スペクトルとは？

私たちがふだん目にする光は可視光とも呼ばれ、ラジオの電波やレントゲン写真を撮るときに使う X 線と同じく「電磁波」の一種です。電磁波は海面の波や音の波のように波としての性質を持ちますが、これらと異なり真空中でも伝わります。電磁波は「波長」の長い方から順に、電波、赤外線、可視光、紫外線、X 線、γ線と分類されます（表 1-1）。

（表 1-1）さまざまな電磁波の名称と波長

名称	典型的な波長
電波	mm、cm 、m、km
赤外線	700nm～1mm 程度
可視光線	400 nm ～ 700 nm 程度（nm = 10 億分の 1 m）
紫外線	10 nm ～ 400 nm 程度
X 線	0.01 nm ～ 10 nm 程度
γ線	0.01 nm 程度以下

人の目に見えるのは可視光だけで、可視光の範囲内での波長の違いは色の違いとして人の目には認識されます。たとえば波長 450 nm の光は青く、波長 650 nm の光は赤く見えます（図 1-1）。天文学では、波長を表すのにÅ（オングストローム）という単位をよく使います。1Åは 100 億分の 1 m です。

1 m = 1,000 mm = 1,000,000 μm = 1,000,000,000 nm = 10,000,000,000 Å

（図 1-1）可視光の波長と色

分光とスペクトル

私たちが普段目にする光は、様々な波長を持つ光が混ざったものです。プリズムなどを使うと、混ざった光を波長ごとに分け、どんな波長の光がどの程度混ざっているのか調べることができます。光を波長ごとに分けることを「分光」と呼び、1 つの波長のみからなる光を「単色光」と呼びます（図 1-2）。

（図 1-2）プリズムによる分光の概念図

どんな波長の光がどの程度の強さであるのか示したものを「スペクトル」と呼びます。これを分かりやすく表示するために、横軸に光の波長、縦軸にその波長の光の強さを描いたグラフがしばしば使われます（図 1-3）。

（図 1-3）　スペクトルの画像とグラフの対応

明るく見える色に相当する波長のところで、グラフの曲線が上がります。

（図 1-3）の(a)には様々な波長の光が含まれているのに対し、(b)では特定の波長の光だけが含まれています。(c)では(a)のような連続成分から特定の波長の光を差し引いた光だけが含まれています。特定の波長のみ強くなっているところを輝線、弱くなっているところを吸収線と呼びます（図 1-4）。輝線や吸収線ができるのは、さまざまな元素の原子や分子がそれぞれ特定な波長の光を吸収したり放出したりする性質を持つためです。

（図 1-4）連続成分・輝線・吸収線（β Cyg b という星のスペクトル）

スペクトル中の吸収線や輝線は水素原子によるものです。

プリズムと回折格子

様々な波長の光が混ざった光を波長毎に分けるには、「分散素子」を使います。プリズム、回折格子、グリズムなどです。プリズムはガラスなどでできた光が入る面と出る面が平行でないもので、これに斜めに光をあてると、波長により結晶中での光の屈折率が異なるため、波長ごとに異なる角度に光が出てきます（図 1-2）。

回折格子は多数の細長い刻み（隙間）を等間隔で平行に並べたもので、反射型と透過型があります。光の波長ごとに干渉により強めあう角度が異なるため波長ごとに光を分けることができます（図 1-5）。

（図 1-5）回折格子

回折格子による光の干渉について（補足）

下の図で、A の位置から B の位置まで光が進むとき、（1）の経路と（2）の経路の距離は異なり、その差は反射角 θ によります。この距離の差が光の波長に等しくなるとき（あるいは整数倍になるとき）、反射光は干渉により強め合います。強め合うようになる角度 θ は波長により異なるので、波長により異なる角度に光が出て行くようになります。このほかに、波長によらず入射角と反射角が等しくなる方向にも光が出ます（この場合は経路（1）と（2）で距離に差が出ません）。入射角と異なる角度に出て行く光を、「回折光」と呼びます。

光路の長さの差 $= d(\sin\theta + \sin\phi)$
が波長 λ の整数倍（n 倍）となる角度
に回折する

$$d(\sin\theta + \sin\phi) = n\lambda$$

分光器

実際の天体観測では、スリット、コリメーター、分散素子、カメラレンズと CCD カメラからなる「分光器」という装置を使います（図 1-6）。受光部のどの位置にどの波長の光が来るか較正するために、波長比較用光源（輝線ばかりが出る光源で、どの波長にどんな輝線が現れるか分かっているものを使います）の光をスリットから入れることもできるようになっています。受光部の CCD は一般にモノクロです（カラーである必要がありません）。

（図 1-6）分光器の構造（反射型回折格子を使う場合）

補足説明

★目に見える色と波長の関係

光の波長が分かれば何色に見えるか分かりますが、色が分かっても見ている光の波長はほとんど分かりません。というのも、ふだん目にする光は単色光ではなく、さまざまな光の波長が混ざったものだからです。

人間の目の網膜には、光を感じる４種類の細胞があります。感度が高いが色が全くわからない細胞と、長い波長の光（赤）を感じる細胞と、中くらいの波長の光（緑）を感じる細胞と、短い波長の光（青）を感じる細胞です。人の脳は、この赤と緑と青を感じる細胞がそれぞれどの程度の強さで光を感じているかという情報から、色を判断しています。

たとえば黄色く見える単色光の場合、赤と緑を感じる細胞が主に働きます。ところが、赤く見える単色光と緑色に見える単色光を適当な割合で混ぜた光を目に入れ、赤と緑と青を感じる細胞がそれぞれ黄色い単色光を入れたときと同じだけ働いた場合、人の目にはこの光が黄色い単色光と同じ色に見えてしまいます。テレビはこのことを利用しており、画面は赤・緑・青の３種類の色でしか光らないのに、人の目には画面でほとんどあらゆる色が表現されているように見えます。

赤・緑・青を感じる細胞は、感度が高い細胞に比べて、あまり弱い光を感じることができません。そのため薄暗い場所では景色が白黒に見えます。写真で見るときれいな色が見える M42、M 57、M 27 などをぐんま天文台の 150 cm 反射望遠鏡で見ると白黒に見えるのはこのためです。

★粒子性と波動性

光は粒子としての性質と波としての性質をあわせもっています。光は粒子のように数えることができ、この光の粒は光子（フォトン）と呼ばれます。人の目では光子の数を数えることはできませんが、光子の数が多ければ光が強いと感じます。CCD カメラなどを使えば光子を一つ一つ数えられることもあります。

2 本の光線を交わらせると、光は衝突せずに交点で重ね合わされ、お互いをすり抜けるように見えます。波長のそろった光を位相があうように（波の山と山が重なるように）重ね合わせると強め合い、位相が逆になるように（波の山と谷が重なるように）重ね合わせると弱め合います（これを「干渉」といいます）。これらは光の波としての性質です。

光子ひとつひとつが、特定の波長を持ちます。波長の短い光ほど、光の持つエネルギーは高くなります。

スペクトルから天体の温度を調べる

私たちが天体について知ることのできる情報は、太陽系内の一部の天体を除いて、天体から地球へ届く様々な波長の電磁波（光を含む）から得られるものだけです。私たちは直接、天体に探査機を送りこんで詳しく様子を調べることはできません。ここでは、恒星の温度を調べる方法について考えてみましょう。構成からやってくる光だけから、どうやって温度を調べるのでしょう。そのためには、光の性質の中で温度に依存して変化する量を測る必要があります。もちろん、温度に依存するような「何か」があれば、という条件付きです。幸い、恒星から出てくる光の中に、表面の温度を知るための手がかりとなるものがあります。それらは、光をスペクトルに分解することではじめて分かります。一つめは、恒星から出てくる光が「黒体輻射（放射）」で近似できるということに関係します。また、二つ目の方法は、恒星に含まれるガスによる吸収線の強さをもとにした方法です。本稿では、前者の方法について見てみましょう。

「黒体輻射」は、ある温度になっている物体から電磁波（光を含む）が放射される現象です。放射される電磁波は波長方向に連続な放射となっており、その強度は温度と波長によって変化します。いくつかの異なる温度における黒体輻射のスペクトルを、図２-１に示しました。波長方向には連続で、ある波長で最大値となります。また、温度が上がるにしたがい、総輻射量（スペクトルのグラフから下の面積）が増え、また、最大値を示す波長が短いほうへ移ってゆくのが分かります。このことから黒体輻射している物体の温度を調べるには、その総輻射量を測るか、あるいは輻射が最大となる波長を調べればよいということが分かります。

黒体輻射について（補足）

あらゆる波長の電磁波を完全に吸収することのできる物体（十分に低温な場合には光が当たっても真黒に見えることから「黒体」と呼びます）から出る輻射のことを「黒体輻射」と言います。私たちの体温程度では目に見える光は出てきませんが、温度が 1000 度を超えるようになると次第に目に見えるような光を発するようになります（どろどろに解けた金属が光を出しているのを見たことがありますか？）。黒体輻射の強度は温度と波長の関数で、以下のような式で書き下すことができます。

$$B(T,\lambda) = \frac{2hc^2\mu^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT}-1)} \quad [\mathrm{erg/cm^2/sec/strad/cm}] \qquad (1)$$

ここで、h はプランク定数、c は光速、μ は媒質の屈折率、k はボルツマン定数、λ は波長、T が絶対温度です（プランク定数、光速、ボルツマン定数などについては理科年表などをご覧ください）。

式（１）を全ての波長の輻射について足し合わせる(積分する)と、全輻射量が温度の４乗に比例するというステファンーボルツマン（Stefan - Boltzmann）の法則が得られます。

$$B(T) = \sigma T^4 \quad [\mathrm{erg/cm^2/sec/strad}] \qquad (2)$$

ここで、σ は輻射定数と呼ばれます。また、輻射が最大となる波長 λ_{max}は、温度Tに反比例し、

$\lambda_{max} = 2.90 \times 10^3 / T$ [μm]　　（3）

となります。温度が高いほど、輻射が最大と成る波長が短くなることが分かります。これはウイーン（Wien）の変位則と呼ばれます。

（図２-１）温度による黒体輻射スペクトルの違い（「天体物理学の基礎」、桜井）

星のスペクトルに見られる連続光成分は黒体輻射によるものと考えられていますが、その総輻射量を測るには星までの距離を知っている必要があります（観測から分かるのは地球から見た時の見掛けの明るさですから）。一方、スペクトルが最大となる波長はスペクトルの相対強度（見かけの明るさ）からも分かりますので、この方法で星の温度を求めることができます。

星のスペクトルは黒体輻射に似ているか？（補足説明）

星のスペクトルにはいろいろな原子や分子による吸収線が重なっていて、連続光成分の最大となる波長を見つけにくいものがあったり、またピークが観測したスペクトルの波長範囲よりも短いところにあるなど、なかなかうまくゆきません。また、原子や分子などによる吸収は、波長に対して連続的になっているものもあり、実際の星のスペクトルは黒体輻射からずれているのです。

（図２-２）A1V 型の星のスペクトル

特に紫外線の領域で、様々な吸収によって大きく黒体輻射スペクトルから外れている様子がわかります。

参考文献

（１）「天体物理学の基礎」、桜井邦朋（地人書館）

（２）「星間物理学」、小暮智一著（ごとう書房）

スペクトルから組成を調べる

原子のスペクトル ― 輝線と吸収線

プリズムや回折格子などを使って光を色に分け、色の順に並べたものをスペクトルと呼びます。また光を色に分けることを「分光」といいます。スペクトルは光源の種類や状態によっていろいろ変化します。

たとえば水素やナトリウムなどの気体が一種または複数種入っている光源を直視分光器で見ると、とびとびの位置（いくつかの特定の波長）に明るい線が現れます。この明るい線を「輝線」とよびます。次に白熱電球などの白色光の光源を見ると、連続的に変化する色の帯が見えます。これを「連続線」とよびます。白色光源の手前に前記の気体が入っている管を置くと、条件によってはとびとびの位置に暗い線が現れます。この暗い線を「吸収線」とよびます。輝線と吸収線は同じ位置に現れます。言い換えると、物質の種類によって決まるいくつかの特定の波長に輝線か吸収線が見られます（図３-1)。輝線と吸収線を総称して線スペクトルと呼び、これに対して連続線を「連続スペクトル」と呼びます。

ところでこのような輝線や吸収線はなぜ生じるのでしょうか。波長のならびに何か規則性があるのでしょうか。ここでは水素を例に考えてみましょう。[1]

（図 3-1）　白熱電球の連続スペクトルとナトリウムの線スペクトル

「宇宙スペクトル博物館」（粟野他より）

[1]　水素は宇宙で最も簡単な構造をもつ原子で、陽子１個から成る原子核とその周りを”回る”電子１個からできています。少し詳しい人は、陽子１個と中性子１個から成る原子核を持つ水素（重水素）や、陽子１個と中性子２個から成る原子核を持つ水素（三重水素）があることを知っているでしょうけれども、ここでは最も簡単な構造を持ち、水素の大半を占める原子１個、電子１個のもの（軽水素）だけを考えます。

水素気体を詰めた管の中で放電してこれを分光してみると、可視光では 656.3nm を最も長い波長として一連の輝線がとびとびに見られます（図３-2)。これをよく調べてみたところ、ある規則性をもって輝線が現れていることがわかりました。

（図 3-2） 水素の線スペクトル

「宇宙スペクトル博物館」（粟野他より）

量子力学によると、電子は特定のエネルギーを持つことができる軌道にのみ入ることができ、勝手な軌道をとることができません。水素原子の輝線の波長についてこれを式で書き表すと次のようになります。

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2}\right) \quad [\mathrm{cm}^{-1}]$$

ここで、Rはリュードベリ定数（$1.09737\times10^{7}\mathrm{m}^{-1}$）、n, n'は整数（n < n'）です。n=1 が紫外部、n=2 が可視部、n=3 が赤外部の一連の輝線を表し、それぞれ発見者にちなんで、ライマン系列、バルマー系列、パッシェン系列と呼ばれています。この式は現在では理論的に導かれますが、もともとは経験的に求められたもので、この式の解釈をめぐって水素原子模型が提出され、量子力学の誕生に大きな役割を果たしました。

（図 3-3）水素原子模型

図中の数字は、該当する遷移によって生じる
輝線の波長を示したものです（単位はÅ）。

ここまでは輝線のお話でしたが、吸収線はどのようにして生じるのでしょうか？　エネルギーの高い軌道から低い軌道へ移るときに余ったエネルギーが光として放出され輝線となるのでした。そう、吸収線はその逆です。原子が適当なエネルギーをもった光を受けるとそれを吸収し、電子がより高い軌道に移るのです。このとき吸収された光が吸収線として観測されます。実際に見られるのは、背景の光源の前に低いエネルギー（より低温）の原子がある場合です。

水素原子以外の原子は原子核の電荷や電子の数が増え、原子核と電子との相互作用が複雑になりますが、原理的には水素原子の場合と同じく電子がとびとびのエネルギーをもつことしか許されないと考えることができます。つまり電子がエネルギーの高い軌道から低い軌道へ移ったときに軌道エネルギーの差が光として放出されて輝線が現れ、逆の場合は

吸収線が現れると考えることができます。このエネルギーの差は原子によって決まっているいわば「光の指紋」とも呼べるもので、輝線や吸収線を調べればその場に行かなくても物質についての物理的情報を得ることができるということになります。

原子が結合してできた分子についても同様のことがいえます。

参考文献

参考文献

（１）　マルチメディア天文教育用ソフト『宇宙スペクトル博物館－虹からクェーサーまで－』（体験版 URL: http://galaxy.cc.osaka-kyoiku.ac.jp/cd-rom/top.htm）

（２）　物理科学のコンセプト『４　電気・磁気と光』小出昭一郎監訳（共立出版）

（３）　物理入門コース『５　量子力学Ⅱ』長岡洋介著（岩波書店）

スペクトルから運動を調べる

ドップラー効果

人間がドップラー効果と呼ばれる現象を体験できるようになったのは、蒸気機関車が走り始めた頃のことです。汽笛を鳴らしながら汽車が目の前を通過するとき音の高さが下がることに気がついた人は、はじめどのように思ったことでしょう。現代では、救急車や消防車などサイレンを鳴らしながら目の前を通り過ぎる車両を見ていれば、この効果を簡単に体験することができます。

私たちがこのような音のドップラー効果を体験できるようになったのは、音が空気中を伝わる速さ（およそ 340 m/sec）に比べて、音を出すもの（音源）の移動する早さ（速い救急車でおおむね 20 m/sec）が無視できないくらい大きくなったためです。

音源から出た音は波（音波）として空気中を伝わります。音の高さは音波の波長で決まります。音波は、音源の運動とは関係なしに、空気の密度と温度で決まる速度で伝わっていきます。ドップラー効果を考えるときに大切なのは、音源の運動とは独立に音波が伝わるというこの事実です。

図 4-1 を見てください。

（図 4-1）　ドップラー効果の説明

音源から出た音波は、音波が出た瞬間の音源の位置を中心に四方八方に伝わります。いま音源の進行方向の前方に注目すると、音源はそこから出た音波を追いかけながら次々に音波を発する形になっています。結果として、前方に伝わる音波の波長が短くなります。このとき、音源の前方に静止した観測者が音を聞くと、本来よりも高い音に聞こえます。音源の後方では逆のことが起こり、静止した観測者には本来より低い音が聞こえます。これが音のドップラー効果です。

ドップラー効果は音源が運動している場合だけでなく、観測者が運動している場合にも生じます。なぜなら、観測者にとっての音の高さは自分の位置を通過する音波の波長で決まるからです。波長の変化は、音源が動いていても自分が動いていても起こります。こうしてみると、ドップラー効果という現象は、音源と観測者の相対運動で決まることがわかります。つまり音源と観測者が互いに近づくときは音波の波長が“縮められ”て音程が上がり、互いに遠ざかるときには波長が“引き伸ばされ”て音程が下がることになります。救急車の運転士はというと、音源に対して静止しているので常に同じ高さのサイレンの音を聞いています。

ところで天体観測でお馴染みの光には、物陰に回りこむ現象（回折）や互いに強めあったり弱めあったりする現象（干渉）が見られます。これらは水面の波と同じ性質をもつことを表していて「光は波である」と表現されます。波であるからには、光にもドップラー効果が見られます。音の場合は音程の変化として観測されましたが、光の場合はどのように観測されるのでしょうか？

太陽スペクトル（虹）では、肉眼では紫から赤までの無数の色を見ることができますが、これらの色の違いが波長の違いに相当し、波長が長いほど赤みが増します。したがって光のドップラー効果は、光源と観測者が互いに近づくときには本来より青く見え、互いに遠ざかるときには本来より赤く見えることになります。

さて、音のドップラー効果がはっきりみられるのは、音源の速さが音の速さに比べて無視できないくらい速いときだと言いました。光の場合も同様です。光の速さは 300,000 km/sec ありますから、通常地上で運動している物体については、よほど精密に測定しない限り光のドップラー効果はわかりません。日常生活で音のドップラー効果が感じられるのに光のドップラー効果が体験できないのは、音波と光波の速さが極端に違うためなのです。光のドップラー効果が見られるのは、たいていの場合宇宙で起こる現象に伴ってです。

輝線や吸収線の波長のずれは、私たちに対して（視線方向に）その天体がどれくらいの速さで近づいたり遠ざかったりしているかを示します。輝線や吸収線の幅は、天体表面の物質の運動状態や温度、膨張速度などを示す指標になります。

天体での実例

輝線や吸収線の波長のずれや幅から天体の視線方向の運動や膨張速度などがわかることを実例を通してみてみましょう。

1）輝線のずれ ― クェーサーの後退速度（3C273）

３Ｃ２７３という天体のスペクトルは以下のようなものです。水素原子の出すバルマー系列のうち、Ｈβ とＨγ の光の波長がどれくらいずれているでしょうか？Ｈβ およびＨγ の実験室における波長は、4861 および 4340Åです。

光源が止まっているときに観測される光の波長をλ、天体が相対運動していることにより生じる波長のずれをδλ（波長が伸びるとき正の値をとる）とすると、波長の伸び率として

$$z = \frac{\delta\lambda}{\lambda}$$

という量が定義できます。これが赤方偏移です。私たちから見た天体の後退速度をv（遠ざかるとき正の値），光速度をcとすれば、赤方偏移とこれらの速度の間に次の関係式が成り立ちます。

$$1 + z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v/c}}$$

v << c の場合（v が c に比べてきわめて小さい場合。普通は一桁以上小さいときをいう。）上の式を、

$$z = \frac{v}{c}$$

のように書き直すことができます。

ところで、有名なハッブルの膨張則は近似的に次のように書くことができます。

$$v = H r$$

ここで、H はハッブル定数、r は天体までの距離です。スペクトルを調べて赤方偏移がわかると後退速度がわかり、距離がわかっていればハッブル定数が求まります。逆にハッブル定数がわかっていれば、天体までの距離が求まることになります。

2）吸収線の幅 ― 超新星の膨張速度（SN2001bg）

超新星のスペクトルには、様々な元素の幅広い吸収線が見られます。この幅は超新星の膨張速度によるものだとすると、一体、どれくらいの速度なのでしょうか。下図に示した珪素の吸収線（Si II）の幅から、計算してみましょう。この吸収線の波長は、実験室では6250Åとなっています。

3）銀河の後退速度

過去に Ia 型超新星が現れた銀河の後退速度を、銀河のスペクトル中にある輝線や吸収線から測定します。Ia 型の超新星は本来ほぼ一定の明るさであると考えられており、見かけの明るさの違いは、私たちからの距離の違いよるものです。このことから銀河までの距離が分かります。そこで、銀河までの距離と後退速度の関係を調べます。