

De la spectro en action:

Est-ce qu'on peut regarder s'éloigner et tourner* des galaxies ?

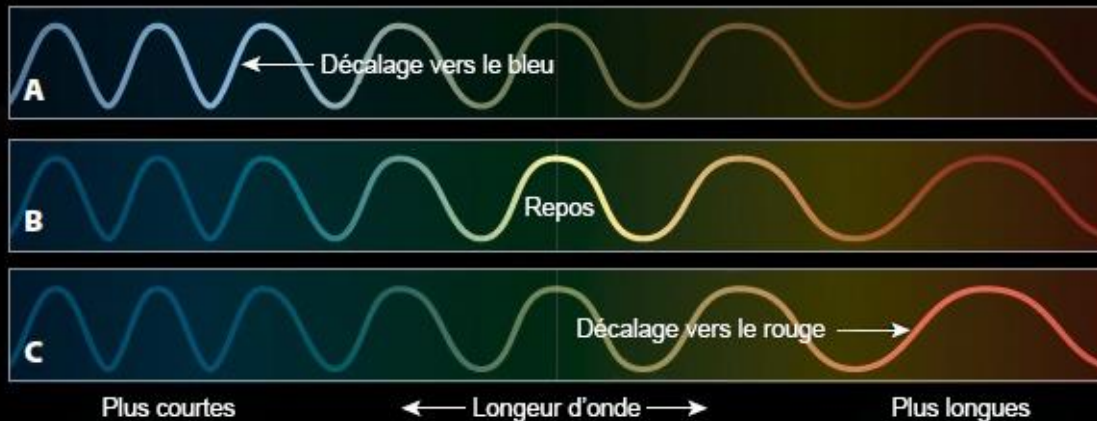
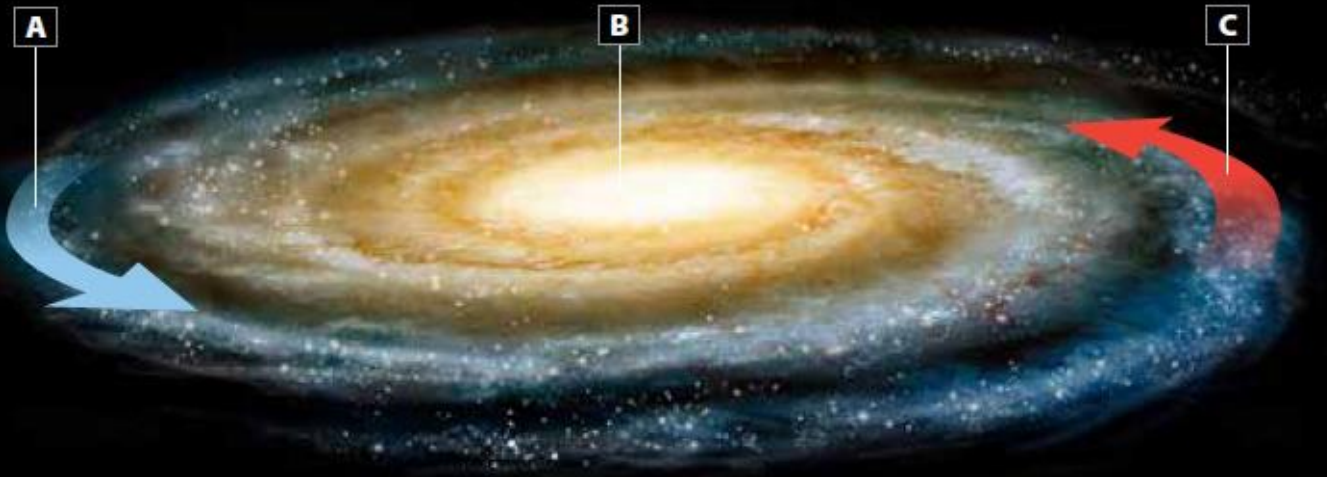
Jean-Philippe Nougayrède

SPOC, MGP2A, U31

62eme RICAR printemps 2022

* et donc peser !

Mesure de la rotation d'une galaxie



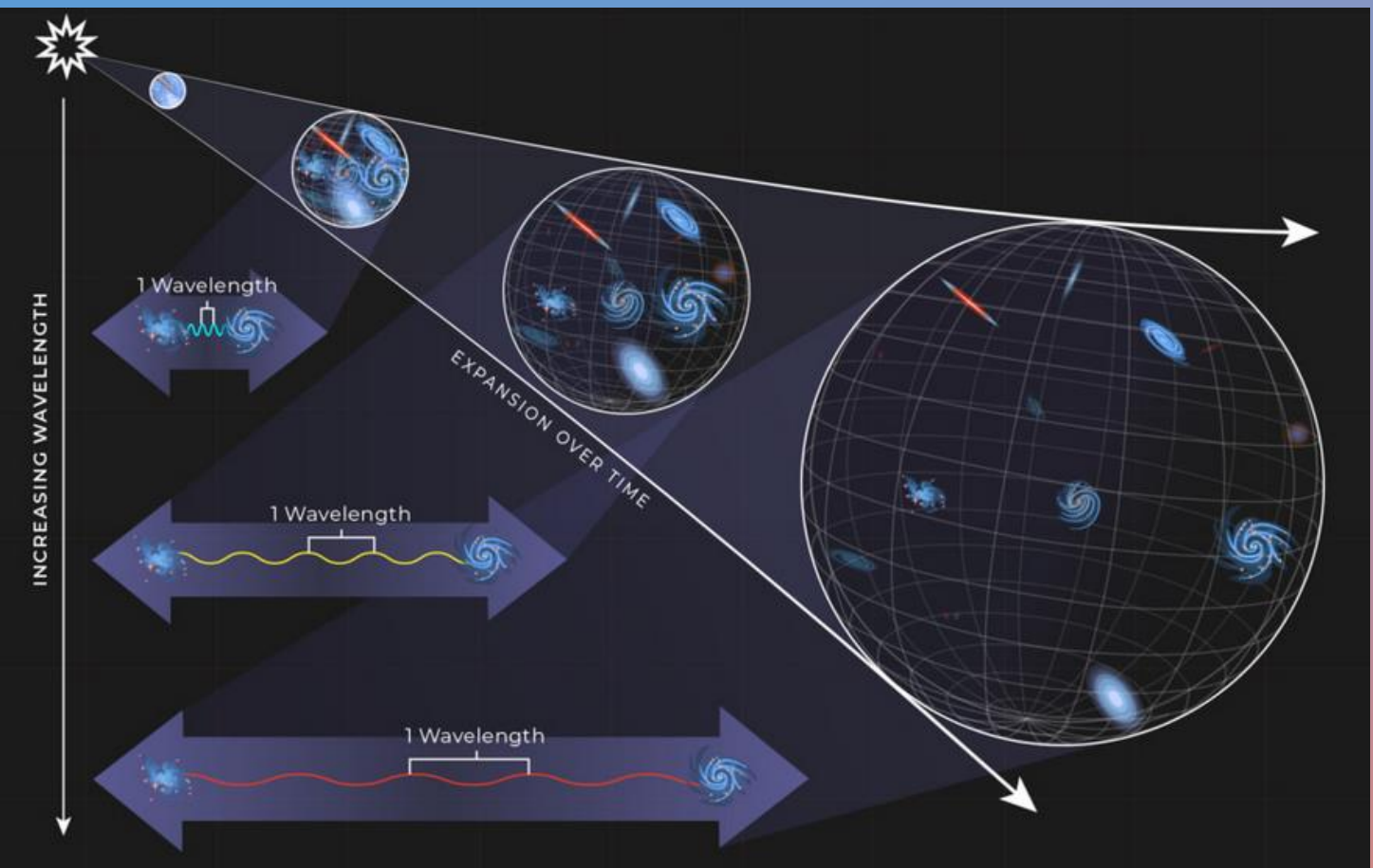
L'effet Doppler-Fizeau est proportionnel à la vitesse selon laquelle les étoiles de la galaxie se rapprochent ou s'éloignent de l'observateur:

$$v = \Delta\lambda/\lambda \times c$$

Nous obtenons ainsi la vitesse des étoiles en fonction de leur distance par rapport au centre de la galaxie.

Si l'on suppose que la galaxie est soumise à la loi Newtonienne de gravitation universelle, la vitesse est proportionnelle à la masse contenue entre le centre et la distance r

$$M = V^2 r / G$$



L'expansion de l'Univers conduit au décalage vers le rouge (« redshift ») de la lumière de galaxies distantes. Ce décalage est mesuré sur un spectre avec :

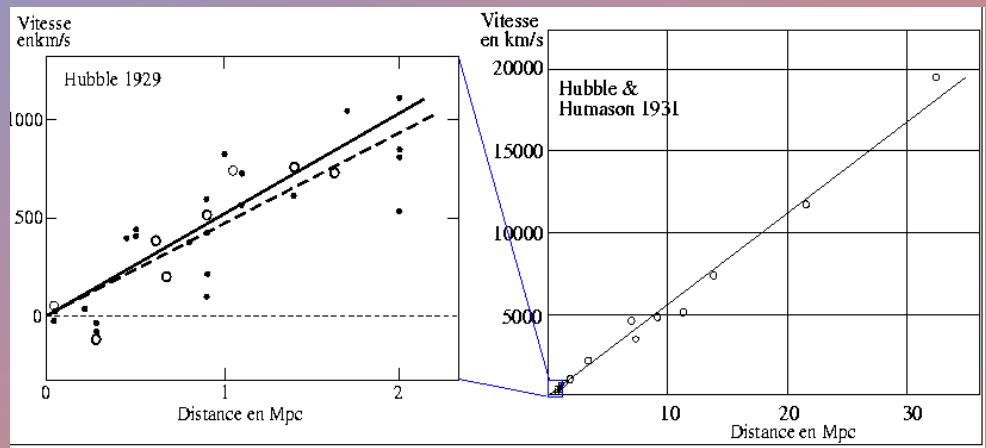
$$z = \Delta\lambda / \lambda$$

Les galaxies distantes semblent s'éloigner avec une vitesse de récession de :

$$V = z \times c$$

La loi de Hubble-Lemaitre fait la relation directe entre le décalage vers le rouge (la vitesse de récession apparente) et la distance :

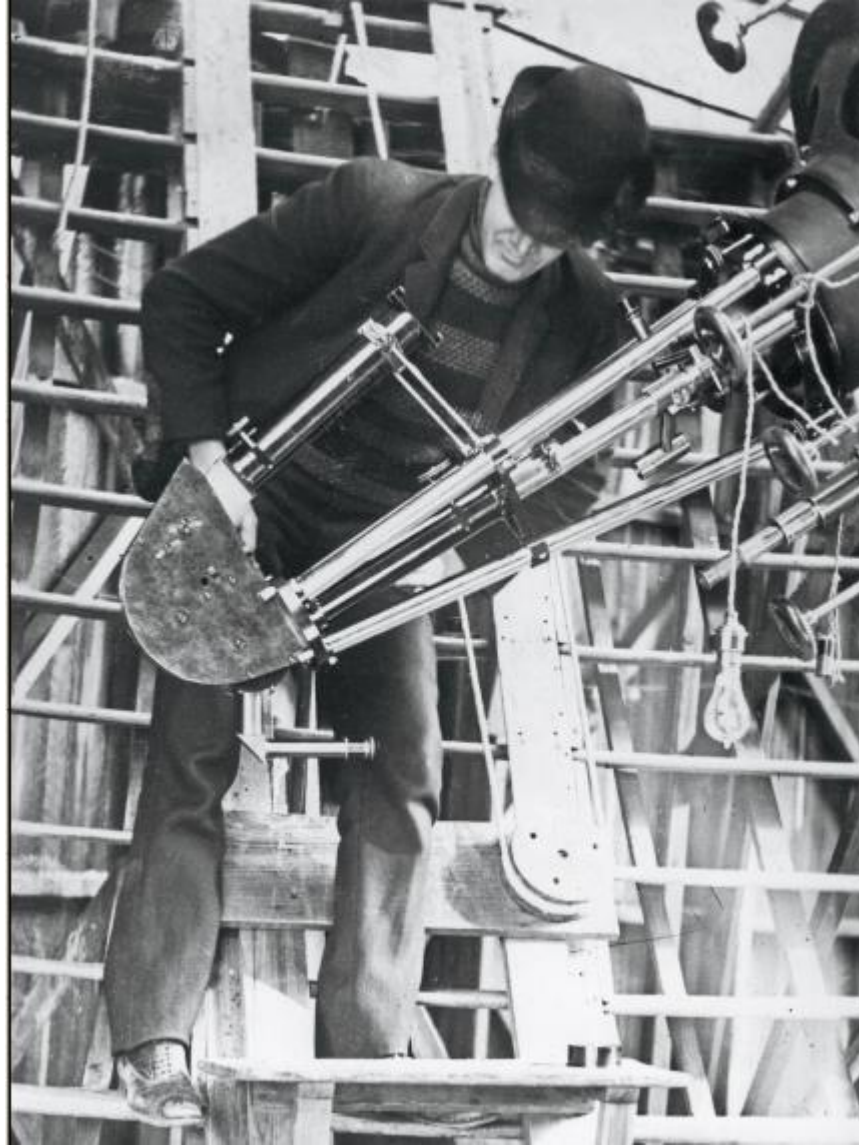
$$D = V / H_0$$

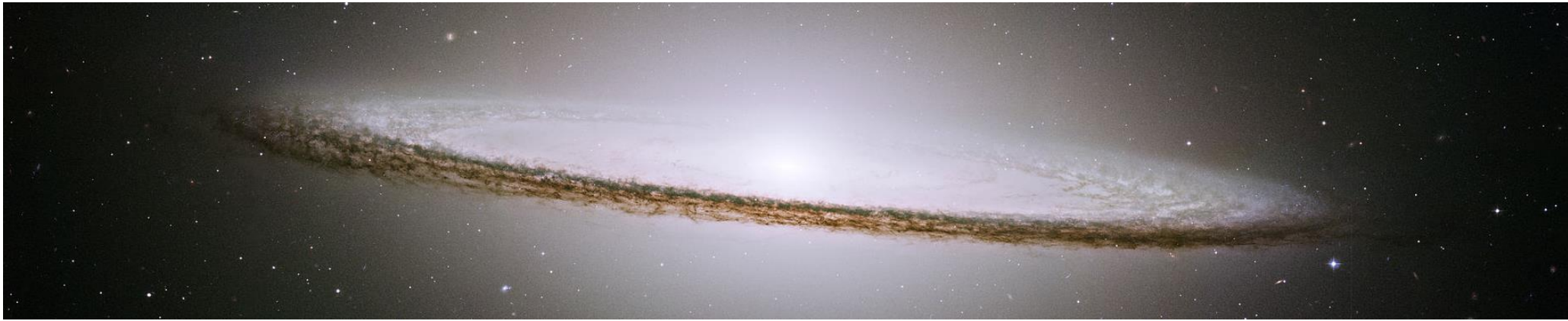


En 1914, Vesto Slipher observe un décalage vers le rouge, et l'inclinaison des raies du spectre de la galaxie Sombrero

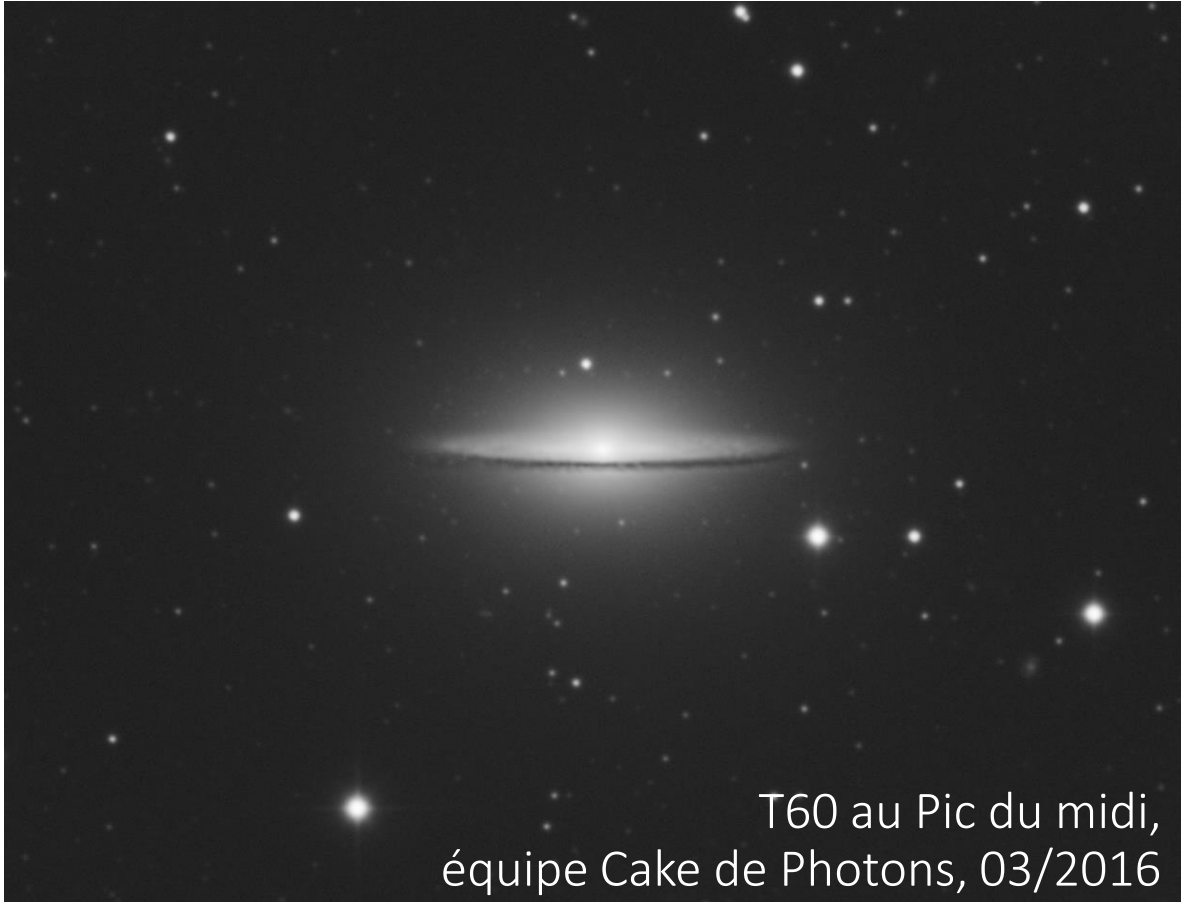
Vesto Slipher et son spectrographe sur la lunette Clark de 24 pouces (60 cm) à l'observatoire de Lowell

<https://astronomy.com/magazine/news/2020/04/remembering-vm-sliphers-work-at-lowell>

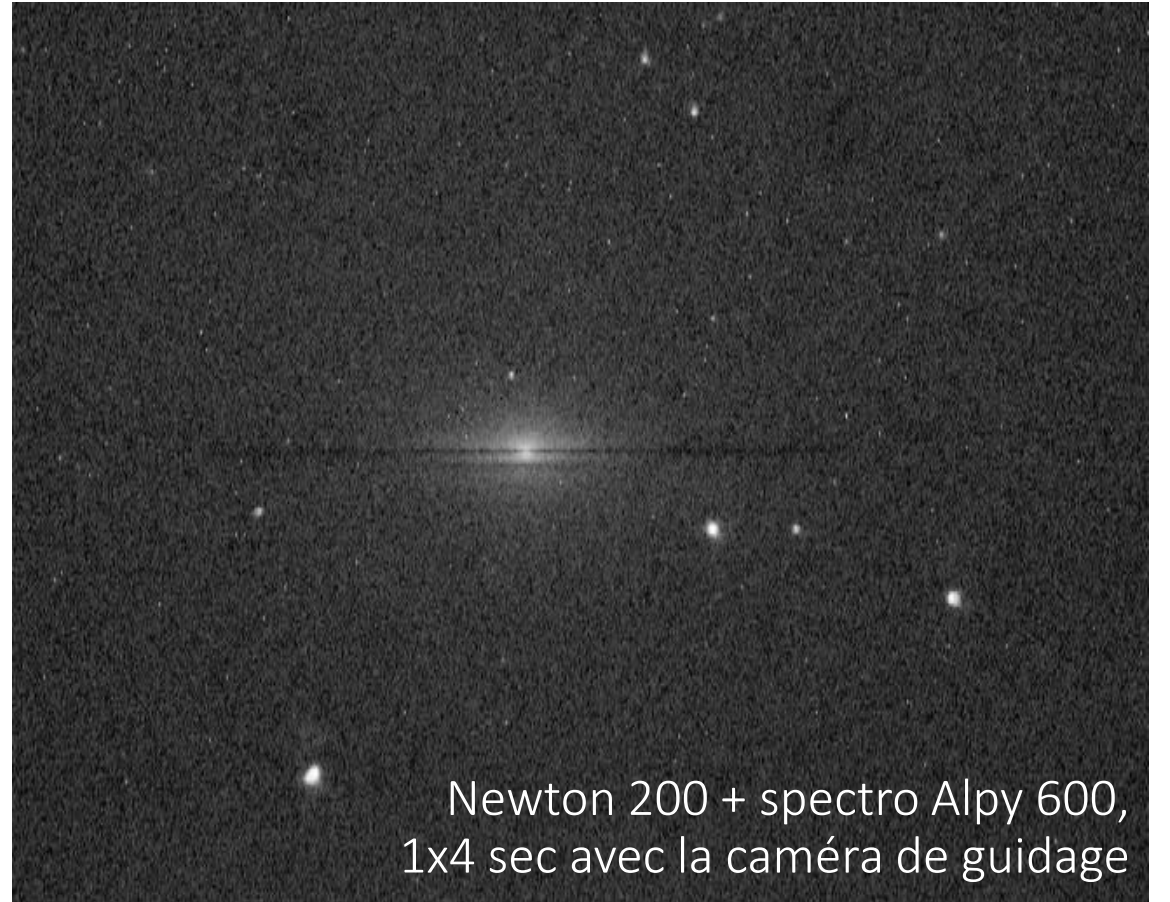




Hubble
Heritage
Team

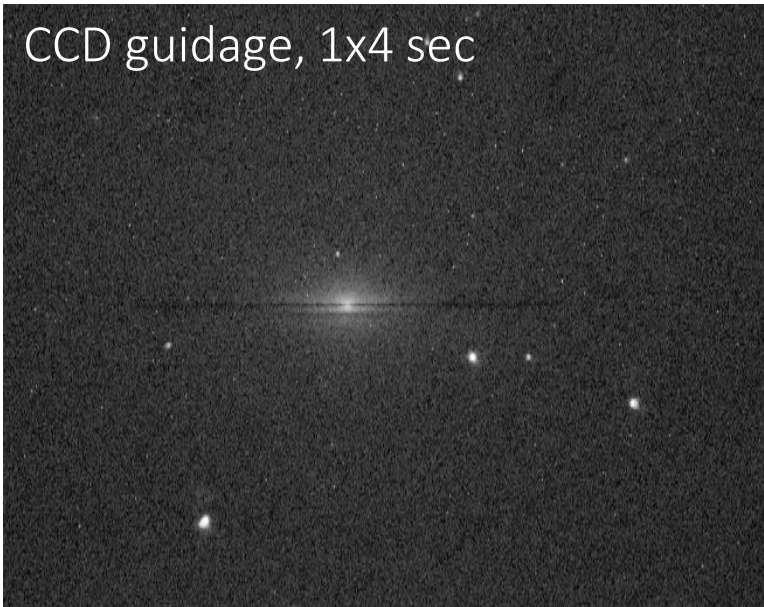


T60 au Pic du midi,
équipe Cake de Photons, 03/2016

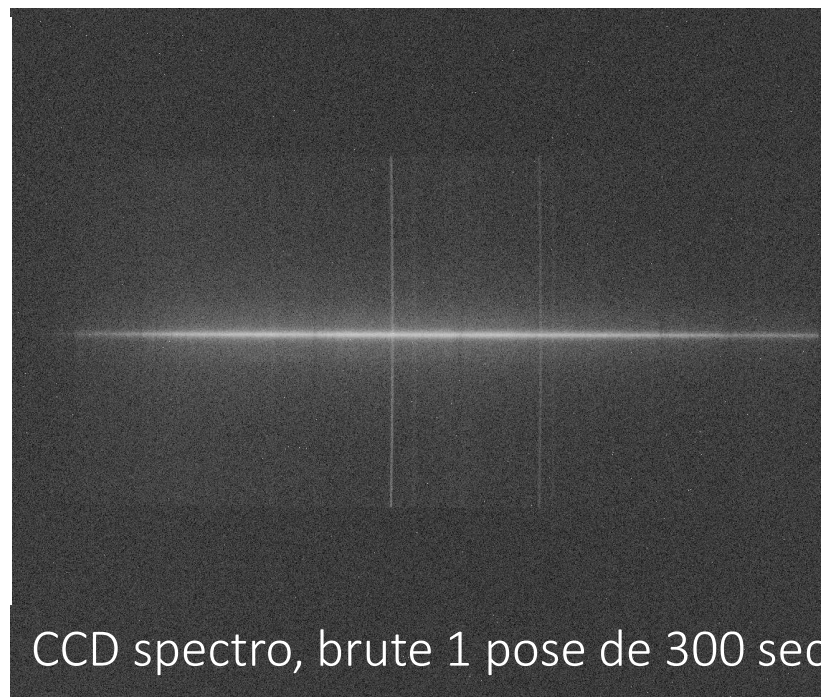
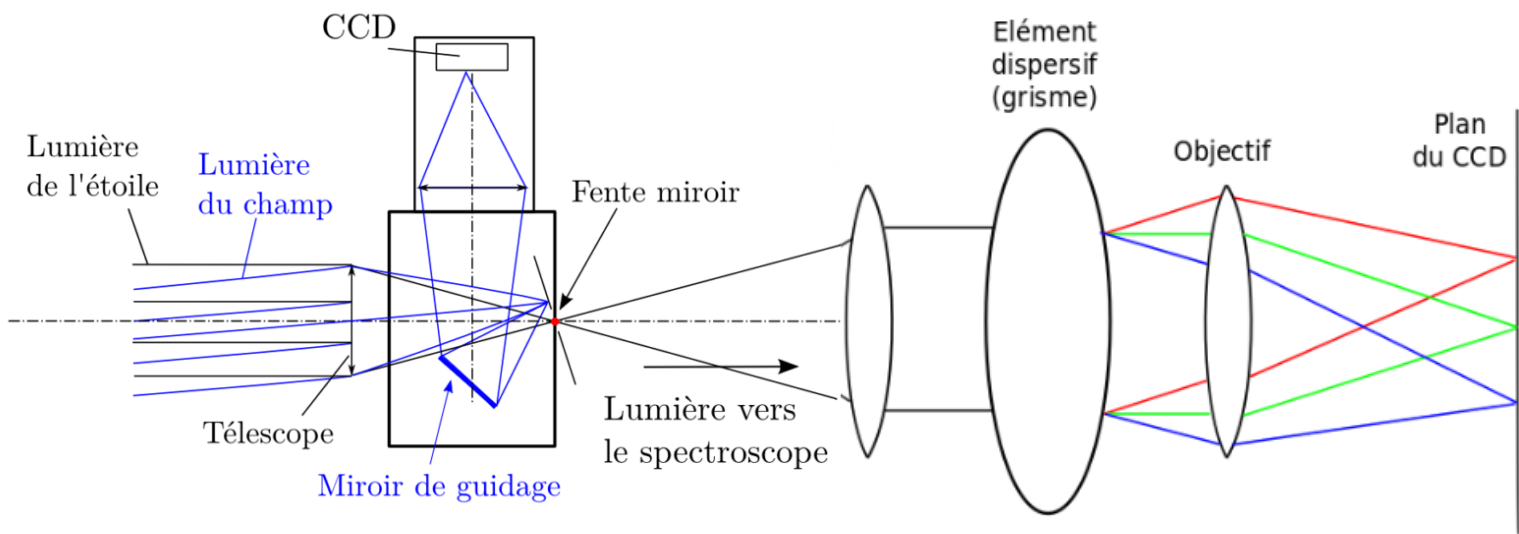


Newton 200 + spectro Alpy 600,
1x4 sec avec la caméra de guidage

CCD guidage, 1x4 sec

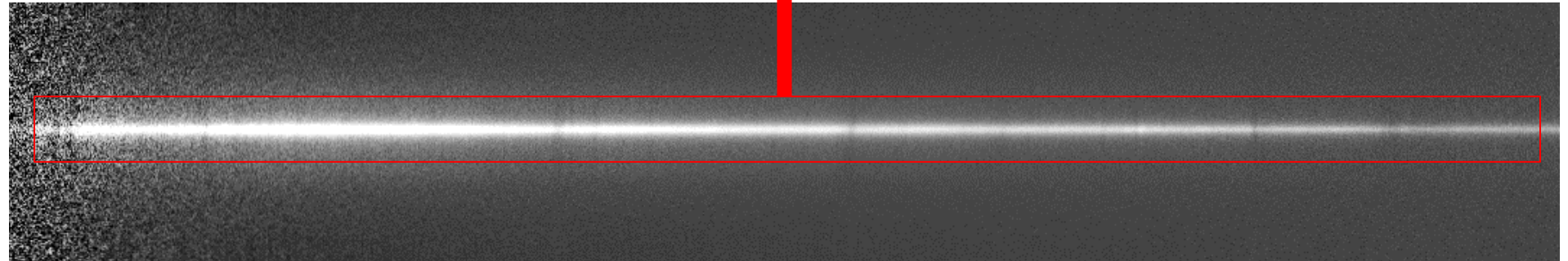
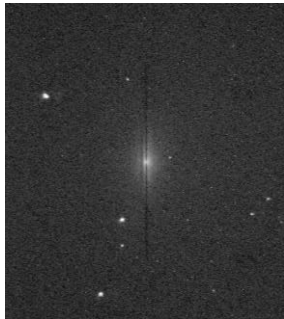
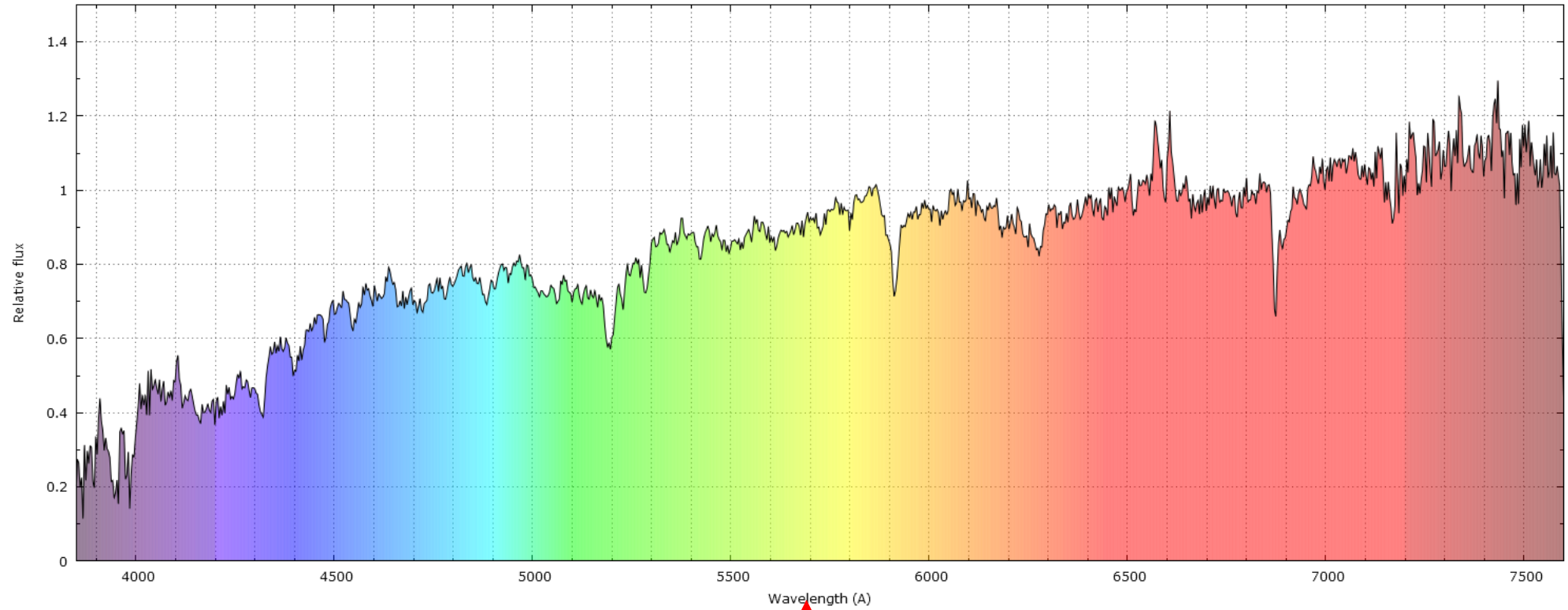


Newton 200
+ spectro Alpy



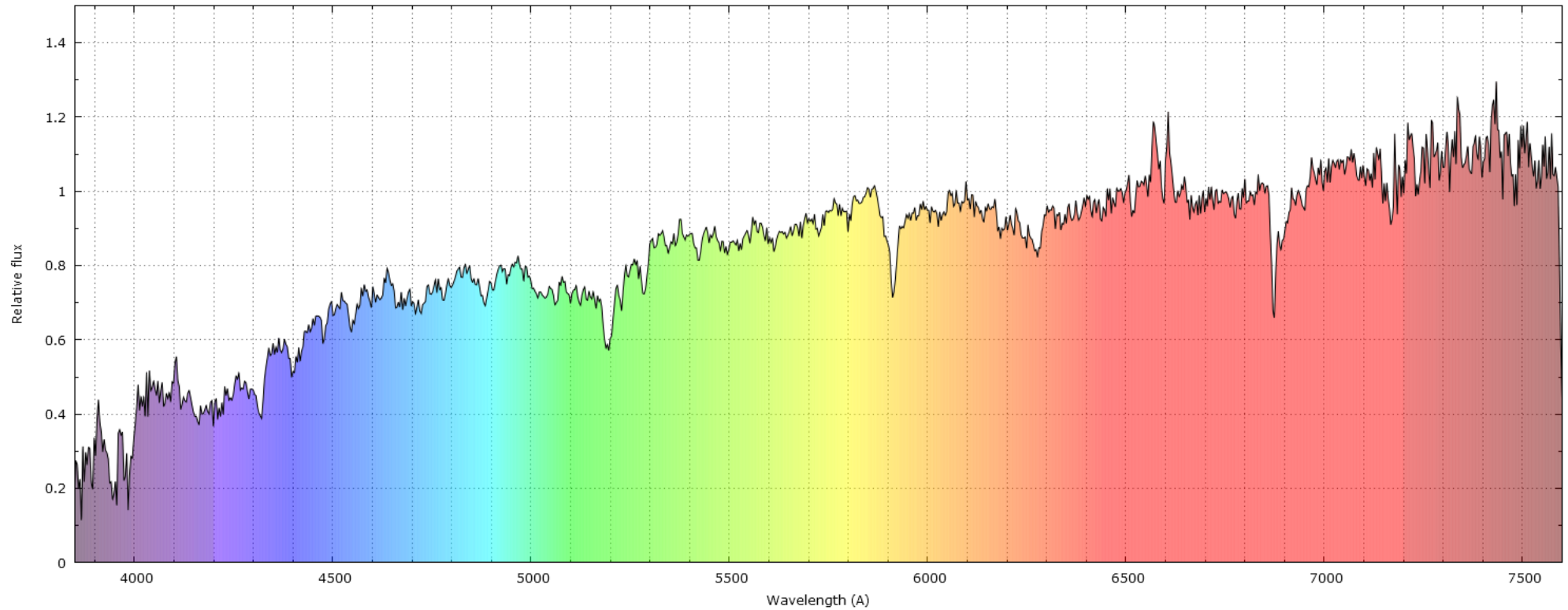
CCD spectro, brute 1 pose de 300 sec

Extraction du spectre



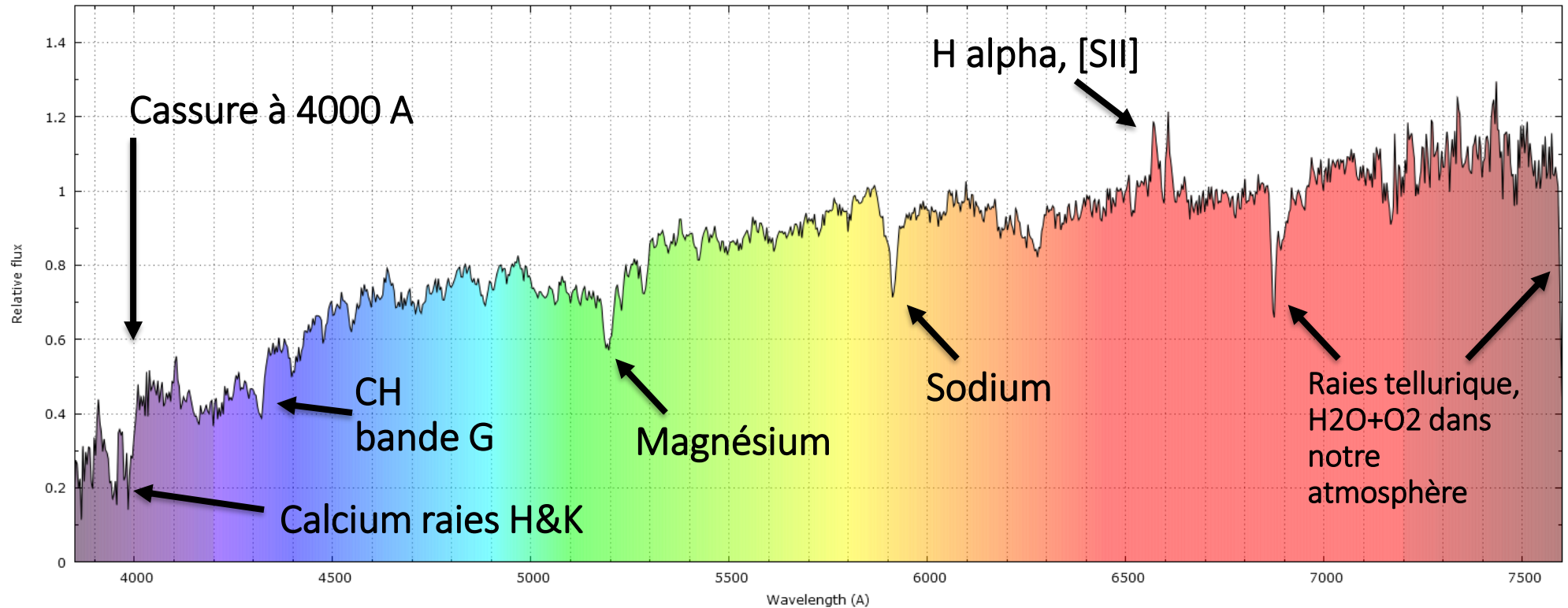
9 poses de 300 sec (addition & étalonnage en quelques clics avec les logiciels Isis ou Demetra)

Lecture du spectre, continuum



Forme générale du spectre (du « continuum ») : dominante jaune-rouge, spectre global de type G ou K, nombreuses vieilles étoiles... on voit surtout le bulbe car le plus lumineux

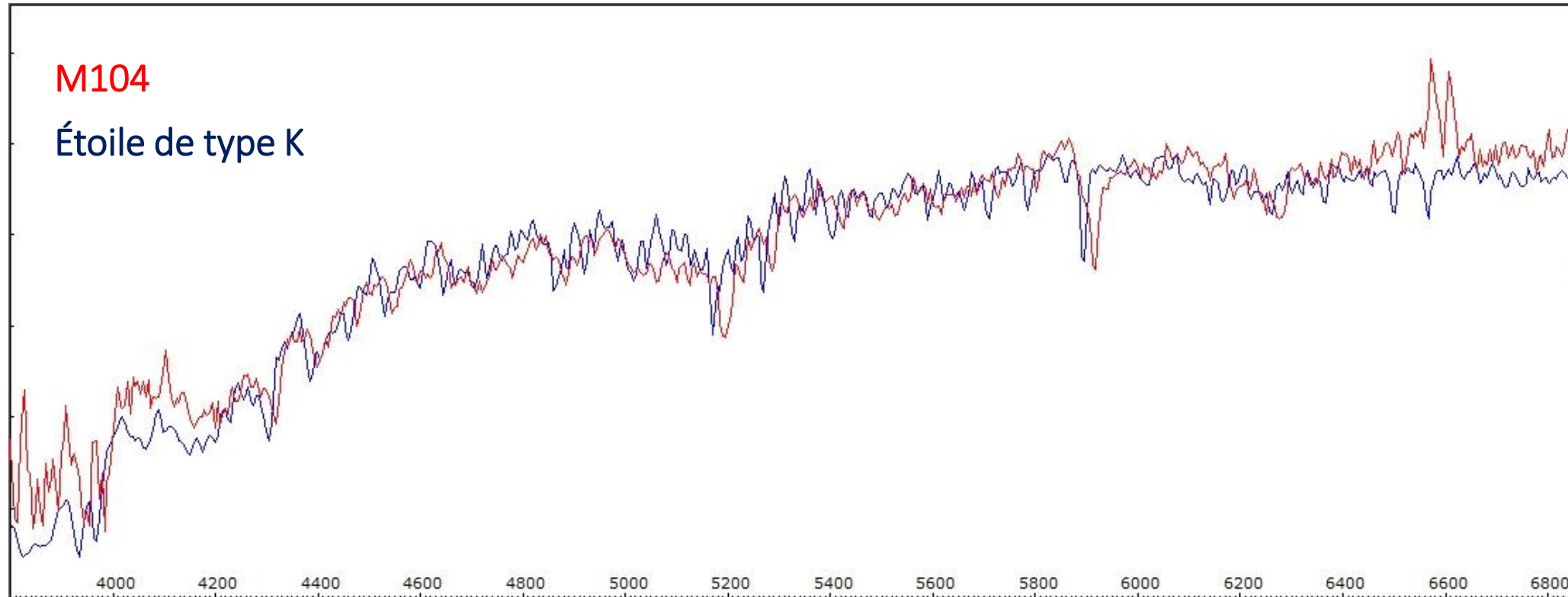
Lecture du spectre, signatures d'éléments atomiques



Code barre du bulbe d'une galaxie spirale :

- raies en absorption des « métaux » dans les étoiles évoluées (Ca, Mg, Na...)
- cassure à 4000 Å (= absence d'étoiles jeunes/bleues dans le bulbe)
- quelques raies en émission associées aux étoiles jeunes (H alpha + [SII] = gaz de régions HII excité par des étoiles jeunes chaudes)

Lecture du spectre, redshift



Le spectre de la galaxie est décalé vers le rouge (vers une plus grande longueur d'onde, « redshift ») par rapport à un spectre de référence au repos

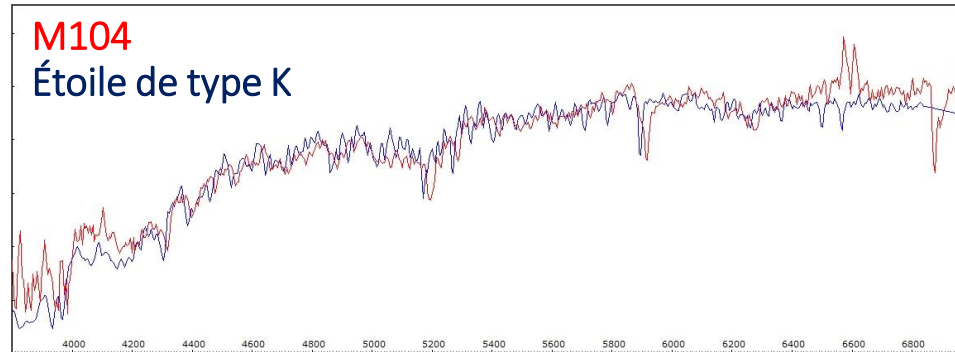
Avec la loi de Hubble-Lemaitre, on peut mesurer la distance cosmologique de M104

$$D = V/H_0$$

Mesure de la distance cosmologique de M104

$$D = V/H_0 \quad V = z \times c = \Delta\lambda/\lambda \times c$$

$H_0 = \text{constante de Hubble} = 73? \text{ km/s}/10^6 \text{ parsec}$



Mesure de v avec le logiciel Isis

Calcul de l'écart de vitesse radiale

Spectre de l'objet : Vh : km/s

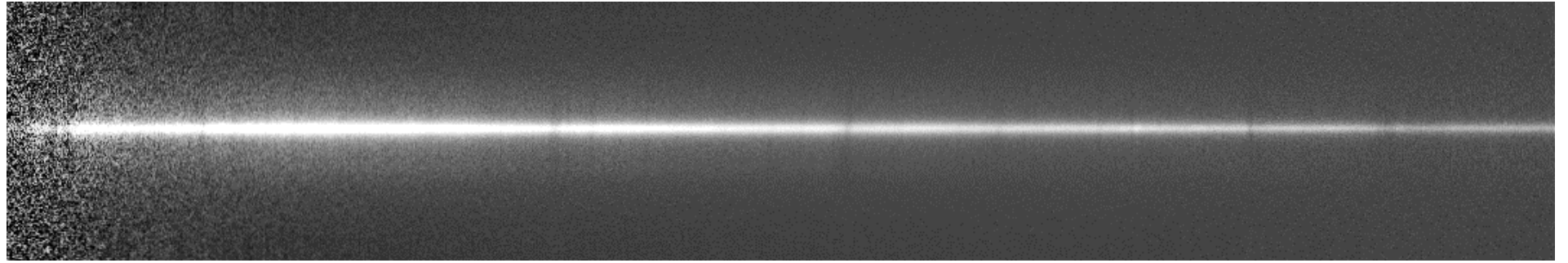
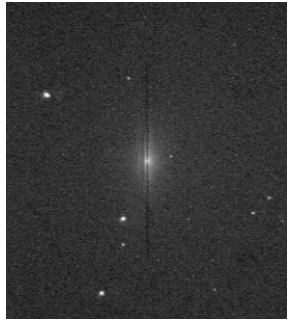
Spectre de référence : Vh : km/s

1/2 intervalle CCF : km/s Pas : km/s

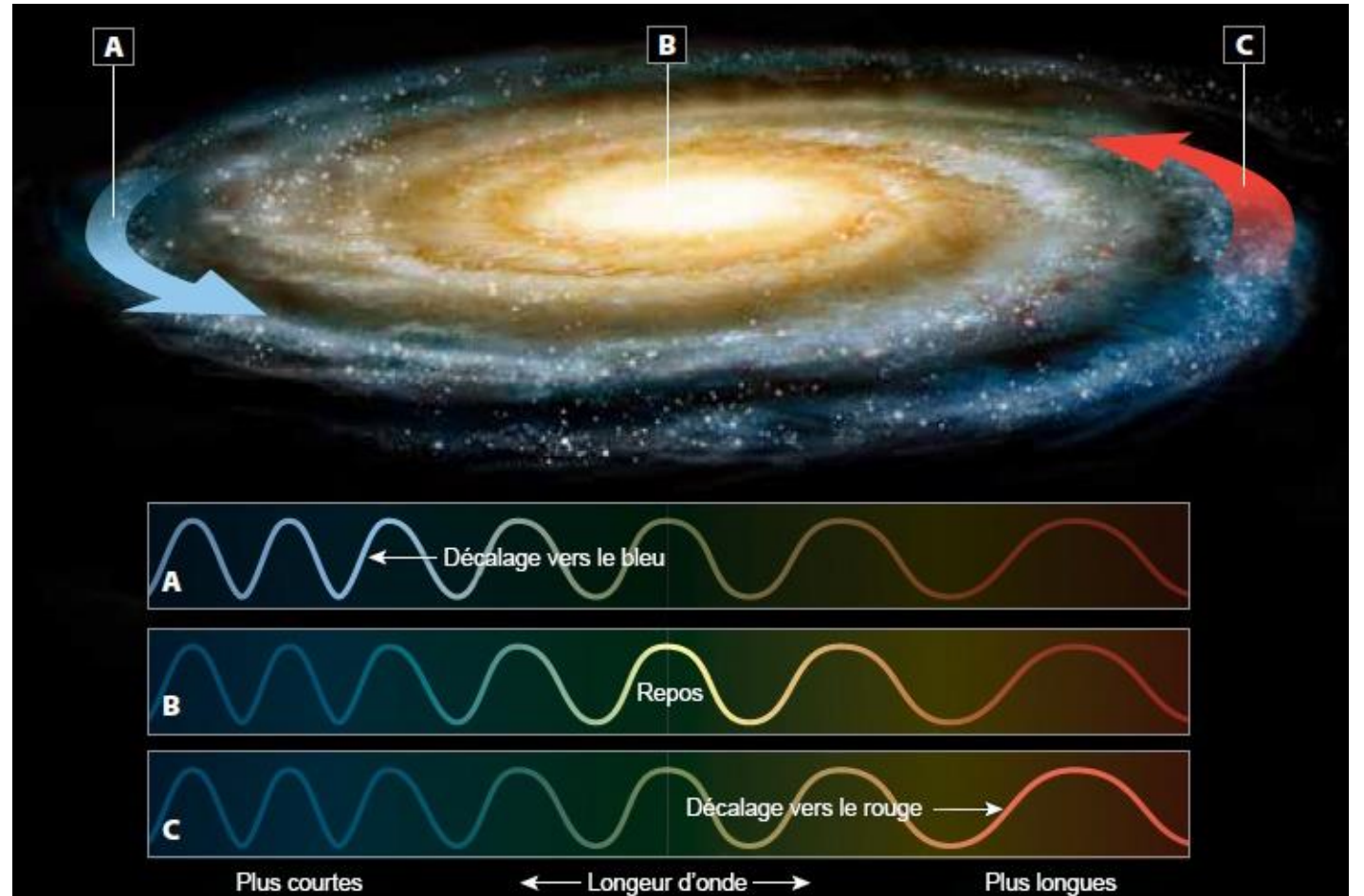
Ecart de vitesse radiale (pic CCF observé) = -1000.000 km/s
Ecart de vitesse radiale (pic CCF ajusté) = -1185.767 km/s

Avec l'expansion de l'Univers, M104 semble s'éloigner de nous à la vitesse de 1000 km/s

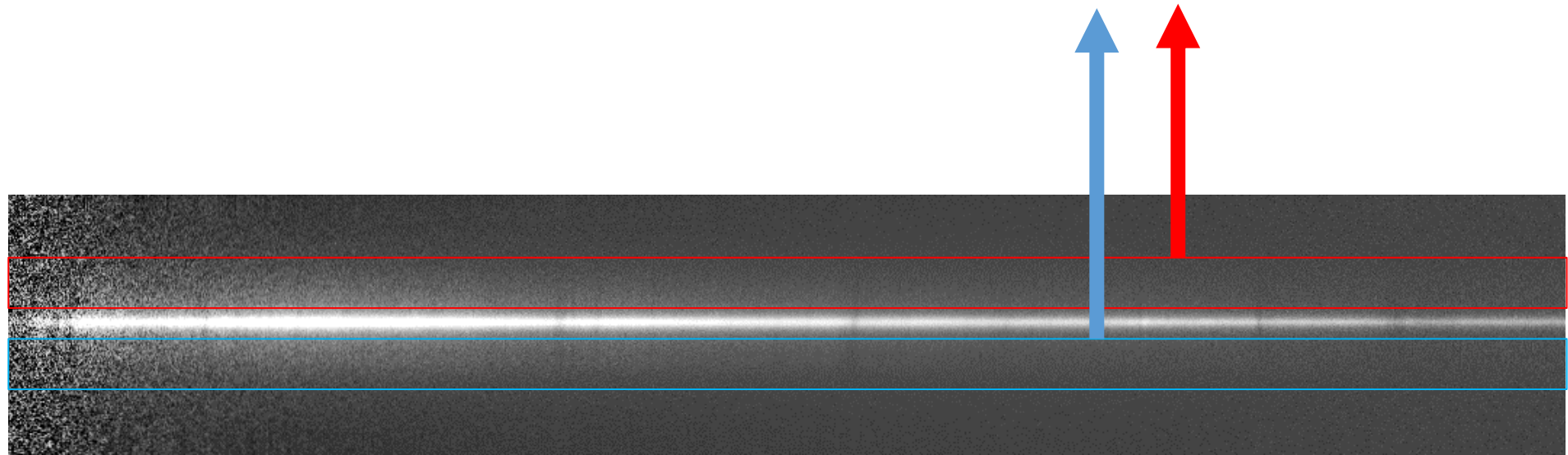
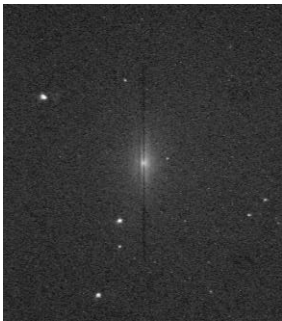
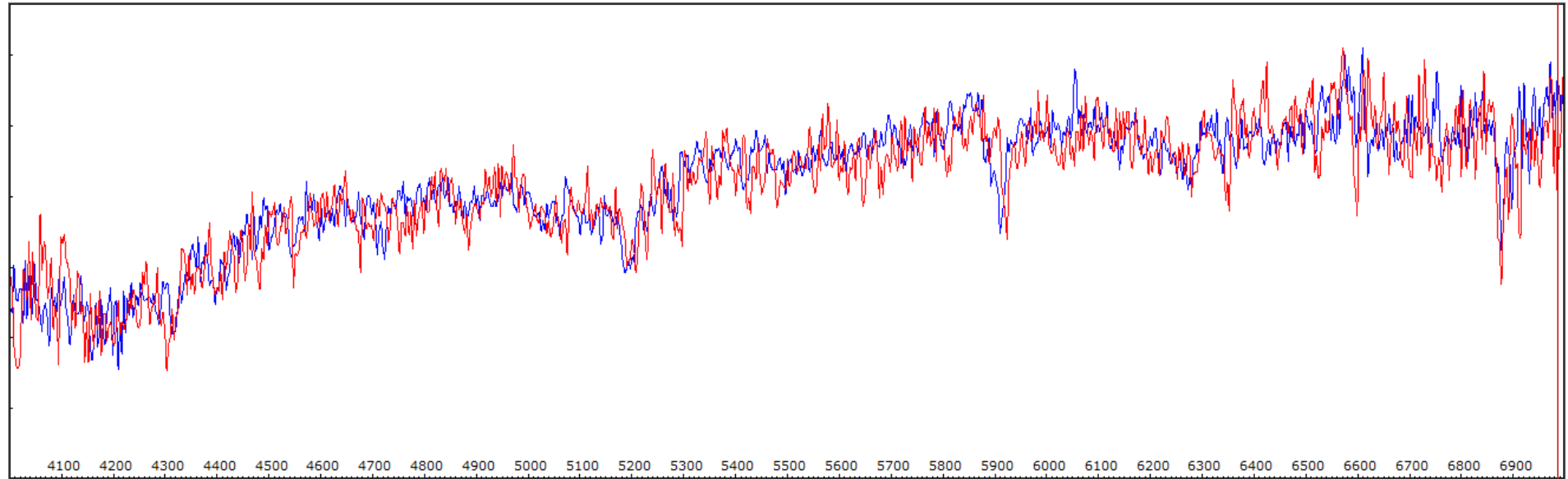
$$D = 1000/H_0 = 14 \text{ Mpc} = 45 \text{ millions d'années-lumière}$$



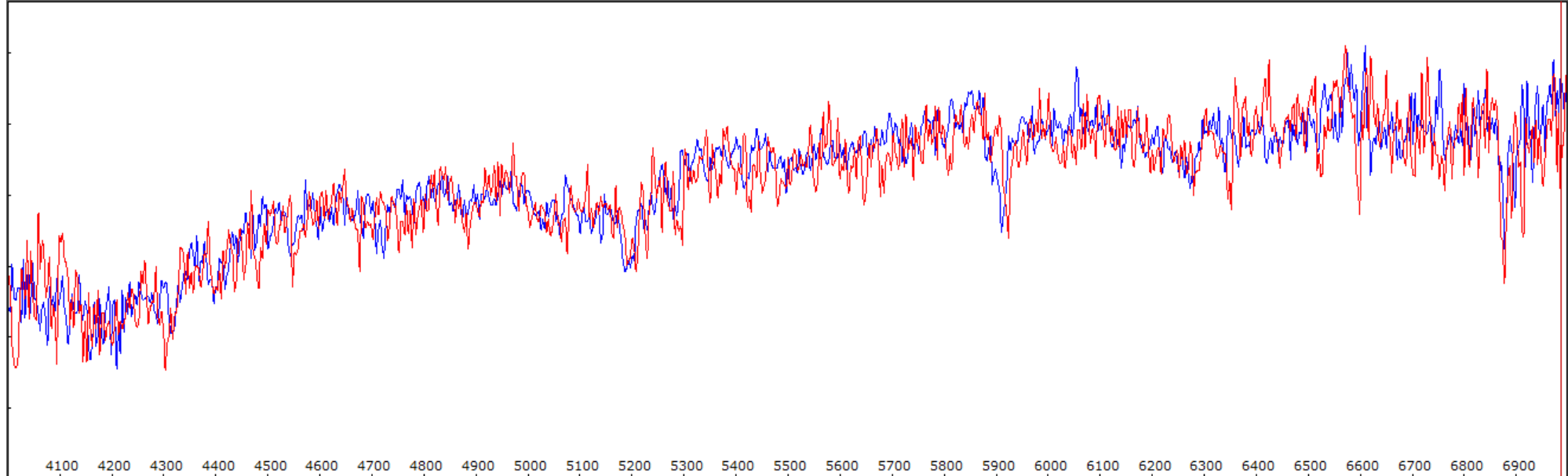
Est-ce que le Sombrero tourne ?



Extraction des spectres des ailes de M104



Mesure de la rotation de M104 avec la différence de vitesse des étoiles dans les ailes



Calcul de l'écart de vitesse radiale

Spectre de l'objet : Vh : km/s

Spectre de référence : Vh : km/s

1/2 intervalle CCF : km/s Pas : km/s

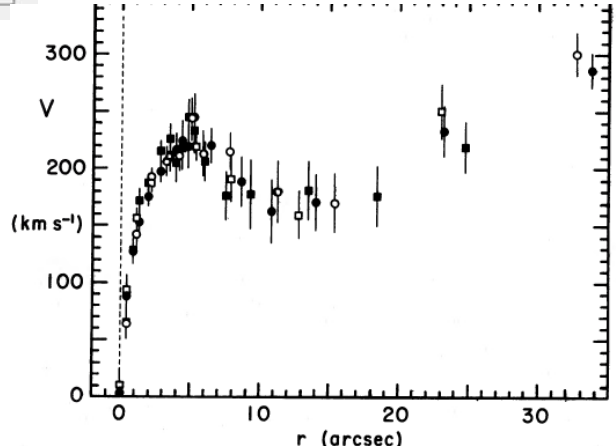
```

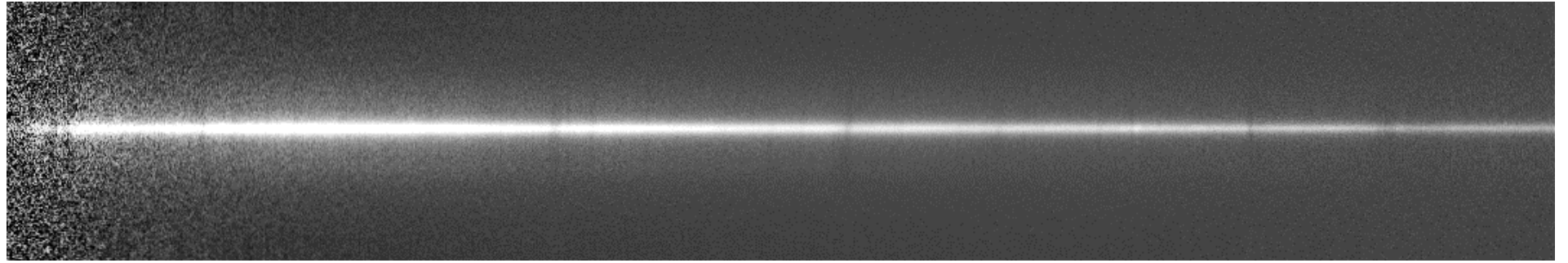
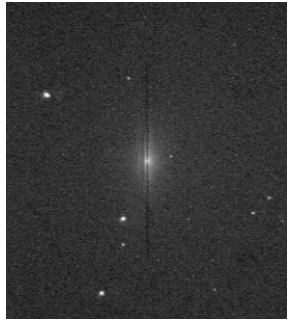
M104\@correl11.dat (base en vitesse)
Sauvegarde de : C:\Users\jpnou\Documents\SPECTRO_\2019 05 31
M104\@correl22.dat (base en vitesse)
Sauvegarde de la CCF : C:\Users\jpnou\Documents\SPECTRO_\2019 05 31
M104\@ccf.dat
=====
Ecart de vitesse radiale (pic CCF observé) = -410.000 km/s
Ecart de vitesse radiale (pic CCF ajusté) = -401.504 km/s
(l'objet s'approche)
=====
    
```

On obtient $v = 200 \text{ km/s}$

Comparaison avec des mesures pro

The Astrophysical Journal, 335:40-56,1988 EVIDENCE FOR A CENTRAL DARK MASS IN NGC 4594 THE SOMBRERO GALAXY
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988ApJ...335...40K/abstract>

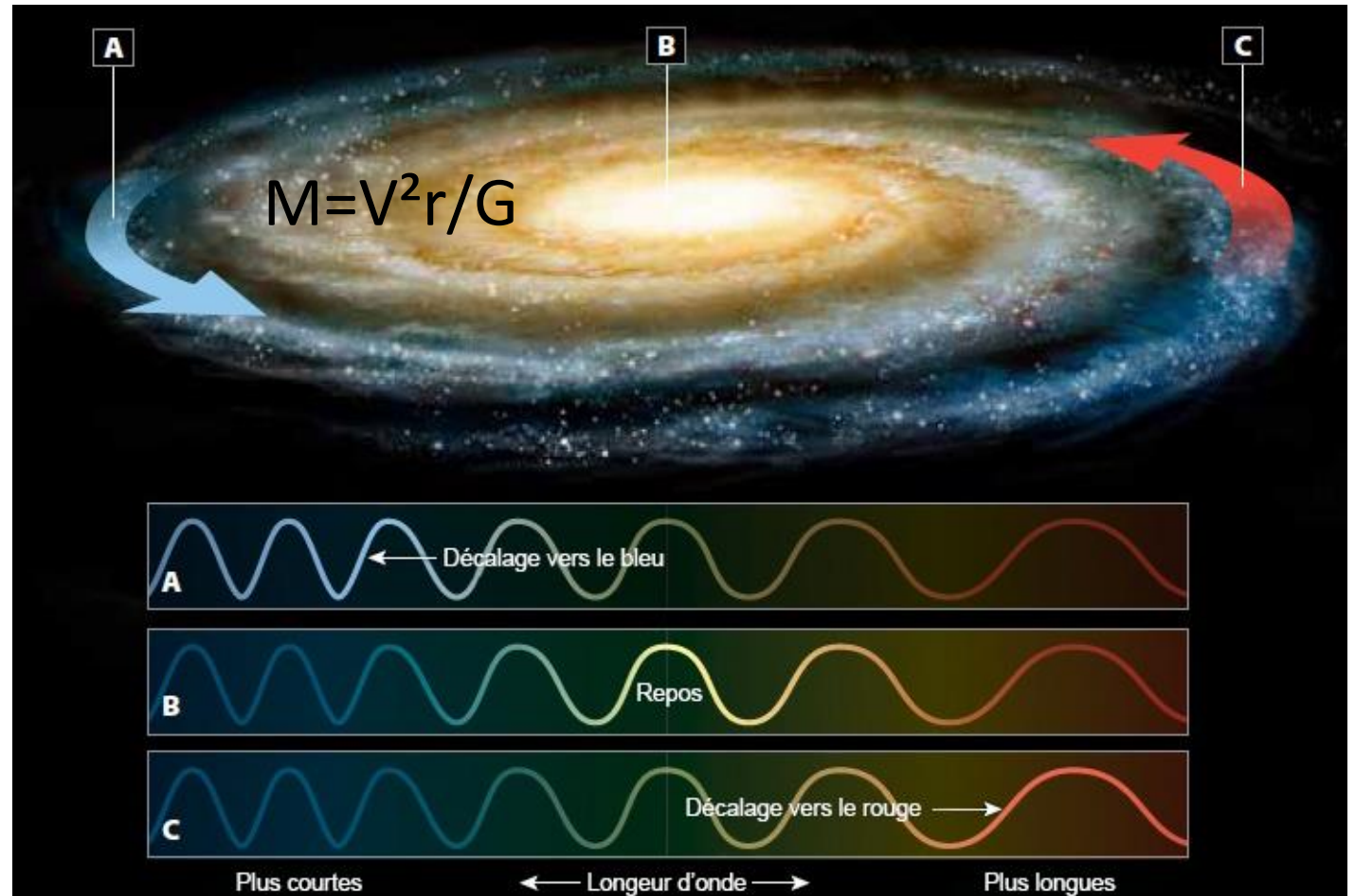




Pour peser la galaxie il nous faut r

Mais le signal est trop faible avec les raies en absorption de M104

Cibler une autre galaxie avec des raies plus facilement détectables ?



THE SPECTRUM AND VELOCITY OF THE NEBULA N. G. C. 1068 (M 77)

I first photographed the spectrum at Flagstaff on November 6, 1913, with an exposure of six and one-half hours. Because of the interesting nature of this plate a second one was made on the nights of November 22 and 23, 1913, with about double the exposure of the first plate, but the sky was poor both nights and the negative is not much stronger than the first plate. For both these plates the slit stood E and W across the nebula.

These plates confirmed FATH'S analysis of the spectrum and showed that the dark lines were FRAUNHOFER lines. In addition they revealed in both series of lines a very large shift toward the red. Measurement of the displacement implied that the nebula was receding from the *Sun* with a velocity of about 1100 km. per second. A brief account of these observations was given — along

In addition to confirming the earlier plates in regard to the composite nature of the spectrum, the extremely high radial velocity and the peculiar disk-like images of the emission lines, the high scale spectrogram brings out what had not been recognized before — that the hydrogen lines extend farther into the fainter parts of the nebula than do the nebular lines N_1 and N_2 , and that these lines are strongly inclined. (They are perhaps also somewhat concave toward the violet). On it the dark lines are faintly traceable into the fainter parts of the nebula and these, too, apparently incline with the long emission lines.

The nebula is elongated in a south-preceding north-following direction and the inclination of the lines implies that the southwestern portion of the nebula is receding and the northeastern portion approaching, relatively, in consequence of rotation about an axis through the shorter diameter of the nebula.



Vesto Slipher

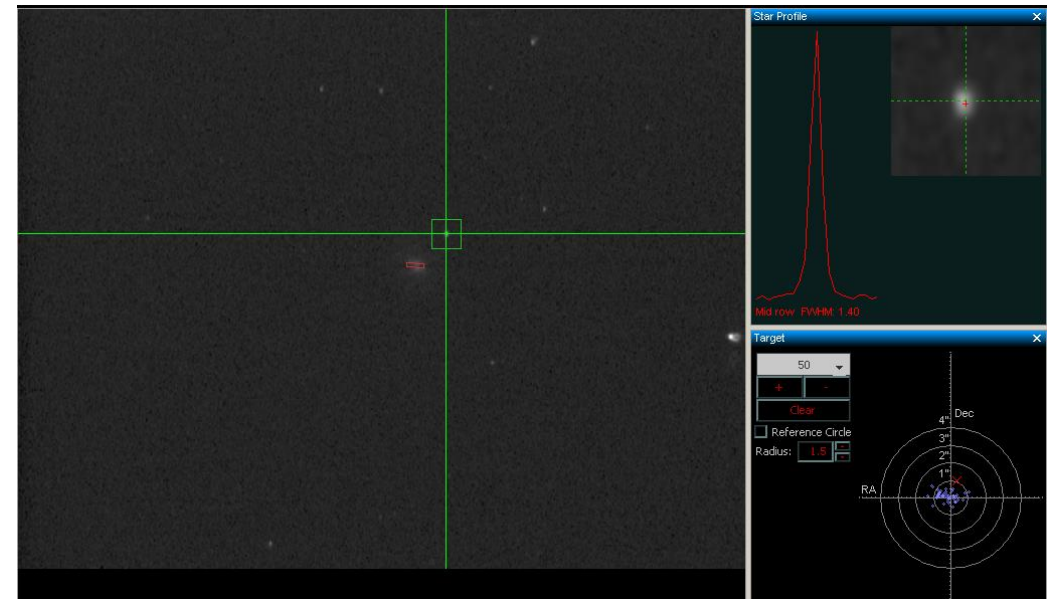
Nouvel essai avec M77



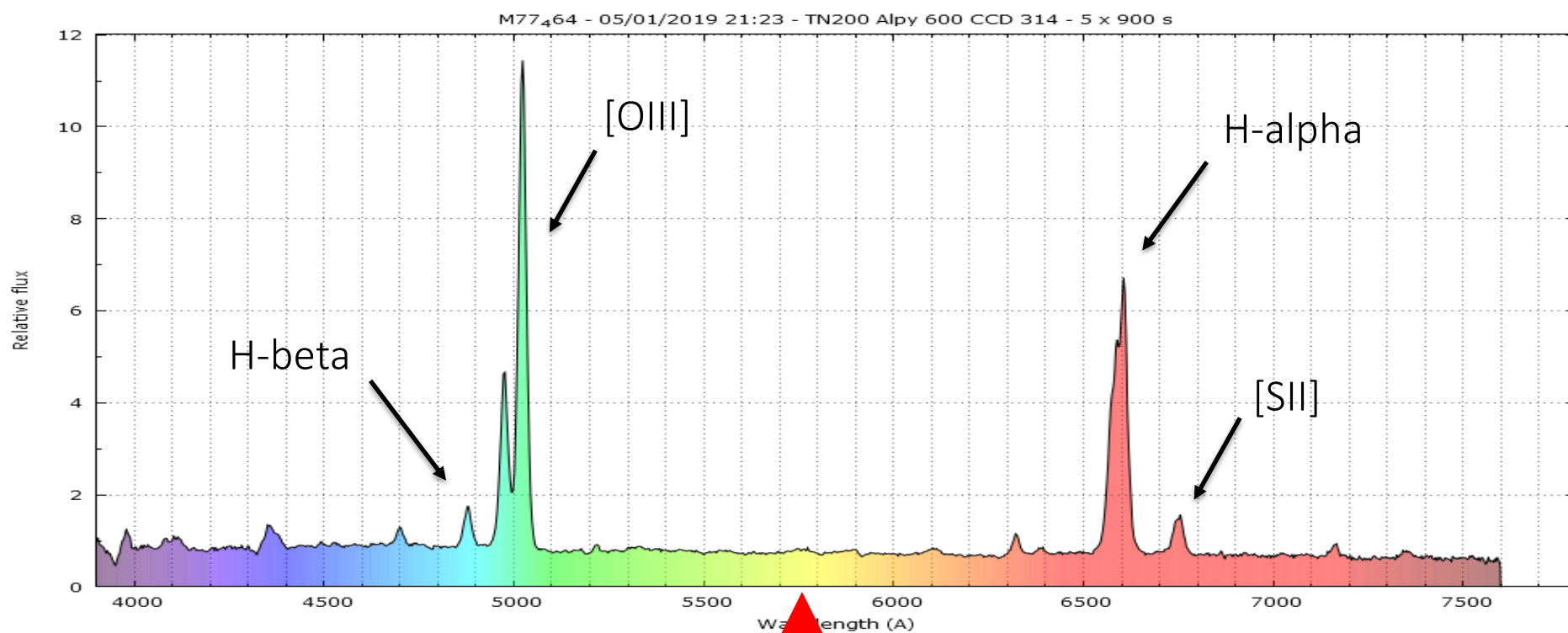
HST (NASA, ESA, van der Hoeven)



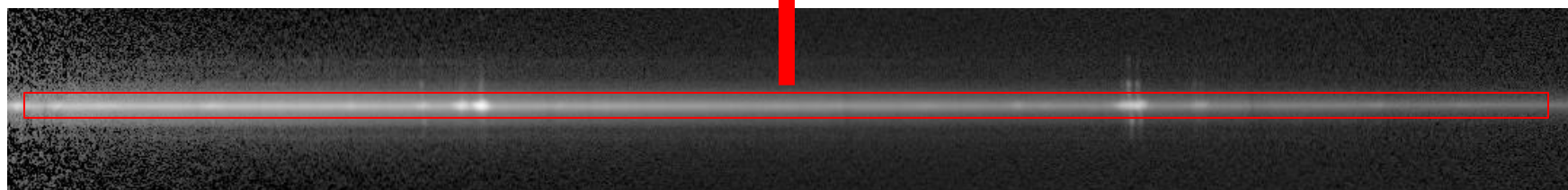
T 0,2m, Alpy 600, sous un ciel Pyrénéen



Extraction & lecture du spectre de M77



5 x 900 sec *



Noyau brillant + code barre d'une galaxie de Seyfert :

- continuum + puissantes raies en émission
- raies en émission de l'hydrogène (H-alpha, H-beta, H- et caetera)
- raies en émission [SII] [OIII]
- raies en émission élargies

* V Slipher : 1x 6.5h

Détermination du redshift et de la distance

$$Z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$V = c \times z$$

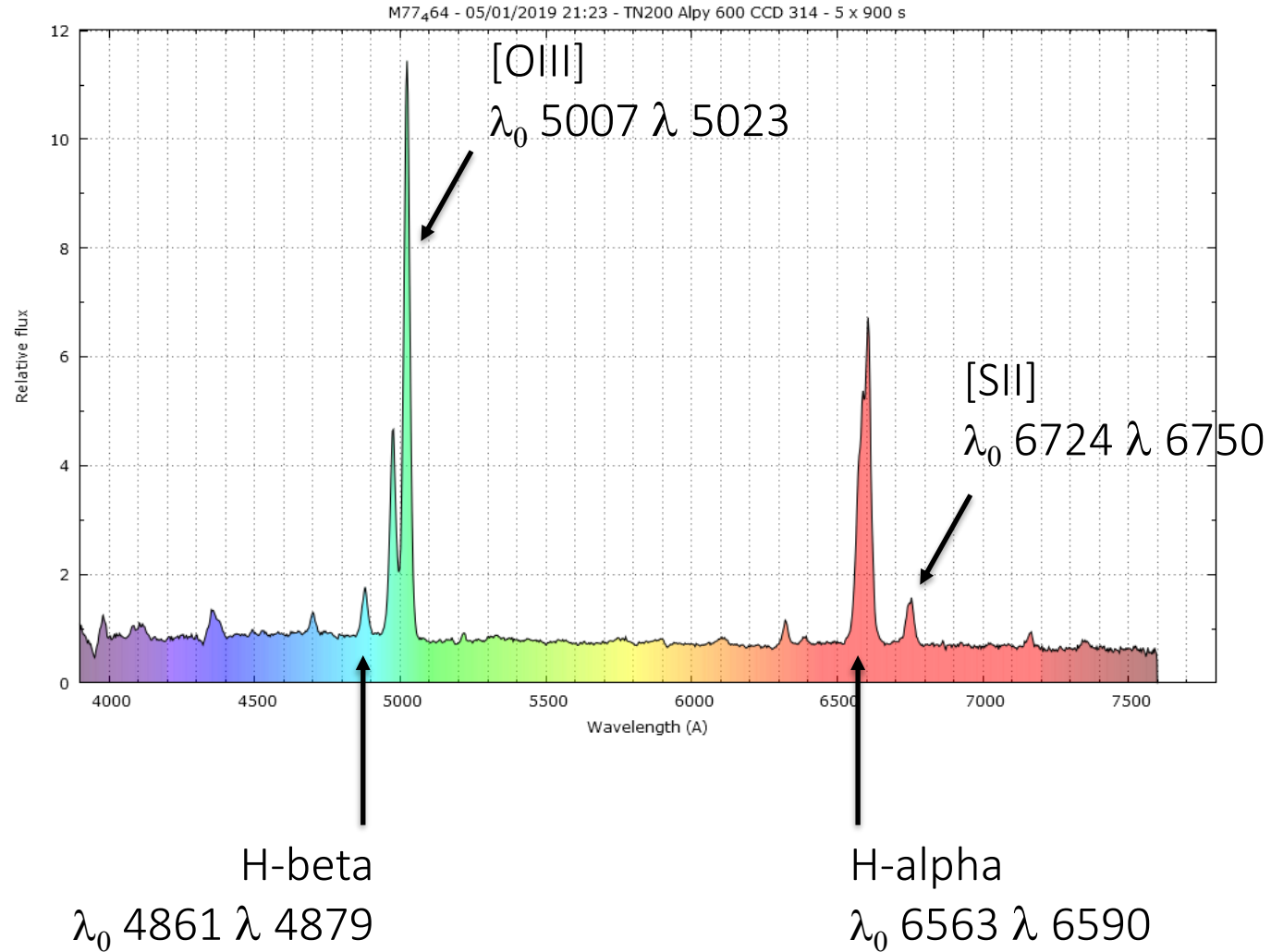
$$D = V / H_0$$

$$Z \text{ (moyenne)} = 0.00382$$

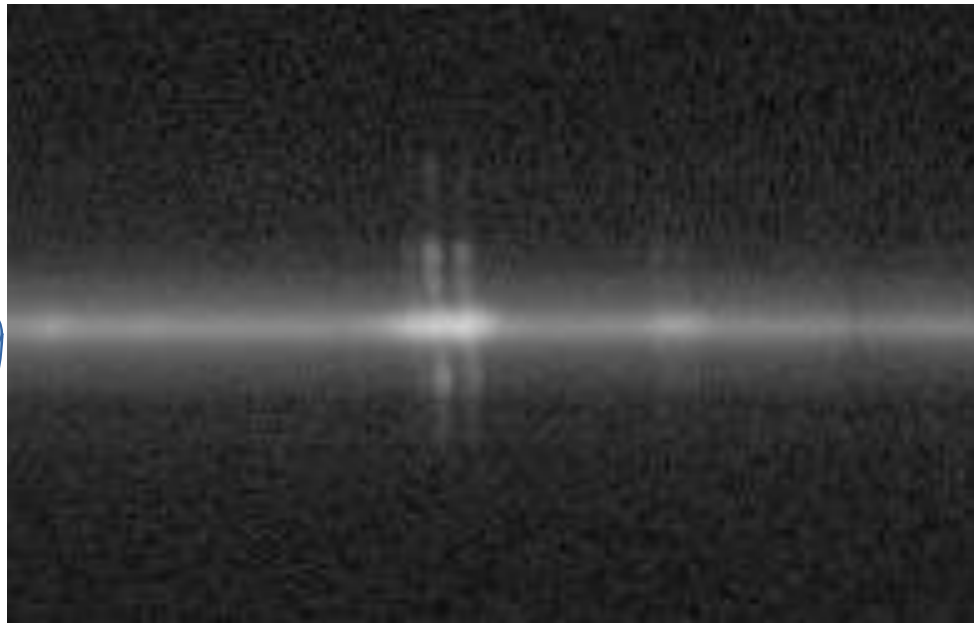
$$V = 1100 \text{ km/s}$$

(comme V Slipher)

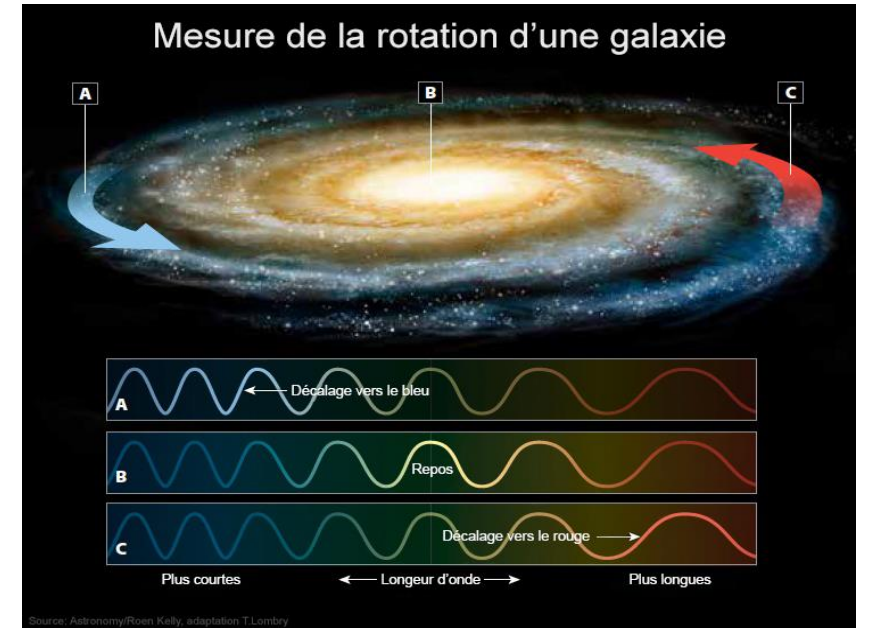
$$D = 16 \text{ Mpc}$$



Les raies en émission de part et d'autre du cœur montrent un décalage vers le bleu/rouge le long de la fente...

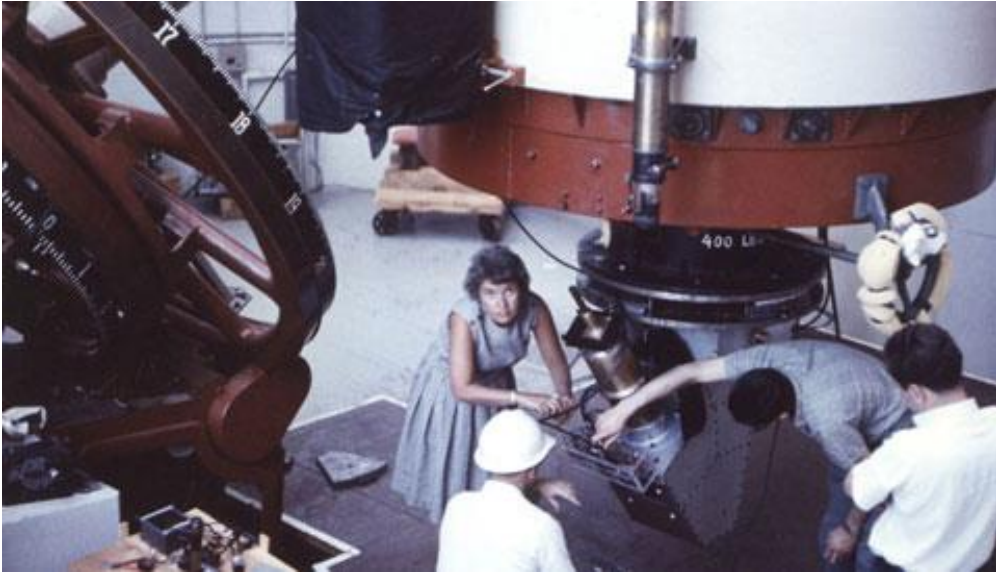


Fente

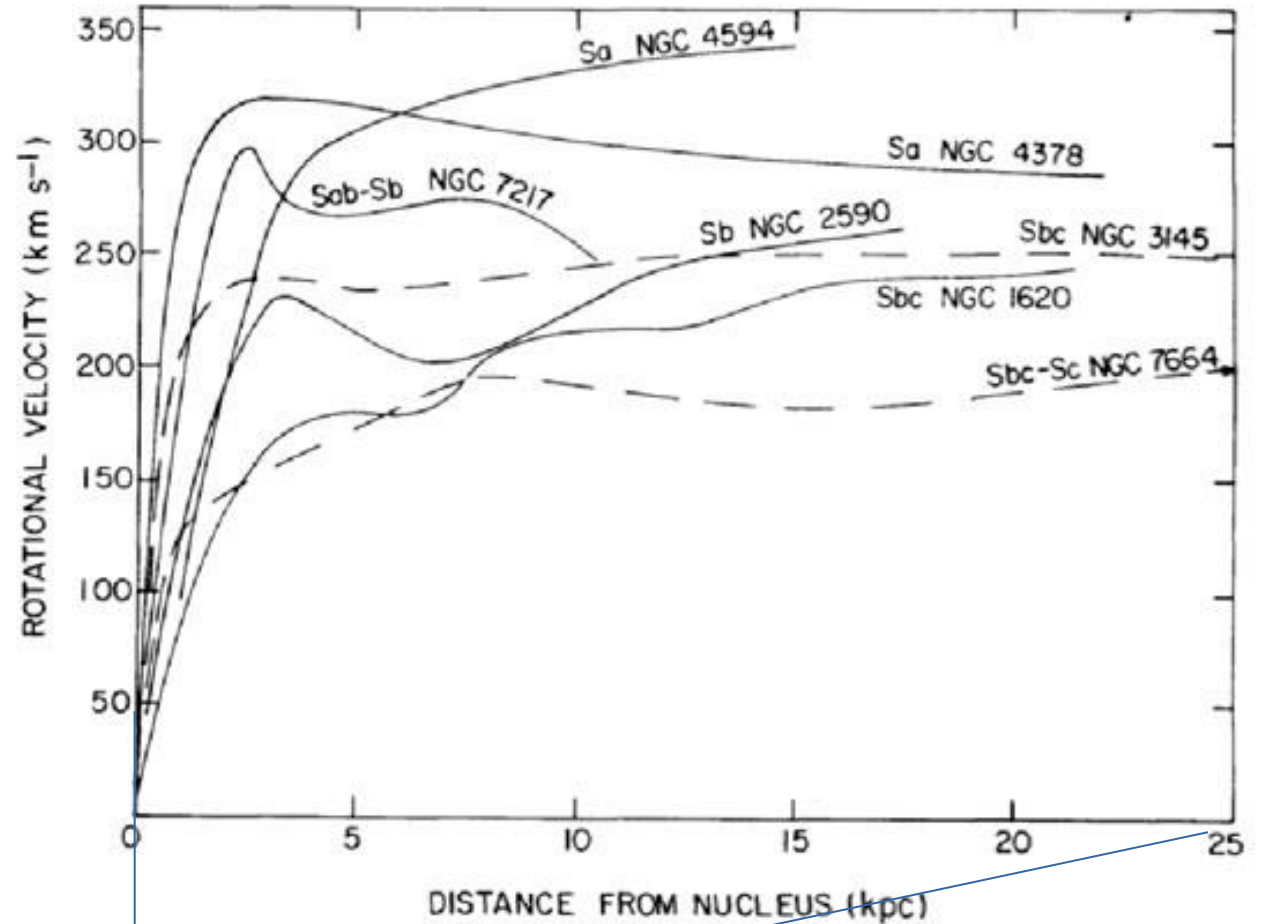


...donc on peut mesurer la vitesse de rotation à différentes distances r du cœur de la galaxie

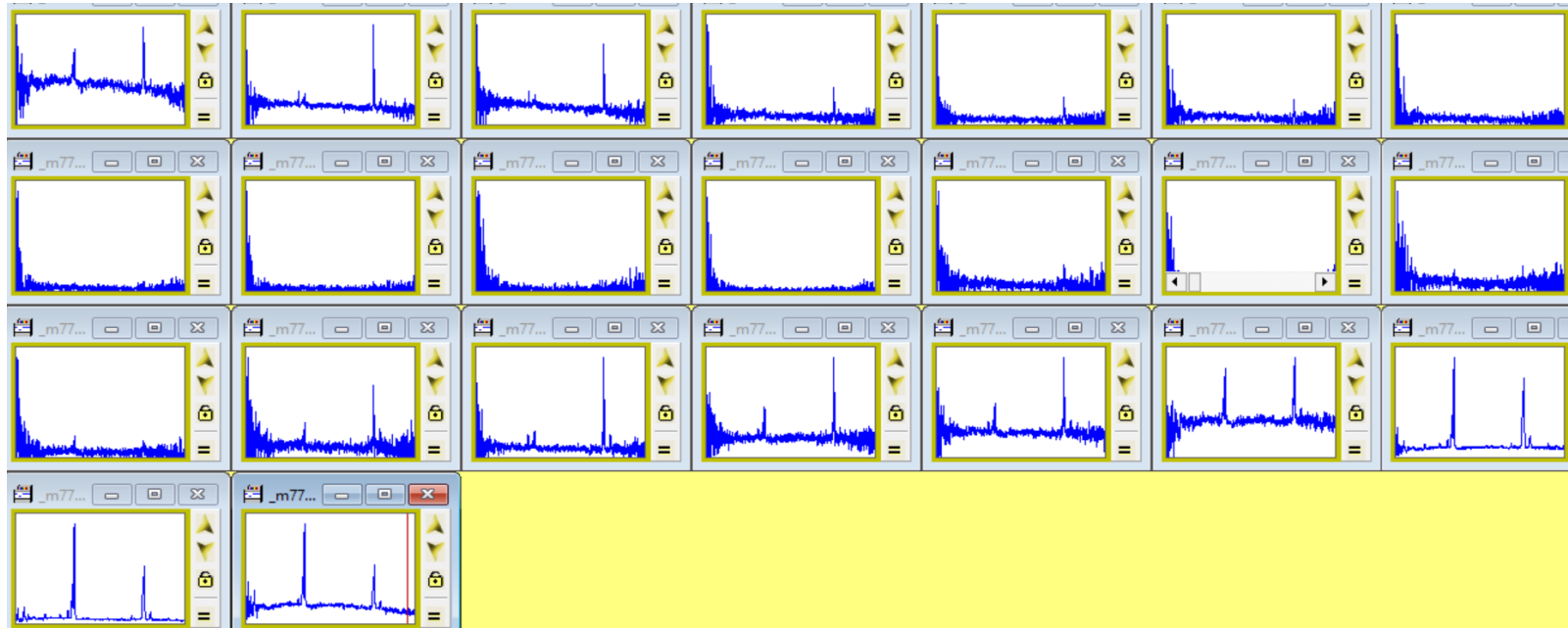
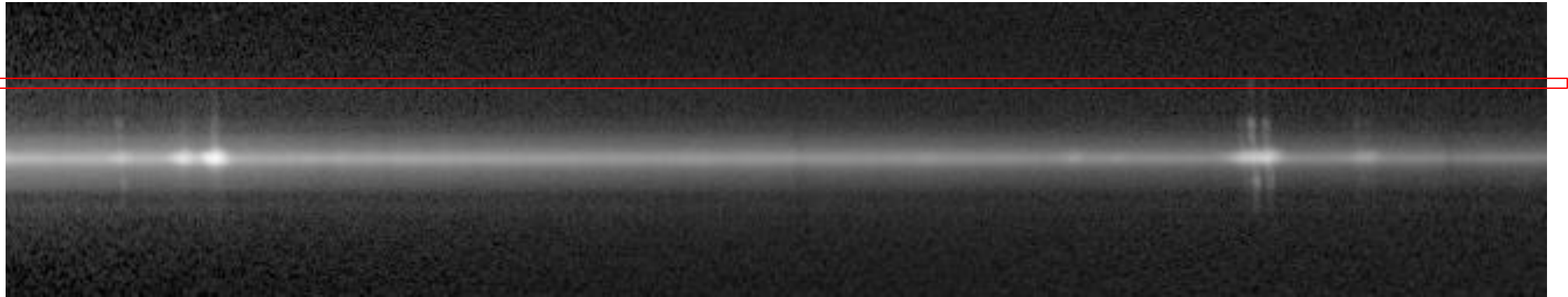
En mesurant le décalage spectral le long de la fente, on peut tracer la courbe de rotation de la galaxie



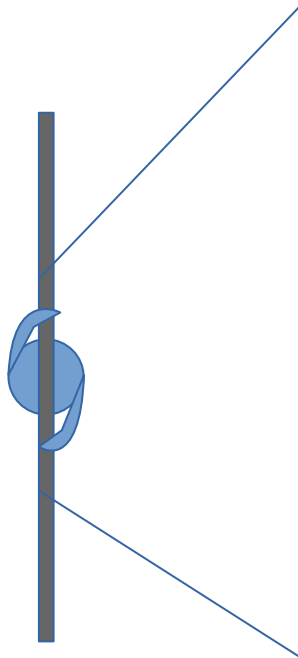
Vera Rubin



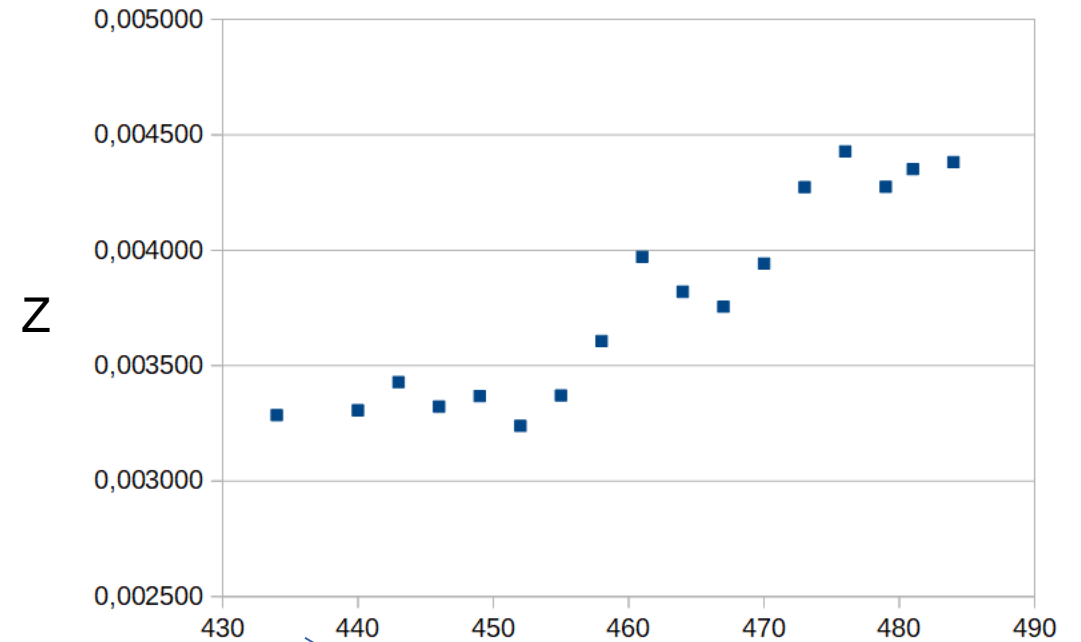
Extraction de 23 spectres tout les 3 pixels le long de la fente



On détermine z (donc v) pour chaque position le long de la fente

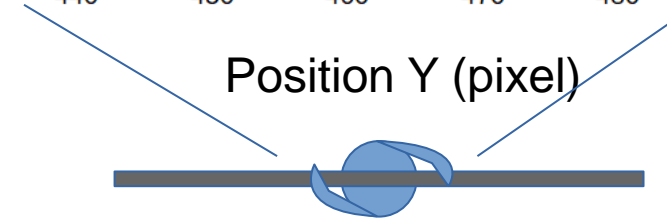


Pos Y	z (moyen)	V /obs (km/s)	V /coeur (km/s)
434	0,003286	986	-160
437			
440	0,003307	992	-154
443	0,003428	1028	-118
446	0,003322	997	-149
449	0,003368	1011	-135
452	0,003239	972	-174
455	0,003371	1011	-135
458	0,003607	1082	-64
461	0,003971	1191	45
464	0,003820	1146	0
467	0,003755	1127	-19
470	0,003942	1183	37
473	0,004273	1282	136
476	0,004428	1329	183
479	0,004275	1283	137
481	0,004351	1305	159
484	0,004382	1314	168



$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$

$$V = c z$$



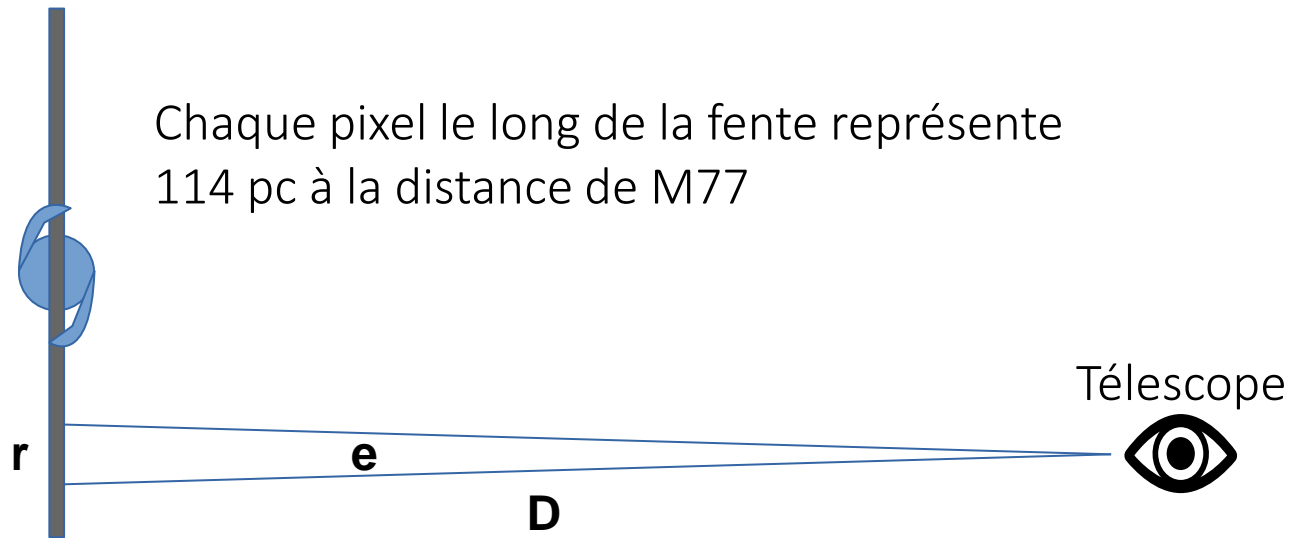
Position Y (pixel)

Calcul de r à la distance D de la galaxie

e = taille pixels caméra ($6,45 \times 10^{-6}$ m) x focale (0,9 m)
= $7,167 \times 10^{-6}$ radian

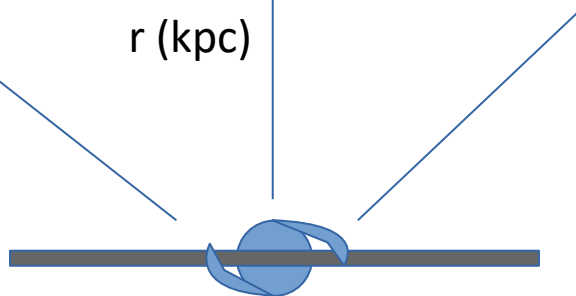
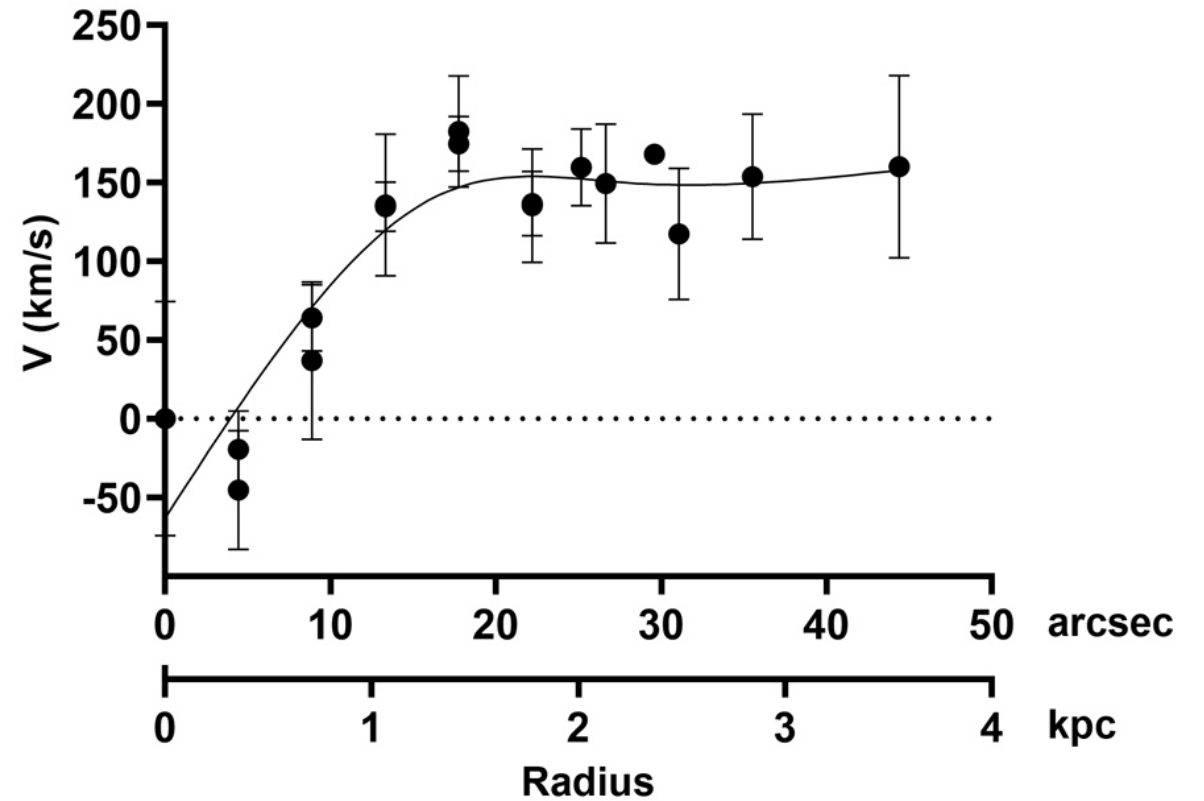
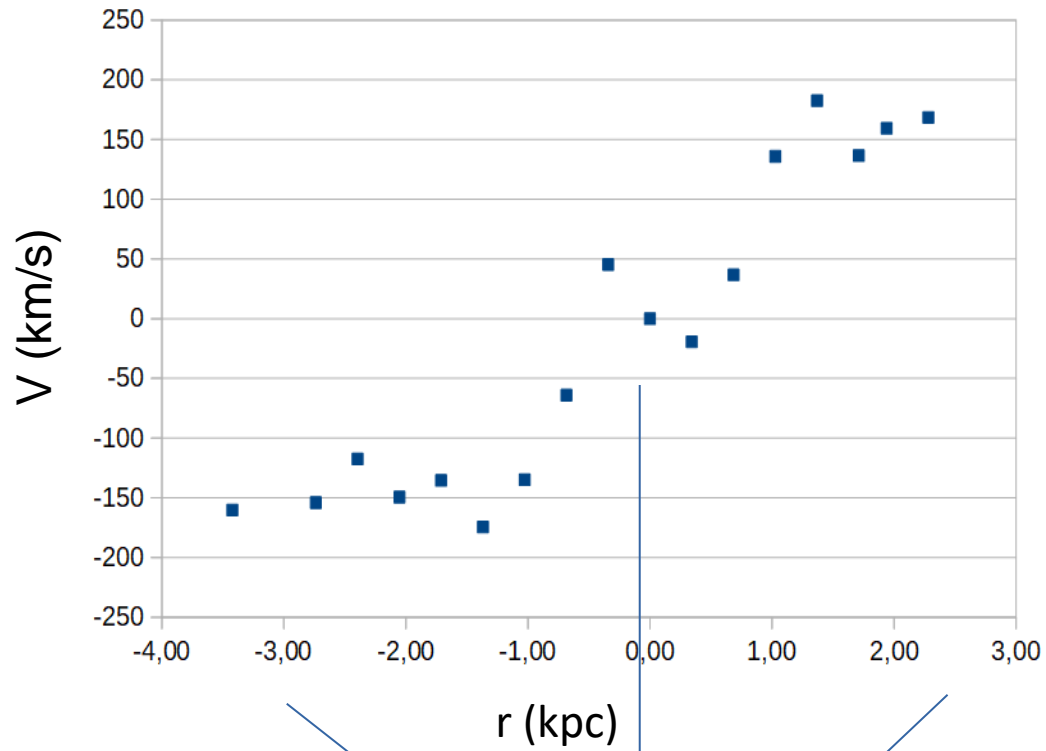
$r = e$ ($7,167 \times 10^{-6}$ radian) x D galaxie (16 Mpc) = 114 pc

Chaque pixel le long de la fente représente
114 pc à la distance de M77



Pos Y (pixel)	Y pixel/centre	kpc/centre
434	-30	-3,42
437	-27	-3,08
440	-24	-2,74
443	-21	-2,40
446	-18	-2,05
449	-15	-1,71
452	-12	-1,37
455	-9	-1,03
458	-6	-0,68
461	-3	-0,34
464	0	0,00
467	3	0,34
470	6	0,68
473	9	1,03
476	12	1,37
479	15	1,71
481	17	1,94
484	20	2,28

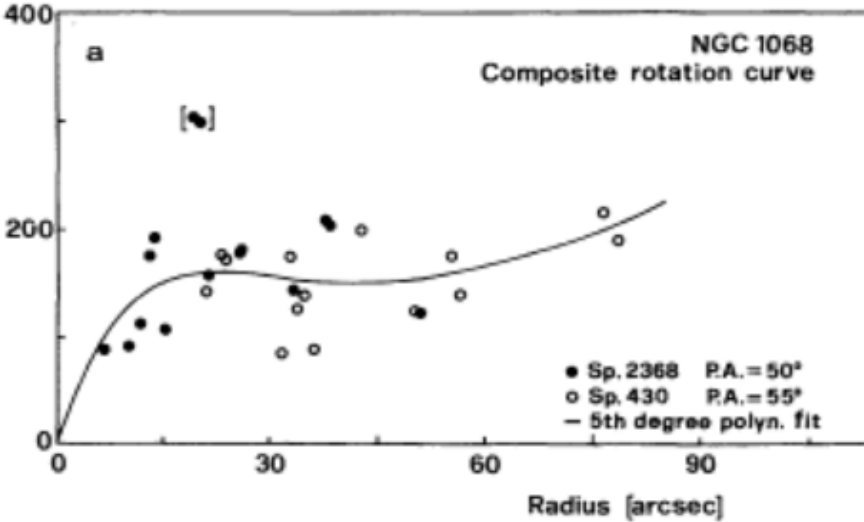
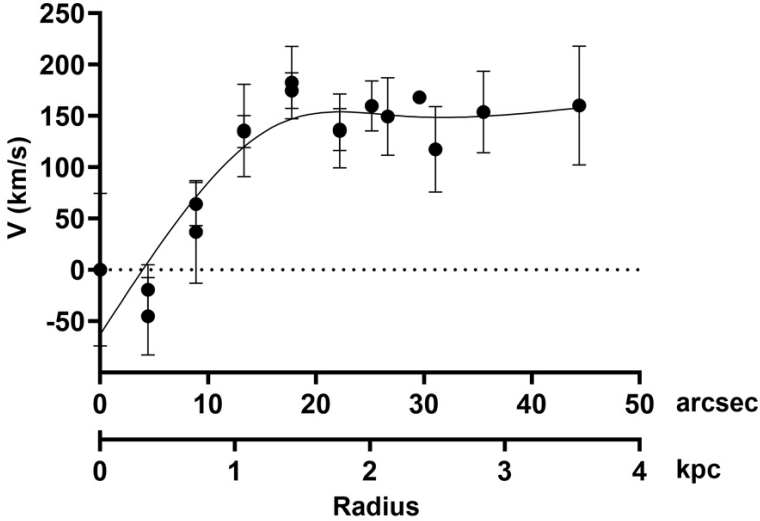
Courbe de rotation de M77



Comparaison avec la courbe de rotation par un instrument pro



Newton 0.2 m



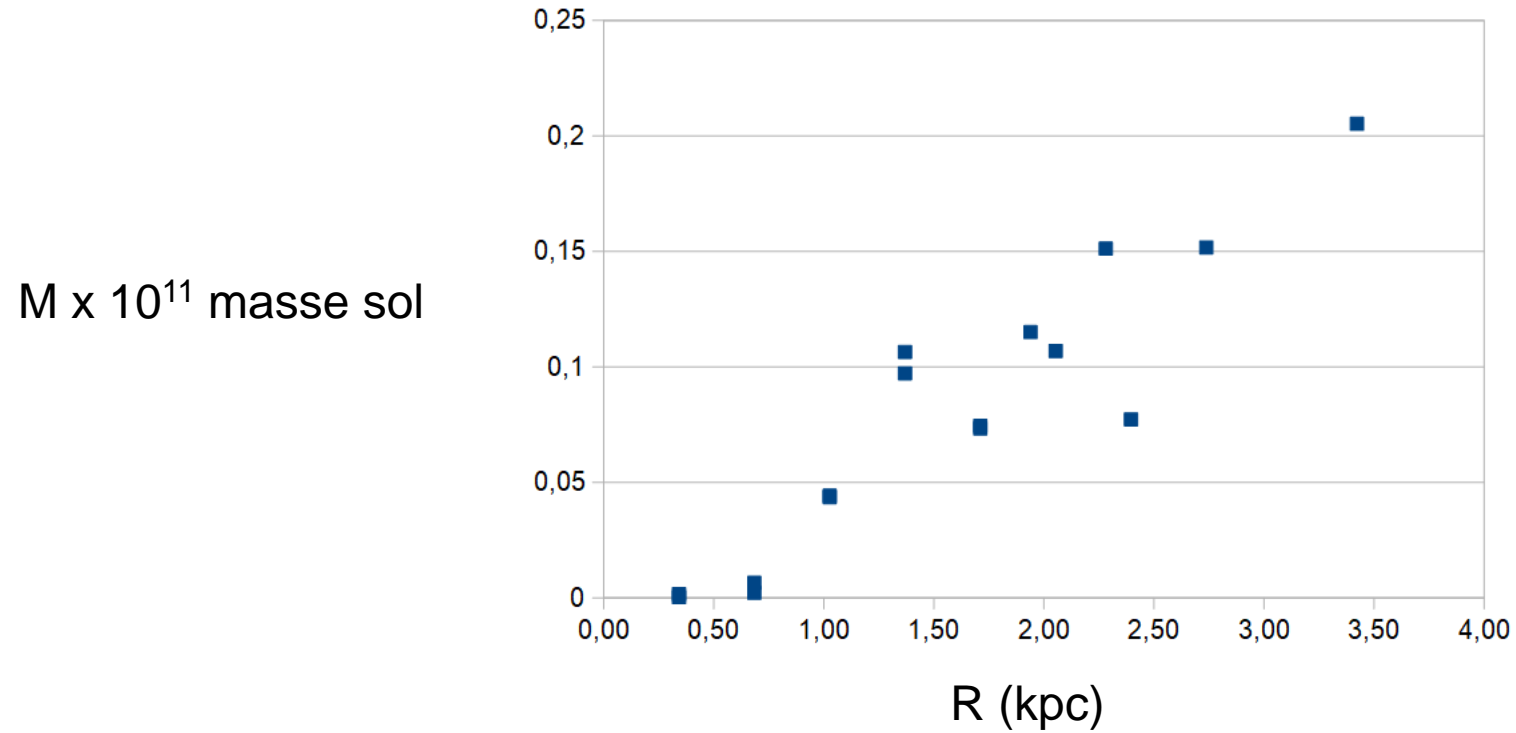
<http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1982A%26A...112..361G>



Mt Ekar, ITA
Cassegrain 1.8 m

Avec $M = R V^2 / G$ on pèse M77...

Profil de masse intégrale



...mais...est-ce qu'on aperçoit la matière noire !?

