

# フラウンホーファー線とは

国立天文台副台長 渡部 潤一

太陽の光を虹色に分けると、その色の所々に線状に暗い部分が見いだせる。これを発見者のドイツの物理学者ヨゼフ・フォン・フラウンホーファーの名前をとって、フラウンホーファー線と呼んでいる。本稿では、分光の知識を元にして、このフラウンホーファー線の仕組みを説明し、それが何に用いられているのかを紹介する。

## <虹>

光をガラスや水など適切な媒体を通すと、波長つまり色ごとの屈折率の違いによって、虹色に分かれることは、17世紀のアイザック・ニュートンによって明らかにされた。それまで、光というものは本来が白色とされており、虹の現象は屈折されることで色を帯びるとされていたのである。この常識を根本から覆し、彼は「光学」という著作の中で、白色光こそがあらゆる色の光が混ざったものであり、色彩が異なると屈折率が異なることで、虹ができることを明らかにした。さらに、虹が「七色」であるという概念を持ち込んだのもニュートンである。虹の色は特に分離しているわけではなく、連続的に変化している。それを承知の上で七色としたのは、音楽の基本音（ドレミファソラシド）に見られるように、当時は7というのが神聖な数と考えられていたかららしい。いずれにしろ、当時まで虹の基本色は赤黄緑青紫の5色と考えられていたのを、ニュートンは橙色と藍色を加えた7色とし、それが現在まで伝わっている。

さて、このように光をプリズムなどを通して、虹色に分けることを「光を分ける」という意味で分光と呼ぶ。また、波長毎に分かれた状態、あるいは分かれた光の分布をスペクトルと呼ぶ。スペ

クトルは、もともと英語のスペクトラムに対応させた日本語なのだが、漢字を充てた言葉はない。これを中国語では「光譜」と書くのだが、なかなかよい単語なので、個人的には好きである。

## <連続スペクトル>

太陽の光を分光すると、基本的には紫から赤まで連続的につながった光の帯となる。このようにスペクトルに途切れがなく、つながっている場合を「連続スペクトル」と呼ぶ。連続スペクトルは、熱を持つすべての物体から放射される黒体放射（熱放射）である。連続スペクトルがどのようになるかは、基本的には、その物体の温度だけで決まる。太陽のように6000度ほどだと主に可視光を発する。太陽の可視光のスペクトルは、緑色から黄色あたりまでの光がもっとも強い。ところが、同じ恒星でも温度が低いと波長が長い赤色が、太陽よりも温度が高いと波長が短い青色が強くなる。夜空を眺めて、恒星の色が違うのは、星の表面温度の違いである。高温になると青白く、逆に低温になるほど、黄色からオレンジ色、さらに赤色へと変化する。ちょうどニコロム線がむき出しになった電熱器やオーブントースターを考えてみてほしい。スイッチを入れて、だんだんと温度が上がるにつれ、鈍い赤色からオレンジ色に、さらに温度が高くなると白っぽく輝いていく。星の表面の色も、これと同じである。さまざまな色の恒星のスペクトルを見てみれば、それがわかる（図1）。天文学者は、恒星の光を分光し、その強度などで分類している。これを恒星のスペクトル分類と呼ぶ。高温の星から低温の星まで、O、B、A、F、G、K、Mと分け、それぞれの分類を10段階で細分

している。太陽はG2型である。もっとも高温のO型星になると、その温度は数万度となり、連続スペクトルのピークは可視光領域を外れて、紫外線領域になる。ちなみに人間の体温程度だと、せいぜい波長の長い赤外線を放射する程度となり、可視光はほとんど発しない。

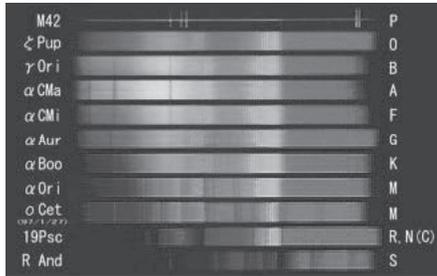


図1 恒星の様々なスペクトル

### <輝線スペクトル>

ところで、天体の中には、分光しても連続スペクトルがほとんど見えないものがある。しかし、その代わりに特定の波長の光だけが強く輝いている。連続スペクトルが帯状になるのに対して、これらは輝く線状になるために、「輝線スペクトル」と呼ばれる。こちらは身近な実験でも観察できる。高校の化学で習う炎色反応が好例である。

炎色反応とは、高温の炎中にいろいろな物質を置くと、その物質毎に炎が特定の色で輝く現象である。この炎色反応が起こっている時に、分光して観察すると、特有の色に対応した輝線スペクトルが観察できる。物質毎の発色の違いは目で見てわかるので、炎色反応は化学実験の中でも印象に残るものの一つに違いない。その応用が花火の色を付けるのに使われると説明されれば、なおさらである。このような炎色反応の仕組みは以下の如くである。

熱に晒された物質は熱を受け取って原子へと分離し、さらに熱によって原子中の電子が励起され、外側のエネルギーの高い準位へと移動する。励起した電子は、そのまま基底状態に戻る。この時に、高い準位からもとの低い準位（基底状態のことが多い）へと戻るときに、その準位間の差に対応するエネルギーを光として放出する。この光が元素に特有の輝線スペクトルとなる。日常

生活でも、この輝線スペクトルはうまく利用されている。その好例が照明器具である。ナトリウムランプは、ナトリウム蒸気を封入した管の中で、アーク放電を起こして、ナトリウム原子で励起を起こし、それが基底状態に戻るときの発光を利用したものである。したがって、炎色反応と同じナトリウム原子特有のオレンジ色の輝線スペクトルが中心となる。家庭でも使われている蛍光灯は、ナトリウムの代わりに水銀を封入し、その中でアーク放電で紫外線を発生させ、水銀にエネルギーを与えている。蛍光灯を分光して観察してみると、蛍光灯のスペクトルには卓越した輝線があり、それが水銀の発する輝線スペクトルであることがわかる（図2）。



図2 蛍光灯と水銀ランプのスペクトル  
(撮影：国立天文台 乗本祐慈, 株式会社裳華房提供)

天体の輝線スペクトルも原理は同じである。特に輝線が目立つのが星雲である。散光星雲や惑星状星雲は、輝線で光っているものが多い。特に散光星雲の場合、照らし出す恒星がO型星だと、星雲のガスに含まれる水素が紫外線を大量に浴びることになり、水素原子が励起し、電子が水素を飛び出してしまふ。つまり水素イオンとなるのだが、この水素原子核に電子が再び結合して、基底状態に向かって準位を落としていくとき、その準位間のエネルギーに対応する波長の光を放つ。こういった仕組みで発光する輝線を再結合線と呼ぶ。その時に可視光では波長656ナノメートルや486ナノメートルの光を放つ。これをH $\alpha$ 線、H $\beta$ 線と呼んでいる。特に前者が、こういった星雲を写真に撮影すると赤い色に写る理由である。この仕組みで光っている星雲を、輝線星雲と細分している。代表的な星雲が、オリオン大星雲（M42）である。この中心には若いO型星があって、そこから紫外線が放射され、まわりの星雲の中の水素が光っている。同じような理由で、星雲には他の元素でも励起された原子による輝線も観察される。酸素

の青色の輝線は、通常の実験では観察できない。というのも、通常はエネルギーを酸素に与えても、他の原子との衝突によって準位を落とすからで、光として放出する確率が極めて少ないのである。しかし、星雲のように空間密度が低い場所では、衝突が起きる確率も極めて少なくなるので、こうした光が輝線として観察される。通常は禁止されているという意味で、酸素が放つ青色の輝線は、禁制線と呼ぶ。なお、同じ酸素でも630ナノメートルの赤い輝線は再結合線で、地球のオーロラでも見られるものである。

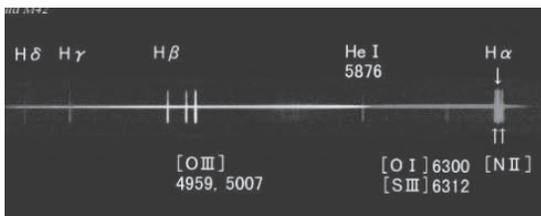


図3 オリオン大星雲のスペクトル

### <フラウンホーファー線>

前述の輝線とは、電子が原子核のまわりでエネルギー準位を落とすことで、自ら発光するものである。したがって、輝線の波長は遷移する準位間のエネルギーにちょうど対応している。では、逆に、落ち着いている原子、つまり準位を落としている電子を持つ原子に、準位間のエネルギーに対応する光がやってきたら、どうなるか。そう、その光を吸収して、電子が準位を上げてしまうのである。これが起こるのは、輝線と同じ波長の光だけであって、他の波長の光がやってきても、何も起こらない。選択的に輝線に対応する波長の光を吸収することになる。これが吸収線（暗線）の原理で、太陽のフラウンホーファー線の仕組みなのである。

太陽の場合、そのスペクトルは基本的に連続スペクトルである。どの波長の光も可視光なら、太陽の光球からまんべんなく放射されている。ところが、よく見ると暗い筋が無数に存在している。フラウンホーファーは、こういった暗線に、長い波長、つまり赤い方から順番に、A, B, C, ..., Kとアルファベットの名前をつけた。現在では、そのうち、D線がナトリウム、H線、K線はカルシ

ウムによる暗線として知られている。当初、フラウンホーファーが命名した暗線の中には、地球大気成分の吸収でできる暗線もあった。いずれにしても、背景に波長を横断するような連続光源があり、観察者である地球との間に、可視光を吸収する原子があれば、その原子特有の波長の暗線ができる。これらの大部分は光球の直上に存在する太陽の大気に含まれる水素や微量のカルシウム、ナトリウム、マグネシウム、鉄などの原子が存在することで、暗線が現れるわけである。

### <フラウンホーファー線から何がわかるのか>

このフラウンホーファー線は、太陽研究の貴重な鍵を握っている。暗線の存在から、こういった原子がどの程度の量存在しているのかがわかる。また、それぞれの暗線の深さを調べると、その原子の温度が分かる。また暗線の波長のずれから、その原子を含む太陽大気の運動がわかる。さらには、暗線の偏光や磁場の影響で波長が微妙にずれるゼーマン効果などを利用すれば、磁場の向きや強さを推定できる。また、複数のフラウンホーファー線を組み合わせると、太陽大気の三次元構造を知ることができる。暗線は光が吸収されてできるがゆえに、その波長で見ると大気の透明度が低く、通常の光球よりも外側の部分を観察することになる。大気の透明度は暗線によって異なるので、複数の暗線を観測することで、太陽の大気の高さ（光球から2000 kmほど）での観察ができるのである（図4）。なお、フラウンホーファー線は、太陽以外の恒星にも見られ、広く恒星天文学でも活用されている。

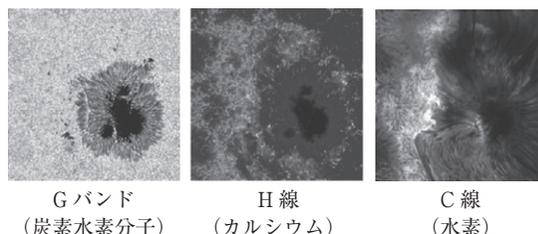


図4 「ひので」可視光望遠鏡による異なるフラウンホーファー線で観測した黒点。Gバンドでは光球と呼ばれる太陽表面が見えるが、H線やC線（水素α線）では彩層と呼ばれる外側の大气層の様子を観察できる。（国立天文台分光アルバムより）

# DVD 地学基礎

DVD 全2巻  
定価(各巻)本体 19,000 円+税

CD-ROM 付  
「内容資料」  
「生徒用ワークシート」収録

## 第1巻 地球 (68分)

私たちが暮らす地球。宇宙から見る地球は穏やかに見えますが、地上では絶えず変化が起こっています。地学基礎第1巻「地球」では、地球のしくみと歴史について学んでいきます。

序章	
1	宇宙の誕生～太陽系の誕生
2	生命の誕生～人類の発展
1章 地球の構成と運動	
3	地球内部の層構造・地殻の構造
4	岩石の分類
5	P波S波で地球内部を知る
6	様々な火山の噴火と現在の山の形態
7	地震と地殻変動
8	地震による被害
9	プレートテクトニクスとプレートの境界
10	東北日本とプレートとの関係
2章 地球の変遷	
11	河川による地形
12	示準化石と示相化石
13	初期生命の誕生 先カンブリア時代
14	多様な生物の出現と脊椎動物の発展 古生代～中生代
15	ほ乳類の繁栄と人類の発展
3章 大気と海洋	
16	大気の層構造
17	雲のできかたとその種類
18	大気の大循環
19	熱帯低気圧
20	日本周辺の気団と季節変化
21	海洋大循環
22	海洋温暖化

## 第2巻 宇宙 (75分)

夜空に輝く無数の星。人は遠い昔から星や月、太陽を深く観察し、私たちの生活に利用してきました。地学基礎第2巻「宇宙」では、宇宙を学習することから始めて地球環境について考えます。

4章 太陽系と宇宙	
1	太陽系の構成
2	惑星以外の太陽系の仲間
3	金星の公転周期と見え方
4	太陽系の形成
5	地球型惑星・木星型惑星
6	地球の誕生
7	太陽の特徴と太陽活動の周期性
8	恒星の特徴
9	太陽の誕生と進化
10	質量によって異なる恒星の最後
11	宇宙の進化と膨張
12	銀河系の構造と様々な銀河
5章 地球の環境	
13	日本列島がつくる自然
14	地震・火山・気象による災害
15	自然のもたらす恩恵
16	エルニーニョ・ラニーニャ
17	地球温暖化
18	オゾン層の破壊
19	地球環境問題
発展	
20	南極観測
21	海底掘削
22	津波の威力
23	緊急地震速報の原理
24	ミューンで浅間山の観測

発行：NHKエンタープライズ

<http://www.nhk-ep.com>

ご注文はお出入りの書店さんへお願いします