

天体物理学の成立と天体スペクトル観測

— G. KirchhoffとW. Hugginsの観測を中心に—

On the Formation Process of the Astrophysics and the Spectroscopic Observations of the Heavenly Bodies — The Meaning of G. Kirchhoff's Observations and W. Huggins' Observations.

高橋 智子
(Tomoko TAKAHASHI)
井原 聰
(Satoshi IHARA)

1. はじめに

この小論は、「理論と実験」という「古くて新しい」認識論の課題を歴史的に解明するための試論であり、またその基礎的作業の一つでもある。従来個別の学説史つまり理論史では、実験や観測、実験装置、実験の方法、実験の対象のような主として物質的手段の発展過程はその添え物としてついでに語られてきたに過ぎない。だからまず、これまで論じられてこなかった実験の歴史や実験に固有な歴史が、体系的に整理されてはじめて「理論と実験」に関わる認識論的課題の歴史的検討が可能になるものと考えられる。しかし「研究手段」としての実験は、単に観測・計測・実験装置といった物質的手段や実験の行為を切り出してそれだけで論じられるようなものではなく、当時の諸理論との相互作用をはじめ、研究組織・研究環境・研究体制・研究制度などとも関わりをもつものである。だから実験の問題は、認識論の問題だけではなく、従来の学説史・理論史をどのように描くべきなのかという問題であったり、自然科学の社会的・経済的・政治的な関わりの問題ともなっているのである。

最近の科学史研究ではこうした実験や実験装置に注目する研究がないわけではない。たとえば、ケンブリッジの科学史・科学哲学科に「科学と装置」のマスターコース (J. Bennet) が開かれたのをはじめ、科学機器学会が作られたりもしている。しかし、これなどは、実験というよりは科学機器研究が盛んになったといったほうがよく、むしろ博物館学の延長線上のものでしかないといってもよいだろう。また研究組織・研究制度などは学説史とは切り離され、「科学の社会史」、「外的科学史」として論じられ、「理論と実験」の問題や研究活動に不可欠な「研究手段・研究方法」の歴史は、今なを、なおざりにされたままである。

筆者は上述した問題意識のもとで、これまでキュリーの電気補償法実験をはじめ、ヘルツ、ブラウン、パウルセン、マルコニーらの電磁気学的な復元的研究に取り組んできた¹⁾。それはなによりも抽象的な実験論を排し、実証的な歴史研究の手法ともかかわって、従来の学説史に新たな側面を構

築しようとするためであった。以下に述べる実験の再検討も含めて、まだ「理論と実験」との関わりやその社会的諸契機としての実験の位置づけを解明するような段階ではないが、以下のような検討は重要な基礎的作業と考える。

例えば、19世紀～20世紀初頭といえ、物質の階層的構造やエネルギーレベルの違いと実験（実験や観測の装置・方法・対象・ノウハウ）などが複雑にリンクして、実験そのものが、科学的認識の過程の中に体系的に組み込まれていく時代であった。物質の階層的構造とエネルギーレベルの科学的認識の過程は、理論の自己展開としてではなく、それらに固有な「研究手段」としての実験と関連づけて理解される必要がある。誰しも、実験・実験手段・実験装置系の発展過程と理論的認識の発展過程が相互作用の関係にあることは否定しまい。しかし、これまでこの関係を明示的に語ろうとはしてこなかった。上述の基礎的作業は、この相互作用の歴史的メカニズムの実証的整理であり、この作業を通じて「理論と実験」の問題や「研究組織」の問題を解く鍵が得られると考える。

この小論で論じることは、天体スペクトル分析という実験の問題と天体の物理的および化学的性質の認識の関わりであり、きわめて小さな事例で「研究組織」までは論じられないが、上述の問題関心に照らして、Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887)の太陽スペクトル観測とWilliam Huggins (1824-1910)の恒星スペクトル観測を事例として再検討を試みる。

2. 天体スペクトル観測におけるKirchhoffの意義について

1859年にKirchhoffは論文「Fraunhofer線について」²⁾を提出し、炎で熱せられたときにFraunhofer線と一致する輝線スペクトルを出す物質を探すことで、太陽大気の化学分析ができる、と報告した。彼は、太陽スペクトルの暗線と実験室で得られる物質のスペクトルの輝線とを一致させるというこの方法を、「太陽大気の化学分析に最適の方法」³⁾と述べ、これに「理論的根拠」を与えるものとして「同一温度における同一波長の放射線にたいして、放射能と吸収能の比はあらゆる物体において同一である」⁴⁾とする、いわゆるKirchhoffの法則を提出した。

Kirchhoffによる太陽スペクトルの研究は、Bunsenとの共同研究と同時進行的に行われたものであった。その第1報となったBunsenとの共著「スペクトル観測による化学分析」は、熱放射法則(Kirchhoffの法則)を提出した翌年の1860年に、第2報は1861年に提出された。また1862年にはKirchhoffの単著『太陽スペクトルおよび化学元素のスペクトルに関する研究』が出版され、Fraunhofer線の起源元素を書き込んだ太陽のスペクトル図表が発表された。

このようなKirchhoffらの一連のスペクトル研究によって、スペクトル分析の基礎が確立されたとする見解は、これまで多くの論者が一致して認めてきた。しかし、論者たちの議論の内容は必ずしも同じものではない。

1) Kirchhoffの評価をめぐる議論

化学分析の歴史を論じたF.Szabadváryは、「スペクトル分析は、他分野の科学と同様に無から生じたものではなく、BunsenとKirchhoffが依拠した多数の準備的研究が存在した」のだが、「スペクトル分析が利用できる方法に発展したのは、彼らの研究結果のみによっていることは議論の余地のない事実である」と、Kirchhoffのスペクトル研究、とりわけ分光器の発明をもっとも重要なもの

として評価した⁵⁾。また W.McGucken は、Kirchhoff は Fraunhofer 線の起源を完全には説明しなかったが、スペクトルの反転実験に成功したことで、分光化学分析の原理が提出され、スペクトル分析の実験的基礎が確立されたとしている⁶⁾。F.Szabadváry や W.McGucken はともに分光化学分析の装置や原理の創出という点を高く評価したのである。こうした今日の評価もさることながら、Kirchhoff に対する評価は、彼の研究が発表された直後から論争的となった。論争は Kirchhoff の研究のオリジナリティを争うかたちで、当時、イギリスの科学者との間で激しく展開された。ここではこの論争の詳細には立ち入らないが、争点は以下のものであった。イギリスの科学者たちは、太陽スペクトルの D 線とナトリウムの輝線の一致は早くから知られた事実であり、輝線スペクトルが元素に固有で、また吸収線も元素に固有なことはよく知られた事実ではないかと、それに貢献した主としてイギリス側科学者の名を挙げて Kirchhoff の業績のオリジナリティに疑問を投じたものであった⁷⁾。これに対する Kirchhoff の反論は、暗線（吸収線）は物質の物理的状态によるもので、実験的に反転スペクトルを観測し、吸収線を説明したこと、そしてこれにもとづいて太陽にナトリウム以外の鉄やマグネシウム、カルシウムなどの元素を認めたのは私の功績である、というものであった⁸⁾。

こうして見ると、先の Szabadváry や W.McGucken の評価はこの論争をそのまま踏襲したものと見える。例えば Szabadváry の主張はいわば当時のイギリスの化学者の主張そのものであり、一方の McGucken の主張は、Kirchhoff の主張そのままとってよいだろう。つまり Kirchhoff らによるスペクトル分析の基礎の確立を、化学分析の一手法としての分光化学分析法の確立として評価するものであった。だから当時の論者たちはもとより、Szabadváry や W.McGucken からも、太陽の物理的・化学的研究の一貫としての「太陽大気化学分析」の意義についての評価を、失念してしまったのである。その結果、Kirchhoff による Fraunhofer 線成因の解明研究さえ、太陽の問題としてではなく、単なる実験室レベルでの分光分析の延長線上の業績とされてしまったといえる。

この分光化学分析という枠組みからの評価を批判した論者は F.A.J.L.James であった。彼は、Kirchhoff のスペクトル研究は化学分析の一手法としての分光分析の延長線上に位置づけられるものではなく、むしろ当時の光の波動論や電気理論、熱の運動論のような物理学理論の解明の流れの中に位置づけられなければならないとして、Kirchhoff 評価を独自に論じたのであった⁹⁾。James は分光化学分析の側面を評価する論者は Kirchhoff の研究とイギリスの個々のスペクトル研究の「質的違い」に気づいていないからだと批判した¹⁰⁾。James によれば「分光学や天体物理学は 1859 年の Kirchhoff と Bunsen の仕事によって突然に出現したものではないが、またこれまで信じられてきたようなスペクトル研究の結果成立したものでもない。それは 19 世紀の前半期の物理学理論の進歩によって出てきた問題への一つの解答であった。スペクトルがこれらの問題を解くための方法をさまざまな形で提起しその解答を与えたのである。つまり吸収媒質の構造は何か、スパークの本性は何かといったようにである。さらに熱力学が 2 つの方向でスペクトル研究に影響を与えた。それはスペクトルの新しい理論を確立させ、ついには Kirchhoff の輻射法則を導いた。そして新しい太陽理論を提出させるほど科学者の太陽への視点を完全に違った方向に変えさせ、それがスペクトル研究に影響した¹¹⁾」というのである。この James の主張は、分光器という新たな観測手段の登場をメルクマールとして、天体物理学の成立を論じてきた従来の天文学史の通説¹²⁾への批判であり、積極的な意味をもっている。また James のこの主張は Kirchhoff の輻射法則の導出過程を「分光化学分析の

文脈」ではなく、「物理学の文脈」から再検討しなおしたもので、この点でも積極的な意味を評価してよいであろう。しかし、よく考えてみると、この論法は、Kirchhoffの輻射法則を「もともと太陽スペクトル中のFraunhofer線の成因の説明を目指した」ものであり、「分光学から、輻射の熱力学的考察へと展開する形で、ここに熱輻射論独自の問題領域が設定された」¹³⁾と位置づけてきた従来の熱輻射論史の延長線上の議論となっている。また折角の指摘にもかかわらず、天体物理学の成立との関連を深くは論じなかったのである。

このように、Kirchhoffのスペクトル研究を太陽大気の化学分析だからといって短絡的に分光化学分析という枠でのみ論じたり、またスペクトルだからといって分光学の枠の中で論じたり、あるいは輻射法則だからといって「物理学の文脈」の中で、その時々都合によって論じているのはKirchhoffの業績は部分的にしか評価できまい。さりとしてあれもある、これもあるといった具合に関係のありそうなものを並べ立てるだけでは、歴史の本質は見えてこない。それこそ、歴史の相対化につながるだけである。それではKirchhoffの研究にとって、いったい何が本質的なことがらであったのかである。

それはなんといっても、Kirchhoffのスペクトル研究の核心となった彼の実験とその装置そのものを検討してはじめて明らかとなるのである。従来実験装置などは単なる「道具」として、所与のものとして、実験とその装置の歴史が語られてこなかった。以下ではこれまで等閑視されてきたKirchhoffの太陽スペクトル観測装置の成立の経緯とその意義を検討し、本質的な問題を抽出してみよう。

2) スペクトル観測装置誕生の経緯

プリズムによって光が分散されスペクトルを生じるのは、光の屈折率が波長によって異なるからである。このことは、太陽光のスペクトルをはじめて観測したNewtonによって、太陽光は屈折性のことなる複数の色の光が複合したものであるというかたちで認識されていた¹⁴⁾。この太陽スペクトルが連続の色スペクトルではなく、無数の暗線で区切られたものであることを明らかにしたのはFraunhoferであった。1814年にFraunhoferは太陽スペクトル中に576本の暗線を観測し、特にはっきりと観測された8本の暗線にAからHまでの記号をつけて太陽スペクトルの図表を提出した¹⁵⁾。これより前の1802年にWollastonも太陽スペクトル中に暗線を観測しているが、それをプリズムの傷や色を隔てるすき間程度にしか考えていなかった¹⁶⁾。Fraunhoferは暗線がプリズムの傷や色の境界などではなく太陽光のもつ特徴の一つであることを明確にし、この暗線を固定線（fixed line）と名づけたのである¹⁷⁾。太陽スペクトル中に現れる暗線すなわち吸収線をFraunhofer線と呼ぶのはこのためである。

Fraunhofer線の観測は、Newtonが1672年に太陽の色スペクトルを論じたときのように、太陽光を小さな孔から導きプリズムで分散させてスクリーンに映し出すだけで観測するのはきわめて困難といえる。この観測でもっとも重要な点は、太陽光をスペクトル方向に、つまり光の分散と垂直な方向に、スリットを用いて十分細く絞っておくことにある。そうでないとプリズムで分散された単色光が互いに重なり合ってしまう、Fraunhofer線の観測は困難になる。1802年のWollastonの観測は、0.04インチ（約1mm）の間隙をもつ垂直スリットを用いたときに、いわば偶然にスクリーン上で観測されたものであった¹⁸⁾。Fraunhoferはこの垂直スリットの利用に加え、精確な平面に仕

上げられたフリントガラス製のプリズムを選択することなど、スペクトル線を観測する基本的な条件を明らかにした。またNewtonの時代から観測用に使われてきたスクリーンに替えて、望遠鏡でスペクトルを直接観測することで、従来の「少なくとも2倍の鮮明さで観測」¹⁹⁾ できることを示した。これによって、分散されたそれぞれの単色光が、望遠鏡の色消しされた対物レンズで結像されることになり、それまでスクリーン上では重なってしまったスペクトル像が重なりのない像として観測できたのである。しかもこの観測用望遠鏡の利用は、スクリーンとは違い、対物レンズの焦点距離と接眼レンズの倍率を適当に組み合わせることで、観測するスペクトル像の大きさや明るさをある程度まで選択することを可能にした。Fraunhoferが太陽スペクトル中に576本もの暗線を数えることができたのは、この観測用望遠鏡の導入によっていたのである。このように、同じ太陽を対象にしたスペクトル観測とはいえ、その精確なスペクトル像を得るためには、光の分散と垂直な方向に十分絞り込んだスリットを挿入し、望遠鏡で観測するというそれだけのことで、Newtonの観測から数えて150年を要したのであって、そこには観測技術上大きな「ギャップ」²⁰⁾ が存在していたのである。

そもそも、WollastonやFraunhoferによる暗線の観測は、望遠鏡の色収差を完全に取り除くために、さまざまな色光に対するレンズの屈折率や分散能を精確に測定する方法を研究する過程で行われたものであった。彼らによるスペクトルの観測は、もともとガラスの材質による分散能の違いを測定するためのものであったし、屈折率の精確な測定のために、一度分散させて得た単色光を観測に使用するものであった。つまり当時の代表的光学器機であった望遠鏡の改良のために種々の物質の色の分散や屈折率を測定する必要があり、それに太陽スペクトルが使われていたというわけである。この過程で分光学的に精確なスペクトル観測の方法が導き出され、結果として、光源の特徴を示すものとしてのスペクトル線の観測が可能になったのである。

この経緯からしても、太陽以外の光源のスペクトル観測を系統的にはじめて行ったのがFraunhoferであったとしても不思議はない。彼は、Fraunhofer線の報告と同時に、金星やアーク灯、ローソク、アルコールランプの光によって生じるそれぞれのスペクトルの特徴を論じ、金星の光が太陽と同じ位置に暗線をもつことや、食塩で着色された炎光スペクトルが黄色い輝線をもち、その位置は太陽のD線と同じであることなどを報告している²¹⁾。また1824年には回折格子をつくり、T.Youngによって当時提出されたばかりの光の波動論を使い各Fraunhofer線の波長測定を行ってもある²²⁾。そして種々の観測の結果、Fraunhoferは、食塩による着色炎光スペクトルの輝線を用いて各種レンズ材料の屈折率を測定・比較する方法や、またこの輝線と同じ位置にあるD線に対して最小偏角の位置にプリズムを置いたときに観測される太陽スペクトルの長さによってプリズムの分散を測定・比較する方法を確立させた。このことから明らかであるが、Fraunhoferの一連の観測の目的は、先にもふれたように、さまざまなレンズ材料の光学定数を精確に決定する方法の確立にあったといえる。Fraunhoferが光学器機会社を営み、研究の中心を光学器機の改良においていたことを考えればこうした研究目的は当然であったといえよう。今日いうところの研究開発とそこから生まれる新しい研究課題との関係のプロトタイプがここには芽生えている。このことはFraunhofer自身が暗示²³⁾ しているがここでは触れない。

かくして、各種の光源が固有なスペクトルをもつことを明らかにしたFraunhoferの研究は、各種光源のスペクトルの研究が多くの謎を解決する可能性を示し、スペクトル観測に新たな関心と呼び

起こしたのである。特にこの新しい方法が化学の分野に大きな影響を与えずにはいなかった。当時、物質を識別する方法として炎色反応が知られていたが、この着色された炎光をプリズムで分散させて観測しようとする化学者たちが登場する。もっとも炎光スペクトルの観測はすでに1752年にT.Melvilleによって行われているが、1826年にイギリスのW.H.F.Talbotによって試料の中にランプの芯を浸し、乾燥させて火をつける方法が考案され、はじめてさまざまな固体・液体試料の着色炎光スペクトルを系統的に観測できるようになった。また1845年にはイギリスのW.A.Millerによってナトリウムやカリウムなどアルカリ金属やアルカリ土類金属の炎光スペクトルが写真に撮影されるなど、さまざまな金属やその化合物のスペクトル図表が写真や手書きのスケッチによって蓄積された。さらに1856年にはイギリスのW.Swanによってそうした物質のスペクトル反応はきわめて鋭敏で、通常の化学反応では検出できないほど微量な含有量でも観測されることが知られた。しかし気体状態の物質について、気体だけを発光させる方法は1856年にガイスラー管が登場するまでは存在せず、気体を満たした容器に太陽光を透過させ、その透過光のスペクトルを観測する方法がとられていた。この方法ではあったが、イギリスのD.Brewsterにより、早くも1832年に気体の種類によって吸収される太陽光が異なり、透過光のスペクトルはそれぞれ吸収帯 (absorption bands) をもつことが明らかにされていた²¹⁾。さらに1850年代になると、アーク灯や誘導コイルの二次火花によって試料を発光させ、アークスペクトルや火花スペクトルの観測も盛んに行われ、同じ固体試料であっても発光法によってスペクトルに違いがあることが明らかにされた。こうした実験室での化学物質のスペクトル観測では、装置はもちろんのこと試料の発光法が大きな問題であった。また実験室でのスペクトル観測では、スリットの近くに光源が置かれるためにスリットで絞られた光束が広がり、スペクトルが重なりぼやけるという新たな問題を発生させた。これは、平行光線として扱える太陽のスペクトル観測では問題にならなかった点である。しかしこの問題は1847年に化学者のSwanによって、スリットを通過した光束を平行光線にしてプリズムに導くためのコリメータが導入されたこと、またその翌年光学者Simmsによって、スリットをこのコリメータレンズの焦点に置くことでより精確なスペクトル像が得られて解決された²³⁾。

以上にKirchhoff以前のスペクトル観測装置の歴史的状況の概略を述べた。1840年代の終わりまでに、スペクトル観測装置の基本的構成部分としてのスリット、プリズム、コリメータ、結像系装置がすでに出揃っていたことが了解される。もちろん各種の光源ごとに各種の装置が独自に組み立てられ、観測者によっても当然ながらそれぞれ違った装置が使われたのはいうまでもない。だから観測は標準化されたものではないし、システム化されたものでもなかった。とはいえ、精確なスペクトル像を観測するために、スリットの間隙を例えば太陽や石灰灯 (ライムライト) の場合には1mm以下にすることなど、必要以上に大きくしないことが原則とされたり²⁶⁾、個々の光源によってその具体的な観測方法の蓄積があり²⁷⁾、固体・液体・気体の各種物質のスペクトル観測を可能にする発光法や観測方法が工夫されていた。その結果としてさまざまな物質のスペクトルが観測され、スペクトル図表が提出されたり、その鋭敏性が試験されたりしていた。

こうした状況の中で、Kirchhoffのスペクトル研究が発表されたのである。だからイギリスの化学者W.A.Millerが、アルカリ金属やアルカリ土類金属による着色炎光スペクトルが元素に固有であることを明らかにしたのは自分だとして、その優先権を主張したのは当然ともいえる。もっとも、ここで注意されなければならない点は、スペクトルが物質に固有なものであるという認識があったか

らといって、直ちにスペクトル観測から元素を特定する方法が出てくるわけではない点である。実際、その点についてはW.A.Miller自身が、Kirchhoffらによって「さまざまな金属塩によって色づいた炎のスペクトル観測からアルカリやアルカリ土類を分析するための簡単で体系的な方法」²⁸⁾が与えられたとして、Kirchhoffの貢献を全面的に認め、Kirchhoffが発明した分光器をそのための「もっとも完全」²⁹⁾な装置だと、それに高い評価を与えたのである。先の状況を考慮すればKirchhoffにも若干の勇足はあったものの、Millerの優先権の主張に代表されるささいな多くの苦情にかまけて、Kirchhoff自身が彼らと同様な土俵に引きずり込まれ、自分の研究の積極的な意義を見失ったともいえる。この論争の結末は、Kirchhoffをはじめ論争の当事者たちがそれぞれにスペクトル分析の歴史を書いたことで一応の決着がついた。その内容の大筋は1868年のH.A.Roscoeの判断に代表されると考えられるので紹介すると、「KirchhoffとBunsenは分光化学分析の真の方法を発見し、科学的正確さをもってそれを実行し、その上に確かな基礎を築いたにちがいないが、それは人跡未踏の分野であったのではない。すべてを一度にやり遂げるような偉大な発見はないのである。新しい位置に到達するための踏み石は常に存在する。このことを明らかにし、またかつての観測者のためにそれを記録しておくのが正しい」³⁰⁾というものであった。これこそ、先に述べたSzabadváryの主張そのものなのである。

このような過去の決着やSzabadváryの主張はさておき、よしんば分光化学分析の文脈あるいは土俵を認めたとして、ではなぜKirchhoffだけがその方法を発見し、すぐ側まで来ていたはずのMillerらにはそれができなかったのか、その点の説明がつかないのである。論争の騒ぎの中で彼らの土俵に上がりながらもKirchhoffが断固として譲らなかった主張の中にこの問題を解く鍵がある。Kirchhoffはいう。熱放射法則によって太陽大気のスเปクトル分析の方法に理論的根拠を与えたことこそ自分の貢献であり、吸収スペクトルの説明にMillerがそれを無断で引用していることこそ問題だ³¹⁾と。しかし、このKirchhoffの主張そのものは当時の化学者には受け入れられなかったのである。次にKirchhoffの分光器そのものの検討に入ろう。

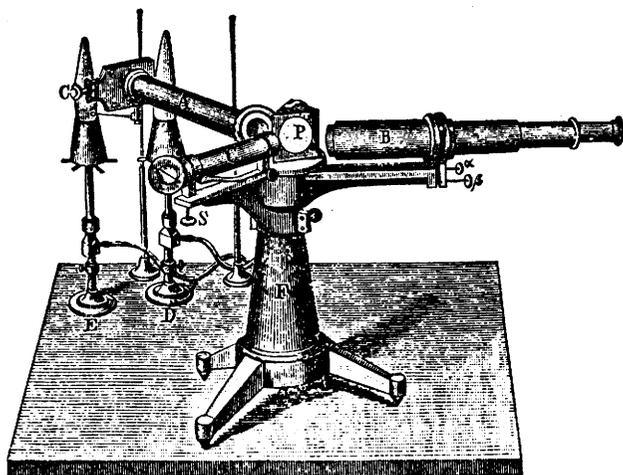


図1 Kirchhoffの分光器(1860年改良型)

3) Kirchhoffの分光器の再評価

図1にMillerが「もっとも完全」な装置と評したKirchhoffの分光器を示した³²⁾。cは幅を調節できるスリット、Pは屈折角(頂角)60度のフリントガラス製プリズム、Bは倍率8倍の望遠鏡である。スリットcからの光は筒Aを通してプリズムで分散され、そのスペクトルは望遠鏡Bで観測された。筒Aのプリズム側にはコリメータレンズがあり、スリットはこのレンズの焦点位置に置かれた。筒Cのプリズム

側の端にもレンズがあり、その焦点の位置にはスケールがおかれた。このスケールはミリメートル・スケールをおよそ15分の1に縮小して写真に撮ったもので、目盛りと数字だけが光を透し、その光はプリズムの表面で反射されて望遠鏡Bで読み取れるようになっていた。したがってスペクトルの観測はこのスケール上で行われ、スペクトル線の位置はこの目盛りによって測定された。しかもスリットcの下半分にはランプEの光が入射するように、その光を全反射する小さな直角プリズムが置かれ、スリットの上半分からはランプDの光がそのまま導かれた。これによって二つの光源のスペクトルが同じ条件で同時に観測でき、しかもスペクトル線の位置を独自の目盛りで測定することができるようになっていた。

Millerが注目したのは、まさにこの二つの光源の同時観測と、独自の目盛りによるスペクトル線の位置測定ができるという点にあった。プリズムによるスペクトルは、光の波長によって屈折率が異なることから偏角すなわち入射光と屈折光のなす角が異なるために生じる。したがってそのスペクトル線の位置は相対的にしか決まらない。屈折率がプリズムの材質によってことなり、しかも波長に従って屈折率が一樣に変化するわけではなく、この変化の仕方もプリズムの材質に依存するからである。たとえば、同じ大きさのプリズムを使って同じ位置で太陽のスペクトルを観測する場合でも、フロントガラスのプリズムではクラウンガラスのプリズムのほぼ2倍の長さのスペクトルが観測され、しかもそれぞれのFraunhofer線の位置関係は相似形にはなっていない³⁹⁾。したがってまったく同じ条件で観測するか、何らかの基準線を設けてスペクトル線の位置を測定しない限り、観測しているスペクトル線が他のスペクトル線と同じものなのか違うものなのかを精確に判断することはできないのである。とはいえ、炎光スペクトルでは光源の温度が比較的低温のため、元素の低励起エネルギー線だけしか発光させることができず、そのスペクトル線は元素によって色が違って見えるほど実際には波長が違い、当然ながら主なFraunhofer線を基準線にして十分区別ができる位置に観測される。したがって、予め化学組成が明らかなアルカリ金属やアルカリ土類金属の化合物を相手にスペクトル線を観測する分には、スペクトル線の位置を精確に決定することなどそもそも問題にならなかったのである。

逆にいえば、炎で熱せられたときにFraunhofer線と一致する輝線スペクトルをもつ物質を探すことで太陽大気の化学分析ができることが知られてはじめて、二つの光源を同時に観測できて、かつ独自の目盛りでスペクトル線の位置測定をする分光器のアイディアが生まれ、分光器が開発されたのである。つまり、通常の化学反応ではその化学組成を知ることができないものを相手に、スペクトル線の精確な一致・不一致の判断が迫られてはじめてスペクトル線の精確な位置の比較が問題になり、同一条件による観測とスペクトル線の位置測定が必要とされたのである。

Kirchhoffがはじめて組み立てた分光器を図2に示した。二つの光源の同時観測を可能にする直角プリズムこそないが、すでにスペクトル線の位置は測定できるものであったことがわかる。光源Dの光はスリットからコリメータBの光軸に沿って入射し、プリズムFで分散される。プリズムを回転させながらスペクトルを観測し、望遠鏡Cの糸線とスペクトル線が一致したときのプリズムの回転角を鏡の反射で読みとりスペクトル線の位置を測定する。

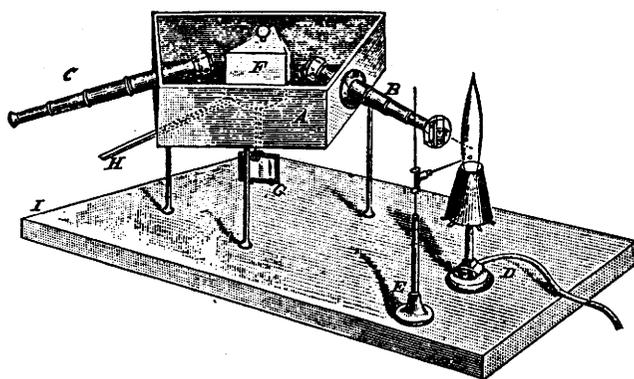


図2 Kirchoffの最初の分光器(1859年)

この分光器は、「種々の金属化合物の灼熱した蒸気から得られるスペクトル中に観測される輝線は、それら金属の存在を確かめるための最も鋭敏で確実な検査法として使うことができる」³⁴⁾として、アルカリ金属およびアルカリ土類金属の炎光スペクトルの観測用に組み立てられた。実際にKirchoffは、この分光器でカリウム、ナトリウム、リチ

ウム、ストロンチウム、カルシウム、バリウムの各スペクトル図表を作製した。本格的なFraunhofer線の分析を行う前に、当然ながらFraunhofer線と一致する輝線スペクトルをもつ物質を探すための観測が行われ、スペクトル線の位置測定が行われたのである。しかし彼は、いたずらに多くのスペクトル線を測定したわけでもなく、むやみに分散を大きくしてスペクトル線の測定を行ったわけでもない。「太陽スペクトルの暗線のうち最も明らかなものだけが現れる」³⁵⁾ようにプリズムの材質(二硫化炭素)、スリットの幅、望遠鏡の倍率(約4倍)を選択することで、明確に元素に固有なものと判断されるスペクトル線の位置だけが測定された。もちろん、Kirchoffは、より分散の大きなプリズムを使えばスペクトル線をさらに細かく分けることもでき、またスリットの間隙を広げて光の強度を増せばたくさんのスペクトル線を観測できることも知っていたが³⁶⁾、設定した条件こそ「スペクトル観測によって化学分析を行うときに最も有利と思われる条件」³⁷⁾だったのである。

実験室でのスペクトル分析に限れば、スペクトル線の位置を測定するよりは二つの光源を同時に観測してスペクトル線の一致を観測するほうが容易である。実際1860年代にそれは「ダブルスペクトル法」あるいは「一致法」として知られた。しかしKirchoffは、最初から二つの光源の同時観測ではなく、スペクトル線の位置測定を行おうとした。すでにFraunhoferが観測していたように、太陽のスペクトルは、AからHの主なFraunhofer線以外に何百というスペクトル線をもつ。そのそれぞれに一致するスペクトル線を決定するためには、それぞれの元素のスペクトル線が主なFraunhofer線からどのくらいの位置にあるのかを知っておく必要があったことはいうまでもない。だからこそ主なFraunhofer線を基準線にしながらも、それぞれのスペクトル線の位置を測定したのである。

もちろん「スペクトル観測によって化学分析を行うときにもっとも有利」な条件が「太陽スペクトルの暗線のうち最も明らかなものだけが現れる」条件であるとすれば、そのままでは太陽大気の化学分析を行うどころか、数百のFraunhofer線を観測することさえ不可能である。Kirchoffは、太陽光のスペクトル分析を本格的に研究する段になると、分散の大きな二硫化炭素を満たした中空プリズムを4個用いた分散能の大きな分光器を組み立てている。それでもスペクトル線の位置測定が行われていれば、少なくともそれぞれのスペクトル部分で比較する元素を選択することは容易であ

ったといえる。

以上により、Kirchhoffの分光器登場の必然性が、彼が強調してやまなかった太陽大気のスペクトル分析という課題の解決の中にあつたことが知られよう。またいわゆる分光化学分析の土俵にいたMillerらと決定的に異なる立場がここにはあつたのである。しかしスペクトル線の測定手段を組み込んだこの分光器登場の意義は、単に太陽大気の化学分析装置の登場に留まるものではなく、まさしく分光化学分析に威力を放つことになった。当該時代の多くの研究者やその後の多くの論者が読み間違い、当の本人すら取り込まれた分光化学分析に計り知れない手段を提供したのだから。

そこでこれらの諸点を改めて整理すれば、①スペクトルの観測ではもっとも重要な光学定数の分散を、装置の性能を表す定数に仕立て上げたことである。プリズムの分散度は個々の装置の幾何学的配置によつても変化してしまう。それまで偶然の組み合わせとして利用されていた基本的構成部品が一つの装置として組み立てられ、その結果幾何学的配置が固定され、観測用望遠鏡の接眼部の位置での線分散度が装置の分散として表せることになったのである。かくしていわゆる標準化・システム化が可能となり、研究者間のデータ比較が可能となつたといえる。②スペクトル線を測定する独自の目盛りの組み込みによつて、AからHのFraunhofer線を基準線にその間の位置を測定する手段を登場させ、太陽スペクトルに現れる数百のスペクトル線をはじめて分析可能な対象とし得たことである。元素に固有なスペクトル線の観測では、スペクトル線の位置はたとえば赤や緑あるいはD線の右や左というように、色と主なFraunhofer線を目盛りを使って決定できた。太陽はいわば誰もが観測できる対象で、しかもFraunhofer線の間隔によつて観測に用いた装置の分散も予想できた。しかし主なFraunhofer線だけを目盛りをしていたのではその間の位置は精確には決定できないため、分散が大きくなるほどスペクトル線の位置は不精確にならざるを得ない。太陽をはじめ火花スペクトルやアークスペクトルのように高励起エネルギーのスペクトル線やイオン化した原子スペクトルを生じる光源に適した高い分散での観測は、この独自の目盛りがなければできなかったのである。だから、独自の目盛りの組み込みではじめてこうした光源のエネルギーレベルに合わせた自在な装置の設計が可能になつたといえる。

以上の経緯から、従来論じられてきたような分光化学分析や熱輻射論のあれこれではなく、太陽大気の解明に向けられたKirchhoffの研究が、その結果として、分光器の開発を促した点が明確になつたと考える。そこで次に太陽大気の関心の問題に移ろう。

4) Kirchhoffによる太陽の物理学的・化学的研究の意味

Kirchhoffの太陽大気の化学分析法は、次のような観測から導かれたものであつた。

まずナトリウムの着色炎光を透過させた太陽光のスペクトルを観測した時、アルコールランプのスペクトル線が、太陽光の強度によつて、暗線にも輝線にもなることが観測されたのである。つまりD線の位置にできるスペクトル線は、太陽光を十分に弱くすれば輝線として、太陽光の強度を大きくしていくと暗線として観測され、しかも暗線は太陽光だけを観測した場合より明瞭だったのである。ついで太陽のかわりにDrummondの石灰灯を使って同様の観測を行っている。Drummond灯のスペクトルは、石灰シリンダーが白熱状態になるまではナトリウムの輝線を示し、白熱状態になると輝線は消えて連続スペクトルになつた。その状態でDrummond灯の前に食塩をいれたアルコールランプを置いてスペクトルを観測すると、D線の位置に暗線が現れたのである。さらにアルコール

ランプの代わりにリチウム塩化物を入れたBunsen灯で同様の観測を行っている。リチウムの着色炎光スペクトルはB線とC線の間位置に明瞭な輝線を示すが、太陽光を透過させると、太陽光の強度を強くするにしたがって輝線は消えてついには暗線に反転し、Bunsen灯を取り去るとこの暗線は完全に消えてしまった³⁸⁾。

以上のことからKirchhoffは、Drummond灯を太陽本体とみなし、太陽光にみためたDrummond灯のスペクトルは、太陽大気にみためたアルコールランプやBunsen灯の炎によって吸収が起こり、それが暗線として観測されると考えたのである。この時、炎が吸収した光は、それが放射する光と同じであったから、Fraunhofer線と一致する炎光スペクトルの輝線があれば、その輝線を放射する物質が太陽大気中に存在するという、太陽大気の化学分析法を提出できたのである。

Kirchhoffの熱輻射法則は、この着色炎光が同じ波長の光を放射・吸収する理由を説明しようとしたものであった。Kirchhoffはこの熱輻射法則を「力学的熱理論の基本法則」から証明しているが、この理論を展開するために彼は、熱線は光線と同じように振る舞うとみなし、さらに温度が一定に保たれた物体は、熱の供給または奪取によってなんらの変化も受けないという性質をもっていると仮定して、2つの物体からなる系では、ひとたび温度が等しくなれば、2つの物体のうちそれぞれは同一温度を保つにちがいがなく、したがって物体が放出によって失うのと同量の熱を吸収によって得る、という考えを提示したのである³⁹⁾。この考えの基礎になったのは、きわめて長い年月にわたって熱線と光線を放射し続けながら、変化しているようには見えない太陽像そのものであった。

優先権論争の中でKirchhoffは、Fraunhofer線の成因は同一温度・同一波長が重要な条件であることを強調した。この条件が、実験室で観測されていた気体による特定の波長の光の吸収や、蛍光・リン光など特定の物質による光の吸収・放射を説明するものでないことはいまでもない。Kirchhoffの熱輻射法則は太陽のスペクトルの吸収線の成因を説明するものであった。しかし、論争に加わった化学者たちは、太陽のスペクトルと実験室で観測されるスペクトルとの区別もできず、ましてや温度条件の著しく異なる先のような特殊な吸収スペクトルと、太陽のスペクトルとの区別もなかった。だから、Kirchhoffの輻射法則を正しく理解することができず、現象的に知られていた実験室での吸収線とKirchhoffの太陽スペクトルの吸収線（暗線）との区別ができず、したがってKirchhoffのオリジナルな仕事を理解できなかったのである。これはイギリスの科学者たちの関心事と太陽の物理学的・化学的性質に強い問題関心をもつKirchhoffとの大きな落差といえる。

さて、このFraunhofer線の成因の説明が、太陽は白熱状態にある固体あるいは液体の中心をもち、その周囲を灼熱したガス状物質が取り囲んでいるという、一つの太陽モデルを想定していた。

ところで、Fraunhofer線の解釈をめぐる天文学者の間では、Kirchhoff以前にも光の干渉説、地球大気吸収説、太陽大気吸収説などが提出されていた。第1の光の干渉説は、観測装置に何らかの不備があって光が干渉し、Fraunhofer線を生じるというものであったが、Fraunhoferの観測によって否定された。第2の地球大気吸収説は、Fraunhofer線のほとんどは大気層の厚さに影響されず、いつも所定の場所に現れることを説明できないという弱点をもっていた。第3の太陽大気吸収説は、1836年5月15日の金環食に行われたForbesの観測によって否定されていた。Forbesは、太陽大気による吸収に原因があるのなら、太陽の縁からくる光は最も厚い太陽大気層を通ることになり、そのスペクトルでは暗線の強度が増すはずだとして、日食のときに月に食されない太陽の光輪部、つまり太陽の縁からの光のスペクトルを観測したのである。しかしそのスペクトルは太陽の中心部か

らの光のスペクトルと変わらないものであった。つまりは天文学者は、Kirchhoffの登場まで暗線が生じる理由を説明する確からしい説を見いだすことはできなかったのである。

太陽モデルについてみれば、W.Herschelが1795年に発表したいわゆる「太陽地球説」以外に見るべきものはなかった。しかし一方では、1836年のF.Bailyによる「ベイリーのビーズ」の観測を契機に、1842年7月8日の皆既日食では太陽のコロナ、プロミネンス、彩層が発見され、1851年には光斑が発見され、1850年代にはこれらの正体をめぐって活発な議論が行われていた。さらにいえば、太陽視差の観測（1835年）、太陽の表面温度の推算（1837年）、黒点の10年周期説の提出（1840年）、黒点の周期と磁気嵐の周期との関連の発見（1852年）、太陽エネルギーに関する収縮による重力エネルギー説の提出と太陽寿命の見積り（1854年）など、太陽に対する物理的関心は急速に拡大されつつあったのである。Kirchhoffは鉄の電極間の火花スペクトルの緑色の部分にFraunhofer線と一致する多数の輝線を観測し、ここから太陽大気中における鉄の存在を証明するものとして、鉄は地球内部および隕石中に存在すること、しかも太陽の大気中に鉄の蒸気があると仮定するのは、太陽に与えられる温度と少しも矛盾するものでないことをあげている⁴⁰⁾。つまりKirchhoffの太陽大気のスペクトル分析の結果は、隕石の化学分析や太陽温度の見積もりなどによっても「証明」される時代になっていたのである。これで先に述べたKirchhoffの太陽モデルが、実は太陽大気分析の要だった事が知れよう。

以上、Kirchhoffのスペクトル研究の核心ともいうべき、実験とその装置の成立と特徴を検討してみた。すでに論じたように、Kirchhoffの研究をさまざまな角度から評価し、意義づける事は容易だが、彼のこの新しい研究の展開にとって本質的な問題はなんであったのかを明らかにするには、実験そのものを解析しなければならないことが了解されたのではないだろうか。この時代のKirchhoffの全活動は、今みてきたような、天文物理学へと新しい画期を迎え始めていた天文学の流れの中心にあったことを確認しておこう。スペクトル観測の応用程度という視点やあれやこれやの視点ではなく、彼の実験とその装置にそくした視点から分析をはじめること、間違いのない、本質的ことからたどりつくことができると考える。

3. W.Hugginsの恒星スペクトル観測と観測装置

Kirchhoffが観測した太陽も恒星の一つには違いない。しかし太陽以外の恒星は点光源としてしか見えず、地上に届く光量はもっとも明るく見える恒星ベガでさえ太陽のおよそ400億分の1にすぎない。したがってスペクトル分析の対象としてみれば、太陽とそれ以外の恒星とではまったく異なる光源であったといえる。Hugginsは、恒星スペクトルの化学分析、スペクトル写真の撮影、その応用としての視線速度の測定、そのいずれの分野でも先駆者の一人として知られている。そのHugginsでさえ、「当時では、天空の物体（天体）の化学的性質や物理的性質はいかなる観測方法をもってしても知り得ないものとして、つまり地球上という、その位置や感覚によって課せられる人間の限界にたいしてまったくその外にあるものと考えられた⁴¹⁾」と書いている。この分野の第一人者となったHugginsにとっても、恒星のスペクトル分析は、太陽のスペクトル分析と決定的な違いを感じるものであり、そこにはいわば「人間の（認識の）限界」を超えるかに思われる大きな壁があったといえる。

そもそも恒星も太陽の一種であることが実証的に示されるのは、Kirchhoffの太陽スペクトル研究の成果はもとよりのこと、それに加えて恒星のスペクトル分析が可能になってからのことであった。しかし、この恒星のスペクトル観測についてはこれまで、Kirchhoffの方法を恒星に「応用した」もの、という程度にしか論じられることがなかった。したがって、以下ではHugginsの天体スペクトル観測装置と観測方法について具体的に検討しその歴史的意義を再考してみる。

1) 恒星スペクトル分光器の組み立て

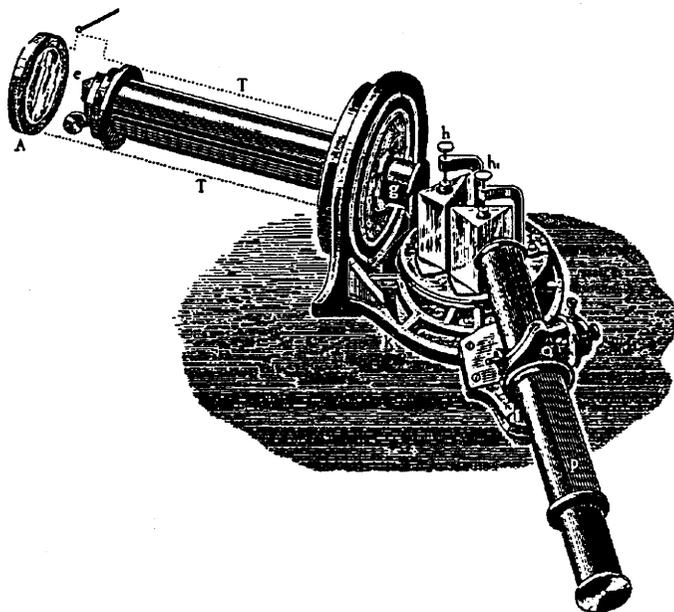
Hugginsは1856年にロンドン郊外のタルス・ヒルに私設天文台を設け、観測のほとんどをここでやった。この天文台は北緯 $51^{\circ} 26' 47''$ 、東経 $0^{\circ} 6' 56''$ 、海拔177フィートの地点にあり、観測用ドームは直径12フィート(約3.2m)の大きさで、北面を除いては何の障害物もなく全天が見渡せた⁴²⁾。しかしここでの恒星の観測は、ロンドンスモッグの影響はないものの、雲や霧が多く大気が不安定で「きわめて不利な地方での仕事」⁴³⁾であった。Hugginsはこの大気が不安定な問題を「実験者のコントロールを超える」⁴⁴⁾問題、したがって装置組み立て以前の「重大」な問題として認識していた。その上で「星の組成成分を調べるという特別な目的」のために「特別に設計されたスペクトル装置」⁴⁵⁾の検討が行われた。

Kirchhoffのところで述べたように、装置に必要な条件は、まず太陽スペクトルのD線を D_1 、 D_2 にまたb線を b_1 、 b_2 、 b_3 に分解できる高い分散能をもつことである。次に星のスペクトルと化学元素のスペクトルを装置の中で同時に比較できるようにし、星のスペクトル線である暗線と化学元素のスペクトル線である輝線との一致・不一致を確実に判定し、その上でそれぞれの位置を測定することである。この条件は太陽大気の化学分析で、Kirchhoffが提案した「一致法」と呼ばれる方法そのものであるが、それでも「試験しようとしている対象の光の距離によって確実さはほとんどなく、そのための装置の改良に2年4ヶ月以上の間いつもより骨の折れる調査に従事し、得られる限りの情報を集め、その膨大な情報を比較するのに多大な時間を費や」⁴⁶⁾すことをHugginsは余儀なくされたのである。そこには、例えば恒星の光は点光源のためそのままプリズムで分散させても細いスペクトルが観測されるだけで、スペクトル線の存在を確認することはできないことや、高い分散といっても恒星の光は弱いためにプリズムの数を増やすには限界があり、その分測定用の目盛りを細かくとる必要があるなど、太陽の場合にはなかった困難が存在したのである。

図3a.b.にHugginsが1862年の末によく完成させた「特別に設計されたスペクトル装置」を示した。Aの円柱レンズは光を一方方向だけに広げる。これで点光源にすぎない星の像が一方方向に拡大され、はじめて恒星スペクトルの観測に必要な幅が得られた。このような円柱レンズの使用はFraunhoferにはじまることはすでに指摘したが、Hugginsはその使用法の決定に各種の円柱レンズを用いた実験を行ったのである。図の円柱レンズは焦点距離約35cm、2.5cm四方の平凸レンズで、その円柱表面の軸方向がスリットDに対し直角になるように、すなわちスリットの間隙方向に星の光が広げられるように、スライド可能な円筒Bに装着された。その位置は対物レンズからの収束光線がちょうどスペクトルの観測に必要な幅になるように決定された。これは「試された中でもっとも適当なアレンジ」⁴⁷⁾であったという。分光学的には焦点距離に置くべきものだが、点光源という恒星の特徴がそれを不可能にしていたのである。

a.

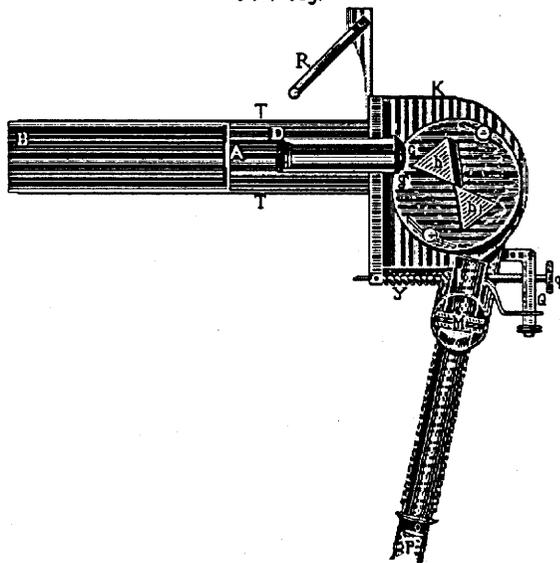
FIG. 164.



Huggins' Stellar Spectroscop. (Perspective View.)

b.

FIG. 105.



Huggins' Stellar Spectroscop. (Horizontal Section.)

図3 W.Huggins の恒星分光器 (1862年)

さて、拡大された星の光はスリットを通してコリメータ g に入射しプリズム h で分散される。使われたプリズムは屈折角 (頂角) 約 60 度の稠密で均質なフリントガラスで、その位置は D 線に対し最小偏向になるように調節され、小望遠鏡 P はその糸線と D 線が一致するように設置された。この小望遠鏡 P の位置を基準に、いいかえれば D 線の位置を基準にスペクトル線の相対的位置が測定された。小望遠鏡 P を移動させながらスペクトルを観測し、それぞれスペクトル線が望遠鏡の糸線と重なったときの移動量を測定する。移動量はマイクロメータ q のネジの回転数から求められた。ネジは 1 インチに 50 のネジ山が切れ、さらにネジの頭に $1/100$ 回転の幅で溝が切られているので、ネジは $1/100$ づつ回転させることができた。この $1/100$ 回転を単位目盛りとして測定は行われたのである。したがって、ネジの頭を一目盛り分回転させると望遠鏡は $1/5000$ インチ、約 $5 \mu m$ 移動する。この目盛りで Fraunhofer の A 線と H 線の間隔を約 1800 に分割できたという。つまり約 9cm の長さの星のスペクトルを得たのである。

今日の値で計算すれば、A線とH線の波長はそれぞれ7593.7Åと3968.49Åであるので、およそ2Åの差を1目盛りとして測定できたことになる。しかも実際には拡大鏡Qを使って1/2目盛りまで読まれた。D線の二重線はそれぞれ5889.97Å, 5895.94Åであり、またb線の三重線はそれぞれ5167.33Å, 5172.70Å, 5183.62Åであるから、この目盛りによって充分区別できたといえる。

一方この星のスペクトルと比較するための元素のスペクトルにはインダクション・コイルの2次回路側電極の火花放電が使われた。この金属火花は鏡Rで円筒Tの孔に導かれ、スリットの上半分前面に置かれた直角プリズムeでスリット方向に反射され、後は星の光と同じようにプリズムで分散され火花スペクトルを得る。この金属の火花スペクトル線と星のスペクトル線との相対的位置を比較しやすく金属の火花スペクトルが恒星のスペクトルの真下にできるように鏡の傾きによって位置を調整することができた。また必要に応じスペクトル線を発生できるようにインダクション・コイルは小望遠鏡を覗いたまま接続・遮断が行えるように配線された。Hugginsが比較用のスペクトルに火花スペクトルを用いたのは、火花スペクトルが炎光スペクトルよりも多くのスペクトル線をもつからであった。これは火花放電によって中性原子だけでなく、イオン化した原子スペクトルも励起されるからであるが、もちろんそうした区別がされるのは20世紀になってからのことである。

以上のことから明らかなように、Hugginsの恒星スペクトル分光器はKirchhoffの単なる「応用」として片づけられる問題ではなかった。そこには、Kirchhoffの分光器開発の過程にも似た事情を、太陽の400億分の1以下のエネルギー・レベルを克服する過程にみることができるのだが、恒星スペクトル分光器への展開という単なる装置の開発ではそのことは不十分なので、以下観測の方法と特徴について論じ、似た事情を検討してみよう。

2) 恒星スペクトルの観測方法とその特徴

Hugginsは、この分光器を口径8インチ（約20cm）、焦点距離10フィート（約3.3m）の色消し対物レンズをもつ屈折望遠鏡の接眼部に取付けて恒星スペクトルを観測した。この対物レンズは1858年に友人の天文学者W.R.Dawesから200£で譲り受けたもので⁴⁸⁾、1855年にアメリカのA.Clarkによって磨かれた、当時としては「もっとも良いものの一つ」⁴⁹⁾であった。しかもHugginsはこのレンズを運転時計によって駆動される赤道儀に取り付けた。この赤道儀の製作と据え付けはヨーク市のT.Cookeによって行われたもので、これによって望遠鏡は「なめらかに移動」⁵⁰⁾したという。Hugginsは1858年にこの望遠鏡を手に入れ、まもなくして「通常のアstronomicalの仕事には満足できなくなった」と書いているように、恒星のスペクトル観測を決意した前提には、当時手にいれたばかりのこの望遠鏡システムの性能のよさがあったといえる。この点がまず太陽スペクトル観測と決定的に異なる条件であった。

以下に実際の観測の手順に従ってその特徴について述べる。

①予備操作 恒星の観測に先だって、塩化ナトリウムをしみ込ませた小さなアルコールランプの炎を天体望遠鏡の対物レンズの前に置き、ナトリウムの炎光スペクトルが得られるようにする。インダクション・コイルでもナトリウムの火花スペクトルを発生させ、両者の輝線の位置が完全に一致するように鏡の角度を調整する。このナトリウムの炎光スペクトルを用いた装置の調整は、測定の精確さを保つために、測定が終わるたびに毎回繰り返された。

②観測 その上でアルコールランプを除き、恒星を視野に入れる。分光器を介しているため、天

体望遠鏡の光軸方向で直接に恒星を観測できるわけではないので、恒星が光軸上に精確にとらえられているかどうかを判断するだけでも相当の経験が必要となる。しかも地球の自転に合わせて恒星を追尾しなければならず、精度の高い運転時計で駆動される赤道儀が不可欠であった。恒星のスペクトル像が観測されたらまず望遠鏡の糸線に一致するスペクトル線があるかどうかを観測する。もしあればそれはD線ということになる。幸いこのD線はほとんどの恒星で観測されるが、Hugginsは予備的な観測でこのことを熟知していたからこそD線をスペクトル線の測定基準としたと考えられる。

③スペクトル線の位置測定 したがって多くの観測でこのD線を基準にスペクトル線を測定することができた。実際の観測では、大気の流れや恒星の運動のためにスペクトル線がちらつき、そう簡単に測定できるものではなかった。Hugginsは、「たくさんのスペクトル線が見えるもっとも晴れた夜でさえ、接近したそのスペクトル線はまったく気まぐれで、測定ができないように見えた」⁵¹⁾と述べている。またこの「観測のたびにスペクトル線の位置や本数が変わって見える」恒星のスペクトルでは、1つの恒星について100回近い観測を繰り返さない限り常に観測されるスペクトル線、つまり明らかに恒星のものと思われるスペクトル線を決定することができなかった、と測定の困難について語っている⁵²⁾。

④スペクトル線の同定 この測定さえ困難な恒星のスペクトル線を、インダクション・コイルの火花スペクトルの線と比較し、その起源元素を決めていくのである。Hugginsは、恒星のスペクトル線が同定しやすいように、前もって地上の24の元素の火花スペクトル図表を用意した。まずこの図表と測定した恒星のスペクトル線の位置を比較し、それがどの元素と一致する線なのか見当をつけておく。その上でもう一度調整からはじめて恒星スペクトルを視野にいれ、今度は恒星スペクトルと見当をつけておいた物質の火花スペクトルとを同時に観測する。この時スペクトル線が一致すれば、その物質が起源元素として記録されるのであった。図4はHugginsが1864年に公表した恒星のスペクトル図表である。実際には50に近い恒星のスペクトルを観測しているが、1864年に報告されたものはこのアルデバラン（牡牛座の α 星）とベテルギウス（オリオン座の α 星）の二つの図表だけであった。

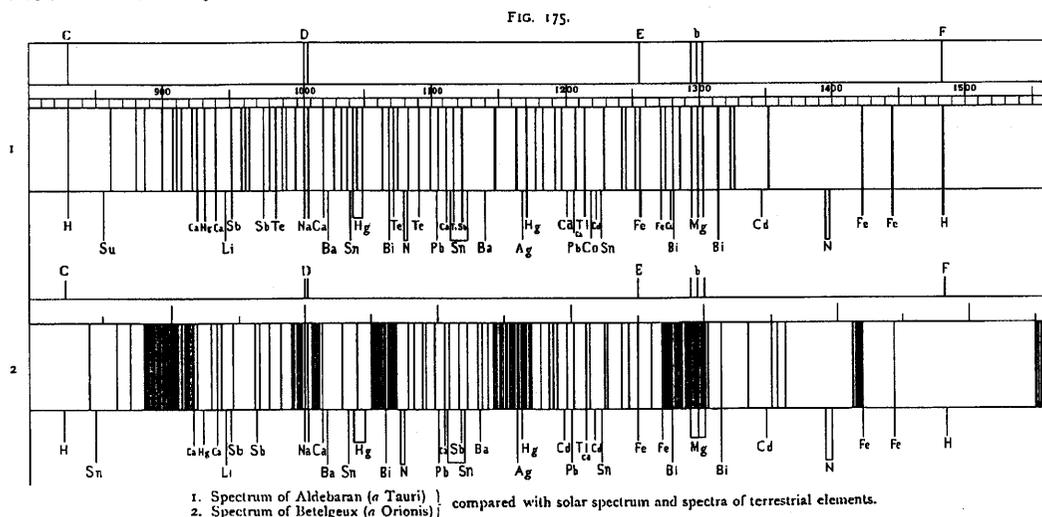


図4 W. Hugginsによる恒星スペクトル図表 (1864年)

こうしてみると、この時代に到達した恒星位置天文学の知見と豊かな観測経験の文脈なくして、Hugginsの成果を理解することができない。W.Herschel以来、恒星も太陽の一種であるという考え方はある程度広まっていた。また精度の高い位置天文学が恒星の力学的運動を支持し、それが物質的実体のあることも知られていた。しかし、このことに疑問を抱いたり、実証は不可能と考える研究者たちも少なくなかった。

Kirchhoffの太陽大気の化学分析を契機に、アメリカのM.RutherfordやローマのA.Secchi、ドイツのVogelらによっても恒星のスペクトル観測が試みられた。しかしHugginsのように24もの元素を対象にスペクトル線を測定した天文学者はいない。SecchiやVogelらは上述した測定の高難さから、恒星のスペクトル・パターンの分類へと転進し、恒星の分類という新しい分野に進んでいった。Rutherfordなどは、スペクトル観測から天体の化学組成を決定するのは「大胆な企て」で、それは当然ながら化学者の領域であるとし、もっと多くの正確なデータが蓄積される必要があるとして、「そんな当てずっぽうをいうことは私の目的ではない」とまで述べて⁵³⁾、元素の同定を放棄してしまった。こういうRutherfordでさえ恒星のスペクトル分析による元素の同定に対しては、「この思いを述べずにはいられない」と前置きして、「私たちは長い間“一つの星は他の星から栄光において区別される”ことを知っていたが、今やそれを構成する物質でも区分できるという強力な証拠をもった」⁵⁴⁾と書いて、新たな天文学の到来を賛美した。恒星が太陽の仲間であるという認識は、今日考えるように当たり前のことではなく、まったく新しい天文学が切り開かれてはじめて得られたものだったのである。当時のこのような状況を考慮に入れるなら、Hugginsによる恒星の元素の同定がもつ意味は新しい天文学への核心ともいえるものであった。先にみたHugginsの執拗ともいえる元素同定の取り組みこそ、新しい装置の開発を可能にし、困難な観測を成功に導いたものなのである。先にKirchhoffと似た事情と述べておいたが、当時の天文学の強烈な問題意識を体現するという意味で、よく似た事情を共通にもっていたといえる。むろんこうした研究の核心を実現し得る物質的基礎ともいべき装置群が、Kirchhoffの時と同様出そろっていることも忘れてはならない。以下その点に触れながら観測の意義について述べよう。

3) Hugginsの恒星スペクトル観測の意義

Hugginsがそれまでの「ルーチン的な性格をもつ通常的天文学的工作」⁵⁵⁾、つまり子午儀を操りながら惑星の子午線通過を観測しスケッチする位置測定の仕事をやめて恒星のスペクトル観測をはじめたのは1859年であった。その主要な動機は、Kirchhoffが太陽スペクトルの観測から太陽大気の化学分析を行ったことにあった。Hugginsは晩年、「もっと新しい方法で天空の物体のさまざまな問題に取り組みたいそんな気持ちで一杯だった。まさにその時に、Fraunhofer線の解明から太陽の化学組成を明らかにしたKirchhoffの偉大な発見の知らせが届いた。この知らせは私にとって、乾いた砂漠の地に春の雨がやってきたようなものだった」⁵⁶⁾と、Kirchhoffの研究の影響の大きかったことを吐露している。Hugginsを「新しい方法で天空の物体のさまざまな問題に取り組みたいそんな気持ち」にさせたのは、すでに指摘したように1858年に手に入れた望遠鏡の存在であった。この時代にイギリスで行われた天文台調査によれば、当時イギリスにあった47の望遠鏡のうち40台は屈折望遠鏡で、赤道儀が32台、経緯儀が8台、このうち運転時計で作動するものは14台であった⁵⁷⁾。Hugginsの望遠鏡は、口径8インチとそれほど大きなものではないが、運転時計という恒星の自動

追尾機構を備えた数少ないものの一つだったのである。この点は先にも強調しておいたが、物質的には重要な基盤の一つであった。

1859年は、「優秀」な観測装置の登場を契機に開始された掃天観測の結果が、32万4000個の恒星を記載した『ボン掃天星表』として結実した年でもあった。おびただしい数の恒星、連星、二重星、星雲、星団が確認され、急速にその対象が広げられていた時代だったのである。しかも連星の運動の周期と軌道の決定（1827年）、恒星視差の測定の実現（1838年）、みかけの等級に関するボグソンの法則の提出（1856年）などによって、「天空の物体」が「太陽系の構成員」と同じニュートンの引力法則に従う物理的系として統一的に理解されようとしていた。Kirchhoffの研究は太陽が地上の物質と同じ物質で構成されていることを明らかにしたものであったが、Hugginsは、その拡張が「太陽系の構成員」と「天空の物体」とを結びつける可能性をもっていただき、誰よりも早く見抜いたのである。この精度の高い位置天文学とそれを支えた観測技術は、今一つの物質的な基盤であった。

フンボルトがその著『コスモス』で「天体とは、私たちの認識にとっては、物質の元素的相違をもたない重力的物質にすぎない」⁵⁸⁾と書き、1835年にA.Comteが「実証哲学講義」の中で「人間は決して天体の組成を知ることはできない」⁵⁹⁾と述べたような「懐疑論」は、恒星のスペクトル分析によって完全に根拠を失う。Hugginsは、この「懐疑論」を最終的に打破する可能性をもっていたところにKirchhoffの「新しい分析方法」の意義を認め、「新天文学」の誕生を位置づけていた⁶⁰⁾。つまり「この新しい分析方法を恒星から地球に届く光に応用する」⁶¹⁾ことで「目に見える宇宙全体の一般的な設計図と構造が明らかにされる」ことを見抜いていたのである。三つ目の物質的な基盤はいうまでもなくこの分光器であった。Huggins自らがKirchhoffの「応用」と述べた恒星天文学への分光器の導入の過程はすでにみた。「応用」などといえば、AからBへものを移す程度の意味しかもち得ないが、そうでなかったことはすでに述べた。それは「新天文学」の創造に踏み出すための、新天文学に固有な方法とそれを実現するための装置体系へと変身させる過程でもあった。

さて、恒星のスペクトル観測を決意したHugginsは、すぐに友人の化学者Millerの協力をとりつけた⁶²⁾。Millerは1845年にさまざまな元素スペクトルの写真をとり、スペクトル分析の専門家として知られ、先にも述べたKirchhoffとの論争に加わった一人でもあった。それでもHugginsの協力依頼に対しMillerは、「星の光の著しい微弱さ」と「地球の運動に基づいて観測に求められる仕事の精確さ」から目的の研究が成功するかどうかに疑いをもち、はじめは協力をためらっていた⁶³⁾。Rutherfordが「化学者の仕事」だと考えたことを想起するとよい。化学者のMillerがこうした恒星に対する不安をあらわにしたのも当然であろう。しかし一方の天文学者Hugginsからみれば、恒星の追尾はまさにそれまでの「ルーチン的な性格をもつ通常のアストロノミカルな仕事」だったのである。ここには単なる「応用」ではない本質的な問題が内包されているとみなくてはなるまい。

4. おわりに

以上、KirchhoffやHugginsの研究の意義を、彼らの実験とその装置の成立過程を通して再検討してみた。彼らは単なる観測装置の応用者ではなく、誰よりも明確に太陽や恒星に対して物質としての問題関心を強く持っており、その解決のために、独自の「研究手段と方法」を創造し、結果と

して新しい学問領域をきりひらいたといえる。この経緯がもっとも本質的部分ではなからうか。

十分な論証とはいえないにしても、彼らの研究活動にとって、何が本質的過程だったのかを、彼らの実験とその装置にそくして抽出し得たと考える。もちろん、いろいろな視点からの豊かな検討が必要なのであるから、これまでの議論が間違いだの、不必要だのと非難することはできない。多くの場合研究者は、種々の分野と関連しており、また種々の研究者と交流があり、装置や資料の交流さえまれではなく、決して孤立した存在ではないのであるから、さまざまな角度からの検討が必要ともなる。しかし、上述した新しい学問分野の登場に関わる彼らの研究の本質的意義の評価をはずしてはならない。従来の研究では、上述した一見あたりまえとも思える評価さえ欠落していたのは不思議なことだが、こうした珍妙なことは、彼らの実験とその装置にそくして検討することで回避できるといえる。

「理論と実験」の相互作用のメカニズムまで踏み込むことは、こうした事例史研究を積み上げてからのことになろう。しかし、今日、「理論屋」、「実験屋」などと職業分化した専門家集団が与える「印象」とは違って、実験的行為や実験装置という物質的手段が理論的な思考と見事にバランスしてはじめて、創造的研究を生みだしうることが了解されたのではなからうか。したがって学説史・理論史といえどもこの程度の実験については語らねばならないと考える。

さてこの小論では実験に固有な技術の問題についてふれてこなかった。たとえば光学機器製作技術や自動追尾機構などに関連した当時の光学ガラス技術、精密機械技術などがそれであるが、19世紀中ごろの、こうした技術レベルの検討は機会を改めて論じる予定である。結論だけを述べておけば、技術レベルの到達段階が彼らの時代に照準を合わせたように高度化を遂げていることが、ここでは語らなかつた物質的な基盤でもあった。

-
- 1) 高橋智子、「技術の歴史－通信事始め」(NHK, TV, 1983年),「Curieの電気補償法について」(茨城大学教養部紀要, 第17号, 1985年)など。
 - 2) Kirchhoff, "The Fraunhofer Lines," W. F. Magie ed., 'A Source Book in Physics,' Harvard Univ. Press, 1969, pp.354-6. 原論文は "Ueber die Fraunhofer'sche Linien," Monatsberichte Akad. Wissen. Berlin, 1859, S. 662-665. 当時この論文は G. G. Stokes によって Phil. Mag. でも紹介された: G. G. Stokes, "On the Simultaneous Emission and Absorption of rays of the same definite Refrangibility; being a translation of a portion of a paper by M. Léon Foucault, and of a paper by professor Kirchhoff", Phil. Mag., S. 4, Vol. 19, No. 126, March, 1860, pp.193-196.
 - 3) Kirchhoff, "Emission and Absorption," W. F. Magie ed., 'A Source Book in Physics,' Harvard Univ. Press, 1969, p.359. 原論文は "Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme", Monatsbericht der Akad.d.Wiss. zu Berlin. Dec. 1859. 前川太市訳, 「光と熱の放出と吸収の関係について」, 物理学史研究刊行会編, 『熱輻射と量子』, 東海大学出版会, 1970年, 6頁。
 - 4) Ibid., p.357.
 - 5) サバドバリー著, 阪上正信他訳, 『分析化学の歴史』, 内田老鶴圃, 1988年, 425頁。

- 6) W. McGucken, 'Nineteenth-Century Spectroscopy. - Development of the Understanding of Spectra 1802-1897,' The Jones Hopkins Press, 1969, p.33.
- 7) W. A. Miller, "On Spectrum Analysis", Chemical News, April 1862, pp.201-203 : pp.214-218.
- 8) Kirchhoff, "Contributions towards the History of Spectrum Analysis and of the Analysis of the Solar Atmosphere", Phil. Mag., S. 4, Vol. 25, 1863, pp.250-62.
- 9) F. A. J. L. James, 'The Early Development of Spectroscopy and Astrophysics,' Ph. D. thesis, Uni. of London, 1981.
- 10) Ibid., p.215.
- 11) Ibid., pp.217-8.
- 12) A. J. Meadows, "The origins of astrophysics", O. Gingerich ed., 'Astrophysics and twentieth-century astronomy to 1950 Part A,' Cambridge University Press, 1984, pp.3-15.
- 13) 辻哲夫, 「解説」, 物理学史研究刊行会編, 『熱輻射と量子』, 東海大学出版会, 1970年, p.248.
- 14) I. Newton, "New Theory about Light and Colors," Phil.Trans., No.80, 1672, p.3075. この問題はさらに詳細に 'Optiks' (1704年) で論じられた。
- 15) J. Fraunhofer, "Determination on the Refractiv and Dispersive Power of Deffrent Kinds of Glass, with Reference to the Perfecting of Achromatic Telescopes," Denkschriften der königlichen Akademie der Wissenschaften zu München, V., S. 193-226, 1817. ここでは J. S. Ames, 'Prismatic and Diffraction Spectra Memoirs by Joseph von Fraunhofer' (Harper & Brothers Pub., 1898) pp.3-10 に再録されたものを利用。以下 Fraunhofer の論文の引用はすべて J. S. Ames の本からである。
- 16) W. H. Wollaston, "A Method of Examining Refractiv and Dispersiv Powers by Prismatic Reflection," Phil. Trans., 1802. ここでは J. S. Ames の前掲書 pp.62-3 に再録されたものを参照。
- 17) Fraunhofer, op. cit., p.6.
- 18) Wollaston, op. cit., p.62.
- 19) Fraunhofer, op. cit., p.7.
- 20) H. Schellen, 'On Spectrum Anarysis,' 1873, p.104.
- 21) Fraunhofer, op. cit., pp.8-10.
- 22) Fraunhofer, "Short Account of the Results of New Experiments on the Laws of Light, and their Theory," Annalen der Physik, B. 74, 1823, S.337-378 : J. S. Ames, pp.38-61.
- 23) Fraunhofer, op. cit., 15), p.10.
- 24) W. A. Miller, op. cit., p.202.
- 25) H. Schellen, op. cit., p.230.
- 26) Ibid., p.100.

- 27) Ibid., p.93.
- 28) W. A. Miller, op. cit., p.214.
- 29) Ibid.
- 30) H. E. Roscoe, 'Spectrum Analysis, six Lectures, Delivered in 1868, before the Society of Apothecaries of London,' Macmillan and Co., 1873, p.101.
- 31) Kirchhoff, op. cit., 8), p.261.
- 32) Kirchhoff and Bunsen, "Chemical Analysis by Spectrum-observations", Phil. Mag. S. 4, Vol. 22, No.148, 1861, pp.329-349 : No.150, Suppl. pp.498-510. 装置の説明は pp.505-6. 原論文は G. Kirchhoff und R. Bunsen, "Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen Zweite Abhandlung," Poggendorf Annalen, 113, 1861, S. 337.
- 33) H. Schellen, op. cit., p.232.
- 34) G. Kirchhoff and R. Bunsen, op. cit., Phil. Mag. p.329.
- 35) Ibid.
- 36) Ibid.
- 37) Ibid., p.93.
- 38) Kirchhoff, op. cit., 2), p.355.
- 39) Kirchhoff, op. cit., 3), p.360.
- 40) Kirchhoff, "On the Chemical Analysis of the Solar Atmospher," Phil. Mag., S. 4, Vol. 21, No.139, p.186.
- 41) Huggins, "The New Astronomy : a personal retro-spect", The Nineteenth Century, Vol. 41, 1897. 3, p.908.
- 42) Huggins ed., 'Publications of Sir William Huggins's Observatory, Vol. II : The Scientific Papers of Sir William Huggins,' London, 1909, p.3. 以後この論文集からの引用は 'Papers' と略記する。
- 43) Huggins, "On the Spectra of some of the Fixed Stars", p.413.
- 44) Ibid.
- 45) Ibid., p.415.
- 46) Ibid., p.414.
- 47) Ibid., p.415. 著者の注によれば、円柱表面の軸方向をスリットに対し平行にした場合には、その可視スペクトルの幅が対物レンズからの円錐光線の直径に等しくなり、しかもスペクトルの両端で収縮するかわりに拡大し、すでに弱い照度がさらに弱められることから星のスペクトルには不向きなこと、また焦点距離 14 インチの平凹レンズは凸型よりも多少の利点をもつが、装置全体を大型にしてしまうことが指摘されている。
- 48) Huggins and Miller, "On the Lines of Spectra of some of the Fixed Stars", Proc. Roy. Soc., Vol. 12, 1863, p.444.
- 49) Huggins, 'Papers', p.911.
- 50) Ibid.

- 51) Huggins and Miller, *op. cit.*, p.413.
- 52) *Ibid.* p.423.
- 53) Rutherford, "Astronomical Observations with the Spectroscope," *American Journal of Science*, n. s. 35, 1863. p.77.
- 54) *Ibid.*
- 55) Huggins, *op. cit.*, 41), p.911.
- 56) ダンネマン著, 安田徳太郎訳・編, 『新訳 大自然科学史』, 第11巻, 三省堂, 1979年, p.315.
- 57) H. C. King, 'The History of the Telescope,' New York, 1979, p.261.
- 58) Huggins, *op. cit.*, 41), p.908.
- 59) Huggins, 'Papers', p.910
- 60) Huggins, *op. cit.*, 43), p.413.
- 61) *Ibid.*
- 62) Huggins, *op. cit.*, 41), pp.911-2.
- 63) *Ibid.* p.911.