

恒星スペクトル線の解析法

—線強度の測定と成長曲線法—

加藤 賢一

大阪市立科学館学芸課

E-mail: kato@sci-museum.kita.osaka.jp

概 要

恒星スペクトル線測定ならびに解析法を紹介する。前半の第1章では、写真乾板に記録された恒星スペクトルに見られる吸収線の等価幅を測定し、それに基づいて成長曲線を描くまでを扱い、後半の第2章では成長曲線法の理論的背景を紹介し、観測されたデータに基づいて描かれた成長曲線を理論曲線と比較することから元素量を求める。本論文の特徴の一つは、実習の要素を取り入れたことで、等価幅測定、成長曲線の作成、と順を追っていけば、最終的に種々の大気パラメータを算出することができる。例題として太陽の中性鉄の吸収線を扱い、最終的に鉄の量を $\log \epsilon(\text{Fe}/\text{H}) = -4.42$ と求めることができた。この値は現在もっともらしいとされている値に極めて近く、成長曲線法が元素量を求めるのに有効な手段であることが分かる。

第0章 はじめに

セッキが世界で最初に恒星のスペクトル分類を行なったのは 1866 年のこととされている (Hearnshaw 1986)。ラッセルがスペクトルと絶対等級の関係を示したのが 1913 年、ウンゼルトの「恒星大気の物理学」が出版されたのは 1938 年 (Unsöld 1938)、ミハラスの「恒星の大気」は 1970 年である (Mihalas 1970)。恒星のスペクトルに関する理論や解析法はウンゼルトからミハラスまでの時代、すなわち 1930 年代から 1960 年代にかけて大いに研究され、基本的な諸問題はほぼ見通しがつくようになった。基本的というのは、静的で、恒星大気が平板的であるという近似が適用できる場合ということで、超巨星のように拡散している上に運動があるような場合については今でも研究の途上にある。

スペクトル線は恒星の深部から発した光が上層の希薄な大気を通過するうちに形成されるものである。したがって、恒星大気の物理的条件が分かり、光の伝達方程式が解ければ、スペクトル線の

強度や形状などは理論的に計算されるはずである。しかし、これが実現できるようになったのは膨大な数値計算が可能になったコンピュータ時代においてであって、これはミハラスの時代に対応している。それ以前のウンゼルト時代はそれをいかに少ない計算量で解くかに腐心した時であり、その手法の一つがウンゼルト自身も開発に携わった成長曲線法であった。

恒星大気は急激な温度変化のある層であり、その扱いが光の伝達などの式を解く場合に障害となっている。そこで、近似的に恒星大気を一層と見なし、簡略化するのである。成長曲線法はこの仮定においてスペクトル線の解析を行なう一手法である。

現在、成長曲線法が研究現場で使うことはまれになったが、恒星大気でのスペクトル線形成についての物理はしっかり取り入れられていて、教育的な意義は決して失われていないし、大気モデルが利用できないような恒星については使用されている手法であることを見れば実際的でもある。そ

れがここで紹介する意義である。

この実習の原稿は 1986 年前にできあがり、何人かの大学生に読んでもらったが、実際に手を動かして最後までやってもらうところまではいかなかった。途中のプロセスが多すぎる、頁数の制限から省略が多く、理解しにくい、という反応もあった。恒星大気論、放射の伝達方程式、分光学、熱力学など様々な領域がいきりまじった複合領域であり、丁寧に解説しなければ理解しにくいということであろう。しかし、星のスペクトル線解析を行うにはこの実習で試みるような内容は最低限把握しておく必要がある。「星のスペクトルを調べたらどんな元素がどれだけあるか分かると聞いたんですけど、どうやるんですか？」という素朴な質問にまともに答えようとしたら、こんなものになってしまったということでご了解いただきたい。

参考文献

- Hearnshaw, J.B. 1986, The analysis of starlight: one hundred and fifty years of astronomical spectroscopy, Cambridge University Press, Cambridge
- Mihalas, D. 1970, Stellar Atmospheres, W. H. Freeman and Company, San Francisco
- Unsöld, A. 1938, Physik der Sternatmosphären, Springer-Verlag, Berlin

第 1 章 スペクトル線の測定

1. スペクトルのもたらす情報

夜空に光っている星々はどれも小さな光点のようにしか見えない。しかし、現代に生きる私たちはこの星々が太陽と同じような巨大な火の玉であることを知っている。星までの距離を測るのは極めてむずかしい仕事であったため、星と太陽が同種の天体であることがはっきり証明されたのはそう昔のことではなかったが、それ以前の人々も星が太陽の仲間らしいとうすうす感じていたようである。

19 世紀の中頃、太陽が星の一つであることが、

別の側面から明らかにされた。それは分光術が天体観測に応用され、星の光を分析することができるようになってからのことである。光を波長に分解してその性質を調べるのが分光学であり、波長に分解された光が、すなわち、スペクトルである。さまざまな星のスペクトルを調べてみると、太陽と同じスペクトルを示す星々が見つかり、太陽は星の一つであることが疑いようのない事実となった。

このようにして、星の性質を調べるうえでスペクトルの分析が重要であることが知られるようになり、やがて星の分光学はスペクトル型への分類から観測・理論ともに精密さを加え、天文学の一分野としての地位を確立することになった。

一般に光を含めた電磁波を波長とその強度という二つの要素に変換することを分光と言い、分光された電磁波をスペクトルと言っている。虹の七色は可視光線のスペクトルである。現在の天体観測においても可視光はもちろん電波・赤外・紫外・X線のいずれにおいてもスペクトルの観測は天体の物理状態を教えてくれる最も重要な情報源となっている。

細い隙間（スリット）を通った太陽光線を虹の七色に分光するとたくさんの暗線が並んでいるようすが見られる。これをフラウンフォーファー線、暗線、あるいは吸収線などと呼んでいる。この吸収線の波長や強さを調べることによって、太陽や恒星にどのような化学元素がどれぐらいあるのかといったことや、温度や圧力などの物理状態も分ってきた。では実際にどのような手続きを経て求められるのだろうか？この章では、吸収線解析の一例として太陽と恒星の可視域のスペクトル線の強度測定を行い、成長曲線とよばれるグラフを作成してみよう。

2. 分光観測

太陽や恒星のスペクトルを見たり、写真に撮ったりするには光を波長別に分ける装置、つまり分光器を用意しなければならない。分光器はスリット、プリズムやグレーティングなどの分散系、カメラレンズなどで構成されている。実験室で使うような簡単な分光器でも太陽の高分散スペクトルを得るための何十倍という大きさのものでも原理

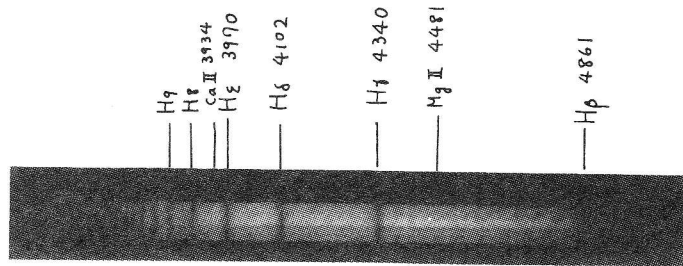


写真1. シリウスのスペクトル写真

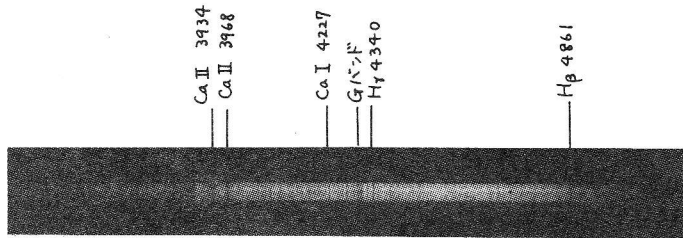


写真2. カペラのスペクトル写真

は同じである。星のスペクトル型を決めるために撮影される 50~100 Å/mm ほどの中程度の分散度のスペクトルならば全長 50~60cm ほどの分光器で得られるが、本書で扱うような成長曲線法による解析に要求される高分散のスペクトル写真 (10 Å/mm 以上が欲しい。可能ならば 5 Å/mm 以上) を撮るための光学系となると全長 5m ほどにもなってしまう。また暗い星を対象としたり、効率よくスペクトルを撮るためには、できるだけ入射光量が多いほうがよい。そのためには大きな集光装置である大望遠鏡を使わなくてはならない。このように高分散のスペクトルを得ることは装置の規模や経費の点から見て容易にできることではない。このような理由からここでは既に撮影された高分散のスペクトル写真があるものとして、解析の方法のみに話を限ることとする。

しかし分光観測がどのように行われているかを知っておくことは大切である。章末に掲げた参考文献の 1) を参照して戴きたい。なお分光観測の雰囲気味わいたい方には分光器の自作をお薦めする (参考文献 2)~ 5) を参照)。分散系に透過型のグレーティングを使い、スリットの幅をうまく調節すればそれだけで太陽の吸収線を見ることができる。これならば極めて安価に作ることがで

きる。また対物プリズムという手段もあるのでこのあたりのことは読者の研究にまかせることにしよう。

では実際に撮影されたシリウスとカペラのスペクトル写真を見てみよう (写真1・2)。この例の場合、フィルム上での実際の長さは 25mm ほどあって、約 60 Å/mm の分散である。強い線や弱い線、規則正しく並んだ線、鋭い線や広がった線などいろいろある。波長域は同じであるが、ずいぶん様子が違っている。強い吸収線には名称と吸収源となっている元素名を記しておいた。シリウスのスペクトル型は A 型、カペラは G 型に分類されているが、ここにその典型的な特徴がでていいる。吸収線の現れ方にこのように大きな差があるのは、主に表面温度の違いが原因になっていると考えられる。ちなみに、シリウスは約 10000 度、カペラは約 5500 度という表面温度である。シリウスのスペクトルにでていいる水素の線を見ると、他の線より強いだけでなく、かなり広がっている。このような情報も恒星大気の状態を明らかにする手掛りとなる。

他の恒星のスペクトルはどのようになっているか、スペクトル分類とは何か、どの恒星がいかなるスペクトル型に分類されているか、といったこ

とも興味深いのであるが本書ではふれる余裕がない。関心のある方は参考文献6)の「代表的恒星のスペクトル・アトラス」を見て戴きたい。これは東京天文台岡山天体物理観測所で撮影されたスペクトル写真をもとにした写真集で、さまざまな種類の恒星スペクトルが収録されている。

こうして得られたスペクトル写真を解析にかけるとまでは、さらにいくつかのステップを踏まなければならない。その最初の手続きは写真の黒み¹から元の光の強度分布を復元することである。そもそも、写真は光の強さを感光乳剤の黒みに変換して記録したものであって、われわれが欲しい情報はその元になった入射光の強さである。このためには、写真測光法で行われている手法を用いる(参考文献7))。つまり、あらかじめ強さの分っている光を当てた時に、どれだけの黒みになるかをいろいろな強度の光について測定し、黒みとの相関関係(感光乳剤の特性曲線)を求めておく。そして、スペクトルの各波長点での黒みを測り、特性曲線を用いて入射光の強さへ変換していくのである(図1)。このようにして、黒みから光の強度に変換されたスペクトルを、強度分布図と呼んでおこう。

なお、黒みを測定するにはデンシトメータ、あるいはマイクロフォトメータと言われる測定器を使う。さまざまなタイプのものがあるが、写真3にマイクロフォトメータの一つを例としてあげておいた。また図2、図3はこのマイクロフォトメータを使って描いたシリウスとカペラのスペクトル写真の黒みの波長別分布である。

図2、図3を見ると全体として山型になっているように見えるが、これは決して星が放つ光の真実の強度分布を表しているのではなく、あくまでも感光乳剤に記録された黒みの分布にすぎない。この点、注意が必要である。真の強度分布を知るためには、感光乳剤の波長依存性をはじめ、望遠

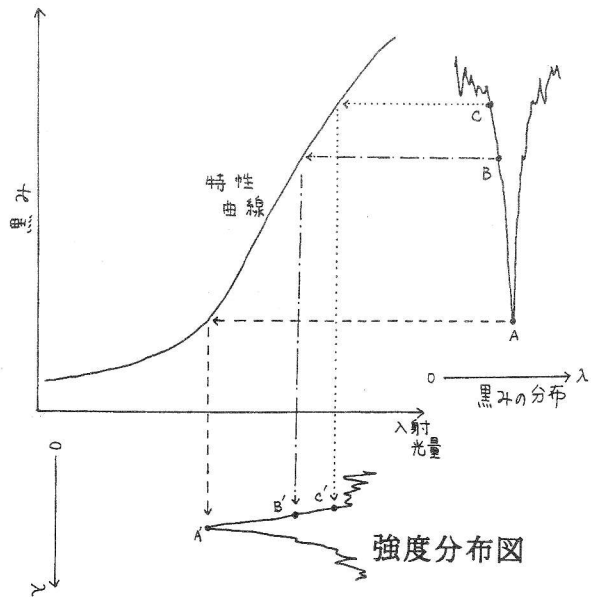


図1. 特性曲線を用いて黒みを入射光の強さへ変換。これを強度分布図とよんでおく。

鏡などの光学系による吸収、グレーティングなどの分散系の特性、地球大気などの影響をすべて補正しなければならない。しかし、このような作業は決して容易なことではないので、ふつうは真実の強度分布が問題にならないような分析法をとるようにしている。任意のスケールで測ったある波長での強度 I_0 とそのごく近くの波長における強度 I_1 の比を考えてみよう。もし波長の違いがごく小さければ、この比には図2・図3の山型分布の影響は効いてこないと思ってよいだろう。すなわち、相対的な強度比だけが強度分布図から得られる情報であって、星が放つ光の本当の波長別強度という重要な情報は残念ながら失われているのである。

ところで図2・図3は吸収線があるため、ぎざぎざしたスペクトルになっているが、もし吸収線の影響がなかったらどうなるだろうか。吸収線の影響をあらかじめ推定する方法がないので、正しく見積ることはできないが、吸収線の少ないところを滑らかに結んでいけば、ほぼそのようなスペクトルを得ることができるだろう。このようにして引いた仮想的な強度分布をスペクトルの連続部とよぶことにしよう。

次に、強度分布図(黒みから変換されたもの)の上でどの波長でも連続部は1の強さで一定していると見なして規格化した分布図を作る(図4)。

¹ 黒みは光の透過率で定義される。入射光の強度を I_0 、透過光の強度を I とすると透過率 T は $T=I/I_0$ 、黒み D は $D=\log(1/T)$ 。

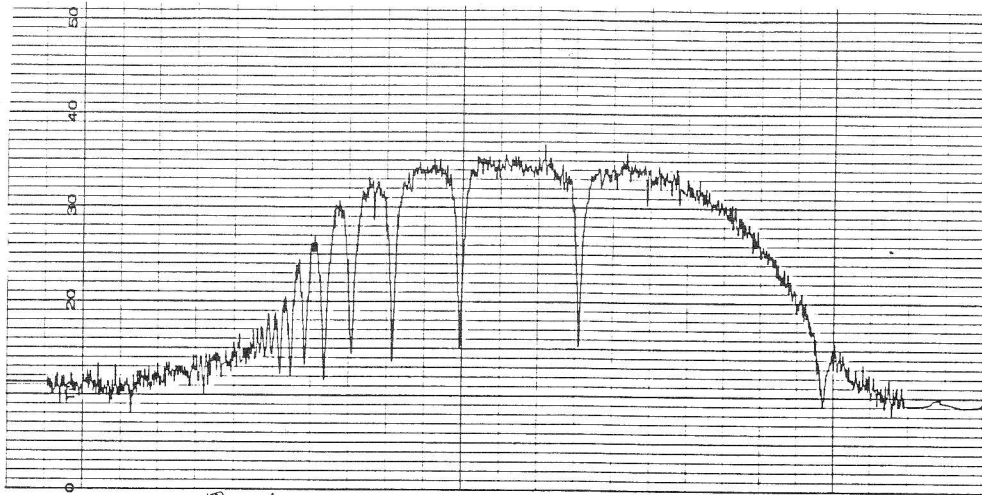


図 -1

図2. マイクロフォトメータで描いたシリウスのスペクトル

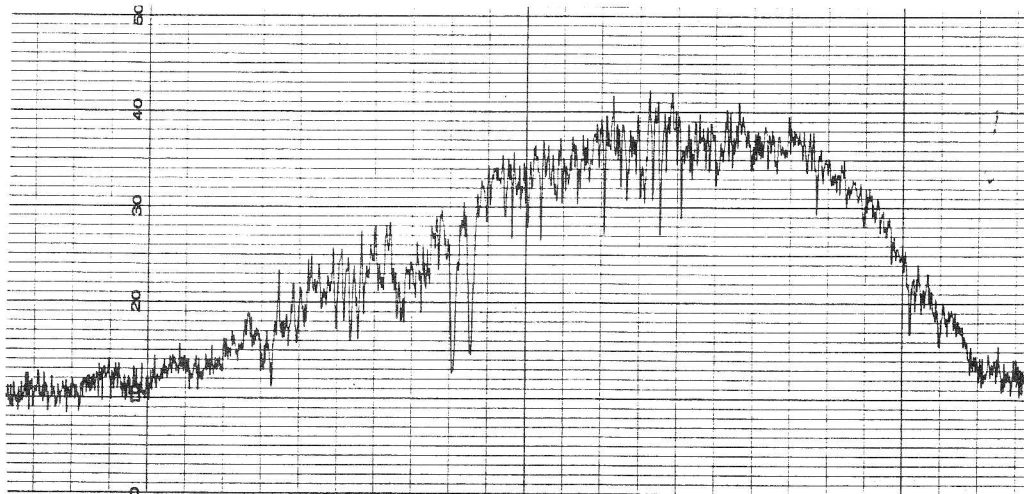


図 -2

図3. マイクロフォトメータで描いたカペラのスペクトル

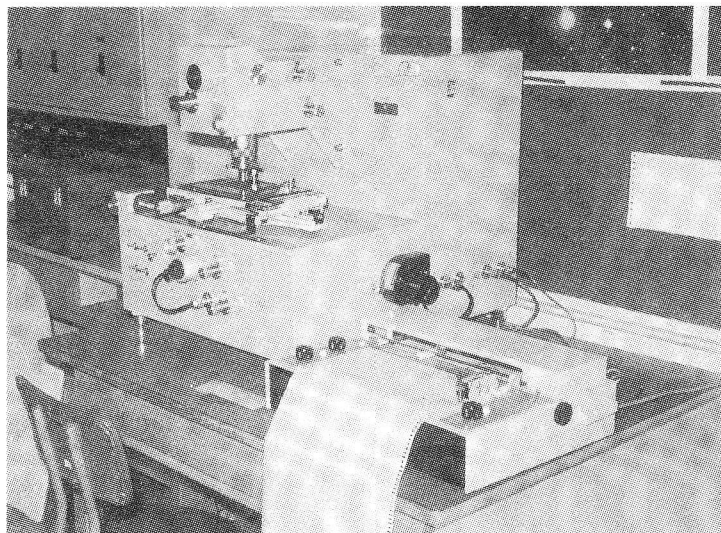


写真3. 大阪府科学教育センターにあるマイクロフォトメータ

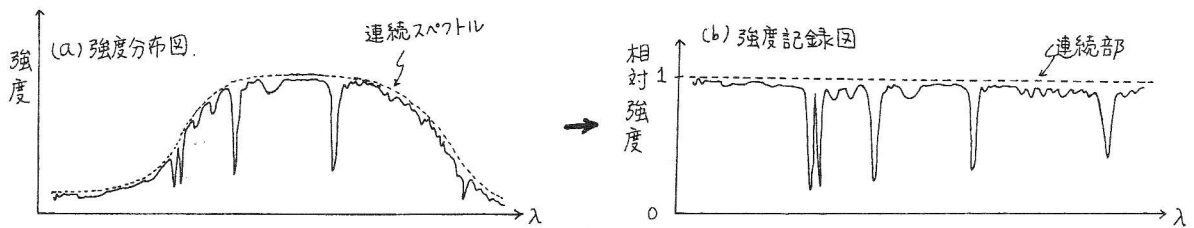


図4. スペクトルの連続部と強度記録図

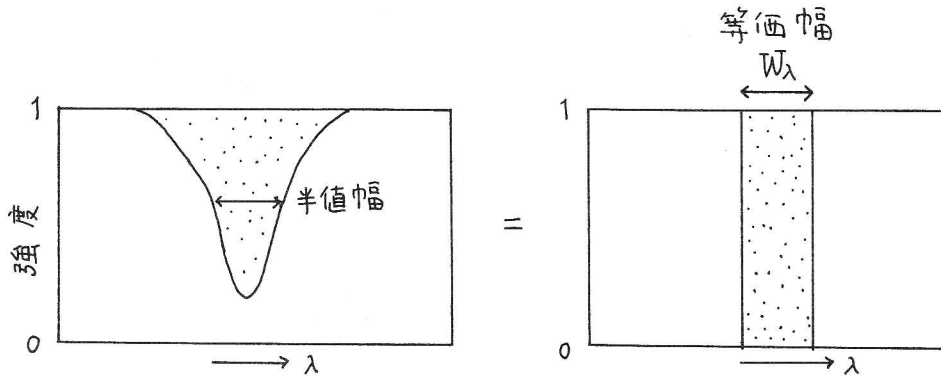
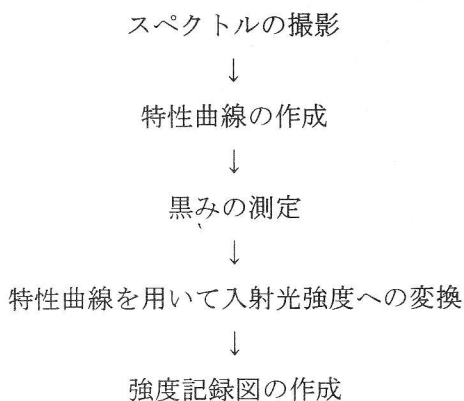


図5. 等価幅の定義

こうして黒みを入射光の相対強度分布に変換してしまえば感光乳剤の波長依存性や光学系による吸収などの影響を考えずに済ますことができる。この相対強度分布を強度記録図 Intensity Tracing と言う。これから吸収線の強さを測る一連の作業は強度記録図の上で行うことにする。

ここまでの準備の過程をまとめると、



という順序になる。

いくつかの恒星についてはスペクトルの強度記録図が出版されている。章末にあげた太陽、プロ

キオン、アークツルス（参考文献8～10）は比較的容易に手にはいるはずである。

3. 等価幅の測定

スペクトルの強度記録図を用意したところで、吸収線の測定にすすんでいこう。まず、並んでいる吸収線がどのような元素のどの状態で形成されたかを決めなければならない。この作業を吸収線の同定と言う。実験室で得られた吸収線の波長と強度のデータをもとに、水素やナトリウムやカルシウムなどの特徴的な強い吸収線を手掛りにしながら、同定をすすめていく。同定の基本となるスペクトル線のデータ表はあまり一般的なものではないようで、わが国の出版物には適当なものが見当たらない。参考文献11)は比較的入手しやすいと思われる。太陽の主要なスペクトル線は長い間の研究によってほとんどが同定されていて、結果は参考文献12)に出ているが、この文献を新たに入手することは現在では難しいかも知れない。本章ではすでに同定されている吸収線を扱うことにして、同定作業は省くことにする。

では、吸収線の強度を測ってみよう。吸収線を見ると細長いものや膨らんだもの、あるいは底の深いものや浅いものなど、いろいろである。スペクトル線の強度の指標としては中心部の深さ、半値幅、面積などが使われている。その中で、本章の目的から見て最もふさわしいのは面積である。スペクトル線の形に関係した中心部の深さや半値幅は分光器や感光材料による影響を受けたり、星の自転速度の大小なども効いてくる。それに反して、面積はこのような影響をあまり受けないので、元素量を求めるような場合には強度の指標に面積を使っている。ここでも面積を使うことにするが、ただし面積そのものではなく、次に定義される等価幅を用いることにする。等価幅とは、図5のように、吸収線でえぐり取られた部分の面積を、スペクトルの連続部までの高さを持つ矩形で置き換えたときの幅のことである。「幅」とは言うものの連続部の高さはいつも1に規格化しているので面積と同じことである。では実際に、いくつかの吸収線の等価幅を測ってみよう。

[実習1-1] 図6に示したのは太陽で観測された中性の鉄 (Fe I) のスペクトル線である。等価幅を測ってみよう。まず 1Å 幅の連続スペクトルの面積を本書の上で測り、これを S としよう。次に吸収線で囲まれる部分の面積 B を吸収線が三角形とみなして測る。すると等価幅 W_λ (mÅ、ミリ・オングストローム) は $B/S \times 1000$ で求められる。連続部に近いところでは線をたどるのがむずかしいが、適当に伸ばせばよい。では以下の 13本の吸収線の等価幅を求め、それを表1に記入しよう。

[実習1-2] 次に図7を用いてプロキオンの吸収線の等価幅を同じように求め、測定値を表2に記入しよう。

上の実習ではスペクトル線の形は単純に三角形と見なしたが、もちろん正しい三角形ではない。もっと正確に等価幅を求めたい場合にはプラニメ

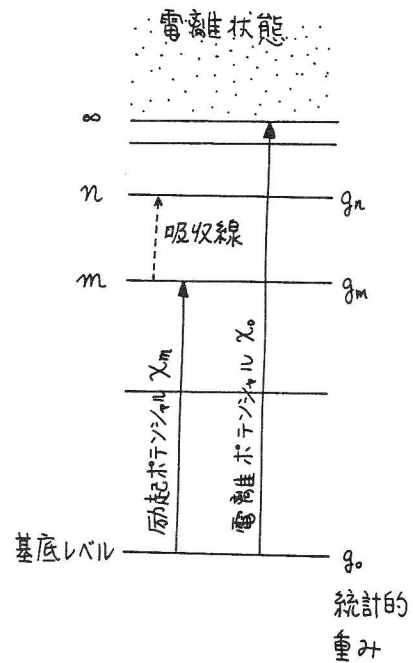


図8. 原子のエネルギーレベル

ータ (面積計) で面積を測るか、透明の方眼紙を重ねてその升目の個数を数えるなどすればよい。

4. 成長曲線を描く

スペクトル線は原子またはイオンのなかにある電子のエネルギー状態が変化することによって形成されることはよく知られている。そのエネルギー状態はどのような値でもとれるわけではなく、原子に固有のある決まったとびとびの値しかとることができないこともよく知られている。そのとびとびのエネルギー状態をエネルギーレベルを用いて模式的に示したのが図8である。入射した光をレベル m にあった電子が吸収し、上のレベル n に移る時に吸収線ができる。この時の吸収線の波長 λ は上下のレベル間のエネルギー差に反比例し

$$\frac{hc}{\lambda} = \epsilon_n - \epsilon_m \quad (1)$$

と表わされる。ここで h はプランク定数 (6.626×10^{-27} erg·s)、 c は光速 (2.998×10^{10} cm/s)、 ϵ は最も下の基底レベルから測ったエネルギー (erg) である。

考えるのは中性の原子でも電離しているイオンでもよいが、ここでは便宜上鉄の中性の原子であるとしておこう。さて、星の大気中を飛び回っ

ているこの中性の鉄原子であるが、全部が全部(単位体積当りの数 N) 波長 λ の光を吸収するわけではなく、レベル m に電子が入っている状態の鉄原子 (N_m 個) だけが吸収にあずかることができる。したがって、全吸収量を知るためにはレベル m の状態の鉄がどのくらいあるかを見つもらなければならない。この計算はボルツマンの法則を使って行なうことができる。

統計力学のボルツマンの法則によれば、熱平衡状態においては、 ε というエネルギー状態にある原子の数は $g \exp(-\varepsilon/kT)$ に比例するという。 g はそのレベルの統計的重みと言われている量で、通常 1~10 の整数値をとる。 T は温度 (K)、 k はボルツマンの定数 (1.3807×10^{-16} erg/K) である。そして二つのレベル m と n にある原子数の比は

$$\frac{N_n}{N_m} = \frac{g_n}{g_m} \exp(-\chi/kT) \quad (2)$$

となる。ここで $\chi = \varepsilon_n - \varepsilon_m$ である。

またレベル m にある原子の数 N_m は、原子全体の数を N とすると

$$\frac{N_m}{N} = \frac{g_m}{U(T)} \exp(-\varepsilon_m/kT) \quad (3)$$

と書ける。 ε_m は基底レベルから測ったレベル m までのエネルギーで、これを励起ポテンシャルという。 $U(T)$ は分配関数と呼ばれていて、 $g \exp(-\varepsilon/kT)$ を全てのレベルについての和をとったものである。すなわち、

$$U(T) = \sum_i g_i \exp(-\varepsilon_i/kT) \quad (4)$$

上の(3)式に定数を代入し、対数化すると

$$\log(N_m/N) = \log g_m - \log U(T) - \chi_m \theta \quad (5)$$

ただし、

$$\theta = 5040/T \quad (6)$$

である。ボルツマンの式で本質的に重要なのは指

数関数で効いてくる $\exp(-\varepsilon_m/kT)$ 、つまり $\chi_m \theta$ という項である。

こうして吸収に関与する鉄原子の割合が計算されたが、吸収線強度を知るためにはもう一つのステップが必要である。それは、そのレベル自身の吸収能力を考慮することである。たとえレベル m に電子があっても、そのレベルがしっかり電子を押しえ込んでなかなか離さないような性質があれば、入射光はあまり吸収されない。したがって、吸収線は弱いということになる。このような吸収能力、すなわちレベル間の電子の遷移確率は、通常、振動子強度という量で表現されている。振動子強度の値 f は実験や理論的計算から求められている。また、ボルツマンの式に表れている統計的重みとこの振動子強度の積を gf 値と呼び、吸収能と言えは gf 値を指すことが多い。

以上で見たように、吸収線の強さは吸収源の数と1原子当りの吸収能で決ってくる。別な表現をすれば、 $\chi_m \theta$ と gf 値で決まるということである。そこで、 $\log gf\lambda - \chi_m \theta$ を横軸に、等価幅を波長で規格化した $\log(W_\lambda/\lambda)$ を縦軸にとって両者の関係を図示してやると、両者の関係が明瞭に見えてくるはずである。このようにして作られたグラフは成長曲線とよばれている。なぜこれが成長曲線という名称でよばれているかは次章で分るだろう。

[実習1-3] 実習1-1で測定した等価幅 W_λ (mÅ) の値を用いて太陽の中性鉄の成長曲線を描いてみよ。温度は $T = 5300\text{K}$ とせよ。 gf 値と励起ポテンシャル χ_m (単位は電子ボルト eV、 $1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-12}$ erg) は以下に与えておく。

[実習1-4] 実習1-2で測定した等価幅 W_λ (mÅ) の値を用いてプロキオンの中性鉄の成長曲線を描いてみよ。温度は $T = 5800\text{K}$ とせよ。実習1-3で作った太陽の成長曲線と並べてみるとよい。

参考文献

- 1) 西村・海部編 現代天文学講座 11「宇宙の観

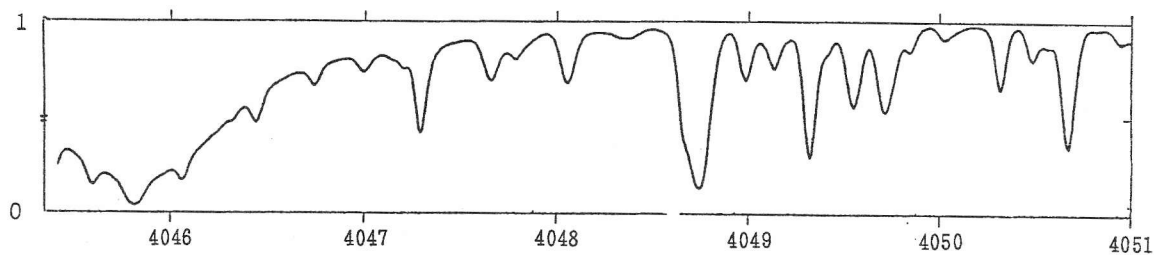
表1. 太陽のデータ.

$\lambda(\text{\AA})$	$W_\lambda(m\text{\AA})$	$\chi_m(\text{eV})$	$\log gf$	$\log(W_\lambda/\lambda)$	$\log gf\lambda - \chi_m\theta$
4045.83		1.48	+0.28		
4071.75		1.60	-0.02		
4132.07		1.60	-0.63		
4187.05		2.44	-0.55		
4206.70		0.05	-3.79		
4271.78		1.48	-0.16		
4389.26		0.05	-4.58		
5232.95		2.93	-0.18		
5332.91		1.55	-2.94		
5543.95		4.20	-1.14		
5586.77		3.35	-0.20		
5618.65		4.19	-1.38		
6400.02		3.59	+0.07		
6733.16		4.62	-1.55		

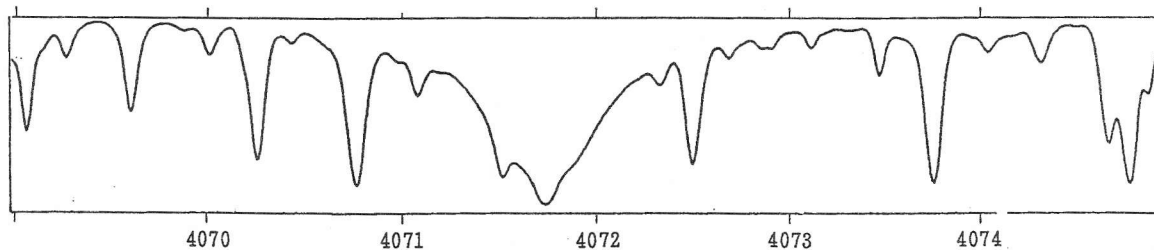
表2. プロキオンのデータ.

$\lambda(\text{\AA})$	$W_\lambda(m\text{\AA})$	$\chi_m(\text{eV})$	$\log gf$	$\log(W_\lambda/\lambda)$	$\log gf\lambda - \chi_m\theta$
4045.83		1.48	+0.28		
4045.83		1.48	+0.28		
4071.75		1.60	-0.02		
4132.07		1.60	-0.63		
4187.05		2.44	-0.55		
4206.70		0.05	-3.79		
4271.78		1.48	-0.16		
4389.26		0.05	-4.58		
5232.95		2.93	-0.18		
5332.91		1.55	-2.94		
5543.95		4.20	-1.14		
5586.77		3.35	-0.20		
5618.65		4.19	-1.38		
6400.02		3.59	+0.07		
6733.16		4.62	-1.55		

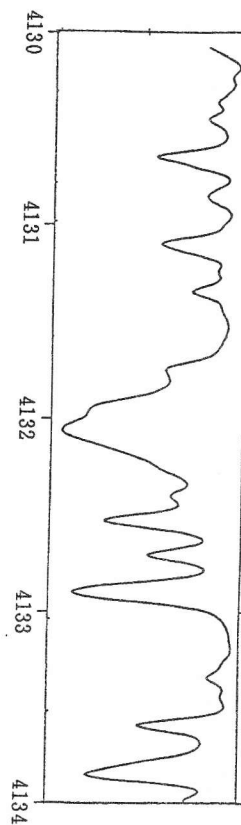
(1) λ 4045.83 A 長波長側の半分だけなので、要注意



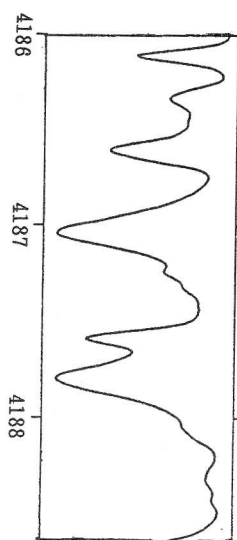
(2) λ 4071.75



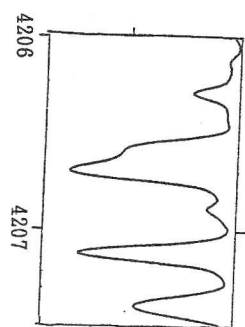
(3) λ 4132.07



(4) λ 4187.05



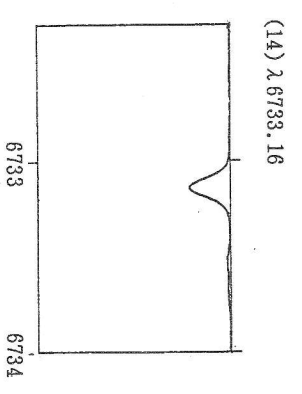
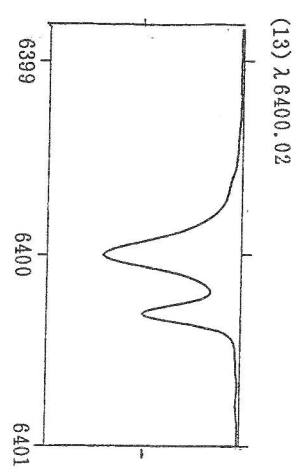
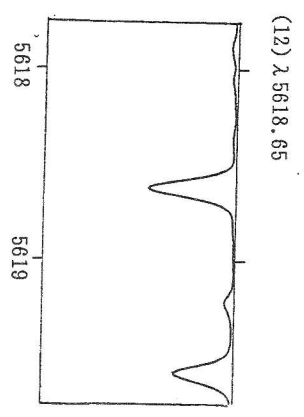
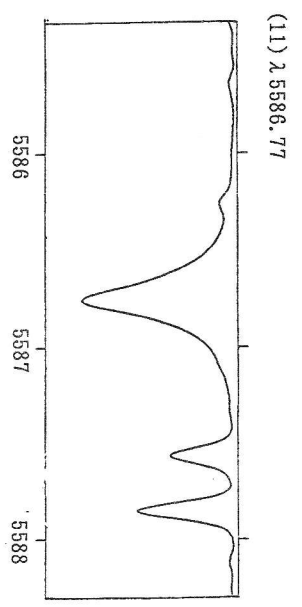
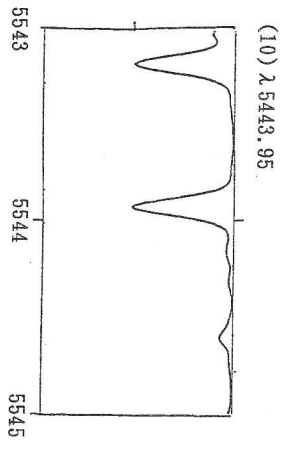
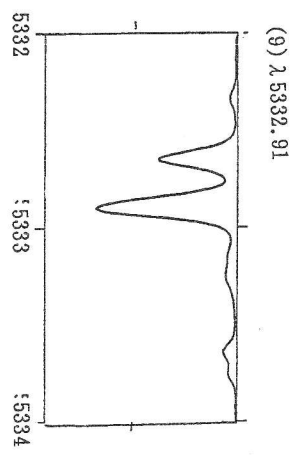
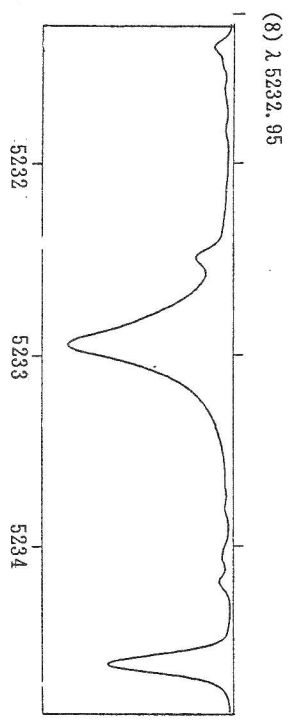
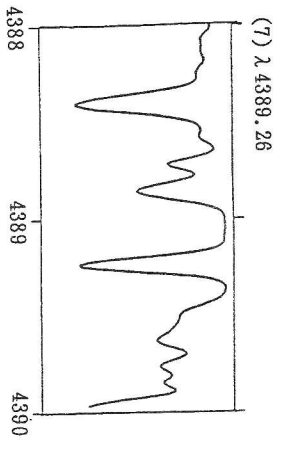
(5) λ 4206.70



(6) λ 4271.78



図6. Fe I のスペクトル線 (太陽). 横軸は波長 (Å)、縦軸は連続部を1にした相対強度. 等価幅を測定し、結果を表1に記入しよう.



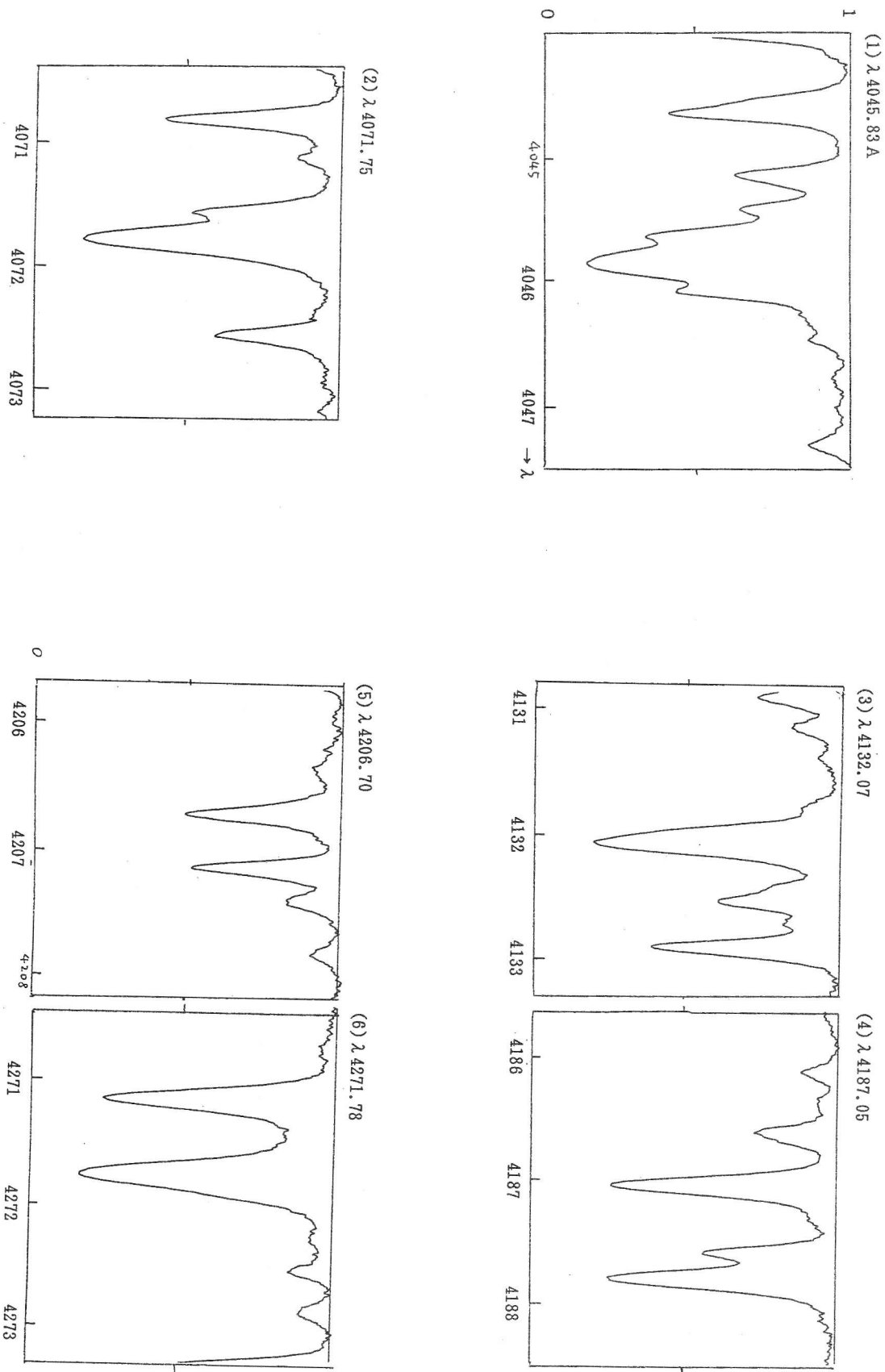
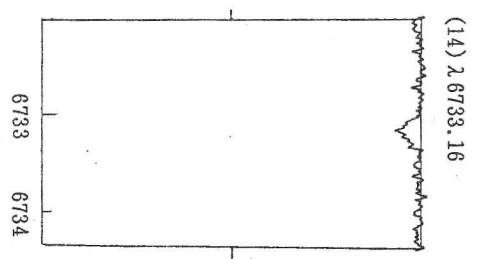
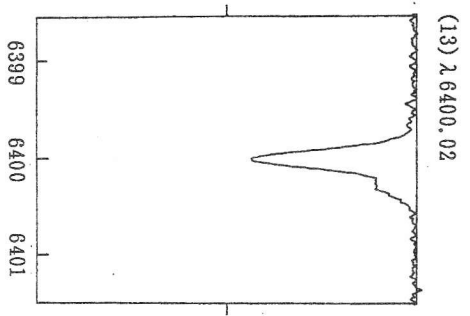
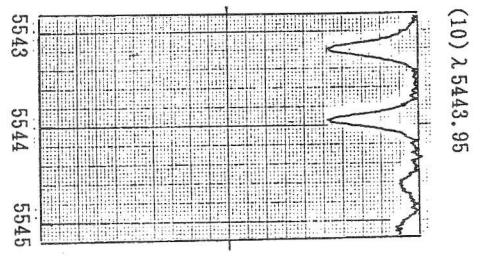
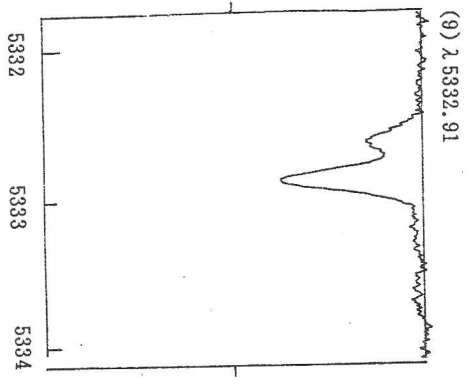
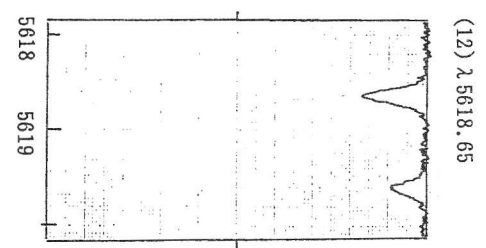
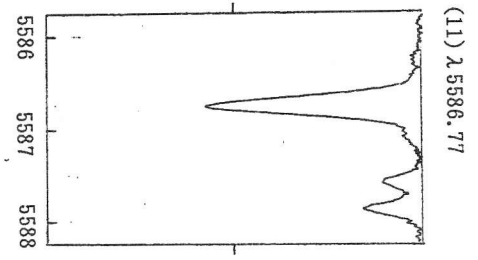
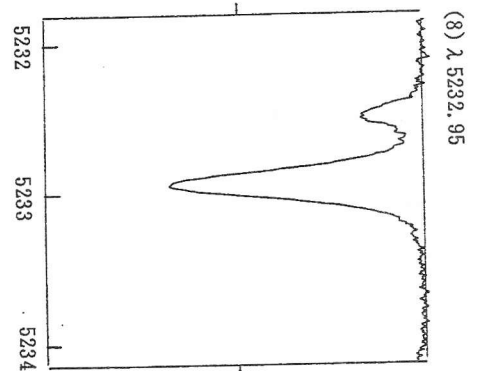
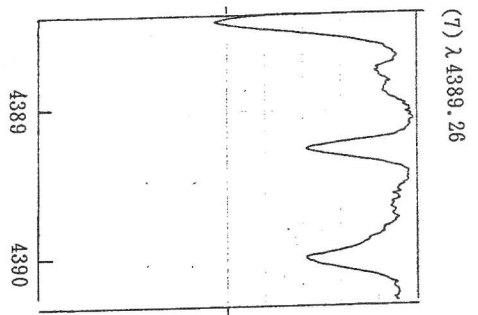


図7. Fe I のスペクトル線 (プロキオン) . (10) ~ (14) は横軸のスケールが短いので要注意. 等価幅を測定し、結果を表2に記入しよう.



測 I」、1981年、恒星社厚生閣

2) 森本編 現代天文学講座 13「天体観測セミナー」、1980年、恒星社厚生閣

3) 清水編 アストラルシリーズ7「太陽観測」、1983年、恒星社厚生閣

4) 伊東・西城編 「工作による天体観測」、1984年、共立出版

5) 黒田著 アストラルシリーズ 11「天文教室 I」、1983年、恒星社厚生閣

6) 山下・成相・乗本著 「代表的恒星のスペクトル・アトラス」、1977年、東京大学出版会

7) 富田編 アストラルシリーズ9「天体写真」、1985年、恒星社厚生閣

8) R. L. Kurucz, I. Furenlid, J. Brault, and L. Testerman: "National Solar Observatory Atlas No. 1, Solar Flux Atlas from 296 to 1300nm", 1984, National Solar Observatory, Sunspot, New Mexico

9) R. & R. Griffin: "A Photometric Atlas of the Spectrum of Procyon $\lambda\lambda 3140-7470 \text{ \AA}$ ", 1979, R. & R. Griffin, The Observatory, Madingley Road, Cambridge, England

10) R. F. Griffin: "A Photometric Atlas of the Spectrum of Arcturus $\lambda\lambda 3600-8825 \text{ \AA}$ ", 1968, Cambridge Philosophical Society, Cambridge, England

11) W. F. Meggers, C. H. Corliss, and B. F. Scribner: "Table of Spectral-Line Intensities", Part I and II, NBS Monograph 145, 1975, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.

12) C. E. Moore, M. G. J. Minnaert, and J. Houtgast: "The Solar Spectrum 2935 \AA to 8770 \AA ", NBS Monograph 61, 1966, U. S. Government Printing Office, Washington, D. C.

第2章 成長曲線法による元素量解析

1. 励起温度

この章では、吸収線の等価幅をもとに作られた成長曲線から、太陽に含まれている鉄原子の数密

度を求めることにしよう。ここで紹介するのはごく簡略化された一方法であって、決して典型的な手法ではないことを初めにことわっておく。

前の章で見たように、吸収線の強さは原子の吸収能、励起ポテンシャル、大気の温度、吸収源の数密度などに影響されていて、これらの量がある値に設定されるとそれに応じて強さ=等価幅が決まる、という性質を持っている。この性質を逆に使えば、観測された吸収線の等価幅から吸収源の量を知ることができる。そのためには、吸収源の数は別として、他に必要な物理量を何らかの方法で求めなければならない。そのうち原子の吸収能などは実験などからあらかじめ分かっている定数であるが、温度や密度などはそうではない。前の実習で使った太陽の温度 5300 Kはどのようにして決められたのだろうか？では、手始めにこの温度を求めることを考えてみよう。

温度 $\theta (=5040/T)$ は成長曲線の横軸に $\log gf\lambda - \chi_m\theta$ という形ではいつているが、これが今のところ分らない。そこで、 θ として適当な値をいくつかとってみて成長曲線を描いてみよう。前章の実習のデータはあまりにも少なく全体の特徴がはっきりしないので、もっとたくさんのスペクトル線の観測値を使いたい。次の表1に、太陽の中性鉄の400本の吸収線のデータを用意した。これを前の実習と同じようにそれぞれについて $\log(W_\lambda/\lambda)$ と $\log gf\lambda - \chi_m\theta$ を計算して描いた成長曲線が図1である。

温度のとりかたによって分散がずいぶん違っている。4500K や 6000K ではばらつきが大きく、5100K から 5400K ($\theta = 0.93 \sim 0.99$) の間に散らばり具合が最小になる温度があるようだ。多少の曖昧さが残るが、ここでは散らばりが最小になる時の温度として $T=5300\text{K}$ 、 $\theta=0.95$ を採用することにしよう。成長曲線法ではこのようにして試行錯誤をくり返して得られた温度を吸収線が形成される大気の温度と見なし、励起温度とよんでいる。こうすると励起ポテンシャルが異なるいろいろな吸収線を一つの系列に乗せることができる。成長曲線から元素量を求めるための第一歩はこの励起温度を決めることである。

λ (Å)	λ (eV)	EU	gf	λ (Å)	λ (eV)	EU	gf	λ (Å)	λ (eV)	EU	gf	λ (Å)	λ (eV)	EU	gf
5636.70	3.64	18	-2.60	5880.03	4.56	11	-2.02	6322.70	2.58	75	-2.43	6820.37	4.64	41	-1.22
5638.27	4.20	81	-0.80	5881.28	4.61	15	-1.84	6330.85	4.73	32	-1.29	6824.85	4.99	3	-2.23
5644.36	4.15	2	-3.26	5902.47	4.59	13	-1.93	6335.35	2.19	100	-2.23	6833.24	4.64	10	-2.03
5651.47	4.47	17	-1.87	5916.26	2.44	53	-2.99	6336.84	3.67	119	-0.74	6837.01	4.59	18	-1.79
5652.32	4.26	25	-1.84	5930.19	4.63	141	-0.20	6344.16	2.42	87	-2.92	6839.83	2.56	29	-3.42
5661.02	4.58	4	-2.48	5934.67	3.91	75	-1.25	6353.84	0.91	1	-6.57	6851.64	1.61	4	-5.39
5661.34	4.28	23	-1.89	5947.53	4.61	8	-2.11	6355.04	2.83	86	-2.35	6855.72	4.61	17	-1.79
5677.69	4.10	6	-2.71	5969.57	4.28	4	-2.78	6355.72	4.73	11	-1.90	6857.25	4.07	22	-2.15
5678.39	3.88	5	-3.04	5976.17	4.29	1	-3.22	6392.54	2.78	15	-4.04	6860.10	4.83	3	-2.43
5679.03	4.63	61	-0.81	5976.79	3.93	63	-0.39	6400.02	3.59	252	0.07	6861.94	2.42	18	-3.84
5680.24	4.19	11	-2.37	5984.83	4.71	91	-0.30	6411.11	4.73	4	-2.37	6862.50	4.56	31	-1.50
5701.56	2.55	86	-2.22	5987.08	4.78	78	-0.57	6411.67	3.64	148	-0.49	6864.31	4.56	6	-2.34
5707.26	3.64	2	-3.59	6003.03	3.87	89	-1.13	6421.37	2.27	142	-2.03	6880.63	4.15	13	-2.37
5717.84	4.27	58	-1.09	6015.24	2.22	4	-4.74	6430.86	2.17	117	-2.01	6898.29	4.22	15	-2.21
5731.78	4.24	53	-1.18	6019.37	3.57	5	-3.30	6436.41	4.19	9	-2.46	6936.50	4.61	6	-2.27
5738.23	4.22	12	-2.30	6034.04	4.31	7	-2.46	6475.64	2.55	54	-2.96	6960.32	4.59	11	-2.01
5741.85	4.26	31	-1.73	6054.08	4.37	8	-2.33	6518.38	2.82	57	-2.64	6970.47	3.02	15	-3.85
5742.96	4.18	10	-2.42	6056.02	4.71	73	-1.33	6533.94	4.56	38	-1.35	6971.94	3.02	11	-3.49
5752.04	4.53	54	-0.99	6065.50	2.60	117	-1.53	6546.26	2.75	172	-1.62	6988.53	2.40	32	-3.53
5753.14	4.24	84	-0.66	6078.50	4.78	81	-0.36	6591.31	4.59	9	-2.10	7000.62	4.14	17	-2.25
5754.41	3.64	10	-2.91	6089.57	5.02	37	-0.92	6592.93	2.72	188	-1.57	7007.97	4.18	27	-1.93
5759.26	4.65	7	-2.14	6093.65	4.61	30	-1.45	6609.13	2.55	77	-2.69	7010.35	4.58	12	-1.99
5760.34	3.64	21	-2.53	6094.38	4.65	20	-1.65	6625.03	1.01	14	-5.35	7024.07	4.07	26	-2.07
5760.53	4.15	2	-3.26	6096.68	3.97	34	-1.96	6627.55	4.55	27	-1.59	7069.54	2.56	5	-4.36
5763.01	4.19	118	-0.21	6097.09	2.18	2	-5.08	6639.73	4.59	15	-1.72	7071.86	4.61	29	-1.50
5775.09	4.20	58	-1.22	6098.25	4.56	14	-1.90	6646.98	2.60	5	-3.99	7072.81	4.07	5	-2.85
5778.46	2.59	20	-3.56	6120.26	0.91	5	-5.94	6667.43	2.45	8	-3.44	7083.40	4.91	21	-1.40
5784.66	3.40	24	-2.68	6136.63	2.44	141	-1.40	6667.72	4.58	8	-2.16	7114.56	2.69	7	-4.02
5784.67	3.38	25	-2.70	6137.71	2.58	157	-1.40	6678.01	2.68	172	-1.21	7118.10	5.01	11	-1.63
5793.92	4.22	35	-1.68	6151.63	2.17	46	-3.30	6699.14	4.59	8	-2.17	7124.99	3.69	2	-3.72
5806.74	4.59	68	-1.00	6157.41	3.30	3	-3.87	6703.57	2.76	37	-3.07	7132.99	4.07	42	-1.75
5807.98	4.61	3	-2.60	6159.38	4.61	12	-1.95	6704.49	4.22	6	-2.69	7142.52	4.95	37	-1.02
5809.23	3.87	47	-1.83	6170.52	4.78	99	-0.41	6710.32	1.48	13	-4.91	7151.47	2.48	22	-3.68
5809.88	4.28	2	-3.09	6187.40	2.83	3	-4.19	6713.05	4.59	23	-1.48	7155.64	5.01	34	-1.02
5811.91	4.14	10	-2.44	6188.00	3.93	49	-1.80	6713.75	4.79	21	-1.50	7180.00	1.48	17	-4.80
5814.81	4.28	22	-1.90	6198.51	2.56	4	-4.41	6725.36	4.10	17	-2.28	7189.16	3.07	37	-2.79
5827.87	3.28	11	-3.23	6200.33	2.60	74	-2.44	6733.16	4.64	27	-1.50	7190.13	3.11	12	-3.39
5834.04	2.60	14	-3.59	6213.44	2.21	79	-2.66	6736.53	4.29	2	-3.14	7212.44	4.95	32	-1.12
5837.70	4.29	9	-2.38	6219.29	2.19	87	-2.43	6739.52	1.56	11	-4.92	7221.21	4.56	41	-1.31
5844.92	4.15	3	-3.02	6220.78	3.88	17	-2.45	6745.97	4.07	6	-2.76	7228.70	2.76	23	-3.38
5849.69	3.69	7	-3.03	6226.74	3.88	29	-2.15	6750.17	2.41	76	-2.62	7261.00	2.73	15	-3.64
5853.15	1.48	7	-5.17	6229.24	2.83	21	-3.02	6752.73	4.62	25	-1.34	7268.56	3.88	7	-2.94
5855.08	4.61	20	-1.65	6230.74	2.55	185	-1.28	6753.47	4.56	5	-2.39	7284.84	4.14	40	-1.73
5856.09	4.29	34	-1.64	6252.57	2.39	127	-1.69	6756.55	4.29	4	-2.83	7306.57	4.18	43	-1.64
5858.78	4.22	13	-2.26	6254.25	2.47	104	-2.47	6786.86	4.19	24	-1.99	7312.06	5.03	5	-1.96
5861.11	4.28	8	-2.43	6270.24	2.85	54	-2.69	6789.26	4.07	11	-2.49	7400.86	2.61	3	-4.51
5862.37	4.53	93	-0.36	6290.55	2.59	3	-4.44	6796.12	1.61	11	-2.46	7401.69	4.19	41	-1.67
5873.22	4.24	25	-2.13	6297.81	2.21	73	-2.74	6801.87	4.14	1	-5.88	7418.33	4.14	3	-3.03
5876.28	4.30	4	-2.78	6303.47	4.32	5	-2.67	6804.28	4.58	14	-1.92	7421.56	4.64	16	-1.81
5879.49	4.61	9	-2.06	6311.51	2.83	26	-3.21	6806.85	2.73	31	-3.21	7430.54	2.59	12	-3.92

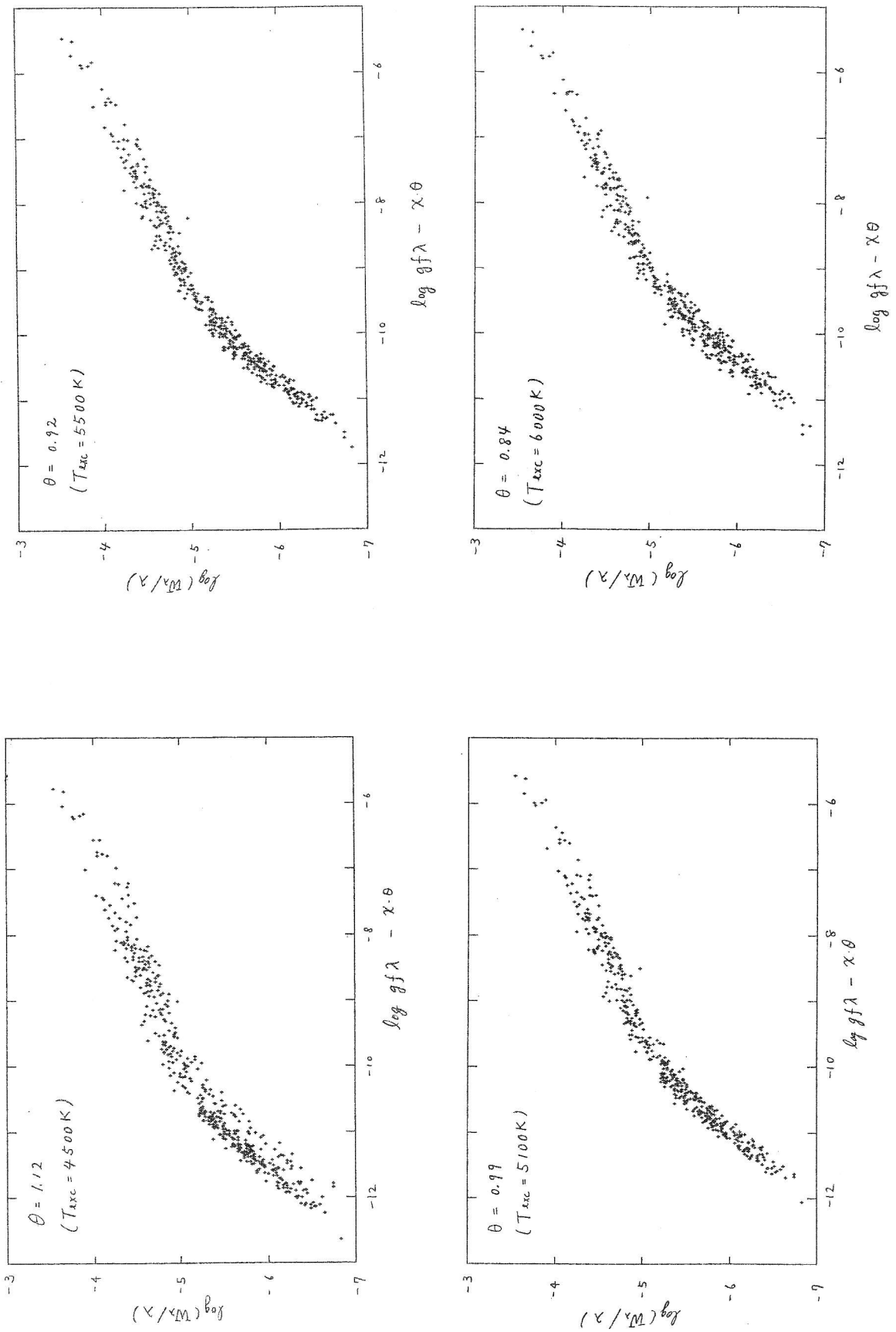


図1. 太陽の Fe I 吸収線のデータから作成した成長曲線.

2. 理論的な成長曲線

(1) 吸収のシミュレーション

中性鉄 Fe I のスペクトル線は、星の深部から発した光が星の外層部にある気体状になった中性の鉄原子に吸いとられてできたものである。鉄が多ければ吸収量は増すであろうし、温度が高ければ中性の鉄は減ってしまうし、まわりにある水素原子なども吸収量に影響するかもしれない。こういった大気の中で起きているミクロな現象を考慮して、光の伝達のようなすを追いかけていけば吸収線の強さ、ひいては成長曲線を計算することができる。しかし、ここではその詳細については触れる余裕はないので、章末の参考文献1)～4)をご覧ください。

(2) 幅を持っている吸収線

恒星の吸収線の特徴の一つは、実験室で見られる吸収線に比べてかなりの幅を持っていることである。これは恒星大気と実験室では環境が大きく異なっていることが原因と考えられる。恒星はまず温度が極端に高く、原子は激しい運動状態にさらされ、またさまざまな元素が混然一体となって互いに力を及ぼしあっている。そのうえ大規模、小規模の乱流なども渦巻いている。このような環境下では、実験室ならば吸収しないような波長の光も吸収してしまい、そのため幅を生じるのである。これは見かけ上、その元素が大量に含まれていることに相当する。したがって、解析の際にこのような影響を考慮しておかないと元素量の推定を誤ってしまう。

吸収線が広がるメカニズムを整理しておこう。

一つは熱運動や乱流によるドップラー効果である。この効果は主としてスペクトル線の中心部に近いところに現れていて、その吸収係数はガウス分布型で広がっている。

二つ目の原因は減衰効果と呼ばれるもので、主として周囲にある原子（特に水素原子）や自由電子の影響によって広がるものである（衝突減衰）。したがって、これは周囲に原子や電子が多いほど強く影響が出るという性質を持っている。太陽のような星の場合、衝突減衰としては中性の水素原子の効果だけを考えれば充分である。その減衰係

数 Γ は

$$\Gamma \simeq 17C^{2/5}\xi^{3/5}N_H \quad (7)$$

である。ただし

$$C = [13.6/(\chi_0 - \chi_m)]^2 \times 10^{-32} \quad (8)$$

と表わされている。ここで ξ は考える元素の速度 (km/s)、 N_H は中性の水素原子の数密度 (個/cm³)、 χ_0 はその電離ポテンシャル (eV)、 χ_m は励起ポテンシャル (eV) である。

(3) 線吸収係数

吸収線の強さは吸収源の数 N と考えている原子の吸収能 f でほぼ決るが、そのほかに以上のような効果が加わることになる。このような効果をそれぞれ考慮して、原子が光を吸収する能率として線吸収係数が求められる。それを κ_{mn} と書いてレベル $m \rightarrow n$ の遷移を考えると

$$\kappa_{mn} = \frac{\pi e^2 \xi}{m_e c \lambda} f n_m H(a, \nu) \quad (9)$$

となることが知られている。 e は素電荷 (単位は esu 系、 4.80×10^{-10})、 m_e は電子の質量 (9.11×10^{-28} g)、 n_m はレベル m にある原子の数密度、最後の $H(a, \nu)$ は熱運動や減衰効果による吸収線の広がり、輪郭を表わすホークト Voigt 関数で、次のように定義されている。

$$H(a, \nu) = \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-y^2)}{(\nu - y)^2 + a^2} dy \quad (10)$$

ここで、

$$\nu \equiv \Delta\lambda/\Delta\lambda_D, \quad (11)$$

$$a \equiv \Gamma\lambda^2/(4\pi c\Delta\lambda_D), \quad (12)$$

$$\Delta\lambda_D \equiv \lambda\xi/c \quad (13)$$

である。 c は光速度、 λ は吸収線の波長、 $\Delta\lambda$ は吸収線の中心から測ったある波長点までの長さ、 Γ は減衰係数である。 $\Delta\lambda_D$ は原子が運動していることによる波長のずれ、つまりドップラー幅を表わ

している。

(4) 連続吸収係数

上では光の吸収源として原子の線吸収だけについて見てきたが、考えている原子のまわりある他の原子（特に水素原子と水素負イオン）も吸収源としてはたらいっている。それは連続吸収係数 κ_c として表わされている。これについても詳しく紹介する余裕がないので図2に中性の水素原子と水素負イオンの連続吸収係数を計算するプログラムを一例として示すだけにとどめる。吸収係数が階段状に変化することや水素の負イオンがかなり寄与することなどを確かめてほしい。プログラムはFORTRANで書いているがBASIC等へ移植するのは容易であろう。もっとも、この連続吸収係数を計算するにはまだ求められていない大気の数密度や電子の数密度などを準備しなければならない。それについては次の項で考えることにしよう。

(5) 理論的な曲線

以上のような吸収の影響を入れ、深部からやってきた光がどの程度吸いとられるかを計算し、その結果を等価幅 W_λ で測ったものが理論的な成長曲線である。これは η_0 の関数として次のように与えられている。

$$\frac{W_\lambda}{\Delta\lambda_D} = \int_0^\infty \frac{\eta_0 H(a, \nu)}{1 + \eta_0 H(a, \nu)} d\nu \quad (14)$$

なお η_0 は $\eta_0 H(a, \nu)$ が線吸収係数と連続吸収係数の比 κ_{mn}/κ_c となるようにとった変数で、(10)式から

$$\eta_0 = \frac{\pi e^2 f n_m \xi}{m_e c \kappa_c \lambda} \quad (15)$$

である。

a が 0.1、0.01、0.001 の三つの場合について(14)式を実際に計算した結果を表2と図3に示した。ホークト関数も理論的な成長曲線の式も積分範囲が無限大になっているが、これを適当な有限値で置き換え、シンプソンの公式を使って数値積分したものである。これはぜひ確かめてほしい。

図3を見ると、 a による違いは等価幅の大きい

表2. 理論成長曲線

$\log \eta_0$	$\log a$		
	-1	-2	-3
-2.0	-2.05	-2.06	-2.06
-1.5	-1.56	-1.56	-1.56
-1.0	-1.07	-1.08	-1.08
-0.5	-0.62	-0.64	-0.64
0.0	-0.24	-0.27	-0.27
0.5	0.04	-0.01	-0.01
1.0	0.25	0.16	0.15
1.5	0.43	0.28	0.25
2.0	0.62	0.37	0.33
2.5	0.84	0.49	0.39
3.0	1.07	0.64	0.45
3.5	1.31	0.84	0.53
4.0	1.56	1.07	0.66
4.5	1.79	1.31	0.85
5.0	2.02	1.55	1.07
5.5	2.27	1.77	1.31
6.0	2.48	1.98	1.55
6.5	2.66	2.16	1.77

強いスペクトル線に表れていることがよくわかる。 a は(12)式を見れば分るように、減衰効果を表わしている。つまり、減衰効果は弱い線ではあまり効かず、強い線で大きくでているのである。したがって、減衰効果の影響を調べるときには、強いスペクトル線を測定しなければならないし、弱い線では減衰効果を気にしなくともよい、ということになる。

ところで図3の理論曲線の横軸は(15)式の η_0 で目盛っている。変数 η_0 には吸収源の数が含まれているから、吸収源の数を徐々に増やしていった時に等価幅がどのように大きくなっていくかを図3は表わしていると見ることができる。成長曲線とよばれているのはこのためである。

3. 理論曲線との重ね合わせ

こうして観測から求めた成長曲線と理論曲線がそろったところで、解析の第二段目へ移っていく。それは二つの曲線を重ね合わせ、うまく両者が合致するように互いにずらしていくことである。理論曲線を薄手の半透明用紙に写しとり、観測から求めた成長曲線にのせてやればよい。そしてその場合の縦軸と横軸の座標のズレを読み取ることに

```

FUNCTION OPCNT(WAVE,TEMP,PE,H0)
C --- Absorption coefficient per cm^3. Neutral hydrogen + negative
C --- hydrogen ion.
C --- WAVE = wave length in Angstrom,
C --- PE = electron pressure. dynes/cm^2,
C --- H0 = number density of neutral hydrogen atoms. N/cm^3
T=TEMP
FR=2.997925E18/WAVE
OPCNT=(1.0E-26*ABNEGH(T,FR)*PE + ABHYD(T,FR)) *H0
RETURN
END

FUNCTION ABHYD(T,FREQ)
C --- Hydrogen Opacity per Neutral Atom. Scale 1.
DIMENSION G(10)
U1=157786.46/T
U10=U1/100.
EHKT=EXP(-4.799275E-11/T*FREQ)
IF(FREQ-FR) 1,2,1
2 I=2
GO TO 3
1 FR=FREQ
I=1
M0=IFIX(SQRT(3.2880515E15/FR))+1
W=2.9979E14/FREQ
IF(W-.545) 400,500,500
400 J=1
GOTO 3
500 J=2
3 BF=0.0
DO 200 M=M0,9
XM=M
XM2=XM*XM
GO TO (10,20),I
10 G(M)=GAUNT(FREQ,XM)
20 BF=BF+G(M)*EXP(U1/XM2)/XM/XM2
200 CONTINUE
GO TO (40,50),J
C --- BF --- Bound-Free Opacity Summation Term.
40 G2=1.0
GO TO 300
50 AA=1.084+3.729863E-6*T
BB=0.00161+5.279343E-6*T
CC=0.0192+(-7.715657E-6+(1.115107E-9+(-6.113020E-14+1.13162E-18
* T)*T)*T)*T
G2=AA+(BB-CC*W)*W
300 FF=(EXP(U10)-1.0+G2)/2./U1
ABHYD=(BF+FF)*2.0898E-14*EXP(-U1)*(1.0-EHKT)*W*W/2.0
RETURN
END

FUNCTION GAUNT(WAVE,X)
C --- Hydrogen B-F Gaunt Factors
K=X
W=2.9979E14/WAVE
IF(K-6) 90,6,7
90 GO TO (1,2,3,4,5),K
1 GAUNT=.9916+(.09068-25.24*W)*W
RETURN
2 GAUNT=1.105+(-.7922+.4536*W)*W
RETURN
3 GAUNT=1.101+(-.3290+.1152*W)*W
RETURN
4 GAUNT=1.101+(-.1923+.0511*W)*W
RETURN
5 GAUNT=1.102+(-.1304+.02638*W)*W
RETURN
6 GAUNT=1.0986+(-.0902+.01367*W)*W
RETURN
7 GAUNT=1.0
RETURN
END

FUNCTION ABNEGH(TEMP,FREQ)
TH=5040./TEMP
IF(FREQ-FR) 30,600,30
30 FR=FREQ
CHK=9.5224E-15*FR
W=2.9979E15/FR
W16=16.419-W
IF(W16) 500,210,210
500 I=2
GO TO 600
210 I=1
IF(W-14.2) 100,100,200
100 STAR=.00680133+(.178708+(.16479+(-.0204842+5.95244E-4*W)*W)
*W)*W
GO TO 600
200 STAR=(.269818+(.220190+(-.0411288+.00273236*W16)*W16)*W16)*W16
600 A=.0053666+(-.011493+.027039*TH)*TH
B=-3.2062+(11.924-5.939*TH)*TH
C=-.40192+(7.0355-.34592*TH)*TH
ABNEGH =A+(B+C*W)*W/1000.
GO TO (300,2),I
300 BF=.4158*TH*TH*SQRT(TH)*EXP(1.737*TH)*(1.-EXP(-TH*CHK))*STAR
ABNEGH=BF+ABNEGH
2 RETURN
END

```

図2. 連続吸収係数を計算するFORTRANプログラムの一例.

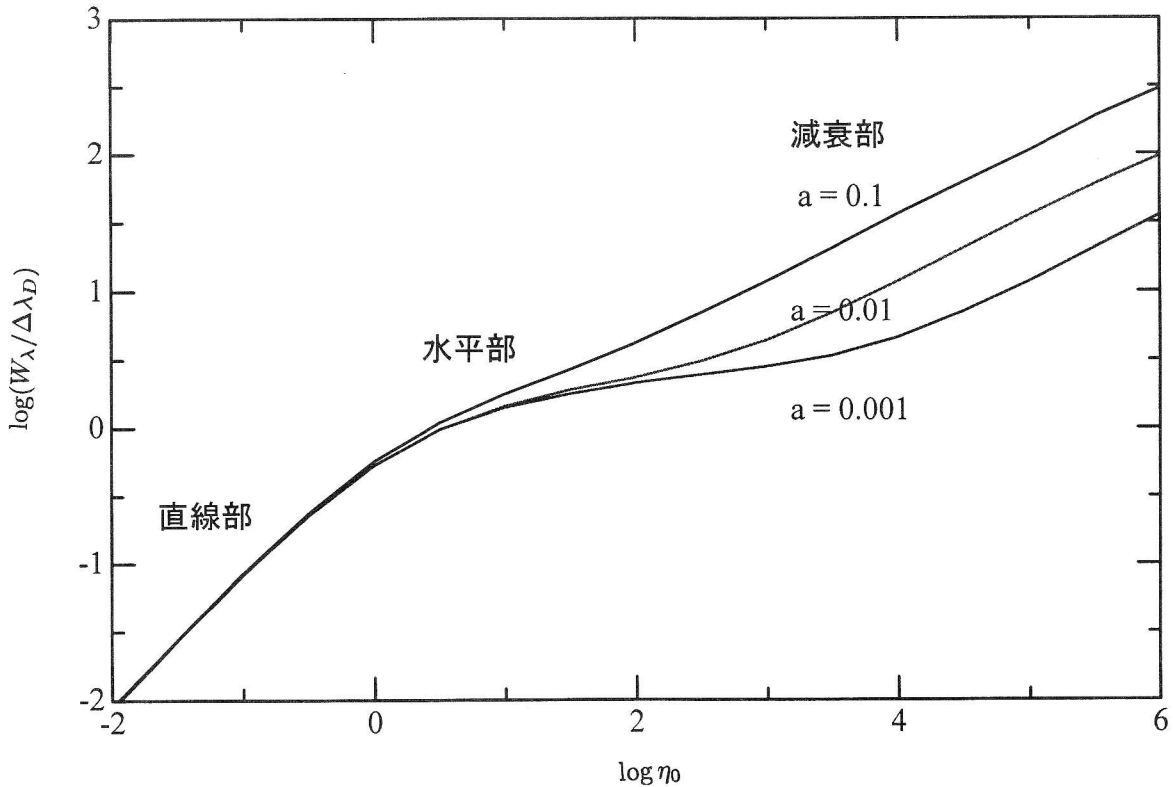


図3. 理論的な成長曲線.

しよう。最もよく合うところを見つけるのであるが、実際にやってみるとなかなか難しい。いま扱っている太陽の中性鉄の場合、縦が -5.2 、横が 10.2 といったところであろうか。一例としてこの値を採用しよう。

(1) 縦軸の差 — 小規模乱流速度

観測から求めた成長曲線と理論曲線では、縦軸も横軸もスケールのとり方が違っている。縦軸方向の差は(12)式を考慮すると

$$\log(W_\lambda/\lambda) - \log(W_\lambda/\Delta\lambda_D) = \log(\xi/c) \quad (16)$$

である。つまり縦軸の差は速度場を表わしている。縦軸のズレ $\log(\xi/c)$ はここでは -5.2 であるから、 $\xi = 1.9\text{km/s}$ となる。

ところで原子はその温度に応じた熱運動をしている。その速度 v は運動エネルギーの式から

$$v^2 = 2kT/M \quad (17)$$

と求められる。 k は前にも出ていたボルツマン定数、 M は考えている原子の質量である（鉄ならば質量数 55.8 に原子質量単位 $1.661 \times 10^{-24} \text{g}$ を掛けた値 $9.23 \times 10^{-23} \text{g}$ を使えばよい）。

この T に励起温度 5300K を代入して計算すると、 v は 1.3 km/s にしかならない。これは縦軸のズレからわかった $\xi = 1.9 \text{ km/s}$ とやや異なっている。この差は、熱運動だけでは説明のできない別の速度場があることを意味している。それを

小規模乱流 Microturbulence

と名づけてその速度を ξ_t と書くことにし、ここでは次のように定義する。

$$\xi^2 = v^2 + \xi_t^2 \quad (18)$$

こうして今の場合、 $\xi_t = 1.4 \text{ km/s}$ という値が得られる。

(2) 横軸の差—元素量

では次に観測から求めた成長曲線と理論曲線の

横軸の差について考えてみよう。理論曲線では横軸に $\log \eta_0$ を採っているが、 η_0 はすでに(15)式で定義されているとおりでである。ここには吸収にあずかる原子の数密度 n_m がはいつている。前章の終りで見たように、吸収に関与するのは中性鉄の全部ではなく、そのうち励起ポテンシャル χ_m のレベルまで励起されている原子だけである。その割合はボルツマンの法則(3)式を使って求めることができるので n_m にこれを適用して η_0 を書き直してやると

$$\log \eta_0 = -1.824 + \log N + \log gf\lambda - \chi_m\theta - \log \xi U(T) - \log \kappa_c \quad (19)$$

となる。 N はこの場合には中性の鉄原子全体の数密度である。

観測から作られた成長曲線では横軸に $\log gf\lambda - \chi_m\theta$ をとっていたから、理論曲線との横軸の差 $\log c$ は(19)式からこれを引いて

$$\log c = -1.824 + \log N - \log \xi U(T) - \log \kappa_c \quad (20)$$

ということになる。

横軸の差 $\log c$ と速度場の値 ξ は既に分っているので、分配関数 $U(T)$ と連続吸収係数 κ_c を知ることができれば、中性鉄の原子数密度 N 、ひいては鉄全体の含有量が決ってくる。

(3) 分配関数

表2に主要な元素の分配関数と電離ポテンシャルの値を掲げておいた。分配関数は温度の関数であるが、その値は表にあるように依存性はそれほど大きなものではない。

(4) 水素原子の数密度

成長曲線を重ね合わせみて分ったように、観測された曲線の右上の減衰部は $\log a$ が -1 と -2 の曲線の間伸びている。 $\log a = -1.7$ とでもとればまずまずといったところである。こうして二つの曲線を比較すると、 a を決めることができる。値 a が決まれば(12)式から減衰係数 Γ が求まる。さらに、それは中性水素の衝突減衰によると仮定すると(7)式を使うことができ、最終的に中性の

水素原子の数密度 N_H がわかってくる。式(8)の励起ポテンシャルとしては 2eV ぐらいたとればよいだろう。実際に数値をあたってみると、 $N_H = 1.45 \times 10^{17}$ 個/cm³ ぐらいになっている。

(5) サハの電離式

恒星の大気のような高温の状態では原子の相当部分が電離しており、中性の原子はそれだけ少なくなっている。いま考えている鉄原子がもし 90% 電離していたならば、残り 10% の中性の鉄だけが吸収源として働く可能性をもっている。こうした電離状態を見積るのがサハの電離式である。 i と $i+1$ の二つの電離状態を考え、それぞれの状態にある元素の数密度を N_i と N_{i+1} と表わすことにしよう。すると、

$$\frac{N_{i+1}P_e}{N_i} = \frac{(2\pi m_e)^{3/2}(kT)^{5/2}}{h^3} \frac{2U_{i+1}}{U_i} e^{-I/kT} \quad (21)$$

となるというのがサハの電離式である。 I は電離ポテンシャル(erg)、 h はプランク定数(6.63×10^{-27} erg·s)、 m_e は電子の質量(9.11×10^{-28} g)、 U は分配関数、 P_e は電子圧で、 n_e を電子の数密度とすると $P_e = n_e kT$ (dyne/cm²) となる。定数を代入して対数化すると

$$\log(N_{i+1}P_e/N_i) = (-5040 \times \chi_0/T) + 2.5 \log T - 0.48 + \log(2U_{i+1}/U_i) \quad (22)$$

である。なお χ_0 は電子ボルト(eV)で表わした電離ポテンシャルである。

[実習 2-1] 太陽の大気中で、中性の鉄と一階電離した鉄はどの位の割合で存在しているかを求めてみよう。T=5300 K、電子の数密度 n_e は 6×10^{12} 個/cm³ とする。

サハの電離式を解くには、まだ求められていない電子圧、あるいは電子の数密度を与えなければならない。これを決めるために、ここでは簡単に次のように考えよう。太陽にある元素のほとんど

表 3. 主な元素の分配関数 $\log U(T)$ と電離ポテンシャル $\chi_0(\text{eV})$.
 分配関数は温度 $\theta(= 5040/T)$ が 1 と 2 のときの対数值.

原子番号	元素	中性	原子	一階電離	イオン	χ_0
		$\theta = 1$	2	1	2	
1	H	0.30	0.30	0.00	0.00	13.60
6	C	0.97	1.00	0.78	0.78	11.27
7	N	0.61	0.66	0.95	0.97	14.53
8	O	0.94	0.97	0.60	0.61	13.62
11	Na	0.31	0.46	0.00	0.00	5.14
12	Mg	0.01	0.14	0.31	0.31	7.64
14	Si	0.98	1.04	0.76	0.77	8.15
20	Ca	0.07	0.48	0.34	0.54	6.11
21	Sc	1.08	1.46	1.36	1.50	6.54
22	Ti	1.48	1.83	1.75	1.91	6.82
23	V	1.69	2.01	1.64	1.83	6.74
24	Cr	1.01	1.38	0.86	1.07	6.77
25	Mn	0.81	1.07	0.89	1.02	7.43
26	Fe	1.42	1.65	1.61	1.73	7.87
27	Co	1.50	1.73	1.44	1.63	7.86
28	Ni	1.46	1.58	1.00	1.27	7.65
29	Cu	0.36	0.58	0.01	0.18	7.73
56	Ba	0.36	0.92	0.62	0.85	5.21

が水素とヘリウム（数密度は水素が 93.9%、ヘリウムは 5.9%、他の重元素は 0.2%）であることからすれば、大気中を飛びまわっている自由電子の供給源は水素である、と仮定してもよからう。すると、電子の数密度 n_e は電離している水素原子の数 N_1 に等しいとおける。したがってサハの電離式を水素原子に適用して計算すれば、電離している水素原子の数、つまり電子の数密度が求まるであろう。そこで、 N_H を上で求めた中性水素の数密度として計算してみると

$$\log(N_1^2/N_H) = 8.34 \quad (23)$$

すなわち、 N_1 と n_e は 5.6×10^{12} となる。

なお、これは電離していない中性の水素原子の 1% 未満であって、意外にも太陽では水素はほとんど電離していないのである。これは水素の電離ポテンシャルが 13.6eV と鉄などよりも高いからである。ぜひ上の実習で計算した鉄の電離度と比べていただきたい。

(6) 確定された物理量

これだけの情報がそろえば連続吸収係数 κ_c を計算することができる。代表的な波長として 5000 Å をとってみると物質 1cm³ あたりの吸収係数は

$$\log \kappa_c = -7.78 \quad (24)$$

ほどになる。

以上のように、いくつかの手続きを経た結果、(20)式の未知数をすべて決めることができた。そして、いよいよ最終的に残った中性の鉄の数密度 N (個/cm³) は

$$\begin{aligned} \log N &= \log c + 1.824 + \log \xi U(T) + \log \kappa_c \\ &= 10.2 + 1.824 + 6.97 - 7.78 \\ &= 11.21 \end{aligned} \quad (25)$$

すなわち

$$N = 1.6 \times 10^{11} \text{個/cm}^3 \quad (26)$$

が得られる。

ところで、鉄の電離状態をサハの式で調べてみると、電離度は 97%にも及び、中性の鉄はわずか 3%に過ぎないことがわかる。したがって、中性の鉄と電離している鉄（ただしここでは一階電離だけを考えている）の両者を含めた鉄の総量はこの N を 0.03 で割った値、すなわち

$$N_{Fe} = 5.5 \times 10^{12} \text{個/cm}^3 \quad (27)$$

ということになる。これでようやく、目的とした太陽にある鉄の含有量を決定することができた。

ついでにいくつかの物理量も求めておこう。

さきに大気の主成分として水素とヘリウムを考えたが、ヘリウムは水素の 6%ほどあった。ガス圧 P_g (dyne/cm²) には水素原子の数と共にヘリウムの寄与も入ってくるから、両者を加えて

$$\begin{aligned} P_g &= (N_H + 0.06 \times N_H) \times kT \\ &= 1.1 \times 10^5 \end{aligned} \quad (28)$$

となる。これに比べて電子圧は圧倒的に小さい。

ヘリウムは水素の 4 倍の質量を持っているために質量密度には相当大きい影響がある。そこで原子 1 個あたりの平均の質量数 μ を考えると、

$$\begin{aligned} \mu &= (1 + 4 \times 0.06) / (1 + 0.06) \\ &= 1.17 \end{aligned} \quad (29)$$

となる。質量密度 ρ はこれに $(N_H + 0.06 \times N_H)$ と 1 質量数あたりの質量（原子質量単位） 1.661×10^{-24} g を掛けて得られる。すなわち

$$\rho = 3.0 \times 10^{-7} \text{g/cm}^3$$

である。

4. 鉄は水素の 10 万分の 4

求められた鉄の量を水素原子の数と比較してみよう。水素はほとんど電離していないことが分っているから、水素原子の総数は中性水素の数に等しいと思ってよい。これは 1.45×10^{17} 個/cm³ であつた。そこで水素原子の数との比を $\varepsilon(\text{Fe})$ と書く

と

$$\epsilon(\text{Fe}) = 3.8 \times 10^{-5} \quad (30)$$

$\log \epsilon(\text{Fe}) = -4.42$ となる。鉄の含有量は水素のおよそ 10 万分の 4 というわけである。

現在の詳しい解析によれば太陽の小規模速度は 1 km/s あたりがもっともらしい値と言われている。ここで得られた $\xi_t = 1.4$ km/s は少々大きい。もっとも励起温度をもう少し低めにとればこれも小さくなっていく。また鉄の含有量は $\log \epsilon(\text{Fe}) = -4.42$ という結果であるが、現在採用されている太陽の鉄の値は -4.49 ± 0.03 である。

では最後に、ここでの実習で得られた値と現在採用されている値を比較しておこう。ここでの実習はその性質上、簡略化した取り扱いをしており、厳密性に欠けることは否めないが、その結果はこの通りである。

表 3. 結果のまとめと比較

項目	本実習	理科年表、他
励起温度 K	5300	4600 ~ 5600
微小乱流速度 km/s	1.4	1.0
ガス圧 $\log P_g$	5.0	5.1
水素原子の数密度 \log	17.2	17.2
質量密度 g/cm^3	3.0×10^{-7}	2.7×10^{-7}
鉄の含有量 \log	-4.42	-4.49

[実習 2-2] 表 4 にペルセウス座アルファ星 (F5 Ib) の Fe I の吸収線のデータがある。これを使ってこの星の鉄の含有量を計算し、太陽と比べてみよう。

参考のため、実習 2-2 の成長曲線を最後に掲げておく。ばらつきが大きく、どれが最良か、判別がむずかしい。この表 4 のデータはカナダのドミニオン天文台の 180 cm 望遠鏡で撮られたスペクトル写真から測定したものである (参考文献 5)。スペクトル線観測から有用な情報を得ることが決

して容易ではないことが分かるだろう。いかに質の良い、高分散のスペクトルを得ることができるか、それが、恒星分光の観測面の大きな課題となっている。

参考文献

- 1) 小尾・古在・守山著 「太陽系」、1976 年、共立出版
- 2) ギブソン著、桜井訳 「現代の太陽像」、1978 年、講談社
- 3) ウンゼルト著、小平訳 「現代天文学」、1978 年、岩波書店
- 4) 小平編 現代天文学講座 6 「恒星の世界」、1980 年、恒星社厚生閣
- 5) K. O. Wright: Publ. Dominion Astrophys. Obs. 8, 1., 1948

終章 あとがき

筆者が大阪市立電気科学館に就職したのは 1974 年であった。その翌年、職場の先輩であった黒田武彦氏 (現・兵庫県立西はりま天文台) との話の中で、「スペクトル線の測定や解析は実際のところどうやったらいいのだろう」という話題が持ち上がった。二人とも学生時代にそれに類することを聞いていたはずだったが、分光写真からスペクトル線の強度を求め、何がしかの情報を得るといふ、その実際の手続きや方法については知らなかったのである。そして、「わが国にはこのあたりのことを解説した書物がないではないか」といういつもの愚痴めいた話が出て、「では一度、片平さんに聞いてみよう」ということになった。

その頃、堺市科学教育研究所に片平順一氏が着任したばかりであった。片平氏は岡山天体物理観測所で得られたスペクトル写真の解析を行ない、すでにいくつかの論文を書いたり、学会発表を行っていた。この方面には詳しい人である。そこで、機会を見つけて聞いたのだが、「そんなの何ということもないよ」というような答えで、簡単にあしらわれてしまい、どうもよく分からぬまま

に終わってしまった。その頃は、恒星分光學に特に興味があったわけでもなく、それ以上追求することもなかった。

それからしばらくして、片平氏から星風の勉強をしないかという提案があった。氏はウォルフ・レイエ星や Be 星のような広がった大気を持った高温星を専門としており、そのような星からは強い放射場の影響で大気の一部が吹き飛ばされることがある。どのような条件ならばそうなるのか調べようというという意図であった。筆者はまったく不案内であったから、いくつか関係する論文を読むところから始めたが、自分がいかに不勉強であったか、つくづく思い知らされることになった。星の内部からの光で大気が飛ばされるのである。どのような性質の光がやってくるのか、強度やスペクトルがどうなっているか、それが分からなくては話にならない。では、放射分布を求めるにはどうすればよいか？こうした分野を勉強していたはずであったが、さっぱり身につけていなかったのである。星風の問題にかかる前に、基本的な恒星大気の勉強を改めてしなければならない、ということに気づいた次第であった。

恒星大気の問題は、天体物理学という用語と同一視されるくらい関係の深い学問分野であった。特に 1950 年代までは確かにそうであった。そんなわけで、教科書とされるような書籍もあって、比較的容易に学ぶことができた。

次は、教科書に書かれている内容を実際に計算することである。それは恒星大気の物理的な構造を理論的に求めようという試みで、言い換えれば大気モデルを計算機用プログラムとして構築することである。大気層の深さの関数として温度、密度、輻射の流れなどを求めるのである。理論的背景はできているから、後はプログラミングである。アンダーヒルだったか、ハックだったかが、恒星の研究者はすべからく自ら作ったモデル大気を用いるべし、というようなこと書いていたのを真に受けて、プログラム作成にかかった。

しかし、これは無謀な計画であった。プログラムをかける計算機がなかったからである。だが、こんな時、大都市は便利である。調べてみたら、

近くに計算機を賃貸する会社がいくつもあったのである。筆者が選んだ会社は 10 秒間の CPU 使用料が 700 円、その他、カード読み込み代やプリント代などの経費が加算されるが、とにかくそこへいけばカード穿孔機がおいてあって作業ができる。おまけに夜 9 時までやっている。勤務を終えてもかなりの時間を充てることができた。まだパソコンが登場する以前のことであり、卓上で FORTRAN が走ることなど夢想だにできぬ時代であった。

エラーを重ねながらも、一応、アブレット・クルックの温度補正ルーチンも仕上がって、何とか格好がついたかなと思った頃、ケンブリッジ大学天文台のグリフィン夫妻がプロキオンのスペクトル・アトラスを出版した (1979 年)。長年に亘ってウェルソン山天文台の 2.5 米望遠鏡で撮影したスペクトル写真をもとに作成した大作である。これはちょうど良い。できかったプログラムが働く番である。

天王寺の大阪教育大学の天文研究室にはその頃もお世話になっていた。ここには文献が豊富に揃っており、プログラム作りには欠かせぬ資料があるからである。そんなある日、プロキオンのスペクトル・アトラスを注文したという話を定金晃三氏にしたところ、それならプロキオンの吸収線の解析をやらないか、という話になった (結果は 1982 年、1986 年に発表)。定金氏はすでに A 型特異星 (Ap 星) の分光解析では世界的に著名で、その頃はベガの再解析を行なって金属欠乏星であることを示すという大ヒットを飛ばし、正常星にも関心を持っていた。Ap 星の異常性を正確に把握するには正常星の性質をおさえておく必要があると考えていたのであった。

こうして筆者は吸収線の解析に手を染めることになり、黒田氏と分からないと話しあっていた問題と正面から向き合うことになった。この時の解析には定金氏が用意していたクルズの作成した大気モデルを用いた吸収線強度解析プログラムを用いることになった。これは、筆者が作成していたプログラムなどまったく足元に及ばぬほど精緻な、かつ膨大な内容を含んでおり、すでにスペク

トル線解析用プログラムとして世界の標準として多くの研究者に使用されていた。こうして数年間に亘って作成してきた筆者のプログラムは何の結果も出さぬまま、お蔵入りとなった。

こうして、モデル大気を用いた細密解析法による解析が始まったが、筆者は粗解析とも言われる成長曲線法も合わせて採用した。実は、成長曲線法を測定データの良否を判定するのに補助的に用いたところ、ずいぶん便利なことが分かったからである。成長曲線を描いてみると、系列からはずれている線が見つかることがある。それらは大抵測定が悪かったり、線がブレンドしていたり、物理データがおかしかったりするのである。そうしたことが視覚的に見当がつくのが便利なところである。このあたりのことについては小林英輔氏(当

時・大阪府科学教育センター、現・大阪府教育センター)にお教えていただいたことが多かった。

このような背景があってできあがったのが本論文である。当初、ある実習書のために用意したのであるが(1986年)、出版のめどが立たず今日まで経過してしまった。この間に、天文台の受光装置は写真から CCD などの固体撮像素子にとって代わり、本論文の内容はすっかり古くなってしまった。

なお、上記した方々の他に、横尾武夫氏(大阪教育大学)、近藤雅之氏(元・東京大学東京天文台)には文献の閲覧や複写等でお世話になった。また、京都大学宇宙物理学教室と東北大学天文学教室にも文献ではお世話になっている。合わせて御礼申し上げたい。

表4. ペルセウス座アルファ星の中性鉄 Fe I のデータ.

λ (Å)	χ (eV)	EW	gf	λ (Å)	χ (eV)	EW	gf	λ (Å)	χ (eV)	EW	gf	λ (Å)	χ (eV)	EW	gf
4044.62	2.82	92	-1.01	4494.58	2.19	248	-1.14	5393.18	3.23	158	-0.56	6230.74	2.55	183	-1.28
4045.83	1.48	698	0.28	4504.84	3.25	32	-2.20	5397.14	0.91	324	-1.99	6252.57	2.39	134	-1.69
4049.34	2.58	26	-2.49	4528.63	2.17	325	-1.45	5405.79	0.99	287	-1.84	6254.25	2.27	115	-2.47
4062.45	2.83	123	-0.77	4602.01	1.60	34	-3.15	5429.71	0.95	300	-1.88	6270.24	2.85	49	-2.69
4063.61	1.55	530	0.08	4602.95	1.48	193	-2.22	5434.54	1.01	226	-2.12	6297.81	2.21	80	-2.74
4065.39	3.42	28	-1.23	4625.05	3.23	90	-1.26	5445.06	4.37	96	0.29	6311.51	2.82	20	-3.21
4067.99	3.20	143	-0.42	4637.51	3.27	44	-1.25	5446.93	0.99	313	-1.86	6322.70	2.58	48	-2.03
4070.78	3.23	83	-0.77	4647.45	2.94	99	-1.30	5456.79	0.99	182	-2.80	6335.35	2.19	103	-2.23
4071.75	1.60	421	-0.02	4661.98	2.98	16	-2.56	5543.95	4.20	48	-1.14	6336.84	3.67	122	-0.74
4079.85	2.85	34	-1.26	4691.43	2.98	72	-1.42	5554.90	4.53	80	-0.41	6344.16	2.42	49	-2.92
4082.12	3.40	34	-1.61	4859.75	2.86	167	-0.81	5567.40	2.60	41	-2.73	6355.04	2.83	44	-2.35
4084.50	3.32	87	-0.58	4872.15	2.87	216	-0.59	5572.85	3.38	228	0.19	6411.67	3.64	153	-0.49
4085.32	3.23	69	-0.69	4882.15	3.40	41	-1.64	5576.10	3.42	115	-0.64	6421.37	2.27	130	-2.03
4087.10	3.32	44	-1.43	4890.77	2.86	252	-0.42	5586.77	3.35	247	-0.20	6430.86	2.17	139	-2.01
4091.56	2.82	10	-2.27	4896.44	3.87	17	-2.07	5618.65	4.19	15	-1.38	6475.64	2.55	38	-2.96
4100.75	0.86	94	-3.18	4903.33	2.87	130	-1.01	5624.56	3.40	126	-1.26	6518.38	2.82	45	-2.64
4114.45	2.82	67	-1.15	4919.00	2.85	264	-0.36	5638.27	4.20	41	-0.80	6546.26	2.75	115	-1.62
4132.07	1.60	352	-0.63	4924.78	2.27	64	-2.28	5679.03	4.63	33	-0.81	6592.93	2.72	161	-1.57
4132.91	2.83	99	-0.85	4938.82	2.86	94	-0.92	5701.56	2.55	61	-2.22	6639.73	4.59	17	-1.72
4136.53	3.35	30	-1.61	4939.70	0.86	109	-3.34	5717.84	4.27	49	-1.09	6646.98	2.60	16	-3.99
4139.94	0.99	24	-3.63	4946.40	3.35	174	-1.17	5731.78	4.24	46	-1.18	6678.01	2.68	150	-1.21
4143.88	1.55	346	-0.44	4950.11	3.40	53	-1.67	5752.04	4.53	44	-0.99	6703.59	2.75	21	-3.13
4147.68	1.48	139	-2.10	4966.10	3.32	133	-0.61	5753.14	4.24	70	-0.66	6713.05	4.59	22	-1.48
4156.81	2.82	183	-0.61	4973.11	3.94	38	-0.79	5763.01	4.19	112	-0.21	6733.16	4.62	29	-1.55
4175.65	2.83	177	-0.66	4994.14	0.91	93	-3.08	5775.09	4.20	38	-1.22	6750.17	2.41	28	-2.62
4187.05	2.44	235	-0.55	5001.87	3.87	226	0.13	5778.47	2.58	19	-3.59	6752.73	4.62	15	-1.34
4191.69	2.85	37	-1.35	5002.80	3.38	29	-1.61	5784.67	3.38	12	-2.70				
4206.70	0.05	64	-3.79	5014.95	3.93	113	-0.14	5806.74	4.59	53	-1.00				
4222.22	2.44	215	-0.97	5022.24	3.97	70	-0.44	5809.23	3.87	46	-1.83				
4233.61	2.47	234	-0.60	5044.22	2.84	38	-2.15	5834.04	2.60	15	-3.59				
4235.95	2.42	342	-0.34	5049.83	2.27	185	-1.35	5873.22	4.24	19	-2.13				
4241.12	2.82	19	-2.63	5110.41	0.00	172	-3.76	5916.26	2.44	42	-2.99				
4247.43	3.35	153	-0.22	5127.37	0.91	77	-3.31	5930.19	4.63	93	-0.20				
4250.80	1.55	269	-0.69	5141.75	2.41	18	-2.15	5976.79	3.93	47	-0.39				
4271.17	2.44	218	-0.35	5145.10	2.19	13	-3.21	5984.83	4.71	63	-0.30				
4271.78	1.48	398	-0.16	5150.85	0.99	119	-3.00	5987.08	4.78	44	-0.57				
4276.68	3.87	27	-1.14	5166.29	0.00	52	-4.20	6003.03	3.87	74	-1.13				
4325.78	1.60	392	0.00	5171.61	1.48	206	-1.79	6056.02	4.71	99	-0.45				
4352.75	2.21	155	-1.19	5215.19	3.25	87	-0.75	6065.50	2.60	159	-1.53				
4375.95	0.00	199	-3.03	5216.29	1.60	136	-2.15	6078.50	4.78	112	-0.36				
4383.56	1.48	393	0.20	5217.40	3.20	55	-0.99	6096.68	3.97	34	-1.96				
4389.26	0.05	31	-4.58	5232.95	2.93	301	-0.18	6136.63	2.44	204	-1.40				
4404.76	1.55	414	-0.14	5253.47	3.27	32	-1.58	6137.71	2.58	166	-1.40				
4415.14	1.60	325	-0.62	5263.32	3.25	67	-0.79	6151.63	2.17	26	-3.30				
4427.32	0.05	236	-3.04	5266.57	2.99	219	-0.48	6170.52	4.78	52	-0.41				
4430.62	2.21	97	-1.66	5281.80	3.03	123	-0.95	6188.00	3.93	39	-1.80				
4439.89	2.27	18	-3.00	5307.37	1.60	83	-2.99	6200.33	2.60	48	-2.44				
4442.35	2.19	150	-1.26	5324.19	3.20	228	-0.23	6213.44	2.21	80	-2.66				
4447.73	2.21	149	-1.34	5339.94	3.25	118	-0.49	6219.29	2.19	85	-2.43				
4489.75	0.12	69	-3.97	5371.50	0.95	326	-1.65	6229.24	2.83	15	-3.02				

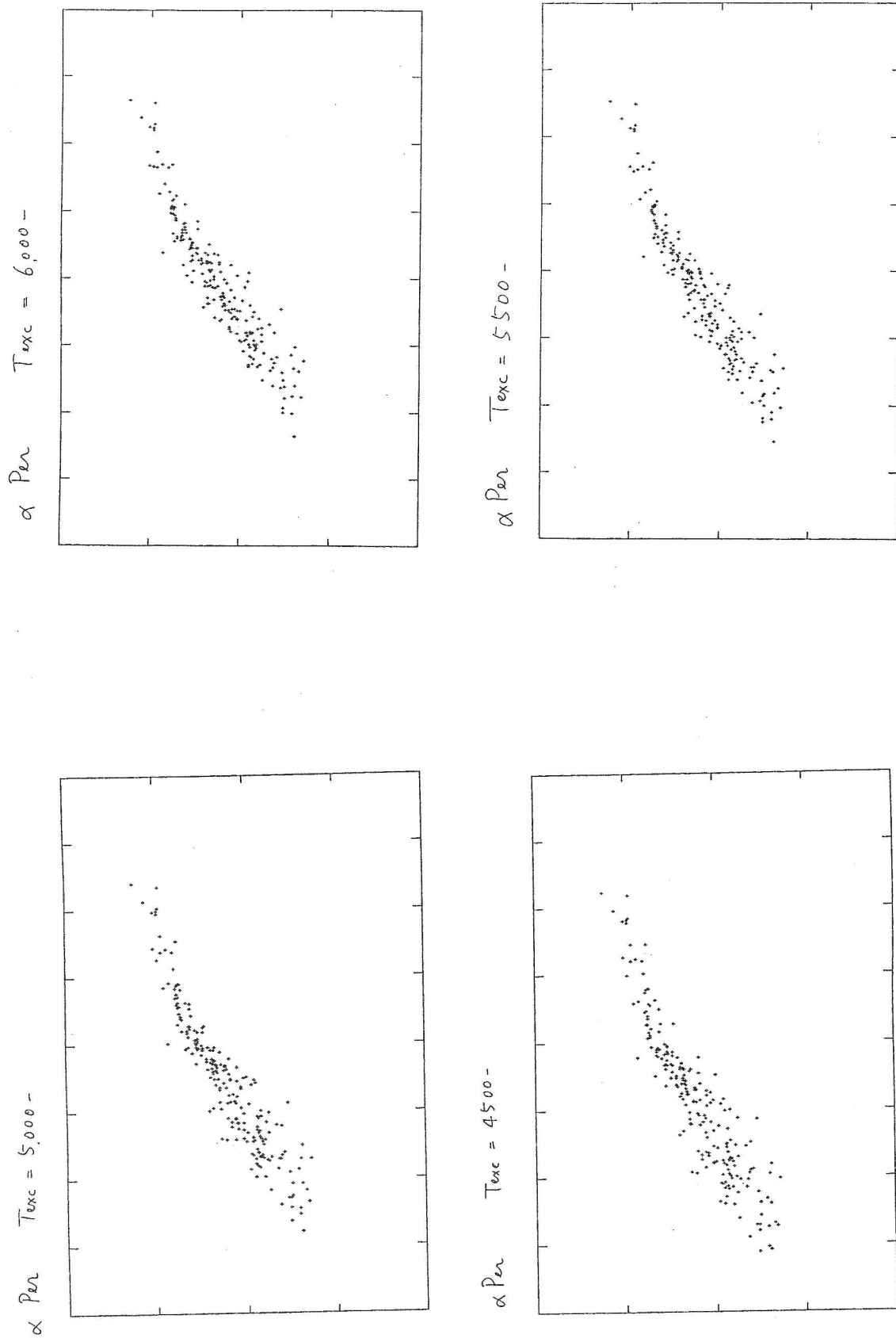
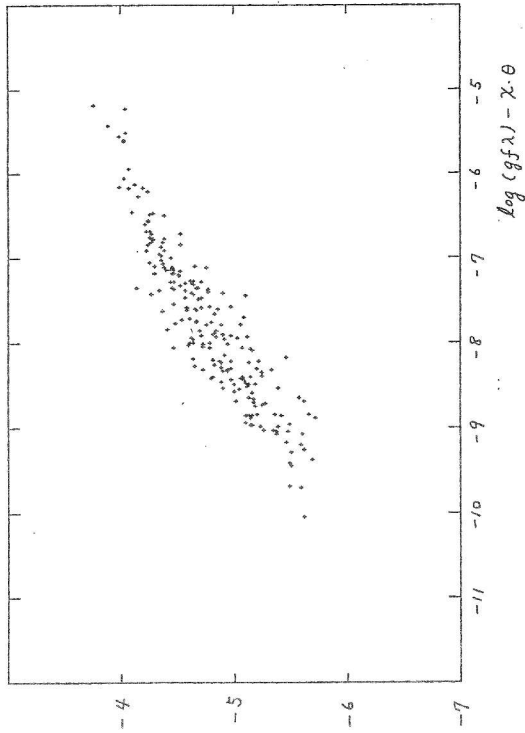


図4. ペルセウス座アルファ星の中性鉄 Fe I の成長曲線.

α Per Texc = 7000 -



Texc = 6500 -

