

# 天体分光学入門

(天体スペクトルから何がわかるか)

りくべつ宇宙地球科学館館長  
山 下 泰 正

銀河の森天文台

## 改稿の辞

天体分光学は、天文学の一分野であって、天体のスペクトルから天体についての情報を取得し、その素性を研究するための手段である。本書を書いた直接の動機は前述の通りであるが、読み直して見ると、ある程度まとまった範囲を扱った一般的な入門書になっているように思われる。入門書と言って教科書と言わないのは肝心の第5章以下に於いて記述の軽重にやや恣意的な個所があり、特に第8章の項目の選択が系統的でないからである。本書の性格は天体スペクトルの解説書、あるいは天体のスペクトル解析の手引書であって、天文学、あるいは天体分光学の成果を網羅することは意図しなかった。むしろ、私が今までに考えたテーマに的を絞って、それらのスペクトルから何がわかるか、そして、どういう情報を得るには、どのような観測が必要かを一緒に考えた積もりである。およそ学問というものは好奇心を持って自分で考えることから出発する。

最初の意図はなるべく数式を使わないで言葉で説明することであったが、改訂に当たってはむしろ数式による表現を多くした。場合によっては、その方が、筆者が何を考えているかが正確に伝わると考えたからである。

第8章各論の最後では、Diffuse Interstellar Bands (DIB) と呼ばれているいわゆる星間吸収帯の問題を扱った。この節だけは他と違って最近勉強したことのみをまとめた。最近の測定技術の進歩によって星間吸収帯のスペクトル線（あるいは帯）の数は100本を超える。少数の線については物質の同定が提唱されているが、大部分は何の線か未だわかっていない。その昔、謎であった星雲線やコロナ輝線が高階電離したイオンの禁制線に同定されたのと比べると、綺麗には行かないようである。最近では、芳香族炭化水素の連鎖のようなものを考えるのが主流のようである。分子が重いから、回転定数が小さくて回転構造線が重なって幅ができ、線がボケて見える、また、分子の構造が複雑だから、振動スペクトルには差、または和のスペクトルが優越し、スペクトルの振動構造を複雑にしているという訳である。この考え方が正しいとすると、100本の線はそれぞれの分子に同定されることになる。

私がこの問題に関心を持つのは、多くの星間吸収帯の深さが連続スペクト

ルの1パーセント程度あるいはそれ以下と極めて弱いことである。このような星でも、星間ダストによる連続吸収の光学的厚さは1を超えているから、これ以上深い星間吸収帯は星の星間ダストによる減光が大き過ぎて（星の実視等級が暗過ぎて）観測できなくなるということかもしれない。そんなことから、私は星間吸収帯が星間ダストの連続吸収の微細構造ではないだろうかという考えを持つに至った。定年後、固体光物性の勉強をしてみたけれども、良いアイデアは浮かばない。同定の論文は一つしか書けないと昔、同僚と話したことがある。同定に成功すれば、それは論文になるが、失敗すれば、通常、論文にはならない。しかし、現状では失敗の報告が主要な天文学の雑誌に年間数編の割合で載っている。物事がはっきりするまで、外堀を埋めるのも重要な知見だということのようである。

最後に、本書のCD版出版については銀河の森天文台村田拓也さんに大いに助けていただいた。あらためて感謝の意を表す。

2002年9月

陸別にて 山下泰正

## 目 次

第 1 章序論	1
1 光のスペクトルとは	1
2 本書の構成	3
3 光の強度と放射流束 (フラックス)	4
4 光検出器	5
5 信号対雑音比 (S/N 比)	7
6 単位系	8
6.1 波長の単位	8
6.2 波数およびエネルギー	9
第 2 章原子、分子のスペクトル	11
1 スペクトル系列	11
1.1 水素のスペクトル系列	11
1.2 アルカリ原子のスペクトル系列	12
2 原子模型	13
3 原子の量子論的描像	13
3.1 ボーアの古典的量子論	13
3.2 シュレディンガー方程式と波動関数	15
4 多重項と電子スピン	17
4.1 電子スピン	17
4.2 ベクトル模型	18
4.3 多重項	19
5 グロトリアン図表	19
6 パウリの排他律	24
6.1 パウリの排他律	25
6.2 元素の周期律	25
6.3 等価電子と非等価電子	26
7 スペクトル線の強度	27

7.1	遷移確率	27
7.2	選択律	28
7.3	禁制線	29
7.4	gf 値	31
8	超微細構造	32
8.1	同位体効果	32
8.2	核スピン	32
9	分子のバンド (帯) スペクトル	33
9.1	回転スペクトル	35
9.2	振動スペクトル	36
9.3	振動回転スペクトル	38
9.4	等核分子	40
第3章連続スペクトルと黒体放射		42
1	連続スペクトル	42
2	フーリエ変換	42
3	指数関数と対数関数	44
4	黒体放射	45
5	キルヒホッフプランクの法則	46
6	理想気体の状態方程式	47
7	熱運動	48
8	熱力学的平衡状態	49
8.1	励起温度	49
8.2	原子の電離と分子の解離	50
第4章放射輸達と星の大気構造		53
1	ガス体としての星	53
2	静水圧平衡	55
3	光学的厚さ	56
4	放射輸達の過程	57

5	放射平衡	58
6	星の大気構造	61
7	モデル大気	62
8	太陽の周辺減光	63
9	吸収線の形成	64
10	輝線の形成	66
第5章	スペクトル型	68
1	スペクトル型から何がわかるか	68
2	スペクトル分類の歴史	70
3	ハーバード分類	71
4	ヤーキス分類 (MK 分類)	72
5	星の自転	73
6	実際の分類と判定条件の選択	74
7	数値分類	75
8	スペクトルの特異星	75
8.1	ウォルフライエ星	75
8.2	A 型特異星	75
8.3	金属線星	76
8.4	高速度星	76
8.5	水素欠乏星	76
8.6	炭素星 (C 型星)	77
8.7	バリウム星	78
8.8	S 型星	78
8.9	CS および SC 星	79
第6章	スペクトル線の変移と幅	80
1	ドップラー効果	80
1.1	天体现象へのドップラー効果の適用	80
1.2	波長の測定	82

1.3	視線速度の測定	84
2	ゼーマン効果、磁場の測定	85
2.1	正常ゼーマン効果	85
2.2	異常ゼーマン効果	86
2.3	ゼーマン効果による天体磁場の測定	88
3	減衰幅	88
3.1	放射減衰	89
3.2	衝突減衰	89
4	シュタルク効果	90
4.1	一次シュタルク効果	90
4.2	二次シュタルク効果	91
4.3	ファンデルワールス力	92
5	超微細構造、同位体効果	92
6	フォイクトプロファイル	92
第7章	元素（原子）の定量	95
1	分光分析	95
2	吸収線の飽和	96
3	スペクトル線の同定	97
4	等積幅の測定	98
5	成長曲線	100
5.1	理論的成長曲線	100
5.2	経験的成長曲線	102
5.3	モデル大気による詳細解析	103
6	スペクトル合成法	104
7	標準的な化学組成	105
第8章	天体スペクトル各論	107
1	連星系	107
1.1	実視連星	107

1.2	分光連星	108
1.2.1	視線速度曲線	108
1.2.2	見えない惑星系の探査	110
1.3	食連星	111
1.3.1	光度曲線	111
1.3.2	星の半径、有効温度、質量	113
2	質量放出	113
3	太陽視差	115
4	惑星	115
4.1	地球大気	117
4.2	惑星大気	119
5	新星	121
5.1	光度曲線	122
5.2	スペクトル変化	123
5.3	スペクトル線のプロファイル	124
6	脈動変光星	127
6.1	セファイド	127
6.2	ミラ型変光星	129
6.3	ミラの伴星	132
7	はくちょう座P星	134
8	共生星	134
9	高温の輝線星	138
9.1	B型輝線星(Be星)とガス殻星	138
9.2	希釈放射場	139
9.3	O型星における蛍光	141
10	惑星状星雲	142
10.1	惑星状星雲のスペクトル	142
10.2	水素線の励起	144
10.3	ストレームグレン球	

11	コロナ輝線	146
12	彗星	148
12.1	彗星の構造とスペクトル	148
12.2	バンドスペクトル	149
12.3	分子スペクトルの発光機構（共鳴蛍光）	151
12.4	スウィングス効果とグリーンシュタイン効果	152
12.5	分子の昇華、解離、電離	153
13	星の混合、球状星団、銀河	153
14	星間吸収線	154
14.1	星間物質	154
14.2	星間吸収線	155
14.3	星間吸収バンド	157
14.4	星間吸収帯の観測された性質	162
14.5	星間吸収帯を生ずる物質の同定	165
第9章天体用分光器		169
1	分散系	169
2	分光器の構造	174
3	天体用分光器の特徴、望遠鏡との適合	177
4	明るさと分解能	178
5	対物プリズムの方法	179
6	フーリエ干渉分光計（FTS）	180
7	狭帯域フィルター測光	181
付録1	物理定数および天文定数の表	183
付録2	陸別 1.15 メートル望遠鏡の分光器について	184
索引		185

## 第1章 序論

### 1 光のスペクトルとは

良く知られているように光は電磁波の一種であって、電気振動が空間を伝搬する現象である。波には横波と縦波との別があって、電磁波は横波である。音波は圧力波の伝搬なので縦波である。波が1秒間に何回振動するかを振動数 (frequency) といい、波の山から山 (谷から谷) の長さを波長 (wavelength) という。光の経路が光線という幾何学的直線で表されるのは波長が著しく短いからであって、波であることは光の干渉 (波が足し合わされたり、あるいは打ち消し合ったりする現象) や回折 (光が幾何学的な影のなかに回り込む現象) によって確かめられている。

電磁波は波長の長い方から電波、赤外線、可視光、紫外線、エックス (X) 線、ガンマ線などに分けられる (理科年表,1999,503 頁参照)。電波は電気信号 (波) として受信され、増幅、検波される。他方、赤外線以下は (難しい言葉でいうと自乗検波されて) エネルギーとして検出器に受け取られる。

図 1.1 電磁波の分類

太陽の光をプリズムに通すと、虹の七色に分かれる。色の違いは光の波長の違いであって、長波長側から赤橙黄緑青藍堇 (「せきとうおうりよくせいらんきん」と読む) と呼ばれている。これらは単一の波長のみをもつ光の色であって、純色と名付けられる。桃色、茶色、紫など私たちの周りにある色の大部分は混合色 (絵具の色) であって純色ではない。ついでに云うと、純色というものは最近流行の三色分解では決して作ることはできない。何故なら、純色の光は三色のうちの、一つのバンドしか感光させないからである。したがって、純色をどんなに露出過度にしても白っぽくなることはない。三色分解の赤はただ赤なのである。

## 図 1.2 可視域

上記のように光を波長ごとに分けて、各波長毎の強度分布という形で表したものを光のスペクトル (spectrum) と呼ぶ。太陽スペクトルのように広い波長範囲にわたって連続的に分布しているものを連続スペクトル (continuous spectrum) という。一般に、高温の固体が発する光は連続スペクトルを示す。分散度を高くすると、太陽の連続スペクトルの所々に暗線があるのがわかる。これは太陽の表面にあるガスが連続スペクトルの光を選択的に吸収したからである。これらを吸収線 (absorption line) あるいはフラウンホーファー線 (Fraunhofer line) という。それに対して例えば、ネオンサインの赤い光をプリズムに通して見ると、何本かの赤い輝いた線が見られる。これを輝線スペクトル (emission spectrum) という。一般に高温ガス (気体) から発せられる光は輝線スペクトルを示し、個々の線をスペクトル線 (spectral line) という。スペクトル線は物質 (元素) に固有である。また吸収線および輝線を含めて、これらを連続スペクトルに対して線スペクトル (line spectrum) ともいう。

分光学 (spectroscopy) はスペクトル線の研究をテーマとする分野である。スペクトル線は物質固有であって、スペクトル線を用いて光源である物質の原子、分子の構造やその物性を研究するのが分光学である。その成果は 20 世紀の初頭、量子力学の発展と相まって原子および分子の構造の解明に大きな貢献をした。スペクトル線は適切な波長域を見れば、ごく微量でも強く現れるから、化学の微量定量分析をはじめ、環境科学など多方面に広く応用されている。また新しい材料の物性的研究にも役立っている。

天体分光学 (stellar spectroscopy) は分光学の一つである。あるいは、天体という光源に分光学を適用したものである。その意味で分光学の基礎知識が重要である。同時に、天体分光学は天文学、あるいは天体物理学の一つである。

天文学には、その時々々の天空の記録という性格がある。我々は勝手に天体現象を起こさせるわけにはいかないから、あるがままの天空の姿を記録する。その記録の蓄積のなかから現象の本質が見えてくる。実験ではなくて、観測と呼ばれる由縁である。同様に実験室の分光分析では、光源を明るくしたり、

試料を濃縮したり、あるいは濃過ぎる場合は希釈したり、あるいは成分に分離したりして測定精度を向上させることができる。ところが天体の場合には、測定しやすいように光源である天体に勝手に細工を施すことはできない。測ろうとする線が他の線と重なっていても、邪魔な線を取り除くことはできない。あるがままの天体の光を測定しなければならない。ここにも天体分光學固有の困難がある。その結果の不具合は、データの整約の段階で工夫しなければならない（第7章参照）。

太陽スペクトル中の吸収線（暗線）をフラウンホーファー線という。これは1817年頃、フラウンホーファー（J. v. Fraunhofer）が詳しい測定を行ったからで、彼はその主なものを波長の長い方から順にA,B,C,...H,Kと名付けた。D線は黄色の領域にある2本の接近した強い吸収線で、長波長側のものをD1、短波長側のものをD2と呼ぶ。一方、食塩を炎のなかに入れると焰色反応を示して黄色く光る。この光を分光器で見ると、やはり黄色の2本の輝いたスペクトル線（輝線）が見える。19世紀の半ばまでは、この実験室の輝線スペクトルと太陽の吸収線とが同じものだとはわからなかった。波長を測ると一致する、そして実験室の2本の線はナトリウム（Na;食塩が分解してできた）のスペクトル線であることがわかってきて分光學の基礎が確立した。しかし太陽ではなぜ吸収線になるかが理解されたのは、キルヒホッフ（G. R. Kirchhoff）の熱力学的研究、そしてプランク（M. Planck）の量子論的研究によって光の放射、吸収の機構が明らかにされ、そしてそれに基づいて一般の恒星大気の構造が明らかにされてからである。太陽も、遠くの星々も地球上にあるのと同じ元素でできているという認識は、ニュートン力学が遠くの天体でも成り立っているという発見とともに、当時の人々にとっては驚きであったに違いない。

1868年、イギリスの天文学者ロッキヤー（J. N. Lockyer）は太陽の彩層スペクトルに新しいスペクトル線を見つけた。それらのスペクトル線を示す元素はそれまで地球上では知られていなかったのがヘリウム（太陽素）と命名されたが、1895年に地球上でも発見された。天体にだけ見られる奇妙なスペクトル線は他にもある。惑星状星雲の緑の領域に見られる星雲線と呼ばれる輝線は、長い間ネビリウム（星雲素）という仮想的な元素の線と考えられてい

たが、1928年ボーウェン (I.S.Bowen) によって2回電離した酸素の禁制線 (禁制線については次章参照) であることが明らかにされた。太陽コロナにはコロナ輝線と呼ばれる数十本の輝線がある。これらもコロナウム (コロナ素) という仮想的な元素の線と考えられていたが、1939-40年にグロトリアン (W. R. W. Grotrian) 及びエドレン (B. Edlen) によって鉄、カルシウム、ニッケルなどの十数回電離したイオンの禁制線であることが同定された。これはコロナの温度が100万度という高温であることの最初の直接的証拠である。このように問題のスペクトル線が何の線であるかがわかると、その天体について新しい知見が得られることが多い。

1960年代の後半以降には電波のミリ波領域で星間分子のスペクトル線の発見が続き、星の誕生の場所としての星間雲のようすが明らかにされてきた。可視域でも、遠方の星のスペクトルには diffuse interstellar bands (DBI) と呼ばれる一群の幅の広い星間吸収帯が存在する。これらの最初のメンバーが発見されてから、既に3/4世紀が過ぎた。これらは星間ダスト (微粒子) に付随する微細構造であろうという傍証はあるけれども、何のスペクトル線かは未だにわかっていない (第8章14節参照)。

## 2 本書の構成

本章、「序論」の後半では、天体スペクトルの観測と理解に必要な事項として、光の強度と放射流束との違い、光電効果、信号対雑音比、及び用いる単位系について述べる。第2章では分光学の基礎的知識として、原子、分子の構造とその線スペクトルについて記述する。本来はこれだけで分光学の教科書になるものだが、本書では天体スペクトルを理解するための準備として必要なものに絞る。第3章では連続スペクトルの理解に必要な黒体放射、並びにガスの一般的な熱力学的性質について述べる。第4章ではガスと光との相互作用としての放射輸達の考え方と、自ら光としてエネルギーを放出しているガス体としての恒星の大気構造について述べる。ここまでが、天体スペクトルから何がわかるかという問に対する準備である。

次章からは、天体スペクトルから何が分かるかについての解説である。第5章では恒星のスペクトル型について述べる。スペクトル型からは、その星

の温度と絶対等級とがわかる。同じ星でも遠方であれば暗く見えるから、絶対等級がわかると見かけの明るさと比較してその星の距離がわかる。これを分光視差という。第6章ではスペクトル線の変移と幅について考察する。地球に対して相対運動している天体からの光はドップラー効果によって波長が変移している。したがってスペクトル線の波長を正確に測れば、その天体の視線方向の運動速度がわかる。これを視線速度と云い、種々の天体現象の研究に応用されている。食連星では、ケプラー第三法則を用いて各成分星の質量がわかる。これは星の質量が直接測定される唯一の場面である。銀河に適用すれば、ハッブルの法則が得られ、そこから膨張宇宙のモデルが導かれ、宇宙の大きさ、年齢に関する知見が得られる。

第7章では元素の定量（分光分析）の問題について述べる。ここでは吸収線の飽和を理解することが重要で、それを補正する方法が述べられる。次の第8章では天体スペクトルの各論として幾つかのトピックスについて述べるが、いわゆるスペクトルの特異星を網羅する積もりはない。むしろ、輝線天体に重きを置いて発光機構を考察するとともに、ガスと星との幾何学的な関係を考察してみたい。輝線天体では連続スペクトルは星から、輝線スペクトルは周りのガスから出ていることが多い。星とガスとは惑星状星雲のように分離して見えることもあるが、新星のように、星の爆発現象の初期では分離しなくて点像にしか見ないことも多い。後者の場合には光っているガスの幾何学的モデルもスペクトル線のプロファイル（輪郭）から求めねばならない。球対称モデルが採れれば何とか解釈できるが、そうでない場合には、分光学的知見からだけではガスの幾何学を分離できないことも多い。

第9章では分光器、特に天体用分光器の特徴について述べる。この章ではまた、実際の観測計画を立てるときの注意をも述べてみる。

### 3 光の強度と放射流束（フラックス）

光の強さという言葉は一般に良く使われるが、狭義の光の強度 (*intensity*) は単位面積から単位立体角に毎秒放射される光のエネルギーによって定義される。すなわち、図 1.3 のように面要素  $dS$  を通り面の法線から  $\theta$  方向に立体角  $d\omega$  に毎秒放射される光のエネルギーを

$$(1.1) \quad I(\theta) \cos \theta \, dS d\omega$$

と書いたとき、 $I(\theta)$ を光の強度という。光の強度 $I(\theta)$ は方向と大きさを持っているがベクトルではない。何故ならベクトル算法は成り立たないから。

図 1.3 光源面と受光面との関係

次に、この光を図 1.3 のように面要素 $dS'$ で受けることを考える。 $d\omega'$ は $dS'$ から $dS$ を見込む立体角だから

$$d\omega' = dS \cos \theta / r^2$$

と書くことができる。同様に、 $d\omega$ は $dS$ から $dS'$ を見込む立体角だから

$$d\omega = dS' \cos \theta' / r^2$$

となる。 $dS'$ に入射する光の強度を $I'(\theta')$ と書くと、 $dS'$ に毎秒入射する光のエネルギーは

$$\begin{aligned} I'(\theta') \cos \theta' \, dS' \, d\omega' &= I'(\theta') r^2 d\omega \cos \theta \, dS / r^2 \\ &= I'(\theta') \cos \theta \, dS d\omega \end{aligned}$$

と書ける。これは幾何学によって、 $dS$ から毎秒放射される光のエネルギーである (1.1) 式

$$I(\theta) \cos \theta \, dS d\omega$$

に等しいから、

$$I'(\theta') = I(\theta)$$

になる。 $\theta$ と $\theta'$ との違いは $dS$ と $dS'$ とが一般には平行でないからである。もし放射が等方的（方向 $\theta$ に依らない）ならば $I' = I$ と書ける。光の強度は不変、あるいは面積と立体角の積（掛けたもの）が一定であること、すなわち、

$$(1.2) \quad I = \text{一定} \quad \text{あるいは} \quad dS d\omega = \text{一定}$$

という法則をランバート (Lambert) の法則という。このことは、光の強度は幾何学によっては変わらないことを示している。すなわち、太陽が近くにあっても、遠くにあっても太陽からの光の強度は変わらない。近づけば太陽の見かけの立体角が大きくなり、遠ざかれば小さくなるだけである。同様に望遠鏡を使って光を集めても、太陽に近づいたのと同じ効果であって、立体角が増しただけである。しかし、吸収があると光の強度は減少する。増加することはない。

そう言うと、光源に近づけば明るくなるし、望遠鏡を使えば光を集められるのではないか反論するだろう。光源までの距離によって変わるのは面の照度とか、放射流束（フラックス）と呼ばれる量である。放射流束 (radiative flux)とは、ある面の単位面積を一方から他方に単位時間に通過する放射（光）のエネルギーをいい、照度 (illumination)とはある面を照らすとき、その単位面積が受け取る光のエネルギーをいう。図 1.3 で面要素 $dS'$ の $\theta'$ 方向の投影は $dS' \cos \theta'$ だから、光源 $dS$ による面 $dS'$ 上の照度は

$$I \cos \theta' d\omega'$$

と書ける。ここで、 $d\omega' = dS \cos \theta / r^2$ は面 $dS'$ から見た光源 $dS$ の立体角、 $r$ は面 $dS'$ と光源 $dS$ との間の距離である。したがって、上式は

$$I \cos \theta \cos \theta' dS / r^2$$

と書くことができる。同様に、面  $dS'$  を通過する放射流束は

$$(1.3) \quad I \cos \theta' d\omega' = I \cos \theta \cos \theta' dS/r^2$$

となつて、照度と放射流束とは次元的には同じものである。これらから、放射流束や照度は距離の自乗に反比例することがわかる。

図 1.3 のような有限な面積を持つ光源  $dS$  の  $\theta$  方向の単位 (投影) 面積当たり放出される光のエネルギーを光源の輝度 (brightness) [あるいは面輝度 (surface brightness)] という。光源の輝度は上述の光の強度  $I$  と同じ次元を持つから距離によっては変わらない。

図 1.3 の  $dS'$  上から見た光源  $dS$  の見掛けの明るさは

$$(1.3') \quad Id\omega' = I \cos \theta dS/r^2$$

と書ける。例えば、彗星は地球に近づくと明るくなるという。これは地球に近づくと彗星の見かけの大きさ (立体角) が大きくなるため、放射流束 (積分等級) が増すという意味であつて、彗星の輝度が変わるわけではない。彗星の輝度は彗星が太陽に近づくと増加するが、地球からの距離によっては変わらない。

恒星のなかで光の強度が測れるのは太陽だけである。他の恒星は距離が遠過ぎて望遠鏡を使つても点像にしか見えない (最近、ハッブル宇宙望遠鏡によって幾つかの星が円板状に分解されている)。したがつて、私たちが見ている星は、星の放射流束であつて、星の光の強度ではない。太陽の光球面には黒点があり、光球の外には彩層、さらにその外にコロナがある。太陽の場合、それらを模様あるいは景色として分離して見ることができるから、私たちは光球からの光の強度、彩層の光の強度、等々を別々に測ることができる。ところが、もし太陽が一般の恒星の距離にあれば、もはや分解して見ることはできない。光球からの光と、黒点からの光と、彩層の光と、そしてコロナの光を足し合わせたものが星としての太陽の光である。これが星の光が放射流

束だということの、もう一つの理解の仕方である。