

# TP de cosmologie : Mise en évidence observationnelle de l'expansion de l'Univers et estimation de l'âge de l'Univers (niveau lycée)

TP initialement conçu par Laurent Chemin, adapté par Loïc Le Tiran

## 1 Introduction

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence l'expansion de l'Univers par des observations photométriques et spectroscopiques de galaxies et de mesurer un âge approximatif de l'Univers. Lemaitre (1926) et Hubble (1929) furent les premiers à proposer que l'Univers est en expansion en observant que les galaxies s'éloignaient les unes des autres et que plus les galaxies étaient distantes, plus leur vitesse d'échappement était importante.

L'expansion de l'Univers se traduit alors par une relation de proportionnalité entre la vitesse d'éloignement  $v_{rad}$  des galaxies et leur distance  $D$  :

$$v_{rad} = H_0 \times D \quad (1)$$

On appelle cette relation la loi de Hubble.  $v_{rad}$  est mesurée en  $\text{km s}^{-1}$ ,  $H_0$  est une constante appelée constante de Hubble et est un des paramètres les plus fondamentaux de l'Univers.  $D$  est exprimée en Mpc ( $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc} \sim 3.1 \times 10^{22} \text{ m}$ ). La vitesse radiale d'une galaxie est déterminée à partir de mesures spectroscopiques tandis que sa distance est estimée à partir de mesures photométriques. En effet, la magnitude apparente  $m$  d'un astre, i.e. la brillance observée depuis la Terre, est reliée à sa distance  $D$  (en Mpc) par la relation suivante :

$$m - M = 25 + 5 \times \log(D) \quad (2)$$

Ici  $M$  est la magnitude absolue de l'astre, i.e. sa brillance telle qu'on la mesurerait si on était juste à côté de lui (à 10 parsecs très précisément). Or, la magnitude absolue d'une étoile dont la brillance est variable (telle qu'une étoile type Céphéide, RR Lyrae) ou d'une supernova (de type Ia) est connue précisément et est indépendante de toutes galaxies. Pour le cas d'une supernova, il est montré que sa magnitude absolue en bande photométrique  $B$  (centrée dans le bleu à 445 nm) est  $M_B = -19.48 \pm 0.07$ .

Ainsi, pour mettre en évidence l'expansion de l'Univers, il suffit de déterminer (1) la distance des galaxies à partir de l'Équation 2 et des mesures de la magnitude apparente d'étoiles variables ou de supernovae et (2) la vitesse radiale de chaque galaxie à partir de leur spectre. Le travail de ce TP consiste alors :

- à reporter sur un graphe la vitesse (ordonnée) et la distance (abscisse) de 9 galaxies pour lesquelles des supernovae ont été identifiées.
- à décrire le comportement des points (sont-ils répartis aléatoirement ? regroupés au même endroit ?)
- à tracer une régression linéaire passant par ces points.
- le coefficient directeur de cette droite correspond au paramètre  $H_0$  de l'Équation 1.
- à déterminer l'âge approximatif de l'Univers en milliards d'années. Celui-ci est le temps  $t_U$  mis par la lumière d'un astre formé juste après le Big Bang à nous parvenir. Or le temps est relié à la vitesse et la distance parcourue par la lumière par  $t = D/c$  ( $c = 299792.458 \text{ km s}^{-1}$  est la vitesse de la lumière), soit  $t_U \sim D/v$  (la vitesse d'éloignement de l'objet étant quasiment celle de la lumière à cause de sa très grande distance) et donc  $t_U = 1/H_0$  d'après l'Équation 1.

## 2 Méthodologie

### 2.1 Échantillon de galaxies

L'échantillon consiste en 9 galaxies dont les spectres sont donnés dans un document joint et dont les caractéristiques sont reportées dans la Table 1.

TABLE 1 – Caractéristiques des galaxies de l'échantillon

Nom galaxie	Ascension droite (J2000, hh :mm:ss.s)	Déclinaison (J2000, dd : mm : ss.s)	Nom de la Supernova Ia	$m_{SNIa}$
CGCG 180-022	08 :54 :31.8	+36 :30 :34.5	SN 1999X	15.71
CGCG 224-104	16 :49 :51.2	+40 :26 :00.3	SN 1994Q	16.39
IC 3690	12 :42 :49.2	+10 :21 :27.0	SN 1992P	16.02
NGC 4493	12 :31 :09.7	+00 :36 :36.0	SN 1994M	15.38
NGC 4495	12 :31 :22.9	+29 :08 :10.4	SN 1994S	14.54
NGC 4675	12 :45 :31.9	+54 :44 :15.4	SN 1997Y	14.77
NGC 6063	16 :07 :12.9	+07 :58 :44.5	SN 1999ac	13.19
UGC 05691	10 :29 :27.5	+22 :00 :28.5	SN 1991S	17.37
UGC 09391	14 :34 :37.0	+59 :20 :16.1	SN 2003du	13.48

### 2.2 Estimation des vitesses des galaxies

La vitesse d'éloignement  $v_{rad}$  d'une galaxie (appelée aussi vitesse radiale ou vitesse systémique) est calculée à partir de la relation Doppler suivante :

$$v_{rad} = c \times \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_0)}{\lambda_0} \quad (3)$$

Pour cela, il suffit donc mesurer à partir du spectre d'une galaxie la position de la longueur observée  $\lambda_{obs}$  d'une raie d'émission (un pic) ou d'absorption (un creux) d'un atome de référence (hydrogène, azote, soufre, sodium, magnésium, calcium). La longueur d'onde au repos (i.e. celle estimée sur Terre, en laboratoire) pour ces mêmes éléments chimiques est données par le Tableau. 2.

TABLE 2 – Liste de longueurs d'onde mesurées au repos des principales raies en émission ou en absorption

Élément	Longueur d'onde $\lambda_0$ (Å)	Élément	Longueur d'onde $\lambda_0$ (Å)
Ca K	3934	[NII]	6548
Ca H	3968	H $\alpha$	6563
H $\delta$	4102	[NII]	6584
H $\gamma$	4341	[SII]	6717
H $\beta$	4861	[SII]	6731
Mg	5178	CaII	8498
[OIII]	4959	CaII	8542
[OIII]	5007	CaII	8662
Na	5891		

Il est conseillé d'estimer la vitesse  $v_{rad}$  non pas à partir de la mesure d'un seul élément, mais à partir de la moyenne des mesures de plusieurs éléments chimiques (avec les 3 ou 4 raies les plus évidentes sur le spectre). On remplira ainsi, par exemple, pour chaque galaxie un tableau similaire au Tableau 3. Dans celui-ci  $v_{rad}$  est donc la moyenne mesurée avec les vitesses de tous les éléments utilisés.

TABLE 3 – Longueurs d’onde observées des raies d’absorption ou d’émission et vitesse radiale de la galaxie CGCG 180-022

Galaxie	Élément	$\lambda_{obs}$ (Å)	vitesse (km s <sup>-1</sup> )
CGCG 180-022	Mg	xx	xx
	H $\alpha$	xx	xx
	H $\beta$	xx	xx
	Ca8542	xx	xx
	etc...	xx	xx
			$v_{rad} =$

## 2.3 Estimation des distances

Les distances sont mesurées par la photométrie des supernovae de type Ia observées dans ces galaxies. Le Tableau 1 reporte la magnitude apparente de la SNIa détectée dans chaque galaxie. À partir de cette magnitude, en déduire la distance de chaque galaxie.

## 2.4 Loi de Hubble

En utilisant un tableur, calculez les valeurs de vitesse ainsi que la distance de chaque galaxie, puis tracez le graphe correspondant (vitesse en ordonnée, distance en abscisse). Faites-le pour au moins 3 raies spectrales différentes. Quelles sont les meilleures raies ? Vaut-il mieux utiliser celles aux grandes ou aux plus petites longueurs d’onde ? Une loi linéaire devrait apparaître. Elle montre que plus la distance aux galaxies est grande, plus leur vitesse d’éloignement est grande. Cet effet est causé par l’expansion de l’Univers. Dans la réalité les galaxies ne se déplacent pas les unes par rapport aux autres, c’est l’espace/le vide entre les galaxies qui grandit. On visualise souvent l’expansion de l’Univers par la cuisson d’un gâteau aux raisins. La pâte du gâteau se dilate lors de la cuisson et les raisins sont de plus en plus espacés les uns des autres. Les raisins sont équivalents aux galaxies, et la pâte à l’Univers (sauf que l’Univers se refroidit à mesure qu’il s’expand, alors que la pâte est constamment chauffée...).

Utilisez une regression linéaire (trend line) pour relier au mieux par un seul trait tous les points d’observation les uns aux autres. Faites afficher la fonction,  $H_0$  est alors la pente de cette droite. En déduire  $t_U$  l’âge de l’Univers (en secondes, puis en années). On sait d’après l’ajustement d’un modèle théorique sur les mesures des anisotropies du fond cosmologique micro-onde réalisée par le satellite américain WMAP que l’Univers est âgé de 13.7 milliards d’années. Comment se compare cette valeur avec celle de  $t_U$  que vous avez estimée ?