# COURS

# Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : XII- L'Univers

**Georges Paturel,**
**Observatoire de Lyon**

**Résumé :** *Ce dernier cours nous permet d'aborder le problème de l'Univers considéré dans son ensemble. À mon sens, ce cours est d'une grande importance, car il nous permet de prendre conscience de la place de l'homme dans l'Univers. Le résultat égratignera probablement notre orgueil. Mais peu importe, l'homme cultivé et honnête devrait faire sienne cette réalité. Attention, la lecture de cet article est dangereuse. Âmes sensibles s'abstenir !*

## Introduction

Ce cours présente l'Univers, Notre Univers, tel qu'il nous apparaît à travers les observations astronomiques. L'interprétation de ces observations sera expliquée, mais il ne faut pas perdre de vue que la physique, et partant, l'astrophysique, ne donnent que des modèles. L'une comme l'autre ne répondent pas au pourquoi originel mais se contentent de décrire le comment qui en résulte.

Dans le cours précédent nous avions compris que l'Univers était peuplé de galaxies, semblables à la nôtre, elles-mêmes peuplées de milliards d'étoiles semblables à notre Soleil. Était-il possible d'aller plus loin, de trouver des lois régissant l'Univers ? Ces lois, comme celles de la mécanique, nous rendraient-elles possibles des prédictions, comme celles qui nous permettent de prévoir les conjonctions des planètes, le retour de certaines comètes, ou celles qui nous permettent d'interpréter les étoiles nouvelles (supernovæ) et rendent plausible le schéma d'évolution des étoiles ?

## L'univers de Newton

Newton a consacré un peu de temps à imaginer la gravitation à l'échelle de l'Univers. Selon lui, l'attraction gravitationnelle entre tous les corps, universelle et instantanée, imposait que l'Univers soit infini. Sans cela tous les corps se seraient rassemblés au centre de l'Univers, sous l'effet de cette attraction. Avec un Univers infini, chaque corps est attiré dans chaque direction de la même manière et reste donc immobile. Mais un univers infini ne posait pas que des problèmes philosophiques (qu'est-ce que l'infini ?). En effet, dans un univers homogène, le nombre d'étoiles croissant comme le cube de la distance et l'éclat apparent ne décroissant que comme le carré de la distance, l'augmentation du nombre d'étoiles faisait plus que compenser la perte d'éclat. Le ciel aurait dû être aussi brillant que la surface d'une étoile, prédiction évidemment non confirmée. On peut aussi comprendre ce résultat en disant que, quelle que soit la direction de notre regard, dans un univers infini, la visée s'arrête nécessairement à la surface d'une étoile.

Nous verrons un peu plus loin dans ce cours, comment ce paradoxe, qu'on appelle le paradoxe d'Olbers, peut être levé aujourd'hui.

## La loi de Hubble

1917, de Sitter avait trouvé, pour l'Univers, des solutions aux équations de la Relativité Générale proposée par Einstein et déjà auréolée de succès dans le système solaire. Les solutions de de Sitter montraient que l'Univers était instable. Il ne pouvait être qu'en expansion ou en contraction. Certes, le modèle décrit considérait que l'Univers était vide de matière, dont notre seule présence témoignait du contraire... mais bon, admettons.

1925, Hubble venait de prouver que certaines des nébuleuses visibles sur les clichés astronomiques étaient des galaxies distantes, semblables à notre Voie Lactée.

Plusieurs astronomes, dont Slipher et Lundmark, avaient bien noté une corrélation entre la distance probable de ces galaxies et leur vitesse, mesurée par le décalage des raies spectrales. Plus les galaxies étaient lointaines et plus elles nous fuyaient rapidement. Selon Lundmark, la vitesse semblait atteindre une valeur maximale. Il représenta la variation par une courbe qui s'infléchissait pour atteindre cette valeur maximale.

Dans le même temps, les théoriciens cherchaient une solution des équations d'Einstein, sans adopter comme de Sitter, l'hypothèse d'un univers vide de matière. Tolman y parvint. Il publia son résultat dans la revue Astrophysical Journal (ApJ 69, 245). Son résultat était que la vitesse devait être simplement proportionnelle à la distance $D$ :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K.D$$

$\Delta\lambda / \lambda$ est le décalage spectral relatif, égal selon la loi de Doppler-Fizeau, à la vitesse de fuite de la galaxie considérée, divisée par la vitesse de la lumière c[1]. Pour cette galaxie, $D$ est sa distance à l'observateur. K est la constante de proportionnalité. Tolman, dans le texte de son article, semble avoir été guidé par des résultats expérimentaux qui laissaient prévoir une telle relation, mais il ne cite pas ses sources.

Nous étions en 1929. Or, et ce point est important, Hubble avait publié un article dans cette même revue. Il est probable qu'il aura vu le résultat de Tolman. L'histoire ne le dit pas, toujours est-il que dans les semaines qui suivirent, Hubble publia un article où il montrait que les observations (en l'occurrence celles de Slipher (mais il ne cite pas non plus ses sources[2]) corroboraient parfaitement la loi de proportionnalité trouvée par Tolman. La loi de Hubble s'écrit donc simplement :

$$V = H.D$$

Cette loi était la première loi générale applicable à l'Univers, dans son ensemble. Les galaxies, ces briques de l'Univers, peuvent donc être vues comme des particules libres se déplaçant selon les lignes d'espace-temps de la Relativité Générale.

Les équations les plus générales proposées par Einstein contenaient un terme (la constante cosmologique) dont le rôle était de gommer toute évolution, pour forcer l'Univers à être statique, selon l'a priori de l'époque. Quand l'expansion fut observée par les astronomes, Einstein déclara que l'addition de la constante cosmologique pour permettre à l'Univers d'être statique, était "*la plus grosse erreur de sa vie*". Avec plus de nuances il écrira plus tard :

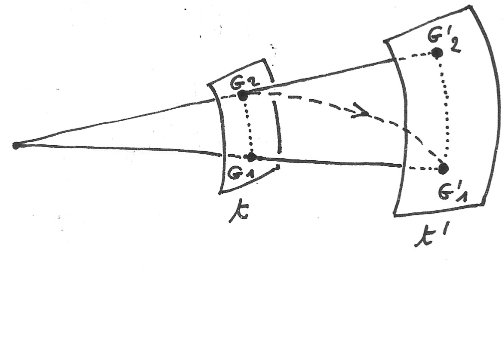
*"La découverte de l'expansion des nébuleuses extragalactiques justifie le passage de la théorie à des solutions dynamiques de la structure de l'espace, une voie qui ne devait apparaître auparavant que comme une issue nécessitée par l'insuffisance de la théorie".*

La constante cosmologique a été alors considérée comme nulle, car elle n'était plus nécessaire. Il faut cependant signaler que l'addition de cette constante par Einstein n'était pas totalement arbitraire. En effet, les équations ainsi modifiées satisfaisaient toujours aux postulats qui présidaient à la Relativité Générale. Elles étaient donc plus générales. On peut simplement dire que Einstein a apporté cette modification pour une mauvaise raison, mais la modification était justifiée et ce d'autant plus que des mesures récentes tendent à réhabiliter cette constante, non pas pour rendre l'Univers statique, mais au contraire pour expliquer une accélération de l'expansion. Nous reviendrons sur cette question à la fin de cet article.

## Un modèle géométrique

L'Univers pouvait donc être décrit par les équations de la Relativité Générale. L'expansion générale de l'Univers, qui constituait la preuve évidente d'une évolution, obligeait à envisager que l'Univers ait eu un début et peut-être une fin.

Pour expliquer ces nouvelles observations nous allons d'abord décrire l'Univers par un modèle très simple. L'Univers réel observable est à quatre dimensions. L'espace et le temps ne peuvent plus être considérés indépendamment l'un de l'autre. Pour visualiser un tel univers ce n'est pas facile. Aussi ferons-nous une supposition simplificatrice : nous enlèverons une dimension d'espace.




[1] Rappelons la relation de Doppler-Fizeau : $\Delta\lambda / \lambda = V / c$

[2] Selon l'étude faite par A. Brémond.

Nous serons alors dans un monde plat possédant une longueur, une largeur et un temps. Le schéma ci-dessus représente l'Univers à deux instants t et t'. L'Univers est plat. Deux galaxies G1 et G2 sont figurées à l'instant t. Elles sont devenues G1' et G2' à l'instant t' quand l'Univers s'est expansé. Notons au passage que, si nous avions un grand nombre de galaxies, chacune d'elles aurait l'impression de voir les autres la fuir. Chacune se croirait au centre de ce gigantesque mouvement de fuite. On comprend que ce n'est qu'une illusion de plus que nous réservait la Nature.

Écrivons la vitesse qui résulte de l'expansion, en supposant que toutes les distances augmentent dans toutes les directions proportionnellement à un certain facteur d'échelle R, ce qui peut s'écrire : *D=K.R*, où K est la constante de proportionnalité et R le facteur d'échelle. La vitesse relative des deux galaxies est égale à l'accroissement de distance divisé par l'accroissement de temps :

$$V = \frac{D - D'}{t - t'} = K\frac{R - R'}{t - t'} = \frac{D}{R} \cdot \frac{R - R'}{t - t'}$$

La variation de R avec le temps est parfois notée $\dot{R}$, comme en mécanique rationnelle. La vitesse s'écrit alors :

$$V = H.D$$

On reconnaît la loi de Hubble avec pour constante de Hubble :

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

Mais alors, la constante de Hubble n'est pas une constante ? Eh bien non ! Mais nous pouvons calculer sa valeur observable aujourd'hui (voir dans ce cahier, l'article sur "Mesure de distances"). Nous adopterons *H*=65(km/s)/Mpc.

## L'âge de l'Univers

Le problème que l'on peut se poser est le suivant : comment le facteur d'échelle *R* varie-t-il avec le temps ?

Dans un premier temps, nous pouvons choisir la relation la plus simple possible. Par exemple une relation linéaire : $R = a.t + b$, où *a* et *b* sont des constantes inconnues.

Nous allons adopter une convention pour définir l'origine du temps. Nous dirons par exemple que *R=0* pour *t=0*. Vous voyez alors que cette convention conduit à *b=0*.

En considérant alors deux instants *t* et *t'*, on calcule aisément : $\dot{R} = (R - R')/(t - t')$. On trouve alors : $\dot{R} = a$. D'où nous déduisons :

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

La constante de Hubble est donc variable ! Elle varie comme l'inverse du temps. L'inverse de la constante de Hubble que nous observons aujourd'hui donne le "*temps de Hubble*". L'âge de l'Univers est peut-être plus petit. En effet la relation entre *R* et *t* que suggèrent les équations de la Relativité appliquée à la cosmologie n'est pas *R=a.t* mais plutôt :

$$R = a.t^{2/3}$$

On trouve alors que l'âge de l'Univers est :

$$t = \frac{2}{3H}$$

Avec ce modèle et *H*=65(km/s)/Mpc on trouve que l'âge de l'Univers, en milliards d'années est à peu près de *t*=10 milliards d'années. Il suffit de convertir les Mégaparsecs en kilomètres et les secondes en milliards d'années. C'est long mais facile !

## Regardons le plus loin possible

Dans notre modèle géométrique simple, quand nous observons une galaxie lointaine, quelle que soit sa direction, nous la voyons sur une nappe du passé, plus contractée que la nappe dans laquelle nous sommes aujourd'hui, car la lumière a eu besoin d'un temps important pour arriver jusqu'à nous et pendant ce temps l'Univers s'est dilaté. Quelle que soit la direction, notre regard plongera dans le passé et arrivera sur un univers plus condensé et donc plus chaud (comme pour un gaz que l'on comprimerait, la température augmente quand le volume diminue). Où que nous regardions, nous devrions voir le rayonnement de l'Univers primordial. Ce rayonnement a été observé. Il s'agit d'un corps émissif en équilibre (corps noir) à la température de 3 degrés Kelvin environ. En réalité, ce rayonnement était bien plus chaud dans l'Univers primordial, si chaud (3700 degrés Kelvin), que les protons et les électrons ne pouvaient pas rester attachés les uns aux autres. Ce n'est qu'après s'être dilaté que l'Univers est devenu plus froid et que les protons et les électrons ont pu se combiner.

Avant cette combinaison, l'Univers était donc baigné d'électrons libres qui absorbaient les ondes électromagnétiques et les re-rayonnaient dans toutes les directions. L'Univers n'était pas plus transparent qu'un brouillard qui diffuse la lumière. Ce n'est qu'à partir de cette combinaison que l'Univers est devenu transparent et que l'on a pu voir les premiers objets, les premières galaxies.

## Combien y a-t-il de galaxies dans l'Univers ?

On pourrait penser que ce calcul est impossible. Pourtant nous allons essayer, au moins pour avoir une idée.

Introduisons tout d'abord la courbe de complétude. Si nous comptons toutes les galaxies d'éclat supérieur à une limite donnée (c'est-à-dire de magnitude apparente inférieure à une valeur limite) et que nous portions sur un graphique le logarithme du nombre trouvé en fonction de la magnitude limite, nous obtenons une courbe linéaire qui s'infléchit à une certaine magnitude, dite magnitude de complétude. La pente de la partie linéaire vaut à peu près 0,6.

La démonstration est assez simple même si la démonstration rigoureuse est assez subtile. Le nombre de galaxies *N* augmente comme le cube de la distance *d*, si la répartition est homogène. En notation logarithmique nous obtenons :

$$\log N = \log d^3$$

Or nous avons vu dans le cours numéro IX la relation qui lie la magnitude apparente à la distance et à la magnitude absolue :

$$m - M = 5\log d + 25$$

Dans cette expression, *d* est en mégaparsecs. En combinant les deux relations on trouve :

$$\log N = 0.6m + 0.6M - 15$$

Quelle que soit la magnitude absolue, la pente de la relation *logN=f(m)* est de 0,6. Si on considère toutes les magnitudes absolues possibles, les galaxies les plus lumineuses, comme les plus faibles, le résultat sera le même. Si on fait l'essai avec la base de données HYPERLEDA (voir l'article "La mesure des distances" dans ce cahier) on trouve que jusqu'à la magnitude m=18 il y a environ 700 000 galaxies[3]. La relation de complétude a donc pour expression :

[3] Il faut faire la requête suivante :
select count(*) where objtype='G' and bt<18
Le résultat est 743784 galaxies.

$$\log(700\,000) = 0.6 \times 18 + C$$

D'où : C=–4,955.

Or, notre regard porte environ jusqu'à 10 milliards d'années lumière. Combien de galaxies sont présentes dans ce volume ?

10 milliards d'années de lumière, c'est-à-dire 3 milliards de parsecs, ou 3000 Mpc. Si nous reprenons la définition des magnitudes, nous pouvons calculer la magnitude apparente des plus faibles galaxies (*M*=–15), à cette distance :

$$m = M + 5\log(3000) + 25 = 27.4 \text{ mag.}$$

Si nous observons toutes les galaxies plus brillantes que *m*=27.4, la courbe de complétude précédente nous donne le nombre attendu :

$$\log N = 0{,}6 \times 27{,}4 - 4{,}955 = 11{,}485$$

d'où : N=300 milliards de galaxies, environ. Dans la réalité, la pente est souvent un peu inférieure à 0,6, comme si les galaxies se raréfiaient avec la distance. C'est une façon de lever le paradoxe de Olbers que nous présentions plus haut.

Ce calcul ne donne qu'une estimation très incertaine, mais elle a le mérite de nous montrer que l'Univers observable est extrêmement riche. Si on se rappelle qu'une galaxie peut contenir quelques centaines de milliards d'étoiles, on se trouve bien minuscule dans cet Univers.

Oserait-on dire maintenant que l'Univers est fait pour l'homme ? L'homme, petit microbe, sur une petite planète, orbitant autour d'une petite étoile, au milieu des 300 milliards d'étoiles semblables, membres d'une petite galaxie, elle-même perdue au milieu de milliards de galaxies semblables, dans un petit univers...

Oserait-on dire que la Terre est le seul endroit de l'Univers abritant de la matière vivante ? On ne peut s'empêcher de penser à Giordano Bruno, brûlé comme hérétique pour avoir dit que d'autres étoiles devaient abriter la vie. La découverte des galaxies conforte sa position.

On peut aussi se poser la question de savoir si la matière vivante ne serait pas une étape dans l'évolution de la matière (pas nécessairement l'aboutissement de l'évolution).

Nos conceptions philosophiques, voire religieuses, ne peuvent pas sortir indemnes d'une telle prise de conscience. Je vous avais prévenu, cette lecture était dangereuse.

■