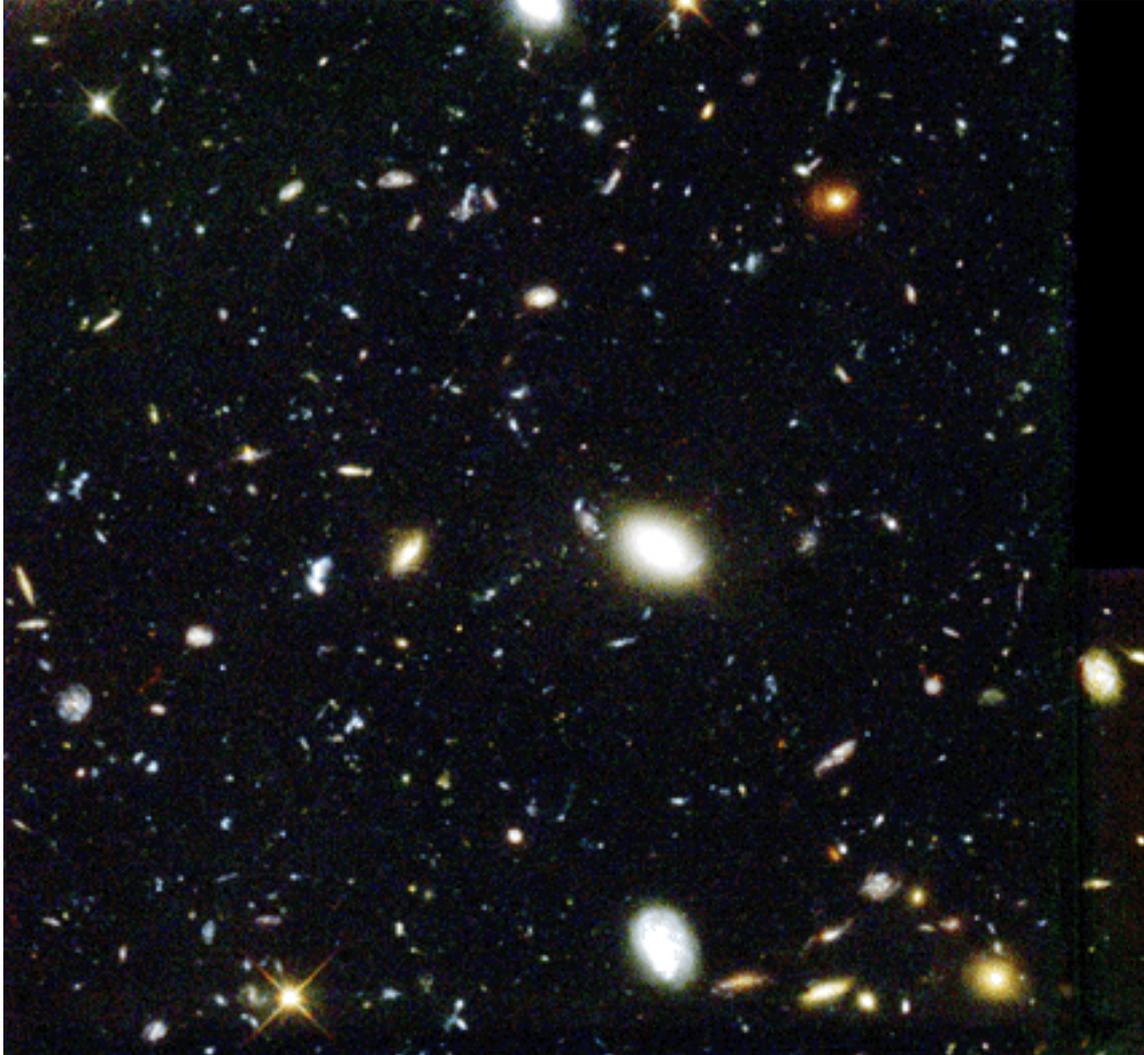


Mesurer l'âge de l'univers



Objectif : Mesurer l'âge de l'univers à partir de la vitesse d'expansion des galaxies

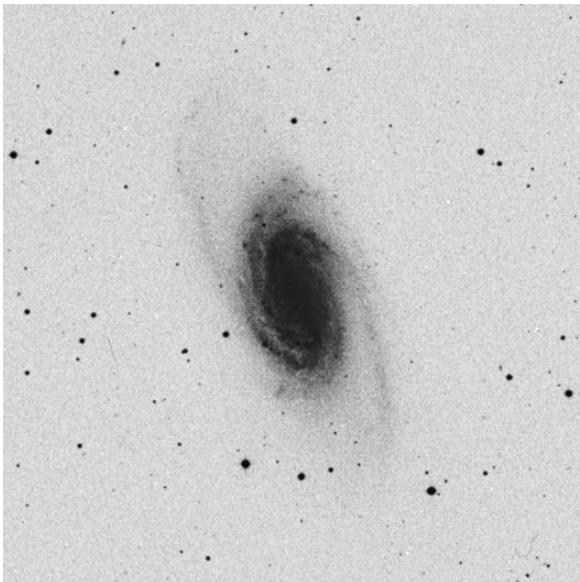
Méthode : A partir d'un échantillon réel de galaxies, évaluer par l'**effet Doppler** la vitesse apparente d'éloignement des galaxies. Par comparaison avec la distance connue de ces galaxies, calculer le taux d'expansion de l'Univers (constante de Hubble) et en déduire une estimation de l'âge de l'Univers

Hubble et les galaxies

Jusqu'au début du XXe siècle, l'univers semble limité aux étoiles qui nous environnent. La mise en service des premiers grands télescopes dévoile dans le ciel la présence de nébuleuses, régions lumineuses diffuses, qui se révèlent en fait une collection d'étoiles.

Ces nébuleuses provoquent en 1920 un grand débat. Font-elles partie avec notre Voie lactée d'un seul et même ensemble ou sont-elles des îlots d'étoiles totalement séparés ? Les premières mesures de distance vont trancher. Elles sont beaucoup plus loin que les étoiles qui nous environnent

Ces îlots lointains d'aspect « laiteux » sur le ciel sont baptisés galaxies (du grec *galaktikos*, laiteux). C'est la mesure de la distance et de la vitesse de ces galaxies qui a permis à l'astronome Hubble de démontrer l'expansion de l'univers



Photographie de la galaxie NGC 2903



Edwin Hubble observant au télescope

L'expansion de l'Univers

Einstein n'avait pas prévu l'expansion de l'univers. Lorsque grâce à sa nouvelle théorie de la gravitation, la Relativité générale, il tenta en 1917 de décrire la distribution de la matière dans l'univers, il construisit un univers statique, en incluant notamment dans ses équations une constante cosmologique.

C'est le soviétique Alexander Friedmann qui découvrit en 1922 que, sans cette constante cosmologique, l'univers prédit par la Relativité générale devait être en expansion.

En mesurant pour la première fois tout à la fois la distance et simultanément la vitesse sur la ligne de visée d'un échantillon de 24 galaxies, Edwin Hubble découvrit en 1929 que plus une galaxie est loin, plus sa vitesse d'éloignement est élevée. Il constata qu'en reportant la vitesse des galaxies en fonction de leur distance, les points se répartissent approximativement le long d'une droite.

Cette proportion régulière entre distance et vitesse est désormais connue sous le nom de « **loi de Hubble** ». La constante de proportionnalité entre distance et vitesse (la pente de la droite) est la « **constante de Hubble** »

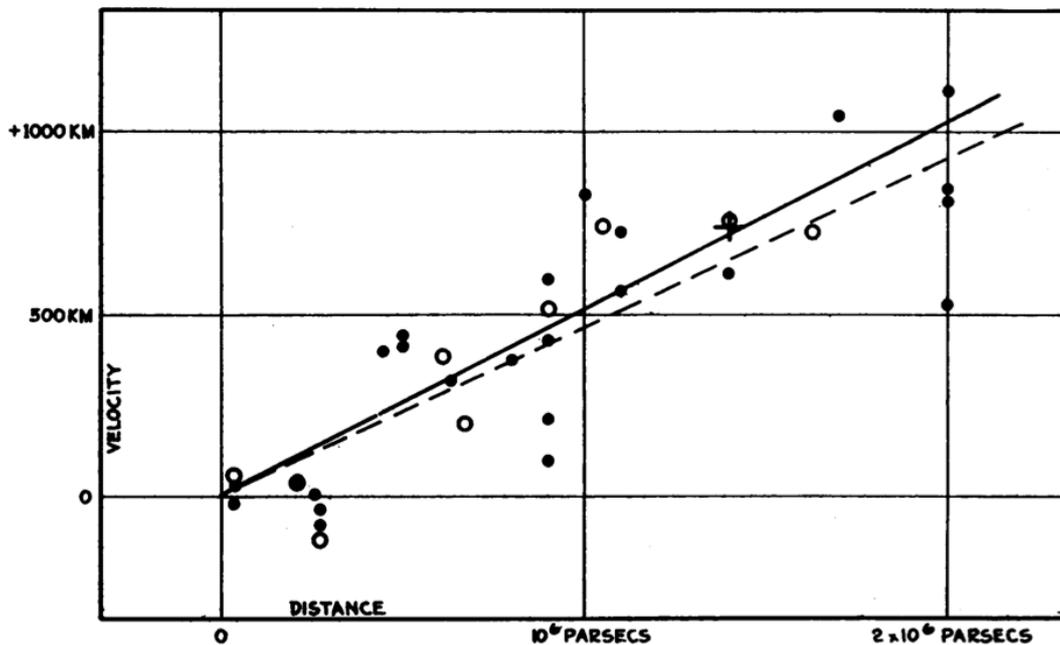


FIGURE 1

Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

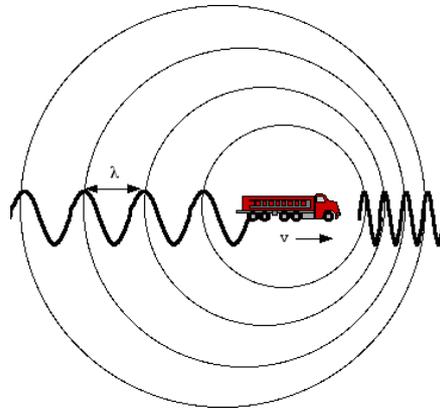
*Diagramme de la découverte de l'expansion de l'univers réalisé par Hubble en 1929
(tiré de Proc. Nat. Astron. Soc., vol. 15, p. 168, 1929)*

L'effet Doppler

L'objectif est de construire un diagramme de Hubble en mesurant la vitesse des galaxies grâce à l'effet Doppler.

L'effet Doppler (ou Doppler-Fizeau du nom de ses deux découvreurs) traduit le décalage de longueur d'onde (ou de fréquence) lorsque une onde est reçue en provenance d'un corps en mouvement.

Il peut être montré que ce décalage est proportionnel à la vitesse du corps et dépend du sens du mouvement. Si le corps s'éloigne, la longueur d'onde d'une lumière visible est décalée vers le rouge (la fréquence diminue), s'il se rapproche, elle est décalée vers le bleu (la fréquence augmente).



Un exemple courant est la sirène des pompiers dont le son paraît plus aigu (fréquence plus élevée) lorsqu'elle se rapproche et plus grave (fréquence moins élevée) lorsqu'elle s'éloigne

La relation Doppler

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

z = décalage Doppler

λ longueur d'onde mesurée (corps en mouvement)

λ_0 longueur d'onde mesurée (corps immobile)

v = vitesse du corps

c = vitesse de la lumière (300 000 km/s)

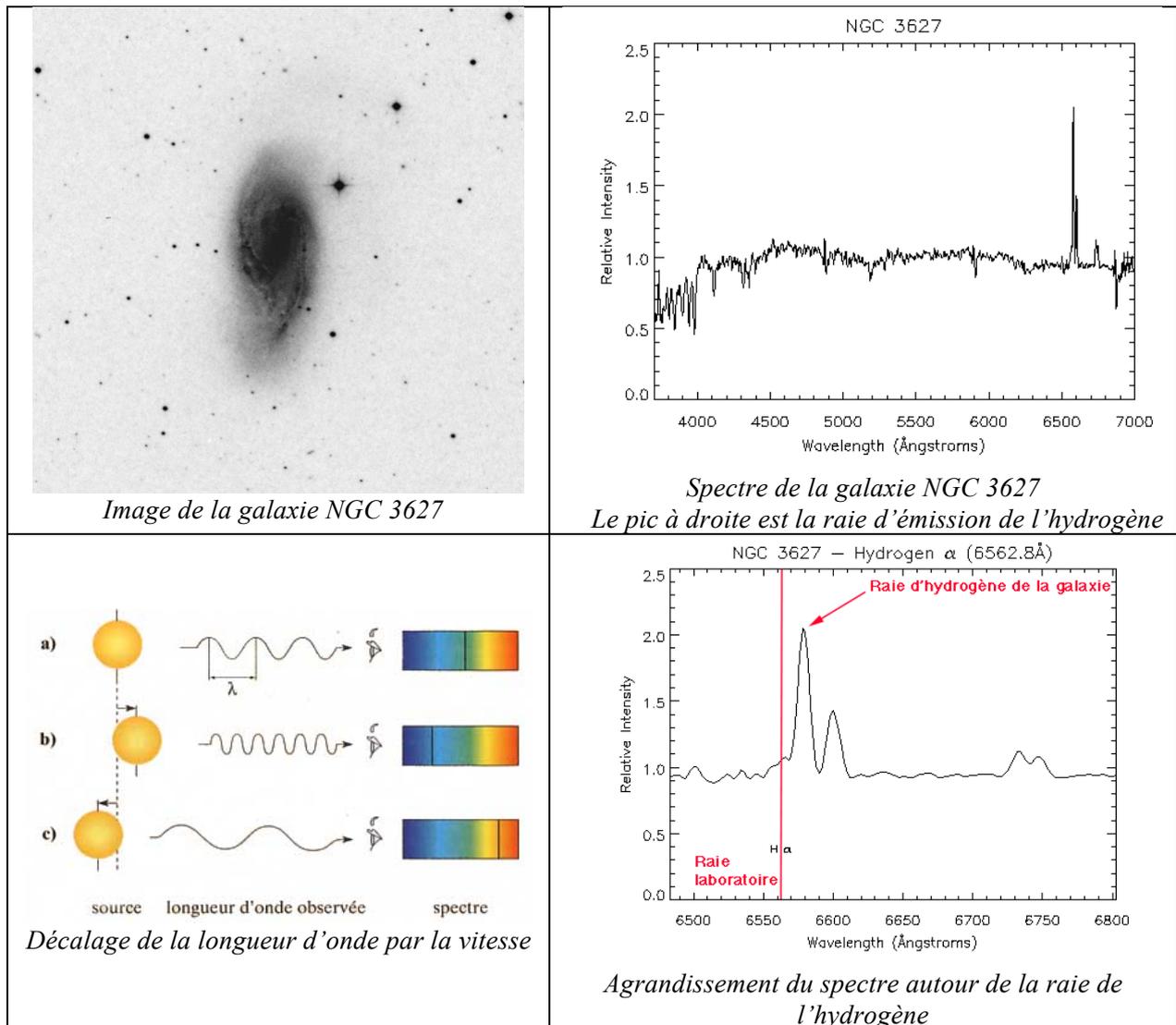
(cette formule n'est exacte que si la vitesse ' v ' est très petite devant la vitesse de la lumière ' c ')

Le spectre des galaxies

L'objectif est de construire un diagramme de Hubble en mesurant la vitesse des galaxies grâce à l'effet Doppler.

La lumière en provenance d'une galaxie peut être décomposée (par un prisme ou un réseau) en un **spectre lumineux**, une répartition de la lumière en fonction de la longueur d'onde (un analogue de l'arc-en-ciel) ;

Dans ce spectre lumineux, on distingue des « **raies** » d'absorption ou d'émission qui sont la trace des éléments chimiques. Dans les galaxies, la principale raie d'émission est la raie de l'hydrogène, l'élément le plus abondant.



Le décalage vers le rouge de la galaxie peut être évaluée sur le spectre de la galaxie en mesurant l'écart entre la longueur d'onde de la raie d'émission de l'hydrogène – la position du premier pic (le deuxième pic est dû à l'azote) – et la longueur d'onde connue au laboratoire.

Les unités

Distances

Pour mesurer les distances, les astronomes utilisent le « parsec »

1 parsec = 1pc = $3,085\ 677 \times 10^{16}$ m, soit environ 3,2616 années-lumière.

Le 'parsec' (pour 'par seconde') est la distance à laquelle on voit distance Terre-Soleil (150 millions de kilomètres) sous un angle d'une seconde d'arc

La distance des astres dans l'Univers se détermine de proche en proche en établissant une « échelle de distance ». Un des objectifs principaux du télescope spatial Hubble a été d'améliorer la précision de cette échelle des distances.

Pour déterminer la distance des galaxies lointaines, on peut utiliser différentes méthodes :

- utiliser des étoiles variables (Céphéides)
- utiliser la dimension apparente de la galaxie
- utiliser la dimension de régions gazeuses (régions HII)
- utiliser la brillance de certaines explosions d'étoiles (supernova SNIa)

Il existe encore une très large incertitude sur la distance des galaxies

La distance des galaxies n'est pas ici calculée ici mais fournie.

Longueur d'onde- vitesse

Pour mesurer les longueurs d'onde, les astronomes utilisent les Angströms (Å)

1 Å = 0.0001 micromètre ou 10^{-10} m

10 000 Å = 1 micromètre = 10^{-6} m

La longueur d'onde de la raie d'hydrogène (la raie Hydrogène α ou H α) est au laboratoire :

$\lambda_0(\text{H}\alpha) = 6562,8 \text{ \AA}$

En utilisant la formule Doppler

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$$

La vitesse de la galaxie peut être calculée à partir du spectre en faisant :

$$v = \left(\frac{\lambda_{\text{mesurée}} - \lambda_0}{\lambda_0} \right) * c$$

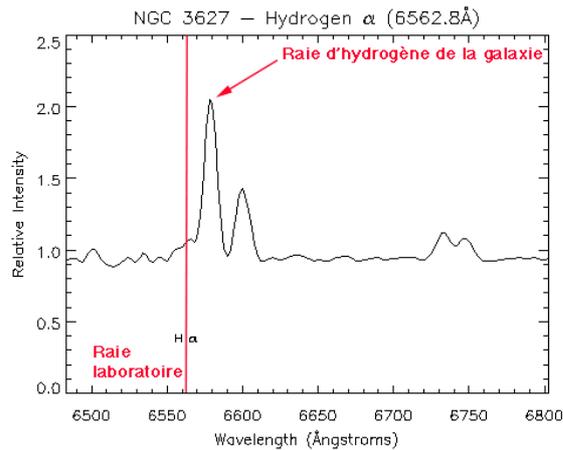
$$v(\text{km} / \text{s}) = \left(\frac{\lambda_{\text{mesurée}}(\text{Å}) - 6562,8}{6562,8} \right) * 300000$$

Procédure

Un échantillon de dix spectres réels de galaxies est fourni à partir d'un catalogue (Atlas Spectrophotométrique de Galaxies, R. Kennicutt, 1992)

Procédure à suivre

- faire les mesures de la position du pic de la raie ' $\lambda_{mesurée}$ ' en Å (en mesurant sur la figure ou en utilisant le fichier numérique)
- remarquer que le décalage est toujours « vers le rouge » correspondant donc à une vitesse d'éloignement



- calculer la vitesse de la galaxie ' v ' en km/s avec la formule Doppler
- reporter ces valeurs dans le tableau des galaxies (ou utiliser le fichier Excel associé)

Loi de Hubble : Table de distance et de vitesse des galaxies.

Galaxy ID	Distance (Mpc)	Incertitude (Mpc)	Décalage vers le rouge des longueurs d'onde		Vitesse (km/sec)
			Hydrogen ($H\alpha$) ($\lambda_{vraie} = 6562.8 \text{ \AA}$)		
Numéro NGC			Mesurée ($\lambda_{mesurée}$)	Décalage (z)	
			$z = \frac{(\lambda_{mesurée} - \lambda_{vraie})}{\lambda_{vraie}}$		$v = z \times c$
<i>Exemple</i>	12.70	0.15	6584.45	0.0033	990.0
1357	24.7	2.90	6608.2	0.0069	2075.3
1832	26.15	5.45			
3034	3.77	0.66			
3147	41.50	5.88			
3310	18.10	0.85			
3471	28.60	6.22			
3627	10.01	1.74			
4775	26.60	4.00			
5548	71.5	5.00			
6643	22.09	6.22			

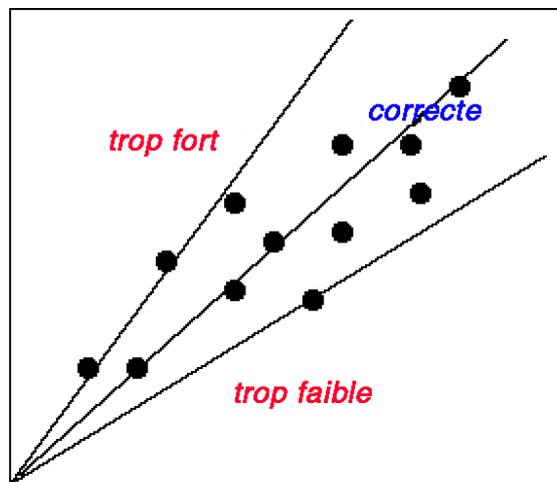
La loi de Hubble

On construit le diagramme de Hubble en reportant dans un graphique la distance 'd' (en abscisse) en fonction de la vitesse 'v' (en ordonnée)

La **loi de Hubble** établit la proportion entre la distance d'une galaxie et sa vitesse d'éloignement selon la relation :

$$v \text{ (km/s)} = H_0 \cdot d \text{ (Mpc)}$$

H_0 est la **constante de Hubble**, la constante de proportionnalité, exprimée en km/s/Mpc (kilomètre par seconde par Megaparsec)



Méthode

La proportion se traduit par une droite et la constante de Hubble est la pente de la droite.

Comme l'expansion est mesurée depuis le Système solaire, où par convention la vitesse d'éloignement est nulle, la droite doit passer par le point (0,0)

La pente peut être estimée visuellement ou par la méthode des moindres-carrés (en tenant compte ou non des barres d'erreur)

On peut aussi utiliser et remplir le fichier Excel fourni, associant la courbe de tendance linéaire

L'âge de l'univers

La loi de Hubble s'écrit :

$$v \text{ (km/s)} = H_0 \cdot d \text{ (Mpc)}$$

où l'indice 0 de H_0 signifie qu'il s'agit de la constante de Hubble au temps de la mesure.

En inversant les termes, elle peut aussi s'écrire :

$$d \text{ (Mpc)} = (1/H_0) * v \text{ (km/s)}$$

Si on fait l'hypothèse que la valeur de H_0 est constante depuis le début de l'expansion, alors la durée de l'expansion peut être calculée en divisant la distance 'd' par la vitesse 'v' :

$$\frac{d \text{ (Mpc)}}{v \text{ (km/s)}} = \frac{1}{H_0}$$

L'inverse de la constante de Hubble est donc la durée de l'expansion qui peut être assimilée à **l'âge de l'univers**

En réalité, l'expansion n'est pas constante au cours du temps du fait notamment de l'attraction gravitationnelle de la matière qui tend à la ralentir. Pour estimer plus exactement l'âge de l'univers, il est nécessaire d'utiliser les équations de la Relativité générale.

Pour une estimation plus exacte de l'âge de l'univers > voir **la détermination exacte** (p. 10)

Méthode

Avec les unités astronomiques utilisées, pour calculer l'âge de l'univers, il est nécessaire d'uniformiser les unités de longueur différentes employées pour les distances (Mpc) et les vitesses (km)

- comme 1 Mpc = 1 Megaparsec = 10^6 pc = $3,09 \times 10^{19}$ km

il faut diviser la valeur de H_0 (km/s/Mpc) par $3,09 \times 10^{19}$ pour obtenir H_0 (en km/s/km) soit H_0 (en 1/s), c'est à dire l'inverse d'un temps en secondes

($1/H_0$), l'inverse de H_0 est alors l'âge de l'univers en secondes

- en divisant le résultat par la durée d'une année en secondes ($3,16 \cdot 10^7$ s), on obtient **l'âge de l'univers en années**

Valeur de Hubble (1929)

Reprendre le diagramme originel de Hubble (v. p. 3)

Calculer l'âge de l'univers obtenu à partir de ces données (en utilisant la pente de la droite)

Comparer à l'âge de la Terre

Les données utilisées par Hubble étaient inexactes en raison d'une sous-estimation systématique de la distance des galaxies. Ce résultat initial a été une des raisons pour lesquelles l'hypothèse d'une expansion de l'univers n'a pas été considérée comme valable jusqu'au milieu du XXe siècle.

COMPLEMENTS

L'interprétation de l'expansion de l'univers

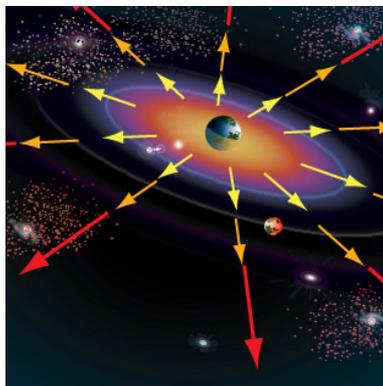
Dans le cadre de la cosmologie actuelle, le décalage vers le rouge de la lumière des galaxies est interprété comme l'effet d'une vitesse d'expansion.

Dans l'interprétation de la relativité générale, la vitesse d'expansion des galaxies n'est pas une vitesse physique, elle traduit seulement la dilatation de l'espace-temps.

D'autres interprétations du décalage vers le rouge ont été proposées comme l'effet de la fatigue de la lumière ou la théorie de la masse variable.

La loi de Hubble est une droite qui passe par l'origine (le point 0,0) mais cela ne signifie pas que l'expansion opère uniquement depuis notre position dans l'espace.

L'hypothèse cosmologique suppose que la même loi de Hubble serait établie par un observateur situé en un point quelconque de l'univers.



Ce n'est actuellement qu'une supposition. Elle est fondée sur l'hypothèse que l'univers dans son ensemble est totalement homogène et isotrope (au moins en moyenne) à tout instant.

Cette hypothèse n'a pu encore être vérifiée. Certaines théories prédisent en effet que l'expansion pourrait être différente selon les régions d'univers

La détermination exacte de l'âge de l'univers

Le calcul exact de l'âge Univers se base actuellement sur la relativité générale (RG).

En faisant l'hypothèse d'un univers homogène et isotrope, les équations de la RG, qui décrivent l'interaction de l'espace et de la matière, peuvent être résolues.

Elles fournissent un âge de l'univers en fonction de la densité de la matière.

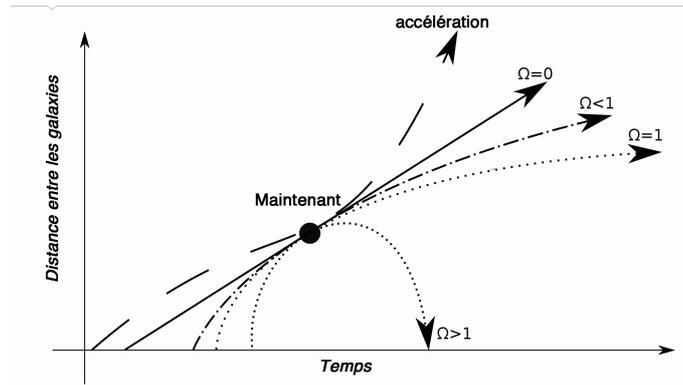
Dans l'hypothèse d'un univers dont la densité de matière est égale à une densité critique, l'âge de l'univers est alors

$$T(\text{univers}) = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{1}{H_0} \right)$$

L'accélération de l'expansion

Depuis 1998, de nouvelles observations sont venues suggérer que l'expansion subit non seulement l'effet de ralentissement dû à l'attraction de la matière mais un **effet d'accélération** dû à une **hypothétique énergie noire** depuis probablement quelques milliards d'années. Cet effet a été établi en prolongeant la loi de Hubble à plus grande distance.

La loi de Hubble à grande distance est établie non grâce des galaxies mais grâce à des explosions d'étoiles très brillantes, les supernovae de type Ia, SNIa, qui sont visibles à très grande distance.

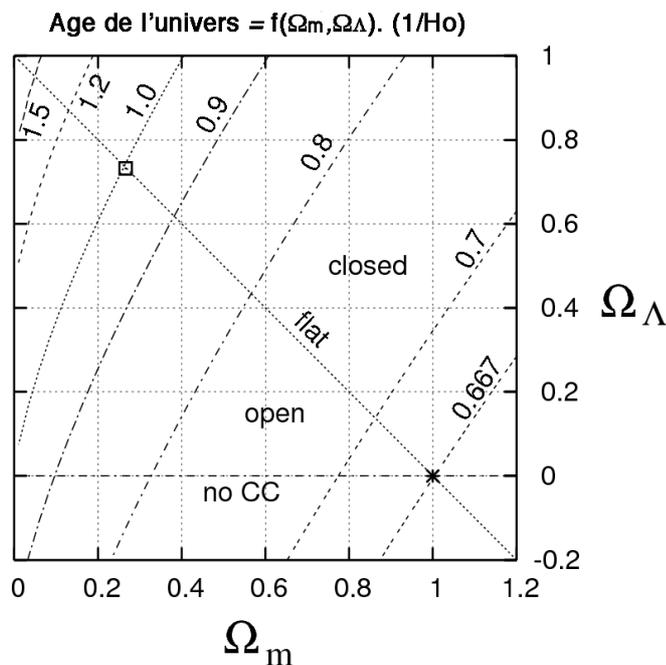


Si cette accélération de l'univers est confirmée, l'âge de l'univers dépend alors non seulement de la densité de matière (notée Ω_m) mais aussi de la densité d'énergie noire (notée Ω_Λ).

L'âge exact de l'univers doit donc être calculé comme :

$$T(\text{univers}) = f(\Omega_m, \Omega_\Lambda) \cdot \left(\frac{1}{H_0} \right)$$

où le facteur correctif $f(\Omega_m \text{ et } \Omega_\Lambda)$ est évalué ici selon les valeurs de Ω_m et Ω_Λ



Ex : $\Omega_m=0,3$ et $\Omega_\Lambda=0,7$ donne $f=0,964$
 pour $H_0=72$, $(1/H_0)= 13,58$ Ga (milliards d'années), l'âge réel est $13,58 \cdot 0,964=13,09$ Ga

Sources

Un échantillon de dix galaxies est fourni

Pour chaque galaxie est donné

- l'image de la galaxie (extraite du Palomar Observatory Sky Survey)

http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form

- la distance de la galaxie estimée (extraite de la NED Extragalactic Database)

<http://ned.ipac.caltech.edu/forms/d.html>

La valeur moyenne, extraite avec l'incertitude associée (standard déviation), est reportée dans le Tableau des galaxies

- le spectre global de la galaxie et la région de la raie d'hydrogène

(extrait de l'Atlas Spectrophotométrique de Galaxies, R. Kennicutt, Astrophysical Journal Supplement Series, vol. 79, no. 2, April 1992, p. 255-284)

<http://adsabs.harvard.edu/abs/1992ApJS...79..255K>

Liens externes

- base de données extragalactiques (NED Extragalactic Database)

<http://ned.ipac.caltech.edu/>

- calculateur cosmologique

A Cosmology Calculator for the World Wide Web

<http://www.astro.ucla.edu/~wright/DlttCalc.html>

E. Wright (2006) Publ.Astron.Soc.Pac., vol.118, p. 1711

<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0609593>