

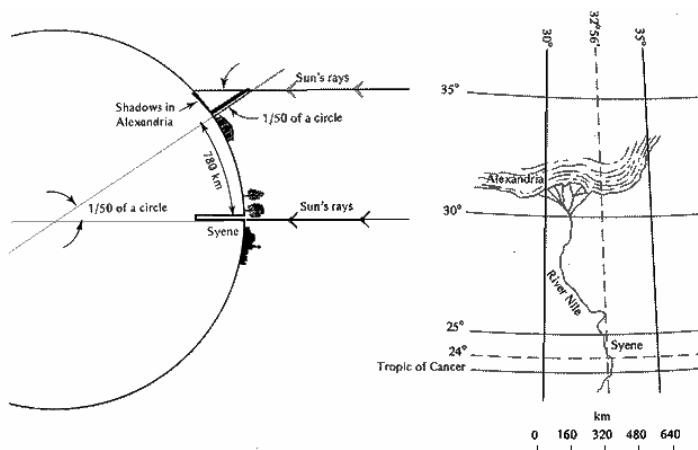


JOURNÉES NATIONALES A.P.M.E.P. GÉRARDMER 3-6 novembre 1999

Conférence 3 LES NOMBRES ASTRONOMIQUES Mesure des distances dans l'Univers Vincent LÉCUYER

Vers 200 avant J.C., Ératosthène (284-192 avant J.C.), alors bibliothécaire de la mythique Bibliothèque d'Alexandrie, remarqua que, le même jour, les rayons du Soleil éclairaient le fond d'un puits situé à Syène, alors que les obélisques d'Alexandrie avaient une ombre, le Soleil étant au plus haut dans ces deux villes.

Il en conclut tout d'abord que le Soleil devait être très éloigné de la Terre, et que celle-ci devait être ronde. La distance entre Syène et Alexandrie était bien connue des caravaniers, il l'estima à environ 780 km (en unités de l'époque). La mesure qu'il fit de l'ombre portée des obélisques lui permit de dire que cette distance représentait environ 1/50 de la circonférence de la Terre. Le calcul qui s'ensuivit lui donna une estimation de cette circonférence dont la précision est encore étonnante :



$$50 \times 780 = \mathbf{39\ 000\ km}$$

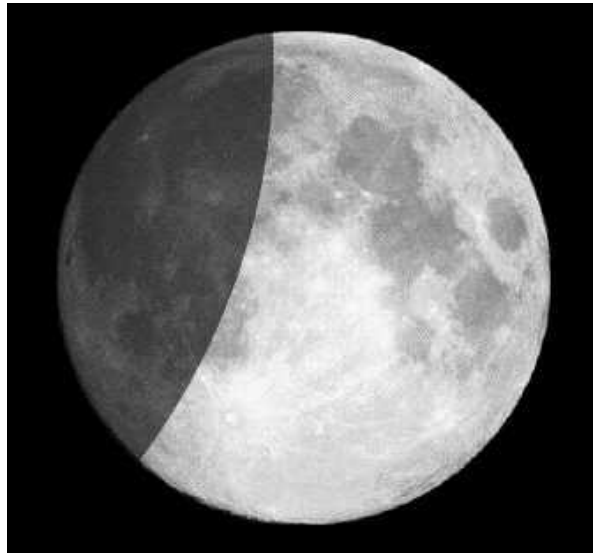
Le calcul d'Ératosthène est certainement l'un des premiers calculs de cosmographie de tous les temps, et repose sur une observation et une hypothèse, largement confirmée par la suite.

Nous allons voir comment, avec des moyens modernes aussi bien qu'avec des moyens modestes, il est possible de mesurer certains de ces nombres "très grands" que l'on qualifie de Nombres Astronomiques.

I. La Terre et la Lune

Comme beaucoup d'autres connaissances de l'antiquité, le calcul et les conclusions d'Ératosthène furent oubliés en Occident pendant des siècles. Il fallut attendre 1492 et Christophe Colomb pour voir renaître cette idée d'une Terre ronde. De nos jours, nous disposons d'un moyen très simple de le vérifier directement.

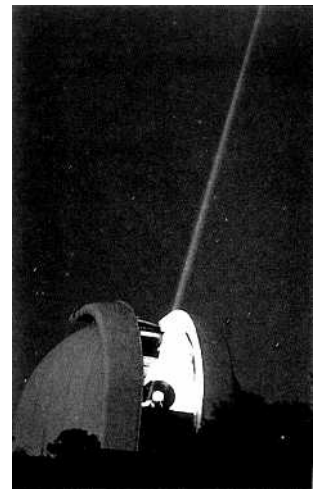
En moyenne deux fois par an se produit un phénomène très populaire : l'éclipse de la Lune. La Terre est éclairée par le Soleil, et donc projette une ombre dans l'espace. Tout objet qui s'y trouve est alors protégé des rayons solaires. C'est le cas de la Lune lorsque son mouvement autour de la Terre l'amène à traverser l'ombre de celle-ci. Ce phénomène étant extérieur à la Terre, il est visible exactement au même moment et sous le même aspect de tout les points de la Terre, à l'inverse d'une éclipse de Soleil. Pendant une éclipse de Lune, celle-ci peut alors être considérée comme un écran éclairé par le Soleil, devant lequel passe la Terre : sur la surface de la Lune, on voit progresser l'ombre de la Terre, une ombre dont le bord est arrondi !



Aspect de la Lune lors de l'éclipse du 21 janvier 2000 vers 05 h 30, heure française

De nos jours, les satellites artificiels permettent de connaître les dimensions de la Terre avec une très grande précision, voire de suivre ses déformations : environ 12.756 km de diamètre équatorial, et 12.713 km de diamètre polaire.

La distance de la Lune est mesurée par LASER à l'aide de réflecteurs déposés sur la surface de la Lune par les missions Apollo en particulier : environ 380 000 km de la Terre à la Lune.



Laser

II. Le Système Solaire

Au XVI^{ème} siècle, un aristocrate danois, Tycho Brahe (1546-1601), fit édifier un observatoire astronomique, équipé des instruments de mesure angulaire les plus grands et les plus précis de l'époque. À partir de ses observations de la planète Mars, un de ses disciples, Johannes Kepler (1571-1630) déduisit le calcul complet des orbites de la Terre et de Mars, et énonça 3 lois empiriques, qu'Isaac Newton (1642-1727) unifia en une seule : la Gravitation Universelle.



Tycho Brahe



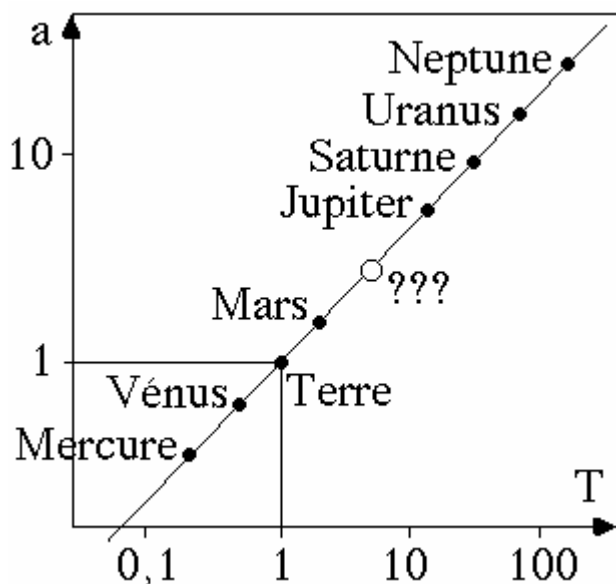
Johannes Kepler



Isaac Newton

Pour mesurer d'aussi grandes distances, le mètre, voire le kilomètre, étaient des unités bien trop petites. On définit ainsi l'Unité Astronomique (**ua**) comme étant la distance moyenne entre la Terre et le Soleil :

$$1 \text{ ua} \approx 149\,600\,000 \text{ km}$$



Exprimées dans cette unité, les distances des huit planètes principales laissent apparaître une "lacune", mise en évidence dès 1770 par Titius et Bode, alors qu'on ne connaissait pas encore Uranus (découverte en 1781 par Sir William Herschel) et Neptune (découverte en 1846 par Galle, d'après les calculs de Le Verrier). On y découvrit plus tard (à partir de 1801) la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter.

III. Les étoiles

1. De nouvelles unités de mesure

Les distances qui nous séparent des étoiles, comme on le sait maintenant, sont encore bien plus grandes que celles des planètes. À son tour, l'Unité Astronomique se révèle trop petite, et est remplacée par deux autres unités : l'Année-Lumière (**al**) et le Parsec (**pc**).

Les trois grandeurs durée-distance-vitesse sont reliées par une relation simple. Parmi elles, deux se mesuraient avec une précision satisfaisante : la durée et la distance, d'où on déduisait la vitesse. Depuis une époque récente, on sait mesurer la vitesse de la lumière avec une précision bien supérieure au résultat fourni par la méthode précédente. Les conventions ont désormais changé : le temps est mesuré par des horloges à désintégration atomique d'une très grande précision, et la vitesse de la lumière dans le vide est fixée à 299.792.458 m/s, le mètre n'étant plus un étalon, mais la 299.792.458^{ème} partie de la distance parcourue par la lumière dans le vide en une seconde.

Et, même à cette vitesse :

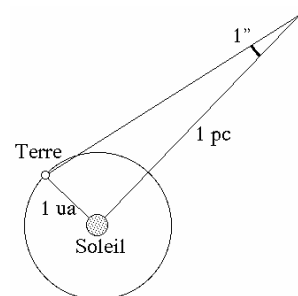
- Terre-Lune = 1 seconde-lumière
- Terre-Soleil = 8 minutes-lumière
- Soleil-Jupiter = 45 minutes-lumière
- Soleil-Pluton = 5,5 heures-lumière

L'année-lumière est alors la distance parcourue par la lumière en une année de 365,25 jours, soit :

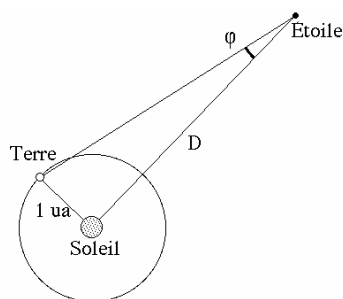
$$1 \text{ al} \approx 63\,240 \text{ ua} \approx 9\,460\,000\,000\,000 \text{ km}$$

La définition du Parsec est très différente : il faut se placer à une distance de 1 Parsec du Soleil pour voir le rayon de l'orbite de la Terre sous un angle apparent (PARallaxe) de 1 SEconde d'arc. Parsec est ainsi l'abréviation de PARallaxe-SEconde :

$$1 \text{ pc} \approx 3,2615 \text{ al} \approx 30\,850\,000\,000\,000 \text{ km}$$



2. Méthode trigonométrique



La plus ancienne des méthodes utilisées pour déterminer la distance des étoiles utilise cette parallaxe : par rapport à des étoiles (supposées) très lointaines, on repère la position d'une étoile proche à 2 dates correspondant aux positions de la Terre aux extrémités d'un diamètre de son orbite qui soit perpendiculaire à la direction de l'étoile. Connaissant la valeur du diamètre de l'orbite terrestre, on en déduit la distance de l'étoile :

$$D \text{ (ua)} \approx 1/\varphi \text{ (rad)} \quad \text{ou} \quad D \text{ (pc)} \approx 1/\varphi \text{ (°)}$$

Le satellite Hipparcos (High Precision PARallax Collecting System) a rendu cette méthode utilisable jusqu'à environ 100 pc. L'étoile connue la plus proche de la Terre se trouve dans la constellation du Centaure (hémisphère Sud), à environ 4,22 al :

$$D \approx 4,22 \text{ al} \approx 40.000.000.000.000 \text{ km}$$

3. Utilisation de la photométrie et de la spectroscopie

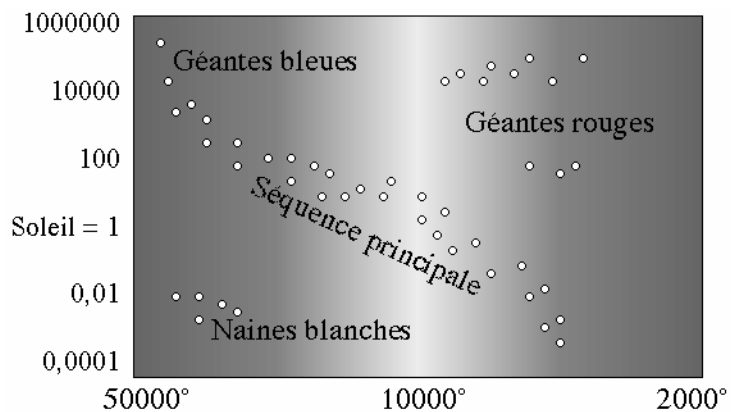
Pour des étoiles plus lointaines, la solution vient de la photométrie (mesure de l'éclat). La magnitude m d'une étoile est une grandeur relative, définie à une constante près par une échelle logarithmique de l'éclat E :

$$m = 2,512 \cdot \log(E) + \text{constante}$$

On définit par ailleurs la magnitude absolue M d'une étoile comme étant la magnitude qu'aurait cette étoile à une distance de 10 pc. L'éclat étant inversement proportionnel au carré de la distance D (en pc) :

$$m = M + 5 \cdot \log(D/10)$$

On voit ainsi que la connaissance de m et M permet de déterminer la distance D . L'accès à la magnitude absolue est indirect. Les étoiles sont réparties en plusieurs familles de mieux en mieux connues, qui apparaissent dans un diagramme reliant leur éclat absolu à leur température de surface (ou type spectral) : c'est le diagramme de Hertzsprung-Russell (ou diagramme HR).



La méthode est donc la suivante, et est efficace pour des distances atteignant 100 000 pc :

- mesure de la magnitude relative m ;
- détermination spectroscopique de la température de surface ;
- à partir d'une hypothèse sur la famille de l'étoile, le diagramme HR donne son éclat absolu, donc sa magnitude absolue M ;
- on peut calculer D connaissant m et M .

4. Les Céphéïdes

Les deux méthodes précédentes possèdent une différence fondamentale : la première (parallaxe) ne fait aucune hypothèse sur la nature de l'étoile, contrairement à la seconde. Il manquait alors une "passerelle" permettant d'étalonner et de valider la seconde méthode à partir de la première, les deux ne fonctionnant malheureusement pas pour les mêmes ordres de grandeur de distances.

Une famille d'étoiles pulsantes est venue au secours des astronomes : dans la constellation de Céphée (hémisphère Nord) se trouve une étoile très modeste, dont la particularité est d'avoir un éclat variable, périodique avec une période remarquablement stable. Suite à la découverte d'autres étoiles proches et du même type (nommées Céphéïdes), dont la distance pouvait être déterminée par la méthode de la parallaxe, il fut établi une relation entre la période de leur pulsation et leur éclat absolu. Ces étoiles peuvent être observées à de très grandes distances. La mesure de leur période fournit leur magnitude absolue M qui, comparée à leur magnitude relative m , permet de déterminer leur distance. La méthode photométrique a pu par ailleurs leur être appliquée également, et être ainsi vérifiée puis appliquée à d'autres étoiles.

Les Céphéïdes ont pu être étudiées avec succès jusqu'à des distances de l'ordre de 10 millions de Parsec, soit environ **300 000 000 000 000 000 000 km ...!**

IV. Les galaxies



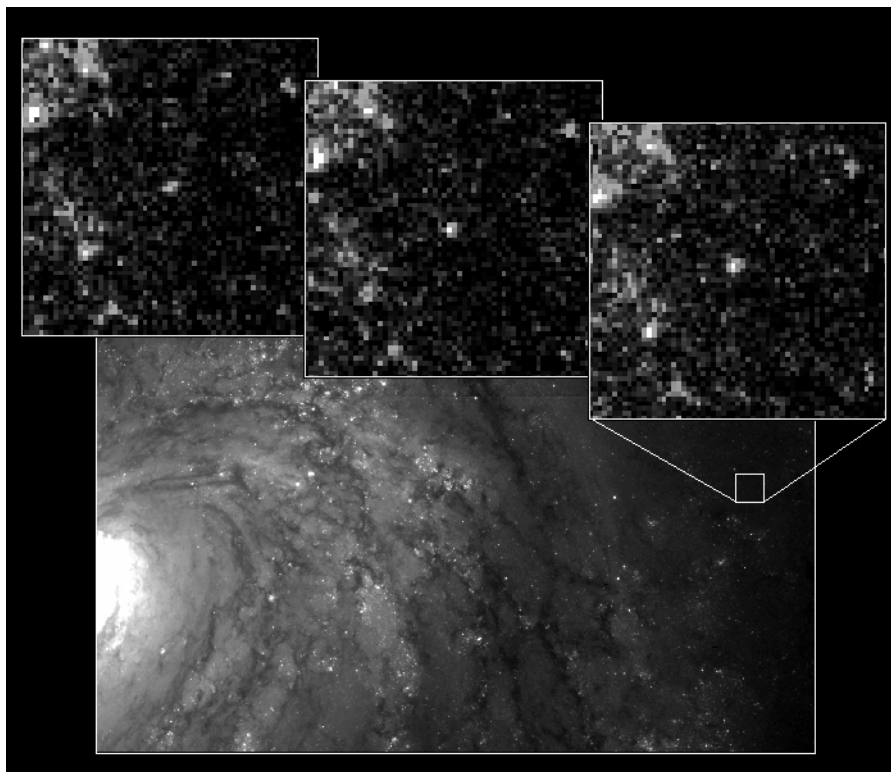
La Galaxie d'Andromède



Edwin Hubble

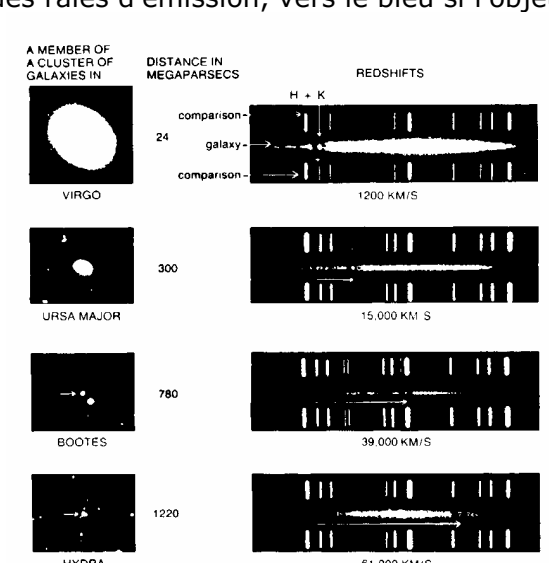
En 1923, l'astronome américain Edwin Hubble (1889-1953) étudia un objet connu mais mystérieux : la Nébuleuse d'Andromède, située dans la constellation du même nom et visible à l'œil nu par une nuit limpide. Il y découvrit des Céphéïdes, mais l'application de la relation période - magnitude absolue le conduisit à une distance d'environ 2 millions d'années-lumière, ce qui ajoutait plusieurs ordres de grandeur aux distances des étoiles les plus lointaines connues à cette époque. Il en déduisit que les étoiles ne sont pas réparties uniformément dans l'Univers, mais regroupées en systèmes isolés : les galaxies.

C'est aujourd'hui grâce au Télescope Spatial qui porte son nom (le Hubble Space Telescope) que des Céphéïdes ont pu être observées dans des galaxies bien plus lointaines.

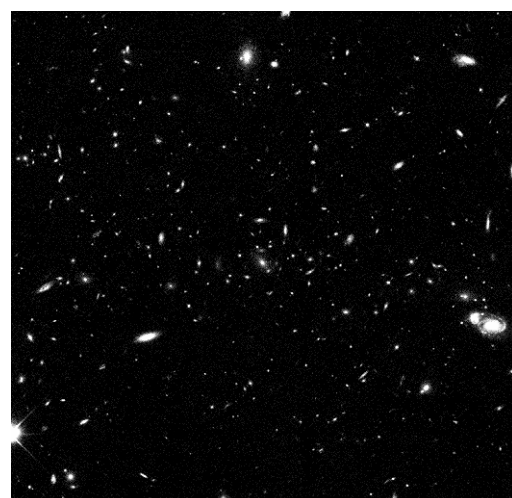


Observation d'une Céphéïde dans la galaxie M100 par le Hubble Space Telescope

Grâce à l'effet Doppler (ce même effet qui rend un son plus aigu s'il s'approche, ou plus grave s'il s'éloigne), on sait mesurer la vitesse radiale d'une galaxie en observant son décalage spectral : certains éléments ont des raies d'émission très caractéristiques, par paires ou même triplets de raies, qui les rendent parfaitement identifiables ; par comparaison avec des spectres obtenus en laboratoire, on observe un décalage global des raies d'émission, vers le bleu si l'objet s'approche, vers le rouge s'il s'éloigne.



L'effet Doppler



Un amas de galaxies lointaines

Fort de ses observations, Hubble détermina la distance de quelques galaxies, de plus en plus lointaines. Il put ainsi établir une corrélation entre la distance et la vitesse d'éloignement des galaxies : plus une galaxie est lointaine, plus elle s'éloigne vite de la Terre. C'est la loi de Hubble :

$$V = H.D$$

La distance D est, en général, exprimée en Mpc (méga-parsecs), et la vitesse V en km/s. La valeur de la constante de Hubble H fut, et est encore sujette à révisions :

1929 : H = 550 km/s/Mpc

1956 : H = 200 km/s/Mpc

1974 : H = 55 km/s/Mpc

1978 : H = 43 km/s/Mpc

1997 : H = 70 km/s/Mpc

Dans l'hypothèse d'un Univers en expansion linéaire, on montre que $T = 1/H$ est l'âge de l'Univers. Avec $H = 70$ km/s/Mpc, et sachant que $1 \text{ pc} \approx 3.10^{13} \text{ km}$:

$$T \approx 4,3.10^{17} \text{ s} \approx 13,6 \text{ milliards d'années.}$$

Les objets les plus lointains observables seraient ainsi situés à environ 14 milliards d'années-lumière, soit environ :

140 000 000 000 000 000 000 km

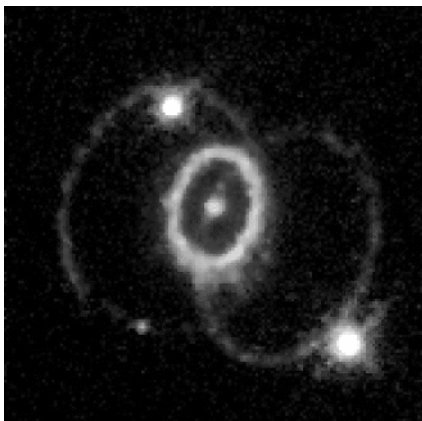
V. Vers l'infini et au-delà ...

Le vertige en trois points :

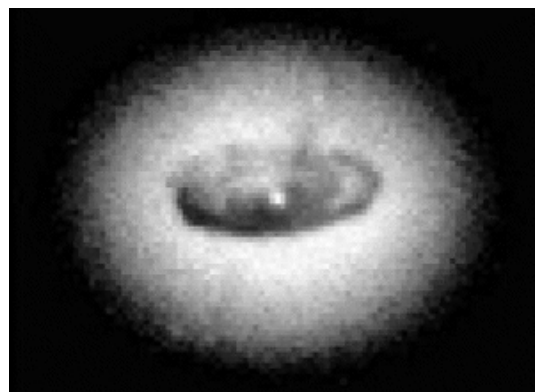
- si on ramène la Terre à la taille de ce point • : la Lune s'en trouve éloignée de 3 cm, le Soleil de 12,5 m, et Pluton de 500 m, alors qu'un être humain ne mesure que 2 Å ;
- si on ramène l'orbite de Pluton à la taille de ce point • : 1 année-lumière mesure 2 m, l'étoile la plus proche est à 7 m, et notre galaxie a un diamètre de 200 km, alors que la Terre ne mesure plus que 0,2 μ ;
- si on ramène notre galaxie à la taille de ce point • : la grande Galaxie d'Andromède se trouve à 2 cm, les galaxies très lointaines à 120 m.

Rappelons enfin que, à part l'hydrogène, tous les atomes dont nous sommes constitués ont tous été fabriqués dans les réactions de fusion nucléaire au cœur des étoiles, puis rendus à l'Univers lors de l'explosion de celles-ci. Ce qui fit dire à Isaac Asimov que

« nous sommes tous des poussières d'étoiles ».



Résidu de l'explosion de la supernova de 1987 dans le Grand Nuage de Magellan.



Trou Noir au centre d'un disque de matière (NGC 4261C ; distance de la Terre : 100 millions d'années-lumière)