

連載

恒星天文学の源流【2】

恒星分光の開幕期 その2

小暮智一（元京都大学）

3. Gustav Kirchhoff (1824-1887)

ハイデルベルグの繁華街ハウプトストラッセに面してハイデルベルグ大学の化学研究所がある。正面の壁には

IN DIESEM HAUSE HAT

KIRCHHOFF

1859 SEINE MIT BUNSEN BEGRUNDET

SPEKTRALANALYSE

AUF SONNE UND GESTIRNE GEWANDT

UND DAMIT DIE CHEMIE DES WELTALES

ERSCHLOSSEN

この建物において、キルヒホッフは、1859年にブンゼンとともに、太陽と恒星界の分光解析の基礎を築き、それによって宇宙の化学を開拓した。

と書かれたタブレットが掲げられている。面白いことにハウプトストラッセを隔てた通りの反対側には Kirchhoff ではなく Bunsen の銅像が首を傾げて人懐こい表情を見せている。

1859年2月、ハイデルベルグから 20 kmほど離れた隣町のマンハイムで火事が発生した。この研究所の実験室にいた Bunsen と Kirchhoff の2人は火事の炎光を分光器に導き、そのスペクトル中にバリウム、ストロンチウムの輝線を見つけた。数日後、二人してネッカー河を望む山道を散策中、Bunsen がふとつぶやいた。「遠い火事の火が分析できるなら、太陽にも同じことが出来ないだろうか」。この一言がきっかけとなって Kirchhoff はさっそく太陽光を分光器に入れてみた。多数の Fraunhofer 線のなかに地上の元素と対応す

るものがあるのかどうか、彼はまず Na の炎光から実験を始めた。そのときの模様を Kirchhoff (1861) は次のように描き出している[24]。

「私はまず、ようやく Fraunhofer 線の見られる程度の、弱い太陽スペクトルを作っておいた。次にナトリウム蒸気によって色づけられた炎光を分光器のスリットの前に置いてみた。すると太陽の D 線と同じ位置に輝線が現われている。ナトリウム線が太陽スペクトルの上で明るく輝いていたのだ。私は太陽スペクトルの強度をどの程度上げることが出来るかを調べるために十分な太陽光をスリットに送り込んで見た。驚いたことに D 線はきわめて明確な吸収線に変わっていた。・・・」

「この現象は次のように仮定すると容易に説明できる：ナトリウム炎は同じ波長で光を放射したり吸収したりする。その炎が他の放射に対して完全に透明であるとき輝線となる。・・・一方、固体または液体による連続光の前にこの炎を置くと輝線と同じ波長で吸収線が形成される。・・・」

こうして Kirchhoff は太陽スペクトルの D 線が Na 元素に対応すること、および、D 線がなぜ吸収線になるかを同時に理解したのである。他の知られた元素についても同じ実験をして見たが結果はどの元素もそれぞれ対応する Fraunhofer 線と一致する。この実験から Kirchhoff は太陽に Na, Fe, Mg, Ca が確実に存在し、Cu, Zn, Ba も少量ではあるが存在すると推定した。また、Fraunhofer 線が暗線である理由も太陽の内部から放射される連続

光を吸収するとして容易に理解できた。この実験の成果はその年の12月15日にベルリン科学アカデミーの会合で報告された[25]。Kirchhoffはさらに同定作業を進めて、1861年には太陽のスペクトルマップを公刊しており、これは翌年、ロンドンからその英訳版が出版されている[26]。

当時は月より遠い天体は地上とは異なった物質で構成されているというアリストテレスの考え方が一般的な時代であった。Kirchhoffの報告は誰も予想していなかった新しい発見を伝えるものであったが、宗教界や思想家から強い反発を受けたという記録は残っていない。因みにこの年の11月にはチャールス・ダーウィンの「種の起源」が公刊され、教会や保守派から激しい批判が集中した。Kirchhoffとは対照的である。

Kirchhoff (1824–1887) はKönigsberg (現カリーニングラード) で生まれた。ケーニッヒスベルグはイマヌエル・カントの生地でもある。父は同市の法律顧問で、両親ともプロ



図4 左から順にKirchhoff、Bunsen、およびRoscoeの肖像[24]。1862年撮影、Roscoeはロンドン在住の化学教授でBunsenの友人、2人には「光化学研究」1892の共著もある。

シヤ帝国への強い愛国心を持っており、Kirchhoffは生涯その強い影響を受けている。ケーニッヒスベルグ大学で数学と物理学を学ぶが、在学中に数学は楕円関数で著名な Carl Gustav Jacobi (1805 – 1851) に師事している。

1847年、同大学を卒業、Clara Richelot と結婚してベルリンに移る。無給講師として学生からの講義料を得て働きながら、この時期の彼はオームの法則を理論的に一般化した電流回路の研究を行い、複雑な回路を流れる電流の計算を行うための規則を発見した。これは電流回路に関するキルヒホッフの法則と呼ばれ、次の2つからなる：

第1法則 回路網内任意の点に流出入する電流の総和は0である。

第2法則 回路網内任意の閉回路について起電力の総和と電圧降下の総和は等しい。

これは多重通信における複雑な回路計算に広く応用され、電気工学の分野では Kirchhoff の名前はむしろこの法則によって良く知られている[27]。

1850年になってようやくブレスラウ大学に招聘され、数学と物理学を担当する。ここで彼は1851–52年のアカデミック (サバティカル?) イヤーを送っていた Robert Bunsen (1811–1899) と知り合いになり、2人は互いに意気投合して生涯の友となる。

1854年、Kirchhoff は Bunsen に招かれてハイデルベルグ大学に移り、Bunsen とともに化学分析法の開発に取り組むことになる。Bunsen はブンゼンバーナーの発明でよく知られている。これは無色高温の炎中に試料を入れ、バーナーの色の変化によって試料の化学組成を推定するという簡明なものである。一方、Kirchhoffはプリズム分光器を製作し、スペクトル線の特徴によって化学分析の精度を高めようとしていた。1860年にBunsenも分光分析の意義を認め、Kirchhoff との共著「スペクトルの観測による化学分析」と題す

る論文を次の書き出しから始めている[28]。

「いくつかの物質は炎に投じると明るい線を生じる性質を持っている。物質の定性分析はこれらのスペクトル線に基づいている。

これによって化学反応の分野は大きく拡大し、これまで到達できなかった問題を解決できるようになった。」

この書き出しに続いて論文はアルカリ金属 (Na, Li, K) およびアルカリ土類金属 (Ca, Sr, Ba) についてスペクトル線の特徴を記述し、この分光分析法の有用性を述べている。図 5 はこのときの実験に用いられた分光器を示す。原図には光学系の詳しい説明も付されている。

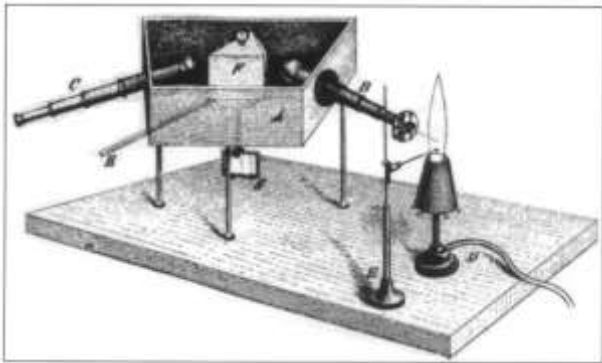


図 5 Kirchhoff と Bunsen の用いたプリズム分光器[28]

Bunsen が Kirchhoff のよき先輩であり、暖かい心情を持った人であることは Bunsen からロンドンに住む友人の Roscoe に宛てた次の手紙 (1859 年 11 月 15 日付) から読み取れる[24]。

「現在のところ、Kirchhoff と私は夜も眠れないくらい忙しい毎日を送っています。Kirchhoff は太陽スペクトル中の暗線とその起源について、すばらしい、まったく予想もしていなかった発見を成し遂げました。彼は太陽の連続スペクトル上の Fraunhofer 線と精確に一致する位置に人工的な輝線を出現させたのです。こうして太陽や恒星の化学組成を、われわれが地上

の化学分析でストロンチウムや塩化物などを決定するのと同じ精度で決定する方法が得られたのです。」

この手紙は Kirchhoff が太陽スペクトルの第一論文を書き上げている時期に書かれたもので Bunsen による Kirchhoff の宇宙化学への評価にもなっている。一方、Bunsen は地上の化学に徹し、未知の元素を探る独自の研究を進めていた。この手紙は Kirchhoff と Bunsen の友情を示すひとこまである。Bunsen は後になって地球化学で新しい分野を開き、ハイデルベルグに留まって晩年を送った。

Kirchhoff は 1859 年の太陽の連続スペクトルと吸収線の解析が動機となって、放射の問題に取り組み、翌年には Kirchhoff の法則と呼ばれる次の法則を見出している。

1. 高温の固体または液体は連続スペクトルを示す。
2. 高温の希薄なガスは輝線を示し、異なった元素は異なった輝線を示す。

したがって、輝線の波長を測定することによって元素の種類が特定できる。このとき黒体放射 (black body radiation) という概念が Kirchhoff によって導入された[29]。この法則は彼らの分光分析法の原理であり、また、量子論の発展につながる重要な一歩であった。

Kirchhoff はその後もハイデルベルグ大学において分光分析の研究に携わっていたが、1869年に最初の妻クララを失ってから環境が変わってくる。残された子供 4 人の養育に加えて、彼自身も次第に身体不自由になり松葉杖と車椅子の生活に入るようになった。それでもハイデルベルグの生活を楽しんでいたので、彼は 3 年後に Luise Blömmel と結婚し、他の大学からの招聘も断っていた。しかし、次第に実験生活に限界を覚えるようになり、理論的研究に専念するために 1875 年にベルリン大学の招聘を受けてベルリンに移り、数

理物理学を担当する。彼は自分の講義録を丹念にまとめて「数理物理学講義」(Verlesungen über mathematische Physik) 4巻の執筆に取り掛かる。この書は1876年から1894年にかけて順次刊行され、長年にわたりドイツの大学における標準的な教科書となった。彼は優れた研究者であると共に優れた教育者でもあったと評価されている。しかし、その間に彼の健康も次第に悪化し、出版の完結を待たずに1887年に世を去った。享年63歳であった。

4. William Huggins (1824-1910)

4.1 出生からタルスヒル天文台の建設まで

1851年5月、ロンドンのハイドパーク公園では第1回万国博覧会が開かれた。産業革命の成果を誇る工業製品から工芸品、美術品まで多彩な展示に人々は興奮して群がっていた。特に巨大な温室を思わせるクリスタル館には世界の科学技術の粋が集まっている。20歳代後半を迎えた William Huggins も観衆の一人として何度もこの館を訪れ、顕微鏡や望遠鏡の展示を丹念に見てまわっていた。彼はすでに小型望遠鏡を使って惑星面の観測などを趣味としていたが、性能の高い次の望遠鏡を物色していたのである。

Huggins は1824年ロンドン シティの裕福な絹織物問屋にひとりっ子として生まれた。当時の富裕層の習慣に従って幼少時は家庭教育を受けたが、その頃から科学装置の工作などに興味を持っていた。1838年(14歳)に休暇で母とパリに出かけた折に、前年に発売されたばかりというダゲールカメラセットを買ってもらった。カメラの木箱セットは8センチのカメラレンズと背面にガラスの焦点面のついた重さ50kgという大きなものであった。また、湿式乾板の感度が低いため野外の明るいところでも10分あまりの露出を要したといわれている。それ以後、カメラの改良にも

関心を持ち、写真撮影は一つの趣味となって後年の観測にも生かされている。

Huggins は家業を手伝いながら1842年(18歳)のときに初めて望遠鏡を手に入れ、彼の天体観測が始まる。この時期にいくつかの天文事象が世間を賑わせていた。

1843年：“Great comet of 1843” の出現。このコメットは日中でも見え、天空で40度以上の長い尾をもっていた。

1845年：アイルランドで William Parsons (Lord Rosse ロス卿) が口径180cmの反射望遠鏡を2月に完成させ、4月に渦状星雲を発見したというニュース。

1846年：9月28日、ベルリンで Galle が海王星を発見し、10月10日にはリバプール近郷に住む酒造家の William Lassell によってその衛星が発見されたというニュース。

ロンドンでは人々の惑星や彗星への関心も高まっていた。こうしたなか、Huggins は家業に励みながらアマチュア天文家へと育っていく。惑星面の細部を見るために彼はさらに大きい口径の望遠鏡を必要としていた。ロンドン万博で検討を重ねたあと、1853年に John Dolland 製の5インチ(12cm)屈折鏡を購入した。その頃にはすでにかんりの観測の実績があったので、翌年には王立天文協会へ入会が認められている。

その頃、父が病に倒れたが、Huggins は家業を継がず、ロンドン南部のアップー タルスヒルの丘の広い敷地に家を建て、父母と共に移り住んだ。やがて父は死去したが地代収入などで生活には事欠かなかったもので、それ以後、彼は天文の道に専念するようになる。空の美しさに魅了された Huggins は1856年に敷地内に天文台を建設し、タルスヒル天文台と呼んだ。天文台の設備は5インチ(12cm)屈折鏡と3.25インチ(8.25cm)子午儀で、ドームは内径3.6m、床の高さ5mをもち、周囲の森を越えて十分な視界を持っていた[30]。

2年後の1858年に8インチ(20 cm)屈折鏡を購入し、翌年から始まる分光観測はこの望遠鏡で行っている。天文台の跡地は地下鉄終点のブリックストン駅からバスで南下し、アップータルスヒル通りの緩やかな坂を登るとその90番地にある。いまは中層住宅の並ぶ住宅街で当時の面影はない[31]。



図6 タルスヒル天文台の外観[32]



図7 William Hugginsの肖像[33]

4.2 恒星と星雲の分光観測

1862年1月、ロンドンで開かれた薬学会の

会合に出席した Huggins は、近隣に住む友人の William Allen Miller から分光学に関する講義を聴いた。Miller はロンドンのキングス・カレッジの化学教授である。彼は講義の中で Kirchhoff の新しい分光法について触れたが、それを聞いて Huggins の頭の中に一つのブレークスルーが走った。このときの感激を彼は後年次のように振り返っている[34] (抄訳) :

「私は通常のルーチン的な天文観測に次第に満足できなくなっていた。天体の研究についてなにか新しい方向か、新しい方法の可能性があるのではないかと漠然と考えるようになっていた。丁度このとき、Fraunhofer 線から太陽の本性と化学組成が得られるという Kirchhoff の偉大な発見のニュースが入ってきた。この報せは砂漠の中の水のように私の心に浸み込んだ。これこそ私のこれまで探してきた道なのだ。Kirchhoff が太陽について行った新しい方法を他の天体に広げる考えが直ちに思い浮かんだのである。」

Huggins はこの会合の後、Miller を誘って タルスヒルに戻り、Kirchhoff の化学分析法と太陽スペクトルの分析について詳しく検討した。このとき、Huggins は分光器を製作して星の分光分析に応用しようと提案した。Miller にとってはまったく新しい分野なのでしばらくためらっていたが、やがて同意し、2人で分光器の製作に取り掛かった。最初の分光器は2個の60度角のフリントガラス製プリズムを組み合わせたもので、スペクトルの幅付けはシリンダーレンズを用いた。眼視鏡は回転台に置かれ、スペクトル線の位置はマイクロメータで精密に読み取られた。このときの分光器の光学系を図8に示そう。

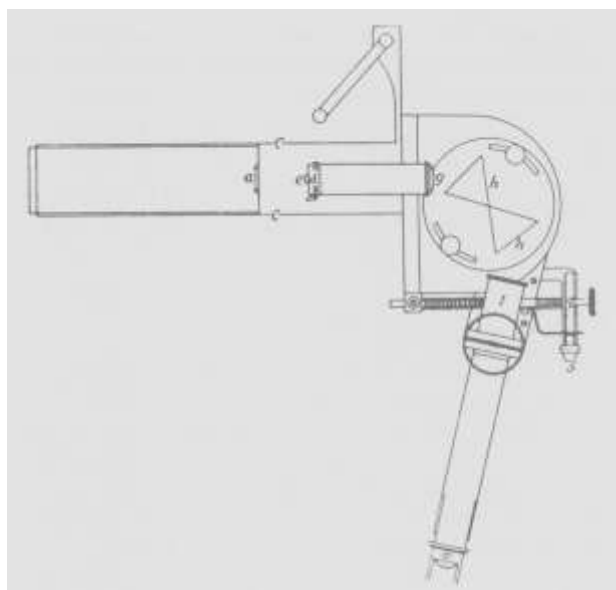


図 8 Huggins & Miller による最初の分光器の光学系 [35] [36]

8 インチ屈折鏡にこの分光器を取り付け二人は星の分光観測を始めた。その第 1 報は 1863 年 2 月 19 日受理で Proc. R. S. London 誌に掲載され、次の文章から始まっている [37]。

「最近の太陽スペクトルの詳細な検討、特に Kirchhoff による Fraunhofer 暗線と人工炎中の明るい線との一致に関する注目すべき観測はスペクトル研究に新しい興味を惹き起こした。・・・われわれの研究はまだ充分ではないが王立協会もこの速報を無意味とは考えないであろう。」

この速報はシリウス、ベテルギウス、アルデバランの 3 星のスペクトルが太陽スペクトルと比較してスケッチされており、まだ、分光解析までは進んでいない。また、この速報の最後に「L. M. Rutherford 氏による月、木星、火星およびいくつかの恒星スペクトルの論文が American Journal of Science, 1 月号に掲載されている。観測法はこの速報でわれわれの用いた方法に良く似ている。」と述べて Rutherford の先行性を認めている。

1863 年後半は二人がさらに分光器の改良を

重ね、プリズムを 6 個に増やし、また、N, O ほか 25 元素のスパークスペクトルを比較に取り入れるなど、本来の目的である星の化学組成の測定に向かっていた。その成果は 1864 年のシリーズとして公表された次の 3 編の論文である(その一部はすでに 1863 年にアブストラクトとして報告されている)。

(a) 「化学元素のスペクトルについて」[39]

改良した分光器によって測定された実験室における主要な 24 種の元素のスペクトル線を太陽および大気スペクトルと比較して表にまとめている。Huggins らはもちろん Kirchhoff (1861)の太陽スペクトルマップを見ているが、Kirchhoff のマップは元素の数、および波長域の広さが限られており、恒星分光には不十分と考えて、天文台内で新しく実験を行った。なお、当時のスペクトル線の位置は波長ではなく、屈折角のマイクロメータ値によって表示されているので青側の線ほどその値が大きくなっている。スペクトル線表は Fraunhofer 線の 4 つの波長域、a-D (赤), D-E (黄), E-F (緑), F-H (青) に分けられ、スペクトル線の特徴は次の記号によって表されている：

- s** --- sharp, スリットを狭めると線も細くなる
- n** --- nebulous, バンドのような線、スリットを狭めても変わらない
- h** --- hazy, 細かい線には分解できない
- d** --- double, 接近しすぎて分離できない

このとき作成された表の一部を表 1 に抜き出して見た。これは赤色域 (C - D²) における Na, Ca, Sr, Fe のスペクトル線位置の読み取り値を与えた表の一部である。

表 1 化学元素のスペクトル線の位置 [38]

Solar	Air	Na	Ca	Sr	Fe
C 589.5 b (H α)	589.5 h	---	---	595 s	---
	629.5	---	622 s	---	622 s
		---	625 s	---	---
		---	637 s	655 h	641 s
		---	642 s	---	667 s
		807 h, d	---	---	760 h
		818 s	---	807 s	772 s
		821 s	859 s	856 s	795 s
D ¹ 1000 (Na)		1000 s	---	---	---
D ² 1005 (Na)		1005 s	---	---	---

こうした準備の上でいよいよ本格的な分光観測に入る。このような詳細な表の作成は当時の他の人にはないもので、これによってはじめてスペクトル線の精確な同定にせまる分光分析が可能になった。

(b) 「いくつかの恒星のスペクトルについて」 [35]

Huggins らも Rutherford と同じように月、惑星から恒星分光へと進む。星については 50 個ほど観測したと述べているが、そのうち明るい数星について分光解析の記述がある。3 星について例を挙げると：

アルデバラン (α Tau、薄赤色、現 K5III 型) :

「約 70 本のスペクトル線を検出し、その中から Na, Mg, H, Ca, Fe, Bi, Ta, Sb, Hg の線とは一致が見られたが、N, Co, Sn, Pb, Cd, Li, Ba については該当する線が見出されなかった。」

ベテルギウス (α Ori、オレンジがかった色、現 M1 Iab) : 「観測した星の中で最も複

雑なスペクトルを示す。赤側に顕著な吸収線が多く、青側では少ない。16 元素の線と比較したが、そのうち、Na, Mg, Ca, Fe, Bi については存在が認められたが、H, N, Sn, Pb, の線は検出されなかった。」

シリウス (α CMa、明るい白色、現 A1 V) :

「ロンドンからでは地平高度が低いので大気の揺らぎが大きく、弱い線は見えにくい。しかし、1863 年の速報時に比べて分散を上げ、スリットと狭くしたため、3 種、あるいは 4 種の元素が同定できた。はっきりしているのは Na, Mg および H である。Fe の存在の可能性もある。シリウスを含む白色星では水素が「異常に強い」という一般的な特徴を示している。」

この論文の特徴はスペクトル線と元素との関係を明確に示している点にある。また、星の色とスペクトル線の形成について Huggins と Miller は

「連続光を放射する光球はすべての星について同一である。ただし、光球を構成する元素組成は星によって異なる。スペクトル線を形成するのは星の大気であるが、色の違いも大気に起因する」

と述べている。ここではまだ熱放射の概念は生まれていないが、星を光球と大気に分けるアイデアはすでに明白に示されている。

こうして彼らはスペクトルの多様性は恒星がそれぞれ異なった化学成分を持つためであると考えようになった。恒星の本性と形成について論文の末尾で述べている：

「恒星はすべて太陽と同じ自ら輝く天体で、太陽と同じように原始星雲から形成される。星によって化学組成が異なる。ラプラスの星雲説を採用すると宇宙の原始星雲には局所的に組成の異なった星雲があり、それを反映して種々の星が生まれる。」

「恒星には太陽系と同じように惑星系を持つ星があるかも知れない。もし、母星が地球と同じような組成を持つとすれば、その惑星の中には地球と似た星も存在するかもしれない。」

最後の点は大変ユニークで面白い。しかし、宇宙組成は果して不均質なのか。この考えに満足できなかった彼は後述するように、やがて1870年代から主流になる収縮論へと考えを変えていく。

また、この時期の観測について後年 Huggins (1897) は次のように回顧している [34]：

「星や他の天体に対する初期の分光観測は地球上と同じ化学元素が宇宙にあまねく存在することを示したが、この結果はたいへん満足できるものであった。それによって化学が宇宙全体に適用できるものとなったのである。」

(c) 「いくつかの星雲のスペクトルについて」 [39]
Huggins のすぐれた発見の中に惑星状星雲

の観測がある。この論文はその第1報である。

星雲とは遠方の恒星の集団にほかならない、大きな望遠鏡で見れば個々の星に分解できるであろう、というのが William Herschel 以来の一般的な考え方であった。アイルランドのロス卿 (Lord Rosse) の大型反射鏡による観測もそれを支持していた。Huggins も星雲には興味を持っていたが、一般に星雲は表面輝度が低いので分光は難しいのではないかと思っていた。しかし、星雲の中で惑星状星雲は小型で比較的輝度の高いものもあり、また、ロス卿をはじめ、これまでの観測で星に分解された例のない星雲であった。Huggins は Miller と相談して惑星状星雲の分光観測を始めることにした。望遠鏡はまだ8インチの時代であったが、1864年の8月29日、最初の観測目標として望遠鏡をりゅう座の惑星状星雲 (NGC6543) に向けた。最初に分光器をのぞいたときの驚きを彼は次のように述べている：

「最初、スペクトルに何も見えず、分散と直角方向にただ1本の短い線が見えていただけだったので、分光器の調整が悪いのかと思った。もう一度、分光器をのぞいてみたところ、それはどんな天体にもこれまでに見たことのないスペクトルであった。確かに、ただ1本の明るい線だけが見えていたのだ。」

これが輝線スペクトルのはじめて観測されたときの生の声である。このあと、この星雲が3本の輝線スペクトルを示すことを見出し、実験室で見られる元素のスペクトルと類似することから、星雲が星の集団ではなく、高温のガス体であることにすぐに気が付いたと記述している。3本のうち青側の1本はH β 線であるが、赤側の2本は同定が難しく、最初は窒素の線ではないかと考えてみた。しかし、「もし窒素であるなら、他の元素も輝線として見えていなければならないのに、水素以外

は何も見えていない。」として窒素とすることに否定的になっている。これが2回電離の酸素による禁制線と同定されたのは半世紀以上も後になってからであった[40]。

この論文で Huggins と Miller は NGC 6543 のほかにこと座リング星雲(NGC 6720)を含む7個の惑星状星雲を観測し、すべてに3本の輝線を認めている。また、比較のためにヘルクレス座の球状星団とアンドロメダ星雲のスペクトルも観測し、それらが共に輝線を示さず、吸収線スペクトルであることを指摘している。

Huggins はその後も精力的に星雲の観測を進め、1868年頃までに70個ほどの星雲の分光を行い、スペクトルのリストを示して、その3分の1に輝線を認めている[41]。

初期の観測はすべて眼視であったが1882年になって Huggins はオリオン星雲の写真分光観測に挑んだ[42]。当時の乾板は紫外域の感度が高かったため、この観測によって4本の輝線(5005 Å, 4957 Å, H β , H γ)のほか、初めて紫外域に3730 Åを検出した。さらに星雲には微弱ながら連続スペクトルの存在することも発見しているが、これらは写真観測によって始めて可能になった発見であった。

[次回は、William Hugginsの続き「天体分光の発展」から始まります。お楽しみに！]

文 献

- [24] Gingerich, O. 1992, *The Great Copernicus Chase, and Other Adventures in Astronomical History*, Cambridge Univ. Press, Chaper 22, *Unlocking the chemical secrets of the cosmos*, p.171 – 176.
- [25] Kirchhoff, G. 1859, *Monatsherichte Berliner Akademie*, p. 664 (太陽スペクトル)
- [26] Kirchhoff, G. 1861, *Researches on the Solar Spectrum and the Spectra of the Chemical Elements* (English translation, 1862, by H. Roscoe, London), *Archives of the Universe*, edited by M. Bartusiak, 213 – 217.
- [27] 電気史偉人伝
<http://www.ijinten.com/contents/ijin/kirchhoff.htm>
- [28] Kirchhoff, G. & Bunsen, R. 1860, *Annalen der Physik und der Chemie*, Vol. 110, 161 – 169, *Chemical analysis by observation of spectra*.
- [29] O'Connor, J. J. & Robertson, E. F. 2008, *Gustav Robert Kirchhoff (Biography)*,
- [30] Huggins, W. 1856, *MNRAS*, 16, 175, *Description of an observatory erected at Upper Tulse Hill*.
- [31] 小暮智一, 2005, 天文月報 98 卷 257, タルスヒル天文台とハギンス夫妻
- [32] McKenney-Lawlor, Susan M. P. 2003, *Whatever Shines Should Be Observed*, Kluwer Academic Publisher, Chapter 5. Margaret Lindsay Huggins (1848 – 1915), *Pioneering Astrophysicist*. (ハギンス夫人の伝記)
- [33] Belkora, Leila 2003, *Minding the Heavens – The Story of our Discovery of the Milky Way*, Institute of Physics Publishing, Chapter 6. William Huggins:

- Pioneer of the New Astronomy, p. 165 - 205
(ウイリアム・ハギンスの伝記)
- [34] Huggins, W. 1897, The Nineteenth Century Review (1897年6月号)
- [35] Huggins, W. and Miller, W. A. 1864, Philosophical Transaction of the Royal Society of London, **154**, 413 – 435, On the spectra of some of the fixed stars.; Proc. Roy. Soc. London, **13**, 242 – 244 (1863, abstract)
- [36] Hearnshaw, J. B. 1986, The Analysis of Starlight - One Hundred and Fifty Years of Astronomical Spectroscopy, Cambridge Univ. Press, Chapter 4, William Huggins and stellar composition
- [37] Huggins, W. and Miller, W. A. 1863, Proceedings of the Royal Society of London, **12**, 444 - 445, Note on the spectra of some of the fixed stars. (最初の恒星分光論文)
- [38] Huggins, W. and Miller, W. A., 1864, Philosophical Transaction of the Royal Society of London, **154**, 139 – 160, On the spectra of some of the chemical elements
- [39] Huggins, W. and Miller, W. A. 1864, Philosophical Transaction of the Royal Society of London, **154**, 437 – 444, On the spectra of some of the nebulae. (惑星状星雲の輝線スペクトル発見論文); Proceedings of the Royal Society of London, **13**, 491 – 493 (1863, abstract)
- [40] Bowen, I. S. 1928, ApJ, **67**, 1 – 15, The origin of the nebular lines and the structure of the planetary nebulae.
- [41] Huggins, W. 1868, Phil. Trans. R. S. London, **158**, 529 – 564, Further observations on the spectra of some of the stars and nebulae, with an attempt to determine there from whether these bodies are moving towards or from the Earth. (文
献[2], p.402 参照)
- [42] Huggins, W. 1882, The Observatory, **5**, 106 – 107, The photographic spectrum of the Great Nebula of Orion

小暮智一 (元京都大学)