

重力赤方偏移と精密視線速度測定

竹 田 洋 一

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: takeda.yoichi@nao.ac.jp

アインシュタインの一般相対性理論が予測する太陽スペクトル線の重力赤方偏移を観測的に検出することは太陽物理学者に課せられた宿題であったが、太陽表面の非均一なガス運動に起因する効果に災いされて定量的に十分納得のいく結果はなかなか得られぬままに時は流れ、一方では地上の実験でこの理論からの予言値が確認されて實際上ほぼ決着がついたこともあり、天文学の世界ではしだいに人々の興味も薄れるに至った。最近われわれはヨードセル法という精密視線速度測定の手法を適用して改めてこの古典的な問題に取り組む機会をもったのでそれについて報告する。併せて、白色矮星など他の恒星におけるスペクトル線シフトの話題も含め、重力赤方偏移百年の歴史を振り返る。

1. 太陽スペクトルとアインシュタイン効果

1.1 一般相対性理論の予言

等速運動する系を対象にした特殊相対性理論を1905年に発表し¹⁾、時空の概念を変革させて世界に名をとどろかせたアインシュタインは、これを加速度運動系に一般化して重力をも含む一般的な理論にするべく努力を重ねた。そして重力場の影響を等価原理に基づいて論じた最初の論文²⁾を1911年に出版したが、さらに考察と理論の改善を進め、ついに1916年に重力を四次元時空の幾何学として記述する一般相対性理論を完成するに至る³⁾。

この理論は観測的に検証されうる予測を提示したが、くしくもそれはいずれも天文学に関するものだった。①水星の近日点の移動、②太陽のそばを通る光線の重力による湾曲、③太陽表面から発せられる光におけるスペクトル線の長波長側への偏移、の三つである。このうち最初の水星軌道の近日点の移動（1世紀につき43''）はこれまで他

の諸々の影響を考慮してもどうしても説明できずに謎とされていた値と驚くべき一致を示したので、この理論は一躍注目を集めることになる。そこで残り二つを検証することが天文学者に課せられた重要な課題となった。

重力による光線の湾曲は皆既日食の際における太陽近傍の恒星の位置を太陽がいないときの位置と比較してそのずれを調べることで確認できる。特にこの場合は理論そのものの検証として重要であった。1911年の最初の未完の理論では太陽のすぐ縁で0."87という予測をしており、たまたまこの値は古典的なニュートン力学に等価原理を適用しても導かれる値であったが、1916年に完成した理論の予言によればその2倍の1."74になったからである。

この予測値の改訂という混乱もあり、1910年代中頃の第一次世界大戦中に早速取りかかったチームは一度は否定的な見解を出すか、戦後1919年のアフリカ～南米での皆既日食でエディントン率いる英国の観測隊はほぼ理論の予言に近い値を確認した。さらに1922年の豪州の日食の

観測においてリック天文台長のキャンベルが中心になった米国の観測隊は縁付近でのずれの値(1."74)のみならず太陽からの距離に反比例する依存性までも理論と極めてよく一致する結果を得た。ここにおいて一般相対性理論はほぼ科学界における認知を受けるに至り、アインシュタインブームが世界的に巻き起こった。

一方、残りの一つである重力赤方偏移(半径 R 、質量 M の物体から発せられる光はドップラー速度に換算して $v_g = GM/(cR)$ の赤方偏移を示す:ここで G は重力定数で c は光速)については一般相対性理論に特有の予言というよりも、等価原理のもたらす帰結である。実際太陽スペクトルにおけるこの視線速度の増加(+633 m/s)は1911年の最初の論文でも1916年の完成した理論でも変わっていない。ただ理論の根幹となる原理が絡むことなので、万一これが成立していなかったら一般相対性理論は根底から覆されることになるからその意味でも事は重大だった。もちろんこの確認についても世界の名だたる太陽研究者が挑戦を試みるが、こちらははるかに困難な問題であることを思い知らされることになる。

1.2 初期の太陽分光学者の苦闘

実は十九世紀の終わりから二十世紀の初めにかけて、すでに太陽物理学者たちは太陽スペクトル線の波長のずれの問題に直面していた。1890年代にロウランドらによって太陽スペクトル線の波長同定が進められていたが、彼らは吸収線の波長(自転など他の効果を差し引いた後でも)が実験室のアーキ放電で作出した比較輝線スペクトルと比べて、一般にわずかに(千分の数Å程度)長波長にずれている傾向があることに気づいていた。そしてこの赤方偏移を最初に定量的に論じたのがジュウエルであった⁴⁾。ただ、このずれの大きさは線に対応する元素によっても線の強度によってもまちまちであって解釈に苦しむものだったのである。一方1907年、ハルムは太陽円盤におけるいろいろな位置のスペクトルを合わせて詳

細に調べ、縁に近づくほどスペクトル線の波長は円盤中心の波長と比べてより赤い方に系統的にずれるといういわゆるリム効果(limb effect)を発見していた⁵⁾。この二つの事実からも、この1910年代の太陽研究者たちに突然降りかかってきた一般相対論の検証という課題が決して一筋縄ではない難題であることは明らかだった。つまり重力赤方偏移によるシフトは太陽円盤上の位置にもスペクトル線の種類にも一切無関係にドップラー効果と同じくずれの大きさは波長に比例するはずだからである。

実際、地上における実験の経験のみを頼りにして手探りで進むしか手がない黎明期の天体分光学者の苦労はたいへんなものだった。当初彼らがこの謎のシフトの原因として特にこだわっていたのは「圧力効果」、つまり実験室での実験で知られていた「圧力を1気圧から10気圧くらいまで上げていくにつれてアーキ放電のスペクトル線の輪郭が非対称になり中心波長が一般に長波長側にずれていく」効果である。これは、圧力が上がることでガス粒子が接近してその電場が引き起こす原子エネルギー準位の摂動によるスペクトル線の成分分岐、つまりシュタルク効果のことであるが、おのおののラインの個性に応じてその程度は異なる現象である。実際には希薄な太陽大気ではこのようなシフトは無視できるのであるが、太陽大気の物理状態などほとんど未知の当時、重力が地上の約30倍もある太陽表面の気圧が地表よりずっと高いと考えたとしても責められないだろう。

一方、インドのコダイカナル天文台の英国人太陽物理学者エバーシェッド(「エバーシェッド流」と名づけられた太陽黒点半暗部における表面に沿った外方へのガスの流れを1909年に発見していた)は、この太陽面のリム効果などの奇妙な波長のずれは圧力効果よりも基本的にドップラー効果に帰せられるものであろうと結論した。ただ彼といえどもその物理的な解釈には困りはて、「地球が何らかの反発力を与えて太陽表面ガスが常に

地球から遠ざかるように流れている」という、今日から見るとかなり荒唐無稽な説（地球効果）さえ真剣に検討していたのである。

ともあれ太陽重力赤方偏移の有無を調べる研究はアインシュタインの1911年の最初の論文で予言されてすぐにドイツのシュバルツシルトやフロイントリッヒによって試みられたが、やがて中心になったのはインドのエバーシェッドと米国ウィルソン山天文台のセントジョンだった。しかし1910年代から20年代始めにかけてこれらのグループが多大な努力を費やしたにもかかわらず、得られた結論は不可解な混乱の様相を呈していた。つまり人によって結果がまちまちで一致しないのである（ただ大ざっぱに言えることは赤方偏移はあるにしても理論の予測よりも足りずに小さいということだった）。たとえばエバーシェッドは「重力赤方偏移は縁では大体確認できる」と報告する一方で、セントジョンは「そのようなシフトは見られずアインシュタイン効果は存在しない」と言明した。ウィルソン山の60フィートと150フィートの太陽塔望遠鏡という当時の世界最高の太陽観測機器を有するセントジョンはこの分野の第一人者として特に影響力のある立場にいたので、この発言はかなりの動揺をもたらす結果となった。

当時の状況を今日の目で振り返るといろんな不幸な事情が複雑に絡んでいたことがわかる。まず彼らが心配していたのは先述した圧力効果であった。絶対測定に大きく影響するこの効果をなるべく避けたいという一心から彼らは測定には紫～青領域にあるCNの分子線（実験室での実験から圧力効果はほとんど効かないと知られていた）を専ら測定に用いていたのである。ただ太陽のスペクトルを一見すればすぐわかるが、この領域は絶望的にラインが混み合っており、とても視線速度の精密測定に適しているとは思えない。またセントジョンは弱いCN分子線を、エバーシェッドは強いCN分子線を、用いるなどおのおのの好みによ

る違いがあった。それに比較に用いるアークの輝線スペクトル自体も初期の頃はかなり質が悪く、圧力効果や電極からの位置による波長の変化などもあって、それも混乱に輪をかけていたようだ。

1.3 徐々に見えてきた真実

状況が改善してきたのは1920年代に入ってからである。特に重要な伏線は1920年にインドの物理学者のサハによって電離平衡の理論が初めて確立されたことだった。これを基にして英国のファウラーやミルンらの努力により太陽大気の大まかな物理状態が推定できるようになったのだが、それにより太陽表面物質はほとんど中性の水素で構成されていて圧力は地表とは比べものにならないくらい極めて低いことが明らかになった。したがって、ついに圧力効果の呪縛から逃れ、(CN分子線だけではなく)鉄などの普通の多数の原子スペクトル線を安心して測定に用いることができるようになったのである。一方では比較スペクトルに用いる実験室の光源の改良も進み、基準のスペクトル線波長表も充実してきた。これによってこれまでの仕事の再検討なども進められた。

そして1923年のアメリカ合同天文学会の席上、セントジョンはついにこれまでの前言を翻して「一般相対論の予測する重力赤方偏移は確かに存在し、観測されるシフトの見かけの傾向はアインシュタイン効果と太陽大気の垂直速度場によるドップラー効果が合わさったものとして説明できる」と公式に発表し、世界に大きな反響を巻き起こす。「St. John's conversion」として知られるこの転向は、純粋に自分自身の研究のみから帰結したことなのか、それとも日食観測における光の湾曲の理論的予想値と観測値のすばらしい一致に影響されたのかは今日でも科学史家の間で議論される点のようだが、彼によるガスの垂直運動によるドップラー効果の解釈⁶⁾はかなりの的を得ていると言ってもよい（ただ同時に提唱したリムの過剰赤方偏移の光散乱起因説は当たっていないが）。

ここでは現在の知見に基づく言葉で述べるこ

にするが、太陽面スペクトル線のシフトの観測事実を定性的に説明するうえで重要な役割を果たすのは、ぐつぐつ煮えたぎるように見える太陽表面のいわゆる粒状斑（グラニュール）、つまり光球の下方の対流層に起因する非均一かつ動的なガスの運動である。このガス運動は近似的に太陽大気中の高温の泡の上方流と低温の泡の下降流の二つに分けて考えることができる。深い対流層から上方に発せられた熱い泡は周りのガスより軽いので浮力で上昇するが、しだいに熱を失い減速して上方の表面近くで止まる。一方、その逆の過程として、表面近くの周りのガスより重い低温の泡は重力で下向きに動く（図1）。実はこの上向きに動く高温の泡が明るく見える粒状斑（グラニュール）であり、下降する低温の泡は（グラニュールを隔てる）暗い境界線のように見えるインターグラニュール線である。太陽面を観測した場合、この両者が引き起こすスペクトル線のドップラー効果（前者は近づくので青側にシフトし後者は遠ざかるので赤側に）は互いに逆向きに拮抗するが、より高温で明るい前者が卓越するので、結果的にスペクトル線はやや青側にシフトすることになる（対流青方偏移）。そしてこの短波長への対流起因のシフトは典型的には毎秒数百メートル程度で、不幸にもたまたま重力赤方偏移と同等のオーダーであったことが混乱を引き起こしていたのであった。

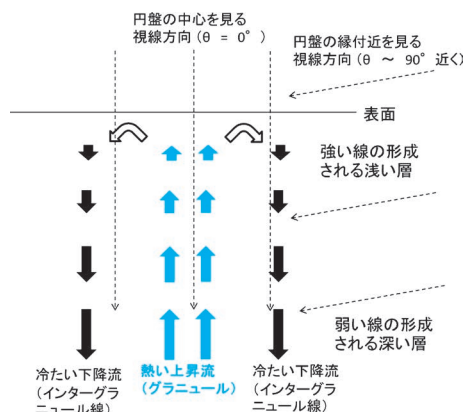


図1 対流青方偏移の生じる機構を説明した模式図。

このシフトを引き起こす泡の速さは（上述のように）大気の深さが深いほど大きく浅くなるにつれて減少するので、形成層の深い弱いラインではこの青方偏移は大きく、逆に表面近くの浅い層で形成される強いラインでは小さいので重要でない。これこそ測定に用いた線の強度によってさまざまに異なる結果が得られた原因だった（図2に例として1980年にロプレストラ⁷⁾の求めた結果を示す）。つまり、普通の円盤中心での観測の場合を例にとると、弱いラインでは重力赤方偏移のかなりの部分がこの対流青方偏移でキャンセルされてアインシュタイン効果はほとんど見えないかなり弱い、強いラインではこのキャンセルの効果が重要にならないので一般相対論の予測に近い赤方偏移が観測される。

また対流青色偏移は本質的にガスの垂直な運動によって生じるドップラー効果であるから、視線と大気平面に垂直な法線のなす角を θ とすると、円盤中心での観測（ $\theta=0^\circ$ で $\cos \theta=1$ ）でこの対流起因の短波長へのずれは最大になって、それ以外ではこの因子だけ弱まり、特に太陽の縁（ $\theta=90^\circ$ で $\cos \theta=0$ ）ではこの単純なモデルに基づいて言えば青色偏移は消え去る（実際はもっと複雑

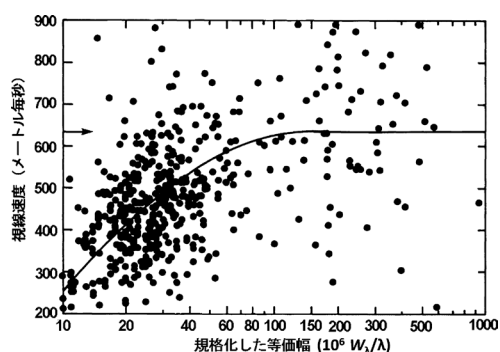


図2 太陽円盤中心で観測したときの視線速度とスペクトル線強度との関係の例（文献7のロプレストラの観測より）。矢印は予測される重力赤方偏移の値を示す。ラインによって大きな散らばりを示すことに注意。平均的な傾向は実線で表されている。

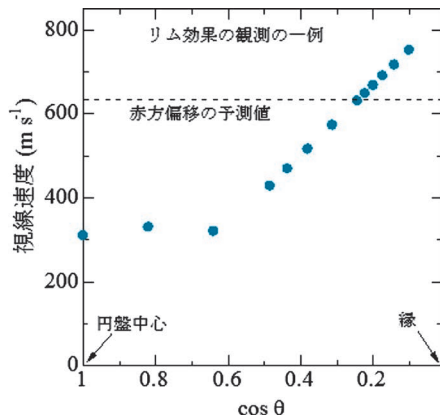


図3 視線速度が太陽円盤上の位置によってどのように変わるかの例（文献8のアダムの論文のデータから作成）。実際はもっと大きい散らばりを示すがここに示したのは平均してならした関係。円盤中心での絶対値は彼に従って310 m/sを採用している。

で $\cos \theta$ の線形関係からは食い違いを示すし、さらに縁になると過剰の赤方偏移が出てくるのだが）。したがって、重力赤方偏移と合わせて考えると、円盤中心では本来見られるべき赤方偏移はキャンセルされて小さくなってしまいが、縁では予測に比較的近いアインシュタイン効果が観測されるのである（図3に例として1959年にアダム⁸⁾によって得られた結果を示す）。ちなみに円盤中心を基準にして考えれば縁に近づくほど相対的にスペクトル線はより赤い方向に系統的にずれを示すことになるが、これこそハルムの発見したリム効果にほかならない。

1.4 玉虫色の幕引きへ

セントジョンの分光観測で得られたシフトの傾向はほかのグループによっても確認され、その解釈もおおむね受け入れられた。このように1920年代中頃までに「太陽面の重力赤方偏移は存在する」という方向にトレンドは移ったが、もちろんこれは定量的に赤方偏移の観測値を導いてそれが633 m/sという予測値に誤差内で一致することを示したのではなく、観測される見かけのシフトの系統的な傾向をグラニユー爾垂直運動のドップ

ラー効果の解釈と合わせて「おそらく対流青方偏移を補正すれば予測値のオーダーの赤方偏移が残るはずなのでアインシュタイン効果の存在は確かであろう」と結論しているに過ぎない。したがって、重力による光線の湾曲効果の予言値との日食観測による観測値のすばらしい一致と比較するとその意味合いはかなり劣っている。その後もこの研究の試みは続いたが、もう本質的な進展は見られなくなった。というのもこの問題に決定的な役割を果たす対流青方偏移の補正は実は非常に複雑で各ラインの個性によって大きく異なるので正確に見積もるのはきわめて困難だからである（現在でさえも真の意味では解明されていない）。したがって、この補正値の抜本的な改善がなされない限り、太陽面の通常の分光観測を繰り返しても過去の仕事の再確認になるだけで、もはや意義が薄れてきたのである。

たとえば1922年にフロイントリッヒが中心になって、アインシュタインの予測した重力赤方偏移を太陽で検出することを大命題に掲げた「アインシュタイン塔（Einsteinurm）」と呼ばれる太陽塔望遠鏡をポツダム郊外に建設したが、この施設はドイツ表現主義の著名な建築家メンデルスゾーン的设计になるその芸術的な形状で世界的に有名になってはいるものの、本来の目的であったスペクトル線のアインシュタイン効果の検出についてはあまり大した実績を上げていない。ちなみにわが国においても同じ目的を掲げ、1930年に三鷹の東京天文台にやはりドイツのツァイス社の製作による姉妹的な太陽塔望遠鏡が設置されている。もっとも本家のほうは流線型を基調にしたスマートな白亜の塔であるのに対し、こちらは渋い赤茶造りの角ばった塔なので外見は異なるのであるが、同じ「アインシュタイン塔」という愛称で親しまれてきた。しかし残念ながらこれも本命の重力赤方偏移では特に成果は出せなかったようだ。現在は正式名を国立天文台太陽分光写真儀室と呼ばれ、登録有形文化財として保存されてい

る。この太陽望遠鏡については斉藤国治先生の回顧文を参照されたい⁹⁾。

そして数十年の時が流れ、1960年に画期的な出来事が起こる。きわめて正確にガンマ線の振動数変化を検出できるメスbauer効果（ γ 線無反跳吸収共鳴現象）を応用した地上の実験で、パウンドとレプカの二人がアインシュタインの予測した重力赤方偏移を十分満足できる精度（ $\sim \pm 10\%$ ）で検証することに成功したのである¹⁰⁾。ここにおいて太陽においてこの効果を検出することの意味が薄れてきたので、この問題に対する太陽物理学者の熱はかなり冷めたことであろう。もちろんスペクトル線のシフトや大気速度場の研究はその後も続くが、重力赤方偏移は当たり前のものとして最初から差し引く取り扱いさえされるようになった。

1960年以降今日までの半世紀の間に太陽面における重力赤方偏移検出を目論んだ論文の数は両手の指の数にも満たないが、まれに新たな技術を応用した挑戦もあった。たとえば1960年代から70年代にかけて試みられた、ストロンチウムやカリウムの原子ビームを使った共鳴散乱の手法を用いてSr I 4607線¹¹⁾やK I 7699線¹²⁾などの共鳴線のスペクトルにおいて正確な視線速度スケール

を確立する方法である。しかし大気速度場に起因するシフトを補正しないのでは見通しが限られることは明らかだった。また1本の強い線の輪郭だけをいくら詳しく調べても（広がった非対称の太陽スペクトル線輪郭のどこを基準の線中心として良いかを眼視で決めては）あまり意味はなく、測定の仕方によって結果が異なる不確実性が出たりしたのである。太陽スペクトルにおける重力赤方偏移を定量的に確認したい場合、①系統誤差を避けるには円盤の位置に依存する対流青方偏移をきちんと取り扱うこと、②乱雑誤差を軽減するためには数多くの線を用いてかつ人間の目で決めるような要素を排除すること、が必須であることをこれらの仕事は教訓として示してくれている。

2. 太陽重力赤方偏移検出へのわれわれの試み

2.1 ヨードセルと視線速度精密測定

そういう事情でこの太陽スペクトルにおける重力効果問題は今日ではほとんど忘れ去られたに近い状態になっていたが、たまたまわれわれもこれにかかわることになった。それはヨードセル法という最近の手法が適用できそうだったからである。ヨードセルとはヨウ素分子ガスを封入したガスフィルターのことであるが、天体の光をまずこれを通した後で分光することで無数のシャープなヨウ素分子線を天体のスペクトルに重ねて焼き込む方法である。これによって（言うならば測定するものに物差しの目盛り自体を埋め込むようなもので）機器の不安定性に起因する誤差を除去して非常に高い精度の視線速度測定決定が可能になる¹³⁾。このテクニックが大活躍しているのがドップラー法に基づく系外惑星の検出や星震学への応用であり、毎秒数メートルという高精度でわずかな視線速度の変化をとらえることで、数多くの系外惑星が発見されたり恒星の微妙な振動から星の性質が調べられたりしている。

この手法の大きなメリットは、測定のために天

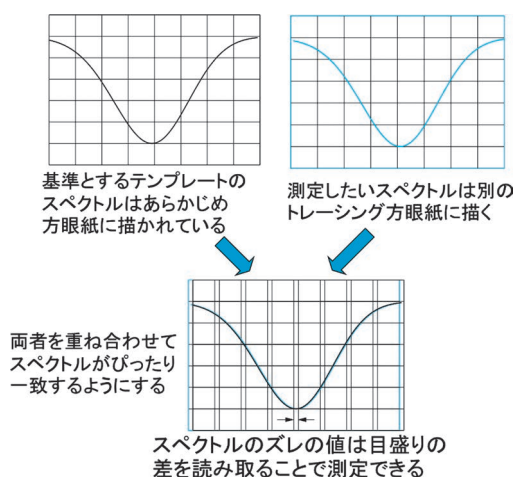


図4 ヨードセル法でいかにして微少な波長のずれを検出できるかの原理の比喩的な説明。

体スペクトル線の線中心波長（前節で述べたように眼視で正確に決めるのはほぼ不可能）をわざわざ決める必要がなく、きわめて効率の良い半自動的な解析が可能になることである。図4はヨードセル法で視線速度の微妙な差がどうやって検出できるかの原理を比喩的に示したものであるが、このように、比較とする基準のスペクトル（テンプレートと呼ぶ）とぴったり重なり合うようにして目盛り（波長）のずれを読み取ることは、言い換えれば残差の2乗（ χ^2 ）が最小になるようにフリーパラメーター（視線速度差）を決めることであり、これは数値解析における最適化問題と呼ばれるものにほかならないので数値計算で容易に解が得られる。つまり計算機の助けを借りて主観に影響されずに迅速に視線速度の解が求まるので、一つのスペクトルの中の広い波長域の多数のスペクトル線に適用してそれらの解を重ね合わせることで乱雑誤差を抑えることも、あるいは多数の異なるスペクトル（異なる観測日や異なる観測点）に対して適用してそれぞれの視線速度を効率よく求めることも問題なくできる。

ここで重力赤方偏移の検出のために決定的に重要な対流青方偏移の補正の大きさは太陽円盤上の各点で異なることを思い起こそう。したがって（いろいろな $\cos \theta$ ）多くの点で求めた視線速度を補正して得られた結果が系統的に位置に依存しないことを確認できればこの青方偏移の補正がうまくなされたかと判定して良い。この種の多数の観測点の精密視線速度解析にはまさにヨードセル法がうってつけであるので、「太陽重力赤方偏移を観測的に求めて理論的予測と一致するかどうかをチェックする」という百年来の問題に改めてこの能率的な手法で取り組むことは有意義であろう。

2.2 飛驒ドームレス太陽望遠鏡での観測

観測は2010年7月20日と21日に京都大学飛驒天文台のドームレス太陽望遠鏡の水平分光器で行った。この望遠鏡は本格的な分光器をもつ国内随一の地上太陽望遠鏡であり、ウィルソン山の

60フィート太陽塔望遠鏡を彷彿とさせる立派な風格を備えている。太陽面上の狙った点に正確にポインティングして露出しスペクトルを取得することを半自動的につぎつぎに連続して行うことができるので、今回の目的にはうってつけであった。ヨードセルは以前岡山観測所でプロトタイプとして試作した第一号機セル¹⁴⁾（すでに役目を終えて引退して物置に眠っていた）を持ち込んで使った。

この時期には太陽面に特に顕著な活動領域は見られず、この種の光球静穏領域の観測には適しており、飛驒天文台の上野 悟さんに協力していただいたこの二日間の観測で、太陽面上にまんべんなく分布した3,744点の観測点において5,188–5,212 Åの波長範囲の（ヨードセルを通してヨウ素分子線を焼き込んだ）高分散スペクトルを得ることができた。なお飛驒の水平分光器は広い波長域のスペクトルを一度に撮れると聞いていたので当初は期待したのだが、これは長い写真フィルムを使っていた昔の話でありCCDを検出器に使う現在はこのようにただか20–30 Åしかカバーできないということがわかってこの点は少し残念であった。というのも波長域が広いほど使える太陽のスペクトル線の数（ N ）も増えて、視線速度の誤差は $\propto 1/\sqrt{N}$ で減少するからである。

余談であるが、実はこの観測を行った時点ではアインシュタイン効果の検出のことなど全く考えていなかった。われわれの当初の目的は太陽自転だったのである。というのは、2008年から2009年にかけてサイクル24の太陽活動の始まる気配がなかなか見られないことから「何か太陽に異常が起こっているのではないか」と世間が騒いでいたのであるが、17世紀後半のマウンダー極小期には太陽の差動自転（緯度が高くなるにつれて自転角速度が減少していること）の度合いが現在の約3倍にも増大していたらしいという報告¹⁵⁾があるので、「ひょっとしたら最近の太陽にもそのような差動度の異常が生じているのかもしれない

が、なるべく実際に近い補正を求めるべくこれまでの研究成果を参考にした。まず円盤中心 ($\mu=1$) においてはシフトや非対称性も含めた線輪郭が非常によく再現できるような2成分モデル (つまりグラニュール大気とインターグラニュール大気の両方でスペクトルを計算して充填因子という重率の比率を掛けて両者を平均する方法) がボレロとベロット・ルビオによって発表されており¹⁸⁾、これを用いてシミュレーションした理論スペクトルから円盤中心における $(\delta V_1)_{\text{計算}}$ を18本のライン (解析した5,188–5,212 Å領域に存在する主なライン) について計算した。そして円盤上の位置 μ におけるシフトの中心における値との相対的な差 $\delta V_\mu - \delta V_1$ はバルタサルによって集中的に研究され、線形成層の深さ (スペクトル線の強度によって異なり、一般的に言って強く飽和した成長曲線の平坦部に属するラインほど形成層は浅くなる) に依存することが経験的に示されている。彼の結果¹⁹⁾ に基づいて $\delta V_\mu - \delta V_1$ を線形成の平均的深さ $\langle \log \tau \rangle$ の関数として近似的に表す表式を導出した。それを適用してそれぞれのラインについて $(\delta V_\mu - \delta V_1)_{\text{経験}}$ が得られる。そして両者を合わせて $\delta V(\mu) = (\delta V_1)_{\text{計算}} + (\delta V_\mu - \delta V_1)_{\text{経験}}$ として円盤上の任意の位置 μ における対流青方偏移 δV が計算できるわけである。各ラインについてこのようにして求められた δV が $\mu = \cos \theta$ あるいは $\sqrt{1-\mu^2} = \sin \theta$ についていかに依存するかを図6に示す。個々のラインによって振る舞いはかなり異なるが、円盤中心で約−300 m/sであるのに対して縁では+200 m/sまで増加する。ただヨードセル法では1本1本の線について視線速度を求めるわけではなく、得られるのは解析する波長範囲 (今の場合約24 Å) に含まれるスペクトル線全体に対応する平均的な値であるので、 $\delta V(\mu)$ も平均形成層に依存する重みを掛けて各18本の線について平均した ($\langle \delta V(\mu) \rangle$)。

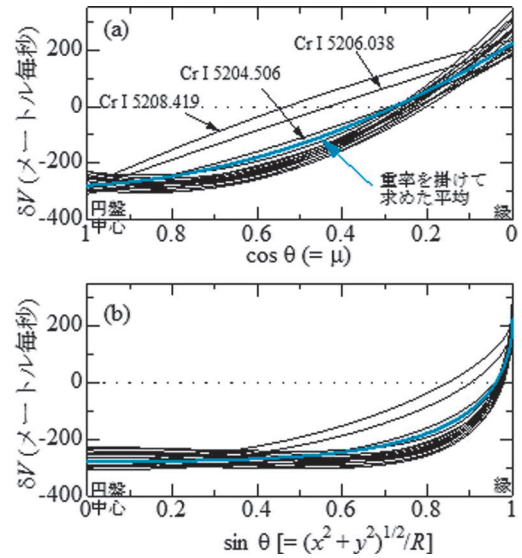


図6 計算した対流青方偏移。個々のラインの結果は黒の実線、重率を掛けて平均したものは太い青線です。上図の横軸は $\cos \theta$ で下図は $\sin \theta$ 。

2.4 得られた赤方偏移

われわれは円盤上の全点に対して太陽中心系での視線速度 (V) を求めたのであるが、最終的には自転速度の影響する観測点は使わずに $x=0$ の子午線上のデータのみを用いることにした。これらに対して V から $\langle \delta V \rangle$ を補正した値 $V_c (\equiv V - \langle \delta V \rangle)$ は重力赤方偏移に対応するはずである。

しかしこの最終段階で頭の痛い事態が生じた。当初得られた値は確かに赤方偏移を示していたのだが、アインシュタインの予測値である 633 m/s と比べると約200 m/s も食い違いが見られたのであった。われわれの値にかかわる主な誤差要因は太陽に見られるスペクトル線波長の精度、乱雑誤差、対流青方偏移補正の不確定性、などであったが合わせてせいぜい $\sim \pm 50$ –100 m/s 程度に収まるはずだと予想していたので、この違いは大きすぎて容認できない。なかなか原因を特定できないままに数カ月の日々を費やした末に結局わかったのであるが、なんと絶対基準にしていたヨウ素分子線スペクトル (マーシー氏から提供してもらったもの) の絶対波長スケールの原点が 160 m/s も

ずれていたのである。ドップラー法による惑星検出などは相対的な視線速度の変化だけが問題になるので絶対波長は関係ないからこれまでこのスペクトルを常用的に使っていてもわからなかったのである。この問題の解明にはドイツのクネッケル氏らの開発したヨウ素分子スペクトルを非常に高精度でシミュレーションできるIodineSpec²⁰⁾というプログラムが非常に役に立った。

最終的に得られた結果を図7に示す。まず図7aと図7bは全データ点に対する補正前の視線速度 V と太陽面上の y 座標または x 座標との関係を示した図である。図7bでは太陽の自転速度の視線方向成分のせいで V は x に比例する直線上に乗っているように見える（剛体自転の場合は厳密に x に比例する）。一方、本命とする子午線上のデータについては、補正前の V と対流青方偏移の大きさ $\langle\delta V\rangle$ を図7cに、補正済みの V_c を図7dに、そ

れぞれ y 座標（太陽円盤子午線上の中心からの距離）に対してプロットしている。 V は $|y|$ が大きくなって縁に近づくにつれて赤いほうにずれる傾向を示し（これはリム効果にほかならない）また $\langle\delta V\rangle$ も同様の弱い y 依存性を示すので（図7c）、これを補正した V_c ではこの傾向が消えてほぼ一定に近い値が得られたことがわかる（図7d）。この値の分布を表すヒストグラムが図7eであるが、ピークはまさに予測値あたりにきていることが見て取れる。子午線上のデータを全部合わせて平均した結果は $\langle V_c \rangle = 698 \text{ m/s}$ となった。予測される誤差は大体 $\sim 50\text{--}100 \text{ m/s}$ 程度であることを思い起こすとこの観測値は理論から予測される値（633 m/s）とほぼ一致していると結論して良いであろう。

もちろん新しいことを見いだしたわけではなく、むしろ「こうならねばならない」との予見を

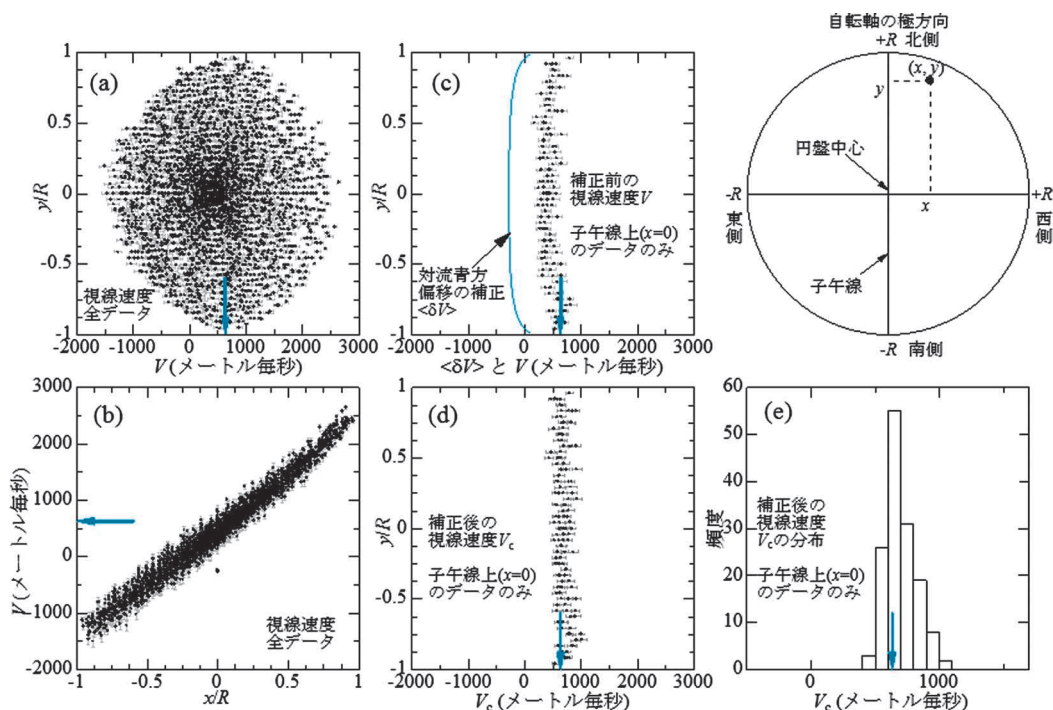


図7 われわれの太陽面視線速度解析で得られた結果。(a) V と y の関係（全データ）、(b) V と x の関係（全データ）、(c) V ならびに $\langle\delta V\rangle$ と y の関係（子午線上のデータのみ）、(d) 補正済みの V_c と y の関係（子午線上のデータのみ）、(e) 補正済みの V_c の分布。予測される太陽重力赤方偏移は各図において青い矢印で示してある。

もって解析を進めたのであるが（それだからこそ基準スペクトルの波長の狂いに気づくことができた）、最終的に不確定性の範囲内で理論値と観測値との整合が得られたことは、用いた手順や補正値がリーズナブルであったことを示唆するのでとりあえず満足している。本研究の詳細についてはわれわれの論文を参照されたい²¹⁾。

3. 恒星におけるスペクトル偏移

3.1 シリウスBのドラマ

1920年代の半ば、太陽重力による日食時の光路の湾曲も太陽重力場のスペクトル線のシフトもほぼアインシュタインの予測が正しいと認知された頃、もう一つのテストの可能性が出てきた。それはシリウスBにおけるスペクトルの重力赤方偏移である。

1913年にヘルツシュプルングとラッセルが恒星の光度とスペクトル型（有効温度）の間に密接な関係があること（HR図）を発見し、恒星のほとんどが主系列星と光度の高い巨星に属することが示されたにもかかわらず、ごく少数の極めて例外的な星があった。HR図上の左下に位置する高温で光度の低い白色矮星である。光度 L は輝度（有効温度 T_{eff} の4乗に比例する）と表面積（半径 R の2乗に比例する）との積だから $L \propto T_{\text{eff}}^4 R^2$ で、 T_{eff} が高いのに L が低いということは半径が異常に小さい信じがたいほど高密度の星でなければならず、当初は何かが間違っていてこのような星はありえないと思われた。英国のエディントンは彼の恒星内部構造論で主系列星や巨星の質量-光度関係を理論的に導出するなど成功を収めていたが、この白色矮星についても状態方程式が理想気体でなく電子の縮退圧（熱運動の圧力でなく量子力学の不確定性原理によるゼロ点運動がもたらす圧力）で支えられているとの仮説に立って理論を作り上げ、このような高密度の星でも実際に存在しうるかもしれないと考え始めていた。

シリウスBは全天一明るい恒星であるシリウス

Aの伴星であるが、もともとシリウスAの運動のふらつきからベッセルによってその存在が予測されており、1862年に望遠鏡職人クラークによって初めて直接確認されて以来これも当時知られていた数少ない白色矮星の一つだった。もし白色矮星が本当に異常に小さい半径をもつ高密度の星なら重力赤方偏移（半径に反比例する）は相当大きくなるであろう。好都合なことにシリウスは実視連星系であるのでシリウスBの質量も大体推定できるし、その軌道運動による視線速度もわかっている。1924年にエディントンは友人のウィルソン山天文台の分光観測の専門家アダムスに手紙を書き、重力赤方偏移が実際に観測されるかどうか確かめてくれと頼んだ。彼が計算して求めた最終的な予測値は $+20 \text{ km/s}$ だった²²⁾。そしてアダムスが100インチ鏡で観測して得られたシリウスBのスペクトルを解析したところ、まさに平均して約 20 km/s という非常によく一致する値が得られたのである²³⁾。さらに1926年にリック天文台のムーアが独立に36インチ屈折鏡で観測した結果も本質的に同じになってこれを支持した²⁴⁾。ここにアインシュタイン効果のみならずエディントンの白色矮星の理論の正当性も見事に証明された…と皆信じた。

しかし何十年もの後、意外な事実が判明する。なんと理論の予測値も観測された値も全く誤っていて、一致は単なる偶然に過ぎなかったのである。エディントンはシリウスBのパラメーターとして $T_{\text{eff}}=8,000 \text{ K}$, $M=0.85 M_{\odot}$, $R=0.028 R_{\odot}$ という値（添字sは太陽の値を示す）を出していたので重力赤方偏移はほぼ 20 km/s の予測になったのだが²²⁾、実際ははるかに大きかった。現在わかっている最良の値はバースタウらがハッブル望遠鏡を用いて決定して2005年に発表したものであり²⁵⁾、観測されたスペクトルと理論的モデルを合わせて決めたパラメーター（ $T_{\text{eff}}=25,193 \text{ K}$, $M=0.98 M_{\odot}$, $R=0.0086 R_{\odot}$ ）から予測される赤方偏移は $+72 \text{ km/s}$ （誤差は10%程度）で、実際に

測定された値の $+80 \pm 5 \text{ km/s}$ とよく一致する。なぜこのような大きな間違いが起こったのだろうか。

予測に関しては必ずしもエディントンの理論自体が間違っていたというわけではなく、単なる情報の欠如による誤ったパラメーター設定のせいだった。電子の縮退圧で支えられている白色矮星の半径 R は質量 M と電子1個あたりの平均分子量 μ_e に $R \propto \mu_e^{-5/3} M^{-1/3}$ のように依存するのだが、彼は内部が水素で構成されていると考えて $\mu_e=1$ を使っていた。実際は水素が燃え尽きた中心核なので水素はなく（表面大気にはあるが）、核反応生成物であるヘリウム、炭素、酸素などが主体であり、これらは完全電離では核子2個に対して電子1個だからむしろ $\mu_e=2$ を用いるべきだった。それで R を $2^{5/3}=3.2$ 倍も過剰に見積もりすぎたのである。本来なら計算した光度が観測値とひどく矛盾していることに気づきそうなものだが、不幸なことに有効温度も大きく間違っていた。これはシリウスA（A型だが比較的金属量が多い）の散乱光の金属線を誤ってシリウスBのものだと思ってF型に分類したためのようだ。白色矮星のバルマー線強度は晩期B型でピークになって早期B型とF型で同じくらいになることも誤解の基になったらしい。

一方、視線速度観測のほうはこれだけ間違うのはちょっと信じがたいくらいであるが、初期の恒星分光学特有のいろいろな難しい事情があったらしい。ウィルソン山やリックではプリズム分光器を使用していたのだが、光学系に問題があって星のスペクトルを撮るときと比較スペクトルを撮るときで光の当たり方が変わって、比較の標準星を観測して較正しないと系統誤差が出たらしいが、その辺をきちんとやらなかったようだ。また最も大きな誤差の要因は、すぐそばに1万倍も明るいシリウスAが存在してその散乱光の影響をどう補正するかという問題だったらしい。アダムスも一応その補正は考慮しているのだが（有効温度の大きな誤りもあったせい）結局不十分だったい

うことになる。詳しくはグリーンシュタインらによるアダムスの観測結果の検証報告²⁶⁾を参照されたい。想像であるが、準備不十分のままに急いで観測と解析を行い、最初に偶然予測に近い（実は誤った）結果が出たのでそれに満足して発表してしまい、その後きちんとした再確認を怠ったのではなかろうか。

今日ではシリウスBだけでなくエリダヌス座40番星Bなどほかの白色矮星についても重力赤方偏移の測定から質量も推定されて理論との比較も行われている。

3.2 K項とフロイントリッヒ効果

十九世紀末から二十世紀初めにかけてリック天文台ではキャンベルが中心になって36インチ鏡を用いた多数の恒星の分光観測に基づき視線速度を測定するプロジェクトが進められた。目的はわれわれの属する恒星系の運動学的構造とそこでの太陽の位置づけを統計的に調べることであったが、その結果は1911年にリック視線速度カタログとして発表される。キャンベルはこのデータを眺めてB型星の視線速度が平均的に約 4 km/s ほど他のスペクトル型の星に比べて大きく出ているように感じ、この過剰のことをK項と呼んだ²⁷⁾。特定のスペクトル型の星のみほかと異なった運動の傾向（太陽から遠ざかる）を示すことは興味をひいたが良い説明は見つからなかったようだ。

ところがしばらく後にこのK項が一躍脚光を浴びることになる。つまり早期型星は質量が大きいので重力赤方偏移も観測できるはずだとの考えから「この過剰の 4 km/s こそアインシュタイン効果ではないか」との声が出てきたのである。もっとも当時はまだ恒星の半径や質量について正確な情報が欠けていたので多分に思いつきに近いものがあり、定量的な証明ができずに結局は予言検証の本流にはならず忘れ去られていった。ちなみにB型星は主系列星でも質量が $5\text{--}10 M_\odot$ で半径が $3\text{--}8 R_\odot$ であるから重力赤方偏移も太陽とオーダーは変わらず $<1 \text{ km/s}$ のはずで（巨星になるとき

らに小さい), 自転の速い星の多いこのクラスでは検出はまず無理である。

この「K項=アインシュタイン効果」説にこだわった一人がこれまでも名前が出てきたフロイントリッヒである。ドイツで一般相対性理論の観測的検証に熱心に取り組んだ人だが、どうも直情径行というかちょっと思慮深さに欠けていた性格のようだ。いろんな人を怒らせて問題を起こし、当初は自分の理論の立証のための大事な観測家として庇護していたアインシュタインももてあましてしまう。だがアインシュタイン塔の建設をなした実績もあり、プロジェクトを遂行する才能に長けていた人と言えるだろう。彼の生涯については以前横尾広光先生も簡単に紹介しておられる²⁸⁾。

このフロイントリッヒは晩年になって昔のK項のことを思い出したのか、1954年になって、OB型の高温の早期型星は赤方偏移を示すことを再度引き合いに出す²⁹⁾。ただ今度は「高温の強い輻射場では光子同士が相互作用してエネルギーを失う過程が働き、そのために輻射温度を T 、光子の通過距離を l とすると $T^4 \times l$ に比例する大きさの赤方偏移が生じる」との仮説を提唱したのである。そして、ハッブルの法則（遠方の銀河ほど赤方偏移が大きくなる）さえこの機構で説明できるかもしれない、とまで話を膨らませた。このフロイントリッヒ効果は言ってみれば「光の疲労効果」で何となくもっともらしく聞こえるので、その当時はかなり反響を巻き起こしていろいろ議論されたようだ。ただ*ad hoc*な説の悲しさで結局は消え去る運命をたどったのはやむをえない。

3.3 視線速度と恒星天文学

これまで太陽と白色矮星について触れたが、それ以外の普通の星について重力赤方偏移は検出できるだろうか。太陽でできたのだから原理的には他の星でも不可能ではないはずだ。ただ問題は視線速度に影響するほかの諸々の要素を十分に排除して重力の効果だけを残せるか否かにかかっている。ここで有望なのは星団の個々の星の視線速度

を調べる方法である。というのは全体としては運動を共にしてほぼ同じ方向に動いており、もちろんランダムな成分はあるのだがそれは全体を合わせて統計的に考えることで平均として打ち消せるだろうからである。

つい最近ESOのパスキーニ氏らのグループがこの線に沿って、M67というかに座にある星団の多数の星の視線速度解析を行った³⁰⁾。これは年齢が太陽と同程度の古い散開星団でFGK型の主系列星や進化したK型の巨星で構成されている。彼らのアイディアは半径の小さい主系列星グループと大きい巨星グループでそれぞれ平均の視線速度を比べることだった。質量は互いにそう大きく異なっていないが、半径について言うと後者は前者の何十倍も大きい。したがって前者は太陽と同様の500 m/s程度の重力赤方偏移を示すが、後者はほとんど無視できるはずである。全体の運動は同様だから、結局両グループ間の平均の視線速度に有意な差異が見いだされるはずだった。しかし結果を言うと、この違いは検出できなかったのである。おそらくはスペクトル型の異なる星では視線速度に系統的な違いをもたらす効果があってそれが影響したのではないかと彼らは結論した。

実はそのような違いは確かにあるらしいのである。といっても先述したK項ではなく、むしろそれとは全く逆向きの効果で、より高温のF型やA型の早期型の星ほど視線速度が毎秒数キロメートル程度「負」の方向（青方偏移）にずれる傾向があるようだ。これは10年ばかり前にスウェーデンのlund天文台のマドセンら³¹⁾がヒアデス星団をはじめとするいろいろな散開星団の星の視線速度を調べて発見したことであるが、晩期型の星に比べて早期型では自転が速いことが絡んでいるらしいので、おそらく高速自転星大気の動的現象として外向きの質量放出（恒星風）が起こっていてそれが青方向へのドップラー偏移を引き起こすのだろうと仮説を立てている。ただその解釈が妥当かどうかはまだ不明である。先のM67の場合で

いうと、主系列グループは比較的早期型に近い星を多く含むのでこの青方偏移が重力赤方偏移を打ち消したから検出できなかったと考えられよう。

このように一般の恒星の絶対視線速度解析やアインシュタイン効果の検出はいろいろ難しい問題を含んでいて一筋縄ではいかず、まだかなりハードルが高い。しかし近い将来は有望な分野になるような気がする。これからは欧州で打ち上げられるGaia（ガイア）衛星などで超高精度で恒星の位置が測定されるようになるので、視差（距離）や固有運動も非常に正確に決まるだろう。位置ベクトルの3成分と速度ベクトルの2成分が確定するのだから残り一つの速度成分たる視線速度を正確に求めることは重要である。この六つを確定して運動方程式を解くことで今後は恒星の運動学が飛躍的に発展するのではないか。そうすれば実際の運動による恒星の視線速度成分をきちんと押さえることができ重力赤方偏移直接検出への道も開けるだろう。たとえば最近ではM型の赤色矮星がハビタブルゾーンの地球型惑星搜索などの分野で特に着目を浴びているが、質量や半径の恒星パラメーターを正確に決めることがなかなか難しく苦労している。もし重力赤方偏移の測定からこういうパラメーターの情報を得ることができたら大きな福音である。星の振動から内部を探る星震学のような新たな学問分野が開くのではなかろうか。

ただ大切なことは、その時代に向けての準備として、恒星大気物理（特に動的現象）のさらなる理解や原子分子スペクトル線の高精度波長データベースの充実など地道な学問をおろそかにしないことである。アインシュタインの一般相対性理論の予言を確かめるために多くの人々がこの課題に取り組み、成功も失敗もいろいろあったが、その目的の達成の成否よりもむしろその努力の過程において蓄積された底力こそが科学の進歩に貢献している。たとえばウィルソン山天文台長のヘールは最先端の理論である量子論や相対論を理解でき

る人材が米国に不足していることから欧州からローレンツやエプシュタインなどの有能な理論家を招聘して学生の教育に気を配り、セントジョンはスペクトル線のデータが貧弱なことを痛感して世界に呼びかけてデータベースの整備拡充を図りその後の天体分光学に大きな寄与をしているが、そういう基礎固めがその後の米国（それも特に西海岸の天文台）が二十世紀の天文学において主導的な地位に立つ原動力になったのである。したがってわれわれは単に目先の成果を上げるだけでなく後世に向けて種をまくことも忘れてはならないであろう。

謝 辞

本稿の執筆に当たって歴史的な側面について特に参考にさせてもらったのは近年出版されたクレリンステンの「Einstein's jury」³²⁾である。過去の文献や書簡の資料を綿密に考証し、併せて1970年代にまだ存命だった（当事者の親族や知人など）関係者に対して行ったインタビューで得られた事実も交え、二十世紀初頭に一般相対性理論の正否を巡って激しい論争を繰り広げた著名な天文学者たちや個性的な脇役の姿が生き生きと述べられている労作である。この分野に興味がある方には一読をお勧めする（ただあまり一般向けではなく、むしろ研究者や科学史家向けの書物だろう）。

太陽重力赤方偏移の検出のための有用なデータをもたらしてくれた、飛騨ドームレス太陽望遠鏡でのヨードセルを用いた太陽面視線速度観測においては上野 悟さんをはじめ京都大学飛騨天文台の皆さんにたいへんお世話になった。また牧田貢先生ともたいへん有意義な議論ができて感謝している。皆さんにこの場を借りて御礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) Einstein A., 1905, Ann. d. Phys. 17, 891
- 2) Einstein A., 1911, Ann. d. Phys. 35, 898
- 3) Einstein A., 1916, Ann. d. Phys. 49, 769
- 4) Jewell L. E., 1896, AJ 3, 89
- 5) Halm J., 1907, Astron. Nachr. 173, 273
- 6) St. John C. E., 1923, MNRAS 84, 93
- 7) Lopresto J. C., Chapman R. D., Sturgis E. A., 1980, Sol. Phys. 66, 245
- 8) Adam M. G., 1959, MNRAS 119, 460
- 9) 斉藤国治, 1999, 天文月報 92, 448
- 10) Pound R. V., Rebka G. A., 1960, Phys. Rev. Lett. 4, 337
- 11) Blamont J. E., Roddier F., 1961, Phys. Rev. Lett. 7, 437
- 12) Snider J. L., 1972, Phys. Rev. Lett. 28, 853
- 13) 佐藤文衛, 2003, 天文月報 96, 190
- 14) 竹田洋一, 2003, 天文月報 96, 303
- 15) Eddy J. A., Gilman P. A., Trotter D. E., 1977, Science 198, 824
- 16) Takeda Y., Ueno S., 2011, Sol. Phys. 270, 447
- 17) Neckel H., 1999, Sol. Phys. 184, 421
- 18) Borrero J. M., Bellot Rubio L. R., 2002, A&A 385, 1056
- 19) Balhasar H., 1984, Sol. Phys. 93, 219
- 20) Knöckel H., Bodermann B., Tiemann E., 2004, Eur. Phys. J. D 28, 199
- 21) Takeda Y., Ueno S., 2012, Sol. Phys. 281, 551
- 22) Eddington A. S., 1924, MNRAS 84, 308
- 23) Adams W. S., 1925, Observatory 48, 337
- 24) Moore J. H., 1928, PASP 40, 229
- 25) Barstow M. A., et al., 2005, MNRAS 362, 1134
- 26) Greenstein J. L., Oke J. B., Shipman H., 1985, QJRAS 26, 279
- 27) Campbell W. W., 1911, PASP 23, 85
- 28) 横尾広光, 1999, 天文月報 92, 453
- 29) Finlay-Freundlich E., 1954, Proc. Phys. Soc. A 67, 192
- 30) Pasquini L., et al., 2011, A&A 526, A127
- 31) Madsen S., et al., 2003, A&A 411, 581
- 32) Crellin J., 2006, Einstein's jury: the race to test relativity (Princeton University Press, Princeton)

Gravitational Redshift and Precise Radial-Velocity Measurement

Yoichi TAKEDA

*National Astronomical Observatory, 2-21-1
Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: It was an important and challenging task for solar physicists to detect the gravitational redshift in solar spectral lines, which Einstein had predicted based on his general theory of relativity. Unfortunately, however, the complex Doppler effect due to inhomogeneous gas motions of convective origin prevented them from establishing its quantitatively satisfactory detection. And as time went by, especially after this prediction had successfully been confirmed by a ground-based experiment, astronomers seem to have almost lost their interest on this issue. Recently, we had an opportunity to contend with this classical problem by using the iodine-cell technique, which is known to be effective for precise radial-velocity measurement. Here, I will report the outcome of our trial toward detecting this Einstein effect in the solar spectrum, while reviewing its historical background over these 100 years including the topics of gravitational redshift on other stars such as white dwarfs.