

宇宙科学実習 I: ハッブル・ルメートルの法則

今回は遠方の銀河からの光のスペクトルを解析して、宇宙膨張のハッブル定数を決定し、これを用いて地球からクエーサーという遠方天体までの距離を空いてします。

1 準備: 宇宙膨張 — ハッブル・ルメートルの法則

遠くの銀河が、ほぼその距離に比例した速さで我々の天の川銀河から遠ざかっていることはアメリカの天文学者スライファー(Vesto Melvin Slipher (1875-1969))、そしてハッブル(Edwin Powell Hubble (1889- 1953))の観測によって 1920 年代に明らかになっています:

$$v = H_0 r \quad (1)$$

ここで、 v は我々の銀河からの後退速度(慣習的に km/s の単位で測る)、 r は遠方銀河までの距離(Mpc を単位に測る)、 H_0 はハッブル定数と呼ばれる定数で、「km/s/Mpc」という(少し変な)単位をもっています。¹ この銀河が遠ざかる様子は、アインシュタインの一般相対性理論により、宇宙(の時空)が一様かつ等方的に膨張している結果と解釈されています。

¹実はハッブルの発見より少し前に、ベルギーのルメートル(Georges-Henri Lemaitre (1894-1966))が宇宙膨張における「ハッブル定数」を発見していたことが分かっています。詳しくは <http://www.astroarts.co.jp/news/2011/11/14lemaitre/index-j.shtml>

1.1 一様な膨張

宇宙が一様に膨張しているとどのようなことが起きるでしょうか。

ある時刻に、同一直線上で我々から 1Mpc の距離に銀河 A, 2Mpc 距離に銀河 B があったとします。時刻 Δt の後に銀河 A が 1.5Mpc の距離に離れたとすると、宇宙が一様に膨張していることから、銀河 B は我々から 3Mpc のところにあることとなります。このとき、A の後退速度は $0.5/\Delta t$, B の後退速度は $1/\Delta t$ となって、確かに距離が 2 倍になると後退速度が 2 倍になるという比例関係がある事が分かります。

1.2 等方的膨張

更に宇宙が等方的に膨張していることを仮定すると、この膨張は何処から見ても同じように起きている事が分かります。

いま、銀河 A,B,C が三角形をなすように並んでいたとします。これらの位置ベクトルを $\vec{r}_A, \vec{r}_B, \vec{r}_C$ とします。いま、銀河 A に我々がいるとして、A に対する B,C の後退速度をハッブルの法則から求めると

$$\vec{v}_{BA} = H_0 \cdot (\vec{r}_B - \vec{r}_A), \quad \vec{v}_{CA} = H_0 \cdot (\vec{r}_C - \vec{r}_A) \quad (2)$$

となります(等方的膨張)。このとき、B から見た C の運動はどう見えるでしょうか。その速度は

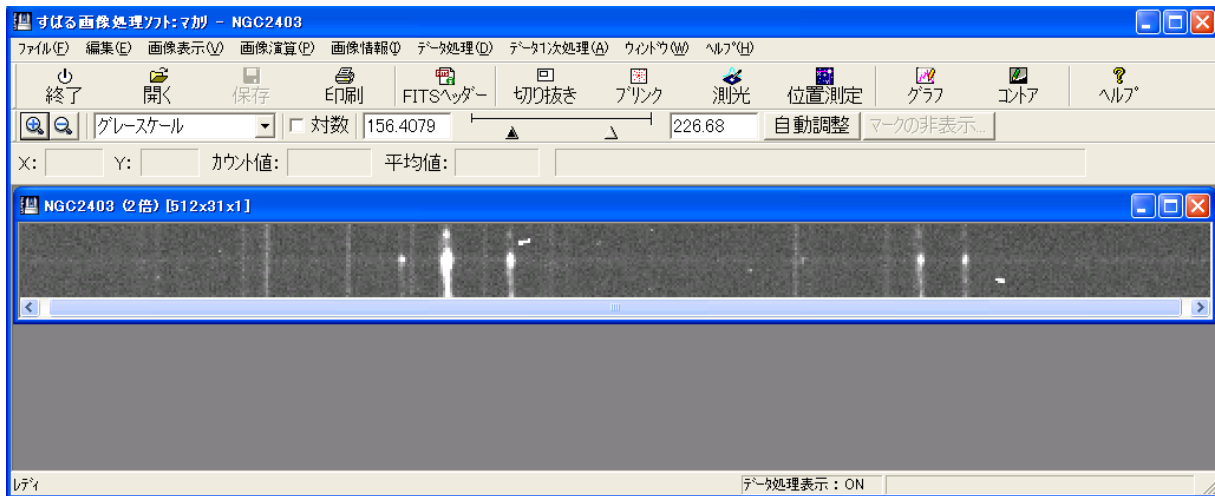
$$\vec{v}_{CB} = \vec{v}_{CA} - \vec{v}_{BA} = H_0 \cdot (\vec{r}_C - \vec{r}_A) - H_0 \cdot (\vec{r}_B - \vec{r}_A) = H_0 \cdot (\vec{r}_C - \vec{r}_B) \quad (3)$$

となり、これは B から見た C の運動もやはり同じ形のハッブルの法則に従うことを示しています。つまり、B からも C や A(我々)が同じハッブルの法則で後退しているわけです。このように、ハッブルが発見した宇宙膨張は、我々の銀河が宇宙の中心にあって他の銀河がそれから遠ざかっているということを意味してはいません。

実習【ハッブル定数の決定】

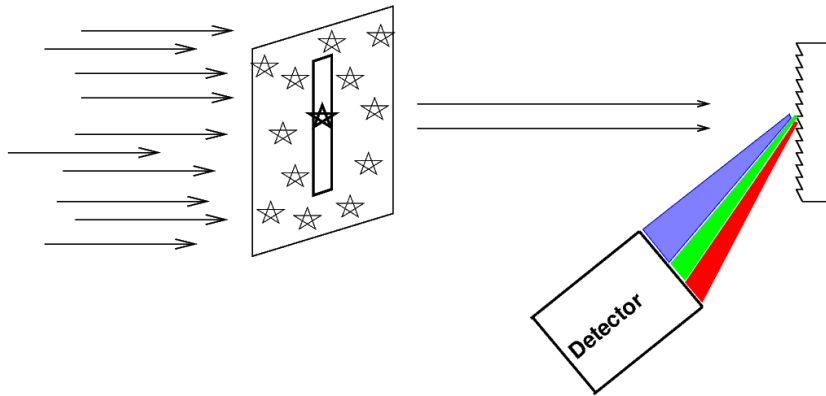
ここでは、実際に観測された銀河のスペクトルを使い、膨張する宇宙を表す「ハッブルの法則」に現れるハッブル定数を求め、それをを用いて遠くのクェーサーまでの距離を求めます。

1. 画像解析ソフト「マカリ」で銀河のスペクトルの画像を開いてみましょう。



この画像データは、スリットを通して選んだ天体（銀河）だけからの光を、分光用のグレーティング（回折格子）に当てて波長ごとの光に分けて撮像したものです（下図）。縦方向がスリットの方向、横方向が光の波長の分散に対応しています。

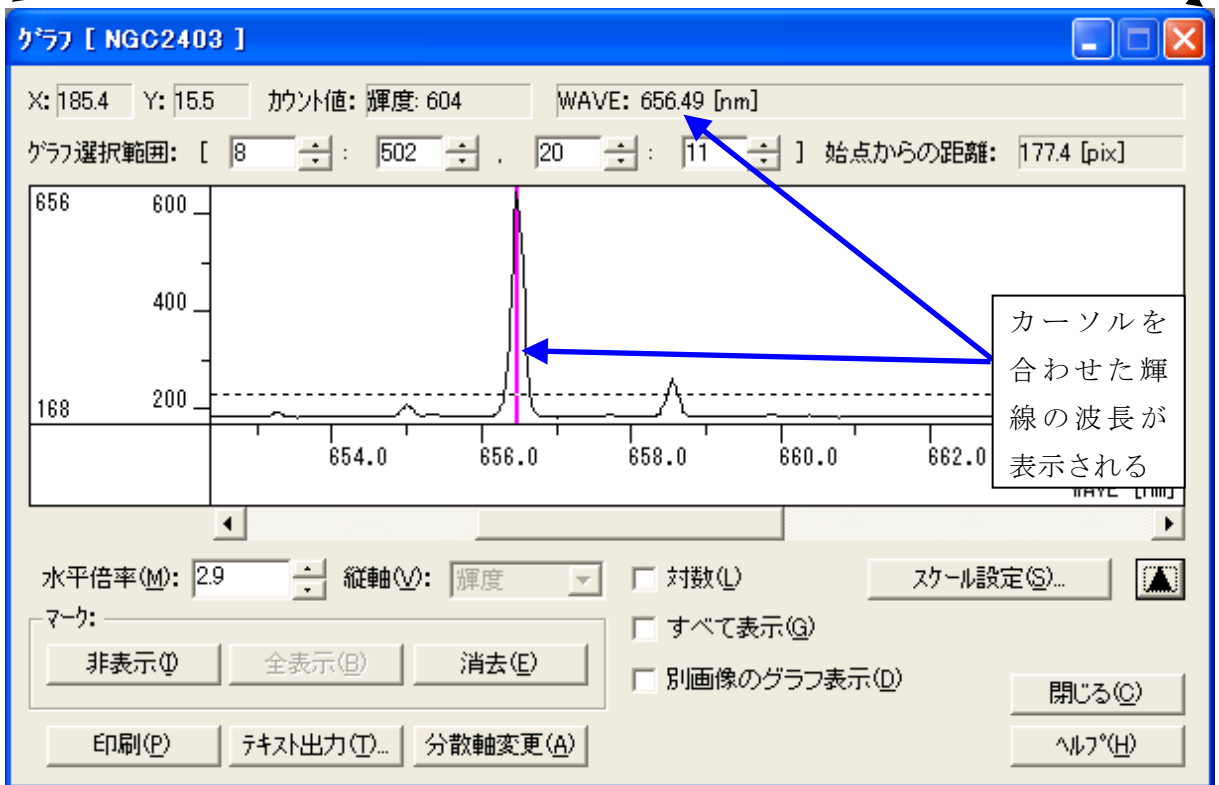
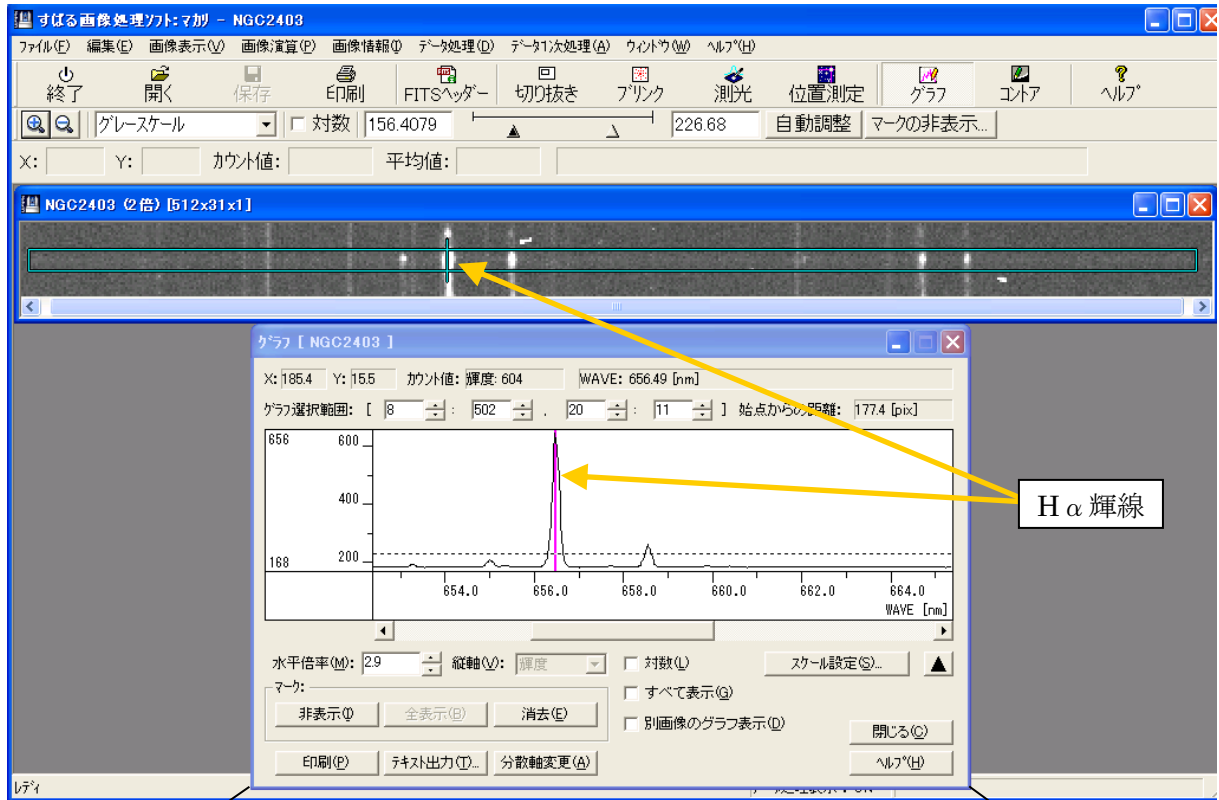
グレーティング
スリット



スペクトルには輝線と呼ばれる他よりも明るい場所が存在します。この中で水素原子による輝線 ($H\alpha$) を見つけるため“グラフツール”を使って、開いたスペクトル画像のグラフをつくりましょう。(Shift キーを押しながら範囲指定をすると矩形選択が出来ます)

グラフツールボタン

2. 水素の輝線 $H\alpha$ の波長を利用し、銀河の後退速度を求めましょう。



H α 線の静止系での波長（656.281nm）と、銀河のスペクトル画像から求めた H α の波長のずれは、次のドップラー偏移の式によって、遠方銀河の我々に対する視線方向の速度と関係づけられます。

ドップラー偏移の式

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

（ c ：光速（ 2.9979×10^8 km/s）、 λ_0 ：光源の静止系での波長、

λ ：移動している光源の λ_0 に対する波長、 v ：光源の速度）

これを使い、それぞれの波長のずれから銀河の速度を求めましょう。

4. これらの銀河の距離と速度の関係をプロットし、最小二乗法でハッブル定数 H_0 を求めなさい。

5. ハッブル時間 T は次の式で定義されます。

$$T = \frac{1}{H_0}$$

これは宇宙膨張の典型的な時間であり、宇宙の年齢の大まかな値を与えます。この値（単位 Gyr (giga year) =10 億年）を求めなさい（ H_0 の次元・単位に注意すること）。

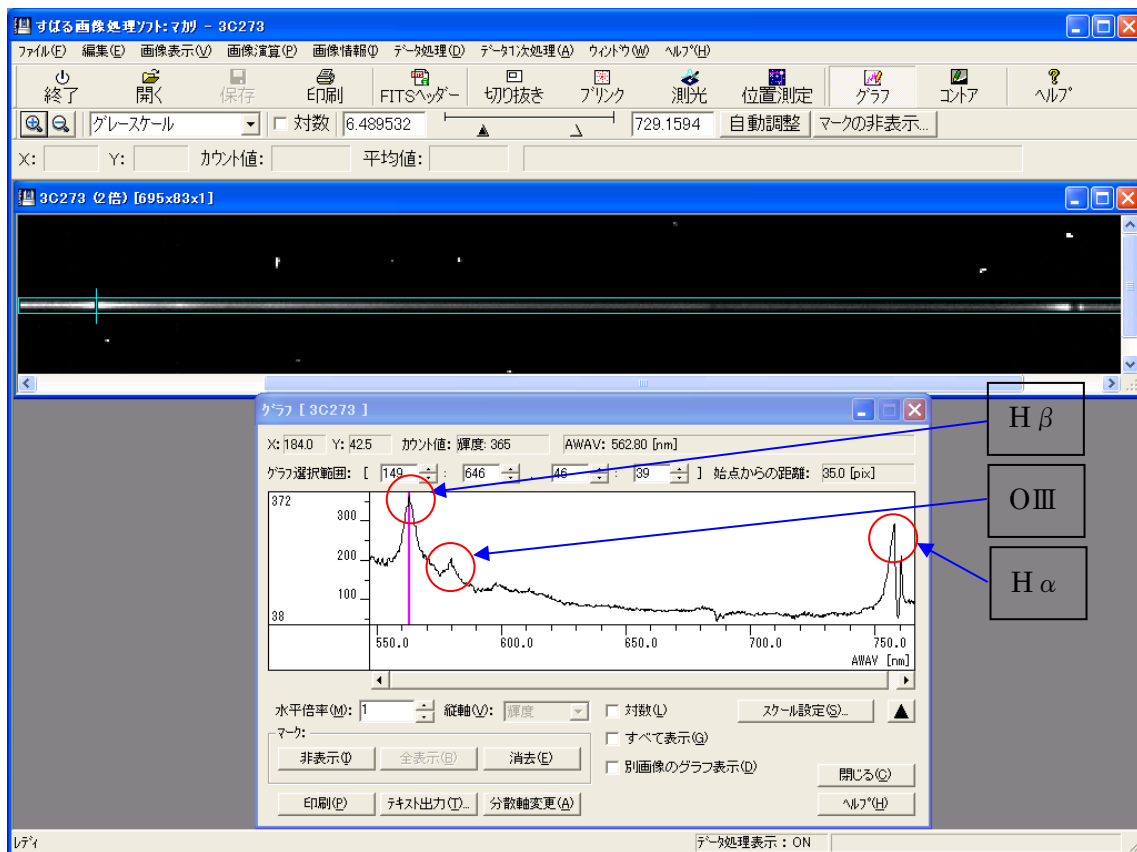
銀河の一覧

| 銀河名 | 銀河までの距離 (Mpc) | H α の波長 (nm) | 銀河の速度 (km/s) |
|---------|------------------|---------------------|--------------|
| NGC673 | 72.40 | | |
| NGC925 | 9.16 | | |
| NGC2403 | 3.22 | | |
| NGC2541 | 11.22 | | |
| NGC2608 | 31.00 | | |
| NGC2713 | 55.40 | | |
| NGC3031 | 3.63 | | |
| NGC3198 | 13.80 | | |
| NGC3627 | 10.05 | | |
| NGC4258 | 7.98 | | |
| NGC4321 | 15.21 | | |
| NGC4414 | 17.70 | | |
| NGC4536 | 14.93 | | |
| NGC4548 | 16.22 | | |
| NGC4639 | 21.98 | | |
| NGC7331 | 14.72 | | |
| NGC7678 | 51.80 | | |

クェーサーまでの距離を求める

宇宙には、上でみた銀河よりも遥かに遠方にあるにも関わらず、明るく見える天体があります。クェーサーはそのような天体で、われわれの銀河全体を超える量のエネルギーを放出している銀河の中心核とされています。最初に発見されたクェーサー3C273の距離を、自分が求めたハッブル定数から算出してみましょう。クェーサーは、かなり遠方にあり、赤方偏移も大きいと考えられるので、赤方偏移を求めるために使用する輝線は、今まで使用してきた $H\alpha$ ではなく、 $H\beta$ (486.134nm) や $[OIII]$ とします。

※ $[OIII]$ とは、二階電離した酸素原子による禁制線のこと。 $[OIII]$: 495.9nm



6. クェーサー3C273の距離 (Mpc) を上で決定したハッブル定数を使って求めなさい。また、3C273の見かけの等級は+13等級です。このとき私たちの銀河系全体の絶対等級は-20.5等とすると、3C273の光度は銀河系全体の何倍ですか。

レポート課題：

上の課題 2 から 6 をレポートにまとめて提出しなさい。

- 銀河の距離(Mpc)を横軸に，銀河の後退速度(km/s)を縦軸にしてプロットしたグラフを添付する。
- グラフには最小二乗法で決定した直線も描く。
- ハッブル定数の値，ハッブル時間 (Gyr) を記す。
- ケーサー3C273 までの距離 (測定した線スペクトルの波長，式を書く)。

データについて

※ 銀河のスペクトル画像データは SMOKA からのデータです。

☆ SMOKA は国立天文台のデータアーカイブで、このデータセットは国立天文台岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡とカセグレン分光器で観測されたものです。

※ ケーサーのスペクトル画像データは美星天文台の 101 cm 望遠鏡で観測されたデータです。

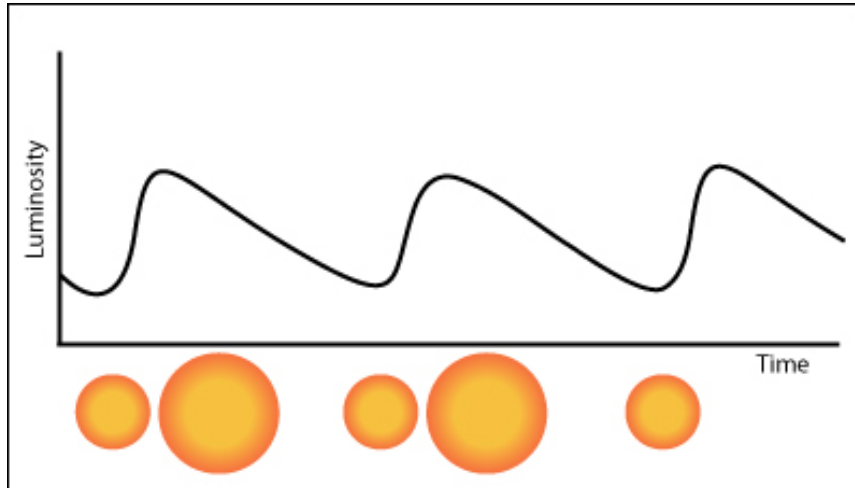
参考教材

Sky Server (日本語) (<http://skyserver.sdss.org/edr/jp/>)

[参考] 遠方の銀河までの距離の測り方

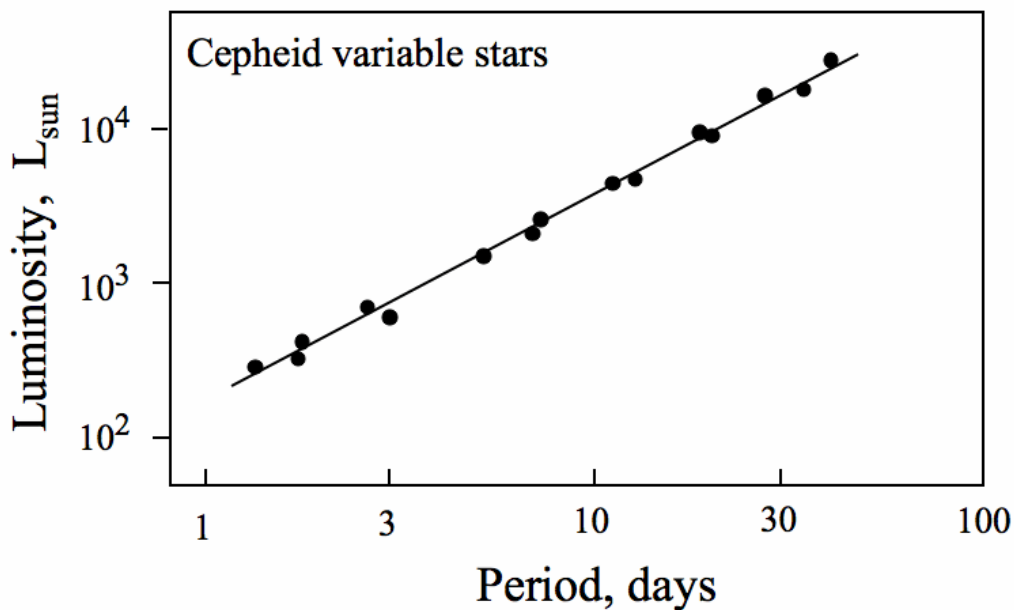
ハッブルの法則を導くためには、遠くの銀河の視線速度と独立にそこまでの距離を観測から求める必要があります。このため複数の方法が開発されていますが、ハッブル自身が用い、現在も使われている古典的方法は以下の通りです。

セファイド(Cepheid)という種類の星は、周期的に膨らんだり縮んだりする性質を持つ星（脈動型変光星）で、その膨張・収縮によって明るさが周期的に変化します。



セファイドの光度曲線の模式図 横軸は時間、縦軸は光度。

このセファイドの周期と平均絶対光度の間には簡単な関係（周期-光度関係）があるので、この関係を用いれば、星の変光周期を観測することで絶対等級が分かることになります。セファイドを遠くの銀河の中で見つけて周期を観測するとその絶対等級が分かり、それを見かけの等級と比べることでセファイドまでの距離、つまり銀河までの距離がわかることになります。



セファイドの周期-光度関係 横軸は周期（日）、縦軸は太陽光度を単位とした光度。