

VO 講習会 2012(国立天文台): Subaru HDS data からの、成長曲線を用いた金属量の推定

小宮悠* (作成協力:青木和光、石垣美歩†)

平成 24 年 4 月 24 日

概要

星の表面の元素組成は、スペクトル観測を行うことにより、各元素の作る吸収線の強さから推定することが出来る。現在では、恒星大気モデルを用いた詳しい解析が行われているが、大まかな組成は、以下のような方法で吸収線の等価幅から、成長曲線を描くことにより見積もることが出来る。(方法の詳細は、参考文献にある、野本 et al. 2009, Gray 1992 を参照。後者のテキストはより専門的である。)

ここでは、Subaru HDS の観測データを用いて、金属量の指標としてよく用いられる鉄の組成を推定する。スペクトルデータの扱いには、VO 用スペクトルツールである Specview を用いる。

恒星大気の吸収線

弱い吸収線については、ある周波数における吸収の深さは、線吸収係数 l_ν と連続吸収係数 κ_ν との比に比例する。(強い吸収線では、吸収線は飽和し比例関係にはならないので¹、今回は弱い吸収線のデータのみを用いる。)つまり、 F_c, F_ν をそれぞれ連続波成分の flux と、吸収を受けた flux とすると、

$$\frac{F_c - F_\nu}{F_c} \propto \frac{l_\nu}{\kappa_\nu} \quad (1)$$

と書ける。吸収線の等価幅 W は、

$$W \equiv \int \frac{F_c - F_\nu}{F_c} d\lambda \quad (2)$$

と定義される量である。線吸収係数 l_ν は遷移確率と吸収を起こす粒子数に比例するので、状態 i から j への遷移による弱い吸収線の場合、等価幅は下記の式のように書ける。

$$W = \text{const.} \frac{1}{\kappa} \int_0^\infty l_\nu d\lambda = \text{const.} \lambda^2 f_{ij} \frac{N_i}{\kappa} \quad (3)$$

(f_{ij} : 遷移確率、 N_i : 状態 i にある粒子の個数密度、 λ : 波長。)

ここで N_i は、状態分布がボルツマン分布になっていれば下記のように書ける²。

$$N_i = N_{\text{H}} A \frac{N_r}{N_e} \frac{N_i}{N_r} = N_{\text{H}} A \frac{N_r}{N_e} \frac{g_i}{u(T)} \exp\left(-\frac{\chi}{kT}\right) \quad (4)$$

*国立天文台 JVO プロジェクト

†国立天文台 光赤外研究部

¹飽和した場合の吸収線の振る舞いについては、末尾の参考文献にある教科書等を参照のこと。

²実際の恒星大気は、特に光学的に浅い部分では、必ずしもボルツマン分布にはなっていないが、ここではボルツマン分布を仮定する。

(N_{H} :水素の数密度、 N_e :元素 e の数密度、 N_r :該当するイオン化状態にある元素の数密度、 $A \equiv N_e/N_{\text{H}}$: 元素組成、 g_i :状態 i の統計重率、 $u(T)$:分配関数)

これを用いると、式 (3) を下記のようにあらわすことができる。

$$\log\left(\frac{W}{\lambda}\right) = \log\left(\text{const.} \cdot \frac{N_r/N_e}{u(T)} N_{\text{H}}\right) + \log A + \log(gf\lambda) - \theta_X \chi - \log \kappa \quad (5)$$

$$(\theta_X \equiv \frac{\log e}{kT} = \frac{5040}{T(\text{K})} (\text{eV}))$$

イオン化状態 N_r/N_e は、Saha の式を用いて出すべきものであるが、今回用いる鉄の場合などは、ほぼ全て 1 階電離の状態にあると考えて問題ない。右辺第 1 項と κ を一定と仮定してしまうと、この式は以下のように書ける。

$$\log\left(\frac{W}{\lambda}\right) = \text{const.} + \log A + \log(gf\lambda) - \theta_X \chi \quad (6)$$

$\log gf$ と χ は実験などで知られている各吸収線に固有の値なので、観測により等価幅を測定してやり、 θ_X (または励起温度 T) が分かれば、組成が (定数項を別として) 求められることになる。定数項を正確に求めるのは困難なので、実際には相対的な組成比の方が精度よく求まる。今回は、2 つの天体 (BD+04 2621 と HD107752) で吸収線等価幅を測定し、鉄の組成比を求める。

励起温度の見積もり³

ある特定の元素のつくる多数の吸収線について、 χ と $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda)$ の相関をとると、 A の値は同じなので、式 (6) から傾き $-\theta_X$ の直線にのるはずである。 θ_X の定義から、この測定により励起温度がわかる。

今回は、中性の鉄 (FeI) の line の等価幅を測ってこの相関をとり、傾きを測定して、励起温度を見積もる。(これらの星では鉄は多くが 1 階電離 (FeII) の状態にあるが、FeI の方が様々な励起ポテンシャルの line が多数あるため、励起温度を求めるには FeI を用いた方が測定しやすい。)

組成比の見積もり

$\log(W/\lambda)$ と $\log(gf\lambda) - \theta_X \chi$ の相関をとったものを、成長曲線と呼ぶ。式 (6) から、この曲線は弱い line に対しては傾き 1 の直線になるはずである。組成の違う 2 天体についてこの相関をみると、平行移動した 2 本の直線となり、そのズレが相対組成となる。

鉄は、今回用いる星ではほぼ 1 階電離の状態にあると考えられるので、FeII の line を用いる。式 (6) より、 $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda) - \theta_X \chi$ の値の差が、 $\log A$ の差となるので、2 天体それぞれについて複数の line で $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda) - \theta_X \chi$ の値の平均を求め、その差を導出する。この差が元素組成 A の比 ($=[\text{Fe}/\text{H}]$ の差⁴) となる。

³実際には、恒星大気は温度勾配を持っているが、この方法ではそれを一つの値で代表させている。現代の研究では、温度構造も考慮した、恒星大気モデルを用いた解析が行われている。

⁴金属量の指標として、鉄の相対組成の太陽との比の対数をとった、 $[\text{Fe}/\text{H}] \equiv \log(A_{\text{Fe}}/A_{\text{Fe},\odot})$ という量がよく用いられる。

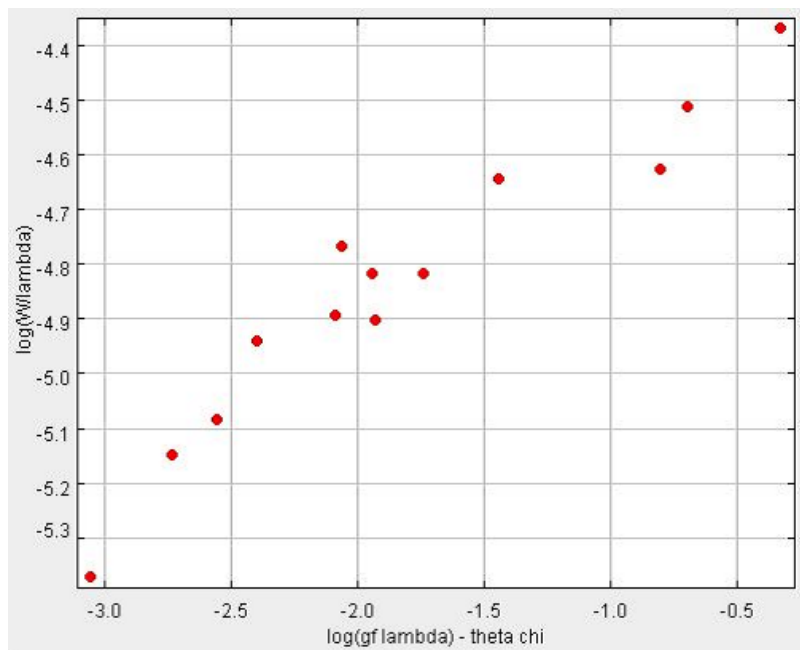


図 1: 観測的成長曲線の一例。今回の解析では、左下側のほぼ直線になっている部分のみを使う。この観測で $\log(W/\lambda) \gtrsim -5$ では、吸収線は飽和し、直線からは大きくはずれている。

0 準備

0.1 Specview のインストール

Specview のダウンロードサイト

http://www.stsci.edu/resources/software_hardware/specview/download

から取得できる。インストーラ版 (version 2.15.1) ではなく ZIP file か TAR file (version 2.15) を使用すること。(インストーラ版は、動作が異なり本テキストの実習を実行できない。安定版ではないようである。)

ダウンロードしたファイルを解凍して、中にある Specview.jar をダブルクリックすると起動する。起動時に、「New version (2.15.1) of Specview is now available」とメッセージが出るが、気にせず **Dismiss** してよい。

吸収線のリスト (specview_lines.jar) もダウンロードし、Specview があるのと同じディレクトリに入れる (これは、後で別の方法でダウンロードしてもよい)。

起動しなかった場合

・ Windows

解凍したファイルの中にある、バッチファイル Specview.bat を編集する。「set spv=」に、解凍した Specview のファイルのあるディレクトリを、「set jhome=」に、JAVA の実行ファイルのあるディレクトリ (C:\Program Files\Java\jre<version>\ などの場合が多い) を指定する。バッチファイルをダブルクリックで起動する。

・ Mac/Unix

解凍したディレクトリ内に移動して、コマンドラインから下記のコマンドを打つ。

```
java -jar sprcview.jar
```

0.2 TOPCAT のインストール

TOPCAT のサイト <http://www.star.bristol.ac.uk/~mbt/topcat> より取得できる⁵。(詳しくは、このサイト、または本講習会の TOPCAT のテキストを参照)

0.3 データリストファイルのダウンロード

講習会ホームページ

<http://jvo.nao.ac.jp/vos2012/>

から以下のファイルを取得する。

- JVO で公開している HDS データのうち、今回使用する 2 天体のスペクトルファイルの URL リスト
BD+04_2621List.txt, HD107752List.txt
- 今回の例で使用する FeI, FeII の吸収線の、周波数、励起ポテンシャル (χ)、 $\log gf$ の値のリスト
Fe1Lines.csv, Fe2Lines.csv

0.4 凡例

下記の文章で、**Button** はボタン操作、**TextBox:□** はテキストボックス、**menu** はメニューバーのボタン、**tab** はタブなどからの選択を表す。

⁵本テキストの記述は、TOPCAT Version3.9 に対応したものです。

1 Quick Look

- Web ブラウザから JVO ポータルサイト <http://jvo.nao.ac.jp/portal/top-page.do> に接続
- Subaru の HDS を開く。天体名のアルファベット順にリストされているので、BD+04 2621 を探す。(B の #13)
- 天体名の横の「P」をクリックすると、データのリストが表示される。111130_ML.00051512 を選び、メタデータを確認する。

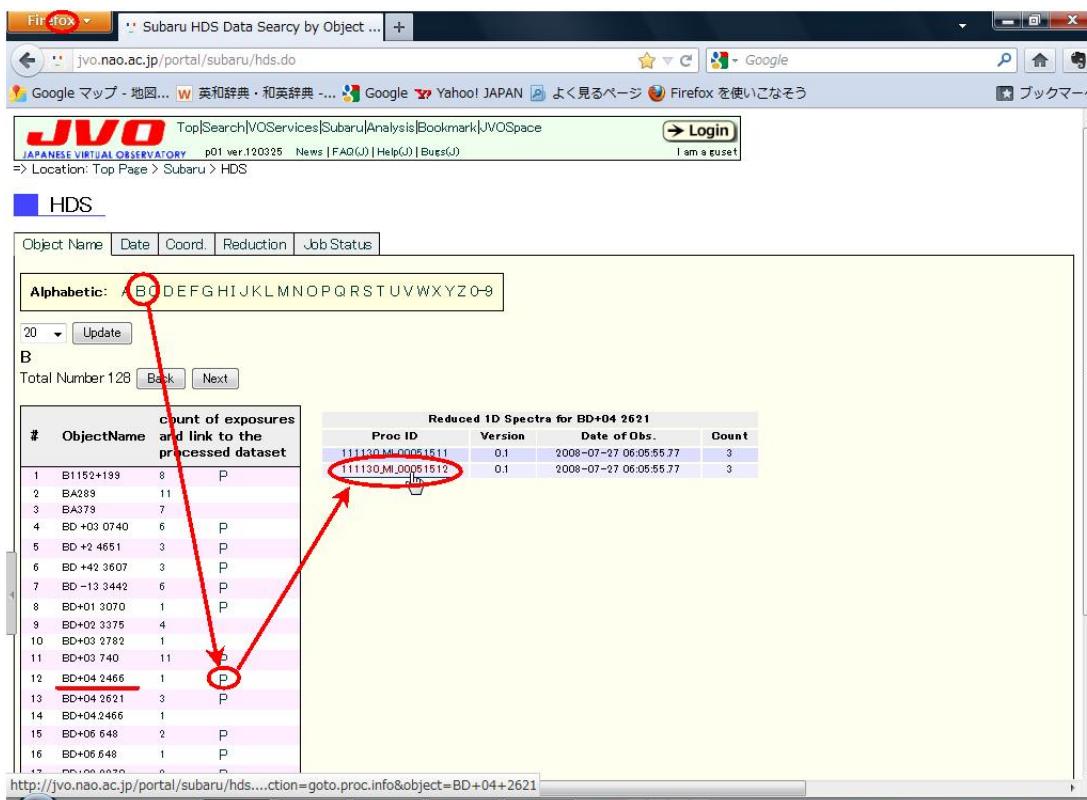


図 2: JVO ポータルの HDS のページから、BD+04 2621 のデータを選択。

- Download タブから、Quick Look(QL) 画像を表示する画面に移動し、スペクトルの様子を確認。
- 今回使うのは、normalized 1D spectrum の画像である。スペクトル画像の下の PDF ボタンで、スペクトルの PDF ファイルを取得できる。QL 画像で網掛けになっている領域は、bad data がある領域なので使用しない。
QL 画像のグラフに対応する 36 個の fits ファイルがアーカイブされており、そのファイル名が、URL リスト (BD+04.2621List.txt) 中のファイル名である。URL リストの最初の、末尾が “.0001” のファイルは、QL 画像の 36 番目 (一番右下) の図に対応し、一番左上の絵に対応するのは最後の “.0036” である。
- 同様にして、もう一天体、HD107752 のデータ 111130_ML.00041076 の、QL 画像も取得し、確認。

2 Specview でのデータの取得、表示

- Specview を起動。
- **FILE** から Read from file を選択。ダウンロードした URL リスト (BD+04_2621List.txt) を選択して、開くとスペクトルを読み込む。(読み込み中は、Specview file read ウィンドウが開き、ファイル毎に Connect... ウィンドウが開閉する場合もある。)
- **Coplot** から Coplot を選ぶと、Spectrograms in memory 画面が開き、ダウンロードされた 36 個のファイル名が表示される。表示されたファイルリストから使用するファイルを選択する (図 3)。Bad data 等を避けるため、今回は、4490 – 5250Å の範囲のデータを使用する (ファイルリストの 2 個目から 22 個目にあたる)。2 個目をクリックした後、Shift キーを押しながら 22 個目をクリックすると、その間全てが選択される。
- **Process** から、Processing pipeline を起動。以下の手順で、これらのデータを繋げて 1 個のスペクトルを作る。

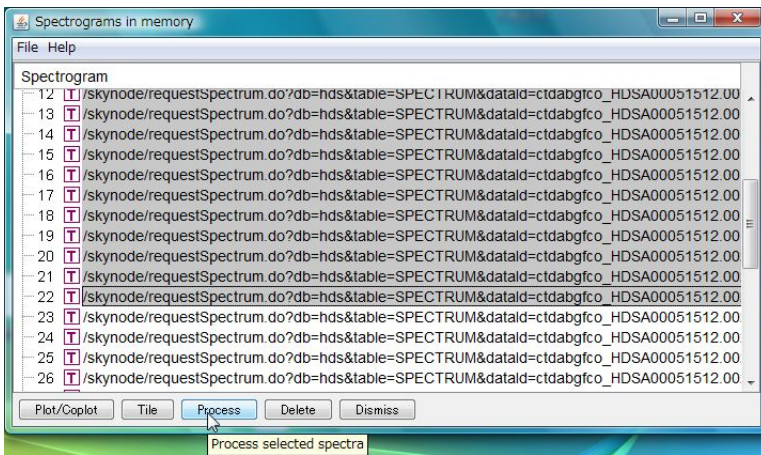


図 3: 読み込んだファイルリストから、使用するファイルを選択。2 個目から 22 個目までを選ぶ。

- **Coadd** タブに移動してから、Execute this step チェックボックスにチェックを入れる (図 4)。
- **Execute** とすると、選んだスペクトルを全て連結したデータが作成される。メイン画面では、スペクトルが上下 2 段で表示される。
- Spectrograms in memory 画面で、「Processed」(1 番下にある) を選び、**Plot/Coplot** でスペクトルを表示。メイン画面では連結された 1 つのスペクトルだけが表示されるようになる。
- 画面右上の **Unit** ボタンから、縦軸の単位を photons/s/cm2/Angstrom に (図 5)⁶。(複数のスペクトルが表示されている状態では、**Unit** ボタンは表示されない。前のステップを確認しよう。)

⁶実際には、normalize したスペクトルなので縦軸には単位は無いが、Specview ではスペクトルを連結すると勝手に単位を photons/s/cm2/Angstrom として読み込む。

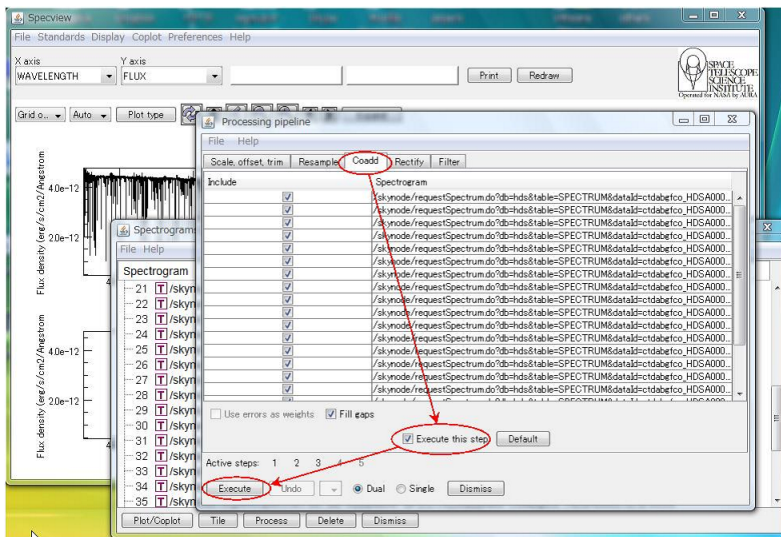


図 4: スペクトルの連結

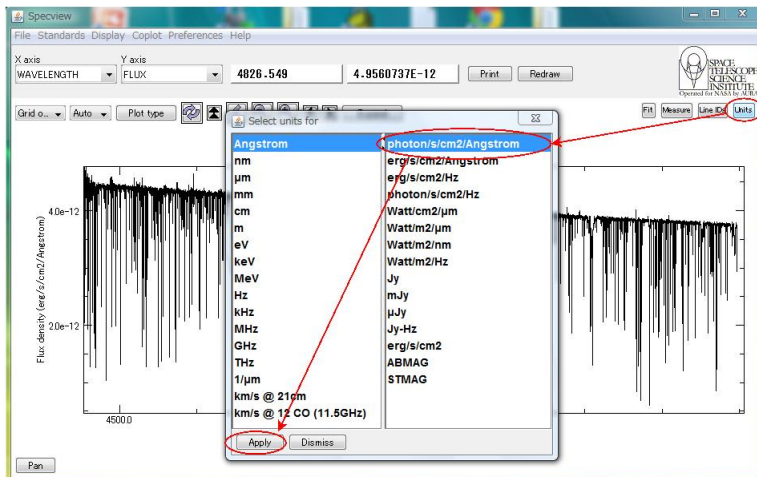


図 5: 単位の変更

3 視線速度の測定

Mg の吸収線 (5183.619Å) の位置を測り、視線速度を求める。

- **LineIDs** から **Stellar** を選び、星の吸収線のリストを表示 (図 6)。**Select all** で全ての吸収線を選び、**Draw** で、スペクトル画面上に吸収線の位置が表示される (図 7 上)。**Dismiss** でウィンドウを閉じる (Mac の場合はウィンドウのボタンから閉じる)。

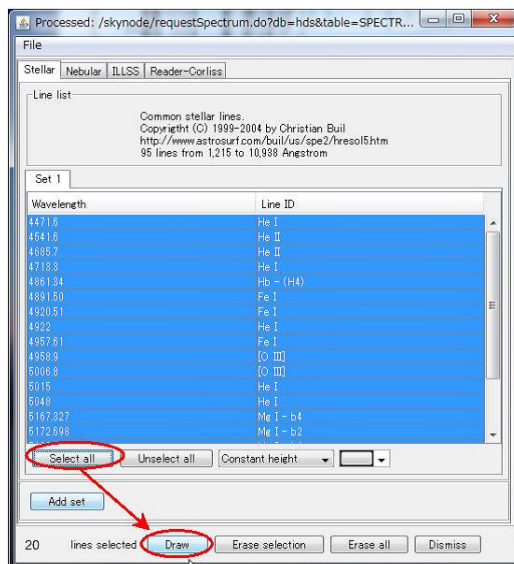








図 6: 吸収線リストの表示

- 吸収線のある 5150 – 5200Å あたりを拡大表示。この領域にある吸収線のうち最も強い 3 本が、Stellar line list にある MgI の line 3 つである。
グラフ領域の角付近を右クリックすると、表示領域の角の位置の座標を数値で指定できる。左上角を X=5150, Y=1.7, 右上角を X=5200 と指定したのが、図 7 下。

グラフの表示領域の選び方

- 拡大縮小は、  か、マウスホイールの回転。
- マウスで矩形領域指定すると、その領域を拡大表示。
- **Expand** を押すか、Shift キーを押しながらマウスホイールを回すと、X 軸方向のみ拡大する。
-  スペクトル全体を表示する。
-   左右に移動。
-  ひとつ前の画面に戻る。

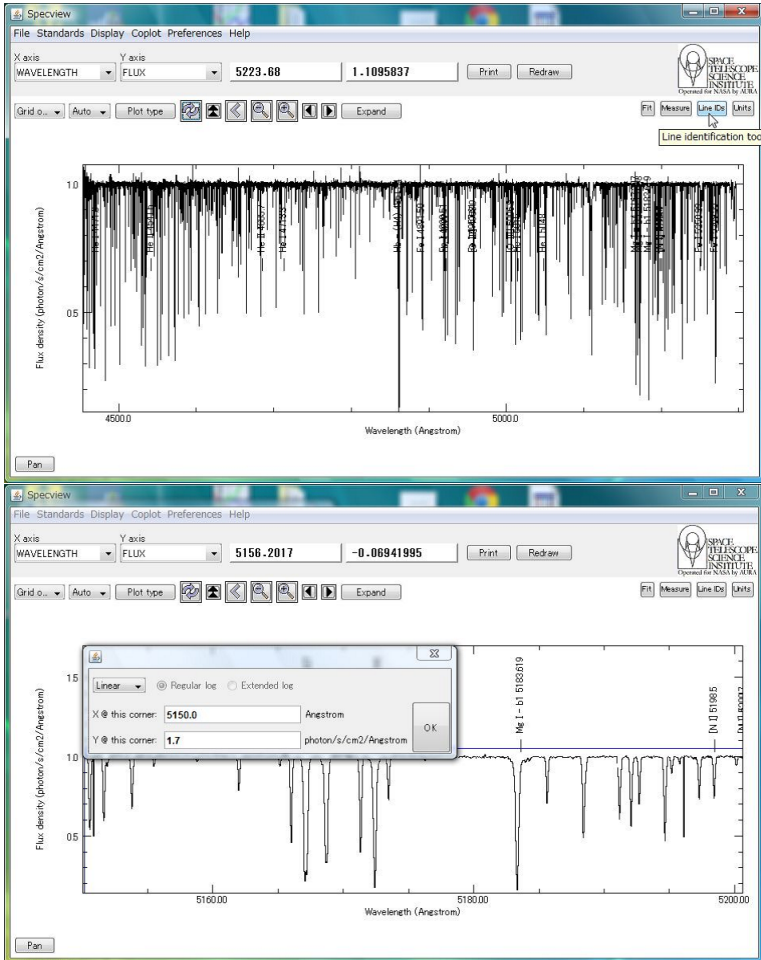


図 7: 上: スペクトル上に、星の吸収線の位置を表示。下: 5150 – 5200Å を拡大。

- MgI, 5183.619Å の吸収線から視線速度を測る。まずは **Measure** で、測定画面を起動。(**Line IDs** で開いたウィンドウを閉じておかないと、 **Measure** ボタンは表示されないので注意。)
- グラフに現れる赤の小四角 () マークをマウスでドラッグして、測定領域 (赤線で示された幅) を、吸収線のある場所にあわせる (図 8)
 まず中心の マークを吸収線の中心付近に合わせてから、赤線上の マークを吸収線の端に合わせてるとよい。
- 青・緑線も同様に マークを動かして、こちらは吸収線の左右の吸収の無い場所にもっていく。青の領域の平均と、緑の領域の平均を結んだ直線が、連続波成分とみなされる。(赤青緑の線の位置を指定するもう一つの方法として、測定画面の **Settings** タブから、Regions defined by wavelength limit にチェックを入れて、数値で指定するやり方もある。使いやすい方法を用いればよい。)⁷
- **FeatureID** の、RestWavelength:□ に、この line の周波数 (5183.619Å) を入力 (数値を入れた後、Return キーを押すこと)

⁷line の Gaussian fit を行って、吸収線の位置を出す fitting 機能もあり、複数の吸収線を用いた測定もできるが、今回は行わない。

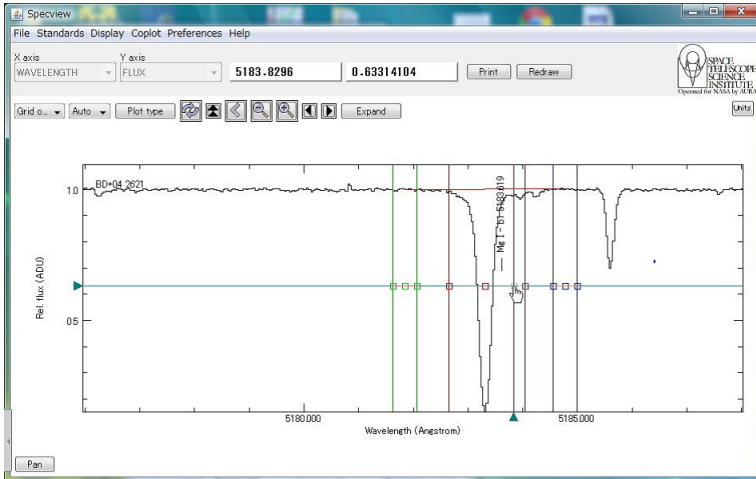


図 8: Line の測定。赤線で示された測定領域幅を、line の場所に合わせる。

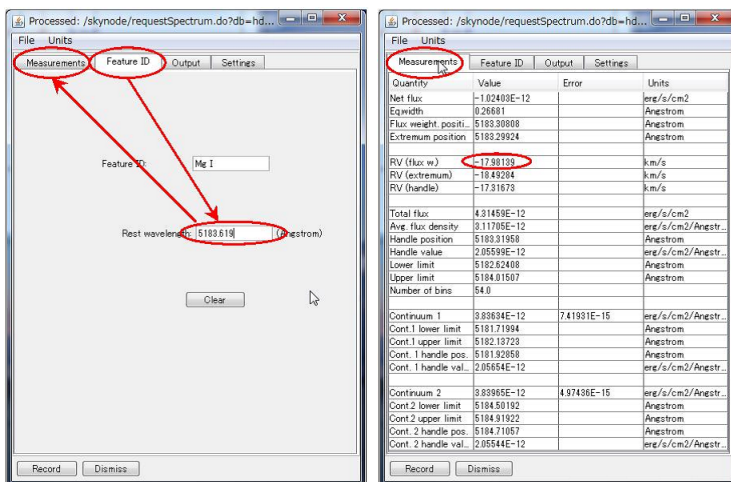


図 9: 静止系での周波数を入力すると、視線速度が計算される。

- **Measurements** タブに戻ると、RV(flux w.) の所に、視線速度 (flux weighted) が表示されるので、メモする。(BD+04 2621 では $-17 \sim -18$ km/s 程度、HD107752 では 198 km/s 程度になる)
- メイン画面グラフの、データ線が表示されているあたりを右クリックして、Header を表示した画面を開く。
- Rad.vel/z タブに移動し Or enter radial velocity / redshift:□ に、メモした視線速度を入力 (数値を入れた後、Return キーを押すこと)。
- メイン画面左上の Xaxis で、WAVELENGTH(Rest) を選択すると、視線速度シフトしたデータが表示される (図 11)。

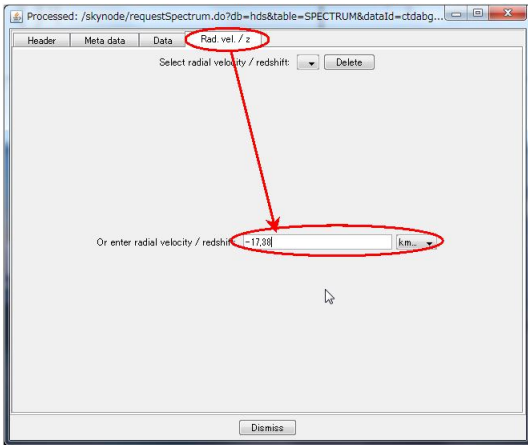


図 10: 測定した視線速度の値を入力。

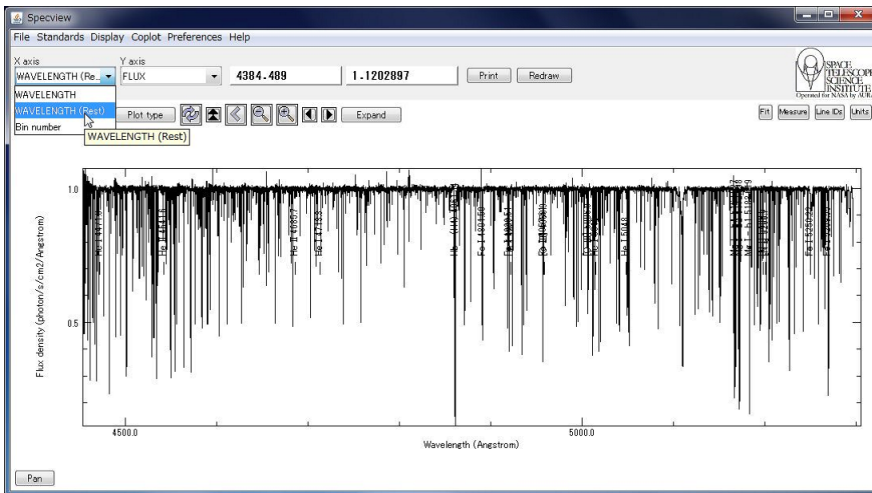


図 11: 静止系でのスペクトルに換算して表示。

4 励起温度の見積もり

- **LineIDs** から line list の画面を開き、今回は **ILLSS** を選ぶ。ILLSS(Identification List of Lines in Stellar Spectra) の吸収線リストがダウンロードしてあればリストが表示される。していなければ、**Download** ボタンが表示されるので、これを押してリストを取得する。
- カラム名をクリックするとソートされるので、Element でソートする。今回は周波数 5100 ~ 5250Å にある line を使うので、FeI の吸収線のうちこの周波数範囲のものを選択し、表示させる (図 12)。(「FeI P」, 「FeI ?」 と表示されている line は用いない)

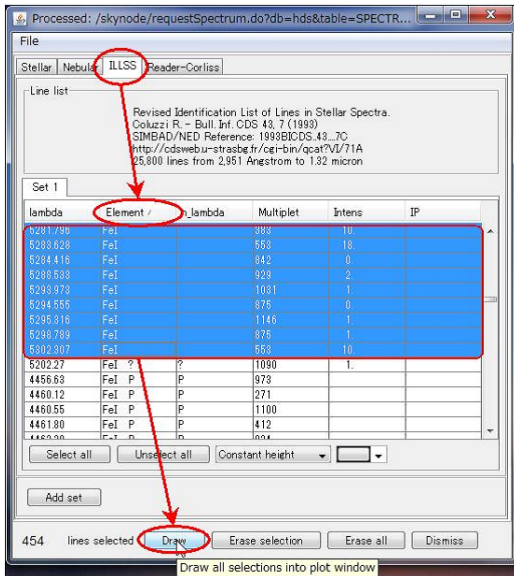
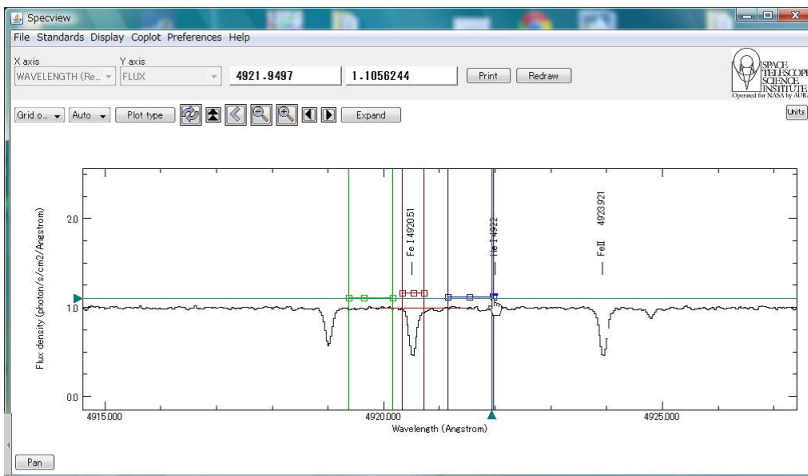


図 12: ILLSS の吸収線リストから、FeI のラインを選択

- 講習会サイトからダウンロードしたファイル Fe1Lines.csv を開き、ここに載っている周波数の吸収線 6 本について、等価幅の値を測定していく。
- Measure** で吸収線測定画面を開く。赤線を吸収線の場所に合わせ、青・緑線は吸収の無い部分を適当な幅で指定する。測定画面の **Measurements** にある Eq.width のセルに、自動的に等価幅の値が表示される。



- **Record** を押すと、表示されている測定値が記録される。記録されたデータは **Output** タブから見る事ができる。(図 13 左)
- リストにある 6 つの line 全てについてこれを繰り返す。6 個測定し終わったら、測定画面の **File**, **Save as** から、適当なファイル名 (例えば「BD04_2621FeI」など) を指定して保存する。(図 13 右)

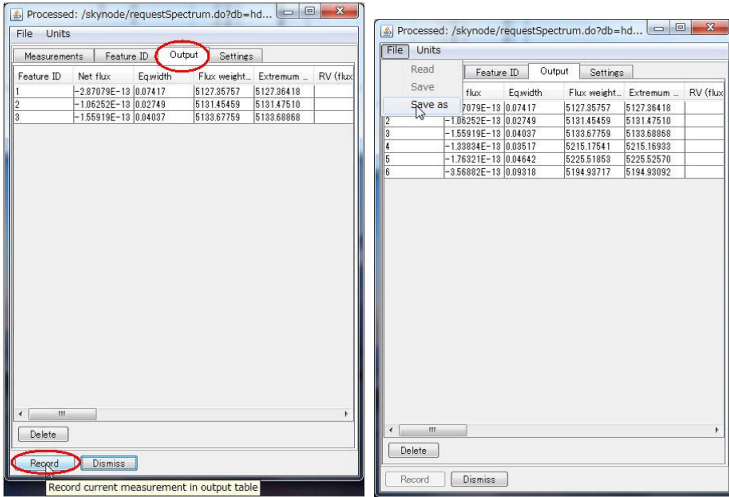


図 13: 左: 測定した吸収線のリストを作成。右: 作成したリストを VO Table として保存。

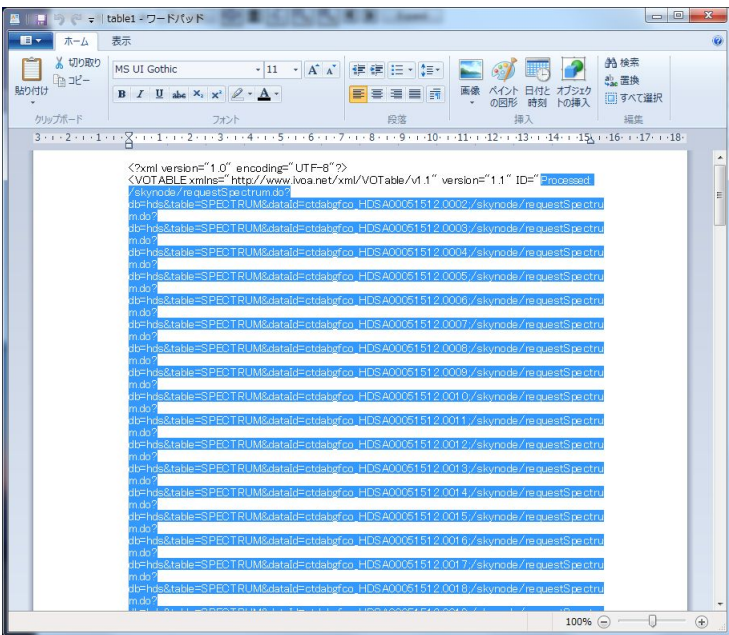



図 14: line の等価幅リストのファイルを編集。この図はワードパットを使用した場合。

- 保存したファイルを適当なエディタで開いて編集する。
 ファイル中に、`<VOTABLE xmlns="http://www.ivoa.net/xml/VOTable/v1.1" version="1.1" ID="Processed: /skynode ... (略) ... HDSA00041076.0022;">`
 13

となっている箇所があるので、ID=” ”のダブルクォーテーションの中身を消す。(ファイル中に「&」記号があると、TOPCAT で読み込めないために行う。「&」記号だけを消すのもよい。)

- TOPCAT を起動し、 Load New Table を開く。Filestore Browser か System Browser から、FeI の吸収線リストファイル (Fe1Lines.csv) を選び、Table Format で CSV を選択して読み込む。

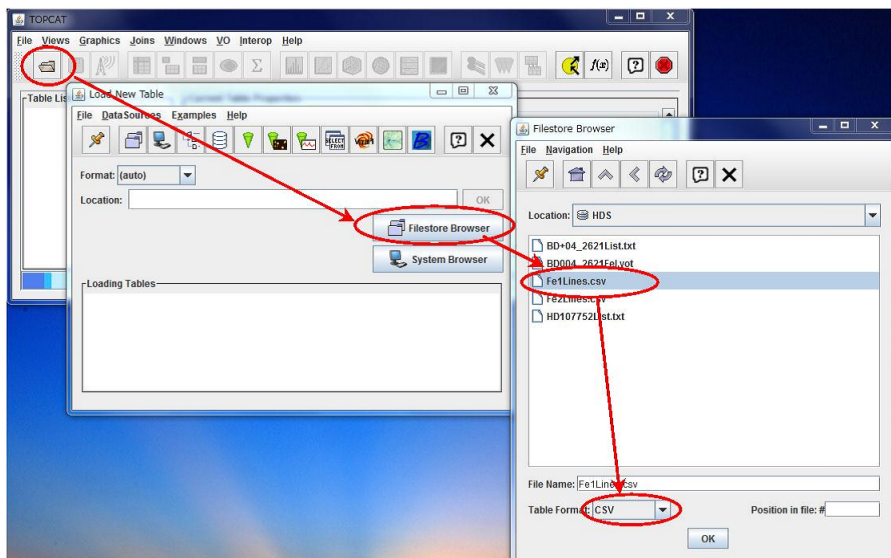






図 15: TOPCAT でファイルを読み込む

- 同様に、さっき Specview から作って編集をした等価幅のファイル (BD04.2621FeI.vot) を読み込む。今度は Table Format には VOTable を選択する。(TOPCAT のテーブルリストには、BD04.2621FeI.vot のテーブルが 2 個表示されるが、1 個目だけを使う)

-  2 つのテーブルをクロスマッチする (図 16)。今回は、周波数の違いが 0.1\AA 以内なら同じ line であるとみなす。図のように、パラメータは、Algorithm: 1-d Cartesian, Error: 0.1, Table1: には Fe1Lines.csv を選び、X column: lambda, Table2: には Specview で作ったファイルを選び、X column: Flux weight, position とする。6 件のデータがペアになり、新たに「match(1,2)」という名前のテーブルが作られる。

- クロスマッチしたテーブル match(1,2) を選び、コラム表示画面  において、コラム作成機能  から、 $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda)$ のコラムを作成する (図 17)。Expression に書く式の中では、コラム名 (lambda など) とコラム番号 (\$1 など) のどちらの表記も使える。Name, Expression 以外の欄は空のままよい。⁸

- X 軸に χ , Y 軸に $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda)$ でグラフを作成 。(図 18)
- 右下の Row Subset フィールドの、グラフの点のマーカが表示されている所をクリックすると Plot Style Editor 画面が起動する。Line の所で Linear correlation をとってやると、直線での fitting を行い、“m=” に傾きが表示される。この m の値が、式 (5) における $-\theta_X$ であり、 $T_X = 5040\text{K}/\theta_X$ が励起温度である。m の値をメモしておく。

⁸このテキストの log は全て常用対数。TOPCAT では $\log_{10}(x)$ と記述する。

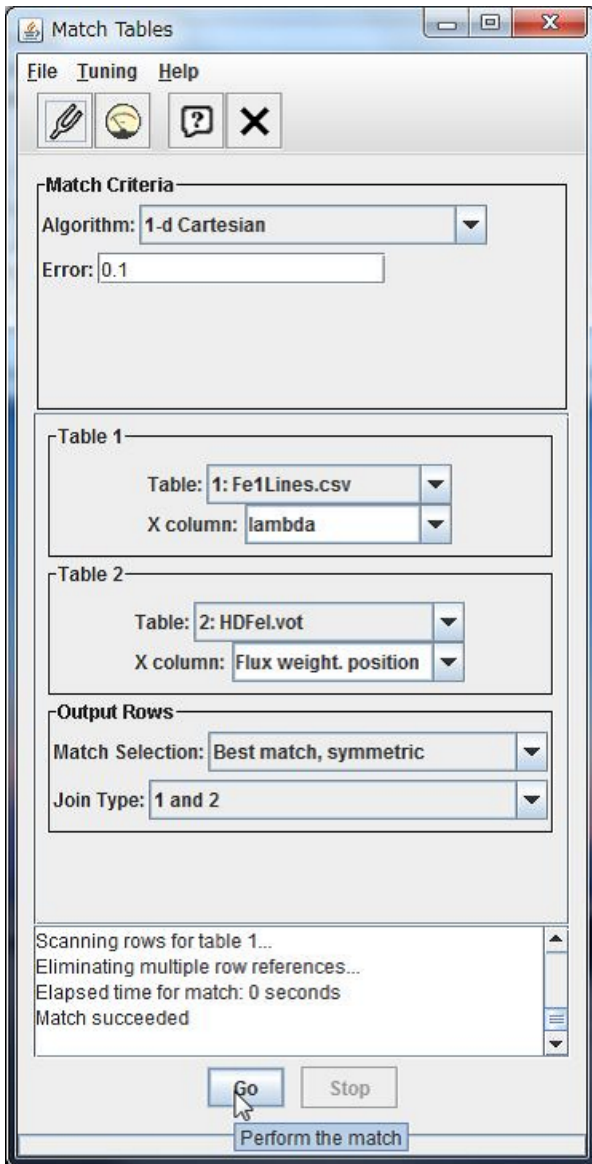


図 16: Fe1Lines.csv と、等価幅を測定したテーブルのクロスマッチ

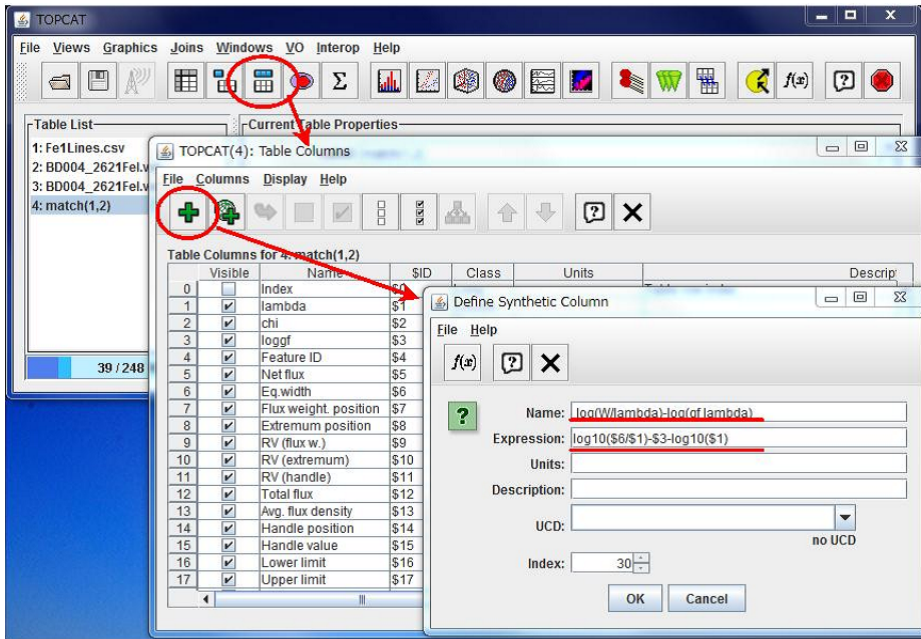


図 17: $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda)$ のカラムの作成

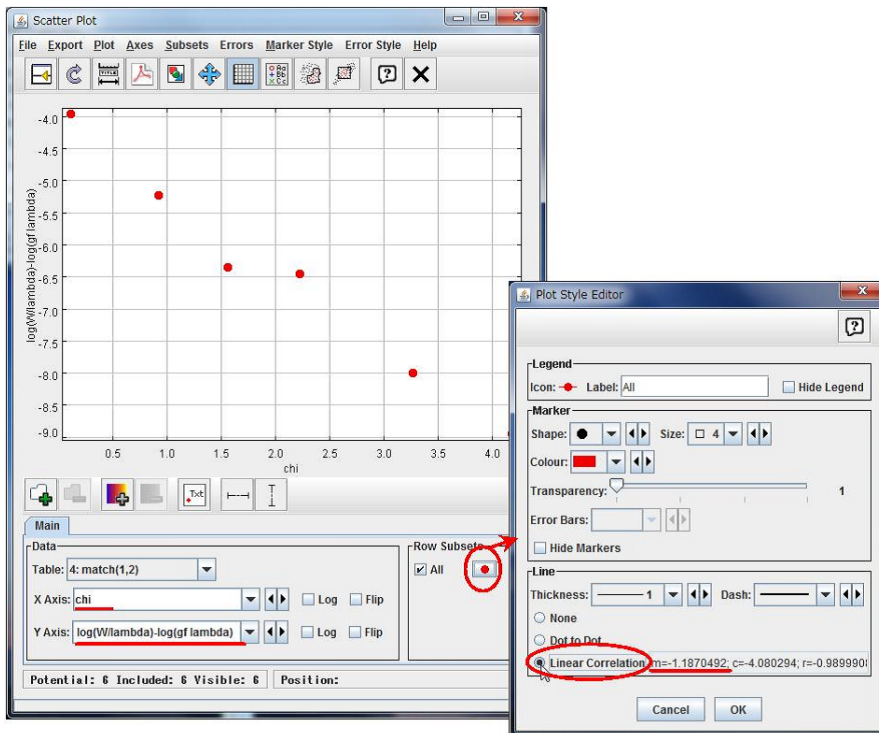



図 18: 励起温度の推定。 χ と $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda)$ の相関を見る。

5 成長曲線の作成

- FeI でやったのと同様にして、今度は ILLSS のリストから FeII の line を選び、Fe2Lines.csv にある周波数の吸収線について、等価幅を測定していく。
- FeI の時と同様に、等価幅の値を保存したファイルを作り、「ID“Processed...”」の部分編集。
- 励起温度を出した時と同様に、TOPCAT で、Fe2Lines.csv と、測定結果のファイルを読み込み、クロスマッチする。
- $\log(W/\lambda)$ と $\log(gf\lambda) - \theta_{X\chi}$ のカラムを作成する。 $-\theta_X$ には、励起温度測定の所でグラフから測った m の値を使う。
- X 軸: $\log(gf\lambda) - \theta_{X\chi}$, Y 軸: $\log(W/\lambda)$ のグラフを作成する。このグラフが成長曲線と呼ばれる。右上側の点を除き、データはほぼ直線上に乗るはずである。
- もう 1 天体、HD107752 についても同じ手順で、視線速度測定、励起温度の推定をし、成長曲線を描く。

HD107752 で、吸収線が微弱で測れない場合などは、その line は測定しなくてもよい。  ボタンで、2 つ目のグラフを前のグラフに重ねて plot できる。

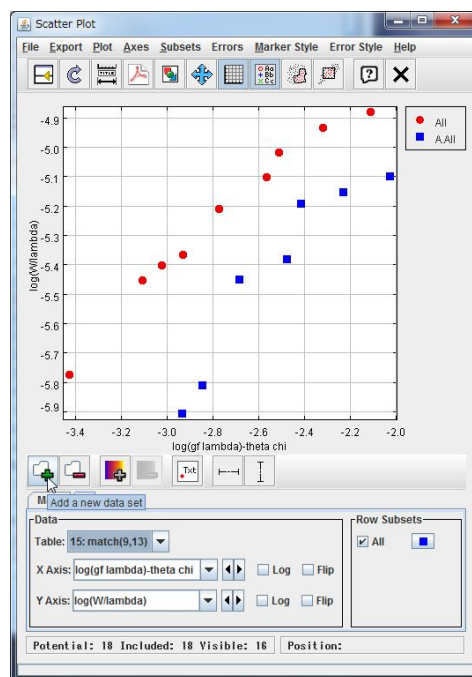


図 19: 2 天体の成長曲線。

6 組成比の推定

- 飽和の影響が見られる line を除いた、弱い line だけのデータセットを作成する。



ボタンを押してから、直線に乗っている「弱い」吸収線に当たるデータを、グラフでドラッグして囲っ



て選択し、もう一度ボタンを押すと、subset 作成画面が開く。今回の例では、Y 軸の値で-5 以下を選べばよいであろう。名前を付けて **Add Subset** で、部分集合を作成する。

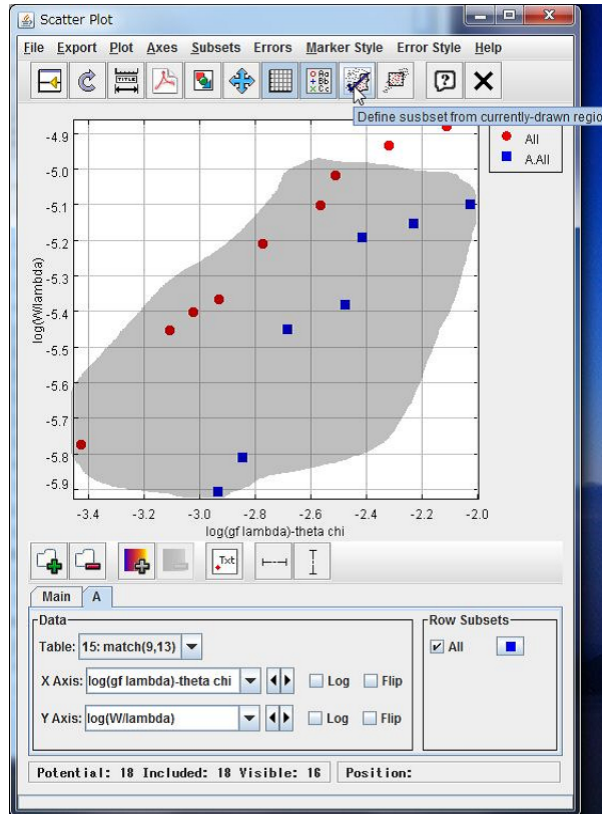


図 20: グラフ上で「弱い line」のみを選択。マウスでドラッグして、囲まれた領域がグレーで表示される。

- $\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda) + \theta_{X\chi}$ のカラムを作成する。

- 統計機能 Σ を用いて、弱い line の部分集合について、この値 $[\log(W/\lambda) - \log(gf\lambda) + \theta_{X\chi}]$ の平均値を求める。

2 天体についてのこの平均値の差が、金属量の比の対数 ($[\text{Fe}/\text{H}]$ の差) となる。

Name	Mean	SD	Minimum	Maximum	nGood
lambda	4826.16	311.785	4491.401	5284.092	
chi	2.89857	0.193248	2.81	3.22	
loggf	-3.02286	0.414374	-3.67	-2.27	
Eq.width	0.025463	0.012731	0.00834	0.04986	
log(W/lambda)	-5.33473	0.233862	-5.77723	-5.02113	
log(gf lambda)-...	-2.90539	0.296593	-3.42791	-2.51171	
log(W/lambda)-...	-2.42934	0.069266	-2.53857	-2.34897	

Subset for calculations: weak

図 21: テーブルの統計情報

ここで使った 2 天体の観測について詳細と、より高度な方法を用いた解析結果は、Ishigaki et al.(2010) にある。今回の結果と比較してみよう。

余裕があれば、これらの天体の他の元素の組成比や、他の天体の金属量も求めてみる。他の元素の吸収線についての χ , $\log gf$ のデータは、過去の観測論文 (e.g. Aoki et al. 2002) で用いている line のデータを使うとよいであろう。より微弱な吸収線を含めた全ての line のリストは、例えば Hirata & Horaguchi(1994) などがあり、VizieR (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>) 等から取得できる。(ILLSS の吸収線リストとは、同じ吸収線でも周波数が若干異なっている)

参考文献

- D.F.Gray 1992 "The observational analysis of stellar photospheres"
 野本憲一、佐藤勝彦、定金晃三 2009 "シリーズ現代の天文学 7 恒星"
 Aoki et al. 2002, PASJ, 54, 427
 Hirata & Horaguchi 1994, Atomic Spectral Line List
 Ishigaki, M., Chiba, M., & Aoki, W. 2010, PASJ, 62, 143
 Ishigaki, M., Chiba, M., & Aoki, W. 2010, PASJ, 62, 1369