Avec les Profs - le 5 janvier 2020

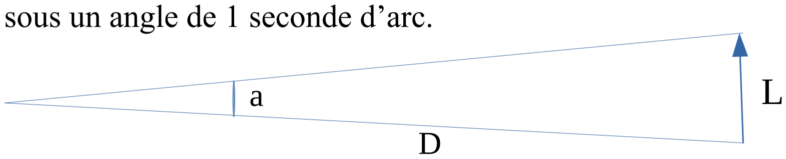
Simulation de la relation Période-Luminosité des Céphéides

G. Paturel, g.patu@orange.fr

Le but est de montrer que l'on peut déterminer la distance d'un objet inaccessible en utilisant une relation physique. Pour cela nous simulons des Céphéides (étoiles dont l'éclat varie avec une période fonction de leurs propriétés intrinsèques) par des pendules simples de longueurs quelconques.

Prérequis

Longueur apparente : C'est l'angle sous lequel on voit la longueur. Les astronomes ont utilisé la seconde d'arc. La distance de 1 parsec est la distance sous laquelle on voit une l'unité astronomique (150 Mkm) sous un angle de 1 seconde d'arc.



Magnitude et logarithme : L'éclat apparent d'une étoile est mesuré dans une échelle logarithmique. C'est une façon de mesurer qui cherche à faire le lien avec les observations historiques faites à l'œil nu (et donc dans une échelle naturellement logarithmique). Les propriétés des logarithmes simplifient beaucoup les calculs (les multiplications ou les divisions sont transformées en additions ou soustractions. Les puissances sont transformées en multiplications). Comme les lois physiques sont souvent des lois de puissances, les représentations graphiques sont ainsi représentées par des droites (on dit qu'elles sont « linéarisées). Nous utiliserons ici les logarithmes en base 10, mais les propriétés sont les mêmes (sauf mention spéciale) en népérien.

log (a.b) = log a + log b   log (a/b) = log a – log b   log(a^b) = b. log a $a=10^{(\log a)}$

Relation inverse : a = 10 $^{\log(a)}$ (En base « e » la relation est : a = $e^{Ln(a)}$)
Propriété importante : log(1) = 0
Exemple d'application à la loi du pendule simple

$$P=2\pi\sqrt{\left(\frac{L}{g}\right)}=2\pi\left(\frac{L}{g}\right)^{-1/2}\Rightarrow$$

$$\log(P)=\log(2\pi)-0.5\log(g)+0.5\log(L)$$

$$\log(P)=A+B\log(L)$$

Le Principe

Des pendules simples simuleront des étoiles variables dont l'éclat oscille régulièrement.
On place un premier pendule à une distance très faible (de l'ordre de 1 m) pour qu'on puisse la déterminer par la méthode des parallaxes. Ce sera la représentation d'une Céphéides de notre Galaxie. Trois pendules seront placés, ensuite, à une même distance, assez grande (3 à 4 m). Ce seront les Céphéides d'une même galaxie proche. Enfin nous placerons un dernier pendule plus loin (6 à 7 m), simulant une étoile Céphéide « cosmologique » très lointaine dont nous cherchons à déterminer la distance. Au début de l'exercice, nous ne connaissons pas ces distances.

Nous nous mettrons dans la peau de l'astronome, qui ne peut pas approcher les objets qu'il étudie. Une photographie nous donnera la possibilité de mesurer la longueur apparente des pendules. Les périodes d'oscillation peuvent être mesurées sans s'approcher des pendules.

Les définitions des pro's

Nous appellerons "*magnitude apparente*" m le logarithme de la longueur apparente **a** du pendule dans une unité arbitraire (par exemple la longueur sur la photo en mm) : **m=loga**. La longueur apparente varie comme l'inverse de la distance :

$$\mathbf{a= L/D}$$

(L et D en unités de longueur). Donc :

$$\mathbf{m = loga = log\ L – logD}$$

Nous définirons la "*magnitude absolue*" M comme étant la magnitude apparente à une distance arbitraire de une unité

$$\mathbf{M = \ log\ L–log(1) \ = \ log\ L}$$

A_0 est la longueur vraie du pendule (le L des prérequis).

Nous avons donc la relation : m=M−logD. Nous pourrons poser **μ = –logD = log(1/D)** et désigner cette quantité comme étant le "*module de distance*", car sa connaissance nous donne la distance D. Nous avons donc la relation simple :

$$\mu = \mathbf{m - M} \qquad (1)$$

Pour trouver la distance (c'est-à-dire **μ**), il faut deviner M. Nous allons voir que c'est possible grâce à la physique.

Les mesures

Comme on l'a vu, **a** désigne les longueurs apparentes des pendules en unités arbitraires (mesure sur une photo, en mm par exemple). P désigne les périodes d'oscillation.
Nous utiliserons la relation (1) en nous rappelant que :
m = log(a)
μ = – log(D) = log(1/D)

Application

Nous mesurons les hauteurs apparentes **a** de tous les pendules, sur la photo. Nous les avons mesurées en mm (l'unité importe peu ; nous aurions pu les mesurer en inchs, ou en pieds !) ; l'échelle de la photo n'a pas d'importance. **Nous en déduisons les magnitudes apparentes m.**

Nous mesurons aussi toutes pour les périodes P en secondes **pour avoir les logP.**

Pour les trois « Céphéides extragalactiques » nous traçons le graphique de m en fonction de logP. On détermine A et B de la relation linéaire :

$$\mathbf{m = A \ \ log\ P \ + \ B} \qquad (2)$$

Pourquoi cette relation empirique marche-t-elle ? La pente est-elle à peu près conforme à la théorie ?

Il ne reste plus qu'à calibrer (2) avec la Céphéide galactique et trouver la distance de la galaxie proche et de la Céphéide cosmologique. **Nous comparons alors les distances calculées à celles qu'il fallait trouver !**

Réponse aux questions
Les Céphéides extragalactiques sont dans une même galaxie extérieure à notre Galaxie, donc à la même distance pour l'observateur (La taille de la galaxie en question est négligeable comparée à la distance de la galaxie elle-même). Donc m = M + cste.
La relation trouvée relie donc deux propriétés intrinsèques des Céphéides, mais à une constante B près. La pente A doit être de l'ordre de 2 pour la relation m= A logP + B (ou 0,5 pour la relation logP = A' m + B' ; ce qui serait conforme aux prérequis donnés en introduction).
Pour la céphéide galactique dont la distance est connue, nous appliquons la même relation pour déterminer la constante B (ou B'). Ainsi la relation donnant M = A logP + B est connue complètement et nous pouvons l'appliquer à toute céphéide, car les lois de la physique sont supposées être les mêmes dans tout l'Univers. On déduit ainsi la distance de la galaxie proche à partir des trois Céphéides qu'elle contient et celle de la galaxie à distance cosmologique contenant une céphéide.

La correction est donnée dans un tableur.

Petit rappel historique

Une petite forme brillante, le Grand Nuage de Magellan (LMC), apparaît très proche de notre Voie Lactée, comme un morceau qui s'en serait détaché. En 1913, Miss Leavitt étudie les étoiles Céphéides du LMC. Elles sont faciles à identifier, car leur éclat varie de manière cyclique. Elle a rassemblé beaucoup de mesures et pour les classer, elle les range par magnitude apparente croissante. Elle découvre qu'elles sont alors classées selon leur période. Comme, toutes ces étoiles sont dans le LMC, et donc toute approximativement à la même distance de nous, cette relation est donc une relation intrinsèque générale entre la magnitude absolue et la période.

Dans notre Voie Lactée, l'étoile *delta_Céphée*, est assez proche pour qu'on ait pu mesurer sa distance par triangulation. C'est une technique difficile, car il faut mesurer un angle inférieur à 1 seconde d'arc (angle sous lequel on voit une pièce de monnaie de 2 cm de diamètre à plus de 4 km). Néanmoins la distance de *delta_Céphée* va servir à calibrer la relation Période-Luminosité de Miss Leavitt.

Edwin Hubble, à partir de 1925, parvient à détecter des Céphéides dans des objets flous observés dans le ciel (on appelle ces objets des nébuleuses). Il applique la relation de Miss Leavitt, calibrée par Harlow Shapley, et trouve que ces nébuleuses sont en dehors de notre Voie Lactée. On comprend vite que ces nébuleuses sont des galaxies, semblables à notre Voie Lactée, mais très éloignées. Le Nuage de Magellan est une galaxie naine, voisine de notre Voie Lactée, qui est désormais appelée notre Galaxie, avec un grand G,

Aujourd'hui, grâce aux observations spatiales, on peut mesurer des angles de l'ordre d'une micro seconde d'arc (10^{-6} seconde d'arc).
Par ailleurs, ces mêmes observations spatiales, permettent aujourd'hui d'observer des Céphéides dans des galaxies très lointaines, soumises à l'expansion de l'Univers.

On peut dire que la vision de notre Univers a changé grâce à ces progrès fantastiques. Notre Galaxie n'est qu'une galaxie parmi des centaines de milliards d'autres.

Miss Leavitt ***src : wikipedia***