très facile à démontrer à partir de la définition des magnitudes apparentes et absolues et de la loi qui dit que l'éclat varie comme l'inverse du carré de la distance r. Si vous n'y parvenez pas reportez-vous aux CC34.

En conclusion, tout le problème de la détermination des distances astronomiques revient à déterminer M. En effet, m étant mesurable, m - M donne une fonction de r parfaitement définie. D'ailleurs, pour vous prouver que m -M est bien équivalent à la distance, les astronomes ont appelé m - M le module de distance et ils l'ont noté μ (ça, c'est une preuve !). Oui, mais : comment déterminer M ? Vous l'avez deviné... Grâce à la relation de Tully-Fisher.

La relation de Tully-Fisher TF

Brent Tully n'est pas un astronome du temps jadis. C'est un astronome encore en exercice. Avec son collègue R. Fisher il a trouvé empiriquement une relation très simple entre la magnitude absolue M et une quantité mesurable : la largeur de la raie 21 cm. Nous allons expliquer en deux mots d'où vient cette relation. Pour la petite histoire et pour la vérité historique une forme équivalente de la relation avait été employée avant Tully et Fisher par des astronomes que vous connaissez bien : L. Bottinelli, L. Gouguenheim et J. Heidmann. Et le concept de base avait été compris encore avant par un astronome américain M.S. Roberts. Mais l'histoire des sciences est ainsi faite qu'elle attache souvent à un ensemble de travaux les noms de ceux qui les ont épurés pour en tirer une forme simple.

Les galaxies spirales tournent sur elles-mêmes. Si elles étaient vues par la tranche, un côté s'éloignerait de nous tandis que l'autre côté s'en rapprocherait. Une émission monochromatique apparaîtra plus large que si la galaxie n'avait pas de rotation, effet Doppler-Fizeau oblige. Pour une galaxie vue sous un angle quelconque, il faudra faire une correction d'inclinaison moyennant quoi la largeur de cette émission nous renseignera sur la vitesse de rotation. Or l'hydrogène neutre localisé dans le disque des galaxies émet justement une radiation monochromatique sur une longueur d'onde de 21 cm observable en radioastronomie. La largeur de cette raie d'émission nous renseignera donc sur la vitesse de rotation de la galaxie considérée, c'est-à-dire sur son énergie cinétique interne.

Or, par les bienfaits des lois de la mécanique (théorème du viriel), l'énergie cinétique est directement corrélée à l'énergie potentielle, c'est-à-dire à la masse de la galaxie considérée. Je résume pour ceux qui n'auraient pas suivi, la largeur de la raie 21 cm est reliée à la masse de la galaxie (à une correction d'inclinaison près). Mais ! me diront les gens qui savent qu'une grosse lampe éclaire plus qu'une petite, si la masse est grande la luminosité intrinsèque doit être grande aussi. Eh bien oui. Pour une étoile, et plus généralement pour une galaxie donnée, il y a une relation quasi directe entre la masse et la luminosité. Ainsi, pour prendre un exemple : une galaxie spirale a un rapport masse sur luminosité de 10 (unités solaires) et une galaxie elliptique a un rapport de 40.

Je résume encore une fois pour ceux du fond qui n'écoutent pas : la largeur de la raie 21 cm nous donnera la luminosité à condition que l'on sache corriger l'effet d'inclinaison et que l'on sache quel rapport masse-sur-luminosité adopter. Cette relation entre largeur 21 cm et luminosité, c'est justement la relation de Tully-Fisher. On l'écrit généralement sous forme logarithmique chère aux astronomes comme une relation linéaire entre la magnitude absolue M et la vitesse de rotation :

$$\mathbf{M = a \log_{10} V_m + b}$$

où a et b sont deux constantes et où V_m est la vitesse de rotation déduite de la largeur de la raie 21 cm proprement corrigée de l'inclinaison. On ne sait pas trop si a et b dépendent du type morphologique de la galaxie. Ils le devraient, car le rapport masse-sur-luminosité dépend du type morphologique. Mais nous allons voir que ce débat ne nous intéresse pas. C'est là le miracle des galaxies « saucisses ». Toutes ces incertitudes vont disparaître comme par enchantement. C'est ce que nous allons expliquer maintenant.

Les galaxies sosies

Vous ne l'avez peut-être jamais réalisé mais pour mesurer une longueur il faut avoir une règle étalonnée. Il en va de même pour mesurer la distance des galaxies. La règle de référence sera la distance de l'une des galaxies proches, si proche que sa distance aura pu être mesurée (disons en parsecs) grâce à l'étude de son contenu stellaire (les étoiles variables Céphéides par exemple).

Le satellite HIPPARCOS est parti à bord de la fusée Ariane en 1989. Les résultats sont tombés très récemment (Janvier 1997) : la galaxie d'Andromède (alias Messier 31 ou M31) se situerait à la respectable distance de 0,942 Mpc, 3 millions d' années-lumière ou, dit en logarithme, à un module de distance de $\mu_{M31} = 24{,}87$. Cette révision, si elle est confirmée, est déchirante. Toute mon enfance avait été bercée par le chant de ma grand-mère qui me répétait qu'Andromède avait un module de distance de 24,4 (2,5 millions d'années-lumière). Que voulez-vous ! Tout fout le camp, surtout les galaxies !

Bref, nous avons notre règle étalonnée, reste à comparer les distances des galaxies lointaines à cet étalon. C'est ce que va nous permettre de faire la relation de Tully-Fisher et la méthode des « saucisses ».

Si nous choisissons des galaxies lointaines ayant la même inclinaison que celle d'Andromède, le même type morphologique que celui d'Andromède et la même vitesse de rotation que celle d'Andromède, la relation de Tully-Fisher nous dit ipso-facto que ces galaxies ont la même magnitude absolue qu'Andromède. Point n'est besoin de savoir corriger de l'inclinaison (elle est la même). Point n'est besoin de savoir si le rapport masse sur luminosité dépend du type morphologique de la galaxie (il est le même). Point n'est besoin... (Cette redondance oratoire me rappelle la formule célèbre de notre ami Victor Tryoën : « la répétition fixe la notion »). Je résumerai simplement en disant que tout étant pareil, tout est pareil, y compris la magnitude absolue. Absolument !

Ecrivons alors le module de distance d'Andromède (que nous désignerons par M31) et faisons de même pour une galaxie lointaine :

$$\mu_{M31} = m_{M31} - M_{M31} \text{ et}$$
$$\mu = m - M.$$

Par différence entre ces deux relations, on trouve (en se rappelant que $M_{M31} = M$) :

$$\mu = \mu_{M31} + m - m_{M31} \quad (2)$$

Nous voyons donc que la distance de notre galaxie lointaine est égale à la distance de M31 augmentée de la différence des magnitudes apparentes (que l'on sait mesurer). Tout simple.

Bon alors au travail !

La sélection des galaxies sosies d'Andromède

Pour sélectionner les sosies d'Andromède, nous puiserons dans une base de données gigantesque : la base LEDA. 160 000 galaxies y sont enregistrées avec leurs principaux paramètres observés : magnitude, vitesse, largeur 21 cm, inclinaison, type morphologique et j'en passe. Nous pouvons nous connecter sur cette base via internet. Pour cela lançons un programme pour « surfer sur internet » (ce qu'on appelle un « browser ») sur notre ordinateur personnel relié au réseau par un « modem » après avoir contracté un abonnement chez un « provider » (voir figure 1).

www-obs.univ-lyon1.fr/leda/leda-consult.html

Tapons alors l'adresse « WEB » noter qu'une telle adresse est moins charmante que par exemple: Mlle. LEDA, Hameau du bois-joli 42000 Bellevue mais c'est ainsi... bref,

Nous obtenons la page web de LEDA et là nous choisissons la consultation de la base par le langage SQL(java). Tout simple il suffit de cliquer avec une souris. La sélection s'obtient ainsi :

```
SELECT
btc,vlg
WHERE
abs(t-3)<1 and abs(logr25-0.48)<0.05
and abs(w20-536)<50 and vlg>500
END
```

Donnons quelques explications pour rendre compréhensible ce langage ésotérique.

Nous voulons sélectionner la magnitude en couleur bleue (c'est la plus commune actuellement), totale (on veut toute la lumière) et corrigée de l'extinction galactique. Cette magnitude est notée « btc » (pour bleue, totale, corrigée). Nous voulons aussi la vitesse radiale de la galaxie, ce qu'on appelle la vitesse de fuite (cette vitesse nous servira ultérieurement pour calculer la constante de Hubble). Nous choisirons la vitesse rapportée au centre du groupe de galaxies locales (ce qu'on appelle le Groupe Local), d'où la désignation « vlg » pour vitesse par rapport au groupe local.

Cette sélection se fait avec la phrase : SELECT btc,vlg. Jusque-là ça va !

Mais cette sélection ne doit être faite que pour les galaxies répondant à la bonne définition de sosies. Nous avons quelques explications à donner. Accrochez-vous !

- Le type morphologique est codé selon la méthode de G. de Vaucouleurs, de -5 pour les galaxies elliptiques à 10 pour les galaxies irrégulières en passant par 3 pour les galaxies comme Andromède. Or, nous voulons les galaxies « comme » Andromède (à peu près). Donc nous voulons que le code, noté « t » soit compris entre 2 et 4. C'est ce qu'on écrira : abs(t-3)<1. Pour les non matheux, disons que cela signifie que t ne diffère pas de 3 de plus d'une unité.

- Parlons maintenant de l'inclinaison. Une galaxie vue de face a un contour à peu près circulaire. Une galaxie vue sous un angle d'inclinaison quelconque aura un contour en forme d'ellipse. Le rapport des axes de cette ellipse (a / b ou b / a) nous renseignera sur l'inclinaison. Dans la base de données, ce rapport d'axes est donné en échelle logarithmique et est noté « logr25 » (je pourrais vous expliquer pourquoi mais vous le trouverez dans la documentation de LEDA). Pour Andromède logr25 = 0.48 ± 0.2. Pour obtenir les galaxies ayant la même inclinaison que Andromède, nous dirons donc comme précédemment :

  abs(logr25 - 0.48) < 0.05.

- Enfin pour sélectionner les galaxies qui tournent à la même vitesse qu'Andromède (c'est-à-dire qui ont la même largeur 21 cm, notée w20) nous écrirons de même : abs(w20 - 536)<50 (ce sont des kilomètres par seconde).

Comme nous voulons que les trois conditions soient réunies, nous écrirons donc bien :

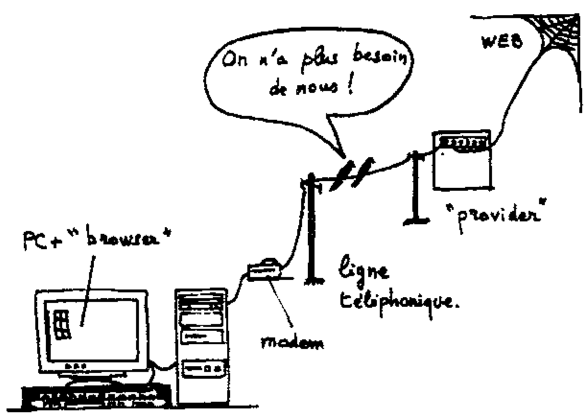
abs(t-3) < 1
and abs(logr25 - 0.48) < 0.05
and abs(w20 - 536) < 50

Le résultat est que notre sélection (SELECT) sera faite là où (WHERE) les trois conditions seront remplies. C'est fini (END).

Après une courte réflexion la machine vous dit : 16 galaxies sélectionnées et vous obtenez les « btc » et les « vlg » que je vous donne ci-dessous. Sachant que la magnitude btc d'Andromède est btc = 3.11 et que contrairement à ce que me disait ma grand-mère son module de distance sera pris égal à μM31 = 24.87, vous n'aurez qu'à appliquer la formule (2) (dans laquelle les magnitudes apparentes seront les btc) et vous aurez le module de distance pour chacune des galaxies. Vous pourrez en déduire la distance en mégaparsecs (formule (1)) pour chacune des galaxies et ensuite... patience... .

Si nous voulons calculer les distances des galaxies ce n'est pas pour aller y passer des vacances. Notre objectif pourrait être par exemple de tester la loi de Hubble qui nous dit que la vitesse de fuite d'une galaxie est d'autant plus grande que sa distance est grande. C'est la fameuse loi de Hubble (voir l'encadré : La loi de Hubble et l'âge de l'Univers) : V=H.r

Figure 1 : Connectez-vous
(ou l'abandon des pigeons voyageurs)



Le calcul final (table 1) conduit à une valeur moyenne $H = 62 \pm 3$ km.s^{-1}.Mpc^{-1}.

L'âge de l'univers, estimé par l'inverse de la constante de Hubble (voir l'encadré), est alors de 16 Milliards d'années (le calcul est facile à faire, il suffit de savoir que 1 pc = 3, 26 a.l.). Cependant on peut se demander quelle serait la constante de Hubble et l'âge de l'univers si ma grand-mère avait raison (elle prétendait que M31 était situé à 2, 5 millions d'a.l. et non à 3, 0 millions d'a.l.). La constante de Hubble serait simplement 74 km.s^{-1}.Mpc^{-1} et l'âge de l'univers serait de 13 Milliards d'années. Cette valeur est un peu faible pour être compatible avec l'âge des étoiles les plus vieilles.

NDLR : On relira à ce propos l'article de L. Gouguenheim "la constante de Hubble et l'âge de l'Univers" (CC76).

Note

(1) "sosies" n'a pas d'équivalent en anglais. La traduction la plus proche serait "look alike". Pour faire smart n'oubliez pas qu'en anglais "sosies" se prononce "saucisse". Ce sera tout bon.

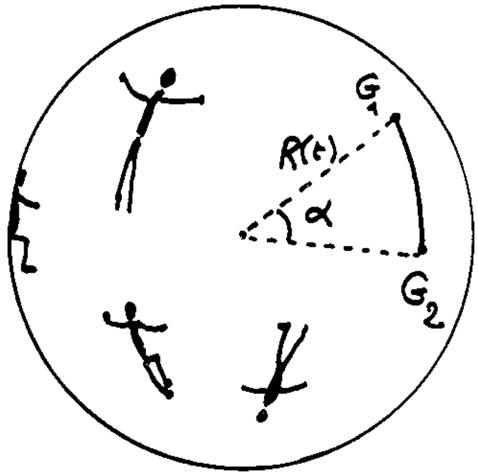
TABLE 1 :

btc	vlg km.s^{-1}	μ	r Mpc	H=vlg/r km.s^{-1}.Mpc^{-1}
3.11	-13.	24.87	0.94	-
12.77	5039.	34.53	80.54	63
12.21	5451.	33.97	62.23	88
13.64	8438.	35.40	120.23	70
12.19	3678.	33.95	61.66	59
13.25	5318.	35.01	100.46	53
13.21	4848.	34.97	98.63	49
11.46	2281.	33.22	44.06	52
12.77	6172.	34.53	80.54	77
11.71	2538.	33.47	49.43	51
13.95	8185.	35.71	138.68	59
14.27	6945.	36.03	160.69	43
13.84	7077.	35.60	131.83	54
13.17	6635.	34.93	96.83	69
13.17	6895.	34.93	96.83	71
14.57	12520.	36.33	184.50	68
				$62 \pm 12 / \sqrt{15}$

La loi de Hubble et l'âge de l'Univers

Si nous étions plats et si notre Univers était la surface d'une sphère, la distance entre deux galaxies G_1 et G_2 serait :

$$r = \alpha . R$$



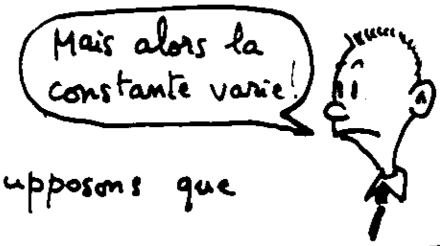
Si R variait avec le temps la vitesse entre G_1 et G_2 serait :

$$V = \frac{dr}{dt} = \alpha . \frac{dR}{dt} = \alpha . \dot{R} = \frac{r}{R} . \dot{R}$$

d'où

$$\boxed{V = H . r} \quad \text{avec} \quad H = \frac{\dot{R}}{R}$$

c'est la loi de Hubble. H est la constante de Hubble.



Si maintenant nous supposons que

$R(t) = a . t$ alors

$$H = \frac{\dot{R}}{R} = \frac{a}{a.t} = \frac{1}{t}$$

t est le temps que l'Univers a mis pour atteindre le rayon R. c'est l'âge de l'Univers.

$$\boxed{t = \frac{1}{H}}$$