

McLean ゼミ 第 2 週資料

天文学科 4 年 山口淳平
(学生証番号 05-142009)

2015 年 4 月 22 日

4.2 SPECTROSCOPY; ATOMIC FINGERPRINTS

4.2.1 Introduction

分光観測することによって様々な物理量を知ることができる：化学組成、温度、密度、速度 etc...
分光器の性能を示すパラメータは波長分解能 R で、以下の式によって定義される。

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\lambda$ は分光器によって分解できる最小の波長幅である。この R の値によって分光器は以下のように大別される。

- 低分散分光器 ($R \sim 500$) : 暗い天体の分光に用いられる
- 中分散分光器 ($R \sim 5000$)
- 高分散分光器 ($R \sim 25000$)
- 撮像分光器 (撮像と分光を同時に行える)

一般に光を分散させるのにはプリズムが用いられるが、天文ではほとんどの分光器が回折格子 (グレーティング) を用いている (図 1)。

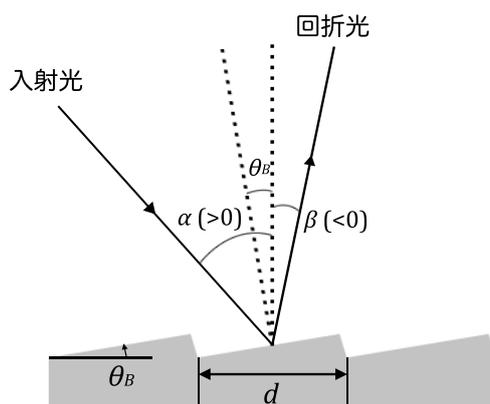


図 1 グレーティングの模式図。

光を分散させるとどの波長域でも光は暗くなるのでノイズの影響が大きくなる。入射する光子数

N に対して S/N 比は \sqrt{N} に比例して大きくなるが、光子数 N はおよそ波長幅 $\Delta\lambda$ の大きさに依存するため、高分散では S/N が急激に小さくなる (およそ $S/N \sim 1/\sqrt{R}$)。

天体からのスペクトルは大きく分けて次の 3 種類のものが含まれる。

- 連続線 (continuum) : 天体からの黒体輻射。
- 吸収線 (absorption line) : 天体の周辺に位置する希薄なガスの原子が、天体からの光のうち特定波長のもを吸収して励起することで見える線。
- 輝線 (emission line) : 希薄なガス中の原子が吸収した光を再放射することで見える線。

分光観測が天文学で行われ始めた初期の頃は、得られたスペクトルは目によって確認されており、スペクトル線の有無や線の見かけの幅によってスペクトルが分類された。後年、スペクトルが温度や原子の電離状態に依存することがわかってから、スペクトル型が温度に対応することがわかった。恒星のスペクトル型は温度の高い方から OBAFGKM の順に分類され、それに加えて 1995 年の褐色矮星の発見によって新たに L と T のスペクトル型が加えられた。

スペクトル線の波長は輝線を発する原子の速度に依存して Doppler-shift する。観測波長 λ_{obs} と元の波長 λ_{em} の関係は、

$$\frac{V}{c} = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}} \quad (2)$$

である。分光器で検出可能な最小の速度は、それに対応する Doppler 効果による波長の変化が分解能に対応することによって与えられる (すなわち、 $V/c = \Delta\lambda = 1/R$)。

また、遠方銀河のスペクトル線が赤くなるのは宇宙膨張によるものであり、赤方偏移のパラメータは

$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{em}}}{\lambda_{\text{em}}} \quad (3)$$

すなわち

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}} \quad (4)$$

で与えられる。 $1/(1+z)$ はその z の値の時代での、宇宙の大きさに比例する。

4.2.2 High resolution, from cosmic abundances to planet hunting

高分散分光器の装置は非常に大きくなる傾向にあるため、クーデ焦点やナスミス焦点などの安定する焦点に位置する事が多い。

高分散分光器による観測で行う研究の例として、同位体のスペクトルの違いの観測と系外惑星の探査を挙げる。

同位体のスペクトルの違いの観測

同位体はわずかに異なったスペクトルを見せるが、特に重要なのは遠方銀河における水素と重水素のスペクトルの観測である。ビッグバン宇宙論によれば初期の重水素と水素の比率 D/H によって、宇宙におけるバリオンと光子の割合を見積もることができると考えられている。宇宙背景放射の観測により光子の密度が分かるため、これからバリオンの密度を得ることができる。

弱い重水素線を分解するには $R = 30000\text{--}60000$ の高分解能を持つ分光器と大きな望遠鏡が必要になり、最初の観測は Keck 望遠鏡で行われた。

系外惑星の探査

系外惑星の分光観測による探査 (視線速度法) では中心星の Doppler-shift を観測する。惑星系では中心星も、惑星との重心を中心に公転を行っている。Doppler-shift を観測して中心星の視線速度 K が得られたとき、(細かい導出は省略するが) 以下の式が成り立つ。

$$M_{\text{pl}} \sin i = \frac{M_{\text{star}} K}{M_{\text{pl}}} = 11.2 M_{\text{earth}} \frac{M_{\text{star}}}{M_{\text{sun}}} \frac{K}{1 [\text{m s}^{-1}]} \frac{30 [\text{km s}^{-1}]}{V_{\text{pl}}} \quad (5)$$

ここで、 i は惑星軌道の中心軸の視線方向に対する角度であり、 M_{pl} 、 V_{pl} はそれぞれ、惑星の質量と速度である。この式から、地球のような惑星を発見するには中心星のおよそ 0.1 m/s の動きを検出する必要がある。

太陽は木星との重心を 14.7 m/s の速度で回っているが、 $R = 100,000$ の分光器を用いて検出できるのは $V = 3 \text{ km/s}$ 程度であるため、視線速度法による惑星の発見は非常に難しい。これを検出するのは正確な波長校正が必要になる。ヨウ素を用いて特定の波長を吸収させたり、数千個のスペクトル線の相互相関関係を用いたりすることで正確な校正を行うことができる。例えば、Keck 望遠鏡の HIRES では誤差 1 m/s の観測を達成している。

4.2.3 Medium-resolution and low-resolution spectroscopy

中分散分光器 ($R \sim 5000$) は天文学でよく用いられており、 2 m より大きな望遠鏡はほとんど中分散分光器を備えている。現在のカセグレン分光器の多くは2つのバンドに分けて分光を行う “double spectrograph system” を採用している。これは beam-splitter で光を短波長側と長波長側に分け、それぞれに最適な CCD とカメラを用いてスペクトルを得るシステムであり、高赤方偏移の銀河やクエーサー、超新星や GRB 天体の残骸 (?) を観測するのに用いられる。

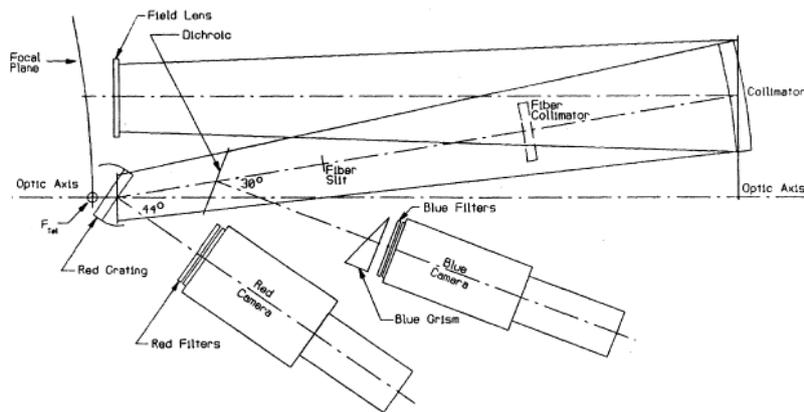


図2 LRIS の光学系。

暗い天体は、天体から来るかすかな広げすぎでしまわないように、低分散の分光器を用いて観測を行う。

4.2.4 Multiobject spectroscopic surveys; 3-D maps of the Universe

分光をするとある波長での天体からの光はとても暗くなるので、分光観測は高感度の CCD を用いてもとても時間がかかる。そのため、一度に多天体を分光できると効率が良い。以下に多天体分光の種類と概要を記す。

スリットレス分光・多天体分光

スリットレス分光と対物プリズム分光はどちらも似た方法で多天体分光を行える。観測波長で空の明るさが十分に暗く、天体の密度が少ない領域ならばスリットがなくても分光観測ができる。最も簡単なスリットレス分光の方法は、望遠鏡の開口部に薄いプリズムを配置することで、近年ではシュミット望遠鏡の対物プリズム分光に用いられている。ハッブル宇宙望遠鏡は背景光が暗いことを利用して、グリズムを用いたスリットレス分光を行っている (3)。

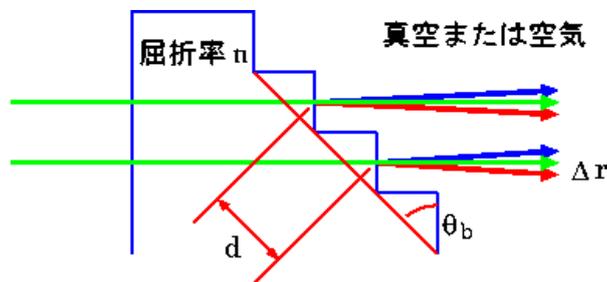


図3 グリズムの模式図。

マルチスリット分光

マルチスリット分光は一枚に複数個のスリットを配置してそれぞれを分光する方法である。近赤外でスリット分光を行う際は、熱放射を抑えるためにスリットを冷やす必要がある。この分光観測で利用できるものとしては、真空容器の中に入れられた交換可能なスリットや、平行に移動するスリット、MEMS の技術から派生したマイクロシャッタがある。MEMS は機械要素部品やセンサなどを一つの基板の上に集積したものであり、MEMS の技術ですでに天文学に用いられているものとしては、波面補償光学装置で用いられる可変形鏡 (Deformable Mirror) がある。

ファイバー分光

ファイバー分光は多数の光ファイバーを、片方の端は焦点面の天体が映る配置し、もう片方の端を分光器のスリットに配置する方法であり、2dF や SDSS に用いられている。Anglo-Australian Schmidt 望遠鏡に搭載されていた FLAIR では、光ファイバーの端を曲がった形状の陽極板に配置して紫外線硬化によって貼り付けて固定しており、 $6.5^\circ \times 6.5^\circ$ の視野での分光を達成している。FLAIR に置き換わって登場した 6dF ではロボットアームによる完全自動でのファイバーの配置ができ、150 本のファイバーを 1 時間以内に配置することができる。さらに、2 枚のプレートを用いているため 1 枚のプレートにファイバーを配置している間、もう 1 枚のプレートで観測することができる。