



Les galaxies sont groupées en amas contenant des centaines, voire des milliers de galaxies, à des distances de millions d'a.l. (photo ESO).

8

La galaxie d'Andromède, visible à l'œil nu dans l'hémisphère nord comme une tache diffuse, se trouve à 2 millions d'a.l. de la nôtre.



Notre Soleil se trouve à 28,000 a.l. de son centre. (photo ESO).



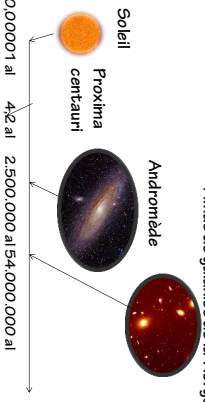
Notre Galaxie, visible par temps clair dans le ciel comme une nuée laiteuse, mesure environ 103,000 a.l. de diamètre.

Les galaxies sont groupées en amas contenant des centaines, voire des milliers de galaxies, à des distances de millions d'a.l. (photo ESO).

9

En 1900, on ne connaissait pas encore l'existence d'autres galaxies que la nôtre, nommée « Voie lactée ». On observait des clartés « nébuleuses » que l'on situait dans notre Galaxie.

Cette supposition fut remise en question par Hebert D. Curtis au cours d'un « grand débat » qui l'opposa en 1920 à Harlow Shapley. Mais la question de savoir si ces objets appartenaient à notre Galaxie ou non demeura ouverte, jusqu'à ce que l'on soit capable de déterminer leurs distances, grâce à la méthode des céphéides, puis celle des décalages spectraux (voir le Tuimp n°2) obtenus par l'analyse de la lumière à travers des prismes ou des réseaux.



Amas de galaxies de la Vierge

La distance de la Lune, départ de notre parcours vers les confins de l'Univers, est mieux connue aujourd'hui grâce aux lasers, qui envoient des flashes de lumière réfléchis par des miroirs déposés sur la Lune au cours de missions Apollo. On obtient ainsi une mesure très précise de la distance de notre satellite, et donc des distances des planètes du Système solaire. Au-delà, on utilise une succession de méthodes. D'abord les parallaxes, puis les céphéides. Plus loin, lorsque les céphéides ne peuvent plus être distinguées, on utilise des astres plus lumineux, comme les supernovae de type I. Ces méthodes s'embourbent les unes dans les autres, chacune étant calibrée par la précédente dont l'ensemble constitue « l'échelle de distance cosmique ».

En 1838, Friedrich Bessel effectua la première mesure d'une parallaxe : 0,3 s.a. pour la  $\alpha$  étoile du Cygne ; peu après, on mesura celle de Vega (0,12 s.a.) ainsi que celle d'  $\alpha$  Centauri ; d'autres mesures suivirent mais on était limité en sensibilité. Les satellites européens Hipparcos vers 1990, Gaia aujourd'hui, ont mesuré des millions de parallaxes.

5

La « parallaxe » est l'angle au sommet du triangle dont la base est le rayon de l'orbite terrestre. L'étoile la plus proche,  $\alpha$  Centauri, se trouve à 4,2 a.l., ce qui implique une parallaxe de 0,74 secondes d'arc (s.a.), seulement.

En visant un même astre depuis deux lieux différents, on obtient un triangle dont la base et deux angles sont connus, ce qui permet d'évaluer la distance de l'objet.

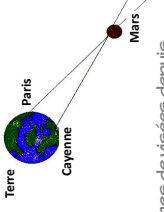
### L'Univers

Les galaxies fuient d'autant plus vite qu'elles sont plus loin. En généralisant cette relation, bien établie et admise par la communauté scientifique après 1929, le redshift devient à son tour une mesure de distance pour les objets plus lointains dans lesquels on ne peut plus observer de céphéides ou de supernovae.

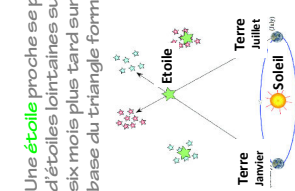
En fait, les astronomes n'utilisent pas l'année-lumière comme unité pour exprimer les distances des galaxies ou des quasars les plus lointains, mais simplement le redshift, c'est-à-dire la valeur (notée  $z$ ) du décalage spectral par rapport à la longueur d'onde au repos. Les redshifts de la plupart des galaxies de l'amas de la Vierge se situent entre 0,5 et 1 tandis que le redshift de la galaxie la plus lointaine connue à ce jour est  $z = 11,09$ .

13

Pour les planètes on utilise la dimension du globe terrestre afin d'obtenir deux visées différentes. La distance de notre voisin, la planète Mars, a ainsi été évaluée en 1672 par l'angle entre les lignes de visées depuis Paris et Cayenne, permettant d'obtenir enfin une distance correcte pour notre Soleil, car on connaissait déjà le rapport de la distance au Soleil de Mars à celle de la Terre.



Une étoile proche se projette sur un fond d'étoiles lointaines supposées à l'infini, puis six mois plus tard sur un fond différent. La base du triangle formé par les deux lignes de visée est alors le diamètre de l'orbite terrestre autour du Soleil, et non plus le diamètre de la Terre comme dans la mesure de 1672.



4

### Jeu

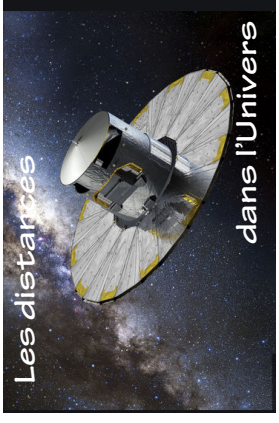
Supposons que nous disposions d'un vaisseau spatial capable de voyager à une vitesse égale à celle de la lumière...



- Combien de temps mettrions-nous pour atteindre :
- Le Soleil ?
  - Proxima centauri,
  - Vega ?
  - La galaxie d' Andromède ?
  - Les galaxies de l'amas de Virgo ?

Réponses au dos

### L'Univers dans ma poche



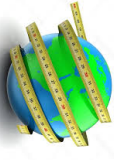
Christiane Vilain  
Observatoire de Paris



des planètes : Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne. **2**

Quant au système solaire, on ne connaissait en 1573, lorsque Copernic affirma que la Terre tourne autour du Soleil (ci-contre), que les **rappports** des distances au Soleil pouvait calculer sa distance.

Alexandre encore, une autre astuce permit à Aristarque de Samos d'estimer la distance de la Lune. Il mesura la durée d'une éclipse de Lune par la Terre. Celle-ci lui permit de dire que le diamètre de la Terre est trois fois celui de la Lune (en réalité 3,7 fois) et d'en déduire le diamètre réel de la Lune. Connaissant le diamètre de la Lune et sa taille angulaire, il pouvait calculer sa distance.



Les distances astronomiques ne peuvent pas être mesurées avec une règle ou un ruban. Il faut des astuces. L'astronome grec Eratosthène, le premier à estimer le rayon de la Terre il y a 2200 ans, utilisa l'idée ingénieuse de comparer l'inclinaison des rayons du Soleil entre Syène et Alexandrie.

## Céphéides

La lumière des astres nous parvient affaiblie d'un facteur égal au carré de leur distance. Cela pourrait être un moyen de déterminer cette distance si on connaissait la luminosité propre de l'objet.

C'est pourquoi la découverte d'Henrietta Leavitt fut tellement importante. Les étoiles variables du type de celles qu'elle découvrit dans la constellation de Céphée et les nuages de Magellan, dont la période de variation indique la luminosité propre, se rencontrent également dans d'autres galaxies. On en détecte aujourd'hui jusqu'à des distances de 80 millions d'a.l. grâce au télescope spatial Hubble, lancé en 1990.

7

- Proxima centauri : 42 ans
- Vega : 250 ans
- La galaxie d'Andromède : 25 millions d'années !
- Les galaxies de l'amas de Virgo : 540 millions d'années



## Réponses

Combien de temps mettrions-nous pour atteindre :

Ci-contre, le télescope du Mont Wilson avec lequel Edwin Hubble effectua ses observations. En 1929, il montra que la vitesse des galaxies augmente avec leur distance à la nôtre. Hubble n'a pas été le premier à penser à une telle relation. En fait, l'abbé Georges Lemaître, un astronome et cosmologiste belge, avait déjà suggéré que les décalages vers le rouge des galaxies étaient proportionnels à leurs distances.

La « constante de Hubble-Lemaître », qui nous dit de combien la vitesse de récession des galaxies augmente pour chaque Mpc de distance, a d'abord été estimée à environ 500 km/s par Mpc (1 Mpc = un million de parsecs, et un parsec vaut 3,26 a.l.). Mais depuis les années 1950, de bien meilleures estimations donnent un nombre compris entre 50 et 100 km/s par Mpc. Elle est aujourd'hui estimée à 73 km/s par Mpc, à 2 % près.

Toutefois les données du satellite Planck, basées sur une autre approche, donnent une valeur de 67,4±0,5 (km/s)/Mpc.

10



TUMIP Creative Commons



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter <https://www.tumip.org>

L'image de la première page de ce livre est une représentation d'artiste du satellite Gaia, qui a mesuré des millions de distances d'étoiles et galaxies. (Crédit ESA)

Ce mini-livre a été écrit en 2020 par Christiane Vainin de l'Observatoire de Paris et révisé par Grazyna Stasińska (Observatoire de Paris) et Stan Kurtz (UNAM, Mexique). Christiane est malheureusement décédée pendant la révision de ce texte.

## L'Univers dans ma poche N°15

### Décalage spectral

Les spectres des étoiles présentent des raies sombres dues à l'absorption de la lumière par les atomes des couches extérieures de l'étoile (voir TUMIPs 2 et 10).

Dès 1914 Vesto Slipher avait vu que les raies sombres dans les spectres des galaxies présentaient un décalage vers le rouge (redshift) ressemblant à un effet Doppler : la fréquence de l'onde lumineuse, donc sa couleur, est modifiée par la vitesse de la source. Cet effet ressemble à celui affectant les ondes sonores d'un klaxon dont le son est plus aigu lorsqu'un véhicule se rapproche et se grave lorsqu'il s'éloigne. Une lumière plus rouge vibre à une fréquence plus faible ; elle indique donc une vitesse d'éloignement : les galaxies semblent nous « s'écarter » !

En 1929, Edwin Hubble estima les distances de 46 galaxies en utilisant les céphéides qu'elles contenaient et montra que leurs redshifts augmentent avec leurs distances.

11

Les anciens avaient su évaluer le rayon de la Terre et la distance de la Lune, mais pas notre distance au Soleil qui est de 150 millions de km. C'est l'Unité Astronomique (U.A.)

On croyait notre Soleil plus proche et il en était de même des étoiles. Or elles sont très lointaines, elles sont des "soleils" : souvent plus gros que le nôtre, dont la lumière met des années à nous parvenir. On utilise alors comme unité de distance l' "année-lumière" (a.l.) qui est la distance parcourue par la lumière en un an, soit 9,460 milliards de km !

Les observations actuelles nous donnent accès à des distances de plus en plus grandes grâce aux grands télescopes terrestres et aux nombreux satellites, jusqu'à des millions d'a.l.

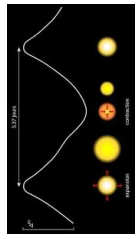
3

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, une astronome américaine Henrietta Leavitt (1868 - 1921), observa que certaines étoiles avaient une éclat variable avec une période régulière (voir la figure ci-dessous).



Elle observa d'abord ces étoiles dans la constellation de Céphée, d'où leur nom de céphéides. Plus tard, elle observa des étoiles similaires dans nos galaxies voisines, les « nuages de Magellan ». Leur période dépendait de leur luminosité, qui pouvait être calculée en supposant que toutes les étoiles étaient à la même distance que leur galaxie hôte.

Bien que son patron Edward Pickering ait tenté de la découvrir, Henrietta persista et détecta près de deux mille Céphéides pour en déduire la proportionnalité entre période et luminosité. Elle mourut trop tôt pour connaître l'importance de sa découverte.



6