

学生たちが求めた視線速度曲線

—地学演習・恒星スペクトルの測定—

中村泰久 (理科教育)

I はじめに

恒星をはじめとする天体の観測には、スペクトルを利用する場合が数多くある。その一例として、天体の視線速度の測定があげられる。高等学校の「地学」教科書には、ドップラー効果により天体のスペクトル線が波長のより短い向きに、あるいはより長い向きにずれる、という説明が記されている。この現象を利用することにより天体の視線方向の速度が求まるわけであるが、天文学研究の実際の場合では、例えば後述するように、連星系の視線速度の変化の様子等を使って、天文学におけるもっとも基本的な量である質量、半径等々が求められている。あるいは、そもそも宇宙膨張が発見されたのも、遠方の銀河のスペクトル線の赤方偏移による。これらのことから考えると、後に教師となる学生たちに、この重要な原理を単にことばあるいは式による説明にとどまらず実際に試させることは、大いに意義あることと思われる。そこで筆者は、「地学演習」授業で恒星スペクトルの測定を行わせてみた。

「地学演習」は、理科専門科目の3年次以降選択可能な通年演習授業であり、前期は地学担当教官の持ち回りで授業が行われる。この科目は、特別教科(理科)教員養成課程・地学の学生の必修科目であり、事実上地学関係で卒論を書く学生が選択することとなっている。筆者はそのうち天文分野関係を担当していたが、一昨年度と昨年度に、表題のように「スペクトル線のドップラー効果によるずれから連星系を構成する恒星の視線速度を測定する」という演習を行った。一昨年度の筆者の担当は2回分のみであったので、実際の作業はデスクワークとせざるを得なかった。このため、後述するように各スペクトル写真上の位置と波長の関係式を求める際に作業をグラフ上で行わざるを得ず、その結果誤差が大きすぎ、学生たちのせつ

かくの努力にもかかわらず、得られた値はあまり良いものとはいえなかった。そこで、昨年度は3回分担当することになったので、一昨年度の反省からパソコンを使っての実習を試みた。

天体のスペクトル観測の生データを整約するのはかなり大変な仕事であって、パソコンレベルの仕事を超える面があるが、整約されたデータを用いて視線速度を測るということ自体は、パソコンを使えば十分にできる範囲の作業となっている。筆者自身もパソコンによって星の視線速度測定の仕事をしており、今回学生たちに測定させた観測データも、実際に筆者らが専門論文を書くときに使う本物のデータであった。この点からも、実際に学生たちがどの程度うまい作業をするのか大変興味をもたれた。

ここではまずこの原理について簡単に述べ、そのあと学生たちはどのようにこの課題に取り組んだのか等について紹介してみたい。

II ドップラー効果と分光連星 高校地学教科書での扱いを含めて

「ドップラー効果」自身は高校物理のどの教科書にもものっているきわめて重要な物理現象で、波源(音源、光源など)と観測者のあいだに相対速度がある場合に、観測される波長が本来の(固有の)波長とは違ってくるというものである。天文学の分野では、この現象がきわめて重要な役割を果たしており、天体の視線方向の速度を決める基となっている。

たとえば、宇宙が膨張しているという発見のもととなった観測事実は、1920年代末にE. ハッブルが多くの銀河のスペクトルを測って、それらのスペクトル線がいずれも波長の長い方に、すなわち赤方にずれていること(いわゆる赤方偏移)を見いだしたということである。これらの銀河までの距離は、たとえばそれらの銀河に含まれる脈動

型変光星の「周期-光度関係」等を用いて求められるが、ハッブルは遠方の銀河ほど赤方変異の割合が大きい、つまり後退速度が大きく、銀河までの距離と後退速度との間には比例関係が成り立つということに気づいた。(これは現在ハッブルの法則として知られており、このこと自体すべての高校地学の教科書に載っている。)

そしてドップラー効果は天文学の分野において、それ以外にも重要な役割を果たしている。そのひとつがこの小論で扱う、恒星の質量、半径等を決定するうえでの大きな役割である。このような基本的な諸量を求めることは、学問上からもきわめて重要なことである。いったい行くことのできない遠くの天体の質量をどうやって決めているのだろうか、ということは、多くの人の抱く当然の疑問である。学生たち自身も、そしてまた、学生たちが将来接するであろう小学校、中学校および高校の児童、生徒たちも同様であろう。

それには、夜空にみえる恒星のうちかなりを占めている連星系を利用することとなる。連星系とは、二つの恒星が実際にお互いのまわりを重力で引き合いながら公転している系であるが、ではこの原理はどのようなものであろうか。高校の地学教科書は現在8社から出ているが、この中で連星におけるドップラー効果の重要性を大きく取り上げているものとしては、東京書籍「改訂地学」と第一学習社「高等学校地学」の二つがあげられる。これらの教科書ではとくに、スペクトル線のドップラー効果によるずれの周期的変化からその星が実は連星系を成していると判断される分光連星というものを取り上げている。この分光連星のスペクトルを一定の期間に渡って観測し、それを構成している二つの恒星のスペクトル線の周期的なずれ、すなわちそれらの星の視線速度の周期的変化を測定することにより、視線速度曲線と呼ばれるものが得られる。この曲線から、二つの星の質量

の比や、質量関数と呼ばれる量(後述)がわかり、あるいは両星間の距離なども見当がつけられる。

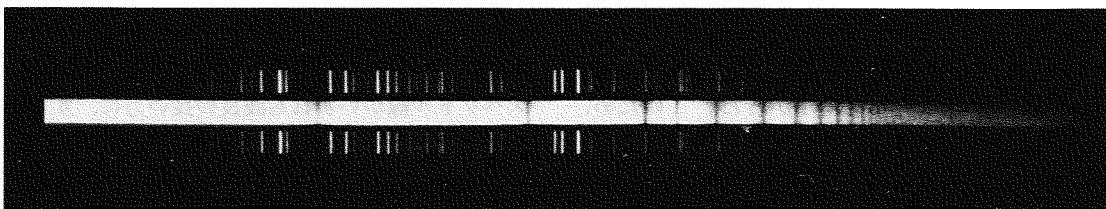
そしてもし、この分光連星の公転軌道面がたまたまわれわれの視線方向近くであれば、この両星はお互いの回りをまわる間にわれわれから見て互いに隠し合いをし、したがってこの連星の明るさも周期的に変化することとなる。このような場合、この連星は食連星とも呼ばれ、この食連星の明るさの変化を続けて観測することにより、われわれはこの星の変光の様子を光度曲線とよばれるものとして得ることができる。そして、この光度曲線を解析することにより、この系の公転面の傾きの角度、あるいは両成分星間の距離を1としたときの両成分星の半径、あるいは明るさの比などを知ることができる。

つまり、分光連星としての視線速度曲線の解析を行うことによって分光要素と呼ばれる量が求まり、食連星としての光度曲線の解析を行うことによって測光要素と呼ばれる量が導かれる。あるひとつの連星系について分光要素と測光要素を同時に求めることができれば、その連星を構成する成分星の質量や半径あるいは温度などのきわめて基本的な諸量が得られるのである。今でも恒星の質量、半径等が直接的に得られるのは、この分光連星でもあり、食連星でもあるような連星系の分光および測光観測・解析によってだけである。したがって、天文学におけるこのような観測の重要性はいくら強調してもしすぎることはない。

Ⅲ 測定の具体的手順

恒星の視線速度を測るには、上に述べたように恒星が観測者に対して視線方向に運動していることによって生ずるスペクトル線の固有の位置からのずれを測り、そのずれの向きと大きさから視線速度の向きと大きさを求めるのであるが、そのためには、もしその恒星がわれわれに対して視線方

図1 スペクトル写真の例(中央の部分が恒星のスペクトルで上下に比較スペクトルが焼き込まれている。)



向の運動をしていない場合にあるであろうそれぞれのスペクトル線の位置を知る必要がある。このために天体のスペクトルを撮影する際に、同時にスペクトル線の波長がよくわかった元素（たとえば鉄とかトリウムなど）のスペクトル線を天体のスペクトルを挟み込むように焼き付けるのである。具体的には地上に固定した陰極管ランプを天体観測の前後にともし、この明りに短時間露光させてスペクトルを得る。こうしたスペクトルを比較スペクトルと呼ぶ（図1参照）。こうすれば比較スペクトル源は観測者に対して運動していないわけであるので、比較スペクトルの各スペクトル線は本来の位置、すなわちドップラー効果によるずれのない位置に焼き込まれることになる。したがって天体が視線速度を持つかどうか、すなわちその天体のスペクトル線が赤方あるいは青方にずれているかどうかは、この比較スペクトルとの位置関係から判定できることとなる。

この演習で使用したスペクトルは、東京天文台岡山天体物理観測所（当時）の188cm 反射望遠鏡クーデ焦点で写真乾板上に撮影したものである。比較スペクトルとしては、ネオンガス中の鉄アークによるスペクトル線（したがって輝線スペクトルとなる；図2）を使用している。

さて、計算機での処理を行うためには、スペクトルに込められている情報をデジタル化しなければならない。ここでは、それらを東京大学東京天文台（当時）のPDSマイクロデンストメータと呼ばれる測定機器でデジタル化し、読み込んだデータをフロッピーディスクに落としたものを使用した。

実際の測定手順は大まかにいって、次のような部分から成っている。

- ① 測定するスペクトル写真の比較スペクトル中のスペクトル線の同定：

その比較スペクトル中に見えている各スペクトル線がいったい与えられた表中のどのスペクトル線なのかを見いだす必要がある。この作業をスペクトル線の同定作業という。

- ② そのスペクトル写真における位置 x と波長 λ との関係式を求める：

位置のずれと波長のずれの換算のため、乾板上のある位置からの距離 x と波長 λ とのあいだの関係式を導くこととなる（このことを乾板定数を求めるといふ）。この関係式はスペクトル写真ごとに違っている。関係式として3次式、5次式などがよく用

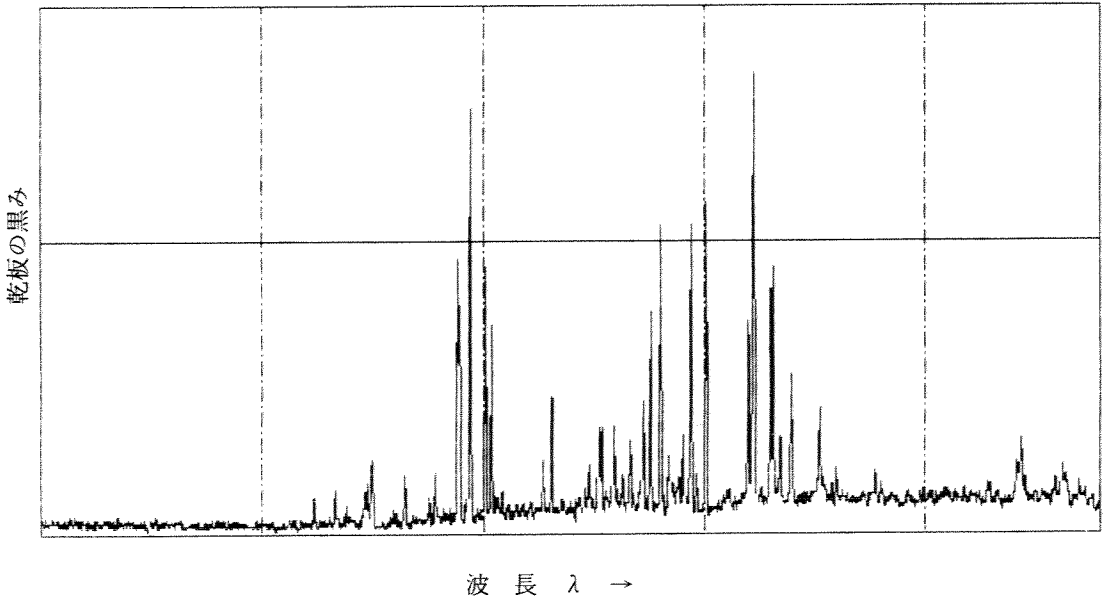


図2 比較スペクトル（鉄-ネオン陰極管による）右にいくほど波長が長い

いられる。

- ③ 天体スペクトル中のスペクトル線（吸収線）の同定：

星のスペクトル上で視線速度を測定するスペクトル線を特定する作業である。これができる、それぞれのスペクトル線の固有の波長がわかることとなる。通常は、一本のスペクトルにつき多くのスペクトル線を測定する。

- ④ 天体スペクトル線のずれの測定：

③で特定したスペクトル線ごとに、そのずれの量を見積る。具体的には、各スペクトル線の中心の位置を求めるわけである。

- ⑤ 視線速度の計算：

④で見積ったスペクトル線のずれの量を、②で求めた関係式を使って波長のずれに換算し、ドップラー法則から視線速度を計算する。

- ⑥ 視線速度曲線の決定

いろいろな時期に撮ったスペクトル写真ごとに評価した視線速度を公転位相のもとに並べ、それらにもっともよくフィットする理論視線速度曲線を求める。これから連

星系の分光要素がわかる。（ここで公転位相とは、連星の公転周期を単位として、暗い方の星が明るい方の星のちょうど手前に来た瞬間から測った、両星の位置関係を表す量である。連星のひと回りする間に公転位相は0から1まで変化する。）

学生たちは上記の①から⑥までについて、同定表やパソコンを利用しながら作業を進めていくことになる。必要なパソコンのプログラムはこちらで用意した。

IV 学生たちの測定作業の様子と結果

学生たちの行った作業の様子と得た結果について記してみよう。上記について説明を受けた後、学生たちは実際の測定作業に入るわけであるが、その第一段階がまずそれぞれ与えられたスペクトルについて、その比較スペクトル中に見えている各スペクトル線（図2参照）がいったい与えられた同定表（図3）中のどのスペクトル線なのかを見出すことである。この同定作業が学生たちにとって最初の、そして恐らくは最大の困難点であった。見えている比較スペクトルの波長域がいったいどの辺りの領域なのかは最初はわざと伏せていたので、見当の付け方は説明したものの、初めて見る学生たちには当然ながらまったく見当がつかない。時間ばかりが経過するが誰もいっこうに判断がつかない。しかしこちらも時計をにらみながら頑として黙っている。時間がさらに経過する。何人かは試行錯誤的に領域を限りながら比例配分で見当をつけにかかる。しかし何人かはまったくお手上げのようで手が動かない。学生たちの様子と時間の経過を考えながら、ヒントを少しずつ与えていく。しかし、やはり人間はたいしたものだと思えたのは、わけがわからないながらにらみ続けているうちに、少数であるがいいところに絞り込み始める者が現われたことである。長い時間の経ったあと、とうとうほとんど独力に近い状態で比較スペクトルの同定に成功するものが現われる。その後はわいわい言いながら、次々と他の学生にも広まっていく。ここまでできたところで一回目は終了とした。結局この日はパソコンに触れないままであった。

翌週からは、福島大学情報処理センターの演習室の半分を借用してパソコンによる演習を行った。次の段階の仕事は乾板上のある位置からの距離x

— 3834.225 Fe I	— 4045.815 Fe I
— 3839.259 Fe I	
— 3840.439 Fe I	
— 3841.051 Fe I	
— 3843.259 Fe I	444 Fe I
— 3846.203 Fe I	4062.90 Fe I
— 3849.769 Fe I	4063.577 Fe I
— 3850.820 Fe I	
— 3856.373 Fe I	
— 3859.216 Fe I	
— 3859.713 Fe I	4071.740 Fe I
— 3865.526 Fe I	
— 3867.219 Fe I	
— 3872.504 Fe I	
— 3873.763 Fe I	
— 3878.021 Fe I	
— 3878.575 Fe I	
— 3886.284 Fe I	
— 3887.051 Fe I	
— 3888.577 Fe I	
— 3895.658 Fe I	
— 3897.895 Fe I	
— 3897.709 Fe I	
— 3902.742 Fe I	
— 3906.482 Fe I	4112.549 Fe
— 3920.260 Fe I	4132.060 Fe I
— 3922.914 Fe I	4134.681 Fe I
— 3927.922 Fe I	
— 3930.279 Fe I	4143.420 Fe I
	4143.871 Fe I

図3 比較スペクトル線の同定表（一部）

と波長 λ とのあいだの関係を、同定した多くの比較スペクトル線を使ってそれぞれのスペクトルごとに導くことである。パソコンを使わずにグラフからこの関係を導くには1次式が精一杯であったが、より適切には3次式、5次式等を用いるのがよく、パソコンを使うとこれを簡単に求めることができる。実際には最小2乗法でベストフィットの3次式を求めるようなプログラムを使用させた。最小2乗法で求める際に、何本かの比較スペクトル線はどうしてもはずれるのがでてくる。これを除きながらもっとも良さそうな3次式を求めるのであるが、学生の個性によって当然ながら除去し具合に差が出てくるので、適切な助言が必要である。

次の段階はいよいよ星のスペクトル上で視線速度を測定するスペクトル線を特定する作業である。使用した連星のスペクトルの例を図4に示してある。この連星はA型スペクトルの特徴を示し、水素原子による吸収線がはっきり見えるので、まずそれを使うこととした。その他に一回電離のカルシウムによる有名な吸収線（K線と呼ばれる）や1回電離の鉄原子によるたくさんの吸収線等が測定に適している。カタログよりこれらの吸収線の波長をひろいだして学生たちに与えるが、学生た

ちはそれらの吸収線が、いったい実際に見えている吸収線のどれに対応するかを判定する必要がある。しかし、今度はもうスペクトルのだいたいの波長域もわかっているし、なにより比較スペクトルで苦労した経験がものをいい、ほとんどの学生が比較的簡単に対応する実際の吸収線を見つけたすことができた。

さて、それではある特定の吸収線のずれの大きさはどのように測定できるのであろうか。それはその吸収線の中心の位置 x_0 を見つければよいのであるが、実際のスペクトル線はいろいろ他の元素による弱い吸収線が重なったりして、その輪郭は一般に対称ではない。一昨年度はパソコンを使用しなかったため、スペクトル線の中心を見つけるために、そのような非対称性を無視して図上のスペクトル線輪郭の中心と思われるところにエイッとばかりに線を引き、そこを x_0 としたのである。これが、あまりよい結果の出なかった2番目の原因であろう。これに対し昨年度は、パソコンの画面上に、ひとつのスペクトル線はそのままの向きで、もう一方はそれを波長方向に裏返した向きに表示させ、パソコンを操作してそれらの位置をお互いに試行錯誤的にずらしながら、両方がもっともよく重なり合うようなずれの量を見つけるとい

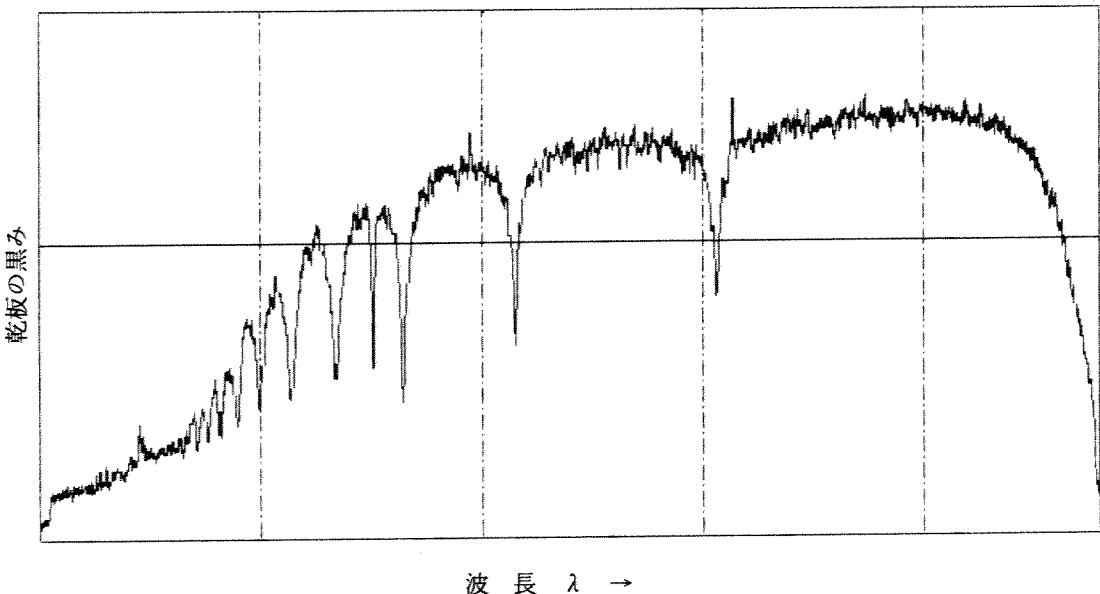


図4 恒星のスペクトルのトレース例 右にいくほど波長が長い

う手法をとった(図5参照)。そのずれの量から、さきほど求めておいた関係式により、波長のずれに換算できる。するとただちにこの波長のずれに対応する視線速度の大きさが計算されることとなる。これはパソコンを利用すれば、一気に行うことができ、たちまちそのスペクトル線からの視線速度の見積り量が、地球と太陽とその天体との位置関係による補正を済ませて求まってくるのである。

このずれを試行錯誤的に見積るといふ部分はもっともパソコン的な作業であり、ある意味では学生たちがもっとも測定しているという実感を感じずる部分であるが、これについての操作法はこちらが思っていたよりもずっと簡単に学生たちは理解し、すぐに手慣れた操作でずれを見積っていった。こういった点における最近の学生の能力はなかなか大したものであると感ぜられたものである。

さてそのようにして視線速度の見積りを、そのスペクトルの何本かの吸収線について行う。対象とした連星系は実は、両星の明るさにかかなりの差があるため、明るい方の成分星(主星と呼ぶ)によると考えられるスペクトルしか見られなかった。このような分光連星を単一スペクトル線分光連星という。原理的には同一のスペクトルのスペクトル線からは、同じ成分星について同じ視線速度が

導かれることになるはずであるが、実際にはある程度の差が生じる。通常これらの平均を取ってそのスペクトルの視線速度とするわけである。

昨年度この演習授業をとった学生数は16名であって、各人それぞれ3本ずつのスペクトルについて視線速度を測ってもらった。そして同一のスペクトルは少なくとも3人によって測られるよう留意した。実際に測定してもらったスペクトル数は10本だった。

学生たちの測定結果の一覧を表1に掲げておく。一つだけ他の結果と大きく違っているのがあるが、それを別にすればあとは各人によって決定的に大きな違いは見られないといってよい。それらを公転位相に対してプロットしたものが図6である。図中には、それらの測定結果から計算したこの連星系の主星の理論視線速度曲線も、この系の軌道の離心率を0と仮定して描いてある。

V まとめと議論

この演習で学生たちにスペクトルを測定してもらった星は、オリオン座V392星(V392 Oriと表記する)という分光連星系である。変光星総合カタログ(GENERAL CATALOGUE OF VARIABLE STARS, 4th Ed., Vol. II)によれば、この系は見かけの等級約11等、公転周期0.659284日の

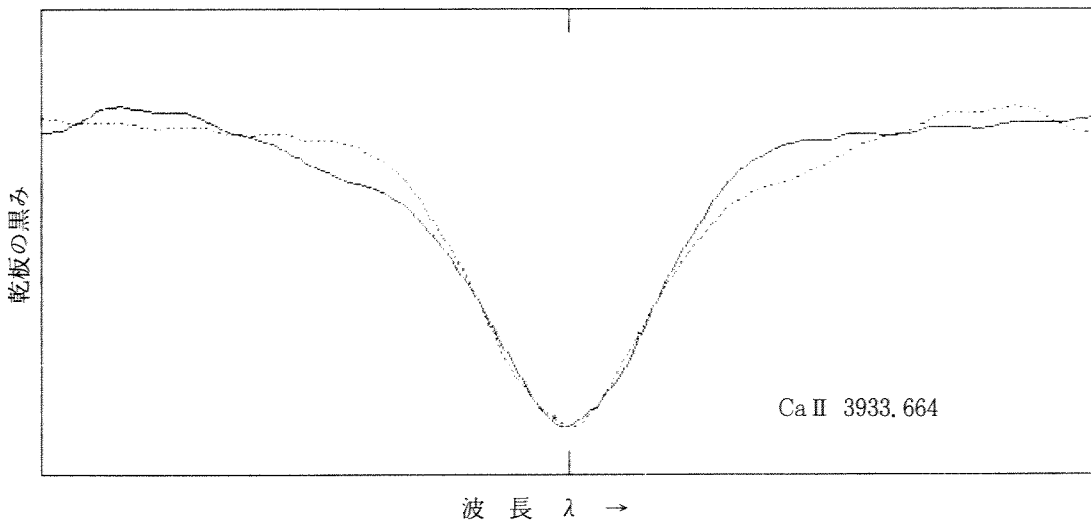


図5 恒星の吸収線のフィッティングの様子(点線は実線の輪郭を裏返しにしたもの。)

近接食連星系である。筆者自身も同じ資料を用いてこの連星の主星の視線速度を測定した。学生たちに測定してもらった乾板の、筆者自身の測定結果は表1の最後の欄に示されている。スペクトル線によっては測定値にかなりの開きが見られる。

図6の視線速度曲線から、次のような分光要素が求められる。

$$K_1 = 37.1 \pm 1.1 \text{ km/s,}$$

$$V_0 = -53.0 \pm 1.4 \text{ km/s,}$$

$$a_1 \sin i = 3.36 \times 10^5 \text{ km,}$$

$$f(M) = 6.97 \times 10^{27} \text{ kg.}$$

ここで、 K_1 は視線速度曲線の半値幅、 V_0 は連星系の重心の視線速度、 a_1 は主星の重心から連星系の重心までの距離、 i は系の公転面の傾角を表す。 $f(M)$ は質量関数と呼ばれる量で、両成分星の質量をそれぞれ M_1 、 M_2 とすると

$$f(M) = \frac{(M_2 \sin i)^3}{(M_1 + M_2)^2}$$

である。

学生たちと筆者自身の測定値にそれなりの開きが現われたもっとも大きな原因は、星の吸収線を左右にずらしながらの輪郭のフィッティングの巧拙などではなく、むしろ乾板ごとの乾板定数の求め方にあるようである。上にも述べたが、ある乾

板の x と λ のあいだの関係式を求める際に、不適当と思われるデータの除き方に適切さに欠けるところがあり、これに対する筆者の目配りが、16名16台という多さに十分行き届かなかったせいがある。今後注意する点であろう。

この演習はまさにパソコンの威力に依拠して有効に行えるもので、パソコンの使用なくして再び行うことなどはとても考えられない。学生間に当然パソコン扱いの習熟度の差はあったが、それでもこの演習では、それがさほど大きな障害にはならないように組んだ積もりであり、実際にすべての学生が目標の測定を行うことができた。

また、視線速度の測定へ向けてかなり省力化になるよう組んだが、それでもなお踏むべきいくつかのステップがあり、大体の学生はその一つずつのステップの意味するところについてきちんと理解してくれたと思われる。学生たちは、初回の比較スペクトル線の同定作業にはまったく苦しんだものの、全体としてはそれなりに楽しく実習がやれ、原理の理解に一段と近づいてもらったものと考えている。なお、各人からの提出はそれぞれの測定結果のみであったが、全員の結果から求めた図6のグラフ等をあとから受講者全員に渡し、自分の測定結果の位置づけを確認してもらった。

大学の教員養成レベルでの天文分野の演習課題

表1 視線速度の測定値

番号	スペクトル番号	公転位相	学生の測定値 ^{*)} (km/s)	学生の 平均値	筆者の 測定値
1	CI10-1246E	0.783	A-12.5, K-13.2, F-18.4	-14.7	-8.3
2	-1247C	0.073	B-68.6, L-81.3, G-68.9	-72.9	-64.3
3	-1247D	0.108	C-77.3, M-81.1, H-76.4, P-81.0	-79.0	-69.9
4	-1247E	0.220	D-89.3, (N-142.8,) I-91.3	-90.3	-90.2
5	-1247F	0.254	E-78.7, O-78.1, J-81.1	-79.3	-91.0
6	-1247G	0.286	F-81.3, A-89.0, K-92.6	-87.6	-95.9
7	-1249B	0.333	G-90.9, B-93.1, L-77.7	-87.2	-81.4
8	-1249C	0.368	H-86.2, C-93.4, M-88.3	-89.3	-74.1
9	-1249D	0.402	I-69.4, D-76.4, N-71.3	-72.4	-71.7
10	-1249E	0.438	J-66.0, E-72.9, O-69.1, P-56.1	-66.0	-61.1

*) 記号A~Pは学生を表す。スペクトル4番の学生Nによる測定値は、明らかに飛び離れているので解析からは除いた。

については、従来何かと不足を感じるが多かったとのことであるが、最近、大阪教育大学や愛知教育大学での実践を中心として編まれた演習書(横尾武夫編「現代天文学演習 宇宙を解く」)が出版され、長年の渴望がかなり満たされるようになった。ここでの実践も、それらの巨大な成果とともに、天文分野での教育実践にわずかでも付け加えることができるものがあれば幸いである。

謝辞

この演習で使用した測定プログラムは、群馬大学の岡崎彰氏から提供いただいたものを一部改変したものです。同氏に感謝いたします。また、使用した比較スペクトル線の波長同定表は、東京大学東京天文台岡山天体物理観測所(当時)から筆者に提供いただいたものを使用させていただきました。あわせてお礼申し上げます。

参考文献

横尾武夫編:「現代天文学演習 宇宙を解く」

恒星社(1988年)

P.N.Kholopov et al.(Ed.): "GENERAL CATALOGUE OF VARIABLE STARS, 4th Ed., Vol. II(1985) (Nauka, USSR)

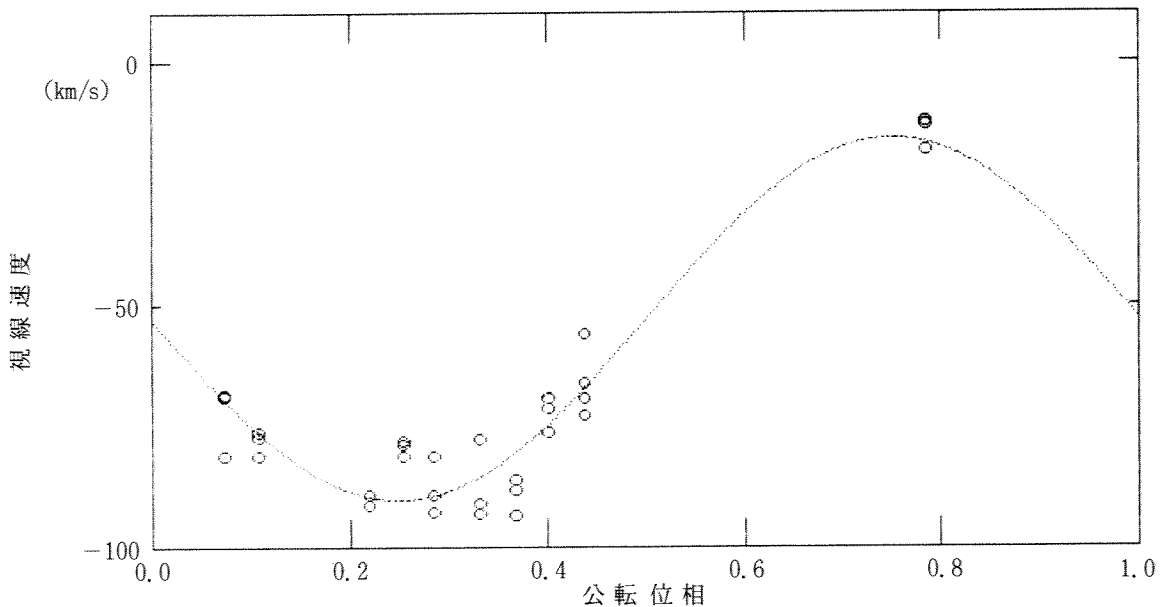


図6 視線速度の測定値(白丸)と求められた視線速度曲線