

実習【ハッブルの法則】（ハッブル定数・宇宙年齢の決定）

教師用ガイド

■ねらい

銀河のスペクトルを観測すると、多くの銀河のスペクトルは赤方偏移をしていることがわかる。ここでは、銀河の赤方偏移を光のドップラー効果によるものと仮定して、ドップラー方程式を利用し、銀河の後退速度を求める。それにより、我々の銀河から遠い銀河ほど後退速度は大きく、その後退速度と銀河の距離の関係は比例している（ハッブルの法則）ことがわかる。

ここでは、距離のわかっている銀河のスペクトルからハッブルの法則を求め、宇宙の単位距離当たりの膨張速度（km/s/Mpc）であるハッブル定数を決定する。

注 銀河の赤方偏移は、本来、「銀河の遠方への移動によるドップラー効果」ではなく、「空間の膨張に伴うもの」であるという考え方が正しいとされている。しかし、本教材では説明を簡単にするため「相対論の項を含まないドップラー方程式」で近似的に計算している。

■前提とする知識

光のドップラー効果

光のドップラー方程式については、高等学校の教育課程から削除されているが、必要に応じ指導することで対応する。

※ 新指導要領の高等学校理科の解説には、課題研究の中に「すばるのデータを用いた距離はしご」の例があり、導入も可能と思われる。（次の式は $v \ll c$ の時にのみ有効）

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

c ：光速　　 v ：光源の速度

λ_0 ：基本波長（ $H\alpha = 656.3\text{nm}$ ）

λ ：移動している光源の λ_0 に対する波長

※ 光の波長については、データによって \AA （オングストローム）を使用しているものもあるが、ここでは nm を使用した。 $1\text{ nm} = 10\text{ \AA}$

※ この教材での基本波長は原則として [$H\alpha = 656.3\text{nm}$] を用いる

■必要とするデータ

距離既知の銀河のスペクトルデータ

ハッブル定数決定用データセット… Hubble Diagram を求めるセット

■授業展開

1. H0 決定用データセットにある銀河を一つ選び、画像解析ソフト「マカリ」で、そのスペクトルの画像を開く。

※ マカリはできる限りフルスクリーンで使用するほうが使いやすい。

※ 銀河の距離は NED の光度距離（Luminosity Distance）を使用。

この距離は、セファイド型変光星、I a 型超新星等の天体の明るさから求められた距離の平均値である。

galaxy	データセット	距離(Mpc)	備考
NGC2403	H0決定用	3.6	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC925	H0決定用	8.6	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC3627	H0決定用	10.1	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC3198	H0決定用	14.1	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC4536	H0決定用	14.9	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC4321	H0決定用	15.8	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC4414	H0決定用	18.3	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC2608	H0決定用	25.5	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC7678	H0決定用	46.8	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC673	H0決定用	67.3	SMOKA(岡山天体物理観測所)
NGC2339	H0決定用	34.7	独自観測(東広島天文台)
NGC3516	H0決定用	38.9	独自観測(東広島天文台)
NGC1275	H0決定用	72.7	独自観測(東広島天文台)

2. グラフツールを使い、開いた画像のスペクトルのグラフをつくる。

最初を開く画像は、測定しやすい画像を選んだほうが説明しやすい。画像のコントラスト調整をしてできるだけ見やすくするように指示をする。

銀河回転のわかる銀河（輝線が斜めになっているもの）を選べば、輝線が銀河のものか、地球から（大気、人工光源）のものかが判別できるため、目的の波長を測定しやすい。

※ 測定しやすい画像

NGC2403 は輝線がはっきりしている。また、東広島天文台で取得した画像はすべて Seyfert 銀河であるため輝線が判別しやすい。

注 Seyfert 銀河とは

活動銀河の一種で、中心核が非常に明るく巨大なブラックホールを持つと考えられている。この銀河のスペクトルには水素、窒素、酸素、などの輝線がはっきりと表れる。

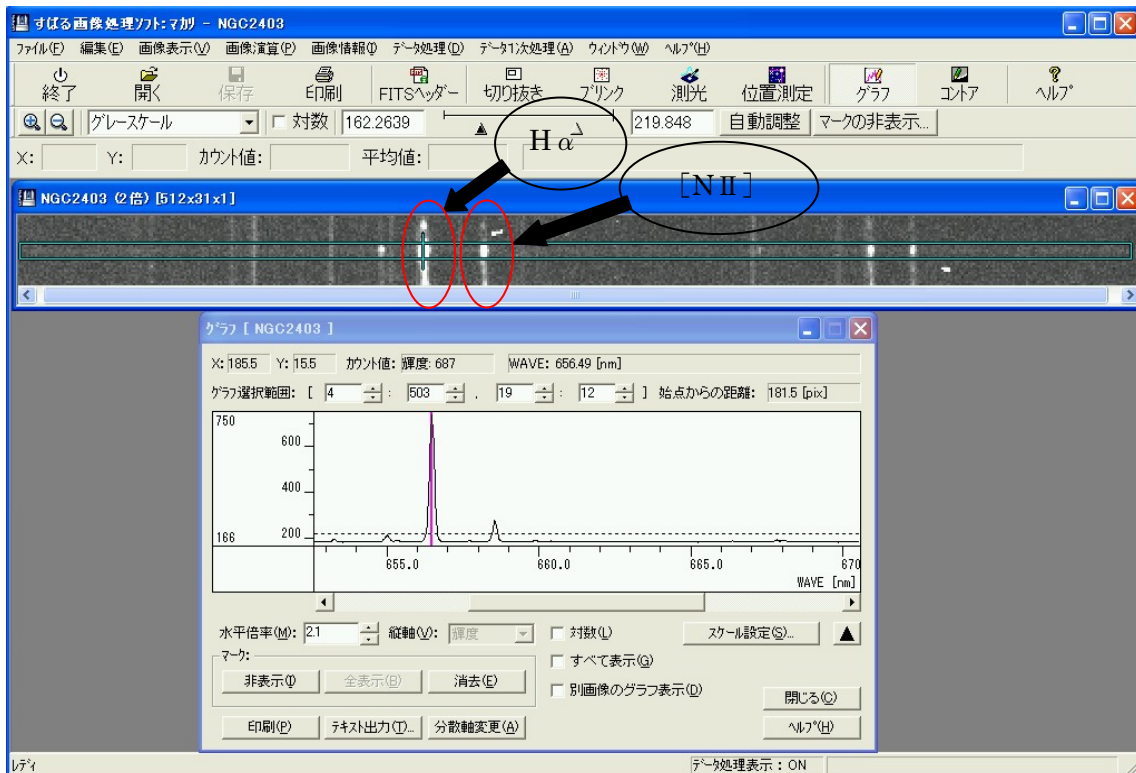
3. H α の波長（656.3nm）の Red Shift から、ドップラー方程式を使い後退速度を求める。

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

※ 一般的に銀河のスペクトルでは 656.3nm 付近に最も強く現れる輝線が H α の輝

線であるが、 $H\alpha$ のみだとスペクトルを同定したとはいえない。本教材では $H\alpha$ のみを使用して波長を調べるが、本来は $[N II]$ (658.4nm)なども利用し、複数の輝線、吸収線で判断することを授業の中で知らせておく方がよい。

※ 今回のデータセットでは、 $H\alpha$ と $[N II]$ が並んで見えているものも多数ある。実際にはRed Shiftの影響は受けるが、今回使用した天体の距離では、ほとんど無視できる程度である。一方、地球の大気や人工光源からくる輝線はRed Shiftが起きないため銀河の輝線とは間隔が変化する。これにより、銀河による輝線、吸収線と、地球の大気や人工光源とが区別できる。



※ 可能であれば、 $H\alpha$ と $[N II]$ で各銀河の後退速度を求める。 $([N II]$ が見えない銀河もある)

注 銀河の赤方偏移を表す場合、【赤方偏移大きさ Z 】で表す場合が多い。

$Z \leq 0.1$ の場合、次の式であらわされる。本教材の天体では、発展学習の3C59と3C273は Z が0.1を超えているが、まだ、さほど影響が感じられない。

$$Z = \frac{v}{c}$$

※ Z は正確には下記の式であらわされる。この式では Z が1を超える遠方の銀河でも速度が光速を超えることが無い。(今回の教材では、この式を利用しない)

$$z' = \frac{2Z + Z^2}{2 + 2Z + Z^2} = \frac{v}{c}$$

4. 以上の作業をデータセットの各銀河について繰り返し、後退速度と距離のグラフを作成する。

- (1) 時間があれば、エクセルを利用して計算・グラフを自分で作らせる。時間が無い場合、ハッブル図作成シート（エクセルシート）にデータのみを記入させ、読み取らせる。
- (2) データの中で、輝線が傾いているものは銀河回転の影響であるので、地上光と区別しやすい。銀河回転による輝線の傾きは、どの波長でもほぼ同じ角度で傾いている。
- (3) 銀河回転の多い画像では計測する位置により、ズレが大きくなるので矩形選択をしたほうが良いが、ノイズの多い画像では、矩形選択でないほうが読み取りやすい場合がある。（Shift キーを押しながら範囲指定をすると矩形選択が出来る）
- (4) 銀河団は互いに影響しあい固有の運動を持っているため、比例関係がきれいに çıkにくくなる傾向があるものもある。

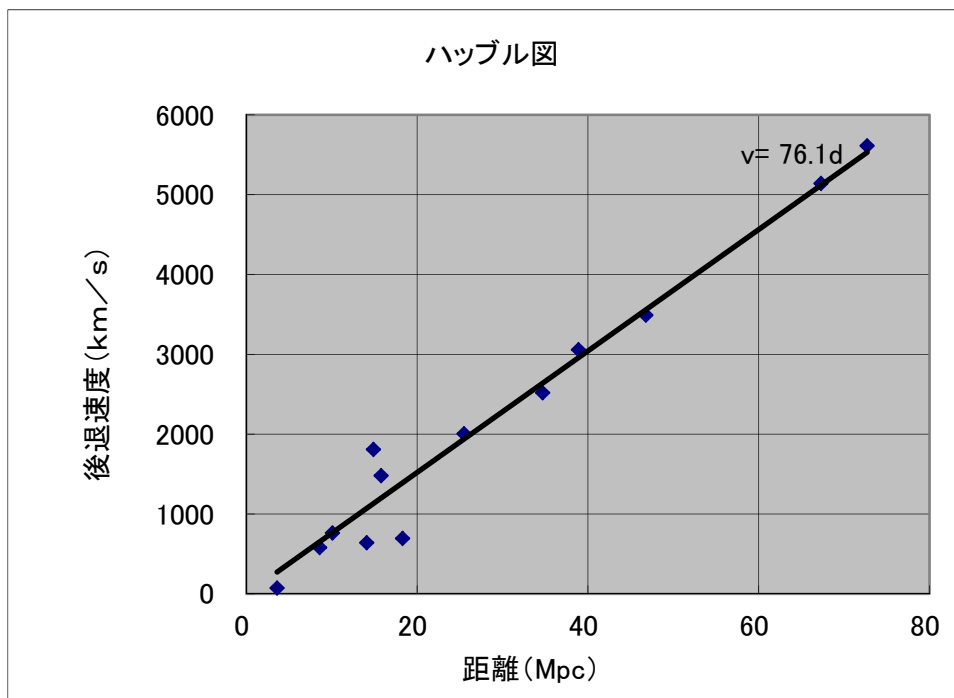
おとめ座銀河団

NGC4321	NGC4414	NGC4536
---------	---------	---------

5. ハッブル定数を求める。

エクセルのグラフ機能でハッブル定数を算出すると便利である。

【ハッブル定数を算出したグラフの例】



測定誤差により必ずしも上記の値になるとは限らない

6. 求めたハッブル定数から宇宙年齢を求める。

宇宙年齢の推定は次の式で求められる。

1 pc=3.26 光年として

y : 宇宙年齢 H_0 : ハッブル定数 c : 光速

$$y = \frac{c}{H_0} \times 3260000$$

※ 以下の計算方法でもよい

1Mpc=3.09×10²²m として Hubble 定数の単位 km/s・Mpc を m、年 に
そろえ、逆数をとる。

$$y = \frac{3.09 \times 10^{22}}{H_0 \times 1000 \times 60 \times 60 \times 24 \times 365.25}$$

参考 研究論文の H_0 は以下の値が公表されている

HST Key Project : (2001) $H_0=(72\pm 8)$ km/s・Mpc

WMAP : (2005) $H_0=(71\pm 4)$ km/s・Mpc

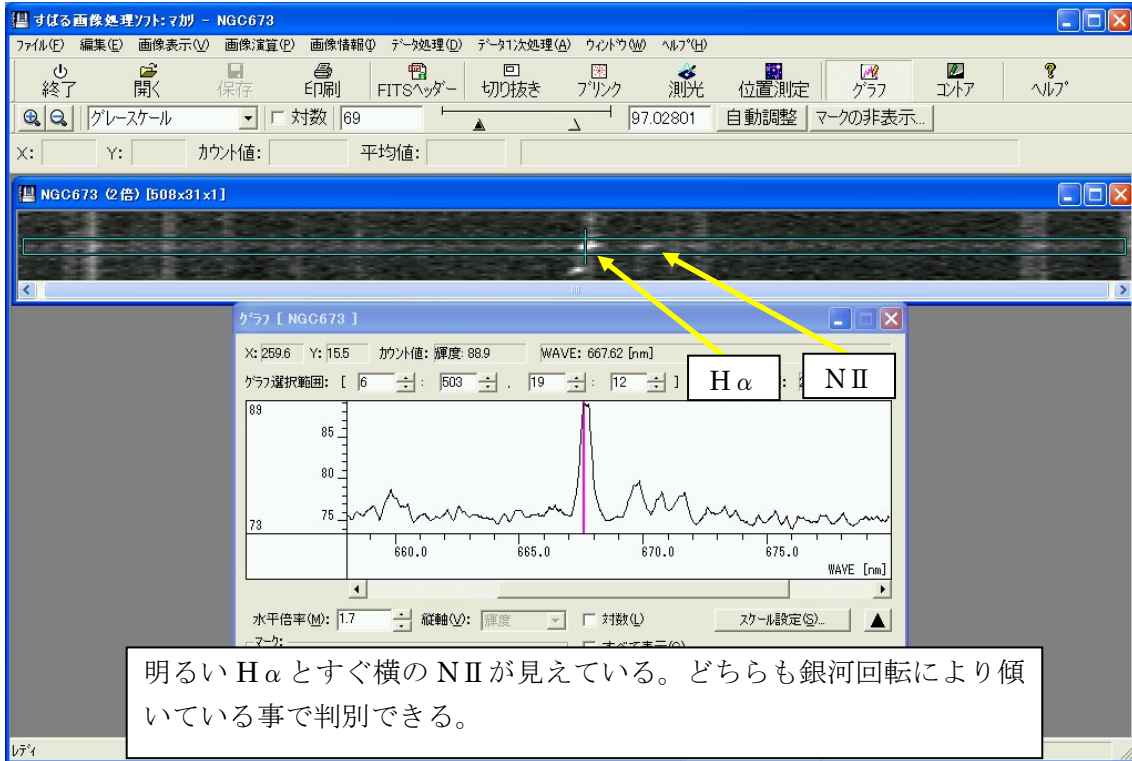
WMAP+α : (2008) $H_0=(70.5\pm 1.3)$ km/s・Mpc

HST : Hubble Space Telescope

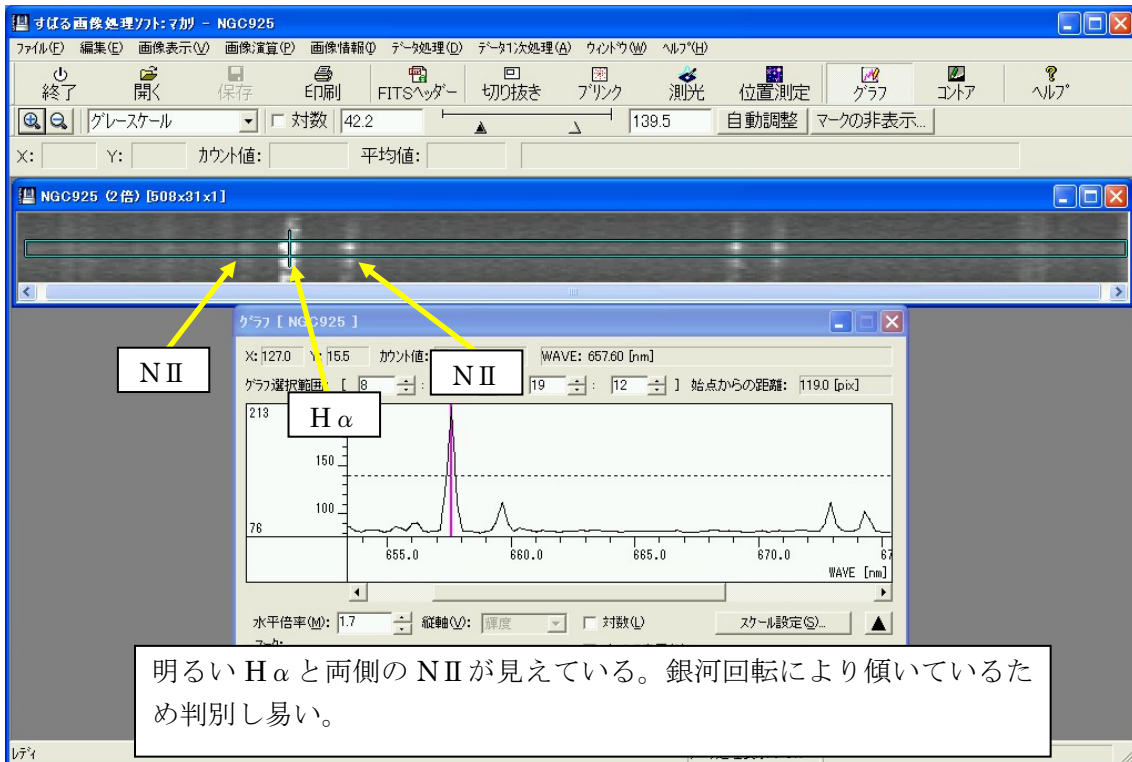
WMAP : Wilkinson Microwave Anisotropy Probe

☆ 各銀河の $H\alpha$ 、 NII

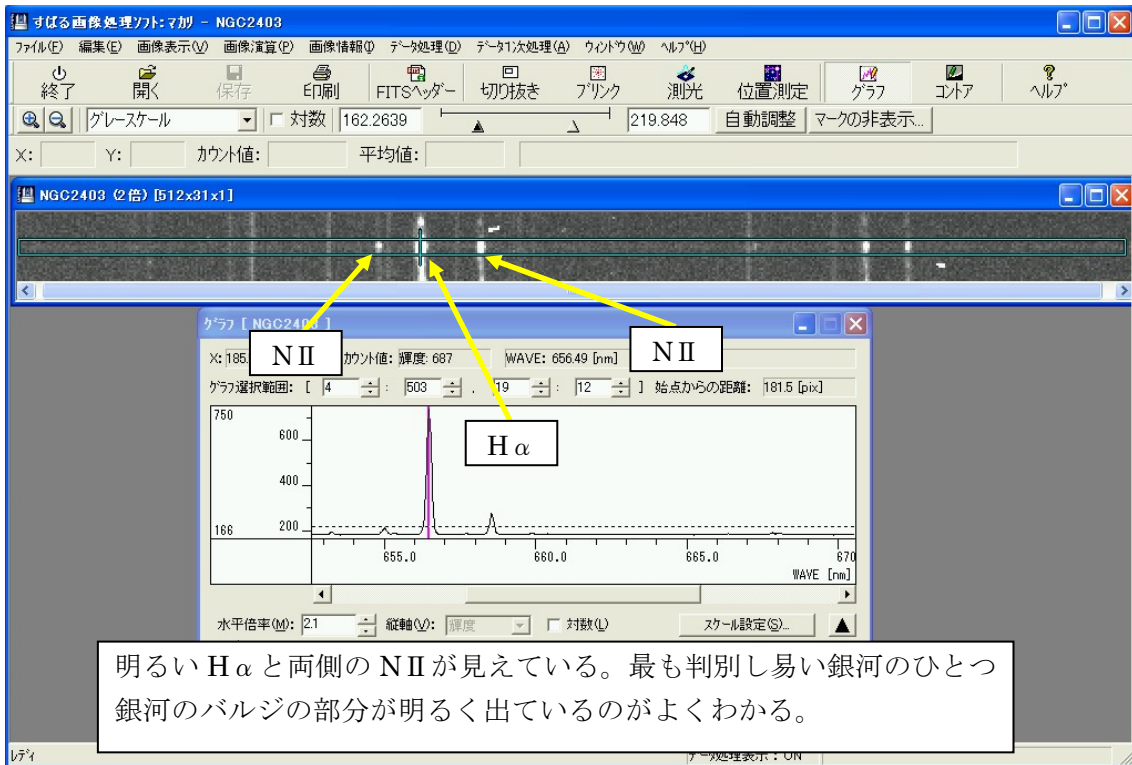
NGC673



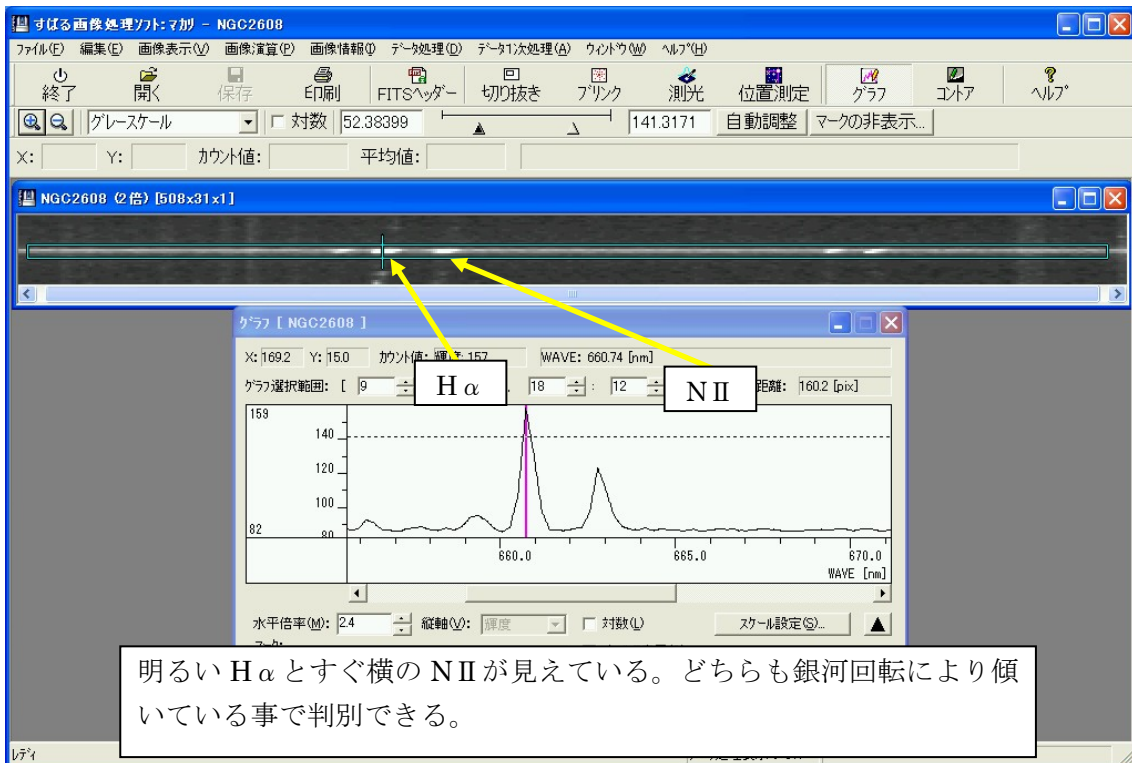
NGC925



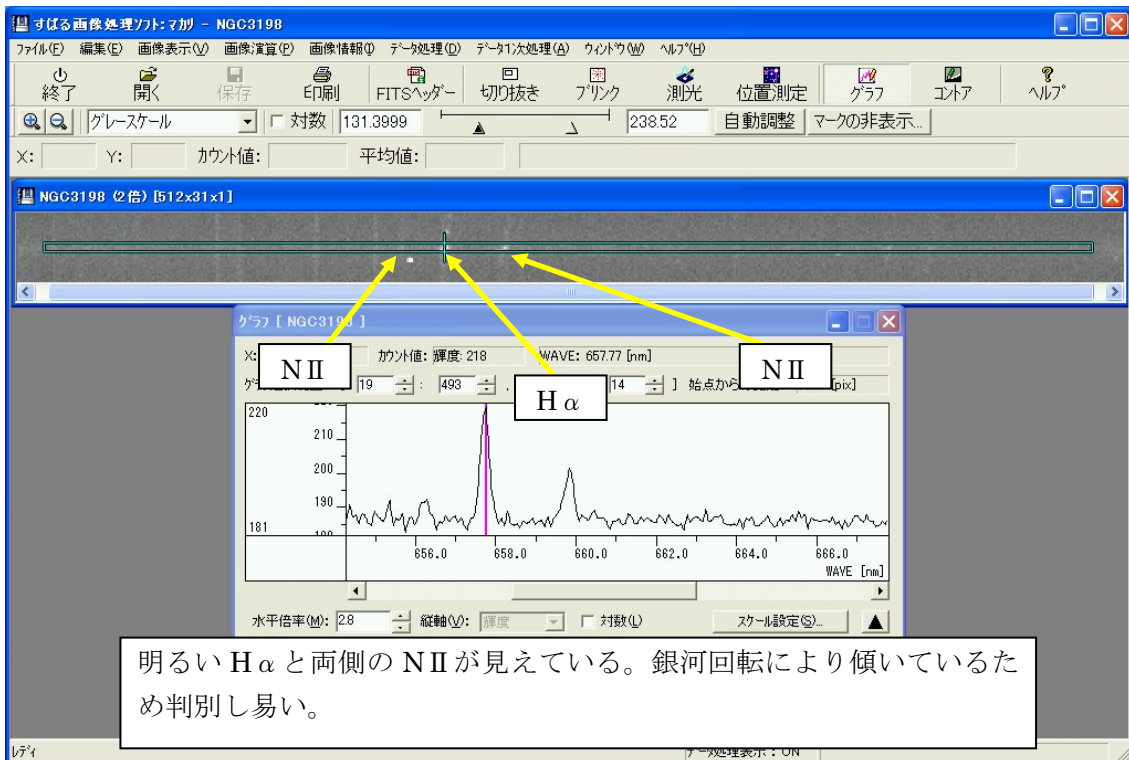
NGC2403



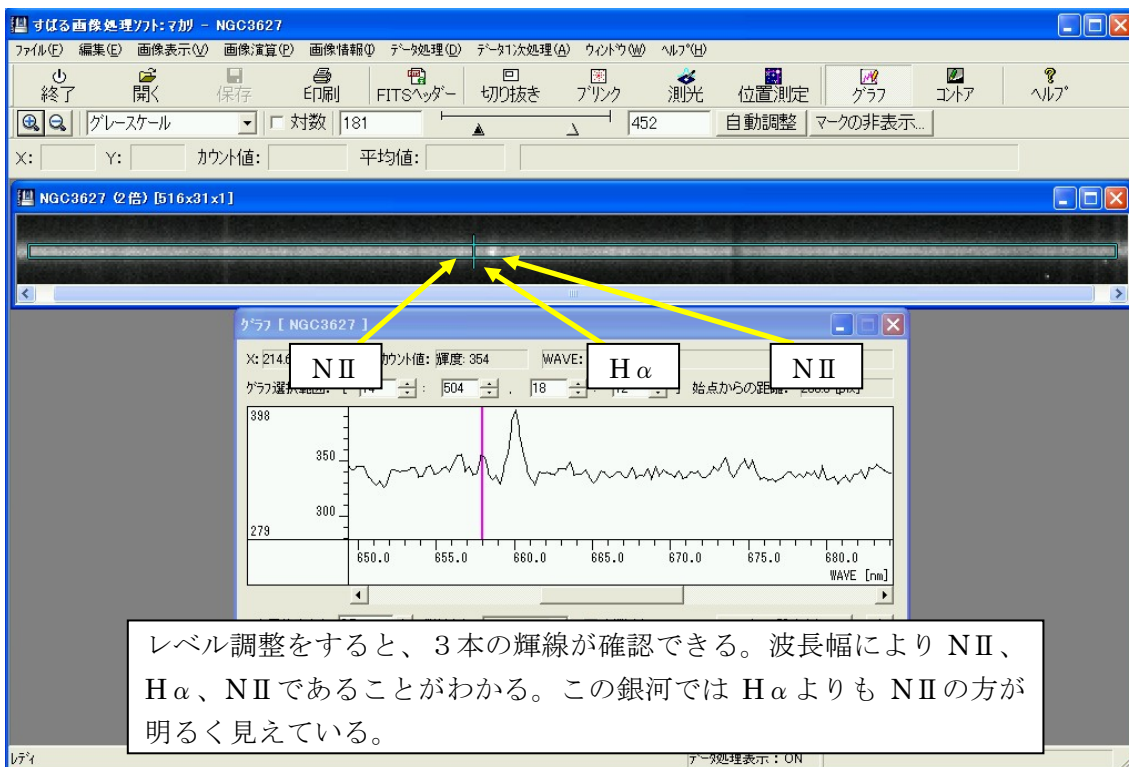
NGC2608



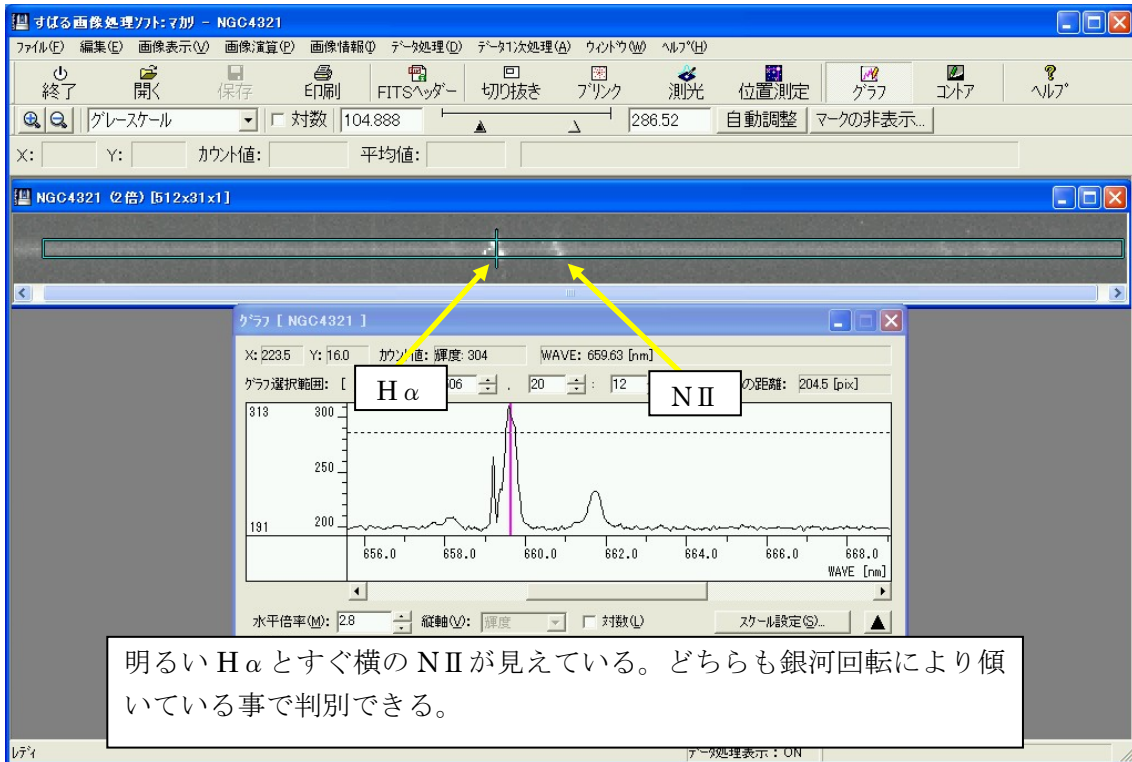
NGC3198



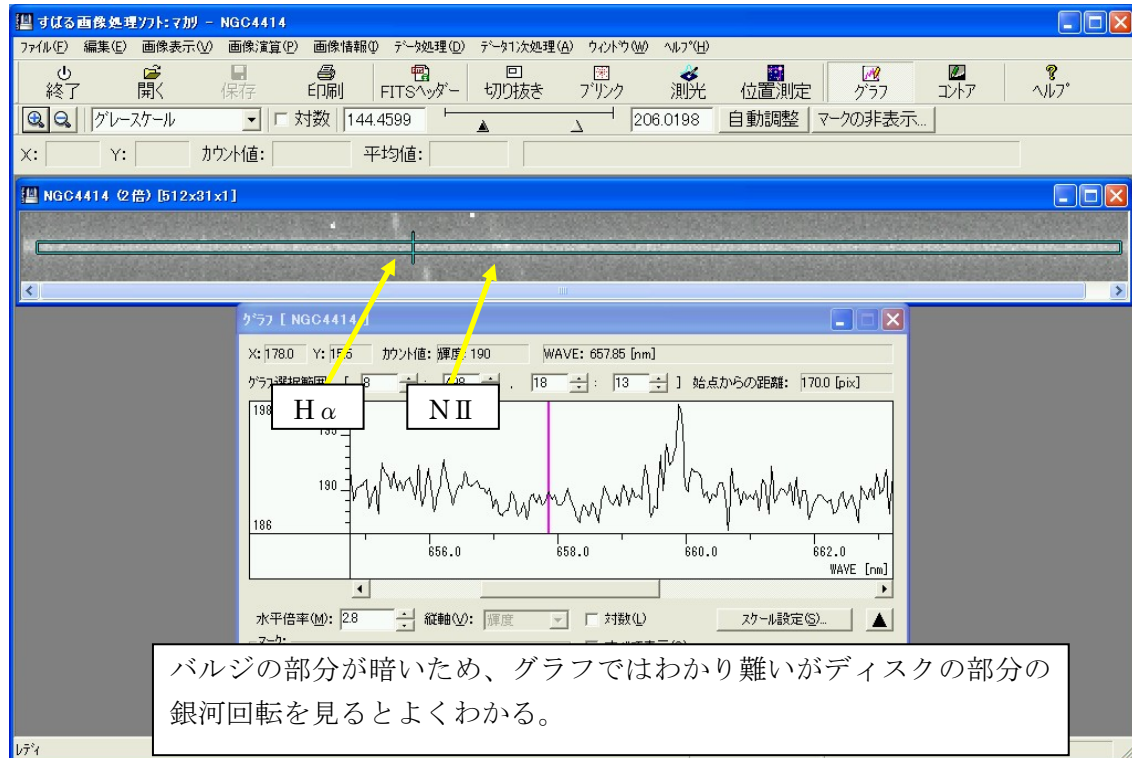
NGC3627



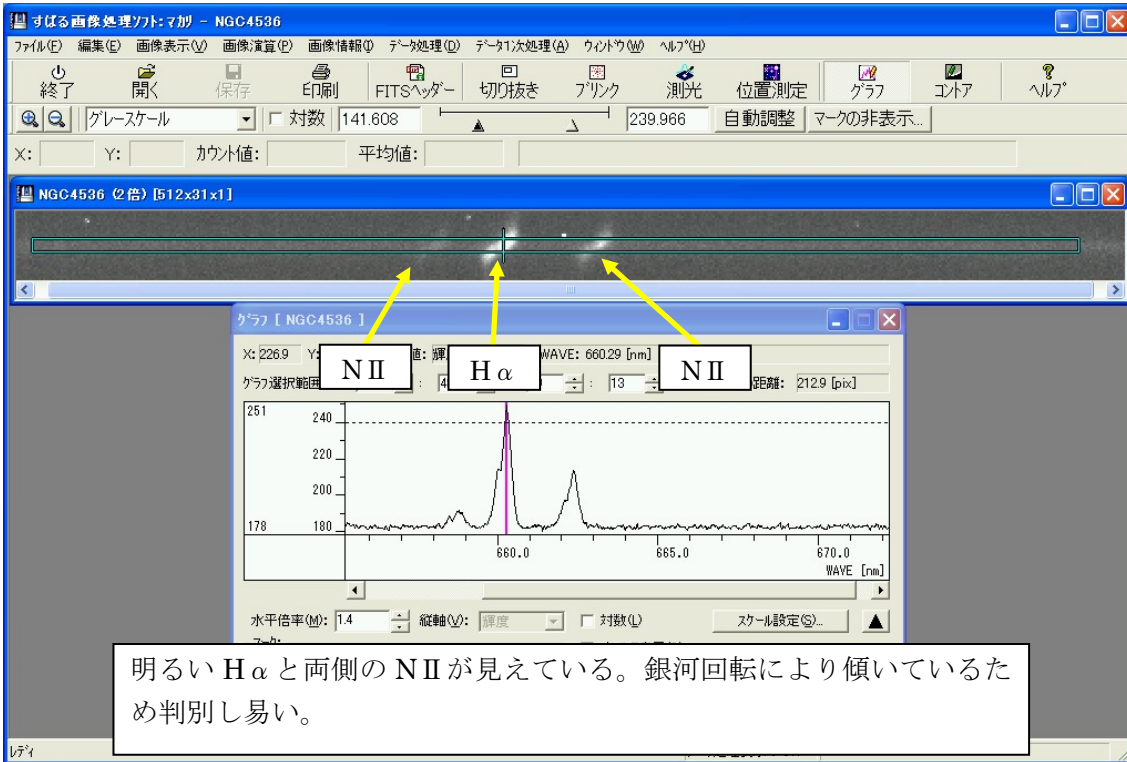
NGC4321



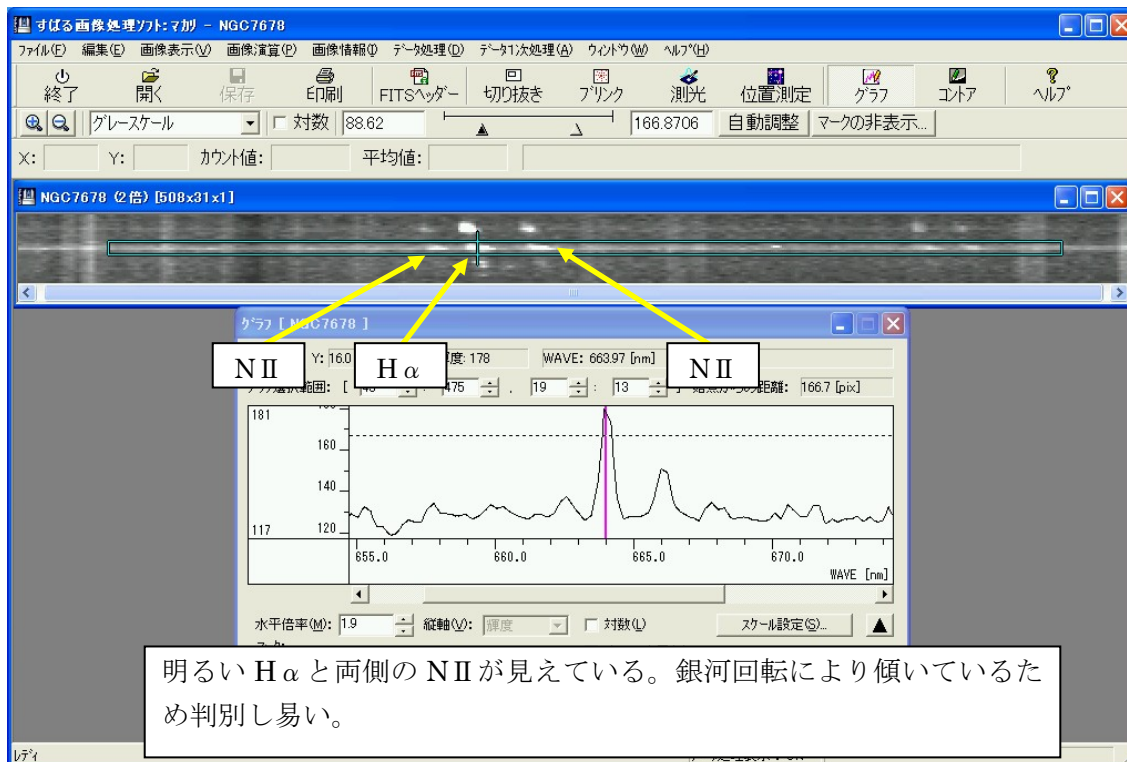
NGC4414



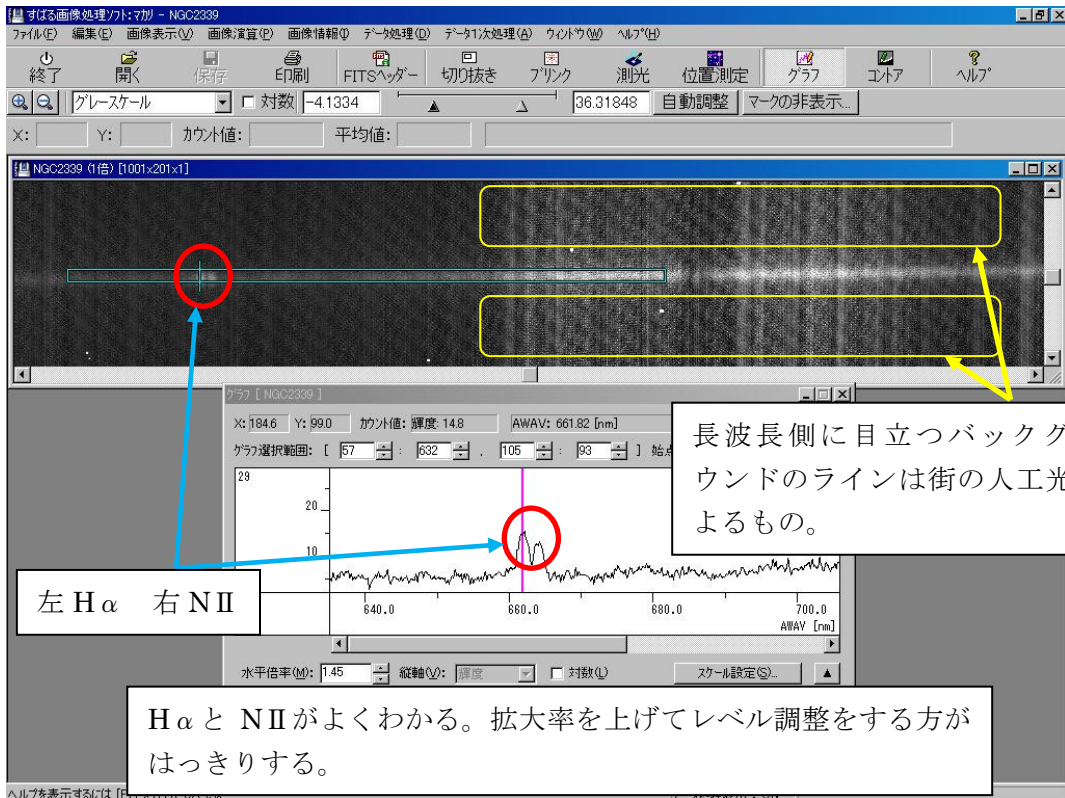
NGC4536



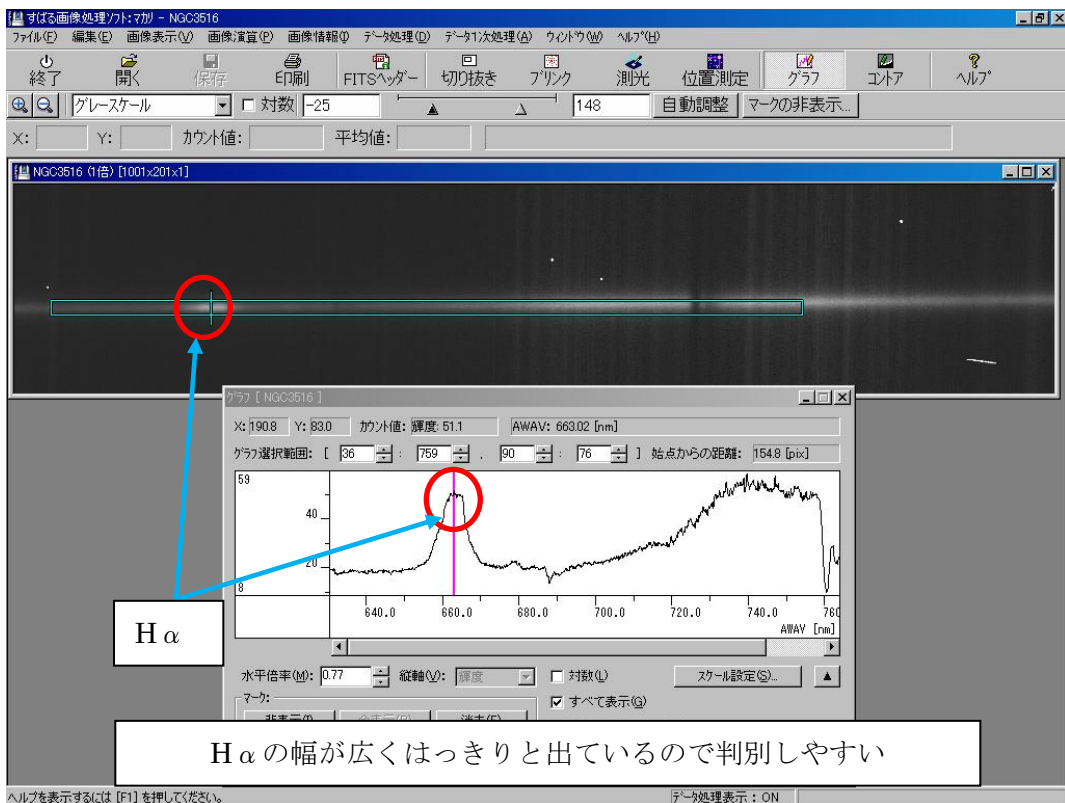
NGC7678



NGC2339



NGC3516

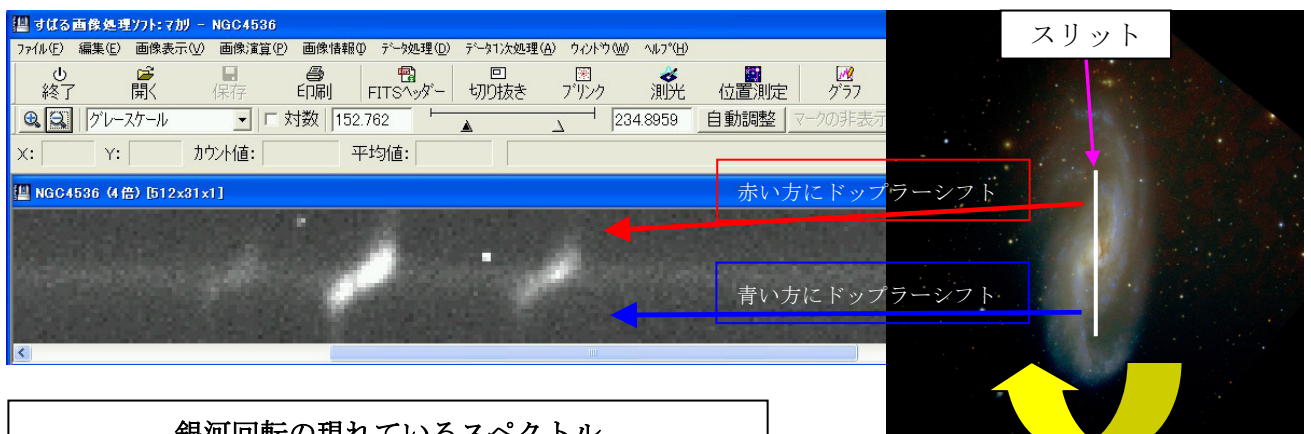


NGC1275



【参考】

スリットとスペクトルデータの見方



銀河回転の現れているスペクトル
 銀河とスリットの向きによっては、銀河の円盤部の回転がドップラーシフトによって観測される。これを利用すると、地上光源の輝線か銀河由来の輝線か区別することができる。

NGC4536
 IPAC Infrared Science Archive