

シリーズ

「宇宙と原子」

第二回 原子分子分光学

－「天体物理学」とは「原子分光学」のことだった－

市川行和

yukitikawa@nifty.com

平成 24 年 5 月 7 日原稿受付

宇宙からの情報の大部分を、われわれはさまざまな波長(電波から X 線, ガンマ線まで)の電磁波を受信することで得ている. そこでこれらの電磁波の取得と分析(分光学)が天文学の大きな部分を占めている [1]. そもそも分光学はニュートンが白色の太陽光がさまざまな色の光の重ね合わせであることをプリズムを使って明らかにしたことに始まる. ただ分光学が科学として確立するのは, Fraunhofer による太陽スペクトル中の暗線(フラウンホーファー線)の発見である. 彼は自作の分光器を用いて太陽スペクトルを観測し, 574 本の暗線を見つけ, その波長を確定した(1817 年発表). その中の強度の強いものに, 波長の長い方から順に A から K までの記号をつけた. 有名なナトリウムの D 線はその 4 番目に当たる(図 1).

フラウンホーファー線が何に由来するかを明らかにしたのは Bunsen と Kirchhoff である. 彼らは高温に熱した気体の発する光はそれを構成する物質に固有のものだとし, 「分光分析」の基礎を築いた. たとえば 1860 - 61 年に *Ann. Phys. Chem.* に「スペクトル観測による化学分析」という 2 編の論文を発表し, 多数の分光データを報告している. 彼らによってフラウンホーファー線は太陽大気中の原子による吸収線であることが示された. (正確に言うと, フラウンホーファーの見つけた暗線には地球大気分子による吸収も一部含まれている.) これにより天体を構成する物質は地上のものと同じであり, 同じ法則に従うことがわかったわけである. こうして「天体物理学 (astrophysics)」が始まった. 最初の頃, 天体物理学の研究の多くは分光学であった. 現在もっと

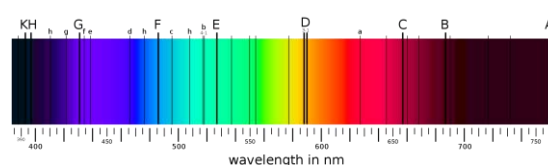


図 1: フラウンホーファー線

も広く読まれている天体物理学の雑誌は *Astrophysical Journal* であるが, 1895 年に創刊されてからしばらくは分光学の雑誌でもあることが明記されていた (図 2).

原子分子は量子力学に従い, その種類ごとに固有のエネルギー状態を持つ. それらの状態間の遷移に伴い特定の波長(振動数)の電磁波を放出あるいは吸収する. すなわち宇宙からやってくる電磁波のスペクトルを見れば, どのような原子がどのようなエネルギー状態にどれだけあるかがわかる. さらに, それらの電磁波の励起の機構の解明から, 周囲の環境(温度や密度, 電場や磁場の存在など)に関する情報が得られる. 光を放出・吸収する原子や分子が動いていると, ドップラー効果により観測される波長が変化する. このことから天体の運動に関する情報が得られる. その最たるものが宇宙膨張に起因する赤方偏移であるが, これについては後であらためて紹介する.

現在では宇宙から来るあらゆる波長の電磁波(電波 赤外 可視 紫外 X 線)について観測が行われている. このうち, 波長の短いもの(紫外や X 線), および赤外線も多くは地球大気による吸収があるので, 大気圏外に出て観測する必要がある. すなわち, ロケットや人工衛星に観測装置を積んで観測する. このような飛翔体を使

う研究を宇宙科学と呼び、第二次大戦後に盛んになった。分光学と宇宙科学が結びついて今まで見えなかったものが見えるようになったのである。

いま波長 λ の電磁波を放出している原子分子を含む気体の温度を T とする。気体原子分子間の衝突で励起(熱励起)が行われているとすると、おおざっぱに言って

$$\lambda \propto 1/T \quad (1)$$

の関係が成り立つ。すなわち、低温の気体からは波長の長い電磁波(電波や赤外線)が、高温の気体からは波長の短いもの(紫外線や X 線)が放出される。したがって調べたい天体に合わせて観測手法を変える必要がある。ただ実際には観測手法毎に研究分野のグループ分けがなされており(電波天文学, 赤外線天文学, など)それぞれで話す言葉が違っていたりするので注意が必要である。

宇宙における電磁波の放出過程は地上におけるそれと本質的には同じである。ただ環境が異なるために地上では起こらないことが起こることがある。宇宙の特徴の一つは、大部分の領域においてその粒子密度が低いことである。銀河系では平均して 1 cm^{-3} (ほとんどが水素原子)であり、星間雲などやや濃いところでも 10^4 cm^{-3} 程度である。粒子密度が低いことで顕著となるのは禁制線の出現である。電磁波の放出・吸収を伴う原子分子の状態間遷移には選択則がある。電気双極子許容遷移以外はその確率が小さく、一般に禁制遷移と呼ばれている。ただ禁制といっても厳密に禁止されているわけではなく、非常に小さな確率ではあるが遷移が可能なのがふつうである。しかし、実験室では周囲の粒子や容器の壁との衝突による脱励起があり、放射の確率があまりにも小さいものは観測にかからない。ところが宇宙では粒子密度が小さく壁もないので禁制遷移に伴う電磁波の放出を観測することができる。

天体の一種に惑星状星雲と呼ばれるものがある。これは高温の星の周りにあるガスの塊で、中心の星の光で電離していて、やや濃く暖かい(密度は 10^4 cm^{-3} , 温度は 10^4 K 程度)。そこからの輝線は 19 世紀後半以来観測されているが、そ

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME LXVII

JANUARY 1928

NUMBER 1

THE ORIGIN OF THE NEBULAR LINES AND THE STRUCTURE OF THE PLANETARY NEBULAE

By I. S. BOWEN

ABSTRACT

Identification of nebular lines.—Eight of the strongest nebular lines are classified as due to electron jumps from metastable states in N^+ , O^+ and O^{++} . Several of the weaker lines are identified with recently discovered lines in the spectrum of highly ionized oxygen and nitrogen.

Behavior of lines in nebulae.—The lines thus identified are shown to behave in various nebulae in a way consistent with the foregoing classifications. A similar study of the few lines yet unknown makes it possible to estimate the stage of ionization from which they arise.

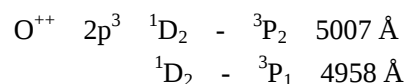
Structure of the planetary nebulae.—On the basis of the foregoing identifications, the relative sizes and intensities of the monochromatic images of the planetary nebulae are explained by an extension and modification of the ideas developed by Zanstra for hydrogen in the diffuse nebulae.

図 2: Bowen の論文 [2] の第一頁。雑誌のタイトルのところに Spectroscopy という言葉が入っている。(文献[2]より, アメリカ天文学会の許可を得て転載。)

の起源の多くが不明だった。たとえば, 1918 年に

W. H. Wright は多くの惑星状星雲を観測してそこからの輝線のリストを作った。しかし, その大半は同定できなかった。そこでこれらの輝線は新しい元素ネブリウムの出す光だとされた。しかし, 同定できない輝線は多数あり, それらがすべて同じ未知の元素(ネブリウム)から出ているとするのは無理があった。やがて 1928 年 Bowen [2] はそれらの輝線が軽い原子の低価数のイオンによる禁制線であることをつきとめた。そしてそれが観測にかかるのは周囲の密度が低いので衝突による脱励起の確率が小さいためだとした。

一つの例を挙げよう。惑星状星雲からの輝線で比較的強度の大きいのは



である。これらは禁制遷移であり, その確率は詳しい計算 [3] によると $2.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ および $6.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ である。一方衝突の頻度 ν は

$$\nu = n\nu Q \quad (2)$$

で評価できる。ここに n は衝突相手の粒子密度, ν はその粒子の速度, Q は衝突断面積である。

衝突相手として、最も多い水素原子を考えると $n = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $v = 1.3 \times 10^6 \text{ cm s}^{-1}$ (温度を 10000 度とする)とし, Q はわからないので 10^{-16} cm^2 (標的イオンのサイズ程度)とすると

$$v = 1.3 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$$

となる. 一方自由電子との衝突を考えると, 断面積は同じ程度としても, 衝突速度が大きいので, vQ は大きい. 電離度は平均すると 100 % より小さいだろうから電子密度は 10^4 より小さい. したがって衝突頻度は水素原子との衝突と同じ程度であろう. 電子衝突の場合には断面積の理論値が存在する. それを使えばもう少し定量的な議論ができるが, 結論は基本的に変わらない. 結局衝突による脱励起の確率は放射確率よりかなり小さいことになる. このことから禁制線が観測可能であることがわかる. 本シリーズでは今後折に触れて分光観測の話が出てくるが, そのいくつかは禁制線が関係している.

分光学を宇宙に応用する際のもう一つの特異性は宇宙膨張に伴う赤方偏移である. 星や星間雲などの天体は多かれ少なかれ動いている. したがって宇宙からやってくる電磁波にはドップラー効果がつきものである. 宇宙膨張の速度は遠くのものほど速い. そこである程度以上遠くにある天体は宇宙膨張の速度がその天体固有の運動を上回り, 放射する電磁波は一様に波長の長い方にずれる. これが赤方偏移である. 図3は最近, Keck 望遠鏡の分光器を用いて観測された遠方銀河 GN-108036 からの水素原子ライマンアルファ線(1216 Å)である [4]. 波長 9980 Å のところにあるピークがそれで, 赤方偏移により波長が 8.2 倍に伸びている. 現在の宇宙論のモデルによると, これは129.1億光年の彼方にあることになる. もちろん, このピークが水素のライマンアルファであると断定するにはさまざまな吟味が要る. 詳細は原論文に譲るが, 一番決め手になるのがピークの非対称性であった. このピークはよく見ると, 波長の長い方に比べて短い方が急激に下がっている. われわれの地球からこの銀河までの間(銀河間空間)にはたくさんの水素原子がある(その密度は小さいが距離がきわめて長い). それらがライマンアルファ線を吸収する. それらの水素は問題の銀河より手前にあるので赤方偏

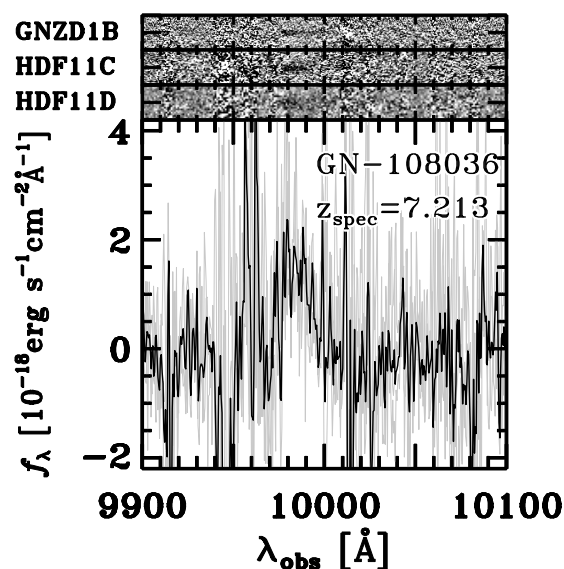


図 3: 遠方銀河 GN-108036 からの水素原子ライマンアルファ線のスペクトル. 赤方偏移により, 波長が 9980 Å のところにずれて観測されている. (文献[4]より、アメリカ天文学会の許可を得て転載.)

移は小さく, 9980 Å より短波長のところで吸収が起こる. すなわちピークの短波長側は銀河間(および当該銀河の周囲にある)水素による吸収で削り取られているのである. このような天体がどの程度遠方まで観測できるかということは宇宙の成り立ちを知る際に重要な情報となる. ここでも原子分光学が大きな寄与をしているのである.

参考文献

- [1] 天体分光学の歴史については簡単なまとめがある. B.R. Masters, Optics and Photonics News **20**, 34 (2009).
- [2] I. S. Bowen, Astrophys. J. **67**, 1 (1928).
- [3] P. J. Storey and C.J. Zeippen, Mon. Not. R. Astron. Soc. **312**, 813 (2000).
- [4] Y. Ono et al., Astrophys. J. **744**, 83 (2012).