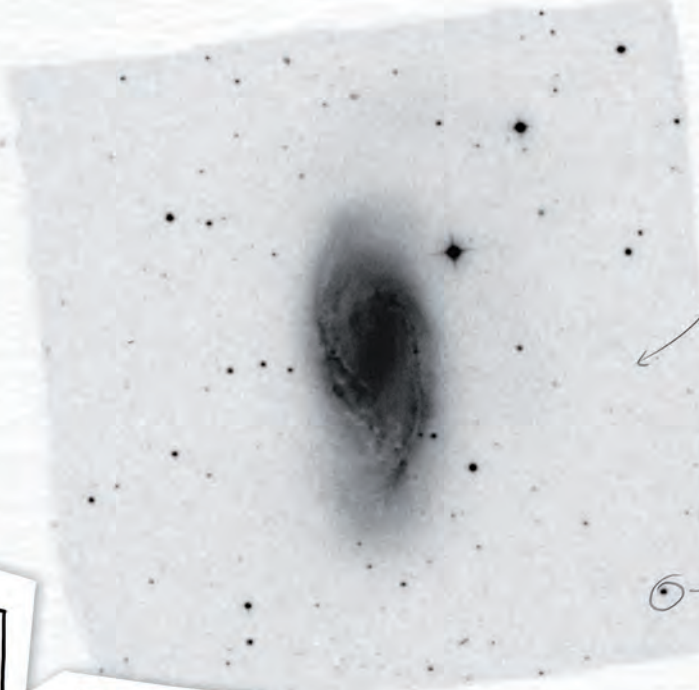
Astro Exos

MESURER L'ÂGE DE L'UNIVERS

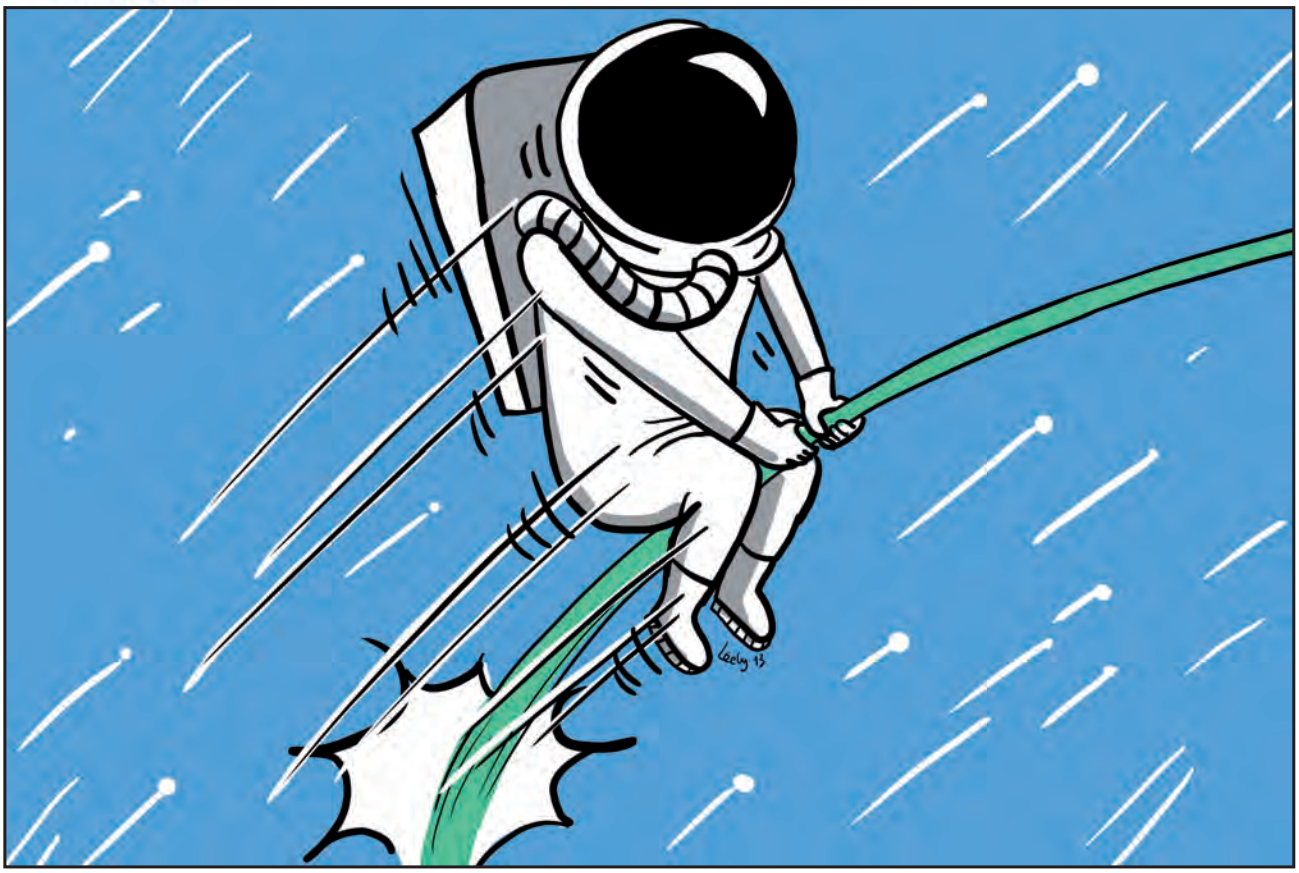
L'ENQUÊTE





décalage vers le rouge ?
v. spectre ...

îledeFrance



Astro Exos

Responsables éditoriaux

Roland Lehoucq et Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Contributeur

Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Conception graphique

Aurélie Bordenave, *aureliebordenave.fr*

Photo de couverture :

Image de la galaxie NGC 3267 (Palomar Observatory Sky Survey (NASA-STSI)

Cet Astro Exo est librement inspiré de la page « Hubble's law : an introductory astronomy lab » de l'université de Washington (USA)

Introduction

Cours / rappel historique

Bibliographie

Données

À vous de le faire !

Glossaire

Introduction

Le calcul de la distance des galaxies, couplé à la détermination de leur vitesse, a permis il y a près d'un siècle de démontrer l'expansion de l'Univers. Cet exercice montre comment l'âge de l'univers peut être calculé à partir de la vitesse d'expansion des galaxies

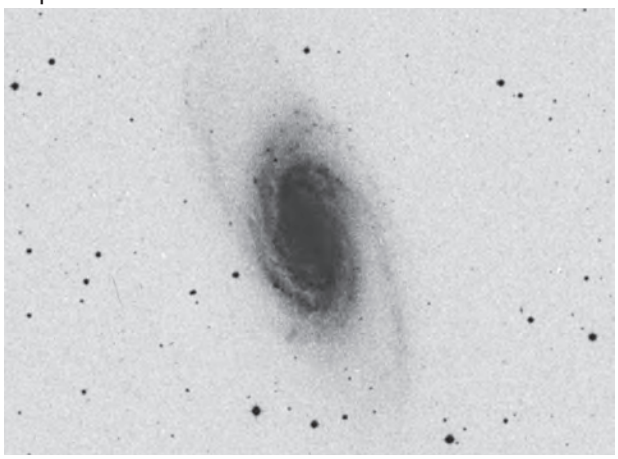
Hubble et les galaxies

Jusqu'au début du XX^{ème} 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 Edwin Hubble de démontrer l'expansion de l'univers.



Photographie de la galaxie NGC 2903

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 tente en 1917 de décrire la distribution de la matière dans l'univers, il construit 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 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 constate 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 ».

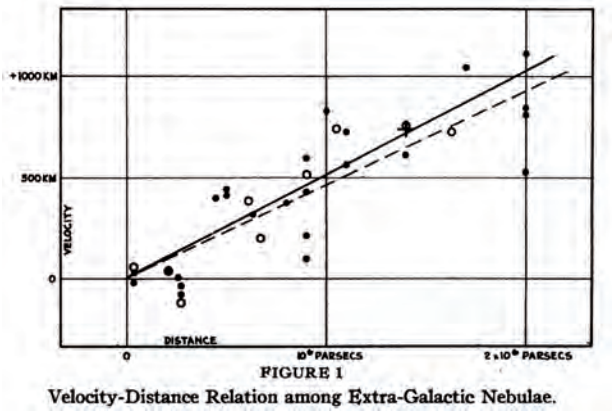


FIGURE 1

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)

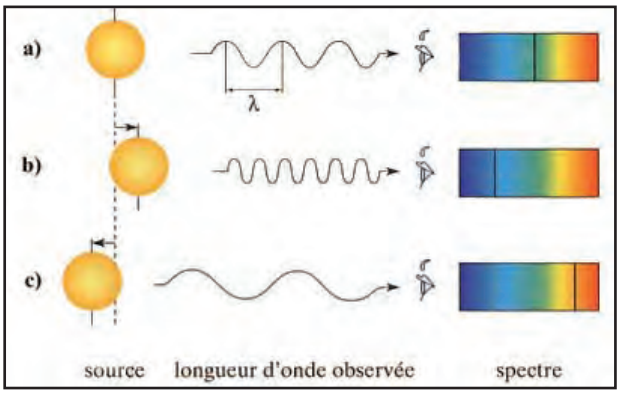


Edwin Hubble observant au télescope

L'effet Doppler

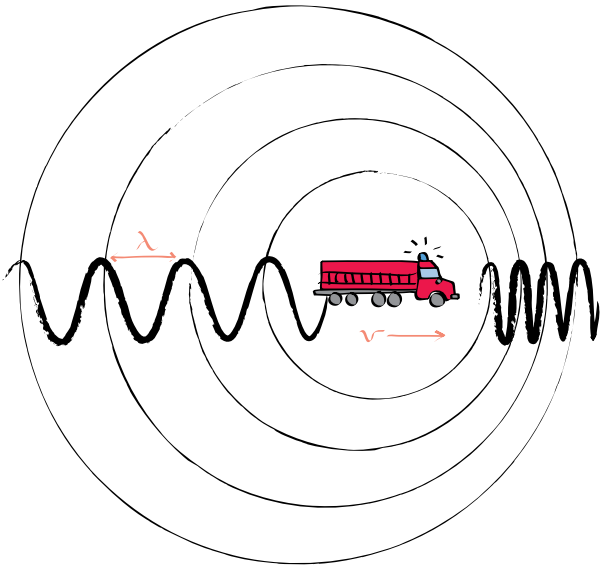
L'objectif est de construire un diagramme de Hubble en mesurant la vitesse des galaxies grâce à l'effet Doppler.

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.



Décalage de la longueur d'onde par la vitesse

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

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

z : décalage Doppler

λ : longueur d'onde mesurée (corps en mouvement)

λo : 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.

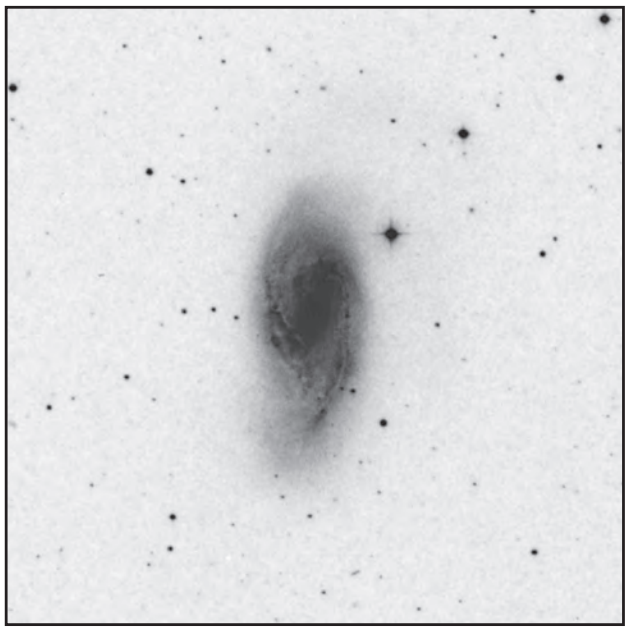
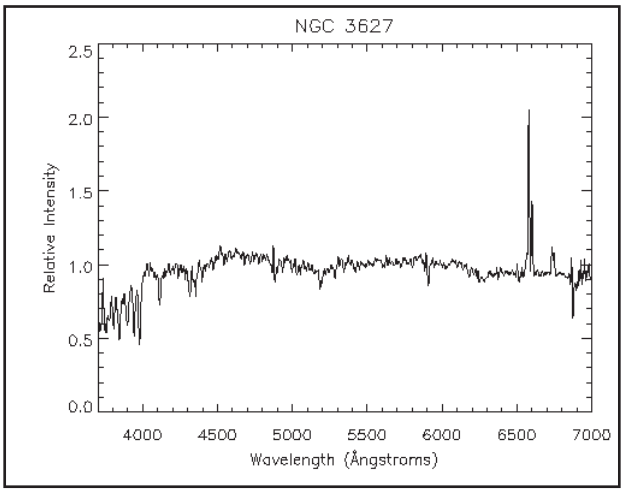
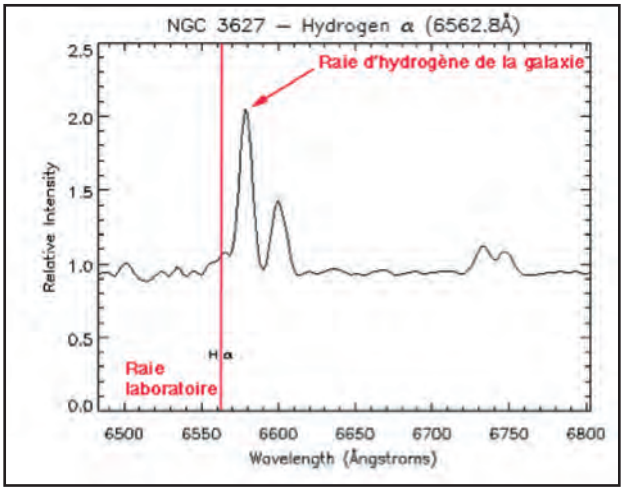


Image de la galaxie NGC 3627



Spectre de la galaxie NGC 3627

Le pic à droite est la raie d'émission de l'hydrogène



Agrandissement du spectre autour de la raie de l'hydrogène

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= 3,085 677×1016 m, soit environ 3,2616 années-lumière.

Le « parsec » (pour « par seconde») est la distance à laquelle on voit la 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 mais fournie.

Longueur d'onde - vitesse

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

1 Å = 0,0001 micromètre (μm) = 10^{-10} m

10 000 Å = 1 micromètre (μm) = 10^{-6} m

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

$\lambda o(H\alpha)$ = 6562,8 Å

En utilisant la formule Doppler

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

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

$$v = \left(\frac{\lambda mesurée - \lambda o}{\lambda o} \right) * c$$

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

Procédure

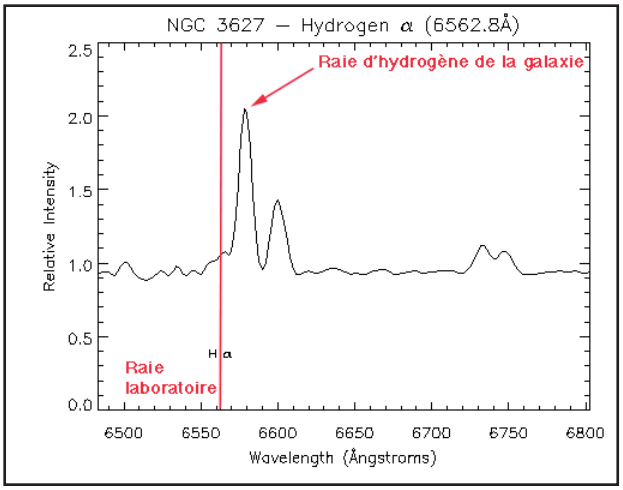
Un échantillon de dix spectres réels de galaxies est fourni à partir d'un catalogue (Atlas Spectrophotometrique de Galaxies, R. Kennicutt, 1992)

> annexes n°I à X

Procédure à suivre

• faire les mesures de la position du pic de la raie « λ mesurée » en Å (en mesurant sur la figure ou en utilisant le fichier numérique)

Question 1 : Montrer qu'il y a bien « expansion de l'Univers » c'est-à-dire que toutes les galaxies s'éloignent de la nôtre



• calculer la vitesse de la galaxie « v » en km/s avec la formule Doppler

• reporter ces valeurs de vitesses dans le tableau des galaxies où les distances sont données (ci-dessous également en annexe n°XI ou utiliser le fichier Excel associé)

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

Galaxy ID			Décalage vers le rouge des longueurs d'onde		
			Hydrogen (Hα) (λvraie =6562.8 Å)		Vitesse (km/sec)
Numéro NGC	Distance (Mpc)	Incertitude (Mpc)	Mesurée (λ mesurée)	Décalage (z)	
			$z = (\lambda mesurée - \lambda vraie)$ / $\lambda vraie$		$v = z \times c$
Exemple	*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

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

$v\ (km/s) = Ho\ .\ d\ (Mpc)$ où la distance « d » est donnée en Megaparsec (Mpc) : 1 $Mpc = 10^6 pc = 3{,}09 \times 10^{19}\ km$

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

Méthode

• construire le diagramme de Hubble en reportant dans un graphique la distance *« d »* (en abscisse) en fonction de la vitesse *« v »* (en ordonnée)

• examiner le graphique v(d)

Question 2 : Quelle condition supplémentaire doit-on imposer et quel point doit-on ajouter pour calculer la constante de Hubble ?

• déterminer la meilleure droite passant par les points du graphique soit visuellement soit par une régression linéaire (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: *Table de distances et de vitesses 1_aremplir.xlsx*

> annexe n°XII

Question 3 : Que représente la pente (ou coefficient directeur) de la droite sur ce graphique ? en quelles unités est-elle ?

L'âge de l'univers

La loi de Hubble s'écrit :

$v\ (km/s) = Ho\ .\ d\ (Mpc)$

où l'indice *o* de *Ho* signifie qu'il s'agit de la constante de Hubble au temps de la mesure.

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

$d\ (Mpc) = (1/Ho)\ x\ v\ (km/s)$

Si on fait l'hypothèse que la valeur de *Ho* 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* » .

Méthode

Question 4 : vérifier que *1/Ho* a la dimension d'un temps

• ce temps est la durée de l'expansion qui peut être assimilée à l'âge de l'univers

• en utilisant la valeur *Ho* (à partir du coefficient directeur de la droite calculée plus haut), calculer l'âge de l'univers en secondes en sachant que 1 Megaparsec = 10^6 pc = $3{,}09\times10^{19}$ km

• la convertir en années

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 ci-dessous.

Valeur de Hubble (1929)

• reprendre le diagramme originel de Hubble (v. p. 3)

Question 5 : quelle erreur a-t-il commise sur son échelle ? Corriger l'erreur

• 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.

Question 6 : qu'en déduisez-vous ?

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 XX^{ème} siècle.

COMPLÉMENTS

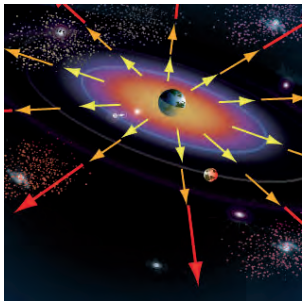


L'interprétation de l'expansion de l'univers

Dans le cadre de la cosmologie newtonienne, 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.

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 :

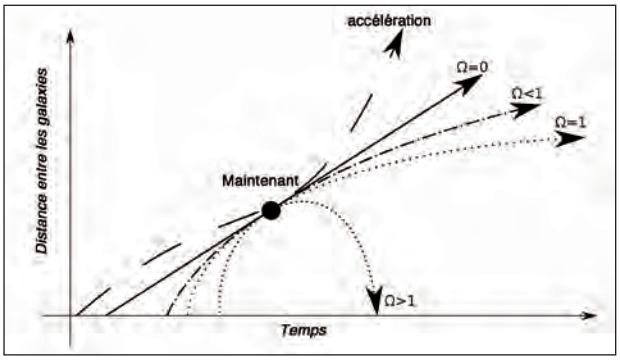
$$T(univers) = \frac{2}{3}.\left(\frac{1}{Ho}\right)$$

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 pas grâce à des galaxies mais grâce à des explosions d'étoiles très brillantes, les supernovae de type Ia, SNIa, qui sont visibles à très grande distance.

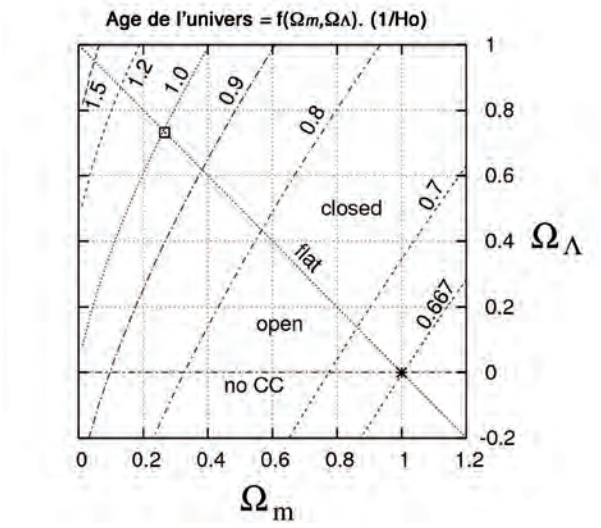


Si cette accélération de l'univers est confirmée, l'âge de l'univers dépend alors non seulement de la densité de matière (notée Ω_m) mais aussi de la densité d'énergie noire (notée Ω_Λ).

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

$$T(univers) = f(\Omega_m, \Omega_\Lambda).\left(\frac{1}{Ho}\right)$$

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



Ex : Les dernières données du satellite Planck (2013) donnent Ω_m=0,3175 et Ω_Λ=0,6825

L'intersection de ces deux valeurs fournit f=0,948

Pour la valeur Ho=67,11 obtenue par Planck, $(1/Ho)$= $14,58\ Ga$ (milliards d'années)

L'âge réel de l'univers est donc 14,58 x 0,948=13,82 Ga

Sources

Un échantillon de dix galaxies est fourni.

Pour chaque galaxie est donné :

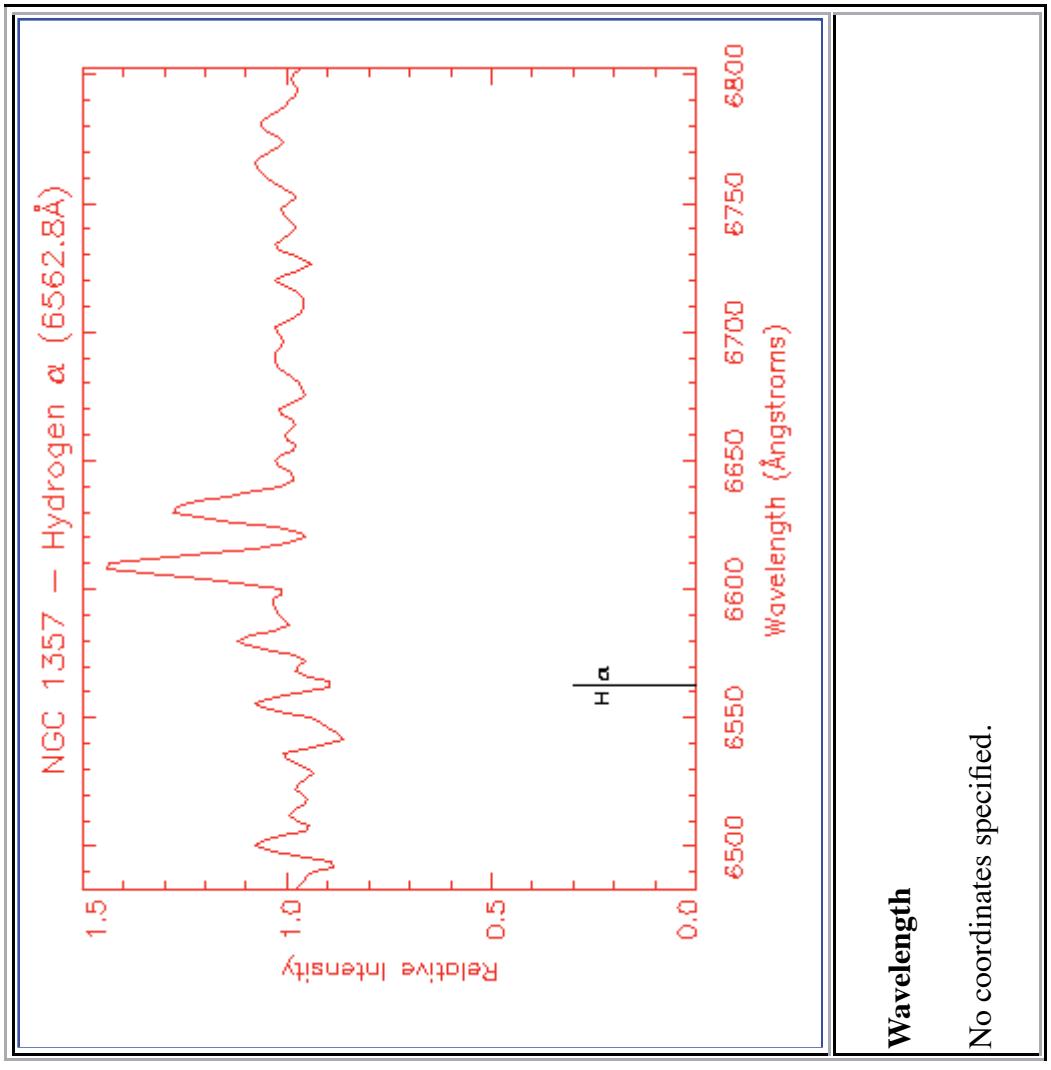
- L'image de la galaxie (extraite du Palomar Observatory Sky Survey) *http://archive.stsci.edu/cgi-bin/dss_form*
- La distance de la galaxie estimée
(Extraite de la NED Extragalactic Database) *http://ned.ipac.caltech.edu/forms/d.html*
- La valeur moyenne, extraite avec l'incertitude associée (standard 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 Spectrophotometrique 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

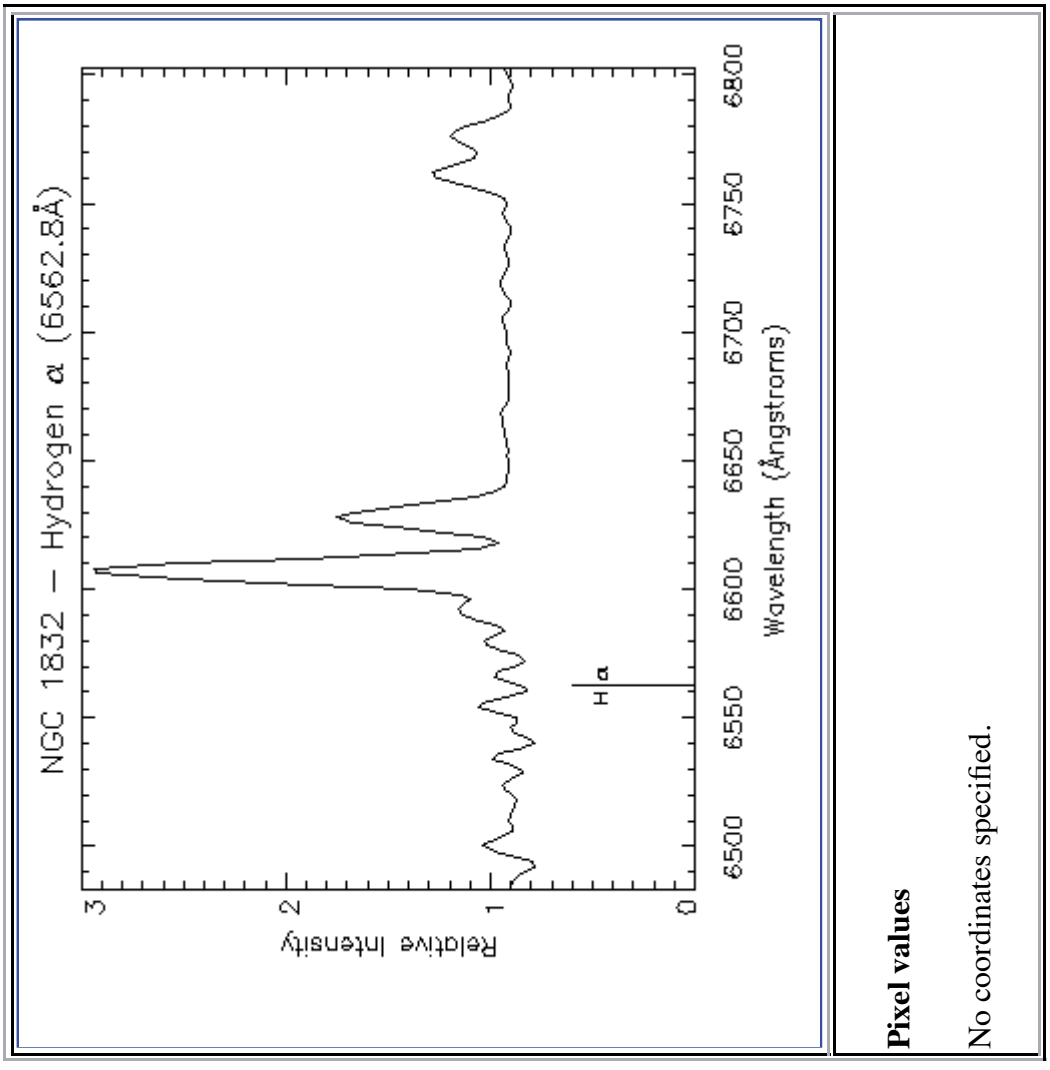
ANNEXES





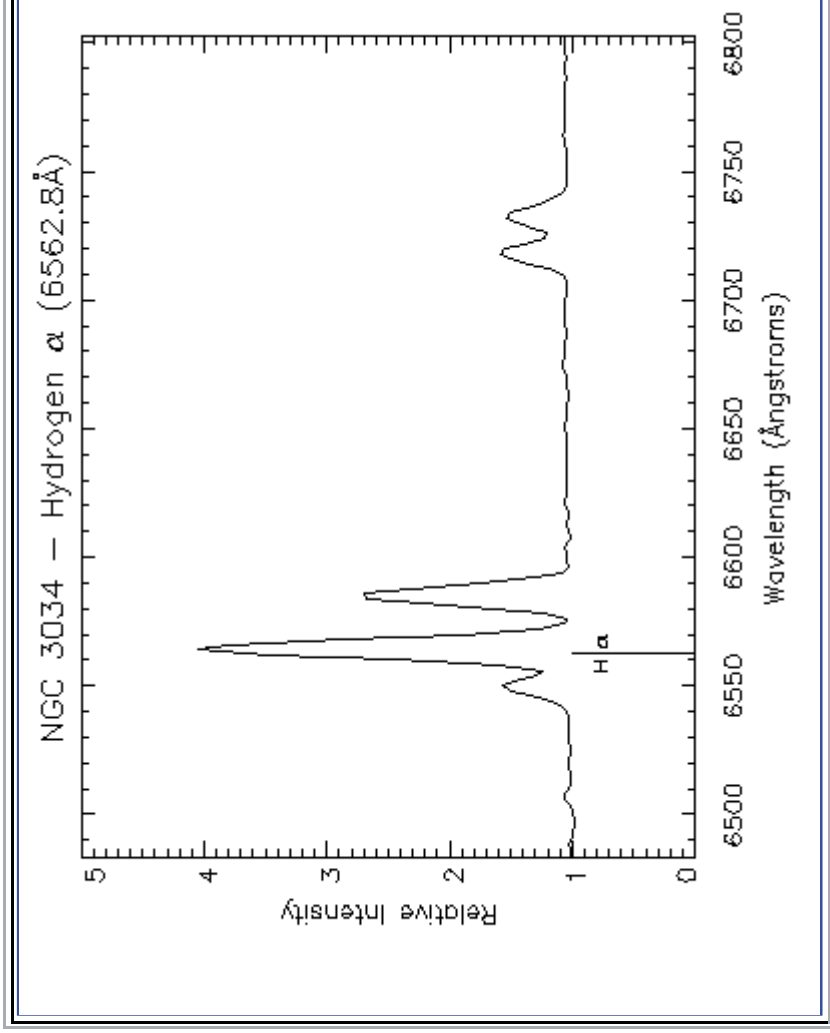
Wavelength

No coordinates specified.



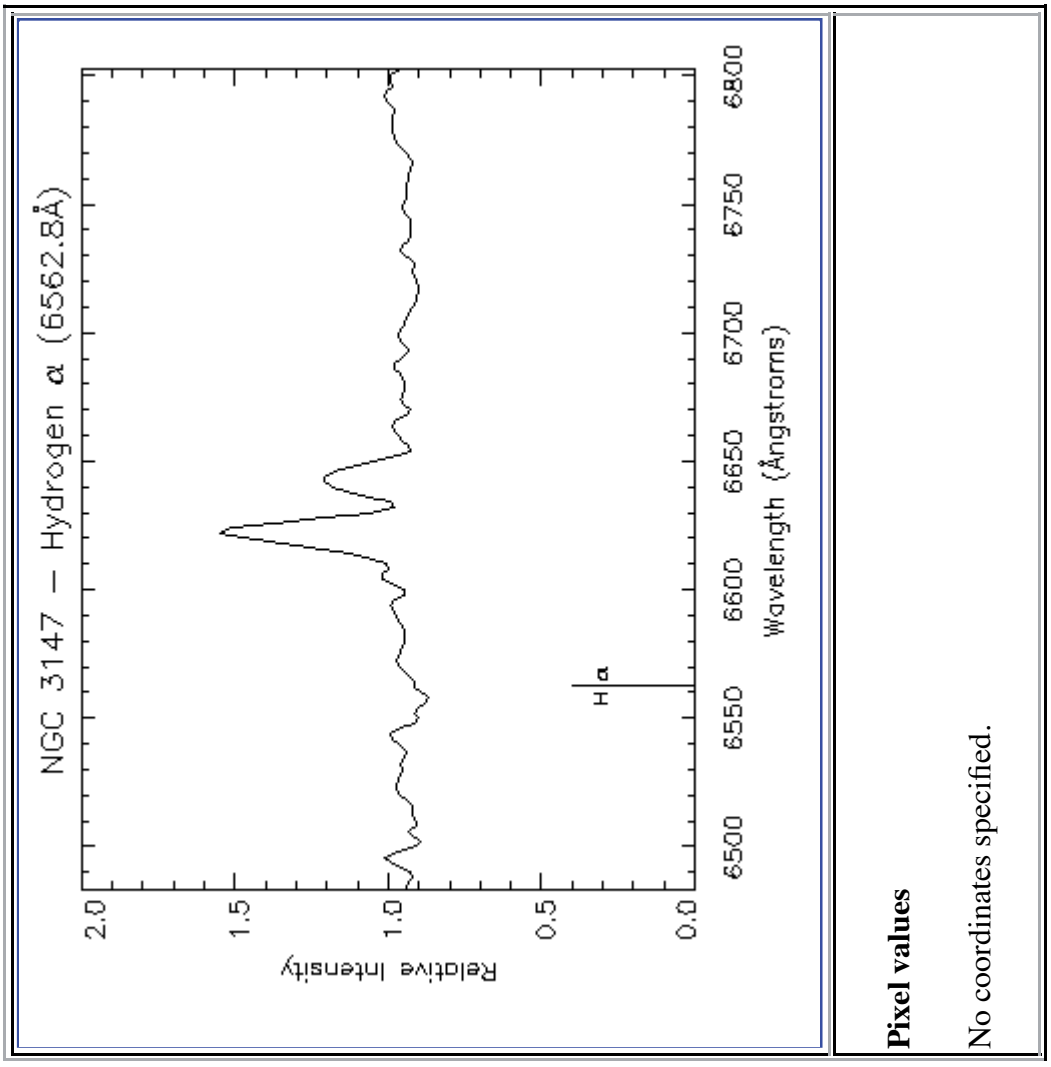
Pixel values

No coordinates specified.



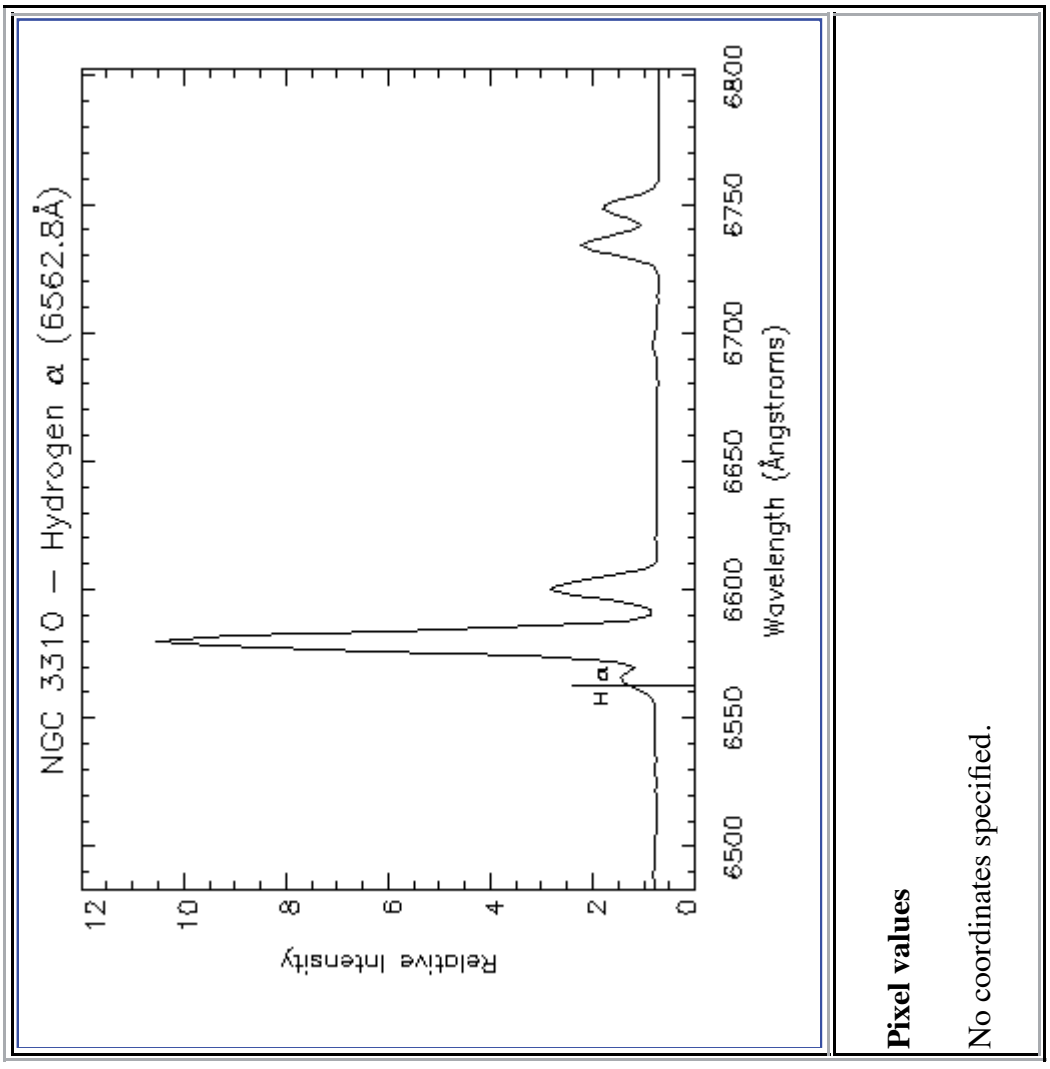
Pixel values

No coordinates specified.



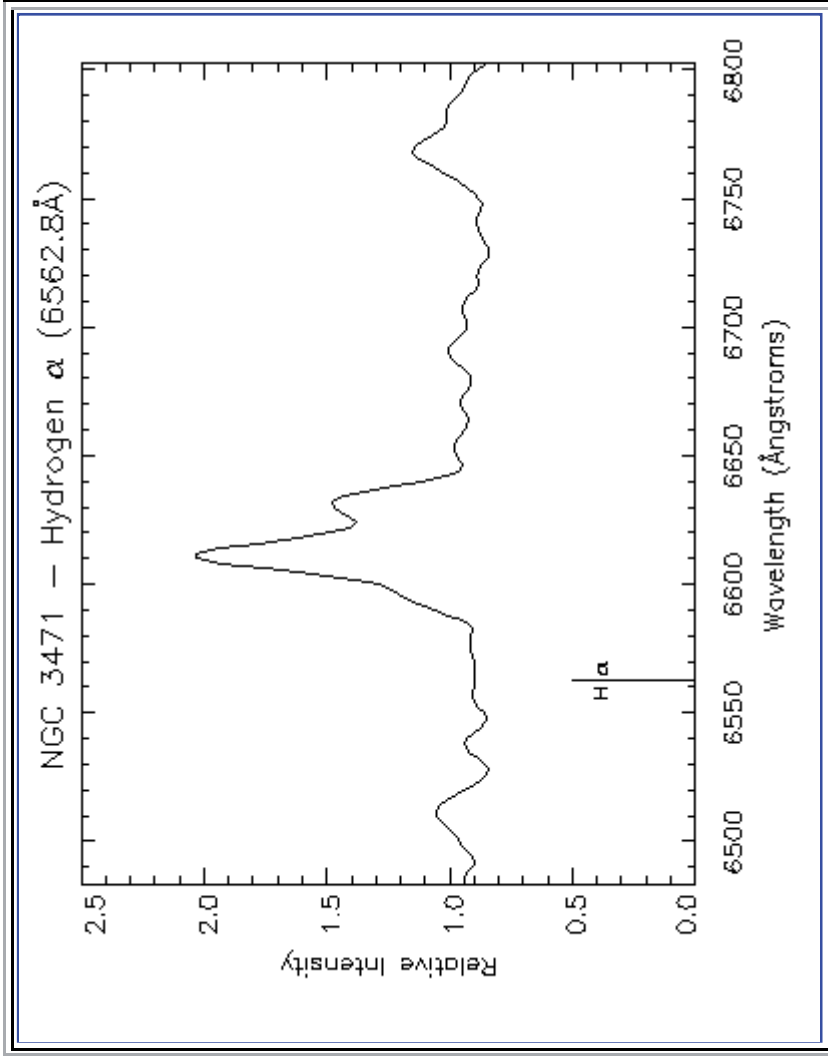
Pixel values

No coordinates specified.



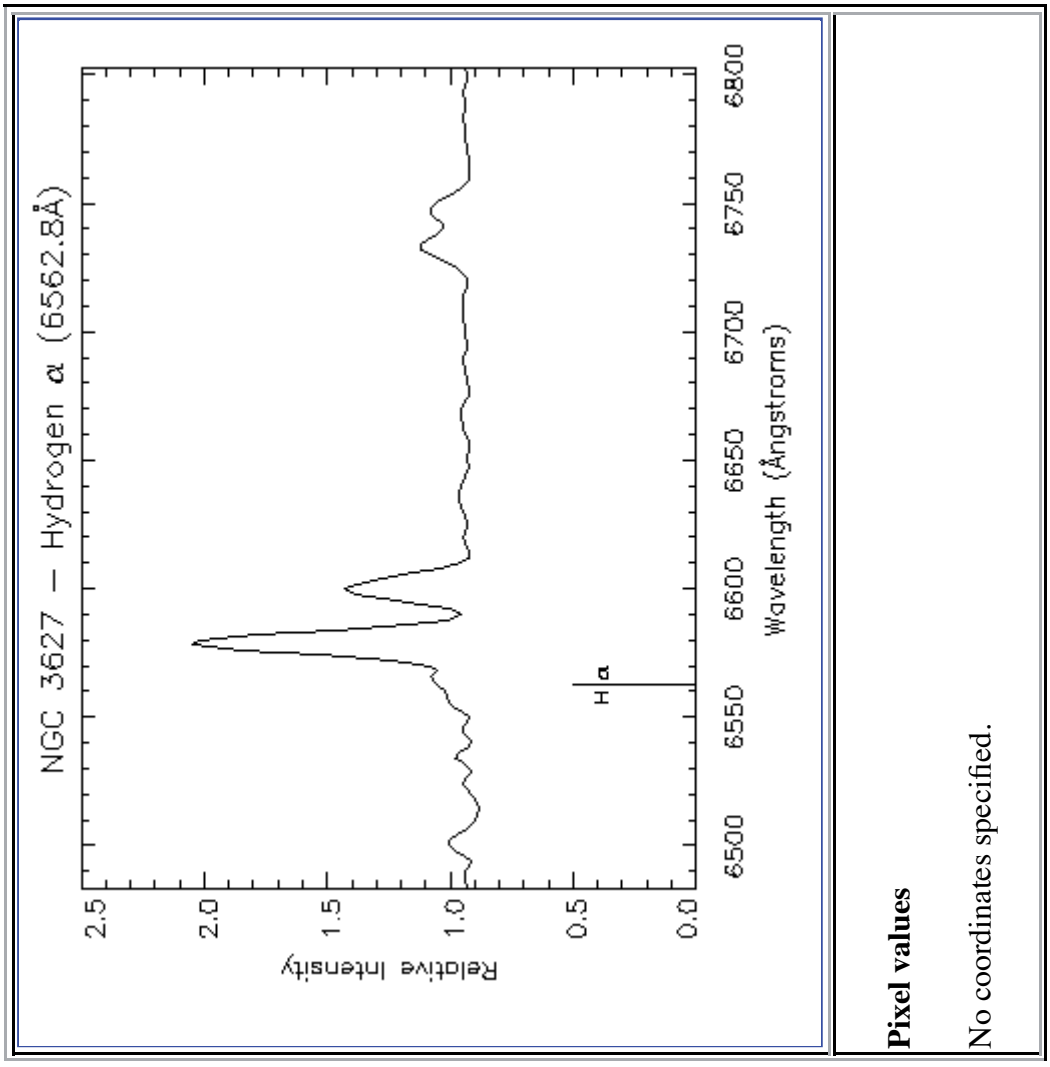
Pixel values

No coordinates specified.



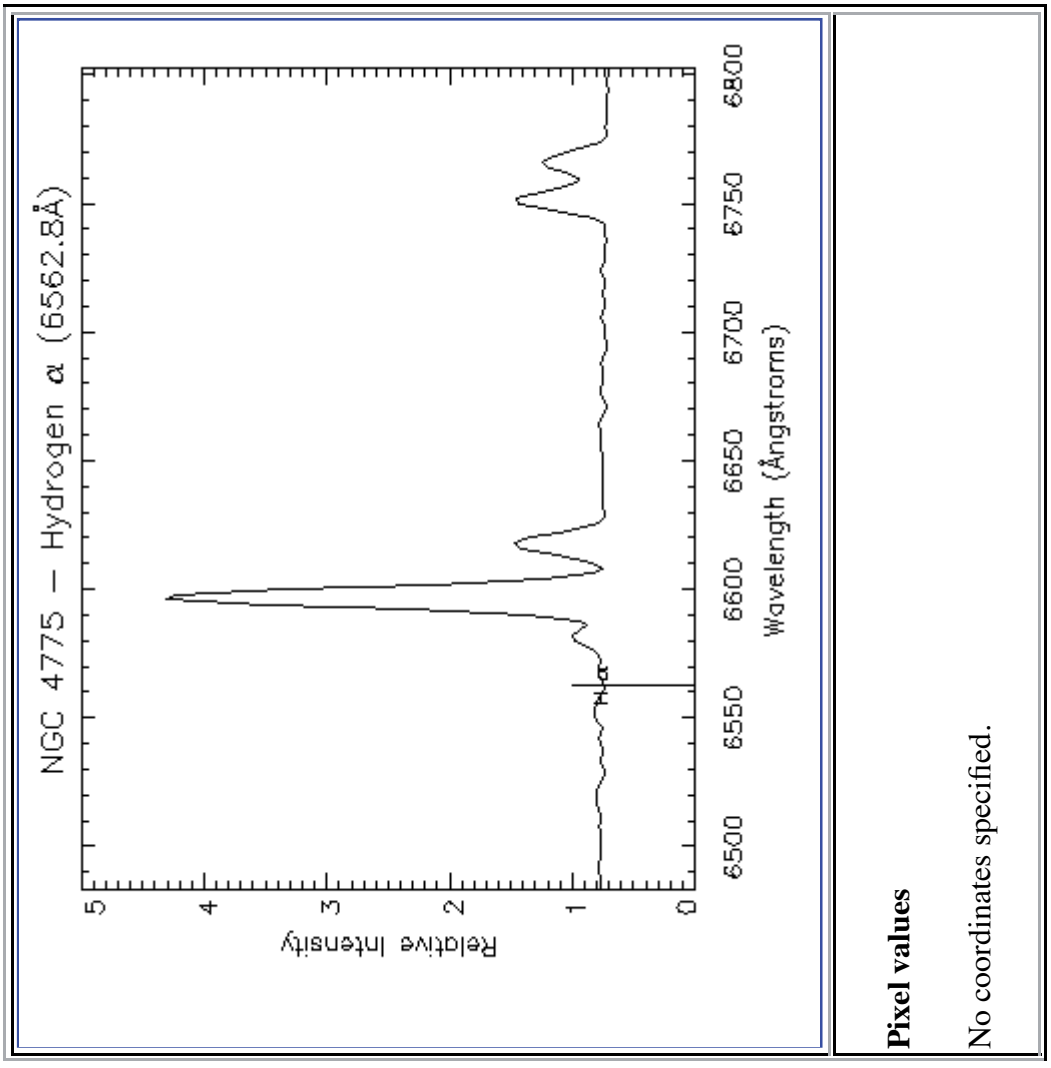
Pixel values

No coordinates specified.



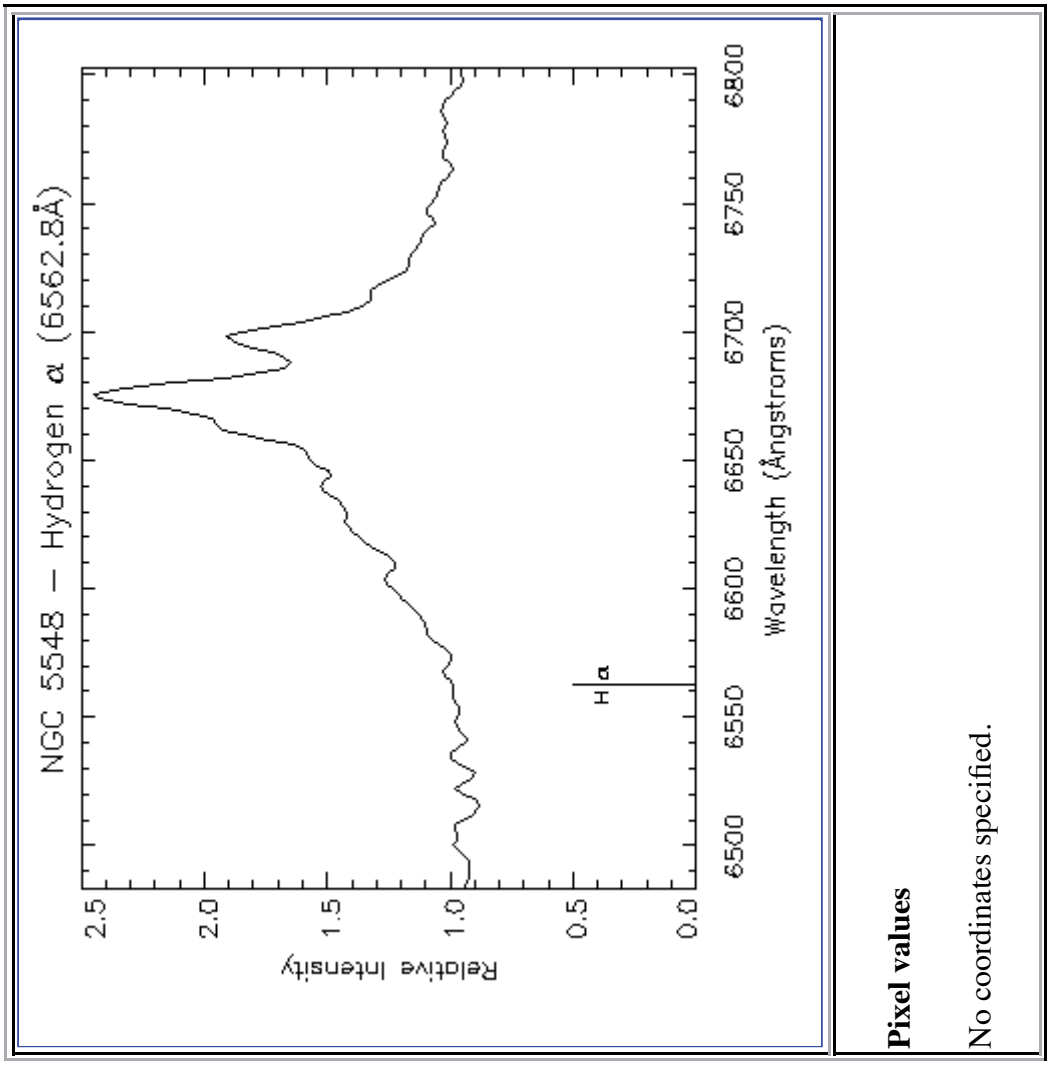
Pixel values

No coordinates specified.



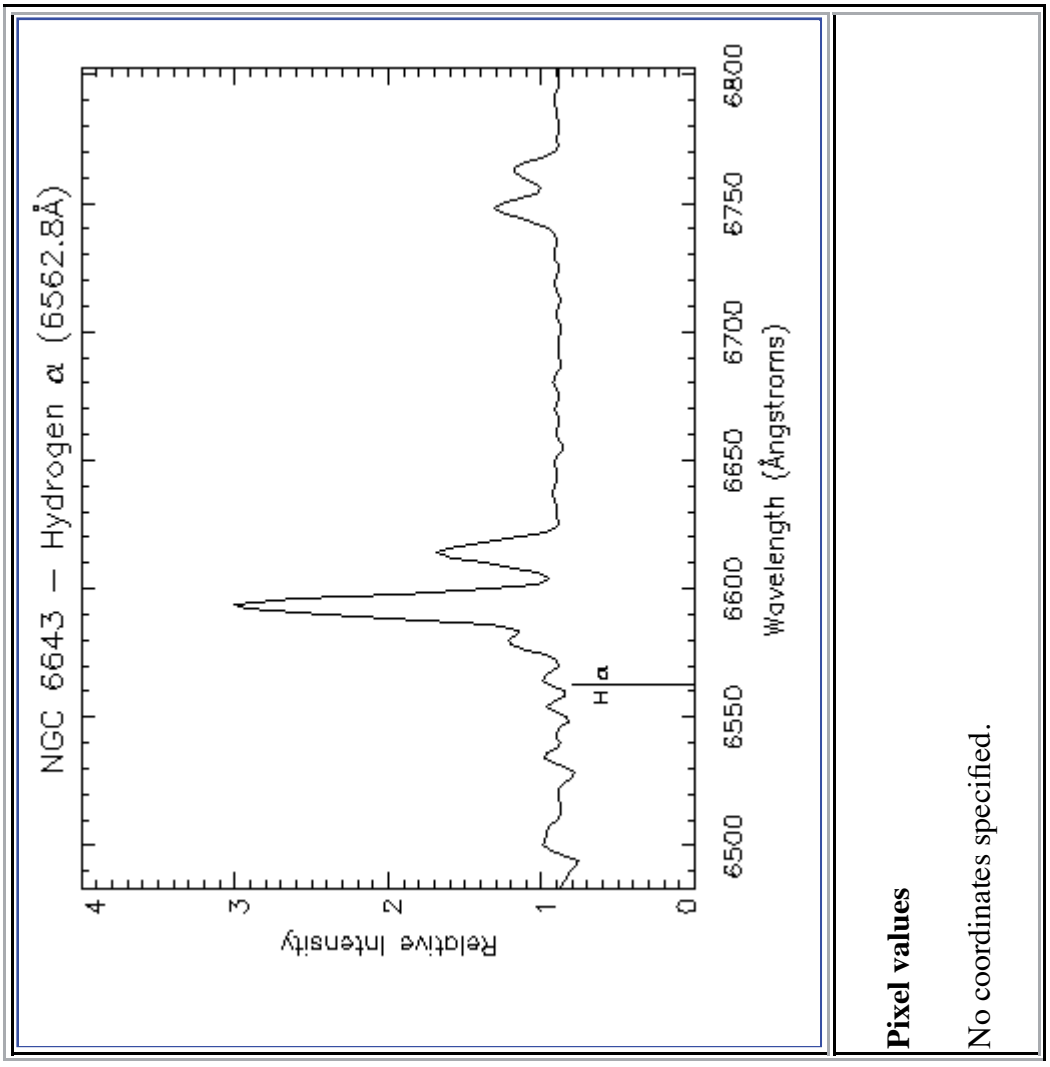
Pixel values

No coordinates specified.



Pixel values

No coordinates specified.



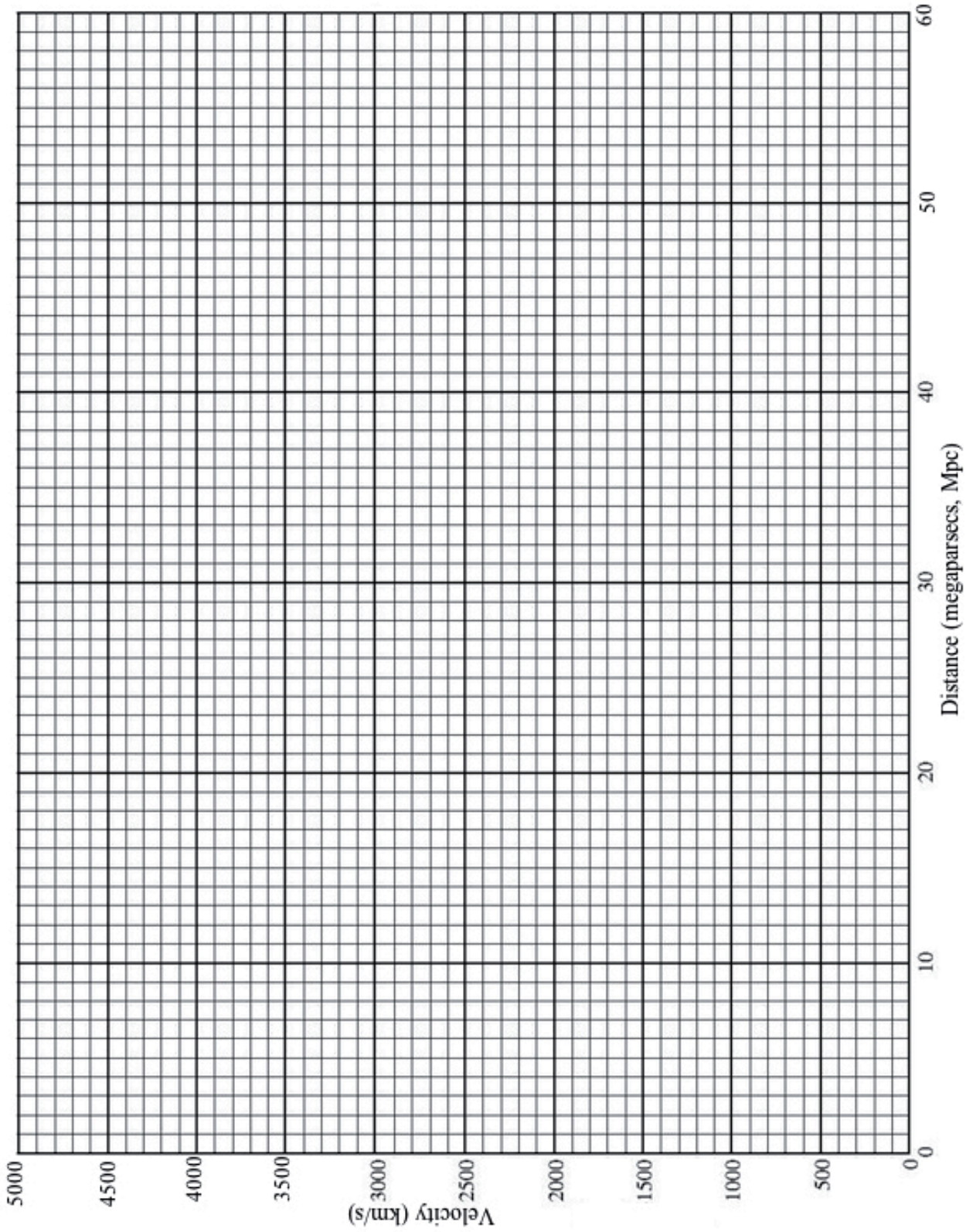
Pixel values

No coordinates specified.

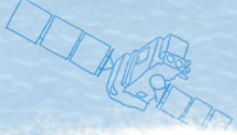
Astronomie

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

Galaxy ID			**Décalage vers le rouge des longueurs d'onde**		
			Hydrogen (Hα) (λvraie =6562.8 Å)		**Vitesse (km/sec)**
Numéro NGC	**Distance (Mpc)**	**Incertitude (Mpc)**	Mesurée (λ mesurée)	Décalage (z)	
			$z = \frac{(\lambda\text{mesurée} - \lambda\text{vraie})}{\lambda\text{vraie}}$		$v = z \times c$
Exemple	*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			

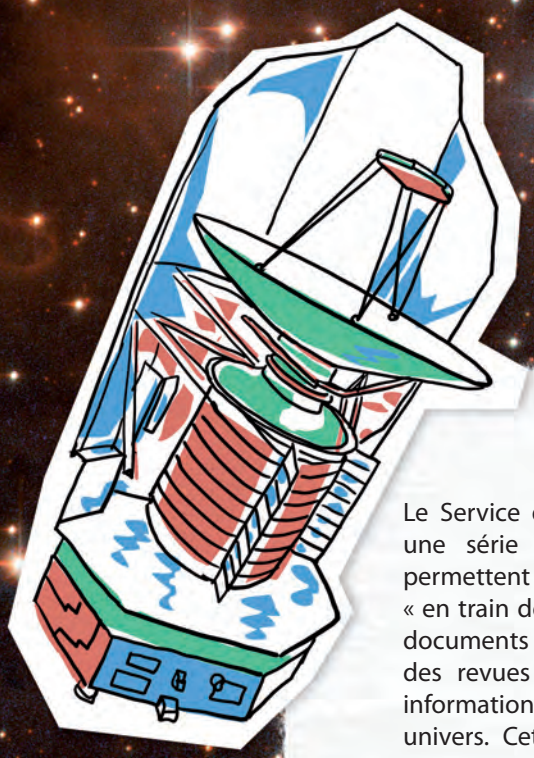

Velocity (km/s)
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
0
10
20
30
40
50
60
Distance (megaparsecs, Mpc)





Notes

Notes



Le Service d'Astrophysique du CEA propose une série d'exercices d'astrophysique qui permettent de se plonger dans la recherche « en train de se faire ». Il s'agit d'analyser des documents extraits d'articles publiés dans des revues scientifiques pour en tirer des informations sur les objets qui peuplent notre univers. Cette activité peut être menée en classe ou en petit groupe d'élèves et permet d'illustrer différents points des programmes de physique-chimie de Première et de Terminale Scientifique.

Cet exercice propose de déterminer l'âge de l'univers à partir de la mesure de la vitesse des galaxies. A partir d'un échantillon réel de galaxies, la méthode utilise l'effet Doppler pour évaluer la vitesse apparente d'éloignement des galaxies et calculer le taux d'expansion de l'Univers (constante de Hubble).

