

宇宙の観測と技術

第 10 章 分光器

27. 天体観測と分光器

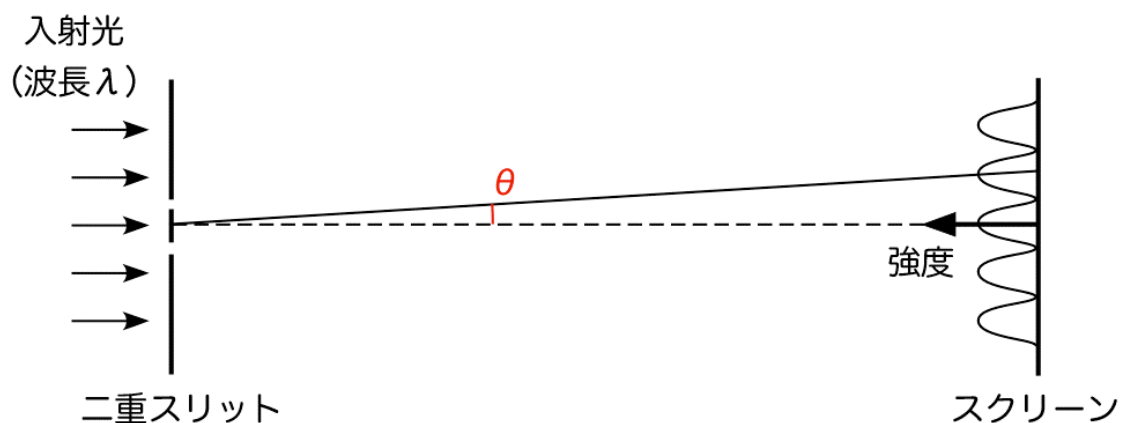
天文学は研究対象を試料として手元に置いて分析することができない学問である。天体を分析するには対象が放つ電磁波の持っている情報を使う。このため天体望遠鏡には分光器が重要な観測装置として用意される。分光器は望遠鏡で集められた天体からの光を分解（人工的に虹を作る）し、その画像を取得する。この画像をスペクトルという。天文学者は天体スペクトルから天体の組成・温度・運動といった物理情報を引き出す。分光器は物理・化学など広範な分野で分析装置として使用される。天体分光器も実験室で使うものと原理的には同じものであるが天体観測では常に光量が限られるため、特に光の損失が少ない（スループットが高い）設計が求められる。

27-1. 分散素子

入射光を色の成分に分解する光学素子を分散素子という。代表的なものにプリズムやグレーティングがある。ここでは特にグレーティングによる分散の原理について説明する。

27-2. 二重スリットの作る干渉縞

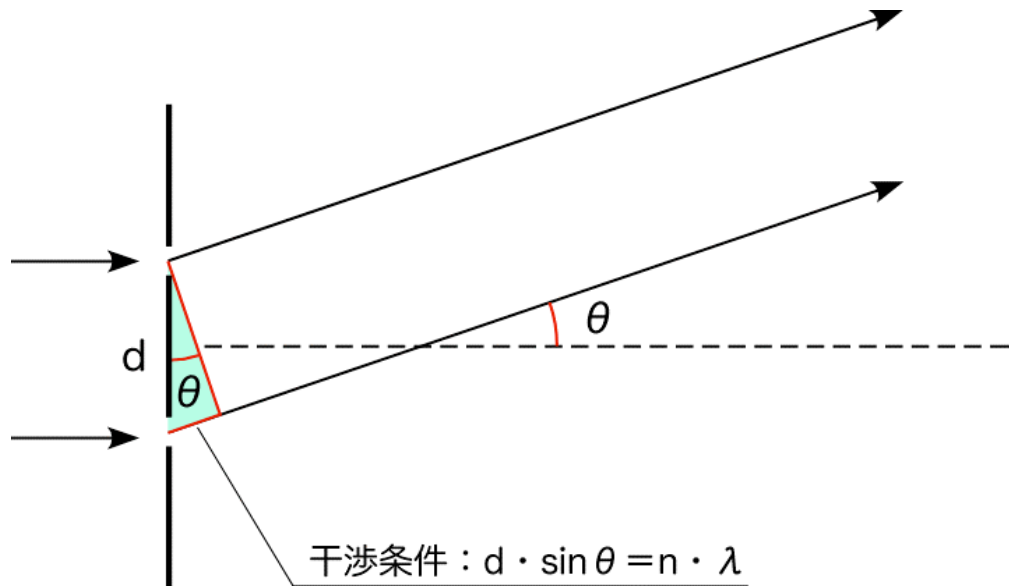
ヤングの実験として知られる問題である。波長 λ の光を間隔 d 離れた二つのスリット（細い線上の開口）から入射させると反対側に置いたスクリーンに縞模様ができる。



このときスクリーンの中心にある0次の干渉縞から、両側にそれぞれ1次，2次，3次・・・と干渉縞が生じる。その間隔（周期）は

$$\theta = \lambda/d$$

となる。このような縞模様が生じるのは光波の干渉条件による。



d だけ離れたスリットを通過した光の進行方向に対して、光路差が波長 λ の整数倍 n に一致すれば、その波長の光は強め合うことになる。スリットの間隔 d が波長 λ よりも十分に大きければ θ は ($n=1,2,3$ 程度に対して) 小さい角度になる。従って n 次の干渉縞の出る角度 θ_n は

$$\theta_n = n \cdot \frac{\lambda}{d}$$

と近似される。この干渉条件からわかることが三つある。

- 1) 0 次の干渉縞は波長によらず $\theta = 0$ (中央) にできる
- 2) 波長が変わると強め合う (1 次以上の) 干渉縞の位置が変わる

$$\begin{aligned}\Delta\theta_n &= \theta_n(\lambda + \Delta\lambda) - \theta_n(\lambda) \\ &= n \cdot \frac{\Delta\lambda}{d}\end{aligned}$$

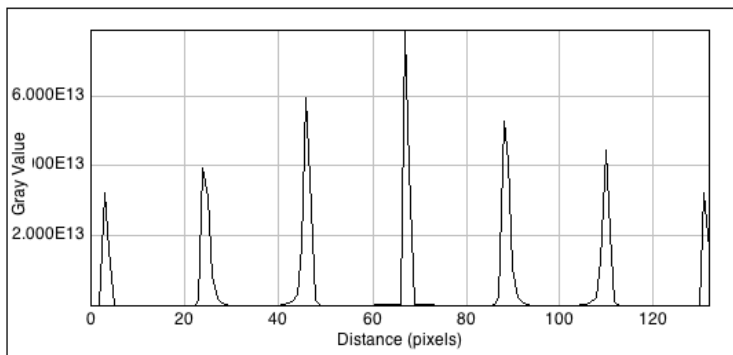
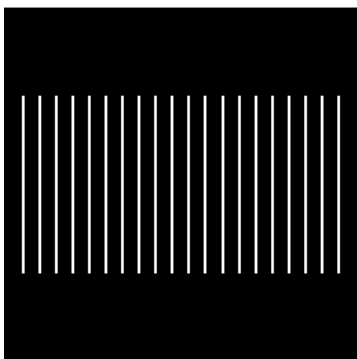
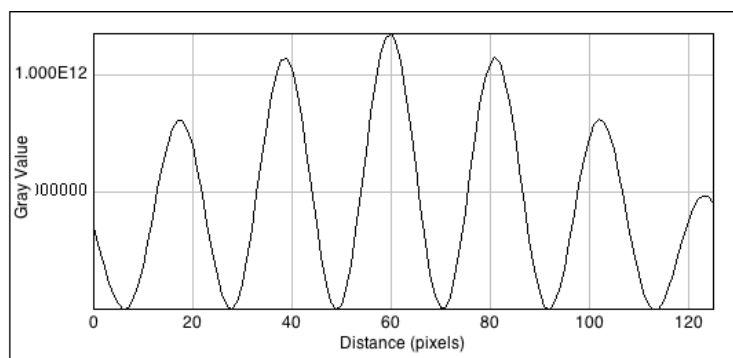
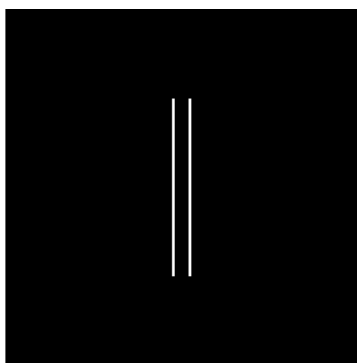
- 3) 次数 n が大きいほど、スリット間隔 d が小さいほど、波長変化に対する干渉縞の位置の変化が大きくなる

この性質により 1 次以上の干渉縞は波長毎に位置を変えてスクリーンに投影される。つまり分散されることになる。

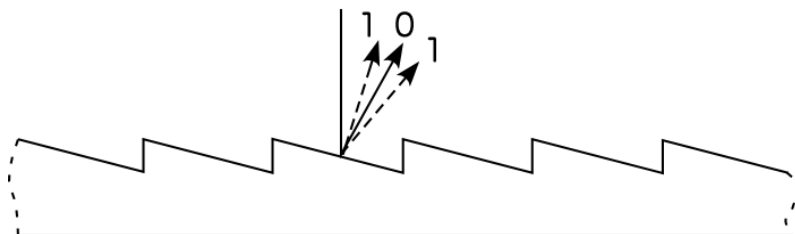
27-3. グレーティング

このように間隔を置いたスリット（開口）に光を通過させることで、干渉の性質を利用した分光器ができそうである。しかし二重スリットでは実用にはならない。一つには光を入射させる面積が細長い二つのスリット分ではないこと。そして二重スリットのつくる干渉縞は巾が非常に広くなるため、隣り合う波長の干渉縞どうしが重なってしまい色をきれいに分離できないことである。

分散素子として光の入射面積を大きく、そして干渉縞の巾を細くするには、スリットを周期的（間隔 d ）に数多く並べてやれば良い。そうした分散素子をグレーティングという。



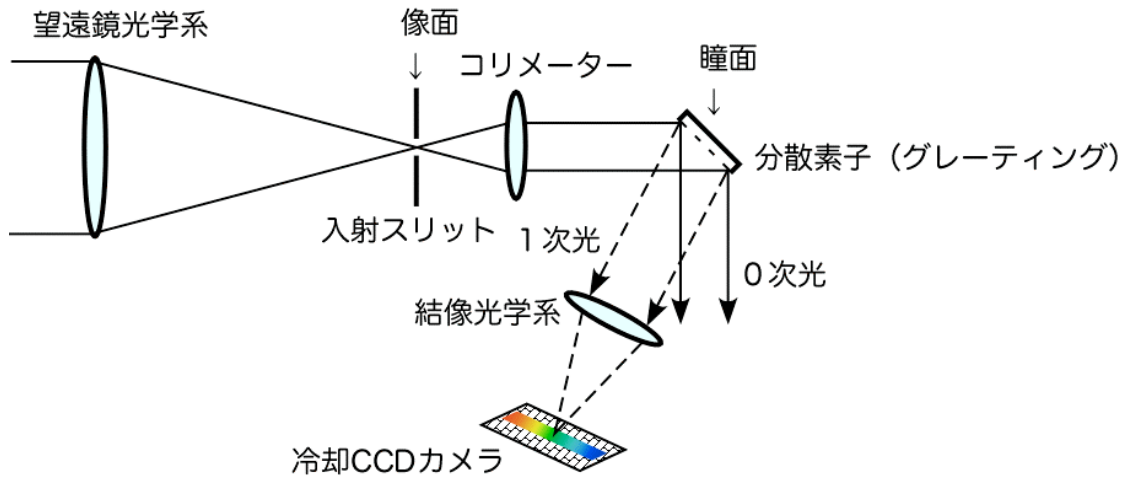
光を透過または反射させる面積を大きくとるため、実際のグレーティングにはガラス表面に周期的な溝を掘ったものが使われる。



可視光分光器で使われるグレーティングには、およそ数千本/mm くらいの溝を刻んだものが使われる。

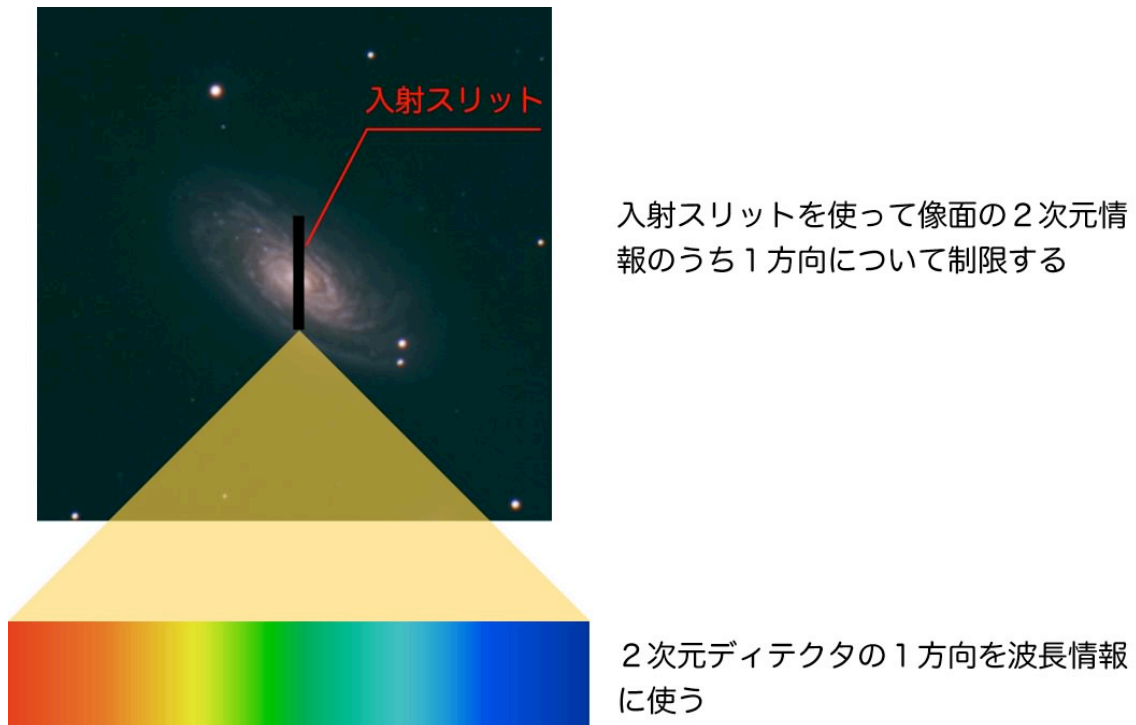
27-4. 分光器の光学系

望遠鏡を込みにした分光器の光学系は、およそ下図のようなものとなる。

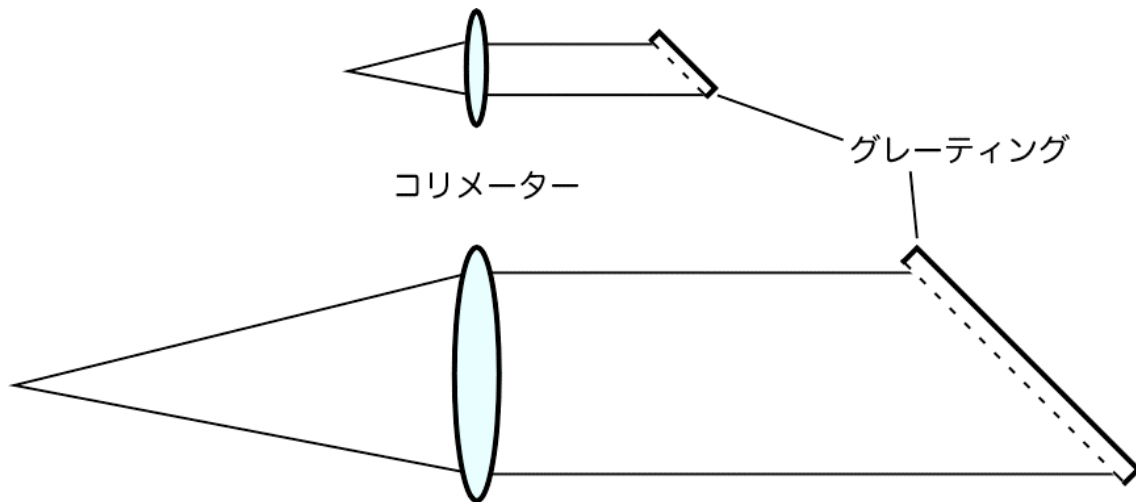


もちろん2次以上の光も使えるし波長分解能も高くなるが光量は落ちる
以下に、分光器光学系の各要素について解説する。

1) 望遠鏡の像面に入射スリットを置く



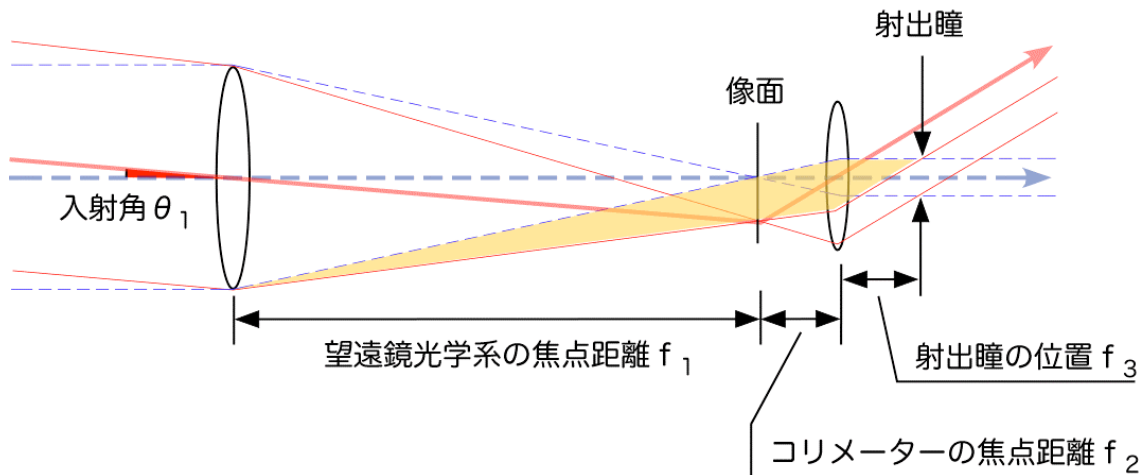
2) コリメーターで平行光束をつくる



グレーティングを大きくしたい（波長分解の精度があがる）

→ コリメーターの焦点距離と口径が大きくなる

3) 平行光束の途中にできる射出瞳面（開口の像）上に分散素子を置く



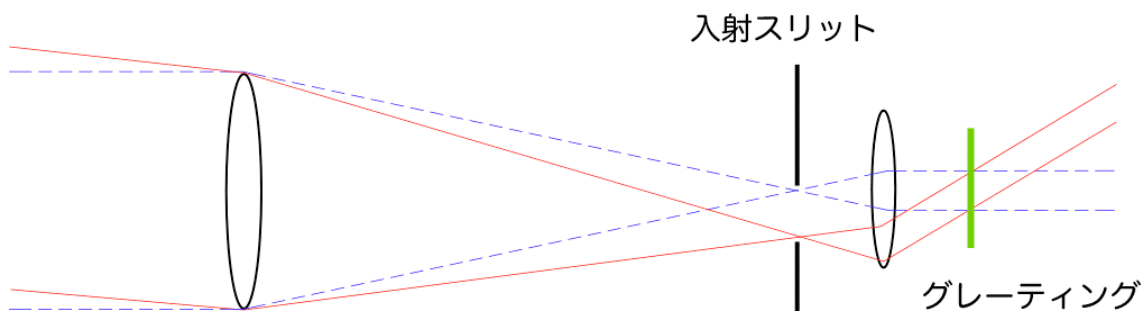
望遠鏡の開口には、あらゆる方向から来る光が入射する。開口を入射瞳とも言う。一方で望遠鏡光学系の収束光をコリメーターで平行光にすると、コリメーターを通過してきたあらゆる方向の光が必ず通過する面ができる。これを射出瞳という。射出瞳はコリメーターがつくる入射瞳の像と見ることができる。射出瞳がコリメーター後方のどの位置にできるかはレンズの公式より

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{f_1 + f_2} + \frac{1}{f_3}$$

$$f_3 = \frac{f_2(f_1 + f_2)}{f_1}$$

と表せる。

入射スリットからは長さ方向について一次元の空間（画像）情報が得られる。その光はコリメーターに対し異なる角度で入射しグレーティングに当たる。グレーティングを射出瞳に置かないと、それぞれの入射方向でグレーティング面の異なる場所を使って分散させることになり精度が落ちる。



グレーティングの溝は全面均一な精度とは限らない。どの方向からコリメーターに入射する光もグレーティングの同じ場所に当たるようにしたい。これがグレーティングを射出瞳上に置く理由である。

4) 結像光学系はできるだけ射出瞳面に近いところまで近づける

グレーティングの場合と同じ事情で結像光学系も射出瞳に置いた方が良い。しかし1カ所にグレーティングと結像光学系の二つを配置することは物理的に不可能なので、結像光学系は可能な限り瞳面に近づけるようにする。グレーティングを大きくするとコリメーターも大きくなる。すると結像光学系にはさらに大きな口径が必要になる。巨大な光学系を製作する負担を軽減するためにも結像光学系の配置には工夫が必要である。

5) ディテクタ上での分散像サンプリング

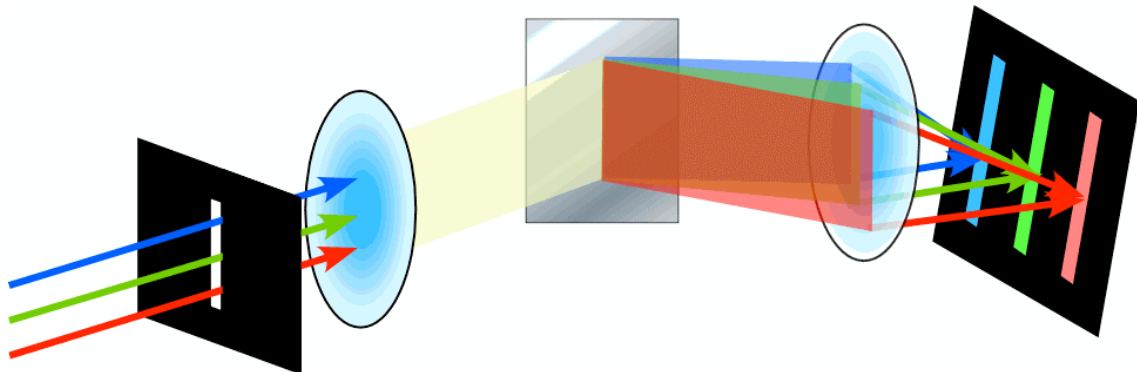
分散素子の分散角と結像光学系の焦点距離がディテクタ上での分散像のサイズを決める。波長変化 $\Delta\lambda$ に対するディテクタ上での変位 Δx は、結像光学系の焦点距離を f_i とすると

$$\begin{aligned}\Delta x &= f_i \cdot \tan(\Delta\theta) \\ &\cong f_i \cdot \Delta\theta \\ &= f_i \cdot n \cdot \frac{\Delta\lambda}{d}\end{aligned}$$

である。

6) 入射スリット像の拡大率

コリメーターと結像光学系の焦点距離の比がディテクタ上にできる入射スリット像の拡大率となる。ディテクタ上にできる分散像は、単色の入射スリット像が波長毎にズレて重なったものである。入射スリットの中を広く取れば入射光量を増やすことができる。しかしディテクタ上でのスリット巾の占めるピクセル数が多くなると、最終的な分光器の波長分解能は悪くなる。



スリット巾はグレーティングの分散角と結像光学系で決まる波長分解能を阻害しない程度にする必要がある。しかし天体観測においては波長分解能を多少悪くしても光量を稼ぐためにスリット巾を若干広く取る場合も多い。天体分光器では星像のシーイングサイズ近辺で何種類かのスリットを用意して適宜選択できるようにになっている。

28. 分光観測の実例

分光器には低分散 ($\lambda / \Delta \lambda \sim$ 数千以下)、中分散 ($\lambda / \Delta \lambda \sim 1$ 万前後)、高分散 ($\lambda / \Delta \lambda \sim 5$ 万以上) という波長分解能の区分があり、観測目的によって使い分けられている。ここでは西はりま天文台で観測されたデータとそこから得られる知見を幾つか紹介する。分光データは全て西はりま天文台の時政典孝主任研究員によるものである。

28-1. ニート彗星の低分散分光

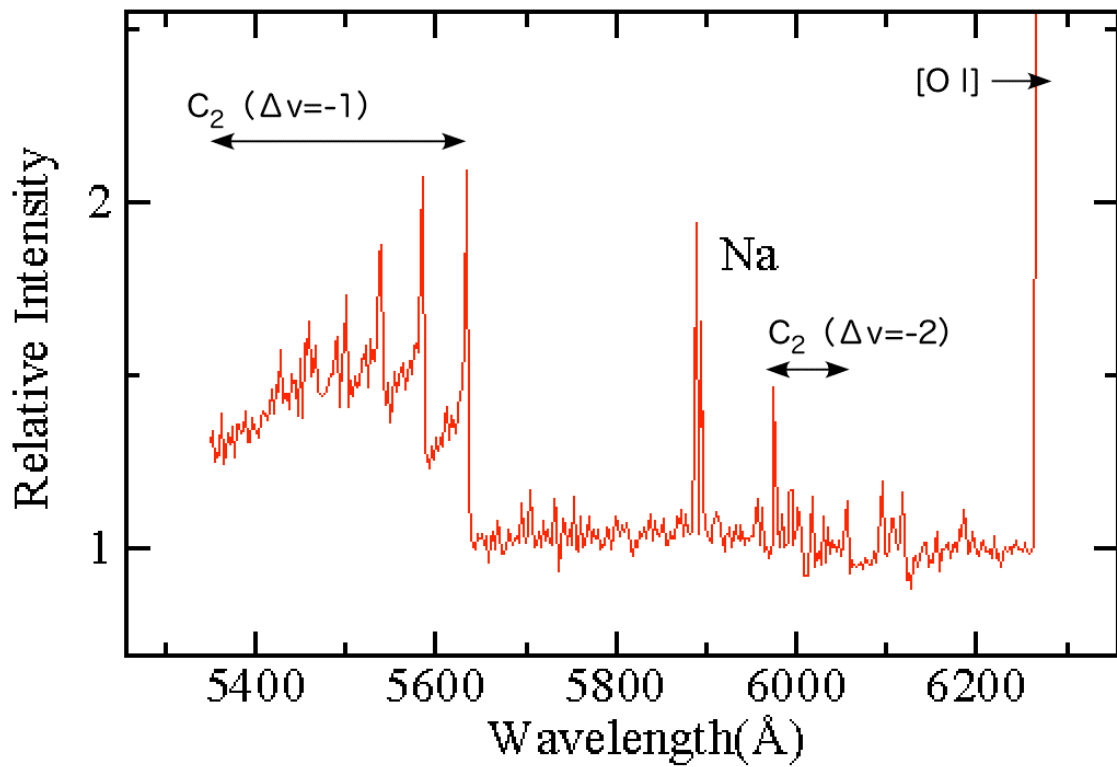
彗星（ほうき星）は太陽系の外縁部から太陽に向けて落下して来る氷のかたまりであり、大きさは数 km 程度である。この氷の塊（彗星核）が火星軌道の内側にまで近づくと、太陽光によって表面の揮発性物質が激しく昇華して「てる坊主」のような様相を示し、彗星（ほうき星）となる。



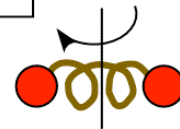
彗星核は、太陽系外縁部が起源であることから、太陽系の原初物質のサンプルであると考えられている。可視光域で分光すると次のようなスペクトルが得られる。

C/2002 V1 NEAT

2003.02.06 18:40 JST



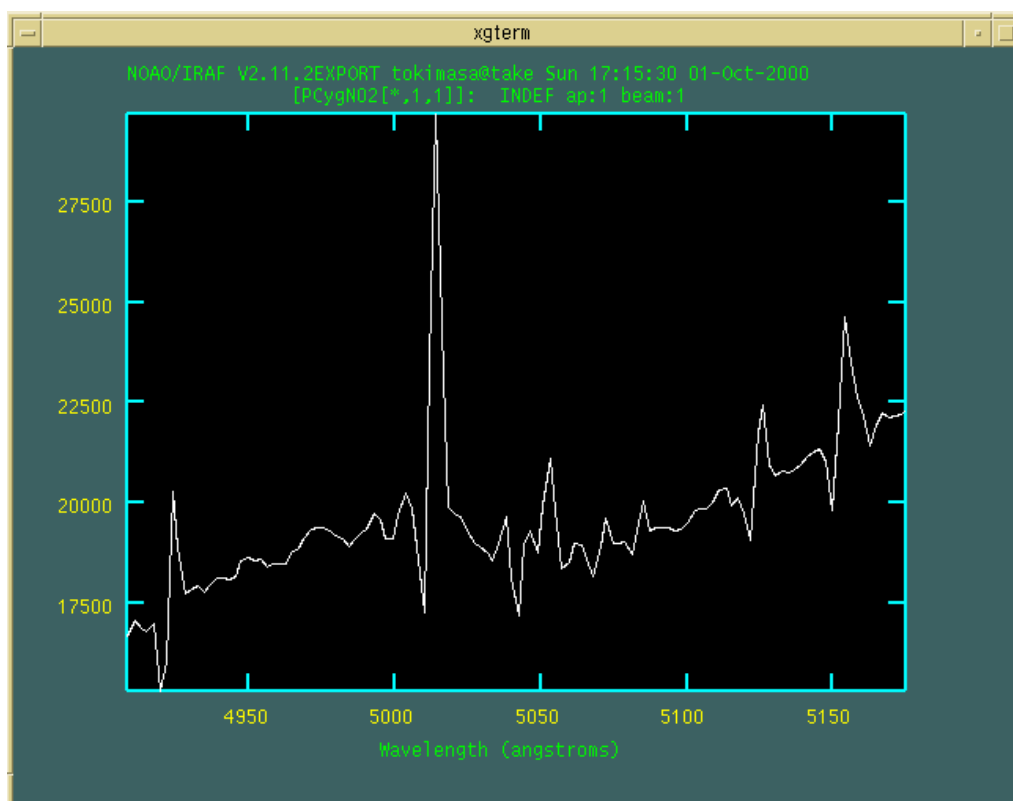
2 原子分子の電子以外の状態遷移

振動状態の遷移 (Δv)回転状態の遷移 (ΔJ)

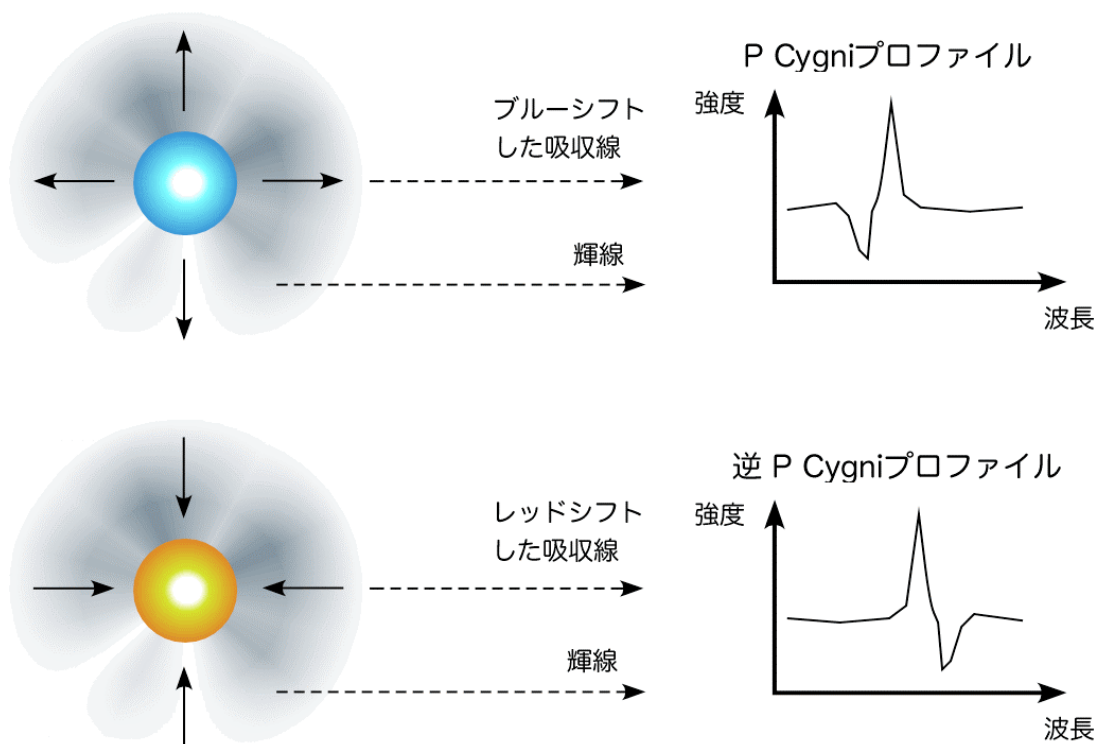
2 8 - 2. はくちょう座 P 型星のスペクトル (低分散分光)

はくちょう座 P 型星 (P Cygni) は、約 5000 光年の距離にある、非常に巨大な星 (銀河系内最大クラス) である。星は構成するガスの自己重力と内部の核融合反応で発生するエネルギー放出による圧力との釣り合いで存続している。P Cygni ほどの星になると、この均衡の限界点にあるため、不安定で明るさも激しく変化する変光星である。表面からは光の放射圧によって激しい恒星風が噴き出し分光スペクトルに特徴的に現れる。

激しくガスを噴き出している星の典型的なスペクトル形状を「P Cygni プロファイル」と呼ぶ。短波長側にドップラーシフト (ブルーシフトと呼ぶ) したガスの吸収線があり、それに隣り合ってガスの輝線が見える。

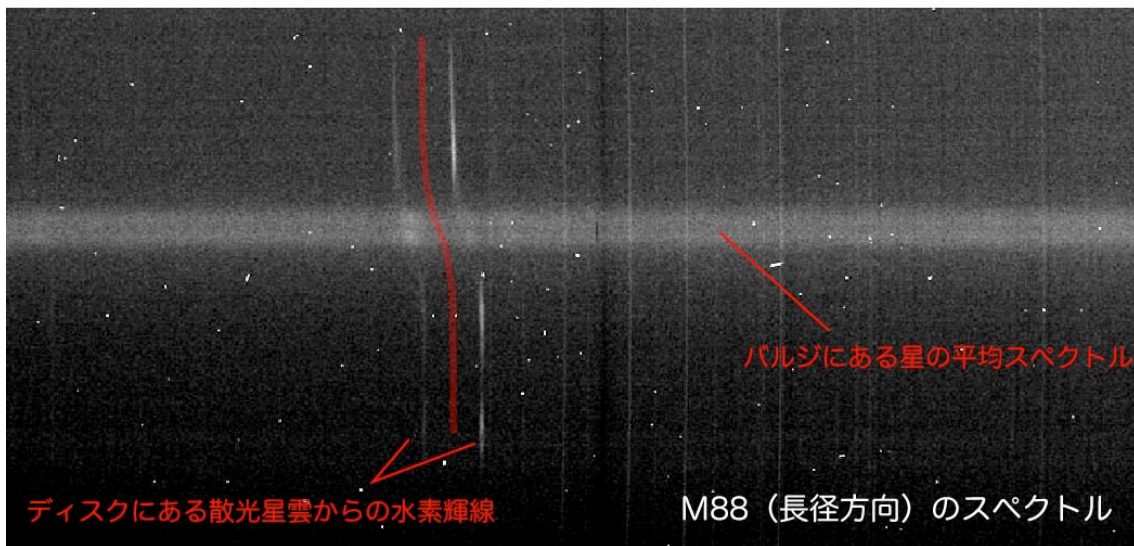
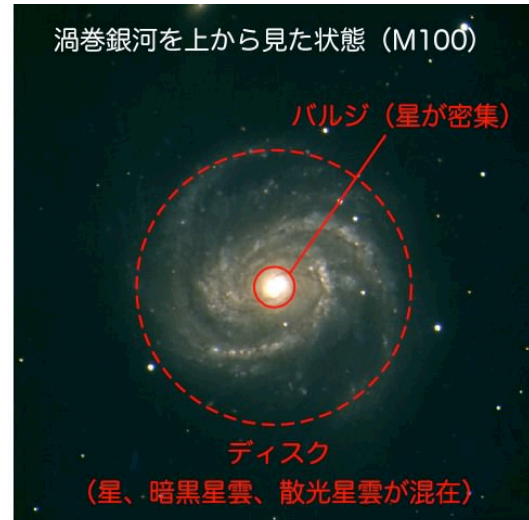
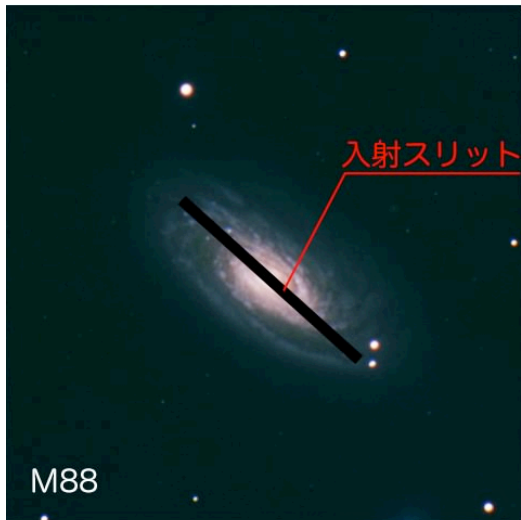


ちなみに生まれてまもない原始星では、周囲からガスが落下して、P Cygni とは逆にレッドシフトした吸収線の隣に輝線が見える。これを逆 P Cygni プロファイルと呼ぶ。



28-3. 系外銀河 (M88) の回転曲線 (中分散分光)

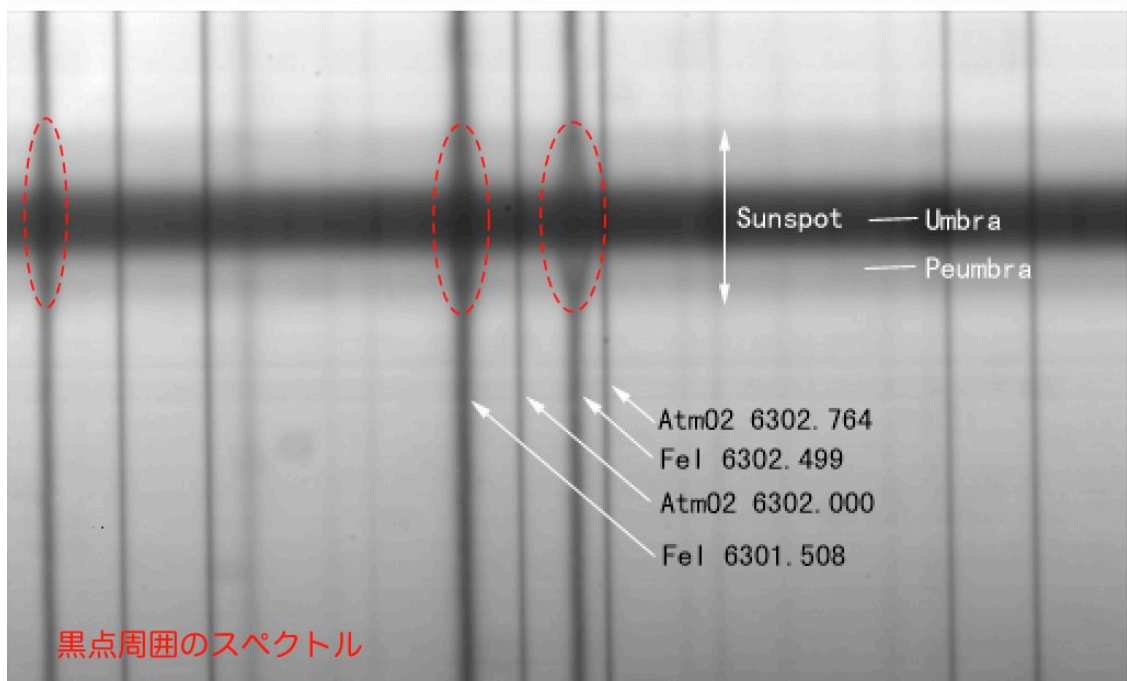
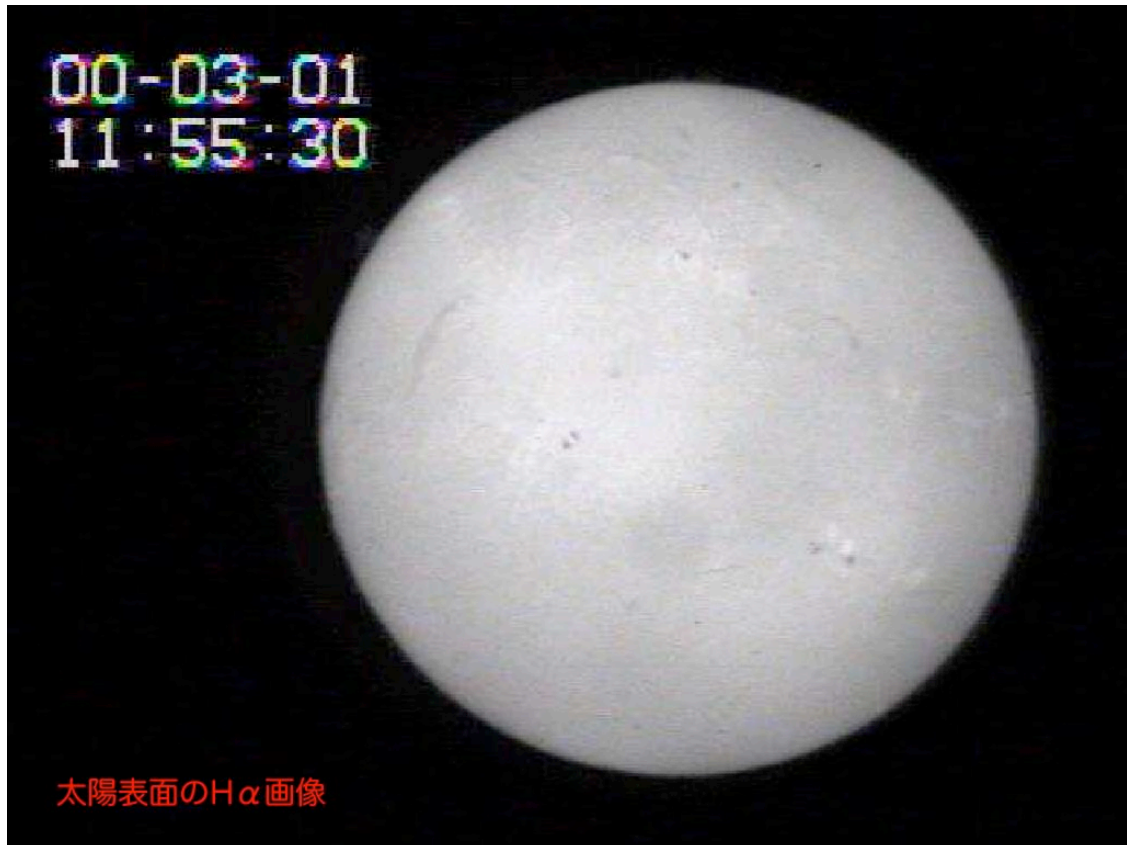
M88 のような渦巻銀河の長径方向に入射スリットを合わせてスペクトルを撮ると、回転する円盤の典型的なパターンが見られる。渦巻銀河の円盤部 (ディスク) には大きな星が生まれている散光星雲が存在していて、それが水素の輝線を出す。この輝線のドップラーシフトを調べると、ディスクの回転速度が中心からどのように変化するかを知ることができる。



ディスクの中心となる部分には星が密集したバルジと呼ばれる領域があり、水素の輝線はそこを中心として、対称的にブルーシフトとレッドシフトの変化を示す。回転曲線からは中心近傍では距離に応じて回転速度が速くなるが、ディスクの外側では距離によらず回転速度が一定になっていることがわかる。この回転曲線は、渦巻状に見える物質の質量分布では説明ができない。

28-4. 太陽表面のスペクトルと磁場（高分散分光）

可視光で太陽を見ると、ほぼ一様な明るさに見える光球上に、黒点と呼ばれる暗い斑点が見られる。黒点は太陽表面に飛び出した太陽内部で発生した磁力線の根元の部分にあたる。



この黒点周囲のスペクトルを撮ると、鉄などの元素の吸収線が、黒点部分で広がっているのが観測される。これは原子に対して外からの磁場が影響を与え、原子を取り巻く電子のエネルギー準位を分裂させることによって生じる。磁場による電子エネルギー準位の分裂をゼーマン効果という。