岡山188cm鏡を用いた東大学部学生観測実習について

竹田洋一（国立天文台三鷹）

1. 趣旨と目的

本授業は科目名を「基礎天文学観測7　スペクトル解析」と称して、天体分光観測・スペクトルデータの整約・科学的解析の基礎を実際に自分達の手で得たデータを用いて体験することを目的とするものである。対象となる履修者は東京大学理学部天文学科の3年生であり、具体的な構成は「三鷹での講義・観測打ち合わせ（半日）」、「岡山観測所での二泊三日の観測・解析実習」、「得られたデータを基に各自に課す課題の提出」の三つに分けられる。

実習は夏季の適当な時期（大体8月）に3日間岡山天体物理観測所に滞在して岡山188cm反射望遠鏡と高分散エシェル分光器HIDESを用いた観測で天体の高分散スペクトルを実際に取得し、CCD上に記録された分光画像データを各自のPC(最近はVirtual Boxを用いたバーチャルなLinux環境を使用)にインストールした汎用ソフトウェアIRAF（Image Reduction & Analysis Facility)を用いて処理解析する。観測とデータ処理は基本的に岡山観測所で行うが、データ解析は帰京後に引き続き三鷹で続きを行う場合もある。

2. 典型的な実習日程と進行の例（最近の場合）

第一日目
　午後2時頃JR山陽本線鴨方駅に集合
　タクシー（～20分）で観測所へ
　レジストレーション、観測所内見学、夕食
　日没後暗くなってから観測開始
　（前半夜のみなので～0時頃まで）
　夜半に観測が終わり次第宿泊室に戻って就寝
第二日目
　午前は解説に引き続いて前日の晩に取った
　データの解析（もしデータが取れなかった場合は
　こちらから用意するもので代用して行う）
　昼食後の午後もデータ解析
　夕食後の夜は自由（必要に応じてデータ解析）
第三日目
　支度を済ませて午前中の適当な時刻に
　タクシーで下山して鴨方駅で解散。

3. 具体的な観測とデータ整約・解析の流れ

観測は岡山天体物理観測所の188cm反射望遠鏡に据え付けられている高分散エシェル分光器HIDESを用いていくつかの比較的明るい恒星を観測してスペクトルを実地に取得する。取得データは天体スペクトル、波長比較輝線光源スペクトル（波長較正のため）、一様照射連続光源スペクトル（CCD各ピクセルの感度補正のため）、ゼロレベルを規定するバイアスフレーム、などで構成されるが、これらのデータセットを基に以下の手順で整約・解析を行う。

(1)IRAFを用いて生データに各種の処理を行って二次元のエシェルスペクトルから一次元の天体スペクトルを復元する。
(2)比較光源スペクトルを用いて波長スケールを定める。
(3)弱い比較線や地球大気の吸収線のFWHM(Full-Width at Half Maximum)を測定することで、得られたスペクトルの分解能を評価する
(4)（連続光レベルの乱雑性の大きさなどから）得られたスペクトルのS/N比を評価する
(5)太陽スペクトル表などを用いて天体の主なスペクトル線を同定する
(6)その同定したスペクトル線から視線速度や等価幅を測定する

4. これまで（平成22-25年）の具体的な観測実施状況

当初は1夜＋悪天候の際のバックアップ1夜の2夜を観測所時間で用意していただいていたが、この時期の夏の天気は概ね良く折角の望遠鏡時間をもてあます例が続いたので最近は0.5夜から1夜になっている。

平成22年度
2010年8月2日～4日　学生2名（うち1名は女性）
［引率は竹田洋一・青木和光の2名］
観測の割り当ては1夜＋バックアップ1夜
（初日が晴れなかった場合）の2夜
最初の夜(8/2)は良く晴れて解析実習には
十分すぎるくらいのデータ（明るいFG型矮星）が撮れた
次の夜(8/3)の観測所時間も晴れたが他に使用者がいなかったので
竹田が自分の研究のための観測をさせてもらった

平成23年度
2011年8月29日～31日　学生3名
［引率は竹田洋一・青木和光の2名］
観測の割り当ては1夜＋バックアップ1夜
（初日が晴れなかった場合）の2夜
最初の夜(8/29)は特に後半夜は良く晴れて
解析実習に十分なデータ（明るいFG型矮星）が撮れた
次の夜(8/30)は前半夜に観測所時間として行われた
超新星の観測（しかし使えるデータにはならなかったようだ）を見学
それ以降は望遠鏡が空いたので（雲に悩まされて条件が
悪かったが）竹田が4時頃まで自分の観測をさせてもらった。

平成24年度
2012年8月6日～8日　学生4名（うち1名は女性）
［引率は竹田洋一1名］
観測の割り当ては8月6日の1夜（全夜）
曇りのち晴れ（しかしトラッキング不調）で8個の星
（G型巨星）を何とか観測できたにとどまる

平成25年度
2013年 8月5日～7日　学生5名
［引率は竹田洋一1名］
観測の割り当ては8月5日の半夜（前半夜）
曇り時々晴れでどうにか5個の星（G型巨星）を観測
することができた。これで実習には十分だった。

5. 課題として与えた問題の例

［波長分解能の見積り］

（基本）
地球大気の吸収線（あまり強くないもの）は星の吸収線と異なりシャープなので、その幅を（近似的には）器械輪郭の幅とみなすことができます。ナトリウムの強い二重線NaI D_1,D_2(5889, 5896Å)付近の領域には地球大気の水蒸気の吸収線があるので、上の図を参考にして適当なものを選び、半値幅を測定してください。（規格化したスペクトルで）。ここで注意すべきは星のスペクトルとブレンド（重なり合い）しているものは使わないことです。これを避けるために極力シャープな幅の狭いものを探して選ぶようにしてください。測定はsplotでまず「h」を押してからカーソルを線中心(x)とコンティニューム(y)に合わせ、「c」を押すとガウシアンフィットで半値幅(FWHM)が測定されます。波長分解能R(=λ/FWHM)の値を求めなさい。（測定は1本のみでなく数本のラインで試みてその平均値をとる。）
（応用）
分光器のパラメータから理論的に求められる波長分解能を計算し、それを自分の測定した値と比較して論じなさい。打ち合わせの時に配布したスライドにあるスペクトル純度$\delta\lambda$の表式「$\delta\lambda = -(\cos\alpha\ W)/(m f_{cam})$」が参考になります（つまり$\lambda/\delta\lambda$を理論的に予想される波長分解能とみてよい）。ただしHIDESの基本的仕様と観測時のセッティングは以下の通りです。
◎カメラの焦点距離：855mm、
◎コリメータの焦点距離：2850mm、
◎エシェルグレーティングの溝の密度：31.6本/mm
◎干渉の次数mはほぼ100としてよい。(5000Åあたりのオーダーでm=113、～6000Åのオーダーでm=95)
◎エシェルグレーティングの法線に対する光の入射角と出射角はα～70°、β～61°
◎スリット幅はW=200μm

［S/N比の測定］

（基本）
規格化する前のスペクトルの適当な場所（カウントのピークあたりの平坦になっているところでしかもラインのあまりないところ）でsplotの「m」コマンドでS/N比を測定し、その測定ポイントのカウント値「I」(光電子の数)と関係を調べなさい。特に以下の(1)と(2)の点についてチェックしてください。
(1)予想される関係S/N～$\sqrt{I}$は成立しているか？
(2)scombineで重ね合わせたスペクトルのS/Nは期待通りに増加しているか？。
（応用）
可視域（5000～6000Å）での見かけの等級がV等の星から地球表面（今地球大気の吸収は考えない）降り注ぐエネルギーフラックス（単位波長、単位時間、単位表面積あたり）は$\log F_\lambda$ (erg/Å/sec/cm^2) = $-0.400\ V - 8.449$で与えられます。（たとえばV=0のベガの場合、$F_\lambda = 10^{-8.449} = 3.556\times10^{-9}$ (erg/Å/sec/cm^2)です。）
地球大気の影響は無視するとして、岡山の直径188cm反射鏡（口径面積S）の望遠鏡が露出時間でV等の星を観測した場合に受け取る（1Åあたりの）フォトンの数Nが求められます（フォトン数に直すにはエネルギーをフォトン1個あたりのエネルギー$h\nu$で割ればよい）。自分の担当する星の物理量と実際の露出時間（ファイルヘッダに書かれています）の値を入れて具体的なNの値を勘定しなさい。
そしてスペクトル(5)における典型的な光電子の数のカウント「I_λ」は1ピクセルあたりの値ですが、このスペクトルでは1ピクセルは大体0.025Åに対応していることから、「I_λ」を1Åあたりに焼き直した「C_λ」を求めなさい。
本来なら1ÅあたりN個のフォトンを受け取るべきところが露出中にやってきた雲や地球大気の吸収など観測する過程での色んなロスでこれより小さい値しか受け取れません。Cを実際に受け取った1Åあたりのフォトン数と見なし、どれだけの割合が観測されたかを示す量である「効率」を$C\div N$として求め、その値を論じなさい。

［スペクトル線の諸量の測定］

（基本）
規格化したスペクトルで、表の36本のスペクトル線について以下の量を測定しなさい。
(1)線中心の深さ（カーソルを線中心の底に合わせてブランクキーを押し
表示されるx_c y_cの値から1－yとして求まる）
(2)線中心の波長（「h」J-「c」のガウシアンフィットで）
(3)半値幅（「h」J-「c」のガウシアンフィットで）
(4)等価幅（「h」J-「c」のガウシアンフィットで）
さらに(2)で測定した見かけの波長λ_{obs}と真の実験室系での波長λ_0から視線速度V（単位はkm/s）をそれぞれの線について求め、さらに平均値<V>とその誤差について論じなさい。
（応用）
上で求めたみかけの視線速度<V>は地球表面の特定の地域である特定の日時に観測したもので地球の運動（自転運動や公転運動）の影響も含まれています。この見かけの視線速度に地球運動の補正(heliocentric correction)を加えて太陽中心の座標系に直した視線速度(heliocentric radial velocity)に直しなさい。この補正は観測日時と天体の赤経赤緯（いずれもFITSファイルのヘッダに書かれています）からIRAFのrvcorrectというタスクを用いて求められます。もちろん何か他の類似のツールを使っても構いません。
さらにこの星の固有運動と距離(視差)をsimbad (http://simbad.u-strasbg.fr/)などのwebサイトやカタログで調べ、上で求めたheliocentric radial velocityと併せて太陽中心系から見たその星の速度ベクトルの絶対値 | V| 、ならびに視線方向と速度ベクトルのなす角度θを求めなさい（0°≦θ≦180°）。

NiI 6007.31
V I 6039.73
S I 6046.00
S I 6052.68
Fe I 6055.99
Fe I 6062.85
TiI 6064.63
Fe I 6078.50
V I 6081.44
Fe I 6085.27
NiI 6086.29
Fe I 6089.57
V I 6090.21
TiI 6091.18
SiI 6091.92
CaI 6093.14
SiI 6106.60
NiI 6108.12
V I 6111.65
SiI 6125.03
TiI 6126.22
NiI 6128.99
SiI 6131.86
V I 6135.36
SiI 6142.49
Fe I 6151.62
SiI 6155.14
NiI 6175.42
NiI 6176.81
Fe I 6180.20
NiI 6186.74
V I 6199.19
Fe I 6215.15
V I 6224.51
NiI 6230.09
SiI 6237.33