

実習 星のスペクトル分類 (Rutten カリキュラムより)

福江 純 (大阪教育大学)

1. まずはチャレンジ!

次ページ (図 1) に 18 個の星のスペクトルがランダムに並べてある。横軸は、左側が短波長 (青い波長) で右側が長波長 (赤い波長) になっている。また、画像は白黒反転したネガ画像である。ハサミやカッターでそれぞれのスペクトルを 18 本のスリットに切り取り、似たものの系列順に並び替えてみて欲しい。

原図は A4 サイズだが本会誌は B5 サイズと小さいし、コピーなどで画質が落ちてしまうだろうが、たぶん模様は判読できると思う。

制限時間は 30 分 (それ以上やっても煮詰まって千日手になるだけ)、最後のページの正答と比べて、どれだけ合っただろうか?

さらに、大学や高校などでは、事前に練習せずに生徒と一緒に実習してみることをお勧めする。後で述べるが、この実習では、生徒より正答率が高いとは限らない。

2. 分光学の歴史の厚みが違う

ぼく自身は、長年にわたり、相対論・流体力学・電磁流体力学などの手法は一通りやり、最後に取っておいた分野が、輻射輸送・輻射流体力学と呼ばれる分野である。そして、この 10 年近く、その輻射輸送にも取り組み初め、ブラックホール降着流やブラックホール風に関連して、相対論的な輻射輸送および相対論的輻射流体力学を調べてきている。さらに、輻射輸送の講義までしている。

残念なことに、現在の日本では輻射輸送の専門家がほとんどいない。恒星大気の研究をしていた一世代前はリタイアしていて後継者があまりおらず、ぼく自身も独学に近い状態だった。しかし、観測機器など技術の向上に

伴い、太陽や星、降着円盤、初期宇宙、系外惑星など、多方面で詳細な観測が進んできて、今後、輻射輸送の分野が再び脚光を浴びる重要な分野に返り咲くことは間違いない。

そんな折り、2010 年の 11 月中旬に、国立天文台で 5 日間にわたり、太陽の専門家でオランダはユトレヒト大学とノルウェーのオスロ天体物理学研究所所属の、Robert J. Rutten 教授による輻射輸送の集中講義 (+ 実習) があった。事前にアナウンスされた講義プログラムや講義資料をみると、内容はかなり本格的なものだ。このラッキーな機会を逃す手はない。そこで、実習に必要なだと指示された IDL という高価なソフトも購入して、太陽関係の院生と一緒に Rutten さんの集中講義を時間の都合がついた 4 日間ほど受講してきた。

この歳になって大学院向けの集中講義を聴くことになるとは思わなかったが、でも、久しぶりに、学生に返ったつもりで、(昼は) しっかり勉強してきた。しかし毎時間、目ウロコ状態で、実習も実践的なものであり、期待をはるかに超えてとても勉強になった。と同時に、オランダやデンマークやドイツあたりは、分光学発祥の地であり、歴史の厚みがまったく違うことを実感した。

講義本編はかなり専門性の高いものだが、初日の午後 (実習時間) の初端に課されたのが星のスペクトル分類の歴史を辿る意味での、この実習である。きわめて印象的な実習だったので、その後、高校や大学でも実践してみると同時に、ここでも紹介することにした。

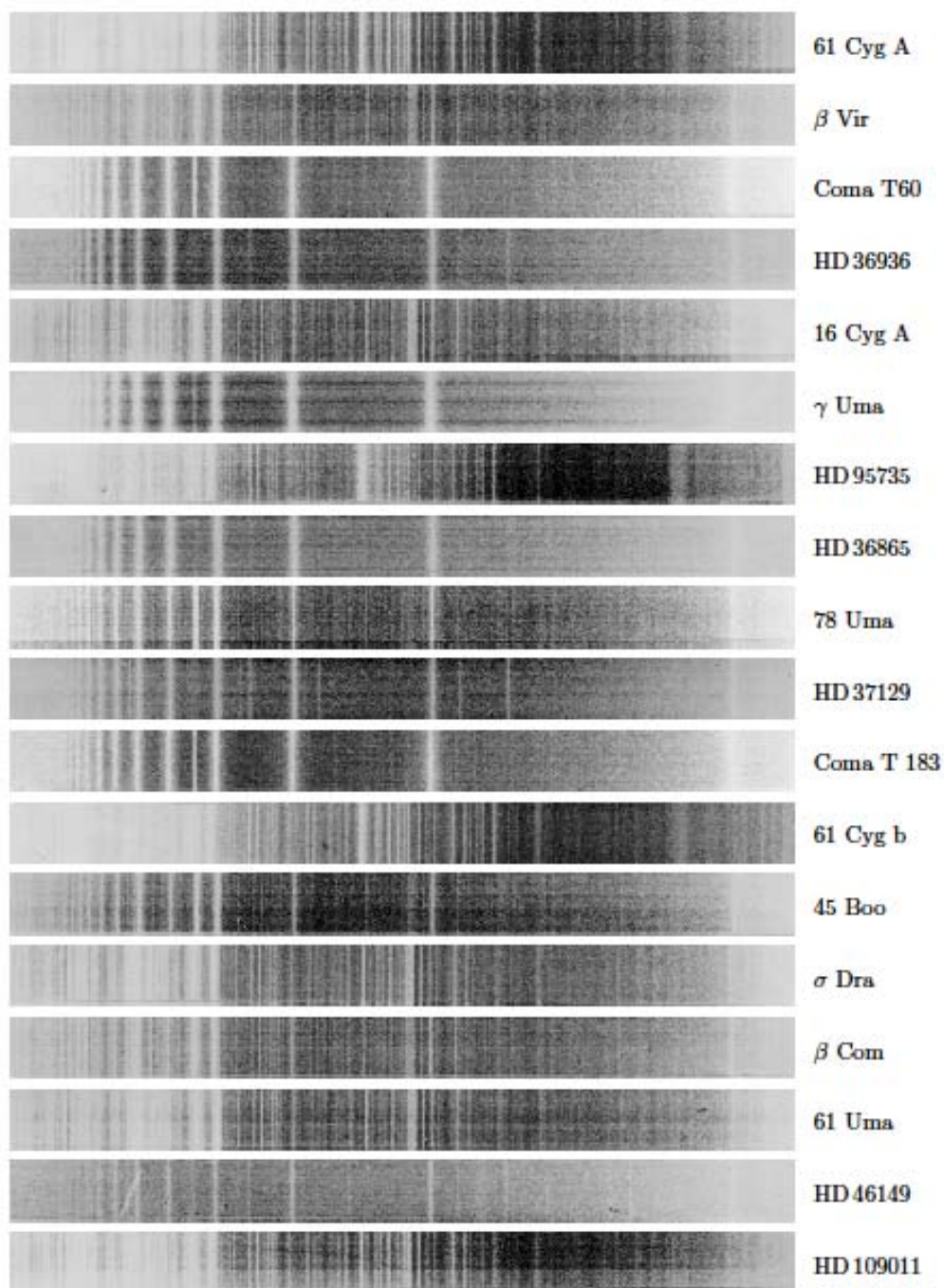


Figure 3: Stellar spectrograms taken with a low-dispersion grating spectrometer. The wavelength increases to the right. From Abt et al. (1968).

図 1 問題

2. 実践例

もちろん、ぼく自身、星のスペクトル分類についての知識はもっているし、講義でも教えている。つまり答えは知っているのだが、実際の分類作業は、これはまた別の話だ。いくつかの場面で実践してみたので、その実例を簡単に紹介したい。

2.1 プロの場合

これはぼくが実践したわけではないが、まず Rutten さんの集中講義時のケースだ。このスペクトル分類の実習をしたときは、プロの研究者が 4 人と、院生が 10 人ぐらいいた。

ハサミで切る時間も含めて、並べ替えの作業でだいたい 30 分ぐらいかかった。答えを知っていて、バルマー線が強いグループだとか弱いグループだとか分けながら、効率的に作業しても、隣り合う似たもの同士を並べ替えていくと、プロでも 30 分ぐらいはかかるだろう。そして最初にも書いたように、30 分もやると、もう頭が煮詰まって後はよくわからなくなってしまう。



図2 国立天文台での実習時

(<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/TOPIC/2010/101115.htm>)

ぼく自身の結果が図2である。完答できず、

二つ（上下1組み）を間違えた。しかし、それでも、太陽の専門家よりよくできて、Rutten さんからご褒美のチョコレートをもらった。

2.2 高校生の場合

この実習は非常にインストラクティブなものだと思ったので、Rutten さんにあちこちで使わせて欲しいと頼み、快諾してもらった。そして早速、2週間後に洛東高校で実施してみた（図3）。



図3 洛東高校での SPP 授業

これは2日目で色合成の実習をしているとき。

(<http://quasar.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/~fukue/TOPIC/2010/101201.htm>)

この4、5年ほど、洛東高校の西村昌能さんが頑張って SPP 授業を続けている。重力レンズをやったりブラックホール活動天体だったり、いろいろなテーマでこちらも手伝わしてもらっているが、今年は星のスペクトルをテーマとしていたので、ちょうどピッタリの実習となった。SPP 授業本体については、西村さんから別途報告されるはずである。

このとき受講していた高校生（2年生）は10人ほどだった。やはり切る時間も含め、30分ほどかかる（カッターと定規で切ると、か

なり早く切れる)。そして、30 分ぐらい経つと、やはり集中力が切れてきて、“あー、イライラするう”と言い始める。その気持ち、よくわかる（笑）。

そしてこのときは、10 人のうち 1 人ほど完答者が出た。本人はいろいろヒントをもらったからと謙虚に言っていたが、後で述べるような、スペクトルで比べるべき点をいくつか紹介しただけである。十分な観察眼があれば、ほとんど専門的知識のない高校生でも、スペクトル系列を完全に並べられる点に注目したい。

2.3 大学生の場合

理科に関する基礎知識を補うために、コースの再編に伴いカリキュラムを変更した今年度の 1 回生から、「理科基礎」という講義を開始している。前半 7 回は物理の先生が、数量の扱い、次元解析、三角関数・指数関数、フェルミ推定、テイラー展開、微分・積分、ベクトル解析の初歩などを行う。後半はぼくが、科学の体系や対象や考え方、科学のプロセス、最小自乗法などデータ解析の初歩、微分方程式、科学的な表現方法などなどを行う予定だ。

上の SPP 授業の 2 週間ほど後、この後半の 2 回目があった。そこで、博物学や分類学としてスタートする科学のプロセスの実例として、この実習を実施してみた。

この「理科基礎」は理科系の学生全員（60 人ぐらい）に受講して欲しいのだが、必修ではないため、受講者は 40 人ほどだ。時間の節約のため、前の週にプリントを渡して家で切ってくるように指示していたので、作業時間は 20 分とした。

フタを開けてみると、完答者はいなかったものの、二つ（上下 1 組み）だけ間違えたのが 2 人いた（花丸をあげた）。まあ、妥当なところだろう。

3. 分類の手がかりと物理的な説明

知っている人には余計な話したが、ここで少し、分類（並べ替え）のときに着目する点と、物理的な説明をまとめておく。

主な着目点は、知識的には、

- (1) 連続スペクトル
- (2) 水素のバルマー線
- (3) カルシウムの HK 線
- (4) 分子バンド

などだ。

高温恒星は青い光が強く（ネガでは左側が黒っぽい）、低温恒星は赤い光が強い（ネガでは左側が白く右側が黒っぽい）ので、ちゃんと並べば、全体として、左上から右下に背景の黒い帯が並ぶことになる（図 4）。

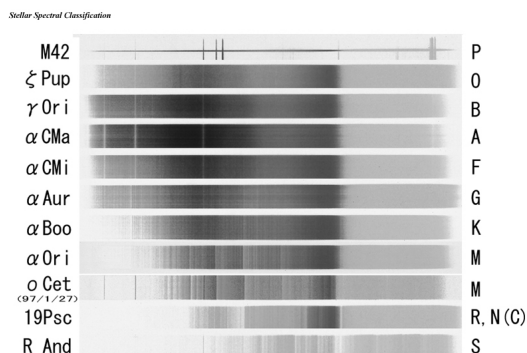


図 4 星のスペクトル分類（栗野諭美他『宇宙スペクトル博物館』より）

原図をネガ画像にしてある。

水素のバルマー線は多くのスペクトルで顕著だ。ただし、実は図 1 で一番右方の吸収線は、 $H\alpha$ 線ではなく $H\beta$ 線である。図 1 に波長は書いてないが、このスペクトルは、可視光全域ではなく、赤い側が 500nm ぐらいまでのようだ。ただ、そういうことを知らなくても（というより、むしろそういう余計な情報は伏せてある）、バルマー系列のパターンは並べ替えの大きな目安になる（図 5）。

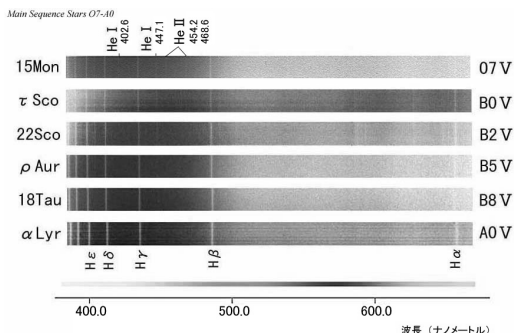


図5 O型からA型の星(同上)
バルマー線がラベルしてある。

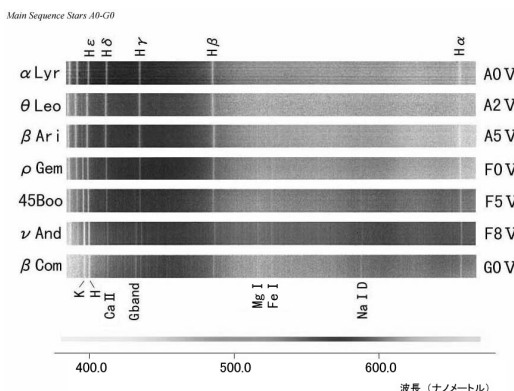


図6 A型からG型の星(同上)
バルマー線とカルシウムのHK線がラベルしてある。

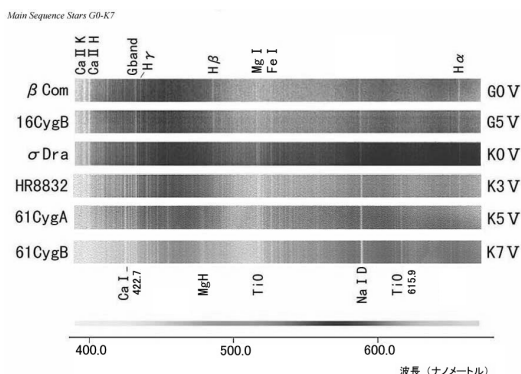


図7 G型からK型の星(同上)

いまのぼくたちは、量子力学も知っているし、バルマー線などの吸収線が生じる仕組みも理解している。しかしこの実習は、バルマー線という名前すらついていなかった時代、19世紀の研究者が行ったことを追体験するものなのだ。

さらに、バルマー線の右から四つ目(Hε)と五つ目(Hδ)の間に現れるカルシウムK線も一つの目安になる(カルシウムH線はほぼHεと重なる)(図6)。

また低温度星で現れる、多くの金属線やTiO分子の吸収帯も一つの目安になる(図7)。

これらは事前の“知識”として知っていたことだ。ただし、実際に分類作業してみると、結局は歴史を辿るように、水素のバルマー線(スペクトル分類の開始時点では、水素のスペクトル線だという正体は知られていなかった)の強さを目安に分類することになった。アルファベットのAが振られた歴史を体感できる。

物理的な説明を簡単にしておくと、背景の連続成分については、すでに少し触れたが、星の連続スペクトルはおおざっぱには星の表面温度をもつ黒体放射(熱放射)で近似できることによる。したがって、表面温度が高温の星はスペクトルのピークが青い波長(あるいは紫外線領域)にあり、低温の星は赤い波長にくることになる。

また、バルマー線の強さの消長については、低温の星でバルマー線がみえなくなるのは、低温の星では水素はほとんどが基底状態にあって、バルマー線を生じる第1励起状態の原子が少ないためだ。逆に高温度星でバルマー線が薄くなる理由は、温度が高くなると励起や電離が進み、やはり第1励起状態の原子が減少するためである。

知っている人には当たり前みたいだが、机を並べて Rutten さんの講義を受けた JAXA

の某 Y. Kato 研究員の言「福江さん、こっち（低温度星）でバルマー線がなくなるのはわかるんですけど、こっち（高温度星）はどうしてでしたっけ?」「をいをい、そりゃ、電離するからだろうよ」「ああ、そっか!」

若手のバリバリの研究者でもこんな感じだから、日本での輻射輸送の衰退は著しい。いま、どうにかしないといけないと模索しているところである。閑話休題。

4. この実習の面白さ

ほとんどすべての実習は、テーマを出す教師側が圧倒的によくできるだろう。この実習が興味深いのは、一つは教員も学生も同じ土俵に立てる実習だ、という点だ。上でも述べたように、いくら知識があったからといって、うまくできるとは限らない。観察眼や集中力が重要なファクターになる。またある種、パズル的な要素もあるので、ぼく自身も最初によったとき面白かったし、生徒や学生もかなり熱心に取り組む。

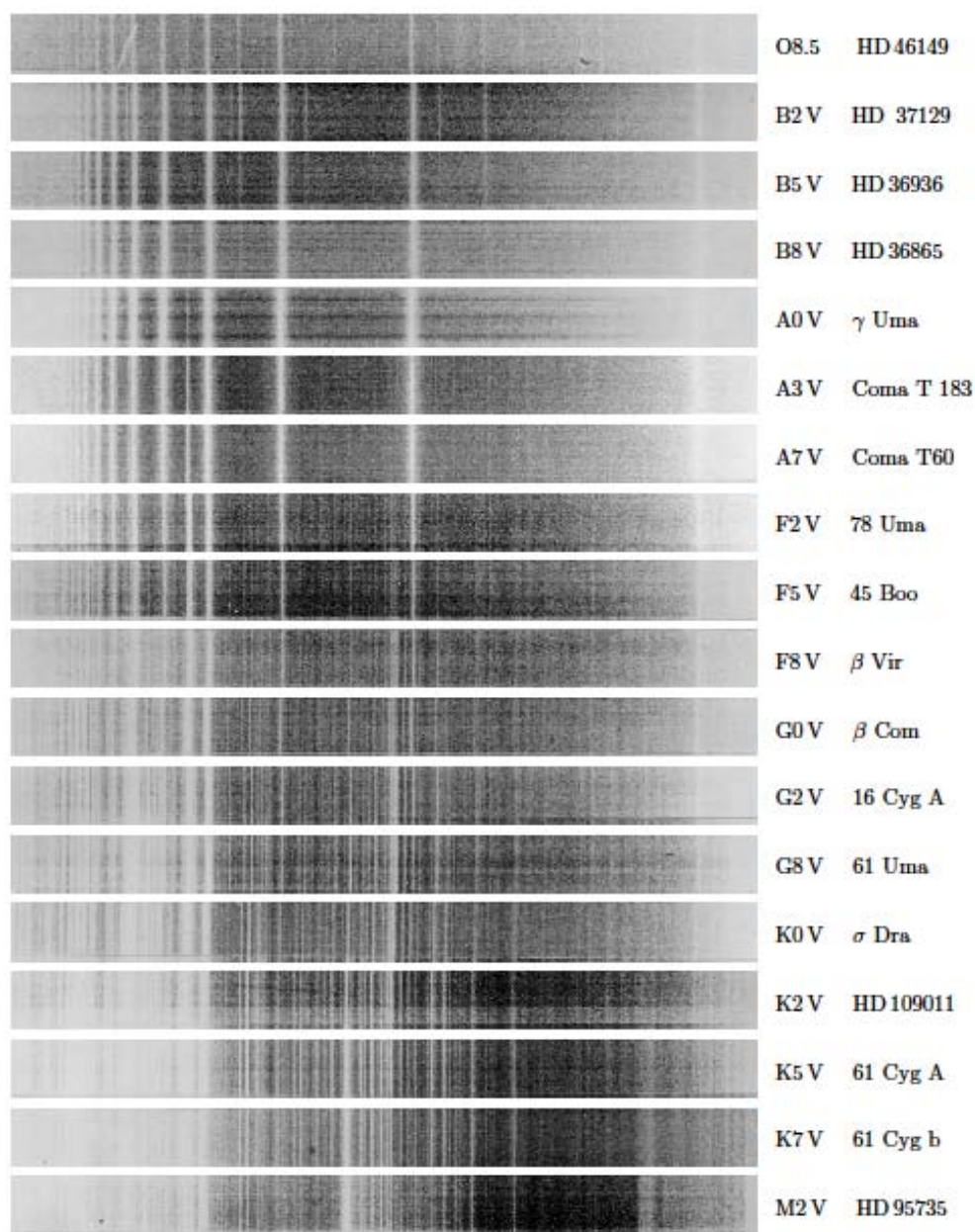
また、星の名前がつけてあるが、使われているのが無名の星々だという点もいい。有名な星だと、すでにタイプを知っていたりする可能性もあるが、そんな先入観を排除できる。

さらに、博物学・分類学として始まる科学の考え方を学ぶためには、きわめてインストラクティブな実習でもある。ここでは省略したが、Rutten さんの講義では、スペクトル分類の歴史の話しが午前中であって、それを受けての実習である。大学で実習してみたときも、後の説明のときに A 型の名前の由来などを話したら、妙に納得していた。

一般には星のスペクトル分類は天下りに与えるだけだ。『宇宙スペクトル博物館』でも、JAHOU の「天体分光観測カリキュラム製作プロジェクト (スペクトルカリキュラム)」でもそうである。このような単純な分類作業は、単純なだけに、きわめて効果的で実用的だ。しかし、このような実習は、ぼく自身が大学院で輻射輸送の講義を受けたころはもちろん、現在まで、あまり見聞がなかった。JAHOU のカリキュラムにも、その本家である HOU (Hands-On Universe) のワークブック (昔、翻訳を手伝ったもので、1997 年版) にも、見当たらなかった。Rutten さんによると、Rutten さん自身が師匠から引き継いだものらしく、そこらへんが欧州の伝統の重みかも知れない。もしかしたら、教育現場ですでに同様な実習をしている人もおられるかもしれないが、敢えて紹介してみた。

福江 純 (大阪教育大学)

(次ページに正解が掲載されています)



Stellar spectrograms covering the Harvard sequence. The wavelength increases to the right. From H. A. Abt, A. B. Meinel, W. W. Morgan and J. W. Tapscott, "An Atlas of Low-Dispersion Grating Stellar Spectra", Kitt Peak National Observatory, 1968.

1

图 8 正答